

## LARGE SCALE PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY – MERENJE URBANOG OTICAJA

Nemanja BRANISAVLJEVIĆ i dr Dušan PRODANOVIĆ  
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

### REZIME

Terenska merenja brzina i protoka je široko rasprostranjena i poznata hidrološka disciplina neophodna za osmatranje i proučavanje hidroloških procesa. Mali oticaji koji se formiraju u urbanim područjima za vreme i nakon kišnih epizoda obično su sa malim dubinama što otežava njihovo određivanje tradicionalnim metodama i uređajima. Nova metoda, Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV), bazirana na procesiranju slike, je uvedena u hidrološku praksu poslednjih godina kao neinvazivna metoda koja se upotrebljava kod određivanja polja površinskih brzina otvorenih tokova. U ovom radu LSPIV je primenjena na terenskom merenju urbanog oticaja u rigoli za vreme jedne umerene kišne epizode u Beogradu.

**Ključne reči:** Large Scale Particle Image Velocimetry, merenje brzina kod urbanog oticaja

### 1 Uvod

U analizi urbanog oticaja protok vode ima vrlo važnu ulogu [7]. Neophodan je kako kod određivanja bilansa voda, tako i kao ulazni parametar za analizu dinamike voda u urbanim uslovima. Kod analize oticaja sa sliva ili bilansa voda protok se javlja kao rezultat, dok se kod analize dinamike u kanalizacionom sistemu protok koristi kao ulazna veličina. I u jednom i u drugom slučaju protok (posredno i brzina) je neophodna veličina za analizu i tačnost ove dve vrste modela i ima značajan uticaj na njihov rezultat. Tradicionalno, merenje protoka na urbanom slivu se izbegavalo pronalaženjem zavisnosti intenziteta kiše na tom slivu i protoka u kanalizacionom sistemu gde se protok mogao meriti na unapred definisanim mestima. Na ovaj način nije bilo potrebe za informacijama o protoku na ulazu u slivnik, već su se osrednjeni koeficijenti o sastavu i upotrebi zemljišta koristili za njegovu procenu. Na ovaj način

greška se uvećavala i na spoju dva konceptualno različita ali povezana modela: modela oticaja sa sliva i modela kanalizacionog sistema.

Podatak o protoku je direktno zavistan od podatka o brzini toka. Integral brzine po poprečnom preseku daje nam protok, pa je dovoljno poznavati polje brzina, dubinu i geometriju korita da bi se sračunao protok [2].

U urbanim uslovima, merenja brzina su izvođena samo onda kada je dubina toka bila dovoljna za upotrebu tradicionalnih merila (konstruisanih uglavnom na principu propelera). Na žalost kod plitkih tokova, ispod 10 cm dubine, tradicionalni merni instrumenti nisu mogli da daju dovoljno tačne rezultate merenja jer su vrlo osetljivi na lokalne poremećaje koje sami prave u toku. Kod malih dubina čak i nove vrste instrumenata, kao radarski sistemi, posebno projektovani za neinvazivno merenje površinskih brzina kod otvorenih tokova, bazirani na merenju doplerovog pomaka reflektovanih od talasa, imaju problema [1].

U poslednjih 20 godina, novi pristup merenju polja brzina, baziran na obradi slika, je predstavljen naučnoj javnosti [1]. Kada su računari postali dovoljno moćni za obradu velikog broja podataka u algoritmima koji se bave obradom slika, novi princip merenja je dobio na popularnosti ali je uglavnom primenljiv u laboratorijskim uslovima. Neki od algoritama su prilagođeni merenjima u terenskim uslovima i u ovom radu biće prikazan jedan od njih. Primer njegove primene biće prikazan na određivanju polja brzina u toku duž rigole pored parkinga ispred zgrade Instituta za Hidrotehniku i Vodnoekološko Inženjerstvo.

### 2 Neinvazivne optičke metode merenja polja brzina

Iz ugla razvoja neinvazivnih optičkih metoda merenja brzine fluida u poslednjih 20 godina pažnja je bila okrenuta metodi Particle Image/Tracking Velocimetry,

gde se merenje brine fluida bazira na praćenju delića zasejanih u fluidnoj struji. Rezultat merenja je polje brzina u dve, ređe u tri, dimenzije, uglavnom prikazanih strelicama koje representuju intenzitet, pravac i smer vektora brzine u nekoj tački, osrednjene u prostoru.

Suština metode Particle Image Velocimetry (PIV) je autokorelacija i/ili kroskorelacija dva dela dve slike, snimljene u  $t_1$  i  $t_2$  vremenskim trenucima [3]. Brzina se registruje kao pomeraj dela slike u intervalu vremena  $dt=t_2-t_1$ . Da bi se ovo postiglo prilikom pripreme podataka slike se izdele na segmente (ispitivane regione) koje određuju minimalne i maksimalne brzine koje se mogu odrediti. Najčešća kroskorelaciona metoda koja se koristi u ovoj tehnici je bazirana na 2DFFT transformaciji slike, dok se veličina ispitivanih površina određuje na osnovu rezolucije slike, veličine trasera (kontrasta na slikama) i željene rezolucije vektora brzina.

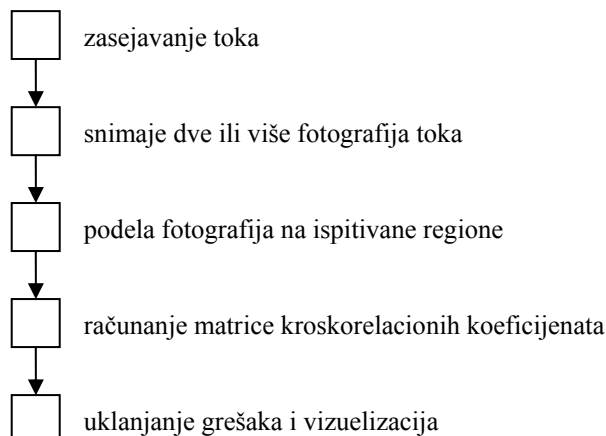
Particle Tracking Velocimetry (PTV) je bazirana na praćenju delića u toku pojedinačno, i na optimizaciji upoređivanja dve uzastopno snimljene slike tako da dobijeni vektori brzina izgledaju što prihvatljivije (nema nereálnih vektora brzina).

Ograničenja ova dva pristupa je što su oni testirani uglavnom u laboratorijskim uslovima dok je van laboratorije upotreba ovih metoda ograničena. Proširenje PIV i PTV metoda je Large Scale PIV (PTV), metoda uglavnom korišćena pri analizi otvorenih tokova. U ovom radu biće prikazan test razvijenog softvera za LSPIV, na plitkom toku u rigoli tokom umerenog kišnog događaja u Beogradu.

### 3 LSPIV

Large Scale PIV (LSPIV) se uglavnom koristi za površinske profile brzina kod analize otvorenih tokova. Procedura se sastoji iz:

- 1) zasejavanja površine toka svetlim, ekološkim i neprovidnim materijalom (materijal treba da je u dobrom kontaktu sa tokom sa kojim treba da bude u što većem kontrastu),
- 2) snimanje dve ili više fotografija sa definisanim vremenskim korakom  $dt$ ,
- 3) podela fotografija na ispitivane regione,
- 4) računanje i poređenje kroskorelacionih koeficijenata između ispitivanih regiona,
- 5) upotreba postprocesnih tehnika za uklanjanje grešaka u dobijenom polju brzina,
- 6) vizuelizacija polja brzina.



### 4 LSPIV procedura

Materijal, izabran za zasejavanje toka, treba da bude neprovidan, u kontrastu sa tokom i da ne pravi senku (da dobro prijanja uz vodenu površinu). Zasejavanje se uglavnom obavlja ručno pomoću belih papirnih konfeta (u našem slučaju prečnika  $d=0.5$  cm) ili sličnog materijala. Preporučuje se snimanje više snimaka (serije fotografija) sa različitim gustinom zasejanja.



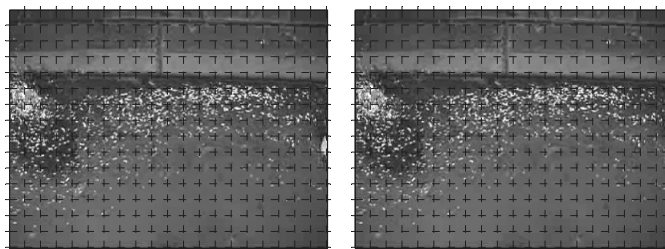
Slika 1: Zasejavanje toka

Preporučuje se i difuzno osvetljenje koje ne pravi oštre senke od kapljica kiše koje padaju na tok (ukoliko se meri za vreme kišne epizode) ili vegetacije koja se pomera pod uticajem vetra. U svakom slučaju potrebno je napraviti više snimaka pa odabrati najbolje.

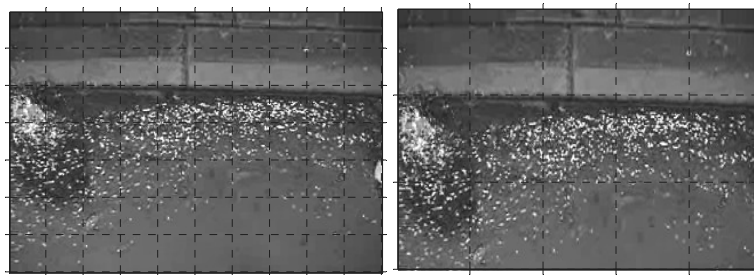
Zatim se iz snimka izdvoje dve ili više fotografije sa definisanim vremenskim korakom  $dt$ . U našem slučaju  $dt=0.6$  sekundi. Izbor  $dt$  intervala vremena zavisi od intervala brzina koje se javljaju u toku. Ukoliko je brzina toka velika, potrebno je manje  $dt$ .

Slika 2: Dve fotografije snimljene u intervalu  $dt=0.6$  sec

Nakon snimanja fotografija potrebno je fotografije podeliti na ispitivane regione. Ispitivani regioni su uglavnom kvadratnog oblika, mada mogu biti i pravougaonog. Da bi se iskoristila mogućnost rada brzog algoritma 2D Furijeove transformacije, poželjno je da ispitivane površine budu  $2^n \times 2^n$  pixela.



Slika 3: Fotografije podeljene na ispitivane regione 16x16 pixela

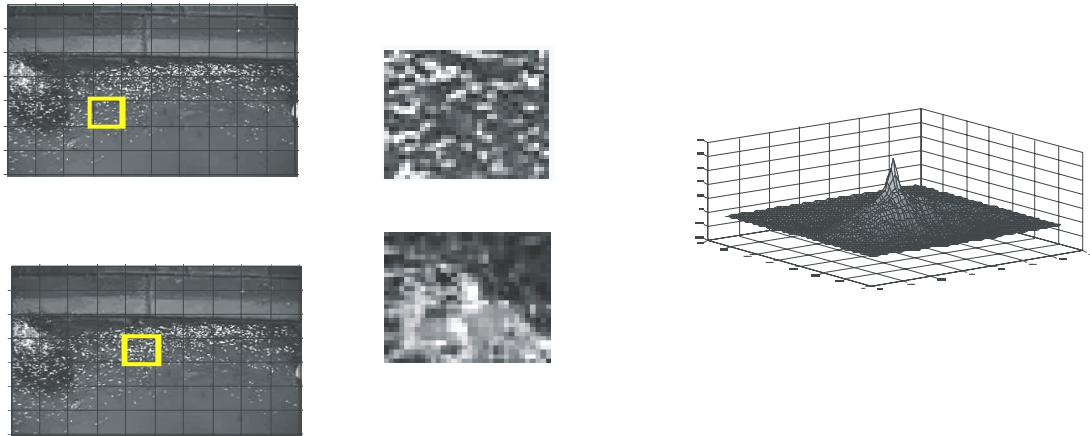


Slika 4: Fotografije podeljene na ispitivane regione 32x32 pixela i 64x64 pixela

Ispitivanjem matrica kroskorelacionih koeficijenata dobija se uvid u slaganje pojedinih ispitivanih regiona na prvoj slici sa regionima na drugoj. Na taj način se formira matrica pomeranja pojedinih regiona za  $dt$ . Upotrebljena je metoda koja koristi 2D Furijeovu transformaciju slike:

$$iffi2(fft2(a):fft2(conj(b))) \quad (1)$$

gde su: a – ispitivani region 1, b – ispitivani region 2.



Slika 5: Kroskorelacija ispitivanih regiona

Nakon dobijanja matrica korelacije i utvrđivanja gde se pomerio koji ispitivani region (maksimalni pik matrica korelacije), rezultati se čiste i uklanjaju se greške. Greške mogu nastati na više načina. Neki od uzroka su nedovoljna zasejanost toka, loše izabrana veličina ispitivanih regiona ili nemogućost da se pronade gde se neki region pomerio (matrica korelacije nema jasan pik). Greške se ispravljaju interpolacijom ili kriging tehnikama [5], [6].

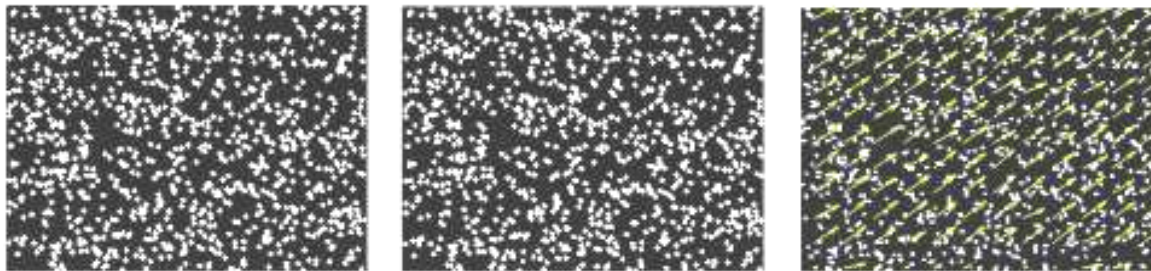
Nakon proračuna, vektori brzina se vizuelizuju. Iz vizuelizovanog polja površinskih brzina mogu se dalje

generisati strujnice ili protok, ali to prevazilazi okvire ovog rada.

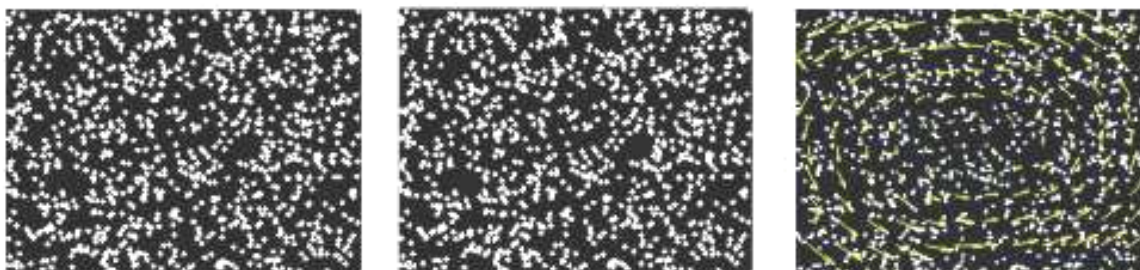
#### 4 Testiranje softvera

Softver, razvijen u MatLab okruženju [4], je prvo testiran na sintetički generisanim slikama. Prvi set slika (slika 6) predstavlja slučajno raspoređene bele tačke po crnoj podlozi koje su pomerene za  $u=0.5$  i  $v=0.5$ .

Drugi set (slika 7) predstavlja takođe bele tačke na crnoj podlozi zarotirane za  $\pi/35$ .



Slika 6: Testiranje softvera 1



Slika 7: Testiranje softvera 2

I kod prvog i kod drugog testa može se uočiti problem kod vektora brzina na ivici slike. To je u literaturi poznat problem kod PIV tehnika i može se prevazići pažljivim odabirom regiona od interesa i njegovim smeštanjem u sredinu fotografija/snimaka.

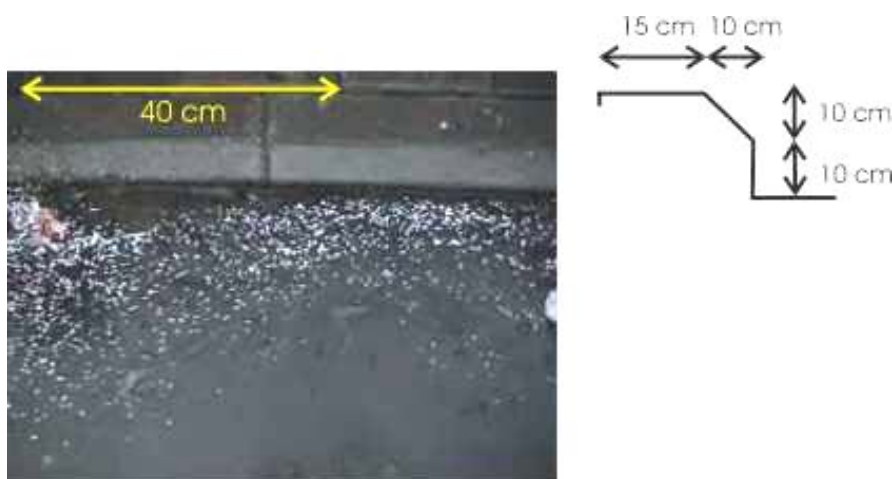
### 5 Merenje polja površinskih brzina toka u rigoli uzvodno od slivnika

Metoda je primenjena na određivanju polja brzina toka u rigoli neposredno pre slivnika za vreme umerenog kišnog događaja u Beogradu. Dimenzije ivičnjaka koji formira jednu od stranica rigole su prikazane na Slici 8. U toku umerenog kišnog događaja voda je formirala

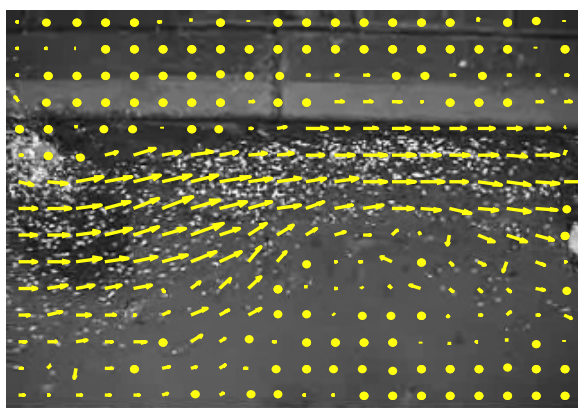
plitak tok ka slivniku na najnižvodnijem delu podsliva (parkinga ispred zgrade Instituta Tehničkih fakulteta u Beogradu, Ruzveltova 1).

Tok je snimljen kamerom Sony DCR-HC18E handycam dok je softver napisan u MatLab programskom okruženju [4]. Iz snimljenog materijala je izvučeno 20 fotografija sa vremenskim intervalom  $dt=0.6$  sekundi rezolucije 800x600 pixela.

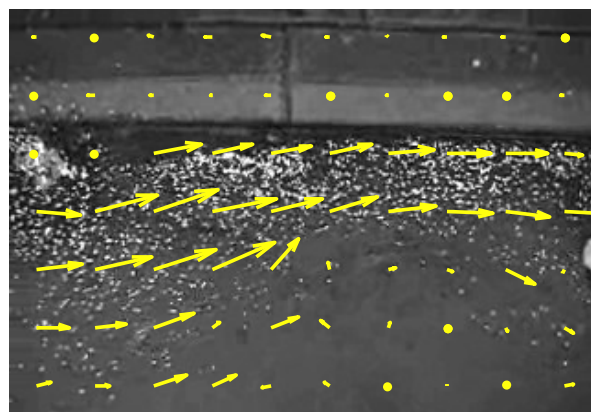
Nakon preprocesiranja i vizuelne inspekcije slika, prve dve slike su podejene na ispitivane regione veličine 16x16 i 32x32 pixela. Nakon obrade, ispravljanja grešaka i vizuelizacije dobijeni su rezultati (slike 9 i 10).



Slika 8: Rigola neposredno uzvodno od slivnika



Slika 9: Vektori brzina (16x16 pixela)

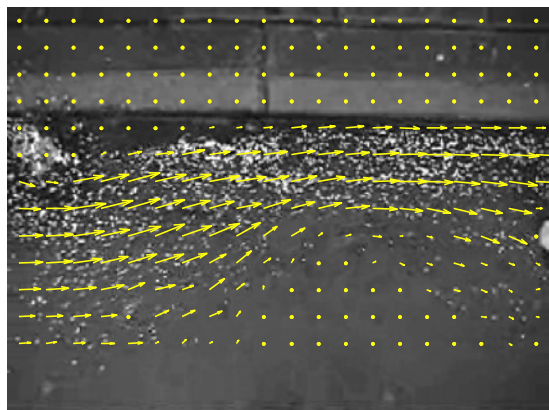


Slika 10: Vektori brzina (32x32 pixela)

Vektori koji nemaju smisla na slici polja brzina predstavljaju odgovor metode na šum slike. Šum slike je pre svega nastao pomeranjem kamere (sve je snimano iz ruke), a delom i usled senke koje su nastale od kapljica

kiše. Dodatno ispravljanje grešaka obavljeno je ponavljanjem postupka generisanja vektora brzina sa ostalih 20 fotografija i otklanjanja šuma slike.

Nakon dodatnog čišćenja iz seta od 20 slika, otklanjanjem šuma slike, pri čemu je šum smatran slučajnom pojavom koja se javlja po normalnoj raspodeli:



Slika 11: Konačno strujno polje (uklonjen šum slike)

## 6 Zaključak

U ovom radu prikazan je jedan, još uvek nestandardan, postupak određivanja polja površinskih brzina kod otvorenih tokova. Prednosti ovog postupka su mnogobrojne. Osim što je neinvazivan i jeftin, ovaj postupak je i brz.

## LITERATURA

- [1] Prodanovic D. (2005), *Bezkontaktno merenje protoka u kanalizaciji*, 26. Savetovanje Vodovod i Kanalizacija 137-146
- [2] Jovanović M. (2002), *Regulacija reka - rečna hidraulika i morfologija*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
- [3] Stanislas M., Kompenhans J., Westerweel J. (2000), *Particle Image Velocimetry – Progress towards Industrial Application*, Springer
- [4] MatLab 7.1 (2006), *User's Manual*
- [5] Weitbrecht V., Kühn G., Jirka G.H.(2002), *Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows*, Flow Measurement and Instrumentation 13 (2002) 237–245
- [6] Creutina J.D, Muste M., Bradleyb A.A., Kimb S.C., Krugerb A. (2003), *River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River*, Journal of Hydrology 277 (2003) 182–194
- [7] Čedo Maksimović. (1993), *Merenja u hidrotehnici*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

## LARGE SCALE PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY – MEASURING URBAN RUNOFF

by

Nemanja BRANISAVLJEVIĆ and dr Dušan PRODANOVIĆ  
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

### Summary

Measuring velocities and discharge in the field is well established hydrologic discipline essential for observing and studying the hydrological processes. Small discharges formed on urban areas during rain events are usually low-depth surface flows very difficult to measure with standard devices and procedures. New method, Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV), based on image processing, is introduced in hydrological practice in recent years as non invasive

method for measuring surface velocity in free surface streams. In this article Large Scale Particle Image Velocimetry is applied in the field measurement of an urban discharge during a moderate storm event in Belgrade.

Key words: Large Scale Particle Image Velocimetry, velocity measurement in urban runoff

Redigovano 22.12.2006.