

# Obrada eksperimentalnog profila brzine za uvjete pokretnog dna

---

**Grabež, Tino**

**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:237:358989>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-25**

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Tino Grabež

**OBRADA EKSPERIMENTALNOG PROFILA  
BRZINE ZA UVJETE POKRETNOG DNA**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Tino Grabež

# OBRADA EKSPERIMENTALNOG PROFILA BRZINE ZA UVJETE POKRETNOG DNA

ZAVRŠNI ISPIT

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

Komentor: dr. sc. Antonija Harasti

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Tino Grabež

# **ANALYSIS OF FLOW VELOCITY PROFILE FOR MOVING BED CONDITIONS**

FINAL EXAM

Supervisor: Assoc. Prof. Gordon Gilja

Co-supervisor: Antonija Harasti

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 2

TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: Tino Grabež

JMBAG: 0082062417

Završni ispit iz kolegija: Hidrotehničke građevine

Naslov teme završnog ispita (HR): Obrada eksperimentalnog profila brzine za uvjete pokretnog dna

Naslov teme završnog ispita (ENG): Analysis of flow velocity profile for moving-bed conditions

Opis teme završnog ispita:

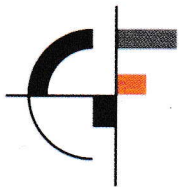
Student u sklopu završnog ispita treba analaizirati podatke o profilu brzine snimljene tijekom eksperimenata u hidrauličkom kanalu. Eksperimenti se provode u sklopu projekta R3PEAT, a obuhvaćaju uvjete pokretnog dna. Potrebno je prikazati profil brzine kroz sve 3 komponente (u, v i w) te turbulentne 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 :

Tino Grabež

(Ime i prezime)

0082062417

(JMBAG)

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

Obrada eksperimentalnog profila brzine za uvjete pokretnog dna

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

Analysis of flow velocity profile for moving-bed 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:

11.6.2024.

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Gordon Gilja

Potpis mentora:

Komentor:

dr. sc. Antonija Harasti



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

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

(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:

Potpis:

*Tina Grabež*



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Ja :

(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:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

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

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(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:

Potpis:

*Tina Grabež*



## ZAHVALE

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

Zahvalu upućujem svojoj majci koja mi je velika potpora i koja ostaje uz mene u svim usponima i padovima koji su mi se događali tokom života i školovanja

## SAŽETAK

Na temelju provedenog pokusa u hidrauličkom kanalu, koji replicira stvarni tok u prirodi, dobiveni su potrebni podaci za obradu eksperimentalnog profila brzine za uvjete pokretnog dna. Pomoću ADVP uređaja mjerene su brzine strujnica u kanalu u jednoj točki u kojoj imamo 6 rubnih uvjeta u kojima se dobivaju vrijednosti brzina kojima se određuju srednje brzine u tri smjera:  $u$ ,  $v$  i  $w$ , Reynoldsova posmična naprezanja, Turbulentna kinetička energija i način na koji strujnice djeluju na pojedine komponente u kanalu, odnosno kako bi utjecale u prirodi, npr. stupovi mostova.

**Ključne riječi:** Hidraulički kanal; ADVP uređaj; Reynoldsova posmična naprezanja; Turbulentna kinetička energija; Srednje brzine u tri smjera:  $u$ ,  $v$  i  $w$ ; Podlokavanja stupova mostova

## SUMMARY

Based on the conducted experiment in the hydraulic channel, which replicates the actual flow in nature, the necessary data were obtained for the processing of the experimental speed profile for moving bottom conditions. Using ADVP devices, the speeds of currents in the channel were measured at one point in which we have 6 marginal conditions in which values are obtained that determine the average speeds in three directions:  $u$ ,  $v$  and  $w$ , Reynolds shear stresses, Turbulent kinetic energy and the way in which currents act on individual components in the channel, i.e. how they would affect nature, e.g. bridge piers.

**Key words:** Hydraulic canal; ADVP; Reynolds shear stresses; Turbulent kinetic energy; Bridge scour

---

## SADRŽAJ

ZAHVALE .....	i
SAŽETAK .....	ii
SUMMARY .....	iii
SADRŽAJ .....	iv
1 UVOD .....	1
1.1 Utjecaj vodotoka na sigurnost mostova.....	1
1.2 Kretanje riječnog nanosa, podlokavanje i istraživanje podlokavanja.....	3
2 METODOLOGIJA.....	5
3 PREGLED STANJA ZNANJA.....	8
4 REZULTATI.....	13
5 ZAKLJUČAK .....	24
POPIS LITERATURE .....	25
POPIS SLIKA.....	27
POPIS TABLICA.....	28

# 1 UVOD

## 1.1. Utjecaj vodotoka na sigurnost mostova

Često se priča o klimatskim promjenama. One se odnose se na dugoročne vremenske prilike na Zemlji, primjerice temperaturu, razinu mora, oborine. Posljedice klimatskih promjena su ekstremne pojave, kao što su poplave i njezini razorni učinci koji uzrokuju opasnost za ljudske živote i čine veliku materijalnu štetu na imovini, prometnicama i mostovima. U Hrvatskoj i u Europi veliki broj mostova pri kraju je svog uporabnog vijeka, dok je istovremena pojava ekstremnih klimatskih događaja (kao što su poplave) pod utjecajem klimatskih promjena sve češća [1].

Djelovanje vodotoka tijekom poplava utječe na hidromorfološke promjene u koritu rijeke i uzrokuje podlokavanje dijelova konstrukcije koje može narušiti stabilnost mosta [2]. Dostupni podaci iz studija koje su obrađivale otkazivanje stabilnosti mostova diljem svijeta pokazuju da su događaji uvjetovani režimom voda i nanosa najviše utjecali na oštećenje mostova: do otkazivanja stabilnosti u 28,3% došlo je kao posljedica poplavnih djelovanja na konstrukciju i u 18,8 % došlo je uslijed podlokavanja, što objedinjeno čini 47,1% otkazivanja stabilnosti [1]. Podlokavanje se definira kao iskopavanje i pomicanje materijala (u koritu rijeke) zbog erozivnog djelovanja vode [2].

U našoj je zemlji u bliskoj prošlosti bilo slučajeva oštećenja mostova uslijed podlokavanja. Na mostu Sava – Jakuševac u Zagrebu za trajanja vodnog vala 30. ožujka 2009. godine došlo je do naginjanja jednog od dva stupa koja se nalaze u koritu rijeke Save [3].



Slika 1 Most „Sava – Jakuševac“ nakon oštećenja

Most Đurmanec u Krapinsko-zagorskoj županiji oštećen je za vrijeme velikovodnog događaja u lipnju 2015. godine kao posljedica velike količine dnevne oborine. Protok vode je imao takav erozivni kapacitet da je erodirao desnu obalu i temelje upornjaka što je rezultiralo naginjanjem mosta [3].



Slika 2 Most „Đurmanec“ nakon oštećenja

U velikim bujičnim poplavama koje su se dogodile u Sloveniji, 4. kolovoza 2023. godine došlo je do urušavanja mosta preko rijeke Bistrice na državnoj cesti Strahovica – Kamnik.



Slika 3 Most na državnoj cesti Strahovica-Kamnik, Slovenija nakon oštećenja

Primjeri oštećenja i rušenja mostova u svijetu, kroz povijest, zbog podlokavanja su brojni. Nekoliko primjera takvih mostova su: rušenje mosta iznad rijeke Douro u Portugalu 2001. godine, a uzrok je bilo podlokavanje u području stupova mosta; most *Schoharie Creek* u SAD-u urušio se 1987. godine zbog podlokavanja oko srednjeg stupa; dio željezničkog mosta *Malahide* u Irskoj srušio se 2009. godine zbog narušavanja stabilnosti preljeva uslijed djelovanja vode [3]. Posljedice takvih oštećenja, osim ekonomskih, su i ljudske žrtve.

## 1.2. Kretanje riječnog nanosa, podlokavanje i istraživanje podlokavanja

U velikom broju slučajeva uzrok pojave oštećenja i rušenja mostova je djelovanje vode vodotoka. Korito vodotoka i njegova stabilnost ovisi su o kretanju riječnog nanosa - kamena, šljunka, pijeska i sl. Upravo trenjem tekuće vode (u kojoj ima krupnog i sitnog materijala) o dno i strane korita nastaje riječna erozija [4]. Takvo kretanje nanosa podrazumijeva eroziju i taloženje, odnosno vremensku i prostornu dinamiku nanosa. Pod utjecajem procesa erozije dolazi do nestabilnosti korita rijeke, a to se može razvijati postepeno kada rijeka teče u normalnim uvjetima ili naglo u uvjetima poplava. Za vrijeme poplava dolazi do snažnog odnošenja riječnog materijala s dna korita rijeke čime njegova nestabilnost postaje veća. Zbog erozije korita može biti ugrožena stabilnost mostova jer dolazi do odnošenja dijela tla ispod stupova mosta. Takvo pokretanje materijala s dna rijeke uzrokuje podlokavanje oko stupova mosta [5].

Zbog činjenice da je velik broj mostova pretrpio velika oštećenja pa i rušenja zbog pojave podlokavanja oko stupova mosta, istraživanja podlokavanja započeta su već sredinom 20. stoljeća. U početku istraživanja to su bila tradicionalna mjerenja direktno na terenu koja su se provodila u dužem vremenskom razdoblju i koja ako se nisu provodila za vrijeme nailaska vodnog vala, postojala je mogućnost da se ne dođe do točnog zaključka. Zato se kaže da su tradicionalna mjerenja bila djelomično učinkovita. Krajem 20. stoljeća došlo je do razvoja hidroakustičke opreme i numeričkog modela pa je iz toga razloga došlo i do napretka istraživanja podlokavanja. U sklopu međunarodnog projekta BRIDGE SMS, čiji je partner bio i Građevinski fakultet u Zagrebu, razvijen je sustav ranog upozoravanja na način da su se na određenim lokacijama mosta pratili hidrološki parametri, a sustav je upozoravao da se moraju poduzeti određene mjere ako bi došlo do prelaska utvrđenih granica.

U svrhu učinkovitog prikupljanja podataka i donošenja zaključaka i time sprečavanja oštećenja mostova i nastanka šteta, a za potrebe provođenja znanstvenog istraživanja pojave podlokavanja pod utjecajem riječnog toka u prirodi, potrebno je uvjete replicirati u

manjem mjerilu koje omogućava simuliranje željenih hidrauličkih uvjeta u modelu [1]. Time će se omogućiti značajnija procjena opasnosti za mostove.

Cilj ovoga rada je analizirati podatke o profilu brzine vodotoka snimljene tijekom eksperimenata u hidrauličkom kanalu. Profil brzine prikazat će se kroz tri komponente:  $w$  – Vertikalna komponenta brzine;  $u$  – Komponenta brzine u smjeru toka;  $v$  – Komponenta brzine poprečno na tok. Na temelju analiziranih podataka ispitat će se povezanost između karakteristika toka kroz svaku od navedenih komponenti i uvjeta pokretnog dna. Pod pojmom uvjeta pokretnog dna podrazumijeva se potpovršinski nanos u pokretu odnosno pokretanje materijala (pijeska, šljunka, kamena i sl.) s dna korita rijeke.



## 2 METODOLOGIJA

Podaci o profilu brzine vodotoka koji će se analizirati snimljeni su tijekom eksperimenta u sklopu znanstvenog projekta R3PEAT, a svrha istraživanja je proučavanje podlokavanja oko stupova mosta zaštićenih rip-rap zaštitom (kamenom oblogom). Eksperiment je proveden u laboratoriju Zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. U sklopu fakultetskog laboratorija, a u svrhu provođenja eksperimenata, nalazi se hidraulički kanal dužine 18,00 m, širine 0,9 m i visine 0,9 m koji replicira stvarne uvjete korita rijeke u prirodi (tečenje, hrapavost korita, krupnoća nanosa riječnog korita) u umanjenom mjerilu. Repliciranje uvjeta u umanjenom mjerilu koje simulira željene hidraulične uvjete u modelu omogućava praćenje pojave podlokavanja pod utjecajem riječnog toka u prirodi i analizu podataka o profilu brzine vodotoka snimljene tijekom eksperimenta [1].



**Slika 4** Hidraulički kanal, Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta, Zagreb

Takva metodologija istraživanja obuhvaća eksperimentalno prikupljanje podataka na fizičkom modelu umanjenog mjerila u hidrauličkom kanalu vodotoka [1].

Mjerenje karakteristika polja brzine toka u hidrauličkom kanalu izvodi se pomoću uređaja Acoustic Doppler Velocimeter Profilers (ADVP) koji ima mogućnost kontinuiranog mjerenja i prikupljanja podataka o brzinama strujanja vode.

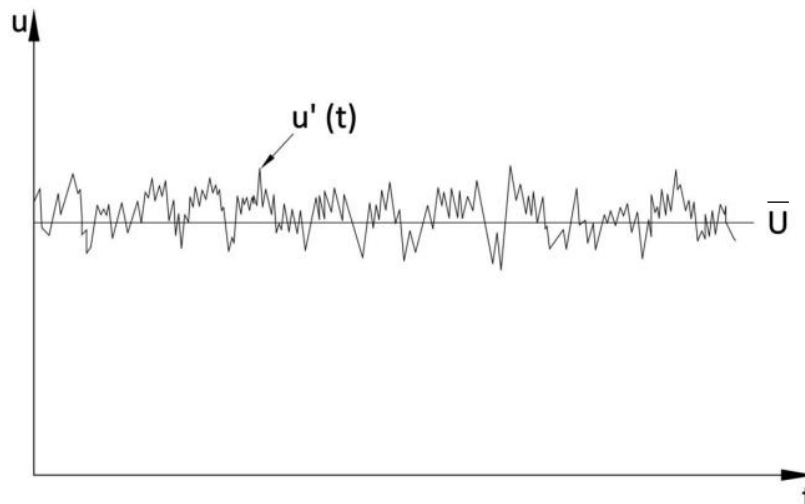


Slika 5 ADVP uređaj, Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta, Zagreb

Pomoću ADVP uređaja u sklopu hidrauličkog kanala prikupljeni su podaci na način da je izvršeno mjerenje u jednoj točki u kojoj imamo 6 rubnih uvjeta u kojima su izmjerene 3 komponente brzina: brzina u smjeru toka –  $u$ , brzina poprečna na tok –  $v$  i vertikalna komponenta brzine –  $w$ . ADVP uređaj se sastoji od 4 prijavnika koji su postavljeni u  $x, y$  i  $z$  smjeru, 30 ćelija, koje služe za mjerenje brzina, pri čemu je razmak svake ćelije 1 mm, a promjer istih 6 mm, pri čemu je njegov profil mjerenja u rasponu od 40 do 70 mm. Brzine su izmjerene kroz cijeli protok pri čemu jedno ispitivanje traje 12 minuta. Unutar svakog od 6 rubnih uvjeta, nalaze se 3 komponente brzine, udaljenost korita i udaljenost ćelije. Izračunavanjem srednje vrijednosti komponenta brzina možemo dobiti turbulentnu kinetičku energiju ( TKE ) iz sljedećeg izraza:

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

Te vrijednosti srednjih brzina još se nazivaju i varijance fluktuacije brzina koje su proporcionalne protocima količine gibanja, inducirane sa turbulentnim vrtlozima [6]. Na taj način se uzrokuju normalna naprezanja. Uz turbulentnu kinetičku energiju, javlja se i Reynoldsovo posmično naprezanje ( RSS ). Sve 3 komponente brzine  $u, v$  i  $w$  su izmjerene i prikazane dijagramom u odnosu na vrijeme  $t$ .



Slika 6 Izmjerena vremenska serija brzina u točki strujnog polja

Graf prikazuje izmjerenu vremensku seriju brzine u točki strujnog polja. Prikazana je dekompozicija stvarne brzine  $u_i$  u određenom vremenu na srednju vrijednost brzine  $\bar{u}$  i oscilacije srednje vrijednosti  $u_i'$  izrazom:  $u_i = u_i' + \bar{u}$  pri čemu se srednja vrijednost brzine zbraja s oscilacijom srednje vrijednosti koju dobijemo izmjerenom udaljenošću od mjesta srednje vrijednosti brzine do nasumične vrijednosti stvarne brzine. S obzirom da priloženi dijagram ima i za brzine  $v$  i  $w$ , možemo na isti način odrediti dekompozicije stvarnih brzina  $v_i$  i  $w_i$  te odrediti srednje vrijednosti oscilacija. Reynoldsovo posmično naprezanje je dvosmjerno pri čemu je Reynoldsova jednadžba za cijeli zapis:

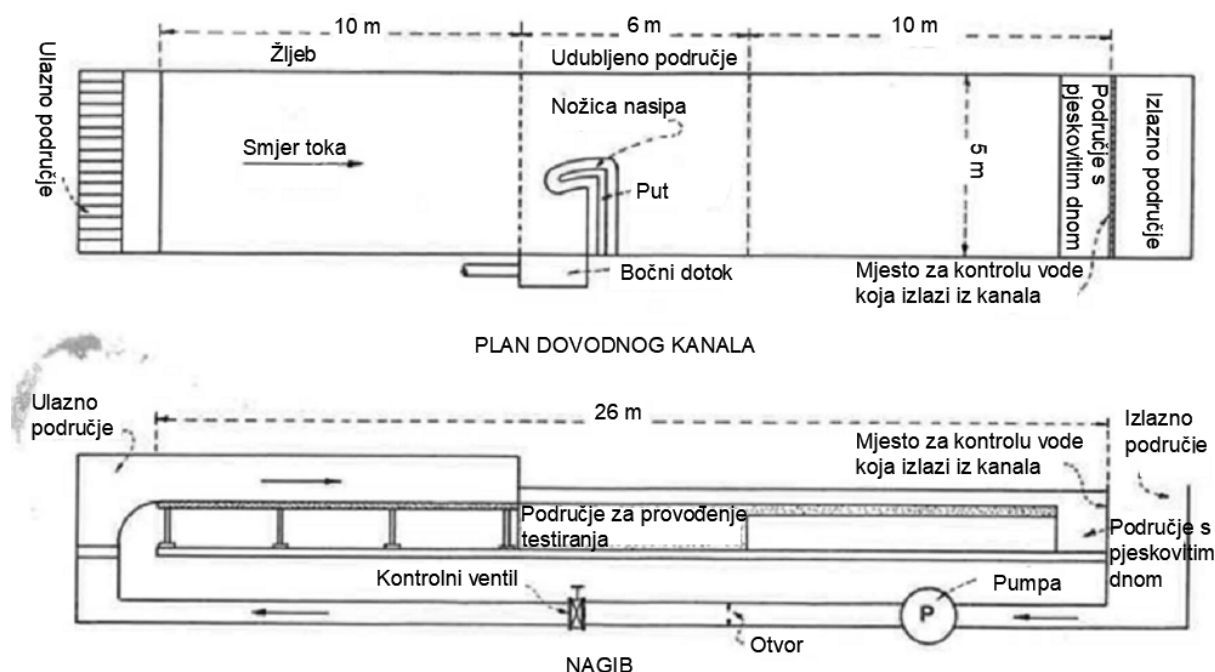
$$\overline{\rho u' v'} = \frac{1}{N} \sum_1^N \rho (u - \bar{u}) (v - \bar{v})$$

Gdje  $N$  predstavlja ukupan broj podataka potrebnih za provođenje istraživanja, a  $\rho$  gustoću fluida (u ovom slučaju voda).

### 3 PREGLED STANJA ZNANJA

Problem podlokavanja stupova mostova je oduvijek stvarao problem inženjerima pa su tokom povijesti provedena razna istraživanja na terenu te u kanalima umanjenih mjerila. U nastavku je naveden dio koji se odnosi na metodologiju istraživanja koja obuhvaća eksperimentalno prikupljanje podataka u dvije faze, na fizičkom modelu umanjenog mjerila u hidrauličkom kanalu (I. faza) i numeričkim modelom, odnosno simulacijom u mjerilu prototipa kojom se simulira hidraulički okoliš (II faza).

Inženjer Sasumu Karaki sa sveučilišta Colorado u SAD-u 1959. godine proveo je istraživanje djelovanja podlokavanja na stupove i upornjake mostova. Istraživanje je provedeno u dvije faze. Prva faza predstavlja određivanje učinkovitosti nasipa, njegova lokacija i oblik, a druga faza predstavlja određivanje duljine nasipa na određenoj lokaciji na kojoj se provodi istraživanje. Istraživanje je provedeno na fizičkom modelu u obliku kanala duljine 26 m i širine oko 5 m. Sadržavao je 2 žljeba koji je svaki dugačak oko 10 m i dijela koji ih je odvajao dubine oko 1,2 m i duljine oko 6 m s ulogom osiguravanja dubine čišćenja na dijelu gdje će se provoditi istraživanje. Dno kanala bilo je obloženo pijeskom.

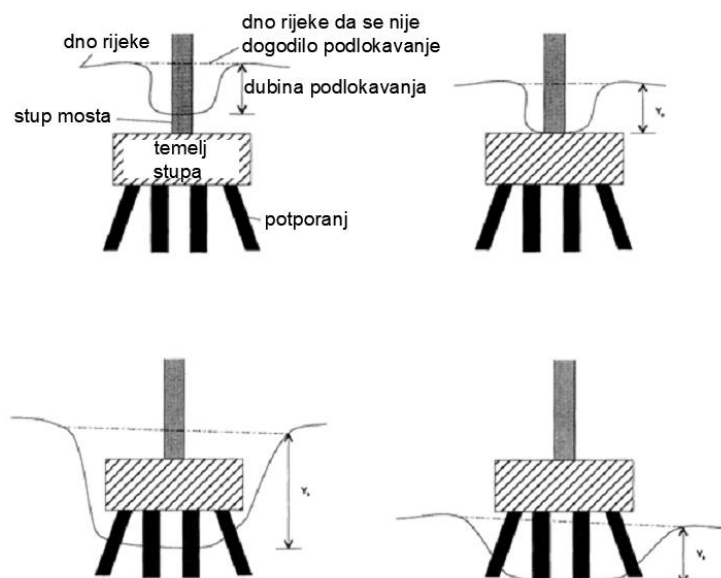


Slika 7 Shematski crtež Karakijevog kanala za provođenje istraživanja

Zaključio je da su nasipi kvalitetni za sprječavanje podlokavanja na upornjacima mosta, da su zakrivljeni nasipi učinkovitiji od ravnih nasipa iz razloga što bolje usmjeravaju tok vode i da su potrebna dodatna istraživanja kako bi se pronašli dodatni kriteriji za izradu što kvalitetnijih nasipa da bi bili učinkovitiji u sprječavanju podlokavanja [7].

Nadalje, C. Alonso i R. Kuhnle proveli su mjerenje brzina strujanja korita u kanalu umanjenog mjerila pomoću ADV uređaja. Ispitivanje se odvelo u nacionalnom laboratoriju za sedimentaciju na sveučilištu Mississippi u Sjedinjenim Američkim Državama. Sva mjerenja provedena su u kanalu duljine 30 m, širine 1,2 m i dubine 0,6 m. Glava ADV uređaja sadrži 3 glave za mjerenje brzina u x, y i z smjeru te je montirana na stalak duljine 60 cm i promjera 10 cm. ADV uređaj sadrži cilindar za mjerenje brzina visine i dubine od 6 mm. Brzine u svakoj točki su mjerene u x, y i z smjeru tijekom 5 minuta s frekvencijom od 50 Hz, a tih 5 minuta je potrebno da bi se dobile srednje vrijednosti svake od navedenih komponenti brzina. Svi podaci o brzini su prikazani dijagramima u ravninama x-z i y-z. [8].

Uz istraživanja koja su provedena na kanalima umanjenog mjerila, provedeno je istraživanje na terenu na 22 odabrana mosta u saveznoj državi Mississippi u SAD-u u razdoblju od 1938. do 1994. godine. Ovim istraživanjem uspostavljena je tehnologija mjerenja podataka na terenu i metodologija za obradu podataka. Istraživanje je dokazalo da je erozija korita u blizini stupova mosta i upornjaka najčešći uzrok naginjanja stupova mostova i samim time gubitak stabilnosti konstrukcije.

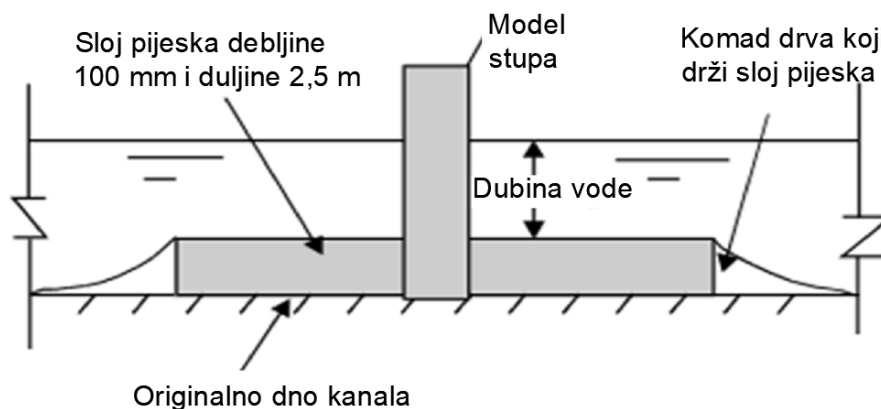


Slika 8 Načini na koji su postavljeni temelji stupova mostova s potporanjima

Samo korito sastojalo se od pijeska i šljunka ili šljunka sa slojem gline. Mnoge empirijske jednadžbe koje se koriste za istraživanja temeljene su na laboratorijskim eksperimentima u hidrauličkim kanalima u mjerilu i ne koriste se za istraživanje na terenu zbog nedostatka podataka o protoku na licu mjesta. Metode koje se koriste za istraživanje prikazuju hidrauličke i geometrijske karakteristike mostova [9].

M. Zaid razvio je numerički model kako bi proveo analizu osobina turbulentnog tečenja i procijenio povećanje posmičnog napreznja oko stupova mosta na temelju već postojećih podataka dobivenih iz raznih eksperimenata. Ovaj numerički model temelji se na Reynoldsovoj prosječnoj Navier Stokesovoj jednadžbi. Istraživanje se provodilo pomoću CFD (Computational fluid dynamics) alata koji predstavlja proizvodnju kvantitativnih predviđanja strujanja fluida na temelju zakona očuvanja mase i zakona očuvanja količine gibanja, uz pomoć digitalnih računala. CFD omogućuje reprodukciju karakteristika protoka za različite oblike stupova mosta. Na temelju ovog numeričkog modela analizirana su strujanja protoka oko stupova mosta, ponašanje protoka na ravnoj podlozi i posmična napreznja u koritu oko stupova mosta i potrebno je bilo pronaći matematički proračun kojim se može dobiti kretanje podloga [10].

Primjeri istraživanja provedenih na temelju fizičkog modela korištenjem empirijskih jednadžbi koje su razvijene na temelju podataka iz laboratorija, a služe za određivanje procjene dubine podlokavanja. Navedeno istraživanje proveli su Mohammad, Noor i Ghazali. Empirijske jednadžbe ( CSU, Melville i Sutherland, Jain i Fisher te Laursen i Toch ) odabrane su na temelju laboratorijskih istraživanja i podataka s terena dok podaci potrebni za istraživanje dobiveni su iz laboratorija i terenskih ispitivanjem 14 mostova koji se nalaze u Kanadi, Pakistanu i Indiji. Laboratorijskim pokusom u kanalu na zavodu za hidrotehniku u Maleziji nastojalo se prikupiti dovoljno podataka za stupove različitih širina i oblika na temelju gore navedenih empirijskih jednadžbi da bi se odredila dubina podlokavanja oko stupova mostova.



Slika 9 Shematski prikaz modela stupa mosta u kanalu gdje se provodilo istraživanje

Kanal je duljine 450 cm, širine 80 cm i dubine 24 cm obložen pijeskom vrste  $d_{50}$  do visine od 10 cm. Terenski podaci su uključivali širinu korita rijeke, dubinu rijeke, protok rijeke na mjestu mosta, veličinu pijeska koju nosi protok rijeke te srednju brzinu toka. Na temelju istraživanja i pokusa donesen je zaključak da jednadžbe CSI te Laursen i Toch daju dobre rezultate predviđanja dubina podlokavanja, dok jednadžbe Melville i Sutherland te Jain i Fisher daju rezultate prevelikih dubina podlokavanja. Melville i Sutherland jednadžba daje posebno velike rezultate vezano za dubina podlokavanja u usporedbi s ostalim jednadžbama kojima se izračunavala dubina podlokavanja oko stupova mostova [11].

Kao relativno novi primjer istraživanja, Y. Moussa i M. Atta su proveli eksperimentalno istraživanje simulacije podlokavanja stupova mostova u pravokutno otvorenom kanalu na sveučilištu u Jazanu u Saudijskoj Arabiji. Sam kanal se sastoji od 2 dijela: gornjeg žlijeba u kojem se nalaze modeli za ispitivanje i gdje se samo ispitivanje provodi te donjeg žlijeba u kojem se mjere protoci.



Slika 10 Model kanala u kojem se provodilo istraživanje

Gornji kanal je dugačak 162 cm, širok 65 cm i dubok 66 cm, a sastoji se od 3 dijela: ulaznog dijela, središnjeg dijela gdje se provode ispitivanja i izlaznog dijela. Na ulaznom dijelu je dno od kamenog materijala radi smanjenja poremećaja u protoku. Donji žlijeb je dugačak 180 cm, širok 99 cm i dubok 100 cm. Na donjem žlijebu se nalazi pravokutni preljev kojim se mjere protoci. Sam eksperiment se provodi u bistroj vodi i na dnu korita se nalazi pijesak promjera zrna 1,4 mm. Za svako ispitivanje potrebno je izravnati pijesak na dnu korita, a nivo pijeska se pomoću mjerne letvice mjeri u nasumično odabranim točkama. Nakon punjenja korita vodom, pomoću crpke se postiže brzina protoka koja je potrebna za ispitivanje. Svaki

eksperiment je trajao 6 sati, a najveći dio podlokavanja se odvija 3 do 4 sata nakon početka eksperimenta. Numeričkim modelom SSIIM se nastoji prikazati simulacija kretanja vode i nanosa, a trodimenzionalnom mrežom se prikazuje raspored elemenata u x, y i z smjeru i također služi za prikaz polja u blizini i u područjima udaljenima od stupova da bi se dobili rezultati simulacije. Početna razina vode, dimenzije nanosa i brzina toka su važni ulazni podaci u rubnim uvjetima. Provođena su ispitivanja s jednim stupom, trokutastim, pravokutnim i skupinom stupova pri čemu je zaključak da je dubina lokalnog podlokavanja manja kod skupina stupova, a veća kod pojedinačnih stupova [12].



## 4 REZULTATI

Na temelju ispitivanja u hidrauličkom kanalu u laboratoriju zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu dobiveni su podaci mjereni u jednoj točki u kojoj se nalazi 6 protoka  $Q_1=5$  l/s,  $Q_2=10$  l/s,  $Q_3=15$  l/s,  $Q_4=20$  l/s,  $Q_5=25$  l/s i  $Q_6=30$  l/s koji su potrebni za provođenje obrade eksperimentalnog profila brzine za uvjete pokretnog dna. Podacima za 6 protoka potrebno je izračunati srednje brzine  $u$ ,  $v$  i  $w$ , Reynoldsova posmična naprezanja  $RSS_{u,w}$  i  $RSS_{v,w}$  te turbulentnu kinetičku energiju TKE. Također je potrebno izračunati omjer udaljenosti ćelije  $y$  i srednje vrijednosti udaljenosti korita  $h$  prema izrazu:  $y/h$  da bi bio prikazan njihov omjer u svakom stupcu. Provedeno ispitivanje za svaki od protoka po stupcima, kojih je 30, daje rezultate koji su prikazani u sljedećim tablicama:

Tablica 1 Rezultati za protok  $Q_1$

stupac	$y/h$	$u$ (srednja brzina) [cm/s]	$v$ (srednja brzina) [cm/s]	$w$ (srednja brzina) [cm/s]	TKE [ $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ]	RSS ( $u,w$ ) [ $\mu\text{Pa}$ ]	RSS ( $v,w$ ) [ $\mu\text{Pa}$ ]
1	0.45	16.006	0.148	-0.305	125.569	-525.206	26.075
2	0.47	16.257	0.184	-0.339	91.917	-347.789	-1.429
3	0.48	16.350	0.154	-0.312	65.788	-236.185	-12.672
4	0.49	16.369	0.145	-0.266	46.321	-119.145	-0.670
5	0.50	16.220	0.142	-0.287	31.645	-30.337	-9.867
6	0.51	16.088	0.169	-0.327	23.161	10.577	-2.585
7	0.52	16.060	0.159	-0.324	17.517	47.323	-5.680
8	0.54	15.964	0.104	-0.343	15.122	65.962	-6.060
9	0.55	15.869	0.087	-0.362	21.301	85.590	-3.131
10	0.56	15.814	0.048	-0.402	22.546	43.241	0.898
11	0.57	15.760	0.038	-0.439	18.241	52.904	-1.310
12	0.58	15.736	0.040	-0.458	13.531	85.186	-2.242
13	0.59	15.682	0.035	-0.477	16.253	86.205	-2.722
14	0.61	15.631	0.051	-0.502	22.678	86.062	-4.298
15	0.62	15.587	0.027	-0.514	73.656	41.800	-10.821
16	0.63	15.454	0.034	-0.545	92.031	0.314	-13.306
17	0.64	15.289	0.053	-0.567	81.354	129.179	-15.491
18	0.65	15.146	0.047	-0.601	52.832	78.855	-9.412
19	0.66	14.938	0.158	-0.621	27.608	292.852	-27.214
20	0.67	14.777	0.243	-0.645	23.338	161.396	-40.678
21	0.69	14.595	0.272	-0.689	24.725	132.619	-40.874
22	0.70	14.431	0.319	-0.738	21.727	52.054	-40.796
23	0.71	14.229	0.368	-0.786	28.047	140.689	-32.913
24	0.72	14.103	0.402	-0.823	30.852	53.499	-35.454
25	0.73	13.968	0.433	-0.858	34.705	47.752	-27.539
26	0.74	13.748	0.418	-0.870	41.173	231.627	-28.556
27	0.76	13.352	0.423	-0.880	81.864	507.202	-15.333
28	0.77	12.673	0.422	-0.910	195.908	-166.877	12.408
29	0.78	11.235	0.425	-0.868	353.034	-584.048	-61.345
30	0.79	9.469	0.387	-0.830	498.489	-1448.197	-28.275

Tablica 2 Rezultati za protok Q2

stupac	y/h	u (srednja brzina) [cm/s]	v (srednja brzina) [cm/s]	w (srednja brzina) [cm/s]	TKE [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [μPa]	RSS (v,w) [μPa]
1	0.47	16.453	0.091	0.064	1003.533	564.125	-5.986
2	0.48	18.559	0.048	0.094	692.926	-770.421	38.025
3	0.49	19.647	0.336	0.128	476.805	-313.997	-40.880
4	0.50	19.876	0.218	0.097	290.395	-677.383	-14.454
5	0.51	20.264	0.277	0.153	182.282	-56.411	28.480
6	0.53	20.363	0.259	0.171	114.674	228.053	-6.090
7	0.54	20.457	0.207	0.124	75.283	205.452	-5.997
8	0.55	20.405	0.194	0.115	52.820	232.441	7.790
9	0.56	20.318	0.208	0.084	38.106	200.750	2.686
10	0.57	20.164	0.180	0.047	29.867	200.806	4.146
11	0.58	20.054	0.185	0.016	25.468	213.879	4.872
12	0.60	20.007	0.216	-0.007	21.267	176.110	3.735
13	0.61	19.878	0.238	-0.019	18.979	174.142	3.545
14	0.62	19.784	0.247	-0.037	16.813	173.806	5.802
15	0.63	19.630	0.237	-0.054	15.488	159.575	2.546
16	0.64	19.440	0.217	-0.074	15.090	157.740	-6.358
17	0.66	19.232	0.203	-0.089	15.330	162.461	-14.921
18	0.67	18.951	0.180	-0.099	16.612	156.202	-21.270
19	0.68	18.648	0.184	-0.105	18.367	146.334	-22.590
20	0.69	18.309	0.123	-0.113	20.683	148.434	-21.412
21	0.70	17.937	0.111	-0.142	24.128	144.563	-24.054
22	0.71	17.660	0.096	-0.181	27.973	146.789	-26.180
23	0.73	17.361	0.077	-0.211	32.145	141.326	-30.079
24	0.74	17.048	0.100	-0.236	37.940	133.524	-20.667
25	0.75	16.763	0.078	-0.262	44.137	88.681	-18.759
26	0.76	16.496	0.122	-0.268	52.983	73.807	-16.281
27	0.77	16.163	0.093	-0.284	62.255	60.693	-4.618
28	0.79	15.699	0.133	-0.329	72.873	10.334	11.211
29	0.80	15.327	0.158	-0.364	84.228	8.140	-22.277
30	0.81	14.975	0.125	-0.401	96.115	29.829	-3.029

Tablica 3 Rezultati za protok Q3

stupac	y/h	u (srednja brzina) [cm/s]	v (srednja brzina) [cm/s]	w (srednja brzina) [cm/s]	TKE [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [μPa]	RSS (v,w) [μPa]
1	0.55	12.837	0.328	0.364	1608.223	-1866.186	-35.518
2	0.56	14.736	0.274	0.349	1390.208	-2009.933	-58.685
3	0.58	16.639	0.039	0.382	1153.378	-2424.130	-43.719
4	0.59	18.361	0.069	0.580	888.048	-2184.810	-40.401
5	0.61	19.731	0.079	0.673	649.269	-1448.097	-247.208
6	0.62	20.857	0.029	0.763	466.293	-619.839	-112.856
7	0.63	21.481	0.193	0.798	331.300	-213.521	1.617
8	0.65	21.735	0.416	0.811	247.829	72.315	-46.818
9	0.66	21.773	0.474	0.841	224.493	385.331	17.198
10	0.68	21.486	0.550	0.794	243.619	500.437	19.889
11	0.69	21.400	0.534	0.810	264.300	681.899	92.429
12	0.70	21.180	0.662	0.759	284.096	519.596	68.917
13	0.72	21.102	0.662	0.725	297.698	404.156	70.975
14	0.73	20.715	0.794	0.703	298.881	117.949	96.211
15	0.75	20.592	0.892	0.698	304.841	-90.865	76.595
16	0.76	20.190	1.208	0.709	309.128	-156.504	20.983
17	0.77	19.821	1.385	0.697	309.406	-54.370	-34.272
18	0.79	19.499	1.529	0.713	316.403	-12.066	-17.494
19	0.80	19.143	1.743	0.707	318.923	76.169	-89.752
20	0.82	18.811	1.855	0.710	323.535	130.720	-92.242
21	0.83	18.431	1.996	0.673	333.790	-273.312	-111.900
22	0.84	18.162	2.133	0.655	328.720	-599.064	23.242
23	0.86	17.705	2.286	0.583	328.051	-1259.931	-117.791
24	0.87	17.541	2.454	0.520	315.809	-1535.778	-120.642
25	0.89	17.440	2.656	0.532	304.299	-1780.090	-69.162
26	0.90	17.318	2.791	0.523	289.673	-1758.732	-86.059
27	0.91	17.220	2.902	0.529	273.096	-1705.107	-54.558
28	0.93	15.464	2.845	0.381	221.488	-1244.625	-155.880
29	0.94	8.764	2.680	-0.398	115.862	469.527	-46.534
30	0.96	4.601	1.767	-0.455	58.144	897.030	-7.782

Tablica 4 Rezultati za protok Q4

stupac	y/h	u ( srednja brzina ) [cm/s]	v ( srednja brzina ) [cm/s]	w ( srednja brzina ) [cm/s]	TKE [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [μPa]	RSS (v,w) [μPa]
1	0.52	14.175	0.140	0.654	1170.483	796.054	67.042
2	0.54	14.982	0.350	0.589	1095.307	1191.509	100.392
3	0.55	15.651	0.446	0.618	1014.469	778.133	37.837
4	0.56	16.767	0.247	0.615	905.821	23.736	77.420
5	0.58	17.791	0.237	0.587	794.998	-247.771	-61.052
6	0.59	19.297	0.207	0.562	670.853	-476.746	19.545
7	0.60	21.199	0.018	0.556	538.629	-809.854	-38.589
8	0.62	22.910	0.066	0.665	414.405	-653.728	-16.710
9	0.63	23.911	0.091	0.754	316.725	-311.510	26.327
10	0.64	24.706	0.282	0.785	241.862	-114.022	3.418
11	0.66	25.116	0.274	0.786	183.437	-163.177	-55.251
12	0.67	25.330	0.393	0.773	147.174	-330.381	-38.694
13	0.68	25.392	0.412	0.776	112.086	-557.536	-43.202
14	0.70	25.403	0.511	0.808	86.733	-623.172	-12.833
15	0.71	25.439	0.659	0.853	66.722	-483.944	-35.194
16	0.72	25.339	0.768	0.898	52.910	-279.020	-48.224
17	0.74	25.204	0.910	0.936	45.611	-97.679	-75.438
18	0.75	24.942	1.079	0.971	44.546	-60.211	-89.666
19	0.76	24.624	1.209	1.017	46.529	-29.095	-106.831
20	0.78	24.205	1.323	1.048	52.373	-79.624	-115.674
21	0.79	23.706	1.509	1.054	59.487	-169.555	-124.368
22	0.80	23.249	1.681	1.065	68.232	-266.401	-125.681
23	0.82	22.821	1.798	1.082	78.982	-395.349	-121.718
24	0.83	22.408	1.939	1.090	92.072	-540.585	-105.088
25	0.84	21.985	2.136	1.126	105.315	-656.216	-109.871
26	0.86	21.530	2.275	1.153	120.223	-807.120	-96.488
27	0.87	21.020	2.400	1.195	135.015	-966.874	-69.910
28	0.88	20.453	2.561	1.203	147.790	-1017.850	-54.786
29	0.90	19.214	2.700	1.060	155.691	-816.692	-97.086
30	0.91	16.604	2.961	0.560	153.000	-157.111	-81.578

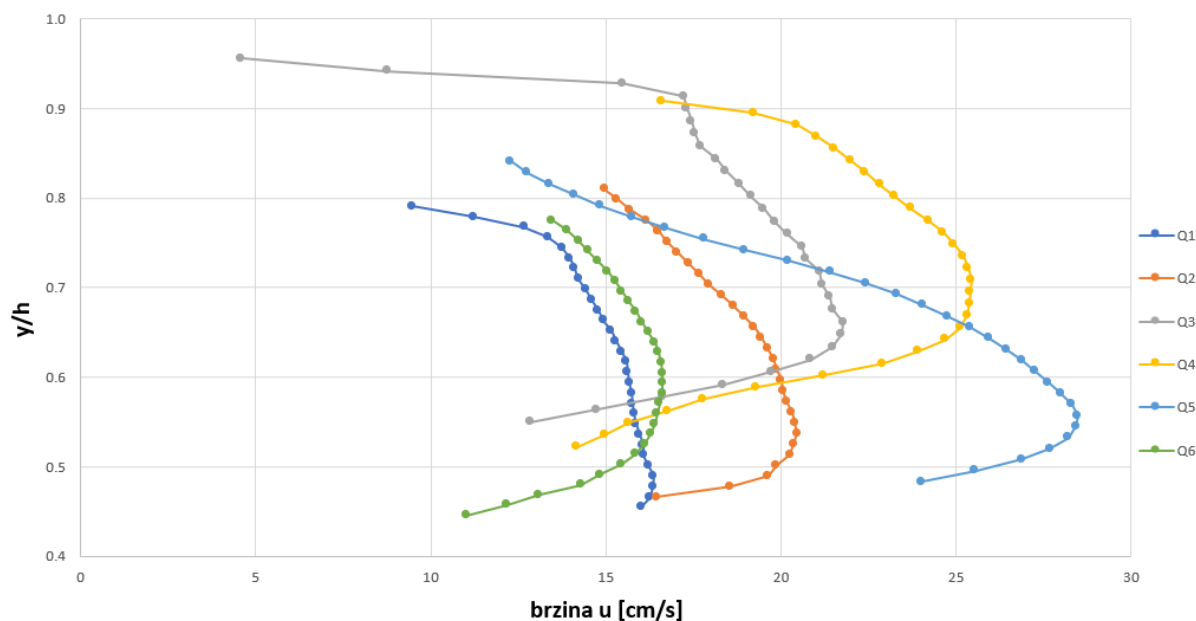
Tablica 5 Rezultati za protok Q5

stupac	y/h	u ( srednja brzina ) [cm/s]	v ( srednja brzina ) [cm/s]	w ( srednja brzina ) [cm/s]	TKE [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [μPa]	RSS (v,w) [μPa]
1	0.48	24.030	0.864	0.303	66.017	-103.503	52.067
2	0.50	25.540	0.940	0.382	58.975	13.988	63.919
3	0.51	26.871	1.012	0.567	52.892	106.396	70.850
4	0.52	27.690	1.123	0.757	47.281	220.329	60.852
5	0.53	28.201	1.192	0.879	43.852	324.097	50.219
6	0.54	28.431	1.171	0.949	42.413	390.195	45.627
7	0.56	28.482	1.196	1.039	42.185	434.217	43.230
8	0.57	28.302	1.230	1.123	42.516	468.602	45.687
9	0.58	27.983	1.201	1.169	42.950	512.435	49.711
10	0.59	27.630	1.154	1.189	43.034	550.539	45.620
11	0.61	27.257	1.079	1.210	43.481	595.093	47.360
12	0.62	26.877	0.985	1.252	43.567	627.470	57.061
13	0.63	26.428	0.914	1.301	43.174	664.848	56.629
14	0.64	25.939	0.844	1.355	42.146	698.739	46.342
15	0.66	25.388	0.769	1.421	41.631	731.900	25.967
16	0.67	24.745	0.724	1.484	42.122	758.188	-26.306
17	0.68	24.055	0.679	1.538	44.190	785.977	-76.872
18	0.69	23.298	0.618	1.599	48.250	814.055	-117.948
19	0.71	22.430	0.573	1.670	52.409	827.413	-156.516
20	0.72	21.415	0.560	1.768	56.149	815.202	-202.154
21	0.73	20.220	0.603	1.889	59.456	748.506	-239.656
22	0.74	18.968	0.633	2.020	62.048	656.809	-260.818
23	0.75	17.799	0.704	2.115	64.478	535.274	-272.262
24	0.77	16.694	0.824	2.154	67.527	400.937	-271.566
25	0.78	15.741	0.892	2.171	68.570	282.605	-283.780
26	0.79	14.843	0.960	2.168	69.660	176.316	-265.960
27	0.80	14.091	0.971	2.141	69.322	110.539	-248.071
28	0.82	13.376	0.945	2.126	69.245	70.481	-212.275
29	0.83	12.758	0.831	2.134	68.371	47.704	-181.148
30	0.84	12.284	0.687	2.147	67.173	5.485	-150.498

Tablica 6 Rezultati za protok Q6

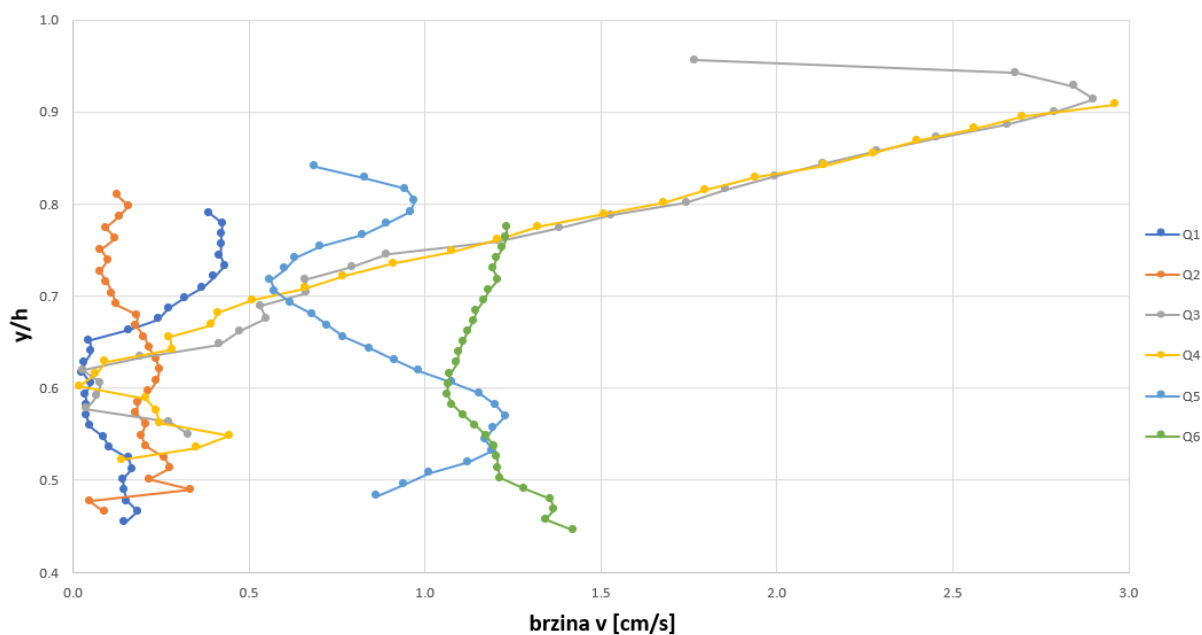
stupac	y/h	u ( srednja brzina ) [cm/s]	v ( srednja brzina ) [cm/s]	w ( srednja brzina ) [cm/s]	TKE [cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	RSS (u,w) [μPa]	RSS (v,w) [μPa]
1	0.45	11.013	1.424	-0.217	31.940	57.884	26.616
2	0.46	12.174	1.343	-0.268	27.793	67.455	18.933
3	0.47	13.092	1.368	-0.281	22.638	63.114	14.017
4	0.48	14.298	1.356	-0.233	17.590	57.494	12.847
5	0.49	14.829	1.281	-0.236	13.674	63.144	4.977
6	0.50	15.450	1.215	-0.222	10.717	71.073	7.676
7	0.51	15.847	1.206	-0.183	9.042	78.797	8.971
8	0.53	16.116	1.206	-0.141	7.659	87.979	6.665
9	0.54	16.275	1.198	-0.132	6.678	90.496	8.569
10	0.55	16.398	1.176	-0.137	5.973	92.055	10.095
11	0.56	16.473	1.144	-0.137	5.560	92.336	10.888
12	0.57	16.535	1.110	-0.128	5.153	92.645	12.585
13	0.58	16.619	1.078	-0.115	4.745	92.892	11.678
14	0.59	16.624	1.064	-0.118	4.480	92.271	11.763
15	0.60	16.622	1.068	-0.103	4.231	92.069	10.552
16	0.62	16.580	1.073	-0.097	4.111	90.694	7.547
17	0.63	16.503	1.091	-0.089	4.153	90.505	4.279
18	0.64	16.395	1.097	-0.072	4.353	90.594	2.217
19	0.65	16.222	1.110	-0.060	4.687	89.093	0.313
20	0.66	16.027	1.122	-0.047	5.035	87.397	-0.685
21	0.67	15.856	1.139	-0.044	5.389	84.945	0.416
22	0.68	15.655	1.147	-0.044	5.839	82.959	1.294
23	0.70	15.453	1.169	-0.057	6.429	78.941	2.701
24	0.71	15.271	1.182	-0.047	6.960	77.385	4.120
25	0.72	15.047	1.208	-0.030	7.908	68.662	5.660
26	0.73	14.768	1.194	-0.011	8.928	61.895	5.421
27	0.74	14.503	1.204	0.008	10.007	55.101	7.241
28	0.75	14.230	1.222	0.008	11.693	41.942	9.028
29	0.76	13.884	1.231	0.028	13.220	30.079	14.501
30	0.78	13.465	1.233	0.017	15.766	16.739	14.773

Za brzine u, v i w izračunata je njihova srednja vrijednost u svakom od 30 stupaca za svih 6 protoka i na sljedećim grafovima su prikazane njihove vrijednosti u cm/s. Na y osi je prikazan omjer udaljenosti ćelije y i srednje vrijednosti udaljenosti korita h prema izrazu: y/h za svaki od 6 protoka, a na x osi vrijednosti brzina u cm/s:



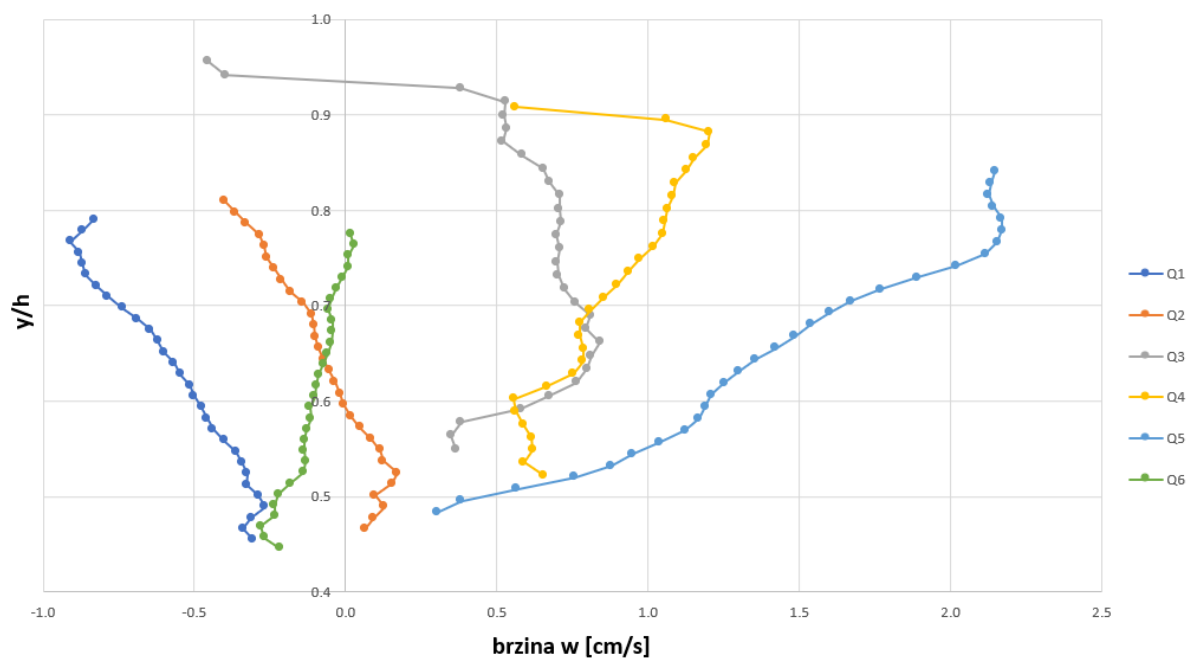
Slika 11 Graf srednje brzine u

Na grafu srednje brzine  $v$  može se vidjeti da su u protocima Q1 i Q3 njezine vrijednosti manje, a u protocima Q4 i Q5 veće u odnosu na ostale protoke.



Slika 12 Graf srednje brzine  $v$

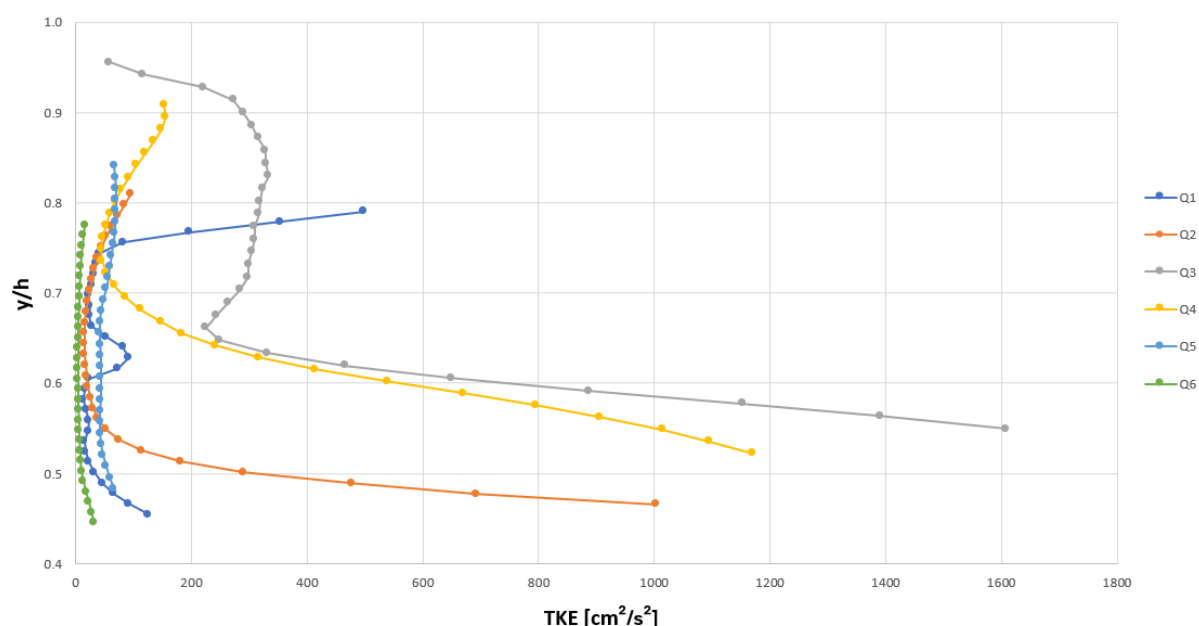
Na grafu srednje brzine  $w$  može se vidjeti da su u protocima Q1 i Q2 njezine vrijednosti manje, a u protocima Q3 i Q4 veće u odnosu na ostale protoke.



Slika 13 Graf srednje brzine  $w$

Na grafu srednje brzine  $w$  može se vidjeti da su u protocima Q1 i Q2 njezine vrijednosti manje, a u protocima Q4 i Q5 veće u odnosu na ostale protoke.

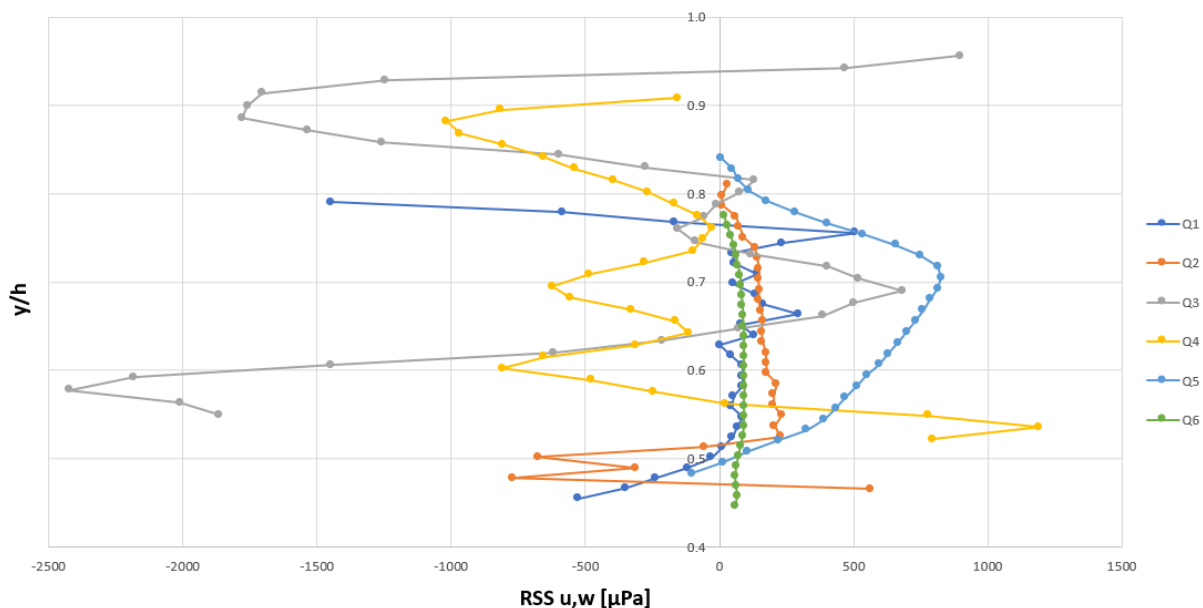
Nadalje turbulentna kinetička energija dobivena je izračunom fluktuacija brzina svake od brzina  $u$ ,  $v$  i  $w$ . Izračunom srednje vrijednosti fluktuacija za svaki od 30 stupaca i korištenjem izraza za turbulentnu kinetičku energiju dobivene su vrijednosti turbulentne kinetičke energije u svakom 6 protoka te su prikazane sljedećim grafom. Na y osi je prikazan omjer udaljenosti ćelije  $y$  i srednje vrijednosti udaljenosti korita  $h$  prema izrazu:  $y/h$  za svaki od 6 protoka, a na x osi vrijednosti turbulentne kinetičke energije u  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ :



Slika 14 Graf Turbulentne kinetičke energije

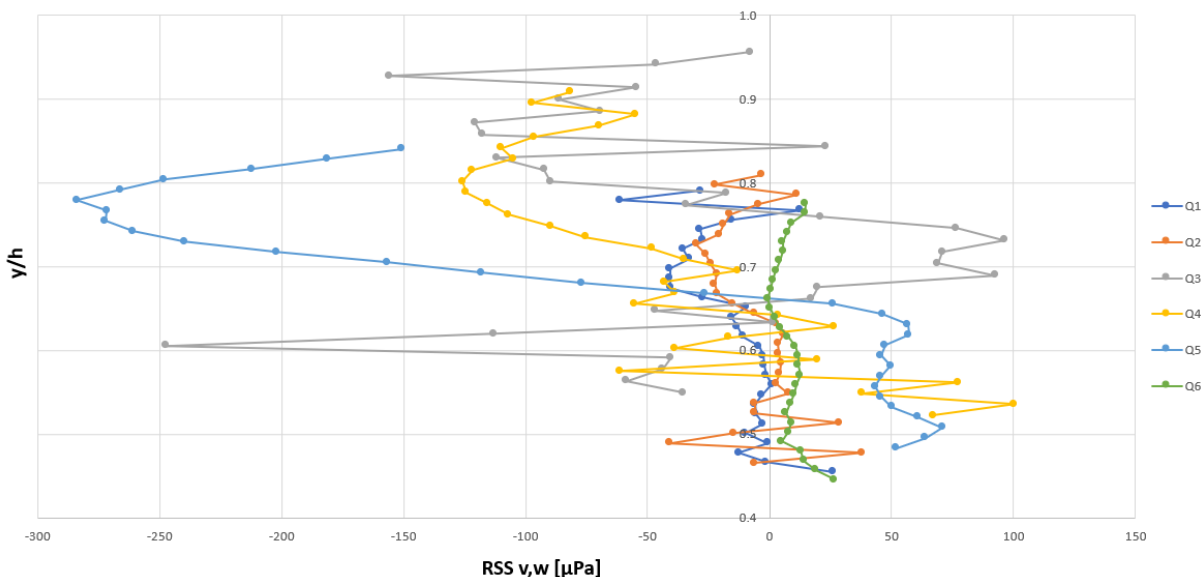
Na grafu Turbulentne kinetičke energije može se vidjeti da se njezina vrijednost smanjuje s povećanjem protoka, tj. njene vrijednosti su manje u protocima Q5 i Q6 u odnosu na ostale protoke. Najveće vrijednosti TKE ima u protoku Q3.

Reynoldsova posmična naprežanja u  $u$ ,  $w$  i  $v$ ,  $w$  smjeru za svih 6 protoka dobivena su množenjem srednjih vrijednosti fluktuacija brzina svakog od 30 stupaca koje su izračunate za potrebu proračuna turbulentne kinetičke energije. Na y osi je prikazan omjer udaljenosti ćelije  $y$  i srednje vrijednosti udaljenosti korita  $h$  prema izrazu:  $y/h$  za svaki od 6 protoka, a na x osi vrijednosti Reynoldsovih posmičnih naprežanja u  $\mu\text{Pa}$ . Vrijednosti su prikazane sljedećim grafovima:



Slika 15 Graf Reynoldsovih posmičnih naprežanja  $u$ ,  $w$  smjer

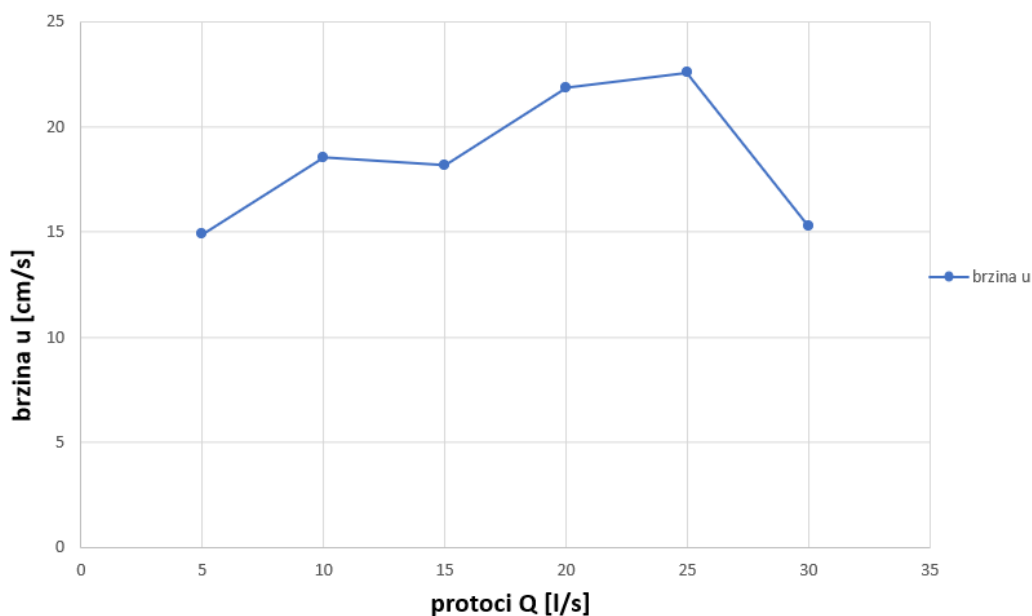
Na grafu Reynoldsovih posmičnih naprežanja  $u$ ,  $w$  smjeru može se vidjeti da su njihove vrijednosti znatno manje u protoku Q3 u odnosu na ostale protoke. Najveće vrijednosti su u protocima Q4 i Q5.



Slika 16 Graf Reynoldsovih posmičnih naprežanja  $v$ ,  $w$  smjer

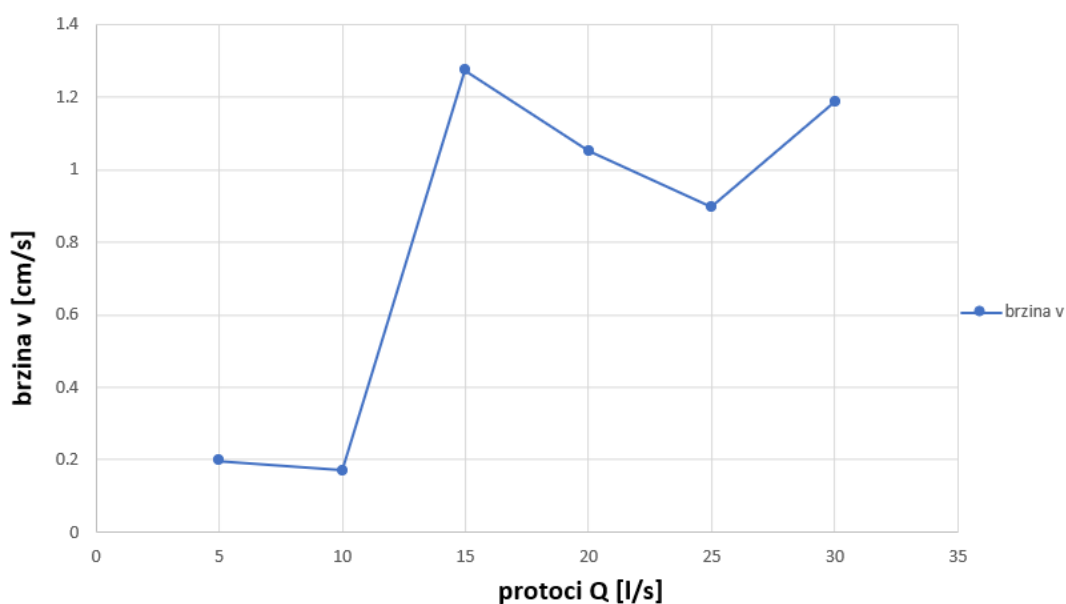
Na grafu Reynoldsovih posmičnih naprežanja  $u$ ,  $v$ ,  $w$  smjeru može se vidjeti da su njihove vrijednosti manje u protoku Q5 u odnosu na ostale protoke. Najveće vrijednosti su u protocima Q4 i Q3.

Na sljedećim grafovima je prikazano kako se srednje vrijednosti  $u$ ,  $v$  i  $w$  brzina, Reynoldsovih posmičnih naprezanja i Turbulentne kinetičke energije za svaki od 6 protoka mijenjaju s porastom protoka:



Slika 17 Graf srednjih vrijednosti srednje brzine  $u$  po protocima

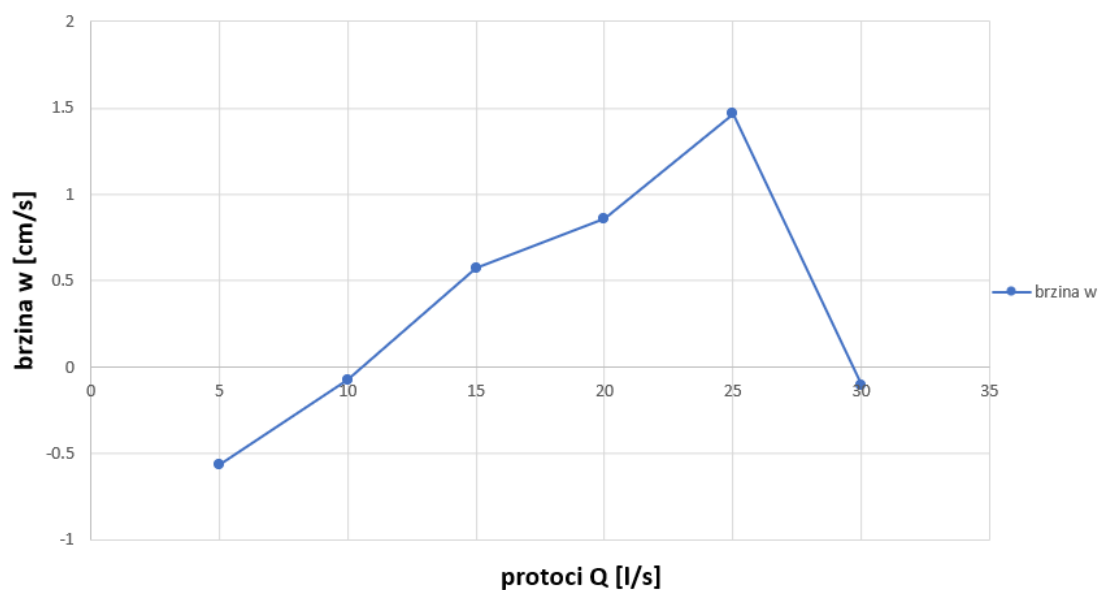
Na grafu srednjih vrijednosti srednje brzine  $u$  po protocima možemo vidjeti da je najveća njezina srednja vrijednost u protoku Q5, a najmanja u protocima Q1 i Q6.



Slika 18 Graf srednjih vrijednosti srednje brzine  $v$  po protocima

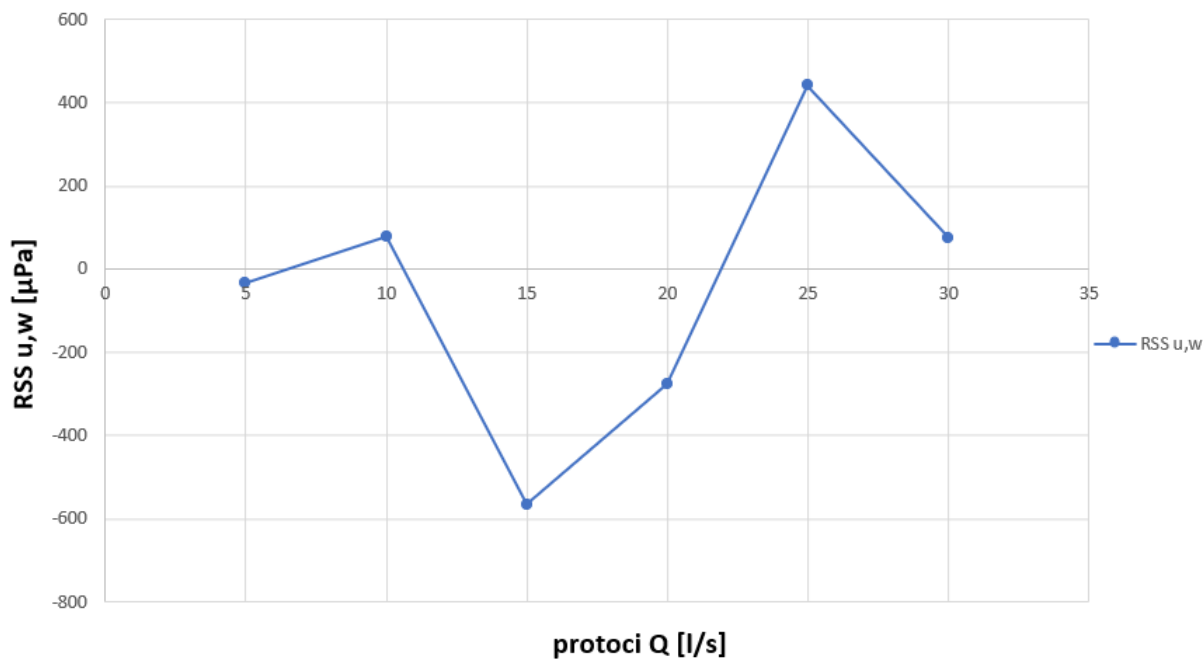


Na grafu srednjih vrijednosti srednje brzine  $w$  po protocima možemo vidjeti da je najveća njezina srednja vrijednost u protoku Q3, a najmanja u protoku Q2.



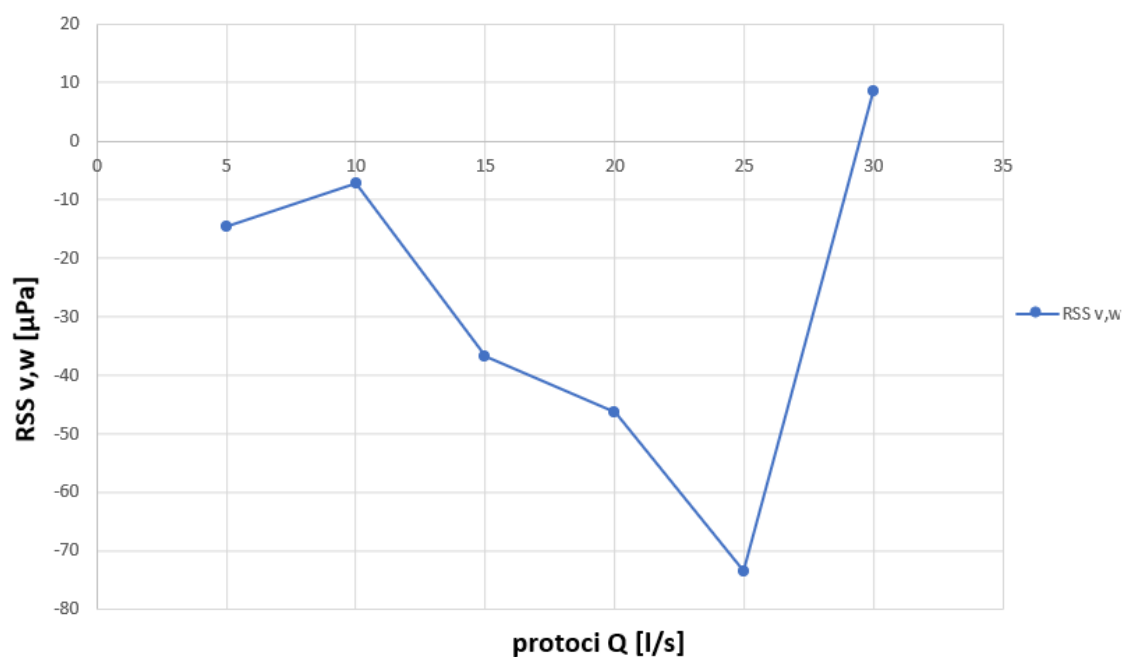
Slika 19 Graf srednjih vrijednosti srednje brzine  $w$  po protocima

Na grafu srednjih vrijednosti srednje brzine  $w$  po protocima možemo vidjeti da je najveća njezina srednja vrijednost u protoku Q5, a najmanja u protoku Q1.



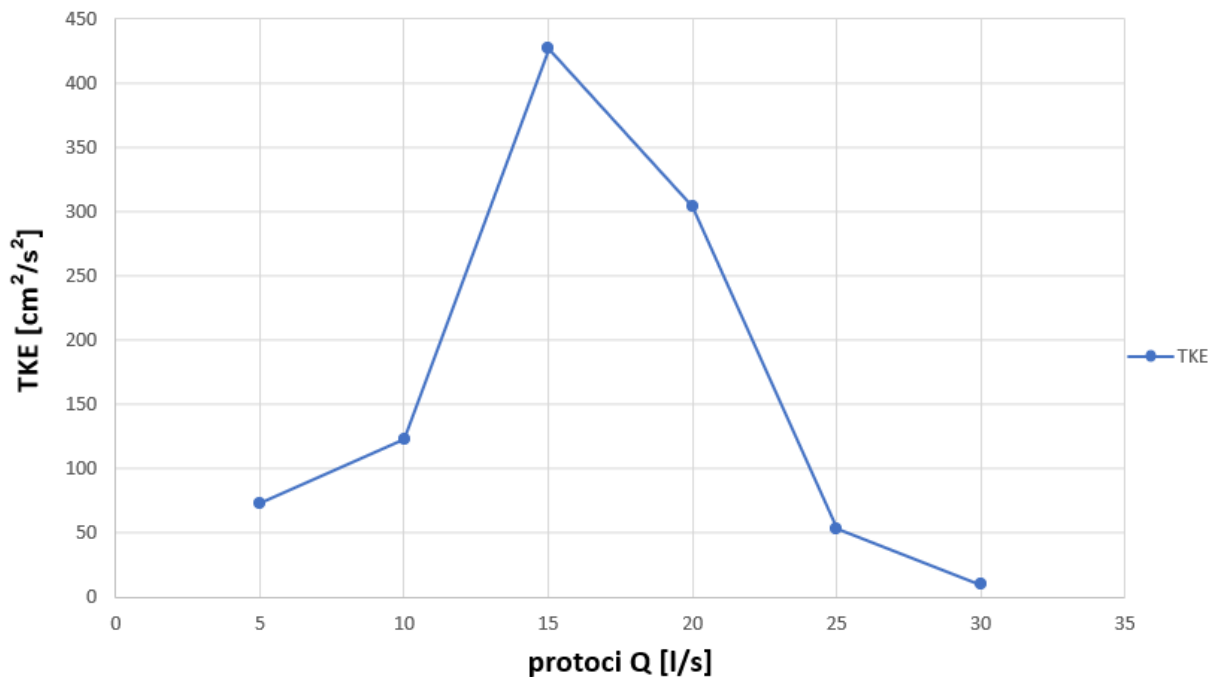
Slika 20 Graf srednjih vrijednosti Reynoldsovih posmičnih naprezanja  $u,w$  smjer po protocima

Na grafu srednjih vrijednosti Reynoldsovih posmičnih naprezanja u u,w smjeru po protocima možemo vidjeti da je njihova vrijednost najveća u protoku Q5, a najmanja u protoku Q3.



Slika 21 Graf srednjih vrijednosti Reynoldsovih posmičnih naprezanja v, w smjer po protocima

Na grafu srednjih vrijednosti Reynoldsovih posmičnih naprezanja u v, w smjeru po protocima možemo vidjeti da je najveća njihova vrijednost u protoku Q6, a najmanja u protoku Q5.



Slika 22 Graf srednjih vrijednosti Turbulentne kinetičke energije po protocima

Na grafu srednjih vrijednosti Turbulentne kinetičke energije po protocima možemo vidjeti da je najveća njihova vrijednost u protoku Q3, a najmanja u protoku Q6.

## 5 ZAKLJUČAK

U ovom radu opisana je obrada eksperimentalnog profila brzine za uvjete pokretnog dna na temelju podataka dobivenih iz eksperimenata u hidrauličkom kanalu. Na umanjenim modelima u hidrauličkom kanalu provodi se istraživanje podlokavanja oko stupova mosta zbog čega može doći do gubitka stabilnosti mosta i mogućeg otkazivanja konstrukcije. Na temelju podataka izmjerenih ADVP uređajem (vektora brzine vode) mogu se izračunati varijable koje su potrebne za ocjenu stanja korita (turbulentna kinetička energija i Reynoldsovo naprezanje), te ocijeniti utjecaj toka na korito i posljedično građevine smještene u njemu. Negativno djelovanje toka na obale i mostove poticalo je brojna istraživanja mnogih inženjera i znanstvenika tijekom prošlosti kako bi se došlo do saznanja kako i na koji način dolazi do takvih djelovanja. U ovom radu analizirani su podaci o profilu brzine koji su snimljeni u jednoj točki za 6 protoka. Na mjestima gdje su izmjerene veće brzine strujnica u toku, vrijednosti srednjih brzina, Reynoldsovih posmičnih napreznja i turbulentne kinetičke energije su veće, a upravo veće brzine strujnica i veće vrijednosti ostalih komponenti uzrokuju veća i jača djelovanja na korito rijeke.

---

## POPIS LITERATURE

- [1] Gilja, G., Harasti, A., Potočki, K., Varga, M.: Istraživački okvir projekta R3PEAT daljinsko praćenje erozije riprapi zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu, Conference: Nanos u vodnim sustavima stanje i trendovi – At: Varaždin, Croatia, 2020.
- [2] HRVATSKO STRUKOVNO NAZIVLJE, pristup dana 23.06.2023. <http://struna.ihjj.hr/naziv/podlokavanje>
- [3] Čibarić, A., Troskot, N., Veseljak, M., Vukovac, M.: Utjecaj karakteristika toka kroz mostovski profil na nastavak kaverne od podlokavanja, Sveučilište u Zagrebu GRAĐEVINSKI FAKULTET (2021)
- [4] POMORSKA ENCIKLOPEDIJA I. IZDANJE, pristup dana 7. 7.2023. <https://pomorska.lzmk.hr>
- [5] Cikojević, A., Gilja, G.: Pregled postojećeg stanja znanja u istraživanju razvoja odbačene Kaverne uz riprapi zaštitu, UDRUGA HRVATSKIH GRAĐEVINSKIH FAKULTETA, ZAJEDNIČKI TEMELJI, Rijeka-25. – 27. 9.2019.
- [6] Lončar, G.: Muh 3 RH, prezentacija s kolegija Modeliranje u hidrotehnici, smjer Hidrotehnika sveučilišni diplomski studij, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet
- [7] Karaki, S.: Laboratory Study of Spur Dikes for Highway Bridge Protection Hydraulic model study of spur dikes for highway bridge openings, Washington DC, United States, Highway Research Board, 1959
- [8] Kuhnle, R., Alonso, C.: Flow near a model spur dike with a fixed scoured bed, International Journal of Sediment Research, vol. 28, 2013, pp. (349-357), doi: 10.1016/S1001-279(13)60045-1
- [9] Wilson, K.V.: Scour at selected bridge sites in Mississippi, Jackson, Mississippi, Denver, 1995
- [10] Zaid, M., Yazdanfar, Z., Chowdhury, H., Alam, F.: Numerical modeling of flow around a pier mounted in a flat and fixed bed, Energy Procedia, vol. 160, 2019, pp. 51-59 doi:0.1016/j.egypro.2019.02.118
- [11] Mohammad, T.A., Megat Mohd Noor, M.J., Ghazali, A.H.: Validation of Some Bridge Pier Scour Formulae Using Field and Laboratory Data, American Journal of Environmental Sciences, vol. 1, 2005, pp., doi: 10.3844/ajessp.2005.119.125

- [12] Moussa, Y., Atta, M.: Simulation of Scour at Bridge Supports, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 9, pp. 793-801, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2506.2018>

## POPIS SLIKA

Slika 1: Most „Sava – Jakuševac“ nakon oštećenja (Izvor: internet).....	1
Slika 2: Most „Đurmanec“ nakon oštećenja (Izvor: [3]) .....	2
Slika 3: Most na državnoj cesti Strahovica-Kamnik, Slovenija nakon oštećenja (Izvor: internet) .....	2
Slika 4: Hidraulički kanal, Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta, Zagreb (Izvor: fotografirano u laboratoriju Zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu).....	5
Slika 5: ADVP uređaj, Zavod za hidrotehniku Građevinskog fakulteta, Zagreb (Izvor: fotografirano u laboratoriju Zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu).....	6
Slika 6: Izmjerena vremenska serija brzina u točki strujnog polja (Izvor: [6]).....	7
Slika 7: Shematski crtež Karakijevog kanala za provođenje istraživanja (Izvor: [7]).....	8
Slika 8: Načini na koji su postavljeni temelji stupova mostova s potpornjima (Izvor: [9]).....	9
Slika 9: Shematski prikaz modela stupa mosta u kanalu gdje se provodilo istraživanje (Izvor: [11]) .....	10
Slika 10: Model kanala u kojem se provodilo istraživanje (Izvor: [12]).....	11
Slika 11: Graf srednje brzine u .....	16
Slika 12: Graf srednje brzine v .....	17
Slika 13: Graf srednje brzine w .....	17
Slika 14: Graf Turbulentne kinetičke energije .....	18
Slika 15: Graf Reynoldsovih posmičnih naprezanja u,w smjer .....	19
Slika 16: Graf Reynoldsovih posmičnih naprezanja v,w smjer .....	19
Slika 17: Graf srednjih vrijednosti srednje brzine u po protocima .....	20
Slika 18: Graf srednjih vrijednosti srednje brzine v po protocima .....	20
Slika 19: Graf srednjih vrijednosti srednje brzine w po protocima .....	21
Slika 20: Graf srednjih vrijednosti Reynoldsovih posmičnih naprezanja u,w smjer po protocima .....	21
Slika 21: Graf srednjih vrijednosti Reynoldsovih posmičnih naprezanja v,w smjer po protocima .....	22
Slika 22: Graf srednjih vrijednosti Turbulentne kinetičke energije po protocima .....	23

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Rezultati za protok Q1.....	13
Tablica 2: Rezultati za protok Q2.....	14
Tablica 3: Rezultati za protok Q3.....	14
Tablica 4: Rezultati za protok Q4.....	15
Tablica 5: Rezultati za protok Q5.....	15
Tablica 6: Rezultati za protok Q6.....	16