

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Studenti: Doris Martinović, Matea Marić, Iva Đerek

**FIZIKALNI I NUMERIČKI MODEL POLJA  
TEČENJA U RIBLJIM STAZAMA BAZENSKOG  
TIPA**

Zagreb, 2018.

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Students: Doris Martinović, Matea Marić, Iva Đerek

**PHYSICAL AND NUMERICAL MODEL OF FLOW  
FIELDS IN POOL FISHWAY**

Zagreb, 2018.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom mentorice izv. prof. dr. sc. Eve Ocvirk i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017./18.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1 Općenito .....	1
1.2 Vrste riba i zonacija rijeka u Hrvatskoj .....	2
1.3 Općenito o ribljim stazama .....	4
1.4 Riblje staze bazenskog tipa .....	5
2. PREGLED STANJA ZNANJA .....	8
3. CILJ RADA .....	11
4. METODOLOGIJA .....	12
4.1 Fizikalni model .....	12
4.1.1 Opis fizikalnog modela .....	12
4.1.2 Opis ispitivanja .....	16
4.1.3 Opis obrade podataka .....	22
4.2 Numerički model .....	23
4.2.1 Općenito .....	23
4.2.2 Model trodimenzionalnog strujanja u MIKE-u .....	23
4.2.3 Opis numeričkog modela .....	27
5. REZULTATI I RASPRAVA .....	32
6. ZAKLJUČAK .....	42
7. ZAHVALE .....	43
8. POPIS LITERATURE .....	44
9. DODACI .....	46
9.1 Popis slika .....	46
9.2 Popis tablica .....	47
10. SAŽETAK .....	48
11. SUMMARY .....	49



## 1. UVOD

### 1.1 Općenito

Kroz povijest ljudi u vodotocima grade pregrade i ostale zahvate kojima zadovoljavaju svoje potrebe u odnosu na vodu, a te potrebe se povećavaju s poboljšanjem životnih prilika. Kada čovjek naruši prirodnu strukturu vodnih tijela gradeći umjetnu barijeru poremetio je prirodni ciklus riba i drugih vodnih organizama te onemogućio njihove prirodne migracije. Ponekad sa stajališta vodnog gospodarstva i najmanji zahvat u koritu može predstavljati nesavladivu prepreku za vodne organizme (Slika 1.1a) i b). Zajedno s ostalim čimbenicima kao što je onečišćenje voda to dovodi do smanjenja veličine populacije nekih vrsta, ponekad i do razine izumiranja.



Slika 1.1 a) i b) Hidrotehničke stepenice – nesavladiva prepreka za vodne organizme

Da bi se spriječile te pojave i očuvala prirodna ravnoteža okoliša, Hrvatska kao i sve članice Europske unije u zadnje vrijeme sve više provode planove za očuvanje okoliša, a time i vodnih tokova. Od svih uzroka ugroženosti riba, regulacije vodotoka zauzimaju treće mjesto sa procijenjenim udjelom od 27%. Prema Strategiji održivog razvoja Republike Hrvatske, u Republici Hrvatskoj se nalazi ukupno 32000 km državnih vodotoka I. i II. reda (za I. red 73% je potpuno uređeno, 24% djelomično, a 3% ih nije uređeno, za II. red 75% ih je potpuno uređeno, ostalo neuređeno ili djelomično uređeno. [1] Prilikom regulacije vodnih tokova izgrađene su razne hidrotehničke građevine, među njima i pragovi. Pragovi su poprečne regulacijske građevine čija je osnovna funkcija stabilizacija uzdužnog profila korita. Osim što reguliraju vodotok, pragovi predstavljaju umjetnu barijeru za sve vodne organizme u vodotoku i time narušavaju njihov prirodni ciklus i onemogućavaju im migracije, kao što je već prije spomenuto. U Hrvatskoj postoji jako puno pragova na kojima je potrebno izvršiti obnovu u smislu uzdužnog povezivanja vodotoka da bi se omogućilo nesmetano kretanje svih vodnih

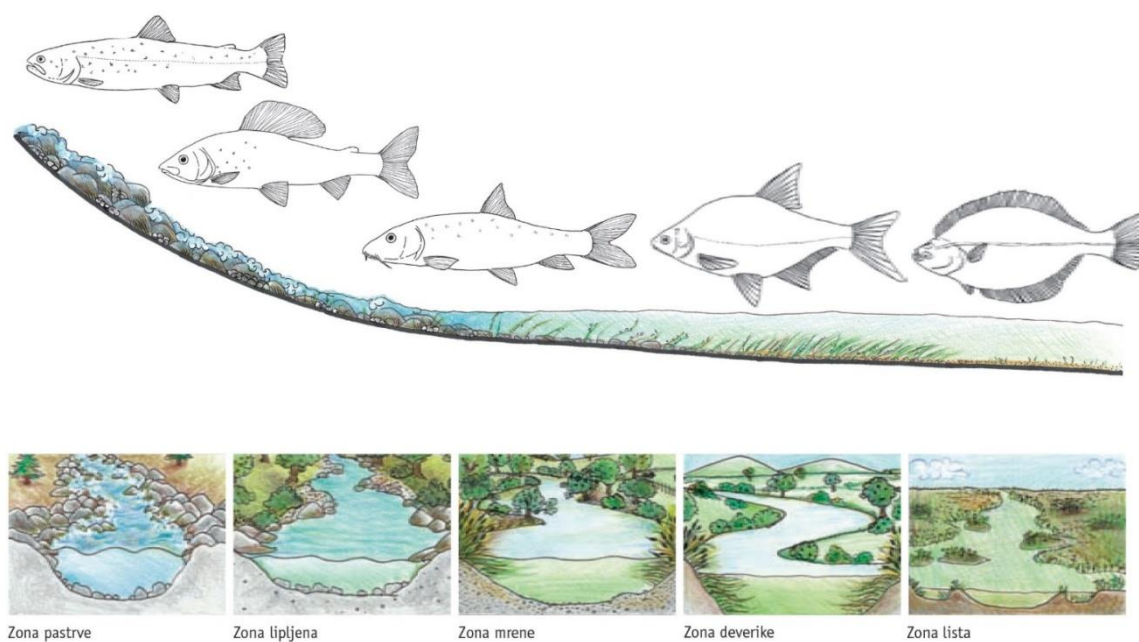
organizama. Hrvatske vode, kao institucija zadužena za upravljanje vodama, zainteresirane su za projekt revitalizacije, odnosno povezivanja vodnih tokova. [2]

U ovom radu naglasak će se staviti na proučavanje ribljih staza bazenskog tipa koje se smatraju pogodnima za područje spomenutih vodotoka.

## 1.2 Vrste riba i zonacija rijeka u Hrvatskoj

Uzdužni tok rijeka se može podijeliti na mnogo načina. Jedan od načina je podjela toka rijeke na gornji, srednji i donji tok. Velike europske rijeke kao Dunav i Drava protječu unutar granica Hrvatske samo srednjim, odnosno donjim dijelom svoga toka. Jedna od rijeka koja cijelim svojim tokom protječe kroz Hrvatsku jest rijeka Kupa.

Tradicionalno na području Hrvatske, tok jedne rijeke dijeli se prema vrstama riba (Slika 1.2).



Slika 1.2 Zonacija rijeka[3]

Zona pastrve čini najgornji dio brdskih potoka s kamenitim dnom i jakom strujom vode. Karakterizirana je relativno velikim nagibom dna (i do 10%) te temperaturom vode do 20°C. Osim pastrve (*Salmo trutta*) od riba tu žive još i peš (*Cottus gobio*) i pijor (*Phoxinus phoxinus*). Česte su i alge kremenjašice i mahovine.

Zona lipljena je prelazna zona prema srednjem toku (prema nekim autorima područje između potoka i rijeke). Karakteristika ove zone je šljunkovito tlo nagiba 2-7%, sporijeg toka od zone pastrve. Prosječna godišnja temperatura u ovoj zoni je nešto viša nego u zoni pastrve, ali i dalje do 20°C. Uz lipljena (*Thymallusthymallus*) tu još uvijek obilno nalazimo i pastrvu, peša i pijora te ribe srednjeg toka: mrenu (*Barbusbarbus*), klena (*Squatiuscephalus*), podusta (*Chondrostornanasus*) i krkuš (Gobiosp).

Zona mreke podudara se sa srednjim tokom rijeke šljunkovito-pjeskovite podloge, gdje je veće kolebanje temperature vode i ima manje otopljenog kisika. Uz mrenu dolaze još i klen, podust, jez (*Leuciscusidus*), bolen (*Aspiusaspius*), klenić (*Leuciscusleuciscus*) te populacije mladica (Kuchohucho) koje su u posljednje vrijeme zbog pregradnje korita i ograničavanja sezonskih migracija prorijeđene.

Zona deverike obuhvaća donji tok rijeke s muljevito-pjeskovitim koritom. Korito u ovoj zoni je u pravilu široko i duboko, malih nagiba (do 1,5%) što za posljedicu ima sporo tečenje i relativno visoke ljetne temperature vode (i preko 25°C). Uz deveriku (*Abramisbrama*) česte vrste ove zone su i bodorka (*Rutilusrutilus*), šaran (*Cyprinuscaprio*), linjak (*Tincatinca*), smuđ (*Sanderluciooperca*), som (*Silurusglanis*) i štika (*Esaxlucius*). U ovoj zoni raste mnogo vodene vegetacije, česta je i nestašica kisika dok su kolebanja ekoloških parametara velika.

Zona lista predstavlja samo ušće rijeke u more od kojega je voda zaslanjena. Primjer ribe koju nalazimo ovdje je jegulja.[3]

Za projektiranje ribljih staza bitno je poznavati i plivačke karakteristike riba. Prolazak kroz otvore uzvodno, ribama nije jednostavan zadatak. Prolazak kroz mlaz vode u otvoru uzrokuje fizičko naprezanje koje može ostaviti traga na ribama. Ribe plivaju u tri različite brzine. Brzina naleta, koju ribe mogu podnijeti samo nekoliko sekundi, a zatim im je potrebno dugo vrijeme oporavka. Produljena brzina je brzina koju riba može podnijeti do 200 minuta. Ova brzina iznosi otprilike pet duljina tijela u sekundi. Trajnu brzinu riba može podnijeti duže od 200 minuta, a iznosi dvije duljine tijela ribe po sekundi. Što znači da za prosječnu ribu duljine 20-40 cm trajna brzina iznosi 0,4 m/s, a produljena brzina 1 m/s. Brzina naleta se prema preporukama uzima do 2 m/s te predstavlja glavno ograničenje prilikom projektiranja ribljih staza. [4]

### 1.3 Općenito o ribljim stazama

Riblje staze su prirodne ili umjetne hidrotehničke građevine koje za cilj imaju omogućiti ribama i drugim organizmima prolaz oko umjetnih barijera prvenstveno uzvodno, ali i nizvodno jer veliki broj riba stradava prilikom prolaska kroz turbinu, preko preljeva i sl. To je obično kanal opremljen elementima koji omogućuju postizanje željenih hidrauličkih karakteristika potrebnih da bi ribe mogle plivati stazom. Elementi su preljevi, pregrade, otvori, kameni blokovi itd. Kroz povijest su se razvijale različite konstrukcije ribljih staza koje se većinom razlikuju po pregradama postavljenim u ribljoj stazi. Najpoznatije među njima su riblje staze s bazenima, riblje staze s vertikalnim prorezima i denilove riblje staze (Slika 1.3). Osim spomenutih koje spadaju u tehničke riblje staze postoje i prirodne riblje staze. To su kanali u kojima se optimalni hidraulički uvjeti tečenja ostvaruju rasporedom kamenih blokova po kanalu.

Jedne od bitnih stavki koje treba odrediti pri projektiranju ribljih staza su protok vode kroz riblju stazu, tj. brzina vode i turbulentnost, pravilan smještaj ulaza i izlaza te nagib riblje staze. Brzina vode jedan je od najbitnijih parametara. Mora biti dovoljno velika da na ulazu/izlazu u riblju stazu privuče ribe, a dovoljno mala tako da i najslabiji organizmi mogu svladati hidrauličke uvjete u ribljoj stazi. Maksimalna brzina ne smije biti premašena kako ne bi došlo do pojave turbulencija koje loše utječu na organizme te mogu dovesti do ozljeda i iscrpljivanja prilikom svladavanja struje vode. Smještaj je također jako bitan, ulaz bi trebao biti što bliže pregradi vodotoka kako ga organizmi ne bi promašili i tako ušli u mrtvu zonu između ulaza u riblju stazu i pregrade, ali i izvan područja jakih turbulencija.

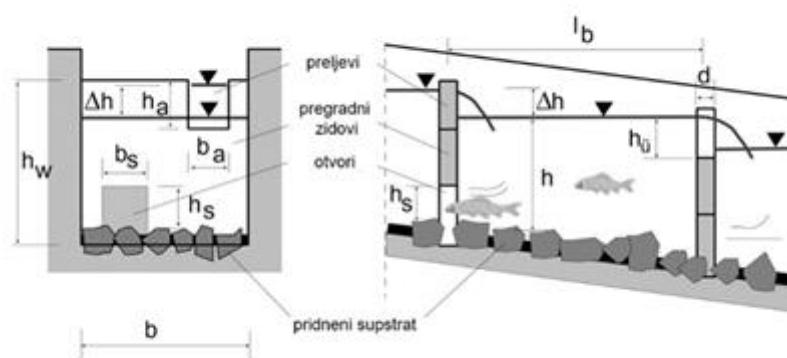
[5]



Slika 1.3 Tehnički tipovi ribljih staza [6]

### 1.4 Riblje staze bazenskog tipa

Riblje staze bazenskog tipa jedne su od najstarijih vrsta ribljih staza. Zbog svojih raznih prednosti i danas su u širokoj primjeni. Osnovni princip izgradnje ribljih staza ovoga tipa je podjela kanala na bazene gradnjom vertikalnih pregrada koje osiguravaju stepenasti pad vodnog lica od gornje do donje vode. Protok se ostvaruje kroz otvore u pregradnim zidovima ili preko preljeva, a potencijalna energija se disipira postepeno duž bazena (Slika 1.4).



Slika 1.4 Shema bazena s odgovarajućim oznakama prema [5]

Ovisno o vrsti riba, migracija se odvija kroz otvore ili preko preljeva što je jedna od prednosti ove vrste ribljih staza naspram ostalih jer se riblje vrste uvelike razlikuju po plivačkim sposobnostima i veličini. Pri migraciji, ribe svladavaju veće brzine samo prilikom prolaska kroz otvore, dok su bazeni predviđeni kao područje za odmor. Preduvjet za prolaz svih migracijskih vrsta, a ne samo riba, je uređenje dna prirodnim agregatom kao i u koritu. Obično se ovakvi tipovi staza konstruiraju u pravcu, od uzvodnog do nizvodnog dijela, međutim ponekad s obzirom na raspoloživi prostor i visinu koju je potrebno svladati postoje situacije u kojima imaju i nekoliko lomova od 180 stupnjeva (Slika 1.5).





Slika 1.5 Riblja staza bazenskog tipa uz malu hidroelektranu u Njemačkoj

Brzine toka usko su povezane s razlikom u razini vode između pojedinih bazena. Prihvatljiva razlika razine vode između bazena iznosi  $\Delta h = 0,15$  m, a maksimalna ne bi smjela bit veća od  $\Delta h = 0,20$  m. Nagib se dobiva kao omjer između razlike u razini voda i duljine bazena

$$I = \frac{\Delta h}{l_b} \quad (1)$$

Za preporučene duljine bazena od 1,0 - 2,25 m, nagibi se kreću od 1:7 - 1:15. Ukupni broj potrebnih bazena se dobije iz omjera ukupne visine  $h_{tot}$  (razlike u maksimalnoj razini vode uzvodno u rezervoaru i minimalnoj razini nizvodno od pregrade prema kojoj je projektirana riblja staza) i dozvoljene razlike u razini voda između dva bazena ( $\Delta h$ ).

$$n = \frac{h_{tot}}{\Delta h} - 1 \quad (2)$$

Kod projektiranja bazena, uzimaju se dimenzije koje osiguravaju dovoljan prostor ribama za kretanje ili odmor, ali i koje postižu disipaciju energije vode bez velikih turbulencija. Također, uzimaju se u obzir plivačke karakteristike očekivane riblje vrste i očekivani broj migracijskih riba. Tablica 1-1 [7]

Tablica 1-1 Preporučene dimenzije pojedinih elemenata konstrukcije ribljih staza bazenskog tipa i pripadni hidraulički uvjeti prema [7]

		<i>Zona pastrve, gornji tok</i>	<i>Zona lipljena</i>	<i>Zona mrene</i>	<i>Zona deverike</i>
<i>Dimenzije bazena [m]</i>	<i>Duljina</i>	$>1,0$	$1,4-2,0$		
	<i>Širina</i>	$>0,8$	$1,0-1,5$		
	<i>Dubina vode</i>	$>0,6$	$0,6-0,8$		
<i>otvori</i>		$0,2 \times 0,2$	$(0,25-0,35) \times (0,25-0,35)$		
<i>Protok [m<sup>3</sup>/s]</i>		$0,05-0,1$	$0,08-0,2$		
<i>Max razlika vodnih lica između bazena [m]</i>		$0,20$			

Za funkcioniranje riblje staze bazenskog tipa neki od najvažniji parametri su:

- Brzina tečenja u prolazima ne smije biti preko 2 m/s
- Osiguranje minimalnog protoka
- Volumetrijska disipacija snage ne smije prelaziti 150 W/m<sup>3</sup>

Volumetrijska disipacija snage generalni je pokazatelj razine agitacije (tj. grubi pokazatelj intenziteta turbulencije). Definirana je u funkciji gustoće vode, ubrzanja sile teže, protoka vode, razlike razina vode ispred i iza otvora bazena, svjetle duljine i širine bazena i prosječne dubine toka mjerene u centru bazena [m]. [7]

Kao što je već spomenuto u tekstu jedna od glavnih prednosti ovog tipa ribljih staza je pogodnost za migraciju svih ribljih vrsta, kao i mala potreba za vodom (zbog malih protoka) i normalne razlike u razinama voda. S druge strane, potrebna su česta održavanja zbog potencijalnog zatrpavanja pridnenih otvora nanosom što zahtjeva redovito održavanje i čišćenje.

## 2. PREGLED STANJA ZNANJA

Sami počeci istraživanja ribljih staza sežu još u 20. stoljeće, kada su kasnih 40-ih godina na Sveučilištu u Iowi, u Sjedinjenim Američkim Državama, A.M. McLeod i Paul Nemeny objavili „*An investigation of fishways*“ u kojem su prikazali općenito problematiku ribljih staza te su na kraju došli do zaključka da je potrebno razjasniti razne učinke kroz temeljita hidraulička mjerenja, prebrojavanje riba i promatranje napora koji im je potreban za svladavanje same staze, radije nego proučavati velik broj modela. [8]

Prva ozbiljna znanstvena istraživanja ribljih staza započinju 80-tih godina prošlog stoljeća u Kanadi. Autori Rajaratnam, N., Van der Vinne, G. i Katopodis, C. (1986) u članku „*Hydraulics of Vertical Slot Fishways*“ istraživali su osnovne hidrauličke uvjete tečenja u ribljim stazama s vertikalnim prorezima. Ukupno je ispitivano 7 modela od kojih su neki uključivali konvencionalni dizajn. Stanje uniformnog toka je definirano za one slučajeve za koje postoji linearna veza relativne dubine i brzine protoka. Za neke od modela su koristili *Bakhmeteff-Chow* metodu pomoću koje su analizirali nejednolik protok. Također su provodili zapažanja vezano za brzine u utorima i raspored strujnica u bazenu. [9]

Nadalje, tijekom 90-tih godina velik broj istraživanja se također provodio u Kanadi, u Hidrauličkom laboratoriju Sveučilišta Alberta u Edmontonu. Jedno od tih istraživanja je istraživanje riblje staze s vertikalnim prorezima, „*New design for vertical slot fishways*“ 1992. godine od već prethodno spomenutih autora N. Rajaratnam, C. Katopodis i S. Solan.

U sklopu istraživanja napravljeno je 18 fizikalnih modela ribljih staza različitog dizajna u kojima je mjerena dubina i brzina vode pri različitim protocima. Rezultat ovog istraživanja su preporuke za optimalnu geometriju riblje staze koja se zadržala do danas. [10]

Hidrauličke karakteristike tečenja u ribljim stazama počinju se detaljno promatrati tek kasnijih godina. Prema dobivenoj optimalnoj geometriji iz prvih istraživanja kasnijih godina rađena su mnogobrojna mjerenja različitih hidrauličkih karakteristika tečenja kroz riblju stazu. U istraživanju provedenom u Hidrauličkom laboratoriju Sveučilišta Alberta u Edmontonu, Kanada 1999. godine (*Structure of flow in vertical slot fishway*) geometrija prethodno definirana kao optimalna dodatno je istražena kako bi se dobile hidrauličke karakteristike tečenja kao što su karakteristike mlaza u prorezima i cirkulirajuće zone u bazenu pri različitim nagibima dna bazena. Dobiveni rezultati pokazuju da pri manjim nagibima bazena veći dio volumena je cirkulirajuća zona koja ribama pruža odmor te se tečenje odvija dvodimenzionalno. Pri većim nagibima tečenje je trodimenzionalno te su cirkulirajuće zone manje. [11]



Sljedećih godina nastavno su provedena detaljna istraživanja disipacijske energije („*Mean Flow and Turbulence Structure in Vertical Slot Fishways*“). Rezultati prikazani u spomenutom članku također pružaju korisne informacije o razini disipacije energije u ovisnosti o nagibu dna bazena. Ti su rezultati važni za razumijevanje mogućih učinaka tečenja za prolaz riba i korisni su i za biologe i projektante ribljih staza. [12]

U kasnijim istraživanjima („*Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways*“) doneseni su zaključci kako riblje staze s vertikalnim prorezima mogu biti problematične za male ribe zbog velikih cirkulirajućih zona kroz koje ne mogu proći. Disipacijska energija koja djeluje nepovoljno na prolaz riba povećava se povećanjem nagiba. [13]

Osim fizikalnih modela zadnjih godina rađeni su i numerički modeli koji ako su dobro kalibrirani mogu vjerno prikazivati hidrauličke karakteristike tečenja u bazenima.

Rezultati numeričkog istraživanja s *OpenFOAM CFD* paketom („*3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways*“) uspoređeni s laboratorijskim mjerenjima pružaju prihvatljive rezultate te se mogu koristiti pri problemima u projektiranju ribljih staza. [14]

Iako se riblje staze bazenskog tipa često koriste, postoji relativno malo eksperimentalnih istraživanja koja su provedena vezano za njih.

Jedan od tih članaka je „*Pool-Type Fishways: Two Different Morpho Ecological Cyprinid Species Facing Plunging and Streaming Flows*“, autora Paulo Branco, José M. Santos, Christos Katopodis, António Pinheiro, Maria T. Ferreira. Cilj njihovog rada je bio proučiti ponašanje i performanse dviju vrsta riba s različitim ekološkim karakteristikama u punoj veličini eksperimentalnog bazenskog tipa riblje staze koja nudi dva različita režima protoka: plutajući i strujajući. Dobili su rezultate koji su pokazali da su obje vrste prolazile kroz površinu otvora lakše tijekom protoka strujanja nego tijekom protoka plutanja. Pokazalo se da su obje vrste bile uspješnije krećući se uzvodno u strujajućem protoku nego u plutajuće. Došli su do zaključka da se ovakav tip strujanja se čini najpogodniji za riblje staze u riječnim sustavima gdje se nalazi širok raspon morfo-ekoloških svojstava riba. [15]

Jedan od zanimljivih članaka vezano za riblje staze bazenskog tipa je „*Use of a Scale Model to Design Fishway Resting Pool Improvements*“ gdje su autori proučavali problem odmorišta bazena na konkretnom primjeru na Grand rijeci u Kanadi. Praćenje i studije su pokazale da odmarališta mogu stvoriti značajne prepreke za prolaz riba kroz bazen. Istraživanje je uključivalo terensku istragu i model fizikalne skale za identifikaciju potencijalnih hidrauličkih barijera i ispitivanje modifikacija za uklanjanje istih. Terenska istraživanja su pokazala da su brzine u donjem bazenu takve da vode ribe daleko od izlaza bazena, što je također potvrđeno i u fizikalnom modelu. Za gornji bazen odmarališta je utvrđeno da nema hidrauličkih prepreke za kretanje riba, stoga su provodili brojne potencijalne

modifikacije na donjem dijelu bazena odmarališta kako bi došli do najučinkovitijeg rješenja što im je i bio cilj. [16]

Riblje staze bazenskog tipa predmet su istraživanja rađenog na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje se korištenjem *OpenFOAM CFD* paketa simuliralo tečenje kroz riblju stazu. Istraživanje je rađeno za rješavanje problema nekvalitetno izvedene riblje staze na maloj HE Ilovac na rijeci Kupi. „*Pool fishways hidraulical flow conditions*“.

Cilj analize je bio pokazati ovisnost potrebne razine vode u bazenima i odgovarajuće brzine kroz otvore. Naglasak se stavlja na to da je uvijek važno pažljivo konstruirati ulaz/izlaz riblje staze zbog protoka koji se ostvaruje na tom mjestu kao jedan od ključnih parametara. Varirana je geometrija otvora u poprečnim zidovima (25x25 cm, 30x30 cm, 40x40 cm ) i protok u rasponu od 75 l/s do 175 l/s povećavajući protok za 25 l/s. Također, nagib je bio konstantan u svim bazenima iznosa 6%. [4] Ovaj primjer se navodi kao relevantan iz jednog od razloga što se nalazi na rijeci Kupi koja prolazi kroz teritorijalno područje Republike Hrvatske, a upravo cilj ovog istraživanja je dobiti što bolje rezultate koji bi odgovarali za primjenu u inženjerskoj praksi na širem području Republike Hrvatske. Koristeći sličnu geometriju otvora u rasponu od 24x24 cm do 36x36 cm, povećan je nagib na 12.5 % kako bi se uvidjelo što se događa s brzinama pri strmijim nagibima koji bi bili prikladni za izvedbu na kraćim dionicama, poput pragova i slično. Takve dionice sa strmijim nagibima ne zauzimaju velik prostor, samim time smanjuju i štetni utjecaj na remećenje ekosustava vodotoka jer su kraće i zahtijevaju manji volumen i trošak izgradnje što sveobuhvatno gledano igra veliku ulogu prije projektiranju svih konstrukcija pa tako i ovih.

### **3. CILJ RADA**

Cilj ovog rada je detaljno istraživanje uvjeta tečenja u ribljim stazama bazenskog tipa.

Kako je brzina najvažniji parametar pri projektiranju ribljih staza, cilj istraživanja je za određenu geometriju prikazati rezultatno polje brzine vode u bazenu. Za praktičnu primjenu dobivenih rezultata konstruiran je nomogram brzina vode u ovisnosti o geometriji, tj. duljini bazena i otvorima, koji bi se koristio prilikom projektiranja.

Nomogram definiran na ovaj način bio bi od velikog značaja pri projektiranju ribljih staza jer bi omogućio jednostavan način određivanja geometrije riblje staze na temelju ulaznog podatka o traženoj brzini koja odgovara pojedinoj vrsti riba, čime bi se eliminirala potreba za kompleksnim numeričkim modeliranjem.

## **4. METODOLOGIJA**

### **4.1 Fizikalni model**

#### **4.1.1 Opis fizikalnog modela**

Laboratorijsko ispitivanje fizikalnog hidrauličkog modela provedeno je u prostorijama Zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

U sklopu fakultetskog laboratorija, između ostalog, nalazi se i hidraulički kanal pravokutnog poprečnog presjeka. Kanal je širine 0,9 m i ukupne duljine 18 m, od kojih 13 m predstavlja radnu duljinu za simuliranje uvjeta tečenja vode u koritu. Fizikalni model riblje staze postavljen je u taj kanal. Za ostvarivanje tečenja korištena je cirkulacijska crpka maksimalnog kapaciteta 25 l/s s elektromagnetnim mjerачem protoka za reguliranje protoka u kanalu (Slika 4.1 a)), a rubni uvjeti u modelu ostvaruju se zapornicom na izlazu iz kanala koja kontrolira razinu donje vode (Slika 4.1 b)). Sva voda koja se koristi smještena je u spremniku ispod laboratorija, u koji se na izlazu iz kanala voda ponovno vraća.



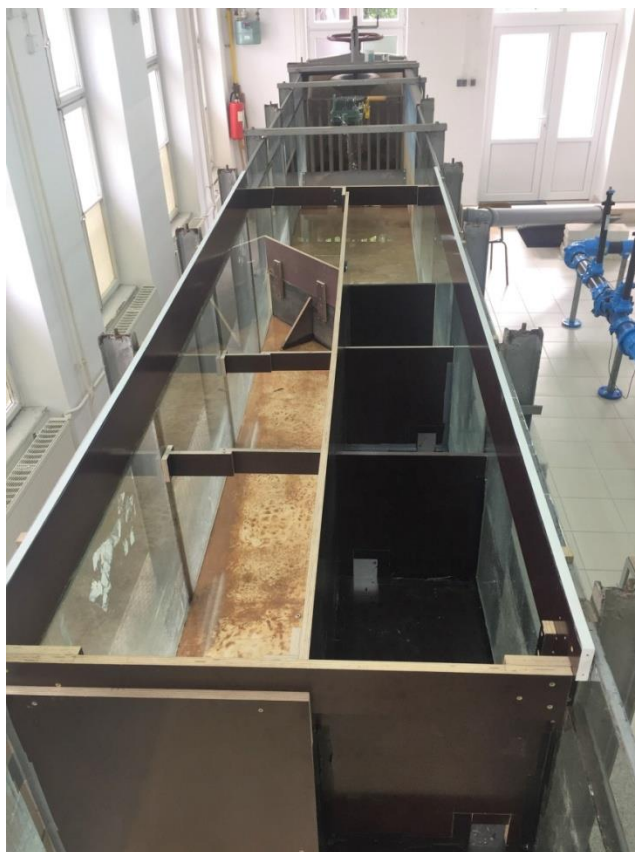
Slika 4.1 a) Elektromagnetni mjerач protoka



Slika 4.1 b) Zapornica na izlazu iz kanala

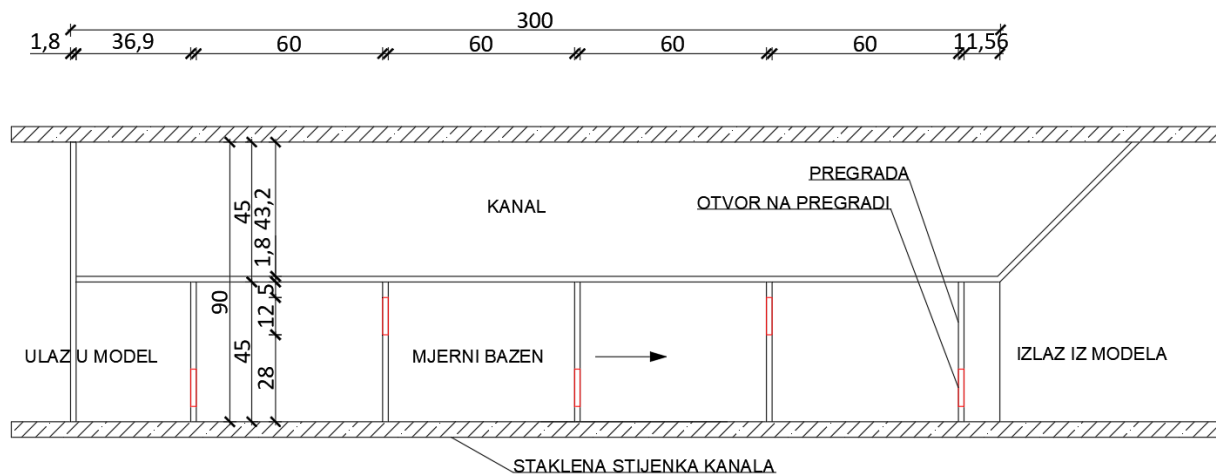
Model riblje staze izrađen je od vodonepropusne šperploče debljine 1,8 cm i smješten u spomenuti kanal tako da mu je desna strana, obzirom na smjer tečenja vode, staklena bočna stjenka kanala što omogućuje vizualno opažanje pojava do kojih dolazi tijekom ispitivanja. (

Slika 4.2 )

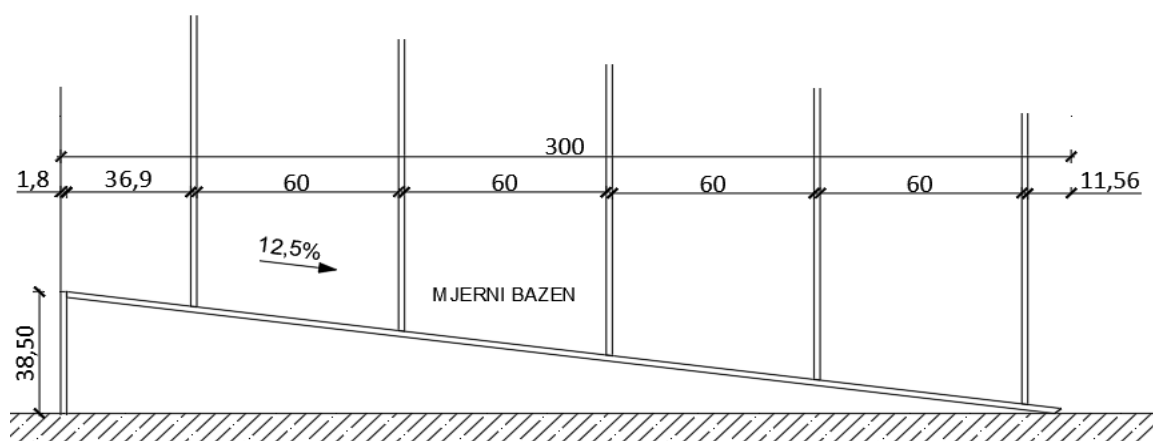


Slika 4.2 Model riblje staze u laboratorijskom kanalu

Sam je model riblje staze širok 0,45 m i 3m dug s konstantnim padom dna od 12,5% što je izvedeno tako da je ulaz u riblju stazu povišen za 0,385 m u odnosu na izlaz (Slika 4.3.) Konstrukcija modela sastoji se od dijela koji se nije mijenjao tijekom cijelog vremena ispitivanja, a to su bočna stjenka ( Slika 4.2.) i nagnuto dno, i od pregrada debljine 1,8 cm pričvršćenih vijcima od nehrđajućeg čelika na njih.



Slika 4.3 Tlocrt varijante s razmakom pregrada 60 cm i otvorima 12x12 cm



Slika 4.4 Poprečni presjek varijante s razmakom pregrada 60 cm i otvorima 12x12 cm

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 (Slika 4.5).



Slika 4.5 Pregrada s promjenjivim otvorima

Hidraulički model je fizikalni model u kojem se simulira strujanje vode. U fizikalnom modelu se odvijaju isti procesi kao i u prirodi [17], stoga spoznaje do kojih dolazimo promatrajući pojave u modelu možemo primijeniti i na pojave u prototipu u prirodi. Međutim, to je jedino moguće ukoliko fizikalni model zadovoljava uvjete sličnosti pri čemu razlikujemo geometrijske, kinematičke i dinamičke uvjete sličnosti. Model zadovoljava uvjete sličnosti ako se određene fizikalne veličine na prototipu mogu odrediti pomoću izmjerenih veličina na modelu jednostavnim množenjem konstantom koja se naziva koeficijentom sličnosti. Prilikom ovog mjerenja korištena je Froudova sličnost kod koje se promatra odnos inercijskih i gravitacijskih sila budući da su to sile koje su dominantne u ovom ispitivanju. Froude-ov kriterij sličnosti se koristi u slučajevima kad su dominantne sile gravitacije i sile inercije - to odgovara strujanju sa slobodnom površinom (istjecanje, prelijevanje) u zonama malih gubitaka energije. Takvi objekti se često nazivaju i kratki objekti. [17]

$$\frac{SILAINERCIJE}{SILAGRAVITACIJE} = \frac{\rho \cdot L^2 \cdot v^2}{\rho \cdot L^3 \cdot g} = \frac{v^2}{g \cdot L} = Fr \quad (3)$$

Da bi kriterij sličnosti bio ispunjen mora vrijediti:

$$\frac{g \cdot L}{v^2} = \frac{g \cdot L'}{v'^2} \quad (4)$$

$$\frac{1}{Fr^2} = \frac{1}{Fr'^2} \quad (5)$$

Za koeficijent geometrijske sličnosti modela odabrano je  $\lambda=3$ , što znači da je fizikalni model riblje staze tri puta manji od riblje staze istih karakteristika koja bi se gradila u prirodi. Mjerilo 1:3 dovoljno je veliko da se izbjegnu neželjeni efekti trenja koji bi bili prisutni u manjim modelima, ali je i dovoljno malo da bi model bio ekonomičan te da dimenzijama odgovara prostoru laboratorija u kojem je smješten. Prema ovom mjerilu odnos protoka i brzine u prirodi i na modelu je:

$$Q = \lambda^{2.5} \cdot Q' \quad (6)$$

$$v = \sqrt{\lambda} \cdot v' \quad (7)$$

#### 4.1.2 Opis ispitivanja

Nakon odabranog mjerila i dimenzija (Poglavlje 4.1.1), model je izrađen u laboratorijskoj radionici i postavljen u spomenuti hidraulični kanal.

Nakon toga je odabrana referentna razina u kanalu te označena na četiri mjesta (ulaz vode u kanal, ulaz vode u model, izlaz vode iz modela i preljev) korištenjem geodetskog teodolita radi točnog očitavanja razine vode u cijelom kanalu.

Laboratorijsko ispitivanje započinje paljenjem crpke koja kanal puni vodom. Kada dosegne željenu razinu vode u kanalu, protok na crpki se fino regulira elektromagnetnim mjeračem i/ili zatvaračem na vrijednost koja će razinu održavati istom tijekom cijelog vremena ispitivanja. U svrhu ovog rada ispitano je devet varijacija modela bazenskih ribljih staza nagiba 12,5% (Tablica 4-1). Dogovorena je nomenklatura „nagib dna“-„razmak pregrada“-„veličina otvora“.



Tablica 4-1 Pregledni prikaz geometrije svih varijanti korištenih pri modeliranju

Model	Nagib [%]	Duljina bazena [cm]	Dimenzije otvora [cm]
125-45-8	12,5	45	8×8
125-45-10			10×10
125-45-12			12×12
125-60-8		60	8×8
125-60-10			10×10
125-60-12			12×12
125-90-8		90	8×8
125-90-10			10×10
125-90-12			12×12

Pri početku mjerenja pojedine varijante registrirani su uvjeti ispitivanja, a to su protok pumpe Q [l/s], gornja voda GV [m], donja voda DV [m] i visina stupca vode u mjernom bazenu h [m] (Tablica 4-2)

Tablica 4-2 Uvjeti ispitivanja

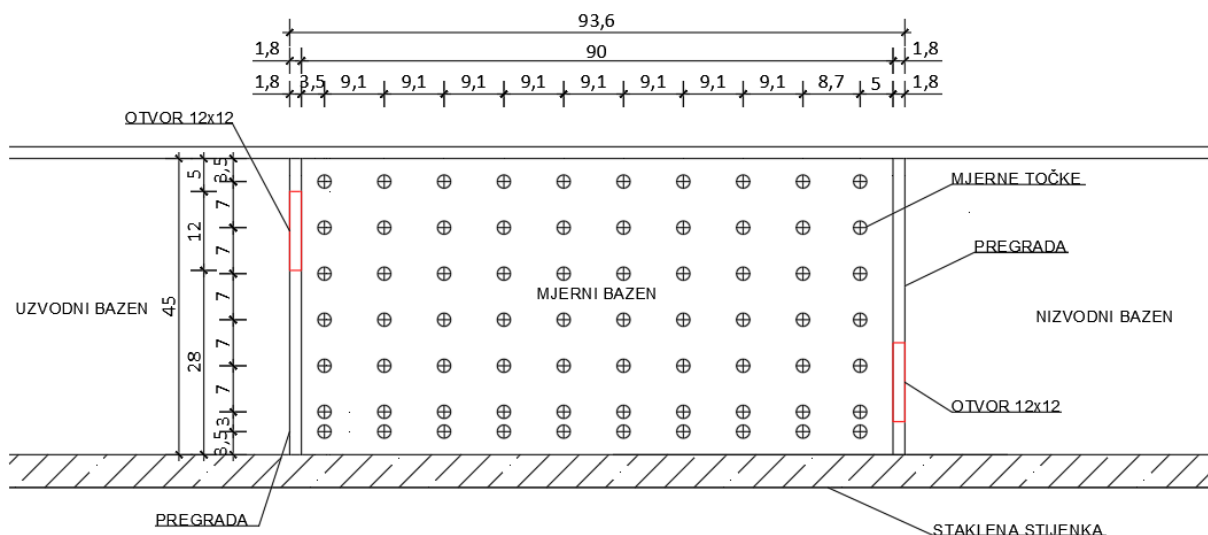
Model	GV [cm]	DV [cm]	Q [l/s]	h - Dubina vode u bazenu [cm]
125-45-8	69	26.5	6.5	17
125-45-10	69	26.5	8.5	18
125-45-12	69	26.5	11.5	18
125-60-8	61	22	6.4	19
125-60-10	62	24	9	23
125-60-12	62	22	11.5	23
125-90-8	64	27	5.9	21
125-90-10	64	27	9.2	21.5
125-90-12	64	27	12.9	21.5

Za svaku od varijanti brzine su mjerene u jednom bazenu koji je određen kao mjerodavan za svaku varijantu. 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 varijantu modela(

Slika 4.6)

Točke su definirane koristeći pravilan raster kako bi se osiguralo preklapanje pozicija mjernih točaka u svakoj varijanti. Sve točke su mjerene u pridненоj C, srednjoj B i površinskoj A razini. Za razmak pregrada od 45 cm bilo je 25 mjernih točaka u svakoj razini, za razmak pregrada od 60 cm bilo je 49 točaka u svakoj razini i za razmak pregrada od 90 cm bilo je 70 točaka u svakoj razini.

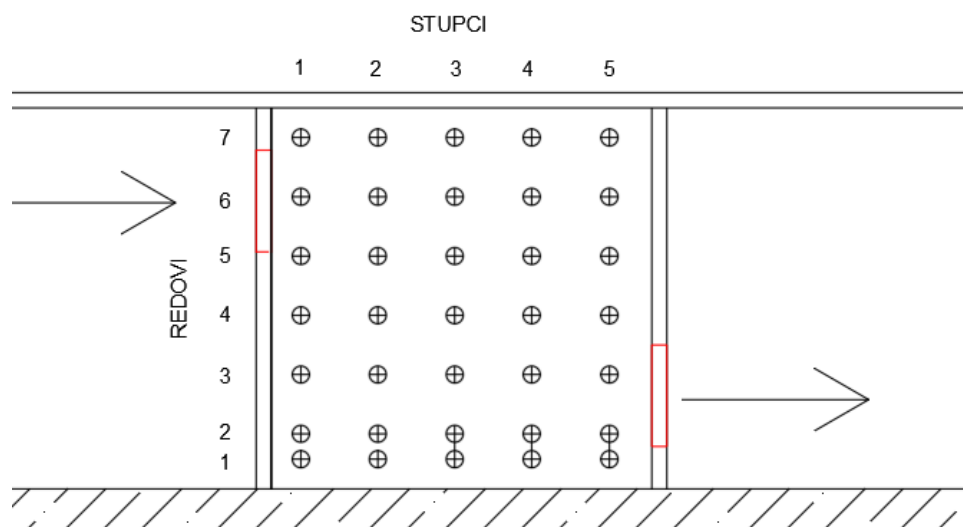
Tako je, na primjer, za ispitivanje varijante modela s razmakom pregrada od 90 cm bilo potrebno 210 minuta snimanja brzina za sve točke ne računajući vrijeme potrebno da se ADV uređaj pomakne od jedne točke do druge. U jednom je danu bilo moguće snimiti točke najviše jedne cijele varijante (A, B i C razina) zbog dodatnog vremena koje je potrebno za zamjenu pregrada i veličina otvora. Za mjerenje svih varijanti ribljih staza bazenskog tipa obuhvaćenih u ovom radu bilo je potrebno devet dana mjerenja na fizikalnom modelu u laboratoriju.



Slika 4.6 Raspored mjernih točaka za varijantu 125-90-12

Nazivlje mjernih točaka definirano je po sistemu matrice, po stupcima i redovima u kojima se točke nalaze (

Slika 4.7). Broj redova je uvijek 7, a broj stupaca se mijenja od 5 do 10 ovisno o razmaku između pregrada.



Slika 4.7 Raspored mjernih točaka i njihovog nazivlja za varijantu 125-45-12

Da bi se ADV uređaj brzo i lako premjestio iz točke u točku, napravljena je greda na koju je uređaj pričvršćen i po kojoj se može micati uzdužno, poprečno i po visini ( Slika 4.9). ADV uređaj spojen je na laboratorijsko računalo pomoću kojeg se upravlja snimanjem podataka putem Vectrino softwaru. U svakoj su se točki podaci o brzini prikupljali 60 s zbog pretpostavke da se u 60 s mogu snimiti sve eventualne brzine pri održavanju istih rubnih uvjeta [12].



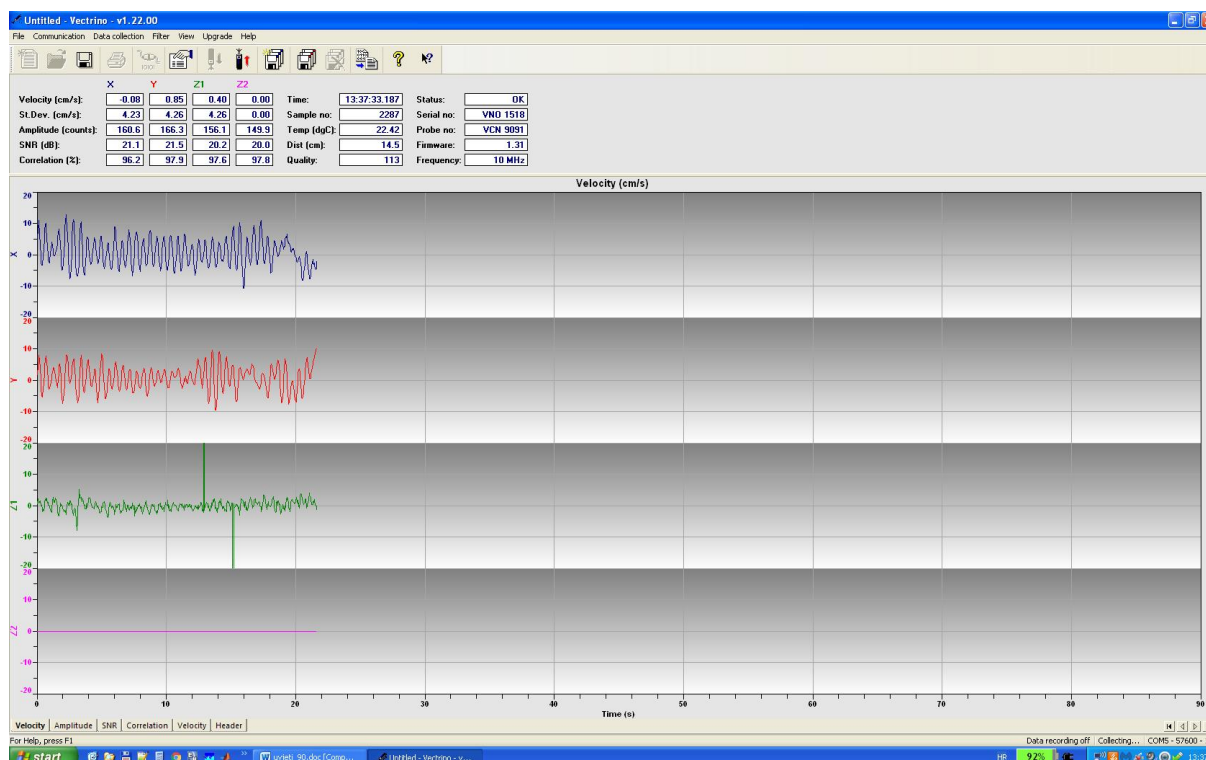
Slika 4.8 ADV uređaj



Slika 4.9 Greda za pomicanje ADV uređaja

Uređaj trodimenzionalno snima brzinu kao  $u$ ,  $v$  i  $w$  komponente pri čemu se treba voditi računa o smjeru u kojem je glava uređaja okrenuta. Komponenta  $u$  je uzdužnog smjera (smjer tečenja vode), komponenta  $v$  je poprečnog smjera, a  $w$  okomitog. Mjerni volumen ADV uređaja nalazi se 5 cm od glave uređaja. Uređaj radi na principu slanja kratkog zvučnog impulsa i snimanja njegovog odjeka u svim krakovima koristeći Doppler tehniku. Da bi snimanje bilo točno impuls se mora moći odbiti od nešto, 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. 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  $w$  (

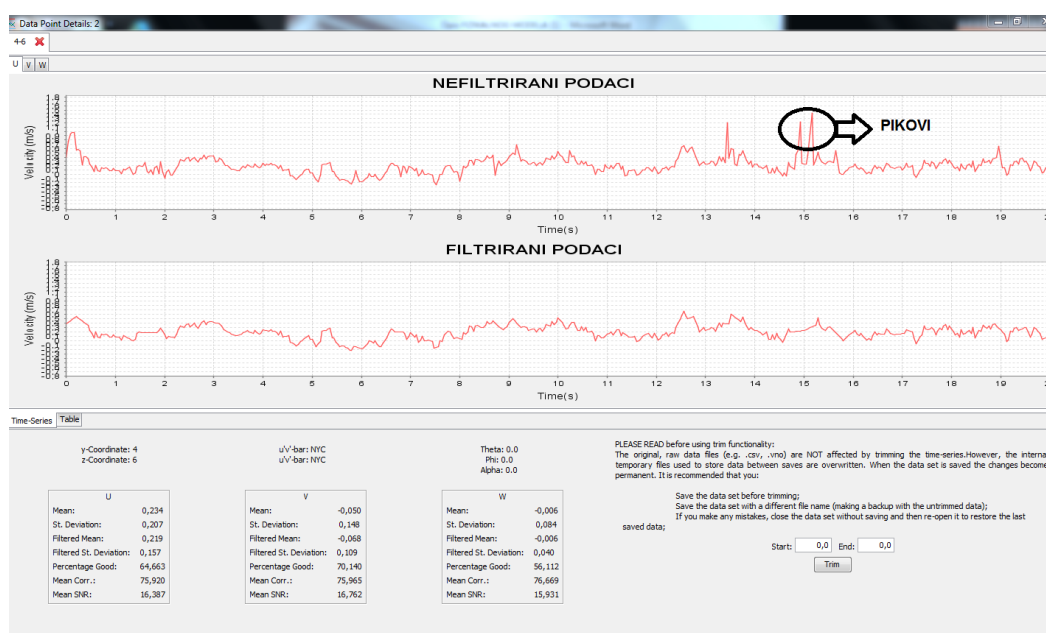
Slika 4.10). Uređaj je tijekom cijelog ispitivanja podešen na 25Hz. Opseg snimanja brzina pojedine točke mijenjan je od 0,3 m/s do 4,0 m/s ovisno snima li se točka koja je u mirnom dijelu bazena ili blizu otvora pod utjecajem mlaza. Važno je pratiti i SNR (*Signal/Noise Ration*) tijekom mjerenja koji treba biti  $\geq 15$  dB. 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. [18]



Slika 4.10 Rad Vectrino programa na računalo

### 4.1.3 Opis obrade podataka

Sve dobivene sirove podatke o brzinama potrebno je dodatno obraditi tj. filtrirati kako bismo se riješili nevažjećih podataka, tj. „pikova“ koji se mogu pojaviti (Slika 4.11). 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.



Slika 4.11 Prikaz nefiltriranih i filtriranih podataka

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. [19]

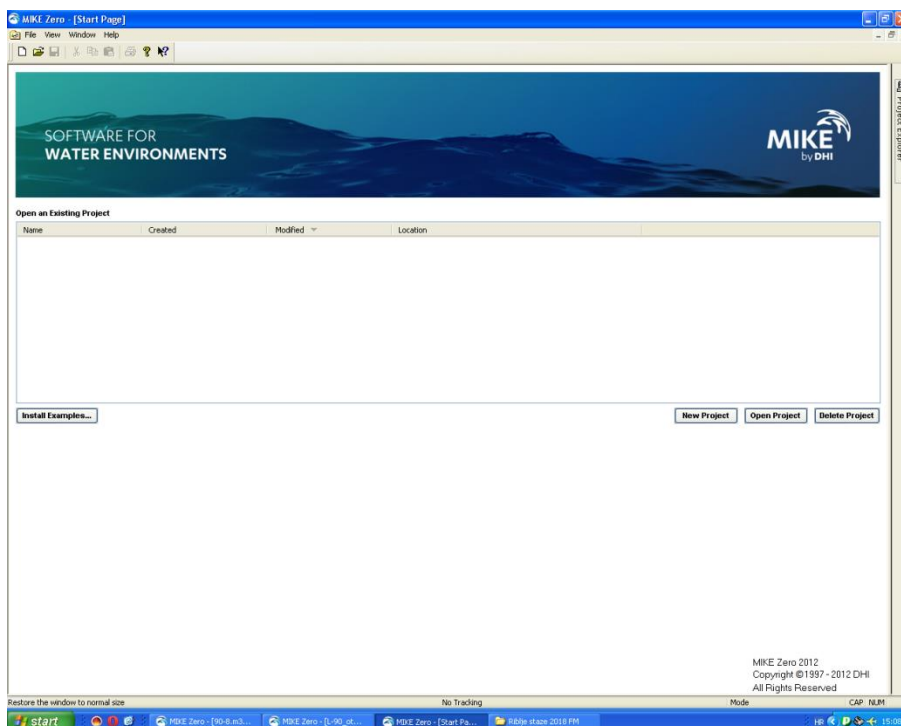
## **4.2 Numerički model**

### **4.2.1 Općenito**

U današnje doba javlja se sve veća potreba za brzim i učinkovitim rješavanjem problema, a numeričko modeliranje postavlja se kao logičan pristup istom. Da bi numerički model bio vjerodostojan njegovu točnost potrebno je potvrditi uspoređivanjem sa stvarnim izmjerenim veličinama, u ovom slučaju sa fizikalnog modela. Kada se ustanovi kolika je eventualna pogreška numeričkog modela, kao takav bi se mogao koristiti i u drugim situacijama s pretpostavkom iste pogreške što bi uvelike ubrzalo cijeli postupak projektiranja/istraživanja u budućnosti. Rezultate numeričkog modeliranja uvijek treba uzimati s dozom opreza jer su aproksimativne naravi. Pri tome je vlastita procjena, iskustvo i razumijevanje pojedinog programa od velike važnosti za dobru interpretaciju dobivenih rezultata. Motivacija za izradu numeričkog modela u ovom istraživanju je da se istraži mogućnost simuliranja uvjeta tečenja u ribljim stazama programskim paketom MIKE. MIKE se sastoji od raznih dijelova pogodnih za rješavanje pojedinih hidrauličkih problema od kojih su u ovom slučaju korišteni MIKE Zero i MIKE 3. [20]

### **4.2.2 Model trodimenzionalnog strujanja u MIKE-u**

MIKE je polivalentni program koji je često korišten u hidrotehnici, a služi za 2D i 3D modeliranje tekućina, valova, pronosa nanosa i sl.. Na računalima u prostorima Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu dostupna je verzija iz 2007.godine. Program MIKE jednostavnog je sučelja i njegovo korištenje dio je nastavnog programa na Zavodu za hidrotehniku zbog čega je i odabran za ovaj rad (Slika 4.12 )



Slika 4.12 Sučelje programa MIKE Zero

U programu MIKE koristi se modelski sustav pogodan za analizu trodimenzionalnog strujanja u kontinuiranoj akvatičkoj sredini poput mora, jezera i rijeka. U sklopu modela implementirane su 3D Reynoldsove jednadžbe uz Boussinesqovu pretpostavku o hidrostatskoj raspodjeli tlaka po vertikali stupca analizirane tekućine. U modelu je jednadžba kontinuiteta definirana sljedećom jednadžbom:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (7)$$

gdje je:  $u, v, w$  komponente brzina u  $x, y$  i  $z$  smjeru;  $S$  intenzitet ponora ili izvora.

Dvije horizontalne komponente zakona o očuvanju količine gibanja glase:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_{tv} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_{tv} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \quad (9)$$



gdje je:  $h$  trenutna dubina tekućine ( $= \eta + d$ );  $d$  srednja normalna dubina;  $\eta$  trenutno nadvišenje razine vodnog lica iznad srednje normalne dubine;  $f$  Coriolisov parametar ( $2\Omega \sin \phi$ ;  $\phi$  - geografska latituda);  $\nu_{TV}$  kinematski koeficijent turbulentne viskoznosti u vertikalnom smjeru;  $p_a$  atmosferski tlak;  $g$  gravitaciono ubrzanje;  $\rho$  gustoća tekućine;  $\rho_0$  referentna gustoća tekućine;  $x, y$  prostorne koordinate;  $t$  vrijeme;  $u_s, v_s$  komponente brzine u  $x$  i  $y$  smjeru za ponor/izvor.

Članovi horizontalnog naprezanja opisani su putem odnosa gradijent-naprezanje uz pojednostavljenje na sljedeći način:

$$F_U = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2\nu_{tH} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{tH} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (10)$$

$$F_V = \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{tH} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2\nu_{tH} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) \quad (11)$$

gdje je:  $\nu_{tH}$  kinematski koeficijent turbulentne viskoznosti za horizontalne  $x$  i  $y$  smjerove.

Rubni uvjeti na površini ( $z = \eta$ ) i dnu ( $z = -d$ ) za komponente brzina  $u, v, w$  su:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \quad \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t} (\tau_{SX}, \tau_{SY}) \quad (\text{na } z = \eta) \quad (12)$$

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t} (\tau_{BX}, \tau_{BY}) \quad (\text{na } z = -d) \quad (13)$$

gdje su  $\tau_{SX}$  i  $\tau_{SY}$  komponente naprezanja na površini, a  $\tau_{BX}$ ,  $\tau_{BY}$  komponente naprezanja na dnu.

Površinsko naprezanje pri dnu (trenje sa dnom) definirano je jednažbama 6.7:

$$\tau_{BX} = \rho_0 c_f u_{BX} |u_{BX}| \quad ; \quad \tau_{BY} = \rho_0 c_f u_{BY} |u_{BY}| \quad ; \quad c_f = 1 / \left( \frac{1}{\kappa \ln(\Delta z / z_0)} \right)^2 \quad (14)$$

gdje je:  $u_{BX}, u_{BY}$  pridnene brzine u  $x$  i  $y$  smjeru na vertikalnoj udaljenosti  $\Delta z$  od dna;  $c_f$  koeficijent trenja uz pretpostavku važenja logaritamskog profila brzina od dna do  $\Delta z$ ;  $z_0$  karakteristična duljina za hrapavost dna;  $\kappa$  von Karmanova konstanta.

Jednažba pronosa (kontinuiteta) za skalarna polja glasi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = F_c + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) - k_p C + C_s S \quad (15)$$

$$(F_c) = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (C) \quad (16)$$

gdje je:  $C$  koncentracija skalarnog polja u pronosu;  $k_p$  linearnog odumiranja skalarnog polja;  $C_s$  koncentracija skalarnog polja u pronosu na poziciji izvora;  $F_c$  član horizontalne turbulentne difuzije za promatrano skalarno polje.

Model turbulencije definiran je na bazi koncepta vrtložne viskoznosti uz separaciju vertikalnog i horizontalnih smjerova. U vertikalnom smjeru primjenjuje se  $k$ - $\varepsilon$  model sa sljedećim obilježjima:

$$v_{tV} = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (17)$$

gdje je:  $c_\mu (=0,09)$  empirijska konstanta  $k$  -  $\varepsilon$  modela.

Model  $k$ - $\varepsilon$  primjer je jednog od najpopularnijih turbulentnih modela. Zbog svoje sposobnosti, koriste ga i znanstvenici i inženjeri.

Vrijednosti turbulentne kinetičke energije  $k$  (po jedinici mase) i njezine disipacije  $\varepsilon$  dobivaju se iz pripadnih jednadžbi pronosa:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} + \frac{\partial wk}{\partial z} = F_k + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_{tV}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - \varepsilon \quad (18)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial w\varepsilon}{\partial z} = F_\varepsilon + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_{tV}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} B - c_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (19)$$

$$P = \frac{\tau_{xz}}{\rho_0} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\tau_{yz}}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial z} \approx v_{tV} \left( \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (20)$$

$$B = - \frac{v_{tV}}{\sigma_t} N^2 \quad (21)$$

$$N^2 = - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (22)$$

$$(F_k, F_\varepsilon) = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (k, \varepsilon) ; D_h = \frac{v_{tH}}{\sigma_k} ; D_h = \frac{v_{tH}}{\sigma_\varepsilon} \quad (23)$$

gdje su:  $\sigma_k (=1)$ ,  $\sigma_\varepsilon (=1,3)$ ,  $c_{1\varepsilon} (=1,44)$ ,  $c_{2\varepsilon} (=1,92)$ ,  $c_{3\varepsilon} (=0)$  empirijske konstante  $k$ - $\varepsilon$  modela;  $P$  produkcija posmičnog napreznaja;  $B$  član produkcije uzgonskog djelovanja;  $N$  Brunt-Vaeisalae frekvencija;  $F_k$ ,  $F_\varepsilon$  članovi horizontalne turbulentne difuzije.

Rubni uvjet za turbulentnu kinetičku energiju  $k$  i ratu njezine disipacije  $\varepsilon$  na dnu ( $z = -d$ ) definiran je na sljedeći način:

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} U_{\tau b}^2 \quad ; \quad \varepsilon = \frac{U_{\tau b}^2}{k \Delta z_b} \quad (24)$$

gdje je:  $\Delta z_b$  vertikalna udaljenost od dna na kojoj je primijenjen rubni uvjet.

Kinematski koeficijent turbulentne viskoznosti u horizontalnom smjeru  $\nu_{tH}$  tretiran je Smagorinsky konceptom:

$$\nu_{tH} = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (25)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad (26)$$

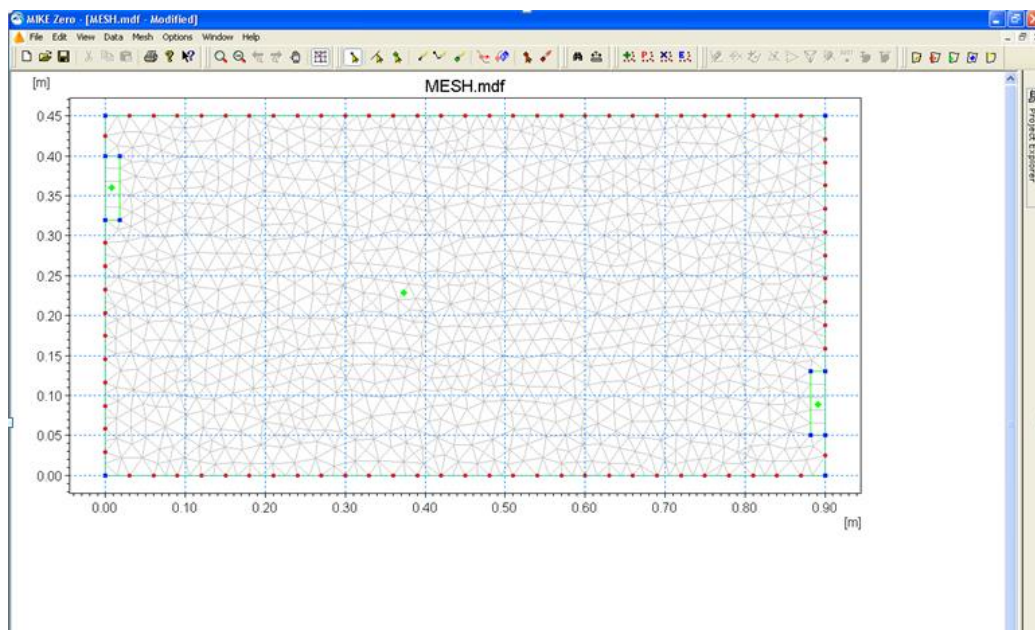
gdje je:  $c_s$  Smagorinsky konstanta;  $l$  karakteristična duljina;  $S_{ij}$  rata deformacije.

Vrtložna viskoznost se izračunava pomoću različitih modela turbulencije. U turbulentnim tokovima vrtložna viskoznost nije svojstvo tekućine, već ovisi o karakteristikama protoka. Na njega utječe oblik i narav bilo koje krute granice kao i intenzitet turbulencije stoga predstavlja jedan od glavnih problema pri numeričkom modeliranju tekućina. [20]

### 4.2.3 Opis numeričkog modela

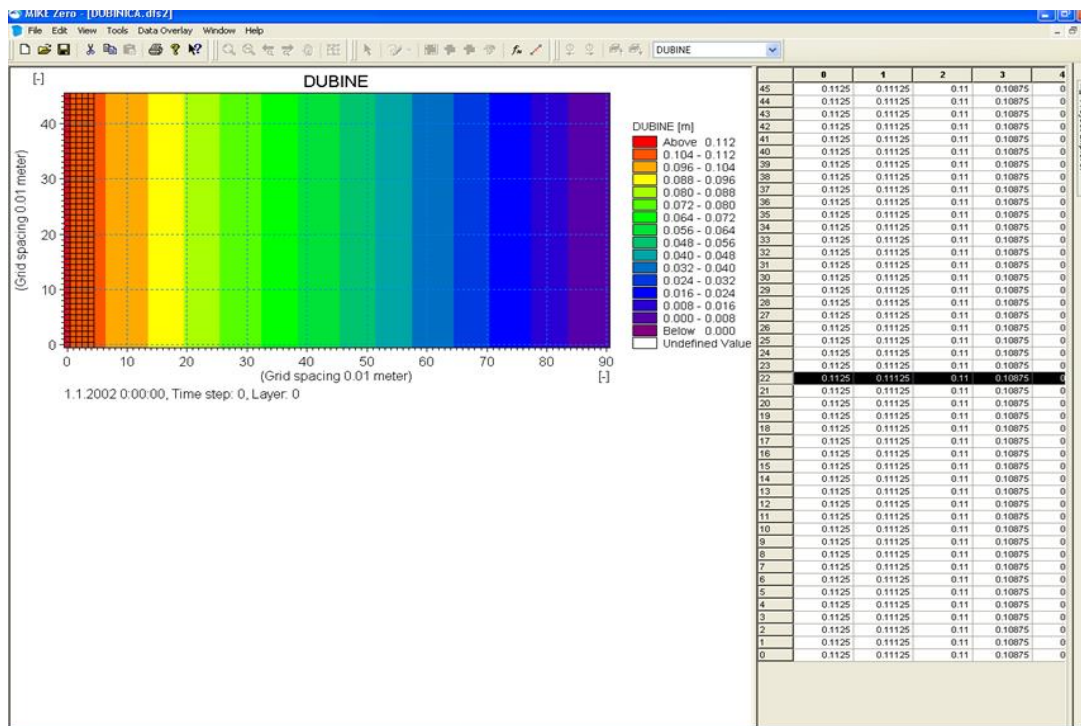
Budući da se numerički model riblje staze radio po uzoru na fizikalni model modelirana je geometrija mjernog bazena za svaku varijantu koja je mjerena u fizikalnom modelu.

Prvi korak izrade modela u MIKE Zero- je definiranje geometrije i „mreže“ modela kao .mdf datoteke (*Mesh Generator*). Na geometriji definiranoj fizikalnim modelom generira se triangularna mreža odabrane veličine stranica trokuta 0.003 m za sve varijante modela (Slika 4.13). Takva veličina trokuta za ovu mrežu dovoljno je mala da daje dovoljno točne rezultate, a dovoljno velika da proračun ne traje predugo. Vrijeme koje je potrebno programu za jednu simulaciju ovisi o detaljnosti mreže koja je izrađena za model, o broju ulaznih i izlaznih podataka koji su mu zadani i o samoj veličini geometrije modela, kao i o specifikacijama računala na kojem se proračun odvija. Vrijeme jedne opisane simulacije u prosjeku traje 2 h.

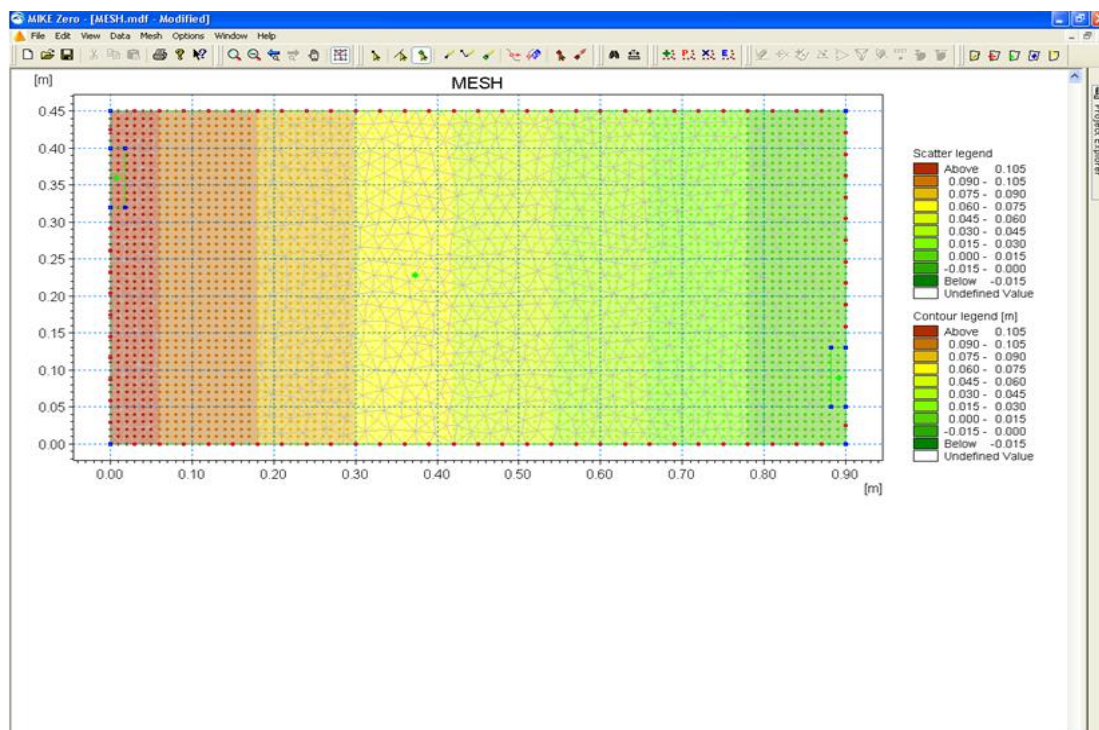


Slika 4.13 Generirana mreža za varijantu 125-90-8 u MIKE Zero-u

Na mjestu pravokutnih otvora u pregradama riblje staze, to jest ulazu i izlazu iz bazena, napravljena je kvadratna mreža duljine stranica od 0,0181 m jer bolje opisuje geometriju otvora u usporedbi s triangularnom mrežom. Ta duljina stranica kvadratne mreže odabrana je jer odgovara stvarnoj debljini stjenke na fizikalnom modelu. Nadalje, definirana je datoteka, također u MIKE Zero-u, s podacima o dubini (*scatter data*) dna bazena na način da je zadana ulazna i izlazna kota, a vrijednosti između linearno su interpolirane (Slika 4.14) Tako definirana datoteka s podacima o dimenziji dubine/visine unosi se u prethodno definiranu mrežu i preklapa s njom tako da zajedno tvore novu datoteku (Slika 4.15).



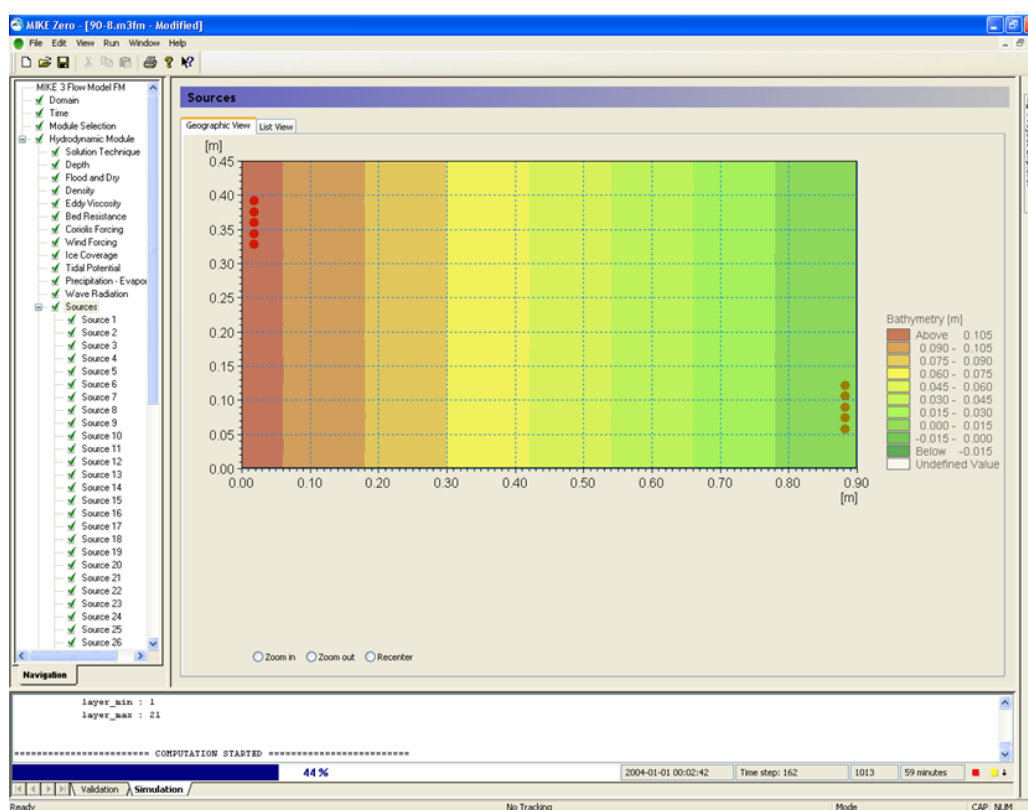
Slika 4.14 Unos podataka o dubini u mjernom bazenu



Slika 4.15 Mreža s podacima o dubini

Ovako definirana ulazna datoteka uvodi se u MIKE 3 Flow Model FM kao domena/rubni uvjet numeričkog modela. Vrijeme u kojem događaj u modelu ukupno traje je 360 sekundi od kojih je prvih 300 sekundi vrijeme potrebno da protok i brzina dosegnu vrijednosti istovjetne onima na fizikalnom modelu za istu varijantu otvora i pregrada (vrijeme punjenja bazena) odnosno da se uspostave stacionarni uvjeti. Unutar posljednjih 60 sekunda simulacije, kada je uspostavljeno stacionarno/uniformno tečenje, računaju se brzine koje predstavljaju rezultat proračuna.

Otvor, tj. ulaz vode u bazen koji je modeliran, riješen je na način da je na mjestu otvora postavljen broj izvora (sources) jednak broju kvadrata u mreži tog otvora, po jedan izvor za svaki kvadrat. Otvor na izlazu je napravljen na isti način razlikujući se od ulaza po tome što mu je zadan protok istog iznosa, ali negativnog predznaka predstavljajući hidraulički ponor (Slika 4.16).



Slika 4.16 Prikaz ulaznog i izlaznog otvora bazena u MIKE-u 3

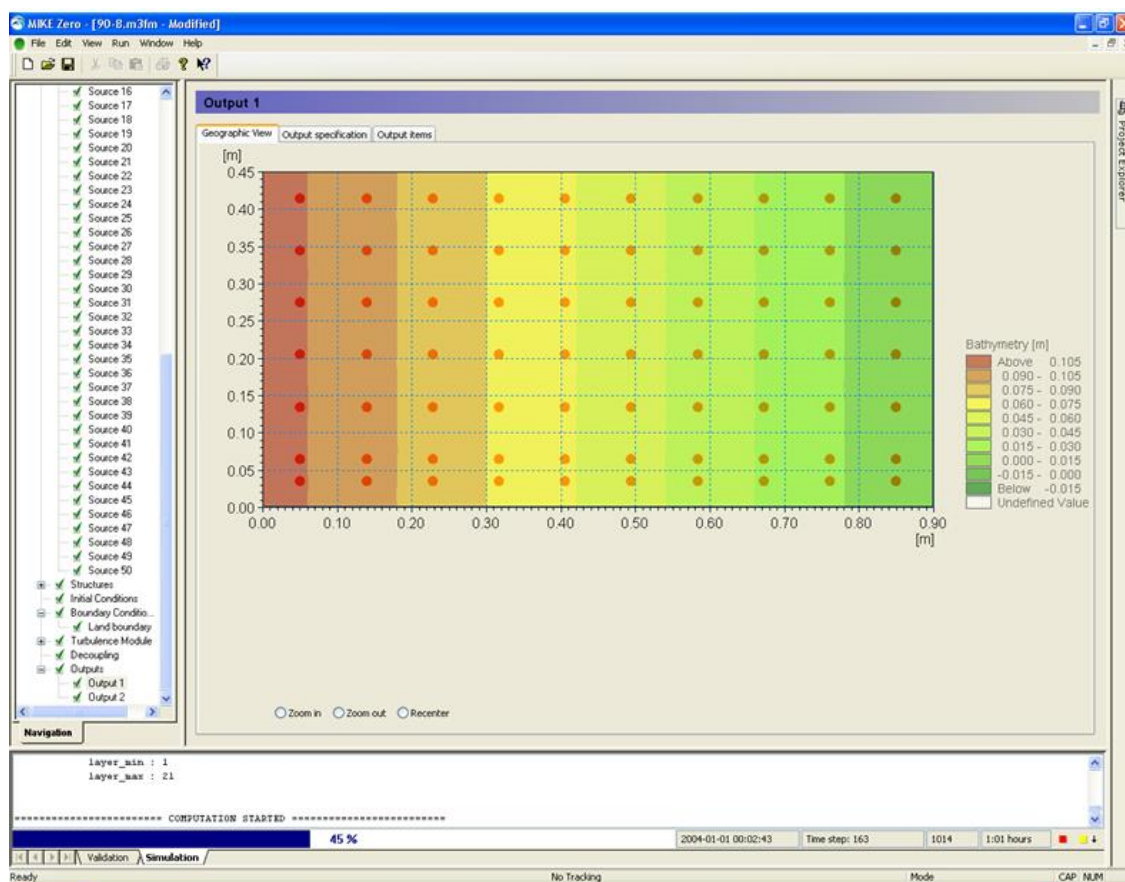
Nakon usporedbe dvije moguće metode rješavanja „*Low order, fast algorithm*“ i „*High order metode*“ odabrana je „*Low order, fast algorithm*“ s obzirom da daje rezultate zadovoljavajuće točnosti uz znatno kraće vrijeme proračuna.



Za izbornik vrtložnog viskoziteta u horizontalnom smjeru odabrana je Smagorinsky formulacija konstantne vrijednosti od 0.15, a za vertikalni smjer odabrana je k- $\epsilon$  formulacija promjenljiva u vremenu do maksimalne vrijednosti od 0.4.

Početni uvjeti (*boundary conditions*) u svakoj od varijanata modela je izmjerena visina vode u mjernom bazenu fizikalnog modela.

Na temelju ulazne geometrije i zadanih uvjeta protoka, brzine i visine vode u bazenu, program daje rezultate u od strane korisnika zadanom obliku. U ovom slučaju za prvi izlazni podatak zadane su točke na istim koordinatama kao mjerne točke fizikalnog modela (Slika 4.17). U zadanim točkama program daje  $u$ ,  $v$  i  $w$  komponente brzine usporedive s onima mjerenima na fizikalnom modelu. Za drugi izlazni podatak program daje grafički prikaz brzine vode cijelog potopljenog volumena bazena u kojem su bojama i vektorima prikazani smjer i red veličine brzine. Takvi rezultati vizualno su povoljniji za prikaz, a rezultati u točkama daju preciznije vrijednosti koje dalje možemo obrađivati na željeni način, u ovom slučaju uspoređivanjem s brzinama na fizikalnom modelu u Microsoft Excelu.

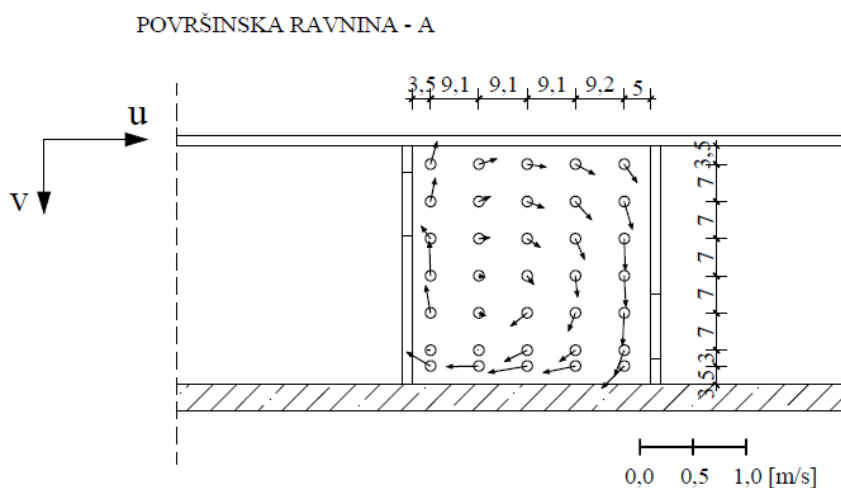


Slika 4.17 Mjerne točke u numeričkom modelu

## 5. REZULTATI I RASPRAVA

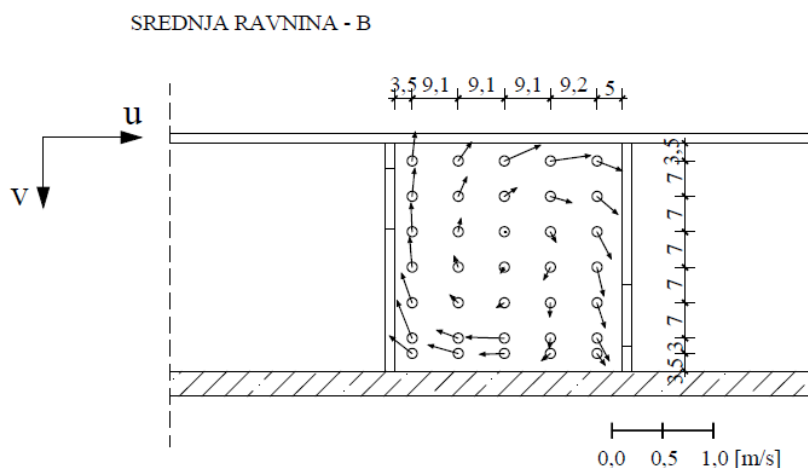
Rezultati ovog rada su prikazi polja brzina u bazenima ovisno o geometriji te usporedba fizikalnog i numeričkog modela. Prikazi svih komponenti brzina za sve varijante modela nalaze se u Prilozima. Uspoređujući brzine po dubini, može se zaključiti da se najveće brzine javljaju u donjoj (pridnenoj) razini, što opravdava činjenica da se u području te ravnine nalaze ulaz i izlaz iz bazena.

To je vidljivo na Slikama Slika 5.1, Slika 5.2 i Slika 5.3, koje prikazuju vektore brzina za pojedinu ravninu varijante 125-45-8, uzimajući u obzir da je duljina vektora proporcionalna iznosu brzine. Također, kao što se u Prilozima vidi i na ostalim modelima značajna je dominacija polja brzina u pridnenoj ravnini u odnosu na srednju i površinsku. Pridnena razina može se smatrati kritična i zbog toga što kroz nju većinom prolaze ribe slabijih plivačkih karakteristika, prema kojim prilikom projektiranja odabiremo maksimalnu dopuštenu brzinu. Zbog toga smatra se opravdano prilikom proučavanja i analiziranja rezultata usmjeriti se samo na rezultate za pridnenu ravninu. Na temelju toga zaključeno je da je pridnena razina mjerodavna i stoga će se sva daljnja rasprava usmjeriti na usporedbu polja brzina za sve varijante modela u toj razini.

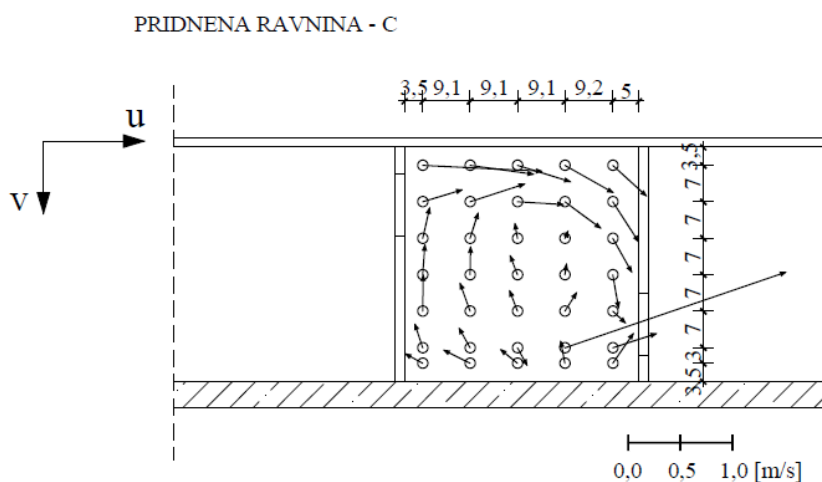


Slika 5.1 Vektori brzina površinske ravnine varijante 125-45-8





Slika 5.2 Vektori brzina srednje ravnine varijante 125-45-8



Slika 5.3 Vektori brzina pridnene ravnine varijante 125-45-8

Vektori prikazani na slici iznad pokazuju cirkulirajući smjer strujanja vode u bazenu do kojeg dolazi zbog udara mlaza u stjenke bazena. U ostalim varijantama modela prikazanim u Prilozima 1-9 može se primijetiti isti obrazac strujanja odnosno cirkulirajuće strujanje.

Najveća izmjerena brzina ove varijante modela nalazi se u blizini nizvodnog otvora (izlaza) i iznosi 2,24 m/s što u stvarnom mjerilu iznosi 3,88 m/s. Kao što se na Slika 5.3 može primijetiti, maksimalna brzina skoro je dvostruko veća od druge najveće izmjerene brzine u tom bazenu, koja iznosi 1,98 m/s u stvarnom mjerilu. Razlog tomu jest lokalna područja turbulencije koja se javljaju u svim varijantama modela. Prema preporukama, za nesmetan prolazak riba maksimalna dozvoljena brzina iznosi 2 m/s što u ovom slučaju nije zadovoljeno. Za ostale varijante modela prikaz maksimalnih brzina na modelu i u stvarnosti dan je u Tablica 5-1. Iz prikazanih rezultata može se primijetiti kako

i za sve varijante modela razmaka pregrada 90 cm preporučena maksimalna brzina je premašena. Za varijante modela duljine bazena 90 cm maksimalna brzina javlja se na početku bazena odnosno na ulazu. Uočeno je da se u bazenima s manjim razmakom između pregrada javlja turbulentno strujanje, dok u bazenima s većom duljinom energija mlaza uspije disipirati dolaskom do sljedeće pregrade.

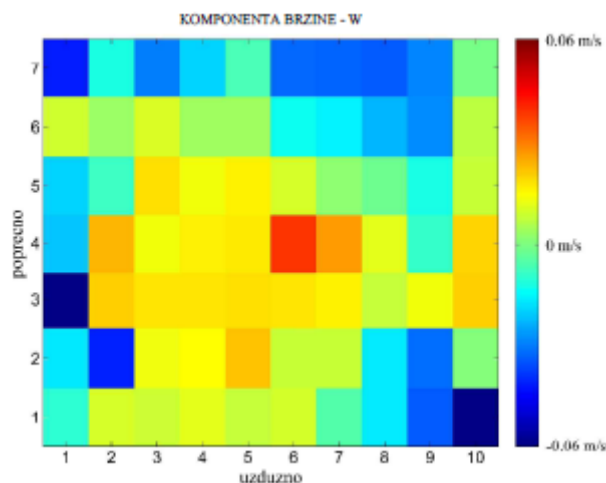
Tablica 5-1 Prikaz maksimalnih izmjerenih brzina za sve varijante

Model	Protok [l/s]	Maksimalna brzina na fizikalnom modelu [l/s]	Maksimalna brzina u stvarnom mjerilu [m/s]
VARIJANTA 125-45-8	6,5	2,24	3,88
VARIJANTA 125-45-10	8,5	1,15	1,99
VARIJANTA 125-45-12	11,5	1,13	1,95
VARIJANTA 125-60-8	6,4	1,22	2,11
VARIJANTA 125-60-10	9	1,15	2,00
VARIJANTA 125-60-12	11,5	1,02	1,77
VARIJANTA 125-90-8	5,9	1,26	2,18
VARIJANTA 125-90-10	9,2	1,28	2,22
VARIJANTA 125-90-12	12,9	1,29	2,24

Prilikom mjerenja i obrađivanja podataka uočeno je da je kvaliteta dobivenih podataka za komponentu  $w$  manja, zbog čega se svi prikazani rezultati za ovu komponentu trebaju uzeti s dozom opreza.

Iznosi vertikalnih komponenti brzina u mjernim bazenima značajno su manje u odnosu na horizontalne komponente. Također, primijećeno je da se vertikalna komponenta za svaku varijantu

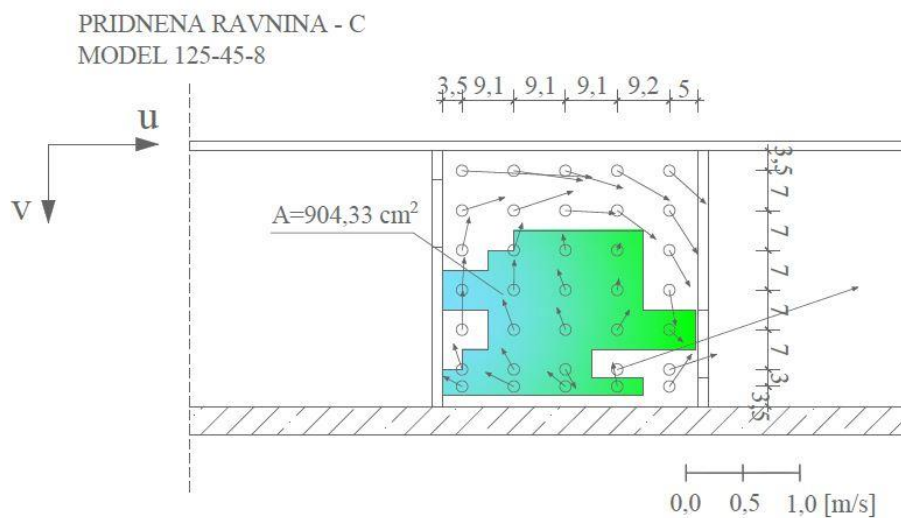
modela povećava približavanjem površini (Prilozi 10-18). Promatrajući rezultate uočeno je da se komponenta  $w$  smanjuje povećanjem otvora te povećanjem razmaka pregrada.



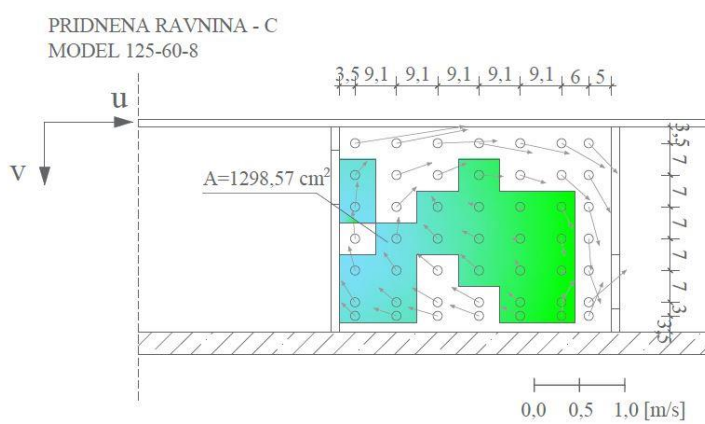
Slika 5.4 Prikaz  $w$  komponente brzina za model 125-90-8, pridnena ravnina C

Mijenjanjem geometrije tj. duljine bazena i dimenzija otvora polje brzina u bazenima se mijenja. Prema preporukama [21] brzina vode u bazenu od 0,5 m/s ribama pruža mjesto za odmor između prolaska kroz dva otvora. Prema tome poželjno je da područje bazena u kojima su brzine manje od 0.5 m/s bude što veće. U mjerilu ispitivanog modela ta brzina iznosi 0,29 m/s.

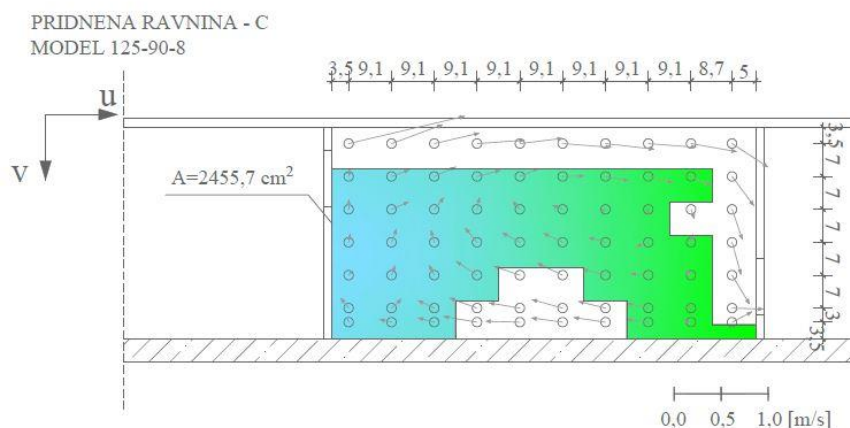
Iz dobivenih rezultata (Slika 5.1, Slika 5.2, Slika 5.3) možemo primijetiti da uspoređujući modele bazena za isti otvor, a različitu duljinu bazena, povećanjem duljine površina bazena koja zadovoljava ovaj uvjet se povećava. Tako za model 125-45-8, površina bazena u pridnenoj razini koja ima brzinu manju od 0,29 m/s iznosi 904,33 cm<sup>2</sup>, odnosno 45% za model 125-60-8 iznosi 1298,57 cm<sup>2</sup>, odnosno 48%, a za model 125-90-8 2455,7 cm<sup>2</sup>, odnosno 61%. Sukladno tome ista situacija se dešava i za otvore od 10×10 i 12×12 što je prikazano u Prilozima 20 i 21.



Slika 5.5 Prikaz površine s brzinama manjim od 0,29 za model 125-45-8



Slika 5.6 Prikaz površine s brzinama manjim od 0,29 za model 125-60-8



Slika 5.7 Prikaz površine s brzinama manjim od 0,29 za model 125-90-8

Tablica 5-2 Prikaz površina u mirnom dijelu bazena

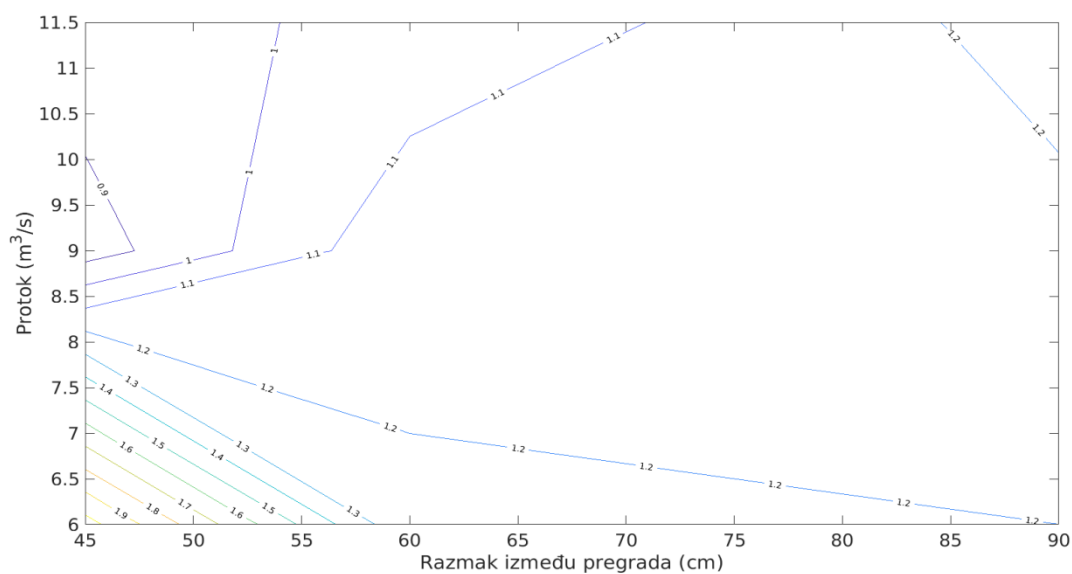
Dimenzije otvora [cm]	Duljina bazena [cm]	Površina s brzinom < 0,29 m/s [cm <sup>2</sup> ]	Postotak površina s v < 0,29 m/s [%]
8×8	45	904,33	45
8×8	60	1298,57	48
8×8	90	2455,7	61
10×10	45	740,12	37
10×10	60	915,95	34
10×10	90	2212,45	55
12×12	45	715,56	35
12×12	60	974,6	36
12×12	90	1374,55	34

Osim mjerenja brzina u mjernim točkama u bazenu, izmjerene su i brzine u samom otvoru za svaku od varijanti modela ( Tablica 5-3).

Tablica 5-3 Brzine u otvoru

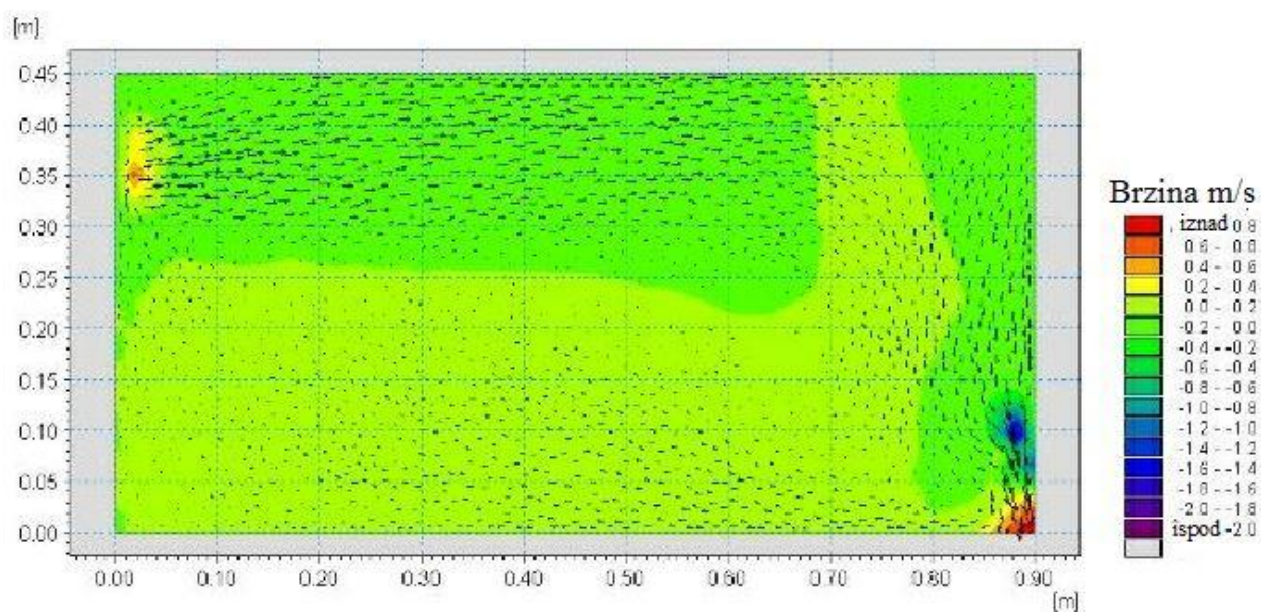
Varijanta modela	Protok ( m <sup>3</sup> /s)	Brzina u otvoru (m/s)
125-45-8	6.5	2.04
125-45-10	8.5	0.85
125-45-12	11.5	0.97
125-60-8	6.4	1.21
125-60-10	9	1.18
125-60-12	11.5	1.02
125-90-8	5.9	1.2
125-90-10	9.2	1.17
125-90-12	12.9	1.24

Na temelju tih izmjerenih brzina izrađen je nomogram ovisnosti protoka, razmaka pregrada i brzine u otvorima. Ideja nomograma je da se, za određen protok i raspon brzina koji odgovara ribama u danom području, na jednostavan način očita potrebna duljina bazena i dimenzija otvora. Takav nomogram bi se mogao koristiti u graditeljstvu čime bi se uvelike olakšao postupak projektiranja ribljih staza. Potrebno je napomenuti da je nomogram izrađen za dimenzije fizikalnog modela koji je mjerila 1:3.

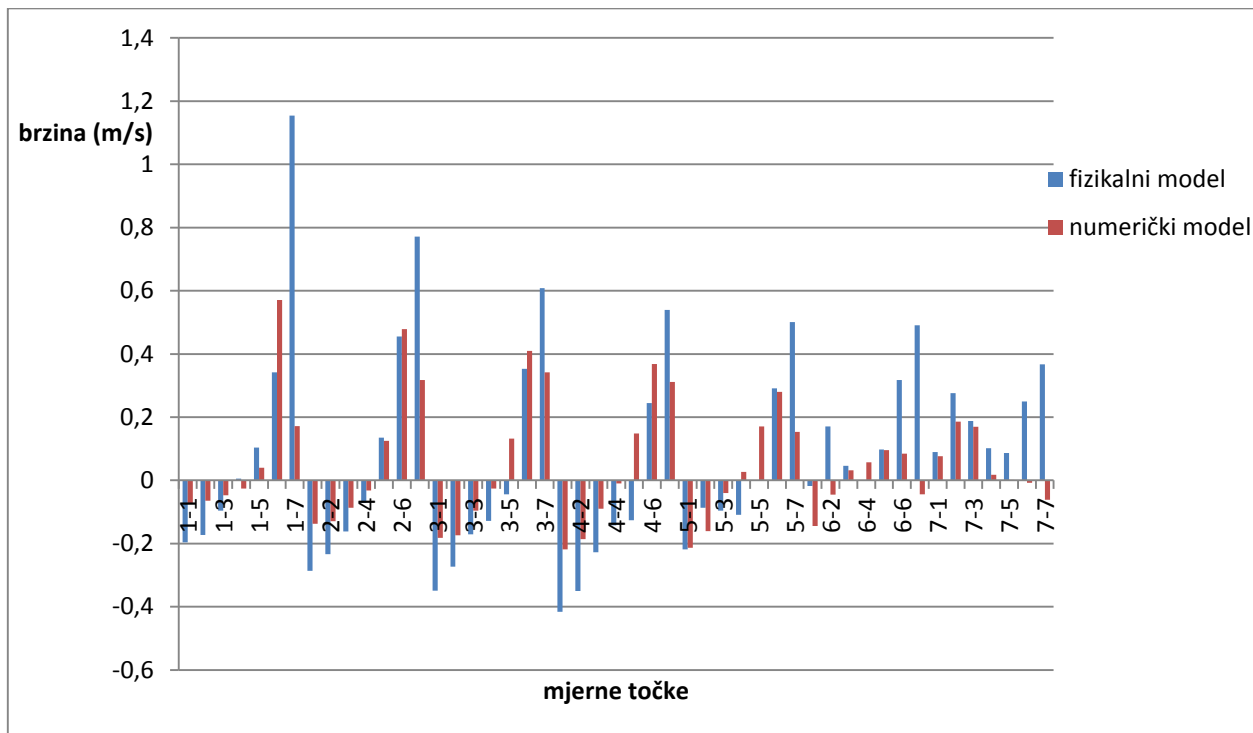


Slika 5.8. Nomogram brzina, protoka i razmaka između pregrada

Rezultati numeričkog modela izrađenog u MIKE-u uspoređivani su s onima dobivenim na fizikalnom modelu za iste mjerne točke. Iz usporedbi slika polja brzina fizikalnog i numeričkog modela može se uočiti isti uzorci strujanja. Dobiveni su rezultati po komponentama brzina  $u$ ,  $v$  i  $w$  za pridneni, srednji i površinski sloj u svim varijantama modela. Prikazani su grafički uspoređeni rezultati pridnenog sloja u obliku histograma, budući da je taj sloj izabran kao mjerodavan zbog pojave najvećih brzina i  $u$  komponenta brzine koja je po iznosu dominantna (Slika 5.10). Na dijagramu se primjećuje odstupanje u iznosima, ali sličnost u omjerima između brzina.



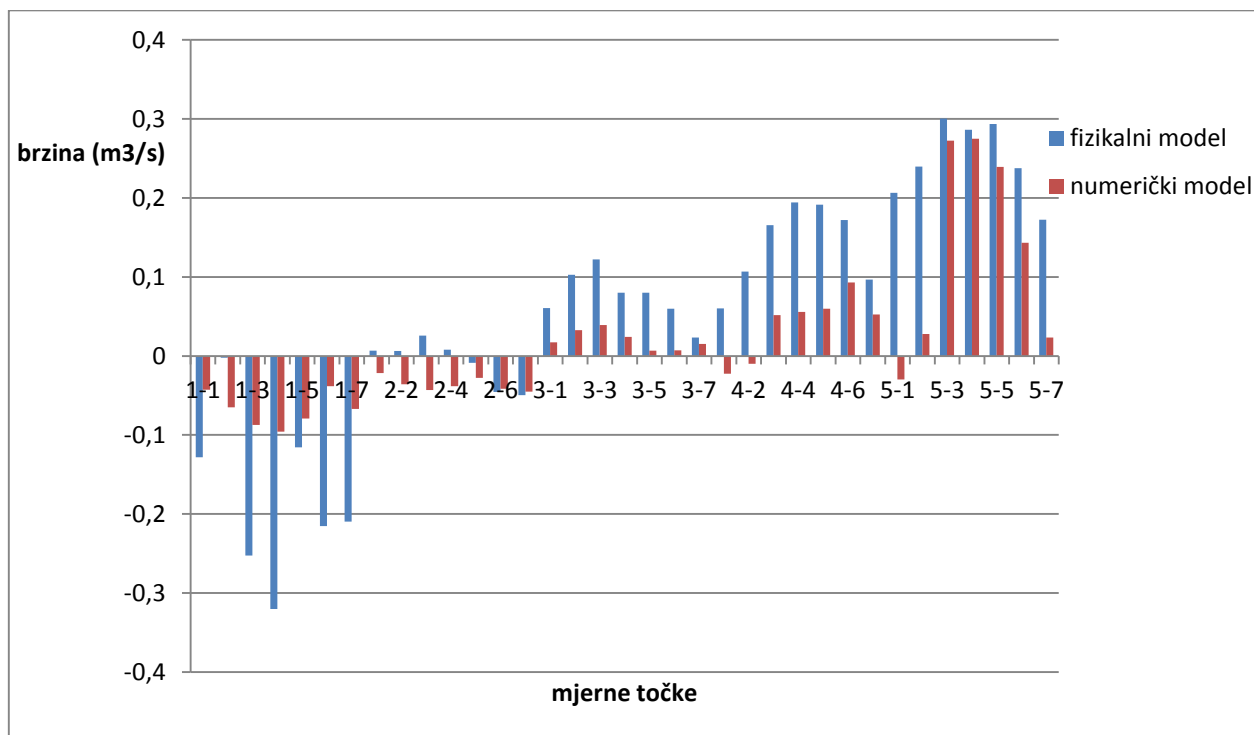
Slika 5.9 Prikaz polja brzina iz numeričkog modela za varijantu 125-90-8, pridnena ravnina C



Slika 5.10 Usporedba  $u$  komponente brzine pridnenog sloja za varijantu 125-60-10

Pri simulacijama svih varijanti u numeričkom modelu održavana je ista gustoća mreže i vrijednosti viskoznosti kako bi iz dobivenih rezultata mogli izvući zaključci primjenjivi na sve varijante modela. Izračunate su razlike dobivenih brzina između numeričkog i fizikalnog modela u istim mjernim točkama i one su reda veličine 0.1 do 0.2 m/s. Takve veličine odstupanja smatraju se velikima te se proračun ne može smatrati preciznim. Najveća odstupanja primijećena su kod modela s duljinom bazena od 90 cm što sugerira da je za veće dimenzije potrebna gušća struktura mreže numeričkog modela.





Slika 5.11 Usporedba  $u$  komponente brzine pridnenog sloja za varijantu 125-45-10

U Prilozima 22-30 dani su rezultati rasporeda brzina u polju numeričkog modela koji pokazuju veću sličnost sa fizikalnim modelom pokazujući da u otvorima dolazi do najvećih brzina i da se pojavljuje cirkulirajuće strujanje vode u bazenu.

## **6. ZAKLJUČAK**

Analizirajući ove rezultate primjećujemo da se povećanjem duljine bazena udio površine s malim brzinama, koje su pogodne za odmor riba, eksponencijalno povećava. Iz toga možemo zaključiti kako je veća duljina bazena poželjna. S druge strane, u prethodnim poglavljima je spomenuto kako, prema preporukama, razlika u visini vodnih lica između bazena treba biti do 0,20 m, što odgovara brzini od 2 m/s. Projektiranjem ribljih staza s duljim bazenima bilo bi potrebno više prostora za svladavanje pada čime bi se volumen cijele konstrukcije povećao, a samim time i cijeli projekt poskupio. Osim duljine bazena, na stanje polja brzina utječu i dimenzije otvora, prema čemu manji otvori daju optimalniju sliku strujanja za odmor riba.

Usporedba numeričkog i fizikalnog modela pokazuje da su brzine dobivene u numeričkom modelu po iznosu znatno manje od onih izmjerenih u fizikalnom modelu, ali po orijentaciji pokazuju odgovarajuću sličnost. Također, možemo zaključiti da je u programu MIKE moguće napraviti stabilan model riblje staze za simuliranje uvjeta tečenja, ali je potrebno dodatno kalibrirati numerički model s podacima iz fizikalnog. Ovaj model predstavlja odličnu podlogu za sustavnu primjenu numeričkog modela u daljnjim istraživanjima.

Prikazanim istraživanjem postavljeni su temelji za daljnje analize kojima bi se omogućilo formiranje nomograma veće preciznosti i u ovisnosti o više parametara (protok, nagib, geometrija).

## **7. ZAHVALE**

Zahvaljujemo mentorici izv. prof. dr. sc. Evi Ocvirk na pomoći, susretljivosti i uloženom trudu tijekom cijelog rada. Velika hvala laborantu Franji Živkoviću koji je bio sveprisutan za vrijeme izvođenja laboratorijskog ispitivanja i na nesebičnoj pomoći oko izrade samih modela i mijenjaju istih tijekom ispitivanja. Hvala docentu Gordonu Gilji, stručnom suradniku Damjanu Bujaku na strpljenju i korisnim savjetima te izv. prof. dr. sc. Goranu Lončaru za pomoć pri izradi numeričkog modela. Također se zahvaljujemo Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na ustupanju hidrotehničkog laboratorija i pripadne opreme bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć. Na kraju, željeli bi se zahvaliti svima koji su nam bili potpora cijelo vrijeme, a također i onima koji su svojim konstruktivnim kritikama pridonijeli doprinosu za naš rad.

Istraživanje je provedeno u sklopu projekta Planiranje i projektiranje ribljih staza financiranog od Hrvatskih voda.

## 8. POPIS LITERATURE

- [1] [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009\\_03\\_30\\_658.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009_03_30_658.html) [Pristup: 10. travnja 2018.]
- [2] Vodič za izradu Planova revitalizacije vodotoka u Hrvatskoj, Hrvatske vode, Državni zavod za zaštitu prirode, Zagreb, 2013. godina
- [3] Duplić, A. (2008.): Slatkovodne ribe - priručnik za inventarizaciju i praćenje stanja. Državni zavod za zaštitu prirode, Zagreb
- [4] Ocvirk, E., Gilja, G., Bujak, D., *Pool fishways hydraulic analysis*, WMHE 2017
- [5] DVWK (German Association for Water Resources and Land Improvement)
- [6] Prša, M., Rebrina, M., Srednoselec, I., (2013): *Analiza geometrijskih karakteristika ribljih staza u ovisnosti o hidrauličkim uvjetima tečenja*, rad za rektorovu nagradu, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
- [7] FAO (Food and Agriculture Organization of the US)
- [8] McLeod, A. M., Nemenyi, P. *An investigation of fishways*, State University of Iowa 1939-1940
- [9] Rajaratnam, N., Van der Vinne, G. and Katopodis, C., *Hydraulics of Vertical Slot Fishways* (1986)
- [10] Rajaratnam, N., Katopodis, C., Solanki, S. (1991): *New design for vertical slot fishways*, Canadian journal of Civil Engineering
- [11] Wu, S., Rajaratnam, N., Katopodis, C., (1999): *Structure of Flow in Vertical Slot Fishway*, *Journal of Hydraulic Engineering*
- [12] Liu, M., Rajaratnam, N., Thu, D.Z., *Mean Flow and Turbulence Structure in Vertical Slot Fishways*, *Journal of Hydraulic Engineering*
- [13] Tarrade, L., Texier, A., David, L., Larinier, M., (2008): *Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways*, *Hydrobiologia*
- [14] Fuentes-Perez, J.F., Silvia, A. T., Tuhtan, J.A., Garcia-Vega, A., Carbonell-Baeza, R., Musall, M., Kruusmaa, M., *3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways*, *Environmental Modelling & Software*, Volume 99, siječanj 2018
- [15] Branco, P., Santos, J.M.M, Katopodis, C., Pinheiro, A., Ferreira, M. T., *Pool-Type Fishways: Two Different Morpho-Ecological Cyprinid Species Facing Plunging and Streaming Flows*, svibanj, 2013
- [16] Weber, N.S., Joy, D. M., (2002), *Use of a Scale Model to Design Fishway Resting Pool Improvements*, Canadian Water Resources Journal
- [17] Gjetvaj, G. (2006), *Skripta iz predmeta Hidraulika*, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
- [18] <http://www.nortekusa.com/lib/data-sheets/datasheet-vectrino-lab>

[19][http://www.mikejesson.com/DataAnalyserWebsite/downloads/MAJVSA\\_Installation\\_and\\_User\\_Guide.pdf](http://www.mikejesson.com/DataAnalyserWebsite/downloads/MAJVSA_Installation_and_User_Guide.pdf)

[20] Lončar, G., *Skripta iz predmeta Modeliranje u hidrotehnici*, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

[21] Liao, J.C., *A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows*, The Royal nSociety publishing, 2007

## 9. DODACI

### 9.1 Popis slika

Slika 1.1 a) i b) Hidrotehničke stepenice – nesavladiva prepreka za vodne organizme .....	1
Slika 1.2 Zonacija rijeka[3].....	2
Slika 1.3 Tehnički tipovi ribljih staza [6] .....	4
Slika 1.4 Shema bazena s odgovarajućim oznakama prema [5] .....	5
Slika 1.5 Riblja staza bazenskog tipa uz malu hidroelektranu u Njemačkoj .....	6
Slika 4.1 a)Elektromagnetni mjerač protoka.....	12
Slika 4.2 Model riblje staze u laboratorijskom kanalu.....	13
Slika 4.3 Tlocrt varijante s razmakom pregrada 60 cm i otvorima 12x12 cm.....	14
Slika 4.4 Poprečni presjek varijante s razmakom pregrada 60 cm i otvorima 12x12 cm.....	14
Slika 4.5 Pregrada s promjenjivim otvorima .....	15
Slika 4.6 Raspored mjernih točaka za varijantu 125-90-12 .....	18
Slika 4.7 Raspored mjernih točaka i njihovog nazivlja za varijantu 125-45-12.....	19
Slika 4.8 ADV uređaj.....	20
Slika 4.9 Greda za pomicanje ADV uređaja .....	20
Slika 4.10 Rad Vectrino programa na računalu .....	21
Slika 4.11 Prikaz nefiltriranih i filtriranih podataka .....	22
Slika 4.12 Sučelje programa MIKE Zero.....	24
Slika 4.13 Generirana mreža za varijantu 125-90-8 u MIKE Zero-u .....	28
Slika 4.14 Unos podataka o dubini u mjernom bazenu.....	29
Slika 4.15 Mreža s podacima o dubini.....	29
Slika 4.16 Prikaz ulaznog i izlaznog otvora bazena u MIKE-u 3 .....	30
Slika 4.17 Mjerne točke u numeričkom modelu .....	31
Slika 5.1 Vektori brzina površinske ravnine varijante 125-45-8.....	32
Slika 5.2 Vektori brzina srednje ravnine varijante 125-45-8.....	33
Slika 5.3 Vektori brzina pridnene ravnine varijante 125-45-8.....	33
Slika 5.4 Prikaz w komponente brzina za model 125-90-8, pridnena ravnina C.....	35
Slika 5.5 Prikaz površine s brzinama manjim od 0,29 za model 125-45-8.....	36
Slika 5.6 Prikaz površine s brzinama manjim od 0,29 za model 125-60-8.....	36
Slika 5.7 Prikaz površine s brzinama manjim od 0,29 za model 125-90-8.....	37
Slika 5.8. Nomogram brzina, protoka i razmaka između pregrada.....	38
Slika 5.9 Prikaz polja brzina iz numeričkog modela za varijantu 125-90-8, pridnena ravnina C .....	39

Slika 5.10 Usporedba <i>u</i> komponente brzine pridnenog sloja za varijantu 125-60-10 .....	40
Slika 5.11 Usporedba <i>u</i> komponente brzine pridnenog sloja za varijantu 125-45-10 .....	41

## **9.2 Popis tablica**

Tablica 1-1 Preporučene dimenzije pojedinih elemenata konstrukcije ribljih staza bazenskog tipa i pripadni hidraulički uvjeti prema [7] .....	7
Tablica 4-1 Pregledni prikaz geometrije svih varijanti korištenih pri modeliranju .....	17
Tablica 4-2 Uvjeti ispitivanja.....	17
Tablica 5-1 Prikaz maksimalnih izmjerenih brzina za sve varijante .....	34
Tablica 5-2 Prikaz površina u mirnom dijelu bazena .....	37
Tablica 5-3 Brzine u otvoru .....	38

## **10. SAŽETAK**

Doris Martinović, Matea Marić, Iva Đerek

Riblje staze su prirodne ili umjetne hidrotehničke građevine koje za cilj imaju omogućiti ribama i drugim organizmima prolaz preko umjetnih barijera prvenstveno uzvodno, ali i nizvodno jer veliki broj riba stradava prilikom prolaska kroz turbinu, preko preljeva i sl. Upravo da bi spriječili negativne posljedice stradavanja riba kroz povijest su se vršila mnoga istraživanja u svrhu poboljšanja tih konstrukcija.

Riblje staze bazenskog tipa spadaju u tehničke riblje staze. Osnovni princip izgradnje ribljih staza ovoga tipa je podjela kanala na bazene gradnjom vertikalnih pregrada koje osiguravaju stepenasti pad vodnog lica od gornje do donje vode. Protok se ostvaruje kroz otvore u pregradnim zidovima ili preko preljeva, a potencijalna energija se disipira postepeno duž bazena. Budući da je brzina jedan od ključnih parametra pri projektiranju ribljih staza u ovom radu je naglasak stavljen na određivanje brzina vode u bazenima pomoću fizikalnog i numeričkog modela. Ukupno je izrađeno 9 modela kako fizikalnih tako i numeričkih u kombinaciji s različitim otvorima u pregradnim zidovima (8x8 cm, 10x10 cm, 12x12 cm) i različitim duljinama bazena (45 cm, 60 cm, 90cm) pri konstantnom nagibu od 12,5 %.

Fizikalni modelom je dobiven raspored bolja brzina u tri sloja ravnina: pridnena, srednja i površinska. Također, takav isti raspored ispitivanja je napravljen i u numeričkom modelu radi usporedbe dobivenih vrijednosti i mogućnosti primjene za daljnja ispitivanja.

Cilj je dobiti nomogram brzina vode u ovisnosti o geometriji, tj. dimenzijama otvora i duljine bazena. Takav nomogram je doprinos projektiranju ribljih staza u praksi jer bi omogućio jednostavan način određivanja geometrije riblje staze na temelju ulaznog podatka o traženoj brzini koja odgovara pojedinoj vrsti riba.

Ključne riječi: riblje staze bazenskog tipa, fizikalni model, numerički model



## **11. SUMMARY**

Doris Martinović, Matea Marić, Iva Đerek

Fishways are natural or artificial hydro-engineering structures designed to enable fish and other organisms to pass through the artificial barriers primarily upstream, but also downstream because of the many fishes that get caught and injured in turbines and spillways. In order to prevent those negative effects on fish, many researches have been done throughout the history to improve these structures.

Poolfishways are considered as technical type of fishways. The basic idea of designing a pool fishpass is to divide canals into pools by building vertical cross-walls that ensure a gradual drop from head water to tailwater. The flow is possible through openings in cross-walls or through the over flow and potential energy is dissipated gradually pool by pool. Since velocity is one of the key parameters in the design of fishways, in this paper emphasis is placed on determining water velocities in pools using a physical and numerical model. A total of nine models were made in which the dimension of openings (8x8 cm, 10x10 cm, 12x12 cm) and pool length (45 cm, 60 cm, 90cm) were changed for the constant slope of 12,5%.

The physical model showed the distribution of the velocity field in three parallel planes: bottom, middle and surface. This same test was made in numerical model for comparison of values and for examination of the possibility of using the same software for further research.

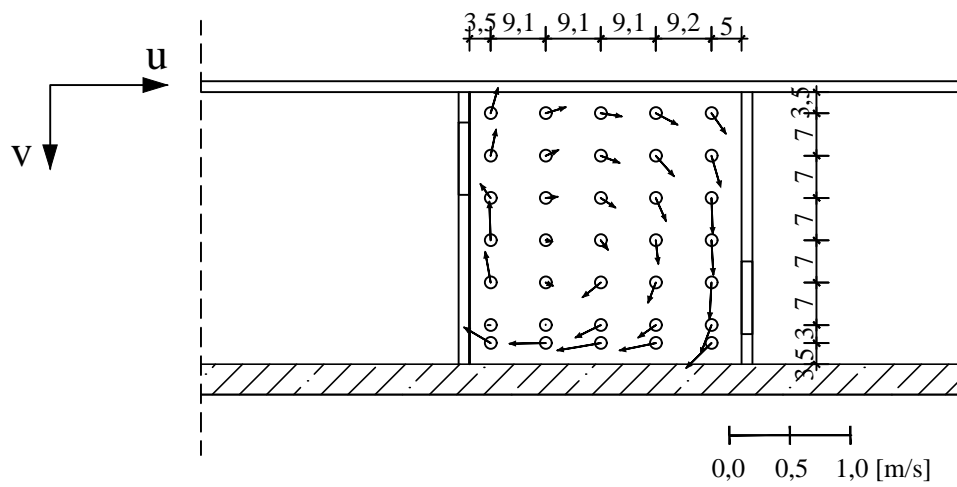
The goal is to make a nomogram of water velocity depending on the geometry of pool fishway. Such a nomogram would be a contribution to the design of fishways in practice as it would provide an easier way to determine the geometry of a pool fishway based on the permissible speed of the particular fish species.

Key words: pool fishway, numerical model, physical model

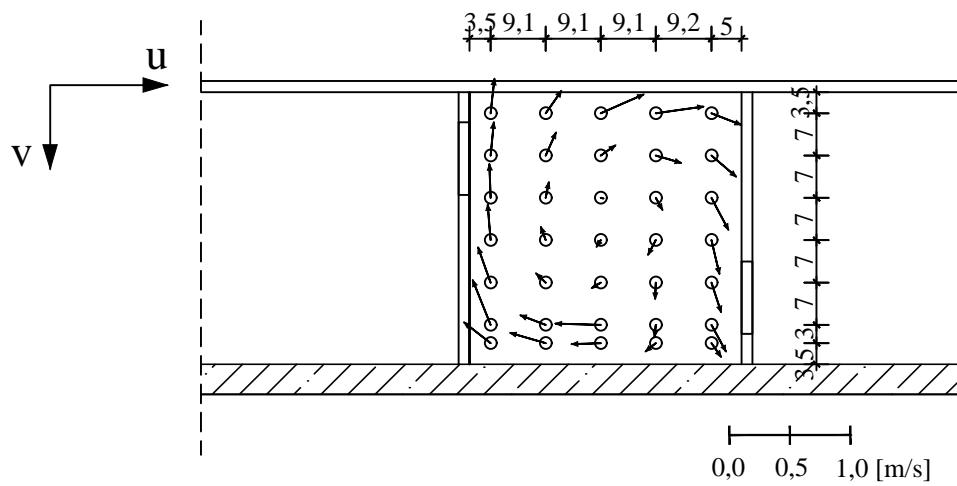
## REZULTATI FIZIKALNOG MODELA

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

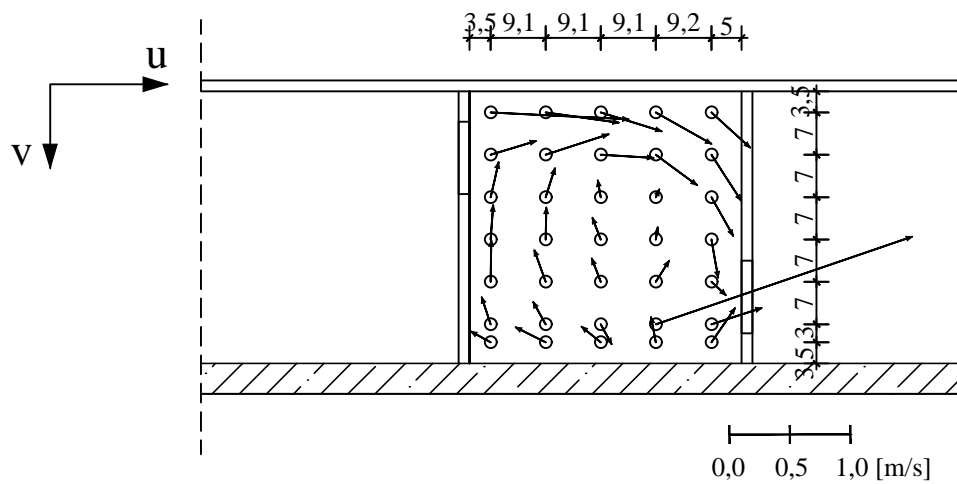
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

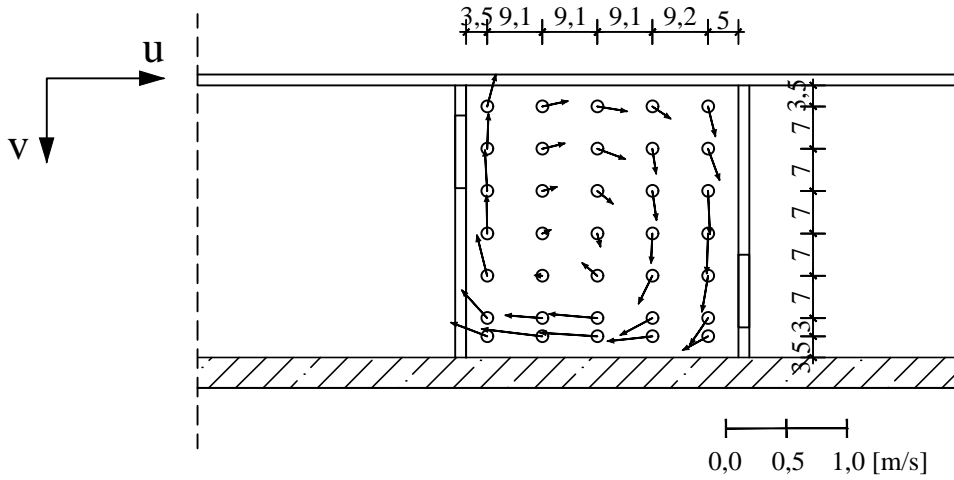


PRIDNENA RAVNINA - C

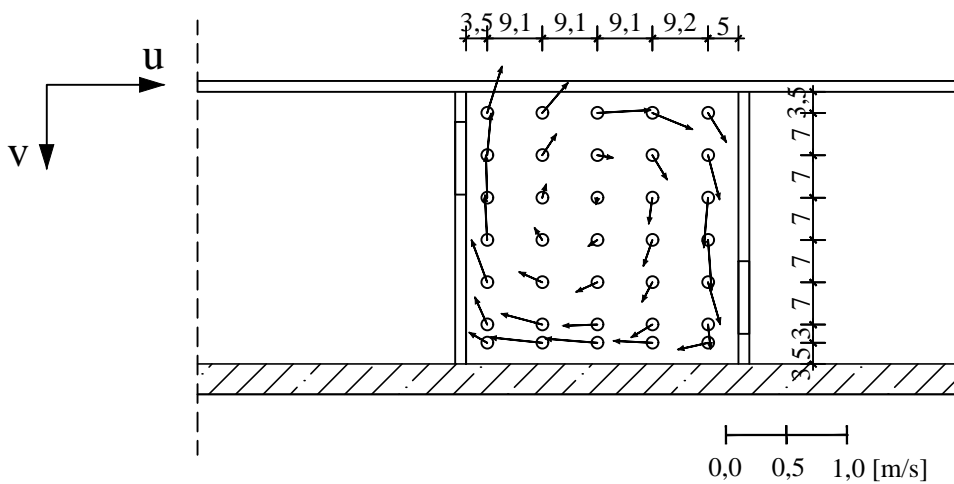


**PRILOG 2:  
PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA:  
MODEL 125-45-10**

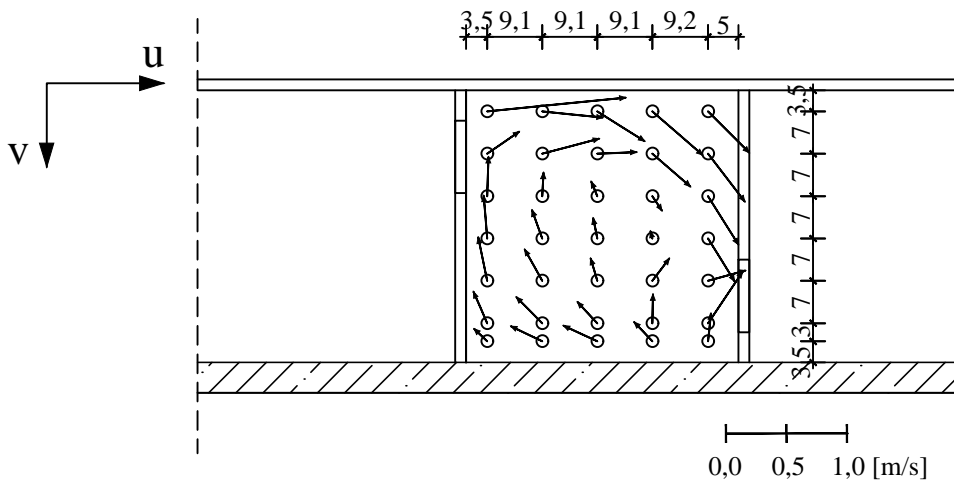
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

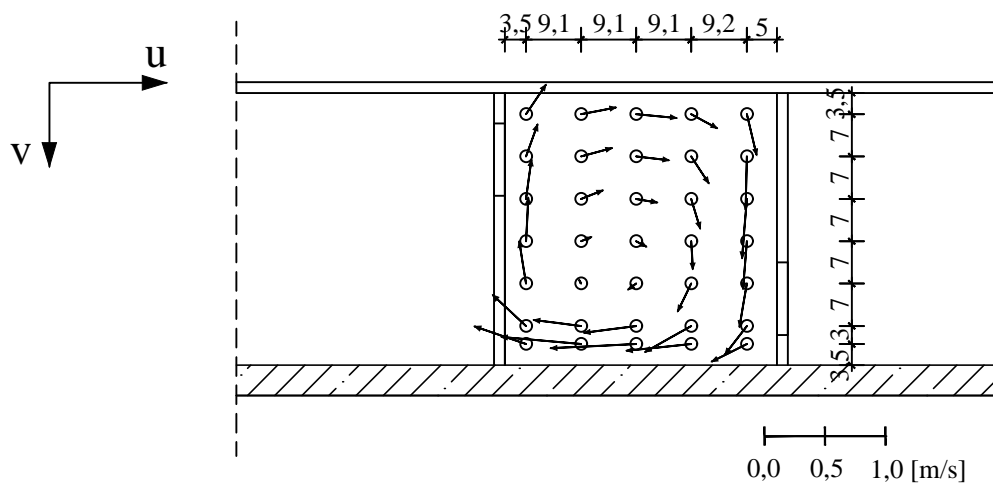


PRIDNENA RAVNINA - C

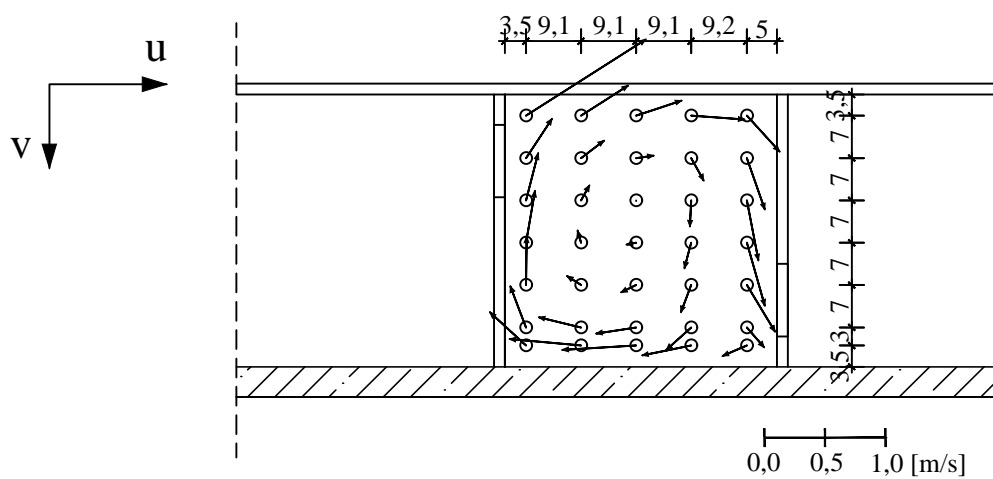


**PRILOG 3:**  
**PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA:**  
**MODEL 125-45-12**

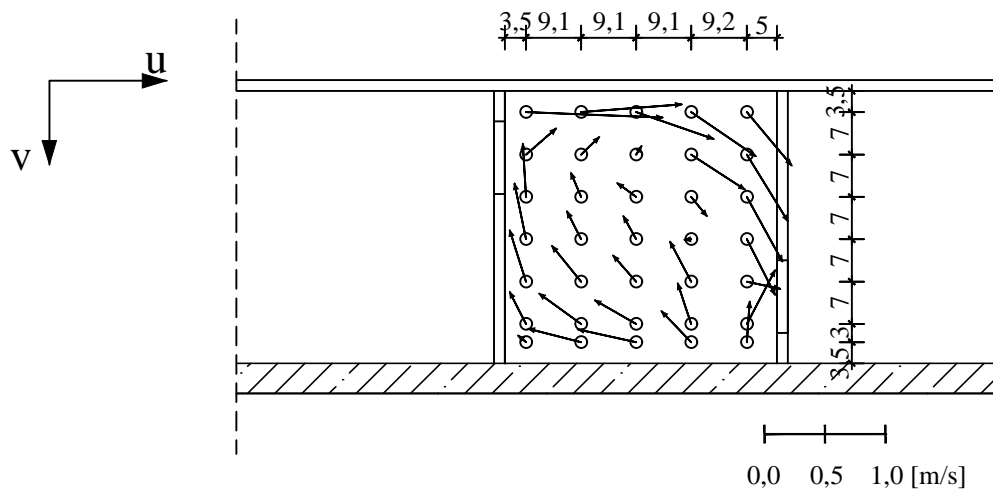
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

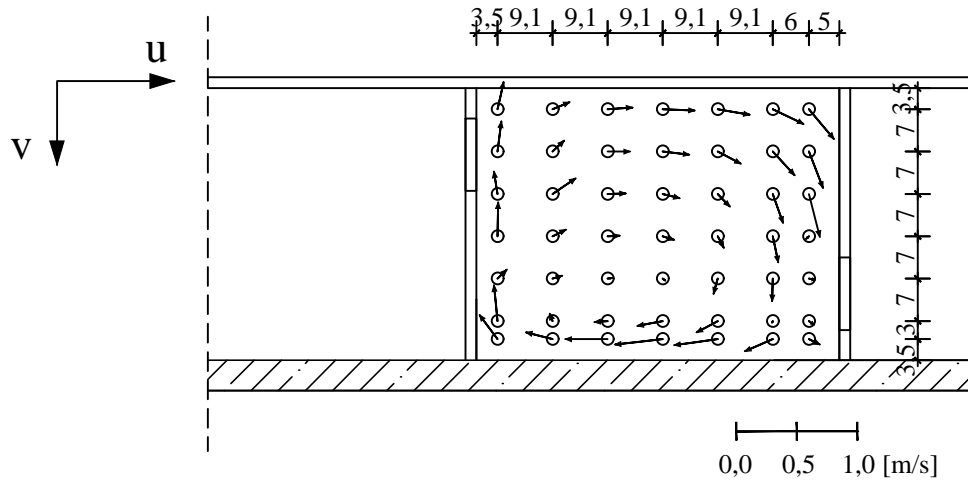


PRIDNENA RAVNINA - C

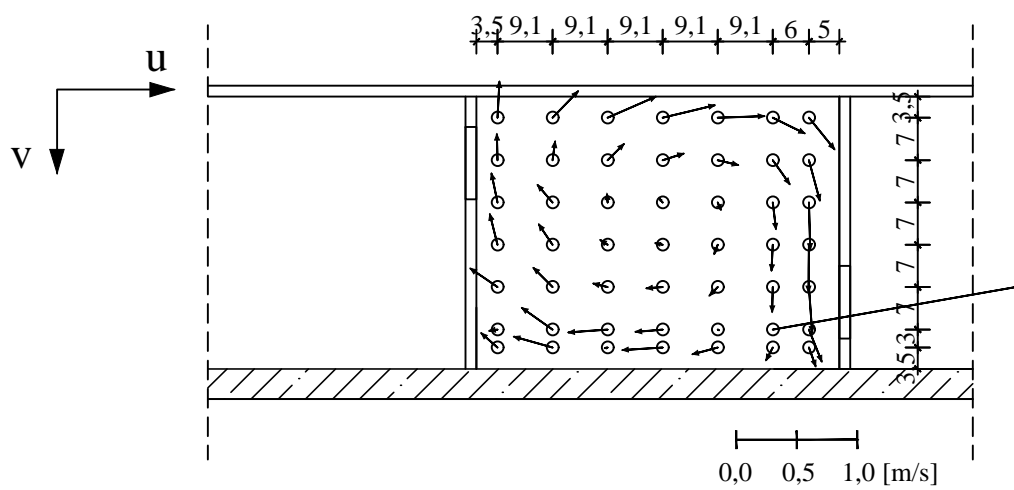


**PRILOG 4:**  
**PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA:**  
**MODEL 125-60-8**

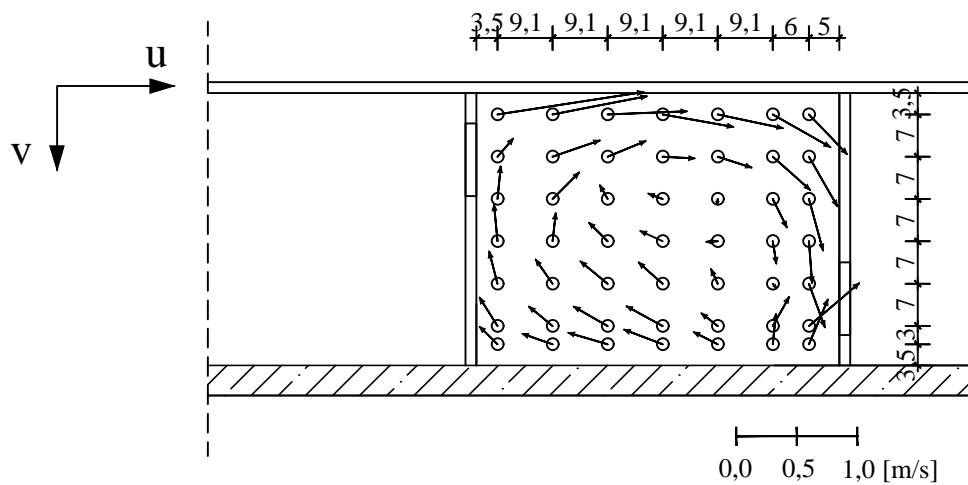
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

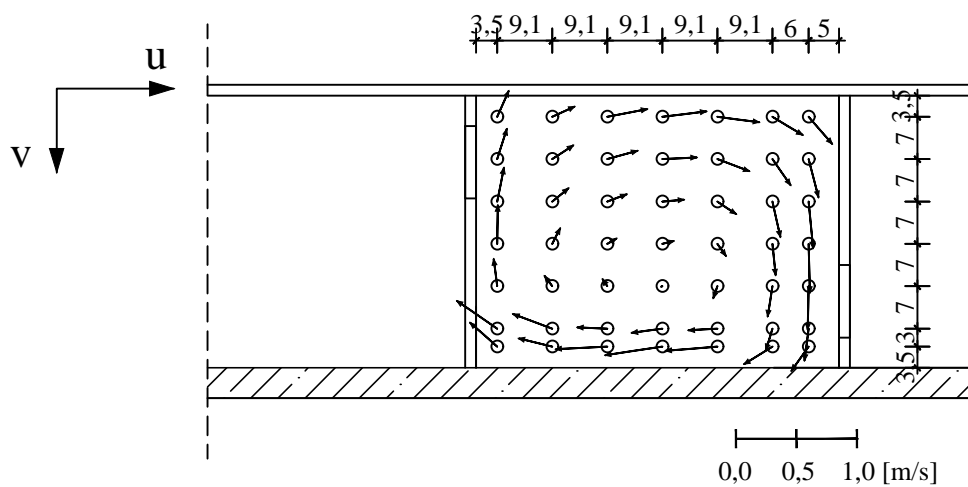


PRIDNENA RAVNINA - C

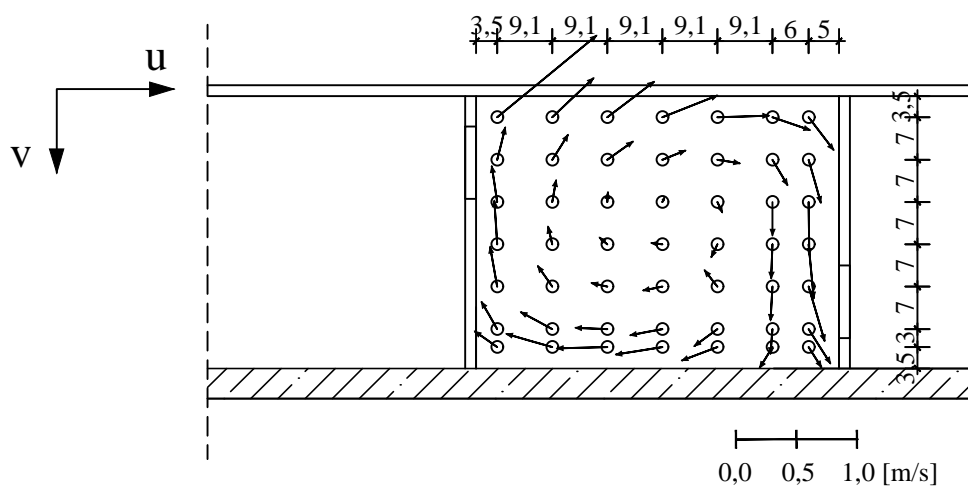


**PRILOG 5:**  
**PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA:**  
**MODEL 125-60-10**

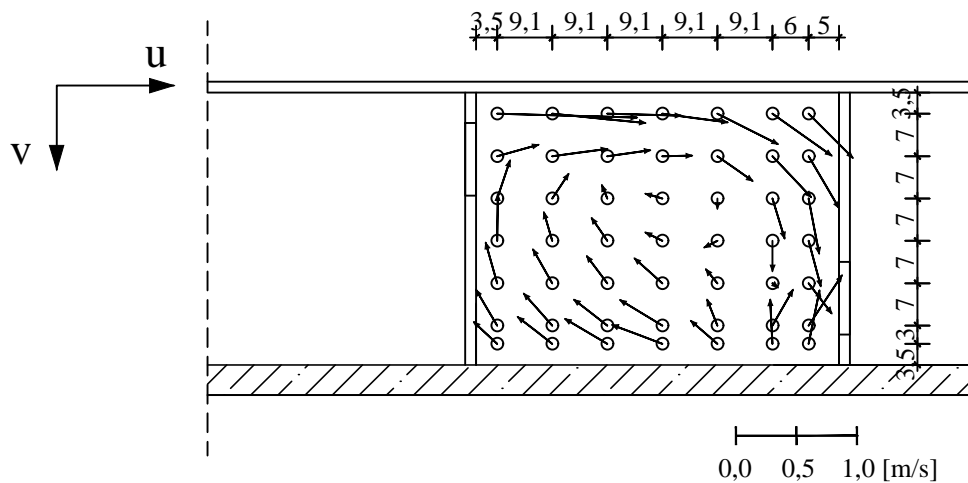
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

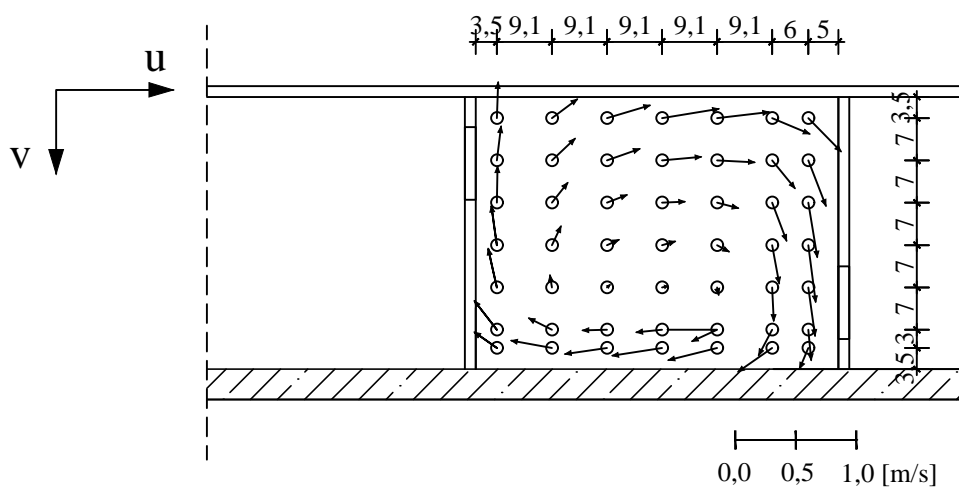


PRIDNENA RAVNINA - C

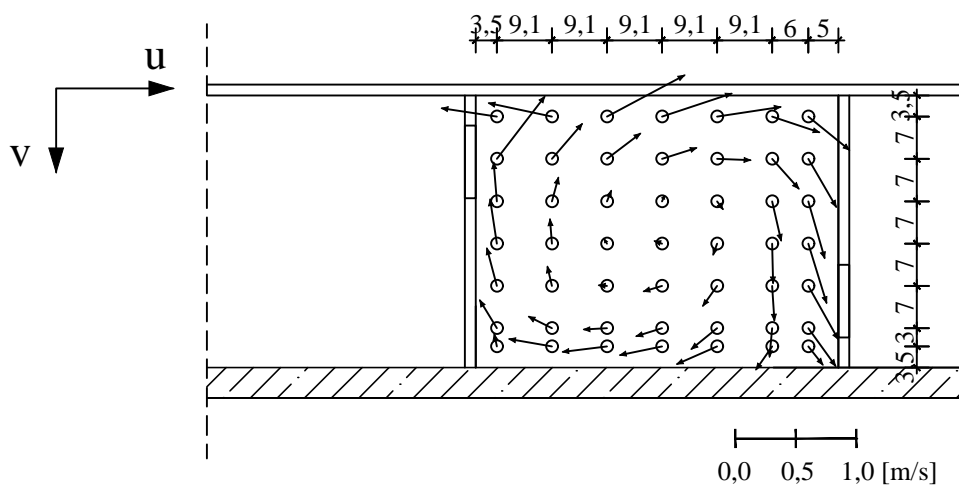


**PRILOG 6:  
PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA:  
MODEL 125-60-12**

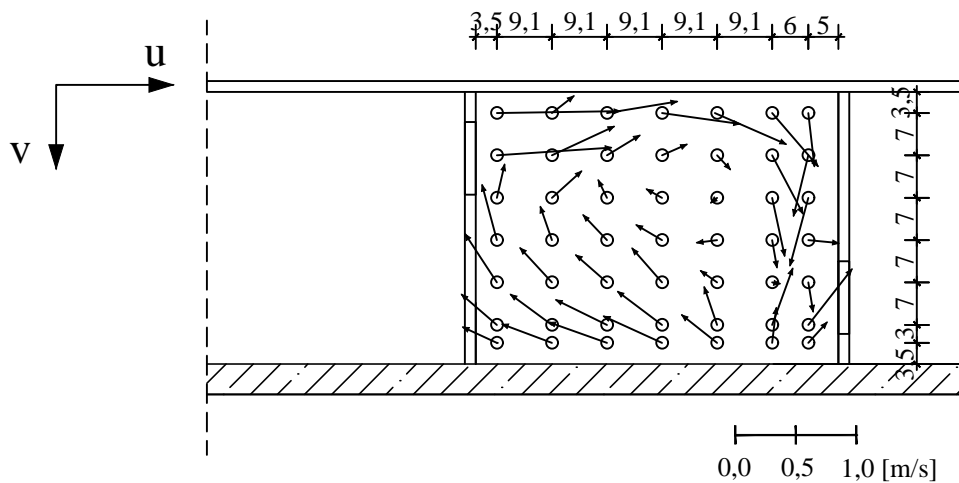
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B



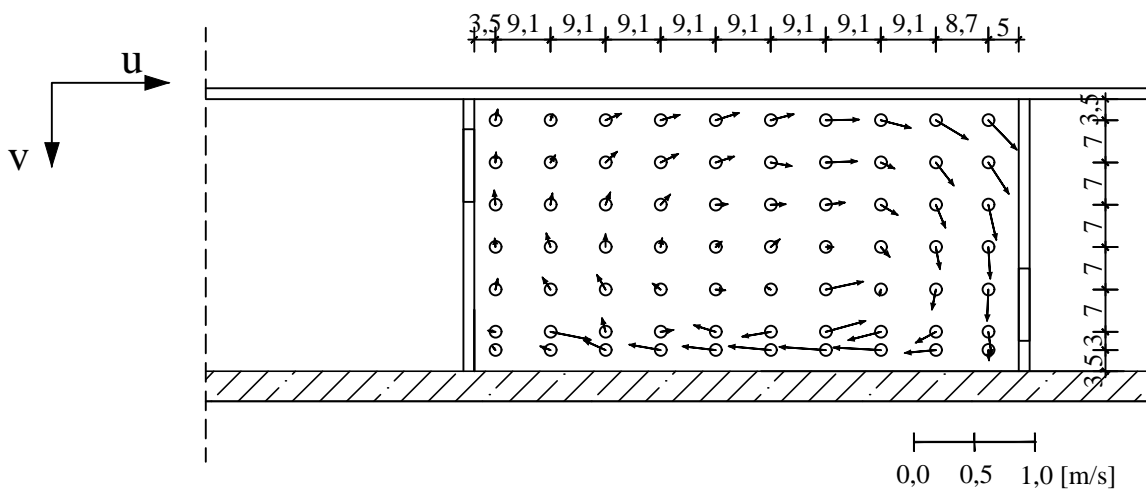
PRIDNENA RAVNINA - C



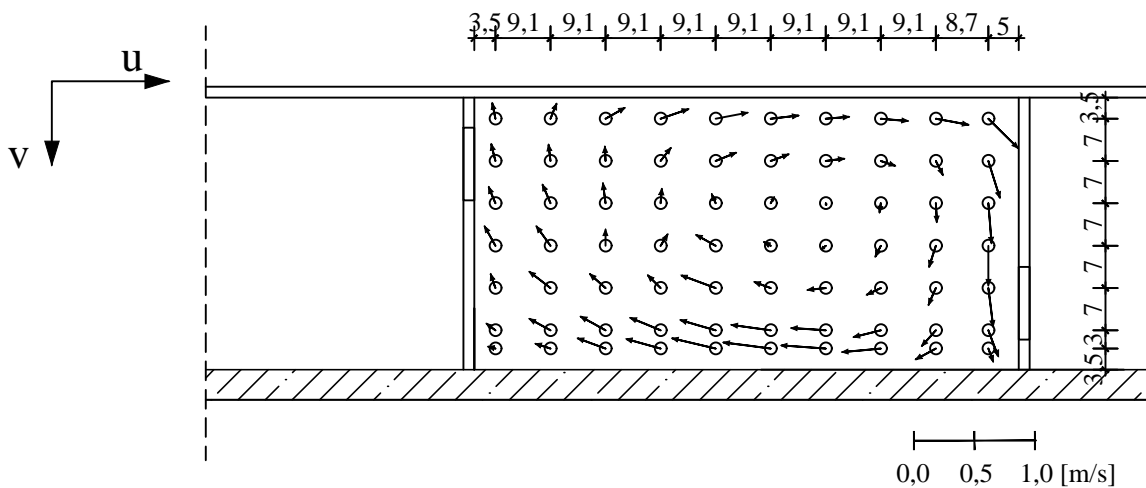


**PRILOG 7:**  
**PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA:**  
**MODEL 125-90-8**

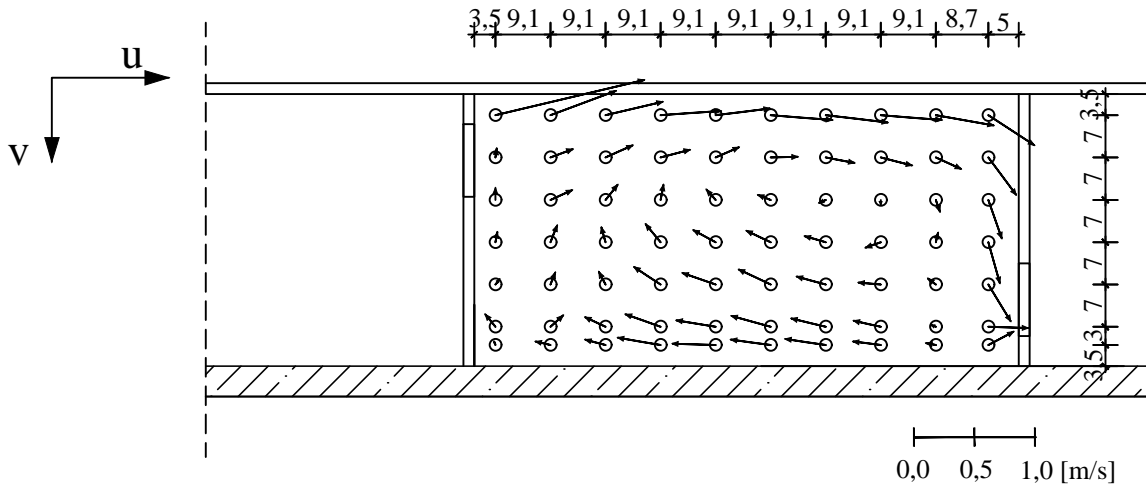
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B



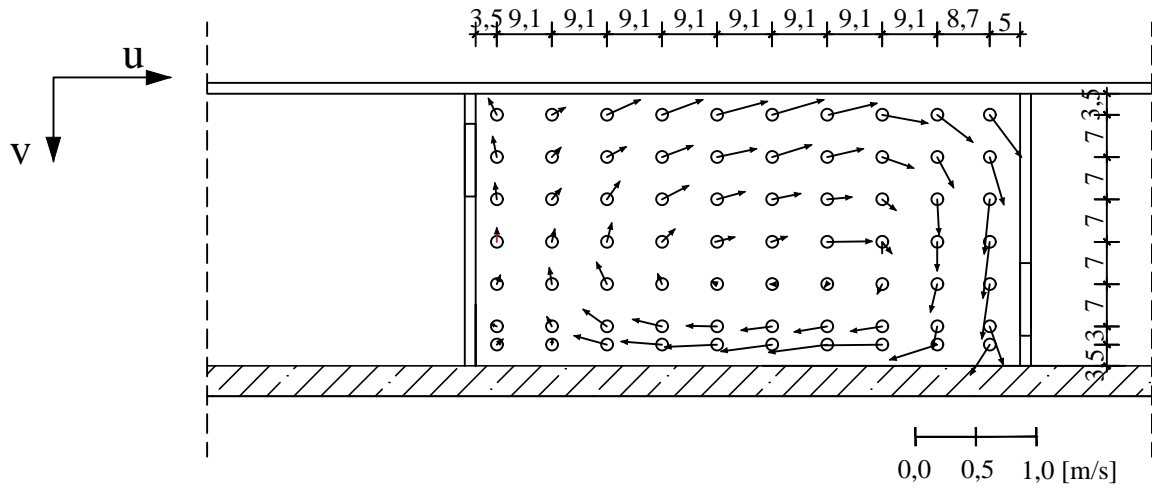
PRIDNENA RAVNINA - C



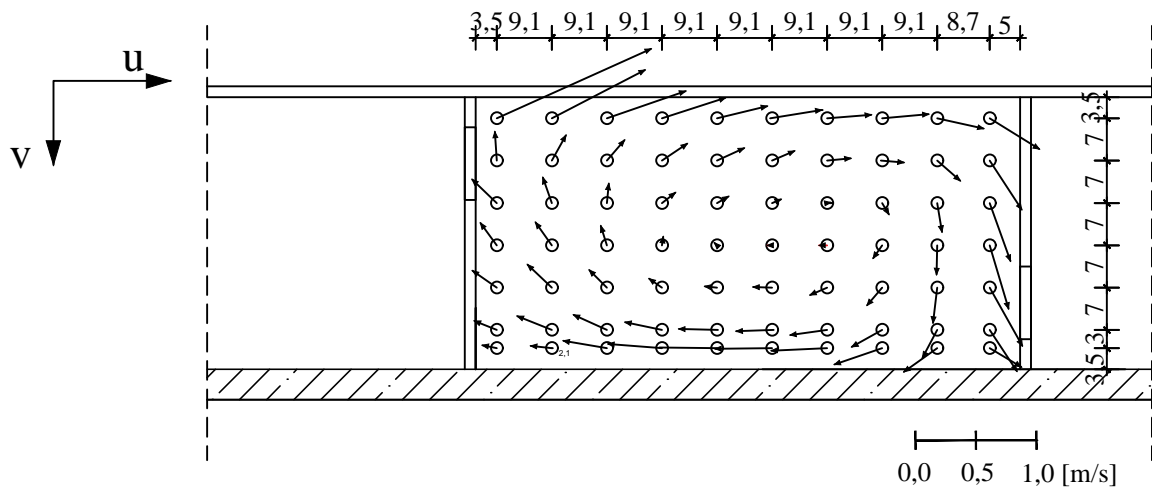


**PRILOG 9:  
 PRIKAZ POLJA BRZINA U HORIZONTALNIM RAVNINAMA:  
 MODEL 125-90-12**

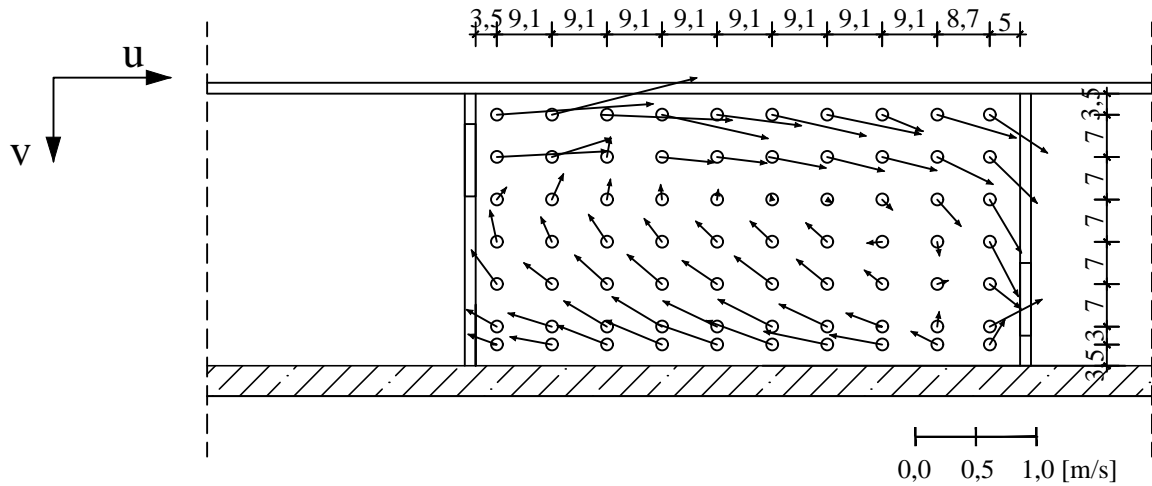
POVRŠINSKA RAVNINA - A



SREDNJA RAVNINA - B

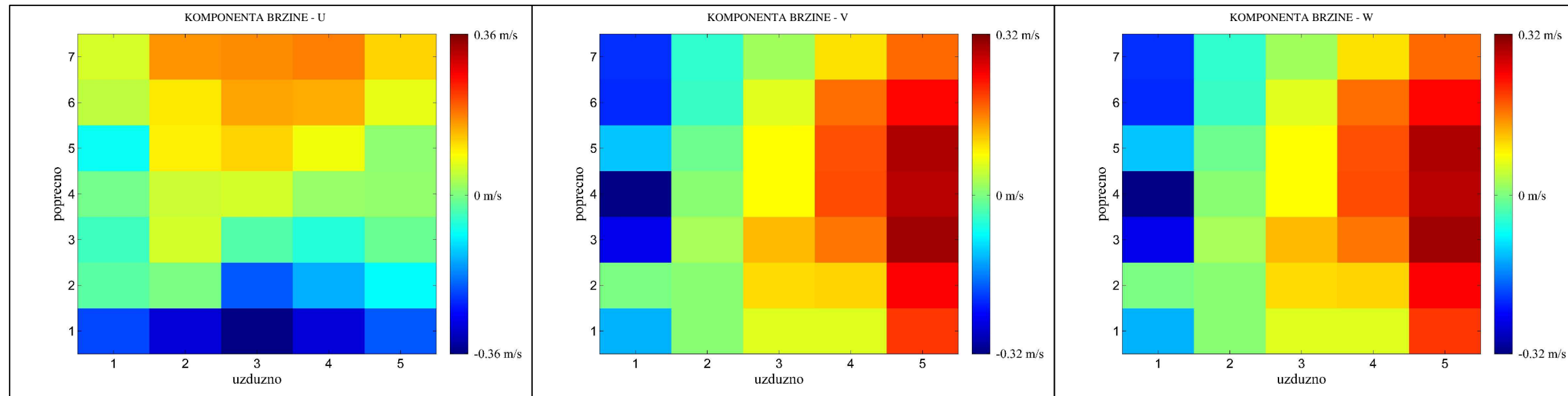


PRIDNENA RAVNINA - C

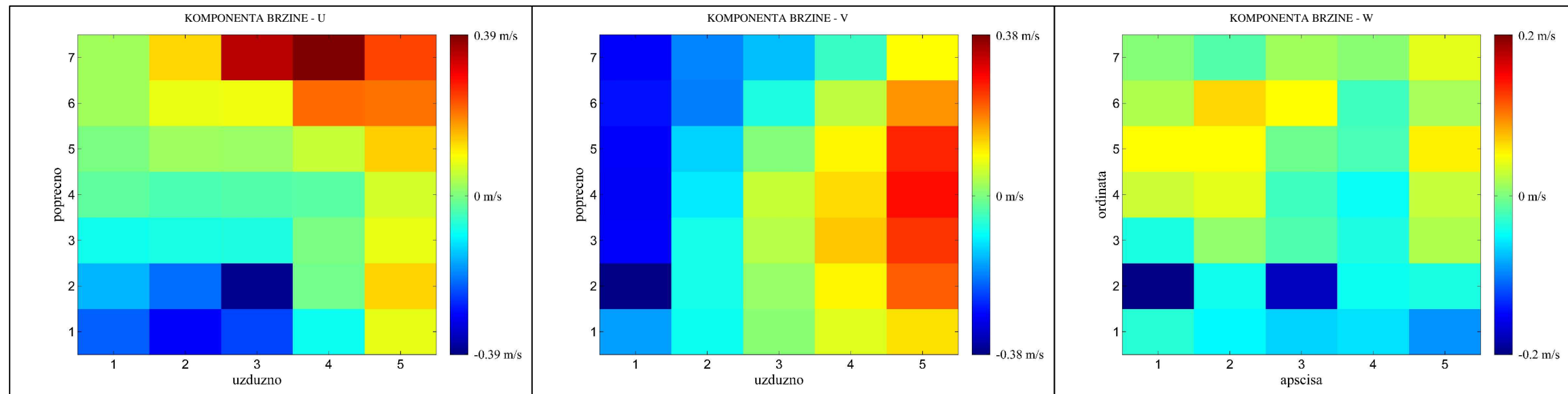


# PRILOG 10: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-45-8

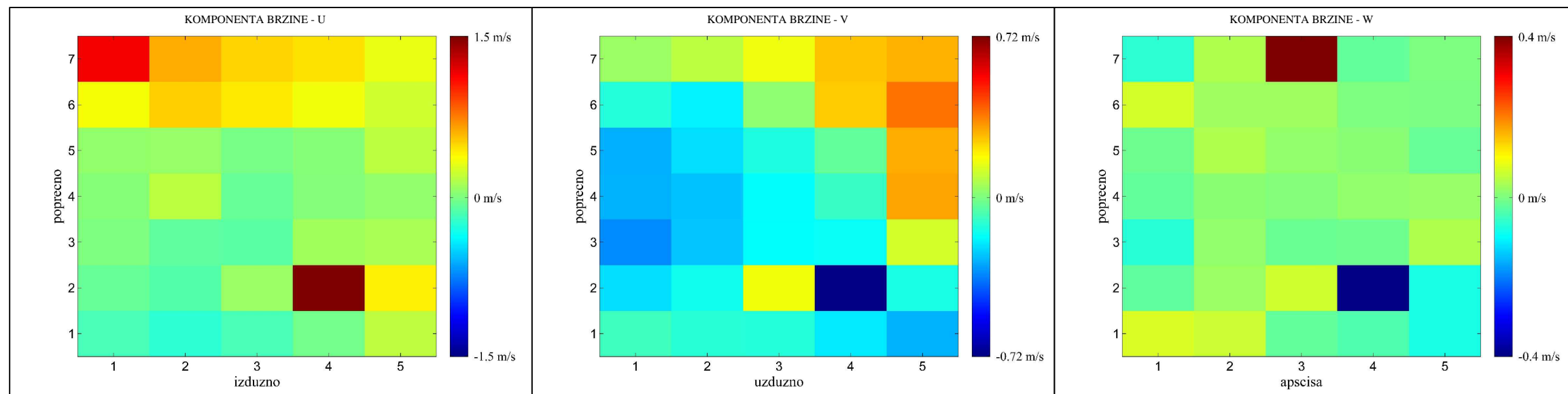
## POVRŠINSKA RAVNINA - A



## SREDNJA RAVNINA - B

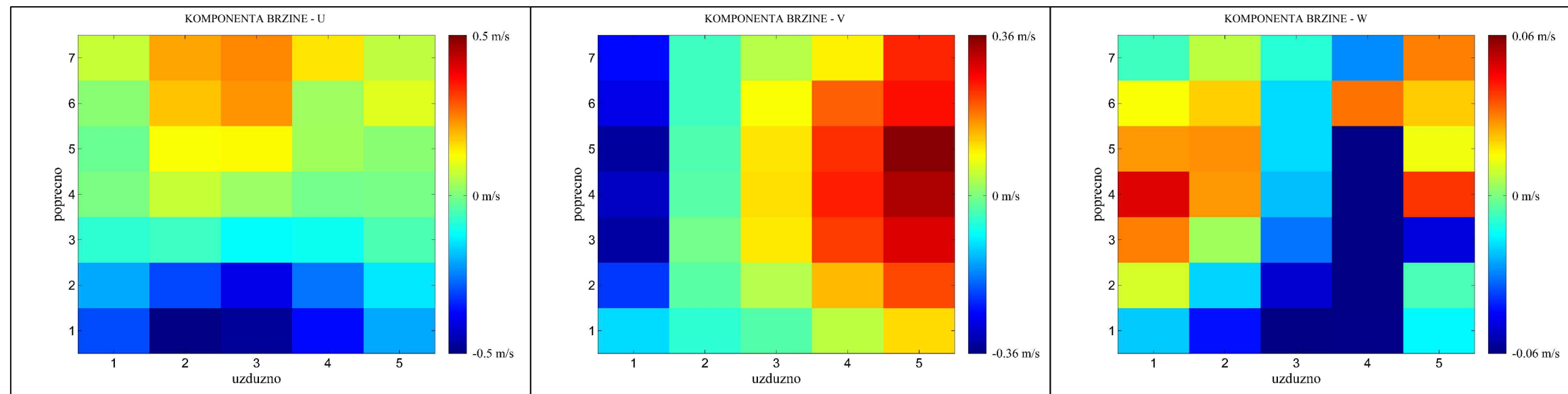


## PRIDNENA RAVNINA - C

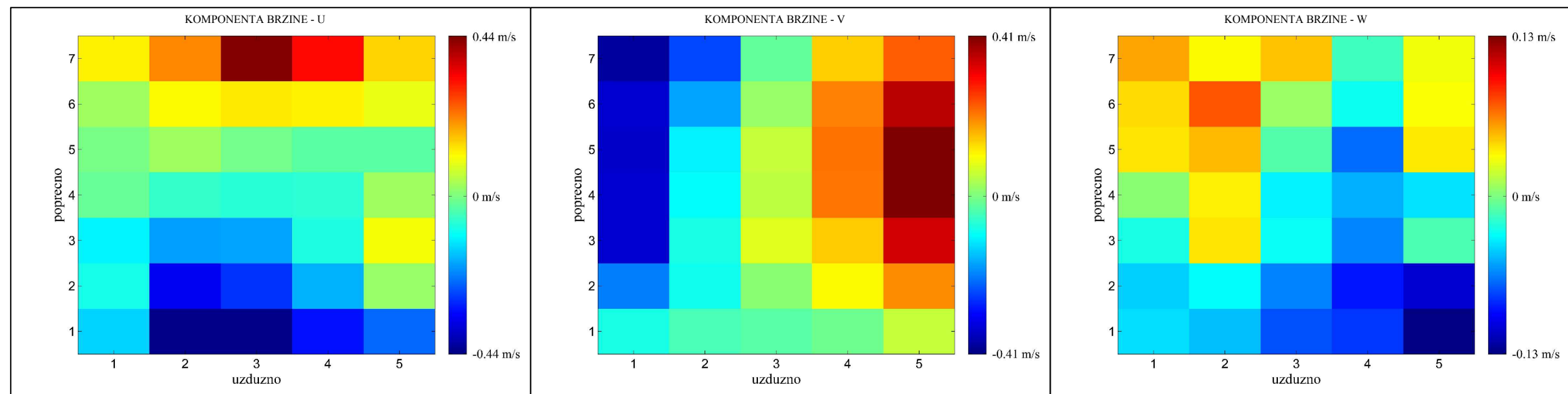


# PRILOG 11: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-45-10

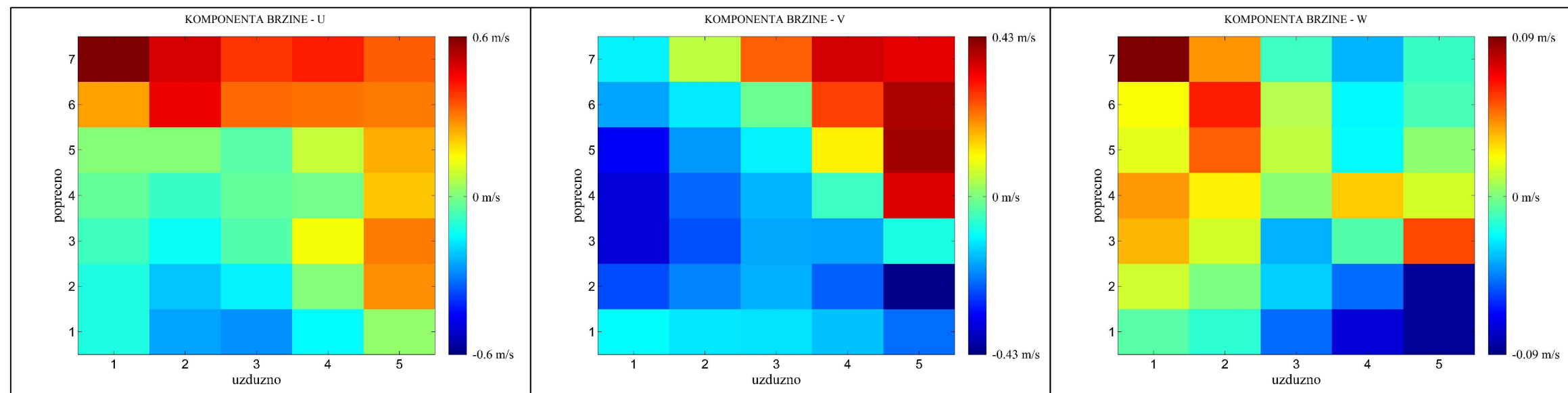
## POVRŠINSKA RAVNINA - A



## SREDNJA RAVNINA - B

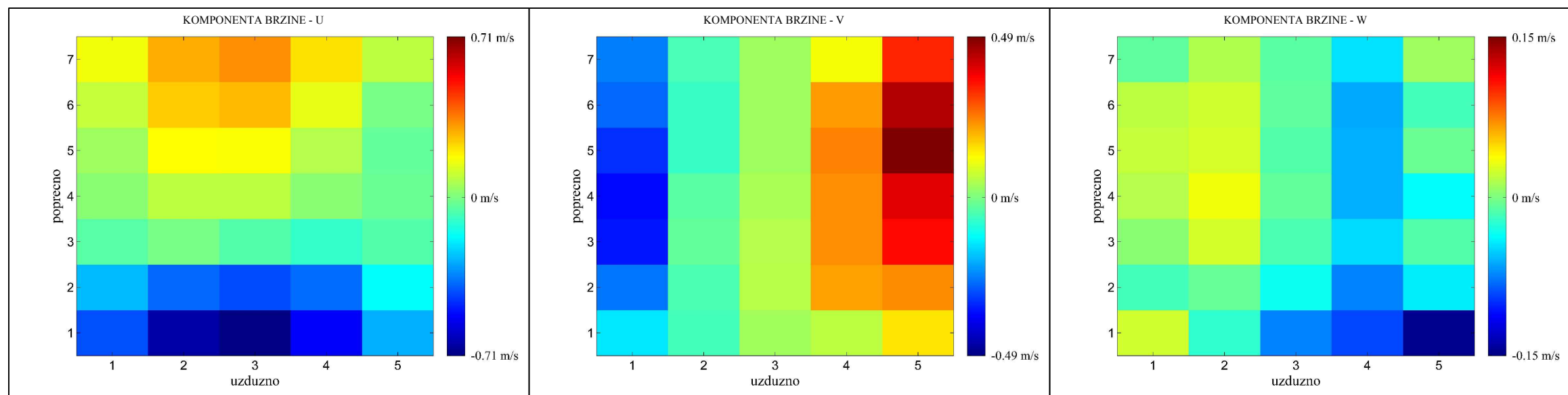


## PRIDNENA RAVNINA - C

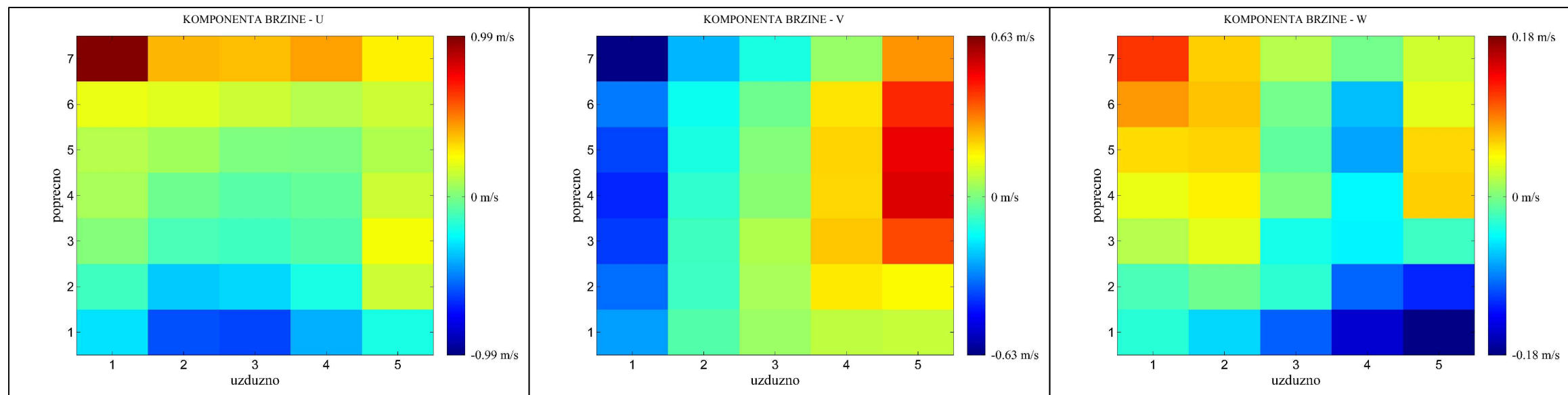


# PRILOG 12: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-45-12

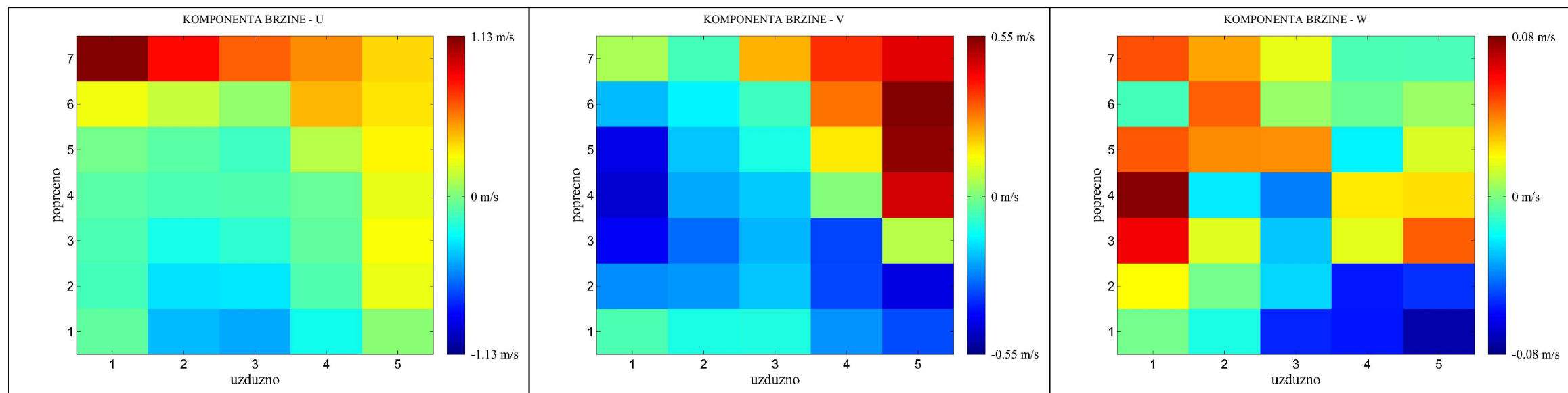
## POVRŠINSKA RAVNINA - A



## SREDNJA RAVNINA - B

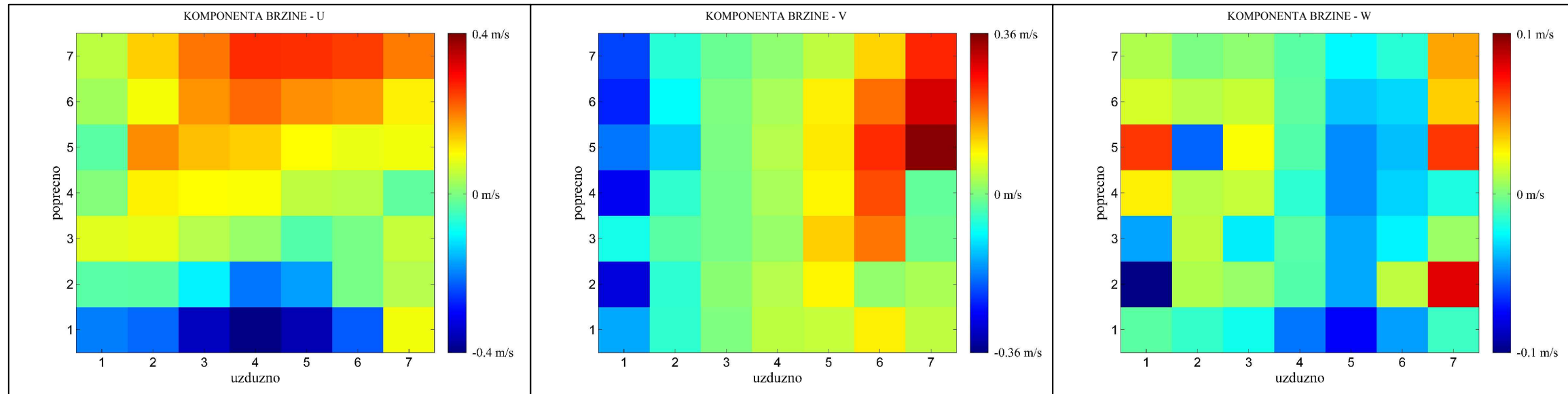


## PRIDNENA RAVNINA - C

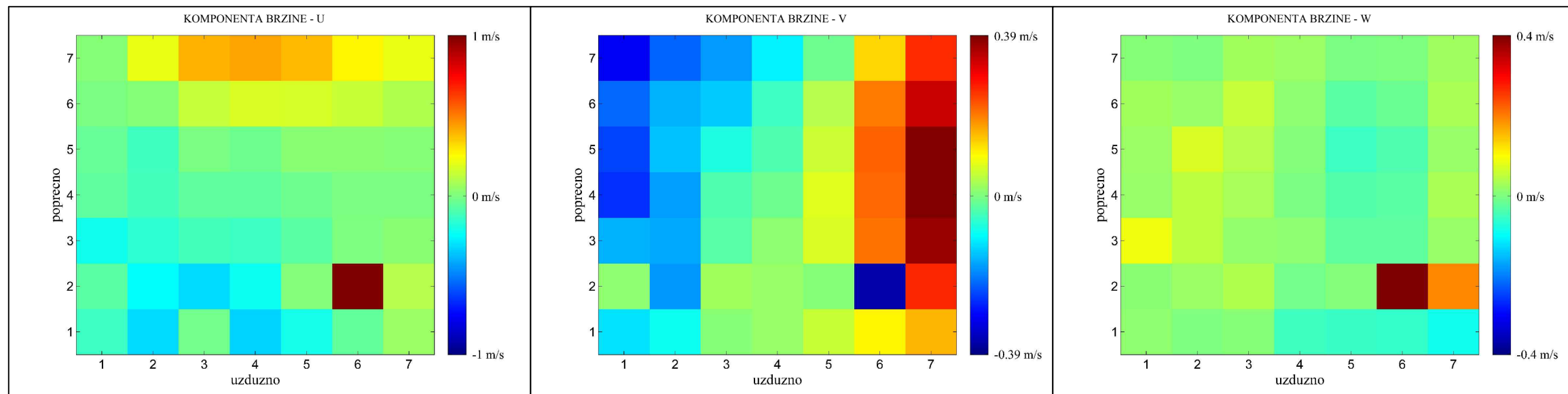


# PRILOG 13: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-60-8

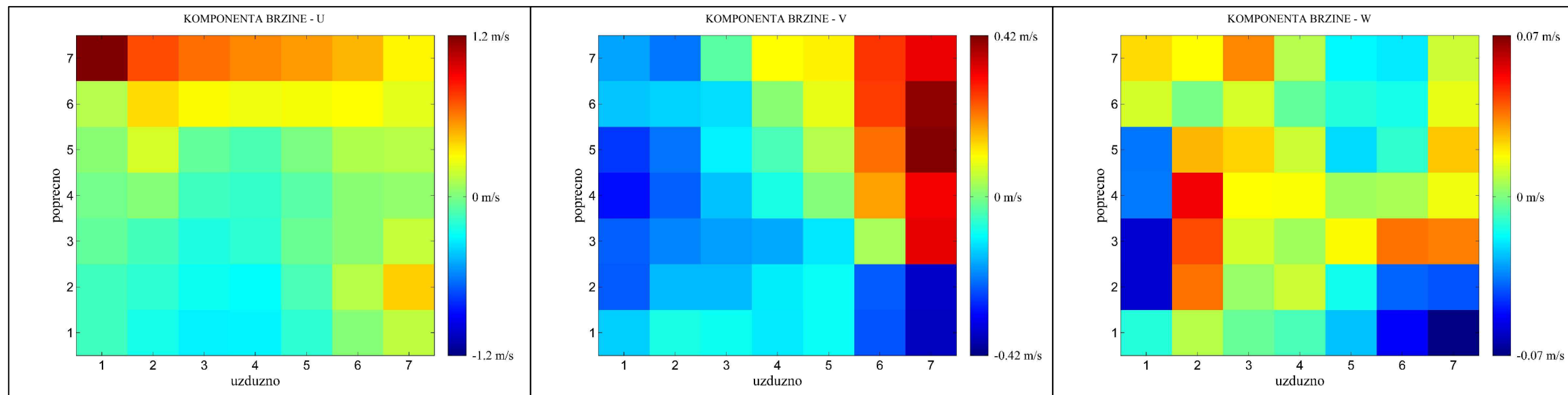
## POVRŠINSKA RAVNINA - A



## SREDNJA RAVNINA - B

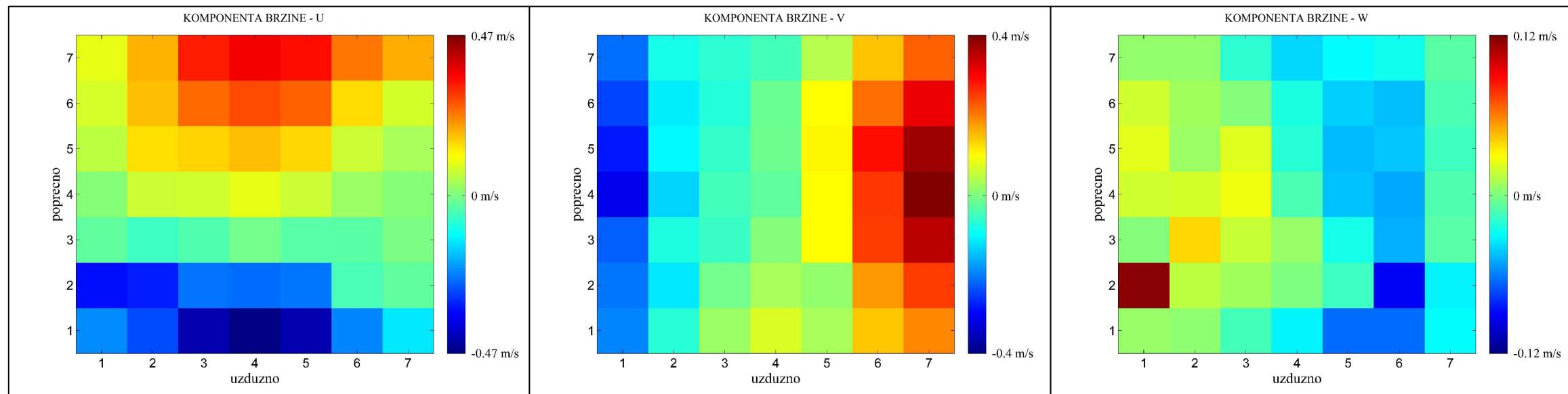


## PRIDNENA RAVNINA - C

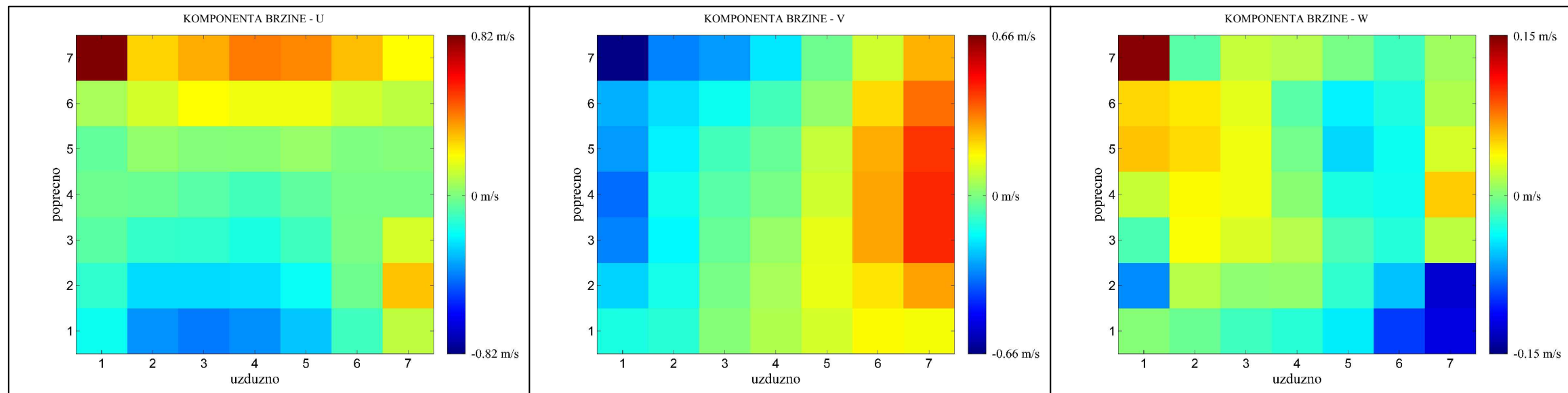


# PRILOG 14: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-60-10

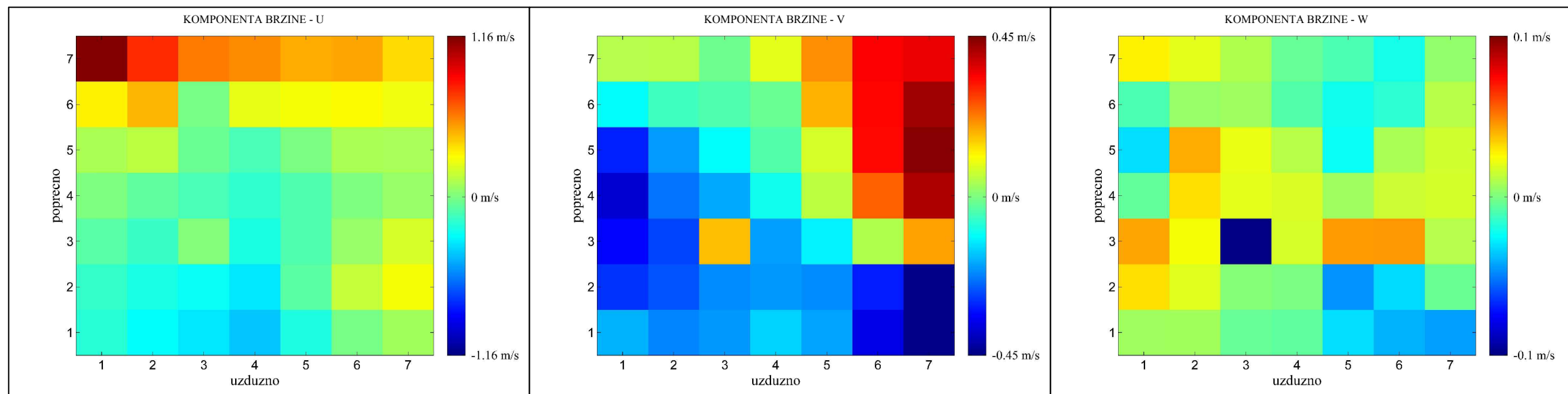
## POVRŠINSKA RAVNINA - A



## SREDNJA RAVNINA - B



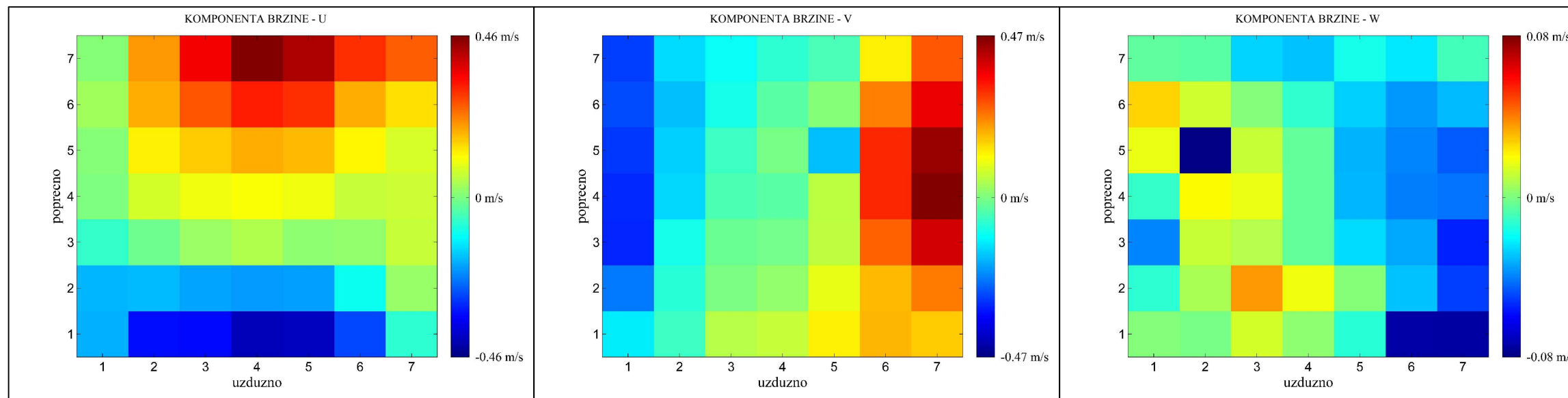
## PRIDNENA RAVNINA - C



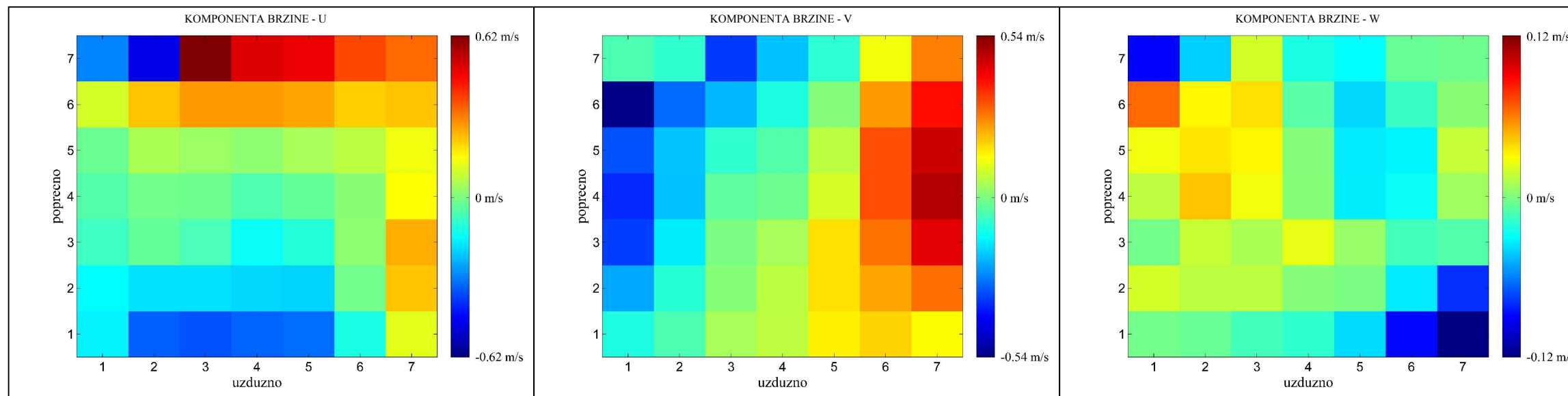


# PRILOG 15: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-60-12

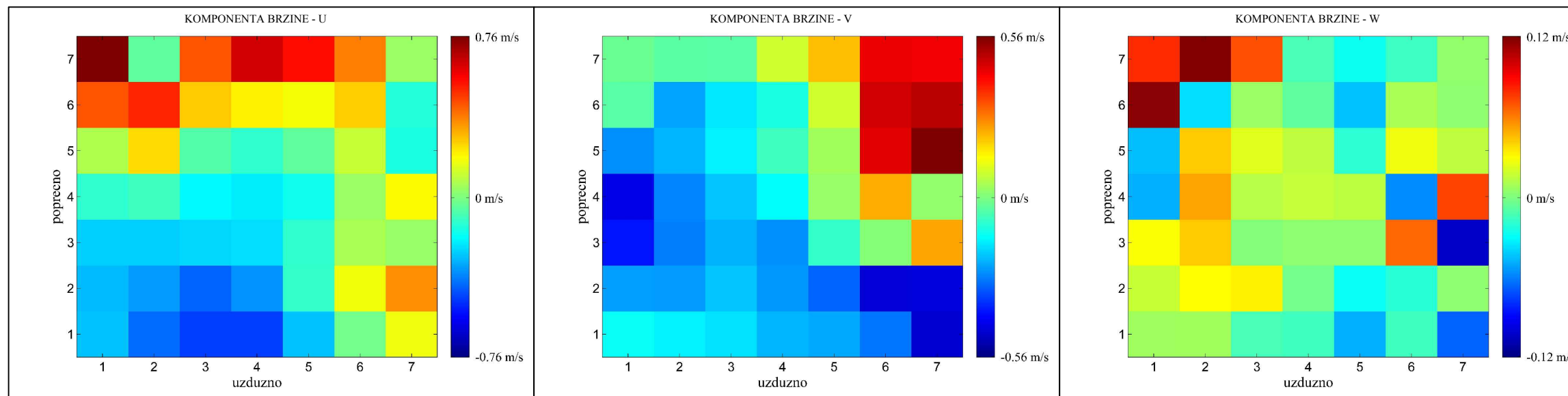
## POVRŠINSKA RAVNINA - A



## SREDNJA RAVNINA - B

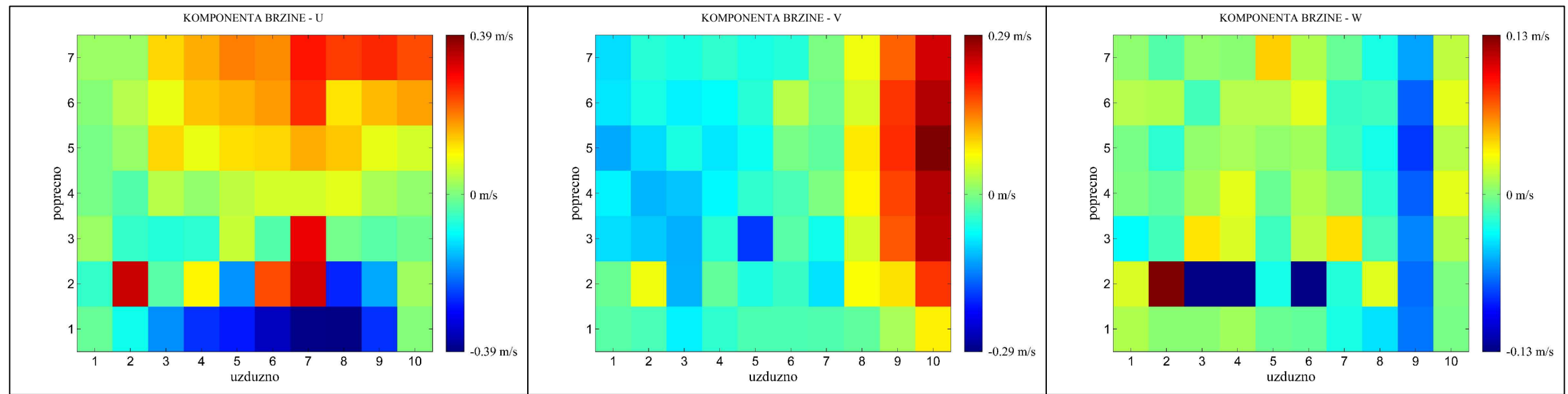


## PRIDNENA RAVNINA - C

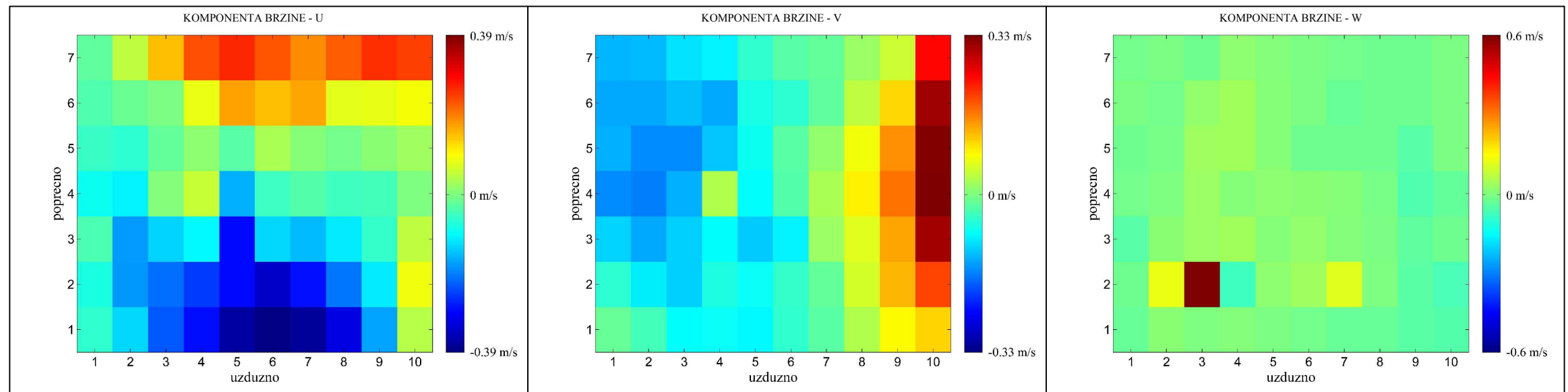


# PRILOG 16: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-90-8

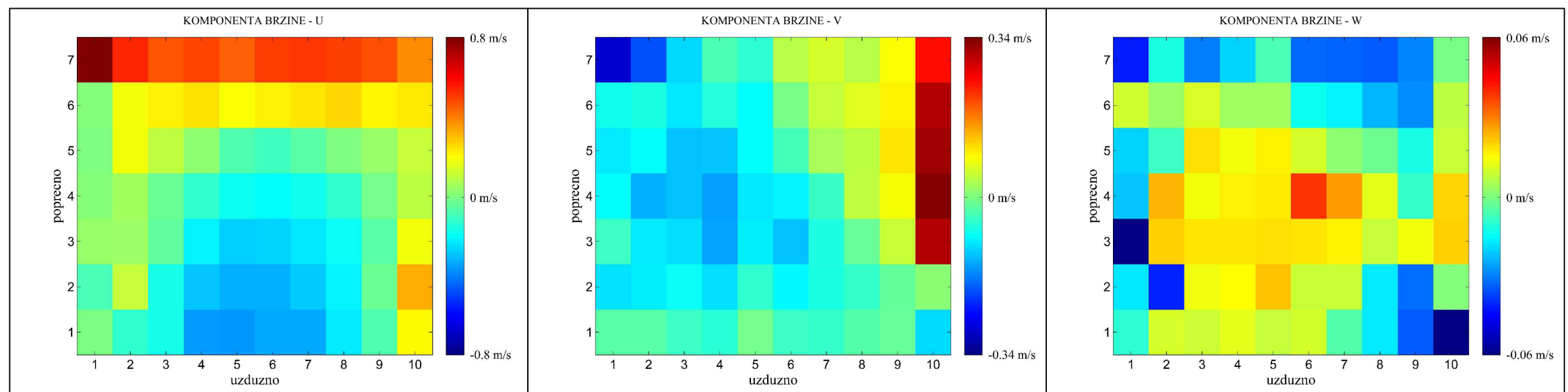
## POVRŠINSKA RAVNINA - A



## SREDNJA RAVNINA - B

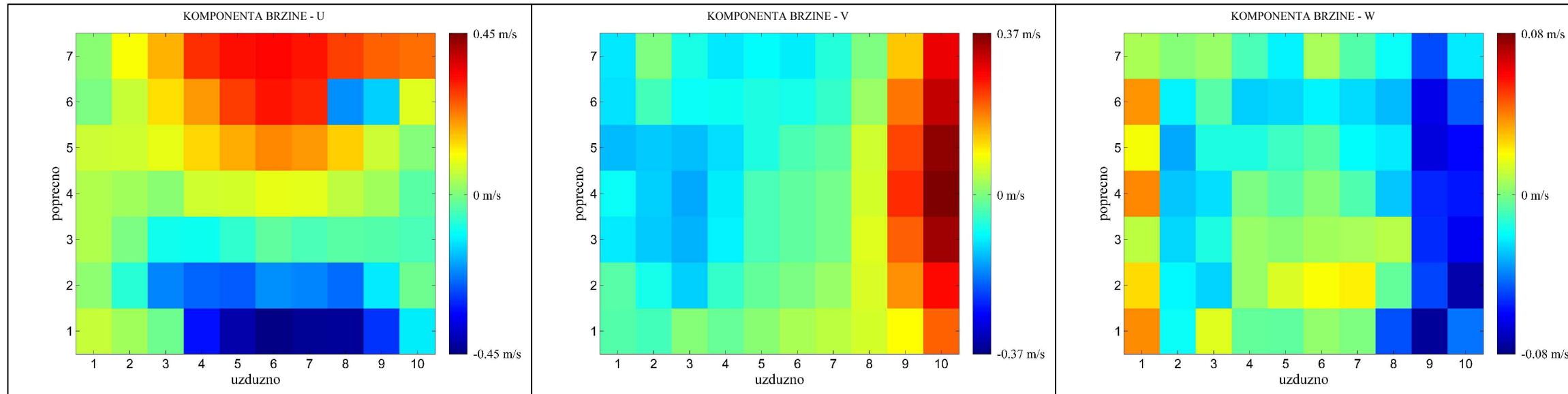


## PRIDNENA RAVNINA - C

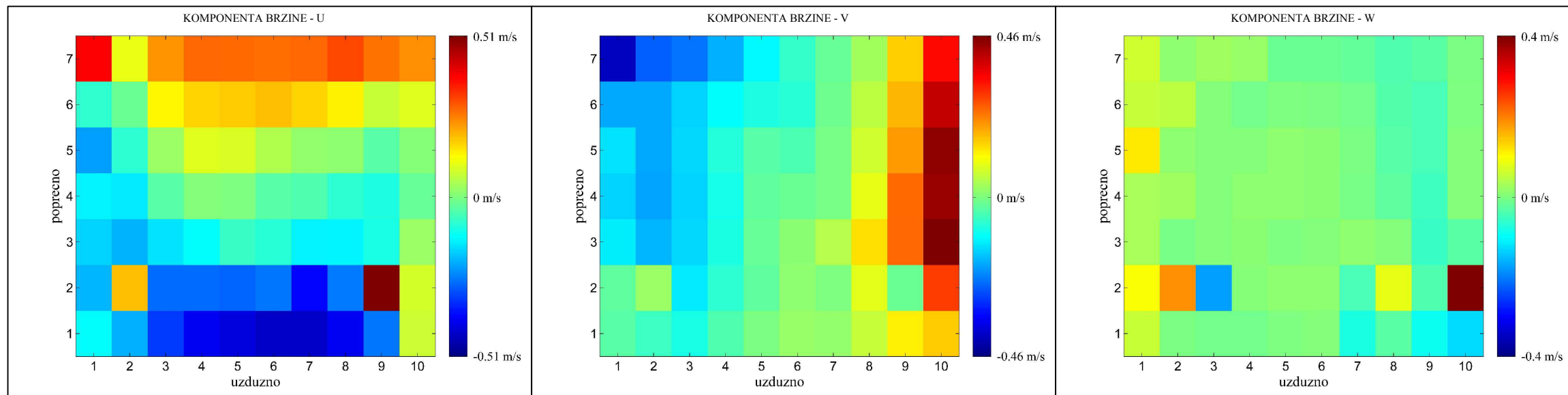


# PRILOG 17: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-90-10

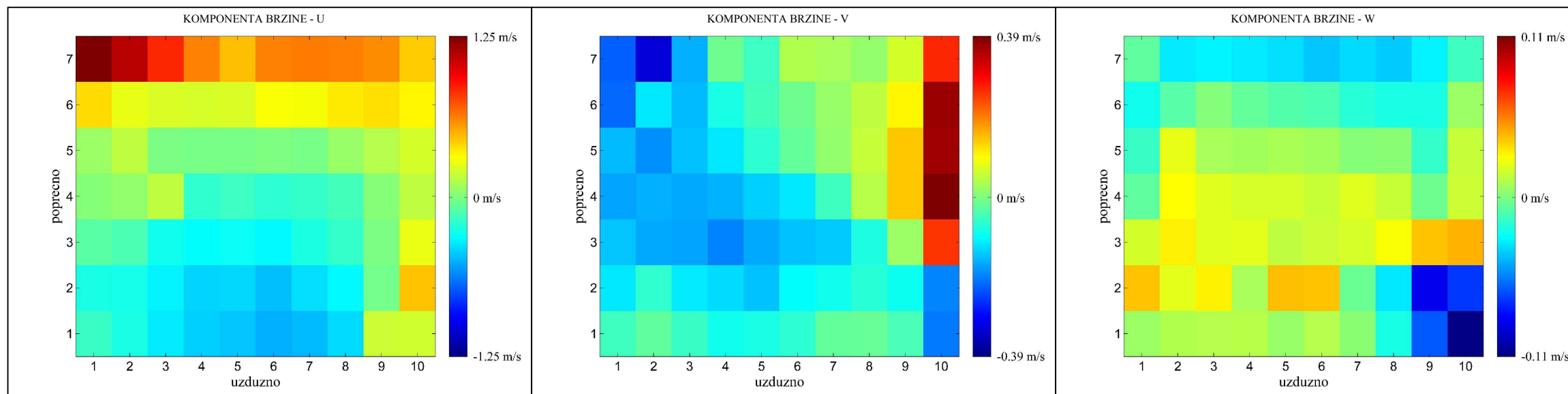
## POVRŠINSKA RAVNINA - A



## SREDNJA RAVNINA - B

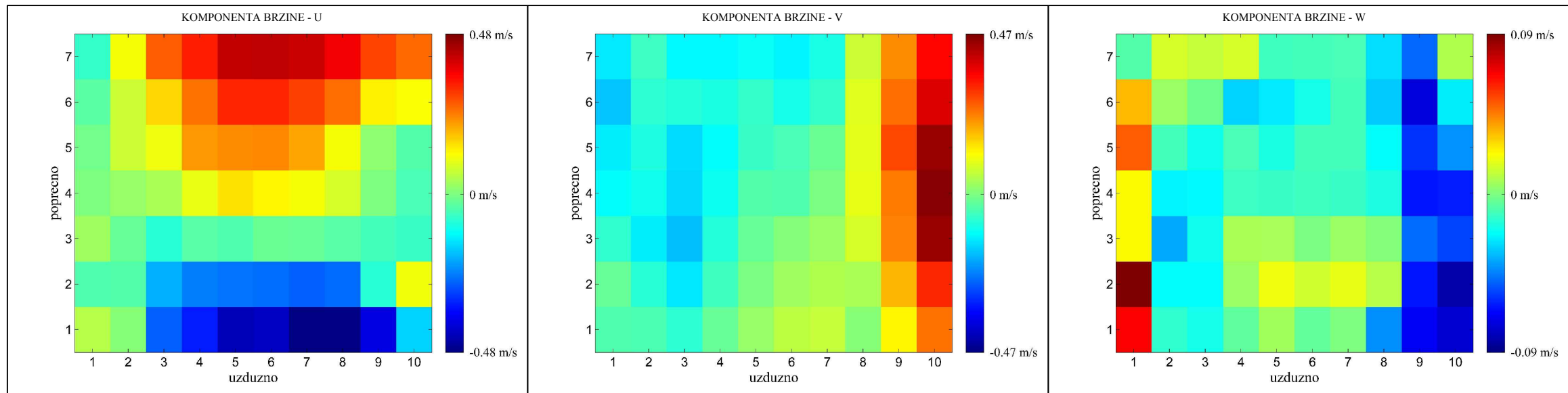


## PRIDNENA RAVNINA - C

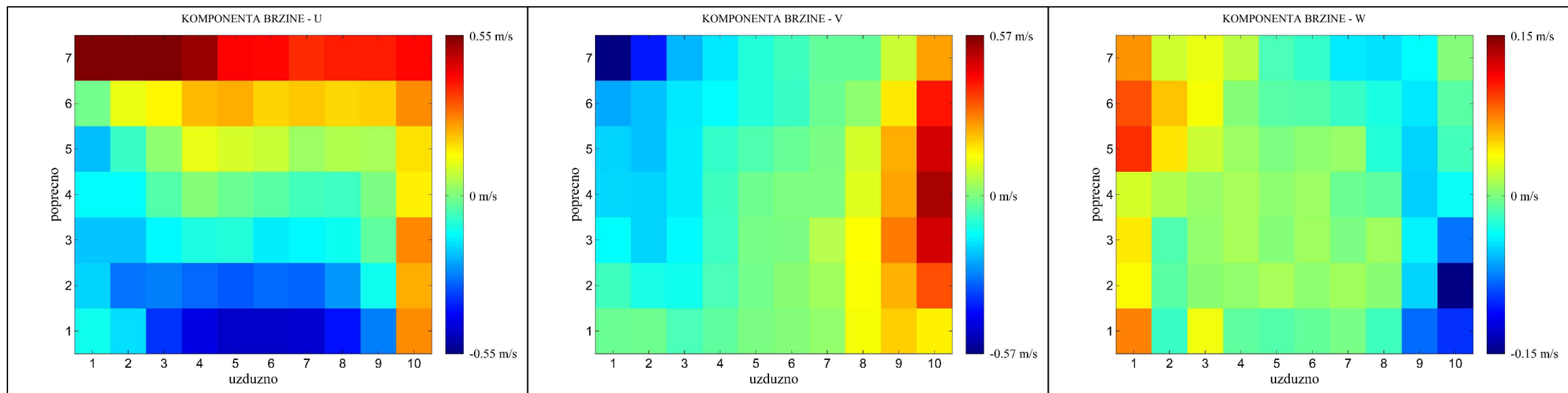


# PRILOG 18: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-90-12

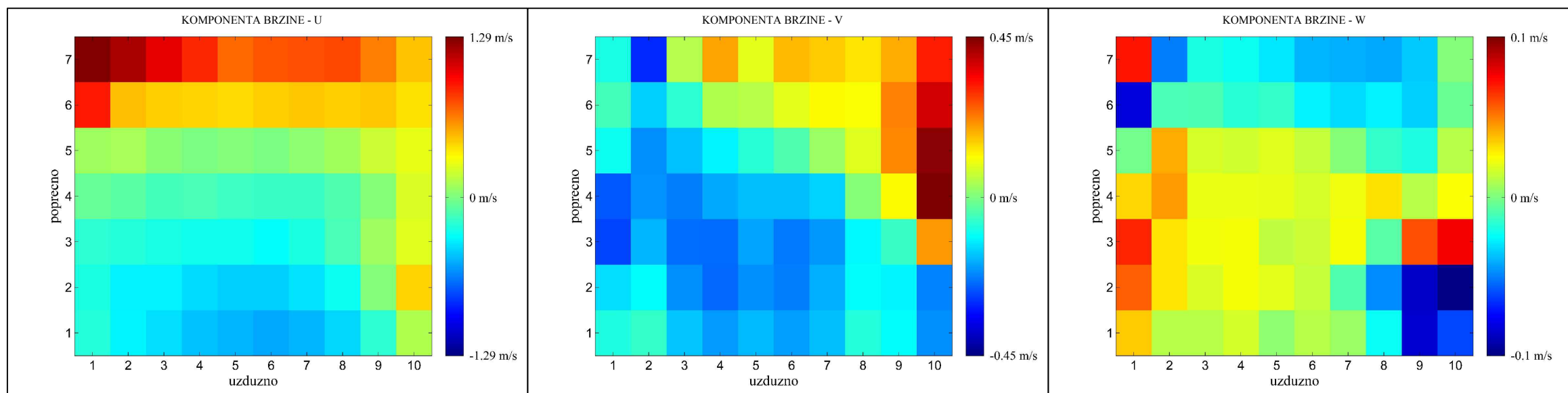
## POVRŠINSKA RAVNINA - A



## SREDNJA RAVNINA - B

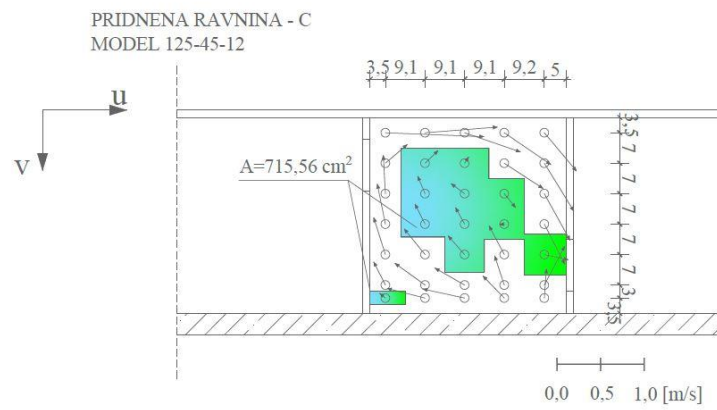
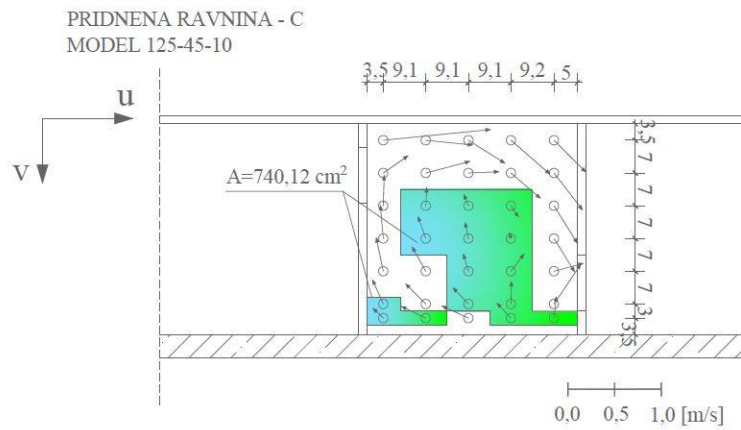
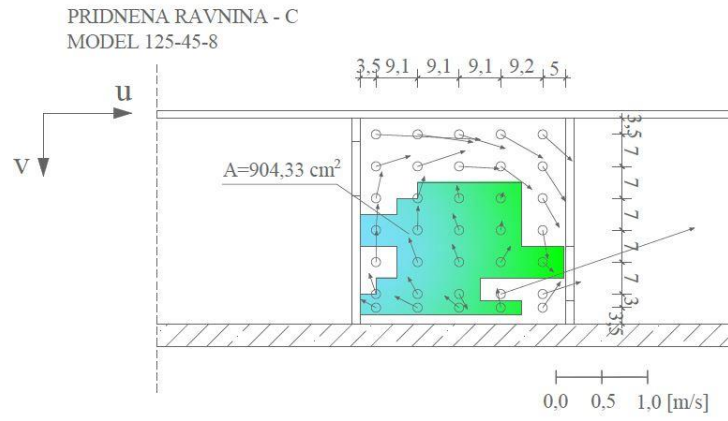


## PRIDNENA RAVNINA - C



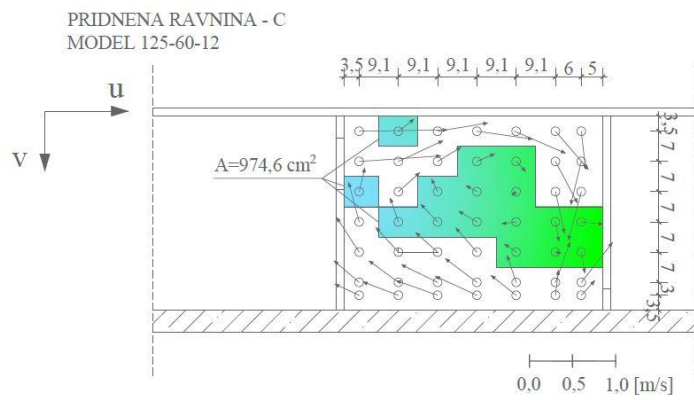
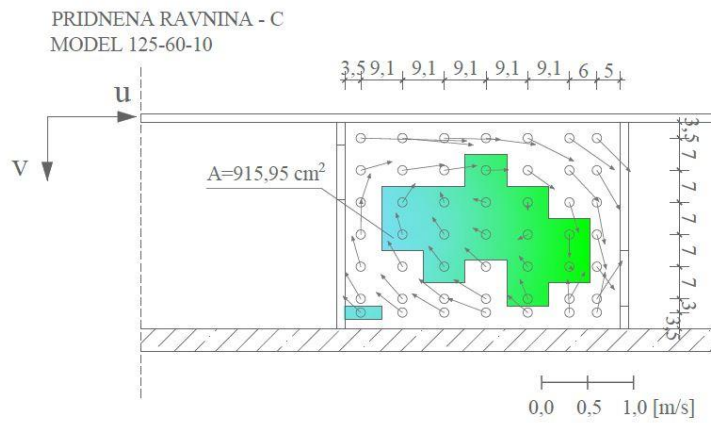
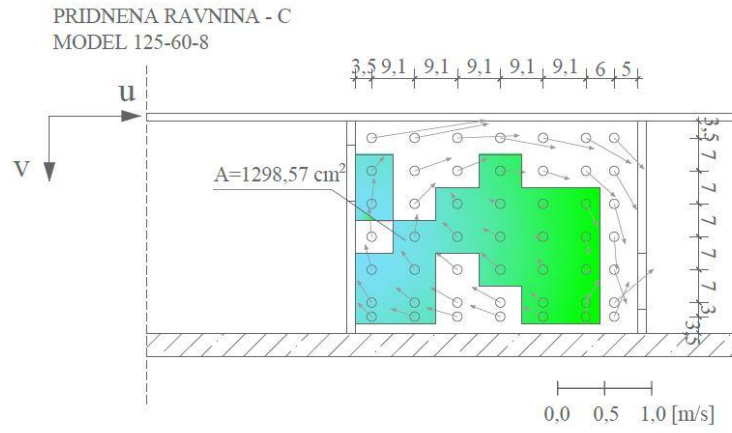
# PRILOG 19:

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



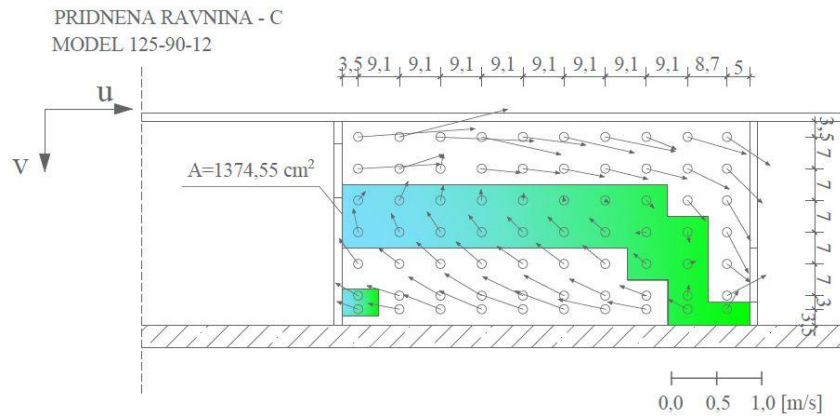
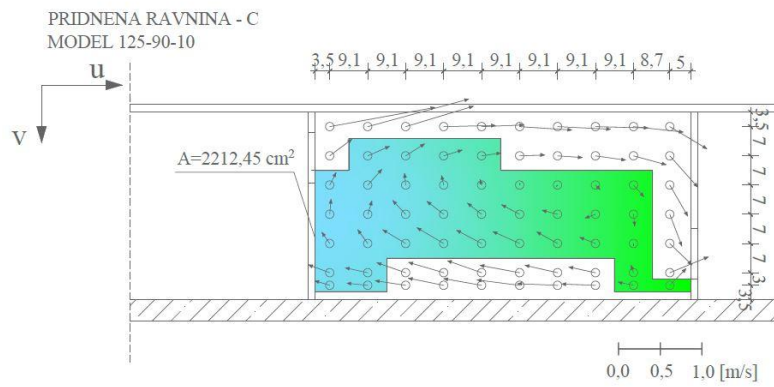
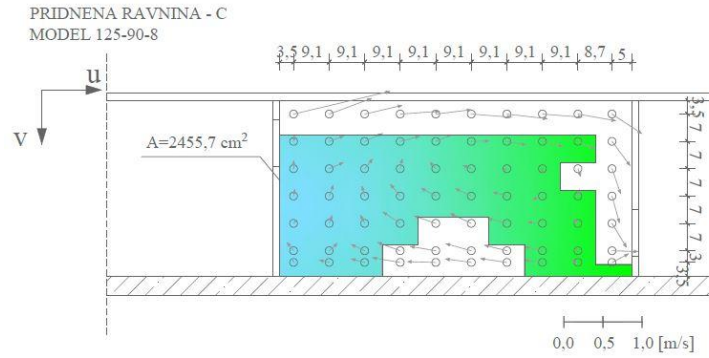
# PRILOG 20:

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



# PRILOG 21:

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



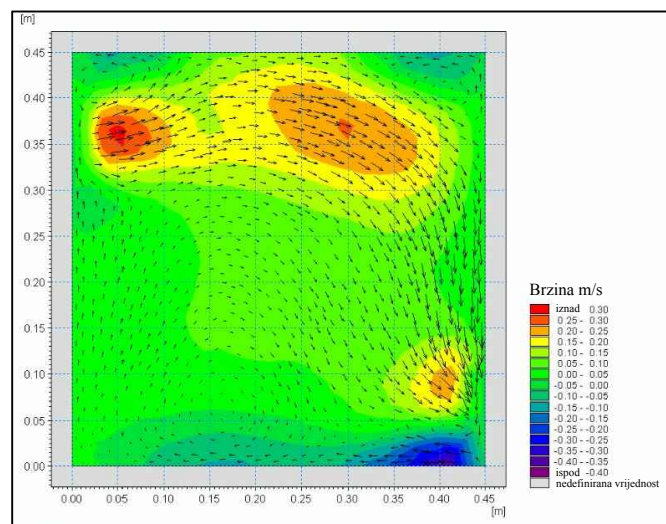
# REZULTATI NUMERIČKOG MODELA



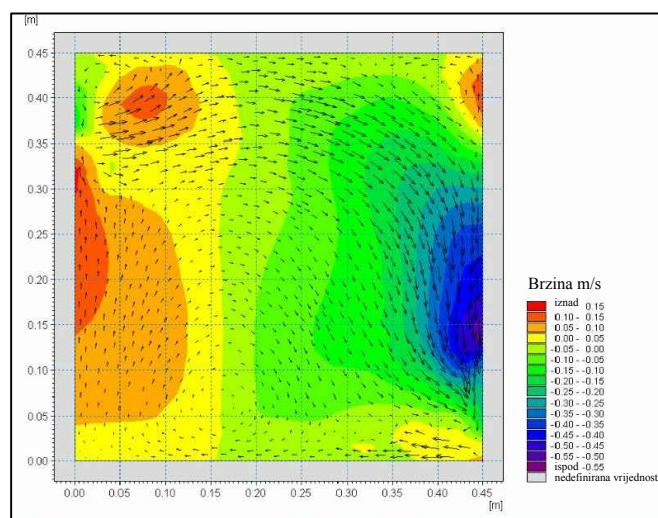
# PRILOG 22: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-45-8

## POVRŠINSKA RAVNINA - A

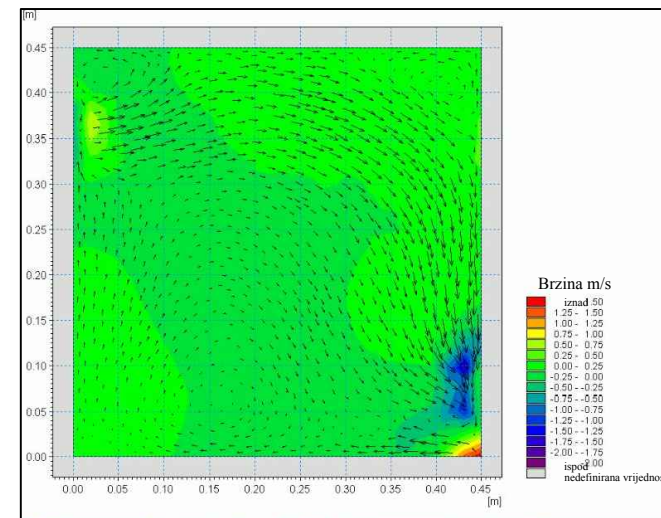
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

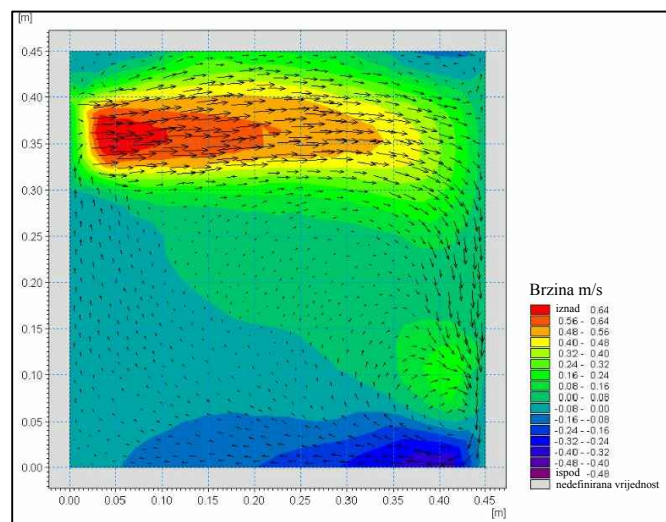


KOMPONENTA BRZINE - W

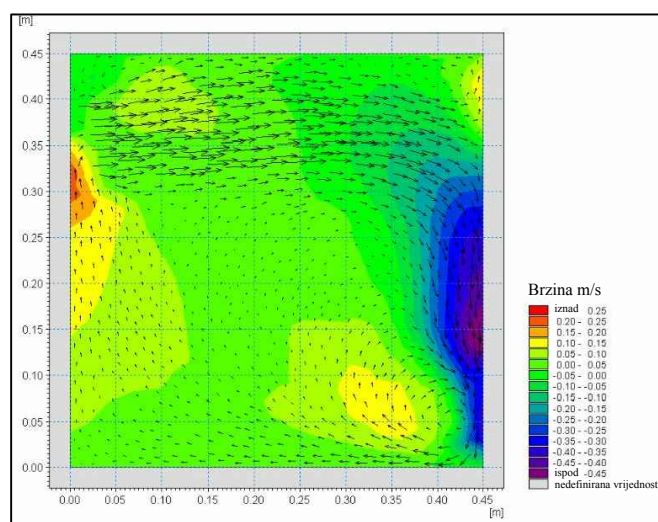


## SREDNJA RAVNINA - B

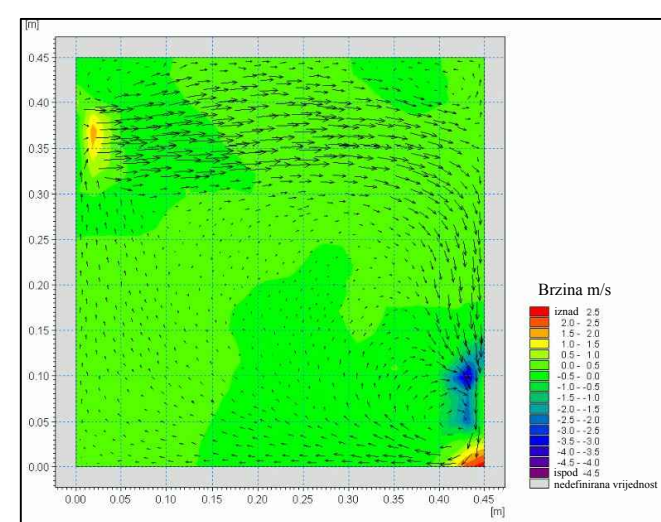
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

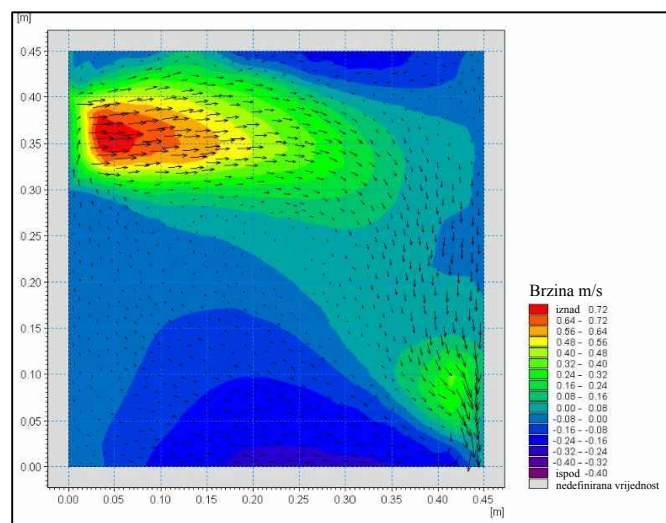


KOMPONENTA BRZINE - W

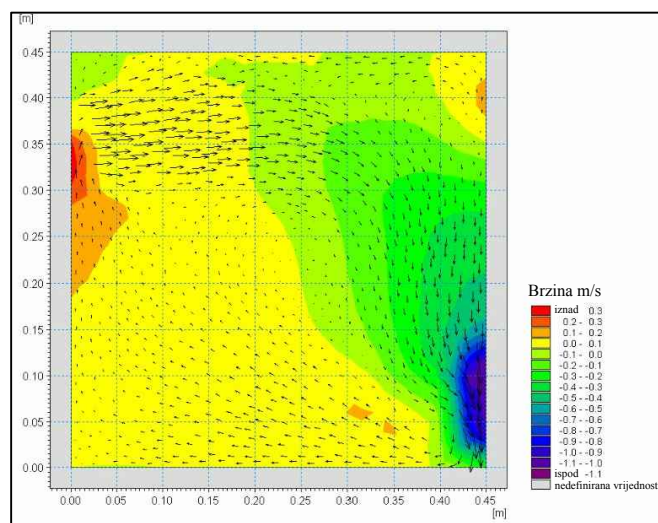


## PRIDNENA RAVNINA - C

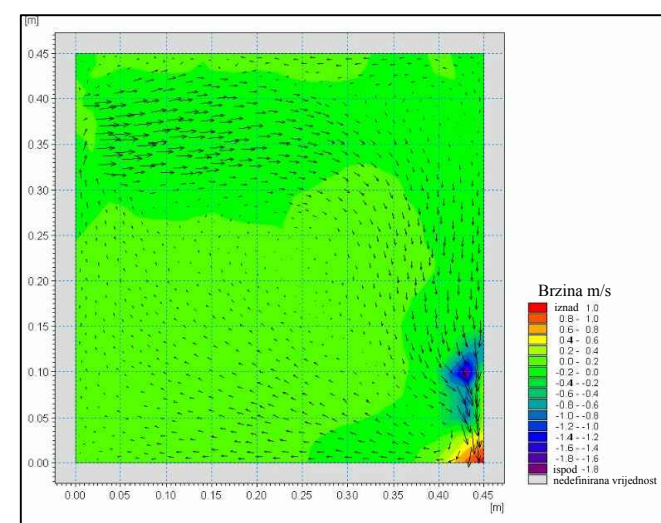
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V



KOMPONENTA BRZINE - W

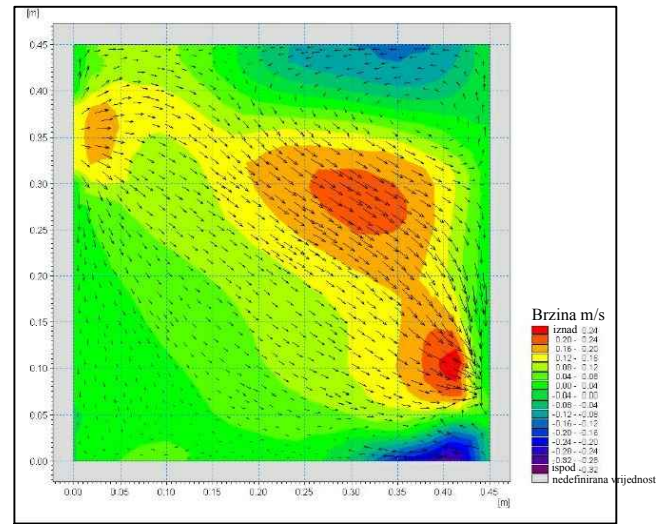




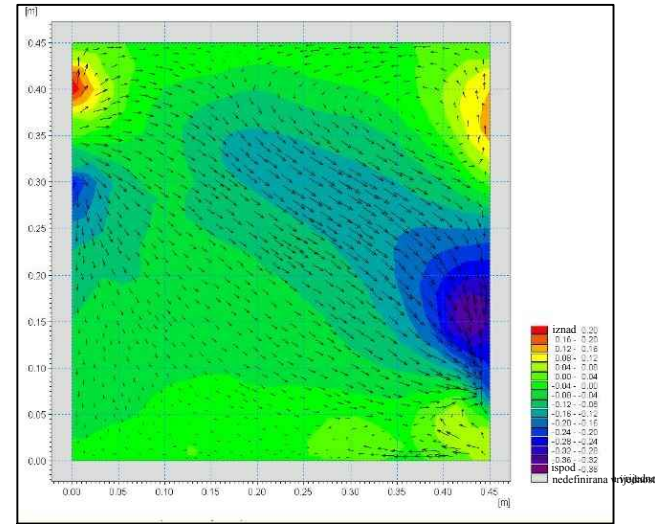
# PRILOG 23: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-45-10

## POVRŠINSKA RAVNINA - A

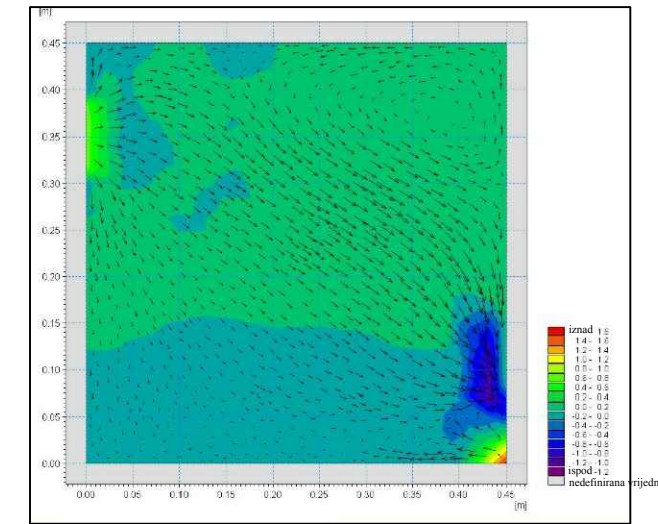
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

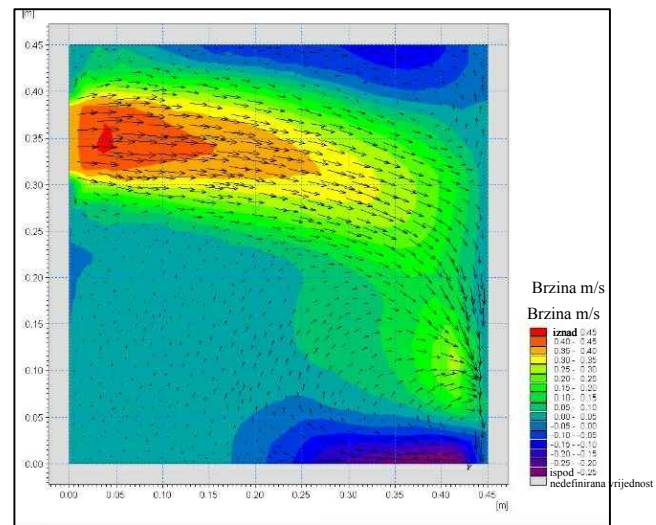


KOMPONENTA BRZINE - W

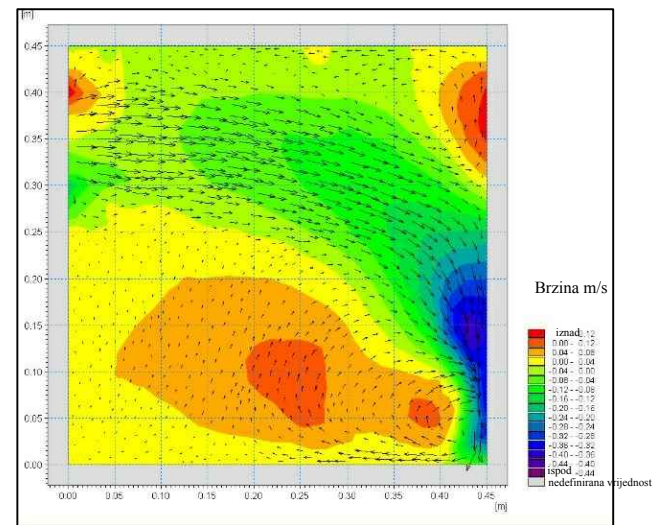


## SREDNJA RAVNINA - B

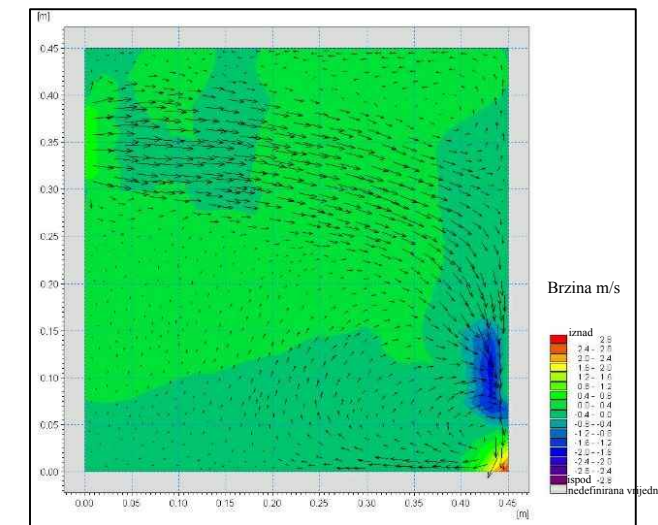
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

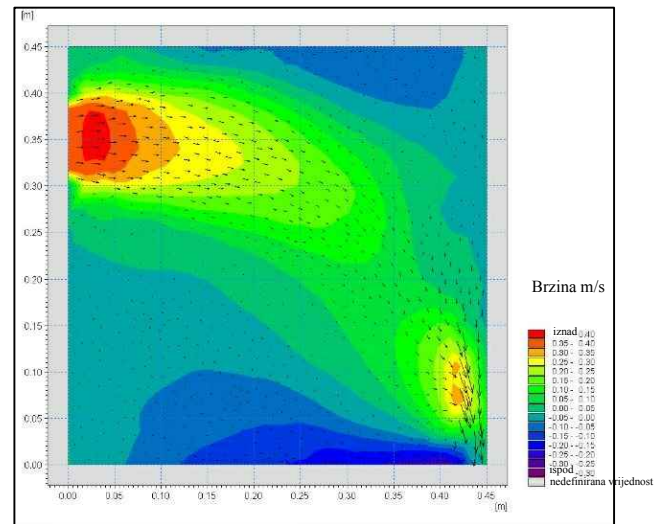


KOMPONENTA BRZINE - W

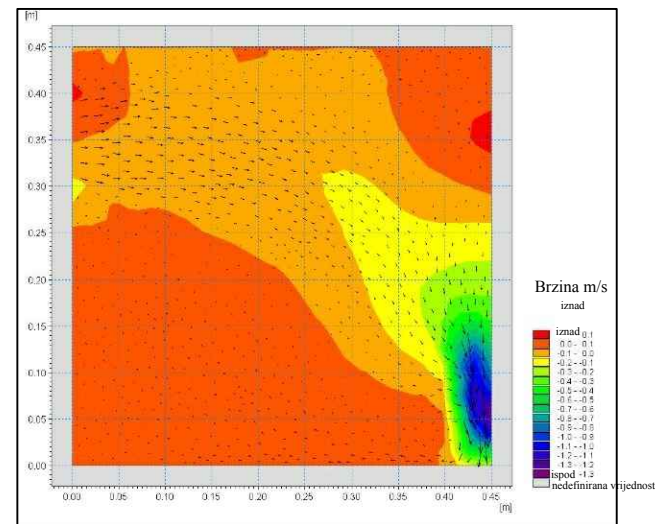


## PRIDNENA RAVNINA - C

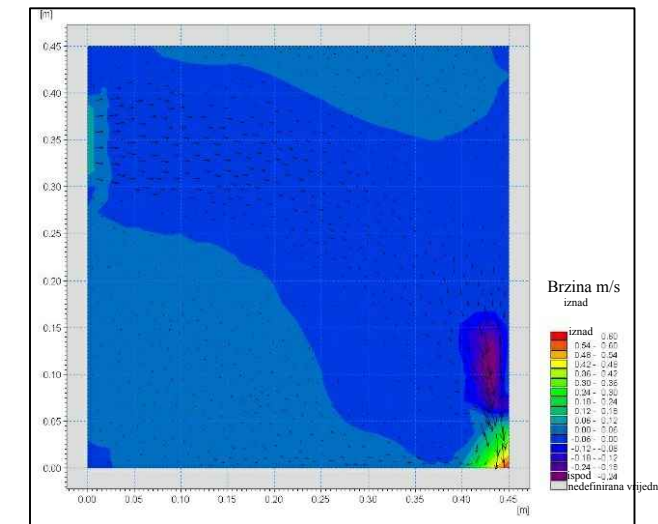
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V



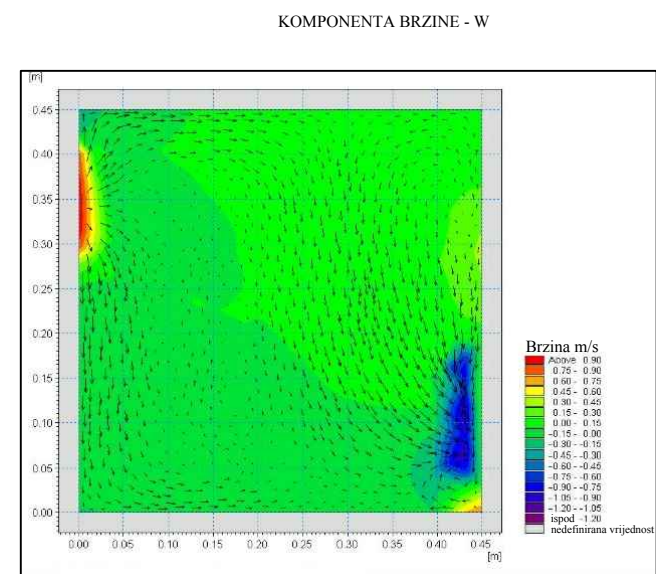
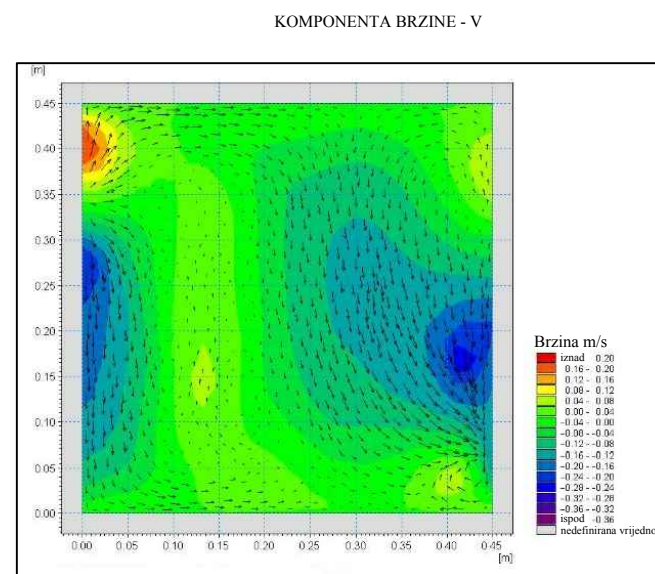
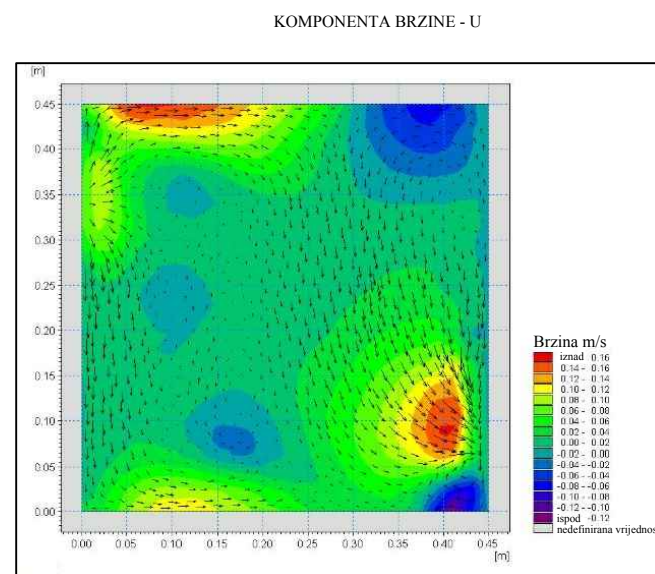
KOMPONENTA BRZINE - W



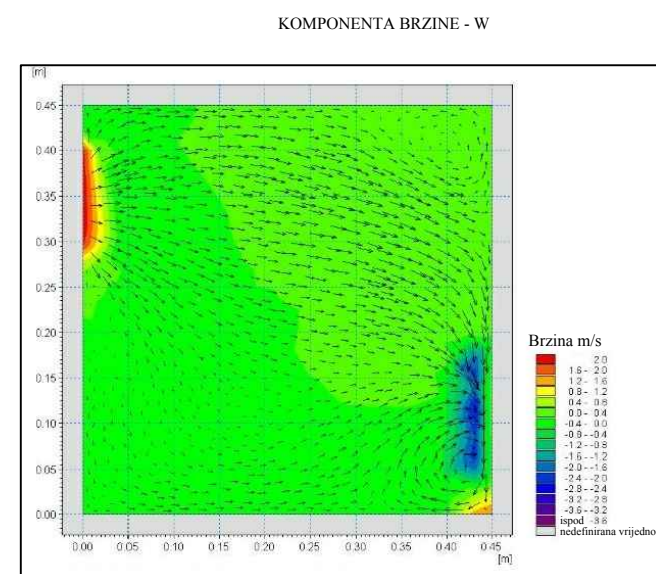
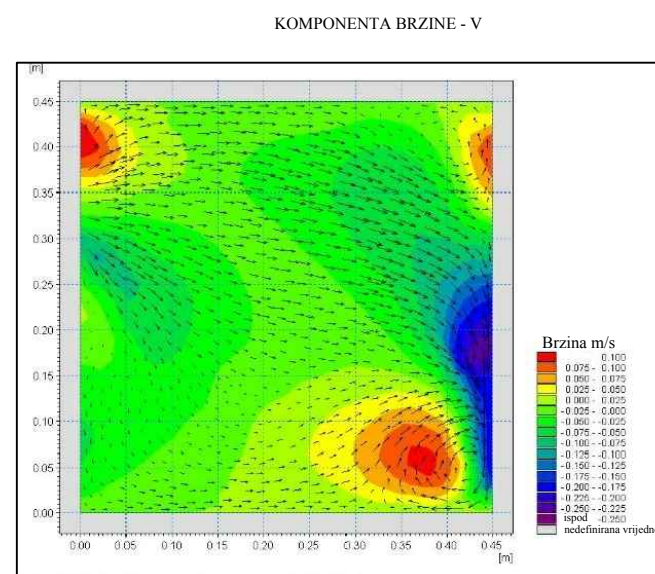
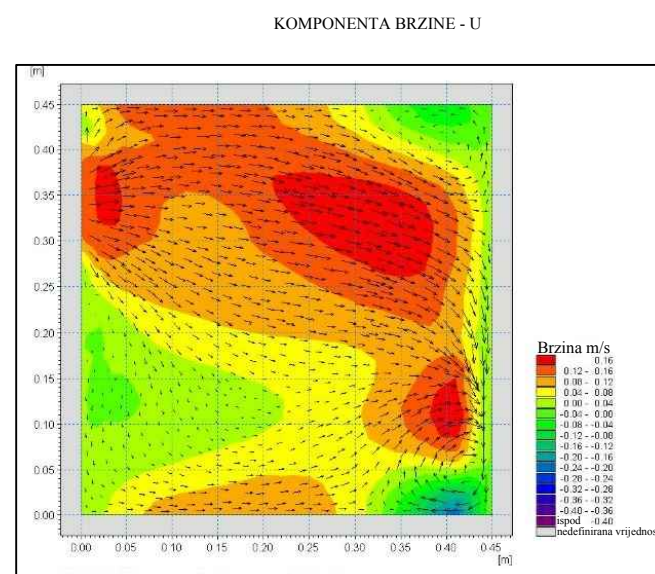


# PRILOG 24: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-45-12

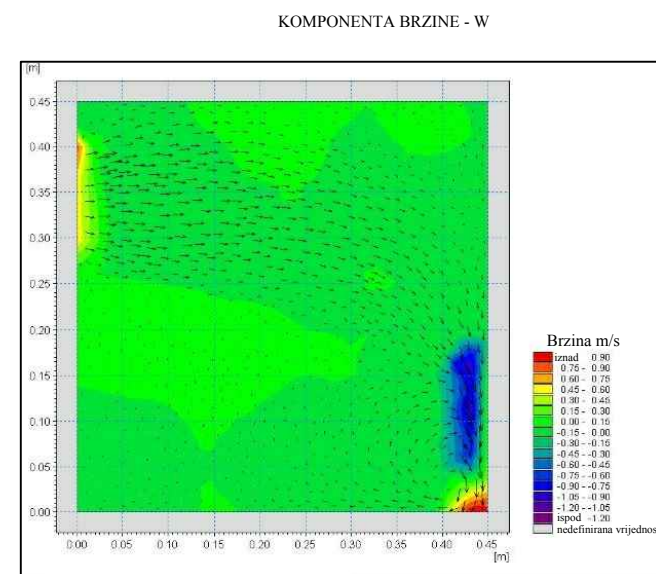
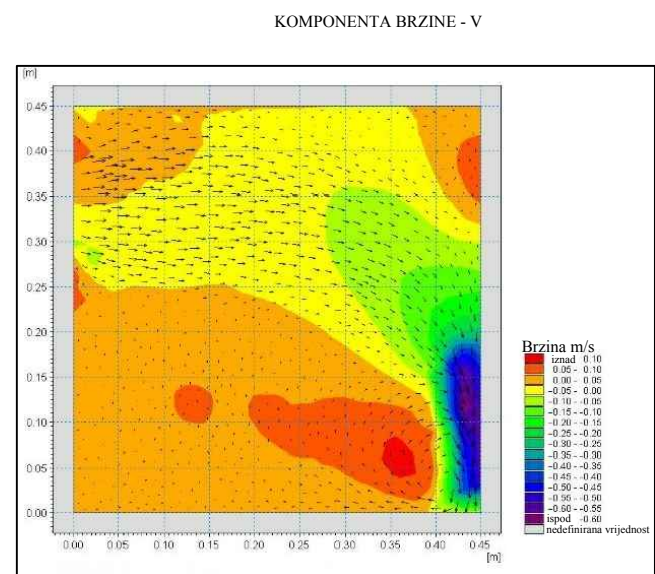
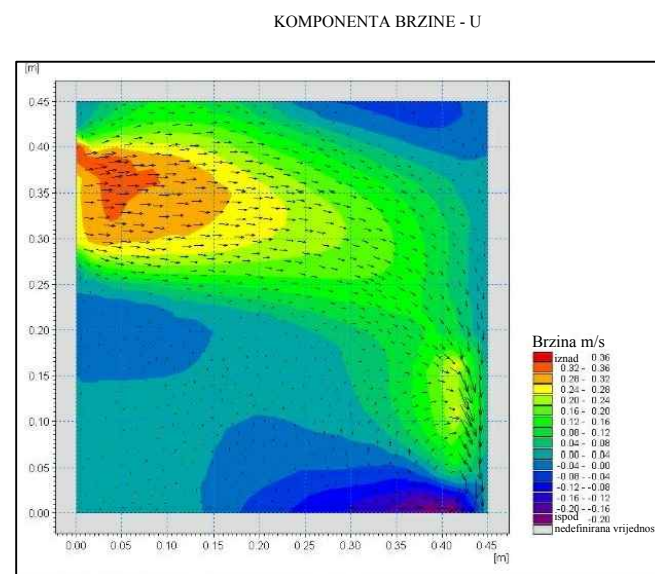
## POVRŠINSKA RAVNINA - A



## SREDNJA RAVNINA - B



## PRIDNENA RAVNINA - C

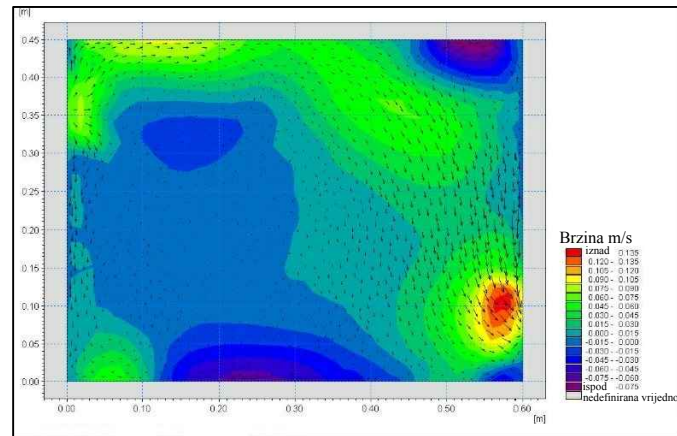




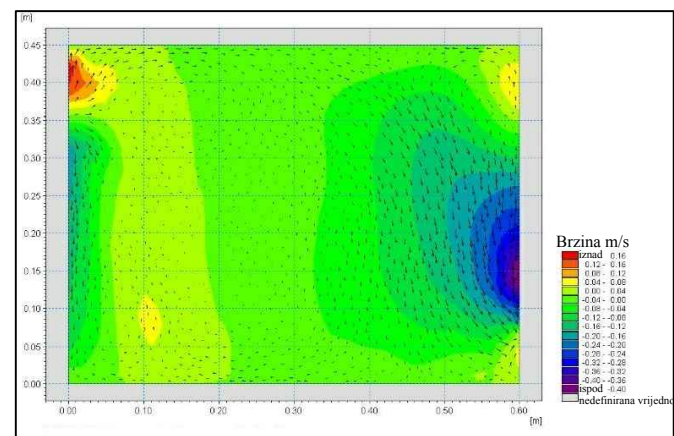
# PRILOG 25: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-60-8

## POVRŠINSKA RAVNINA - A

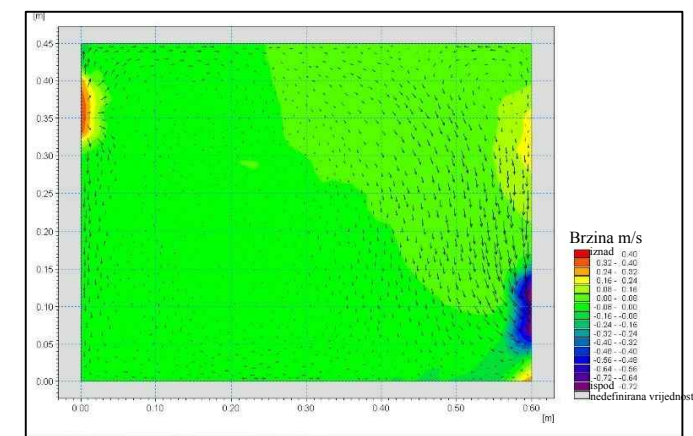
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

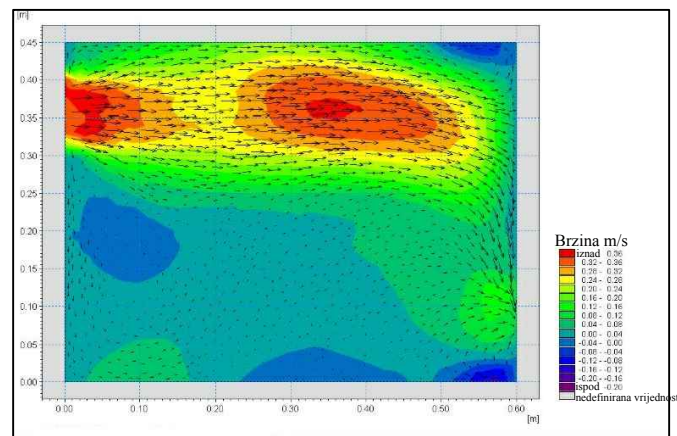


KOMPONENTA BRZINE - W

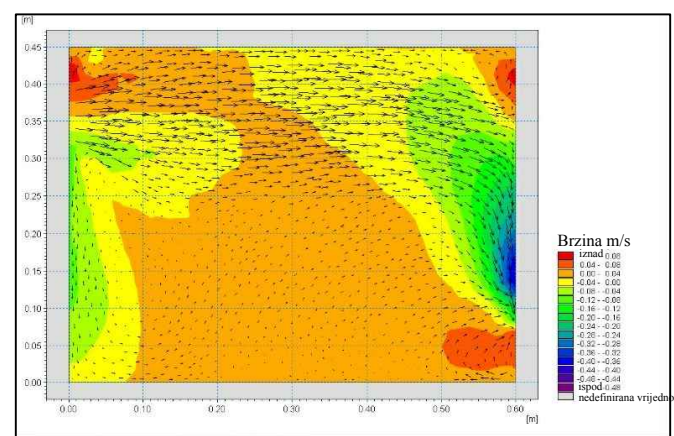


## SREDNJA RAVNINA - B

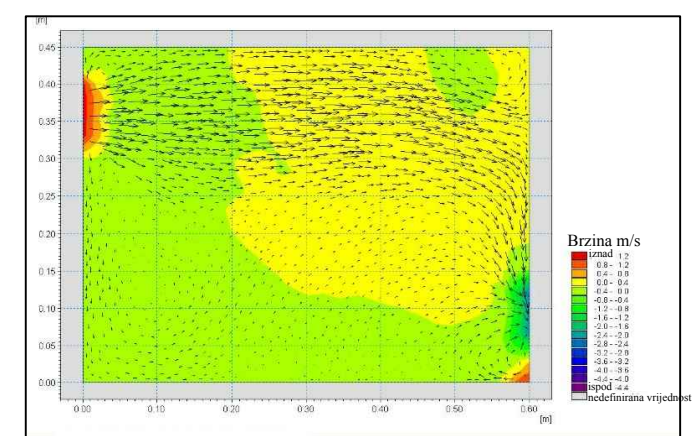
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

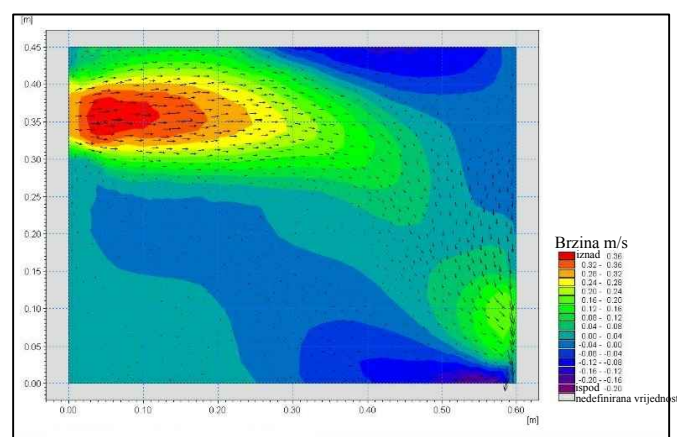


KOMPONENTA BRZINE - W

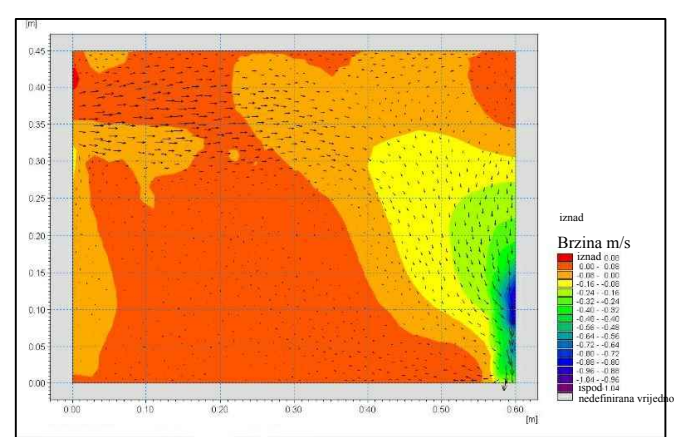


## PRIDNENA RAVNINA - C

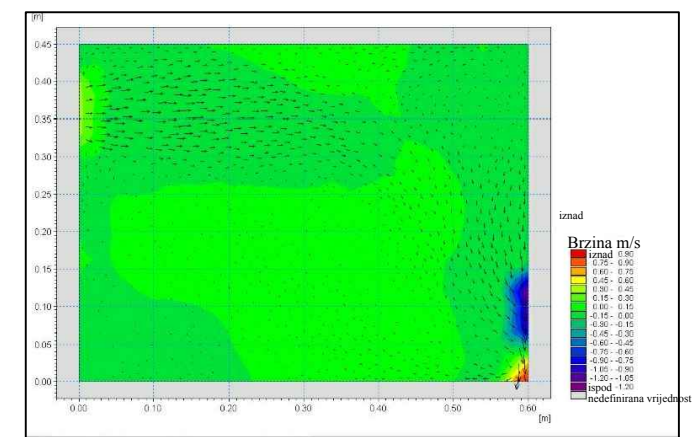
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V



KOMPONENTA BRZINE - W

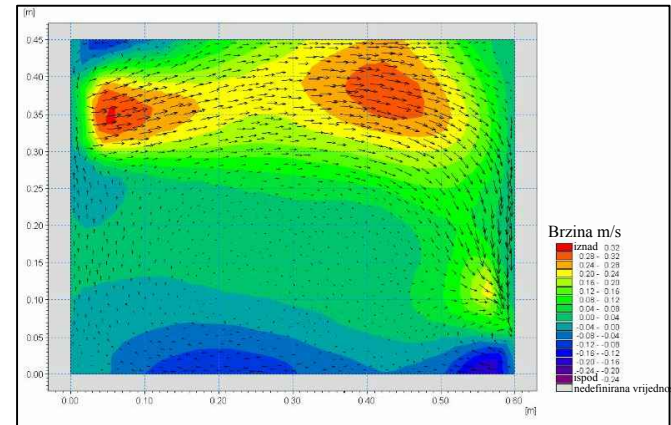




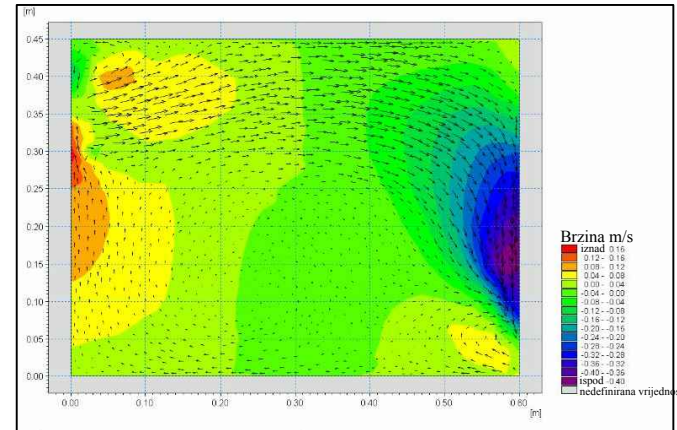
# PRILOG 26: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-60-10

## POVRŠINSKA RAVNINA - A

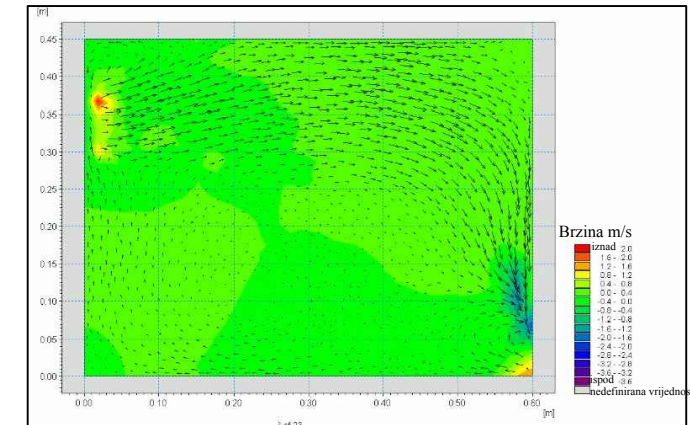
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

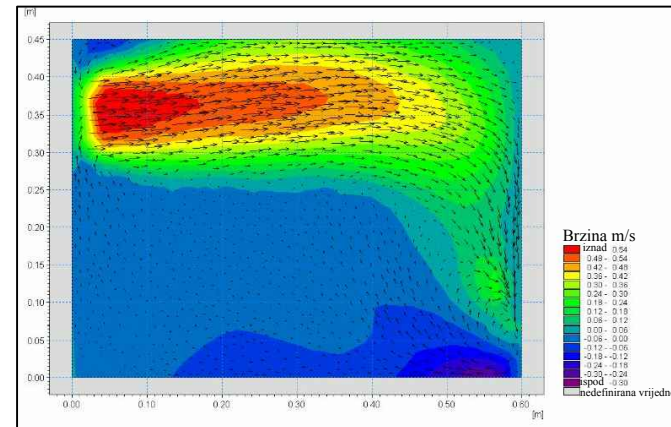


KOMPONENTA BRZINE - W

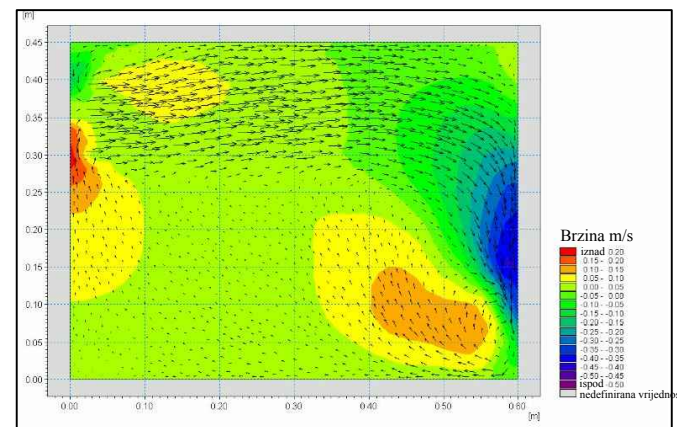


## SREDNJA RAVNINA - B

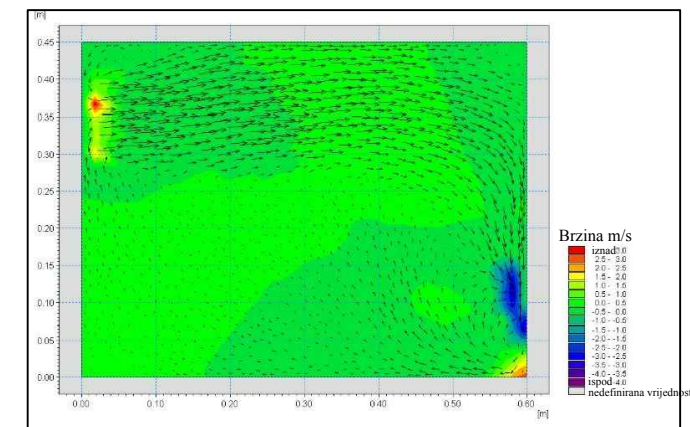
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

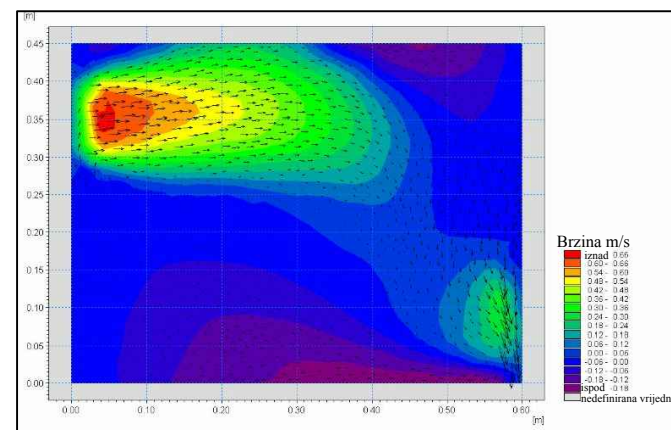


KOMPONENTA BRZINE - W

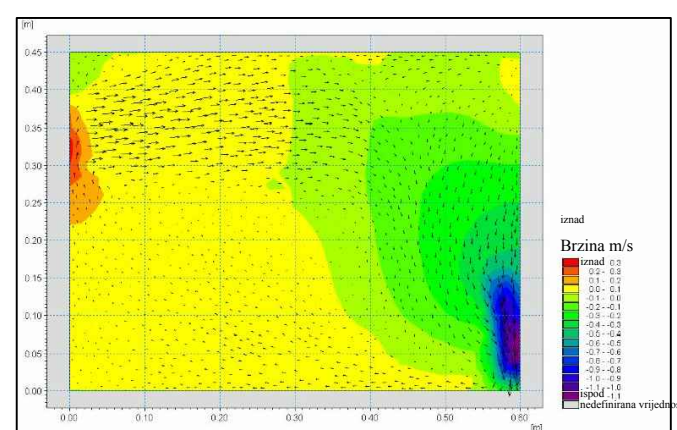


## PRIDNENA RAVNINA - C

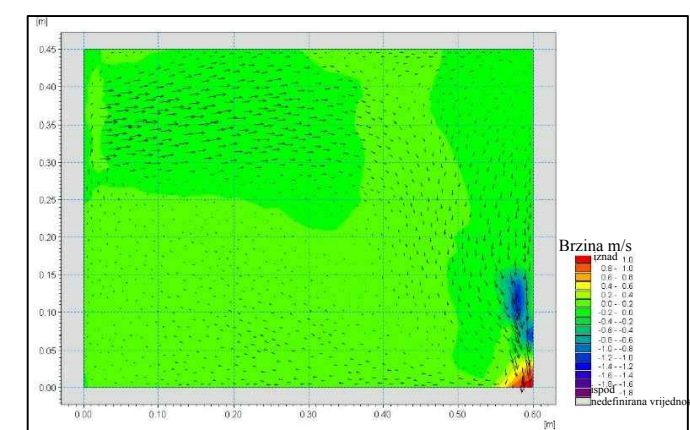
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V



KOMPONENTA BRZINE - W

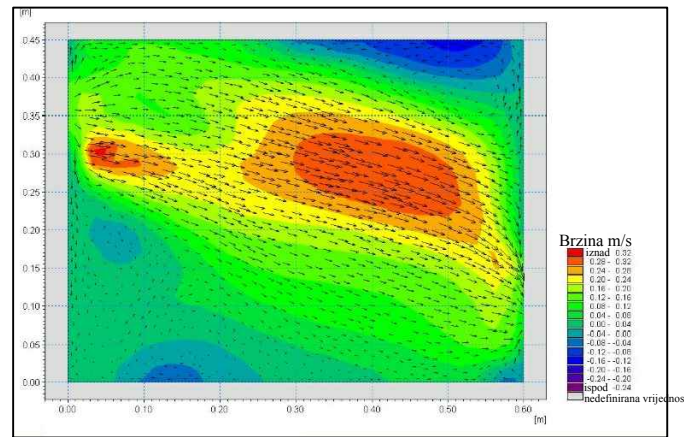




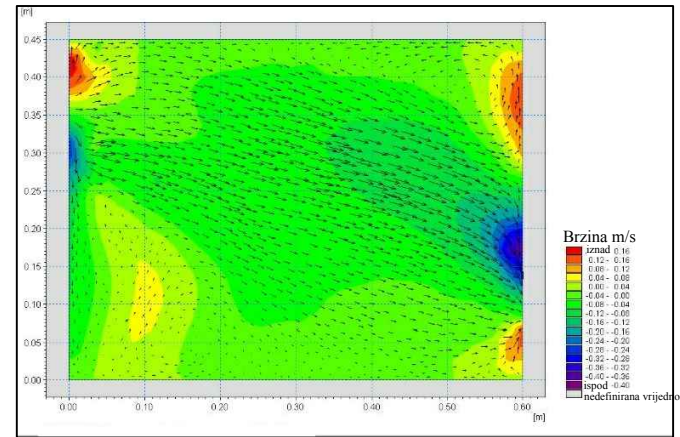
# PRILOG 27: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-60-12

## POVRŠINSKA RAVNINA - A

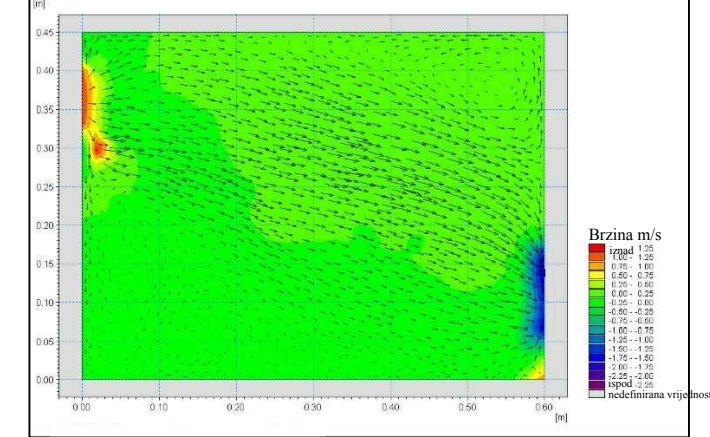
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

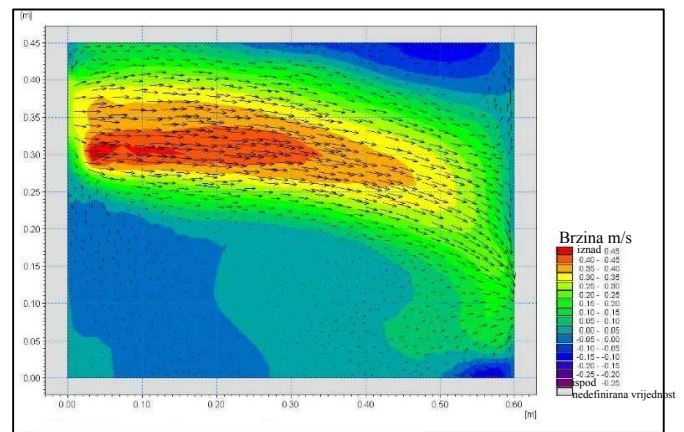


KOMPONENTA BRZINE - W

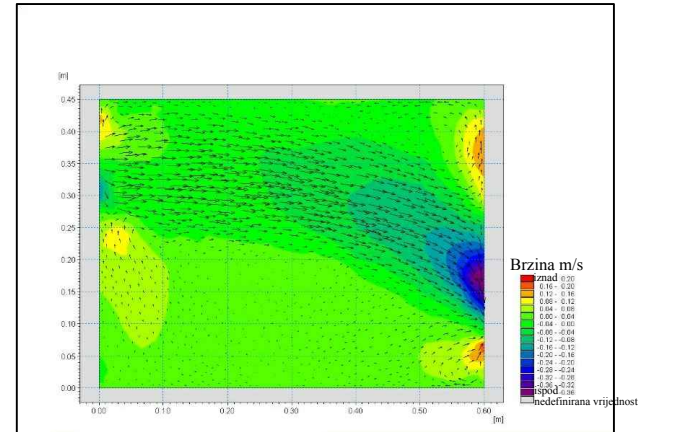


## SREDNJA RAVNINA - B

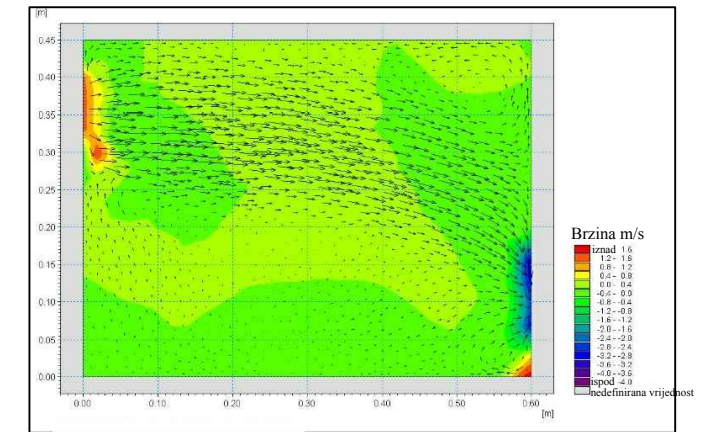
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

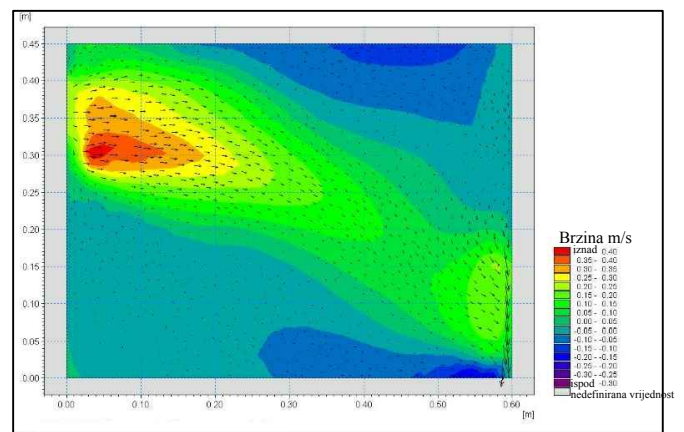


KOMPONENTA BRZINE - W

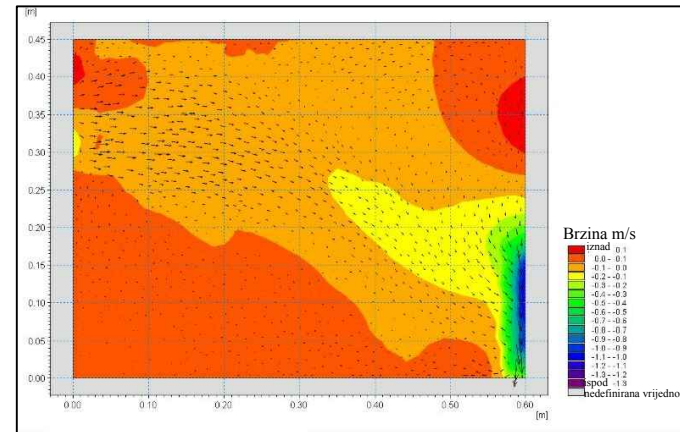


## PRIDNENA RAVNINA - C

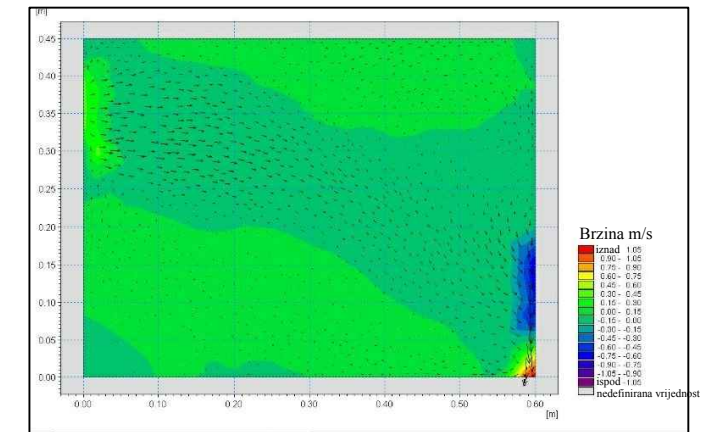
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V



KOMPONENTA BRZINE - W

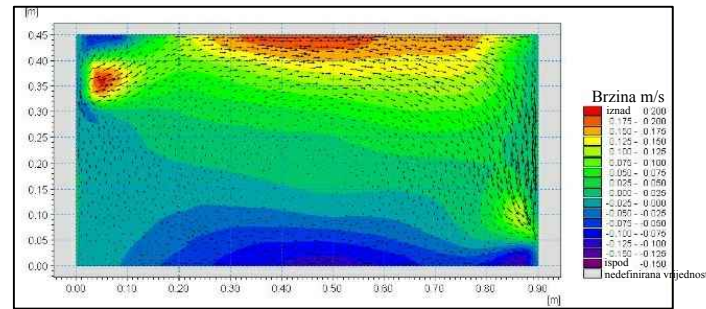




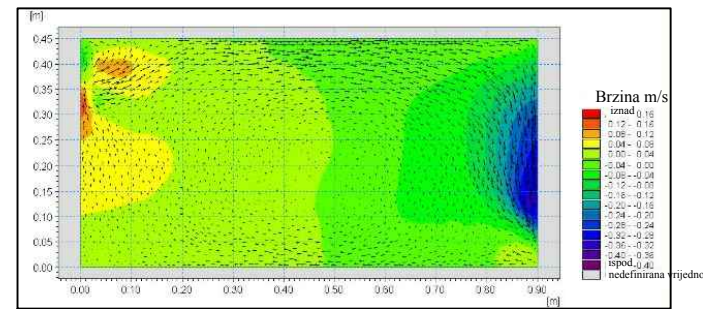
# PRILOG 28: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-90-8

## POVRŠINSKA RAVNINA - A

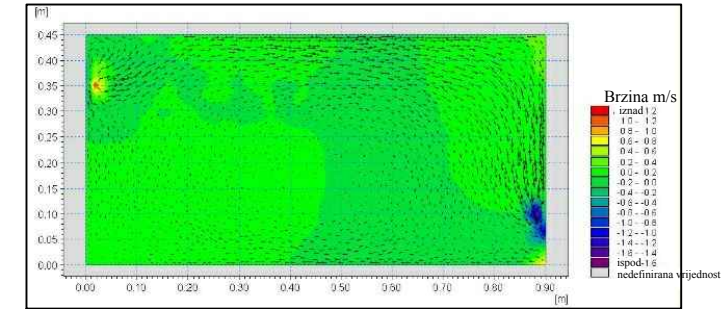
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

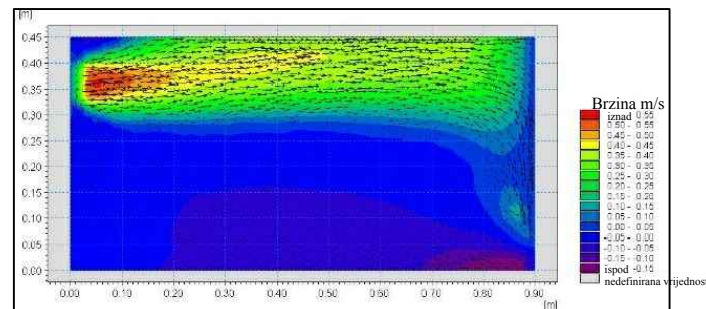


KOMPONENTA BRZINE - W

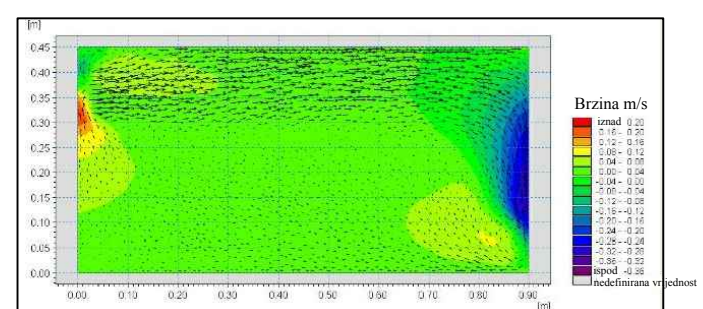


## SREDNJA RAVNINA - B

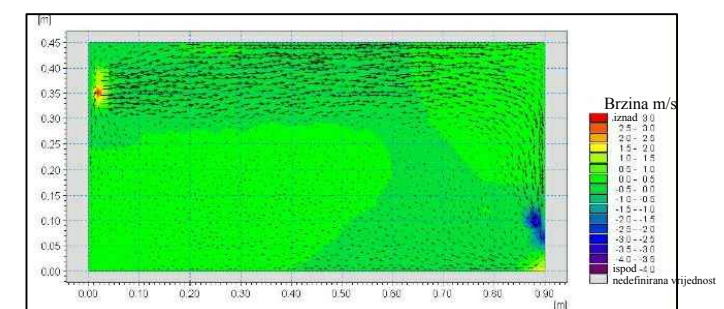
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

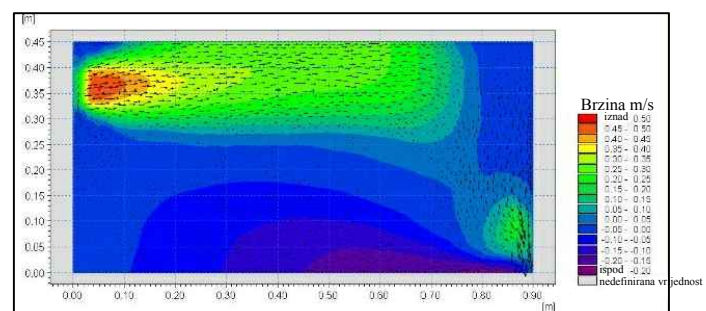


KOMPONENTA BRZINE - W

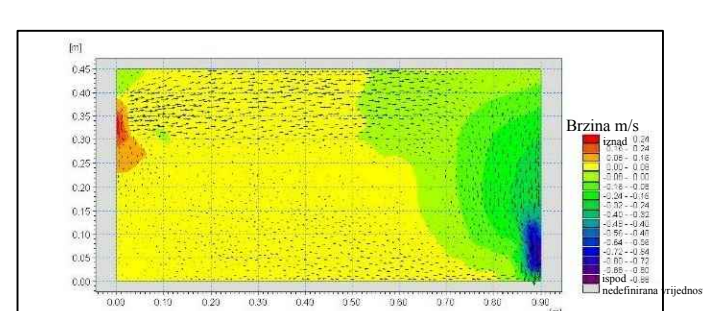


## PRIDNENA RAVNINA - C

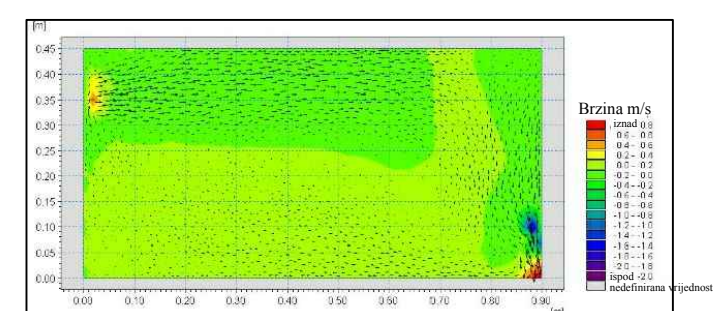
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V



KOMPONENTA BRZINE - W

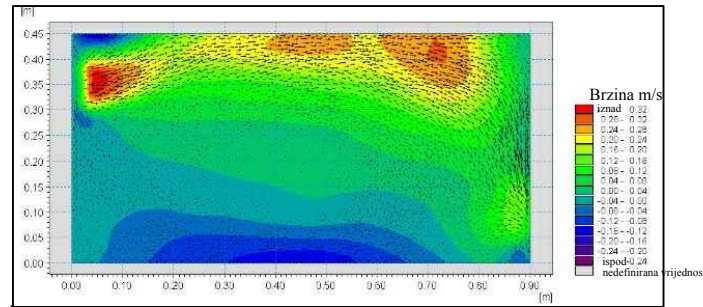




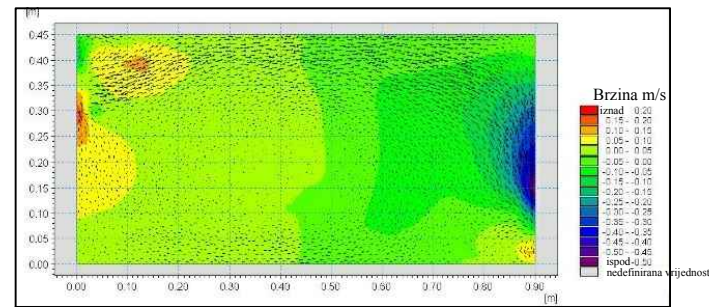
# PRILOG 29: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-90-10

## POVRŠINSKA RAVNINA - A

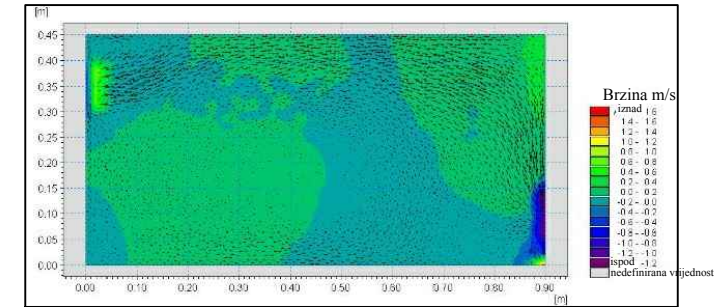
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

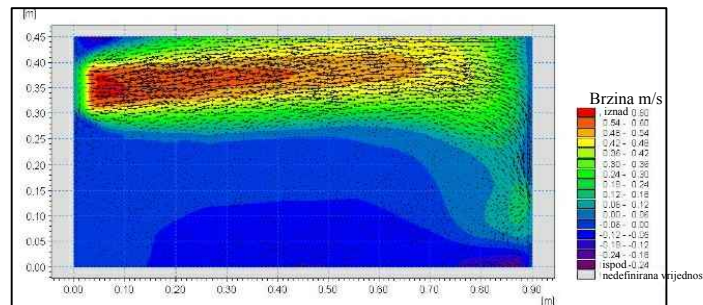


KOMPONENTA BRZINE - W

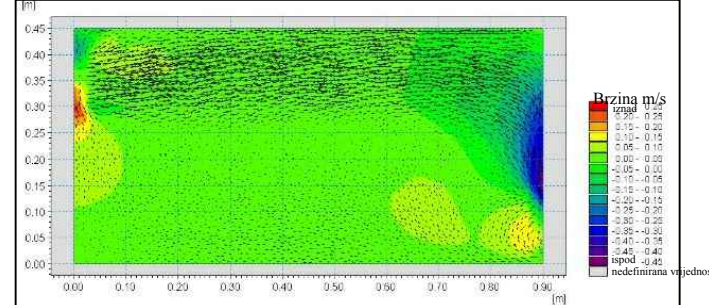


## SREDNJA RAVNINA - B

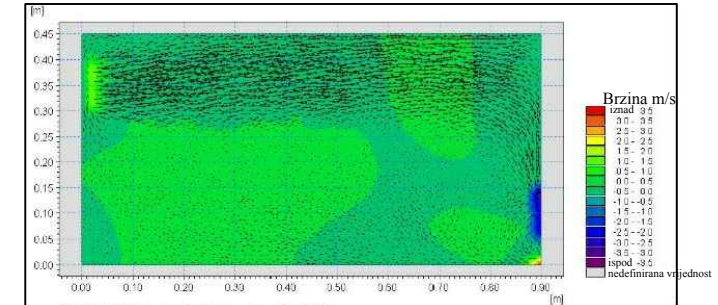
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

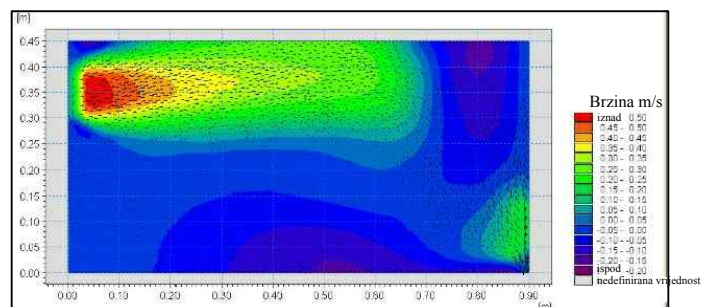


KOMPONENTA BRZINE - W

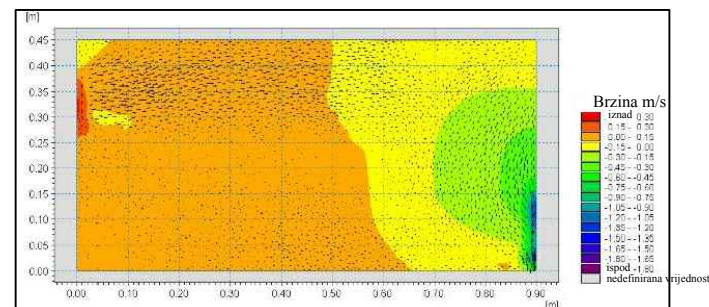


## PRIDNENA RAVNINA - C

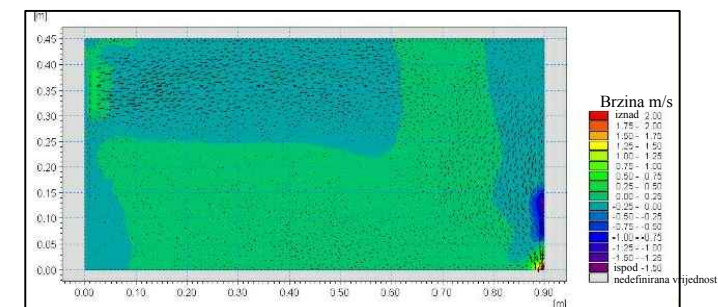
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V



KOMPONENTA BRZINE - W

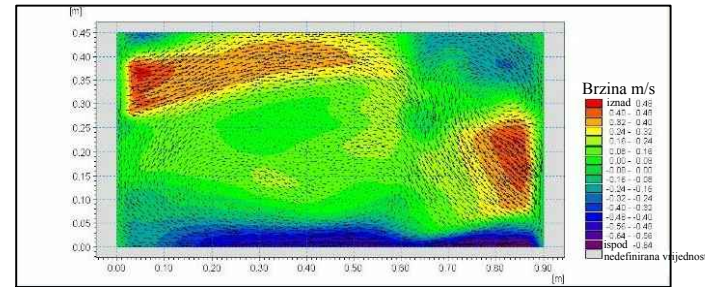




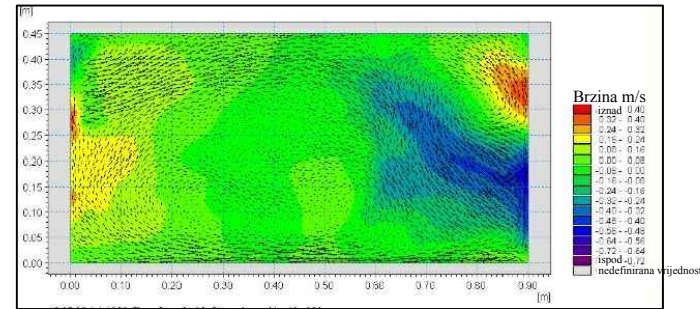
# PRILOG 30: PRIKAZ BRZINA PO KOMPONENTAMA ZA MODEL 125-90-12

## POVRŠINSKA RAVNINA - A

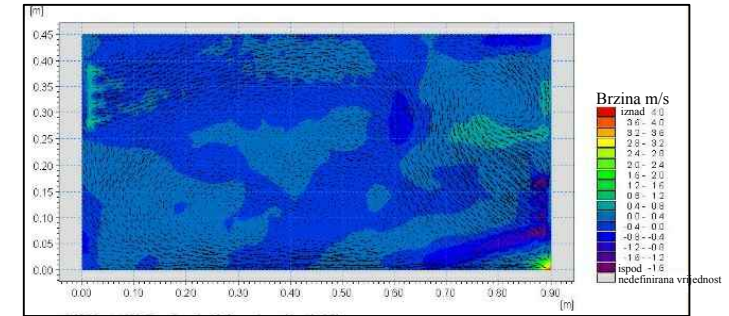
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

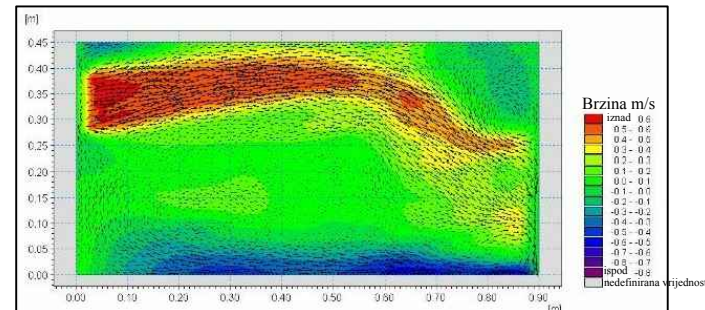


KOMPONENTA BRZINE - W

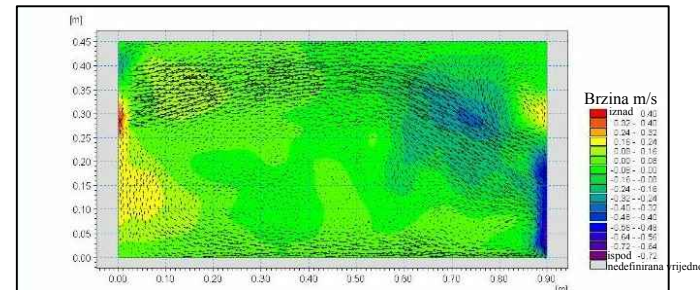


## SREDNJA RAVNINA - B

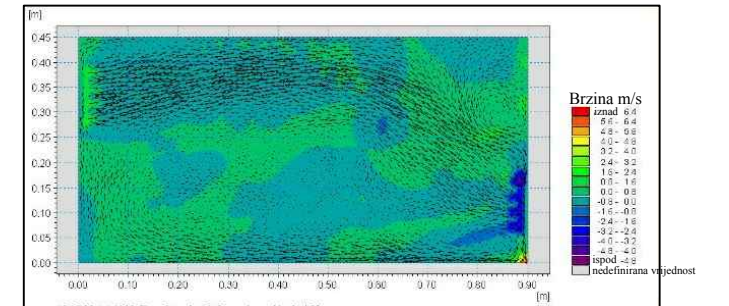
KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V

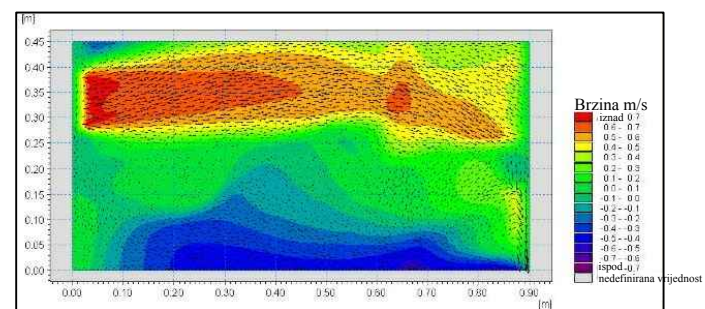


KOMPONENTA BRZINE - W

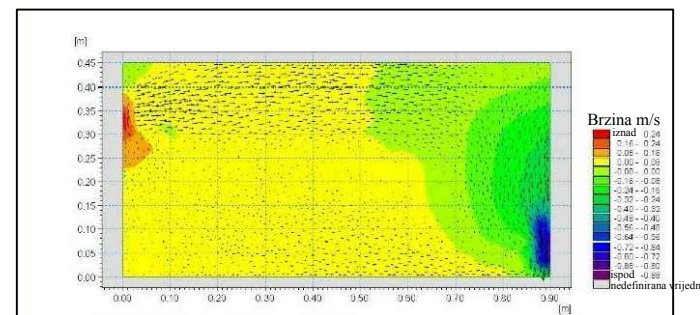


## PRIDNENA RAVNINA - C

KOMPONENTA BRZINE - U



KOMPONENTA BRZINE - V



KOMPONENTA BRZINE - W

