

# Obrada eksperimentalnog profila brzine za uvjete granične brzine toka

---

**Kirhmajer, Matija**

**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:237:734474>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Matija Kirhmajer

**OBRADA EKSPERIMENTALNOG PROFILA  
BRZINE ZA UVJETE GRANIČNE BRZINE TOKA**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Matija Kirhmajer

**OBRADA EKSPERIMENTALNOG PROFILA  
BRZINE ZA UVJETE GRANIČNE BRZINE TOKA**

ZAVRŠNI ISPIT

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Gordon Gilja

Komentor:

dr. sc. Antonija Harasti

Zagreb, 2024



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Matija Kirhmajer

# **ANALYSIS OF FLOW VELOCITY PROFILE FOR INCIPIENT MOTION CONDITIONS**

FINAL EXAM

Supervisor:

Assoc. Prof. Gordon Gilja

Cosupervisor:

Antonija Harasti, Ph.D.

Zagreb, 2024



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Student/ica :

Matija Kirhmajer

(Ime i prezime)

0082064224

(JMBAG)

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

Obrada eksperimentalnog profila brzine za uvjete granične brzine toka

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

Analysis of flow velocity profile for incipient motion conditions

(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:

20. 6. 2024.

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Gordon Gilja

Potpis mentora:

Komentor:

dr. sc. Antonija Harasti



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Matija Kirhmajer, 0082064224

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio završnog ispita pod naslovom:

OBRADA EKSPERIMENTALNOG PROFILA BRZINE ZA UVJETE GRANIČNE BRZINE TOKA

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

24.06.2024

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Ja :

Matija Kirhmajer, 0082064224

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela završnog ispita i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela završnog ispita pod naslovom:

OBRADA EKSPERIMENTALNOG PROFILA BRZINE ZA UVJETE GRANIČNE BRZINE TOKA

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom prijediplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

Gordon Gilja

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

02.07.2024

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio završnog ispita bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

24.06.2024

Potpis:

---

## ZAHVALE

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



---

## SAŽETAK

U ovom radu obrađujemo eksperimentalni profil brzine pri uvjetima granične brzine toka. Eksperimenti su se provodili u sklopu projekta R3EPEAT, čiji je cilj razviti sustav za daljinsko praćenje erozije oko riprapp zaštite na velikim rijekama. Pomoću recirkulirajućeg hidrauličkog kanala, koji se nalazi u laboratoriju Zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu, obrađuje se i analizira osam različitih slučajeva. Svaki slučaj ima različit protok  $Q$  ( $Q_1 = 10$  l/s;  $Q_2 = 15$  l/s;  $Q_3 = 20$  l/s;  $Q_4 = 25$  l/s;  $Q_5 = 30$  l/s;  $Q_6 = 35$  l/s;  $Q_7 = 40$  l/s;  $Q_8 = 45$  l/s) koji djeluje na simulaciju riprapp zaštite mosta. ADVP uređajem snimili smo profile brzine toka vode u stvarnom vremenu (komponente  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), pomoću kojih smo izračunali i analizirali potrebne hidrauličke karakteristike (Reynoldsovo naprezanje i turbulentna kinetička energija). Cilj ovog rada je obraditi profile brzina i navedene hidrauličke karakteristike u svrhu boljeg razumijevanja problema erozije korita pri uvjetima granične brzine toka.

**Ključne riječi:** granična brzina toka, hidraulički kanal, turbulentna kinetička energija, Reynoldsovo naprezanje, riprapp zaštita

---

## SUMMARY

In this paper, we analyze the experimental velocity profile under incipient motion conditions. The experiments were conducted as part of the R3EPEAT project, which aims to develop a system for remote monitoring of erosion around riprap protection on large rivers. Using a recirculating hydraulic flume located in the Hydrotechnical Department laboratory at the Faculty of Civil Engineering in Zagreb, eight different cases are processed and analyzed. Each case has a different flow rate  $Q$  ( $Q_1 = 10$  l/s;  $Q_2 = 15$  l/s;  $Q_3 = 20$  l/s;  $Q_4 = 25$  l/s;  $Q_5 = 30$  l/s;  $Q_6 = 35$  l/s;  $Q_7 = 40$  l/s;  $Q_8 = 45$  l/s) affecting the simulation of riprap bridge protection. Using an ADV device, we recorded water flow velocity profiles in real time (components  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), with which we calculated and analyzed the necessary hydraulic characteristics (Reynolds stress and turbulent kinetic energy) for a better understanding of the bed erosion problem. The aim of this paper is to analyze velocity profiles and the mentioned hydraulic characteristics to better understand the problem of bed erosion under incipient motion conditions.

**Key words:** incipient motion, hydraulic channel, turbulent kinetic energy, Reynolds stress, riprap protection

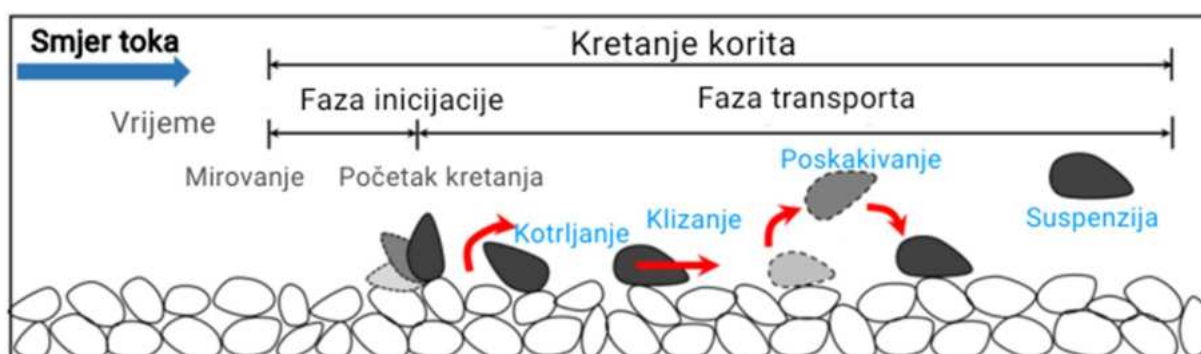
---

## SADRŽAJ

ZAHVALE .....	i
SAŽETAK .....	ii
SUMMARY .....	iii
SADRŽAJ .....	iv
1. UVOD .....	1
2. PODLOGE .....	3
3. PREGLED STANJA ZNANJA .....	6
4. METODOLOGIJA .....	9
5. REZULTATI .....	10
6. ZAKLJUČAK .....	22
POPIS LITERATURE .....	23
POPIS SLIKA .....	25
POPIS TABLICA .....	26

## 1. UVOD

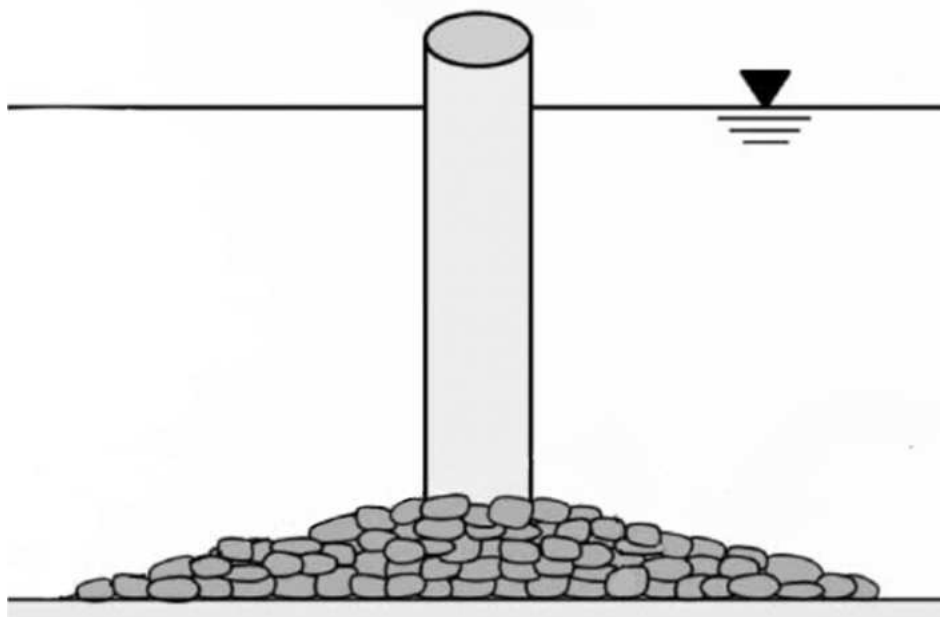
Rijeka je veliki prirodni vodotok slatke vode koji teče po Zemljinoj površini te se ulijeva u drugu rijeku, jezero ili more. Prostor koji oblikuje riječni tok i po kojem rijeka teče naziva se riječno korito. Jedno od osnovnih obilježja rijeke jest riječni protok, odnosno, umnožak protjecajnog presjeka i srednje brzine kretanja vode u mjernoj jedinici [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] [1]. Protok rijeke određenog intenziteta može erozivno djelovati na riječno korito. Kada je sila kojom rijeka djeluje na korito veća od sile otpora čestica korita, dolazi do erozije tijekom koje rijeka pokreće materijal s riječnog dna i prenosi ga duž svoje trase [2]. Sila potrebna da se riječno korito pokrene ovisi, između ostalog, i o sastavu materijala korita. Zrna manjih dimenzija zahtjevat će veću silu ako se nalaze među većim zrnima koja ih štite od djelovanja toka, za razliku od slučaja kada se korito sastoji od zrna istih dimenzija [3]. Sediment može varirati u obliku šljunka, pijeska, mulja, gline i organskih materijala. Ovisno o veličini i vrsti materijalnog nanosa, sediment se može kotrljati, klizati i poskakivati po riječnom dnu, ili se kretati u suspenziji uzduž riječnog toka bez kontakta s dnom [4]. Brzina toka potrebna da se materijal nanosa korita pokrene definira se kao granična brzina toka [5]. Pokretanjem materijala riječnog tla uslijed erozije može doći do produbljenja riječnog korita. Podlokavanje kao podskup erozivnog djelovanja toka može biti uzrok oštećenja i nestabilnosti hidrotehničkih građevina. Izgradnjom građevina u riječnom toku remeti se strujna slika te se stvaraju uvjeti za intenzivnije odnošenje materijala korita, što može rezultirati nestabilnošću konstrukcije i opasnošću za ljudski život [6].



Slika 1. Vremenski prikaz transportiranja materijala korita [7]

---

Štetno djelovanje podlokavanja dogodilo se oko srednjeg stupa mosta *Schoharie Creek* 5. travnja 1987. Osim materijalne i ekonomske štete, posljedice rušenja mosta bile su deset ljudskih žrtava [8]. U Republici Hrvatskoj, oštećenje mosta uslijed lokalnog podlokavanja dogodilo se na mostu *Sava – Jakuševac*, 30. ožujka 2009. kod naselja Mičevec. Uslijed djelovanja vodnog vala, nagnuo se južni stup mosta koji je ležao u koritu rijeke Save. Iako je most pretrpio oštećenje, težih posljedica, kao što su ljudske žrtve i urušavanje cijele konstrukcije, nije bilo [9]. Krajem 20. stoljeća dolazi do napretka u području istraživanja protoka razvojem bolje hidrauličke opreme i numeričkih modela. Znanstveni projekt R3PEAT osnovan je u svrhu razvitka sustava za daljinsko praćenje erozije oko riprap zaštite na velikim rijekama. Riprap zaštita je vrsta zaštite stupa mosta koja se sastoji od različitih veličina kamena i betona. Urušavanje riprap zaštite najčešće se događa radi erozije njene nožice te se kamenje iz obloge urušava u kavernu nastalu podlokavanjem. Uslijed ovog procesa formiraju se odbačene kaverne čija je lokacija nepoznata jer se nalazi u interakciji toka i građevine čiji su uvjeti za svaku lokaciju drugačiji. Uz terenska mjerenja, istraživanja se provode eksperimentima na fizičkom modelu i numeričkim simulacijama [10].



Slika 2. Skica riprap zaštite stupa mosta

Cilj ovog rada je analiza i obrada podataka profila brzine snimljenih tijekom eksperimenata u hidrauličkom kanalu. Eksperimenti obrađuju uvjete pri graničnoj brzini toka. Profil brzine prikazat će se kroz komponente:  $u$  – Komponenta brzine u smjeru toka,  $v$  – Komponenta brzine poprečno na tok,  $w$  – Vertikalna komponenta brzine, te kroz turbulentne karakteristike toka: Reynoldsovo naprezanje i turbulentna kinetička energija.

---

## 2. PODLOGE

U sklopu znanstvenog projekta R3PEAT ( Remote Real-time RipRap Protection Erosion Assessment on large rivers ) razvijen je sustav za daljinsko praćenje erozije riprap zaštite. Istraživanje se provodi na recirkulirajućem hidrauličkom kanalu duljine 18 metara, širine i visine 0,9 metara, koji se nalazi u laboratoriju Zavoda za hidrotehniku u sklopu Građevinskog fakulteta [11].

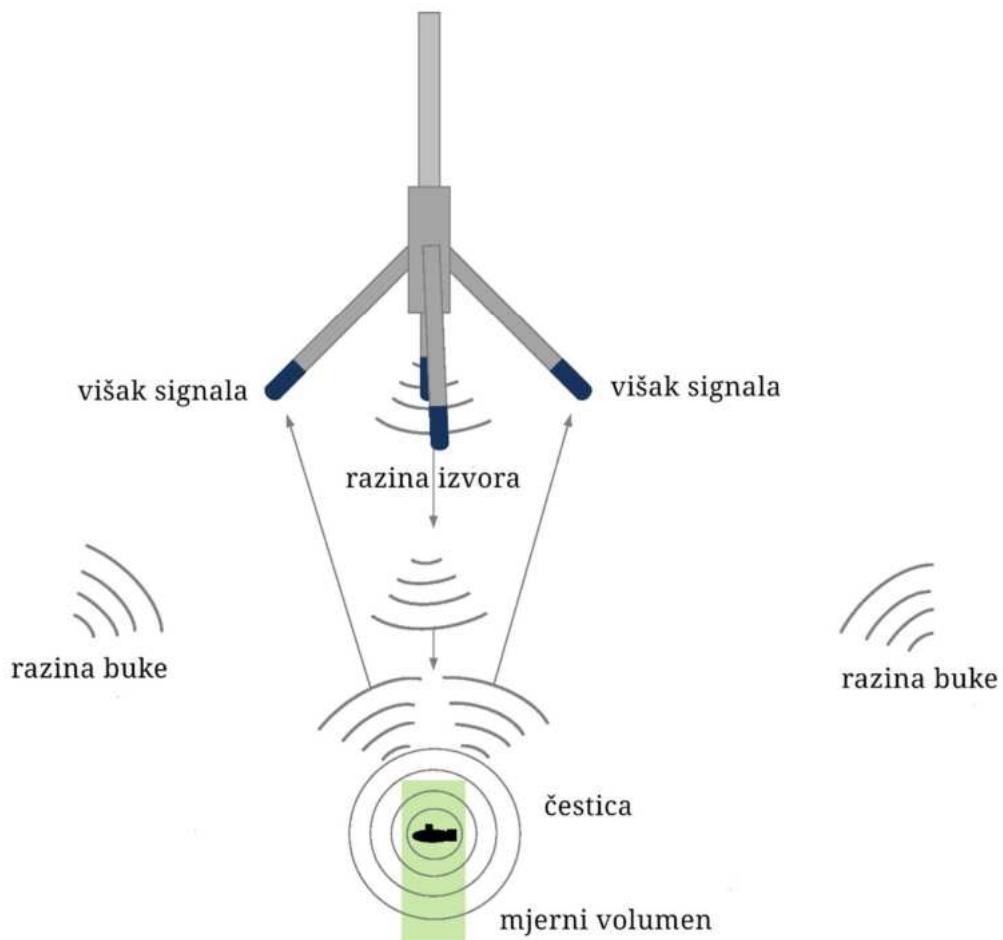


Slika 3. Hidraulički kanal, Zavod za hidrotehniku, Građevinski fakultet, Zagreb

Hidraulički kanal reprezentira stvarne riječne uvjete u umanjenom mjerilu. Repliku stvarnih uvjeta obuhvaćaju crpka pomoću koje se simulira riječni tok, model riječnog korita, pripadni materijalni nanos riječnog korita i model stupa s riprap zaštitom od podlokavanja. Rekonstrukcijom stvarnih riječnih uvjeta i njihovog okoliša simulira se utjecaj riječnog toka vezan uz podlokavanje na pripadajući stup te se snimaju i analiziraju eksperimentalni profili brzine.

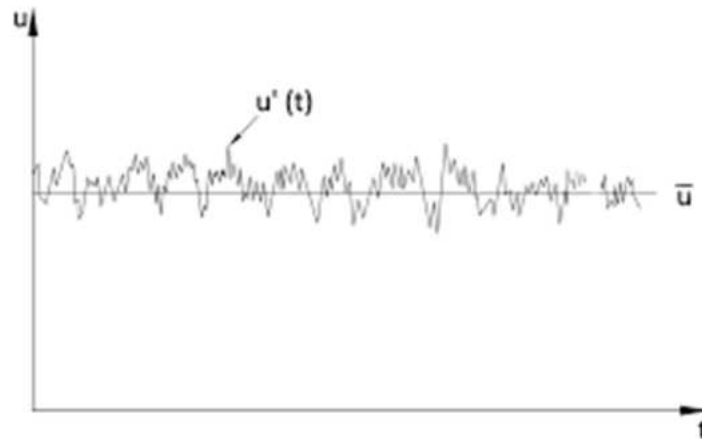
---

Mjerenje profila brzine protoka vode ostvaruje se pomoću uređaja ADVP (Acoustic Doppler Velocimeter Profiler). ADVP mjeri brzinu protoka vode zvukom koristeći Dopplerov efekt. Uređaj proizvodi zvuk frekvencije 100 Hz, čiji se zvučni valovi odbijaju od čestica u protoku vode natrag prema uređaju. Razlika u frekvencijama valova koje uređaj šalje i koji se vraćaju natrag na uređaj, omogućava izračun brzine kretanja čestice i vode oko njih [12]. Mjerenje se izvodi u trajanju od 12 minuta (720 sekundi). Budući da je frekvencija ADVP uređaja 100 Hz, što znači da se u jednoj sekundi prikupi 100 podataka o profilu brzine, u jednome mjerenju prikupi se 72000 podataka o profilu brzine toka. Uređaj ima četiri glave koje svaka mjere 30 ćelija veličine 1 mm koje sadrže komponente brzina u relativnom koordinatnom sustavu.



Skica 4. Skica načina rada ADVP uređaja

Podatci su zabilježeni mjernim softverom, transformirani iz sirovog zapisa u tablični format i obrađeni u programu Excel. U ovom radu analiziramo promjene korita pomoću osam različitih protoka ( $Q_1 = 10$  l/s;  $Q_2 = 15$  l/s;  $Q_3 = 20$  l/s;  $Q_4 = 25$  l/s;  $Q_5 = 30$  l/s;  $Q_6 = 35$  l/s;  $Q_7 = 40$  l/s;  $Q_8 = 45$  l/s). Svaki protok sadrži podatke o udaljenosti korita, udaljenosti ćelije i tri komponente brzine ( $u$  – komponenta brzine u smjeru toka,  $v$  – komponenta brzine poprečno na tok,  $w$  – vertikalna komponenta brzine).



Slika 5. Graf izmjerene vremenske serije brzina u točki strujnog polja

Komponente brzine toka variraju na kaotičan i nasumičan način, stoga se takav tok naziva turbulentnim. Graf na slici prikazuje dekompoziciju trenutne brzina vode  $u(t)$  u određenim trenucima tijekom vremenskog intervala te nam pomaže u boljem razumijevanju nepredvidive naravi turbulentnog toka. Trenutnu brzinu vode  $u(t)$  dobivamo zbrajanjem srednje vrijednosti brzine  $\bar{u}$  i oscilacije od srednje brzine  $u'(t)$ . Pomoću komponenta srednjih oscilacija brzina toka  $\bar{u}'$  možemo izračunati turbulentnu kinetičku energiju TKE izrazom :

$$TKE = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

Protok vode djeluje posmičnom silom na površinu riječnog korita. Takvo naprezanje nazivamo Reynoldsovo naprezanje te ono može djelovati uzdužno ili poprečno na tok vode. Računamo ga pomoću komponenta srednjih oscilacija brzina:

$$RSS_{u,w} = \tau_{u,w} = \bar{u}' \times \bar{w}'$$

$$RSS_{v,w} = \tau_{v,w} = \bar{v}' \times \bar{w}'$$

Gdje  $RSS_{u,w}$  predstavlja Reynoldsovo posmično naprezanje u smjeru toka, dok  $RSS_{v,w}$  predstavlja Reynoldsovo posmično naprezanje u smjeru okomito smjera toka.



---

### 3. PREGLED STANJA ZNANJA

Erozivno djelovanje vodotoka oduvijek se uzimalo u obzir pri projektiranju hidrotehničkih građevina i izvršavanja hidrotehničkih zahvata. Tijekom povjesti obavljena su mnoga istraživanja i eksperimenti vezani za graničnu brzinu toka kako bi se bolje razumjeli parametri potrebni za pokret materijalnog nanosa, odnosno početka erozije. U nastavku će se navesti i obraditi istraživanja vezana za uvjete granične brzine toka koje imaju korelaciju sa temom ovog rada. Obradivanje i usporedba prijašnjih istraživanja pomaže u razumjevanju problema te daju širu i jasniju sliku ovog eksperimenta.

Godine 1935. inženjer Lorens G. Straub proučavao je transportiranje nanosa rijeke Missouri u više navrata tijekom istraživanja sedimentnih karakteristika rijeke. Osim terenskih istraživanja, Straub je također provodio ekspeimente vezane za eroziju u hidrauličkom laboratoriju sveučilišta Minnesota. Laboratorijski eksperimenti provodili su se u kanalu na materijalima različitih mehaničkih komponenti. Usprkos uvjetima da se brzina toka održi konstantom, uočena je progresivna promjena brzine erozije. Iz kasnijih studija ispostavilo se da je razlog promjene brzine toka u kanalu bio razlog proces sortiranja; transportiranje većeg i manjeg nanosa bliže, odnosno dalje od riječne obale [13].

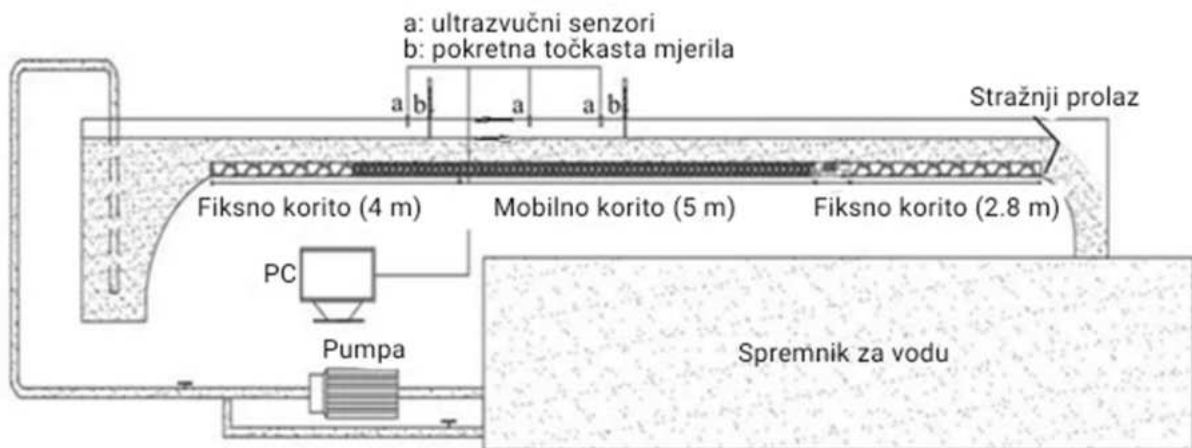
Terenska promatranja i mjerenja granične brzine kretanja šljunčanog materijala korita proveli su Batalla i drugi. Pokusi su provedeni u pordručju Ribera Salade, nemodificirane planinske šljunčane rijeke u katalonskim Pirenejima. Terenski eksperimenti provedeni su pomoću portabilnih kanala i Birkbeck tip zamki za transport čestica na dnu vode. Mjerenja su se odvijala na 30 lokacija u periodu od više mjeseci 2006. Godine. Kombinirani rezultai iz kanala i zamki ukazuju na dvije glavne faze transporta materijala korita: Prvom fazom dominira pijesak, a drugom fazom fini šljunak. Portabilni kanali pomagali su u opisivanju početnog gibanja materijala pri graničnoj brzini toka prije uvjeta kada zamke mogu detektirati transport, dok su zamke davale bolje i veće podatke o nosivosti pri posmičnom naprezanju od onih koje su davali kanali. Definiranjem faza transporta materijala i kombinacijom podataka iz kanala i zamki dalo je podloge za bolje razumijevanje ranih faza trasnporta materijala [14].



Slika 6. Eksperimentalni uređaji za mjerenje: a) portabilni kanal, b) Birkbeck-tip zamka za transport čestica na dnu vode [14]

Zaid i drugi 2019. Godine su proveli istraživanje koje se fokusiralo na analizu karakteristika turbulentne brzine, procjeniti ukupno posmično naprezanje na korito te količinu i brzinu prijenosa materijala u području oko stupa mosta na riječnom koritu. Rezultati njihovog istraživanja potvrđuje upotrebljivost numeričkih modela vezanih za podlokavanje i graničnu brzinu, radi dobrog slaganja rezultata numeričkih modela i rezultata dostupnih eksperimentalnih podataka. Ishod ovog istraživanja može se koristiti kao podloga za razvijanje budućih dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih numeričkih modela turbulentnog toka [15]

Eksperimentalnu analizu granične brzine toka za jednoliku i gradiranu vrstu sedimenta istraživali su Khorsavi i drugi, godine 2021. Fokus njihovog istraživanja bilo je proučavanje posmičnog naprezanja pri graničnoj brzini. Različiti eksperimenti provedeni su u hidrauličkom laboratoriju na Sveučilištu Guilan, u 12 metara dugom cjevovodu za recirkulaciju vode sa staklenim zidovima, s ciljem određivanja hidrauličkih parametra vezanih za graničnu brzinu toka. Eksperimenti su se provodili na gradiranom sedimentu te na uglatom i zaobljenom jednolikom sedimentu. Rezultati ukazuju da s povećanjem Reynoldsovog broja, kritična brzina smicanja zrna raste linerano. Također, rezultati su pokazali da uglati sediment ima veću kritičnu brzinu posmika od zaobljenog sedimenta u uvjetima granične brzine toka. Ishod istraživanja daje jasniji uvid u interakciji početnog kretanja sedimenta i karakteristikama materijala, kao i bolje razumijevanje razlike ponašanja sedimenta različite geometrije pri uvjetima granične brzine toka [16].



Slika 7. Skica eksperimentalnog cjevovoda za recirkulaciju vode [16]

---

## 4. METODOLOGIJA

Pomoću ADVP uređaja u recirkulirajućem hidrauličkom kanalu čija je frekvencija 100 Hz kroz 12 minuta mjerenje prikupljeno je 72000 podataka na svakoj od 30 mjernih stanica što je sve skupa 2160000 podataka za brzine  $u$ ,  $v$  i  $w$ . Podatci su tablično prikazani u programu Excel, gdje su i obrađivani. Za svaku od 30 stanica izračunali smo srednju brzinu ( $u,v,w$ ). Od svakog podatka brzine oduzeli smo srednju brzinu ovisno kojoj su mjernoj stanici odgovarali kako bi dobili fluktuacije brzina. Za fluktuacije brzina smjerova „ $u$ ,  $v$ ,  $w$ “ izračunali smo srednju fluktaciju brzine za svaku od 30 stanica ADVP uređaja. Srednje fluktuacije brzina su nam potrebne kako bismo izračunali turbulentnu kinetičku energiju (TKE), Reynoldsova posmična naprezanja  $RSS_{u,w}$  i  $RSS_{v,w}$ . Podatci fluktuacije brzina kvadrirani su te je izračunata njihova srednja vrijednost kako bismo izračunali TKE za svaku mjernu stanicu pomoću formule:

$$TKE = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

Kako bi dobili vrijednosti  $RSS_{u,w}$  pomnožili smo svaku fluktaciju brzine  $u$  sa svakom pripadajućom fluktacijom brzine  $w$ . Za svaku stanicu izračunali smo srednju vrijednost  $RSS_{u,w}$ . Vrijednosti  $RSS_{v,w}$  dobili smo množenjem svake fluktaacije brzine  $v$  sa svakom pripadajućom fluktacijom brzine  $w$ . Izračunali smo srednje vrijednosti  $RSS_{v,w}$  za svaku mjernu stanicu.

$$RSS_{u,w} = \tau_{u,w} = \overline{u'} \times \overline{w'}$$

$$RSS_{v,w} = \tau_{v,w} = \overline{v'} \times \overline{w'}$$

Kako bi dobili bolje razumijevanje dubine na kojoj se mjerne stanice nalaze te na kojoj hidraulički parametri djeluju, izračunali smo omjer izmjerenih udaljenosti ćelija  $y$  i srednju vrijednost izmjerenih udaljenosti mjerne stanice od korita  $h$ . Što se više omjer približava vrijednosti 1, mjerna stanica se nalazi na manjoj dubini.

Podatke obrađujemo u osam slučajeva gdje na ADVP uređaj djeluje osam različitih protoka  $Q$ . Pomoću dobivenih rezultata obrade podataka dobit ćemo uvid ponašanja eksperimentalnog riječnog korita pri uvjetima granične brzine toka. Grafičkim prikazom pomoću programa Excel prikazat ćemo dobivene vrijednosti parametara te iz njih očitati i pretpostaviti pri kojem intenzitetu protoka  $Q$  je došlo do erozije, kada je započelo te u kakvom intenzitetu je djelovalo.

## 5. REZULTATI

U nastavku su prikazani rezultati eksperimenta provedenog u hidrauličkom kanalu laboratorija zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Podaci su mjereni pomoću ADVP uređaja na 30 mjernih stanica. (Q1 = 10 l/s; Q2 = 15 l/s; Q3 = 20 l/s; Q4 = 25 l/s; Q5 = 30 l/s; Q6 = 35 l/s; Q7 = 40 l/s; Q8 = 45 l/s). Nakon mjerenja u hidrauličkom kanalu, podaci su obrađeni i tablični prikazani u programu Excel gdje se računaju njihove srednje vrijednosti na svakoj mjernoj ćeliji. Obrađeni podatci su: omjer udaljenosti stanice  $y$  i srednje vrijednosti udaljenost korita od mjerne stanice  $h$ , srednje brzine ( $u, v, w$ ), srednja Reynoldsova posmična napreznja  $RSS_{u,w}$  i  $RSS_{v,w}$  i srednja turbulentna kinetička energija TKE. Pomoću dobivenih rezultata možemo bolje razumijeti erozivno djelovanje pri uvjetima granične brzine toka.

Tablica 1. Prikaz rezultata za protok Q1

	y/h	u (srednja brzina) [mm/s]	v (srednja brzina) [mm/s]	w (srednja brzina) [mm/s]	TKE [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [mPa]	RSS (v,w) [mPa]
1	0,44986	-82,41	-8,18	-2,94	0,080	-0,092	-0,121
2	0,46131	-94,06	-5,74	-2,99	0,068	0,107	0,070
3	0,47277	-104,63	-7,27	-2,93	0,056	0,126	0,049
4	0,48423	-111,76	-6,22	-2,56	0,043	-0,035	0,022
5	0,49568	-118,61	-6,52	-2,87	0,032	0,201	0,074
6	0,50714	-121,17	-6,57	-2,76	0,025	0,350	0,009
7	0,51860	-122,50	-7,21	-2,78	0,024	0,509	0,027
8	0,53006	-120,92	-8,06	-2,56	0,023	1,002	0,041
9	0,54151	-124,06	-7,05	-2,73	0,019	0,869	0,041
10	0,55297	-124,04	-6,90	-3,39	0,016	0,234	0,028
11	0,56443	-125,74	-8,44	-3,73	0,016	-0,005	0,054
12	0,57588	-122,30	-7,92	-3,27	0,025	0,793	0,056
13	0,58734	-123,52	-7,88	-3,18	0,027	1,112	0,030
14	0,59880	-124,30	-8,03	-3,16	0,024	0,935	0,043
15	0,61026	-122,84	-7,85	-3,71	0,018	0,448	0,036
16	0,62171	-123,72	-6,93	-3,70	0,012	0,107	0,033
17	0,63317	-122,94	-6,98	-3,87	0,011	-0,087	0,041
18	0,64463	-120,58	-6,58	-3,88	0,010	0,012	0,026
19	0,65608	-116,96	-6,14	-3,86	0,016	0,136	0,021
20	0,66754	-109,81	-5,76	-3,91	0,027	-0,276	0,039
21	0,67900	-99,50	-5,70	-4,10	0,038	-0,183	0,102
22	0,69046	-80,06	-5,91	-2,97	0,059	0,731	0,035
23	0,70191	-63,42	-6,62	-2,17	0,083	1,449	0,015
24	0,71337	-44,49	-4,28	-3,46	0,095	-0,542	-0,020
25	0,72483	-34,95	-2,88	-3,31	0,102	-0,271	-0,032
26	0,73628	-30,66	-4,15	-3,47	0,106	-0,590	-0,030
27	0,74774	-27,20	-2,92	-3,65	0,107	-0,689	0,040
28	0,75920	-32,79	-1,10	-2,83	0,105	-0,685	0,126
29	0,77066	-31,91	-3,80	-2,89	0,103	-0,553	-0,036
30	0,78211	-34,85	-2,97	-3,11	0,100	-0,248	0,141

Tablica 2. Prikaz rezultata za protok Q2

	y/h	u (srednja brzina) [mm/s]	v (srednja brzina) [mm/s]	w (srednja brzina) [mm/s]	TKE[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [mPa]	RSS (v,w) [mPa]
1	0,45461	-160,06	1,48	-3,05	0,013	0,026	-0,525
2	0,46620	-162,57	1,84	-3,39	0,009	-0,014	-0,348
3	0,47778	-163,50	1,54	-3,12	0,007	-0,013	-0,236
4	0,48937	-163,69	1,45	-2,66	0,005	-0,001	-0,119
5	0,50096	-162,20	1,42	-2,87	0,003	-0,010	-0,030
6	0,51254	-160,88	1,69	-3,27	0,002	-0,003	0,011
7	0,52413	-160,60	1,59	-3,24	0,002	-0,006	0,047
8	0,53571	-159,64	1,04	-3,43	0,002	-0,006	0,066
9	0,54730	-158,69	0,87	-3,62	0,002	-0,003	0,086
10	0,55889	-158,14	0,48	-4,02	0,002	0,001	0,043
11	0,57047	-157,60	0,38	-4,39	0,002	-0,001	0,053
12	0,58206	-157,36	0,40	-4,58	0,001	-0,002	0,085
13	0,59364	-156,82	0,35	-4,77	0,002	-0,003	0,086
14	0,60523	-156,31	0,51	-5,02	0,002	-0,004	0,086
15	0,61682	-155,87	0,27	-5,14	0,007	-0,011	0,042
16	0,62840	-154,54	-0,34	-5,45	0,009	-0,013	0,000
17	0,63999	-152,89	-0,53	-5,67	0,008	-0,015	0,129
18	0,65158	-151,46	-0,47	-6,01	0,005	-0,009	0,079
19	0,66316	-149,38	-1,58	-6,21	0,003	-0,027	0,293
20	0,67475	-147,77	-2,43	-6,45	0,002	-0,041	0,161
21	0,68633	-145,95	-2,72	-6,89	0,002	-0,041	0,133
22	0,69792	-144,31	-3,19	-7,38	0,002	-0,041	0,052
23	0,70951	-142,29	-3,68	-7,86	0,003	-0,033	0,141
24	0,72109	-141,03	-4,02	-8,23	0,003	-0,035	0,053
25	0,73268	-139,68	-4,33	-8,58	0,003	-0,028	0,048
26	0,74426	-137,48	-4,18	-8,70	0,004	-0,029	0,232
27	0,75585	-133,52	-4,23	-8,80	0,008	-0,015	0,507
28	0,76744	-126,73	-4,22	-9,10	0,020	0,012	-0,167
29	0,77902	-112,35	-4,25	-8,68	0,035	-0,061	-0,584
30	0,79061	-94,69	-3,87	-8,30	0,050	-0,028	-1,448

Tablica 3. 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 <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [mPa]	RSS (v,w) [mPa]
1	0,45129	-115,35	-6,77	2,85	0,120	3,915	-0,290
2	0,46278	-116,66	-6,29	0,44	0,093	3,819	-0,221
3	0,47427	-117,27	-6,50	0,00	0,073	3,291	-0,155
4	0,48577	-127,48	-9,79	0,22	0,052	2,605	-0,173
5	0,49726	-131,02	-12,57	-0,08	0,037	2,650	-0,032
6	0,50875	-131,54	-12,39	-0,36	0,027	2,157	-0,005
7	0,52025	-133,85	-11,61	-0,85	0,020	1,731	0,000
8	0,53174	-133,93	-10,78	-1,21	0,015	1,111	0,000
9	0,54323	-134,66	-10,56	-0,75	0,011	0,843	0,019
10	0,55473	-134,59	-10,67	-0,94	0,008	0,739	0,000
11	0,56622	-133,41	-9,90	-1,10	0,006	0,697	0,009
12	0,57772	-134,19	-10,17	-1,03	0,005	0,629	0,011
13	0,58921	-134,04	-8,96	-0,95	0,004	0,533	0,001
14	0,60070	-133,79	-8,63	-0,80	0,004	0,422	0,002
15	0,61220	-133,80	-9,16	-0,61	0,004	0,365	0,006
16	0,62369	-133,41	-9,40	-0,55	0,004	0,362	-0,003
17	0,63518	-133,03	-9,14	-0,49	0,004	0,357	-0,006
18	0,64668	-132,13	-9,37	-0,36	0,004	0,345	-0,002
19	0,65817	-132,31	-9,59	-0,30	0,005	0,395	0,009
20	0,66966	-131,23	-9,51	-0,27	0,006	0,522	-0,005
21	0,68116	-129,52	-10,21	-0,30	0,007	0,562	-0,018
22	0,69265	-128,94	-10,09	0,05	0,009	0,704	-0,010
23	0,70414	-129,06	-11,44	0,38	0,012	0,892	-0,002
24	0,71564	-132,78	-11,52	1,62	0,016	0,889	0,014
25	0,72713	-127,64	-10,60	1,34	0,019	0,884	-0,015
26	0,73863	-123,57	-8,96	0,25	0,025	1,149	-0,092
27	0,75012	-121,74	-8,99	0,74	0,030	1,211	-0,072
28	0,76161	-118,43	-11,50	0,85	0,037	1,519	-0,059
29	0,77311	-116,34	-8,01	1,16	0,044	1,600	-0,116
30	0,78460	-114,41	-10,94	1,24	0,052	1,925	-0,009

Tablica 4. Prikaz rezultata za protok Q4

y/h	u (srednja brzina) [mm/s]	v (srednja brzina) [mm/s]	w (srednja brzina) [mm/s]	TKE [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [mPa]	RSS (v,w) [mPa]	
1	0,45490	-151,68	-4,62	1,612	0,057	-1,108	0,075
2	0,46648	-152,85	-2,66	0,906	0,036	-0,271	0,004
3	0,47807	-157,39	-0,65	1,295	0,024	-0,151	-0,022
4	0,48966	-158,34	-0,78	1,669	0,015	0,037	-0,015
5	0,50124	-159,48	-0,63	1,980	0,010	0,087	-0,005
6	0,51283	-159,08	0,75	1,830	0,006	0,082	-0,019
7	0,52441	-159,00	0,60	2,029	0,004	0,092	0,003
8	0,53600	-158,68	0,61	2,249	0,003	0,105	-0,006
9	0,54758	-158,17	0,59	2,251	0,002	0,082	-0,004
10	0,55917	-157,86	0,50	2,164	0,002	0,072	0,002
11	0,57075	-158,04	0,55	2,054	0,001	0,077	0,002
12	0,58234	-157,84	0,56	2,090	0,001	0,079	0,004
13	0,59393	-157,79	0,72	2,092	0,001	0,065	0,003
14	0,60551	-157,63	0,83	2,179	0,001	0,062	0,004
15	0,61710	-157,26	0,79	2,225	0,001	0,060	0,002
16	0,62868	-156,82	0,71	2,236	0,001	0,052	-0,002
17	0,64027	-156,11	0,48	2,217	0,001	0,051	-0,006
18	0,65185	-155,34	0,31	2,278	0,001	0,045	-0,006
19	0,66344	-154,42	0,07	2,292	0,001	0,041	-0,009
20	0,67502	-152,83	-0,10	2,213	0,001	0,034	-0,009
21	0,68661	-151,80	-0,35	2,159	0,001	0,024	-0,011
22	0,69820	-150,89	-0,34	2,039	0,002	0,018	-0,009
23	0,70978	-149,89	-0,24	1,838	0,002	0,008	-0,003
24	0,72137	-149,00	-0,33	1,615	0,003	-0,042	-0,008
25	0,73295	-148,65	-0,36	1,696	0,004	-0,082	-0,003
26	0,74454	-147,59	-0,69	1,624	0,005	-0,148	-0,006
27	0,75612	-146,00	-0,32	1,543	0,007	-0,203	0,000
28	0,76771	-144,19	0,19	1,532	0,009	-0,277	-0,011
29	0,77929	-141,48	-0,05	1,353	0,011	-0,346	-0,007
30	0,79088	-139,11	0,80	1,048	0,014	-0,385	0,005

Tablica 5. Prikaz rezultata za protok Q5

y/h	u (srednja brzina) [mm/s]	v (srednja brzina) [mm/s]	w (srednja brzina) [mm/s]	TKE [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [mPa]	RSS (v,w) [mPa]	
1	0,45097	-147,72	-17,23	-1,24	0,002	0,278	-0,019
2	0,46248	-168,39	-17,30	-2,25	0,003	0,395	-0,012
3	0,47398	-190,24	-17,61	-2,43	0,003	0,502	-0,012
4	0,48548	-210,11	-18,24	-2,44	0,003	0,610	0,004
5	0,49698	-226,83	-18,37	-2,59	0,003	0,747	0,010
6	0,50848	-240,94	-18,25	-2,35	0,003	0,908	0,014
7	0,51999	-251,46	-18,50	-1,71	0,003	1,063	0,016
8	0,53149	-258,13	-18,57	-0,99	0,003	1,213	0,022
9	0,54299	-260,82	-18,33	-0,83	0,003	1,319	0,025
10	0,55449	-261,51	-17,87	-0,96	0,002	1,400	0,029
11	0,56599	-261,72	-16,91	-1,25	0,002	1,435	0,036
12	0,57750	-262,06	-15,80	-1,43	0,002	1,468	0,046
13	0,58900	-262,01	-14,89	-1,68	0,002	1,501	0,043
14	0,60050	-261,83	-14,08	-2,10	0,002	1,497	0,049
15	0,61200	-261,32	-13,33	-2,43	0,002	1,516	0,046
16	0,62350	-260,55	-12,47	-2,87	0,002	1,541	0,045
17	0,63500	-259,11	-11,63	-3,34	0,002	1,564	0,052
18	0,64651	-257,19	-10,77	-3,93	0,002	1,554	0,050
19	0,65801	-254,86	-9,86	-4,34	0,002	1,571	0,054
20	0,66951	-251,97	-9,05	-4,79	0,003	1,578	0,052
21	0,68101	-248,94	-8,21	-5,35	0,003	1,589	0,060
22	0,69251	-245,30	-7,30	-5,85	0,003	1,629	0,056
23	0,70402	-241,66	-6,54	-6,30	0,003	1,678	0,064
24	0,71552	-239,36	-5,76	-6,90	0,003	1,679	0,070
25	0,72702	-237,20	-5,00	-7,38	0,003	1,661	0,068
26	0,73852	-233,98	-3,94	-7,72	0,004	1,653	0,072
27	0,75002	-230,78	-3,00	-8,23	0,004	1,605	0,070
28	0,76153	-227,38	-2,09	-8,75	0,004	1,563	0,052
29	0,77303	-223,01	-1,16	-9,30	0,004	1,519	0,053
30	0,78453	-220,27	-0,30	-10,10	0,004	1,444	0,037

Tablica 6. Prikaz rezultata za protok Q6

stupac	y/h	u (srednja brzina) [mm/s]	v (srednja brzina) [mm/s]	w (srednja brzina) [mm/s]	TKE [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [mPa]	RSS (v,w) [mPa]
1	0,48320	-240,30	-8,64	3,03	0,007	-0,104	0,052
2	0,49552	-255,40	-9,40	3,82	0,006	0,014	0,064
3	0,50785	-268,71	-10,12	5,67	0,005	0,106	0,071
4	0,52017	-276,90	-11,23	7,57	0,005	0,220	0,061
5	0,53249	-282,01	-11,92	8,79	0,004	0,324	0,050
6	0,54482	-284,31	-11,71	9,49	0,004	0,390	0,046
7	0,55714	-284,82	-11,96	10,39	0,004	0,434	0,043
8	0,56947	-283,02	-12,30	11,23	0,004	0,469	0,046
9	0,58179	-279,83	-12,01	11,69	0,004	0,512	0,050
10	0,59411	-276,30	-11,54	11,89	0,004	0,551	0,046
11	0,60644	-272,57	-10,79	12,10	0,004	0,595	0,047
12	0,61876	-268,77	-9,85	12,52	0,004	0,627	0,057
13	0,63108	-264,28	-9,14	13,01	0,004	0,665	0,057
14	0,64341	-259,39	-8,44	13,55	0,004	0,699	0,046
15	0,65573	-253,88	-7,69	14,21	0,004	0,732	0,026
16	0,66806	-247,45	-7,24	14,84	0,004	0,758	-0,026
17	0,68038	-240,55	-6,79	15,38	0,004	0,786	-0,077
18	0,69270	-232,98	-6,18	15,99	0,005	0,814	-0,118
19	0,70503	-224,30	-5,73	16,70	0,005	0,827	-0,157
20	0,71735	-214,15	-5,60	17,68	0,006	0,815	-0,202
21	0,72967	-202,20	-6,03	18,89	0,006	0,749	-0,240
22	0,74200	-189,68	-6,33	20,20	0,006	0,657	-0,261
23	0,75432	-177,99	-7,04	21,15	0,006	0,535	-0,272
24	0,76665	-166,94	-8,24	21,54	0,007	0,401	-0,272
25	0,77897	-157,41	-8,92	21,71	0,007	0,283	-0,284
26	0,79129	-148,43	-9,60	21,68	0,007	0,176	-0,266
27	0,80362	-140,91	-9,71	21,41	0,007	0,111	-0,248
28	0,81594	-133,76	-9,45	21,26	0,007	0,070	-0,212
29	0,82826	-127,58	-8,31	21,34	0,007	0,048	-0,181
30	0,84059	-122,84	-6,87	21,47	0,007	0,005	-0,150

Tablica 7. Prikaz rezultata za protok Q7

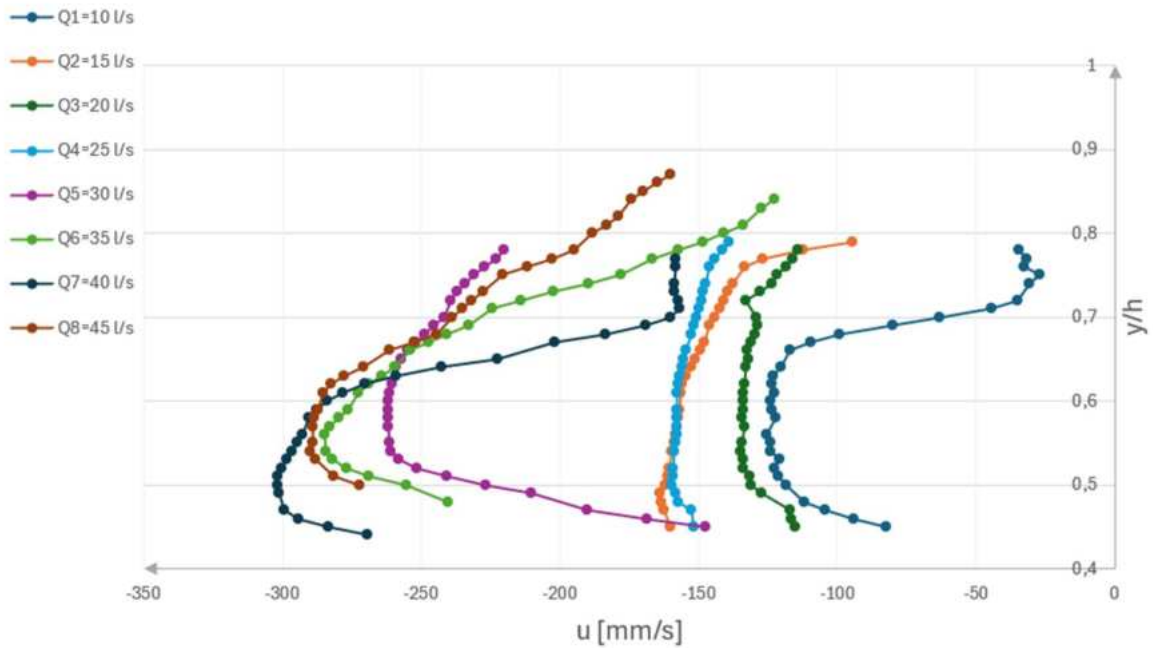
	y/h	u (srednja brzina) [mm/s]	v (srednja brzina) [mm/s]	w (srednja brzina) [mm/s]	TKE [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [mPa]	RSS (v,w) [mPa]
1	0,44086	-269,52	-16,97	-1,39	0,005	0,101	0,027
2	0,45210	-283,57	-16,84	-1,72	0,005	0,200	0,032
3	0,46334	-294,10	-17,05	-0,99	0,004	0,247	0,036
4	0,47458	-299,20	-17,97	-0,22	0,004	0,295	0,033
5	0,48582	-301,05	-18,46	-0,21	0,004	0,332	0,029
6	0,49706	-301,66	-18,75	-0,44	0,003	0,378	0,029
7	0,50830	-301,64	-19,56	-0,44	0,003	0,392	0,030
8	0,51954	-300,44	-20,20	-0,44	0,003	0,407	0,032
9	0,53078	-298,36	-20,56	-0,76	0,003	0,418	0,035
10	0,54202	-296,39	-20,65	-1,20	0,003	0,434	0,035
11	0,55326	-294,49	-20,62	-1,49	0,003	0,455	0,045
12	0,56450	-292,67	-20,43	-1,57	0,003	0,470	0,047
13	0,57574	-290,28	-20,22	-1,64	0,003	0,480	0,052
14	0,58698	-287,42	-20,36	-1,75	0,003	0,490	0,050
15	0,59822	-283,62	-20,54	-1,99	0,003	0,491	0,041
16	0,60946	-278,07	-20,40	-2,48	0,003	0,493	0,021
17	0,62070	-270,33	-20,43	-3,34	0,003	0,476	-0,013
18	0,63194	-258,83	-20,27	-4,78	0,003	0,441	-0,042
19	0,64317	-242,61	-19,87	-6,71	0,003	0,408	-0,068
20	0,65441	-222,46	-19,26	-8,69	0,004	0,378	-0,089
21	0,66565	-201,97	-18,66	-9,38	0,004	0,391	-0,099
22	0,67689	-183,50	-17,43	-8,27	0,005	0,414	-0,101
23	0,68813	-168,87	-16,23	-5,79	0,005	0,400	-0,093
24	0,69937	-159,97	-14,86	-2,86	0,005	0,374	-0,069
25	0,71061	-156,84	-13,33	-0,14	0,005	0,347	-0,034
26	0,72185	-157,31	-11,98	1,70	0,004	0,328	0,018
27	0,73309	-158,54	-11,04	2,60	0,004	0,336	0,053
28	0,74433	-158,77	-10,42	2,43	0,004	0,343	0,076
29	0,75557	-158,44	-10,26	1,38	0,004	0,374	0,078
30	0,76681	-158,46	-10,27	0,01	0,004	0,396	0,062



Tablica 8. Prikaz rezultata za protok Q8

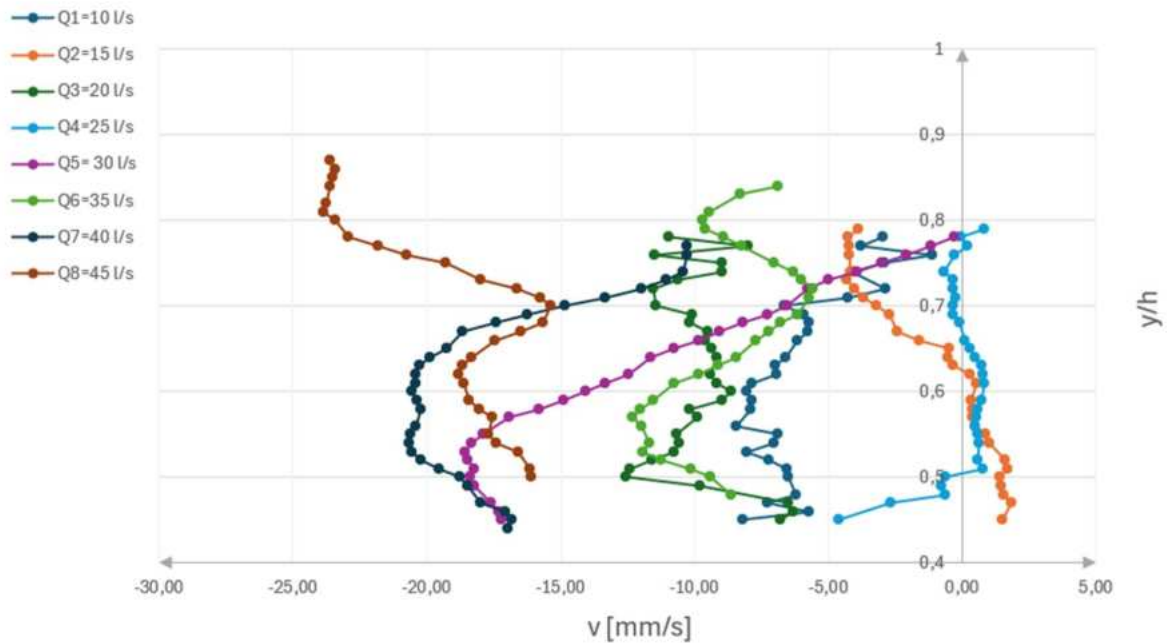
	y/h	u (srednja brzina) [mm/s]	v (srednja brzina) [mm/s]	w (srednja brzina) [mm/s]	TKE [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [mPa]	RSS (v,w) [mPa]
1	0,50274	-272,08	-16,09	4,26	0,005	0,022	0,009
2	0,51556	-281,36	-16,15	4,39	0,004	0,122	0,004
3	0,52838	-288,06	-16,60	5,87	0,004	0,190	0,007
4	0,54120	-289,92	-17,41	7,71	0,004	0,248	0,012
5	0,55402	-289,13	-17,69	9,03	0,004	0,301	0,006
6	0,56685	-288,89	-17,55	10,00	0,003	0,338	0,005
7	0,57967	-288,52	-18,02	10,83	0,003	0,354	0,007
8	0,59249	-287,02	-18,44	11,29	0,003	0,345	0,011
9	0,60531	-285,03	-18,63	11,19	0,003	0,323	0,016
10	0,61813	-282,27	-18,82	11,11	0,003	0,317	0,024
11	0,63096	-277,59	-18,69	11,45	0,003	0,310	0,027
12	0,64378	-270,52	-18,34	12,15	0,003	0,295	0,025
13	0,65660	-261,44	-17,44	12,73	0,003	0,237	0,029
14	0,66942	-252,24	-16,48	13,29	0,004	0,169	0,044
15	0,68224	-244,44	-15,68	13,57	0,004	0,109	0,046
16	0,69507	-238,70	-15,37	13,50	0,004	0,056	0,052
17	0,70789	-234,95	-15,75	13,21	0,004	0,033	0,041
18	0,72071	-232,04	-16,63	13,01	0,004	0,026	0,016
19	0,73353	-227,61	-17,98	13,02	0,004	-0,007	-0,013
20	0,74635	-220,54	-19,31	13,26	0,004	-0,035	-0,036
21	0,75918	-211,79	-20,75	13,53	0,004	-0,084	-0,044
22	0,77200	-202,75	-21,82	13,75	0,004	-0,119	-0,047
23	0,78482	-194,87	-22,92	13,88	0,004	-0,148	-0,043
24	0,79764	-188,27	-23,41	13,92	0,004	-0,171	-0,042
25	0,81047	-183,08	-23,87	13,94	0,004	-0,191	-0,041
26	0,82329	-178,69	-23,76	13,78	0,005	-0,197	-0,036
27	0,83611	-174,27	-23,63	13,48	0,005	-0,187	-0,023
28	0,84893	-169,95	-23,52	13,16	0,005	-0,190	-0,018
29	0,86175	-164,81	-23,42	12,81	0,005	-0,194	-0,003
30	0,87458	-160,28	-23,63	12,64	0,005	-0,195	-0,011

Izmjerene su komponente srednjih brzina u, v i w za svih osam protoka i grafički prikazane u vrijednostima mm/s na apcisi. Na odrinatu se nalazi omjer udaljenosti ćelije y i srednje vrijednosti udaljenosti korita od mjerne stanice h, pomoću kojeg lakše uspoređujemo promatrane vrijednosti na istoj ljestvici.



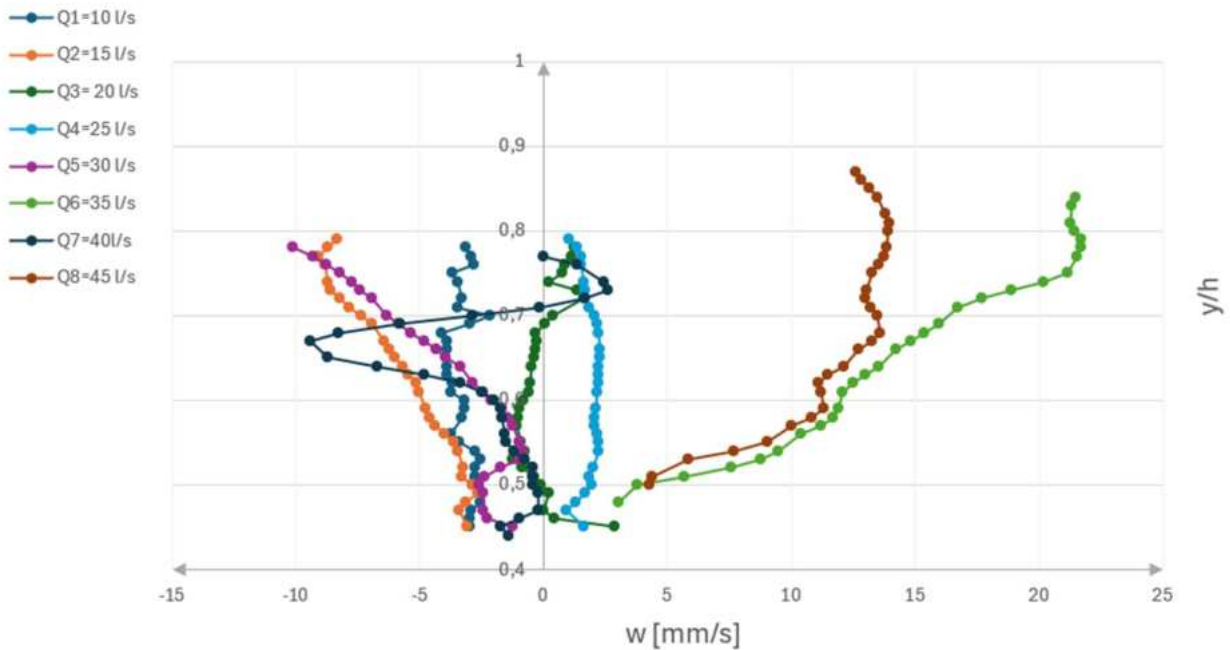
Slika 8. Grafički prikaz srednje brzine  $u$  [mm/s]

Na grafičkom prikazu srednje brzine „ $u$ “ mogu se uočiti manje vrijednosti pri protocima slabijeg intenziteta, dok pri protocima jačeg intenziteta, brzina „ $u$ “ poprima veću vrijednost. Srednja brzina „ $u$ “ poprima najmanju vrijednost pri protoku  $Q_1 = 10$  l/s, a najveću pri protoku  $Q_7 = 40$  l/s.



Slika 9. Grafički prikaz srednje brzine  $v$  [mm/s]

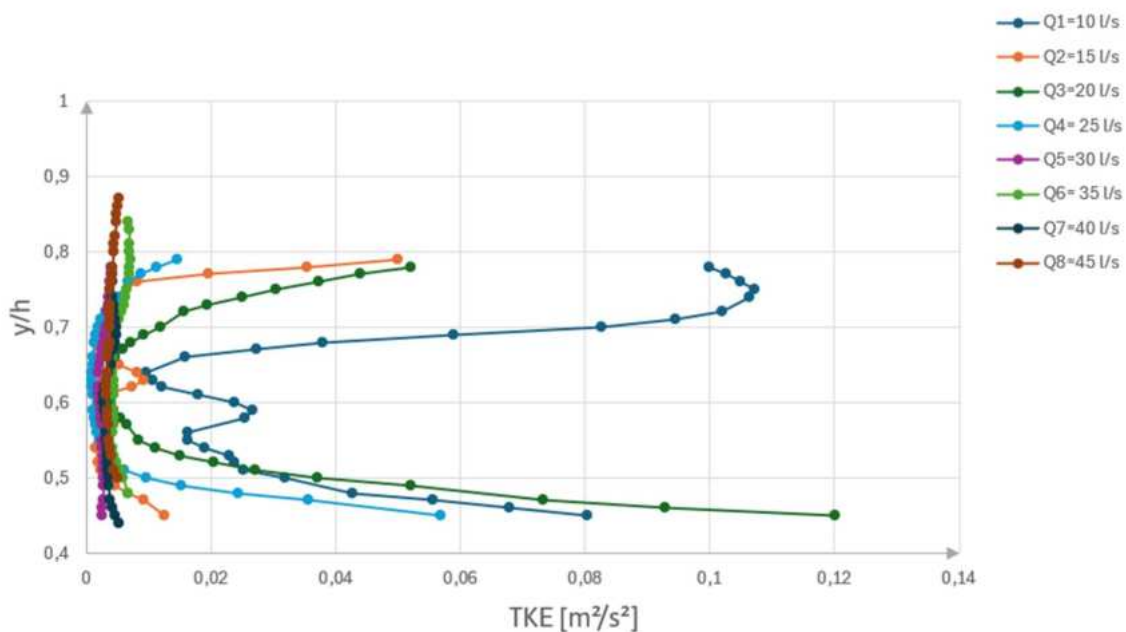
Na grafičkom prikazu srednje brzine „ $v$ “ možemo uočiti manje vrijednosti, čiji je postotak 62,67%, pri protocima slabijeg intenziteta, dok su vrijednosti pri protocima jačeg intenziteta veće. Srednja brzina „ $v$ “ poprima najveću vrijednost pri protoku  $Q_8 = 45 \text{ l/s}$ , a najmanju pri protoku  $Q_4 = 25 \text{ l/s}$ .



Slika 10. Grafički prikaz srednje brzine  $w$  [mm/s]

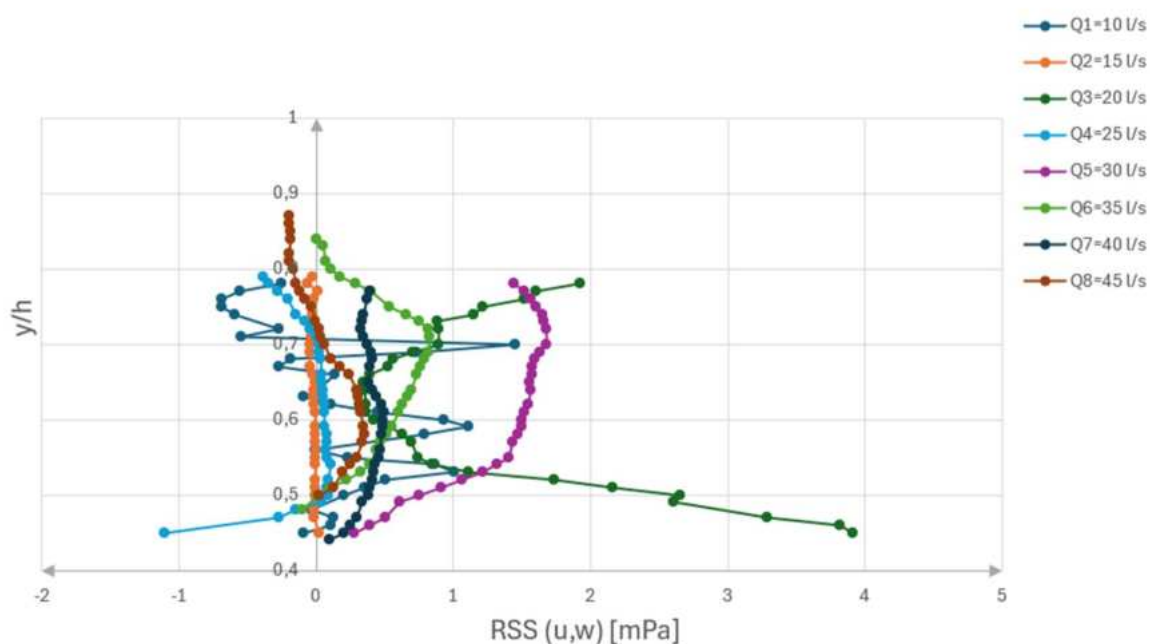
Kao i u slučajevima prethodnih brzina, srednja brzina „ $w$ “ najveće vrijednosti poprima pri protocima većeg intenziteta, s najvećom vrijednosti u protoku  $Q_6 = 35 \text{ l/s}$ , dok najmanju vrijednost poprima pri protoku  $Q_3 = 20 \text{ l/s}$ . Također, srednja brzina „ $w$ “ ima uočljive razlike u orijentacijama pri različitim protocima.

Na idućim grafovima prikazane su turbulentna kinetička energija i Reynoldsova naprezanja u smjerovima „ $u,w$ “ i „ $v,w$ “ na apcisi. Na ordinati se nalazi omjer udaljenosti ćelije  $y$  i srednje vrijednosti udaljenosti korita od mjerne stanice  $h$ . Turbulentna kinetička energija izračunata je pomoću srednjih vrijednosti fluktacija brzina svih 30 ćelija ADVP uređaja u vrijednostima  $\text{m}^2/\text{s}^2$ . Reynoldsovo naprezanja izračunate su množenjem srednjih fluktacija brzina u smjeru toka ( $RSS_{u,w}$ ) te u smjeru okomito od smjera toka ( $RSS_{v,w}$ ) u vrijednostima mPa.

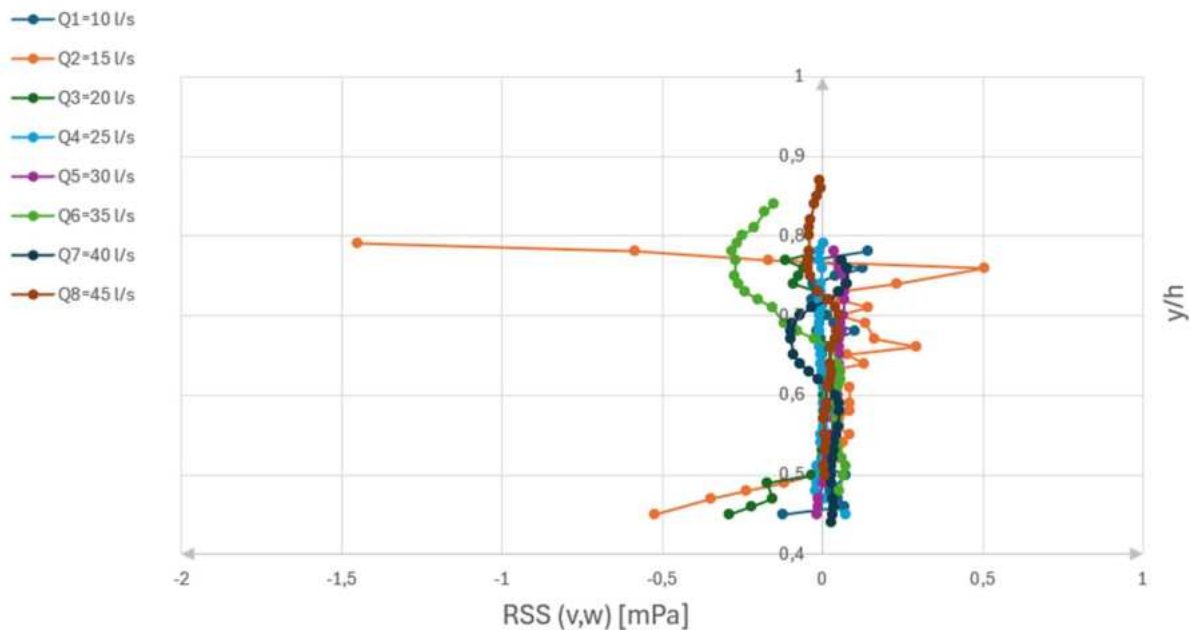


Slika 11. Grafički prikaz srednje vrijednosti TKE [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ]

Na grafičkom prikazu turbulentne kinetičke energije možemo uočiti najveće vrijednosti pri protocima slabijeg intenziteta, s najvećom vrijednosti pri protoku  $Q_3 = 20 \text{ l/s}$ . Krivulja pri protocima  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  poprma oblik slova „C“, dok su krivulje ostalih protoka  $Q_5, Q_6, Q_7$  i  $Q_8$  gotovo konstantne, što ukazuje da je pri većim protocima već došlo do mogućnosti erozije pošto se smanjuje vrijednost TKE radi manjeg otpora.



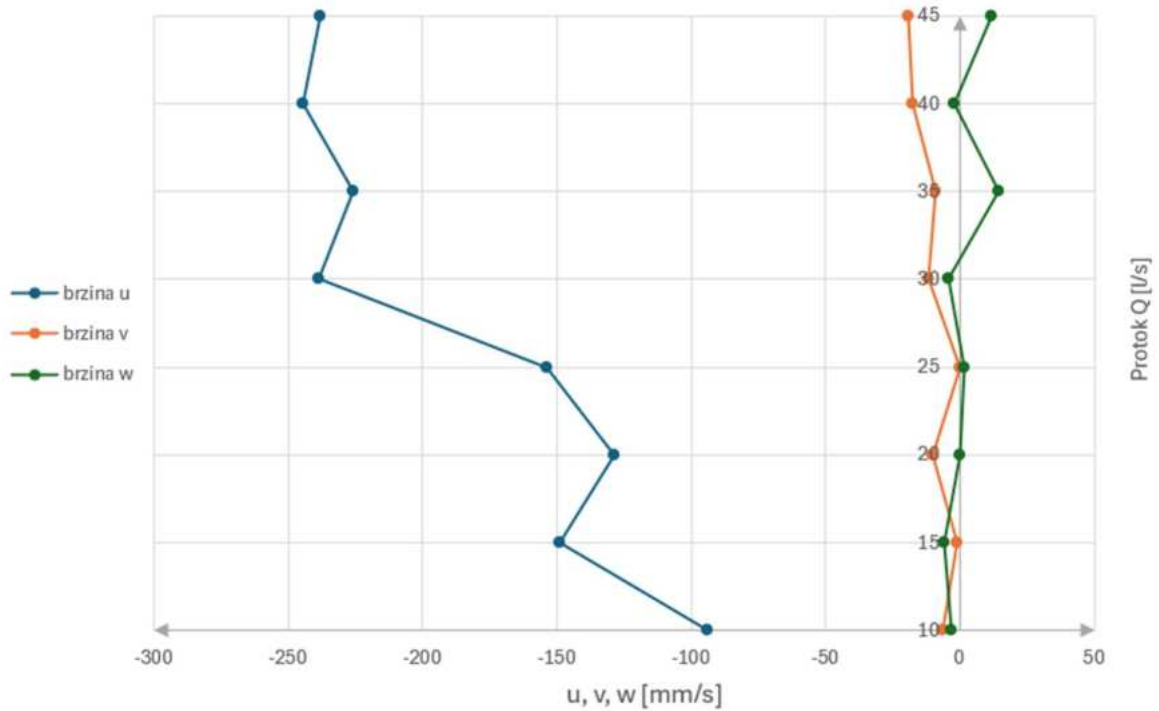
Slika 12. Grafički prikaz srednje vrijednosti RSS (u,w) [mPa]



Slika 13. Grafički prikaz srednje vrijednosti RSS (v,w) [mPa]

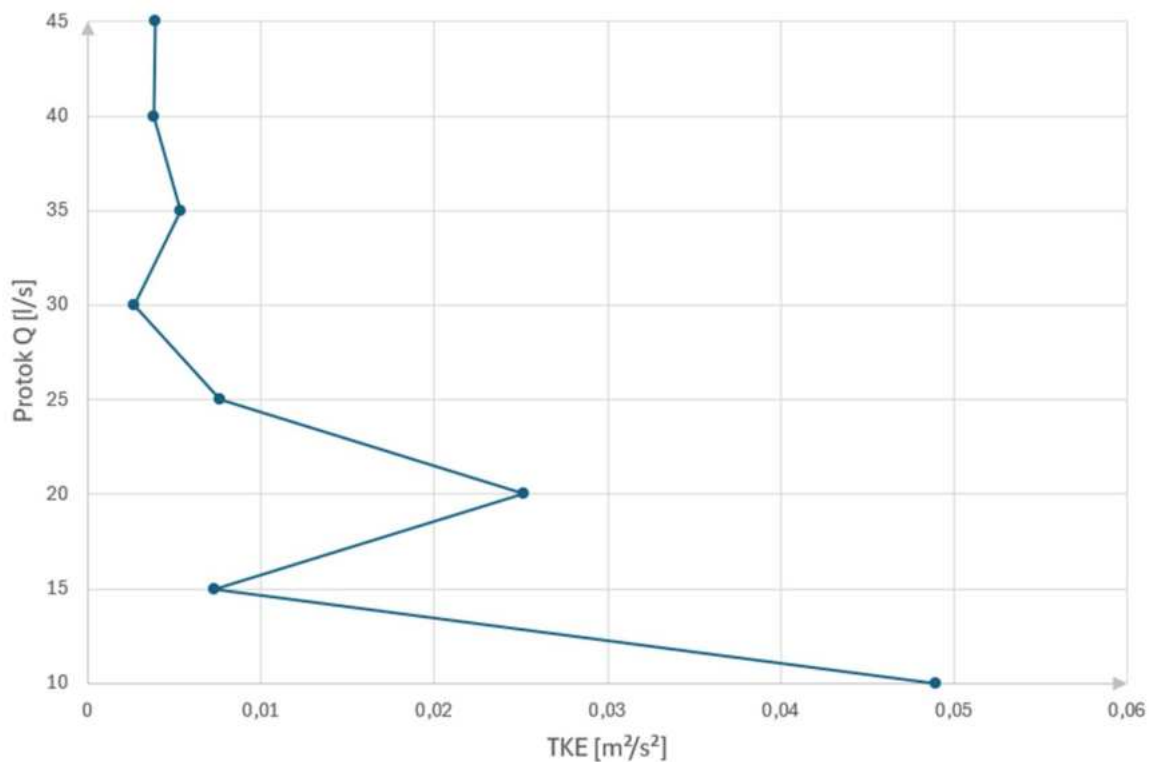
Na grafu Reynoldsovog naprezanja u smjeru „u,w“ uočavamo da poprima najveće vrijednosti pri protocima Q3 i Q5, dok su najmanje vrijednosti pri protocima Q2 i Q4. Reynoldsovo naprezanje u smjeru „v,w“ pri manjoj dubini poprima najveću vrijednost u protoku Q2, a najmanje vrijednosti poprima pri protocima Q4 i Q5. Također, pri protoku Q6 na manjoj dubini uočavamo veće vrijednosti Reynoldsovog naprezanja u smjeru „v,w“ u usporedbi s vrijednostima ostalih protoka.

Na idućim grafovima prikazane su srednje vrijednosti brzina (u, v, w), turbulentne kinetičke energije i Reynoldsovih naprezanja u smjeru „u,w“ i u smjeru „v,w“ po protocima Q.



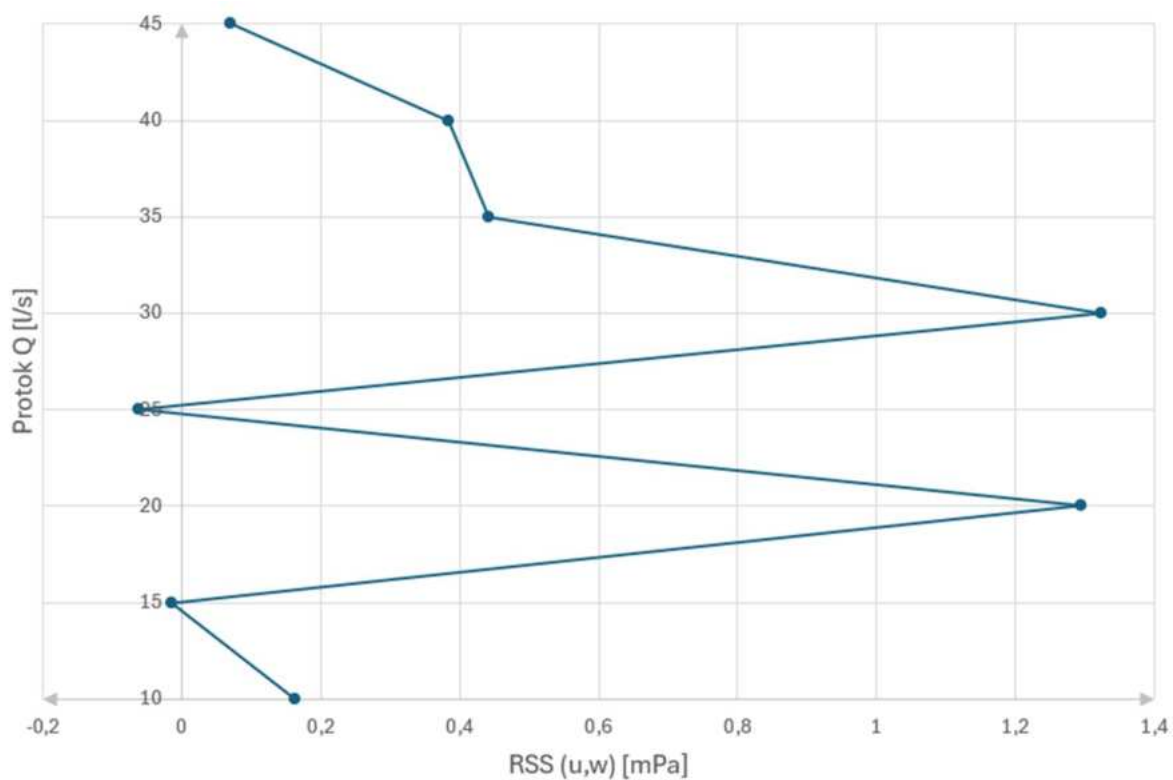
Slika 14. Grafički prikaz srednjih brzina u, v, w po protocima Q

Grafički prikaz srednjih brzina po protocima Q prikazuje da su u svim slučajevima srednje vrijednosti brzina veće kako su protoci većeg intenziteta. Srednja brzina „u“ poprima svoju najveću vrijednost pri protoku  $Q_7 = 40 \text{ l/s}$ , srednja brzina „v“ poprima svoju najveću vrijednost pri protoku  $Q_8 = 45 \text{ l/s}$ , dok srednja brzina „w“ poprima svoju najveću vrijednost pri protoku  $Q_6 = 35 \text{ l/s}$

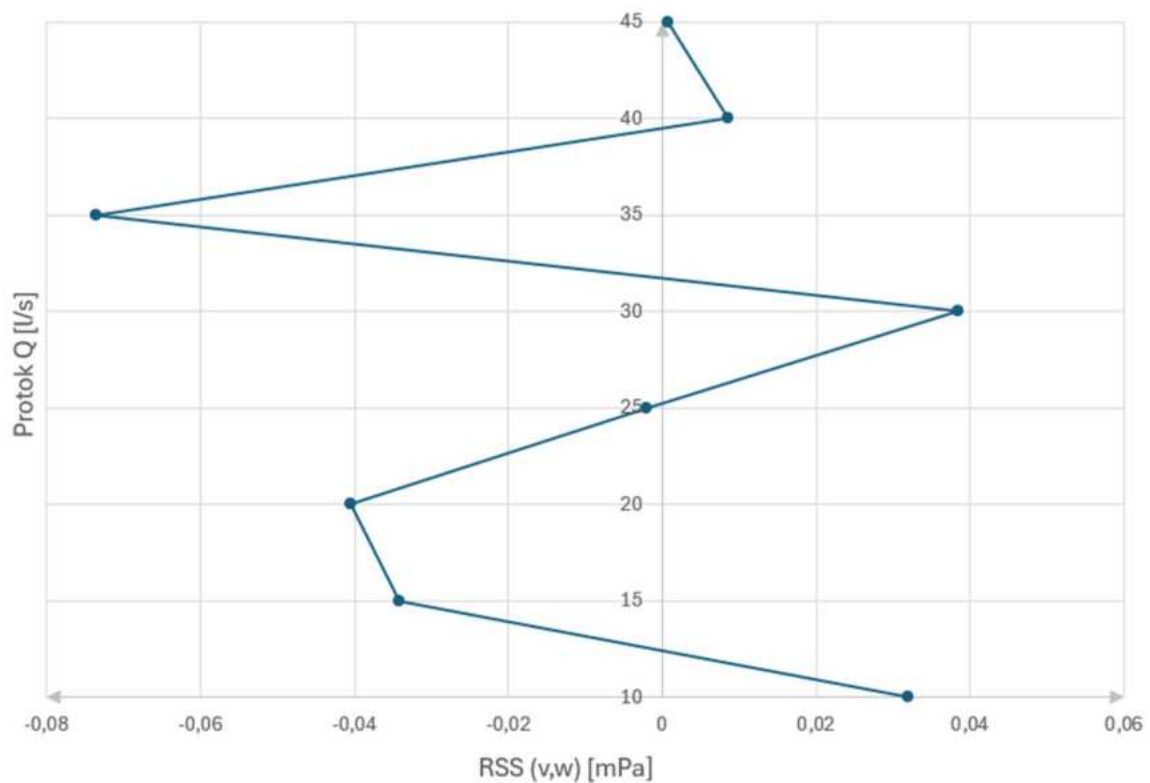


Slika 15. Grafički prikaz srednje turbulente kinetičke energije po protocima Q

Na grafičkom prikazu turbulente kinetičke energije po protocima Q uočavamo da TKE poprima najveću srednju vrijednost pri protoku Q1 = 10 l/s. Srednje vrijednosti TKE smanjuju se kako se protok Q povećava.



Slika 16. Grafički prikaz srednjeg Reynoldsovog napreznja (u,w) po protoku Q



Slika 17. Grafički prikaz srednjeg Reynoldsovog naprezanja (v,w) po protoku Q

Na grafičkom prikazu Reynoldsovih naprezanja po protocima Q uočavamo da Reynoldsovo naprezanje u smjeru toka (u,w) poprima najveću srednju vrijednost pri protocima Q3 = 20 l/s i Q5 = 30 l/s. Reynoldsovo naprezanje okomito na smjeraž toka (v,w) poprima najveću vrijednost pri protoku Q6 = 35 l/s. Možemo zaključiti da su u navedenim protocima veće erozije i veća mogućnost stvaranja vrtloga.



---

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu obrađen je i opisan postupak analize eksperimentalnog profila brzine pri uvjetima granične brzine toka. Granična brzina toka predstavlja brzinu vode koja je potrebna da pokrene sedimentni materijal koji se nalazi na riječnom koritu. Razumijevanje granične brzine toka potrebno je znanje inženjerima pri izvršavanju hidrotehničkih zahvata kao što su: projektiranje hidrotehničkih građevina, uređivanje korita te zaštita konstrukcija od erozije. Eksperiment se provodio u sklopu projekta R3PEAT u hidrauličkom kanalu laboratorija na Građevinskom fakultetu u Zagrebu te su se obrađivali podatci za 8 protoka s različitim intenzitetom. Protoci su djelovali na umanjene modele riječnog korita i riprapp zaštite stupa mosta. Pomoću ADVP uređaja izmjerili smo brzine u smjerovima u, v, w pomoću kojih smo izračunali turbulentnu kinetičku energiju i Reynoldsova naprezanja u smjeru toka i u smjeru okomito od smjera toka. Pomoću navedenih komponenti možemo bolje razumjeti i predvidjeti eroziju dna. Kao primjer možemo uzeti najveću vrijednost Reynoldsovog naprezanja „v,w“ u protoku  $Q_6 = 35$  l/s. Možemo zaključiti da je veće Reynoldsovo naprezanje u smjeru okomito od smjera toka prouzrokovalo veću eroziju dna i vrtloge u toku. Reynoldsovo naprezanje u smjeru toka dobivalo je najveće vrijednosti kod protoka  $Q_3 = 20$  l/s i protoka  $Q_5 = 30$ . Srednja vrijednost brzina u,v,w rasla je po većem intenzitetu protoka dok je srednja vrijednost turbulentne kinetičke energije padala. Rezultati ovog rada daju nam bolji uvid u razumijevanje problema erozije i granične brzine toka te mogu poslužiti kao informacije pri inženjerskim zahvatima u hidrauličkim uvjetima.

---

## POPIS LITERATURE

- [1] Buchanan, T.J. and Somers, W.P., 1969, Discharge Measurements at Gaging Stations: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Chapter A8, p. 1.
- [2] Li, S., Lu, Y., Roelvink, D.J.A., : Adaptive criterion curves describing incipient motion of sediment under wave and current conditions, INTERNATIONAL JOURNAL OF SEDIMENT RESEARCH 36 ( 2021) 5, pp 616-627, DOI :10.1016/J.IJSCR 2021.03.002
- [3] Shvidchenko, A.B., Pender, G., Hoey, T.B., : Critical shear stress for incipient motion of sand/gravel streambeds, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 37, NO. 8, PAGES 2273-2283, AUGUST 2000
- [4] <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/hydrology/sediment-transport-deposition>
- [5] Kumar, R., Kulkarni, D.R., Chandra, V., : Experimental study of incipient motion condition for non – uniform sediment, INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND TECHNOLOGY, Volume 8, Issue 6, June 2017, pp. 218–224, Article ID: IJCIET\_08\_06\_025
- [6] Kuspilić, N., Separati iz kolegija „Postupci zaštite od voda“, Zagreb, 2009.
- [7] Zhang, B., Xu, D., Zhang, B. *et al.* Numerical investigation on the incipient motion of non-spherical sediment particles in bedload regime of open channel flows. *Comp. Part. Mech.* 7, 987–1003, (2020). <https://doi.org/10.1007/s40571-020-00323-8>
- [8] Čibarić, A., Troskot, N., Veseljak, M., Vukovac M.: Utjecaj karakteristika toka kroz mostovski profil na nastanak kaverne od podlokavanja, Sveučilište u Zagrebu GRAĐEVINSKI FAKULTET, (2021)
- [9] Kuspilić, N., Bekić, D., Gilja, G., Praćenje morfo-dinamičkih promjena korita vodotoka u zoni stupova mostova, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, 2010, str. 69-112
- [10] Gilja, G., Harasti, A., Potočki, K., Varga, M.: Istraživački okvir projekta R3PEAT – daljinsko praćenje erozije riprap zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu, Conference: Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi – At: Varaždin, Croatia, 2020

- 
- [11] [https://www.grad.hr/r3peat/?page\\_id=10](https://www.grad.hr/r3peat/?page_id=10)
- [12] <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/instruments/instruments-sensors-samplers/acoustic-doppler-current-profiler-adcp/>
- [13] Straub, L.G. Some observations of sorting of river-sediments. Trans. Am. Geophys. Union 1935, 16, 463–467
- [14] Batalla, R.J., Vericat, D., Gibbins, C.N., Garcia, C., 2010. Incipient bed-material motion in a gravel-bed river: field observations and measurements. In: Gray, J.R., Laronne, J.B., Marr, J.D.G. (Eds.), Bedload-surrogate Monitoring Technologies: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5091, pp. 52–66. <http://pubs/usgs.gov/sir/2010/5091>
- [15] Zaid, M., Yazdanfar, Z., Chowdhury, H., Alam, F. (2019): Numerical modeling of flow around a pier mounted in a flat and fixed bed, Energy Procedia, 160, str. 51-59
- [16] Khorsavi K., Chegini A. H. N., Mao, L., Rodriguez, F. J., Saco, P. M., Binns A. D., Experimental Analysis of Incipient Motion for Uniform and Graded Sediments, Extreme Hydrology: Induced Impacts and Vulnerability of Water Resources, Special Issue (2021.), <https://doi.org/10.3390/w13131874>

## POPIS SLIKA

Slika 1. Vremenski prikaz transportiranja materijala korita (Izvor: [7]).....	1
Slika 2. Skica riprap zaštite stupa mosta (Izvor: Internet).....	2
Slika 3. Hidraulički kanal, Zavod za hidrotehniku, Građevinski fakultet, Zagreb (Izvor: fotografirano u laboratoriju Zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu).....	3
Slika 4. Skica načina rada ADVP uređaja (Izvor: Internet).....	4
Slika 5. Graf izmjerene vremenske serije brzina u točki strujnog polja (Izvor: Internet).....	5
Slika 6. Eksperimentalni uređaji za mjerenje: a) portabilni kanal, b) Birkbeck-tip zamka za transport čestica na dnu vode (Izvor: [14]).....	7
Slika 7. Skica eksperimentalnog cjevovoda za recirkulaciju vode (Izvor: [16]).....	8
Slika 8. Grafički prikaz srednje brzine u [mm/s].....	14
Slika 9. Grafički prikaz srednje brzine v [mm/s].....	14
Slika 10. Grafički prikaz srednje brzine v [mm/s].....	15
Slika 11. Grafički prikaz srednje vrijednosti TKE [mm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ].....	16
Slika 12. Grafički prikaz srednje vrijednosti RSS (u,w) [mPa].....	16
Slika 13. Grafički prikaz srednje vrijednosti RSS (v,w) [mPa].....	17
Slika 14. Grafički prikaz srednjih vrijednosti brzina u, v, w po protocima Q.....	18
Slika 15. Grafički prikaz srednje turbulentne kinetičke energije po protocima Q.....	19
Slika 16. Grafički prikaz srednjeg Reynoldsovog naprezanja (u,w) po protoku Q.....	19
Slika 17. Grafički prikaz srednjeg Reynoldsovog naprezanja (v,w) po protoku Q.....	20

---

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz rezultata za protok Q1.....	9
Tablica 2. Prikaz rezultata za protok Q2.....	10
Tablica 3. Prikaz rezultata za protok Q3.....	10
Tablica 4. Prikaz rezultata za protok Q4.....	11
Tablica 5. Prikaz rezultata za protok Q5.....	11
Tablica 6. Prikaz rezultata za protok Q6.....	12
Tablica 7. Prikaz rezultata za protok Q7.....	12
Tablica 8. Prikaz rezultata za protok Q8.....	13