

USPOREDBA METODA ODREĐIVANJA PROTOKA I BRZINA U VODOTOCIMA: ULTRAZVUČNI MJERNI UREĐAJI, HIDROMETRIJSKO KRILLO I MOBILNI TELEFON

BOJAN ĐURIN¹, IGOR RUŽIĆ², MARIO SVRTA¹, MEHDI KEBLOUTI³

¹ Sveučilište Sjever, Odjel za graditeljstvo, Varaždin, Hrvatska

² Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka, Hrvatska

³ Abdelhafid Boussouf University Center, Environmental Engineering and Technology Laboratory, Mila, Alžir

Sažetak

Predviđanje protoka vodotoka u pravilu se radi primjenom modeliranja vremenskih nizova postojećih protoka. U pravilu su na raspolaganju vrijednosti dobivene od Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) Republike Hrvatske. Provjera dobivenih vrijednosti, odnosno kalibriranje preporuča se usporedbom sa protocima dobivenih primjenom hidrometrijskih mjerenja. Takva mjerenja u pravilu nisu na raspolaganju, budući da je potrebno izvršiti mjerenja primjenom mjernih uređaja koji znaju biti skupi, uz vrijeme koje je potrebno za terenski rad. U radu će se prikazati rezultati dobiveni primjenom ultrazvučnih mjernih uređaja, konkretno akustičkog (ultrazvučnog) mjerača strujanja (Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)) i ultrazvučnog mjerača brzine (Acoustic Doppler Velocity meter (ADV)). Dodatna provjera će se napraviti primjenom hidrometrijskog krila i mobilnog telefona, tj. usporedbom dobivenih površinskih brzina. U svrhu dodatne provjere, primjenom teorije entropije usporediti će se površinske brzine dobivene korištenjem spomenuta četiri uređaja. Istraživanje se provelo na rijeci Mirni, kod mjerne postaje Portonski most, dana 6. lipnja 2025. godine. Srednji protok izmjeren ADCP-om iznosio je 1,277 m³/s, uz srednju brzinu 0,454 m/s. Mjerenje istih vrijednosti ADV-om pokazalo je srednji protok od 1,149 m³/s, uz srednju brzinu od 0,410 m/s. Vrijednosti dobivene ADV-om pokazale su vrlo dobro podudaranje s ADCP-om. Rezultati pokazuju da ove tehnologije predstavljaju pouzdanu i ekonomičnu metodu hidroloških mjerenja.

Ključne riječi

ADCP, ADV, hidrometrijsko krilo, mobilni telefon, entropija

1. Uvod

Mjerenje protoka i brzina vodotoka ne provodi se u kontinuitetu, kako u Hrvatskoj, tako i u cijelome svijetu. Osim mjernih hidroloških postaja, na kojima se korištenjem baždarenih protočnih krivulja dobivaju protoci te uz hidrometrijska mjerenja u svrhu znanstveno-nastavnih svrha te po potrebi za stručne projekte, drugi podaci o protocima nisu dostupni. Uvid u brzine tečenja nije na raspolaganju, osim tijekom pojedinačnih hidrometrijskih mjerenja. Bez obzira na raspoložive modele i alate za modeliranja protoka i brzina (HEC-RAS i dr.), radi provjere rezultata dobivenih modeliranjem te za kvalitetne ulazne podatke, preporučljivo je obavljati hidrometrijska mjerenja, uz geodetsku izmjeru vodotoka. U novije vrijeme razvijeni su i uređaji za kontinuirano mjerenje površinskih brzina temeljeni na radarskoj ili optičkoj tehnologiji, poput sustava tvrtke Geolux (Geolox, 2026), koji omogućuju beskontaktno i dugotrajno praćenje brzina tečenja. Takvi sustavi predstavljaju napredna, ali financijski zahtjevnija rješenja. Predviđanja protoka od iznimne su važnosti za vodoprivredne zadaće, počevši od predviđanja poplava, perioda niskih vodostaja u vodotoku, projektiranja različitih hidrotehničkih i geotehničkih građevina u i izvan vodotoka, regulacijskih zahvata i s. S obzirom da

hidrometrijska i geodetska mjerenja iziskuju troškove terenskog rada i obrade podataka, kao i skupu opremu i uređaje za mjerenje, nameće se potreba za pronalaskom metoda koje bi olakšale i pojeftinile postojeće metode određivanja protoka i brzina u vodotocima. Budući da je tijekom hidrometrijskih mjerenja, kao i uvidom u raspoložive podatke od strane Državnog Hidrometeorološkog Zavoda Republike Hrvatske (DHMZ) utvrđeno niz fluktuacija i odstupanja promjena vodostaja i protoka tijekom vremena, pristupilo se terenskim hidrološkim radovima. Također, rijeka Mirna nije hidrološki previše istraživana, niti hidrometrijski obrađivana, što je i daljnja motivacija za analizu ove rijeke, koja je složena sa hidrološkog i hidrogeološkog aspekta (Benac et al, 2003., Knežević et al., 2023.).

2. Metode

Metodologija istraživanja sastoji se od primjene akustičkog (ultrazvučnog) mjerača strujanja (Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)), ultrazvučnog mjerača brzine (Acoustic Doppler Velocity meter (ADV)), hidrometrijskog krila i mobilnog telefona (mobitela). Metodologija se nastavlja sa određivanjem srednjih protoka i brzina tečenja korištenjem ADCP-a i ADV-a, u svrhu međusobne usporedbe dobivenih rezultata i daljnjeg modeliranja izmjerenih podataka. Hidrometrijsko krilo se koristi za određivanje površinskih brzina tečenja. Mobilni telefon služi za video snimanje tečenja vode na promatranj lokaciji te rekonstrukciju površinskih brzina pomoću tehnike "Image rastering". Površinske brzine služe za određivanje raspodjele brzina tečenja po promatranom poprečnom presjeku korištenjem entropijskih jednadžbi. Uvidom u aktualne bibliografske jedinice (Muste et al, 2004., Tauro et al, 2016., Yu, Cho, 2014., Yu, Lee, 2022.), utvrđeno je da ovakva metodologija nije korištena u kombinaciji kao u ovom istraživanju, odnosno korištena je za idealne uvjete tečenja. Provedena mjerenja izvršena su na rijeci Mirni, na lokaciji kod mjerne hidrološke postaje Portonski most, Slika 1.



Slika 1. Lokacija istraživanja kod mjerne hidrološke postaje Portonski most na rijeci Mirni

Ultrazvučni mjerni uređaj „FlowTracker 2" je prijenosni uređaj za mjerenje brzine vode koji radi na principu Dopplerove tehnologije (ADV – Acoustic Doppler Velocity meter), Slika 1. Uređaj koristi Dopplerov efekt kako bi mjerio brzinu suspendiranih čestica u vodi, omogućujući precizna točkasta mjerenja. Namijenjen je prvenstveno za plitke vodotoke i kanale. Idealan je za terenska mjerenja zbog jednostavnog korištenja i mogućnosti rada jer se lako može premještati po poprečnom presjeku vodotoka (SonTek, (2020.)).

Hidrometrijsko krilo FP211-S, slika 2 mehanički je uređaj za mjerenje brzine vode u prethodno određenim točkama, uglavnom po vertikalama u poprečnom presjeku vodotoka. Radi na principu magnetnog Turbo propelera (elise) koji se vrti zbog kretanja vode. Uređaj također ima ručni teleskopski štap, koji omogućuje rad na većim dubinama i opasnom terenu. Uređaj mjeri brzinu pomoću broja okretaja koji je u zadanom vremenskom intervalu proporcionalna brzini tečenja vode, koja je za svaki model drukčija i matematički kalibrirana. Model FP211-S s okretnom glavom omogućuje jednostavnu orijentaciju uređaja u smjeru toka te digitalni prikaz brzine na jednu decimalu tijekom mjerenja.



Slika 2. Mjerenje hidrometrijskim krilom

ADCP „StreamPro“ je akustični Dopplerov profilometar strujanja razvijen za mjerenje protoka u dubljim vodotocima poput manjih rijeka, kanala i potoka, Slika 3. Uređaj se temelji na Dopplerovom efektu, pomoću kojega je akustični signal emitiran iz sonde reflektiraju čestice suspendirane u vodi (npr. mulj, pijesak, organska tvar i sl.). Analizom promjene frekvencije povratnog signala računa se brzina strujanja vode u više dubinskih slojeva. ADCP „StreamPro“ se koristi u kombinaciji s plutajućom platformom (kod ovog uređaja malim splavom) koja omogućuje prijelaz preko poprečnog presjeka vodotoka pomoću vučenja užeta. Tijekom prelaska s jedne strane na drugu, uređaj bilježi brzine u vodenom stupcu i podatke o dubini, programska aplikacija obrađuje rezultate i izračunava ukupan protok.



Slika 3. Mjerenje ADCP-om „StreamPro“ na lokaciji Portonski most

ADCP je posebno praktičan u uvjetima gdje klasične metode (npr. hidrometrijsko krilo) nisu učinkovite zbog ograničenog pristupa vodotoku, velikih brzina tečenja ili dubina vodotoka (Teledyne Instruments, 2026.). Pokazano je da korištenje pametnih telefona za mjerenje brzine površinske vode ima konkretnu primjenu (Yang et al, 2020.). Cijena i jednostavno korištenje čini ih konkurentnom zamjenom tradicionalnim hidrometrijskim mjernim uređajima. U ovom istraživanju, korišten je mobilni telefon Samsung Galaxy A55 5G.

Metodologija istraživanja sastoji se od dva koraka. Prvi je usporedba rezultata dobivenih ADV-om i ADCP-

om, s obzirom da je ADV namijenjen za plitke vodotoke do 1.5 m dubine, dok je ADCP prikladan za dublje vodotoke. Sljedeći korak je određivanje površinske brzine dobivene hidrometrijskim krilom i mobitelom, pri čemu je naglasak na najvećim površinskim brzinama. Svrha navedenog je određivanje raspodjele površinskih brzina po poprečnom presjeku, odnosno izračunavanje srednjeg protoka primjenom teorije entropije. Protoci dobiveni/izmjereni ultrazvučnim uređajima usporediti će se sa protocima dobivenim teorijom entropije. Time će se utvrditi koliko je mjerenje površinskih brzina mobitelom precizno u odnosu na hidrometrijsko krilo. U konačnici, utvrditi će se preciznost određivanja srednjeg protoka korištenjem svih četiriju metoda. Raspodjela brzine duž vertikala, izračunata metodom entropije, može se definirati kao (Bahmanpouri et al., 2022):

$$U(x_i, y) = \frac{U_{\max v}(x_i)}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{y}{D(x_i) - h(x_i)} \exp\left(1 - \frac{y}{D(x_i) - h(x_i)}\right) \right] \quad i = 1 \dots N_v \quad (1)$$

Gdje je U osrednjena brzina s obzirom na vrijeme, $U_{\max v}(x_i)$ najveća vrijednost U kod i^{th} vertikale, x_i je udaljenost i^{th} vertikale od lijeve obale, $h(x_i)$ dubina $U_{\max v}(x_i)$ ispod razine vode, $D(x_i)$ je dubina, y udaljenost točke izmjerene brzine od dna, N_v broj vertikala u promatranom poprečnom presjeku. M je parameter entropije i može se izračunati preko (Bahmanpouri et al., 2023):

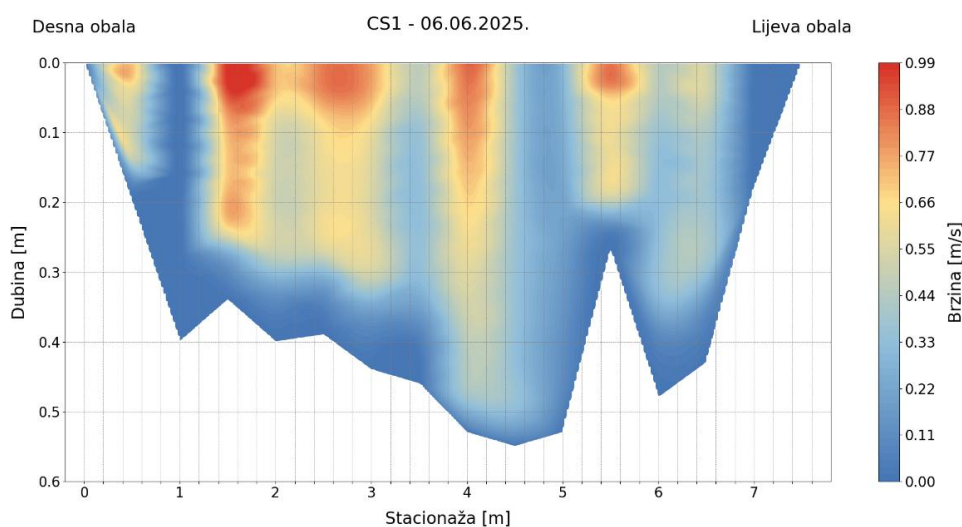
$$U_m = \left(\frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \right) U_{\max} = \phi(M) U_{\max} \quad (2)$$

U_{\max} pretpostavlja najveću brzinu s obzirom na $U_{\max v}(x_i)$, izmjerenu u poprečnom presjeku. Pri tome je moguća raspodjela brzina po paraboli i hiperboli.

3. Rezultati

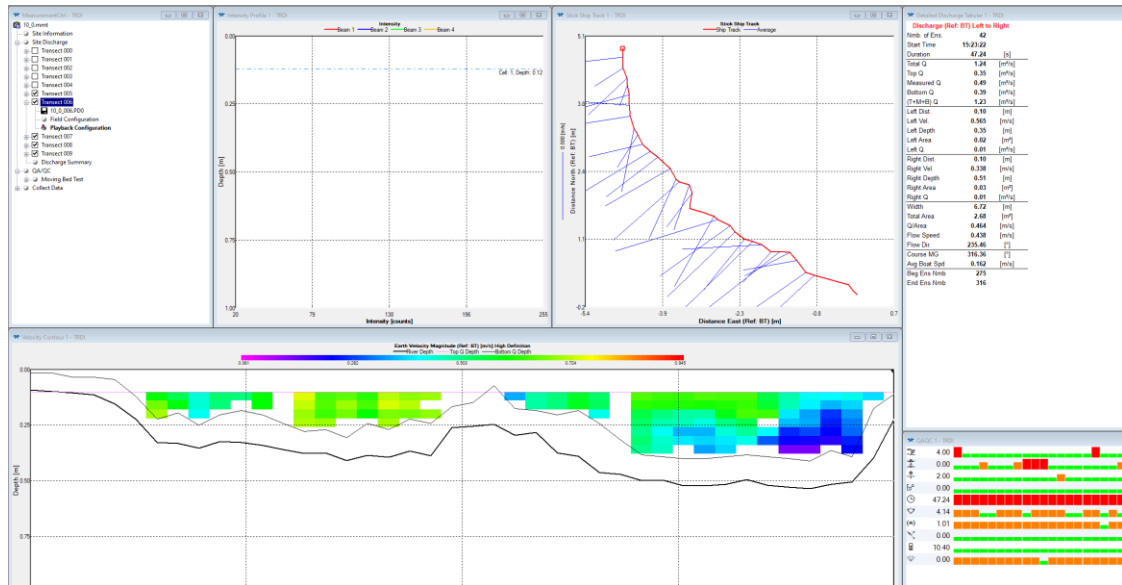
Zbog bujičnih svojstava rijeke Mirne, odnosno pojave ekstremnih visokih i niskih vrijednosti vodostaja i protoka, a radi kvalitetnog uvida u trendove promjene spomenutih hidroloških veličina, rekonstrukcija raspodjele brzina tečenja po dubini i širini, odnosno poprečnom presjeku daje uvid u stvarno stanje promjene tih veličina. Geometrijske karakteristike vodotoka (dubine i širine) dobivene su tijekom primjene ADCP-a i ADV-a, odnosno hidrometrijskog krila. Za primjenu entropije korištene su dubine dobivene tijekom mjerenja hidrometrijskim krilom.

Slika 4 prikazuje rezultate dobivene primjenom ADV-a, uz obradu primjenom entropije (jednadžbe 1 i 2).



Slika 4. Rezultati mjerenja dobiveni korištenjem ADV-a

Slika 5. prikazuje rezultate mjerenja dobivene korištenjem ADCP-a.



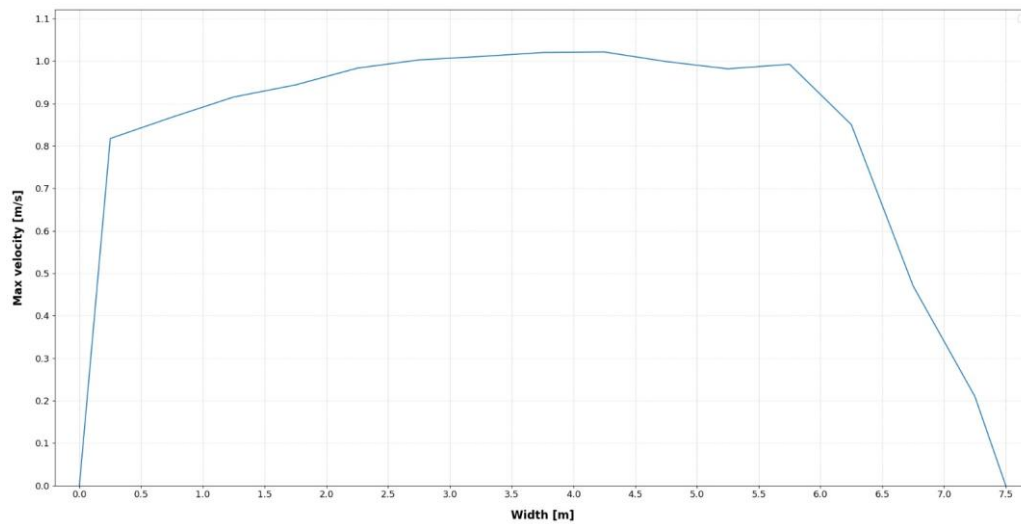
Slika 5. Rezultati mjerenja dobiveni korištenjem ADCP-a

Korištenjem hidrometrijskog krila, dobivene su najveće površinske brzine, Tablica 1.

Tablica 1. Površinske brzine izmjerene hidrometrijskim krilom

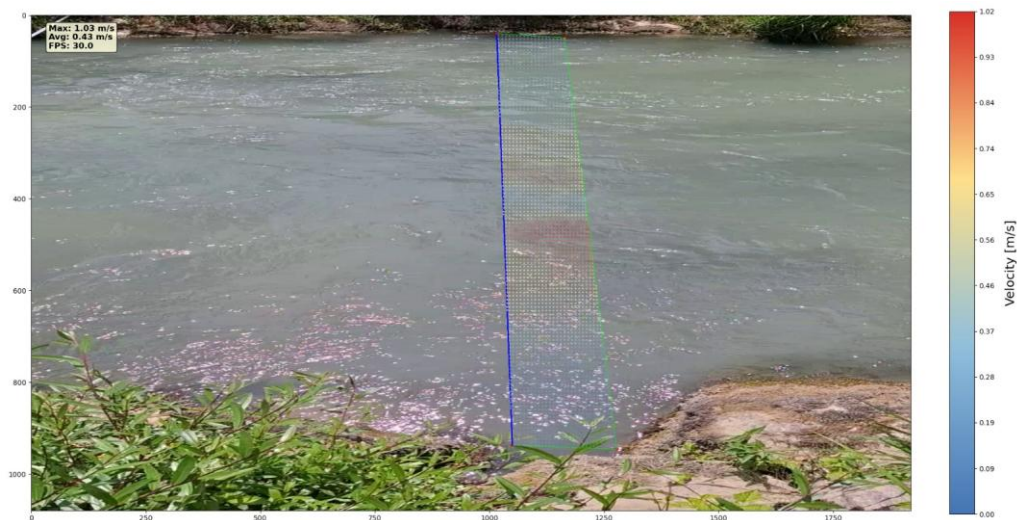
x [m]	v [m/s]	y [m]
0	0	0
0,5	0,4	0,2
1,0	0,7	0,37
1,5	0,9	0,38
2,0	0,6	0,44
2,5	0,9	0,40
3,0	0,8	0,45
3,5	0,8	0,45
4,0	0,7	0,57
4,5	0,8	0,65
5,0	0,5	0,52
5,5	0,7	0,28
6,0	0,5	0,41
6,5	0,6	0,49
7,0	0,5	0,2
7,5	0	0

x označava poprečne stacionaže (udaljenosti od lijeve, odnosno desne obale vodotoka), y označava pripadnu dubinu, dok v označava maksimalnu površinsku brzinu dobivenu hidrometrijskim krilom.



Slika 6. Maksimalne površinske brzine dobivene primjenom hidrometrijskog krila

Primjenom mobilnog telefona, dobivena je raspodjela maksimalnih površinskih brzina, Slike 7 i 9.



Slika 7. Raspodjela maksimalnih površinskih brzina, dobivenih primjenom mobilnog telefona

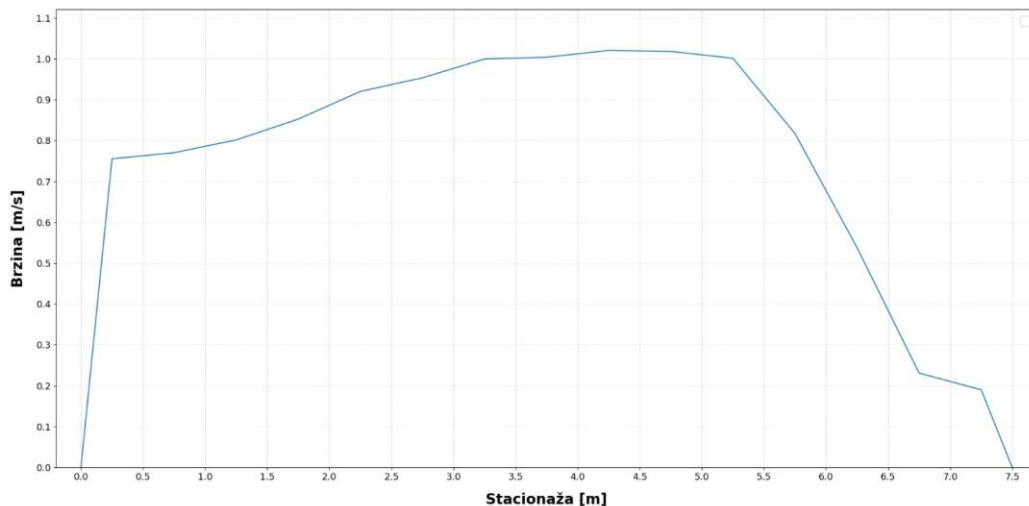
Za obradu slike, primijenjen je Image rastering. Pseudokod izrađen u programskom jeziku Python, korišten za navedeno, prikazan je na slici 8.

```

1 PROCEDURE OpticalFlowFarneback(I_t, I_{t+1}, params):
2
3   FOR level l = 0 TO L-1 DO
4     I_t^{(l)} ← GaussianPyramidDown(I_t^{(l-1)}, λ_pyr)
5     I_{t+1}^{(l)} ← GaussianPyramidDown(I_{t+1}^{(l-1)}, λ_pyr)
6   END FOR
7
8   FOR level l = L-1 DOWN TO 0 DO
9
10    FOR each pixel p = (x, y) in I_t^{(l)} DO
11
12     COMPUTE local polynomial approximation:
13     I(x+ξ, y+η) ≈ f0 + f1ξ + f2η + f3ξ2 + f4ξη + f5η2
14     WHERE (ξ, η) are weighted by G(ξ, η, σ_poly)
15
16     SOLVE: min Σ [ I_{t+1}^{(l)}(p + w) - I_t^{(l)}(p) ]2 · G(-)
17     w* ← ArgMin(w)
18
19    END FOR
20
21    FOR iteration k = 1 TO N_iter DO
22      (Δu, Δv) ← LocalFlowSmoothing(u, v)
23      (u, v) ← (u, v) + (Δu, Δv)
24    END FOR
25
26    IF l > 0 THEN
27      (u, v) ← InterpolateFlow(u, v, λ_pyr^{(-1)})
28    END IF
29
30  END FOR
31
32  RETURN flow = (u, v)
33
34 END PROCEDURE

```

Slika 8. Pseudokod korišten za obradu videozapisa mobilnim telefonom



Slika 9. Površinske brzine izmjerene mobilnim telefonom i dobivene korištenjem Image rasteringa

Usporedbom profila maksimalnih površinskih brzina sa slika 6 i 9, vidljivo je njihovo preklapanje, što ukazuje da je mobilni telefon pouzdani mjerni uređaj kojim se može dati pouzdana procjena površinskih brzina. Usporedba sa srednjim površinskim brzinama (Slika 4), dobivenih ADV-om također potvrđuje navedeno. Dodatni uvid u brzine dobivene ADCP-om prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Prikaz podataka dobiven korištenjem ADCP-om

Početak	Ukupni protok m ³ /s	Srednja brzina m/s	Kraj
15:22:39	1,292	0,476	15:23:18
15:23:22	1,245	0,438	15:24:09
15:24:14	1,373	0,463	15:24:55
15:25:02	1,299	0,461	15:25:46
15:25:51	1,178	0,433	15:26:33
Prosjek	1,277	0,454	

Tablica 2 prikazuje srednje protoke u mjernom profilu dobivenu korištenjem ADCP-a. Protok dobivena ADV-om je 1,149 m³/s, što je zadovoljavajuća točnost mjerenja (greška oko 10%). Zaključuje se da je primjena mobilnog telefona kao najjeftinijeg "mjernog uređaja" zadovoljavajuća.

4. Zaključak

Prikazana metodologija omogućava jednostavnu i jeftinu procjenu pojave i promjene niskih i visokih vodostaja, uz uvjet da postoji barem približna geometrijska interpretacija, odnosno uvid u poprečni presjek vodotoka na analiziranoj lokaciji. Dobiveni rezultati mogu služiti i u svrhu kalibracije rezultata dobivenih modeliranjem korištenjem različitih postupaka, aplikacija i alata za modeliranje vodotoka.

Hidrometrijsko krilo je daleko jeftiniji i jednostavniji mjerni uređaj za korištenje u odnosu na ADCP i ADV, no u slučaju visokih vodostaja to može biti problematično za odvijanje mjerenja, odnosno iznimno opasno za mjeritelje. Također, u odnosu na ostale primijenjene metode, hidrometrijsko krilo pokazalo se vremenski najzahtjevnijim zbog potrebe za mjerenjem po većem broju vertikalna i točaka u poprečnom presjeku. Mobilni telefon je najjednostavniji i najjeftiniji "mjerni uređaj", no tehnička usporedba sa preostala tri mjerna uređaja pokazuje da je njegova primjena moguća samo za određivanje maksimalnih površinskih brzina. Uspostavljeni funkcijski odnosi između površinskih brzina i brzina po poprečnom presjeku omogućavaju korištenje mobilnog uređaja na sigurnoj udaljenosti od bujice. Mjerenja protoka temeljena na video i fotografskim zapisima posebno su opravdana u kombinaciji s drugim metodama, osobito tijekom velikih voda na unaprijed poznatim profilima, kada je izravno mjerenje otežano ili nesigurno. Površinske brzine u takvim se uvjetima mogu brzo i sigurno izmjeriti te pružaju vrijedan uvid u hidrološke podatke koji često nedostaju ili se ne mogu prikupiti primjenom klasičnih kontaktnih metoda. Usporedba dobivenih rezultata korištenjem četiri korištena uređaja (instrumenta) daje uvid u pouzdanost takvih mjerenja.

Daljnja istraživanja planiraju uključiti bespilotnu letjelicu (DRON) te korištenje profesionalne video opreme za kvalitetnije video i fotografske zapise mjerenja, uz mjerenja totalnom stanicom i GNSS uređajem. Primjena ehosondera za ultrazvučno mjerenje dubina također bi dala precizniju snimku poprečnog presjeka ispod razine vodnog lica. Također, primjenom teorije entropije odrediti će se srednji protoci korištenjem dobivenih maksimalnih površinskih brzina, što u ovom radu nije napravljeno, uzevši u obzir svrhu i opseg rada.

Zahvala

Ovaj je rad nastao u sklopu projekta Hidrološko-geodetski model za predviđanje poplava i suša (IP-UNIN-TEH-2025-11), koji financira Europska unija – NextGenerationEU. Iznoseni stavovi i mišljenja samo su autorova i ne odražavaju nužno službena stajališta Europske unije ili Europske komisije. Ni Europska unija ni Europska komisija ne mogu se smatrati odgovornima za njih.

Literatura

- Benac, Č., Rubinić, J., Ružić, I., and Radišić, M. (2017) 'Geomorfološka evolucija riječnih dolina i ušća na istarskom poluotoku'. *Hrvatske Vode*, 25, pp. 71–80.
- Bahmanpouri, F., Lazzarin, T., Barbetta, S., Moramarco, T., and Viero, D. P. (2023). Estimating flood discharge at river bridges using the entropy theory. Insights from Computational Fluid Dynamics flow fields. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2023, 1-29.
- Geolux. Dostupno na: <https://www.geolux-radars.com/> (Preuzeto: 7. prosinac 2025).
- Knežević, R. (2003) 'Uvjeti otjecanja i režim tekućica u porječju Mirne'. *Hrvatski Geografski Glasnik*, 65/2, pp. 81–98.
- Muste, M., Yu, K., and Spasojevic, M. (2004) 'Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements'. *Flow Measurement Instruments*, 15, pp. 1-16.
- SonTek (2020) Flowtracker 2 user's manual (v1.6).
- Tauro, F., Olivieri, G., Petroselli, A., Porfiri, M., and Grimaldi, S. (2016) 'Flow monitoring with a camera: a case study on a flood event in the Tiber River'. *Environmental Monitoring Assessment*, 188, 118, pp. 1-13.
- Teledyne Instruments - Marine specifications – StreamPro. Dostupno na: https://www.teledynemarine.com/en-us/products/SiteAssets/RD%20Instruments/streampro_datasheet_hr.pdf (Preuzeto: 15. prosinac 2025).
- Yang, T.; Liu, Z.; Chen, Y.; Yu, Y. Real-Time, Inexpensive, and Portable Measurement of Water Surface Velocity through Smartphone. *Water* 2020, 12, 3358.
- Yu, K., and Lee, J. (2022) 'Method for Measuring the Surface Velocity Field of a River Using Images Acquired by a Moving Drone'. *Water*, 15, 1(53), pp.1-13.
- Yu, K., and Cho, W. (2014) 'Real-time surface image velocimeter using a smartphone', in *Proceedings of 19th IAHR-APD Congress*. Hanoi, Kina, 21-24 rujna 2014. Madrid: IAHR.