

Eksperimentalno određivanje karakteristika vodnog skoka iza preljeva praktičnog profila krivolinijskog obrisa

Delšeno, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:404533>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)

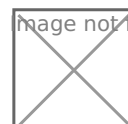


image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Luka Delšeno

**Eksperimentalno određivanje karakteristika vodnog skoka iza preljeva
praktičnog profila krivolinijskog obrisa**

Završni rad

Rijeka, rujan 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij

Hidromehanika

Luka Dešeno

JMBAG: 0114033845

**Eksperimentalno određivanje karakteristika vodnog skoka iza preljeva
praktičnog profila krivolinijskog obrisa**

Završni rad

Rijeka, rujan 2022.

ZAVRŠNI/DIPLOMSKI ZADATAK

(ispunjava mentor, preuzima se kod mentora - mora biti potpisan i sadržavati naslov rada na hrvatskom i engleskom jeziku – NE UVEZUJE SE U RAD)

IZJAVA

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Luka Delšeno

U Rijeci, 14.09.2022.

IZJAVA

Završni rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta

Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci

Voditelj projekta prof. dr. sc. Nevenka Ožanić
Šifra projekta RC.2.2.06-0001
Financijer projekta Europski fond za regionalni razvoj (EFRR)
 Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH
Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, 14. rujna 2022.

Mentor:

Doc. dr. sc. Elvis Žic, dipl.ing.građ.

SAŽETAK:

Ovim završnim radom obrađena je tema eksperimentalnog određivanja karakteristika vodnog skoka iza Cragerovog preljeva. Definiran je vodni skok i njegove fizikalne veličine i glavne karakteristike koje su bitne kod eksperimentalnog ispitivanja. Prikazani su tipovi vodnog skoka i njihove karakteristike. Opisan je fizikalni model hidrauličkog žlijeba u hidrotehničkom praktikumu. Eksperimentalno ispitivanje provedeno je u tri varijante kako bi se dobile ovisnosti određenih fizikalnih veličina koje su prikazane grafički i tabelarno.

SUMMARY:

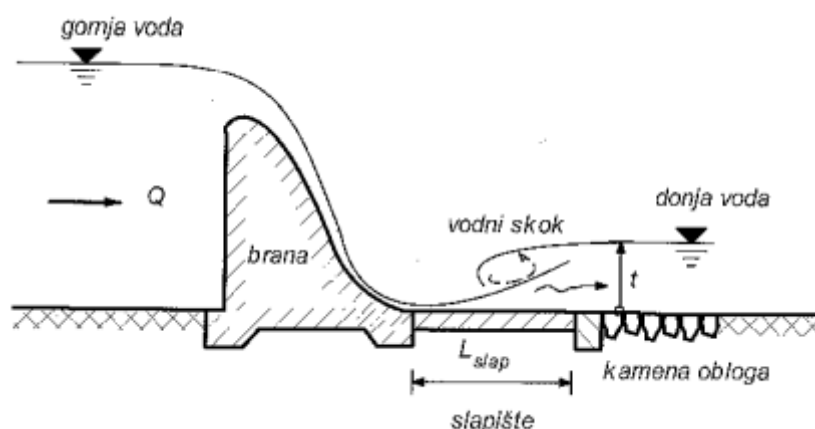
This final work deals with the topic of experimental determination of hydraulic jump characteristics behind the Creager spillway. The hydraulic jump and its physical dimensions and main characteristics that are important in experimental testing are defined. The types of hydraulic (water) jump and their characteristics are presented. The physical model of the hydraulic channel in the hydrotechnical laboratory is described. The experimental test was carried out in three variants in order to obtain the dependences of certain physical quantities, which are shown in graphs and tables.

Sadržaj

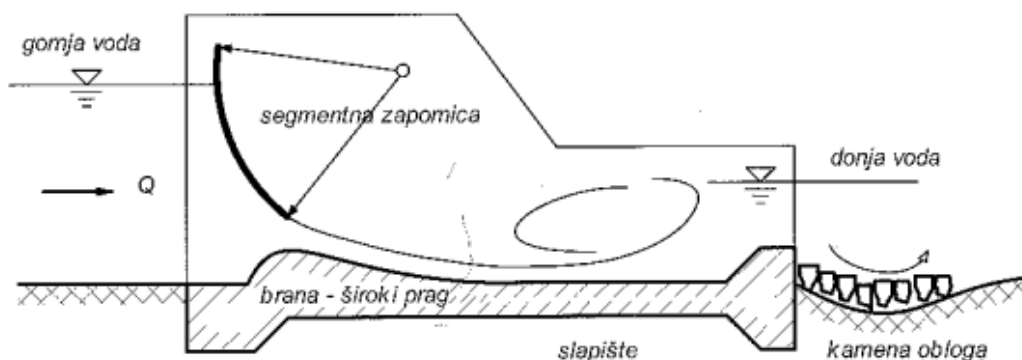
1. Uvodno.....	1
2. Dosadašnja eksperimentalna ispitivanja vodnog skoka.....	4
3. Određivanje fizikalnih veličina kod pojave vodnog skoka.....	7
4. Tipovi vodnog skoka i njihove karakteristike	15
4.1. Potpuni skok	15
4.2. Valovit skok.....	16
4.3. Navučen skok	17
4.4. Potopljen skok	19
4.5. Površinski skok.....	20
5. Fizikalni model malog hidrauličkog žlijeba u hidrotehničkom praktikumumu	24
6. Eksperimentalno ispitivanje vodnog skoka.....	30
7. Zaključak.....	46
8. Literatura.....	47
9. Popis slika, tablica i grafova	49

1. Uvodno

U ovom završnom radu obrađena je tematika vodnog skoka uslijed njegovog formiranja iza preljeva praktičnog profila krivolinijskog preljeva. Proveden je eksperiment u laboratoriju pomoću kojeg su određene fizikalne veličine vodnog skoka i dane grafičke ovisnosti istih. Vodni skok je fenomen koji se javlja na vodotocima u slučajevima promjene karaktera vodotoka, sa silovitog strujanja na mirno, na relativno malim udaljenostima. Prilikom pojave vodnog skoka dolazi do naglog smanjenja brzine toka, povećanja dubine i disipacije kinetičke energije (Shaughnessy, 2005.). Kroz povijest vodni skok je bio detaljno promatran, jer je njegova pojava bitna kod razmatranja hidrotehničkih građevina i objekata. Primjerice kod gradnje brana javlja se vodni skok, te je u takvim slučajevima vrlo bitno zaštititi područje disipacije energije (moguća oštećenja s većim posljedicama). Mjesta na kojima se vrši disipacija energije na hidrotehničkim objektima nazivaju se slapišta ili bučnice. Na slikama 1. i 2. se mogu vidjeti dva moguća rješenja slapišta.



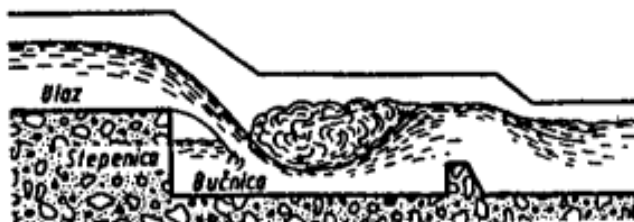
Slika 1. Slapište iza brzotoka na brani (Jović, 2006.)



Slika 2. Slapište unutar ispusta na brani (Jović, 2006.)

Slapište se izgrađuje odmah u podnožju brane, te se projektira tako da bude 10-20% duži od duljine vodnog skoka. Svojim oblikom slapište treba stvarati potopljeni vodni skok, a glavna

mu je funkcija prihvaćanje opterećenja vodnog skoka (Jović, 2006.). Sljedeći hidrotehnički objekti koji su bitni kod pojave vodnog skoka su: kaskade, brzotoci i konzolni odskoci. Kaskade su hidrotehnički objekti koji se postavljaju u vodotocima, kako bi se umirio vodotok, te mogu biti sa jednom (Slika 3.) ili više stepenica (Slika 4.), (Agroskin, 1969.).



Slika 3. Kaskada sa jednom stepenicom (Agroskin, 1969.)



Slika 4. Kaskada sa više stepenica (Agroskin, 1969.)

U prvom dijelu završnog rada govori se o tome što su znanstvenici proučavali u dosadašnjim eksperimentalnim istraživanjima u pogledu formiranja vodnog skoka iza preljeva praktičnih profila krivolinijskih obrisa (tzv. Cragerov preljev). Prikazane su metode i načini koji su se koristili prilikom eksperimenata. Kroz nekoliko se radova prikazalo kako su se određivale fizikalne veličine, poput prve i druge spregnute visine, disipacije mehaničke energije, Froudeovog broja Fr , te brzine toka uslijed vodnog skoka.

U drugom su dijelu definirane značajnije fizikalne veličine koje su bitne za pojavu vodnog skoka, te su definirani njihovi načini izračuna pomoću empirijskih formula. Definirani su duljina vodnog skoka, prva i druga spregnuta (uzajamna, konjugirana) dubina, promjena energije i tlaka, Froudeov broj, te brzina toka.

U trećem poglavlju su prikazani tipovi vodnog skoka i podjela prema oblicima: potpun, valovit, navučen, potopljen i površinski. Za vodne skokove su dane slike na kojima se mogu prepoznati određeni oblici, ali također i empirijske formule preko kojih su dobivene određene fizikalne veličine. Nakon toga dana je podjela u odnosu na potopljenost vodnog skoka, pri čemu se pojavljuju normalni, odbačeni i potopljeni vodni skok.

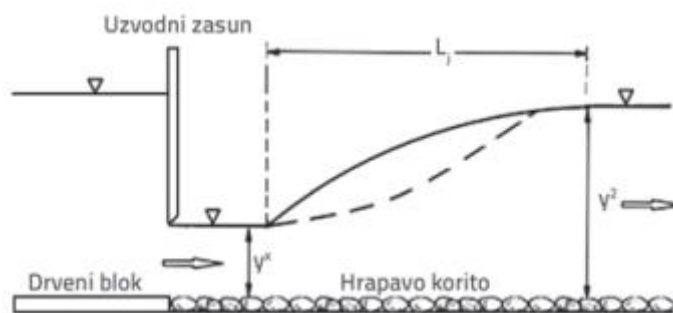
U četvrtom je dijelu opisan fizikalni model malog hidrauličkog žlijeba u hidrotehničkom praktikumumu na kojem je provedeno eksperimentalno istraživanje. Fizikalni model je prikazan u stvarnosti, prikazani su svi značajni detalji: zapornica, Cragerov preljev, donji preljev na izlazu (koji ima funkciju i kao donja zapornica u određenim slučajevima), pumpa za recirkulaciju vode, bazen za disipaciju kinetičke energije, bazen za volumetrijsko mjerenje protoka i sl. Također, prikazane su i dimenzije cijelog hidrauličkog žlijeba, ali također i Cragerovog preljeva koji se koristio u eksperimentu. Dodatno su prikazane i različite vrste preljeva praktičnih profila krivolinijskih obrisa koje postoje u praksi.

U petom dijelu završnog rada prikazano je eksperimentalno ispitivanje vodnog skoka, opisan je cjelokupni postupak eksperimenta i načina rada malog hidrauličkog žlijeba. Eksperiment je izveden kroz tri različite varijante, pri kojima su se mjerili i računali određeni fizikalni parametri, koji su tablično prikazani te je dana njihova međusobna ovisnost kroz grafičke prikaze.

2. Dosadašnja eksperimentalna ispitivanja vodnog skoka

Dosadašnja eksperimentalna ispitivanja vodnog skoka iza preljeva praktičnog profila krivolinijskog obrisa većinom su se provodila na modelima smanjenih razmjera (mjerila) zbog jednostavnosti provedbe ispitivanja. Ta su se ispitivanja većinom provodila u laboratorijima u manjim bazenima. U nastavku će biti dano nekoliko sažetaka znanstvenih radova kroz koje je vodni skok promatran na više načina, te što se tim eksperimentima zaključilo.

U radu Eada i Rajaratnama (2002.) govori se o tome kako hrapavost utječe na spregnute dubine kod vodnih skokova na podlozi koja nije ravna. Eksperiment se provodio u laboratoriju u žlijebu pravokutnog oblika postavljenog horizontalno, ali također žlijeb ima mogućnost postavljanja pod nekim određenim kutem. Kako bi se izvelo hrapavo korito (Slika 5.), na dno žlijeba se ubacilo drobljeno kamenje (Ead i Rajaratnam, 2002.).



Slika 5. Prikaz hrapavog korita (Deshmukh i drugi, 2017.)

Mjerile su se prve i druge spregnute dubine. Prva je izmjerena neposredno prije skoka, a druga spregnuta dubina je izračunata na kraju skoka. Uz to mijenjale su se visine neravnina u koritu. Na kraju eksperimenta zaključuje se da se hrapavim koritom u svim varijantama pokusa smanjuje druga spregnuta dubina. Ukoliko se povećavaju visine neravnina druga se spregnuta dubina smanjuje. Na kraju, zaključak sa ekonomične strane je da korita sa hrapavim dnom mogu biti dobra zamjena za bučnice sa skretnim blokovima, jer su hrapava korita jeftinija od takve vrste bučnica (Deshmukh i drugi, 2017.).

U drugom radu autora Alghwaila, Stevovića i Abourohiema (2017.) fokus je dan na disipaciji mehaničke energije preljevnog mlaza pomoću suprotstavljenog toka. Kad se govori o disipaciji mehaničke energije vodnog skoka vrlo je bitno zaštititi korito kako ne bi došlo do podlokavanja i daljnjeg oštećenja hidrotehničkih objekata. Zaštita korita je skupa, te se drugim metodama nastoji smanjiti utjecaj mehaničke energije na korito. U tome pogledu nastoji se hidraulički skok pomaknuti prema preljevu ili druga varijanta je izgradnja prepreka

unutar slapišta, poput stuba, razdjelnih blokova, košara kako bi se smanjila brzina vodotoka (Novak i drugi, 2001. i 2006., Manoochehr i drugi, 2011., Verma, 2000.). Disipacija energije u slučaju suprotstavljenog toka se temelji na sudaru dvaju tokova suprotnih smjerova. Sudar se može dogoditi u području slapišta ili u zraku (Komora, 1969.). Prema Khaderu i Vollmeru bi bilo dobro postaviti na dno slapišta razdjelni blok u obliku slova V što dovodi do gubitka energije (Vollmer i Khader, 1971.). Prema Kao se može izvesti podvodni poprečni mlaz koji bi kontrolirao vodni skok i uslijed kojeg bi se kao rezultat smanjivala dubina donje vode (Kao, 1971.). Na bazi eksperimenata i pokusa dolazi se do toga da je moguće kontrolirati vodni skok na bazi suprotstavljenog mu toka, čime se vodni skok transformira u potopljeni, što dovodi do smanjenja potrebne čvrstoće (krutosti) podloge (Alghwail i drugi, 2017.).

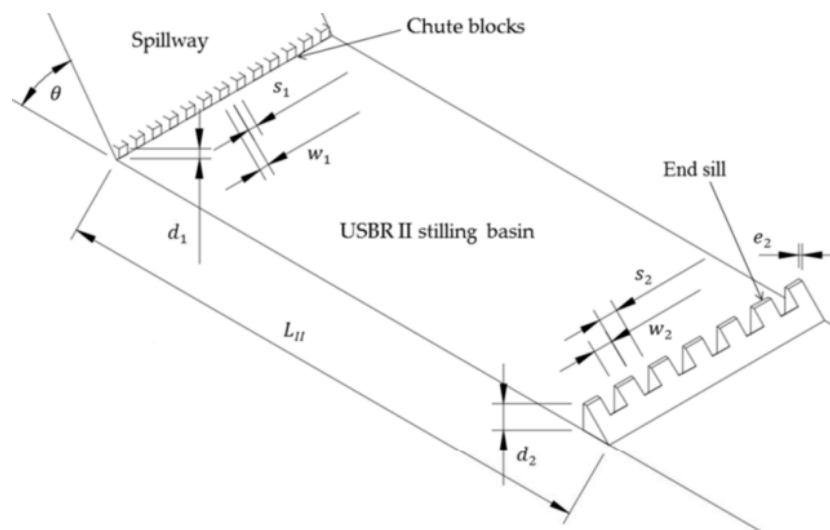
Nakon prva dva promatrana eksperimenta o energiji i spregnutim dubinama, na red dolazi eksperiment autora Gualtieria i Chanson a iz 2007. godine o Froudeovom broju, tj. kako Froudeov broj utječe na uvlačenje zraka u vodnom skoku. Eksperiment je proveden u pravokutnom bazenu na sveučilištu u Queenslandu (Slika 6.). Froudeov broj tijekom pokusa bio je u rasponu od 5,18 do 14,27, što su karakteristike silovitog tečenja ($Fr > 1$).



Slika 6. Prikaz silovitog tečenja, $Fr=14,27$ (Chanson, 1995.)

Na slici 6. može se vidjeti ponašanje zraka pri silovitom tečenju, gdje se zrak uvlači ispod mlaza i u obliku mjehurića. Usporedba dobivenih rezultata tijekom pokusa pokazala je da na fiksnoj udaljenosti od skoka udio frakcije maksimalnog promjera raste usporedno s Froudeovim brojem. Također, visina točke s maksimalnim sadržajem zraka opadala je s povećanjem Froudeovog broja. Na kraju pokusa zaključeno je da gornja granica sloja difuzije ima tendenciju sustavnog linearnog povećanja s udaljavanjem od skoka za jednak Froudeov broj (Gualtieri i Chanson, 2007.).

Nadalje, u sljedećem se eksperimentu (Macián-Pérez, Vallés-Morán, Sánchez-Gómez, De-Rossi-Estrada, García-Bartual, 2020.) ispitivala raspodjela brzine toka u mirnom bazenu. Eksperiment se proveo na USBR II mirnom bazenu (Slika 7.), na kojem se može doći i do ostalih zaključaka za neke druge fizičke veličine. Međutim, ovdje će se reći nešto samo o brzini toka (Padulano i drugi, 2017., Macián-Pérez i drugi, 2020., Peterka, 1978.).



Slika 7. USBR II bazen (Macián-Pérez i drugi, 2020.)

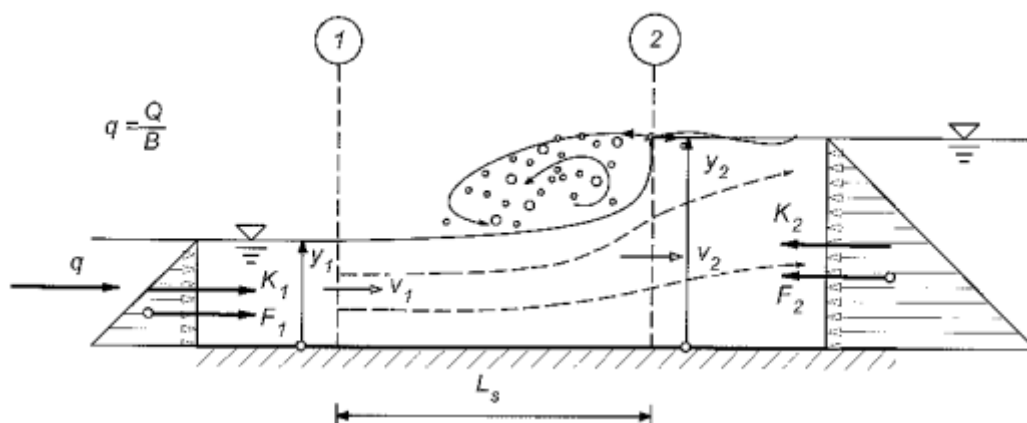
Dani model sa slike 7. karakterističan je po blokovima (disipatorima kinetičke energije) koji se nalaze na početku i na kraju horizontalnog kanala. Brzina toka mjerila se pomoću Pitotovih cijevčica. Brzina se dobila tako da se mjerila razlika tlaka dvije ulazne cijevi koje su bile spojene na senzor. Brzina se mjerila na 7 različitih presjeka kako bi se dobilo polje brzina. Eksperimentalnim ispitivanjem dobile su se vrijednosti brzina toka koje opadaju udaljavanjem od skoka, međutim omjer opadanja prema dobivenim rezultatima je manji nego dobiven analitičkim putem i Hagerovom formulom (Hager, 1992.). Kad se govori o raspodjeli brzina toka, istraživanje je pokazalo da Pitotove cijevi ne daju točne i pouzdane podatke u nekim dijelovima hidrauličkog skoka, primjerice na mjestima gdje se nalazi veća količina zraka, mjehurića. Pitotova cijev uz minimalne nedostatke svejedno predstavlja dobru alternativu skupljoj tehnici, poput sonde s optičkim vlaknima ili PIV tehnologijom, ali se također pokazala više pouzdana nego ADV tehnika. Model takvog bazena sa blokovima na kraju kosog kanala se predstavio kao uspješan u smanjenju maksimalne brzine toka udaljavajući se od mjesta vodnog skoka (Macián-Pérez i drugi, 2020.).

3. Određivanje fizikalnih veličina kod pojave vodnog skoka

Vodni skok se još naziva i hidraulički skok, te se javlja u procesu promjene oblika slobodne površine vodotoka pri prijelazu iz silovitog u miran tok (Jović, 2006.) U ovom će poglavlju nadalje biti definirane sve značajnije fizikalne veličine koje su značajne za pojavu vodnog skoka, te će se definirati način njihova izračuna.

Duljina vodnog skoka

Kao prva od fizikalnih veličina javlja se duljina vodnog skoka. Duljina vodnog skoka je udaljenost između dva presjeka vodnog skoka koji se promatra. Početak vodnog skoka je prvi poprečni presjek ispred njega, u kojem je pri silovitom stanju vidljiva raspodjela brzina, a za kraj skoka se uzima poprečni presjek vodotoka na kojem je vidljivo mirno tečenje. Također bitno je napomenuti da se dužina vodnog skoka ne može točno odrediti, zbog nemirnog toka i strujanja vodotoka. Pri nekim se pokusima koristi boja kako bi se preciznije odredila duljina između dvaju presjeka, koja predstavlja duljinu vodnog skoka. Na slici 8. je prikazana duljina vodnog skoka između presjeka 1 i presjeka 2, a označena je sa L_s (Jović, 2006.).



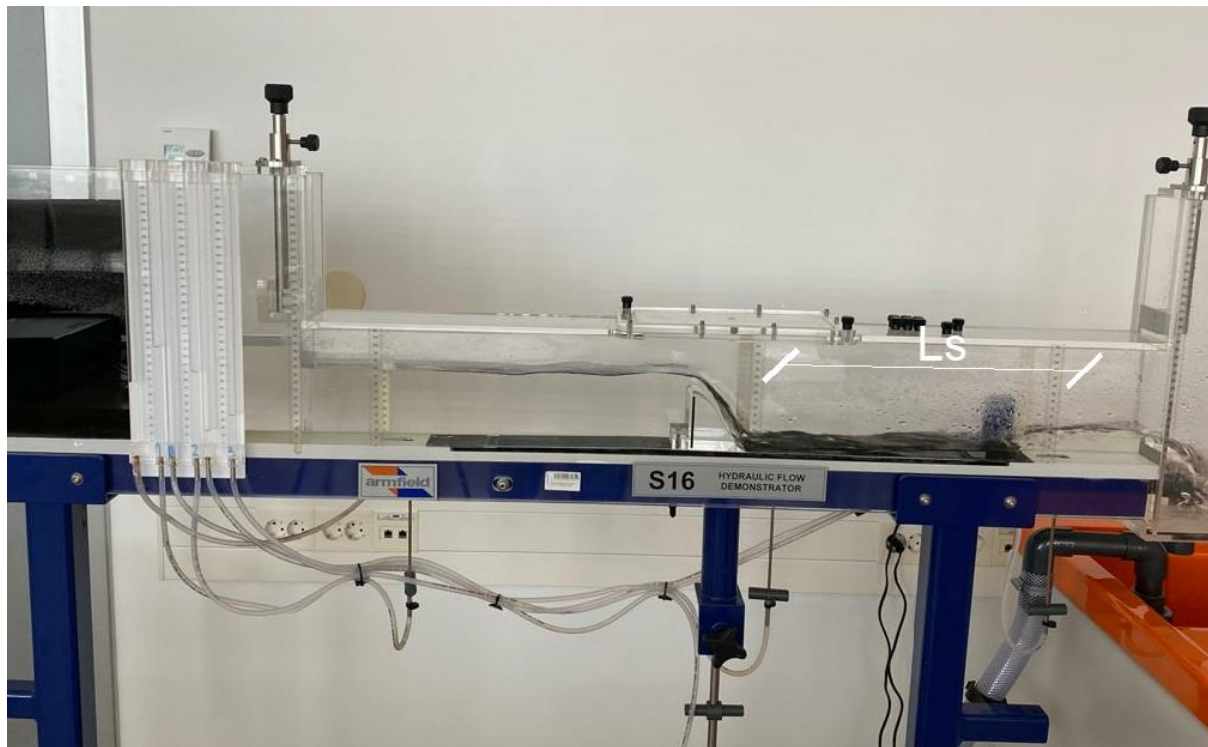
Slika 8. Duljina vodnog skoka (Jović, 2006.)

Duljinu vodnog skoka pri malim Froudeovim brojevima, tj. pri mirnom strujanju vodotoka je jako teško odrediti. U laboratorijskom ispitivanju duljina vodnog skoka se određivala ručno, pomoću ravnala te se izražavala u mm (Slika 9.). Bitno je napomenuti kako to nisu prave vrijednosti duljina vodnog skoka već približno izmjerene. Kroz povijest se koristilo puno empirijskih formulacija za određivanje duljine skoka. Jedna od empirijskih formulacija koja se koristila je formula Pavlovskog koja definira duljinu vodnog skoka:

$$L_s = 2,5(1,9h_1 - h_2) \quad (3.1)$$

u kojem h_1 i h_2 predstavljaju prvu i drugu spregnutu dubinu. Nadalje, postoji i formula koju je definirao Smetana (Agroskin, 1969.):

$$L_s \approx 6(h_2 - h_1). \quad (3.2)$$

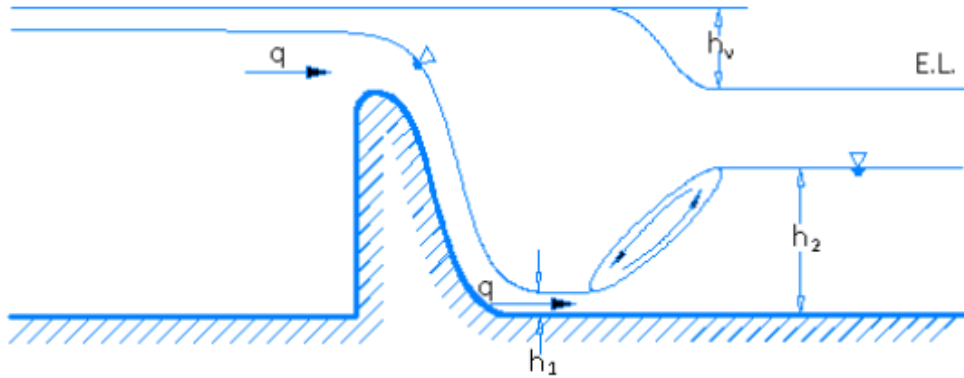


Slika 9. Određivanje duljine vodnog skoka u laboratoriju

U laboratorijskom ispitivanju u nekim slučajevima nakon Cragrovog preljeva nije bilo moguće odrediti duljinu vodnog skoka zbog toga jer se pojavio potopljeni vodni skok. Za potrebe inženjerstva i projektiranja većih hidrotehničkih građevina i objekata potrebno je poznavati i duljinu iza skoka, koja predstavlja udaljenost između kraja presjeka skoka i presjeka sa normalnom raspodjelom brzina.

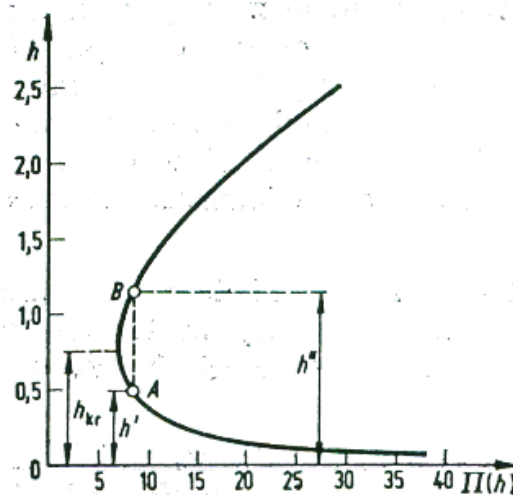
Spregnuta dubina

Spregnute dubine su dvije dubine koje se pojavljuju kod vodnog skoka. Karakteristične su po tome jer se jedna nalazi na početku, a druga na kraju vodnog skoka. Spregnute dubine su u takvom odnosu da ako npr. vrijednost prve spregnute dubine raste, u tom će slučaju vrijednost druge spregnute dubine opadati, i obrnuto. Oznaka za prvu spregnutu dubinu je h_1 , a za drugu spregnutu dubinu je h_2 (Slika 10.), (Lončar i Andročec, 2010.).



Slika 10. Prikaz prve i druge spregnute dubine iza preljeva (Lončar i Andročec, 2010.)

Kada se u grafičkom smislu (Slika 11.) sagledava odnos prve i druge spregnute dubine dobije se dijagram na kojem je vidljivo da je moguće dobiti neograničen broj parova spregnutih dubina pri određenom zadanom koritu i protocima. Prema tome svaka prva spregnuta dubina, h_1 imati će samo jedan određeni par h_2 . Postoji i slučaj kada pojava vodnog skoka nije moguća, a to se događa u situaciji kad je vodotok u kritičnom stanju, tj. kad funkcija skoka ima minimalnu vrijednost ($h_1 = h_2 = h_{kr}$), (Agroskin, 1969.).



Slika 11. Dijagram ovisnosti prve i druge spregnute dubine (Agroskin, 1969.)

Moguće je analitičkim putem prikazati međusoban odnos prve i druge spregnute dubine. Prije krajnjeg prikaza jednadžbi i odnosa spregnutih dubina, potrebna je i jednadžba zakona o očuvanju količine gibanja na određenom vodnom skoku koja glasi:

$$\rho g \frac{h_1^2}{2} - \rho g \frac{h_2^2}{2} - \tau_0 L_j = \rho q (v_2 - v_1) \quad (3.3)$$

pri čemu članovi u formuli predstavljaju:

ρ - gustoću vode (kg/m^3)

g – konstantu gravitacije ($9,81 \text{ m/s}^2$)

τ_0 - posmično naprezanje na dnu na duljini vodnog skoka

L_j - duljina vodnog skoka (m)

v_1, v_2 - brzine vodotoka (m/s)

q – specifični protok po metru dužnom ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m} = \text{m}^2/\text{s}$).

Također potrebna je i jednadžba kontinuiteta:

$$q = v_1 h_1 = v_2 h_2 \quad (3.4)$$

koja se uvrštava u jednadžbu (3.3) iz koje se onda dobiva izraz za prvu i drugu spregnutu dubinu:

$$h_1 = \frac{h_2}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_2} - 1); \quad h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1} - 1) \quad (3.5)$$

te u tim jednadžbama Fr predstavlja Froudeov broj (Agroskin, 1969.).

Promjena energije i tlaka kod vodnog skoka

Poznato je kako do pojave vodnog skoka dolazi zbog promjene strujanja režima vodotoka, tj. prijelaza iz silovitog u miran tok. Pri tom prijelazu iz silovitog u mirno tečenje događaju se energetske promjene vodotoka, troši se mehanička energija vodotoka. Može se reći da su gubitci energije na vodnom skoku također usko povezani sa smanjenjem brzina na vodotoku, smanjenje brzina vodotoka bitno utječe na disipaciju energije vodotoka. Pomoću Bernoullijeve jednadžbe i međusobnog odnosa spregnutih dubina u određenim presjecima može se dobiti izvod, formula za gubitak energije u vodnom skoku. Također, radi se o vodotoku koji ima horizontalno dno (pad je jednak nuli). Bernoullijeva jednadžba glasi:

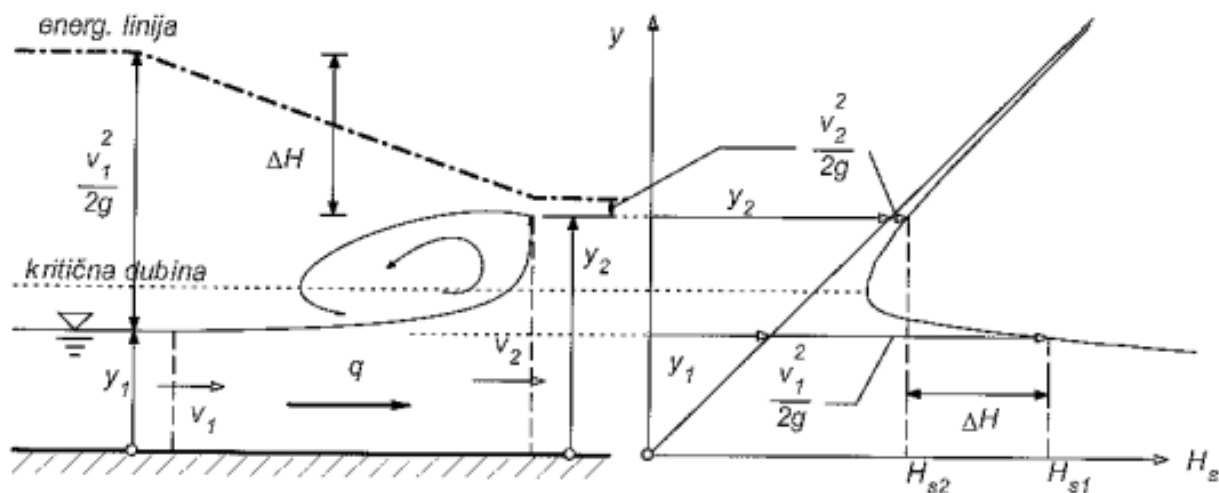
$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \Delta H. \quad (3.6)$$

pri čemu je α Coriolisov koeficijent.

U Bernoullijevu jednadžbu (3.6) uvrštava se vrijednost Coriolisovog koeficijenta približna 1, te se dobiva izraz:

$$\Delta H = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} - h_2 - \frac{v_2^2}{2g} \quad (3.7)$$

u kojem ΔH predstavlja disipaciju energije na vodnom skoku, tj. gubitak je izražen preko razlike gubitaka specifične energije u dvama presjecima. Na slici 12. prikazana je disipacija energije na vodnom skoku.



Slika 12. Disipacija energije na vodnom skoku (Jović, 2006.)

Kasnije se nakon jednostavnih matematičkih operacija dobiva izraz pomoću kojeg se mogu odrediti gubici energije u pravokutnom koritu samo preko visina:

$$\Delta H = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2} \quad (3.8)$$

Kada bi se promatrala utrošena energija vodnog skoka na postepeno promjenjivom ili silovitom tečenju, na dionici duljine jednake duljini skoka, bila bi deset i više puta manja nego ona na potpunom skoku (Agroskin, 1969.).

Promjene tlaka su normalne i učestale pojave koje se događaju zbog velikih i intenzivnih turbulencija u vodnom skoku. Na slici 13. mogu se na grafičkom prikazu vidjeti fluktuacije tlaka u vremenu na određenom vodnom skoku.

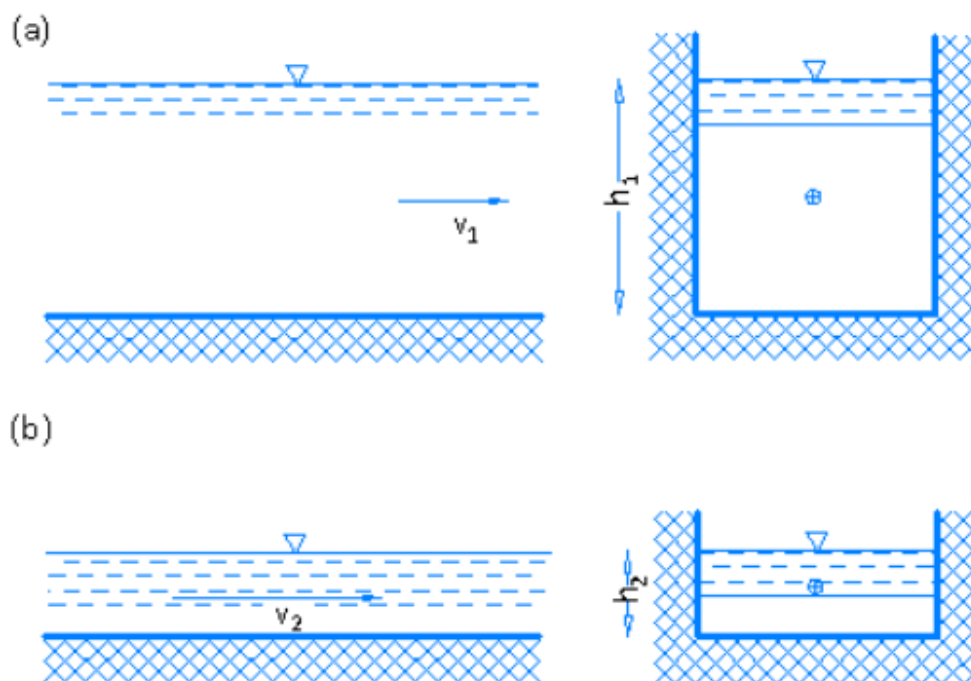


Slika 13. Fluktuacije tlaka pri pojavi vodnog skoka (Jović, 2006.)

Na slici 13. se jasno može vidjeti da neke vrijednosti dosežu vrijednosti podtlaka. Prema tome u inženjerstvu je vrlo bitno na hidrotehničkim objektima kod kojih je prisutan vodni skok, te samim time i velika disipacija energije, pridodati dosta pažnje pri projektiranju i izvedbi zbog raznih opterećenja koja se pojavljuju (Jović, 2006.).

Froudeov broj

Froudeov broj (Fr) u hidromehanici služi kako bi smo pomoću njega opisali strujanje, tj. vrstu vodotoka. Froudeov broj može se promatrati u tri slučaja: 1. slučaj je kad je $Fr > 1$ što predstavlja silovito tečenje (Slika 14.b)), 2. slučaj kad je $Fr < 1$ što predstavlja mirno strujanje (Slika 14.a)), te 3. slučaj kad je $Fr = 1$ predstavlja kritično strujanje (Lončar i Andročec, 2010.). Froudeov broj je bezdimenzionalna veličina.



Slika 14. Strujanje u pravokutnim koritima: a) mirno strujanje, b) silovito strujanje (Lončar i Andročec, 2010.)

Froudeov broj moguće je izračunati pomoću sljedećeg izraza koji je dobiven prethodnom derivacijom formule za minimum specifične energije:

$$Fr = \alpha \frac{Q^2}{gA^3} B \quad (3.9)$$

odnosno,

$$Fr = \alpha \frac{v^2}{g \frac{A}{B}} = \alpha \frac{v^2}{g \bar{y}} \quad (3.10)$$

gdje su:

A - površina pravokutnog poprečnog presjeka (m^2)

B - širina pravokutnog poprečnog presjeka (m)

\bar{y} - srednja dubina toka vode, A/B (m)

v – brzina toka (m/s).

Iz danih izraza se može zaključiti da se Froudeov broj može izračunati na više načina. Kasnije, ukoliko se Froudeov broj računa u poprečnim presjecima jednostavnih oblika, može se uzeti da je Coriolisov broj ($\alpha=1$), te se dobiva izraz:

$$Fr = \frac{v^2}{g \bar{y}}. \quad (3.11)$$

Međutim, izraz za Froudeov broj (3.11.) pretežno se koristi u europskoj literaturi, a u američkoj je više upotrebljiv izraz:

$$F = \sqrt{Fr} = \frac{v^2}{g \bar{y}}, \quad (3.12)$$

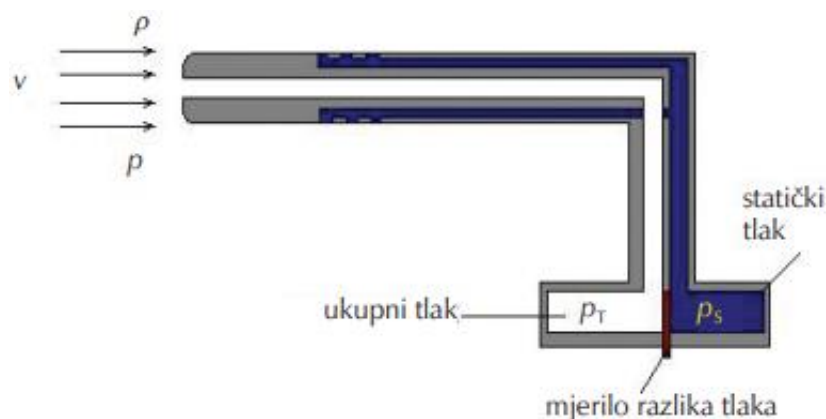
U tom slučaju i dalje vrijede isti parametri za određivanje vrste strujanja vodotoka (Jović, 2006.).

Brzina vodotoka

Brzina vodotoka, kako u stvarnosti tako i u eksperimentalnom određivanju, bitna je za određivanje ostalih fizikalnih veličina, ali i samih osobina vodotoka i vodnog skoka. Pri provođenju eksperimenta brzina toka se mjerila pomoću Torricellijevog zakona:

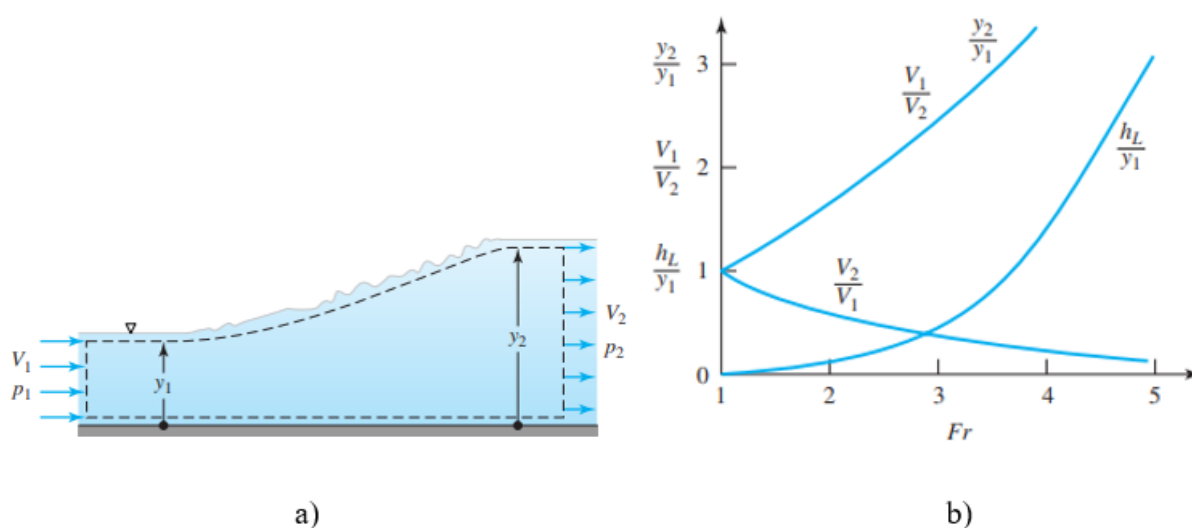
$$v = \sqrt{2gh}, \quad (3.13)$$

gdje h predstavlja visinu na piezometru na dispoziciji piezometarske harfe (na mjestu triju Pitotovih cijevi), točnije mjeri se tlak ispred cijevi uz poznatu gustoću fluida. Pitotova cijev (Slika 15.) dobila je ime po francuskom fizičaru Henriju Pitotu (Bolf, 2020.).



Slika 15. Pitotova cijev (<https://hr.wikipedia.org/wiki/Pitot-cijev#/media/Datoteka:Pitot-cijev.jpg>, (pristup 6.7.2022.))

Na slici 16.b) grafički je prikazan odnos dubine, brzine toka vode i visinskog gubitka hidrauličkog skoka kao funkcija Froudeovog broja. Na slici 16.b) može se iz omjera brzina toka vidjeti kako je brzina toka v_1 veća od brzine toka v_2 , te da u slučaju kada je omjer brzina toka manji od 1, vrijednost Froudeovog broja brže raste nego kada je omjer brzina toka veći od 1. Brzina toka v_1 mjerena je na mjestu dubine y_1 , a brzina toka v_2 mjerena je na mjestu dubine y_2 (Slika 16.a)). Na slici 16.a) vidi se kako je dubina y_2 veća od dubine y_1 , a na slici 16.b) vidi se da je omjer y_2/y_1 jednak omjeru v_1/v_2 . Omjer y_2/y_1 mora biti veći od 1 kako bi i vrijednost Froudeovog broj bila veća od 1. Sa slike 16.b) može se vidjeti da povećanjem omjera visinskog gubitka hidrauličkog skoka i dubine y_1 raste vrijednost Froudeovog broja.



Slika 16. a) Prikaz formiranja vodnog skoka, b) Odnos dubine, brzine toka vode i visinskog gubitka hidrauličkog skoka, te Froudeovog broja (Shaughnessy, 2005.)

4. Tipovi vodnog skoka i njihove karakteristike

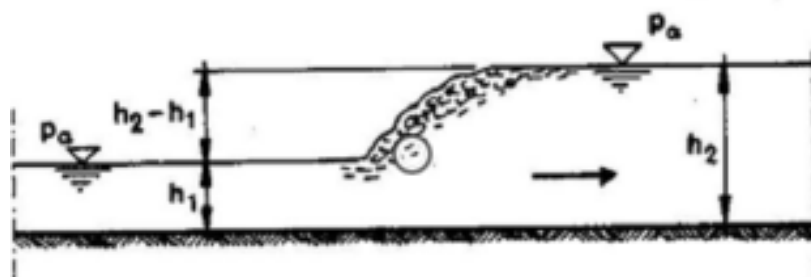
U hidrotehnici vrlo zanimljivo pitanje je pitanje rješavanja prelaska sa silovitog strujanja vodotoka u mirno strujanje. Prelazak sa silovitog na mirno tečenje javlja se kod istjecanja ispod zapornice, pri promjeni pada kanala, preko preljeva brane, te se u svakom od tih slučajeva pitanje prelaska nastoji rješavati pomoću skoka. U hidrotehničkoj se praksi nastoji čim je više moguće osigurati miran tok, u tim slučajevima ne treba specijalna obloga korita kao kod silovitog toka. Pozitivna stvar vodnog skoka je ta što skraćuje put, duljina dijela vodotoka gdje silovit tok prelazi u miran. Samim time se smanjuje i dimenzija određenog dijela hidrotehničkog objekta. Prema tome, kako je prethodno navedeno, vodni skokovi mogu nastati na više načina, te je prema tome moguće napraviti i podjelu prema različitim oblicima. Podjela vodnih skokova prema oblicima bi onda glasila (Agroskin, 1969.):

1. potpun skok
2. valovit skok
3. navučen skok
4. potopljen skok
5. površinski skok.

4.1. Potpuni skok

Na slici 17. prikazan je potpuni skok. To je skok koji ima jasno izraženu zonu širenja i površinsku zonu, te je u koritu stalnog presjeka i pada. Mora biti zadovoljen uvjet $a > h_1$, gdje je a visina skoka:

$$a = h_2 - h_1. \quad (4.1)$$



Slika 17. Potpuni skok (Žic i drugi, 2010.)

Promatra se skok u intervalu od kotiranih spregnutih dubina h_1 i h_2 . U četrdesetim godinama 19. stoljeća, francuski matematičar Jean-Baptiste Bélanger predložio je izvod jednadžbe za

potpun skok na temelju teorije o promjeni količine gibanja. U tu jednadžbu ulaze vrijednosti vanjskih sila, koje zapravo i uzrokuju promjenu količine gibanja, a to su sile tlaka u presjecima vodotoka i težina tekućine u vodotoku. Kasnijim matematičkim operacijama i sređivanjem izraza dobiva se konačni izraz za potpuni skok (Žic i drugi, 2010.):

$$\frac{Q^2}{gA_1} + A_1 h'_c = \frac{Q^2}{gA_2} + A_2 h''_c \quad (4.2)$$

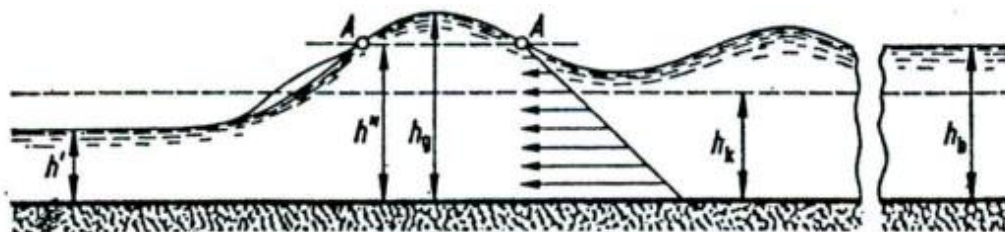
gdje su:

A_1, A_2 - površine promatranih poprečnih presjeka (m^2)

h'_c, h''_c - dubine na kojima se nalaze težišta poprečnih presjeka (m).

4.2. Valovit skok

Valovit vodni skok (Slika 18.) je skok male visine, kod kojeg ne postoji površinska zona, te izgleda poput niza postepeno prigušenih valova.



Slika 18. Valovit skok (Agroskin, 1969.)

U slučajevima kada je $Fr > 0,375$ i $Fr < 3$, tada će skok imati oblik u nizu prigušenih valova. Kasnije za daljnju analizu valovitog skoka treba vidjeti da li je moguće koristiti jednadžbu (3.5) za izračun spregnutih dubina. U pogledu na jednadžbu (4.2), h''_c je druga spregnuta dubina odmah nakon skoka, do najbližeg poprečnog presjeka gdje se tlak raspoređuje po hidrostatičkom zakonu. Takav se presjek na valovitom skoku nalazi iza niza prigušenih valova, te se zbog toga sile trenja moraju uzeti u obzir. Stoga se za presjek s hidrostatičkom raspodjelom tlaka uzima presjek kroz točku infleksije krivulje slobodne površine prvog polu vala. Uzima se taj presjek zato jer se pretpostavlja da je u toj točki zakrivljenost jednaka nuli. Nadalje, dolazi se do zaključka da kod valovitog vodnog skoka za drugu spregnutu dubinu treba uzimati vrijednost na presjeku A-A (Slika 18.), te se samim time i jednadžba (3.5) može upotrijebiti za valoviti vodni skok, ali uz minimalne izmjene:

$$h_2 = 0,58h_1(\sqrt{1 + 8Fr_1} - 1) \quad (4.3)$$

Pri maloj silovitosti toka, kad je $1 < Fr < 1,5$, može se valoviti skok smatrati i zaustavljenim vodnim valom male visine a . U tom slučaju se može uzeti da je $a=1$, iz čega slijedi izvod formule za brzinu:

$$v_1^2 = g \frac{h_2(2h-a)}{2(h_2-a)}, \quad (4.4)$$

Poznato je kako je a visina vala puno manja u odnosu na h_2 te iz toga slijedi (Agroskin, 1969.):

$$v_1 = \sqrt{gh_2} \quad (4.5)$$

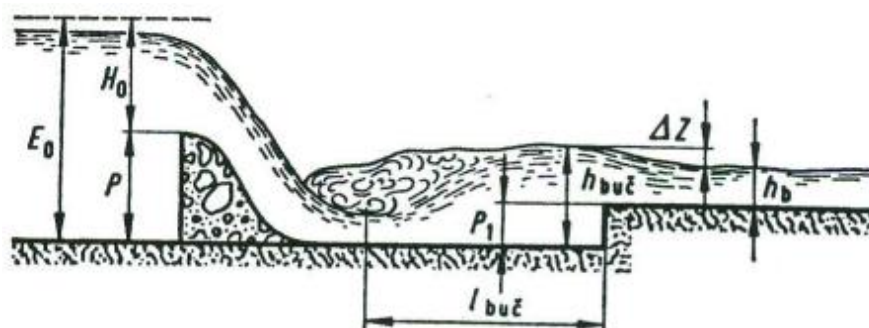
4.3. Navučeni skok

Navučeni skok se još naziva i poduprt skok (Slika 19.). Specifičan je po tome jer se na kraju vodnog skoka nalazi stepenica ili stijenka na dnu korita koja poremećuje poprečni presjek vodotoka. Može se reći da navučeni skok ima razvijenu površinsku zonu.



Slika 19. Navučeni skok (Agroskin, 1969.)

Kod navučenog skoka normalna je pojava stejšnjavanja po dužini i promjene toka na većim dubinama. Bunari ili bazeni za smanjivanje energije još se nazivaju bučnice ili slapišta, te se oni grade kako bi se stvorila dubina u donjoj vodi, koja će osigurati spajanje pomoću navučenog vodnog skoka. U nastavku će se obraditi hidraulički proračun bučnice, točnije odredit će se dubina i duljina. Na slici 20. može se vidjeti prikaz bučnice.



Slika 20. Bučnica (Agroskin, 1969.)

Prva stvar koja se određuje u bučnici je visina druge (suprotne) stepenice P_1 . Visina suprotne stepenice određuje se tako da dubina vode u njoj bude veća od dubine druge spregnute dubine poduprtog skoka ispred praga, te mora vrijediti izraz:

$$h_{buč} = \sigma * h_2, \quad (4.6)$$

gdje je:

$\sigma=1,05$ - koeficijent rezerve.

Posljedično tome, postoji druga formulacija za dubinu vode u bučnici:

$$h_{buč} = P_1 + H', \quad (4.7)$$

gdje su:

P_1 - visina praga, [m]

H' - dubina na pragu na izlazu iz bučnice, [m].

Visina H' određuje se pretpostavkom da izlazni dio bučnice funkcionira kao potopljen preljev sa širokim pragom. Druga veličina kod bučnice koja se može razmatrati i odrediti je duljina same bučnice. Bučnica treba biti dimenzionirana kao takva da mlaz skoka ne bi iskakao iz nje. Bučnica mora moći prihvatiti vodni skok. Samim time dimenzije bučnice ovise o veličini vodnog skoka. V. A. Šaumjan izdao je formulu za dužinu (l_{nkp}) navučenog skoka:

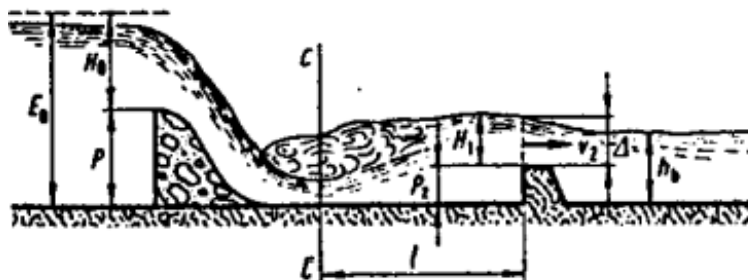
$$l_{nkp} = 3h_2 \quad (4.8)$$

Posljedično tome ako se uzima da je dužina navučenog skoka jednaka dubini bučnice, nastaje izraz:

$$l_{buč} < 3h_2. \quad (4.9)$$

Pri projektiranju bučnica, na takvim se smanjenim modelima ispituju svojstva u laboratoriju, te se na temelju tih ispitivanja izgrađuju bučnice. Drugi način rješavanja slučaja gdje se spajaju preljevni mlaz i donja voda pomoću poduprtog skoka može se riješiti izgradnjom odbojnog praga (Slika 21.) na slapištu. Veličine koje se računaju hidrauličkim proračunom odbojnog praga su udaljenost od podnožja brane do zida (l) i visina zida (p_z). Visina odbojnog praga mora biti takva da zbrojena sa visinom preljeva preko zida mora biti jednaka drugoj spregnutoj dubini navučenog skoka. U daljnjim formulacijama koeficijent rezerve i dalje iznosi 1,05. Izraz za visinu zida je tada:

$$p_z = \sigma * h_2 - H'. \quad (4.10)$$

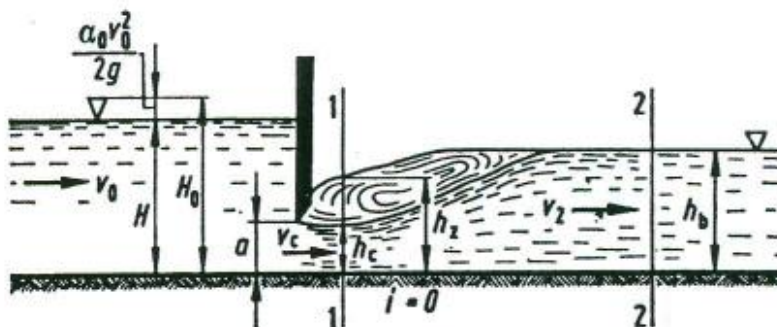


Slika 21. Poduprt skok ispred zida (Agroskin, 1969.)

Bitno je napomenuti kako vrijednosti E_0 i h_c ostaju iste, te samim time postupak proračuna odbojnog zida postaje puno jednostavniji od proračuna bučnice, zbog toga jer se radi bez iterativnog postupka (Agroskin, 1969.).

4.4. Potopljen skok

Za potopljeni vodni skok (Slika 22.) je karakteristično da se pojavljuje na mjestu kod istjecanja ispod zapornice. Prepoznatljiv je po tome jer ima razvijenu površinsku zonu, a sam vodotok na svom putu udara u zapornicu.



Slika 22. Potopljeni vodni skok (Agroskin, 1969.)

Potopljeni vodni skok, istjecanje, javlja se u slučaju kad je $h_c < h_z < h_b$. Nadalje moguće je izračunati protok preko formule:

$$Q = \mu b a \sqrt{2g(H_0 - h_z)}, \quad (4.11)$$

gdje su:

μ - koeficijent protoka, [/]

b - širina otvora, [m]

a - visina otvora ispod zapornice, [m]

h_z - dubina iza zapornice (presjek 1-1), [m].

Koeficijent protoka jednak je kod potopljenog i kod slobodnog istjecanja kroz otvor ispod zapornice, dokazano eksperimentima. Nakon toga može se odrediti dubina h_z , te se u tom slučaju promatra mjesto tekućine od presjeka 1-1 do presjeka 2-2 (Slika 22.). Pri proračunu h_z može se iskoristiti poučak o promjeni količine gibanja, s time da je pad jednak nuli, te se u pravokutnom koritu dobiva jednadžba za potopljeni skok koja glasi:

$$\frac{2a'q}{g} (v_z - v_c) = h_s^2 - h_b^2 \quad (4.12)$$

gdje su:

$$q = \frac{Q}{b} [\text{m}^2/\text{s}],$$

$$v_c = \frac{q}{h_c}, \text{ brzina u promatranom presjeku, [m/s]}$$

$$v_z = \frac{q}{h_z}, \text{ brzina u presjeku 2-2, [m/s].}$$

Također pri rješavanju jednadžbe, u presjecima 1-1 i 2-2, pretpostavljen je takav tlak da se povećava po dubini po hidrostatičkom zakonu. Nakon zamjene v_c i v_z u jednadžbi (4.12), te postavkom da je $a'=1$, dobiva se sljedeći izraz:

$$h_z^2 = h_b^2 - \frac{2q^2}{g} * \frac{h_b - h_c}{h_b h_c}, \quad (4.13)$$

pomoću kojeg je moguće odrediti h_z , kad su poznate veličine q i h_b i kad se zna veličina otvora zapornice (Agroskin, 1969.).

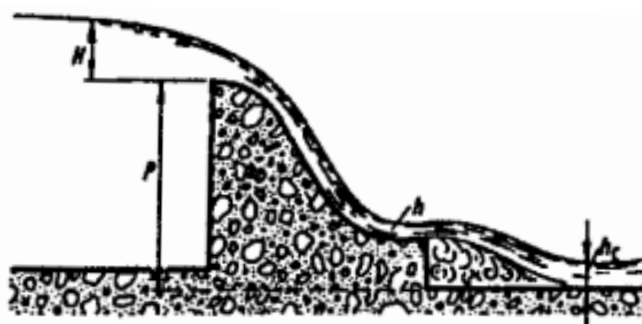
4.5. Površinski skok

Za površinski skok se može reći da pri dnu ima razvijeni vrtložni valjak. Taj se vrtložni valjak nalazi na početku skoka. Površinski skok primjerice može nastati na mjestu gdje se vodni mlaz spušta sa brane, sa stepenicom (Slika 23.).



Slika 23. Površinski skok (Agroskin, 1969.)

Površinski skok karakterističan je po već spomenutom vrtlogu koji se nalazi na dnu i po raspodjeli brzine po presjeku. U praksi površinski se skok javlja u slučaju preljeva vodotoka preko nekog praktičnog profila, tj. pri spajanju preljevnog mlaza s donjom vodom. Postoje dvije vrste površinskog skoka, potopljen i slobodan. Izgled površinskog skoka ponajviše ovisi o dubini donje vode koja nije stalne veličine i iznosa poput protoka, visine hidrotehničkog objekta, visine ruba. Na slici 24. može se vidjeti situacija u kojoj vodotok dolazi na dno donje vode s dubinom h_c , te prostor nakon skoka biva ispunjen vodom, a ne zrakom i na tom mjestu nastaje vrtlog. Na mjestu vrtloga hidrostatički je tlak veći od normalnog.



Slika 24. Prikaz prelaska mlaza preko stepenice (Agroskin, 1969.)

Ako su u promatranom presjeku dubina donje vode i spregnuta dubina jednake, onda dolazi do pojave potpunog skoka (Slika 25.).



Slika 25. Potpuni skok (Agroskin, 1969.)

U slučaju da se vrijednost dubine vode h_b povećava, skok se pomiče prema rubu praga, te pri određenoj vrijednosti nestaje (Slika 26.) ili se transformira u oblik površinskog skoka.



Slika 26. Nestajanje skoka (Agroskin, 1969.)

Kako je već prije navedeno, površinski skok može biti potopljen ili slobodan. Slobodan površinski skok nastaje kad se vrtlog ispod mlaza nakon stepenice povećava i spaja se s donjom vodom na nekoj dubini h_b (Slika 27.).



Slika 27. Spajanje vodnih razina u obliku površinskog skoka (Agroskin, 1969.)

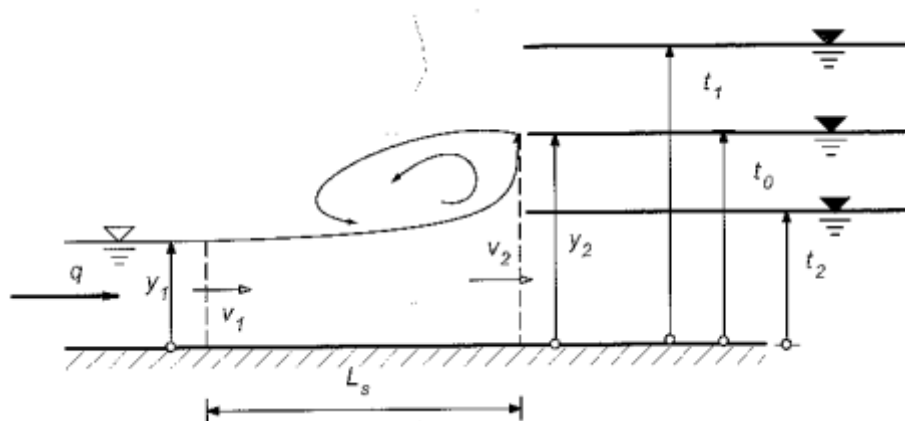
Nakon toga ako se dubina h_b nastavi povećavati, skok se počinje vraćati unazad, tj. prema brani. Nakon toga se na mjestu obruba javlja vrtložni valjak, te se spajanje dešava kao potopljeni površinski skok (Slika 28.).



Slika 28. Spajanje vodnih razina u obliku potopljenog površinskog skoka (Agroskin, 1969.)

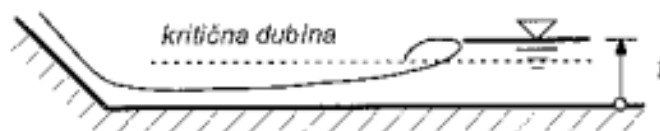
U slučaju da se dubina i dalje povećava, to će dovesti do povećanja volumena vrtložnog valjka na površini, a smanjivati će se donji vrtložni valjak. Nakon promjene odnosa vrtložnih valjaka, dolazi i do promjene tlakova ispod mlaza vodotoka. Tlak na tome prostoru postaje veći od hidrostatičkog tlaka. Eksperimentalnim ispitivanjima kroz povijest ustanovljeno je da vrijednost tlakova ispod mlaza ovisi i o zakrivljenosti strujnica iza obruba, tj. da su tlakovi isti kad je zakrivljenost nula. Kod površinskog skoka mogu se promatrati dva stanja spajanja vodotoka koja se nazivaju prvi i drugi kritični režim površinskog skoka. Prvi kritični režim može se gledati kao prijelaz sa slike 26. na sliku 27., tj. tad nastaje slobodni površinski skok. Drugi kritični režim se može opisati kao prijelaz sa slobodnog površinskog skoka na potopljeni skok (Agroskin, 1969.).

Postoji mogućnost podjele vodnog skoka prema stupnju potopljenosti (Slika 29.) pri čemu su mogući normalni, odbačeni i potopljeni vodni skok.



Slika 29. Potopljenost vodnog skoka (Jović, 2006.)

U slučaju kad je uspostavljena ravnoteža sila na spregnutim dubinama nastaje normalni vodni skok, točnije nastaje u slučaju uspostave ravnoteže t_0 i druge spregnute dubine y_2 , tj. $t_0=y_2$. Nadalje, pojavu odbačenog vodnog skoka najbolje je opisati kao onu kada nizvodne sile mirnog strujanja nisu u ravnoteži, kada dubina donje vode t_2 biva manja od druge spregnute dubine y_2 . Potopljeni vodni skok pojavljuje se kad su sile potrebne za ravnotežu manje od sila mirnog strujanja, te na mjestu druge spregnute dubine, dubina t_1 biva manja od y_2 , što predstavlja drugu spregnutu dubinu. Na slici 30. prikazan je izgled odbačenog, a na slici 31. potopljenog vodnog skoka (Jović, 2006.).



Slika 30. Odbačeni vodni skok (Jović, 2006.)



Slika 31. Potopljeni vodni skok (Jović, 2006.)

5. Fizikalni model malog hidrauličkog žlijeba u hidrotehničkom praktikuumu

Uređaj na kojem je provedeno eksperimentalno istraživanje naziva se mali hidraulički žlijeb, S16 firme Armfield iz Velike Britanije koji služi za promatranje formiranja vodnog skoka različitih oblika, prelijevanja preko određenih hidrotehničkih objekata i slično. Fizikalni model se sastoji od dva dijela. Prvi dio je spremnik koji se puni vodom do određene razine, kapaciteta oko 250 litara vode (Slika 32.). U prvom dijelu se još nalazi centrifugalna pumpa za recirkulaciju vode, manji spremnik za volumetrijsko mjerenje protoka, cijevi za cirkuliranje vode prema gornjem spremniku, postolja za montažu različitih vrsta profila preljeva, skale za očitavanje količine vode u spremniku, otvor za pražnjenje vode u spremniku, te kuglica sa utegom za volumetrijsko mjerenje protoka. Dužina spremnika je 1,13 m, širina je 0,73 m, a visina 1,00 m. Maksimalni protok vode iznosi $Q=80$ l/min, snaga motora $P=0,37$ kW, maksimalno dizanje vode centrifugalne pumpe je 21 m. Mali spremnik za volumetrijsko mjerenje je kapaciteta 40 litara/6 litara (maksimalni/minimalni), (Katalog laboratorijske i terenske opreme Građevinskog fakulteta Rijeka).



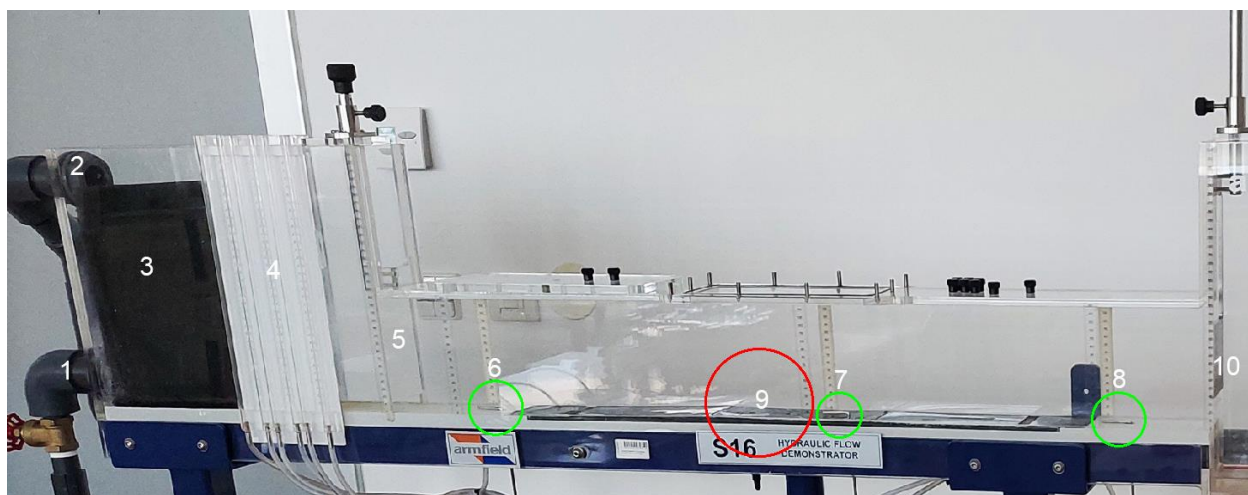
Slika 32. Spremnik vode za recirkulaciju vode u sustavu hidrauličkog žlijeba

Drugi dio fizikalnog modela je mali hidraulički žlijeb koji se nalazi na metalnom postolju, te je cijevima povezan sa spremnikom vode (Slika 33.).



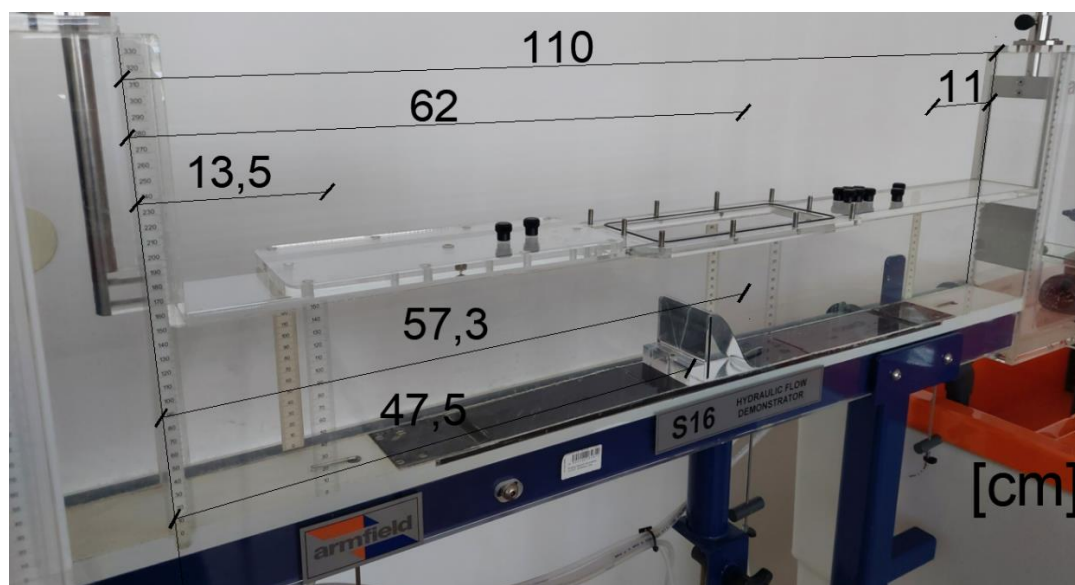
Slika 33. Mali hidraulički žlijeb na metalnom postolju

Na početku hidrauličkog žlijeba se nalazi gornji spremnik sa spužvom (Slika 34.-3), te dva otvora, točnije dovodna cijev (Slika 34.-1) i sigurnosni preljev (Slika 34.-2). Unutar fizikalnog modela nalazi se početna (tablasna ili pločasta) zapornica (Slika 34.-5). Na kraju radne sekcije se nalazi zapornica (Slika 34.-10) koja ima mogućnost formiranja preljeva ili pločaste zapornice. Unutar radne sekcije nalaze se tri Pitotove cjevčice (oznake 6,7,8), te se uz njih nalaze milimetarske skale. Pitotove cjevčice nalaze se na poziciji: prije preljeva (Slika 34.-6), nakon preljeva (Slika 34.-7), te na kraju radne sekcije (Slika 34.-8). Pitotove cjevčice mogu biti povezane sa piezometarskom harfom (Slika 34.-4) koja se nalazi prije ulaska vode u radnu sekciju. U radnu sekciju se mogu postaviti razni hidrotehnički objekti izrađeni od pleksi-stakla na poziciji koja je na slici 34. označena brojem 9. Razni hidrotehnički objekti se mogu izraditi pomoću 3D printera koji je sastavni dio hidrotehničkog laboratorija.



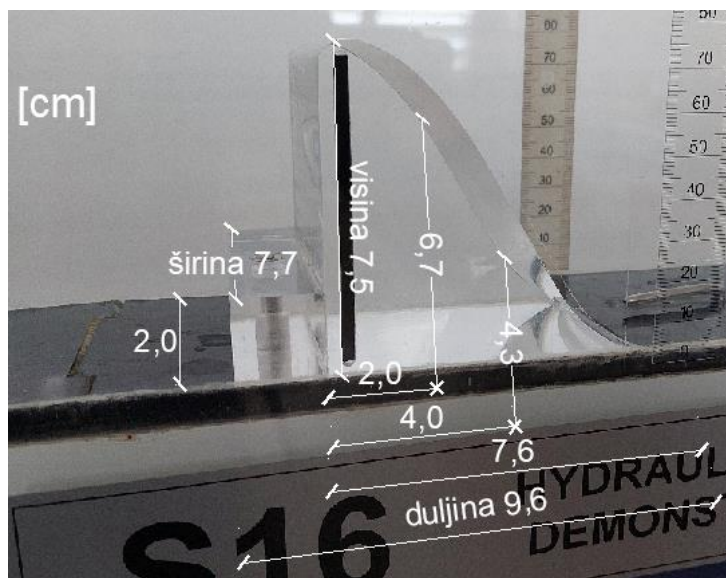
Slika 34. Prikaz dijelova malog hidrauličkog žlijeba

Visina malog hidrauličkog žlijeba je 1,60 m, dužina 2,20 m i širina je 0,63 m. U slučaju kad bi se dimenzije gledale zajedno sa prvim dijelom, tj. spremnikom vode onda bi dužina iznosila približno 3,00 m. Težina iznosi 100 kg u suhom radu. Osnovne dimenzije radne sekcije iznose: visina 15 cm, dužina 110 cm, te širina 7,7 cm. Ostale dimenzije radne sekcije u slučaju dok se u njoj nalazi Creagerov preljev izmjerene su u laboratoriju. Od tih dimenzija prikazani su položaji Pitotovih cjevčica (1. i 2.) od prve zapornice, te položaj 3. Pitovih cjevčica od krajnje zapornice. Prikazan je i položaj Creagerovog preljeva u radnoj sekciji u odnosu na početnu zapornicu (Slika 35.).



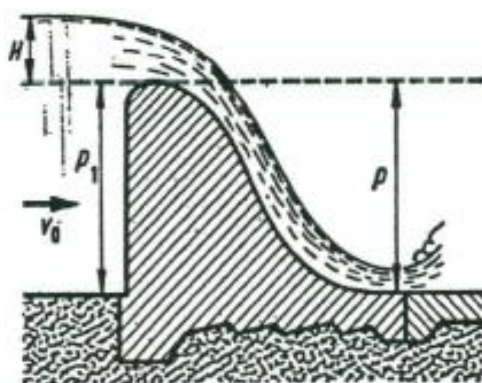
Slika 35. Dimenzije radne sekcije malog hidrauličkog žlijeba (u cm)

Na slici 36. su prikazane osnovne geometrijske vrijednosti praktičnog preljeva krivolinijskog obrisa koji se koristi pri eksperimentu. Preljev se još naziva i Creagerov preljev, te je on izrađen od pleksi-stakla.



Slika 36. Dimenzije preljeva praktičnog profila krivolinijskog obrisa korištenog u ispitivanjima

Preljev je u pravilu građevina koja se nalazi na mjestu gdje se vodotok pregradi ili na mjestu gdje se njegovo korito sužava sa bočnih strana. Dvije vrste razina vode koje se mogu mjeriti i koje su bitne pri daljnjim proračunima su gornja voda, koja se nalazi prije preljeva, te donja voda koja se nalazi iza preljeva. Mjesto na kojem voda prelazi preko preljeva naziva se kruna preljeva. Postoji više različitih preljeva: preljev s oštrim bridom, preljev praktičnog profila poligonalnog obrisa, preljev sa širokim pragom, te preljev praktičnog profila krivolinijskog obrisa o kojem će nešto više biti rečeno u nastavku teksta. Preljev praktičnog profila krivolinijskog obrisa karakterističan je po tome jer ima zaobljenu stranu od krune uzdužno prema vodotoku (Slika 37.).

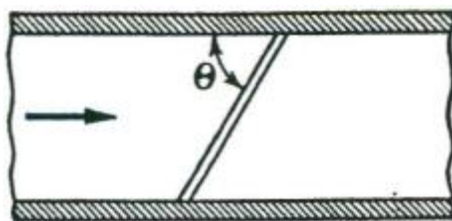


Slika 37. Preljev praktičnog profila krivolinijskog obrisa (Agroskin, 1969.)

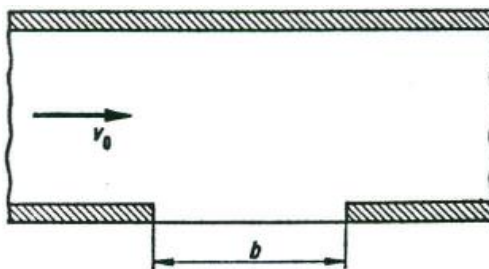
Pošto je takav preljev široke primjene u svijetu, iz njegovog osnovnog oblika izvedeni su ostali oblici, ako se gleda prema položaju praga u tlocrtu postoje: normalni preljev (Slika 38.), kosi preljev (Slika 39.), bočni preljev (Slika 40.), krivolinijski preljev (Slika 41.).



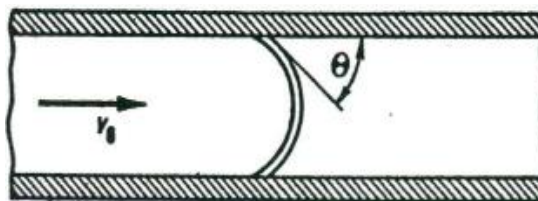
Slika 38. Normalni preljev (Agroskin, 1969.)



Slika 39. Kosi preljev (Agroskin, 1969.)



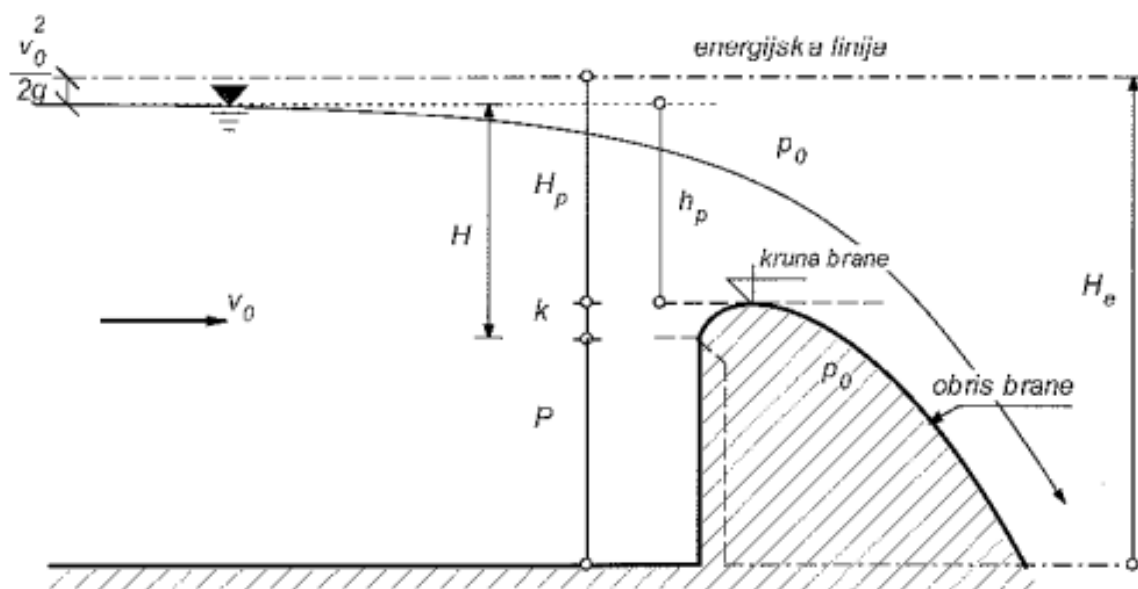
Slika 40. Bočni preljev (Agroskin, 1969.)



Slika 41. Krivolinijski preljev (Agroskin, 1969.)

Sljedeća podjela koju je moguće napraviti je prema prilazu vodotoka k preljevu, te se tu razlikuju preljevi bez bočnog suženja vodotoka i preljevi sa bočnim suženjem. Nakon toga slijedi podjela prema načinu spajanja vodotoka s donjom vodom, dijele se na potopljene i ne potopljene preljeve. Krivolinijske preljeve moguće je podijeliti i prema obrisu profila, na vakuumske i bezvakuumske. Vakuumski preljevi su jednostavno rečeno oni kod kojih se između površine preljeva i mlaza vodotoka stvara slobodan prostor. Bezvakuumski preljev je

onaj preljev kod kojeg se profil preljeva poklapa s donjim licem vodotoka. Vakuumski preljevi nepogodniji su od bezvakuumskih, jer vakuum povećava opterećenje na hidrotehničkim objektima, te može doći do određenih nestabilnosti i poteškoća na istima. Kod izrade bezvakuumskog preljeva za vanjsku preljevnu plohu uzima se obris donje strane mlaza sa oštrobridnog preljeva pri određenoj preljevnoj visini. Najiskorišteniji u praksi je profil kojeg je predložio Creager. Creager je na dubini od $\frac{2}{3}H$ definirao koordinate trajektorije čestica tekućine, te je uzeo da je donji obris vodotoka udaljen za $\frac{1}{3}$ debljine mlaza koji se pojavljuje u presjeku. Creager je postavio nizvodnu stranu da ulazi u tijelo mlaza, da se ne stvori vakuum. Zaobljeni oblik krune na krivolinijskom presjeku zbog svojeg oblika utječe na povećanje koeficijenta protoka na preljevu, tako što se na kruni preljeva stvaraju centripetalna ubrzanja, koja smanjuju pritisak za dolje, te se time povećava srednja brzina uz jednaku preljevnu visinu, posljedično tome povećava se i protok. Vakuumski profil nastaje na način da se nizvodna strana preljeva ne podudara sa donjom stranom mlaza, te nastaje prazan prostor, vakuum. Što se tiče koeficijenta protoka kod vakuumskih preljeva on je veći nego kod bezvakuumskih. U praksi se više koriste bezvakuumski preljevi, zato jer su više proučavani od vakuumskih i nemaju puno nedostataka. Na slici 42. može se vidjeti oblikovanje bezvakuumskog preljeva (Agroskin, 1969.).



Slika 42. Oblikovanje bezvakuumskog preljeva (Jović, 2006.)

6. Eksperimentalno ispitivanje vodnog skoka

Eksperiment je izveden u praktikumu hidrotehničkog laboratorija na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Kao što je već prije navedeno eksperiment je proveden na hidrauličkom žlijebu S-16, demonstracijskom fizikalnom modelu tvrtke Armfield (*Hydraulic flow demonstrator*). Na početku eksperimenta bitno je cijeli sustav spojiti sa strujom, tj. da uređaj ima napajanje. Nakon toga spremnik se puni vodom do određene razine, tijekom eksperimenta se u spremniku nalazilo oko 150 litara vode. Bitno je da se u spremniku nalazi dovoljna količina vode, da pumpa ne bi počela usisavati zrak, već da usisa vodu i nakon toga da normalno cirkulira voda cijelim sustavom. Uređaj se jednostavno uključuje pomoću prekidača, te se voda pomoću pumpe kroz cijev dovodi do gornjeg spremnika. Nakon što voda neko vrijeme procirkulira kroz cijeli sustav, na dnu spremnika nalazi se otvor (rupa) koja se zatvara sa kuglicom na koju je pričvršćen uteg. Otvor se zatvara kako bi se mogao odrediti protok u sustavu, na način da se u vremenu od 10 sekundi izmjeri koliko se poveća volumen. To se još naziva i volumetrijsko mjerenje protoka. Izmjerena je promjena volumena od 6,5 litara vode, te se nakon toga pomoću jednostavnim putem može izračunati protok uz poznati volumen i vrijeme, s time da je $1 \text{ litra} = 0,001 \text{ m}^3$. Jednadžba glasi:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{6,5 \text{ l}}{10 \text{ s}} = 0,65 \text{ l/s} \quad (6.1)$$

gdje su:

V – volumen vode (m^3)

t – vrijeme promatranja promjene volumena (s).

Uz poznate dimenzije hidrauličkog žlijeba, te uz izmjerenu razinu vode, koja se dobiva kroz razne simulacije u radnoj sekciji, moguće je odrediti dimenzije poprečnog presjeka vodotoka u željenom profilu. Poprečni presjek kanala, tj. površina pri određenoj razini vode u kanalu se računa po dobro poznatoj formuli:

$$A = b * h \quad (6.2)$$

gdje su:

A - površina poprečnog presjeka kanala (mm^2)

b - širina hidrauličkog žlijeba (mm)

h – stupac (visina) vode na promatranom poprečnom profilu (mm).

Nakon dobivene površine poprečnog presjeka moguće je dobiti brzinu toka vode tako da se protok podijeli sa poprečnim presjekom. Takav način izračuna brzine može poslužiti kao kontrola, ako se brzina toka dobiva pomoću Pitotovih cjevčica. Nakon što je objašnjeno kako funkcionira pumpa, ona se jednostavno uključuje pomoću prekidača te se voda kroz cijevi dovodi do gornjeg spremnika. Na početku gornjeg spremnika nalazi se spužvasti dio, koji služi kako voda koja se dovodi do gornjeg spremnika ne bi silovito ulazila u radnu sekciju hidrauličkog žlijeba, već da se njezin tok smiri i ravnopravno ulazi u radnu sekciju. Iznad dovodne cijevi, na vrhu, se nalazi i sigurnosni preljev koji služi da ne bi došlo do prelijevanja u početnom dijelu gornjeg spremnika. Na ulazu u radnu sekciju je tablasta zapornica, koja može biti otvorena za različite stupnjeve otvorenosti, te kao takva formira tok sa određenom brzinom koji nailazi na Creagerov preljev. Prije preljeva tok ima karakter silovitog tečenja, te dolaskom na preljev stvara se pojava vodnog skoka. Nakon preljeva strujanje toka je mirno, te dolaskom na drugu zapornicu voda odlazi u donji spremnik. Bitno je napomenuti kako druga zapornica ima mogućnost podizanja do nekog određenog stupnja otvorenosti kao i prva, ali također može poslužiti i kao preljev pravokutnog oblika. Bitno je napomenuti kako je cijela radna sekcija pravokutna i prozirna, sa određenim milimetarskim skalama kako bi se lakše mogla vršiti mjerenja i vidjeti što se događa kroz eksperimentalna istraživanja. U radnoj sekciji nalaze se tri, već spomenute Pitotove cjevčice pomoću kojih se može izračunati brzina toka vode na određenim pozicijama. Također, moguće ih je postaviti na različite visine, te na taj način dobiti poprečni profil brzina po vertikali. Pitotove cjevčice direktno su povezane sa piezometarskom harfom na početku žlijeba. Brzina se određuje na temelju stupca kapljevine h u piezometru, te se preko Torricellijeve formule lako određuje:

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (6.3)$$

pri čemu je:

h – stupac kapljevine u piezometru, [m].

Ostale fizikalne veličine koje su mjerene kroz eksperiment su: duljina vodnog skoka, prva i druga spregnuta dubina, brzina toka, te se na temelju određenih brzina toka i stupca kapljevine mogu odrediti Froudeovi brojevi Fr .

Eksperimentalno ispitivanje je provedeno u tri varijante. U prvoj varijanti određivale su se fizikalne veličine na vodnom skoku pri različitom stupnju otvorenosti gornje zapornice, ali uz konstantnu visinu preljeva na kraju hidrauličkog žlijeba. Prva varijanta je provedena u 8 faza

u kojima se mijenjala visina otvora gornje zapornice. Početna visina otvora gornje zapornice bila je 5 mm, te se ona postepeno podizala na 7, 9, 11, 15, 20, 25 i 30 mm. Preljev je bio na konstantnoj visini od 15 mm. Svi rezultati prve varijante biti će prikazani u Tablici 1. Također, dani su grafički prikazi ovisnosti određenih fizikalnih veličina koji će biti objašnjeni u nastavku rada. U drugoj varijanti određivale su se fizikalne veličine na vodnom skoku uz konstantan otvor gornje zapornice od 20 mm, međutim mijenjala se visina preljeva na kraju hidrauličkog žlijeba. Druga varijanta provedena je u 6 faza. Početna visina preljeva na kraju bila je 15 mm, a kasnije se podizala na 20, 25, 30, 35, 40 mm. Dobiveni rezultati prikazani su u Tablici 2., te su dani grafički prikazi ovisnosti određenih fizikalnih veličina. Zadnja, treća varijanta provedena je uz konstantan otvor gornje zapornice od 20 mm, te uz promjenjiv otvor donje zapornice na kraju radne sekcije. Prvotna razina otvora bila je 9 mm, a nakon toga podizala se na 10, 11, 12, 13, 14, 16 mm. Rezultati mjerenja 3. varijante prikazani su u Tablici 3., te su također dani grafički prikazi ovisnosti određenih fizikalnih veličina. U nastavku rada prikazane su tablice i grafovi dobiveni eksperimentalnim ispitivanjem na hidrauličkom žlijebu.

Međutim, bitno je napomenuti nekoliko stvari koje su utjecale na dobivene rezultate i grafove tokom eksperimentalnog ispitivanja. Kod mjerenja visina (stupca kapljevine) preko Pitotovih cjevčica, zbog relativno malih visinskih razlika dogodila su se manja odstupanja u samim izmjerenim podacima, te samim time to utječe na fizikalne veličine poput brzine toka, te na Froudeov broj koji je usko povezan. Svakako, postoji i mogućnost odstupanja zbog težih individualnih vizualnih očitavanja i titranja razine vode kod vodnog skoka, te samim time to može utjecati primjerice na očitavanja spregnutih dubina, te mjerenja razine gornje i donje vode. U dosta slučajeva, prvenstveno kod 2. i 3. varijante bilo je pojave potopljenog vodnog skoka, što je rezultiralo značajnijim oscilacijama vrijednosti Froudeovog broja.

Luka Delšeno, Eksperimentalno određivanje karakteristika vodnog skoka iza preljeva praktičnog profila krivolinijskog obrisa, Završni rad, 2022.

Tablica 1: Izmjerene fizikalne veličine za 1. varijantu mjerenja

Redni broj	Otvor gornje zapornice, H_{otvor} [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 [mm]	Razina vode iza preljeva (ispred PT2) [mm]	Pitotova cjevčica 2 (PT2) [mm]
1.1	5,00	99,00	104,00	1,43	22,00	10,00	96,00
1.2	7,00	98,00	102,80	1,42	25,00	9,80	97,00
1.3	9,00	97,50	91,00	1,34	23,00	9,50	96,00
1.4	11,00	96,00	73,40	1,20	24,00	9,00	97,00
1.5	15,00	92,00	63,00	1,11	23,00	8,50	96,00
1.6	20,00	91,00	56,20	1,05	24,00	8,20	97,00
1.7	25,00	90,00	51,00	1,00	22,00	8,00	96,00
1.8	30,00	89,50	36,00	0,84	22,00	7,70	97,00

Redni broj	Brzina toka vode u PT2 (m/s)	Duljina vodnog skoka [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	1,37	295,00	12,00	31,00	38,20	0,87	32,00	15,00
1.2	1,38	300,00	15,00	32,00	40,00	0,89	34,00	15,00
1.3	1,37	302,00	10,00	30,00	41,00	0,90	36,00	15,00
1.4	1,38	310,00	9,50	29,00	40,00	0,89	38,00	15,00
1.5	1,37	325,00	9,00	27,50	41,00	0,90	38,50	15,00
1.6	1,38	328,00	8,70	27,00	41,70	0,905	38,70	15,00
1.7	1,37	330,00	8,50	27,00	42,00	0,91	39,00	15,00
1.8	1,38	340,00	8,30	26,80	43,00	0,92	40,00	15,00

Luka Delšeno, Eksperimentalno određivanje karakteristika vodnog skoka iza preljeva praktičnog profila krivolinijskog obrisa, Završni rad, 2022.

Tablica 2: Izmjerene fizikalne veličine za 2. varijantu mjerenja

Redni broj	Otvor gornje zapornice, H_{otvor} [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 [mm]	Razina vode iza preljeva (ispred PT2) [mm]	Pitotova cjevčica 2 (PT2) [mm]
2.1	20,00	98,00	47,00	0,96	23,00	7,00	97,96
2.2	20,00	97,50	47,00	0,96	23,00	7,50	97,00
2.3	20,00	97,00	47,00	0,96	22,00	25,00	96,50
2.4	20,00	96,40	46,00	0,95	23,00	32,00	96,36
2.5	20,00	96,00	45,00	0,94	22,00	50,00	96,00
2.6	20,00	95,50	44,80	0,93	24,00	57,00	95,44

Redni broj	Brzina toka vode u PT2 (m/s)	Duljina vodnog skoka [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	1,386	292,00	10,00	29,00	41,00	0,897	36,00	15,00
2.2	1,380	75,00	7,00	40,00	43,00	0,919	48,00	20,00
2.3	1,376	potopljeni vodni skok	25,00	47,00	45,00	0,940	50,00	25,00
2.4	1,375	potopljeni vodni skok	32,00	54,00	51,00	1,000	57,00	30,00
2.5	1,372	potopljeni vodni skok	/	/	64,00	1,121	65,00	35,00
2.6	1,368	potopljeni vodni skok	/	/	64,00	1,121	70,00	40,00

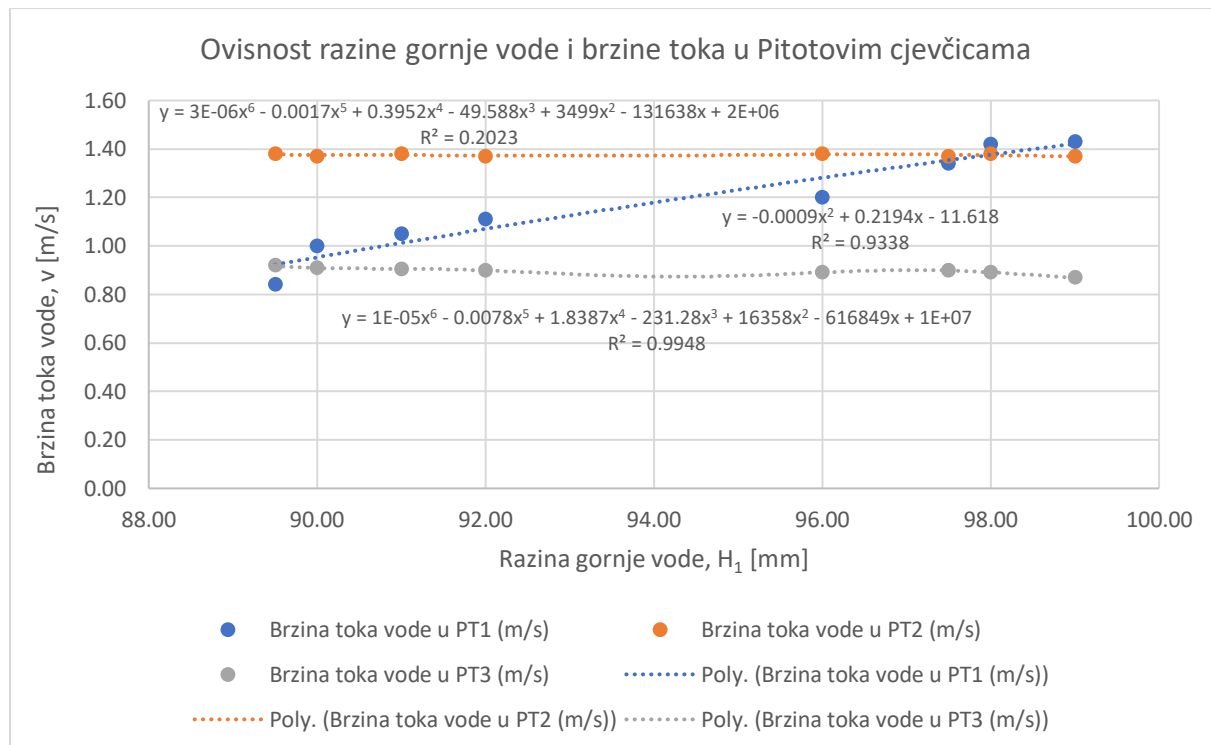
Luka Delšeno, Eksperimentalno određivanje karakteristika vodnog skoka iza preljeva praktičnog profila krivolinijskog obrisa, Završni rad, 2022.

Tablica 3: Izmjerene fizikalne veličine za 3. varijantu mjerenja

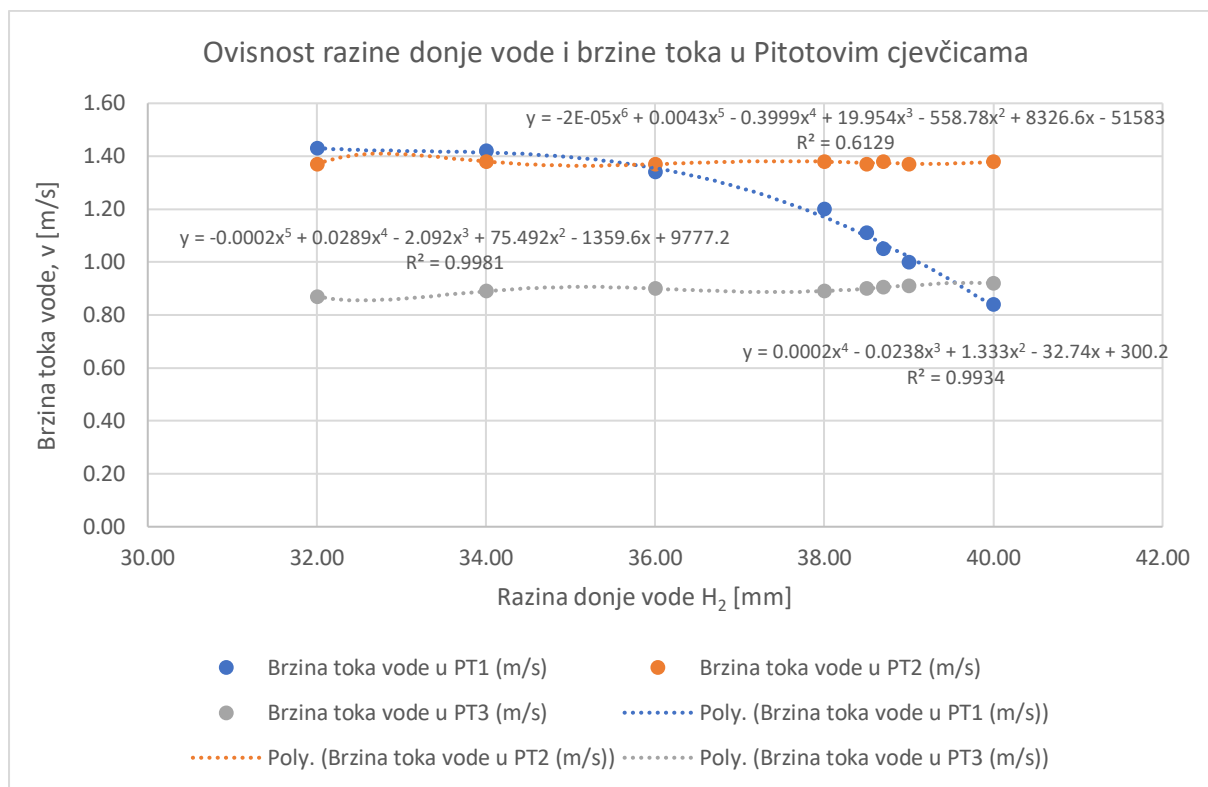
Redni broj	Otvor gornje zapornice, H_{otvor} [mm]	Razina gornje vode H_1 [mm]	Pitotova cjevčica 1 (PT1) [mm]	Brzina toka vode u PT1 (m/s)	Visina mlaza vode na kruni preljeva [mm]	Razina vode iza preljeva (ispred PT2) [mm]	Pitotova cjevčica 2 (PT2) [mm]
3.1	20,00	103,00	56,00	1,048	32,00	95,00	88,00
3.2	20,00	101,00	54,50	1,034	27,00	90,00	88,50
3.3	20,00	100,00	54,00	1,029	23,00	65,00	91,00
3.4	20,00	99,50	53,50	1,025	23,00	55,00	92,50
3.5	20,00	99,00	52,00	1,010	24,00	45,00	94,10
3.6	20,00	98,00	51,50	1,005	24,00	22,00	95,40
3.7	20,00	97,00	51,00	1,000	24,00	6,00	97,50

Redni broj	Brzina toka vode u PT2 (m/s)	Duljina vodnog skoka [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	1,314	potopljeni vodni skok	/	/	65,00	1,129	101,00	9,00
3.2	1,318	potopljeni vodni skok	/	/	63,00	1,112	95,00	10,00
3.3	1,336	potopljeni vodni skok	/	/	55,00	1,039	76,00	11,00
3.4	1,347	potopljeni vodni skok	/	/	52,00	1,010	69,00	12,00
3.5	1,359	potopljeni vodni skok	/	/	48,00	0,970	62,00	13,00
3.6	1,368	150,00	/	/	45,00	0,940	55,00	14,00
3.7	1,383	280,00	8,00	42,00	39,00	0,875	44,00	16,00

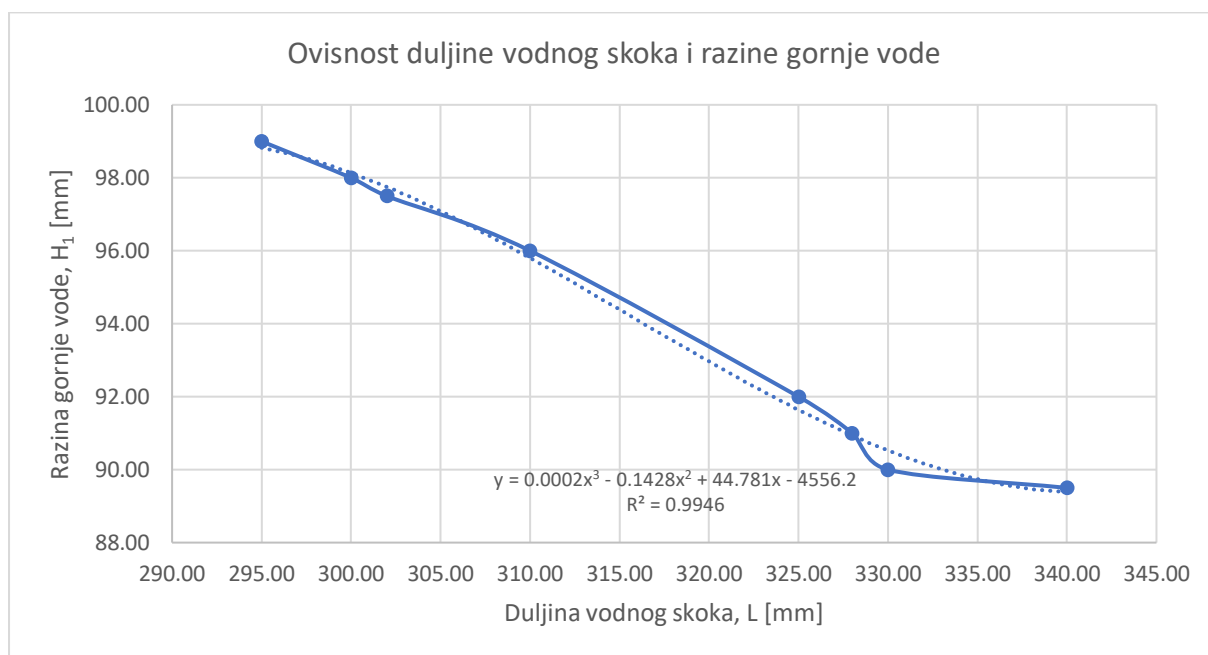
Nakon prikaza izmjerenih i izračunatih podataka, u nastavku su dani grafički prikazi ovisnosti određenih fizikalnih veličina za 1. varijantu. Na slici 43. može se vidjeti grafički prikaz ovisnosti razine gornje vode i brzine u Pitotovim cjevčicama. Vidi se kako u Pitotovim cjevčicama 2 i 3 brzina toka varira s povećanjem razine gornje vode, a u Pitotovoj cjevčici 1 kako brzina toka postepeno raste s povećanje razine gornje vode. Na slici 44. grafički je prikazana ovisnost razine donje vode o promjeni brzine toka na Pitotovim cjevčicama. Može se vidjeti kako povećanjem razine donje vode brzina toka u 1. Pitotovoj cjevčici lagano opada, a na 2. i 3. Pitotovoj cjevčici varira. Brzina u 2. i 3. Pitotovoj cjevčici varira zbog težeg očitavanja visinskih razlika prilikom eksperimentalnog ispitivanja. Na slici 45. grafički je prikazana ovisnost promjene duljine vodnog skoka o promjeni razine gornje vode. Na grafu se može vidjeti kako povećanjem razine gornje vode raste i duljina vodnog skoka (naravno te pojave su uzrokovane povećanjem otvora gornje zapornice). Na slici 46. grafički je prikazana ovisnost duljine vodnog skoka o razini donje vode, te se može vidjeti kako duljina vodnog skoka lagano raste s povećanjem razine donje vode. Vidi se kako u rasponu povećanja dubine donje vode od 8 mm, duljina vodnog skoka poraste za 45 mm.



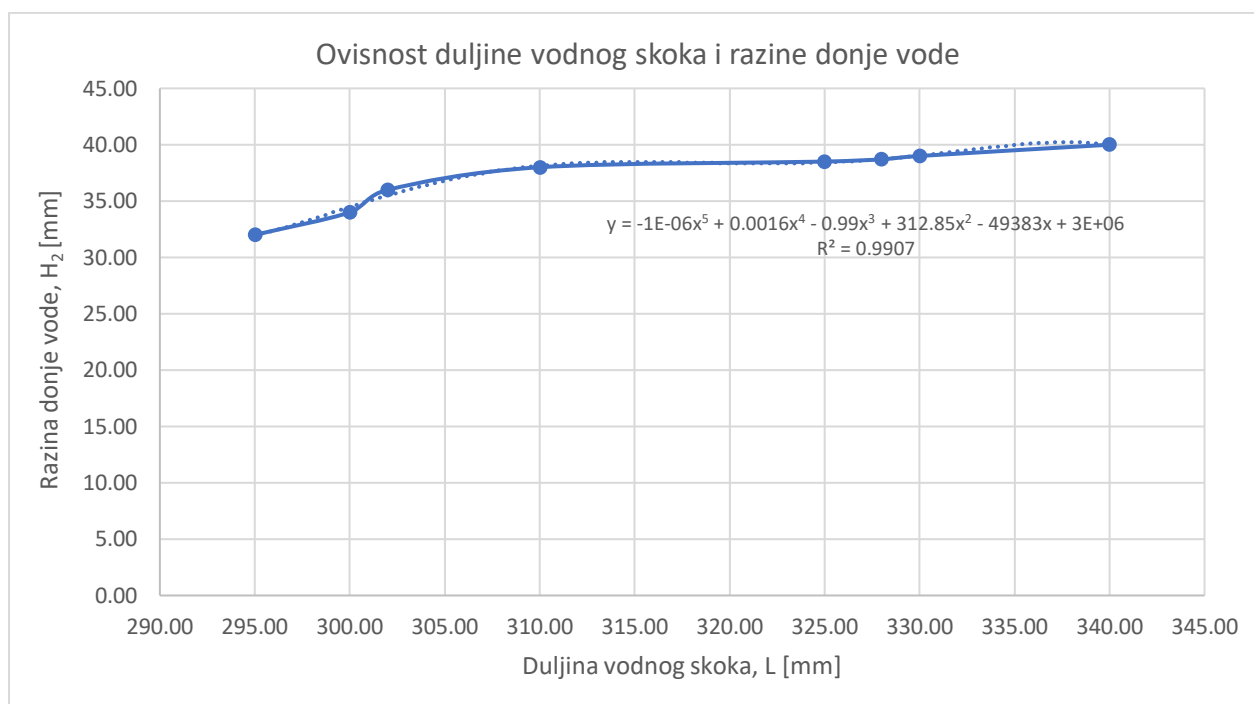
Slika 43. Grafički prikaz ovisnosti razine gornje vode o brzini toka vode u Pitotovim cjevčicama



Slika 44. Grafički prikaz ovisnosti razine donje vode o brzini toka vode u Pitotovim cjevčicama



Slika 45. Grafički prikaz ovisnosti duljine vodnog skoka o promjeni razine gornje vode



Slika 46. Grafički prikaz ovisnosti duljine vodnog skoka o promjeni razine donje vode

U tablicama 4., 5. i 6. su prikazane vrijednosti Froudeovih brojeva na mjestima Pitotovih cjevčica: Fr_1 na mjestu Pitotove cjevčice 1, te Fr_2 i Fr_3 na mjestima Pitotovih cjevčica 2 i 3, za 1., 2. i 3. varijantu.

Tablica 4: Izračun Froudeovih brojeva za 1. varijantu ispitivanja

Fr_1 [/]	Fr_2 [/]	Fr_3 [/]
2,0043	1,9929	2,0220
1,9995	2,0013	2,0186
2,0114	1,9929	2,0139
1,9999	2,0013	2,0186
1,9936	1,9929	2,0139
1,9997	2,0013	2,0021
1,9988	1,9929	2,0099
1,9980	2,0013	2,0065

Tablica 5: Izračun Froudeovih brojeva za 2. varijantu ispitivanja

Fr_1 [/]	Fr_2 [/]	Fr_3 [/]
1,9988	2,0018	2,0005
1,9988	2,0013	2,0021
1,9988	2,0001	2,0016
1,9999	2,0000	1,9988
1,9970	1,9988	2,0015
1,9840	1,9900	2,0015

Tablica 6: Izračun Froudeovih brojeva za 3. varijantu ispitivanja

Fr_1 [/]	Fr_2 [/]	Fr_3 [/]
1,9992	2,0000	1,9990
1,9997	2,0009	2,0008
1,9988	1,9994	2,0008
2,0018	1,9995	1,9997
1,9997	2,0007	1,9982
1,9992	1,9997	2,0016
1,9988	1,9997	2,0012

Froudeov broj Fr dobiven je preko izraza:

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot h} \quad (6.4)$$

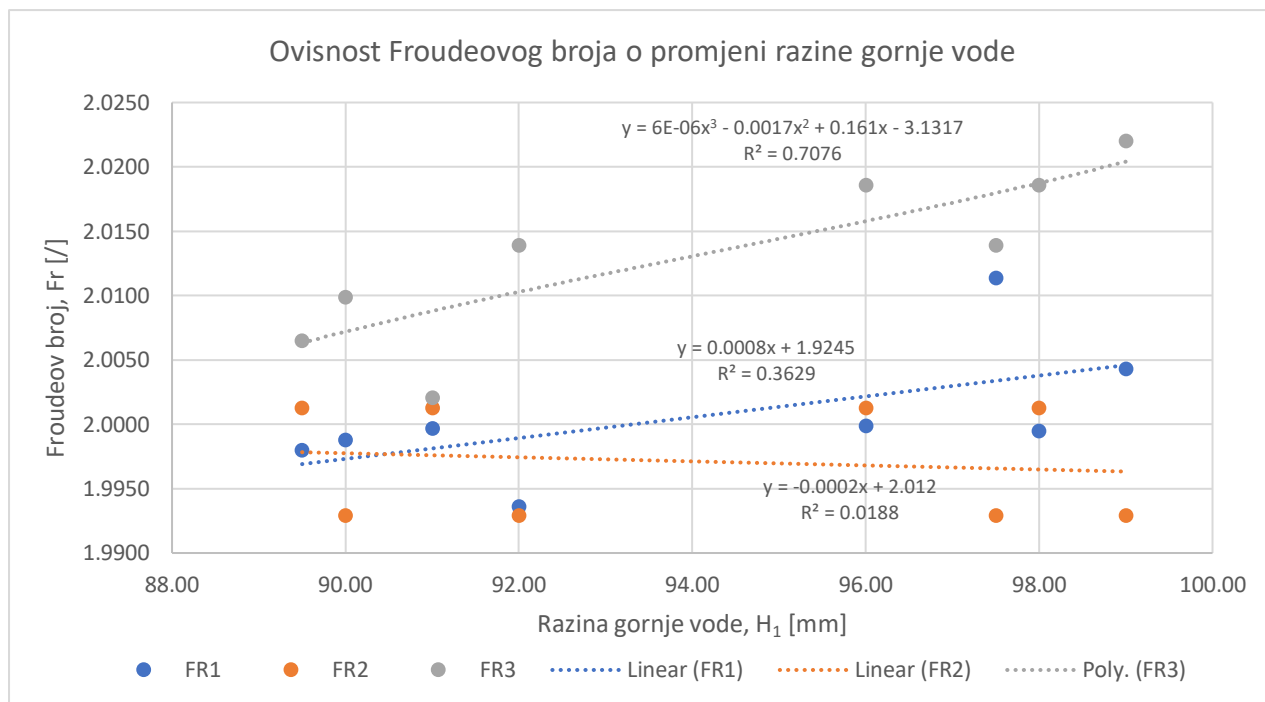
pri čemu su:

Fr - Froudeov broj, [/]

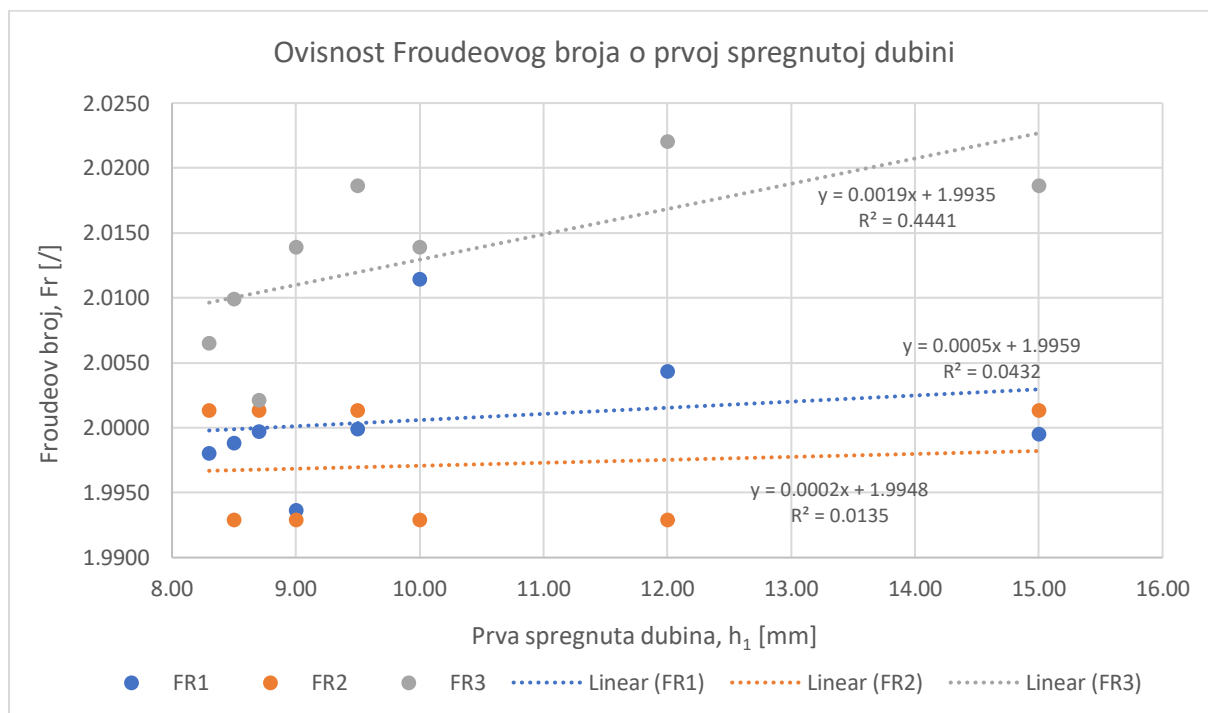
h - visina na Pitotovim cjevčicama (mm).

Na slici 47. grafički je prikazana ovisnost Froudeovog broja o promjeni razine gornje vode, te se iz navedenog grafa može vidjeti da povećanjem razine gornje vode Froudeov broj na mjestima Pitotovih cjevčica 1 i 3 raste, a na mjestu druge Pitotove cjevčice neznatno opada. Na slici 48. grafički je prikazana ovisnost Froudeovog broja o promjeni prve spregnute dubine, te se može zaključiti putem trendline krivulja kako povećanjem prve spregnute dubine

svi Froudeovi brojevi rastu. Dakako, kada smo kod mjerenja treba jako dobro paziti oko očitavanja pojedinih fizikalnih veličina u visinskom smislu, jer može doći do znatnijih odstupanja u konačnom izračunu (što se i jasno vidi kod koeficijenta korelacije za pojedine Froudeove brojeve kod pojedinih varijanti).

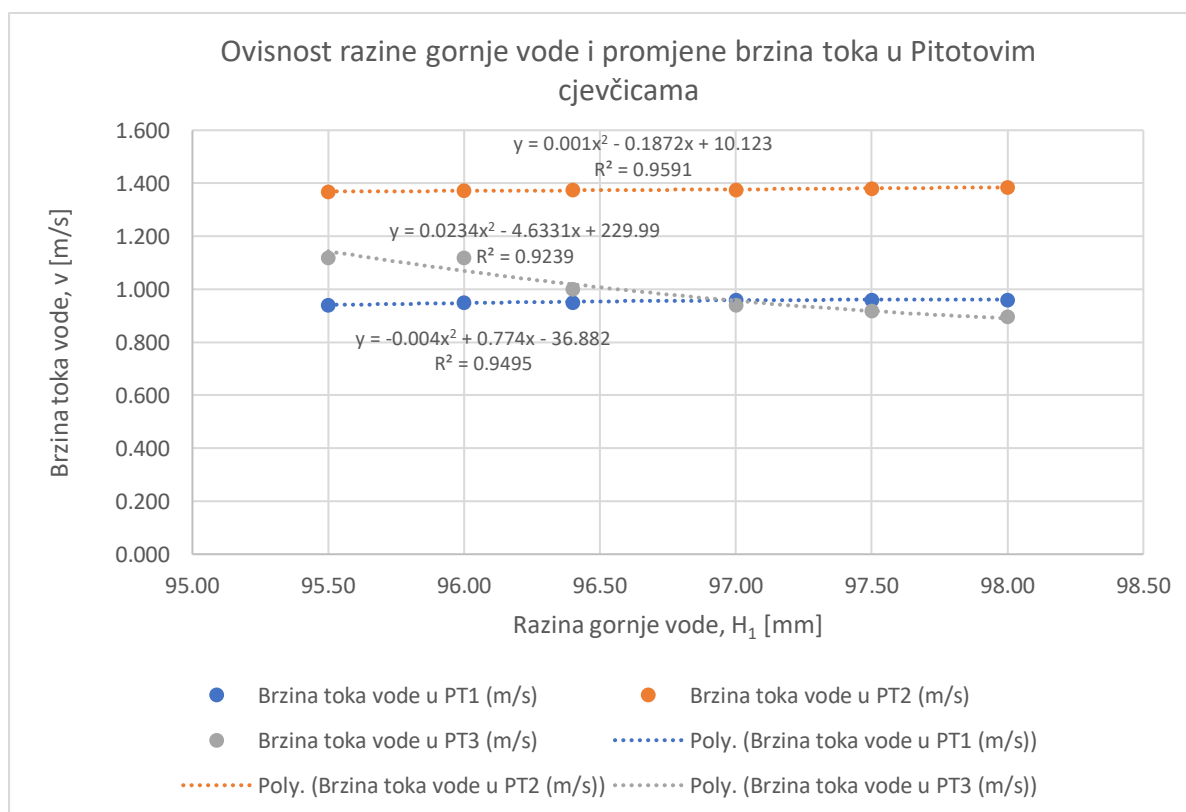


Slika 47. Grafički prikaz ovisnosti Froudeovog broja o promjeni razine gornje vode

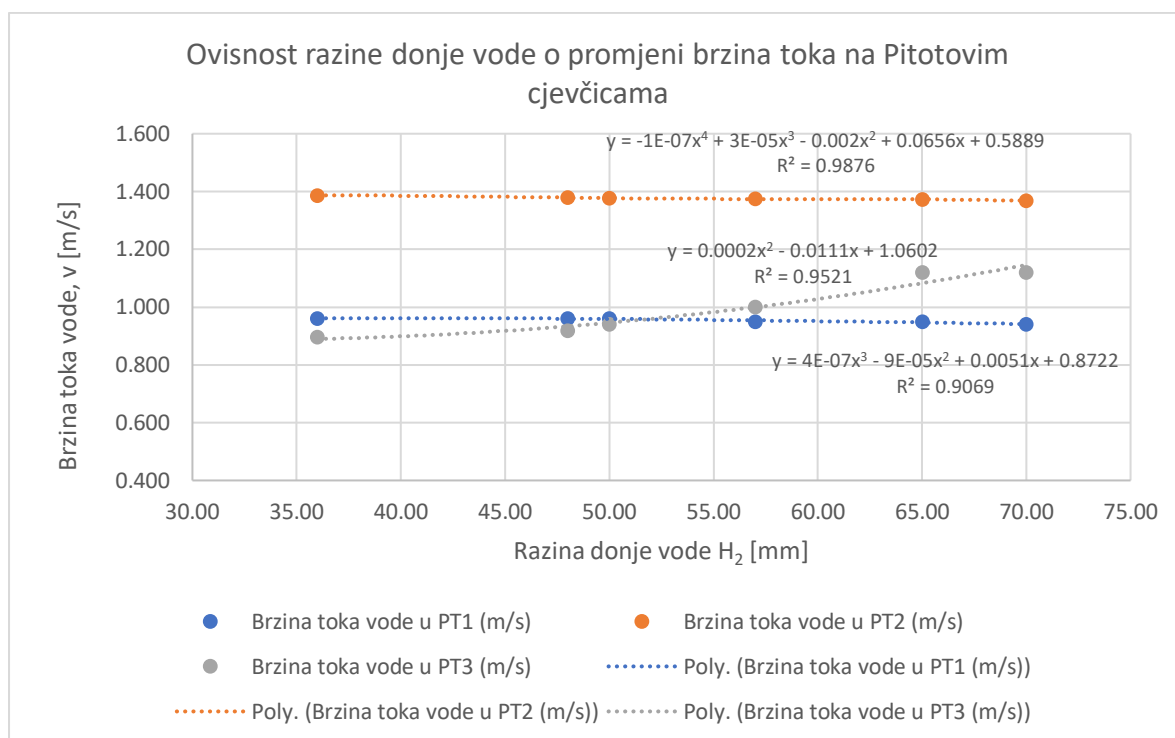


Slika 48. Grafički prikaz ovisnosti Froudeovog broja o promjeni razine prve spregnute dubine

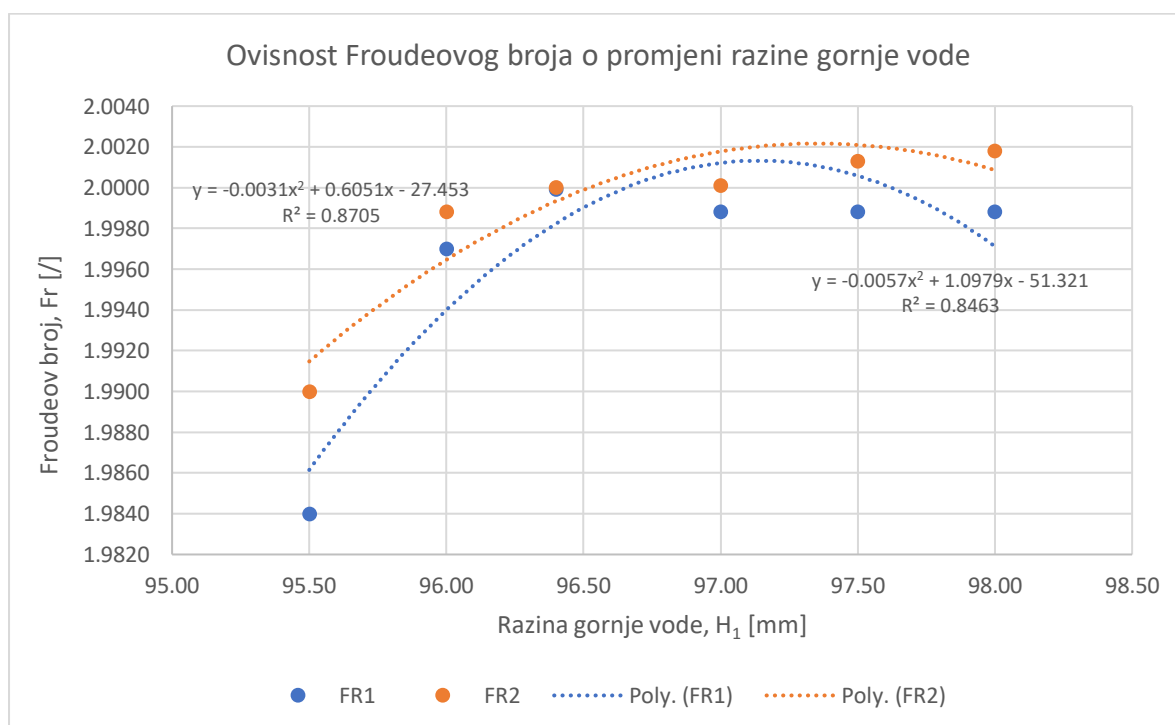
Nadalje, slijede grafički i tablični prikazi za određene fizikalne veličine dobivene u drugoj varijanti eksperimentalnog ispitivanja. Na slici 49. grafički je prikazana ovisnost razine gornje vode o promjeni brzina na mjestima Pitotovih cjevčica. Iz grafičkog prikaza se može vidjeti kako brzina na mjestima 1. i 2. Pitotove cjevčice neznatno varira, te je približno konstantna, a na mjestu treće Pitotove cjevčice opada uz povećanje razine gornje vode. Na slici 50. grafički je prikazana ovisnosti brzine toka vode na mjestima Pitotovih cjevčica i promjena razine donje vode, te se može vidjeti kako uz povećanje dubine donje vode, brzina toka vode na mjestu 3. Pitotove cjevčice raste, a na 1. i 2. Pitotovoj cjevčici ne varira, tj. približno je konstantna. Na slici 51. grafički je prikazan odnos Froudeovog broja i promjene razine gornje vode, te se može vidjeti da povećanjem razine gornje vode rastu i Froudeovi brojevi, dok su na slici 52. točkastim vrijednostima prikazani Froudeovi brojevi u ovisnosti promjene razine donje vode. Slučaj variranja brzine i Froudeovog broja rezultat je otežanih očitavanja razina vode zbog pojave potopljenog vodnog skoka u 5 od 7 slučajeva u drugoj varijanti.



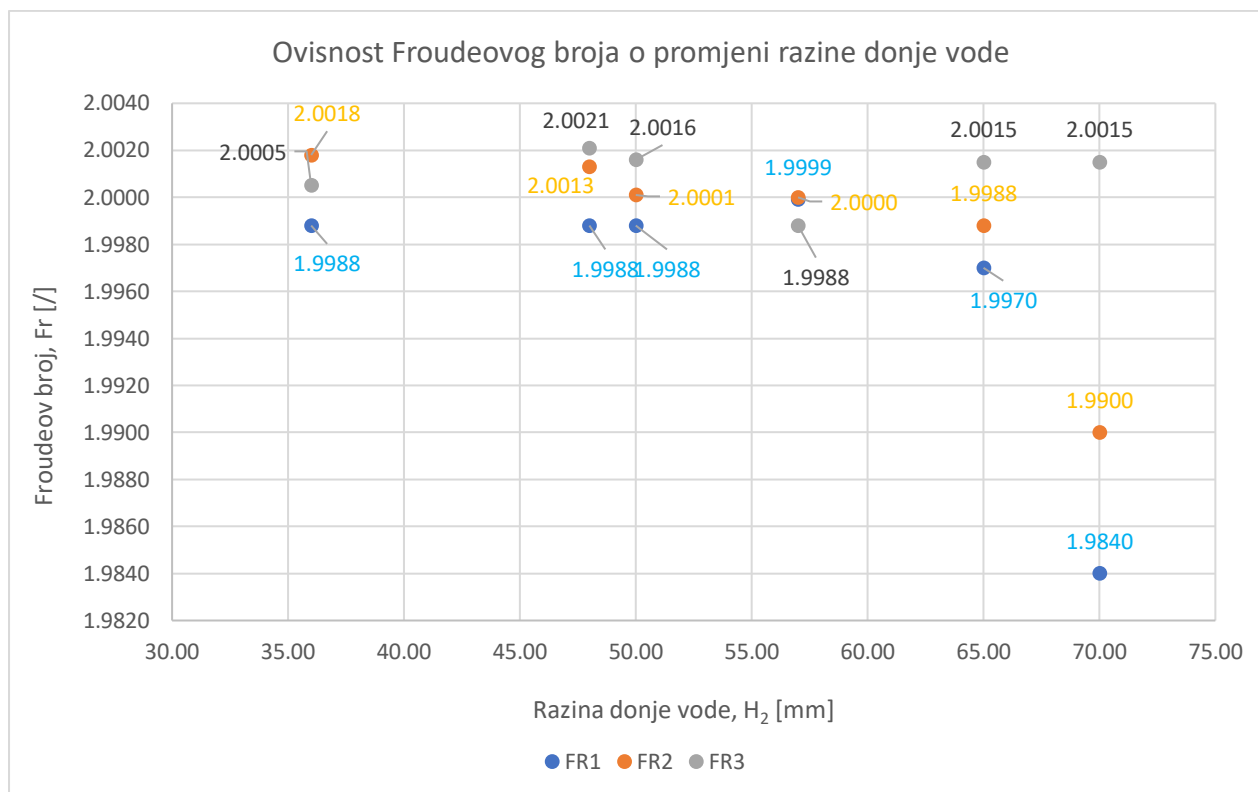
Slika 49. Grafički prikaz ovisnosti razine gornje vode o brzini toka vode u Pitotovim cjevčicama



Slika 50. Grafički prikaz ovisnosti razine donje vode o brzini toka vode u Pitotovim cjevčicama

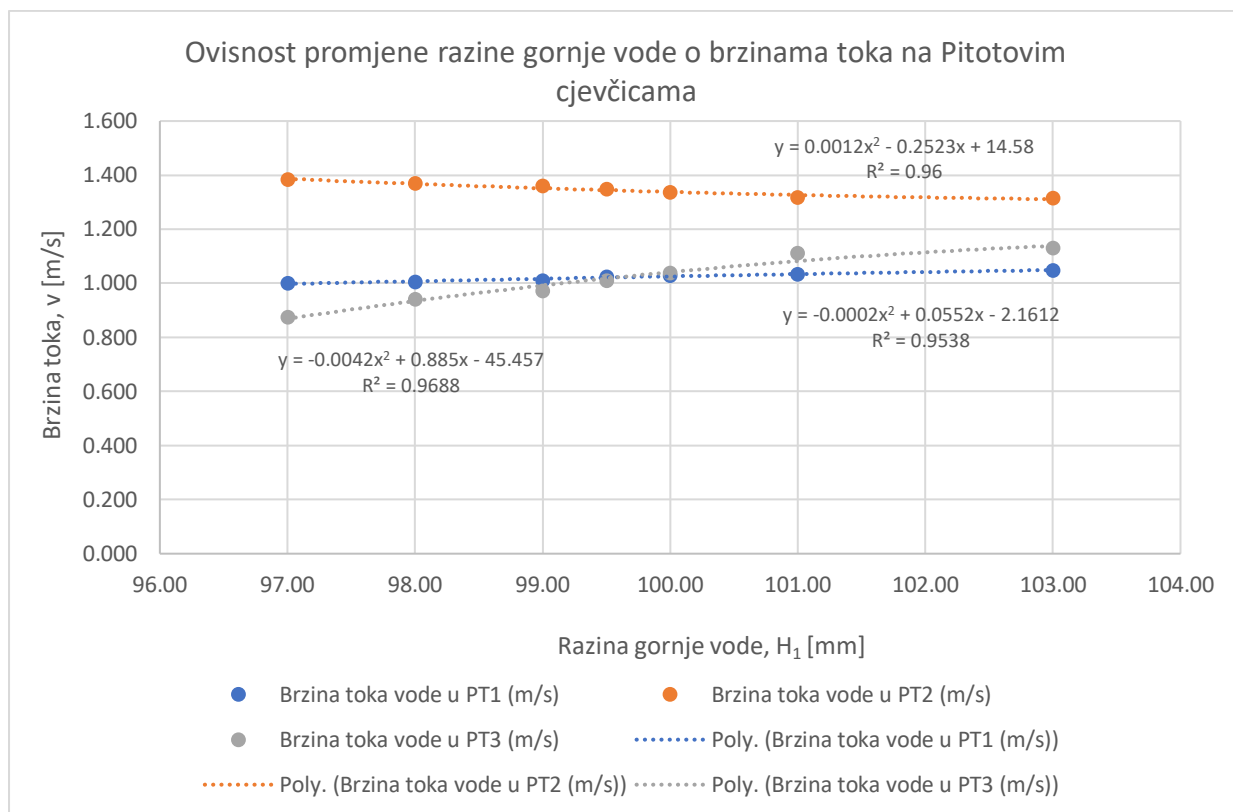


Slika 51. Grafički prikaz ovisnosti Froudeovog broja o promjeni razine gornje vode

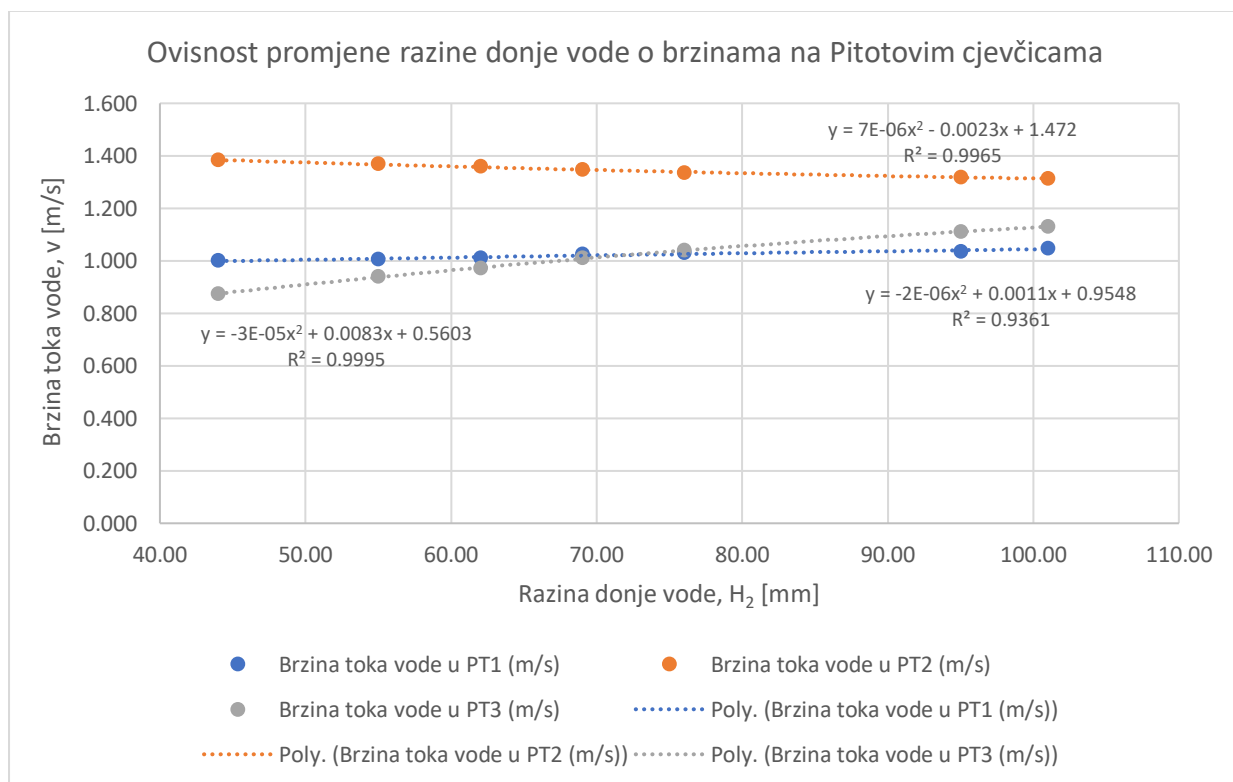


Slika 52. Grafički prikaz ovisnosti Froudeovog broja o promjeni razine donje vode

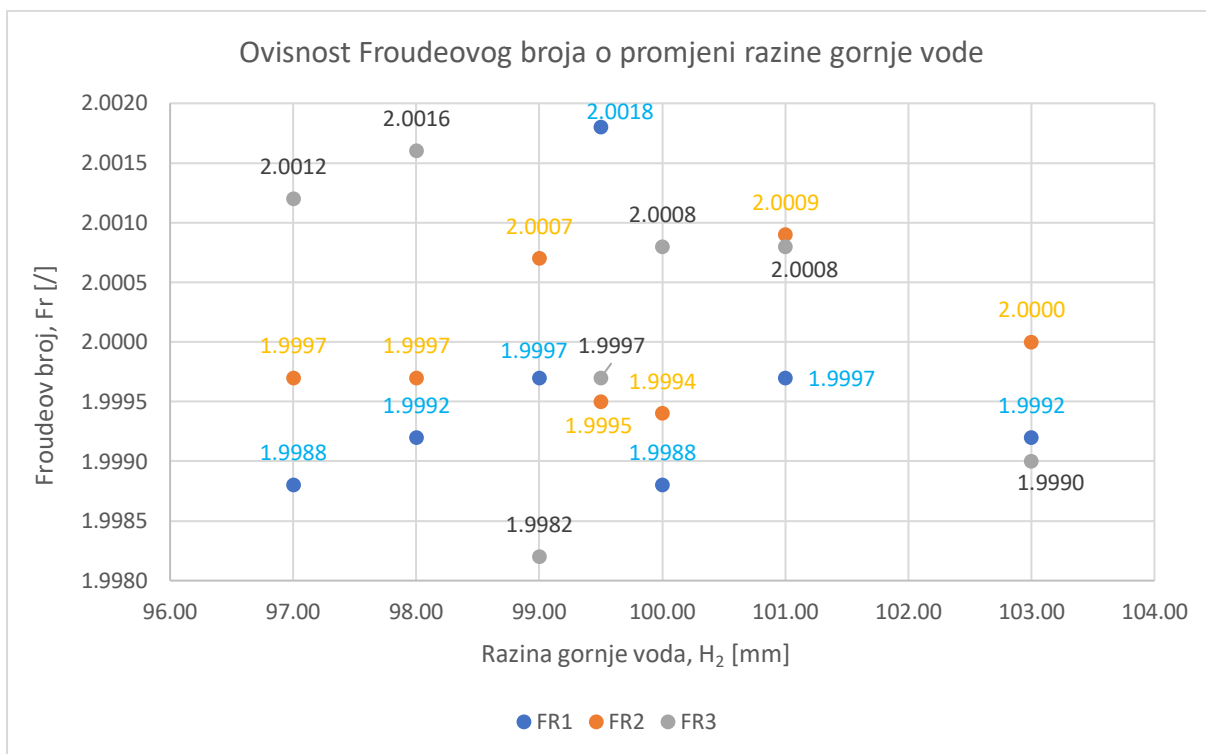
U nastavku su dani grafički prikazi za 3. varijantu eksperimentalnog ispitivanja. Na slici 53. dan je grafički prikaz ovisnosti brzine toka vode na mjestima Pitotovih cjevčica o promjeni razine gornje vode, te se može vidjeti da povećanjem razine gornje vode brzina toka vode na mjestima 1. i 3. Pitotove cjevčice raste, a na mjestu 2. Pitotove cjevčice neznatno opada. Na slici 54. može se vidjeti grafički prikaz ovisnosti brzine o promjeni razine donje vode, te se može vidjeti kako povećanjem dubine donje vode brzina toka vode na mjestima 1. i 3. Pitotove cjevčice raste, a na mjestu 2. Pitotove cjevčice pada. Na slici 55. grafički je prikazan odnos Froudeovog broja o promjeni razine gornje vode pomoću točkastih vrijednosti, a na slici 56. grafički prikazan Froudeovog broja na mjestu druge Pitotove cjevčice u odnosu na razinu donje vode. Grafički prikazi su dani točkasto, jer trendline linije ne bi dale relevantan prikaz Froudeovog broja za sve slučajeve 3. varijante zbog potopljenog vodnog skoka u većini slučajeva. U ovoj varijanti je bilo teže očitati visinske vrijednosti tokom eksperimentalnog ispitivanja (npr. donje vode) i zato postoje znatnija odstupanja u rezultatima.



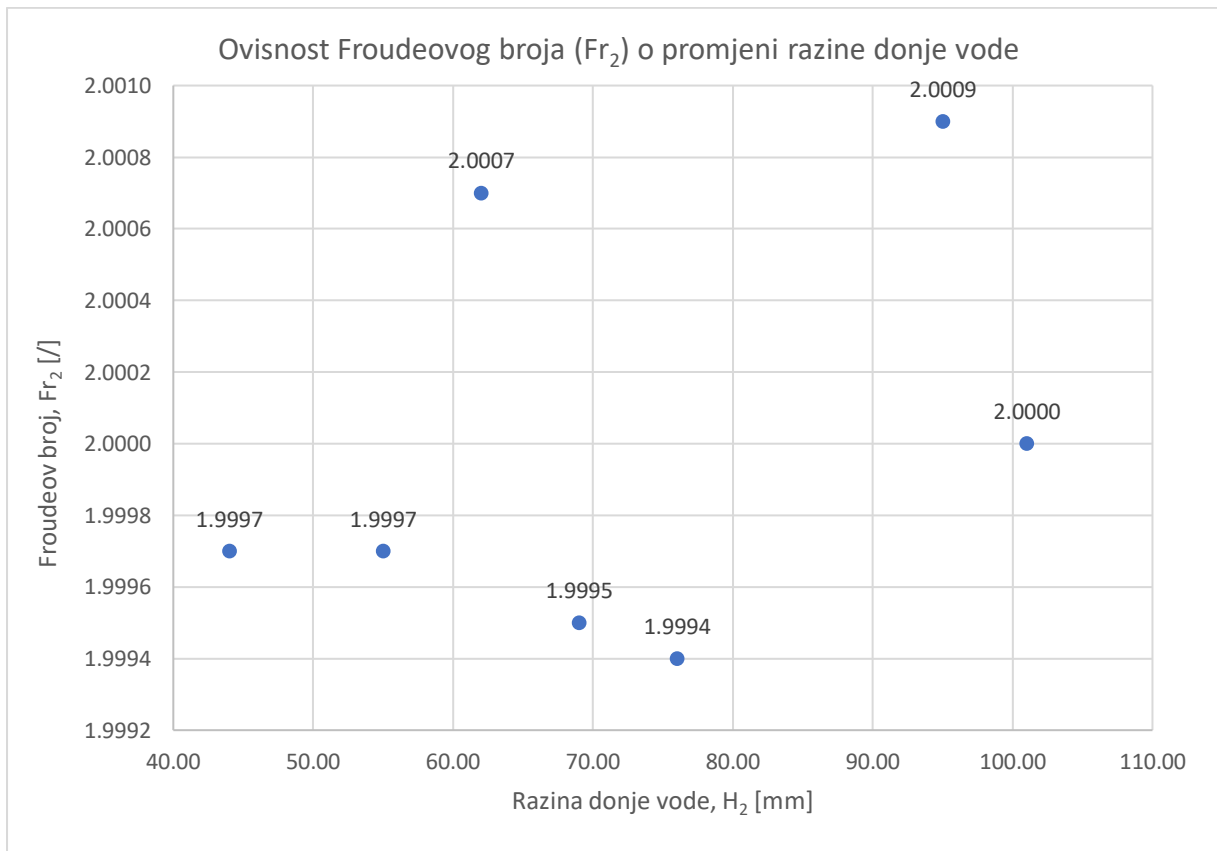
Slika 53. Grafički prikaz ovisnosti razine gornje vode o promjeni brzina toka na Pitotovim cjevčicama



Slika 54. Grafički prikaz ovisnosti promjene razine donje vode o brzinama na Pitotovim cjevčicama



Slika 55. Grafički prikaz ovisnosti Froudeovog broja o promjeni razine gornje vode



Slika 56. Grafički prikaz ovisnosti Froudeovog broja o promjeni razine donje vode

7. Zaključak

U ovom radu provedeno je eksperimentalno određivanje karakteristika vodnog skoka iza preljeva praktičnog profila krivolinijskog obrisa. Eksperimentalno ispitivanje provedeno je na malom hidrauličkom žlijebu u sklopu hidrotehničkog praktikuma Građevinskog fakulteta u Rijeci. U prvom dijelu rada koji obuhvaća prva četiri poglavlja objašnjen je pojam vodnog skoka, te sama njegova pojava i na kojim mjestima može nastati. Također u istom dijelu dan je fokus na disipaciji energije koja nastaje prilikom vodnog skoka, te način zaštite hidrotehničkih objekata i mjesta gdje vodni skok nastaje. U prvom dijelu još su objašnjena neka prijašnja eksperimentalna ispitivanja, te ono što su znanstvenici zaključili na temelju njih. Ti zaključci mogu općenito pomoći pri daljnjem shvaćanju vodnog skoka. Ono na čemu je bio fokus, je drugi dio završnog rada. U tom dijelu opisan je fizikalni model malog hidrauličkog žlijeba u hidrotehničkom praktikumu, njegove osnovne dimenzije i različite podvrste. Tijekom eksperimentalnog ispitivanja očitavale su se razne veličine koje nastaju prije, na i nakon vodnog skoka, poput gornje i donje razine vode, spregnutih dubina, duljine vodnog skoka itd. Nakon osnovnih fizikalnih veličina koje je bilo moguće očitati, brzinu i Froudeov broj bilo je potrebno izračunati, te se tako brzina mjerila pomoću Pitotovih cjevčica, a posljedično tome računao se i Froudeov broj na istim tim mjestima. Eksperiment se provodio u tri različite varijante i nakon svake od tih varijanti rezultati su bili različiti, međutim iste promatrane stvari su se mogle zaključiti kroz tri varijante ispitivanja. Nakon provedbe eksperimenta, rezultati su prikazani tablično i grafički. Grafičkim se prikazima dala ovisnost određenih fizikalnih veličina, te se time došlo do određenih zaključaka. Primjerice smanjenjem razine gornje vode povećava se duljina vodnog skoka. Također, povećanjem duljine vodnog skoka povećava se i razina donje vode. Što se tiče Froudeovog broja došlo se do zaključka da porastom gornje razine vode raste i vrijednost Froudeovog broja.

Kroz buduće radove mogla bi se provesti analiza za neke granične slučajeve tipa kako dolazi do potopljenog vodnog skoka, koliki je raspon mogućnosti otvora zapornice ili preljeva gdje nastaje potopljeni vodni skok i slično. Moglo bi se provesti eksperimentalno istraživanje na temelju neravnog dna kanala i nekih nepravokutnih oblika radne sekcije (složeniji profili). Također, moglo bi se provesti istraživanje u slučaju različitog pada dna kanala na određenim dionicama, ili kombinacije ravnog i kosog dna kanala.

8. Literatura

1. Shaughnessy, E.J., Katz. I. M., Schaffer, J.P.: Introduction to Fluid Mechanics, Oxford University, 2005.
2. Jović, V., Osnove hidromehanike, Element, Zagreb, 2006.
3. Agroskin, I. I., Hidraulika, Tehnička knjiga Zagreb, Zagreb, 1969.
4. Ead, S. A., Rajaratnam N.: Hydraulic jumps on corrugated beds, Journal of Hydraulic Engineering, 128 (2002) 7, pp. 656-663.
5. Deshmukh A. A., Sudharsan N., Vasudeo D A., Ghare A. D., (2017.): Utjecaj hrapavosti na spregnutu dubinu kod vodnih skokova na neravnoj podlozi, Građevinar, 2/2019.
6. Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., Narayanan, R.: Hydraulic Structures, Spon Press, London, 2001 & 2006.
7. Manoochehr, F., Sadegh, H., Babak, L., Peyman, A.: Reduction of Stilling Basin Length with Tall End Sill, Journal of Hydrodynamics, 4 (2011), pp. 498-502.
8. Verma, D.: Stilling Basins for Pipe Outlets Using Wedge-shaped Splitter Block, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 3 (2000), pp. 179-184, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:3\(179\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:3(179)).
9. Komora, Y.: Spillway Design Using Jet Collision for Energy Dissipation. Power Technology and Engineering (formerly Hydrotechnical Construction), 4 (1969), pp. 363-364, <https://doi.org/10.1007/BF02378164>.
10. Vollmer, E., Khader, M. H.: Counter Current Energy Dissipator for Conduit Outlets, International Journal of Water & Power, 7 (1971), pp. 260-263.
11. Kao, T. Y.: Hydraulic Jump Assisted by Cross jet. Proc., ASCE., J. Hydraulic Division, HY, 12 (1971), pp. 2037-2050.
12. Alghwail, A. D. A., Stevović S., Abourohiam, M. A., (2017.): Rasap mehaničke energije preljevnog mlaza pomoću suprotstavljenog toka, Građevinar, 5/2018.
13. Chanson, H. (1995). Air entrainment in two-dimensional turbulent shear flows with partially developed inflow conditions. Int. J. Multiphase Flow, 21(6): pp. 1107–1121.

14. Gualtieri C., Chanson H, (2007.): Experimental analysis of Froude number effect on air entrainment in the hydraulic jump, University of Napoli “Federico II”, Department of Civil Engineering, The University of Queensland
15. Padulano, R.; Fecarotta, O.; Del Giudice, G.; Carravetta, A. Hydraulic design of a USBR Type II stilling basin. J. Irrig. Drain. Eng. 2017, 143, 04017001.
16. Macián-Pérez, J.F.; García-Bartual, R.; Huber, B.; Bayón, A.; Vallés-Morán, F.J. Analysis of the Flow in a Typified USBR II Stilling Basin through a Numerical and Physical Modeling Approach. Water 2020, 12, p. 227.
17. Peterka, A.J. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators; Department of the Interior, Bureau of Reclamation: Washington, DC, USA, 1978.
18. Hager, W.H., Energy Dissipators and Hydraulic Jump; Springer Science & Business Media: Dordrecht, The Netherlands, 1992.
19. Macián-Pérez J. F., Vallés-Morán F. J., Sánchez-Gómez S., De-Rossi-Estrada M., García-Bartual R.: Experimental Characterization of the Hydraulic Jump Profile and Velocity Distribution in a Stilling Basin Physical Model, Universitat Politècnica de València, 2020.
20. Lončar, G., Andročec, V.: Mehanika fluida (interna skripta), Građevinski fakultet Zagreb, Zagreb, 2012.
21. Bolf, N.: Mjerenje protoka mjerenjem razlike tlaka, Mjerna i regulacijska tehnika, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Kem. Ind., 69 (5-6), str. 349-351, 2020.
22. Pitotova cijev, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Pitot-cijev#/media/Datoteka:Pitot-cijev.jpg> , pristupljeno 20.08.2022.
23. Žic, E., Ožanić, N., Karleuša, B.: Skripta zadataka iz kolegija Hidromehanika, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 2010.
24. Katalog laboratorijske i terenske opreme Rijeka, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 2018.

9. Popis slika, tablica i grafova

Popis slika	Stranica
Slika 1. Slapište iza brzotoka na brani (Jović, 2006.)	1
Slika 2. Slapište unutar ispusta na brani (Jović, 2006.)	1
Slika 3. Kaskada sa jednom stepenicom (Agroskin, 1969.)	2
Slika 4. Kaskada sa više stepenica (Agroskin, 1969.)	2
Slika 5. Prikaz hrapavog korita (Deshmukh i drugi, 2017.)	4
Slika 6. Prikaz silovitog tečenja, $Fr=14,27$ (Chanson, 1995.)	5
Slika 7. USBR II bazen (Macián-Pérez i drugi, 2020.)	6
Slika 8. Duljina vodnog skoka (Jović, 2006.)	7
Slika 9. Određivanje duljine vodnog skoka u laboratoriju	8
Slika 10. Prikaz prve i druge spregnute dubine iza preljeva (Lončar i Andročec, 2010.)	9
Slika 11. Dijagram ovisnosti prve i druge spregnute dubine (Agroskin, 1969.)	9
Slika 12. Disipacija energije na vodnom skoku (Jović, 2006.)	11
Slika 13. Fluktuacije tlaka pri pojavi vodnog skoka (Jović, 2006.)	11
Slika 14. Strujanje u pravokutnim koritima: a) mirno strujanje, b) silovito strujanje (Lončar i Andročec, 2010.)	12
Slika 15. Pitotova cijev (https://hr.wikipedia.org/wiki/Pitot-cijev#/media/Datoteka:Pitot-cijev.jpg , (pristup 6.7.2022.))	14
Slika 16. a) Prikaz formiranja vodnog skoka, b) Odnos dubine, brzine toka vode i visinskog gubitka hidrauličkog skoka, te Froudeovog broja (Shaughnessy, 2005.)	14
Slika 17. Potpuni skok (Žic i drugi, 2010.)	15
Slika 18. Valovit skok (Agroskin, 1969.)	16
Slika 19. Navučen skok (Agroskin, 1969.)	17
Slika 20. Bučnica (Agroskin, 1969.)	17
Slika 21. Poduprt skok ispred zida (Agroskin, 1969.)	19
Slika 22. Potopljeni vodni skok (Agroskin, 1969.)	19
Slika 23. Površinski skok (Agroskin, 1969.)	20
Slika 24. Prikaz prelaska mlaza preko stepenice (Agroskin, 1969.)	21
Slika 25. Potpuni skok (Agroskin, 1969.)	21
Slika 26. Nestajanje skoka (Agroskin, 1969.)	21
Slika 27. Spajanje vodnih razina u obliku površinskog skoka (Agroskin, 1969.)	22
Slika 28. Spajanje vodnih razina u obliku potopljenog površinskog skoka (Agroskin, 1969.)	22

Luka Delšeno, Eksperimentalno određivanje karakteristika vodnog skoka iza preljeva praktičnog profila krivolinijskog obrisa, Završni rad, 2022.

Slika 29. Potopljenost vodnog skoka (Jović, 2006.)	23
Slika 30. Odbačeni vodni skok (Jović, 2006.)	23
Slika 31. Potopljeni vodni skok (Jović, 2006.)	23
Slika 32. Spremnik vode za recirkulaciju vode u sustavu hidrauličkog žlijeba	24
Slika 33. Mali hidraulički žlijeb na metalnom postolju	25
Slika 34. Prikaz dijelova malog hidrauličkog žlijeba	26
Slika 35. Dimenzije radne sekcije malog hidrauličkog žlijeba (u cm)	26
Slika 36. Dimenzije preljeva praktičnog profila krivolinijskog obrisa korištenog u ispitivanjima	27
Slika 37. Preljev praktičnog profila krivolinijskog obrisa (Agroskin, 1969.)	27
Slika 38. Normalni preljev (Agroskin, 1969.)	28
Slika 39. Kosi preljev (Agroskin, 1969.)	28
Slika 40. Bočni preljev (Agroskin, 1969.)	28
Slika 41. Krivolinijski preljev (Agroskin, 1969.)	28
Slika 42. Oblikovanje bezvakuumskog preljeva (Jović, 2006.)	29
Slika 43. Grafički prikaz ovisnosti razine gornje vode o brzini toka vode u Pitotovim cjevčicama	36
Slika 44. Grafički prikaz ovisnosti razine donje vode o brzini toka vode u Pitotovim cjevčicama	37
Slika 45. Grafički prikaz ovisnosti duljine vodnog skoka o promjeni razine gornje vode	37
Slika 46. Grafički prikaz ovisnosti duljine vodnog skoka o promjeni razine donje vode	38
Slika 47. Grafički prikaz ovisnosti Froudeovog broja o promjeni razine gornje vode	40
Slika 48. Grafički prikaz ovisnosti Froudeovog broja o promjeni razine prve spregnute dubine	40
Slika 49. Grafički prikaz ovisnosti razine gornje vode o brzini toka vode u Pitotovim cjevčicama	41
Slika 50. Grafički prikaz ovisnosti razine donje vode o brzini toka vode u Pitotovim cjevčicama	42
Slika 51. Grafički prikaz ovisnosti Froudeovog broja o promjeni razine gornje vode	42
Slika 52. Grafički prikaz ovisnosti Froudeovog broja o promjeni razine donje vode	43
Slika 53. Grafički prikaz ovisnosti razine gornje vode o promjeni brzina toka na Pitotovim cjevčicama	44

Slika 54. Grafički prikaz ovisnosti promjene razine donje vode o brzinama na Pitotovim cjevčicama	44
Slika 55. Grafički prikaz ovisnosti Froudeovog broja o promjeni razine gornje vode	45
Slika 56. Grafički prikaz ovisnosti Froudeovog broja o promjeni razine donje vode	45

Popis Tablica	Stranica
Tablica 1: Izmjerene fizikalne veličine za 1. varijantu mjerenja	33
Tablica 2: Izmjerene fizikalne veličine za 2. varijantu mjerenja	34
Tablica 3: Izmjerene fizikalne veličine za 3. varijantu mjerenja	35
Tablica 4: Izračun Froudeovih brojeva za 1. varijantu ispitivanja	38
Tablica 5: Izračun Froudeovih brojeva za 2. varijantu ispitivanja	39
Tablica 6: Izračun Froudeovih brojeva za 3. varijantu ispitivanja	39