

Obrada eksperimentalnog profila brzine za rubne uvjete Q2d2

Ivković, Mislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:141042>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Mislav Ivković

**OBRADA EKSPERIMENTALNOG PROFILA
BRZINE ZA RUBNE UVJETE Q2d2**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Mislav Ivković

**OBRADA EKSPERIMENTALNOG PROFILA
BRZINE ZA RUBNE UVJETE Q2d2**

ZAVRŠNI ISPIT

Mentori:

Izv.prof.dr.sc. Gordon Gilja

dr. sc. Antonija Harasti

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Mislav Ivković

**ANALYSIS OF FLOW VELOCITY PROFILE FOR
BOUNDARY CONDITIONS Q2d2**

FINAL EXAM

Supervisors:

Assoc. Prof. Gordon Gilja

Antonija Harasti

Zagreb, 2024

ZAHVALA

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom R3PEAT (UIP-2019-04-4046).



OBRAZAC 2

TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: Mislav Ivković

JMBAG: 0119043765

Završni ispit iz kolegija: Hidrotehničke građevine

Naslov teme završnog ispita (HR): Obrada eksperimentalnog profila brzine za rubne uvjete Q2d2

Naslov teme završnog ispita (ENG): Analysis of flow velocity profile for boundary conditions Q2d2

Opis teme završnog ispita:

Student u sklopu završnog ispita treba analaizirati podatke o profilu brzine snimljene tijekom eksperimenata u hidrauličkom kanalu. Eksperimenti se provode u sklopu projekta R3PEAT, a obuhvaćaju mjerenja profila brzine pri protoku Q2 (50 l/s) i dubini toka d2 (50 cm). Potrebno je prikazati profil brzine kroz sve 3 komponente (u, v i w) te turbulentne karakteristike toka (Reynoldsovo naprezanje i turbulentnu kinetičku energiju).

Datum: 9. 4. 2024.

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Gordon Gilja

Potpis mentora: 

Komentor: Antonija Harasti



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Student/ica :

Mislav Ivković

(Ime i prezime)

0119043765

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu završnog ispita pod naslovom:

Obrada eksperimentalnog profila brzine za rubne uvjete Q2d2

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

Analysis of flow velocity profile for boundary conditions Q2d2

(Naslov teme završnog ispita na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

R3PEAT, UIP-2019- 04-4046, izv.prof.dr.sc. Gordon Gilja

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

16.9.2024.

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Gordon Gilja

Potpis mentora:

Komentor:

dr. sc. Antonija Harasti

SAŽETAK

Ovaj rad analizira profil brzine strujanja vode u hidrauličkom kanalu, temeljen na eksperimentalnim podacima dobivenim tijekom mjerenja pet različitih protoka ($Q_1 = 40$ l/s, $Q_2 = 45$ l/s, $Q_3 = 50$ l/s, $Q_4 = 55$ l/s, $Q_5 = 60$ l/s). Eksperimenti su provedeni u sklopu projekta R3PEAT, s ciljem praćenja erozije i zaštite riječnih korita uz pomoć daljinskog sustava. Za mjerenje je korišten Acoustic Doppler Velocimeter Profilers (ADVP) uređaj, koji omogućuju precizno očitavanje brzine u tri dimenzije (u , v , w). Osim mjerenja brzine, istražene su i turbulentne karakteristike toka, uključujući Reynoldsovo naprezanje (RSS) i turbulentnu kinetičku energiju (TKE), temeljem prikupljenih podataka. Kroz analizu rezultata dobiveni su važni uvidi u ponašanje protoka vode pri različitim intenzitetima protoka, s posebnim naglaskom na procese erozije riječnih korita.

Ključne riječi: erozija, profil brzine, hidraulički kanal, Reynoldsovo naprezanje, turbulentna kinetička energija, ADVP uređaj

SUMMARY

This paper analyzes the flow velocity profile in a hydraulic channel, based on experimental data obtained during the measurement of five different flow rates ($Q_1 = 40$ l/s, $Q_2 = 45$ l/s, $Q_3 = 50$ l/s, $Q_4 = 55$ l/s, $Q_5 = 60$ l/s). The experiments were conducted as part of the R3PEAT project, aiming to monitor erosion and protect riverbeds using a remote system. The Acoustic Doppler Velocimeter Profilers (ADVP) device was used for the measurements, enabling precise readings of velocity in three dimensions (u , v , w). In addition to measuring velocity, the turbulent flow characteristics were examined, including Reynolds shear stress (RSS) and turbulent kinetic energy (TKE), based on the collected data. Through the analysis of the results, important insights were gained into the behavior of water flow at different flow intensities, with a particular emphasis on the processes of riverbed erosion.

Keywords: erosion, velocity profile, hydraulic channel, Reynolds stress, turbulent kinetic energy, ADVP device

SADRŽAJ

| | |
|---|------------------------------|
| ZAHVALA | i |
| SAŽETAK | ii |
| SUMMARY | iii |
| SADRŽAJ | iv |
| 1. UVOD..... | Error! Bookmark not defined. |
| 1.1. Utjecaj vodotoka na mostove..... | 1 |
| 1.2. Primjer rušenja mostova zbog podlokavanja..... | 2 |
| 1.3. Hidrauličko modeliranje | 5 |
| 1.4. Cilj rada..... | 6 |
| 2. METODOLOGIJA..... | 7 |
| 2.1. Fizički model | 7 |
| 2.2. Analiza turbulentnih karakteristika | 9 |
| 3. PREGLED STANJA ZNANJA..... | 12 |
| 3.1. Metode istraživanja podlokavanja..... | 12 |
| 4. REZULTATI | 24 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 34 |
| POPIS LITERATURE..... | 35 |
| POPIS SLIKA..... | 37 |
| POPIS TABLICA..... | 39 |

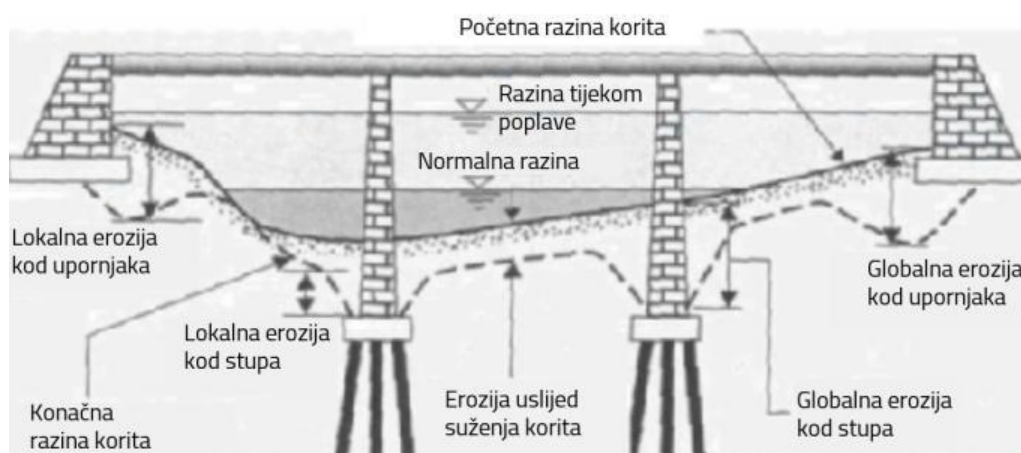
1. UVOD

Kontinuirano svjedočimo promjenama u geometriji korita prirodnih vodotoka, uzrokovanim antropogenim aktivnostima, posebno produblivanjem. Ove promjene često nadilaze očekivane razmjere, što stvara izazove na lokacijama gdje su izgrađeni mostovi. Prilikom planiranja mostova, stavlja se naglasak na nosivost, trajnost konstrukcije i temelje, te na zadovoljenje tehničkih zahtjeva poput vođenja trase [1]. Međutim, ponekad se zanemaruju potencijalni neželjeni utjecaji vode. Građevine u vodotocima lokalno smanjuju prirodni profil što za posljedicu ima usporavanje i izdizanje razine vode, narušavajući tako strujnu sliku. Iako su građevine projektirane tako da ne podliježu oštećenjima od djelovanja vode, njihova stabilnost može biti ozbiljno narušena zbog postupnog ispiranja i erozije korita vodotoka [2]. Česte pojave oštećenja i rušenja mostova ponekad rezultiraju tragičnim ishodom, kao što su gubitak ljudskih života, ozljede i velike materijalne štete. U mnogim slučajevima glavni uzrok tih gubitaka leži u utjecaju vode vodotoka. Taj utjecaj može biti izravan, poput hidrodinamičkog djelovanja uzrokovanog protokom vode oko dijelova mosta, ili neizravan, putem promjene geometrije korita vodotoka što dovodi do novih opterećenja na konstrukciju [3].

1.1 Utjecaj vodotoka na mostove

Razumijevanje kako vodotoci utječu na mostove ključno je za njihovo pravilno projektiranje i održavanje. Ometanje strujnog toka uzrokuje tri procesa povezana s režimom nanosa: globalnu eroziju, eroziju uslijed suženja toka i lokalnu eroziju. Globalna erozija rezultira promjenama poput produblivanja ili uzdizanja korita kanala i horizontalnog pomicanja obala. Može biti kratkoročna, koja se odvija u periodu od nekoliko mjeseci do nekoliko godina, ili dugoročna, koja traje tijekom desetljeća ili dužeg vremenskog razdoblja. Kratkoročna erozija je povezana s vremenskim prilikama, kao što su intenzivne oborine ili nagli porasti vodostaja, dok dugoročna erozija nastaje kontinuiranim hidrološkim procesima, poput stalnog protoka rijeke, promjenama u vegetaciji, te izgradnjom regulacijskih građevina i brana. Erozijski uslijed suženja toka javlja se kada konstrukcija mosta ili drugi objekti smanjuju profil rijeke, dok se brzina vode koja prolazi kroz suženi dio povećava. U eksperimentima je utvrđeno da širina i duljina suženog dijela kanala utječu na

strujanje i eroziju. Kraće duljine suženja stvaraju veću turbulenciju i eroziju zbog nedovoljno prostora za stabilizaciju strujanja, dok duže suženje osigurava strujanju da se postupno prilagodi novim uvjetima i tako smanjujući učinak erozije [4]. Da bi se razumjelo zašto dolazi do erozije uslijed suženja toka, koristi se pojam granične brzine. Ako je granična brzina manja od prosječne brzine toka, dolazi do erozije u uvjetima čiste vode. S druge strane, ako je granična brzina veća od prosječne brzine toka, dolazi do erozije u uvjetima pokretnog korita. Lokalna erozija javlja se oko stupova i temelja mosta zbog promjene u strujanju vode oko konstrukcije, stvarajući vrtloge i povećavajući brzine i protok vode, što rezultira lokalnim povećanjem posmičnih naprezanja [5].



Slika 1. Vrste erozije u okolini mosta

Negativne posljedice lokalne erozije kao što je pokretanje materijala s dna oko stupova mostova uzrokuje stvaranje kaverni i podlokavanje. Kaverna postiže svoje ravnotežno stanje kada snaga vodenog toka i intenzitet turbulencije nisu dovoljni za daljnje pokretanje čestica s njenog dna. Ipak, dubina kaverne nije konstantna - tijekom pojave velikih vodenih valova, povećava se zbog veće dubine vode, što stvara nove uvjete za njeno produbljivanje. U rijekama gdje se nanos obično kreće vučenjem, teško je odrediti ravnotežnu dubinu kaverne jer se ona može ponovno napuniti nanosom nakon povlačenja vodenog vala. Podlokavanje je prirodni proces koji se ne može potpuno spriječiti, pa je ključno predvidjeti njen vremenski i prostorni razvoj kako bi se osigurala odgovarajuća zaštita tijekom projektiranja ili procijenila opasnost tijekom eksploatacije mosta [6].



Slika 2. Sanacija temelja stupa mosta zbog podlokavanja

1.2 Primjeri rušenja mostova zbog podlokavanja

Postoje mnogi primjeri rušenja mostova tijekom povijesti, dok neki od njih su uzrokovani lokalnim podlokavanjem. Istaknuta su i dva primjera oštećenja mostova u Hrvatskoj. Most Sava-Jakuševac u Zagrebu doživio je naginjanje južnog stupa 30. ožujka 2009. tijekom vodnog vala (slika 3). Degradacija dna korita rijeka u području gornjeg toka, uključujući rijeku Savu u području Jakuševca, prirodna je pojava. Progresivna erozija korita uzrokovala je snižavanje dna rijeke za otprilike 5 metara u odnosu na početnu razinu u vrijeme projektiranja i izgradnje mosta. Lokalna erozija koja se dogodila uz uzvodne stijenke stupova probudila je korito za dodatnih 5 metara. U trenutku urušavanja mosta, vodostaj je bio izuzetno visok, a protok i brzina toka znatno povećani. Ovi uvjeti, zajedno sa statičkim i dinamičkim opterećenjem uzrokovanim prolaskom vlaka, rezultirali su gubitkom stabilnosti konstrukcije i naginjanjem stupova mosta u kavernu. Srećom, nije bilo težih posljedica kao što su ljudske žrtve ili kompletno rušenje mosta u rijeku.



Slika 3. Most „Jakuševac“ nakon gubitka stabilnosti

Drugi primjer je most Đurmanec koji je pretrpio oštećenje tijekom velikih oborina u lipnju 2015. godine u slivu rijeke Krapinice, što je rezultiralo erozijom desne obale uz južni upornjak mosta (slika 4). Dodatni faktor koji je utjecao na eroziju obale bilo je nagomilavanje plutajućih nanosa u središnjem i najvećem rasponu mosta. Velika količina plutajućih naplavina bila je dovoljna da blokira protok kroz središnji otvor mosta, usmjerivši ga prema desnom otvoru, gdje je izazvao eroziju desne obale iza upornjaka. Erozijska se proširila u dubinu od 2 do 3 metra, ugrožavajući stabilnost temelja upornjaka i posljedično rezultirajući naginjanjem konstrukcije mosta [3].



Slika 4. Most „Đurmanec“ nakon gubitka stabilnosti

U kolovozu 2023. velike poplave dogodile su se u velikom dijelu Slovenije i susjednim područjima Austrije i Hrvatske zbog obilne kiše. Uslijed poplava rijeka Kamniška Bistrica srušila je most u Godiču kod Kamnika (slika 5).



Slika 5. Urušavanje mosta u Godiču kod Kamnika

Zatim spomenuti su i primjeri oštećenja mostova u svijetu. Primjerice, 4. ožujka 2001., došlo je do rušenja mosta Hintze Ribeiro (slika 6) iznad rijeke Douro u Portugalu, što je rezultiralo smrću 59 ljudi. Razlog rušenja bilo je podlokavanje koje se dogodilo zbog nekontrolirane ekstrakcije pijeska u području stupova mosta [7]. Slično, most Schoharie Creek u SAD-u (slika 7) srušio se 5. travnja 1987. zbog podlokavanja oko srednjeg stupa. Kritična točka bila je činjenica da je žmurje za izgradnju temelja ostavljeno kao zaštita, no nije izvedeno kako je planirano [8].



Slika 6,7. Posljedice rušenja mosta Hintze Ribeiro i Schoharie Creek

1.3 Hidrauličko modeliranje

Hidrauličko modeliranje predstavlja sustavni pristup proučavanju i simuliranju protoka tekućina u hidrauličkim sustavima, kao što su rijeke, kanali, jezera i hidrotehničke građevine. Proizvod hidrauličkog modeliranja je detaljan model specifične dionice vodotoka koji omogućuje simulaciju hidrauličkih uvjeta na manjim segmentima istraživanog područja. Najpoznatije metode za analizu i simulaciju protoka su fizički model, numerički model i hibridno modeliranje. Fizički model: Ova tradicionalna metoda je ključni alat u hidrauličkom inženjerstvu koji omogućuje simulaciju složenih hidrauličkih procesa u kontroliranim laboratorijskim uvjetima. Fizički modeli se temelje na principima dimenzionalne analize i zakona sličnosti, što omogućuje skaliranje modela kako bi rezultati bili primjenjivi na stvarne uvjete. Najčešće korišteni principi uključuju Froudeovu i Reynoldsovu sličnost, ovisno o vrsti protoka koji se modelira. Fizički modeli omogućuju prikupljanje točnih podataka koji su ključni za razumijevanje dinamike strujanja i procjenu utjecaja različitih struktura na okoliš. Također pružaju brzo i jednostavno provođenje promjena u eksperimentalnim postavkama. Male izmjene u modelu mogu se lako provesti kako bi se odmah vidjeli rezultati promjena u hidrauličkim uvjetima. Za izradu i održavanje fizičkih modela potrebno je puno resursa, što može biti ograničavajući faktor za neke projekte [9]. Numerički model: Numerički model omogućuje simulaciju tečenja na većim dijelovima vodotoka, što nije moguće postići fizičkim modelom zbog ograničenja u prostoru, te pruža detaljnije rezultate na cijeloj domeni vodotoka [10]. Hibridno modeliranje: predstavlja pristup koji kombinira eksperimentalne podatke dobivene iz fizičkih modela s rezultatima numeričkih simulacija. Na ovaj način osigurano je nadopunjavanje svakog modela tako da se nedostaci pojedinog modela nadoknade prednostima drugog te se dosegne tražena pouzdanost ulaznih podataka [11].

1.4 Cilj rada

Cilj ovog rada je analizirati podatke o profilu brzine snimljene tijekom eksperimenata u hidrauličkom kanalu. Tijekom eksperimenta koristit ćemo Acoustic Doppler Velocimeters (ADV) uređaj. Pomoću ovog uređaja možemo dobiti detaljan prikaz strujanja vode u hidrauličkom kanalu, što će nam omogućiti analizu profila brzine kroz prostor i vrijeme. Također potrebno je istražiti turbulentne karakteristike toka (Reynoldsovo posmično naprezanje i turbulentnu kinetičku energiju) temeljem prikupljenih podataka.

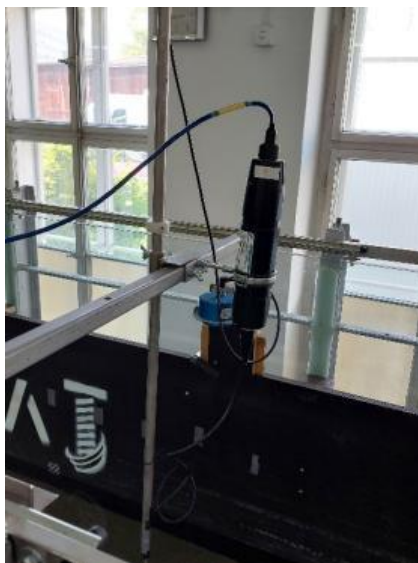
2. METODOLOGIJA

Mjerenje hidrauličkih parametara tijekom nailaska poplava, u slučaju kada dolazi do značajnog razvoja kaverne, ključno je za razumijevanje morfodinamičkih procesa u koritu rijeke u blizini građevina. Međutim, takva mjerenja mogu biti opasna zbog velikog protoka u blizini građevinskih struktura, što za posljedicu ima terenske podatke koji ne obuhvaćaju dovoljan raspon hidrauličkih čimbenika. Kako bi se prevladale ove prepreke, laboratorijski eksperimenti u kontroliranim uvjetima pružaju alternativu za opisivanje pojave podlokavanja. Repliciranje uvjeta u hidrauličkim kanalima omogućava simuliranje i proučavanje specifičnih uvjeta u manjem mjerilu [11]. Metodologija ovog istraživanja temelji se na laboratorijskim eksperimentima provedenim u hidrauličkom kanalu. Ovaj pristup omogućava detaljno proučavanje hidrauličkih procesa u kontroliranim uvjetima kako bi se precizno analizirali protoci oko stupova mostova i procijenio njihov utjecaj na eroziju.

2.1. Fizički model

Mjerenje podataka o protoku obično se provodi pomoću instrumenta Acoustic Doppler Velocimeter Profilers (ADVP). Čimbenici koji otežavaju terenska istraživanja povezani su s vremenski zahtjevnim prikupljanjem podataka, gdje se režim protoka brzo mijenja kao i hardverskim ograničenjima ADVP-a koja ne mogu detaljno opisivati turbulenciju na željenoj razini. Kako bi se prevladale te prepreke, istraživanje se može provoditi u kontroliranom okruženju odnosno laboratoriju. Laboratorijski eksperimenti su ograničeni veličinom kanala kao i kapacitetom pumpe za generiranje protoka, stoga zahtijevaju značajno skaliranje. Obično se provode kako bi se detaljno prikupili podaci o protoku u blizini struktura, na domeni dovoljno velikoj da replicira uvjete u rijeci oko strukture koja inducira simulirane turbulentne uvjete. Pouzdani podaci o turbulenciji mogu se prikupiti samo ako instrumenti za prikupljanje podataka rade na visokoj frekvenciji. ADVP koristi princip Dopplerovog efekta, pri čemu se koriste zvučni valovi za mjerenje čestica u tekućini. Uređaj emitira zvučni signal u tekućinu, a zatim prima reflektirane signale od čestica u pokretu. ADV Vectrino dostupan je od 1990-ih kao jedan od najpopularnijih instrumenata za laboratorijske eksperimente, a napravljeno je nekoliko nadogradnji, poput Vectrina II ili Vectrino profilera (ADVP). ADV-ovi imaju široku primjenu u različitim

područjima hidrauličkih istraživanja kao što su: studije kvalitete vode, hidrauličko modeliranje, obalna i riječna inženjerska istraživanja, ekološke studije [12].



Slika 8. ADVP uređaj, Građevinski fakultet, Zagreb

U sklopu ovog istraživanja pomoću ADVP-a prikupljeni su podaci u hidrauličkom kanalu dužine 18,00 m, širine 0,9 m i visine 0,9 m koji se nalazi u laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Kako bi dobili željeni profil brzine, potrebna su ograničenja. Mjerenje je izvršeno u jednoj točki u kojoj imamo 5 rubnih uvjeta za 3 komponente brzina (u, v, w), udaljenost korita i udaljenost ćelije. Unutar ADVP uređaja nalazi se 30 ćelija za mjerenje brzina čija je međusobna udaljenost 1 mm, a promjer 6 mm. Ukupno trajanje ispitivanja je 12 minuta, a tijekom svake minute provedeno je 6000 mjerenja uz frekvenciju od 100Hz. Na temelju prikupljenih podataka izrađuju se profili brzina, turbulentne kinetičke energije (TKE) i Reynoldsovog posmičnog naprezanja (RSS), što omogućava detaljno analiziranje hidrauličkih karakteristika.



Slika 9.,10. Hidraulički kanal, Građevinski fakultet, Zagreb

2.2. Analiza turbulentnih karakteristika

Profili brzina za tri ortogonalna smjera (u , v , w) prikazuju promjenu brzine toka na različitim visinama hidrauličkog kanala. Prosječne brzine izračunavaju se kao srednje vrijednosti svih brzina u svakoj ćeliji tijekom trajanja mjerenja.

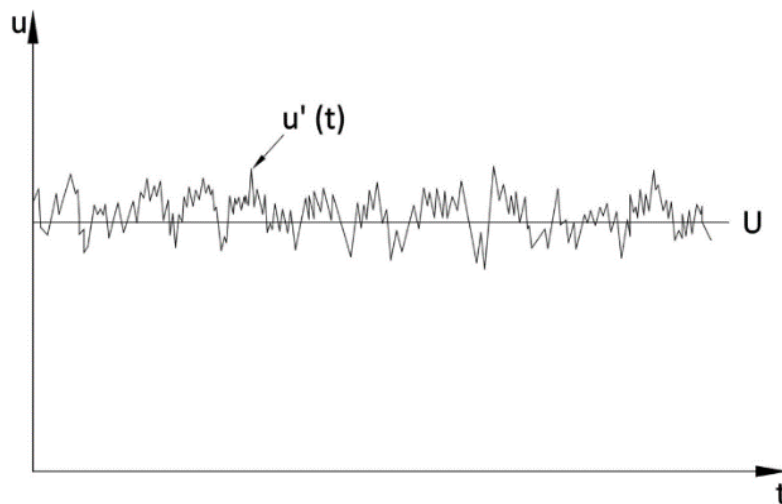
$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \text{ [m/s]}, \quad \bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \text{ [m/s]}, \quad \bar{w} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \text{ [m/s]} \quad (1)$$

gdje su: \bar{u} – prosječna brzina u smjeru x [m/s], \bar{v} – prosječna brzina u smjeru y [m/s], \bar{w} – prosječna brzina u smjeru z [m/s], N – broj mjerenja, u_i, v_i, w_i – brzine u odgovarajućim smjerovima za svako pojedinačno mjerenje.

Turbulentna kinetička energija (TKE) predstavlja količinu gibanja po jedinici mase i ključan je pokazatelj intenziteta turbulencije. Veća vrijednost TKE ukazuje na jaču turbulenciju, što može rezultirati povećanom erozijom i promjenama u strujnom profilu oko konstrukcija kao što su stupovi mostova. Definira se kao:

$$TKE = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \text{ [m}^2\text{/s}^2] \quad (2)$$

gdje su: $\overline{u'^2}$ – srednja kvadratna fluktuacija brzine u smjeru x [m²/s²], $\overline{v'^2}$ – srednja kvadratna fluktuacija brzine u smjeru y [m²/s²], $\overline{w'^2}$ – srednja kvadratna fluktuacija brzine u smjeru z [m²/s²].



Slika 11. Vremenski zapis izmjerene brzine toka i dekompozicija na srednju i fluktuirajuću komponentu

Na slici su prikazane varijacije brzine u u smjeru x komponente (u) u funkciji vremena (t). Može se uočiti da je vrijednost prosječne brzine \bar{u} označena ravnom linijom, a fluktuacije brzine oko te prosječne vrijednosti označene kao $u'(t)$ [12]. Veće fluktuacije impliciraju na veću kinetičku energiju, što može ukazivati na intenzivniju turbulenciju unutar toka [9]. Metoda razdvajanja trenutne brzine na prosječnu brzinu i fluktuirajuću komponentu može se opisati pomoću izraza: $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ koji je poznatiji kao Reynoldsova dekompozicija. Svi parametri toka (u, v, w) mogu se karakterizirati na isti način [13]. Reynoldsova posmična naprezanja (RSS) su dodatna naprezanja koja se javljaju zbog turbulentnih fluktuacija brzine. Definiraju se izrazom:

$$RSS_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad [N/mm^2] \quad (3)$$

gdje su: RSS_{ij} komponente posmičnog naprezanja, ρ [kg/m^3] gustoća fluida, $\overline{u'_i u'_j}$ [m^2/s^2] srednje vrijednosti produkata brzinskih fluktuacija u različitim smjerovima [14].

Reynoldsova posmična naprezanja uključuju tri normalne komponente ($\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$) koje su varijance brzinskih fluktuacija u smjerovima x, y i z . Ove komponente su uvijek pozitivne zbog kvadrata fluktuacija. Također, RSS uključuje tri posmične komponente ($\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$) koje predstavljaju interakciju između različitih smjerova brzinskih fluktuacija. Normalna naprezanja, koja predstavljaju varijance brzinskih fluktuacija, su ključna za razumijevanje intenziteta turbulencije unutar fluida. Posmična naprezanja, s druge strane, opisuju kako različiti smjerovi fluktuacija međusobno djeluju, što je bitno za analizu prijenosa količine

gibanja unutar fluida [15]. Kao i kod TKE, veća vrijednost RSS ukazuje na veće turbulentne sile koje mogu dovesti do intenzivnije erozije i oštećenja konstrukcija.

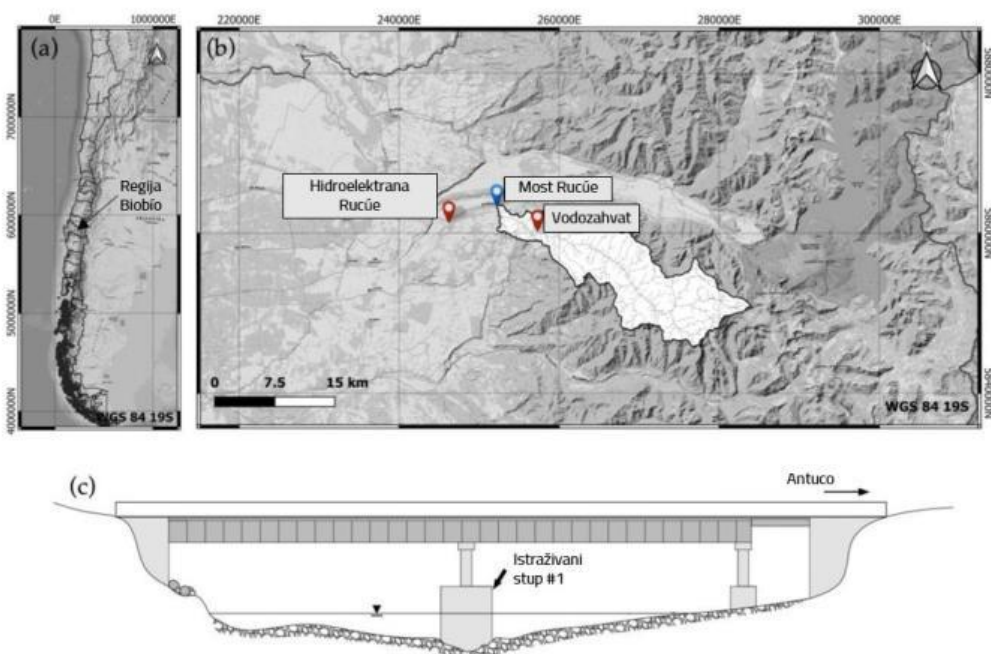
Analiza turbulentnih karakteristika, kao što su TKE i RSS, pruža ključne uvide u dinamiku tekućina i njihove interakcije s hidrotehničkim građevinama. Ove analize omogućuju inženjerima optimizaciju dizajna i održavanja mostova i drugih konstrukcija kako bi se minimizirali rizici od erozije i osigurala dugotrajna stabilnost građevina [16].

3. PREGLED STANJA ZNANJA

Podlokavanje mostova predstavlja veliki problem za sigurnost i stabilnost mostova. Pojava podlokavanja se najčešće javlja za vrijeme poplava i visokih vodostaja koji intenziviraju eroziju, narušavajući tako stabilnost elemenata mosta. Razumijevanje mehanizama podlokavanja i razvoj učinkovitih mjera zaštite uključuje poznavanje različitih istraživačkih metoda. U ovom dijelu obuhvatit ćemo bitne metode istraživanja podlokavanja kao što su terenska mjerenja, fizičke i numeričke modele.

3.1. Metode istraživanja podlokavanja

Terensko istraživanje dubine podlokavanja provedeno je 2022. godine na mostu Rucúe preko istoimene rijeke u središnjem Čileu. Most izgrađen 1970. godine premošćuje rijeku sa dva pravokutna stupa međusobno udaljena 21 m. Promatrani stup duljine je 9 m i širine 2.9 m.



Slika 12. Lokacija istraživanja: a) karta Čilea i regije Biobío b) Sliv Rucúe i istraživani most c) Shematski prikaz poprečnog presjeka rijeke Rucúe, istraživani stup i batimetrija rijeke

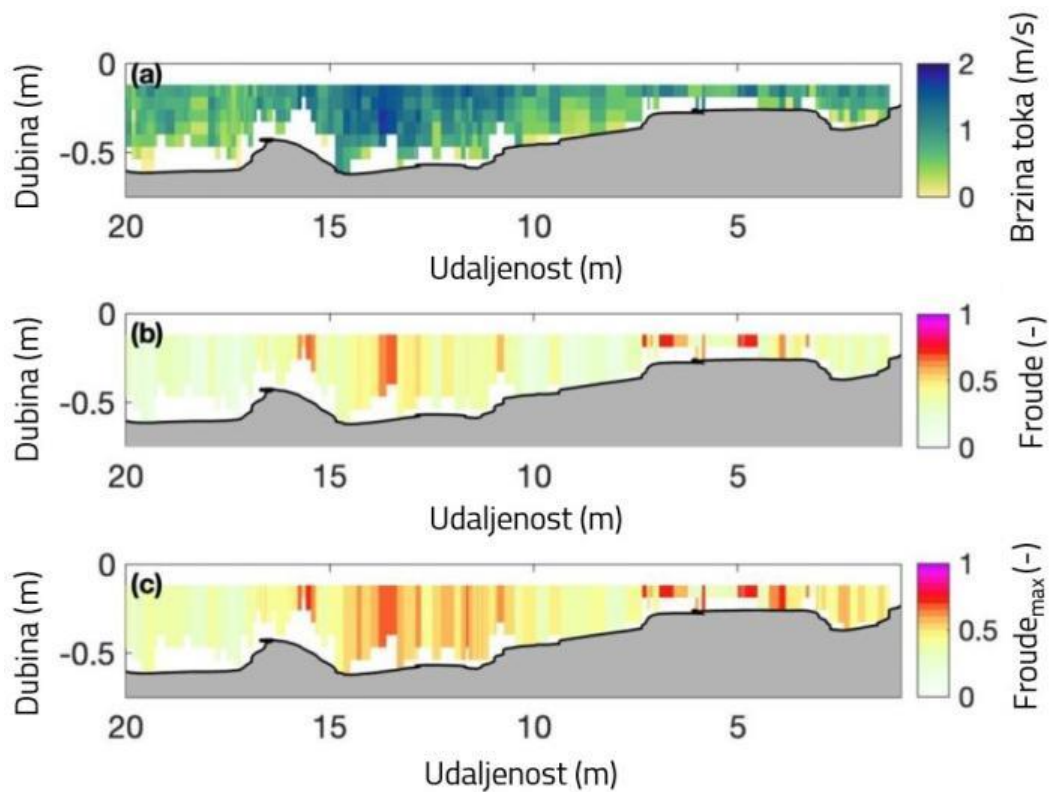
Mjerenja protoka obavljena su korištenjem ADCP-a na poprečnom presjeku odmah uzvodno od mosta. ADCP je stabilno pričvršćen na čamac i pomican preko rijeke dok su mjereni vertikalni profili brzine i dubina vode u vodenom stupcu frekvencijom od 1 Hz koristeći ćelije od 7 cm. Istovremeno, dubina protoka mjerena je pomoću senzora tlaka (HOBO, U20-001-01) s frekvencijom uzorkovanja od 15 minuta i preciznošću od ± 0.5 cm. Kako bi se ustanovio režim tečenja, bilo je potrebno izračunati Froudeov broj:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \times h'}} \quad (4)$$

gdje su: U srednja brzina horizontalnog toka (m/s), g akceleracija gravitacije jednaka 9,81 (m/s²), h' lokalna dubina vode (m) [17].

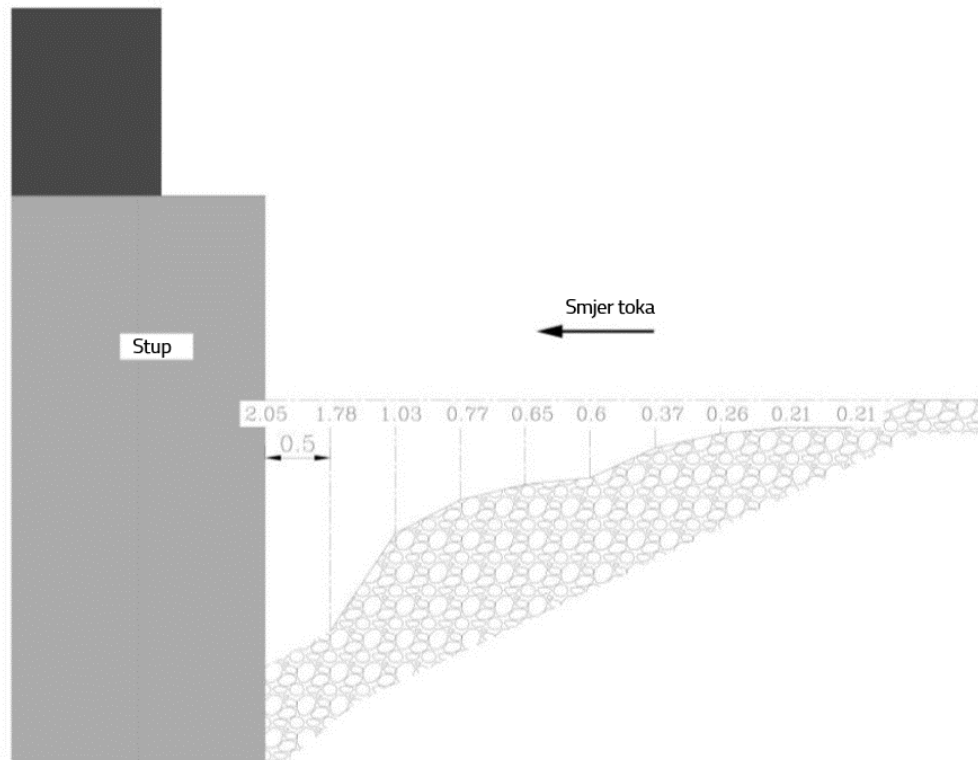
Froudeov broj koristi se za opisivanje tipa protoka u otvorenim kanalima. Izražava omjer između inercijskih i gravitacijskih sila u tekućini. Ako je Froudeov broj manji od 1, protok se karakterizira kao mirni protok, gdje gravitacijske sile dominiraju nad inercijalnim silama. Nasuprot tome, kada je Froudeov broj veći od 1, protok je siloviti, što znači da dominiraju inercijske sile. Froudeov broj je ključan za razumijevanje prijelaza između mirnog i silovitog protoka, što je osobito važno u dizajnu hidrauličkih struktura, poput mostova i drugih objekata koji se nalaze u otvorenim vodotocima [18].

Slika 13a prikazuje rezultate brzine toka dobivene mjerenjem ADCP-a za protok od 15 m³/s izmjeren 9. rujna 2022. Maksimalna zabilježena brzina iznosila je 1.7 m/s na 12 metara od desne obale, a promatrani stup se nalazi na 11 metara. Osim brzine, prikazan je i Froudeov broj na slici 13b i maksimalni Froudeov broj na slici 13c. Može se uočiti da i Froudeov broj ima najveće vrijednosti ($>0,7$) u blizini stupa. Iz tog razloga se očekuje da se siloviti tok može dogoditi za vrijeme poplava sa protokom većim od 15 m³/s.



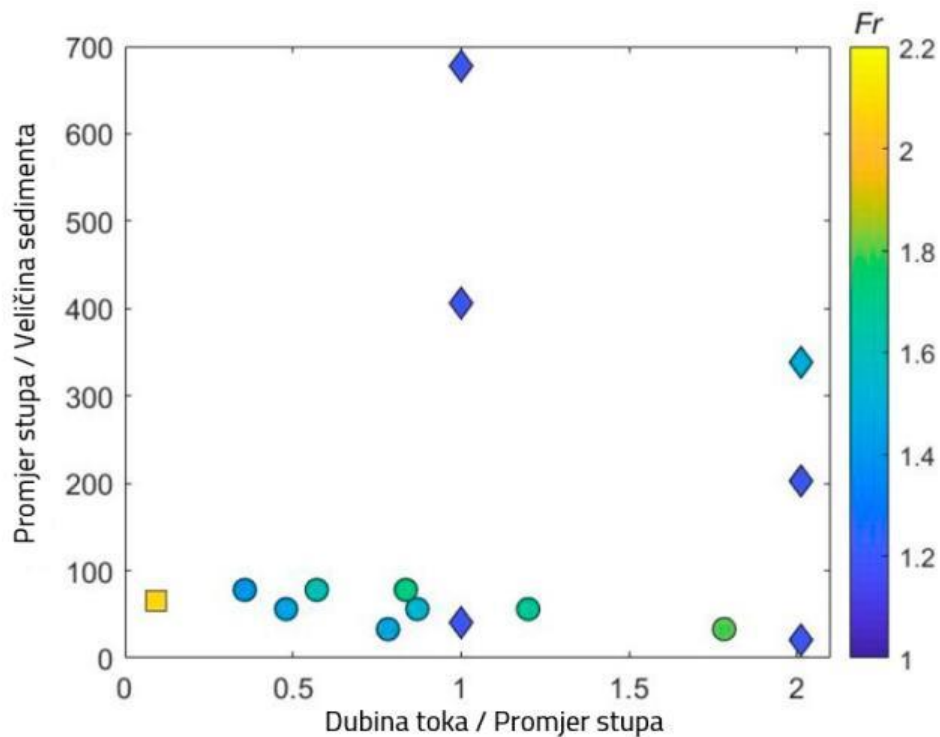
Slika 13. Brzine toka i Froudeov broj na poprečnom presjeku pri protoku od $15 \text{ m}^3/\text{s}$

Podaci o silovitom režimu od $64 \text{ m}^3/\text{s}$ oko promatranog stupa su zabilježeni tijekom zimskih poplava 1.7.2022. Zbog sigurnosnih problema ADCP nije bio u mogućnosti očitati brzine toka, ali na temelju uočenih obrazaca slobodne površine (val u obliku mlaza i odvojeni hidraulički skok) koji su se formirali ispred pravokutnog stupa, bilo je moguće aproksimirati Froudeov broj. Budući da svaki obrazac ovisi o dubini vode (0.8 m) i širini stupa (2.9 m), Froudeov broj bi se trebao nalaziti između 1 i 1.6 za spomenuti protok. Dubina podlokavanja izmjerena pomoću limnimetra u travnju 2022. prikazana je na slici 13. Istraživani stup pokazuje maksimalnu dubinu podlokavanja od 2.05 m, što je 0.71 puta širina stupa, i mnogo manju od ravnotežne dubine podlokavanja koju bi se očekivalo oko stupa u mirnom režimu prilikom primjene formula za podlokavanje [17].



Slika 14. Jama podlokavanja ispred promatranog stupa

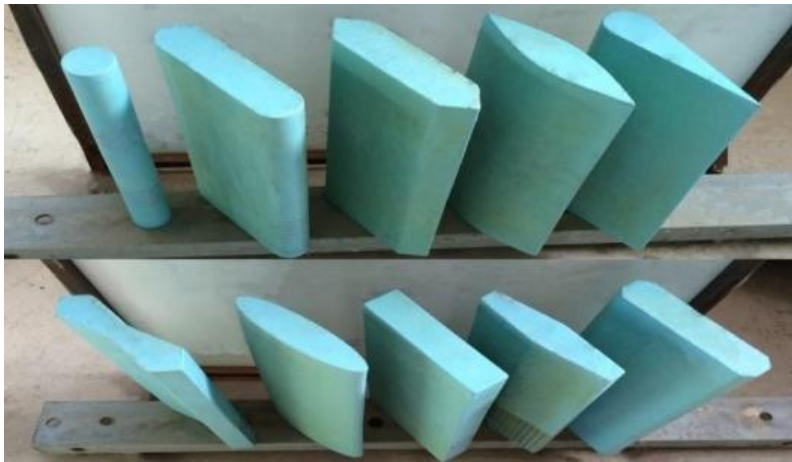
Prema istraživanju [19], izmjerene su dubine podlokavanja na stupovima u eksperimentima s pokretnim dnom za nekoliko konfiguracija protoka, uključujući 7 s silovitim tokom. Rezultati su pokazali da nema značajnog povećanja maksimalne dubine podlokavanja kada je Froudeov broj bio veći od 1 [20].



Slika 15. Dubine podlokavanja za siloviti režim

Siloviti protoci se češće javljaju u strmim rijekama gdje je posmično naprezanje dna, koje je povećava kako nagib dna raste, veće nego u blagim riječnim koritima. Zbog toga razloga očekivalo bi se da je kapacitet transporta sedimenta veći u rijakama sa silovitim tokom, ali strma riječna korita imaju grublje sedimentne slojeve od blagih korita jer dolazi do prirodne segregacije veličine sedimenata. Može se zaključiti da veći kapacitet transporta ne uzrokuje veću dubinu podlokavanja u grubljim riječnim koritima. Također, i geometrija jame podlokavanja potvrđuje tu hipotezu [17].








Sljedeće istraživanje analizira kako oblici stupova mostova utječu na dubinu podlokavanja. Eksperiment je proveden u hidrauličkom laboratoriju Tehničkog instituta Kut u Iraku. Hidraulički kanal je dugačak 12 m i širok 0.5 m, a bočne stijenske su od ojačanog prozirnog stakla visine 45 cm. 10 različitih modela stupova izrađeni su od MDF ploča debljine 18 mm, vlaknastog drvenog materijala srednje gustoće.



Slika 16. Modeli stupova korišteni u istraživanju

Kako ne bi došlo do utjecaja stijenki kanala na podlokavanje, širina stupova (4,5 cm) morala je biti bar 10 puta manja od širine kanala (50 cm). Ispitivanja su provedena u uvjetima čiste vode pri različitim protocima: 10.9 l/s, 15.42 l/s i 18 l/s. Rezultati u Tablici 1. pokazuju kako se ovisno o obliku stupa i brzini toka mijenja dubina podlokavanja. Najveću dubinu podlokavanja ima pravokutni oblik stupa, dok strujni oblik ima najmanju dubinu podlokavanja.

Tablica 1. Dubine podlokavanja za različite oblike stupova

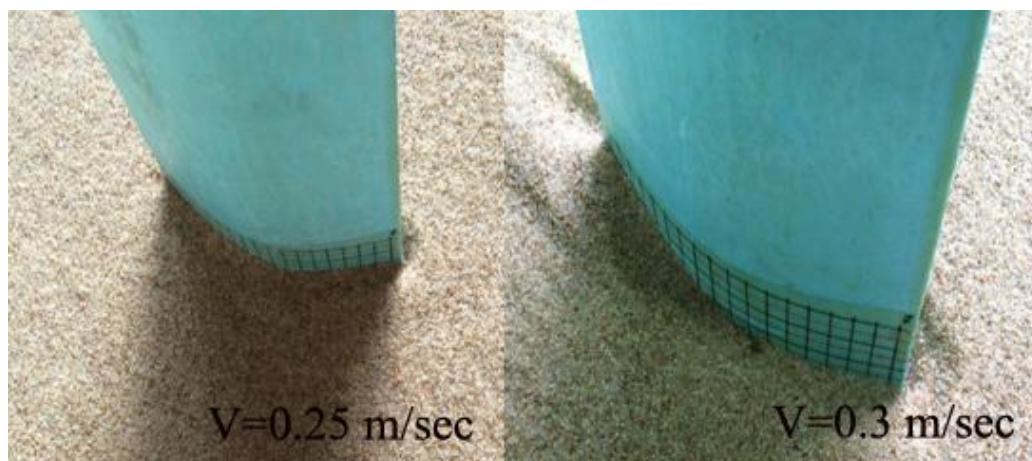
| Oblik stupova | | V=0,18 (m/s) | V=0,25 (m/s) | V=0,3 (m/s) |
|---------------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | Dubina podlokavanja (cm) | Dubina podlokavanja (cm) | Dubina podlokavanja (cm) |
| Kružni |  | 3.9 | 6.1 | 6.9 |
| Pravokutni |  | 4.3 | 6.8 | 7.6 |
| Osmerokutni |  | 4.2 | 5.2 | 5.9 |
| Joukowsky |  | 4.7 | 5.5 | 6.1 |
| Kosih rubova |  | 4.1 | 5.9 | 6.7 |
| Duguljasti |  | 4.1 | 4.6 | 5.8 |
| Eliptični |  | 3.6 | 4.9 | 5.6 |

| | | | | |
|--------------|---|-----|-----|-----|
| Oštri |  | 3 | 4.5 | 4.9 |
| Heksagonalni |  | 2.8 | 3.6 | 4.1 |
| Strujni |  | 1.9 | 2.6 | 3 |

Uočeno je da veća izložena površina na uzvodnoj strani stupa i prisutnost kutova utječe na veću dubinu podlokavanja. Teorijsko objašnjenje pronalazimo u tome da stupovi kao prepreka na vodotoku stvaraju zonu stagnacije, pa kada brzi tok naiđe na uzvodnu stranu stupa, nastaje mlaz koji se kreće prema dolje i stvara jamu podlokavanja [21].



Slika 17. Jama podlokavanja za minimalnu i maksimalnu brzinu toka (heksagonalni stup)



Slika 18. Jama podlokavanja za srednju i maksimalnu brzinu toka (strujni stup)

Osim terenskih i laboratorijskih ispitivanja dubine podlokavanja, razvijeno je i mnogo empirijskih formula za izračun dubine podlokavanja. U ovom istraživanju korišteno je 6

formula za podlokavanje stupova kako bi se odradilo koja daje najbolje rezultate. Formule su testirane pomoću nasumičnih generičkih i originalnih terenskih podataka. U prvom slučaju ulazne varijable generirane su tehnikom Monte Carlo simulacije u realnim rasponima tipičnim za vodotoke, kako u uvjetima čiste vode, tako i u uvjetima pokretnog dna. Za drugi slučaj formule korištene su na terenskom skupu podataka u slučaju uniformnih sedimentnih korita. Odabrane formule za ovo istraživanje su:

1. Breusers et al. (1977) za uvjete čiste vode i pokretnog dna:

$$\frac{d_{se}}{b} = 2 \left(2 \frac{U}{U_c} - 1 \right) \tanh \left(\frac{h}{b} \right) \cdot K_s \cdot K_\theta \quad (5)$$

gdje je: d_{se} [m] maksimalna dubina podlokavanja u ravnotežnom stanju, b [m] širina stupa, U [m/s] brzina pristupajućeg toka, U_c [m/s] kritična brzina za pokretanje sedimenta, h dubina pristupajućeg toka, K_s faktor oblika stupa i K_θ faktor poravnanja stupa

2. Jain i Fischer (1979) za uvjete čiste vode i pokretnog dna:

$$d_{se} = 1.84b \left(\frac{h}{b} \right)^{0.3} Fr_c^{0.25}, \text{ kad je } Fr - Fr_c < 0 \text{ u uvjetima čiste vode} \quad (6)$$

$$d_{se} = 2.0b \left(\frac{h}{b} \right)^{0.5} (Fr - Fr_c)^{0.25}, \text{ kad je } Fr - Fr_c \geq 0.2 \text{ za pokretno dno} \quad (7)$$

gdje je: $Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$ i $Fr_c = \frac{U_c}{\sqrt{gh}}$ Froudov broj i kritični Froudov broj

3. Froehlich (1988) za uvjete pokretnog dna:

$$d_{se} = 0.32b\phi Fr^{0.2} \left(\frac{b_e}{b} \right)^{0.62} \left(\frac{h}{b} \right)^{0.46} \left(\frac{b}{d_{50}} \right)^{0.08} \quad (8)$$

gdje je: b_e [m] širina mostovskog stupa projicirana ortogonalno na pristupajući tok, ϕ koeficijent koji u obzir uzima oblik stupa, a d_{50} [m] srednji promjer zrna sedimenta

4. Kothyari et al. (1992) za uvjete čiste vode:

$$\frac{d_{se}}{b} = 1.0 \left(\frac{b}{d_{50}} \right)^{-0.25} \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{0.16} \left(\frac{U^2 - U_{cp}^2}{\frac{\Delta\gamma_s}{\rho_f} d_{50}} \right)^{0.4} \alpha^{-0.3}, \quad (9)$$

$$U_{cp}^2 = 1.2 \left(\frac{\Delta\gamma_s}{\rho_f} d_{50} \right) \left(\frac{b}{d_{50}} \right)^{-0.11} \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{0.16}, \Delta\gamma_s = \gamma_s - \gamma_f$$

gdje je: U_{cp} kritična brzina za pokretanje čestica sedimenta na nosu stupa, γ_s specifična težina sedimenta, γ_f specifična težina fluida, ρ_f gustoća mase fluida, a $\alpha = \frac{B-b}{B}$ omjer otvora, pri čemu je B širina kanala ili razmak od centra do centra između dva stupa. U ovoj studiji pretpostavljeno je da je B znatno veće od b , te je stoga njegov učinak zanemaren

5. Melville (1997) za uvjete čiste vode i pokretnog dna:

$$d_{se} = K_{hb}K_IK_dK_SK_\theta K_G \quad (10)$$

Gdje su: K_{hb} , K_I , K_d , K_S , K_θ i K_G koeficijenti koji uzimaju u obzir utjecaje dubinske skale, intenziteta toka, veličine sedimenta, oblika stupa, poravnanja stupa i geometrije kanala na dubinu podlokavanja

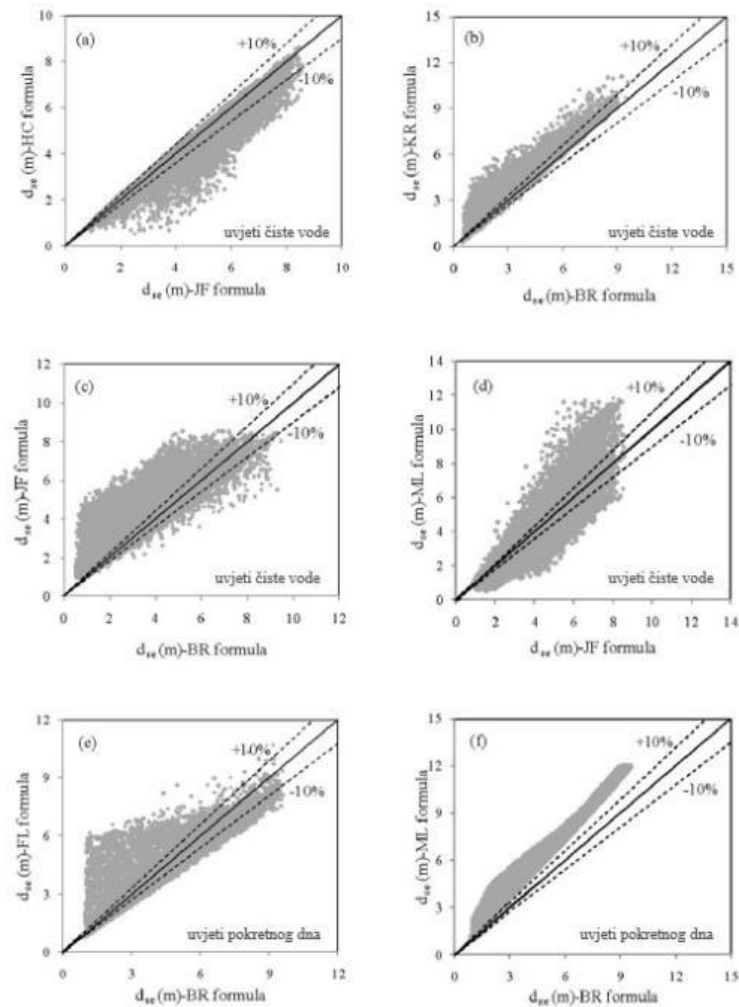
6. FHWA (HEC-18) formula (Richardson i Davis, 2001) za uvjete čiste vode i pokretnog dna:

$$\frac{d_{se}}{b} = 2K_1K_2K_3K_4K_w \left(\frac{b}{h}\right)^{0.35} Fr^{0.43} \quad (11)$$

gdje su: K_1 , K_2 , K_3 , K_4 i K_w korekcijski faktori koji uzimaju u obzir oblik nosa stupa, kut napada toka, prisutnost oblika dna, oklopljavanje dna i široke stupove u plitkim tokovima

Primjenom Monte Carlo tehnike, 10,000 trojki podataka (h , b , d_{50}) sintetički su generirani za uvjete čiste vode i 10,000 podataka za uvjete pokretnog dna u sljedećim rasponima vrijednosti, koji su tipični za mnoge prirodne vodotoke: $0.5 \leq h \leq 10$ m, $0.5 \leq b \leq 5$ m i $0.062 \leq d_{50} \leq 64$ mm. Među 6 odabranih formula, 4 su analizirane za uvjete čiste vode i pokretnog dna (BR, JF, ML i HC), jedna za uvjete čiste vode (KR), a jedna za uvjete pokretnog dna (FL). Ukupno su provedene 10 usporedbe u uvjetima čiste vode i 10 usporedbe u uvjetima pokretnog dna, što daje ukupno 20 usporedbi.

Slika 19. prikazuje podudaranost rezultata dobivenih od dvije formule, a svaka se nalazi na jednoj osi dijagrama koji sadrži liniju savršenog poklapanja i isprekidane linije sa $\pm 10\%$ intervalima.



Slika 19. Usporedba dubina podlokavanja predviđenih formulama uzetim dvije po dvije (formula A na apscisi)

Slaganje između formula A i B može okarakterizirati kao "jako", "umjereno" ili "slabo" ovisno o tome koliko se simuliranih točaka nalazi unutar $\pm 10\%$ intervala. 75%-100% za "jako" slaganje, 50%-75% za "umjereno" slaganje i 0-50% za "slabo" slaganje.

Tablica 2. Postotak točaka koje se nalaze ispod, unutar i iznad $\pm 10\%$ intervala u uvjetima čiste vode

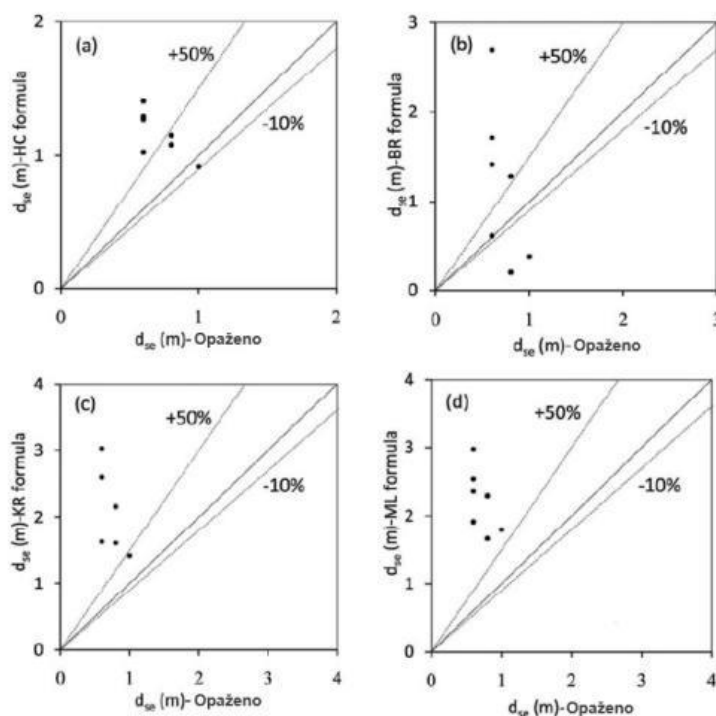
| | | B | | | |
|---|----|------------|------------|------------|-----------|
| | | HC | ML | KR | JF |
| A | BR | 11, 24, 65 | 0, 3, 97 | 2, 37, 61 | 4, 21, 75 |
| | JF | 44, 55, 1 | 41, 26, 33 | 50, 30, 20 | - |
| | KR | 26, 31, 43 | 15, 30, 55 | - | - |
| | ML | 43, 28, 29 | - | - | - |

Tablica 3. Postotak točaka koje se nalaze ispod, unutar i iznad $\pm 10\%$ intervala za pokretno dno

| | | B | | | |
|---|----|-----------|------------|------------|----------|
| | | HC | ML | FL | JF |
| A | BR | 0, 2, 98 | 0, 4, 96 | 34, 42, 24 | 1, 8, 91 |
| | JF | 5, 32, 63 | 53, 26, 21 | 82, 10, 8 | - |
| | FL | 2, 3, 95 | 6, 13, 81 | - | - |
| | ML | 5, 12, 83 | - | - | - |

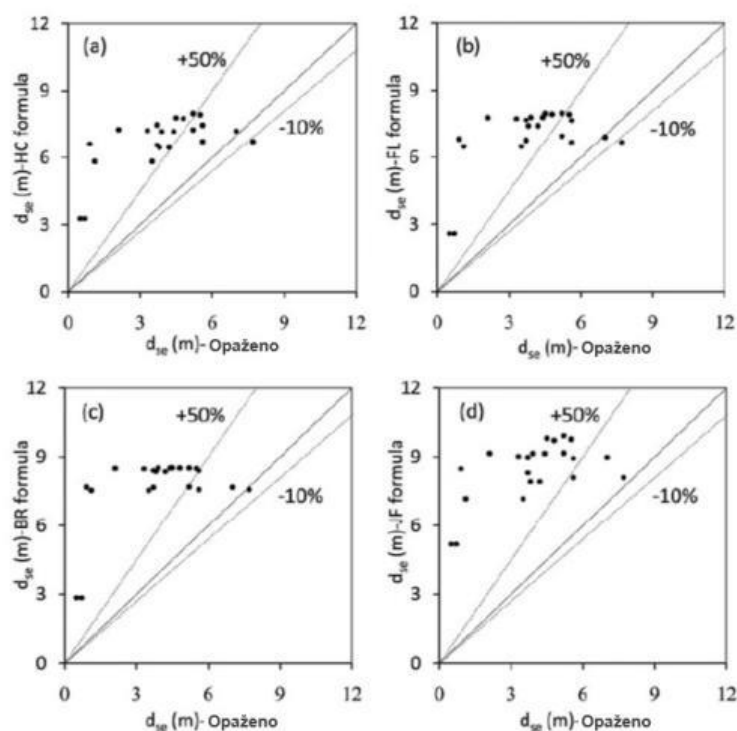
Postotak simuliranih točaka koje se nalaze ispod, unutar i iznad zadanog intervala prikazan je u Tablicama 2 i 3 za uvjete čiste vode i pokretnog dna. U uvjetima čiste vode umjereno slaganje postignuto je između formula JF i HC, pri čemu je samo 55% rezultata unutar $\pm 10\%$ intervala. Za uvjete pokretnog dna, najbolje (ali ipak slabo) slaganje postignuto je između FL i BR formula (42% točaka pada unutar $\pm 10\%$ intervala).

Formule su također uspoređene i s dostupnim terenskim podacima za 29 stupova mostova. Podaci su odabrani iz skupa podataka Mueller i Wanger (2005) koji je prikupljen na 79 lokacija u SAD-u. Na temelju sigurnosnih i ekonomskih problema određena je asimetrična zona kako bi se ocijenila učinkovitost odabrane formule. Gornja granica je postavljena na +50%, a donja na -10%.



Slika 20. Usporedba predviđenih i promatranih dubina podlokavanja u uvjetima čiste vode

HC formula se pokazala preciznijom u predviđanju dubine podlokavanja u uvjetima čiste vode u odnosu na druge formule, iako nijedna od njih nije u potpunosti zadovoljavajuća.



Slika 21. Usporedba predviđenih i promatranih dubina podlokavanja u uvjetima pokretnog dna

U uvjetima pokretnog dna, odabrane jednadžbe rezultirale su precjenjivanjem dubina podlokavanja. Iako su HC i FL formule bolje predviđale dubine u odnosu na druge, one su u mnogim slučajevima značajno precijenile dubine podlokavanja.

Tablica 4. Postotak točaka koje se nalaze unutar asimetričnog područja

| Uvjeti podlokavanja | BR | JF | FL | KR | ML | HC |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|
| Čista voda | 14 | 0 | - | 14 | 0 | 43 |
| Pokretno dno | 18 | 14 | 23 | - | 9 | 23 |

Istraživanje ukazuje na to da niti jedna od analiziranih formula nije uspjela točno predvidjeti najveće ravnotežne dubine podlokavanja u stvarnim uvjetima, a primjena različitih formula često rezultira značajnim varijacijama u dobivenim rezultatima [22].

4. REZULTATI

U ovom poglavlju prikazani su rezultati eksperimenata provedenih u hidrauličkom kanalu u laboratoriju hidrotehničkog zavoda Građevinskog fakulteta pri različitim uvjetima protoka. Podaci su izmjereni pomoću ADVP uređaja na 30 mjernih stanica. Ispitani protoci uključuju šest različitih intenziteta: Q1 = 40 l/s, Q2 = 45 l/s, Q3 = 50 l/s, Q4 = 55 l/s, i Q5 = 60 l/s. Glavni podaci koji su analizirani odnose se na srednje vrijednosti brzina u tri smjera (u, v, w), Reynoldsova posmična naprezanja (RSS) u smjerovima (u,w) i (v,w), kao i turbulentnu kinetičku energiju (TKE). Tablice rezultata prikazuju omjere udaljenosti stanica y/h , gdje je y vrijednost udaljenosti stanice, a h srednja vrijednost udaljenosti korita. Pored toga, tablice sadrže srednje vrijednosti brzina (u, v, w) za svaki protok, čime se omogućuje praćenje promjena brzine u različitim dijelovima vodotoka. Također, prikazani su rezultati Reynoldsovih naprezanja (RSS), koji daju uvid u interakciju između turbulentnog toka i protoka vode, te vrijednosti turbulentne kinetičke energije (TKE), koje pokazuju razinu turbulencije unutar sustava.

Tablica 5. Prikaz rezultata za protok Q1

| Stupac | y/h | u (srednja brzina) [mm/s] | v (srednja brzina) [mm/s] | w (srednja brzina) [mm/s] | TKE [m ² /s ²] | RSS (u,w) [N/mm ²] | RSS (v,w) [N/mm ²] |
|--------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 0.454898699 | -151.6828525 | -4.62169065 | 1.611555034 | 0.011515822 | 1.91E-06 | -1.63723E-06 |
| 2 | 0.466484247 | -152.8534731 | -2.657048951 | 0.905881671 | 0.011686032 | 8.26076E-07 | -1.3864E-06 |
| 3 | 0.478069838 | -157.3880562 | -0.651560353 | 1.295379327 | 0.012386551 | 1.80385E-06 | -1.25526E-06 |
| 4 | 0.489655386 | -158.3401318 | -0.780120251 | 1.669029029 | 0.012537496 | -3.8262E-07 | 2.2079E-07 |
| 5 | 0.501240934 | -159.483187 | -0.633718019 | 1.98047854 | 0.012719605 | -2.87773E-06 | 1.47126E-06 |
| 6 | 0.512826482 | -159.0753123 | 0.750349256 | 1.82976538 | 0.012654433 | -1.61311E-06 | 1.17223E-06 |
| 7 | 0.524412072 | -159.0020154 | 0.596734843 | 2.028812639 | 0.012643057 | -3.05398E-06 | 2.17743E-06 |
| 8 | 0.535997621 | -158.680401 | 0.60581502 | 2.248770133 | 0.012592447 | -4.45894E-06 | 3.33105E-06 |
| 9 | 0.547583169 | -158.1737707 | 0.588476858 | 2.251346415 | 0.012512178 | -4.15283E-06 | 3.33342E-06 |
| 10 | 0.559168759 | -157.8642531 | 0.501848521 | 2.163948671 | 0.012463028 | -3.41457E-06 | 2.83021E-06 |
| 11 | 0.570754307 | -158.0381514 | 0.551358958 | 2.053853257 | 0.01249029 | -2.81094E-06 | 2.28803E-06 |
| 12 | 0.582339855 | -157.8367556 | 0.556393467 | 2.090478122 | 0.012458561 | -2.94725E-06 | 2.4799E-06 |
| 13 | 0.593925403 | -157.7884396 | 0.716092368 | 2.091687792 | 0.01245104 | -2.93149E-06 | 2.56284E-06 |
| 14 | 0.605510994 | -157.63106 | 0.829262651 | 2.178623059 | 0.012426493 | -3.37304E-06 | 3.09106E-06 |
| 15 | 0.617096542 | -157.2608699 | 0.785453367 | 2.22487113 | 0.012368274 | -3.42109E-06 | 3.31629E-06 |
| 16 | 0.62868209 | -156.8185175 | 0.707120522 | 2.236052608 | 0.012298774 | -3.20721E-06 | 3.32783E-06 |
| 17 | 0.640267638 | -156.1132844 | 0.475459343 | 2.217033955 | 0.012188249 | -2.68253E-06 | 3.08622E-06 |
| 18 | 0.651853229 | -155.336046 | 0.306251123 | 2.277846698 | 0.012067285 | -2.43409E-06 | 3.28345E-06 |
| 19 | 0.663438777 | -154.4193662 | 0.072941407 | 2.291914168 | 0.011925299 | -1.86181E-06 | 3.19404E-06 |
| 20 | 0.675024325 | -152.8345308 | -0.099188916 | 2.213341055 | 0.011681651 | -6.93064E-07 | 2.72158E-06 |
| 21 | 0.686609915 | -151.7989504 | -0.348453525 | 2.158864158 | 0.011523852 | -6.35415E-08 | 2.33878E-06 |
| 22 | 0.698195463 | -150.8874926 | -0.336922056 | 2.039062211 | 0.011385653 | 3.40022E-07 | 1.83177E-06 |
| 23 | 0.709781012 | -149.885633 | -0.238990036 | 1.83780116 | 0.011234569 | 4.06614E-07 | 9.91569E-07 |
| 24 | 0.721366602 | -149.0042711 | -0.329251539 | 1.6152896 | 0.011102495 | 1.00033E-08 | 1.60304E-08 |
| 25 | 0.732952108 | -148.6497761 | -0.358504502 | 1.69611123 | 0.011049881 | 2.56465E-07 | 3.60479E-07 |
| 26 | 0.744537698 | -147.5882495 | -0.692143361 | 1.624142008 | 0.010892704 | 5.15387E-08 | 4.94611E-08 |
| 27 | 0.756123289 | -146.0012699 | -0.316318755 | 1.542752347 | 0.010659425 | -3.90908E-07 | -2.96221E-07 |
| 28 | 0.767708794 | -144.1886649 | 0.194621054 | 1.532316669 | 0.010396378 | -5.93827E-07 | -3.81637E-07 |
| 29 | 0.779294385 | -141.478246 | -0.04915073 | 1.352522776 | 0.010008963 | -2.64332E-06 | -1.18444E-06 |
| 30 | 0.790879975 | -139.1095461 | 0.803687323 | 1.047674378 | 0.009676605 | -7.08984E-06 | -3.05927E-06 |

Tablica 6. Prikaz rezultata za protok Q2

| Stupac | y/h | u (srednja brzina) [mm/s] | v (srednja brzina) [mm/s] | w (srednja brzina) [mm/s] | TKE [m ² /s ²] | RSS (u,w) [N/mm ²] | RSS (v,w) [N/mm ²] |
|--------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 0.490883304 | -169.6076649 | 2.96757208 | 3.121639296 | 0.014392656 | -5.26E-06 | -1.11E-06 |
| 2 | 0.503389575 | -184.1192127 | -0.131834749 | 3.517986676 | 0.016956139 | -5.75161E-06 | -1.22844E-06 |
| 3 | 0.5158958 | -208.4079805 | 0.326972458 | 1.767741577 | 0.021718559 | 5.25317E-05 | 3.5751E-06 |
| 4 | 0.52840207 | -223.1597613 | -0.687478266 | 1.817817268 | 0.024902028 | 6.98224E-05 | 4.76554E-06 |
| 5 | 0.540908295 | -232.8015996 | -1.759425261 | 0.786868579 | 0.02710015 | 0.000147543 | 1.10365E-05 |
| 6 | 0.553414566 | -237.7542862 | -3.019749096 | -0.411437004 | 0.028268194 | 0.000240767 | 2.11537E-05 |
| 7 | 0.56592079 | -239.405984 | -3.900116557 | -0.961375201 | 0.02866568 | 0.000284988 | 2.80409E-05 |
| 8 | 0.578427061 | -240.1693424 | -5.539439883 | -1.505141419 | 0.028857132 | 0.000326473 | 3.93601E-05 |
| 9 | 0.590933286 | -238.7234499 | -7.083886594 | -1.786800503 | 0.02852113 | 0.000339251 | 4.9337E-05 |
| 10 | 0.603439557 | -237.2224931 | -8.288547491 | -2.1128508 | 0.028173838 | 0.000353929 | 5.892E-05 |
| 11 | 0.615945827 | -236.4439339 | -9.989946006 | -2.386881042 | 0.028005615 | 0.000368169 | 7.13768E-05 |
| 12 | 0.628452052 | -235.3551515 | -11.00818411 | -2.342931485 | 0.027759358 | 0.000359282 | 7.63715E-05 |
| 13 | 0.640958323 | -233.5413257 | -12.47012038 | -2.21013147 | 0.02735097 | 0.00034088 | 8.23102E-05 |
| 14 | 0.653464547 | -231.7087383 | -14.62266674 | -2.055983725 | 0.026953494 | 0.000321536 | 9.10756E-05 |
| 15 | 0.665970818 | -229.6583863 | -17.18539046 | -1.833986038 | 0.026520838 | 0.000297589 | 9.98705E-05 |
| 16 | 0.678477043 | -226.5918488 | -19.57754906 | -1.692733595 | 0.025865006 | 0.000274343 | 0.000108541 |
| 17 | 0.690983313 | -222.8586753 | -22.33377999 | -1.423174 | 0.025083406 | 0.000242016 | 0.00011499 |
| 18 | 0.703489584 | -217.9964724 | -25.19271217 | -1.26178489 | 0.024079363 | 0.000212109 | 0.000123438 |
| 19 | 0.715995809 | -210.2878563 | -27.58891922 | -0.98787826 | 0.022491553 | 0.000167176 | 0.000125572 |
| 20 | 0.728502079 | -201.6112861 | -29.69893957 | -1.049992339 | 0.02076512 | 0.000133507 | 0.000136273 |
| 21 | 0.741008304 | -190.7135585 | -31.83030488 | -1.101215204 | 0.018693021 | 8.91271E-05 | 0.000146946 |
| 22 | 0.753514575 | -178.3089466 | -33.32925768 | -0.728540458 | 0.016452725 | 3.35015E-05 | 0.000139749 |
| 23 | 0.7660208 | -167.2143244 | -32.26352155 | -0.402116565 | 0.014500863 | -8.43355E-06 | 0.000124146 |
| 24 | 0.77852707 | -155.2450928 | -30.56516873 | 0.03100843 | 0.012517635 | -4.43894E-05 | 0.000103637 |
| 25 | 0.791033341 | -144.1293076 | -29.34494328 | -0.351627014 | 0.010817253 | -8.84931E-05 | 0.00011223 |
| 26 | 0.803539612 | -132.7541027 | -26.07669754 | 0.393654418 | 0.0091519 | -0.000100536 | 7.92323E-05 |
| 27 | 0.816045791 | -121.6584862 | -23.14847103 | 0.152460314 | 0.007668331 | -0.00014237 | 7.75432E-05 |
| 28 | 0.82852061 | -112.3652361 | -18.56605789 | 0.420938005 | 0.006485411 | -0.000154595 | 5.81559E-05 |
| 29 | 0.841058332 | -102.6114469 | -13.34348677 | 1.682860386 | 0.005354995 | -9.63927E-05 | 2.3468E-05 |
| 30 | 0.853564602 | -91.63150471 | -5.294548697 | 2.128290428 | 0.004214447 | -7.74575E-05 | 8.20717E-06 |

Tablica 7. Prikaz rezultata za protok Q3

| Stupac | y/h | u (srednja brzina) [mm/s] | v (srednja brzina) [mm/s] | w (srednja brzina) [mm/s] | TKE [m ² /s ²] | RSS (u,w) [N/mm ²] | RSS (v,w) [N/mm ²] |
|--------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 0.512342965 | -187.1742176 | 0.842504657 | 2.494934994 | 0.017520561 | 4.72E-06 | 4.14E-06 |
| 2 | 0.525404745 | -201.5514375 | 2.981659977 | 2.123696557 | 0.020318191 | 5.33738E-06 | -7.94137E-07 |
| 3 | 0.538466524 | -212.3407782 | 1.803861872 | 3.779012207 | 0.02255307 | -3.23158E-05 | 1.23446E-06 |
| 4 | 0.551528304 | -218.9643912 | -0.904805115 | 4.088626694 | 0.02398147 | -5.06637E-05 | -2.78467E-06 |
| 5 | 0.564590083 | -226.6460344 | -0.855901913 | 4.104398046 | 0.025693002 | -6.35284E-05 | -2.73352E-06 |
| 6 | 0.577651911 | -230.5643298 | -1.106973635 | 3.678883005 | 0.026587335 | -5.13716E-05 | -2.30808E-06 |
| 7 | 0.59071369 | -233.6563059 | -2.814568243 | 3.891557857 | 0.027309168 | -6.49179E-05 | -5.10755E-06 |
| 8 | 0.60377547 | -237.0596648 | -3.144107727 | 4.159884596 | 0.028112237 | -8.30568E-05 | -6.63751E-06 |
| 9 | 0.61683725 | -240.1154791 | -4.401140395 | 4.551518956 | 0.028847765 | -0.000108878 | -1.0784E-05 |
| 10 | 0.629899029 | -243.0703197 | -5.420573597 | 4.636774216 | 0.029567031 | -0.00011972 | -1.34145E-05 |
| 11 | 0.642960809 | -247.1474953 | -5.903172731 | 4.72227119 | 0.030569516 | -0.000133581 | -1.50249E-05 |
| 12 | 0.656022589 | -247.6726506 | -5.935122429 | 4.836511654 | 0.03070018 | -0.000141662 | -1.58703E-05 |
| 13 | 0.669084416 | -248.9828235 | -7.00115423 | 5.203517271 | 0.03103427 | -0.000167414 | -2.12452E-05 |
| 14 | 0.682146196 | -248.8608676 | -8.317857681 | 5.355071062 | 0.031014797 | -0.000176432 | -2.61999E-05 |
| 15 | 0.695207975 | -247.7504335 | -9.040122029 | 5.318016119 | 0.030745141 | -0.000171012 | -2.78995E-05 |
| 16 | 0.708269755 | -246.4915767 | -9.885516183 | 5.347179143 | 0.030442207 | -0.000169188 | -3.05989E-05 |
| 17 | 0.721331535 | -242.8986506 | -12.25087558 | 5.36883643 | 0.029589331 | -0.000160147 | -3.76291E-05 |
| 18 | 0.734393314 | -239.3686236 | -13.47786865 | 5.567074951 | 0.028754992 | -0.000160349 | -4.39942E-05 |
| 19 | 0.747455094 | -235.6759446 | -15.06101511 | 5.781716882 | 0.027901707 | -0.000159415 | -5.22714E-05 |
| 20 | 0.760516874 | -231.2875902 | -16.62594389 | 5.755519755 | 0.026901749 | -0.000143835 | -5.69574E-05 |
| 21 | 0.773578653 | -225.522863 | -18.87019331 | 5.657481282 | 0.025624327 | -0.000121279 | -6.23423E-05 |
| 22 | 0.786640481 | -221.1306981 | -20.66326822 | 5.256553321 | 0.024676694 | -9.37748E-05 | -5.93907E-05 |
| 23 | 0.79970226 | -215.9641482 | -22.97730996 | 4.974440379 | 0.023596608 | -7.13848E-05 | -5.90614E-05 |
| 24 | 0.812763992 | -210.9178234 | -25.10230261 | 4.681518259 | 0.022569185 | -5.19174E-05 | -5.67305E-05 |
| 25 | 0.825825772 | -206.6083493 | -28.21440089 | 4.654126442 | 0.021752362 | -4.1962E-05 | -6.27394E-05 |
| 26 | 0.838887647 | -202.5410229 | -30.32561848 | 4.552601123 | 0.020981618 | -3.16198E-05 | -6.41336E-05 |
| 27 | 0.851949427 | -196.8402048 | -33.52456678 | 4.42747784 | 0.019944783 | -1.86799E-05 | -6.64158E-05 |
| 28 | 0.865011206 | -190.8347108 | -35.26388046 | 4.236406095 | 0.018839688 | -6.37464E-05 | -6.28782E-05 |
| 29 | 0.878072986 | -172.8339277 | -32.98228852 | 2.011892707 | 0.015481723 | -6.92697E-06 | 1.63388E-05 |
| 30 | 0.891134765 | -139.2971932 | -30.33766681 | -1.798071773 | 0.010163658 | -0.000205536 | 0.000133857 |

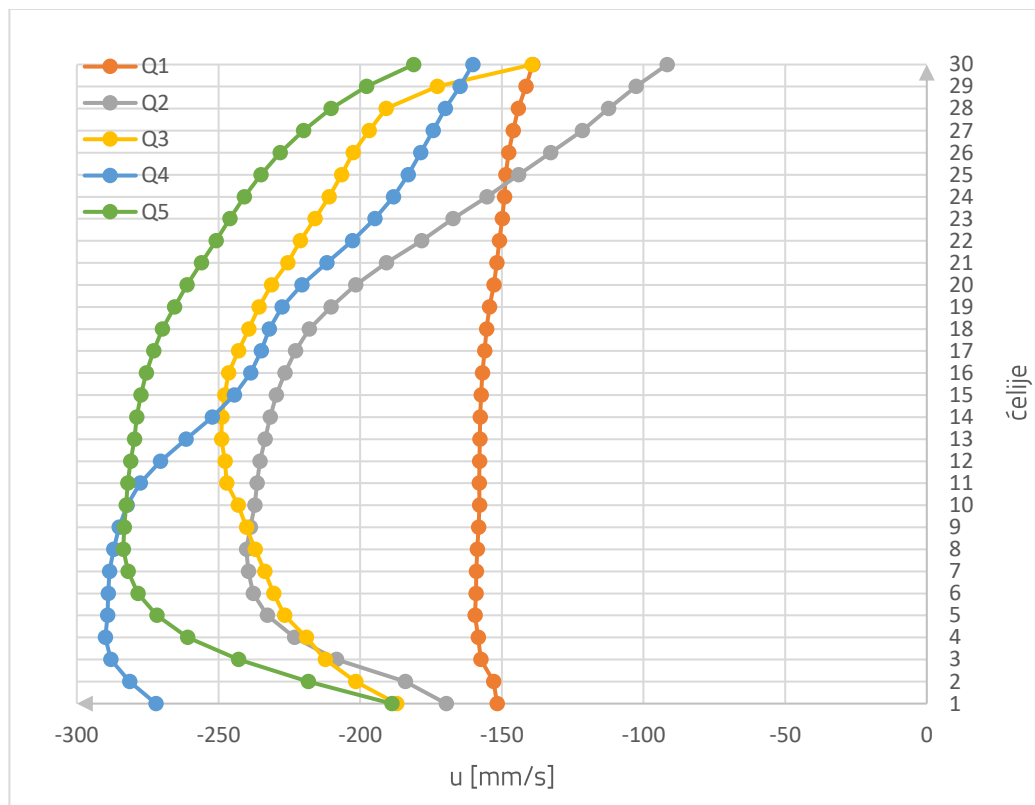
Tablica 8. Prikaz rezultata za protok Q4

| Stupac | y/h | u (srednja brzina) [mm/s] | v (srednja brzina) [mm/s] | w (srednja brzina) [mm/s] | TKE [m ² /s ²] | RSS (u,w) [N/mm ²] | RSS (v,w) [N/mm ²] |
|--------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 0.502735966 | -272.0764761 | -16.08510022 | 4.255329534 | 0.037151224 | 8.61E-05 | -8.80E-08 |
| 2 | 0.51555802 | -281.3566405 | -16.15217242 | 4.394469568 | 0.039720882 | -1.29124E-06 | -9.33243E-09 |
| 3 | 0.528380074 | -288.0579917 | -16.59511646 | 5.874707854 | 0.041643658 | -2.58801E-05 | -8.25909E-07 |
| 4 | 0.541202128 | -289.9173434 | -17.41052413 | 7.708136969 | 0.042207304 | -6.16011E-05 | -4.57643E-06 |
| 5 | 0.554024135 | -289.1276444 | -17.685571 | 9.031260973 | 0.041994569 | -8.14352E-05 | -7.64374E-06 |
| 6 | 0.566846189 | -288.8665086 | -17.55412926 | 10.0043329 | 0.041931824 | -9.66409E-05 | -8.44545E-06 |
| 7 | 0.579668243 | -288.5196155 | -18.01796547 | 10.82921518 | 0.041842744 | -0.000108095 | -1.27064E-05 |
| 8 | 0.592490296 | -287.0221016 | -18.44307413 | 11.29355971 | 0.041424689 | -0.000105191 | -1.6596E-05 |
| 9 | 0.60531235 | -285.033672 | -18.62784143 | 11.18657528 | 0.040858165 | -8.98095E-05 | -1.76244E-05 |
| 10 | 0.618134404 | -282.274769 | -18.81526417 | 11.11312418 | 0.04007828 | -6.99378E-05 | -1.87229E-05 |
| 11 | 0.630956411 | -277.5852422 | -18.68818752 | 11.45428773 | 0.038767008 | -3.96574E-05 | -1.87395E-05 |
| 12 | 0.643778465 | -270.5173022 | -18.34110061 | 12.15263361 | 0.036831847 | 1.23133E-05 | -1.78163E-05 |
| 13 | 0.656600519 | -261.4424278 | -17.43665637 | 12.7280463 | 0.034409092 | 9.00997E-05 | -1.14514E-05 |
| 14 | 0.669422573 | -252.2402128 | -16.47693805 | 13.28596831 | 0.032036566 | 0.000179134 | -3.53855E-06 |
| 15 | 0.682244627 | -244.4351979 | -15.67929907 | 13.56741908 | 0.030089241 | 0.000257398 | 3.77886E-06 |
| 16 | 0.695066681 | -238.7020508 | -15.37352155 | 13.49721922 | 0.028698595 | 0.000308443 | 6.57633E-06 |
| 17 | 0.707888735 | -234.9498601 | -15.74757263 | 13.21292691 | 0.027812002 | 0.000332565 | 3.02344E-06 |
| 18 | 0.720710742 | -232.040573 | -16.6319677 | 13.01157836 | 0.027144376 | 0.000350564 | -4.78851E-06 |
| 19 | 0.733532796 | -227.611798 | -17.97851017 | 13.02000995 | 0.026149939 | 0.000389719 | -1.65951E-05 |
| 20 | 0.74635485 | -220.5401081 | -19.31208234 | 13.25720007 | 0.024593325 | 0.000463924 | -2.90489E-05 |
| 21 | 0.759176904 | -211.7931922 | -20.74689475 | 13.52536527 | 0.022734863 | 0.000558828 | -4.3215E-05 |
| 22 | 0.771998958 | -202.7467971 | -21.81907783 | 13.74517555 | 0.020885633 | 0.000657928 | -5.44146E-05 |
| 23 | 0.784821012 | -194.8654229 | -22.91995415 | 13.87537845 | 0.019345192 | 0.000742774 | -6.57516E-05 |
| 24 | 0.797643065 | -188.2712992 | -23.41375023 | 13.92400977 | 0.018094082 | 0.000810285 | -7.08584E-05 |
| 25 | 0.810465073 | -183.0843155 | -23.86737716 | 13.94092295 | 0.017141934 | 0.000861942 | -7.5376E-05 |
| 26 | 0.823287173 | -178.688871 | -23.76237736 | 13.77794919 | 0.016342098 | 0.000889295 | -7.31078E-05 |
| 27 | 0.83610918 | -174.2728176 | -23.62727604 | 13.47703812 | 0.015555447 | 0.000901917 | -6.95517E-05 |
| 28 | 0.848931187 | -169.9495103 | -23.52292901 | 13.16412755 | 0.014804729 | 0.000909829 | -6.62621E-05 |
| 29 | 0.861753288 | -164.8142244 | -23.41793477 | 12.81399632 | 0.013938163 | 0.000918022 | -6.27593E-05 |
| 30 | 0.874575295 | -160.2792676 | -23.6284746 | 12.63545237 | 0.013203702 | 0.000936874 | -6.32144E-05 |

Tablica 9. Prikaz rezultata za protok Q5

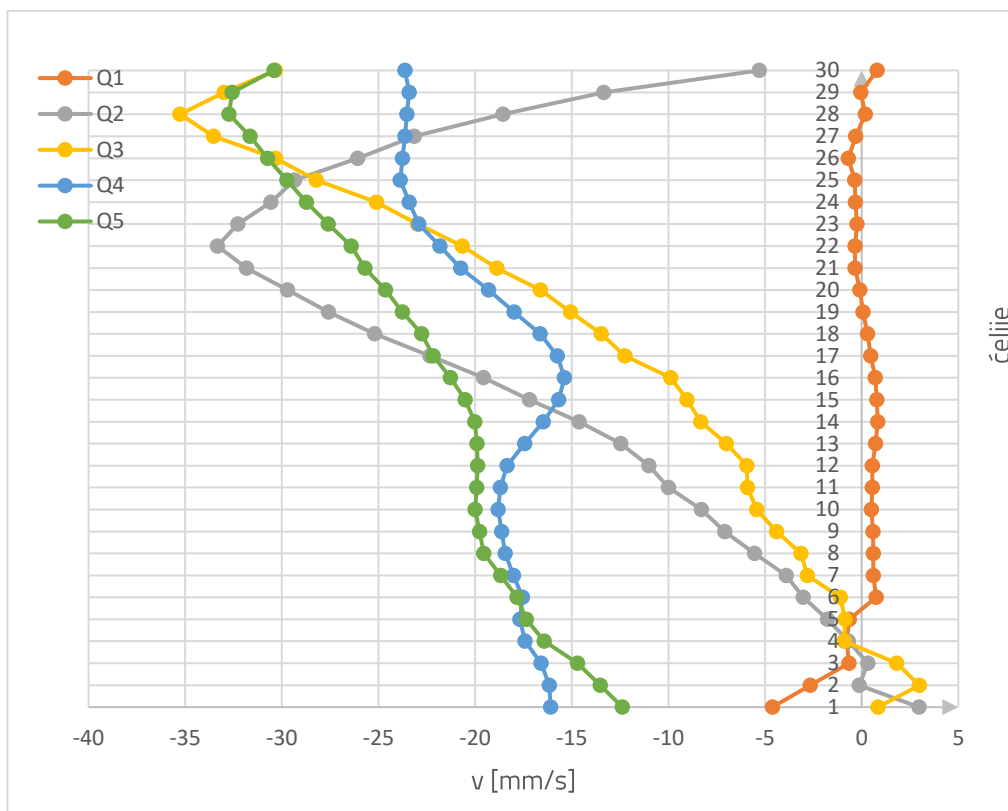
| Stupac | y/h | u (srednja brzina) [mm/s] | v (srednja brzina) [mm/s] | w (srednja brzina) [mm/s] | TKE [m ² /s ²] | RSS (u,w) [N/mm ²] | RSS (v,w) [N/mm ²] |
|--------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 0.491505828 | -188.8098781 | -12.37991997 | 0.128961287 | 0.017901225 | -8.31E-05 | -7.67E-06 |
| 2 | 0.504036381 | -218.3523979 | -13.51893498 | 0.246042523 | 0.023930296 | -3.45887E-06 | -1.33357E-07 |
| 3 | 0.516566935 | -242.8925969 | -14.69914133 | 0.993486358 | 0.029606933 | -4.67559E-05 | -2.00503E-06 |
| 4 | 0.529097488 | -260.9033155 | -16.41902241 | 2.101458223 | 0.03417227 | -0.000142204 | -7.96712E-06 |
| 5 | 0.541628041 | -271.6995418 | -17.34269778 | 2.322251793 | 0.037063402 | -0.000181801 | -1.08848E-05 |
| 6 | 0.55415864 | -278.3788883 | -17.83610082 | 2.393547436 | 0.038909331 | -0.000202837 | -1.2356E-05 |
| 7 | 0.566689194 | -281.8816992 | -18.67023411 | 2.734959586 | 0.039906675 | -0.000242545 | -1.63925E-05 |
| 8 | 0.579219747 | -283.5884489 | -19.55269037 | 3.057490578 | 0.040407032 | -0.000277562 | -2.10057E-05 |
| 9 | 0.5917503 | -283.2779272 | -19.77286591 | 3.162602869 | 0.040323676 | -0.000286582 | -2.24275E-05 |
| 10 | 0.604280853 | -282.58876 | -20.00004256 | 3.160066865 | 0.040133198 | -0.000284254 | -2.30974E-05 |
| 11 | 0.616811407 | -281.9832755 | -19.91276981 | 3.129779239 | 0.039960441 | -0.000279596 | -2.26047E-05 |
| 12 | 0.62934196 | -280.9782286 | -19.87527415 | 3.326334932 | 0.039677428 | -0.000294697 | -2.39654E-05 |
| 13 | 0.641872559 | -279.6574545 | -19.89603162 | 3.46934147 | 0.03930809 | -0.000303365 | -2.51067E-05 |
| 14 | 0.654403112 | -278.8819201 | -20.01008241 | 3.800626268 | 0.039094987 | -0.000330714 | -2.80154E-05 |
| 15 | 0.666933666 | -277.3733358 | -20.5211375 | 4.097006968 | 0.038686935 | -0.000351424 | -3.23047E-05 |
| 16 | 0.679464219 | -275.4311904 | -21.27031042 | 4.429238951 | 0.038167192 | -0.000372496 | -3.82311E-05 |
| 17 | 0.691994772 | -272.8914476 | -22.16942712 | 4.732427697 | 0.037491811 | -0.000387067 | -4.50657E-05 |
| 18 | 0.704525326 | -269.8401165 | -22.77183394 | 5.195509779 | 0.036679619 | -0.000410544 | -5.26511E-05 |
| 19 | 0.717055879 | -265.4971185 | -23.75725674 | 5.678202158 | 0.035542685 | -0.000425556 | -6.31356E-05 |
| 20 | 0.729586432 | -261.1087236 | -24.63381881 | 6.086300416 | 0.034410817 | -0.000430709 | -7.30006E-05 |
| 21 | 0.742116985 | -256.0955076 | -25.69916051 | 6.443539696 | 0.033143438 | -0.00042488 | -8.41054E-05 |
| 22 | 0.754647584 | -250.8291522 | -26.41630701 | 6.854611443 | 0.031830035 | -0.00041712 | -9.44038E-05 |
| 23 | 0.767178138 | -245.9920483 | -27.59756191 | 7.12759867 | 0.030662258 | -0.000400197 | -0.000106503 |
| 24 | 0.779708645 | -240.9643163 | -28.72173448 | 7.477879904 | 0.029472329 | -0.000383279 | -0.000120095 |
| 25 | 0.792239199 | -234.9957665 | -29.73380756 | 7.978610413 | 0.028085384 | -0.000362543 | -0.000136222 |
| 26 | 0.804769843 | -228.3089675 | -30.73362838 | 8.76427905 | 0.026573177 | -0.000341087 | -0.00015849 |
| 27 | 0.817300397 | -219.9885185 | -31.64923327 | 9.62452235 | 0.024744627 | -0.000296059 | -0.000182973 |
| 28 | 0.82983095 | -210.2364863 | -32.73713652 | 10.32977628 | 0.022688902 | -0.000218569 | -0.00020766 |
| 29 | 0.842361503 | -197.7084836 | -32.56786997 | 10.70607309 | 0.020131965 | -9.41215E-05 | -0.00021353 |
| 30 | 0.854892056 | -181.1261819 | -30.396173 | 10.74114941 | 0.016922997 | 8.15408E-05 | -0.000191192 |

Na sljedećim grafovima prikazani su rezultati mjerenja srednjih brzina u smjerovima (u, v, w) za 5 različitih protoka na 30 mjernih stanica. Na svakom grafu prikazana je ovisnost srednje brzine (u, v, w) u mm/s i svake od 30 ćelija.

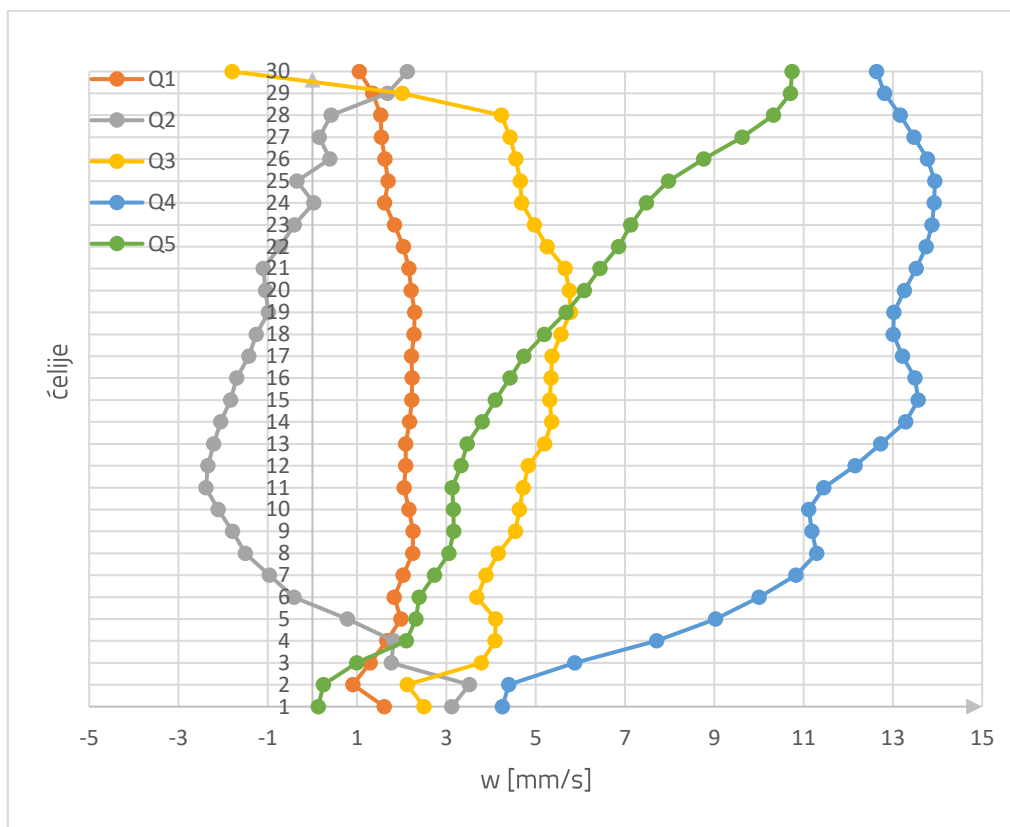


Slika 22. Grafički prikaz srednje brzine u [mm/s]

Graf koji prikazuje komponentu brzine „u“ možemo primjetiti kako se prosječne brzine mijenjaju s promjenom protoka. Manji protoci povezani su s nižim brzinama, dok veći protoci pokazuju porast brzine. Graf također prikazuje da su najveće brzine na većim dubinama budući da se prva ćelija nalazi na najvećoj dubini.

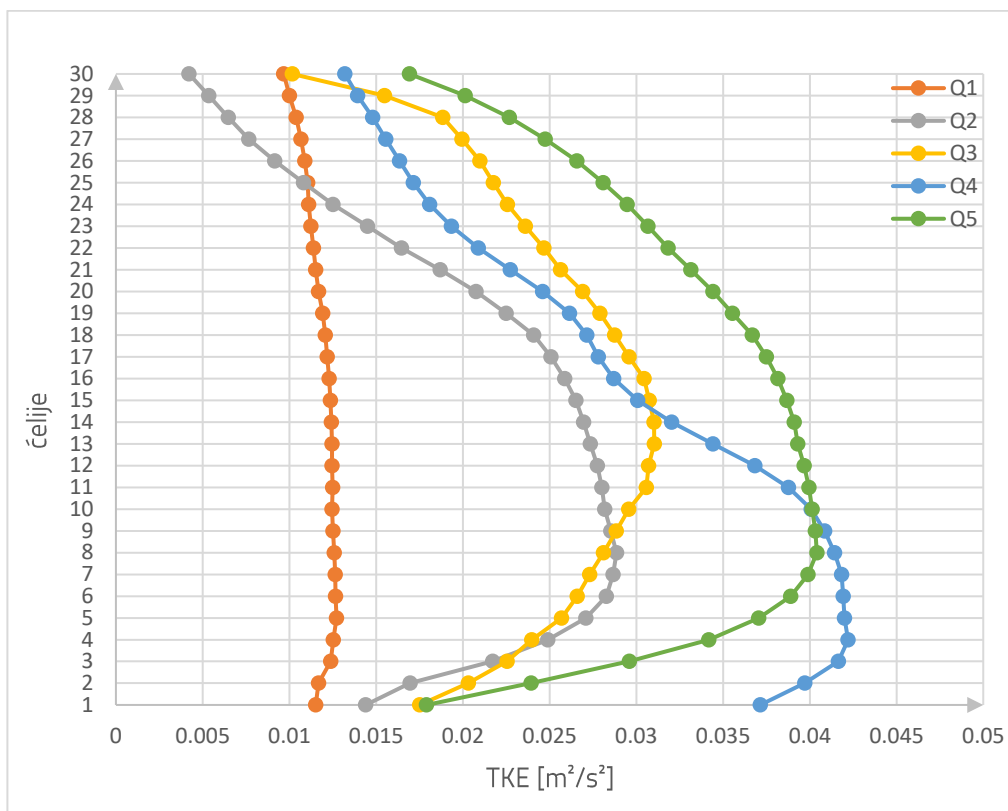
Slika 23. Grafički prikaz srednje brzine v [mm/s]

Na prikazanom grafu komponente brzine „ v “ vidimo kako se brzina povećava što je veći broj ćelija, odnosno što je veća udaljenost od dna korita. Podaci također pokazuju da se ova komponenta brzine općenito raste s povećanjem protoka, što ukazuje na veće turbulencije u smjeru „ v “ pri većim protocima.

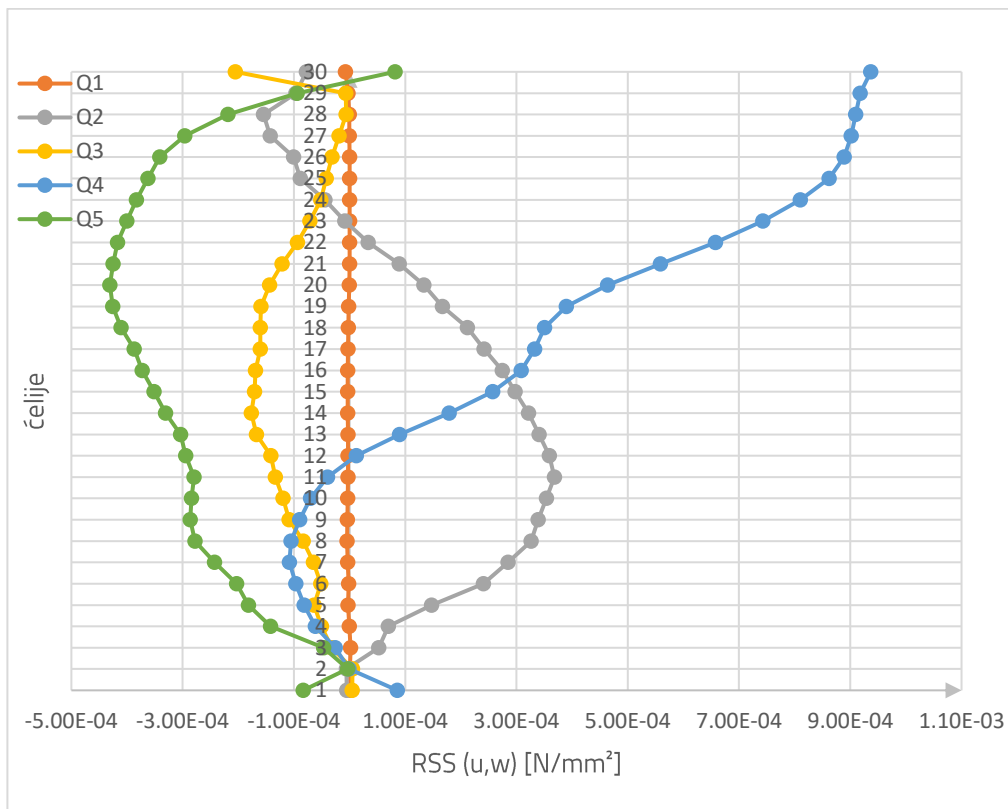
Slika 24. Grafički prikaz srednje brzine w [mm/s]

Iz grafičkog prikaza komponente brzine „ w “ uočavamo da je vertikalna komponenta toka raste što su veći protoci, a najveću vrijednost postiže pri protoku Q4. Također je vidljivo da najveće varijacije u brzini nastaju kod najviših protoka, što može upućivati na veću razinu turbulencije.

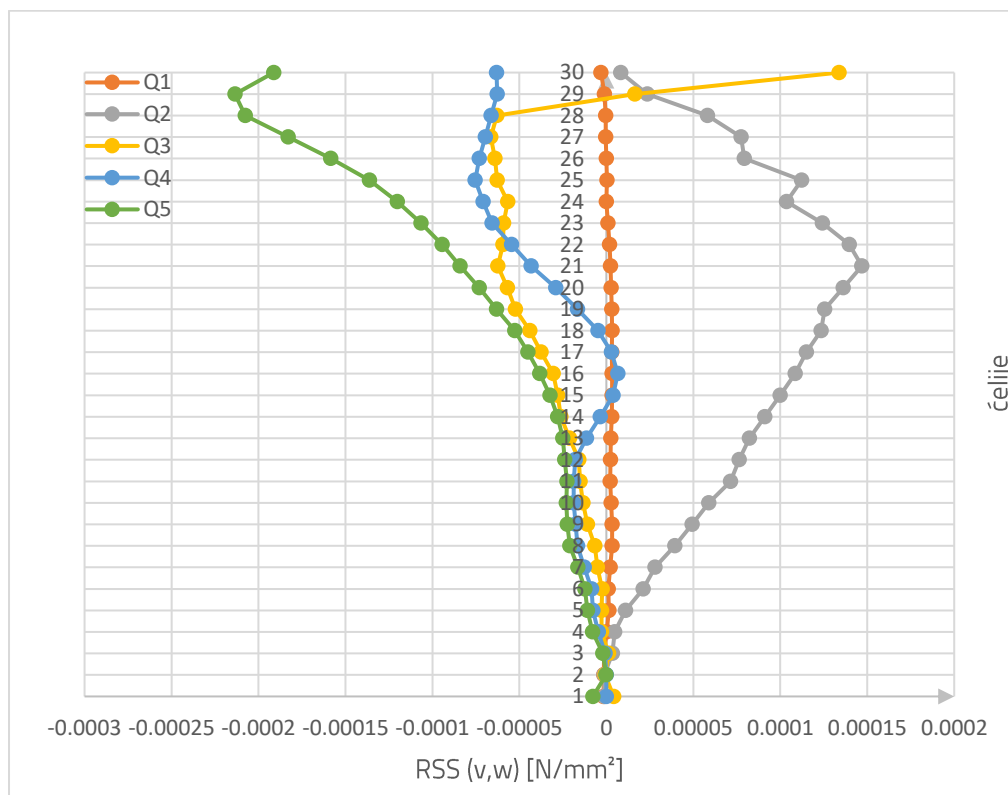
Na sljedećim grafovima prikazani su rezultati mjerenja turbulentne kinetičke energije (TKE) i Reynoldsovih posmičnih naprezanja (RSS) za 5 različitih protoka, zabilježenih na 30 mjernih stanica. Na grafovima je prikazana ovisnost TKE u m^2/s^2 i RSS u mPa o broju ćelija. Izračun TKE temelji se na srednjim kvadratima fluktuacija brzina u svim smjerovima (u , v , w), dok je izračun RSS izveden kao rezultat umnoška srednjih fluktuacija brzina u smjeru toka (u , w) i okomitom smjeru (v , w).

Slika 25. Grafički prikaz srednje vrijednosti TKE [m^2/s^2]

Na grafičkom prikazu srednje vrijednosti turbulentne kinetičke energije (TKE) može se uočiti kako TKE raste s povećanjem protoka. Pri manjim protocima (Q1 i Q2), vrijednosti TKE su znatno niže, dok s povećanjem protoka do Q5 vrijednosti TKE postaju sve veće. Ovaj porast ukazuje na jaču turbulentnost pri višim protocima, gdje dolazi do značajnijih fluktuacija u brzini strujanja.



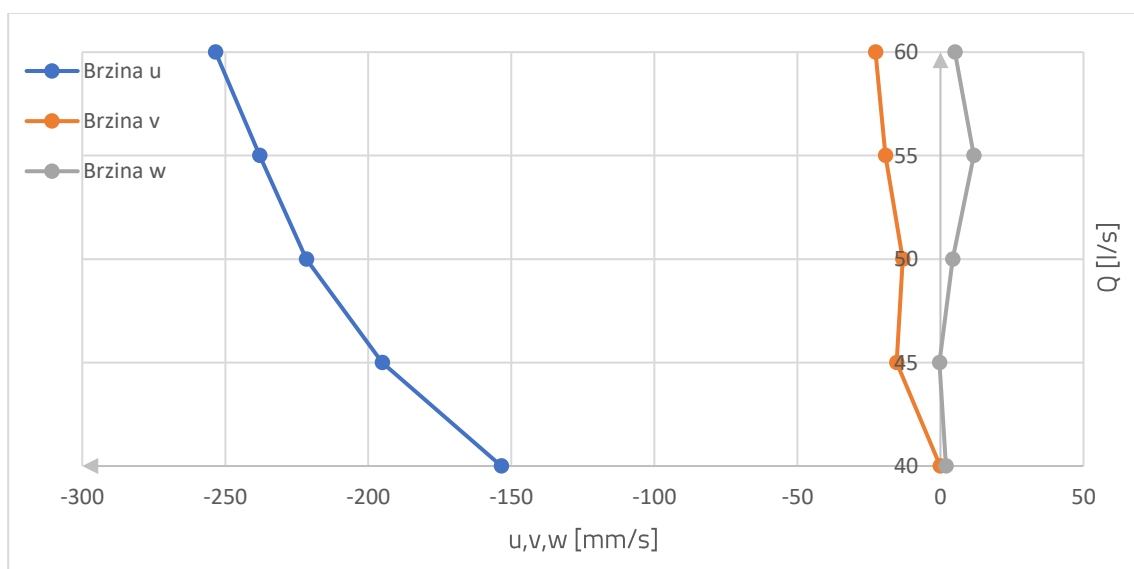
Slika 26. Grafički prikaz srednje vrijednosti RSS (u,w) [N/mm²]



Slika 27. Grafički prikaz srednje vrijednosti RSS (v,w) [N/mm²]

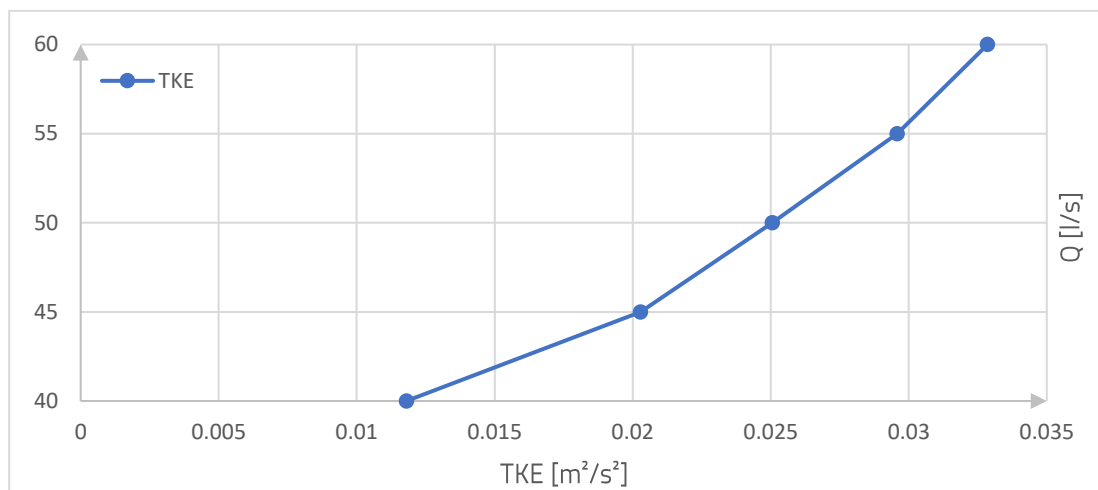
Iz grafičkog prikaza Reynoldovih posmičnih naprezanja u smjerovima (u,w) i (v,w) vidljive su promjene vrijednosti u odnosu na protoke i povećanje broja ćelija. Najveće vrijednosti RSS-a za smjer (u,w) zabilježene su pri protoku Q5, dok se najmanje vrijednosti pojavljuju pri nižim protocima poput Q1. Također, za protok Q5 RSS ima najveće vrijednosti na manjoj dubini u usporedbi s ostalim protocima. U smjeru (v,w) RSS najveće vrijednosti poprima za protok Q5, a najmanje pri protoku Q1. Može se uočiti da protok Q3 ima najveće vrijednosti kada je dubina manja.

Na priloženim grafovima prikazani su rezultati mjerenja srednjih brzina (u, v, w), turbulentne kinetičke energije (TKE) i Reynoldovih posmičnih naprezanja (RSS) po protocima Q.



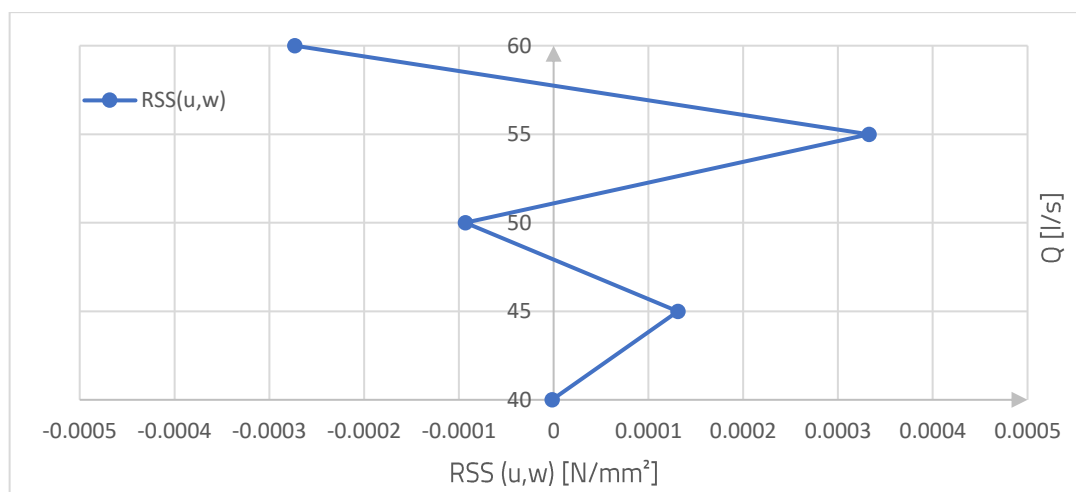
Slika 28. Grafički prikaz srednjih brzina u, v, w po protocima Q

Prikaz srednjih brzina u, v i w kroz različite protoke Q pokazuje rast brzina s povećanjem intenziteta protoka. Najniže vrijednosti svih brzina vidljive su pri protoku Q1, dok se za brzinu „u“ najveća vrijednost bilježi za protok Q5. S druge strane, brzina „v“ postiže najvišu vrijednost pri protoku Q5, a najveća vrijednost brzine „w“ zabilježena pri protoku Q4.

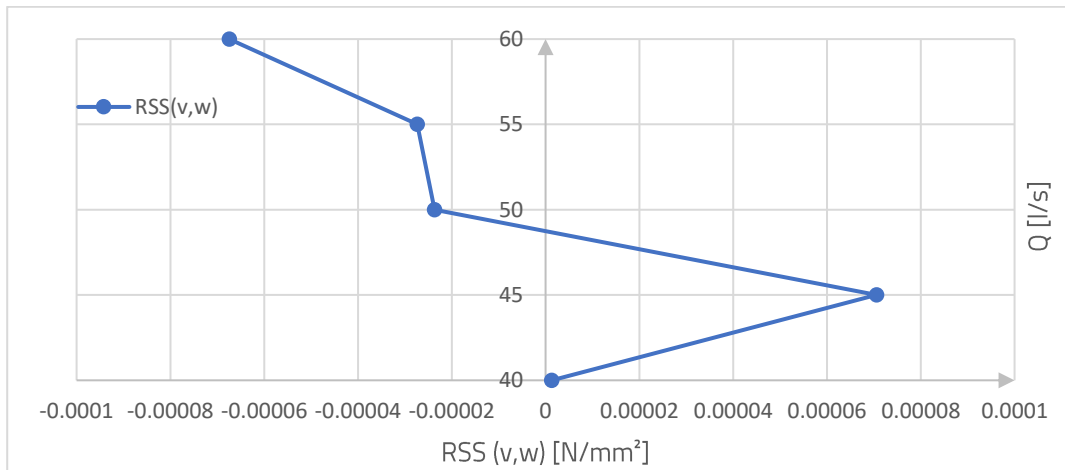


Slika 29. Grafički prikaz srednje turbulente kinetičke energije po protocima Q

Grafički prikaz srednje turbulente kinetičke energije (TKE) po različitim protocima Q pokazuje da TKE raste s povećanjem intenziteta protoka. Najniža vrijednost TKE vidljiva je pri protoku Q1, dok se najveća vrijednost bilježi pri najvećem protoku Q5.



Slika 30. Grafički prikaz srednjeg Reynoldsovog naprežanja (u,w) po protoku Q



Slika 31. Grafički prikaz srednjeg Reynoldsovog napreznja (v,w) po protoku Q

Analizom Reynoldsovih napreznja kroz različite protoke Q, može se uočiti se da u smjeru toka (u,w) najveće vrijednosti napreznja postižu pri protocima Q4 i Q5, dok su niže vrijednosti zabilježene pri nižim protocima. Reynoldsovo napreznje u smjeru (v,w) doseže najveće vrijednosti pri protocima Q2 i Q5.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirane su turbulentne karakteristike i brzinski profili protoka vode u hidrauličkom kanalu, pri čemu su ispitivani različiti protoci i njihovi učinci na eroziju korita rijeke. Ispitivanje je obuhvatilo mjerenja turbulentne kinetičke energije (TKE) i Reynoldsovih posmičnih naprezanja (RSS), čime je omogućeno detaljnije razumijevanje strujanja u uvjetima različitih protoka. Rezultati su pokazali da se turbulentna kinetička energija povećava s povećanjem protoka, što ukazuje na veći intenzitet turbulencije i mogućnost veće erozije u uvjetima viših protoka. Također, vrijednosti Reynoldsovih posmičnih naprezanja varirale su ovisno o smjeru protoka, pri čemu su maksimalne vrijednosti zabilježene u smjeru okomitom na tok. Ovi podaci omogućuju inženjerima da bolje predvide uvjete erozije i optimiziraju dizajn hidrotehničkih građevina poput mostova, kako bi se osigurala njihova dugotrajna stabilnost u uvjetima različitih hidrauličkih opterećenja.

POPIS LITERATURE

- [1] Kuspilić, N., Bekić, D., Gilja, G.: Praćenje morfodinamičkih promjena korita vodotoka u zoni stupova mostova // Prometnice - nove tehnologije i materijali / Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Zavod za prometnice Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, str. 69-111, 2010.
- [2] Gilja, G., Kuspilić, N., Bekić, D.: Utjecaj degradacije korita na sigurnost mostova Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2012.
- [3] Kuspilić, N., Gilja, G.: Utjecaj vodotoka na sigurnost mostova, E-zbornik: elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta, Vol. 8, str. 24-38, 2018.
- [4] Abdulrasul, W.A., Mohammed-Ali, W.S.: Experimental study of energy dissipation in sudden contraction of open channels. Instrumentation Measure Métrologie, Vol. 23, No. 1, pp. 55-61, 2024.
- [5] Čibarić, A., Troskot, N., Veseljak, M., Vukovac, M.: Utjecaj karakteristika toka kroz mostovski profil na nastanak kaverne od podlokavanja, Građevinski fakultet Zagreb, 2021.
- [6] Cikojević, A., Gilja, G.: Pregled postojećeg znanja u istraživanju razvoja odbačene kaverne uz riprapp zaštitu, Zajednički temelji, 2019.
- [7] Sousa, J.J., Bastos, L.: Multi temporal sar interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, str. 659-667, 2013.
- [8] On this date: Thruway Bridge collapses into Schoharie Creek in 1987, Dostupno: https://www.syracuse.com/vintage/2017/04/on_this_date_thruway_bridge_collapses_into_schoharie_creek_in_1987.html
- [9] Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., Narayanan, R.: Hydraulic Modelling: An Introduction, Routledge, 2010.
- [10] Fliszar, R., Gilja, G.: Metodologija procjene karakteristika odbačene kaverne nastale uz riprapp zaštitu od podlokavanja, SIMPOZIJ DOKTORSKOG STUDIJA GRAĐEVINARSTVA – Zagreb, 6. do 7. rujna 2021.

-
- [11] Gilja, G., Harasti, A.: Pristup istraživanju prostornog i vremenskog razvoj odbačene kaverne uz riprap zaštitu od podlokavanja, 5. Simpozij doktorskog studija građevinarstva, rujan 2019.
- [12] Gilja, G., Fliszar, R., Harasti, A., Valyrakis, M.: Calibration and Verification of Operation Parameters for an Array of Vectrino Profilers Configured for Turbulent Flow Field Measurement around Bridge Piers—Part I., *Fluids* 2022.
- [13] https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/MUH_3_HR.pdf
- [14] Gilja, G., Ocvirk, E., Fliszar, R.: Experimental Investigation of the Reynolds Shear Stress Exceedance Rate for the Injury and Disorientation Biocriteria Boundary in the Pool-Orifice and Vertical Slot Type Fishways. *Applied Sciences*, 2021.
- [15] Wang, Y., Zhang, P., Yang, S., Hu, C., Jin, J., Zhang, R.: Characteristics of Large-Scale Coherent Structures on Irregularly Arranged Rough-Bed Open-Channel Flows. *Water* 2023, 15, 1105. <https://doi.org/10.3390/w1506110>
- [16] Li, J., Yang, Y., Yang, Z.: Influence of Scour Development on Turbulent Flow Field in Front of a Bridge Pier. *Water* 2020., 12. 2370. [10.3390/w12092370](https://doi.org/10.3390/w12092370).
- [17] Carrasco, C., Herrera, C., Guerra, M., Ettmer, B., Link, O.: Monitoring Scour at Bridge Piers in Rivers with Supercritical Flows, July 2023.
- [18] Retsinis, E., Papanicolaou, P.: Numerical and Experimental Study of Classical Hydraulic Jump. *Water* 2020, 12, 1766. <https://doi.org/10.3390/w12061766>
- [19] Jain, S.C., Fischer, E.E.: Scour around bridge piers at high velocities. *J. Hydraul. Div.* 106, 1827–1842, 1980.
- [20] Link, O., Mignot, E., Roux, S., Camenen, B., Escauriaza, C., Chauchat, J., Brevis, W., Manfreda, S.: Scour at Bridge Foundations in Supercritical Flows: An Analysis of Knowledge Gaps. *Water* 2019., 11, 1656. <https://doi.org/10.3390/w11081656>
- [21] Al-Shukur, A.-H., Hadi Obeid, Z.: EXPERIMENTAL STUDY OF BRIDGE PIER SHAPE TO MINIMIZE LOCAL SCOUR. 7. 162-171., 2016.
- [22] Gaudio, R., Grimaldi, C., Tafarojnoruz, A., Calomino, F.: COMPARISON OF FORMULAE FOR THE PREDICTION OF SCOUR DEPTH AT PIERS, 2010.

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Vrste erozije u okolini mosta (Izvor: B Marulasiddappa, Sreedhara & Manu, Manu & U, Pruthviraj. (2015). Comparative Study on different Bridge Scour Monitoring Techniques: A Review.10.13140/RG.2.1.3197.1925)..... | 2 |
| Slika 2. Sanacija temelja stupa mosta zbog podlokavanja (Izvor: [11])..... | 3 |
| Slika 3. Most „Jakuševac“ nakon gubitka stabilnosti (Izvor: Kuspilić, N., Gilja, G.:Potencijalan učinak morfoloških promjena rijeke Save na zagrebački vodonosnik,2016.)..... | 4 |
| Slika 4. Most „Đurmanec“ nakon gubitka stabilnosti (Izvor:[3])..... | 4 |
| Slika 5. Urušavanje mosta u Godiču kod Kamnika (Izvor: Internet)..... | 5 |
| Slika 6. Posljedice rušenja mosta Hintze Ribeiro (Izvor: [6])..... | 5 |
| Slika 7. Posljedice rušenja mosta Schoharie Creek (Izvor: [8])..... | 5 |
| Slika 8. Slika 8. ADVP uređaj, Građevinski fakultet, Zagreb (Izvor: Zavod za hidrotehniku, Građevinski fakultet Zagreb)..... | 8 |
| Slika 9. Hidraulički kanal, Građevinski fakultet, Zagreb (Izvor: Zavod za hidrotehniku, Građevinski fakultet Zagreb)..... | 9 |
| Slika 10. Hidraulički kanal, Građevinski fakultet, Zagreb (Izvor: Zavod za hidrotehniku, Građevinski fakultet Zagreb)..... | 9 |
| Slika 11. Vremenski zapis izmjerene brzine toka i dekompozicija na srednju i fluktuirajuću komponentu (Izvor: [13])..... | 10 |
| Slika 12. Lokacija istraživanja: a) karta Čilea i regije Biobío b) Sliv Rucúe i istraživani most c) Shematski prikaz poprečnog presjeka rijeke Rucúe, istraživani stup i batimetrija rijeke (Izvor:[17])..... | 12 |
| Slika 13. Brzine toka i Froudeov broj na poprečnom presjeku pri protoku od 15 m ³ /s (Izvor:[17])..... | 14 |
| Slika 14. Jama podlokavanja ispred promatranog stupa (Izvor:[17])..... | 15 |
| Slika 15. Dubine podlokavanja za siloviti režim (Izvor:[20])..... | 16 |
| Slika 16. Modeli stupova korišteni u istraživanju (Izvor:[21])..... | 17 |

| | |
|---|----|
| Slika 17. Jama podlokavanja za minimalnu i maksimalnu brzinu toka (heksagonalni stup) (Izvor:[21])..... | 18 |
| Slika 18. Jama podlokavanja za srednju i maksimalnu brzinu toka (strujni stup) (Izvor:[21])..... | 18 |
| Slika 19. Usporedba dubina podlokavanja predviđenih formulama uzetim dvije po dvije (formula A na apscisi) (Izvor:[22])..... | 21 |
| Slika 20. Usporedba predviđenih i promatranih dubina podlokavanja u uvjetima čiste vode (Izvor:[22])..... | 22 |
| Slika 21. Usporedba predviđenih i promatranih dubina podlokavanja u uvjetima pokretnog dna (Izvor:[22])..... | 23 |
| Slika 22. Grafički prikaz srednje brzine u [mm/s]..... | 28 |
| Slika 23. Grafički prikaz srednje brzine v [mm/s] | 28 |
| Slika 24. Grafički prikaz srednje brzine w [mm/s] | 29 |
| Slika 25. Grafički prikaz srednje vrijednosti TKE [m^2/s^2]..... | 30 |
| Slika 26. Grafički prikaz srednje vrijednosti RSS (u,w) [N/mm^2]..... | 30 |
| Slika 27. Grafički prikaz srednje vrijednosti RSS (v,w) [N/mm^2]..... | 31 |
| Slika 28. Grafički prikaz srednjih brzina u, v, w po protocima Q..... | 32 |
| Slika 29. Grafički prikaz srednje turbulentne kinetičke energije po protocima Q..... | 32 |
| Slika 30. Grafički prikaz srednjeg Reynoldsovog naprezanja (u,w) po protoku Q..... | 33 |
| Slika 31. Grafički prikaz srednjeg Reynoldsovog naprezanja (v,w) po protoku Q..... | 33 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Dubine podlokavanja za različite oblike stupova (Izvor:[21])..... | 17 |
| Tablica 2. Postotak točaka koje se nalaze ispod, unutar i iznad $\pm 10\%$ intervala u uvjetima čiste vode (Izvor:[22])..... | 21 |
| Tablica 3. Postotak točaka koje se nalaze ispod, unutar i iznad $\pm 10\%$ intervala za pokretno dno (Izvor:[22])..... | 22 |
| Tablica 4. Postotak točaka koje se nalaze unutar asimetričnog područja (Izvor:[22])..... | 23 |
| Tablica 5. Prikaz rezultata za protok Q1..... | 24 |
| Tablica 6. Prikaz rezultata za protok Q2..... | 25 |
| Tablica 7. Prikaz rezultata za protok Q3..... | 25 |
| Tablica 8. Prikaz rezultata za protok Q4..... | 26 |
| Tablica 9. Prikaz rezultata za protok Q5..... | 26 |