

# NUMERIČNI MODELI ZA DOLOČANJE STANJA MORJA V JADRANSKEM MORJU

## Numerical models for determining sea state in the Adriatic Sea

Matjaž Ličer\*, Dušan Žagar\*\*, Maja Jeromel\*\*\*, Martin Vodopivec\*\*\*\* UDK 551.465.013(262.3)

### Povzetek

V prispevku predstavljamo glavne razloge za numerično modeliranje morja v Jadranskem morju in na kratko opisujemo modele, ki se trenutno uporabljajo v ta namen. Predstavljeni so cirkulacijski model POM za severno Jadransko morje, valovni model SWAN in model razlitja ogljikovodikov v morskem okolju NAFTA3d. Prikazani so tudi nekateri rezultati vseh navedenih modelov in trenutni načrti njihove implementacije.

### Abstract

The abstract describes the main reasons for numerical modelling of sea in the Adriatic Sea and briefly explains the models currently used for this purpose. It also depicts the POM circulation model for the area of the north Adriatic Sea, the SWAN wave model and the NAFTA3d model of hydrocarbon spills in marine environment. Moreover, some results of these models as well as current plans for their implementation are presented.

## Uvod in motivacija

V prispevku želimo na kratko predstaviti delo, ki v Sloveniji v zadnjih letih poteka na področju numeričnega modeliranja morja. Numerični modeli, ki jih opisujemo v nadaljevanju, nam omogočajo napoved stanja morja. To pomeni, da nam omogočajo predvsem določitev tokov, temperaturnih in slanostnih porazdelitev ter plimovanja in valovanja v vsem Jadranskem morju. Ko v Sloveniji omenjamo modeliranje morja, se marsikdo najprej vpraša, čemu naj bi v državi s tako malo obale in morja namenjali sredstva za postavitev fizikalnih numeričnih modelov, ki nam omogočajo napoved in analizo fizikalnega stanja morja. Obstaja več zelo dobrih razlogov. Izpostavimo jih nekaj.

Najbolj vsakdanja prednost poznavanja stanja morja je kakovostna obveščenenost ljudi na Primorskem o stanju morja, temperaturi, valovanju, plimovanju ipd. Našteti dejavniki so pomembni tako z varnostnih kot finančnih vidikov. Zaradi plitkosti severnega Jadranskega morja je z nekaterimi vremenskimi razmerami, in sicer južnim vetrom ter nizkim tlakom, povezano izrazito naraščanje

in upadanje gladine morja v severnem Jadranskem morju. Jugovzhodni veter je eden glavnih vzbujevalcev osnovnega lastnega nihanja morske vode v Jadranskem morju. To nihanje ima osnovno lastno frekvenco približno 22 h. Lastna nihanja lahko zaradi majhnega trenja pri tleh v južnem Jadranskem morju in zaradi ozkega ustja pri Otranstskih vratih po amplitudi včasih celo presežejo astronomsko plimo [1]. Poplave v Benetkah in Piranu se pojavljajo takrat, ko se lastno nihanje Jadranskega morja sešteje z visoko astronomsko plimo [1], nepričakovano visoka plima pa lahko povzroči in je že povzročala škodo, ki se meri v milijonih evrov. Pri takšnih dogodkih ne gre le za obveščanje stalnih prebivalcev slovenske obale, ki so vajeni živeti z morjem, temveč tudi za obveščanje drugih ljudi, ki so takrat na morju ali obali.

Naslednja, prav tako vsakdanja prednost je povezana z dejstvom, da je severno Jadransko morje plitvo morje z naraščajočim ladijskim prometom skozi tržaško in koprsko pristanišče. Težnja naraščanja prometa se verjetno še ne bo tako kmalu obrnila, z njo pa je povezano veliko obmorske infrastrukture in drugih industrijskih dejavnosti. Z naraščajočim ladijskim prometom se veča tudi možnost neljubih dogodkov, kot so ladijske nesreče in izlivi polutantov. Z ustreznimi modeli, s katerimi lahko pravočasno predvidimo dogajanje na morju, lahko zmanjšamo oziroma omilimo posledice ekstremnih hidroloških in vremenskih razmer ter izrednih ekoloških dogodkov tako za ljudi kot okolje. Ko je na primer februarja 2010 pred Luko Koper nasedla kitajska tovorna ladja, so pri načrtovanju reševalne akcije morali upoštevati napoved astronomske plime [2], za morebitno razlitje nafte iz ladij-

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

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

\*\*\* Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, ARSO, Vojkova cesta 1 b, Ljubljana

\*\*\*\* Nacionalni inštitut za biologijo, Morska biološka postaja, Fornače 41, Piran, martin.vodopivec@mbss.org

skega trupa pa je bila predhodno pripravljena tudi simulacija širjenja naftnega madeža v takratnih vremenskih razmerah.

Naslednja prednost poznavanja stanja morja je dejstvo, da lahko dobra oceanografska napoved bistveno izboljša vremensko napoved. Model Aladin/SI uporablja računsko domeno, ki obsega velik del Sredozemlja [3]. Če model nima podatkov o stanju morja, je velik del modelskega spodnjega robnega pogoja nenatančen oziroma postavljen na klimatološke vrednosti. Kakovost robnega pogoja nad Sredozemskim morjem je izredno pomembna, saj lahko nekaj stopinj razlike v temperaturi površine morja pomeni tudi razliko nekaj deset milimetrov padavin nad celino. Tudi to je razlog, zakaj so danes na področju numeričnega modeliranja v sklopitev oceanskih in atmosferskih modelov usmerjeni precejšnji napor [4], [5].

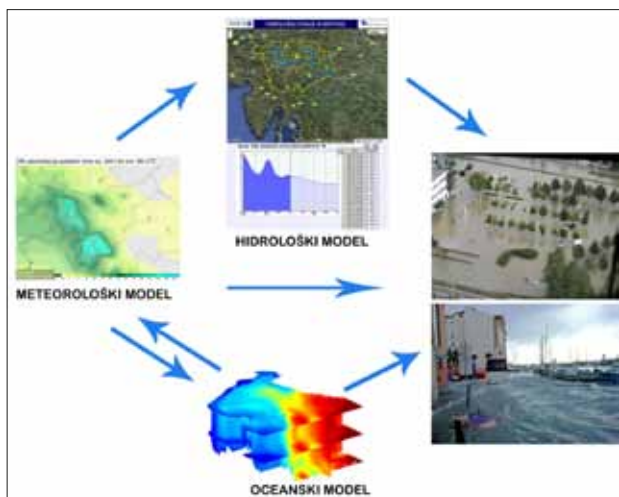
Dobra napoved stanja morja vodi do kakovostnejše vremenske napovedi, ta pa je ključna pri oblikovanju hidroloških napovedi, zato nam boljše poznavanje stanja morja omogoča boljšo hidrološko napoved. Boljša napoved stanja morja je torej povezana z višjo poplavno varnostjo v celinski Sloveniji. Ko seštejemo milijonsko škodo, ki so jo v Sloveniji le v zadnjih nekaj letih povzročili visoke plime, visoki valovi in hudourniške poplave, se finančni vložek vzpostavitve oceanografskih modelov, ki nam lahko pomagajo pri omilitvi posledic teh pojavov, ne zdi več tako velik.

## Numerični modeli morja

Agencija RS za okolje pri vzpostavitvi modelske verige za napovedovanje stanja morja med drugim sodeluje z Morsko biološko postajo v Piranu (MBP) ter s Katedro za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo UL (UL FGG). Namen sodelovanja je vzpostavitev modelske verige, ki vključuje hidrološki model za vodnatost Save in Soče, valovni model SWAN ter oceanski model POM. Temu je, če je treba, na primer ob razlitju nafte na morju, priključen model razlitja onesažil NAFTA3d. Model NAPOM za površinsko vzbujanje in toplotne tokove uporablja rezultate atmosferskega modela Aladin/SI. Srednjeročni cilj omenjenih naporov je dvosmerno sklopljena modelska veriga, pri kateri bi model Aladin/SI vplival na dinamiko v oceanskih modelih (NAPOM, SWAN) in nasprotno, pri čemer bi rezultati oceanskih modelov med integracijo vplivali na dinamiko modela Aladin/SI. Nabor in komunikacija med osrednjimi modeli modelske verige, ki se trenutno postavlja, sta shematsko prikazana na sliki 1.

Eden izmed ciljev modelske verige je izboljšana varnost pred poplavami tako na obali kot celini. Na kratko si oglejmo nekatere numerične modele za napoved stanja morja, ki so na ARSO, MBP ali UL FGG že postavljeni in so že del podpore pri odločitvah pristojnih služb.

**Model NAPOM (POM):** model NAPOM (Northern Adriatic Princeton Ocean Model) je različica ocean-



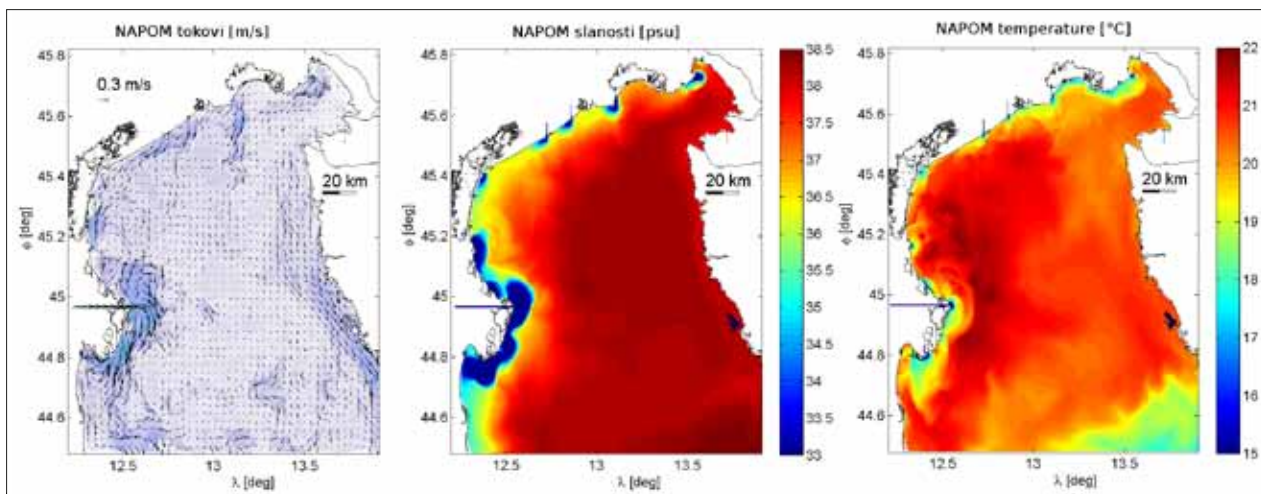
Slika 1: Komunikacija med numeričnimi modeli v dvosmerno sklopljeni modelski verigi. Oceanski in atmosferski model si vzajemno pošiljata robne pogoje med integracijo. Kakovostna napoved stanja morja vodi do kakovostnejše napovedi vremena in tako do boljše hidrološke napovedi.

Figure 1: Communication between numerical models in a two-way coupled modelling chain. The ocean and atmospheric models allow for reciprocal edge data transmission during integration. Quality prognosis of sea state enables better quality of both weather and hydrological prognosis.

skega modela Princeton Ocean Model [6], postavljena na domeno severnega Jadranskega morja, kamor sta ga postavila Vlado Malačič in Boris Petelin z Morske biološke postaje Piran, na ARSO pa je bil isti model postavljen s sodelovanjem Martina Vodopivca, Jureta Jermana in Neve Pristov. Gre za tridimenzionalni cirkulacijski model za izračun tokov, plimovanja in advekcije ter disperzije temperature in slanosti. Računska domena modela NAPOM je sestavljena iz ortogonalne horizontalne mreže (232 x 248 celic) s prostorsko resolucijo 600 metrov in iz krivočrtne vertikalne  $\sigma$ -mreže z 11 sloji. Model je enostransko gnezden v model AREG (Adriatic Regional Model) operativnega prognostičnega centra za Jadransko morje pri italijanskem Nacionalnem inštitutu za geofiziko in vulkanologijo INGV v Bologni [8]. Enostransko gnezdenje pomeni, da model NAPOM dobiva robne pogoje in inicializacijske podatke od modela AREG, v nasprotni smeri pa komunikacije med modeloma ni.

Nekaj rezultatov modela NAPOM je predstavljenih na sliki 2.

**Model SWAN:** model SWAN (Surface Wave ANalysis) je dvodimenzionalen valovni model, razvit na univerzi v Delftu, omogoča pa izračun značilne višine in smeri (valovnega vektorja) valov v modelski domeni. Vhodna podatka modela sta tokovanje na površini in vetrovno polje, ki ga zagotavlja atmosferski model Aladin/SI. Rezultate valovnega modela potrebujemo za ustrezno obravnavo turbulentne mejne plasti tako v atmosferi

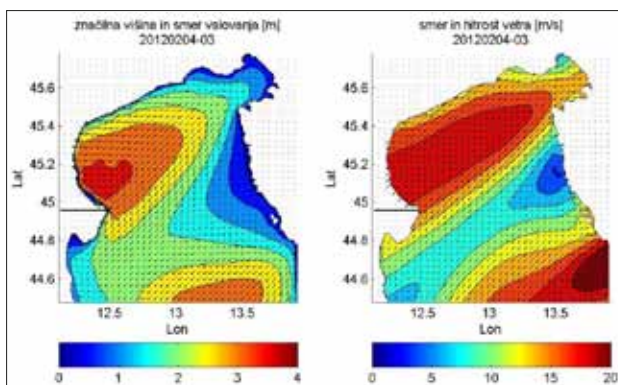


Slika 2: Nekaj rezultatov modela NAPOM. Površinsko hitrostno polje (levo), površinske temperature morja (center) in površinsko slanostno polje (desno) 8. januarja 2011. Na abscisni osi so navedene geografske dolžine, na ordinatni pa geografske širine v stopinjah.

Figure 2: A selection of the NAPOM model products. Surface speed field (left), surface temperature of the sea (centre) and sea surface salinity (right) as of 8 January 2011. The abscissa axis shows the longitude and the ordinate axis the latitude expressed in degrees.

kot morju. Model, postavljen na ARSO, omogoča napovedovanje značilne smeri in višine valovanja na računski domeni severnega Jadranskega morja in tudi v celotnem Jadranskem morju. Sklopitev modela Aladin/SI z oceanskim modelom POM bo omogočila boljše napovedi vetra pri tleh in boljši opis toplotnih tokov ter gibalne količine v mejni plasti. Rezultate modela SWAN predstavljamo na sliki 3.

Rezultati modela SWAN so danes poleg vetrovnih polj modela Aladin/SI eden ključnih dejavnikov pri določanju



Slika 3: Rezultati valovnega modela SWAN, ki omogoča napoved značilne smeri in višine valovanja v Tržaškem zalivu. Na sliki so prikazane značilna višina in smer valovanja (levo) ter smer in hitrost vetra (desno). Na abscisni osi so navedene geografske dolžine, na ordinatni pa geografske širine v stopinjah.

Figure 3: Results of the SWAN wave model which is used for prognosis of the typical wave direction and height in the Gulf of Trieste. The picture depicts a typical wave height and direction (left) and the direction and speed of the wind (right). The abscissa axis shows the longitude and the ordinate axis the latitude expressed in degrees.

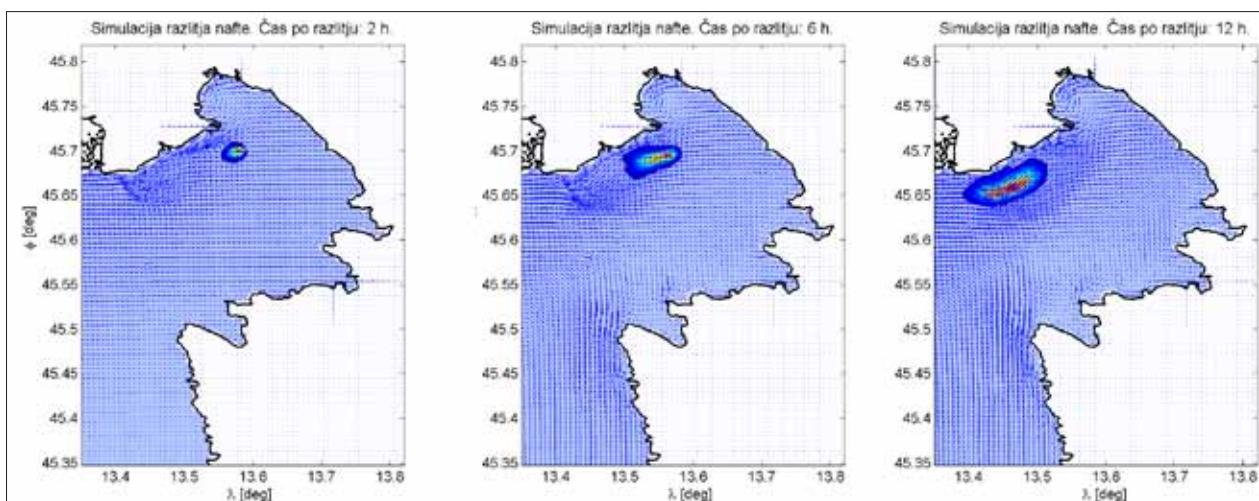
stopnje ogroženosti slovenske obale po sistemu Meteo alarm.

**Model NAFTA3d:** model NAFTA3d je namenjen simulacijam razlitja ogljikovodikov v morju [8], [9]. Model je v tej številki podrobno predstavljen [10], zato mu tu namenimo le kratek opis. Model kot vhodni podatek potrebuje tridimenzionalna tokovna polja na pravokotni prostorski mreži, nato pa z metodo sledenja delcev simulira advekcijo in disperzijo naftega madeža na računski domeni. Na voljo ima tudi biogeokemični modul, s katerim je mogoče upoštevati emulzifikacijo, izhlapevanje in še nekatere druge procese preobrazbe ogljikovodikov v morskem okolju. Model NAFTA3d se uporablja občasno, torej takrat, ko pride do izlitja ogljikovodikov oziroma ko obstaja nevarnost izlitja (na primer nasedla ali goreča ladja), vendar mora ob zagonu pridobiti začetne pogoje, trenutno na primer hidrodinamiko iz modela NAPOM in vetrovno polje iz modela Aladin/SI. Na sliki 4 so prikazani rezultati simulacije razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Scenarij je izračunan za primer razlitja nafte v severnem delu Tržaškega zaliva ob močni burji 29. januarja 2012.

## Sklepne misli

V prispevku smo na kratko predstavili numerične modele, ki se v Sloveniji trenutno uporabljajo za napoved in analizo fizikalno-kemijskega stanja morskega okolja. Omenjena modelska veriga je bila postavljena in se vzdržuje s skupnimi prizadevanji Agencije RS za okolje, Morske biološke postaje Piran ter Katedre za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Skupno delo je usmerjeno k zagotavljanju delujoče in zanesljive modelske verige numeričnih modelov, ki bodo z zagotavljanjem kakovostnih napovedi stanja okolja omo-





Slika 4: Primer simulacije razlitja nafte v Tržaškem zalivu z modelom NAFTA3d. Na abscisni osi so navedene geografske dolžine, na ordinatni pa geografske širine v stopinjah.

Figure 4: An example of oil spill in the Gulf of Trieste based on the NAFTA3d model. The abscissa axis shows the longitude and the ordinate axis the latitude expressed in degrees.

gočali boljše razumevanje našega okolja, večjo varnost prebivalcev Slovenije ter kakovostnejše odločanje pristojnih služb ob izjemnih okoljskih dogodkih.

## Viri in literatura

1. Cushman-Roisin, B., Malačič, V., Gačič, M. Tides, seiches and low-frequency observations. V: B. Cushman-Roisin in drugi (ur.), *Physical Oceanography of the Adriatic Sea*, 217–240.
2. Ličer, M., Jeromel, M., Vodopivec, M., 2012. Prognoziranje plimovanje morja 2012. Ljubljana, Agencija republike Slovenije za okolje.
3. Markošek, J., 2012. High resolution NWP model in operational use in Slovenia. <http://www.euroforecaster.org/latenews/slovenia.pdf> (11. 1. 2012).
4. Bye, J., 1996. Coupling ocean-atmosphere models. *Earth-Science Reviews* 40. 149–162.
5. Warner, J., Perlin, N., Skillingstad, E., 2008. Using the Model Coupling Toolkit to couple earth system models. *Environmental Modelling and Software* 23, 1240–1249.
6. Blumberg, A., Mellor, G., 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. V: N. S. Heaps (ur.), *Three Dimensional Coastal Models*, American Geophysical Union, Washington, 1–16.
7. Oddo, P., Pinardi, N., Zavatarelli, M., 2005. A numerical study of the interannual variability of the Adriatic Sea (2000–2002). *Science of the Total Environment* 353, 39–56.
8. Širca, A., 1992. Modeliranje transporta polutantov po metodi sledenja delcev. Magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, FAGG.
9. Žagar, D., 1994. Tridimenzijski model za simulacijo širjenja nafte. Magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, FAGG.
10. Žagar, D., Ramšak, V., Ličer, M., Malačič, V., 2012. Uporaba numeričnih modelov ob razlitjih nafte na morju. V tej številki revije *Ujma*, 168–174, Ljubljana.