

Stručni članak | Professional Paper | UDK 628.193:665.7][497.5 Split]
Primljeno (Received): 15. 7. 2010.; Prihvaćeno (Accepted): 28. 2. 2011.

NUMERIČKA ANALIZA PRONOSA NAFTNOG ONEČIŠĆENJA U LUCI SPLIT

Doc. dr. sc. Goran Lončar, dipl. ing. građ.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10000 Zagreb
goran.loncar@grad.hr

Marin Paladin, dipl. ing. građ.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10 000 Zagreb

Dr. sc. Dalibor Carević, dipl. ing. građ.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Gordana Beg-Paklar, dipl. ing. fiz.

Institut za oceanografiju i ribarstvo
Šetalište Ivana Meštrovića 63,
21000 Split

Prof. dr. sc. Vladimir Andročec, dipl. ing. brod.

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Prikazana je numerička analiza pronosa naftnog onečišćenja u akvatoriju luke Split uslijed nastupa ekološkog incidenta. Motivacija za provedbu ovih analiza vezana je uz stvarnu ekološku nesreću koja se dogodila 22. 3. 2010. oko 19 h na vezu 12/13 gata Sv. Petra pri čemu je isteklo oko 34 tone dizela D2. Numeričke analize hidrodinamike i pronosa provedene su uz hipotetsko i stacionarno modelsko vjetrovno forsiranje s brzinama 5, 10 i 15 m/s iz smjerova NE, E, SE, S, SW i NW. Unos 34 tone naftnog onečišćenja modeliran je sa stacionarnim protokom tijekom 60 minuta, a simulacijama je obuhvaćen i nastavni period od 17 sati. Numeričkim modelom su, osim disperzijskog procesa, obuhvaćeni i reakcijski procesi emulzifikacije i disolucije uz definirane ovisnosti o temperaturi zraka, evaporaciji, naoblaci te toplinskoj emisivnosti vode, zraka i nafte. Rezultati provedenog istraživanja ukazuju na formiranje potencijalnih zona u kojima dolazi do zadržavanja nafte. Upravo te zone predstavljaju položaje na kojima bi se moglo lokalno intervenirati u smislu povećanja učinka sanacijskih mjera.

Ključne riječi:
izljev nafte, numerički model, luka Split

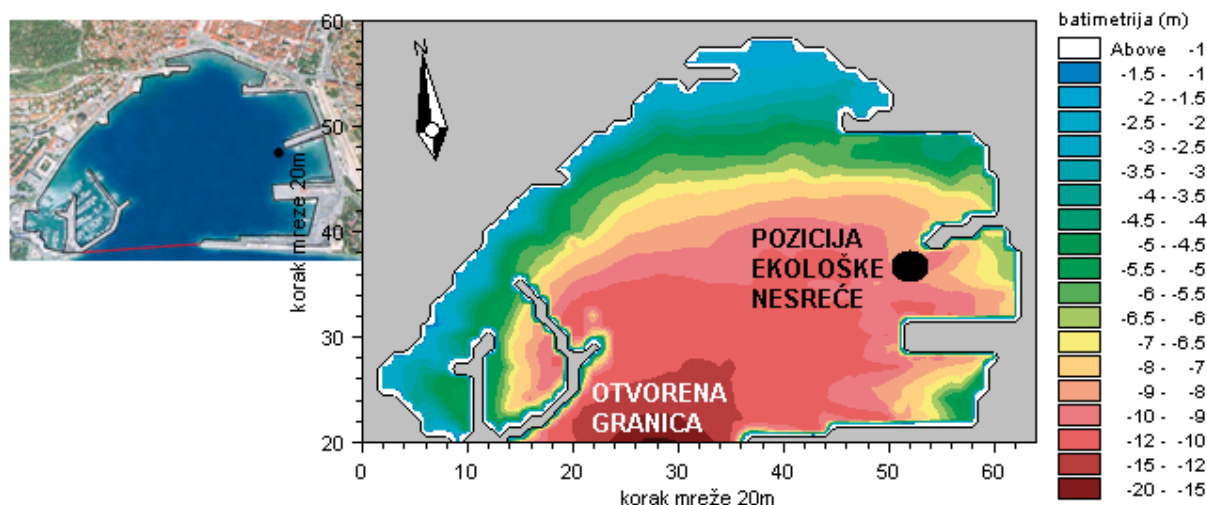
1. UVOD

Izlijevanje nafte u lučkim akvatorijima predstavlja klasični primjer ekološkog incidenta. U Republici Hrvatskoj na snazi je „Plan intervencija kod iznenadnog onečišćenja mora u Republici Hrvatskoj“ (NN 92/2008). Plan intervencija se primjenjuje kod iznenadnog onečišćenja mora uljem i/ili smjesom ulja razmjera većeg od 2000 m³, opasnim i štetnim tvarima te kod izvanrednih prirodnih događaja u moru. Za onečišćenja uljem i/ili smjesom ulja razmjera manjeg od 2000 m³, za manji opseg i jačinu izvanrednog prirodnog događaja u moru primjenjuje se županijski plan intervencija kod iznenadnih onečišćenja mora koji, uz prethodnu suglasnost središnjeg tijela državne uprave za zaštitu okoliša, donosi predstavničko tijelo županije. Pod pojmom ulje smatraju se sva postojana ugljikova mineralna ulja, kao što su sirova nafta i njeni derivati, te talozi i otpadna ulja. Pod pojmom smjesa ulja smatra se smjesa s bilo kakvim sadržajem ulja. Već na razini izrade studija utjecaja na okoliš marina, luka i lučica, od izrađivača studija uobičajeno se zahtjeva i analiza posljedica i mogućih sanacijskih mjera u slučaju izlijevanja većih količina efluentnih sadržaja iz plovila. Generalni pristup ovom problemu je da se onemogućiti širenje izlivena nafte izvan gabarita lučkog akvatorija kroz što hitniju intervenciju poput postavljanja plutajućih brana za sprječavanje širenja i lokalizaciju onečišćenja, prikupljanja onečišćenja s površine mora u specijalizirane pokretne spremnike specijaliziranim uređajima tzv. skimmerima te korištenje raznih prirodnih i umjetnih vlakana koja imaju sposobnost apsorpcije uljnog onečišćenja, tzv. apsorbensi. Sve navedene metode mogu se primjenjivati u RH, jer postoji više specijaliziranih tvrtki koje posjeduju odgovarajuću opremu za izvođenje navedenih zahvata. U svijetu postoje i druge metode saniranja morske površine onečišćene naftom kao što su spaljivanja nafte na površini mora, upotreba kemijskih disperzivnih sredstava i metoda biorazgradnje pomoću

bakterija, gljivica i plijesni. Koja će se metoda saniranja onečišćenja koristiti, ovisi prije svega o raspoloživim sredstvima te o karakteristikama svakog pojedinog područja i slučaja onečišćenja.

U slučaju većih luka, poput luke Split, bilo bi vrlo poželjno prognozirati pozicije na kojima se u slučaju izlijevanja nafte može očekivati njezino zadržavanje. Sam lokalitet takvih zona unutar lučkog akvatorija primarno je ovisan o položaju incidenta te dinamici morskih struja i vjetrova. Obzirom da je vjetrovno djelovanje bitan generator strujanja u akvatoriju zatvorenih lučkih bazena, prvotno se nameće potreba za uspostavljanjem modela strujanja baziranog na vjetrovnom forsiranju. Nakon dobivanja modelskih rezultata o polju strujanja, pri karakterističnim stanjima atmosfere (primarno vjetra), moguće je prognozirati pronos i eventualno zadržavanje nafte u predmetnoj prostornoj domeni. Ovakav pristup korišten je i u sklopu provedenih istraživanja prikazanih u ovom radu, koji je, prema spoznajama autora, prvi takve vrste u Republici Hrvatskoj. Važan doprinos numeričkom modeliranju pronosa nafte u moru ostvaren je od strane autora Korotenko i sur. (2001., 2004., 2010.). Analiziran je slučaj izlijevanja nafte u akvatoriju luke Split. Prvotno je uspostavljen 3D numerički model strujanja koji je na kontaktu mora i atmosfere forsiran stacionarnim poljima vjetra s brzinama 5, 10 i 15 m/s iz smjerova NE, E, SE, S, SW i NW. Rezultantna polja strujanja poslužila su kao osnova za daljnju numeričku analizu pronosa naftnog onečišćenja uključujući relevantne reaktivne procese. Kako je 22. 3. 2010. došlo do izlijevanja 34 tone nafte na vezu 12/13 na gatu Sv. Petra u provedenim numeričkim analizama je korišten upravo identičan scenario o poziciji i intenzitetu ekološkog incidenta (slika 1).

Luka Split je trenutno najveća putnička trajektna luka u Hrvatskoj i ima poseban značaj za organizaciju i odvijanje pomorskog prometa. Gustoća prometa u



Slika 1: Prostorna domena numeričkog modela strujanja i pronosa naftnog onečišćenja s batimetrijskom podlogom te pozicijom ekološkog nesreće koja je nastupila 22. 3. 2010. na vezu 12/13 na gatu Sv. Petra

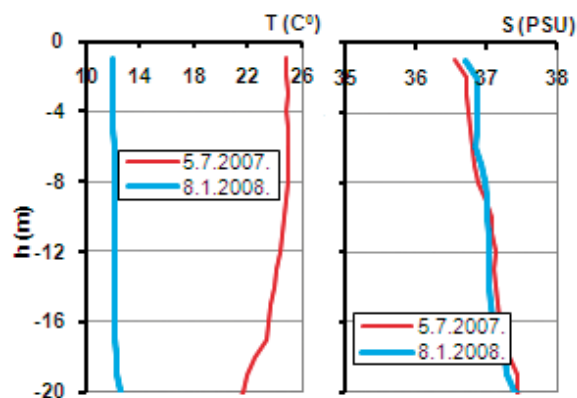
najfrekventnijim ljetnim mjesecima bi se uskoro mogla povećati sa sadašnjih cca 250 na 400 uplovljavanja i isplovljavanja dnevno. Luku koriste linijski putnički brodovi, trajekati, brzi katamarani, turistički jedrenjaci i jahte te veliki cruiseri do dužine 185 m i gaza 7 m. Unutar akvatorija luke postoje i nautički sadržaji. Dinamika razvoja pomorskog prometa u svijetlu prognoze rasta putničkog i trajektnog prometa upućuju na povećanje vjerojatnosti ekoloških incidenata pa predložena metodologija istraživanja i dobiveni rezultati njene primjene mogu biti i od praktične koristi.

2. USPOSTAVA NUMERIČKOG MODELA STRUJANJA

Analize strujanja pri vjerovnom forsiranju provedena je s 3D numeričkim modelom Mike 3 (www.dhigroup.com, verzija 2005). Model je baziran na metodi konačnih diferencija s kojom se rješava sustav jednadžbi očuvanja količine gibanja (Navier-Stokesove jednadžbe s Reynolds-ovim osrednjavanjem) i jednadžbi kontinuiteta za skalarna polja. Osnovne karakteristike, procesne jednadžbe i numeričke formulacije samog modela objašnjene su detaljnije u radu (Lončar i sur., 2010.). U provedenom istraživanju korištena je modelska domena s ekvidistantnom diskretizacijom u horizontalom $D_x=D_y=20\text{m}$ i u vertikalnom smjeru $D_z=1\text{m}$ (slika 1). Vremenski proračunski korak u provedenim simulacijama strujanja iznosio je $Dt=4\text{s}$. Za potrebe uspostave modela provedeni su preliminarni istražni radovi detaljnog batimetrijskog premjera s multi-beam tehnologijom temeljem kojeg je dobiven raster informacija s prostornim korakom od 2.5 m unutar luke.

Dinamika morskih razi na otvorenoj granici modela definirana je temeljem 7 osnovnih konstituenata plimnog signala s odgovarajućim amplitudama i faznim pomacima (<http://skola.gfz.hr>). Polja temperature i saliniteta mora u vertikalnoj ravnini otvorene granice usvojena su kao horizontalno homogena i stacionarna tijekom 18 sati simulacijskog perioda. Za vertikalnu raspodjelu korišteni su aritmetički osrednjeni rezultati dvaju mjerenja s CTD sondom (slika 2) smještenom ispred samog ulaza u luku u terminima 8. 1. 2007. i 5. 7. 2007. Početni uvjeti temperatura i saliniteta mora također su usvojeni kao horizontalno homogena te uz vertikalnu raspodjelu prema mjerenjima na spomenutoj CTD postaji. Utjecaj toplinske izmjene između mora i atmosfere na samo polje strujanja nije uzet u obzir, budući da je obuhvaćeni simulacijski period relativno kratak.

Rezultantna polja strujanja dobivena usvajanjem navedenih početnih i rubnih uvjeta prikazana su u sljedećem poglavlju.



Slika 2: Vertikalna raspodjela temperatura i saliniteta mora izmjerena na CTD postaji smještenoj ispred ulaza u luku u terminima 8. 1. 2007. i 5. 7. 2007.

3. USPOSTAVA NUMERIČKOG MODELA PRONOSA NAFTE

Nadgradnja osnovnog modela hidrodinamike dobivena je implementacijom modula za pronos nafte. Naftno onečišćenje je prezentirano sa skupom sitnih diskretnih čestica u pripadnim prostornim koordinatama. Za konvektivno-difuznu komponentu pronosa korišten je Lagrange-ov model diskretnih čestica. Članovi konvekcije proračunavaju se na bazi brzina strujanja dobivenih iz hidrodinamičkog dijela modela, dok je utjecaj turbulentne difuzije tretiran kao slučajni i neovisan Markovljev proces (Gardiner, 1985.). Nakon unosa čestice prate se njeni relativni diskretni pomaci kroz stacionarni referentni koordinatni sustav u funkciji vremena, a proračunata distribucija gustoće skupa čestica interpretira se kao koncentracija onečišćenja. Pomaci, odnosno transport čestica proračunava se prema metodologiji slučajnog koraka (eng: random walk) u kojoj se rješavaju Fokker-Planck-ova i Langevin-ova jednadžba (Gardiner, 1985., Kloaden i Platen, 1995.).

Širenje nafte po površini mora generirano je s dva mehanizma. Prvi je induciran razlikom u gustoći nafte i mora te površinskom napetošću (Fay, 1969., Mackay i sur., 1980.). Pri tome se širenje odvija u tri faze (Fay, 1969.). U prvoj fazi su bitne sile gravitacije i inercije, u drugoj fazi sile gravitacije i viskoznosti, a u trećoj fazi ravnotežno stanje postignuto između sila površinske napetosti i sile viskoznosti. Drugi mehanizam širenja je disperzija uzrokovana valovima, vjetrom i strujanjem mora. Disperzija dominira procesom širenja nakon dekompozicije naftnog sloja u niz separiranih mrljica sa stabilnom površinom.

Evaporacija naftnog onečišćenja na površini mora ovisna je o kemijskom sastavu nafte, temperaturi mora i zraka, brzini vjetera, solarnoj radijaciji te površini i

debljini naftnog sloja. Uslijed evaporacije dolazi do povećanja gustoće i viskoznosti nafte te do promjene točke fluidizacije (eng: pour point). U dosadašnjim pokušajima kvantifikacije evaporacije (Mackay i sur., 1980.) uobičajeno je usvajanje pretpostavki o neograničenoj difuziji u području faze nafte, formiranoj idealnoj mješavini nafte i zanemarivanju parcijalnog tlaka komponenti prisutnih u zraku naspram tlaka isparavanja. Rata evaporacije u tom slučaju može se opisati jednadžbom (Mackay i sur., 1980.):

$$N_i^e = \frac{k_{ei} \cdot P_i^{SAT}}{RT} \cdot \frac{M_i}{\rho_i} \cdot X_i \quad (1)$$

gdje je: N_i^e rata evaporacije frakcije i [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]; k_{ei} koeficijent pronosa mase za frakciju i [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]; P_i^{SAT} tlak isparavanja frakcije i [Pa]; R plinska konstanta [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$]; T temperatura [K], M_i molarna masa frakcije i [$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$]; ρ_i gustoća frakcije i [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], X_i molarni omjer frakcije i u ukupnoj mješavini [1]; i indeks frakcije.

Procjena k_{ei} je definirana prema Mackay i sur. (1980.) izrazom:

$$k_{ei} = k \cdot A_N^{0.045} \cdot Sc_i^{-2/3} \cdot U_V^{0.78} \quad (2)$$

gdje je: k modelski baždarni koeficijent; A_N površina površinskog sloja nafte [m^2]; Sc_i Schmidt-ov broj za komponentu i [1]; U_V brzina vjetra 10 m nad površinom mora [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Pronos uzduž vertikale morskog stupca uzrokovan je djelovanjem više čimbenika poput disolucije, disperzije, akomodacije i sedimentacije. Disperzija i akomodacija su najutjecajni čimbenici vertikalnog pronosa u kraćim vremenskim razdobljima nakon izlivanja nafte (prvih 7 dana). Disperzija je mehanički proces u kojem turbulencija razdvaja grupe čestica nafte i formira emulziju nafta-u-vodi. Takva emulzija nije stabilna pa čestice nafte imaju tendenciju ponovnog vraćanja na površinu i ponovnog spajanja. Ipak, stabilizacija emulzije može se provesti s česticama koje su na jednoj strani hidrofilne, a na drugoj hidrofobne. Time se smanjuje prianjanje između vode i nafte te se onemogućuje ponovno spajanje čestica nafte u veće nakupine. Proces formiranja takovih koloida naziva se akomodacija. Vertikalnom disperzijom reducira se volumen naftne mrlje na površini, no ne mijenjaju se fizikalno-kemijska svojstva nafte kao što je to slučaj pri evaporaciji.

U korištenom modelu se dio površine mora, disperziranog u vertikalnom stupcu u jedinici vremena, tretira kao ponor, odnosno izgubljeni dio površine mora. U modelskom proračunu se koriste izrazi:

$$D = D_a D_b \quad (3)$$

$$D_a = \frac{0.11(1+U_V)^2}{3600} \quad (4)$$

$$D_b = \frac{1}{1+50\mu_N h_N \gamma_{NM}} \quad (5)$$

gdje je: D_a dio površine mora disperziran u jedinici vremena; D_b dio disperzirane nafte koja se gubi iz površinskog sloja nafte; μ_N dinamička viskoznost nafte [$10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$], h_N debljina površinskog sloja nafte [cm]; γ_{NM} naprežanje na kontaktnoj plohi mora i nafte (usvojena vrijednost $200 \mu\text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$, Mackay i sur., 1980.).

U modelskom proračunu disolucije usvojena je pretpostavka o neograničenoj topivosti ugljikovodika, a čime se omogućuje upotreba izraza (Mackay i sur., 1980.):

$$\frac{dV_{ds_i}}{dt} = K_{S_i} C_i^{SAT} X_{moli} \frac{M_i}{\rho_i} A_N \quad (6)$$

gdje je: C_i^{SAT} topivost frakcije i ; K_{S_i} koeficijent transfera mase za disoluciju frakcije i ; e_i koeficijent odgovarajućim vrijednostima 1.4 (alkani); 2.2 (aromatici); 1.8 (sintetski polimeri).

Emulzifikacija je proces koji uzrokuje postojanost nafte na morskoj površini putem formirane emulzije voda-u-nafti (disperzirane čestice vode u nafti). Takva emulzija pretvara naftu u vrlo viskoznu mješavinu koja može sadržati i do 80% vode. Postojeći modeli emulzifikacije su samo empiričke naravi, a u provedbi prikazanog numeričkog modeliranja korištena je formulacija izražena sljedećim jednadžbama (IKU, 1984.):

$$\frac{dy_V}{dt} = R_1 - R_2 \quad (7)$$

$$R_1 = K_1 \frac{(1+U_V)^2}{\mu_N} (y_V^{\max} - y_V) \quad (8)$$

$$R_2 = K_2 \frac{1}{y_A \cdot y_W \cdot \mu_N} y_V \quad (9)$$

gdje je: y_V postotno učešće vodene faze; R_1 rata uvlačenja vode; R_2 rata otpuštanja vode; K_1 , K_2 baždarni koeficijent emulzifikacije; y_V^{\max} maksimalno postotno učešće vodene faze; y_A postotno učešće asfaltena u nafti; y_W postotno učešće prirodnog voska u nafti.

Rata uvlačenja vode R_1 povećava se s povećanjem temperature i brzine vjetra, a rata otpuštanja vode R_2 smanjuje se s povećanjem koncentracije asfaltena i prirodnog voska u nafti te s povećanjem viskoznosti nafte.

Tlak isparavanja i viskoznost značajno ovise o temperaturi. Kako bi se proračunala temperatura površinskog sloja nafte, modelom su obuhvaćeni i

sljedeći procesi: izmjena topline između zraka i nafte, izmjena topline između nafte i mora, emisija i primitak radijacijske topline na kontaktnoj plohi atmosfere i površinskog sloja nafte, emisija i primitak radijacijske topline na kontaktnoj plohi površinskog sloja nafte i mora, solarna radijacija, gubljenje topline kroz evaporaciju. Numerička modelska implementacija zasnovana je na radovima Duffie i Backmann (1970.) i Bird i sur. (1960.).

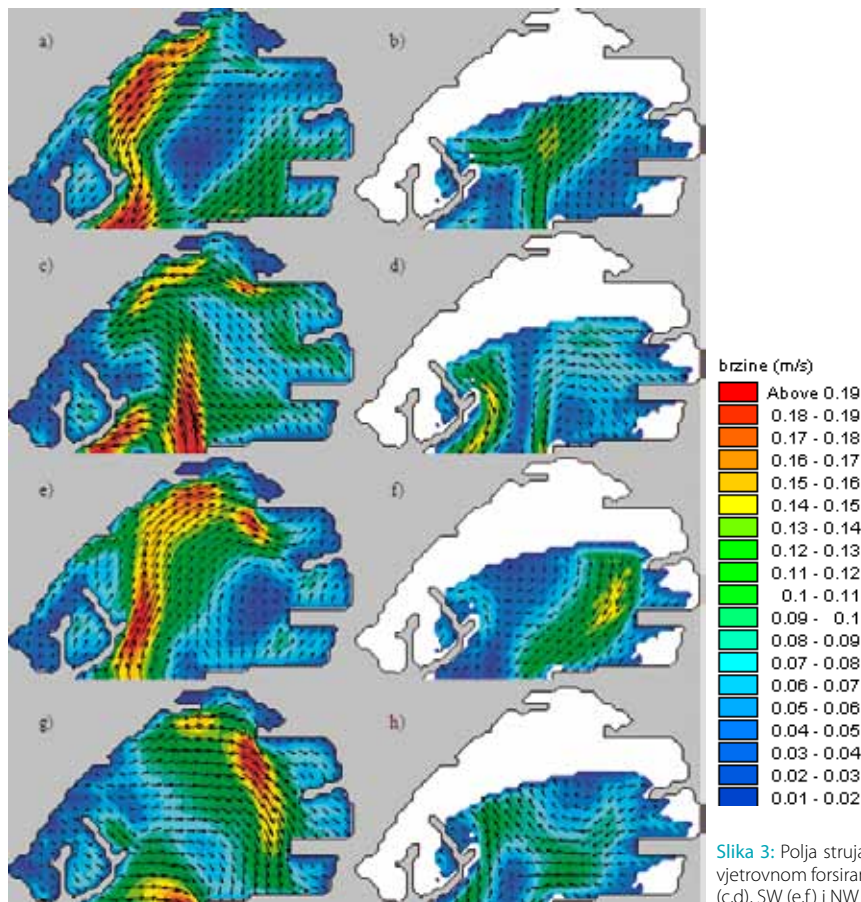
Nafta je mješavina više stotina ugljikovodika koji imaju značajnu varijaciju kemijskih svojstava. Zbog toga konačna svojstva nafte ovise o svojstvima njenih parcijalnih konstituenata. Brzina degradacije pojedinih konstituenata je različita pa naftno onečišćenje tijekom vremena mijenja svoje karakteristike. U sklopu provedenog modeliranja nafta je podijeljena u osam frakcija prema kemijskoj strukturi i destilacijskim karakteristikama.

Modelska formulacija za definiranje ovisnosti viskoznosti o temperaturi temeljena je na Kendell-Monroe jednadžbi i jednadžbi sugeriranoj od strane CONCAWE (1983.). Modelski tretman utjecaja učešća vodene faze i evaporacije na viskoznost oslanja se na rad Hossain i Mackay (1980.). Tlak isparavanja pri proizvoljnoj temperaturi definiran je prema Yong i Wang (1977.). Modelskim simulacijama obuhvaćene su i promjene u točki fluidizacije uslijed formiranja emulzije voda-u-nafti (CMFMWOS, 1985.).

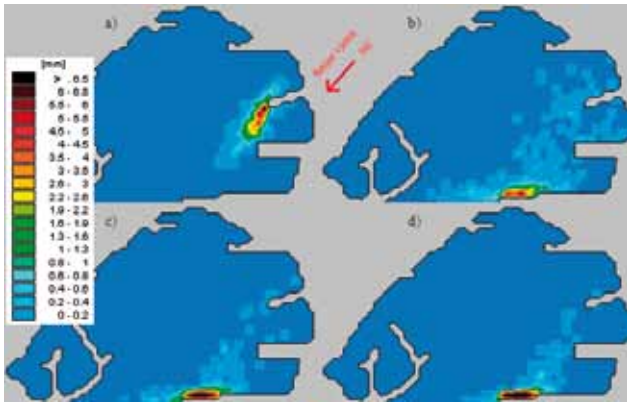
4. REZULTATI

Na [slici 3](#) prikazana su polja strujanja na 1 m i 7 m dubine pri vjetrovnom forsiranju od 15 m/s za analizirane smjerove NE, SE, SW i NW. Na [slici 4](#) dan je prikaz površinske raspodjele debljine sloja nafte pri brzinama vjetra 5, 10, i 15 m/s iz NE smjera u reprezentativnim terminima. Na [slikama 5, 6, 7, 8 i 9](#) također su prikazana polja debljine sloja nafte pri brzinama vjetra 5, 10, i 15 m/s za preostale analizirane smjerove E, SE, S, SW i NW. Prikazani rezultati dobiveni su za slučaj upuštanja naftnog efluenta na poziciji prikazanoj na [slici 1](#).

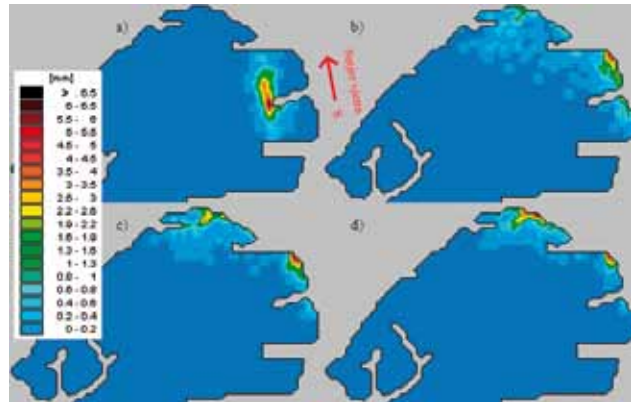
Na [slikama 5-9](#) mogu se uočiti lokalne zone s duljim zadržavanjem nafte pri inicijalnom istjecanju na poziciji prikazanoj na [slici 1](#). U slučaju djelovanja vjetra iz NE smjera zadržavanje nafte dogodilo bi se na vezu 28 ([slika 10](#)). Zona lukobrana ACI marine bila bi izraženije zahvaćena naftnim onečišćenjem pri vjetru E smjera. Vjetar SE smjera u većoj mjeri ugrožava zapadnu obalu luke u području ulaska u ACI marinu. Na vezovima 7/8/14 te u zoni obale kneza Branimira ([slika 10](#)) zadržavanje nafte dogodilo bi se u slučaju djelovanja vjetra iz S smjera. Djelovanje vjetra iz SW smjera uzrokuje zadržavanje nafte na području vezova 14/15, a vjetar NW smjera na području vezova 15/16 ([slika 10](#)). Nadalje, povećanje brzine vjetra uzrokuje



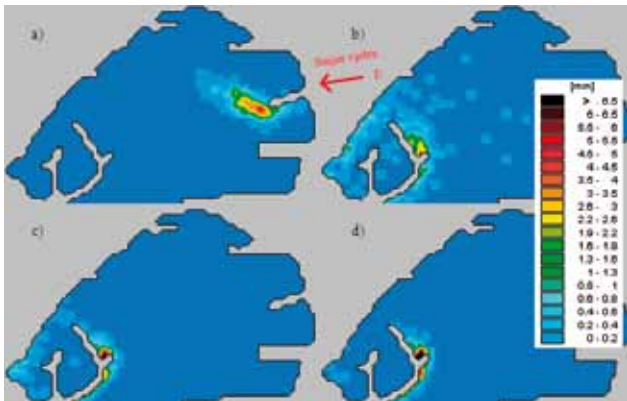
Slika 3: Polja strujanja na 1 m (lijevo) i 7 m (desno) dubine pri vjetrovnom forsiranju od 15 m/s za vjetar iz smjerova NE (a,b), SE (c,d), SW (e,f) i NW (g,h).



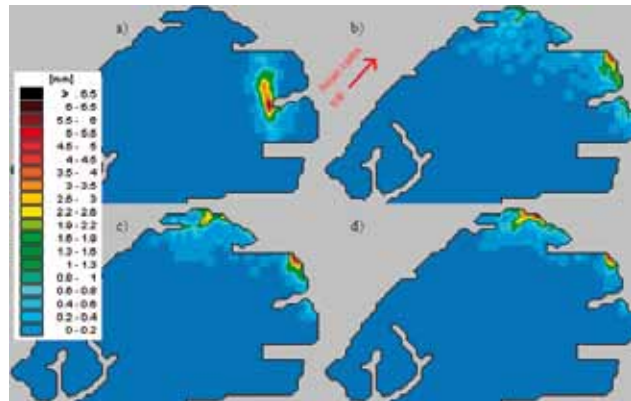
Slika 4: Debljine sloja nafte u površinskom horizontalnom sloju pri brzinama vjetra 5 (a,b), 10 (c), i 15 (d) m/s iz NE smjera (a - odmah po prekidu istjecanja, odnosno 60 minuta nakon početka istjecanja; b - 6 sati nakon početka istjecanja; c - 3 sata nakon početka istjecanja; d - 2 sata nakon početka istjecanja)



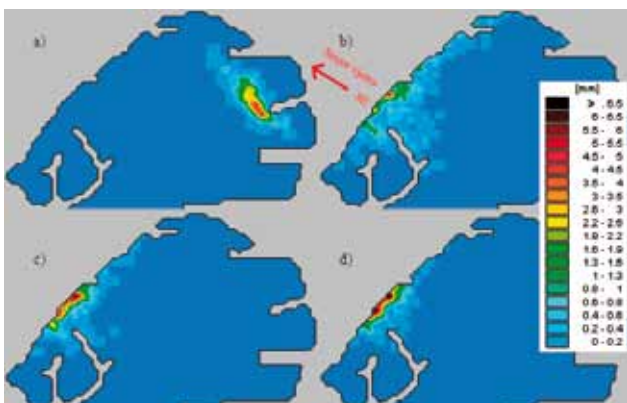
Slika 7: Debljine sloja nafte u površinskom horizontalnom sloju pri brzinama vjetra 5 (a,b), 10 (c), i 15 (d) m/s iz S smjera (a - odmah po prekidu istjecanja odnosno 60 minuta nakon početka istjecanja; b - 14 sati nakon početka istjecanja; c - 12 sati nakon početka istjecanja; d - 8 sati nakon početka istjecanja)



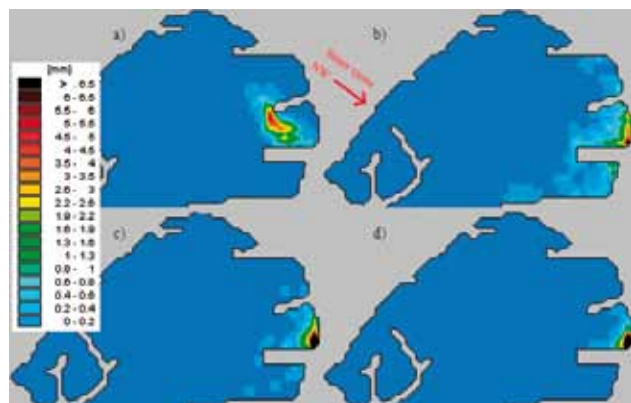
Slika 5: Debljine sloja nafte u površinskom horizontalnom sloju pri brzinama vjetra 5 (a,b), 10 (c), i 15 (d) m/s iz E smjera (a - odmah po prekidu istjecanja odnosno 60 minuta nakon početka istjecanja; b - 12 sati nakon početka istjecanja; c - 10 sati nakon početka istjecanja; d - 8 sati nakon početka istjecanja)



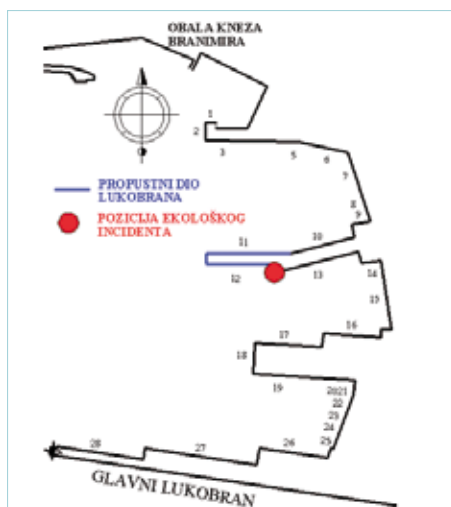
Slika 8: Debljine sloja nafte u površinskom horizontalnom sloju pri brzinama vjetra 5 (a,b), 10 (c), i 15 (d) m/s iz SW smjera (a - odmah po prekidu istjecanja odnosno 60 minuta nakon početka istjecanja; b - 14 sati nakon početka istjecanja; c - 12 sati nakon početka istjecanja; d - 8 sati nakon početka istjecanja)



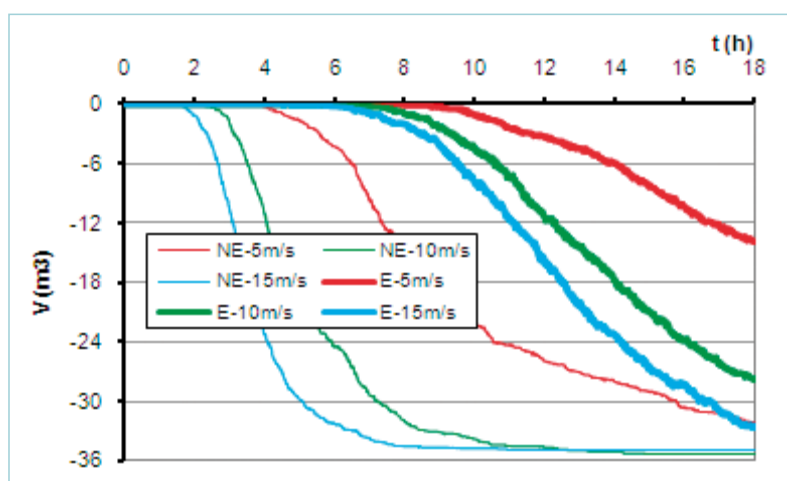
Slika 6: Debljine sloja nafte u površinskom horizontalnom sloju pri brzinama vjetra 5 (a,b), 10 (c), i 15 (d) m/s iz SE smjera (a - odmah po prekidu istjecanja odnosno 60 minuta nakon početka istjecanja; b - 14 sati nakon početka istjecanja; c - 12 sati nakon početka istjecanja; d - 8 sati nakon početka istjecanja)



Slika 9: Debljine sloja nafte u površinskom horizontalnom sloju pri brzinama vjetra 5 (a,b), 10 (c), i 15 (d) m/s iz NW smjera (a - odmah po prekidu istjecanja odnosno 60 minuta nakon početka istjecanja; b - 14 sati nakon početka istjecanja; c - 12 sati nakon početka istjecanja; d - 8 sati nakon početka istjecanja)



Slika 10: Karta vezova za istočnu obalu gradske luke Split



Slika 11: Kumulativni razvoj količine nafte koja je izašla iz modeliranog područja luke kroz otvorenu granicu modela tijekom 18 sati simulacije

smanjenje područja s izraženom koncentracijom nafte, ali se pritom pojavljuju i veće debljine naftnog sloja.

Na slici 11 prikazan je kumulativni razvoj volumena nafte koja je izašla iz modeliranog područja luke kroz otvorenu granicu modela. Prikazani dijagram odnosi se na slučaj izlivanja nafte na poziciji prikazanoj na slici 1. Širenje naftnog onečišćenja iz područja luke u okolno more (Splitski kanal) najizraženije je u slučaju vjetrova iz NE smjera, zbog intenzivnog površinskog strujanja usmjerenog prema izlazu iz luke. Pri vjetru E smjera izlazni intenzitet je nešto manji, a pri ostalim analiziranim smjerovima vjetrovnog djelovanja (SE, S, SW) naftno onečišćenje se zadržava u području akvatorija luke.

5. ZAKLJUČAK

Provedeno je numeričko modelsko istraživanje cirkulacije vodnih masa i pronosa naftnog onečišćenja na akvatorijalnom području luke Split. Za provedbu numeričkih analiza korišten je 3D numerički model. Numeričkim modelom prvotno su analizirana polja strujanja, a nastavno su provedene i analize pronosa nafte uz obuhvat niza relevantnih reakcijskih procesa. U svim

provedenim simulacijama korišteno je vjetrovno forsiranje, a slučaj vjetrovne tišine s dominacijom gradijentnih struja u cirkulaciji vodnih masa nije analiziran. U slučaju da se koristio model barotropnog strujanja, odnosno 2D model, polja strujanja koja su prikazana na slici 3 (na 1 m i 7 m dubine) bi zasigurno drugačije izgledala, a koliki bi utjecaj barotropnost imala na proces pronosa naftnog onečišćenja u površinskom sloju, bio bi cilj nekih daljnjih istraživanja.

Iako je analizirana samo jedna točka incidenta, dobiveni rezultati ukazuju na mogućnost prognoze pozicija na kojima dolazi do zadržavanja nafte pri djelovanju vjetrova iz određenog smjera. Također je primijećeno da su pri manjim brzinama vjetrova područja koncentriranog naftnog onečišćenja većih dimenzija.

Djelovanje vjetrova iz NE i E smjera uzrokuje intenzivnije odnošenje naftnog onečišćenja izvan područja luke, dok se pri djelovanju vjetrova iz smjerova SE, S, SW i NW onečišćenje zadržava u luci tijekom cjelokupnog analiziranog perioda od 18 sati.

Smjer daljnjeg istraživanja usmjerio bi se ka analizi utjecaja pozicije ispuštanja nafte na položaje zona zadržavanja. ■

LITERATURA:

- Bird, R.B., Steward, W.E., Lightfoot, E.N. (1960.): *Transport Phenomena*. Wiley and Sons, New York.
- CMFMWOS (1985.): Computer Model Forecasting Movements and Weathering of Oil Spills. *Final Report for the European Economic Community*, WQI and DHL.
- CONCAWE (1983.): Characteristics of Petroleum and its Behaviour at Sea. *Report No. 8/83*.
- Duffie, J.A., Beckmann, W. A. (1974.): *Solar Energy Thermal Processes*, Wiley Interscience, New York.
- Fay, J. (1969.): The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea. *Oil on the Sea* (ur. D.P. Hoult), Plenum Press, New York, 53-63.
- Gardiner, C.W. (1985.): *Handbook of stochastic methods for Physics Chemistry and Natural Science*. Springer-Verlag, Berlin.
- Hossain, K, Mackay, D. (1980.): Demoussifier - a new chemical for oil spill countermeasures. *Spill Technology Newsletter*, 5(6), 154-156.
- IKU (1984.): The experimental Oil Spill in Haltenbanken 1982. Institut for kontinentalsokkelundersøgelser, *IKU Publication No. 112*.
- Kloeden, P., Platen, E. (1995.): *Numerical Solution of Stochastic Differential Equations*. Springer-Verlag, Berlin.

- Lončar, G., Matković, M., Anročec, V. (2010.): Numerička analiza pronosa efluenta iz podmorskog ispusta. *Hrvatske vode*, 18(71), 1-11.
- Mackay, D., Bruijs, I., Cascarenhus, R., Peterson, S. (1980.): *Oil Spill Processes and Models*. EPS, R&D Division, Canada.
- Yong, W.E., Wang, H. (1977.): Modelling of Oil Evaporation in aqueous environment. *Water Research*, 11, 879-887.
- Korotenko, K., Mamedov, R., Mooers, C. (2001.): Prediction of the dispersal of oil transport in the Caspian Sea resulting from a continuous release. *Spill Sci. Technol. Bull.*, 6, 323-339.
- Korotenko, K., Mamedov, R., Kontar, A., Korotenko, L. (2004.): Particle tracking method in the approach for prediction of oil slick transport in the sea: Modelling oil pollution resulting from river input. *J. Mar. Syst.*, 48, 159-170.
- Korotenko, K., Bowman, M., Dietrich, D. (2010.): High-Resolution numerical model for Predicting the Transport and Dispersal of oil spilled in the Black Sea. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 21(1), 123-136.

NUMERICAL ANALYSIS OF OIL POLLUTION TRANSFER IN SPLIT HARBOUR

Abstract. The paper presents a numerical analysis of oil pollution transfer in the local seas of Split harbour due to the occurrence of an environmental accident. The analyses were conducted in relation to the actual environmental accident of 22 March 2010 at about 7 p.m. on berth 12/13 of Sv. Petar pier, when about 34 tonnes of diesel D2 spilled out.

Numerical analyses of hydrodynamics and transfer were conducted with hypothetical and stationary wind force velocities of 5, 10 and 15 m/s from the NE, SE, S, SW and NW directions. The inflow of 34 tonnes of oil pollution was modelled with stationary flow in the period of 60 minutes, while simulations also included the follow-up period of 17 hours. The numerical model included, aside from the dispersion process, the reactive processes of emulsification and dissolution, with defined dependence on air temperature, evaporation, cloud cover and thermal emissiveness of water, air and oil.

Results of the conducted investigation indicate formation of potential oil retention zones, i.e. locations where local interventions could be carried out with increased effects of rehabilitation measures.

Key words: oil spill, numerical model, Split harbour

NUMERISCHE ANALYSE DER ÖLPESTAUSBREITUNG IM HAFEN VON SPLIT

Zusammenfassung. Die numerische Analyse der Ausbreitung der durch einen Umweltvorfall verursachten Ölpest im Aquatorium des Hafens von Split wird dargestellt. Die Untersuchung ist durch einen tatsächlichen Umweltunfall motiviert, der am 22.3.2010 um 19 Uhr am Liegeplatz 12/13 am Kai St. Peter geschah, wobei etwa 34 Tonnen Diesel D2 ins Meer geflossen waren.

Die numerischen Analysen der Hydrodynamik und Ausbreitung wurden durchgeführt mit dem hypothetischen und stationären Modellwindforcing mit den Geschwindigkeiten von 5, 10 und 15 m/s aus den Windrichtungen NO, O, SO, S, SW und NW. Die Eintragung von 34 Tonnen Ölverschmutzung wurde mit der stationären Durchströmung in Dauer von 60 Minuten modelliert. Der anschließende Zeitraum von 17 Stunden wurde auch simuliert. Außer vom Dispersionsverfahren wurden im numerischen Modell auch die Reaktionsverfahren der Emulsifikation und der Auflösung einbezogen mit den definierten Abhängigkeiten von Lufttemperatur, Verdunstung, Bewölkung und Wärmeemissionsvermögen von Wasser, Luft und Öl.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung weisen auf die Gestaltung von potentiellen Zonen hin, in welchen Öl aufgehalten wird. Gerade diese Zonen sind die Stellen, wo man lokal intervenieren könnte, um die Wirkung von Sanierungsmaßnahmen zu erhöhen.

Schlüsselwörter: Ölauslauf, numerisches Modell, Hafen von Split