

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/>

V zbirki je izvirna različica izdajatelja.

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

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 a publisher's version PDF file.

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

Ostanek Jurina, T., Šoško, H., Žagar, D. 2014. Primerjava modelov širjenja nafte na morju po metodah trajektorij in koncentracij = Comparison of trajectory and concentration methods in oil spill modelling at sea. Acta hydrotechnica 27, : 43-56.

<ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a46to.pdf>  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5483/>

Datum arhiviranja / Archiving Date: 25-4-2016

UDK/UDC: 504.5:551.35:665.61

Prejeto/Received: 13. 06. 2015

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 18. 08. 2015

## PRIMERJAVA MODELOV ŠIRJENJA NAFTE NA MORJU PO METODAH TRAJEKTORIJ IN KONCENTRACIJ

## COMPARISON OF TRAJECTORY AND CONCENTRATION METHODS IN OIL SPILL MODELLING AT SEA

Tadej Ostanek Jurina<sup>1,\*</sup>, Helena Šoško<sup>1</sup>, Dušan Žagar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

### Izvleček

Razlitij nafte v morskem okolju ni mogoče povsem preprečiti, zato skušamo zmanjševati njihove posledice. V ta namen uporabljamo modele širjenja in razgradnje nafte. Model NAFTA3d deluje na osnovi metode sledenja delcev, rezultati pa so običajno prikazani kot koncentracije nafte ob izbranih časih. Modelu je bil dodan modul, delujoč po metodi trajektorij, s katerim je prikazana verjetnost pojava naftnega madeža na izbrani lokaciji po razlitju. V prvem delu prispevka sta opisani obe metodi in delovanje modela. V drugem delu primerjamo rezultate izračuna koncentracij in metode trajektorij z več simulacijami v Tržaškem zalivu in Severnem Jadranu ter analiziramo uporabnost simulacij s trajektorijami. V tretjem delu 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.

**Ključne besede:** razlitje nafte; model NAFTA3d; metoda sledenja delcev; metoda trajektorij; metoda koncentracij; Tržaški zaliv; Severni Jadran.

### Abstract

Oil spills in the marine environment cannot be entirely prevented. 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 usually presented as oil concentrations at specified times. A new module based on the trajectory method showing the probability of oil slick occurrence at a certain location after a spill was added to the model. The article first describes both methods and functioning of the model. In the second 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. In the third section we describe 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.

---

\* Stik / Correspondence: [tadej.ostanek@gmail.com](mailto:tadej.ostanek@gmail.com)

© Ostanek Jurina T. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Ostanek Jurina T. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence.](#)

**Keywords:** oil spill; NAFTA3d model; particle tracking method; trajectory method; concentration method; Gulf of Trieste; Northern Adriatic.

## 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, njen transport pa je kompleksen proces z več kot desetimi pretovarjanji (Fingas, 2011a).

Tega spremlja nevarnost razlitja, kar je ena najhujših ekoloških in ekonomskih katastrof v morskem okolju. Količina razlite nafte in pogostost razlitij se sicer v zadnjih desetletjih stalno zmanjšujeta, število velikih tankerskih razlitij (>700 ton) se je iz 245 v 70ih letih znižalo na le 35 v celotnem prvem desetletju 21. stoletja (ITOPF, 2015). Skladno s tem se zmanjšuje tudi sprejemljivost tovrstnih nesreč in povečuje pomen njihovega preprečevanja.

Zaradi človeških napak in neizogibne odpovedi opreme v vseh fazah ravnanja z nafto, razlitij nikoli ne bo mogoče povsem preprečiti. Še posebej to velja za manjša razlitja, ki so vse pogostejša in predstavljajo največji delež nesreč. Delovanje je zato usmerjeno tudi v izboljšanje tehnik čiščenja in odpravljanja posledic razlitij (Fingas, 2011a).

Kot podpora takim dejavnostim se je že v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja začel razvoj matematičnih modelov za simuliranje širjenja naftnih madežev, od povsem enostavnega dvodimenzijskega sledenja delcem, pa vse do kompleksnih tridimenzijskih modelov, ki upoštevajo tudi učinke razgradnje nafte (Reed et al., 1999). Modeli lahko zajamejo celo vpliv intervencij 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).

Tudi na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani 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) v model SIMON, ki je vključeval tudi nekatere pomembnejše procese razgradnje nafte in možnost modeliranja bodisi v taktičnem ali prognostičnem načinu. Pri prvem simuliramo širjenje nafte v realnem času ob dejanskem razlitju, pri drugem pa za potrebe predhodnega načrtovanja preverjamo verjetne situacije. Rezultate modela prikažemo kot koncentracije nafte ob določenih 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 Morsko biološko postajo Nacionalnega inštituta za biologijo 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. Najnovejša nadgradnja je uporaba modela NAFTA3d za izračun trajektorij in verjetnosti pojava naftnega madeža namesto koncentracij (Šoško, 2012), ki jo prikazujemo tudi v tem članku.

Prednost modeliranja z metodo trajektorij, ki jo je predstavila Šoško (2012), je bistveno večja hitrost izračuna kot pri računu koncentracij. Poleg tega lahko dober prikaz predvidene poti madeža 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 ogrožena (Fingas, 2011b). Drugačna je tudi končna vizualizacija podatkov, saj namesto madeža v točno določenem času prikazuje pot, ki jo ta prepotuje skozi celotno simulacijo, porazdelitev naftnih 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

razlitja največja, kot tista, kjer je verjetnost pojava madeža majhna, ranljivost pa velika (Ostaneek Jurina, 2015). Na slovenski obali so zelo ranljiva območja na primer Sečoveljske soline, izliv Drnice, Naravni rezervat Strunjan in Stjuža, obala Fiese, močvirje pri naselju Sv. Katarina in obale ob Debelem Rtiču (Bosnič, 2014). Z nekaj modifikacijami lahko z metodo trajektorij upoštevamo tudi nezanesljivost vhodnih podatkov, kar je natančneje prikazano v Ostaneek Jurina (2015).

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 pri katerih pogojih, pristop po metodi trajektorij nadomesti metodo koncentracij. V ta namen smo metodi primerjali na domenah Tržaškega zaliva in Severnega Jadrana v različnih meteoroloških in cirkulacijskih razmerah, s prevladujočim vplivom bodisi advekcije ali difuzije. Za primerjavo smo izbrali ta dva parametra, saj gre za najbolj pomembna procesa pri taktičnem modeliranju (Žagar et al., 2012). Cilj je bil raziskati in prikazati prednosti novega modela in osnovati dobre temelje za njegov nadaljnji razvoj.

## 2. Metode

Uporabljen transportno-disperzijski in biokemijski 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 ni interakcije. Vsak delec ima predpisane lastnosti – maso, gostoto, viskoznost itd. Gibanje delca je posledica advekcije in turbulentne difuzije. Adveksijske hitrosti dobimo iz rezultatov hidrodinamičnega modela na mejah med kontrolnimi volumni, 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 (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 Morski biološki postaji Nacionalnega inštituta za biologijo. Modela na podlagi merjenih meteoroloških parametrov, robnih in začetnih pogojev, pridobljenih iz večjih domen ter drugih meteoroloških, hidroloških in oceanografskih modelov, v katerih sta enostransko gnezdena, izračunata tokove, anomalijo morske gladine in porazdelitev slanosti ter temperature (Ličer et al., 2012; Malačič et al., 2012).

NAPOM sestavlja pravokotna horizontalna mreža z 232×248 kvadratnimi 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  $\sigma$ -slojev. Resolucija programa NAFTA3d je v horizontalni smeri enaka, v vertikalni pa slednji uporablja  $z$ -koordinate, zato je potrebno z vmesnikom prilagoditi hitrostna polja (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. Ker so hitrostna polja tekom izvedenih simulacij z modelom NAFTA3d časovno spremenljiva, jih v prispevku grafično ne prikazujemo. Zaradi boljšega razumevanja so cirkulacijske slike kratko opisane v nadaljevanju. 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. Ena od prednostnih nadgradenj modela NAFTA3d je prav možnost izračuna in uporabe spremenljivih koeficientov turbulentne difuzije v horizontalni in vertikalni smeri (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 in pravokotno na advekcijo (longitudinalno in transverzalno). Difuzijsko hitrost izračunamo po enačbah (1),(2) in (3) (Žagar in Četina, 2011):

$$u_L = r_1 \sqrt{2D_h / \Delta t} \quad (1)$$

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

$$w = r_3 \sqrt{2D_v / \Delta t} \quad (3)$$

$\Delta t$  označuje časovni korak,  $r_{1,2,3}$  pa so normalno porazdeljena naključna števila s pričakovano vrednostjo, izračunano po enačbi (4) v vertikalni smeri in 0 v horizontalni, ter standardno deviacijo 1. Pridobljena so z generatorjem psevdo-naključnih števil, ki je bil prav za potrebe metode trajektorij izboljššan. V originalnem 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()* in Box-Mullerjevega algoritma (Box in Muller, 1958) program generira posamezna normalno porazdeljena naključna števila. V primeru vertikalne difuzije je v enačbi upoštevan še vzgon, tako da je srednja vrednost naključnih števil določena po enačbi (4) (Žagar et al., 2011):

$$M_{r_3} = \frac{(\rho_{vode} - \rho_{nafte})}{\rho_{vode}} \quad (4)$$

Dobljeno zaporedje je sicer le na videz naključno, saj računalnik brez uporabe naravnih pojavov prave naključnosti ni sposoben generirati (Gentle, 2003). Ima pa dovolj veliko periodo ponovitve, da se števila znotraj ene simulacije ne ponavljajo, in je zaporedje drugačno za vsak vnovičen zagon programa, razen če ga uporabimo ob natančno istem času. Izjema je 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, in števila 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 podrobno opisani v literaturi (Žagar, 1994; Betancourt et al., 2005; Lehr et al., 2002; Reed et al., 1999; ASCE, 1996). Gibanje madeža 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 trenutnega modela trajektorij je 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). 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. Delci, na katere deluje manjši vzgon, zaradi turbulence potonejo, z globino pa hitrosti upadajo, spreminjajo smer zaradi vpliva Coriolisove sile, v primeru izrazitih kompenzacijskih tokov pa so lahko pri dnu usmerjene popolnoma drugače kot na gladini. Ko nekatere delce turbulenca kasneje dvigne nazaj na površino, madež dobi značilen »rep« (Žagar, 1994).

Za račun izhlapevanja nafte je uporabljena Mackay-eva enačba (Mackay et al., 1980). Izhlapevanje je tako funkcija temperature zraka, hitrosti vetra in površine madeža. 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. Z modelom lahko upoštevamo še dolgoročne procese emulzifikacije, disperzije v vodnem stolpcu, sprememb gostote, mešanja s sedimentom in biodegradacije, vendar izračunamo le količino nafte podvržene tem procesom, ne pa tudi prostorske razporeditve (Žagar et al., 2012). Pri taktičnem načinu modeliranja so ti procesi manj pomembni, zato jim v raziskavi nismo posvečali velike pozornosti.

Končni rezultat oz. prikaz rezultatov modela NAFTA3d so bile doslej 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.

Pri drugem načinu pa smo koncentracije izračunali v celotnem vodnem stolpcu, dobljene vrednosti normalizirali na globino morja, saj bi sicer v globljih delih računskega območja pri enaki količini nafte dobili manjše koncentracije. 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 v končni fazi grafično prikažemo z uporabo ustreznega programa, npr. Matlab, Surfer, ipd.

Prikaz rezultatov po metodi trajektorij poteka nekoliko drugače. V splošnem je trajektorija krivulja, ki opiše pot, ki jo opravi posamezen delec v opazovanem času. Tudi pri modeliranju razlitja nafte po metodi trajektorij nas zanima pot, ki jo prepotuje nafta, opisana z delcem, le da ne opazujemo več stanja v določenem času, kot pri računu koncentracij, temveč celotno simulacijo naenkrat. Izhodni podatki modela NAFTA3d so 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 mrežama uporabljenih modelov (NAPOM ali TSPOM in NAFTA3d).

Za vsak delec posebej program 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 potekajo. Pri tem opazujemo le, ali posamezna trajektorija celico prečka ali ne, čas zadrževanja delca v celici pa ni pomemben (Šoško, 2012). Rezultat modela so tako deleži (v odstotkih) za vsako računsko celico tekom celotne simulacije. Uporabno vrednost dobijo rezultati z grafičnim prikazom.

Interpretacija je drugačna kot pri koncentracijah, saj tu posamezni delci ne predstavljajo več majhnega dela madeža, temveč vsak svoj madež, ki se zaradi naključne turbulentne difuzije, ki je v metodi sledenja delcev upoštevana s stohastično komponento, giblje nekoliko drugače od ostalih. Izračunani deleži tako predstavljajo verjetnost pojava madeža na lokaciji celice v celotnem času

simuliranega razlitja (AMEC, 2010; Simecek-Beatty, 2011). Zanesljivost rezultata 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).

Za metodo trajektorij je pravilna izbira časovnega koraka računa bistveno pomembnejša kot pri metodi koncentracij. Premajhen časovni korak račun močno podaljša brez izboljšanja rezultatov, saj daljše zadrževanje delca v celici nima vpliva na potek trajektorij. Predvsem pa časovni korak ne sme biti prevelik, saj v tem primeru delec med simulacijo nekatere celice »preskoči« (če je pot, ki jo opravi v časovnem koraku, večja od dimenzij celice). Rezultat so v tem primeru prekinjene trajektorije, ki nimajo fizikalnega smisla, verjetnosti v problematičnih celicah pa so premajhne. Korak je torej potrebno določiti v odvisnosti od hitrosti potovanja delcev in dimenzij računske mreže tako, da delec ne more preskočiti nobene od sosednjih osmih celic. Največja razdalja, ki jo delec v časovnem koraku lahko prepotuje, sme torej biti ravno najmanjša dimenzija računske celice (Šoško, 2012).

Opisani način modeliranja trajektorij je nekajkrat hitrejši od računanja koncentracij, saj operira le s koordinatami delcev nafte, uporabne rezultate pa dobimo že z uporabo za red velikosti manjšega števila 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 prikaz le en, rezultat je tako veliko bolj pregleden, pot madeža pa takoj razvidna. Lahko pa se pri tem izgubi del informacij o času in gibanju naftnega madeža. Primerjalne prednosti in slabosti so opisane v nadaljevanju.

Za uspešno primerjavo metod je bilo potrebno poenotiti še grafični izpis. 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 tudi rezultate koncentracij zapiše v ustrezni obliki. Prednost orodja Surfer 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). S ciljem hitrejše uporabe in manjše možnosti napake smo izdelavo kart avtomatizirali, seveda pa ostaja možnost ročnih nastavitvev parametrov.

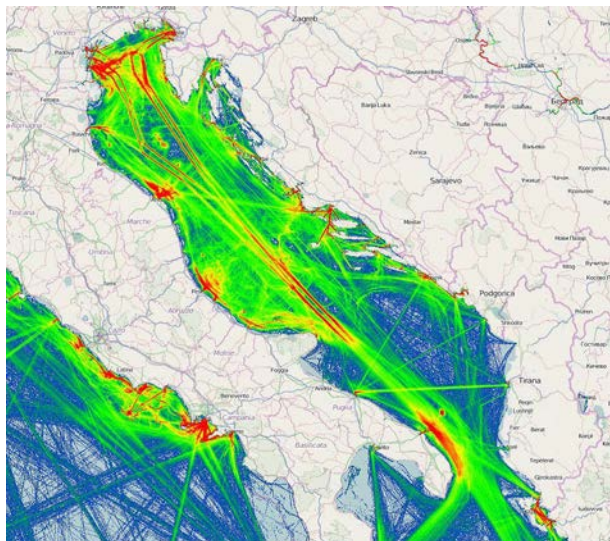
Metodo trajektorij je Šoško (2012) že preizkusila na domeni Tržaškega zaliva, vendar primerjava z izračunom koncentracij ni bila izvedena, zato smo simulacijo ponovili. Bolj obsežno pa smo metodi primerjali na domeni Severnega Jadrana, saj smo imeli poleg poteka plovni poti, ki je omogočil izbiro možnih točk, kjer je večja verjetnost razlitij (slika 1), na razpolago celoletne podatke o cirkulaciji, in tako možnost primerjave v različnih razmerah.

V Tržaškem zalivu smo tako ponovili simulacijo točkovnega razlitja pred Koprskim zalivom na lokaciji  $\varphi = 45,55^\circ$ ,  $\lambda = 13,7^\circ$  na površini morja (slika 2). Hidrodinamične vhodne podatke 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  $1027 \text{ kg/m}^3$  in temperaturo na gladini  $17^\circ\text{C}$ . 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 plovni poti, predvsem zaradi ozkih koridorjev in usmerjenega prometa (slika 1). Za lokacijo razlitja smo zato izbrali vozlišče pomorskih poti v Tržaško, Koprsko in italijanska pristanišča, ki smo jo razbrali iz objave Mesarić et al. (2015). Izbrano mesto ima koordinate  $\varphi = 45,4^\circ$ ,



$\lambda = 13,0^\circ$  (sliki 4 in 6). Tako smo v izračunih uporabili dejansko potencialno območje razlitja, ki je tudi dovolj oddaljeno od obale, da smo vplive stika nafte z obalo lahko izločili iz prve primerjave.



**Slika 1:** Plovne poti v Jadranskem morju, podatki za drugo polovico leta 2013 (Mesarić et al., 2015). Rdeča barva prikazuje območja z gostejšim prometom.

**Figure 1:** Maritime transport routes in the Adriatic Sea for the second half of year 2013 (Mesarić et al., 2015). Red colour depicts heavier traffic.

Na 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 se v Severnem Jadranu vzpostavi gibanje vode v obliki ciklonalno-anticiklonalega sistema dveh vrtincev, razlitje pa se nahaja na lokaciji ciklonalnega vrtinca. V drugem obdobju zaradi spremenljivih šibkih vetrov jasnega cirkulacijskega vzorca ni. Ob severni jadranski obali je prisoten nekoliko močnejši zahodni tok,

hitrosti se v geografski širini Benetk zmanjšajo. Neposredno v bližini razlitja je bilo tokovanje v simuliranem obdobju zelo šibko, v širši okolici pa se tekom simulacije pojavljajo lokalni vrtinci.

Simulirani razlitji sta trajali 7 dni, časovni korak računa pa 160 sekund v primeru močnejših tokov in vetrov ter 240 s v mirnejših razmerah. 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.

### 3. Rezultati

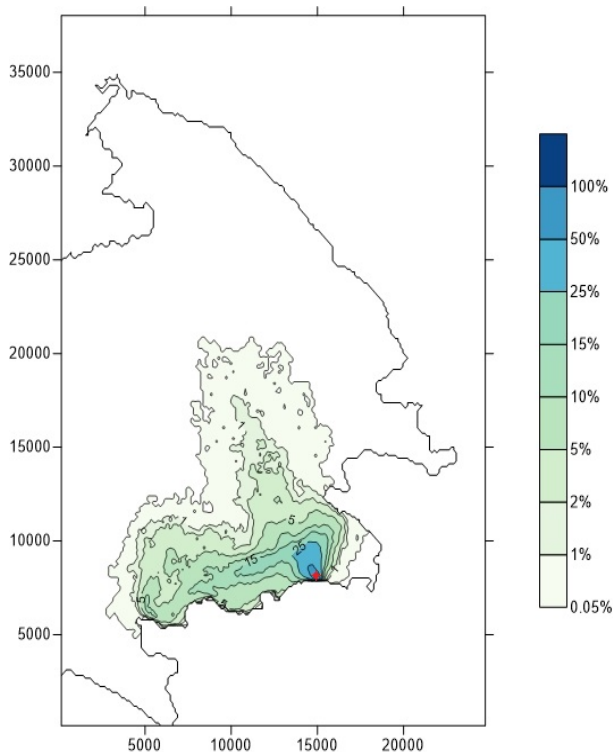
Prikaz rezultatov in njihova analiza sta izvedena na kartah z ovojnici koncentracij in verjetnosti pojava madeža pri pogoju razlitja na izbranih lokacijah. Lestvica pri prikazu trajektorij je približno povzeta po AMEC (2010), vendar z ustreznimi modifikacijami, saj gre za nekoliko drugačen tip simulacij. Barvna lestvica koncentracij se razlikuje med simulacijami, ne pa tudi med posameznimi koraki izrisa. Prilagojena je čim večji preglednosti rezultatov, ki je sicer otežena zaradi hitrega pojemanja koncentracij tekom posamezne simulacije.

Izračun koncentracij smo sicer 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 zgolj površinskega sloja zaradi hitrejših sprememb manj pregledne. Značilni pojavi na površini, kot npr. rep zaradi strižne difuzije, so opazni le proti koncu simulacij, za primerjavo pa niso pomembni. V nadaljevanju so tako vse koncentracije izražene v  $kg/m^2$ . Brez upoštevanja izhlapevanja je glavni generator zmanjševanja koncentracij in verjetnosti difuzija (turbulentna in strižna). Slike 2, 4 in 6 jasno prikazujejo zmanjševanje verjetnosti prehoda delcev 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 kar najverjetnejšo lokacijo madeža.

### 3.1 Tržaški zaliv

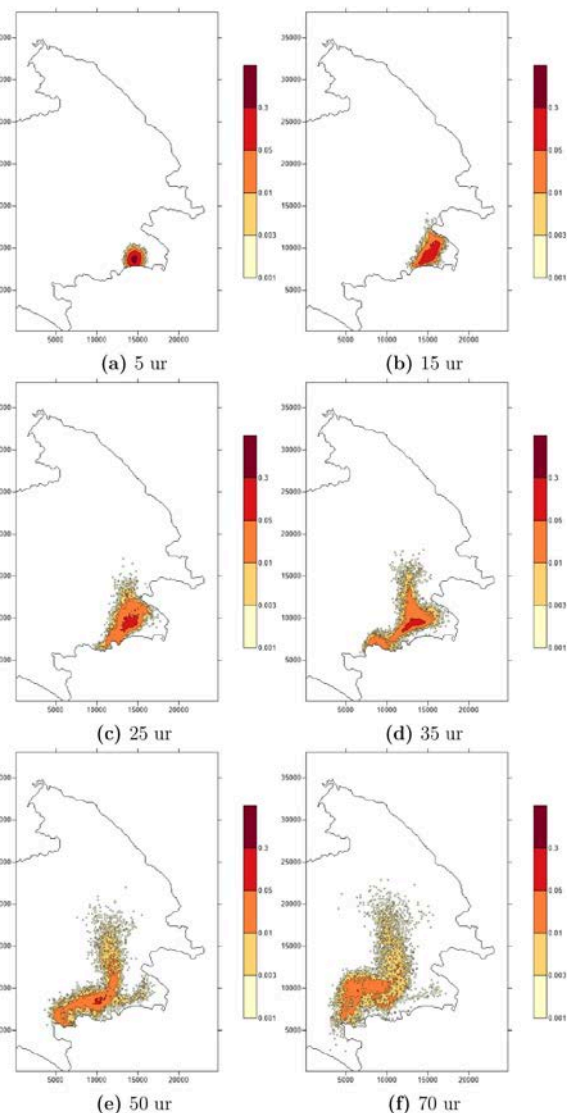


**Slika 2:** Verjetnosti pojava naftnega madeža pri razlitju v bližini koprskega pristanišča med 19. in 21. 3. 2009, pridobljene po metodi trajektorij. Mesto razlitja je označeno z rdečo.

**Figure 2:** Oil slick occurrence probabilities for the spill near the Port of Koper between 19 and 21 March 2009, obtained with the trajectory method. Spill location is marked in red.

Slika 2 prikazuje verjetnosti pojava madeža v Tržaškem zalivu, izračunane po metodi trajektorij. Prva, najpomembnejša informacija je doseg razlitja oziroma potencialno ogrožena območja. Razvidna je takoj, brez potrebe po natančnem poznavanju delovanja metode ali poglobljanju v obliko ovojníc verjetnosti. 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 možnost širjenja proti

središču Tržaškega zaliva, hrvaška in italijanska obala pa nista ogroženi.



**Slika 3:** Koncentracije nafte pri razlitju v Tržaškem zalivu med 19. in 21. 3. 2009 ob značilnih časih ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ).

**Figure 3:** Oil concentrations in the Gulf of Trieste spill between 19 and 21 March 2009 at representative time intervals ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ).

Iz oblike kontur na sliki 2 pa lahko razberemo več kot le obseg ogroženega območja. Jasno je razvidna dominantna smer gibanja središča oziroma najgostejšega dela madeža pod prevladujočim vplivom advekcije, ki je posledica predvsem vetrov. V začetku se zaradi juga giblje proti severovzhodu, nato z burjo proti jugozahodu, ob koncu simulacije pa se spet obrne proti severu.

Iz široke zadnje ovojnice na severnem delu madeža lahko sklepamo na prevladujoč vpliv difuzije na gibanje v tej smeri. Zaradi kratkega trajanja simulacije bi moral dejanski madež zavzeti podobno obliko, z izjemo začetnega dela v bližini razlitja.

Primerjava s kartami koncentracij potrjuje zgoraj izpeljane ocene oziroma interpretacijo (slika 3). Glavnina madeža se giblje skladno z interpretacijo metode trajektorij. Po 15 urah spremeni smer gibanja (slika 3b), po 25 urah pa je že razvidno gibanje v dveh smereh (slika 3c). Madež dobi obliko črke T (slika 3d), s premikanjem proti zahodu pa desni krak počasi izginja (slika 3e). Glavnina nafte se po 50 urah še nahaja na sredini poti, skrajni položaj, ki je blizu zahodnemu robu kontur verjetnosti, prikazanih na sliki 2, pa doseže šele v zadnjih izrisih (sliki 3e in 3f). Prvi delci Strunjanski zaliv dosežejo po 40 urah, nato pa napredujejo zelo počasi, razdalja med njimi in glavnino madeža pa se manjša, česar iz karte verjetnosti nismo mogli oceniti.

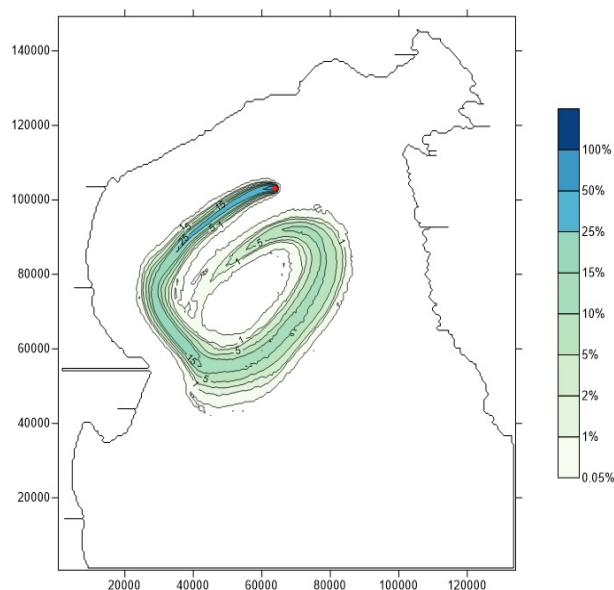
Z metodo trajektorij smo lahko ustrezno opisali območje, ki ga delci dosežejo. Zanimarjiva odstopanja so posledica naključnosti turbulentne difuzije in različnega števila delcev. Določitev gibanja madeža tako v dominantni kot sekundarni smeri ni težavna, oblika kontur večjih verjetnosti sovpada z gibanjem najgostejšega dela. 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, kar je potrebno upoštevati pri interpretaciji rezultatov.

### 3.2 Severni Jadran

V Severnem Jadranu smo pristopa primerjali z več simulacijami. Januarska simulacija z metodo trajektorij pod vplivom močnih vetrov je prikazana na sliki 4. Zaradi močne advekcije in manjšega merila je pot nafte še lažje določljiva, ta zakroži ciklonalno skladno z gibanjem vodnih mas na območju razlitja.

Konture so do geografske širine izliva reke Pad zelo blizu skupaj, zaradi velike advekcijske hitrosti

in majhnega vpliva difuzije. Na tem mestu se trajektorije razširijo. Iz kontur večjih verjetnosti je razvidno, da glavnina madeža ostane zgoščena prečno na smer gibanja skozi celotno simulacijo. Oblika kontur ob poznavanju cirkulacije nakazuje na veliko razpotegnjenost madeža vzdolž smeri gibanja. Ob koncu simulacije nekateri delci zadenejo pot, ki jo je madež že opisal. Tudi če bi razlitje opazovali dlje časa, v območju, kjer se delci pojavijo dvakrat ne bi dobili višjih verjetnosti in popačene slike, saj modul prisotnost delca v celici upošteva le enkrat.

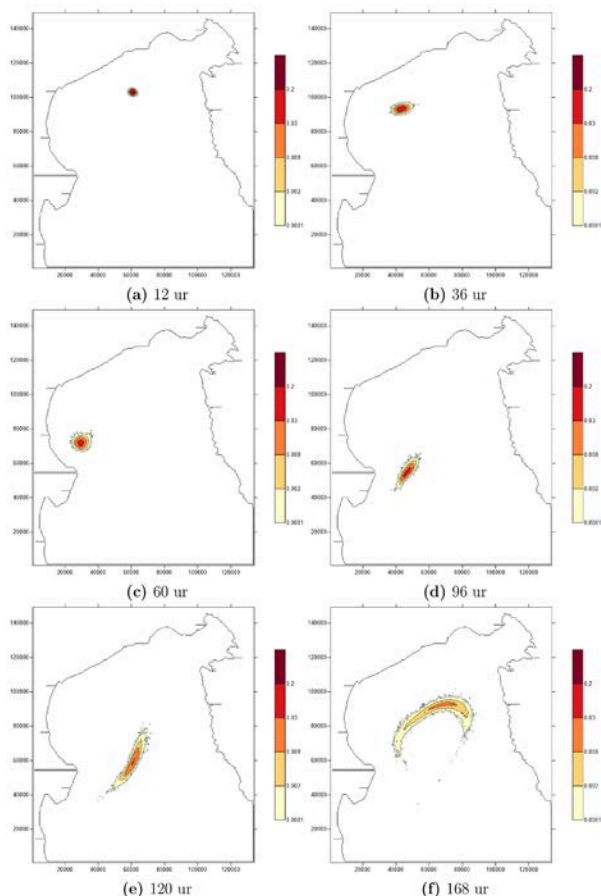


**Slika 4:** Verjetnost pojava naftnega madeža pri razlitju v Severnem Jadranu med 28. 1. in 5. 2. 2012 ob prisotnosti močne burje. Mesto razlitja je označeno z rdečo.

**Figure 4:** Oil slick occurrence probability in the northern Adriatic spill between 28 January and 5 February 2012 in the presence of strong bora wind. Spill location is marked in red.

Tudi v tem primeru izris koncentracij (slika 5) potrjuje interpretacijo metode trajektorij. Geografsko širino izliva Pada madež doseže tretji dan (slika 5c), do takrat obdrži skoraj okroglo obliko, širi se le zaradi turbulentne difuzije. Tu se gibanje upočasni in spremeni smer. Madež dobi drugačen obris, začne se razširjanje vzdolž smeri gibanja (slika 5d). Širjenje je vse izrazitejše, dokler po tednu dni madež ne zavzame velike površine, ki jo določa tokovanje v tem obdobju (slika 5f).

Drugo simulacijo smo izvedli za mirnejše razmere konec maja 2012. Slika 6 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 do 2 % za posamezen kontrolni volumen. Iz karte je tako mogoče takoj razbrati, da je mesto ogroženo in načrtovati ustrezne ukrepe.



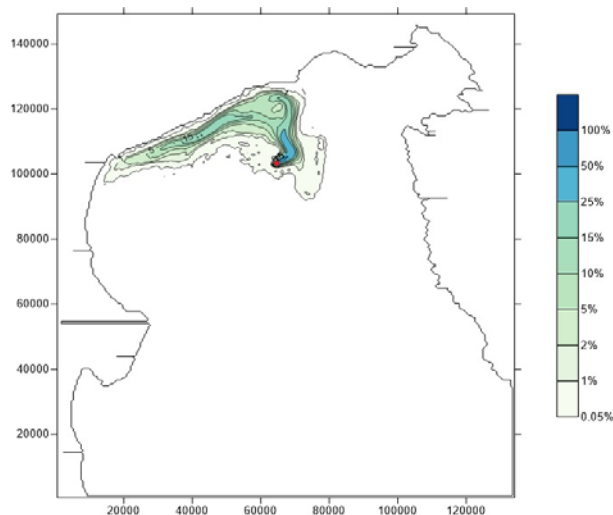
**Slika 5:** Koncentracije nafte pri razlitju v Severnem Jadranu med 28. 1. in 5. 2. 2012 ob značilnih časih ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ).

**Figure 5:** Oil concentrations in the northern Adriatic spill between 28 January and 5 February 2012 at representative time intervals ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ).

Vpliv difuzije v smeri gibanja ni močan, opazen pa je v okolici točke razlitja, kjer je zadnja kontura zelo široka. Iz tega lahko sklepamo na daljše zadrževanje dela nafte v okolici razlitja. Presenetljivo pa se vzdolž poti ovojnice zožijo, verjetnosti pa za kratek čas celo povečajo, kar

nakazuje na pojav tokov, ki zberejo in usmerijo razpršene delce.

Gibanje madeža je iz slike 6 razvidno, čeprav predvsem v začetnem delu nekoliko težje določljivo. Madež se očitno razdeli na dva dela, večina delcev se giblje proti severu, ostali proti severozahodu. Verjetnosti so kmalu precej majhne, ob ponovni združitvi pa spet narastejo. Tudi v tem primeru lahko sklepamo na razvlečenost madeža vzdolž osi gibanja, saj so na zahodnem robu ovojnice med seboj bolj razmaknjene, kar nakazuje, da glavnina madeža tega območja še ni dosegla.



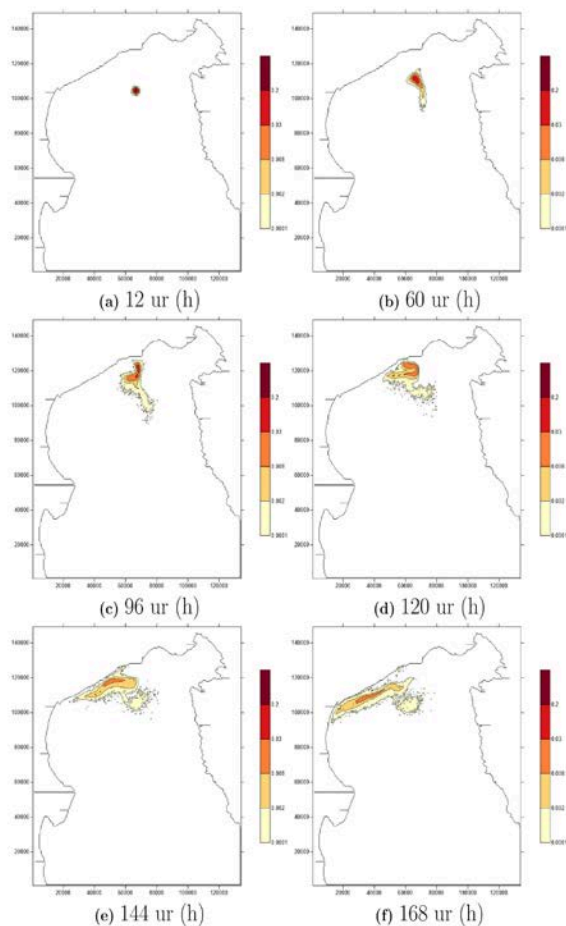
**Slika 6:** Verjetnost pojava naftnega madeža pri razlitju v Severnem Jadranu med 25. 5. in 2. 6. 2012 v mirnem morju. Mesto razlitja je označeno z rdečo.

**Figure 6:** Oil slick occurrence probability in the northern Adriatic spill between 25 May and 2 June 2012 in calm sea conditions. Spill location is marked in red.

Ovojnice koncentracij (Slika 7) natančneje prikazujejo časovni potek gibanja madeža. V začetku se ta na mestu počasi razleže na dva dela, glavnina proti severu, ostalo proti jugu (slika 7b). Po štirih dneh severni del prispe v območje močnejšega toka in se ponovno razdeli, del se usmeri proti zahodu, del proti severu. Slednji prvi zadene obalo (slika 7c). Oba kraka se nato s tokom gibljeta proti zahodu (slika 7d), šesti dan pa se združita (slika 7e). Obalo v bližini Benetk madež doseže v

zadnjem dnevu simulacije (slika 7f). Nafta, ki se v začetku širi proti jugu, ves čas simulacije ostane v okolici razlitja. Njeno gibanje je v nadaljevanju predvsem posledica turbulentne difuzije.

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 podvrženo naključnosti, relativni vpliv turbulentne difuzije je manjši. Spoznanja glede odstopanj, gibanja in difuzije so enaka kot pri simulaciji v Tržaškem zalivu, zato jih ne bomo ponavljali. Zaradi večje domene je viden vpliv turbulentne difuzije manjši tudi pri šibki cirkulaciji, karte pa so lažje berljive.



**Slika 7:** Koncentracije nafte pri razlitju v Severnem Jadranu med 25. 5. in 2. 6. 2012 ob značilnih časih ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ).

**Figure 7:** Oil concentrations in the northern Adriatic spill between 25 May and 2 June 2012 at representative time intervals ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ).

#### 4. 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 razmerah. Konture verjetnosti 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. To je največja prednost metode trajektorij in osnovni argument za njeno uporabo.

Pokazali smo tudi, da lahko iz rezultatov metode trajektorij do neke mere 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, številni detajli oblike madeža 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 prepreči, da bi se pojav madeža na kakšnem območju izgubil zaradi preredkega diskretnega časovnega izpisa koncentracij.

Poleg primernosti metode v različne namene smo določili še njene prednosti in slabosti v primerjavi z izračunom koncentracij.

##### Pozitivne lastnosti so predvsem:

- Hiter pregled celotnega ogroženega območja v opazovanem časovnem okviru.
- Prikaz na eni sami karti, kar zmanjša možnost napak in izgube informacij.
- Veliko krajši računski čas simulacij, tudi zato, ker je potrebno manjše število delcev.
- Krajši in enostavnejši izris karte z ovojniciami. Pri metodi koncentracij je izrisov veliko, zato je brez prilagojene avtomatizacije njihova izdelava zamudna.
- Za prikaz koncentracij moramo izbrati neenotno barvno lestvico, ali enotno, vendar slabše



pregledno. Slednja je že v splošnem slabša, lestvico pa je potrebno ponovno definirati za vsako razlитоje.

- Prikaz verjetnosti prepreči zmotno predstavo o deterministični naravi simulacije, bolje posreduje možnost napake. Nizka koncentracija se lahko zdi zanemarljiva, majhna verjetnost pa vseeno izrazi realno nevarnost.

- Omogoča identifikacijo območij, kjer je glavni mehanizem širjenja turbulentna difuzija, interpretacija pa je tam manj zanesljiva.

#### **Ugotovljene slabosti metode trajektorij so:**

- 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.

- Informacije o gibanju madeža so manj natančne, še posebej pri prevladujočem vplivu turbulentne difuzije.

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 običajni prikaz rezultatov metode sledenja delcev z izrisom koncentracij. V splošnem predlagamo, da se pri odzivu na razlitoje vedno najprej izvede račun po metodi trajektorij, ki uporabniku poda strnjen prikaz dogajanja z ogroženimi območji, ki že omogoča prvo načrtovanje odziva. Nato 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).

Poleg takojšnje aplikacije metoda ponuja vznemirljive možnosti za nadaljnji razvoj tako prognostičnega kot taktičnega načina modeliranja. Za prvega bi zadostovala že manjša modifikacija

modela, a bi, glede na izvedene simulacije drugih avtorjev (AMEC, 2010; Chang et al., 2011), potrebovali meteorološke in oceanografske podatke za čim daljše obdobje (vsaj 5 let), pri čemer njihova časovna in prostorska resolucija ni ključnega pomena. Tako bi lahko za katerokoli mesto razlitoje izvedli statistično analizo obsega ogroženega območja v različnih razmerah. Zahtevnejša nadgradnja v smeri taktičnega modeliranja bi vsebovala statistično obdelavo nezanesljivosti vhodnih podatkov in zmožnost določitve območja nezanesljivosti. Način, potek in razlogi za obe nadgradnji so prikazani v Ostaneek Jurina (2015).

#### **Zahvala**

Zahvaljujemo se Morski biološki postaji Nacionalnega inštituta za biologijo in Agenciji Republike Slovenije za okolje za zagotovitev vseh potrebnih vhodnih podatkov, brez katerih izvedba simulacij ne bi bila mogoča.

#### **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.

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.

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., Fortuanto, 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.

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. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Bosnič): 38 p. (in Slovenian).
- 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.
- 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.
- 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 p.
- Elliott, A., Hurford, N., Penn, C. (1986). Shear diffusion and the spreading of oil slicks. *Marine Pollution Bulletin* **17**, 308–313.
- 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: 187–200.
- Fingas, M. (2004). Modeling evaporation using models that are not boundary-layer regulated. *Journal of Hazardous Materials* **107**, 27–36.
- 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.
- Galuf, S. (2005). Simulacija razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Galuf): 71 p. (in Slovenian).
- Gentle, J.E. (2003). *Random Number Generation and Monte Carlo Methods*. New York idr., Springer: p. 2.
- ITOPF. (2015). Oil tanker spill statistics 2014.
- Jeglič, T. (2010). Modeliranje razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Gradbeništvo in Geodezijo (samozaložba T. Jeglič): 51 p. (in Slovenian).
- Koutitas, C., O'Connor, B. (1980). Modeling three-dimensional wind induced flows. *Journal of the Hydraulics Division* **106**, 1843–1865.
- 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.
- Ličer, M., Žagar, D., Jeromel, M., Vodopivec, M. (2012). Numerični modeli za določanje stanja morja v Jadranskem morju. *Ujma* **26**, 164–167.
- 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: p. 1–16.
- Mesarić, M., Likić, J., Safner, T., Peleš, P., Doboš, M., Božić, B., Gredelj, M., Delić, D., Gundac, I., Harmel, M., Strmšnik, K., Privšek, A., Gaurina-Međimurec, N., Valič, 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: str. 197.
- Ostaneek Jurina, T. (2015). Modeliranje širjenja nafte v morju po metodi trajektorij: primerjava z metodo sledenja delcev. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Ostaneek Jurina): 44 p. (in Slovenian).
- Rajar, R., Četina, M. (1997). Hydrodynamic and Water Quality Modelling: An Experience. *Ecological Modelling* **101**, 195–207.
- 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.



Šaponja, M. (2014). Modeliranje izhlapevanja nafte po metodi Fingas. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Šaponja): 48 f. (in Slovenian).

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.

Širca, A. (1992). Modeliranje transporta polutantov po metodi sledenja delcev. Magistrski naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Širca): 87 p. (in Slovenian).

Šoško, H. (2012). Modeliranje širjenja nafte v morskem okolju po metodi trajektorij. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba H. Šoško): 44 p. (in Slovenian).

Žagar, D. (1994). Tridimenzijski model za simulacijo širjenja nafte. Magistrski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Žagar): 67 p. (in Slovenian).

Žagar, D., Četina, M. (2011). Končno poročilo o izdelavi strokovne naloge NAFTA3d. Ljubljana, Nacionalni inštitut za biologijo: 22 p.

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.