

# UPORABA NUMERIČNIH MODELOV OB RAZLITJIH NAFTE NA MORJU

## Application of numerical models of oil spills in the sea

Dušan Žagar\*, Vanja Ramšak\*\*, Matjaž Ličer\*\*\*, Boris Petelin\*\*\*\*, Vlado Malačič\*\*\*\*\*  
UDK 502.51(26):504.5:665.6

### Povzetek

Razlitje nafte v morju ima številne škodljive posledice na okolje in gospodarstvo. Potrebno je takojšnje ukrepanje pristojnih služb, ki si ob razlitju lahko pomagajo tudi z matematičnimi modeli, s katerimi je mogoče simulirati procese širjenja in razgradnje nafte. V prispevku je predstavljen pregled procesov in modelov širjenja naftnih madežev v morskem okolju. Opisan je model NAFTA3d in prikazana je njegova uporaba. Predstavljeni so vhodni podatki in rezultati modela na dveh možnih razlitjih v Tržaškem zalivu, pri čemer so upoštevane dejanske (nestacionarne) vremenske in hidrodinamične razmere. Prikazane so simulacije po taktičnem in prognostičnem načinu. Z vgrajenimi procesi in možnostjo povezav z različnimi modeli cirkulacije je lahko model NAFTA3d koristno dodatno orodje za ustrezne službe, ki skrbijo za omejitev širjenja in omilitev posledic ob morebitnih razlitjih nafte na morju.

### Abstract

Oil spills in the sea can have several negative effects on the environment and the economy. They require immediate response by the competent authorities which can, in case of a spill, also apply mathematical models simulating the processes of oil spreading and degradation. The article provides an overview of processes and models of oil slick spreading in marine environment. It describes the NAFTA3d model and its application, and explains the input data and results of the model in two potential spill locations in the Gulf of Trieste taking into account the actual (non-stationary) weather and hydrodynamic conditions. The description also includes simulations based on tactical and forecasting methods. By means of the process integration and coupling of different circulation models, the NAFTA3d model can also be used as a supplementary tool by the services which are responsible for spill containment and mitigation of consequences during oil spills in the sea.

## Uvod

Razlitja nafte in naftnih derivatov spadajo med hujše okoljske nesreče, ki lahko prizadenejo morsko okolje. Razlitja imajo dolgotrajne posledice na naravno okolje pa tudi na številne gospodarske panoge, najhujše gotovo na ribištvo, marikulturo in turizem. V tržaško in koprsko pristanišče pripluje razmeroma veliko število tankerjev s surovo nafto ali derivati: leta 2005 jih je priplulo v Trst

405 in v Koper 220 (MOP, 2008), kljub temu pa razlitij večjih razsežnosti na tem območju še ni bilo. Zaradi majhnih dimenzij, zaprtosti območja in bogate biotske raznovrstnosti zaliva pa lahko imajo hude posledice tudi razlitja ob potopitvi večjega turističnega plovila ali zaradi izpusta balastnih voda s tankerjev. Nevarnost razlitij je povečana tako pozimi, ko so na območju Tržaškega zaliva pogoste vremenske situacije z močnim vetrom ali zmanjšano vidljivostjo, kot tudi poleti, ko je zaradi turizma povečan pomorski promet.

Ne glede na velikost razlitja je torej potrebno ukrepanje pristojnih služb, ki lahko ob hitrem delovanju preprečijo večjo škodo ali pa vsaj omejijo posledice s postavitvijo baraž, črpanjem in z uporabo drugih sredstev, ki preprečujejo oziroma omejijo širjenje nafte po vodni gladini in v vodnem stolpcu. Pri večjih razlitjih, predvsem na območjih, kjer pristojne službe težko ukrepajo (zaradi oddaljenosti, vremenskih razmer ali drugih vzrokov), pa je pomembna tudi pravočasna in pravilna uporaba mate-

\* dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana, dusan.zagar@fgg.uni-lj.si

\*\* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana, vanja.ramsak@fgg.uni-lj.si

\*\*\* dr., Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja, Forjače 41, Piran, matjaz.licer@mbss.org

\*\*\*\* mag., Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja, Forjače 41, Piran, boris.petelin@mbss.org

\*\*\*\*\* dr., Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja, Forjače 41, Piran, vlado.malacich@mbss.org

matičnih modelov, s katerimi lahko predvidimo gibanje onesnažil v morju. Ob poznavanju vremenske situacije, cirkulacije vodnih mas na obravnavanem območju in lastnosti razlite nafte oziroma derivata je mogoče z umerjenimi in preverjenimi modeli s precejšnjo zanesljivostjo napovedati lokacijo, smer širjenja in velikost naftnega madeža po določenem času.

V prispevku predstavljamo kratek pregled procesov in modelov širjenja nafte v morskem okolju. Prikazujemo model, ki je bil v zadnjih dveh desetletjih izdelan in uporabljen na Univerzi v Ljubljani, Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo (UL FGG), nekaj časa pa v uporabi tudi na Ministrstvu za obrambo RS. Model je bil v letih 2010–2012 dopolnjen v sodelovanju z Nacionalnim inštitutom za biologijo (NIB). V modele so vgrajeni osnovni transportni procesi, ki imajo pri širjenju nafte največji vpliv, in tudi pomembnejši kratkoročni procesi razgradnje. Opozarjamo pa tudi na druge, še ne dovolj raziskane procese, ki prispevajo k slabši zanesljivosti matematičnih modelov. Ti procesi v obstoječe modele širjenja nafte, večinoma tudi drugod po svetu, še niso vgrajeni. Predstavljamo tudi simulacije dveh možnih primerov razlitja ob upoštevanju dejanskih meteoroloških in cirkulacijskih razmer v Tržaškem zalivu.

## Modeli širjenja nafte v morskem okolju

Matematični modeli razlitja nafte so pomembni z operativnega in raziskovalnega stališča. V zadnjih desetletjih so bili razviti številni modeli, ki omogočajo različne vrste simulacij. Nekateri se osredotočajo samo na fizikalne procese, pogosto le kratek čas po razlitju (na primer Howlett in sod., 2008), drugi obravnavajo tudi kemične in biološke procese v daljšem časovnem obdobju, od nekaj tednov do nekaj let (na primer Delgado in sod., 2006). Večinoma delujejo po Lagrangeovem principu oziroma metodi sledenja delcev – MSD (na primer Žagar, 1994, Delgado in sod., 2006), nekaj pa je tudi modelov, ki obravnavajo naftni madež kot kontinuum po Eulerjevem principu modeliranja (na primer Tkalič, 2006). Pri MSD ponazorimo naftni madež z večjim številom delcev, ki se deterministično gibljejo zaradi vodnih tokov (cirkulacije) na gladini in v vodnem stolpcu, dodano pa je še stohastično gibanje zaradi turbulentne difuzije. Hkrati lahko ima vsak delec predpisane lastnosti (gostota, masa, viskoznost itn.). V vsakem časovnem koraku lahko iz položaja in mase delcev izračunamo velikost in obliko naftnega madeža ter koncentracije nafte na izbranih lokacijah znotraj madeža. Pri metodah, ki naftni madež obravnavajo kot kontinuum, se računajo položaj, velikost in debelina naftnega madeža kot celote. Znani so tudi modeli, ki z določitvijo trajektorij posameznih delcev ter perturbacij cirkulacije in začetnih pogojev določajo stopnjo verjetnosti širjenja naftnega madeža na določeno območje (Beegle-Krause, 2001), prav tako pa se hitro razvijajo tudi modeli, podprti z metodami daljinskega zaznavanja madežev, predvsem s

satelitskimi opazovanji (Perkovič in sod., 2008). Ne glede na zasnovo pa vsi našteti modeli širjenja nafte na morju potrebujejo za simulacije kakovostne podatke o cirkulaciji vode, ki jih zagotovimo s hidrodinamičnimi modeli. Drugačen pristop k modeliranju nafte predstavlja metoda zglajenih delcev (SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics, Monaghan, 1994). Metoda je zelo primerna tudi za simulacije večfaznih tokov, pri čemer vsako od tekočin ponazorimo z delci drugačnih lastnosti in upoštevamo interakcije med njimi. Poleg simulacij na meji med vodo in sedimentom ter dobrega opisa proste gladine je bila metoda uporabljena tudi za simulacije razlitja nafte oziroma obtekanja baraž (Violeau in sod., 2007).

Tudi na UL FGG že približno dve desetletji razvijamo modele širjenja naftnih madežev na morju. Prvi uporabni tridimenzionalni MSD-model pri nas je izdelal Širca (1992), Žagar (1994) pa ga je vgradil v hidrodinamični model PCFLOW3D (Rajar in sod., 1997). Model širjenja nafte SIMON je za simulacije po taktičnem in prognostičnem načinu uporabljala tudi Uprava RS za zaščito in reševanje Ministrstva za obrambo (Rajar in sod., 1994). Model je bil pozneje posodobljen z novimi grafičnimi vmesniki (Galuf, 2005), v zadnjem času pa so mu bile dodane številne dodatne zmožnosti. V sodelovanju z NIB ter v okviru EU FP7 projektov »Hydronet« in »MyOcean« potekajo nadaljnje posodobitve. Model NAFTA3d smo povezali s cirkulacijskimi modeli POM (Princeton Ocean Model) in ga izpopolnili z nekaterimi pomembnimi procesi razgradnje nafte (Žagar in Četina, 2011). V izdelavi je tudi Eulerjev model širjenja nafte, ki trenutno deluje le v dvodimenzionalni različici in samo na primeru Tržaškega zaliva (Jeglič, 2010). V pripravi je tudi nadgradnja Eulerjevega modela z metodo Lattice-Boltzmann (Succi, 2001), ki je pri simulacijah nekajkrat hitrejša od podobnih računskih metod.

## Procesi in modeliranje

Poleg transportnih procesov (advekcije, turbulentne difuzije), ki so posledica gibanja vode in trajajo ves čas dogodka, so za širjenje naftnih madežev na morju značilni še drugi procesi širjenja in razgradnje. V grobem jih delimo na kratkoročne in dolgoročne. Prvi se začnejo takoj po razlitju, trajajo nekaj ur in so velikega pomena za ukrepanje. Najpomembnejša procesa sta mehansko širjenje in izhlapevanje. Slednje je odvisno predvsem od vrste nafte oziroma derivata in parametrov okolja (veter, temperatura). Namesto klasičnih mehanizmov mehanskega širjenja (Fay, 1971) se v tridimenzionalnih modelih pogosto uporablja t. i. princip strižne difuzije (Elliott in sod., 1986). Med kratkoročne procese spada še raztapljanje vodotopnih sestavin nafte, ki pa ga v prvem približku zanemarimo zaradi visoke hlapnosti vodotopnih frakcij in njihove majhne količine. Med dolgoročne procese prištevamo tiste, ki se začnejo šele po določenem času (nekaj ur do nekaj tednov po razlitju) in so za neposredno ukrepanje na terenu (fizično preprečevanje širjenja) običajno manj pomembni. To so emulzifikacija, disperzija

naftnih kapljic v vodnem stolpcu, mešanje s suspendirano snovjo v vodi in tonjenje (sinking), procesi ob stiku z obalo (odlaganje in sproščanje), sprememba gostote zaradi izhlapevanja, emulzifikacije in fotodegradacije ter biološka razgradnja. Dolgoročni procesi so zanimivi z znanstvenega stališča ter za napovedovanje dolgoročnih posledic in oceno celotne škode ob razlitju.

Simulacije lahko izvedemo po taktičnem ali prognoističnem načinu: taktični način pomeni izvedbo simulacij ob nezgodnem dogodku, ko se je razlitje že zgodilo, pri čemer uporabimo vse razpoložljive podatke dejanskega razlitja. Prognoistični način pomeni izvedbo simulacij po vnaprej določenih možnih scenarijih razlitja v izbranih meteoroloških in cirkulacijskih razmerah.

Z operativnega stališča je pomembno predvsem modeliranje po taktičnem načinu, torej v realnem času. Rezultati simulacij morajo biti na voljo v nekaj urah, zato mora biti model v nenehni pripravljenosti. Najbolje je, da je instaliran v operativni službi, ki skrbi tudi za fizične ukrepe preprečevanja širjenja madeža. Hkrati mora biti zagotovljen tudi dostop do potrebnih meteoroloških podatkov in prognoze cirkulacijskih razmer na morju. Račun cirkulacije za Tržaški zaliv neodvisno od uporabljenega modela traja nekaj ur, zato je pomembno, da je za modeliranje po taktičnem načinu vedno na voljo vnaprej izvedena prognoza cirkulacije. Simulacije širjenja naftnega madeža se le tako lahko izvedejo v najkrajšem mogočem času po obvestilu o dogodku, kar je pogoj za naglo ukrepanje strokovnih služb in omejitev posledic razlitja. Nekajurne simulacije širjenja nafte potekajo znatno hitreje: vključno s pripravo podatkov jih je mogoče izvesti v približno pol ure. Vseeno pa se pri simulacijah po taktičnem načinu pogosto upoštevajo le kratkoročni procesi (advekcija, disperzija, mehansko širjenje, izhlapevanje; zaradi krajšega računskega časa se celo izhlapevanje v prvem približku zanemari). Če se razlitje pojavi v bližini obale, se upošteva interakcija delcev, ki simulirajo disperzijo madeža z obalno strukturo. Ob razlitju v izrazito vetrovnem vremenu pa se lahko upošteva tudi disperzija oljnih kapljic v globino.

Pri simulacijah, izvedenih po prognoističnem načinu, lahko upoštevamo vse procese. Enako velja tudi za podrobne oziroma ponovne simulacije, s katerimi želimo umeriti ali preveriti model oziroma podrobno raziskati dolgoročne vplive razlitja. Takšne simulacije običajno izvedemo za tipične cirkulacijske in meteorološke razmere (značilne sezonske ali ob ekstremnih vremenskih dogodkih).

## Uporaba modela NAFTA3d

V model NAFTA3d so bile doslej vgrajene enačbe za simulacijo advekcije in disperzije, mehanskega širjenja in izhlapevanja, na kvalitativni ravni pa tudi enačbe disperzije v vodnem stolpcu in emulzifikacije – določimo lahko količino, ne pa tudi točne lokacije emulzije in disperzije v vsakem časovnem koraku. Splošno veljavne enačbe, ki jih

model upošteva pri simulaciji posameznih procesov, so opisane v literaturi (Delgado in sod., 2006; Elliott in sod., 1986; Fingas, 2004; Jeglič, 2010; Mackay in sod., 1980; Žagar, 1994; Žagar in Četina, 2011). V model vnesemo dve skupini podatkov: prva obsega gibanje vode (cirkulacijo) in meteorološke parametre (veter, temperatura zraka), druga pa podatke o razlitju.

**Cirkulacija** izračunamo predhodno na podlagi meteorološke situacije in robnega pogoja na odprtem robu obravnavanega območja (Ličer in sod., 2012) v dovolj gosti numerični mreži, da je mogoča prostorska interpolacija hitrosti za poljuben položaj delca znotraj računskega območja. Model omogoča račune z nestacionarno cirkulacijo in vetrom. V primeru nestacionarnih računov rezultate cirkulacijskega modela zapišemo v dovolj gostih časovnih razmikih, da tudi napaka časovnih linearnih interpolacij med zapisanimi hitrostnimi polji ni pomembna. Podatke z ustreznim vmesnikom pripravimo v obliko, ki jo kot vhodni podatek zahteva model NAFTA3d. Trenutno izdelani vmesniki omogočajo uvoz podatkov iz modela PCFLOW3D (v poljubni računski domeni) in iz različic modela POM, ki računata cirkulacijo v Tržaškem zalivu in Severnem Jadranu. Z izdelavo dodatnih vmesnikov lahko hidrodinamične količine uvozimo tudi iz drugih modelov cirkulacije. Pretvorba izhodnih podatkov cirkulacijskega modela v vhodne podatke modela NAFTA3d je bila preverjena na več primerih (Žagar in Četina, 2011; Žagar in sod., 2011).

**Podatki o razlitju** obsegajo lokacijo in čas trajanja razlitja ter količino in vrsto (lastnosti) razlite nafte. V model sta poleg možnosti simulacij z nerazgradljivim onesnažilom vgrajeni tudi možnosti modeliranja širjenja in izhlapevanja dizelskega goriva ter motornega bencina. Kadar ne poznamo lastnosti razlite nafte, lahko v prvem približku uporabimo nerazgradljivo onesnažilo. Pri takšni izbiri smo glede velikosti madeža in preostale količine nafte na varni strani. Če poznamo lastnosti razlite nafte (temperatura vrelišča, viskoznost, kemična sestava), jih lahko vnesemo v model in računamo z dejanskimi vrednostmi parametrov.

Model izračunava gibanje delcev s predpisano začetno maso in spreminjanje mase zaradi izhlapevanja. Izračunajo se tudi koncentracije nafte v tridimenzionalni računski mreži. Rezultate iz numerične oblike pretvorimo v grafično z vmesnikom, mogoča je tudi priprava animacij.

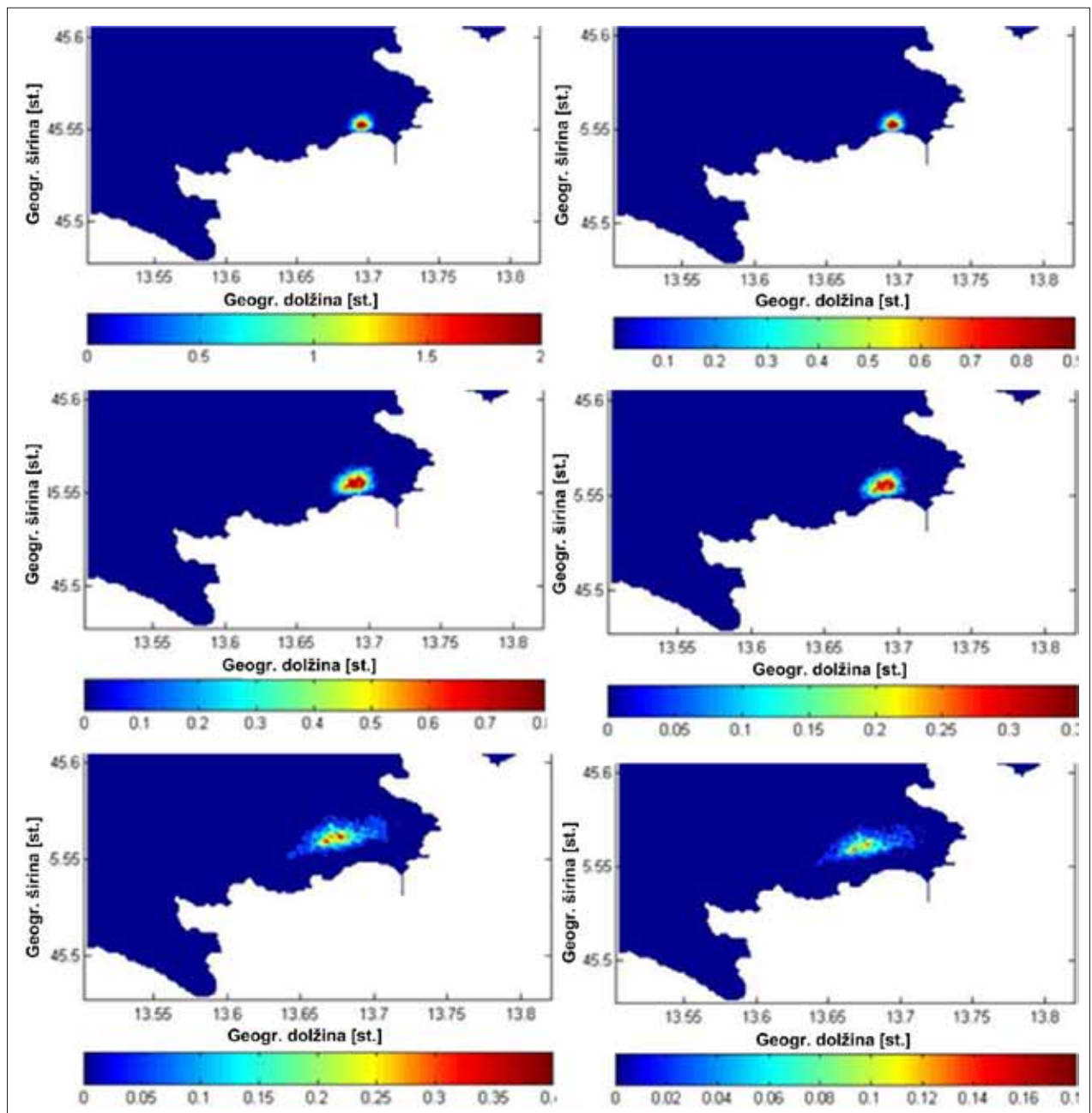
## Primer razlitja in širjenja nafte v Tržaškem zalivu

V nadaljevanju sta prikazana dva primera razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Kljub temu da model deluje v treh dimenzijah in je rezultate mogoče grafično prikazati v poljubnih horizontalnih in vertikalnih prerezih, prikazujemo v obeh primerih slike koncentracij v površinskem sloju, ki so najpomembnejše v začetku, ko je večina nafte

še na gladini ali tik pod njo. Rezolucija numerične mreže Tržaškega zaliva v horizontalni smeri je približno 140 x 150 m, v vertikalni smeri pa merijo debeline slojev od 30 cm na gladini do 5 m na dnu zaliva. V obeh primerih se razlitje zgodi pred Koprskim zalivom, na lokaciji  $\varphi = 45,55^\circ$ ,  $\lambda = 13,7^\circ$ , masa razlite nafte je 500 ton, trajanje razlitja 5 ur, v simulacijah pa smo opazovali širjenje 5000 oziroma 10.000 delcev. Cirkulacija je za dogodke, ki trajata 72 ur, izračunana z modelom POM, in sicer z različicama TSPOM za manjše območje Tržaškega zaliva (prvi primer) oziroma NAPOM za večje območje simulacij (drugi primer). V obeh primerih so poleg robnega pogoja na odprtem robu kot vsiljevanja upoštevani še

veter (izračunan na MOP ARSO z modelom ALADIN/SI za isto obdobje) in klimatološki srednji mesečni pretoki Soče, Dragonje, Rižane in Badaševce. Hidrodinamične količine so zapisane v enournih presledkih.

**V prvem primeru (slika 1)** prikazujemo simulacije v realni meteorološki situaciji med 19. in 21. marcem 2009, ko so se v kratkem času zgodili dva obrata vetra (jugo-burja-jugo) in povečan pretok Soče. Simulacije so bile izvedene na dva načina: s konservativnim onesnažilom (brez upoštevanja izhlapevanja) in z lahkim kurilnim oljem, ki spada med derivate z največjim koeficientom izhlapevanja. V prvem primeru smo vsaj v prvih nekaj



Slika 1: Koncentracije nafte v površinskem sloju debeline 30 cm; levo je primer brez izhlapevanja, desno z upoštevanjem izhlapevanja, v časih 10, 20 in 40 h. Koncentracije v  $\text{kg/m}^3$  so prikazane na barvni lestvici pod slikami.  
Figure 1: Concentrations of oil in a 30-cm thick surface layer; left – example without evaporation, right – example with evaporation in 10-, 20- and 40-hour intervals. The colour scale below the simulations shows concentrations in  $\text{kg/m}^3$ .



urah, ko je še možno posredovanje, na varni strani glede količine in obsega razlitja, simulacija pa poteka nekoliko hitreje. Po daljšem času (nad 24 ur), ko posredovanje ni več učinkovito, je pomembnejši drugi primer, prikazan v nadaljevanju, saj je ob neupoštevanju izhlapevanja količina preostale nafte močno precenjena, trajanje simulacije pa ni zelo pomembno. Celotni volumen razlite nafte smo ponazorili z 10.000 delci in računali s časovnim korakom šest minut, kar zadošča za razmeroma gladke grafične prikaze. Računski čas pri nobeni simulaciji na povprečno zmogljivem osebнем računalniku ni presegel ene ure, pri taktičnem načinu modeliranja pa ga je mogoče še skrajšati z zmanjševanjem števila delcev. Za prvi približek pri takšni količini nafte zadošča že 1000 delcev, kar skrajša računski čas na nekaj minut.

Razlika v koncentracijah nafte je med simulacijami z upoštevanjem izhlapevanja in brez njega velika ter narašča s časom. Če izhlapevanja ne upoštevamo (slika 1, levi stolpec), so najvišje koncentracije na površini v istem času dva- do trikrat višje, kot če izhlapevanje upoštevamo. Ker je kemična sestava vseh delcev enaka, delci ne morejo popolnoma izhlapeti; površina naftnega madeža je torej skoraj enaka ne glede na upoštevanje izhlapevanja.

**Drugi primer (slika 2)** prikazuje potencialno razlitje 500 ton nafte pred Koprskim zalivom ob močni burji. Naftni madež smo ponazorili s 5000 delci, časovni korak računa je znašal šest minut. Cirkulacija je izračunana za obdobje med 30. januarjem in 1. februarjem 2012, ko je burja občasno dosegala hitrosti nad 40 m/s. Naftni madež je že kmalu po razlitju zavzel izrazito podolgovato obliko in se je gibal s površinskim tokom proti odprtemu robu Tržaškega zaliva. Slika površinskih tokov v konkretnem primeru močne burje kaže izrazit izhodni tok nekoliko severno od sredine odprtega roba zaliva. Naftni madež se v tem primeru le v prvih nekaj urah približa južni obali zaliva, pozneje pa se usmeri proti odprtemu robu in po približno dveh dneh zapusti območje Tržaškega zaliva. Širjenje madeža je v danih razmerah veliko, za morebitno ukrepanje pa je na voljo razmeroma malo časa.

Razlika v gibanju madeža med obema primeroma je značilna. Med obrati razmeroma šibkega vetra se zaradi spreminjanja smeri vetra madež premika sem ter tja pred Koprskim zalivom in se pod vplivom vetra širi, najbolj v prevladujoči smeri vetra (ENE-WSW). Razdalja, ki jo prepotuje težišče madeža od točke razlitja, v dveh dneh ne preseže 3 km. V drugem primeru, ko je veter znatno močnejši, zavzame madež bistveno večjo površino, hkrati pa potuje občutno hitreje v (skoraj nespremenljivi) smeri vetra. Tako je že po 45 urah težišče madeža na meji Tržaškega zaliva, približno 13 km od točke razlitja.

O zanesljivosti modelnih napovedi transporta in širjenja nafte seveda ni mogoče govoriti, dokler model ni ustrezno validiran. Za rigorozno preverjanje modela v naravnem okolju pa ni pravih možnosti, dokler se na

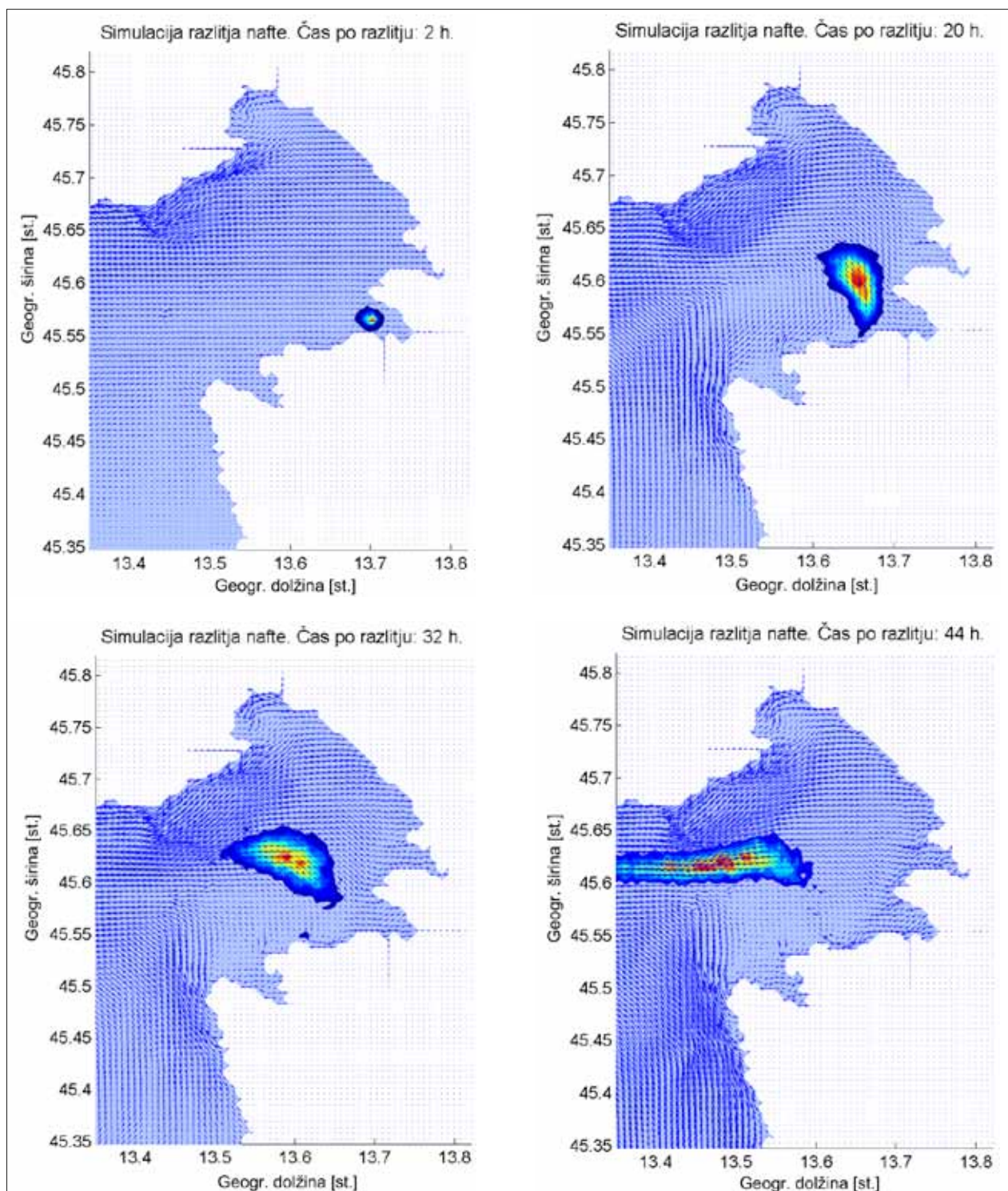
nekem območju, ki smo ga zmožni pokriti s simulacijami, ne zgodi razlitje, saj meritev ni mogoče opraviti z drugimi snovmi. Po skoraj dveh desetletjih obstoja modela ravno v času nastajanja članka poteka validacija modela na dejanskih podatkih dobro dokumentiranega razlitja, ki se je zgodilo leta 2006 pred libanonsko obalo. To razlitje je bilo uporabljeno tudi za umerjanje drugih modelov širjenja naftnih madežev (Coppini in sod., 2011).

## Sklepne misli

Model NAFTA3d omogoča simulacije širjenja nafte na morju v razmeroma gosti numerični mreži z nestacionarnimi vrednostmi hidrodinamičnih spremenljivk. Te lahko pridobimo s cirkulacijskima modeloma PCFLOW3D in TSPOM/NAPOM, z dodatnimi vmesniki pa tudi iz drugih cirkulacijskih modelov. Ko bo model ustrezno validiran in bodo na voljo vsakodnevne napovedi stanja morja z modeloma TSPOM/NAPOM, ki so v razvojno-testni fazi na NIB-MBP in na MOP-ARSO, bo mogoče model NAFTA3d na območju Tržaškega zaliva uporabljati z razmeroma veliko zanesljivostjo in v (skoraj) realnem času. To je še posebno pomembno za taktični način simulacij, ki omogoča ustreznim službam pravočasno ukrepanje in s tem omilitev posledic razlitja nafte. Pri taktičnem modeliranju napovedujemo širjenje madeža le za naslednjih nekaj ur in pri tem običajno upoštevamo le transport, mehansko širjenje in izhlapevanje. Z modelom NAFTA3d je mogoče na kvalitativni ravni upoštevati tudi emulzifikacijo in disperzijo nafte v vodnem stolpcu. Model izpopolnjujemo z drugimi pomembnimi procesi, ki vplivajo na potovanje, širjenje in razgradnjo naftnih madežev ter dogajanje ob stiku nafte z obalo. Najpomembnejša mehanizma pri modeliranju po taktičnem načinu sta advekcija in turbulentna difuzija, zato pri nadaljnjem delu dajemo prednost razvoju modeliranja teh dveh procesov.

## Viri in literatura

1. Beegle-Krause, C., 2001. General NOAA Oil Modeling Environment (GNOME): A New Spill Trajectory Model. Proc. Internation. Oil Spill Conf., mar. 2001., 865–872.
2. Coppini, G., De Dominicis, M., Zodiatis, G., Lardner, R., Pinardi, N., Santoleri, R., Colella, S., Bignami, F., Hayes, D. R., Soloviev, D., Georgiou, G., Kallos, G., 2011. Hindcast of oil-spill pollution during the Lebanon crisis in the Eastern Mediterranean, July–August 2006. Marine Pollution Bulletin 62, 140–153.
3. 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.
4. Elliott, A., Hurford, N., Penn, C., 1986. Shear diffusion and the spreading of oil slicks. Marine Pollution Bulletin 17, 308–313.
5. Fay, J., 1971. Physical Processes in the Spread of Oil on Water Surface. Proc. of the Joint Conf. on



Slika 2: Tokovno polje in širjenje nafte v površinskem sloju (30 cm) Tržaškega zaliva. Simulacija v dejanskih meteoroloških razmerah 30. in 31. januarja 2012. Prikazane so relativne koncentracije.

Figure 2: The current field and spreading of oil in the surface layer (30 cm) of the Gulf of Trieste. Simulation in realistic meteorological conditions as of 30 and 31 January 2012. Relative concentrations are given.

- Prevention and Control of Oil Spills, Amer. Petroleum Institute, Washington, D. C., 463–468.
6. Fingas, M., 2004. Modeling evaporation using models that are not boundary-layer regulated. *Journal of Hazardous Materials* 107, 27–36.
  7. Galuf, S., 2005. Simulacija razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomski naloga. UL FGG Ljubljana, 71.
  8. Howlett, E., Jayko, K., Isaji, T., Anid, P., Mocke, G., Smit, F., 2008. Marine Forecasting and Oil Spill Modeling in Dubai and the Gulf Region. *COPEDEC Proceedings*, 1–12.
  9. Jeglič, T., 2010. Modeliranje razlitja nafte v Tržaškem zalivu. diplomski naloga. UL FGG Ljubljana, 51.
  10. Ličer, M., Žagar, D., Jeromel, M., Vodopivec, M., 2012. Numerični modeli za določanje stanja morja v Jadranskem bazenu. *Ujma*, 2012, 164–167.

11. Mackay, D., Patterson, S., Nadeau, S., 1980. Calculation of the Evaporation Rate of Volatile Liquids. Proc. of the National Conference on Control of Hazardous Material Spills, Louisville, Kentucky, 361–368.
12. Monaghan, J. J., 1994. Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics* 110, 399–406.
13. MOP, 2008. Poročilo o čezmejnih vplivih na okolje za kopenski terminal za uplinjanje utekočinjenega zemeljskega plina v Žavljah (in Slovenian). MOP – Ministrstvo za okolje in prostor, Republika Slovenija, Ljubljana, 190.
14. 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., Lee, K., Cogswell, A. (Eds.), *Oil Spill Response: A Global Perspective*. Springer Netherlands, 237–256.
15. Rajar, R., Četina, M., Širca, A., 1997. Hydrodynamic and water quality modelling: case studies. *Ecological Modelling* 101, 209–228.
16. Rajar, R., Četina, M., Žagar, D., Širca, A., Steinman, F., 1994. Matematični model za simulacijo širjenja nafte in procesov ob razlitju polutantov v površinskih vodah. Del. 1, Tridimenzionalni model za simulacijo širjenja nafte in polutantov v morju in jezerih. Poročilo FAGG, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo, Laboratorij za mehaniko tekočin, 32.
17. Succi, S., 2001. *The Lattice Boltzmann Equation For Fluid Dynamics and Beyond*. Oxford University Press, 308.
18. Širca, A., 1992. Modeliranje transporta polutantov po metodi sledenja delcev. Magistrska naloga, Univerza v Ljubljani – FAGG.
19. Tkalič, P., 2006. A CFD solution of oil spill problems. *Environmental Modelling & Software* 21, 271–282.
20. Violeau, D., Buvat, C., Abed-Meraim, K., de Nanteuil, E., 2007. Numerical modelling of boom and oil spill with SPH. *Coast Eng* 54, 895–913.
21. Žagar, D., 1994. Tridimenzijski model za simulacijo širjenja nafte. Magistrska naloga, Univerza v Ljubljani – FAGG.
22. Žagar, D., Četina, M., 2011. Končno poročilo o izdelavi strokovne naloge NAFTA3d. Poročilo UL FGG Ljubljana, Katedra za mehaniko tekočin, 22.
23. Žagar, D., Ličer, M., Malačič, V., 2011. Modeliranje razlitja nafte v morskem okolju = Oil spill modelling in marine environment. V: EBERLINC, Matjaž (ur.), ŠIROK, Brane (ur.). *Kuhljevi dnevi*, 22. september 2011, Mengeš. Zbornik del, 283–290.