

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Šoško, H. 2012. Modeliranje širjenja nafte v morskem okolju po metodi trajektorij. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Žagar, D.): 44 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Šoško, H. 2012. Modeliranje širjenja nafte v morskem okolju po metodi trajektorij. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Žagar, D.): 44 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
PRVE STOPNJE VODARSTVA  
IN KOMUNALNEGA  
INŽENIRSTVA**

Kandidatka:

**HELENA ŠOŠKO**

**MODELIRANJE ŠIRJENJA NAFTE V MORSKEM  
OKOLJU PO METODI TRAJEKTORIJ**

Diplomska naloga št.: 4/B-VKI

**OIL - SPILL TRAJECTORY MODELLING AT SEA**

Graduation thesis No.: 4/B-VKI

**Mentor:**

doc. dr. Dušan Žagar

**Predsednik komisije:**

doc. dr. Dušan Žagar

**Član komisije:**

prof. dr. Mitja Brilly

Ljubljana, 25. 09. 2012

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisana **Helena Šoško** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom: »**Modeliranje širjenja nafte v morskem okolju po metodi trajektorij**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, september 2012

Helena Šoško

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>504.054:532.5(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Helena Šoško</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Dušan Žagar</b>
<b>Somentor:</b>	
<b>Naslov:</b>	<b>Modeliranje širjenja nafte po metodi trajektorij v morskem okolju</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomsko delo</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>44 str., 20 sl., 10 en., 1 pril.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>razlitje nafte, matematično modeliranje, modeliranje transporta, metoda trajektorij, Tržaški zaliv</b>

### **Povzetek**

Modeliranje širjenja in razgradnje nafte ob razlitju je v zadnjih dveh desetletjih, s hitrim razvojem računalniške tehnologije, v svetu izjemno napredovalo. Obstajajo številni modeli, ki delujejo na podlagi različnih teorij in metod, med katere sodi tudi metoda trajektorij. Na UL Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo so bili do sedaj razviti trije modeli za simuliranje širjenja nafte v morju (Nafta, Nafta2 in NAFTA3d), ki temeljijo na Lagrangeovi metodi sledenja delcev (MSD). V okviru diplomske naloge smo se osredotočili na modeliranje po metodi trajektorij, ki deluje po principu statistike dotika trajektorije naftnega delca in celice numerične mreže. Na ta način dobimo verjetnosti pojava nafte v posamezni celici numerične mreže. Ob ustreznih vhodnih podatkih in z zadostnim številom simuliranih trajektorij nam model poda statistično značilne verjetnosti za pojav nafte na definiranem območju. Novi model temelji na ogrodju NAFTA3d, ki ga je bilo potrebno modificirati, izdelali pa smo še krajši program za izračun območij verjetnosti pojava naftnega madeža. Model smo, na predhodno izračunanih hitrostnih poljih, preverili v dveh scenarijih razlitja nafte v Tržaškem zalivu in pri tem spreminjali horizontalni koeficient turbulentne difuzije. Dobljeni rezultati so ustrezni, vendar zaradi razmeroma kratkotrajnega niza meteoroloških in hidrodinamičnih podatkov še ne statistično značilni.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 504.054:532.5(043.2)  
**Author:** Helena Šoško  
**Supervisor:** assist. prof. dr. Dušan Žagar, Ph. D.  
**Co-Supervisor:**  
**Title:** Oil-spill trajectory modeling at sea  
**Document type:** Graduation Thesis—University studies  
**Notes:** 44 p., 20 fig., 10 eq., 1 ann.  
**Key words:** oil spill, mathematical modelling, transport modelling, trajectory method, Gulf of Trieste

**Abstract**

The modelling of spreading and weathering of oil-spills progressed rapidly during the last two decades, supported by fast development of computer technology. Nowadays there are numerous models based on different theories and methods. The trajectory method is one of them. Three models for simulation of oil spreading in the sea (Nafta, Nafta2 and NAFTA3d) have so far been developed at the UL Faculty of Civil and Geodetic Engineering. The models are based on the Lagrangian particle tracking method (PTM). We focused on the trajectory method, which uses statistical principles of contact between oil-particle trajectories and cells of numerical grid. As a result we can calculate the probability of occurrence of oil in each grid-cell. With adequate input data and with a sufficient number of simulated trajectories the model gives us statistically characteristic probabilities for occurrence of oil in any defined area. The original model NAFTA3d was modified and another short programme, which calculates the areas of probabilities for an oil-spill occurrence, was developed. The model was verified on a previously calculated velocity field. Two scenarios of oil-spill in the Gulf of Trieste were simulated, each with three different values for the horizontal coefficient of turbulent diffusion. The results of simulations were found to be coherent, although, because of the relatively short time-range of meteorological and hydrodynamic data, not yet statistically characteristic.

## **ZAHVALA**

Iskreno se zahvaljujem mentorju dr. Dušanu Žagarju za vso pomoč pri nastajanju diplomske naloge.

Hvala tudi očetu in mami za potrebno podporo ter Jerneju, ki mi je s svojim programerskim znanjem pomagal pri pisanju programa.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MATEMATIČNO MODELIRANJE ŠIRJENJA NAFTE .....</b>	<b>5</b>
2.1	Metode sledenja razliti nafte .....	5
2.2	Opis modeliranja po metodi trajektorij .....	6
2.3	Lastnosti nafte.....	8
2.3.1	Specifična gostota.....	8
2.3.2	Viskoznost.....	9
2.3.3	Temperatura vrelišča .....	9
2.3.4	Točka tečenja in točka strdišča .....	10
2.4	Procesi, ki vplivajo na razlito nafto .....	10
2.4.1	Mehansko širjenje.....	11
2.4.2	Izhlepevanje ali evaporacija .....	12
2.4.3	Disperzija.....	13
2.4.4	Emulzifikacija .....	13
2.4.5	Raztapljanje .....	14
2.4.6	Sedimentacija .....	14
2.4.7	Oksidacija.....	14
2.4.8	Biorazgradnja .....	15
2.4.9	Odlaganje na obalo .....	15
<b>3</b>	<b>MODELIRANJE ŠIRJENJA NAFTE NA OBMOČJU SEVERNEGA JADRANA.....</b>	<b>16</b>
3.1	Model NAFTA3d .....	16
3.2	Modifikacija programa NAFTA3d .....	17
3.2.1	Generiranje naključnih spremenljivk.....	17
3.3	Modeliranje po metodi trajektorij .....	19
3.4	Opis in uporaba modela.....	20
3.4.1	Program Trajectory.java .....	22



<b>3.5</b>	<b>Vhodni podatki .....</b>	<b>22</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Končni čas .....</b>	<b>23</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Numerična mreža .....</b>	<b>23</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Časovni korak .....</b>	<b>25</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Horizontalni koeficient turbulentne difuzije.....</b>	<b>26</b>
<b>3.6</b>	<b>Navodila za uporabo modela.....</b>	<b>26</b>
<b>3.7</b>	<b>Rezultati in diskusija.....</b>	<b>32</b>
<b>3.7.1</b>	<b>Scenarij 1.....</b>	<b>33</b>
<b>3.7.2</b>	<b>Scenarij 2.....</b>	<b>35</b>
<b>3.7.5</b>	<b>Diskusija.....</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>40</b>
	<b>VIRI .....</b>	<b>42</b>

**KAZALO SLIK**

Slika 1:	Število srednjih (7-700 ton) in velikih (>700 ton) razlitij nafte za desetletna obdobja od leta 1970 do 2010 .....	2
Slika 2:	Severni Jadran in njegova navidezna meja od Ancone (Italija) do Jablanca pri Zadru (Hrvaška).....	3
Slika 3:	Razgradnja štirih tipov nafte v času glede na specifično gostoto.....	8
Slika 4:	Razmerje temperatur in viskoznosti štirih naftnih skupin glede na specifično gostoto....	9
Slika 5:	Procesi, ki delujejo na razlit naftni madež.....	11
Slika 6:	Programska koda se začne z definiranjem potrebnih knjižnic .....	21
Slika 7:	Določitev koordinat središča celice (4,3) .....	24
Slika 8:	Programski ukaz, ki vsebuje pot (zapis v sivi barvi) do datoteke traj.txt. Ta se nahaja na disku E v mapi »Diploma« in podmapi »20120524«.....	27
Slika 9:	Konzolno okno cmd.exe z ukazi za zagon programa. V prikazanem primeru se naš program imenuje »Trajectory.java« in se nahaja na namizju (angl. desktop) v mapi »diploma« in podmapi »program« .....	28
Slika 10:	Na sliki je prikazan celoten ukaz, zapisan v programu Wolfram Mathematica, ki iz datoteke »mreza.txt« izriše matriko in zeleno grafiko. ....	29
Slika 11:	Grafični prikaz rezultatov v programu Wolfram Mathematica. ....	29
Slika 12:	Nastavitev geometrije mreže v programu Surfer.....	30
Slika 13:	Primer prikaza rezultatov v programu Surfer. ....	31
Slika 14:	Verjetnostna polja pojava naftnega madeža 70 ur po razlitju pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije $2 \text{ m}^2/\text{s}$ .....	33
Slika 15:	Verjetnostna polja pojava naftnega madeža 70 ur po razlitju pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije $5 \text{ m}^2/\text{s}$ .....	34
Slika 16:	Verjetnostna polja pojava naftnega madeža 70 ur po razlitju pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije $10 \text{ m}^2/\text{s}$ .....	34
Slika 17:	Verjetnostna polja pojava naftnega madeža 70 ur po razlitju pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije $2 \text{ m}^2/\text{s}$ .....	36
Slika 18:	Verjetnostna polja pojava naftnega madeža 70 ur po razlitju pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije $5 \text{ m}^2/\text{s}$ .....	36
Slika 19:	Verjetnostna polja pojava naftnega madeža 70 ur po razlitju pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije $10 \text{ m}^2/\text{s}$ .....	37
Slika 20:	Zaglajenost robov med območji verjetnosti pojava pri 100 trajektorijah (levo) in pri 1000 trajektorijah (desno). ....	38

## **SEZNAM PRILOG**

Priloga A: PROGRAMSKA KODA PROGRAMA Trajectory.java

45

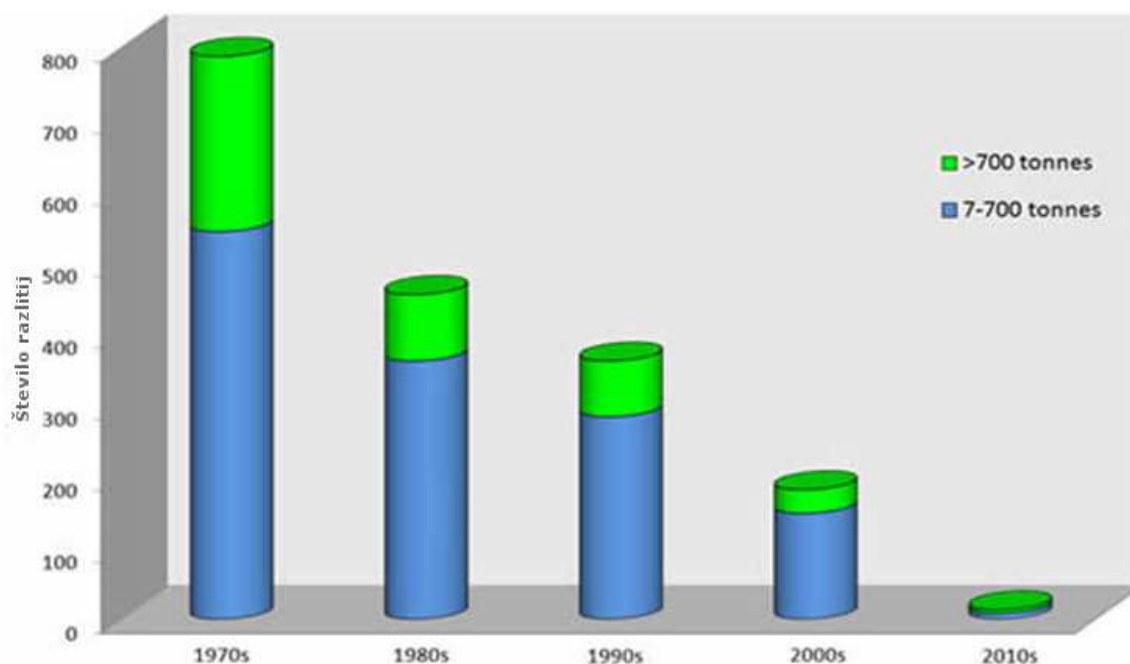
Ta stran je namenoma prazna.

## 1 UVOD

Morja in oceani so eden glavnih elementov, ki omogočajo življenje in njegovo pestrost na Zemlji, istočasno pa je nafta vir, ki že desetletja poganja svet ljudji in brez katere danes skoraj več ne znamo živeti. Črno zlato, kakor tudi drugače pravimo nafti, je viskozna temnorjava ali zelenkasta tekočina, ki je nastala pri visokih temperaturah in pritiskih pred več milijoni let. Ena od teorij nastanka nafte pravi, da je ta nastala iz ostankov morskih rastlin in živali, prekritih z muljem in blatom, medtem ko druga zagovarja nastanek nafte iz zemlje, vode, grafita in  $\text{FeS}_2$  zaradi delovanja anaerobnih bakterij. Kakorkoli, to črno zlato je zagotovo najpomembnejša surovina in glavni energetski vir razvite družbe.

Skupaj z industrijskim razvojem sta se skokovito povečala pridobivanje in poraba nafnih derivatov. Vse od leta 1970 je nafta primarni vir energije ter hkrati strateška surovina, zaradi katere se bijejo številne vojne. Po podatkih ameriškega urada za informacije o energetiki (EIA) je bila v letu 2011 svetovna proizvodnja nafte 87,0128 milijonov sodčkov dnevno, kar pomeni približno 31,759 milijard sodčkov letno (EIA, 2012). Več kot polovica vse proizvedene nafte se transportira po morju, hkrati pa je danes na svetu tudi več kot 6000 obratujočih naftnih ploščadi, od tega jih je samo v Mehiškem zalivu okoli 4000, v Aziji 950, na Bližnjem vzhodu 750 in v Severnem morju 600 (Poremski, 1998). Vsa ta dejstva nam dajo torej zadosten razlog za zaskrbljenost ob morebitnem razlitju nafte v morskem okolju ter posledični okoljski in ekonomski katastrofi.

ITOPF (The International Tanker Owners Pollution Federation Limited) kategorizira velikosti razlitij v tri skupine: velika ( $> 700$  ton), srednja (7-700 ton) in manjša ( $< 7$  ton). V zgodovini je že prišlo do številnih velikih ( $> 700$  ton) razlitij nafte, zaskrbljujoče pa je tudi ogromno število srednjih (7-700 ton) in manjših ( $< 7$  ton) izlivov. Samo pri razlitjih v tankerskih nesrečah je bilo od leta 1970 do 2011 izgubljenih kar 5,7 milijonov ton nafte (ITOPF, 2012). Statistični podatki sicer kažejo, da se stanje na tem področju izboljšuje in se je letna količina razlite nafte v tem štiridesetletnem obdobju občutno zmanjšala, kot prikazuje Slika 1, vendar to še ne pomeni, da do katastrof ne bo več prišlo. Spomnimo se samo nesreče, ki se je zgodila aprila leta 2010 v Mehiškem zalivu na naftni ploščadi Deepwater Horizon. Zaradi domnevnega varčevanja in malomarnega vodenja je prišlo do sistemskih napak in eksplozije na naftni ploščadi. Ta se je nato potopila, iz vrtnice pa je začela iztekati nafta. Omenjena nesreča je privedla do doslej največje ekološke katastrofe v zgodovini ZDA. Po nekaterih podatkih se je v morje razlilo skoraj 5 milijonov 159-litrskih sodov nafte in močno prizadelo tamkajšnji morski in obmorski biotop (RTV SLO, 2010).



Slika 1: Število srednjih (7-700 ton) in velikih (>700 ton) razlitij nafte za desetletna obdobja od leta 1970 do 2010 (povzeto po ITOPF, 2012: str 4).

Tveganje za razlitje nafte pa se iz dneva v dan povečuje tudi v Severnem Jadranu. Ta je bil od nekdaj pomemben del pomorskih transportnih povezav, v zadnjih letih pa je postal del najpomembnejših svetovnih plovnih poti za nafto in njene derivate. Celotni Severni Jadran, katerega del je tudi naše morje z obalnim območjem, je tipično priobalno morje, kot prikazuje Slika 2. Je najplitvejši del Jadrana, ki le redko presega globino 50 metrov, in ravno zaradi te značilnosti so nekateri vplivi negativnih dejavnikov na njegovo kakovost veliko bolj izraziti, kot v globljih odprtih morjih. Do sedaj sicer res še ni prišlo do večjih razlitij nafte na tem območju, vendar je potencialna nevarnost velika. V letih od 1977 do 2006 je bilo namreč več kot sedemsto zabeleženih primerov onesnaženja, v katerih je ukrepala Služba za varstvo obalnega morja, od tega je bila kar slaba polovica onesnaženja z nafto in olji (Kajfež, 2012). Največja potencialna nevarnost za onesnaženje Jadranskega morja z nafto so vsekakor veliki tankerji, ki v tržaško pristanišče letno pripeljejo ali iz njega odpeljejo od 30 do 31 milijonov ton nafte. Ostali potencialni viri onesnaženja z nafto pa so še tovari nafte in derivatov, ki se transportirajo v Luko Koper ter nenamerno izpuščanje odpadnih olj iz ladij, ki plujejo v koprsko oz. tržaško pristanišče ali iz njega (Sotlar, 2012).



Slika 2: Severni Jadran in njegova navidezna meja od Ancone (Italija) do Jablanca pri Zadru (Hrvaška) (povzeto po Google Maps).

Zaradi vseh teh tveganj je torej zelo pomembno, da lahko ob morebitnem razlitju ukrepamo in kolikor se le da omejimo škodo. V ta namen se danes že povsod po svetu uporabljajo matematični modeli. Večinoma so to t.i. ekološki modeli, s katerimi poleg hidrodinamičnih in transportno-disperzijskih procesov simuliramo tudi biokemične procese v naravnem okolju (Žagar, 1994). Takšni modeli nam omogočajo, da lahko natančno predvidimo obseg in širjenja naftnega madeža ter tako ustreznim službam omogočimo, da pravočasno omejijo razlitje ali vsaj omilijo posledice. Ta način modeliranja imenujemo »taktično modeliranje«, modeli pa se uporabljajo tudi za študij možnih posledic potencialnih razlitij, pri čemer uporabimo t.i. »prognostični način« modeliranja. Oba pristopa sta podrobno opisana v literaturi (Žagar, 1994, Žagar in sod., 2012).

V Sloveniji je bil prvi matematični model širjenja nafte v morskem okolju kot nadgradnja modela po metodi sledenja delcev (Širca, 1992) razvit leta 1994 na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani (Žagar, 1994). Model imenovan SIMON je bil namenjen simuliranju razlitja naftnih derivatov v Tržaškem zalivu, leta 1996 pa mu je sledila še nadgradnja imenovana Nafta. Galuf (2005) je v svoji diplomski nalogi model Nafta (ki je bil v osnovi napisan v programskem jeziku Fortran77 in je deloval samo v okolju DOS) v celoti prepisal v jezik C++ ter ga tako priredil za okolje Windows. Program je poimenoval Nafta2, ga dopolnil z grafičnim vmesnikom za vnos podatkov in vmesnikom za grafični prikaz ter dosegel boljše preglednost in uporabnost

samega programa (Galuf, 2005). V sodelovanju med Nacionalnim inštitutom za biologijo (NIB) in UL-FGG je bil na Katedri za mehaniko tekočin izdelan matematični model NAFTA3d, ki ob uporabi ustreznih vmesnikov omogoča izvajanje simulacij širjenja naftnih madežev na katerem koli območju, NIB in ARSO pa ga že uporabljata za simulacije na območju Severnega Jadrana in Tržaškega zaliva (Žagar in Četina, 2011, Žagar in sod., 2012). Ta model je bil z nekoliko spremenjenim izpisom rezultatov uporabljen tudi pri tej diplomski nalogi.

Doslej v okviru diplomskih in raziskovalnih nalog še ni bila preizkušena možnost modeliranja nafte po metodi trajektorij. Predpostavljamo, da je mogoče z istim modelom, vendar z drugačnim potekom simulacij, izvesti tudi modeliranje po metodi trajektorij, ki lahko enakovredno dosedanjim rezultatom modela prikažejo širjenje nafte, hkrati pa podajo tudi neko statistično verjetnost, v kateri smeri se bo nafta širila.

Cilj naloge je preizkus modela Nafta3d in primerjava z modeli trajektorij, ki jih navajajo drugi avtorji (AMEC, 2010, Apai, 2001, Drozdowski, 2011).



## 2 MATEMATIČNO MODELIRANJE ŠIRJENJA NAFTE

Da bi omejili škodo ter zaščitili občutljive vire in obale, je ob naftnem razlitju zelo pomembno, da znamo predvideti, v katero smer se bo naftni madež širil. Za takšne napovedi so nam v pomoč računalniško razviti matematični modeli za napovedovanje trajektorij ali poti ter usode nafnega madeža. Današnji modeli za napovedovanje širjenja nafnega madeža so že zelo napredni in sofisticirani, saj združujejo najnovejše informacije o obnašanju nafte z računalniško tehnologijo. Tako lahko predvidimo, kam se bo nafta širila in v kakšnem stanju bo, ko pride na določeno območje. Glavna pomanjkljivost teh modelov pa je še vedno pomanjkanje natančnih ocen morskih tokov in hitrosti vetra, ki jih dobimo s hidrodinamičnimi modeli. Rezultati, ki jih dobimo z modelom za simulacijo širjenja nafte, so namreč lahko le toliko natančni, kot so podatki, ki jih vanj vnesemo. Kljub velikemu napredku na področju modeliranja in računalniške tehnologije te pomanjkljivosti še ne moremo popolnoma odpraviti in bo najverjetneje ostala glavna omejitev tudi v prihodnje.

### 2.1 METODE SLEDENJA RAZLITI NAFTE

Za simulacijo gibanja nafte v morskem okolju so bile razvite tri metode: metoda sledenja delcev (MSD), metoda s sledili in metoda delcev z več prostostnimi stopnjami.

Pri metodi sledenja delcev (angl. Particle tracking method, PTM), je nafta parametrizirana s končnim številom delcev, vsakemu od teh delcev pa sta dodeljena začetni položaj in masa. Za vsak posamezni delec je advekcija določena s hitrošnim poljem okoliške vode, dodajo pa se še naključni procesi za simulacijo disperzije (širjenja, difuzije) nafte, ki so neodvisni od morskih tokov. Celotno razlitje lahko tako predstavimo s porazdelitvijo delcev na statistični način. Pri tem pa mora število oziroma gostota delcev zagotavljati izračun zanesljivih statističnih podatkov. Večja ko je ločljivost modela in daljša ko je simulacija, več delcev je potrebno za ustrezno statistično predstavitev, za določanje trenutnega stanja in napovedovanje širjenja nafte v določenem časovnem obdobju. Če se na primer simulacija izvaja s samo dvema delcema na mrežno celico in ta delca naletita na nasprotna si tokova, lahko eden od delcev (50%) potuje v eno smer, medtem ko drugi (50%) potuje v nasprotno. Če pa uporabimo 25 delcev na celico mreže, gre lahko 15 delcev (60%) proti vzhodu, 5 proti zahodu in 5 proti jugu, kar nam daje povsem drugačno statistično porazdelitev in vsebino informacij.

Za metodo s sledili (angl. tracers method) mora biti območje razlitja prikazano z zelo gosto mrežo oziroma mrežo visoke ločljivosti (najbolje manj kot 1 km). Govorimo torej o binarni metodi, ki nam pove, ali se sledilo oziroma nafta nahaja v neki celici ali ne. Razlita nafta tako zavzame majhne celice, ki kar najbolje predstavljajo njen dejanski fizični obseg. V vsakem časovnem koraku se nafta širi od

celice do celice, zaradi lokalnih tokov v kombinaciji z dodatno (naključno) difuzijo, pri čemer pa ohranja maso. Prednost te metode je v tem, da je primerna tudi za dodajanje empiričnih formul, ki opisujejo lokalne spremembe oziroma medsebojni vpliv nafte in okolja. Druga prednost je sposobnost povečanja resolucije na določeno raven, kjer lahko zajamemo tudi značilnosti območij s plavajočim ledom ali obale. Glavna pomankljivost te metode pa je dejstvo, da je za zagotavljanje potrebne resolucije in zajemanja celotnega obravnavanega območja potrebna zelo gosta numerična mreža. Izračun tako traja precej dlje kot pri ostalih metodah, hkrati pa je takšen model, zaradi kompleksnosti, tudi relativno težko oblikovati.

Metoda delcev z več prostostnimi stopnjami (angl. spilletts method) je skoraj enaka metodi sledenja delcev, vendar pri tej metodi govorimo o plavajočih "kosih" nafte, ki imajo več prostostnih stopenj in se zato obnašajo nekoliko drugače kot delci (npr. tanjšajo). Dodatna prostostna stopnja lahko predstavlja območje ali debelino za vsak madež posebej. Celotno razlitje je torej razdeljeno na več manjših individualnih razlitij oziroma madežev, ki se lahko širijo po teoriji, kot je Fayeve (Fay, 1941). Tak model razlitja lahko razumemo kot nekakšen kompromis med metodo sledenja delcev in metodo s sledili (Drozdowski, 2011).

## **2.2 OPIS MODELIRANJA PO METODI TRAJEKTORIJ**

Model širjenja nafte po metodi trajektorij je v bistvu računalniško zaporedje izračunov, katerih namen je določiti stopnjo verjetnosti za pojav naftnega madeža v nekem območju na vodni površini. Takšni modeli vključujejo transport in/ali širjenje in/ali razgradnjo ter s pomočjo trajektorij naftnega delca napovejo obnašanje naftnega madeža. Omogočijo nam torej napoved značilnih oziroma najbolj verjetnih in ekstremnih scenarijev širjenja nafte za določeno mesto razlitja. Pri tem skušajo običajno odgovoriti na tri vprašanja:

- Kakšna je verjetnost določenih hitrosti in smeri gibanja naftnega madeža?
- Kakšna kombinacija okoljskih pogojev (veter in tokovi) ustvarja najhujši scenarij razlitja?
- Kako pogosto se pojavljajo ti pogoji?

Razlikujemo dva osnovna tipa modelov: deterministični in statistični. Razlike se ne nanašajo toliko na mehaniko modela, temveč na vrsto vetra in podatkov, ki jih vnesemo v model. Pri determinističnem modelu se za račun širjenja uporabljajo dejanski podatki o advekciji. Te podatke je mogoče tudi modificirati, da so za neko obravnavano območje bolj reprezentativni, vendar glavnino še vedno predstavljajo izmerjene časovne serije podatkov. Deterministični model bo tako pri neki seriji vhodnih

podatkov podal vedno enake rezultate. Če želimo pridobiti statistično značilne rezultate z determinističnimi modeli, moramo izvesti simulacije z velikim številom vhodnih podatkov, ali pa je potrebno rezultate povprečiti v primernem časovnem obdobju (npr. mesec dni). Nasprotno pa pri statističnih modelih uporabljajo izmerjene podatke samo kot standard oziroma vodilo za ustvarjanje sintetičnih nizov vhodnih podatkov. Ta pristop se najpogosteje uporablja pri določanju moči vetra. Generacija sintetičnih podatkov s statističnim postopkom (simulacija Monte Carlo, Markovska veriga), ki generira naključna števila, je običajno sestavni del modela. Vsak ponovni zagon modela, z določeno količino osnovnih (fiksni) parametrov in nekaterimi naključnimi vrednostmi pri sintezi podatkov, ki se ves čas spreminjajo, daje drugačne rezultate. Da zagotovimo statistično značilne rezultate, moramo takšne modele dovoljkrat zagnati (AMEC, 2010).

Širjenje, prostorski obseg in usoda razlitja so odvisni tudi od časovnega koraka računa. Časovni korak je v modelu določen in mora ustrezati geografskemu obsegu obravnavanega območja ter numerični mreži modela, vetru in trenutnim razmeram, ki jih bomo upoštevali v modelu za širjenje madeža. V vsakem časovnem koraku simulacije se izračuna nova lokacija in obseg razlitja, zato je pravilna izbira tega zelo pomembna. Če izberemo prevelik časovni korak, lahko to privede do napačnih rezultatov, izbira premajhnega časovnega koraka pa bistveno podaljša čas izračuna.

Glavni gradnik teh modelov, kot se je dalo razbrati že v zgornjih stavkih, je numerična mreža, ki omogoča lažje spremljanje prostorskega obsega razlitja in ima tri osnovne namene:

- služi kot mrežni koordinatni sistem za izračun zaporednih premikov madeža v vsakem časovnem koraku posebej;
- je prostorska mreža, na kateri so prikazani vektorji vetrov in trenutnih morskih tokov;
- zagotavlja koordinatni sistem, ki pokaže mejo med morjem in kopnim in predvidene stike nafte z obalo.

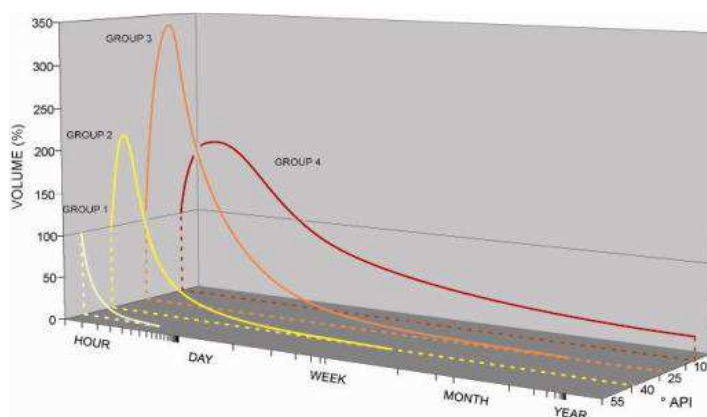
S pravilno določenim časovnim korakom in primerno definirano prostorsko mrežo dobimo s simulacijami stopnjo verjetnosti za pojav nafte na nekem območju. Glavna prednost te metode je bistveno skrajšan čas izračuna in dejstvo, da za delovanje takšnega modela ne potrebujemo zelo zmogljivih računalnikov, saj model ne računa koncentracij, temveč samo koordinate naftnih delcev. Kljub precejšnji poenostavitvi pa so dobljeni rezultati primerljivi z rezultati kompleksnejših modelov, ki delujejo na principu metod, kot je na primer metoda sledenja delcev (Drozdowski, 2011).

## 2.3 LASTNOSTI NAFTE

Ko govorimo o naftnih razlitjih, imamo običajno v mislih surovo nafto, ki jo prevažajo tankerji in jo črpajo na naftnih ploščadih. Ta se glede na svoj izvor črpanja zelo razlikuje v svojih fizikalnih in kemijskih lastnostih. Medtem ko so si karakteristike surove nafte, glede na izvor, precej različne, imajo rafinirani produkti običajno te lastnosti jasno določene, ne glede na izvor surove nafte, iz katere so pridobljeni. Od vsebnosti kemičnih sestavin nafte, kot je delež hlapnih snovi, asfaltov, smol in voskov, so tako odvisne tudi njene lastnosti. Glavne fizikalne lastnosti, ki vplivajo na vedenje in obstojnost razlite nafte, so: gostota, viskoznost, temperatura vrelišča, temperatura tečenja in temperatura strdišča.

### 2.3.1 Specifična gostota

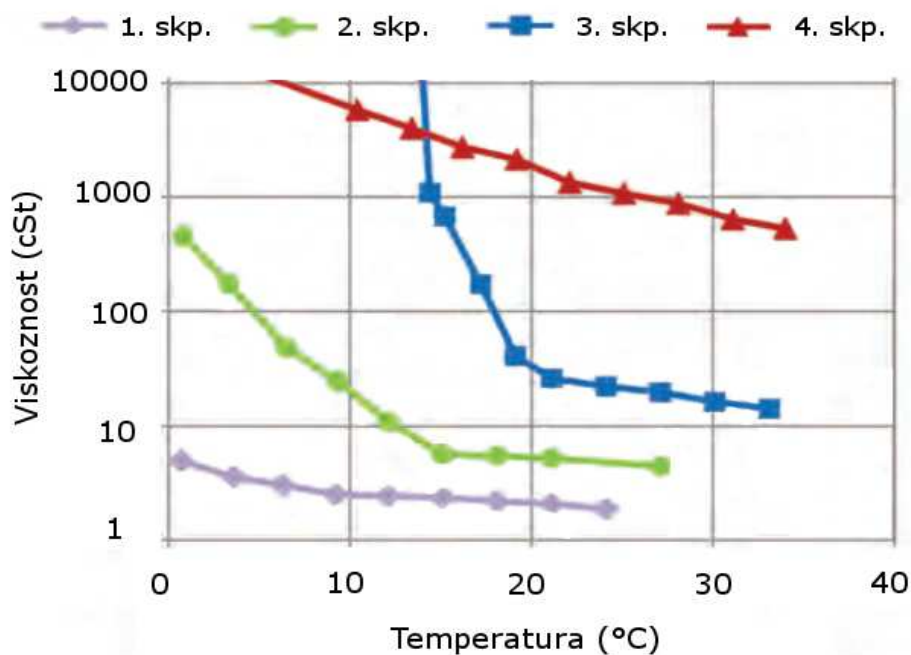
Najpomembnejša lastnost nafte je njena gostota. Ta je namreč nižja od gostote morske vode, zato večji del razlite nafte plava na površini oziroma v zgornjih slojih morja. Glede na specifično gostoto delimo transportirano nafto in njene derivate najpogosteje v štiri osnovne skupine, kot prikazuje Slika 3. V 1. skupino sodita bencin in kerozin, z gostoto manj kot  $800 \text{ kg/m}^3$ , ki lahko v celoti izhlapijo v nekaj urah po razlitju in običajno ne tvorita emulzije. V 2. skupino, z gostoto med  $800$  in  $850 \text{ kg/m}^3$ , uvrščamo nafto iz Združenih arabskih emiratov, v 3. skupino pa nafto iz Savdske Arabije in Severnega morja, z gostoto med  $850$  in  $950 \text{ kg/m}^3$ . Tako za 2. kot za 3. skupino je značilno, da lahko nafta z izhlapevanjem v prvih urah po razlitju izgubi do 40% svoje prostornine, vendar preostanek, zaradi fizikalno-kemijske sestave, tvori viskozno emulzijo, ki lahko za razgradnjo potrebuje tudi leto dni. Zadnja, 4. skupina, katere predstavnica je nafta iz Venezuele z gostoto nad  $950 \text{ kg/m}^3$ , pa predstavlja nafto, ki je zaradi visoke viskoznosti in pomanjkanja hlapnih snovi najobstojnejša. Z naraščanjem specifične gostote od 1. do 4. skupine narašča tudi delež nafte, ki bo potonil (ITOPF, 2012).



Slika 3: Razgradnja štirih tipov nafte v času glede na specifično gostoto (ITOPF, 2012: str 10).

### 2.3.2 Viskoznost

Druga pomembna lastnost nafte, ki jo moramo upoštevati pri razlitju, je viskoznost. Pri gibanju tekočine prihaja do striženja med sosednjimi sloji, zaradi njihovih različnih hitrosti, pri čemer prihaja do notranjega trenja. Drugače povedano: viskoznost (židkost) je fizikalna količina, ki podaja odpor tekočine na strižno deformacijo. Ta določa razlivnost naftnih madežev, širjenje nafte v globino ter nadzira stabilnost emulzije, saj preprečuje disperzijo. Od viskoznosti je torej odvisno, kako hitro se bo razlita nafta širila po morju. Nafta z višjo viskoznostjo še širi veliko počasneje, kot nafta z nižjo. Zelo pomembno je torej, da poznamo viskoznost nafte ob razlitju, ki je običajno višja pri višjih specifičnih gostotah, hkrati pa se moramo zavedati, da je ta odvisna tudi od temperature (Slika 4). Nafta v tankerjih ima običajno okoli 30°C, povprečne temperature v zgornjih plasteh morja pa so približno 17°C, kar pomeni, da se nafta ob razlitju ohladi, postane viskoznejša in tako odpornejša na širjenje (ITOPF, 2012).



Slika 4: Razmerje temperatur in viskoznosti štirih naftnih skupin glede na specifično gostoto (povzeto po ITOPF, 2011).

### 2.3.3 Temperatura vrelišča

Naslednja pomembna lastnost, ki smo jo v prejšnjem odstavku posredno tudi že omenili, pa je točka vrelišča. Nafta namreč vsebuje derivate z različnimi temperaturami vrelišča, kar pomeni, da so različne nafte različno hlapne. Snovi z nižjimi vrelišči, kot je npr. bencin, so veliko bolj hlapne kot

tiste z višjimi, zato se bodo ob razlitju tudi prej porazgubile v okolju, medtem ko se bodo slabše hlapne snovi precej dlje časa zadrževale v naftnem madežu (ITOPF, 2012).

### **2.3.4 Točka tečenja in točka strdišča**

Obe točki podajata sposobnost tečenja nafte v območju nizkih temperatur. Točka tečenja je najnižja temperatura, pri kateri se še opazi premikanje snovi ob mirovanju okoliške tekočine, in je približno 6 do 8°C nad temperaturo strdišča. Točka strdišča pa je temperatura, pod katero nafta izgubi lastnosti tekočine, odvisna pa je od vsebnosti voskov in asfaltov v nafti. Ko z ohlajanjem nafta doseže to točko, začnejo voski tvoriti kristalno strukturo. S takšno kristalizacijo se nafta iz tekočega stanja pretvarja v pol-trdno agregatno stanje, kar pomembno vpliva na nadaljnji potek širjenja (Lovrec in Kambič, 2007).

## **2.4 PROCESI, KI VPLIVAJO NA RAZLITO NAFTO**

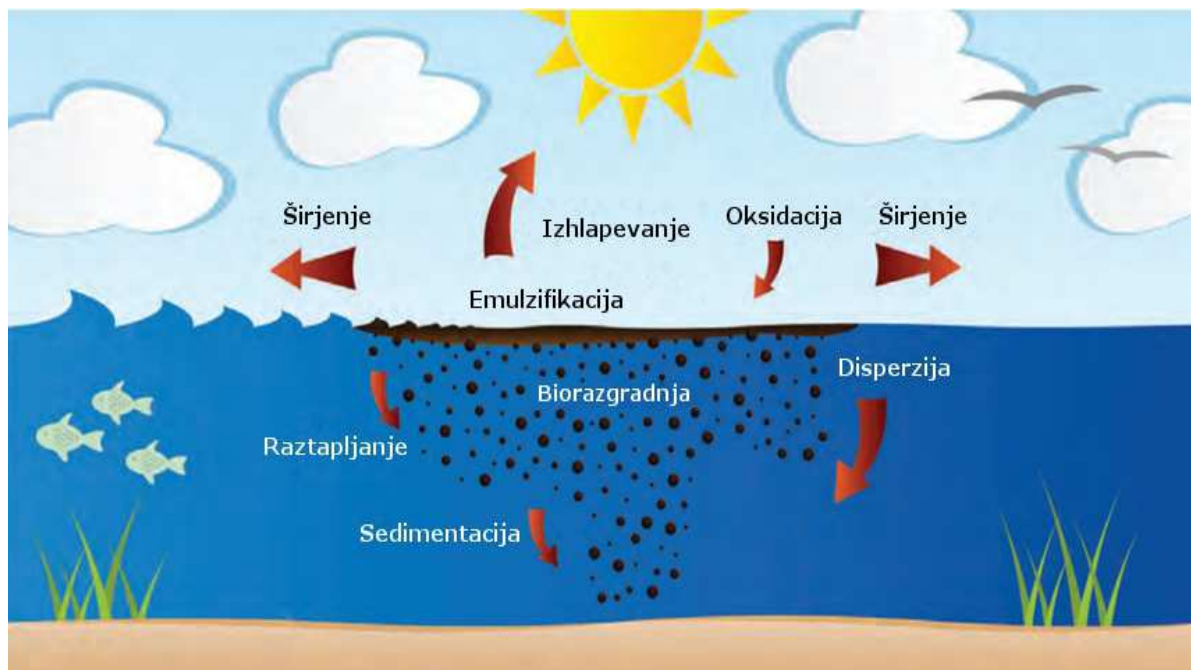
Pri razlitju nafte, se ta zaradi posledic naravnih procesov ne obnaša več kot celota, temveč se razdeli v več naftnih madežev. Ti se običajno v daljšem časovnem obdobju razgradijo in razpršijo po morju. Govorimo torej o vsoti fizikalnih, kemijskih in bioloških procesov, prikazanih na Sliki 5, ki vplivajo na hitrost in smer širjenja razlite nafte ter na spreminjanje njene fizikalno-kemijske sestave. Učinek teh procesov je odvisen predvsem od vrste nafte (oziroma njenih derivatov), ki se je razlila. Obnašanje naftnega madeža namreč določajo fizikalne lastnosti, ki smo jih predstavili v prejšnjem podpoglavju.

V grobem procese delimo na tri načine:

- kratkotrajni in dolgotrajni procesi;
- glede na globino delovanja procesov (površinski, podpovršinski ali po celotnem vodnem stolpcu);
- procesi, ki vplivajo samo na transport nafte, in tisti, ki spreminjajo tudi njene lastnosti.

Delitev procesov na kratkotrajne in dolgotrajne je precej relativna. Za kratkotrajne procese pravimo, da nastopijo takoj po razlitju in trajajo nekaj ur, medtem ko začnejo dolgotrajni procesi delovati po določenem času (od nekaj ur do nekaj dni) in lahko trajajo tudi več let. Glede na globino delovanja pa procese delimo predvsem zato, da si poenostavimo delo, saj lahko procese, ki delujejo na istem mestu, obravnavamo skupaj. Primer je izhlapevanje, emulzifikacija in raztapljanje v vodi, ki jih nekateri avtorji obravnavajo s skupnimi enačbami. Prav tako nam delo nekoliko olajša delitev procesov na tiste, ki vplivajo samo na transport, in tiste, ki vplivajo tudi na lastnosti nafte. Ta delitev je pomembna

zato, ker lahko procese, ki izražajo samo transport, zajamemo v transportno disperzijskem modulu modela (Žagar, 1994).



Slika 5: Procesi, ki delujejo na razlit naftni madež (povzeto po ITOPF, 2011: str 4).

#### 2.4.1 Mehansko širjenje

Ob razlitju se nafta sprva obnaša kot en sam homogen madež na morski gladini, hitrost širjenja tega madeža in njegovo spreminjanje pa sta v veliki meri odvisna od lastnosti nafte, ki so opisane v podpoglavju 2.3. Kljub začetni tako imenovani homogenosti se med širjenjem začnejo pojavljati velike razlike v debelini in obliki naftnega madeža. Po nekaj urah se bo zaradi vpliva vetrov in strižnih tokov naftni madež z nizko viskoznostjo razlezel v tanek sloj na gladini in s časom dobival obliko kometa. V smeri vetra se namreč naftni madež debeli, za seboj pa vleče širok in vse tanjši sloj nafte. Nekoliko drugače se bo širila razlita nafta z visoko viskoznostjo. Takšen madež se namreč ne bo toliko stanjšal in razvlekel, temveč se bo začel lomiti v manjše relativno debele naftne zaplate.

Za mehansko širjenje, ki je posledica viskoznih sil, gravitacije, vztrajnostnih sil in sil površinske napetosti, obstajajo številni modeli, ki skušajo opisati ta pojav. Vsi ti modeli oziroma teorije pa imajo skupni sklop osnovnih predpostavk: pospešek masnega središča je majhen, Coriolisova sila je zanemarljiva, pritisk je hidrostatično porazdeljen, gibanje nafte je neturbulentno in enačbe predstavljajo vertikalno integrirane pogoje. Poleg tega pa so v primeru proste gladine zanemarljive tudi

strižne sile na naftni madež, ki jih povzročata veter in plimovanje. Mehansko širjenje so tako poskušali opisati mnogi avtorji.

Med mnogimi teorijami se največ uporabljajo Fayeva (1971) in modificirana Fayeva (Johansen, 1985) teorija o treh fazah širjenja, Elliotova (1986) teorija, ki temelji na medsebojnem vplivu vzgona in turbulentne difuzije v vodnem stolpcu, teorija Shena in Yapan (1988) ter Reedova (1991) teorija. Elliotov (1986) model strižne difuzije je uporabljen tudi v modelih, razvitih na UL-FGG (Žagar 1994, Galuf, 2006, Žagar in Četina, 2011)

#### **2.4.2 Izhlapevanje ali evaporacija**

Izhlapevanje igra zelo pomembno vlogo v zgodnjih fazah naftnega razlitja. Dokazano je, da lahko v prvih nekaj dneh po razlitju lahka surova nafta izgubi do 75%, srednje težka do 40% in težka do 10% prvotne mase. Zaradi tega dejstva je zelo pomembno, da izhlapevanje upoštevamo v modeliranju širjenja. Količina in hitrost evaporacije sta odvisni predvsem od vrste nafte in njenih sestavin. V splošnem namreč velja, da bodo ob zmernih razmerah tiste sestavine nafte z vreliščem pod 200°C (npr. bencin in kerozin) izhlapeli že v prvih 24 urah. Če se takšna, zelo hlapna nafta, razlije v zaprtem območju, lahko pride do nevarnosti požara, eksplozije ali predstavlja splošno nevarnost za človekovo zdravje. V nasprotnem primeru pa je pri razlitju težkih naft izhlapevanje počasno in je nevarnost eksplozije minimalna (ITOPF, 2011).

Na izhlapevanje pa vplivajo tudi zunanji dejavniki, kot so razburkanost morja, visoke temperature in veter. Ti namreč pospešujejo izhlapevanje neposredno (npr. višja temperatura, hitrejše izhlapevanje) ali posredno, s širjenjem naftnega madeža in povečevanjem njegove površine. Naftni madež, ki ostane po izhlapevanju, ima praviloma večjo gostoto in višjo viskoznost, kar pomembno vpliva tako na kasnejše procese širjenja kot na tehnike čiščenja (Apai, 2001).

V večini modelov širjenja nafte (tudi v modelu NAFTA3d) je za proces izhlapevanja vgrajena Mackayeva (Mackay in sod., 1980) enačba, novejši pristop pa je pokazal Fingas (2004). Ta je v laboratoriju opazoval hitrost izhlapevanja glede na vpliv vetera, velikosti površine naftnega madeža in temperature. Eksperimentalno je dokazal, da je Mackayeva predpostavka, da mejna plast nasičenega zraka nad madežem regulira izhlapevanje, napačna. Fings je prišel do spoznanja, da so eksperimentalni podatki za časovno odvisnost izhlapevanja korelirani z vrednostjo odstotka destilacije pri 180°C, in tako zapisal nove empirične enačbe za veliko število raznih surovih naft (Fingas 2004).



### 2.4.3 Disperzija

Disperzija je razpad koherentnega naftnega madeža v majhne kapljice različnih velikosti in širjenje ter raztapljanje teh kapljic v vodnem stolpcu. Sestava kapljic je sicer enaka kot sestava naftnega madeža, vendar pa lahko kapljice pod vremenskimi vplivi hitreje razpadejo. Medtem ko manjše kapljice ostanejo razpršene v vodi, se večje ponovno dvignejo na površje in bodisi tvorijo naftni madež ali pa se razporedijo in oblikujejo zelo tanek sloj nafte za njim (rep). Pri kapljicah, s premerom manjšim od približno 70  $\mu\text{m}$ , je hitrost, s katero se dvigajo proti površini, uravnotežena s turbulenco morja, zaradi česar se zadržujejo v suspenziji. Zaradi tako razpršenih naftnih kapljic v vedno večji količini morske vode se koncentracija nafte hitro in znatno zmanjšuje. Povečana površina in posledično manjša koncentracija, povzročeni zaradi disperzije, spodbujata tudi ostale procese, ki delujejo na razlito nafto, kot so biorazgradnja, sedimentacija in raztapljanje. Hitrost, s katero se nafta razprši, je odvisna tako od vrste nafte kot od razmer na morju. Lažje, manj viskozne nafte v razburkanem morju se namreč razpršijo veliko hitreje, kot nafta enakih lastnosti v mirnem morju ali viskoznejša nafta v razburkanem (ITOPF, 2011).

### 2.4.4 Emulzifikacija

Medtem ko izhlapevanje zmanjšuje prostornino naftnega madeža, jo emulzifikacija povčuje. To je proces, ko vodne kapljice zaradi turbulence vstopijo v razlito nafto in se z njo pomešajo (Slika 2). Takšni mešanici pravimo emulzija in lahko vsebuje tudi do 90% vode. Od količine vode in velikosti vodnih kapljic v tej mešanici pa je odvisna viskoznost in časovna stabilnost emulzije. Pojav je odvisen od številnih dejavnikov, kot so: turbulenca, sestava nafte, hitrost razgradnje in hitrost vetra na območju naftnega razlitja. Vendar pa se vse nafte ne emulzificirajo, oziroma lahko nekatere surove nafte tvorijo emulzijo le ob točno določenih pogojih. Raziskave, ki so jih opravili Bobra (1990) in drugi, so namreč pokazale, da se emulzifikacija pojavi pri nafti z relativno visoko vsebnostjo asfaltov, številna laboratorijska opazovanja pa potrjujejo tudi dejstvo, da intenzivnost turbulence vode krepi emulzifikacijo (Lehr, 2002).

Nastanek emulzije lahko torej drastično spremeni lastnosti in značilnosti nafte. Po Fingas (1994) stabilna emulzija vsebuje med 50 in 80% vode, s čimer se poveča tudi obseg razlitja. Tako lahko emulzifikacija poveča prvotno prostornino nafte za dva do petkrat, njena gostota pa je lahko za 0,2g/ml višja od začetne. Najpomembnejša povzročena sprememba, ki močno vpliva na nadaljnje širjenje, pa je sprememba viskoznosti. Ta se od nekaj sto cSt poveča na približno 50000 cSt, kar pomeni spremembo tekoče snovi v pol-trdno. Emulzija v pol-trdnem agregatnem stanju je pogosto stabilna emulzija, ki je intenzivne rdeče-rjave, oranžne ali rumene barve in lahko v taki obliki ostane

nedoločen čas. Manj obstojne emulzije pa se lahko ponovno ločijo na vodo in nafto, če so izpostavljene sončni svetlobi in mirnemu morju ali kadar jih naplavi na obalo (Apai, 2001).

#### **2.4.5 Raztapljanje**

Nekatere od naftnih komponent, ki so podvržene izhlapevanju, se lahko tudi raztopijo v vodnem stolpcu. Da pride do raztapljanja, pa morajo biti te naftne sestavine oziroma komponente topne v vodi, kar za večino teh komponent do neke mere tudi velja. Dobro topni so zlasti alifati in aromatski ogljikovodiki z nizko molekularno težo (npr. benzen). Ker je izhlapevanje veliko hitrejši proces, je količina raztopljene nafte precej majhna, kljub temu pa je proces potrebno upoštevati, zaradi visoke toksičnosti raztopljenih frakcij nafte (Apai, 2001).

#### **2.4.6 Sedimentacija**

Razpršene naftne kapljice lahko nase vežejo sedimentne delce ali suspendirano organsko snov, zaradi česar se jim poveča gostota in začnejo počasi toniti na morsko dno. Temu pojavu pravimo sedimentacija. Ugodni pogoji za ta pojav so predvsem v plitvih obalnih območjih in ustjih rek, kjer je veliko suspendiranih snovi. Nafta, ki jo naplavi na peščeno obalo, se pogosto pomeša s peskom in ostalimi sedimenti, takšno mešanico pa lahko morje spere nazaj v globlje vode, kjer potone. Podobno lahko pesek na naftni madež prinese tudi veter, kar prav tako povzroči potopitev zaradi povečane teže.

Večina naft ima sicer nižjo specifično težo od vode, zaradi česar plavajo na njeni gladini, vendar pa lahko pri težkih surovih naftah, težkih kurilnih oljih in emulzijah že minimalna interakcija s sedimenti povzroči njihovo potopitev. Le redko imajo nafte namreč večjo gostoto od morske vode, vendar pa se v takšnih primerih, ob razlitju, lahko nafta začne potapljati brez dodatnega vpliva suspendiranih snovi.

Odstotek nafte, ki je vključen v proces sedimentacije, je v primerjavi z ostalimi procesi minimalen, vendar pa je hkrati eden ključnih dolgoročnih dejavnikov, ki vplivajo na kopičenje nafte v morskem okolju. Tako je pogosto izvzet iz modelov, katerih namen ni dolgoročna napoved posledic razlitja (ITOPF, 2011).

#### **2.4.7 Oksidacija**

Oksidacija je fotokemični proces, pri katerem ogljikovodiki v nafti reagirajo s kisikom. Pojav pospešuje sončna svetloba in čeprav je prisoten skozi celotno obdobje razlitja, je njegov skupni vpliv

na razpad nafte, v primerjavi z ostalimi procesi, manjši. Tudi pri močni sončni svetlobi se že tanke plasti nafte razgrajujejo počasi in ponavadi za manj kot 0,1% na dan. Pri oksidaciji nafte torej lahko nastajajo tako topne snovi kot obstojni katrani. Debele plasti zelo viskoznih naft ali emulzij po navadi oksidirajo do obstojnih ostankov in se ne razgradijo popolno (ITOPF, 2011).

#### **2.4.8 Biorazgradnja**

Usoda nafte je na koncu, potem ko nanjo že deljujejo vsi prej navedeni procesi, odvisna tudi od mikrobne aktivnosti. Številne vrste bakterij, alg in gliv so sposobne presnavljati naftne komponente. V odmaknjenih in nedotaknjenih območjih njihova prisotnost običajno ne presega 0,1-1% celotne heterotrofne bakterijske populacije, na območjih onesnaženih z nafto pa se lahko ta delež poveča tudi za 10-krat (Apai, 2001).

Zaradi različnih dejavnikov, ki vplivajo na biorazgradljivost, je težko napovedati hitrost, s katero se bo nafta razgradila. Čeprav biorazgradnja ne more odstraniti velike količine rezlute nafte, pa je eden glavnih dolgoročnih mehanizmov za naravno odstranjevanje zadnjih sledov nafte z obalnega območja, ki je pod nenehnim vplivom plimovanja (ITOPF, 2011).

#### **2.4.9 Odlaganje na obalo**

Odlaganje naftnih madežev na obalo je odvisno predvsem od stopnje izpostavljenosti obale vplivu morja ter od tipa in obsega obalne podlage. Najpogostejša posledica naplavljenega nafte na obalno območje, kot piše že v poglavju o sedimentaciji, je njena interakcija s sedimenti in potopitev.

Glavni problem tega procesa je predvsem njegov negativen vpliv na gospodarstvo, turizem in obalni biotop. V primeru, ko morje naplavi nafto na obalo, lahko namreč ta popolnoma uniči naravno ravnovesje obalnega ekosistema, hkrati pa je čiščenje obal izredno zahteven in drag proces. Samo odlaganje na obalo lahko traja zelo dolgo, prav tako pa se lahko odložena nafta v primeru, ko ni odstranjena, tam zadrži zelo dolgo (ITOPF, 2011).

### 3 MODELIRANJE ŠIRJENJA NAFTE NA OBMOČJU SEVERNEGA JADRANA

V tem poglavju predstavljamo uporabljene podatke in potek simulacije širjenja naftnega madeža z modelom NAFTA3d na območju Severnega Jadrana, natančneje Tržaškega zaliva.

#### 3.1 MODEL NAFTA3d

Model NAFTA temelji na Lagrangeovem principu in metodi sledenja delcev. Maso onesnažila, v tem primeru nafte, razdelimo na končno število diskretnih delcev, katerih širjenje v prostoru nato opišemo z deterministično in stohastično komponento vektorja hitrosti, ki predstavljata advekcijo in turbulentno difuzijo. Vse enačbe, ki so v tem modulu uporabljene, so podrobno opisane v literaturi (Širca, 1992, Žagar, 1994, Galuf, 2005, Žagar in Četina, 2011). Omenjamo le vse procese, ki so v modelu NAFTA3d (Žagar in Četina, 2011) upoštevani in nekatere metode, po katerih so izračunani.

Vpliv mehanskega širjenja je v modulu zajet po metodi strižne difuzije (Elliot in sod., 1986), ker daje pri tridimenzijskih modelih znatno boljše rezultate, kot Fayeve in modificirana Fayeve metoda.

»Vlečenje« (angl. wind drift) naftnega madeža je proces, ki je značilen predvsem za dvodimenzijske modele, v tridimenzijskih modelih pa je običajno izpuščen, saj naj bi celotni 3D opis tokov zajel tudi vpliv vetra na gladini. Ker pa se lahko pojavijo okoliščine z močnim vetrom in šibkimi tokovi, vpliv tega procesa ni zanemarljiv, zato je bil proces vseeno dodan v modelu NAFTA3d (Žagar in Četina, 2011).

Za izračun izhlapevanja je uporabljen analitični pristop, ki so ga opisali Mackay in sod. (1980). Pri tem pristopu je za razliko od psevdo-komponentnega potrebno poznati bistveno manj lastnosti in parametrov razlite nafte. Parni tlak nafte je tako po analitičnem pristopu opisan kot funkcija temperature okolja in lastnosti nafte kot zmesi vseh komponent, ki jo sestavljajo (gostota, vrelišče itd.).

Proces emulzifikacije je opisan po enačbah, navedenih v Mackay in sod. (1980) in Delgado in sod. (2006).

Tudi sprememba viskoznosti, ki vpliva na proces disperzije nafte v vodnem stolpcu, je povzeta po enačbah, opisanih v Mackay in sod. (1980) in Delgado in sod. (2006). Ta proces je posledica emulzifikacije, izhlapevanja in znižanja okoliške temperature ob razlitju.

### 3.2 MODIFIKACIJA PROGRAMA NAFTA3d

Osnovne vhodne podatke, ki so potrebni za izračun verjetnosti pri metodi trajektorij, dobimo s programom NAFTA3d. Za to nalogo namreč potrebujemo koordinate vsakega delca posebej v vsakem časovnem koraku, ali drugače povedano, potrebujemo trajektorije delcev.

V numerični mreži modela NAFTA3 se med računom izvajajo 3-D interpolacije hitrosti na točne koordinate obravnavanih delcev, v posamezni celici numerične mreže pa se iz mase delcev izračunajo tudi koncentracije (Žagar in sod., 2012). Ker za metodo trajektorij koncentracije niso potrebne, naključno generirane spremenljivke za koordinate  $x$ ,  $y$  in  $z$  pa so bistvenega pomena, smo model NAFTA3d nekoliko modificirali. Izključili smo račun koncentracij in s tem bistveno skrajšali čas, ki ga program potrebuje za izračun rezultatov (koordinat), ter dodali generator naključnih števil. Model NAFTA3d je sicer že vseboval generator, vendar vrednosti niso bile popolnoma naključne: za isto vrednost semena (začetna vrednost), ki je bila v modelu fiksirana, je vrnil vedno isto zaporedje naključnih števil. Z modifikacijo smo tako zagotovili, da so števila res generirana slučajno in so enakomerno porazdeljena (Gaussova oz. Normalna porazdelitev), s povprečjem 0 in standardnim odklonom 1.

Celotna koda modificiranega modela NAFTA3d je zapisana v programskem jeziku Fortran (datoteka *pt3dmtraj.for*), rezultati dobljeni s tem modelom pa se izpišejo v datoteki *traj.txt*, ki vsebuje 5 stolpcev. Za vsak delec v vsakem časovnem koraku so torej prikazane izračunane koordinate. Tako se v prvem stolpcu izpišejo časovni koraki, v drugem indeks delca, v tretjem, četrtem in petem pa koordinate  $x$ ,  $y$  in  $z$ .

#### 3.2.1 Generiranje naključnih spremenljivk

Pravo naključnost je izredno težko zagotoviti, zato slučajnost običajno kar izračunamo. Ker je takšno izračunano zaporedje v bistvu deterministično in je slučajno le po obnašanju, mu pravimo navidezno (psevdo) slučajno zaporedje. Navidezna slučajnost takšnega zaporedja je posledica zelo velike periode ponovitve (Ambrožič in Turk, 2000).

Za generiranje slučajnih spremenljivk smo v ta namen uporabili funkcijo, ki podaja naključna števila, enakomerno porazdeljena v intervalu  $[0,1)$ , kar pomeni, da vključuje 0, ne pa tudi 1. Generator je bil dodan v model NAFTA3d, zapisan v programskem jeziku Fortran. Začetno vrednost (*rand*) smo določili z velikim lihim številom (7654321), kot prikazuje enačba (1).

$$\text{rand} = 7654321 + 2 * \text{int}(\text{secnds}(0.0)) \quad (1)$$

Funkcija  $\text{secnds}(X)$  nam poda čas v sekundah iz realnega časa systemske ure. Ker je  $X$  v našem primeru 0.0, nam funkcija  $\text{secnds}(0.0)$  poda čas v sekundah od polnoči (ACADEMIC, 2008). S funkcijo  $\text{int}$  dobimo celo število in ker je to število pomnoženo z 2, je rezultat, dobljen s funkcijo  $2 * \text{int}(\text{secnds}(0.0))$  vedno celo sodo število. Tako je torej začetna vrednost ( $\text{rand}$ ), ki je seštevek lihega (7654321) in sodega ( $2 * \text{int}(\text{secnds}(0.0))$ ) števila, vedno liho število.

Ko smo seme ( $\text{rand}$ ) definirali, smo ga uporabili v programskih enačbah (3), (4) in (5), za generiranje slučajnih spremenljivk ( $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ) v smeri  $x$ ,  $y$  in  $z$ . Pri tem smo uporabili Box-Mullerjev algoritem, ki generira slučajna števila iz normalne porazdelitve in je prikazan z enačbo (2).

$$r_i = \sqrt{-2 * \ln u_{1i}} * \cos(2 * \pi * u_{2i}) \quad (2)$$

V zgornji formuli sta slučajni spremenljivki  $u_{1i}$  in  $u_{2i}$  neodvisni in enakomerno porazdeljeni med 0 in 1, kar v programu zagotovimo s funkcijo  $\text{ran}(\text{rand})$ , kot je prikazano v formulah (3), (4) in (5). Funkcija  $\text{ran}()$  nam namreč vrne psevdo-naključno število iz enakomerne porazdelitve med 0 in 1, pri kateri smo uporabili seme oz. začetno vrednost ( $\text{rand}$ ), ki je definirana z enačbo (1).

$$r_1 = \text{sqrt}(-2 * \log(\text{ran}(\text{rand}))) * \cos(2 * \pi * \text{ran}(\text{rand})) \quad (3)$$

$$r_2 = \text{sqrt}(-2 * \log(\text{ran}(\text{rand}))) * \cos(2 * \pi * \text{ran}(\text{rand})) \quad (4)$$

$$r_3 = \text{sqrt}(-2 * \log(\text{ran}(\text{rand}))) * \cos(2 * \pi * \text{ran}(\text{rand})) + \text{vzgon} \quad (5)$$

Z generatorjem naključnih števil tako dobimo vrednosti  $r_i$ . V horizontalni smeri ( $r_1$  in  $r_2$ ) ima vrednost naključne spremenljivke takšno verjetnostno porazdelitev, da je srednja vrednost spremenljivke 0 in standardna deviacija 1, v vertikalni smeri ( $r_3$ ) pa je upoštevan še vpliv vzgona, tako da je srednja vrednost naključnih števil v vertikalni smeri odvisna od gostot vode in nafte, kot prikazuje formula (6), standardna deviacija pa je 1 (Žagar in Četina, 2011).

$$M_{r3} = \frac{(\rho_{\text{vode}} - \rho_{\text{nafte}})}{\rho_{\text{vode}}} \quad (6)$$

### 3.3 MODELIRANJE PO METODI TRAJEKTORIJ

Že v poglavju 2.2 smo podali nekaj teoretičnega ozadja o metodi trajektorij, v tem poglavju pa bomo bolj podrobno opisali delovanje in potek modeliranja po tej metodi in račun verjetnosti. Kot smo že omenili, so osnovni vhodni podatki, s katerimi računamo verjetnost pojava naftnega madeža na nekem območju, rezultati pridobljeni z modificiranim modelom NAFTA3d. Vsak model, ki deluje na podlagi metode trajektorij, torej tudi našega, sestavljajo osnovni gradniki (numerična mreža, časovni korak idr.), ki bodo podrobneje razloženi v nadaljevanju.

Pri modeliranju po metodi trajektorij govorimo o simulaciji trajektorij delcev. Naftni madež je v modelu namreč opisan kot delec oziroma več delcev z neko začetno maso, ta pa se s časom izgublja v procesih razgradnje, ki so vključeni v model. Pri tem načinu modeliranja nas tako zanima pot, ki jo opravi delec v nekem končnem času ob znanih vhodnih podatkih (točka izliva, advekcija, disperzija, mehansko širjenje itd.). V vsakem časovnem koraku tako dobimo nove koordinate delca, trajektorija tega delca pa je črta vseh teh koordinat.

Če želimo določiti verjetnost, da se razlita nafta pojavi na nekem območju v nekem časovnem obdobju (npr. teden dni, za katerega imamo podatke), moramo poznati število simuliranih trajektorij, ki so bile izračunane za to obdobje. S tem lahko določimo odstotek trajektorij, ki prehajajo skozi kateri koli element mreže. Če je število simuliranih trajektorij za obravnavano obdobje dovolj veliko (npr. 700), se lahko ta odstotek interpretira kot verjetnost, da se nafta pojavi v mrežnem elementu (celici). Pri tem moramo biti pozorni, da so vse trajektorije izračunane z istim končnim časom, saj jih sicer ne moremo vključiti v isti račun verjetnosti. V našem primeru, ko imamo podatke samo za 3 dni (glej poglavje 3.5), lahko torej računamo trajektorije z največjim končnim časom 72 ur in verjetnost pojava samo za obdobje teh treh dni. Verjetnost pojava nafte v neki celici se torej določi tako, da se preštejejo trajektorije, ki so šle skozi to celico, nato pa se ta vsota deli s številom vseh trajektorij. Pri tem obravnavamo vsako trajektorijo kot binarni sistem, saj ni pomembno, kolikokrat se je naftni delec pojavil v isti celici pri eni trajektoriji, ampak samo, ali se je v celici pojavil ali ne. Celice, ki jih prečka večje število trajektorij, imajo tako višjo verjetnost kot tiste, katere prečka manjše število. Če npr. vsem trajektorijam določimo isto točko izpusta, ima celica, ki vsebuje to točko, vedno verjetnost 100%, okoliške celice pa ustrezno nižjo. Celice, skozi katere ne poteka nobena od trajektorij, imajo seveda stopnjo verjetnosti 0%, kar pomeni, da lahko z neko določeno gotovostjo trdimo, da se pri uporabljenih vhodnih podatkih nafta tam ne bo pojavila.

### 3.4 OPIS IN UPORABA MODELA

Model, ki ga želimo pri tej diplomski nalogi predstaviti, je trenutno sestavljen iz dveh ločenih delov (programov). Prvi del predstavlja modificiran model NAFTA3d, zapisan v programskem jeziku Fortran, s katerim simuliramo trajektorije delcev, drugi del – program Trajectory.java, ki je bil izdelan v okviru diplomske naloge, pa je zapisan v programskem jeziku Java in iz simuliranih trajektorij izračuna verjetnosti. Da bi dobili želene rezultate torej potrebujemo oba sklopa.

Prvi sklop (modificiran model NAFTA3d) mora v mapi vsebovati:

- datoteko *podatki.dat* v kateri podamo splošne vhodne parametre,
- datoteko, ki vsebuje vhodne podatke tokov (za obdobje 19. – 21.3.2009 je to *ptm\_z\_out72.dat*), in
- aplikacijo *pt3dmtra.exe*, s katero poženemo program.

Drugi sklop (Trajectory.java) pa mora v mapi vsebovati:

- datoteko *Trajectory.java*, v kateri je zapisan program,
- tri podmape (*mreza*, *xyp*, *binar*), kamor se zapišejo datoteke z vmesnimi rezultati in
- podmapo *Rezultati*, kamor se zapišeta datoteki s končnimi rezultati.

Tukaj je potrebno dodati, da program *Trajectory.java* ne bo deloval, če na računalniku ni naložen programski jeziki Java JRE 6 (angl. JRE = Java Runtime Environment) in razvojni paket Java JDK 7 (angl. JDK = Java Development Kit) ali katera od novejših verzij teh dveh. JRE lahko brezplačno dobimo na spletni strani <http://www.java.com/en/download/index.jsp>, JDK pa na spletni strani <http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/index.html>. Ko imamo JRE in JDK naložena, je potrebno nastaviti še nekatere sistemske spremenljivke pri razvojnem paketu JDK, kot jih prikazuje postopek spodaj.

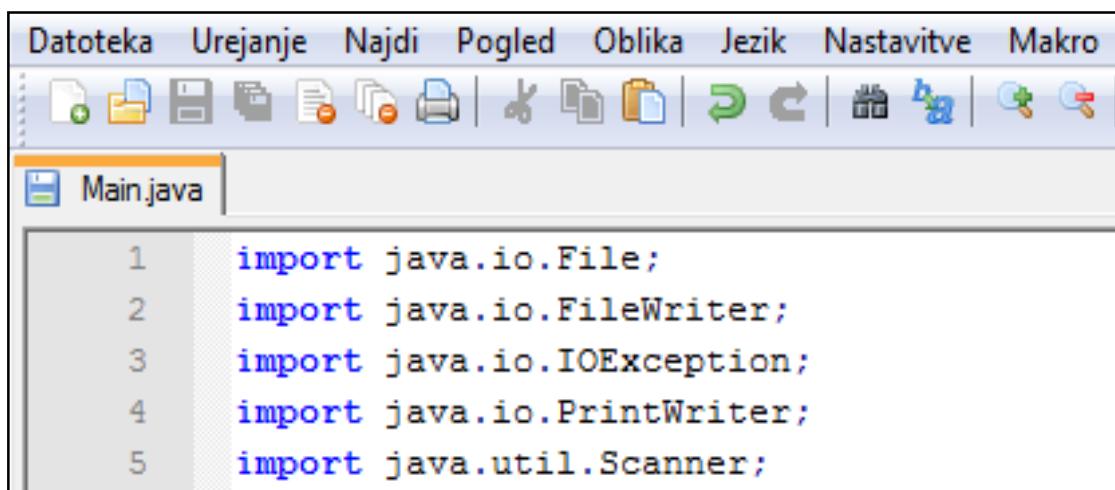
Nastavitev sistemskih spremenljivk:

- Z desnim klikom na *Moj računalnik* (angl. Computer) se nam odpre meni, v katerem izberemo *Nastavitve* (angl. Properties).
- Odpre se okno in levo zgoraj izberemo *Sistemske nastavitve* (angl. Advanced system settings).
- V novem oknu nato izberemo zavihek *Napredno* (angl. Advanced) in kliknemo na gumb *Okoljske spremenljivke* (angl. Environment variables) desno spodaj.



- Odpre se nam okno in v okvirju *Uporabniške spremenljivke* (angl. User variables) dodamo novo ime s klikom na gumb *Novo* (angl. New).
- V prvo okence (angl. Variable name) nato vpišemo ime `JAVA_HOME`, v drugo (angl. Variable value) pa pot do Java JDK (npr.: `C:\Program Files\Java\jdk1.7.0_03`) in potrdimo s klikom *V redu* (angl. OK). Vrne nas v prejšnje okno.
- Sedaj v okvirju *Sistemske spremenljivke* (angl. System variables) poiščemo spremenljivko z imenom *Path* in jo z dvojnimi klikom odpremo.
- V drugo okence (angl. Variable value) vpišemo pot do java JDK mape bin (npr.: `C:\Program Files\Java\jdk1.7.0_03\bin`) in potrdimo s klikom *V redu* (angl. OK) ter nato še enkrat *V redu* (angl. OK).

Namestitev programskega jezika Java JRE je potrebna, ker nam omogoča izvajanje Javanskih programov, medtem ko je namestitev in nastavitve razvojnega paketa Java JDK nujna, za razvoj Javanskih programov. Slednja vsebuje standardne knjižnice programskih struktur in funkcij (za delo z datotekami, za dostop do podatkovnih baz, za mrežne povezave, hkratno izvajanje več programov, grafične aplikacije, aplikacije vgrajene v brskalnike, itn.), brez katerih Javanski programi (razen nekaterih najpreprostejših) ne delujejo. Knjižnice, potrebne za delovanje nekega programa, so definirane na začetku programske kode, kot prikazuje Slika 6.



The image shows a screenshot of a code editor window. The title bar contains menu items: Datoteka, Urejanje, Najdi, Pogled, Oblika, Jezik, Nastavitve, Makro. Below the title bar is a toolbar with various icons for file operations and editing. The editor area shows a file named 'Main.java' with the following code:

```
1 import java.io.File;  
2 import java.io.FileWriter;  
3 import java.io.IOException;  
4 import java.io.PrintWriter;  
5 import java.util.Scanner;
```

Slika 6: Programska koda se začne z definiranjem potrebnih knjižnic.

V kolikor želimo dobljene rezultate tudi grafično prikazati, pa potrebujemo še enega od programov: Wolfram Mathematica ali Surfer.

### 3.4.1 Program Trajectory.java

Program *Trajectory.java* (Priloga A) je, kot smo že omenili, napisan v programskem jeziku Java. To je moderen programski jezik, katerega uporaba se je v zadnjem desetletju v svetu zelo razširila. Kot pri večini ostalih programskih jezikov, lahko programsko kodo pregledamo ali spreminjamo v katerem koli urejevalniku besedil (npr. Notepad). Vendar pa je med temi programi najprimernejši Notepad ++, v katerem je bil program *Trajectory.java* v večji meri tudi napisan, lahko pa uporabimo tudi katerega od bolj sofisticiranih urejevalnikov programskih kod (npr. Eclipse).

Sam program v bistvu deluje kot nekakšen urejevalnik rezultatov, ki smo jih dobili z modificiranim modelom NAFTA3d. V začetku je definirana numerična mreža in celica izpusta, v kateri mora biti verjetnost pojava nafte 100% (ker imajo vse trajektorije isti izpust). To celico moramo v programu ustrezno podati in ročno spremeniti, če spremenimo koordinate izpusta v datoteki *podatki.dat* pri prvem sklopu modela (NAFTA3d). V naslednjem koraku definiramo način, po katerem naj program prebere vhodne podatke (podrobneje v poglavju 3.6), ki jih mora uporabiti. Z normiranjem v nadaljevanju so vsi prebrani podatki (koordinate) ustrezno umeščeni v numerično mrežo, na podlagi katere se nato izračunajo verjetnosti.

Program na koncu izpiše več datotek, vendar je namen nekaterih le v tem, da nam omogoči pogled vmesnih rezultatov. Te (izhodne) datoteke so tudi smiselno razporejene po mapah, ki morajo biti v programski kodi pravilno locirane (Slika 8). Rezultati, ki jih dejansko uporabimo, se zapišejo v mapo *rezultat* v dve datoteki: *mreza.txt* in *xyp.txt*. V obeh so vrednosti enake, razlika je samo v načinu zapisa. V datoteki *mreza.txt* so rezultati zapisani v obliki matrike, ker lahko s takšnim zapisom rezultate grafično prikažemo v programu Wolfram Mathematica. V datoteki *xyp.txt* pa so isti rezultati zapisani v petih stolpcih (i, j, verjetnost, x(i), y(j)), tako da so rezultati primerni za grafične prikaze v programu Surfer.

## 3.5 VHODNI PODATKI

Tokovna slika (cirkulacija), ki je bila uporabljena pri izdelavi in simulacijah, je pridobljena iz dejanskih vremenskih podatkov na območju Tržaškega zaliva za obdobje treh dni. Hitrostna polja so bila izračunana z modelom TSPOM na NIB (Morska biološka postaja Piran) za tridnevno vremensko situacijo med 19. in 21. marcem 2009. V teh treh dneh sta se zgodila dva obrata vetra (jugo – burja – jugo) in povečan pretok Soče. Za isto obdobje so bili, na MOP-ARSO z modelom Aladin, izračunani tudi veter in klimatološki pretoki Soče, Dragonje, Rižane in Badaševce, ki so kot vsiljevanja prav tako

upoštevani v modelu NAFTA3d (Žagar in sod., 2012). Z razliko od nekaterih drugih avtorjev (npr. AMEC, 2010), ki so se ukvarjali z modeliranjem po metodi trajektorij, smo uporabili dejanske podatke in nestacionarno hitrostno polje, kar pomeni, da se v vsakem časovnem koraku hitrost in smer vetra (ter posledično tudi tokov) nekoliko spremenita. S temi podatki smo lahko preverili delovanje modela, rezultati simulacij pa so relevantni le za dejanske vremenske razmere v konkretnem obdobju konec marca 2009 in jih ne smemo posplošiti na druga ali daljša obdobja.

Nekatere vhodne podatke v datoteki *podatki.dat* modificiranega modela NAFTA3d lahko tudi pri računu po metodi trajektorij poljubno spreminjamo, saj vplivajo na potek trajektorij in s tem na verjetnost pojava nafte na nekem območju. V sklopu diplomske naloge smo se omejili le na nekatere in spreminjali končni čas simulacij, časovni korak in horizontalni koeficient turbulentne difuzije. V nadaljevanju smo te parametre na kratko razložili in opisali, kako smo jih določili.

### 3.5.1 Končni čas

S končnim časom podamo celoten čas trajanja ene simulacije. To trajanje sicer določimo sami, vendar smo omejeni s podatki o tokovih, ki so na voljo. V našem primeru, ko imamo podatke samo za tri dni, lahko končni čas računa znaša največ 72 ur, vendar zaradi pravilnosti rezultatov raje izberemo 70 ur. To pomeni, da lahko simuliramo potek širjenja nafte za tri dni in nič več. Če bi imeli podatke o tokovih za cel mesec in bi določili končni čas 14 dni, bi skoraj zagotovo dobili bistveno drugačne rezultate. V dveh tednih (14 dni) lahko namreč delec prepotuje veliko večjo razdaljo in se bistveno bolj oddalji od točke izliva, kot v končnem času treh dni.

### 3.5.2 Numerična mreža

Za numerično mrežo, v kateri prikazujemo rezultate, smo v programu za račun verjetnosti (Trajectory.java) izbrali mrežo enakih dimenzij in resolucije, kot je bila uporabljena računsko mreža v modelu NAFTA3d. Izhodišče je tako v točki (0,0), njena velikost pa je definirana s 176 mrežnimi celicami (stolpci) v smeri koordinate X, ki jih označujemo z indeksom »i«, in 256 mrežnimi celicami (vrsticami) v smeri koordinate Y, označenimi z indeksom »j«. Vsaka celica je v programu tako podana s spremenljivkama  $i$  in  $j$ , celotno mrežo pa sestavlja 45.056 enakih mrežnih celic s konstantno dimenzijo v smeri  $x$   $\Delta x=140,58$  m in v smeri  $y$   $\Delta y=148,55$  m. Da v programu, pri umeščanju koordinat delcev v celice numerične mreže, ne pride do napak, morajo biti meje celic točno definirane. Te meje smo podali tako, da normirane koordinate, ki padejo na enega izmed zunanjih robov celice (gledano od izhodišča) zavzamejo položaj te celice, v kolikor pa te normirane koordinate presežejo vrednost na

robu, zavzamejo položaj naslednje. Celica (1,1) je tako definirana v x smeri z intervalom [0, 140,58], v smeri y pa z intervalom [0, 148,55]. Pri vsakem znanem položaju delca je potrebno tako najprej normirati njegove koordinate, kot prikazujeta enačbi (7). S tem delec umestimo v numerično mrežo.

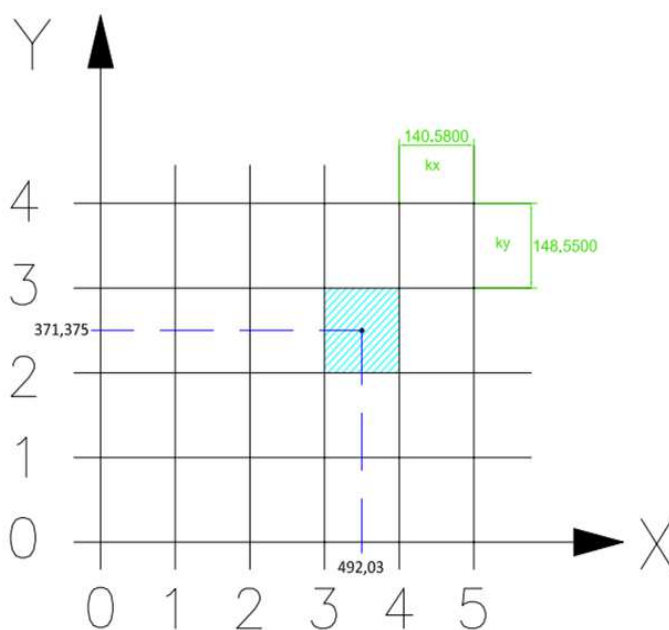
$$i = \frac{x}{\Delta x} \qquad j = \frac{y}{\Delta y} \qquad (7)$$

Za lažji prikaz rezultatov smo določili tudi vse koordinate središčnih točk celic numerične mreže. Položaj teh koordinat smo izračunali z enačbama (8) in (9).

$$x(i) = 70,29 + (i - 1) * 140,58 \qquad (8)$$

$$y(j) = 74,275 + (j - 1) * 148,55 \qquad (9)$$

Če se npr. nahajamo v celici (4,3), to pomeni, da je  $i=4$  in  $j=3$ . Z enačbama (8) in (9) nato določimo koordinate središča te celice, ki v tem primeru znašajo (492,03 , 371,375). Shematično je ta izračun prikazan na Sliki 7.



Slika 7: Določitev koordinat središča celice (4,3).

Resolucijo in velikost mreže za prikaz rezultatov določamo sami. Kako velika bo posamezna celica, je odvisno od tega, kako gosto mrežo želimo imeti. Manjša ko je celica, gostejša bo mreža oziroma večja je njena resolucija. Z gostejšo mrežo, ki jo lahko za prikaz rezultatov določimo neodvisno od računske

mreže, lahko natančnejše prikažemo rezultate razlitja, vendar pa je bila računsko mreža v izbranem primeru dovolj natančna, da nadaljnje drobljenje ne bi izboljšalo preglednosti rezultatov.

### 3.5.3 Časovni korak

S časovnim korakom definiramo časovni interval, v katerem bomo izračunali položaja delca oziroma delcev. Z vsakim korakom tako dobimo vedno nove koordinate delcev, ki opisujejo širjenje nafte. Pri metodi sledenja delcev za določitev časovnega koraka ne obstajajo neke splošne vrednosti ali enačbe, ki bi bile kompatibilne z različnimi modeli in numeričnimi mrežami. Osnova za določitev časovnega koraka računa je namreč gostota oz. dimenzije celice v numerični mreži, s katero izvajamo simulacije. Pravilna določitev časovnega koraka je prav pri metodi trajektorij bistvenega pomena. V primeru prevelikega časovnega koraka bodo rezultati napačni, ob izbiri premajhnega pa se bo čas računa bistveno podaljšal, medtem ko se kvaliteta rezultatov ne bo spremenila.

Ko je resolucija numerične mreže definirana (in prav tako vsi ostali vhodni podatki), lahko določimo časovni korak. Ta mora biti dovolj majhen, da v enem koraku delec ne prepotuje prevelike razdalje. V enem časovnem koraku lahko namreč delec oparvi samo pot iz trenutne celice v eno izmed osmih sosednjih celic. Ne smemo dovoliti, da bi delec v enem koraku preskočil sosednjo celico, saj bi s tem dobili napačne oziroma nepopolne rezultate – verjetnost, da se nafta pojavi v neki celici, bi bila manjša.

Pomembno je tudi vedeti, da moramo ob kakršnikoli spremembi vhodnih podatkov (npr. horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije) preveriti in po potrebi ponovno nastaviti časovni korak, ne glede na to, da numerična mreža ostaja nespremenjena. Pri drugačnih podatkih lahko namreč delec potuje drugače (hitreje, počasneje) in je to potrebno upoštevati. Če npr. določimo časovni korak pri nižjem horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije (npr. 2) in potem ta koeficient turbulentne difuzije povečamo (na npr. 5), moramo temu ustrezno prilagoditi časovni korak. Z višjim koeficientom se namreč hitrost delca poveča, zato mora biti časovni korak ustrezno krajši, da ne prihaja do zgoraj omenjenega preskakovanja celic. Da bi se izognili napakam, smo pri tej nalogi določili časovni korak na podlagi razdalje med sosednjima koordinatama istega delca. Določili smo, da razdalja ne sme biti večja od 150 metrov, kot je prikazano v enačbi (10). S tem smo zagotovo na »varni strani«, saj meri diagonala ene mrežne celice ( $d = \sqrt{140,58^2 + 148,55^2}$ ) cca 204,52 metrov in delec v časovnem koraku, določenem po spodnji enačbi, ne bo nikoli preskakoval celic.

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \leq 150 \quad (10)$$

### 3.5.4 Horizontalni koeficient turbulentne difuzije

Trenutno je v modelu NAFTA3d mogoče upoštevati konstanten horizontalni koeficient turbulentne difuzije, ki ga definiramo v datoteki *podatki.dat*, medtem ko se vertikalni koeficient turbulentne viskoznosti izračuna po enačbah, ki so podrobneje razložene v Žagar (1994), Galuf (2005) in Žagar in Četina (2011). V podatkih tako podamo iz izkušenj pridobljeno vrednost horizontalnega koeficienta turbulentne difuzije (HD), ki za Tržaški zaliv znaša približno  $5 \text{ m}^2/\text{s}$ . V okviru diplomske naloge smo opazovali rezultate pri izbranih vrednostih 2, 5 in  $10 \text{ m}^2/\text{s}$ .

### 3.6 NAVODILA ZA UPORABO MODELA

Povedano je že bilo, da je model sestavljen iz dveh samostojnih sklopov (programov), torej moramo tudi pognati vsak program posebej. Ko imamo vse potrebne podatke (glej poglavje 3.4), poženemo modificirani model NAFTA3d, nato pa program *Trajectory.java*. Podrobnejša navodila o vnosu želenih podatkov in samem zagonu programov so zapisana v nadaljevanju.

Pri modificiranem modelu NAFTA3d so vsi vhodni podatki, s katerimi želimo simulirati širjenje nafte, tako kot pri prvotnem modelu NAFTA3d, zapisani v datoteki *podatki.dat* (razen podatkov o tokovnem polju, ki se nahajajo v posebni datoteki). Datoteka *podatki.dat* je smiselno razdeljena na 5 delov: osnova, grafika, voda, veter in nafta. V okviru te naloge smo spreminjali samo nekatere podatke v prvem, tretjem in petem sklopu (osnova, voda in nafta), ker je bilo spreminjanje ostalih parametrov (npr. grafike) za naše potrebe nesmiselno, saj so namenjeni drugačnemu tipu simulacij. V osnovnem delu tako določimo končni čas simulacije v urah (do 72 ur) in ustrezen časovni korak v sekundah (glej poglavje 3.5.2), pri vodi podamo želeni horizontalni koeficient turbulentne difuzije (HD), v zadnjem delu pa število delcev. Ko so vsi želeni podatki vpisani (spremenjeni), shranimo spremembe v datoteki *podatki.dat* in poženemo program, z dvojnimi klikom na aplikacijo *pt3dmtraj.exe*. Ko program zaključi izračun, rezultate shrani v datoteko *traj.txt*, z vsakim ponovnim zagonom programa pa se rezultati v tej datoteki posodobijo oziroma »povezijo« prejšnje.

Tukaj je dobro omeniti, da si lahko s pravilno izbiro števila delcev v datoteki *podatki.dat* prihranimo ogromno časa. Če namreč pri številu delcev zapišemo 1 (en delec), bomo kot rezultat v datoteki *traj.txt* dobili trajektorijo tega delca. Ker pa za izračun verjetnosti potrebujemo dovolj veliko število trajektorij (glej poglavje 3.3), moramo program pri nespremenjenih vhodnih podatkih pognati dovoljkrat (npr. 100-krat). Tako bomo ob vsakem novem zagonu aplikacije *pt3dmtraj.exe*, dobili novo trajektorijo zapisano v datoteki *traj.txt*. Ker je ta postopek zelo zamuden, je veliko boljše že pri vhodnih

podatkih izbrati zadostno število delcev (npr. 100 delcev) in tako je dovolj, da program poženemo samo enkrat. V datoteki *traj.txt* tako neposredno dobimo trajektorijo za vsak delec posebej. Ker modificiran model NAFTA3d zaradi novega generatorja slučajnih števil deluje pravilno ne glede na to, kateri način izberemo, je izbira slednjega primernejša.

S podatki, pridobljenimi iz prvega sklopa (*traj.txt*), lahko nadaljujemo z drugim delom (programom) modela. Ker je program *Trajectory.java* za računanje verjetnosti napisan tako, da se ukazi za branje vhodnih podatkov izključujejo, moramo v začetku določiti, katerega od prej opisanih načinov (z enim ali več delci) smo uporabili.

- Če smo uporabili način pridobivanja trajektorij z enim delcem, moramo v programski kodi nastaviti atribut *enaDatoteka* na *false*, s čimer programu povemo, da mora za račun verjetnosti uporabiti podatke iz vseh datotek *traj\_n.txt* v mapi *Podatki*.
- Če pa smo uporabili postopek z več delci, moramo v programski kodi nastaviti atribut *enaDatoteka* na *true*. Tako bo program prebral podatke neposredno iz datoteke *traj.txt*. Pri tem načinu je potrebno z atributom *stDelcev* podati tudi število delcev, ki mora biti enako številu delcev, ki smo jih določili v datoteki *podatki.dat* pri prvem sklopu modela. V atribut *stKorakov* pa nastavimo potrebno število časovnih korakov (pri končnem času 20 ur in časovnim korakom 120 sekund je število časovnih korakov 600).

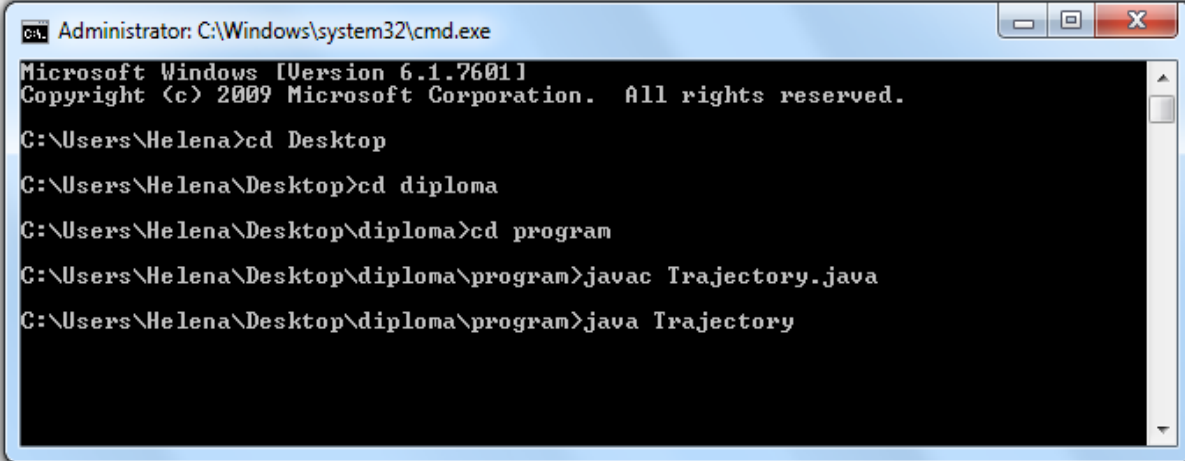
Preden zaženemo program, je prav, da preverimo, ali so v programski kodi pravilno definirane poti do zelenih datotek oziroma map, ki jih želimo uporabiti. Primer takšnega zapisa poti oz. lokacije datoteke je prikazan na Sliki 8.

```
Scanner scanner = new Scanner(new File("E:\\Diploma\\20120524\\traj.txt"));  
int korak = 0;  
while(scanner.hasNext()) {  
    String line = scanner.nextLine();  
    String[] splitLine = line.split(";");
```

Slika 8: Programski ukaz, ki vsebuje pot (zapis v sivi barvi) do datoteke *traj.txt*. Ta se nahaja na disku E v mapi »Diploma« in podmapi »20120524«.

Ko je način branja podatkov izbran in so poti pravilno definirane, lahko poženemo program. V tem delu »modela« nimamo aplikacije, ki bi jo pognali z dvojnim klikom, kot pri prejšnjem (*pt3dmtraj.exe*), zato je postopek nekoliko drugačen. V računalniškem okolju Windows odpremo konzolno okno *cmd.exe* in v njem poiščemo lokacijo, kjer se nahaja program (*Trajectory.java*). Nato vpišemo ukaz »*javac Trajectory.java*«, s katerim se prevede programska koda. Vsak program, napisan

v Javi, je namreč potrebno prevesti z Javinim prevajalnikom *javac*, ki preveri, ali je program napisan po pravilih programskega jezika Java, in ga prevede v t.i. "bitno kodo" (angl. bytecode) (Računalništvo 1, 2004). Nato z ukazom »*java Trajectory*« poženemo program. Opisan postopek je prikazan na Sliki 9.



```
Administrator: C:\Windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\Helena>cd Desktop
C:\Users\Helena\Desktop>cd diploma
C:\Users\Helena\Desktop\diploma>cd program
C:\Users\Helena\Desktop\diploma\program>javac Trajectory.java
C:\Users\Helena\Desktop\diploma\program>java Trajectory
```

Slika 9: Konzolno okno cmd.exe z ukazi za zagon programa. V prikazanem primeru se naš program imenuje »Trajectory.java« in se nahaja na namizju (angl. desktop) v mapi »diploma« in podmapi »program«.

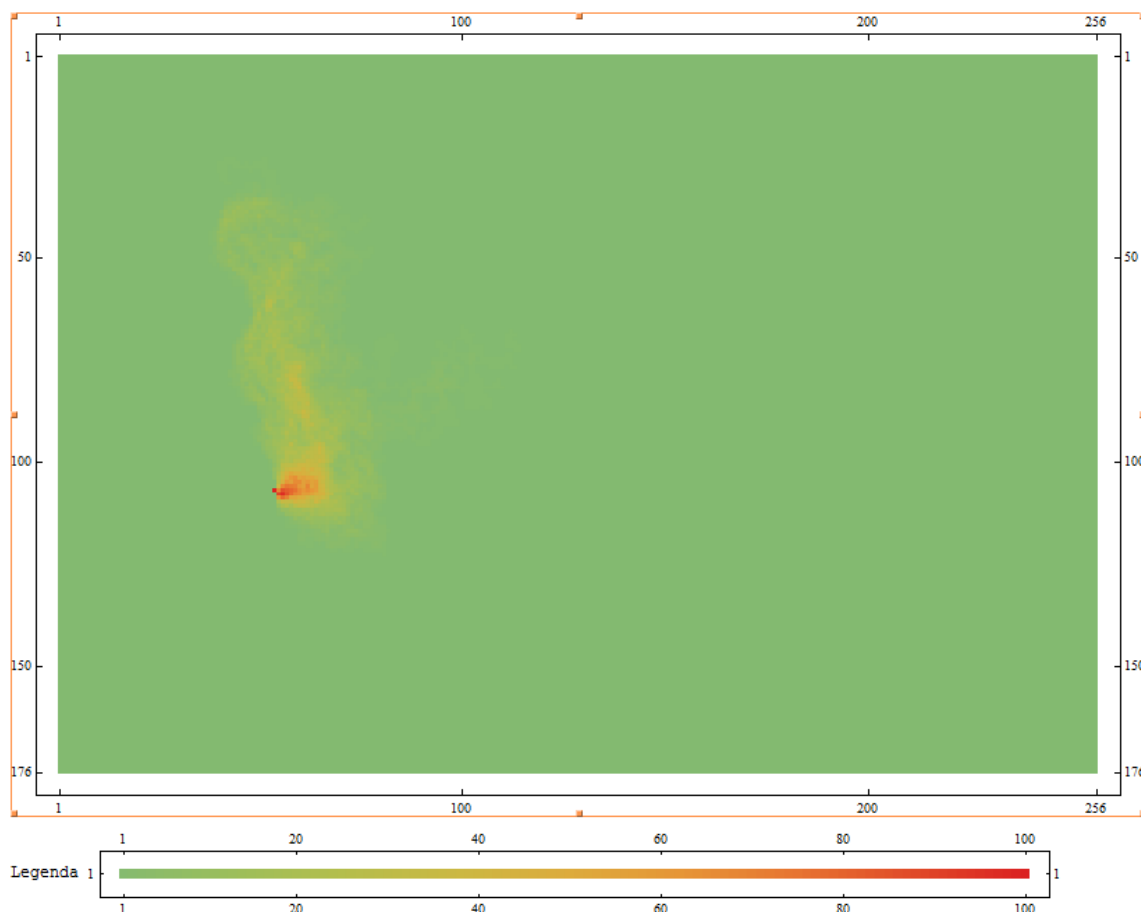
Ko program zaključi z izračunom, izpiše rezultate v datoteko *mreza.txt* in *xyp.txt*. Ti datoteki sta pripravljene za grafičen prikaz dobljenih rezultatov. Že v poglavju 3.4.1 smo povedali, da so rezultati v obeh datotekah isti, le zapis je drugačen. Za hitrejši vpogled v širjenje razlitja je primerna datoteka *mreza.txt*, ki ima rezultate zapisane v matrični obliki in je tako ustrezna za grafični prikaz v programu Wolfram Mathematica. Za prikaz moramo tako v programu Wolfram Mathematica vpisati ukaz, kot prikazuje Slika 10, in ga potrditi. S tem ukazom bo program izpisal matriko ter izrisal grafiko in legendo grafike.



```
SetDirectory[
  "C:\\Users\\Helena\\Desktop\\program\\rezultat"];
FileNames[];

A = Import["mreza.txt", "Table"];
AA = A // TableForm;
Print["Matrika verjetnosti =", AA]
S1 = MatrixPlot[A, ColorFunction -> "Rainbow"];
L1 = MatrixPlot[{Table[5 i, {i, 100}]},
  ColorFunction -> "Rainbow"];
Print["Razlitje ", S1]
Print["Legenda ", L1]
```

Slika 10: Na sliki je prikazan celoten ukaz, zapisan v programu Wolfram Mathematica, ki iz datoteke »mreza.txt« izriše matriko in želeno grafiko.



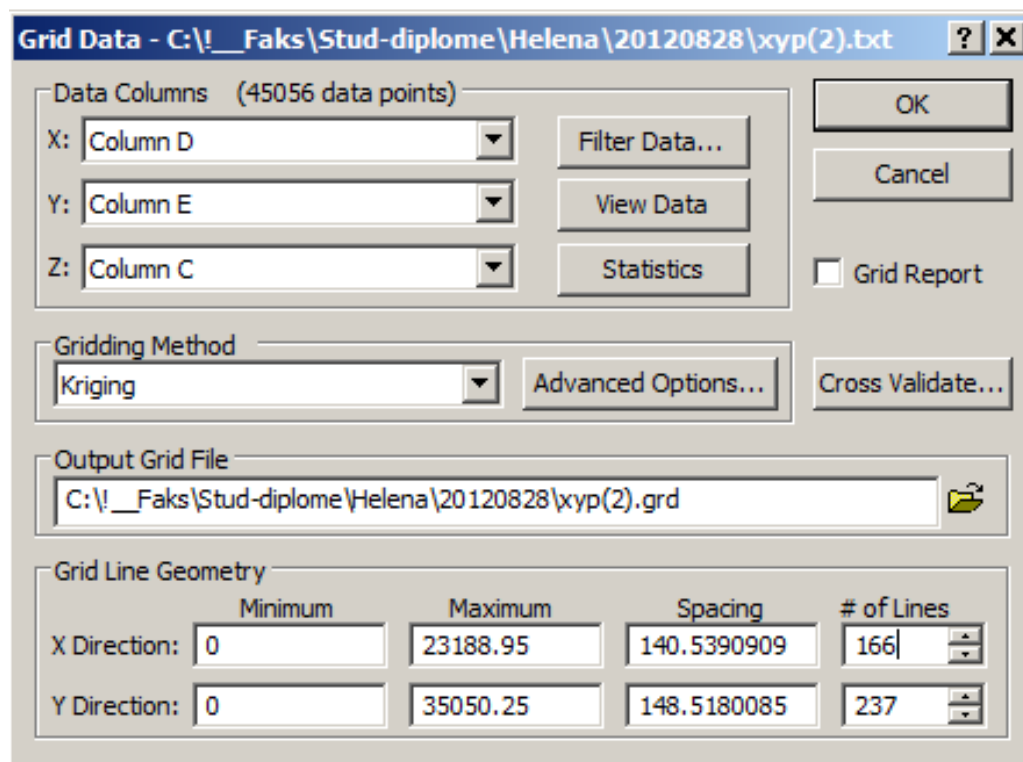
Slika 11: Grafični prikaz rezultatov v programu Wolfram Mathematica.

Omenjen način grafičnega prikazovanja je bil v času nastajanja programa namenjen predvsem za hitro ocenjevanje pravilnosti delovanja programa, zato se nismo ukvarjali z nastavitvijo koordinatnega

sistema. Ker sta koordinati x in y zamenjani, izhodišče pa je levo zgoraj (Slika 11), je slika v primerjavi z realno situacijo »zvrnjena« na desni bok.

Rezultati zapisani v datoteki *xyp.txt* pa so zapisani v stolpcih, tako da so primerni za grafičen prikaz v programu Surfer. Ta lahko namreč izriše rezultate samo pri stolpično podanih vrednostih za smeri X, Y in Z. Postopek za prikaz zelenih rezultatov v tem programu je nekoliko daljši, zato ga je bolje napisati v več korakih.

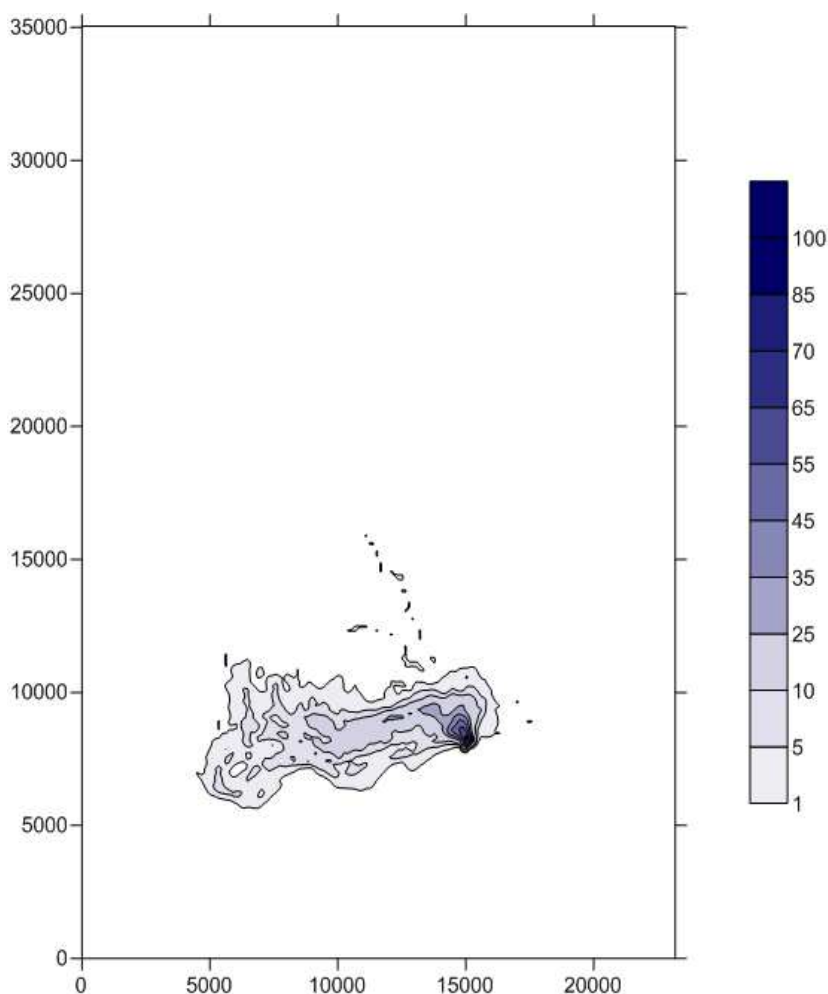
- Odpremo program Surfer in v zgornjem meniju izberemo *Grid* ter nato *Data*.
- Poiščemo datoteko z rezultati (*xyp.txt*). Odpre se nam novo okno in ker so podatki v datoteki ustrezno zapisani, lahko takoj kliknemo *OK*.
- V naslednjem oknu moramo določiti, katere stolpce v datoteki naj program uporabi. V našem primeru moramo za prvi stolpec (x) izbrati *Column D*, za drugi stolpec (y) izberemo *Column E* in za tretji stolpec (z) *Column C*. Nato spodaj nastavimo še geometrijo mreže (Grid Line Geometry). Ta naj bo nastavljena z vrednostmi, ki so prikazane na Sliki 12. Ko je tudi to urejeno, nastavitve potrdimo s klikom na *OK* desno zgoraj. In še enkrat *OK*.



Slika 12: Nastavitev geometrije mreže v programu Surfer.

- Sedaj v zgornjem meniju izberemo *Map/ New in Contour Map*.
- Izriše se grafika, ki jo je potrebno še urediti. Z desnim klikom na sliko se nam odpre meni, v katerem izberemo *Properties*.
- Odpre se nam okno lastnosti, v katerem uredimo nastavitve v prvih dveh zavihkih in po želji tudi v tretjem. V zavihku *General* je smiselno obkljukati vsa tri okenca (*Fill contours*, *Color scale*, *Smooth contours*) in za *Amount* izbrati *Low*. V zavihku *Levels* pa poljubno določimo meje in barve slojev. Ko vse nastavitve uredimo, jih potrdimo z *Apply* in nato *OK*. Slika se posodobi v skladu z nastavitvami, ki smo jih izbrali.

Ta navodila zadoščajo zgolj za osnovni grafični prikaz rezultatov (Slika 13), saj program omogoča še številne druge možnosti, ki jih nismo omenjali. Program Surfer ima namreč zelo široko paleto različnih orodij za urejanje grafike, zaradi česar je za prikazovanje rezultatov širjenja nafte primernejši kot Wolfram Mathematica.



Slika 13: Primer prikaza rezultatov v programu Surfer.

### 3.7 REZULTATI IN DISKUSIJA

V nadaljevanju sta prikazana dva scenarija razlitja nafte na gladini ( $z = 0$ ) na območju Tržaškega zaliva, v realni meteorološki situaciji med 19. in 21. marcem 2009. Resolucija numerične mreže Tržaškega zaliva znaša  $140,58 \times 148,55$  m, njena velikost pa  $176 \times 256$  mrežnih elementov. V prvem scenariju se razlitje zgodi pred Koprskim zalivom, v drugem pa pred pristaniščem v Trstu. Celotni volumen razlite nafte v obeh scenarijih znaša 500.000 kg, uporabljenih pa je bilo 500 delcev, kar zadošča za razmeroma gladke rezultate. Prav tako v vseh primerih razlitje traja 70 ur, tako da so rezultati med seboj primerljivi. Vse izračune smo izvedli na povprečno zmogljivem prenosnem računalniku, v nobenem od spodaj navedenih primerov pa celotni čas izračuna ni presegel devetih minut. Omenjeni čas izračuna bi bil na zmogljivejših računalnikih še bistveno krajši, tako da je z modelom možno v relativno kratkem času narediti večje število simulacij.

Izračunani rezultati širjenja naftnega madeža so v nadaljevanju prikazani znotraj meja območij verjetnostne porazdelitve. Vsa območja v numerični mreži, katerih verjetnosti pojava naftnega madeža so znotraj intervala verjetnosti definiranega sloja, so tako prikazana s tem slojem. Zaradi lažje primerjave rezultatov smo v programu Surfer določili enotno barvno in verjetnostno lestvico teh slojev. Izbrali smo 11 verjetnostnih območij v različnih odtenkih rdeče barve z velikostnimi rangi 5, 10 in 15%, kot je prikazano spodaj.

#### Verjetnostni razredi:

85%  $< P \leq 100\%$

80%  $< P \leq 85\%$

70%  $< P \leq 80\%$

60%  $< P \leq 70\%$

50%  $< P \leq 60\%$

40%  $< P \leq 50\%$

30%  $< P \leq 40\%$

20%  $< P \leq 30\%$

10%  $< P \leq 20\%$

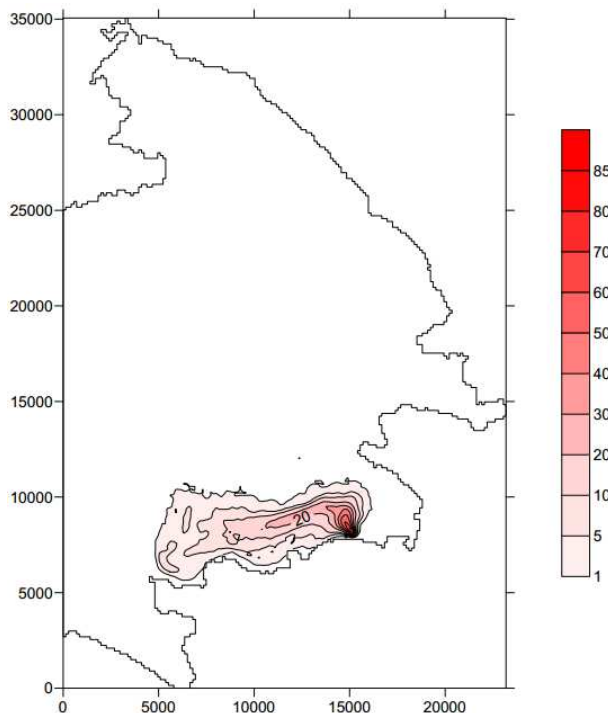
5%  $< P \leq 10\%$

1%  $\leq P \leq 5\%$

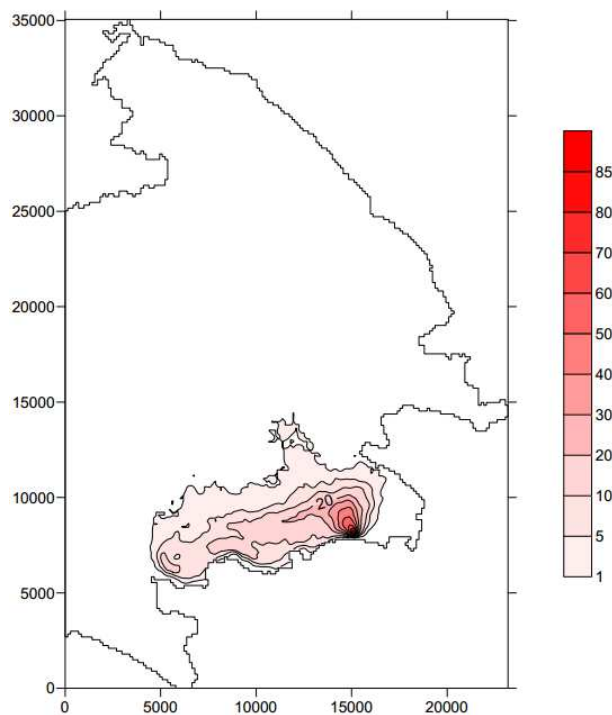
### 3.7.1 Scenarij 1

V prvem scenariju pride do naftnega razlitja pred Koprskim zalivom, na lokaciji  $\varphi = 45,55^\circ$ ,  $\lambda = 13,7^\circ$ . Koordinati razlitja v lokalnem koordinatnem sistemu sta  $x = 15e+03$  in  $y = 8e+03$  in se v podani numerični mreži nahajata v celici (107, 54). Primerjali smo verjetnosti pojava naftnega madeža v času 70 ur po razlitju pri treh različnih vrednostih horizontalnega koeficienta turbulentne difuzije.

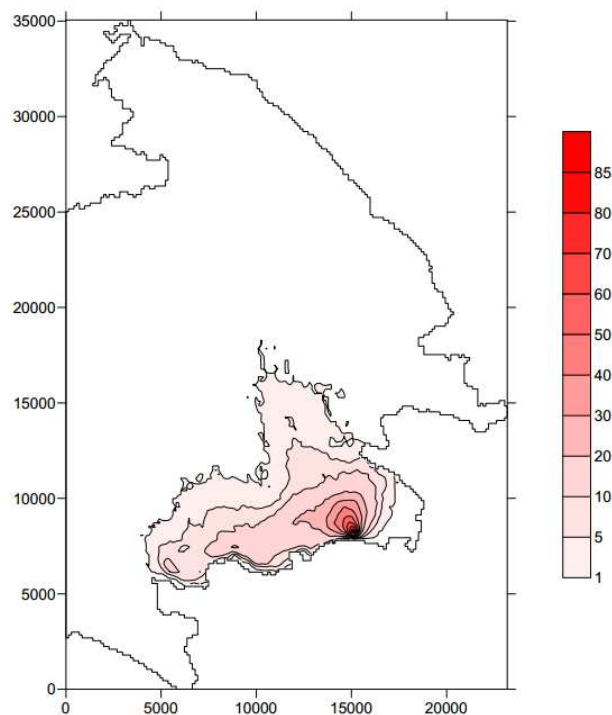
- V prvem primeru smo simulirali širjenje nafte z vrednostjo horizontalnega koeficienta turbulentne difuzije (HD)  $2 \text{ m}^2/\text{s}$  in časovnim intervalom med izračuni minuto in pol (90 s). Dobljeni rezultati po 2.800 časovnih korakih oziroma 70 ur po razlitju so prikazani na Sliki 14.
- V drugem primeru (Slika 15) so prikazane verjetnosti pojava madeža pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije (HD)  $5 \text{ m}^2/\text{s}$  in z definiranim minutnim časovnim intervalom (60 s). V 70 urah od razlitja s takšnim intervalom med izračuni dobimo 4.200 časovnih korakov.
- V tretjem primeru pa smo izbrali vrednost horizontalnega koeficienta turbulentne difuzije (HD)  $10 \text{ m}^2/\text{s}$  in definirali ustrezeni časovni interval 30 s. V končnem času tako dobimo 8.400 časovnih korakov. Verjetnosti pojava madeža v tem primeru so prikazane na Sliki 16.



Slika 14: Verjetnostna polja pojava naftnega madeža 70 ur po razlitju pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije  $2 \text{ m}^2/\text{s}$ .



Slika 15: Verjetnostna polja pojava naftnega madeža 70 ur po razlitju pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije  $5 \text{ m}^2/\text{s}$ .



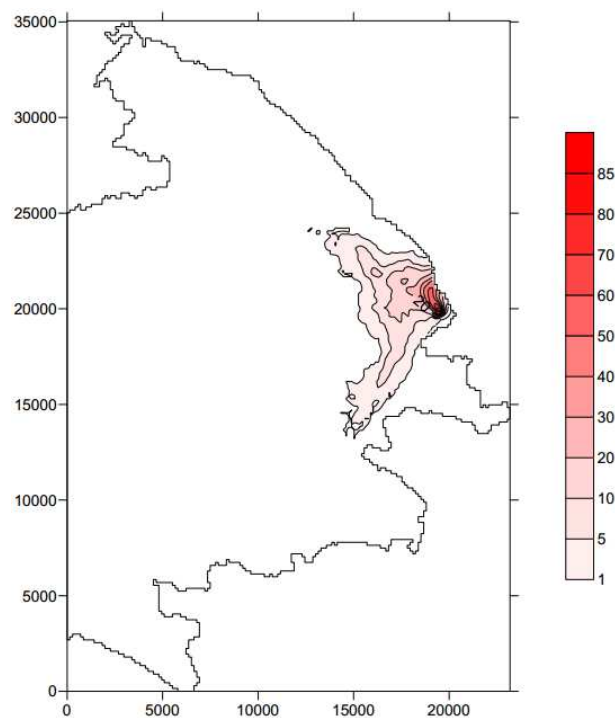
Slika 16: Verjetnostna polja pojava naftnega madeža 70 ur po razlitju pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije  $10 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Iz rezultatov lahko vidimo, da se ob spreminjanju vrednosti horizontalnega koeficienta (HD) spreminjajo tudi verjetnosti pojava nafte na določenih območjih. Značilno za vse tri simulacije je, da so verjetnosti pojava nafte skoraj enake v celicah, ki ležijo v prevladujoči smeri vetra (ENE – WSW). V celicah, ki ležijo izven smeri prevladujočega vetra, pa se pri povečevanju horizontalnega koeficienta turbulentne difuzije verjetnost porazdeli precej drugače. Sklepamo lahko, da je v smeri (ENE – WSW) prevladujoča komponenta, ki vpliva na premikanje naftnega madeža, advekcija, saj spreminjanje turbulentne difuzije pokaže le neznamenit vpliv. Nasprotno pa je v smeri pravokotno na prevladujočo smer vetra prav turbulentna difuzija tista, ki povzroči večje ali manjše širjenje oz. verjetnost, da bo naftni madež dosegel celice, ki so bolj oddaljene od vira. Verjetnosti pojava naftnega madeža so pričakovano najvišje pri samem izlivu, ne glede na vrednost horizontalnega koeficienta turbulentne difuzije. Iz dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da obstaja 70 – 100% verjetnost za pojav nafte v območju 700 m od točke izliva v smeri proti severu ter prav tako velika verjetnost za naplavitev nafte na obalo pri izlivu. Z oddaljevanjem od točke izpusta se razumljivo zmanjšujejo tudi verjetnosti, da se bo nafta tam pojavila. Sklepamo lahko, da se bo v območju z nižjo verjetnostjo pojavila manjša količina razlite nafte.

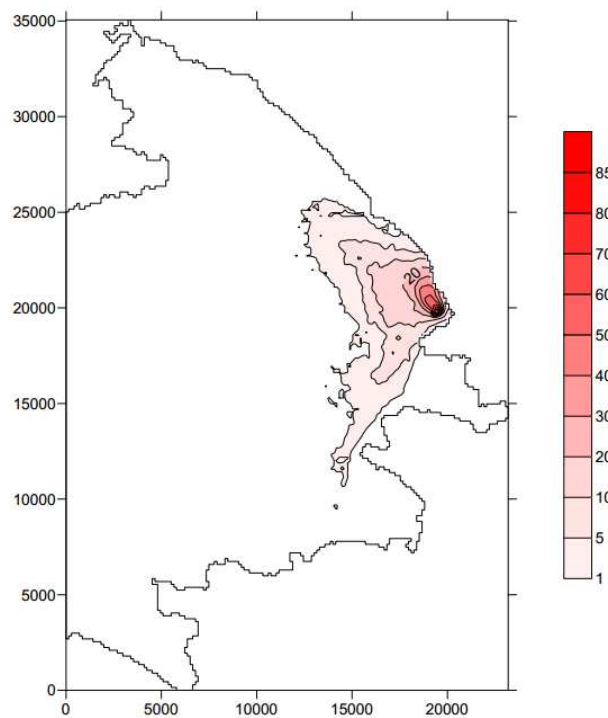
### 3.7.2 Scenarij 2

Tokrat se razlitje zgodi pred pristaniščem v Trstu, na lokaciji  $\varphi = 45,7^\circ$ ,  $\lambda = 13,8^\circ$ . Koordinati razlitja v lokalnem koordinatnem sistemu znašata  $x = 19.4e+03$  in  $y = 19.7e+03$ , v numerični mreži pa točko izliva predstavlja celica (138, 133). Tako kot v prvem scenariju smo tudi tukaj primerjali verjetnosti, da se naftni madež pojavi v določeni celici mreže pri treh različnih vrednostih horizontalnega koeficienta turbulentne difuzije.

- V prvem primeru (Slika 17) smo pri vrednosti horizontalnega koeficienta turbulentne difuzije  $2 \text{ m}^2/\text{s}$  določili časovni interval dolžine minuto in pol (90 s). V 70 urah smo tako dobili 2800 časovnih korakov.
- V drugem primeru (Slika 18), je izbrani horizontalni koeficient turbulentne difuzije  $5 \text{ m}^2/\text{s}$ , za katerega smo določili časovni interval med izračuni eno minuto (60 s), kar v končnem času 70 ur nanese 4.200 časovnih korakov.
- Rezultati pri tretjem primeru pa so nastali pri vrednosti horizontalnega koeficienta turbulentne difuzije  $10 \text{ m}^2/\text{s}$  in z definiranim časovnim intervalom izračuna 30s. Slika 19 tako prikazuje madež po 8.400 časovnih korakih oziroma po 70 urah od razlitja.

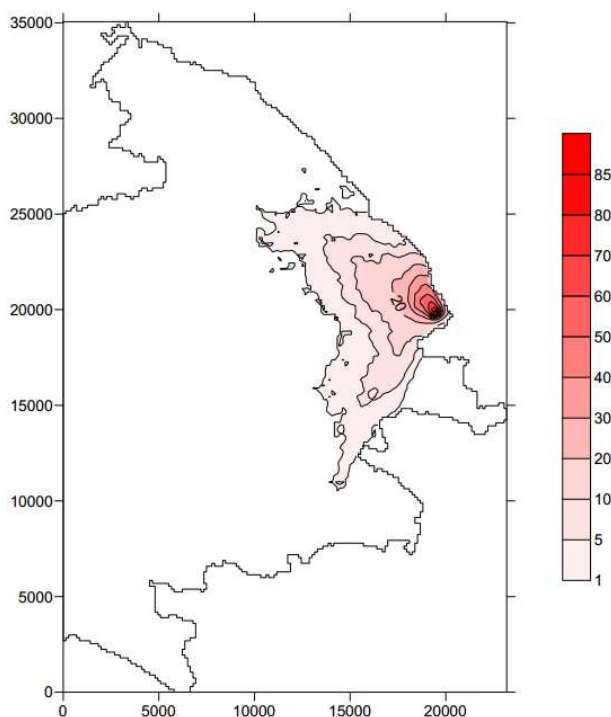


Slika 17: Verjetnostna polja pojava naftnega madeža 70 ur po razlitju pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije  $2 \text{ m}^2/\text{s}$ .



Slika 18: Verjetnostna polja pojava naftnega madeža 70 ur po razlitju pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije  $5 \text{ m}^2/\text{s}$ .





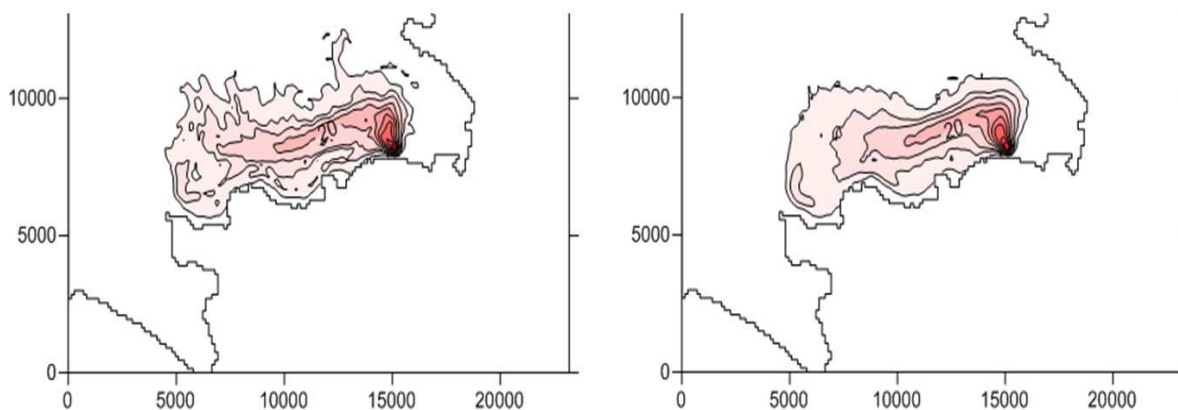
Slika 19: Verjetnostna polja pojava naftnega madeža 70 ur po razlitju pri horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije  $10 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Iz vseh treh primerov je razvidno, da se ob nižjem horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije ( $DH = 2 \text{ m}^2/\text{s}$ ) naftni madež širi predvsem v prevladujoči smeri tokov (ki tokrat niso v značilnih smereh vetra) proti slovenski obali. Z višjim koeficientom turbulentne difuzije pa se, poleg še vedno konstantnega širjenja v smeri tokov, vedno večji del naftnega madeža preusmeri tudi pravokotno na smer prevladujočih tokov, severozahodno proti Italiji. V prvem primeru ( $DH = 2 \text{ m}^2/\text{s}$ ) je obalni pas, ki se ga nafta dotakne, razmeroma kratek, medtem ko je v drugem ( $DH = 5 \text{ m}^2/\text{s}$ ) in tretjem ( $DH = 10 \text{ m}^2/\text{s}$ ) primeru nafta dosegla že precejšen del severovzhodne obale Tržaškega zaliva. V tem primeru lahko ponovno opazimo povečano širjenje zaradi višje turbulentne difuzije predvsem v smeri, pravokotni na prevladujočo smer tokov. Hkrati pa opazimo, da se pri višjem horizontalnem koeficientu turbulentne difuzije poleg lokalne spremembe verjetnosti pojava naftnega madeža poveča tudi verjetnost, da bo nafta dosegla SV obalo Tržaškega zaliva.

### 3.7.5 Diskusija

Na podlagi prikazanih primerov lahko vidimo, da so območja verjetnosti pojava naftnega madeža precej velika za relativno kratek čas simulacije. To v realnosti pomeni, da tudi pri realnem vetru v krajšem časovnem obdobju treh dni rezultati simulacije kažejo, da je zelo malo časa za ukrepanje in omejitev katastrofe. Iz rezultatov izračunov, ki so bili narejeni v okviru diplomske naloge,

ugotavljamo, da so dobljene vrednosti ustrezne in predstavljajo dokaj realno sliko verjetnosti pojava naftnega madeža na obravnavanem območju za obdobje treh dni med 19. in 21. marecem 2009. Rezultati v obeh simuliranih situacijah so sicer pravilni, vendar ne splošno veljavni. Za račun splošno verjetnega prikaza možnosti pojava nafte ob razlitju na nekem območju, bi za to območje potrebovali meteorološke podatke daljšega časovnega obdobja (npr. 1 leto ali več), s katerimi bi lahko nato izračunali ustrezna hitrostna polja. Ker meteoroloških podatkov za obdobje daljše od treh dni nismo mogli zagotoviti v ustrezni resoluciji, prikazani rezultati zadoščajo za prvo preverjanje modela. Kljub omenjenim omejitvam smo uspeli pokazati, da so dobljeni rezultati z modelom po metodi trajektorij primerljivi z rezultati, dobljenimi z modeli dugačnih metod (npr. MSD, Žagar in Četina, 2011). Tako kot je pri modeliranju po metodi sledenja delcev (MSD) pomembno, da simuliramo z dovolj velikim številom delcev, je tudi pri modeliranju z metodo trajektorij zelo pomembno, da širjenje nafte modeliramo z zadostnim številom trajektorij teh delcev. Pri primerjanju širjenja naftnega madeža z različnim številom trajektorij in istimi vhodnimi podatki smo ugotovili, da so polja verjetnosti pojava nafte med seboj različna. Osnovna oblika in smer verjetnosti pojava naftnega madeža se je sicer ohranjala, vendar so bile podrobnosti (robovi med polji verjetnosti) drugačne. Iz Slike 20 lahko vidimo, da so te meje pri modeliranju s trajektorijami 1000 delcev veliko gladkejše kot pri trajektorijah s 100 delci. Popolnoma jasno je namreč, da so statistične verjetnosti za pojav nafte na nekem območju pravilne samo ob dovolj velikem številu upoštevanih trajektorij delcev. Pri simulaciji z dvema trajektorijama bi vedno dobili samo tri območja verjetnosti pojava z vrednostmi 100%, 50% in 0%, takšnih rezultatov pa ne moremo prikazati kot neko splošno verjetnost za pojav naftnega madeža, tudi če smo uporabili ustrezne meteorološke podatke. Pri takšnem številu simuliranih trajektorij bi bilo nespametno trditi, da se nafta na nekem območju ne bo pojavila, ker je izračunana verjetnost na tem območju 0%. Na tem mestu je torej potrebno opomniti, da sta razumevanje in pravilna interpretacija rezultatov ključna pri uporabi takšnega modela.



Slika 20: Zaglajenost robov med območji verjetnosti pojava pri 100 trajektorijah (levo) in pri 1000 trajektorijah (desno).

S številnimi izvedenimi simulacijami ob zadostnem številu trajektorij smo ugotovili, da imajo na določitev verjetnostnih območij pojava nafte največji vpliv meteorološki podatki (hitrostna polja), medtem ko so vplivi ostalih parametrov (npr. turbulentne difuzije) manjši, vendar ne zanemarljivi. Ko bomo imeli na razpolago ustrezne meteorološke podatke celega koledarskega leta, bomo lahko primerjali razlitija v različnih obdobjih in ugotovili, kakšen je tipični meteorološki vpliv na potek širjenja v različnih in različno dolgih časovnih obdobjih.

#### 4 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo predstavili modeliranje širjenja nafte po metodi trajektorij, razložili princip delovanja metode ter samo modeliranje primerjali z modelom NAFTA3d, ki temelji na metodi sledenja delcev (MSD). Delovanje obravnavanega modela trajektorij je zasnovano na statistiki dotika trajektorije in celice numerične mreže. Ta nam ob ustreznih vhodnih podatkih tako omogoči napoved statistične verjetnosti pojava nafte na določenem območju. Glavna razlika med modelom trajektorij in modelom po MSD je torej v tem, da rezultati pri modelu MSD, ki simulira gibanje oblaka delcev, predstavljajo koncentracije nafte na območju širjenja, pri modelu trajektorij pa dobljene vrednosti predstavljajo verjetnosti pojava nafte. Rezultati, dobljeni tako z eno kot z drugo metodo, so primerljivi, vendar pa je čas, ki ga potrebuje posamezen model za izračun, različen. Model po MSD za simulacijo istega dogodka namreč potrebuje precej več časa kot model, ki deluje po metodi trajektorij. Vzrok je v dejstvu, da je računanje koncentracij bistveno bolj zamuden proces kot računanje verjetnosti, v modelu po MSD pa so zajeti tudi nekateri procesi razgradnje nafte. S časovnega vidika je tako izbira modela trajektorij racionalnejša. Kljub tej prednosti pa glavni namen takšnega modeliranja ni v prihranjenem času, temveč v dejstvu, da lahko ob morebitnem razlitju z določeno stopnjo verjetnosti napovemo, kje v prostoru se bo naftni madež pojavil, ter definiramo verjetna kritična območja. Takšne napovedi bi v primeru resničnega razlitja zagotovo pripomogle pri reševanju nastale situacije, saj bi bilo lahko delovanje ustreznih služb, seznanjenih s temi informacijami, učinkovitejše. Pri dejanskih razlitjih pa je, poleg dobrih meteoroloških in drugih podatkov, pomembna tudi pravočasna in pravilna uporaba takšnega modela.

Da smo prišli do zelenih rezultatov, smo v okviru diplomske naloge nadgradili model NAFTA3d ter napisali dodaten program za izračun verjetnosti pojava nafte na nekem območju. Pri nadgradnji smo v modelu »popravili« generator slučajnih spremenljivk, ki je v osnovnem modelu NAFTA3d ob istih vhodnih podatkih podal vedno enako zaporedje naključnih vrednosti, kar je bilo za modeliranje s trajektorijami povsem neuporabno. Naključnost pri omenjeni metodi je namreč bistvenega pomena. Z nadgradnjo smo tako dosegli ustrezno slučajnost dobljenih koordinat posameznega delca, iz teh pa je bilo nato potrebno definirati še trajektorije in izračunati verjetnosti. Ta del naloge prevzame program *Trajectory.java*, ki smo ga napisali v programskem jeziku Java. Program deluje tako, da iz datoteke *traj.txt* prebere dobljene koordinate in poveže vse položaje istega delca ter definira njegovo trajektorijo. Iz vseh tako ugotovljenih trajektorij nato program na osnovi vgrajene numerične mreže s statistiko dotika izračuna verjetnosti pojava za vsako celico posebej. Dobljene verjetnosti pojava program zapiše v novo tekstovno datoteko. Za prikaz rezultatov v programu Wolfram Mathematic smo definirali zapis rezultatov v matrični obliki, kasneje pa smo zaradi želje po prikazovanju rezultatov v

programu Surfer dodali v program še funkcijo za zapis datoteke z rezultati, zapisanimi v stolpcih. Če želimo rezultate tudi grafično prikazati, imamo tako na razpolago dve datoteki in s tem možnost izbire med omenjenima programoma za prikaz.

Delovanje modela po metodi trajektorij je trenutno sestavljeno iz dveh ločenih programov: iz modificiranega modela NAFTA3d in programa, ki smo ga napisali za računanje verjetnosti pojava. V prihodnje bi bilo torej smiselno model NAFTA3d nadgraditi z neposrednim dodatkom – z vgradnjo programa za izračun verjetnosti. Na ta način bi dobili model, pri katerem bi se lahko uporabnik sam odločil med računanjem koncentracij razlitja ali verjetnosti pojava nafte na definiranem območju. Še pomembnejša naloga za v prihodnje pa je pridobitev ustreznih meteoroloških podatkov za daljše časovno obdobje, iz katerih bi lahko izračunali primerna hitrostna polja za daljše simulacije. Rezultati, dobljeni iz meteoroloških podatkov daljšega časovnega obdobja, bi bili tako splošno verjetni, model pa uporaben tudi v praksi.

## VIRI

Ambrožič, T., Turk, G. 2000. Analiza natančnosti določitve koordinat točk v ravninski mreži z metodo Monte Carlo. Geodetski vestnik 44, 1-2: 11-22.

AMEC. 2010. Spill Trajectory Modelling for the Hebron Project. April 2010: 99 str.

Apai, D. 2001. Oil spill fate and trajectory modelling in cockburn sound. Western Australia, Department of Environmental Engineering, University of Western Australia: 101 str.

Delgado, L., Kumzerova E, Martynov, M. 2006. Simulation of oil spill behaviour and response operations in PISCES. WIT Transactions on Ecology and the Environment 88: 279-292.

Drozdowski, A., Nudds, S., Hannah, C. G. in sod. 2011. Review of Oil Spill Trajectory Modelling in the Presence of Ice. Dartmouth, N.S., Bedford Institute of Oceanography: 84 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. Washington, D.C. American Petroleum Institute: 463-468.

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

Fingas, M. 2011. Oil Spill Science and Technology: Prevention, Response, and Cleanup. Part IV - Behaviour of Oil in the Environment and Spill Modeling. USA. Elsevier Inc.: 1149 str.

Galuf, S. 2005. Simulacija razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Galuf): 71 str.

Jeglič, T. 2010. Modeliranje razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Jeglič): 51 str.

Johansen, O. 1985. Particle in Fluid Model for Simulation of Oil Drift and Spread. Part I: Basic Concepts. Oceanographic Center, Sintef Group, Norway Note Number 02.0706.40/2/85.

Lehr, W., Jones, R., Evans, M., in sod. 2002. Revisions of the ADIOS oil spill model. Environmental Modelling & Software 17: 191-199.

Lovrec, D., Kambič, M. 2007. Hidravlične tekočine in njihova nega. Ostale lastnosti hidravličnih tekočin in dodatki. 1. izdaja. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo: 46 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: 361-368.

Shen, H. T., Yapa P. D. 1988. Oil Slick Transport in Rivers. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE: 529-543.

Žagar, D. 1994. Tridimenzijski model za simulacijo širjenja nafte. Magistrska naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Žagar): 68 str.

Žagar, D., Četina, M. 2011. Končno poročilo o izdelavi strokovne naloge NAFTA3d. Poročilo UL-FGG Ljubljana, Katedra za mehaniko tekočin: 22 str.

Žagar, D., Ličer, M., Malačič, M. 2011. Modeliranje razlitja nafte v morskem okolju. Kuhljevi dnevi 2011, Grad Jable. Zbornik del. Ljubljana, Slovensko društvo za mehaniko: 275-289.

Žagar, D., Ramšak, V., Ličer, M., in sod. 2012. Uporaba numeričnih modelov ob razlitjih nafte na morju. Ujma 26. sprejeto v objavo.

ACADEMIC Tutorial. 2008. Random numbers and Monte Carlo simulations (online). Dostopno na naslovu: <http://www.academictutorials.com/fortran/fortran-randomnumbers.asp> (Pridobljeno 20.8.2012.)

EIA. 2012. International energy statistic (online). Dostopno na naslovu: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=5&pid=53&aid=1&cid=ww,&syid=2011&eyid=2011&unit=TBDP> (Pridobljeno 27.6.2012.)

ITOPF. 2011. Technical information papers No. 2. Fate of marine oil spills. Dostopno na naslovu: <http://www.itopf.com/information-services/publications/documents/TIP2FateofMarineOilSpills.pdf> (Pridobljeno 15.7.2012.)

ITOPF. 2012. Oil tanker spill statistics 2011. Dostopno na naslovu: <http://www.itopf.com/information-services/publications/documents/STATSPACK2011.pdf> (Pridobljeno 30.6.2012.)

Kajfež, B. L. 2012. Svet se utaplja v razliti nafti. Polet (online), 16.2.2012. Dostopno na naslovu: <http://www.polet.si/soba-z-razgledom/svet-se-utaplja-v-razliti-nafti> (Pridobljeno 28.6.2012.)

Poremski, H. J. 1998. Life Cycle Assessment - Development Planning through Decommissioning. Texas, Offshore Technology Conference. Dostopno na naslovu: <http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=OTC-8788-MS> (Pridobljeno 5.7.2012.)

Računalništvo 1. 2004. Lekcije. Prvi koraki v Javi. Dostopno na naslovu: <http://andrej.com/java/lekcija01/index.html> (Pridobljeno 25.8.2012.)

RTV SLO, 2010. T.V. Ameriška vlada toži BP za razlitje v Mehiškem zalivu. MMC RTV SLO (online). Washington, MMC RTV SLO, 15.12.2010. Dostopno na naslovu: <http://www.rtv slo.si/svet/ameriska-vlada-tozi-bp-za-razlitje-v-mehiskem-zalivu/246405> (Pridobljeno 26.6.2012.)

Shinzato, T. 2007. Box Muller Method. Dostopno na naslovu: [http://www.lmpt.univ-tours.fr/~nicolis/Licence\\_NEW/08-09/boxmuller.pdf](http://www.lmpt.univ-tours.fr/~nicolis/Licence_NEW/08-09/boxmuller.pdf) (Pridobljeno 28.7. 2012.)

Sotlar Z. Skrb za kakovost slovenskega morja. *Slovensko-morje* (online). Dostopno na naslovu: [http://slovensko-morje.net/?page=info&info\\_id=32](http://slovensko-morje.net/?page=info&info_id=32) (Pridobljeno 26.6.2012.)



**PROGRAMSKA KODA PROGRAMA Trajectory.java**

```
import java.io.File;
import java.io.FileWriter;
import java.io.IOException;
import java.io.PrintWriter;
import java.util.Scanner;

public class Trajectory {

    //velikost mreze xn*yn
    private final static int xn = 176;
    private final static int yn = 256;

    public static void main(String[] args) throws IOException{

        //celica izpusta
        int x_zacetni = 107;
        int y_zacetni = 54;

        //enaDatoteka - true, vec datotek - false
        boolean enaDatoteka = true;

        int[][] table = null;
        table = initTable(xn, yn);

        if(enaDatoteka) {
            //stavilo vseh delcev
            int stDelcev = 500;

            //stevilo casovnih korakov
            int stKorakov = 2800;

            //[delec][korak][x-y]
            double[][][] podatki = new double[stDelcev][stKorakov][2];

            for(int i=0;i<podatki.length;i++)
                for(int j=0;j<podatki[i].length;j++)
                    for(int k=0;k<podatki[i][j].length;k++)
                        podatki[i][j][k] = 0.0;

            Scanner scanner = new Scanner(new File("E:\\Diploma\\20120524\\traj.txt"));
            int korak = 0;
            while(scanner.hasNext()) {
                String line = scanner.nextLine();
                String[] splitLine = line.split(";");

                int delec = Integer.parseInt(splitLine[1].trim())-1;

                //shrani x
                podatki[delec][korak][0] = Double.parseDouble(splitLine[2]);
                //shrani y
                podatki[delec][korak][1] = Double.parseDouble(splitLine[3]);

                if(stDelcev == delec + 1)
                    korak++;
            }

            for(int i=0;i<podatki.length;i++) {
                String fileNo = i + 1 + ".txt";
                int vsiPodatki = 0;

                table = initTable(xn, yn);

                for(int j=0;j<podatki[i].length;j++) {
                    double x = podatki[i][j][0];
                    double y = podatki[i][j][1];

                    int[] results = normiranje(podatki[i][j][0], podatki[i][j][1]);

                    table[results[0]][results[1]] += 1;
                }
            }
        }
    }
}
```

```
        vsiPodatki++;
    }
    System.out.println("vsi podatki: " + vsiPodatki);
    zapisiVDatoteke(fileNo, table, vsiPodatki, xn, yn);
}

} else {

    //normiranje true/false
    boolean normiranje = true;

    final File folder = new File("C:\\Users\\Helena\\Desktop\\program\\Podatki");
    for (final File fileEntry : folder.listFiles()) {
        if(fileEntry.isFile()) {
            Scanner skener = new Scanner(fileEntry);
            System.out.println(fileEntry.getName());
            String fileNo = (String)(fileEntry.getName().split("_")[1]);
            int vsiPodatki = 0;

            table = initTable(xn, yn);

            while(skener.hasNext()) {
                String line = skener.nextLine();

                String[] splitLine = line.split(";");
                if(normiranje) {
                    double c3 = Double.parseDouble(splitLine[2]);
                    double c4 = Double.parseDouble(splitLine[3]);
                    int[] results = normiranje(c3, c4);

                    table[results[0]][results[1]] += 1;

                } else {
                    int x = Integer.parseInt(splitLine[2]);
                    int y = Integer.parseInt(splitLine[3]);
                    //x-vrstica, y-stolpec
                    table[x][y] += 1;
                }
                vsiPodatki++;
            }
            System.out.println("vsi podatki: " + vsiPodatki);
            zapisiVDatoteke(fileNo, table, vsiPodatki);
            skener.close();
        }
    }

    FileWriter fw = new FileWriter("C:\\Users\\Helena\\Desktop\\program\\rezultat\\xyp.txt");
    PrintWriter pw = new PrintWriter(fw);
    FileWriter fw2 = new FileWriter("C:\\Users\\Helena\\Desktop\\program\\rezultat\\mreza.txt");
    PrintWriter pw2 = new PrintWriter(fw2);
    for(int i=0;i<xn;i++) {
        for(int j=0;j<yn;j++) {
            double xi = 70.29+(i)*140.58;
            double yj = 74.275+(j)*148.55;
            if(i+1 == x_zacetni && j+1 == y_zacetni) {
                pw.printf("%d\\t%d\\t%.3f\\t%.3f\\t%.3f\\n", (i+1), (j+1), 100.0, xi, yj);
                pw2.printf("%.3f\\t", 100.0);
            } else if(table[i][j] != 0) {
                double vrjetnost = 0.0;
                vrjetnost = (table[i][j]*100)/noOfFiles;
                pw.printf("%d\\t%d\\t%.3f\\t%.3f\\t%.3f\\n", (i+1), (j+1), vrjetnost, xi, yj);
                pw2.printf("%.3f\\t", vrjetnost);
            } else {
                pw.printf("%d\\t%d\\t%.3f\\t%.3f\\t%.3f\\n", (i+1), (j+1), 0.0, xi, yj);
                pw2.printf("%d\\t", 0);
            }
        }
        pw2.println();
        pw2.flush();
        pw2.flush();
    }
    pw.close();
    System.out.println("konec!");
}
```

```
private static int[][] initTable(int xn, int yn) {
    int[][] table = new int[xn][yn];
    for(int i=0;i<xn;i++)
        for(int j=0;j<yn;j++)
            table[i][j] = 0;

    return table;
}

private static void zapisiVDatoteke(String fileNo, int[][] table, int vsiPodatki) throws IOException {
    double skupnaVerjetnost = 0.0;

    FileWriter fw = new FileWriter("C:\\Users\\Helena\\Desktop\\program\\mreza\\mreza_" + fileNo);
    FileWriter fwtri = new FileWriter("C:\\Users\\Helena\\Desktop\\program\\xyp\\xyp_" + fileNo);
    FileWriter fwbin = new FileWriter("C:\\Users\\Helena\\Desktop\\program\\binar\\binar_" + fileNo);
    PrintWriter pw = new PrintWriter(fw);
    PrintWriter pw2 = new PrintWriter(fwtri);
    PrintWriter pw3 = new PrintWriter(fwbin);
    for(int i=0;i<xn;i++) {
        for(int j=0;j<yn;j++) {
            double vrjetnost = 0;
            if(table[i][j] != 0) {
                vrjetnost = (table[i][j]*100.0)/vsiPodatki;
                skupnaVerjetnost += vrjetnost;
            }
            pw.printf("%.3f\\t", vrjetnost);
            pw2.println((i+1) + "\\t" + (j+1) + "\\t" + vrjetnost);
            if(vrjetnost > 0.0) {
                pw3.println((i+1) + "\\t" + (j+1) + "\\t" + 1);
            } else
                pw3.println((i+1) + "\\t" + (j+1) + "\\t" + 0);
        }
        pw.println();
        pw.flush();
        pw2.flush();
        pw3.flush();
    }
    pw.close();
    pw2.close();
    pw3.close();
    System.out.printf("Skupna verjetnost: %.3f\\n", skupnaVerjetnost);
}

private static int[] normiranje(double x, double y) {
    //normiranje koordinat
    double kx = 140.58;
    double ky = 148.55;

    Double x1 = x/kx;
    int x2 = x1.intValue();
    if(x1-x2 != 0.0)
        x2 = x2 + 1;

    Double y1 = y/ky;
    int y2 = y1.intValue();
    if(y1-y2 != 0.0)
        y2 = y2 + 1;

    int[] results = new int[2];

    //x
    results[0] = x2;
    //y
    results[1] = y2;

    return results;
}
}
```