

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni študij vodarstva in
komunalnega inženirstva

Kandidatka:

Teja Jeglič

Modeliranje razlitja nafte v Tržaškem zalivu

Diplomska naloga št.: 141

Mentor:

doc. dr. Dušan Žagar

Somentor:

dr. Gregor Petkovšek

Ljubljana, 2010

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **TEJA JEGLIČ** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
»**MODELIRANJE RAZLITJA NAFTE V TRŽAŠKEM ZALIVU**«.

Ljubljana, _____ 2010

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	519.61/.64:532.5:551.46:665.61(043.2)
Avtor:	Teja Jeglič
Mentor:	doc. dr. Dušan Žagar
Somentor:	asist. dr. Gregor Petkovšek
Naslov:	Modeliranje razlitja nafte v Tržaškem zalivu
Obseg in oprema:	51 str., 23 sl., 35 en.
Ključne besede:	razlitje nafte, numerično modeliranje, Eulerjev pristop, advekcija, difuzija, Tržaški zaliv

Izvleček

V zadnjih dveh desetletjih je bilo na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo razvito orodje Nafta in Nafta2, ki temelji na Lagrangeovem opisu problema razlitja nafte v morju. Po Lagrangeovem opisu nafto obravnavamo kot skupek delcev, ki se gibljejo v danem hitrostnem polju. V tem diplomskem delu je predstavljen alternativen pristop, kjer pri numerični simulaciji uporabimo Eulerjev opis procesov, ki so pomembni pri modeliranju širjenja nafte po površini morja, kot so to na primer advekcija, difuzija zaradi lastne teže nafte in izhlapevanje. Takšen pristop omogoča obravnavo naftnega madeža kot porazdeljeno maso na vodni površini, kjer v enačbah kot glavna spremenljivka nastopa debelina naftnega madeža. Ker je proces difuzije zaradi lastne teže odvisen od debeline naftnega madeža na danem mestu, je v primerjavi z obstoječimi modeli, ki temeljijo na Lagrangeovi metodi sledenja delcev, formulacija difuzije v predlaganem modelu naravnejša. Osnovni principi novega modela so natančno predstavljeni in podprti s številnimi simulacijami, ki so bile izdelane v programu za matematično modeliranje MATLAB. Eulerjev pristop uporabimo na zgledu Tržaškega zaliva in ga primerjamo z obstoječim programom Nafta2, ter ga tudi nadgradimo za primer, ko se hitrostno polje s časom spreminja.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 519.61/.64:532.5:551.46:665.61(043.2)
Author: Teja Jeglič
Supervisor: assist. prof. dr. Dušan Žagar
Co-Supervisor: dr. Gregor Petkovšek
Title: Oil spill modelling in the Gulf of Trieste
Notes: 51 p., 23 fig., 35 eq.
Key words: Oil spill, Numerical models, Eulerian approach, Advection, Diffusion, Gulf of Trieste

Abstract

During the last two decades modeling tools called Nafta and Nafta2 were developed at the Faculty of Civil and Geodetic Engineering. The tool is based on the Lagrangian description of oil-spill problem, where the oil slick is split into oil droplets moving according to the surrounding velocity field. An alternative approach using Eulerian description of processes, which are relevant for spreading of oil slick on the sea surface is presented. Advection, diffusion due to gravity of oil and evaporation are also taken into account. The oil slick is represented as a continuous layered medium with the oil slick thickness as a main variable. The diffusion due to gravity-viscosity forces is precisely a function of the oil slick thickness, which results in a more natural description of this process within the proposed model compared to the Lagrangian-based particle tracking method used in all currently available modeling tools. Fundamentals of the new model are described in detail and are supported by numerous numerical simulations programmed in high-level technical computing language MATLAB. The Euler approach is also applied in a case study of the Gulf of Trieste and compared with the existing model Nafta2, including an upgrade with a time-dependent velocity field.

ZAHVALA

Hvala, Dušan in Gregor za pomoč pri nastanku tega dela. Morda se kdaj nismo v vsem strinjali, a le tako smo prišli do diplome vrednih rezultatov.

Hvala, mami, oči, Tanja, Tadeja, Peter, Frank, Pucky, Olli, Thorsten, Marjan, Anuška in ostali neimenovani, za vzpodbudo in potrpežljivost.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	OSNOVE MATEMATIČNEGA MODELIRANJA RAZLITJA NAFTE	5
2.1	Lastnosti nafte	6
2.2	Procesi pri razlitju nafte.....	7
2.2.1	Mehansko širjenje	9
2.2.2	Izhlapevanje.....	10
2.2.3	Emulzifikacija.....	12
2.2.4	Disperzija	14
2.2.5	Sedimentacija	15
2.2.6	Biološka razgradnja.....	15
2.2.7	Raztapljanje.....	16
2.2.8	Oksidacija	16
2.2.9	Odlaganje na obalo	16
2.3	Kratek opis obstoječega modela Nafta.....	17
3	CFD MODEL RAZLITJA NAFTE.....	19
3.1	Modeliranje širjenja nafte v 1D.....	20
3.1.1	Advekcija	21
3.1.2	Ohranitev »mase« naftnega madeža	22
3.1.3	Difuzija.....	25
3.1.4	Poljubna začetna oblika naftnega madeža.....	27
3.1.5	Izhlapevanje.....	27
3.2	Modeliranje širjenja nafte v 2D.....	29
3.2.1	Advekcija v 2D	29
3.2.2	Difuzija v 2D.....	31
3.2.3	Odlaganje na obalo	33
3.3	Kratek opis programa Euler v okolju MATLAB	34
4	RAZLITJE NAFTE V TRŽAŠKEM ZALIVU.....	39
4.1	Scenarij 1	40

4.2	Primerjava z modelom Nafta2	40
4.3	Scenarij 2	41
4.4	Scenarij 3	46
5	ZAKLJUČKI	47
VIRI	49

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz večjih nesreč tankerjev, ki so prevažali surovo nafto in so se zgodile od leta 1967 do leta 2009.....	2
Slika 2: Naraščanje viskoznosti v odvisnosti od časa po razlitju nafte.....	7
Slika 3: Časovna odvisnost pomembnosti posameznih procesov pri razlitju nafte.....	8
Slika 4: Shematski prikaz procesov pri razlitju nafte.....	8
Slika 5: Spreminjanje volumna nafte v odvisnosti od časa po razlitju nafte.....	14
Slika 6: Numerična shema za enodimenzionalni primer advekcije.....	20
Slika 7: Simulacije advekcije v 1D za drugi red aproksimacije (2UP).....	23
Slika 8: Simulacije advekcije v 1D za tretji red aproksimacije (3UP).....	23
Slika 9: Simulacije advekcije v 1D za tretji red aproksimacije (3UP), ko se hitrost naftnega madeža spreminja s krajem.....	24
Slika 10: 1D simulacija širjenja naftnega madeža pod vplivom advekcije (3UP) s konstantno hitrostjo naftnega madeža v_x , in difuzije (FTCS).....	26
Slika 11: 1D simulacija širjenja naftnega madeža za primer bolj splošne začetne oblike naftnega madeža ob razlitju.....	27
Slika 12: 1D simulacija širjenja naftnega madeža pod vplivom advekcije (3UP) s konstanto hitrostjo naftnega madeža v_x in difuzije, za primer, ko je in ko ni vključen proces izhlapevanja.....	28
Slika 13: Numerična shema TOP-12.....	30
Slika 14: Simulacija širjenja naftnega madeža v 2D zaradi advekcije pod vplivom konstantnega hitrostnega polja.....	31
Slika 15: Simulacija širjenja naftnega madeža v 2D pod vplivom advekcije in difuzije.....	32
Slika 16: Simulacija širjenja naftnega madeža v 2D pod vplivom advekcije in difuzije z neenakomernim hitrostnim poljem.....	34
Slika 17: Alternativna prikaza simulacije širjenja naftnega madeža v 2D pod vplivom advekcije in difuzije.....	36
Slika 18: Posplošitev za primer, ko hitrostno polje ne kaže le v smeri I. kvadranta.....	37
Slika 19: Hitrostno polje.....	39
Slika 20: Scenarij 1, ko se približno 20 km severno in 10 km zahodno od Piranskega zaliva razlije 52500 m ³ nafte.....	42

Slika 21: Scenarij 1 v programu Nafta2.....	43
Slika 22: Scenarij 2, ko se po približno 20 h velikost in smer vetra začne spreminjati.....	44
Slika 23: Scenarij 3, kjer so parametri identični kot pri scenariju 2, le da upoštevamo še proces izhlapevanja	45

1 UVOD

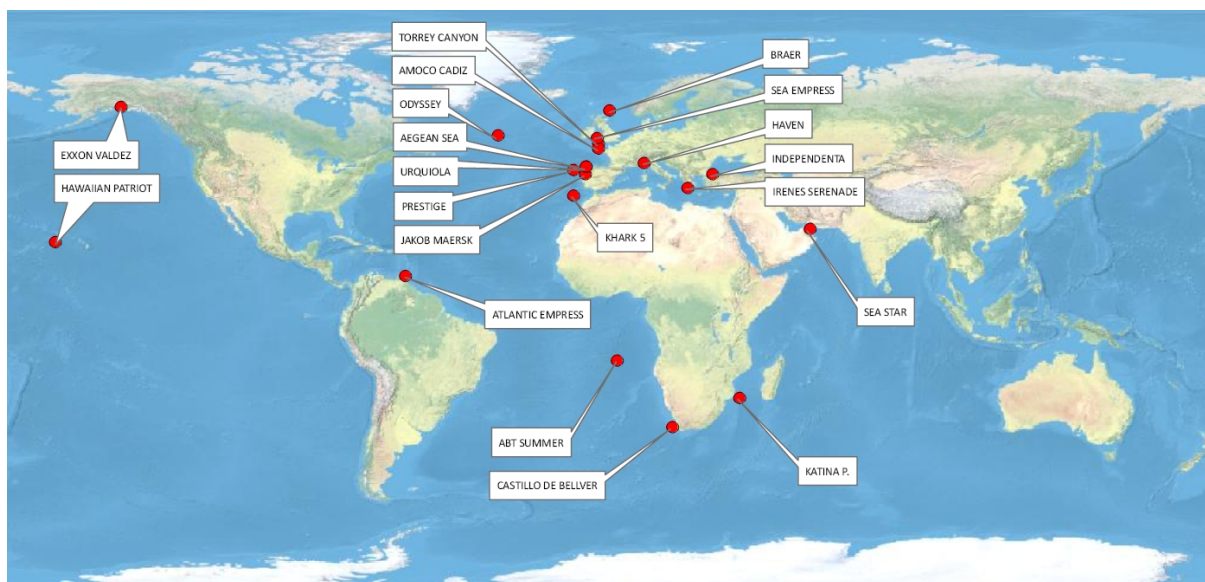
Z gospodarskim in industrijskim razcvetom je v zadnjih nekaj desetletjih prišlo do izrazitega povečanja porabe naftnih derivatov. Svetovna proizvodnja surove nafte znaša okoli 3 milijarde ton letno in več kot polovica proizvedene nafte se transportira po morju. Zato se moramo zavedati, da se vsako leto zgodi nekaj nesreč, v katerih so udeleženi tankerji, ki prevažajo surovo nafto. Izjema niso niti nesreče na naftnih ploščadih, s katerih lahko v nekaj urah odteče zelo velika količina surove nafte (Salomone, 2002; Peterson in sod., 2003). Primer takšne nesreče je naftna ploščad Deepwater Horizon v Mehiškem zalivu, ki se je zgodila aprila 2010. V morje naj bi vsak dan iztekalo vsaj 800 ton, po najslabšem scenariju pa celo 16 000 ton nafte dnevno. V času oddaje diplome naftni madež že ogroža obale v ameriških zveznih državah Louisiana, Alabama in Mississippi (Dnevnik, 2010; RTV Slovenija, 2010). Vsaka taka nesreča lahko povzroči pravo ekološko katastrofo.

V zadnjih štiridesetih letih se je zgodilo okoli 450 nesreč, pri katerih je v morje izteklo več kot 700 ton nafte. Eno najhujših razlitij se je zgodilo leta 1991, približno 700 navtičnih milj od Angolske obale, ko je v morje izteklo kar 260 000 ton nafte. Razlitje k sreči ni imelo večjih ekoloških posledic, saj se je zgodilo precej daleč od obale. Zelo znana je tudi nesreča tankerja Exxon Valdez, ki se je potopil leta 1989 blizu obale Aljaske. V morje se je izlilo približno 40 000 ton nafte in pri tem onesnažilo skoraj 2 000 km obale, kar je imelo večletne posledice (ITOPF, 2010). Leta 2002 se je blizu Španske obale potopil tanker Prestige, iz katerega je izteklo med 10 000 in 20 000 ton nafte. Zelo veliko razlite nafte je prišlo do obale, kar je povzročilo pogin velikega števila živali in rastlinja (Whitfield, 2003). Vse večje nesreče, ki so se zgodile od leta 1967 do leta 2009, so prikazane na Sliki 1.

V Tržaškem zalivu razlitja nafte s hujšimi posledicami še ni bilo. Vendar ne smemo spregledati nesreče, ki se je zgodila leta 2008 pred Rovinjem. Prišlo je do požara na tovorni ladji, ki je prevažala približno 11 ton nevarnih snovi in 200 tovornjakov (Dnevnik, 2008). Takšna nesreča bi lahko ogrozila občutljiv vodni ekosistem, kar bi občutile glavne gospodarske panoge tega dela obale, kot sta ribištvo in turizem. Ob neugodnem vetru bi posledice nesreče čutili tudi v Sloveniji in Italiji. V Italiji se je februarja leta 2010, zaradi sabotaze v reko Lambro, izlilo okoli 2 500 ton nafte. Naftni madež je dosegel tudi reko Pad,

ki se izliva v Jadransko morje (Delo, 2010a). Če bi naftni madež prišel do morja, bi to prav tako lahko povzročilo večje onesnaženje morja. Ekološko nesrečo bi lahko povzročila tudi februarja 2010 nasedla ladja pred obalo Debelega rtiča. K sreči se ladja ni poškodovala in tako ni iz nje izteklo nič nafte (Delo, 2010b). Do manjšega onesnaženja morja pride tudi ob praznjenju balastnih tankov in rezervoarjev, kar je za Slovenijo zelo pomembno, saj sta v Kopru in Trstu relativno veliki pristanišči, kamor dnevno pripluje večje število ladij (Luka Koper, 2010; Porto Trieste, 2010). Prav tako je pomembno dejstvo, da je slovensko morje del relativno zaprtega akvatorija, zato je za Slovenijo nevarno tudi vsako onesnaženje, ki se zgodi v italijanskih ali hrvaških vodah.

Glede na to, da nesreče niso nobena izjema in se bodo dogajale tudi v prihodnosti, je pomembno, da poskušamo preprečiti hujše posledice razlitja nafte v morje. Za pravilno napoved smeri širjenja in obsega naftnega madeža uporabljamo matematične modele. Na ta način lahko v kratkem času ocenimo potencialno ogrožena območja in primerno ukrepamo, ter s tem poskušamo zmanjšati vpliv nesreče na okolje.



Slika 1. Prikaz večjih nesreč tankerjev, ki so prevažali surovo nafto in so se zgodile od leta 1967 do leta 2009 (ITOPF, 2010).

Na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani je bilo narejenih več modelov za simulacijo razlitja nafte v morju. Leta 1994 je bil izdelan model SIMON (Žagar, 1994), kateremu je leta 1996 sledila nadgradnja z imenom Nafta. Ker je bil ta program napisan za okolje DOS, je bil v okviru diplomske naloge (Galuf, 2005) prirejen za okolje Windows in poimenovan Nafta2. Dodan mu je bil tudi grafični vmesnik za vnos podatkov, kar je izboljšalo njegovo preglednost in uporabnost. Poleg tega je bila raziskana možnost računanja hitrostnega polja vode v tako imenovanem »hot start« načinu. Obstoječi modeli niso bili ponovno nadgrajeni, zato so možne različne izboljšave. Predlogi za možno nadgradnjo so bili preučeni in zbrani že v seminarski nalogi (Jeglič, 2009).

Zaradi aktualnosti problematike in velikega napredka v modeliranju razlitja nafte v zadnjem desetletju smo se odločili, da v tej diplomski nalogi ne poskušamo nadgraditi že obstoječega programa Nafta2, ampak se osredotočimo na opis in razvoj novega numeričnega modela za simulacijo širjenja nafte v morju. Medtem ko je program Nafta2 temeljil na Lagrangeovem opisu, pri novem modelu uporabimo Eulerjev pristop za reševanju parcialnih diferencialnih enačb, ki določajo krajevno in časovno spreminjanje oblike naftnega madeža zaradi fizikalnih in kemijskih procesov, kot so advekcija, difuzija, izhlapevanje in emulzifikacija.

V naslednjem poglavju so opisani vsi fizikalno-kemijski procesi, ki so pomembni pri modeliranju razlitja nafte. Obenem so povzeti ključni elementi že obstoječega programa Nafta2. V tretjem poglavju so v prvem delu najprej razvite numerične sheme, ki so potrebne za modeliranje širjenja nafte v eni dimenziji. V tej omejeni, a preprosti geometriji spoznamo osnovne principe reševanja v okviru Eulerjevega pristopa, kot so ohranitev »mase« naftnega madeža in numerične sheme z uporabo višjega reda interpolacijskega polinoma. Podrobneje si ogledamo metodologijo reševanja, ko na naftni madež delujejo advekcija, difuzija pod vplivom lastne teže nafte (mehansko širjenje) in proces izhlapevanja. Osnovni principi so podkrepjeni s številnimi simulacijami, ki so bile izdelane v programu za matematično modeliranje MATLAB. V nadaljevanju so numerične sheme posplošene na dve dimenziji. V obravnavo vključimo obalo, numerične sheme posplošimo za primer, ko kot vhodni podatek v račun vstopa poljubna oblika hitrostnega polja na površini morja.

V zadnjem poglavju si natančno ogledamo tri scenarije potencialnega razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Prvi scenarij kvalitativno primerjamo z rezultatom, ki ga dobimo s programom Nafta2. Pri drugem scenariju dopustimo, da se hitrostno polje v Tržaškem zalivu s časom spreminja, kar je glavni dosežek te diplomske naloge. Pri tretjem scenariju na najbolj preprost način vključimo še proces izhlapevanja.

2 OSNOVE MATEMATIČNEGA MODELIRANJA RAZLITJA NAFTE

Matematični modeli za simulacije razlitja nafte so se razvili z namenom, da bi znali napovedati, kako se bo naftni madež širil s časom, pod znanimi pogoji. Za pravilno napoved je pomembno čim bolj natančno poznavanje spodaj opisanih procesov, poznavanje vseh zunanjih parametrov, ki določajo te procese, ter poznavanje parametrov, ki določajo fizikalno-kemijske lastnosti razlite nafte. Pri modeliranju moramo paziti, da ne naredimo prevelikih napak pri numeričnem reševanju diferencialnih enačb, ki opisujejo fizikalne procese (npr. z uporabo pregrobih numeričnih shem). Slednje lahko vodijo do nesmiselnih rezultatov in niso posledica slabih matematičnih modelov opisanih procesov, ampak neustrezne numerične sheme.

V praksi sta se za modeliranje razlitja nafte uveljavila dva numerična pristopa, Lagrangeov in Eulerjev. Po Lagrangeovem pristopu delcem sledimo, ko se gibljejo v hitrostnem polju, medtem ko pri Eulerjevem pristopu opazujemo tok delcev skozi izbrani volumen (t.i. kontrolni volumen) v prostoru. Žal so praktično uporabne numerične sheme za Eulerjev pristop zelo zahtevne in so se razvile šele v zadnjem desetletju, hkrati s povečevanjem računske zmogljivosti računalniških procesorjev.

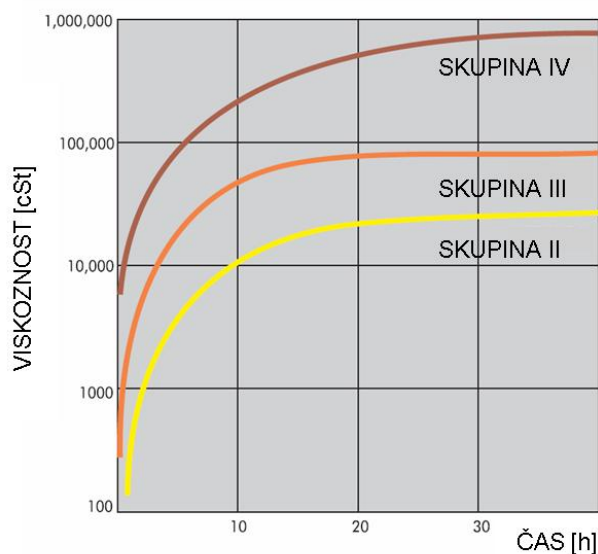
V seminarski nalogi (Jeglič, 2009) so bile predlagane tri možnosti nadgradnje oziroma spremembe obstoječega modela Nafta2. Prva možnost je predvidevala opis razlitja nafte z Eulerjevim pristopom, kar je predmet te diplomske naloge. Druga predlagana možnost je temeljila na nadgradnji obstoječega modela Nafta s pravilnim matematičnim opisom izhlapevanja nafte brez mejne plasti. V okviru tretje možnosti nadgradnje, smo si želeli upoštevati negotovost vhodnih podatkov. Slednja dva predloga sta natančno opisana že v seminarski nalogi (Jeglič, 2009). V nadaljevanju se bomo posvetili modeliranju razlitja nafte v okviru Eulerjevega pristopa, po tako imenovanem Computational Fluid Dynamics modelu (CFD, Lomax in sod., 2001; Tkalič in sod., 2003; Tkalič, 2006a), ki predstavlja fleksibilno okostje in omogoča enostavno nadgradnjo z vsemi pomembnimi procesi pri razlitju nafte. Pri tem naj poudarimo, da obstoječi model Nafta2 temelji na Lagrangeovem pristopu, zato so za doseg tega cilja potrebni povsem novi prijemi za numerično reševanje enačb, ki opisujejo fizikalno-kemijske procese razlitja nafte.

2.1 Lastnosti nafte

Tankerji prevažajo večinoma surovo nafto, ki se med seboj razlikuje glede na izvor črpanja. Zato je pomembno, da poznamo njene fizikalno-kemijske lastnosti. Tako lahko nafto razdelimo v štiri skupine glede na njeno povprečno gostoto. V skupino I z gostoto pod 800 kg/m^3 štejemo rafinirane produkte, kot sta kerozin in bencin. V skupino II uvrščamo nafto z gostoto od 800 kg/m^3 do 850 kg/m^3 , kot jo ima nafta iz Savdske Arabije. V skupini III z gostoto od 850 kg/m^3 do 950 kg/m^3 je na primer surova nafta iz Nigerije. Za skupino IV pa velja, da ima povprečno gostoto nad 950 kg/m^3 , kot jo ima nafta iz Venezuele. Za vse štiri skupine velja, da imajo povprečno gostoto manjšo od gostote morske vode (1025 kg/m^3), zato v primeru razlitja nafte pričakujemo, da bo večji del razlite nafte plaval na površju. Delež nafte, ki bo potonil narašča od skupine I proti skupini IV (ITOPF, 2002).

Naslednja pomembna lastnost je viskoznost. Nafta z nizko viskoznostjo se razširja po morski površini hitreje kot nafta, ki ima visoko viskoznost. Upoštevati moramo tudi, da nafta postane bolj viskozna pri nižji temperaturi. V tankerju je temperatura nafte okoli 30°C , temperatura morja pa znaša ponavadi okoli 15°C . Zato nafta kmalu po razlitju v morje postane bolj viskozna in se težje razširja. Viskoznost nafte narašča od skupine I proti skupini IV (Slika 2) (ITOPF, 2002).

Nafta vsebuje derivate z različno temperaturo vrelišča. Snovi z nizko temperaturo vrelišča bodo hitreje izhlapevale kot snovi z visoko temperaturo vrelišča. Slednje se bodo zaradi tega dlje zadrževale na morski gladini in se kasneje odložile na obalo. Pomembno vlogo ima tudi temperatura strdišča. Lahko se namreč zgodi, da se po razlitju v morje nafta tako ohladi, da se začne pri temperaturi strdišča strjevati in preneha teči, kar lahko bistveno, vpliva na širjenje nafte po morju (ITOPF, 2002).

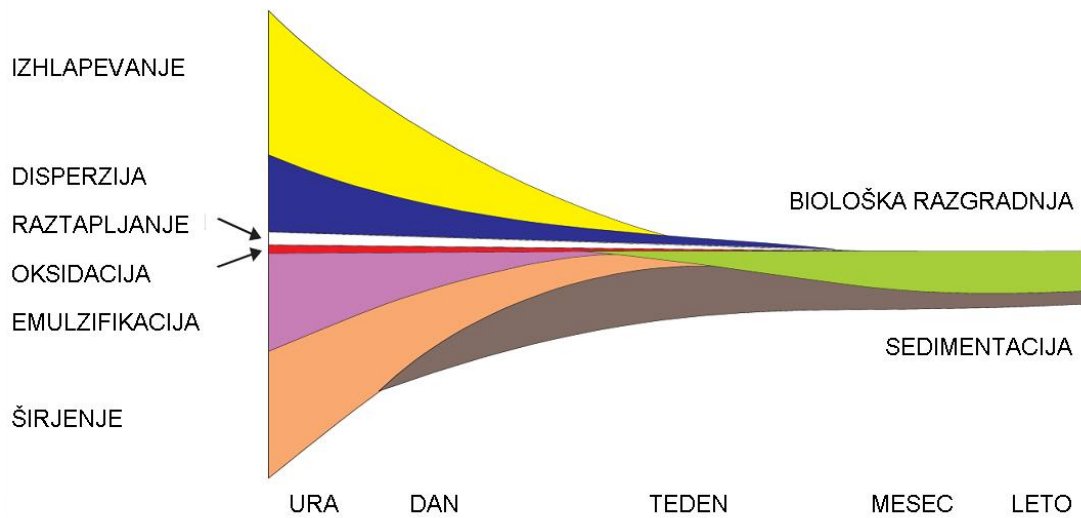


Slika 2. Naraščanje viskoznosti v odvisnosti od časa po razlitju nafte za skupine II, III in IV (ITOPF, 2002). Viskoznost je podana v enotah centistokes, kjer je $1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

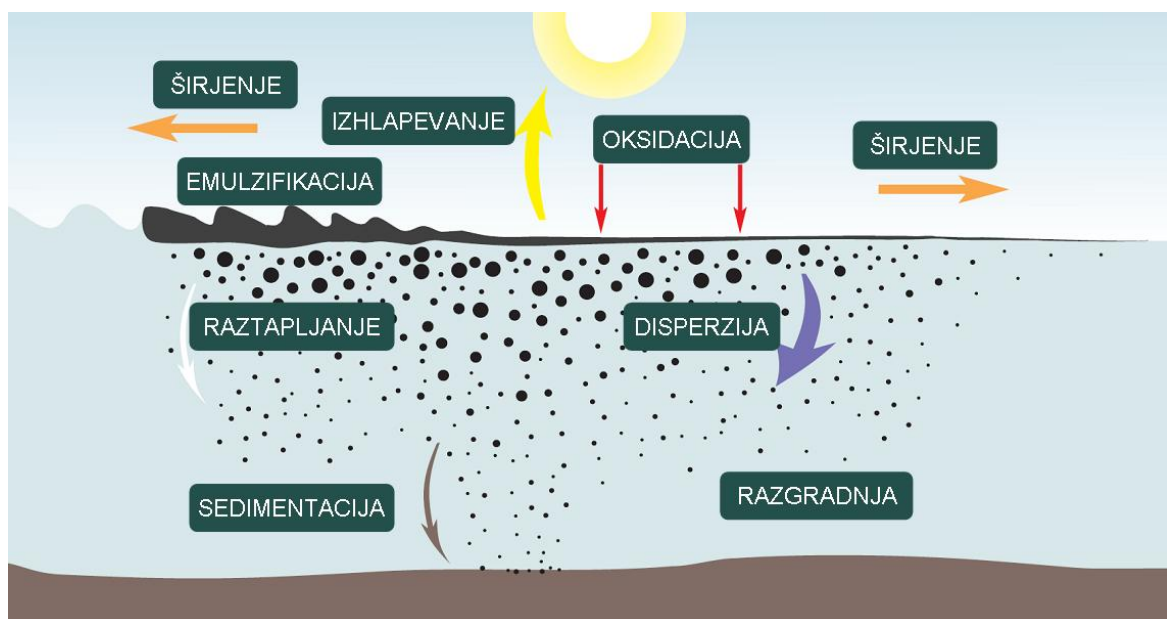
2.2 Procesi pri razlitju nafte

Pri obravnavi razlitja nafte moramo upoštevati večje število različnih fizikalno-kemijskih procesov. Nekateri procesi so odločilni v prvih nekaj urah po razlitju, drugi postanejo pomembnejši čez nekaj dni in prevladujejo šele po nekaj mesecih oziroma letih, kot je to razvidno iz Slike 3 (ITOPF, 2002).

V prvih nekaj dneh so najpomembnejši procesi mehansko širjenje, izhlapevanje, emulzifikacija in disperzija. Po nekaj tednih pride v ospredje sedimentacija, ki je sprva posledica usedanja težjih delcev nafte, kasneje pa produkt mikrobne razgradnje. Slednja prevladuje šele nekaj mesecev po razlitju nafte in je lahko prisotna več let. Pri razlitju nafte so v manjši meri prisotni tudi drugi procesi, kot sta oksidacija in raztapljanje v vodi. Shema pomembnejših procesov je prikazana na Sliki 4 (ITOPF, 2002).



Slika 3. Časovna odvisnost pomembnosti posameznih procesov pri razlitju nafte (ITOPF, 2002).



Slika 4. Shematski prikaz procesov pri razlitju nafte (ITOPF, 2002).

2.2.1 Mehansko širjenje

Takoj ko se nafta razlije, se začne širiti po vodni površini v velik in tanek madež. Mehansko širjenje je posledica dinamičnega ravnovesja med težnostnimi silami, vztrajnostnimi silami, viskozni silami in silami zaradi površinske napetosti. Hitrost širjenja je odvisna predvsem od volumna razlite nafte, njene viskoznosti in površinske napetosti. Nafta z nizko viskoznostjo se širi hitro in pri tem debelina naftnega madeža hitro upada. Nasprotno se nafta z visoko viskoznostjo ne širi kot celota, ampak razpade na več relativno debelih delov. Če dosežejo temperaturo strdišča, so lahko madeži debeli več centimetrov. Kot bomo videli v nadaljevanju, je proces mehanskega širjenja naftnega madeža v okviru Eulerjevega pristopa možno opisati z difuzijsko enačbo, zato v tej diplomski nalogi večkrat za ta pojav uporabimo kar izraz difuzija zaradi lastne teže ali na kratko difuzija.

Poleg tega, da se nafta začne zaradi lastne teže širiti po vodni površini, nanjo delujejo tudi veter in morski tokovi. To povzroči premikanje in dodatno širjenje naftnega madeža v smeri teh tokov. Temu pojavu pravimo advekcija (Jeglič, 2009).

Pojav mehanskega širjenja nafte po morski površini je možno izračunati na več načinov. Uporabljen pristop in kvaliteta modelov sovпада z razvojem računalnikov, saj so se z naraščanjem njihove računske zmogljivosti, razvijale tudi numerične metode. Za račun mehanskega širjenja so avtorji sprva uporabljali osnovno in modificirano Fayevo enačbo (Fay, 1971; Houlst, 1972; Lehr in sod., 1984), kjer je časovna odvisnost oblike in velikosti naftnega madeža podana analitično. Fay (1971) je predpostavil, da je naftni madež tanek (tipična debelina 1 cm) s preprosto geometrijo (krožni madež z debelino h in premerom l). Obenem je predpostavil hidrostatično ravnotežje po vertikali, ter da se lastnosti nafte s časom ne spreminjajo. Kljub temu, da Fayev model pravilno opiše mehansko širjenje le znotraj omenjenih predpostavk, vseeno nudi vpogled v dinamiko širjenja naftnega madeža.

Lehr (1984) je z opazovanjem razlitja nafte spoznal, da je osnovna oblika Fayeve enačbe za mehansko širjenje primerna samo za laboratorijske razmere. Naftni madež dobi ob upoštevanju vpliva vetra približno obliko elipse, katere vzdolžna os je usmerjena v smeri vetra in je lahko bistveno daljša od prečne osi, česar pa osnovna oblika Fayeve enačbe ne

upošteva. Vključitev dodatnega člena, s katerim upoštevamo vpliv vetra, bistveno izboljša ujemanje med izračunanimi in opazovanimi površinami razlitja, vendar pri tem še vedno ne moremo upoštevati sprememb mase nafte med njenim širjenjem. Obenem z opisano metodo ne vključimo vpliva strižne difuzije (Elliot in sod., 1986), ki pride do izraza v nemirnih vodah. Še več, če se veter in s tem morski tokovi s krajem in časom spreminjajo, bodo predvidevanja osnovana na modificirani Fayeovi metodi lahko popolnoma napačna.

Kasneje so se avtorji začeli zavedati pomembnosti vpliva strižne difuzije, ki je kombinacija vpliva turbulentne difuzije in neenakomernega razporeda hitrosti po vertikali vodnega stolpca. Za obravnavo tega procesa so številni avtorji razvili tridimenzionalni model (Elliott in sod., 1986; Spaulding, 1988) osnovan na metodi sledenja delcev (Lagrangeov pristop), ki je uspešno modeliral opazovano in merjeno širjenje naftnih madežev. Glavna značilnost tega modela je v medsebojnem vplivu difuzije in vzgona v vertikalni smeri. Večji delci (z manjšo gostoto) se premikajo s (hitrejšimi) tokovi na površini morja v smeri vetra in valov. Nasprotno imajo manjši delci manjši vzgon in lahko zaradi turbulentne difuzije potonejo tudi več metrov globoko v območje počasnejših podpovršinskih tokov. Sčasoma nekateri delci ponovno pridejo na površje za glavino madeža in tvorijo »rep«, ki se vleče za madežem. Zaradi znatnega razvoja zmogljivosti računalnikov in spremljajočih numeričnih metod, lahko pojav strižne difuzije uspešno vključimo tudi v modele, ki uporabljajo Eulerjev pristop.

Obenem nam tridimenzionalni modeli omogočajo enostavno vključitev spremenljive horizontalne in vertikalne turbulentne difuzije v različnih slojih vodnega stolpca med površjem in morskim dnom (Tkalich, 2006a; Žagar, 1994).

2.2.2 Izhlapevanje

Izhlapevanje je najpomembnejši izmed procesov pri katerih se spreminja prostornina razlite nafte. Hlapljive snovi s temperaturo vrelišča pod 200°C izhlapijo v manj kot 24 urah. Na primer kerozin in bencin popolnoma izhlapita že v nekaj urah. Nasprotno težke frakcije praktično ne izhlapevajo. Iz Slike 5 je razvidno, da je proces izhlapevanja najbolj izrazit pri skupini I, za frakcije nafte z najmanjšo gostoto, vendar pa igra zelo pomembno vlogo tudi pri

preostalih skupinah, le da na daljšem časovnem merilu. Količina izhlapele snovi naj bi bila odvisna od temperature okolice, hitrosti vetra in površine naftnega madeža.

Osnovni model za izračun izhlapele nafte so podali Mackay in sod. (1980). Proces začne potekati takoj po razlitju in je v okviru Mackayevega modela odvisen od temperature okolice, hitrosti vetra in površine naftnega madeža. Takšen model izhlapevanja nafte temelji na boljše poznanim procesu izhlapevanja vode. Pri izhlapevanju vode se tik nad gladino pojavi mejna plast nasičenega zraka, ki močno upočasni nadaljnje izhlapevanje. Z večanjem hitrosti vetra se mejna plast hitreje odstranjuje in je tako izhlapevanje bolj učinkovito. Podobno izhlapi več vode na enoto časa, če je površina gladine in s tem mejne plasti večja. Razumljivo tudi višja temperatura pospeši izhlapevanje. Nedavno sta Fingas in Fieldhouse (2004) eksperimentalno dokazala, da je Mackayeva predpostavka napačna. Izkazalo se je, da izhlapevanja nafte ne regulira mejna plast. Posledično jakost izhlapevanja nafte ni odvisna od hitrosti vetra.

Fingas je v laboratoriju opazoval kako na hitrost izhlapevanja vplivajo veter, velikost površine naftnega madeža in temperatura. Iz meritev je razvidno, da je izhlapevanje vode močno odvisno od hitrosti vetra. Nasprotno pri bencinu in vrsti ameriške nafte Alberta Sweet Mixed Blend (ASMB) ni opaziti bistvene odvisnosti hitrosti izhlapevanja od hitrosti vetra. Tako lahko zaključimo, da je izhlapevanje nafte kvečjemu šibko regulirano z mejno plastjo, ker najverjetneje že zelo šibek veter odpravi mejno plast. V naslednjem koraku je bila eksperimentalno preverjena odvisnost hitrosti izhlapevanja od površine naftnega madeža. Iz meritev je bila opazna zelo jasna korelacija med hitrostjo izhlapevanja in maso nafte. Še več, hitrost izhlapevanja je kar premo sorazmerna masi nafte, kar znova pomeni, da pri tem procesu mejna plast ne igra pomembne vloge. Pri premo sorazmernosti med hitrostjo izhlapevanja in maso nafte je potrebno biti previden, saj omenjena zveza zagotovo velja le za dovolj majhne debeline naftnih madežev. Iz tega sledi, da izhlapevanje takoj po razlitju še ni tako učinkovito, saj spodnje plasti ne morejo prispevati k izhlapevanju. To je dobro razvidno iz Slike 5 za skupine II, III in IV. Preverjena je bila tudi hitrost izhlapevanja v odvisnosti od temperature za različne vrste nafte. Fingas (2004) je izmeril časovni potek izhlapele snovi (v odstotkih) za približno 200 različnih sestavin nafte. Za večino vzorcev je ugotovil, da narašča

odstotek izhlapele snovi logaritemsko s časom. Za nekatere vzorce (v manjšini) pa odstotek izhlapele snovi narašča korensko s časom.

Tako je Fingas (2004) empirične zveze, ki podajajo časovni potek izhlapevanja snovi, podal v preglednici, ki ni ravno priročna, saj za vsako vrsto snovi velja drugačna empirična zveza. Bolje bi bilo, če bi lahko zapisali kar univerzalni zakon za proces izhlapevanja. Avtor je prišel do spoznanja, da se eksperimentalni podatki za časovno odvisnost izhlapevanja korelirani z vrednostjo odstotka destilacije (% D) pri 180°C. Za logaritemsko časovno odvisnost tako lahko zapišemo

$$F = [0,165 \cdot \%D + 0,045(T - 15)] \ln t, \quad (1)$$

kjer je T temperatura nafte in F odstotek izhlapele nafte. Podobno za korensko časovno odvisnost lahko zapišemo

$$F = [0,0254 \cdot \%D + 0,01(T - 15)] \sqrt{t}. \quad (2)$$

Pri tem moramo poudariti, da so destilacijski podatki običajno edini način karakterizacije nafte. Ob tem dejstvu sta zvezi (1) in (2) zelo pomembni, saj za modeliranje izhlapevanja potrebujemo le podatek o odstotku destilacije % D pri 180°C in temperaturo nafte. To je bistvena poenostavitev v primerjavi s starejšimi modeli, kjer je bilo izhlapevanje regulirano z mejno plastjo in smo za opis procesa izhlapevanja potrebovali številne dodatne parametre kot so hitrost vetra, površina madeža, njegova debelina ter stopnja turbulence.

2.2.3 Emulzifikacija

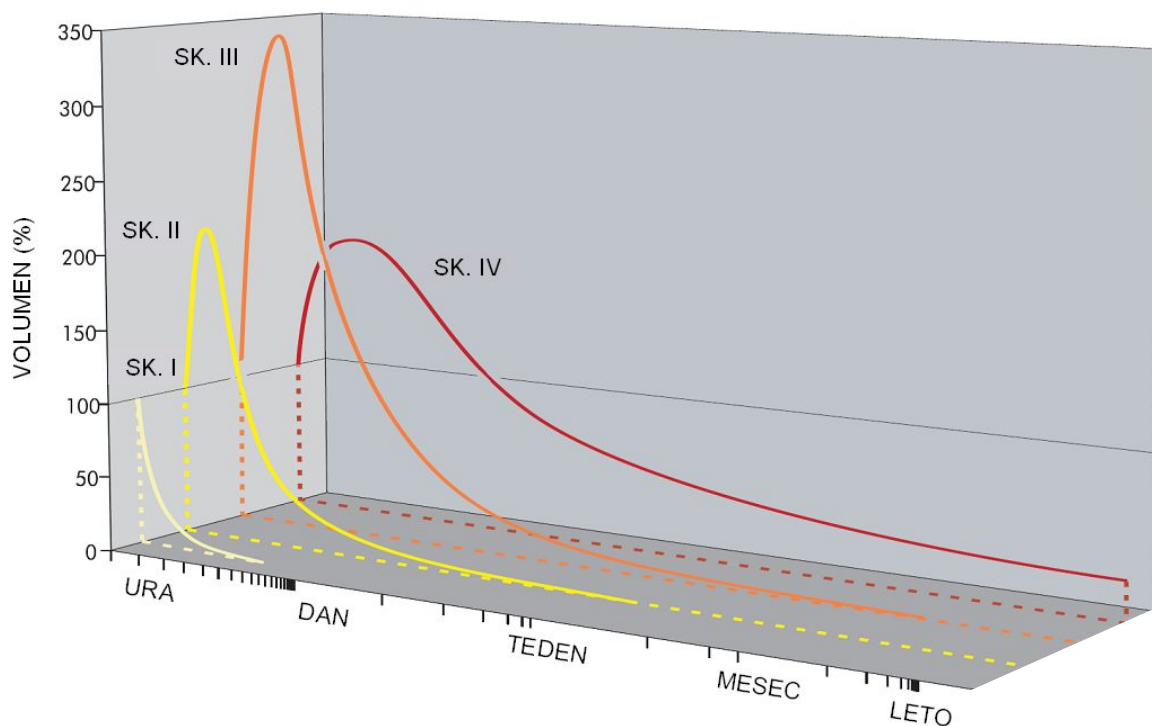
Emulzifikacija je proces, pri katerem kapljice vode prodrejo v nafto in se z njo zmešajo. Do emulzifikacije pride v zmerno do zelo razburkanem morju, zaradi vpliva turbulentnih tokov in valov. V mirnem morju lahko proces emulzifikacije zanemarimo. Načeloma poznamo dve obliki emulzifikacije, to sta emulzija tipa »voda v nafti« in tipa »nafta v vodi«. V prvem primeru kapljice vode prodrejo v nafto in se nafta speni. V drugem primeru pa je proces ravno obraten in se voda pod vplivom naftnih kapljic prav tako speni. V praksi prevladuje emulzija tipa voda v nafti. Hitrost emulzifikacije določa vsebnost niklja, vanadija in asfaltenov v nafti, temperatura okolja in jakosti turbulence na vodni površini. Zelo viskozna nafta se težje

emulzificira, saj le-ta težko vsrkava vodne kapljice. Prav tako se ne emulzificira nevskožna nafta, saj že pred tem izhlapi.

Sprememba volumna nafte v odvisnosti od časa je prikazana na Sliki 5. Iz slike lahko razberemo, da se volumen nafte pri skupini I ne povečuje s časom, saj ima ta skupina najmanjšo gostoto in zato snovi prej izhlapijo. Skupini II in III imata srednjo gostoto, zato sta na začetku izraziti emulzifikacija in disperzija, kasneje nato nastopijo še ostali procesi. Tako se pri skupini III volumen naftnega madeža lahko poveča skoraj štirikrat (ITOPF, 2002). Skupina IV ima zelo veliko gostoto in je zaradi tega emulzifikacija nekoliko manj učinkovita kot pri skupini III, a vseeno zelo pomembna na začetku razlitja nafte v morje.

Procesi, ki povzročajo emulzifikacijo še niso povsem znani, vemo le, da nanjo vplivajo hitrost vetra, debelina naftnega madeža in temperatura okolja. Mackay (opisano v Fingas in sod., 1999; Fingas in Fieldhouse, 2004) je že v osemdesetih letih prejšnjega stoletja, na osnovi opazovanj, podal splošen model, ki opisuje spreminjanje deleža vode v nafti v odvisnosti od časa. Obenem je Mackay podal spremembo viskoznosti nafte zaradi emulzifikacije v odvisnosti od deleža vode v nafti. S povečevanjem stopnje emulzifikacije (torej povečevanjem deleža nafte v vodi) se hkrati izrazito poveča viskoznost.

V zadnjem desetletju se je večje število raziskovalcev posvetilo eksperimentalnemu opazovanju emulzifikacije v laboratoriju. Izkazalo se je (Fingas in sod., 1999; Fingas in Fieldhouse, 2004), da je Mackayev model neustrezen in nepravilno opisuje proces emulzifikacije za večino sestavin nafte. Omenimo le, da je potrebno različne sestavine nafte (glede na tip emulzifikacije) klasificirati v vsaj v štiri skupine: stabilne emulzije, metastabilne emulzije, nestabilne emulzije in neprave emulzije. Za vsako skupino veljajo popolnoma različne zakonitosti in tako ni možen opis tega procesa z enostavnim modelom. Večina novodobnih avtorjev predlaga empirični pristop, kjer se za modeliranje procesa emulzifikacije v primeru razlitja nafte raje uporabi empirične podatke, pridobljene v laboratoriju ali na terenu samem.



Slika 5. Spreminjanje volumna nafte zaradi emulzifikacije in izhlapevanja v odvisnosti od časa po razlitju nafte za skupine I, II, III in IV (ITOPF, 2002).

2.2.4 Disperzija

Disperzija je proces, kjer se nafta zaradi vpliva valov in turbulence, razcepi na majhne oljne kapljice, ki se ne zadržujejo na gladini, ampak preidejo v zgornje sloje vodnega stolpca. Večji delci lahko ponovno pridejo na površje, kjer se z drugimi delci ponovno združijo v madež ali pa se po vodni površini razlezejo v tanko plast z značilnim mavričnim ali srebrnim sijajem. Jakost disperzije je odvisna od sestave nafte in stanja morja ter je izrazitejša v nafti z manjšo viskoznostjo. Ker obenem nafta izhlapeva, se njena viskoznost povečuje in se posledično proces disperzije manjša. Z dodajanjem kemikalij je mogoče disperzijo umetno povečati, kar omogoča hitrejšo razgradnjo nafte (ITOPF, 2002).

2.2.5 Sedimentacija

Ker je gostota nafte večinoma manjša od gostote morske vode, le redke sestavine nafte potonejo na dno morja. Večina razlite nafte tako plava na površju, razen če se združi s težjimi sedimentnimi ali organskimi delci. Zelo učinkovita je sedimentacija oljnih kapljic, ki so nastale pri procesu disperzije. Ponavadi do sedimentacije pride v bližini obale, kjer je v morju prisotnih veliko lebdečih plavin (npr. mivka). Tako so sedimenti, ki so prepojeni z nafto k sreči že po nekaj letnih ciklih prekrti z novimi plastmi sedimentov, ki so posledica erozije obale. Sedimentacija je mogoča tudi zaradi prehranjevanja zooplanktona z naftnimi delci in posledičnega izločanja (ITOPF, 2002).

2.2.6 Biološka razgradnja

Biološka razgradnja je proces pri katerem mikroorganizmi presnavljajo sestavine v nafti. Med mikroorganizme sodijo bakterije, alge, kvasovke, plesni, gobe in praživali, katerim služi nafta kot vir ogljika in energije. Proces biološke razgradnje se začne po daljšem času od razlitja nafte v morje in lahko poteka več let. Hitrost razgradnje je odvisna od sestave nafte, prisotnosti kisika, dušika in fosfatov ter temperature. Ker je vsaka vrsta mikroorganizmov sposobna presnove le določne skupine ogljikovodikov, je za učinkovito razgradnjo potreben širok spekter različnih organizmov. Kljub temu, da je v morski vodi prisotno manjše število mikroorganizmov, se njihovo število namnoži v prisotnosti nafte. Razmnoževanje mikroorganizmov se ustavi, ko začne primanjkovati kisika ali hrane. Ti organizmi so sposobni razgraditi vse vrste molekul, z izjemo dolgih in kompleksnih molekul. Ker mikroorganizmi živijo v vodi iz katere pridobivajo kisik, poteka proces biološke razgradnje na meji med nafto in vodo. Tako je biološka razgradnja neučinkovita v primeru, ko nafta v procesu sedimentacije potone na morsko dno, saj tam primanjkuje kisika. Podobno se dogaja z nafto, ki se odloži na obalo, ker mikroorganizmi živijo v morski vodi. Tvorba oljnih kapljic pri procesu disperzije pospeši biološko razgradnjo, saj se s tem površina nafte efektivno poveča (ITOPF, 2002).

2.2.7 Raztapljanje

Raztapljanje se pojavi takoj po razlitju nafte v morje. Hitrost raztapljanja nafte v vodi je odvisna od temperature vode, sestave nafte, stopnje disperzije in turbulence. V vodi se raztapljajo le lažje komponente nafte, ki hkrati tudi hitro izhlapevajo. Zato je za njih proces izhlapevanja od 10 do 100 krat hitrejši od procesa raztapljanja, kar pomeni, da raztapljanje ne igra pomembnejše vloge pri odstranjevanju naftnega madeža z gladine morja (ITOPF, 2002). Raztapljanje je lahko zelo škodljivo za okolje, predvsem za različne organizme, ki se prehranjujejo z razgrajenimi komponentami, saj so le-te toksične.

2.2.8 Oksidacija

Oksidacija je fotokemični proces pod vplivom sončne svetlobe. Ko se nafta razlije v morje, lahko nekateri ogljikovodiki pod vplivom sončne svetlobe sčasoma reagirajo s kisikom v vodotopne produkte, ali pa v produkte, kot je katran, ki je odporen na vse zgoraj opisane procese. Proces oksidacije tudi v primeru intenzivne sončne svetlobe in tanke plasti naftnega madeža poteka zelo počasi, pri tem pa se razgradi manj kot promil nafte na dan (ITOPF, 2006).

2.2.9 Odlaganje na obalo

Ko razlita nafta pride do obale, se začne nanjo odlagati. Efektivno se količina nafte v naftnem madežu zmanjša. Po določenem času se lahko del nafte zaradi tokov in plimovanja ponovno sprosti, ter se vrne nazaj v morje. Zato je pomembno, da poznamo razpolovni čas, ki meri sposobnost obale, da zadrži nafto. Natančneje razpolovni čas pove, v kolikšnem času se v morje vrne polovica prvotno odložene nafte. Proces ponovnega sproščanja nafte, je za različne tipe obale opisal Torgrimson (1980). Za ravne betonske obale je razpolovni čas reda velikosti ene ure, za peščene obale nekaj dni, medtem ko lahko za skalnati tip obale ta čas presega eno leto (Wang in sod., 2005).

Wang in sod. (2005) pri modelu odlaganja nafte na obalo in kasnejšega sproščanja, predpostavijo eksponentno zmanjševanje količine nafte na obali v odvisnosti od časa. To pa

pomeni, da se po dovolj dolgem času vsa nafta vrne v morje. Če preteče na primer petkratnik razpolovnega časa, ostanejo na obali le še 3% prvotne količine nafte. Pri tem pristopu popolnoma zanemarimo fizikalno-kemijske lastnosti nafte, saj se razpolovni čas nanaša le na tip obale (Wang in sod., 2005).

2.3 Kratak opis obstoječega modela Nafta

Obstoječa modela Nafta (Žagar, 1994) in Nafta2 (Galuf, 2005) sta poenostavljena ekološka modela, namenjena simuliranju razlitja nafte v Tržaškem zalivu. V splošnem izraz ekološki model predstavlja matematični model, s katerim simuliramo razne procese v naravi. Ti procesi so lahko širjenje onesnažil, njihova razgradnja, evtrofikacija, biokemični procesi pri pretvorbah onesnažil in vplivi teh procesov na okolje.

Model je sestavljen iz treh med seboj povezanih modulov. Prvi je hidrodinamični modul, s katerim simuliramo cirkulacijo vode, ki jo povzroča veter. Hidrodinamični del predstavlja osnovni model PCFLOW3D (Četina in Rajar, 1997), ki je tridimenzionalni matematični model, zasnovan na osnovnih enačbah ohranitve mase, gibalne količine in transporta pasivnega skalarja (slanost, temperatura, koncentracija različnih kemičnih in bioloških snovi), katerega masa se s časom ne spreminja. V modelu vplivajo temperatura, slanost in koncentracija pasivnega onesnažila na gostoto, ta pa prek vzgonskega člena na tlak in posredno nazaj na hitrostno polje. Rezultat je hitrostno polje, ki opisuje gibanje vode v nekem trenutku. Drugi je transportno-disperzijski modul, kjer simuliramo premikanje onesnažil, ki se širijo predvsem zaradi gibanja vode (advekcija) in turbulentne difuzije. Kot transportno-disperzijski modul za račun širjenja naftnega madeža, je bil uporabljen program PT3D (Širca, 1992). To je 3D Lagrangeov model, ki deluje na osnovi metode sledenja delcev in obravnava difuzijo stohastično po principu naključnih korakov. Osnova za račun transporta onesnažil je predhodno izračunano hitrostno polje, ki je rezultat modela PCFLOW3D. Zadnji je biokemijski del, kjer računamo spremembe skupne mase onesnažila. Masa se postopoma zmanjšuje zaradi procesov razgradnje in izhlapevanja. V modelu Nafta upoštevamo le proces izhlapevanja. Mehansko širjenje, advekcija in turbulentna difuzija so že sestavni del

transportno-disperzijskega dela. Vsi trije moduli modela Nafta so bolj natančno opisani v magistrskem delu Žagar (1994) in seminarski nalogi Jeglič (2009).

V modelu so zajeti procesi, ki imajo v prvih nekaj urah po razlitju nafte v morje bistven vpliv na transport in razgradnjo nafte. To so hidrodinamična cirkulacija (zajet je vpliv tokov, vetra, vtokov rek in spremenljive gostote vode), turbulentna difuzija, mehansko širjenje nafte in njeno izhlapevanje. Ostali procesi ekološkega modela in tudi procesi specifični za naftna razlitja (emulzifikacija, disperzija, sedimentacija, biološka razgradnja, raztapljanje nafte v vodi, oksidacija, odlaganje na obalo) niso vključeni v obstoječi model.

Program Nafta, ki je bil razvit na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo že leta 1994, je bil napisan v programskem jeziku Fortran 77 in je deloval samo v okolju DOS. Zato je bil v okviru diplomske naloge (Galuf, 2005) v celoti napisan na novo v programskem jeziku C++ in prirejen za okolje Windows. Programu je bil dodan grafični vmesnik za vnos podatkov, s čimer se je izboljšala preglednost in uporabnost programa. Poleg tega je bil v model Nafta2 vključen tudi popolnoma nov grafični prikaz porazdelitve delcev in koncentracij.

3 CFD MODEL RAZLITJA NAFTE

V prejšnjem stoletju so modeli razlitja nafte sprva temeljili na poenostavljenih empiričnih shemah in kasneje na numerično manj zahtevnem Lagrangeovem pristopu sledenja delcev. Computational Fluid Dynamics (CFD, Lomax in sod., 2001; Tkalich, 2006a) model temelji na Eulerjevem pristopu in predstavlja pomembno alternativo ustaljenim prijemom v modeliranju razlitja nafte. Čeprav je CFD model računsko bolj potraten, ter je, kot bomo videli v nadaljevanju, v primerjavi z metodo sledenja delcev numerično lahko manj stabilen, nam v zameno nudi fizikalno relevantno matematično formulacijo problema razlitja nafte. V nadaljevanju bo predstavljeno okostje modela, ki omogoča enostavno nadgradnjo tudi z zahtevnejšimi fizikalno-kemijskimi procesi.

V okviru Eulerjevega pristopa dinamiko naftnega madeža opišemo s sistemom parcialnih diferencialnih enačb, posebej za madež na površini vode in posebej za vodni stolpec (Tkalich in sod., 2003; Tkalich, 2006a):

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\bar{\nabla}(h\bar{\mathbf{v}}) + \bar{\nabla}(D\bar{\nabla}h) + R_h, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\bar{\nabla}(C\mathbf{u}) + \bar{\nabla}(\mathbf{E}\bar{\nabla}C) + R_C. \quad (4)$$

Enačba (3) opisuje časovno spreminjanje debeline naftnega madeža h zaradi različnih procesov. Prvi člen na desni strani enačbe je advekcija, kjer je $\bar{\mathbf{v}} = (v_x, v_y)$ hitrost naftnega madeža na površini in $\bar{\nabla} = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$. Drugi člen opisuje difuzijo naftnega madeža zaradi mehanskega širjenja pod vplivom lastne teže in viskozne sile, kjer je D koeficient difuzije, ki ga bomo podrobno obravnavali v nadaljevanju. V tretjem členu R_h so zajeti vsi ostali procesi, kot je na primer izhlapevanje, ter tudi izmenjava nafte nad površino z nafto v vodnem stolpcu. Podobno enačba (4), ki je tridimenzionalna, opisuje časovno spreminjanje koncentracije nafte C v vodnem stolpcu. Pri tem je $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ hitrost vode v vodnem stolpcu, $\bar{\nabla} = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$, $\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z)$ koeficient turbulentne difuzije in R_C člen, kjer so zajeti vsi drugi fizikalno-kemijski procesi.

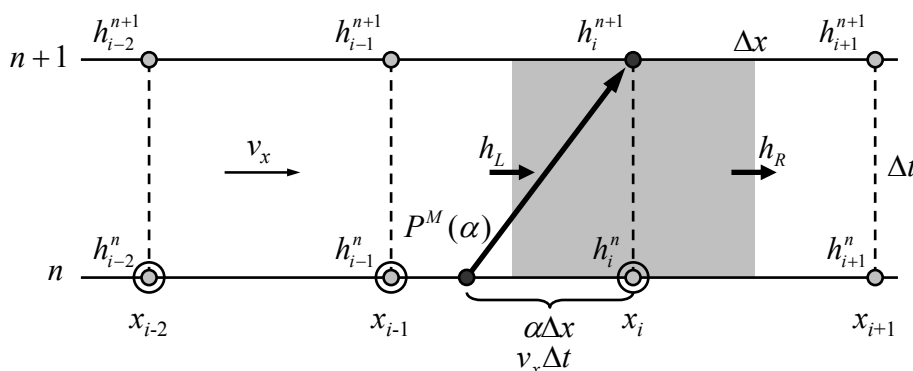
V diplomski nalogi, se bomo omejili na modeliranje širjenja naftnega madeža na površini morja v okviru modela CFD. V naslednjem poglavju bomo preučili nekatere realne scenarije razlitja nafte v Tržaškem zalivu, najprej pa si bomo v nadaljevanju poglobljeje ogledali principe numeričnega reševanja enačbe (3), najprej v 1D nato v 2D.

3.1 Modeliranje širjenja nafte v 1D

V eni dimenziji se enačba (3), ki opisuje časovno spreminjanje debeline naftnega madeža vzdolž smeri x poenostavi v

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial(v_x h)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial h}{\partial x} \right] + R_h. \quad (5)$$

Pri tem je lahko hitrost naftnega madeža $v_x(x)$ eksplicitna funkcija kraja, ter koeficient difuzije $D(h)$ funkcija debeline naftnega madeža. To pomeni, da v splošnem primeru teh dveh količin ne moremo izpostaviti pred ustreznim krajevnim odvodom. Enačbo (5) rešimo z metodo končnih diferenc (Slika 6), kjer koordinato x na izbranem intervalu razdelimo na točke x_i , ki so enakomerno porazdeljene v razmaku Δx . Debelino nafte h_i na mestu x_i v času $t^{n+1} = (n+1)\Delta t$ povežemo z debelinami nafte h_j na mestu x_j ob času $t^n = n\Delta t$. Poglobljeje si najprej ogledjmo rešitev enačbe (5) za primer, ko je prisoten le adveksijski člen.



Slika 6. Numerična shema za enodimenzionalni primer advekcije. Prikazane so točke x_k ob času $n\Delta t$ za izračun debeline naftnega madeža h_i na mestu x_i ob času $(n+1)\Delta t$. V skladu s shemo 2UP, enačba (10), za to potrebujemo vrednosti h_k v treh točkah (obkrožene). Shema velja v primeru, ko je $v_x > 0$. Adveksijska pretoka h_L in h_R sta definirana z enačbo (11).

3.1.1 Advekcija

Če je prisotna le advekcija, potem naftni madež ohranja svojo obliko in se v času Δt premakne vzdolž smeri x za $v_x \Delta t$. Kot je razvidno iz Slike 6, za debelino nafte $h(x,t)$ na mestu x_i in času t^{n+1} velja

$$h_i^{n+1} = h(x_i, t^n + \Delta t) = h(x_i - v_x \Delta t, t^n). \quad (6)$$

Vrednost debeline nafte na mestu $x_i - v_x \Delta t$ ob času t^n aproksimiramo z interpolacijskim polinomom (Tkalic in Chan, 2003; Tkalic, 2006b)

$$P^M(\alpha) = \sum_{m=0}^M A_m \alpha^m, \quad (7)$$

kjer je $\alpha = (x_i - x)/\Delta x$ normalizirana koordinata glede na referenco x_i , ter M stopnja polinoma. Interpolacijski polinom določajo vrednosti debeline nafte v izbranih točkah x_j ob času t^n . Kot zgled poiščimo koeficiente polinoma druge stopnje, ki gre skozi točke x_i , x_{i-1} in x_{i-2} , z normalizirano koordinato $\alpha_i = 0$, $\alpha_{i-1} = 1$ in $\alpha_{i-2} = 2$, kjer je vrednost debeline nafte enaka h_i , h_{i-1} in h_{i-2} . Dobimo sistem linearnih enačb za koeficiente polinoma A_m :

$$\begin{aligned} A_0 \cdot 0^0 + A_1 \cdot 0^1 + A_2 \cdot 0^2 &= h_i \\ A_0 \cdot 1^0 + A_1 \cdot 1^1 + A_2 \cdot 1^2 &= h_{i-1} \\ A_0 \cdot 2^0 + A_1 \cdot 2^1 + A_2 \cdot 2^2 &= h_{i-2} \end{aligned} \quad (8)$$

Rešitev je

$$\begin{aligned} A_0 &= h_i \\ A_1 &= -\frac{3}{2}h_i + 2h_{i-1} - \frac{1}{2}h_{i-2} \\ A_2 &= \frac{1}{2}h_i - h_{i-1} + \frac{1}{2}h_{i-2} \end{aligned} \quad (9)$$

Iz enačb (6), (7) in (9) dobimo

$$\begin{aligned} h_i^{n+1} &= h(x_i - v_x \Delta t, t^n) = P^M(\alpha) = \\ &= h_i^n + \left[-\frac{3}{2}h_i^n + 2h_{i-1}^n - \frac{1}{2}h_{i-2}^n\right]\alpha + \left[\frac{1}{2}h_i^n - h_{i-1}^n + \frac{1}{2}h_{i-2}^n\right]\alpha^2 \\ &= \left[\frac{1}{2}(1-\alpha)(2-\alpha)\right]h_i^n + \left[\alpha(2-\alpha)\right]h_{i-1}^n - \left[\frac{1}{2}\alpha(1-\alpha)\right]h_{i-2}^n. \end{aligned} \quad (10)$$

Pri tem očitno velja (Slika 6), da je $\alpha = v_x \Delta t / \Delta x$. Numerična shema (10) je v literaturi (Tkalic, 2006b) poznana pod imenom »second-order upwinding scheme« (2UP), ima smisel za $v_x > 0$, ter je stabilna v območju $0 \leq \alpha \leq 2$.

3.1.2 Ohranitev »mase« naftnega madeža

Pri reševanju enačbe (5) v primeru, ko je prisoten le advekcijski člen, lahko numerično shemo (na primer 2UP) zapišemo v naslednji obliki (Tkalic in Chan, 2003; Tkalic, 2006b)

$$h_i^{n+1} = h_i^n - (\alpha_R h_R - \alpha_L h_L), \quad (11)$$

kjer sta h_L in h_R tako imenovana advekcijška pretoka z leve in desne smeri v točko x_i (glej Sliko 6). V splošnem primeru je hitrost naftnega madeža v_x funkcija kraja x , zato sta tudi $\alpha_R = v_{xR} \Delta t / \Delta x$ in $\alpha_L = v_{xL} \Delta t / \Delta x$ lahko različna. Izkaže se, da ima shema zapisana v obliki (11) pomembno lastnost, saj nam pogoj

$$(\alpha_L h_L)_i = (\alpha_R h_R)_{i-1}, \quad (12)$$

zagotavlja ohranitev mase naftnega madeža. Če je hitrost naftnega madeža v_x določena v točkah x_i , potem lahko definiramo

$$(\alpha_R)_i \equiv \alpha = v_x \Delta t / \Delta x. \quad (13)$$

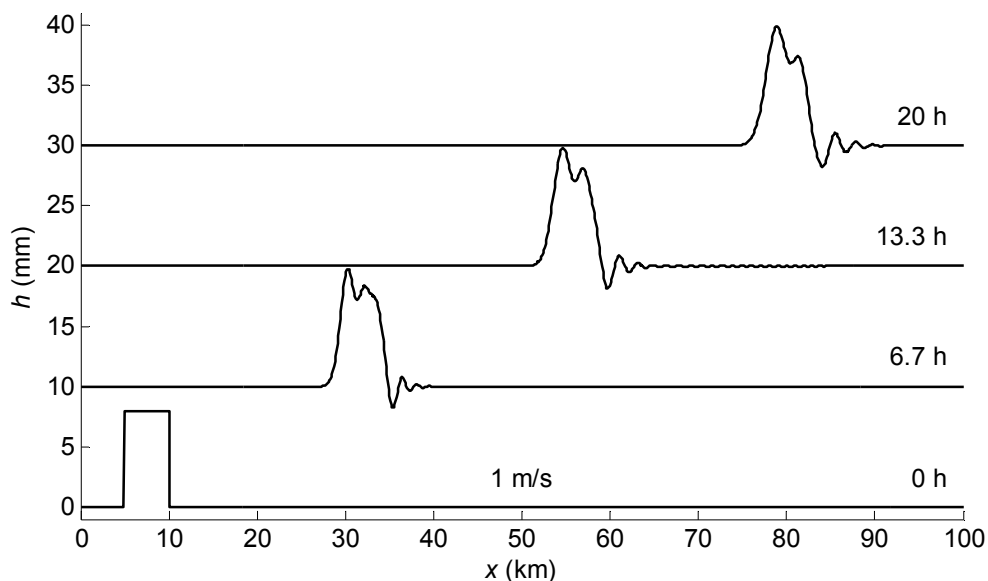
V primeru sheme 2UP s pomočjo enačb (10)-(13) dobimo (Tkalic, 2006b)

$$(h_R)^{2UP} = \left[\frac{1}{2}(3 - \alpha) \right] h_i^n - \left[\frac{1}{2}(1 - \alpha) \right] h_{i-1}^n. \quad (14)$$

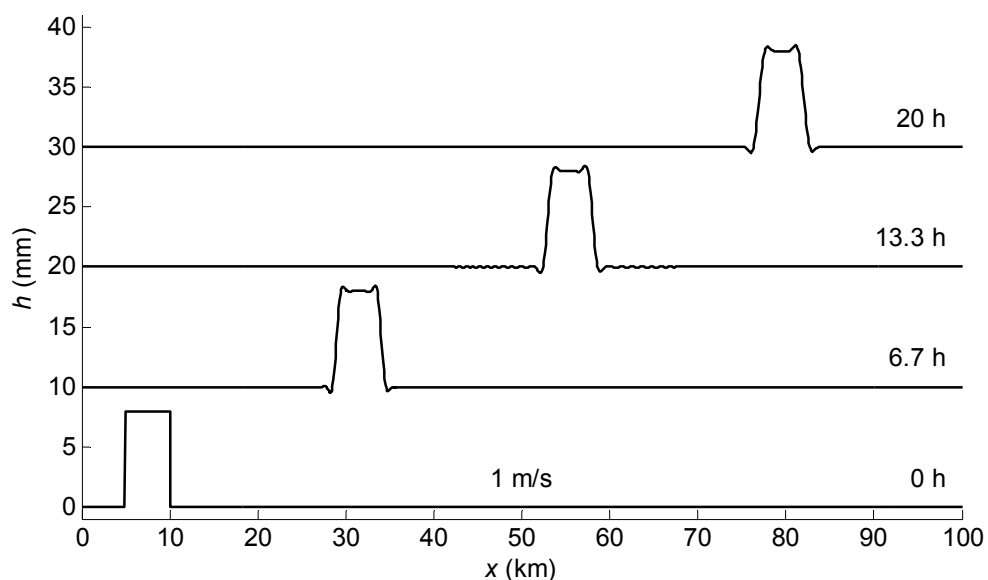
Oglejmo si, kako se naftni madež širi v okviru zgoraj opisane numerične sheme. Kot vidimo na Sliki 7, se sicer težišče naftnega madeža ustrezno premakne v skladu z izrazom $s = v_x t$, pri tem pa je oblika naftnega madeža zaradi numerične nestabilnosti močno popačena. Podobno lahko izpeljemo tudi ustrezno shemo za polinom tretjega reda (3UP)

$$(h_R)^{3UP} = \left[\frac{1}{6}(1 - \alpha)(2 - \alpha) \right] h_{i+1}^n + \left[\frac{1}{6}(1 + \alpha)(5 - 2\alpha) \right] h_i^n - \left[\frac{1}{6}(1 - \alpha^2) \right] h_{i-1}^n. \quad (15)$$

V tretjem redu aproksimacije (Tkalic, 2006b) je oblika naftnega madeža zadovoljiva tudi po daljšem času od razlitja, kot je to razvidno iz Slike 8.

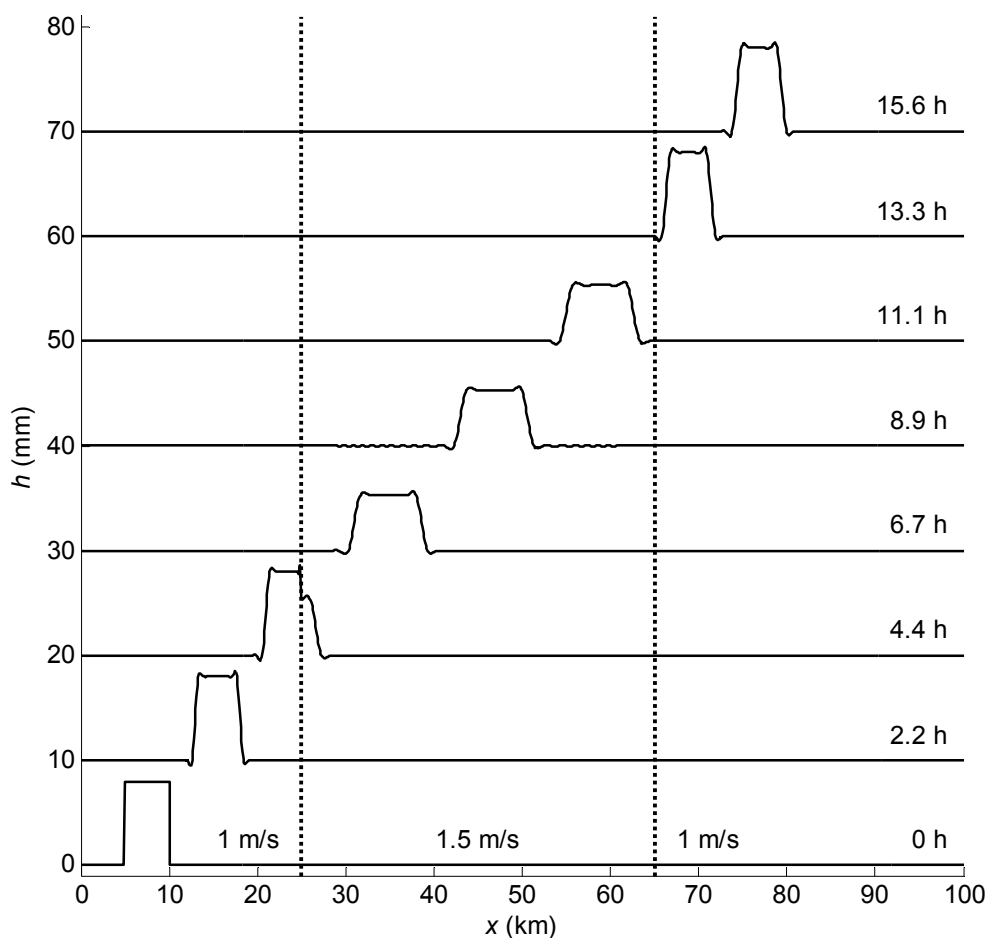


Slika 7. Simulacije advekcije v 1D za drugi red aproksimacije (2UP). Naftni madež ima ob času $t = 0$ debelino $h = 8$ mm in se razteza na območju [5 km, 10 km]. Od spodaj navzgor so prikazani rezultati simulacije ob različnem času. Zaradi preglednosti so sosednje simulacije med seboj premaknjene za 10 mm. Težišče madeža se v času $t = 20$ h premakne za $s = v_x t = 72$ km. Vrednosti preostalih parametrov so $\Delta t = 10$ s, $\Delta x = 100$ m in $v_x = 1,0$ m/s. Simulacija je bila izdelana v programu za numerično modeliranje MATLAB.



Slika 8. Simulacije advekcije v 1D za tretji red aproksimacije (3UP). Vsi parametri so enaki kot na Sliki 7.

Bolj zanimiv in hkrati realen primer je, ko se hitrost naftnega madeža spreminja s krajem, torej v eni dimenziji s koordinato x . Izkaže se, da je v tem primeru ključno, da pri simulaciji uporabimo numerično shemo, ki zagotavlja ohranitev mase. Zgled je prikazan na Sliki 9. V območju, kjer je hitrost večja, se debelina naftnega madeža zaradi ohranitve mase ustrezno zmanjša.



Slika 9. Simulacije advekcije v 1D za tretji red aproksimacije (3UP). Vsi parametri so enaki kot na Sliki 7, le da hitrost naftnega madeža na območju med $x \in [25 \text{ km}, 65 \text{ km}]$ naraste iz $v_x = 1 \text{ m/s}$ na $v_x = 1,5 \text{ m/s}$.

3.1.3 Difuzija

V naslednjem koraku rešimo enodimenzionalno enačbo (5) v primeru, ko je prisotna še difuzija. V numerično shemo za advekcijo (11), ki upošteva ohranitev mase naftnega madeža, dodamo še difuzijski člen (Tkalic in Chan, 2003; Tkalic, 2006b)

$$h_i^{n+1} = h_i^n - (\alpha_R h_R - \alpha_L h_L) + (\delta_R h'_R - \delta_L h'_L), \quad (16)$$

kjer sta h'_L in h'_R sta tako imenovana difuzijska pretoka v analogiji z advekcijama pretokoma h_L in h_R iz Slike 6. Pri tem sta $\delta_R = D_R \Delta t / (\Delta x)^2$ in $\delta_L = D_L \Delta t / (\Delta x)^2$ lahko različna, saj se v splošnem lahko D z debelino madeža spreminja. Ohranitev mase naftnega madeža nam zagotavlja naslednji pogoj

$$(\delta_L h'_L)_i = (\delta_R h'_R)_{i-1}. \quad (17)$$

Če je koeficient difuzije D določen v istih točkah x_i kot debelina madeža h_i , potem predpostavimo, da velja

$$(\delta_R)_i \equiv \frac{1}{2}(\delta_{i+1} + \delta_i) = \frac{1}{2}(D_{i+1} + D_i)\Delta t / (\Delta x)^2. \quad (18)$$

Pri nadaljnjih simulacijah bomo uporabili najpreprostejšo numerično shemo, ki je v literaturi (Tkalic, 2006b) poznana pod imenom »forward-time-central-space« (FTCS) shema

$$(h'_R)^{FTCS} = h_{i+1}^n - h_i^n, \quad (19)$$

ki je stabilna v območju $0 \leq \delta \leq 0,5$. Če je koeficient difuzije D konstanten, se difuzijski del enačbe (16) poenostavi v

$$h_i^{n+1} = h_i^n + (\delta_R h'_R - \delta_L h'_L) = h_i^n + D \Delta t \frac{h_{i+1}^n - 2h_i^n + h_{i-1}^n}{(\Delta x)^2}, \quad (20)$$

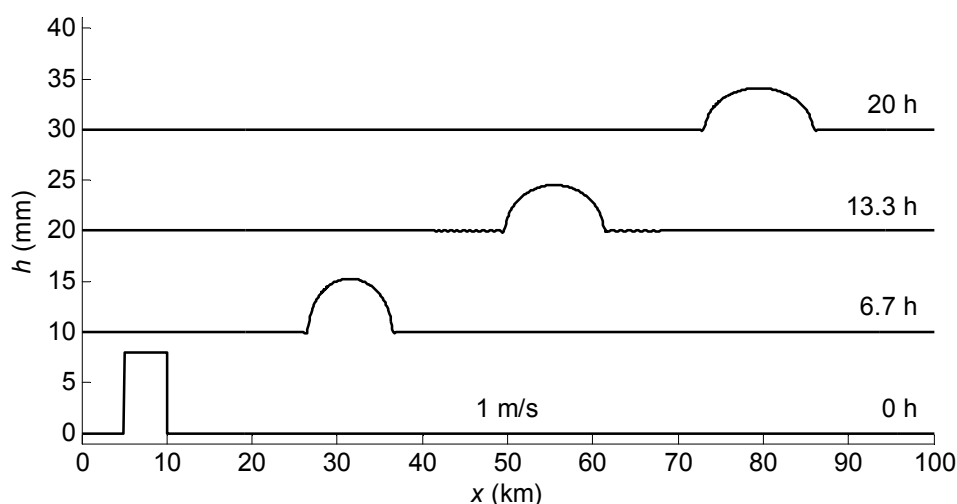
kjer prepoznamo standardni izraz za približek drugega odvoda po kraju (Bohte, 1991; Lomax in sod., 2001).

Za simulacijo širjenja naftnega madeža v prisotnosti advekcije in difuzije, v vsakem časovnem koraku najprej uporabimo numerično shemo za difuzijski del, nato pa (znotraj istega časovnega koraka) še ustrezno numerično shemo za advekcijo. Tak pristop zagotavlja numerično stabilnost. V seminarski nalogi (Jeglič, 2009) smo obravnavali primer, ko je

koeficient difuzije konstanten. Z oddaljevanjem od mesta razlitja nafte se debelina naftnega madeža zmanjšuje, a se obenem naftni madež širi. Že leta 1984 je Nihoul pokazal, da je predpostavka o konstantnem koeficientu difuzije za opis širjenja naftnega madeža nerealistična. Ugotovil je, da pri nafti proces širjenja (difuzije) poteka zaradi delovanja sile teže, viskozne sile in sile zaradi površinske napetosti. Za koeficient difuzije približno velja (Tkalic in sod., 2003)

$$D = gh^2 \frac{\rho_0 - \rho}{f} \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (21)$$

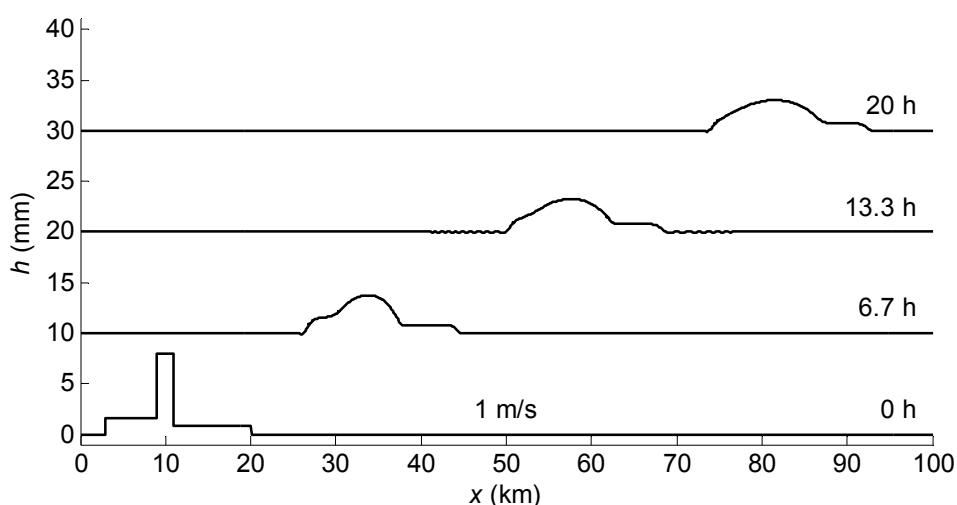
kjer je h debelina naftnega madeža, ρ_0 gostota morja, ρ gostota nafte, $f \approx 0,03$ koeficient trenja med nafto in morjem ter $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Koeficient difuzije je na različnih mestih naftnega madeža različen. Če je naftni madež debelejši, potem nanj deluje večja sila zaradi lastne teže in se naftni madež hitreje razleže. Ker je na robovih naftnega madeža njegova debelina običajno manjša, se posledično naftni madež kot celota širi počasneje kot v primeru, ko privzamemo, da je koeficient difuzije konstanten (Jeglič, 2009). Rezultati simulacije, kjer za koeficient difuzije predpostavimo zgornjo odvisnost (enačba 21) so prikazani na Sliki 10. Naftni madež ima že po kratkem času popolnoma drugačno obliko kot pri modelu s konstantnim koeficientom difuzije. Opazovanja so potrdila pravilnost opisanega modela.



Slika 10. 1D simulacija širjenja naftnega madeža pod vplivom advekcije (3UP) s konstantno hitrostjo naftnega madeža v_x , in difuzije (FTCS), s koeficientom difuzije $D = D'h^2$ z $D' = 7,8 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ (za začetno debelino naftnega madeža $h = 8 \text{ mm}$ dobimo vrednost $D = 500 \text{ m}^2/\text{s}$). Vrednosti preostalih parametrov so $\Delta t = 10 \text{ s}$, $\Delta x = 100 \text{ m}$ in $v_x = 1,0 \text{ m/s}$.

3.1.4 Poljubna začetna oblika naftnega madeža

Ena izmed prednosti opisanega CFD modela, ki temelji na Eulerjevem pristopu, je v primerjavi z obstoječimi modeli, ki so osnovani na Lagrangeovem pristopu, v tem, da lahko simuliramo razlitje nafte za poljubno začetno obliko naftnega madeža. Včasih se namreč zgodi, da ima naftni madež ob začetku simulacije že neko poljubno obliko, ker mine nekaj časa, preden dobimo informacijo o razlitju. V programu Nafta2 ni možno izbrati poljubne oblike naftnega madeža. Zgled je prikazan na Sliki 11.



Slika 11. 1D simulacija širjenja naftnega madeža za primer bolj splošne začetne oblike naftnega madeža ob razlitju. Uporabljeni so enaki parametri kot pri simulaciji prikazani na Sliki 10.

3.1.5 Izhlapovanje

V zadnjem koraku si oglejmo kako lahko v numerično shemo vključimo tudi druge fizikalno-kemijske procese, kot je na primer izhlapevanje. V prvem približku lahko za izhlapevanje predpostavimo, da se volumen nafte eksponentno zmanjšuje v odvisnosti od časa t po razlitju,

$$h = h_0 \exp(-\lambda t). \quad (22)$$

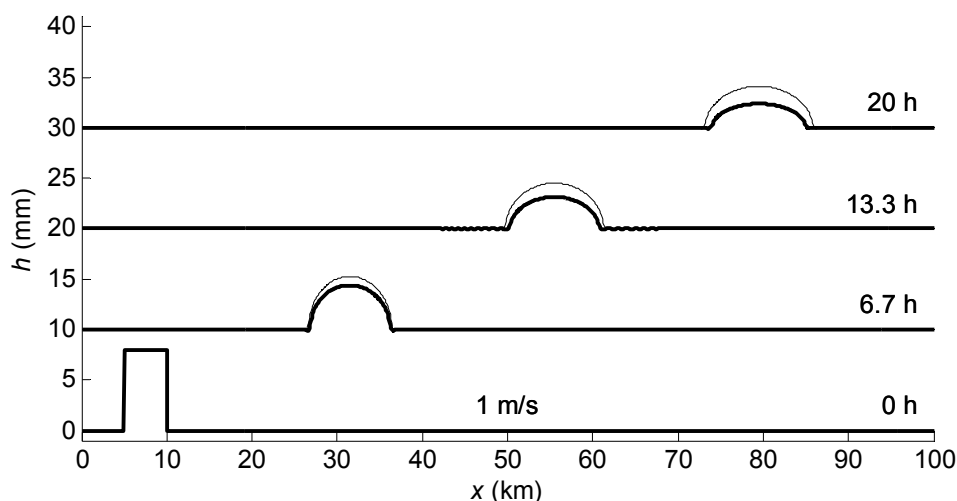
Po odvajanju enačbe (22) lahko tovrstno izhlapevanje opišemo s členom R_h iz enačbe (5)

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\lambda h. \quad (23)$$

Enačbo (23) numerično rešimo z naslednjo diferenčno shemo (Bohte, 1991)

$$h_i^{n+1} = h_i^n - \lambda \Delta t h_i^n, \quad (24)$$

kjer lahko definiramo razpolovni čas $t_{1/2} = \ln(2)/\lambda$. Rezultati simulacije so prikazani na Sliki 12.



Slika 12. 1D simulacija širjenja naftnega madeža pod vplivom advekcije (3UP) s konstanto hitrostjo naftnega madeža v_x , in difuzije s koeficientom difuzije $D = D'h^2$. V prvem primeru (tanka črta) proces izhlapevanja ni vključen. V drugem primeru (debela črta) razpolovni čas izhlapevanja znaša $t_{1/2} = 20$ h. Temu ustrezno je volumen naftnega madeža po $t = 20$ h dvakrat manjši kot v primeru brez upoštevanja procesa izhlapevanja. Obenem se v drugem primeru po pričakovanju naftni madež nekoliko manj razširi. Vrednosti preostalih parametrov so enake kot na Sliki 10.

Zgornji približek je smiseln, saj je Fingas (2004) pokazal, da izhlapevanje nafte ni regulirano z mejno plastjo, torej ni odvisno od površine naftnega madeža, ter se volumen (oziroma višina) naftnega madeža spreminja le kot funkcija časa. Za nafto velja, da vsebuje različne komponente, torej takšne ki izhlapijo v nekaj urah ter tudi take, ki lahko izhlapevajo več mesecev. Najbolj preprosto lahko to upoštevamo tako, da s časom spreminjamo vrednost parametra λ . Če ima prva komponenta nafte kratek razpolovni čas $t'_{1/2}$, in druga komponenta dolg razpolovni čas $t''_{1/2}$, potem je v začetku $\lambda_1 \approx \ln(2)/t'_{1/2}$, kasneje pa $\lambda_2 \approx \ln(2)/t''_{1/2}$. Pravilna obravnava izhlapevanja nafte presega okvirje te diplome, in bi lahko bila predmet

nadaljnega dela in razvoja Eulerjevega modela, kot tudi obstoječega Lagrangeovega modela za širjenje naftnega madeža v morju.

3.2 Modeliranje širjenja nafte v 2D

Oglejmo si numerično reševanje enačbe (4) za širjenje naftnega madeža po površini vode, ki jo v ta namen razvijemo po posameznih komponentah:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial(hv_x)}{\partial x} - \frac{\partial(hv_y)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D\frac{\partial h}{\partial y}\right) + R_h, \quad (25)$$

kjer sta v splošnem $v_x(x,y)$ in $v_y(x,y)$ eksplicitni funkciji kraja, ter koeficient difuzije $D(h)$ funkcija debeline naftnega madeža. Parcialno diferencialno enačbo znova rešimo z metodo končnih diferenc, kjer ravnino (x,y) razdelimo na mrežo točk (x_i, y_j) , ki so dobljene z enakomerno razdelitvijo v smeri koordinat x in y v razmaku Δx oziroma Δy . Debelino nafte $h_{i,j}$ na mestu (x_i, y_j) ob času $(n+1)\Delta t$ povežemo z debelinami nafte $h_{k,l}$ na mestu (x_k, y_l) ob času $n\Delta t$. Leta 2003 sta Tkalich in Chan razvila zelo učinkovito in numerično stabilno shemo za reševanje zgornje enačbe, ki sta jo poimenovala shema TOP-12 (Third Order Polynomial method).

3.2.1 Advekcija v 2D

Če je prisoten le proces advekcije, ima numerična shema naslednjo obliko (za $v_x > 0$ in $v_y > 0$)

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n - (\alpha_E h_E - \alpha_W h_W) - (\beta_N h_N - \beta_S h_S), \quad (26)$$

kjer nam po analogiji z enodimenzionalnim primerom (enačba (12)) pogoja

$$(\alpha_W h_W)_{i,j} = (\alpha_E h_E)_{i-1,j} \text{ in } (\beta_S h_S)_{i,j} = (\beta_N h_N)_{i,j-1}, \quad (27)$$

zagotavljata ohranitev mase naftnega madeža. Če je hitrost naftnega madeža določena v točkah (x_i, y_j) , potem lahko zapišemo

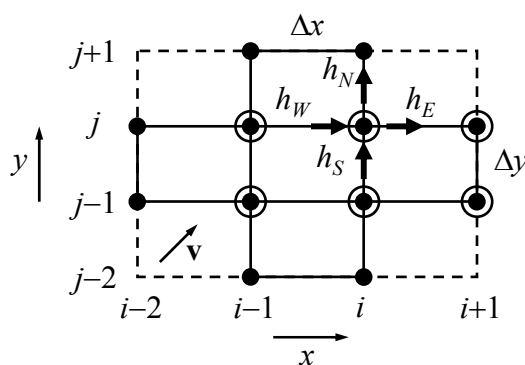
$$(\alpha_E)_{i,j} \equiv \alpha = \frac{v_x \Delta t}{\Delta x}, \quad (\beta_N)_{i,j} \equiv \beta = \frac{v_y \Delta t}{\Delta y}. \quad (28)$$

V enačbi (26) so h_E , h_W , h_N in h_S tako imenovani adveksijski pretoki (glej Sliko 13). Kot zglede navedimo, kako se adveksijski pretok h_E izraža s pomočjo vrednosti $h_{k,l}$.

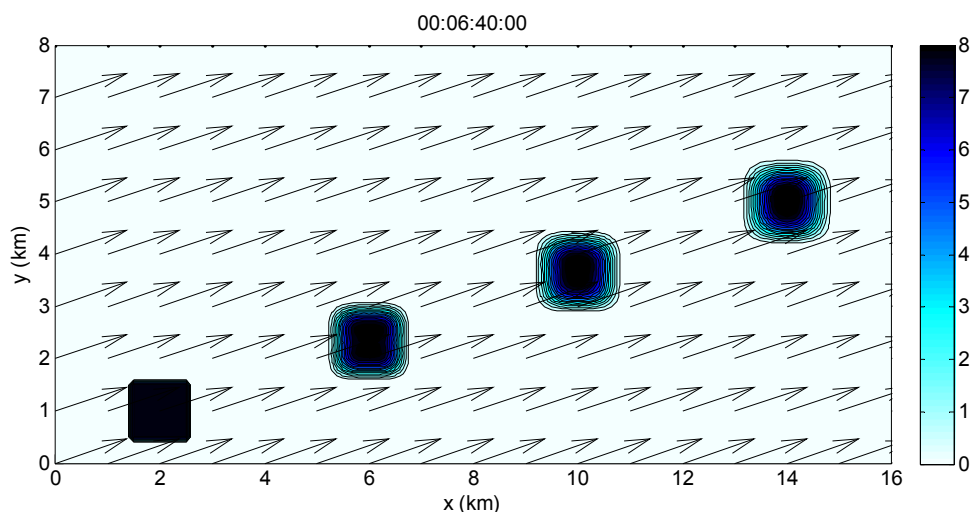
$$\begin{aligned}
 h_E = & \frac{1}{6}(1-\alpha)(2-\alpha)(1-\beta)h_{i+1,j}^n - \frac{1}{6}(1-\alpha^2)(1-\beta)h_{i-1,j}^n \\
 & + \frac{1}{6}\left[(5+3\alpha-2\alpha^2)-\beta(2+3\alpha-2\alpha^2)\right]h_{i,j}^n + \frac{1}{6}(1-\alpha)(2-\alpha)\beta h_{i+1,j-1}^n \\
 & + \frac{1}{6}(2+3\alpha-2\alpha^2)\beta h_{i,j-1}^n - \frac{1}{6}(1-\alpha^2)\beta h_{i-1,j-1}^n
 \end{aligned} \quad (29)$$

Adveksijski pretok h_E na mestu (x_i, y_j) je določen s šestimi sosednjimi vrednostmi $h_{k,l}$ (na Sliki 13 so ustrezna mrežna mesta obkrožena). Za preostale adveksijske pretoke veljajo podobne zveze in jih lahko najdemo v literaturi (Tkalic in Chan, 2003; Tkalic, 2006a). Pri izračunu enega koraka podanega z enačbo (26), potrebujemo 12 sosednjih vrednosti $h_{k,l}$ (na Sliki 13 so ustrezna mrežna mesta označena s črnimi pikami), zato je opisana metoda v literaturi poznana kot shema TOP-12. Tako kot v enodimenzionalnem primeru (enačba (15)), je zaradi numerične stabilnosti tudi v dvodimenzionalnem primeru potreben vsaj tretji red polinomske aproksimacije, kar hkrati tudi zmanjša nezaželeno numerično difuzijo.

Rezultat simulacije, kjer smo uporabili enačbe (26)-(29), je prikazan na Sliki 14. Tudi v tem primeru se naftni madež, ki se premika zaradi advekcije nekoliko razmaže (zaradi numerične difuzije), a vseeno v osnovi ohrani prvotno obliko.



Slika 13. Numerična shema TOP-12. Prikazana je mreža točk (x_k, y_l) ob času $n\Delta t$ za izračun debeline naftnega madeža $h_{i,j}$ na mestu (x_i, y_j) ob času $(n+1)\Delta t$. V skladu s shemo, ki jo podaja enačba (26), za to potrebujemo vrednosti $h_{k,l}$ v dvanajstih sosednjih točkah (označene s črnimi pikami). Na mreži so obkrožene tiste točke, ki so potrebne za izračun adveksijskega pretoka h_E (glej enačbo (27)). Shema velja v primeru, ko sta $v_x > 0$ in $v_y > 0$.



Slika 14. Simulacija širjenja naftnega madeža v 2D zaradi advekcije pod vplivom konstantnega hitrostnega polja z $v = (0,167 \text{ m/s}, 0,5 \text{ m/s})$. Naftni madež ima ob času $t = 0$ debelino $h = 8 \text{ mm}$ in se razteza na intervalu $x \in [1,5 \text{ km}, 2,5 \text{ km}]$ in $y \in [0,5 \text{ km}, 1,5 \text{ km}]$. Prikazana je oblika naftnega madeža v enakomernih časovnih razmikih, z zadnjo vrednostjo ob času $t = 6 \text{ h } 40 \text{ min}$. Vrednosti preostalih parametrov so $\Delta t = 100 \text{ s}$, $\Delta x = 100 \text{ m}$ in $\Delta y = 100 \text{ m}$. Barvna skala na desni strani podaja debelino naftnega madeža v mm.

3.2.2 Difuzija v 2D

Če je poleg advekcije prisotna še difuzija, sta Tkalich in Chan (2003) po analogiji z enodimenzionalnim primerom (glej enačbo (16)) dodala še naslednje člene

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n - (\alpha_E h_E - \alpha_W h_W) - (\beta_N h_N - \beta_S h_S) + (\lambda_E h'_E - \lambda_W h'_W) + (\mu_N h'_N - \mu_S h'_S), \quad (30)$$

kjer so h'_E , h'_W , h'_N in h'_S tako imenovani difuzijski pretoki. Pri tem je na primer

$$h_E^n = (1 - \alpha)(1 - \beta)h_{i+1,j}^n - (1 - 2\alpha)(1 - \beta)h_{i,j}^n - \alpha(1 - \beta)h_{i-1,j}^n + (1 - \alpha)\beta h_{i+1,j-1}^n - (1 - 2\alpha)\beta h_{i,j-1}^n - \alpha\beta h_{i-1,j-1}^n, \quad (31)$$

kjer je difuzijski pretok h'_E na mestu (x_i, y_j) zopet določen s šestimi sosednjimi vrednostmi $h_{k,l}$.

Pogoja

$$(\lambda_W h'_W)_{i,j} = (\lambda_E h'_E)_{i-1,j} \text{ in } (\mu_S h'_S)_{i,j} = (\mu_N h'_N)_{i,j-1}, \quad (32)$$

zagotavljata ohranitev mase naftnega madeža.

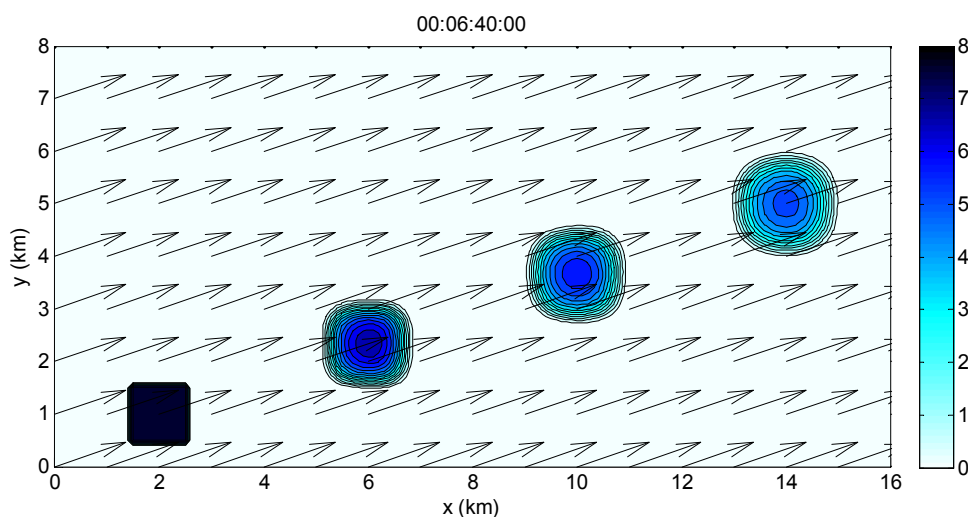
V splošnem je difuzijska konstanta D funkcija debeline, zato predpostavimo, da velja

$$\begin{aligned} (\lambda_E)_{i,j} &\equiv \frac{1}{2}(\lambda_{i+1,j} + \lambda_{i,j}) = \frac{1}{2}(D_{i+1,j} + D_{i,j})\Delta t / (\Delta x)^2 \\ (\lambda_N)_{i,j} &\equiv \frac{1}{2}(\lambda_{i,j+1} + \lambda_{i,j}) = \frac{1}{2}(D_{i,j+1} + D_{i,j})\Delta t / (\Delta y)^2 \end{aligned} \quad (33)$$

Avtorja sta tudi izpeljala območje stabilnosti numeričnih shem (28) in (31), pri čemer mora biti za numerično stabilnost zadoščeno naslednjim relacijam:

$$\begin{aligned} |\alpha| &\leq 1, \quad |\beta| \leq 1, \\ 0 &\leq \lambda \leq \frac{1}{4}, \quad 0 \leq \mu \leq \frac{1}{4}. \end{aligned} \quad (34)$$

V praksi to pomeni, da moramo pri danih vrednostih parametrov v in D , ter smiselnih vrednostih razdelitve mreže Δx , Δy , izbrati dovolj majhen časovni korak Δt . Rezultati simulacije, kjer upoštevamo tako advekcijo kot difuzijo s konstantnim koeficientom difuzije so prikazani že v seminarskem delu (Jeglič, 2009). Na Sliki 15 je prikazan zgled, ko je konstanta difuzije odvisna od debeline naftnega madeža na danem mestu v skladu z $D = D'h^2$ (enačba (21)). Pri tem smo uporabili enačbe (26)-(33).



Slika 15. Prikazana je simulacija širjenja naftnega madeža v 2D pod vplivom advekcije in difuzije z difuzijsko konstanto, ki je funkcija debeline v skladu z enačbo $D = D'h^2$ in $D' = 1,56 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$. Uporabljeni so enaki parametri kot na Sliki 14.

Opazimo, da je efekt »prave« difuzije večji kot efekt numerične difuzije, ki spremlja proces advekcije s Slike 14. To pomeni, da je numerična difuzija zelo majhna v primerjavi z

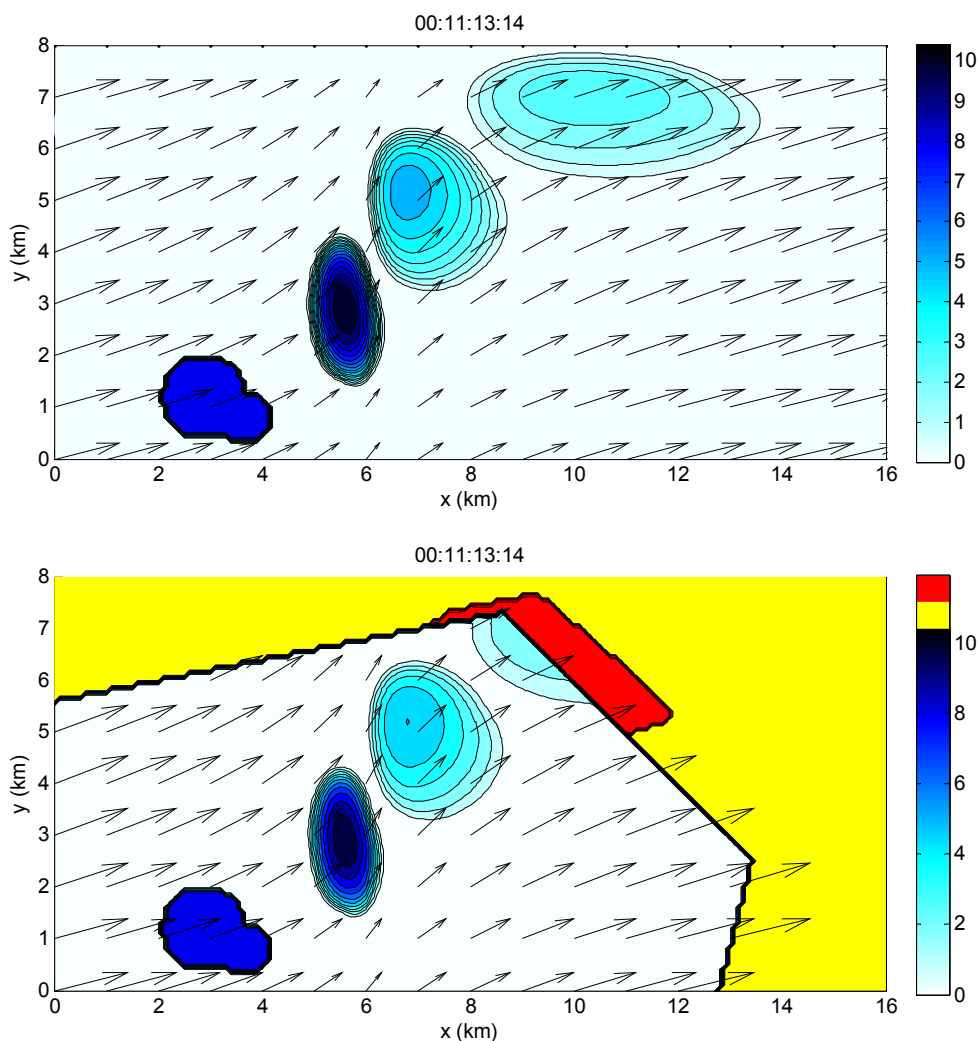
fizikalno relevantno difuzijo naftnega madeža na površini morja. Obenem sta Tkalic in Chan (2003) pokazala, da postane proces advekcije v okviru Eulerjevega opisa numerično stabilnejši, ko vključimo še proces difuzije. Kljub temu, da se pri Lagrangeovem opisu težavam z numerično difuzijo izognemo, izgleda, da se v okviru Eulerjevega pristopa problematika numerične difuzije za problem modeliranja širjenja naftnega madeža ne manifestira do te mere, da bi vodila do pomembnih numeričnih napak. Pri časovno daljših simulacijah je vseeno potrebno biti previden, saj se numerična difuzija v času akumulira. Podrobna obravnava tega problema presega okvirje te diplomske naloge.

3.2.3 Odlaganje na obalo

Če želimo modelirati realno nesrečo, pri kateri se je v morje razlila nafta, je potrebno natančno poznavanje morskih tokov ter vetra na površini morja. Poleg tega pa je nujno tudi poznavanje konfiguracije obale, ki predstavlja robni pogoj na pravokotni mreži (x, y) .

Slika 16 je demonstracija primera z neenakomernim hitrostnim poljem. Kmalu po razlitju, se naftni madež znajde v območju, kjer so tokovi počasnejši, se »zgosti« in celo preseže začetno debelino. Kasneje se naftni madež premakne v območje hitrejših tokov, zaradi česar se naftni madež razleze. Poleg tega se naftni madež dodatno razleze tudi zaradi lastne teže, kar upoštevamo z difuzijskim členom v enačbi (25).

V naslednjem koraku simulaciji dodamo še konfiguracijo obale. Ker se v numerični simulaciji v časovnem intervalu iz t v $t' = t + \delta t$ lahko zgodi, da naftni madež zadane obalo, za nekatere točke obale postane $h_{ij} > 0$, zato na teh mestih postavimo $h_{ij} = 0$, in hkrati v simulaciji, ki predstavlja širjenje naftnega madeža prikažemo točke obale, ki jih je naftni madež dosegel. Pri tem je $\delta t = k\Delta t$, torej v splošnem večkratnik časovnega intervala Δt , kar pomeni, da na izbrano število korakov k preverimo, ali je del madeža zadel obalo. To je najpreprostejši model, ki predpostavi, da je se je celoten del naftnega madeža, ki je zadel obalo, tudi odložil na obali. Zgled je prikazan na Sliki 16.



Slika 16. Zgoraj je prikazana simulacija širjenja naftnega madeža v 2D pod vplivom advekcije in difuzije z neenakomernim hitrostnim poljem. Uporabljeni so enaki parametri kot na Sliki 15. Spodaj je dodana obala (rumena barva), kjer točke, ki so obarvane rdeče, ponazarjajo del obale, ki jo je zadel naftni madež. Barvna skala na desni strani podaja debelino naftnega madeža v mm.

3.3 Kratek opis programa Euler v okolju MATLAB

MATLAB je programsko okolje, ki omogoča numerično modeliranje in enostavno vizualizacijo rezultatov. V okviru te diplomske naloge so bili izdelani naslednji programi:

```
EULER_1D_1 = testne simulacije v 1D
```

```
EULER_2D_1 = testne simulacije v 2D
```

```

EULER_2D_2 = širjenje nafte v Tržaškem zalivu pod vplivom
             stalnega hitrostnega polja
EULER_2D_3 = širjenje nafte v Tržaškem zalivu pod vplivom
             časovno odvisnega hitrostnega polja
EULER_INPUT_1 = uvoz hitrostnega polja iz programa Nafta2

```

Pobljže si oglejmo osnovne elemente programa z imenom Euler_2D_1. V prvem delu so definirani osnovni vhodni parametri:

```

Dx, Dy = dimenzija celice v smeri x, y
Nx, Ny = število celic v smeri x, y
Nt = število časovnih korakov

```

Na voljo so številni testni primeri, kjer lahko izberemo:

```

OIL = oblika naftnega madeža: h(i,j)
VEL = oblika hitrostnega polja: ux(i,j), uy(i,j)
ADV = tip modela za advekcijo: 0(brez), 1(TOP12)
DIF = tip modela za difuzijo: 0(brez), 1(D=konst), 2(D=D0h2)
EVP = tip modela za izhlapevanje: 0(brez), 1(eksponentno)
CL = oblika obale, ki definira matriko c(i,j)

```

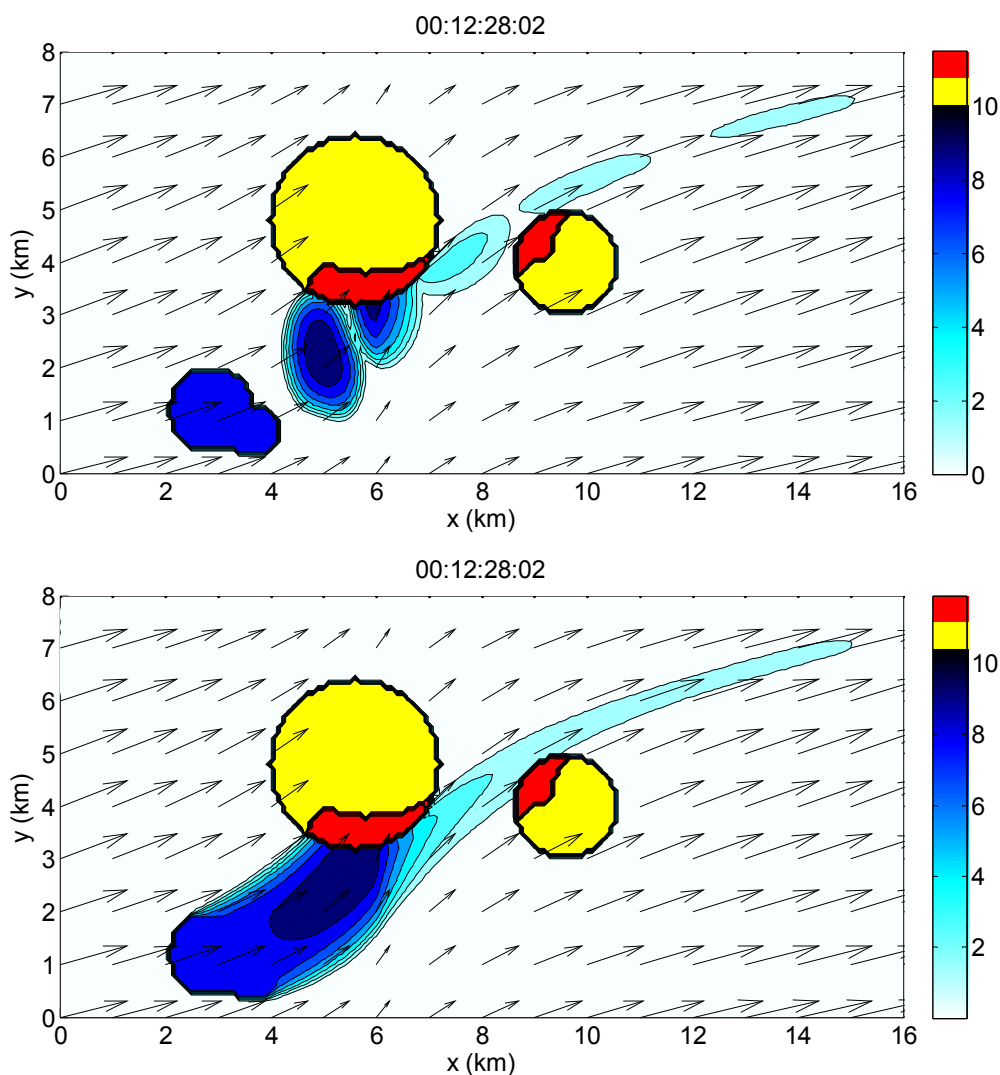
Naj omenimo še nekaj najpomembnejših funkcij v okolju MATLAB ki so uporabljene v programu za modeliranje širjenja nafte v okviru Eulerjevega pristopa v dveh dimenzijah:

```

circshift(i,j) = matriko ciklično premakne za vektor (i,j)
countourf = omogoča risanje naftnega madeža s konturami
quiver = omogoča risanje vektorskega polja
colormap = definira barvno skalo

```

Posebej pomembna je funkcija `circshift`, ki omogoča, da se v vsakem časovnem koraku izračunajo nove vrednosti matrike debeline naftnega madeža $h(i,j)$ v vseh točkah mreže (i,j) hkrati, kar pomeni, da se izognemo časovno potratnim `for` zankam v okolju MATLAB.

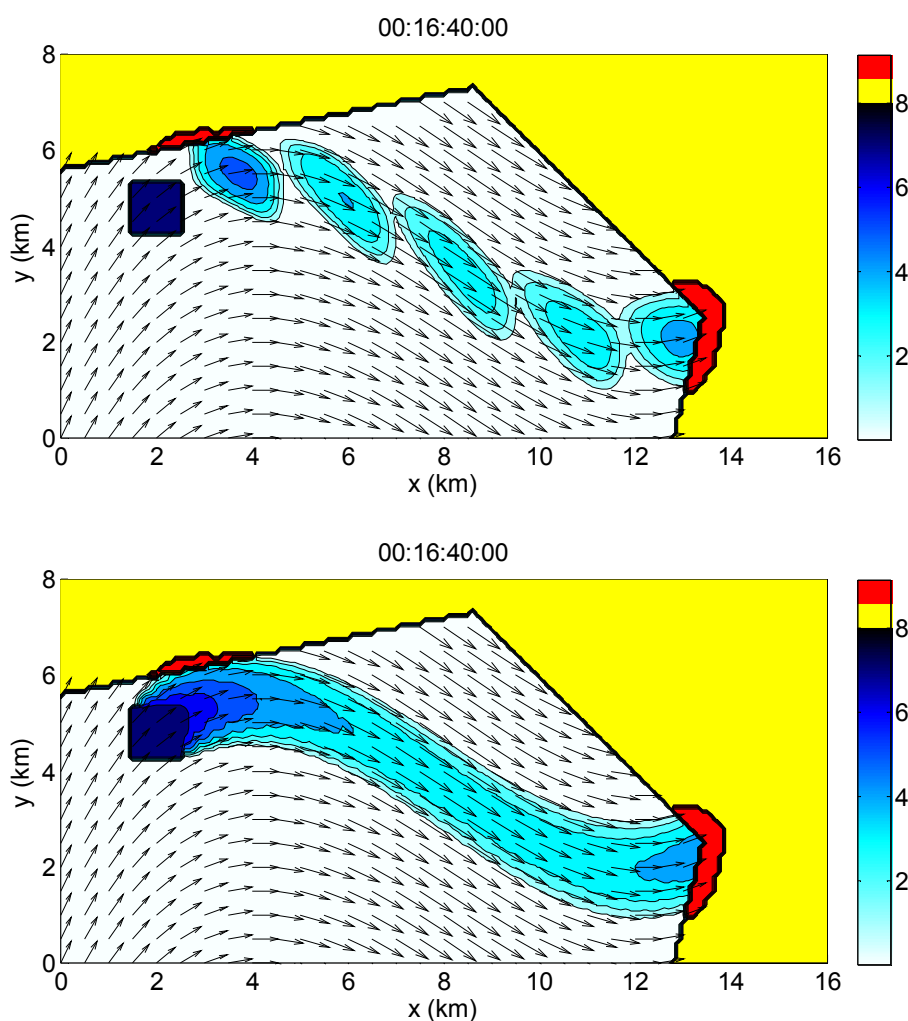


Slika 17. Alternativna prikaza simulacije širjenja naftnega madeža v 2D pod vplivom advekcije in difuzije. V zgornjem primeru so prikazani naftni madeži ob izbranih enakomernih časovnih intervalih, v spodnjem primeru trajektorija poteka naftnega madeža. Naftni madež doseže maksimalno debelino tik preden delno trči v otok. Uporabljeni so enaki parametri kot na Sliki 16.

Približno območje obale v katerega trči naftni madež dobimo z naslednjim postopkom. Na vsako izbrano število časovnih korakov preverimo, ali je morda debelina naftnega madeža v točkah mreže, ki pripadajo obali slučajno večja od 0. Če to drži, potem te točke obarvamo rdeče, in povrnemo vrednost debeline naftnega madeža v teh točkah na 0. To je najpreprostejša možna obravnava robnih pogojev, kjer predpostavimo, da se vsa nafta, ki

pride do obale, na njej tudi odloži. Tak prikaz nam hitro vizualizira potencialno ogrožena mesta na obali v primeru prave nesreče.

Na Sliki 17 je prikazan še en primer simulacije, kjer pa obalo nadomestita dva okrogla otoka. V tem primeru se znatna količina nafte odloži na obeh otokih, kar seveda pomeni, da se v nadaljevanju po morju širi le še del celotne mase naftnega madeža. Posebej zanimiva je spodnja vizualizacija na Sliki 17, ki prikazuje trajektorijo gibanja naftnega madeža.

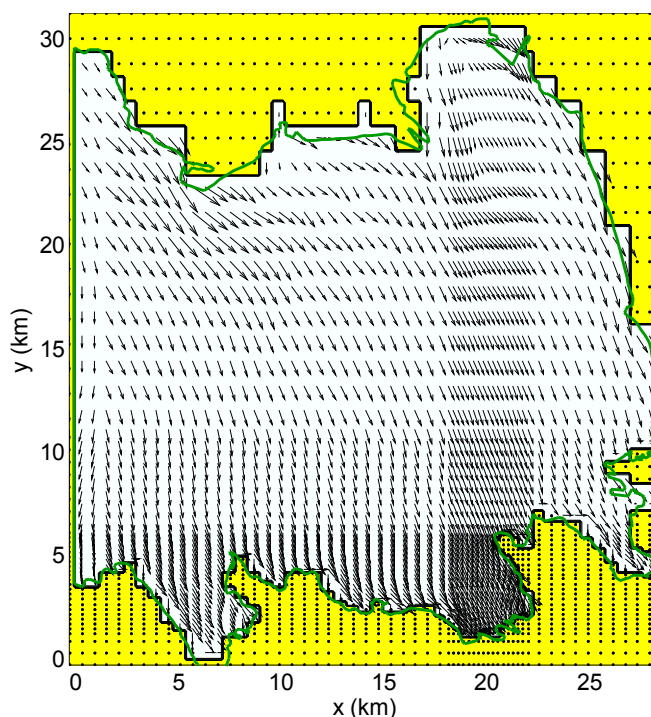


Slika 18. Posplošitev za primer, ko hitrostno polje ne kaže le v smeri I. kvadranta ($u_x > 0$, $u_y > 0$). Uporabljeni so enaki parametri kot na Sliki 16. V zgornjem primeru so prikazani naftni madeži ob izbranih enakomernih časovnih intervalih, v spodnjem primeru trajektorija poteka naftnega madeža z ovojnico največjih debelin naftnega madeža.

Čeprav v tem poglavju tega nismo eksplicitno zapisali, so bile vse do zdaj opisane simulacije narejene za primer, ko kaže hitrostno polje v smeri I. kvadranta, torej ko sta $u_x > 0$, $u_y > 0$. Na Sliki 18 je prikazan primer, ko hitrostno polje kaže tudi v smeri IV. kvadranta. Zgoraj opisane numerične sheme delujejo brezhibno tudi v tem primeru. S tem zgleodom končujemo teoretično poglavje. V naslednjem poglavju se lotevamo realnih scenarijev, kjer bomo modelirali nekaj potencialno možnih primerov razlitja nafte v Tržaškem zalivu.

4 RAZLITJE NAFTE V TRŽAŠKEM ZALIVU

Za realistično modeliranje potencialnega razlitja nafte v Tržaškem zalivu je v model, ki smo ga razvili v prejšnjem poglavju, potrebno dodati še naslednje elemente. Osnova je primerna izbira 2D numerične mreže, kjer moramo najti primerno ravnotežje med hitrostjo računanja in med dovolj natančno upodobitvijo konfiguracije Tržaškega zaliva. V skladu s programom Nafta, ki je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin (Žagar, 1994) in njegovo nadgradnjo Nafta2 (Galuf, 2005), tipično zadostuje mreža velikost 59×51 , kjer je Tržaški zaliv obrnjen za kot 27° v smeri urinega kazalca. V obeh zgoraj omenjenih programih je uporabljena mreža, ki ni ekvidistančna, saj so točke mreže zgoščene v smereh x in y v bližini slovenske obale, ter hkrati v horizontalni smeri v bližini Koprškega zaliva. Na Sliki 19 je prikazan primer hitrostnega polja in profila obale, ko v programu Nafta2 za hitrost vetra vnesemo hitrost 4 m/s pod kotom 300° glede na sever. Izhod na odprto morje je zaprt v skladu z modelom Nafta2, torej kar vzdolž smeri y glede na izbrano orientacijo Tržaškega zaliva (geografsko je to meja Savudrija-Grado).



Slika 19. Hitrostno polje pod vplivom vetra s hitrostjo 4 m/s in smerjo 300° glede na sever, ki ga dobimo iz programa Nafta2. Z zeleno črto je podan potek obale. Kopno je obarvano z rumeno barvo. Tržaški zaliv je obrnjen za kot 27° v smeri urinega kazalca.

Zaradi enostavnosti uporabe numeričnih metod v okviru Eulerjevega modela v naslednjem koraku profil obale in hitrostno polje interpoliramo na ekvidistančno mrežo velikosti 146×136 , kjer sta $\Delta x = 250$ m in $\Delta y = 250$ m, tako kot je to prikazano na Sliki 20. Dodali smo še območja glavnih mest v Tržaškem zalivu, ki smo jih prav tako izluščili iz programa Nafta2 s pomočjo programa EULER_INPUT_1.

4.1 Scenarij 1

Približno 20 km severno in 10 km zahodno od Piranskega zaliva se razlije 52500 m^3 nafte z gostoto 850 kg/m^3 . Ob času $t = 0$, znaša debelina madeža 20 mm in je enakomerno porazdeljena na območju $2,625 \text{ km}^2$, tako kot je to prikazano na Sliki 20. Pri simulaciji s programom EULER_2D_2 upoštevamo le procesa advekcije in difuzije, kjer je difuzijska konstanta funkcija debeline v skladu z enačbo (21). Morje ima gostoto 1025 kg/m^3 . Zaradi preglednosti je hitrostno polje, ki se s časom ne spreminja, izrisano le v vsaki četrti vertikalni oziroma horizontalni točki mreže. Potek naftnega madeža ob enakomernih časovnih intervalih je prikazan na Sliki 20. Simulacija se zaključi po 2 dneh in 22 urah. V približno 60 h naftni madež doseže Piran. Ker se tik ob obali hitrost tokov zmanjša, se tudi naftni madež ponovno nekoliko zgosti, in posledično doseže večjo debelino. Pri simulaciji izberemo časovni korak $\Delta t = 600$ s, ki je v okviru območja stabilnosti uporabljenih numeričnih shem v skladu z enačbo (34).

4.2 Primerjava z modelom Nafta2

Za kontrolo si želimo zgornji rezultat za scenarij 1 primerjati z rezultatom, ki nam ga da obstoječi program Nafta2. Povsem kvantitativna primerjava programa EULER_2D_2 z obstoječim programom Nafta2 ni možna, saj so nekateri procesi v okviru obeh pristopov obravnavani drugače. Medtem ko je proces advekcije v obeh primerih obravnavan enako, to ne velja za proces difuzije, kjer je v okviru Eulerjevega pristopa na površini morja dominantna difuzija pod vplivom lastne teže nafte, le-to pa v okviru Lagrangeovega pristopa

obravnavamo kot turbulentno difuzijo (Žagar, 1994). Naj znova poudarimo, da je pri Eulerjevem modelu formulacija širjenja nafte, ki upošteva, da je difuzijska konstanta sorazmerna kvadratu debeline naftnega madeža, ustrežnejša v primerjavi z obstoječimi modeli, ki temeljijo na Lagrangeovem opisu, in zato bolje opiše proces razširjanja naftnega madeža na površini morja zaradi lastne teže nafte. Ne glede na to vidimo, da v obeh primerih (primerjava med Sliko 20 in 21) naftni madež doseže Piran v približno 60 h.

4.3 Scenarij 2

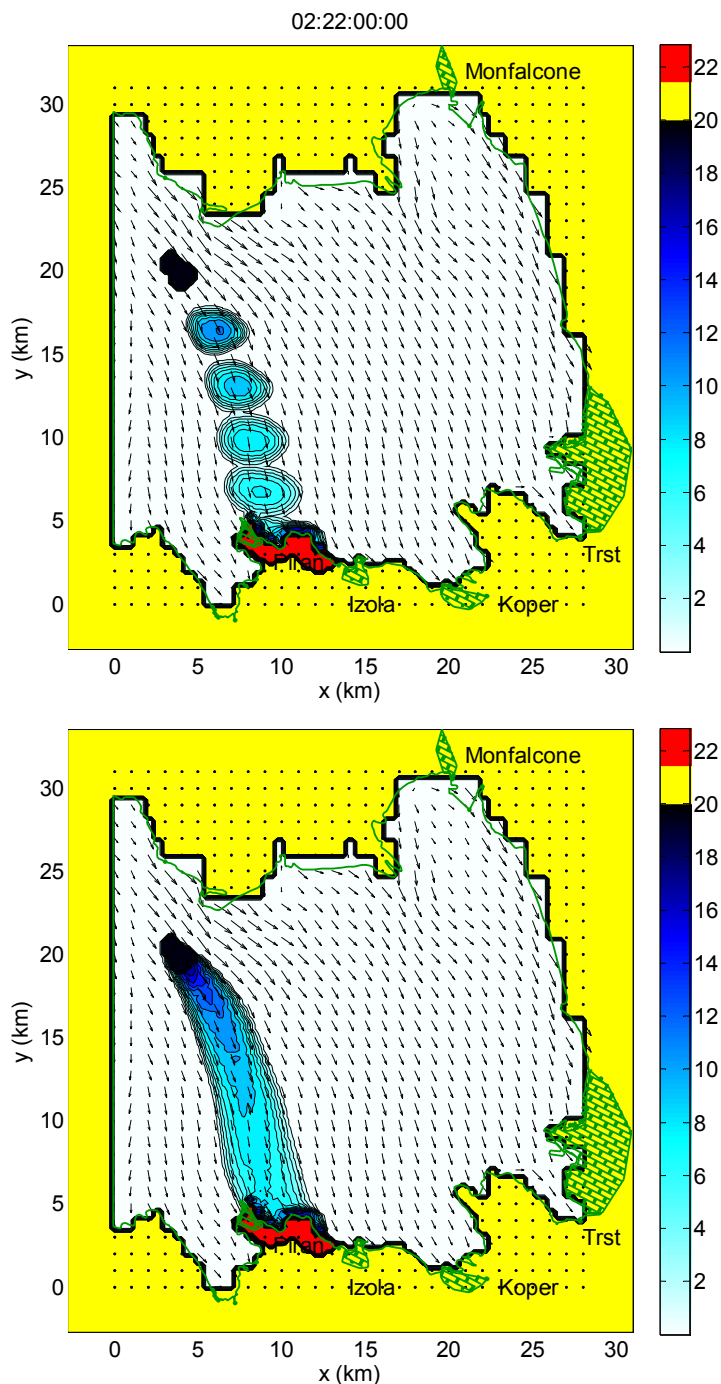
20 h po začetku širjenja naftnega madeža iz scenarija 1, se veter nad Tržaškim zalivom začne obračati in spreminjati velikost, kar pomeni, da se tudi hitrostno polje na površini morja spremeni. V naslednjih 46 h se iz $v_1 = 4$ m/s v smeri 300° ob $t_1 = 20$ h enakomerno spremeni v $v_2 = 6$ m/s v smeri 200° glede na sever ob $t_2 = 66$ h. Ker lahko hitrostno polje na površini morja za obe skrajni situaciji vetra izluščimo iz programa Nafta2, dobimo (v prvem približku) časovno odvisnost hitrostnega polja v vmesnem času $t_1 < t < t_2$ z interpolacijo obeh skrajnih vrednosti

$$\begin{aligned} v_x(x, y) &= v_x^1(x, y) \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} + v_x^2(x, y) \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \\ v_y(x, y) &= v_y^1(x, y) \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} + v_y^2(x, y) \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \end{aligned} \quad (35)$$

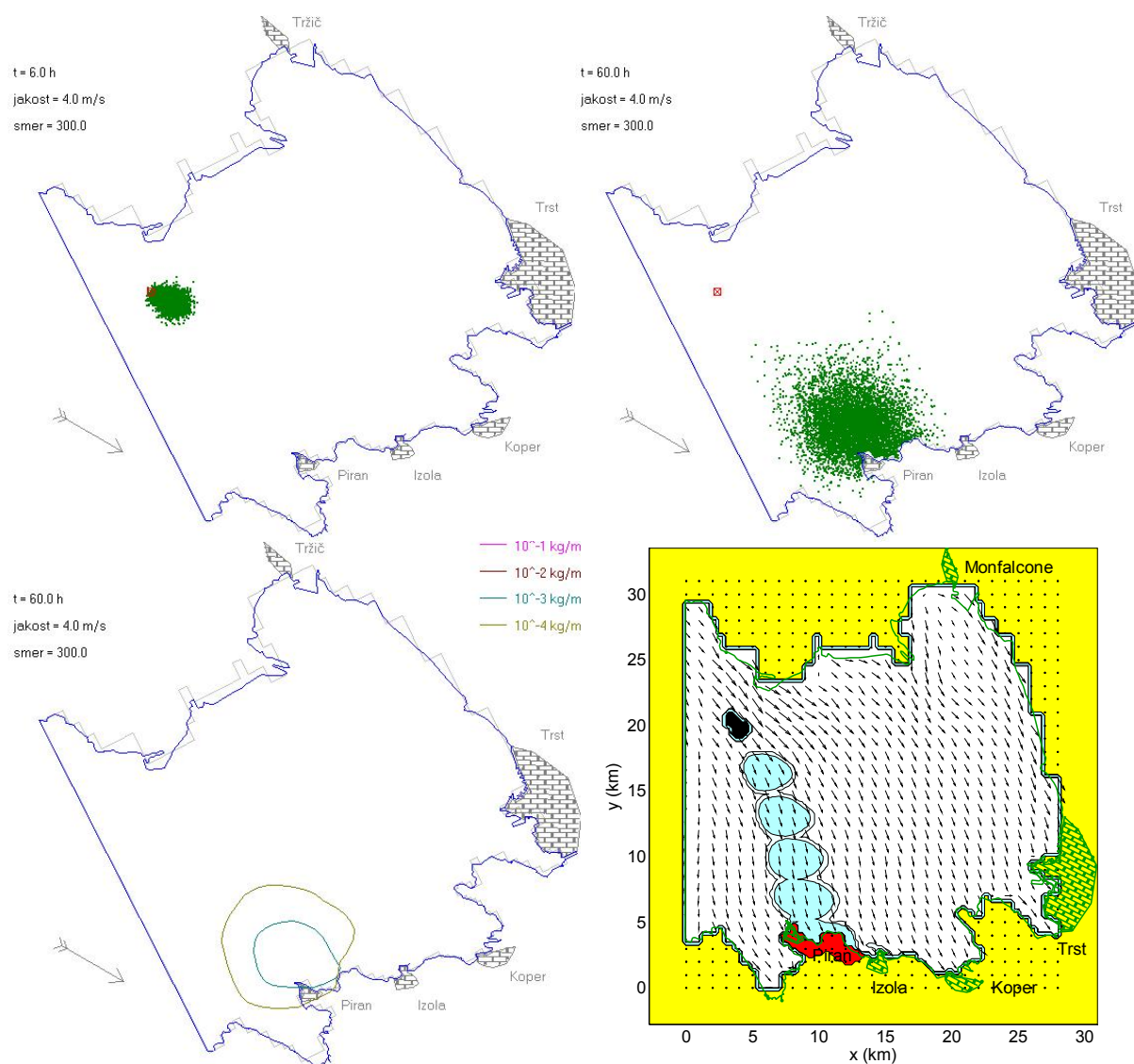
kjer sta $v_x^{1,2}(x,y)$ in $v_y^{1,2}(x,y)$ komponenti hitrostnega polja ob času t_1 oziroma t_2 . Na Sliki 22 je prikazano končno hitrostno polje po času t_2 . V tem primeru se po približno 20 h začne trajektorija naftnega madeža obračati stran od Piranskega zaliva, in se v naslednjih 46 h usmeri proti italijanski obali in jo po približno petih dneh tudi doseže.

Scenarij 2, ki smo ga modelirali s programom EULER_2D_3, prikaže univerzalnost novega modela, saj smo v tem primeru upoštevali tudi možno časovno odvisnost hitrostnega polja, kar v okviru obstoječega orodja Nafta2 ni možno. Pri tem velja poudariti, da je celoten izračun na standardnem računalniku tipično narejen v nekaj minutah, skupaj s časovno

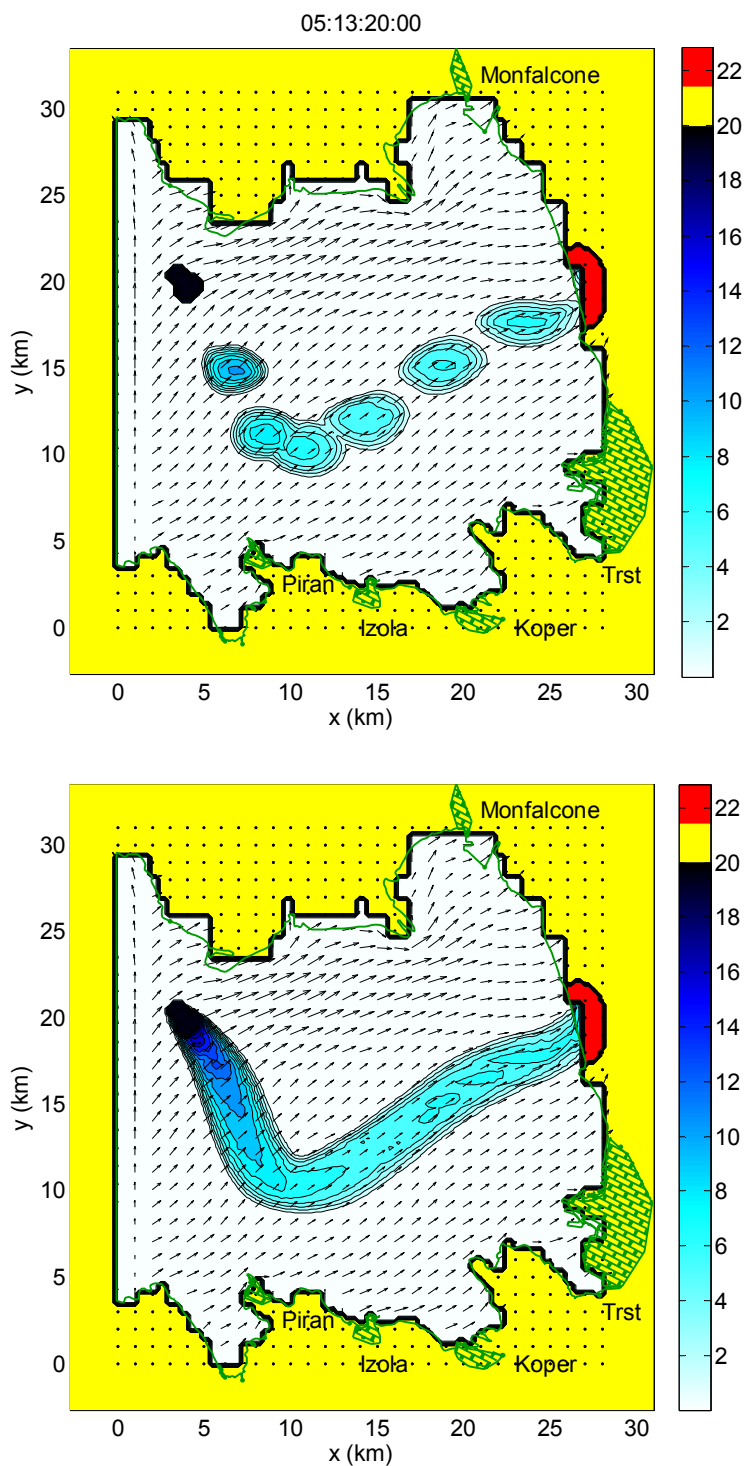
potratno vizualizacijo rezultatov, ki za potrebe diplomske naloge ni bila optimizirana. Tudi v tem oziru je nov model vsaj primerljiv z obstoječim programom Nafta 2.



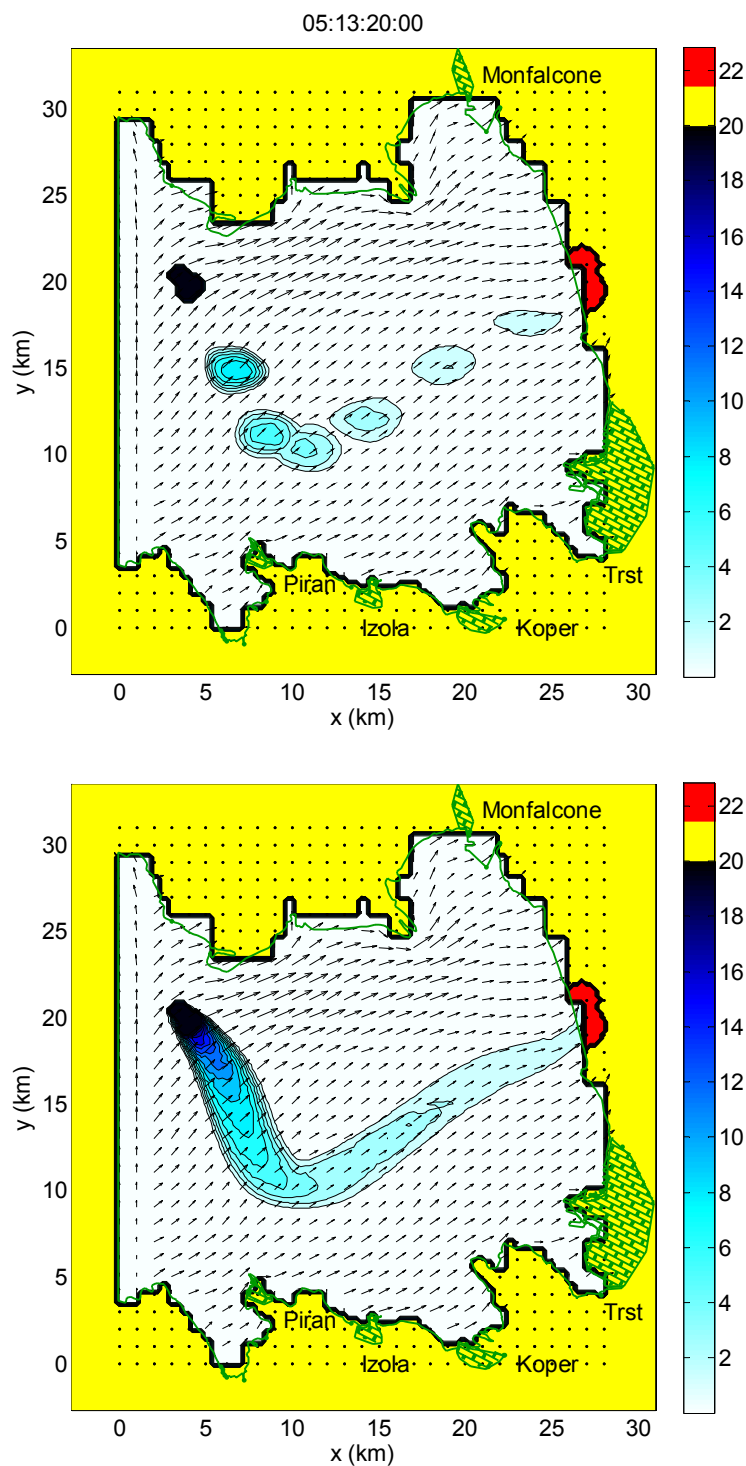
Slika 20. Scenarij 1: Približno 20 km severno in 10 km zahodno od Piranskega zaliva se razlije 52500 m³ nafte z gostoto 850 kg/m³. Zgoraj je prikazan potek naftnega madeža v enakomernih časovnih intervalih. Spodaj je prikazana trajektorija naftnega madeža. Hitrostno polje ustreza vetru s hitrostjo 4 m/s v smeri 300° glede na sever.



Slika 21. Scenarij 1 v programu Nafta2 za primer nerazgradljive nafte. Levo zgoraj je prikazan položaj delcev nafte po 6 h, ki se pod vplivom hitrostnega polja, ki je posledica vetra s hitrostjo 4 m/s in smerjo 300° glede na sever, giblje proti Piranskemu zalivu. Desno zgoraj je prikazan položaj delcev nafte po 60 h, ko naftni madež doseže Piran. Z rdečim kvadratom je označeno mesto razlitja naftnega madeža. Levo spodaj je namesto položaja delcev prikazana njihova koncentracija po 60 h (konture so prikazane v logaritemski skali). Kot vidimo, se pri modelu Nafta2 delci zaradi difuzije eksponentno razležejo. To ne velja za Eulerjev model, kjer so znova prikazani rezultati iz Slike 20, a tokrat s konturami, ki ustrezajo 1%, 10% in 100% začetne debeline naftnega madeža (le-te si sledijo od zunanega roba proti sredini naftnega madeža).



Slika 22. Scenarij 2: Po približno 20 h se velikost in smer vetra začne spreminjati, kar pomeni, da se hitrostno polje na površini morja tudi spremeni iz oblike s Slike 20 v končno obliko, ki je prikazana na tej sliki. V tem primeru Piranski zaliv ni ogrožen, saj naftni madež po približno petih dneh doseže obalo Italije.



Slika 23. Scenarij 3: Vsi parametri so identični kot pri scenariju 2 na Sliki 22 z izjemo tega, da upoštevamo še proces izhlapevanja v skladu z numerično shemo (24) in razpolovnim časom $t_{1/2} = 48$ h. Ker v petih dneh več kot 80% mase nafte izhlapi (oziroma potone), tako precej manj naftnega madeža doseže obalo Italije.

4.4 Scenarij 3

V zadnjem zgledu scenarij 2 nadgradimo še z upoštevanjem procesa izhlapevanja v skladu z numerično shemo (24) in razpolovnim časom $t_{1/2} = 48$ h. Ker tako v času simulacije izhlapi več kot 80% celotne mase naftnega madeža, le manjši delež le-tega doseže obalo Italije. V tem izbranem razpolovnem času se v principu ne skriva le proces izhlapevanja, ampak lahko tudi preostali biokemični procesi, kot so sedimentacija in biološka razgradnja. Vse tovrstne procese je možno opisati s tretjim členom R_h v enačbi (3), kar učinkovito pomeni, da se ta člen lahko s časom tudi spreminja.

5 ZAKLJUČKI

V diplomski nalogi smo predstavili Eulerjev model za simulacijo razlitja nafte v morju. Razvili smo numerične sheme za opis razlitja nafte v eni in dveh dimenzijah. Poleg tega smo izdelali vrsto simulacij v programskem orodju MATLAB, ki so omogočile vizualizacijo posameznih principov delovanja Eulerjevega pristopa. Naj znova poudarimo, da smo se v diplomski nalogi osredotočili le na reševanje enačbe (3), ki opisuje širjenje naftnega madeža na vodni površini. Eulerjev pristop ima v primerjavi z doslej uporabljenim modelom Nafta2, ki temelji na Lagrangeovem pristopu po metodi sledenja delcev, vrsto prednosti, saj omogoča obravnavo naftnega madeža na površini morja kot zvezno celoto, in ne kot skupek delcev, ki ne vplivajo drug na drugega, in so zgolj podvrženi hitrostnemu polju. Kot zgled procesa, kjer je pomemben medsebojni vpliv delcev, navedimo razširjanje naftnega zaradi lastne teže (oziroma difuzije zaradi lastne teže), saj je koeficient difuzije sorazmeren kvadratu debeline naftnega madeža. Ker je v enačbi (3) glavna spremenljivka ravno debelina naftnega madeža, je v primerjavi z metodami, kjer med delci ni interakcij, opis tovrstne difuzije v predlaganem modelu pravilnejši. Kot smo videli, pa pravilen opis procesa difuzije zaradi lastne teže vodi do realističnega profila naftnega madeža. V vodnem stolpcu, ki ga v okviru te diplomske naloge nismo obravnavali (enačba (4)), pride do izraza turbulentna difuzija, ki pa jo je mogoče v okviru obeh pristopov načeloma obravnavati enako. Eulerjev pristop ima v primerjavi z Lagrangeovim pristopom tudi določene slabosti. Poleg računske zahtevnosti uporabljenih numeričnih shem, je potrebno omeniti tudi morebitne težave z numerično difuzijo, ki lahko v daljših časih trajanja simulacije vodi do računskih napak. Čeprav lahko iz predstavljenih simulacij zaključimo, da za obravnavo širjenja naftnega madeža na površini numerična difuzija ne igra pomembne vloge, je lahko njen efekt v vodnem stolpcu nezanemarljiv, in bi ga bilo pri nadaljnjem delu vredno preučiti.

Predstavljen Eulerjev model je fleksibilen v smislu, da omogoča enostavno nadgradnjo z drugimi fizikalnimi in biokemičnimi procesi, ki so lahko pomembni v času trajanja simulacije. V diplomskem delu smo tako poleg advekcije in difuzije upoštevali tudi izhlapevanje. Za pravilno obravnavo preostalih biokemičnih procesov, kot so emulzifikacija, disperzija, raztapljanje in oksidacija, bi bilo potrebno v model vključiti tudi interakcijo med naftnim madežem na površini morja in vodnim stolpcem, v skladu z enačbama (3) in (4).

Poleg tega bi bilo potrebno nafto obravnavati kot sestavljeno iz več komponent, kar presega zastavljene okvirje te diplomske naloge. Osnovni principi tovrstne nadgradnje so podani v literaturi (Tkalich in Chan, 2002; Tkalich in sod., 2003; Tkalich, 2006a). Model je fleksibilen tudi v smislu, da se v vsakem časovnem koraku simulacije hitrostno polje na vodni površini lahko spreminja. Že na urni časovni skali, se lahko vetrovne razmere na morju popolnoma spremenijo, kar vodi do sprememb v trajektoriji potovanja naftnega madeža. To smo prikazali z razlitjem nafte v Tržaškem zalivu po scenariju 2. Hkrati smo v diplomski nalogi razvili preprost model, ki nam pove, kateri deli obale so zaradi naftnega madeža ogroženi.

Pri nadaljnjem delu bi se bilo smiselno osredotočiti predvsem na naslednje točke. V okviru predstavljenega modela, ki temelji na Eulerjevem pristopu, je potreben natančnejši opis procesa izhlapevanja, kjer bi morali upoštevati, da je nafta sestavljena iz več različnih komponent, kjer nekatere izhlapevajo hitreje kot druge komponente. Druga nadgradnja je vključitev vodnega stolpca. To je nujno, če želimo realistično obravnavati procese kot so emulzifikacija in sedimentacija. Tudi v tem primeru je potrebno nafto v vodnem stolpcu razdeliti na več komponent, oljne kapljice, raztopljene oljne kapljice in večje delce (Tkalich, 2006a). Kot smo v diplomskem delu nakazali, je za realistično simulacijo razlitja nafte v morju potrebno tudi natančno poznavanje hitrostnega polja na površini morja, kot tudi v vodnem stolpcu. Le to se lahko s časom spreminja, tako da bi bilo potrebno razviti ustrezen vmesnik med predstavljenim modelom EULER_2D in programom PCFLOW3D, ki je v osnovi nestacionarni model in omogoča izračun hitrostnega polja pod vplivom časovno odvisne hitrosti, kot tudi smeri vetra.

Naj še enkrat izpostavimo, da je bil osnovni namen te diplomske naloge predstaviti alternativni pristop k modeliranju razlitja nafte v morju. Programi, ki so bili v okviru te diplomske naloge izdelani v programskem okolju MATLAB, so bili napisani z namenom, da pokažemo osnovne principe delovanja Eulerjevega pristopa. V principu bi bilo možno opisane in že izdelane module za simulacijo razlitja nafte po Eulerjevem pristopu nadgraditi in jih v kombinaciji s primernim uporabniškim vmesnikom, uporabiti v operativne namene. Takšen programski paket pa bi predstavljal resno alternativo že razvitemu programu Nafta2.

VIRI

Bohte, Z. 1991. Numerične metode. Ljubljana, DMFA: 159 str.

Elliott, A., Hurford, N., Penn, C. 1986. Shear diffusion and the spreading of oil slicks. *Marine Pollution Bulletin* 17: 308-313.

Fay, J.A. 1971. Physical process in the spread of oil on water surface. V: *Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills*, American Petroleum Institute, Washington, D.C. str. 463-468.

Fingas, M.F., Fieldhouse, B., Mullin, J. 1999. Water-in-oil emulsions results of formation studies and applicability to oil spill modelling. *Spill Science & Technology Bulletin* 5: 81-91.

Fingas, M.F., Fieldhouse, B. 2004. Formation of water-in-oil emulsions and application to oil spill modelling. *Journal of Hazardous Materials* 107: 37-50.

Fingas, M.F. 2004. Modeling evaporation using models that are not boundary-layer regulated. *Journal of Hazardous Materials* 107: 27-36.

Galuf, S. 2005. Simulacija razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer: 71 f.

Hoult, D.P. 1972. Oil spreading on the sea. *Annual Review of Fluid Mechanics* 4: 341-367.

Jeglič, T. 2009. Modeliranje razlitja nafte v morju. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 54 f.

Lomax, H., Pulliam, T.H., Zingg, D.W. 2001. *Fundamentals of computational fluid dynamics*. Heidelberg, Springer Science: 249 str.

Mackay, D., Patterson, S., Nadeau, S. 1980. Calculation of the evaporation rate of volatile liquids. V: *Proc. of the National Conference on Control of Hazardous Material Spills*, Louisville, Kentucky, str. 361-368.

Nihoul, J.C.L. 1984. A non-linear mathematical model for the transport and spreading of oil slicks. *Ecological Modelling* 22: 325-339.

Peterson, C.H., Rice, S., Short J.W., et.al. 2003. Long term ecosystem response to the Exxon Valdez oil spill. *Science* 302: 2083-2086.

Rajar, R., Četina, M. 1997. Hydrodynamic and water quality modeling: An experience. *Ecological Modelling* 101: 195-207.

Salomone, M. 2002. Ecological riches threatened as oil-spill history repeats itself. *Nature* 420: 347.

Spaulding, M. 1988. A state-of-the-art review of oil spill trajectory and fate modelling. *Oil and chemical pollution* 4: 39-55.

Širca, A. 1992. Modeliranje transporta polutantov po metodi sledenja delcev. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo, Podiplomski študij hidrotehnične smeri: 87f.

Tkalich, P., Chan, E.S. 2002. Vertical mixing of oil droplets by breaking waves. *Marine Pollution Bulletin* 44: 1219-1229.

Tkalich, P., Huda, K., Gin, K. 2003. A multiphase oil spill model. *Journal of Hydraulic Research* 41: 115-125.

Tkalich, P., Chan, E.S. 2003. The third-order polynomial method for two-dimensional convection and diffusion. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 41: 997-1019.

Tkalich, P. 2006a. A CFD solution of oil spill problems. *Environmental Modelling and Software* 21: 271-282.

Tkalich, P. 2006b. Derivation of high-order advection-diffusion schemes. *Journal of Hydroinformatics* 8: 149-164.

Torgrimson, G.M. 1980. The On-Scene Spill Model: A User's Guide, Technical Report, Hazardous Master. Response Branch, Natl. Oceanic and Atmos. Admin., Seattle, Wash.

Žagar, D. 1994. Matematični model za simuliranje razlitja nafte na morju in njegova aplikacija. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo, Podiplomski študij Hidrotehnične smeri: 68 f.

Wang, S.D., Shen, Y.M., Zheng Y.H. 2005. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. *Ocean Engineering* 32: 1556-1571.

Whitfield, J. 2003. How to clean a beach. *Nature* 422: 464-466.

ITOPF, 2002. Technical information paper No.2: Fate of marine oil spills.

http://www.itopf.com/_assets/documents/tip2.pdf (20.12.2007).

ITOPF, 2006. Weathering process.

<http://www.itopf.com/marine-spills/fate/weathering-process/> (20.12.2007).

ITOPF, 2010. Oil tanker spill statistics: 2009.

<http://www.itopf.com/information-services/data-and-statistics/statistics/index.html>

(14.03.2010).

Delo, 2010a.

<http://www.delo.si/clanek/100239> (15.03.2010).

Delo, 2010b.

<http://www.delo.si/clanek/100149> (15.03.2010).

Dnevnik, 2008.

http://www.dnevnik.si/novice/crna_kronika/297374/ (10.04.2008)

Dnevnik, 2010.

<http://www.dnevnik.si/novice/kronika/1042354645> (17.05.2010).

Luka Koper, 2010.

<http://www.luka-kp.si> (14.03.2010).

Porto Trieste, 2010.

<http://www.porto.trieste.it> (13.03.2010).

RTV Slovenija, 2010.

<http://www.rtvlo.si/okolje/naftni-madez-v-mehiskem-zalivu-bi-lahko-ogrozil-obalo/228808>

(20.05.2010).