

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Lešek, A., 2014. Vpliv prostorskega povprečenja vetra na cirkulacijo v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Žagar, D.): 58 str.

Datum arhiviranja: 20-10-2014

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Lešek, A., 2014. Vpliv prostorskega povprečenja vetra na cirkulacijo v Tržaškem zalivu. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Žagar, D.): 58 pp.

Archiving Date: 20-10-2014

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM PRVE STOPNJE  
VODARSTVA IN  
OKOLJSKEGA INŽENIRSTVA

Kandidatka:

**ANJA LEŠEK**

**VPLIV PROSTORSKEGA POVPREČENJA VETRA NA  
CIRKULACIJO V TRŽAŠKEM ZALIVU**

Diplomska naloga št.: 33/B-VOI

**IMPACT OF SPATIAL AVERAGING OF WIND ON  
CIRCULATION IN THE GULF OF TRIESTE**

Graduation thesis No.: 33/B-VOI

**Mentor:**  
izr. prof. dr. Dušan Žagar

**Predsednik komisije:**  
izr. prof. dr. Dušan Žagar

Ljubljana, 23. 09. 2014

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

<b>Stran z napako</b>	<b>Vrstica z napako</b>	<b>Namesto</b>	<b>Naj bo</b>
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

## **IZJAVE**

Podpisana Anja Lešek izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom: »Vpliv prostorskega povprečenja vetra na cirkulacijo v Tržaškem zalivu«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Anja Lešek

Ljubljana, 10. september 2014

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM**

**UDK:** 532.5(26.05)(497.4)(043.2)  
**Avtor:** Anja Lešek  
**Mentor:** izr. prof. dr. Dušan Žagar  
**Naslov:** Vpliv prostorskega povprečenja vetra na cirkulacijo v Tržaškem zalivu  
**Tip dokumenta:** diplomska naloga – univerzitetni študij  
**Obseg in oprema:** 58 str., 1 pr., 39 sl., 9 en.  
**Ključne besede:** Matematično modeliranje, model PCFLOW3D, Tržaški zaliv, krajevno povprečenje vetra

### **Izvleček:**

V diplomski nalogi smo obravnavali vpliv prostorskega povprečenja dejanskega vetra na cirkulacijo v Tržaškem zalivu. Dejanski veter, podan v resoluciji 150 x 150 m, smo povprečili prek štirikrat in na dva načina devetkrat večjih območij, za vsako uro dvainsedemdeseturne simulacije. Simulacije hidrodinamike smo izvedli z modelom PCFLOW3D ter rezultate izrisali na globini 0,5 m in 10,5 m. Zaradi majhnih razlik med slikami hitrostnih polj tokov smo rezultate obdelali še numerično. V obeh slojih smo opazili večje razlike v tokovih le ob obalah, ob odprtem robu in bližje dnu, kjer je vpliv robnih pogojev večji, drugod so razlike minimalne. Za nadaljnje delo lahko uporabimo katerokoli izmed obravnavanih povprečenj dejanskega vetra, saj napake prostorskega povprečenja vetra ne presegajo nezanesljivosti simulacij modela PCFLOW3D in vhodnih podatkov.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 532.5(26.05)(497.4)(043.2)  
**Author:** Anja Lešek  
**Supervisor:** assoc. prof. Dušan Žagar, Ph. D.  
**Title:** Impact of spatial averaging of wind on circulation in the Gulf of Trieste  
**Document type:** Graduation Thesis – University studies  
**Notes:** 58 p., 1 t., 39 fig., 9 eq.  
**Key words:** mathematical model, PCFLOW3D, Gulf of Trieste, spatial averaging of wind

### **Abstract:**

The thesis addresses the impact of spatial averaging of actual winds on the circulation in the Gulf of Trieste. The given wind fields were averaged from resolution of 150 x 150 m over four- and ninefold larger areas, the latter in two ways, in each hour of the seventy-two hour simulation period. Hydrodynamic simulations were performed with the PCFLOW3D model. The results were mapped at the depths of 0.5 m and 10.5 m. Due to small differences between the currents we also analysed the results numerically. In both layers we observed significant differences in currents only near the coastline, at the open boundary and closer to the seabed, where the boundary conditions have greater impact, while elsewhere the differences were minimal. Any of the examined wind averaging techniques may be used for further modelling, as the error of the space averaging does not exceed the inaccuracy of the PCFLOW3D model and of the input data.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Dušanu Žagarju za čas, nasvete, trud in spodbudo med nastajanjem diplomske naloge. Zahvaljujem se tudi Agenciji Republike Slovenije za okolje, za posredovanje potrebnih podatkov.

Še posebej pa se zahvaljujem staršema za vso podporo v času študija.

## KAZALO

IZJAVE.....	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM .....	III
Izvleček:.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....	IV
ZAHVALA .....	V
1 UVOD.....	- 1 -
2 OPIS MODELA PCFLOW3D .....	- 3 -
2.1 HIDRODINAMIČNI MODUL .....	- 4 -
3 METODE .....	- 6 -
3.1 VHODNI PODATKI .....	- 6 -
3.1.1. VETER .....	- 6 -
3.1.2 NUMERIČNA MREŽA.....	- 8 -
3.1.3 ROBNI POGOJI .....	- 9 -
3.2. POVPREČNA ABSOLUTNA NAPAKA (MAE) VEKTORJEV VETRA .....	- 9 -
3.3 SIMULACIJE.....	- 10 -
3.4 RAZLIKA V DOLŽINI IN SMERI VEKTORJEV TOKOV .....	- 10 -
3.5 ODVISNOST NAPAK OD POVPREČNEGA VETRA .....	- 11 -
4. REZULTATI IN DISKUSIJA.....	- 12 -
4.1 VETER .....	- 12 -
4.2 GRAFIČNI PRIKAZ VPLIVA POVPREČNEGA VETRA NA TOKOVE .....	- 15 -
4.3 RAČUNSKI PRIKAZ VPLIVA POVPREČNEGA VETRA NA TOKOVE .....	- 41 -
4.4 ODVISNOST NAPAK OD POVPREČNEGA VETRA .....	- 45 -
5. ZAKLJUČKI IN NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO .....	- 47 -
VIRI .....	- 48 -



## KAZALO SLIK

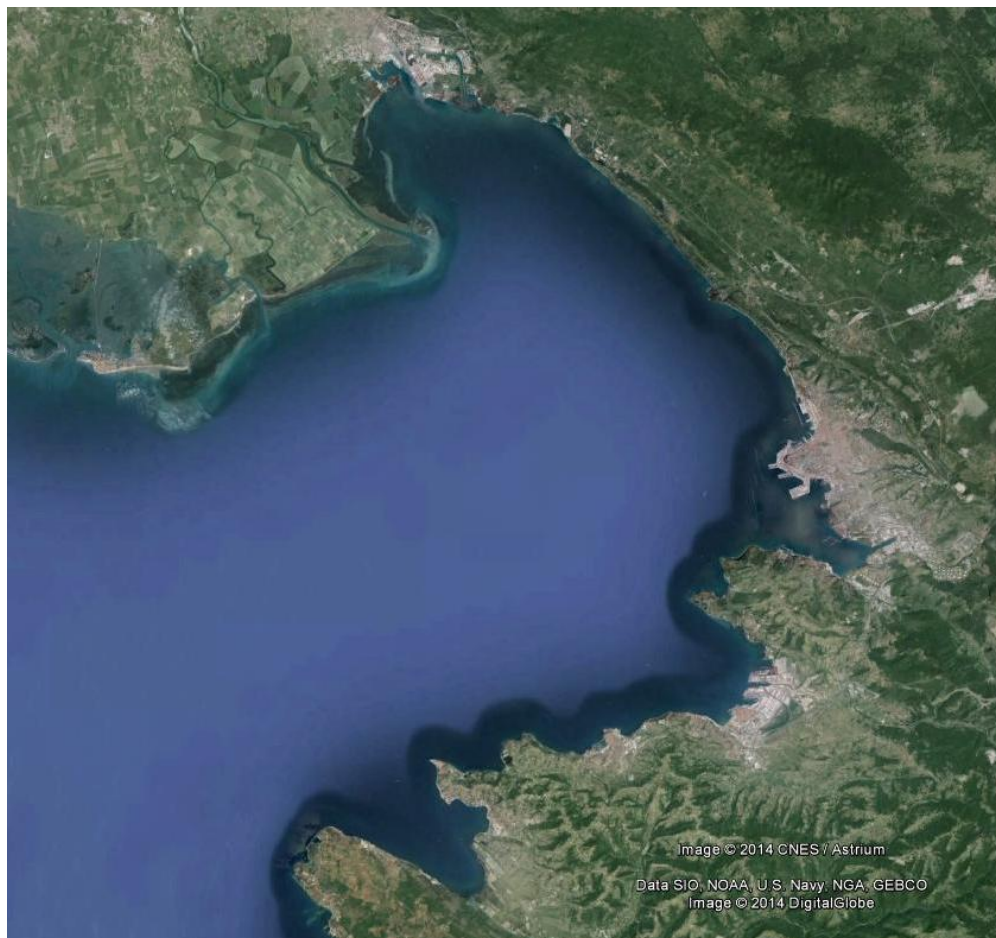
Slika 1: Tržaški zaliv (Google Earth, 2014) .....	- 1 -
Slika 2: Prikaz povprečenja prek štirih celic v programu Microsoft Excel .....	- 7 -
Slika 3: Prikaz povprečenja prek devetih celic v programu Microsoft Excel .....	- 7 -
Slika 4: Prikaz drsečega povprečenja prek devetih celic v programu Microsoft Excel .....	- 7 -
Slika 5: Grafikon povprečne absolutne napake komponente vetrnega vektorja u .....	- 13 -
Slika 6: Grafikon povprečne absolutne napake komponente vetrnega vektorja v .....	- 14 -
Slika 7: Hitrostno polje tokov po 6-ih urah na globini 0,5 m .....	- 16 -
Slika 8: Hitrostno polje tokov po 6-ih urah na globini 10,5 m .....	- 17 -
Slika 9: Hitrostno polje tokov po 12-ih urah na globini 0,5 m .....	- 18 -
Slika 10: Hitrostno polje tokov po 12-ih urah na globini 10,5 m .....	- 19 -
Slika 11: Hitrostno polje tokov po 18-ih urah na globini 0,5 m .....	- 20 -
Slika 12: Hitrostno polje tokov po 18-ih urah na globini 10,5 m .....	- 21 -
Slika 13: Hitrostno polje tokov po 24-ih urah na globini 0,5 m .....	- 22 -
Slika 14: Hitrostno polje tokov po 24-ih urah na globini 10,5 m .....	- 23 -
Slika 15: Hitrostno polje tokov po 30-ih urah na globini 0,5 m .....	- 24 -
Slika 16: Hitrostno polje tokov po 30-ih urah na globini 10,5 m .....	- 25 -
Slika 17: Hitrostno polje tokov po 36-ih urah na globini 0,5 m .....	- 26 -
Slika 18: Hitrostno polje tokov po 36-ih urah na globini 10,5 m .....	- 27 -
Slika 19: Hitrostno polje tokov po 42-ih urah na globini 0,5 m .....	- 28 -
Slika 20: Hitrostno polje tokov po 42-ih urah na globini 10,5 m .....	- 29 -
Slika 21: Hitrostno polje tokov po 48-ih urah na globini 0,5 m .....	- 30 -
Slika 22: Hitrostno polje tokov po 48-ih urah na globini 10,5 m .....	- 31 -
Slika 23: Hitrostno polje tokov po 54-ih urah na globini 0,5 m .....	- 32 -
Slika 24: Hitrostno polje tokov po 54-ih urah na globini 10,5 m .....	- 33 -
Slika 25: Hitrostno polje tokov po 60-ih urah na globini 0,5 m .....	- 34 -
Slika 26: Hitrostno polje tokov po 60-ih urah na globini 10,5 m .....	- 35 -
Slika 27: Hitrostno polje tokov po 66-ih urah na globini 0,5 m .....	- 36 -
Slika 28: Hitrostno polje tokov po 66-ih urah na globini 10,5 m .....	- 37 -
Slika 29: Hitrostno polje tokov po 72-ih urah na globini 0,5 m .....	- 38 -
Slika 30: Hitrostno polje tokov po 72-ih urah na globini 10,5 m .....	- 39 -
Slika 31: Večje razlike med vektorji ob obali (24. ura na globini 10,5 m) .....	- 40 -
Slika 32: Večje razlike med vektorji na odprtem robu (48. ura na globini 0,5 m) .....	- 41 -
Slika 33: Grafikon povprečna razlika dolžin med referenčnimi in povprečenimi vektorji v 1. sloju .....	- 42 -
Slika 34: Grafikon povprečna razlika dolžin med referenčnimi in povprečenimi vektorji v 11. sloju .....	- 42 -
Slika 35: Grafikon povprečna razlika smeri referenčnih in povprečenih vektorjev v 1. sloju .....	- 43 -
Slika 36: Grafikon povprečna razlika smeri referenčnih in povprečenih vektorjev v 11. sloju .....	- 43 -
Slika 37: Grafikon povprečna razlika $\Delta$ kotov x $\Delta$ dolžin v 1. sloju .....	- 44 -
Slika 38: Grafikon povprečna razlika $\Delta$ kotov x $\Delta$ dolžin v 11. sloju .....	- 44 -
Slika 39: Grafikon odvisnost napak od povprečnega vetra v površinskem sloju na globini 0,5 m .....	- 46 -

## **KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Primer standardne deviacije 24. uro v prvem sloju.....	- 45 -
---	--------

## 1 UVOD

Tržaški zaliv je najsevernejši zaliv v Jadranskem morju, ki si ga delijo države Hrvaška, Slovenija in Italija. Jadransko morje je v splošnem zaprto in plitvo, še posebej pa to velja za Tržaški zaliv, ki predstavlja le 0,4 % akvatorija Jadranskega morja. Tržaški zaliv omejuje 130 km dolga navidezna črta med italijanskim Gradežem (it. Grado) in Savudrijo v Hrvaški Istri. Površina zaliva je okoli 550 km<sup>2</sup>, njegova povprečna globina pa je 18.7 m. Manj kot polovica zaliva je globoka povprečno 20 m, petina zaliva je plitvejša od 10 m, ostali del pa je globok med 10 in 15 m. Najgloblja točka je bila izmerjena na 37.25 m. V zalivu ne najdemo otokov ali čeri, z izjemo nekaj manjših otočkov pred Gradeško laguno (it. Laguna di Grado). Obala je razčlenjena, najgloblje pa se zajedajo Miljski (it. Golfo di Muggia), Koprski in Piranski zaliv. Zaliv je iz treh strani obdan s kopnim, vhod vanj iz morske strani pa je na črti Savudrija – Gradež (it. Grado) širok 21 km (Orožen Adamič, 2002).



Slika 1: Tržaški zaliv (Google Earth, 2014)

V diplomski nalogi smo želeli ugotoviti, kakšen je vpliv prostorskega povprečenja dejanskega vetra na cirkulacijo v Tržaškem zalivu. Simulacije smo opravili s tridimenzionalnim baroklinim matematičnim

modelom PCFLOW3D, ki se na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, razvija in dopolnjuje že od leta 1985. Tega in podobne matematične modele uporabljamo predvsem zaradi njihove ekonomičnosti, hitrosti in natančnosti, pa tudi zaradi možnosti simulacije pojavov, ki se v naravi še niso zgodili ter so zato v veliko primerih primernejša izbira od fizičnih modelov (Četina, 1992, Rajar in Četina, 1997, Rajar in sod., 1997, Rajar in sod., 2004, Žagar in sod., 2007, Maslo 2009).

Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) nam je posredovala podatke o dejanskem vetru nad Tržaškim zalivom od 19. do 21. marca 2009, ki so bili pridobljeni s pomočjo meteorološkega modela ALADIN-Si, ki je del globalnega meteorološkega modela ARPEGE. Jakost in smer vetra je bila pri izhodnih podatkih z interpolacijo določena na posameznih območjih velikosti približno 140 x 130 m (računskih celicah domene), v časovnem razmiku ene ure (Novak, 2013). V diplomski nalogi A. Masla (2009) je bilo ugotovljeno, da se rezultati vpliva vetra na cirkulacijo s krajevno spremenljivim vetrom in rezultati s povprečnim vetrom precej razlikujejo.

V tej diplomski nalogi smo želeli natančneje določiti velikost zgoraj omenjene razlike. Za simulacije smo uporabili enakomerno mrežo s  $166 \times 236$  celicami v tlorisu, pri katerih je dolžina in širina vsake bila približno  $140 \times 130$  metrov, po globini pa je območje, razen v najglobljem delu, razdeljeno na enakomerne sloje debeline 1 m od gladine do dna. Veter nad originalnimi celicami smo nato s povprečenjem združevali in opazovali, kolikšna natančnost je potrebna, da dobimo zadovoljive podatke o cirkulaciji tokov v realnih vetrnih situacijah.

Opazovali smo relativno razliko med referenčnimi simulacijami, izvedenimi z vetrom podanim v izvorni resoluciji  $140 \times 130$  m ter vetrom, povprečenim prek 4, 9 in 9 drseče (s premikanjem okna povprečenja) celic, rezultate pa nato prikazali na vsakih 6 ur med 19. in 21. marcem 2009. Pričakovali smo, da se bodo razlike med rezultati simulacij večale z naraščanjem velikosti območja povprečevanja.

## 2 OPIS MODELA PCFLOW3D

PCFLOW3D je nestacionarni nelinearni tridimenzionalni baroklini model, ki ga uvrščamo med modele kvalitete. Je integrirani matematični model, s katerim proučujemo kakovost voda v večjih vodnih telesih, kjer so horizontalne komponente hitrosti za red velikosti večje od vertikalnih komponent. V modelu so uporabljene t.i. z-koordinate v vertikalni smeri, osi  $x$  in  $y$  pa horizontalno (Rozman, 2005, Žagar, 1999).

Model vsebuje štiri module, namenjene simulacijam fizikalnih, kemičnih in bioloških procesov:

1. **Hidrodinamični modul (HD - modul)** - temelj modela, namenjen izračunu tlakov in polja hitrosti v baroklinem načinu (vpliv gostote na polje hitrosti).
2. **Transportno disperzijski modul (TD – modul)** - modul za transport onesanžil.
3. **Sedimentacijski modul (ST (SD) – modul)** - namenjen simulacijam procesov sedimentacije in resuspenzije delcev.
4. **Biogeokemični modul (BGK modul)** – modul za račun biogeokemičnih procesov pretvorb Hg (Rozman 2005).

Hidrodinamični modul bomo v nadaljevanju opisali, ostali moduli pa so podrobno opisani v Rajar in sod. (1997), Rajar in sod. (2000), Rajar in sod. (2004), Žagar in sod. (2007), Kovšca, (2007) in drugih publikacijah.

Od leta 1985, ko je model PCFLOW3D nastal in vseboval le dva modula – hidrodinamičnega in transportno disperzijskega, se je do danes precej razvil. Celoten model je bil večkrat izboljššan, dodana sta bila še preostala modula (sedimentacijski in biogeokemični), tako da je model že uporaben za širok spekter raziskav v hidrodinamiki pri nas in na tujem. Model je bil večkrat uporabljen tudi pri praktičnih problemih disperzije onesnažil. Na osnovi modela PCFLOW3D je bil izdelan tudi SIMON (Simulacijski Model Nafta), 3D model namenjen simulaciji širjenja nafte ob razlitju (Žagar, 1994). Model PCFLOW3D je bil uporabljen tudi pri modeliranju Bohinjskega jezera, pri simulacijah transporta živega srebra in širjenja nafte v Tržaškem zalivu (Rajar in Četina, 1997 ter Rajar in sod., 1997). V svoji doktorski disertaciji je Žagar (1999) predstavil dopolnitev modela z modulom ST, razvoj BGK modula pa je opisan v Žagar in sod. (2007). Izvedeno je bilo tudi 3D modeliranje kroženja živega srebra v Tržaškem zalivu (Rajar in sod., 2000), Žagar in sod. (2001) pa so ga dopolnili z dolgotrajno 3D simulacijo transporta in disperzije živega srebra v raztopljeni in na delce vezani

obliki. Ravno tako so Rajar in sod. (2004) izvedli simulacijo 3D kroženja živega srebra na priobalnih območjih Tržaškega zaliva in zaliva Minamata na Japonskem. V nadaljevanju je Žagar s sodelavci (2007) izvedel simulacije cirkulacije ter transporta in pretvorb živega srebra v Sredozemlju. Z modelom PCFLOW2D so bile v Tržaškem zalivu opravljene simulacije izmenjave živega srebra med vodo in zrakom (Ramšak in sod., 2013). Ne glede na to, da je bila večina doslej izvedenih simulacij namenjena raziskavam širjenja onesnažil, pa je najpomembnejši del modela HD modul, s katerim izračunamo gibanje vode, preden izvajamo simulacije transporta in razgradnje onesnažil.

## 2.1 HIDRODINAMIČNI MODUL

Enačbe hidrodinamičnega modula so zapisane v Kartezijem koordinatnem sistemu ( $x$  in  $y$  osi sta v horizontalni smeri, os  $z$  pa v vertikalni smeri). Definijsko območje je razdeljeno na kontrolne volumne debeline  $h$ , ki v tlorisu predstavljajo mrežo s korakom  $\Delta x$  in  $\Delta y$ .

HD modul temelji na:

- kontinuitetni enačbi:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

- dinamični enačbi:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} + f_i \quad (2)$$

- Enačba stanja in advekcijsko difuzijski enačbi za temperaturo in slanost za izračune v tej diplomski nalogi niso pomembne, saj smo predpostavili popolnoma premešano zimsko stanje z enakomerno slanostjo, temperaturo in gostoto vode po celotnem zalivu.

Pomen oznak v enačbah:

$U_{i(i=1,2,3)}$  – trenutne hitrosti v posameznih koordinatnih smereh

$t$  – čas

$x_i$  – koordinatne smeri

$\nu$  – kinematična viskoznost

$\rho$  – gostota

$f_i$  – prostorninska sila na enoto mase v koordinatni smeri  $i$

Z enačbami (1) in (2) določamo hidrodinamične količine  $u$ ,  $v$ ,  $w$ ,  $h$ , pa tudi tlak, z dodatnimi enačbami pa še gostoto, temperaturo in slanost, saj slednje vplivajo na hitrostno polje (baroklini model). Diferencialne enačbe pretvorimo v diferenčne in jih integriramo znotraj kontrolnih volumnov (Četina, 1992).

Pri določanju hitrostnega polja, tlakov ali globin moramo, poleg zgoraj omenjenih dejavnikov, upoštevati tudi vpliv turbulence. Turbulenco v vodnem mediju povzročajo strižne sile med sloji tekočine in na stiku med tekočino in obalo. Sorazmerno s kvadratom hitrosti se tako povečuje izguba energije (dušenje toka), ki nastaja zaradi vrtinčenja, mešanja in pulzacij hitrosti. Za določanje koeficientov turbulentne difuzije in viskoznosti smo v tej diplomski nalogi pri simulacijah uporabili dva modela turbulence: model Smagorinsky v horizontalni smeri in Mellor-Yamada v vertikalni smeri (Dorić, 2007; Kovšca, 2007):

**Model Smagorinsky** je model z dvema transportnima enačbama za izračun turbulentnih koeficientov v horizontalni smeri. Pri tem modelu lahko izračun koeficientov turbulence zaradi gradientov hitrosti uravnavamo s spreminjanjem t.i. »koeficienta Smagorinskega«.

**Model Mellor-Yamada** je model z dvema transportnima enačbama, ki omogoča izračun koeficientov turbulence tako v vertikalni, kot v horizontalni smeri, a se v modelu PCFLOW3D uporablja v le v vertikalni smeri v kombinaciji z modelom Smagorinsky za horizontalno smer.

### 3 METODE

#### 3.1 VHODNI PODATKI

S simulacijami smo želeli pokazati vpliv krajevnega povprečenja dejanskega vetra nad Tržaškim zalivom na dinamiko tokov v zalivu. Ker smo rezultate primerjali le relativno, med seboj, in ne z meritvami, smo v račun vpeljali določene poenostavitve. Tako smo iz simulacij izključili še plimovanje in vtok Soče. Pri vseh izračunih smo predpostavili enako popolnoma premešano zimsko stanje in enakomerno slanost ter temperaturo, zato dodatni vhodni podatki niso bili ključnega pomena za simulacije.

Vhodne podatke, ki smo jih potrebovali smo tako skrčili na štiri najpomembnejše količine:

- vetrna polja nad zalivom,
- računska mreža,
- topografija,
- robni pogoji.

##### 3.1.1. VETER

Najboljši možen približek realnega vetra smo določili iz podatkov, ki nam jih je posredovala Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO). Pridobljeni so bili z numeričnim meteorološkim modelom ALADIN, ki simulira vreme z uporabo matematično-fizikalnih enačb, s katerimi opisuje procese v ozračju in njihovo interakcijo s tlemi na obravnavanem območju. Robne pogoje v modelu predstavljajo podatki globalnega meteorološkega modela ARPEGE.

Model ALADIN deluje tako, da obravnavano območje razdeli na t.i. kontrolne volumne - podobmočja oblike kvadra, ki sestavljajo prostorsko mrežo. Razlog, zakaj moramo uporabiti približek realnega vetra, izmerjenega s tem modelom, je ravno v gostoti mreže, ki je veliko manjša od tiste, s katero operira model PCFLOW3D. Rezultate ALADIN-a je bilo zato potrebno interpolirati iz bolj grobe mreže v finejšo (Žagar in sod., 2007; Ramšak, 2007; Ramšak in sod., 2013).

Podatki so zbrani v matrikah 166 x 236 za smeri  $x$  (Vzhod) in  $y$  (Sever) posebej, v enournih časovnih intervalih. Vseh 72 matrik torej predstavlja vetrna polja za tridnevno obdobje od 19. do 21. marca 2009. To tridnevno obdobje je bilo izbrano zaradi reprezentativnosti in nehomogenosti vetra, z dvema obratoma burja-jugo-burja, z istimi podatki pa so bile doslej izvedene že številne simulacije (Žagar in



sod., 2012; Novak, 2013; Ramšak in sod., 2013). Podatke za nadaljnjo obdelavo smo pripravili s pomočjo programa Microsoft Excel. Posebej smo krajevno povprečili komponenti v smereh  $x$  in  $y$  za vseh 72 ur in sicer prek 4 in 9 kontrolnih volumnov (celic) skupaj.

Izračunali smo povprečja hitrosti vetra v celicah, kot je prikazano na slikah 2, 3 in 4 in v enačbah 3, 4, 5 in 6:

Splošna enačba:

$$b_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{1}{n} (a_1 + a_{i+1} + \dots + a_n) \quad (3)$$

Povprečenje prek štirih celic, katerega bomo v nadaljevanju imenovali tudi ave4:

$$b_4 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 a_i = \frac{1}{4} (a_1 + a_2 + a_3 + a_4) \quad (4)$$

-9,08381	-9,08381	-9,03323	-9,03323	-8,9822	-8,9822
-9,08381	-9,08381	-9,03323	-9,03323	-8,9822	-8,9822
-9,09769	-9,09769	-9,04641	-9,04641	-8,99469	-8,99469
-9,09769	-9,09769	-9,04641	-9,04641	-8,99469	-8,99469
-9,1114	-9,1114	-9,05946	-9,05946	-9,00699	-9,00699
-9,1114	-9,1114	-9,05946	-9,05946	-9,00699	-9,00699

Slika 2: Prikaz povprečenja prek štirih celic v programu Microsoft Excel

Povprečenje prek devetih celic ali ave9:

$$b_9 = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 a_i = \frac{1}{9} (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8 + a_9) \quad (5)$$

-9,07461	-9,07461	-9,07461	-8,99814	-8,99814	-8,99814
-9,07461	-9,07461	-9,07461	-8,99814	-8,99814	-8,99814
-9,07461	-9,07461	-9,07461	-8,99814	-8,99814	-8,99814
-9,09505	-9,09505	-9,09505	-9,01703	-9,01703	-9,01703
-9,09505	-9,09505	-9,09505	-9,01703	-9,01703	-9,01703
-9,09505	-9,09505	-9,09505	-9,01703	-9,01703	-9,01703

Slika 3: Prikaz povprečenja prek devetih celic v programu Microsoft Excel

Povprečenje prek devetih celic z drsečim povprečjem oziroma ave9d poteka enako, le da izračunamo povprečje za vsako celico iz osmih celic, ki se je dotikajo na robovih in vogalih:

$$b_{9d} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 a_i = \frac{1}{9} (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8 + a_9) \quad (6)$$

-9,08381	-9,07119	-9,04589	-9,02049	-8,99497	-8,96936
-9,08728	-9,07461	-9,04923	-9,02375	-8,99814	-8,97243
-9,09422	-9,08146	-9,05591	-9,03026	-9,00448	-8,97859
-9,10112	-9,08827	-9,06256	-9,03672	-9,01077	-8,98468
-9,10799	-9,09505	-9,06916	-9,04316	-9,01703	-8,99075
-9,11477	-9,10176	-9,07571	-9,04953	-9,02323	-8,99678

Slika 4: Prikaz drsečega povprečenja prek devetih celic v programu Microsoft Excel

Pomen oznak v enačbah:

$a_i$  – skalarji urnih podatkov

$b_j$  – skalarji krajevnega povprečenja

$n$  – število povprečenih celic

$i$  – zaporedna številka urnega podatka

$j$  – oznaka načina povprečenja in števila povprečenih celic

Tako smo dobili nove, enako velike matrike komponent hitrosti vetra, ki smo jih kasneje uporabili za izračun absolutnih napak in simulacij. Razlika med drsečim in navadnim povprečenjem prek devetih celic je v tem, da imamo pri drsečem povprečju manjše gradiente med posameznimi območji, zato pričakujemo, da bodo rezultati simulacij s tem načinom povprečenja manj odstopali od referenčnih rezultatov.

### 3.1.2 NUMERIČNA MREŽA

Da bi bili rezultati realni, moramo za račun hidrodinamičnih količin – v našem primeru hitrostnega polja tokov – izbrati primerno numerično mrežo. Biti mora dovolj gosta, da lahko z njo čim bolj natančno zajamemo podatke o dnu in topografiji obale. Ker račun ne sme biti predolg, mreže niti v horizontalni niti v vertikalni smeri ne zgostimo preveč. Kontrolnih volumnov je namreč z zgoščevanjem zmeraj več, hkrati pa se zaradi stabilnosti računa krajša tudi časovni korak računa (Četina 1992). Tako pri simulacijah vedno naredimo kompromis med natančnostjo računov in časom trajanja poganjanja simulacij.

Za izračune smo uporabili enako enakomerno numerično mrežo, kot je bila že uporabljena v številnih simulacijah v Tržaškem zalivu in daje preverjeno zadovoljivo točne rezultate (Novak 2013, Ramšak in sod., 2013, Žagar in sod., 2012). V tlorisu obsega 166 x 236 celic, torej je posamezna celica dolga cca. 140 m in široka 130 m (Ličer in sod., 2012). Vertikalno je definicijsko območje razdeljeno na 29 slojev. Batimetrija zaliva je takšna, da je celic, ki se nahajajo na večji globini od 25m, le okoli 30, zato so štirje sloji pri dnu debelejši (4,4 m, 3,3 m, 2,2 m ter 1,5 m gledano od dna navzgor), kar je zmanjšalo čas računa, a ni bistveno vplivalo na točnost rezultatov. Ostali sloji so enotne debeline enega metra.

### 3.1.3 ROBNI POGOJI

Tržaški zaliv s treh strani omejuje obala, od spodaj pa dno, kar vse obravnavamo kot trdne stene. Tu ter na prosti gladini so komponente hitrosti pravokotne na rob enake nič. Drugače je na odprtem robu, kjer se v obeh smereh prenaša gibalna količina, saj je tu obravnavano območje (računska domena) povezano s Severnim Jadranom. Uporabili smo »ukleščeni« (clamped) robni pogoj. Zaradi tega pogoja imamo sicer na odprtem robu nerealno stanje, saj predpostavimo, da je gladina na robu ves čas simulacij na isti koti. Takšna poenostavitev pa je dovoljena, ker v nalogi primerjamo simulacije z različnimi krajevnimi povprečenji vetra med seboj in ne z meritvami in lahko zato to nedoslednost dopustimo.

### 3.2. POVPREČNA ABSOLUTNA NAPAKA (MAE) VEKTORJEV VETRA

Zaradi minimalnih razlik med referenčnimi in povprečenimi hitrostnimi vektorji vetra, vetrovnih polj ne prikazujemo grafično, ampak smo podatke obdelali na drugačen način. V programu Excel smo za vse celice izračunali absolutno vrednost razlike med povprečenimi (ave4, ave9 in ave9d) in referenčnimi (nepovprečenimi) komponentami vektorjev hitrosti vetra v vsaki uri. Absolutno vrednost smo uporabili zaradi možnosti, da bi se nasprotno predznačene napake med seboj odšteje, kar ne bi dalo prave slike odstopanj med vrednostmi.

Uporabili smo enačbi:

$$MAEu = \frac{1}{n m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |u_{ij(ref)} - u_{ij(k)}| \quad (7)$$

$$MAEv = \frac{1}{n m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |v_{ij(ref)} - v_{ij(k)}| \quad (8)$$

Oznake v enačbah:

$MAEu$  – povprečna absolutna napaka komponente  $u$  (v smeri  $x$ )

$MAEv$  – povprečna absolutna napaka komponente  $v$  (v smeri  $y$ )

$(ref)$  – oznaka referenčne vrednosti

$(k)$  – oznaka načina povprečenja in števila povprečenih celic (1, 2 in 3 za ave4, ave9 in ave 9d)

$u$  in  $v$  – velikost komponente hitrostnega vektorja

$i$  – zaporedna številka celice v smeri  $x$  (vseh celic je  $n$ )

$j$  – zaporedna številka celice v smeri  $y$  (vseh celic je  $m$ )

Tako dobljene povprečne absolutne napake smo prikazali na grafikonih za posamezno uro simulacije.

### 3.3 SIMULACIJE

Z modelom PCFLOW3D smo izvedli štiri simulacije prek 72 ur z različno povprečenimi vetrovnimi polji ter narisali rezultate v dveh slojih – v prvem (površinskem), kjer so rezultati zapisani na globini 0,5 m ter v 11. sloju na globini 10,5 m. Pri vsaki simulaciji smo uporabili drugačno povprečenje: prek štirih (ave4) in na dva načina prek devetih celic (ave9 in ave9d). Na slikah prikazujemo poleg vektorskih polj tokov dobljenih z različno povprečenim vetrom tudi rezultate referenčne simulacije z nepovprečenim vetrom. Rezultate vseh simulacij smo narisali na isto sliko (s programom Surfer) s korakom šest ur za celotno obdobje treh dni. Vizualno smo primerjali odstopanja v velikosti in smeri hitrostnih vektorjev v obeh slojih. Na začetku (v času 0) smo predpostavili stanje mirovanja, vsaka naslednja simulacija pa je izvedena s t.i. »hot-start« načinom, ki kot začetni pogoj upošteva končno hitrostno polje predhodne simulacije.

### 3.4 RAZLIKA V DOLŽINI IN SMERI VEKTORJEV TOKOV

Razliko v velikosti in smeri vektorjev morskih tokov smo s programom Surfer grafično prikazali. Ker so razlike na slikah, predvsem na območjih večjih globin in v sredini zaliva (kjer ima obala manjši vpliv) skoraj neopazne, smo rezultate obdelali še računsko.

S pomočjo enostavnega programa smo izračunali razlike med referenčnimi in povprečenimi vektorji tokov in jih izpisali vsako šesto uro (ob istih urah, kot so izrisani rezultati) in sicer:

- razliko v **dolžini** referenčnih in povprečenih vektorjev tokov prek 4 in na dva načina povprečenih 9 celic,
- razliko v **smeri** referenčnih in povprečenih vektorjev prek 4 in na dva načina povprečenih 9 celic, da smo dobili kot med njima,
- razliko med **spremembo dolžine pomnoženo s spremembo kota** med referenčnimi in povprečenimi vektorji prek štirih in na dva načina povprečenih devetih celic; ta način prikazuje odstopanja bolj smiselno. Dejansko prikazujemo ploščino med dvema pravokotnima vektorjema, ki predstavljata kot in dolžino ter na ta način produkt odstopanj, ki upošteva hkrati obe odstopanji, v velikosti in smeri.

V Excelu smo nato podatke še statistično obdelali in dobili:

- povprečno razliko dolžin, kotov in produkta dolžin in kotov (srednjo vrednost),
- maksimume vseh treh obravnavanih količin in
- standardno deviacijo, ki ocenjuje standardni odklon, ki je mera za obseg razpršenosti vrednosti od povprečne (srednje) vrednosti. Uporabili smo enačbo:

$$c_j = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (9)$$

kjer je  $x$  vzorčna srednja vrednost in  $n$  velikost vzorca.

Rezultate prikazujemo na grafikonih za vsako količino posebej, na globini 0,5 m (površinski sloj) in 10,5 m (11. sloj).

### 3.5 ODVISNOST NAPAK OD POVPREČNEGA VETRA

Preverili smo še, ali so napake odvisne od povprečnega vetra, torej natančneje, ali obstaja kakršnakoli zakonitost oziroma povezava med jakostjo vetra in razliko dolžin, smeri ali njunega produkta.

Zato smo iz vseh originalnih vetrovnih polj za vsako celico izračunali absolutno hitrost vetra v vsaki uri (za 1 h, ... 72 h), potem pa rezultate povprečili prek 6 ur, kolikor so dolga obdobja, po katerih smo izrisali slike vektorjev v programu Surfer ter stolpčne grafe. Te količine smo nato nanesli na  $Y$  os. Za spremenljivko  $X$  smo vzeli povprečje odstopanja zmnožka » $\Delta$  kota  $\times$   $\Delta$  dolžine« v posameznem 6-urnem obdobju (povprečili smo vsa tri odstopanja skupaj, ref - ave4, ref - ave9 in ref - ave9d, saj so vsa tri povprečenja zelo blizu skupaj in smo tako zabrisali nekatera izrazita odstopanja). Nato smo narisali raztreseni (scatter) graf  $X$ - $Y$  in poskusili narisati regresijsko premico. O odvisnosti med tema količinama bi lahko sklepali v primeru visoke pozitivne ali negativne korelacije.

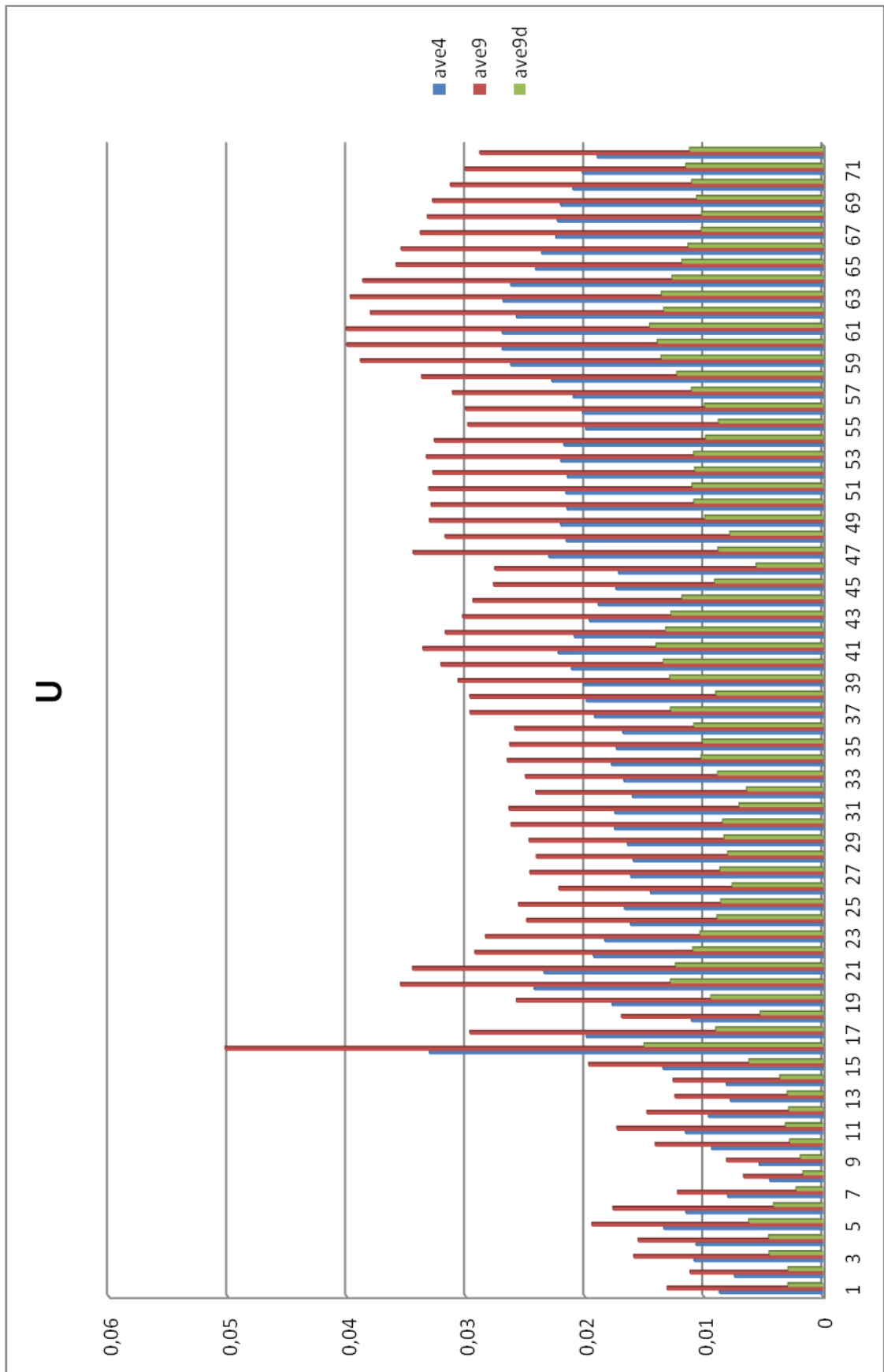
## **4. REZULTATI IN DISKUSIJA**

### **4.1 VETER**

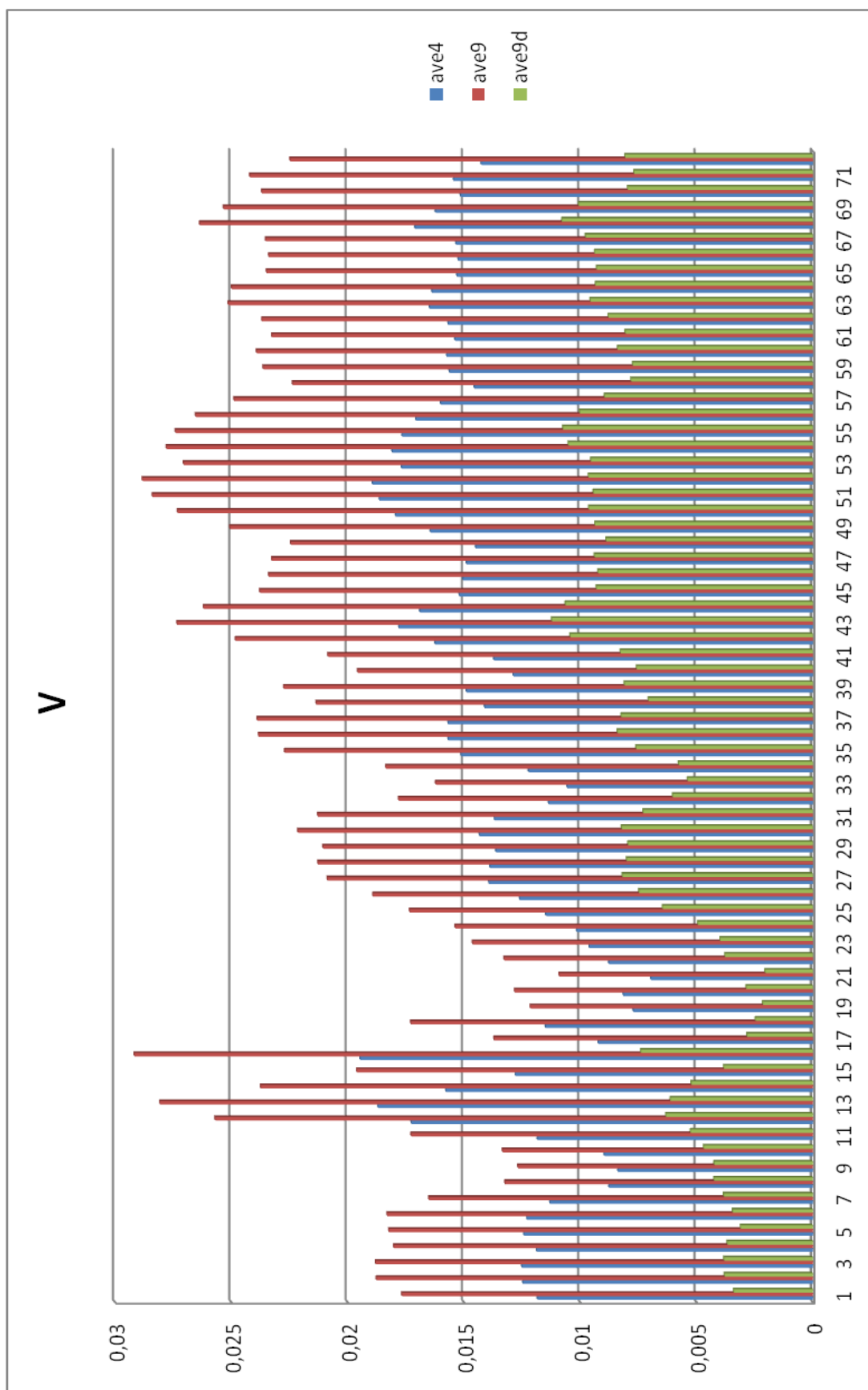
Veter nad Tržaškim zalivom od 19.3. do 21.3. 2009, smo povprečili prek štirih in devetih celic.

Vektorskih slik vetra zaradi majhnih razlik med referenčnimi in povprečenimi vektorji grafično ne prikazujemo, saj odstopanja povprečenih vektorjev vetra na večini slik niso vidna brez izrazite povečave, ki pa naredi sliko vektorskega polja zelo nepregledno. Podobne slike so v diplomski nalogi Barbare Novak (2013), ki je isti referenčni veter povprečila časovno in v prilogi diplome prikazala tudi slike.

V tej nalogi smo razlike primerjali le računsko. Izračunali smo povprečno absolutno napako vsake komponente vetrnega vektorja ( $u$  in  $v$ ) posebej (enačbi 7 in 8) ter ju prikazali na grafikonih na slikah 5 in 6.



Slika 5: Grafikon povprečne absolutne napake komponente vetrnega vektorja  $u$



Slika 6: Grafikon povprečne absolutne napake komponente vetrnega vektorja v



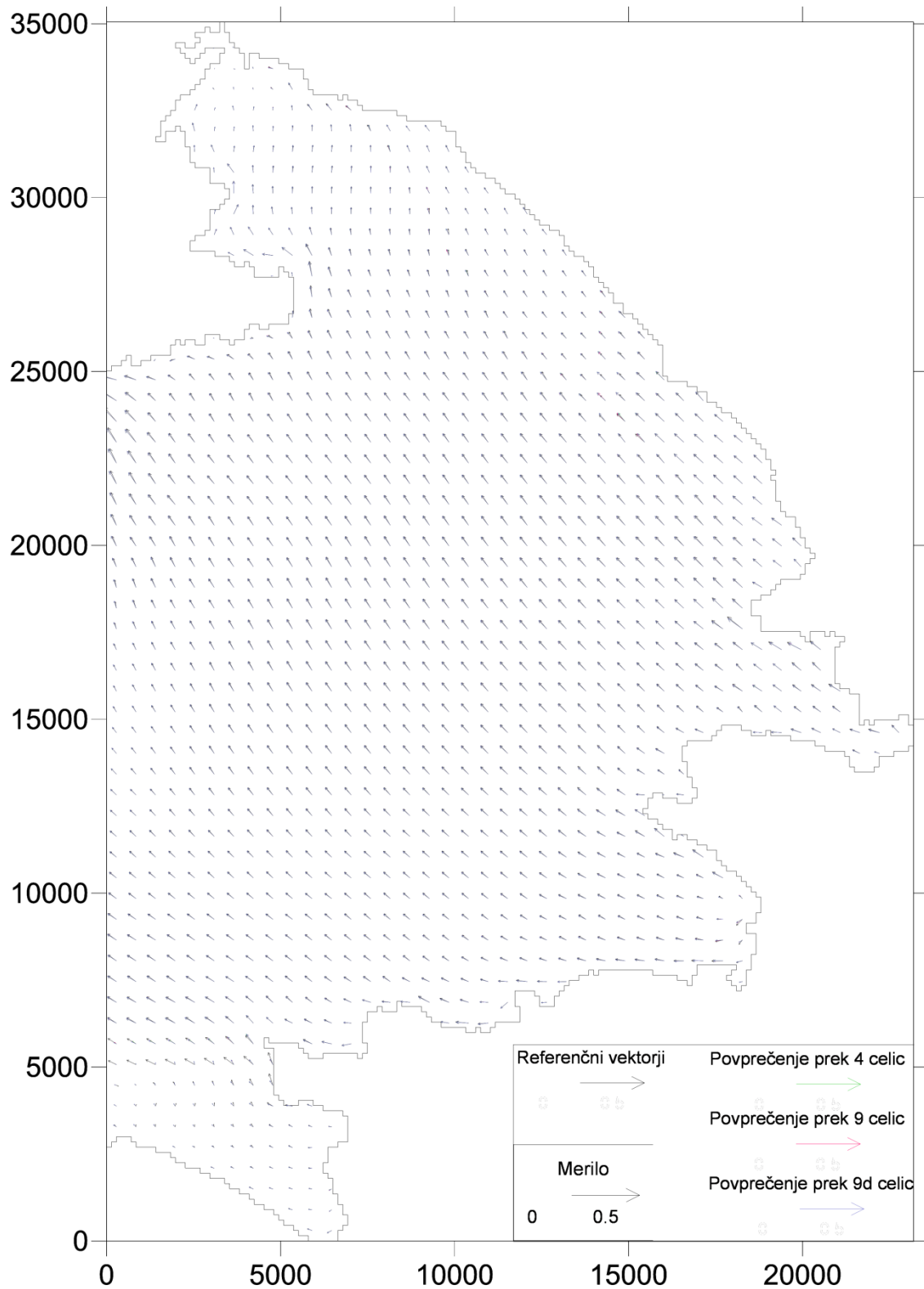
V grafikonu na sliki 5 je prikazana povprečna absolutna napaka za posamezno celico (vsota absolutnih napak posamezne komponente vektorja deljena s številom vseh celic) za komponento vetrnega vektorja  $u$  v smeri  $x$  (Vzhod), na grafikonu na sliki 6 pa za komponento  $v$  v smeri  $y$  (Sever).

Na obeh grafikonih je jasno razvidno, da so absolutne razlike med referenčnimi in povprečenimi vektorji z drsečim povprečjem prek devetih celic najmanjše, pričakovano največje pa pri navadnem povprečenju prek devetih celic. Kljub temu je absolutna razlika majhna in nikjer ne presega 3 cm/s. Če upoštevamo, da je povprečna jakost vetra v posameznem časovnem intervalu med 2 in 9 m/s, je odstopanje majhno tudi v relativnem merilu. Zato tudi ne moremo pričakovati bistvenih odstopanj v tokovih. Opazili smo, da so največje razlike med povprečenji v obdobju okrog 15 ure, ko se je zgodil drugi, hitrejši obrat vetra burja – jugo – burja.

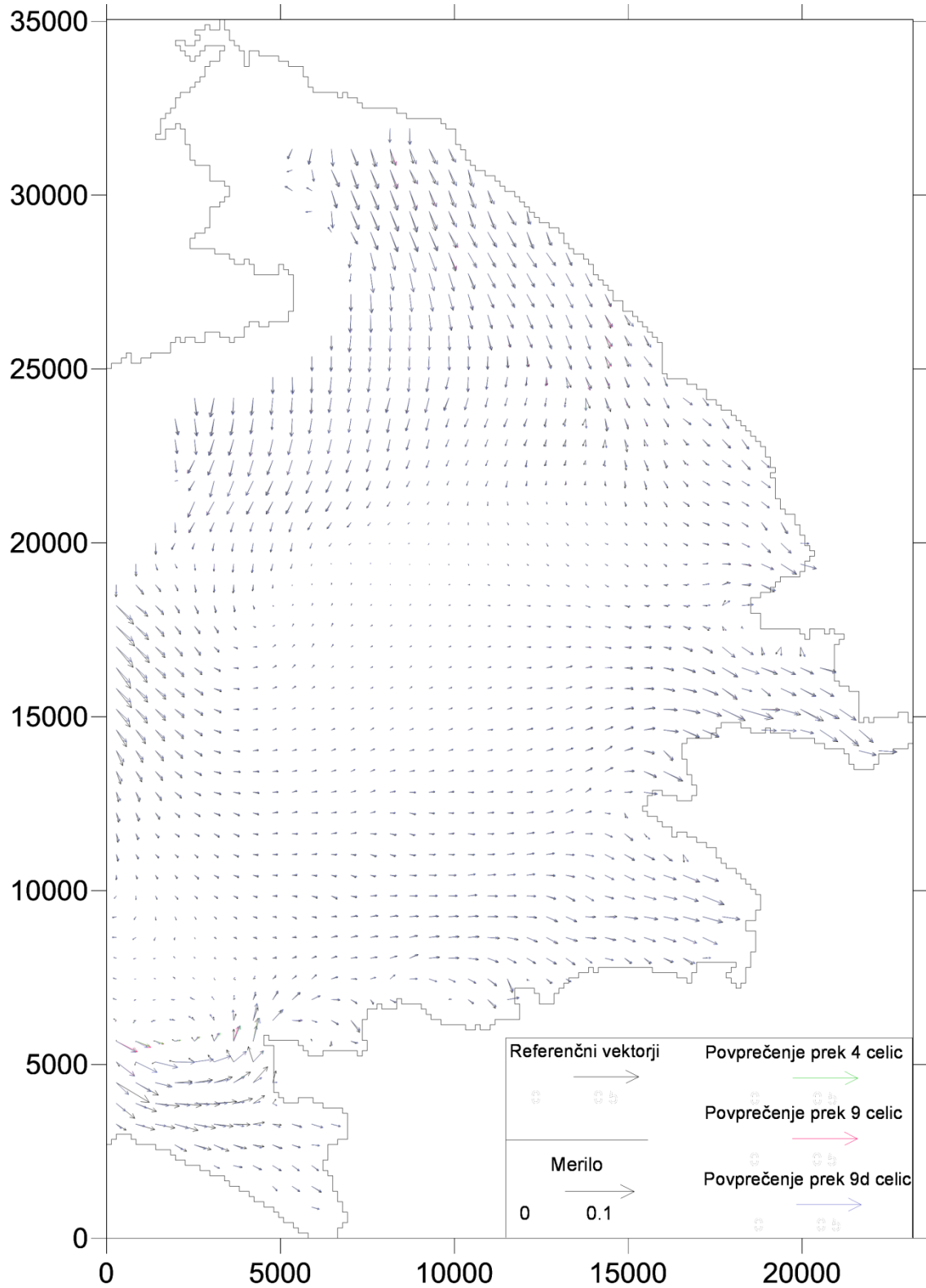
## 4.2 GRAFIČNI PRIKAZ VPLIVA POVPREČENEGA VETRA NA TOKOVE

Vektorske slike tokov smo izrisali na dveh globinah: v prvem sloju na globini 0,5 m (slike 7, 9, 11,...29) in v enajstem sloju na globini 10,5 m (slike 8, 10, 12,...30), na vsakih šest ur (6. uro, 12.,...72. uro) in opazovali morebitna odstopanja v smeri in velikosti vektorjev med hitrostnim poljem v morju, izračunanim s povprečenimi in z referenčnimi vektorji vetra ter na katerih območjih Tržaškega zaliva se pojavljajo najpogostejša in največja odstopanja.

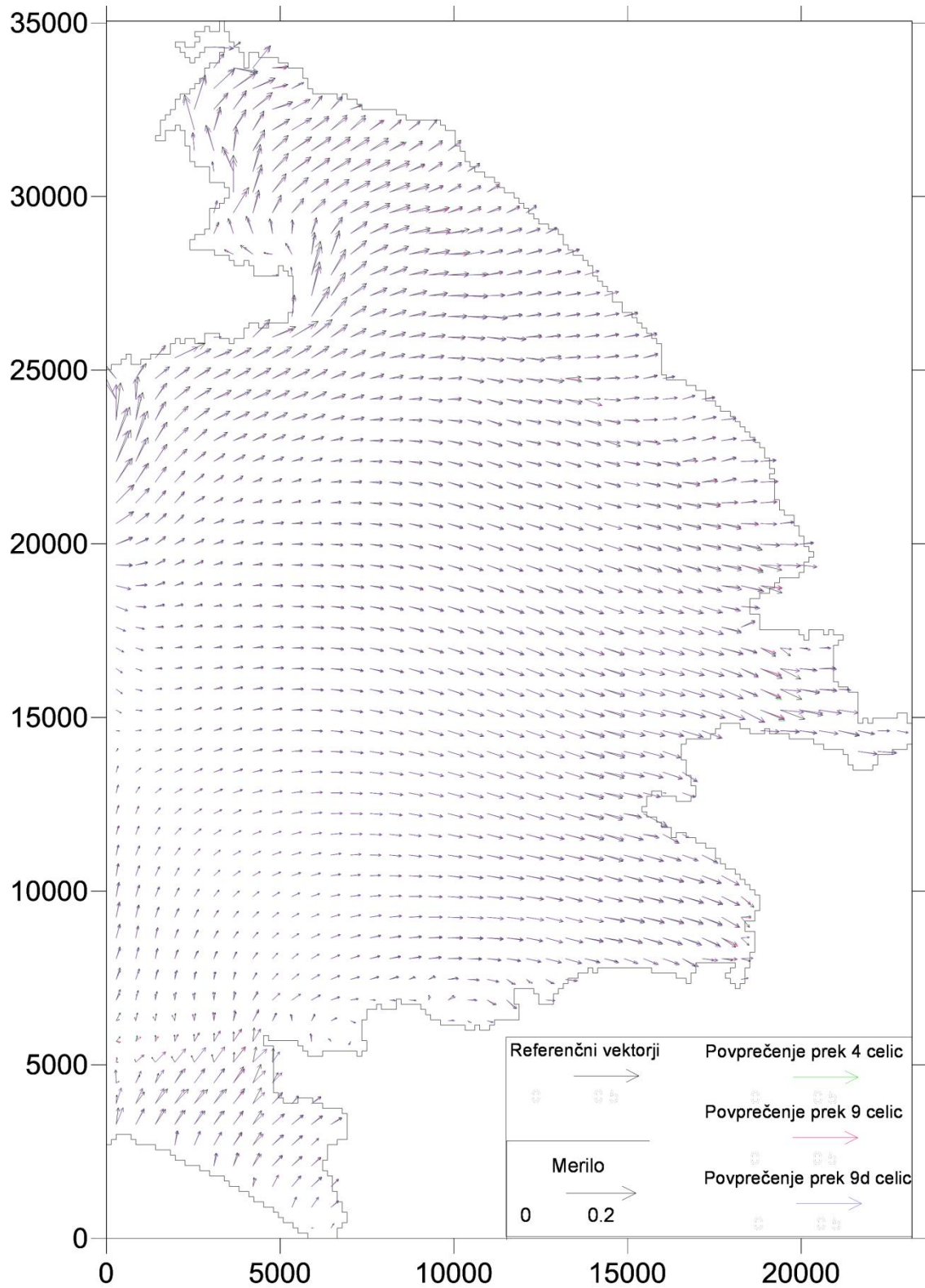
Zaradi boljše preglednosti, smo pri nekaterih slikah spremenili merilo hitrosti, saj so razlike med vektorji povečini zelo majhne.



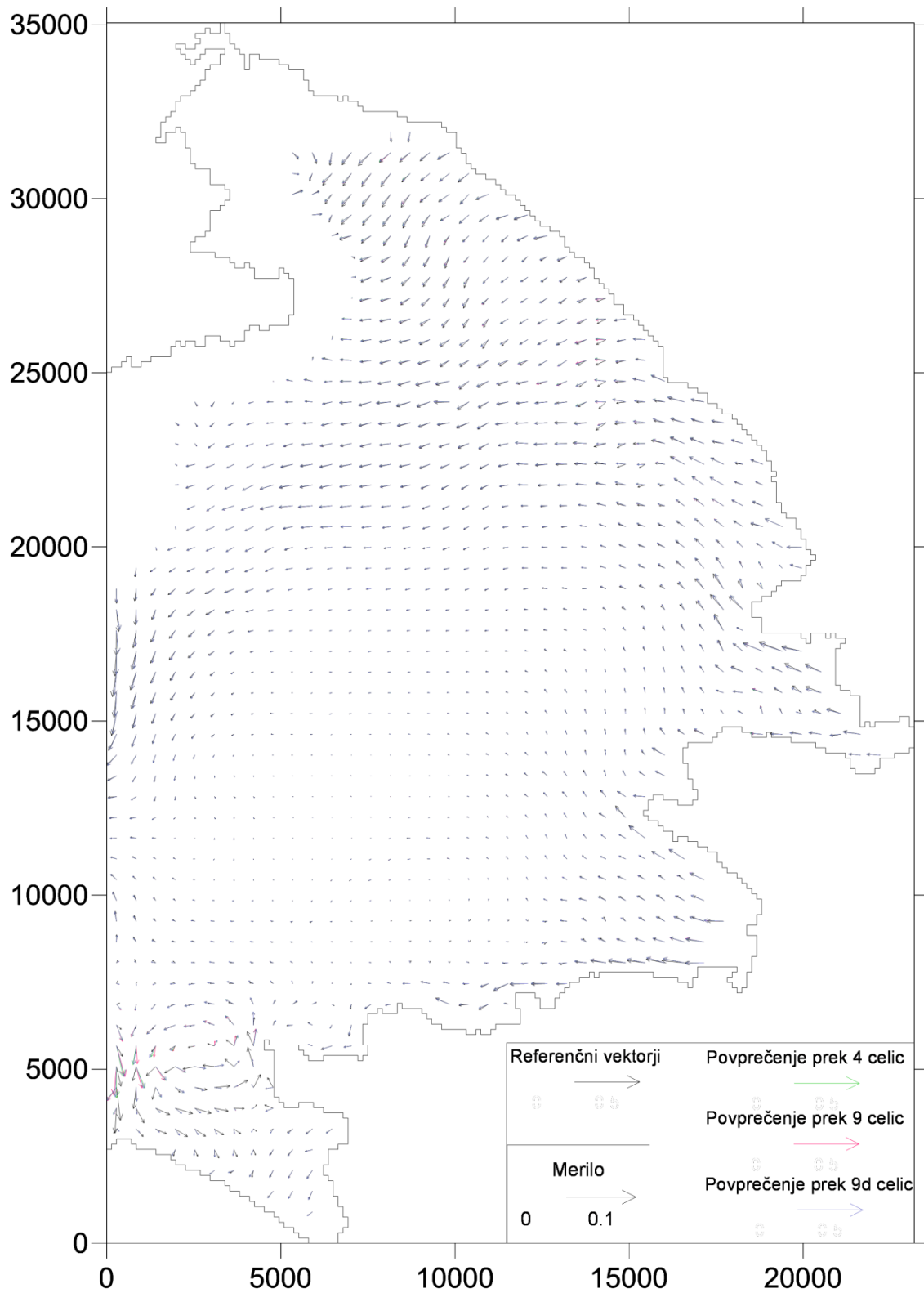
Slika 7: Hitrostno polje tokov po 6-ih urah na globini 0,5 m



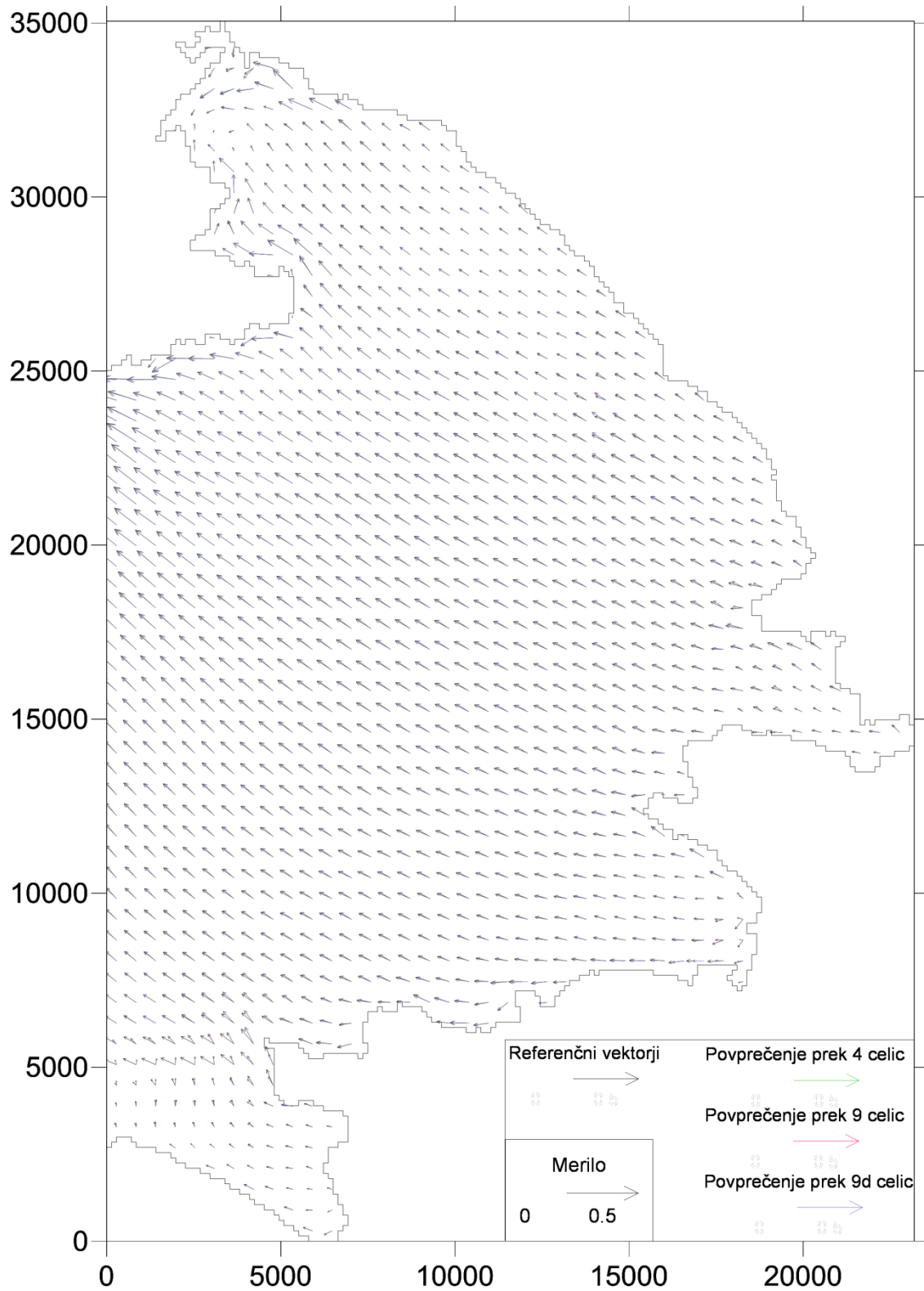
Slika 8: Hitrostno polje tokov po 6-ih urah na globini 10,5 m



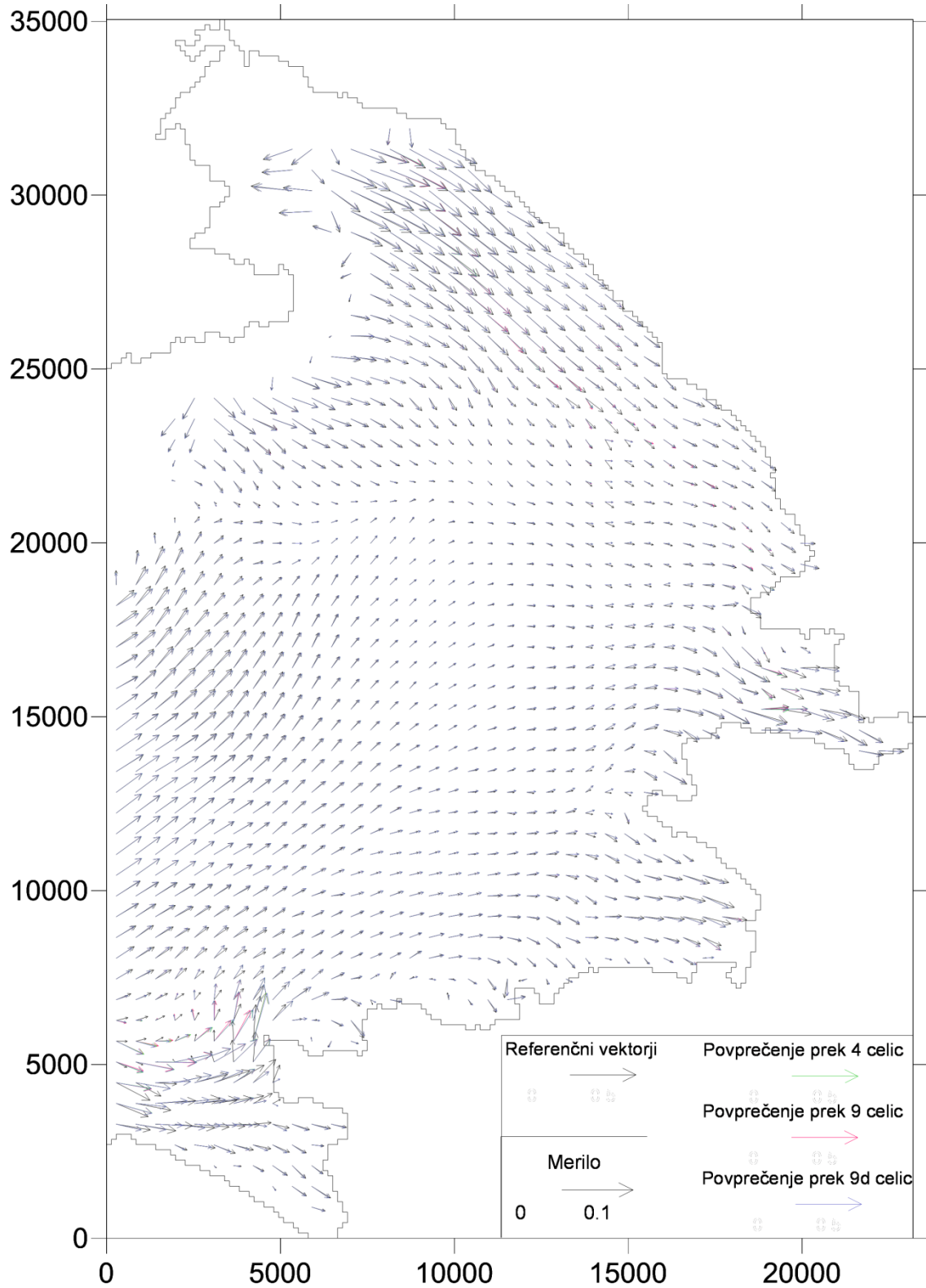
Slika 9: Hitrostno polje tokov po 12-ih urah na globini 0,5 m



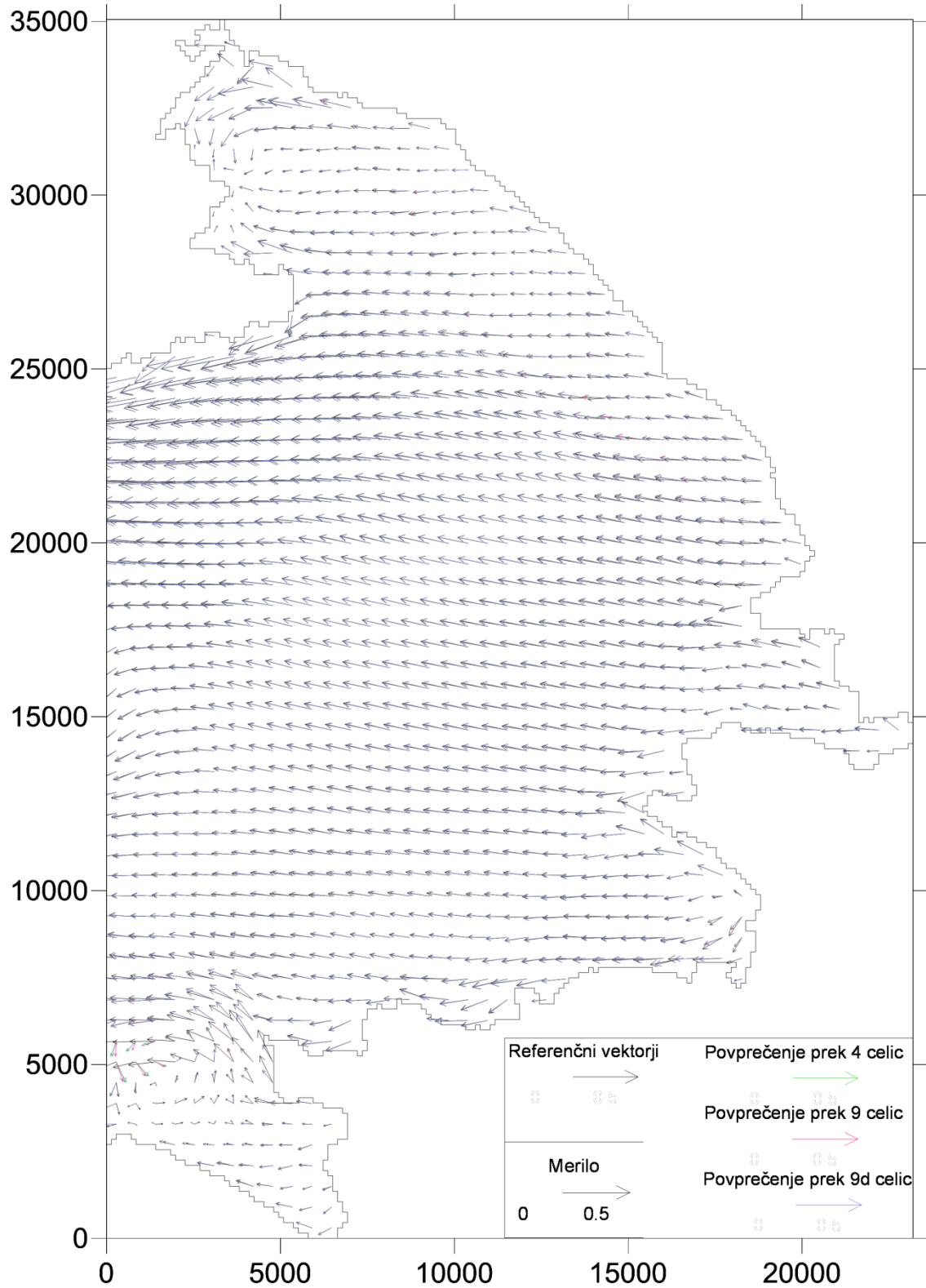
Slika 10: Hitrostno polje tokov po 12-ih urah na globini 10,5 m



Slika 11: Hitrostno polje tokov po 18-ih urah na globini 0,5 m

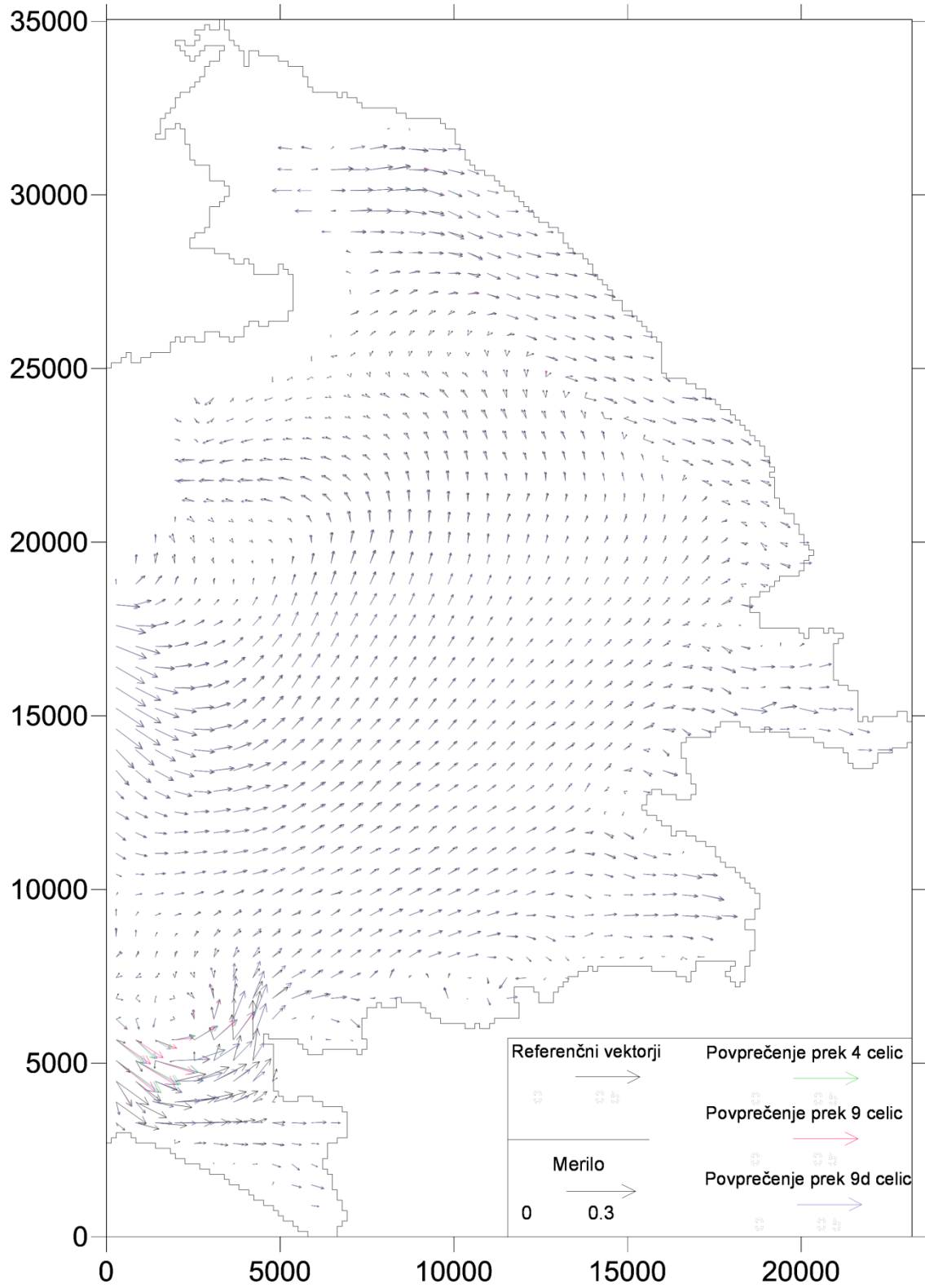


Slika 12: Hitrostno polje tokov po 18-ih urah na globini 10,5 m

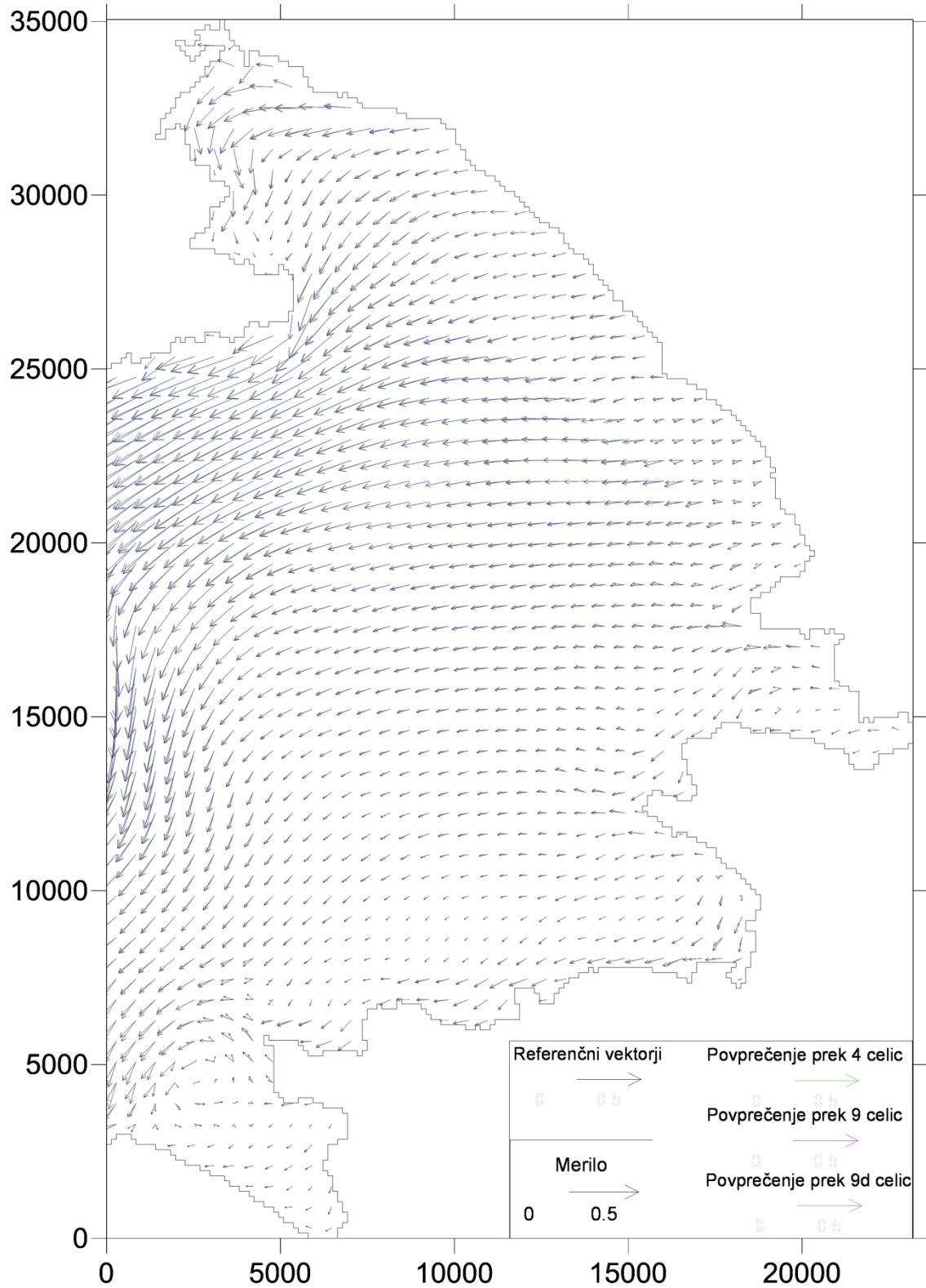


Slika 13: Hitrostno polje tokov po 24-ih urah na globini 0,5 m

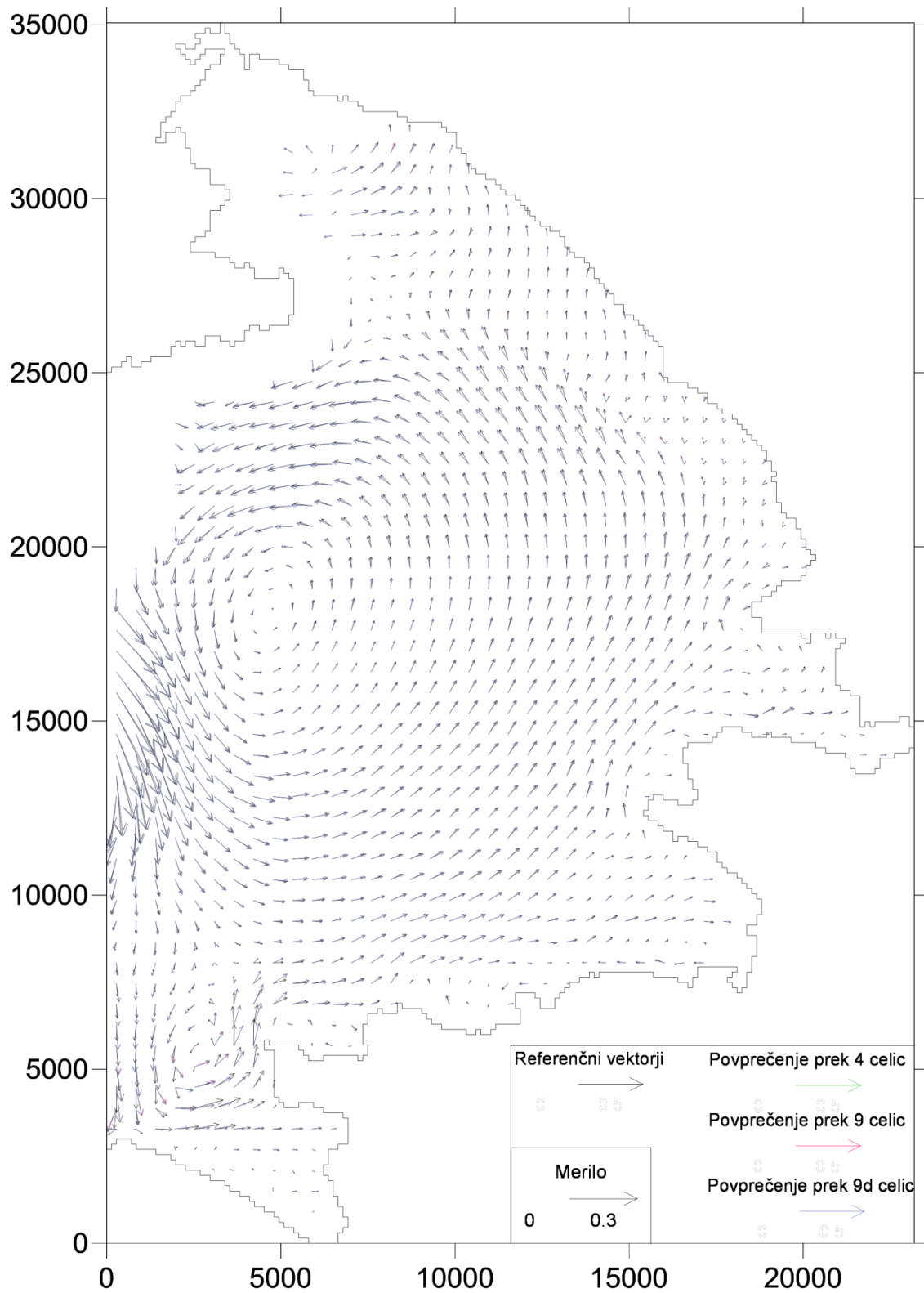




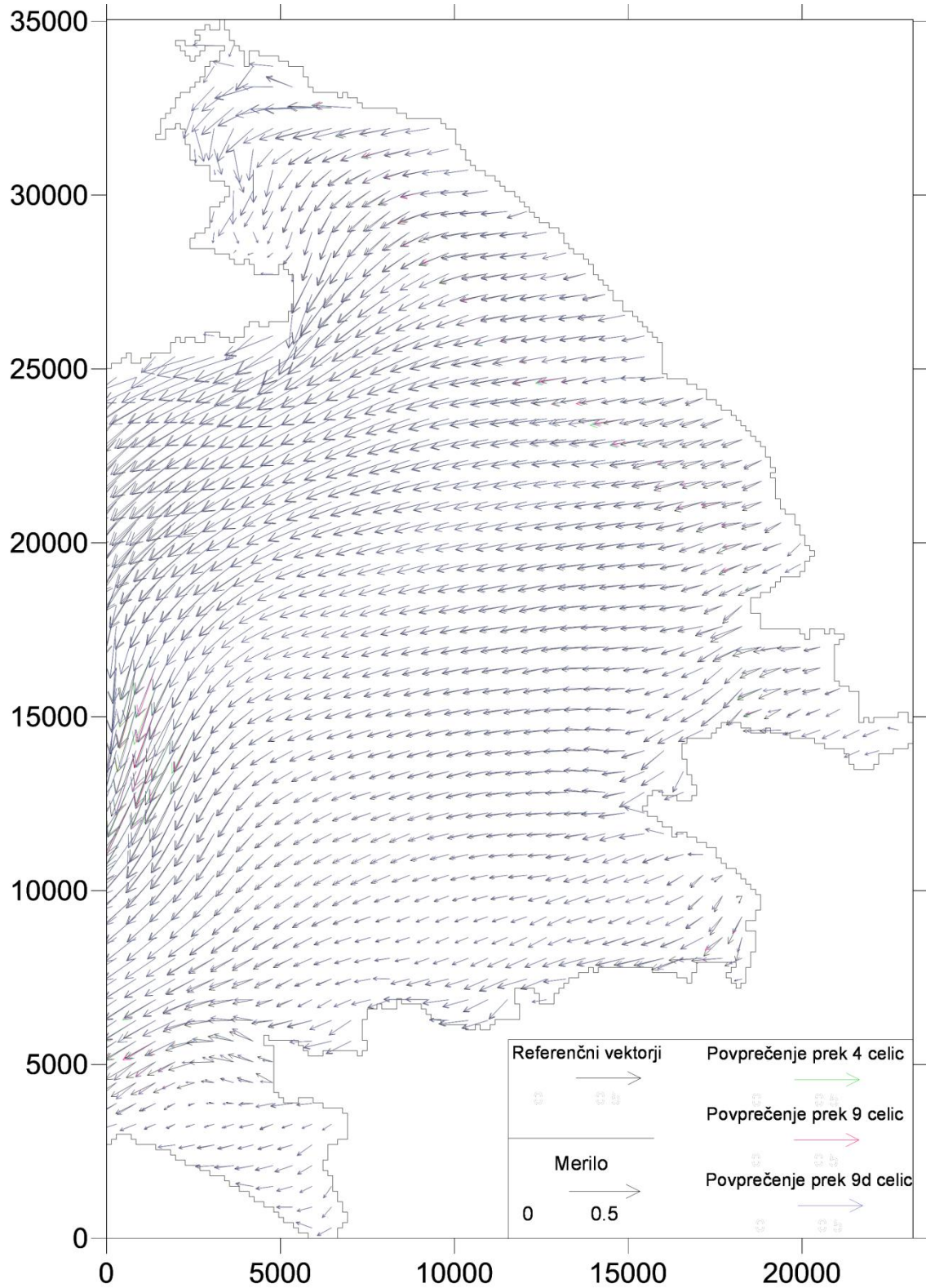
Slika 14: Hitrostno polje tokov po 24-ih urah na globini 10,5 m



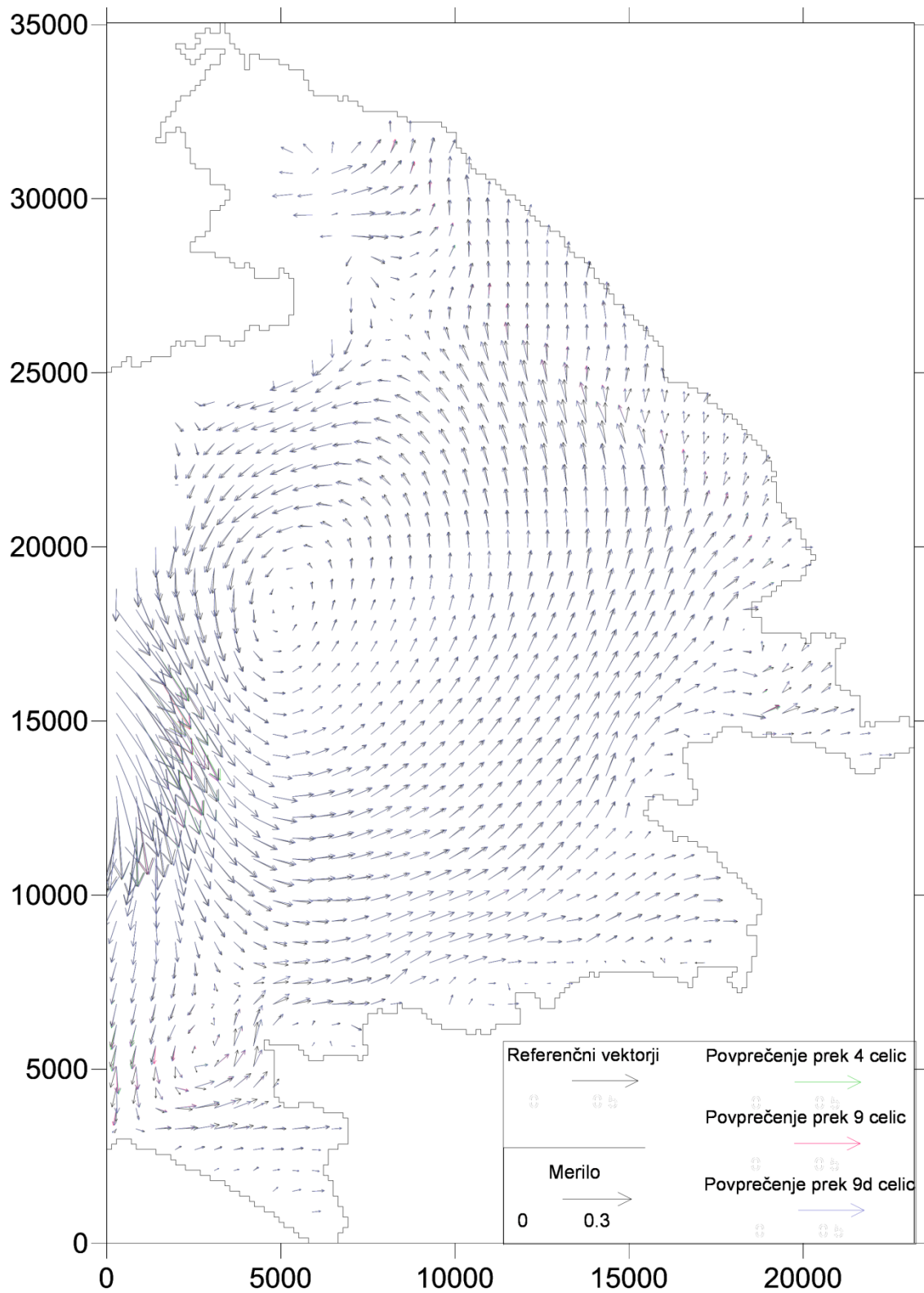
Slika 15: Hitrostno polje tokov po 30-ih urah na globini 0,5 m



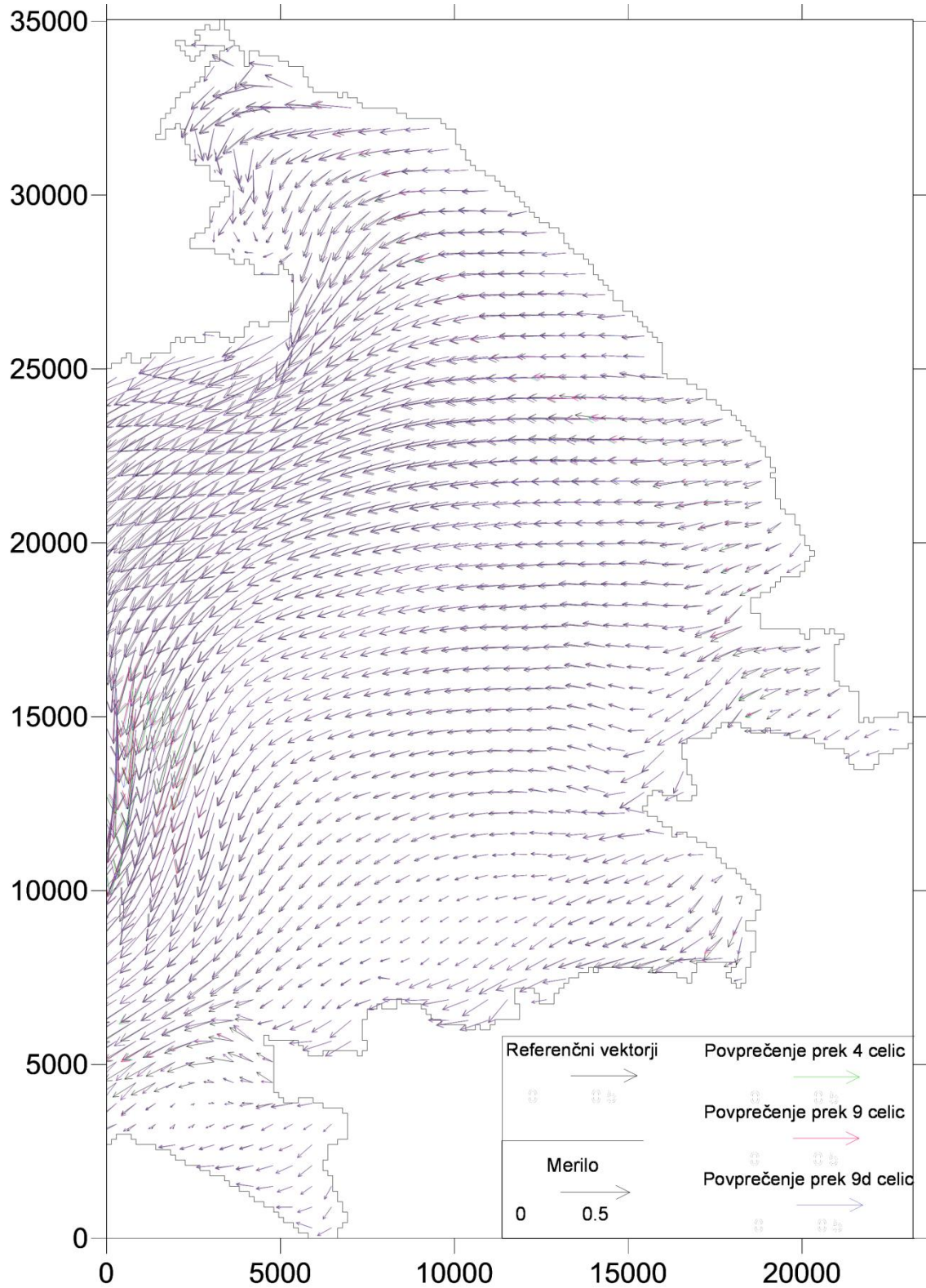
Slika 16: Hitrostno polje tokov po 30-ih urah na globini 10,5 m



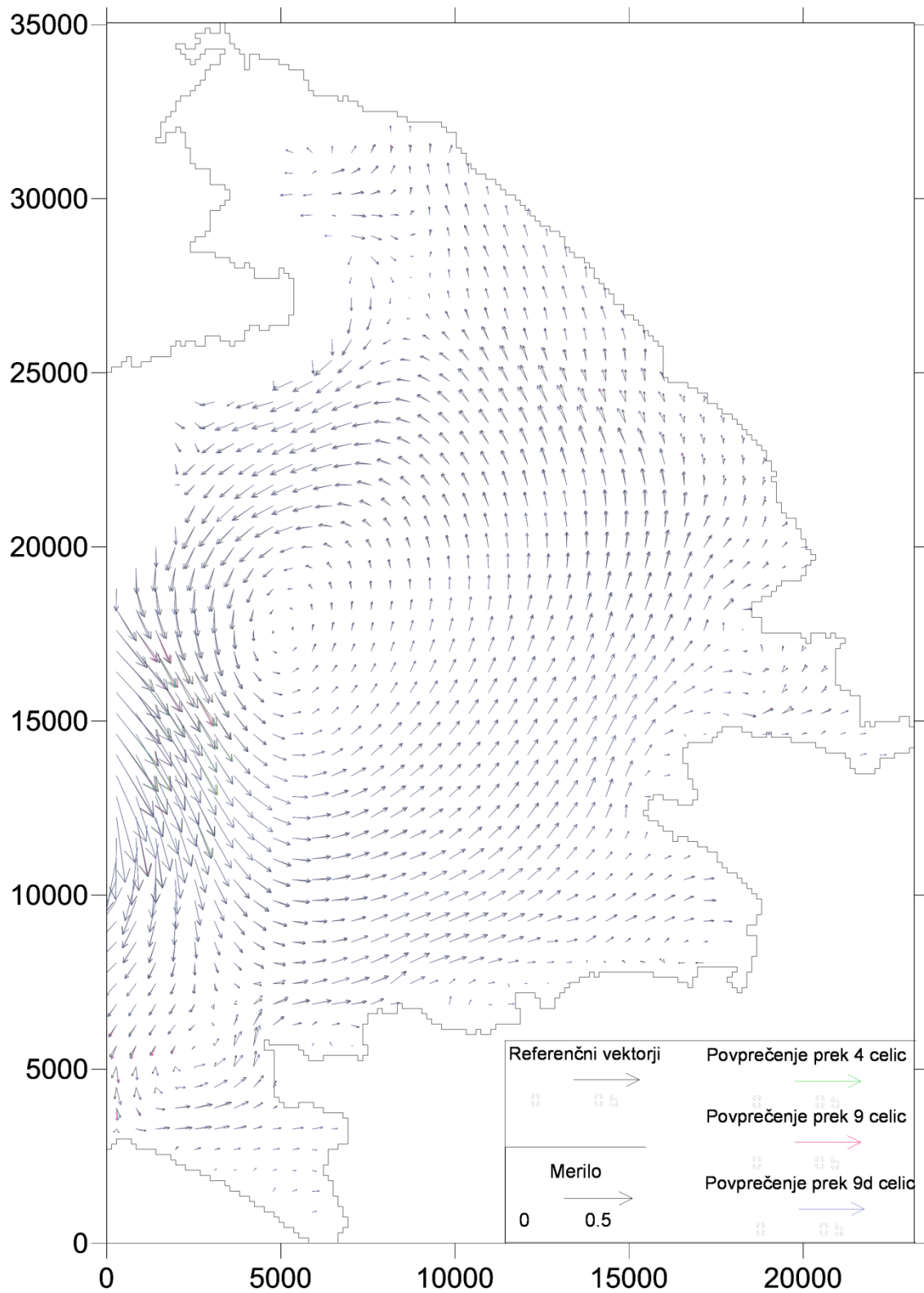
Slika 17: Hitrostno polje tokov po 36-ih urah na globini 0,5 m



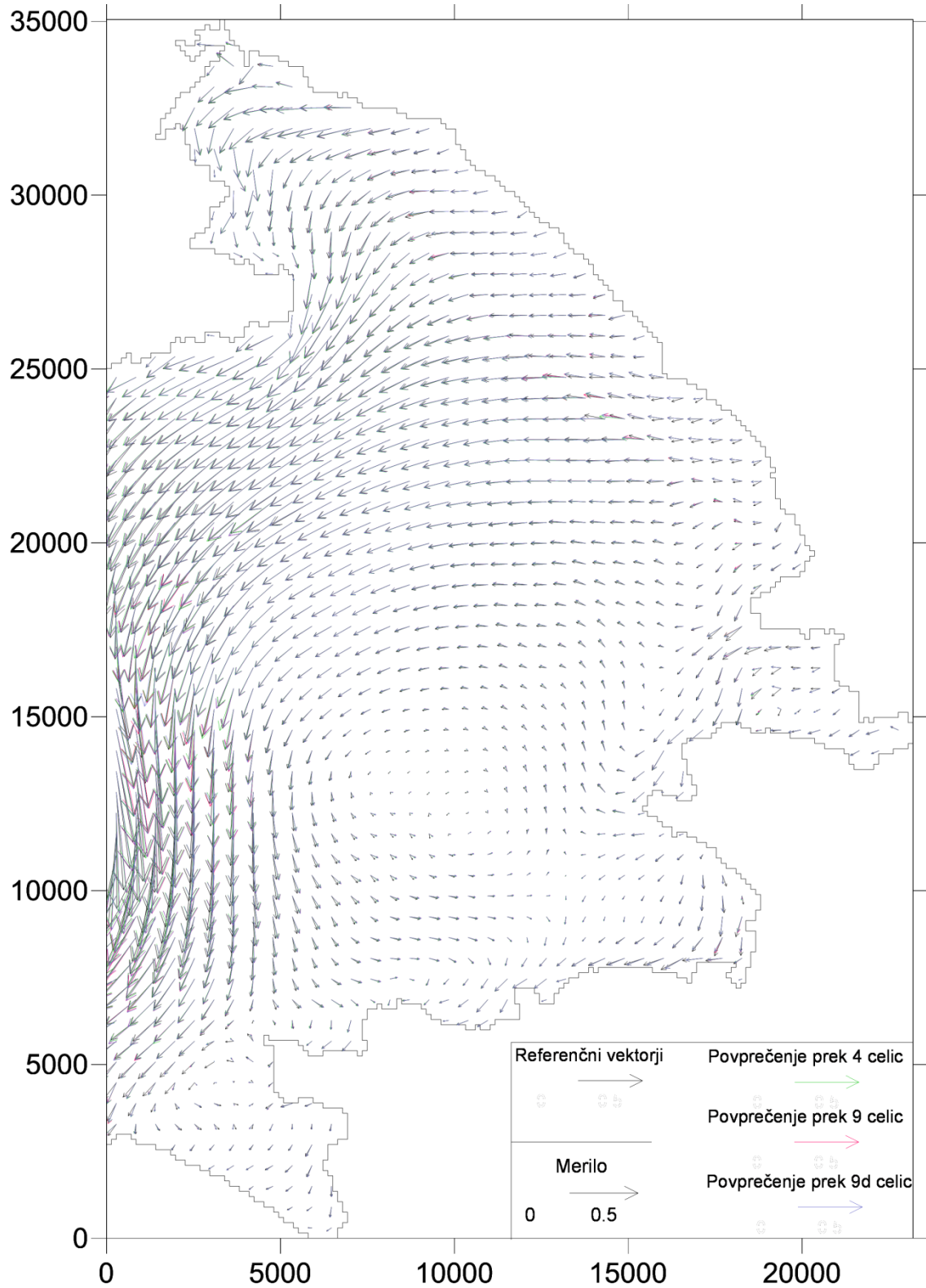
Slika 18: Hitrostno polje tokov po 36-ih urah na globini 10,5 m



Slika 19: Hitrostno polje tokov po 42-ih urah na globini 0,5 m

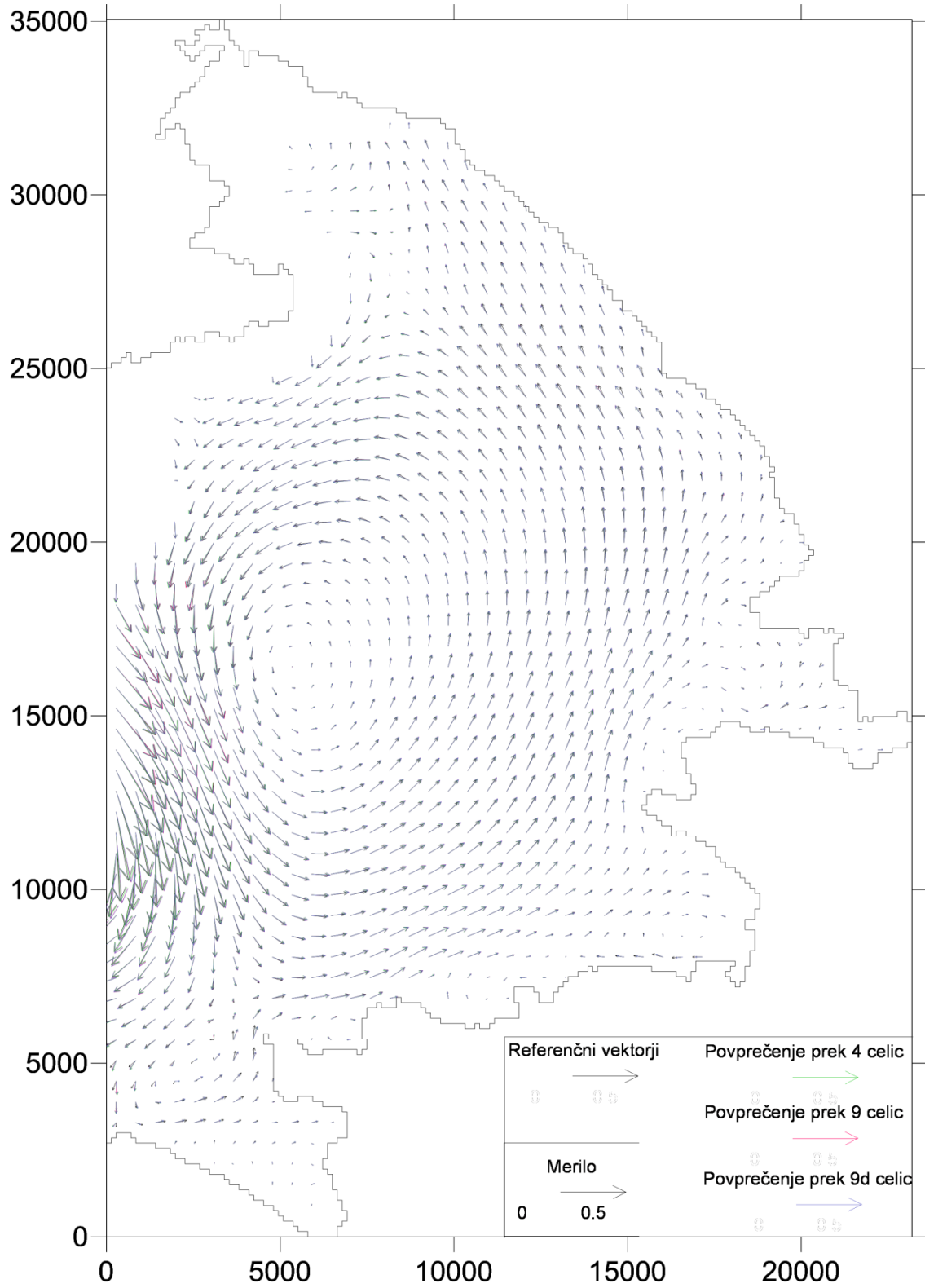


Slika 20: Hitrostno polje tokov po 42-ih urah na globini 10,5 m

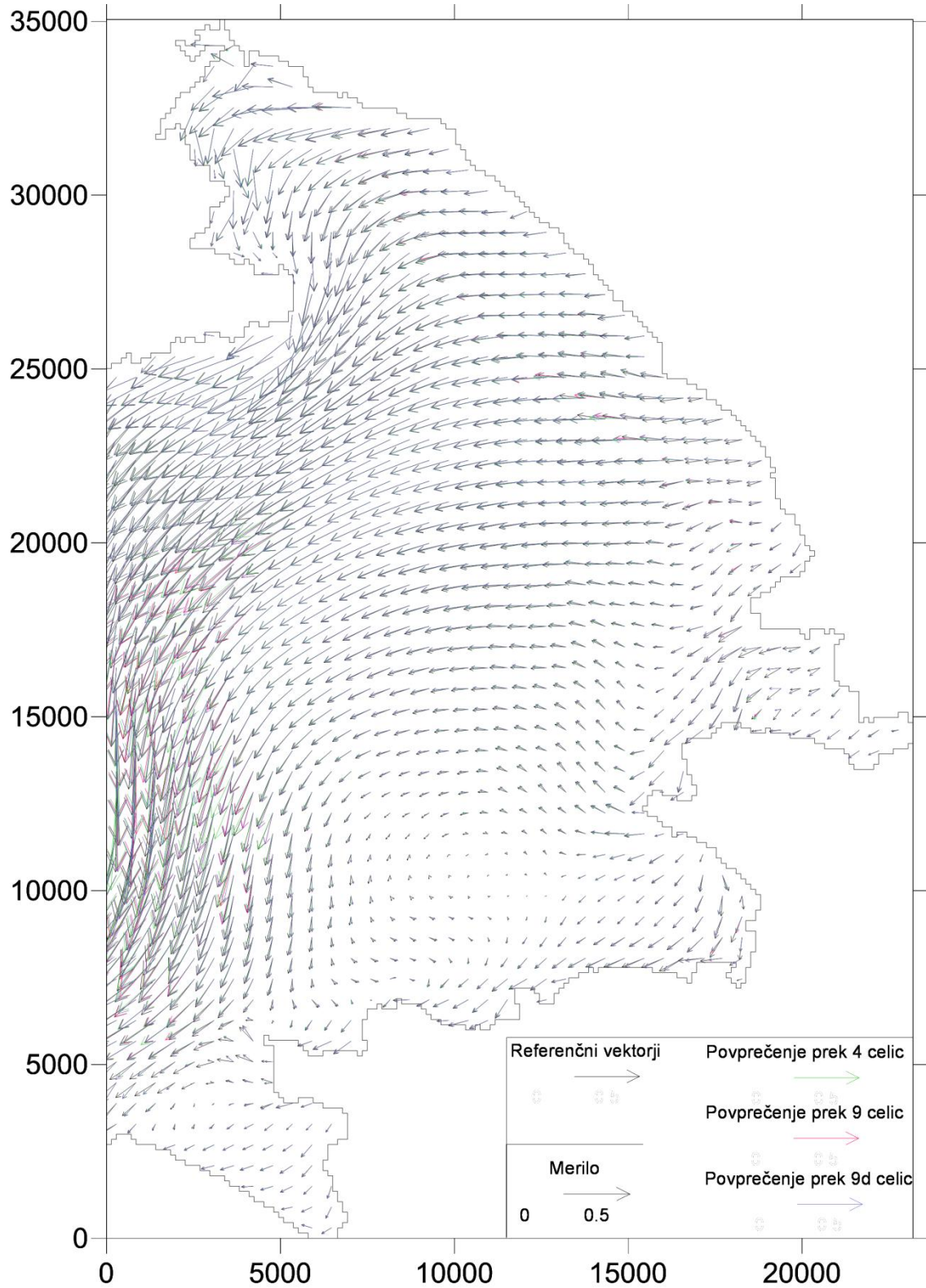


Slika 21: Hitrostno polje tokov po 48-ih urah na globini 0,5 m

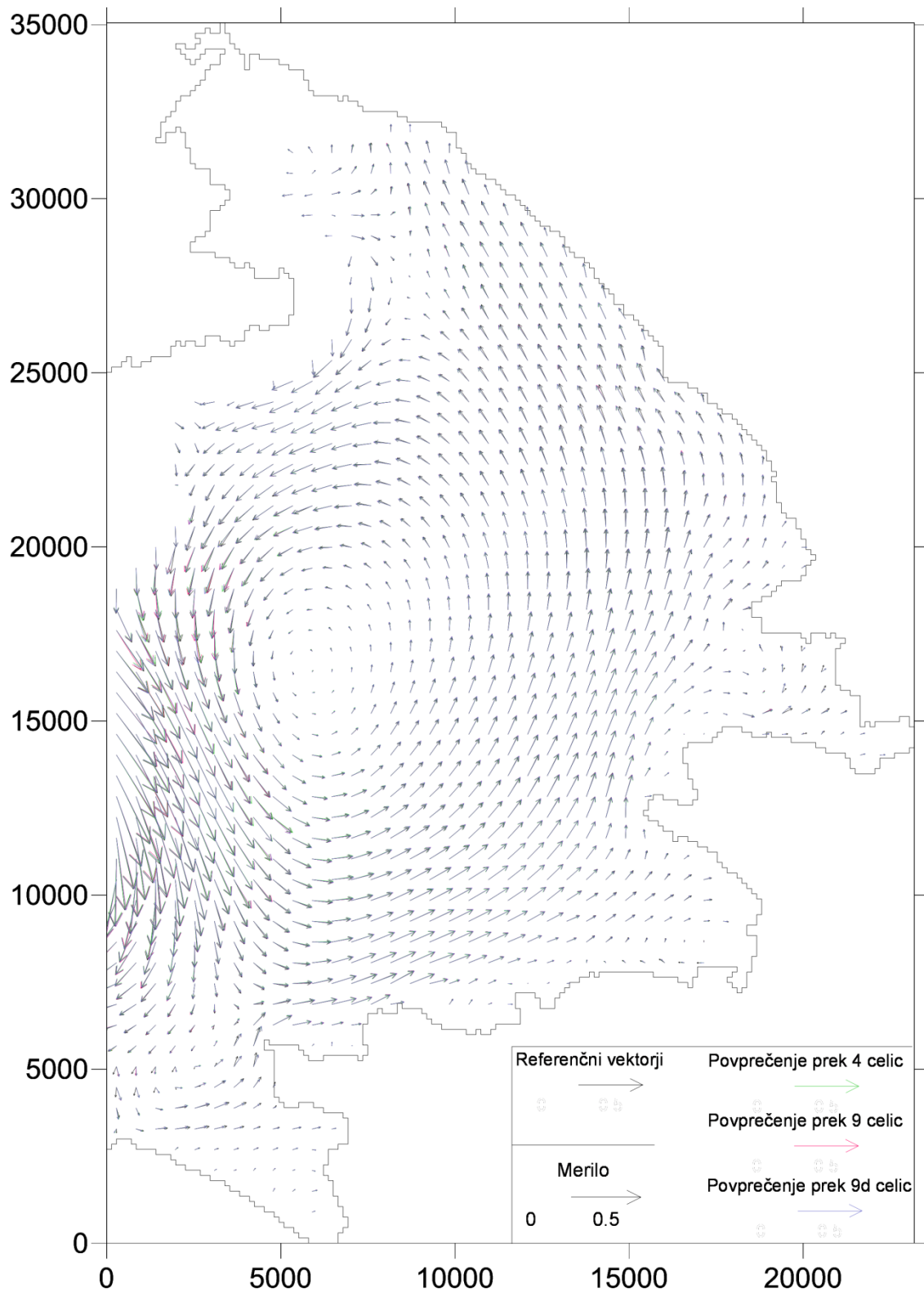




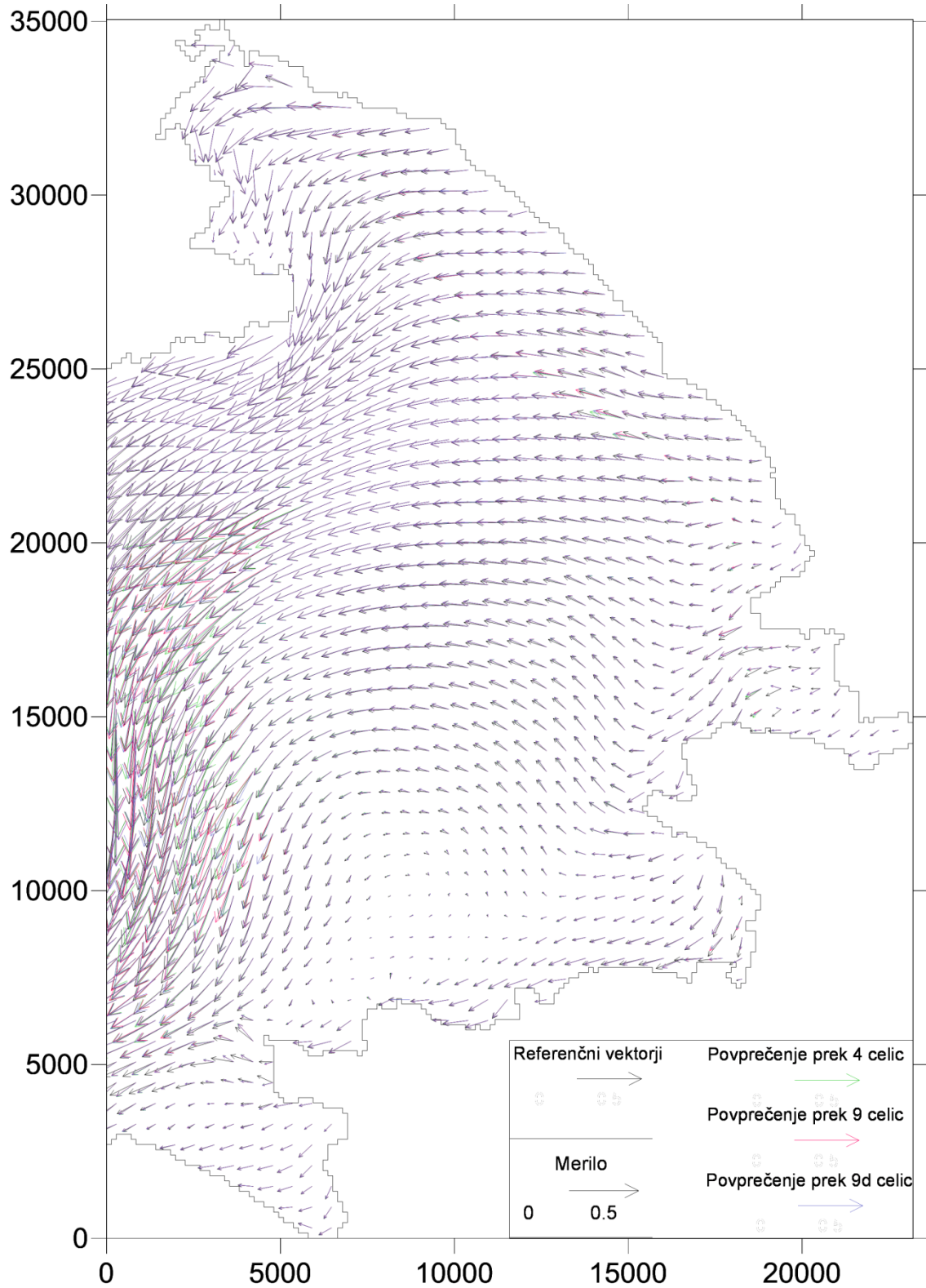
Slika 22: Hitrostno polje tokov po 48-ih urah na globini 10,5 m



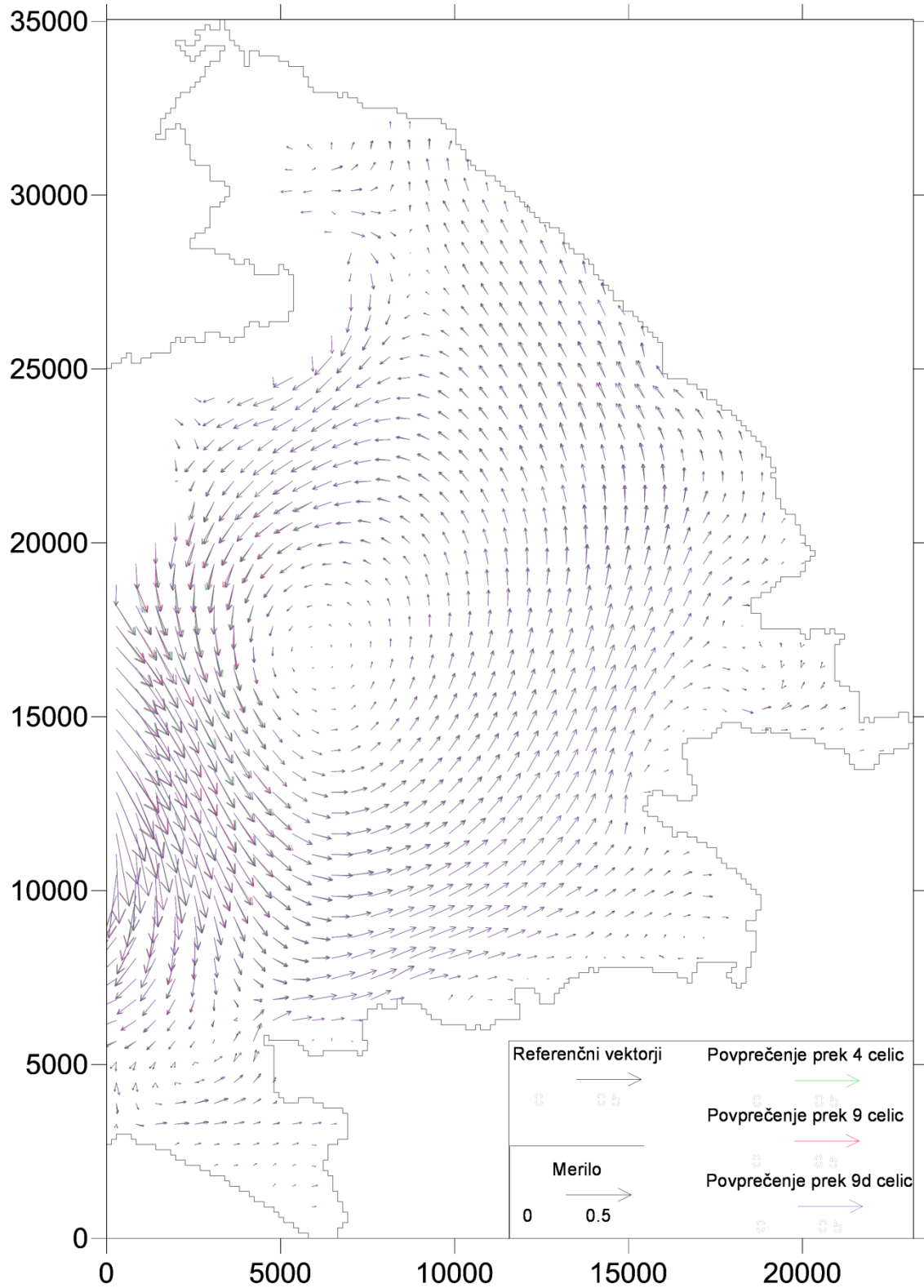
Slika 23: Hitrostno polje tokov po 54-ih urah na globini 0,5 m



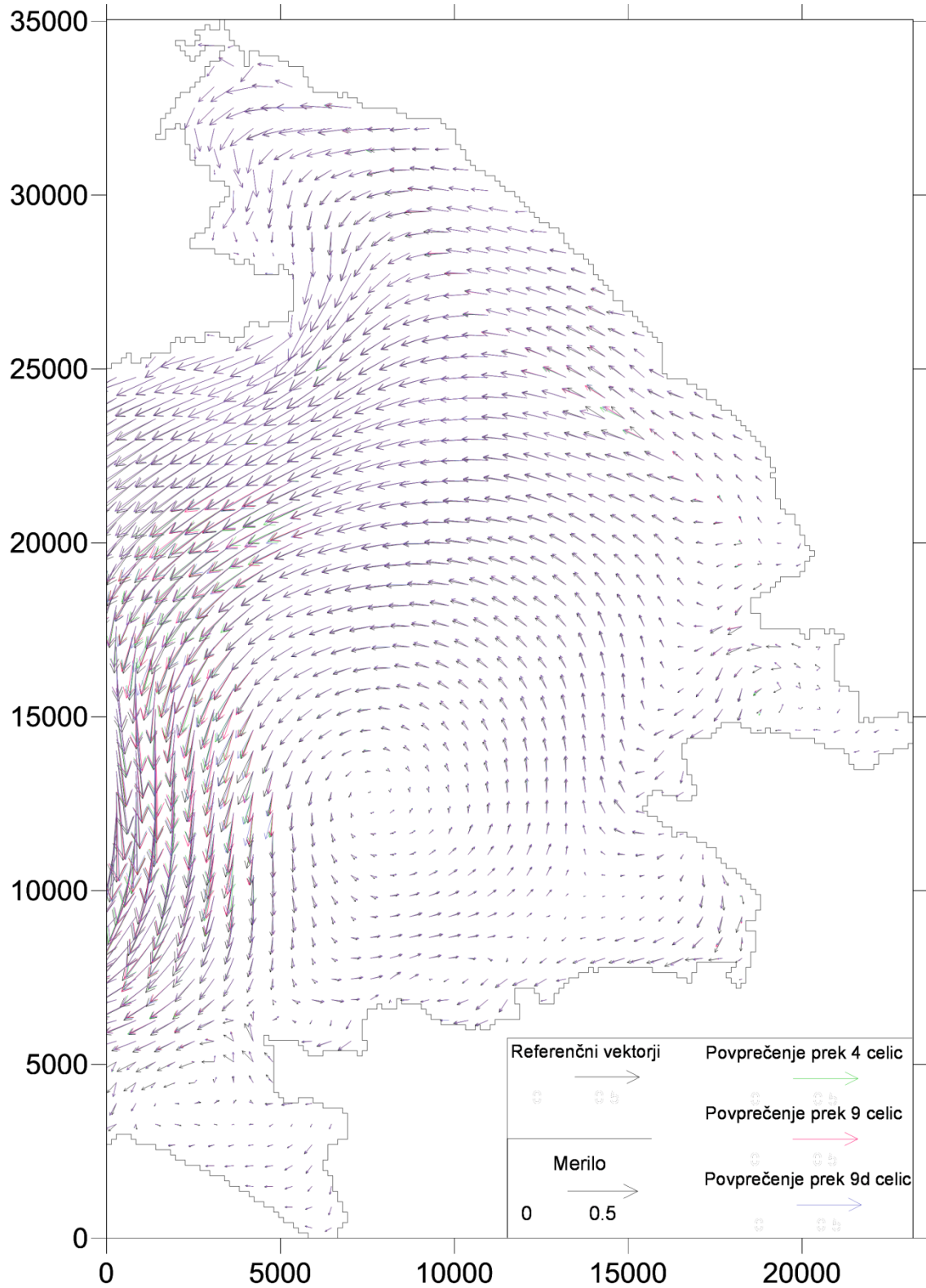
Slika 24: Hitrostno polje tokov po 54-ih urah na globini 10,5 m



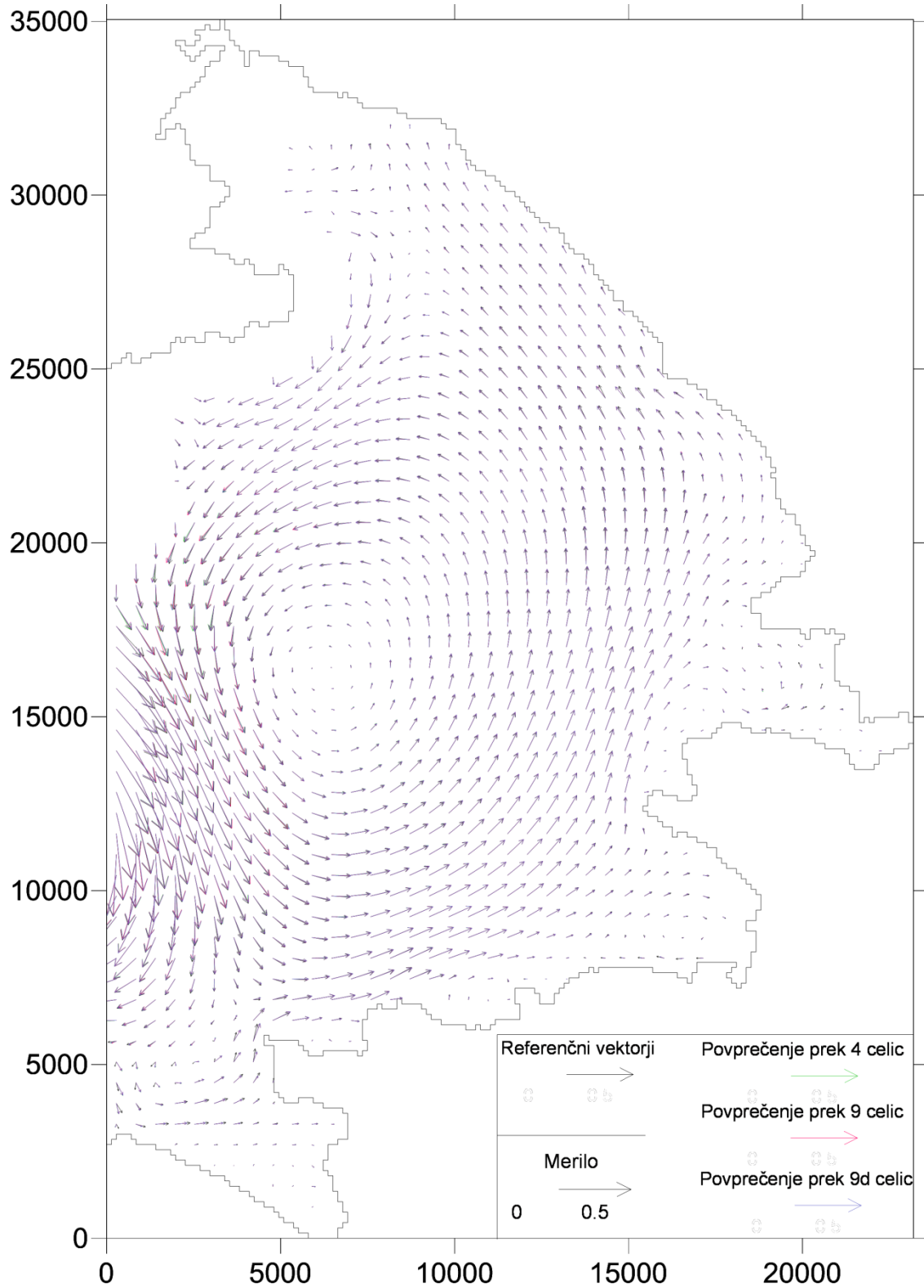
Slika 25: Hitrostno polje tokov po 60-ih urah na globini 0,5 m



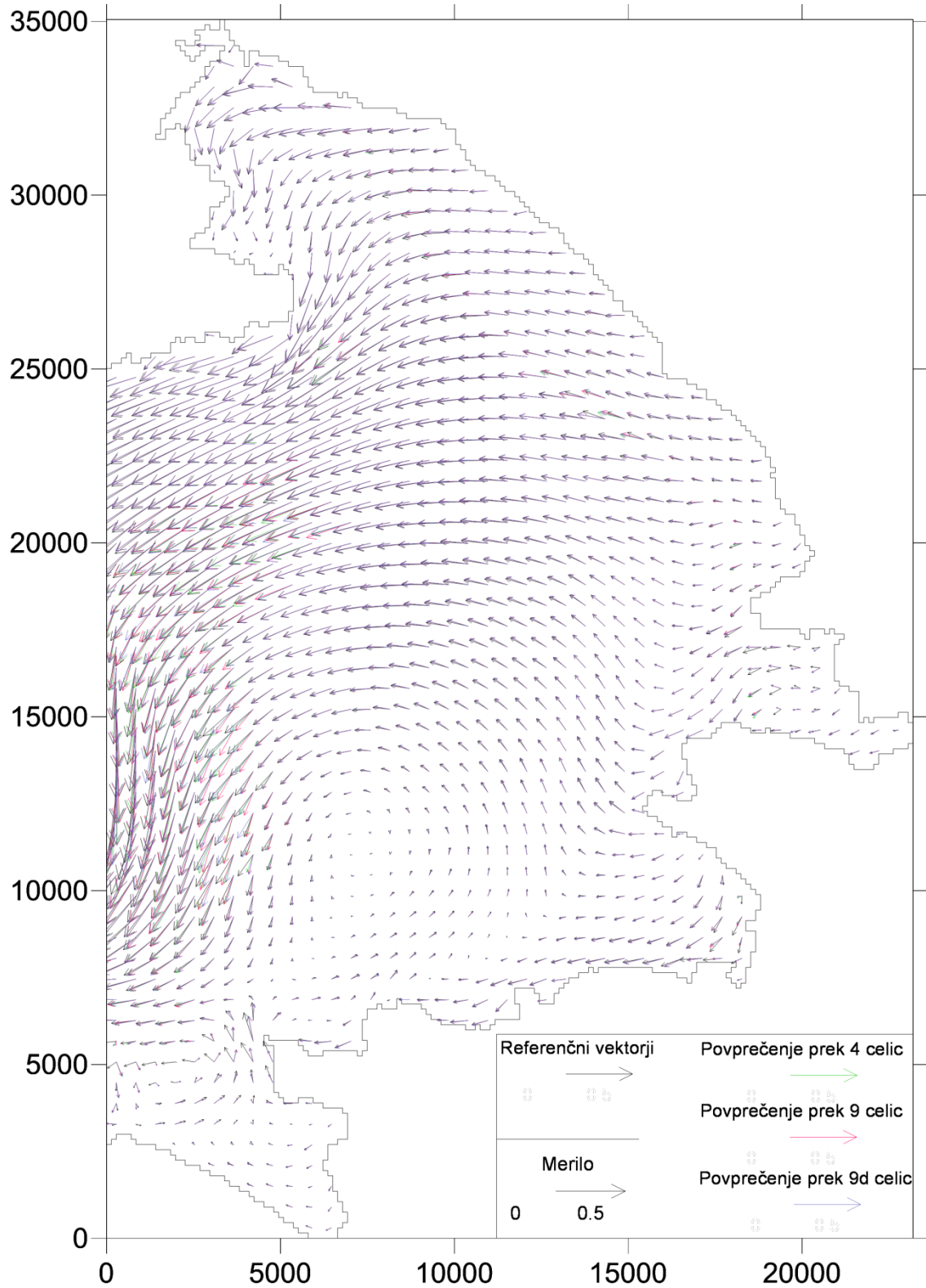
Slika 26: Hitrostno polje tokov po 60-ih urah na globini 10,5 m



Slika 27: Hitrostno polje tokov po 66-ih urah na globini 0,5 m

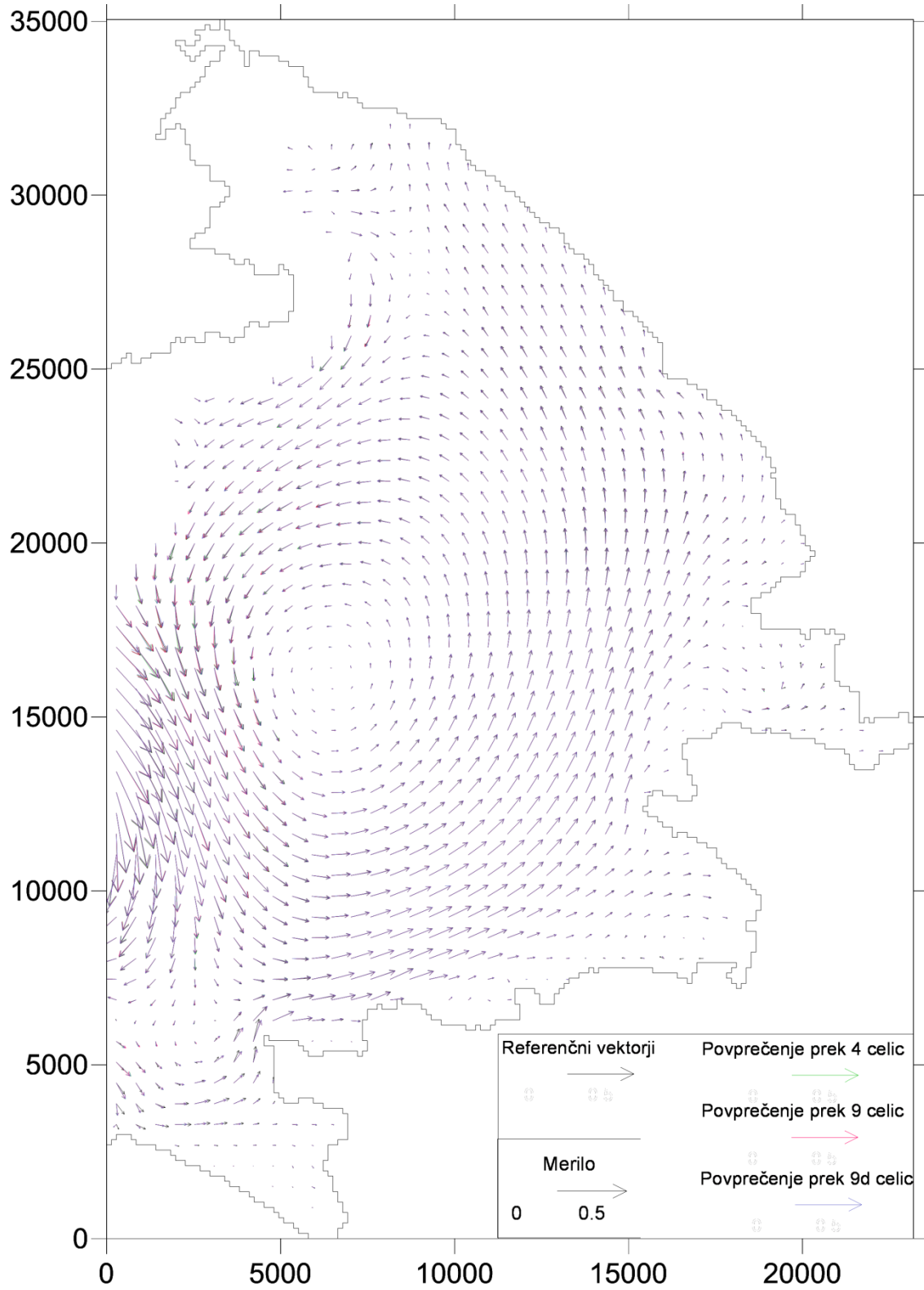


Slika 28: Hitrostno polje tokov po 66-ih urah na globini 10,5 m



Slika 29: Hitrostno polje tokov po 72-ih urah na globini 0,5 m





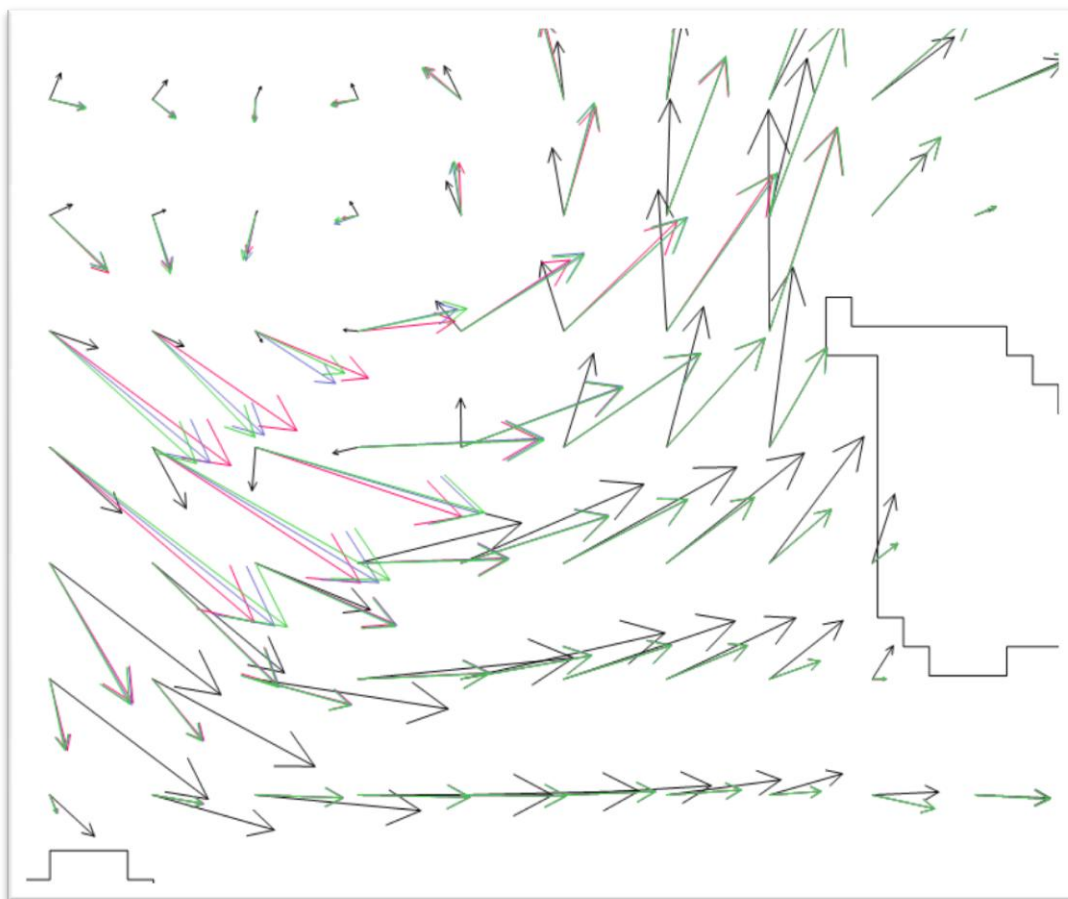
Slika 30: Hitrostno polje tokov po 72-ih urah na globini 10,5 m

Kakor je razvidno iz slik, ki prikazujejo vektorje hitrosti, so tudi vizualne razlike med referenčnimi ter povprečenimi vektorji tokov komaj opazne.

Na območjih večjih globin v sredini zaliva, torej tam, kjer imajo robni pogoji (predvsem obala in dno) manjši vpliv, vektorji sovpadajo v smeri in se le minimalno razlikujejo v velikosti.

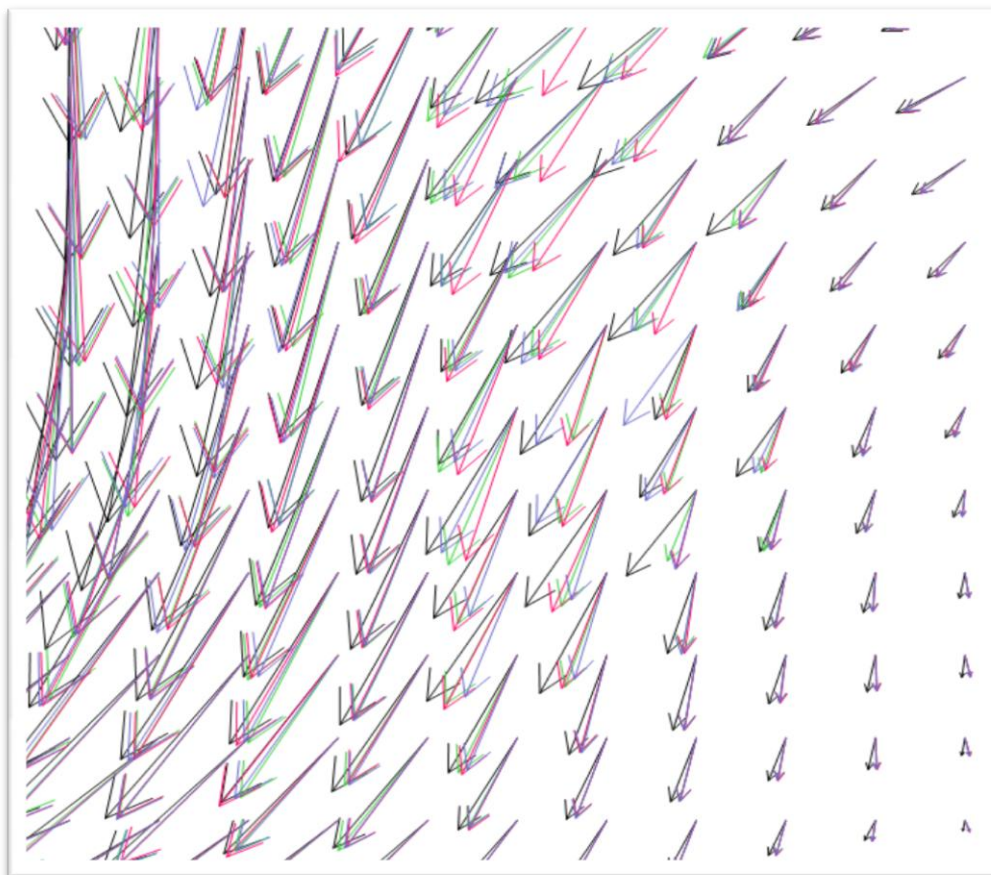
Časovno gledano se razlike zmanjšujejo, ko je veter bolj stacionaren v jakosti in smeri. Med 12. in 18. uro je nastopil obrat, zato so takrat (slika 9 do slika 12) razlike nekoliko večje, nato pa se postopoma zmanjšujejo, saj veter v kasnejših urah piha dlje časa v isti smeri in tudi z manj spremenljivo jakostjo. Če pa pogledamo vseh 72 ur kot celoto, opazimo trend rahlega povečevanje odstopanj s časom.

Večja odstopanja se pojavljajo na plitvejših območjih zaliva, torej v celotnem pasu ob obali. Na sliki 31 lahko opazimo, da je ponekod kot med vektorji večji od  $150^\circ$  in se približuje  $180^\circ$ , tudi razlike v velikosti so ponekod precejšnje.



Slika 31: Večje razlike med vektorji ob obali (24. ura na globini 10,5 m)

Prav tako opazimo nekoliko večja odstopanja v bližini odprtega roba zaradi tamkajšnjega robnega pogoja (slika 32):



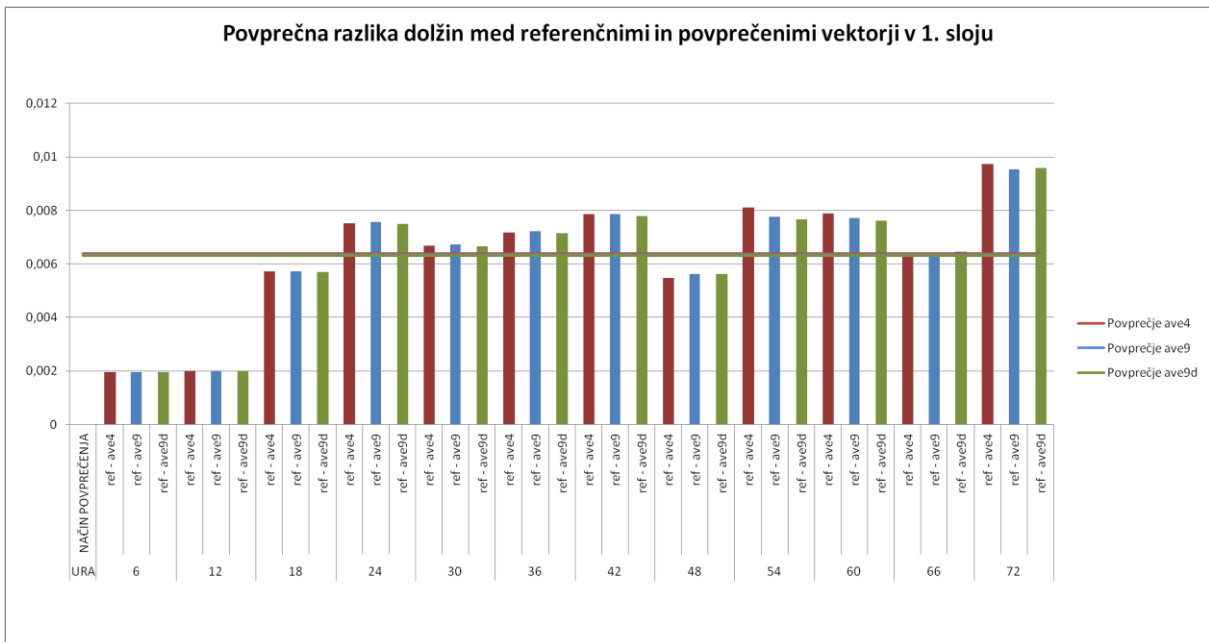
Slika 32: Večje razlike med vektorji na odprtem robu (48. ura na globini 0,5 m)

### 4.3 RAČUNSKI PRIKAZ VPLIVA POVPREČENEGA VETRA NA TOKOVE

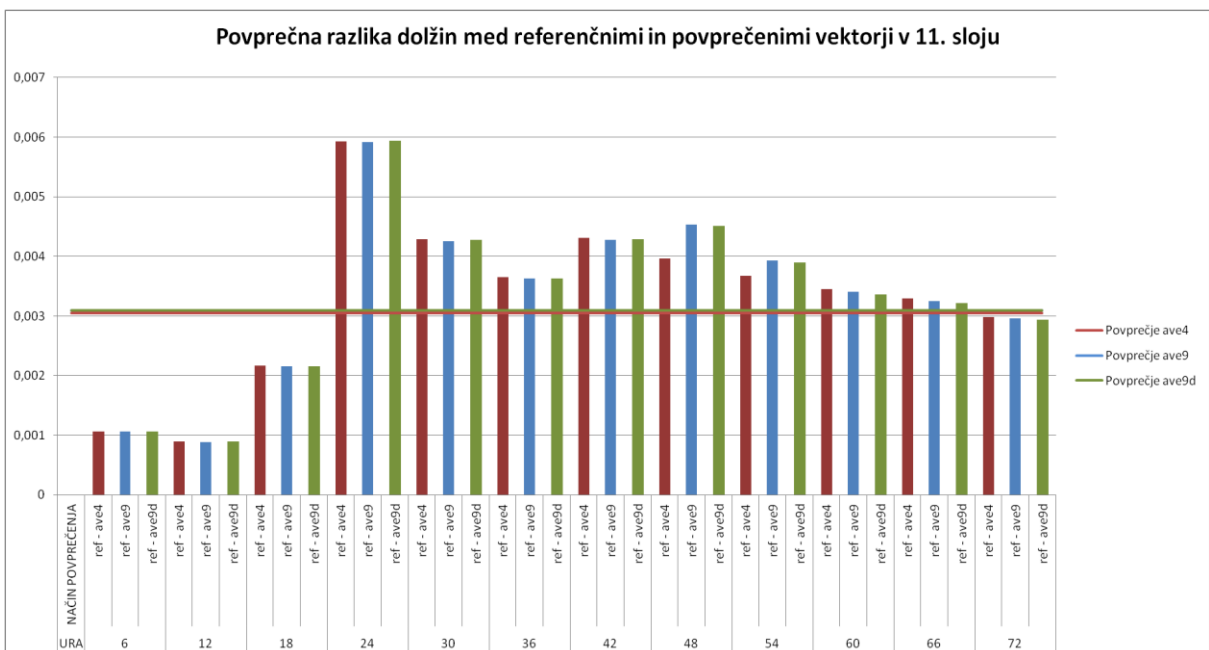
Pri grafični obdelavi in prikazu rezultatov smo ugotovili, da povprečenje vetra po tako majhnih območjih (4 oz 9 krat večja površina od referenčne) nima znatnega vpliva na cirkulacijo v Tržaškem zalivu ter da se povprečenja nekoliko razlikujejo le tam, kjer je vpliv robnih pogojev večji.

Da bi razlike kljub majhnim odstopanjem ovrednotili, smo rezultate obdelali še statistično z analizo odstopanja, kot je opisano v poglavjih 3.4 in 3.5. Izračuni so potrdili, da so odstopanja v povprečju zanemarljiva, saj ne presegajo nezanesljivosti hidrodinamičnega modela, niti zanesljivosti vhodnih podatkov.

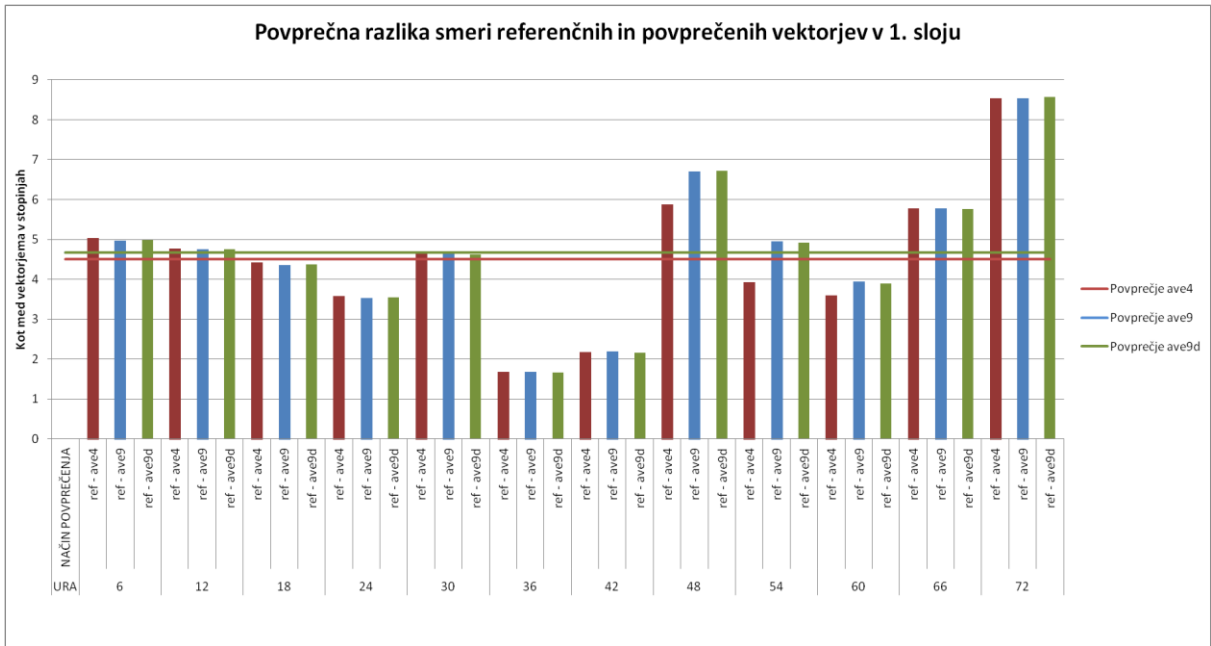
Povprečene vektorje smo primerjali z referenčnimi vektorji po dolžini, smeri ter njunem zmnožku, da bi zajeli obe razliki hkrati. Na grafikonih na slikah 33 do 38 smo prikazali razlike v dolžini med referenčnimi in povprečjem povprečenih vektorjev ave4, ave9 in ave9d.



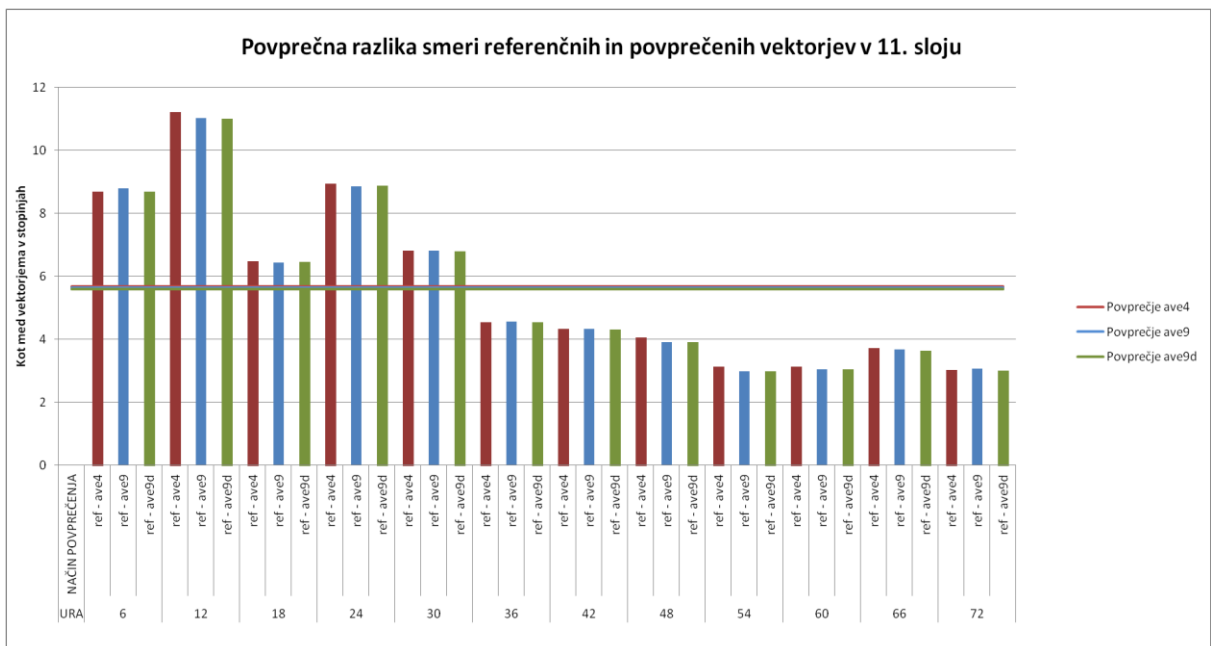
Slika 33: Grafikon povprečna razlika dolžin med referenčnimi in povprečenimi vektorji v 1. sloju



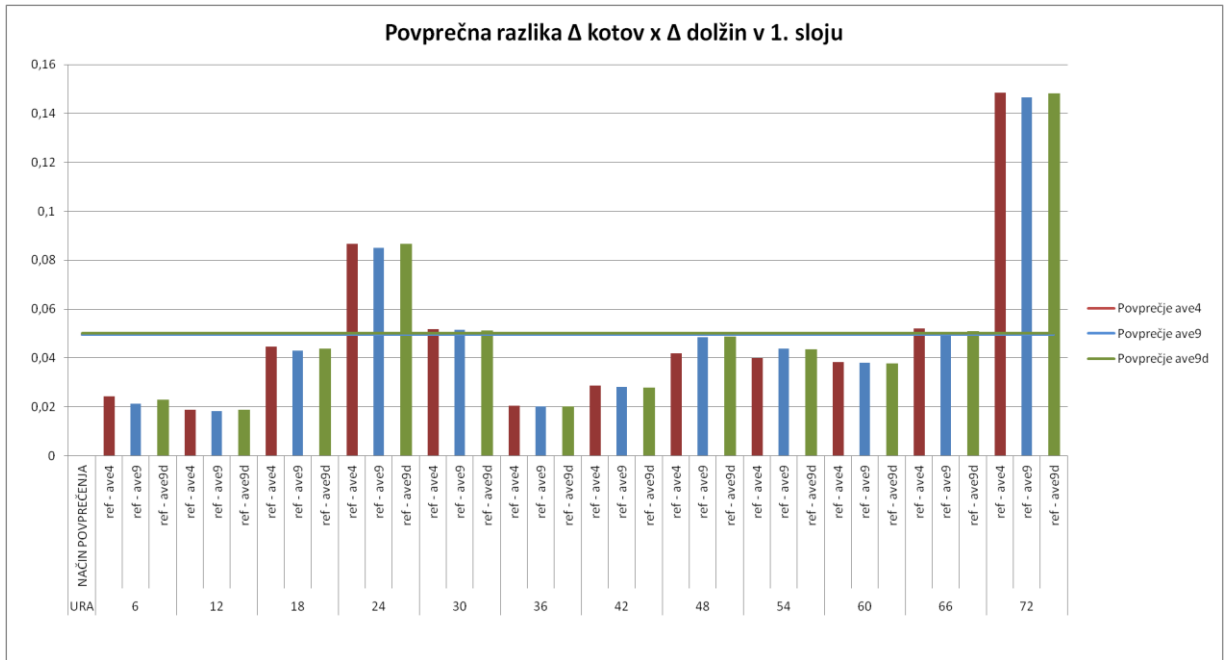
Slika 34: Grafikon povprečna razlika dolžin med referenčnimi in povprečenimi vektorji v 11. sloju



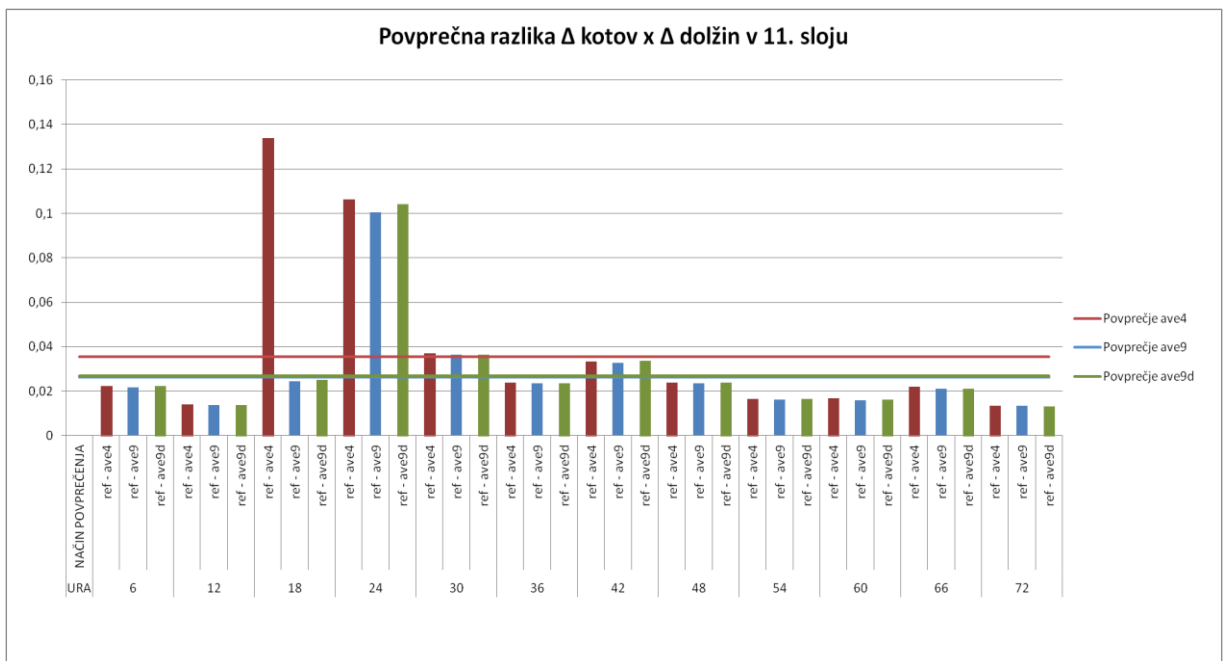
Slika 35: Grafikon povprečna razlika smeri referenčnih in povprečenih vektorjev v 1. sloju



Slika 36: Grafikon povprečna razlika smeri referenčnih in povprečenih vektorjev v 11. sloju



Slika 37: Grafikon povprečna razlika  $\Delta$  kotov x  $\Delta$  dolžin v 1. sloju



Slika 38: Grafikon povprečna razlika  $\Delta$  kotov x  $\Delta$  dolžin v 11. sloju

Na grafikonih so s horizontalno črto prikazana še povprečja odstopanj vseh treh povprečenj ave4, ave9 in ave9d. Vse tri vrednosti se pri vseh treh količinah in pri obeh globinah skorajda ne razlikujejo, izjema je le grafikon na sliki 38, kjer so povprečne velikosti razlik med referenčnimi in ave4 nekoliko večje, zaradi izrazitega odstopanja razlik kotov in dolžin v dvanajsti in osemnajsti uri.

Pri obdelavi rezultatov smo izračunali tudi standardno deviacijo razlik dolžin, kotov in njihovih zmnožkov. Kot lahko opazimo na primeru rezultatov v prvem sloju štiriindvajseto uro simulacij (preglednica 1), so standardne deviacije povsod večje od srednjih vrednosti, ponekod celo za red velikosti, zato jih v grafikonih ne prikazujemo. Podobne rezultate smo dobili v vseh izračunih, standardni odkloni v večini primerov znatno presegajo srednje vrednosti opazovane spremenljivke, kar pomeni, da je raztros rezultatov zelo velik. Na podlagi tega lahko sklepamo tudi, da bo na osnovi dobljenih rezultatov zelo težko pokazati kakršnekoli zakonitosti in povezave med odstopanji in povprečno jakostjo ali smerjo vetra.

Preglednica 2: Primer standardne deviacije 24. uro v prvem sloju

<b>24_1</b>	<b>POVPREČJE</b>	<b>MAKSIMUM</b>	<b>STANDARDNA DEVIACIJA</b>
<b>DOLŽINA</b>			
ref - ave4	0,007508441	0,127598	0,008970837
ref - ave9	0,007573607	0,110963	0,009062442
ref - ave9d	0,007501617	0,124577	0,008848236
<b>KOTI</b>			
ref - ave4	3,587462928	180	14,04138782
ave - ave9	3,528870825	180	13,64864185
ref - ave9d	3,541604362	180	13,8140981
<b><math>\Delta</math> KOTOV x <math>\Delta</math> DOLŽIN</b>			
ref - ave4	0,086759341	17,148746	0,708642273
ref - ave9	0,085120288	18,237175	0,693732455
ref - ave9d	0,086785042	19,907927	0,719160687

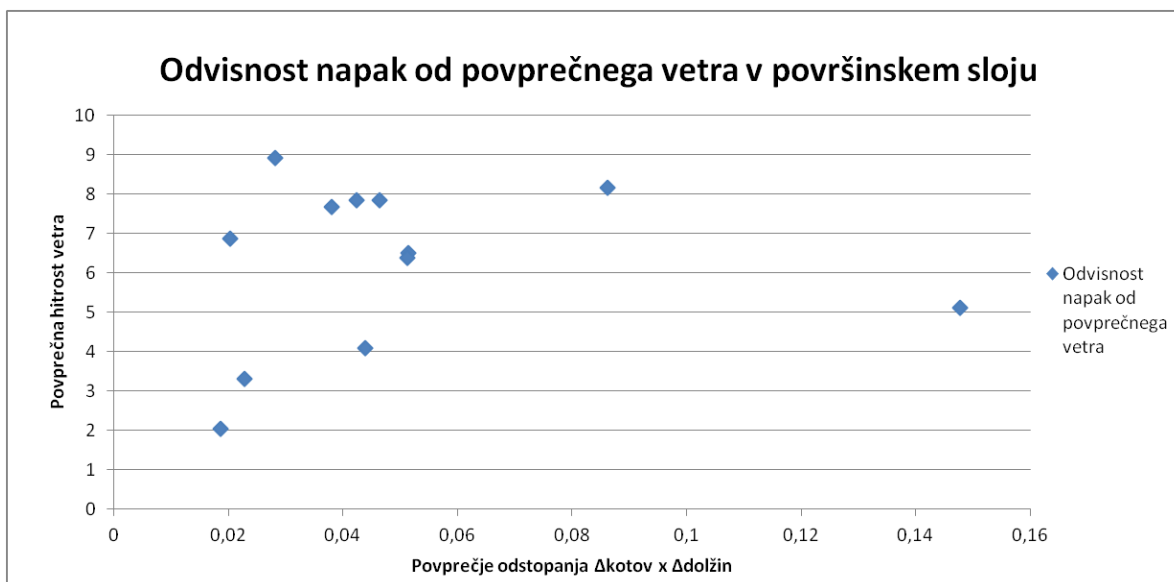
#### 4.4 ODVISNOST NAPAK OD POVPREČNEGA VETRA

Na koncu smo kljub izračunanim visokim standardnim odklonom poskusili poiskati odvisnost med povprečno jakostjo vetra in odstopanji pri povprečenju tokov na različne načine. Opazili smo namreč, da so odstopanja pri nekaterih urah večja kot pri drugih, zato nas je zanimalo ali pa mogoče le obstaja kakšna povezava med vetrom in razlikami med referenčnimi in povprečenimi vrednostmi.

Rezultat smo prikazali v raztresenem grafikonu (slika 39). Na X os smo nanašali povprečja vseh treh povprečenj zmnožkov razlik kotov in dolžin, da bi zmanjšali vpliv nekaterih močno izstopajočih podatkov (npr. ref - ave4 pri osemnajsti uri, ki ga opazimo na grafikonu na sliki 38, saj se drugače povprečenja skoraj niso razlikovala.

V grafikonu regresijske premice sploh nismo poskusili narisati, saj je korelacija med obema spremenljivkama že na prvi pogled zelo nizka. Če bi se izkazalo, da so napake večje pri močnejšem vetru, bi lahko sklepali, da je v tem primeru »opotekanje« vektorjev okrog referenčne smeri manjše, v nasprotnem primeru bi bilo mogoče sklepati, da šibkejši veter povzroči tokove, ki so bližje tistim ob referenčnem vetru.

Mogoče bi bilo izdelati tudi drugačne raztresene grafikone, vendar pa pri razmeroma majhnih razlikah tokov in izrazitih standardnih odklonih ni pričakovati, da bi lahko iz dobljenih rezultatov pokazali kakršnekoli zakonitosti oz. povezave med odstopanji povprečenih podatkov in rezultatov.



Slika 39: Grafikon odvisnost napak od povprečnega vetra v površinskem sloju na globini 0,5 m



## 5. ZAKLJUČKI IN NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO

V nalogi smo obravnavali krajevno povprečenje dejanskega vetra nad Tržaškim zalivom in njegov vpliv na cirkulacijo v zalivu. Uporabili smo dve različni velikosti območja povprečevanja vetra (prek štirih in prek devetih celic) ter dva načina povprečenja (normalno in drseče povprečenje prek devetih celic) ter povprečene vrednosti primerjali z referenčnimi podatki, pridobljenimi z modelom ALADIN. Namen naloge je bilo ugotavljanje razlik v smeri in velikosti vektorjev tokov pri prostorskem povprečenju vetra v primerjavi z vektorji tokov pri referenčnem vetru.

Med seboj smo primerjali rezultate po šesturnih intervalih dvainsedemdeset ur trajajoče simulacije v slojih na dveh globinah – 0,5m in 10,5m. Po grafični in računski obdelavi rezultatov simulacije lahko zaključimo, da so odstopanja pri povprečenju vetra na tako majhnih območjih prenizka, da bi pomembno vplivala na cirkulacijo v Tržaškem zalivu, zato lahko brez tveganja za večja odstopanja v tokovih za simulacije uporabimo katerakoli obravnavana povprečena vetrovna polja. Napake, ki jih s tako izvedenim krajevnim povprečenjem naredimo, ne presegajo nezanesljivosti simulacij z modelom PCFLOW3D, niti nezanesljivosti v podatkih, pridobljenih z numeričnim meteorološkim modelom ALADIN.

Rezultate bi sicer lahko obdelali še natančneje z dodatnimi statističnimi analizami računskih odstopanj, vendar je veliko bolj smiselno postopek ugotavljanja razlik v prihodnosti ponoviti pri povprečenjih prek večjega števila celic, torej na večjem območju (prek šestnajstih, petindvajsetih ali šestintridesetih celic).

Pri večjih odstopanjih bi bilo verjetno lažje ugotoviti, ali pa morda le obstaja kakšna zakonitost oziroma povezava med močjo in/ali smerjo vetra ter velikostjo odstopanja med referenčnimi in povprečenimi vektorji tokov.

## VIRI

- Četina, M. 1992. Tridimenzionalni matematični baroklini model za izračun tokov v jezerih in morju. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FAGG, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer (samozaložba M. Četina): 72 f.
- Dorić, E. 2007. Možnosti uporabe modela MIKE 3 v Tržaškem zalivu. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo (samozaložba E. Dorić): 77 f.
- Kovšca, J. 2007. Dopolnitve modela PCFLOW3D za simulacijo tokov in širjenja polutantov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer (samozaložba J. Kovšca): 67 f.
- Ličer, M., Žagar, D., Jeromel, M. in Vodopivec, M. 2012. Numerični modeli za določanje stanja morja v Jadranskem bazenu. Ujma: 164-167.
- Maslo, A. 2009. Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Hidrotehnična smer (samozaložba A. Maslo): 86 f.
- Novak, B. 2013. Račun hidrodinamičnih količin v Tržaškem zalivu zaradi spremenljivih meteoroloških parametrov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer (samozaložba B. Novak): 35 f.
- Orožen Adamič, M. Geomorfološke značilnosti Tržaškega zaliva in obrobja [Online]. Available: <http://www.dlib.si/stream/URN:NBN:SI:doc-XC29BUUP/8e791642-6a87-4156-8964-9f9537aa7285/PDF> (Pridobljeno 1. 9. 2014.)
- Rajar, R. in Četina, M. 1997. Hydrodynamic and water quality modelling: An experience. *Ecological Modelling* 101: 195-207.
- Rajar, R., Četina, M. in Širca, A. 1997. Hydrodynamic and water quality modelling: case studies. *Ecological Modelling* 101: 209-228.
- Rajar, R., Žagar, D., Širca, A. in Horvat, M. 2000. Three-dimensional modelling of mercury cycling in the Gulf of Trieste. *The Science of The Total Environment* 260: 109-123.
- Rajar, R., Žagar, D., Četina, M., Akagi, H., Yano, S., Tomiyasu, T. in Horvat, M. 2004. Application of three-dimensional mercury cycling model to coastal seas. *Ecological Modelling* 171: 139-155.
- Ramšak, V. 2007. Simulacija hidrodinamike s spremenljivim vetrom z modelom PCFLOW3D. Seminarska naloga na podiplomskem študiju. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer (samozaložba V. Ramšak): 28 f.
- Ramšak, V., Malačič, V., Ličer, M., Kotnik, J., Horvat, M. in Žagar, D. 2013. High-resolution pollutant dispersion modelling in contaminated coastal sites. *Environmental Research* 125: 103-112.
- Rozman, S. 2005. Simulacija transporta in disperzije živega srebra v Tržaškem zalivu z modelom PCFLOW3D. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo (samozaložba S. Rozman): 91 f.

Žagar, D. 1994. Tridimenzijski model za simulacijo širjenja nafte. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FAGG (samozaložba D. Žagar): 68 f.

Žagar, D. 1999. Development and Application of a Three-Dimensional Model to Simulate Mercury Transport and Transformation Process in the Marine Environment. *Acta Hydrotechnica* 17: 68.

Žagar, D., Rajar, R., Četina, M. in Horvat, M. 2001. Long-term 3D simulation of the transport and dispersion of mercury in the Gulf of Trieste. *Acta Hydrotechnica* 19: 25

Žagar, D., Petkovšek, G., Rajar, R., Sirnik, N., Horvat, M., Voudouri, A., Kallos, G. in Četina, M. 2007. Modelling of mercury transport and transformations in the water compartment of the Mediterranean Sea. *Marine Chemistry* 107: 64-88.

Žagar, D., Ramšak, V., Ličer, M., Petelin, B., Malačič, V. 2012. Uporaba numeričnih modelov ob razlitjih nafte na morju = Application of numerical models of oil spills in the sea. *Ujma*, 24: 168-174.