

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:

Praznik, A., 2014. Simulacije širjenja onesnažil iz rek v severnem Jadranu po metodi sledenja delcev. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Žagar, D., somentor Ličer, M.): 64 str.

Datum arhiviranja: 09-06-2014

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:

Praznik, A., 2014. Simulacije širjenja onesnažil iz rek v severnem Jadranu po metodi sledenja delcev. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Žagar, D., co-supervisor Ličer, M.): 64 pp.

Archiving Date: 09-06-2014

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 VODARSTVO IN
KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Kandidatka:

ANJA PRAZNIK

**SIMULACIJE ŠIRJENJA ONESNAŽIL IZ REK V
SEVERNEM JADRANU PO METODI SLEDENJA
DELCEV**

Diplomska naloga št.: 230/VKI

**SIMULATIONS OF POLLUTANT SPREADING FROM
RIVERS IN THE NORTHERN ADRIATIC USING
PARTICLE TRACKING METHOD**

Graduation thesis No.: 230/VKI

Mentor:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Somentor:

dr. Matjaž Ličer

Član komisije:

prof. dr. Mitja Brilly
izr. prof. dr. Jože Panjan
doc. dr. Mojca Šraj

Ljubljana, 23. 05. 2014

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

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

IZJAVE

Podpisana Anja Praznik izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Simulacije širjenja onesnažil iz rek v Severnem Jadranu po metodi sledenja delcev«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju.

Ljubljana, 9. 5. 2014

Anja Praznik

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK	504.5:532.5:551.3(043.2)
Avtor	Anja Praznik
Mentor	izr. prof. dr. Dušan Žagar
Somentor	dr. Matjaž Ličer
Naslov	Simulacije širjenja onesnažil iz rek v Severnem Jadranu po metodi sledenja delcev
Tip dokumenta	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema	64 str., 2 pregl., 94 sl., 1. graf.
Ključne besede:	onesnažila, Severni Jadran, Soča, Pad, model NAFTA3d, metoda sledenja delcev

Izvleček

Z modelom NAFTA3d, ki deluje po metodi sledenja delcev, smo izvedli sezonske simulacije širjenja potencialnih onesnažil iz dveh večjih rek, ki se izlivata v Severni Jadran. V nalogi prikazujemo koncentracije in ustrezna polja tokov za nekaj izbranih situacij, v katerih so se na nekaterih območjih pojavile povišane koncentracije delcev. Uporabili smo z modelom NAPOM izračunana dnevna povprečja hitrostnih polj za leto 2012 in opazovali gibanje onesnažil z različno plovnostjo. Delci z gostoto večjo od gostote morske vode so potonili blizu izliva. Delci z nevtralno plovnostjo so se porazdelili po vodnem stolpcu, povišane koncentracije se pri vtoku Soče pojavljajo blizu izliva, od Pada pa se širijo proti vzhodni obali Severnega Jadrana. Plavajoči delci iz Soče se večinoma gibljejo v smeri generalne cirkulacije v Severnem Jadranu: potujejo ob severni obali do Benetk in naprej do izliva Pada, lahko pa se v določenih razmerah tudi koncentrirajo v madež s središčem na koordinatah 44° 55' S in 13° E. Plavajoči delci iz Pada potujejo najprej proti jugovzhodu in nato proti vzhodu, vendar pa zaradi bližine odprtega roba te simulacije niso popolnoma zanesljive. Koncentracije so najvišje pri plavajočih delcih, ki zaradi hitrejših tokov na gladini tudi najhitreje potujejo.

BIBLIOGRAPHIC- DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC	504.5:532.5:551.3(043.2)
Author	Anja Praznik
Supervisor	Assoc. Prof. Dušan Žagar, PhD
Co-advisor	Matjaž Ličer, PhD
Title	Simulations of pollutant spreading from rivers in the Northern Adriatic using particle tracking method
Document type	Graduation Thesis – University studies
Notes	64 p., 2 tab., 94 fig., 1. graph.
Key words	pollutants, Northern Adriatic, Soča, Po, NAFTA3d model, particle tracking method

Abstract

Seasonal simulations of potential pollutant spreading from two major rivers, Soča (Isonzo) and Po were performed using the particle-tracking based model NAFTA3d. We show concentrations and adequate circulation fields for a few typical situations with elevated concentrations in different parts of the computational domain. Daily circulation fields for the entire year 2012 were obtained from the NAPOM model. Particles with different relative density were observed. The particles with negative buoyancy sank to the sea-bottom close to the river mouth. The particles with neutral buoyancy dispersed throughout the water column; elevated concentrations from the Soča river inflow occurred in the vicinity river mouth, while particles from the river Po spread towards the eastern coast of the Northern Adriatic. Buoyant particles from the Soča mostly spread with the general circulation in the Northern Adriatic: along the northern coast towards Venice and further south to the Po river mouth. In certain conditions the floating particles can concentrate in a slick with coordinates of the centre at 44° 55' S in 13° E. Buoyant particles from the Po spread towards south-east and further to the east. However, these simulations are less reliable because of the vicinity of the open boundary. Highest concentrations occur with floating particles which also move faster due to stronger currents at the sea surface.

ZAHVALA

Za izdelavo diplomske naloge se v prvi vrsti zahvaljujem svojemu mentorju, izr. prof. dr. Dušanu Žagarju, ki mi je pomagal s vsem svojim strokovnim znanjem in bogatimi izkušnjami ter prav tako tudi somentorju, dr. Matjažu Ličerju, ki mi je naklonil kar nekaj svojega časa. Za psihično podporo se iz srca zahvaljujem svojemu možu, Franciju, in seveda staršema, ki so me podpirali že pri samem vpisu na to fakulteto, ne nazadnje pa tudi svojim prijateljem, še posebej Suzani Pavlič in Anji Žogan, ki so me zabavali in spodbujali skozi študijsko obdobje.

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC- DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTACT.....	IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO GRAFIKONOV	VIII
KAZALO SLIK	IX
1 UVOD	1
1.1 Hipoteze in cilji	3
2 METODE	4
2.1 Model NAFTA3d.....	4
2.2 Spremembe v modelu	5
2.3 Vhodni podatki za vse primere.....	5
3 REZULTATI.....	7
3.1 Vtok s Sočo	7
3.1.1 Negativna plovnost - relativna gostota = 1.4.....	7
3.1.2 Nevtralna plovnost	9
3.1.3 Plavajoči delci, relativna gostota = 0,6	30
3.2 Vtok s Padom.....	51
3.2.1 Nevtralna plovnost	51
3.2.2 Pozitivna plovnost	52
4 ZAKLJUČEK	61
VIRI	62

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Debeline slojev in globine mej med sloji.....	6
Preglednica 2: Količina usedlih delcev in razdalje od ustja Soče v intervalih po 1 km za delce z relativno gostoto 1,4.....	8

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Količina usedlih delcev in razdalje od ustja Soče v intervalih po 1 km za delce z relativno gostoto 1,4.....	8
--	---

KAZALO SLIK

Slika 1: Slika Severnega Jadrana (Google Earth; pridobljeno 11.3.2014).....	3
Slika 2: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 12.2.2012 na globini 3 m.....	9
Slika 3: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 13.2.2012 na globini 3 m.....	10
Slika 4: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 14.2.2012 na globini 3 m.....	10
Slika 5: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 15.2.2012 na globini 3 m.....	11
Slika 6: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 16.2.2012 na globini 3 m.....	11
Slika 7: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 17.2.2012 na globini 3 m.....	12
Slika 8: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 18.2.2012 na globini 3 m.....	12
Slika 9: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 19.2.2012 na globini 3 m.....	13
Slika 10: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 19.2.2012 v globini 3,2 m pri nevtralni plovnosti....	13
Slika 11: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 29.4.2012 v globini 4,2 m pri nevtralni plovnosti....	14
Slika 12: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 29.4.2012 na globini 4 m.....	15
Slika 13: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 30.4.2012 na globini 4 m.....	15
Slika 14: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 1.5.2012 na globini 4 m.....	16
Slika 15: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 2.5.2012 na globini 4 m.....	16
Slika 16: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 3.5.2012 na globini 4 m.....	17
Slika 17: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 4.5.2012 na globini 4 m.....	17
Slika 18: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 5.5.2012 na globini 4 m.....	18
Slika 19: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 6.5.2012 na globini 4 m.....	18
Slika 20: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 6.5.2012 v globini 4,2 m pri nevtralni plovnosti.....	19
Slika 21: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 21.7.2012 v globini 4,2 m pri nevtralni plovnosti....	20
Slika 22: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 21.7.2012 na globini 4 m.....	20
Slika 23: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 22.7.2012 na globini 4 m.....	21
Slika 24: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 23.7.2012 na globini 4 m.....	21
Slika 25: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 24.7.2012 na globini 4 m.....	22
Slika 26: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 25.7.2012 na globini 4 m.....	22
Slika 27: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 26.7.2012 na globini 4 m.....	23
Slika 28: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 27.7.2012 na globini 4 m.....	23
Slika 29: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 28.7.2012 na globini 4 m.....	24
Slika 30: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 28.7.2012 v globini 4,2 m pri nevtralni plovnosti....	24
Slika 31: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 11.11.2012 na globini 2 m.....	25
Slika 32: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 12.11.2012 na globini 2 m.....	26
Slika 33: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 13.11.2012 na globini 2 m.....	26
Slika 34: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 14.11.2012 na globini 2 m.....	27
Slika 35: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 15.11.2012 na globini 2 m.....	27
Slika 36: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 16.11.2012 na globini 2 m.....	28
Slika 37: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 17.11.2012 na globini 2 m.....	28
Slika 38: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 18.11.2012 na globini 2 m.....	29
Slika 39: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 18.11.2012 v globini 2,2 m pri nevtralni plovnosti..	29
Slika 40: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 4.3.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6	30

Slika 41: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 4.3.2012 na globini 0,4 m	31
Slika 42: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 6.3.2012 na globini 0,4 m	31
Slika 43: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 8.3.2012 na globini 0,4 m	32
Slika 44: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 9.3.2012 na globini 0,4 m	32
Slika 45: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 10.3.2012 na globini 0,4 m	33
Slika 46: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 11.3.2012 na globini 0,4 m	33
Slika 47: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 11.3.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6	34
Slika 48: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 13.5.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6	35
Slika 49: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 13.5.2012 na globini 0,4 m	35
Slika 50: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 14.5.2012 na globini 0,4 m	36
Slika 51: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 15.5.2012 na globini 0,4 m	36
Slika 52: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 16.5.2012 na globini 0,4 m	37
Slika 53: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 17.5.2012 na globini 0,4 m	37
Slika 54: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 18.5.2012 na globini 0,4 m	38
Slika 55: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 19.5.2012 na globini 0,4 m	38
Slika 56: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 20.5.2012 na globini 0,4 m	39
Slika 57: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 20.5.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6	39
Slika 58: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 29.7.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6	40
Slika 59: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 29.7.2012 na globini 0,4 m	41
Slika 60: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 30.7.2012 na globini 0,4 m	41
Slika 61: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 31.7.2012 na globini 0,4 m	42
Slika 62: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 1.8.2012 na globini 0,4 m	42
Slika 63: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 2.8.2012 na globini 0,4 m	43
Slika 64: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 3.8.2012 na globini 0,4 m	43
Slika 65: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 4.8.2012 na globini 0,4 m	44
Slika 66: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 5.8.2012 na globini 0,4 m	44
Slika 67: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 5.8.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6	45
Slika 68: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 11.11.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6	46
Slika 69: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 11.11.2012 na globini 0,4 m	46
Slika 70: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 12.11.2012 na globini 0,4 m	47
Slika 71: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 13.11.2012 na globini 0,4 m	47
Slika 72: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 14.11.2012 na globini 0,4 m	48
Slika 73: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 15.11.2012 na globini 0,4 m	48
Slika 74: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 16.11.2012 na globini 0,4 m	49
Slika 75: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 17.11.2012 na globini 0,4 m	49
Slika 76: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 18.11.2012 na globini 0,4 m	50
Slika 77: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 18.11.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6	50
Slika 78: Koncentracije delcev iz Pada 21.7.2012 v globini 2,2 m pri nevtralni plovnost.....	51

Slika 79: Koncentracije delcev iz Pada 21.7.2012, globina 2,2 m, relativna gostota 0,99.....	52
Slika 80: Koncentracije delcev iz Pada 14.7.2012, površinski sloj, relativna gostota 0,9	53
Slika 81: Koncentracije delcev iz Pada 21.7.2012, globina 2,2 m, relativna gostota 0,95.....	53
Slika 82: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 20.7.2012 na globini 2 m.....	54
Slika 83: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 21.7.2012 na globini 2 m.....	54
Slika 84: Koncentracije delcev iz Pada 14.7.2012, površinski sloj, relativna gostota 0,8	55
Slika 85: Koncentracije delcev iz Pada 7.7.2012, površinski sloj, relativna gostota 0,6	55
Slika 86: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 7.7.2012 na globini 0,4 m.....	56
Slika 87: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 8.7.2012 na globini 0,4 m.....	56
Slika 88: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 9.7.2012 na globini 0,4 m.....	57
Slika 89: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 10.7.2012 na globini 0,4 m.....	57
Slika 90: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 11.7.2012 na globini 0,4 m.....	58
Slika 91: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 12.7.2012 na globini 0,4 m.....	58
Slika 92: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 13.7.2012 na globini 0,4 m.....	59
Slika 93: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 14.7.2012 na globini 0,4 m.....	59
Slika 94: Koncentracije delcev iz Pada 14.7.2012, površinski sloj, relativna gostota 0,6	60

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Tekoče vode s seboj prenašajo različne raztopljene in na delce vezane snovi, ki so lahko naravnega ali antropogenega izvora. Te snovi se lahko vzdolž rek ob nizkih pretokih odlagajo, ob višjih pretokih pa se sposobnost in količina prenosa snovi s tokom zopet poveča. Kadar reke poplavlajo, se odplaknejo tudi večji plavajoči predmeti, od velikih okroglih bal, do vej dreves ali celih debel, vse, kar ima gostoto manjšo od gostote vode. Z vodotoki v teh razmerah potuje tudi velika količina rinjenih in lebdečih plavin ter različne snovi, ki so raztopljene v vodi. Vse to lahko s skupnim imenom imenujemo onesnažila, ki potujejo po reki in na koncu prispejo v morje, kamor se reka izliva. Tam so razmere drugačne, tokovi so počasnejši, zato se lebdeči delci usedajo v bližini rečnega ustja. Koncentracije raztopljenih snovi se zaradi velikosti vodnega telesa zmanjšajo. Tudi koncentracija plavajočih delcev se v morju zmanjša. Prenos onesnažil pa se dogaja tudi pri običajnih tokovnih razmerah. Takrat reke s seboj nosijo nižje koncentracije manjših delcev, tako plavajočih kot raztopljenih, pa tudi manjše količine plavin.

Širjenje onesnažil v priobalnem morskem okolju lahko razmeroma dobro opišemo z matematičnimi modeli. Problema se lotevamo s t.i. transportno disperzijskimi modeli, ki so na osnovi poznavanja hitrostnega polja (cirkulacije) na določenem območju sposobni opisati premikanje onesnažil in izračunati porazdelitev njihovih koncentracij v prostoru in času. Na območju Tržaškega zaliva in Severnega Jadrana je bilo doslej izvedenih veliko raziskav povezanim s širjenjem onesnažil. Poleg številnih objav drugih avtorjev so se tudi na UL FGG v sodelovanju z Inštitutom Jožef Stefan in Nacionalnim inštitutom za biologijo izvajale modelne raziskave transporta in pretvorb živega srebra (Širca, 1996; Rajar in sod., 1997; Horvat in sod., 1999; Širca in sod., 1999; Žagar, 1999; Žagar in sod., 2001; Rajar in sod., 2004; Žagar in sod., 2006; Ramšak, 2005; Ramšak in sod., 2013), širjenja nafte ob morebitnih razlitjih (Žagar, 1994; Galuf, 2005; Jeglič, 2010; Žagar in sod., 2012; Ramšak in sod., 2013; Šoško, 2012) in modeliranje širjenja hranil in koliformnih bakterij (Centa, 2008). Razvitih in dopoljenih je bilo tudi več numeričnih modelov, ki omogočajo simulacije po Eulerjevem ali Lagrangeovem pristopu (Četina, 1992; Širca, 1992; Žagar, 1994; Rajar in Četina, 1997; Žagar, 1999; Galuf, 2005; Žagar in sod., 2007; Žagar in Četina, 2011).

Kadar onesnaženje opisujemo z diskretnimi delci, za simulacije uporabljamo t.i. metodo sledenja delcev (MSD, angleško particle tracking method, PTM), ki lahko z nekaterimi dopolnili modela simulira tudi bio-geokemične procese razgradnje. Eden takih modelov, ki je bil razvit na UL FGG, je tudi model NAFTA3d (Žagar in Četina, 2011), ki je v osnovi namenjen modeliranju transporta in razgradnje razlite nafte, vendar ga z nekaj popravki lahko priredimo tudi za simulacije drugih onesnažil na poljubnih območjih.

Začetki modela NAFTA3d segajo v leto 1994, ko je Žagar (1994) izpopolnil model PT3D (Širca, 1992) s procesi razgradnje nafte in možnostjo simulacij delcev z različno plovnostjo (relativno gostoto glede na gostoto vode). Takratni prvi ekološki model, imenovan SIMON, je bil sestavljen iz treh modulov: hidrodinamičnega (HD), transportno-disperzijskega (TD) in biokemijskega (BK). Hidrodinamični je bil zajet s tridimenzionalnim modelom TRIDIM, zasnovanem na podlagi enačb o ohranitvi mase, gibalne količine in transporta poljubnega pasivnega skalarja (temperatura, slanost, koncentracija kemijskih in bioloških snovi). Podaja podatke o tokovih v vodi, ki so posledica vetra,

gostotnih tokov, vtokov rek in plimovanja. Transportno-disperzijski del je na nek način glavni del modela, namenjen je simulaciji širjenja nafte, v konkretnem primeru je uporabljen tridimenzionalni Lagrangeov PT3D model (Širca, 1992), ki deluje na osnovi sledenja delcev. Turbulentno difuzijo obravnava stohastično z metodo naključnih korakov. V biokemijskem modulu simuliramo fizikalne, kemijske in biološke procese, ki se dogajajo ob razgradnji nafte (Žagar, 1994).

Program SIMON je bil napisan za okolje DOS, Galuf (2005) ga je priredil za okolje Windows in izdelal model NAFTA2, ki ga je prepisal v C++, zaradi česar so se računi izvajali hitreje. Popravil je vnos vhodnih podatkov in uredil programska okna.

Leta 2011 je bil izdelan model NAFTA3d, s katerim lahko izvedemo simulacije na različnih območjih (izvedene so bile simulacije na območju Tržaškega zaliva, Severnega Jadrana, Ligurskega morja, območja ob obali Libanona ter drugih). V program so vgrajene dodatne enačbe za računanje disperzije nafte v vodnem stolpcu, spremembe viskoznosti in emulzifikacije. V Ujmi (Žagar in sod., 2012) sta predstavljena dva primera razlitja nafte v tržaškem zalivu. Prvi prikazuje simulacije realnih meteoroloških situacij med 19. in 21. marcem 2009, ko sta se v kratkem času zgodila dva obrata vetra (jugo-burja-jugo) ter se je hkrati povečal pretok reke Soče, drugi pa prikazuje potencialno razlitje 500 ton nafte pred Koprskim zalivom ob močni burji.

Leta 2012 je bila preizkušena tudi možnost modeliranja nafte po metodi trajektorij, kjer z zaporedjem izračunov poskušamo določiti verjetnost pojava naftnega madeža na nekem območju na vodni površini. Naftni madež je opisan kot delec oz. skupek delcev z začetno maso, ki se izgublja z procesi, ki so vključeni v model. Diploma (Šoško, 2012) prikazuje dva scenarija, prvi obravnava možno razlitje na znanih koordinatah pred Koprskim zalivom, drugi, za katerega so koordinate prav tako znane, pa se zgodi pred pristaniščem v Trstu.

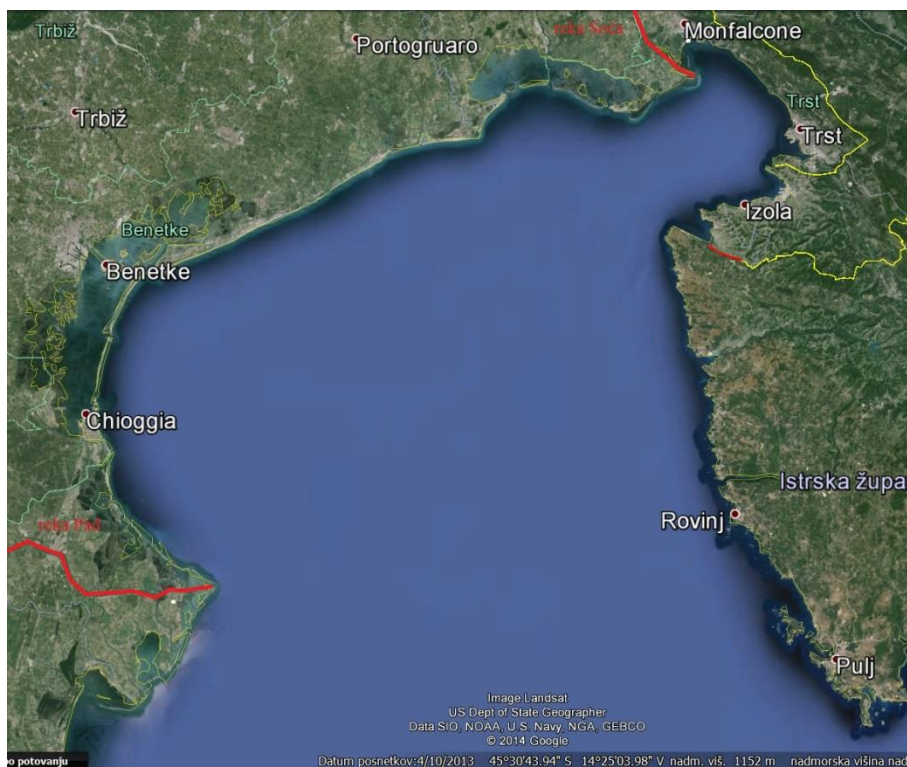
Modeli po metodi MSD so bili za dolgoročne simulacije širjenja onesnažil doslej redko uporabljeni. Četina in sod. (2000) so simulirali transport in razgradnjo radioaktivnih onesnažil v Japonskem morju z dolgoročno povprečnimi hitrostnimi polji. Ostale dolgoročne simulacije širjenja onesnažil pa so bile izvedene z modeli, ki delujejo po metodi kontrolnih volumnov, konkretno z modelom PCFLOW3D ali njegovimi izpeljankami. Četina (1997) je v članku objavil širjenje onesnažil iz reke Pad marca 1991. Uporabil je matematični model LMT3D, ki je bil razvit prav za simulacijo transporta pretoka in mase onesnažil iz jezer in obalnih morij. Konkretno je bilo opisano širjenje onesnažil iz reke Pad v Severnem Jadranu, ki je primerljivo z meritvami temperature in slanosti na točno tem območju. Žagar (1999), Žagar in sod. (2001) in Ramšak in sod. (2013) opisujejo širjenje živega srebra v Tržaškem zalivu na osnovi sezonskih hitrostnih polj, ki so jim dodali vložke močnega vetra. Sezonska hitrostna polja so bila uporabljena tudi v simulacijah širjenja in razgradnje živega srebra v Sredozemlju (Žagar in sod., 2007).

Razvoj računalnikov in sodelovanje z Nacionalnim Inštitutom za Biologijo (NIB) pa nam omogočata tudi dolgoročne simulacije z veliko bolj natančnimi hitrostnimi polji. Operativni model, ki teče na NIB in Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO) na domenah Tržaškega zaliva (TSPOM) in severnega Jadrana (NAPOM) in je izpeljanka modela Princeton Ocean Model (Ličer in sod., 2012), daje na območju Tržaškega zaliva in Severnega Jadrana hitrostna polja v visoki prostorski (ca. 150 m za Tržaški zaliv in ca. 600 m za Severni Jadran) in časovni resoluciji (1 ura). Trenutno so za namerne metode MSD na razpolago hitrostna polja za leti 2010 in 2012, v bodoče pa pričakujemo še simulacije za tekoče obdobje in nekatere simulacije za pretekla leta.

1.1 Hipoteze in cilji

Z modelom NAFTA3d želimo simulirati širjenje onesnažil iz reke Soče in Pad v Severni Jadran (slika 1) po metodi sledenja delcev. Simulacije bomo izvedli za celotno leto 2012, za katerega imamo na razpolago tridimenzionalne (3D) povprečne dnevne podatke o tokovih. Simulirali bomo vtok delcev z različno plavnostjo: plavajoče z relativno gostoto pod ena, nevtralne z relativno gostoto 1 in delce z gostoto večjo od gostote vode.

Z matematičnimi modeli, ki delujejo po MSD metodi, običajno simulirano prenos onesnažil v krajših časovnih obdobjih, saj se pri stalnem dotoku število delcev razmeroma hitro povečuje. V trimesečnih (sezonskih) časovnih obdobjih neprekinjene simulacije bomo tako operirali s približno 500.000 delci. Pokazali bomo, da so simulacije s takšnim številom delcev še obvladljive. Pričakujemo, da bodo simulacije pokazale, da se v določenih obdobjih (značilne meteorološke situacije, npr. močna burja, jugo...) delci koncentrirajo na nekaterih območjih v Tržaškem zalivu ali v Severnem Jadranu. V obdobjih šibkega vetra pričakujemo tudi bolj ali manj standardne vzorce potovanja delcev, ki sledijo generalni cirkulaciji v tem delu Jadranskega morja. Delci z različno plavnostjo se bodo najverjetneje obnašali različno: plavajoči delci bodo na površini tvorili območja z večjo koncentracijo razmeroma daleč od vtoka, delci z nevtralno plavnostjo se bodo porazdelili po vodnem stolpcu in se verjetno koncentrirali le v bližini vtoka v morje, delci z negativno plavnostjo pa bodo potonili zelo blizu rečnega ustja.



Slika 1: Slika Severnega Jadrana (Google Earth; pridobljeno 11.3.2014)

2 METODE

2.1 Model NAFTA3d

Model NAFTA3d je v osnovi sicer namenjen simuliranju širjenja razlite nafte, vendar lahko na isti način in z modelom simuliramo tudi druge snovi. Lahko bi modelirali premikanje meduz, gostejše vode itd, kar je bilo doslej že izvedeno (npr. Lee in sod., 2013). Model je podrobno opisan v literaturi (Širca, 1992; Žagar 1994; Galuf, 2005; Žagar in Četina., 2011; Žagar in sod., 2012; Ramšak in sod., 2013), zato tukaj podajamo le njegove bistvene značilnosti.

Model potrebuje za delovanje polno 3D hitrostno polje, ki je lahko stacionarno ali časovno spremenljivo. Na polzaprtih območjih, kamor štejemo tudi Severni Jadran, je cirkulacijska slika posledica plimovanja, tokov ter pravilnega upoštevanja robnega pogoja na odprtem robu ter zlasti vetrnih polj, ki se spreminjajo tako časovno kot prostorsko. Na takih območjih je cirkulacijsko polje možno pridobiti le z 3D modeli (Žagar in sod., 2012). Gibanje vode pridobimo s hidrodinamičnimi (cirkulacijskimi) modeli na podlagi meteoroloških podatkov v gosti numerični mreži, da lahko prostorsko interpoliramo hitrosti za poljuben položaj delca znotraj območja računanja. V obravnavanem primeru so hitrostna polja rezultat hidrodinamičnega modela NAPOM za celotno leto 2012, ki kot operativni prognostični model teče na NIB in ARSO (Ličer in sod., 2012). Z vmesnikom se ta hitrostna polja pretvorijo iz 11 »sigma« slojev v mreži domene NAPOM v 21 »z« slojev, torej v koordinatno mrežo, ki jo model NAFTA3d zahteva za delovanje (Žagar in Četina, 2011).

Model NAFTA3d deluje po metodi sledenja delcev (MSD). Pri tej metodi onesnažilo predstavimo z večjim številom delcev, ki se gibljejo zaradi vodnih tokov (cirkulacije) po gladini ali po celotnem vodnem stolpcu. Poleg advekcije (premikanja s tokovi) je upoštevano tudi stohastično gibanje zaradi turbulentne difuzije. Hitrostni vektor razdelimo na advekcijsko in difuzijsko komponento. Prva je rezultat hidrodinamičnega modela, druga pa je določena z generacijo naključnih vrednosti in omejena s koeficientom turbulentne difuzije v horizontalni ravnini in vertikalni smeri (Žagar in sod., 2012). Vsak delec je opisan s svojimi lastnostmi. Ima določeno gostoto, maso, viskoznost itd. V vsakem časovnem koraku lahko izračunamo velikost ter obliko madeža, ki jo model izračuna iz položaja ter mase delcev (Žagar in sod., 2012).

Za račun transporta onesnažil torej potrebujemo podatke o gibanju vode (cirkulaciji), za račun širjenja in razgradnje nafte pa tudi meteorološke parametre (veter, temperatura zraka). V vsakem primeru potrebujemo še podatke o lokaciji, količini in vrsti onesnažila (Žagar in sod, 2012).

Podatke za začetek simulacije pripravimo v datoteki Podatki.dat, ki vsebuje vse potrebne podatke za izračun, vključno z imeni datotek, ki vključujejo hitrostno polje in geometrijo domene ter tudi izhodne datoteke za kasnejšo vizualizacijo rezultatov. Model prevedemo v izvedbeno različico z upoštevanjem dimenzij numerične mreže in števila delcev (param.for) ter poženemo. Rezultati se zapisujejo v ASCII in binarno (binary.bin) datoteko. Slednjo uporabimo kot vhodni podatek pri vizualizaciji, ki jo izvedemo z dodatnim MATLAB vizualizacijskim programom, v ASCII datoteko (scr.rez) pa se izpisuje potek računanja.

Rezultate oz. izrise s programom MATLAB lahko dobimo v poljubnih časih in poljubnih slojih, na podlagi izbora sloja (21, 20, 19, ...) ter časovnega koraka, (npr. 1., 2., 3., ...teden). Izrišemo lahko torej sliko koncentracij onesnažila na določeni globini ter v določenem časovnem koraku na karti območja, s katerim se ukvarjamo. Na kartah so podane tudi geografska dolžina λ in geografska širina ϕ . Graf je opremljen tudi z barvno lestvico koncentracij.

2.2 Spremembe v modelu

Model smo prilagodili načrtovanim simulacijam tako, da smo omogočili branje iz datoteke s celoletnimi 3D hitrostnimi polji, pri čemer je možno poljubno določiti začetek in konec simulacije. Spremenili smo še podajanje vertikalnega koeficienta turbulentne viskoznosti, ki se v originalnem modelu računa po Koutitasu (Žagar in Četina, 2011). Pri simulacijah upoštevamo konstantno vertikalno turbulentno viskoznost, saj parabolična porazdelitev Dv v modelu Koutitasa daje nerealne rezultate v primeru delcev z nevtralno plovnostjo.

2.3 Vhodni podatki za vse primere

Podatke smo priredili za simulacije širjenja onesnažil iz rek. Računski čas (v urah) je pri vsaki simulaciji omejen na 13 tednov, kar pri neprekinjenem izpustu z dodajanjem 4 delcev na časovni korak (60 s) omogoča, da se računi koncentracij s približno 500.000 delci izvedejo v razumnem času. Podamo ustrezno število (13) izpisov in čas teh izpisov (v urah), da dobimo rezultate v tedenskih razmikih. Podamo še horizontalni ($5 \text{ m}^2/\text{s}$) in vertikalni koeficient turbulentne difuzije ($0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$). Koordinati izpusta sta različni in se ujemata z lokalnimi koordinatami vtoka rek (Soče in Pada) v Severni Jadran. Predpostavljena masa delca je 1 kg, kar pa pri izvedenih simulacijah ni pomembno, saj nas zanimajo le relativne koncentracije.

V horizontalni smeri je računsko območje razdeljeno na celice velikosti ca. $600 \times 600 \text{ m}$, v vertikalni smeri pa v 22 neenakomerno debelih slojev, ki so oštevilčeni od dna proti gladini (preglednica 1). Sloja 1 in 22 sta neaktivna, v ostalih pa lahko izrišemo koncentracije v poljubnih (tedenskih) časovnih korakih.

Prvi primer oz. prvi komplet simulacij je bil narejen za reko Sočo. V vsakem časovnem koraku trimesečnega računskega obdobja smo dodali 4 delce, simulacije pa smo izvedli za vse štiri letne čase. Upoštevali smo tri vrste delcev: z nevtralno plovnostjo, relativno gostoto 0,6 in relativno gostoto 1,4. Zadnja sezonska simulacija (jesen) je zaradi nepopolnih cirkulacijskih podatkov trajala le 12 tednov, na voljo pa ni bilo tudi podatkov za prvi teden leta 2012.

Zimska simulacija je obsegala obdobje od 8 januarja do 1 aprila. Naslednja, pomladna simulacija se konča 30 junija, poletna je trajala do 30 septembra, jesenska pa do konca koledarskega leta oz. do 24 decembra, do koder so bili na razpolago podatki o cirkulaciji.

Druga simulacija je bila izvedena z vtokom iz reke Pad vendar le za poletno obdobje (1. julij – 30. september). Izvedli smo le simulacije z delci z nevtralno in pozitivno plovnostjo (relativne gostote 0,99; 0,95; 0,9; 0,8 in 0,6). Vsi drugi podatki so enaki kot pri simulacijah vtoka Soče.

Preglednica 1: Debeline slojev in globine mej med sloji

SLOJ	DEBELINA (m)	GLOBINA (m)
21	0,3	0,3
20	0,22	0,52
19	0,25	0,77
18	0,3	1,07
17	0,35	1,42
16	0,4	1,82
15	0,45	2,27
14	0,5	2,77
13	0,75	3,52
12	1,5	5,02
11	2	7,02
10	2,5	9,52
9	3,5	13,02
8	4,5	17,52
7	5,5	23,02
6	6	29,02
5	6,5	35,52
4	6,5	41,72
3	5,5	47,52
2	4,97	52,49

Plovnost delcev smo izračunali glede na relativno gostoto delca v primerjavi z gostoto morske vode ($\rho = 1027 \text{ kg/m}^3$), kot je prikazano v enačbi (1).

$$\text{relativna gostota} = \frac{\rho_{\text{delca}}}{\rho_{\text{vode}}} \quad (1)$$

3 REZULTATI

Za obe simulaciji smo izrisali slike na izbranih globinah. Iz številnih izrisanih slik smo izbrali najzanimivejše slike, kjer so koncentracije delcev na nekaterih območjih povišane. Za lažje razumevanje dogajanja, ki je vzrok za povišano koncentracijo delcev pa smo dodali slike cirkulacije tokov na istih globinah za teden pred tem. Opozarjamo, da so slike koncentracij izrisane v različnih barvnih lestvicah, ker smo želeli s tem poudariti pomen območij z visokimi (relativnimi) koncentracijami.

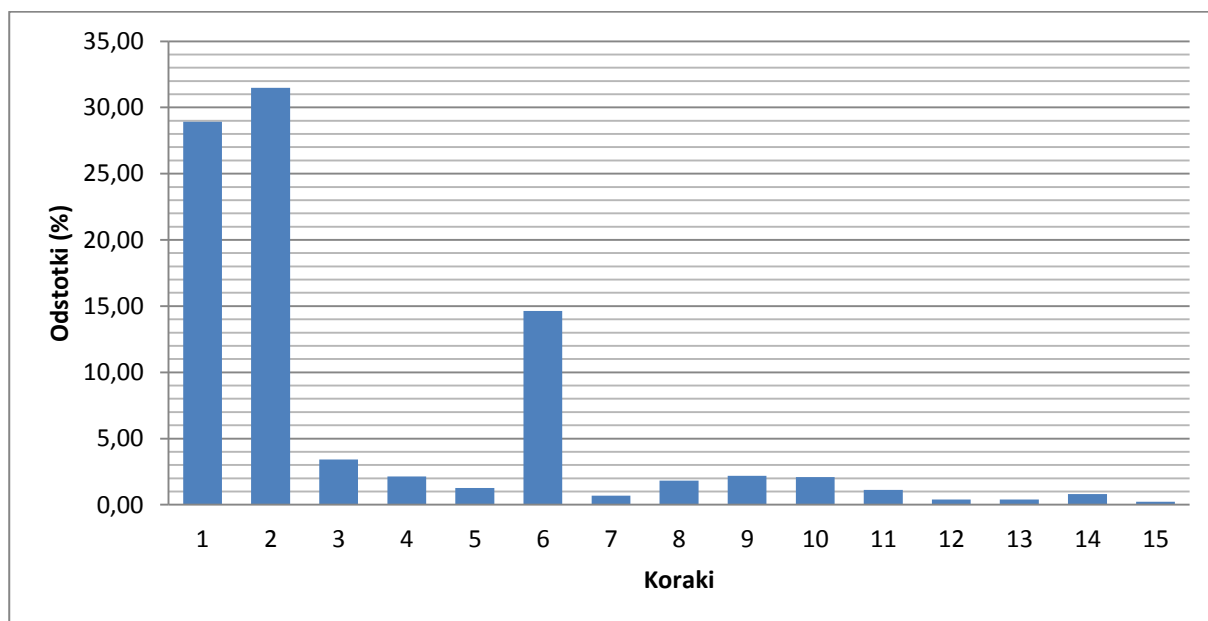
3.1 Vtok s Sočo

3.1.1 Negativna plovnost - relativna gostota = 1.4

Pri negativni plovnosti so nas zanimale le slike zgornjih slojev, saj je večina delcev potonila na dno v neposredni bližini ustja Soče, kjer je globina razmeroma majhna, saj v severnem delu Tržaškega zaliva le redko preseže 7 m. Še bolje kot prikazovati slike se je osredotočiti na »doseg« izpuščenih delcev, torej na kolikšnem obsegu oz. kako daleč od izliva reke se je razpršil največji odstotek delcev. Oddaljenost delcev po 13 tednih je prikazana tabelarično (preglednica 2) in grafično (grafikon 1) v intervalih po 1 km. Prikazujemo intervale do oddaljenosti 15 km, kjer se je usedlo na dno 91,58 % vseh delcev. Iz preglednice 2 je razvidno, da se največ delcev usede na intervalu 1–2 km od ustja, nekoliko manj pa v prvem kilometru. Zanimivo je, da je na razdalji 5-6 km odstotek delcev spet višji. Predvidevamo, da je pojav povezan z večanjem globine na tej razdalji od ustja Soče, pri čemer se tokovi upočasnijo, transportna sposobnost zmanjša, delci pa se usedejo na dno. Podoben pojav je opisal tudi Žagar (1999) pri simulacijah resuspendiranja sedimenta ob močnem vetru v severnem delu Tržaškega zaliva.

Preglednica 2: Količina usedlih delcev in razdalje od ustja Soče v intervalih po 1 km za delce z relativno gostoto 1,4

indeks	intervali (km)	št. delcev	odstotki (%)
1	< 1	151284	28,92
2	1–2	164633	31,47
3	2–3	17841	3,41
4	3–4	11189	2,14
5	4–5	6612	1,26
6	5–6	76604	14,65
7	6–7	3550	0,68
8	7–8	9489	1,81
9	8–9	11482	2,20
10	9–10	10910	2,09
11	10–11	5818	1,11
12	11–12	2110	0,40
13	12–13	2061	0,39
14	13–14	4276	0,82
15	14–15	1172	0,22
vsota:		479031	91,58

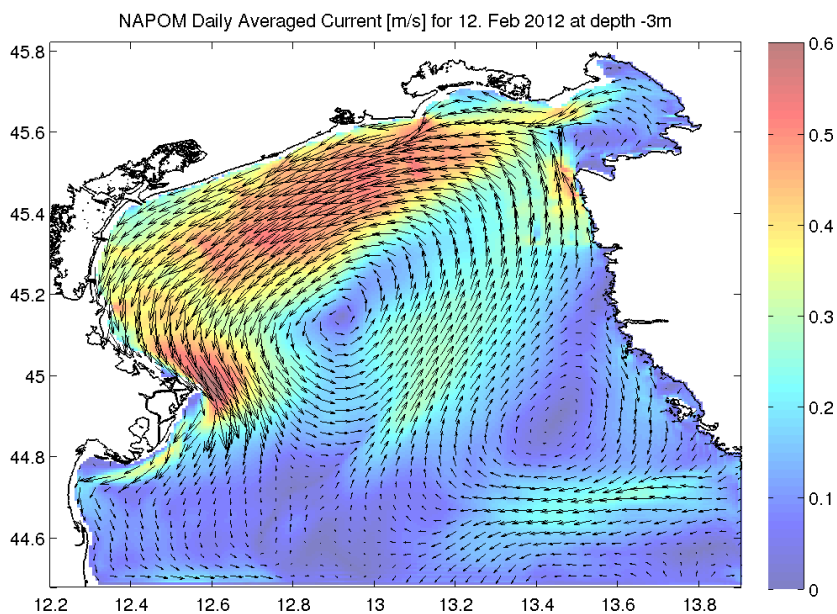


Grafikon 1: Količina usedlih delcev in razdalje od ustja Soče v intervalih po 1 km za delce z relativno gostoto 1,4

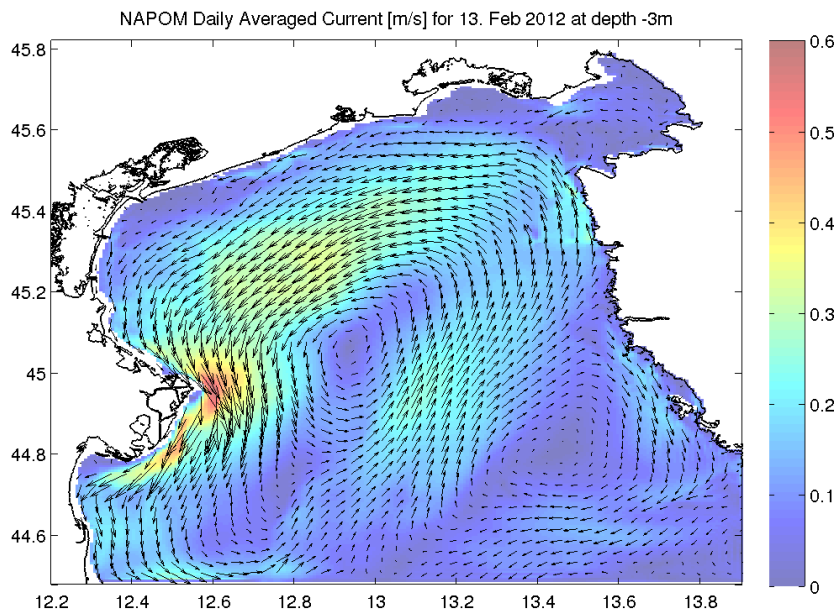
3.1.2 Nevtralna plovnost

Delci z nevtralno plovnostjo lahko predstavljajo poljubno raztopljeno onesnažilo. Na slikah 2 do 39 prikazujemo dogajanje pri nevtralnem vzgonu delcev za tedenske intervale posameznega letnega časa (zima, pomlad, poletje in jesen).

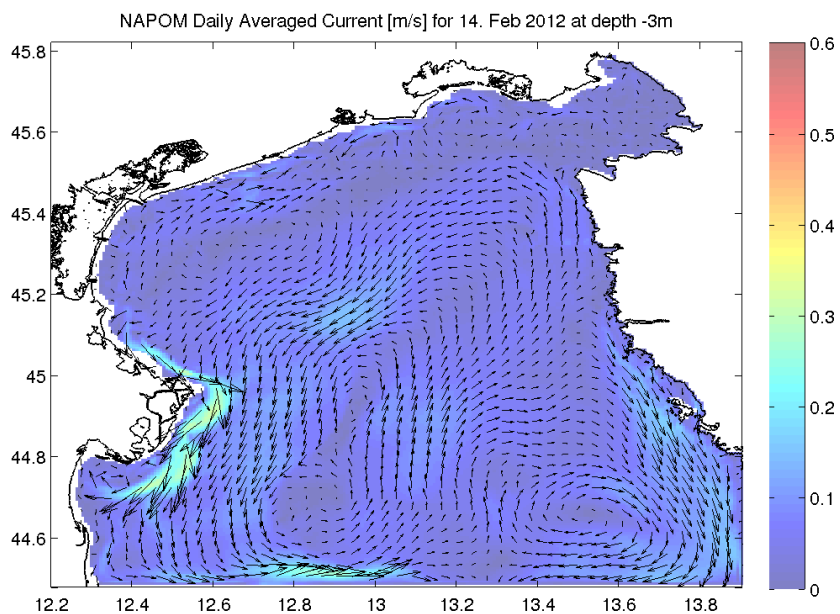
Zimska sezona je prikazana na slikah 2 do 10, ki prikazujejo enotedensko dogajanje v šestem tednu simulacije (12.–19. 2. 2012). Na sliki 10 je prikazana koncentracija delcev v globini 3 m na dan 19.2.2012, kjer je razvidno, da se onesnaženje širi ob severni obali Tržaškega zaliva proti zahodu. Slike koncentracij dne 12.2.2012 ne prikazujemo, saj takrat na tej globini ni razvidnih povišanih koncentracij delcev. Na slikah 2 do 9 so prikazane slike tokov za vsak dan izbranega tedna. Opazno je, da je razmeroma močnim tokovom, ki so v začetku tedna na globini 3 m dosegli do 60 cm/s, in zelo verjetno razpršili delce, sledilo zatišno obdobje, v katerem so se delci koncentrirali na območju rezidualnega toka ob severni obali Tržaškega zaliva.



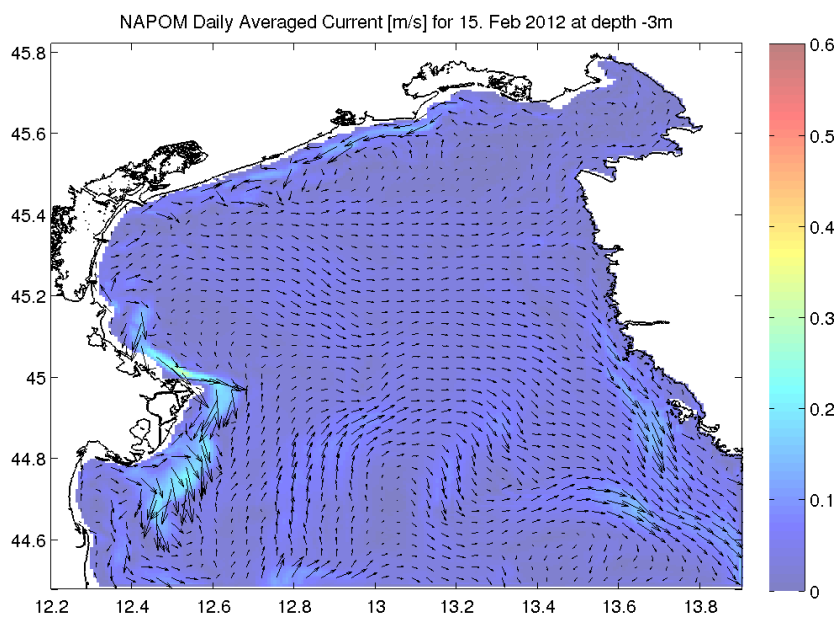
Slika 2: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 12.2.2012 na globini 3 m



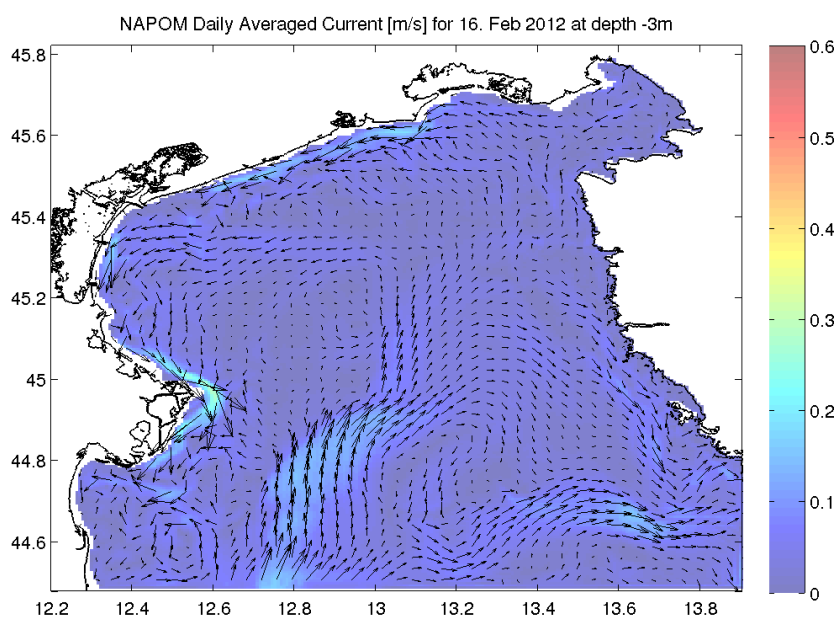
Slika 3: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 13.2.2012 na globini 3 m



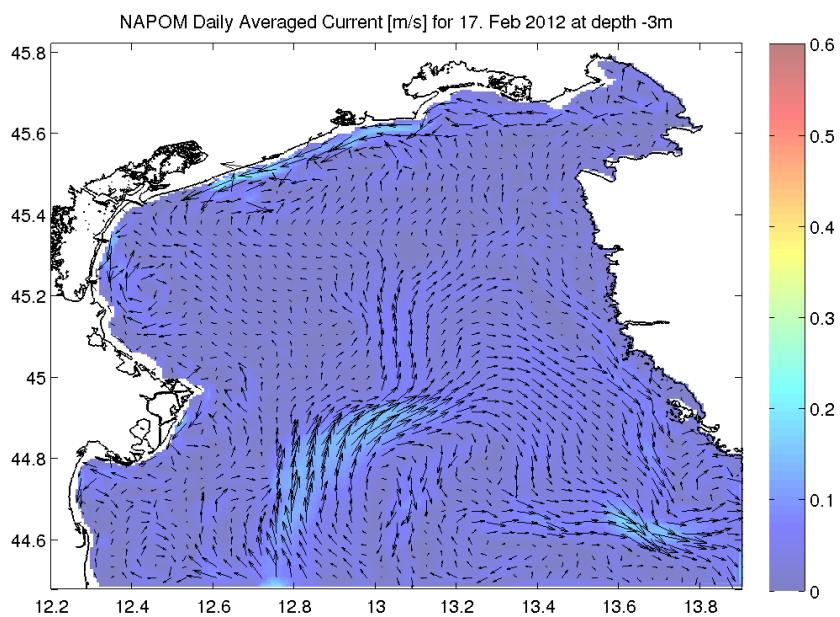
Slika 4: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 14.2.2012 na globini 3 m



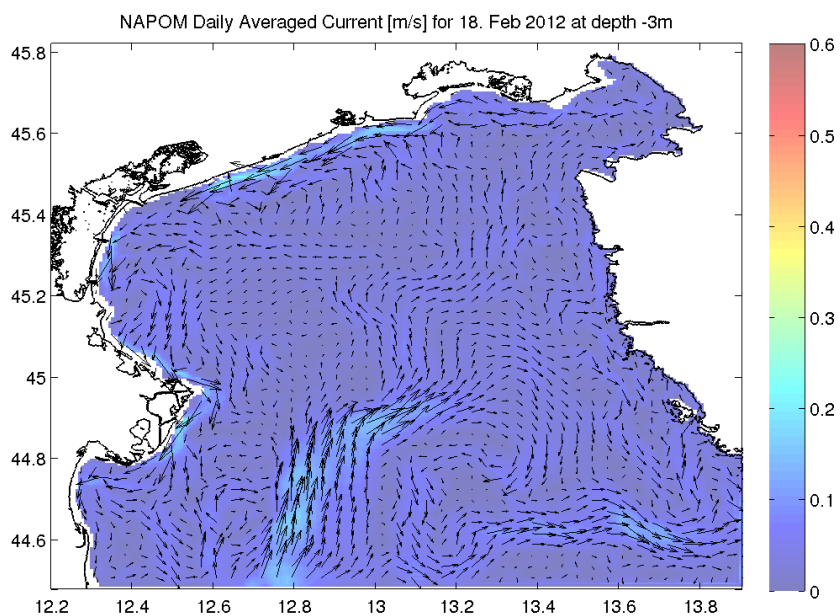
Slika 5: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 15.2.2012 na globini 3 m



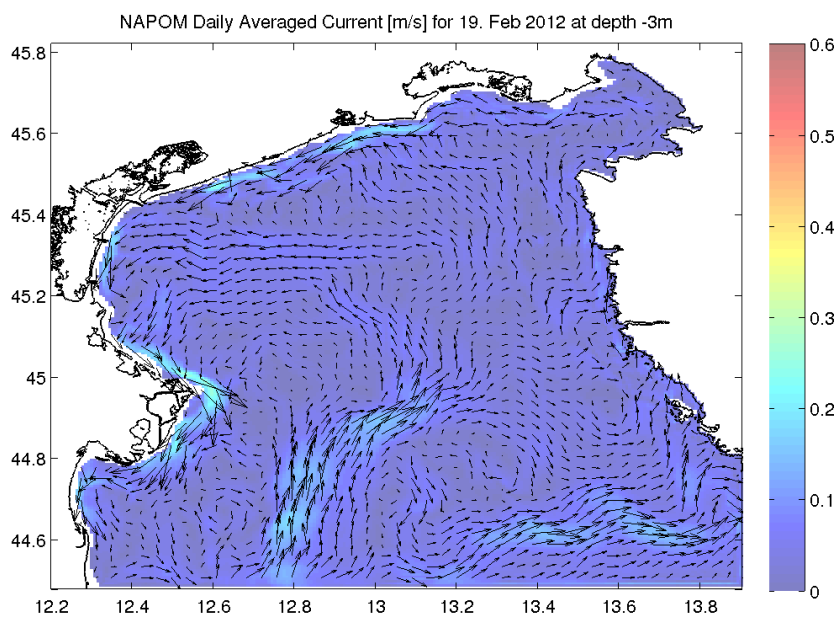
Slika 6: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 16.2.2012 na globini 3 m



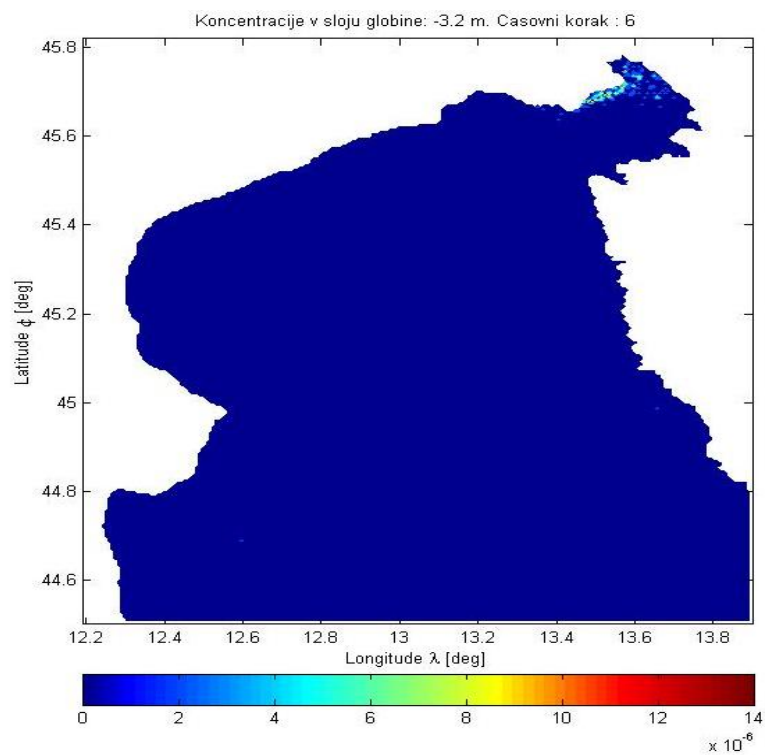
Slika 7: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 17.2.2012 na globini 3 m



Slika 8: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 18.2.2012 na globini 3 m

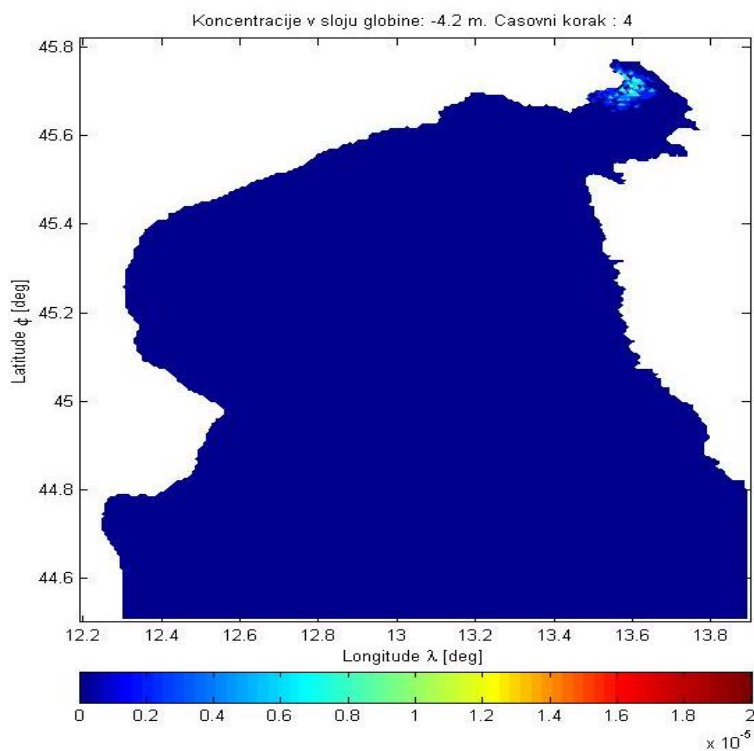


Slika 9: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 19.2.2012 na globini 3 m

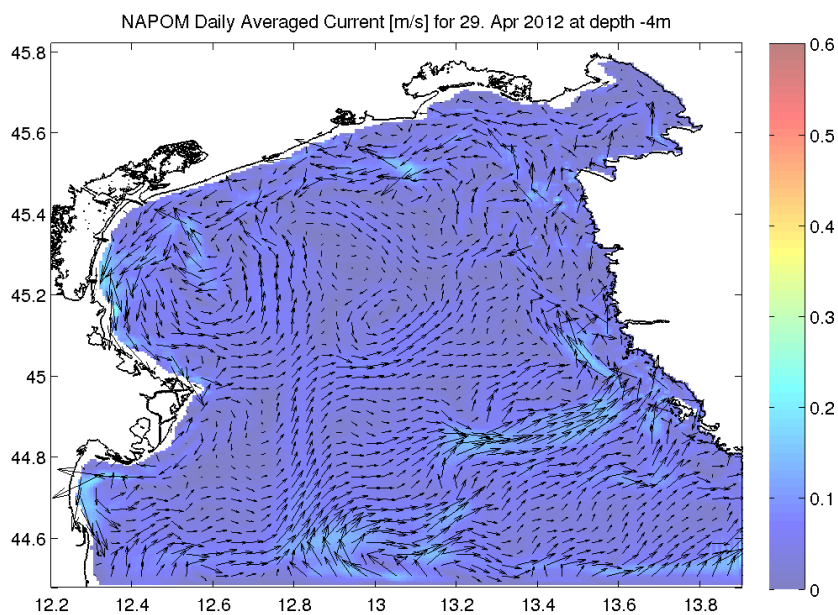


Slika 10: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 19.2.2012 v globini 3,2 m pri nevtralni plovnosti

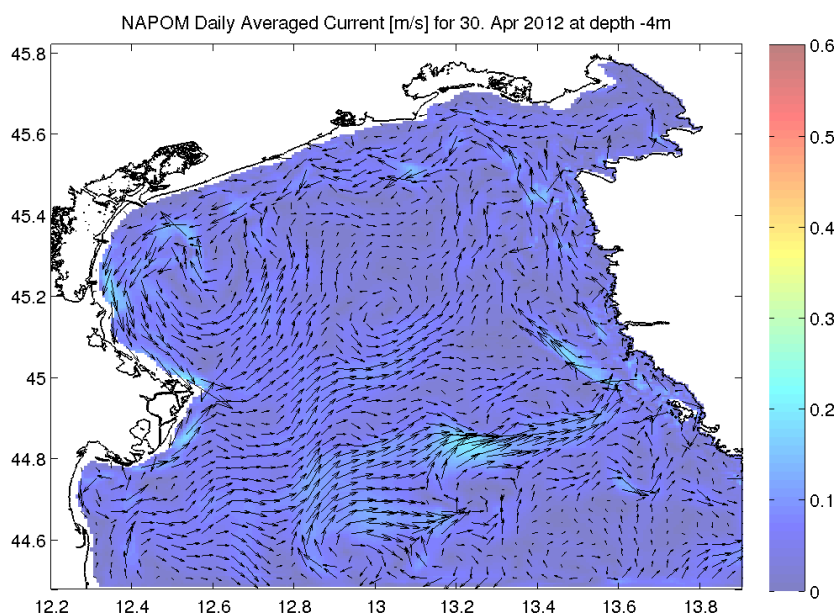
Pomladansko obdobje v sloju na globini 4 m prikazuje slike 11 do 20. Na sliki 11 je prikazana koncentracija delcev dne 29.4.2012, kjer se onesnaženje širi od izliva Soče ob severni obali in proti notranjosti Tržaškega zaliva. Tokovi, prikazani na slikah 12 do 19 so bili v naslednjem tednu šibki (okrog 5 cm/s) in večinoma usmerjeni proti SV. Posledica takšnih tokov je nizka disperzija onesnaženja in pomik delcev proti Tržiškemu zalivu (Baia di Panzano) in vzhodni obali Tržaškega zaliva, kot je razvidno iz slike 20. Če bi šlo v tem primeru za kemično ali biološko onesnaženje (npr. živo srebro, ki dejansko doteka s Sočo v Tržaški zaliv, npr. Ramšak in sod., 2013), bi povišane koncentracije lahko negativno vplivale na marikulturo, ki je locirana vzdolž vzhodne obale Tržaškega zaliva. Že Ramšak in sod. (2013) opozarjajo, da je ob upoštevanju prostorsko neenakomernega vetra nad Tržaškim zalivom slika tokov in s tem tudi širjenja onesnažil od ustja reke Soče drugačna, kot pa ob stalnem enakomernem vetru. Tudi izvedene simulacije so pokazale, da se lahko onesnaženje od ustja Soče širi proti območju Tržiškega zaliva in vzhodne obale.



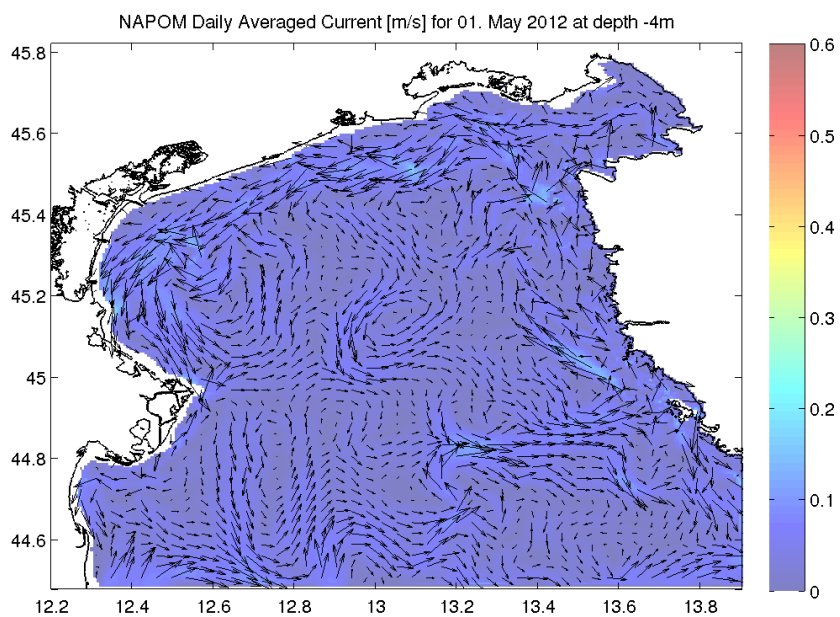
Slika 11: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 29.4.2012 v globini 4,2 m pri nevtralni plovnosti



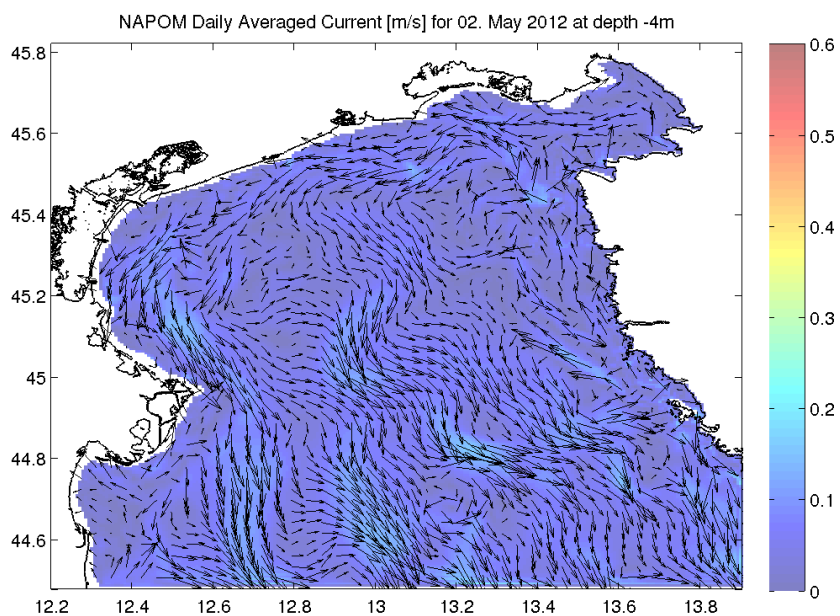
Slika 12: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 29.4.2012 na globini 4 m



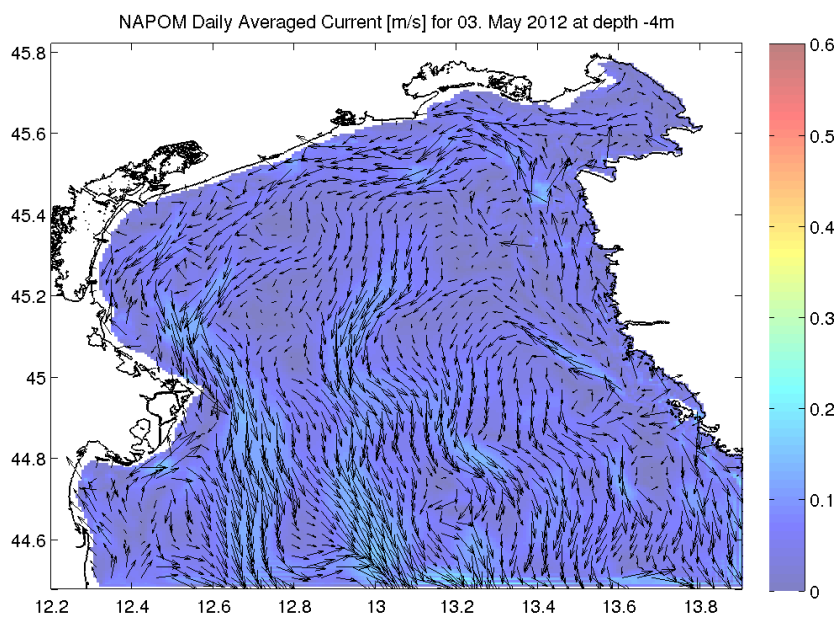
Slika 13: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 30.4.2012 na globini 4 m



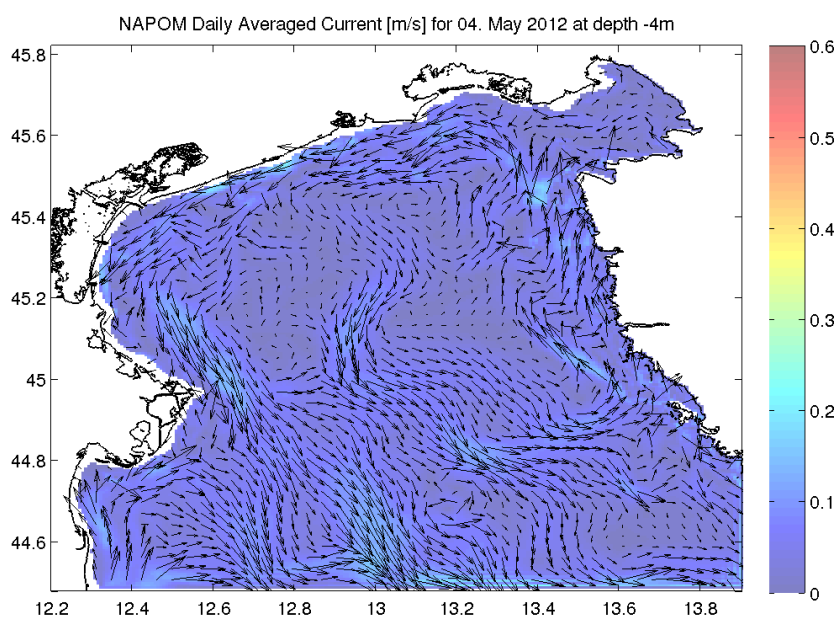
Slika 14: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 1.5.2012 na globini 4 m



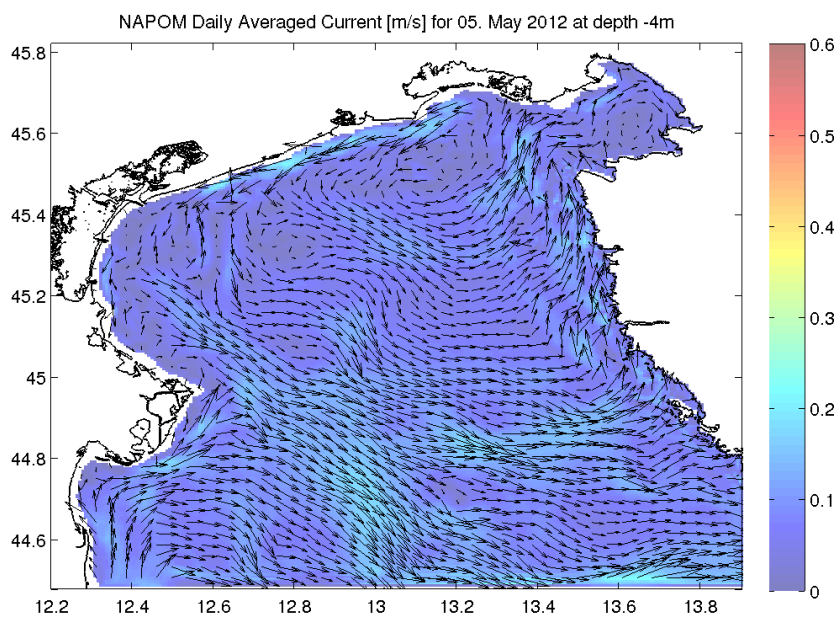
Slika 15: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 2.5.2012 na globini 4 m



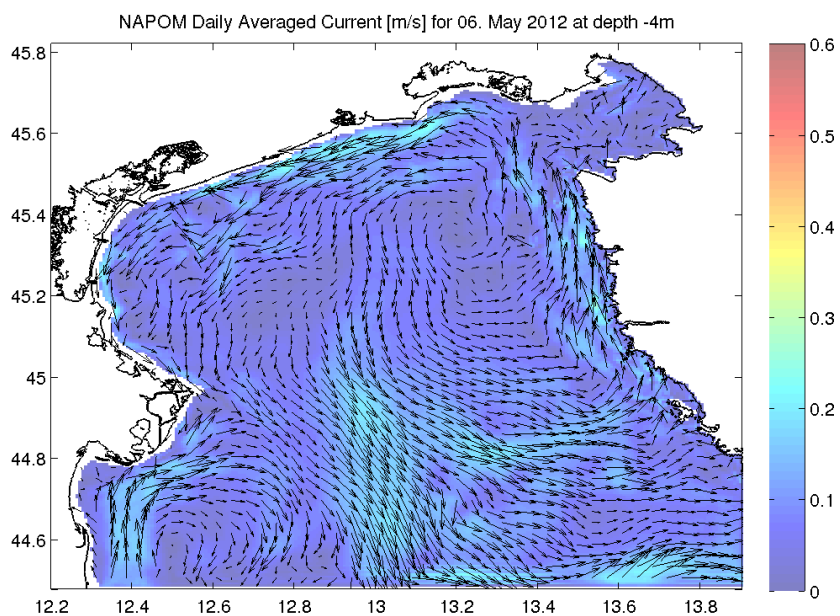
Slika 16: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 3.5.2012 na globini 4 m



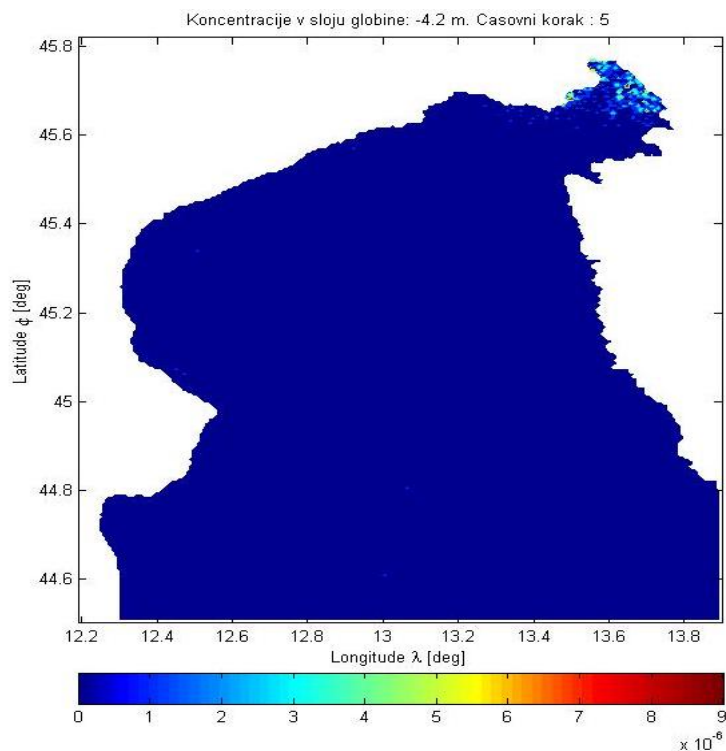
Slika 17: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 4.5.2012 na globini 4 m



Slika 18: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 5.5.2012 na globini 4 m

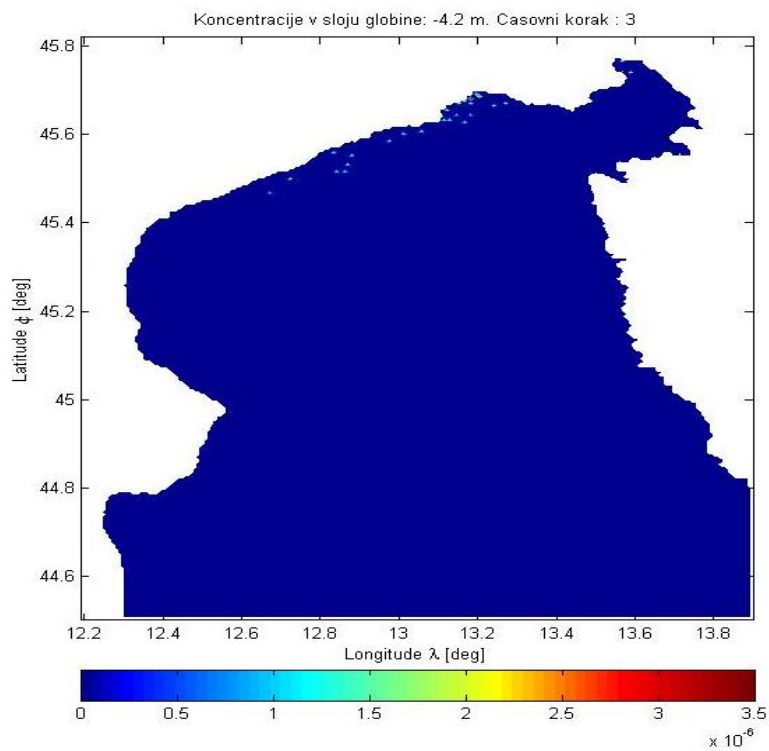


Slika 19: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 6.5.2012 na globini 4 m

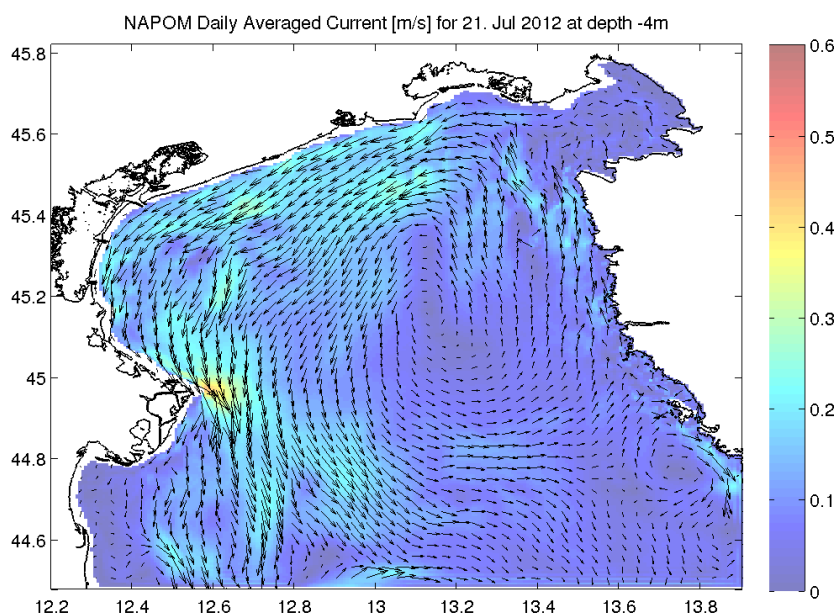


Slika 20: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 6.5.2012 v globini 4,2 m pri nevtralni plovnosti

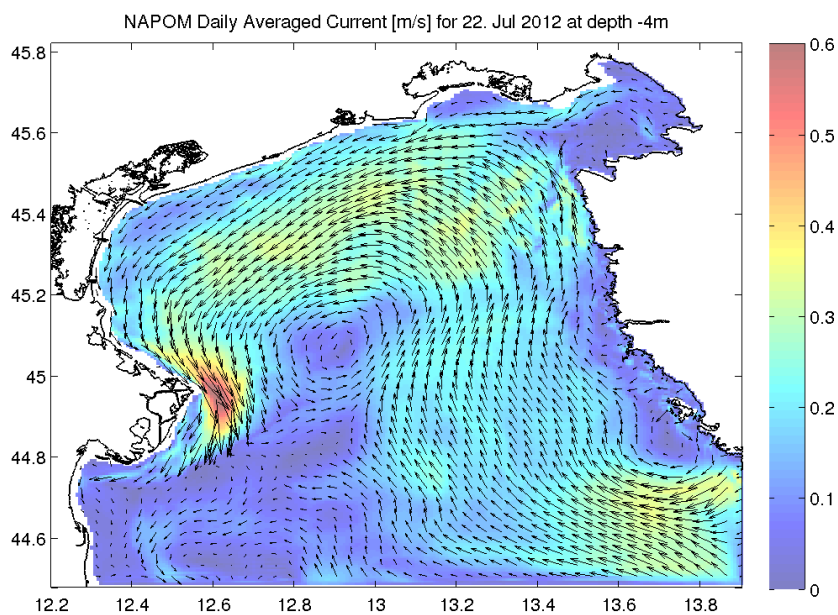
Slike 21 do 30 prikazujejo situacijo iz poletne simulacije. Na začetku tedna (slike 22 do 25) so bili tokovi usmerjeni ob severni obali zaliva in nekoliko močnejši, kasneje pa se kljub šibkejšim tokovom (slike 26 do 29) delci premikajo ob severni obali in ne v notranjost zaliva. Mogoč vzrok je tudi drugačna izmenjava delcev med sloji, kar pa bi lahko ugotovili le s pogostejšimi slikami koncentracij v več slojih. Na sliki 21 je prikazana koncentracija delcev 21.7.2012, slika 30 pa prikazuje koncentracijo onesnaženja dne 28.7.2012.



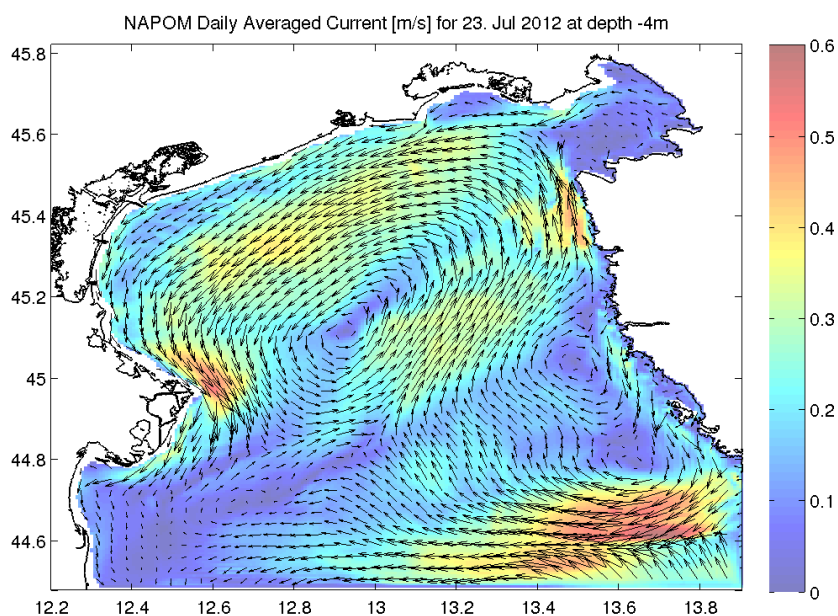
Slika 21: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 21.7.2012 v globini 4,2 m pri nevtralni plovnosti



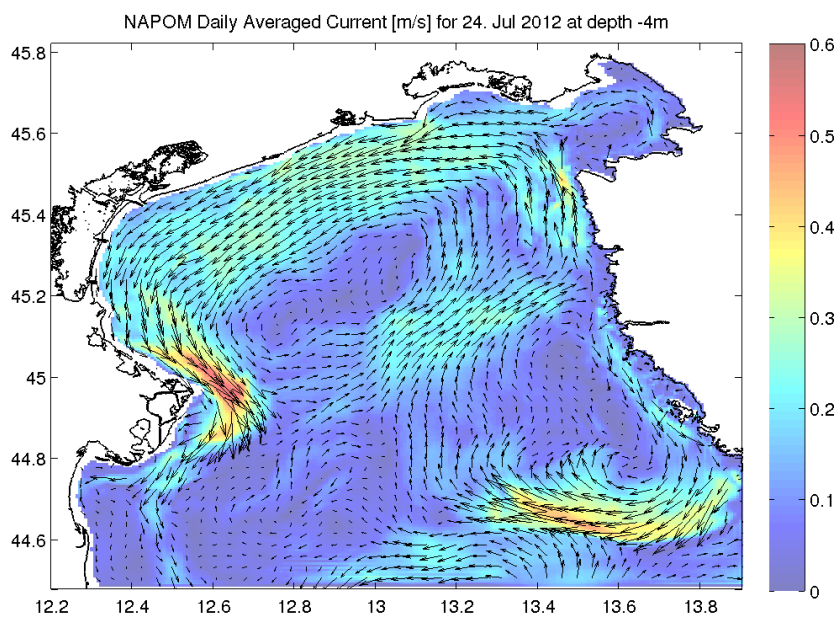
Slika 22: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 21.7.2012 na globini 4 m



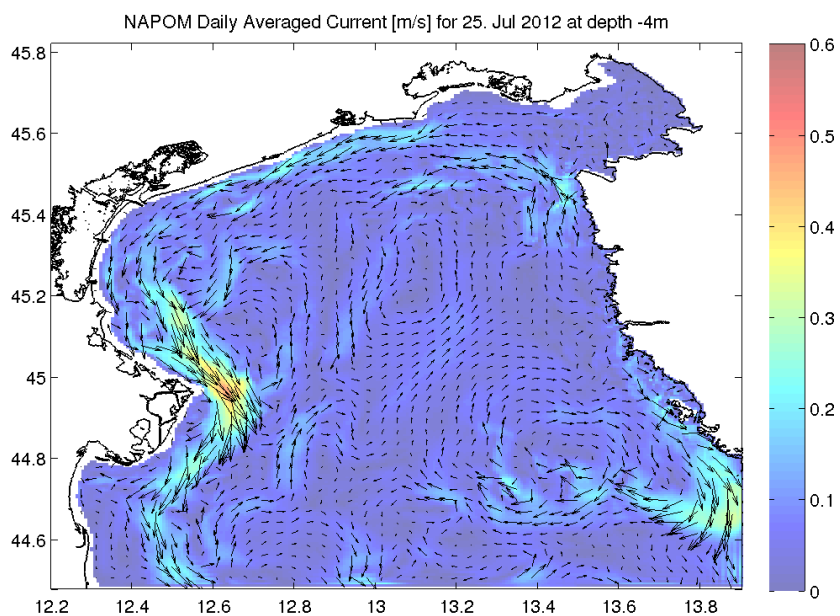
Slika 23: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 22.7.2012 na globini 4 m



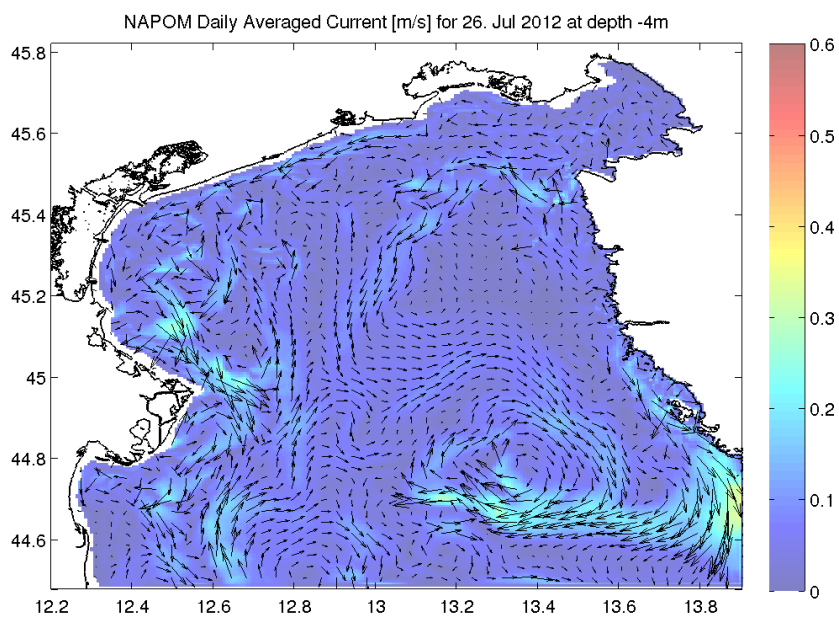
Slika 24: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 23.7.2012 na globini 4 m



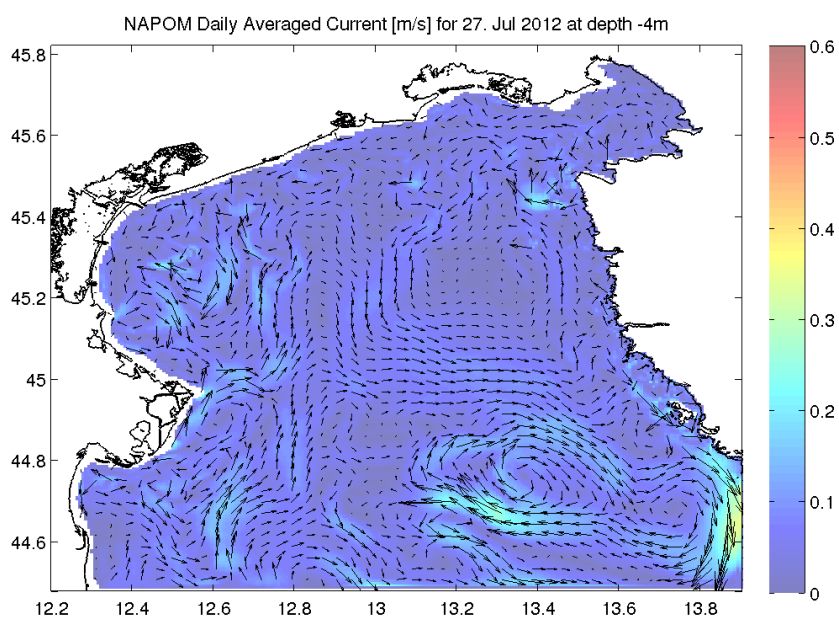
Slika 25: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 24.7.2012 na globini 4 m



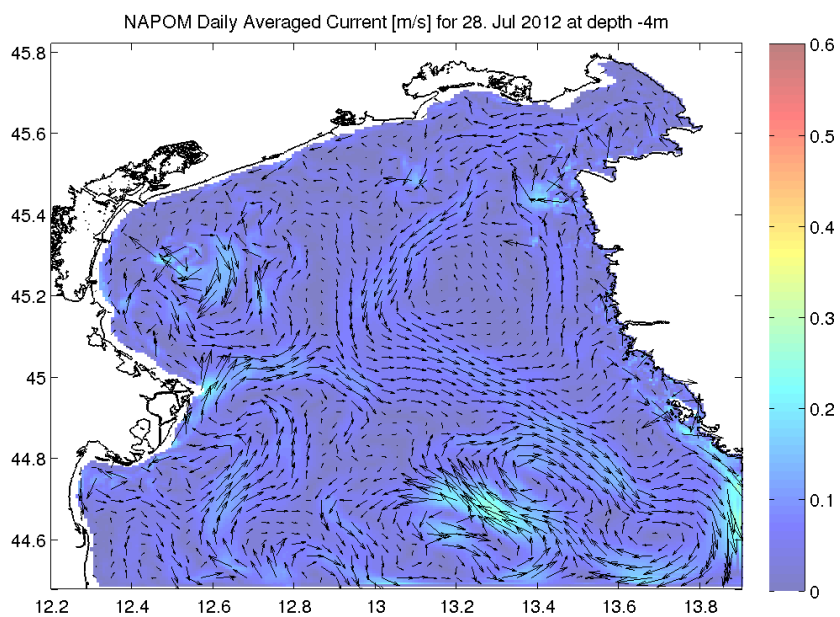
Slika 26: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 25.7.2012 na globini 4 m



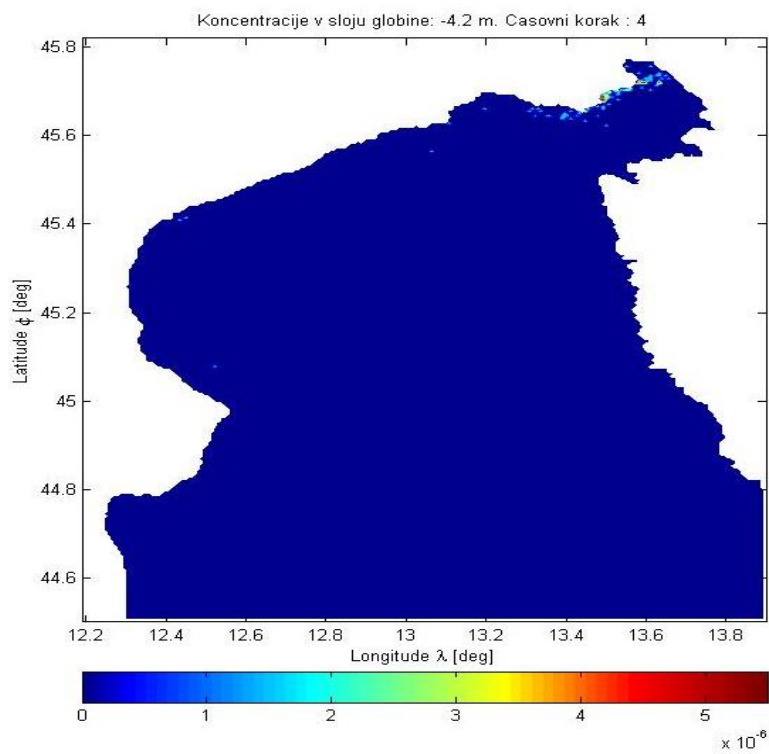
Slika 27: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 26.7.2012 na globini 4 m



Slika 28: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 27.7.2012 na globini 4 m

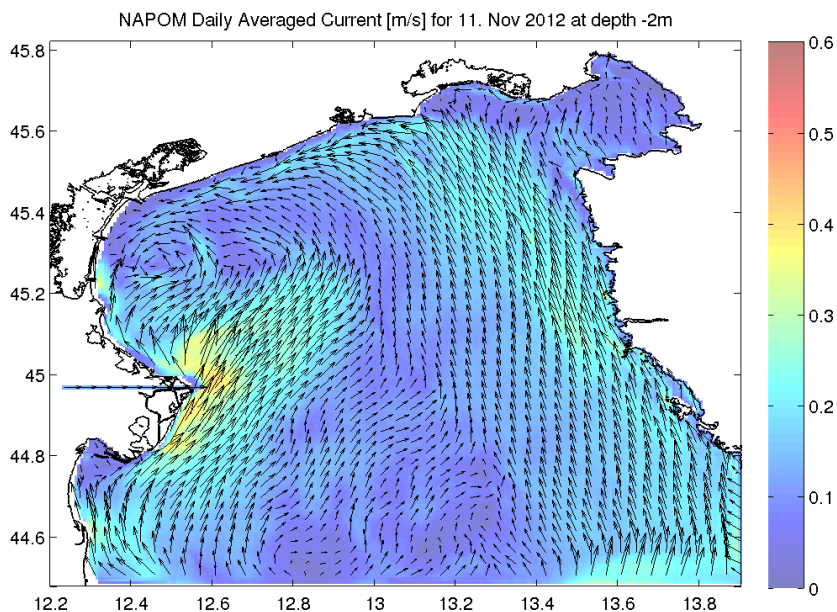


Slika 29: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 28.7.2012 na globini 4 m

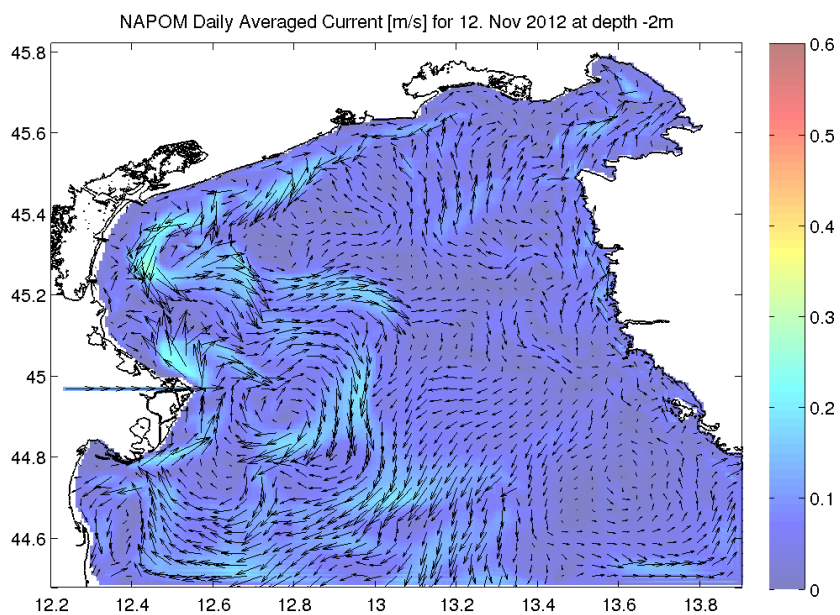


Slika 30: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 28.7.2012 v globini 4,2 m pri nevtralni plovnosti

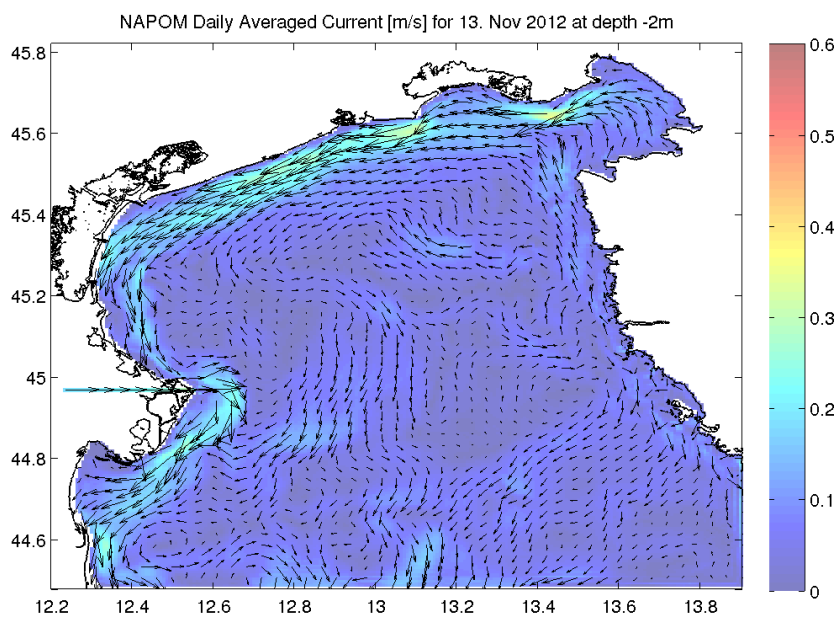
Jesenska slika tokov v tednu med 11. in 18. 11. 2012 kaže v globini 2 m nekoliko močnejše in dokaj stalne zahodne tokove ob severni obali Tržaškega zaliva (slike 31 do 38). Slike na začetku tedna (11.11.2012) ne prikazujemo, ker na njej ni videti povišane koncentracije delcev. Na sliki 39 pa so prikazane koncentracije dne 18.11.2012. Razvidno je, da se je onesnaženje širilo v ozkem pasu tik ob severni obali Tržaškega zaliva od izliva Soče proti zahodu.



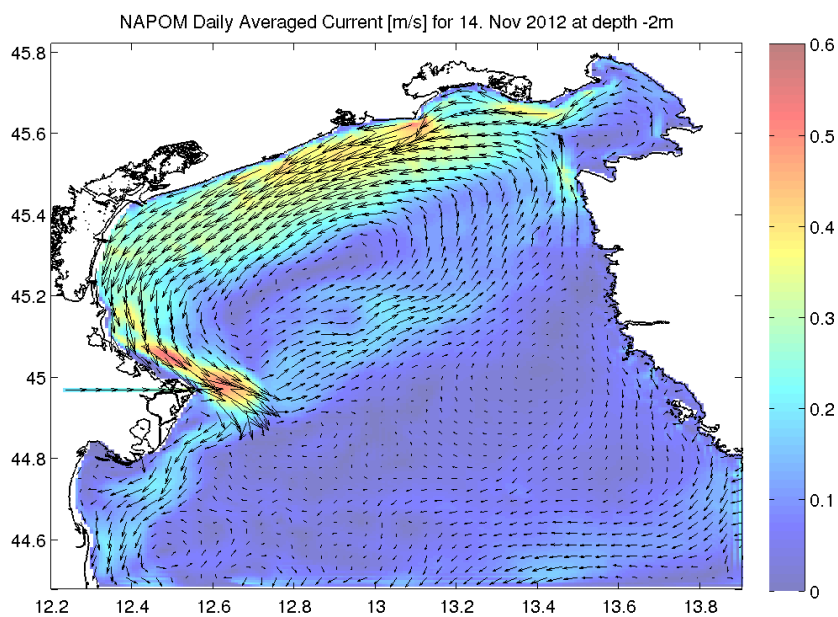
Slika 31: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 11.11.2012 na globini 2 m



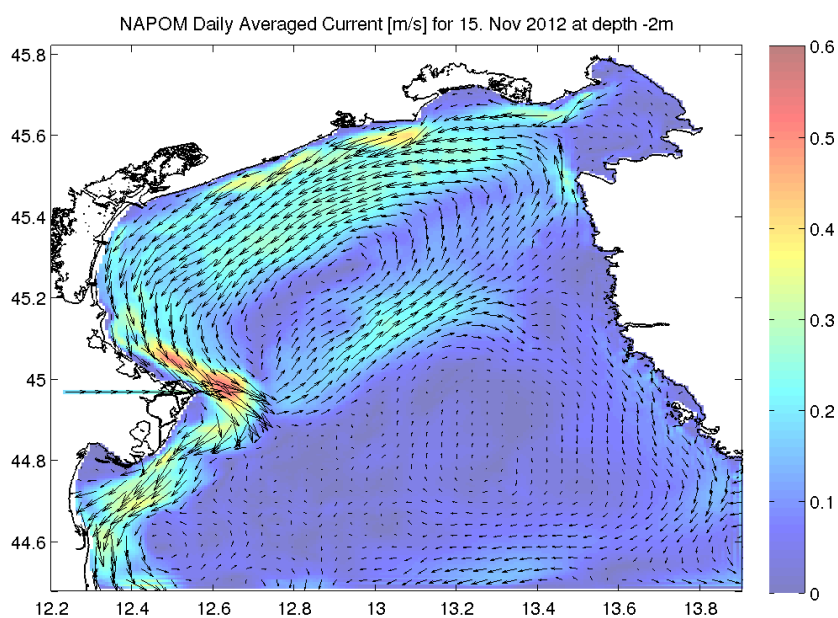
Slika 32: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 12.11.2012 na globini 2 m



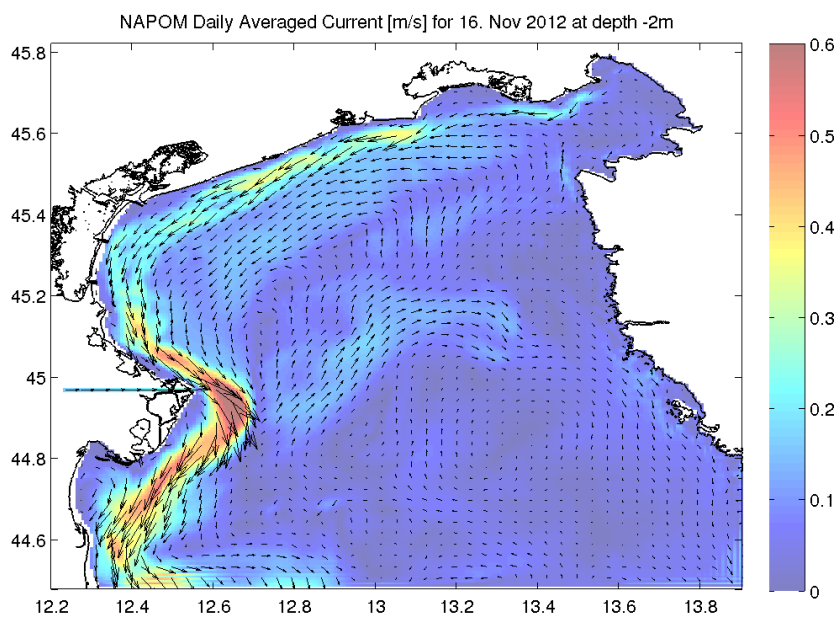
Slika 33: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 13.11.2012 na globini 2 m



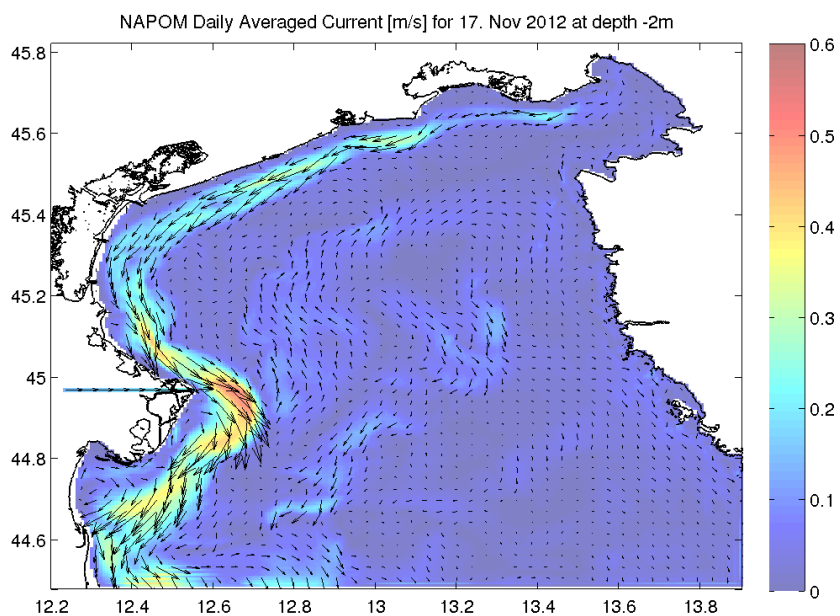
Slika 34: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 14.11.2012 na globini 2 m



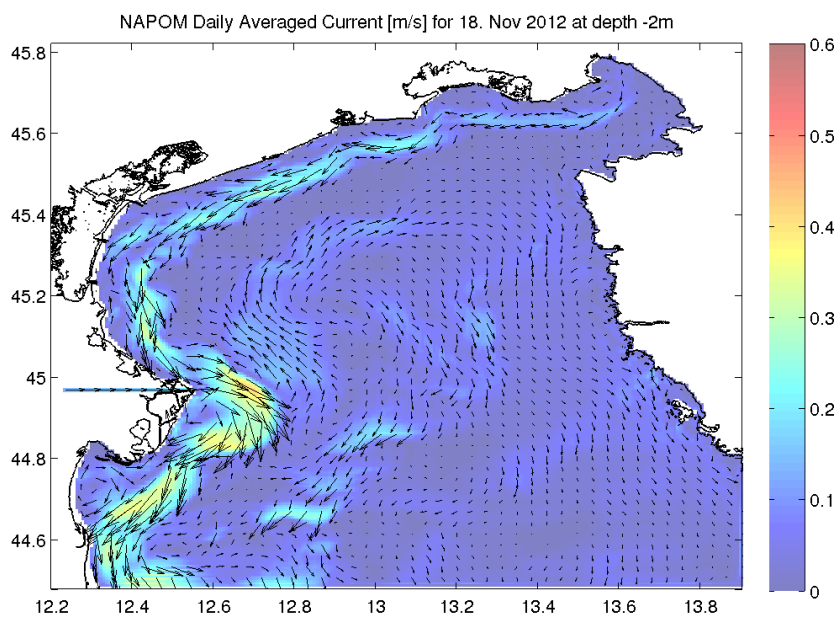
Slika 35: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 15.11.2012 na globini 2 m



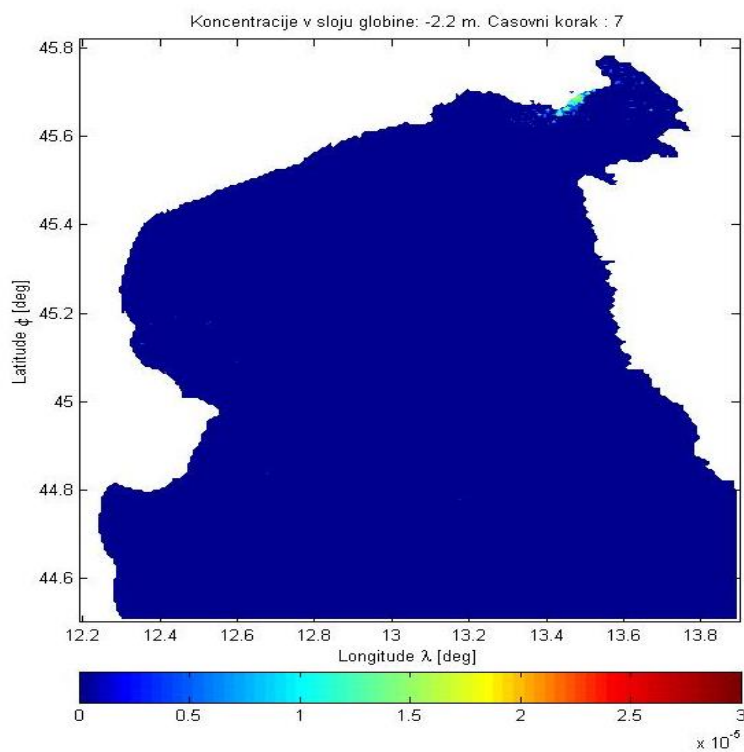
Slika 36: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 16.11.2012 na globini 2 m



Slika 37: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 17.11.2012 na globini 2 m



Slika 38: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 18.11.2012 na globini 2 m

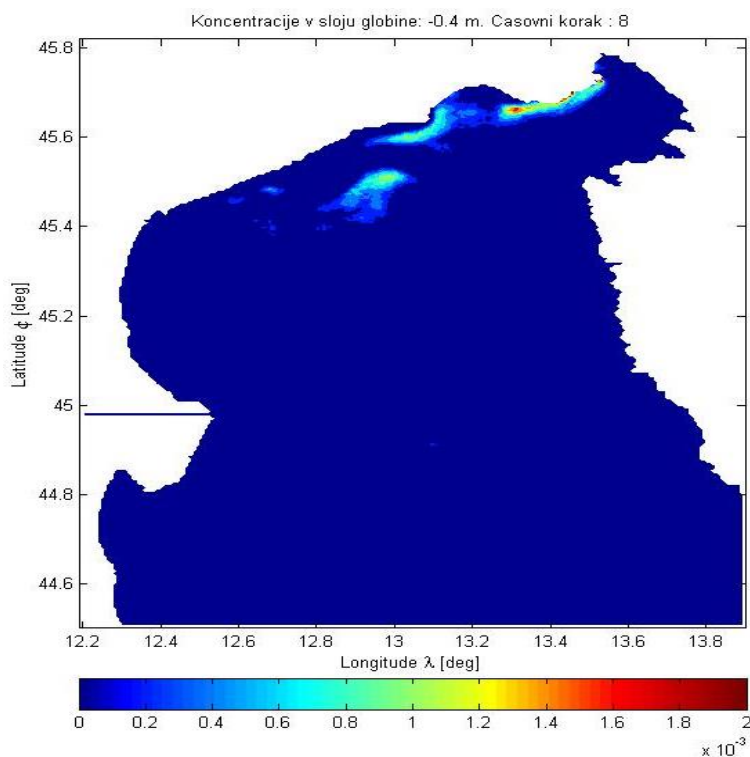


Slika 39: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 18.11.2012 v globini 2,2 m pri nevtralni plavnosti

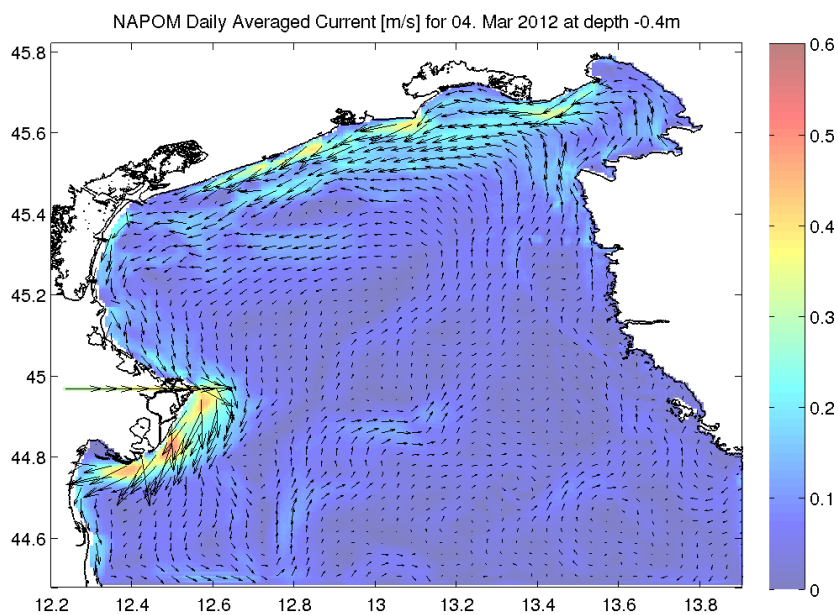
3.1.3 Plavajoči delci, relativna gostota = 0,6

Delci z relativno gostoto 0,6 se pojavljajo v površinskem sloju in slojih tik pod gladino, razen na območjih z zelo močnimi tokovi (običajno vzdolž severne obale severnega Jadrana) ali vertikalnim mešanjem. Koncentracije na slikah so zato višje, zasledimo pa lahko tipičen vzorec širjenja v ciklonalni smeri, kakor poteka generalna cirkulacija v Jadranskem morju. Tudi doseg delcev v teh simulacijah je večji, saj so površinski tokovi močnejši (običajno 10-30 cm/s, v ekstremnih razmerah presežejo 1 m/s), zato delci v enakem času prepotujejo večjo razdaljo.

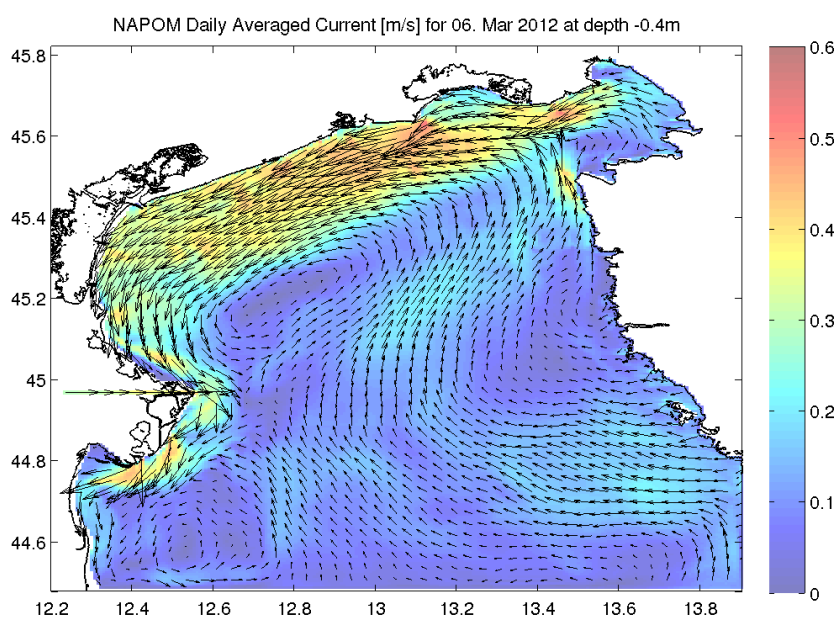
Zimski termin je prikazan na slikah 40 do 47. Na sliki 40 je prikazana koncentracija delcev na dan 4.3.2012, kjer se delci od izliva reke Soče premikajo ob severni obali proti Benetkam. Zaradi nekajdnevni (sicer prekinjenih, najmočnejši na sliki 42, dne 6.3.2012) razmeroma močnih tokov (slike 41 do 46) se delci razmeroma hitro premikajo proti izlivu Pada in na sliki 47 so delci skoncentrirani med Benetkami in izlivom Pada, ob ustju Soče pa se je ustvarilo novo območje z višjo koncentracijo delcev zaradi šibkejšega tokovanja v zadnjem dnevu simulacije.



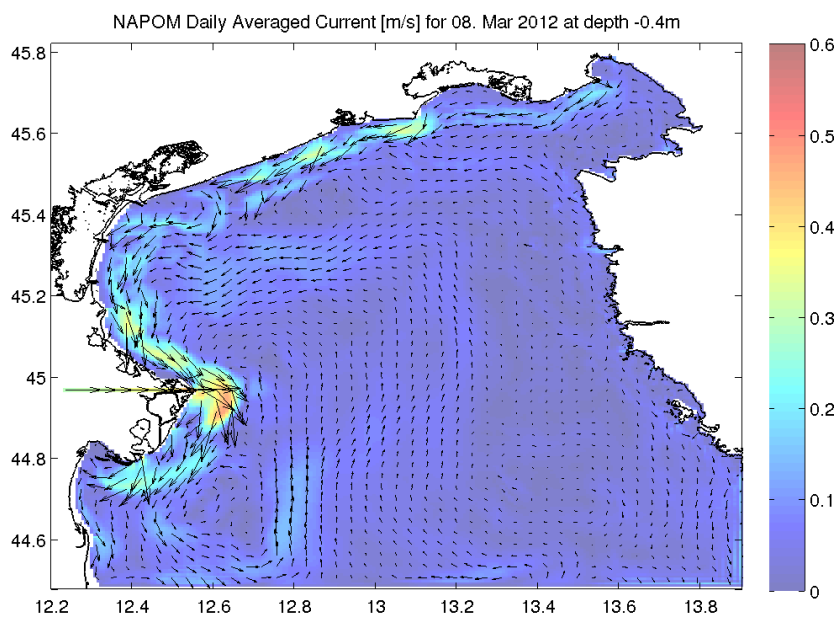
Slika 40: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 4.3.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6



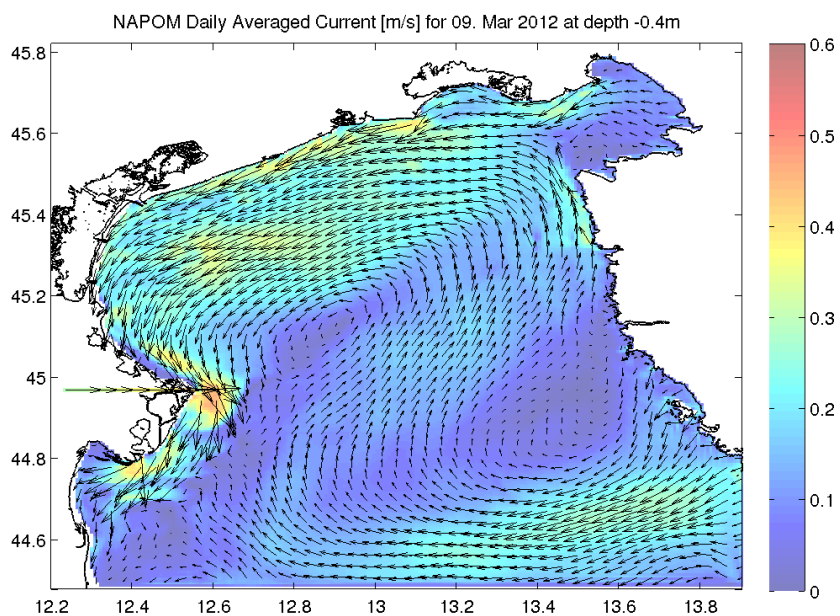
Slika 41: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 4.3.2012 na globini 0,4 m



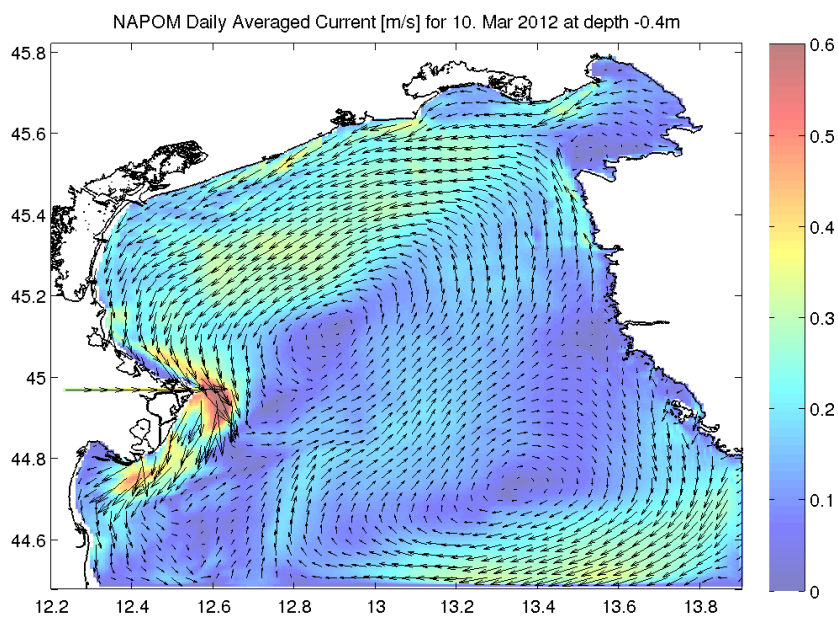
Slika 42: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 6.3.2012 na globini 0,4 m



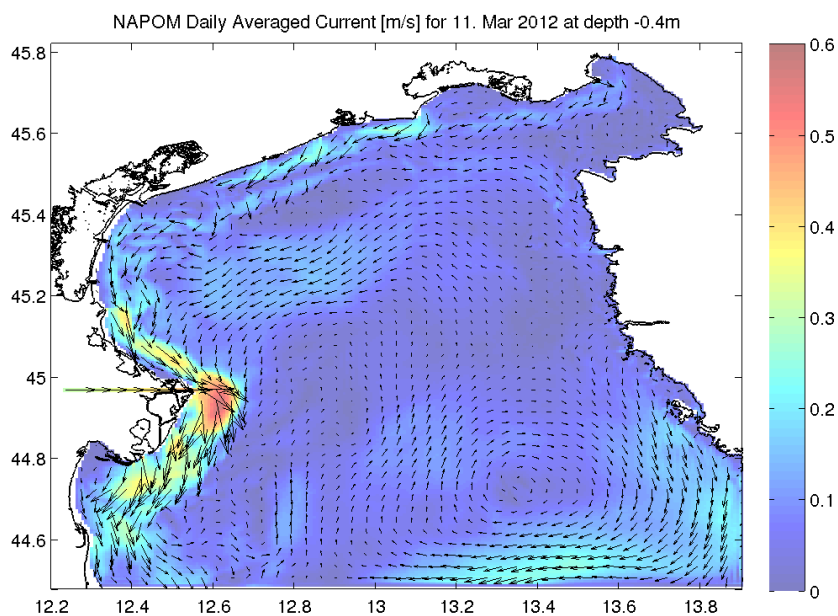
Slika 43: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 8.3.2012 na globini 0,4 m



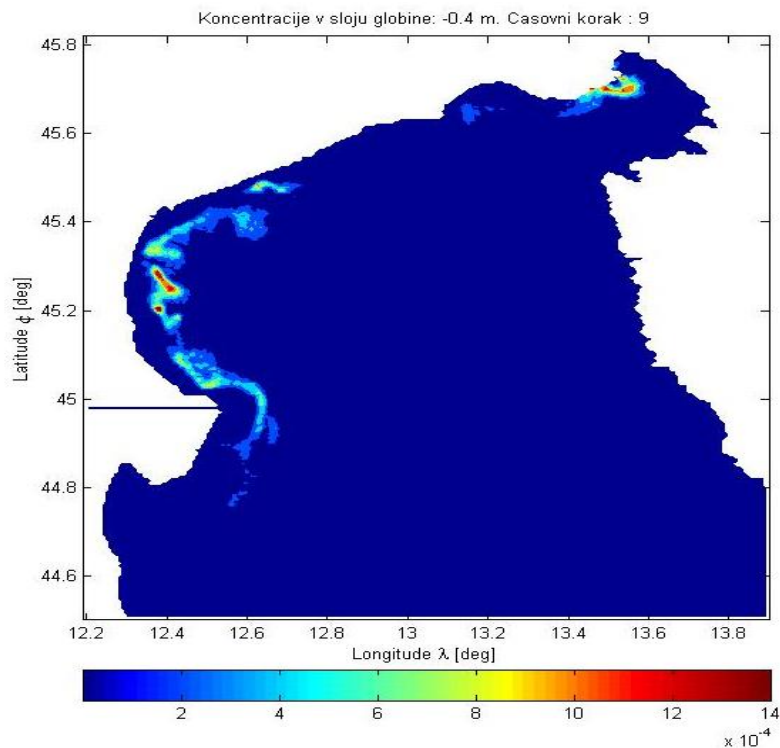
Slika 44: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 9.3.2012 na globini 0,4 m



Slika 45: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 10.3.2012 na globini 0,4 m

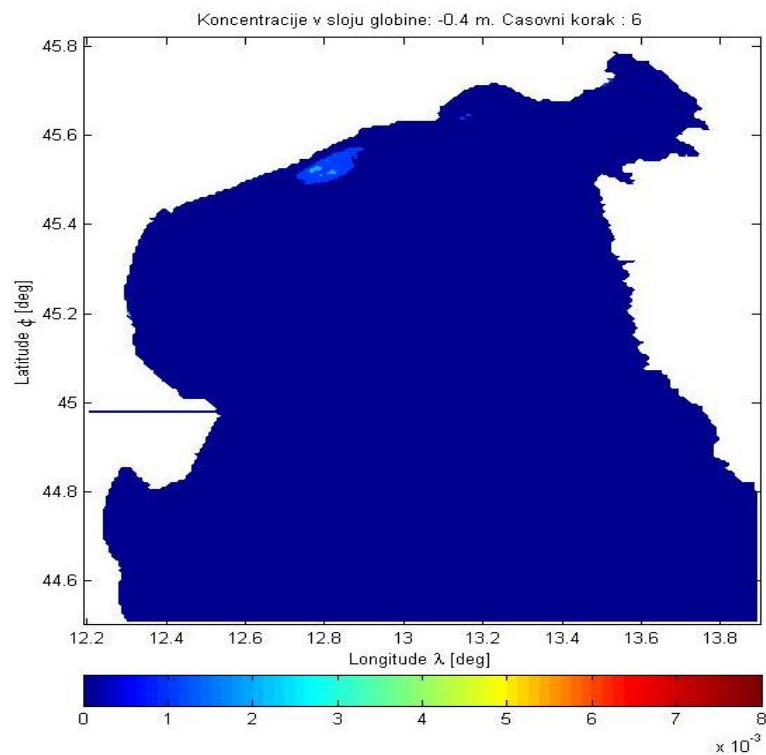


Slika 46: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 11.3.2012 na globini 0,4 m

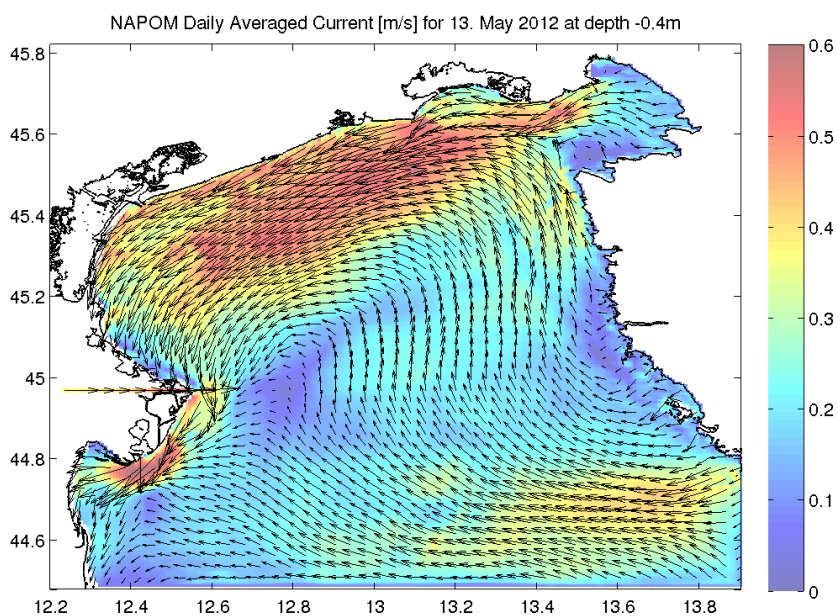


Slika 47: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 11.3.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6

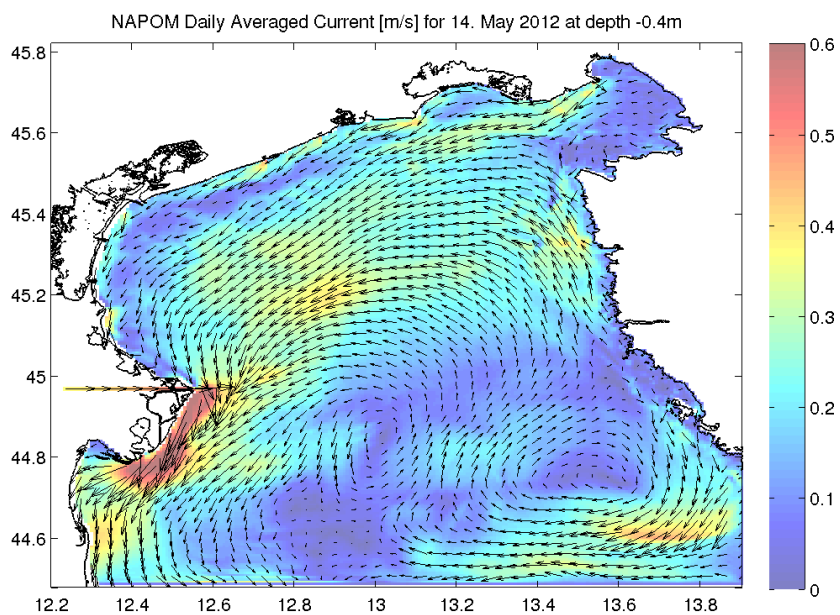
Na slikah od 48 do 57 je prikazana koncentracija delcev v sedmem tednu pomladi. Začetna koncentracija (13.5.2012, slika 48) je zaradi izrazito močnih tokov nizka, tokovi v tem tednu pa kažejo zelo izrazite spremembe (slike 49 do 56). Vrtinec v Severnem Jadranu je vsaj dvakrat zamenjal smer rotacije, pojavljajo se močni tokovi (do 55 cm/s) od izliva Pada proti severu. Delci, ki so v tem tednu vtekali s Sočo so se razporedili v nekaj skupkov na območjih, kamor so jih potisnili tokovi v izrazito spremenljivih cirkulacijskih razmerah (slika 57).



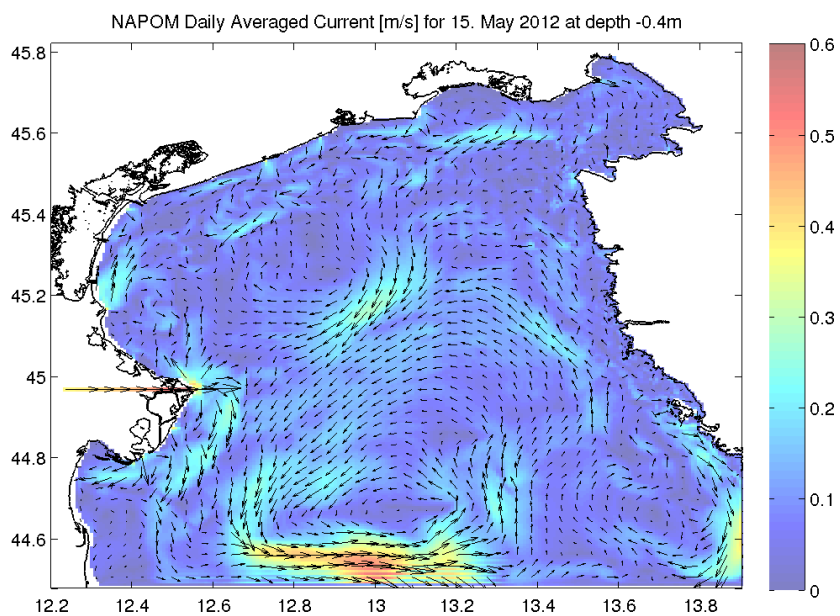
Slika 48: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 13.5.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6



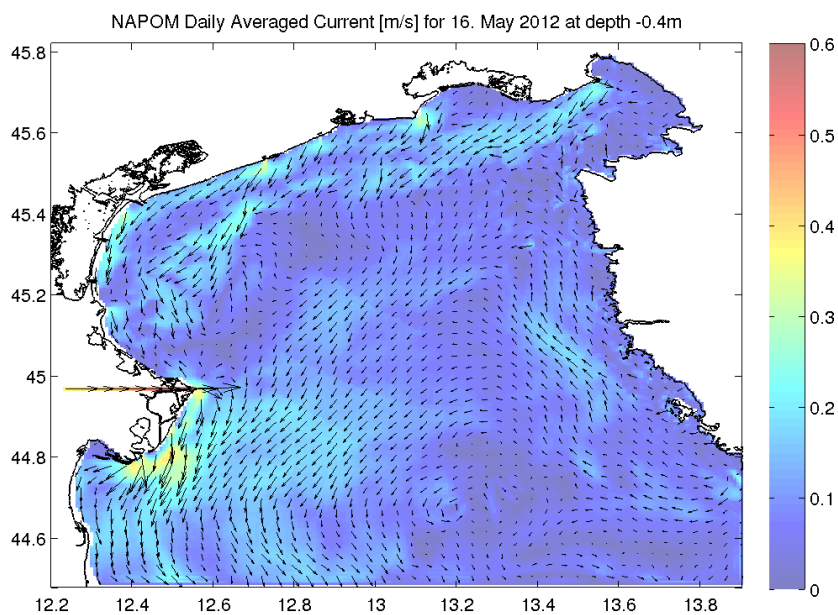
Slika 49: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 13.5.2012 na globini 0,4 m



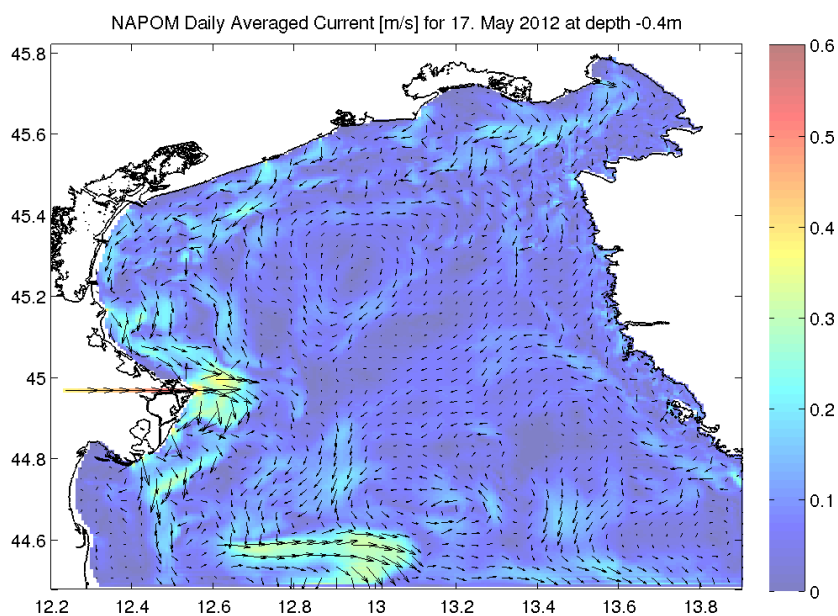
Slika 50: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 14.5.2012 na globini 0,4 m



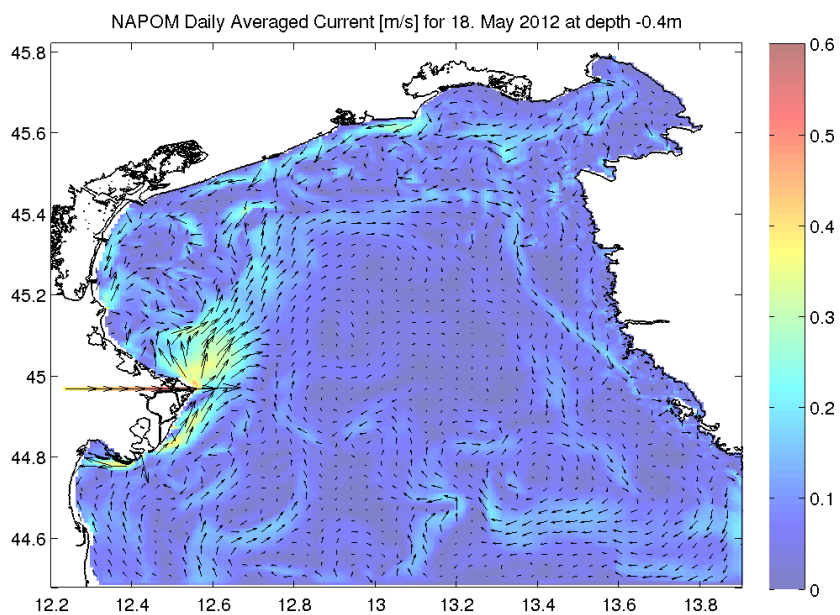
Slika 51: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 15.5.2012 na globini 0,4 m



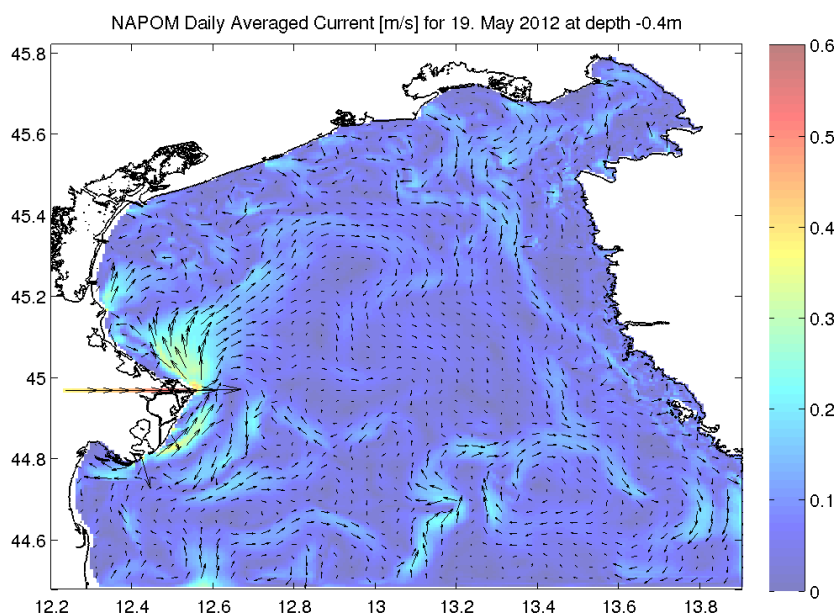
Slika 52: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 16.5.2012 na globini 0,4 m



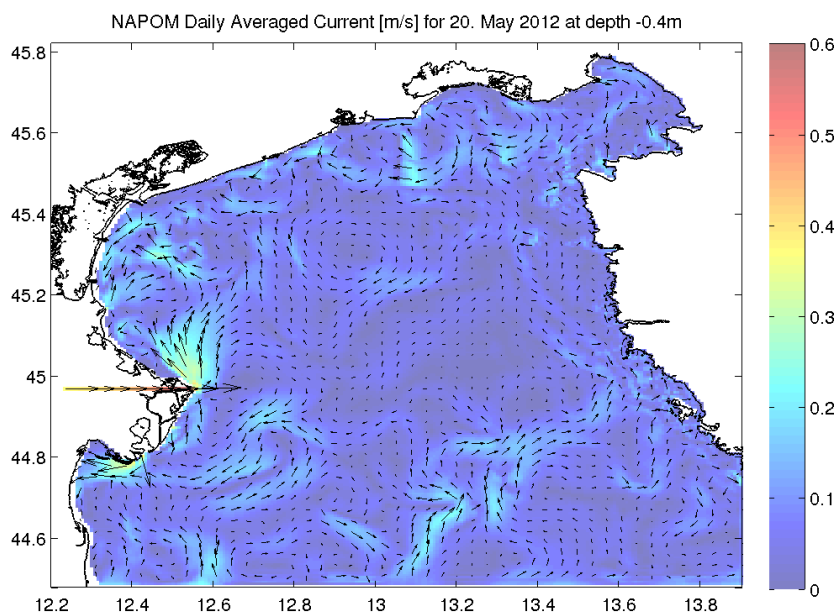
Slika 53: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 17.5.2012 na globini 0,4 m



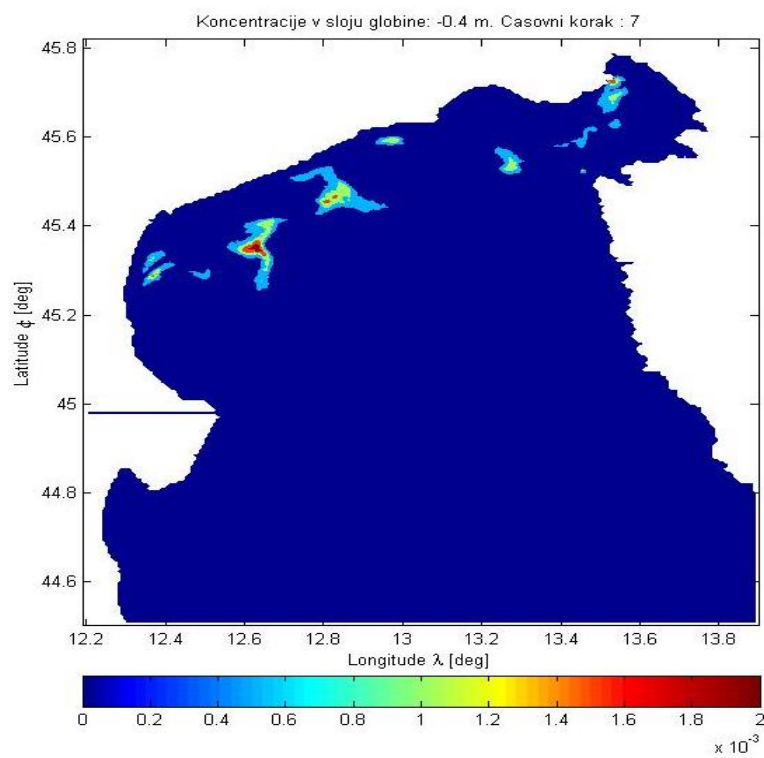
Slika 54: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 18.5.2012 na globini 0,4 m



Slika 55: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 19.5.2012 na globini 0,4 m

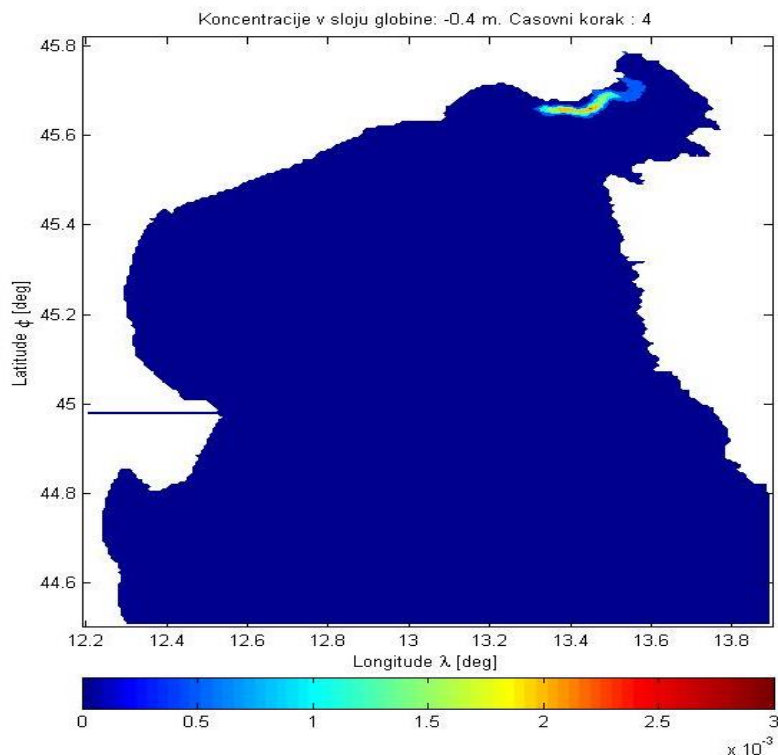


Slika 56: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 20.5.2012 na globini 0,4 m

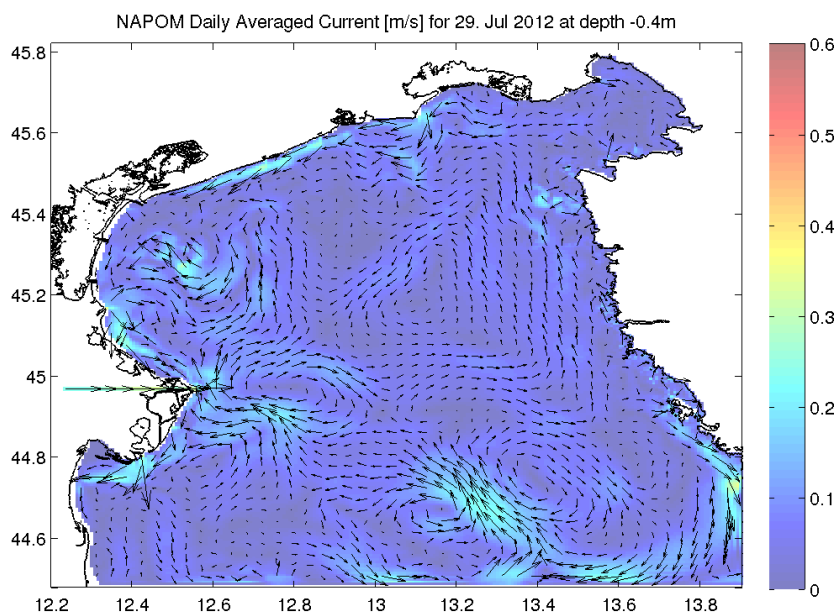


Slika 57: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 20.5.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6

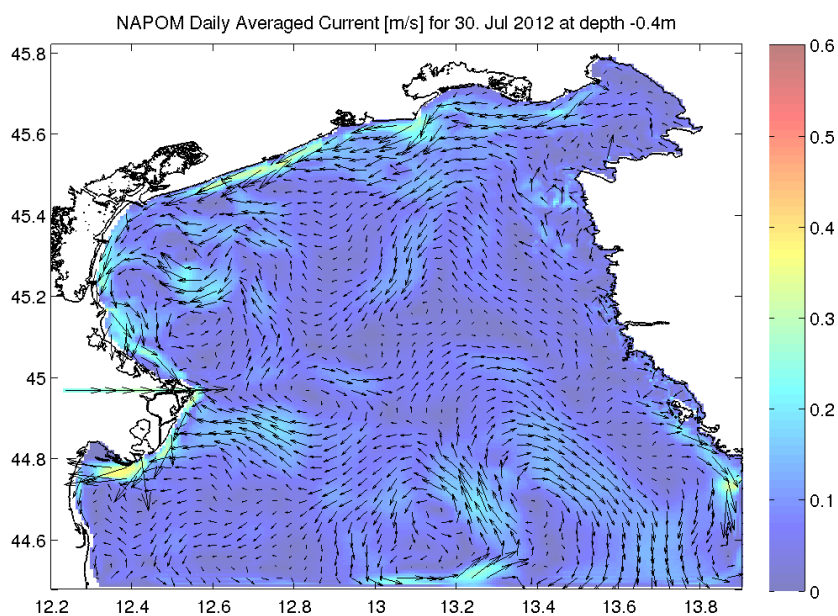
V poletnem simulacijskem obdobju se delci na začetku opazovanega tedna (29.7.2012) pojavljajo na celotni severni polovici Tržaškega zaliva (slika 58). Tokovne razmere v naslednjem tednu (slike od 59 do 66) so delce izven Tržaškega zaliva razpršile. Tokovna slika v tem tednu kaže več manjših, dokaj stalnih vrtincev v Severnem Jadranu, zato se tudi slika koncentracij ob koncu tedna (5.8.2012, slika 67) bistveno ne razlikuje od začetne.



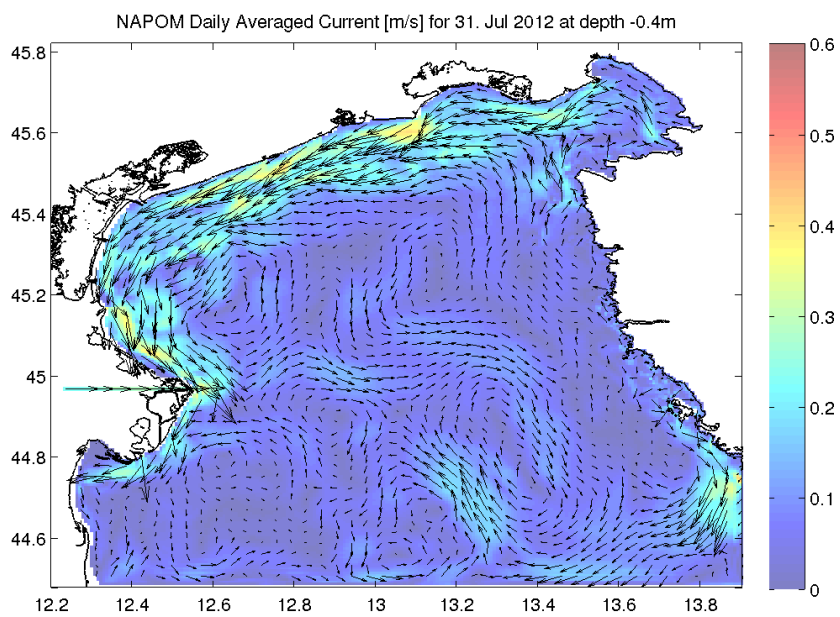
Slika 58: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 29.7.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6



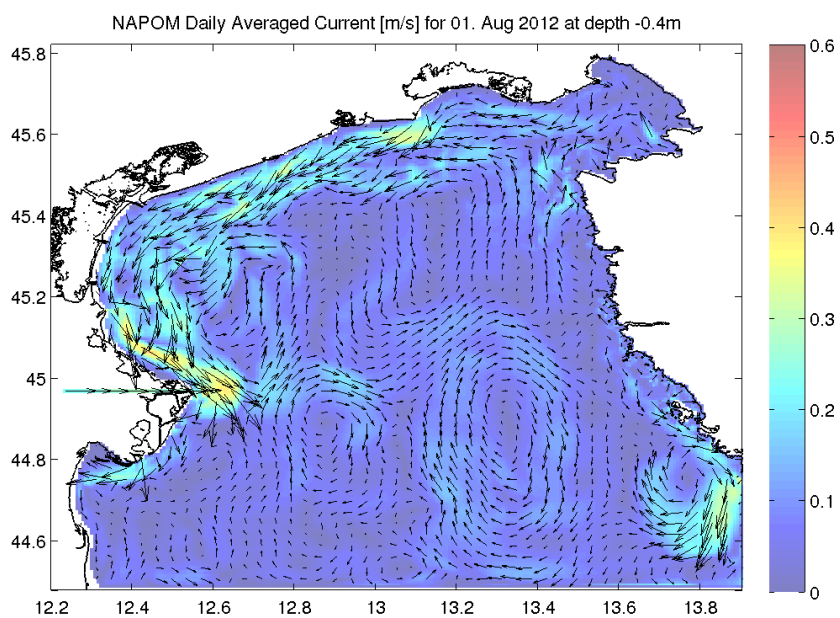
Slika 59: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 29.7.2012 na globini 0,4 m



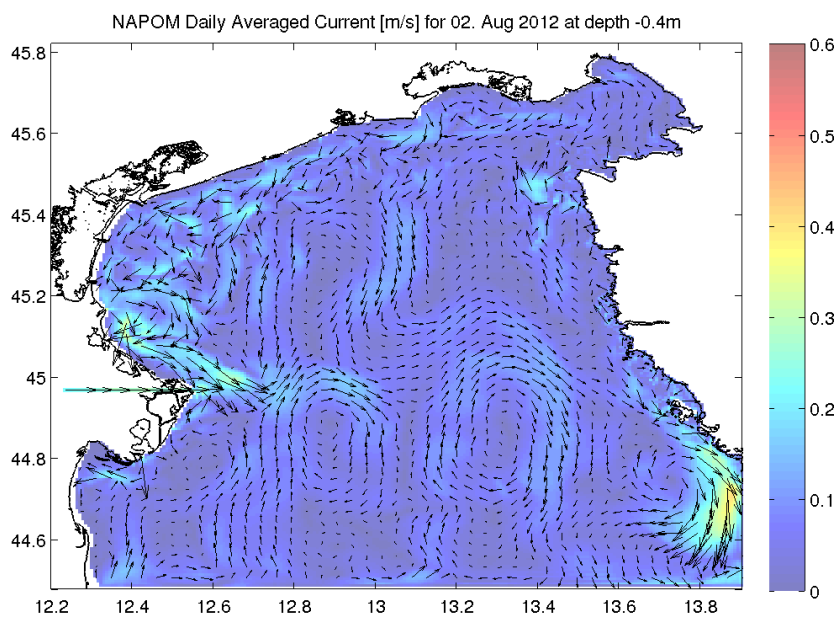
Slika 60: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 30.7.2012 na globini 0,4 m



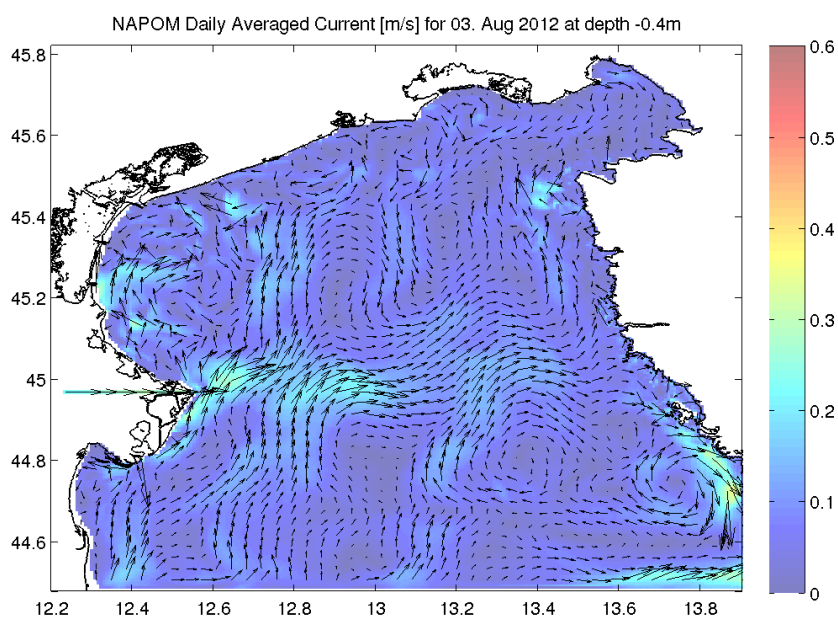
Slika 61: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 31.7.2012 na globini 0,4 m



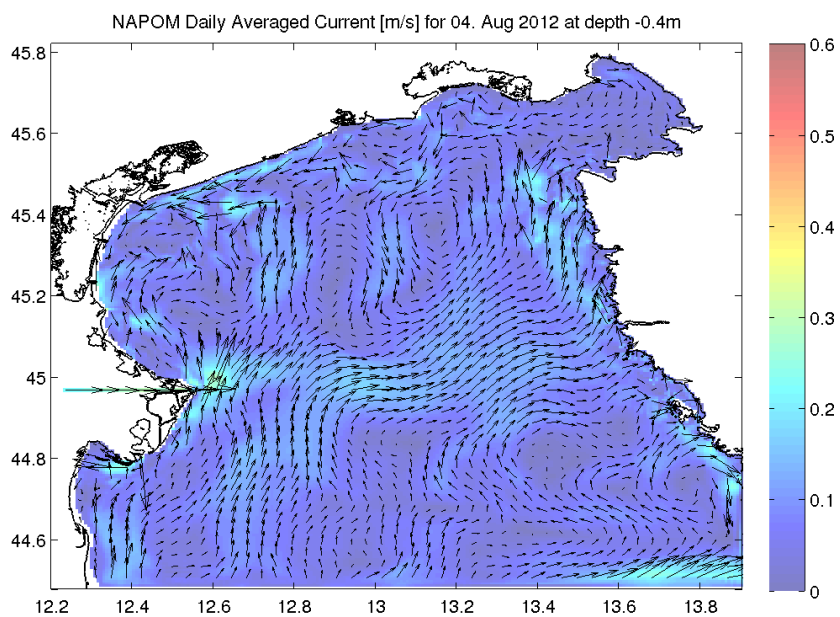
Slika 62: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 1.8.2012 na globini 0,4 m



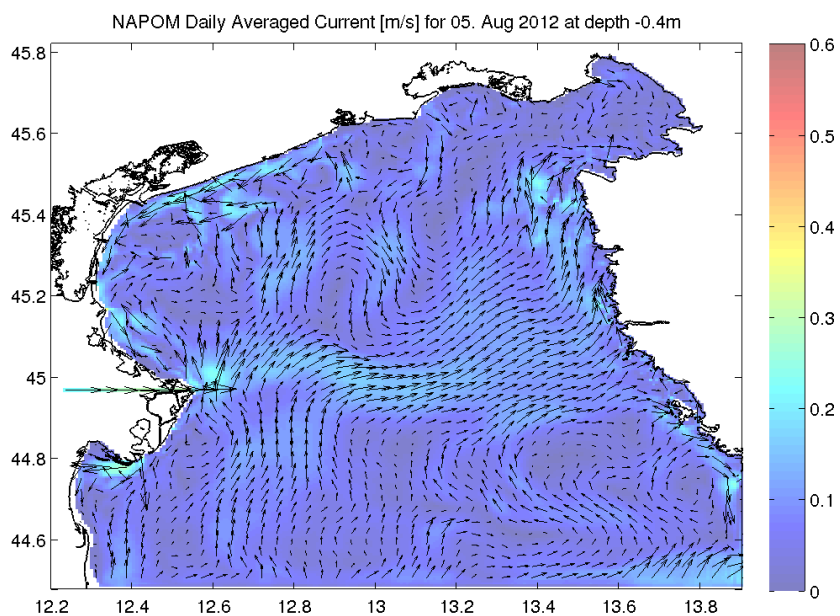
Slika 63: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 2.8.2012 na globini 0,4 m



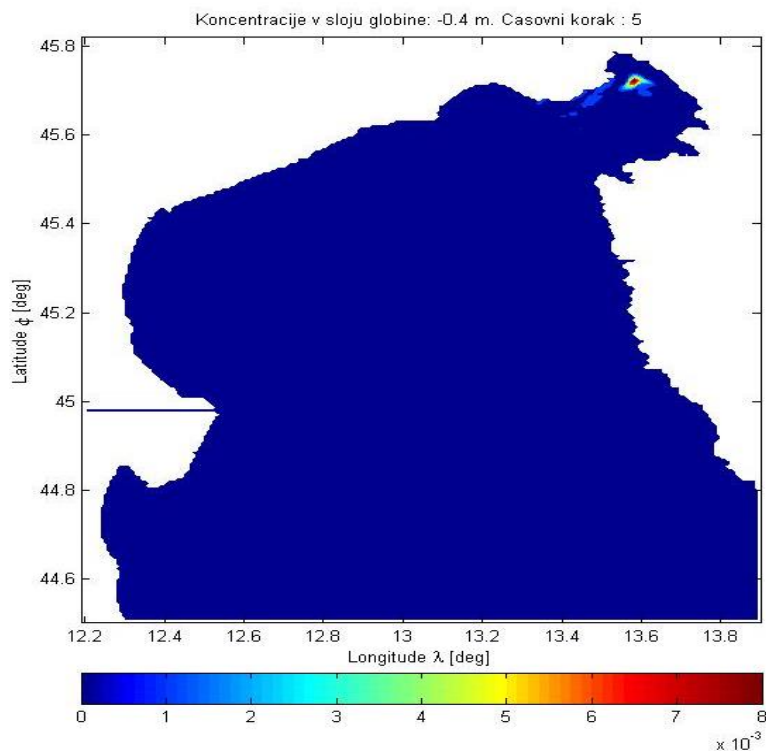
Slika 64: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 3.8.2012 na globini 0,4 m



Slika 65: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 4.8.2012 na globini 0,4 m

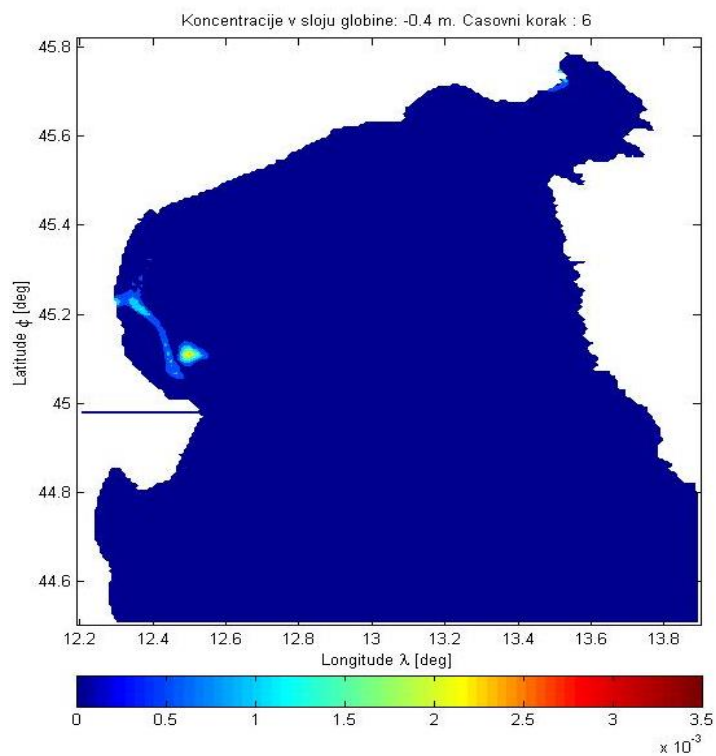


Slika 66: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 5.8.2012 na globini 0,4 m

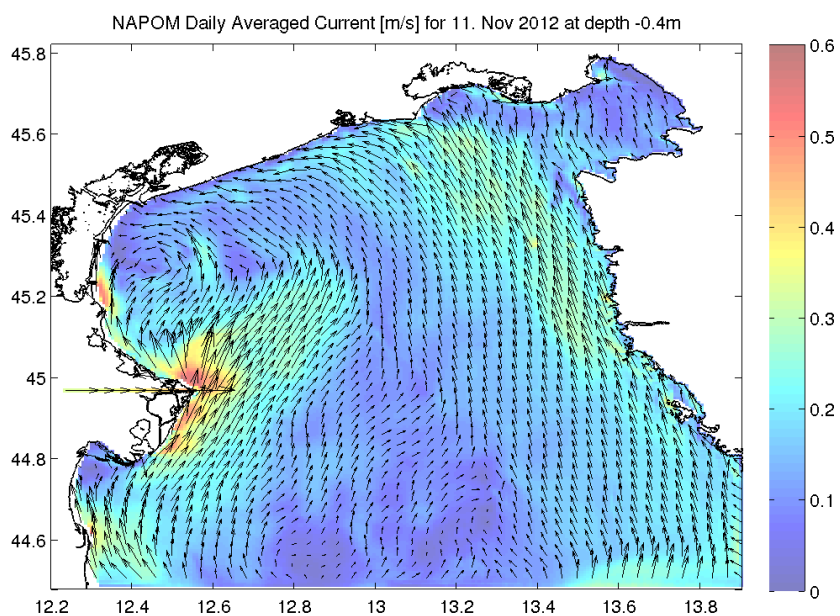


Slika 67: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 5.8.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6

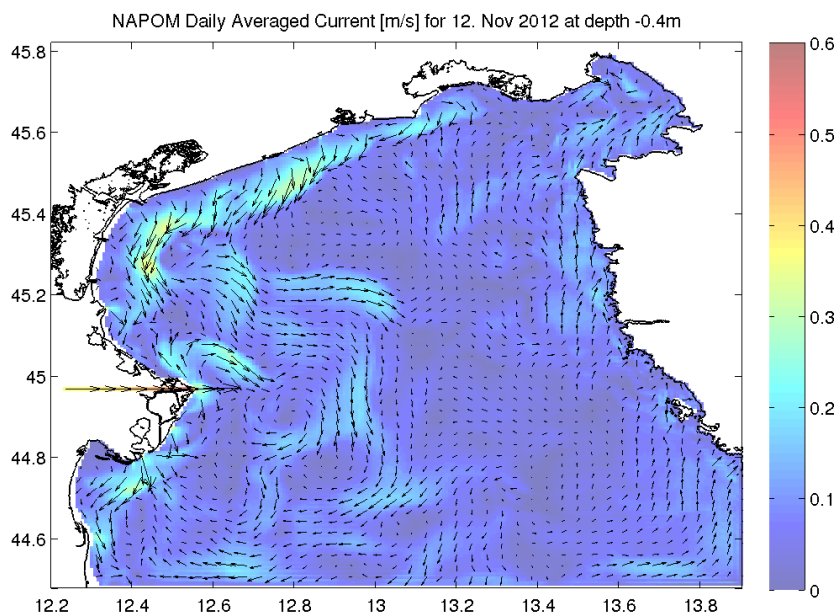
Jeseni se pri plavajočih delcih (11.11.2012, slika 68) pojavijo nekoliko povišane koncentracije ob izlivu Soče ter med Benetkami in izlivom Pada. V naslednjem tednu je tokovanje močnejše (do 40 cm/s) le ob severni obali, v sredini računskega območja pa so tokovi izrazito šibki, pod 10 cm/s (slike od 69 do 76). Ob koncu opazovanega tedna (18.11.2012, slika 77) se zaradi šibkih, konvergentnih tokov pojavi območje z visokimi koncentracijami v sredini Severnega Jadrana. Tam bi se v takih meteoroloških razmerah nakopičilo plavajoče onesnaženje (plastenke, les, ipd.).



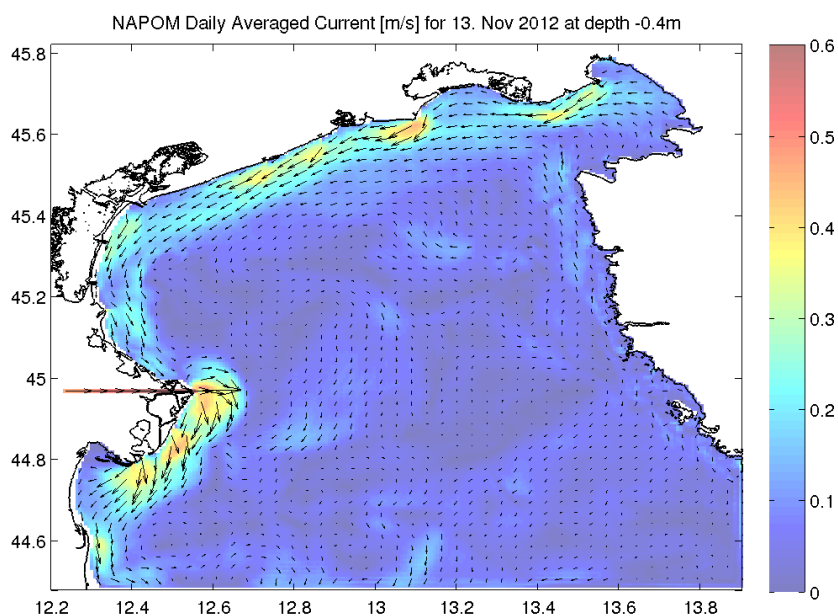
Slika 68: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 11.11.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6



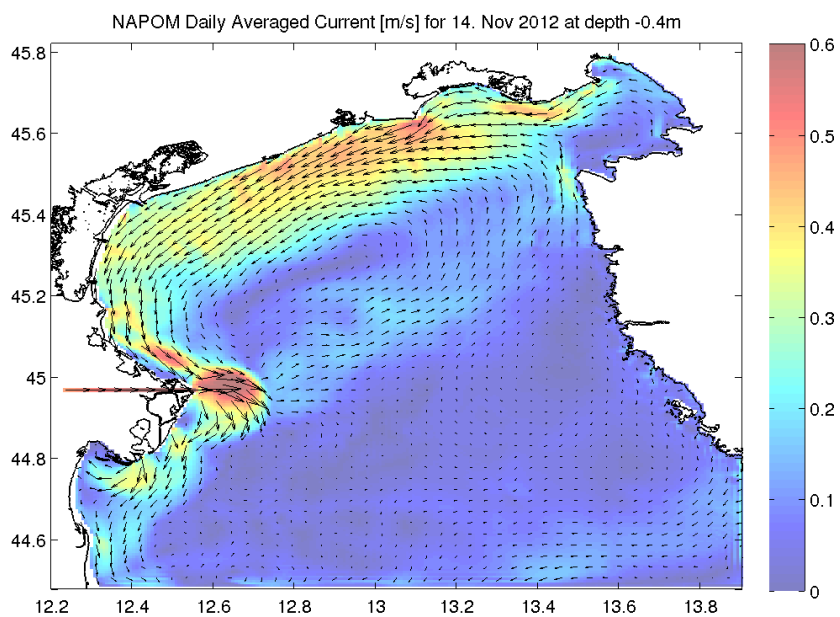
Slika 69: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 11.11.2012 na globini 0,4 m



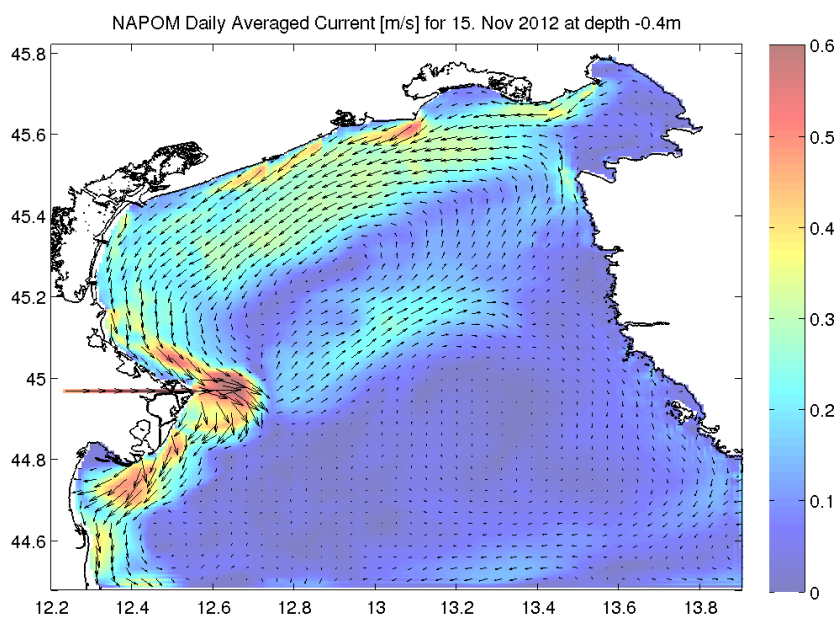
Slika 70: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 12.11.2012 na globini 0,4 m



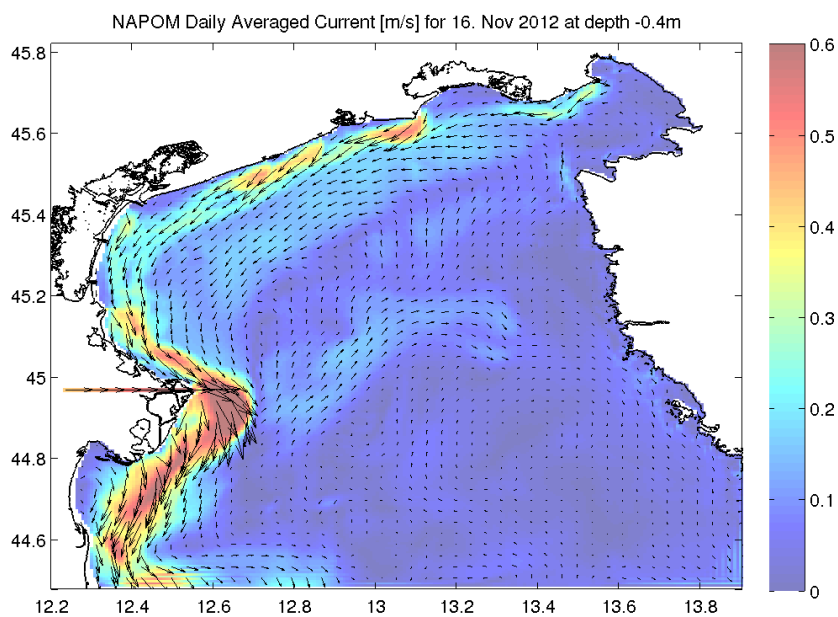
Slika 71: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 13.11.2012 na globini 0,4 m



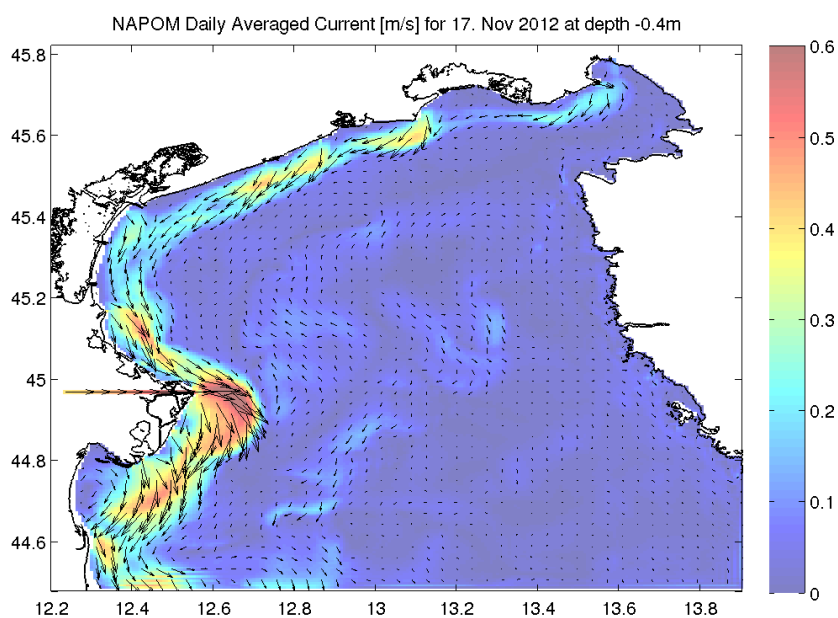
Slika 72: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 14.11.2012 na globini 0,4 m



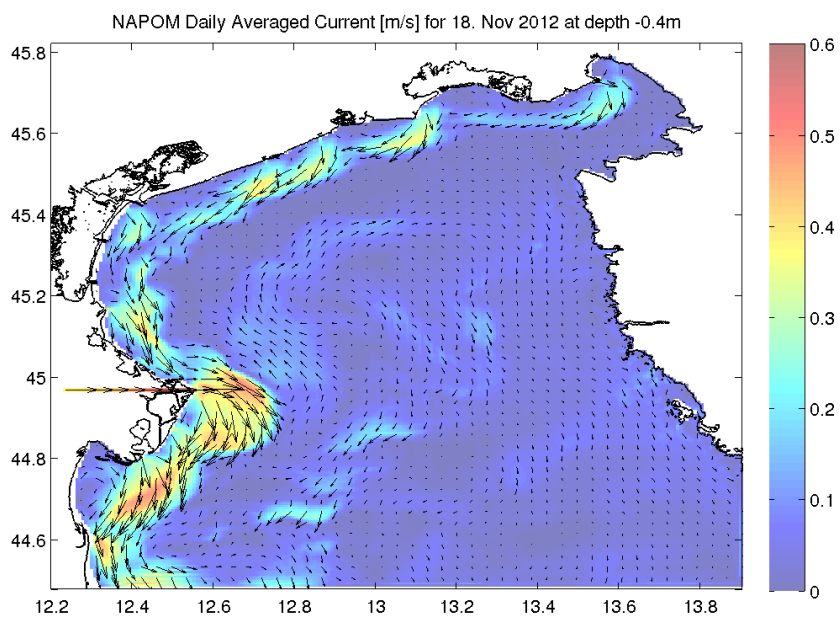
Slika 73: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 15.11.2012 na globini 0,4 m



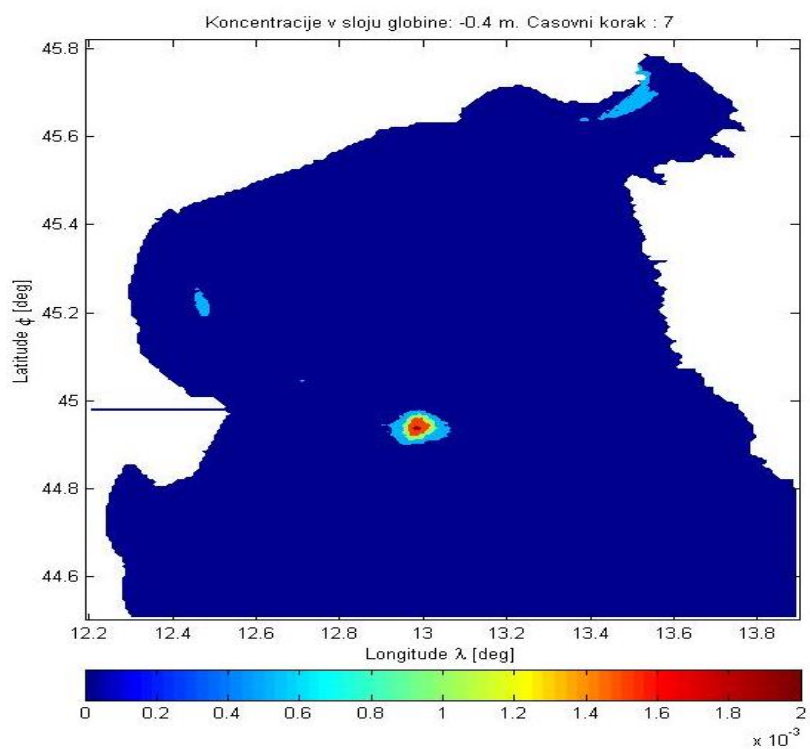
Slika 74: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 16.11.2012 na globini 0,4 m



Slika 75: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 17.11.2012 na globini 0,4 m



Slika 76: Dnevno povprečne slike tokov (hitrosti v m/s) 18.11.2012 na globini 0,4 m



Slika 77: Koncentracije delcev iz reke Soče dne 18.11.2012 v površinskem sloju pri relativni gostoti 0,6

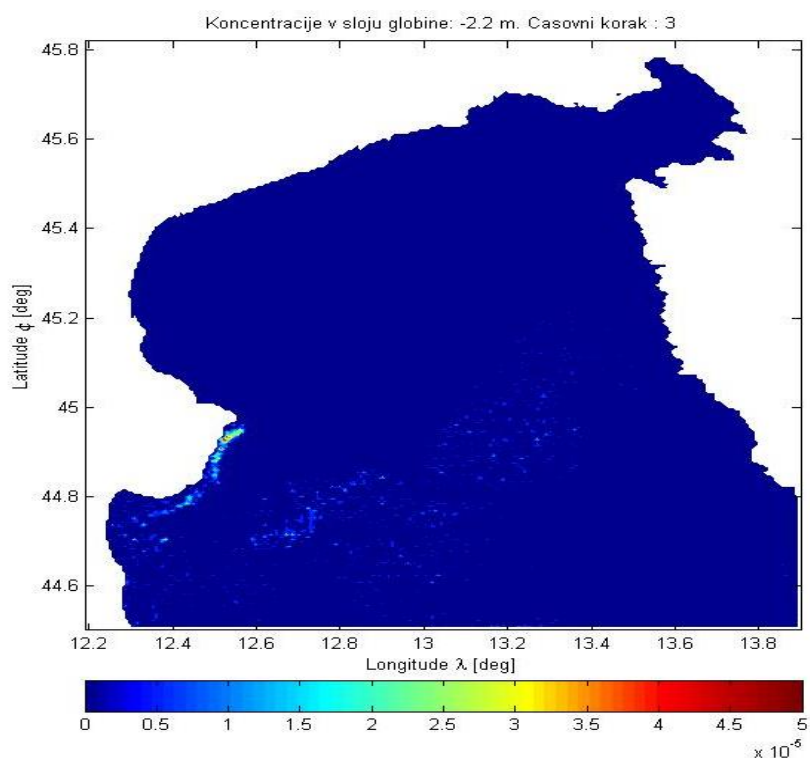
Rezultati dobljeni s simulacijami delcev s pozitivno plavnostjo, ponujajo logične in razumljive zaključke. Delci večinoma potujejo v smeri generalne cirkulacije v Jadranskem morju, ob severni in zahodni obali proti jugu. Ob šibkih vetrovih se lahko delci skoncentrirajo sredi Severnega Jadrana. Na gibanje plavajočih delcev vpliva hitrostno polje v površinskem sloju, na katerega ima v vetrovnih razmerah največji vpliv veter.

3.2 Vtok s Padom

V različnih študijah (npr. Četina, 1997) je bilo prikazano, da se včasih onesnaženje, ki vteka v morje z reko Pad, širi proti vzhodni obali Jadranskega morja. Z izvedenimi simulacijami v poletnih razmerah želimo preveriti, ali se je kaj podobnega zgodilo tudi leta 2012.

3.2.1 Nevtralna plavnost

Na sliki 78 prikazujemo koncentracije delcev z nevtralno plavnostjo v globini približno 2 m. Na slikah 82 in 83 prikazujemo hitrostno polje za datuma 20.7 in 21.7 2012. Vidimo, da so zaradi tokov delci razpršeni na razmeroma velikem območju in da jih veliko število potuje proti vzhodni obali Severnega Jadrana.

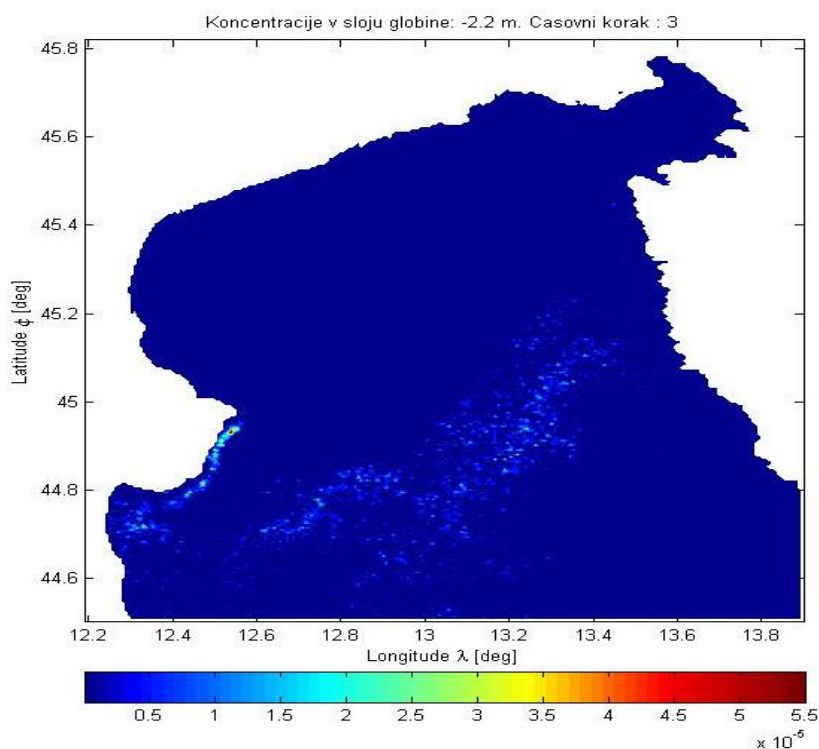


Slika 78: Koncentracije delcev iz Pada 21.7.2012 v globini 2,2 m pri nevtralni plavnost

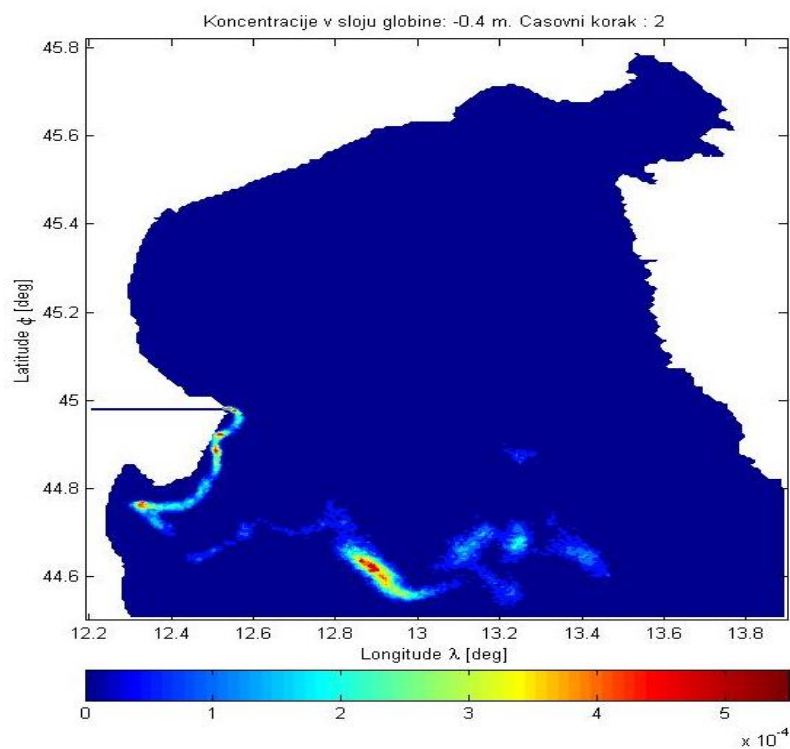
3.2.2 Pozitivna plovnost

Z delci, ki imajo pozitivno plovnost, smo izvedli več računskih primerov. Primerjamo lahko slike koncentracij v sloju na globini 2,2 m pri delcih z različnimi plovnostmi (nevtralno in vedno večjo pozitivno plovnostjo). Na sliki 79 je prikazan primer delcev z minimalno pozitivno plovnostjo (relativna gostota 0,99). Ker so tokovi enaki (sliki 82 in 83), delci pa imajo večji vzgon, je vzorec koncentracij zelo podoben, kot pri delcih z nevtralno plovnostjo, le da so koncentracije višje. Podobno lahko trdimo tudi za delce z relativno gostoto 0,95 (slika 81), ki imajo še nekoliko večji vzgon in zato znatno višje koncentracije pri enakem vzorcu. V vseh treh primerih je razvidno, da se delci širijo globoko v Severni Jadran in da bi morebitno onesnaženje iz Pada lahko doseglo obalo Istre. Trajektorije, po katerih potujejo delci od izliva Pada proti notranjosti zaliva pa so razmeroma blizu odprtega roba, kjer lahko vpliv robnega pogoja iz večje domene znatno pokvari rezultate, zato niti tokovom niti koncentracijam ne gre popolnoma zaupati.

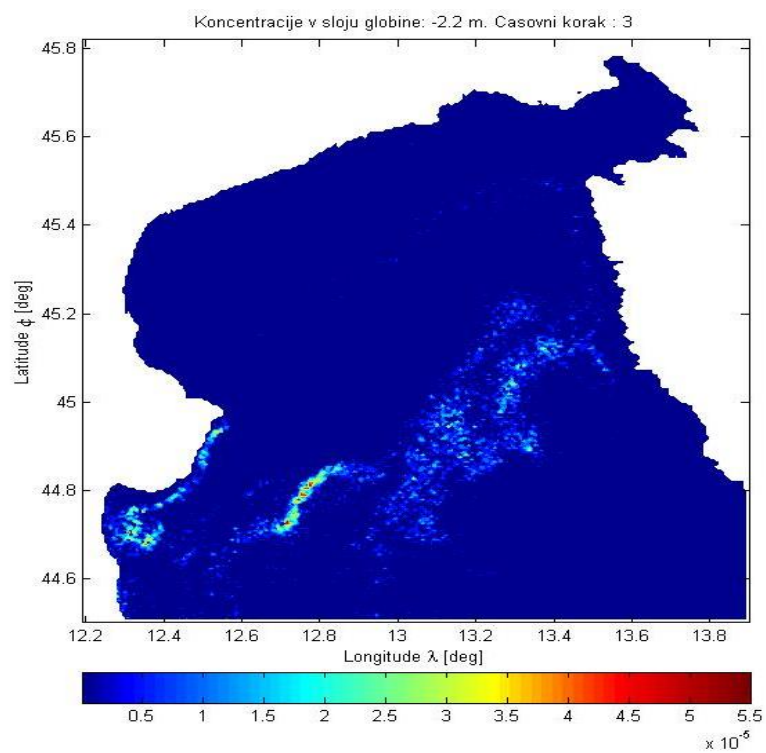
Prikazujemo še tedensko sliko tokov med 7.7. in 14.7.2012 (slike 86–93) ter pripadajoče začetno (slika 85) in končne slike koncentracij v površinskem sloju pri različnih plovnostih delcev (slike 80, 84, in 94). Delci z nižjo relativno gostoto in večjo plovnostjo po pričakovanjih dajejo višje koncentracije v površinskem sloju (ponovno opozarjamo na relativno barvno lestvico!) V vseh treh primerih so vzorci koncentracij podobni. Iz slike tokov je razvidno, da se delci širijo od ustja Pada proti JV, kjer se ob odprtem robu obrnejo proti vzhodu. Ta obrat povzroči tokovno polje, ki ob odprtem (južnem) robu kaže pretežno proti vzhodu, kar je najverjetneje posledica robnega pogoja na odprtem robu v cirkulacijskem modelu.



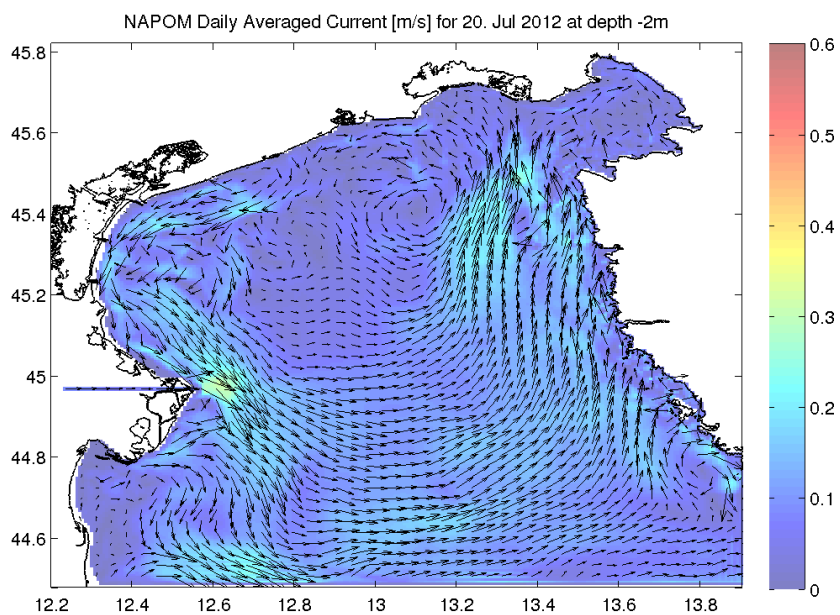
Slika 79: Koncentracije delcev iz Pada 21.7.2012, globina 2,2 m, relativna gostota 0,99



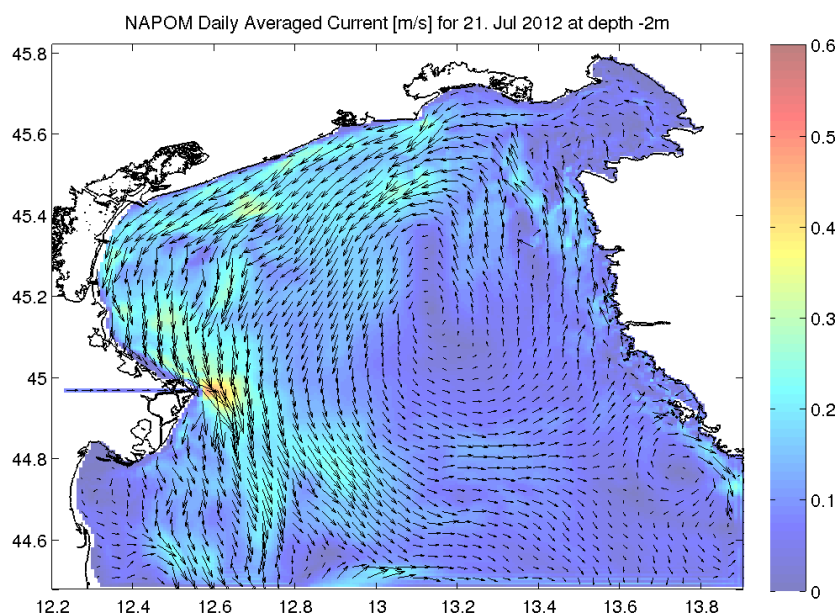
Slika 80: Koncentracije delcev iz Pada 14.7.2012, površinski sloj, relativna gostota 0,9



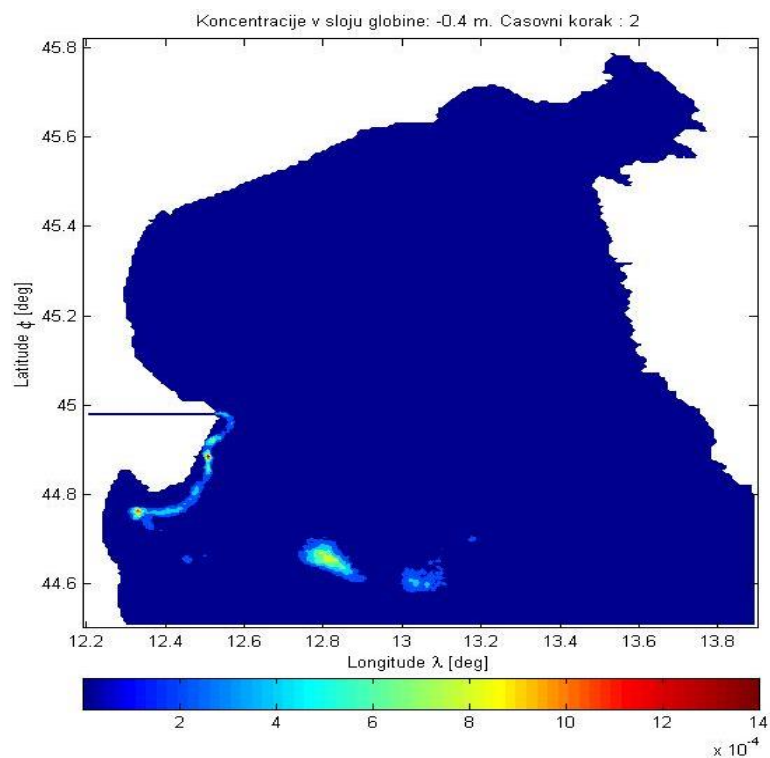
Slika 81: Koncentracije delcev iz Pada 21.7.2012, globina 2,2 m, relativna gostota 0,95



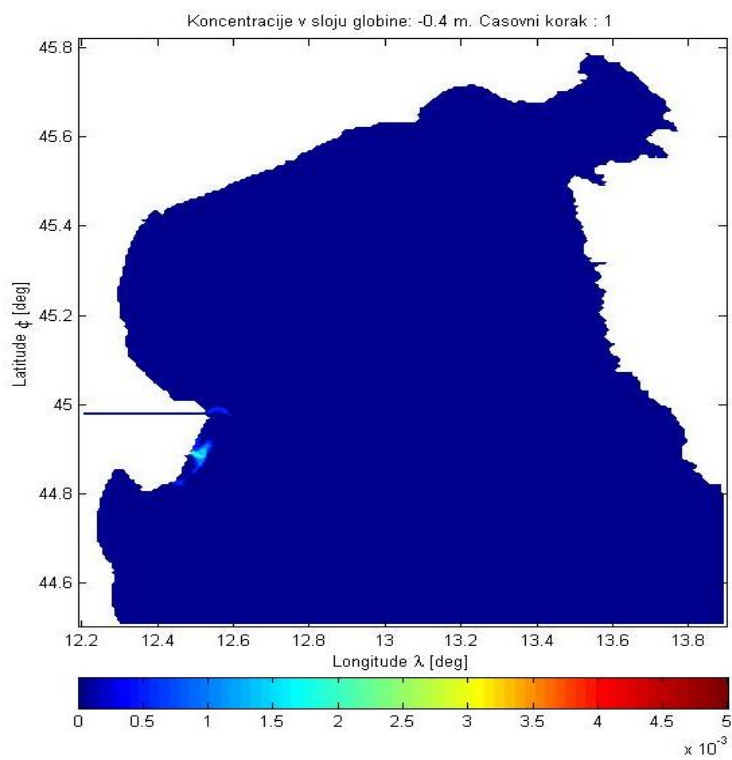
Slika 82: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 20.7.2012 na globini 2 m



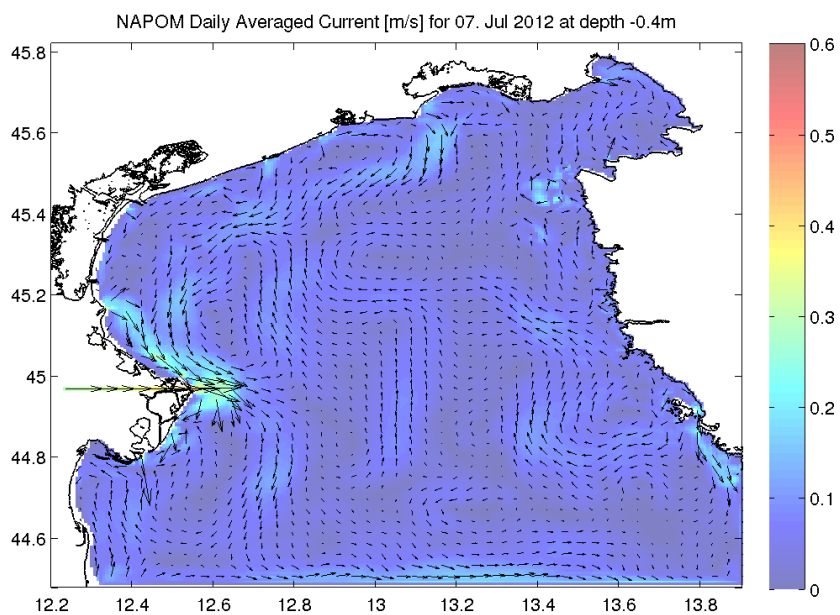
Slika 83: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 21.7.2012 na globini 2 m



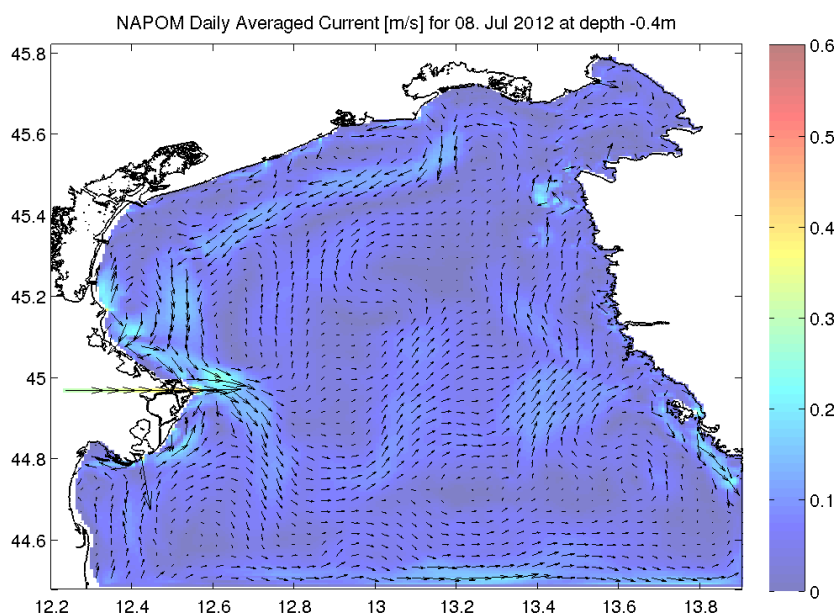
Slika 84: Koncentracije delcev iz Pada 14.7.2012, površinski sloj, relativna gostota 0,8



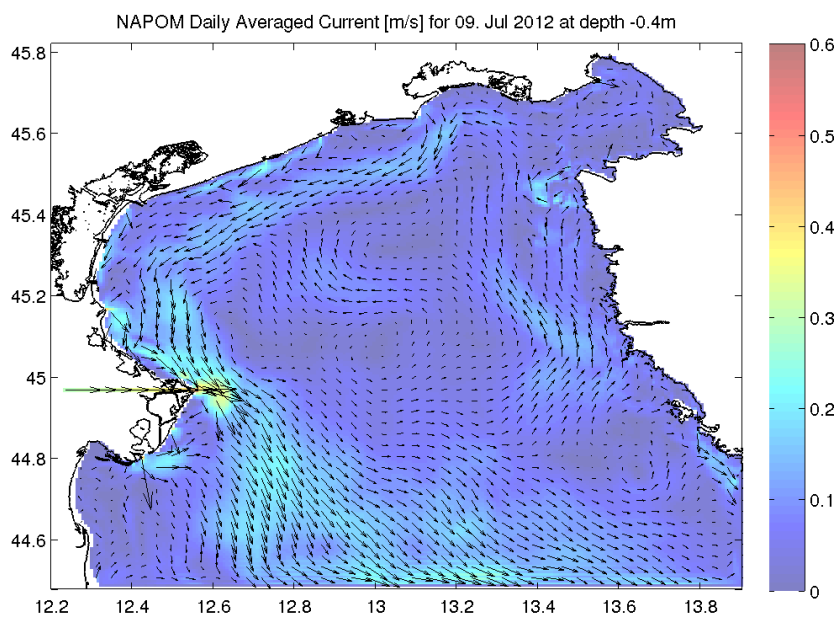
Slika 85: Koncentracije delcev iz Pada 7.7.2012, površinski sloj, relativna gostota 0,6



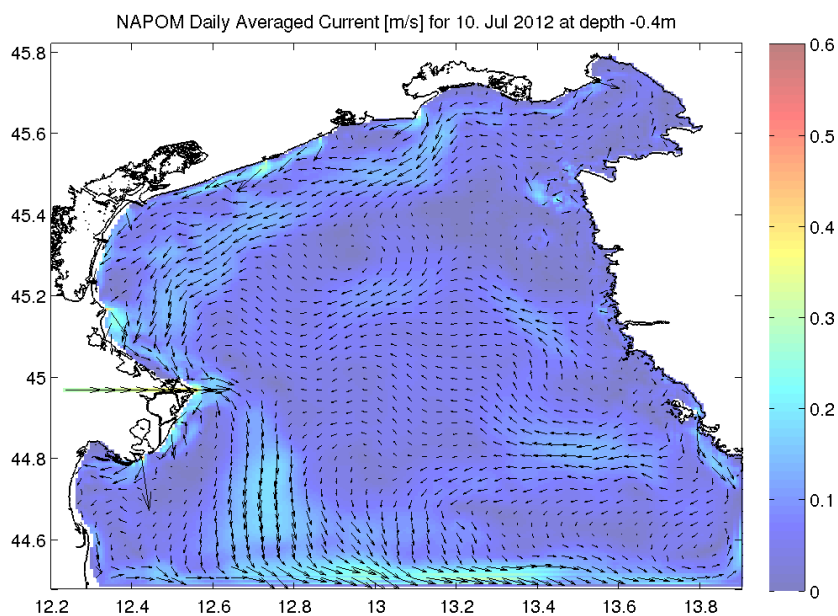
Slika 86: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 7.7.2012 na globini 0,4 m



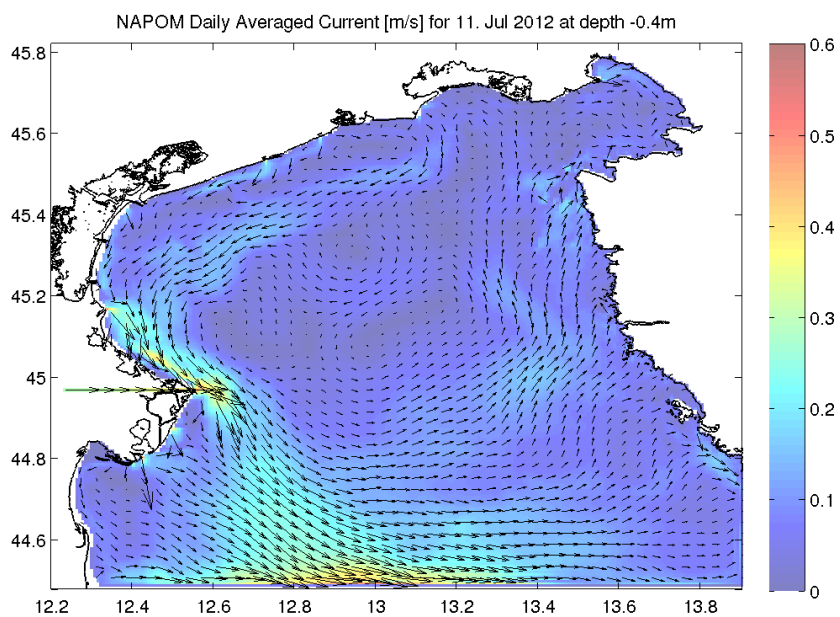
Slika 87: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 8.7.2012 na globini 0,4 m



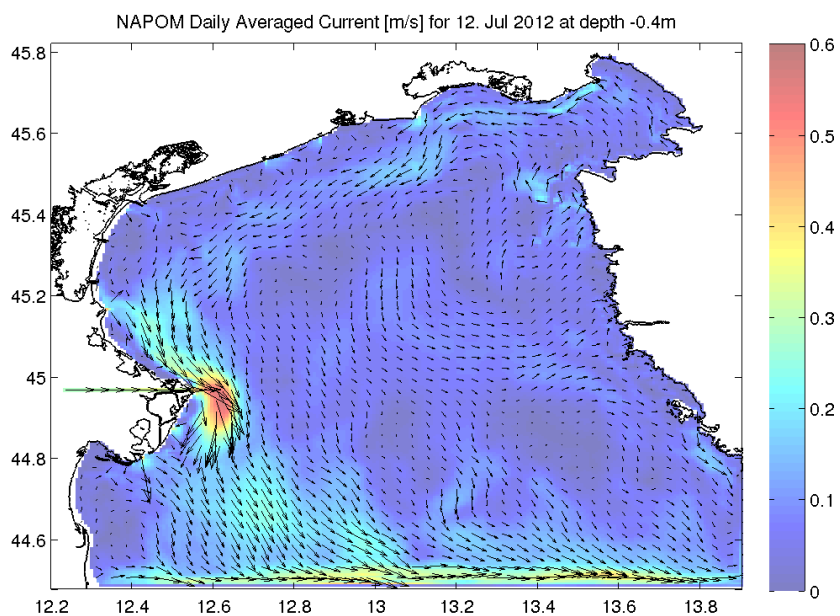
Slika 88: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 9.7.2012 na globini 0,4 m



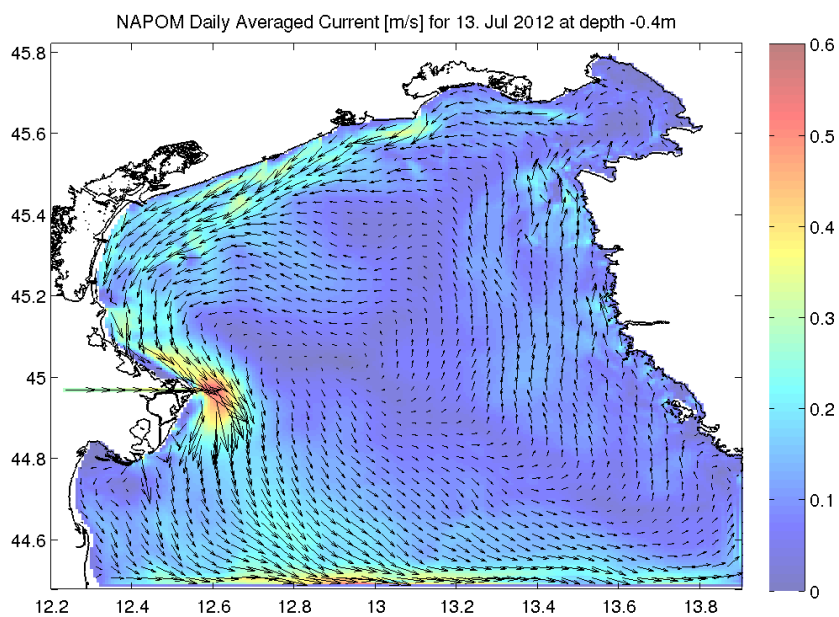
Slika 89: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 10.7.2012 na globini 0,4 m



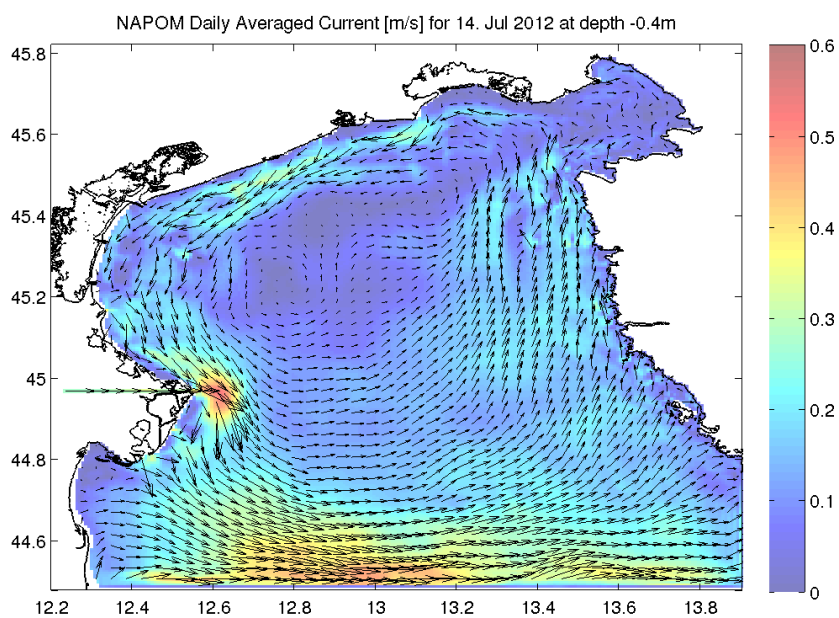
Slika 90: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 11.7.2012 na globini 0,4 m



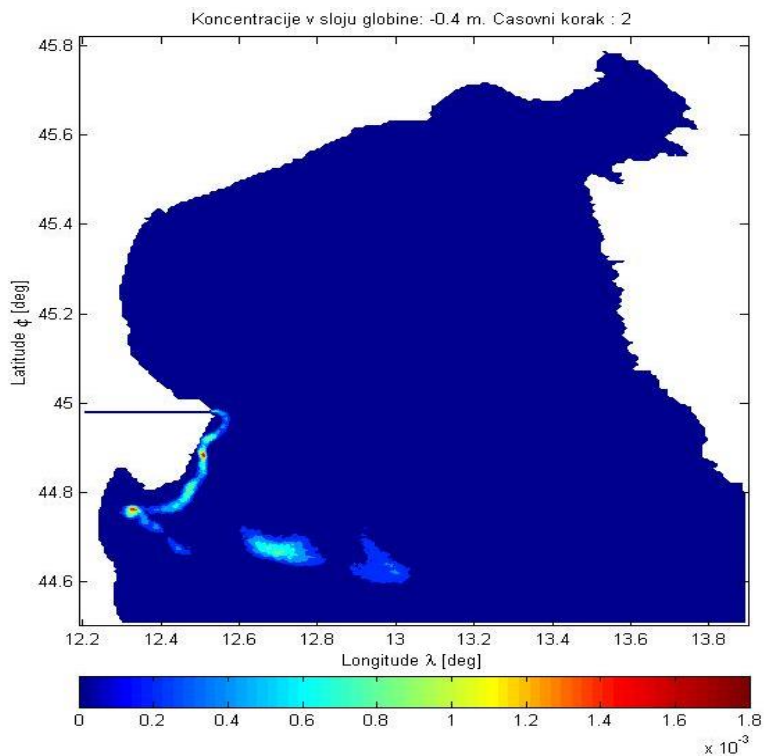
Slika 91: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 12.7.2012 na globini 0,4 m



Slika 92: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 13.7.2012 na globini 0,4 m



Slika 93: Dnevno povprečna slika tokov (hitrosti v m/s) 14.7.2012 na globini 0,4 m



Slika 94: Koncentracije delcev iz Pada 14.7.2012, površinski sloj, relativna gostota 0,6

4 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo simulirali širjenja onesnaženja v Severnem Jadranu prek celega leta s sezonskimi simulacijami tokov in vtokoma Soče in Pada. V morju se onesnaženje z negativno plavnostjo usede na dno blizu vtoka, delci z nevtralno plavnostjo pa se porazdelijo po celotnem vodnem stolpcu in se premikajo počasneje. Višje koncentracije se pri Soči pojavljajo razmeroma blizu izliva, občasno ga tokovi porinejo tudi v Tržiški zaliv in ob vzhodno obalo zaliva. Takšno onesnaženje (npr. živo srebro) bi lahko negativno vplivalo na školjčičišča ob italijanski obali Tržaškega zaliva. Pri Padu se onesnaženje delcev z nevtralno plavnostjo širi globoko v Severni Jadran in bi lahko doseglo istrsko obalo. Plavajoči delci večinoma ostanejo na gladini in se premikajo s hitrejšimi tokovi v površinskem sloju. Prikazali smo slike koncentracij, iz katerih je razvidno, da se plavajoče onesnaženje giblje v smeri generalne cirkulacije, ob šibkih tokovih pa se lahko delci skoncentrirajo tudi v sredini zaliva. Koncentracije so odvisne od tokov in turbulence in so višje v mirnih razmerah, ob hujšem vetru in močnejšem gibanju vode pa se delci razširijo na večje območje in so koncentracije ustrezno nižje.

Simulacije smo izvedli le z vnaprej izračunanimi tokovi za leto 2012. Simulacije bi bilo vredno, ko bodo tokovna polja na voljo, izvesti tudi za druga leta in poiskati še morebitne druge tipične »vzorci«, ki jih lahko onesnaženje različnih vrst tvori v Severnem Jadranu. Za bolj zanesljive simulacije vtoka onesnažil s Padom bi bila potrebna hitrostna polja nekoliko večjega modelskega območja, saj je iztok blizu odprtega roba, kjer je NAPOM povsem odvisen od kvalitete robnih pogojev, generalna cirkulacija pa kaže ravno v normalni smeri na odprti rob.

VIRI

Centa, M. 2008. Modeliranje transporta hranil v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Centa): 100 str.

Četina, M. 1992. Tridimenzionalni matematični baroklini model za izračun tokov v jezerih in morju. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Četina): 72 str.

Četina, M. 1997. 3D Mathematical Modelling of the Po River Inflow into the Northern Adriatic. Ecology and the Environment, Water Pollution IV: 637-646.

Četina, M., Rajar, R., Povinec, P. 2000. Modelling of circulation and dispersion of radioactive pollutants in the Japan sea. Oceanologica Acta 23: 819-836.

Galuf, S. 2005. Simulacija razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Galuf): 71 str.

Horvat, M., Covelli, S., Faganeli, J., Logar, M., Mandić, V., Rajar, R., Širca, A., Žagar, D. 1999. Mercury in contaminated coastal environments; a case study: the Gulf of Trieste. The Science of the Total Environment 237/238: 43-56.

Jeglič, T. 2010. Modeliranje razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Jeglič): 51 str.

Ličer, M., Žagar, D., Jeromel, M., Vodopivec, M. 2012. Numerični modeli za določanje stanja morja v Jadranskem bazenu. Ujma: 164-167.

Lee, L. M., P., Dawson, N M., Neill, P., S., Robins, E., P., Houghton, D. R., J., Doyle, K., T., Hays, C., G. 2013. Identification of genetically and oceanographically distinct blooms of jellyfish. J. R. Soc. Interface 2013 10, 20120920, published online 3 January 2013: 11 p. <http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/10/80/20120920.short?rss=1> (Pridobljeno 30. 4. 2014.)

Rajar, R., Četina, M. 1997. Hydrodynamic and water quality modellinh. An experience. Ecological Modelling 101: 195-207.

Rajar, R., Četina, M., Širca, A. 1997. Hydrodynamic and water quality modelling. Case Studies. Ecological Modelling 101: 209-228.

Rajar, R., Žagar, D., Četina, M., Akagi, H., Yano, S., Tomiyasu, T., Horvat, M. 2004. Application of three-dimensional mercury cycling model to coastal seas. *Ecological Modelling* 171: 139-155.

Ramšak, V. 2005. Simulacija izmenjave živega srebra med vodo in zrakom s 3-D modelom PCFLOW3D v Tržaškem zalivu. *Diplomska naloga*. Ljubljana (samozaložba V. Ramšak): 127 str.

Ramšak, V., Malačič, V., Ličer, M., Kotnik, J., Horvat, M., Žagar, D. 2013. High-resolution pollutant dispersion modelling in contaminated coastal sites. *Environmental research* 125: 103-112.

Širca, A. 1992. Modeliranje transporta polutantov po metodi sledenja delcev. *Magistrsko delo*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Širca): 87 str.

Širca, A. 1996. Modeliranje hidrodinamike in transporta živosrebrovih spojin v Tržaškem zalivu. *Acta hydrotechnica* 14: 5-102.

Širca, A., Rajar, R., Horvat, M. 1999. Mercury transport and fate in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic) – a two-dimensional modelling approach. *Environmental Model Software* 14: 645-655.

Šoško, H. 2012. Modeliranje širjenja nafte v morskem okolju po metodi trajektorij. *Diplomska naloga*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba H. Šoško): 44 str.

Žagar, D. 1994. Matematični model za simuliranje razlitja nafte na morju in njegova aplikacija. *Magistrska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Žagar): 68 str.

Žagar, D. 1999. Razvoj in aplikacija tridimenzionalnega modela za simulacijo transporta in procesov pretvorb živega srebra v morskem okolju. *Acta hydrotechnica* 17, 27: 1-68.

Žagar, D., Rajar, R., Širca, A., Horvat, M., Četina, M. 2001. Dolgotrajna 3D simulacija transporta in disperzije živega srebra v Tržaškem zalivu. *Acta hydrotechnica* 19, 30: 25-43.

Žagar, D., Knap, A., Warwick, J. J., Rajar, R., Horvat, M., Četina, M. 2006. Modelling of mercury transport and transformation processes in the Idrijca and Soča river system. *Science of the Total Environment* 368, 1:149-163.

Žagar, D., Petkovšek, G., Rajar, R., Sirk, N., Horvat, M., Voudouri, A., Kallos, G., Četina, M. 2007. Modelling of mercury transport and transformations in the water compartment of the Mediterranean Sea. *Marine Chemistry* 107, 1: 64-88.

Žagar, D., Četina, M. 2011. Končno poročilo o izdelavi strokovne naloge NAFTA3d. Poročilo UL-FGG. Ljubljana, UL FGG, Katedra za mehaniko tekočin: 22 str.

Žagar, D., Ramšak, V., Ličer, M., Petelin, B., Malačič, V. 2012. Uporaba numeričnih modelov ob razlitju nafte na morju. Ujma 26: 168-174.