

Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet

Modul za hidrotehniku i vodno-ekološko inženjerstvo



SEMINARSKI RAD IZ PREDMETA

MERENJE U HIDROTEHNICI

Radarsko i optičko merenje (LSPIV) površinske brzine vode

Studenti:

Dušan Jolić 580/19

Filip Đorđević 581/19

Teodora Kirćanski 601/19

Nevenka Bašić 602/19

Predmetni nastavnik:

Prof.dr Dušan Prodanović

Predmetni asistenti:

Miloš Milašinović

Doc.dr Damjan Ivetić

Maj 2020, Beograd

Radarsko i optičko merenje (LSPIV) površinske brzine vode

Sažetak:

U ovom seminarском radu imaćete priliku da se upoznate sa teorijskim osnovama radarskog i optičkog merenja, kao i sa praktičnom primenom istih. Poslednjih godina su sve popularnije pomenute metode za merenje površinskih brzina. Stoga se isplati i dalje razrađivati i prezentovati ove metode kako bi one dobile širu upotrebu. Glavne prednosti optičke metode jesu jednostavnost i niska cena za standardne uslove merenja, a za radarske metode jednostavnost postavljanja opreme. Specifičnost ovih metoda jeste u tome što se u teorijskom delu hidraulike koriste srednje profilske brzine a ne površinske, pa je potrebno odrediti i njihovu međusobnu zavisnost za konkretne deonice.

Maj 2020, Beograd

Sadržaj

1. Uvod.....	2
2. Radarsko merenje površinske brzine.....	3
3. Primer radarskog merenja	4
4. Optičke metode za merenje brzine	7
• LSPIV metoda (Large Scale Particle Velocimetry)	8
• Načini za pravljenje snimaka u LSPIV metodi	11
5. Primer optičkog merenja	13
• Opis instalacije za ispitivanje	13
• Opis merenja.....	14
• Rezultati merenja.....	18
• Zaključci ispitivanja na fizičkom modelu	22
6. Zaključak.....	23
7. Literatura	24

Uvod

Brzina vode, pored nivoa (odnosno pritiska), jeste hidraulička veličina koja je u nekim slučajevima najbliža hidroiženjerima. Sa jedne strane, uz razvoj tehnologije, postala je lako merljiva. Dok sa druge strane predstavlja osnovu za optimalno upravljanje vodoprivrednim sistemima, kao i za projektovanje istih.

Nekada to nije važno u svim slučajevima, pa se do brzine vode i protoka teže dolazilo. Prvenstveno se to odnosilo na merenje brzine vode u kanalizaciji. Stare metode merenja brzine vode, i sama oprema je bila dosta osetljiva na rastvorene materije i plivajuće predmete. Tako da su često i sama ta merenja bila uzaludna, pošto bi merna oprema davala netačne rezultate. Takođe, bilo je prisutno i nezadovoljstvo kod merenja plitkih tokova. U cilju savladavanja svih problema i pronalaženja načina dolaska do bitnih veličina za stručno upravljanje i projektovanje, neophodno je bilo razviti kako novi tehnološki tako i novi teorijski pristup merenjima.

U nastavku će biti prikazane bezkontaktne metode merenja brzine rečne i kanalizacione vode. Bezkontaktno merenje (*eng. remote sensing*) protoka podrazumeva da merni senzor ne dodiruje vodu. U praksi se najčešće koriste radarske i optičke metode. Radarsko ili ultrazvučno merenje površinske brzine se bazira na merenju Doplerovog pomaka reflektovanog talasa [1]. Optičko merenje se bazira na obradi fotografija površine vode, ona se još naziva Large-Scale Particle Image Velocimetry (*LSPIV*).

Na samom kraju, biće prikazana merenja brzine vode u kućnoj laboratoriji. Na konkretnom primeru je upoređena primena klasične volumetrijske metode i dve metode koje rade po principu obrade video snimaka.

1. Radarsko merenje površinske brzine

Radarsko merenje površinske brzine zasniva se na merenju promene frekvencije reflektovanog signala sa površine vode, usled Doplerovog (*Doppler*) efekta. Iz predajnika se emituje impuls određene frekvencije F , koji se prostire kroz vazduh sve dok ne dotakne površinu vode. Kada dotakne površinu vode, odbija se od nje i vraća nazad ka prijemniku. Prijemnik registruje impuls sa vremenskim kašnjenjem, koje je proporcionalno putu koji prodje impuls (od predajnika do površine vode i nazad), ali i sa promenjenom frekvencijom $F \pm \Delta F$. Promena frekvencije je proporcionalna brzini kojom se površina, od koje se odbio signal, približava (pozitivan ΔF) ili udaljava (negativan ΔF) [1]. Talasi na površini vode izazivaju refleksiju. Ta činjenica nameće uslov za primenu ove metode koja zahteva da talasi koji reflektuju radarski zrak putuju brzinom vode.

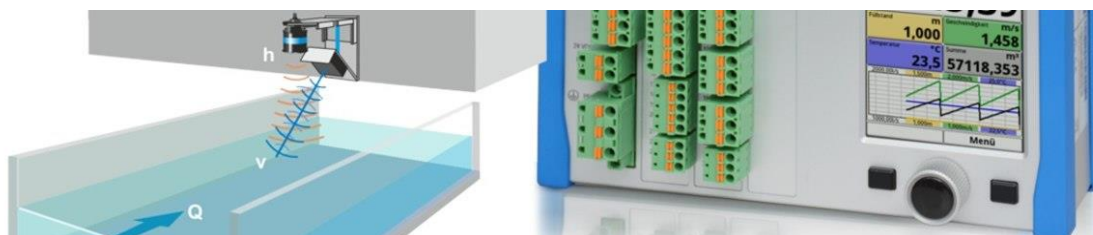


Slika 1: Primer fiksnog radara za merenje površinske brzine vode na otvorenom vodotoku



Slika 2: Dva primera mobilnog radara za merenje površinske brzine vode na otvorenom vodotoku (pomeranjem radara preko celog preseka omogućeno je snimanje površinskih brzina u celom poprečnom preseku)

Radarom se može izmeriti samo površinska brzina vode. Često nam je potrebna i dubina vode, koju najlakše dobijamo ultrazvučnim merenjem. Takođe nam je bitan koeficijent preslikavanja sa površinske brzine na srednju protočnu brzinu, a za njegovo dobijanje je potrebno vršiti povremena detaljna hidrometrijska merenja. Zanimljivo je da taj koeficijent nije konstantan već zavisi od protoka i dubine vode.



Slika 3: Primer kombinovanja radarskog i ultrazvučnog merenja dubine, sa procesorom koji računa protok

Prednosti metode:

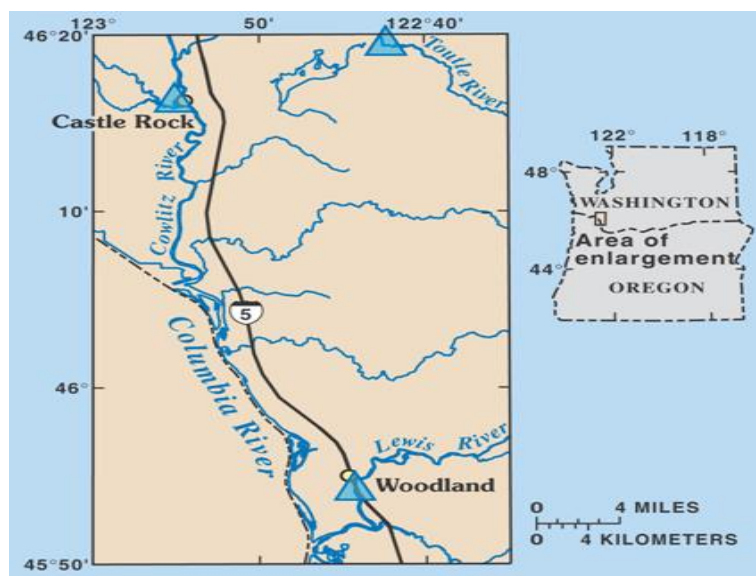
1. jednostavno postavljenje opreme
2. tačnost zavisi od kalibracije

Nedostaci metode:

1. oprema je skupa (investicioni troškovi su veliki, troškovi održavanja nisu)
2. za povratni tok potrebna je još skuplja oprema
3. pogrešna merenja će se dobiti ako se uređaj nađe u zoni uticaja vetrova
4. ne meri male brzine, u zoni uspora
5. neprimenjiva je u slučaju kolektora pod pritiskom

2. Primer radarskog merenja

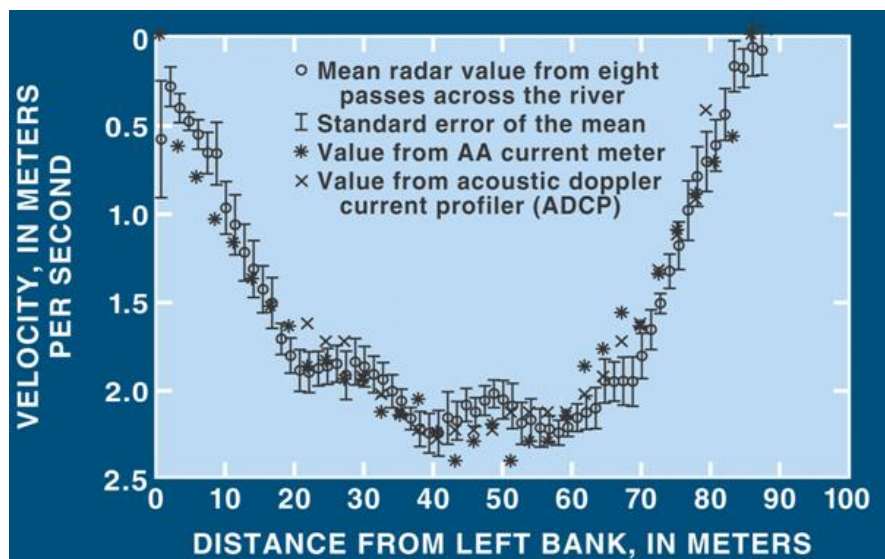
Radarska tehnologija je korišćena na ispitivanju koje je vršio Geološki topografski institut SADA (USGS, United States Geological Survey). Istraživanje je rađeno 2000/2001. godine na području gradova Castl Rock (reke Cowlitz i Toutle) i Woodland (reka Lewis) u SADu (Slika 4).



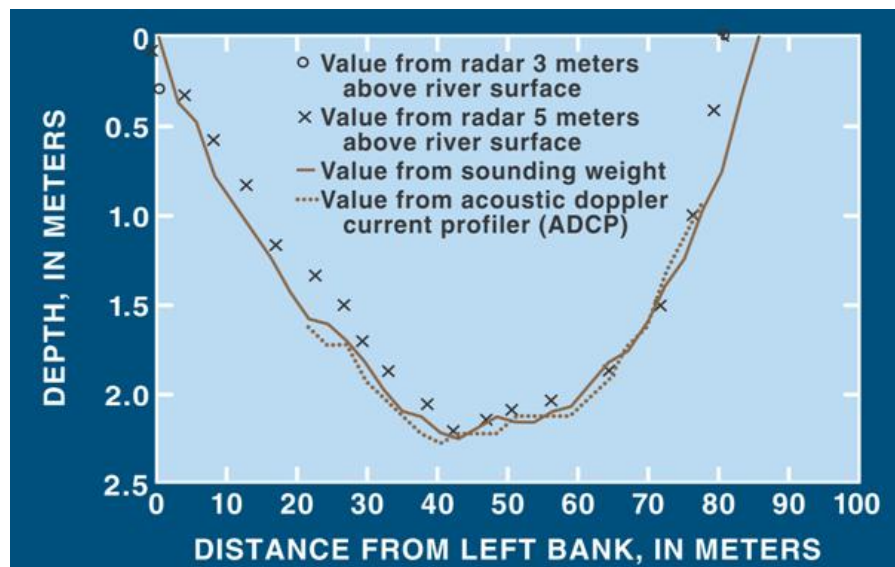
Slika 4: Prikaz područja na kojima je rađeno ispitivanje

Radar, koji je bio prikazan na donjoj strani helikoptera, pravio je zapis brzine vode, kao i površinu poprečnog preseka korita. Helikopter nije pravio smetnje pri slanju radaskih signala. Helikopter se nalazio na rastojanju od 3 do 5 metara od same površine vode. Podaci o brzinama i poprečnim presecima su bili zabeleženi za svako merenje, takođe bilo je potrebno da se vodi evidencija o položaju i stavu helikoptera za vreme merenja.

Rezultati ispitivanja su prikazani na slikama (Slika 5 i Slika 6).



Slika 5: Prikaz rezultata ispitivanja (brzina)



Slika 6: Prikaz rezultata ispitivanja (dubina)

Na prethodnim slikama su prikazani rezultati ispitivanja. Na slici 5 je prikazan raspored brzina po poprečnom preseku. Takođe je na slici prikazan izgled dna korita za određeni poprečni presek, koje je dobijeno primenjivanjem različitih metoda (ADCP, radarskim ispitivanjem...). Na slici 6 je prikazan raspored dubina po porečnom preseku, kao i izgled dna korita u poprečnom preseku, koje je dobijeno primenom različitih metoda ispitivanja.

Na prethodne dve slike se može takođe uočiti da se rezultati merenja različitim metodama vrlo dobri i da se rezultati približno poklapaju. Bilo je neophodno odraditi veći broj merenja da bi se lakše odredilo rasipanje rezultata, tako da je na osnovu toga zaključeno da zbog dobijenog rasipanja rezultata nije moguće odraditi samo jedno merenje.

Uočeno je da je pogodnije raditi sa ovom metodom pri većim brzinama, a da se pri manjim brzinama dobijaju lošiji rezultati.

Merenja radarskom metodom su vrlo pogodna, prvenstveno zato što je jednostavna primena. Prethodno je potrebno ispitati uslove pri kojima će se vršiti merenje (da ne bi došlo do nekog oštećenja sonde pri merenju ili bilo kakvih smetnji). Jedan od primera gde se može primeniti radarsko merenje je kao dopuna hidrološkim stanicama za merenja pri nailasku velikih voda.

3. Optičke metode za merenje brzine

Poslednjih godina je sve popularniji način merenja brzina koji je baziran na obradi slika. Optičke metode koje se zasnivaju na obradi slika i primenjuju se u laboratoriji su PIV metoda (Particle Image Velocimetry), odnosno PTV metoda (Particle Tracking Velocimetry). Ove metode snimaju brzine unutar strujnog polja jer se koristi laser koji osvetli jednu ravan, pa se snimaju deliћи unutar te ravni (Slika 7 – levo). Brzina fluida se meri tako što se prate deliћи koji se upuštaju u tok, a kao rezultat merenja se dobija polje brzina, prikazano strelicama koje označavaju intenzitet, pravac i smer vektora brzine u nekoj tački, u 2D ili ređe u 3D. Kod PIV metode se snimaju dve slike u dva vremenska trenutka i prati se zabeleženi pomeraj na snimljenim slikama u vremenskom intervalu koji se odnosi na razliku vremenskih trenutaka u kojima su nastale slike. Ova metoda se zasniva na kroskorelacionim metodama. Metoda PTV se zasniva na praćenju pojedinačnih delića u toku, gde se onda vrši optimizacija dve uzastupno snimljene slike [5].

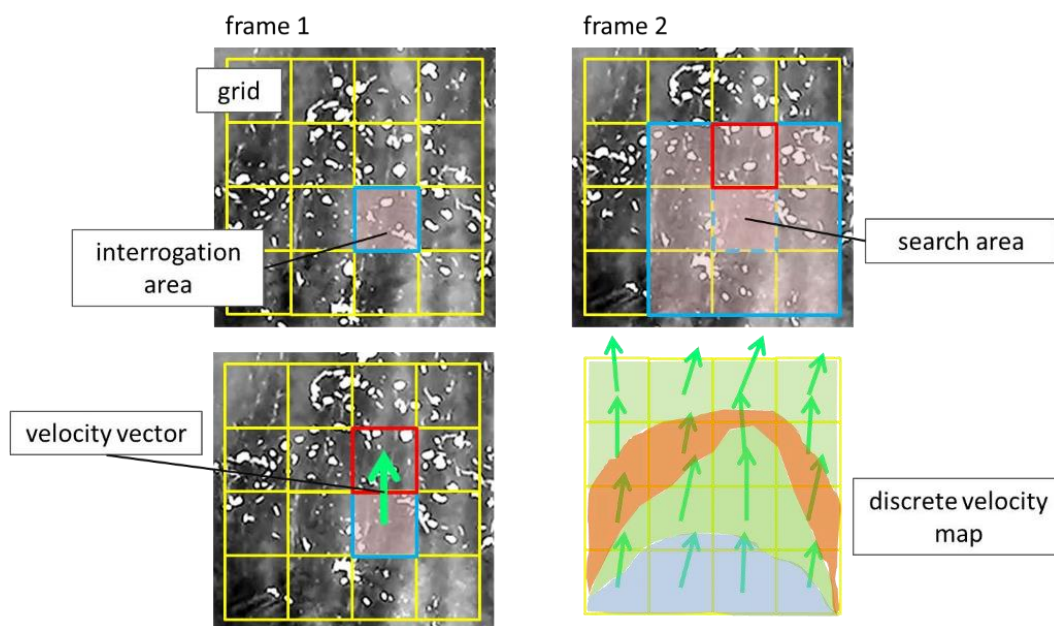
Nešto novija metoda, koja je nastala kao proširenje PIV i PTV metode je metoda LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry). Za razliku od PIV i PTV metode, koje su laboratorijske i koje snimaju brzine unutar strujnog polja, metoda LSPIV se koristi za merenja na terenu, u otvorenim tokovima, pri čemu se koristi obična video tehnika za snimanje samo gornje površine vode (Slika 7 – desno). Ova metoda će biti detaljnije prikazana u nastavku [5].



Slika 7: Način snimanja kod PIV metode (levo) i LSPIV metode (desno)

- **LSPIV metoda (Large Scale Particle Velocimetry)**

Metoda LSPIV je neinvazivna metoda koja služi za određivanje polja površinskih brzina u otvorenim tokovima. Merenja ovom metodom ne iziskuju mnogo novca, prilično su jeftina, a omogućava se merenje malih brzina, čija vrednosti iznosi do 0,15 m/s. Takođe, moguće je vršiti merenja u plitkim kanalima [5].



Slika 8: Prikaz LSPIV metode

Postupak merenja ovom metodom obuhvata sledeće korake [5]:

- 1) *Zasejavanje površine toka ekološkim i neprovidnim materijalom koji je u kontrastu sa tokom*

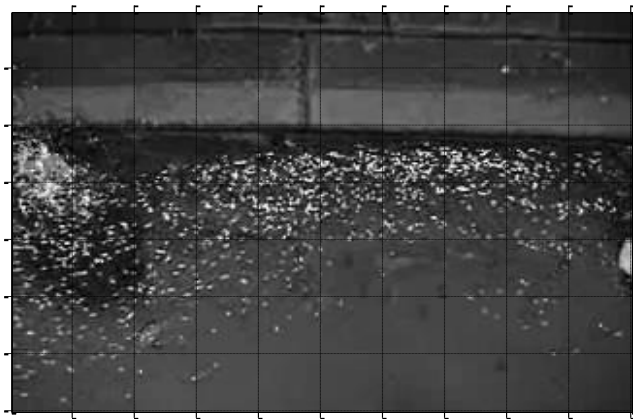
Ovaj korak je neophodan samo u slučaju kada voda na površini nije dovoljno zaprljana pa se vrši zasejavanje toka. Na primer, u kanalizaciji, gde je voda prljava, uglavnom ima dovoljno čestica, pa nije potrebno zasejavanje. Materijali kojima se zasejava tok u kojem se meri brzina se nazivaju traseri. Potrebno je da traseri budu neprovidni i u kontrastu sa tokom, kao i da dobro prijanjaju uz vodenu površinu, odnosno da ne stvaraju senku. Traseri ne treba da budu vezani, već slobodni. Njihova gustina zavisi od površine toka koja se ispituje, a veličina od rezolucije brzina koju treba postići. Zasejan tok je prikazan na slici 7 (desno).

2) *Snimanje najmanje dve fotografije sa definisanim vremenskim korakom Δt*

Najbolje je napraviti više snimaka, odnosno serije fotografija, na kojima će biti različita gustina zasejavanja toka. Od više napravljenih snimaka, biće odabrani oni najbolji. Potrebno je izabrati dve ili više fotografija sa tačno definisanim vremenskim intervalom Δt . Izbor tog intervala zavisi od intervala brzina koje je javljaju u toku. Za slučaj većih brzina, potrebno je izabrati manji vremenski korak Δt .

3) *Podela snimljenih fotografija na ispitivane regione (GRID)*

Ispitivani regioni su najčešće kvadratnog oblika, ali mogu biti i pravougaoni. Poželjno je da ispitivane površine budu $2^n \times 2^n$ piksela (16×16 , 32×32 , 64×64), kako bi se mogla iskoristiti mogućnost rada brzog algoritma 2D Furijeove transformacije.



Slika 9: Podela na ispitivane regione

4) *Računanje i poređenje kroskorelacionih koeficijenata između ispitivanih regiona*

Ispitivanjem matrica kroskorelacionih koeficijenata dobija se uvid u slaganje pojedinih regiona koji su ispitani na jednoj slici, sa regionima na drugoj. Tako se formira matrica pomeranja pojedinih regiona za vremenski korak Δt . Na primer, može se koristiti metoda koja upotrebljava 2D Furijeovu transformaciju slike:

$$iff2\left(fft2(a) \cdot fft2(conj(b))\right) \quad (1)$$

gde je:

a – ispitivani region 1

b- ispitivani region 2

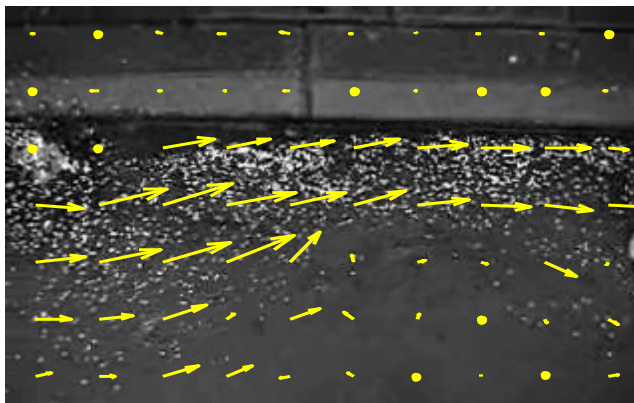
Ispitivani region 1 i 2 se odnose na regione koji su delovi mreže (GRID-a) koja je formirana na snimljenim fotografijama. Na slici 8 su prikazani ovi region 1. Region 1 je na prvom snimku (slika 8 – gore levo) označen plavim kvadratom, a region 2 je označen crvenim kvadratom (kada je utvrđeno pomeranje regiona 1 u označenoj oblasti) i vidi se na drugom snimku (slika 8 – gore desno) koji je zabeležen nakon vremenskog intervala Δt . Region 2 se odnosi na „pomereni“ region 1 nakon vremena Δt i pomoću utvrđivanja tih pomeranja ispitivanih regiona dobijaju se vektori brzina (slika 8 – dole).

5) *Ispravljjanje grešaka metode upotrebom postprocesnih tehnika*

Greške se javljaju na više načina usled nedovoljne zasejanost toka, loše izabrane veličine ispitivanih regiona ili nemogućnosti da se pronađe gde se neki region pomerio (matrica korelacije nema jasan pik). Jedan od načina da se nastale greške isprave je interpolacija ili kriging tehnike.

6) *Vizuelizacija polja brzina*

Iz vizuelizovanog polja površinskih brzina moguće je da se generišu strujnice ili protok.



Slika 10: Dobijeno polje brzina

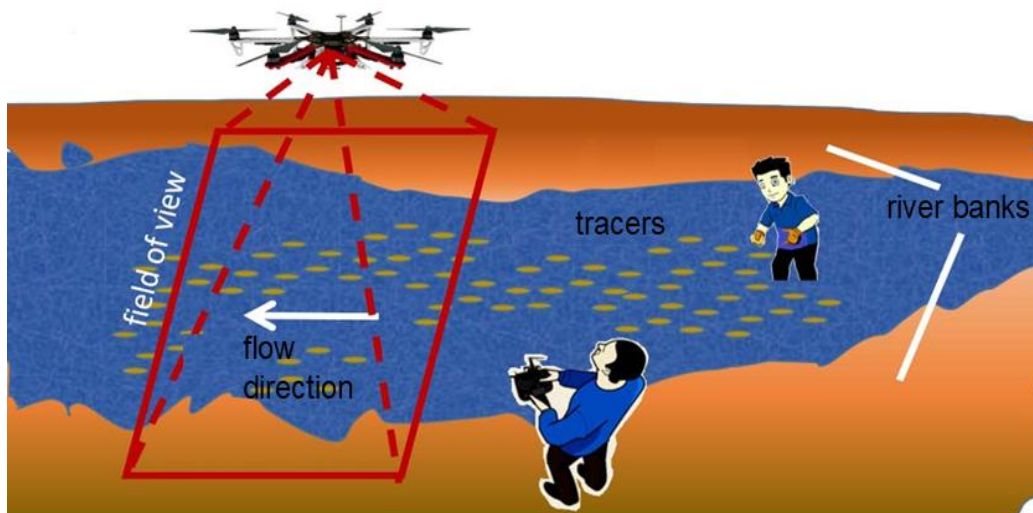
Jedna od prednosti merenja površinske brzine LSPIV metodom bi bila ta, što se ovom metodom dobija kompletan raspored brzina na površini. Pored toga, bitna prednost je i što uklapanje sa numeričkim modelom daje prilično tačan protok.

Kao nedostaci ove metode bi se mogle navesti činjenice da softver još uvek nije dovoljno usavršen, kao i komplikovanost pri postavljanju mernog sistema.

- ***Načini za pravljenje snimaka u LSPIV metodi***

Pored standardnih načina pravljenja snimaka „običnim“ kamerama, sa napretkom tehnologije javili su se i novi načini snimanja vodenih tokova, koji se obrađuju LSPIV metodom. Neki od tih načina biće ukratko predstavljani u nastavku.

- UAV (Unmanned Aerial Vehicle) – bespilotne letelice kojima se snima tok. Ovi uređaji imaju daljinsko upravljanje i njima se na siguran način dobijaju snimci površine vodenog toka. Iz snimaka se izvlače fotografije sa određenim vremenskim korakom Δt , koje se dalje obrađuju 2D kroskorelacionim metodama pomoću kojih se dobija polje brzina. Ispitivanje fotografija se bazira na PIV metodama obrade slika. UAV kamera nije fiksirana na nekom objektu koji je statičan (kao u slučaju standardnih kamera za snimanje), pa zbog toga može doći do pomeranja uređaja tokom snimanja usled vetra i male težine letelice. Problem kod UAV kamere je vremenska stabilnost između snimaka, kao i to što može postojati pristrasnost merenja između snimaka. Ovi problemi se moraju rešiti pre nego što se pristupi ispitivanjima slika, kako se ne bi dobili pogrešni rezultati merenja polja brzine toka [7].



Slika 11: UAV način snimanja

- DischargeKeeper – uređaj za optičko merenje površinske brzine u prirodnim vodotocima, kanalizacionim kolektorima i sistemima za navodnjavanje. Uređaj vrši direktno izračunavanje protoka snimljenog toka. Ovaj uređaj se sastoji od IP kamere, infracrvenog snopa i mernog pretvarača sa daljinskim prenosom podataka. Snimanjem površine toka dobija se profil površinske brzine pomoću optičke metode, zasnovane na kroskorelaciji. Ovim uređajem se pored snimanja površinske brzine, snima i merna letva, pa se obradom snimaka dobija i nivo vode, a zatim se iz poznatog poprečnog profila računa dubina. Takođe, određuje se i vertikalni profil brzina. Nakon toga se direktno dobija protok. Vrlo malo vremena je potrebno da se dobiju rezultati, odnosno izmerene površinske brzine, nivo vode i protok. Sam postupak merenja traje otprilike 40 sekundi. Izmerene vrednosti i zabeleženi snimci se čuvaju i moguće ih je proslediti korisniku [8].



Slika 12: DischargeKeeper uređaj



Slika 13: Princip po kojem radi DischargeKeeper uređaj

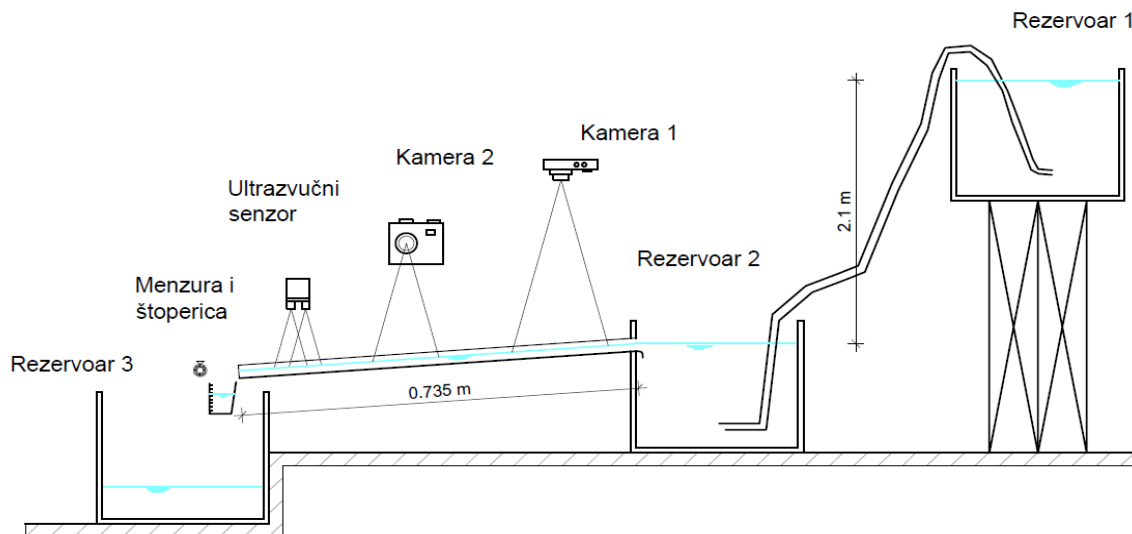
4. Primer optičkog merenja

Na konkretnom primeru ispitane su metode koje na osnovu video snimaka daju rezultate površinskih brzina, odnosno upoređivanje rezultata dobijenih na osnovu klasičnog volumetrijskog principa sa rezultatima dobijenim na osnovu dve metode koje rade po principu obrade video snimaka.

- *Opis instalacije za ispitivanje*

Ispitivanje je vršeno u kućnim uslovima na modelu koji je prikazan na slici 14. Model predstavlja kanal između dva rezervoara (rezervoara 2 i rezervoara 3). Dužina kanala iznosi 73.5 cm, sa poprečnim presekom širine 5.9 cm i visine 2.5 cm. Kanal je postavljen pod nagibom od 1.1 %. Na modelu se nalaze tri rezervoara, svaki od njih ima istu zapreminu od po 15 l. Da bi se omogućio gravitacioni proticaj vode od rezervoara 1 do rezervoara 3, rezervoar 1 je podigut toliko da je denivelacija između nivoa u rezervoaru 1 i rezervoaru 2 iznosila 210 cm. Duž kanala postavljene su dve kamere, odnosno dva mobilna telefona kojima je sniman kanal, ultrazvučni aparat kojim je merena dubina vode u kanalu i menzura sa štopericom kojom je meren proticaj vode kroz kanal.

Rezervoar 1 spojen je sa rezervoarom 2 pomoću gumenog creva kružnog poprečnog preseka prečnika $D=10$ mm. Vreme pražnjenja rezervoara 1 iznosi 22 ± 5 s. Pražnjenje rezervoara 1, postepeno smanjuje protok a samim tim i brzinu vode kroz instalaciju. Kako bi se umanjio uticaj neustaljenog tečenja, jedno merenje vršeno je od trenutka povezivanja rezervoara 1 i rezervoara 2 do trenutka kada rezervoar 1 ostane bez vode. Merenja kamerom 1 i kamerom 2, kao i merenja protoka pomoću menzure i štoperice, počinjala su nakon što se vizualno uspostavi jednoliko tečenje (oko 5 s nakon povezivanja rezervoara 1 i rezervoara 2) i trajala su između 5 i 7 s. Dok su merenja ultrazvučnim senzorom trajala tokom celog vremena pražnjenja rezervoara 1.

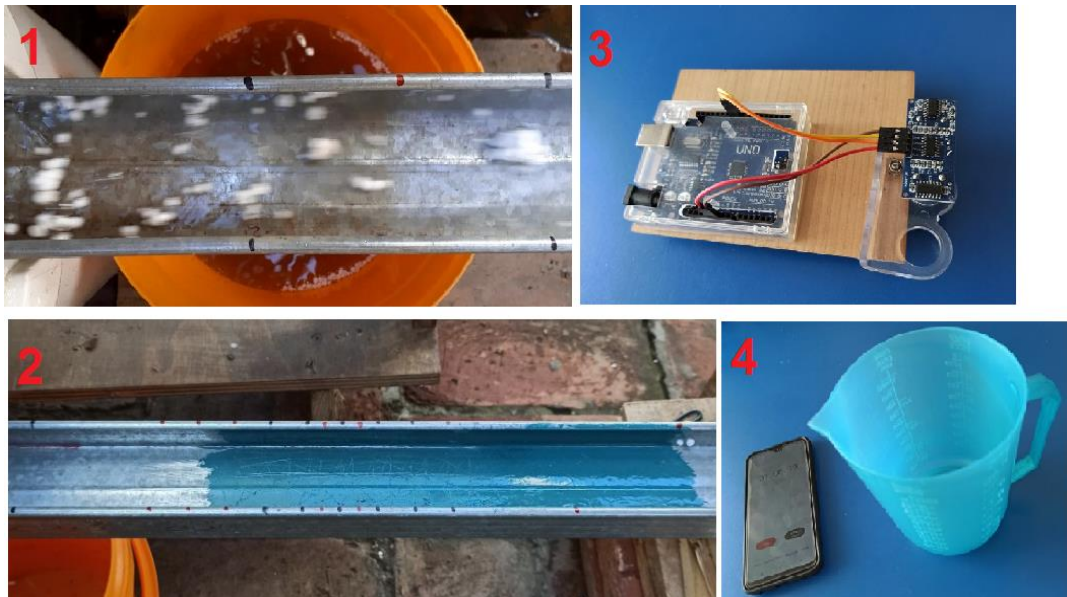


Slika 14: Šema modela na kome su izvedeni opiti

Voda koja je korišćena u eksperimentu bila je mutna sa komadićima piljevine i stiropora koji su služili kao traseri. U prvim danima ispitivanja korišćena je čista voda koja nije dala dobre rezultate. Dobijene vrednosti na osnovu video snimaka odstupale su za red veličina od onih dobijenih preko volumetrijske metode. Potom je korišćena mutna voda koja je dala malo bolje rezultate, ali približne vrednosti dobijene su tek nakon što su u vodu ubačeni komadići stiropora.

- **Opis merenja**

1. Kamerom 1 pravljeni su video snimci za program PIVlab koji je razvijen u okviru softvera Matlab. Ova kamera bila je postavljena najuzvodnije u horizontalnom položaju, takvom da snima isključivo površinu vodenog ogledala. Kamera 1 ima rezoluciju od 720p sa brzinom od 30 fps-a. (Slika 15.1)
2. Kamerom 2 sa rezolucijom od 1080p i brzinom od 60 fps-a, pravljeni su video snimci koji su obrađivani u aplikaciji Discharge (<https://discharge.ch/>). Ova kamera je bila postavljena na sredini kanala i u drugačijem položaju u odnosu na kameru 1. Njome je snimana površina vodenog ogledala sa mogućnošću da se uoči kolika je dubina vode u kanalu. (Slika 15.2)
3. Ultrazvučnim senzorom merena je promena nivoa u kanalu, odnosno dubina vode u kanalu (Prilog 1). (Slika 15.3).
4. Štopericom i menzurom meren je proticaj kroz kanal. (Slika 15.4)



Slika 15: Prikaz merne opreme i položaja kamere, odnosno ugla snimanja u zavisnosti od programa kojim je snimak obrađen

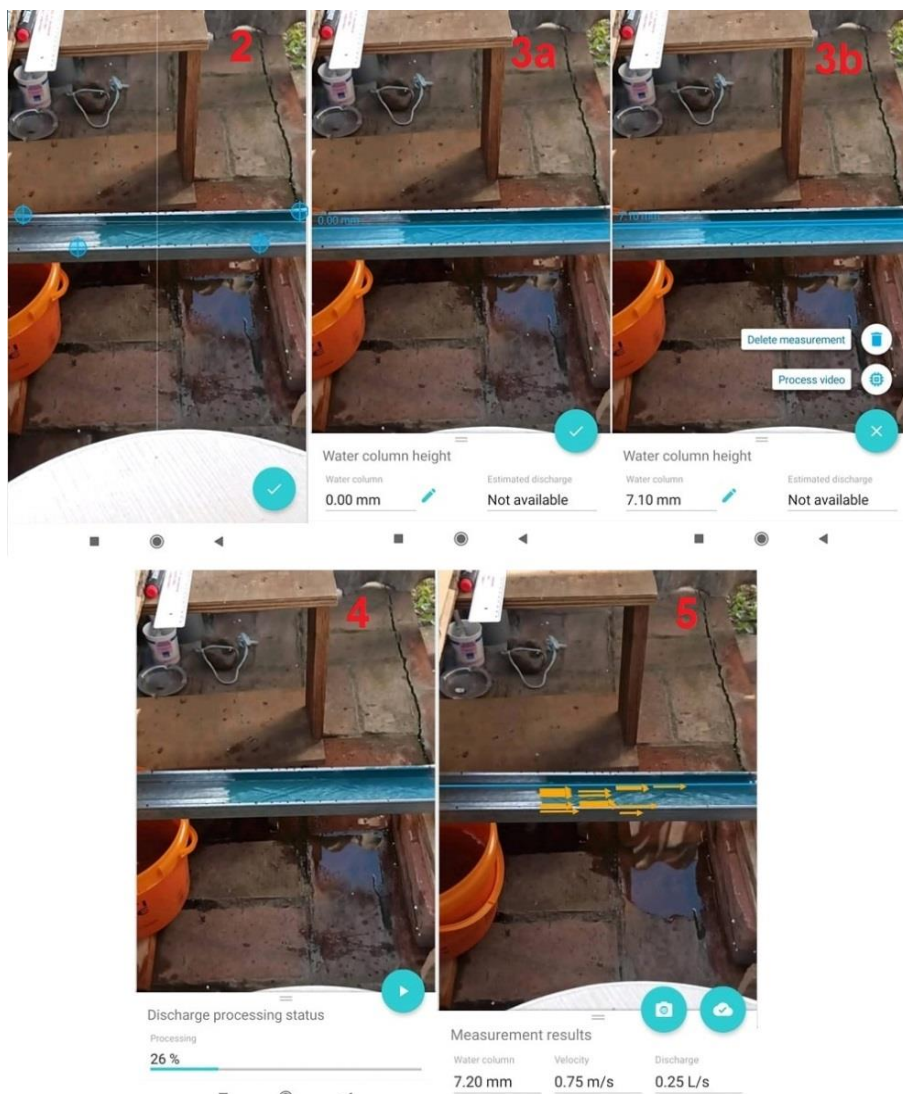
Na osnovu prethodno navedenih merenja dobijene su tri brzine.

Prva brzina V_1 , poznatija i kao srednja profilna brzina, određena je na osnovu volumetrijske metode, tako što je određen proticaj Q_1 preko zapremine istekle vode u menzuru i vremena za koje je istekla ta zapremina vode. Potom je određena dubina vode u kanalu h_1 , na osnovu promene nivoa vode koja je određena pomoću ultrazvučnog senzora (Prilog 1). Preko dubine h_1 i širine kanala B određena je površina poprečnog preseka A , dok je brzina V_1 dobijena kao količnik protoka Q_1 i površine poprečnog preseka A .

$$V_1 = \frac{Q_1}{A}$$

Druga brzina V_2 određena je na osnovu video snimaka koji su obavljani kamerom 2. Video snimci su obrađeni u aplikaciji Discharge. Ta aplikacija se može besplatno skinuti sa interneta odnosno GooglePlay-a i veoma je jednostavna za korišćenje. Potrebno je pre merenja učiniti dve stvari. Napraviti četiri markera, dva markera postaviti sa jedne strane obale, a dva sa druge. Zatim, napraviti merno mesto u kome se unosi geometrija korita (širina, dubina, hrapavost) i položaj četiri markera. Potrebno je uneti odstojanja markera u odnosu na druge markere i njihovu udaljenost od obale. Potom aplikacija je spremna da izvrši merenja. Nakon što se nacentrira kamera tako da svaki od 4 markera upadne u odgovarajuće polje i podesi osvetljenje snimka, može se obaviti snimanje. Procedura je sledeća:

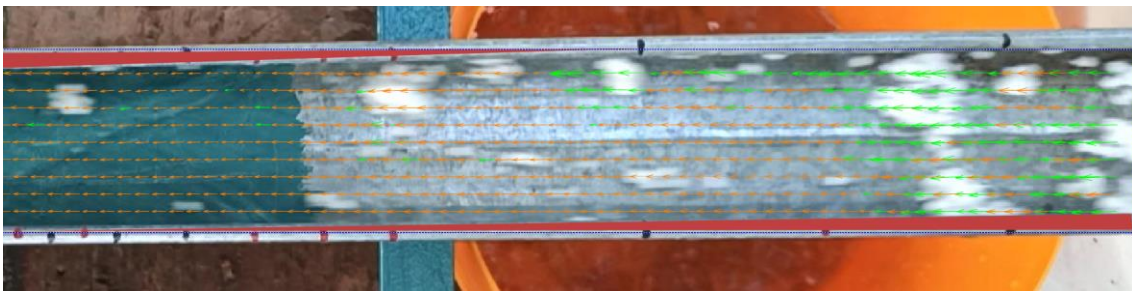
1. Pronadje se optimalan položaj kamere takav da svaki od 4 markera upadne u odgovarajuće polje i nakon što se podesi osvetljenje, napravi se video snimak u trajanju od 5 sekundi.
2. Postave se 4 obeleživača (4 plave mete) u aplikaciji na mesta prethodno definisanih markera. (Slika 16.2)
3. Podesiti plavu liniju tako da se poklopi sa nivoom vode. Kao posledica toga na levoj strani te linije pojaviće se broj koji označava dubinu vode u kanalu. (Slika 16.3a i 16.3b)
4. Pusti se proračun. (Slika 16.4)
5. Dobiju se rezultati. Rezultati proračuna čine dobijena dubina vode u kanalu h_2 , površinska brzina vode V_2 i proticaja vode kroz kanal Q_2 . (Slika 16.5)



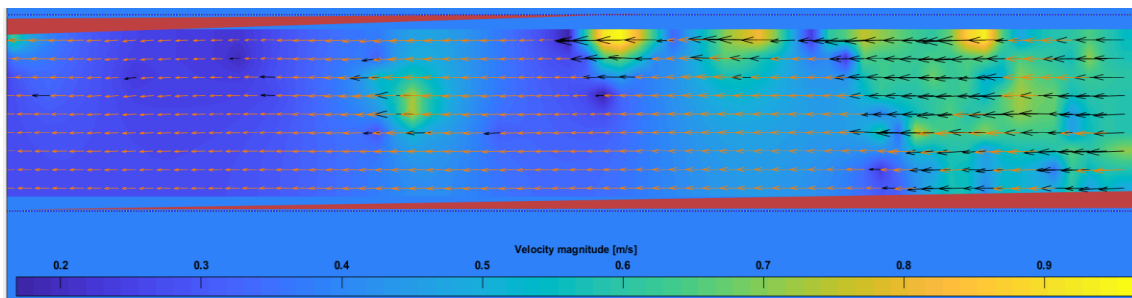
Slika 16. Postupci korišćenja aplikacije Discharge

Treća brzina V_3 određena je na osnovu video snimaka koji su obavljani kamerom 1. Video snimci su potom rastavljeni na slike pomoću programa Video to JPG Converter. Slike su pretvorene u crno beli format i obrađene u programu PIVlab koji je razvijen u okviru softvera Matlab. Kamera 1 je kamera rezolucije od 720p koja pravi snimke sa 30 fps-a (fps- frames per second). To znači da u jednoj sekundi snimka se napravi 30 slika, a vremenski razmak između dve slike je 0.0333 s. U PIVlab-u potrebno je izabrati slike koje su predmet obrade, potom izabrati polje na slikama u kome želimo da saznamo brzinu (Region of interest) i potrebno je uneti referentnu dužinu i vremenski razmak između dve slike. Rezultat svega ovoga predstavlja brzina V_3 .

Veoma je bitno nakon prebacivanja slika u crno beli format izvršiti predprocesuiranje slika kako bi se dobio bolji kontrast boja. Sve slike dobijene tokom svakog merenja predprocesuirane su metodom CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) [14] sa regionima od po 10px. Time su dobijene značajno jasnije slike.



Slika 17: Prikaz vektora brzine dobijenih pomoću programa PIVlab u početnom trenutku

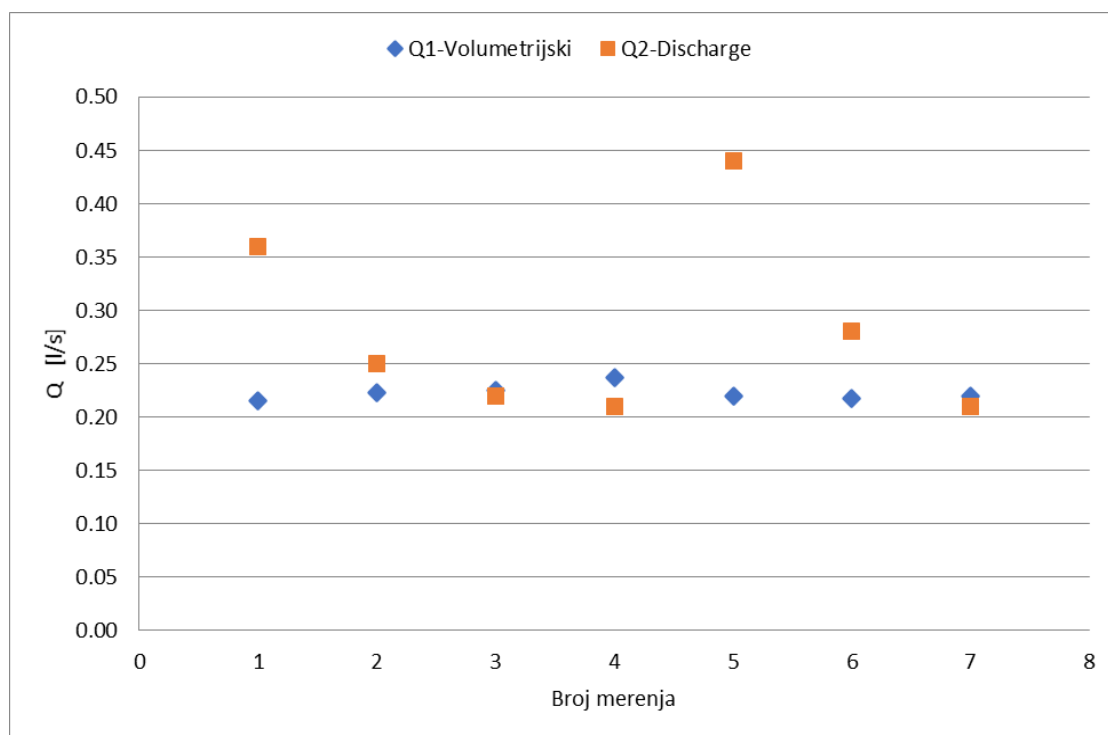


Slika 18: Prikaz polja brzine dobijenih pomoću programa PIVlab u početnom trenutku

- **Rezultati merenja**

Tabela 1: Dobijene vrednosti protoka na onovu volumetrijske metode Q_1 i pomoću aplikacije Discharge Q_2 , kao i vrednosti apsolutnih i relativnih grešaka

i	Q_1	Q_2	δ_{aps}	δ_{rel}
	[l/s]	[l/s]	[l/s]	%
1	0.216	0.360	0.144	67.0
2	0.223	0.250	0.027	11.9
3	0.225	0.220	0.005	2.1
4	0.237	0.210	0.027	11.5
5	0.220	0.440	0.220	100.4
6	0.218	0.280	0.062	28.5
7	0.220	0.210	0.010	4.4

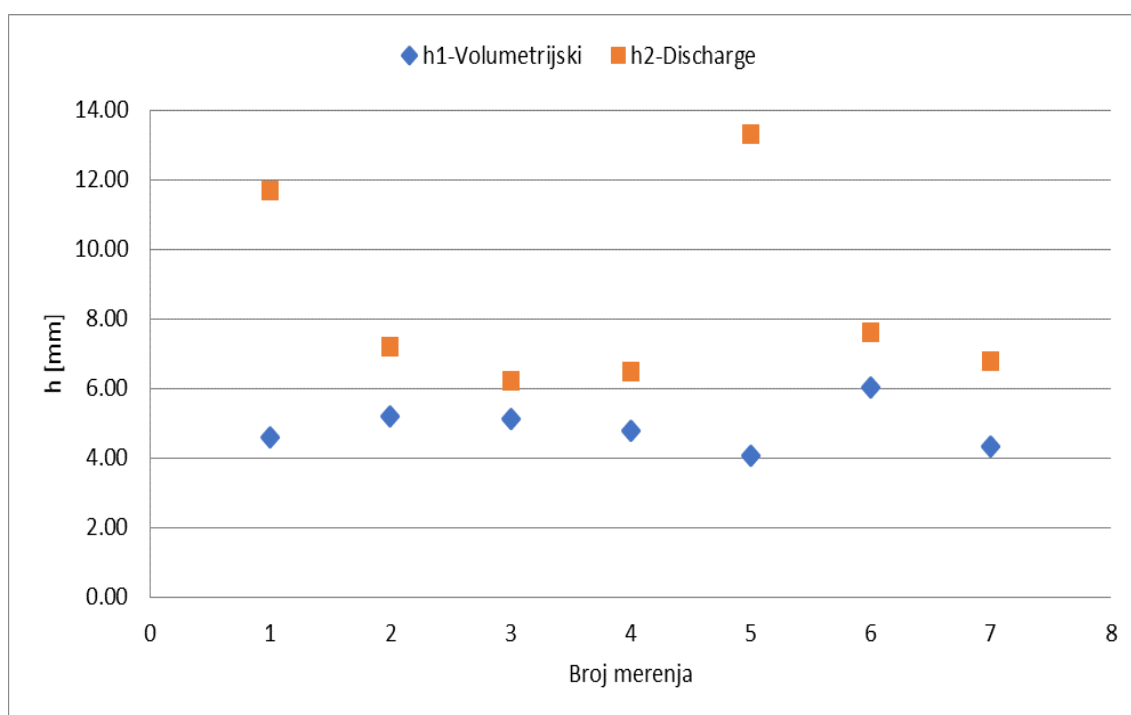


Grafik 1: Grafički prikaz dobijenih protoka

Kao što se može videti iz priloženog proticaji u kanalu varirali su između 0.21 do 0.24 l/s. Međutim, vrednosti dobijene preko aplikacije Discharge značajno su odstupale u prvom i petom merenju. Iako ove vrednosti nisu reprezentativne, one nisu izuzete iz daljeg razmatranja.

Tabela 2: Dobijene vrednosti dubina na osnovu ultrazvučnog senzora h1 i pomoću aplikacije Discharge h2, kao i vrednosti apsolutnih i relativnih grešaka

i	h1	h2	δaps	δrel
	[mm]	[mm]	[mm]	%
1	4.604	11.700	7.096	154.1
2	5.209	7.200	1.991	38.2
3	5.125	6.200	1.075	20.9
4	4.796	6.500	1.704	35.5
5	4.050	13.300	9.250	228.3
6	6.037	7.600	1.563	25.9
7	4.317	6.800	2.483	57.5

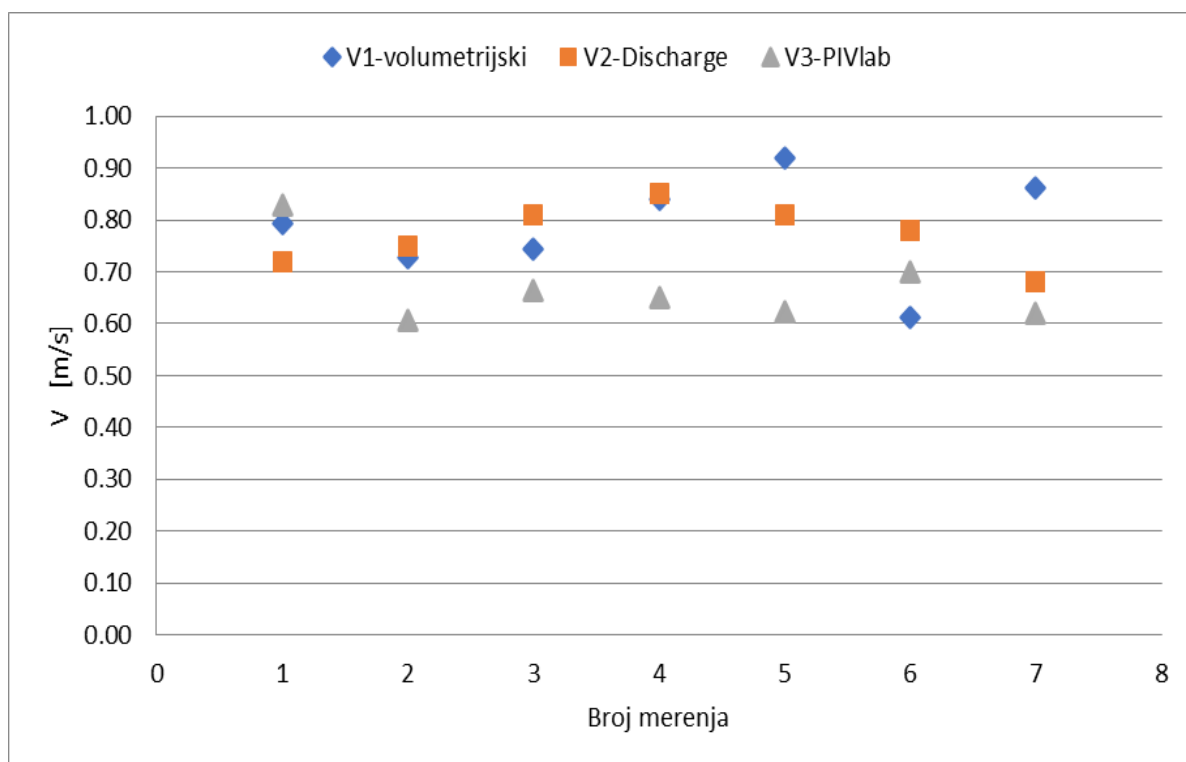


Grafik 2: Grafički prikaz dobijenih dubina vode u kanalu

Uočava se da je dobijena dubina vode u kanalu pomoću ultrazvučnog senzora h1 iznosila približno 5 mm, dok su dubine dobijene na osnovu aplikacije Discharge h2 u merenjima 2,3,4,6 i 7 iznosile od 6 do 7.6 mm. Merenja 1 i 5 preko aplikacije Discharge zasigurno nisu relevantna jer rezultati značajno odstupaju od onih dobijenih volumetrijskom metodom.

Tabela 3: Dobljene vrednosti brzina pomoću volumetrijske metode V1, preko aplikacije Discharge V2 i preko programa PIVlab V3

i	V₁	V₂	V₃
	[m/s]	[m/s]	[m/s]
1	0.794	0.720	0.830
2	0.727	0.750	0.608
3	0.743	0.810	0.663
4	0.839	0.850	0.650
5	0.919	0.810	0.622
6	0.612	0.780	0.699
7	0.862	0.680	0.622

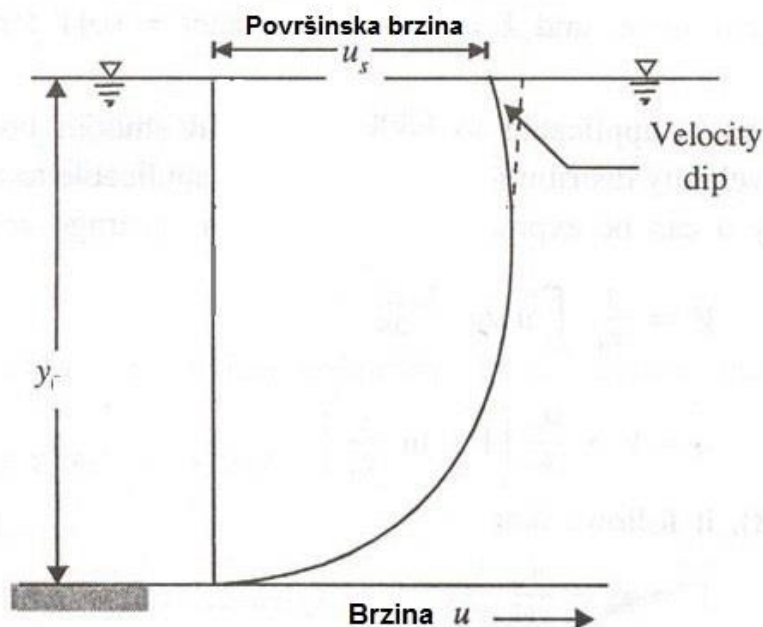


Grafik 3: Grafički prikaz dobijenih brzina

Tabela 4: Prikaz apsolutnih i relativnih grešaka između rezultata dobijenih preko aplikacije Discharge i PIVlab-a sa rezultatima dobijenih volumetrijskom metodom

i	V₁	V₂	δ_{aps}	δ_{rel}	V₃	δ_{aps}	δ_{rel}
	[m/s]	[m/s]	[m/s]	%	[m/s]	[m/s]	%
1	0.794	0.720	0.074	9.263	0.830	0.036	4.585
2	0.727	0.750	0.023	3.178	0.608	0.119	16.347
3	0.743	0.810	0.067	9.022	0.663	0.080	10.724
4	0.839	0.850	0.011	1.321	0.650	0.189	22.519
5	0.919	0.810	0.109	11.846	0.622	0.297	32.280
6	0.612	0.780	0.168	27.492	0.699	0.088	14.302
7	0.862	0.680	0.182	21.115	0.622	0.240	27.892

Ukoliko isključimo merenje 1 i merenje 5, vrednosti brzine V3 dobijene pomoću programa PIVlab imaju manje vrednosti od 10% do 28% u odnosu na vrednosti brzina V1 dobijenih volumetrijskom metodom (grafik 3.). Taj uticaj je posledica toga što su površinske brzine manje od srednjih profilskih brzina zbog trenja između vode i vazduha. Taj uticaj se ne vidi kod brzina V2, dobijenih preko aplikacije Discharge, zato što su najverovatnije tu grešku predvideli i savladali u samom programu.



Slika 19: Prikaz rasporeda brzina po visini poprečnog preseka [13]

- ***Zaključci ispitivanja na fizičkom modelu***

Bitno je napomenuti da je u prvoj fazi ispitivanja korišćen drugačiji model od gore navedenog. Prvi model sačinjavao je kanal od jednog rebra Salonit table niz koju je bila puštana voda da teče. Brzine na modelu odredjivale su se preko volumetrijske metode i preko video snimaka koji su obradjivani u programu PIVlab. Tako dobijene dve brzine razlikovale su se za red veličine. Razlozi zašto je došlo do tolike greške su posledice lošeg video snimka. Pre svega sama Salonit tabla je rebrasto sive boje, pa se nije mogao lepo sagledati kontrast boja kada su slike video snimka prebačene u crno beli format. Svakako je bitno posebnu pažnju posvetiti predprocesuiranju slika kako bi se dobio bolji contrast crno bele boje. Pored toga u ovom ispitivanju nisu korišćeni traseri i snimak je sniman iz ruke.

Uočeno je da je najbolje na ultrazvučnom meraču prvo kalibrisati brzinu zvuka kroz vazduh a zatim meriti vreme putovanja ultrazvuka i tako dolaziti do promene dubine vode. Druga bitna stvar je vezana za položaj ultrazvučnog senzora. Senzor mora biti postavljen tako da i prijemnik i predajnik leže u ravni poprečnog preseka kanala. Zaključak je dobijen nakon što su izvršena merenja sa položajem prijemnika i predajnika u ravni sa poprečnim presekom kanala i ravni sa uzdužnom osom kanala.

Upoređivanjem rezultata dobijenih na osnovu volumetrijske metode i aplikacije Discharge uočeno je da u prvom i petom merenju vrednosti za proticaj značajno odstupaju jedni od drugih, te zbog toga nisu reprezentativni (Tabela 1, Tabela 2, Grafik 1 i Grafik 2). Ovo odstupanje najverovatnije je posledica lošeg video snimka koji je obrađen u aplikaciji Discharge. Loš video snimak najverovatnije nastao je kao posledica lošeg osvetljenja, lošeg fokusa snimka, lošeg ugla snimanja, usled toga da kamera nije bila statična za vreme snimanja (snimak iz ruke)...

Rezultati dubina vode u kanalu dobijenih pomoću ultrazvučnog senzora iznose približno 5 mm, dok dubine dobijene na osnovu aplikacije Discharge u merenjima 2, 3, 4, 6 i 7 iznose od 6 do 7.5 mm. Ovo odstupanje nastalo je kao posledica uticaja stiropora (traseira), uticaja vetra (ispitivanje vršeno na otvorenom), greške u kalibraciji ultrazvučnog aparata i greške samog uređaja. Dok merenja 1 i 5 preko aplikacije Discharge zasigurno nisu relevantna jer je loše snimljen kanal.

Veoma bitan faktor u metodi određivanja površinske brzine pomoću video snimaka jesu traseri. Traseri su plutajući predmeti koji ukazuju na tečenje vode, njihovim pomeranjem se sagledava površinska brzina vode. Vraćanjem na Sliku 17 i Sliku 18 jasno možemo uočiti da je uticaj traseira veoma bitan za dobijanje dobrih rezultata. Kao traseri mogu se u prirodnim vodotocima koristiti određene supstance koje penušaju u vodi i pritom ne zagađuju životnu sredinu ili plutajući predmeti (plovci) drugačije boje

od boje vodotoka koji bi se upuštali na određenom uzvodnom rastojanju od mernog mesta i sakupljali nizvodno od mernog mesta.

Dobijene vrednosti brzina kod svih metoda se relativno poklapaju, nema većih odstupanja osim kod rezultata merenja 1 i 5. Vrednosti relativnih grešaka, ukoliko zanemarimo 5 merenja, kreću se do 27%. Prema tome metoda određivanja površinske brzine na osnovu video snimaka dala je dobre rezultate. Medjutim ova metoda nije toliko jednostavna koliko se čini na prvi pogled. Za dobijanje dobrih rezultata potrebno je da osoba koja snima kanal poseduje viša znanja iz sfere upravljanja kamerom, osvetljenja snimka, fokusa snimka kao i obrade slika u crno beli format.

5. Zaključak

Nakon upoznavanja sa osnovnim principima bezkontaktnog merenja, kako sa radarskim metodama merenja tako i sa optičkim metodama, možemo zaključiti da i jedan i drugi metod nalaze široku primenu u rešavanju problema sa kojima se susreću današnji inženjeri. Bezkontakne metode imaju niz prednosti kao što su lako prikupljanje podataka, brzo prikupljanje podataka, brza obrada podataka, jeftina je, i to sve zahvaljujući razvoju tehnologije. Dok sa druge strane razvoj tehnologije mora pratiti i razvoj metodologije. Pa kao glavni nedostatak ovih bezkontaktnih metoda može biti zahtev za obučanim stručnim timom, koji detaljno poznaje prednosti i nedostatke svih uređaja i programa za primenu istih (njihova ograničenja za upotrebu).

6. Literatura

[1] Prodanović D. (2003) *Merenja u hidrotehnici*. Predavanja na redovnom kursu na Građevinskom fakultetu u Beogradu.

[2] <https://www.hydrologicalusa.com/products/water-flow/velocity-total-discharge-radars/rp-30-portable-non-contact-velocity-radar/>

[3] <https://www.ott.com/products/water-flow-3/ott-svr-100-2406/>

[4] <https://www.nivus.com/en/service-download/know-how/radar/>

[5] Branislavljević Nemanja. Seminarski rad - Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) – merenje urbanog oticaja, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Beograd, Srbija

[6] Tauro Flavia (2018). UAS applications in streamflow monitoring: an overview, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Beograd, Srbija

[7] G. Blois, J. L. Best, K. T. Christensen, V. Cichella, A. Donahue, N. Hovakimyan, A. Kennedy, I. Pakrasi (2016). UAV-based PIV for quantifying water-flow processes in large-scale natural environments, 18. Međunarodni simpozijum o primeni laserskih i tehnika zasnovanim na slikama u mehanici fluida, Lisabon, Portugal.

[8] https://www.sebahydroprometie.com/produkte.html?L=0&tx_sebaproducts_sebaproducts%5Bproduct%5D=299&tx_sebaproducts_sebaproducts%5Bprimarycategory%5D=3&tx_sebaproducts_sebaproducts%5Bsecondarycategory%5D=&tx_sebaproducts_sebaproducts%5Baction%5D=show&tx_sebaproducts_sebaproducts%5Bcontroller%5D=Product&cHash=95452a37634fdd583904cc07ef1fd983

[9] Discharge user manual, https://app.discharge.ch/res/discharge_manual_20170131.pdf

[10] <https://ch.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27659-pivlab-particle-image-velocimetry-piv-tool>

[11] United States Geological Survey, August 27. 2003 The Use of Helicopter-Mounted Radar to Measure River Discharge

- [12]http://www.hydrovision.de/wp-content/uploads/2015/04/Brochure_HydroVision_Q-Eye-Radar-MT_2015_e.pdf
- [13]<https://www.quora.com/In-open-channel-flow-where-is-the-maximum-velocity-in-the-cross-section-of-flow>
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Adaptive_histogram_equalization
- [15]<https://create.arduino.cc/projecthub/abdularbi17/ultrasonic-sensor-hc-sr04-with-arduino-tutorial-327ff6>
- [16] <https://randomnerdtutorials.com/complete-guide-for-ultrasonic-sensor-hc-sr04/>
- [17]https://sr.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%80%D0%B7%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%B0

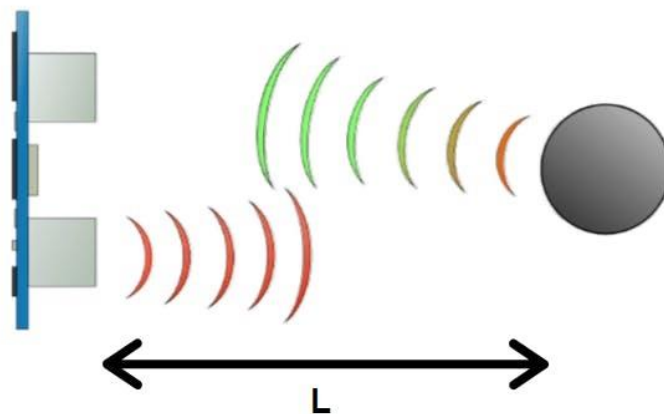
PRILOZI

Prilog 1. Korišćenje ultrazvučnog senzora Arduino HC-SRO4 za određivanje promene nivoa vode

Dubina vode u kanalu određena je na osnovu merenja ultrazvučnim senzorom HC-SRO4, koji je bio povezan na matičnu ploču Arduino UNO.

Ultrazvučni senzor funkcioniše tako što emituje ultrazvučni signal sa predajnika. Signal putuje do prve prepreke, odbija se o nju i vraća se nazad ka prijemniku. Ukoliko se izmeri promena vremena od trenutka emitovanja do trenutka prijema signala- Δt i ukoliko se zna brzina zvuka kroz vazduh- C_{vaz} , lako se može doći do odstojanja između senzora i prepreke- L .

$$L = \frac{C_{vaz}}{2 * \Delta t} \quad (1)$$



Slika 20: Ilustracija rada ultrazvučnog senzora [15]

Jedan od problema ove metode je taj što brzina zvuka kroz vazduh zavisi od raznih parametara vazduha. Najviše na nju utiče temperatura. Sa smanjenjem temperature smanjuje se i brzina zvuka kroz vazduh, njihova zavisnost prikazana je u narednoj tabeli.

Tabela 5: Zavisnost temperature vazduha i brzine zvuka kroz vazduh [17]

T(°C)	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
C (m/s)	325,2	328,3	331,3	334,3	337,3	340,3	343,2	346,1	349,0	351,9

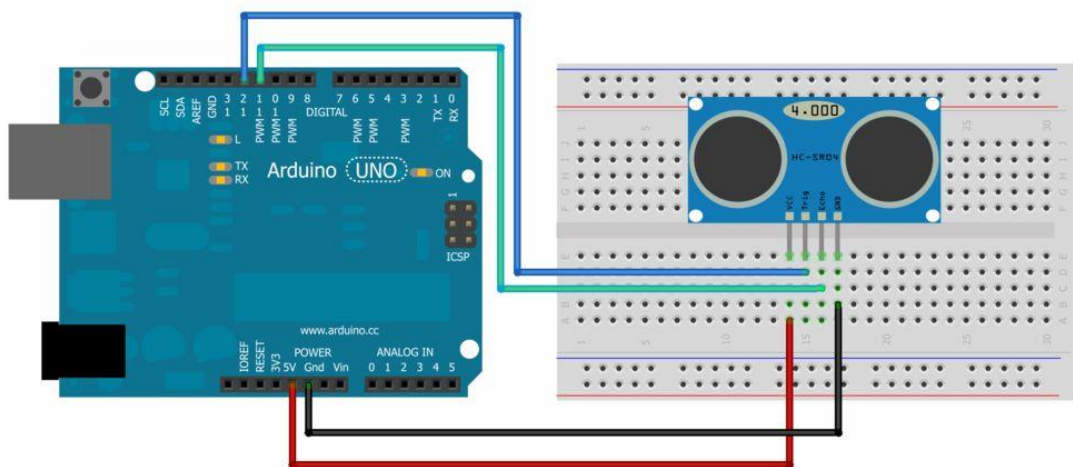
Kako bi se eliminisao prethodni problem potrebno je pre svakog merenja kalibrisati sensor, odnosno odrediti brzinu zvuka kroz vazduh. Postupak je sledeći:

- Nekim mernim instrumentom za merenje dužine izmeriti odstojanje između senzora i prepreke - L_0 ,
- Izmeriti vreme putovanja signala koji emituje sensor – Δt_0 ,
- A potom odrediti kalibrisanu brzinu zvuka kroz vazduh – C_{vaz} preko relacije:

$$C_{vaz} = \frac{2L_0}{\Delta t_0}$$

Zatim za svako naredno merenje u toj prostoriji imamo poznatu brzinu zvuka kroz vazduh C_{vaz} , i za određivanje odstojanja između senzora i prepreke - L , po jednačini 1, potrebno nam je samo vreme putovanja signala - Δt .

Način povezivanja ploče Arduino UNO i senzora HC-SRO4 prikazana je na narednoj slici.



Slika 21: Šematski prikaz povezivanja senzora HC-SRO4 I matične ploče Arduino UNO. [16]

Pinovi na matičnoj ploči i pinovi na senzoru moraju biti povezani na sledeći način ukoliko se koristi kod programa Arduino prikazan u nastavku teksta.

Pinovi na ploči	5V	GND	11	12
Pinovi na senzoru	Vcc	Gnd	Echo	Trig

Arduino kod kojim se vrši softversko povezivanje senzora sa pločom je sledeći:

```
const int trigPin = 12;

const int echoPin = 11;

float duration;

void setup() {

  pinMode(trigPin, OUTPUT);

  pinMode(echoPin, INPUT);

  Serial.begin(9600);

}

void loop() {

  digitalWrite(trigPin, LOW);

  delayMicroseconds(2);

  digitalWrite(trigPin, HIGH);

  delayMicroseconds(10);

  digitalWrite(trigPin, LOW);

  duration = pulseIn(echoPin, HIGH);

  Serial.print("");

  Serial.println(duration);

  delay(500);

}
```