



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET
Zavod za hidrotehniku
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Planiranje i projektiranje ribljih staza Izvještaj 3 i 4

Izrada fizikalnog modela za proračun tečenja

Numerički model za proračun tečenja

Zagreb, lipanj 2018.



**NARUČITELJ: HRVATSKE VODE,
Ulica grada Vukovara 220, 10000 Zagreb**

RAZINA PROJEKTA: IZVJEŠTAJI

BROJ PROJEKTA 120-S-133

**IZRADILI: izv.prof.dr.sc. Eva Ocvirk, dipl.ing.građ.
doc.dr.sc. Gordon Gilja, dipl.ing.građ.**

**Suradnici: Damjan Bujak, mag.ing.aedif.
Iva Đerek, bac.ing.aedif.
Doris Martinović, bac.ing.aedif.
Matea Marić, bac.ing.aedif.**

DEKAN GRAĐEVINSKOG FAKULTETA SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

prof.dr.sc. Neven Kuspilić, dipl.ing.građ.

MJESTO I DATUM IZRADE: Zagreb, srpanj 2018.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET
Zavod za hidrotehniku
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Planiranje i projektiranje ribljih staza

Izvještaj 3

Izrada fizikalnog modela za proračun tečenja

Zagreb, lipanj 2018.



Planiranje i projektiranje ribljih staza Izvještaj 3

Izrada fizikalnog modela za proračun tečenja



SADRŽAJ

1	Uvod	1
2	Program eksperimentalnih ispitivanja	6
2.1	Opis ispitivanja	7
2.1.1	Riblje staze bazenskog tipa	7
2.1.2	Riblje staze s vertikalnim otvorima	11
2.2	Korištena oprema	14
3	Rezultati eksperimentalnih ispitivanja	17
	Prilozi	i

1 Uvod

U ovom Izvještaju dan je detaljan opis fizikalnog modela korištenog pri eksperimentima za određivanje rasporeda polja tečenja u ribljim stazama bazenskog tipa i tipa s vertikalnim otvorima.

Eksperimenti se općenito mogu vršiti u prirodnom ili modelskom okruženju (modelu). Fizikalni model je pomagalo koje služi da bi se eksperimentalno predvidjelo ponašanje nekog fizikalnog procesa u prirodi. Fizikalni model je maketa stvarnog sustava izložena djelovanju tekućine izrađena tako da se dominantne sile koje djeluju na sistem reproduciraju na modelu u odgovarajućem odnosu na stvarni sustav. Osnovne prednosti fizikalnih modela u odnosu na prirodu su:

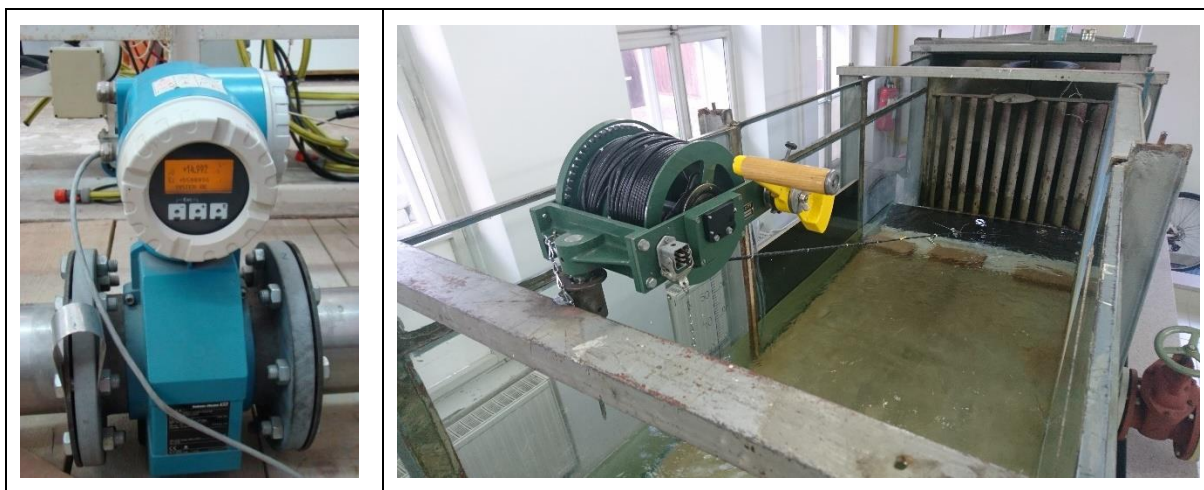
- relativno jednostavno i jeftino prikupljanje podataka
- na fizikalnim modelima je moguće ponavljati pokuse i kontrolirani uvjete
- prikladni su za prikupljanje eksperimentalnih podataka za kalibraciju i verifikaciju numeričkih modela

Fizikalni model ribljih staza je uspostavljen u laboratoriju zavoda za hidrotehniku Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta u Zagrebu sa svrhom kalibracije rezultata za primjenu numeričkog 3D modela, odnosno za provjeru i poboljšanje definiranog numeričkog modela. Za uspostavu fizikalnog modela korišten je hidraulički kanal pravokutnog poprečnog presjeka opisan u nastavku (Slika 1.1)..



Slika 1.1. Fotografija hidrotehničkog kanala u laboratoriju zavoda za hidrotehniku, pogled uzvodno

Hidraulički kanal zavoda za hidrotehniku izveden je na način da bude pogodan za ispitivanje jednosmjernog tečenja u otvorenim koritima. Kanal je širok 0,9 m, dubok 0,9 m i ukupne duljine 18 m, od kojih 13 m predstavlja radnu duljinu. Na uzvodnom kraju kanala nalazi se ulazna građevina kroz koju se pomoću cirkulacijske crpke upušta voda u kanal i time ostvaruje tečenje kroz njega. Kanal je recirkulacijskog tipa, tj. voda koja se koristi u kanalu smještena je u spremniku ispod njega u koji je spojen izlaz iz kanala. Crpka je maksimalnog kapaciteta 25 l/s, a reguliranje protoka ostvaruje se upotrebom elektromagnetnog mjerača protoka (Slika 1.2). Nizvodni rubni uvjet ostvaruje se pokretnom zapornicom zglobno učvršćenom za dno kanala koja kontrolira razinu donje vode na izlazu (Slika 1.2).



Slika 1.2. Elektromagnetni mjerac protoka (lijevo); zapornica na izlazu iz kanala (desno)

Fizikalni model je izgrađena fizička cjelina na kojoj se zbog geometrijske, kinematske i dinamičke sličnosti s oponašanom prirodom mogu provesti mjerenja i analize a dobiveni rezultati se mogu ekstrapolirati na prirodu. Kako bi se ostvarila željena mehanička sličnost procesa na modelu i u prirodi, model se izrađuje u određenim mjerilima uz zadovoljenje uvjeta sličnosti. Teorija sličnosti, polazeći od sustava jednadžbi koji opisuje promatranu pojavu, daje podlogu za modelska istraživanja - kriterije koje treba zadovoljiti da bi se rezultati s modelske pojave mogli preslikati na prirodnu pojavu, kako u mehanici fluida, tako i u svim ostalim granama fizike i tehnike.

Uvjet geometrijske sličnosti dvaju tokova je opisan jednakošću duljina, površina i volumena s karakterističnim omjerima.

$$L_R = \frac{L_P}{L_M} = \lambda$$

gdje je L_R, λ - mjerilo dužina [l], L_P - vrijednost dužine u prirodi [m], L_M - vrijednost dužine na modelu [m]. Analogno mjerilu duljine, može se izračunati i mjerilo površina pomoću sljedećeg odnosa:

$$A_R = \frac{A_P}{A_M} = \lambda^2$$

gdje je λ - mjerilo dužina [l], A_P - vrijednost površine u prirodi [m²], A_M - vrijednost površine na modelu [m²].

Ukoliko je u hidrodinamičkom procesu u mjerilu prirode dominantan utjecaj sile gravitacije, parcijalna dinamička sličnost na fizikalnom modelu bit će zadovoljena kroz ostvarenje istog doprinosa masenih sila u inercionoj sili, što daje odnose:

$$Fr_P = Fr_M$$

gdje je Fr – Froudeov broj [l].

Dakle, ukoliko je u procesu u mjerilu prirode dominantna vanjska sila gravitacijska sila, za postizanje parcijalne sličnosti potrebno je osigurati jednakost Froudeovog broja na modelu i u prirodi. Time se osigurava jednaki doprinos sile gravitacije u inercionoj sili pri hidrodinamičkom procesu u prirodi i na modelu. Daljnje kinematske izvedenice su mjerilo brzina i protoka prema Froudeovom kriteriju sličnosti:

$$v_R = \frac{v_P}{v_M} = \lambda^{1/2}$$

$$Q_R = \frac{Q_P}{Q_M} = \lambda^{5/2}$$

gdje je λ - mjerilo dužina [l], v_P - vrijednost brzine u prirodi [m/s], v_M - vrijednost brzine na modelu [m/s], Q_P - vrijednost protoka u prirodi [m³/s], Q_M - vrijednost protoka na modelu [m³/s].

Kako se to iz prethodnih jednadžbi može uočiti, pri standardnom izboru mjerila duljina ($\lambda > 1$), brzine i protoci koji se pojavljuju na modelu manji su od onih u prirodi, odnosno izmjerene vrijednosti na modelu prenose se u mjerilo prirode s koeficijentom koji je >1 . Fizikalni model izrađen je u geometrijskom mjerilu 1:3, što znači da je odnos geometrijskih karakteristika riblje staze na modelu 3 puta manji od istovjetne riblje staze u prirodi ($\lambda = 3$).

Na temelju prikazanih jednadžbi izmjerene vrijednosti na modelu mogu se prenijeti u prirodu koristeći sljedeće izraze:

$$L_P = 3L_M$$
$$v_P = \sqrt{3}v_M$$
$$Q_P = \sqrt{243}Q_M$$

Mjerilo 1:3 predstavlja maksimalno moguće mjerilo modela uzevši u obzir tehnička ograničenja hidrauličkog kanala: njegovu visinu i snagu crpke. Uzevši u obzir predviđenu visinsku razliku za savladavanje pomoću riblje staze, protok kroz riblju stazu i nizvodnu dubinu vode pred ulazom u riblju stazu najveće moguće mjerilo je 1:3.



Slika 1.3. Model riblje staze bazenskog tipa u hidrotehničkom kanalu, pogled uzvodno

Uzevši u obzir odabrano mjerilo, model riblje staze je širinom manji od širine hidrotehničkog kanala. Stoga ga je potrebno ograničiti prilikom izrade na način da se izvede dodatna uzdužna stjenka unutar kanala. Model riblje staze izrađen je od vodonepropusne šperploče debljine 1,8 cm i smješten u kanal tako da mu je desna strana staklena bočna stjenka kanala što omogućuje vizualno opažanje pojava do kojih dolazi tijekom ispitivanja (Slika 1.3), dok je lijeva strana izvedena od jednog komada šperploče. Stjenke kanala su fiksne i nepromjenjive, dok su njeno dno i pregrade modularne i prilagodljive, što omogućava izvedbu riblje staze različitog nagiba, oblika i razmaka pregrada te veličine otvora. Sam je model riblje staze širok je 0,45 m i dug 3 m s konstantnim padom dna.

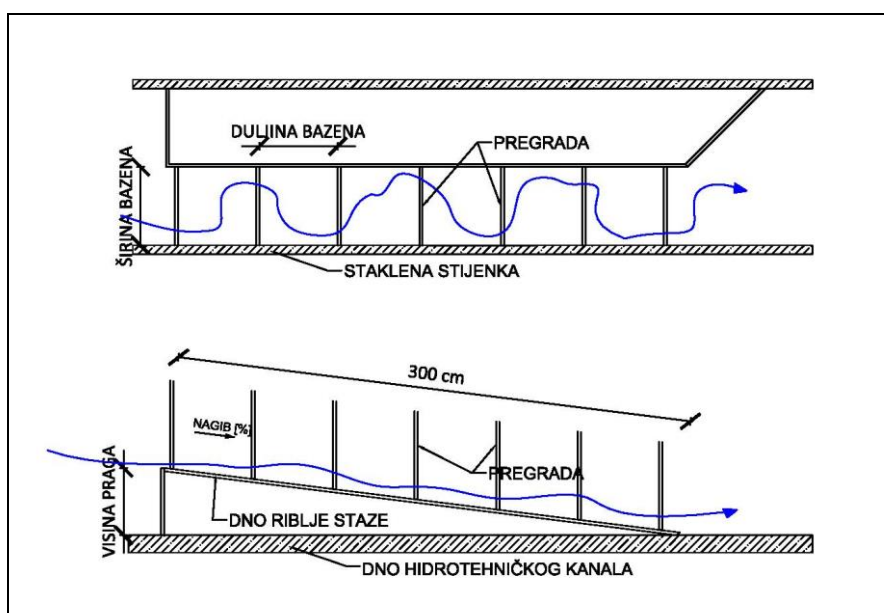


Analizom snimljenih polja tečenja pri različitim protocima i geometriji ribljih staza odredit će se karakteristike polja tečenja koje su usporedive s numeričkim modelom tečenja za svaku pojedinu varijantu. Rezultate fizikalnog modela potrebno je koristiti kao verifikaciju ispravnosti korištenog numeričkog modela u smislu odabrane domene te rubnih i početnih uvjeta.

2 Program eksperimentalnih ispitivanja

Eksperimenti na fizikalnom modelu u laboratoriju su provedeni za dva tipa tehničkih ribljih staza: za staze bazenskog tipa i za staze s vertikalnim otvorima. Oba analizirana tipa karakterizira podjela na bazene gradnjom vertikalnih pregrada koje osiguravaju stepenasti pad vodnog lica od gornje do donje vode. Protok se omogućava kroz otvore u pregradnim zidovima, a potencijalna energija disipira se postepeno bazen po bazen. Svaki tip riblje staze ispitan je fizikalnim modelom za sljedeći raspon geometrijskih parametara:

- Nagib dna riblje staze od 12,5 %, 10 % i 7,5 %;
- Razmak bazena 45 cm, 60 cm i 90 cm;
- Različita geometrija otvora.



Slika 2.1. Nacrt (gore), uzdužni presjek (dolje) riblje staze s naznačenim karakterističnim dimenzijama

U nastavku je za svaki tip riblje staze i njegove konfiguracije dan detaljan opis ispitivanja.

2.1 Opis ispitivanja

Nakon postavljanja ugrađivanja segmenata modela prema nacrtima u hidraulički kanal definirana je referentna razina u kanalu te označena na četiri mjesta (ulaz vode u kanal, gornja voda modela, donja voda modela i zapornica) korištenjem geodetskog teodolita radi točnog očitavanja razine vode u cijelom kanalu. Laboratorijsko ispitivanje započinje paljenjem crpke koja kanal puni vodom do postizanja stacionarnih uvjeta tečenja. Protok na crpki se fino regulira elektromagnetnim mjeračem i/ili zatvaračem na vrijednost koja će razinu održavati istom tijekom cijelog vremena ispitivanja. Ispitivanja su se temeljila na postizanju maksimalne dopuštene brzine kroz pojedini otvor uz zadržavanje konstantne razine nizvodno na ulazu u riblju stazu. Na ovaj način promjenjivi parametri za različite konfiguracije modela postaje protok te posljedično dubina vode u bazenima i razina gornje vode.

2.1.1 Riblje staze bazenskog tipa



Slika 2.2. Fotografija fizikalnog modela riblje staze bazenskog tipa, pogled uzvodno (lijevo); detalj otvora (desno)

U svrhu ispitivanja rasporeda polja brzine u ribljim stazama bazenskog tipa ispitano je ukupno 27 konfiguracija modela: kombinacija 3 nagiba (12,5 %, 10 % i 7,5 %), 3 duljine bazena (45 cm, 60 cm i 90 cm) te 3 dimenzije otvora (8x8 cm, 10x10 cm i 12x12 cm). Za distinkciju rezultata pojedinih konfiguracija usvojena je nomenklatura „nagib dna“-

„razmak pregrada“ - „veličina otvora“. Pregrade se mogu odvit i ponovno pričvrstiti na željeno mjesto uzduž modela ovisno o tome ispituje li se varijanta modela s razmakom pregrada od 45 cm, 60 cm ili 90 cm. Pregrade imaju pravokutne otvore s donje strane čija se pozicija naizmjenično mijenja kroz model lijevo i desno. Otvori na pregradama se također mogu promijeniti od veličine otvora 12x12 cm i 10x10 cm do 8x8 cm umetanjem uložaka točne geometrije i njihovim pričvršćivanjem vijcima na pregradu. U nastavku su preglednom tablicom prikazani promjenjivi geometrijski parametri korišteni pri ispitivanju modela za bazenski tip riblje staze (Tablica 2.1).

Tablica 2.1. Pregledni prikaz promjenjivih geometrijskih parametara korištenih pri ispitivanju modela za bazenski tip riblje staze

Model	Nagib [%]	Duljina bazena [cm]	Dimenzije otvora š x v [cm]
125-45-8	12,5	45	8x8
125-45-10			10x10
125-45-12			12x12
125-60-8		60	8x8
125-60-10			10x10
125-60-12			12x12
125-90-8		90	8x8
125-90-10			10x10
125-90-12			12x12
100-45-8	10	45	8x8
100-45-10			10x10
100-45-12			12x12
100-60-8		60	8x8
100-60-10			10x10
100-60-12			12x12
100-90-8		90	8x8
100-90-10			10x10
100-90-12			12x12
75-45-8	7,5	45	8x8
75-45-10			10x10
75-45-12			12x12
75-60-8		60	8x8
75-60-10			10x10
75-60-12			12x12
75-90-8		90	8x8
75-90-10			10x10
75-90-12			12x12

Prije početka mjerenja polja brzine svake pojedine konfiguracije registrirani su uvjeti ispitivanja, a to su protok pumpe Q [l/s], gornja voda H_{GV} [m], donja voda H_{DV} [m] i visina stupca vode u mjernom bazenu h [m]. U nastavku su preglednom tablicom

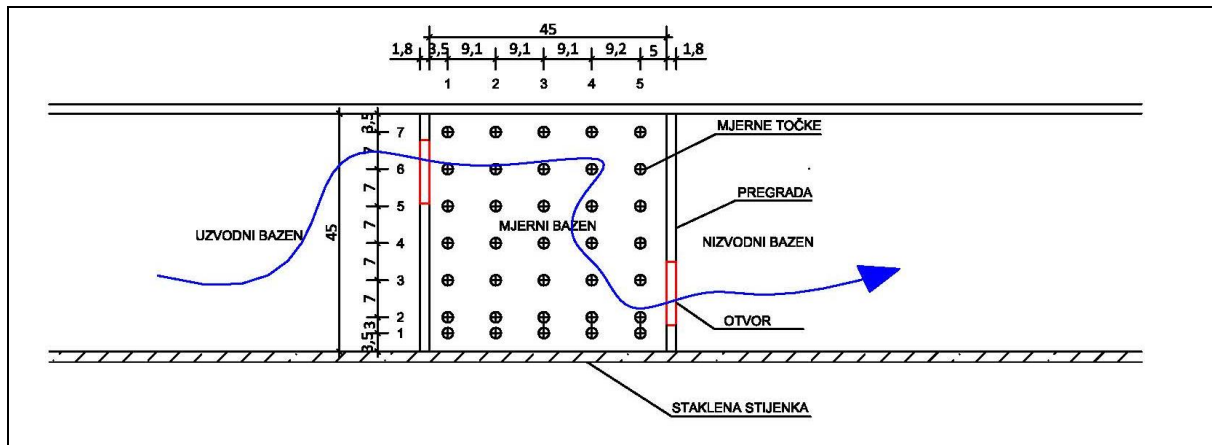
prikazani promjenjivi hidrološki rubni uvjeti korišteni pri ispitivanju modela za bazenski tip riblje staze (Tablica 2.2).

Tablica 2.2. Pregledni prikaz hidroloških rubnih uvjeta korištenih pri ispitivanju modela za bazenski tip riblje staze

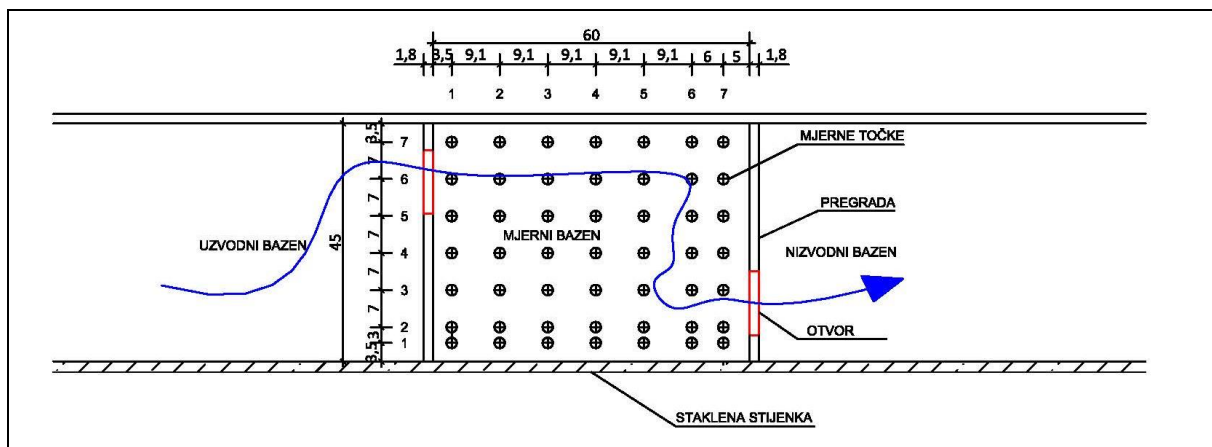
Model	H_{DV} [cm]	H_{GV} [cm]	h [cm]	Q [l/s]
125-45-8	26	69	18	6,5
125-45-10				8,5
125-45-12				11,5
125-60-8		60	23	6,5
125-60-10				9
125-60-12				11,5
125-90-8		65	21,5	6,5
125-90-10				8,5
125-90-12				11,5
100-45-8	26	69	30	5,4
100-45-10				7,7
100-45-12				10,4
100-60-8		60	28	6,5
100-60-10				8,3
100-60-12				11,5
100-90-8		65	25	6,5
100-90-10				9,4
100-90-12				13
75-45-8	26	69	31	6
75-45-10				8,8
75-45-12				12,2
75-60-8		60	32	5,7
75-60-10				8,3
75-60-12				11,4
75-90-8		65	28	6,5
75-90-10				10,2
75-90-12				13,4

Za svaku od navedenih konfiguracija bazenske riblje staze brzine su mjerene u mjerodavnom bazenu koji je odabran u sredini modela i koji nije pod utjecajem rubnih uvjeta. Za razmak pregrada od 45 cm i 60 cm to je bio treći bazen od ulaza u riblju stazu, a za razmak pregrada od 90 cm to je bio drugi bazen. Brzine su mjerene ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) Vectrino akustičnim uređajem u unaprijed određenim točkama za svaku konfiguraciju modela (Slika 2.3 - Slika 2.5). Točke su definirane koristeći pravilan raster kako bi se osiguralo preklapanje pozicija mjernih točaka za različite konfiguracije. Raster točaka je mjereno u tri razine za svaki eksperiment i konfiguraciju: površinskoj razini (A), srednjoj razini (B) i pridnenoj razini (C). Za navedeni raster točaka polje brzine mjereno je u 25 mjernih točaka za konfiguraciju

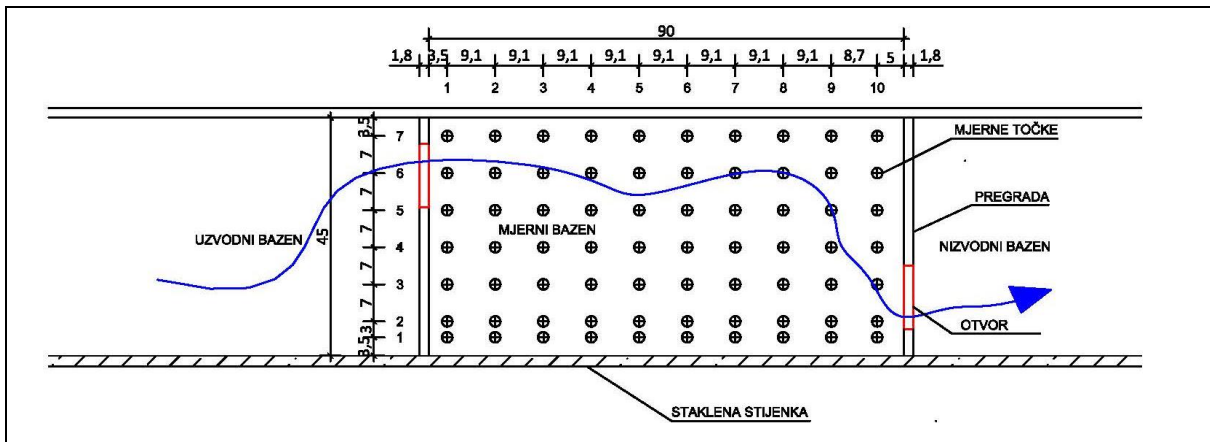
modela s duljinom bazena 45 cm, u 49 mjernih točaka za konfiguraciju modela s duljinom bazena 60 cm te u 70 mjernih točaka za konfiguraciju modela s duljinom bazena 90 cm. Nazivlje mjernih točaka definirano je po sistemu matrice, po stupcima i redovima u kojima se točke nalaze - broj redova je uvijek 7, a broj stupaca se mijenja od 5 do 10 ovisno o razmaku između pregrada. Na slikama u nastavku dan je shematski prikaz rasporeda mjernih točaka za sve konfiguracije bazenske riblje staze.



Slika 2.3. Shematski prikaz rasporeda mjernih točaka za konfiguracije bazenske riblje staze s duljinom bazena 45 cm

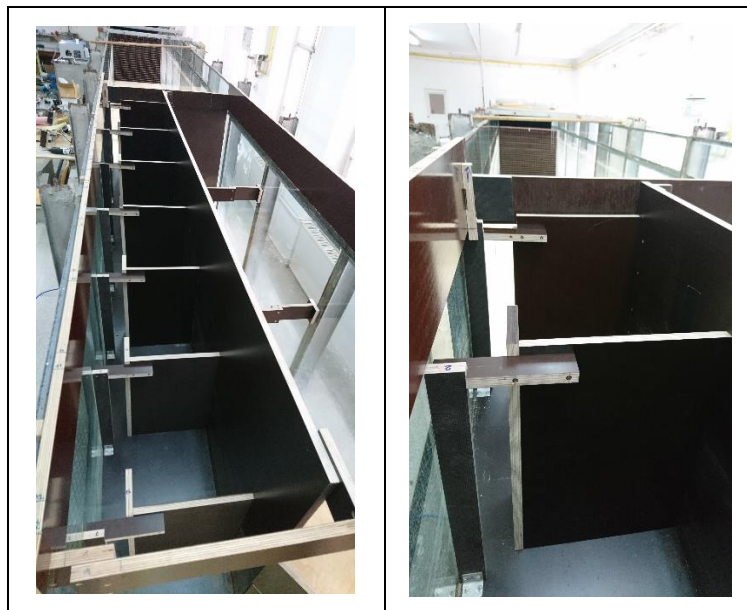


Slika 2.4. Shematski prikaz rasporeda mjernih točaka za konfiguracije bazenske riblje staze s duljinom bazena 60 cm



Slika 2.5. Shematski prikaz rasporeda mjernih točaka za konfiguracije bazenske riblje staze s duljinom bazena 90 cm

2.1.2 Riblje staze s vertikalnim otvorima



Slika 2.6. Fotografija fizikalnog modela riblje staze s vertikalnim otvorima, pogled uzvodno (lijevo); detalj otvora (desno)

U svrhu ispitivanja rasporeda polja brzine u ribljim stazama s vertikalnim otvorima ispitano je ukupno 9 konfiguracija modela: kombinacija 3 nagiba (12,5 %, 10 % i 7,5 %) i 3 duljine bazena (45 cm, 60 cm i 90 cm). Za distinkciju rezultata pojedinih konfiguracija usvojena je nomenklatura „nagib dna“-„razmak pregrada“. Pregrade imaju vertikalne otvore s desne strane uz staklenu stijenu kanala. Sam otvor je

formiran na način da se sastoji od dvije vertikalne pregrade: veće pregrade u obliku slova „L“ gdje kraći krak slova zadire u uzvodni bazen i kraće pregrade uz staklenu stijenu kanala koja je izmaknuta prema nizvodnom bazenu kako bi došlo do otklona toka od desne stijenke. Udaljenost nizvodne stijenke varira s duljinom bazena. U nastavku su preglednom tablicom prikazani promjenjivi geometrijski parametri korišteni pri ispitivanju modela za tip riblje staze s vertikalnim otvorima (Tablica 2.3).

Tablica 2.3. Pregledni prikaz promjenjivih geometrijskih parametara korištenih pri ispitivanju modela za tip riblje staze s vertikalnim otvorima

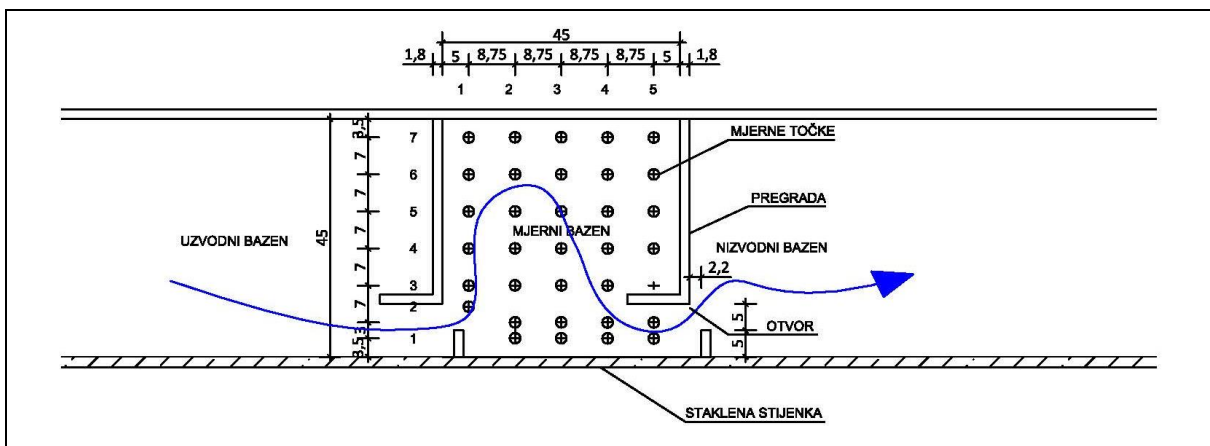
Model	Nagib [%]	Duljina bazena [cm]	Dimenzije otvora š x d [cm]
125-45	12,5	45	5x2,2
125-60		60	5x5,2
125-90		90	5x8,2
100-45	10	45	5x2,2
100-60		60	5x5,2
100-90		90	5x8,2
75-45	7,5	45	5x2,2
75-60		60	5x5,2
75-90		90	5x8,2

Prije početka mjerenja polja brzine svake pojedine konfiguracije registrirani su uvjeti ispitivanja, a to su protok pumpe Q [l/s], gornja voda H_{GV} [m], donja voda H_{DV} [m] i visina stupca vode u mjernom bazenu h [m]. U nastavku su preglednom tablicom prikazani promjenjivi hidrološki rubni uvjeti korišteni pri ispitivanju modela za bazenski tip riblje staze (Tablica 2.2).

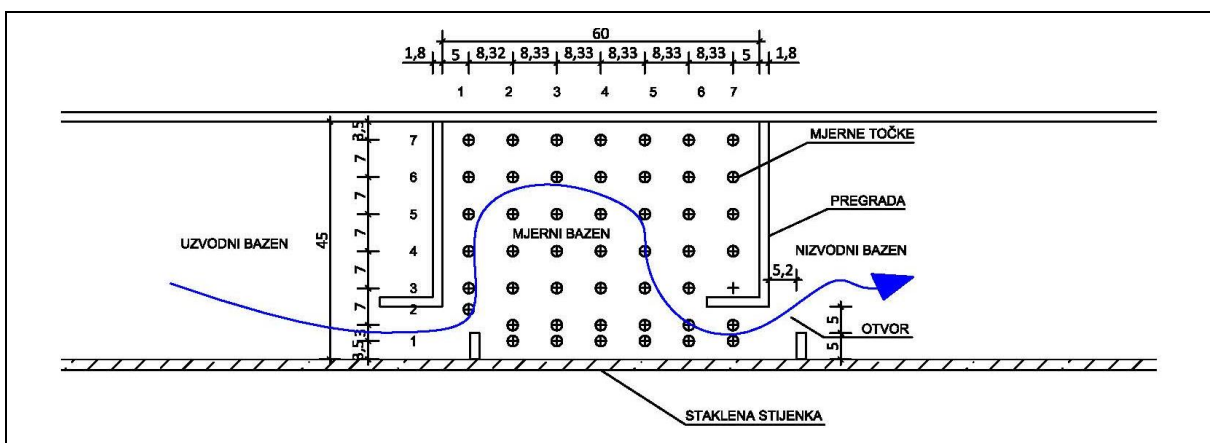
Tablica 2.4. Pregledni prikaz hidroloških rubnih uvjeta korištenih pri ispitivanju modela za tip riblje staze s vertikalnim otvorima

Model	H_{DV} [cm]	H_{GV} [cm]	h [cm]	Q [l/s]
125-45	26	65	20	18
125-60		60		18
125-90		60		18
100-45		65	28	23
100-60		60		23
100-90		60		23
75-45		65	30	26
75-60		60		26
75-90		60		26

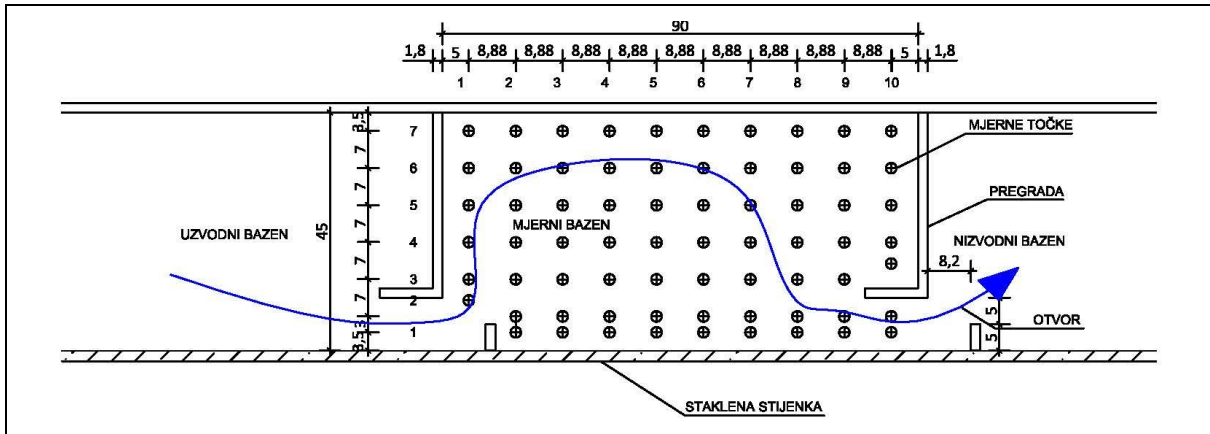
Za svaku od navedenih konfiguracija riblje staze s vertikalnim otvorima brzine su mjerene u mjerodavnom bazenu koji je odabran u sredini modela i koji nije pod utjecajem rubnih uvjeta. Za razmak pregrada od 45 cm i 60 cm to je bio treći bazen od ulaza u riblju stazu, a za razmak pregrada od 90 cm to je bio drugi bazen. Raster točaka je mjereno u tri razine za svaki eksperiment i konfiguraciju: površinskoj razini (A), srednjoj razini (B) i pridненоj razini (C). Za navedeni raster točaka polje brzine mjereno je u 34 mjernne točke za konfiguraciju modela s duljinom bazena 45 cm, u 48 mjernih točaka za konfiguraciju modela s duljinom bazena 60 cm te u 69 mjernih točaka za konfiguraciju modela s duljinom bazena 90 cm. Na slikama u nastavku dan je shematski prikaz rasporeda mjernih točaka za sve konfiguracije riblje staze s vertikalnim otvorima.



Slika 2.7. Shematski prikaz rasporeda mjernih točaka za konfiguracije riblje staze s vertikalnim otvorima i duljinom bazena 45 cm



Slika 2.8. Shematski prikaz rasporeda mjernih točaka za konfiguracije riblje staze s vertikalnim otvorima i duljinom bazena 60 cm



Slika 2.9. Shematski prikaz rasporeda mjernih točaka za konfiguracije riblje staze s vertikalnim otvorima i duljinom bazena 90 cm

2.2 Korištena oprema

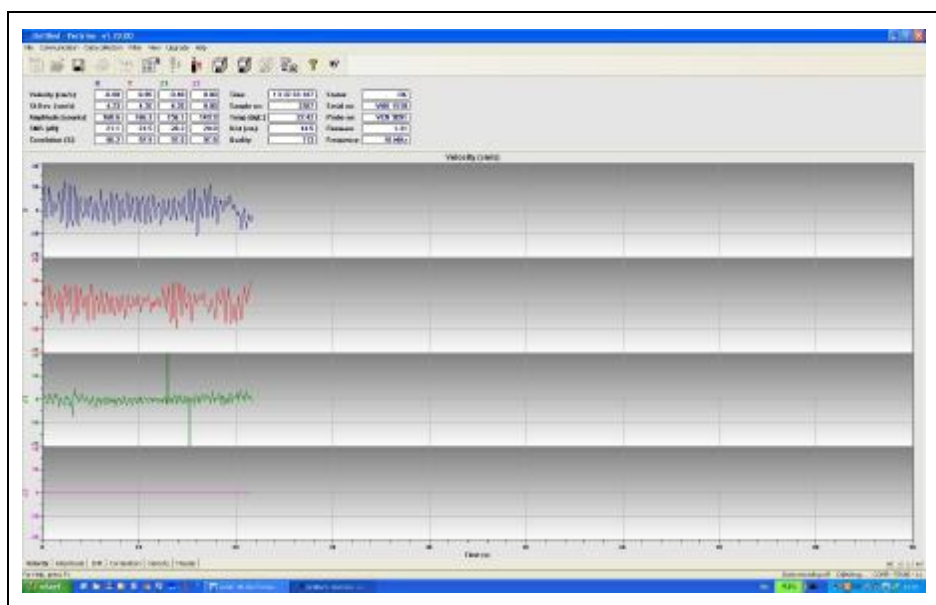
Za mjerenje brzina korišten je Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) *Vectrino* akustički uređaj montiran na pokretnu prečku koja se pruža okomito na hidrotehnički kanal. Ova greda omogućava jednostavno i brzo premještanje uređaja po rasteru mjernih točaka uzdužno, poprečno i po visini (Slika 2.10). ADV uređaj spojen je na laboratorijsko računalo pomoću kojeg se upravlja snimanjem podataka kroz računalni paket *Vectrino*.



Slika 2.10. ADV uređaj (lijevo); snimanje u bazenu (desno)

Uređaj snima trodimenzionalno polje brzine i sprema ga kao u , v i w komponente koristeći sljedeća pravila: u komponenta predstavlja brzinu u smjeru toka s pozitivnim predznakom nizvodno, v komponenta predstavlja brzinu poprečno na glavni smjer toka s pozitivnim predznakom udesno i w komponenta predstavlja vertikalnu brzinu s

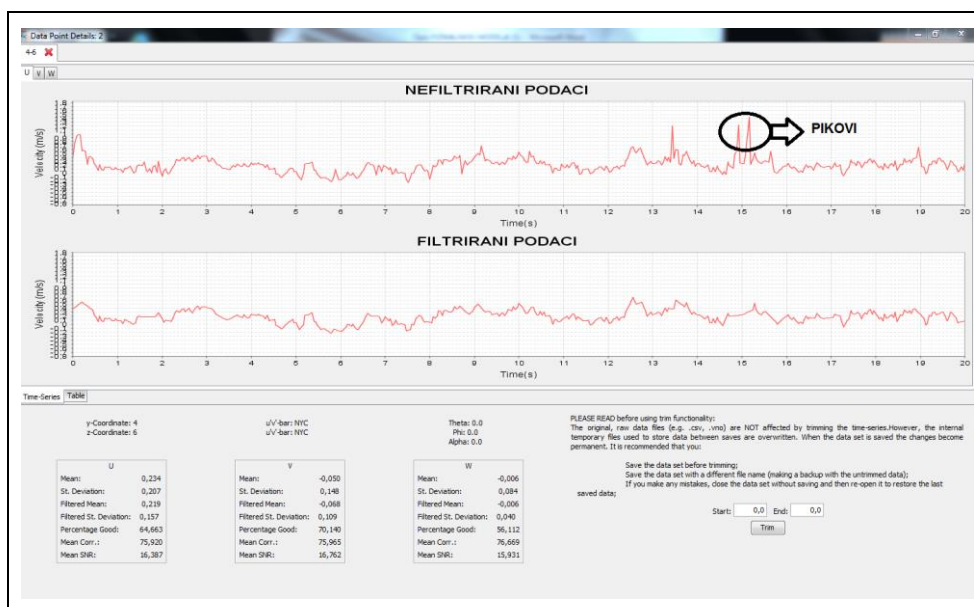
pozitivnim predznakom prema gore. Mjerni volumen ADV uređaja nalazi se 5 cm od glave uređaja, a uređaj radi na principu slanja kratkog zvučnog impulsa i snimanja njegovog odjeka u svim krakovima koristeći Doppler-ov efekt. Da bi snimanje bilo točno impuls se mora moći odbiti od krutih čestica, stoga u vodi trebaju biti prisutne fine čestice koje će to omogućiti. Iz tog razloga se u spremnik s vodom dodavao bentonit, alumosilikatna glina kao raspršivač akustičkog signala. Tijekom snimanja brzine se na računalo mogu pratiti u obliku grafa za X, Y i Z komponente koje zbog konfiguracije mjerne mreže odgovaraju komponentama u , v i w (Slika 2.11). Uređaj je tijekom cijelog ispitivanja podešen na 25 Hz, što znači da u intervalu od 1 s prikupi 25 parova podataka o brzini toka. U svakoj su se točki podaci o brzini prikupljali 60 s kako bi se prikupilo dovoljno podataka o fluktuacijama sve tri komponente brzine, a ukupno jedan zapis sadrži 1500 podataka o fluktuirajućoj brzini toka. Važno je pratiti i SNR (Signal/Noise Ration) tijekom mjerenja koji treba biti što veći. SNR je mjera jakosti zvučnog signala u odnosu na razinu pozadinske buke, povećava se s brzinom i količinom raspršenih čestica u vodi. Sirovi podaci o brzinama spremaju se na računalo gdje se dalje obrađuju pomoću programa za filtriranje.



Slika 2.11. prikaz rada Vectrino programskog paketa za snimanje podataka

Sve dobivene sirove podatke o brzinama potrebno je dodatno obraditi tj. filtrirati kako bismo se riješili nekvalitetnih podataka, tj. „pikova“ koji se mogu pojaviti (Slika 2.12). Za postupak filtracije podataka korišten je program VSA (Velocity Signal Analyser). Taj program je povezan s programom za mjerenje brzina Vectrino tako da se sve vremenske serije brzina direktno mogu ubaciti u VSA. Postoji više različitih metoda

filtracije koje VSA program posjeduje, ali u ovom radu objasniti će se samo one koje su korištene prilikom ovog ispitivanja. Kao prefilter korištena je metoda Correlation i SNR kojom se programu zadaje određeni prihvatljivi korelacijski limit i prihvatljivi SNR limit. Program sve podatke koje ne zadovoljavaju te kriterije odbacuje. Za obradu podataka korišten je prihvatljivi korelacijski limit 60 i SNR limit 15. Korelacija predstavlja mjeru uzajamnosti promjene dvije ili više varijabli. Za detekciju pikova korištena je metoda Phase-Space Thresholding koja radi na principu da su točke zatvorene unutar elipsoida koji je definiran prema određenom kriteriju. Sve točke koje se ne nalaze unutar elipsoida program prepoznaje kao pikove i odbacuje ih. Za zamjenu pikova koje je prethodna metoda odbacila korištena je metoda linearne interpolacije.



Slika 2.12. Filtracija netipičnih vrijednosti iz snimljenih podataka



3 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja

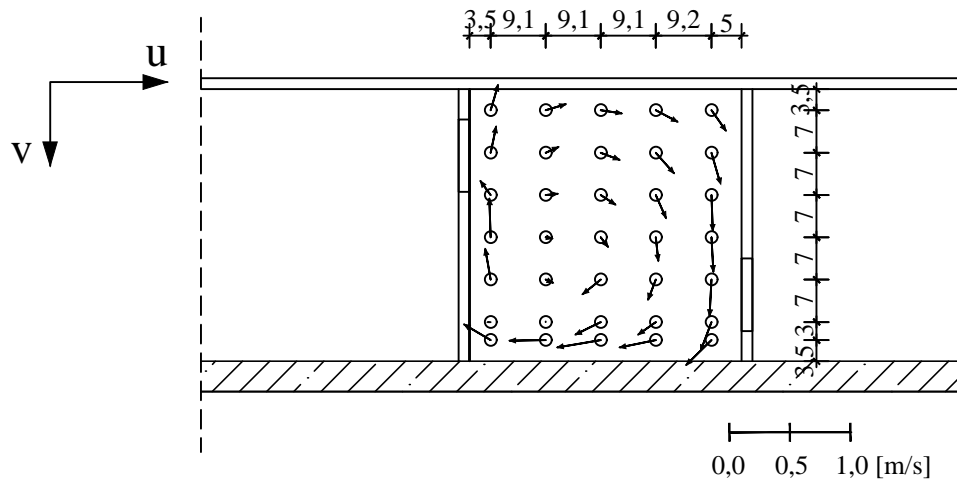
Rezultati eksperimentalnih mjerenja prikazani su kao polja brzina u bazenima za oba tipa ribljih staza i sve konfiguracije unutar njih. Svaka konfiguracija sadrži prikaz tri izmjerene komponente brzina za sve 3 ravnine.



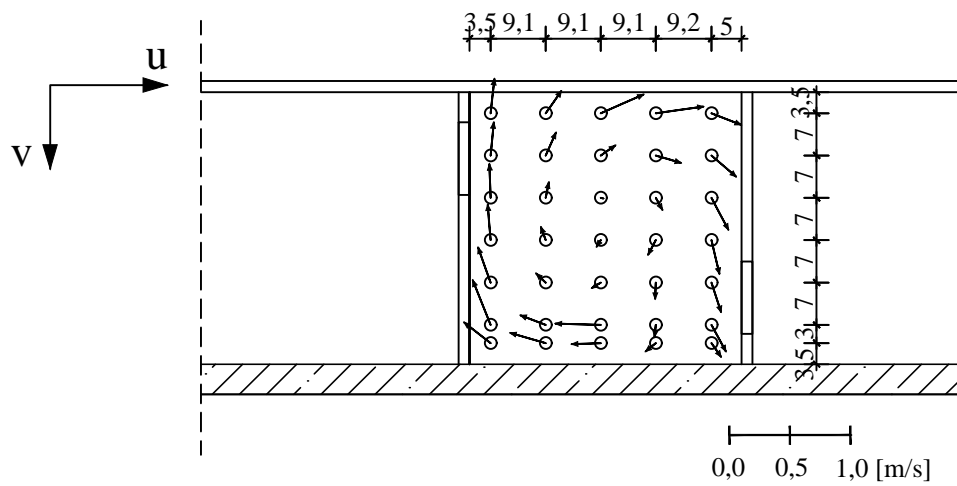
Prilozi

PRILOG 1: PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA: MODEL 125-45-8

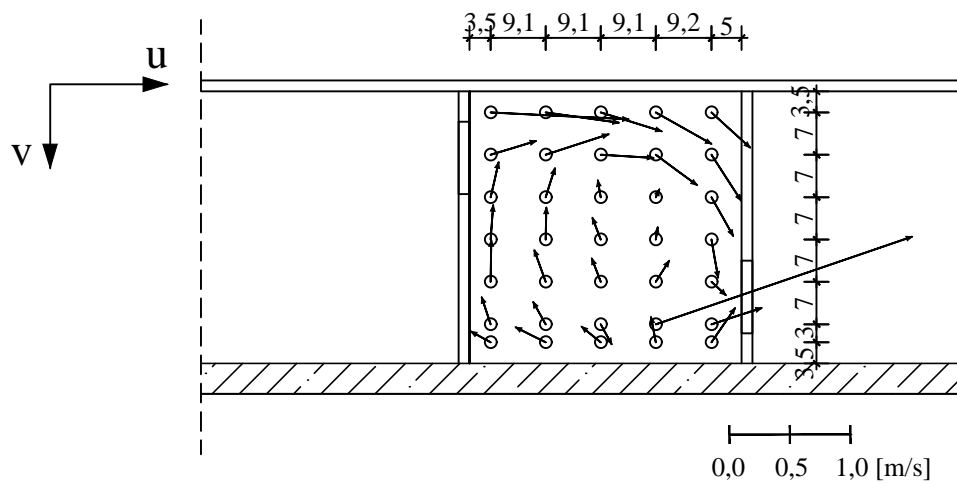
POVRŠINSKA RAVNINA - A



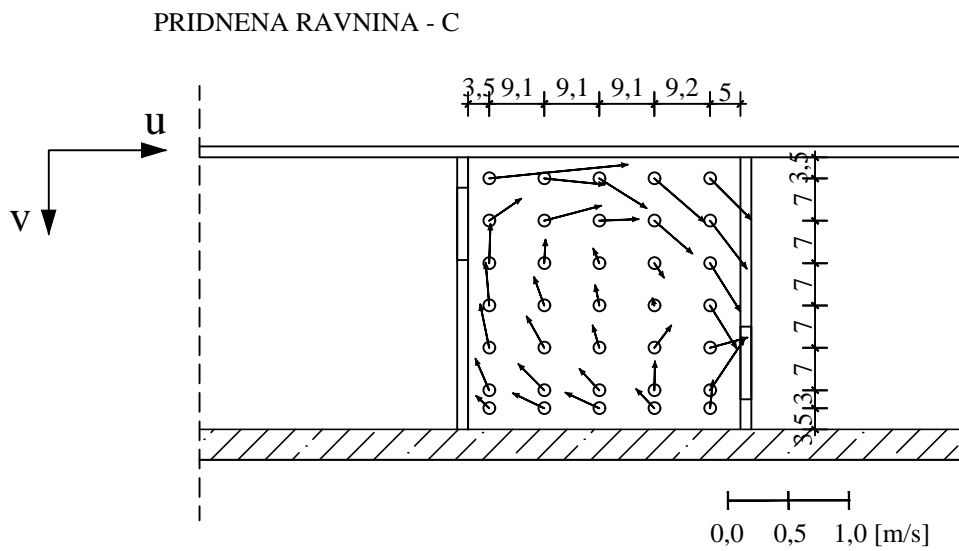
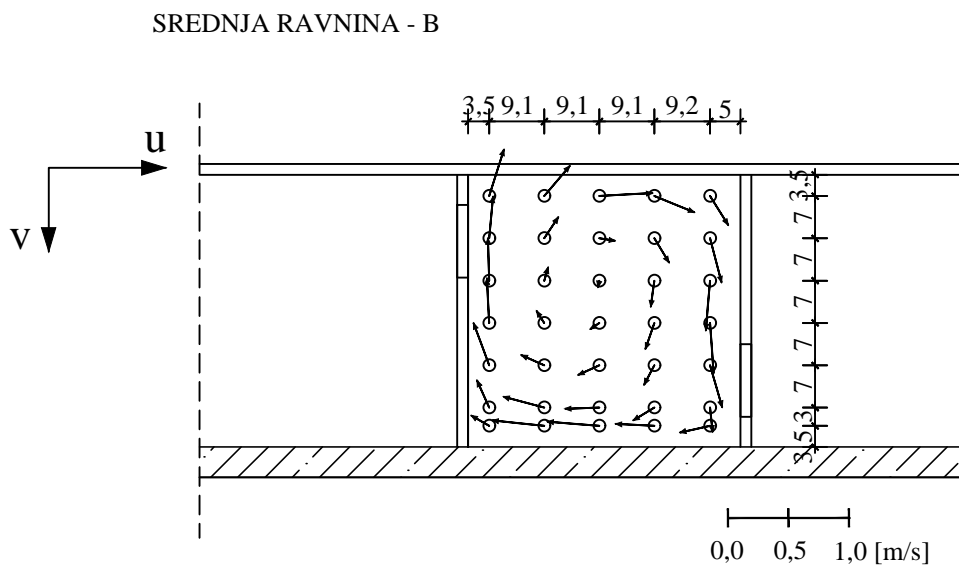
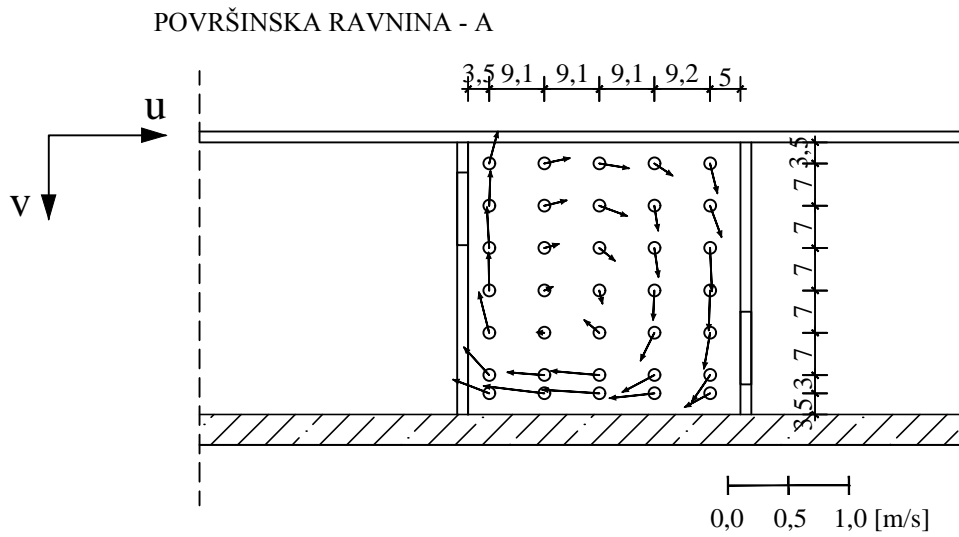
SREDNJA RAVNINA - B



PRIDNENA RAVNINA - C

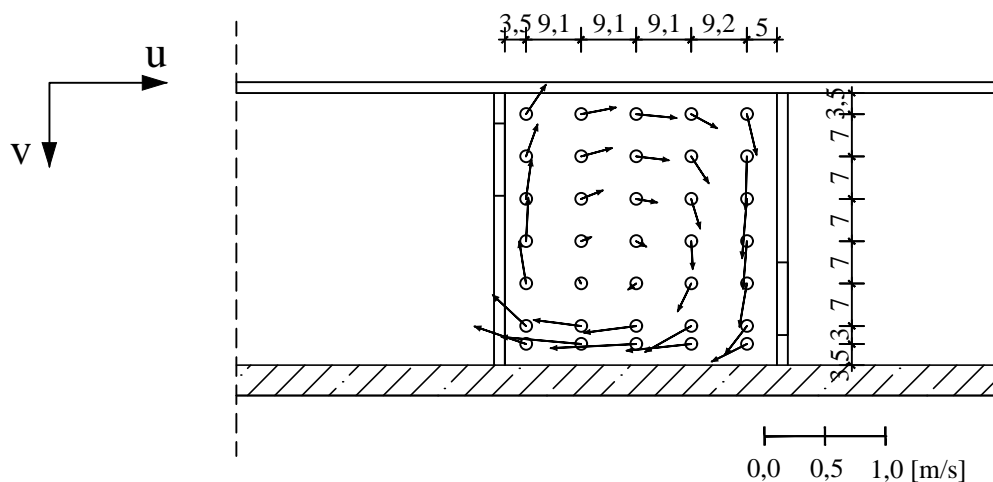


PRILOG 2:
PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA:
MODEL 125-45-10

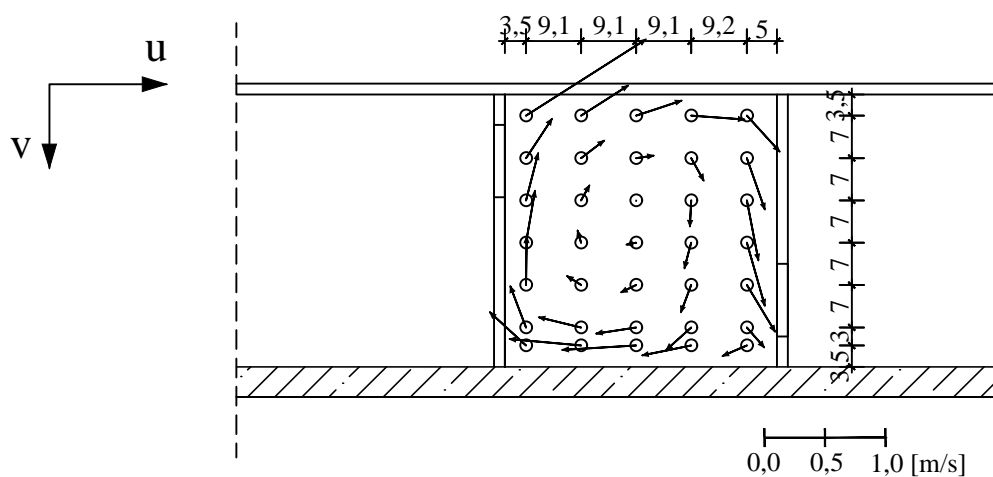


PRILOG 3: PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA: MODEL 125-45-12

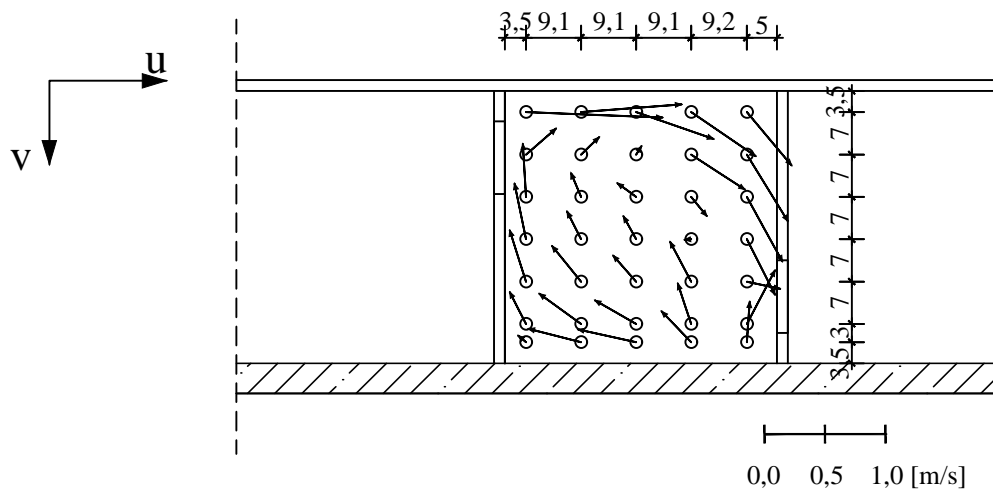
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

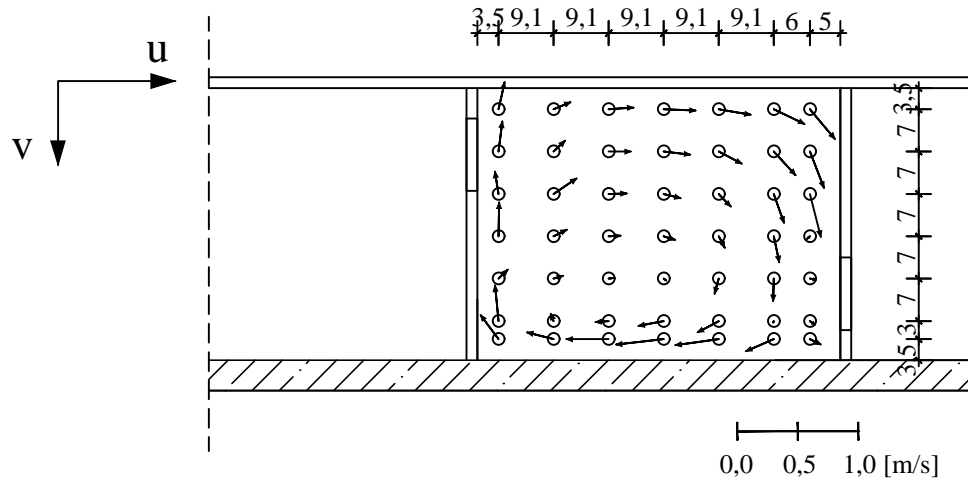


PRIDNENA RAVNINA - C

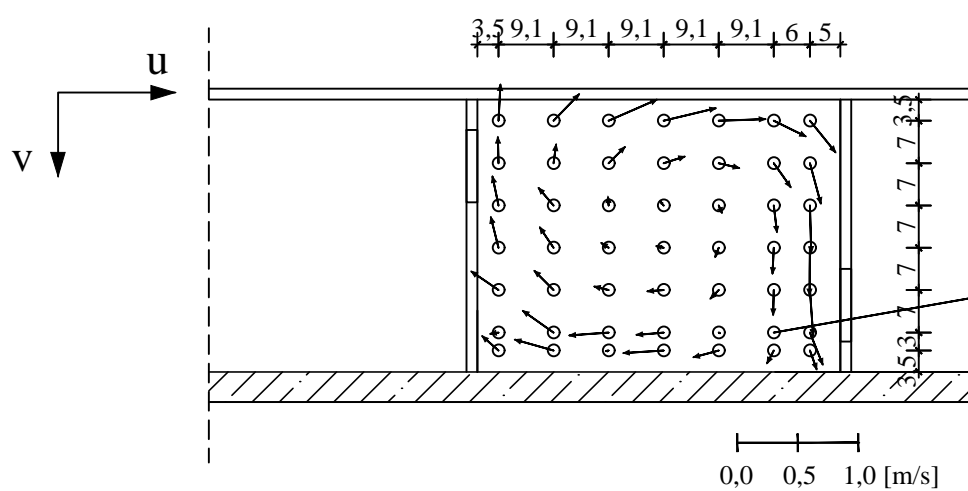


PRILOG 4: PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA: MODEL 125-60-8

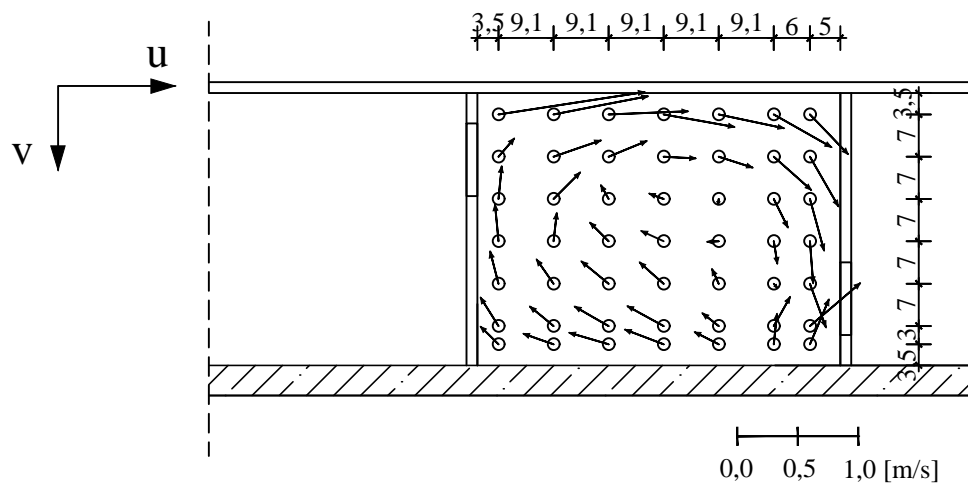
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

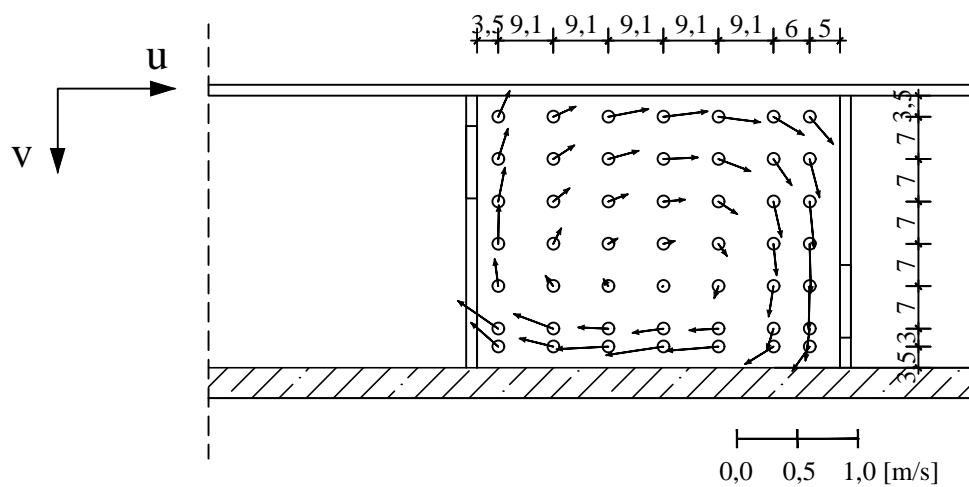


PRIDNENA RAVNINA - C

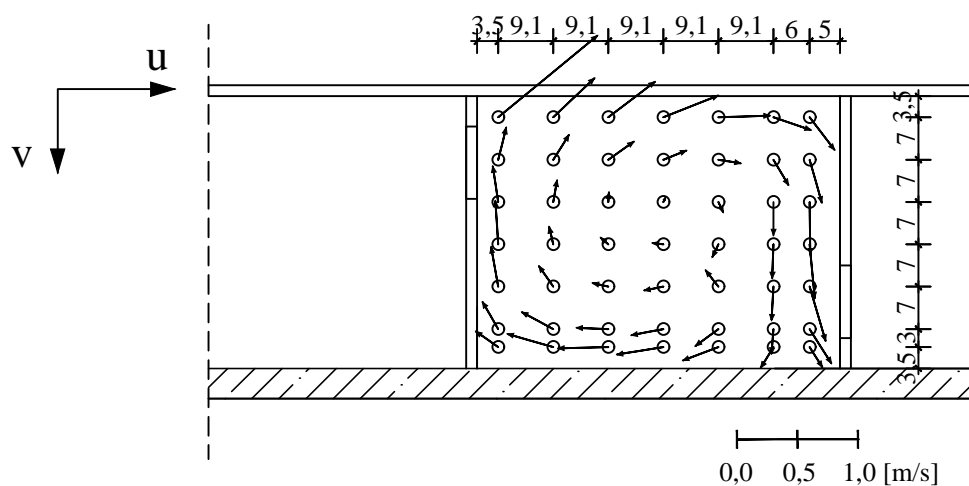


PRILOG 5: PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA: MODEL 125-60-10

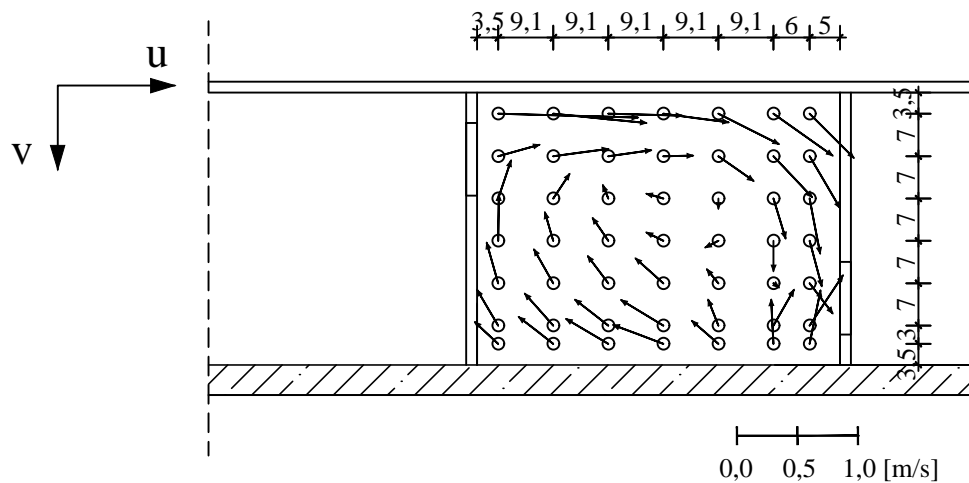
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

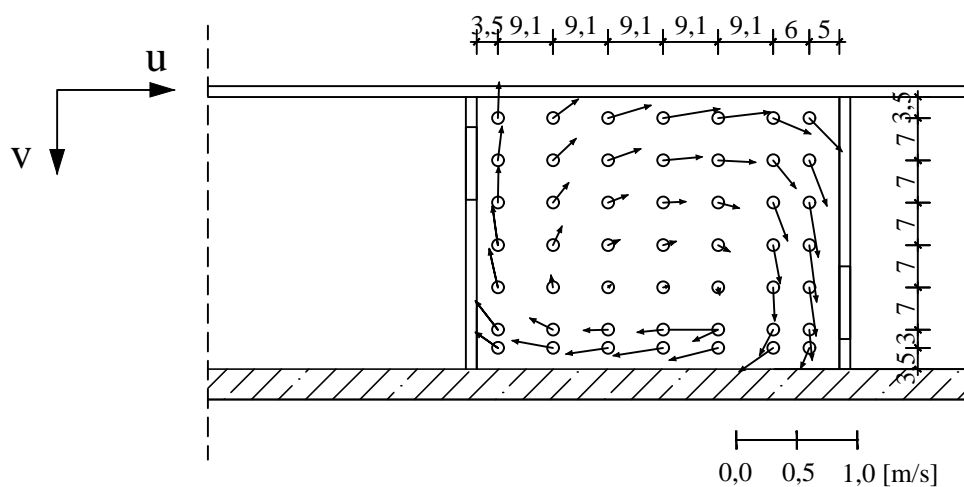


PRIDNENA RAVNINA - C

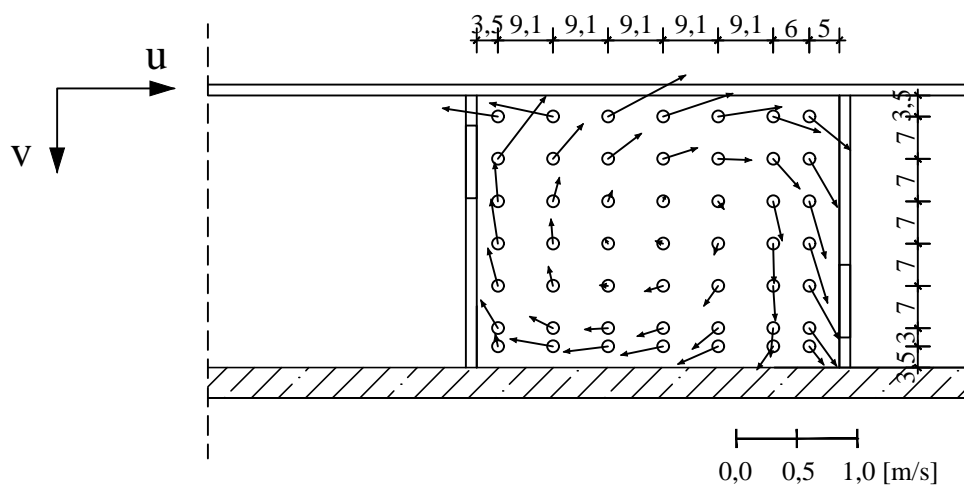


PRILOG 6:
PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA:
MODEL 125-60-12

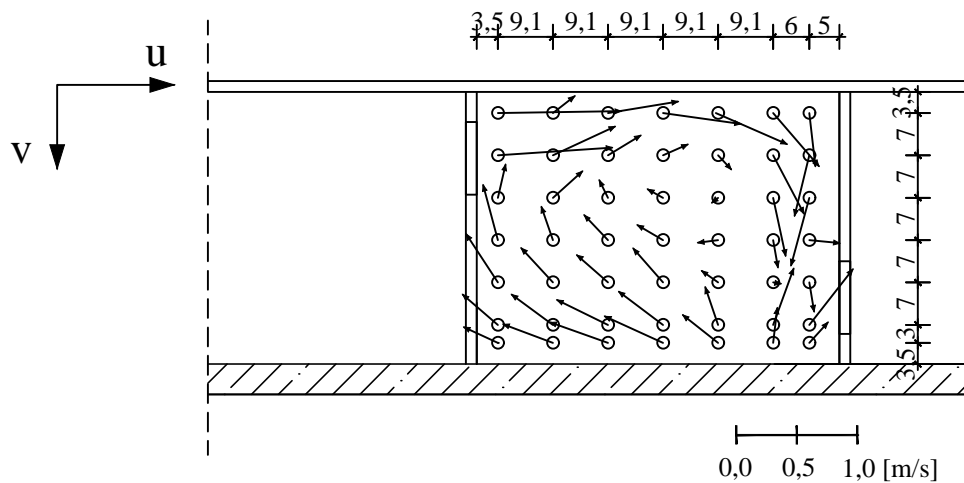
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

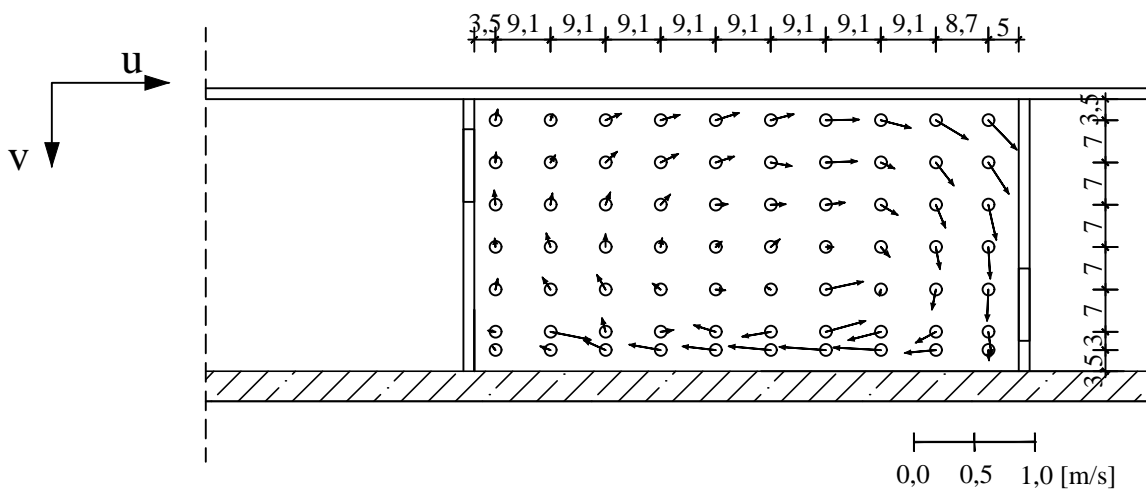


PRIDNENA RAVNINA - C

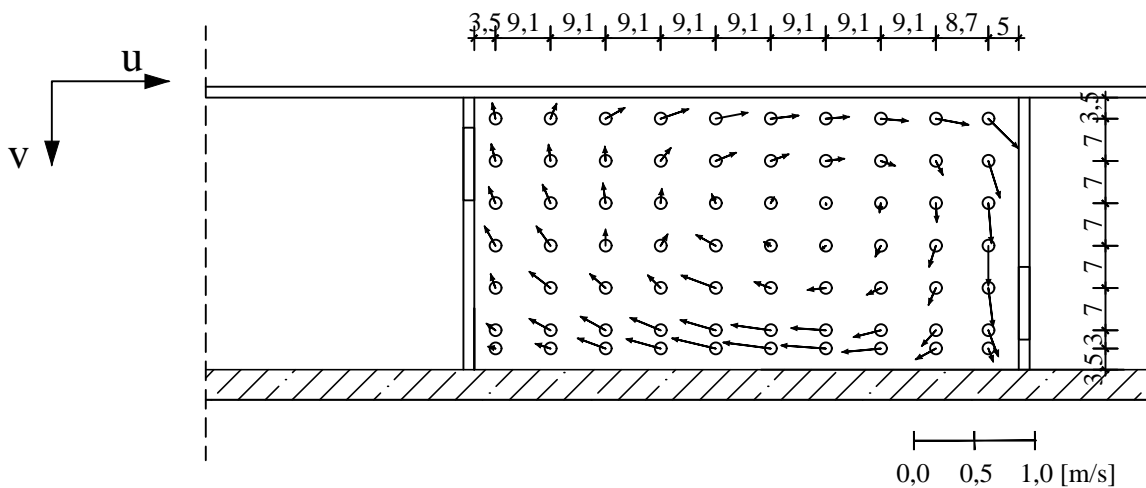


PRILOG 7: PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA: MODEL 125-90-8

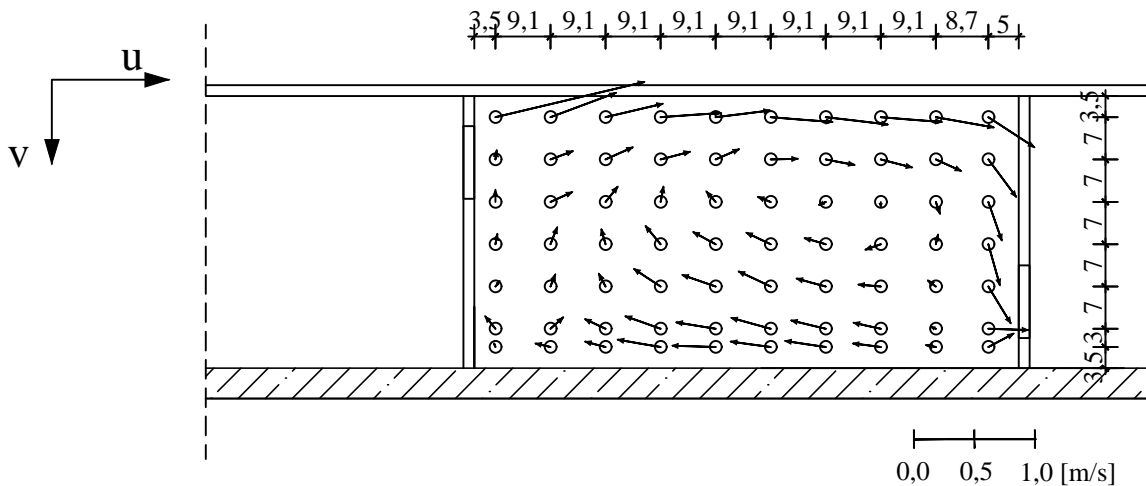
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

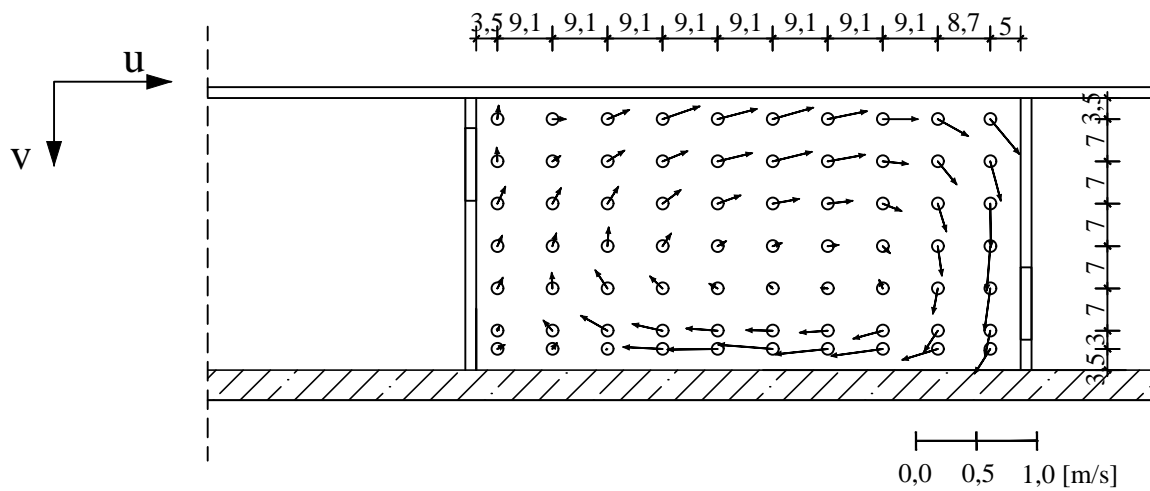


PRIDNENA RAVNINA - C

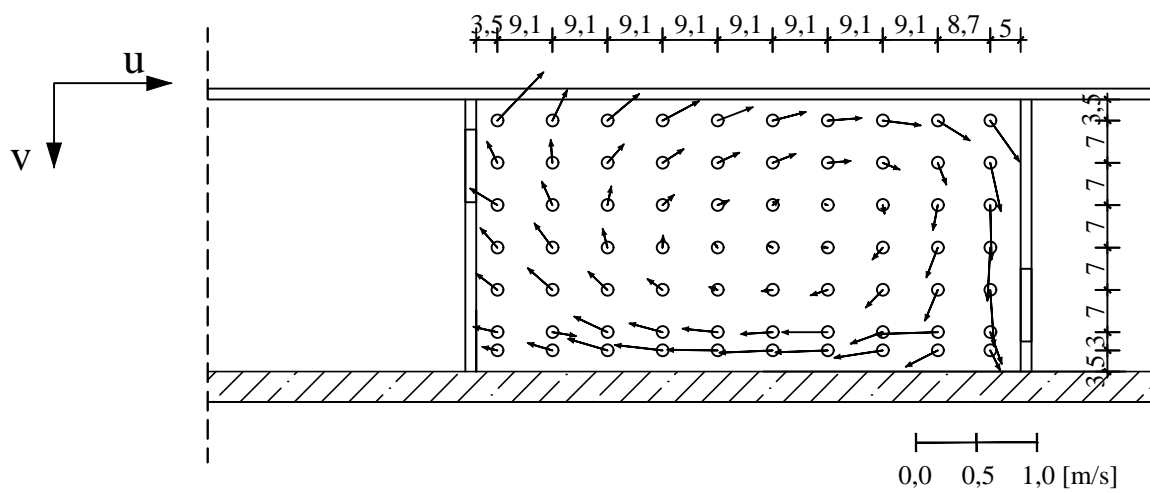


PRILOG 8: PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA: MODEL 125-90-10

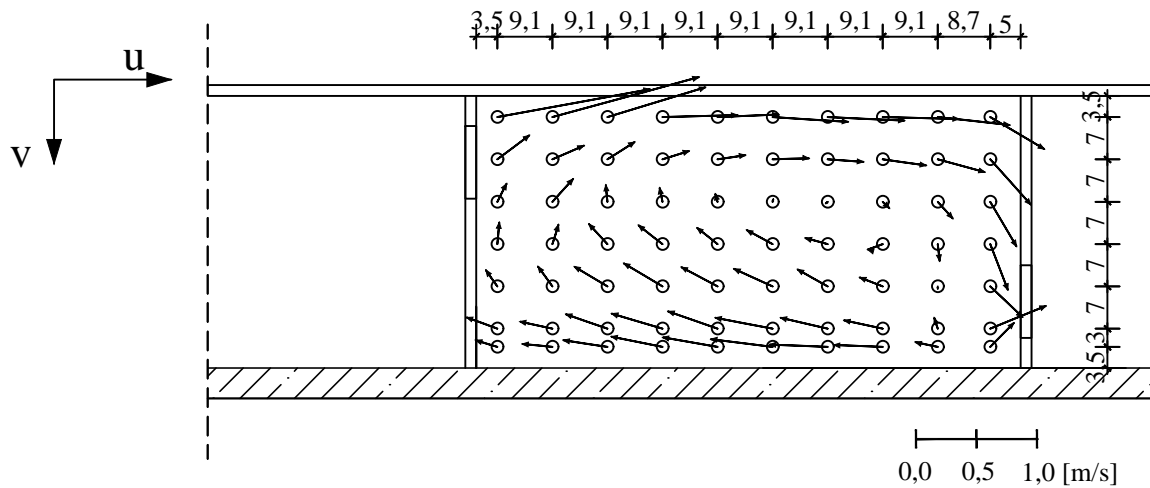
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

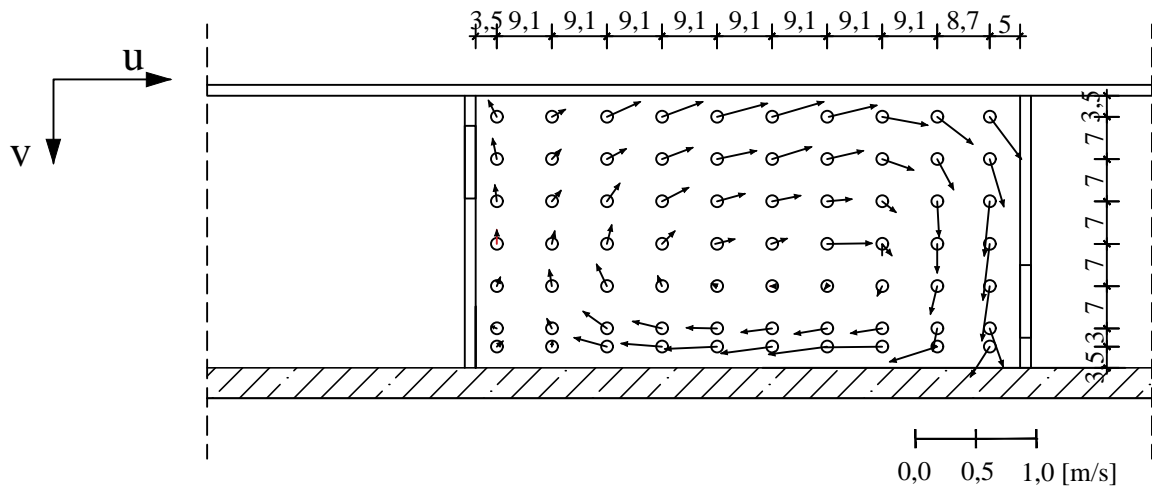


PRIDNENA RAVNINA - C

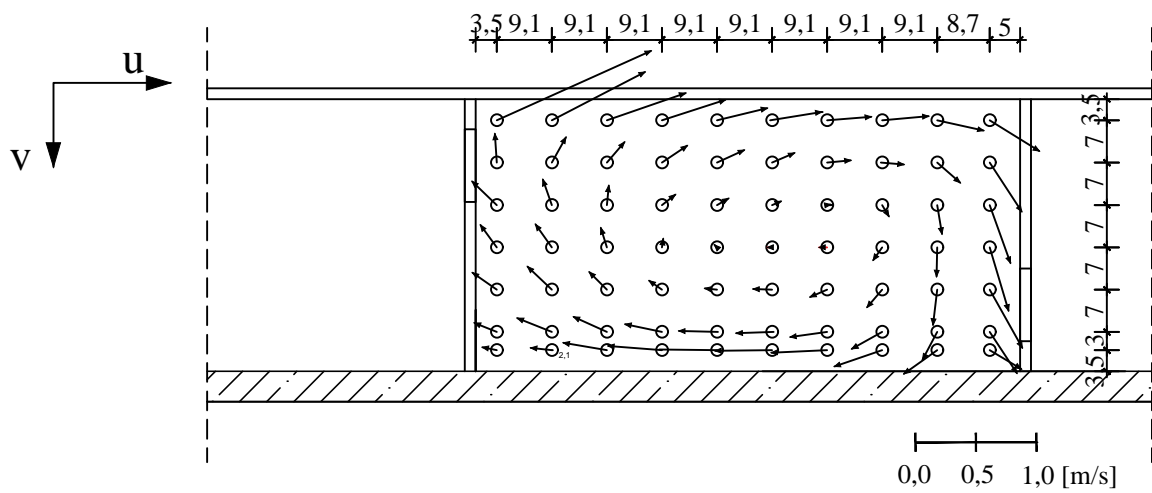


**PRILOG 9:
 PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA:
 MODEL 125-90-12**

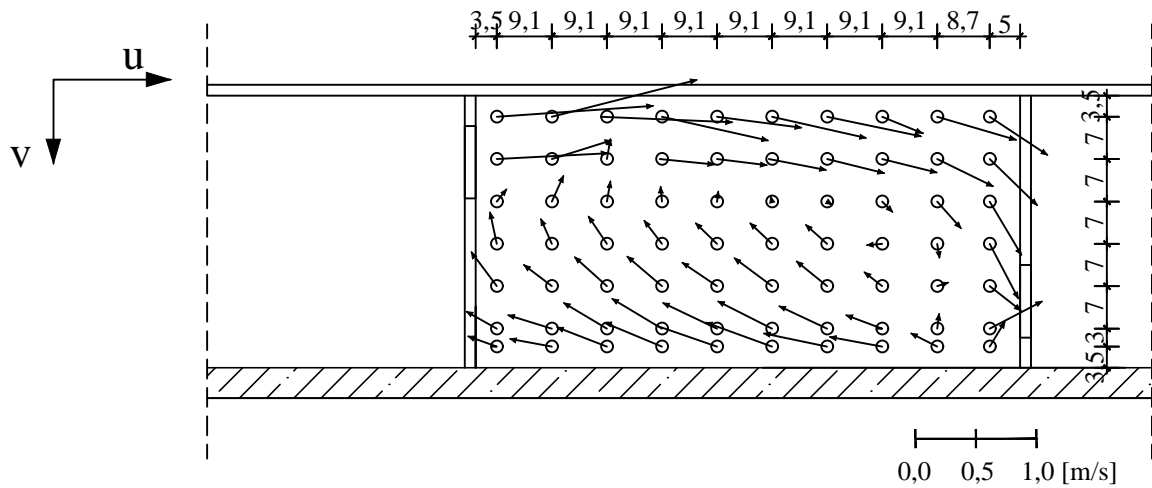
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

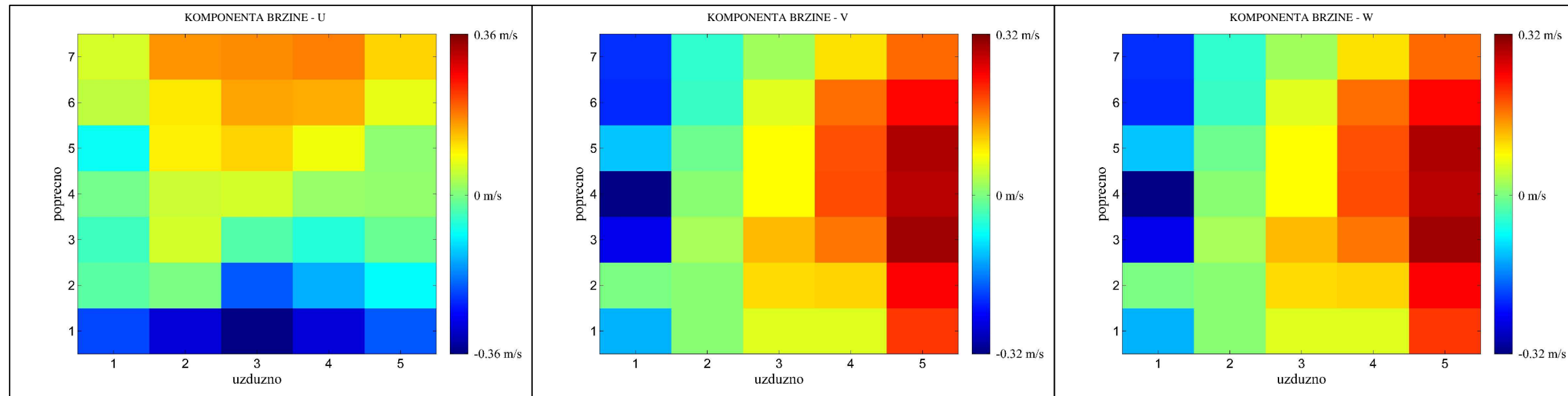


PRIDNENA RAVNINA - C

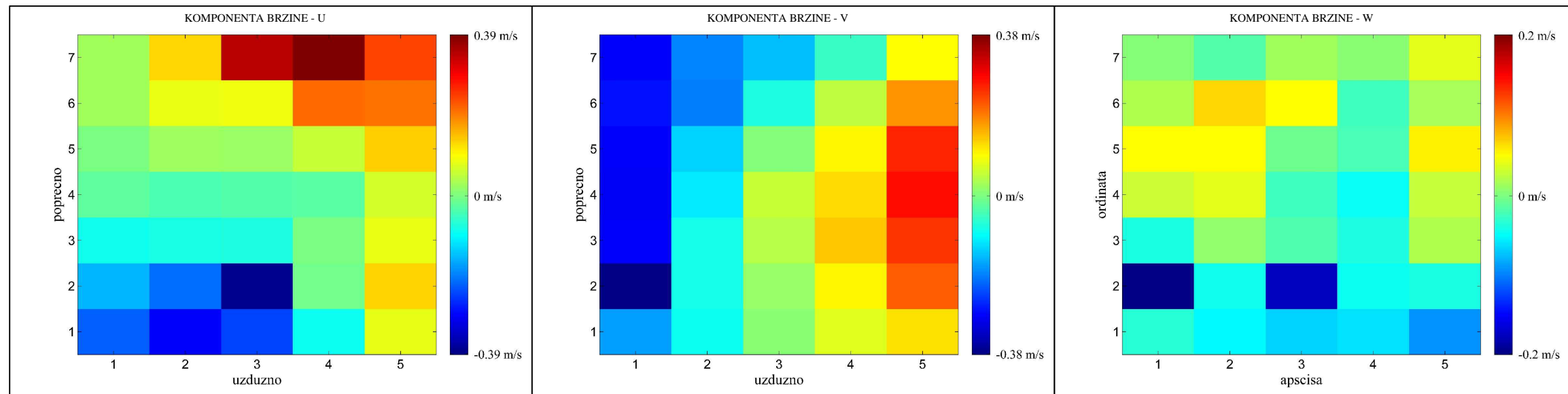


PRILOG 10: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-45-8

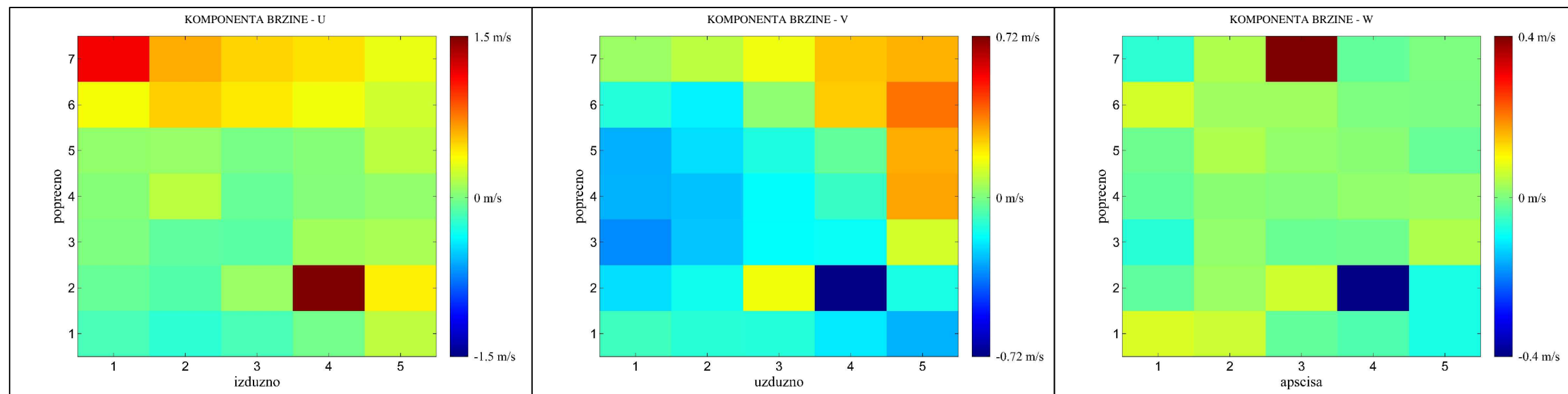
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

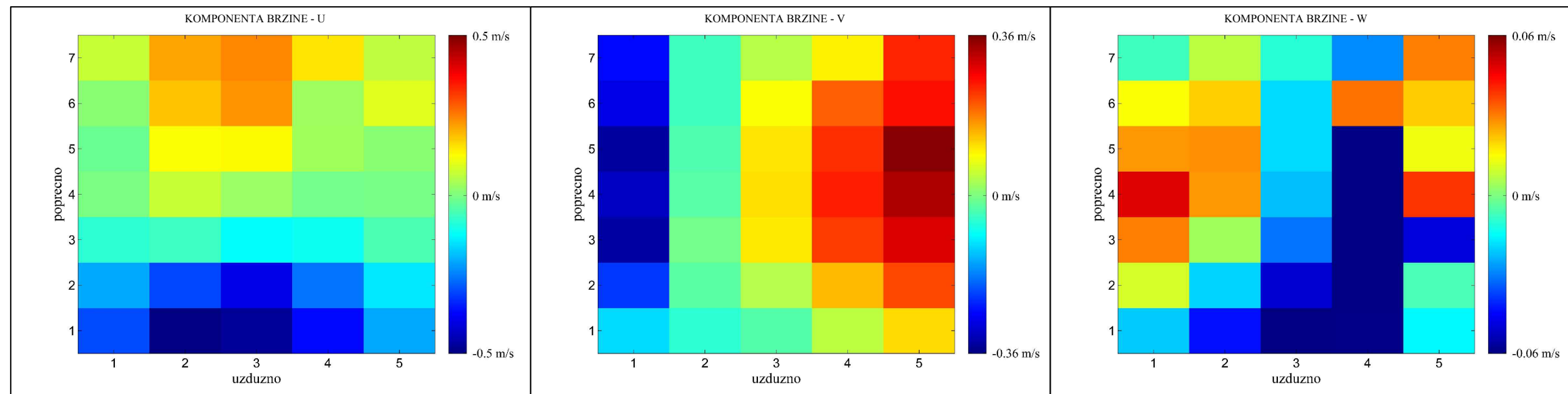


PRIDNENA RAVNINA - C

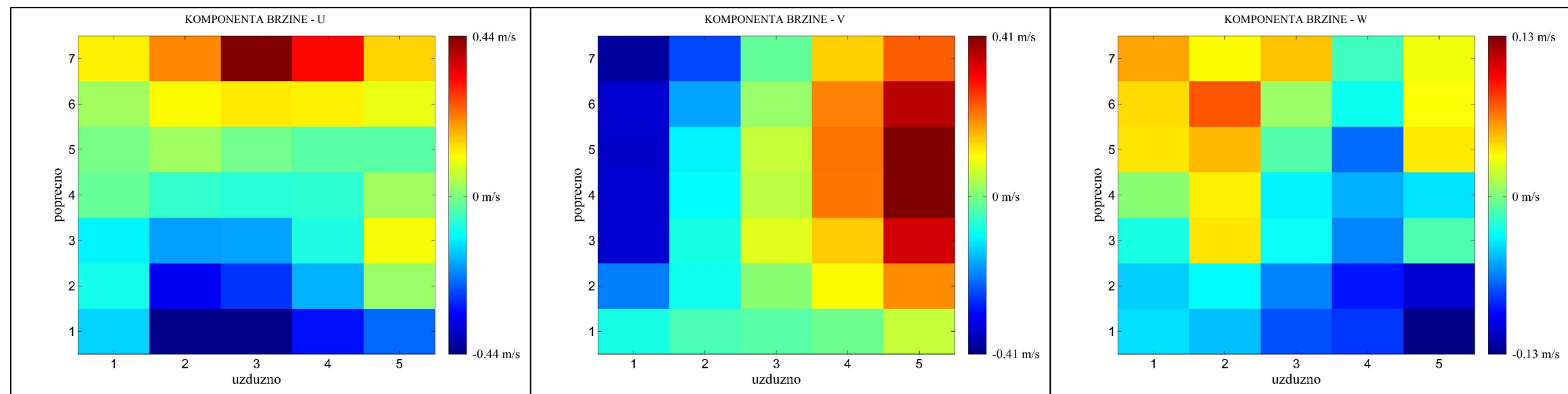


PRILOG 11: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-45-10

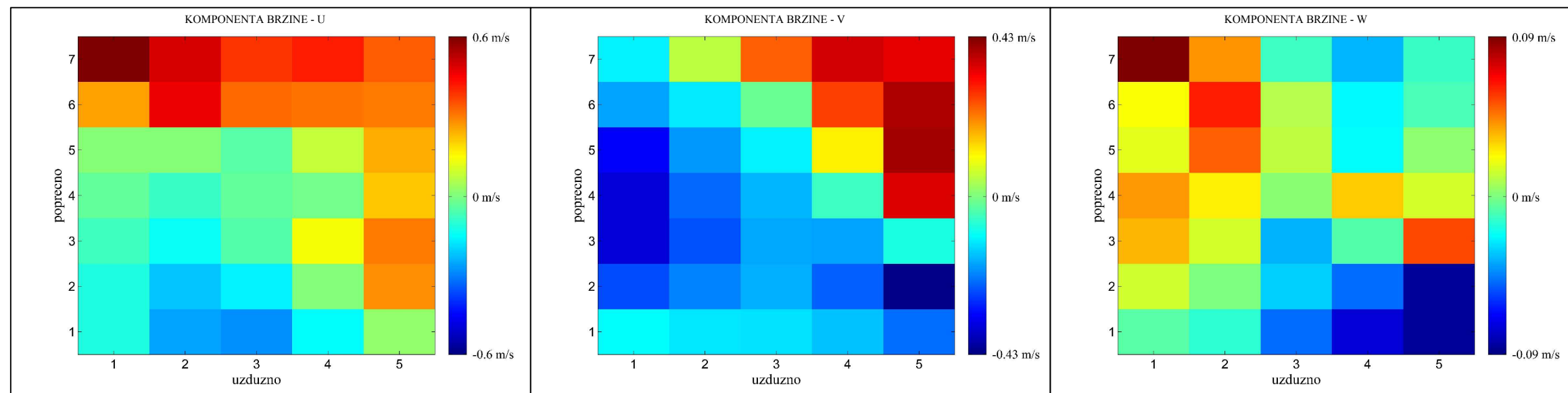
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

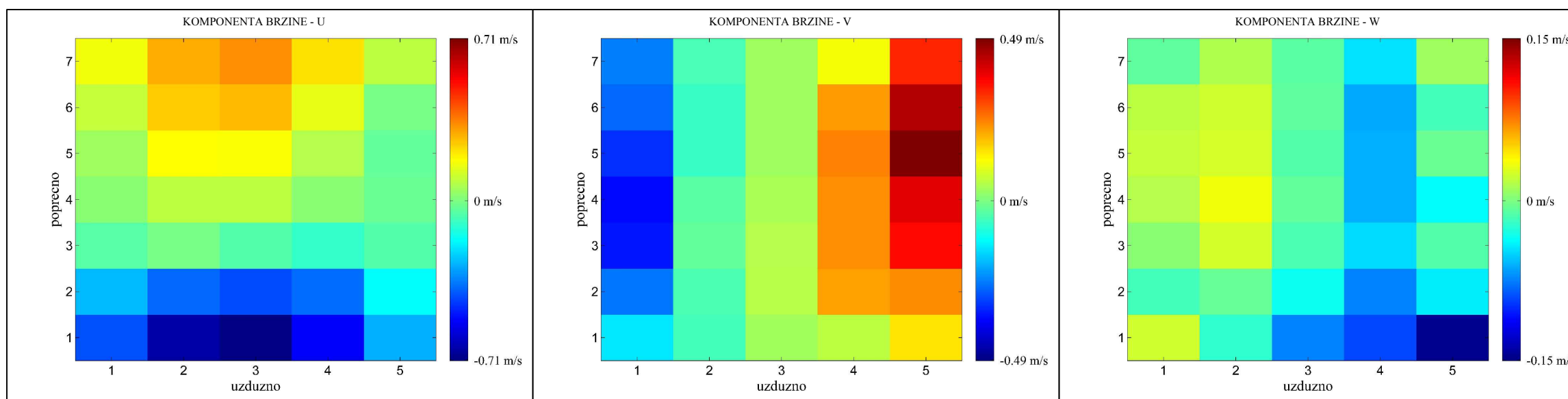


PRIDNENA RAVNINA - C

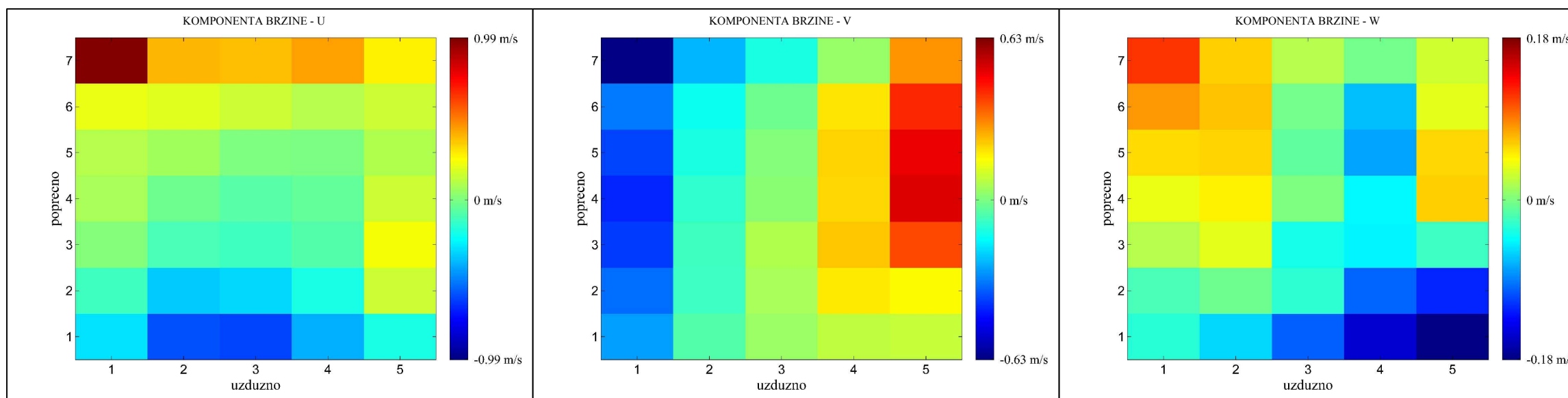


PRILOG 12: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-45-12

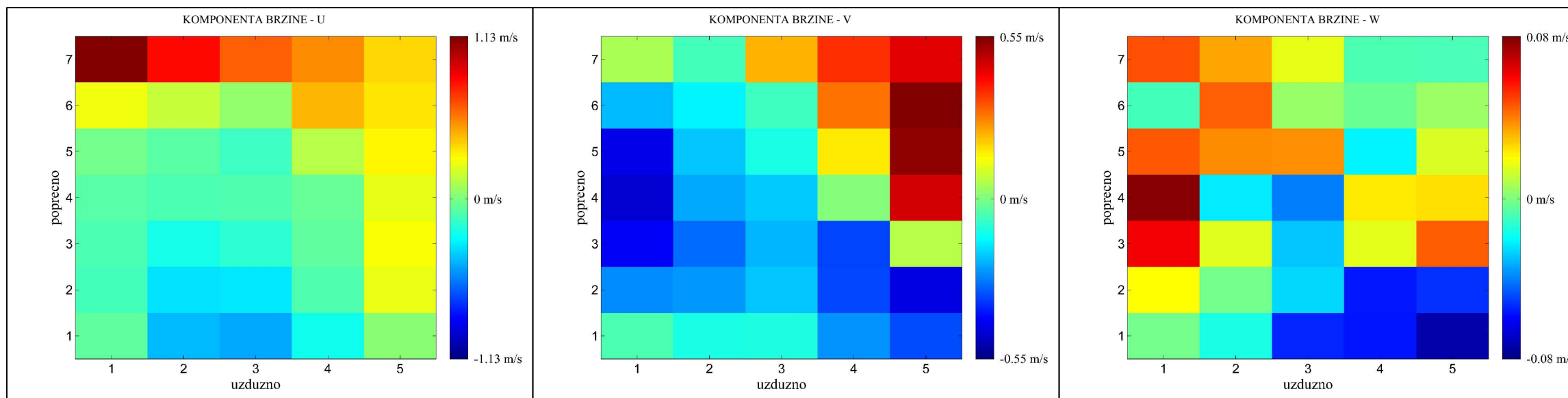
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

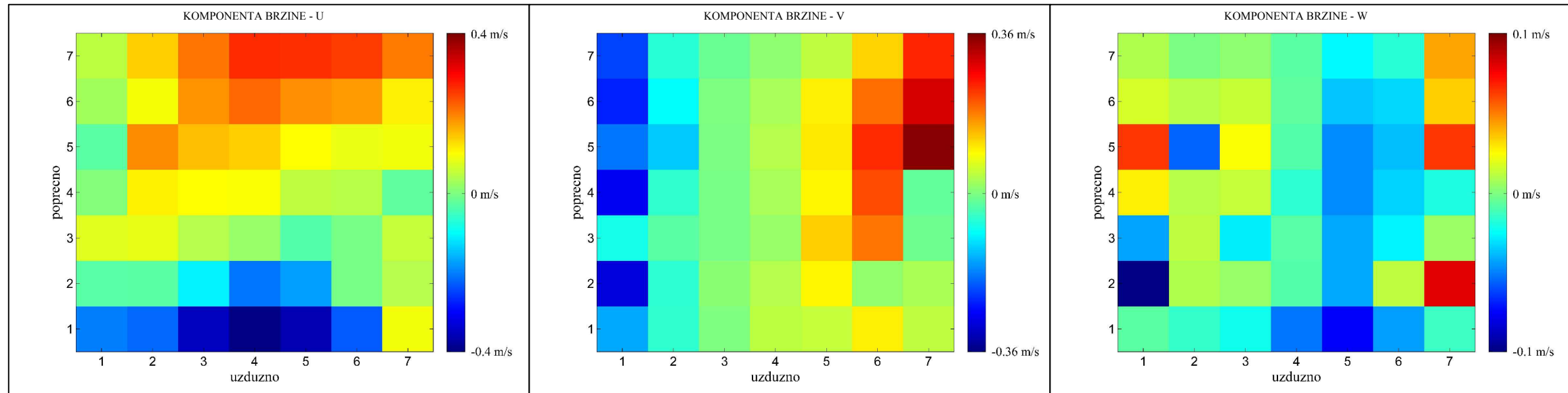


PRIDNENA RAVNINA - C

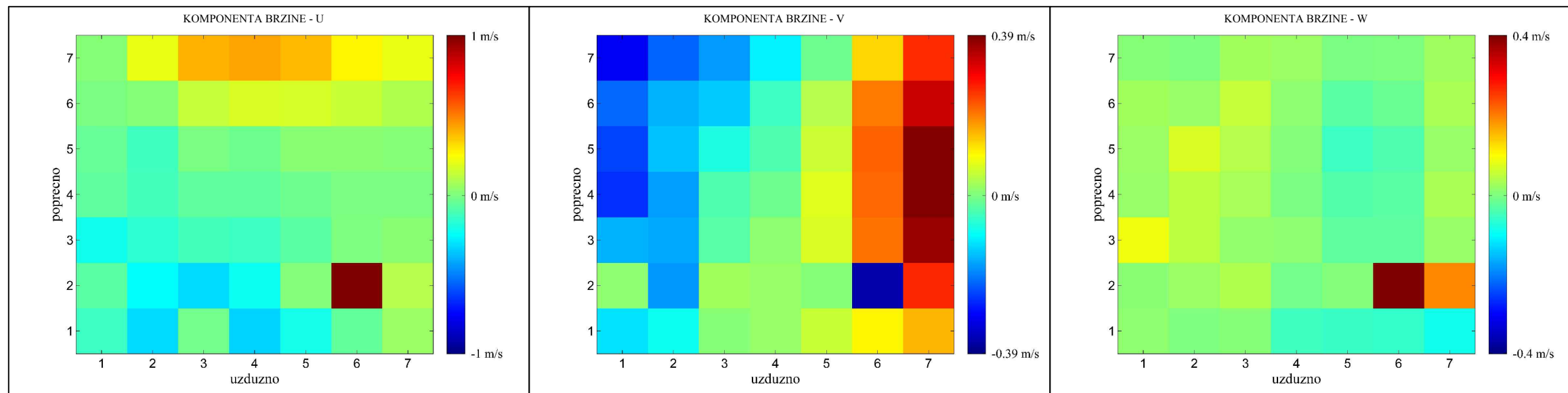


PRILOG 13: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-60-8

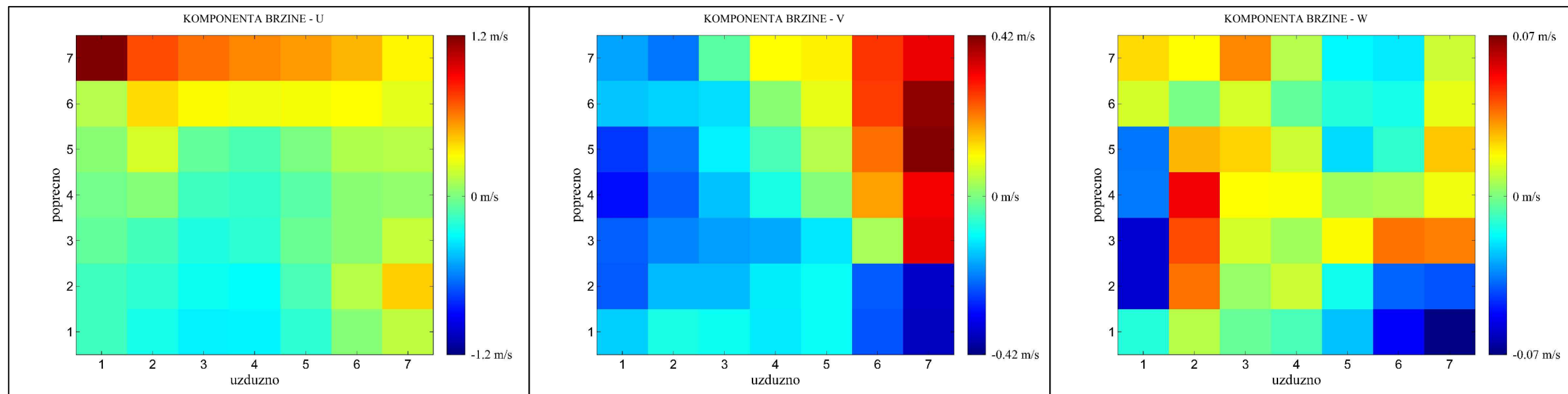
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

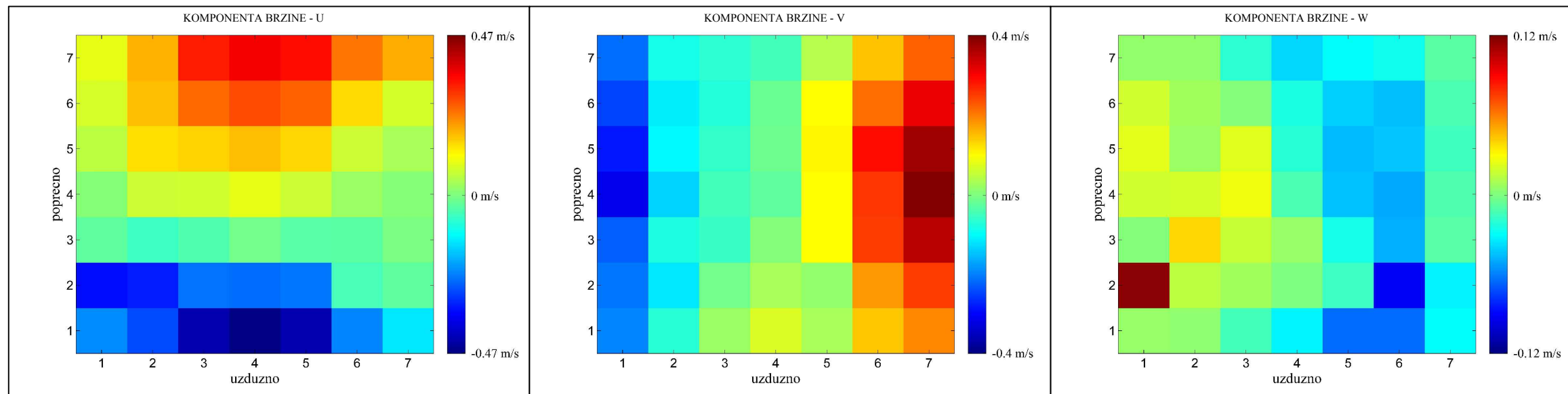


PRIDNENA RAVNINA - C

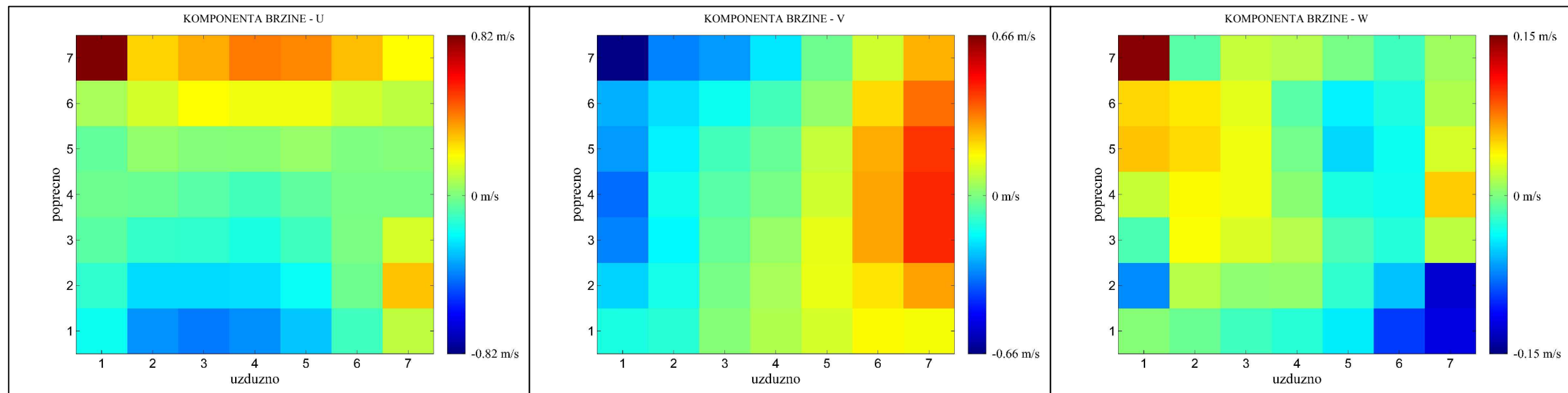


PRILOG 14: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-60-10

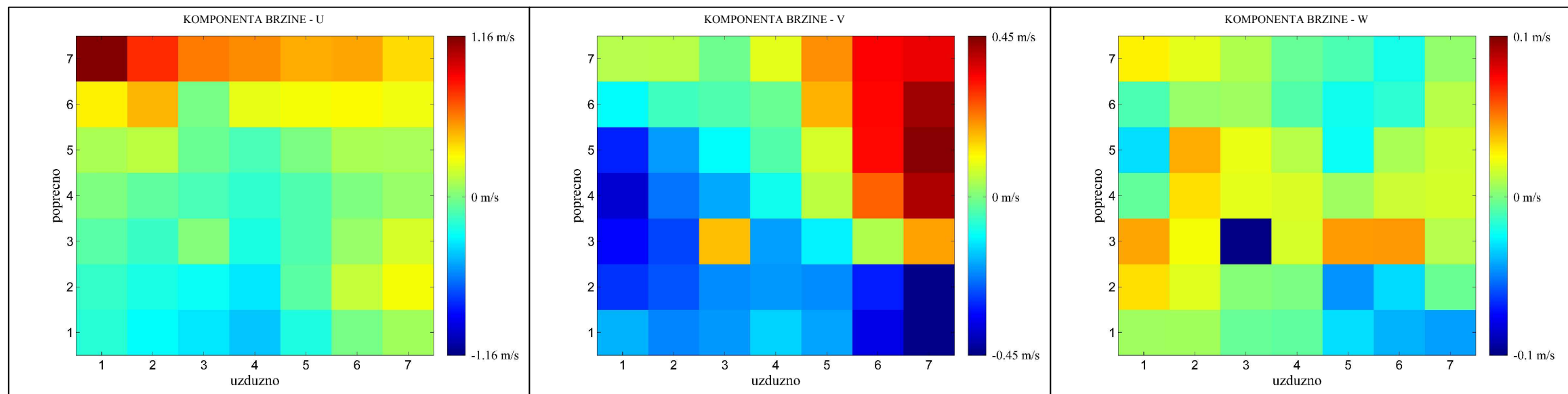
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

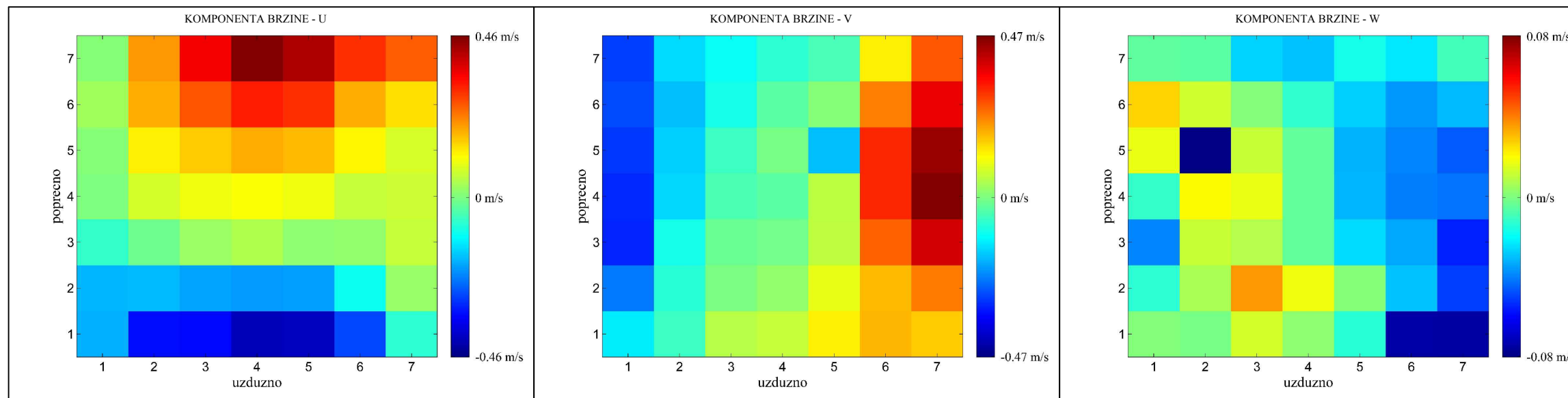


PRIDNENA RAVNINA - C

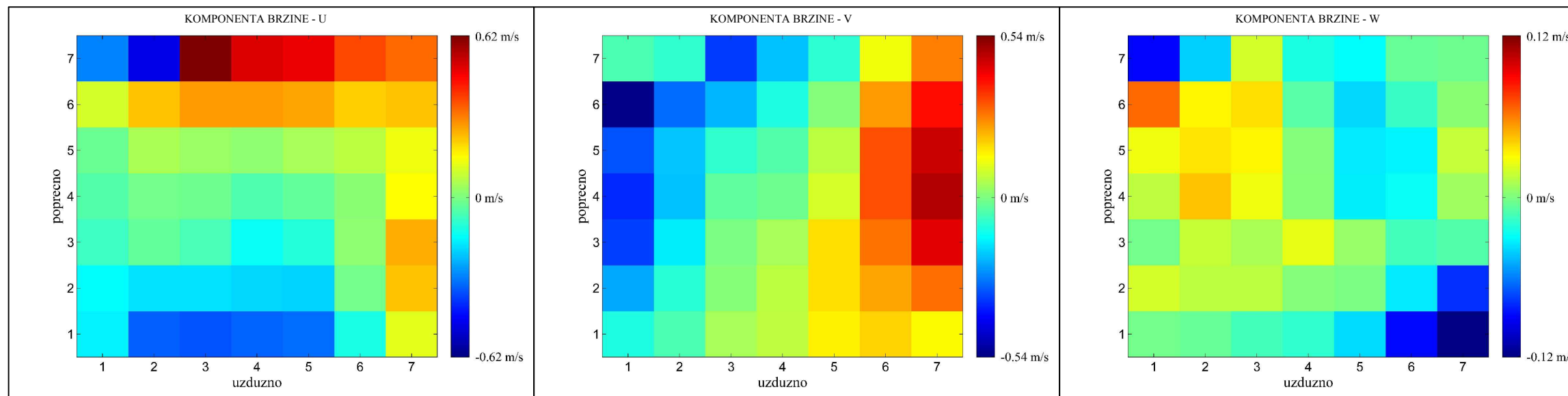


PRILOG 15: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-60-12

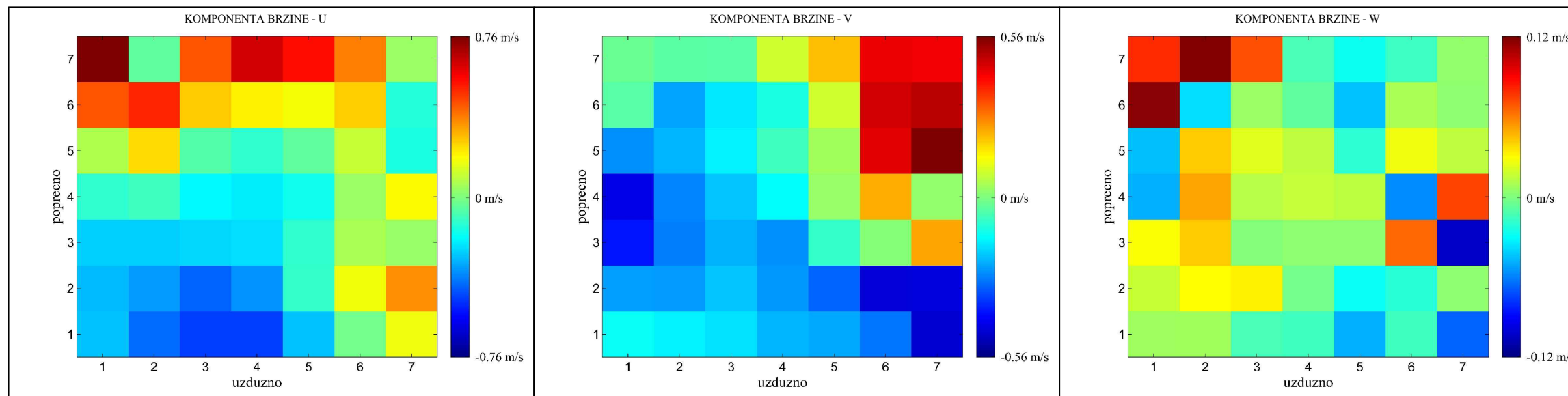
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

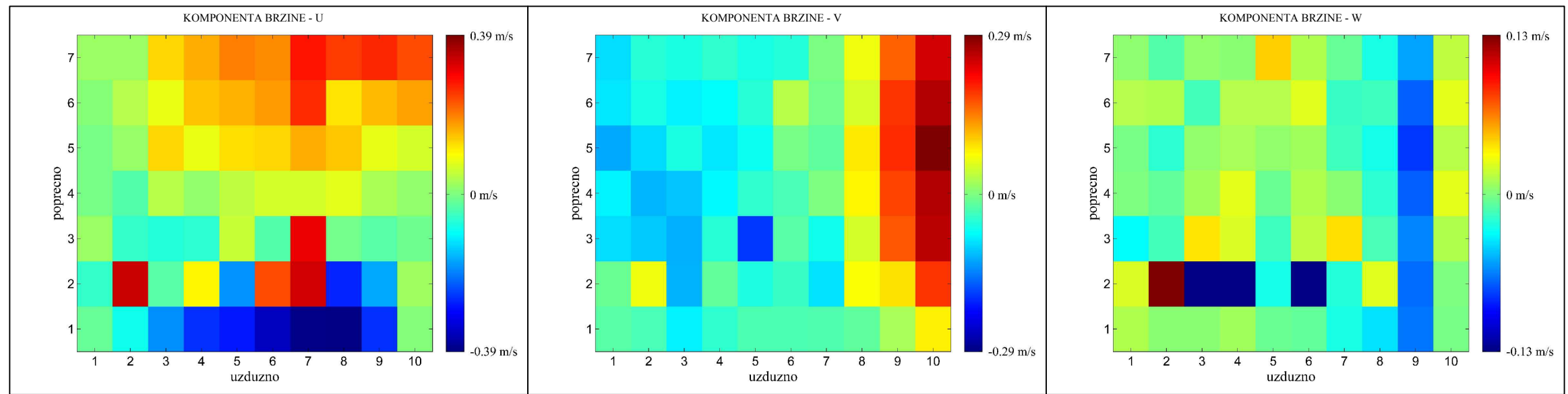


PRIDNENA RAVNINA - C

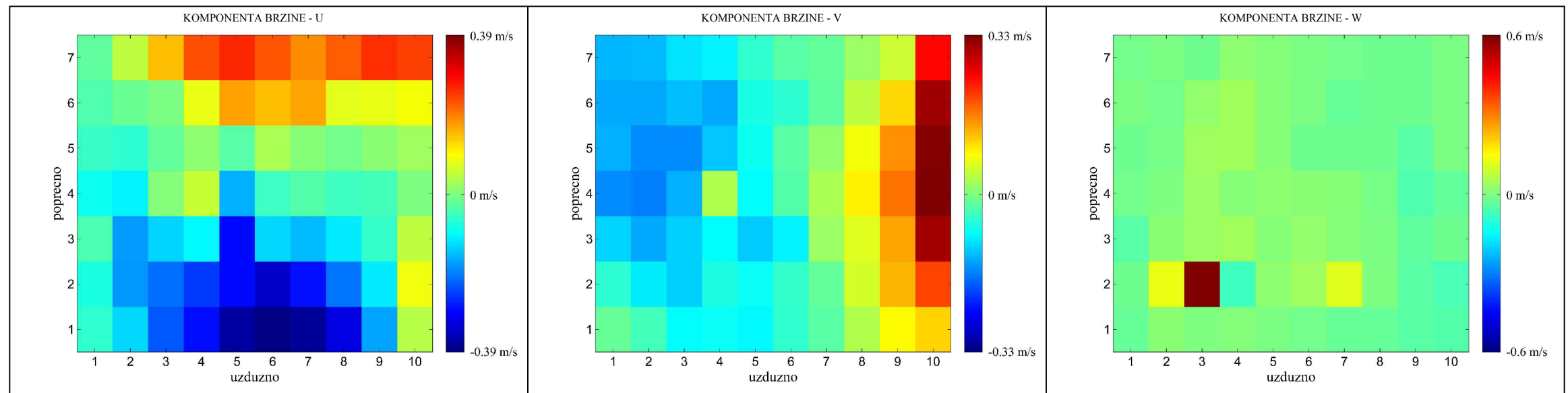


PRILOG 16: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-90-8

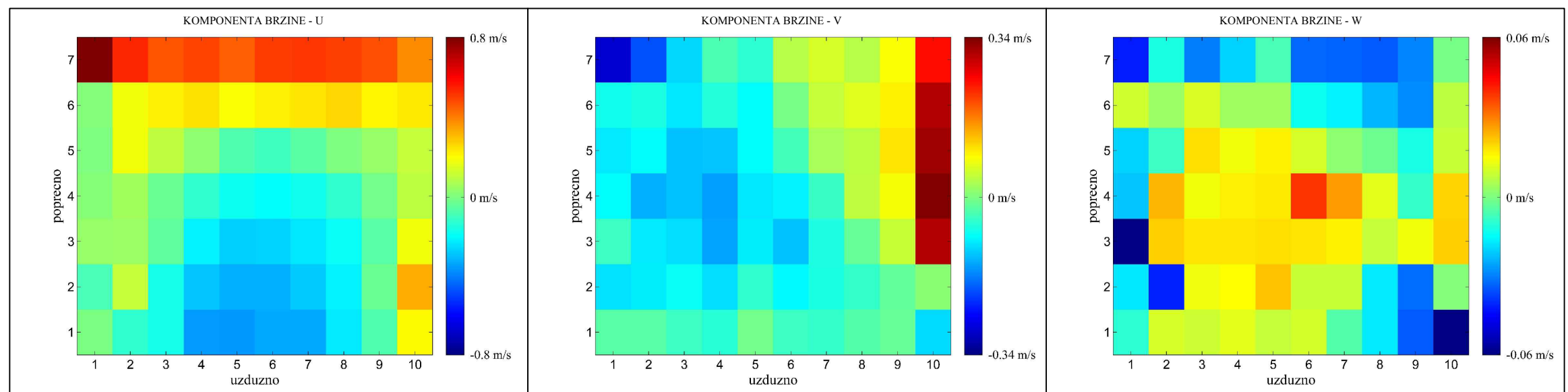
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

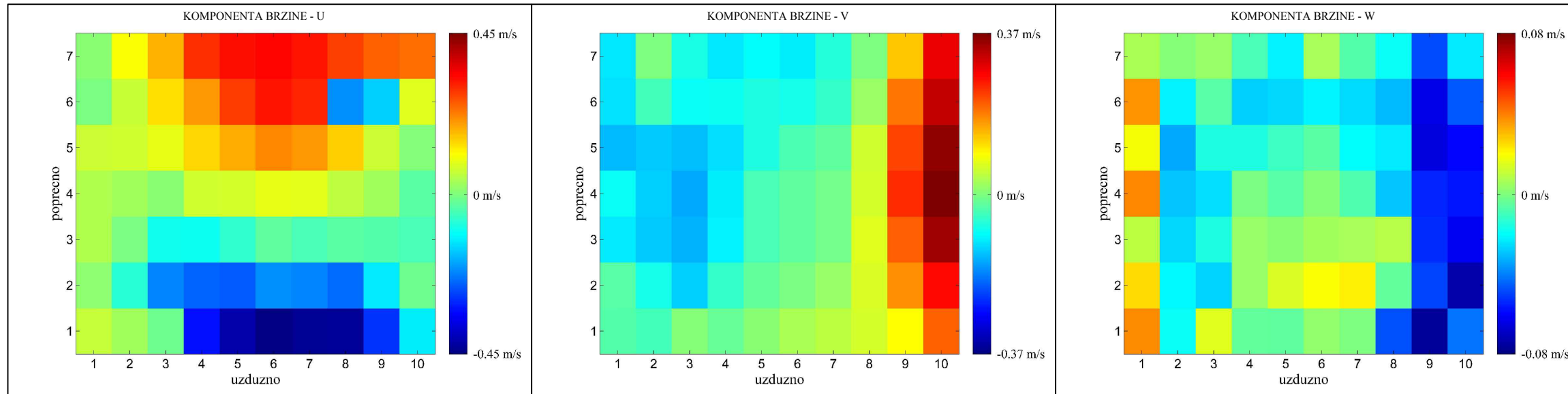


PRIDNENA RAVNINA - C

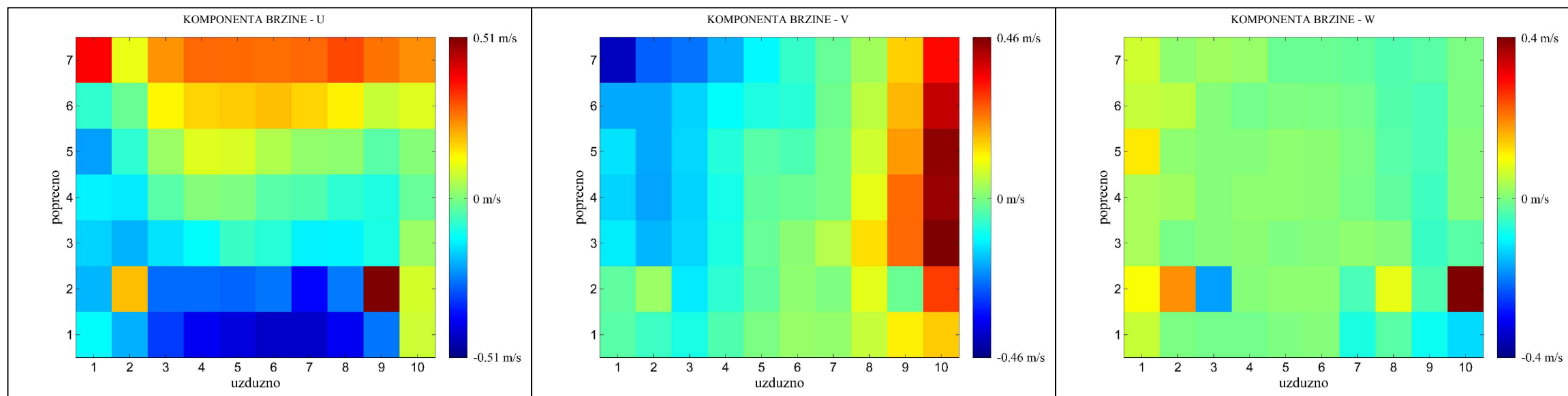


PRILOG 17: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-90-10

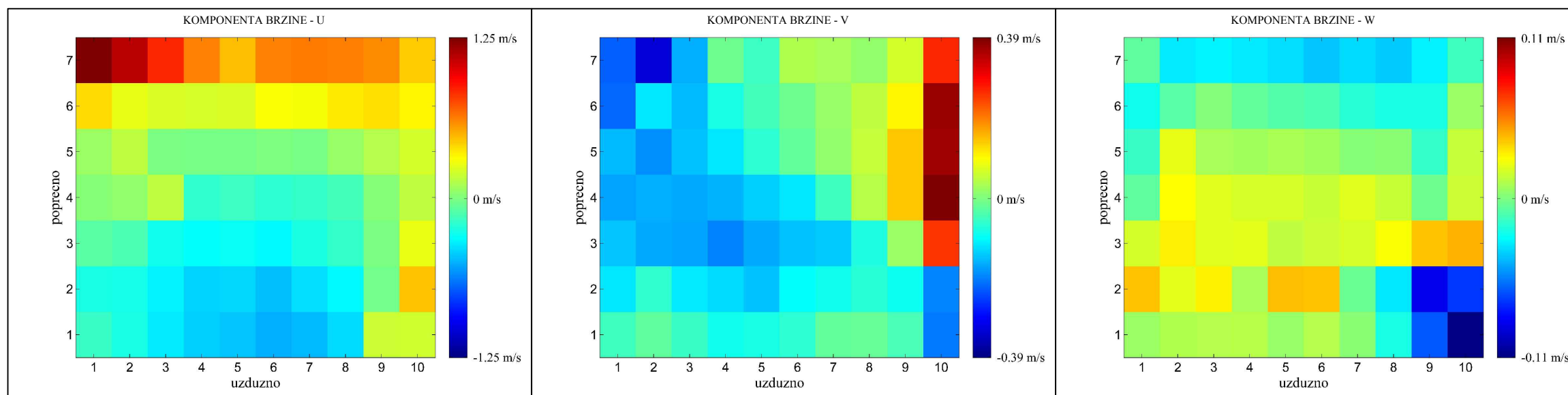
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

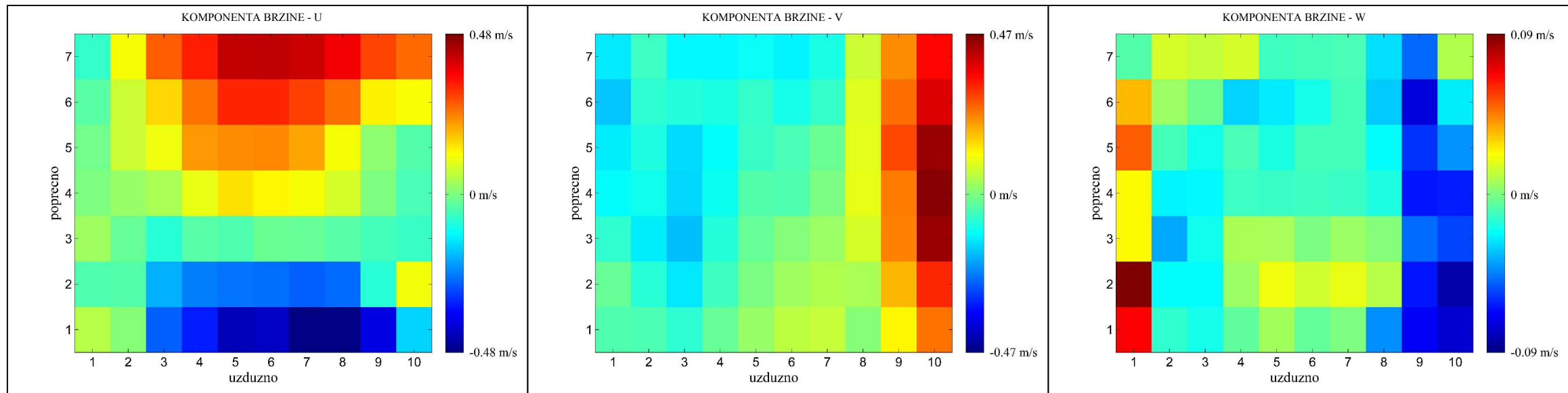


PRIDNENA RAVNINA - C

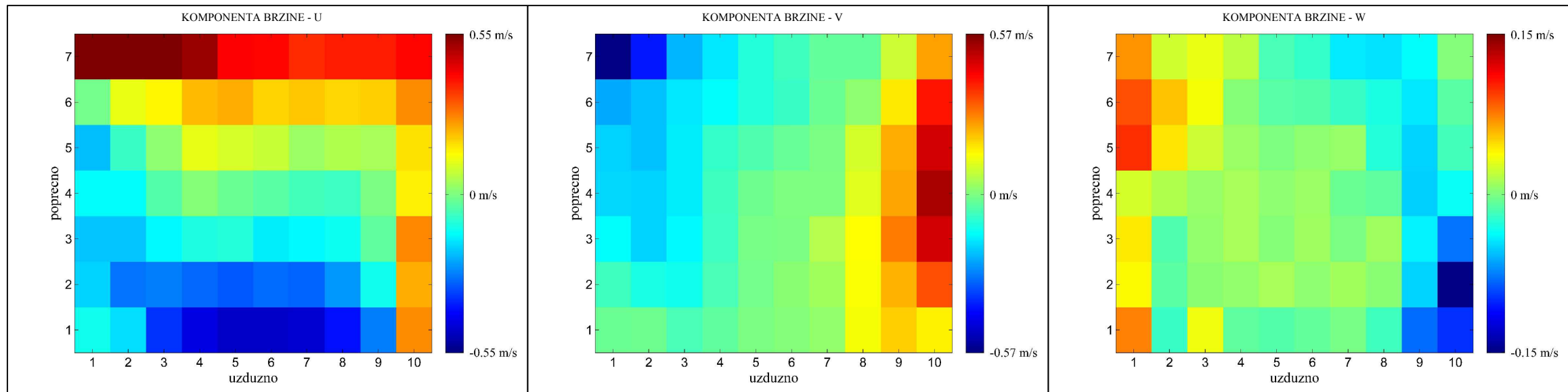


PRILOG 18: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-90-12

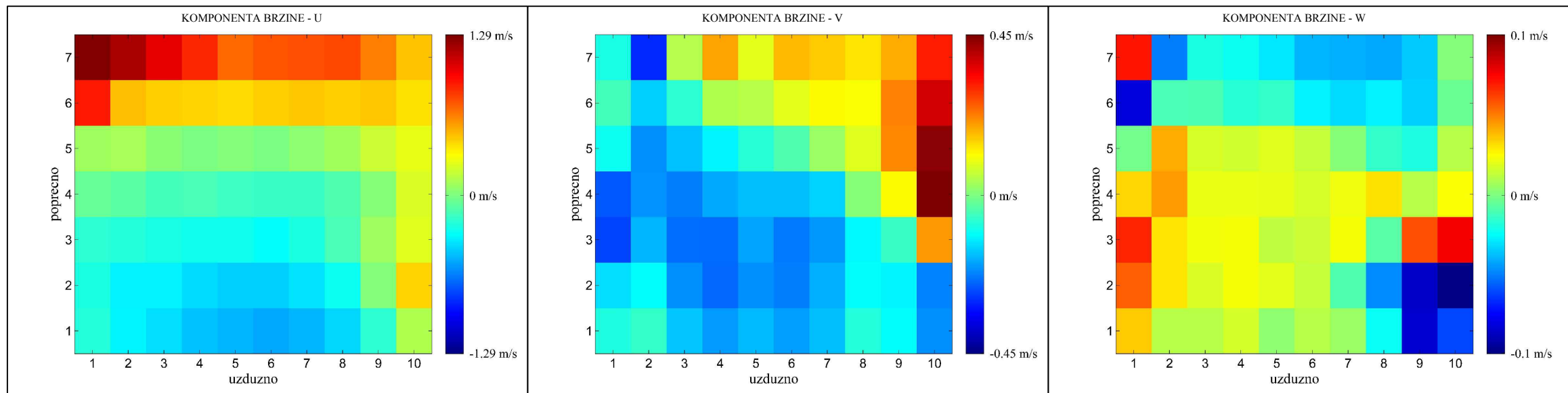
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

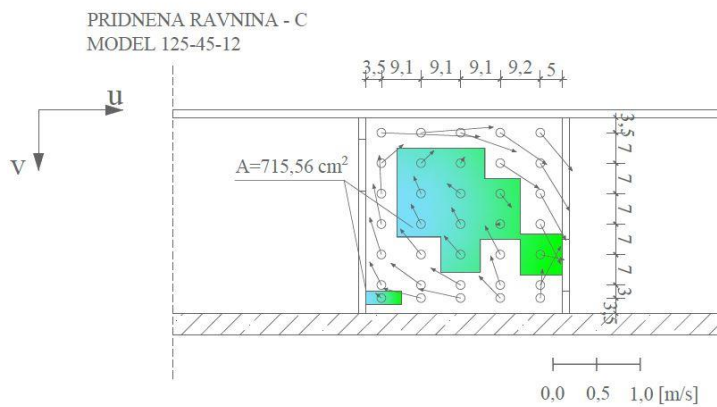
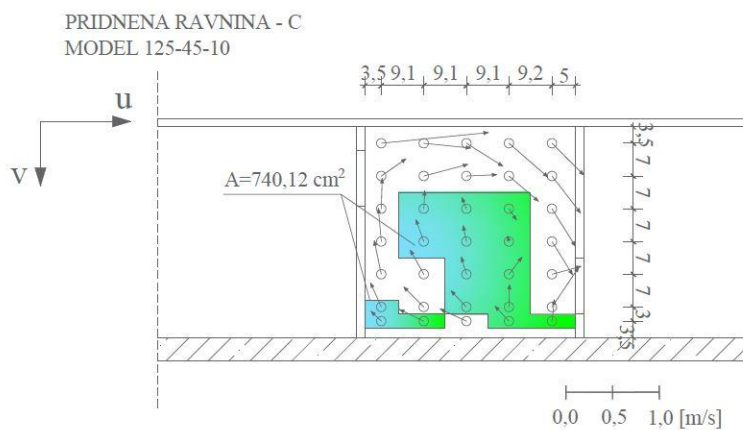
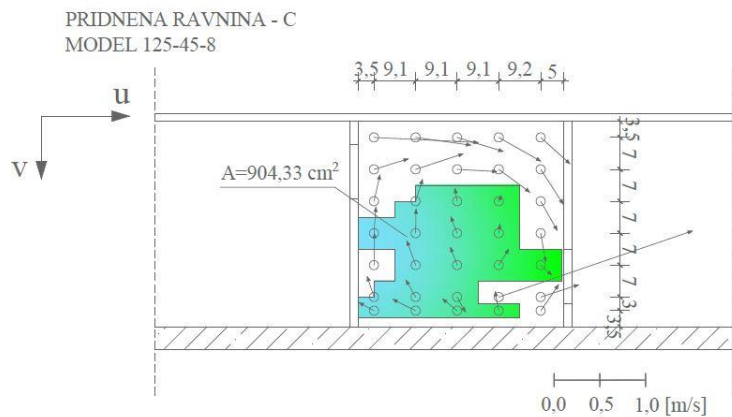


PRIDNENA RAVNINA - C



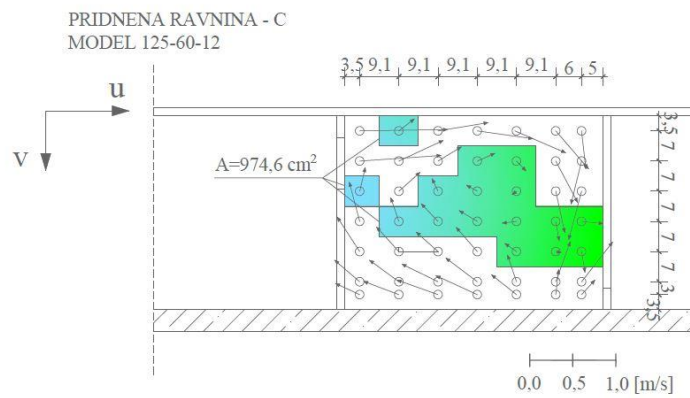
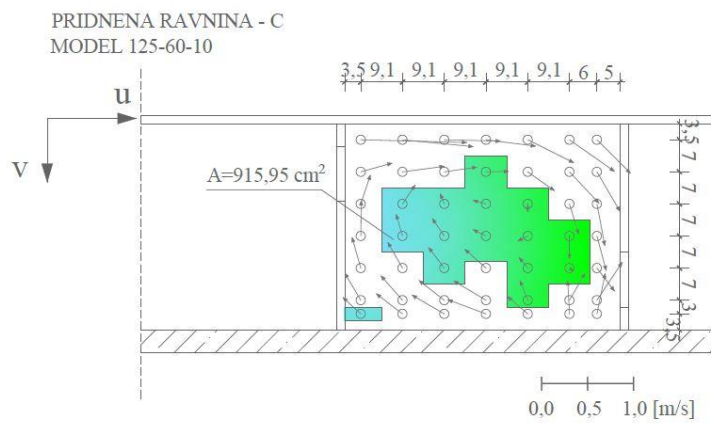
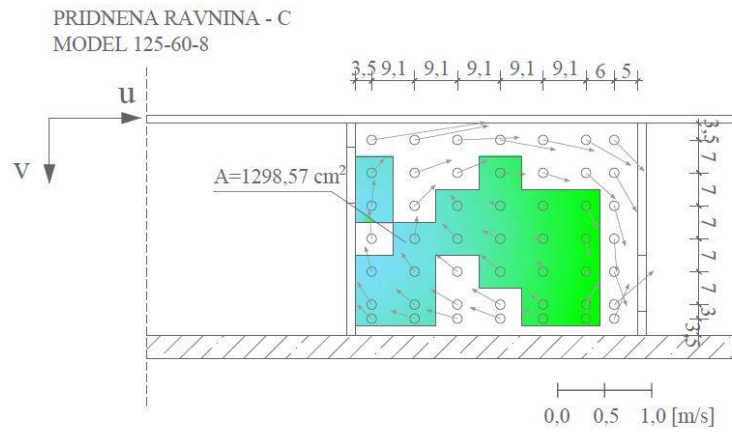
PRILOG 19:

PRIKAZ POVRŠINA ZA BRZINE MANJE OD 0,29 m/s



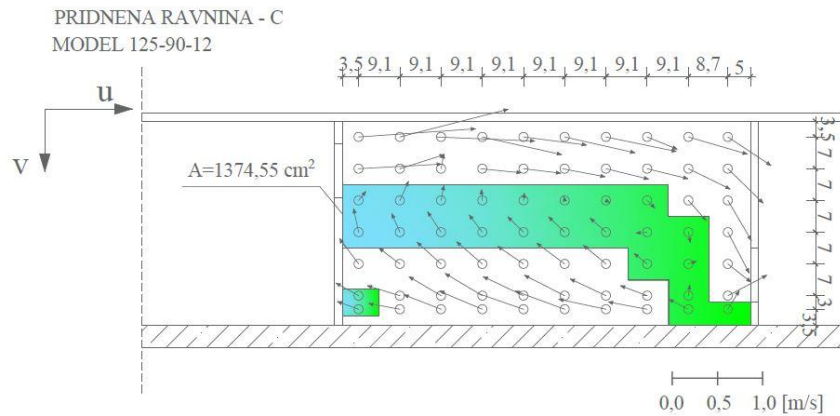
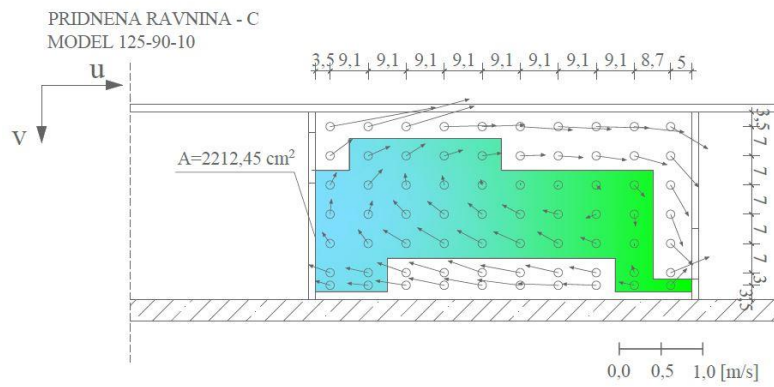
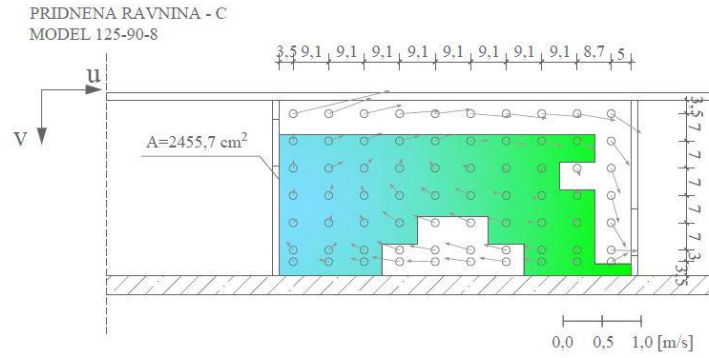
PRILOG 20:

PRIKAZ POVRŠINA ZA BRZINE MANJE OD 0,29 m/s



PRILOG 21:

PRIKAZ POVRŠINA ZA BRZINE MANJE OD 0,29 m/s





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET
Zavod za hidrotehniku
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Planiranje i projektiranje ribljih staza

Izvještaj 4

Numerički model za proračun tečenja

Zagreb, lipanj 2018.



SADRŽAJ

1	Uvod	1
1.1	Riblje staze bazenskog tipa	1
1.2	Riblje staze s vertikalnim otvorima	7
1.3	Denilove riblje staze	18
2	Numerički model	25
2.1	Opis diskretizacije mreže, te rubnih i početnih uvjeta	26
3	Rezultati ispitivanja numeričkim modelom	28
3.1	Riblje staze bazenskog tipa	28
3.2	Riblje staze s vertikalnim otvorom	35
3.3	Denilove riblje staze	42
4	Literatura	43

1 Uvod

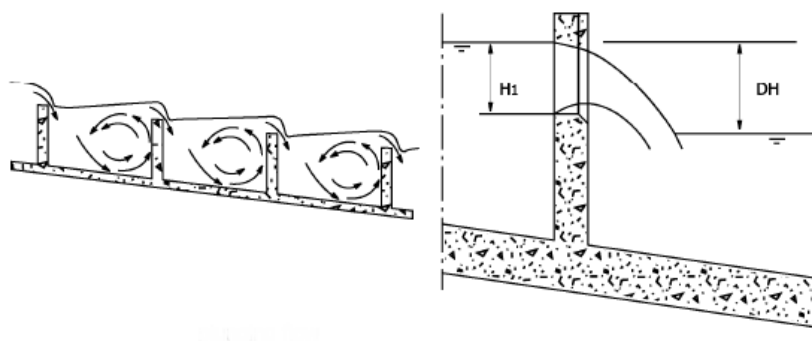
U ovom Izvještaju dan je opis numeričkog modela korištenog za određivanje rasporeda polja tečenja u ribljim stazama tehničkog tipa: bazenskog tipa, tipa s vertikalnim otvorima i Denilovih ribljih staza. Prije samog prikaza korištenog numeričkog modela kratko je opisano stanje područja na temelju kojeg se pristupilo analizi određenih geometrija te korištenju odabranog numeričkog modela.

Hidraulički uvjeti tečenja u ribljim stazama detaljnije se proučavaju posljednjih 30 godina. Najveći broj istraživanja usmjeren je na staze s vertikalnim otvorima koje su najraširenije u Sjevernoj Americi. U različitim studijama (Rajaratnam 1986), (Wu, Rajaratnam et al. 1999) i (Puertas 2004) analizirane su brzine tečenja u bazenima na fizikalnim modelima. Ograničenje fizikalnih modela predstavlja činjenica da mjerenjima nije moguće obuhvatiti istovremenu sliku polja tečenja brzina u svim točkama, zbog čega dolazi do raširene upotrebe numeričkih modela koji izračunima omogućuju istovremene rezultate na cijeloj domeni (Fujihara 2002), (Barton and Keller 2003), (Tarrade, Texier et al. 2008). U novije vrijeme proveden je velik broj analiza i usporedba numeričkih modela za primjenu kod određivanja uvjeta tečenja u ribljim stazama (Chorda 2010), (Wang, David et al. 2010), (Klein 2016) te usporedba numeričkih i fizikalnih modela (Bombač 2014).

1.1 Riblje staze bazenskog tipa

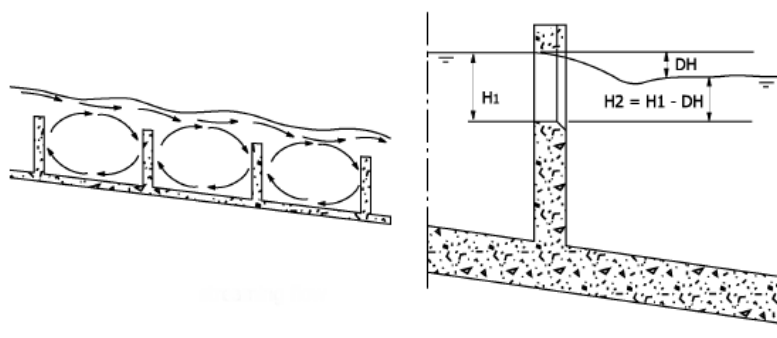
Riblje staze bazenskog tipa u stvari su vrlo stari koncept i prema nekim izvorima u Francuskoj su građene već prije više od 200 godina. Iako se riblje staze bazenskog tipa često koriste, postoji relativno malo eksperimentalnih istraživanja koja su provedena vezano za njih upravo iz tog razloga u ovom projektu posvećena im je veća pažnja kako bi se dobilo što više informacija i na fizikalnom i na numeričkom modelu.

Clay (1961) je prvi primjetio da tečenje u ribljim stazama s bazenima i pregradama može poprimiti dva oblika : „plunging“ i „streaming“. Kod plunging oblika tečenja voda s uzvodne pregrade ponire prema dnu bazena, pri čemu dolazi do disipacije energije uslijed turbulentnog miješanja i hidrauličkog skoka na dnu pada. Nizvodna razina vode kod ovakvog oblika tečenja nalazi se odmah ispod vrha pregrade (*Slika 1*).



Slika 1. Shema plunging tečenja

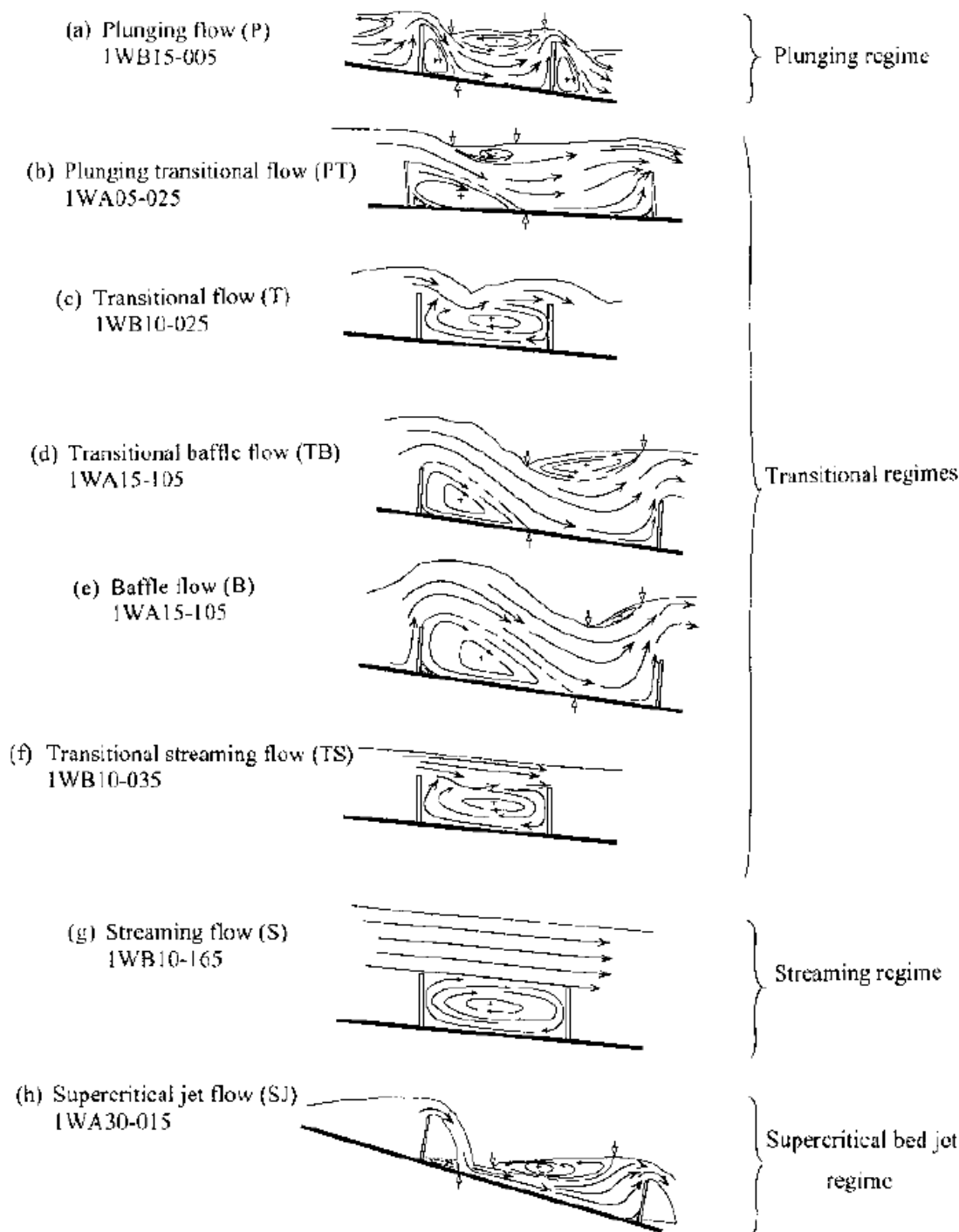
Kod streaming oblika tečenja, mlaz vode koji se javlja na pregradi između bazena ostaje na površini. Njegova energija se disipira u nizvodnom bazenu uslijed velikih recirkulacijskih vrtloga. Ovakav oblik tečenja nastaje u slučajevima kad nizvodna razine vode H_2 iznad vrha pregrade bude u rasponu 0,5-0,6 puta visine uzvodne razine vode H_1 iznad vrha pregrade, tj. za $H_1=0,5-0,6 H_2$ (Slika 2).



Slika 2. Shema streaming tečenja

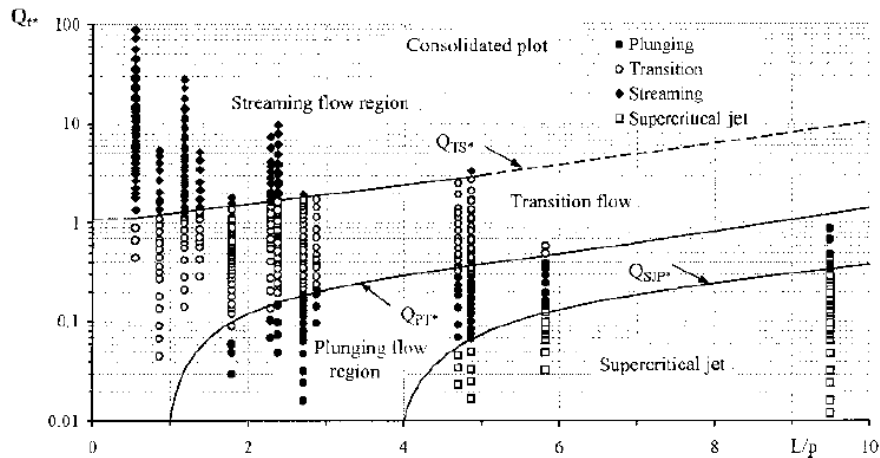
Sikora (1999) je napravio ukupno 435 eksperimenata na hidrotehničkom kanalu duljine 6 m, širine 0,56 m i visine 0,60 m za riblje staze s bazenima i pregradama bez otvora koristeći 5 različitih nagiba (5-30%), 12 različitih protoka (5-165 l/s), 3 pregrade različitih visina (1, 3/4 i 1/2 od fiksne visine $p=141$ mm) i 4 različite udaljenosti između pregrada (685, 335, 166, 77 mm). Ovi modeli su u mjerilu 1:10. Eksperimenti su potvrdili Clayova (1961) zapažanja o dva glavna režima tečenja, ali su i pokazala da za velik raspon nagiba, udaljenosti između pregrada i visina pregrada nastaje nekoliko podrežima tečenja uz dodatak silovitog mlaznog toka. Slika 3a predstavlja ponirući režim tečenja gdje ponirući mlaz uranja u bazen stvarajući dva rotacijska vrtloga. Prvi vrtlog u smjeru kazaljke na satu smješten je ispod samog ponirućeg mlaza između pregrade i dna kanala. Drugi vrtlog smješten je blizu površine i stvara se odmah nizvodno od mjesta gdje ponirući mlaz ulazi u bazen. Smjera suprotnog od kazaljke na satu, površinski vrtlog je sličan vrtlogu koji nastaje uslijed hidrauličkog skoka.

Slika 3b predstavlja tipičnu shemu tečenja i profil vodne površine za ponirući prijelazni režim tečenja. Iako ovaj oblik tečenja pokazuje neke sličnosti s ponirućim režimom, prisutne su značajne razlike u strukturi toka i profilu vodne površine. Površinski vrtlog je relativno kraći i plići, a vrtlog između pregrade i dna se proširuje nizvodno do sredine bazena. Uočeno je da ovaj podrežim nastupa odmah nakon potapanja pregrade. Slika 3c pokazuje prijelazni podrežim tečenja. Glavne osobine toka ovog podrežima su veći vrtlog u smjeru kazaljke na satu, povišeni ponirući mlaz, izostanak površinskog vrtloga i valovita površina vode. Slika 3d predstavlja prijelazni „baffle“ podrežim. Ovaj podrežim nalikuje prijelaznom ponirućem prijelaznom režimu, međutim nastaje isključivo kod potpune visine pregrade, za najveću udaljenost između pregrada (685 mm) i protoke veće od onih potrebnih za održavanje ponirućeg prijelaznog režima. U ovom režimu zbog relativno male veličine pregrada u usporedbi s veličinom ponirućeg mlaza, pregrade djeluju kao pragovi. Karakteristike ovog režima tečenja su jako valovita vodna površina i smještaj površinskog vrtloga bliže nizvodnoj pregradi. Daljnjim povećanjem protoka prigušenje se u potpunosti ostvaruje, pa se takav režim naziva prigušeni režim tečenja (*Slika 3e*). U ovom režimu, mjesto pada mlaza se nalazi u nizvodnijoj polovici bazena, i sa sve većim protocima se pomiče nizvodnije. Također, ovaj režim karakterizira potpun nestanak površinskog vrtloga. Slika 3f predstavlja prijelazni „streaming“ režim tečenja koji je gotovo identičan streaming tečenju, koji se sastoji od cirkulacijske ćelije u smjeru kazaljke na satu i prevladavajućeg površinskog toka. Slika 3h prikazuje siloviti mlazni režim toka. Čini ga ponirući mlaz koji pada u dno bazena tako da tvori siloviti mlaz, iza kojeg slijedi hidraulički skok.



Slika 3. Režimi i podrežimi tečenja prema Sikori (1999) i Eadu (2004)

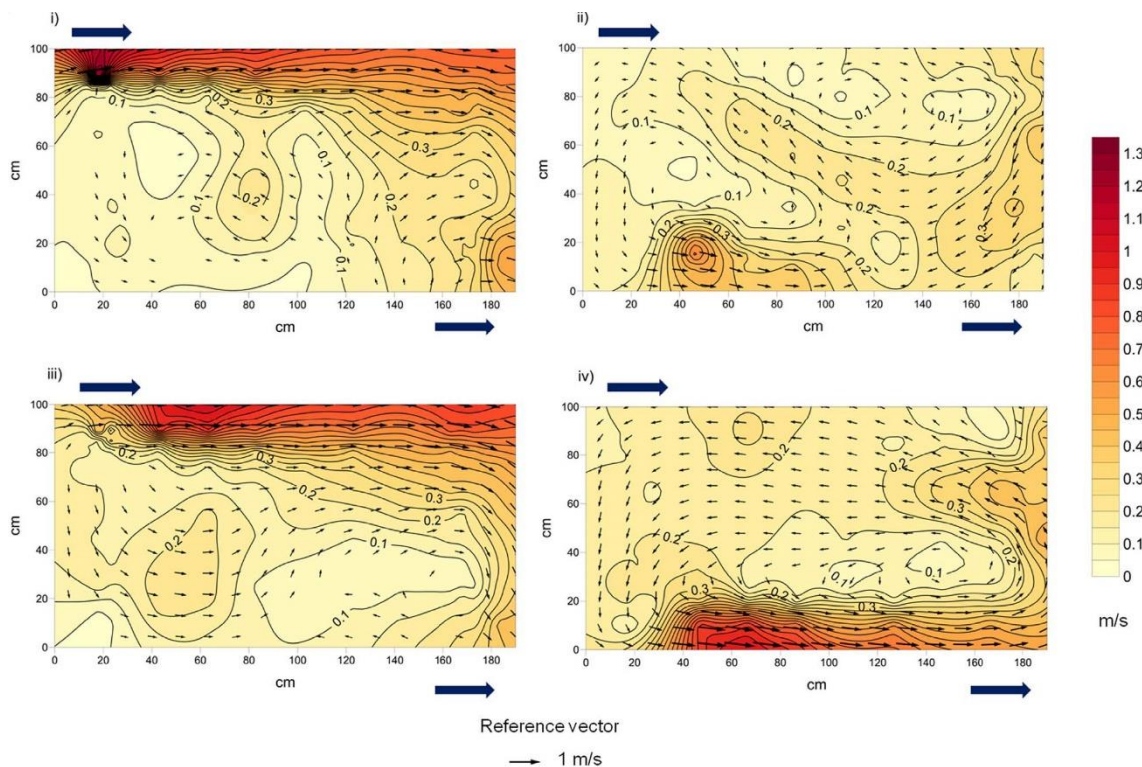
Iz dobivenih rezultata eksperimenata razvijene su dvije bezdimenzionalne varijable Q_t^* i L/p (gdje je Q_t^* bezdimenzionalni protok, a L/p odnos između duljine bazena i visine pregrade) iz kojih je moguće odrediti režim tečenja. Slika 4 prikazuje područja pojedinih režima tečenja u ovisnosti od Q_t^* i L/p .



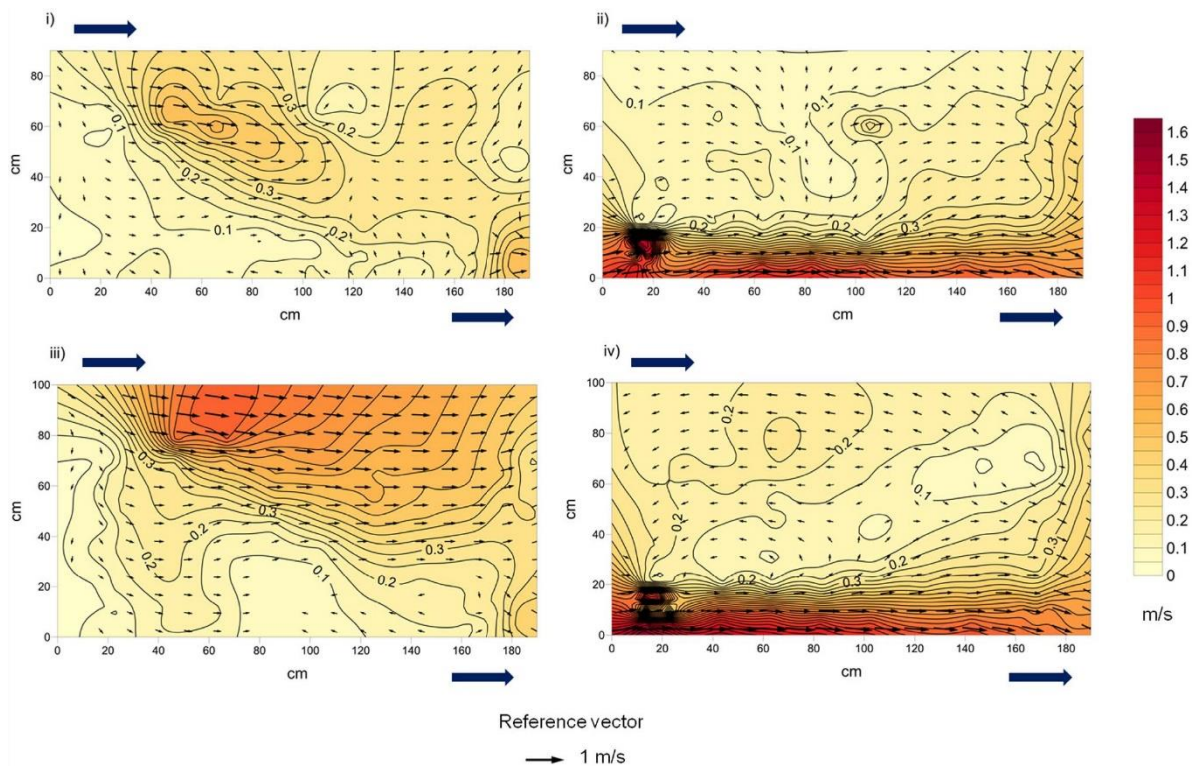
Slika 4. Područja režima tečenja u ovisnosti o Q^* i L/p (Ead, Katopodis et al. 2004)

Također, rezultati su pokazali da su profili brzina u oba režima tečenja slični.

Nadalje (Paulo Branco 2013) analizirali su ponašanje i performanse dviju vrsta riba s različitim ekološkim karakteristikama u punoj veličini eksperimentalnog bazenskog tipa riblje staze koja nudi dva različita režima protoka: „plunging“ i „streaming“ prikazana na slikama 4a i 4b.



Slika 4a Prikaz brzina tečenja u horizontalnim ravninama kroz sredinu otvora: gornji red „plunging“, donji red „streaming“ režim (Paulo Branco 2013)

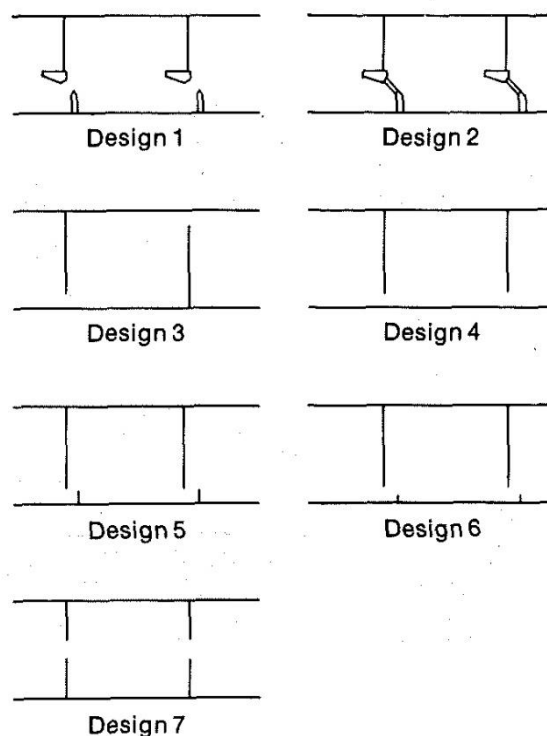


Slika 4b Prikaz brzina tečenja u vertikalnim ravninama kroz sredinu otvora: gornji red „plunging“, donji red „streaming“ režim (Paulo Branco 2013)

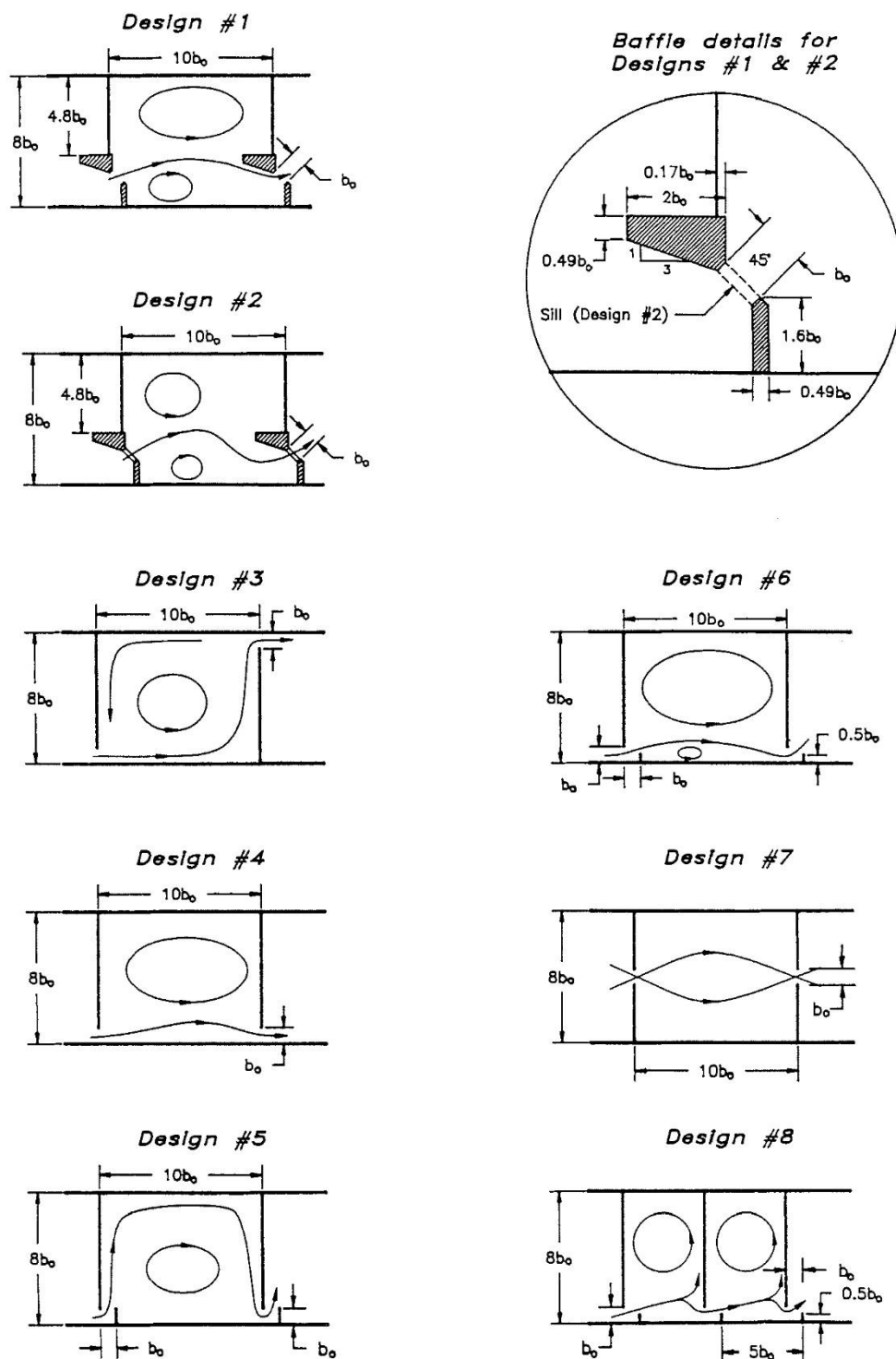
1.2 Riblje staze s vertikalnim otvorima

Riblje staze s vertikalnim otvorima jedne su od najčešće korištenih tipova tehničkih ribljih staza za uzvodnu migraciju riba. Čine ih pravokutan kanal s nagnutim dnom koji je vertikalnim pregradama podijeljen na niz bazena. Voda teče nizvodno prolazeći nizom vertikalnih otvora na pregradama iz jednog bazena u slijedeći. Vodni tok formira mlaz na otvoru između dva bazena, a energija tog mlaza se disipira miješanjem u bazenu.

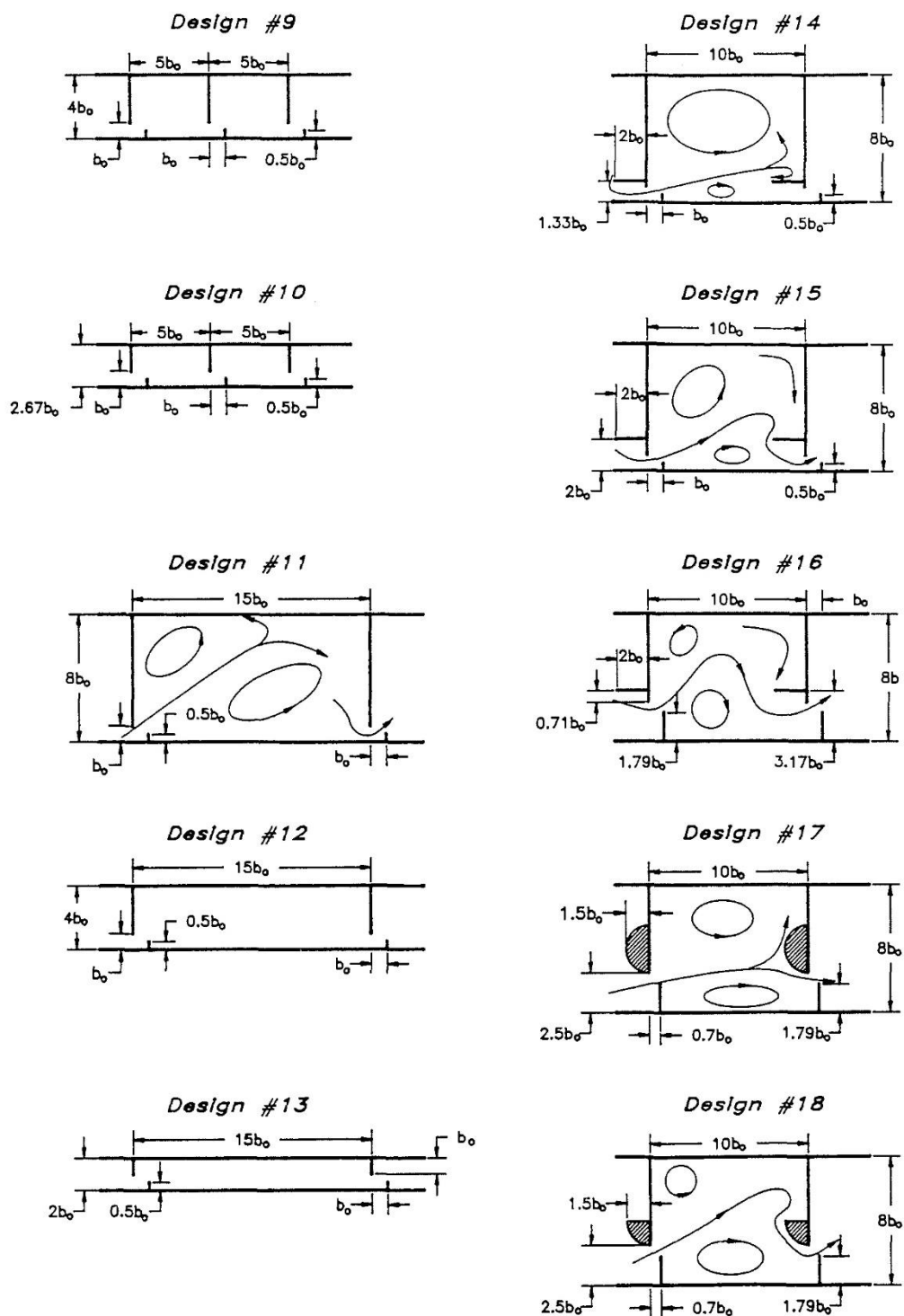
U ovom području proveden je veliki broj istraživanja. (Rajaratnam 1986) je proučavao protočne karakteristike sedam različitih ribljih staza s vertikalnim otvorima na modelima u četiri različita mjerila (slika 5). Primijetio je da se na otvoru stvara mlaz, koji prolazeći kroz bazen gubi brzinu i stvara određene cirkulacije u bazenu. Također, opazio je da je maksimalna brzina na otvoru v_{sm} gotovo jednaka izrazu $v = \sqrt{2g\Delta h}$.



Slika 5 . Analizirane geometrije prema (Rajaratnam 1986)



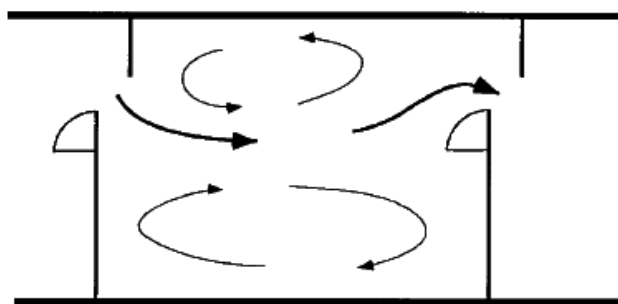
Slika 6a. Analizirane geometrije prema (Rajaratnam, Katopodis et al. 1992)



Slika 6b. Analizirane geometrije prema (Rajaratnam, Katopodis et al. 1992)

Nadalje, (Rajaratnam, Katopodis et al. 1992) je proširio istraživanja na veći broj geometrija (slika 6a i b). Isto tako proučavanjem jednog tipa riblje staze s vertikalnim otvorima (tip geometrije 6) koristeći širok raspon dimenzija poprečnog presjeka, ustanovio da se $10b_0$ i $8b_0$ mogu smatrati pogodnim vrijednostima za duljinu i širinu bazena (gdje je b_0 širina vertikalnog otvora na pregradi). Slično (Larinier 1998) preporuča vrijednosti za duljinu od 8-10 b_0 , a za širinu od 6-8 b_0 .

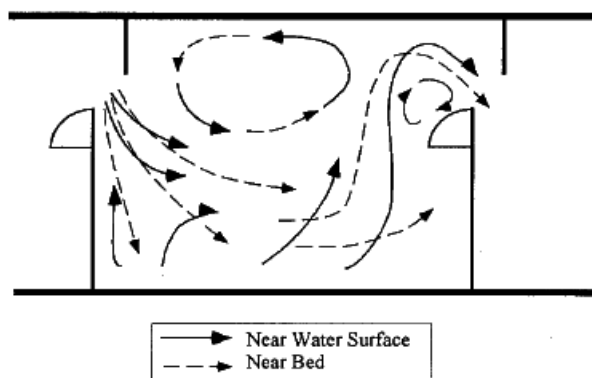
(Wu, Rajaratnam et al. 1999) su eksperimentirali na jednom od preporučenih (prema (Rajaratnam, Katopodis et al. 1992)) tipova ribljih staza s vertikalnim otvorom (tip geometrije 18) koristeći se različitim nagibima (5%, 10% i 20%) i različitim protocima. Eksperimenti su pokazali da se stvaraju dva karakteristična oblika tečenja. U prvom slučaju glavni tok se kreće s uzvodnog otvora kroz sredinu bazena, gdje se stvaraju dva velika recirkulacijska područja, do nizvodnog otvora (*Slika 7*). Ukupni volumen recirkulacijskih područja čini 73% ukupnog volumena vode u bazenu. Vodna površina je gotovo horizontalna i brzine u vertikalnom smjeru su zanemarive, pa se može promatrati kao 2D tečenje. Takav oblik tečenja je dobiven za većinu mjerenih protoka kod nagiba od 5%.



Slika 7. Prvi oblik tečenja (za padove od 5%) (Wu, Rajaratnam et al. 1999)

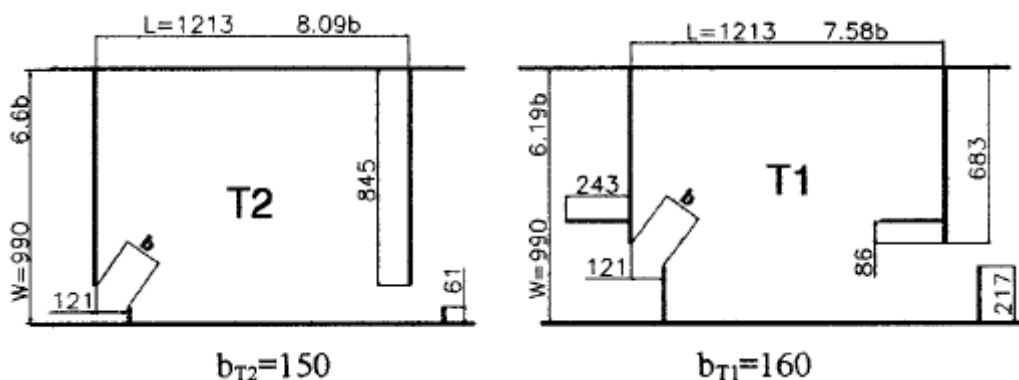
U drugom slučaju, kod nagiba 10%, značajan dio protoka iz uzvodnog otvora putuje uz dno prema bočnom zidu između duljih pregrada i dio tog protoka putuje uz dno do nizvodnog otvora. Ostatak protoka se uzdiže prema površini i putuje do nizvodnog otvora. Veliko recirkulacijsko područje se stvara na drugoj strani mlaza između kraćih pregrada i jedno manje recirkulacijsko područje kod dulje pregrade (*Slika 8*). Ukupni volumen recirkulacijskih područja čini 38% ukupnog volumena vode u bazenu. Postoje varijacije u dubinama vode u pojedinom bazenu i prisutne su izraženije brzine tečenja u vertikalnom smjeru pa se ovo smatra kao 3D tečenje. Ovakvo tečenje se dobilo za nagibe od 10 i 20%.

Također (Wu, Rajaratnam et al. 1999) su primijetili da tok na otvoru nije jednolik pravokutan mlaz okomit na otvor kao što se do tada pretpostavljalo. Uvidio je da maksimalne brzine ne nastaju na otvoru, već u bazenu na udaljenosti b_0 od otvora. Dobivene vrijednosti maksimalnih brzina su bile i do 15% veće od najvećih brzina na otvoru.



Slika 8. Drugi oblik tečenja (za padove od 10 i 20%) (Wu, Rajaratnam et al. 1999)

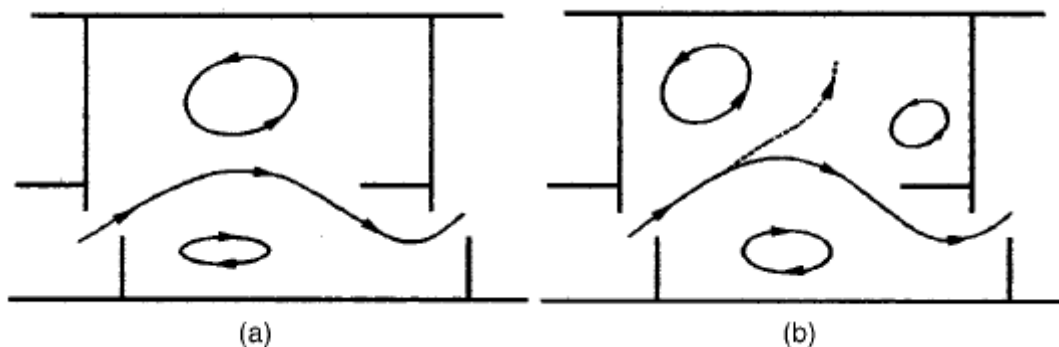
(Puertas 2004) je nastavio s eksperimentima na dva modela slična tipu geometrije 16 (tipu geometrije T1) i tipu geometrije 6 (tipu geometrije T2) prema (Rajaratnam, Katopodis et al. 1992) (Slika 9).



Slika 9. Tip geometrije T2 i tip geometrije T1 (Puertas 2004)

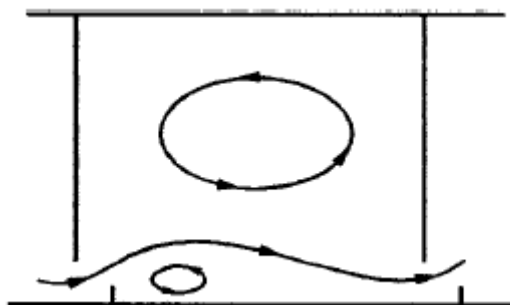
Koristio je dva nagiba slična onima od (Wu, Rajaratnam et al. 1999) 5,7 i 10,054% za koje je varirao protoke od 15-125 l/s. Za sve dizajne i padove primijetio je zanemariv utjecaj dubine na brzine toka, tj. jednoliko polje brzina po vertikalnom vodnom stupcu. Primijetio je i da su brzine neovisne od veličine protoka, čak i na otvoru. Također rezultati eksperimenata su pokazali da su vertikalne brzine jako male i da se njihov utjecaj može zanemariti pa se tečenje u ribljoj stazi s vertikalnim otvorima može promatrati kao dvodimenzionalno (2D).

Usporedbom eksperimentalnih rezultata tipova geometrije T1 i T2 primijećene su razlike u brzinama, strujanjima i recirkulacijskim područjima. Za tip geometrije T1 dobivene su zakrivljena trajektorija glavnog tečenja, manje brzine toka, ali i manja recirkulacijska područja (Slika 10).



Slika 10. Shema tečenja za tip geometrije T1 (Puertas 2004)

Za tip geometrije T2 dobivene su ravnija trajektorija glavnog tečenja u odnosu na T1, veće brzine toka, ali i veća recirkulacijska područja (Slika 11). Iako su za oba tipa geometrije dobivene prihvatljive vrijednosti energije disipacije, kod većih nagiba (10,054%) prisutna je veća energija na tipu geometrije T2 u odnosu na tip geometrije T1. Što je veća energija disipacije to je ribama teži prolaz ribljim stazama.

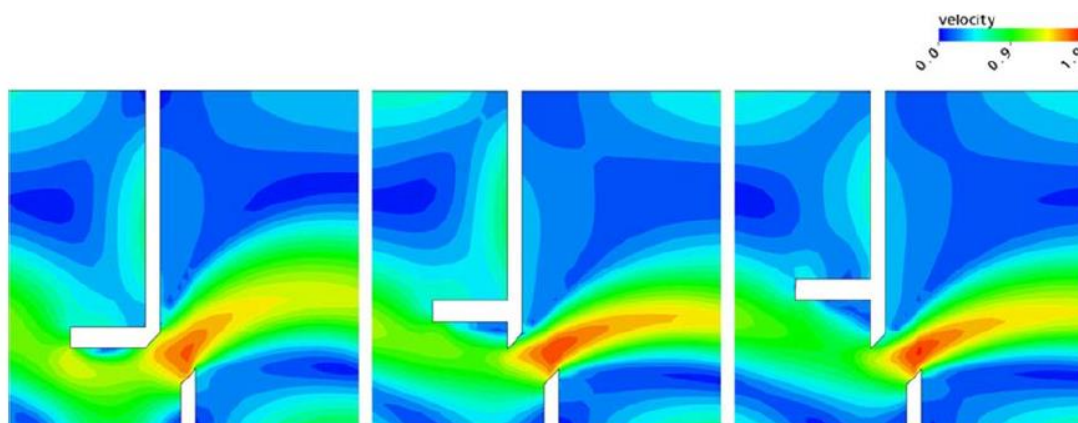


Slika 11. Shema tečenja za tip geometrije T2 (Puertas 2004)

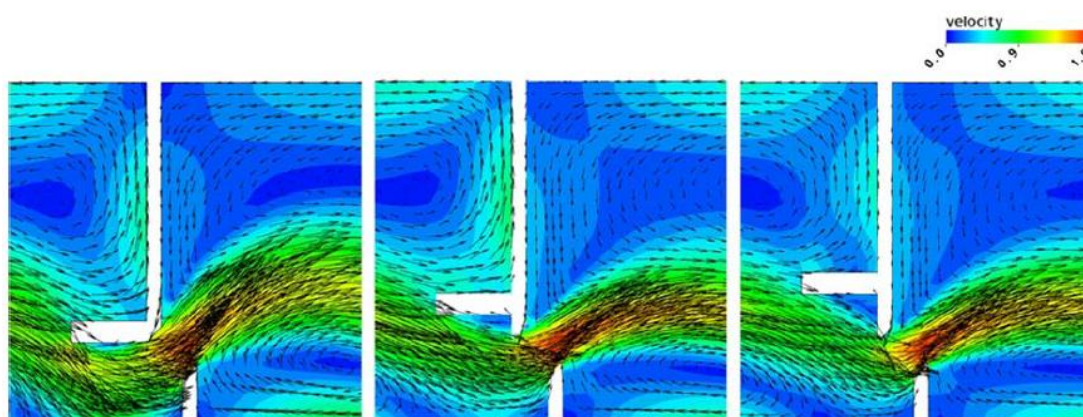
Ako se gleda s hidrauličkog aspekta, gdje se teži što manjim brzinama i energiji disipacije u ribljoj stazi, tip geometrije T1 je prihvatljivije rješenje. S druge strane ako je cilj osigurati što veća područja za odmor riba, a recirkulacijska područja služe kao odmorišta za ribe, tip geometrije T2 je povoljnije rješenje.

Iz analize (Puertas 2004), vidljivo je da je tip geometrije T1 koji sadrži elemente vođenja (usmjeravanja) toka, s hidrauličkog stajališta pogodniji za korištenje, stoga će se dalje u radu pokazati utjecaj veličine i položaja takvih elemenata.

Echteler (2006) je napravio numeričke simulacije tečenja u ribljim stazama s vertikalnim otvorima mijenjanjem položaja i duljine elementa vođenja toka na pregradama. Za različite položaje elementa vođenja, dobiveni su rezultati prikazani na slikama 12 i 13.



Slika 12. Shema tečenja i brzina toka za različite pozicije usmjerivača Echterler (2006)

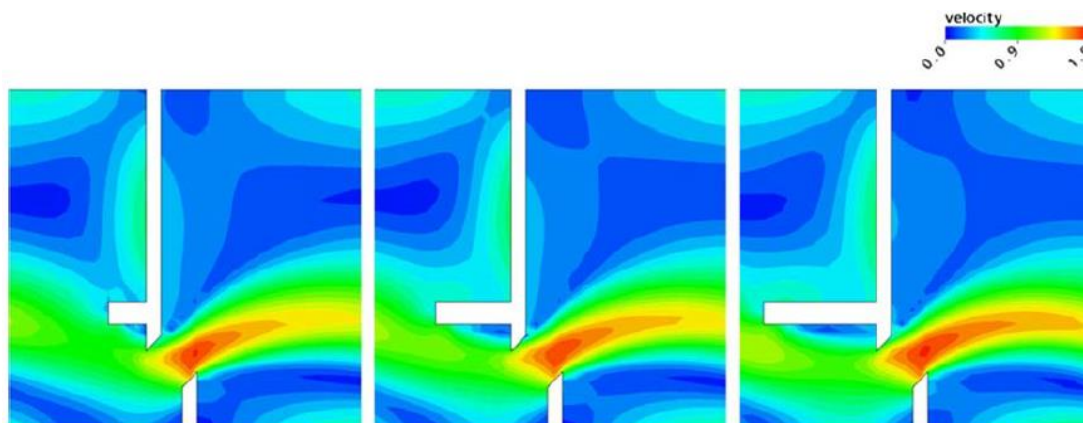


Slika 13. Shema tečenja i vektori brzina za različite pozicije usmjerivača Echterler (2006)

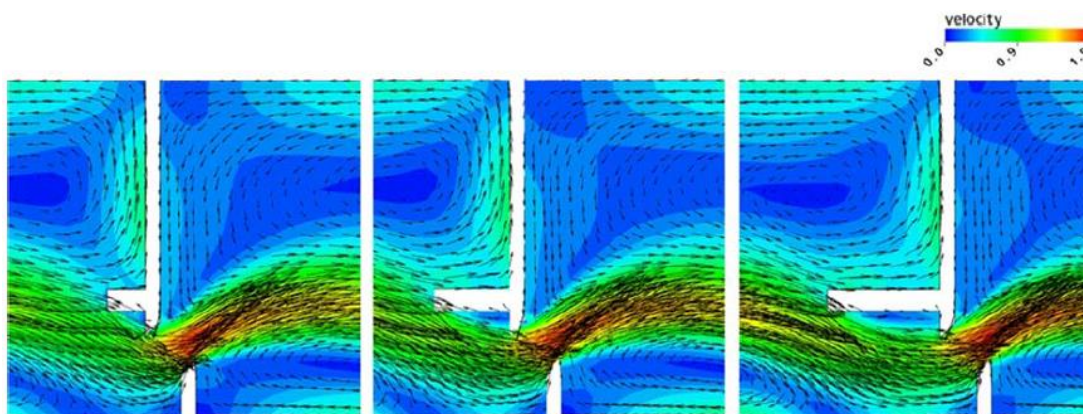
Slika 12 i 13 prikazuju da mijenjanjem pozicije elementa vođenja se mijenja kut ulaska glavnog toka u otvor. Nadalje, vidljivo je da pomicanjem elementa prema otvoru, glavno strujanje postaje sve zakrivljenije, polje brzina postaje uniformnije, vrijednosti maksimalnih brzina se smanjuju, a recirkulacijska područja pokrivaju sve manje površine.

Za različite duljine elementa vođenja, dobiveni su rezultati prikazani na *slikama 14 i 15*. Slike 14 i 15 prikazuju da promjena duljine elementa vođenja prvenstveno utječe na kut ulaska glavnog toka u otvor.

U principu, riblje staze s vertikalnim otvorima su se pokazale kao dobro rješenje za velik broj ribljih vrsta, ali je zapaženo da manjim ribama velika recirkulacijska područja stvaraju problem u migraciji.

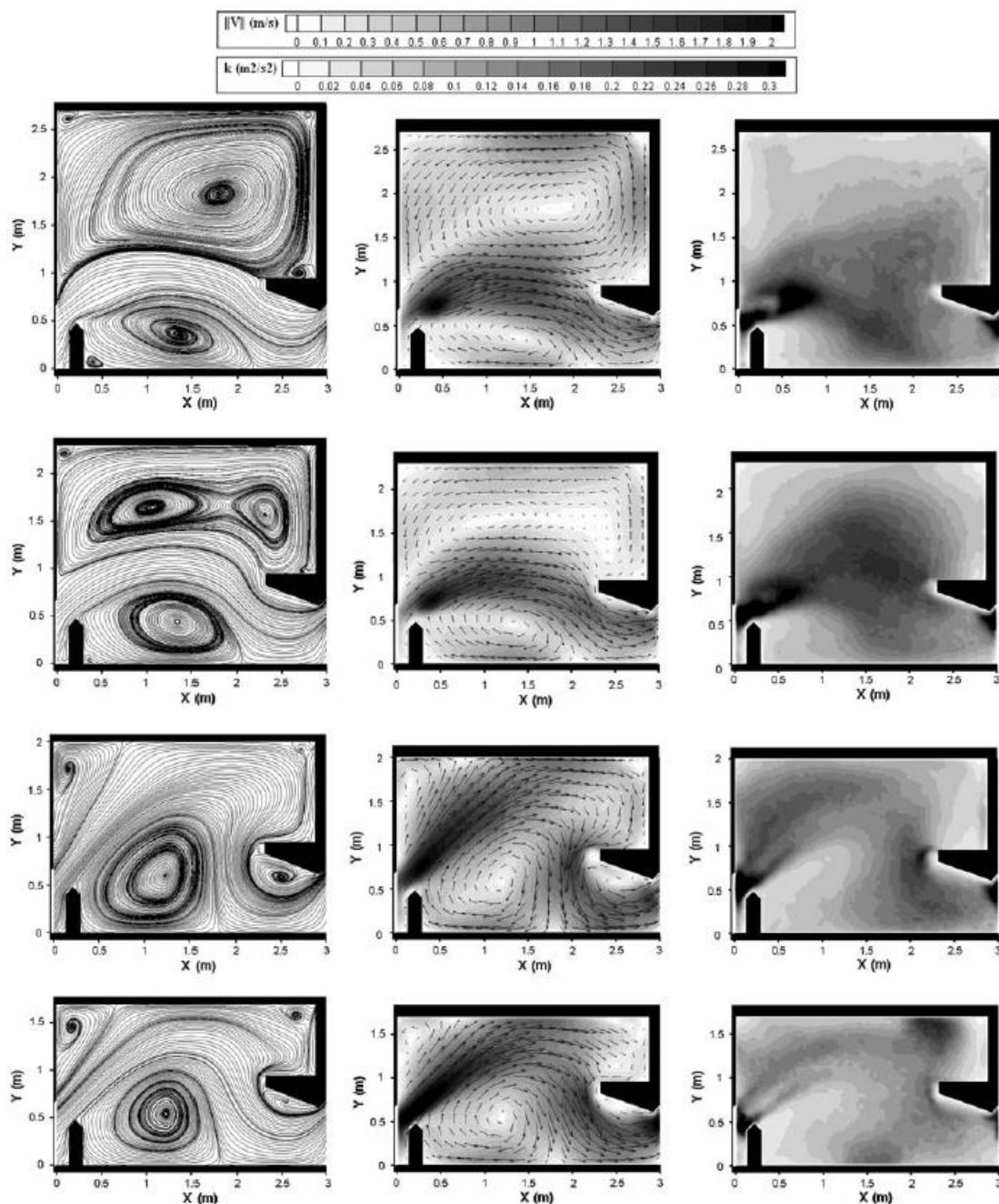


Slika 14. Shema tečenja i brzina toka za različite duljine usmjerivača Echeler (2006)



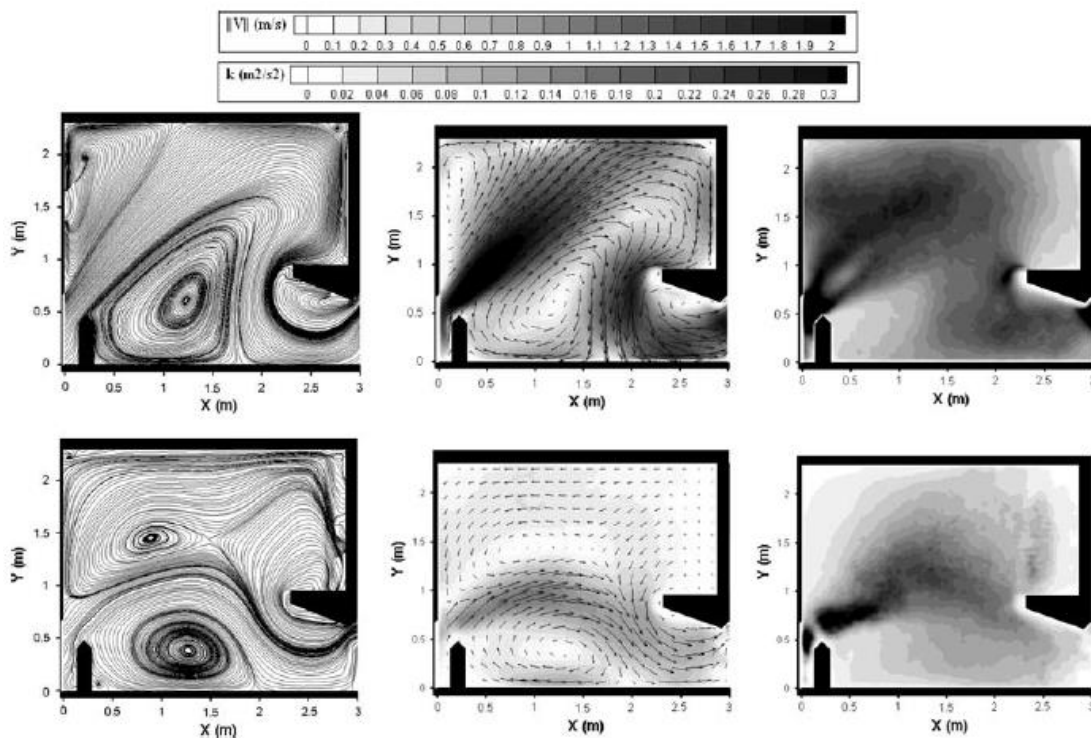
Slika 15. Shema tečenja i vektori brzina za različite duljine usmjerivača Echeler (2006)

(Tarrade, Texier et al. 2008) su eksperimentirali na raznim konfiguracijama ribljih staza s vertikalnim otvorima koristeći tri različita nagiba ($I = 5, 10, 15\%$), tri različita protoka ($Q = 576, 736, 864 \text{ l/s}$), četiri različite širine bazena ($B = 1.7, 2, 2.3, 2.7 \text{ m}$) i fiksnom duljinom bazena $L = 3.0 \text{ m}$ kako bi utvrdio kako se mogu prilagoditi riblje staze da se olakša prolazak manjih ribljih vrsta. U eksperimentima je koristio i cilindre različitih oblika i na različitim pozicijama u bazenu. Prvi eksperimenti su rađeni mijenjanjem širine bazena ($B = 1.7, 2, 2.3, 2.7 \text{ m}$) za konstantan nagib $I = 10\%$ i konstantan protok $Q = 736 \text{ l/s}$. Rezultati su potvrdili dosadašnje zaključke Rajaratnama (1986, 1992), (Wu 1999), (Puertes 2004) i drugih koji su uočili da su moguća dva oblika polja tečenja, i da se ono sastoji od glavne struje kojoj brzina opada prolaskom kroz bazen i recirkulacijskih područja raznih veličina ovisno o kojem je tipu polja tečenja riječ. Dobiveni rezultati su prikazani na slici 16 gdje se može primijetiti da smanjenjem širine bazena prvi oblik polja tečenja, kojeg čine pravilniji glavni tok i dva velika recirkulacijska područja, postupno prelazi u drugi oblik, kojeg čine zakrivljeniji glavni tok koji udara u suprotni zid, te jedan veliki i dva manja recirkulacijska područja.



Slika 16. Sheme tečenja, polja brzina i turbulencije za riblje staze različitih širina ($B=2.7, 2.3, 2, 1.7\text{ m}$) pri konst. $I=10\%$ i konst. $Q=736\text{ l/s}$ (Tarrade, Texier et al. 2008)

Za sve padove ($I = 5, 10, 15\%$) kod širine bazena $B=2,7\text{ m}$ dobije se prvi oblik tečenja, a za $B=2,0\text{ m}$ i $B=1,7\text{ m}$ dobije se drugi oblik tečenja. Samo u slučaju bazena širine $B=2,3\text{ m}$ oblik tečenja se pokazao ovisan o nagibu. Za manje nagibe $I=5\%$ i $I=10\%$ dobije se prvi oblik tečenja sličan onome za veću širinu bazena, a za $I=15\%$ drugi oblik tečenja sličan onome za manje širine bazena (Slika 17). Pokazalo se da povećanjem nagiba rastu brzine toka i turbulencija.



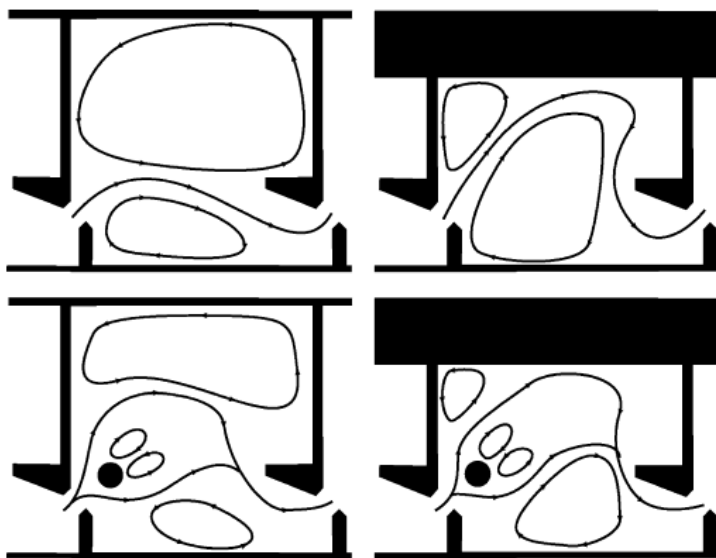
Slika 17. Sheme tečenja, polja brzina i turbulencije za riblje staze širine $B=2,3$ m pri različitim nagibima $l=15\%$ i $l=5\%$ kod konst. $Q=736$ l/s (Tarrade, Texier et al. 2008)

Mijenjanjem protoka ($Q=576, 736, 864$ l/s) pri konstantnom nagibu, širini i duljini bazena primijećen je utjecaj samo na dubinu vode u bazenu. Na oblik tečenja, brzine toka i turbulencije promjena protoka ima zanemariv utjecaj.

Drugi dio eksperimentiranja uključuje postavljanje raznih cilindričnih prepreka u bazen riblje staze s ciljem stvaranja povoljnijih hidrauličkih uvjeta za male ribe (manja recirkulacijska područja i manji gradijenti brzine između glavnog mlaza i recirkulacijskog područja). Svi cilindri i polucilindri ovdje korišteni imaju promjer jednak širini otvora b . Postavljanje prepreke u mlaz na sredini bazena kad je glavna struja već šira od same prepreke, uzrokuje zanemarivo smanjenje recirkulacijskih područja i brzinskog gradijenta između glavne struje i recirkulacijskog područja. Ako se pak, prepreka postavi u sama recirkulacijska područja oblik polja tečenja, recirkulacijska područja i brzinski gradijenti ostaju nepromijenjeni. Samo u slučaju postavljanja prepreke na mlaz odmah nakon otvora pokazao se učinkovitim.

Ubacivanjem polucilindra na izlazu iz otvora s ravnom stranom okrenutom prema mlazu, dolazi do razdvajanja glavnog mlaza na dva dijela. Recirkulacijska područja koja su bila prisutna prije postavljenog polucilindra nestaju, ali se stvara jedno veliko recirkulacijsko područje nizvodno od prepreke i povećavaju se brzinski gradijenti zbog oštih rubova polucilindra što čini ovakvu konfiguraciju neprihvatljivom. Postavljanjem polucilindra sa zaobljenom stranom prema mlazu nije rezultiralo boljim uvjetima od gore navedenih.

Postavljanjem cilindra na izlazu iz otvora, omogućilo je postizanje nekih pozitivnih i ublažavanje negativnih efekta polucilindra. Strujanje zaokružuje cilindar, ali se smanjuje razdvajanje zbog nedostatka oštrog ruba na prepreci. Usprkos tome, glavni tok se dovoljno proširi da uzrokuje smanjenje dva recirkulacijska područja na svakoj strani riblje staze. S druge strane, kao i kod polucilindra, iza cilindra nastaje novo recirkulacijsko područje čija veličina ovisi o udaljenosti cilindra od otvora (*Slika 18*).



Slika 18. Shema tečenja bez i s postavljenim cilindrom (Tarrade, Texier et al. 2008)

Što je veća udaljenost to je manje novonastalo recirkulacijsko područje, ali je tok uži i stara recirkulacijska područja su veća. Također, zbog odsustva oštrog ruba prepreke brzinski gradijenti između glavnog mlaza i recirkulacijskih područja je manji što olakšava prolaz malim ribama. Problem recirkulacijskog područja nizvodno od cilindra pokušalo se umanjiti ubacivanjem još jednog cilindra nakon prvog cilindra, no takva konfiguracija nije pokazala pozitivne promjene na polje tečenja i recirkulacijska područja.

1.3 Denilove riblje staze

Denilove riblje staze, koje su dobile naziv prema svome izumitelju G. Denilu (1909. godine), sastoje se od pravocrtnog pravokutnog kanala u koji su postavljene pregrade u pravilnim i kratkim razmacima, nagnute suprotno od smjera tečenja vode. Tokom godina je bilo razvijano mnogo verzija Denilovih ribljih staza, no danas se najviše upotrebljavaju staze „U“ oblika, koje su se pokazale kao najfunkcionalnije.

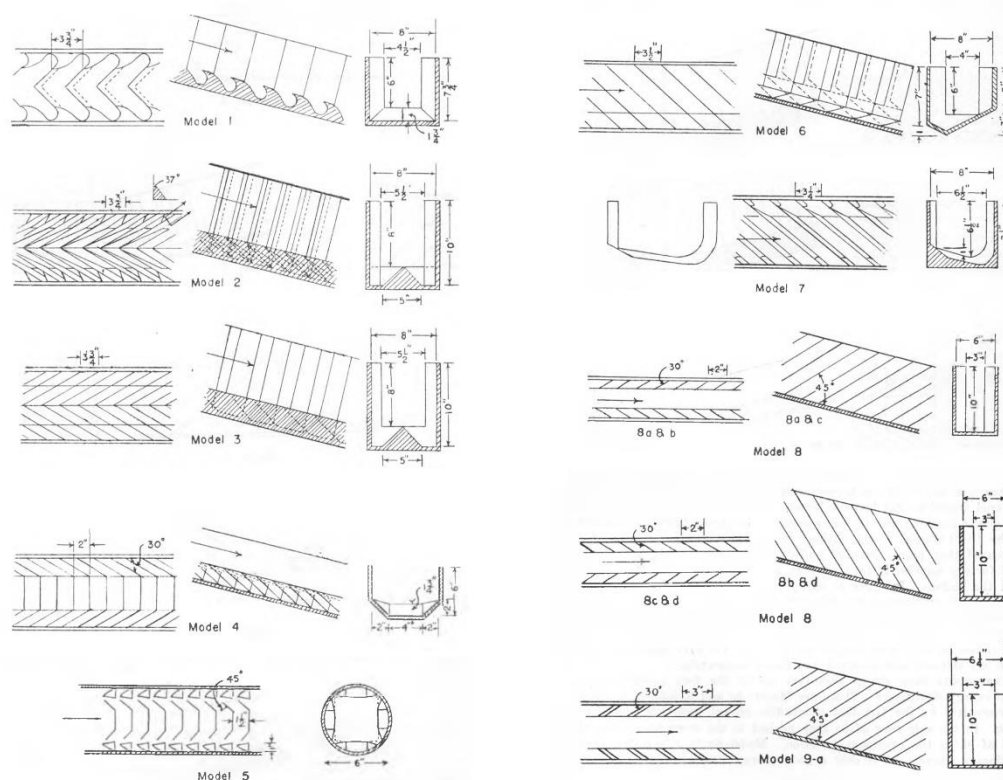
Karakteristična za ovu vrstu staza je velika disipacija energije i nastajanje uspora u području između pregrada, što uzrokuje manje brzine toka pri dnu. To pogoduje ribama u njihovom prelasku staze, te također omogućuje projektiranje ribljih staza većih nagiba, i samim time manjih duljina. U slučaju većih dionica potrebno je napraviti odmorišta za ribe. Također, jedna od prednosti Denilovih ribljih staza su i veliki protoci, koji privlače ribe i olakšavaju usmjeravanje riba u riblju stazu.

Denilova istraživanja trajala su trideset godina s prekidima, a uključivala su opširna opažanja i monitoring na ribljim stazama u prirodi kao i laboratorijska hidraulička ispitivanja na modelima čiji je cilj bio poboljšati prvobitni dizajn. Tako su Denilovim postupnim usavršavanjem geometrije nastale riblje staze preporučenih dimenzija (tablica 1) koje se i danas smatraju najboljima u smislu disipacije energije. McLeod i Nemenyi 1940. godine, u SAD-u, provode opširno istraživanje na zahtjev Iowa Conservation Commission-a. Cilj je bio riješiti problem projektiranja ribljih staza za uvjete vodotoka u saveznoj državi Iowa, budući da su sva dotadašnja istraživanja vezana za denilove riblje staze bila usmjerena na europske vodotoke i riblje vrste. Dotad ugrađene riblje staze u Iowa pokazale su se u većoj mjeri neuspješnima, uglavnom zbog problema privlačenja riba u sam ulaz riblje staze. Istraživanje McLeoda i Nemenyia baziralo se na četrdeset različitih laboratorijskih fizikalnih modela bazenskih i denilovih ribljih staza. Svaki model je testiran na tri različita nagiba (15%, 25% i 35%) te dvije do tri različite dubine vode.

Nakon ispitivanja u laboratoriju, oni modeli koji su pokazali dobre karakteristike disipacije energije i druge povoljne osobine, izvođeni su u prirodi kao pilot projekti. Kao takvi, modeli su na lokaciju postavljeni u paru kako bi se njihova efikasnost mogla direktno usporediti. Za svaki model mjereno je vrijeme i postotak uspješnosti prolaska ribe kroz riblju stazu. Dobiveni podaci uspoređivani su među različitim geometrijama pregrada Denilovih ribljih staza. Zaključak njihovog istraživanja bio je da svaka vrsta riblje staze ima svoja ograničenja, ali da su Denilove riblje staze najučinkovitije po disipaciji energije i da se mogu primjeniti i prilagoditi gotovo svim lokalnim uvjetima. Na temelju svojeg istraživanja preporučili su nagib kanala do 25% i visinsku razliku od 2 metra (bez odmarajućeg bazena).

Tablica 1 Preporučene veličine za projektiranje Denilovih ribljih staza za riblje vrste na području RH prema (FAO 2002)

širina kanala	[m]	0,6-0,9
nagib	[%]	13,5-20,0
	1:n	1:7,4 – 1:5
protok	m ³ /s	0,25-0,60
širina pregrade	b _a /b	0,5-0,6
razmak pregrada	a/b	0,5-0,9
udaljenost najniže točke otvora i dna	c ₁ /b	0,23-0,32
dubina trokutnog presjeka	c ₂ /c ₁	2

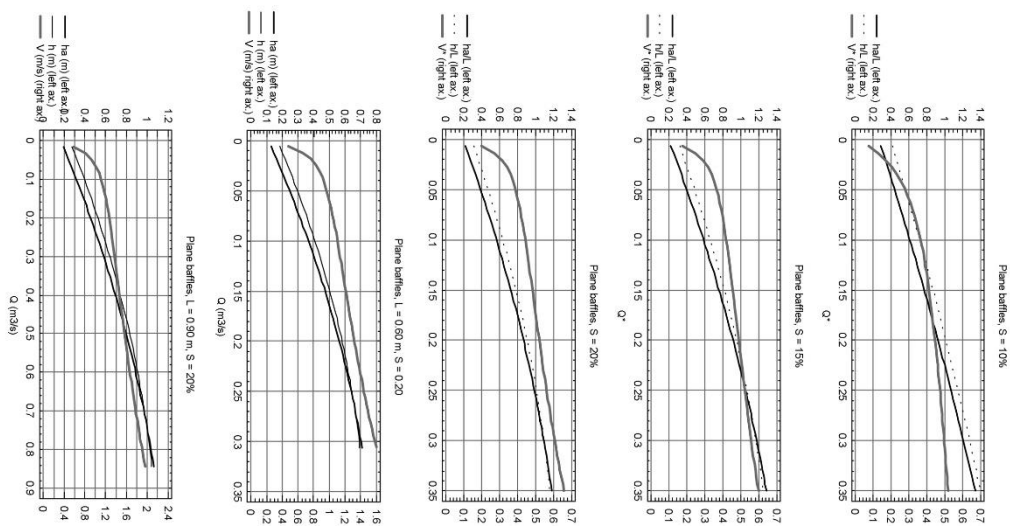
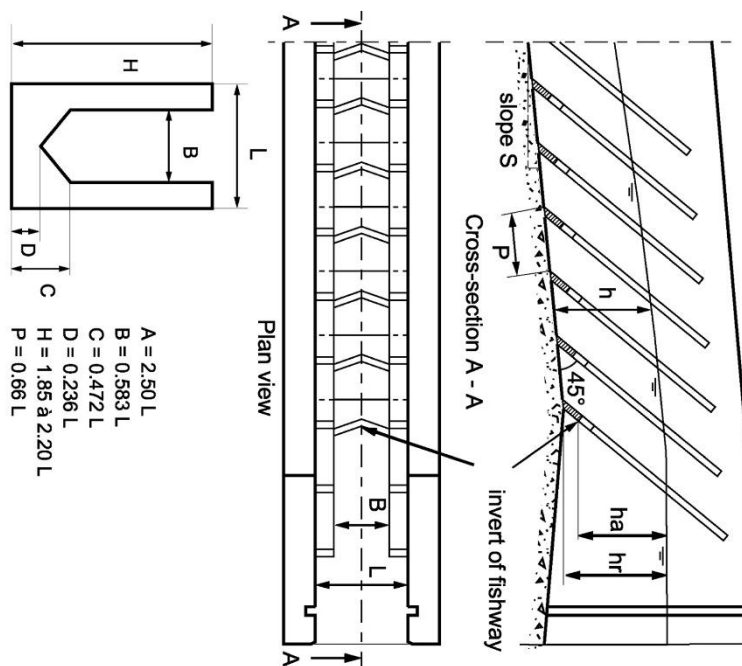


Slika 19 Različiti modeli Denilovih ribljih staza prema . McLeod i Nemenyi

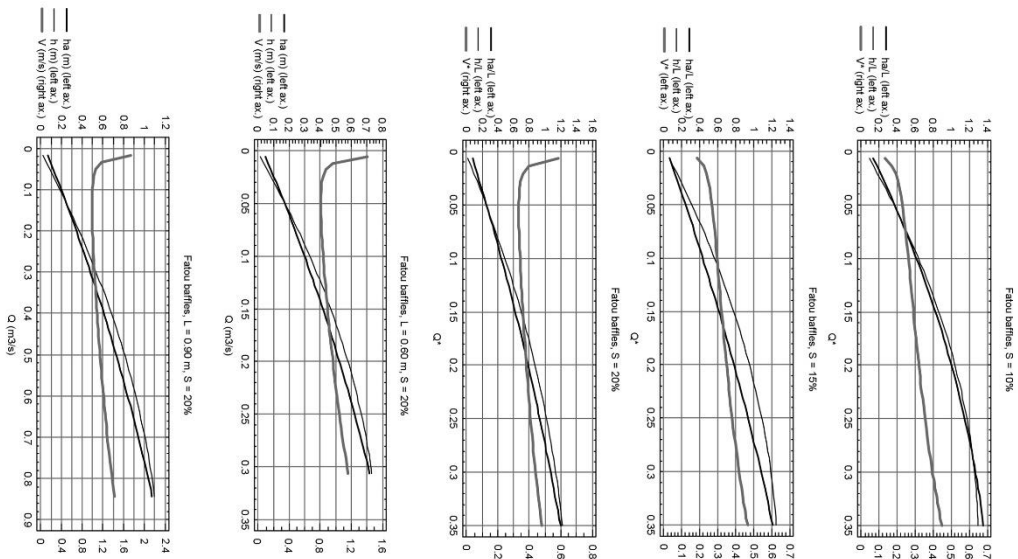
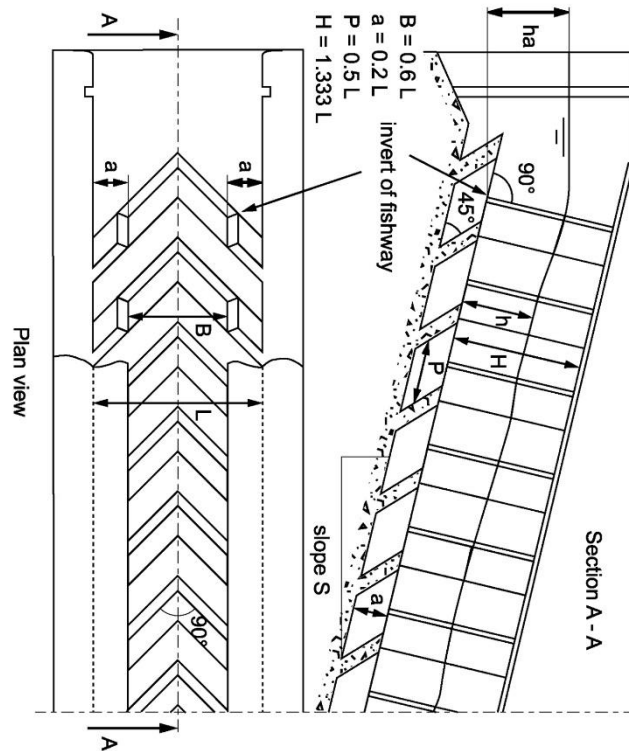
Larinier i Miralles u svom radu (1981.) opisuju istraživanje koje je provedeno na modelima ribljih staza s pregradama u prirodnoj veličini u mjestu Pont Crouzet, u Francuskoj. Model se sastojao od dva bazena u kojima su bile ribe i od riblje staze između njih koja je široka 0.3 m i duga 4.6 m, s promjenljivim nagibom do 20%. Cilj istraživanja bio je pronaći četiri do pet tipova pregrada koje bi se mogle primjenjivati u različitim uvjetima. Istovremeno su promatrane i plivačke sposobnosti lokalnih ribljih

vrsta (smeđa i šarena pastrva) što je također od velike važnosti. Istraživanje je pokazalo da, iako su neke vrste pregrada povoljne u hidrauličkom smislu, ne znači da su povoljne i u biološkom smislu za ribe, i obrnuto. Svi dobiveni rezultati, osim brzine, prikazani su bezdimenzionalno kako bi se mogli primjeniti na riblje staze bilo koje veličine. Modele koje su ispitivali nazvali su na sljedeći način: visoko aktivne pridnene pregrade, pregrade u jednoj ravnini, bočne pregrade, Fatou pregrade, V pregrade, visoko aktivne bočne pregrade i visoko aktivne pridneno bočne pregrade. Ono što su oni nazvali pregradama u jednoj ravnini odgovara osnovnim Denilovim ribljim stazama danas (Slika 2.). Rezultati su pokazali da se kod takvog tipa pregrada najmanje brzine javljaju pri dnu i da se povećavaju prema površini, povećanjem protoka i nagiba generalno rastu brzine u ribljoj stazi. Promatranje riba pokazalo je da ribe traže zonu manjih brzina i da veće (odrasle) ribe mogu lakše savladati iste uvjete. Autori ističu da je odnos protoka i razine gornje vode i odnos protoka i dubine vode u stazi jako bitan za određivanje dimenzija i smještaj riblje staze.

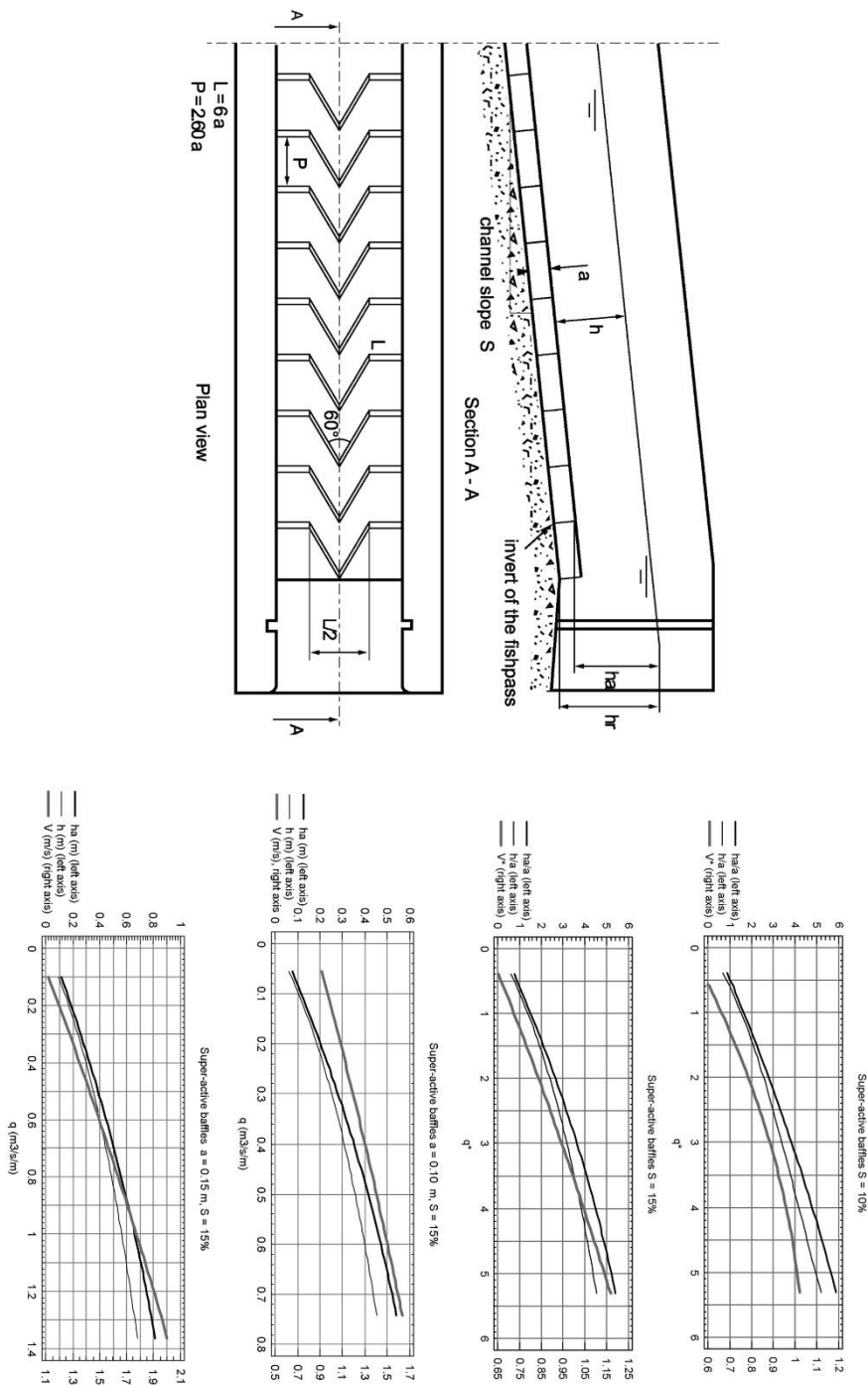
(Larinier 2002) uspoređuje do tada izvedene modele i sve slične (riblje staze s različitim pregradama) Denilovih ribljih staza te ih dijeli na one kojima su pregrade u kanalu postavljene na dnu, na one kojima su pregrade postavljene samo na bočnim stranama kanala i na one kojima su pregrade postavljene i na dnu i na bočnim stranama. Karakteristike geometrije pregrada dane su bezdimenzijskim odnosima kako je prikazano na slikama 20. Larinier uvodi pojam hidrauličnih i bioloških radnih raspona za riblje staze s pregradama. Tako se hidraulični radni raspon kreće od najmanjeg potrebnog protoka da se formiraju spiralne strujnice u ribljoj stazi do maksimalnog protoka iznad kojeg ne dolazi do spiralnog tečenja. Biološki radni raspon ovisi o vrsti ribe i ograničen je maksimalnom brzinom koju pojedina vrsta može savladati te ga je, za razliku od hidrauličkog raspona koji se lako odredi u laboratoriju, puno teže odrediti. Nadalje, Larinier daje nekoliko preporuka, zaključuje da se uz održavanje konstantnog pada dna kanala i povećavanje dimenzija pregrada, brzina vode povećava, a da se smanjenjem dimenzija pregrada smanjuju brzine, ali i njihova hidraulička učinkovitost. Stoga se preporuča uzimanje najmanjih mogućih dimenzija pregrada koje su u hidrauličkom radnom rasponu.



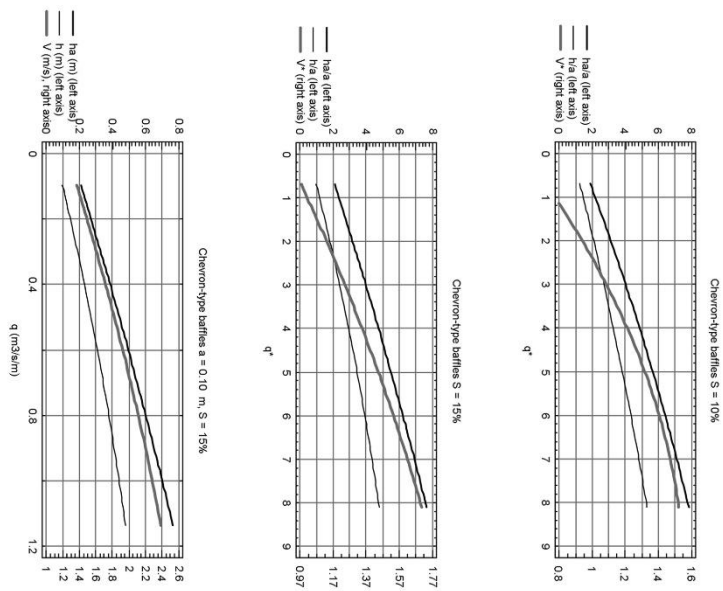
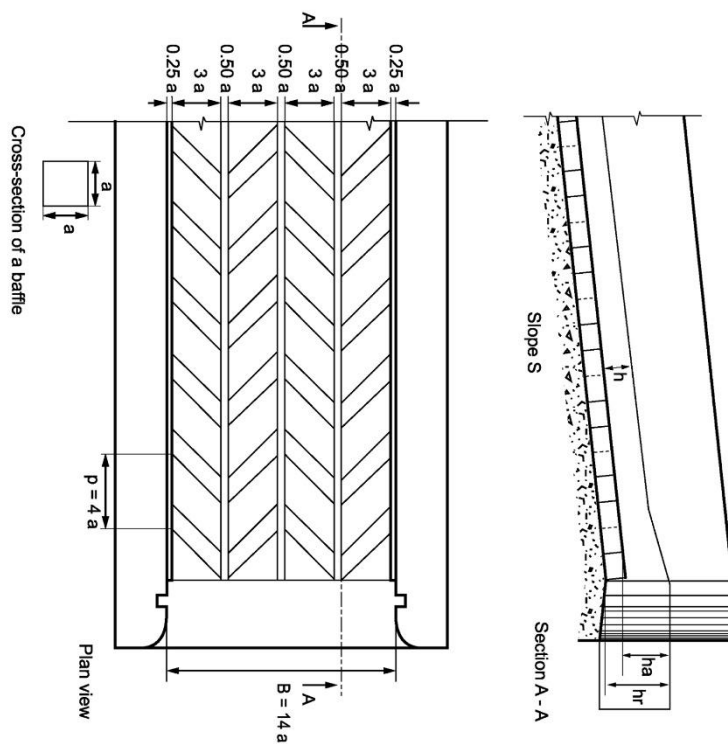
Slika 20a Geometrija klasičnih Denilovih ribljih staza i pripadni bezdimenzionalni dijagrami (Larinier 2002)



Slika 20b Geometrija Fatouovih ribljih staza i pripadni bezdimenzionalni dijagrami (Larinier 2002)



Slika 20c Geometrija s pridnenim pregradama i pripadni bezdimenzionalni dijagrami (Larinier 2002)



Slika 20d Geometrija Chevronove riblje staze i pripadni bezdimenzionalni dijagrami (Larinier 2002)

2 Numerički model

Cilj uspostave numeričkog modela je prikazati ovisnost srednje brzine unutar poprečnog presjeka prolaza riblje staze, s obzirom na rubne uvjete zadanog protoka i razine donje vode. Analiza brzine kroz sam otvor unutar fizičkog modela je pod utjecajem vanjskih faktora jer direktno mjerenje zahtjeva postavljanje mjernog uređaja u otvor koji svojim volumenom utječe na strujnu sliku koju pokušava mjeriti. Stoga se odlučilo brzine dobiti posredno pomoću opisanog numeričkog modela. U fizikalnom modelu se dakle mjere brzine u točkama koje služe za verifikaciju numeričkog modela i na pozicijama gdje samo mjerenje ne utječe na strujnu sliku unutar riblje staze. Nadalje će se unutar uspostavljenog numeričkog modela izvesti srednje brzine u otvoru koje nisu mogle biti direktno mjerene i zabilježene unutar fizikalnog modela.

U svrhu numeričkog istraživanja ribljih staza koristio se 3D model numerički model koji je dio open source OpenFOAM paketa (Weller, Tabor et al. 1998). Navedeni model je već korišten u prethodnim istraživanjima dvofaznog tečenja sa slobodnim vodnim licem poput modeliranja gravitacijskih vodnih valova i sloma brane (Jacobsen Niels, Fuhrman David et al. 2011), (Zhainakov and Kurbanaliev 2013). Neke već provedene analize osjetljivosti modela u svrhu proračuna ribljih staza su pokazala zadovoljavajuću točnost modela (Fuentes-Pérez, Silva et al. 2018). Dvofazni VOF (engl. *Volume Of Fluid*) interFoam model se oslanja na definiciju indikatorske funkcije. Indikator ukazuje na udio volumena vode unutar pojedine ćelije diskretizirane mreže unutar koje se vrši proračun (označena s α). Primjena indikatora temelji se na Eulerovom opisu svake tekućine (vode, zraka ili dr.) na nepokretnoj mreži i opisu vodnog lica između dvije tekućine pomoću jednadžbe transporta indikatorske funkciju. Model pretpostavlja da su pojedini fluidi unutar diskretizirane mreže nestišljivi ($\rho = const.$). U svrhu implicitnog rješavanje vladajućih jednadžbi se koristi PIMPLE algoritam (Higuera, Lara et al. 2013). Model interFoam se sastoji od jednadžbe kontinuiteta Eq (1) i nestacionarne Navier-Stokes jednadžbe u potpunosti opisane pomoću Reynoldsa usrednjavanja koja upravlja protokom Eq (2).

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\tau} - \rho v' v') + \sigma k \nabla \alpha + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (3)$$

U Navier-Stokesovoj jednadžbi ρ označava gustoću tekućine, v označava polje brzine, t određuje vrijeme, p označava tlak, σ označava površinsku napetost i srednja lokalna

zakrivljenost određena je k . Čelije potpuno ispunjene vodom se označe s vrijednosti 1 ($\alpha = 1$), dok su ćelijama potpuno ispunjene zrakom dodijeljene vrijednosti 0 ($\alpha = 0$). Čelijama na vodnom licu, između dvije faze, je dodijeljena vrijednost α između 0 i 1, ovisno o zastupljenosti pojedine faze unutar ćelije. Udio volumena vode i njezin pronos u svakoj ćeliji proračunava se upotrebom transportne jednadžbe Eq (3). Ovim opisom vladajućih jednadžbi, svaka ćelija diskretizirane mreže određena je vektorom brzine, tlakom i volumnim udjelom. Na vodnom licu gustoća Eq (4) i viskoznost Eq (5) linearno se interpoliraju između dvije faze u skladu s α -udjelom dodijeljenoj pojedinoj ćeliji.

$$\rho = \rho_1\alpha + \rho_2(1 - \alpha) \quad (4)$$

$$\mu = \mu_1\alpha + \mu_2(1 - \alpha) \quad (5)$$

Međutim, u VOF pristupu krajnji položaj vodnog lica nije poznat i opisan je s većim brojem ćelija konačnog volumena. Stoga se efekt površinske napetosti (koji je u prirodi ploha) treba pretvoriti u volumenski efekt koji se može uključiti u glavnu jednadžbu količine gibanja valjane za cijelu domenu.

2.1 Opis diskretizacije mreže, te rubnih i početnih uvjeta

Numerički modeli su uspostavljeni na osnovu fizikalnih mjerenja provedenih u hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Provedene su analize na bazenskom tipu ribljih staza i ribljim stazama s vertikalnim otvorom. Tlocrtna duljina riblje staze je konstanta kroz sve testirane varijante, te se mijenjao broj bazena od kojih je sastavljen s obzirom na duljinu samih bazena. Širina fizičkog modela ribljih staza je zadržan uvijek jednakim pri 0.5 m. Nagib dna riblje staze je variran između tri varijanti 7,5°, 10°, 12,5°.

Diskretizirana mreža je uspostavljena pomoću open source alata blockMesh (formira osnovnu mrežu preko cijele domene) i snappyHexMesh (iterativno usitnjuje diskretiziranu mrežu na potrebnim mjestima i prilagođava oblik mreže s obzirom na veličinu otvora pregrada). Pregradni zidovi su prethodno formirani u programu Blender kao .stl datoteke i uvedene u postupak formiranja konačnog oblika diskretizirane mreže pomoću snappyHexMesh. Heksagoni su korišteni za oblikovanje mreže. U pogledu kvalitete diskretizirane mreže modela, ne-ortogonalnost je zadovoljavajuće niska (maksimalna ne-ortogonalnost u mreži bila je ispod 54°) i postignut je udovoljavajući "skewness" (maksimalna "skewness" je ispod 3.5). S obzirom na dostupne računalne resurse i analize osjetljivosti, odlučilo se nadalje koristiti diskretiziranu mrežu s ćelijom veličine $\Delta x = 2$ cm, te u blizini pregrada ona se smanjuje na $\Delta x = 1$ cm. Broj ćelija ovisi o varijanti koja se testirala (veličina otvora u otvoru, dužini bazena, itd.), ali varira

unutar raspona od 365.000 ćelija +/- 5%. Uz navedeni broj ćelija potrebno je oko 1 dan za potpuni proračun jednog modela.

Nakon inicijalnih modela u svrhu okvirne kvantifikacije veličine brzina kod zidova modela, na svim rubovima modela su se naknadno formirala tri sloja ćelija koja služe adekvatnoj interpretaciji graničnog viskoznoznog podsloja i rješavanju modela turbulencije u neposrednoj blizini zida. Udaljenost prve ćelije od zida za točan opis viskoznoznog podsloja ovisi i o brzini fluida, te o kinematskoj viskoznosti fluida. Navedeno se može uskladiti pomoću teoretskog opisa podsloja koji se zove engl. *law of the wall*. On nas navodi da za sve ćelije indikator relativne udaljenosti prve ćelije od zida se treba nalaziti rasponu $30 < y^+ < 300$ (Von Karman 1931). Pomoću već navedena dodana tri sloja je y^+ zadržan unutar potrebnog raspona u cijeloj domeni modela. S obzirom na raspoloživost računalnih resursa, odlučilo se koristiti kompromisno rješenje za proračun turbulencije pomoću RAS skupine modela turbulencije. Od navedene skupine modela turbulencije, k-epsilon model s dvije jednačbe je ocijenjen da najbolje opisuje polje strujanje unutar ribljih staza. Model turbulencije k-epsilon je već korišten u prethodnim istraživanjima i pokazao zadovoljavajuću točnost (Duguay, Lacey et al. 2017).

Uvjeti protoka u modelu i donje vode su zadani u skladu s onima koji su bili prisutni u fizikalnom modelu. Stacionarno stanje unutar numeričkog modela je osigurano kontinuiranim praćenjem dubine vode u bazenima riblje staze, te s obzirom na ulazni i izlazni protok koji cirkulira kroz domenu. Većini modela je bilo potrebno oko 100 s da bi postigla stacionarno stanje, te kako bi se brže došlo do navedenog stanja korišten je Courantov broj u iznosu od 2. Nakon što je došlo stacionarnog stanja, Courantov broj je smanjen na 0.5 kako bi se smanjio efekt vremenske numeričke difuzije količine gibanja i time povećala točnost. Tek nakon dostizanja stacionarnog stanja je otpočelo bilježenje vektora brzine unutar numeričkog modela na pozicijama interesa.

Na ulazu je zadan fiksni protok te je omogućena varijacija vodnog lica kako bi se mogla prilagoditi uvjetima tečenja. Kako bi se zadala nizvodna razina vode, na izlazu je zadan Dirichletov rubni uvjet konstantne brzine koji ishodi željenom razinom vode na izlazu. Veličina vektora izlazne brzine izračunata je pomoću predviđenog protoka na ulazu podijeljenim s željenom površinom potopljenog presjeka na izlazu. Razina donje vode u većini varijanti iznosi oko 0,25 m.

3 Rezultati ispitivanja numeričkim modelom

3.1 Riblje staze bazenskog tipa

Indikatori greške numeričkog modela bazenskih ribljih staza u usporedbi s vrijednostima izmjerenim na fizičkom modelu u laboratoriju se mogu očitati iz tablica 1 i 2, gdje su izražene preko srednje greške i standardne devijacije (engl. Root mean square error – RMSE). Raspon srednje greške kroz različite modele varira između 0.08 – 0.12 m/s, a vrijednosti RMSE u nešto većem rasponu između 0.095 – 0.187 m/s. Navedene vrijednosti su unutar očekivanog raspona, posebice jer se radi o iznimno turbulentnom tečenju kroz riblju stazu. Prethodna istraživanja su također razvila numeričke modele za drukčije vrste ribljih staza, te prihvaćane vrijednosti srednje greške u tim slučajevima su u rasponu 0.07 – 0.10 m/s (Fuentes-Pérez, Silva et al. 2018). Iz navedenog se može zaključiti da je validacija numeričkog modela izvedena s razumnom kvalitetom uzimajući u obzir i dostupne računalne resurse za izvedbu nadolazećeg većeg broja modela.

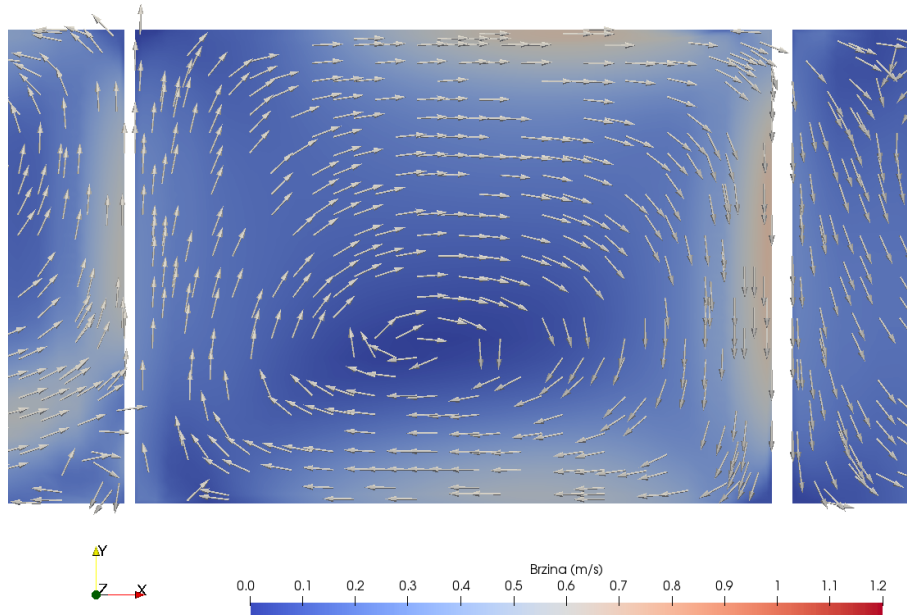
Tablica 1 Srednja greška

Nagib 12,5%	Dimenzije otvora [cmxcm]			
	dužina polja [cm]	8x8	10x10	12x12
45		0.115	0.098	0.122
60		0.093	0.077	0.129
90		0.074	0.087	0.102

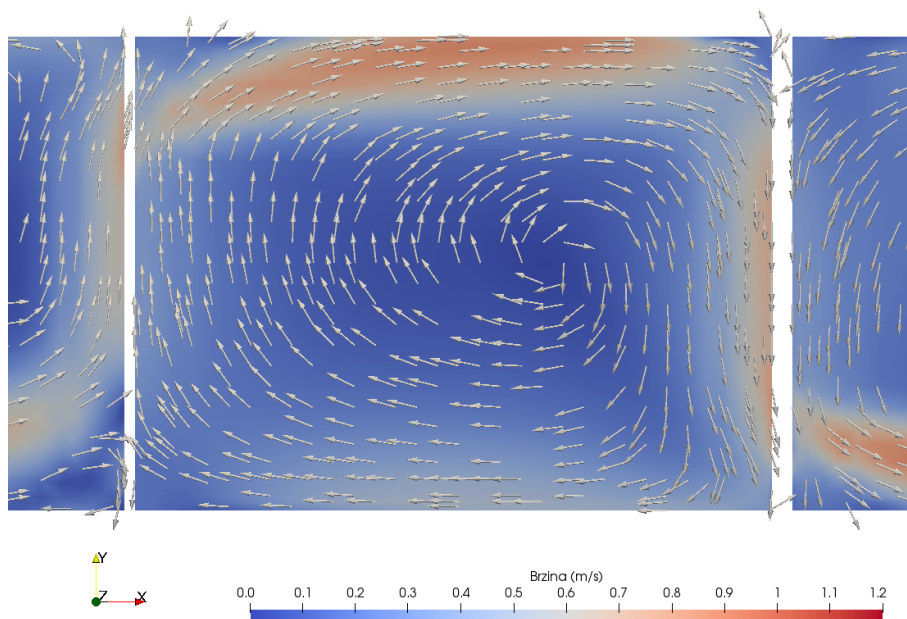
Tablica 2 „Root mean square error“

Nagib 12,5%	Dimenzije otvora [cmxcm]			
	dužina polja [cm]	8x8	10x10	12x12
45		0.166	0.143	0.160
60		0.131	0.109	0.187
90		0.095	0.110	0.127

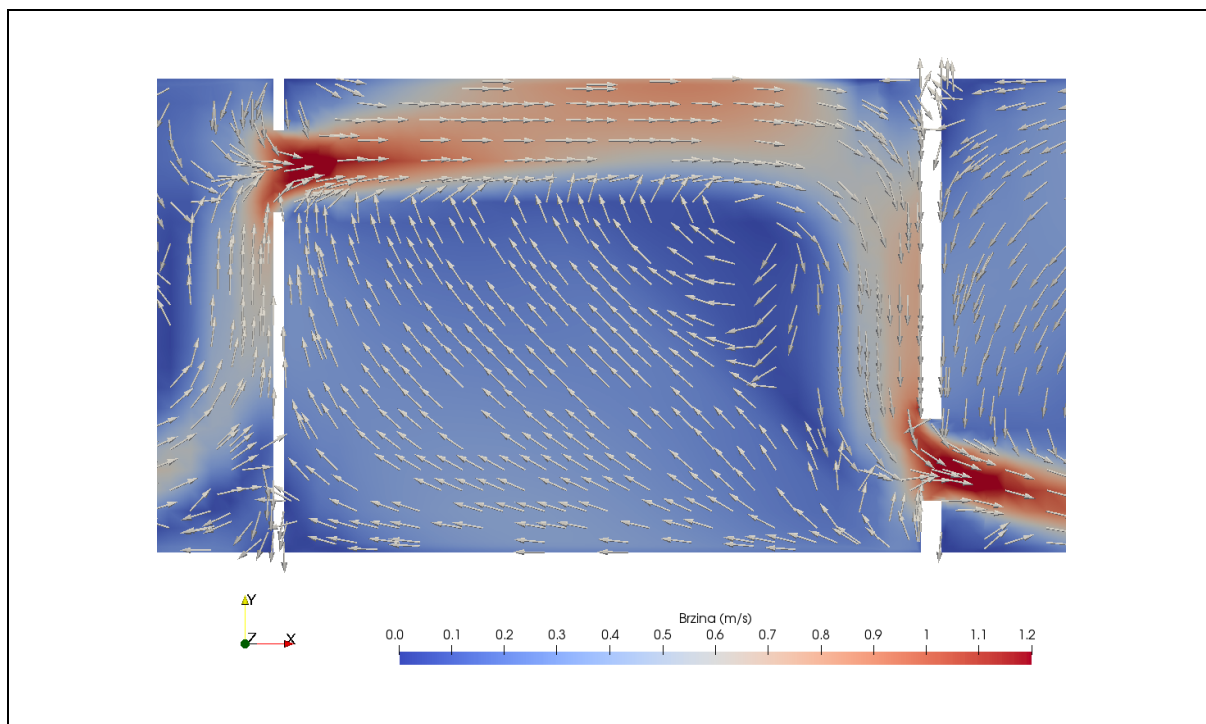
Za ilustraciju prikazani su primjeri rezultata dobivenih numeričkim modelom. Analizirana su polja brzina po visini bazena te polja brzina u karakterističnim vertikalnim presjecima. Također radi lakše usporedbe s podacima dobivenima mjerenjima danim u Izvještaju 3 prikazane su „modelske“ vrijednosti prikazane na slikama 3.1 do 3.3.



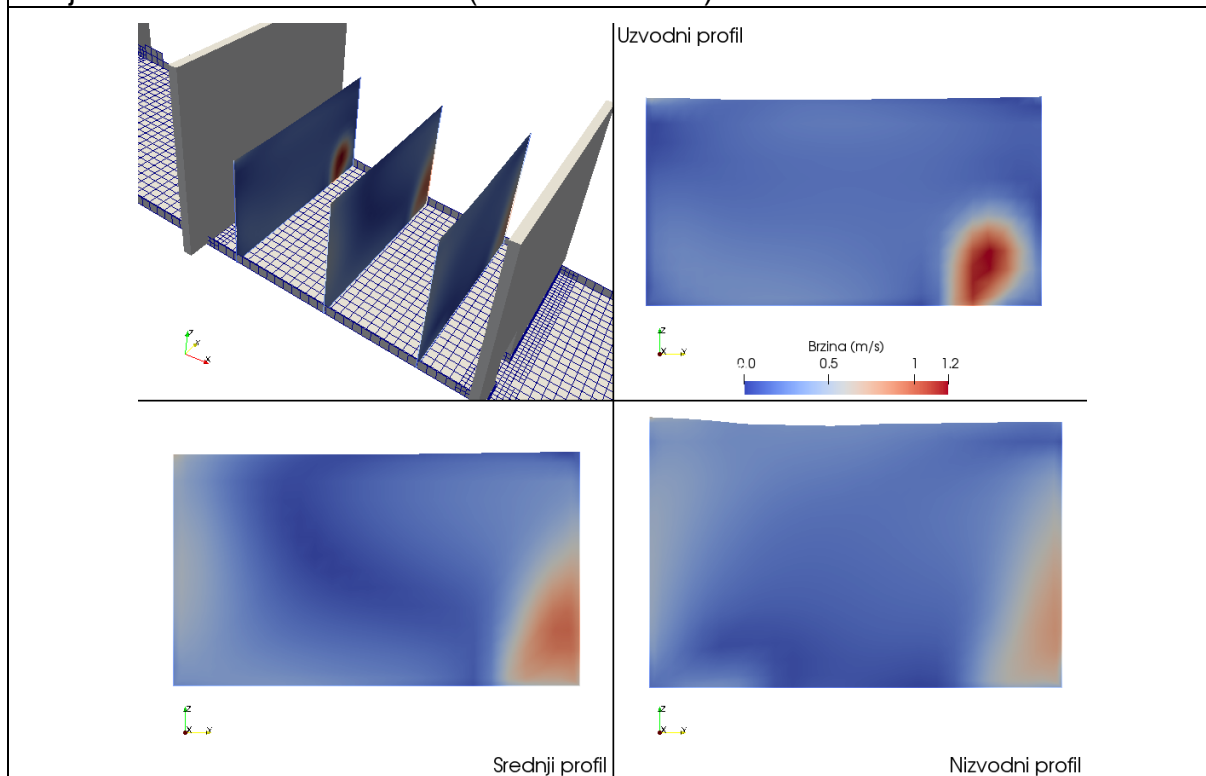
Polje brzina u višoj zoni bazena (cca 5cm ispod površine)



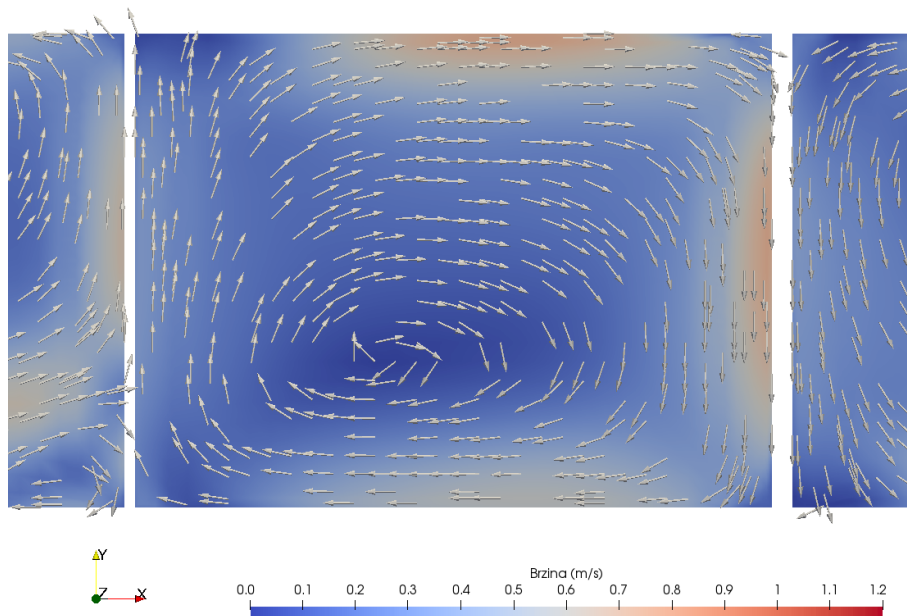
Polje brzina na sredini bazena



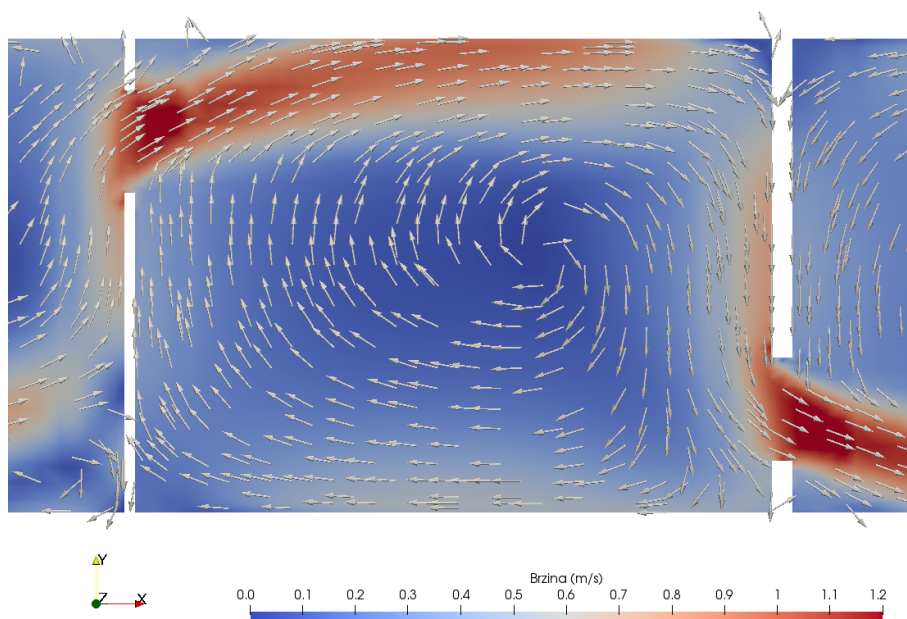
Polje brzine u razini s otvorima (cca 5cm od dna)



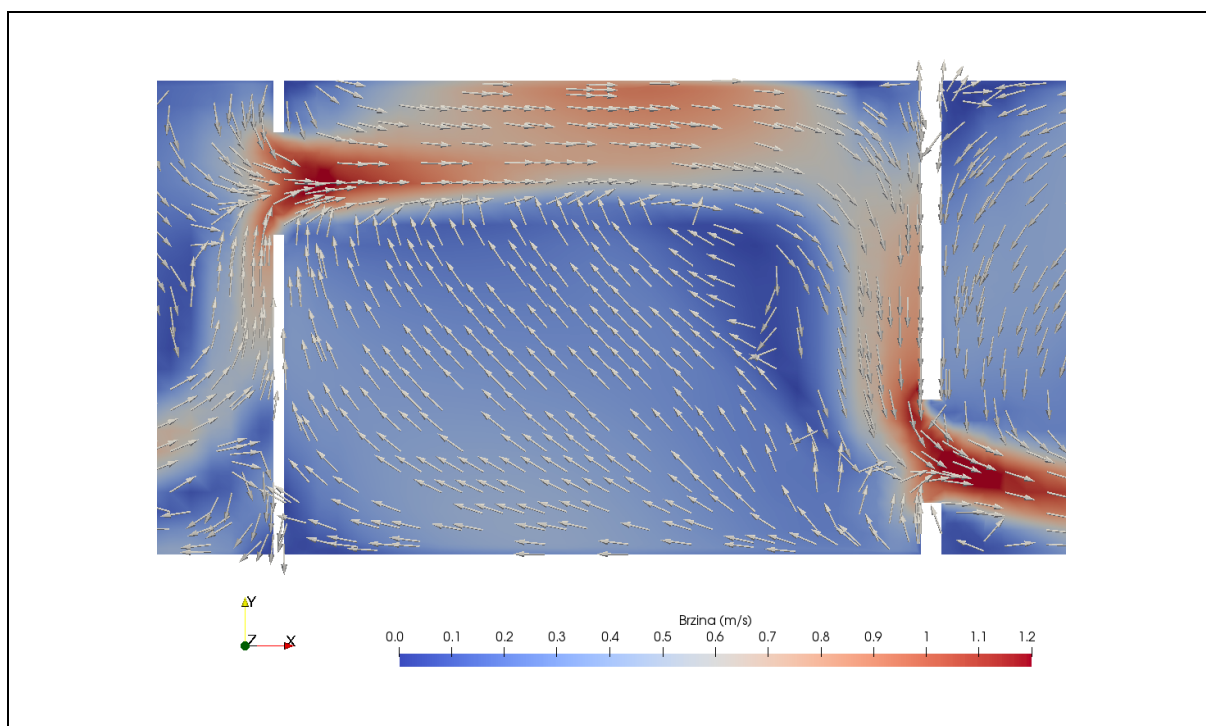
Slika 21 Rezultati numeričkog modela za slučaj nagib 12,5% - duljina bazena 60 cm – dimenzija otvora 8x8cm



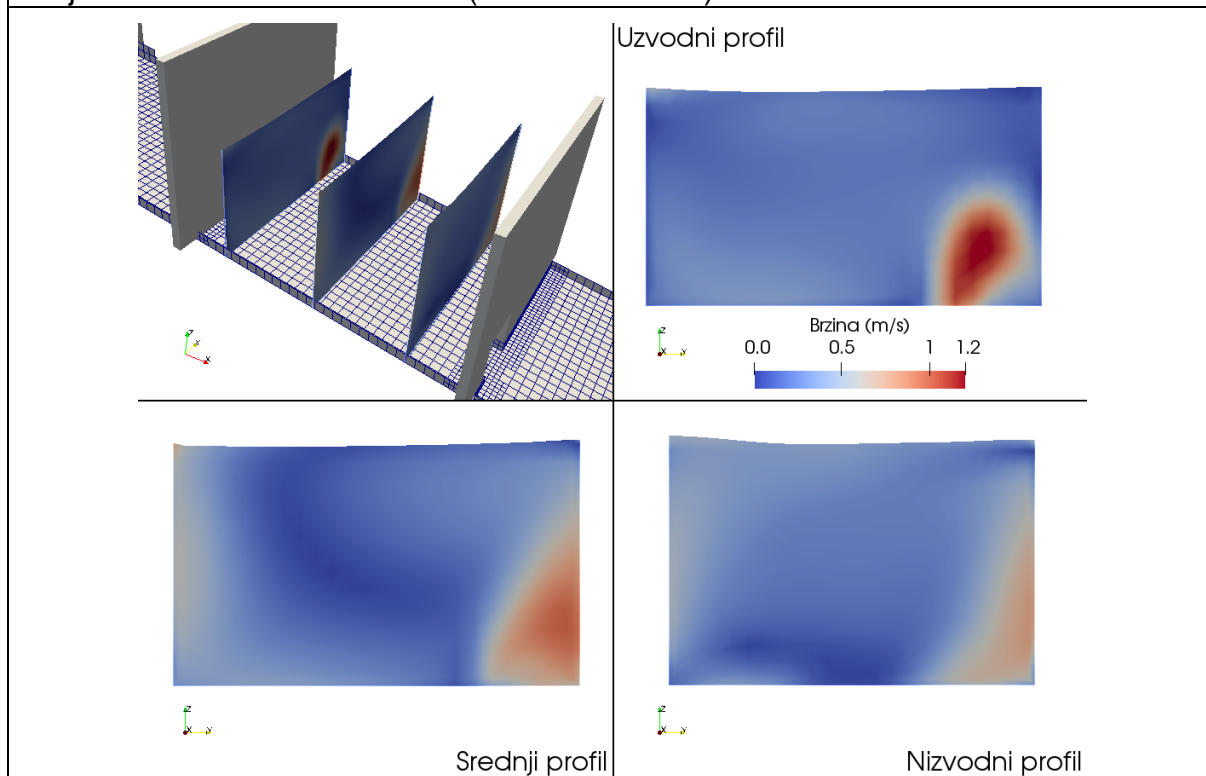
Polje brzina u višoj zoni bazena (cca 5cm ispod površine)



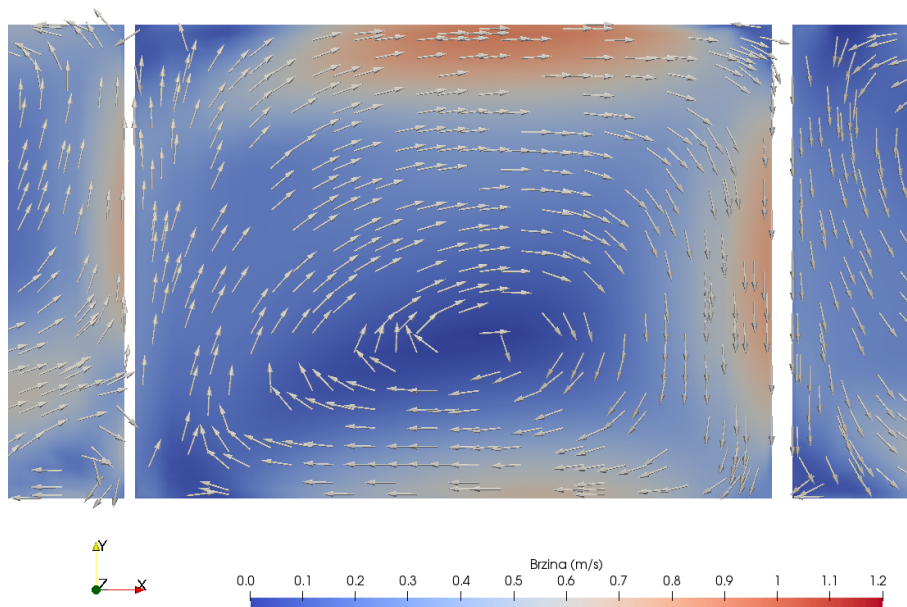
Polje brzina na sredini bazena



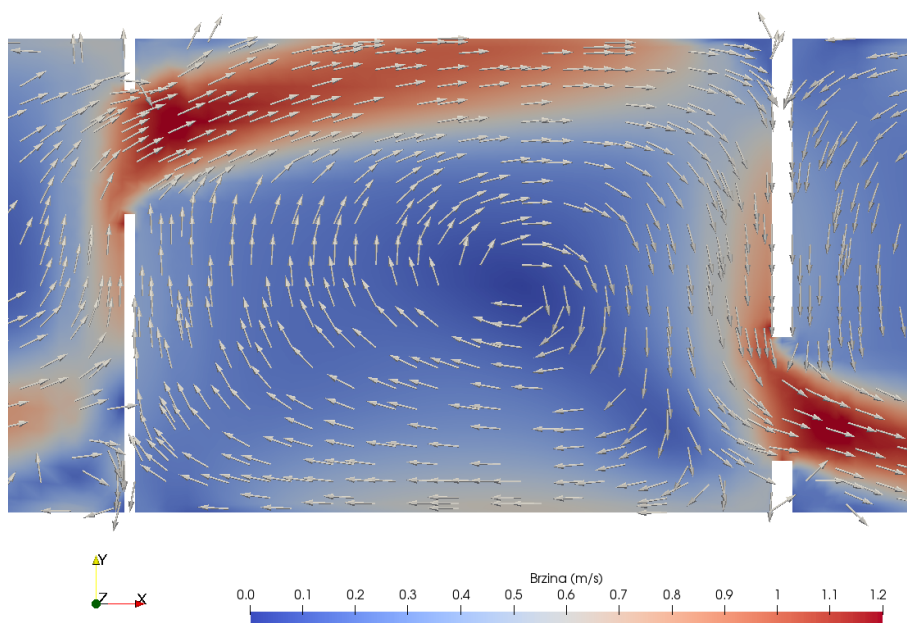
Polje brzine u razini s otvorima (cca 5cm od dna)



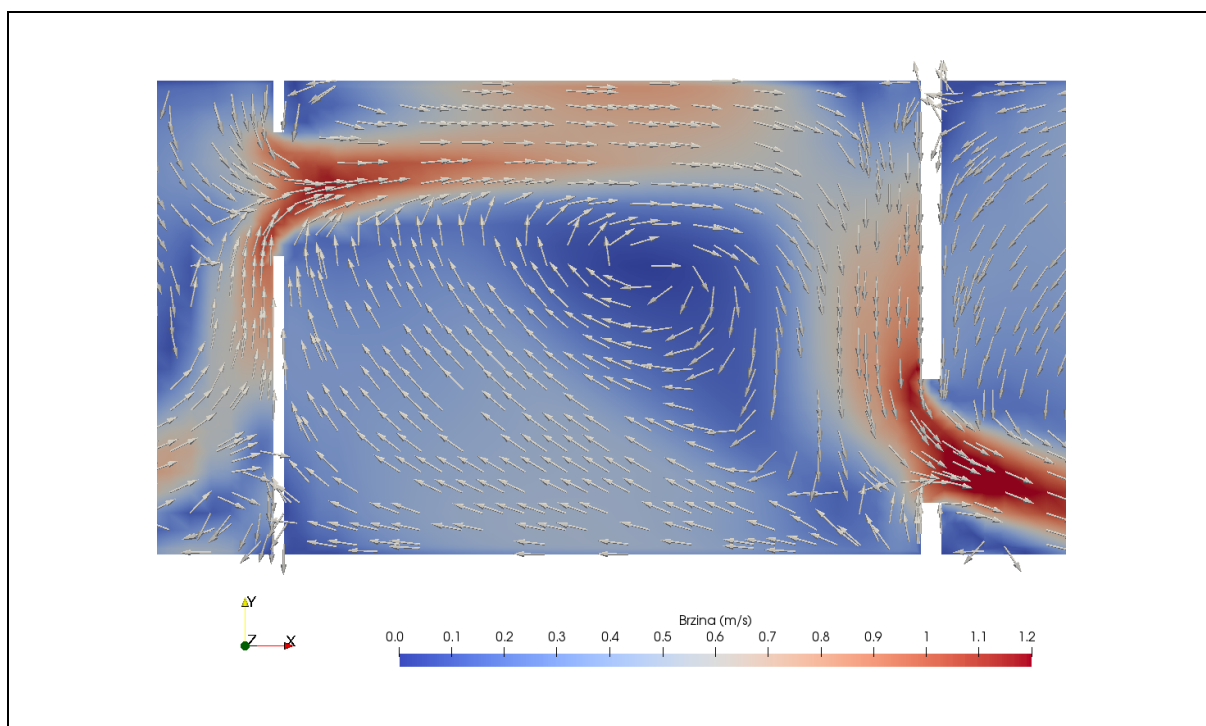
Slika 22 Rezultati numeričkog modela za slučaj nagib 12,5% - duljina bazena 60 cm – dimenzija otvora 10x10cm



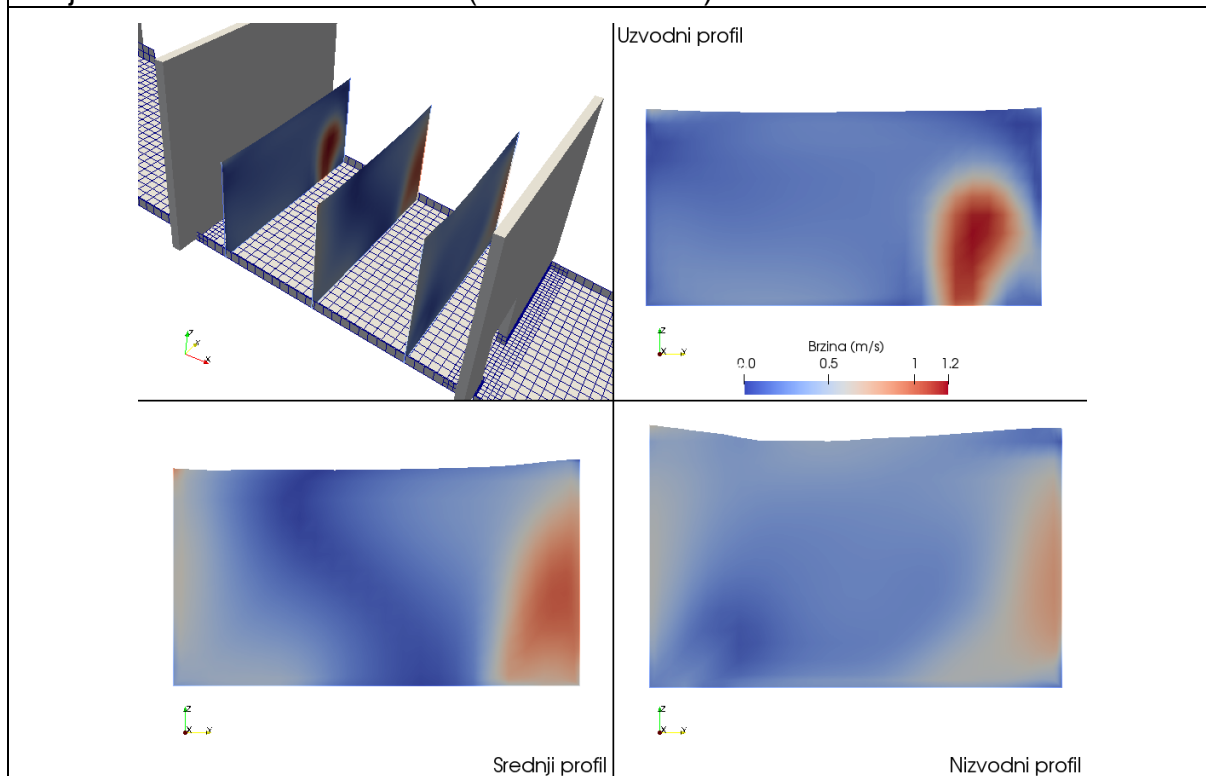
Polje brzina u višoj zoni bazena (cca 5cm ispod površine)



Polje brzina na sredini bazena



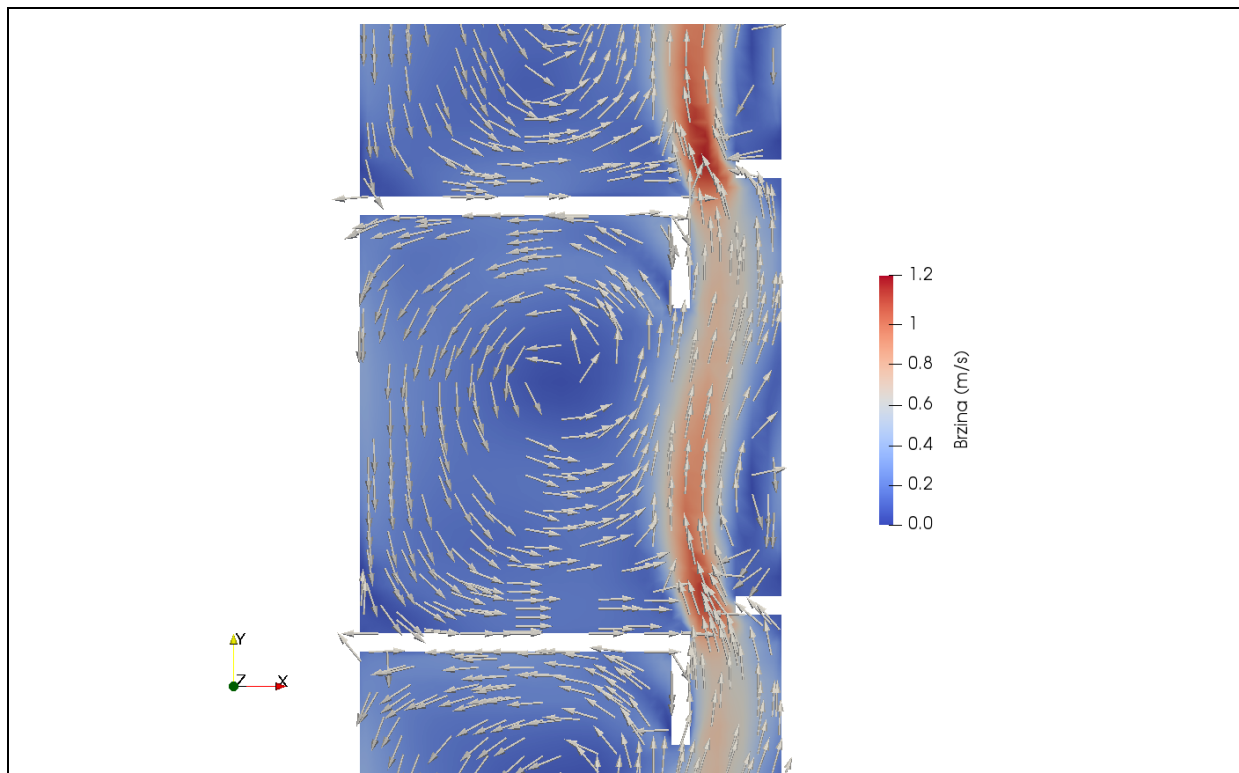
Polje brzine u razini s otvorima (cca 5cm od dna)



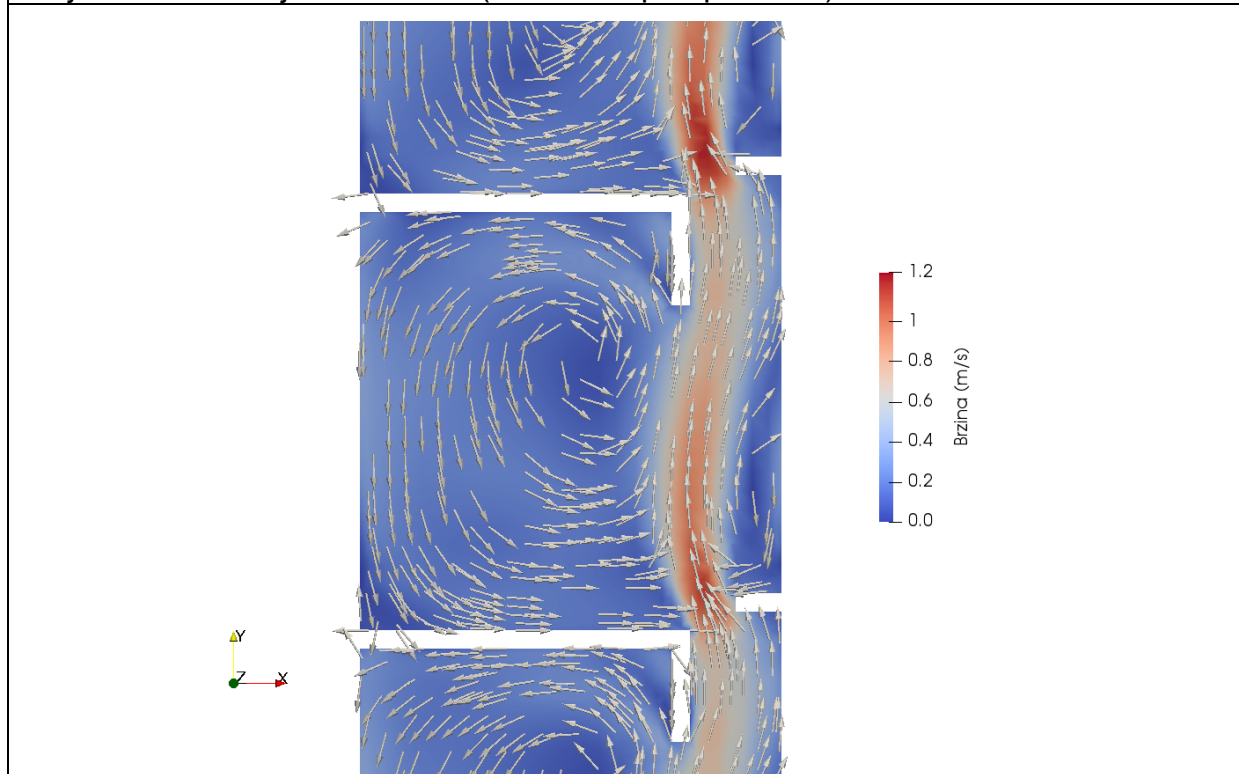
Slika 23. Rezultati numeričkog modela za slučaj nagib 12,5% - duljina bazena 60 cm – dimenzija otvora 12x12cm

3.2 Riblje staze s vertikalnim otvorom

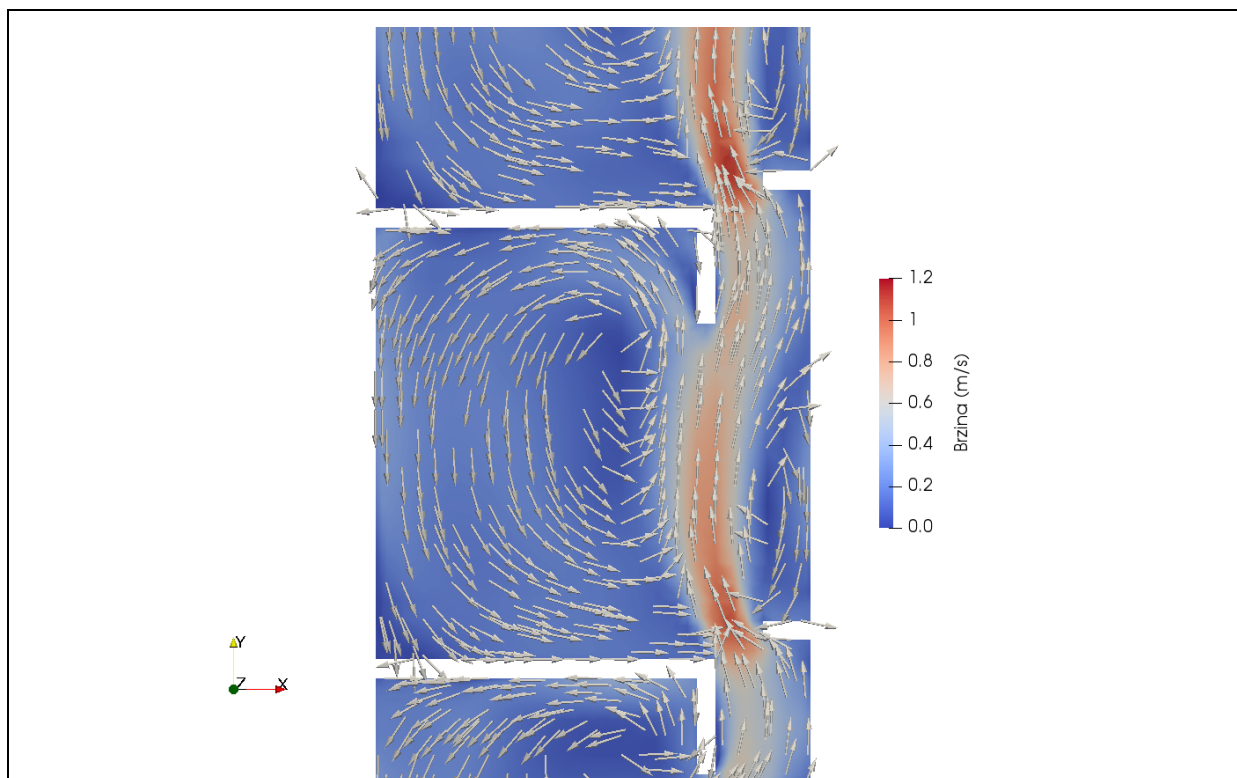
U sklopu projekta provedene su i numeričke simulacije tečenja u ribljim stazama s vertikalnim otvorima tarirane na podacima dobivenim mjerenjima na fizikalnom modelu (kako je prikazano u izvještaju 3). Tako tarirani model korišten je za daljnje simulacije variranjem pojedinih parametara. Za ilustraciju u nastavku su prikazani (slika 24, 25 i 26) rezultati nekoliko provedenih simulacija i to za pad 12,5% te različite duljine bazena 45, 60 i 90 cm (u mjerilu fizikalnog modela).



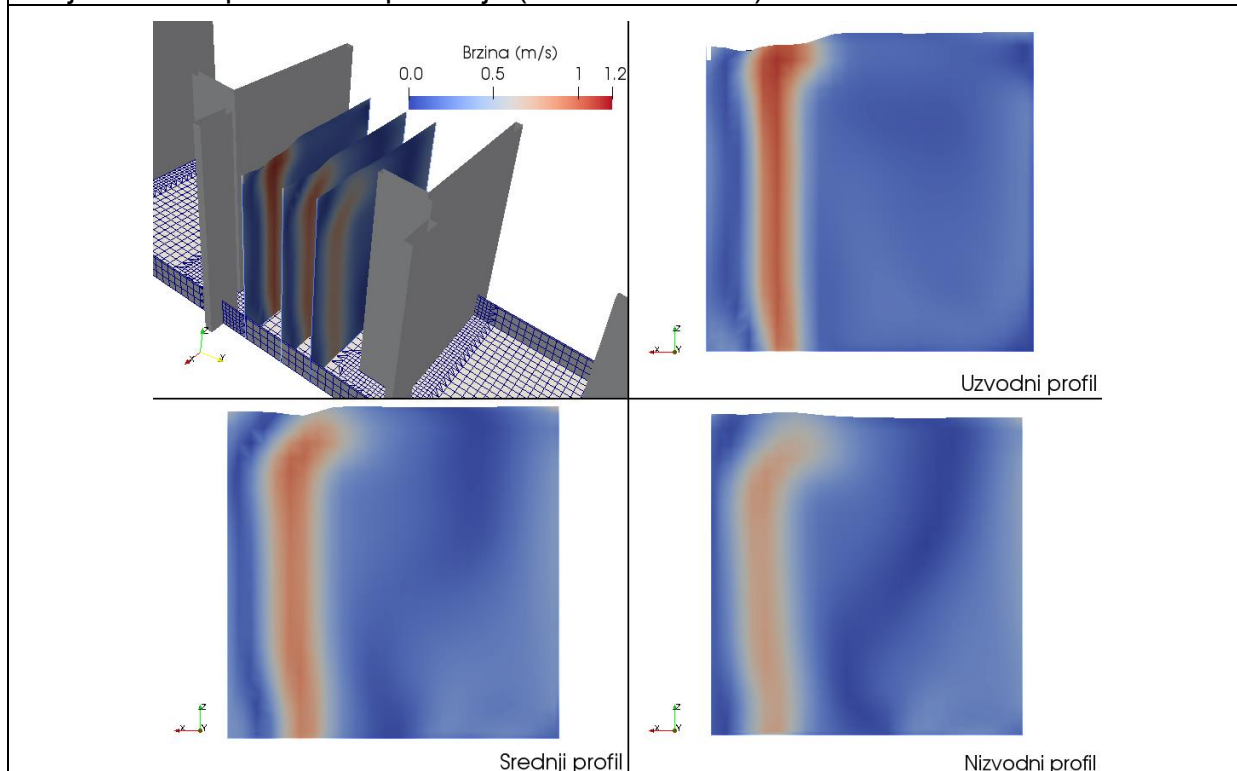
Polje brzina u višoj zoni bazena (cca 5cm ispod površine)



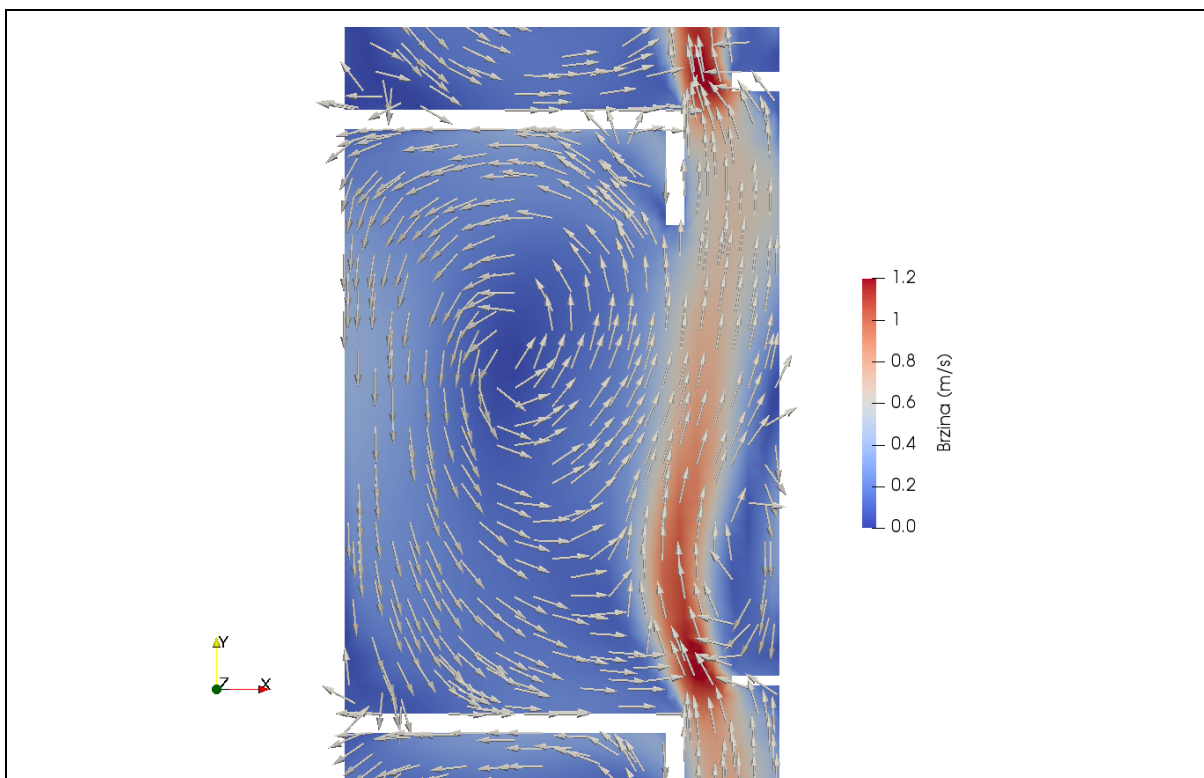
Polje brzina na sredini bazena



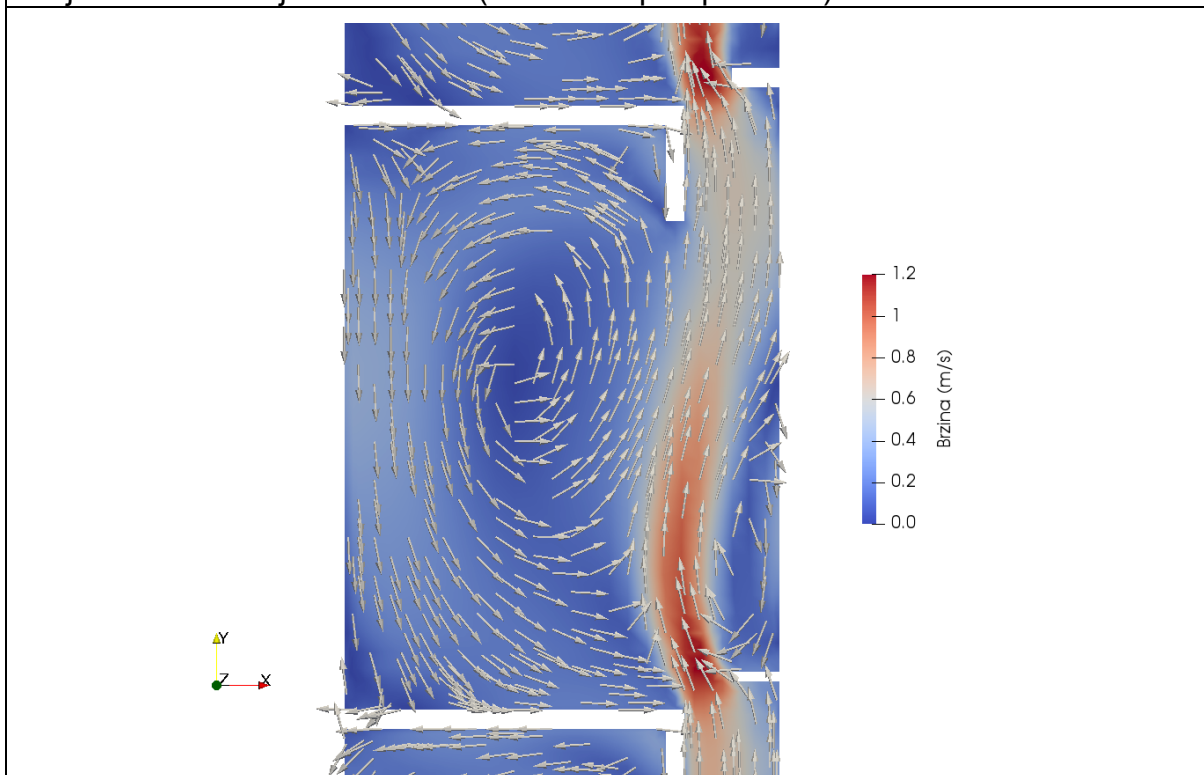
Polje brzine u pridnenom području (cca 5cm od dna)



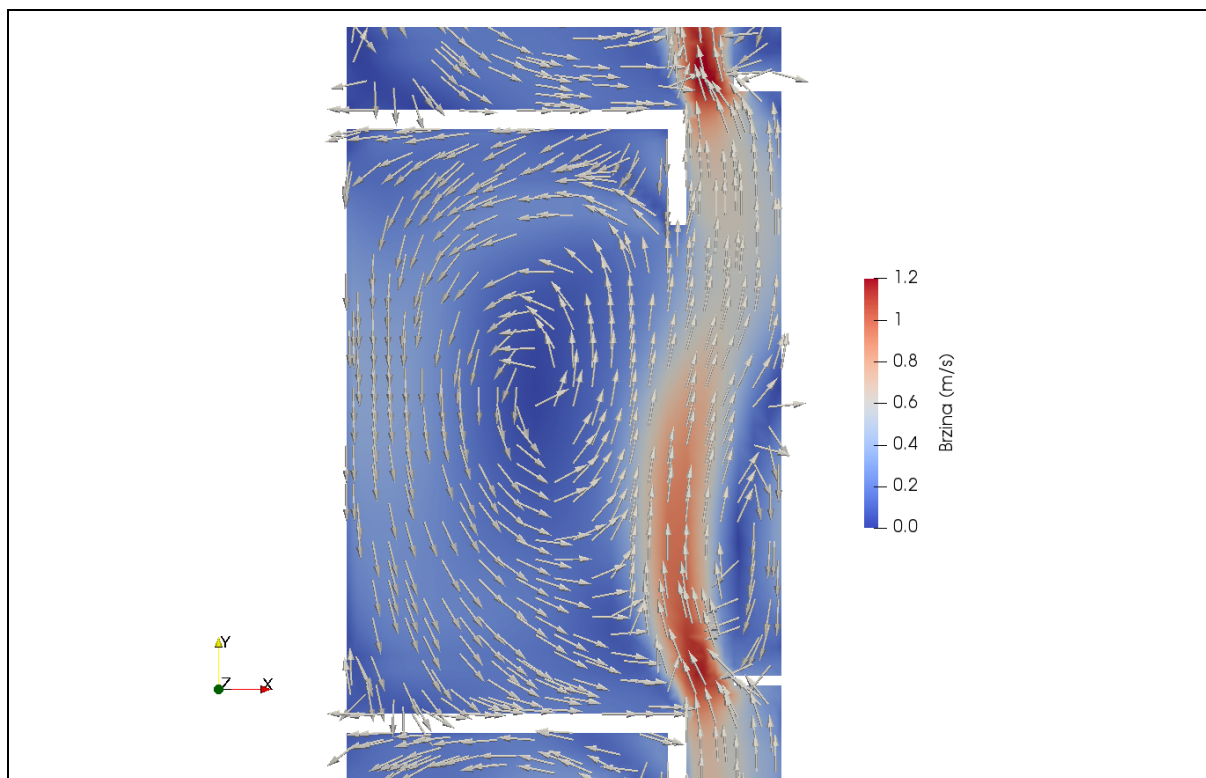
Slika 24 Rezultati numeričkog modela za slučaj nagib 12,5% - duljina bazena 45 cm



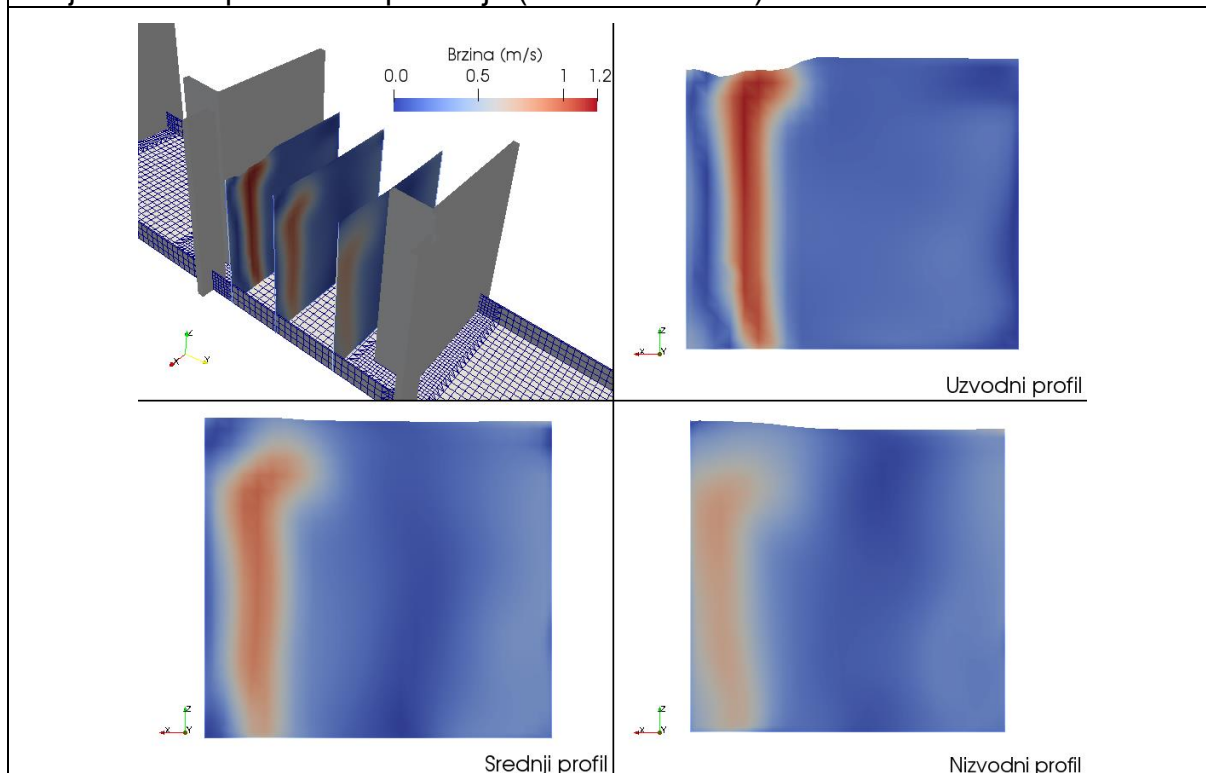
Polje brzina u višoj zoni bazena (cca 5cm ispod površine)



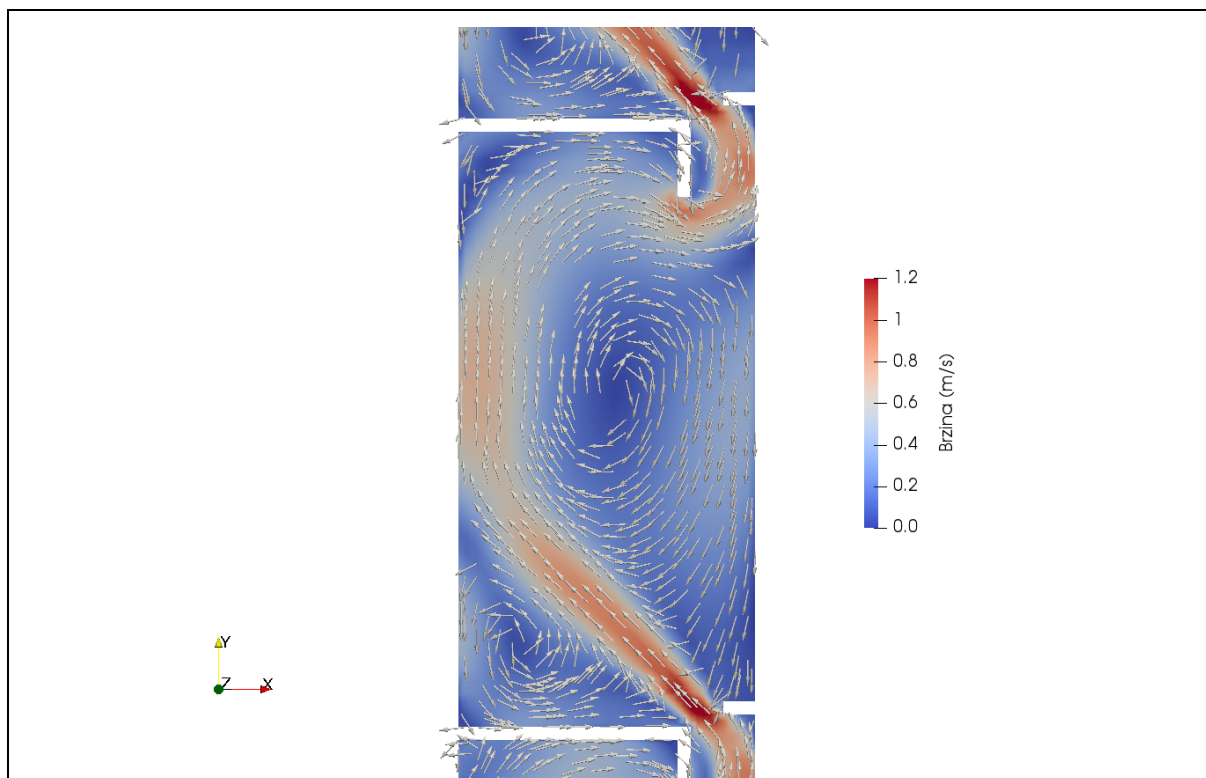
Polje brzina na sredini bazena



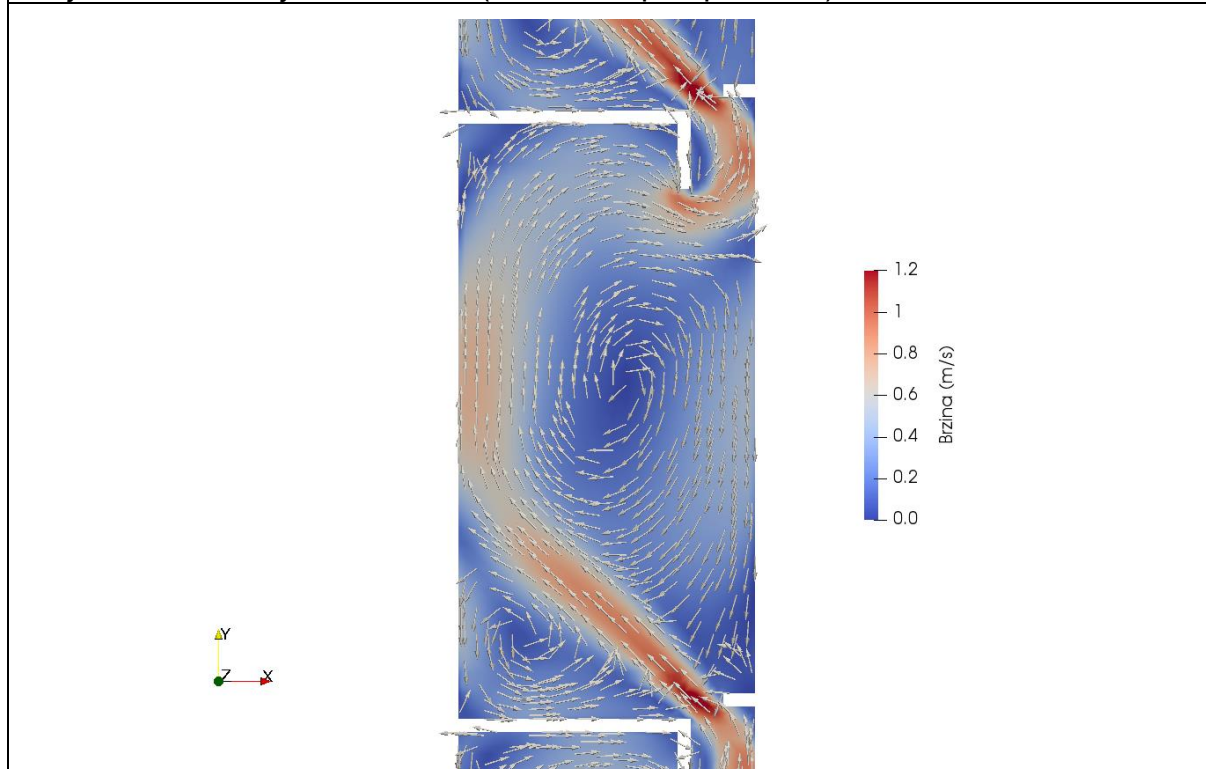
Polje brzine u pridnenom području (cca 5cm od dna)



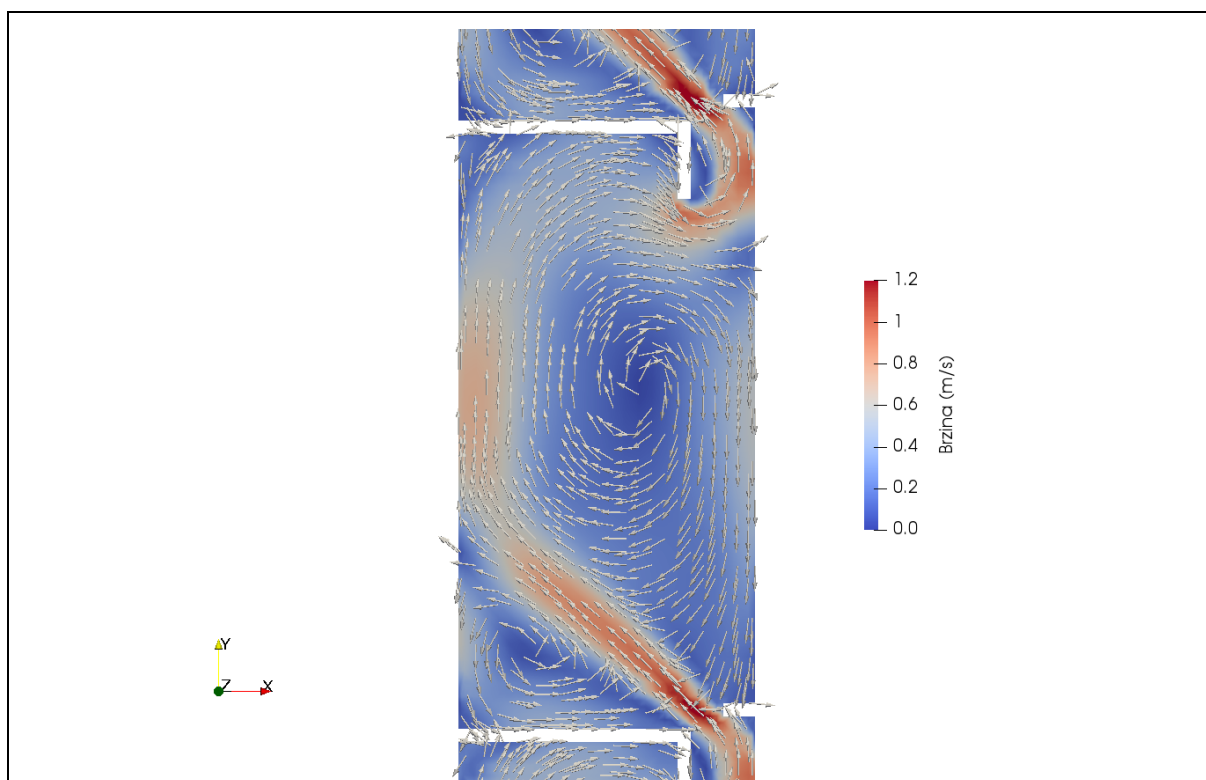
Slika 25 Rezultati numeričkog modela za slučaj nagib 12,5% - duljina bazena 60 cm



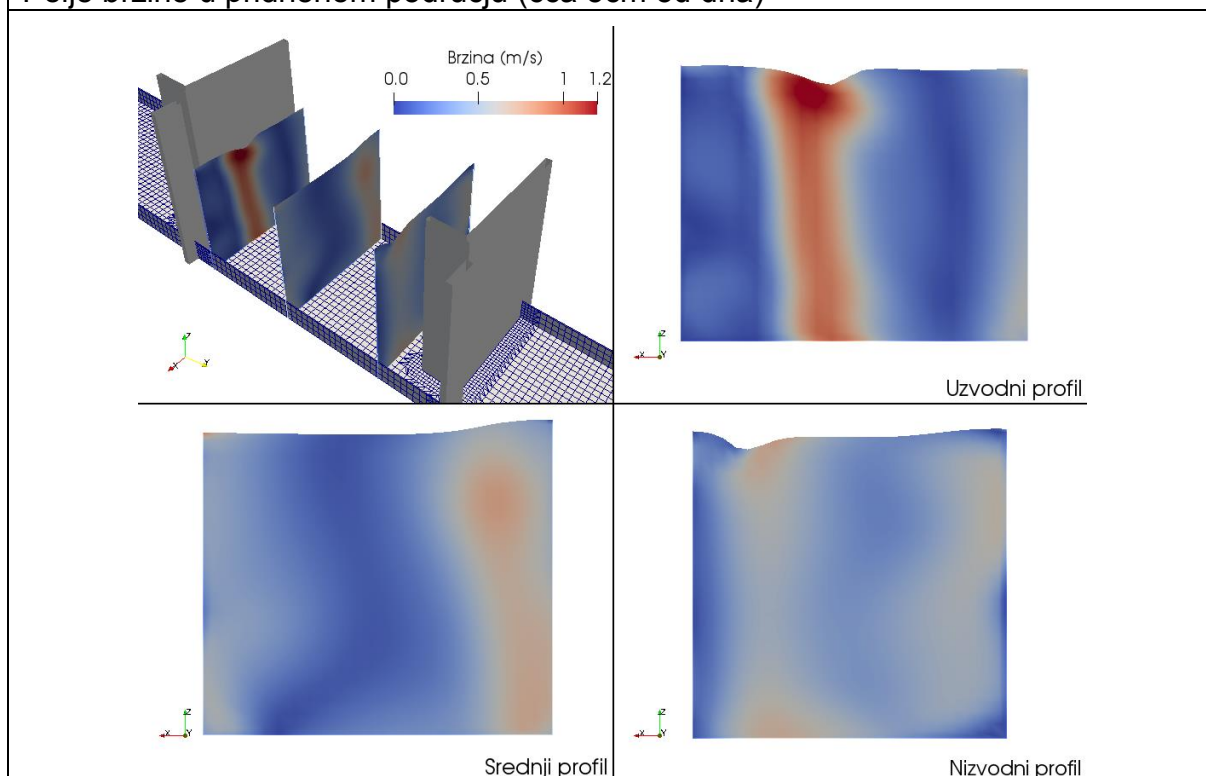
Polje brzina u višoj zoni bazena (cca 5cm ispod površine)



Polje brzina na sredini bazena



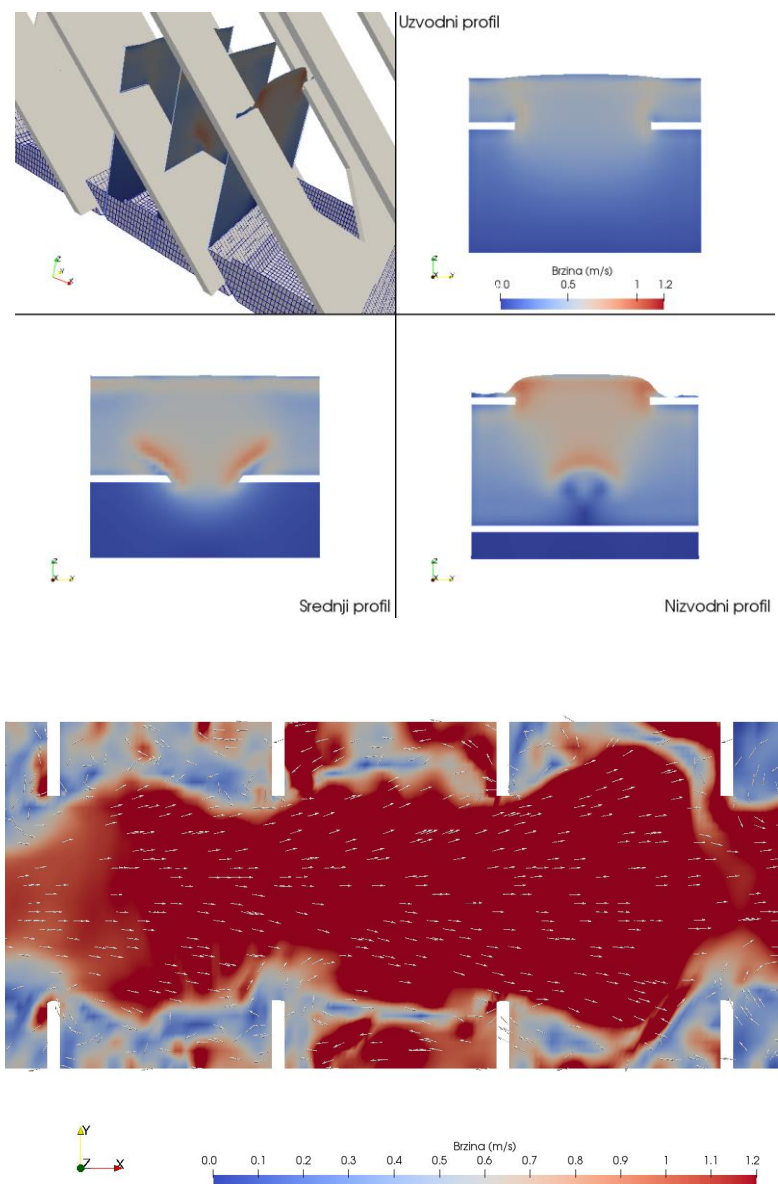
Polje brzine u pridnenom području (cca 5cm od dna)



Slika 26 Rezultati numeričkog modela za slučaj nagib 12,5% - duljina bazena 90 cm

3.3 Denilove riblje staze

Numerički model Denilovih ribljih staza izrađen za potrebe analiza u sklopu projekta kontroliran je prema rezultatima dostupnim u literaturi i ranije opisanim istraživanjima. Tako definiran model korišten je za daljnje analize a u nastavku je za ilustraciju (slika 27) prikazan primjer rezultata za situaciju koja opisuje slijedeće uvjete: nagib 15%, razmak pregrada 0,53m, širina kanala 0,8m i kut između kanala i pregrade 45 stupnjeva.



Slika 27 Rezultati numeričkog modela

4 Literatura

- Barton, A. and R. Keller (2003). 3D Free Surface Model of a Vertical Slot Fishway.
- Bombač, M. N., G.; Rodič, P.; Četina, M. (2014). Journal of Hydrology and Hydromechanics **62**(2): 150-159.
- Chorda, J. a. M., Marie-Madeleine and Roux, Hélène and Larinier, Michel and Tarrade, Laurent and David, Laurent (2010). "Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways." Journal of Hydraulic Research **48**(2): 141-151.
- Duguay, J. M., et al. (2017). "A case study of a pool and weir fishway modeled with OpenFOAM and FLOW-3D." Ecological Engineering **103**: 31-42.
- Ead, S. A., et al. (2004). "Flow regimes and structure in pool and weir fishways." Journal of Environmental Engineering and Science **3**(5): 379-390.
- FAO, D. (2002). Fish passes – Design, dimensions and monitoring. Rim, Italija, FAO (Food and Agriculture Organization of the US), DVWK (German Association for Water Resources and Land Improvement).
- Fuentes-Pérez, J. F., et al. (2018). "3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways." Environmental Modelling & Software **99**: 156-169.
- Fujihara, M. F., T.; Tachibana, K. (2002). "Numerical modelling of flows in vertical slot single-slot and double-slot fishways." Advances in Hydraulic and Water Engineering: Proceedings 13th IAHR-APD Congress **ii**: 1019-1024.
- Higuera, P., et al. (2013). "Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models: Application to OpenFOAM®." Coastal Engineering **71**: 102-118.
- Jacobsen Niels, G., et al. (2011). "A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®." International Journal for Numerical Methods in Fluids **70**(9): 1073-1088.
- Klein, J. O., M. (2016). Vertical Slot Fishway: Evaluation of numerical model quality. 6th International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures (IJREWHS 2016). Utah State University.
- Larinier, M. (2002). "BAFFLE FISHWAYS." Bull.Fr.Peche Piscic. **364 suppl.**: 83-101.
- Paulo Branco, J. M. S., Christos Katopodis, Anto´nio Pinheiro, Maria T. Ferreira (2013). "Pool-Type Fishways: Two Different Morpho-Ecological Cyprinid Species Facing Plunging and Streaming Flows." PLoS ONE **8**(5).

Puertas, J. P., L.; Teijeiro, T. (2004). "Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways." *Journal of Hydraulic Engineering* **130**(1): 10-23.

Rajaratnam, N., et al. (1992). "New designs for vertical slot fishways." *Canadian Journal of Civil Engineering* **19**(3): 402-414.

Rajaratnam, N. V. d. V., G.; Katopodis C. (1986). "Hydraulics of vertical slot fishways." *Journal of Hydraulic Engineering* **10**(112): 909-927.

Tarrade, L., et al. (2008). "Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways." *Hydrobiologia* **609**(1): 177.

Von Karman, T. H. (1931). *Mechanical Similitude and Turbulence*. Washington, USA.

Wang, R.-W., et al. (2010). Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes.

Weller, H. G., et al. (1998). "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques." *Computers in Physics* **12**(6): 620-631.

Wu, S., et al. (1999). "Structure of Flow in Vertical Slot Fishway." *Journal of Hydraulic Engineering* **125**(4): 351-360.

Zhainakov, A. Z. and A. Y. Kurbanaliev (2013). "Verification of the open package OpenFOAM on dam break problems." *Thermophysics and Aeromechanics* **20**(4): 451-461.