

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:

Ostane Jurina, T., 2015. Primerjava modelov širjenja nafte v morju po metodah trajektorij in sledenja delcev. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Žagar, D.): 51 str.

Datum arhiviranja: 28-08-2015

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:

Ostane Jurina, T., 2015. Primerjava modelov širjenja nafte v morju po metodah trajektorij in sledenja delcev. BSc Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Žagar, D.): 51 p.

Archiving Date: 28-08-2015

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
VODARSTVO IN OKOLJSKO
INŽENIRSTVO

Kandidat:

TADEJ OSTANEK JURINA

**PRIMERJAVA MODELOV ŠIRJENJA NAFTE V MORJU
PO METODAH TRAJEKTORIJ IN SLEDENJA DELCEV**

Diplomska naloga št.: 43/B-VOI

**COMPARISON OF OIL SPILL MODELLING AT THE
SEA BETWEEN TRAJECTORY AND PARTICLE
TRACKING METHODS**

Graduation thesis No.: 43/B-VOI

Mentor:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Član komisije:

doc. dr. Mojca Šraj

doc. dr. Simon Rusjan

Ljubljana, 09. 07. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Tadej Ostanek Jurina izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Primerjava modelov širjenja nafte v morju po metodah trajektorij in sledenja delcev«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 29.6.2015

Tadej Ostanek Jurina

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	504:532.5:551.35:665.61(043.2)
Avtor:	Tadej Ostanek Jurina
Mentor:	izr. prof. dr. Dušan Žagar
Naslov:	Primerjava modelov širjenja nafte v morju po metodah trajektorij in sledenja delcev
Tip dokumenta:	Dipl. nal.–UNI
Obseg in oprema:	51 str., 4 preg., 20 sl., 31 en., 2 pr.
Ključne besede:	razlitje nafte, model NAFTA3d, metoda sledenja delcev, metoda trajektorij, Tržaški zaliv, Severni Jadran

Izвлеček

Razlitij nafte v morskem okolju ni mogoče povsem preprečiti, zato skušamo zmanjševati njihove posledice. V ta namen se razvijajo modeli širjenja in razgradnje nafte. Model NAFTA3d, deluje na osnovi metode sledenja delcev, njegov rezultat pa so koncentracije nafte ob izbranih časih. Modelu je bil dodan modul delujoč po metodi trajektorij, s katerim je prikazana verjetnost pojava naftnega madeža. V prvem delu naloge prikažemo teoretično ozadje matematičnega modeliranja širjenja nafte v morju ter opišemo potek in zahteve odziva na razlitje. Prikažemo tudi možen nadaljnji razvoj metode trajektorij. V drugem delu opišemo obe metodi in delovanje uporabljenega modela. Predstavimo izdelan program za avtomatizacijo grafičnega izpisa. V tretjem primerjamo rezultate izračuna koncentracij in metode trajektorij z več simulacijami v Tržaškem zalivu in Severnem Jadranu ter analiziramo uporabnost simulacij s trajektorijami. Prikažemo prednosti in slabosti metode trajektorij. Raziskava kaže, da je novi modul najbolj primeren za odziv na razlitje pri taktičnem načinu modeliranja, njegovi največji prednosti pa sta velika hitrost izračuna ter enostaven in učinkovit prikaz celotnega ogroženega območja na eni sami karti. V zaključku predlagamo način praktične uporabe simulacij po metodi trajektorij.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 504:532.5:551.35:665.61(043.2)
Author: Tadej Ostaneč Jurina
Supervisor: assoc. prof. Dušan Žagar, Ph.D
Title: Comparison of oil spill modelling at sea between trajectory and particle tracking methods
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 51 p., 4 tab., 20 fig., 31 eq., 2 ann.
Keywords: oil spill, NAFTA3d model, particle tracking method, trajectory method, Gulf of Trieste, Northern Adriatic

Abstract

Oil spills in the marine environment cannot be prevented entirely. In order to diminish their consequences, numerous oil spreading and weathering models have been developed. The NAFTA3d model is based on the particle tracking method, its results are oil concentrations at specified times. A new module based on the trajectory method showing the probability of oil slick occurrence was added to the model. The thesis first describes theoretical background of mathematical oil spill modelling in the marine environment as well as the course and demands of an oil spill response. We show possible further development of the trajectory method. The second part describes both methods and functioning of the model. A graphic printout automation program developed in the scope of the thesis is presented. In the third part we present the results of performed simulations and analyse the suitability of the trajectory method by comparing concentrations and trajectories in the Gulf of Trieste and in the Northern Adriatic. We depict the strengths and weaknesses of the trajectory method. The study reveals that the new module is most suitable for oil spill response modelling, its major advantages being high computational speed as well as simple and efficient presentation of the entire area at risk on a single map. Finally, we propose a procedure for practical use of the trajectory method.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju, izr. prof. Dušanu Žagarju, za vso pomoč, spodbudo in motivacijo pri izdelavi diplomske naloge in nadaljevanju študijske poti. Hvala, da ste si vedno vzeli čas tudi za teme, ki niso bile neposredno povezane z diplomsko nalogo.

Zahvaljujem se družini za brezpogojno podporo pri vseh odločitvah povezanih s študijem.

Ana, hvala za vso spodbudo in potrpežljivost tekom izdelave tega diplomskega dela.

Kazalo vsebine

Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract	IV
Zahvala	V
Kazalo preglednic	VII
Kazalo slik	VIII
1 UVOD	1
2 MATEMATIČNO MODELIRANJE RAZLITJA NAFTE	6
2.1 Modeli hidrodinamike	7
2.2 Transportno-disperzijski modeli	8
2.3 Modeliranje procesov razgradnje in širjenja madeža	10
2.3.1 Mehansko širjenje	11
2.3.2 Izhlapevanje	12
2.3.3 Odlaganje na obalo	13
2.3.4 Dolgotrajni procesi	13
3 METODA TRAJEKTORIJ	15
3.1 Lastnosti nafte	15
3.2 Odziv na razlitje	16
3.3 Analiza trajektorij	19
3.3.1 Statistično modeliranje	19
3.3.2 Deterministično modeliranje	23
4 METODE DELA	28
4.1 Model NAFTA3d	28
4.2 Program Trajectory.java	31
4.2.1 Računska mreža	31
4.2.2 Časovni korak	32
4.2.3 Popravki in dopolnitve modela	33
4.3 Grafični prikaz	33
4.3.1 Avtomatizacija	34
4.4 Simulacije	35
5 REZULTATI	38
5.1 Tržaški zaliv	39
5.2 Severni Jadran	41
5.2.1 Simulacija med 28.1. in 5.2. 2012	41
5.2.2 Simulacija med 25.5 in 2.6. 2012	44
5.2.3 Povzetek	45
6 DISKUSIJA	46
7 ZAKLJUČEK	47
VIRI	48

Kazalo preglednic

Preglednica 3.1: Nezaanesljivost podatkov o razlitju. Povzeto po (Simecek-Beatty, 2011, str. 282).	20
Preglednica 3.2: Nezaanesljivost napovedi vetra. Povzeto po (Simecek-Beatty, 2011, str. 285).	21
Preglednica 3.3: Vpliv vleka vetra na različne vrste nafte. Povzeto po (Simecek-Beatty, 2011, str. 289).	21
Preglednica 3.4: Nezaanesljivost napovedi površinskih tokov. Povzeto po (Simecek-Beatty, 2011, str. 287).	22

Kazalo slik

Slika 1.1:	Koncesijska območja za raziskovanje in morebitno črpanje nafte v severnem delu Jadrana (Mesarić et al., 2015).	2
Slika 1.2:	Količina razlite nafte s srednjimi in velikimi razlitji med leti 1970 in 2014. Povzeto po ITOPF (2015, str. 7).	3
Slika 2.1:	Procesi razgradnje in širjenja naftnega madeža na morju (ITOPF, 2002, po Jeglič T., 2010)	10
Slika 3.1:	Matrika tveganja (Etkin, 2015, str. 4).	17
Slika 3.2:	Primer prikaza nezanesljivosti s statistično analizo trajektorij po opisnem standardu (Simecek-Beatty, 2011, str. 292). Meja nezanesljivosti je označena s črno polno črto.	23
Slika 3.3:	Primer prognostične simulacije po metodi trajektorij avtorjev AMEC (2010, str. 41), za zimske razmere v zalivu Trinity ob Novi Fundlandiji.	24
Slika 3.4:	Primer prognostične simulacije po metodi trajektorij avtorjev (AMEC, 2010, str. 58), za januarske razmere na lokaciji projekta Hebron.	25
Slika 3.5:	Primer prognostične simulacije po metodi trajektorij v Mehiškem zalivu avtorjev (Chang et al., 2010, str. 833).	26
Slika 4.1:	Prikaz izračuna komponent difuzijske hitrosti v koordinatnih smereh (Žagar in Četina, 2011, str. 9).	29
Slika 4.2:	Plovne poti v Jadranskem morju, podatki za drugo polovico leta 2013 (Mesarić et al., 2015). Rdeča barva prikazuje območja z gostejšim prometom.	36
Slika 4.3:	Dnevno povprečeno hitrostno polje v površinskem sloju 25.5.2012, pridobljeno z modelom NAPOM.	37
Slika 5.1:	Primerjava prikazov različnih načinov izračuna koncentracij nafte pri simulaciji v severnem Jadranu konec maja 2012 po 7 dneh.	38
Slika 5.2:	Verjetnosti pojava naftnega madeža pri razlitju v bližini koprskega pristanišča, pridobljene po metodi trajektorij.	39
Slika 5.3:	Koncentracije nafte pri razlitju v Tržaškem zalivu ob značilnih časih (kg/m^2).	40
Slika 5.4:	Prikaz sovpadanja karte pridobljene z metodo trajektorij in karte koncentracij ob koncu simulacije v Tržaškem zalivu.	41
Slika 5.5:	Verjetnost pojava naftnega madeža pri razlitju v Severnem Jadranu januarja 2012 ob prisotnosti močne burje.	42
Slika 5.6:	Koncentracije nafte pri razlitju v Severnem Jadranu januarja 2012 ob značilnih časih (kg/m^2).	43
Slika 5.7:	Prikaz sovpadanja kart trajektorij in koncentracij po 12, 36, 60, 84, 120 in 168 urah od začetka simulacije v Severnem Jadranu.	43
Slika 5.8:	Verjetnost pojava naftnega madeža pri razlitju v Severnem Jadranu maja 2012 v mirnem morju.	44
Slika 5.9:	Koncentracije nafte pri razlitju v Severnem Jadranu maja 2012 ob značilnih časih simulacije (kg/m^2).	45

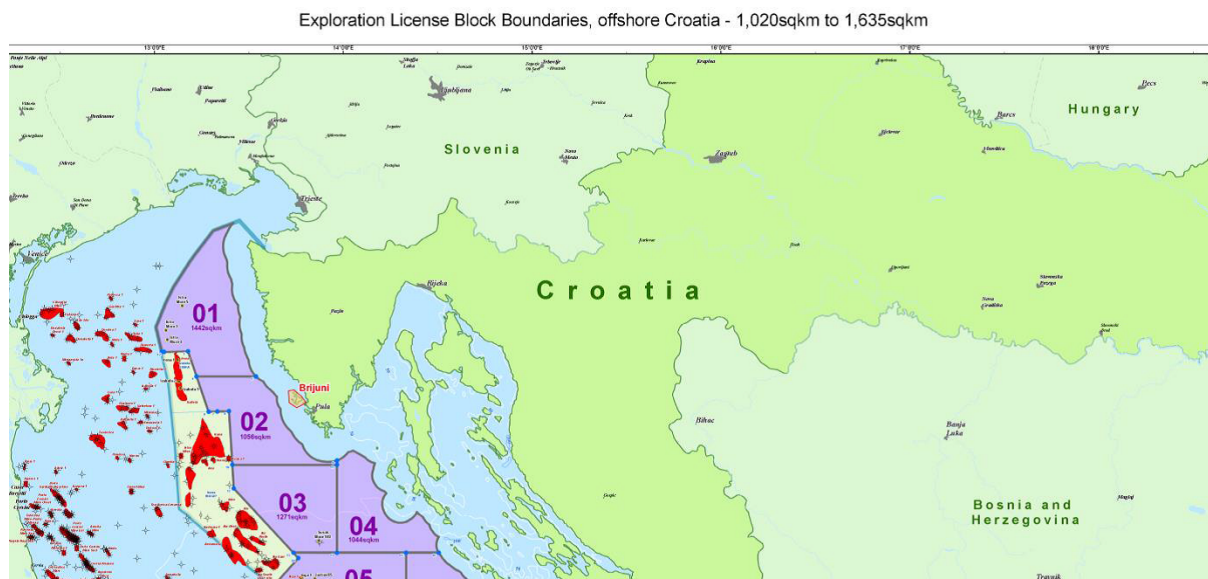
1 UVOD

Kot družba smo močno odvisni od uporabe nafte in njenih derivatov, saj ti predstavljajo najpomembnejši vir energije za transport ter surovino v proizvodnji mnogih izdelkov. Mednarodno povpraševanje po nafti stalno raste, v bližnji prihodnosti pa ni pričakovati večjih sprememb. Njen transport je kompleksen proces z več kot desetimi pretovarjanji med cevovodi, tankerji, železniškimi vagoni in cestnimi cisternami ter vmesnimi skladišči, rafinerijami in uporabniki (Fingas, 2011a). Tako proizvodnjo kot transport spremlja nevarnost razlitja, ki ima v morskem okolju hude ter trajne ekološke in ekonomske posledice (Žagar et al., 2011). V morju do večine razlitij pride pri pretovarjanju v pristaniščih in naftnih terminalih, katastrofalni dogodki pa običajno nastopijo pri transportu na odprtem morju in črpanju na naftnih ploščadih (ITOPF, 2015).

Nekatera razlitja so zaradi svoje velikosti in hudih posledic še posebej zapisana v človeškem spominu in so pogosto podlaga za preizkušanje modelov omenjenih v nadaljevanju diplomskega dela. Omeniti velja nesrečo tankerja *Prestige*, iz katerega je novembra 2002, po nesreči v bližini galicijske obale in razpadu ladje na dvoje, v šestih dneh izteklo 63.000 ton nafte v razburkano morje z osem metrskimi valovi (Azavedo et al., 2009). Še hujša katastrofa je bila eksplozija na naftni ploščadi *Deepwater Horizon* družbe *British Petroleum* v Mehiškem zalivu aprila 2010. V kar dva meseca trajajočem razlitju je izteklo 4,9 milijonov sodčkov nafte, kar je imelo izredno negativne posledice za lokalni ekosistem (Chang et al., 2010). Nesreča tankerja *Exxon Valdez* leta 1989 ob obali Aljaske je spodbudila hiter razvoj tako znanosti in tehnologij preprečevanja razlitij kot ustrezne zakonodaje (Shingenaka, 2011). Za pričujočo nalogo je še posebej zanimiva nesreča tankerja *Puerto Rican* leta 1984 ob obali Kalifornije. Naftni madež, ki bi se po vseh napovedih moral gibati proti jugozahodu je nepojasnjeno krenil iz smeri proti severu in tako močno prizadel nezaščiten obalo (Breaker, 1993).

Razlitje nafte ima v morju lahko katastrofalne posledice. Najbolj znani so prizori ptičev in morskih živali ujetih v lepljivi snovi, a posledice so mnogo širše. Živali se zastrupijo z zaužitjem ali vdihavanjem derivatov, preživele pa prenašajo toksine višje po prehranski verigi, tudi do človeka. Nafta na gladini morja je zmanjša izmenjavo plinov in s tem samočistilno sposobnost vodnega telesa. Zaradi biorazgradnje se poveča poraba kisika, kar lahko pripelje do anoksičnih razmer. Učinki na okolje so predvsem odvisni od sestave razlite snovi. V splošnem velja, da so najbolj akutno strupene lahke hlapne frakcije, čeprav je njihov zadrževalni čas v okolju najkrajši. Razlog je njihova sorazmerno visoka topnost in možnost prehoda celičnih membran, kar povzroči direktno zastrupitev. Razlitje topne nafte ima najhujše posledice v razburkanem morju, kjer pride do hitrega mešanja po vodnem stolpcu in s tem večjega raztapljanja. Obstojne težke frakcije se prilepijo na organizme in jim onemogočajo normalno delovanje, lahko povzročijo tudi kronično zastrupitev. Največja je ponavadi posredna okoljska in ekonomska škoda. Smrtnost živali in slabša kakovost vode zmanjšata možnosti za vse vrste ribolova. Onesnažena obala povzroči močan upad turizma, razlitja v okolici pristanišč pa povzročijo izpad prometa (Shingenaka, 2011; Antunes de Carmo in Costa, 2000).

V Tržaškem zalivu in v Severnem Jadranu na srečo do večjih razlitij še ni prišlo, medtem ko so manjši dogodki pogosti. Transport nafte na območju se povečuje, s tem pa tudi tveganje za večji dogodek, ki bi bil zaradi majhnosti, zaprtosti in plitkosti vodnega telesa lahko katastrofalen. Severni del Jadrana je večinoma globok le do 40 metrov, Tržaški zaliv še manj. Posledice bi poleg uničenega ekosistema najbolj čutili ribištvo, vzreja morskih organizmov in turistična dejavnost (Kajfež Bogataj, 2012; Žagar et al., 2011; Ličer, 2015). V zadnjem letu je veliko razburjenja povzročilo podeljevanje koncesij hrvaške vlade za dodatne raziskave in potencialno črpanje nafte vzdolž Jadranskega morja vključno z Istro (koncesijski območji 01 in 02, slika 1.1). V študiji o oceni vpliva na okolje (Mesarić et al., 2015) je ob nesreči v predvidena možnost širjenja madeža v slovenske vode.

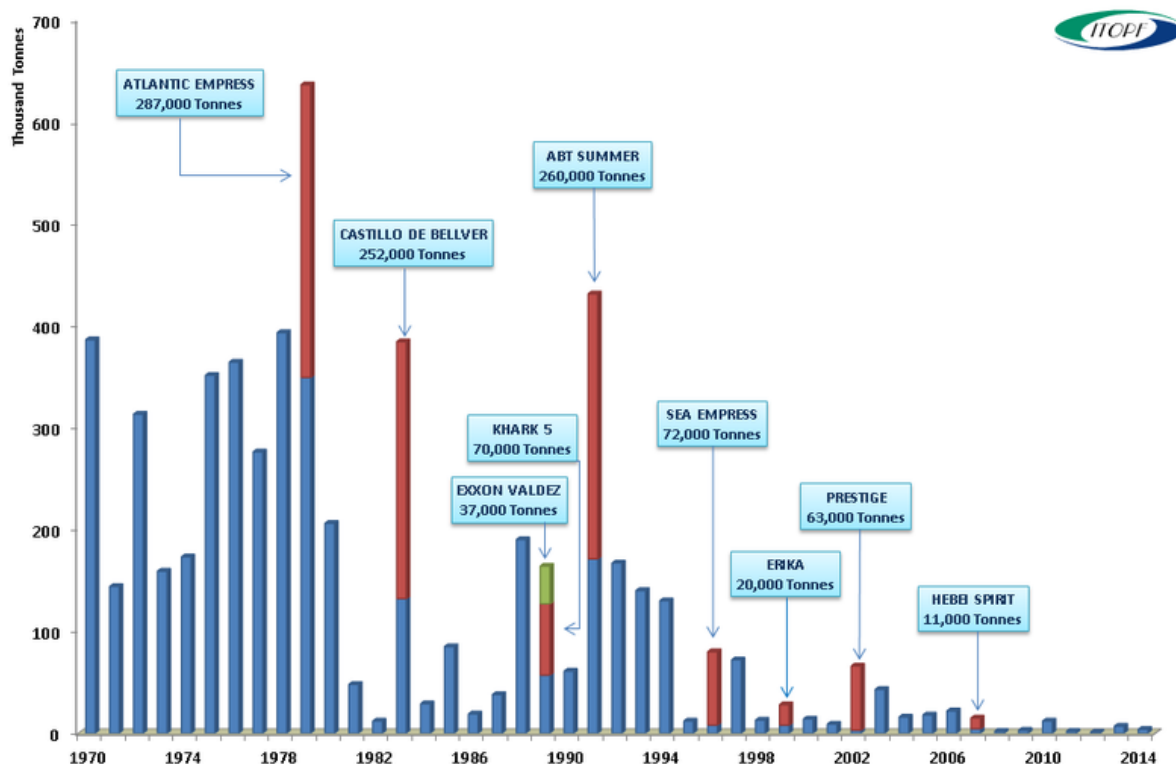


Slika 1.1: Koncesijska območja za raziskovanje in morebitno črpanje nafte v severnem delu Jadrana (Mesarić et al., 2015).

Količina razlite nafte in pogostost razlitij se sicer v zadnjih desetletjih stalno zmanjšujeta, število velikih tankerskih razlitij (>700 ton) se je iz 245 v 70 letih znižalo na le 35 v celotnem prvem desetletju 21. stoletja, manjše je tudi število srednje velikih razlitij in skupna količina razlite nafte (slika 1.2). Večina razlitij se klasificira kot manjša (<7 ton), njihovo število pa je zaradi nepopolnega poročanja težko določljivo. Skupaj s srednje velikimi predstavljajo 95% vseh takšnih nesreč. V letu 2014 je bilo v okolje izpuščene približno 4000 ton nafte (ITOPF, 2015). Skladno z upadom števila razlitij se zmanjšuje tudi njihova sprejemljivost in povečuje pomen preprečevanja. Zaradi katastrofalnih posledic velja prepričanje, da se največ nafte razlije zaradi velikih nesreč tankerjev, čeprav večina onesaženja pride s kopnega (Fingas, 2011a). Po drugi strani pa je taka predstava logična, visoke koncentracije so veliko bolj škodljive, saj presežejo kakršnokoli kapaciteto ekosistema (Shingenaka, 2011).

Zmanjševanje razlitij je posledica tako boljše tehnologije kot strožje zakonodaje, internih pravil podjetij, ki skrbijo za črpanje in transport, višje usposobljenosti delavcev ter visokih stroškov čiščenja. Vendar zaradi človeških napak in neizogibne odpovedi opreme v vseh fazah ravnanja z nafto razlitij ni mogoče povsem preprečiti. To še posebej velja za vse pogostejša manjša razlitja, ki so, čeprav niso deležna velike pozornosti, vseeno lahko nevarna, še posebej v zaprtih morjih. Delovanje je zato usmerjeno tudi v izboljšanje tehnik čiščenja in odpravljanja posledic razlitij, s tem pa tudi napovedovanje njihovega gibanja (Fingas, 2011a).

Kot podpora takim dejavnostim se je že v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja začel razvoj matematičnih modelov za simuliranje širjenja naftnih madežev. Ti so lahko povsem enostavno dvodimenzijsko sledenje delcev, danes pa gre običajno za kompleksne tridimenzijske modele, v katerih so z matematičnimi algoritmi upoštevani tudi procesi razgradnje nafte in njihovi vplivi na gibanje madeža (Reed et al., 1999). Nekateri zajamejo celo vpliv intervencij in ter učinek razlitja na živa bitja v morskem okolju (Delgado et al., 2006). Rezultat takšnih simulacij so koncentracije nafte v določenem času po razlitju (Al-Rabeh et al., 2000), trajektorije madeža (Azavedo et al., 2009) ali statistično določene meje ogroženega območja (AMEC, 2010; Chang et al., 2010; Beegle-Krause, 2001). V svetu je uporabljenih modelov veliko, zaradi različnih pristopov pa vsak prikaže nekoliko drugačne rezultate (Reed et al., 1999). Modeli so običajno verificirani s primerjavo rezultatov z dobro zabeleženimi dogodki ali z drugimi preverjenimi modeli (Žagar, 1994).



Slika 1.2: Količina razlite nafte s srednjimi in velikimi razlitji med leti 1970 in 2014. Povzeto po ITOPI (2015, str. 7).

Tudi na Katedri za mehaniko tekočin UL FGG se je v zadnjih dveh desetletjih razvijal model širjenja nafte v morju. Žagar (1994) je združil modela sledenja delcev (Širca, 1992) in izračuna hidrodinamike PCFLOW3D (Rajar in Četina, 1997; Rajar et al., 1997) model SIMON, ki je vključeval tudi nekatere pomembnejše procese razgradnje nafte in možnost modeliranja bodisi v prognostičnem ali »taktičnem načinu«. Izhodni podatek so bile koncentracije nafte v kontrolnih volumnih ob izbranih časih. Model je z novimi vmesniki dopolnil Galuf (2005). Leta 2011 je bil, tokrat z imenom NAFTA3d (Žagar in Četina, 2011) ter v sodelovanju z Nacionalnim inštitutom za biologijo - Morsko biološko postajo Piran, povezan z modeli cirkulacije POM (Princeton Ocean Model) (Blumberg in Mellor, 1987), dodani pa so mu bili še nekateri novi procesi razgradnje. Jeglič (2010) je predstavila tudi zasnovo modela, delujočega po Eulerjevem principu reševanja diferencialnih enačb in postavila smernice za nadaljnji razvoj. Maslo et al. (2014) so preizkusili model širjenja nafte v večjem obsegu, delujoč po mrežni Boltzmannovi metodi. Vzporedno s splošnimi izboljšavami osnovnega modela so se razvijali tudi moduli za izračun sprememb lastnosti ali procesov razgradnje nafte, na primer emulzifikacije (Kvočka, 2013), viskoznosti (Jotanović, 2014) in izhlapevanja (Šaponja, 2014). V tem diplomskem delu je podrobno analizirana in izboljšana nadgradnja modela NAFTA3d za izračun trajektorij in verjetnosti pojava naftnega madeža namesto koncentracij (Šoško, 2012).

Kvaliteta rezultatov simulacij z matematičnimi modeli je odvisna tudi od vhodnih podatkov, ki pa so vedno le približek dejanskega stanja. Izboljšave obstoječih modelov tako niso edina rešitev, pogosto je bolj smiselno prikazati možna odstopanja od napovedi. Ta lahko nastopijo iz več razlogov, od netočne meteorološke napovedi, lokalnih vetrov, napačne informacije o lokaciji ali tipu razlite nafte, do napak zaradi poenostavitve modela (netočne enačbe, numerične napake, itd.) (Simecek-Beatty, 2011). Izračunano obnašanje nafte je torej le najboljša ocena dogodkov, polje vseh možnih izidov pa običajno ni zajeto, niti v rezultate niso vključene informacije o nezanesljivosti (Galt, 1997). Nevarnost nastopi, če se pri načrtovanju odziva rezultat upošteva

kot determinističen, ranljiva območja izven predvidene najboljše ocene poti pa ob zmotnem zaupanju v natančnost modela ostanejo nezaščiteni. To se je na primer zgodilo v primeru že omenjene eksplozije tankerja Puerto Rican ob obali Kalifornije leta 1984, kjer je naftni madež, verjetno zaradi nastopa Davidsonovega toka, hipoma skrenil v nasprotno smer od napovedane in močno prizadel nezaščiteni obalo (Breaker, 1993).

Ena od možnih rešitev problema je analiza trajektorij naftnega madeža (Galt, 1997), kjer se nezanesljivost vhodnih podatkov upošteva bodisi s statistično obdelavo napovedi (Beegle-Krause, 2001) ali z determinističnim grupiranjem preteklih merjenih vrednosti (AMEC, 2010; Chang et al., 2010). Statistična obdelava se uporablja pri »taktičnem« odzivu na razlitje, pri dolgoročnem ali preventivnem napovedovanju pa je smiselno uporabiti klimatološke pogoje na obravnavanem območju (ASCE, 1996). Rezultat analize trajektorij je ovojnica, znotraj katere se bo naftni madež z veliko zanesljivostjo nahajal (npr. 90%) in/ali verjetnost pojava madeža na posameznih delih obravnavanega območja (Galt, 1997; Beegle-Krause, 2001; AMEC, 2010).

Prednost modeliranja z metodo trajektorij je tudi hitrost izračuna, ki je bistveno večja kot pri računu koncentracij (Šoško, 2012). Dober prikaz predvidene poti omogoči, da se razlitje zadrži in odstrani, še preden se razširi na nezaželeno območje (Apai, 2001). Za ustrezen odziv je pomembno predvsem v kateri smeri madež potuje in katera območja so potencialno ogrožena (Fingas, 2011b). Z metodo trajektorij je možen tudi inverzni proces simuliranja, kar nam omogoča identifikacijo povzročitelja razlitja (Apai, 2001), lokacije nesreče ali območij potencialnih razlitij, ki bi ogrozila dragocen vir (Galt, 1997). Drugačna je tudi končna vizualizacija podatkov, saj je namesto madeža v točno določenem času prikazana pot, ki jo ta prepotuje skozi celotno simulacijo, porazdelitev simuliranih delcev pa je opisana z verjetnostjo pojava naftnega madeža. Takšen prikaz omogoča hitro določitev ogroženih območij, pri ukrepanju pa se sredstva lahko optimalno razporedijo med območja s podobno ogroženostjo, tako tista kjer je nevarnost največja, kot tista kjer je verjetnost pojava madeža majhna, ranljivost pa velika.

Na slovenski obali so zelo ranljiva območja na primer Sečoveljske soline, izliv Seče, Naravni rezervat Strunjan in Stjuža, obala Fiese, močvirje pri naselju Sv. Katarina in obale ob Debelem Rtiču. Problematična so območja solin, gojišč školjk in rib, turistično zanimivi deli obale (običajno peščene ali prodnate plaže), izlivi rek in poplavne ravnice ter območja s katerih bi bilo čiščenje nafte zelo težavno. Določeni odseki so uvrščeni med naravno dediščino. Skupaj zelo ranljivi deli obsegajo kar 22 % celotne dolžine slovenske obale (Bosnič, 2014).

Ker smo želeli poskrbeti, da bi bila nova metoda uporabna v praksi, smo potrebovali bolj podrobne raziskave njenih prednosti, in splošnih značilnosti metode. Najustreznejši način za dosego tega je bila primerjava z obstoječo preverjeno metodo običajnega sledenja delcev in računa koncentracij v različnih pogojih.

Zanimalo nas je, ali lahko iz prikaza rezultatov metode trajektorij dobimo primerljivo količino in kakovost informacij kot z izračunom koncentracij, ter posledično ali lahko, in v katerih pogojih, pristop po metodi trajektorij nadomesti klasično sledenje delcev. Raziskali smo prednosti in slabosti metode ter podrobno analizirali za njene specifične rezultate. V ta namen smo metodi primerjali na domenah Tržaškega zaliva in Severnega Jadrana v različnih meteoroloških in cirkulacijskih pogojih, s prevladujočim vplivom bodisi advekcije ali turbulentne difuzije. Za primerjavo smo izbrali ta dva parametra, saj gre za najbolj pomembna procesa pri taktičnem modeliranju (Žagar et al., 2012). Zaradi potrebe po kvalitetnem in hitrem grafičnem prikazu podatkov smo poiskali tudi optimalen način izrisa kart in ga poenotili za obe metodi. Prikaz koncentracij zahteva veliko število izpisov, izdelava teh pa je zelo zamudna, poleg tega smo želeli kar najbolj pospešiti tudi izdelavo karte trajektorij. Tako je spremljajoč cilj dela tudi zapis ustreznega programa za avtomatizacijo grafičnega izpisa, ki bi bil prenosljiv in tako uporaben tudi za simulacije z drugimi vhodnimi podatki in v drugih domenah.

Model širjenja nafte po metodi trajektorij na UL FGG še ni razvit do faze, ko bi bila mogoča perturbacija vhodnih podatkov in izračun statistično dobljenih trajektorij, niti ni na voljo dovolj preteklih podatkov za deterministično analizo. Ravno zato smo si zadali tudi cilj izdelati podrobno opisno teoretsko podlago, ki bo v prihodnosti olajšala nadgradnjo modula trajektorij tako za prognostično modeliranje z determinističnimi podatki, kot statistično podkrepljeno taktično modeliranje. Sama nadgradnja pa zaradi obsežnosti in pomanjkanja podatkov presega okvir diplomske naloge.

2 MATEMATIČNO MODELIRANJE RAZLITJA NAFTE

Z numeričnimi matematičnimi modeli skušamo opisati gibanje in širjenje naftnega madeža po razlitju v morskem okolju. Vključujejo tudi modeliranje sprememb lastnosti nafte in njenega propadanja preko običajno empiričnih enačb. Sodobni tridimenzionalni modeli so zelo kompleksni in združujejo mnogo različnih procesov. Vsi poskušajo odgovoriti na vprašanja o smeri in hitrosti gibanja razlite nafte, ranljivih območjih v njenem dosegu in njihovi časovni oddaljenosti, o spreminjajočih se lastnostih razlite snovi ter o končni površini naftnega madeža. Glede na namen in uporabo matematične modele lahko razdelimo na prognostične in taktične, glede na naravo vhodnih podatkov pa na deterministične in statistične (Galt, 1998; Al-Rabeh et al., 2000; AMEC, 2010).

S taktičnim modeliranjem simuliramo nafto v realnem času ob dejanskem razlitju. V ta namen se poslužujemo meteoroloških napovedi ali v naprej pripravljenih reprezentativnih podatkov (Žagar, 1994; Beegle-Krause, 2001). Zelo pomembna je natančna informacija o lokaciji razlitja ter količini in vrsti nafte (Simecek-Beatty, 2011; Žagar, 1994). Namen takih simulacij je pridobivanje informacij za načrtovanje in izvajanje odziva na razlitje (Sebastião in Guedes Soares, 2006). Na voljo morajo biti čim hitreje, zato je računski čas zelo pomemben, parametre simulacije pa temu ustrezno prilagodimo (Žagar et al., 2011). Modeliranje mora izvajati izkušen strokovnjak, rezultati pa morajo biti končnemu uporabniku predstavljeni čim bolj razumljivo (Simecek-Beatty, 2011; Galt, 1998). Rezultati takšnega računa so le tako zanesljivi kot vhodni podatki (Simecek-Beatty, 2011; Galt, 1997). Simulacija se zato sproti kontrolira in dopolnjuje s terenskimi opazovanji, pri velikih razlitjih jo ponavljamo vsaj enkrat dnevno (Galt, 1998), ter tako zagotovimo večjo natančnost (Simecek-Beatty, 2011). Opazovanje na terenu se pogosto izvaja z letalskimi preleti ali celo s satelitskimi posnetki (Perkovič et al., 2008). V primerih, ko je simulacija potrebna za več kot sedem dni vnaprej, meteorološke napovedi ne zagotavljajo več zadostne natančnosti, zato je potreben gladek prehod na statistične klimatološke podatke za obravnavano območje (Simecek-Beatty, 2011; Galt, 1998; ASCE, 1996).

Na območjih z veliko ranljivostjo ali verjetnostjo razlitja le pripravljeno na taktični odziv ni dovolj. Možne situacije je potrebno poznati že vnaprej, da se lahko vzpostavijo ustrezni mehanizmi varovanja. V ta namen izvajamo prognostično modeliranje. Pri tem lokacijo simuliranega razlitja določamo na podlagi preteklih razlitij, vremenskih pogojev, prometnih tokov ter kritičnih situacij (Etkin, 2015). Pristop je nujen tudi pri presoji vplivov in umeščanju objektov za ravnanje z nafto v morsko okolje in tekom njihovega delovanja, kjer je lokacija seveda znana (AMEC, 2010). Prognostične simulacije so torej izvedene v naprej, z njimi pa želimo identificirati najverjetnejše in ekstremne situacije. Poleg gibanja madeža lahko določimo tudi najbolj neugodne kombinacije vhodnih podatkov in njihovo pogostost na dani lokaciji (AMEC, 2010). Čas računa v tem primeru ni pomemben, zato so simulacije daljše, bolj natančne in upoštevajo več procesov (Žagar, 1994). Za izračun običajno uporabljamo pretekle merjene meteorološke podatke, ki jih različno obdelamo, lahko tudi z uporabo statističnih metod (AMEC, 2010).

Na tem mestu že pridemo do razlike med determinističnim in statističnim modeliranjem. Medtem ko so tako za taktično kot prognostično modeliranje lahko uporabljeni isti modeli, je za razliko med obravnavanima pristopoma običajno potrebna modifikacija. Osnovna razlika je v uporabljenih vhodnih podatkih. V determinističnem modeliranju se uporabijo realni podatki, bodisi merjene vrednosti ali napovedi. V preprostem primeru je rezultat najverjetnejši potek širjenja nafte, lahko pa se stare merjene vrednosti grupirajo za bolj kompleksno prognostično modeliranje. Če zanemarimo vpliv naključnih naravnih procesov simuliranih v modelu, deterministični pristop za enake vhodne podatke vedno vrne enak rezultat (AMEC, 2010). Takšnemu modeliranju je prilagojena večina matematičnih modelov širjenja nafte po svetu (Žagar et al., 2011; AMEC, 2010; Azavedo et al., 2009; Chang et al., 2010; Delgado et al., 2006; Garcia-Martinez in Flores-Tovar, 1999; Lehr et al., 2002; Al-Rabeh et al., 2000; Pinho et al., 2002).

Pri statističnem pristopu so merjene ali napovedane vrednosti le osnova za izdelavo umetnih vhodnih podatkov. Ti so izračunani, z upoštevanjem nezanesljivosti meritev in napovedi, z uporabo statističnih metod. Običajno se v ta namen uporabi metoda Monte Carlo ali Markovska veriga. Model se zažene večkrat zapored, vhodni podatki in vmesni rezultati pa so ob vsaki ponovitvi drugačni. Končni rezultat je sinteza vseh statističnih variacij. Statistično pridobljeni vhodni podatki so najpogosteje uporabljeni pri analizi trajektorij, ki je natančneje predstavljena v podpoglavju 3.3 (AMEC, 2010). Tako statistični kot deterministični pristop se uporabljata pri taktičnem in prognostičnem načinu modeliranja, odvisno od želenih rezultatov. Statistični pristop se redkeje uporablja v prognostičnih simulacijah.

Kljub naštetim razlikam lahko vse matematične modele širjenja nafte razčlenimo na tri osnovne komponente. Prva je izračun hidrodinamike, t.j. morskih tokov oziroma hitrostnega polja, ki je posledica dejavnikov kot so veter, gradient gostote v vodnem telesu, plimovanje, izlivi rek ter oblika morskega dna. Izračun hidrodinamike se lahko izvede z ločenim modelom, hitrostna polja pa so le vhodni podatek naslednje komponente modela. Druga komponenta je model transporta in disperzije onesnažila, z njim simuliramo gibanje nafte v vodnem telesu. Zadnji element so biokemični modeli, ki opisujejo vse vrste fizikalnih in kemijskih sprememb lastnosti nafte tekom razlitja, pa tudi njeno interakcijo z obalo. Ti so deležni najhitrejšega razvoja, odkriti in implementirani so vedno boljši načini matematičnega opisa teh procesov (Žagar, 1994). Gibanje in procesi razgradnje sicer delujejo ločeno, vendar imajo medsebojen vpliv. Propadanje povzroči spremembe lastnosti nafte in s tem njene poti, lega madeža pa lahko vpliva na propadanje (Fingas, 2011b), torej mora biti med drugo in tretjo komponento modela povratna zveza.

2.1 Modeli hidrodinamike

Pri praktičnem delu diplomske naloge računa hidrodinamike nismo izvajali, temveč smo uporabili že izračunana hitrostna polja za obravnavano časovno obdobje, pridobljena z ločenim modelom. Hidrodinamiki se zato ne bomo podrobno posvečali, navajamo le osnovne koncepte in enačbe tridimenzijskega izračuna, podrobnosti pa so razložene v literaturi (Žagar, 1994; Blumberg in Mellor, 1987).

Osnovne enačbe opisujejo hitrostna polja, spremembe gladine, temperature ter slanosti. Gre za kontinuitetno (2.1) in dinamično (2.2) enačbo, ter enačbi ohranitve toplote in slanosti (2.3). Običajno so zapisane v kartezičnem koordinatnem sistemu in upoštevajo nekatere poenostavitve, npr. zanemaritev stisljivosti vode in spremenljivosti gostote ter hidrostatično stanje v vertikalni smeri (Žagar, 1994; Blumberg in Mellor, 1987).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + f_i \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial U_i \Phi}{\partial x_i} = \Gamma_\Phi \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i^2} + S_\Phi \quad (2.3)$$

Vse vrednosti v enačbah so trenutne. U_i so komponente vektorja hitrosti, P je tlak, t čas, ν koeficient kinematične viskoznosti, ρ gostota, f_i komponenta volumnske sile na enoto mase, Φ vrednost računane skalarne količine, S_Φ je izvorno-ponorni člen, ki predstavlja spremembe koncentracij zaradi biokemičnih procesov, Γ_Φ je laminarna difuzija skalarja, x_i so kartezične koordinatne smeri. Enačbe so rešljive numerično, v nadaljevanju pa se bomo osredotočili le na izračun hitrostnih polj (Žagar, 1994).

V oceanih nastopajo turbulentni tokovi, vrtinci povsem različnih dimenzij se naključno gibljejo v vse smeri. Enačbe zato preoblikujemo z vpeljavo srednjih vrednosti in fluktuacij. Za hitrost

in tlak enačbi zapišemo:

$$U_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (2.4)$$

$$P = \bar{p} + p' \quad (2.5)$$

\bar{u}_i in \bar{p} sta srednji vrednosti, v nadaljevanju ju bomo zaradi preglednosti pisali brez črte. u', p' predstavljata fluktuacije. Najbolj uporabno končno obliko enačb poda zapis prenosa kinetične energije preko mehanizma trenja z vpeljavo Reynoldsovih napetosti. Splošne enačbe povprečimo in upoštevamo analogijo med turbulentno in molekularno difuzijo. Končne enačbe, kot si sledijo v nadaljevanju, so kontinuitetna enačba za posamezni sloj z debelino h (2.6), enačba za izračun gladine (2.7), ter dinamične enačbe v koordinatnih smereh x, y in z (2.8), (2.9), (2.10).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + w_t - w_b = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \int_{z_b}^{z_b+H} \left(\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right) dz = 0 \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} + \frac{\partial(huw)}{\partial z} = +f_v h - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(hN_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hN_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hN_h \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_{wx} - \frac{1}{\rho} \tau_{bx} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + \frac{\partial(hvw)}{\partial z} = -f_u h - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(hN_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hN_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hN_h \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_{wy} - \frac{1}{\rho} \tau_{by} \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (2.10)$$

V enačbah h predstavlja debelino sloja, H globino vode, u, v, w komponente hitrosti, w_t, w_b vertikalno hitrost na zgornjem in spodnjem robu izbranega sloja, z_b koto dna, η fluktuacijo ravni gladine, N_h, N_v horizontalni in vertikalni kinematični koeficient turbulentne viskoznosti, $\tau_{wx}, \tau_{wy}, \tau_{bx}, \tau_{by}$ pa strižne napetosti na površini in ob dnu vodnega telesa v obeh koordinatnih smereh (Žagar, 1994; Knauss, 1997). Koeficiente horizontalne in vertikalne turbulentne viskoznosti in njej analogne difuzije računamo z modeli turbulence. Koeficienti nastopajo v adveksijski difuzijski enačbi, ki opisuje transport snovi v vodi, zato bodo podrobneje obravnavani v naslednjem poglavju (Žagar, 1994).

Sistem enačb (manjkata še enačba stanja in enačba ohranitve toplote in slanost) analitično ni rešljiv, zato se rešuje numerično, običajno z metodo končnih razlik oz. diskretizacijo računskega območja na kontrolne volumne. Diferencialne enačbe prevedemo v diferenčne, območje pa v horizontalno mrežo celic in vertikalne sloje, ter jih rešimo z upoštevanjem robnih pogojev. Vertikalni sloji so zapisani bodisi z z -koordinatami, kjer imajo sloji ves čas konstantno debelino, ali s σ -koordinatami, kjer ima celotno območje ne glede na globino ves čas enako število slojev, njihova debelina pa se spreminja (Žagar, 1994).

2.2 Transportno-disperzijski modeli

Vsi načini matematičnega opisa širjenja nafte v morju izhajajo iz enačbe o ohranitvi mase mešanice vode in nafte (2.11), ki jo za gibajočo tekočino zapišemo v obliki (2.12).

$$m = \iiint_P \rho C dP \quad (2.11)$$

$$\iint_S \rho C \vec{V} d\vec{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \iiint_P \rho C dP \quad (2.12)$$

C predstavlja koncentracijo nafte, \vec{V} vektor hitrosti na površini opazovanega volumna P , $d\vec{S}$ pa navzven orientirano površino volumna. Po enačbi je neto masni pretok nafte skozi površino kontrolnega volumna enak časovni spremembi mase v kontrolnem volumnu. Nadaljnje izpeljave na tem mestu ne bomo podajali, navedena je v literaturi (Širca, 1992). Končna oblika enačbe je (2.13); D_x , D_y in D_z so koeficienti turbulentne difuzije v koordinatnih smereh (Žagar, 1994).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (2.13)$$

Zaradi velikega razmerja med horizontalnimi dimenzijami in globino v morju koeficiente obravnavamo različno. Horizontalna koeficienta v x in y smeri v splošnem nista povsem enaka, a to običajno lahko predpostavimo, pišemo $D_x = D_y = D_h$. Pogosto je horizontalni koeficient turbulentne difuzije privzet kot konstanten. V vertikalni smeri so turbulentne hitrosti mnogo manjše, zato velja $D_v \ll D_h$ (Žagar, 1994; Knauss, 1997). S turbulentno difuzijo v modelih zajamemo še vse naključne in nezanesljive procese manjše od resolucije računske mreže (Galt, 1998; Simecek-Beatty, 2011).

Tudi enačbo (2.13) rešujemo numerično, poznamo dva osnovna principa obravnave, Eulerjev in Lagrangeov. V splošnem se v hidromehaniki najpogosteje uporablja Eulerjev način. Pri njem opazujemo gibanje tekočine skozi nepremičen del prostora, zanimajo pa nas spremembe skalarnih in vektorskih količin v kontrolnem volumnu in pri prehodu z ene točke na drugo. Vse količine so odvisne od časa in lege v prostoru. Z Eulerjevim načinom torej obravnavamo vektorska in skalarna polja (Žagar, 1994; Širca, 1992; Rajar, 1997).

Tudi nekateri modeli širjenja nafte delujejo po Eulerjevem principu. V njih je madež opisan kot zvezna masa nafte, poleg gibanja pa izračunavajo predvsem debelino madeža. Takšni modeli omogočajo opis razširjanja madeža pod vplivom lastne teže. Pri modeliranju naftnih razlitij se Eulerjev pristop redko uporablja, saj zahteva kompleksne numerične metode, rezultate pa kviri numerična difuzija. S povečevanjem zmogljivosti računalnikov postaja uporaba Eulerjevega načina lažja, saj se lahko uporabljajo vse kompleksnejše numerične sheme. Modeliranje procesov razgradnje nafte je v splošnem zahtevnejše (Jeglič, 2010).

Običajno za modeliranje širjenje naftnega madeža uporabljamo Lagrangeov pristop. Opazujemo delce določene z začetnim krajevnim vektorjem, njihovo gibanje in posledične spremembe vektorskih in skalarnih količin, vključno s prehodom z enega delca na drugega (Rajar, 1997; Širca, 1992).

Za modeliranje razlite nafte v morju je pogosto uporabljena metoda sledenja delcev, ki deluje po Lagrangeovem principu. Nafta je opisana s velikim številom diskretnih delcev, na katere vplivajo zunanji dejavniki, med njimi pa interakcije ni. Vsak delec je opisan z začetnim krajevnim vektorjem in poljubnim številom dodatnih lastnosti. Gibanje delcev je posledica advekcije in naključne turbulentne difuzije. Po času Δt se delec nahaja na novi lokaciji in ima zato drugačno hitrost in smer gibanja. Vektorsko polje hitrosti je pridobljeno s predhodnim hidrodinamičnim modelom, advekcijska hitrost delca je enaka hitrosti v točki v kateri se nahaja. Vpliv vlečenja vetra je v tridimenzionalnih modelih običajno zajet že v opisu tokov, v dvodimenzionalnih pa ga upoštevamo s koeficientom α_w , ki ponazarja delež hitrosti vetra, ki se prenese na naftni madež.

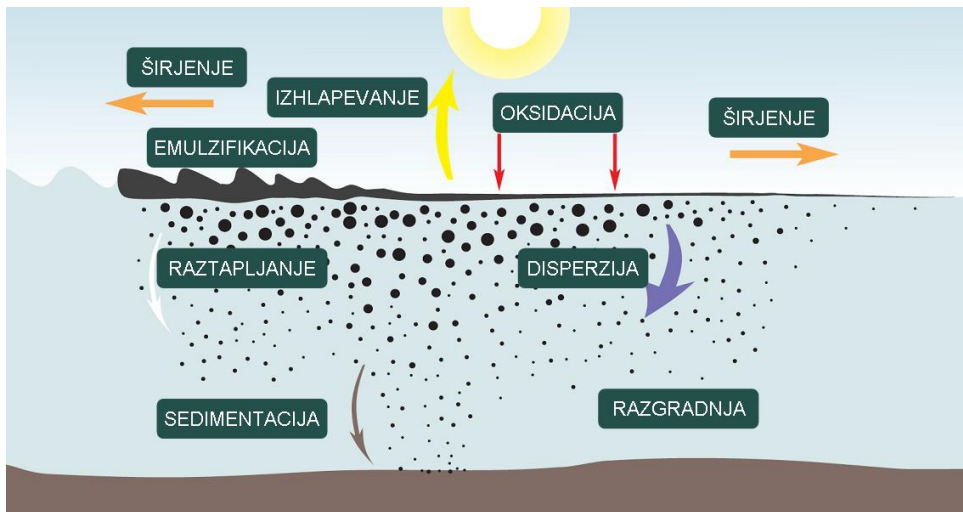
Običajno se giblje okrog 3 %. Gibanje delca je opisano z enačbo (2.14), \vec{u} predstavlja vrednost vektorskega polja hitrosti v točki v kateri se nahaja delec nafte v času t (Žagar, 1994; Širca, 1992; Žagar in Četina, 2011).

$$\vec{r}(t + \Delta t) = \vec{r}(t) + \vec{u}(\vec{r}(t), t)\Delta t \quad (2.14)$$

Prednost takih modelov je numerična preprostost in robustnost ter možnost pripisovanja lastnosti posameznim delcem (Galt, 1997). Z nekaterimi modeli, ki uporabljajo modificiran Lagrangeov pristop, lahko opišemo tudi interakcijo delcev med seboj in z ovirami (Delgado et al., 2006). Podroben pregled prednosti in slabosti metode je naveden v (Žagar, 1994; Delgado et al., 2006). Za končni prikaz je porazdelitev delcev običajno pretvorjena koncentracije nafte. Vsak delec ima določeno maso, tako da koncentracijo izračunamo z vsoto mase vseh delcev v posamezni celici oz. kontrolnem volumnu. Bolj kompleksen izračun se lahko izvede z izdelavo Thiessenovih poligonov iz razporeditve delcev ali uporabo interpolacijskih metod, ki omogočajo manj lomljeno in bolj pregledno karto (Galt, 1997). Tudi uporabljen model NAFTA3d temelji na metodi sledenja delcev, specifična implementacija metode za njegovo delovanje pa je opisana v nadaljevanju (poglavje 4).

2.3 Modeliranje procesov razgradnje in širjenja madeža

Od ostalih modelov gibanja onesnaževal se naftni modeli najbolj razlikujejo prav v biokemičnem delu, kjer so obravnavani procesi seveda specifični za nafto. Z metodo sledenja delcev lahko vse procese računamo hkrati z gibanjem madeža, saj metoda v vsakem časovnem koraku omogoča poleg lokacije delca tudi izračun sprememb njegovih lastnosti (Žagar, 1994). Proces, ki vplivajo na razlito nafto, so prikazani na sliki 2.1.



Slika 2.1: Proces, ki vplivajo na razlito nafto, so prikazani na sliki 2.1. (ITOPF, 2002, po Jeglič T., 2010)

Procese lahko razdelimo na kratkotrajne in dolgotrajne, na tiste, ki delujejo na ali pod gladino in po celem vodnem stolpcu, ter na tiste, ki vplivajo le na gibanje delcev ali pa tudi na lastnosti nafte (Žagar, 1994). Do kratkotrajnih procesov pride kmalu po razlitju, zato so v taktičnem načinu modeliranja pomembnejši od dolgotrajnih. Kategorizacija je sicer odvisna od posamezne situacije, a običajno mednje uvrstimo mehansko širjenje in izhlapevanje, v primerih bližine obale pa še odlaganje na obalo (Žagar et al., 2011). Predpostavljena prednost metode trajektorij je ravno v modeliranju ob razlitju, zato so kratkotrajni procesi v nadaljevanju predstavljeni nekoliko podrobneje. Zaradi enostavnejše primerjave spreminjanja lastnosti nafte v simulacijah nismo upoštevali, ti procesi so zato le grobo orisani.

2.3.1 Mehansko širjenje

Mehansko širjenje naftnega madeža je posledica viskoznih, gravitacijskih in vzgonskih sil ter površinske napetosti. Pod njihovim vplivom se nafta razširi v zelo tanek madež z veliko površino. Proces je dobro raziskan, obstaja več načinov njegovega modeliranja, njihova uporaba pa je odvisna predvsem od vrste uporabljenega transportno-disperzijskega modela (Drozdowski et al., 2011). Poglavitni vplivi na mehansko širjenje imajo vrsta nafte, veter ter temperatura (Žagar et al., 2012). Površina, ki jo nafta zavzame, je pomembna tudi zaradi izračuna izhlapevanja in disperzije (Reed et al., 1999).

Nafta se v morju ne širi enakomerno, pod vplivom tokov se razteza v smeri gibanja, zaradi vetra pa pride do večjih koncentracij na odvetni strani. Madež ima tako, vsaj pri opaznem vplivu advekcije, običajno obliko kometa, z majhnim gostim delom, ki vsebuje večino nafte, spredaj, in dolgo tanko plastjo za njim (Lehr et al., 2002). Ko se madež dovolj stanjša, se zaradi vpliva valovanja ali Langmuirjeve cirkulacije razdeli na več manjših kosov, ki se gibljejo neodvisno, to pa v svoji obravnavi izkorišča metoda sledenja delcev. Pod vplivom Langmuirjeve cirkulacije lahko pride do tankih, vetru vzporednih črt nafte. Končni rezultat mehanskega širjenja so običajno majhne kepice katrana na velikem območju (Lehr et al., 2002; Lehr in Simecek-Beatty, 2000).

Prvi je mehansko širjenje z uporabnimi enačbami opisal Fay (1971), v nadaljevanju te povzemamo po (Žagar, 1994). Nafta se odvisno od prevladujočih sil širi v treh različnih režimih. V vseh treh oblikah je zveza med debelino in polmerom madeža opisana z enačbo (2.15), kjer p predstavlja tlak v horizontalni smeri, Δh lego madeža nad srednjo gladino vode, h njegovo debelino in l polmer.

$$p = (\rho g \Delta h) h l \quad (2.15)$$

Takoj po razlitju širjenju nafte pod vplivom težnosti nasprotuje vztrajnostna sila. Polmer madeža je v tem primeru opisan z enačbo (2.16), kjer Δ predstavlja odstopanje razmerja gostot vode in nafte od 1.

$$l \approx (\Delta g V)^{\frac{1}{4}} t^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

V nadaljevanju vztrajnostno silo pri nasprotovanju težnosti nadomesti vpliv viskoznosti, velja enačba (2.17):

$$l \approx v^{-\frac{1}{12}} (g \Delta)^{\frac{1}{6}} V^{\frac{1}{3}} t^{\frac{1}{4}} \quad (2.17)$$

Po daljšem času širjenje ni več odvisno od količine nafte, uravnavata pa ga viskozna sila in površinska napetost. Polmer madeža dobimo po enačbi (2.18), kjer σ predstavlja koeficient širjenja madeža, ki je odvisen od površinskih napetosti na meji med zrakom, vodo in nafto, μ pa je dinamična viskoznost vode.

$$l \approx \sigma^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho}{\mu} \right)^{\frac{1}{4}} t^{\frac{3}{4}} \quad (2.18)$$

Fayeve enačbe se uporabljajo predvsem v dvodimenzijskih modelih širjenja nafte, saj vertikalna smer v njih niti ni zajeta. So laboratorijsko preizkušene in veljajo za krožen madež na mirni gladini, t.j. brez upoštevanja turbulence. Poleg tega z njimi ni možno zajeti vpliva vetra, ki povzroča izrazito elipsasto obliko madeža, raztegnjenega v smeri vetra. Obstajajo sicer modifikacije enačb, ki ta problem delno rešujejo, vseeno pa se v tridimenzionalnih modelih običajno raje uporablja metoda strižne difuzije (Žagar, 1994).

Metoda strižne difuzije (Elliott et al., 1986) upošteva širjenje madeža zaradi skupka vplivov turbulence, vzgona in različnih hitrosti po vodnem stolpcu, ki so posledica valov, plimovanja in vetra. V smeri vetra je širjenje opazno večje, v prečni smeri pa se madež širi le zaradi turbulentne difuzije, saj v tej smeri strižne sile niso prisotne. Delci z večjo gostoto pod vplivom

turbulence potonejo, z globino pa se horizontalne hitrosti manjšajo. Ko se nekateri kasneje dvignejo nazaj na površino, madež dobi svojevrsten "rep". Metoda zajame tudi večjo debelino madeža na odvetnem delu (Žagar, 1994). Poleg ustrežnejše obravnave dogajanja je metoda tudi zelo elegantna, saj ne potrebuje nobenih dodatnih računov, vpliv mehanskega širjenja je že zajet v strukturi metode sledenja delcev in tridimenzionalnih hitrostnih poljih (Žagar et al., 2011).

2.3.2 Izhlapevanje

Izhlapevanje s površine naftnega madeža je pomemben proces, saj lahko njegovo maso močno spremeni. Lahke frakcije pogosto izhlapijo v celoti (Žagar, 1994). Ravno zelo hlapne komponente so običajno najbolj strupene, zato kljub zmanjšanju mase madeža pomenijo skoraj gotovo zastrupitev okolja (Etkin, 2015). Največji delež nafte izhlapi v začetku razlitja, kasneje se proces upočasni, saj lažje frakcije niso več prisotne. Izhlapevanje povečuje viskoznost in gostoto naftnega madeža ter možnosti za nastop emulzifikacije (Lehr et al., 2002). Proces izhlapevanja se v modelih obravnava na več načinov. Prvi je psevdokomponentni pristop, kjer je nafta glede na svojo sestavo razdeljena na manjše število komponent med katerimi ni interakcije. Za vsako komponento se izhlapevanje izračuna posebej, skupna evaporacija pa je vsota vseh delnih. Metoda potrebuje veliko količino vhodnih podatkov o vsaki frakciji posebej (Žagar, 1994; Lehr et al., 2002).

Pogosto se uporablja analitični pristop oziroma Mackay-eva enačba (Mackay et al., 1980), ki deluje po analogiji z izhlapevanjem vode, torej uporablja princip mejne plasti. Predpostavlja, da se nad gladino vode vzpostavi mejna plast zraka nasičenega z izparelimi ogljikovodiki, ki zavira nadaljnji proces. Veter pospešuje izhlapevanje, saj odstrani nasičeno mejno plast. Tudi tak pristop zahteva sorazmerno veliko podatkov o razliti nafti, ki jih je težko pridobiti. Razvidni so iz enačb (2.19),(2.20):

$$F = \frac{1}{C} \left[\ln P_0 + \ln \left(CE + \frac{1}{P_0} \right) \right] \quad (2.19)$$

$$E = \frac{k_m A v t}{RTV_0} \quad (2.20)$$

F predstavlja delež izhlapevanja, C je konstanta odvisna od specifične teže nafte, P_0 začetni parni tlak odvisen od temperature vrelišča nafte in temperature okolice, k_m koeficient masnega prenosa odvisen od hitrosti vetra 10 m nad morsk gladino, A površina madeža, V_0 začetna prostornina madeža, R plinska konstanta in T temperatura na površini madeža v Kelvinih (Šaponja, 2014).

Mackay-eva enačba po dognanjih v zadnjem času ni pravilna, saj mejna plast ne, oziroma zelo šibko, regulira izhlapevanja nafte. Različne hitrosti vetra nimajo bistvenega vpliva na proces, saj že šibek veter odpravi mejno plast. Fingas (2004) je predstavil metodo za izračun izhlapevanja, ki ga regulira difuzija. Podal je empirične enačbe, v katerih od lastnosti nafte nastopa le odstotek destilacije pri 180 °C, ki je običajno v času razlitja znan. Izhlapevanje je za posamezno vrsto nafte odvisno le od temperature okolice in časa pretekega od razlitja. Metoda je tako veliko enostavnejša za uporabo. V prispevku (Fingas, 2004) so podane končne enačbe za 214 vrst nafte, vse pa sledijo dvema oblikama. Delež izhlapevanja s časom narašča bodisi po logaritmični ali korenski funkciji (2.21), (2.22). $\%D$ je odstotek destilacije pri 180 °C, T temperatura okolice v stopinjah Celzija in t čas v minutah.

$$\text{delež izhlapevanja} = [0,165(\%D) + 0,045(T - 15)] \ln t \quad (2.21)$$

$$\text{delež izhlapevanja} = [0,0254(\%D) + 0,01(T - 15)] \sqrt{t} \quad (2.22)$$

2.3.3 Odlaganje na obalo

Ob dotiku madeža z obalo se del nafte odloži oziroma prilepi na material. Pod vplivom tokov in plimovanja se vrača nazaj v morje. Zadrževanje nafte na obali je odvisno od tipa materiala na obali, oziroma njegove poroznosti in vodopropustnosti, viskoznosti in adhezivnosti nafte, razmerja med vodo in zrakom v porah sedimenta, energije valov in faze plimovanja ob dotiku madeža z obalo.

Proces je običajno modeliran z upoštevanjem različnih karakteristik obale. Sproščanje nazaj v morje lahko opišemo z razpolovnim časom zadrževanja nafte, ki je lastnost posameznega tipa obale in predstavlja čas, v katerem se v morje vrne polovica odložene nafte. Enačbo 2.23 so predstavili Shen et al. (1991), povzemamo pa jo po (Žagar, 1994). V_b pomeni količino nafte na obali, λ pa je razpolovni čas značilen za obalo.

$$\frac{dV_b}{V_b} = 1 - 0.5 \frac{\Delta t}{\lambda} \quad (2.23)$$

Odlaganje lahko obravnavamo tudi z določanjem zadrževalne sposobnosti obale. Ta je kvalitativno razdeljena med polnim zadrževanjem, delnim zadrževanjem in obalo, ki nafte ne zadrži. Tretji način opisa odlaganja je z 'verjetnostjo absorpcije' različnih tipov obale, ki je opredeljena z vrednostmi med 0 in 1. Ko delec zadene obalo, model pridobi naključno število iz enakomerno porazdeljenega naključnega zaporedja med 0 in 1. Če je število manjše od verjetnosti absorpcije obale, se delec odloži, sicer se vrne nazaj. Z maksimalno dovoljeno debelino odložene nafte je lahko določena tudi največja zadrževalna kapaciteta vsakega dela obale. Po enakem principu lahko modeliramo tudi lepljenje delcev na morsko travo (Sayed et al., 2008).

Številni modeli odlaganja na obalo eksplicitno niti ne opisujejo. Ko delec zanese na obalo, tam ostane, dokler ga hitrostno polje ne vrne nazaj. Simulacije se pogosto končajo, ko madež zadene obalo, saj ravno to želimo preprečiti. V tem primeru modeliranje odlaganja niti ni potrebno (AMEC, 2010).

2.3.4 Dolgotrajni procesi

Zaradi turbulence se kapljice vode zamešajo v nafto. Nastane emulzija vode v nafti. Glede na stabilnost emulzije delimo na stabilne, metastabilne, nepravne in nestabilne. Polna emulzija lahko vsebuje do 90 % vode, in tako prekrije mnogo večjo površino. Viskoznost nafte se poveča do dva reda velikosti, kar madež lahko spremeni v nenevtonsko tekočino. Proces propadanja se v emulziji upočasnijo, težje je tudi njeno odstranjevanje. Iz teh razlogov je pri modeliranju širjenja nafte pomembno predvsem kdaj emulzifikacija nastopi. Proces je težko opisati, odvisen pa je od vrste oziroma sestave nafte (Lehr et al., 2002; Kvočka, 2013; Betancourt et al., 2005).

Nafta je le slabo topna v vodi, poleg tega pa se najhitreje raztapljajo ravno zelo hlapne frakcije, pri katerih je izhlapevanje do 100 krat hitrejše. Tako se raztopi manj kot odstotek skupne mase, ki pa je pogosto najbolj toksičen (Betancourt et al., 2005). Nafta v vodni stolpec običajno pride s procesom disperzije. Potopi se zaradi delovanja valov, če so kapljice dovolj majhne, je vzgon manjši od vpliva vertikalne turbulentne difuzije, nafta pa ostane razpršena v vodnem stolpcu. Proces je hitrejši pri nafti z manjšo viskoznostjo (Lehr et al., 2002). Pomemben v prisotnosti močnih vetrov, ki povzročijo dovolj veliko količino turbulentne energije (Žagar et al., 2012). Disperzija zaradi večje površine prenosa pospešuje procese mešanja s sedimentom, raztapljanja in biodegradacije (Betancourt et al., 2005). Če je nafta gostejša od morske vode na površini lahko potone sama od sebe, kar pa se zgodi zelo redko. Pri srednje razburkanem morju občasno pride do preliivanja vode preko naftnega madeža, kar povzroča zmedo pri določanju njegove lokacije, saj je tako slabše zaznaven (Fingas, 2015).

Kapljice nafte razpršene v vodnem stolpcu se lahko prilepijo na suspendirane delce sedimenta. Zaradi povečane gostote so težje od vode in potonejo na morsko dno. Proces v večini primerov

ni relevanten v času odstranjevanja razlite nafte, razen v območjih z visokimi koncentracijami suspendiranih snovi, na primer ob ustjih rek (Lehr et al., 2002). Ko nafta doseže morsko dno jo običajno prekrije sediment, nadaljnja razgradnja je močno upočasnjena (Fingas, 2015).

Pod vplivom sončne svetlobe na površini naftnega madeža nastajajo novi produkti. Njihov vpliv je različen, lahko se raztopijo v vodi, ali pa prispevajo k tvorbi emulzije. Učinek foto-oksidacije je odvisen od vrste nafte, običajno pa za modeliranje ni pomemben. Najpočasnejši proces je biodegradacija, ki traja od nekaj tednov do več let. Nafto mikroorganizmi najprej razgradijo na oksidirane spojine, končni produkt pa je anorganska snov. Proces je odvisen od vrste nafte in temperature okolice, ki vpliva na prisotnost različnih tipov mikroorganizmov, ter dostopnosti kisika, dušika in fosforja. Tudi biorazgradnja poteka prepočasi in v modeliranju ni pomembna (Fingas, 2015).

3 METODA TRAJEKTORIJ

Delovanje uporabljene modela za izračun trajektorij je podrobno opisala že Šoško (2012), v tej diplomski nalogi pa je skupaj s popravki in dopolnitvami predstavljen v podpoglavju 4.2. Metoda trajektorij ima več različnih aplikacij in načinov uporabe, ki temeljijo bodisi na nezanesljivosti vhodnih podatkov, prognostičnem modeliranju širjenja naftnega madeža v čim bolj reprezentativnih okoliščinah, ali na hitrem in enovitem prikazu najboljše ocene dogajanja. Skupna značilnost metode je izračun verjetnosti pojava naftnega madeža v posamezni računski celici oziroma delež trajektorij delcev, ki prečka vsako računsko celico. Namen diplomskega dela je tudi raziskati možnosti in postaviti osnove za nadaljnji razvoj modela v različnih smereh, zato v tem poglavju predstavljamo vse načine uporabe metode trajektorij. Za zagotovitev ustrezno podkrepljene razlage in boljšega razumevanja najprej prikazujemo nekaj povezanih tematik, na katere se lahko pri opisu analize trajektorij sklicujemo.

3.1 Lastnosti nafte

Podatki o vrsti in lastnostih razlite nafte so za uspešno modeliranje razlitja in načrtovanje odziva izredno pomembni, saj se različne vrste nafte v okolju obnašajo različno in imajo nanj drugačen vpliv. Napačna informacija, pa tudi primanjkljaj ustreznih podatkov, lahko povzroči nepravilno opredelitev ogroženega območja in neučinkovit odziv. Lastnosti nafte so tudi vir nezanesljivosti, ki ga poskušamo obravnavati s statistično analizo trajektorij (Etkin, 2015; Fingas, 2011c; Galt, 1997). V nadaljevanju zato kratko opisujemo najpomembnejše lastnosti nafte.

Osnovna delitev nafte je na surovo nafto in njene derivate. Surova nafta je sestavljena iz ogromnega števila spojin ogljikovodikov različne teže in hlapnosti. Njene lastnosti so odvisne od lokacije črpanja oziroma tamkajšnje geološke sestave. Naftni derivati imajo bolj uniformne lastnosti, saj so z različnih vrst surove nafte proizvedeni z namenom izpolnitve določene funkcije. Vsebujejo mnogo manjši razpon spojin (Fingas, 2011c).

Pri opredeljevanju potencialne škode razlito nafto razdelimo v štiri skupine. V prvo sodijo zelo hlapni produkti, ki izhlapijo v nekaj dneh, a so izredno toksični. V okolju povzročijo hudo, a le lokalno škodo, odstraniti pa jih je skoraj nemogoče. V drugo skupino uvrstimo lahka goriva, ki so manj toksična in hlapna, v nekaj dneh v morju ostane le še tretjina razlite mase. Možno je že dolgotrajno onesnaženje gladine in morskega dna, vendar je razlito nafto sorazmerno enostavno odstraniti. Srednje težka nafta, ki sodi v tretjo skupino, je le še malo strupena, a je v kratkem času izhlapi le tretjina, kasneje pa je zelo obstojna, onesnaženje z njo je dolgotrajno in nevarno živalim. Odstranjevanje je učinkovito, predvsem takoj po razlitju, preden se madež razširi. V zadnjo kategorijo sodijo težke, slabo hlapne in zelo obstojne nafte. Onesnaženje z njimi je dolgotrajno, čiščenje izredno zahtevno. Zaradi močnejše disperzije in sedimentacije pogosto onesnažijo tudi morsko dno (Etkin, 2015).

Viskoznost nafte je odvisna od razmerja med lahkimi in težkimi frakcijami, slednje so bolj viskozne. Nanjo močno vpliva temperatura, odvisnost je pri večini vrst nafte logaritmična, nižje kot so temperature, večja je viskoznost. Viskozni madeži se sicer širijo počasneje, a jih je težje odstraniti (Fingas, 2011c).

Gostota nafte je običajno izražena v g/cm^3 . Uporablja se kot merilo za razmejevanje med težko in lahko surovo nafto. Lažje frakcije izhlapevajo hitreje, zato se gostota s časom preteklim od razlitja povečuje. Gostejše nafte pogosteje tvorijo stabilne emulzije, večja je disperzija v vodni stolpec, gostejša nafta tudi hitreje potone. V zadnjem času se uporabljajo vse gostejši derivati, tako da lahko disperzija, pa tudi tonjenje nafte, postaneta bolj pogosta pojava (Fingas, 2011c). Potopljeno nafto je izredno težko odstraniti (Etkin, 2015).

Površinska napetost je prisotna na meji med nafto in vodo ter nafto in zrakom. Temperatura nanjo neposredno ne vpliva, jo pa povečuje izhlapevanje. Sama površinska napetost vpliva

na mehansko širjenje madeža, emulzifikacijo in disperzijo. Slednje izkoriščajo disperzanti, ki z zmanjševanjem površinske napetosti nafte znižujejo turbulentno energijo potrebno za disperzijo (Etkin, 2015).

Adhezivnost določa količino nafte, ki pri dotiku z drugo snovjo ostane na njej prilepljena. Pomembna je predvsem pri modeliranju odlaganja na obalo in vpliva na učinkovitost ukrepov odstranjevanja nafte z morske površine. Bolj adhezivno nafto je možno učinkovito odstraniti z uporabo skimerjev, ko pa enkrat doseže obalo, je sanacija zahtevna in draga (Etkin, 2015).

Delež prostornine nafte, ki izpari pri določeni temperaturi, se imenuje odstotek destilacije. Gre za zelo informativno lastnost, saj je močno povezana z sestavo in fizikalnimi lastnosti nafte, poleg tega pa je zaradi potreb rafinerij poznana pri večini razlitij. Kot smo že omenili, se odstotek destilacije pri 180 °C uporablja pri modeliranju izhlapevanja (Fingas, 2011c).

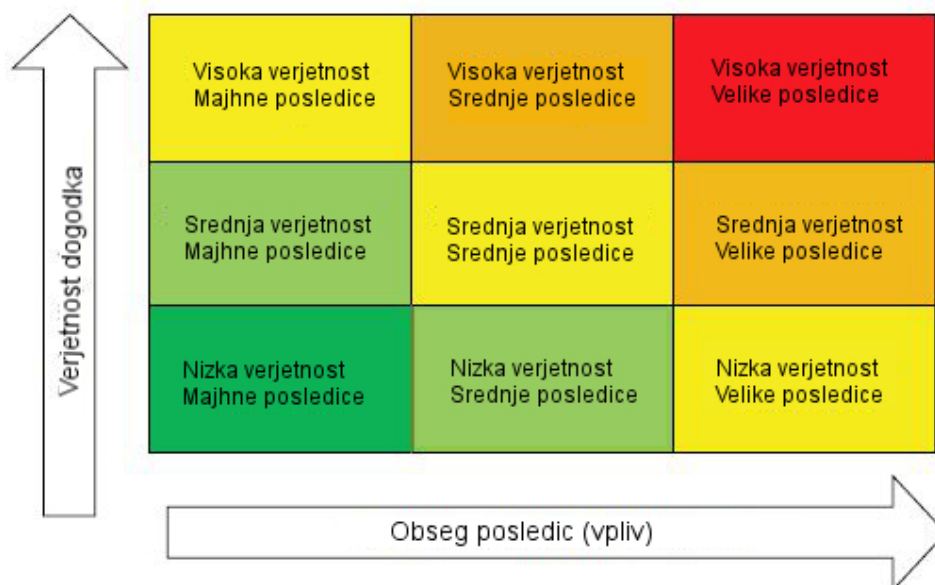
3.2 Odziv na razlitje

Pri vsakem snovanju in preizkušanju novih modelov je potrebno upoštevati kontekst v katerem se bodo ti uporabljali (Galt, 1998). Že v uvodu smo omenili, da ima metoda trajektorij največjo prednost pri taktičnem modeliranju. Če jo skušamo optimizirati za uporabo ob realnih razlitjih, moramo vedeti, kako načrtovanje odziva in samo reševanje potekata. Le tako metodo lahko prilagodimo dejanskim potrebam v krizni situaciji. Predhodno načrtovanje je zanimivo z vidika izvedbe prognostičnega modeliranja in uporabe nekaterih konceptov v analizi rezultatov metode trajektorij.

Ustrezen odziv ob razlitju nafte lahko zelo zmanjša okoljsko in socioekonomsko škodo. Dobro načrtovanje odziva se začne že pred nesrečo, z izdelavo načrtov ukrepanja in analizami ogroženosti. Načrti ukrepov se izdelajo za obravnavano območje in vsebujejo navodila za zaustavitev iztekanja nafte, njeno zadrževanje po razlitju in končno čiščenje z morske gladine in obale. Upoštevati morajo v tako običajne kot najslabše pogoje, saj so razlitja nepredvidljiva. Večinoma so izdelani za več nivojev odziva, odvisno od resnosti nesreče, tako da je določitev obsega razlitja nujna za ustrezno ukrepanje oziroma izbiro primernega protokola. Načrti ukrepanja vsebujejo vse napotke za čim hitrejšo delovanje še pred vzpostavitvijo ustrezne hierarhične strukture odločanja. Določajo katere osebe in organizacije je treba nemudoma obvestiti, način komuniciranja z javnostjo, opremo, ki je na voljo, in ranljiva območja. Slednja so opredeljena v ločenih študijah in prikazana na ustreznih kartah. Vključujejo tako okoljske, kot socioekonomske dejavnike, od območij pomembnih za morske sesalce, ptiče ali ribe, do turističnih plaž in pristanišč. Na takih kartah so pogosto prikazani tudi podatki o plimovanju, cirkulaciji in klimatologiji, pridobljeni z dodatnimi študijami. V predhodno načrtovanje sodi tudi prognostično modeliranje širjenja naftnega madeža in analiza tveganja razlitij ter ogroženosti posameznih območij (Fingas, 2013).

Tveganje razlitja je opredeljeno kot produkt med statistično določeno verjetnostjo razlitja in resnostjo njegovih posledic. Nično tveganje je nedosegljivo, lahko pa tveganje z ukrepi zmanjšujemo. Ker je sestavljeno iz dveh komponent, je ukrepanje lahko osredotočeno na preprečevanje razlitij oziroma zmanjševanje verjetnosti pojava dogodka, ali pa na zniževanje njegovih posledic. Intenziteto tveganja lahko opredelimo z matriko tveganja (slika 3.1) (Etkin, 2015).

Analiza tveganja omogoča optimalno razporeditev omejenih sredstev, vključno s časom, med verjetne scenarije s povprečno povzročeno škodo in malo verjetne dogodke s potencialno katastrofalnimi posledicami. Zelo pomembne so okoliščine nesreče, to so razlog in vir razlitja, vrsta in količina nafte, ter lokacija razlitja vključno z geografijo, ekologijo in političnimi dejavniki. Tako okoljska kot socioekonomska škoda je odvisna od letnega časa (npr. migracije in razmnoževanje živali), različnih vremenskih pogojev in turistične sezone. Verjetnost razlitja se določa na podlagi zbirke podatkov o preteklih nesrečah, klimatoloških značilnosti območja (verjetnost ekstremnih vremenskih razmer), podatkov o potresni aktivnosti in drugih naravnih nesrečah,



Slika 3.1: Matrika tveganja (Etkin, 2015, str. 4).

ali z analizo drevesa odpovedi. Slednja se izvede s kvantifikacijo verjetnosti posameznih dogodkov, ki v zaporedju lahko vodijo do razlitja. Verjetnost razlitja je tako produkt verjetnosti posameznih nivojev drevesa odpovedi. Poleg verjetnosti pojava samega razlitja se v sklopu analize tveganja določa tudi verjetnost posameznih lastnosti razlitja. Volumen razlite nafte se za transportna plovila določene vrste opredeli s kumulativno porazdelitveno funkcijo, iz katere je razvidna verjetnost, da je volumen manjši od neke vrednosti. Funkcije so zaradi mnogo večje pogostosti manjših razlitij običajno prikazane v logaritmičnem merilu. V predhodnih načrtih se velikokrat uporabi kar največje možno razlitje, ki je enako kapaciteti transportnega plovila (Etkin, 2015).

Posledice razlitja so odvisne od vrste razlite nafte, bližine ranljivih območij in virov, meteoroloških in cirkulacijskih pogojev ter uspešnosti odziva. Nafte z različno obstojnostjo, toksičnostjo in lepljivostjo imajo lahko povsem drugačen vpliv na okolje, kar smo predstavili že v podpoglavju 3.1. Klimatološki in cirkulacijski dejavniki določajo smer in hitrost širjenja nafte ter vplivajo na procese propadanja. Močna turbulenca povečuje emulzifikacijo in disperzijo v vodni stolpec, visoke temperature pa pospešujejo izhlapevanje in zmanjšujejo viskoznost ter gostoto nafte. Ključen je vpliv vetra in morskih tokov na trajektorijo naftnega madeža in verjetnost pojava nafte na ranljivih območjih, vključno s časom zadrževanja. To komponento analize tveganja lahko določamo s prognostičnim modeliranjem po metodi trajektoriji, ki je opisano v podpoglavju 3.3.2. Posledice poskušamo kvantificirati z različnimi pristopi, ki so večinoma zelo zahtevni (Etkin, 2015).

Za kvalitetno modeliranje širjenja nafte ob razlitju in za kasnejši odziv je zelo pomembno pridobiti čim več natančnih podatkov tako o vrsti razlitja, kot o spremljajočih dejavnikih. Potrebno je poznati točno lokacijo nesreče, trajanje in volumen razlitja ter kopico lastnosti nafte. Poznavanje slednjih je predpogoj za ustrezno modeliranje tako gibanja kot procesov propadanja in končno tudi izbiro najboljše metode odstranjevanja nafte. Nujna je kvalitetna meteorološka napoved v ustrezno gosti računski mreži, ki omogoča dovolj dober izračun cirkulacije in gibanja madeža (Žagar et al., 2012; Simecek-Beatty, 2011).

Če vsi potrebni podatki o razliti nafti niso na voljo, se z madeža odvzamejo vzorci, ki se analizirajo na terenu ali v laboratoriju. Na sami lokaciji razlitja je med drugim možno določiti tudi tako pomembni lastnosti kot sta viskoznost in gostota nafte. Za zaznavanje razlitij in spremlja-

nje kasnejšega gibanja madeža se uporablja več različnih tehnologij. Najhitreje razlitje zaznajo posebne boje in sistemi nadzora, ki zaznavajo prisotnost nafte v morski vodi z izkoriščanjem značilne fluorescence nafte, a so nameščene le na območjih, kjer so taki dogodki pričakovani. Običajno so v ustreznih pogojih naftni madeži odkriti in opazovani s helikopterjev ali letal. Predvsem pri velikih razlitjih je pogosta tudi uporaba daljinskega zaznavanja z letal ali satelitov z uporabo infrardečih, laserskih ali mikrovalovnih senzorjev. Z nekaterimi je poleg zaznavanja lokacije možna tudi določitev debeline naftnega madeža. Nafta na morski gladini zmanjša prisotnost majhnih, centimetrskih valov, kar omogoča zaznavanje z radarjem, ki pa je zelo nezanesljivo (Fingas, 2013). Zaznavanje madeža je pomembno tudi za modeliranje dogajanja, saj omogoča sprotno umerjanje modela in tako povečuje zanesljivost napovedi. Ob vsakih novih meritvah se simulacija lahko zažene ponovno z upoštevanjem preteklega in trenutnega stanja (Galt, 1998). Primer uporabe satelitskega zaznavanja za podporo modeliranju najdemo v Perkovič et al. (2008).

Kljub pogosto pomanjkljivim in nezanesljivim podatkom se odločevalci ob razlitjih soočijo z ogromnim številom informacij, vključno z rezultati simulacij. Zato je nujna čim bolj strnjena informacija o gibanju naftnega madeža. Karte, ki zavzemajo več strani, so v naglici kriznega odločanja neugodne, saj se deli rezultatov simulacije izgubijo in spregledajo, ali pa pride do napačne interpretacije. Na podlagi simulacij in z upoštevanjem vseh predhodnih planov in raziskav se pripravi celovit načrt odziva. V njem se najprej opredeli vrsto razlite nafte, kar omogoča modeliranje gibanja razlitja in identifikacijo ogroženih območij in virov. Določi se vpliv nafte na ogrožene vire, upoštevajoč podatke o koncentracijah in verjetnosti pojava madeža na njihovi lokaciji. V končni fazi je potrebna optimalna razdelitev razpoložljivih sredstev (denarja, opreme, ljudi in časa) med odkrite nevarnosti. Ko so vsa potrebna sredstva na voljo, se odziv na terenu začne, načrt pa se stalno posodablja na podlagi novih opažanj in že izvedenih ukrepov. Ves čas načrtovanja in ukrepanja je potrebno upoštevati nezanesljivost predpostavk, s katerimi se operira, in predvidevati posledice njihove potencialne neustreznosti (Galt, 1997, 1998). Prednostna naloga ukrepanja je zaustavitev iztekanja nafte. V kolikor to ni možno, se nafto prečrpa v nepoškodovane dele tankerja ali na druga plovila. Celoten postopek lahko traja tudi teden dni, v neugodnih okoliščinah še več. Zato vzporedno že potekajo ukrepi za zadrževanje širjenja nafte, njeno odstranjevanje in uničevanje, ter ukrepi za zaščito ogroženih območij (Fingas, 2013).

Za sanacijo naftnega razlitja se uporabljajo številne metode in tehnologije. Izredno pomembno je, da madež ne doseže obale, kjer povzroči največjo škodo. S tem namenom se njegovo gibanje fizično omejuje, običajno s plavajočimi zavesami. Te so pogosto prva uporabljena oprema, saj je z njimi ob dovolj hitrem odzivu mogoče madež popolnoma obkrožiti in zaustaviti. Zavesa se sicer uporablja še za varovanje ogroženih območij, preprečevanje gibanja v nezaželeno smer ter koncentriranje nafte na čim manjšem območju, kar olajša njeno odstranjevanje. Težave pri njihovi uporabi nastopijo v močnih tokovih in valovanju, ki povzroči njihovo prevrnitev ali uhajanje nafte pod in nad zavesami. Vzporedno z omejevanjem gibanja se izvajajo ukrepi za odstranjevanje razlite nafte, saj so večinoma učinkoviti le kratek čas, dokler je madež dovolj debel. V ta namen se uporabijo skimerji, mehanske naprave, ki nafto poberejo z morske gladine. Najbolj učinkoviti so v kombinaciji s plavajočimi zavesami, saj pogosto le te zagotovijo dovolj velike koncentracije nafte. Učinkovitost je odvisna od vrste razlite nafte, predvsem od njene viskoznosti in adhezivnosti. Tokovi, veter in valovanje učinkovitost zmanjšujejo. Pobrana nafta se običajno odstrani s sežigom, saj njena ponovna uporaba ni ekonomična (Fingas, 2013). Skupaj z zavesami in skimerji se redko odstrani več kot 15 % razlite nafte, bolj učinkovito je njeno uničevanje (Etkin, 2015). Razna kemična sredstva se uporabljajo za pospeševanje ali zaviranje naravno pojavljajočih se procesov. Pogosta je uporaba disperzantov, ki zmanjšajo površinsko napetost med nafto in vodo, s tem pa pospešujejo disperzijo v vodni stolpec. Njihova učinkovitost je močno odvisna od vrste nafte in uspešnega nanosa (ta se običajno vrši z letal). Mešanje nafte po vodnem stolpcu ima v primeru toksičnosti nafte ali disperzanta lahko hude posledice. Poleg

disperzantov se uporabljajo še kemična sredstva za preprečevanje nastanka emulzij in njihovo uničevanje, povečevanje adhezivnosti nafte ter pospeševanje tonjenja in biodegradacije. Zadnji razširjen ukrep je kontroliran sežig naftnega madeža, s katerim se hitro in ekonomično odstrani velike količine nafte, a obenem lahko privede do nezanimljivega onesnaževanja zraka. Tudi ta postopek je učinkovit le ob dovolj veliki debelini madeža (Fingas, 2013; Bosnič, 2014). Nekateri matematični modeli vključujejo tudi možnost vključevanja vpliva omenjenih ukrepov, na primer plavajočih zaves in skimerjev (Delgado et al., 2006).

3.3 Analiza trajektorij

Metoda trajektorij temelji na Lagrangeovem načinu opisa naftnega madeža. Od običajne metode sledenja delcev se razlikuje v tem, da z delci namesto dela nafte opišemo različne možnosti gibanja centra naftnega madeža. Rezultat so verjetnosti, da se madež tekom celotne simulacije v določeni računski celici pojavi, ki so definirane z deležem vseh simuliranih trajektorij delcev, ki celico prečkajo. Opredelitev z verjetnostjo omogoča določanje ogroženosti območja. V prejšnjem poglavju smo opisali princip analize tveganja naftnega razlitja, kjer je tveganje produkt verjetnosti dogodka in njegovih posledic. Pri opisu širjenja madeža z verjetnostjo lahko orodje analogno uporabimo, le da tokrat govorimo o ogroženosti posameznega dela računskega območja, ki je produkt verjetnosti pojava naftnega madeža (rezultat metode trajektorij) in ranljivosti podobmočja. Informacije o ogroženosti so podlaga za optimalno predhodno planiranje ali samo načrtovanje odziva, saj tudi ob dejanskem razlitju omogočijo razporeditev enake količine sredstev med območja z enako ogroženostjo, pa najsi ta izhaja iz velike verjetnosti pojava madeža in majhne ranljivosti, ali dogodka z nizko verjetnostjo a hudimi posledicami (slika 3.1). Izredno pomembna je tudi zunanja ovojnica verjetnosti. Z določeno zanesljivostjo, ki je odvisna od vrste simulacije in stopnje upoštevanja nezanesljivosti, oziroma kvalitete uporabljenih vhodnih podatkov, lahko trdimo, da se madež izven nje ne bo nahajal.

Delovanje metode trajektorij in njeno uporabo lahko glede na uporabljene vhodne podatke razdelimo na dva značilna pristopa, o katerih smo govorili že v začetku poglavja 2, determinističnega in statističnega. Poleg vhodnih podatkov se razlikujeta tudi v potrebni strukturi uporabljenega programa, razlogih in namenu takšnih simulacij, zato ju bomo opisali ločeno. Uporabljen model za izračun trajektorij je determinističen, nadaljnji razvoj pa bo moral potekati ločeno za oba načina izvajanja simulacij.

3.3.1 Statistično modeliranje

Nezanesljivost ali celo pomanjkanje vhodnih podatkov je eden večjih problemov, s katerim se srečujemo pri z matematičnimi modeli širjenja nafte podprtem načrtovanju odziva na razlitje. Prvi vir nezanesljivosti so podatki o razlitju. Lokacija lahko odstopa za več kilometrov, podcenjena je prostornina razlite nafte, njene lastnosti pa niti niso nujno znane, čeprav je njihov vpliv lahko zelo pomemben (podpoglavje 3.1). Še večja težava so meteorološke napovedi in izračunana hitrostna polja. Redna so odstopanja med napovedanimi in dejanskimi lastnostmi vetra in njegovega vpliva na naftni madež, enako velja za morske tokove in valovanje. Poleg tega natančnost napovedi po določenem času hitro pada, lokalnih pojavov pod resolucijo modela pa ta ne zajame. Tudi matematični modeli vsebujejo inherentno nezanesljivost, tako zaradi empiričnosti enačb kot zaradi numeričnih napak (Simecek-Beatty, 2011). Uporaba sofisticiranih modelov, ki zahtevajo veliko količino pogosto težko dostopnih podatkov, tako ni nujno smiselna, saj so rezultati lahko občutljivi ravno na netočen parameter, ki v enostavnejšem modelu niti ne bi bil uporabljen (Galt, 1998). Trend razvoja matematičnih modelov je zato usmerjen tudi v upoštevanje in izračun te nezanesljivosti ter njen prikaz v končnih rezultatih (Galt, 1997).

Večina modelov trenutno deluje tako, da uporabi najboljše ocene vseh vhodnih podatkov in z njimi izračuna najverjetnejše gibanje nafte, ne poda pa nobenih informacij o zanesljivosti rezultata. Za razumevanje obravnavane problematike se Galt (1997) sklicuje na teorijo iger. Pri

igrah, kjer gre za zaščito zelo pomembnih virov ali močno ranljivih območij, sta na voljo dva načina delovanja. Prvi je zasledovanje 'maksimalne koristi' glede na vložena sredstva, kar pomeni zanašanje na najboljšo oceno dogajanja in ustrezen odziv. Drugi način je doseganje 'minimalne škode' (ang. minimum regret) pri najslabšem razvoju dogajanja. V tem primeru je potrebno upoštevati najbolj neugodne situacije, ki pa jih lahko spoznamo le z upoštevanjem nezanesljivosti vhodnih podatkov. Ker je razlitje nafte eklatanten primer dogodka s potencialno katastrofalnimi posledicami napačnih odločitev, avtor predlaga uporabo drugega načina delovanja. Namesto izvedbe le ene simulacije za najboljšo oceno predlaga analizo občutljivosti rezultata na napake posameznih vhodnih podatkov in modeliranje nezanesljivosti.

Namesto z determinističnimi diskretnimi vrednostmi se vhodni podatki o zunanji vsiljevanjih in parametri razlitja opredelijo s statistično porazdelitvijo. Za simulacijo gibanja vsakega delca se uporabi druga statistična kombinacija vhodnih podatkov. Delec predstavlja center posameznega madeža, z nekoliko drugačnimi lastnostmi, na katerega delujejo nekoliko drugačni zunanji dejavniki. Z uporabo velike količine delcev dobimo verjetnosti pojava naftnega madeža ob upoštevanju nezanesljivosti. Simulacija je v svojem bistvu neke vrste Monte Carlo analiza, kjer so posamezni vhodni podatki za vsak delec naključno pridobljeni iz izbrane statistične porazdelitve. Implementacija metode je mogoča na več različnih načinov. Za njeno izvajanje je potrebna dopolnitev obstoječih modelov, tako da ti omogočajo uporabo spremenljivih podatkov, in opredelitev nezanesljivosti posameznih vhodnih parametrov. Za simulacije daljše od smiselnih meteoroloških napovedi je potreben gladek prehod na klimatološke pogoje območja (Galt, 1997).

Ugotavljanje virov nezanesljivosti je enostavno, saj so ti jasno razvidni, določanje intervalov nezanesljivosti in primernih statističnih porazdelitev pa izredno težko (Simecek-Beatty, 2011). Za stanje blizu začetka simulacije največjo nezanesljivost predstavljajo začetna porazdelitev madeža oziroma lokacija razlitja, volumen razlitja in lastnosti nafte. V nadaljevanju ključna postaja vse manj natančna meteorološka napoved, predvsem veter in njegov vpliv na gibanje madeža. Tu maksimalni interval nezanesljivosti predstavljajo klimatološki podatki območja, a ta razpon je lahko zelo velik (Galt, 1998). V splošnem so napake močno odvisne od specifičnih okoliščin dogodka, vseeno pa jih lahko približno razdelimo po rangi nezanesljivosti (Simecek-Beatty, 2011).

Napačna informacija o razlitju je lahko usodna, če do nesreče pride v bližini obale, kjer je tudi kratka razdalja pomembna, ali pa na meji med različnimi morskimi tokovi, ki bi nafto lahko zanesli v povsem drugo smer. Če pri simulaciji podcenimo prostornino razlitja, lahko madež prekrije veliko večjo površino od napovedane. Poleg skupne prostornine je potrebno oceniti tudi hitrost iztekanja nafte iz poškodovanega plovila ali ploščadi. Pravilno poznavanje lastnosti nafte je ključno tako za modeliranje gibanja madeža, kot procesov propadanja, pa tudi napovedovanje vpliva nafte na okolje in izbiro ustreznih ukrepov za odstranjevanje (Simecek-Beatty, 2011). V preglednici 3.1 je prikazana nezanesljivost posameznih lastnosti razlitja.

Preglednica 3.1: Nezanesljivost podatkov o razlitju. Povzeto po (Simecek-Beatty, 2011, str. 282).

Podatki o razlitju	Nezanesljivost
Lokacija	nizka - srednja
Čas	nizka - srednja
Lastnosti nafte	srednja - visoka
Možni volumen	nizka - srednja
Dejanski volumen	visoka
Hitrost iztekanja	visoka

Morda največji vpliv na (ne)zanesljivost rezultatov ima veter. Njegova napoved je natančna le nekaj več kot 24 ur, kasneje pa kakovost hitro pada (preglednica 3.2). Vpliv vetra na gibanje nafte je pogosto zajet z deležem hitrosti vetra na neki višini nad morsko gladino, ki se prenese na naftni madež. Običajno se uporablja vrednost 3 %, odvisno od okoliščin pa se lahko giblje med 1 % in 6 % (preglednica 3.3). Viskozne nafte lahko preplavi voda (podpoglavje 2.3.4), s tem se vpliv vetra močno zmanjša. Pod vplivom Langmuirjeve cirkulacije pride do nastanka razcepljanja na posamezne, vetru vzporedne madeže, na katere ima ta precej večji učinek. Težava je tudi v prostorski in časovni resoluciji meteoroloških modelov, ki je lahko veliko bolj groba od tiste v modelu širjenja nafte, s tem pa ne zajame prostorskih in časovnih sprememb vzdolž naftnega madeža in tekom simulacije ter specifičnih lokalnih pojavov, kot je spreminjanja smeri vetra zaradi dnevno-nočnega cikla, ki je posledica različne akumulacije toplote v morju in na kopnem (Simecek-Beatty, 2011).

Preglednica 3.2: Nezanesljivost napovedi vetra. Povzeto po (Simecek-Beatty, 2011, str. 285).

Napoved	Nezanesljivost
24 ur	nizka - srednja
48 ur	srednja
72 ur	srednja - visoka
96+ ur	visoka

Preglednica 3.3: Vpliv vleka vetra na različne vrste nafte. Povzeto po (Simecek-Beatty, 2011, str. 289).

Vrsta nafte	Koeficient vlečenja α_w (%)
Bencin	3 - 4
Dizel	3 - 4
Kurilno olje	3
Surova nafta	3 - 4
Delno razgrajeno nafta	2 - 3
Emulzija vode v nafti	1 - 2
Kroglice katrana	0,5 - 2

Naslednji vir nezanesljivosti je hidrodinamika oziroma morski tokovi in valovanje, že z enakimi vhodnimi podatki se rezultati različnih modelov hidrodinamike lahko precej razlikujejo. Smer tokov je običajno natančna, pri jakosti pa so odstopanja med napovedjo in naravo večja (Simecek-Beatty, 2011). Preglednica 3.4 prikazuje nezanesljivost izračuna napovedi hidrodinamike v različnih okoljih.

Napake v modeliranju procesov propadanja privedejo do neustreznih sprememb lastnosti nafte, ki vplivajo tudi na gibanje madeža. Še posebej je problematično napovedovanje nastanka emulzije, ki povsem spremeni lastnosti nafte. Modeliranje razlitja lahkih rafinativ, ki ne tvorijo emulzij, je zato bolj zanesljivo. Ker je nezanesljivost procesov propadanja zelo težko opredeliti, se v statističnih simulacijah pogosto raje uporablja kar konzervativno onesnažilo (Simecek-Beatty, 2011).

Standardna metoda za določitev intervalov vhodnih podatkov in ustreznih statističnih porazdelitev ne obstaja, zato je izbira prepuščena subjektivni presoji modelarja (Simecek-Beatty, 2011). To delo je izredno zahtevno, saj se nezanesljivost razlikuje od primera do primera in je ne moremo

Preglednica 3.4: Nezanestljivost napovedi površinskih tokov. Povzeto po (Simecek-Beatty, 2011, str. 287).

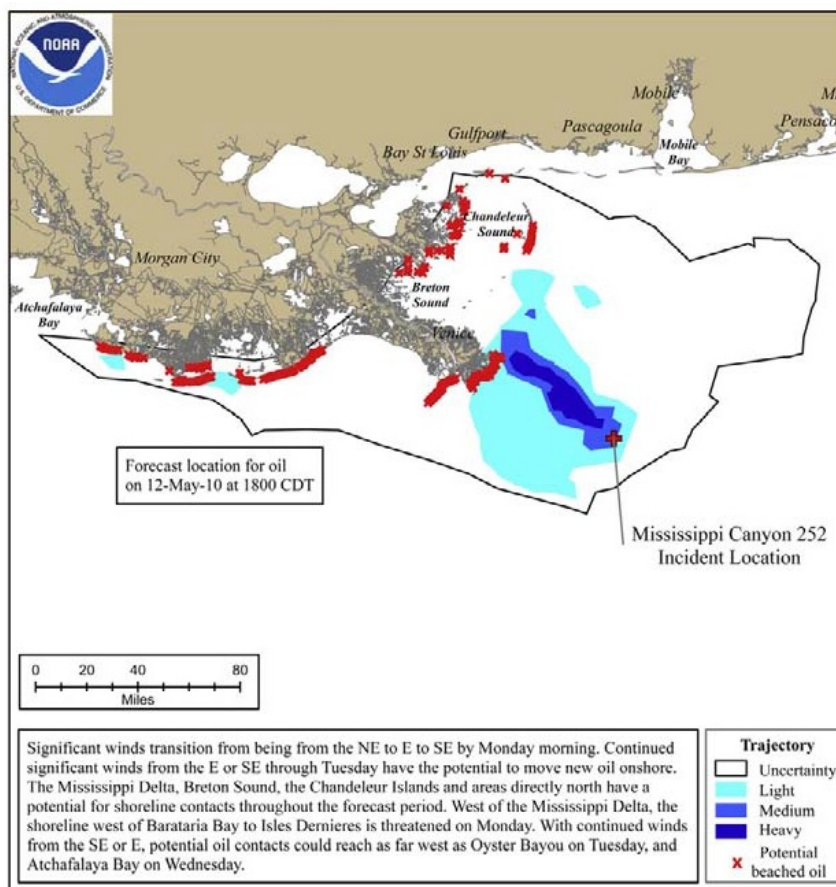
Vodno telo	Nezanestljivost
Reka	nizka - srednja
Jezero	nizka - srednja
Plitev zaliv	nizka - srednja
Estuarij s prevladujočim vplivom plimovanja	srednja
Kontinentalna polica	srednja - visoka
Globoki ocean	visoka

posplošiti. Sebastião in Guedes Soares (2006) sta na primer proučevala občutljivost rezultata analize trajektorij na odstopanja hitrosti tokov in vetra, kjer sta za vse parametre uporabila kar enak interval nezanesljivosti, $\pm 10\%$. Ugotovila sta, da na končna odstopanja najbolj vpliva hitrost vetra in ena od komponent hitrosti tokov, kar nam da jasno vedeti, da takega rezultata ne moremo posplošiti na druga območja. Kadar so pričakovana odstopanja vhodnih podatkov majhna, se lahko za njihovo generiranje uporabi normalna porazdelitev. Lahko uporabimo tudi enakomerno porazdelitev, saj smo tako glede razpona nezanesljivosti na varni strani.

Za opredelitev nezanesljivosti vhodnih podatkov standardne metode torej ni, za prikaz rezultatov dobljenih s statistično analizo trajektorij pa je standard podal Galt (1997). V njem združuje oba poudarka, na katera se osredotoča v prispevku, to je prikaz nezanesljivosti in strnjjenost rezultatov na čim manj kartah. Predlaga združen prikaz tako najboljše napovedi kot nezanesljivosti z verjetnostjo pojava madeža. Dejansko gre za prikaz izračunanih koncentracij pridobljenih z najboljšo oceno vhodnih podatkov, obdan z mejo zanesljivosti, ki določa neko statistično značilno verjetnost, da se madež izven nje ne bo pojavil (Galt, 1997). V modelu GNOME, ki standard uporablja, je ta verjetnost izkustveno ocenjena na 90 % (Beegle-Krause, 2001). Rezultat uporabe modela, ki sledi standardu, je prikazan na sliki 3.2. Tak prikaz podaja informacijo o verjetnem gibanju madeža, obenem pa prikazuje tudi vsa morebitna ogrožena območja, ki jih madež lahko doseže, če vhodni podatki niso povsem pravilni (Galt, 1997).

Pri takem prikazu je še vedno potrebna izdelava velikega števila kart, za vsak izbran čas posebej, zato bi lahko tudi za statistično modeliranje razlitja uporabili metodo trajektorij, oziroma ohranili obstoječi način prikaza celotne simulacije naenkrat. Skladno s predlaganim standardom bi izvedli deterministično simulacijo po metodi trajektorij, kot je prikazana v poglavju 5, to pa bi obkrožili še z mejo nezanesljivosti, ki bi jo dobili s statistično obdelavo vhodnih podatkov in uporabo istega modela za izračun trajektorij. En sam grafični prikaz bi predstavljal simulacijo v celoti. Druga možnost bi bila le statistična uporaba modela trajektorij, s katero bi dobili enake prikaze kot v rezultatih tega diplomskega dela, le da bi ti zajemali še nezanesljivost vhodnih podatkov, najboljšo oceno pa bi modelirali in prikazali ločeno.

Pri nadgradnji modela NAFTA3d za možnost statističnih perturbacij vhodnih podatkov modula za izračun trajektorij ne bi bilo potrebno spreminjati. Dopolnitve pa bi potreboval osnovni model NAFTA3d, ki bi ga bilo potrebno preoblikovati tako, da bi omogočal simuliranje vsakega delca z drugačnimi vhodnimi podatki, ki bi jih z uporabo metode Monte Carlo generiral iz definiranih slučajnih porazdelitev. Model bi moral upoštevati odstopanja pri lokaciji razlitja, volumnu in lastnostih nafte, hitrosti in smeri vetra ter tokov, pa tudi časovna odstopanja, na primer nezanesljiv čas nastopa vetrnega obrata. Potrebno bi bilo raziskati kakšni so intervali nezanesljivosti za posamezne vhodne podatke in s katerimi statističnimi porazdelitvami bi jih bilo smiselno opisati.



Slika 3.2: Primer prikaza nezanesljivosti s statistično analizo trajektorij po opisanem standardu (Simecek-Beatty, 2011, str. 292). Meja nezanesljivosti je označena s črno polno črto.

3.3.2 Deterministično modeliranje

Pri determinističnem pristopu modeliranja trajektorij uporabimo dejanske, deterministične vhodne podatke, bodisi napovedi ali pretekle vrednosti, odvisno od namena simulacije. Model, ki je predmet diplomske naloge, je namenjen uporabi napovedi za taktično modeliranje ob razlitju. Uporablja torej točno določene, največ enotedenske napovedi za izračun in prikaz trajektorij naftnega madeža tekom celotne simulacije. Natančno je predstavljen v naslednjem poglavju in v (Šoško, 2012), na tem mestu pa bomo opisali še možnost uporabe daljšega niza preteklih podatkov o vetrovih in morskih tokovih za prognostično modeliranje širjenja nafte.

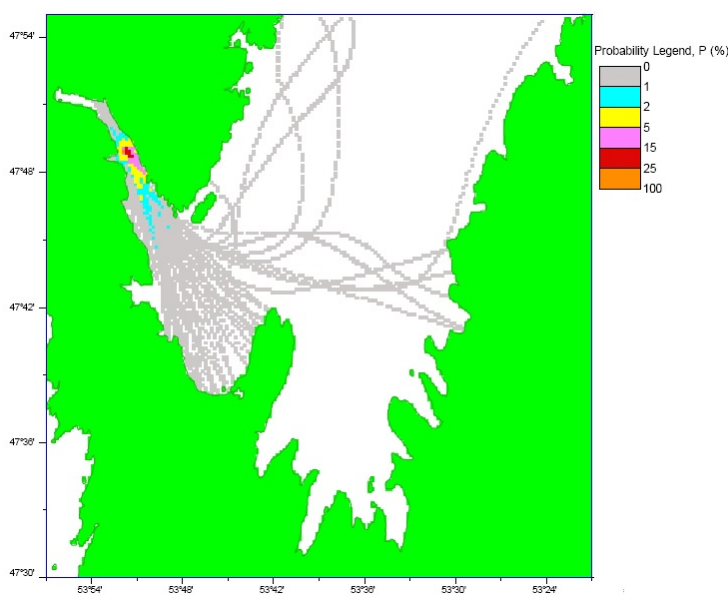
S prognostičnim modeliranjem poskušamo z uporabo preteklih podatkov napovedati potencialno gibanje nafte pri razlitju na neki lokaciji. Zanimajo nas tako najverjetnejše posledice, kot ekstremne, katastrofalne situacije. Za prognostično modeliranje sicer lahko uporabimo le en niz podatkov, ki obsega le trajanje simulacije, a so s tem rezultati reprezentativni le za točno takšne okoliščine, ki pa se, vsaj v celoti, ne bodo več ponovile. Zato pri izvajanju simulacij vhodne podatke združujemo tako, da tekom večletnih podatkov vsak dan v morje izpustimo nekaj delcev, ki jih opazujemo določen čas. To ponavljamo skozi celotno vzorčeno obdobje, na koncu pa rezultate z metodo trajektorij združimo na enak način kot pri taktičnem modeliranju (poglavje 4.2). Z uporabo dovolj velikega števila delcev lahko za dano območje dosežemo statistično značilne rezultate, ki predstavljajo možne smeri širjenja naftnega madeža, njegov doseg in potencialno ogrožena območja. Seveda s tem ne prikažemo dejanskega gibanja madeža ob nekem razlitju, saj to zavzame le del celotne slike pridobljene s tako metodo. Večletne meteorološke in hidrodinamične podatke lahko združujemo v posamezne mesece, letne čase ali obdobja z značilnimi cirkulacijskimi slikami, takšne rezultate pa uporabimo bodisi za dolgoročno na-

povedovanje gibanja naftnega madeža ob dejanskem razlitju v posameznem reprezentativnem obdobju ali le za splošno zaščito ogroženih območij, ki jih identificiramo. Druga možnost je, da v eni sami simulaciji uporabimo vse podatke, ki so na razpolago, in s tem zajamemo vse možne vzorce gibanja na danem območju, ter določimo mesta, ki jih naftni madež pri razlitju na izbrani lokaciji v specifikiranem času lahko doseže. Tak način je uporaben za splošni pregled ogroženosti območja, v primeru pomanjkanja podatkov ali pri umeščanju objektov za ravnanje z nafto v morsko okolje in pri presoji njihovih vplivov. Za uporabo in dolgoročno modeliranje ob dejanskem razlitju so takšni rezultati preveč splošni.

Natančnih pravil za izvedbo prognostičnih simulacij po metodi trajektorij ni, zato na tem mestu predstavljamo dva primera (AMEC, 2010; Chang et al., 2010), iz katerih smo izluščili zahtevane podatke in način izvajanja simulacij, potrebne za uspešno modifikacijo modela NAFTA3d in metode trajektorij. Prikazujemo tudi videz rezultatov takšnih simulacij (slike 3.3, 3.4, 3.5).

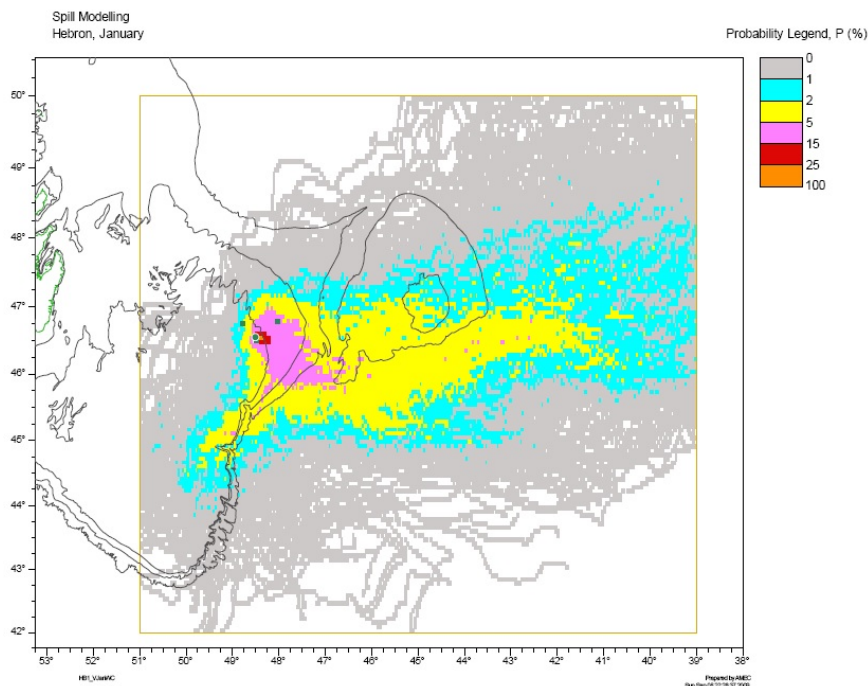
AMEC (2010) so izvedli dve simulaciji, za priobalno območje in odprto morje, obe z namenom določitve možnega gibanja naftnega madeža pri potencialnem razlitju zaradi črpanja nafte pri projektu Hebron v bližini Nove Fundlandije. Simulaciji sta se med seboj nekoliko razlikovali, zato ju prikazujemo ločeno.

Simulacija v priobalnem morju je bila izvedena v zalivu Trinity ob obali Nove Fundlandije, za analizo možnega razlitja nafte s transportnih ladij. Uporabili so računsko mrežo dimenzij 230×250 m in tridesetletne urne podatke o vetru. Ti so bili merjeni le v eni točki, torej so bili po prostoru konstantni. Tokovi so bili le aproksimirani s ciklonalno cirkulacijo in plimovanjem, merjenih podatkov niso uporabili. Simulacije so bile izvedene za mesece januar, april, julij in oktober, ki naj bi predstavljali vsak svoj letni čas. Vsak dan v mesecu je bil v morje izpuščen en simuliran delec, simulacija pa se je zaključila bodisi ob dotiku z obalo, robom računskega območja ali po tridesetih dneh. Postopek so ponovili za vseh trideset ali enaintrideset dni v mesecu tekom tridesetih let in tako za vsak mesec dobili približno 900 simuliranih delcev. Nato so izračunali delež delcev, ki so prečkali posamezno računsko celico in s tem dobili verjetnost pojava naftnega madeža v celici pri razlitju v določenem mesecu (slika 3.3). Poleg tega so izračunali še verjetnost, da delci zadenejo posamezne odseke obale. Dobljene karte se bile uporabljene za določitev ogroženih območij, zaradi sezonske značilnosti pa bi se lahko uporabile tudi v primeru dejanskega razlitja.



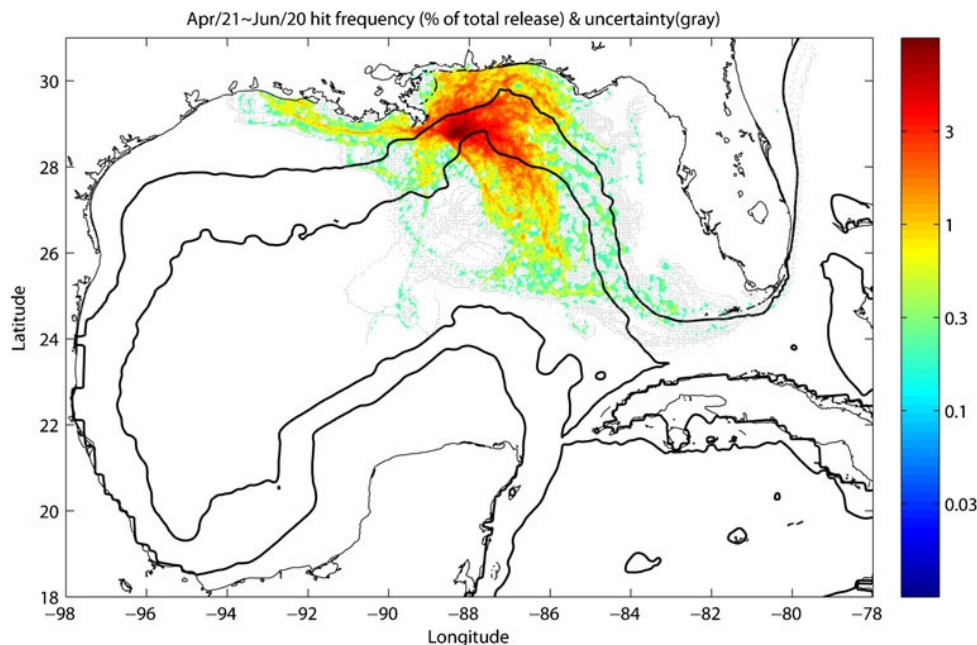
Slika 3.3: Primer prognostične simulacije po metodi trajektorij avtorjev AMEC (2010, str. 41), za zimske razmere v zalivu Trinity ob Novi Fundlandiji.

Na odprtem morju so AMEC (2010) simulacije izvedli za primer nesreče na bodoči naftni ploščadi projekta Hebron, 350 kilometrov zahodno od obale Nove Fundlandije, v računski mreži dimenzij $6,9 \times 3,2$ km. Ker je bila vrsta nafte znana, so lahko v simulacijo vključili tudi izhlapevanje in disperzijo. Postopek modeliranja je bil enak, razlikovali so se le vhodni podatki. Ponovno so uporabili trideset let dolg niz urnih podatkov o vetru, tokrat z devetih točk izvajanja meritev. Uporabljeni so bili izračunani dnevni tokovi v mreži dimenzij $0,2^\circ \times 0,166^\circ$, ampak le za eno 'reprezentativno' leto. Tako je bilo gibanje delcev zaradi vpliva morskih tokov na posamezni dan (npr. 1. januar) enako vseh trideset let, zajetih v simulaciji. Simulacije so bile izvedene ločeno za vseh dvanajst mesecev tekom tridesetih let. Slika 3.4 prikazuje eno od simulacij.



Slika 3.4: Primer prognostične simulacije po metodi trajektorij avtorjev (AMEC, 2010, str. 58), za januarske razmere na lokaciji projekta Hebron.

Na drugi strani so Chang et al. (2010) uporabili precej krajši niz podatkov, a so bili ti bolj natančni. Simulacije po metodi trajektorij so izvedli na mestu nesreče naftne ploščadi Deepwater Horizon v Mehškem zalivu. Namen simulacij je bila podlaga za dolgoročno napovedovanje gibanja madeža ob dejanskem razlitju. Uporabili so osem letni niz podatkov za obdobje med 21.4 in 20.8, ko se v Mehškem zalivu vzpostavi značilna cirkulacijska slika. Podatki o hidrodinamiki so bili pridobljeni z modelom POM (Blumberg in Mellor, 1987), in sicer triurni površinski tokovi in dnevno povprečni podpovršinski tokovi. Uporabljeni so bili še šest urni podatki o vetru v resoluciji $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ in dnevni pretoki 51 rek. Dimenzije računske mreže so znašale približno 3 - 5 km. Podobno kot AMEC (2010), so vsak dan izbranega obdobja simulirali gibanje enega delca izpuščenega na izbrani lokaciji. Temu so dodali še štiri delce odmaknjene približno 3 km v smereh neba, s katerimi so zajeli nezanesljivost lokacije razlitja. Vsak delec so spremljali tekom trajanja simulaciji, ki so trajale 30 ali 60 dni. Verjetnost pojava naftnega madeža so ponovno izračunali kot delež simuliranih delcev, ki so prečkali posamezno računsko celico. Na enak način so določili tudi verjetnost, da naftni madež doseže določene odseke obale, le da se tokrat simulacija ob dotiku z obalo ni končala. Poleg tega so izračunali tudi zadrževalni čas delcev v posamezni celici, kot vsoto časovnih korakov pri katerih se v celici nahaja vsaj en delec. Na sliki 3.5 so v barvah prikazane verjetnosti pojava naftnega madeža. Celice, ki jih je dosegel le kateri izmed štirih delcev, s katerimi je bila simulirana nezanesljivost, so obarvane sivo.



Slika 3.5: Primer prognostične simulacije po metodi trajektorij v Mehškem zalivu avtorjev (Chang et al., 2010, str. 833).

Kot lahko vidimo iz opisanih primerov, točne zahteve po vhodnih podatkih za izvedbo prognostičnih simulacij z metodo trajektorij ne obstajajo. Uporabljeni nizi vhodnih podatkov so različno dolgi, prav tako so različni uporabljeni podatki o morskih tokovih ter dimenzije mreže in računskih celic tako modela kot vhodnih podatkov. Očitno je izbira parametrov prepuščena izvajalcu, prilagoditi pa jo mora danemu območju, namenu in razpoložljivim vhodnim podatkom. AMEC (2010) na primer omenjajo, da je za statistično značilne rezultate za posamezni mesec simulacije potrebno izvesti z vsaj 600 delci oz. dnevi (t.j. 20 let podatkov), a to velja le za uporabljen model ter obravnavano območje in seveda način izvajanja simulacij. Glede na to, da so Chang et al. (2010) uporabili precej krajši niz podatkov, a so jih združevali vzdolž daljših obdobij, lahko zaključimo, da je potrebna količina podatkov odvisna tudi od želene časovne reprezentativnosti. Tudi časovna in prostorska resolucija sta precej poljubni.

Za implementacijo metode v domeni Severnega Jadrana predvidevamo, da bi zadoščali dnevno povprečni podatki o vetrovih in morskih tokovih oz. prav takšna hitrostna polja, kot smo jih uporabili v tej diplomski nalogi. Sklepamo, da je bolj kot prostorska resolucija vhodnih podatkov pomemben njihov časovni obseg, saj z upoštevanjem daljšega obdobja zajamemo tudi ekstremne situacije, rezultati so tako bolj reprezentativni. Torej bi za izvajanje takšnih analiz v Severnem Jadranu lahko uporabili tudi hitrostna polja v mreži celic z večjimi dimenzijami kot 600×600 m. Detajle gibanja, ki bi se tako sicer morda izgubili, bi nadomestili z uporabo več delcev za vsak dan simulacije, s katerimi bi lahko zajeli tudi vpliv turbulentne difuzije. Procese manjše od dimenzij mreže bi tako zajeli z naključnostjo turbulentnega gibanja, rezultati pa bi morali biti zaradi neizogibnih napak modela in nezanesljivosti meritev primerljivi z uporabo prostorsko in časovno gostejših vhodnih podatkov. Za določanje sezonskih karakteristik gibanja nafte bi verjetno zares potrebovali približno 8 let podatkov, če pa bi uporabili vse podatke naenkrat za oceno vpliva razlitja na neki lokaciji, bi za osnovne rezultate ta obseg morda lahko zmanjšali na 5 let. Uporabo večjega števila delcev predlagamo v vsakem primeru, saj le tako lahko v vsaki situaciji upoštevamo tudi vpliv turbulentne difuzije. V obdobju z močno advekcijo se vsi delci gibljejo po približno isti trajektoriji, zato je trajektorija bolj reprezentativna. V mirnem morju prevladuje vpliv turbulentne difuzije, gibanje delcev je naključno, njihove trajektorije so tako lahko zelo različne. Vpliv vsake posebej na končni rezultat mora biti zato ustrezno manjši. Z

uporabo le enega delca v obeh primerih dobimo le eno trajektorijo, s čimer večja naključnost gibanja v mirnem morju ni upoštevana. Z uporabo večjega števila delcev bi bile razlike in prispevki h končnemu rezultatu opazni.

Vse podane trditve nimajo trdne podlage, slonijo le na približnih ocenah in poznavanju problematike, tako da bi bil pred uporabnim nadaljnjim delom nujen preizkus njihove ustreznosti. Pri prognostičnem modeliranju je koristno poznati tudi tip razlite nafte, zato bi bilo smiselno raziskati verjetnost razlitja posameznih vrst na obravnavanem območju. Potrebno bi bilo določiti optimalno dolžino simulacij, saj je npr. 30 dni za Severni Jadran lahko nepotrebno, in opredeliti smiselnost končanja sledenja delca ob dotiku z obalo. V primeru sezonskega ali mesečnega združevanja podatkov bi lahko določili obdobja, ko se v Severnem Jadranu vzpostavi značilna cirkulacijska slika, kar bi omogočilo bolj reprezentativno združevanje. Za implementacijo prognostičnega modeliranja po metodi trajektorij bi bilo potrebno nekoliko prilagoditi tako model NAFTA3d kot modul za izračun trajektorij. Model NAFTA3d bi morali avtomatizirati tako, da ne bi bilo potrebno vsakodnevne simulacije poganjati znova. Program za izračun trajektorij bi potreboval dopolnitev, ki bi omogočala obdelavo rezultatov velikega števila simulacij z več delci naenkrat. Poleg tega bi lahko dodali še podprogram, ki bi izračunal tudi verjetnost dotika naftnega madeža z odsekom obale, ne le s posameznimi celicami.

4 METODE DELA

4.1 Model NAFTA3d

Uporabljeni transportno – disperzijski in biokemični model NAFTA3d, napisan v programskem jeziku Fortran, deluje po metodi sledenja delcev. Razlita nafta je opisana s končnim številom diskretnih delcev, na katere vplivajo zunanji dejavniki, med njimi pa interakcije ni. Vsak delec ima predpisane lastnosti, npr. gostoto, viskoznost, maso, itd. Njihovo gibanje je posledica advekcije in turbulentne difuzije. Adveksijske hitrosti dobimo iz rezultatov hidrodinamičnega modela na koordinatah mrežnih točk, vrednosti pa interpoliramo na točno lokacijo delca. Difuzijska komponenta, ki zajame tudi vpliv vzgona, je upoštevana po metodi naključnih korakov. Vektorska vsota prispevkov hitrosti vseh vplivov po množenju s časovnim korakom poda nove koordinate delca (en. 2.14) (Žagar, 1994).

Kot vhodne podatke o hidrodinamiki, za izračun adveksijskih komponent in prispevka vetra, smo uporabili hitrostna polja pridobljena z modeloma TSPOM (Tržaški zaliv) in NAPOM (Severni Jadran), ki sta v kontinuirani uporabi na Nacionalnem inštitutu za biologijo - Morski biološki postaji Piran. Modela na podlagi merjenih meteoroloških parametrov in robnih pogojev, pridobljenih iz večjih domen ter drugih meteoroloških, hidroloških in oceanografskih modelov, v katerih sta enostransko gnezdena, izračunata tokove, plimovanje in porazdelitev slanosti ter temperature (Ličer et al., 2012; Malačič et al., 2012).

NAPOM sestavlja pravokotna horizontalna mreža z 232×248 kvadratinimi celicami dimenzije približno 600 metrov (Ličer et al., 2012), TSPOM pa 176×256 celic približnih dimenzij 140×150 m (Žagar et al., 2011). Oba modela sta v vertikalni smeri razdeljena na 11 σ -slojev. Resolucija programa NAFTA3d je v horizontalni smeri enaka, v vertikalni pa slednji uporablja z -koordinate, zato je potrebno z vmesnikom hitrostna polja prilagoditi (Žagar in Četina, 2011). Za Tržaški zaliv smo pridobili povprečne urne hitrosti med 19. in 21.3.2009, za Severni Jadran pa dnevno povprečna hitrostna polja za celotno leto 2012. Vektorska polja hitrosti so časovno spremenljiva, zato jih grafično ne prikazujemo, z izjemo slike 4.3, ki je namenjena le splošnemu prikazu. Zaradi boljšega razumevanja simulacij pa so cirkulacijske slike v nadaljevanju kratko opisane. Adveksijska komponenta gibanja delcev je tako znana.

Za izračun difuzijske oz. stohastične komponente je najprej potrebno določiti koeficient horizontalne turbulentne difuzije D_h , ki je odvisen predvsem od resolucije računske mreže in izbire časovnega koraka (Širca, 1992). V modelu je D_h nespremenljiv v prostoru in času ter enak v obeh horizontalnih smereh. Ena od prednostnih nadgradenj je prav možnost izračuna in uporabe spremenljivih koeficientov turbulentne difuzije v horizontalni in vertikalni smeri z modeli turbulence (Žagar in Četina, 2011). Vertikalni koeficient turbulentne difuzije D_v se v modelu izračuna po Koutitasu in O'Connorju (1980) in je spremenljiv z globino. Stohastični prispevek hitrosti v horizontalni smeri je izračunan v obliki dveh komponent, vzporedno z (longitudinalna) in pravokotno na (transverzalna) advekcijo. Komponente difuzijske hitrosti so izračunane po enačbah (4.1), (4.2) in (4.3).

$$u_L = r_1 \sqrt{2D_h / \Delta t} \quad (4.1)$$

$$u_T = r_2 \sqrt{2D_h / \Delta t} \quad (4.2)$$

$$w = r_3 \sqrt{2D_v / \Delta t} \quad (4.3)$$

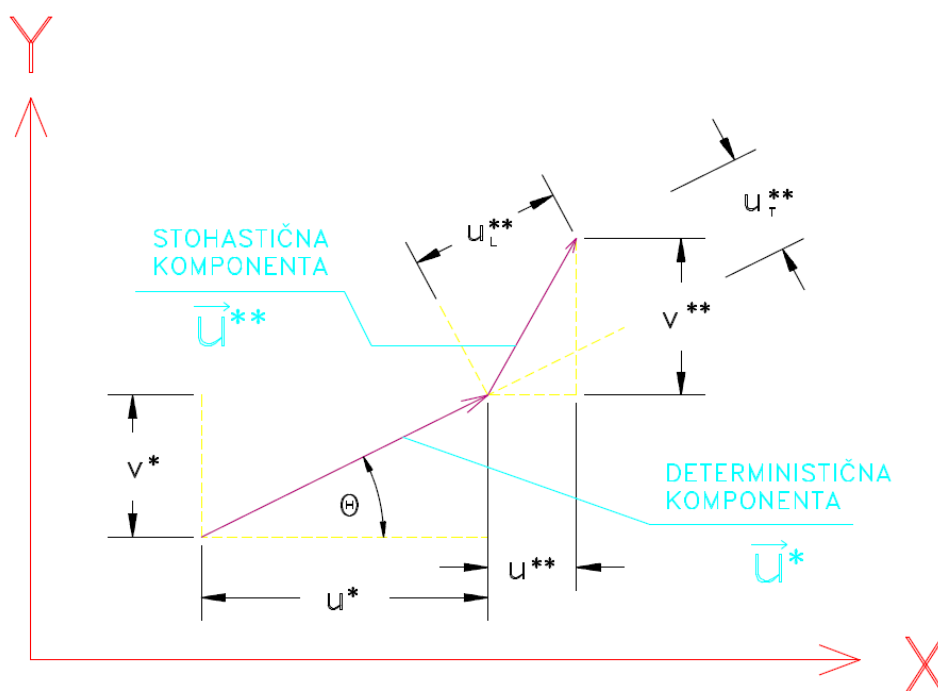
Δt označuje časovni korak, $r_{1,2,3}$ pa so normalno porazdeljena naključna števila s pričakovano vrednostjo 0 ter standardno deviacijo 1. V primeru vertikalne difuzije je v enačbi upoštevan še vzgon, tako da je srednja vrednost naključnih števil r_3 določena po enačbi (4.4).

$$M_{r_3} = \frac{(\rho_{vode} - \rho_{nafte})}{\rho_{vode}} \quad (4.4)$$

Komponenti horizontalne difuzijske hitrosti v koordinatnih smereh sta iz longitudinalne in transverzalne preračunani z enačbama (4.5) in (4.6), kot je prikazano na sliki 4.1 (Žagar in Četina, 2011).

$$u = u_L \cos \Theta - u_T \sin \Theta \quad (4.5)$$

$$v = u_L \sin \Theta + u_T \cos \Theta \quad (4.6)$$



Slika 4.1: Prikaz izračuna komponent difuzijske hitrosti v koordinatnih smereh (Žagar in Četina, 2011, str. 9).

Naključna števila so pridobljena z generatorjem psevdonaključnih števil, ki je bil prav za potrebe metode trajektorij izboljššan. V starem modelu je program zaradi konstantnega semena ob vsakem zagonu generiral isto zaporedje števil, kar je imelo za posledico enake prispevke difuzije na gibanje madeža. Šoško (2012) je generator izboljšala tako, da seme ni več konstanta, temveč je odvisno od računalniške ure, natančneje sekund preteklih od polnoči. Iz semena z uporabo Fortranove vgrajene funkcije $ran()$ (enakomerno porazdeljeni naključni števili u_{1i} in u_{2i}) in Box-Mullerjevega algoritma (Box in Muller, 1958) program generira posamezna normalno porazdeljena naključna števila (en. 4.7).

$$r_i = \sqrt{-2 \ln u_{1i}} \cos(2\pi u_{2i}) \quad (4.7)$$

Dobljeno zaporedje je sicer le na videz naključno, saj računalnik brez uporabe naravno pojavljajoče naključnosti (npr. atmosferski šum), pravega naključnega zaporedja ni sposoben generirati (Gentle, 2003). Ima pa dovolj veliko periodo ponovitve, da se števila znotraj ene simulacije ne ponavljajo, in je drugačno za vsak vnovičen zagon programa, razen če ga uporabimo ob natančno istem času. Pri preverjanju delovanja smo ugotovili, da je izjema le prvo število v nizu, ki izhaja neposredno iz semena, in se pri kratkem razmiku med simulacijami le malo razlikuje. Ker pa to predstavlja le prvo v vrsti več sto tisoč števil v računu, je vpliv zanemarljiv, števila pa lahko obravnavamo kot naključna. Pri vsaki simulaciji z identičnimi vhodnimi podatki torej dobimo nekoliko drugačne rezultate, kar je potrebno pri primerjavi upoštevati.

V model NAFTA3d so vključeni tudi procesi širjenja in razgradnje nafte, ki so predstavljeni v poglavju 2.3 in podrobno opisani v literaturi (Žagar, 1994; Betancourt et al., 2005; Lehr et al., 2002; Reed et al., 1999; ASCE, 1996). Gibanje in procesi razgradnje sicer delujejo ločeno, vendar imajo medsebojen vpliv, saj propadanje povzroči spremembe lastnosti nafte in s tem njene poti, lega madeža pa lahko vpliva na propadanje (Fingas, 2011b). V splošnem procese razdelimo na kratkotrajne in dolgotrajne. Prednost modela trajektorij je najbolj opazna pri simulacijah v taktičnem načinu, kjer so kratkotrajni procesi, predvsem mehansko širjenje in izhlapevanje, pomembnejši (Žagar et al., 2011).

Mehansko širjenje je v modelu upoštevano po metodi strižne difuzije, ki so jo utemeljili Elliott et al. (1986), opisali pa smo jo že v podpoglavju 2.3.1. Madež se širi zaradi vpliva turbulence in različnih hitrosti po vodnem stolpcu, ki so posledica valov, plimovanja in vetra. V smeri vetra je širjenje opazno večje, v prečni smeri pa se širi le zaradi turbulentne difuzije (Žagar, 1994).

Za račun izhlapevanja nafte je uporabljena Mackay-eva enačba (Mackay et al., 1980). Izhlapevanje je tako funkcija temperature zraka, hitrosti vetra, površine madeža in lastnosti razlite nafte. Enačba po dognanjih v zadnjem času (Fingas, 2004) ni pravilna, saj mejna plast ne regulira izhlapevanja nafte. Tudi v modelu NAFTA3d je preizkušena možnost uporabe metode Fingas (Šaponja, 2014), izhlapevanje pa je po tej metodi odvisno le od časa pretekega od razlitja in temperature okolice. Izhlapevanje na trajektorijo delca ne vpliva, saj v modelu ne zmanjšuje števila delcev. Razen pri nekaterih lahkih rafinatih izhlapevanje nafte ni popolno in posameznemu delcu vedno ostane določen delež prvotne mase. Izhlapevanja zato zaradi enostavnejše primerjave pri našem delu nismo upoštevali niti pri izračunu koncentracij. Tudi sicer se pri taktičnem modeliranju izhlapevanje pri prvih računih pogosto ne upošteva (Žagar et al., 2012).

Odlaganje na obalo v modelu ni eksplicitno opisano z enačbami. Delec, ki se znajde na točki definirane obale, tam ostane, dokler vsota advekcije in difuzije na njegovem mestu ni obrnjena v smer morja, kar ga zanese nazaj. V modelu so opisno opredeljeni še dolgoročni procesi emulzifikacije, disperzije v vodnem stolpcu, sprememb gostote, mešanja s sedimentom in biodegradacije (Žagar et al., 2011). Izvemo le količino oziroma delež nafte podvržene tem procesom, prostorskih informacij pa ne (Žagar et al., 2012). Pri taktičnem načinu modeliranja so ti procesi manj pomembni, zato jim v raziskavi nismo posvečali velike pozornosti.

Končni rezultat osnovnega modela po metodi sledenja delcev so koncentracije nafte v kontrolnih volumnih, ki sovpadajo z numerično mrežo. Izračun se izvrši v vnaprej določenih časih. Koncentracija je v podana kot masa nafte na enoto prostornine vode v posameznem kontrolnem volumnu, sestavljenem iz preseka celice horizontalne mreže in vertikalnega z -sloja. Ti so v obeh domenah, Tržaškem zalivu in Severnem Jadranu, različnih debelin, od 30 cm pri površini do 5 m pri dnu. Najbolj nas zanimajo koncentracije v površinskem sloju, saj se tam zadržuje največ delcev (Žagar, 1994). Za potrebe primerjave z metodo trajektorij smo tokrat koncentracije računali na dva načina. Najprej le v površinskem sloju, saj se tu nahaja vidna nafta, dejanski »madež«, katerega gibanje poskušamo opisati s trajektorijami. V tem primeru so kontrolne volumni predstavljali preseki površinskega vertikalnega sloja s horizontalnimi mrežnimi celicami, koncentracije pa so podane v kg/m^3 .

Pri drugem načinu smo koncentracije izračunali v celotnem vodnem stolpcu, dobljene vrednosti pa normalizirali z globino morja, saj bi sicer v globljih delih računskega območja dobili manjše koncentracije pri isti količini nafte. Končni rezultat tako predstavlja dvodimenzijska koncentracija, masa nafte na kvadratni meter morske površine. Drugi način smo izbrali zato, ker metoda trajektorij pri izračunu upošteva vse delce naenkrat, ne glede na njihovo trenutno lego v vodnem stolpcu, in tako v vsakem trenutku metodi primerjamo z enakim številom delcev. Dobljene koncentracije se v končni fazi grafično prikažejo z uporabo ustreznega programa, npr. Matlab, Surfer ipd.

4.2 Program Trajectory.java

Simulacije po metodi trajektorij potekajo nekoliko drugače. V splošnem je trajektorija krivulja, ki opiše pot, ki jo opravi posamezen delec v opazovanem času (Rajar, 1997). Tudi pri modeliranju razlitja nafte nas zanima pot, ki jo prepotuje nafta, opisana z delcem. Ne opazujemo več stanja v določenem času, kot pri računu koncentracij, temveč celotno simulacijo naenkrat. Izhodni podatki modela NAFTA3d so tudi koordinate posameznih delcev v vseh časovnih korakih. Modul za izračun trajektorij, napisan v programskem jeziku Java, iz teh koordinat preračuna trajektorijo vsakega delca posebej (Šoško, 2012). Za to uporablja horizontalno računsko mrežo, ki je poljubno definirana, v obravnavanem primeru pa kar enaka mreži predhodnih programov (NAPOM ali TSPOM in NAFTA3d).

Za vsak delec posebej program iz koordinat najprej določi, katere celice prečka; te celice predstavljajo trajektorije delcev. Gibanje je obravnavano le v horizontalni smeri, razporeditve po vodnem stolpcu ne upoštevamo, sicer bi v dvodimenzionalnih prikazih dobili prekinjene trajektorije, kar bi onemogočilo nadaljnji račun in zmanjšalo jasnost rezultatov. Nato za vsako računsko celico preračunamo delež trajektorij, ki skozi njo potekajo. Pri tem opazujemo le, ali posamezna trajektorija celico prečka ali ne, število teh prehodov pa ni pomembno. Trajanje simulacije mora biti za vse delce enako, sicer bi imele daljše simulacije večjo utež pri izračunu končnih rezultatov (Šoško, 2012). Rezultat modela so tako deleži (v odstotkih) za vsako računsko celico tekom celotne simulacije. Točka razlitja ima ročno definirano vrednost 100 %, saj se lahko zgodi, da nekateri delci že v prvem časovnem koraku zapustijo izhodiščno računsko celico. Uporabno vrednost rezultati dobijo z grafičnim prikazom.

Interpretacija rezultatov je drugačna kot pri koncentracijah, saj tu posamezni delci ne predstavljajo več majhnega dela madeža, temveč vsak svoj madež, ki se zaradi naključnosti giblje nekoliko drugače. Izračunani deleži tako predstavljajo verjetnost pojava madeža na lokaciji računske celice v celotnem času simuliranega razlitja (AMEC, 2010; Simecek-Beatty, 2011). Seveda pa lahko s poznavanjem delovanja metode rezultate interpretiramo tudi drugače in bolj široko, kot bomo pokazali v poglavju 5. Zanesljivost je tudi pri metodi trajektorij odvisna od kvalitete vhodnih podatkov, običajno pa se trajektorij ne modelira za več kot teden dni vnaprej, saj se napake tekom simulacije seštevajo (Drozdowski et al., 2011). Sprememba mase delcev sama po sebi na trajektorije nima vpliva, razen če bi spreminjala njihovo gibanje.

Opisani način modeliranja trajektorij je precej hitrejši od računanja koncentracij, saj operira le s koordinatami delcev nafte, poleg tega pa za uporabne rezultate lahko računamo z manjšim številom delcev. Pri izračunu koncentracij je namreč potrebno določiti mase delcev v posamezni celici, kar je pri velikem številu delcev zamudno. Zato je metoda trajektorij bolj primerna pri taktičnem načinu modeliranja in načrtovanju odziva na dejansko razlitje, kjer je čas do začetka ukrepanja pomemben. Pomanjkljivost prikaza s koncentracijami je tudi veliko število grafičnih prikazov v različnih časih, kar lahko povzroči zmedo pri uporabi v časovni stiski (Galt, 1997). Pri metodi trajektorij je izpis le en, rezultat je tako veliko bolj pregleden, pot madeža pa takoj razvidna. Lahko pa se pri tem izgubi del informacij o dinamiki gibanja naftnega madeža. Delovanje in nastavitve modela so natančno opisani v Šoško (2012), v nadaljevanju predstavljamo le nekatere spremembe in pomembne detajle.

4.2.1 Računska mreža

Točne in pravilne informacije o računski mreži hitrostnih polj pridobljenih z modeloma NAPOM in TSPOM so iz podatkov o modelih slabo razvidne. Simulacije po metodi trajektorij so se posledično že izvajale v nekoliko premaknjenem koordinatnem sistemu, kar pa pred primerjavo z metodo sledenja delcev ni prišlo do izraza. Za lažje nadaljnje delo na tem mestu točno definiramo uporabljeni horizontalni računski mreži, da do napak ne bi več prihajalo.

NAPOM uporablja horizontalno mrežo iz 232×248 celic dimenzij $578,03 \times 601,71$ metrov.

Središče izhodiščne celice se nahaja v točki (578,03, 601,71). Spodnji levi vogal izhodiščne celice (označene z (1, 1)) ima tako koordinati $(\frac{578,03}{2}, \frac{601,71}{2})$. Horizontalna računsko mreža se torej ne začne v točki (0,0).

Enako velja za model TSPOM. Ta uporablja mrežo 176×256 celic dimenzij $140,58 \times 148,55$ metrov. Središče izhodiščne celice je v točki (140,58, 148,55), začetek mreža pa tako v točki $(\frac{140,58}{2}, \frac{148,55}{2})$.

Pri računu trajektorij delcev program ne uporablja koordinat, le oštevilčene celice. Zato v začetku normira koordinate delcev, tako da določi v kateri celici se delec v vsakem časovnem koraku nahaja. Za končni prikaz pa rezultate v oštevilčenih celicah razporedi glede na koordinate središč celic, kar omogoča definiranje in prikaz roba računkega območja v lokalnem koordinatnem sistemu. Zaradi drugačnega koordinatnega sistema je bilo potrebno ta dva dela v programu popraviti. Za izračun koordinat in celic v smeri x v domeni Severnega Jadrana sta prikazana izseka iz programske kode.

```
x = x + dx/2;
Double x1 = new Double(x / dx);
int x2 = x1.intValue();
if(x1-x2 == 0.00000){
    x2 = x2 - 1; }
if(x1 == 1.00000){
    x2 = 1;}
```

V prvem izseku je prikazano normiranje koordinat delcev oziroma izračun pripadajočih računskih celic. Mreža se ne začne v koordinatnem izhodišču, zato za lažji nadaljnji račun koordinati x prištejemo polovico dimenzije celice dx . Tako normirana vrednost x_2 predstavlja pravo celico, razen v primeru, ko se delec nahaja na robu celice. Mreža je definirana tako, da zunanji robovi sodijo še v prejšnjo celico, zato v tem primeru dobljeni vrednosti odštejemo 1. Če se nahajamo v izhodiščni celici pa se to ne sme zgoditi, saj celica 0 ne obstaja, za tak primer je v kodi zapisan dodaten pogoj.

Določanje središča celic za zapis rezultatov je z novim koordinatnim sistemom enostavno, saj je dimenzija celice enaka koordinati središča izhodiščne celice. Če se zanka začne z $i = 0$, x_n pa je število celic v smeri x , s sledečim zapisom elegantno dobimo koordinate središč.

```
for (int i=0; i<x_n; i++) {
    double xi = dx*(i+1);}
```

4.2.2 Časovni korak

Pri metodi trajektorij je pravilna izbira časovnega koraka računa bistveno pomembnejša kot pri metodi sledenja delcev. Premajhen časovni korak račun močno podaljša brez izboljšanja rezultatov, saj daljše zadrževanje delca v celici nima vpliva na potek trajektorij. Prevelik časovni korak lahko povzroči, da delec preskakuje celice, rezultat pa so prekinjene trajektorije, ki nimajo fizikalnega smisla. Korak je torej potrebno določiti v odvisnosti od hitrosti potovanja delcev in dimenzij računke mreže tako, da delec ne more preskočiti nobene od sosednjih osmih celic (Šoško, 2012). Največja razdalja, ki jo delec v časovnem koraku lahko prepotuje, sme torej biti ravno najmanjša dimenzija računke celice, t.j. 140 m v Tržaškem zalivu in 578 m v Severnem Jadranu.

Potrebni časovni korak smo približno izračunali po enačbi (4.8), nato pa rezultat pomnožili še z varnostnim faktorjem, s katerim smo zajeli vpliv naključnega gibanja zaradi turbulentne difuzije in nezanesljivosti uporabljenega faktorja vleka vetra ($\alpha = 3\%$). Δx je krajša dimenzija računke celice, u_c in u_w pa skalarni vrednosti hitrosti površinskih tokov in vetra.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{u_c + \alpha u_w} \quad (4.8)$$

4.2.3 Popravki in dopolnitve modela

Za izvedbo natančnih primerjav je bilo potrebno model za izračun trajektorij najprej natančno preveriti, popraviti in dopolniti. Vpliv drugačnega koordinatnega sistema smo že omenili in prikazali spremenjeno programsko kodo, tu pa naštevamo še ostale spremembe.

Pri normiranju koordinat delcev in shranjevanju izračunanih celic v spomin računalnika smo popravili zamik celic tako, da smo upoštevali, da se v programskem jeziku Java niz spremenljivk začne na mestu z vrednostjo 0 in ne 1.

V primeru, da v začetku programa definiramo večje število časovnih korakov od dejanskega, so rezultati neustrezni, saj v vseh dodatnih časovnih korakih delci dobijo koordinate (0, 0). V tej točki računski mreži niti ni definirana. Po dopolnitvah nas program na preveliko število časovnih korakov opozori že v samem začetku delovanja, z izpisom v konzolnem oknu.

Tekom izvajanja simulacij smo zaradi sprememb koordinatnega sistema večkrat naredili napako pri definiranju celice razlitja v začetku programske kode. Ocenili smo, da bi bile takšne napake zelo verjetne tudi pri nadaljnji uporabi, zato smo program dopolnili tako, da samodejno izračuna celico razlitja z uporabo istega postopka normiranja kot pri koordinatah delcev. Uporabnik mora v programski kodi podati le koordinati razlitja v lokalnem koordinatnem sistemu modela NAFTA3d, ne izgublja pa časa s preračunavanjem in se izogibe napakam.

V programu smo popravili še napačno zaokroževanje rezultatov, ki je nastalo zaradi specifik programskega jezika Java. Pri deljenju dveh spremenljivk, ki sta v računalniškem spominu shranjeni kot celi števili, je rezultat spremenljivka enake vrste. Verjetnosti pojava nafte so bile tako navzdol zaokrožena cela števila, po spremembi vrste spremenljivk pa točna realna števila. Posledica je predvsem večja površina zadnje ovojnice verjetnosti, saj ne zanemarimo deležev med 0 in 1.

4.3 Grafični prikaz

Za uspešno primerjavo je bilo potrebno poenotiti še grafični izpis obeh metod. Izbrali smo program Surfer (<http://www.goldensoftware.com/products/surfer>), kateremu je bil že prilagojen modul za izračun trajektorij. Model Nafta3d smo zato dopolnili tako, da rezultate koncentracij zapiše v ustrezni obliki. Rezultati za vse časovne izpise koncentracij se shranijo v eni sami datoteki, v kateri so v stolpcih podane najprej številke celic, nato koordinate njihovih središč, od petega stolpca naprej pa za vsako celico sledijo izračunane koncentracije v posameznih časih.

Surfer je grafični program, primarno namenjen interpolaciji neenakomernih prostorskih podatkov v enakomerno pravokotno mrežo (»grid«) in njihovi vizualizaciji. Njegova prednost pred podobnimi vizualizacijskimi programi je uporaba različnih postopkov izdelave ravninske mreže in izrisa ter urejanja več vrst kart, dodajanja informacij o robu območja (v našem primeru obale) in združevanje kart, kar je še posebej uporabno za izvajanje primerjav (Surfer User's Guide, 2002). Surfer ravninsko mrežo izdelava z interpolacijo neenakomerno razporejenih podatkov. V obravnavanem primeru že razpolagamo z enakomerno razporejenimi vhodnimi podatki, zato interpolacija pri izdelavi mreže niti ni potrebna, a se ta običajno vseeno izvede. Surfer omogoča prikaz točnih vrednosti z metodo najbližjega soseda (»nearest neighbour«), vendar tako, še posebej pri koncentracijah, dobimo manj pregledno karto in ostre robove. Kot vemo, so rezultati modela že tako le najboljše ocena, ki vsebuje precejšnjo napako, zato taka natančnost na račun jasnosti ni niti fizikalno smiselna. Tako raje uporabimo interpolacijsko metodo Kriging, ki omogoča boljše prikaz.

Kriging je najpogosteje in najbolj splošno uporabljana geostatistična metoda izdelave kart iz neenakomerno razporejenih podatkov. Izstopa zaradi preglednosti, fleksibilnosti in dobrega prikaza trendov v podatkih. Pospošeno gre za preslikavo linearne regresijske analize več spremenljivk v prostor. Z metodo ocenimo neznanе vrednosti na ploskvi ali v prostoru z uteženo obravnavo znanih na vnesenih točkah, pri pogoju minimalne variance. Uporabljena je predpostavka, da je korelacija med točkama odvisna od medsebojne razdalje, pri čemer so uteži pri iskanju minimuma upoštevane z metodo Lagrangeovih množiteljev (Wackernagel, 2003; Armstrong, 1998).

Z uporabo opisane metode dobimo pregledne karte, ki dobro prikažejo ocenjeno stanje, za potrebe primerjave pa moramo upoštevati, da lahko pride do določenih odstopanj med prikazom koncentracij in trajektorij tudi zaradi interpolacije. Pri izdelavi kart smo uporabili linearno točkovno metodo Kriging. Slikovni prikaz rezultatov smo izvedli v obliki ovojníc padajočih koncentracij in verjetnosti pojava madeža.

4.3.1 Avtomatizacija

Izdelava kart koncentracij je ročno izredno zamudna, saj je za vsako simulacijo kart več kot deset, vse parametre pa je pri vsaki karti potrebno nastaviti ponovno. Karte trajektorij so enostavnejše za izdelavo, saj zajemajo celotno simulacijo naenkrat, a vseeno lahko, še posebej ob nepoznavanju računske domene, zahtevajo dragocen čas. Iz teh razlogov smo izdelavo kart avtomatizirali s programom napisanim v Surfer-jevem orodju Scriptor. Avtomatizacija je v programu Surfer dobro podprta, saj omogoča definicijo vseh potrebnih vhodnih parametrov. Program je napisan v programskem jeziku Visual Basic, uporablja pa objekte in metode specifične za program Surfer. Scriptor ne podpira grafičnega uporabniškega vmesnika, zato je potrebno nekatere vhodne parametre nastaviti kar v programski kodi, a je teh precej manj in so za vse karte iste simulacije konstantni. Z enkratnim zagonom programa lahko tako izdelamo vse karte z ovojnícami koncentracij naenkrat. Program je razdeljen na tri dele. V prvem so definirane spremenljivke, nekatere mora uporabnik spreminjati pri vsaki simulaciji, večina pa lahko ostane nedotaknjena. V drugem delu (Sub Grid) rezultate izračuna trajektorij ali koncentracij z uporabo interpolacijske metode pretvorimo v mrežo primerno za izdelavo kart, in jo shranimo v datoteki oblike ".grd". Program nato v tretjem delu (Sub Plot-map) iz mreže izdelava karto z ovojnícami, pri čemer upošteva v naprej pripravljen rob območja in barvno lestvico. Karte so zapisane v vektorskem formatu PDF za natančno analizo in v rastrskem formatu JPG za hiter pregled. Programska koda je v celoti prikazana v prilogi A, v tem podpoglavju pa bomo prikazali in razložili le tiste izseke prvega dela programa, ki jih uporabnik mora ali lahko spreminjati. Komentarjev v programski kodi ne prikazujemo.

Pred zagonom programa moramo v programski kodi definirati nekatere nujne parametre, ki jih moramo ponovno nastaviti za vsako simulacijo. Določiti je potrebno za katero vrsto simulacij gre ter v kateri domeni se je ta izvajala. Zaradi zmanjšanja možnosti napake se definicije podvajajo. S spremenljivko Gridding določimo, ali mora program najprej ustvariti mrežo, ki so podloga za izdelavo kart. Običajno je to potrebno (True), kadar pa naknadno spreminjamo le karte z ovojnícami, pa nam ta spremenljivka omogoči, da z uporabo že izdelanih mrežnih datotek bistveno skrajšamo čas dela (izdelava karte ovojníc iz že izdelane mreže traja le nekaj sekund).

'NUJNI PARAMETRI

```
trajektorije = False
koncentracije = True
SJadran = False
TZaliv = True
Gridding = True
```

Za izdelavo kart koncentracij definiramo še dodatne tri spremenljivke. S spremenljivko strackonc

določimo število računov koncentracij koncentracij. Koncentracije so zapisane v eni sami datoteki, za vsak izbrani čas v svojem stolpcu. S spremenljivko programu povemo kolikokrat bo v nadaljevanju ponovil ukaz za izdelavo mrež in kart, tako da bo zajel vse stolpce. Z drugima dvema spremenljivkama določimo za katero vrsto izračuna koncentracij gre (glej poglavje 4.1). Pravilna izbira vrste koncentracij je pomembna predvsem zaradi uporabe ustreznih, v naprej pripravljenih, razmikov med ovojnici in barvne lestvice ter pravilnega poimenovanja izhodnih datotek.

```
'za koncentracije
```

```
strackonc = 14  
koncTypePov2 = True  
koncTypeVol4 = False
```

Datoteko z vhodnimi podatki izberemo ročno ob zagonu programa za avtomatizacijo. V programski kodi je potrebno določiti lokacijo na disku, kamor se bodo shranile izhodne datoteke in kjer se nahajajo podatki o barvni lestvici in robu območja, ki jih program uporablja. Vse se mora nahajati na lokaciji, ki jo določimo s spremenljivko path. S spremenljivkami, ki se začnejo s korenomo lvl določimo ime datoteke, ki vsebuje podatke o intervalih med ovojnici in barvni lestvici, odvisno od vrste simulacije, ki jo obdelujemo. Datoteko predhodno ustvarimo ročno s programom Surfer. Za trajektorije v vseh simulacijah uporabimo enako lestvico, pri koncentracijah pa je ta vsakič drugačna. Z zadnjima dvema spremenljivkama določimo ime datoteke, ki vsebuje podatke o robu območja.

```
'lokacija
```

```
path = "C:\Users\Tadej\Documents\Faks\Diploma\Simulacije\Surfer\"
```

```
lvltraj = "trajektorijelestvica.lvl"  
lvlkoncNApov = "koncNA2.lvl"  
lvlkoncNAvol = "koncpovNA.lvl"  
lvlkoncTSpov = "koncTS2.lvl"  
lvlkoncTSvol = "koncvolTS.lvl"
```

```
blankNA = "NA.blm"  
blankTS = "TS.blm"
```

Pri ponavljajočih simulacijah spreminjamo le spremenljivke v sklopu nujnih parametrov. Ko začnemo z drugo simulacijo, moramo verjetno popraviti vsaj spremenljivko, ki določa število računov koncentracij in izdelati nove barvne lestvice za prikaz koncentracij. Pri izračunu trajektorij dodatno delo ni potrebno. V nadaljevanju programa so definirane še lastnosti vhodnih datotek (v katerih stolpcih se podatki nahajajo) in lastnosti obeh računskih domen, Severnega Jadrana in Tržaškega zaliva (število celic in največja ter najmanjša vrednost v obeh koordinatnih smereh). Teh parametrov v programu ne spreminjamo, saj gre za lastnosti modelov NAPOM, TSPOM, NAFTA3d in modula za izračun trajektorij. Dodali smo tudi možnost izbire interpolacijske metode, a v splošnem predlagamo, da ostane Kriging.

```
''''''dodatni parametri''''''
```

```
metoda = srfKriging
```

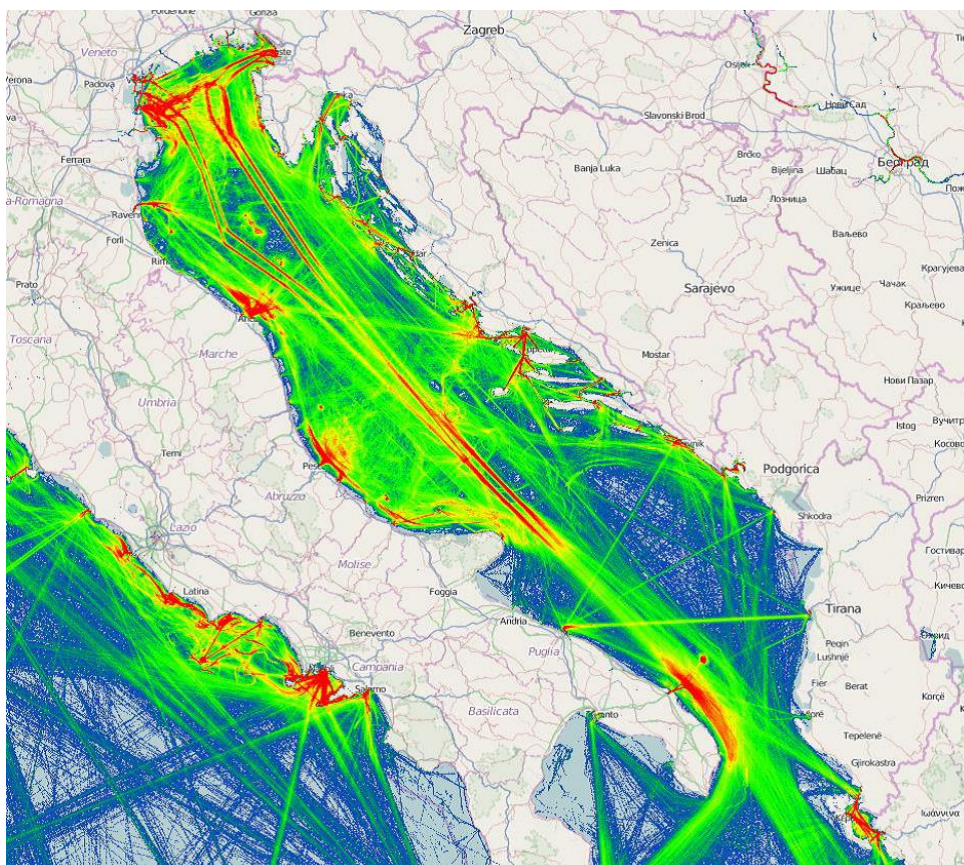
4.4 Simulacije

Metodo trajektorij je Šoško (2012) že preizkusila na domeni Tržaškega zaliva, vendar primerjava z izračunom koncentracij ni bila izvedena, zato smo simulacijo ponovili. Bolj obsežno smo metodi primerjali na domeni Severnega Jadrana, saj smo imeli na razpolago letošnje podatke

o cirkulaciji, in tako možnost primerjave v različnih pogojih. Zanimal nas je tudi vpliv velikosti in resolucije mreže na uporabnost metode trajektorij.

V Tržaškem zalivu smo tako ponovili simulacijo točkovnega razlitja pred Koprskim zalivom na lokaciji $\phi = 45,55^\circ$, $\lambda = 13,7^\circ$ na površini morja, kar se v lokalnem koordinatnem sistemu modela prevede na $x = 15e+03$ in $y = 8e+03$. Podatke o hitrostnih poljih smo pridobili iz modela TSPOM, za dejanske razmere med 19. in 21. 3. 2009. Značilnost izbranega obdobja je dvakratni obrat vetra, iz juga v burjo in nazaj, ter povečan pretok Soče (Žagar et al., 2011). Simulirano razlitje je trajalo 70 ur, časovni korak računa pa 60 sekund. Račun smo izvedli s horizontalnim koeficientom turbulentne difuzije $5 \text{ m}^2/\text{s}$, gostoto vode $1027 \text{ kg}/\text{m}^3$ in temperaturo na gladini 17°C . Uporabili smo 500.000 kg razlite rafinirane nafte, opisali pa smo jo s 1.000 delci pri računu trajektorij in 10.000 delci za izračun koncentracij.

V Severnem Jadranu je gostota prometa visoka na območju plovnih poti, predvsem zaradi ozkih koridorjev in usmerjenega prometa. Za lokacijo razlitja smo zato izbrali vozlišče pomorskih poti v Tržaško, Koprsko in italijanska pristanišča, ki smo jo razbrali iz Mesarić et al. (2015) (slika 4.2). Izbrano mesto ima koordinate $\phi = 45,4^\circ$, $\lambda = 13,0^\circ$ oziroma $x = 64e+03$ in $y = 103e+03$ v lokalnem koordinatnem sistemu. Tako smo v izračunih uporabili dejansko potencialno območje razlitja, ki je obenem dovolj oddaljeno od obale, da smo vpliv odlaganja lahko izločili prve primerjave.

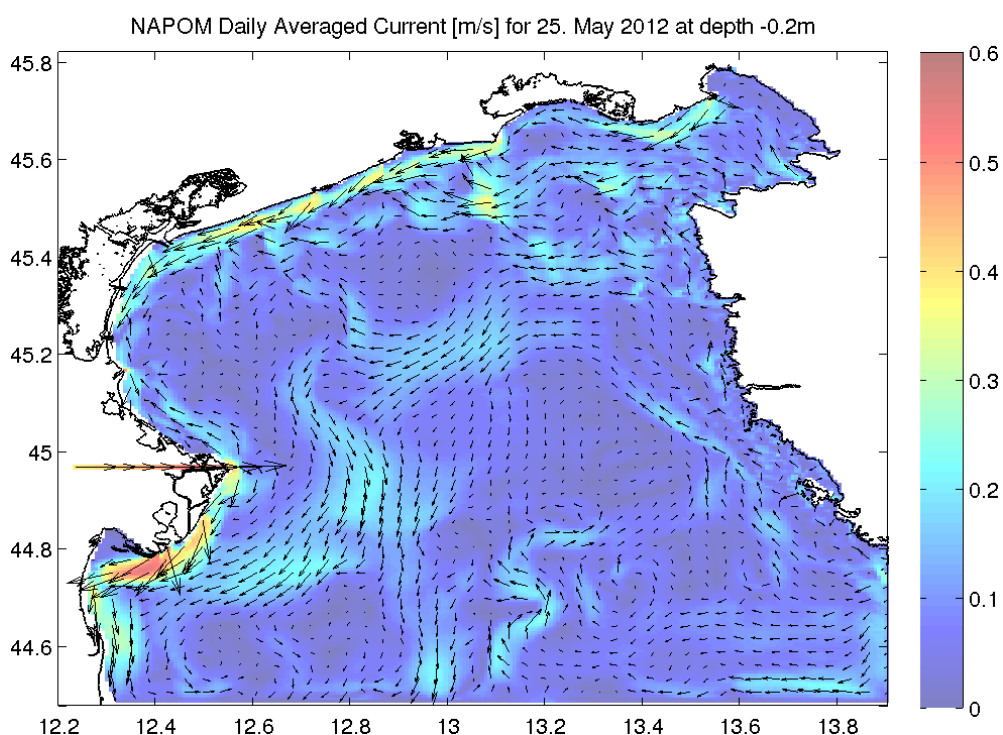


Slika 4.2: Plovne poti v Jadranskem morju, podatki za drugo polovico leta 2013 (Mesarić et al., 2015). Rdeča barva prikazuje območja z gostejšim prometom.

V domeni Severnega Jadrana smo lahko izvedli več simulacij, saj smo imeli na razpolago podatke o cirkulaciji za skoraj celotno leto 2012, od 8. januarja do 8. decembra. Izbrali smo dve značilni tedenski cirkulacijski sliki, prvo z močnimi tokovi in vetrom, kjer pri gibanju delcev prevladuje advekcija, in drugo s šibkimi tokovi, kjer je pomembnejša turbulentna difuzija. Prva simulacija

je bila tako izvedena za obdobje z močno burjo med 28.1 in 5.2. 2012, druga pa za relativno zatišje med 25.5 in 2.6.2012.

V prisotnosti močne burje je cirkulacija enostavna, gibanje vode je vzpostavljeno v obliki ciklonalnega vrtinca. V drugem izbranem obdobju zaradi spremenljivih šibkih vetrov jasnega cirkulacijskega vzorca ni. Ob severni jadranski obali je prisoten nekoliko močnejši zahodni tok, ki se v višini Benetk umiri. Neposredno v bližini razlitja je tokovanje zelo šibko, v širši okolici pa se tekom simulacije pojavljajo lokalni vrtinci. Na sliki 4.3 je prikazano eno od uporabljenih hitrostnih polj v površinskem sloju. Opazimo lahko, da bi v obravnavanem primeru z uporabo statističnega modeliranja nezanesljivosti vhodnih podatkov verjetno dobili drugačne in zelo zanimive rezultate, saj že manjši zamik lokacije razlitja ali hitrostnih polj lahko povzroči gibanje v povsem drugo smer.



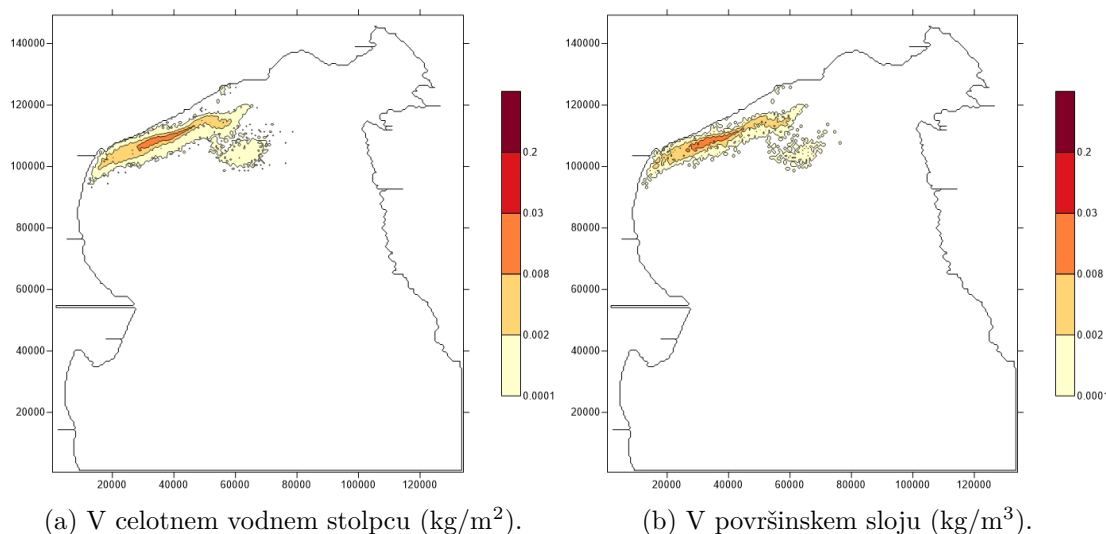
Slika 4.3: Dnevno povprečno hitrostno polje v površinskem sloju 25.5.2012, pridobljeno z modelom NAPOM.

Obe simulirani razlitji v Severnem Jadranu sta trajali 7 dni. Časovni korak računa smo določili po enačbi (4.8), 160 sekund v primeru močnejših tokov in vetrov in 240s v mirnejših pogojih. Koeficient horizontalne turbulentne difuzije, gostota vode in temperatura so bili enaki kot v primeru Tržaškega zaliva. Simulirali smo 1000 ton razlite nafte, ki smo jo opisali z 20.000 delci za izračun koncentracij in 2.000 delci pri metodi trajektorij.

5 REZULTATI

Prikaz rezultatov in njihova analiza sta izvedena na kartah z ovojnici koncentracij in verjetnosti pojava madeža. Lestvica pri prikazu trajektorij je približno povzeta po AMEC (2010), vendar z ustreznimi modifikacijami, saj gre za nekoliko drugačen tip simulacij. Barvna lestvica koncentracij se med situacijami razlikuje, ne pa tudi med posameznimi koraki izrisa. Prilagojena je čim večji preglednosti rezultatov, ki je sicer otežena zaradi hitrega pojemanja vrednosti in velikih sprememb vzdolž celotnega trajanja simulacije. Za osnovo smo izbrali lestvico, ki jo predlaga Galt (1997), t.j. 16, 4 in 1 % največjih vrednosti. Za največje vrednosti smo izbrali približne maksimume prvega časovnega izpisa koncentracij, nato pa lestvico prilagodili vsaki simulaciji posebej.

Izračun koncentracij smo izvedli na oba opisana načina, po celotnem vodnem stolpcu in samo v površinskem sloju. Pri analizi rezultatov smo ugotovili, da je za primerjavo s trajektorijami bolj primeren prikaz koncentracij po celotnem vodnem stolpcu. Med rezultati obeh načinov ni bistvenih razlik, dobljene karte pa so pri upoštevanju le površinskega sloja zaradi hitrejših sprememb in večjega nihanja koncentracij manj pregledne. Značilni pojavi na površini, kot npr. rep zaradi strižne difuzije, so opazni le proti koncu simulacij, za primerjavo pa niso pomembni. Obseg naftnega madeža v posameznem času je pri obeh načinih izračuna približno enak. V nadaljevanju so tako vse koncentracije izražene v kg/m^2 . Sliki 5.1b in 5.1a prikazujeta primerjavo med obema načinoma izračuna koncentracij za primer, ko so razlike najbolj razvidne. Barvna lestvica je enaka zgolj slučajno.



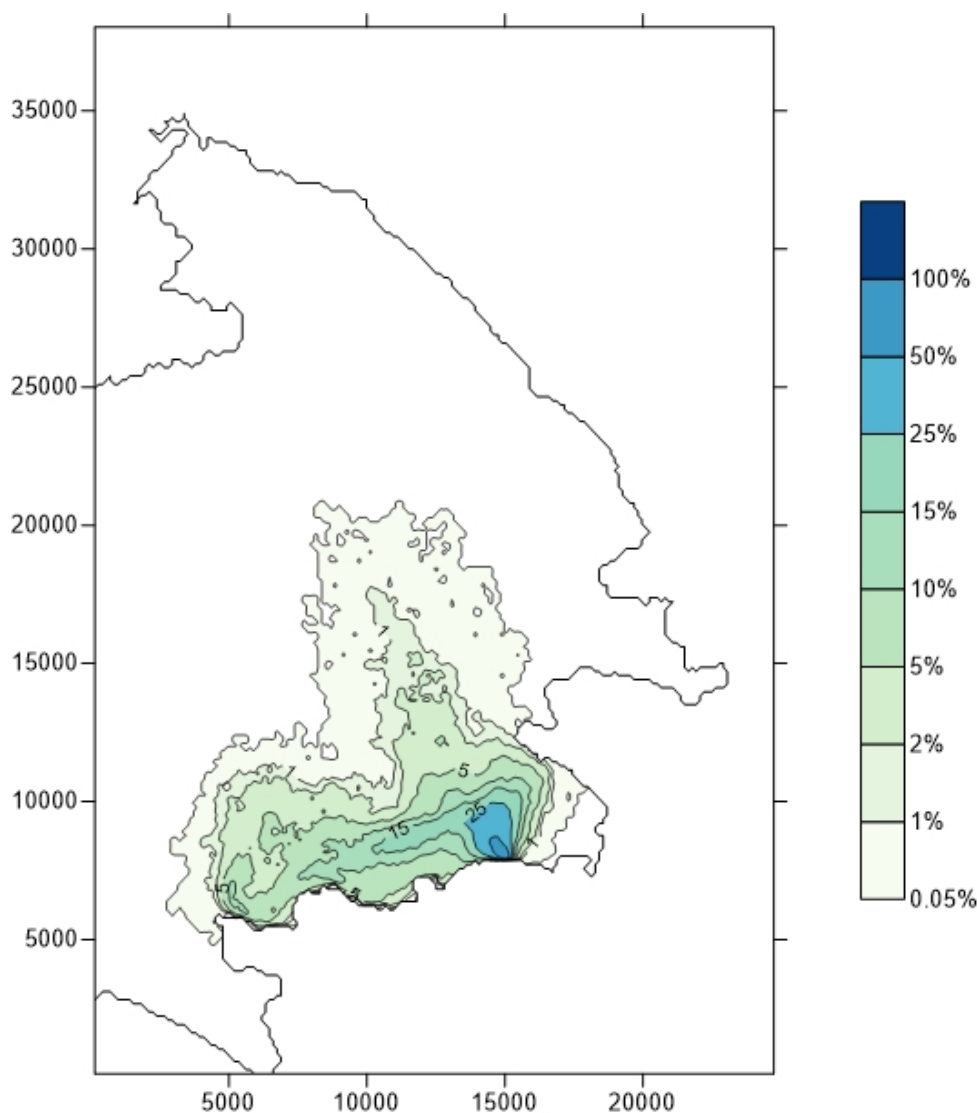
Slika 5.1: Primerjava prikazov različnih načinov izračuna koncentracij nafte pri simulaciji v severnem Jadranu konec maja 2012 po 7 dneh.

Brez upoštevanja izhlapevanja je glavni generator zmanjševanja koncentracij in verjetnosti difuzija (turbulentna in strižna). Slike 5.2, 5.5 in 5.8 jasno prikazujejo zmanjševanje verjetnosti prehoda delcev tekom simulacije zaradi difuzijskega širjenja madeža. Pri analizi rezultatov je to zmanjševanje nujno potrebno upoštevati, saj po daljšem času simuliranja že majhne verjetnosti predstavljajo upoštevanja vredno nevarnost, vrednosti nad 5 % pa skupaj s sosednjimi celicami kar najverjetnejšo lokacijo madeža v nekem trenutku razlitja.

Karte trajektorij so prikazane za vsako simulacijo posebej. V tem poglavju pri vsaki simulaciji prikazujemo le tiste karte s koncentracijami, ki so bistvene za razlago dogajanja in primerjavo, v celotnem obsegu so prikazane v prilogi B.

5.1 Tržaški zaliv

Slika 5.2 prikazuje verjetnosti pojava madeža v Tržaškem zalivu, izračunane po metodi trajektorij. Prva informacija je vedno doseg razlitja oziroma ogrožena območja. V obravnavanem primeru madež onesnaži skoraj celotno slovensko obalo od Ankarana do Pirana, z izjemo Koprškega zaliva. Na tem območju se madež tudi najverjetneje nahaja. Simulacija nakaže tudi verjetno širjenje proti središču Tržaškega zaliva, hrvaška in italijanska obala pa nista v nevarnosti.



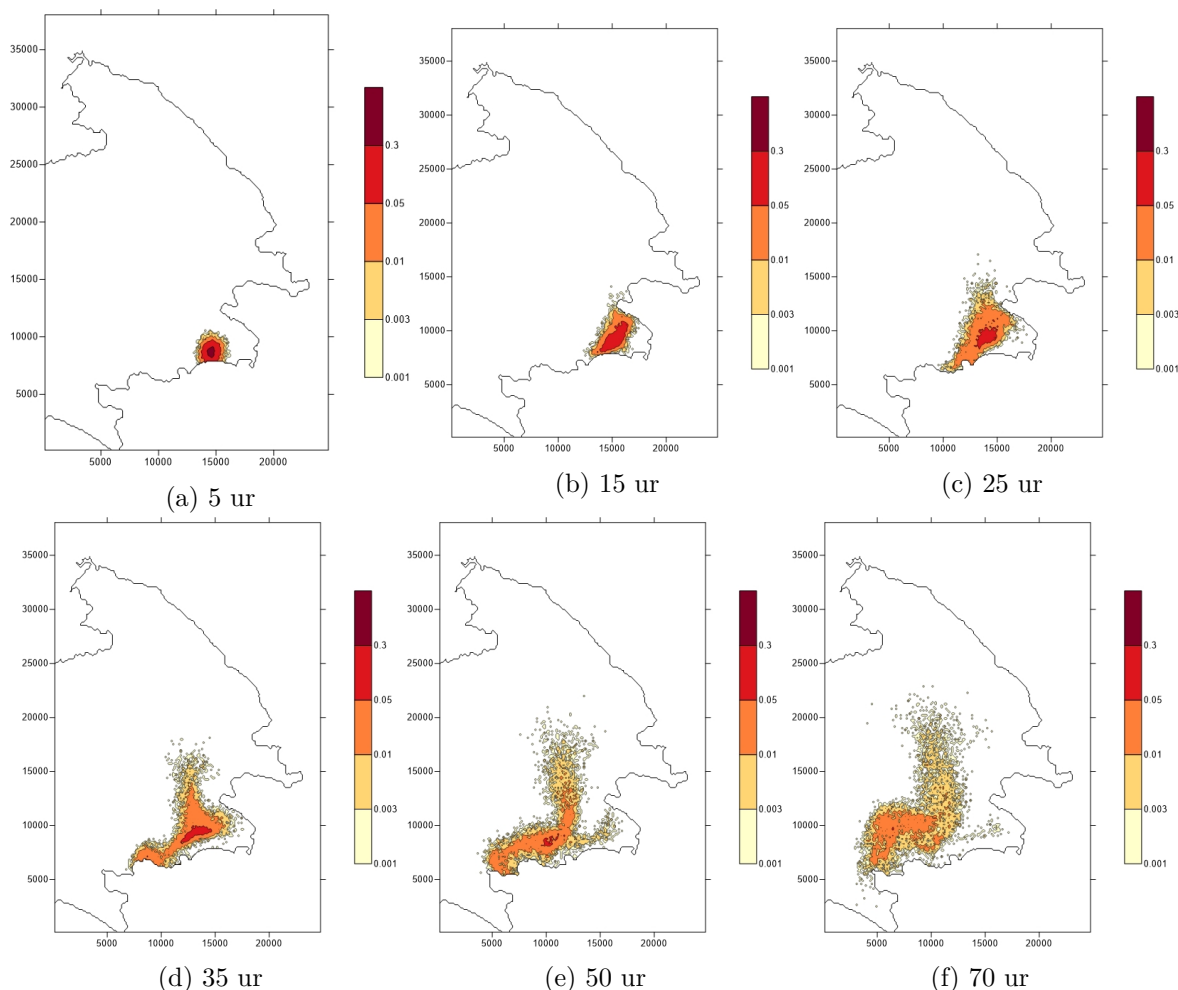
Slika 5.2: Verjetnosti pojava naftnega madeža pri razlitju v bližini koprškega pristanišča, pridobljene po metodi trajektorij.

Iz oblike kontur na sliki 5.2 lahko razberemo več kot le obseg ogroženega območja. Iz oblike ovojníc največjih verjetnosti je jasno razvidna dominantna smer gibanja središča oziroma najgostejšega dela madeža pod prevladujočim vplivom advekcije, predvsem vetrov. V začetku se madež zaradi juga giblje proti severovzhodu, nato z burjo proti jugozahodu, ob koncu simulacije pa se ponovno obrne proti severu. Iz široke zadnje ovojnice na severnem delu madeža lahko sklepamo na prevladujoč vpliv difuzije na gibanje v tej smeri, saj so simulirani delci očitno bolj razpršeni, kar je posledica naključnosti gibanja. Zaradi kratkega trajanja simulacije in oblike kontur, bi moral dejanski madež zavzeti podobno obliko, z izjemo začetnega dela v bližini razlitja. Malo verjetno bi bilo, da bi se madež dejansko razdelil na dva povsem ločena

dela, zato mora ostati povezan, kar pa je mogoče le z obrisom podobnim karti trajektorij (slika 5.4). V splošnem kaj takega seveda ne velja, kar je razvidno tudi iz simulacij prikazanih v nadaljevanju. Najdebelejši in najgostejši del madeža bi se moral nahajati v območju največjih verjetnosti.

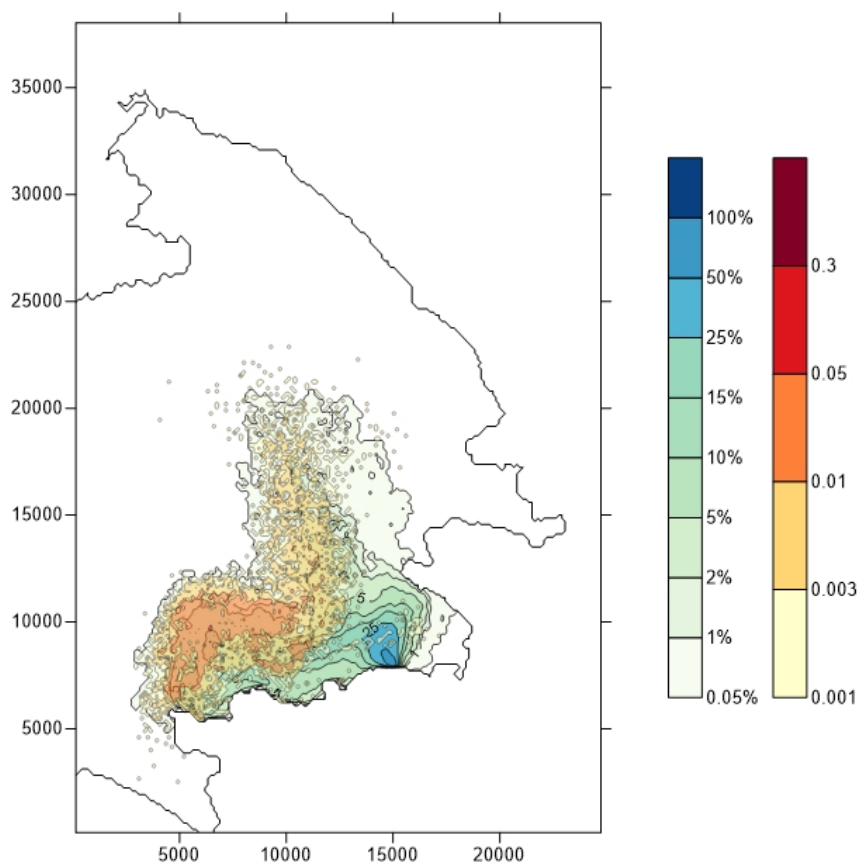
Ocenimo lahko tudi dinamiko gibanja. Proti severu se del naftnega madeža širi že od samega začetka simulacije, saj trajektorije potekajo neposredno severno od točke razlitja. Večinski del madeža skrajno zahodno lego doseže pozno in se večino časa zadržuje nekje pri sredini poti. V nasprotnem primeru bi na zahodnem delu kontur opazili večji vpliv turbulentne difuzije in bolj razmaknjene ovojnice, poleg tega pa celotna karta ne bi imela oblike obrnjene črke T, temveč trikotnika, saj bi se nafta proti severu širila tudi na zahodnem delu območja.

Primerjava s kartami koncentracij (slika 5.3) potrjuje zgoraj izpeljane ocene. Središče madeža se giblje skladno z napovedmi metode trajektorij. Po 15 urah spremeni smer gibanja iz severovzhoda proti zahodu (5.3b), po 25 urah pa je že razvidno gibanje v dveh smereh, proti zahodu in severu (5.3c). Madež dobi obliko črke T (5.3d), s premikanjem proti zahodu pa desni krak počasi izginja (5.3e). Še po 50 urah se masno središče nahaja na sredini poti (5.3e), rob kontur pa doseže šele v zadnjih izrisih (5.3f). Nepričakovano pa prvi delci Strunjanski zaliv dosežejo že po 40 urah, nato pa napredujejo zelo počasi. Razdalja med središčem madeža in prvimi delci se v tem času zmanjšuje, česar iz karte verjetnosti nismo mogli razbrati. V zadnjih 20 urah simulacije skrajni zahodni del madeža skoraj povsem miruje. Nafta, ki se giblje severno, se širi počasi, gibanje proti zahodu pa, za razliko od južnega dela madeža, v tem delu ni opazno.



Slika 5.3: Koncentracije nafte pri razlitju v Tržaškem zalivu ob značilnih časih (kg/m^2).

Z metodo trajektorij smo lahko ustrezno opisali območje, ki ga delci dosežejo, prav tako smo lahko precej natančno ocenili končno obliko naftnega madeža (slika 5.4). Izven kontur verjetnosti se nahaja le nekaj posamičnih delcev oziroma celic s koncentracijo nafte. Odstopanja med koncentracijami in trajektorijami so posledica naključnosti turbulentne difuzije in različnega števila simuliranih delcev. Najmanjša verjetnost prikazana na karti trajektorij je seveda enaka deležu, ki ga predstavlja en delec. Z uporabo več delcev bi torej lahko zajeli še manjše verjetnosti. Iz primerjave sovpadanja s koncentracijami (slika 5.4) lahko razberemo, da to ne bi bilo smiselno, saj so razlike zanemarljive. Določitev gibanja madeža tako v dominantni kot sekundarni smeri ni težavna, oblika kontur večjih verjetnosti sovpada z gibanjem najgostejšega dela. Metoda nepričakovano posreduje tudi informacije o časovni dinamiki gibanja, ki naj bi se v takšnem prikazu praviloma izgubile. Je pa njihova določitev zahtevnejša in podvržena večji nezanesljivosti. Natančnega časovnega dogajanja metoda vseeno ne prikaže, a temu niti ni namenjena.



Slika 5.4: Prikaz sovpadanja karte pridobljene z metodo trajektorij in karte koncentracij ob koncu simulacije v Tržaškem zalivu.

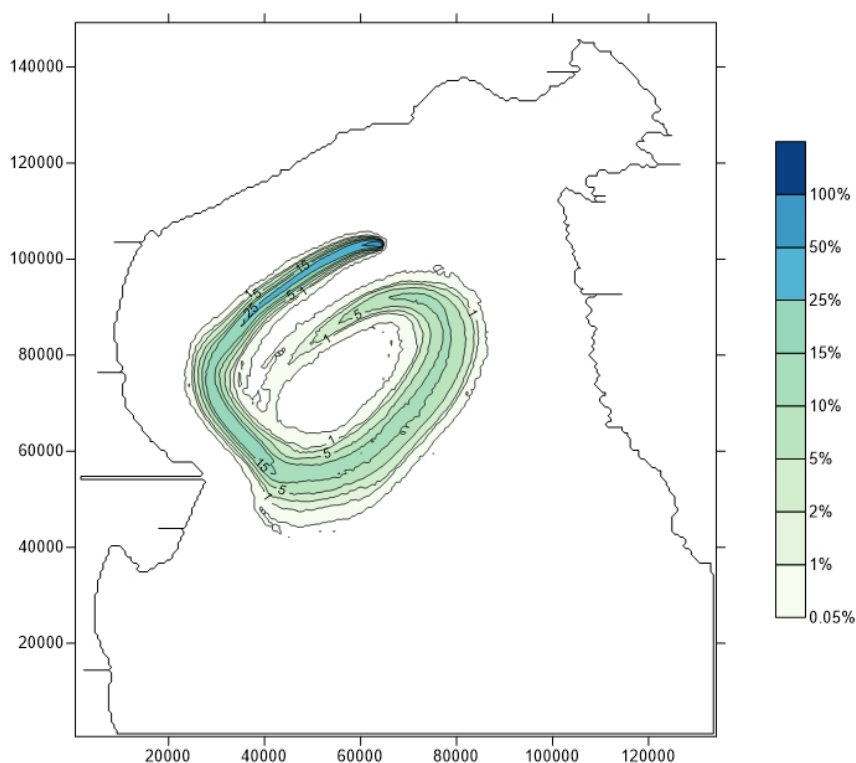
Razberemo lahko tudi območje kjer je glavni mehanizem širjenja turbulentna difuzija. Zaradi njene naključnosti in težavnosti določanja ustreznih koeficientov D_h , je tam napoved najmanj zanesljiva. Zato je na tem območju potrebna posebna pozornost pri načrtovanju ukrepov.

5.2 Severni Jadran

5.2.1 Simulacija med 28.1. in 5.2. 2012

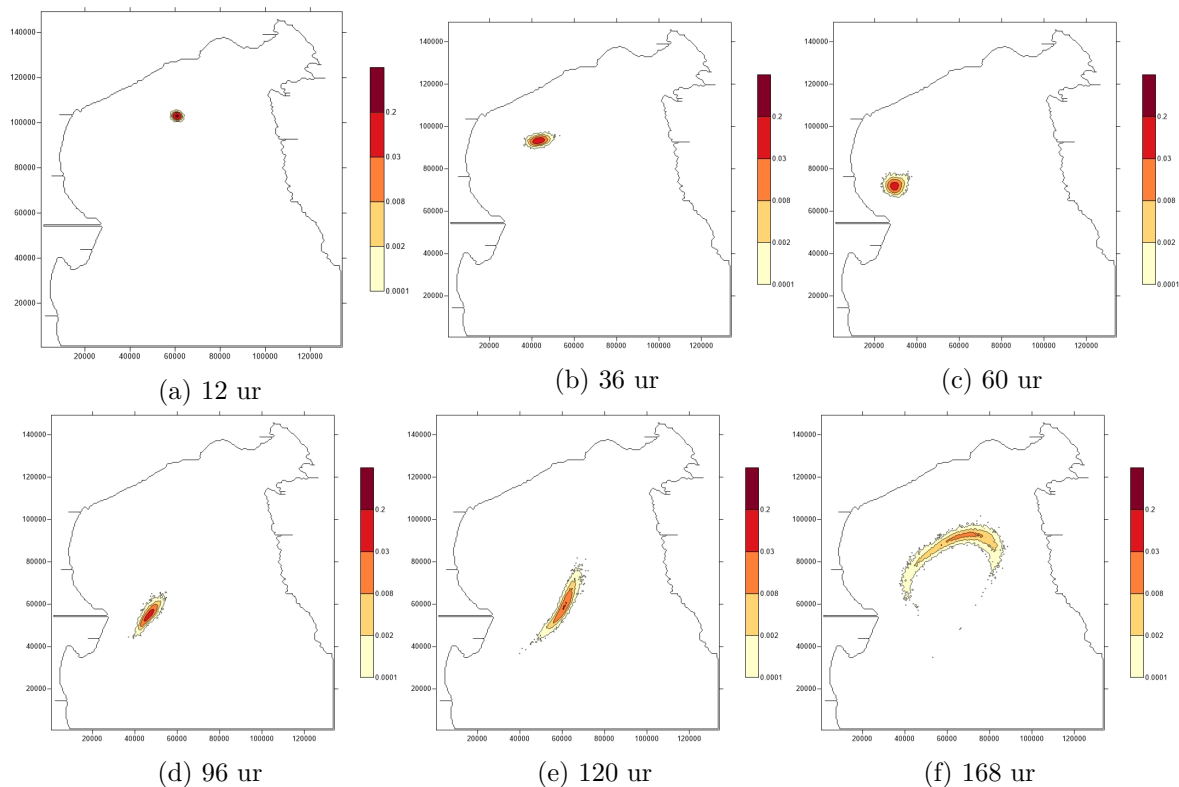
V Severnem Jadranu smo metodi primerjali z več simulacijami. Januarska simulacija z metodo trajektorij pod vplivom močnih vetrov je prikazana na sliki 5.5. Zaradi močne advekcije in manjšega merila je pot nafte še lažje določljiva, ta zakroži ciklonalno skladno z gibanjem vodnih mas. Konture so do višine izliva reke Pad zelo blizu skupaj, zaradi velike advekcijske hitrosti in

majhnega vpliva turbulentne difuzije. Na tem mestu se trajektorije razširijo. Iz ovojníc večjih verjetnosti je razvidno, da središče madeža ostane zgoščeno prečno na smer gibanja skozi celotno simulacijo. Oblika ovojnic in nizke verjetnosti na prednjem delu ob poznavanju cirkulacije nakazujejo na veliko razpotegnjenost madeža vzdolž osi gibanja, kar je posledica strižne difuzije, oziroma vpliva vetra. Ker vidimo, da vzdolž osi gibanja verjetnosti skozi celotno simulacijo padajo le počasi, lahko sklepamo, da hiter padec pri koncu trajektorij pomeni, da tega območja središče madeža še ni doseglo. Tudi če bi razlitje simulirali dalj časa, v območju, kjer se delci pojavijo dvakrat, ne bi dobili višjih verjetnosti, saj modul prisotnosti delca v celici upošteva le enkrat. Lahko pa bi imeli težavo razbrati iz katerega dela simulacije verjetnost na stiku izhaja.

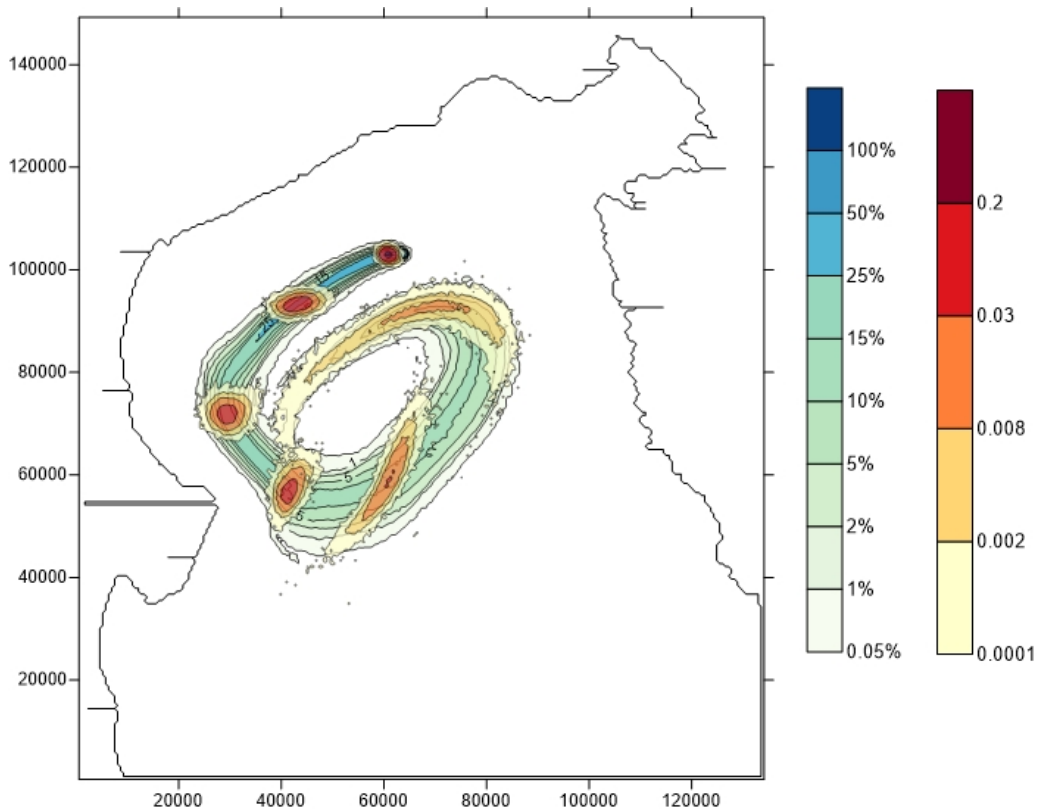


Slika 5.5: Verjetnost pojava naftnega madeža pri razlitju v Severnem Jadranu januarja 2012 ob prisotnosti močne burje.

Tudi v tem primeru izris koncentracij (slika 5.6) potrjuje napovedi metode trajektorij. Višino izliva Pada madež doseže tretji dan (5.6c), do takrat zaradi rotacije obdrži skoraj okroglo obliko, širi se le pod vplivom turbulentne difuzije. Tu ob spremembi smeri dobi izrazito drugačen obris, začne se širiti vzdolž osi gibanja, kar povzroči tudi razširitev trajektorij (5.6d). Širjenje je vse izrazitejše, madež vse bolj razpotegnjen, dokler po tednu dni nafta ne prekrije ogromne površine, ki sledi obliki tokovanja (5.6f). Masno središče madeža ostaja precej za sprednjim delom, kar potrjuje napoved metode trajektorij. Zaradi zelo enostavnega gibanja, ki ni močno podvrženo naključnosti, poleg tega pa nafta nikjer ne zadene obale, pri tej simulaciji koncentracije in trajektorije najboljše sovpadajo, ujemanje rezultatov je tudi najlažje prikazati (slika 5.7).



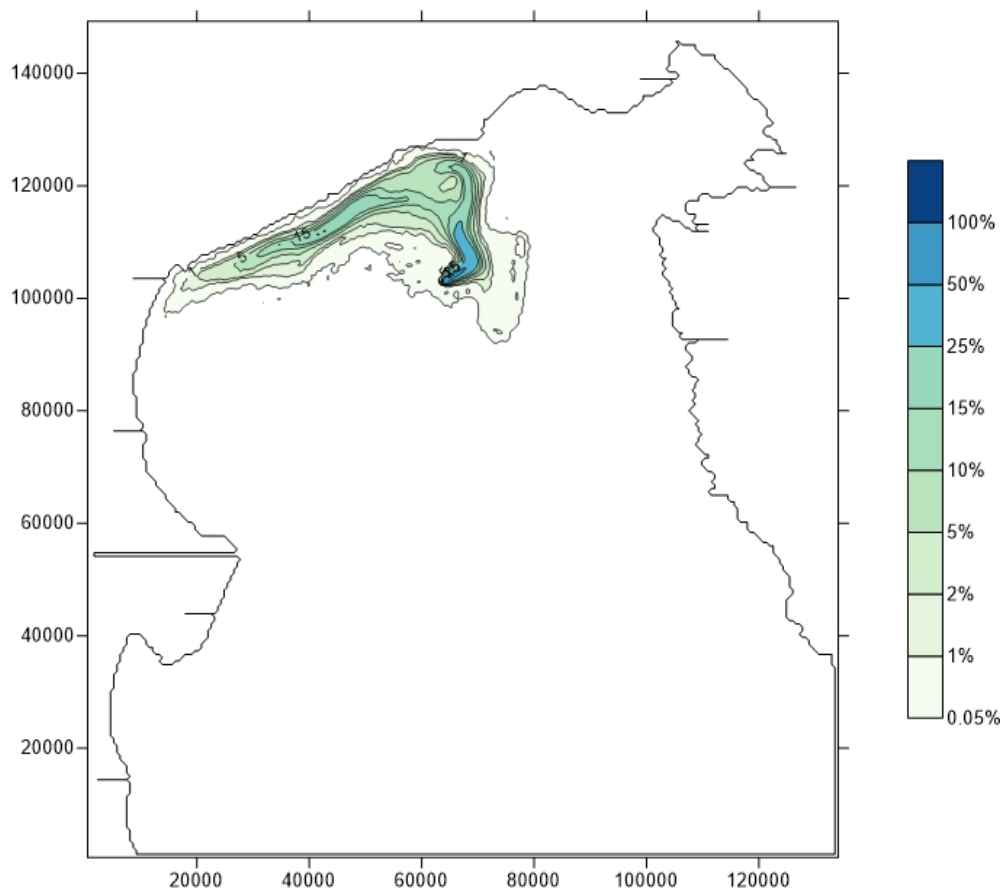
Slika 5.6: Koncentracije nafte pri razlitju v Severnem Jadranu januarja 2012 ob značilnih časih (kg/m^2).



Slika 5.7: Prikaz sovpadanja kart trajektorij in koncentracij po 12, 36, 60, 84, 120 in 168 urah od začetka simulacije v Severnem Jadranu.

5.2.2 Simulacija med 25.5 in 2.6. 2012

Drugo simulacijo smo izvedli za mirnejše pogoje konec maja 2012. Slika 5.8 prikazuje porazdelitev verjetnosti pojava madeža. Doseg razlitja je omejen na zahodni del severne jadranske obale, po enem tednu je verjetnost pojava naftnega madeža v celicah blizu Benetk v do 2 % za posamezen kontrolni volumen. Iz karte je tako mogoče takoj razbrati, da je mesto ogroženo, in načrtovati ustrezne ukrepe.

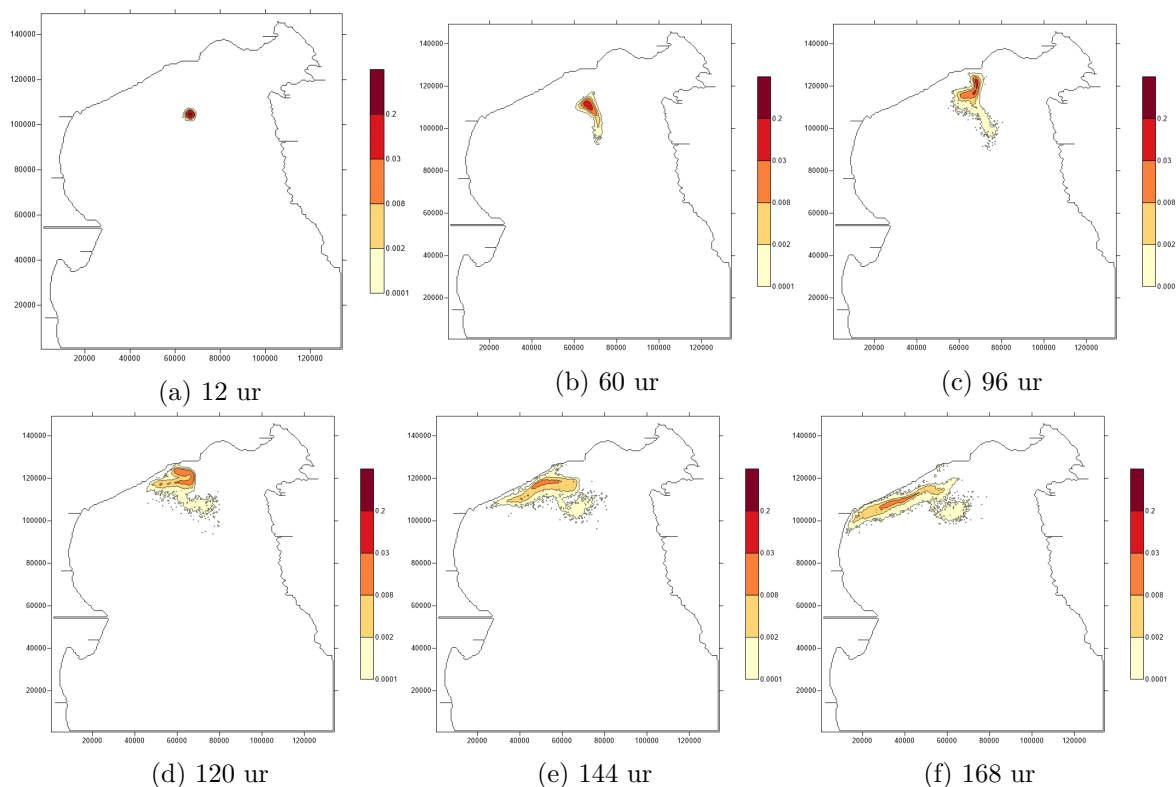


Slika 5.8: Verjetnost pojava naftnega madeža pri razlitju v Severnem Jadranu maja 2012 v mirnem morju.

Vpliv difuzije v smeri gibanja kot običajno ni močan, izrazit pa je v okolici točke razlitja, kjer je zadnja kontura zelo široka, še posebej v primerjavi z ostalimi. Iz tega lahko sklepamo na dolgo zadrževanje dela razlite nafte v okolici razlitja. Oblika ovojnice najmanjše verjetnosti na tem mestu ne opisuje polkroga, kar kaže tudi na prisotnost šibkih tokov oziroma advekcije. V nasprotju s prejšnjo simulacijo se vzdolž poti ovojnice zožijo, verjetnosti pa za kratek čas celo povečajo nazaj na 15 %, kar nakazuje na kasnejši pojav tokov, ki zberejo razpršene delce.

Gibanje madeža je iz slike 5.8 razvidno, čeprav predvsem v začetnem delu nekoliko težje določljivo. Madež se očitno razdeli na dva dela, večina delcev se giblje proti severu (verjetnosti med 15 in 25 %), ostali proti severozahodu (verjetnosti med 10 in 15 %). Del razlite nafte ostaja na mestu razlitja. Verjetnosti so, še posebej pri skrajno severnem delu karte, kmalu precej majhne, a ob ponovni združitvi obeh glavnih tokov spet narastejo. Edino združitvev razdeljenih delov madeža lahko povzroči povečanje verjetnosti navkljub splošnemu trendu padanja. Tudi v tem primeru lahko sklepamo na razvlečenost madeža vzdolž osi gibanja, saj so na zahodnem robu ovojnice med seboj bolj razmaknjene. Masno središče madeža se pri koncu simulacije najverjetneje nahaja pri zahodnem robu 15 % ovojnice, saj proti zahodu verjetnosti, upoštevajoč vse ožje ovojnice prečno na gibanje, padajo prehitro.

Ovojnice koncentracij (slika 5.9) natančneje prikažejo časovni potek gibanja madeža. V začetku se ta na mestu počasi razleže na dva dela, glavnina se giblje proti severu, ostanek proti jugu (5.9b). Po štirih dneh se severni del ponovno razdeli, del se usmeri proti zahodu, večina nafte pa se še naprej giblje proti severu, kjer zelo verjetno zadene obalo (5.9c). Oba kraka se nato s priobalnim tokom gibljeta proti zahodu (5.9d), šesti dan se združita (5.9e). Iz kart ne dobimo informacije o povečanju koncentracij, čeprav smo to lahko razbrali iz prikaza trajektorij. Za to bi morala biti lestvica bolj podrobna, kar pa bi imelo za posledico manj pregledne karte. Obalo v bližini Benetk madež doseže v zadnjem dnevu simulacije, glavnina madeža pa ostane nekje na sredini poti (5.9f). Nafta, ki se v začetku širi proti jugu, skozi celotno simulacijo ostane v okolici razlitja, kjer se počasi širi. Le med četrtem (5.9c) in petim (5.9d) dnem simulacije tudi ta del razlite nafte očitno zajamejo tokovi, ki tudi najjužnejše delce dvignejo v višino začetka Istrskega polotoka oziroma ta del madeža zavrtijo v protiurni smeri. Sicer je gibanje zaostalega dela madeža predvsem posledica turbulentne difuzije, s katero je zajet tudi vpliv gravitacijskega širjenja madeža. Ob koncu simulacije se obravnavani del skoraj odcepi od glavnine naftnega madeža, ki je razpotegnjen vzdolž severne obale (5.9f).



Slika 5.9: Koncentracije nafte pri razlitju v Severnem Jadranu maja 2012 ob značilnih časih simulacije (kg/m^2).

5.2.3 Povzetek

Tudi na večji domeni smo z metodo trajektorij lahko uspešno prikazali tako ogroženo območje kot gibanje madeža. Slednje je bolj očitno ob večjem vplivu advekcije, saj je v tem primeru manj naključno. Nekateri detajli so se pri prikazu verjetnosti sicer izgubili, predvsem pri situaciji z mirnejšim morjem. Spoznanja glede odstopanj, gibanja in določanja območij s prevladujočim vplivom turbulentne difuzije so enaka kot pri simulaciji v Traškem zalivu, zato jih ne bomo ponavljali. Zaradi večje domene je vpliv turbulentne difuzije na jasnost prikaza manjši tudi pri šibki cirkulaciji, manj je posamičnih delcev ločenih od glavnine madeža, karte pa so zaradi manjših nihanj med celicami lažje berljive.

6 DISKUSIJA

Metoda trajektorij, ki z analizo gibanja diskretnih delcev razlite nafte poda verjetnosti pojava madeža na določenem območju, se je v svojem primarnem namenu pri primerjavi z izračunanimi koncentracijami izkazala za uspešno v vseh opazovanih pogojih. Konture verjetnosti skoraj povsem sovpadajo z obliko madeža, ki jo opišejo koncentracije v posameznih časovnih izpisih. S kartami dobimo jasen, strnjen in hiter pregled ogroženega območja in območij večje nezanesljivosti, kar je ključnega pomena pri načrtovanju odziva.

Pokazali smo tudi, da lahko z metodo trajektorij opišemo gibanje naftnega madeža. Kakovost dobljenih informacij je odvisna od pogojev simulacije, boljše so pri prevladujoči advekciji in na večji domeni. Naključno gibanje zaradi turbulentne difuzije je težje natančno določiti, nekateri detajli oblike madeža pa z metodo niso zaznavni. Ker pa vsi modeli vsebujejo precejšnje napake, ti niti pri koncentracijah niso nujno pravilni. Metoda trajektorij gibanje prikaže na eni karti in prepriča, da bi se pojav madeža na kakšnem območju izgubil zaradi časovno preredkega izpisa koncentracij.

Časovne dinamike gibanja v splošnem s trajektorijami ne moremo opisati, saj za to potrebujemo prikaze ob različnih časih. V določenih primerih je dinamika vseeno razvidna, vendar je za njeno določitev potrebno dobro poznavanje ozadja metode dela in sklepanje na podlagi pogosto nezanesljivih indicev. Pristop je tako primeren le za prvo oceno dinamike gibanja, pri natančnem določanju časa pojava madeža na nekem območju pa je še vedno potrebna tudi drugačna metoda, na primer običajno sledenje delcev. Ni pa nujno, da tako natančno informacijo vedno potrebujemo, niti to ni prva informacija, ki zanima načrtovalce odziva.

Poleg primernosti metode v različne namene smo določili še njene prednosti in slabosti nasproti izračunu koncentracij. Pozitivne lastnosti so predvsem:

- Prikaz na eni sami karti, kar zmanjša možnost napak in izgube informacij.
- Veliko krajši računski čas simulacij, tudi zaradi manjšega potrebnega števila delcev.
- Krajši in enostavnejši izris karte z ovojnici. Pri metodi koncentracij je izrisov veliko, zato je brez prilagojene avtomatizacije njihova izdelava zamudna.
- Prikaz koncentracij izsili izbiro med neenotno barvno lestvico in slabšo preglednostjo. Slednja je že v splošnem slabša, lestvico pa je, kljub avtomatizaciji, potrebno ponovno definirati za vsako razlито.
- Prikaz verjetnosti prepriča zmotno predstavo o deterministični naravi simulacije, bolje posreduje možnost napake. Nizka koncentracija se lahko zdi zanemarljiva, majhna verjetnost pa vseeno izrazi realno nevarnost.
- Z nekaj izkušnjami so uporabniku poleg specifičnih na voljo tudi skoraj vse informacije splošne metode sledenja delcev.

Ugotovljene slabosti metode trajektorij pa so:

- V splošnem ne posreduje informacij o časovnem poteku gibanja madeža.
- Prikaz je slabše intuitivno razumljiv, saj ne prikaže stanja v določenem času. Pri nepoznavanju metode lahko tako pride do napačne interpretacije. Nizke verjetnosti v posamezni celici so lahko zmotno razumljene kot neproblematične.
- Nekateri detajli gibanja se v enotnem prikazu izgubijo, še posebej pri prevladujočem vplivu turbulentne difuzije. Zaradi nezanesljivosti vhodnih podatkov in napak modela ti tudi pri izračunu koncentracij niso nujno pravilni.

7 ZAKLJUČEK

Kljub razmeroma majhnemu številu izvedenih simulacij glede na navedeno zaključujemo, da v primerih s prevladujočim vplivom advekcije in na večjih domenah izračun trajektorij zaradi enostavnosti lahko popolnoma nadomesti običajno metodo sledenja delcev in izračun koncentracij. Ravno razlitja v pogojih močnih tokov in vetrov (advekcije) so najbolj nevarna, saj se madež širi zelo hitro, zato je izboljšava simulacij in zmanjšanje računskega časa koristna. V splošnem predlagamo, da se pri odzivu na razlitje vedno najprej izvede račun po metodi trajektorij, ki uporabniku poda strnjen prikaz dogajanja z ogroženimi območji, ki že omogoča prvo načrtovanje odziva. Nato, ali pa vzporedno, se po potrebi izvede še izračun koncentracij, s poudarkom na pridobivanju podrobnosti nedosegljivih s prvo analizo (npr. za ogroženo območje, ki je bilo identificirano z metodo trajektorij, določimo čas, ko se v njem pojavijo prvi delci nafte, in njihovo koncentracijo ter stanje).

V diplomski nalogi smo preučili delovanje matematičnih modelov širjenja nafte v morju po metodah sledenja delcev in trajektorij. Ker je metoda trajektorij še posebej uporabna v primeru dejanskega razlitja smo predstavili tudi potek odziva na razlitje, s čimer smo lažje ocenili prednosti metode. Metodi smo primerjali s tremi simulacijami, prvo v Tržaškem zalivu in dvema v Severnem Jadranu. V ta namen smo popravili in dopolnili program za izračun trajektorij in izdelali program za avtomatizacijo grafičnega izpisa. Rezultate simulacij z obema metodama smo analizirali in primerjali, na podlagi analize pa določili prednosti in slabosti metode trajektorij ter njeno uporabno vrednost. Poleg tega smo natančno preučili in opisali tudi možne nadgradnje metode trajektorij in popisali potrebno delo za njihovo izdelavo.

Za nadaljnjo uporabo metode trajektorij bi lahko preverili še vpliv izhlapevanja, morda pa tudi emulzifikacije in različnih pristopov modeliranja odlaganja na obalo, na njene rezultate oziroma na primerjavo s koncentracijami. Program za izračun trajektorij bi bilo smiselno ponovno napisati v drugem programskem jeziku, ki bi bil bolj primeren za operacije z matrikami, ki prevladujejo v strukturi programa (npr. MATLAB).

Poleg takojšnje aplikacije metoda ponuja vznemirljive možnosti za nadaljnji razvoj tako taktičnega kot prognostičnega načina modeliranja. Za prvega bi bilo potrebno raziskati vpliv nezanesljivosti vhodnih podatkov na rezultate modela in nezanesljivost z uporabo statistično porazdeljenih vhodnih podatkov tudi vključiti v simulacijo. Za to bi bila potrebna obsežna modifikacija programa NAFTA3d, ki bi omogočala uporabo metode Monte Carlo za statistično perturbacijo vhodnih podatkov. Program za izračun trajektorij bi lahko ostal nespremenjen.

Za izvajanje prognostičnih simulacij po metodi trajektorij bi zadoščala že manjša modifikacija obeh modelov, a bi potrebovali meteorološke in oceanografske podatke za daljše časovno obdobje (vsaj 5 let, odvisno od namena in vrste simulacije). Tako bi lahko za katerokoli mesto razlitja izvedli statistično značilno analizo obsega ogroženega območja pri različnih pogojih, ki bi jih zajeli z večletnimi podatki. Še posebej bi bila metoda trajektorij uporabna za določanje potencialnega dosega razlitja pri črpanju nafte, saj je v tem primeru lokacija nesreče znana. Z upoštevanjem večletnih podatkov o obravnavanem območju bi lahko natančno določili potencialno ogroženo območje, kar bi bilo uporabno pri presoji vplivov na okolje in kasnejšem načrtovanju zaščite.

VIRI

- Al-Rabeh, A.H., Lardner, R.W., Gunay, N. 2000. Gulfspill Version 2.0: a software package for oil spills in the Arabian Gulf. *Environmental Modelling and Software* 15: 425-442.
- AMEC Earth & Environmental. 2010. Spill Trajectory Modelling for the Hebron Project. St. John's, Stantec Consulting Ltd.: 104 f.
- Antunes de Carmo, J., Costa, M. 2000. Modelling of oil spill evolution in estuaries and coastal regions. In: Rodriguez, G.R. (ed.), Brebbia, C.A. (ed). 2000. Oil and Hydrocarbon Spills. Modelling, Analysis and Control. WIT Press: p. 63-72.
- Apai, D. 2001. Oil Spill Fate and Trajectory Modelling in Cockburn Sound. Bachelor Thesis. Perth, The University of Western Australia, Department of Environmental Engineering: 101 f.
- Armstrong, M. 1998. The Theory of Kriging. In: Armstrong, M. Basic Linear Geostatistics. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag: p. 83-102.
- ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills of the Water Resources Engineering Division. 1996. State-of-the-Art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills. *Journal of Hydraulic Engineering* 122, 11: 594-609
- Azavedo, A., Oliveira, O., Fortuato, A.B., Bertin, X. 2009. Application of an Eulerian-Lagrangian oil spill modeling system to the Prestige accident: trajectory analysis. *Journal of Coastal Research* 56: 777-781.
- Beegle-Krause, C.J. 2001. General NOAA Oil Modeling Environment (GNOME): A New Spill Trajectory Model. Proceedings of the International Oil Spill Conference, March, 2001., p. 865-872.
- Betancourt, F., Palacio, A., Rodriguez, A. 2005. Effects of the Mass Transfer process in Oil Spill. *American Journal of Applied Sciences* 2, 5: 939-946.
- Blumberg, A.F., Mellor, G.L. 1987. A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model. In: Heaps, N.S. (ed.). Three Dimensional Coastal Ocean Models. Washington, American Geophysical Union: p. 1-16.
- Bosnič, M. 2014. Ranljivost slovenske obale za onesnaženje z nafto. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Bosnič): 38 f.
- Box, G.E.P., Muller, M.E. 1958. A Note on the Generation of Random Normal Deviates. *The Annals of Mathematical statistics* 29, 2: 610-611.
- Breaker, L.C. 1993. Coastal-Ocean Processes and their Influence on the Oil Spilled off San Francisco by the M/V Puerto Rican. *Marine Environmental Research* 36: 153-184.
- Chang, Y., Oey, L., Xu, F., Lu, H. 2011. 2010 oil spill: trajectory projections based on ensemble drifter analyses. *Ocean Dynamics* 61: 829-839.
- Delgado, L., Kumzerova, E., Martynov, M. 2006. Simulation of oil spill behaviour and response operations in PISCES. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 88: 279-292. doi:10.2495/CENV060271
- Drozdowski, A., Nudds, S., Hannah, C.G., Niu, H., Peterson, I.K., Perrie, W.A. 2011. Review of Oil Spill Trajectory Modelling in the Presence of Ice. Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences 274: 92 f.

- Elliott, A., Hurford, N., Penn, C. 1986. Shear diffusion and the spreading of oil slicks. *Marine Pollution Bulletin* 17: 308-313.
- Etkin, D.S., 2015. Risk Analysis and Prevention. In: Fingas, M. (ed.). *Handbook of Oil Spill Science and Technology*. Hoboken, John Wiley & Sons: p. 3-35.
- Fay, J.A., 1971. Physical Processes in the Spread of Oil on Water Surface. *Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills*, American Petroleum Institute, Washington, D.C.: p. 463-468.
- Fingas, M. 2015. Introduction to Spill Modeling. In: Fingas, M. (ed.). *Handbook of Oil Spill Science and Technology*. Hoboken, John Wiley & Sons: p. 287-300.
- Fingas, M. 2013. *The Basics of Oil Spill Cleanup*. Third Edition. Boca Raton, London, New York, CRC Press: 250 p.
- Fingas, M. 2011a. Introduction. In: Fingas, M. (ed.). *Oil Spill Science and Technology : prevention, response, and clean up*. 1st ed. Amsterdam idr., Elsevier : p. 3-6.
- Fingas, M. 2011b. Introduction to Spill Modeling. In: Fingas, M (ed.). *Oil Spill Science and Technology : prevention, response, and clean up*. 1st ed. Amsterdam idr., Elsevier : p. 187-200.
- Fingas, M. 2011. Introduction to Oil Chemistry and Properites. In: In: Fingas, M (ed.). *Oil Spill Science and Technology : prevention, response, and clean up*. 1st ed. Amsterdam idr., Elsevier : p. 51-59.
- Fingas, M. 2004. Modeling evaporation using models that are not boundary-layer regulated. *Journal of Hazardous Materials* 107: 27-36. DOI:10.1016/j.jhazmat.2003.11.007
- Galt, J.A., 1997. The Integration of Trajectory Models and Analysis into Spill Response Information Systems. *Spill Science and Technology Bulletin* 4, 2: 123-129.
- Galt, J.A., 1998. Uncertainty Analysis Related To Oil Spill Modeling. *Spill Science and Technology Bulletin* 4, 4: 231-238.
- Galuf, S. 2005. Simulacija razlitja nafte v Tržaškem zalivu. *Diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Galuf): 71 f.
- Garcia-Martinez, R., Flores-Tovar, H. 1999. Computer Modeling of Oil Spill Trajectories With a High Accuracy Method. *Spill Science and Technology Bulletin* 5, 5/6: 323-330.
- Gentle, J.E. 2003. *Random Number Generation and Monte Carlo Methods*. New York idr., Springer: p. 2.
- ITOPF. 2015. Oil tanker spill statistics 2014.
http://www.itopf.com/fileadmin/data/Documents/Company_Lit/Oil_Spill_Stats_2014FINALlowres.pdf (Pridobljeno 13. 3. 2015.)
- Jeglič, T. 2010. Modeliranje razlitja nafte v Tržaškem zalivu. *Diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Gradbeništvo in Geodezijo (samozaložba T. Jeglič): 51 f.
- Jotanović, G. 2014. Vpliv izhlapevanja in emulzifikacije na viskoznost razlite nafte na morju. *Diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Jotanović): 28 f.

- Kajfež Bogataj, L. 2012. Svet se utaplja v razliti nafti. Polet, 16.02.2012.
<http://www.polet.si/soba-z-razgledom/svet-se-utaplja-v-razliti-nafti> (Pridobljeno 26. 5. 2015.)
- Koutitas, C., O'Connor, B. 1980. Modeling three-dimensional wind induced flows. *Journal of the Hydraulics Division* 106: 1843-1865.
- Knauss, J.A. 1997. Equations of Motion. In: Knauss, J.A., 1997. *Introduction to Physical Oceanography* (dr. izd.). Long Grove, Waveland Press: p. 80-107.
- Kvočka, D. 2013. Emulzifikacija nafte in izdelava modela EMU. *Diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Kvočka): 64 f.
- Lehr, W., Robert, J., Evans, M., Simecek-Beatty, D., Overstreet, R. 2002. Revisions of the ADIOS oil spill model. *Environmental Modelling and Software* 17: 191-199.
- Lehr, W.J., Simecek-Beatty, D. The Relation of Langmuir Circulation Processes to the Standard Oil Spill Spreading, Dispersion, and Transport Algorithms. *Spill Science and Technology Bulletin* 6, 3-4: 247-253.
- Ličer, M., Žagar, D., Jeromel, M., Vodopivec, M. 2012. Numerični modeli za določanje stanja morja v Jadranskem morju. *Ujma* 26: 164-167.
- Ličer, M. 2015. Gibanje vodnih mas v Jadranskem morju. *METAznanost*.
<http://znanost.metinalista.si/gibanje-vodnih-mas-v-jadranskem-morju/> (Pridobljeno 26. 5. 2015.)
- Mackay, D., Patterson, S., Nadeau, S. 1980. Calculation of the Evaporation Rate of Volatile Liquids. *Proceedings of the National Conference on Control of Hazardous Material Spills*, Louisville, Kentucky: p. 361-368.
- Malačič, V., Petelin, B., Vodopivec, M. 2012. Topographic control of wind-driven circulation in the northern Adriatic. *Journal of geophysical research*, 117, C06032: 1-16.
- Maslo, A., Panjan, J., Žagar, D. 2014. Large-scale oil spill simulation using the lattice Boltzmann method, validation on the Lebanon oil spill case. *Marine Pollution Bulletin* 84: 225-235.
- Mesarić, M., Likić, J., Safner, T., Peleš, P., Doboš, M., Božić, B., Gređelj, M., Delić, D., Gundac, I., Harmel, M., Strmšnik, K., Privšek, A., Gaurina-Međimurec, N., Valić, J., Zec, D., Gelo, B., Holcer, D., Mackelworth, P.C., Lazar, B. 2015. *Strateška studija o vjerojatno značajnom utjecaju na okoliš Okvirnog plana i programa istraživanja i eksploatacije ugljikovodika na Jadranu*. Zagreb, Ministarstvo gospodarstva Republike Hrvatske: 197 f.
- Pinho, J.L.S., Antunes do Carmo, J.S., Vieira, J.M.P. 2002. Numerical modelling of oil spills in coastal zones. A case study. In: Brebbia, C.A. (ed.). *Oil and Hydrocarbon Spills III*. Ashurst Lodge, Southampton, WIT press: p. 35-45.
- Perkovič, M., Delgado, L., David, M., Petelin, S., Harsh, R. 2008. The Necessity of Applying SAR Imagery to Oil Spill Modeling in Cases of Data Obfuscation. In: Davidson, W. F., Cogswell, A. (eds.). *Oil Spill Response: A Global Perspective*. Springer Netherlands: p. 237-256.
- Rajar, R. 1997. *Hidromehanika*. Učbenik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 235 str.
- Rajar R., Četina M. 1997. *Hydrodynamic and Water Quality Modelling: An Experience*. *Ecological Modelling* 101: p. 195-207.

- Rajar, R., Četina, M., Širca, A. 1997. Hydrodynamic and Water Quality Modelling: Case Studies. *Ecological Modelling* 101: p. 209–228.
- Reed, M., Johansen, Ø., Brandvik, P.J., Daling, P., Lewis, A., Fiocco, R., Mackay, D., Prentki, R. 1999. Oil Spill Modeling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art. *Spill Science and Technology Bulletin* 5, 1: 3-16.
- Sayed, M., Serrer, M., Mansard, E. 2008. Oil Spill Drift and Fate Model. In: Davidson, W.F., Lee, K., Cogswell, A. (eds.). *Oil Spill Response: A Global Perspective*. Dordrecht, Springer: p. 205-220.
- Sebastião, P., Guedes Soares, C. 2006. Uncertainty in predictions of oil spill trajectories in a coastal zone. *Journal of Marine Systems* 63: 257-269.
- Shingenaka, G. 2011. Effects of Oil in the Environment. In: Fingas, M (ed.). *Oil Spill Science and Technology : prevention, response, and clean up*. 1st ed. Amsterdam idr., Elsevier : 985-1020.
- Simecek-Beatty, D. 2011. Oil Spill Trajectory Forecasting Uncertainty and Emergency Response. In: Fingas, M. (ed.). *Oil Spill Science and Technology : prevention, response, and clean up*. 1st ed. Amsterdam idr., Elsevier : 275-299.
- Surfer User's Guide. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers. 2002. Colorado, Golden Software: 664 p.
- Šaponja, M. 2014. Modeliranje izhlapevanja nafte po metodi Fingas. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Šaponja): 48 f.
- Širca, A., 1992. Modeliranje transporta polutantov po metodi sledenja delcev. Magistrska naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Širca): 87 f.
- Šoško, H. 2012. Modeliranje širjenja nafte v morskem okolju po metodi trajektorij. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba H. Šoško): 44 f.
- Wackernagel, H. 2003. *Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications*. Third Edition. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag: p. 15-33.
- Žagar, D. 1994. Tridimenzijski model za simulacijo širjenja nafte. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Žagar): 67 f.
- Žagar, D., Četina, M. 2011. Končno poročilo o izdelavi strokovne naloge NAFTA3d. Ljubljana, Nacionalni inštitut za biologijo: 22 f.
- Žagar, D., Ličer, M., Malačič, V. 2011. Modeliranje razlitja nafte v morskem okolju. V: Eberlinc, M. (ur.), Širok, B. (ur.). *Kuhljevi dnevi*, 22. september 2011, Mengeš. Zbornik del. Ljubljana, Slovensko društvo za mehaniko: 283-290.
- Žagar, D. Ramšak, V., Ličer, M., Petelin, B., Malačič, V. 2012. Uporaba numeričnih modelov ob razlitjih nafte na morju. *Ujma* 26: 168-174.

Kazalo prilog

PRILOGA A: AVTOMATIZACIJA GRAFIČNEGA IZPISA	A1
PRILOGA B: PRIKAZI KONCENTRACIJ NAFTE (kg/m ²)	B1
B.1 Tržaški zaliv	B1
B.2 Severni Jadran - januar	B4
B.3 Severni Jadran - maj	B7


```

Trzaski zaliv
xminTS = 140.581      'enako
yminTS = 148.55
xmaxTS = 24742.2
ymaxTS = 38028.7
nlxTS = 176
nllyTS = 256

''''''interpolacijska metoda''''''

metoda = srfKriging

''''''enote barvne lestvice''''''
sufixtraj = "┐%"
sufixconc = ""

''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''PROGRAM''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

Dim ssurfer As Object
Set ssurfer = CreateObject("Surfer.Application")
ssurfer.Visible = False      'Ali odpre program Surfer

If koncTypePov2 = True Then   'Izbere pravilno vrsto koncentracij
koncType = "povr"
lvlkoncNA = lvlkoncNApov
lvlkoncTS = lvlkoncTSpov
End If
If koncTypeVol4 = True Then
koncType = "vol"
lvlkoncNA = lvlkoncNAvol
lvlkoncTS = lvlkoncTSvol
End If

If trajektorije = True Then

If Gridding = True Then
If SJadran = True Then
Call Grid(stxtraj, stytraj, ztraj, one, xminNA, yminNA, xmaxNA, ymaxNA, _
nlxNA, nllyNA, metoda, gridType, path, ssurfer, blankNA)
End If

If TZaliv = True Then
Call Grid(stxtraj, stytraj, ztraj, one, xminTS, yminTS, xmaxTS, ymaxTS, _
nlxTS, nllyTS, metoda, gridType, path, ssurfer, blankTS)
End If
End If
Call Plot_map(path, gridType, one, ssurfer, lvltraj, sufixtraj)

End If

If koncentracije = True Then

If SJadran = True Then
If Gridding = True Then
Call Grid(stxkonc, stykonc, zkonc, strackonc, xminNA, yminNA, xmaxNA, _
ymaxNA, nlxNA, nllyNA, metoda, koncType, path, ssurfer, blankNA)
End If
Call Plot_map(path, koncType, strackonc, ssurfer, lvlkoncNA, sufixconc)
End If

If TZaliv = True Then
If Gridding = True Then
Call Grid(stxkonc, stykonc, zkonc, strackonc, xminTS, yminTS, xmaxTS, _
ymaxTS, nlxTS, nllyTS, metoda, koncType, path, ssurfer, blankTS)
End If
Call Plot_map(path, koncType, strackonc, ssurfer, lvlkoncTS, sufixconc)
End If

End If

ssurfer.Quit

End Sub

```



```
,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,MREŽA,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,  
  
Private Sub Grid(x As Long,y As Long,z As Long, stolpci As Long, minx As Variant, _  
  miny As Variant , maxx As Variant, maxy As Variant, nx As Variant, ny As Variant, _  
  meth As Variant, ime As String, path As String, ssurfer As Object, blank As String)  
  Dim z1 As Long  
  Dim outfiles As String  
  Dim plot As Object  
  Set plot = ssurfer.Documents.Add  
  DataFile$ = GetFilePath$() 'Prikaže okno za izbiro vhodne datoteke.  
  
  For i = 0 To (stolpci -1) 'Pri trajektorijah le ena iteracija.  
    z1 = z + i  
    outfiles = path & ime & (i+1) & ".grd"  
  
    ssurfer.GridData2 DataFile := DataFile$, _  
    OutGrid := outfiles, ShowReport := False, _  
    xCol := x, yCol := y, _  
    zCol := z1, _  
    NumCols := nx, NumRows := ny, xMin := minx, yMin := miny, _  
    xMax := maxx, yMax := maxy, _  
    Algorithm := meth  
  
    If blank <> "" Then  
      ssurfer.GridBlank InGrid := outfiles, BlankFile := (path & blank), _  
      OutGrid := outfiles  
  
    End If  
  Next  
  
  plot.Close (SaveChanges := srfSaveChangesNo)  
  
End Sub  
,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,KARTA,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,  
  
Sub Plot_map(path As String, gridname As String, nooffiles As Long, _  
  ssurfer As Object, levelfile As String, suffix As String)  
  Dim outfiles As String  
  
  For i = 0 To (nooffiles -1) 'Karte iz vseh mrež naenkrat.  
  
    outfiles = path & gridname & (i+1) & ".grd"  
    Dim plot As Object  
    Set plot = ssurfer.Documents.Add  
  
    Dim MapFrame As Object  
    Set MapFrame = plot.Shapes.AddContourMap(GridFileName := outfiles)  
  
    Dim Shapes As Object  
    Set Shapes = plot.Shapes  
  
    Dim ContourMap As Object  
    Set ContourMap = MapFrame.Overlays(1)  
  
    If levelfile <> "" Then 'Ce ni definiran samodejno. Slabo!  
      Dim Levels As Object  
      Set Levels = ContourMap.Levels  
      Levels.LoadFile(FileName := path & levelfile)  
  
    End If  
  
    ContourMap.ShowColorScale = True 'Ovojnice  
    ContourMap.FillContours = True  
    ContourMap.SmoothContours = srfConSmoothHigh  
    ContourMap.LabelFont.Size = 8  
    ContourMap.BlankLine.Style = "Solid"  
  
    Dim ColorScale As Object
```

```
Set ColorScale = ContourMap.ColorScale
ColorScale.LabelFormat.Postfix = sufix

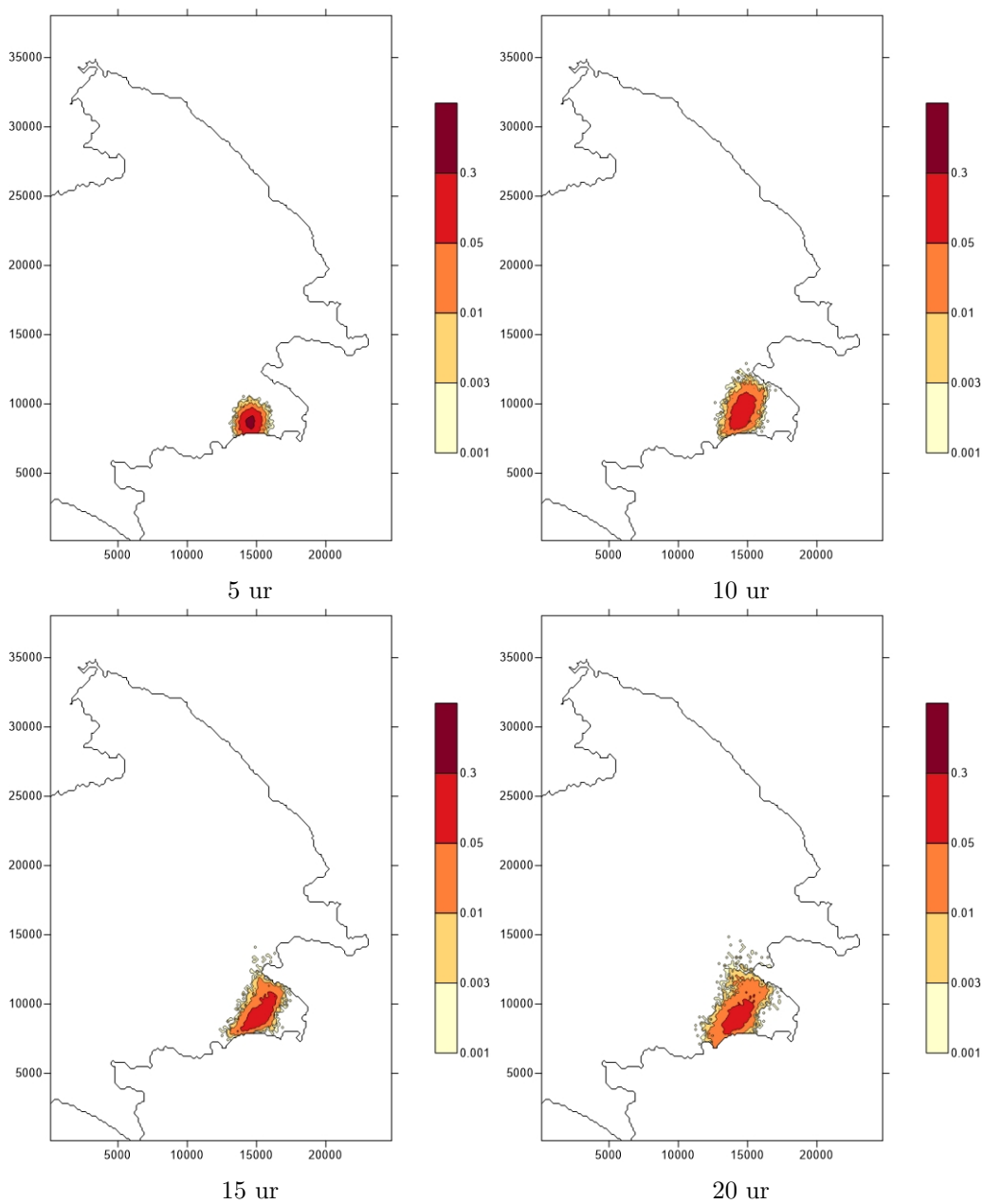
plot.SaveAs(FileName := path & gridname & (i+1) & ".srf")
plot.Export2(FileName := path & gridname & (i+1) & ".jpg", FilterId := "jpg")
plot.Export2(FileName := path & gridname & (i+1) & ".pdf", FilterId := "pdfv")
Debug.Print outfiles
plot.Close
```

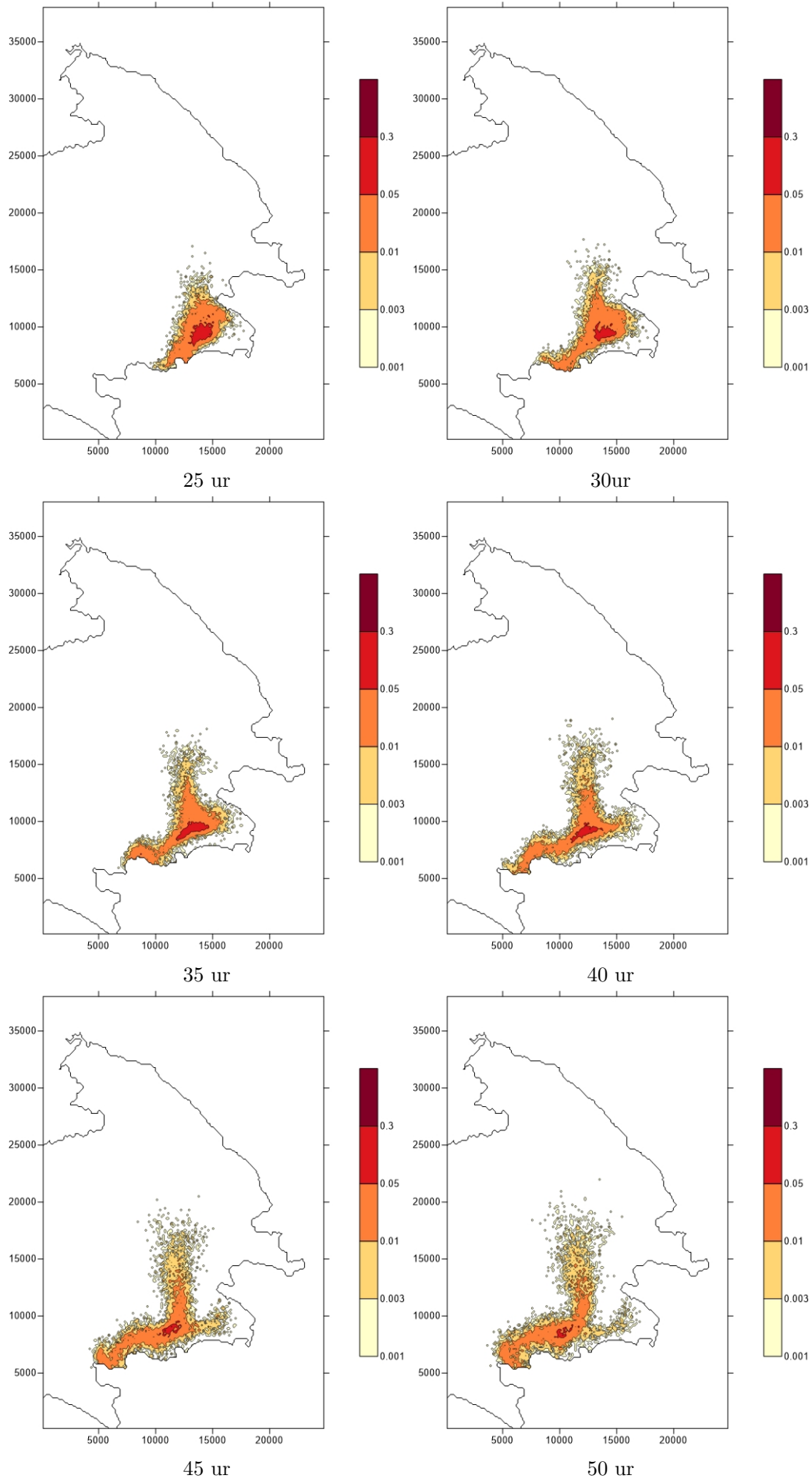
Next

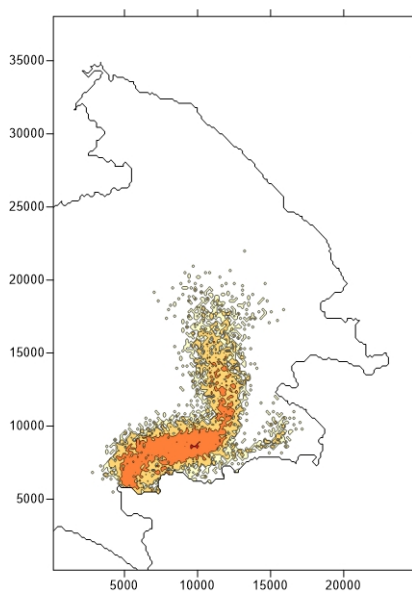
End Sub

PRILOGA B: PRIKAZI KONCENTRACIJ NAFTE

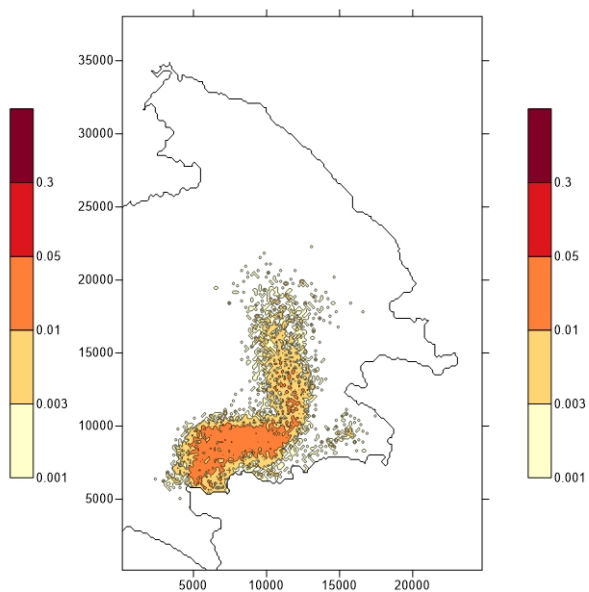
B.1 Tržaški zaliv



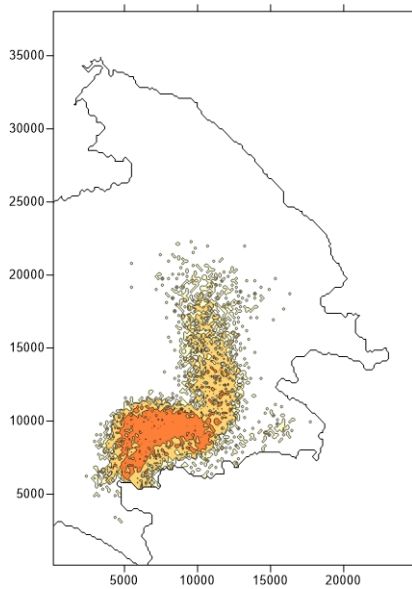




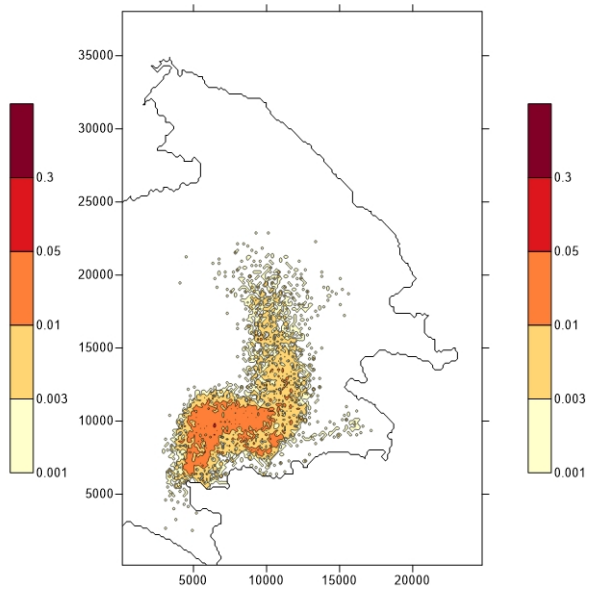
55 ur



60 ur

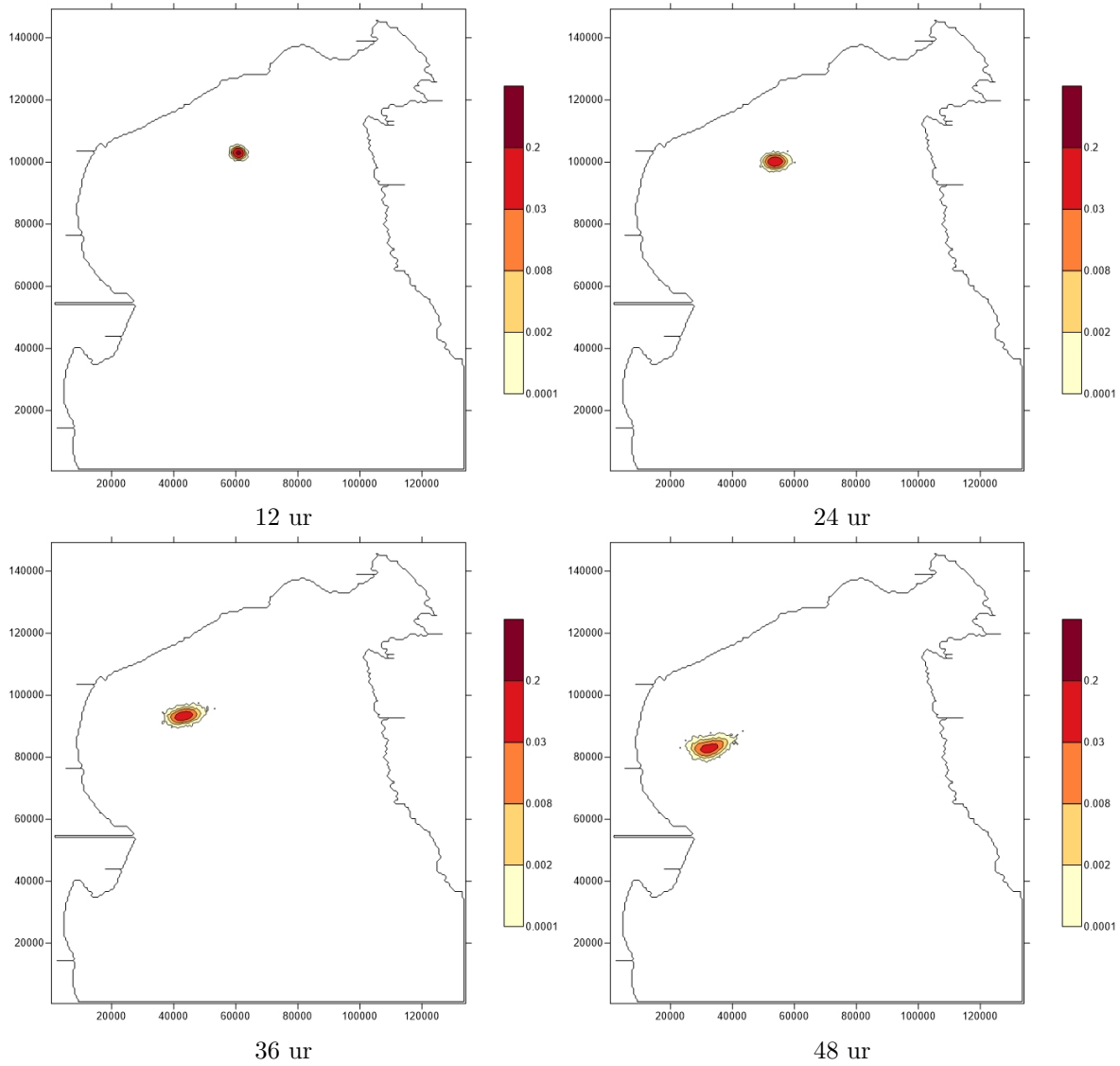


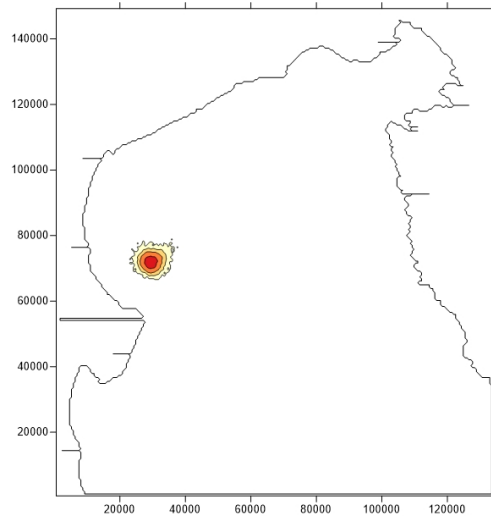
65 ur



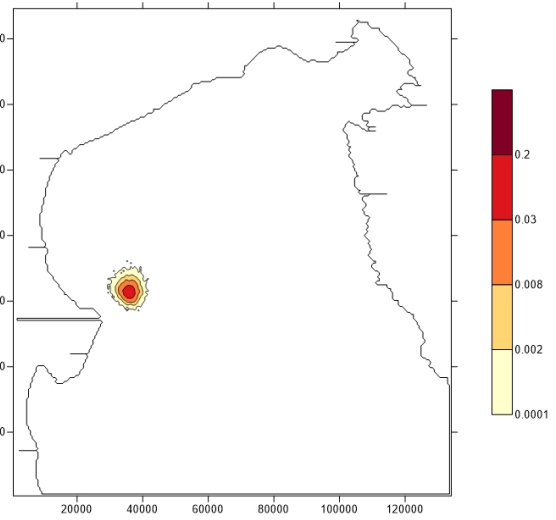
70 ur

B.2 Severni Jadran - januar

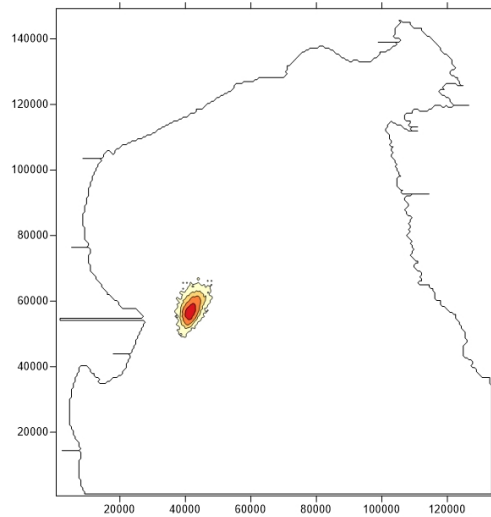




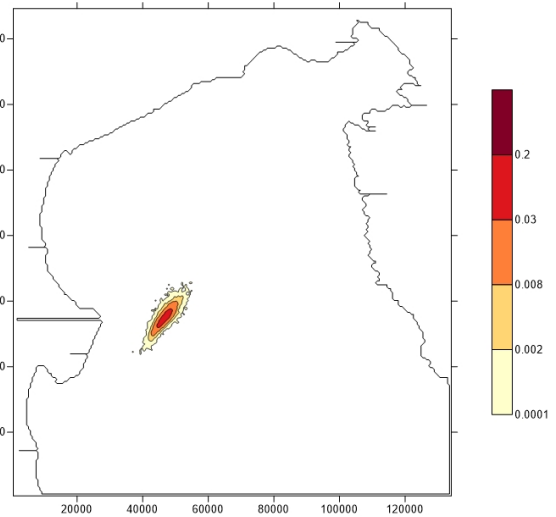
60 ur



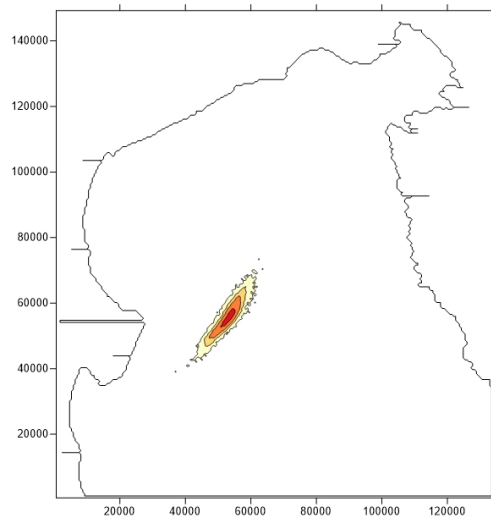
72 ur



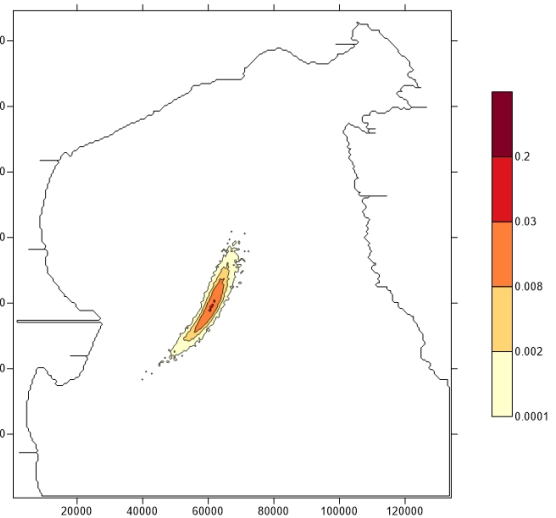
84 ur



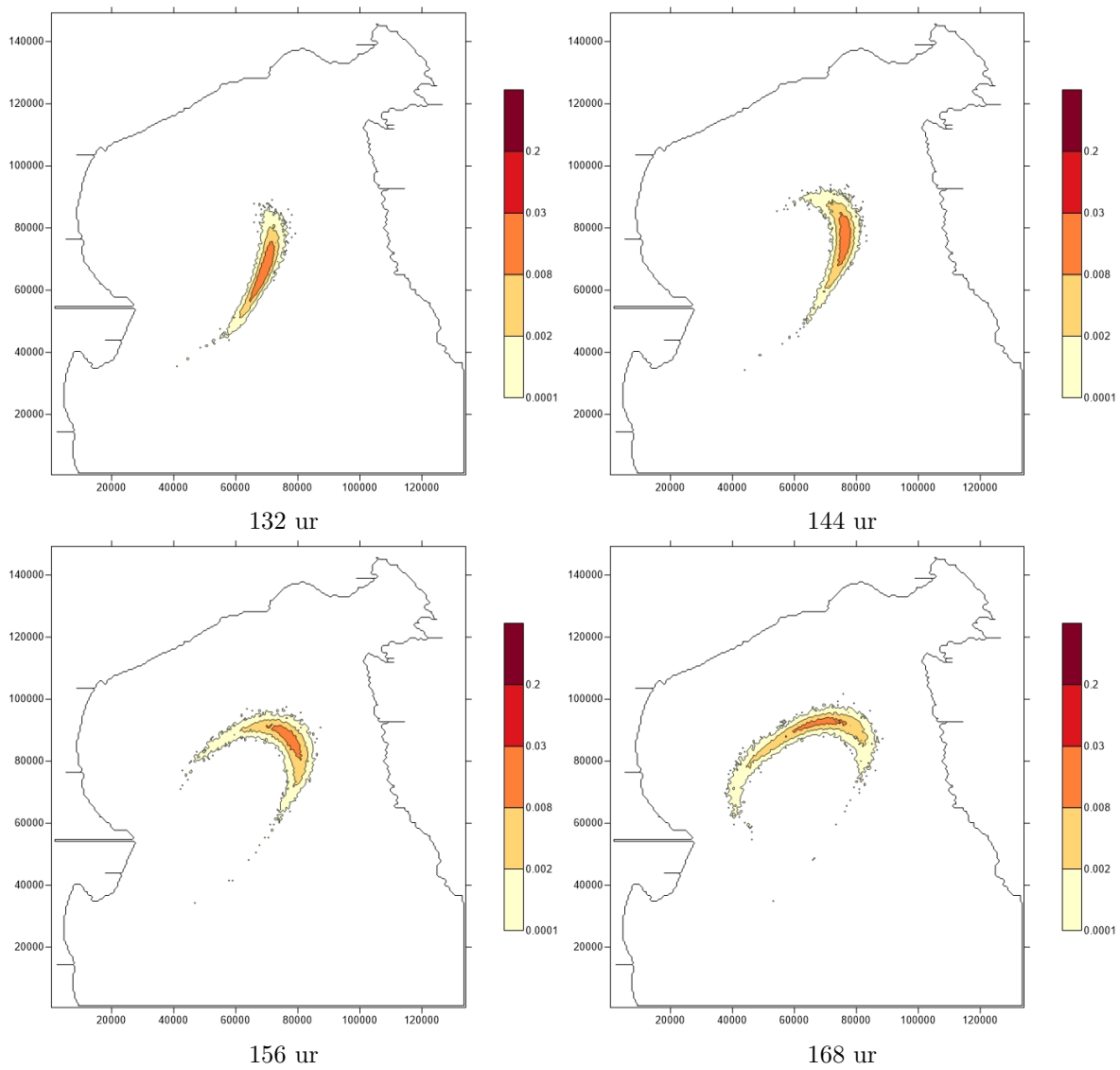
96 ur



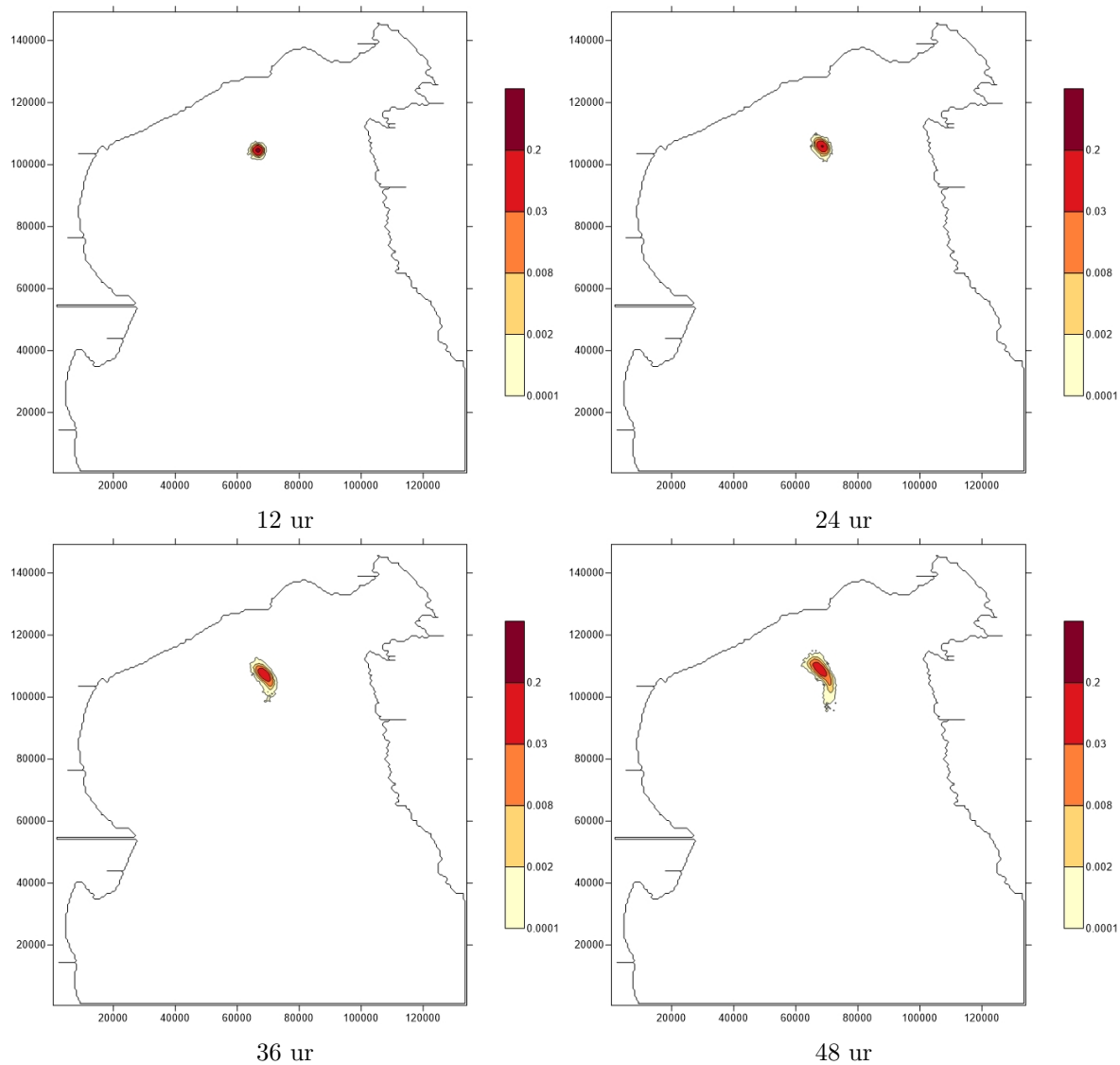
108 ur

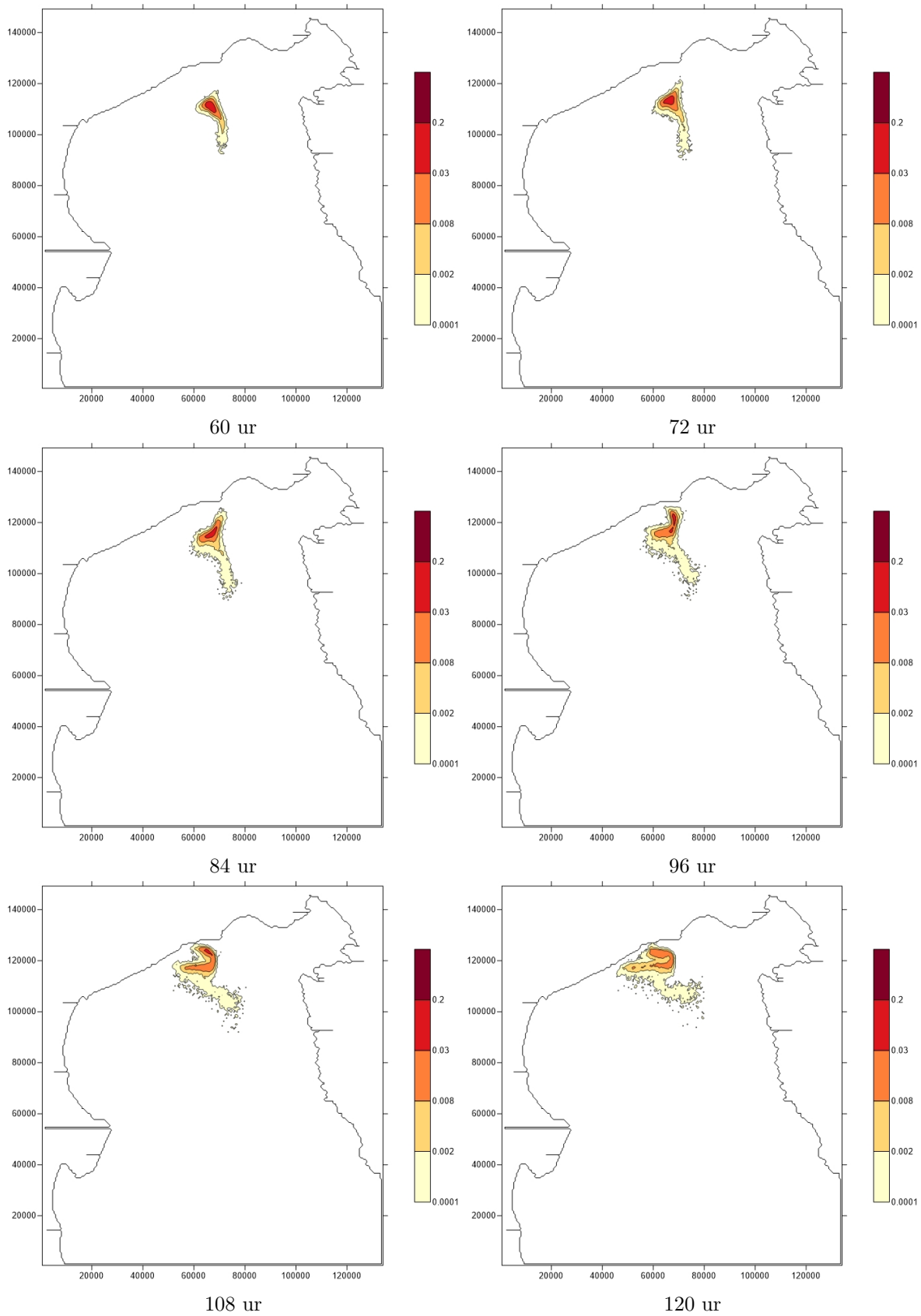


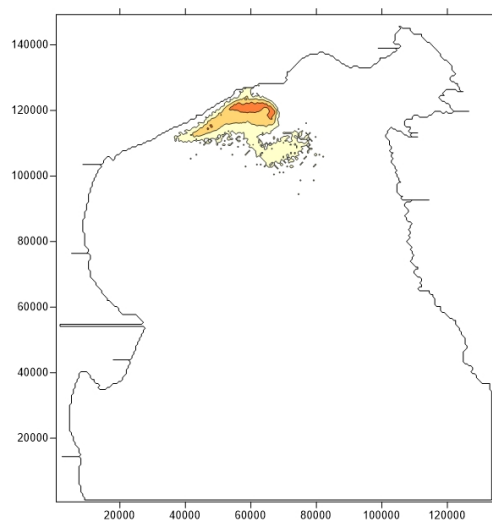
120 ur



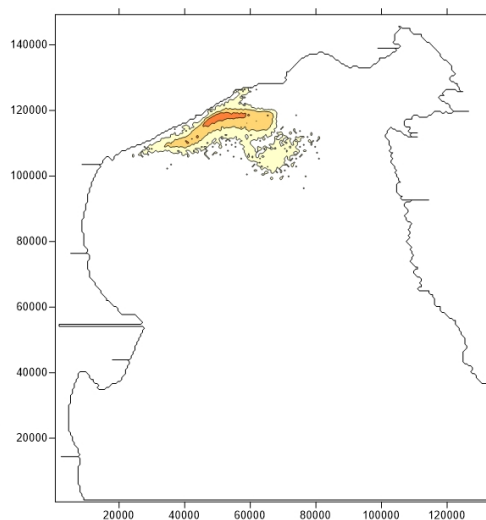
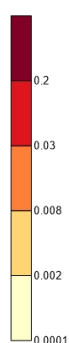
B.3 Severni Jadran - maj



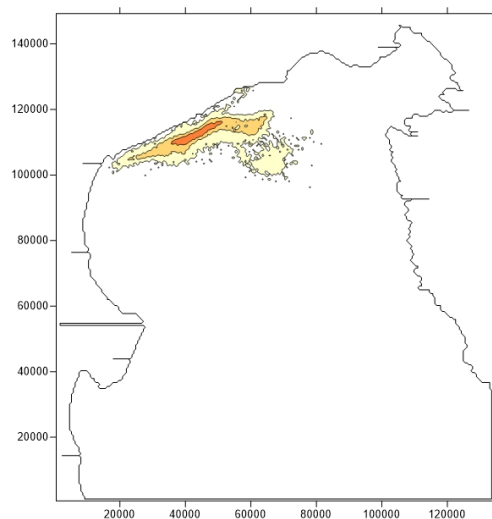
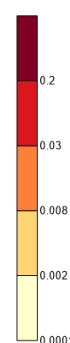




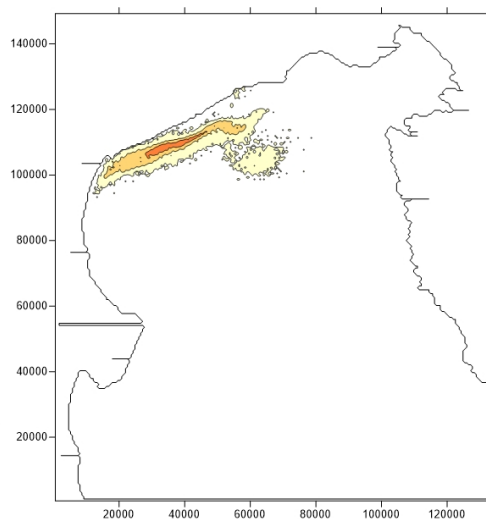
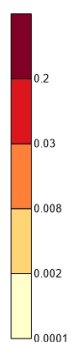
132 ur



144 ur



156 ur



168 ur

