

# UPORABA METEOROLOŠKO-HIDRODINAMIČNIH MODELOV PRI ZAŠČITI IN REŠEVANJU OB NESREČAH V OBALNIH MORJIH

## Use of Meteorological-Hydrodynamic Models in Coastal Sea Accidents

Rudi Rajar\*, Dušan Žagar\*\*, Matjaž Četina\*\*\*

UDK 532.5:504.4

**Povzetek**

*Kombinirani meteorološko-hidrodinamični modeli so lahko koristno orodje pri zaščiti pred naravnimi nesrečami na morju. S simulacijami je možno napovedati sledeče parametre: (1) smer in jakost vetra, (2) višino gladine na posameznih območjih, (3) višino valov, (4) tokove, (5) gibanje in širjenje raznih onesnaževalcev, (6) gibanje večjih plavajočih predmetov. Take napovedi in opozorila zmanjšajo možnost nesreč in/ali olajšajo reševanje. Poleg tega so koristna tudi na drugih področjih, npr. pri načrtovanju pristanišč in marin, pri določanju optimalne lokacije izpustov odplak ali pri gojenju školjk ali škampov, saj lahko z opozorili na možna večja onesnaženja zmanjšamo nevarnost škodljive kontaminacije.*

**Abstract**

*A marine forecast system comprised of meteorological and hydrodynamic (HD) models can be a very useful tool for improving safety at sea. The*

*system enables forecasting of the following parameters: (1) wind force and direction; (2) water level; (3) wave height; (4) current velocities; (5) dispersion of pollutants; (6) trajectories of larger floating objects. The safety conditions in the Slovene coastal sea are initially described, and the basic features of the Coastal Ocean Forecast System in the USA are presented. A short description of the HD model is followed by a proposal of a basic methodology for the forecast system in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic). An example of the application of the HD model for an oil spill simulation in the Slovene coastal sea (operational in Slovenia) is presented. The described model system can also be effectively used in other fields, such as planning of ports, marinas (determination of water levels), locations of sewage outlets (simulation of currents), mariculture (forecast of possible major contamination), sea management etc.*

**Uvod**

V slovenskem obalnem morju ekstremne vremenske razmere občasno povzročijo nevarne situacije, kot so izredno močan veter, nevarni valovi, visoki dvig morske gladine.

Od vetrov ob slovenski obali je nevarna predvsem burja, največkrat v jesenskem in zimskem času, občasno tudi jugo, ki piha z jugovzhoda. Burja je najbolj nevarna zato, ker često nastopi zelo nenadoma in nepredvideno. Viharni veter in valovi so lahko nevarni raznim plovilom, kot so potniške ali ribiške ladje. Ob slovenski obali je močno razvit tudi navtični turizem, saj imamo na borih 43 km obale kar tri marine. Take razmere so lahko nevarne tudi za jadrnice in druga rekreacijska plovila. Med lansko jadrnalno regato, poznano »Barcolano«, ki je po številu udeleženihi jadrnic (med 1400 in 1800) baje največja na svetu, je bilo zaradi izredno močne burje polomljenih veliko jamborov in krmil, kar nekajkrat je bilo treba tudi reševati. V takih razmerah se lahko s privezov ali z ladij odtrgajo ali odplavijo večji plavajoči predmeti, ki so pri močnem vetru in visokih valovih slabo vidni in zato nevarni, saj lahko vanje trčijo razna plovila.

Vemo tudi, da se v nekaterih vremenskih situacijah gladina morja ob slovenski obali lahko zelo dvigne in poplavi nekatera obalne predele, npr. Tartinijev trg v Piranu. To se dogaja predvsem ob kombinaciji treh neugodnih vremenskih pojavov: nizkega zračnega tlaka, visoke plime in močnega južnega vetra, ki z učinkom strižnih napetosti na gladini dvigne gladino v severnem Jadranu.

V takih ekstremnih vremenskih razmerah se tudi zgodi največ ekoloških nesreč z razlihtem raznih onesnaževalcev (npr. nafte). Takrat veter povzroča močne tokove in valove, ki onesnaževalce zelo hitro raznašajo in lahko resno ogro-

zijo ekosistem v obalnem morju ali na obali. Na majhnem območju Tržaškega zaliva sta dva naftna terminala, v Koprju in Trstu in nevarnost razlitja nafte iz tankerjev ali obalnih rezervoarjev je velika. Zato je bil že leta 1994 izdelan matematični model za simulacijo širjenja razlite nafte, ki je operativno pripravljen za uporabo, kar je natančneje opisano kasneje. Vendar pa do sedaj ni bil izdelan noben prognostični model, ki bi omogočal napovedovanje vremenskih razmer in širjenja onesnaževalcev.

Pravočasna napoved takih situacij bi na več načinov pripomogla k bolj učinkoviti in cenejši preventivi in zaščiti uporabnikov morja ter k preprečevanju ekoloških nesreč. Jasno je, da dovolj točna vremenska napoved največ prispeva k temu, da so vsi uporabniki morja pravočasno opozorjeni na nevarne razmere. V takih razmerah se lahko odpove prevoz nevarnih snovi. Če pa do nesreč že pride, je s pomočjo modela lažje zaslediti poškodovana plovila, saj je ob računanju tokov možno tudi dokaj točno simulirati gibanje plovil brez lastnega pogona. Možno je tudi napovedovati gibanje in trenutno lokacijo večjih plavajočih predmetov in plovila opozarjati na možnost trčenja.

Splošna uporabnost matematičnih modelov pri zaščiti prebivalcev in okolja je bila že podrobno opisana v Ujmi (Rajar in sod. 1994).

Kot je opisano v naslednjem poglavju, je v svetu v večini obmorskih držav že vzpostavljen operativni sistem, ki s kombinirano uporabo meteoroloških in hidrodinamičnih modelov ter meritev v naravi omogoča razmeroma zanesljive napovedi nevarnih situacij.

Pobuda za izdelavo skupnega modela za napovedovanje nevarnih razmer v Tržaškem zalivu je prišla iz Italije, iz Talasografskega inštituta v Trstu. Tako se zdaj s tem proble-

\* prof. dr., Orle 44, Škofljica, rraj@fgg.uni-lj.si

\*\* dr., Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Hajdrihova 28, Ljubljana

\*\*\* izr. prof. dr., Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Hajdrihova 28, Ljubljana

mom ukvarjata dve slovenski inštituciji (Fakulteta za gradbeništvo in Oddelek za meteorologijo na ljubljanski Univerzi) in več italijanskih.

Omeniti je treba, da se določene napovedi že danes izvajajo predvsem prek Hidrometeorološkega zavoda Slovenije. Na primer za Tržaški zaliv:

- prognoza vetrov v numerični mreži z resolucijo pribl. 5 x 5 km;
- prognoza valov le za celotni Jadran v zelo grobi mreži 30 x 30 km, razmere v Tržaškem zalivu (ki je velikosti pribl. 25 x 30 km) tako opisuje samo ena točka;
- napoved ekstremno visokih gladin obalnega morja na osnovi približnih metod statistične obdelave preteklih dogodkov (Hidrometeorološki zavod RS).

Kot bo opisano kasneje, bi v nalogi vse našete parametre prognoziral bistveno natančneje, določenih pomembnih parametrov, pa se danes še ne prognozira. Do sedaj v Sloveniji nismo prognoziral gibanja morskih tokov in širjenja onesnaževalcev niti gibanja večjih plavajočih predmetov.

Rezultati opisanega načina modeliranja bi bili poleg tega, da bi pomagali zmanjšati nevarnost nesreč na morju, pomembni tudi za zaščito okolja, in to z več vidikov:

- Določanje širjenja onesnaževalcev iz raznih stalnih virov onesnaženja, bodisi točkovnih ali netočkovnih (npr. s poljedelskih površin), bo v pomoč npr. pri načrtovanju kopalnišča ali marikulture, kjer morajo biti izpolnjene določene norme kakovosti vode. Poznavanje morskih tokov ter smeri širjenja in disperzija onesnaževalcev je nujno pri načrtovanju lokacije podvodnih izpustov komunalnih ali industrijskih odplak.
- Izračun in napoved spreminjanja gladin v priobalnih krajih, posebno ekstremno visokih in ekstremno nizkih, je pomembna pri načrtovanju uporabe obalnega prostora, npr. načrtovanju marin, pristanišč, prometnih poti. Rezultati bodo tudi pokazali možnosti in frekvenco poplav na nekaterih nizko ležečih območjih, ki bi se lahko uporabljala npr. za poljedelstvo, gradnjo naselij ali cest.
- Za marikulturo bo pomen napovedi kakovosti vode v tem, da bodo pri možnih večjih različitih nevarnih onesnaževalcev morebiti še lahko zaščitili objekte pred onesnaženjem ali pa bodo opozarjali na nevarnost nedovoljenega onesnaženja školjk ali škampov.
- Za obalna kopalnišča bo možno približno napovedati kakovost vode v naslednjih 24 urah in s tem opozoriti na morebitna večja onesnaženja.
- Model za napoved širjenja naftnih madežev, ki ga je naša skupina sestavila v letih 1993/94 in je pripravljen za uporabo, bomo dopolnili, da ga bo možno vključiti v opisani kombinirani model. Bistvena korist opisane metodologije je v tem, da mogoče stalno napovedovati tokove (za 24 ur), zaradi česar bodo rezultati izračunov širjenja naftnih madežev na razpologo že pribl. 10 minut po razlitju.

## Primer uporabe modeliranja za zaščito na morju v ZDA

Seveda vemo, da vremenskih razmer v morjih okrog Združenih držav Amerike zaradi velike dolžine obale in hurikanov skorajda ne moremo primerjati z razmerami v severnem Jadranu, je pa kljub temu zanimivo opisati ameriški način zaščite pred naravnimi nesrečami na morju. Če metode priredimo našim razmeram, se lahko marsikaj naučimo, saj imajo tam dolgoletne izkušnje. Podobne službe imajo tudi v Veliki Britaniji, na Nizozemskem in v mnogih drugih državah.

V ZDA sistem COFS (Coastal Ocean Forecast System) izvaja stalne simulacije vremena in tokov v obalnih morjih. Temelji na tri-dimenzionalnem hidrodinamičnem modelu, ki so ga skupaj razvili univerza v Princetonu, mornarica in dva inštituta, eden je meteorološki. Podatki za simulacije na hidrodinamičnem modelu so dobljeni iz simulacij na meteorološkem modelu. To so podatki o vetru, zračnem tlaku, temperaturi in vlažnosti. Ti rezultati se s simulacijami obnavljajo na vsake 3 ure. Do natančnejših napovedi si pomagajo s stalnimi meritvami v naravi. Za klasične meritve na morju uporabljajo merske ladje ali ploščadi, zasidrane na pomembnih lokacijah, kjer merijo razne meteorološke parametre (veter, vlago, temperaturo zraka...), hidrodinamične parametre (hitrost in smer tokov, temperaturo in slanost vode) in tudi biokemične parametre, kot so koncentracije fosforja, alg, raznih onesnaževalcev. Izredno dragoceni so satelitski posnetki, s katerih je mogoče razbrati trenutni razpored pomembnih parametrov na zelo velikih območjih. Ti parametri so npr. razpored višine morske gladine, temperatura na površini morja, pri simulacijah pa tudi zelo pomagajo satelitski posnetki lokacije zalivskega toka. Danes je možno s satelitsko tehniko kratkih radarskih valov registrirati celo višine in smer valov; iz teh podatkov do 20-odstotno natančno izdelajo sliko vetrov, kar je zelo pomembno za varnost plovbe. Sateliti zaznajo tudi večje razlite naftne madeže, in ker se vse informacije takoj (on-line) prenašajo do okoljevarstvenih centrov, je na ta način po eni strani možno zelo hitro začeti z zaščitnimi ukrepi, po drugi strani pa je često možno najti krivca za onesnaženje in ga finančno kaznovati. Uporaba radarskih valov ima pred starejšo metodologijo tudi to prednost, da ni odvisna od oblačnosti in svetlobe.

Kot izhodne rezultate simulacij daje model 24-urno napoved sprememb gladine, tokov, temperature in slanosti. Zelo pomembno napoved višine valov pripravlja NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) z drugim modelom, imenovanim WAVEWATCH. Uporabniki imajo tako stalen pregled nad napovedano situacijo za 24 ali 48 ur vnaprej, z nekoliko manjšo natančnostjo pa tudi za nekaj dni vnaprej; vse je tudi v grafični obliki dostopno na Internetu.

V resnici deluje še bolj splošna prognostična služba, in če pogledamo na Internet (NOAA, 2001) bomo presenečeni, kakšne informacije lahko zainteresirani uporabniki najdejo, poleg vseh prej naštetih. To je med drugim napoved območij megle na oceanih in v obalnih morjih, območij ledu ali nevarnosti zamrzovanja ladij – večinoma v grafični obliki. Seveda pa satelitski posnetki tudi stalno poročajo o gibanju večjih ledenih gora – do nesreč, kakršna je bila Titanikova, danes ne more več priti!

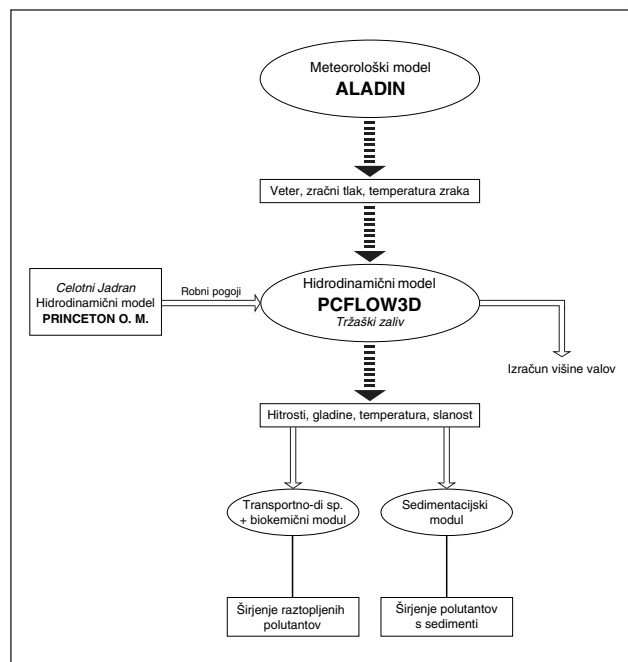
Kot uporabnike navajajo: Obalno stražo (Coast Guard), ki je odgovorna za iskanje in reševanje pogrešanih ter za izvajanje ukrepov ob morebitnih različitih nafte ali nevarnih kemikalij; obalne skupnosti (opozorjanje na zelo visok dvig gladin), mornarico, ribiče, lastnike rekreacijskih plovil, okoljevarstvene in vodnogospodarske ustanove.

Ko sem potoval po ZDA in tudi jadral v zalivu Chesapeake, me je zelo zanimala varnost jadralcev, saj so nekateri deli ZDA na območju, kjer občasno nastopajo izjemno nevarni viharji hurikani. Jadralci, s katerimi sem križaril, so prek radijskih napovedi zelo napeto spremljali gibanje vsakega močnejšega ciklona, ki bi se lahko razvil v hurikan. Napovedi gibanja večjih vremenskih tvorb so dokaj točne celo za nekaj dni vnaprej, tako da sem imel občutek, da se vsaka jadralnica lahko res pravočasno umakne na varno. Seveda pa s hurikani ni šale. Poleg izjemno močnih vetrov in valov, ki so za plovila na odprtem morju lahko pogubni, je treba vedeti, da v obalnih morjih izjemne strižne napetosti zaradi vetra povzročijo lokalni dvig gladine morja, tudi preko 6 ali celo 10 metrov. To pa je lahko pogubno za plovila, ki so zasidrana ob obali v premalo zaščitnih zalivih. Videli sem fotografijo jadralnice, dolge 18 metrov, kako »sedi« na suhem,

več kot 5 m visoko, sredi ruševin in drevja. Le zelo zaprti zalivi (hurricane hole) dajejo varno zavetje. Mornariška šola v Annapolisu, ki ima veliko jadrnic, ima v zelo zaprtem zalivu pripravljene boje, kamor ob napovedi takih viharjev odpeljejo svoja plovila.

## Opis modelov

Naš predvideni sistem modelov bo podoben, kot ga uporabljajo v drugih državah. Slika 1 kaže povezave vseh modelov, ki jih bomo uporabljali.

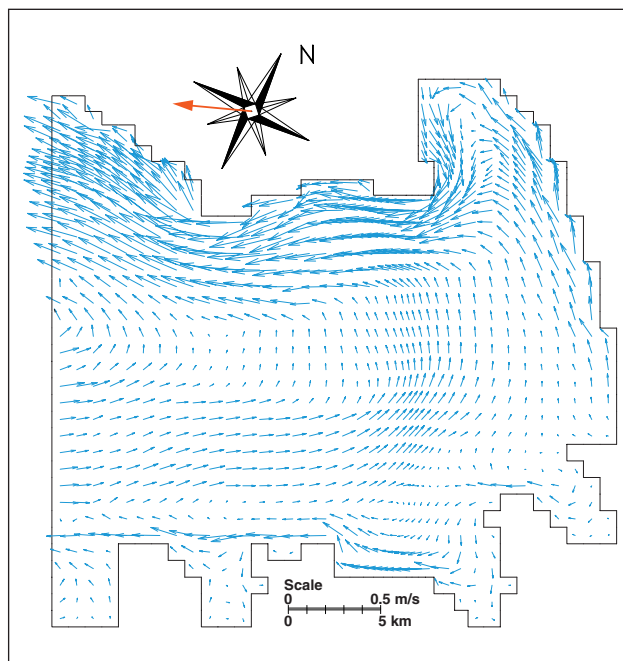


Slika 1. Pregled povezave posameznih modelov v sistem  
Figure 1. Overview of model integration into the system

Podatki o vetru, temperaturi zraka in zračnem tlaku bodo prišli iz meteorološkega modela ALADIN, s katerim že izvajajo stalne simulacije vremenskih pojavov v okviru evropske meteorološke službe. Napoved bo podana za 24 ali 48 ur.

Izhodni rezultati modela ALADIN bodo služili kot vhodni podatki za hidrodinamični model PCFLOW3D. To je tridimenzionalni model, ki ga je razvila naša skupina na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Uporabljali smo ga že pri reševanju številnih praktičnih problemov v Sloveniji, npr: izračun tokov in širjenja živega srebra v Tržaškem zalivu, izračun širjenja nafte v Tržaškem zalivu ob morebitnem razlitju (Žagar, 1994), izračune disperzije onesnaževalcev v Blejskem in Bohinjskem jezeru ter simulacije toplotnega onesnaževanja Save in njenih akumulacij zaradi termoelektrarne Trbovlje 3 in jedrske elektrarne Krško. Model smo že večkrat uporabljali za reševanje podobnih problemov v drugih državah, npr. za izračun disperzije radioaktivnih snovi v Japonskem morju (Rajar in sod. 1997), za izračun disperzije onesnaževalcev s poljedelskih površin v lagunah severozahodne Mehike (Rajar in sodel. 2001). Z modelom smo tudi sodelovali v mednarodni komisiji za oceno posledic francoskih jedrskih poskusov v Polineziji, kjer smo računali, koliko sedimenta in plutonija izperejo tokovi iz lagune Mururoa v normalnih in vihnih razmerah (Rajar, 1998).

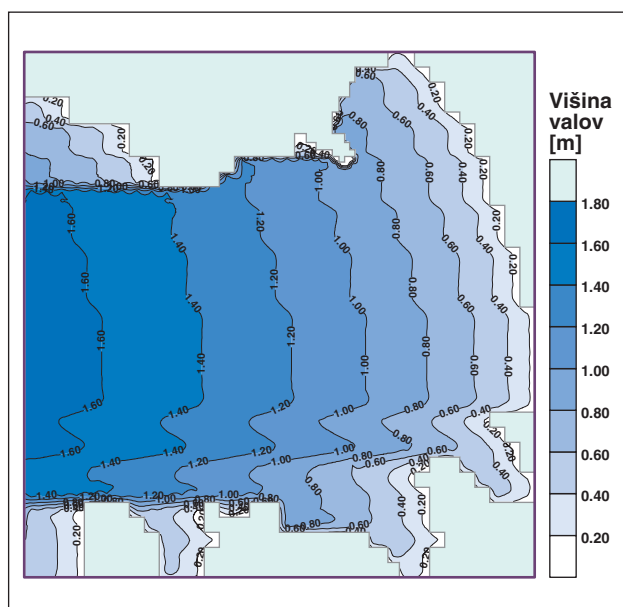
Osnovna enota modela je hidrodinamični modul, kjer se izračuna hitrost tokov, torej vektorje hitrosti na celotnem območju. Simulacije potekajo tako, da najprej celotno območje v vseh treh smereh razdelimo na računske celice, kot je



Slika 2. Vektorji hitrosti toka v Tržaškem zalivu ob burji, 13 m/s, v sloju 5 m pod gladino  
Figure 2. Vectors of current velocity in the Gulf of Trieste, 5 m below the surface, caused by the »burja« wind (NE), 13 m/s

npr. razvidno s slike 2, ki kaže vektorje hitrosti toka v Tržaškem zalivu v globini 5 m, ob burji s hitrostjo 13 m/s. V vsaki računski celici je narisana en vektor hitrosti. V vertikalni smeri, tj. po globini, pa razdelimo celotni prostor na sloje. Dno in bregovi računskega območja, npr. morskega zaliva, so ponazorjeni s t.i. »suhimi« celicami, tako da je v računalniku podana razmeroma točna topografija območja.

Poseben dodatek v modelu (Žagar, 1999) omogoča izračun višine valov na osnovi hitrosti vetra in privetritišča (razdalje do obale). Rezultate za primer burje s hitrostjo vetra 13 m/s



Slika 3. Izračunana višina valov v Tržaškem zalivu ob burji 13 m/s  
Figure 3. Calculated wave height in the Gulf of Trieste (NE wind, 13 m/s)

kaže slika 3. Vpliv časa trajanja vetra na razvoj višine valov zaenkrat ni vključen; predpostavlja se, da je trajanje dovolj dolgo, da so se valovi že razvili do končne (maksimalne) višine.

Na osnovi izračunanih hitrosti toka se računata prenos in disperzija kakršnih koli onesnaževalcev. Intenzivnost disperzije je odvisna od lokalne stopnje turbulence, ki se tudi računa v modelu po posebnih enačbah (modeli turbulence). Sedimentacijski modul je bil razvit (Žagar, 1999) predvsem zaradi tega, ker se na lebdeče delce vežejo razni onesnaževalci, ki se z njimi navadno prenašajo v bistveno večji meri kot raztopljeni v vodi. V biokemičnem modulu se skuša vsaj na poenostavljen način zajeti vpliv raznih reakcij na razpad ali rast onesnaževalca. Ena od enostavnejših reakcij te vrste je npr. izhlapevanje nafte, zelo zapleteni pa so procesi pretvorb živnega srebra iz ene oblike v drugo.

Kot v večini primerov je tudi pri simulacijah v Tržaškem zalivu posebno težko določiti razmere na odprtem robu računskega območja, ki je približno na črti Savudrija – Grado. Podatki o vseh parametrih na tem robu so nujno potrebni kot robni pogoji za izračune znotraj območja. Da bi bile simulacije čim točnejše, smo se z italijanskimi raziskovalci dogovorili, da bodo z modelom POM (Princeton Ocean Model) najprej simulirali celotno Jadransko morje, iz njihovih izračunov pa bomo dobili podatke za robne pogoje za nadaljnje izračune z našim modelom PCFLOW3D. Veliko truda bo v raziskavi treba posvetiti učinkoviti povezavi vseh modelov: ALADIN, POM in PCFLOW3D.

Ker je treba modele vedno tudi umeriti in verificirati, bodo v Tržaškem zalivu postavljene tri merske ploščadi (dve sta že postavljeni), na katerih bodo merili glavne meteorološke in hidrodinamične parametre (glej drugo poglavje). Stalna spremljava modelnih simulacij z meritvami bo omogočala sprotno popravljanje simulacij s točnejšimi najnovejšimi podatki.

Za uporabo modelov v praksi je zelo pomembno, da ima model dober t.i. uporabniški vmesnik (user interface), ki pomaga, da tudi razmeroma neizkušen uporabnik lahko do-

volj enostavno uporablja model. Ti vmesniki so navadno izdelani tako, da prikazujejo menije, ki v glavnem sami sprušujejo po podatkih. V največji možni meri tudi že takoj opozarjajo na napake in nelogičnosti. Poleg tega so seveda nujni razni dobri grafični paketi, ki omogočajo hiter in pregleden izris rezultatov ali celo animacije. Model bo v končni fazi na voljo tudi na Internetu, bodisi za vse uporabnike, ali pa za določene uporabnike, ki bodo imeli dostop z geslom.

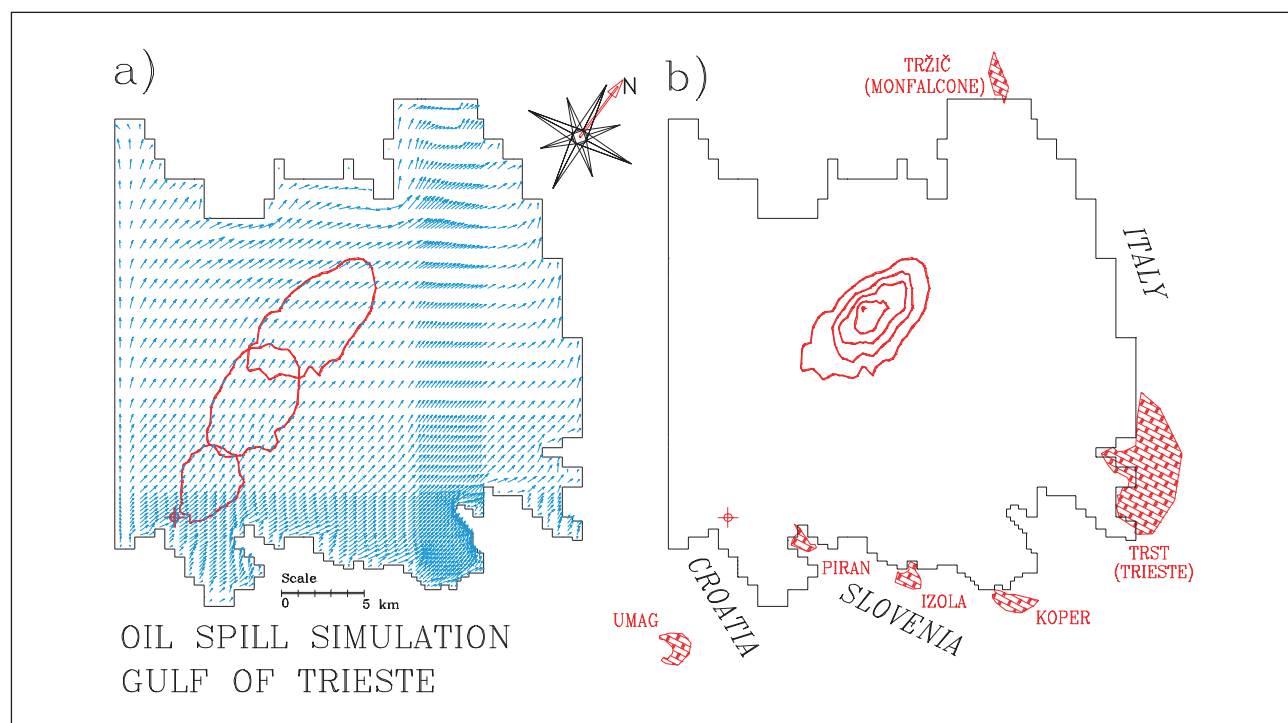
## Primeri uporabe modela PCFLOW3D

### Simulacije razlitja nafte v Tržaškem zalivu

V letu 1994 smo model PCFLOW3D dopolnili z možnostjo simulacije širjenja naftnih madežev. V model smo vgradili posebno metodo za izračun simulacije gibanja onesnaževalcev (Širca, 1992), ki simulira prenos onesnaževalcev z diskretnimi delci (metoda sledenja delcev). Metoda se je pokazala kot zelo primerna in smo jo nato uporabili za simulacijo naftnih madežev (Žagar, 1994). Pri simulaciji širjenja in pretvorb nafte smo zaradi majhnega območja Tržaškega zaliva upoštevali le kratkotrajne procese (izhlapevanje, vzgon, disperzijo), medtem ko nekaterih procesov, ki postanejo pomembni šele v obdobju več tednov, npr. biološka razgradnja ali fotodegradacija, nismo upoštevali.

Izračuni hitrosti tokov so v tridimenzionalnih modelih zelo dolgotrajni, po drugi strani pa naj bi bili rezultati v grafični obliki na razpolago že pribl. 15 minut po razlitju. Ta pogoj je bilo pri praktični uporabi zelo težko izpolniti, posebno ker je bila postavljena zahteva, naj se model uporablja na osebnih računalnikih. Zato smo morali uporabiti naslednjo metodologijo.

Hitrostna polja tokov smo *vnaprej* izračunali za 10 vetrov petih tipičnih smeri in dveh jakosti: tramontana (smer 0°), burja (68° 30'), jugo (158° 30'), garbinada (225°) in mae-



Slika 4. Simulacija širjenja nafte pri možnem razlitju v Tržaškem zalivu. a) vektorji hitrosti toka na površini, ter prikaz širjenja naftnega madeža po 3, 6 in 9 urah. b) Prikaz koncentracije v madežu 6 ur po razlitju  
Figure 4. Oil spil simulation in the Gulf of Trieste: a) velocity vectors on the surface, and spread of oil slick 3, 6, and 9 hours after the spill. b) oil concentrations in the slick 9 hours after the spill

stral (292° 30'). Ko se razliti je zgodi, se na osnovi podatka o trenutni smeri in jakosti vetra iz prej pripravljenih hitrostnih polj z interpolacijo v nekaj minutah dobi realno polje hitrosti tokov. Računi širjenja nafte nato trajajo le nekaj minut. Vhodni podatki, ki jih mora uporabnik čim hitreje pridobiti in vstaviti v model, so: (1) smer in jakost vetra, (2) lokacija razliti je, (3) vrsta nafte, (4) temperatura vode in ozračja.

Slika 4 prikazuje izris rezultatov za primer razliti je za izbrane fiktivne podatke.

Model je v največji možni meri izdelan uporabniško prijazen. Je operativno pripravljen za uporabo v primeru večjega razliti je na Upravi RS za zaščito in reševanje, pripravljena pa se tudi inštalacija na Centru za zaščito morja v Kopru (izpostava Ministrstva za okolje in prostor).

## Izračuni iznosa sedimentov in plutonija iz lagune Mururoa

Med letoma 1996 in 1998 smo sodelovali v mednarodni komisiji za oceno posledic francoskih jedrskih poskusov v Polineziji. Naj zelo kratko opišemo naš prispevek.

Glavni cilj celotne raziskave je bil določiti, koliko so francoski podzemni jedrski poskusi med letoma 1994 in 1996 vplivali na okolje. Z našim modelom PCFLOW3D smo računali, koliko sedimenta in plutonija izperejo tokovi iz lagune Mururoa (Rajar, 1998). Model smo zato morali dopolniti z modulom za transport sedimentov (Žagar, 1999). Ker smo poleg normalnih razmer (pasatni veter in plimovanje) simulirali viharne razmere (tropski ciklon z vetrom s hitrostjo 150 km/h), smo se ob delu veliko naučili o ekstremnih vremenskih razmerah. Poleg iznosa sedimenta in plutonija prek 8 km dolgega preliva v atolu smo morali računati tudi preliv vode in sedimenta prek samega atola, ki je v povprečju visok le 1,5 metra. Slika 5 kaže glavne parametre za izračun. Na podlagi opazovanj na atolih so valovi na zunanji strani ob takih ciklonih visoki do 10 m, znotraj lagune pa tudi 5 do 6 m.

Simulacije so za vse opisane pojave, tj. normalne in viharne razmere, pokazale, da je povprečen iznos sedimenta na leto (upoštevaje frekvenco nastopanja tropskih ciklonov) približno 480.000 ton. Na osnovi količine sedimenta, ki ga tokovi odnesejo iz lagune, in koncentracije plutonija v njem, smo izračunali letno količino radionuklidov, ki jo odnese iz lagune v ocean, in znaša  $7,8 \cdot 10^{10}$  Bq (Bq ali bekerel je enota za količino radioaktivnosti). Nadaljnje izračune širjenja plutonija v Tihem oceanu so izvajale specializirane sku-

pine »modelarjev« iz Nemčije in Japonske. Kljub razmeroma velikim količinam plutonija, ki jih tokovi vsako leto izperejo iz lagune, pa se je pokazalo, da so koncentracije v oceanu nepomembne, bistveno pod naravnimi vrednostmi. Tudi sklepne ugotovitve mednarodne raziskave so bile v tem smislu: izvajani podzemni poskusi v francoski Polineziji v nobenem primeru ne povzročajo zaznavnega vpliva na okolje.

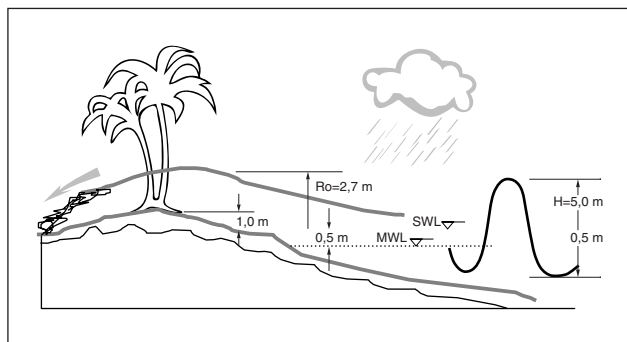
## Sklepne misli

Kot je razvidno iz opisanih primerov uporabe, je naša skupina dosedaj uporabljala matematične modele največ pri problemih zaščite okolja, predvsem kakovosti voda. V tem prispevku pa smo hoteli poudariti, da je iste modele, z nekaterimi dopolnili, mogoče uporabiti tudi za reševanje problemov, ki so neposredno povezani z varnostjo na morju. To so predvsem računanje višine valov, hitrosti tokov, določanje položaja večjih plavajočih predmetov brez lastnega pogona in izračuni višine gladine v ekstremnih vremenskih razmerah.

Velika prednost predlagane metodologije pa je tudi v tem, da je v povezavi z meteorološkimi modeli možno napovedati dogajanje in tako z opozorili nekatere nesreče preprečiti, druge pa omiliti ali olajšati zaščito in reševanje.

## Literatura

- NOAA, 2001. <http://polar.ncep.noaa.gov/omb/products.html>.
- Rajar R., Četina M., 1994. Pomen matematičnih modelov pri zaščiti pred nesrečami, Ujma, št. 8, str. 174–181.
- Rajar, R., Četina, M., Širca, A., 1997. Hydrodynamic and Water Quality Modelling: Case Studies. Ecological Modelling, No. 101. pp. 209–228.
- Rajar, R. 1998. Transport of sediments from Mururoa lagoon into ocean. V: The radiological situation at the atolls of Mururoa and Fangataufa : main report, (Radiological assessment reports series). Vienna: International Atomic Energy, str. 177–179.
- Rajar, R., Četina, M., Gonzales-Farias, F., Pintar, M. 2001. Modelling Of Pollutant Dispersion in Mexican Coastal Lagoons. Poslano v objavo na Mednarodnem kongresu za hidravlične raziskave, Peking, Sept.
- Širca, A., 1992. Modeliranje transporta polutantov po metodi sledenja delcev. Magistrska naloga, FGG, 115 str.
- Žagar, D. 1994. Matematični model za simuliranje razliti je nafte na morju in njegova aplikacija. Magistrsko delo, FGG, 67 str, 8 prilog.
- Žagar, D. 1999. Razvoj in aplikacija tridimenzionalnega modela za simulacijo transporta in procesov pretvorb živega srebra v morskem okolju. Doktorska disertacija. FGG, 101 str.



Slika 5. Shema, ki prikazuje parametre za izračun prelivanja vode in sedimenta preko atola Mururoa ob tropskem ciklonu (veter 150 km/h). Upoštevana višina valov znotraj lagune je 5,0 metrov

Figure 5. Scheme presenting input data for the calculation of water and sediment overflow from the Mururoa lagoon over the atoll rim. A wave height of 5 m was anticipated inside the lagoon