

SSIMS-FLOW: ALAT ZA PROCENU PROTOKA U OTVORENIM TOKOVIMA NA OSNOVU POLJA POVRŠINSKIH BRZINA IZ VIDEO ZAPISA SA LAKIH BESPILOTNIH LETELICA

Robert LJUBIČIĆ, Budo ZINDOVIĆ, Nikola ROSIĆ, Dragutin PAVLOVIĆ
Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

REZIME

Merenje protoka u otvorenim kanalima često je dugotrajan, invazivan, složen i skup poduhvat, koji neretko uključuje veći broj naročito obučeni rukovaoca opremom, i različite naknadne obrade podataka sa terena. Razvoj tehnologije lakih bespilotnih letelica opremljenih kamerama omogućio je alternativan pristup posrednog merenja protoka putem analize polja površinskih brzina u otvorenom toku. Iako merenja ovom metodom pružaju podatke više merne neizvesnosti od konvencionalnih mernih metoda, opisana procedura beskontaktnog merenja protoka je (1) vremenski efikasnija, (2) zahteva manji broj rukovaoca opremom, (3) primenjiva čak i u određenim uslovima u kojima konvencionalne metode nisu i (4) otvara mogućnost automatizovanog i autonomnog monitoringa vodotoka. Procedura hidrometrijske analize video zapisa još uvek nije standardizovana, i na tržištu se teško pronalazi alat koji uspešno obavlja sve korake neophodne za dobijanje podataka o brzinama i protoku. Alat SSIMS-Flow razvijen je sa ciljem da omogućiti lak pristup različitim koracima pripreme i procesiranja podataka iz video zapisa u sveobuhvatnom procesu – od pripreme „sirovog“ video zapisa do procene vrednosti protoka – čime se drastično pojednostavljuje primena opisane metoda merenja.

Ključne reči: otvoreni tok, hidrometrija, merenje protoka, kamera, video

1. UVOD

Merenje protoka u otvorenim tokovima predstavlja jednu od ključnih aktivnosti u okviru upravljanja vodnim resursima. Konvencionalne tehnike merenja, poput hidrometrijskog krila i ADCP uređaja, smatraju se za relativno pouzdane, standardizovane i u praksi dobro ustanovljene metode [1]. Međutim, i ove dobro

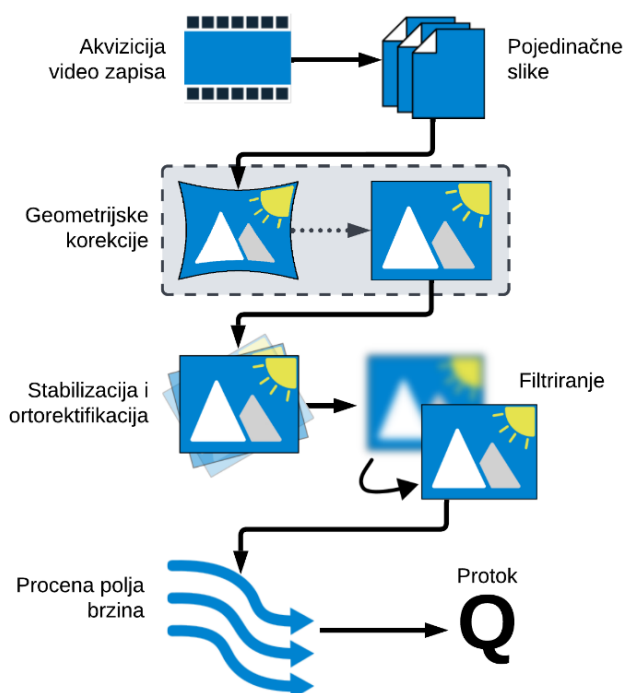
razvijene metode sa sobom nose ograničenja različite prirode – na primer, hidrometrijsko krilo je invazivno merilo najčešće primenjivo kod relativno plitkih vodotoka, merenja su dugotrajna; ADCP uređaj je skup, primenjiv u određenom opsegu (uglavnom) dubina vode [1], zahteva relativno mirnu slobodnu površinu i relativno male brzine tečenja, itd. Obe metode po pravilu zahtevaju i više od jednog rukovaoca prilikom merenja, i ne mogu se primeniti u toku ekstremnih hidroloških događaja poput poplava.

Pojedine nedostatke pomenutih postupaka mogu prevazići metode merenja zasnovane na beskontaktnom merenju polja površinskih brzina, pri čemu se, uz poznavanje batimetrije, može izvršiti procena protoka. Ovakve metode popularizovane su razvojem lakih bespilotnih letelica (engl. *drone*, *unmanned aerial vehicle* – UAV, *unmanned aerial system* – UAS) koje bitno olakšavaju pristup vodotocima čak i u slučaju nepovoljnih hidroloških i/ili topografskih uslova [2]. Savremene letelice mogu podneti čak i uslove snažnog vetra i kiše, sa dometom leta i do 15 km i mogu imati zavidnu tačnost pozicioniranja u prostoru [3]. Zbog jednostavnosti sistema upravljanja, potrebe za brojem i iskustvom rukovaoca znatno su niže nego kod konvencionalnih metoda – u određenim slučajevima može biti dovoljan i samo jedan rukovalac.

Jedan od glavnih nedostataka predložene metodologije je nedostatak standardizacije, a samim tim i sveobuhvatnih softverskih rešenja za adekvatnu analizu prikupljenih video zapisa. Softverski alat SSIMS-Flow [4] razvijen je na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, i namenjen je primeni u celokupnom procesu merenja – od pristupa video zapisu i predprocesiranja do konačnog merenja polja brzina i naknadnih analiza u cilju procene protoka – koji je detaljno opisan u ovom radu.

2. METODOLOGIJA

U predstojećem poglavlju biće predstavljeni koraci koji omogućavaju merenje polja brzina i procenu protoka iz video zapisa, a za koje je primenjiv alat SSIMS-Flow. U slučaju primene fiksnih kamera, korak 2.4 može se preskočiti. Šema procesa merenja prikazana je na slici 1.

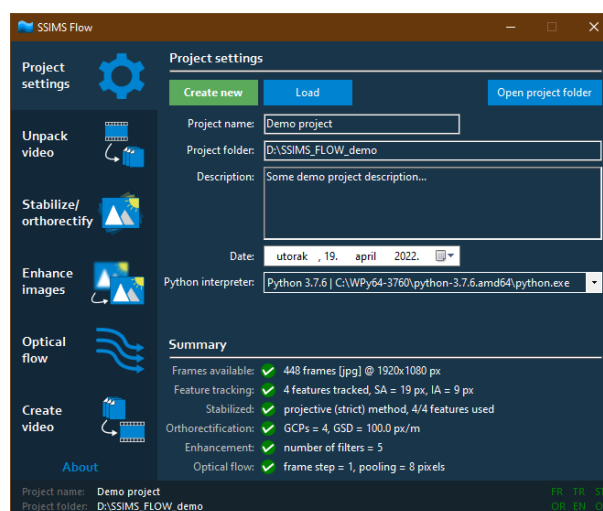


Slika 1. Šema procesa merenja protoka putem video zapisa u alatu SSIMS-Flow

SSIMS-Flow je programski alat sa grafičkim okruženjem (slika 2) namenjen merenju polja brzina i proceni protoka iz video zapisa [4]. Imajući u vidu široku lepezu ponude lakih bespilotnih letelica na tržištu, SSIMS-Flow je prilagođen prvenstveno komercijalnim letelicama nižih tehničkih karakteristika, koje ne poseduju naročite sisteme za precizno pozicioniranje i/ili kamere koje registruju informacije izvan vidljivog spektra svetlosti.

Obrada video zapisa u alatu započinje kreiranjem „projekta“ koji predstavlja skup parametara (podešavanja) i podataka koji će u toku procesa biti kreirani. Grafički koncept korisničkog interfejsa (slika 2) u potpunosti je prilagođen šemi procesa merenja sa slike 1. Korisnik može projektu dodeliti odgovarajuće metapodatke, pregledati obavljene korake i pritom korišćene parametre, i obaviti neophodne obrade

onoliko puta koliko je to neophodno u cilju dobijanja optimalnih rezultata. Nakon svake akcije, SSIMS-Flow ažurira i snima stanje projekta, te se nedovršeni ili stari projekat može ponovo učitati i na njemu se nastaviti rad.



Slika 2. Glavni prozor grafičkog okruženja alata SSIMS-Flow, prikazan panel za metapodatke

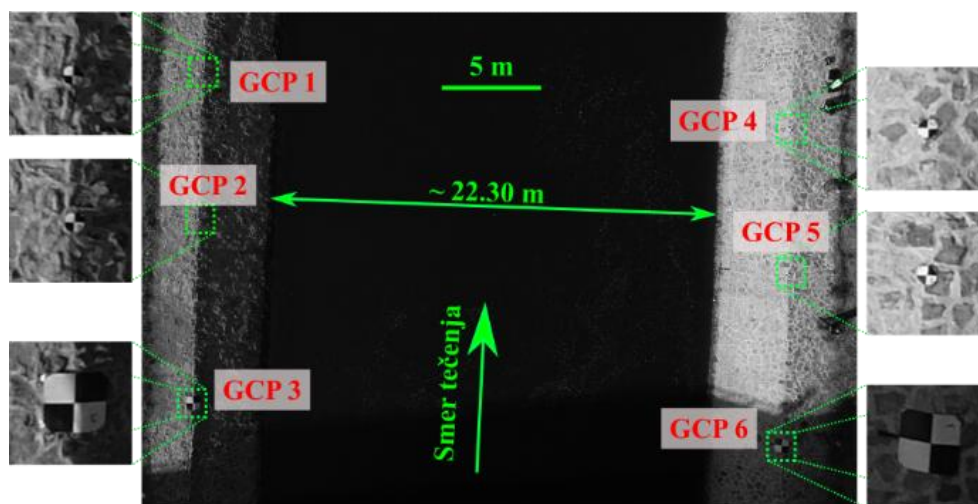
2.1 Procedura merenja i akvizicije video zapisa

Metode obrade slika pogodne su prvenstveno kod vodotoka malih i srednjih protoka. Kriterijum za adekvatnu primenu je da kadar kamere obuhvata celokupnu širinu vodotoka, a da je pri tome moguće detektovati kretanje čestica trasera na njegovoj površini (poglavlje 2.7). Optimalna konfiguracija snimanja je ona sa upravnom orijentacijom kamere u odnosu na ravan slobodne površi vodotoka (engl. *nadir orientation*), čime se umanjuje neophodan intenzitet ortorektifikacije (poglavlje 2.5) i uopšte smanjuje merna neizvesnost.

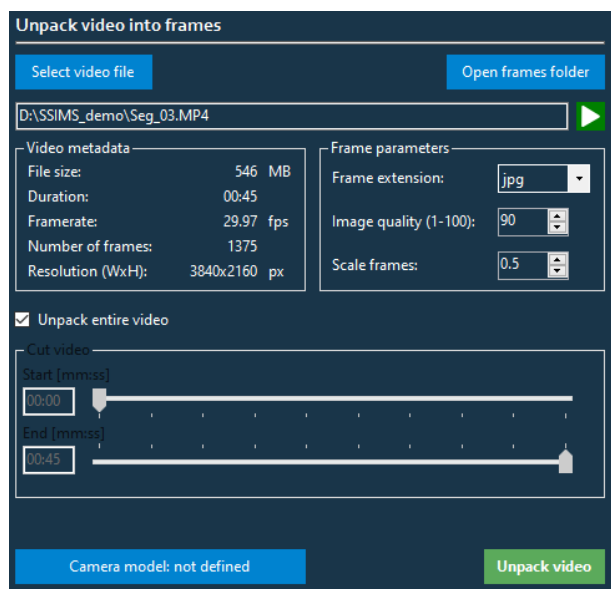
Zbog svoje male mase, ovakve letelice veoma su podložne niskofrekventnim oscilacijama položaja u letu. Stoga je potrebno u toku čitavog trajanja video zapisa obezbediti u kadru dovoljan broj stabilnih karakteristika/tačkaka, kako bi se eventualno neželjeno kretanje letelice/kamere moglo anulirati procedurom digitalne stabilizacije (poglavlje 2.4). Ukoliko takve karakteristike nisu dostupne, poželjna je upotreba veštačkih kontrolnih tačkaka (slika 3). U toku akvizicije video zapisa nije poželjno neposredno rukovanje letelicom od strane operatora kako bi se smanjio intenzitet njenog kretanja u odnosu na ciljnu oblast merenja.

Rezolucija video zapisa od ključnog je značaja za kvalitet detekcije i praćenja čestica trasera, te se preporučuje da ona bude što je moguće veća. Izuzetak mogu biti slučajevi sa velikom brzinom tečenja, gde je poželjnije da brzina snimanja (engl. *framerate*) bude što veća, što često umanjuje najveću dostupnu rezoluciju.

Optimalno trajanje snimka u opštem slučaju zavisi od brzine tečenja vode, i u praksi uglavnom iznosi između 20 sekundi i nekoliko minuta. Kao najmanja orijentaciona vrednost može se uzeti vreme koje je potrebno da čestica trasera sa uzvodne strane kadra stigne do nizvodnog.



Slika 3. Primer postavke merenja i upotrebe veštačkih kontrolnih tačaka, reka Kolubara (prilagođeno iz [5])



Slika 4. Prozor za izdvajanje pojedinačnih slika iz video zapisa

2.2 Od video zapisa do slika

Kako bi se omogućio jednostavniji pristup kadrovima iz video zapisa, prvi korak u alatu SSIMS-Flow je da se iz njega dekodiraju i izdvoje pojedinačne slike kojima će se pristupati u nastavku procesa. U prozoru *Unpack video* (slika 4) moguće je definisati parametre u vezi sa novonastalim slikama – njihovu ekstenziju (način kodiranja), faktore kvaliteta i skaliranja slika.

2.3 Geometrijske korekcije

Nesavršenost izrade kamernog aparata (senzora kamere ili optičkog dela) može uzrokovati pojavu sistematskih grešaka u određivanju položaja (a samim tim i brzina) čestica trasera i drugih objekata u kadru. Procena intenziteta ovih grešaka (deformacija) i njihovo uklanjanje zasniva se na proceni: (1) matrice unutrašnjih parametara kamere – fokalnog rastojanja i položaja optičkog centra, (2) parametara radijalne distorzije i (3) parametara tangencijalne distorzije kamere. Detalji u vezi efekata, načina procene i uklanjanja ovih parametara mogu se pronaći u [6].

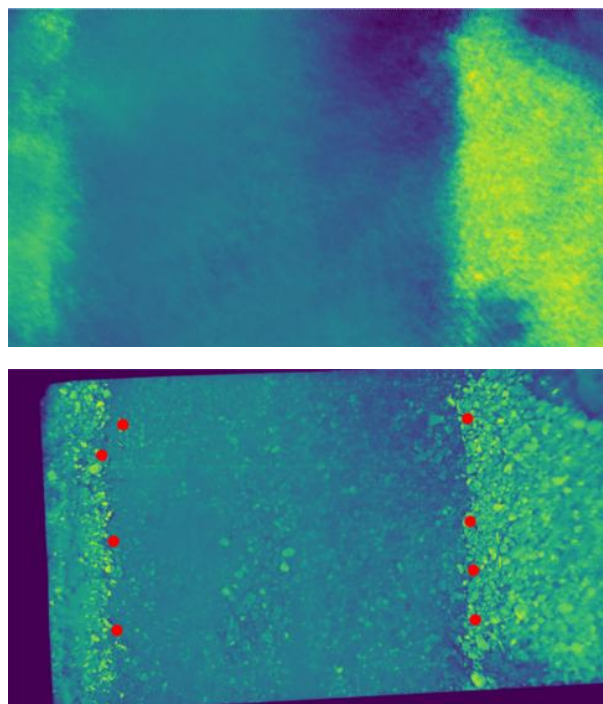
SSIMS-Flow pojednostavljuje postupak procene i uklanjanje ovih nesavršenosti (donji levi ugao prozora *Unpack video*, slika 4): (1) za određeni broj popularnih komercijalnih letelica i njihovih kamera parametri su dostupni u samom alatu, (2) parametri se mogu uneti ručno ili se (3) parametri mogu automatizovanim postupkom odrediti upotrebom kalibracione mete. U slučaju da parametre kamere nije moguće odrediti ili se ne uočava znatno prisustvo ovih nesavršenosti, ovaj korak može se preskočiti.

2.4 Stabilizacija

Relativno pomeranje letelice i kamere u odnosu na tlo u toku akvizicije video zapisa uzrokuje promenu odnosa između prikaza u kadru i odgovarajućih karakteristika (predmeta, objekata; engl. *feature*) na tlu, što onemogućava pouzdanu procenu stvarnih brzina kretanja čestica trasera (slika 5). Pri tome, čak i u povoljnim uslovima leta (bez vetra) očekuje se određeni intenzitet kretanja kamere u odnosu na površinu vodotoka usled vibracija letelice ili nesavršenosti njenog sistema za pozicioniranje [5]. Čak i kod letelica sa ugrađenim mehaničkim sklopovima za stabilizaciju kamere (engl. *gimbal*) primećeni su slični efekti u manjem intenzitetu. Stoga je pre procene polja brzina neophodno izvršiti digitalnu stabilizaciju kadrova iz video zapisa.

Uobičajena procedura digitalne stabilizacije sastoji se iz tri koraka: (1) identifikacija i označavanje određenog broja stabilnih karakteristika u prvom kadru video zapisa, (2) automatizovana procena pomeraja obeleženih karakteristika u svim narednim kadrovima i (3) transformacija koordinatnih sistema svih kadrova na koordinatni sistem prvog, koristeći informacije o položajima stabilnih karakteristika u čitavoj sekvenci kadrova iz video zapisa [5], [7]. Prva dva koraka često se objedinjeno nazivaju „fazom praćenja karakteristika“ (engl. *feature tracking*, leva strana prozora na slici 6), a treća „fazom transformacije“ (engl. *image transformation*, desna strana prozora na slici 6).

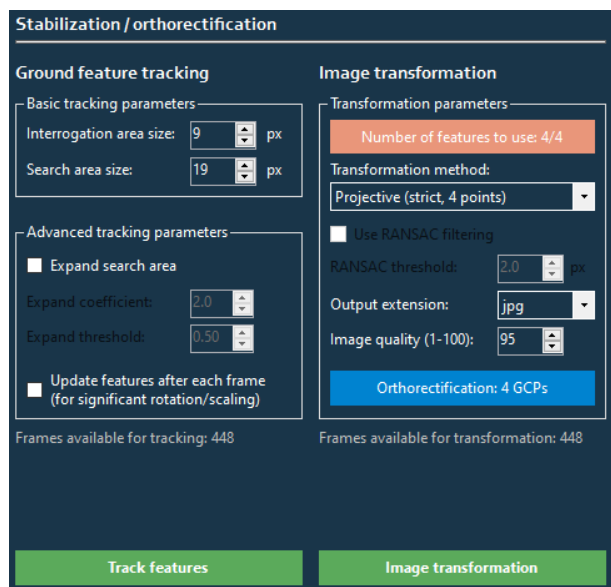
Korisnički interfejs alata SSIMS-Flow korisnicima pruža mogućnost neposrednog interaktivnog izbora potencijalnih stabilnih karakteristika iz prvog kadra, nakon čega se položaj tih objekata procenjuje u svim narednim kadrovima korišćenjem metrike *Structural Similarity Index* (SSIM) [8]. Ova metrika relativno je robusna u uslovima promenljivog osvetljenja i kontrasta, kao i malih uglova rotacije kamere ($< 15^\circ$).



Slika 5. Primer efekata digitalne stabilizacije, reka Basento u Italiji. Gore: medijana nestabilizovanog video zapisa. Dole: medijana stabilizovanog video zapisa. [7]

Broj potrebnih stabilnih karakteristika za adekvatnu digitalnu stabilizaciju zavisi umnogome od: (1) tipa i intenziteta kretanja kamere i kadra, (2) veličine, oblika i istaknutosti karakteristika, (3) položaja karakteristika na slikama i u stvarnosti [5], [7]. Tipičan broj potrebnih karakteristika je između 4 i 8, s tim da SSIMS-Flow nudi mogućnost efikasnog praćenja znatno većeg broja potencijalno stabilnih karakteristika. Nakon završene „faze praćenja“ korisnik može prikazati analizu tačnosti procene njihovih položaja i odabrati karakteristike čiji položaji su procenjeni sa najvišom tačnošću, i koji će biti upotrebljeni u narednoj „fazi transformacije slika“.

Na osnovu procenjenih položaja istih karakteristika u dva kadra – prvom (referentnom) i bilo kom narednom – može se izvršiti transformacija svih kadrova u referentni koordinatni sistem. Ova transformacija omogućava da se naknadne analize polja brzina vrše nad podacima koji su u istom koordinatnom sistemu.

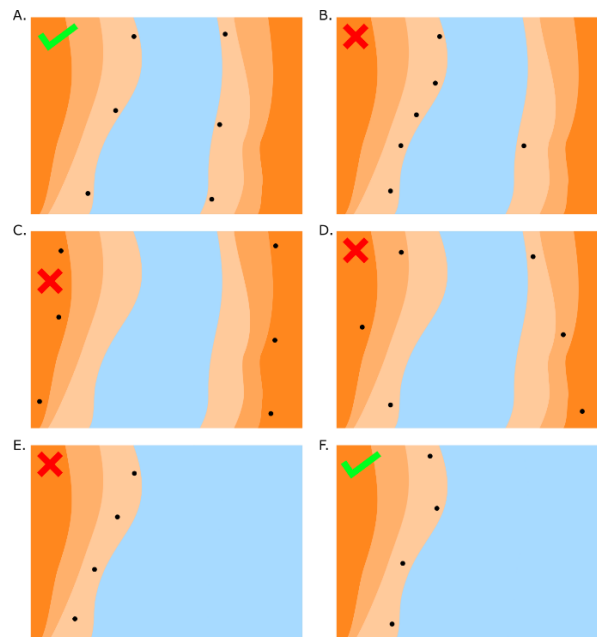


Slika 6. Prozor za stabilizaciju i ortorektifikaciju

2.5 Ortorektifikacija

Ukoliko orijentacija kamere nije upravna (ortogonalna) na površ vodotoka, stvarne dimenzije predstavljene pojedinačnim pikselima znatno će se razlikovati u različitim oblastima kadra. Tada je, pored stabilizacije, neophodno primeniti i proceduru ortorektifikacije, kojom se obezbeđuje ujednačenija rezolucija prikaza površine vodotoka na slici. Procedura ortorektifikacije zahteva da su u kadrovima dostupne karakteristike čije su koordinate u stvarnosti unapred poznate. Ove karakteristike uglavnom su veštačkog porekla, poput kontrolnih tačaka sa slike 3, i ne moraju nužno biti one koje su korišćene u procesu digitalne stabilizacije. Od ključnog značaja za pouzdanu primenu procesa ortorektifikacije je raspored kontrolnih tačaka (ili drugih karakteristika) na tlu [7]. Neki od primera pogodnih i nepodgovnih položaja kontrolnih tačaka (karakteristika) za ortorektifikaciju prikazan je na slici 7.

Osim što omogućavaju ortorektifikaciju, prisustvo određenih tačaka sa poznatim koordinatama omogućava i određivanje razmere slobodne površine u kadrovima video zapisa. Ova razmera obično se naziva „dužinom uzorkovanja tla“ (engl. *ground sampling distance* – *GSD*) izražava u jedinicama m/px ili (ređe) px/m (px = piksel). Poznavanje ove razmere je preduslov za određivanje stvarne vrednosti intenziteta brzine kretanja čestica trasera na osnovu njihovog pomeraja u video zapisu.

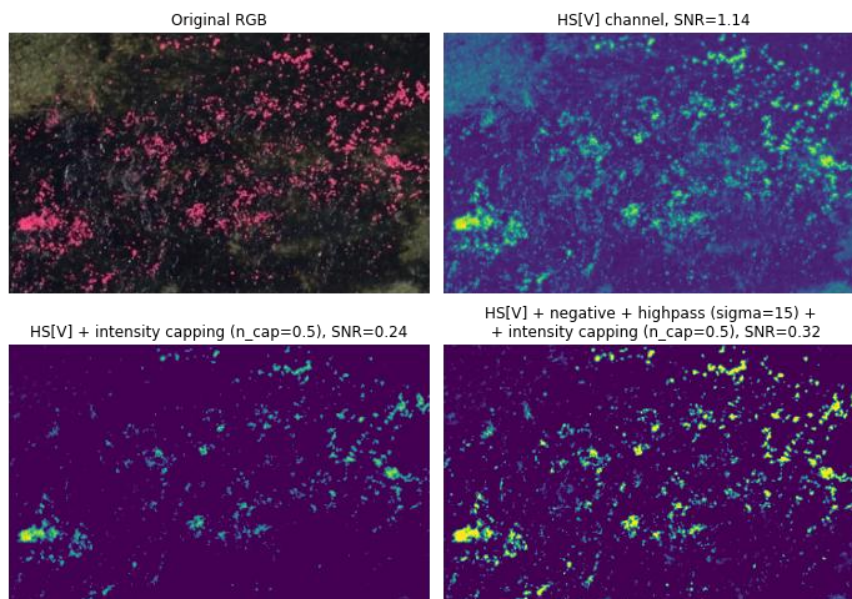


Slika 7. Primer pogodnih i nepodgovnih položaja kontrolnih tačaka u odnosu na vodotok prilikom ortorektifikacije [7]

U alatu SSIMS-Flow se proces ortorektifikacije (ukoliko je potreban) odvija u sklopu procesa stabilizacije, a konkretno u „fazi transformacije“. Alat omogućava korisniku interaktivni izbor karakteristika poznatih koordinata iz prvog kadra, pri čemu se koordinate definišu tabelarno u okviru odgovarajućeg korisničkog prozora. Osim toga, korisnik može definisati i željenu GSD vrednost koju stabilizovane i ortorektifikovane slike treba da imaju nakon „faze transformacije“, a koja se obezbeđuje automatskim skaliranjem dobijenih slika.

2.6 Filtriranje

Osim čestica trasera, na slikama će nezaobilazno biti prisutne i informacije koje nisu od značaja za merenje polja brzina. Naprotiv, određene informacije remete sposobnost identifikovanja i praćenja stvarnih čestica trasera. Primenom tehnika obrade slika – filtriranja slika – moguće je akcentovanje čestica trasera, uz istovremeno ublažavanje ili uklanjanje nepoželjnih informacija poput talasa, refleksija svetlosti o površinu vodotoka, raznih formi i objekata na dnu vodotoka, i sl. Ova procedura smanjuje mogućnost pojave pogrešno („lažno“) detektovanih čestica trasera koje uvećavaju mernu neizvesnost merenja polja površinskih brzina vodotoka. Na slici 8 prikazan je primer efekata filtriranja [9].



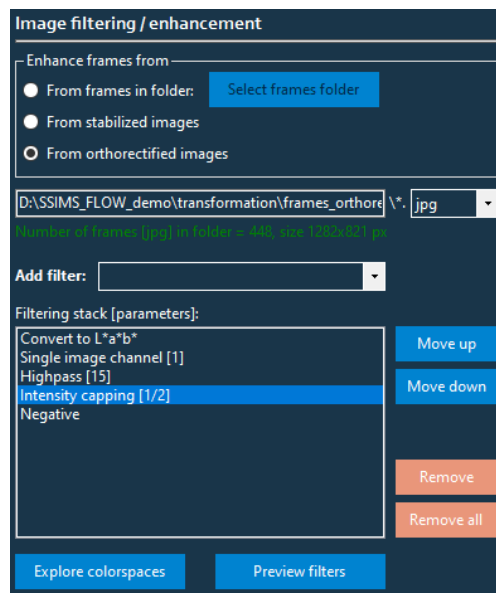
Slika 8. Primer filtriranja slika u cilju akcentovanja čestica trasera [9]

Primena tehnika filtriranja u mnogome zavisi od samih informacija na slici – njihove složenosti, veličine, izgleda, oblika i boje trasera [9]. Zbog te složenosti, čitalac se upućuje na literaturu sa primerima [9]. Od najvećeg praktičnog značaja za prirodne vodotoke su sledeće tehnike: (1) promene sistema boja (engl. *colorspace transformation*) i izdvajanje pojedinačnih kanala boja, (2) visokopropusni filter (engl. *highpass filter*) i (3) ograničavanje opsega intenziteta piksela (engl. *intensity capping*) [9].

U alatu SSIMS-Flow ponuđeno je 16 metoda filtriranja, koje se mogu kombinovati u bilo kom rasporedu kako bi se omogućilo optimalno akcentovanje željenih karakteristika (slika 9). Detalji u vezi parametara različitih metoda i njihovog kombinovanja mogu se pronaći u [9].

2.7 Od brzina do protoka

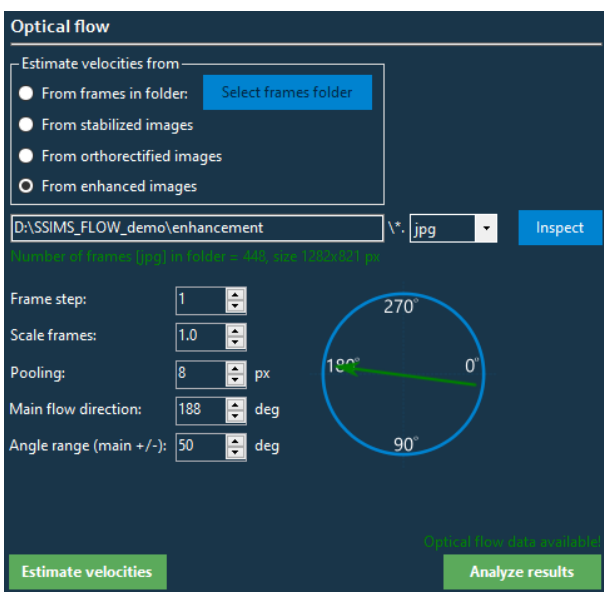
Metode optičkog toka (engl. *optical flow*) predstavljaju skup algoritama za procenu brzine kretanja određenih karakteristika u sekvenci kadrova, pri čemu te karakteristike mogu biti definisane pojedinačnim pikselima (engl. *dense optical flow*) ili grupama piksela (engl. *sparse optical flow*) [10]. U ovu grupu metoda ne spadaju starije i popularnije metode poput *particle image velocimetry* (PIV) i *particle tracking velocimetry*



Slika 9. Deo prozora za definisanje procesa filtriranja slika

(PTV), koje pripadaju grupi korelacionih metoda. U odnosu na njih, metode optičkog toka omogućavaju bolju tačnost kod analiza strujanja fluida, kao i znatno veću rezoluciju polja brzina.

SSIMS-Flow primenjuje metod optičkog toka koji je razvio i popularizovao Gunnar Farneback [11], a koja se zasniva na analizi polja temporalnih gradijenata intenziteta piksela u sekvenci slika, pri čemu se promena intenziteta u okruženju nekog piksela aproksimira polinomom drugog reda. Na ovaj način dobijaju se informacije o brzini kretanja svakog pojedinačnog piksela između dva kadra. Ponavljanjem postupka između svih uzastopnih parova u sekvenci može se dobiti predstava o kretanju objekata iz video zapisa, u vremenu i prostoru. Prikaz prozora za pripremu analize polja brzina metodom optičkog toka prikazan je na slici 10.



Slika 10. Prozor za analizu polja brzina metodom optičkog toka

Od ključnog značaja za pouzdanu primenu Farneback metode su: (1) korišćenje stabilizovane sekvence slika i (2) istaknutost čestica trasera u odnosu na nepokretnu pozadinu kadra (npr. u odnosu na slobodnu površinu). S druge strane, jedna od najvećih prednosti Farneback metode istovremeno je, sa praktičnog stanovišta, njena glavna mana – vektor brzine procenjen je za svaki pojedinačni piksel slike, što neminovno dovodi do znatnih zahteva za prostorom za skladištenje informacija.

U cilju prevazilaženja ovog problema, SSIMS-Flow primenjuje nekoliko algoritamskih rešenja za smanjenje rezolucije rezultujućeg polja brzina. Najpre, imajući u vidu način rada algoritma, nije uvek neophodno

analizirati kretanje između susednih kadrova u video zapisu. Ako je kretanje između dva uzastopna kadra relativno malo – manje od jednog piksela – merna neizvesnost procene pomeraja između kadrova biće značajna. Optimalna vrednost pomeraja neke čestice trasera između dva kadra kod primene SSIMS-Flow metode je u opsegu između 5-8 piksela. Stoga se umesto svakog kadra mogu analizirati parovi sačinjeni od svakog n -tog kadra u sekvenci (engl. *frame step*). Osim toga, rezolucija rezultata može se smanjiti skaliranjem samog kadra, s tim da je ovaj pristup opravdan samo ukoliko je veličina čestica trasera dovoljna da se njen izgled ne izgubi prilikom smanjenja rezolucije.

0.2					0.1
		9		0.1	
					7
0.3		0.2			
			7		0.1
		0.2			8
				0.3	

Slika 11. Primer *pooling* bloka sa prikazanim vrednostima intenziteta brzina pojedinačnih piksela

Elegantnije algoritamsko rešenje primenjeno u SSIMS-Flow za smanjenje rezolucije rezultujućeg polja brzina za je *pooling*, s čime u vezi su usvojene određene razumne pretpostavke. Prva pretpostavka je da je broj čestica trasera u odnosu na ukupan broj piksela na slici izuzetno mali. Dalje, pretpostavlja se da su brzine strujanja u neposrednom okruženju čestica trasera bliske ili iste brzini te čestice, kako u pogledu intenziteta, tako i u pogledu pravca vektora (ugla i smera strujanja). Ova pretpostavka razumna je imajući u vidu da je brzina strujanja po pravilu neprekidna i u svakoj tački diferencijabilna fizička veličina. Na osnovu te dve pretpostavke, primenjuje se sledeći algoritam:

1. Matrica intenziteta brzina dobijena putem metode optičkog toka, koja je iste rezolucije kao i polazna slika, deli se na blokove dimenzija $N \times N$ piksela (slici 11). Na osnovu prve pretpostavke, očekivani broj piksela koji predstavljaju kretanje stvarnih čestica trasera je mali u odnosu na ukupan broj piksela u bloku, što se identifikuje znatno većim vrednostima intenziteta u odnosu na preostale piksele.

2. Intenziteti brzina u preostalim pikselima će biti nula, ili bliski nuli ukoliko su posledica „mernog šuma“ same metode (lažno detektovano kretanje pozadine u kadru) ili zaostalo kretanje pozadine kadra nakon nesavršene digitalne stabilizacije. Zbog velike rezolucije merenja, merni šum po pravilu nastaje prilikom primene bilo koje od metoda iz grupe *dense optical flow*.
3. Na osnovu druge pretpostavke, stvarni intenziteti brzina u ovom bloku brzine bi trebalo da budu međusobno slične, tako da ih za relativno male dimenzije bloka N možemo aproksimirati jednom vrednošću.
4. Jednostavna primena metode aritmetičke sredine ili medijane na čitavom bloku (koji je u suštini jedna retka matrica; engl. *sparse matrix*) za procenu jedne reprezentativne vrednosti će nesumnjivo dovesti do potcenjivanja stvarnih intenziteta. Međutim, aritmetička sredina može poslužiti kao svojevrsni prag za detektovanje i filtriranje šuma i nula vrednosti. Na primeru sa slike aritmetička sredina intenziteta iznosi 0,5. Nadalje se obeležavaju i koriste samo oni pikseli sa vrednostima većim od ovog praga – na slici su to četiri piksela sa vrednostima između 7 i 9.
5. Kao reprezentativna vrednost intenziteta brzina u čitavom bloku usvaja se aritmetička sredina onih piksela sa vrednostima iznad praga, što za primer sa slike 11 iznosi $31/4 = 7,75$. Ovako dobijena vrednost bliska je intenzitetima brzine stvarnih detektovanih čestica trasera.
6. Ugao vektora brzine (pravac i smer) određuje se kao aritmetička sredina vrednosti uglova onih piksela čiji intenziteti su iznad praga.

Opisani postupak omogućava značajno smanjenje rezolucije rezultata merenja brzina, bez značajnog gubitka informacija. Za par kadrova 4K rezolucije (3840x2160 px) neophodno je oko 82 MB za skladištenje podataka o intenzitetima i uglovima vektora brzina. Za video zapis dužine svega 30 sekundi, pri brzini snimanja od 30 slika u sekundi, potreban prostor za skladištenje podataka o brzinama bio bi približno 74 GB.

Primenom opisane *pooling* tehnike blokovima 32x32 px, zahtevani prostor smanjuje se na svega 72 MB. Pri tome je rezultujući broj blokova 120x67, što je uglavnom dovoljan broj za adekvatnu procenu protoka [12], [13].

Konačno, kod otvorenih tokova dominantan pravac i smer strujanja lako je uočiti iz video zapisa, te se kao dodatan filter može primeniti odbacivanje onih vektora brzine čiji uglovi se značajno razlikuju od tog pravca i smeru. U alatu SSIMS-Flow mogu se definisati dominantni pravac i smer strujanja (slika 10, *main flow direction*) i prihvatljivo odstupanje ugla vektora od tih vrednosti (slika 10, *angle range*). Svi vektori brzina sa uglom koji je izvan ovako definisanog opsega odbacuju se prilikom daljih analiza.

Primer procenjenog polja intenziteta brzina opisanim postupkom dat je na slikama 13 i 16.

2.8 Od brzine do protoka

Ukoliko su na analiziranoj deonici vodotoka dostupni batimetrijski podaci – iz 3D modela terena ili samo poprečni profil u vodotoku – SSIMS-Flow omogućava i procenu ukupnog protoka na snimljenoj deonici. Procena protoka zasniva se na definisanju veze između brzine osrednjene po dubini (V_m) i površinske brzine (V_s) u svakoj tački nekog odabranog poprečnog preseka. Korisnik u alatu može interaktivno da odabere dve tačke između kojih su dostupni batimetrijski podaci i koje definišu profil u kom će se proceniti vrednost protoka.

Ukoliko uticaj vetra na površinske brzine nije značajan, veza između brzine osrednjene po dubini i površinske brzine i može se dobiti iz teorijskih funkcija promene brzine po dubini [14]. Pod pretpostavkom da se brzine po dubini mogu modelirati eksponencijalnim izrazom, odnos $\alpha = V_m/V_s$ iznosi približno 0,85 [14]. Međutim, merenja u prirodnim vodotocima pokazala su da se u praksi ovaj odnos uglavnom kreće u opsegu između 0,84 i 0,90 [15]. U ekstremnim slučajevima izraženog uticaja vetra, posebno pri malim brzinama tečenja, ovaj odnos može biti i veći od jedinice [16], [17].

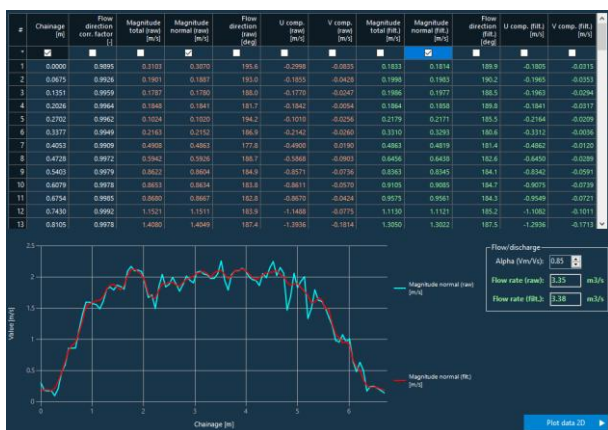
Analizom dostupne literature mogu se izvesti sledeći zaključci [16]:

1. Vrednosti odnosa α zavise prvenstveno od uticaja trenja duž dna vodotoka, pri čemu većim efektima trenja odgovaraju niže vrednosti α (i obrnuto).
2. Kod prirodnih vodotoka **prosečna vrednost** α je oko 0,85 koja se dobro slaže sa teorijskom razmatranjima iz [14]. Ova vrednost dobra je polazna tačka za preliminarnu procenu protoka.
3. **Kod prirodnih vodotoka dubina manjih od 2 metra** utvrđeno je da vrednost α iznosi 0,8 sa mernom nesigurnošću od 15% u intervalu poverenja

od 90%. Ove preporuke mogu se primeniti u slučaju vodotoka obraslih gustom i visokom vegetacijom.

- Kod prirodnih vodotoka dubina većih od 2 metra** utvrđeno je da vrednost α iznosi 0,9 sa mernom nesigurnošću od 15% u intervalu poverenja od 90%.
- Za veštačke kanale** ili veštački uređene merne profile vrednost α iznosi 0,9 sa mernom nesigurnošću od 15% u intervalu poverenja od 90%.

Prema predstavljenim preporukama potrebna je doza rezerve zbog „neprirodnog“ diskontinuiteta vrednosti α pri dubini od 2 m. Kao kompromisna vrednost kod prirodnih vodotoka može se koristiti prosečna vrednost od 0,85. Detaljna diskusija različitih metoda i preporuka za procenu koeficijenta α dostupna je u literaturi [18].



Slika 12. Primer prikaza rezultata procene protoka u SSIMS-Flow. Alat dozvoljava isctavanje i izvoz različitih tipova podataka.

U cilju procene protoka, SSIMS-Flow zahteva od korisnika definisanje profila dubina i koeficijenta α , nakon čega postaje dostupna vrednost procenjenog protoka. Primena alata u praksi pokazala je da su nefiltrirane izmerene vrednosti intenziteta površinskih brzina (plava linija na slici 12) često podložne pojavi „neprirodnih“ lokalnih oscilacija – na primer pri uslovima nejednakih gustina čestica trasera – te alat nad datim podacima automatski primenjuje i 2D medijana filter (crvena linija na slici 12). Osim toga, u odnosu na pravac definisanog profila za procenu protoka, alat takođe vodi računa o pravcu i smeru svih vektora brzina, i uzima u obzir odgovarajući korekcionni faktor prilikom proračuna protoka (sinus ugla između pravca vektora brzine i pravca profila).

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Demonstracija sposobnosti alata SSIMS-Flow biće prikazana na primerima merenja protoka na dve reke sa različitim uslovima tečenja:

- Reka Kolubara** u mirnom režimu tečenja, pri malim brzinama tečenja i sa velikom mutnoćom vode.
- Reka Sušica** u burnom režimu tečenja, pri velikim brzina tečenja i sa malom mutnoćom vode.

Dva odabrana slučaja poslužiće za demonstraciju različitih aspekata i sposobnosti alata SSIMS-Flow. Na kraju poglavlja biće prikazana i analiza vremenske kompleksnosti programskog kôda.

3.1 Reka Kolubara

U novembru 2018. godine obavljena su merenja protoka na reci Kolubari kod Obrenovca pomoću ADCP uređaja Sontek RiverSurveyor M9. Na istom mestu i u isto vreme snimana je slobodna površina vodotoka letelicom (dronom) DJI Phantom 4 (rezolucija video zapisa 4096x2160 px), kako bi se omogućila poređenja rezultata merenja površinskih brzina pomoću različitih metoda, i procena mernih neizvesnosti [17]. U toku merenja prosečan intenzitet brzine tečenja u vodotoku iznosio je svega 12 cm/s, pri dubinama do 1.9 m. Zbog velike mutnoće vode i odsustva prirodnih čestica trasera na površini, u uzvodno od mernog mesta je obavljeno zasejavanje slobodne površine biorazgradivim veštačkim traserima – drvenim malčom crvene boje.

Analizom podataka sa ADCP uređaja utvrđeni su vektori površinskih brzina u tri poprečna profila (nazvanih S1, S2 i S3), nakon čega je merenje polja površinskih brzina iz video zapisa obavljeno korišćenjem pet različitih metoda [17]:

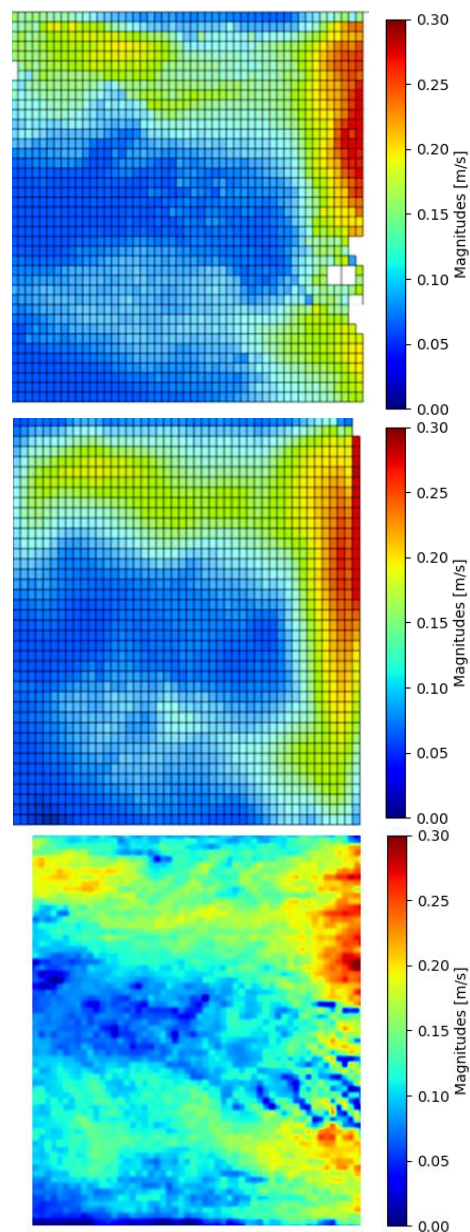
- Large-scale Particle Image Velocimetry* – LSPIV [19], pomoću alata PIVlab [20],
- Large-scale Particle Tracking Velocimetry* – LSPTV [21], pomoću alata PTVlab [22],
- Surface Structure Image Velocimetry* – SSIV [23], koji je ugrađen u softverski alat *Discharge* [24],
- Optical Tracking Velocimetry* – OTV, koji je razvijen na Univerzitetu u Tuši [25],
- Kanade-Lukas-Tomasi image velocimetry* – KLT-IV, koji je ugrađen u istoimenu softverski alat razvijen na Univerzitetu u Njukaslju [26].

Na primeru istog video zapisa kao i kod [17], pomoću SSIMS-Flow alata obavljene su procedure stabilizacije i ortorektifikacije korišćenjem veštačkih kontrolnih tačaka (GCP 1-4, slika 3), i izmerene su površinske brzine tečenja. Zbog uniformnosti boje i velike mutnoće vode, kao i dobre vidljivosti korišćenih veštačkih čestica trasera, nije obavljeno filtriranje u cilju njihovog dodatnog akcentovanja osim pretvaranja video zapisa u jednokanalni prikaz nijansama sive boje (engl. *grayscale colorspace*). Najznačajniji parametri alata SSIMS-Flow korišćenji za dobijanje konačnih rezultata priloženi su u tabeli 1. Dimenzija *pooling* bloka (32x32 px) odabrana je tako da bude ista kao veličina ćelija u poljima brzina kod preostalih metoda u radu [17]. Zbog malih brzina tečenja, analizirano je kretanje između svakog desetog kadra. Detaljna objašnjenja u vezi svih parametara mogu se pronaći u [4].

Tabela 1. SSIMS-Flow parametri, primer reke Kolubara

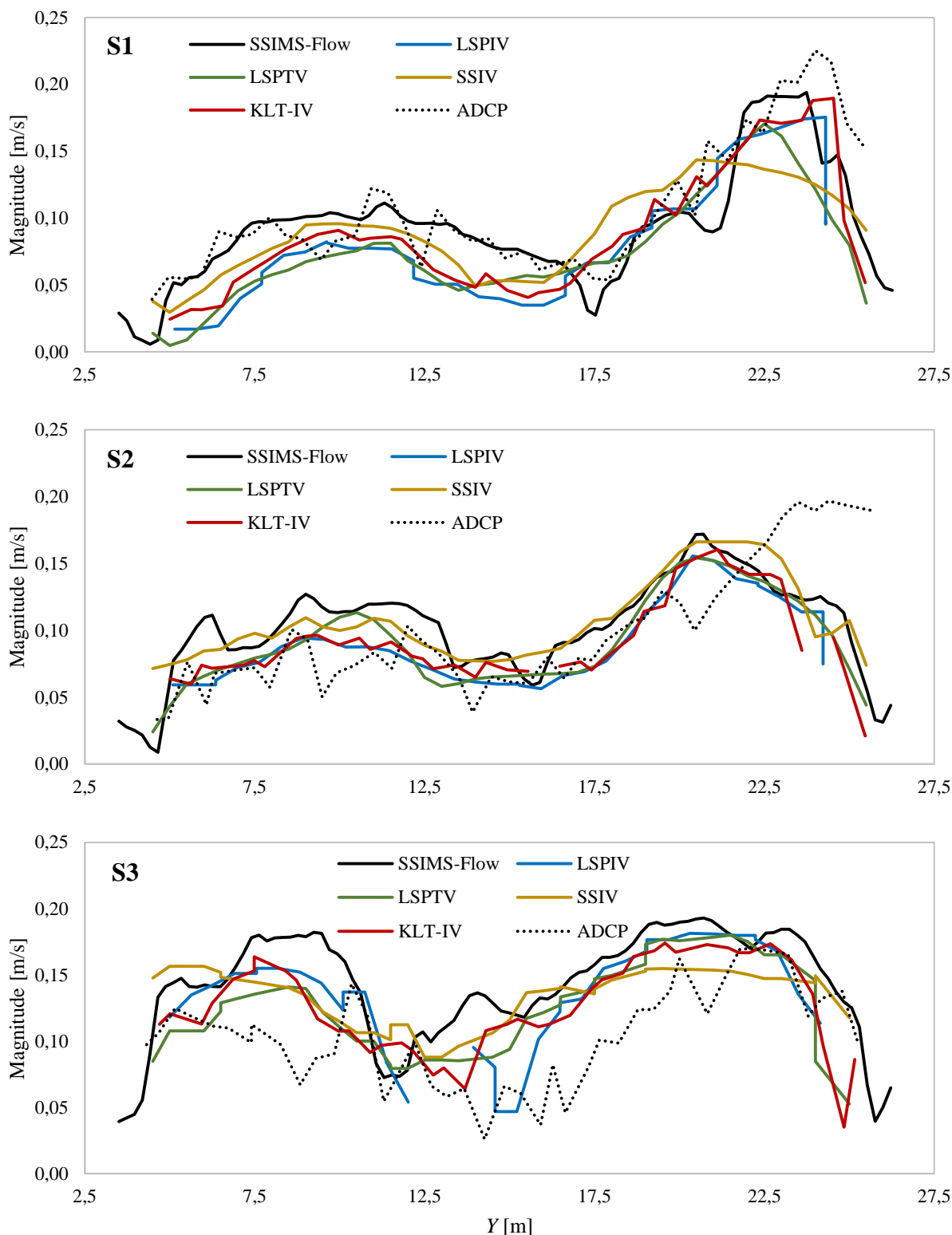
Korak	Parametar	Vrednost
Stabilize	IA size	11 px
	SA size	21 px
	# features	6 (GCPs)
Orthorectify	Trans. method	Projective, optimal
	# GCPs	6
Enhance	To grayscale	-
	Frame step	10
	Scale	1,0
Optical flow	Pooling	32 px
	Main flow dir.	0 deg
	Angle range	45 deg

Na slici 13 prikazani su intenziteti površinskih brzina određeni pomoću alata SSIMS-Flow, KLT-IV i PTVlab, pri čemu je uočljivo dobro slaganje rezultata. Zaključci iz [17] ukazuju na veću tačnost rezultata alata KLT-IV i PTVlab u odnosu na preostale analizirane. Za razliku od rezultata te dve metode, kod SSIMS-Flow je primetno manji udeo nula vrednosti u oblasti merenja, u kojima ranije dostupni alati nisu bili u stanju da adekvatno procene vrednosti intenziteta brzina bliske nuli. Neposredni uvid u originalni video zapis potvrđuje postojanje i kretanje ($V > 0$) čestica trasera po čitavoj površini vode, uključujući i ove oblasti.



Slika 13. Poređenje rezultata merenja intenziteta površinskih brzina različitim alatima na reci Kolubari: KLT-IV iz [17] (gore), PTVlab iz [17] (sredina), SSIMS-Flow (dole, *pooling* 32 px)

Na slici 14 prikazano je poređenje rezultata merenja površinskih brzina pomoću različitih metoda obrade video zapisa i ADCP uređaja u tri profila reke Kolubare. U odnosu na rezultate iz [17], izostavljena je metoda OTV zbog nedovoljne količine podataka.



Slika 14. Poređenje rezultata procene površinskih brzina različitim metodama obrade slika sa podacima dobijenih pomoću ADCP uređaja u profilima S1-S3, reka Kolubara, dopunjeno iz [17]

Na osnovu rezultata sa slike 14 mogu se izvesti sledeći zaključci:

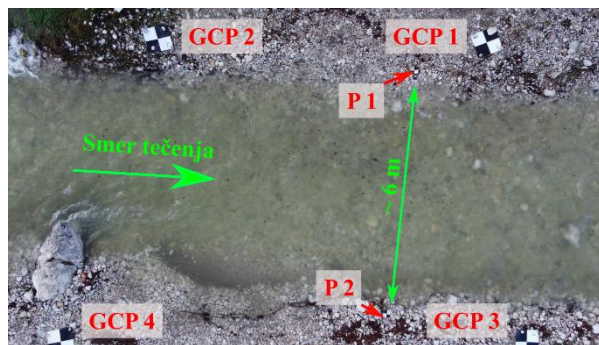
1. U profilu S1 SSIMS-Flow rezultati bolje se uklapaju u vrednosti dobijene iz ADCP podataka od svih preostalih metoda, a najpribližniji su rezultatima alata KLT-IV. Intenziteti brzina koherentni su sa ADCP rezultatima i preostalim metodama. Zbog strme desne obale poprečnog profila, očekivana merna neizvesnost ADCP rezultata u ovoj oblasti je viša nego u ostatku profila [17].
2. Na sličan način, u profilu S2 je u [17] diskutovan problem nemogućnosti adekvatnog merenja brzina putem ADCP-a na desnoj obali reke, te se ADCP vrednosti na ovoj obali ne uklapaju dobro u rezultate nijedne od opisanih metoda. Međutim, rezultati alata SSIMS-Flow dobro se uklapaju u rezultate metode SSIV i alata PTVlab i KLT-IV.
3. U profilu S3 se u najvećoj meri u pitanje dovodi tačnost ADCP rezultata imajući u vidu naglo smanjenje dubine tečenja u okolini ovog profila – usled malih dubina tečenja – gde ADCP uređaj nije u stanju da dobije podatke o brzinama tečenja iz najvećeg dela površine poprečnog preseka [17]. Međutim, sve analizirane metode i alati za procenu brzina iz video zapisa pružaju koherentne rezultate i u ovom profilu. Rezultati alata SSIMS-Flow na kratkoj dužini u blizini leve obale (stacionaža Y od 7.5 do 10 m) pružaju blago precenjene vrednosti intenziteta brzina u odnosu na preostale metode i alate.

Bitno je napomenuti da prema [27] očekivana merna neizvesnost ADCP uređaja pri opaženim brzinama u toku merenja na reci Kolubari (prosečno 12 cm/s) može iznositi i do 12% za pojedinačna merenja. Stoga se ni opažene razlike između rezultata merenja površinskih brzina putem metoda obrade video zapisa ne smatraju statistički značajnim.

Na osnovu prikazanih rezultata na primeru reke Kolubare, i poređenja sa ranije dostupnim rezultatima sličnih metoda, dokazana je adekvatnost Farneback metode optičkog toka iz SSIMS-Flow za primenu u složenim uslovima pri izuzetno malim brzinama tečenja u prirodnim vodotocima. S druge strane, pošto Farneback metod pripada grupi metoda *dense optical flow*, uočljiva je njegova sposobnost detektovanja većeg broja čestica trasera nego npr. korelaciona metoda LSPTV ili alat KLT-IV koji koristi Shi-Tomasi metod detekcije karakteristika na površini toka [28].

3.2 Reka Sušica

Merenja na reci Sušici, pritoci akumulacije „Stuborovni“, obavljena su u decembru 2021. godine. Zatečeni uslovi burnog režima tečenja i velikih brzina (do 2,5 m/s), onemogućila su merenje protoka konvencionalnim tehnikama poput hidrometrijskog krila ili ADCP uređaja. S druge strane, mala mutnoća vode i prisustvo brojnih talasa na slobodnoj površini otežavaju detekciju i praćenje čestica trasera, te predstavljaju značajan izazov čak i za metode obrade video zapisa. Akvizicija video zapisa obavljena je korišćenjem letelice DJI Mini 2, sa upravnom orijentacijom kamere u odnosu na slobodno površinu vode i pri rezoluciji od 3920x2160 px. U svrhu stabilizacije i ortorektifikacije video zapisa korišćene su četiri veštačke kontrolne tačke na obali reke (GCP 1-4). Dve dodatne kontrolne tačke (P1, P2) korišćene su za definisanje poprečnog profila u kom su merene dubine vode i protok. Na slici 15 prikazan je primer kadra iz video zapisa.



Slika 15. Primer kadra iz video zapisa tečenja reke Sušice, sa naznačenim kontrolnim tačkama [9]

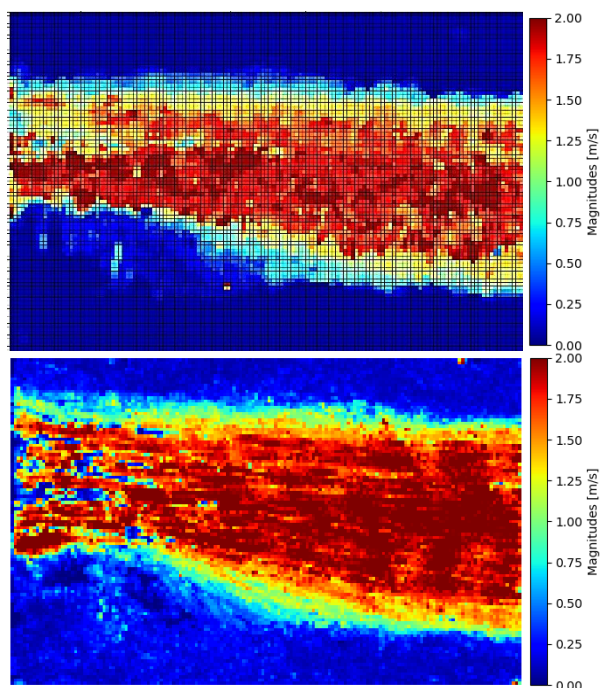
Zbog izrazito bistre vode i velike brzine tečenja, u toku merenja bilo je neophodno korišćenje veštačkih čestica trasera. U te svrhe korišćeno je osušeno lišće koje, zbog svoje kontrastne boje i male mase, predstavlja odličan biorazgradivi traser kod ovog načina merenja. Međutim, zbog velike brzine tečenja nije bilo moguće obezbediti ravnomerno prisustvo trasera po čitavoj površini deonice, kao ni ravnomerno prisustvo trasera na deonici u toku čitavog video zapisa. U opisanim uslovima određene metode koje zahtevaju ravnomerno „zasejavanje“ (engl. *seeding*) česticama trasera, poput LSPIV, ne mogu se primeniti. Merenje polja površinskih brzina obavljeno je korišćenjem dva pristupa: (1) LSPTV metod pomoću alata TracTrac [29] i (2) Farneback metod optičkog toka pomoću alata SSIMS-Flow [4].

Tabela 2. SSIMS-Flow parametri, primer reke Sušice

Korak	Parametar	Vrednost
Stabilize	IA size	9 px
	SA size	19 px
	# features	4 (GCPs)
Orthorectify	Trans. method	Projective, strict
	# GCPs	4
Enhance	To L*a*b*	-
	Single channel	1
	Highpass	15 px
	Intensity capp.	n = 1,0 – mode 2
	Negative	-
Optical flow	Frame step	1
	Scale	1,0
	Pooling	8, 16, 32 px
	Main flow dir.	8 deg
	Angle range	50 deg

Alat TracTrac [29] primenjuje metod LSPTV, a posebno je efikasan u slučajevima kada je neophodno praćenje velikog broja čestica trasera (i preko 10.000 čestica u sekundi). Međutim, pošto TracTrac ne poseduje mogućnosti predprocesiranja video zapisa, priprema podataka (izdvajanje slika, stabilizacija, ortorektifikacija i filtriranje) obavljena je alatom SSIMS-Flow. Korišćeni parametri u alatu SSIMS-Flow prikazani su u tabeli 2. U cilju procene uticaja veličine *pooling* bloka na konačne rezultate, ispitane su tri veličine bloka: 8, 16 i 32 px.

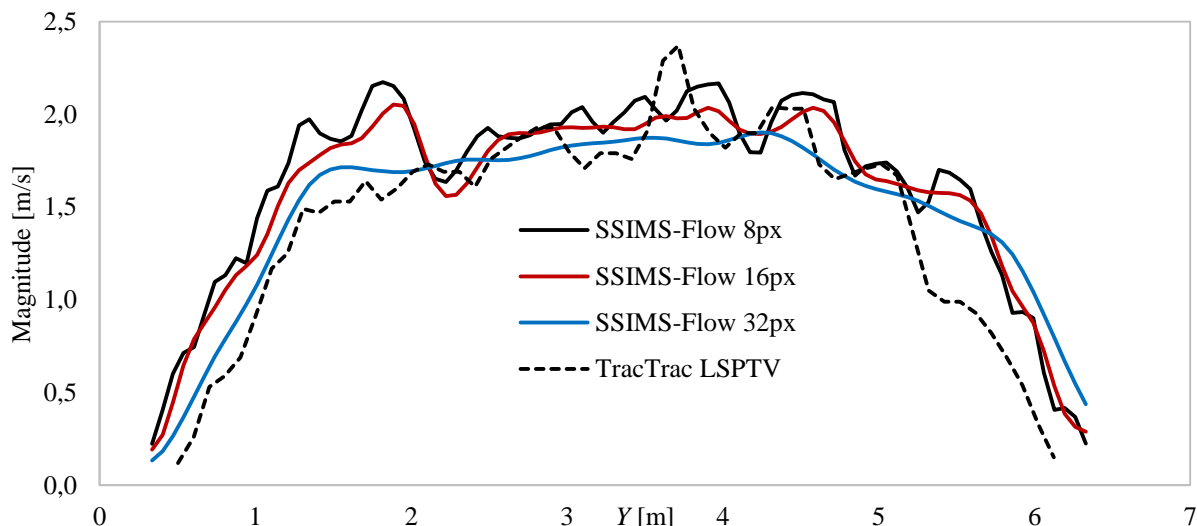
Primeri rezultata merenja polja intenziteta površinskih brzina na primeru reke Sušice prikazani su na slici 16. Na osnovu njih se uočava znatna sličnost u vrednostima intenziteta brzina i njihovom prostornom rasporedu kod dve primenjene metode. Veće razlike uočavaju se uglavnom u uzvodnom delu (leva strana slike), gde je uočeno prisustvo stojećih talasa usled opstrujavanja oko prepreke (stena na desnoj obali na slici 15). Međutim, u okolini definisanog profila za merenje protoka (P1-P2), razlike između rezultata iz dva softverska alata su male i u granicama mernih neizvesnosti korišćenih metoda, o čemu svedoče rezultati poređenja intenziteta brzina u tom profilu prikazani na slici 17.



Slika 16. Polja intenziteta površinskih brzina, primer reke Sušice. Alati TracTrac (gore) i SSIMS-FLOW (dole, *pooling* 8 px)

Zapažanja koja proističu iz rezultata prikazanih na slikama 16 i 17 su:

1. Obe razmatrane metode kao rezultat daju očekivane oblike profila površinskih brzina, u skladu sa režimom i brzinom strujanja.
2. Farnebäck metod optičkog toka (alat SSIMS-Flow) pri manjim veličinama *pooling* bloka (8 i 16 px) detektuje nešto veće vrednosti intenziteta površinskih brzina u odnosu na rezultate LSPTV metode (alat TracTrac) – u proseku oko 10%.
3. Intenziteta brzina izmerenih putem Farnebäck metode sa veličinama *pooling* blokova od 8 i 16 px razlikuju se međusobno u proseku za oko 3%.
4. Sa povećanjem dimenzija *pooling* bloka (32 px), izmereni intenziteti brzina smanjuju se zbog primene osrednjavanja unutar samog bloka koje služi kao svojevrsan prostorni filter.
5. LSPTV metod nije u stanju da adekvatno proceni brzine u neposrednoj blizini linije ureza vode, te rezultati ove metode ne obuhvataju celu izmerenu širinu izabranog mernog profila (6 m). Na osnovu pregleda video zapisa može se identifikovati postojanje i kretanje trasera i u ovim oblastima, te se u njima LSPTV metod smatra manje pouzdanim.



Slika 17. Poređenje intenziteta površinskih brzina u mernom profilu reke Sušice

6. SSIMS-Flow pruža informacije o brzinama i u blizini linije ureza, te uspešno „pokriva“ merenim vrednostima čitavu širinu profila.
7. Osim kretanja čestica trasera, SSIMS-Flow indiskriminantno detektuje čak i kretanje površinskih talasa, što može biti potencijalan uzrok određenog dela razlika u odnosu na LSPTV rezultate.
8. Razlike između procenjenih protoka putem LSPTV i Farneback metode za različite veličine *pooling* bloka od 8, 16 i 32 px iznose (redom) 15%, 11% i 5%. Prilikom primene bloka veličine 32 px, širina slobodne površine u mernom profilu (P1-P2) predstavljena je sa manje od 20 blokova, što je uglavnom nedovoljan broj podataka kako bi procenjena vrednost protoka bila statistički značajna [12], [13], te se ova veličina bloka ne smatra adekvatnom u ovom konkretnom slučaju.
9. Usled nedostatka komparativnih merenja protoka konvencionalnim metodama u toku kampanje na reci Sušici, ne može se dati ocena o tome koja od predstavljenih metoda ima manju mernu neizvesnost. Prikazani rezultati, stoga, imaju zadatak da oslikaju razlike između pojedinih metoda merenja polja površinskih brzina, kao i razlike koje mogu

nastati izborom drugačijih vrednosti parametara u alatu SSIMS-Flow.

Kao najveći nedostatak svih metoda zasnovanih na obradi video zapisa ističe se nemogućnost istovremene procene dubina tečenja, koja se mora proceniti konvencionalnim metodama. Međutim, u slučaju ponovljenih mernih kampanja u morfološki stabilnim profilima, opisane metode mogu obezbediti brzu i efikasnu procenu protoka na osnovu ranije dostupnih batimetrijskih podataka, pa čak i automatizaciju merenja protoka korišćenjem fiksnih kamera. Batimetrijski podaci mogu se takođe mogu dobiti korišćenjem lakih bespilotnih letelica – fotogrametrijskim metodama, obično u toku režima niskih vodostaja. U slučajevima eventualnih ekstremnih hidroloških događaja poput poplava, merenja površinskih brzina mogu se obaviti u toku samog događaja, a batimetrijski podaci mogu se naknadno prikupiti.

3.3 Vremenska kompleksnost

Važan aspekt upotrebljivosti softvera je i njegova efikasnost, koja se najčešće ogleda kroz vremensku kompleksnost u toku izvršavanja zadataka. U tabeli 3 prikazana su trajanja svih stadijuma u procesu analize video zapisa tečenja u reci Sušici iz prethodnog poglavlja. Video zapis rezolucije 3840x2160 px (4K),

pri brzini snimanja i reprodukcije od 29,97 kadrova u sekundi i trajanja od 15 sekundi, sadržao je ukupno 448 kadrova.

Prosečno ukupno vreme analize jednog kadra iznosilo je manje od 0,8 sekundi i dobar je indikator efikasnosti i primenljivosti razvijenog alata u svakodnevnoj praksi. Važno je napomenuti da navedena vremena uključuju i čitanje i pisanje podataka na skladišteni medijum koji je u analiziranom slučaju bio HDD. U slučaju primene brzih SDD medijuma očekuju se znatno kraća vremena.

Tabela 3. Analiza vremenske kompleksnosti alata SSIMS-Flow, primer reke Sušice (448 kadrova)

Korak	Vreme po kadru* [s]	Ukupno vreme [s]
Unpack video	0,072	32,3
Feature tracking	0,055	24,6
Image transformation	0,065	29,1
Image enhancement	0,132	59,1
Optical flow	0,460	206,1
Ukupno	0,784	351,2

* prosek, izračunato na osnovu ukupnog trajanja

4. ZAKLJUČCI

Metode kojima se do fizičkih podataka stiže posredstvom analize video zapisa stekle su značajan ugled u repertoarima inženjera i istraživača u oblastima hidrologije i hidraulike. Uprkos velikom broju i visokoj raznolikosti dostupnih algoritama i metoda, daleko je manji broj softverskih alata koji omogućavaju njihovu jednostavnu primenu u svakodnevnoj praksi. Predstavljeni alat SSIMS-Flow ima za cilj da omogući jednostavan pristup merenju brzina i protoka u otvorenim tokovima na osnovu video zapisa tečenja. Mogućnosti alata, od kojih je većina razmatrana u ovom radu, su:

1. Upotreba je svedena na korišćenje jednostavnog grafičkog interfejsa, bez neophodnosti pisanja dodatnog programskog kôda.
2. Omogućen je pristup svim koracima neophodnim za celovitu analizu video zapisa: (1) izdvajanje kadrova iz video zapisa, (2) geometrijske korekcije na osnovu parametara kamere, (3) stabilizacija i (4)

ortorektifikacija kadrova, (5) filtriranje u cilju naglašavanja čestica trasera i (6) primena metode optičkog toka u cilju merenja brzina tečenja.

3. Metod optičkog toka primenjen za merenje brzina tečenja veoma je robustan i primenjiv je čak i u uslovima prostorno i/ili vremenski neravnomernog prisustva čestica trasera.
4. Pokazano je da je neizvesnost izmerenih brzina uporediva sa neizvesnošću drugih popularnih metoda i njihovih softverskih alata.
5. SSIMS-Flow programski kôd je veoma efikasan (svega 0,8 sekundi za celokupnu analizu kadra rezolucije 4K) te omogućava analizu velikog broja kadrova u kratkom vremenskom roku.
6. U slučaju dostupnosti batimetrijskih podataka, alat može na osnovu izmerenih brzina proceniti i ukupan protok.
7. Omogućen je grafički i tabelarni prikaz podataka i njihov izvoz radi detaljnijih analiza.

S druge strane, važno je istaći i nedostatke predstavljenog alata i/ili metoda koje on primenjuje:

1. Za korišćenje alata neophodna je adekvatna priprema u toku akvizicije podataka na terenu. Iskustvo rukavaoca letelicom i obrađivača podataka mogu znatno uticati na mernu neizvesnost dobijenih rezultata.
2. Batimetrijski podaci ne mogu se dobiti neposredno iz video zapisa, već moraju biti određeni nekom drugom metodom.
3. Merna neizvesnost svih metoda merenja brzina iz video zapisa je po pravilu veća nego kod konvencionalnih metoda poput primene ADCP uređaja. Kako bi se utvrdila konkretna merna neizvesnost alata SSIMS-Flow potrebna su dodatna komparativna terenska merenja uz upotrebu konvencionalnih metoda.

Na osnovu svega iznetog u ovom radu, možda najvažniji zaključak je da odnos između konvencionalnih terenskih mernih metoda i savremenijih metoda analize video zapisa **nije i ne sme biti konkurentski, već bi morao da bude komplementaran**, i da su iskustvo i znanje rukovaoca od ključnog značaja nezavisno od promenjene merne tehnike.

LITERATURA

- [1] S. E. Morlock, „Evaluation of Acoustic Doppler Current Profiler Measurements of River Discharge“, 1996.
- [2] S. Manfreda i ostali, „On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring“, *Remote Sens.*, br. 10, izd. 4, str. 641, 2018, doi: 10.3390/rs10040641.
- [3] DJI Inc, „DJI Matrice 30“. Dostupno na: <https://www.dji.com/matrice-30>.
- [4] R. Ljubičić, „SSIMS-Flow: UAV image velocimetry workbench“, 2022. Dostupno na: <https://github.com/ljubicrobert/SSIMS-Flow>.
- [5] R. Ljubičić i ostali, „A comparison of tools and techniques for stabilising unmanned aerial system (UAS) imagery for surface flow observations“, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, br. 25, izd. 9, str. 5105–5132, 2021, doi: 10.5194/hess-25-5105-2021.
- [6] R. Ljubičić, „Strujanje u umirujućim bazenima stepenastih brzotoka“, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, 2021.
- [7] E. Ben Dor i S. Manfreda, Ur., “Unmanned Aerial Systems for Monitoring Soil, Vegetation, and River Systems“. Elsevier, 2022, u pripremi.
- [8] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, i E. P. Simoncelli, „Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity“, *IEEE Trans. Image Process.*, br. 13, izd. 4, str. 600–612, 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
- [9] R. Ljubičić, „Jupyter notebooks on image enhancement for UAV velocimetry purposes“, 2022. Dostupno na: <https://github.com/ljubicrobert/Image-enhancement-for-UAV-velocimetry>.
- [10] T. Liu i L. Shen, „Fluid flow and optical flow“, *J. Fluid Mech.*, br. 614, str. 253–291, 2008, doi: 10.1017/S0022112008003273.
- [11] G. Farneback, „Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion“, u *Lecture Notes in Computer Science*, br. 2749, izd. 1, 2003, str. 363–370.
- [12] E. M. Shaw, „Hydrology in Practice“. Chapman & Hall, 1994.
- [13] Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels using, Part 2: Determination of the stage-discharge relationship (ISO 1100-2:2010(E)). International Organization for Standardization, 2010.
- [14] S. E. Rantz, „Measurement and computation of streamflow: volume 1. Measurement of stage and discharge.“, 1982.
- [15] D. P. Turnipseed i V. B. Sauer, „Discharge measurements at gaging stations“, u *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 3 - Applications of Hydraulics*, 2010, str. 171.
- [16] A. Hauet, T. Morlot, i L. Daubagnan, „Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers“, *E3S Web Conf.*, br. 40, str. 06015, 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20184006015.
- [17] S. Pearce i ostali, „An Evaluation of Image Velocimetry Techniques under Low Flow Conditions and High Seeding Densities Using Unmanned Aerial Systems“, *Remote Sens.*, br. 12, izd. 2, str. 232, 2020, doi: 10.3390/rs12020232.
- [18] H. Biggs i G. Smart, „River discharge from surface velocity measurements: A field guide for selecting alpha“, *Envirolink Advice Rep.*, izd. June, str. 37, 2021.
- [19] I. Fujita, M. Muste, i A. Kruger, „Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications“, *J. Hydraul. Res.*, br. 36, izd. 3, str. 397–414, 1998, doi: 10.1080/00221689809498626.
- [20] W. Thielicke i E. J. Stamhuis, „PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB“, *J. Open Res. Softw.*, br. 2, 2014, doi: 10.5334/jors.bl.
- [21] W. Brevis, Y. Niño, i G. H. Jirka, „Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry“, *Exp. Fluids*, br. 50, izd. 1, str. 135–147, 2011, doi: 10.1007/s00348-010-0907-z.
- [22] AntoineP, „PTVlab (Particle Tracking Velocimetry - lab)“, MATLAB Central File Exchange. Dostupno na: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/41235-ptvlab-particle-tracking-velocimetry-lab>.

- [23] J. P. Leitão, S. Peña-Haro, B. Lüthi, A. Scheidegger, i M. Moy de Vitry, „Urban overland runoff velocity measurement with consumer-grade surveillance cameras and surface structure image velocimetry“, *J. Hydrol.*, br. 565, str. 791–804, 2018, doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.09.001.
- [24] Photrack AG, „Discharge“. Dostupno na: <https://discharge.ch>.
- [25] F. Tauro, F. Tosi, S. Mattoccia, E. Toth, R. Piscopia, i S. Grimaldi, „Optical Tracking Velocimetry (OTV): Leveraging Optical Flow and Trajectory-Based Filtering for Surface Streamflow Observations“, *Remote Sens.*, br. 10, izd. 12, str. 2010, 2018, doi: 10.3390/rs10122010.
- [26] M. T. Perks, „KLT-IV v1.0: image velocimetry software for use with fixed and mobile platforms“, *Geosci. Model Dev.*, br. 13, izd. 12, str. 6111–6130, 2020, doi: 10.5194/gmd-13-6111-2020.
- [27] D. S. Mueller i C. R. Wagner, „Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat Version adapted for Water Survey of Canada“, 2013.
- [28] J. Shi i C. Tomasi, „Good features to track“, u *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR-94*, 1994, str. 593–600, doi: 10.1109/CVPR.1994.323794.
- [29] J. Heyman, „TracTrac: A fast multi-object tracking algorithm for motion estimation“, *Comput. Geosci.*, br. 128, str. 11–18, 2019, doi: 10.1016/j.cageo.2019.03.007.

SSIMS-FLOW: FLOW RATE ESTIMATION TOOL USING SURFACE VELOCITY IMAGERY FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

by

Robert LJUBIČIĆ, Budo ZINDOVIĆ,
Nikola ROSIĆ, Dragutin PAVLOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

Summary

Open-channel flow rate measurement is often a time consuming, invasive, complex, and expensive procedure, which frequently requires involvement of multiple equipment operators and various postprocessing techniques. The development of camera-equipped lightweight unmanned aerial vehicles has enabled an alternative approach of indirect flow rate measurement by analyzing the surface flow velocities. Although the data acquired by this approach experiences somewhat higher measurement uncertainty than that of conventional measurement techniques, such non-contact measurement method is (1) more time efficient, (2) requires fewer operators, (3) can be applied in certain conditions when conventional methods are

unfeasible, and (4) allows for automated and autonomous flow monitoring. Hydrometric analyses of video footage are still unstandardized, and finding a suitable tool which successfully deals with all the necessary actions for velocity and flow estimation has proven to be difficult. SSIMS-Flow tool is developed with the aim of providing easy access to different actions of video footage data preparation and processing to enable a holistic process – from preparing a “raw” video footage to the estimation of flow rate – which drastically simplifies the described approach.

Key words: open-channel flow, hydrometry, flow rate measurement, camera, video