

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:

Terzić, E., 2015. Modeliranje zadrževalnega časa vode v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Žagar, D., somentor Ličer, M.): 53 str.

Datum arhiviranja: 13-03-2015

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:

Terzić, E., 2015. Modeliranje zadrževalnega časa vode v Tržaškem zalivu. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Žagar, D., co-supervisor Ličer, M.): 53 pp.

Archiving Date: 13-03-2015

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 ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidatka:

ELENA TERZIĆ

**MODELIRANJE ZADRŽEVALNEGA ČASA VODE V
TRŽAŠKEM ZALIVU**

Diplomska naloga št.: 3426/KS

**MODELING RESIDENCE TIME OF WATER IN THE
GULF OF TRIESTE**

Graduation thesis No.: 3426/KS

Mentor:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

dr. Matjaž Ličer

Ljubljana, 05. 03. 2015

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Elena Terzić izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
»**Modeliranje zadrževalnega časa vode v Tržaškem zalivu**«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 2015

Elena Terzić

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 004.4:532.5:665(262.3)(043.2)

Avtor: Elena Terzić

Mentor: izr. prof. dr. Dušan Žagar

Somentor: dr. Matjaž Ličer

Naslov: Modeliranje zadrževalnega časa vode v Tržaškem zalivu

Obseg in oprema: 53 str., 2 pregl., 28 sl., 28 en.

Ključne besede: zadrževalni čas, vertikalni koeficient turbulentne difuzije, model Nafta3D, vpliv vetra, Tržaški zaliv, severni Jadran

Izveček

Z Lagrangevim modelom Nafta3D smo izvedli simulacije zadrževalnega časa vode v Tržaškem zalivu na osnovi hitrostnih polj, pridobljenih z modelom NAPOM. Model Nafta3D smo prilagodili drugačnemu vnosu hitrostnih polj in drugačni začetni porazdelitvi delcev. Račune smo izvedli s hkratnim umerjanjem vertikalnega koeficienta turbulentne difuzije (D_v) za vsako simulacijo posebej s povprečnimi dnevnimi hitrostnimi polji za leto 2012. Razpon možnih zadrževalnih časov za posamezno obdobje računa smo izračunali po metodi drsečega zaporedja intervalov. Določili smo tudi okvirne sezonske vrednosti zadrževalnih časov in območja ustreznih D_v . Zadrževalni čas v obdobjih močnega vetra znaša približno 5 dni, v obdobjih šibkega vetra pa nad 20 dni. Primerjali smo število preostalih delcev v računskem območju v slojih ob gladini in pri dnu in pokazali, da je pri šibkem vetru zadrževalni čas vode v pridnenih slojih veliko daljši kot v slojih ob gladini. Izvedli smo še enostavno statistično analizo in preverili morebitno povezavo med jakostmi vetrnih napetosti in zadrževalnimi časi. Gre za prvi poskus tovrstnega modeliranja v Tržaškem zalivu, zato predstavlja naloga predvsem osnovo za nadaljnje raziskave, hkrati pa smo pokazali tudi pomanjkljivosti modela Nafta3D, ki jih je potrebno odpraviti za izvedbo zanesljivejših simulacij zadrževalnega časa v prihodnje.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**UDC: 004.4:532.5:665(262.3)(043.2)****Author: Elena Terzić****Supervisor: Assoc. Prof. Dušan Žagar, Ph.D.****Co-supervisor: Matjaž Ličer, Ph.D.****Title: Modeling residence time of water in the Gulf of Trieste****Notes: 53 p., 2 tab., 28 fig., 28 eq.****Key words: residence time, vertical coefficient of turbulent diffusivity, model Nafta3D, wind impact, Gulf of Trieste, Northern Adriatic****Abstract**

The Lagrangian model Nafta3D and the velocity calculated with the NAPOM model were used to compute the residence time of water in the Gulf of Trieste. The Nafta3D model had to be upgraded by adjusting the input of velocity fields and the initial distribution of particles. All simulations required manual calibration of the vertical turbulent diffusivity coefficient (D_v). Daily averaged velocity fields for the entire year 2012 were used in simulations. The range of possible residence times was computed using the moving sequence approach. The approximate seasonal range of residence times was determined together with the corresponding range of D_v . Within the high wind periods the residence time is about 5 days; it exceeds 20 days in low wind periods. The number of residual particles along the water column was determined in order to prove that in low wind conditions the residence time in the surface layers is significantly lower compared to the bottom layers. A simple statistical analysis was performed in order to determine possible relationship between the surface wind stress and the residence time. As the first attempt of residence time modelling in the Gulf of Trieste, the thesis represents a valuable basis for further research. Furthermore, we pointed out the necessary improvements in the Nafta3D model for more accurate computations of the residence time in the future.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVA O AVTORSTVU	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VI
KAZALO SLIK	VII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	X
1 UVOD	1
2 METODOLOGIJA	5
2.1 Zadrževalni čas	5
2.2 Hidrodinamični modeli in simulacije	10
2.3 Model in simulacije zadrževalnega časa	13
2.3.1 Opis računske domene	13
2.3.2 Teoretične osnove modela Nafta3D	18
2.3.3 Modifikacije modela Nafta3D	21
2.3.4 Uporaba modelov turbulence	22
2.3.5 Umerjanje vertikalnega koeficienta turbulentne difuzije D_v	24
2.4 Vhodni podatki in postopek računa	29
2.5 Povezava vetrnih napetosti in zadrževalnega časa	32
3 REZULTATI IN DISKUSIJA	34
3.1 Zadrževalni čas v celotnem vodnem stolpcu	34
3.2 Zadrževalni čas ob gladini in ob dnu	41
3.3 Povezava zadrževalnih časov z vetrnimi napetostmi	44
4 ZAKLJUČKI	48
VIRI	50

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Prikaz izvedenih simulacij po datumu začetka in izračunanih zadrževalnih časov glede na umerjene D_v . Prikazujemo še minimalne in maksimalne vrednosti D_v ter pripadajoče zadrževalne čase. V zadnjem stolpcu je podana tudi relativna vrednost odstopanja $T_{Rmax} - T_{Rmin}$ glede na izračunani T_R	36
Preglednica 2: Rezultati regresijskih premic ob analizi korelacije med zadrževalnimi časi in vetrnimi napetostmi. Najboljša povezava se izkaže v primeru burje (točki 4.3 in 5.3). Manjkajoče vrednosti v točkah 4.1, 4.4, 5.1 in 5.4 so posledica premajhnega števila podatkov.	45

KAZALO SLIK

Slika 1: Trije mehanizmi mešanja delcev znotraj zaliva: primer (a) prikazuje obnovitev celotne, primer (b) pa dela vodne mase brez upoštevanja mešanja med vtokom in obstoječo vodo; primer (c) ponazarja popolno mešanje obstoječe in vtočne vode (Knauss, 1997).....	8
Slika 2: σ vertikalni koordinatni sistem – potek slojev v prerezu pri uporabi σ -koordinat	11
Slika 3: Zveza med σ in z koordinatami v grafični obliki.....	11
Slika 4: Satelitski posnetek Tržaškega zaliva. Navidezna črta zelene barve ponazarja približno zunanjo mejo zaliva, vertikalna črta oranžne barve pa označuje mejo računskega območja v modelu (vir: Google Earth, januar 2015).	13
Slika 5: Batimetrija severnega Jadrana, ki je uporabljena v modelu NAPOM. Na abscisni osi je podana geografska dolžina, na ordinatni pa geografska širina območja. Merska lestvica desno od slike ponazarja globino dna. V Tržaškem zalivu je opazno plitvo priobalno območje ob severni obali, globlje območje v sredini zaliva, največjo globino (nad 38 m) pa Tržaški zaliv doseže ob piranski Punti.....	15
Slika 6: Slike numerične mreže, postavljene na območju severnega Jadrana (modela NAPOM in Nafta3D). Pravokotnika v zgornjem desnem kotu prikazujeta območje Tržaškega zaliva, kjer smo računali zadrževalni čas.	16
Slika 7: Slika numerične mreže na območju Tržaškega zaliva. Manjši pravokotnik označuje območje začetne postavitve delcev, večji pa območje deaktivacije delcev (ko zapustijo Tržaški zaliv).....	17
Slika 8: Komponente hitrosti delcev (povzeto po Žagar in Četina, 2011)	19
Slika 9: Koutitasov (Koutitas in O'Connor, 1980) in parabolčno-konstantni (Žagar, 1999) model D_v	23
Slika 10: Prvi računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. 12 minut po začetku število delcev v prvem sloju pade za 5,6%.....	25
Slika 11: Šestnajsti računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. 3 ure po začetku število delcev v vrhnjem sloju pade za 10,5%, kar nakazuje na to, da je izbrani D_v premajhen.....	25
Slika 12: Zadnji računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Opazno je močno tonjenje delcev, največ v globini 17 do 18 m.	26
Slika 13: Petnajsti računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. V vrhnjem sloju se število delcev že po 3 urah poveča za 4,3% glede na začetno stanje.	27
Slika 14: Zadnji računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Delci so po globini razporejeni enakomerneje glede na primer z $D_v = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ in ni opaziti izrazitejšega tonjenja.	27

Slika 15: Trinajsti računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. 2 uri in 36 min po začetku simulacije se pojavi maksimalno splavanje delcev v vrhnji sloj, ki znaša zgolj 0,27%, zato je bil ta D_v izbran kot najustreznejši.	28
Slika 16: Zadnji računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Povečano število delcev je opazno v sloju 16-17 m, kjer je velika stična površina med vodo in dnom Tržaškega zaliva.	28
Slika 17: Prikaz okna v Ukaznem pozivu ob zaključku simulacije, v tem primeru 29.1.	30
Slika 18: Tabelarni prikaz rezultatov simulacije, začete 15.2. V prvih dveh vrsticah je podan začetek in konec simulacije v različnih časovnih enotah (čas 0 pomeni 8. Januar ob 0:00) s skupnim številom delcev. V naslednjih vrsticah je prikazano število aktivnih delcev po slojih glede na začetno število.	31
Slika 19: Obdelava vhodnih in izhodnih podatkov, primer simulacije, začete 15.2. Zadrževalni čas T_R izračunamo, datum začetka prihodnje simulacije pa postavimo za polovico pravkar izvedene simulacije nazaj. V srednjem delu preglednice so prikazani deleži delcev po slojih pri preizkušeni D_v , pod tem pa delež največjega povečanja števila delcev v kritičnem sloju ob umerjanju D_v . Spodnji del prikazuje izračun potrebnega TRAC, tj. končnega časa simulacije (v tabeli podanega v urah), in sicer glede na predvideno trajanje simulacije.	31
Slika 20: Primer računa povprečne dnevne vetrne napetosti v programu Matlab. V levem podoknu so podane matrike (*.mat datoteke), ki vsebujejo podrobne podatke komponent vetrnih napetosti (wus_t – napetost v u -smeri, wvs_t – napetost v v -smeri). Povprečno dnevno vrednost za posamezni dan dobimo z ukazoma <code>umean</code> in <code>vmean</code> , prikazanima v desnem ukaznem podoknu.	33
Slika 21: Intervalni prikaz umerjenih D_v (od zgoraj navzdol) in izračunanih T_R (od spodaj navzgor).	37
Slika 22: Grafični prikaz izračunanih T_R (po ordinati od spodaj navzgor) in povprečnih vetrnih napetosti ter njihovih standardnih deviacij v posameznih obdobjih računa (od zgoraj navzdol). Do največje razpršenosti jakosti vetrnih napetosti prihaja v obdobju močne burje konec januarja, maja in konec julija.	39
Slika 23: Maksimalno odstopanje od začetnega števila delcev pri izbranem D_v je obravnavano v 5 m debelih slojih na začetku vsake simulacije. Število delcev v spodnjih 10 m globine se od aprila naprej izrazito povečuje. Vrh doseže 18. septembra. Prikazane so še jakosti vetrnih napetosti in njihove standardne deviacije v posameznih obdobjih.	40
Slika 24: Preostalo število delcev ob gladini (0-10 m) in pri dnu (10-25 m) ob koncu posamezne simulacije. Na sekundarni ordinatni osi so podani izračunani T_R	43
Slika 25: Zveza med vetrnimi napetostmi in zadrževalnimi časi, upoštevamo vse rezultate (absolutne vrednosti jakosti vetra).	46

Slika 26: Zveza med šibkejšimi (absolutnimi) vetrnimi napetostmi (pod $0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$) in zadrževalnimi časi. Regresijska premica ima naraščajoč trend, za kar ni fizikalne utemeljitve.	46
Slika 27: Zveza med močnejšimi (absolutnimi) vetrnimi napetostmi (nad $0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$) in zadrževalnimi časi.	47
Slika 28: Zveza med vetrnimi napetostmi in zadrževalnimi časi v primeru vetra iz tretjega kvadranta izkazuje najvišjo korelacijo med spremenljivkama.	47

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

A_i	koeficient horizontalne ali vertikalne turbulentne difuzije
B_i	računska ploskev
C_D	koeficient vleka (<i>drag coefficient</i>)
DET	časovni korak
D_h	horizontalni koeficient turbulentne difuzije
dt (Δt)	časovni interval ali računski korak
DTP	časovni inkrement med hitrostnimi polji u , v , w
D_v	vertikalni koeficient turbulentne difuzije
$D_{v\ max}$	maksimalna vrednost vertikalnega koeficienta turbulentne difuzije po Koutitasu, odvisna od hitrosti vetra na gladini
E	zadrževalni čas
h	debelina sloja
H	globina vode, merjena glede na topografijo in batimetrijo dna
η	odstopanje površinskega sloja vode nad povprečno gladino, ali brezdimenzijska razdalja do dna
i	indeks smeri oz. koordinatne osi
n	število enot obravnavane snovi (vodnih delcev) na enoto volumna
N	skupno število enot obravnavane snovi (vodnih delcev)
N_F	število hitrostnih polj
N_h	horizontalni koeficient turbulentne viskoznosti
N_I	število kontrolnih volumnov v smeri x
N_J	število kontrolnih volumnov v smeri y
N_K	število kontrolnih volumnov v smeri z
$NPZAC$	indeks prvega hitrostnega polja
N_v	vertikalni koeficient turbulentne viskoznosti

N_W	število vetrnih parov
p	tlak
ρ_i	gostota kapljevine
ρ_{zraka}	gostota zraka
r	radijvektor oz. pozicija delca v določenem časovnem koraku
S	slanost
S_{in}	slanost vtekajoče vode
S_{out}	slanost iztekajoče vode
σ	krivočrtna vertikalna koordinatna os v modelu POM (NAPOM)
t	čas
T_{in}	vtok
T_{out}	iztok
T_R	zadrževalni čas
$TRAC$	končni čas simulacije
u	komponenta hitrosti v smeri osi x
u^*	deterministična komponenta hitrosti u (adveksijska hitrost)
u^{**}	stohastična komponenta hitrosti u
u_L^{**}	naključno velika hitrost v smeri vektorja u^*
u_T^{**}	naključno velika hitrost pravokotno na vektor u^*
U_{10}	hitrost vetra 10 metrov nad gladino vode
v	komponenta hitrosti v smeri osi y
w	komponenta hitrosti v smeri osi z
w^{**}	stohastična komponenta hitrosti v smeri osi z
v_i	komponenta hitrosti normalno na ploskev B_i
ω	komponenta hitrosti normalno na os σ

1 UVOD

Pričujoča naloga obravnava izračun zadrževalnega časa vode v Tržaškem zalivu, doslej na tem območju še neraziskane kategorije. Splošno bi lahko zadrževalni čas ali »residence time« definirali kot povprečni čas, v katerem se vodni delci nahajajo oz. zadržijo na obravnavanem območju. Kvaliteta vode v (pol)zaprtih estuarijih in zalivih je močno odvisna od zadrževalnega časa, ki nam lahko poda tudi vpliv posameznih transportnih mehanizmov, kot so veter, plimovanje, rečni vtoki in gostotni tokovi.

Področje uporabe zadrževalnega časa zajema razmeroma širok spekter problemov, kot je denimo razmerje med časovnima velikostnima redoma fizikalnih in biogeokemičnih transportnih procesov, kar pomembno vpliva na masno bilanco morskih organizmov v zalivih, njihovo dinamiko in kemične značilnosti (Choi in Lee, 2004), prav tako pa na širjenje in količino onesnažil, ki je običajno obratno sorazmerna hitrosti cirkulacije. Vpliva tudi na transport sedimentov in plavin. Količina fito- in zooplanktona je nizka, če je zadrževalni čas krajši od reprodukcijskega časa mikroorganizmov (Basu in Pick, 1996). Vplivi se kažejo še pri variabilnosti toplotne stratifikacije jezer (Hamilton in Lewis, 1987), alkalnosti (Eshleman in Hemond, 1988), koncentracijah težkih kovin in hranil (Hecky et al., 1993), stopnji mineralizacije organskih snovi (den Heyer in Kalff, 1998), koncentraciji raztopljenega ogljika (Christensen et al. 1996), sestavi izotopov (Herczeg in Imboden, 1988) ipd. Ob daljših zadrževalnih časih je na zaprtih ali polzaprtih območjih evtrofnost višja (Cercu in Cole, 1993) – lahko se pojavi »cvetenje alg«, tj. povečanje količine biomase v vodi kot posledica visoke koncentracije anorganskih hranil (nitrato in fosfatov), ki prispevajo k hitrejšemu razmnoževanju modrozelenih cepljivk. Takrat je koncentracija kisika nizka in pogosto nezadostna za vitalno funkcioniranje številnih organizmov. Lokalni vplivi onesnažil zaradi aktivnosti ribogojnic (neporabljena ribja hrana, patogene bakterije, bolezni) so prav tako odvisni od dolžine zadrževalnega časa – ob krajših zadrževalnih časih je njihov vpliv manjši.

V splošnem je zadrževalni čas obravnavanega sistema zapletena funkcija večjega števila dejavnikov: števila rečnih izlivov in njihovega pretoka, plimovanja, topografije in batimetrije, gostotne stratifikacije in vetra (Choi in Lee, 2004; Ascione et al., 2012).

V dosedanjih raziskavah je bilo uporabljenih več principov za računski pristop k problemu, pri čemer je nujno upoštevati razkorak med dejanskim in idealiziranim stanjem (Monsen et al., 2002) ter lokalne posebnosti oz. specifiko obravnavanega območja, saj se podatki in rezultati od primera do primera razlikujejo za cele velikostne rede.

Začetki določanja zadrževalnega časa segajo v petdeseta leta prejšnjega stoletja. Prvi računi so bili izvedeni po metodah plimske prizme (tj. volumnu vode, ki se izmenja ob plimnem ciklu) in masne bilance soli (Ketchum, 1951; Dyer, 1973). Pri prvi metodi je bilo sprva predvideno popolno mešanje znotraj obravnavanih segmentov, zato so bili zadrževalni časi precej krajši od dejanskih. Kasneje so bile izvedene številne izboljšave računskih metod, vendar kljub temu še do nedavnega ni bilo mogoče v celoti upoštevati gostotne stratifikacije in učinka strižne disperzije (Choi in Lee, 2004). Pri metodi masne bilance soli (Dyer, 1973; Fischer et al., 1979) lahko zadrževalni čas ocenimo na podlagi geometrije estuarija oz. zaliva ter pri natančnih podatkih glede slanosti in dolgoletnega povprečja rečnih pretokov (frakcija sveže vode se izračuna kot razmerje slanosti sveže vode in slanosti izven estuarijskega ustja). Natančnost računa se zmanjšuje z manjšanjem gradienta slanosti ob obali, kar se dogaja denimo v primeru majhnega rečnega vtoka in ob shranjevanju deževnice v rezervoarjih).

Z razvojem hidrodinamičnih in transportno-disperzijskih numeričnih modelov je že konec prejšnjega stoletja narasla tudi uporaba zahtevnejših numeričnih metod (Prandle, 1984; Choi et al., 1989; Signell in Butman, 1992; Luff in Pohlmann, 1995). Za razliko od starejših načinov numerično modeliranje omogoča upoštevanje večjega števila parametrov, ki so bili pred tem zaradi poenostavitve analitičnega računa izpuščeni. S pomočjo sprva 2D, nato tudi 3D hidrodinamičnih modelov dobimo, ob upoštevanju vremenskih in drugih ustreznih podatkov za določeno časovno obdobje, natančnejšo tokovno sliko. Temeljna ideja numeričnega modeliranja zadrževalnega časa po Lagrangevi metodi (metoda sledenja delcev, MSD oz. particle tracking method, PTM) je, da z upoštevanjem vnaprej izračunane cirkulacije sledimo masi vodnih delcev. Prednost te metode je v ohranitvi informacije o izvoru posameznih delcev in njihovem sledenju tokom simulacije. Tako lahko izračunamo zadrževalni čas T_R kot funkcijo prostora – krajši T_R v bližini območja pod vplivom rečnih režimov in v stiku zaliva z odprtim morjem (Braunschweig et al., 2003).

Kljub razvoju tehnologije, ki omogoča vedno bolj sofisticirano modeliranje in približevanje realnim razmeram, je še precej neznank in možnih izboljšav. Že Choi in Lee (2004) sta skušala ugotoviti, kakšna je odvisnost zadrževalnega časa od gostotne stratifikacije in turbulentne difuzije (slednje se je izkazalo tudi kot ključni problem naše naloge), kolikšen je optimalni delež preostalih začetnih vodnih delcev, ki ponazarja najboljši približek realni cirkulaciji ter korelacijo med numerično in analitično (po metodi masne bilance soli) dobljenimi rešitvami. Podobno so tudi Wang, Ksu in Kuo (2004) ter portugalsko-španska skupina raziskovalcev (Ascione et al., 2012) skušali določiti vpliv posameznih transportnih mehanizmov na zadrževalni čas, kjer so podrobneje preučili plimovanje, rečni vtok in gostotno stratifikacijo. V drugem poročilu (Ascione et al., 2012), ki se navezuje na

zahodnoevropska pristaniška območja, je bil poudarek na vplivu plimovanja. Za estuarije izpostavljene močnejšemu plimovanju je predpostavljeno, da je zadrževalni čas dosežen v trenutku, ko 80% prvotnih delcev zapusti območje, za pristanišča z zanemarljivim učinkom plimovanja pa delež znaša 63%. V estuariju tajvanske reke Danushei plimovanje v izbranih razmerah tako prispeva kar 50% celotnega vpliva (Wang et al, 2004).

Za Tržaški zaliv zadrževalni čas še ni bil izračunan. Pretekle študije so na tem območju vključevale številne modele in njihove izboljšave. Na UL FGG npr. že dve desetletji razvijamo modele širjenja naftnih madežev, zadnja verzija je model Nafta3D (Žagar in Četina, 2011). Prvi uporabni tridimenzionalni model po MSD pa je bil izdelan že leta 1992 (Širca, 1992), dve leti kasneje (Žagar, 1994) pa je bil vgrajen v hidrodinamični model PCFLOW3D (Četina, 1992; Rajar et al., 1997). Naknadno je bil model MSD posodobljen z novimi grafičnimi vmesniki (Galuf, 2005), v zadnjih letih pa je nadgradnja vključevala izpopolnitev z nekaterimi pomembnimi procesi razgradnje nafte (Žagar in Četina, 2011) in (v sodelovanju z NIB) povezavo modela Nafta3D s cirkulacijskimi modeli POM (Princeton Ocean Model). Sklopitev modelov je omogočila numerično modeliranje zadrževalnega časa. V pripravi je tudi nadgradnja dvodimenzionalnega Eulerjevega modela (Jeglič, 2010) z metodo Lattice-Boltzmann, ki je pri simulacijah kar nekajkrat hitrejša od podobnih računskih metod (Maslo et al., 2014). Trenutno se Agencija RS za okolje (v sodelovanju z NIB) ukvarja z vzpostavitvijo modelske verige, ki vključuje hidrološki model za vodnatost Save in Soče, valovni model SWAN ter oceanski model POM, h kateremu je po potrebi priključen še model razlitja onesnažil Nafta3D (Ličer et al., 2012).

Vsi naštetih modeli, zahvaljujoč njihovemu konstantnemu nadgrajevanju, omogočajo vedno natančnejše simulacije številnih problemov. Za dolgotrajno simulacijo transporta in disperzije živega srebra je bil dopolnjen obstoječi tridimenzionalni matematični model PCFLOW3D (Žagar et al., 2001), s katerim so bile izvedene tudi simulacije vpliva krajevno spremenljivega vetra na tokovno sliko zaliva (Maslo, 2009). Z modelom MITgcm, ki za hidrodinamiko uporablja POM, je bila izvedena numerična študija vetrnega vpliva na cirkulacijo v primeru močne burje (Crise et al., 2006). Tri leta kasneje je bila objavljena študija sezonske variabilnosti tokov v južnem delu Tržaškega zaliva s primerjavo meritev na boji in vrednosti, dobljenih s pomočjo numeričnega modela POM (Bogunović in Malačič, 2009).

Današnje modelne simulacije hidrodinamike se izvajajo praktično v realnem času (Ličer et al., 2012) in so zadovoljive natančnosti, tako da jih je mogoče uporabiti tudi za račun T_R . Pri tem nas je motiviralo več dejavnikov. Iz urnih klimatoloških hitrostnih polj, izračunanih z modelom NAPOM, so podana povprečna dnevna hitrostna polja za 336 dni v letu 2012. S prireditvijo modela Nafta3D bomo ob umerjanju vertikalnega koeficienta turbulentne difuzije

po metodi sledenja delcev (MSD) z drsečim zaporedjem intervalov skušali izračunati razpon vrednosti verjetnih zadrževalnih časov in s tem ugotoviti tudi značilne sezonske vrednosti za leto 2012. Gre za prvi poskus tovrstnega modeliranja na danem območju, zato bi lahko kot enega od ključnih ciljev označili postavitev platforme za nadaljnje raziskave, ki bi potrdile oz. zavrgle določene ugotovitve in osvetlile možne smeri izboljšav tako modela kakor tudi same metodologije. Zadrževalni čas bi lahko bil obenem tudi pomemben indikator kakovosti morja in razvoja biokemičnih procesov (količina planktona, evtrofnost ipd.).

Delovne hipoteze:

- (1) Zadrževalni čas T_R se razlikuje glede na letni čas in vremenske razmere.
- (2) Zadrževalni čas T_R se razlikuje po globini – ob dnu zastaja znatno večja količina vode kot v vrhnjih slojih.
- (3) Korelacija jakosti vetra in zadrževalnega časa T_R nam bo pokazala, da je ob močnejšem vetru krajši T_R in obratno.

Cilji naloge so:

- (1) Izračunati zadrževalne čase pri podanih dnevni hitrostnih poljih,
- (2) Ugotoviti razpon možnih rešitev glede na vertikalni koeficient turbulentne difuzije,
- (3) Ugotoviti kakšne so okvirne sezonske vrednosti T_R ,
- (4) Primerjati dobljene vrednosti T_R po globini – ali je ob dnu število zastalih delcev res večje kot pri gladini,
- (5) Preveriti povezavo med jakostjo vetra in zadrževalnim časom.

2 METODOLOGIJA

2.1 Zadrževalni čas

Zadrževalni čas lahko v splošnem označimo kot čas, v katerem se vodni delci nahajajo v obravnavanem območju. V preteklih 60 letih, odkar je pojem v uporabi, se skuša ugotoviti optimalni delež preostalih delcev (50%, e^{-1} , 10%, 20% začetnega števila) kot najustreznejši približek realni cirkulaciji in postaviti ustrezno definicijo zadrževalnega časa na različnih območjih v odvisnosti od transportnih mehanizmov, ki ključno vplivajo na cirkulacijsko sliko določenega zaliva ali estuarija.

Knauss (1997) za ilustracijo podaja primer Sredozemskega morja, ki ima prek Gibraltarske ožine edini stik z odprtim morjem. Celotna vodna masa je razdeljena na podobmočja volumna V , pri tem pa je predpostavljeno, da sta tako gostota kakor slanost konstantni. Gre za poenostavljen račun neto masnega in volumnskega pretoka, potrebnih za osnovni račun zadrževalnega časa, kjer se Gibraltarska ožina upošteva kot edino območje izmenjave morske vode, četudi je singularni iztok realno gledano funkcija vseh lokalnih prispevkov. Obe vrednosti sta dobljeni prek sistema dveh kontinuitetnih enačb z dvema neznankama za stalni tok (upoštevajoč zakon o ohranitvi mase):

$$-\sum B_i \rho_i v_i + \sum A_i B_i \left(\frac{\partial \rho}{\partial n} \right)_i = 0 \quad (2.1.1)$$

$$-\sum B_i S_i v_i + \sum A_i B_i \left(\frac{\partial S}{\partial n} \right)_i = 0 \quad (2.1.2)$$

Oznake v enačbah pomenijo: i – indeks smeri oz. koordinatne osi, ρ_i in v_i - gostota in komponenta hitrosti normalno na ploskev B_i , A_i – koeficient horizontalne ali vertikalne turbulentne difuzije, S - slanost. Člen $B\rho v$ predstavlja razmerje med maso in časom ali masni pretok, Bv pa kvocient volumna in enote časa ali volumnski transport. Problem je dalje poenostavljen z upoštevanjem konstantnih slanosti in gostote (v vrednosti okoli 1 t/m^3), zato sta druga člena v enačbah (2.1.1) in (2.1.2) enaka nič. Vrednosti masnega in volumnskega pretoka se lahko enačita z oznako T_i , saj je številčna vrednost masnega pretoka v tonah na sekundo približno enaka vrednosti volumnskega transporta v kubičnih metrih na sekundo. Kontinuitetni enačbi se lahko skrajšano zapišeta kot:

$$\sum T_i = 0 \quad (2.1.3)$$

$$\sum T_i S_i = 0 \quad (2.1.4)$$

Za oceno stalnega dotoka v Sredozemsko morje iz Atlantika je bil upoštevan 100 let star Schottov izračun (iz leta 1915), dobljen s pomočjo razlike med presežkom izhlapevanja in letno količino padavin v vrednosti $70 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Upoštevajoč Gibraltarska vrata kot edino povezavo Sredozemskega bazena z odprtim morjem in vrednosti slanosti vtekajoče ($S_{in} = 36.25 \text{ psu}$) oz. iztekajoče ($S_{out} = 37.75 \text{ psu}$) vode, lahko s pomočjo enačb (2.1.3) in (2.1.4) izračunamo še preostali neznanki – vrednosti vtoka T_{in} in iztoka T_{out} :

$$\text{Voda: } T_{in} = T_{out} + 70,000 \text{ t/s}$$

$$\text{Sol: } T_{in} S_{in} = T_{out} S_{out} = 0 \quad (2.1.5)$$

Z dobljenima vrednostma ($T_{in} = 1.75 \cdot 10^6 \text{ t/s}$ (oz. m^3/s) in $T_{out} = 1.68 \cdot 10^6 \text{ t/s}$ (m^3/s) je tako določen neto masni pretok (razlika med vtokom in iztokom).

Zanima nas, koliko časa se vodni delec zadrži v Sredozemskem morju. Znani so načini obnove vodne mase, in sicer pretok skozi Gibraltarska vrata ter izmenjava z atmosfero, izhlapevanje in padavine. Nekateri delci se bodo v Sredozemskem morju zadržali le za kratek čas, drugi dlje, zato iščemo povprečno vrednost zadrževalnega časa za vse obravnavane delce. Ob upoštevanju predpostavke, da celotni vtok T postopoma, a sistematično, zamenja volumen zaprtega vodnega telesa V , lahko podamo grobo oceno povprečnega zadrževalnega časa z enačbo:

$$E = \frac{V}{T} \quad (2.1.6)$$

Volumen Sredozemskega morja znaša $4 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$, zato je zadrževalni čas

$$E = \frac{4 \times 10^{15} \text{ m}^3}{1.75 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}} = 2.2 \times 10^9 \text{ s} \cong 70 \text{ let}$$

Razumevanje pomena zadrževalnega časa in njegove korelacije z vsemi načini mešanja delcev je precej bolj zapleteno od samega računa. Upoštevajoč novejšo in natančnejšo podatke o vtoku in iztoku (Rajar, 2006), kjer se upoštevajo tudi številni rečni vtoki, izmenjava s Črnim morjem ter točnejši podatki glede izhlapevanja in padavin, lahko dobimo večkratnik prvotne vrednosti, izračunane po Knaussu. Zaradi visoke stopnje izhlapevanja je vodna bilanca v Sredozemskem morju negativna. Skupna količina padavin in rečnih vtokov ne more nadomestiti vodnih izgub, zato je prisoten močan vtočni mehanizem skozi Gibraltarsko ožino. Celotna pretočna slika je nekoliko bolj zapletena (imamo dvoslojni pretočni mehanizem: vtok vode iz Atlantika kot posledica negativne masne bilance v globinah do 200 m in iztok gostejše Sredozemske vode med 200 in 700 m globine, ki nastane zaradi zimskih konvekcijskih procesov). Ocene posameznih vplivov po Boukthiru in Barnieru (2000) temeljijo na 15-letnih opazovanjih – vtok znaša $771.000 \text{ m}^3/\text{s}$, iztok pa $740.000 \text{ m}^3/\text{s}$, neto masni pretok je tako $31.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Vrednost zadrževalnega časa je v tem primeru:

$$E = \frac{4 \times 10^{15} \text{ m}^3}{7.71 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}} = 5.2 \times 10^9 \text{ s} \cong 164 \text{ let},$$

kar je 226 % prej izračunane vrednosti. Takšna poenostavitev je možna zgolj za popolnoma zaprta območja, kjer lahko celotni pretočni mehanizem omejimo na eno samo ožino. V primeru polzaprtga območja, kot je Tržaški zaliv, takšen postopek zato ni ustrezen.

Znotraj zaprtga vodnega območja ločujemo 3 enostavne mehanizme mešanja vodnih delcev, od katerih je odvisen pristop k računu zadrževalnega časa (Knauss, 1997). Prvi je že podan z enačbo (2.1.6) in predvideva popolno obnovitev vodne mase v zaprtem vodnem telesu prek upoštevanega dotoka in iztoka (Slika 1 – primer (a)). Druga možnost je, da voda vteka in izteka z območja, medtem ko je vodna masa dela vodnega telesa popolnoma intaktna, zato čas, potreben že za zamenjavo minimalnega segmenta primarne vodne mase, limitira v neskončnost (Slika 1 – primer (b)). Tretji način predvideva popolno mešanje obstoječe in nove vode (Slika 1 – primer (c)). V tem primeru se zadrževalni čas od delca do delca razlikuje, od zelo kratkih do izjemno dolgih. Kljub temu nam ravno predpostavka popolnega mešanja omogoča definiranje statistične vrednosti zadrževalnega časa – enačba (2.1.6) tako označuje čas, potreben za zamenjavo vseh razen e^{-1} oz. $2,73^{-1}$ začetnih delcev (molekul), kar pokažemo v izpeljavi enačbe (2.1.7 – 2.1.16) (Knauss, 1997).

Predpostavimo popolno mešanje delcev, dotekajočih v zaprto vodno telo z vtokom in iztokom T [m^3/s]. Število vodnih delcev (oz. delcev katerekoli snovi, ki jo proučujemo – lahko je koncentracija soli, raztopljeni kisik, zooplankton ipd.) označimo z n [enot/ m^3]. Iz tega sledi, da je dodatni delež nove snovi v volumnu V enak nT . Ob določenem času t imamo znotraj volumna V N enot obravnavane snovi. Če predpostavimo, da je v infinitezimalno kratkem časovnem intervalu dt stopnja iztekanja snovi premo sorazmerna prisotni količini snovi, oz. z enačbo $(N/V)T$, lahko časovno spremembo količine snovi v vodnem telesu zapišemo kot:

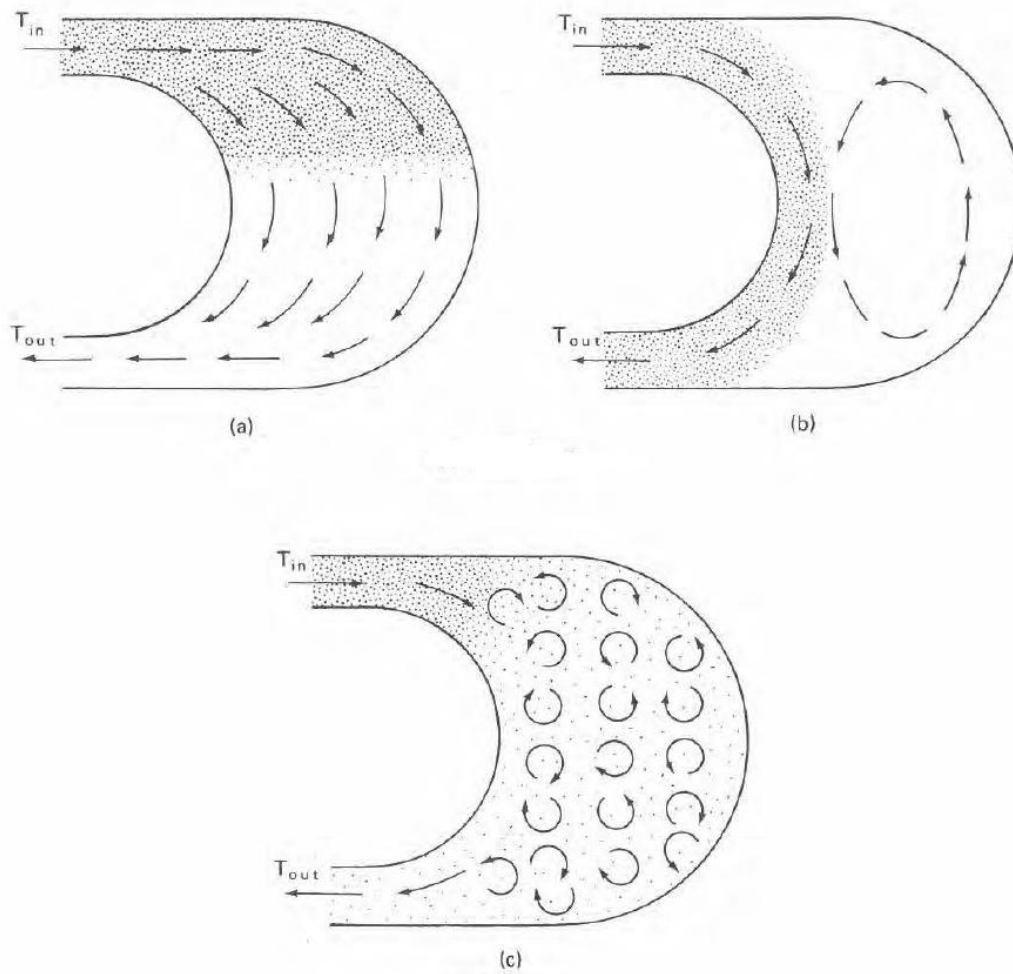
$$\frac{dN}{dt} = nT - \frac{N}{V}T \quad (2.1.7)$$

Časovni integral zapišemo kot

$$\int_0^N \frac{dN}{\left(n - \frac{N}{V}\right)} = \int_0^t T dt \quad (2.1.8)$$

Izraz na levi strani je analogen

$$\int_0^x \frac{dx}{\left(a - \frac{x}{b}\right)} = -b \ln(ab - x) \quad (2.1.9)$$



Slika 1: Trije mehanizmi mešanja delcev znotraj zaliva: primer (a) prikazuje obnovitev celotne, primer (b) pa dela vodne mase brez upoštevanja mešanja med vtokom in obstoječo vodo; primer (c) ponazarja popolno mešanje obstoječe in vtočne vode (Knauss, 1997).

Sledi

$$\int_0^N \frac{dN}{(n - \frac{N}{V})} = -V \ln(nV - N) \Big|_0^N \quad (2.1.10)$$

Če se vrnemo na (2.1.8), lahko izraz zapišemo kot

$$-V \ln(nV - N) \Big|_0^N = Tt \quad (2.1.11)$$

$$\ln(nV - N) - \ln(nV) = -\frac{T}{V}t \quad (2.1.12)$$

$$\ln\left(1 - \frac{N}{nV}\right) = -\frac{T}{V}t \quad (2.1.13)$$

$$e^{-\frac{T}{V}t} = 1 - \frac{N}{nV} \quad (2.1.14)$$

$$N = nV \left(1 - e^{-\frac{T}{V}t}\right) \quad (2.1.15)$$

V kolikor je $t = V/T$ (gre za oceno zadrževalnega časa v primeru, da bi med pretokom in vodno maso potekala linearna menjava s časom), dobimo

$$N = n V (1 - e^{-1}) \quad (2.1.16)$$

Zadrževalni čas je potemtakem definiran kot čas, potreben za zamenjavo vseh razen e^{-1} oz. 37% prvotne vodne mase.

Pri izračunih hidrodinamike, predvsem pa pri modeliranju transporta, ločimo Lagrangev in Eulerjev računski pristop. Pri prvem se (lahko tudi za podobmočja znotraj zaliva) obravnava razmerje volumna začetnih delcev in celote na začetku in koncu simulacije, pri Eulerjevem pa spremljamo razmerje mas in obenem upoštevamo konstantno koncentracijo opazovanega onesnažila v območju. Delež preostalih delcev po Lagrangu, ki nam pove približek za T_R , pa je definiran glede na prevladujoči transportni mehanizem (Ascione et al., 2012), glede na tip estuarija denimo upoštevamo ohranitev:

- 20% začetnih delcev, in sicer kjer je vpliv plimovanja velik (Braunschweig et al., 2003; Malhadas et al., 2009, 2010) - pri tem se upoštevajo letne povprečne vrednosti rečnega vtoka in plimovanja (v primeru dnevnih ali mesečnih povprečij bi bili rezultati drugačni, s tem pa tudi delež začetnih delcev). Za območja, kjer je vpliv plimovanja manjši, so po pričakovanjih dobljeni daljši zadrževalni časi in obratno. Srednje dolgi časi sovpadajo z območji, na katere vplivata tako plimovanje kakor rečni vtoki.
- 37% začetnih delcev, kjer je plimovanje dovolj majhno ali celo zanemarljivo (Monsen et al., 2002; Choi et al., 2004; Wang et al., 2004).

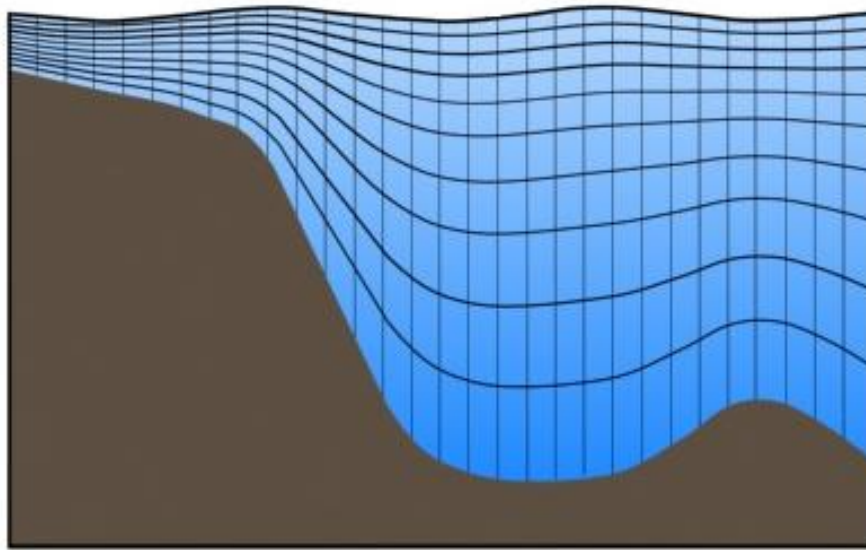
Ascione et al. (2012) so v vseh šestih študijah računa zadrževalnega časa nekaterih zahodnoevropskih estuarijev uporabili Lagrangevo metodo sledenja delcev.

V Tržaškem zalivu je običajno vpliv plimovanja glede na prevladujoči vpliv vetra zanemarljiv, zato smo tudi pri izvedenih računih na tem območju zadrževalni čas definirali kot čas, ko je na območju zaliva ostalo še 37% prvotnih delcev. Podobno so tudi Ascione in sodelavci (2012) upoštevali enak delež za polzaprte zalive z majhnim plimovanjem.

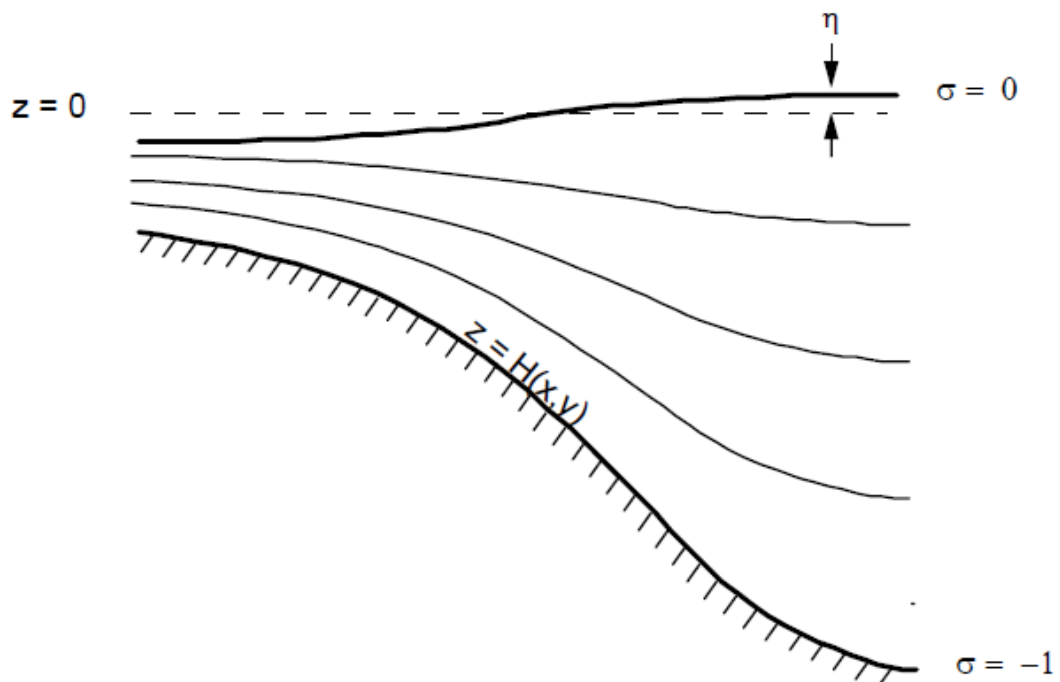
2.2 Hidrodinamični modeli in simulacije

Pri obravnavi zadrževalnega časa v Tržaškem zalivu je bil za račun hidrodinamičnih količin uporabljen tridimenzionalni cirkulacijski model NAPOM (Northern Adriatic Princeton Ocean Model). Gre za različico oceanskega modela POM (Princeton Ocean Model), postavljeno na domeni severnega Jadranskega morja (Ličer et al., 2012). Računsko območje je v horizontalni ravnini razdeljeno z ortogonalno mrežo s prostorsko resolucijo 600 metrov, v vertikalni smeri pa s krivočrtno navpično mrežo enajstih σ -slojev spremenljivih debelin. Meteorološki podatki so pridobljeni z atmosferskim modelom Aladin-SI. Urna hitrostna polja, ki so rezultat modela NAPOM, so povprečena prek celotnega dneva in pretvorjena v ustrezno mrežo ter predstavljajo vhodni podatek za zagon programa Nafta3D, v osnovi namenjenemu simulaciji razlitja ogljikovodikov v Tržaškem zalivu, ki pa smo ga z ustreznimi dodelavami usposobili za račun zadrževalnega časa..

Rezultate modela NAPOM pri prenosu podatkov v transportno-disperzijski model Nafta3D z interpolacijo oz. ekstrapolacijo pretvorimo iz σ - v z-sloje na podani prostorski mreži. Pomembna razlika med modeloma je torej v vertikalni diskretizaciji. Definicija »mokrih« in »suhih« točk (celic, kontrolnih volumnov) je pri modelih z z-koordinatami (PCFLOW3D, Nafta3D) odvisna zgolj od globine, npr. pri globini $z = 15$ m bodo vse točke $z < 15$ m »moke«. Problem takšne diskretizacije je, da ob strmi obali slabo opiše batimetrijo – dno je podano v stopničasti obliki, število »stopnic« pa je enako številu horizontalnih slojev. Natančnost opisa obale in dna je torej odvisna od števila podanih z-slojev. Prednost modelov s σ -koordinatami (NAPOM) je, da σ -koordinate sledijo poteku dna, meja zgornjega sloja je enaka gladini vode, potek vmesnih slojev pa je dobljen s pomočjo interpolacij (slika 2). Na ta način sta dno in gladina natančneje podana. Slabosti takšnega podajanja slojev sta, da nam račun v ukrivljeni ploskvi ne podaja realne globine in da se v istem sloju lahko pojavljajo zelo različne gostote vode. Posledica tega je, da dobimo umetne gostotne tokove vzdolž σ -slojev, ki jih je treba v enačbah odšteti. Druga razlika je v podajanju robih pogojev: NAPOM omogoča realno podajanje plimovanja prek valovnih enačb. To je pomembno zlasti pri kratkotrajnih procesih, saj se pri dolgotrajnem tokovanju efekt plimovanja izniči.



Slika 2: σ vertikalni koordinatni sistem – potek slojev v prerezu pri uporabi σ -koordinat



Slika 3: Zveza med σ in z koordinatami v grafični obliki

Osnovne enačbe so pri modelu NAPOM podane v x - y - σ koordinatah, pri čemer transformacija iz z v σ temelji na sledeči zvezi:

$$\sigma = \frac{z-\eta}{H+\eta} \quad , \quad (2.2.1)$$

Kjer je $H(x, y)$ globina, merjena glede na topografijo in batimetrijo dna, $\eta(x, y)$ pa globina, merjena glede na gladino vode (slika 3). Vrednosti koordinat σ sežejo torej od $\sigma = 0$ pri $z = \eta$ do $\sigma = -1$ pri $z = H$ (Mellor, 2004).

Vmesnik med hidrodinamičnim modelom POM in transportno-disperzijskim modelom Nafta3D pretvori preliminarno izračunana hitrostna polja v format, ki ga za simulacijo izračuna zadrževalnega časa zahteva model Nafta3D. Pretvorba poteka iz *netcdf* datoteke hidrodinamičnih rezultatov, po ekstrakciji podatkov iz NAPOM/TSPOM poteka še interpolacija podatkov na ustrezno vertikalno in horizontalno mrežo, na koncu pa se interpolirani podatki pretvorijo v *ascii* datoteko, ki jo kot vhodne podatke potrebuje modul Nafta. Podrobnejši postopek ekstrakcije, interpolacije σ - z , zapisa in vizualizacije v modelu Nafta je opisan v Končnem poročilu o izdelavi strokovne naloge (Žagar in Četina, 2011).

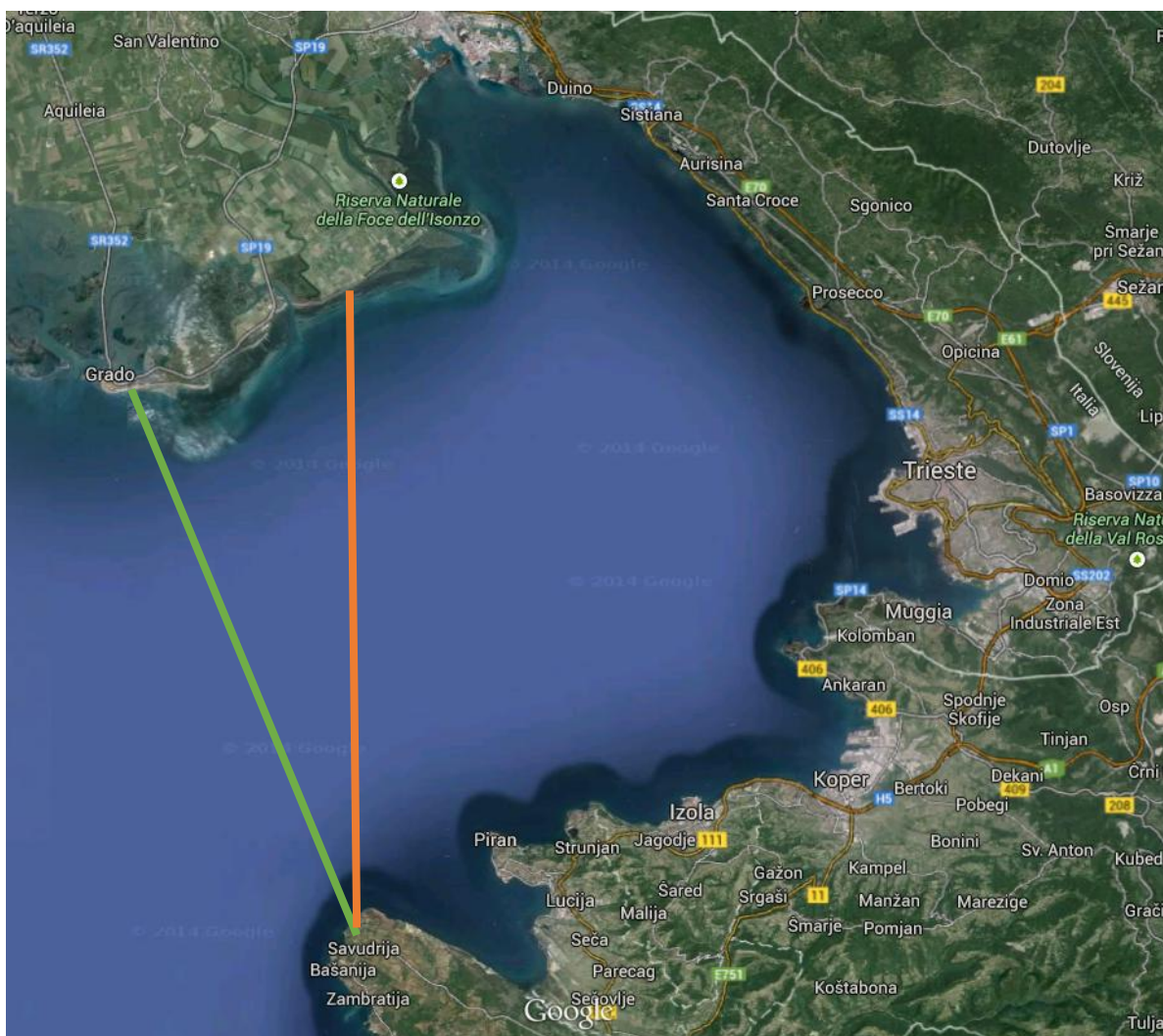
Tokovno sliko zaliva oz. hidrodinamiko se računa s pomočjo sistema diferencialnih enačb: kontinuitetne (ohranitev mase), dinamične (ohranitev gibalne količine), advekcijsko-difuzijske (prenos toplote in slanosti s tokom in mešanjem), enačbe stanja (gostota kot funkcija temperature in slanosti) in modelov turbulence (mehanizem mešanja).

Podrobnejša izpeljava sistema osmih enačb (kontinuitetni enačbi za posamezni sloj debeline h in za račun gladine, dinamične enačbe v vseh treh koordinatnih smereh, advekcijsko-difuzijski enačbi za temperaturo T in slanost S , enačba stanja) z osmimi neznankami (hitrosti v koordinatnih smereh, odmik gladine od referenčne srednje vrednosti η , tlak p , gostota ρ , slanost S in temperatura T) v modelih PCFLOW in NAPOM je podana v številnih virih in je tukaj ne navajamo (npr. Mellor in Blumberg, 1985; Mellor, 2004; Četina, 1992; Rajar in Četina, 1997; Žagar, 1999). Sistem enačb v modelu NAPOM je nekoliko bolj kompliciran zaradi uporabe modela turbulence Mellor-Yamada (Mellor in Yamada, 1982) ter nabora koeficientov horizontalne turbulentne viskoznosti in difuzije, uvedenih za ohranitev veljavnega robnega pogoja na dnu posameznega sloja. Slabost v modelih POM je že omenjeni pojav umetnega toka v vertikalni smeri kljub temu, da so izoterme in izohaline v kartezijskih koordinatah vodoravne (Mellor in Blumberg, 1985). Namesto vertikalne hitrosti v smeri z , ki je označena z w , je uvedena hitrostna komponenta ω v smeri normalno na σ . Pri tem je podana tudi transformacijska enačba med w in ω (Mellor, 2004).

2.3 Model in simulacije zadrževalnega časa

2.3.1 Opis računske domene

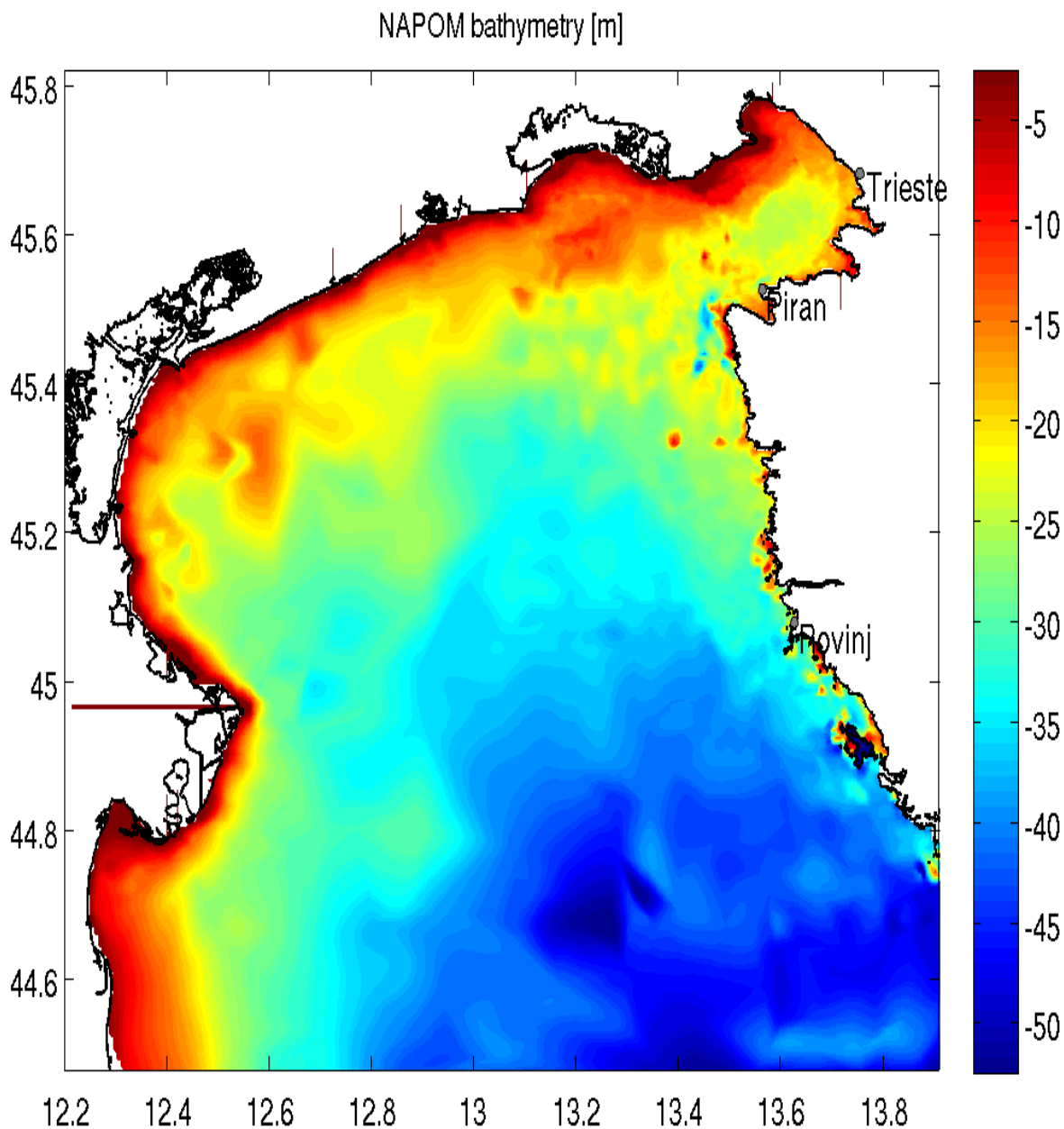
Simulacije zadrževalnega časa smo izvedli za območje Tržaškega zaliva, ki se nahaja na skrajnem severovzhodnem delu severnega Jadrana. Površina zaliva znaša približno 550 km², največja globina 38 m in povprečna globina okoli 16 m. Omejuje ga navidezna črta med Gradežem v Italiji in Savudrijo na Hrvaškem (slika 4).



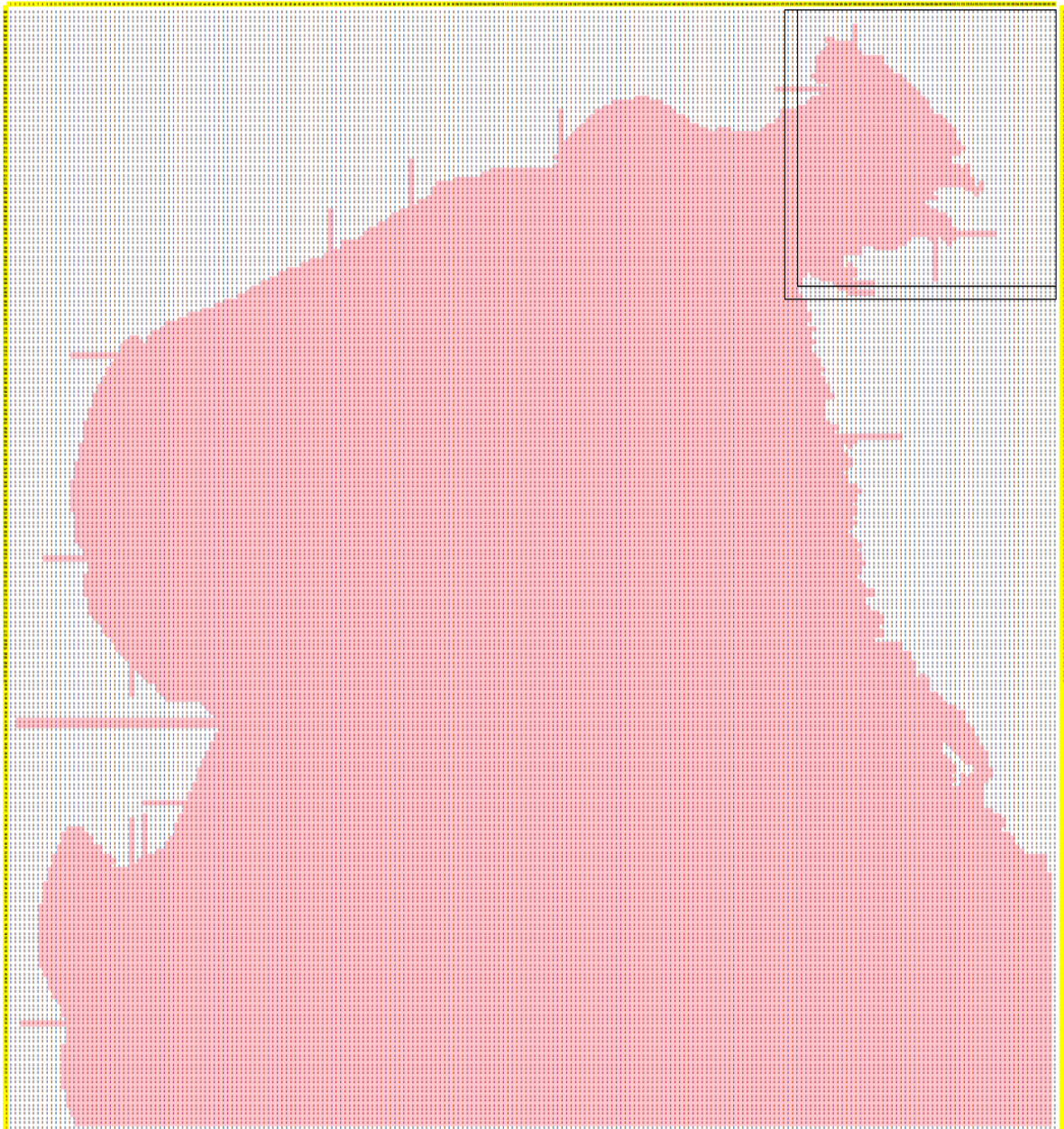
Slika 4: Satelitski posnetek Tržaškega zaliva. Navidezna črta zelene barve ponazarja približno zunanjo mejo zaliva, vertikalna črta oranžne barve pa označuje mejo računskega območja v modelu (vir: Google Earth, januar 2015).

Dejanske simulacije smo izvajali za celotno območje severnega Jadrana (slike 5, 6 in 7). V horizontalni ravnini smo uporabili enako numerično mrežo kot za simulacije z modelom NAPOM (600 m · 600 m, sliki 6 in 7), v vertikalni pa smo modelno domeno razdelili na 20 slojev neenakomernih debelin od 30 cm ob gladini do 5 m ob dnu.

Domena, v katero postavimo delce, je prikazana na slikah 6 in 7 ($i > 175$ in $j > 187$). Delec postane neaktiven, ko prečka mejo $i = 172$ in $j = 184$, kar pomeni, da mu pustimo 1,8 km (3 celice po 600 m), da se lahko vrne v domeno. Na sliki 5 je prikazana batimetrija Severnega Jadrana v hidrodinamičnem modelu NAPOM, kjer je razvidno plitvo priobalno območje ob severni obali, globlje območje v sredini Tržaškega zaliva, največjo globino (nad 38 m) pa Tržaški zaliv doseže ob piranski Punt.



Slika 5: Batimetrija severnega Jadrana, ki je uporabljena v modelu NAPOM. Na abscisni osi je podana geografska dolžina, na ordinatni pa geografska širina območja. Merska lestvica desno od slike ponazarja globino dna. V Tržaškem zalivu je opazno plitvo priobalno območje ob severni obali, globlje območje v sredini zaliva, največjo globino (nad 38 m) pa Tržaški zaliv doseže ob piranski Punti.



Slika 6: Slike numerične mreže, postavljene na območju severnega Jadrana (modela NAPOM in Nafta3D). Pravokotnika v zgornjem desnem kotu prikazujeta območje Tržaškega zaliva, kjer smo računali zadrževalni čas.



Slika 7: Slika numerične mreže na območju Tržaškega zaliva. Manjši pravokotnik označuje območje začetne postavitve delcev, večji pa območje deaktivacije delcev (ko zapustijo Tržaški zaliv).

2.3.2 Teoretične osnove modela Nafta3D

Model je v osnovi namenjen simulacijam procesov ob razlitjih nafte na morju. Izdelan je bil na Univerzi v Ljubljani, Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo (UL FGG) in je doslej doživel številne izpopolnitve (Širca, 1992; Žagar, 1994; Galuf, 2005). V letih 2010-2012 je bil dopolnjen v sodelovanju z Nacionalnim inštitutom za biologijo (NIB) (Žagar et al., 2012). Kot vhodni podatek potrebuje model tridimenzionalna tokovna polja, izdelani vmesniki pa omogočajo uvoz podatkov iz modela PCFLOW3D (v poljubni računski domeni z ortogonalnim koordinatnim sistemom) in iz različic modela POM za severni Jadran in Tržaški zaliv (NAPOM in TSPOM). V model so vgrajene enačbe za simulacijo advekcije in disperzije, mehanskega širjenja in izhlapevanja razlite nafte, na kvalitativni ravni pa tudi enačbe disperzije nafte v vodnem stolpcu in emulzifikacije. V model vnašamo dve skupini podatkov: prva vključuje cirkulacijo in meteorološke podatke (veter, temperatura zraka), druga pa podatke o razlitju in tipu nafte (Žagar et al., 2012). Slednjih ne potrebujemo, saj pri računih zadrževalnega časa simuliramo širjenje konservativnih pasivnih vodnih delcev z nevtralno plovnostjo. Pri izvedenih simulacijah po branju vhodnih podatkov (tridimenzionalnih hitrostnih polj) model po metodi sledenja delcev (MSD) simulira advekcijo in disperzijo delcev. Rezultate je mogoče prikazati tudi v grafični in animirani obliki.

V splošnem se pri MSD maso onesnažila (v našem primeru vode z nevtralno plovnostjo) razdeli na končno število diskretnih delcev, katerih širjenje po prostoru je nato opisano z deterministično in stohastično komponento vektorja hitrosti, ki predstavljata advekcijo in turbulentno difuzijo. Radijvektor r oz. pozicija delca je v vsakem naslednjem časovnem koraku opisana z enačbo:

$$r(t + \Delta t) = r(t) + u(r(t), t) \cdot \Delta t \quad (2.3.1)$$

Hitrostni vektor u je razdeljen na deterministično u^* in stohastično komponento u^{**} (slika 8). Deterministično komponento predstavlja advekcijska hitrost, predhodno izračunana s hidrodinamičnim modelom. Stohastično komponento hitrosti lahko ob predpostavki, da sta longitudinalni in transverzalni koeficient turbulentne difuzije v horizontalni smeri enaka, opišemo kot (2.3.2) in (2.3.3):

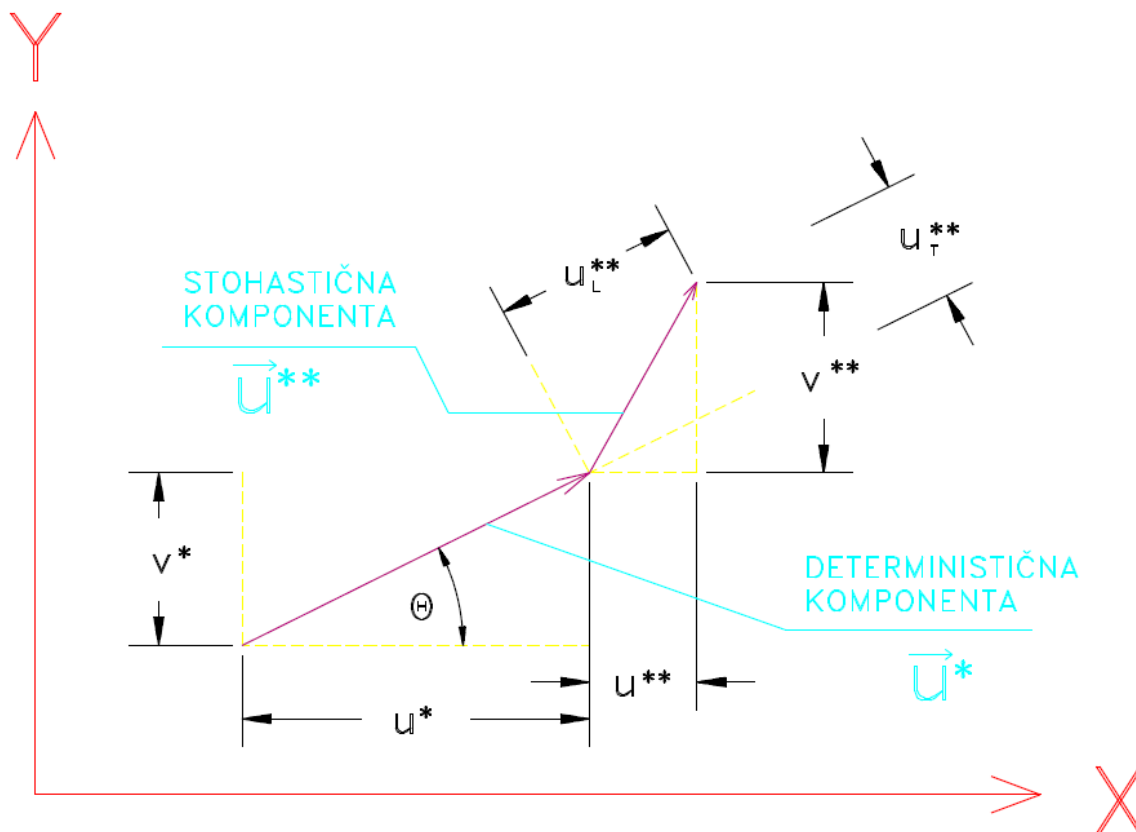
$$u^* = u_L^{**} \cos \theta - u_T^{**} \sin \theta \quad (2.3.2)$$

$$v^* = u_L^{**} \sin \theta + u_T^{**} \cos \theta \quad (2.3.3)$$

Hitrost u_L^{**} je naključno velika hitrost v smeri vektorja u^* , u_T^{**} pa pravokotna na isti vektor. Izračunamo ju po enačbah (2.3.4) in (2.3.5):

$$u_L^{**} = r_1 \sqrt{2D_h / \Delta t} \quad (2.3.4)$$

$$u_T^{**} = r_2 \sqrt{2D_h / \Delta t} \quad (2.3.5)$$



Slika 8: Komponente hitrosti delcev (povzeto po Žagar in Četina, 2011)

V vertikalni smeri pa je

$$w^{**} = r_3 \sqrt{2D_v / \Delta t} \quad (2.3.6)$$

V enačbah pomenita D_h in D_v koeficienta turbulentne difuzije v horizontalni oz. vertikalni smeri, Δt pa predstavlja dolžino časovnega intervala oz. izbrani časovni korak. Vrednosti r_i dobimo z generatorjem naključnih števil. Horizontalna verjetnostna porazdelitev ima srednjo vrednost spremenljivke 0 in standardno deviacijo 1, vertikalno je načeloma upoštevan še vpliv vzgona (v splošnem se delci zaradi stohastične komponente hitrosti v vertikalni smeri in vzgona gibljejo navzgor v razmerju, ki ga določa razmerje gostot nafte in vode), vendar je ob priredbi modela za potrebe konkretne naloge srednja vrednost naključnih števil v vertikalni smeri kar enaka nič, saj imajo vsi delci enako gostoto (Žagar in Četina, 2011). Trenutno je v modelu mogoče upoštevati konstanten D_h , za določitev ustreznega vertikalnega koeficienta pa je bilo pred računom zadrževalnega časa narejenih več poskusov, ki so podrobneje

opisani v naslednjem poglavju. Doslej je bil D_v v modelu izračunan po Koutitasu in O'Connorju (1980), kjer se upošteva parabolično razporeditev D_v po globini (slika 9):

$$D_v = D_{v \max} \cdot \eta \cdot (2 - \eta) \quad \text{za } \eta \leq 0.5 \quad (2.3.7)$$

$$D_v = D_{v \max} \cdot (1 - \eta) \cdot (5\eta - 1) \quad \text{za } \eta > 0.5 \quad (2.3.8)$$

Pri tem je η brezdimenzijska razdalja do dna ($\eta=z/H$), $D_{v \max}$ pa vrednost, odvisna od hitrosti vetra na površini (Žagar in Četina, 2011).

2.3.3 Modifikacije modela Nafta3D

Za izračun zadrževalnih časov je bilo potrebno model Nafta3D prilagoditi drugačnemu vnosu hitrostnih polj in drugačni začetni porazdelitvi delcev. Uporabljenih je 336 dnevnih hitrostnih polj za leto 2012, in sicer za čas od 8. januarja do 8. decembra, ki so rezultat hidrodinamičnega modela NAPOM. Model smo prilagodili tako, da je simulacijo mogoče začeti s katerikoli dnem (hitrostnim poljem) in jo končati, ko število preostalih delcev na obravnavanem območju pade pod 37% prvotnega števila delcev.

Spremenjen je tudi začetni pogoj razporeditve delcev: po en delec se nahaja v vsaki »celici« velikosti $300\text{ m} \cdot 300\text{ m} \cdot 0,2\text{ m}$ ($= 18000\text{ m}^3$). Velikost računske celice (kontrolnega volumna) je določena z numerično mrežo (v horizontali $600\text{ m} \cdot 600\text{ m}$, v vertikalni smeri pa imamo 22 slojev s podanimi hitrostmi, ki so različno debeli, od 30 cm do 5 m). V vsaki računski celici so torej po 4 vertikale, enakomerno oddaljene od oglišč in sredine celice. Tako so delci tlorisno razporejeni na vsakih 300 m po celem TS zalivu. Po globini so razporejeni tako, da je prva "plast" delcev 10 cm nad dnem (vsake celice), potem pa je nova plast na vsakih 20 cm do gladine. Skupaj je to ca. 356000 delcev oz. 1 delec na vsakih 18000 m^3 vode.

Doslej se je model Nafta3D praviloma uporabljal za drugačno vrsto simulacij: pri širjenju naftnega madeža je bila računska domena na začetku »prazna«, širjenje madeža pa je bilo obravnavano kot dodajanje znanega števila delcev v vsakem časovnem koraku v točki izpusta. Pri računu zadrževalnega časa je situacija obratna: »polna« domena se s pomočjo tokov prazni, dokler število aktivnih delcev (ki se nahajajo na območju Tržaškega zaliva) ne upade pod 37% prvotnega števila delcev (ca. 131700). Delce deaktiviramo v trenutku, ko prečkajo mejno črto zaliva, ki smo jo določili tako, da smo na zahodnem in južnem robu zaliva dodali še po tri celice (1800 m) območja, s katerega se lahko ob obratu tokov delec vrne na območje Tržaškega zaliva. Meje zaliva in deaktivacije delca so prikazane na slikah 6 in 7.

2.3.4 Uporaba modelov turbulence

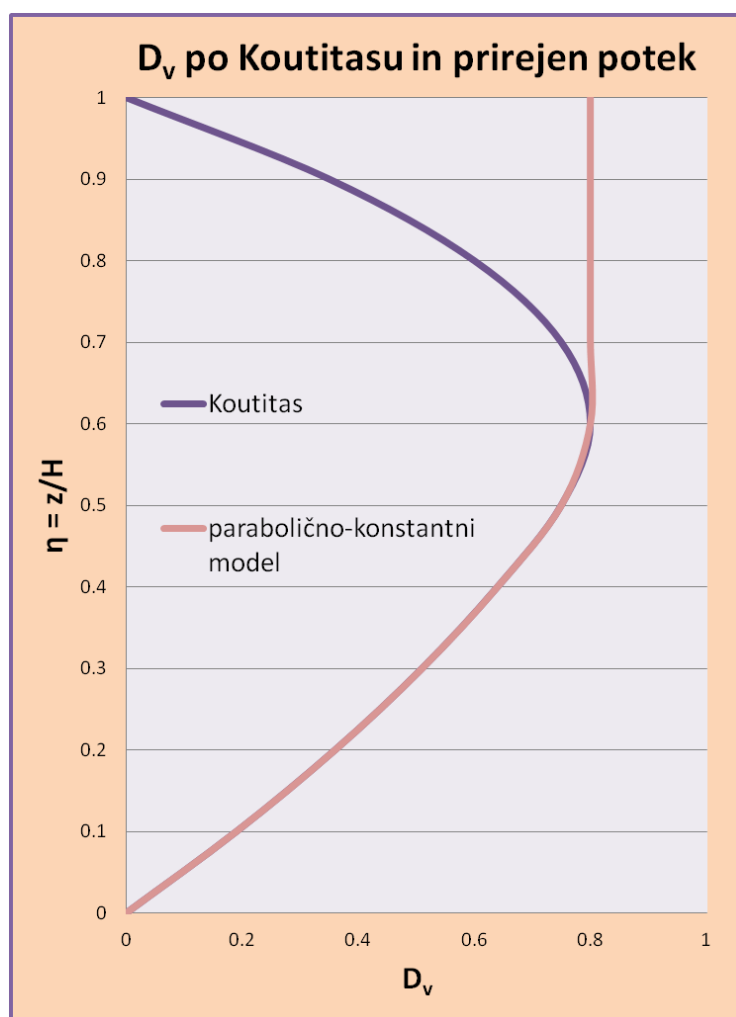
Na določanje hitrostnega polja in tlakov oz. višine vodnega stolpca poleg robnih pogojev vpliva tudi intenzivnost turbulence. Povzročajo jo strižne sile med tekočinskimi sloji ter na stiku med tekočino in obalo. Turbulenca se odraža kot kaotično stanje v obliki mešanja, vrtinčenja in pulzacij hitrosti, kar povzroča dušenje toka oz. visoke energijske (tj. toplotne) izgube na molekularni ravni. Vpliv turbulence je v modelih opisan s koeficienti turbulentne viskoznosti in difuzije, določenih na podlagi dodatnih enačb (s t.i. modeli turbulence). Koeficienti turbulentne viskoznosti so odvisni od lastnosti toka (ne pa tekočine) in so krajevno in časovno spremenljivi, koeficienti turbulentne difuzije pa so s turbulentno viskoznostjo povezani prek Prandtl-Schmidtovega števila (Četina, 1992). V modelih transporta upoštevamo predvsem vpliv mikroturbulence pri računu turbulentnega transporta snovi in toplote. Horizontalni in vertikalni koeficienti turbulentne viskoznosti oz. difuzije se med seboj razlikujejo za nekaj velikostnih redov, v skladu z razsežnostmi zaliva: ok. 20 km horizontalno in 20 m vertikalno, torej v razmerju 10^3 ali več. Horizontalni koeficienti turbulentne viskoznosti N_h so tako v splošnem 10^{-1} do 10^3 m²/s, vertikalni N_v pa 10^{-4} do 10^{-3} m²/s (Knauss, 1997).

Pred izvedbo simulacij smo preizkusili več različnih modelov turbulence. V modelu Nafta3D podamo v horizontalni smeri krajevno in časovno nespremenljiv koeficient turbulentne difuzije, v vertikalni smeri pa se v modelu Nafta3D D_v izračuna po Koutitasu (Koutitas in O'Connor, 1980), modelu prvega reda s paraboličnim potekom D_v . Model Nafta3D smo najprej preizkusili v obstoječi obliki, nato pa smo zaradi slabih rezultatov namesto Koutitasovega modela vgradili še parabolično-konstantni model (Žagar, 1999), ki se uporablja pri računu transporta plavin. Potek D_v je v tem modelu takšen, da se na spodnjih 60% globine upošteva Koutitasov model, v zgornjih 40% vodnega stolpca pa je upoštevana konstantna vrednost D_v (slika 9).

Z obema navedenima modeloma turbulence se je v modelu Nafta3D pojavil nesorazmerno velik vzgon (upwelling), zaradi katerega so se delci premaknili v zgornje sloje. Tak pojav je fizikalno neutemeljen; opravka imamo namreč z delci nevtralne plovnosti, torej z gostoto, enako gostoti vode. Dvigovanje delcev v zgornji polovici vodnega stolpca je bilo odvisno od jakosti vetra (upoštevane so bile hitrosti različnih velikostnih redov, od 10 m/s do 0,1 m/s). Koutitasov model turbulence je namreč prvenstveno namenjen simulacijam, kjer je prevladujoče vsiljevanje veter in izračuna D_v kot funkcijo hitrosti vetra. Delci v izvedenih simulacijah so po nekaj časovnih korakih v velikem številu splavali na površino že pri minimalni hitrosti 0,1 m/s. Tudi ob brezvetrju se pri uporabi obeh navedenih modelov turbulence pojavlja dvigovanje delcev, ki nima fizikalne osnove. Pri vseh modelih turbulence,

ki smo jih imeli na voljo, so zato računi zadrževalnih časov zelo verjetno nerealni – približno polovico krajši od časov, ki jih dobimo s podajanjem konstantnih vrednosti D_v in njihovim umerjanjem.

Vsekakor je pri nadaljnjem delu potrebno v model Nafta3D vgraditi primernejši model turbulence ali pa pri simulacijah uporabiti vertikalne (po možnosti pa tudi horizontalne) koeficiente turbulentne difuzije iz hidrodinamičnega modela. Nadaljnje izboljšave modela so torej potrebne, vendar pa presegajo zastavljeni obseg diplomske naloge, zato smo v nadaljevanju preizkusili konstantne vertikalne koeficiente turbulentne difuzije in model umerjali pri vsaki simulaciji posebej. Fizikalno neutemeljen pojav »privzdigovanja« oz. »tonjenja« delcev bi bilo zelo verjetno mogoče vsaj delno odpraviti tudi z zelo majhnim časovnim korakom (< 1 sekunda) in ustreznimi (bolj podrobnimi) hitrostnimi polji, vendar pa bi takšni računi trajali izredno dolgo (večkratni realni čas), obseg vhodnih podatkov pa bi presegal zmogljivosti računalnika, ki smo ga imeli na razpolago za simulacije.



Slika 9: Koutitasov (Koutitas in O'Connor, 1980) in parabolično-konstantni (Žagar, 1999) model D_v

2.3.5 Umerjanje vertikalnega koeficienta turbulentne difuzije D_v

Modificirani model je torej prirejen za ročno vstavljanje časovno in krajevno nespremenljive vrednosti D_v , ki pa jo moramo umeriti za vsako simulacijo posebej. Vrednost D_v umerjamo glede na opazovanje števila delcev po posameznih slojih: v kolikor začnejo delci toniti, je potrebno D_v povečati in obratno – kadar delci splavajo proti površju, potrebujemo manjši D_v . Območje dopustnih vrednosti D_v je torej pogojeno s povečevanjem oz. zmanjševanjem števila delcev v posameznem sloju. Število delcev v začetnih korakih simulacije v nobenem sloju ne sme presegati 105% začetnega števila. Podobno je bila določena tudi spodnja meja upoštevane D_v : če so v začetnih korakih simulacije delci pospešeno tonili (padli pod 95% začetnega števila), je bilo potrebno D_v povečati. Hitro povečanje koncentracije delcev glede na njihovo začetno število zaradi difuzije je fizikalno nemogoče: opravka imamo z delci nevtralne plovnosti, ki so enake gostote kot voda, zato, kljub uporabi generatorja naključnih števil, ne more priti do znatnega povečanja števila delcev v posameznem sloju. Tudi ob takšnem umerjanju D_v pa se lahko zadrževalni časi precej razlikujejo že ob minimalnih spremembah D_v , kar bomo podrobneje prikazali pri diskusiji rezultatov.

Na slikah 10 – 16 je prikazan primer dvodnevne simulacije z začetkom 29.1., in sicer pri različnih D_v : pri najmanjšem $D_v = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (Slike 10, 11 in 12), največjem $D_v = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Slike 13 in 14) in izbranem $D_v = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (Slike 15 in 16).

Ob najmanjšem izbranem $D_v = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (Slike 10, 11 in 12) je opazno tonjenje delcev proti dnu: že v prvem računskem koraku, 12 minut po pričetku simulacije (slika 10), število delcev v vrhnjem sloju pade za 5,6%, kar nakazuje, da je potrebno D_v nekoliko povečati. Obenem je opazno občutno povečanje delcev v sloju 16-17 m, in sicer za kar 24%. Sloja z dnom na globini 17 in 18 m imata največjo stično površino med vodo in dnom Tržaškega zaliva, kjer se število delcev vedno poveča, ne glede na velikost D_v , zato pri umerjanju modela ta sloja nista merodajna. Sklepamo, da je vpliv robnega pogoja v teh slojih zelo pomemben – pri MSD delci, ko zadenejo ob rob računске domene, tam počakajo, da jih naslednji pravilno usmerjen »sunek« advekcije ali turbulentne difuzije odlepi od roba in jih vrne v računsko domeno. Zelo verjetno bi bilo potrebno za nadaljnje simulacije izpopolniti tudi robni pogoj ob dnu. V 16. računskem koraku, 3 ure po začetku (slika 11), število delcev v vrhnjem sloju pade že za 10,5%, ob zaključku simulacije (slika 12) pa je opazno izrazito tonjenje delcev, zlasti v sloju 17-18 m se število delcev poveča za 160%.

korak=	2521	dni=	21.0083	ur=	504.20	min	30252.00	aktivnih se	356144	delcev
na globini	0	do	1	m	aktivnih se	26599	od	zacetnih	28180	delcev
na globini	1	do	2	m	aktivnih se	27949	od	zacetnih	27848	delcev
na globini	2	do	3	m	aktivnih se	26319	od	zacetnih	26268	delcev
na globini	3	do	4	m	aktivnih se	25865	od	zacetnih	25836	delcev
na globini	4	do	5	m	aktivnih se	25447	od	zacetnih	25500	delcev
na globini	5	do	6	m	aktivnih se	24653	od	zacetnih	24660	delcev
na globini	6	do	7	m	aktivnih se	24764	od	zacetnih	24660	delcev
na globini	7	do	8	m	aktivnih se	22457	od	zacetnih	22560	delcev
na globini	8	do	9	m	aktivnih se	22569	od	zacetnih	21756	delcev
na globini	9	do	10	m	aktivnih se	20487	od	zacetnih	20952	delcev
na globini	10	do	11	m	aktivnih se	18418	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	11	do	12	m	aktivnih se	18639	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	12	do	13	m	aktivnih se	18383	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	13	do	14	m	aktivnih se	11867	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	14	do	15	m	aktivnih se	11766	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	15	do	16	m	aktivnih se	11801	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	16	do	17	m	aktivnih se	11688	od	zacetnih	9428	delcev
na globini	17	do	18	m	aktivnih se	5973	od	zacetnih	7096	delcev
na globini	18	do	19	m	aktivnih se	104	od	zacetnih	100	delcev
na globini	19	do	20	m	aktivnih se	100	od	zacetnih	100	delcev
na globini	20	do	21	m	aktivnih se	105	od	zacetnih	100	delcev
na globini	21	do	22	m	aktivnih se	96	od	zacetnih	100	delcev
na globini	22	do	23	m	aktivnih se	95	od	zacetnih	100	delcev
na globini	23	do	24	m	aktivnih se	0	od	zacetnih	0	delcev
na globini	24	do	25	m	aktivnih se	0	od	zacetnih	0	delcev

Slika 10: Prvi računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. 12 minut po začetku število delcev v prvem sloju pade za 5,6%.

korak=	2536	dni=	21.1333	ur=	507.20	min	30432.00	aktivnih se	348612	delcev
na globini	0	do	1	m	aktivnih se	25227	od	zacetnih	28180	delcev
na globini	1	do	2	m	aktivnih se	26722	od	zacetnih	27848	delcev
na globini	2	do	3	m	aktivnih se	25455	od	zacetnih	26268	delcev
na globini	3	do	4	m	aktivnih se	25477	od	zacetnih	25836	delcev
na globini	4	do	5	m	aktivnih se	24821	od	zacetnih	25500	delcev
na globini	5	do	6	m	aktivnih se	23281	od	zacetnih	24660	delcev
na globini	6	do	7	m	aktivnih se	24603	od	zacetnih	24660	delcev
na globini	7	do	8	m	aktivnih se	22171	od	zacetnih	22560	delcev
na globini	8	do	9	m	aktivnih se	21917	od	zacetnih	21756	delcev
na globini	9	do	10	m	aktivnih se	20430	od	zacetnih	20952	delcev
na globini	10	do	11	m	aktivnih se	17807	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	11	do	12	m	aktivnih se	17914	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	12	do	13	m	aktivnih se	18326	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	13	do	14	m	aktivnih se	12010	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	14	do	15	m	aktivnih se	11877	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	15	do	16	m	aktivnih se	11846	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	16	do	17	m	aktivnih se	11926	od	zacetnih	9428	delcev
na globini	17	do	18	m	aktivnih se	6349	od	zacetnih	7096	delcev
na globini	18	do	19	m	aktivnih se	98	od	zacetnih	100	delcev
na globini	19	do	20	m	aktivnih se	109	od	zacetnih	100	delcev
na globini	20	do	21	m	aktivnih se	98	od	zacetnih	100	delcev
na globini	21	do	22	m	aktivnih se	88	od	zacetnih	100	delcev
na globini	22	do	23	m	aktivnih se	60	od	zacetnih	100	delcev
na globini	23	do	24	m	aktivnih se	0	od	zacetnih	0	delcev
na globini	24	do	25	m	aktivnih se	0	od	zacetnih	0	delcev

Slika 11: Šestnajsti računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. 3 ure po začetku število delcev v vrhnem sloju pade za 10,5%, kar nakazuje na to, da je izbrani D_v premajhen.

korak=	2864	dni=	23.8667	ur=	572.80	min	34368.00	aktivnih se	131757	delcev
na globini	0	do	1	m	aktivnih se	4417	od	zacetnih	28180	delcev
na globini	1	do	2	m	aktivnih se	5301	od	zacetnih	27848	delcev
na globini	2	do	3	m	aktivnih se	5930	od	zacetnih	26268	delcev
na globini	3	do	4	m	aktivnih se	6940	od	zacetnih	25836	delcev
na globini	4	do	5	m	aktivnih se	8862	od	zacetnih	25500	delcev
na globini	5	do	6	m	aktivnih se	6357	od	zacetnih	24660	delcev
na globini	6	do	7	m	aktivnih se	8598	od	zacetnih	24660	delcev
na globini	7	do	8	m	aktivnih se	5411	od	zacetnih	22560	delcev
na globini	8	do	9	m	aktivnih se	11008	od	zacetnih	21756	delcev
na globini	9	do	10	m	aktivnih se	8107	od	zacetnih	20952	delcev
na globini	10	do	11	m	aktivnih se	2120	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	11	do	12	m	aktivnih se	4730	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	12	do	13	m	aktivnih se	14170	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	13	do	14	m	aktivnih se	1928	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	14	do	15	m	aktivnih se	4635	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	15	do	16	m	aktivnih se	5304	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	16	do	17	m	aktivnih se	9474	od	zacetnih	9428	delcev
na globini	17	do	18	m	aktivnih se	18435	od	zacetnih	7096	delcev
na globini	18	do	19	m	aktivnih se	6	od	zacetnih	100	delcev
na globini	19	do	20	m	aktivnih se	20	od	zacetnih	100	delcev
na globini	20	do	21	m	aktivnih se	1	od	zacetnih	100	delcev
na globini	21	do	22	m	aktivnih se	0	od	zacetnih	100	delcev
na globini	22	do	23	m	aktivnih se	3	od	zacetnih	100	delcev
na globini	23	do	24	m	aktivnih se	0	od	zacetnih	0	delcev
na globini	24	do	25	m	aktivnih se	0	od	zacetnih	0	delcev

Slika 12: Zadnji računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Opazno je močno tonjenje delcev, največ v globini 17 do 18 m.

Ob največjem izbranem $D_v = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (sliki 13 in 14) se v vrhnjem sloju število delcev kmalu poveča: v petnajstem koraku (tri ure po pričetku simulacije) za 4,3%, zato je D_v potrebno zmanjšati. V sloju 16-17 m prav tako prihaja do izrazitega povečanja števila delcev, in sicer za 34,6%.

V trinajstem računskem koraku simulacije z $D_v = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (2 uri in 36 min po začetku) nastopi maksimalno povečanje števila delcev v vrhnjem sloju, ki znaša zgolj 0,27%, zato je bil ta D_v izbran kot najustreznejši. Hkrati pa se v sloju 16-17 m število delcev poveča za 30,9% (slika 15). Podobno je tudi v zadnjem računskem koraku (slika 16), ko je v tem sloju še vedno prisotno za 16,6% povečano število delcev.

korak=	2535	dni=	21.1250	ur=	507.00	min	30420.00	aktivnih se	349470	delcev
na globini	0	do	1	m	aktivnih se	29386	od	zacetnih	28180	delcev
na globini	1	do	2	m	aktivnih se	24833	od	zacetnih	27848	delcev
na globini	2	do	3	m	aktivnih se	24933	od	zacetnih	26268	delcev
na globini	3	do	4	m	aktivnih se	24987	od	zacetnih	25836	delcev
na globini	4	do	5	m	aktivnih se	24804	od	zacetnih	25500	delcev
na globini	5	do	6	m	aktivnih se	23692	od	zacetnih	24660	delcev
na globini	6	do	7	m	aktivnih se	24409	od	zacetnih	24660	delcev
na globini	7	do	8	m	aktivnih se	22020	od	zacetnih	22560	delcev
na globini	8	do	9	m	aktivnih se	22334	od	zacetnih	21756	delcev
na globini	9	do	10	m	aktivnih se	19952	od	zacetnih	20952	delcev
na globini	10	do	11	m	aktivnih se	17762	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	11	do	12	m	aktivnih se	18355	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	12	do	13	m	aktivnih se	18404	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	13	do	14	m	aktivnih se	11584	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	14	do	15	m	aktivnih se	11806	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	15	do	16	m	aktivnih se	12141	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	16	do	17	m	aktivnih se	12692	od	zacetnih	9428	delcev
na globini	17	do	18	m	aktivnih se	4965	od	zacetnih	7096	delcev
na globini	18	do	19	m	aktivnih se	52	od	zacetnih	100	delcev
na globini	19	do	20	m	aktivnih se	100	od	zacetnih	100	delcev
na globini	20	do	21	m	aktivnih se	108	od	zacetnih	100	delcev
na globini	21	do	22	m	aktivnih se	86	od	zacetnih	100	delcev
na globini	22	do	23	m	aktivnih se	65	od	zacetnih	100	delcev
na globini	23	do	24	m	aktivnih se	0	od	zacetnih	0	delcev
na globini	24	do	25	m	aktivnih se	0	od	zacetnih	0	delcev

Slika 13: Petnajsti računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. V vrhnjem sloju se število delcev že po 3 urah poveča za 4,3% glede na začetno stanje.

korak=	2790	dni=	23.2500	ur=	558.00	min	33480.00	aktivnih se	131335	delcev
na globini	0	do	1	m	aktivnih se	9456	od	zacetnih	28180	delcev
na globini	1	do	2	m	aktivnih se	8160	od	zacetnih	27848	delcev
na globini	2	do	3	m	aktivnih se	7197	od	zacetnih	26268	delcev
na globini	3	do	4	m	aktivnih se	7287	od	zacetnih	25836	delcev
na globini	4	do	5	m	aktivnih se	7939	od	zacetnih	25500	delcev
na globini	5	do	6	m	aktivnih se	7923	od	zacetnih	24660	delcev
na globini	6	do	7	m	aktivnih se	9742	od	zacetnih	24660	delcev
na globini	7	do	8	m	aktivnih se	7562	od	zacetnih	22560	delcev
na globini	8	do	9	m	aktivnih se	9869	od	zacetnih	21756	delcev
na globini	9	do	10	m	aktivnih se	7462	od	zacetnih	20952	delcev
na globini	10	do	11	m	aktivnih se	6072	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	11	do	12	m	aktivnih se	8264	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	12	do	13	m	aktivnih se	9358	od	zacetnih	18540	delcev
na globini	13	do	14	m	aktivnih se	1979	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	14	do	15	m	aktivnih se	3865	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	15	do	16	m	aktivnih se	6225	od	zacetnih	11760	delcev
na globini	16	do	17	m	aktivnih se	8868	od	zacetnih	9428	delcev
na globini	17	do	18	m	aktivnih se	4091	od	zacetnih	7096	delcev
na globini	18	do	19	m	aktivnih se	2	od	zacetnih	100	delcev
na globini	19	do	20	m	aktivnih se	6	od	zacetnih	100	delcev
na globini	20	do	21	m	aktivnih se	3	od	zacetnih	100	delcev
na globini	21	do	22	m	aktivnih se	3	od	zacetnih	100	delcev
na globini	22	do	23	m	aktivnih se	2	od	zacetnih	100	delcev
na globini	23	do	24	m	aktivnih se	0	od	zacetnih	0	delcev
na globini	24	do	25	m	aktivnih se	0	od	zacetnih	0	delcev

Slika 14: Zadnji računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Delci so po globini razporejeni enakomerneje glede na primer z $D_v = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ in ni opaziti izrazitejšega tonjenja.

korak=	2533	dni=	21.1083	ur=	506.60	min	30396.00	aktivnih se	351151	delcev
na globini	0	do	1	m aktivnih se	28256	od zacetnih	28180	delcev		
na globini	1	do	2	m aktivnih se	25685	od zacetnih	27848	delcev		
na globini	2	do	3	m aktivnih se	25405	od zacetnih	26268	delcev		
na globini	3	do	4	m aktivnih se	25457	od zacetnih	25836	delcev		
na globini	4	do	5	m aktivnih se	24906	od zacetnih	25500	delcev		
na globini	5	do	6	m aktivnih se	23867	od zacetnih	24660	delcev		
na globini	6	do	7	m aktivnih se	24591	od zacetnih	24660	delcev		
na globini	7	do	8	m aktivnih se	22418	od zacetnih	22560	delcev		
na globini	8	do	9	m aktivnih se	22122	od zacetnih	21756	delcev		
na globini	9	do	10	m aktivnih se	19954	od zacetnih	20952	delcev		
na globini	10	do	11	m aktivnih se	17805	od zacetnih	18540	delcev		
na globini	11	do	12	m aktivnih se	18648	od zacetnih	18540	delcev		
na globini	12	do	13	m aktivnih se	18369	od zacetnih	18540	delcev		
na globini	13	do	14	m aktivnih se	11634	od zacetnih	11760	delcev		
na globini	14	do	15	m aktivnih se	11755	od zacetnih	11760	delcev		
na globini	15	do	16	m aktivnih se	12212	od zacetnih	11760	delcev		
na globini	16	do	17	m aktivnih se	12341	od zacetnih	9428	delcev		
na globini	17	do	18	m aktivnih se	5295	od zacetnih	7096	delcev		
na globini	18	do	19	m aktivnih se	85	od zacetnih	100	delcev		
na globini	19	do	20	m aktivnih se	89	od zacetnih	100	delcev		
na globini	20	do	21	m aktivnih se	106	od zacetnih	100	delcev		
na globini	21	do	22	m aktivnih se	94	od zacetnih	100	delcev		
na globini	22	do	23	m aktivnih se	57	od zacetnih	100	delcev		
na globini	23	do	24	m aktivnih se	0	od zacetnih	0	delcev		
na globini	24	do	25	m aktivnih se	0	od zacetnih	0	delcev		

Slika 15: Trinajsti računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. 2 uri in 36 min po začetku simulacije se pojavi maksimalno splavanje delcev v vrhni sloj, ki znaša zgolj 0,27%, zato je bil ta D_v izbran kot najustreznejši.

korak	2521	dni	21.01	=	ur	504.20	=	min	30252	aktivnih se	356144	delcev
korak	2801	dni	23.34	=	ur	560.20	=	min	33612	aktivnih se	131302	delcev
na globini	0	do	1	m aktivnih se	8093	od zacetnih	28180	delcev				
na globini	1	do	2	m aktivnih se	7521	od zacetnih	27848	delcev				
na globini	2	do	3	m aktivnih se	6940	od zacetnih	26268	delcev				
na globini	3	do	4	m aktivnih se	7309	od zacetnih	25836	delcev				
na globini	4	do	5	m aktivnih se	7831	od zacetnih	25500	delcev				
na globini	5	do	6	m aktivnih se	7720	od zacetnih	24660	delcev				
na globini	6	do	7	m aktivnih se	9694	od zacetnih	24660	delcev				
na globini	7	do	8	m aktivnih se	6675	od zacetnih	22560	delcev				
na globini	8	do	9	m aktivnih se	9655	od zacetnih	21756	delcev				
na globini	9	do	10	m aktivnih se	7033	od zacetnih	20952	delcev				
na globini	10	do	11	m aktivnih se	5622	od zacetnih	18540	delcev				
na globini	11	do	12	m aktivnih se	8111	od zacetnih	18540	delcev				
na globini	12	do	13	m aktivnih se	9955	od zacetnih	18540	delcev				
na globini	13	do	14	m aktivnih se	1823	od zacetnih	11760	delcev				
na globini	14	do	15	m aktivnih se	3921	od zacetnih	11760	delcev				
na globini	15	do	16	m aktivnih se	6665	od zacetnih	11760	delcev				
na globini	16	do	17	m aktivnih se	10990	od zacetnih	9428	delcev				
na globini	17	do	18	m aktivnih se	5727	od zacetnih	7096	delcev				
na globini	18	do	19	m aktivnih se	1	od zacetnih	100	delcev				
na globini	19	do	20	m aktivnih se	7	od zacetnih	100	delcev				
na globini	20	do	21	m aktivnih se	2	od zacetnih	100	delcev				
na globini	21	do	22	m aktivnih se	4	od zacetnih	100	delcev				
na globini	22	do	23	m aktivnih se	3	od zacetnih	100	delcev				
na globini	23	do	24	m aktivnih se	0	od zacetnih	0	delcev				
na globini	24	do	25	m aktivnih se	0	od zacetnih	0	delcev				

Slika 16: Zadnji računski korak simulacije, začete 29.1., z $D_v = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Povečano število delcev je opazno v sloju 16-17 m, kjer je velika stična površina med vodo in dnom Tržaškega zaliva.

2.4 Vhodni podatki in postopek računa

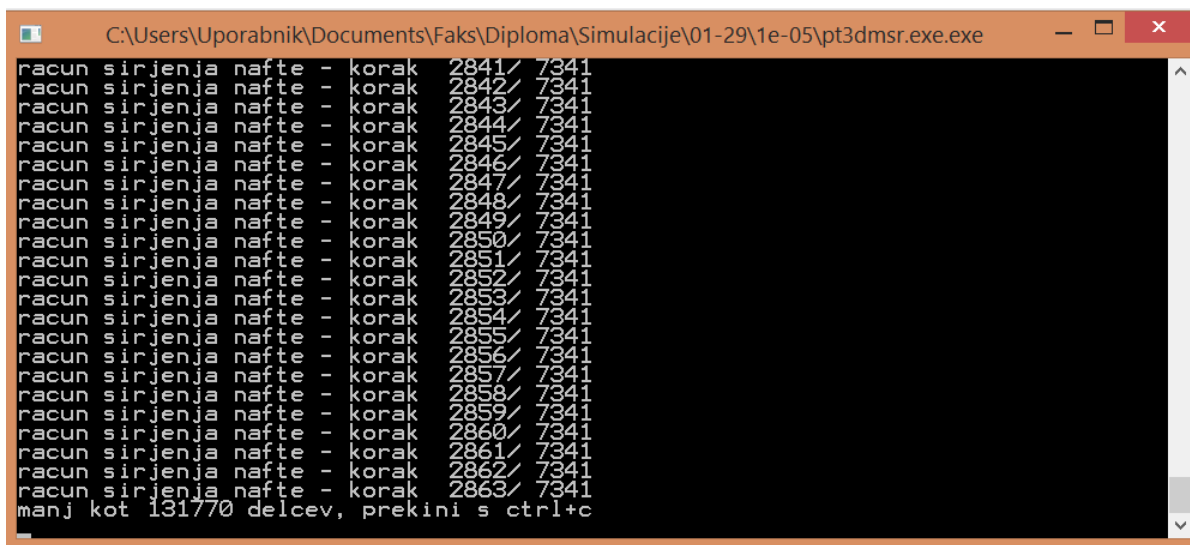
V nadaljevanju so opisani posamezni vhodni podatki:

- N_x – število kontrolnih volumnov v smeri x
- N_y – število kontrolnih volumnov v smeri y
- N_z – število kontrolnih volumnov v smeri z
- N_F – število hitrostnih polj
- N_W – število vetrnih parov

Deterministično komponento hitrosti določajo dana hitrostna polja iz modela NAPOM, stohastično komponento hitrosti pa izračunamo iz časovnega koraka DET in koeficienta turbulentne difuzije (enačbe 2.3.4, 2.3.5 in 2.3.6). Časovni korak je lahko pri metodi sledenja delcev nekoliko večji (od 5 minut do pol ure), saj stabilnostni pogoji za MSD niso tako strogi kot pri Eulerjevih metodah (Žagar in Četina, 2011), vendar se nam s podaljševanjem časovnega koraka natančnost računa zmanjšuje, s tem pa tudi spreminja vrednost izračunanega zadrževalnega časa in ustreznega D_v . Pri krajših časovnih korakih se nekoliko podaljša T_R , veliko bolj pa se podaljša računski čas simulacije. Za račune z znatno krajšimi časovnimi koraki bi (skupaj z umerjanjem D_v) potrebovali paralelno procesiranje ali zmogljivejše računalnike. V vseh izračunanih primerih je bil zato upoštevan časovni korak 720 s, ki po našem mnenju predstavlja optimalno vrednost glede porabe računskega časa.

- $TRAC$ – končni čas simulacije [h]
- DTP – časovni inkrement med polji u , v , w [h]
- DET – časovni korak [s]
- $NPZAC$ – indeks prvega hitrostnega polja

Dodan je bil parameter $NPZAC$, ki označuje indeks prvega polja oz. začetek simulacije, tj. $NPZAC = n$, simulacija bo pričela po končanih $(n-1)$ dneh glede na prvi dan podanih hitrosti (konkretno je to 8. januar 2012). Pri računu zadrževalnega časa je uporabljena metoda drsečega zaporedja intervalov: ob zaključku prve simulacije je izračunan čas m (dni), ko ostane manj kot 131700 delcev (37%), pričetek naslednje simulacije je nato za $m/2$ dni pred zaključkom prejšnjega koraka. Parameter $TRAC$, ki predstavlja končni čas simulacije oz. njeno trajanje v urah, se upošteva absolutno, torej kot seštevek $NPZAC$ in predvidenega trajanja simulacije, pretvorjenega v ure, pri čemer podajamo zgolj pričakovano vrednost računa, saj je model prilagojen tako, da se račun ustavi, ko je število aktivnih delcev manjše od 37% začetnega števila (slika 17). DTP označuje časovni inkrement med hitrostnimi polji: ker imamo opravka z dnevno povprečenimi hitrostnimi polji, znaša DTP 24 ur.



```
C:\Users\Uporabnik\Documents\Faks\Diploma\Simulacije\01-29\1e-05\pt3dmsr.exe.exe
racun sirjenja nafte - korak 2841/7341
racun sirjenja nafte - korak 2842/7341
racun sirjenja nafte - korak 2843/7341
racun sirjenja nafte - korak 2844/7341
racun sirjenja nafte - korak 2845/7341
racun sirjenja nafte - korak 2846/7341
racun sirjenja nafte - korak 2847/7341
racun sirjenja nafte - korak 2848/7341
racun sirjenja nafte - korak 2849/7341
racun sirjenja nafte - korak 2850/7341
racun sirjenja nafte - korak 2851/7341
racun sirjenja nafte - korak 2852/7341
racun sirjenja nafte - korak 2853/7341
racun sirjenja nafte - korak 2854/7341
racun sirjenja nafte - korak 2855/7341
racun sirjenja nafte - korak 2856/7341
racun sirjenja nafte - korak 2857/7341
racun sirjenja nafte - korak 2858/7341
racun sirjenja nafte - korak 2859/7341
racun sirjenja nafte - korak 2860/7341
racun sirjenja nafte - korak 2861/7341
racun sirjenja nafte - korak 2862/7341
racun sirjenja nafte - korak 2863/7341
manj kot 131770 delcev, prekini s ctrl+c
```

Slika 17: Prikaz okna v Ukaznem pozivu ob zaključku simulacije, v tem primeru 29.1.

Vhodne podatke spreminjamo v kateremkoli orodju, ki omogoča zapisovanje neformatiranega besedila (npr. beležnica). Zapisani morajo biti v datoteki *podatki.dat*. Pri izvedenih simulacijah smo ob vsakem zagonu spreminjali zgolj podatka o začetku simulacije *NPZAC* in njenem trajanju *TRAC*. Datoteka vsebuje vse potrebne podatke za izračun, vključno z imeni datotek, ki vsebujejo hitrostno polje (v konkretnem primeru računa je to datoteka *ptm_z_out_w2012.dat*) in geometrijo domene ter izhodnimi datotekami za vizualizacijo rezultatov (*output.dat*). Vertikalni koeficient turbulentne difuzije preberemo iz posebne vhodne datoteke.

Simulacijo poženemo z zagonom programa – datoteke *pt3dmsr.exe*. Po končani simulaciji dobimo rezultate zapisane v več formatih, ena od datotek vsebuje zapis v obliki, ki je ustrezna za tabelarično urejanje in obdelavo rezultatov. Na slikah 18 in 19 je prikazan primer rezultata simulacije, urejenega in oblikovanega v orodju MS *Excel*.

korak	4561		dni	38,01	=	ur	912,20	=	min	54732	aktivnih se	356144	delcev
korak	6780		dni	56,50	=	ur	1356,00	=	min	81360	aktivnih se	131544	delcev
na	globini	0	do	1	m	aktivnih se	5328	od zacetnih	28180				
na	globini	1	do	2	m	aktivnih se	4966	od zacetnih	27848				
na	globini	2	do	3	m	aktivnih se	4930	od zacetnih	26268				
na	globini	3	do	4	m	aktivnih se	5756	od zacetnih	25836				
na	globini	4	do	5	m	aktivnih se	6515	od zacetnih	25500				
na	globini	5	do	6	m	aktivnih se	6847	od zacetnih	24660				
na	globini	6	do	7	m	aktivnih se	8739	od zacetnih	24660				
na	globini	7	do	8	m	aktivnih se	8626	od zacetnih	22560				
na	globini	8	do	9	m	aktivnih se	10647	od zacetnih	21756				
na	globini	9	do	10	m	aktivnih se	10171	od zacetnih	20952				
na	globini	10	do	11	m	aktivnih se	9093	od zacetnih	18540				
na	globini	11	do	12	m	aktivnih se	10251	od zacetnih	18540				
na	globini	12	do	13	m	aktivnih se	10740	od zacetnih	18540				
na	globini	13	do	14	m	aktivnih se	5619	od zacetnih	11760				
na	globini	14	do	15	m	aktivnih se	5618	od zacetnih	11760				
na	globini	15	do	16	m	aktivnih se	5885	od zacetnih	11760				
na	globini	16	do	17	m	aktivnih se	7642	od zacetnih	9428				
na	globini	17	do	18	m	aktivnih se	4171	od zacetnih	7096				
na	globini	18	do	19	m	aktivnih se	0	od zacetnih	100				
na	globini	19	do	20	m	aktivnih se	0	od zacetnih	100				
na	globini	20	do	21	m	aktivnih se	0	od zacetnih	100				
na	globini	21	do	22	m	aktivnih se	0	od zacetnih	100				
na	globini	22	do	23	m	aktivnih se	0	od zacetnih	100				
na	globini	23	do	24	m	aktivnih se	0	od zacetnih	0				
na	globini	24	do	25	m	aktivnih se	0	od zacetnih	0				

Slika 18: Tabelarni prikaz rezultatov simulacije, začete 15.2. V prvih dveh vrsticah je podan začetek in konec simulacije v različnih časovnih enotah (čas 0 pomeni 8. Januar ob 0:00) s skupnim številom delcev. V naslednjih vrsticah je prikazano število aktivnih delcev po slojih glede na začetno število.

Uporabljen Dv			0,000045									
Tr v urah			443,80	ur =		18	dni					
naslednja simulacija			55	dan	NPZAC bo	48						
trenutna simulacija			46	dan	nazaj gremo	9	dni					
Datum trenutne sim.			15	februar								
Datum naslednje sim			24	februar								
Delež delcev po slojih			Dv									
	vsota aktivni	vsota začete	0,000045	0,00005	0,00004	0,00003	0,00001	0,00007	0,00008			
0-5	27495	133632	21	21	20	19	17	25	25			
5-10	45030	114588	39	40	39	37	32	40	40			
10-15	41321	79140	52	52	52	51	46	47	44			
15-25	17698	28784	61	58	58	82	125	51	51			
skupaj	131544	356144	37									
			0,41% -	0,7% +	1,06% -	4,1% -	5,6% -	3,1% +	4,7% +			
mora ustrezati	131544	356144										
NPZAC	39	dni										
TRAC od NP	936											
Uporabljen TRAC	1440											
predvidena dolžina simulacije	21	dni										

Slika 19: Obdelava vhodnih in izhodnih podatkov, primer simulacije, začete 15.2. Zadrževalni čas T_R izračunamo, datum začetka prihodnje simulacije pa postavimo za polovico pravkar izvedene simulacije nazaj. V srednjem delu preglednice so prikazani deleži delcev po slojih pri preizkušeni D_v , pod tem pa delež največjega povečanja števila delcev v kritičnem sloju ob umerjanju D_v . Spodnji del prikazuje izračun potrebnega TRAC, tj. končnega časa simulacije (v tabeli podanega v urah), in sicer glede na predvideno trajanje simulacije.

2.5 Povezava vetrnih napetosti in zadrževalnega časa

Ena od postavljenih hipotez se nanaša tudi na povezavo med jakostjo vetra in zadrževalnim časom. Znano je, da je cirkulacija v Tržaškem zalivu pretežno vetrna, predvsem v obdobjih močnejšega vetra (Crise et al., 2006; Bogunović in Malačič, 2009). Za določitev povezave pa je potrebno v posameznih obdobjih simulacij poznati tudi vetrne napetosti.

Horizontalne napetosti vetra, ki delujejo na vodno površino, imenujemo vetrne napetosti. Gre za vertikalni prenos horizontalne gibalne količine iz atmosfere v vodo. Vetrne napetosti so s hitrostmi povezane s formulo:

$$\sigma = \rho_{zrak} C_D U_{10}^2, \quad (2.5.1)$$

kjer je ρ_{zrak} gostota zraka, U_{10} hitrost vetra 10 metrov nad gladino vode, C_D pa koeficient vleka (*drag coefficient*) (Stewart, 2008 in Mellor, 2004). Po komponentah izrazimo enačbo 2.5.1 kot:

$$\sigma_x = \rho_{zrak} C_D \sqrt{u^2 + v^2} u \quad (2.5.2)$$

$$\sigma_y = \rho_{zrak} C_D \sqrt{u^2 + v^2} v \quad (2.5.3)$$

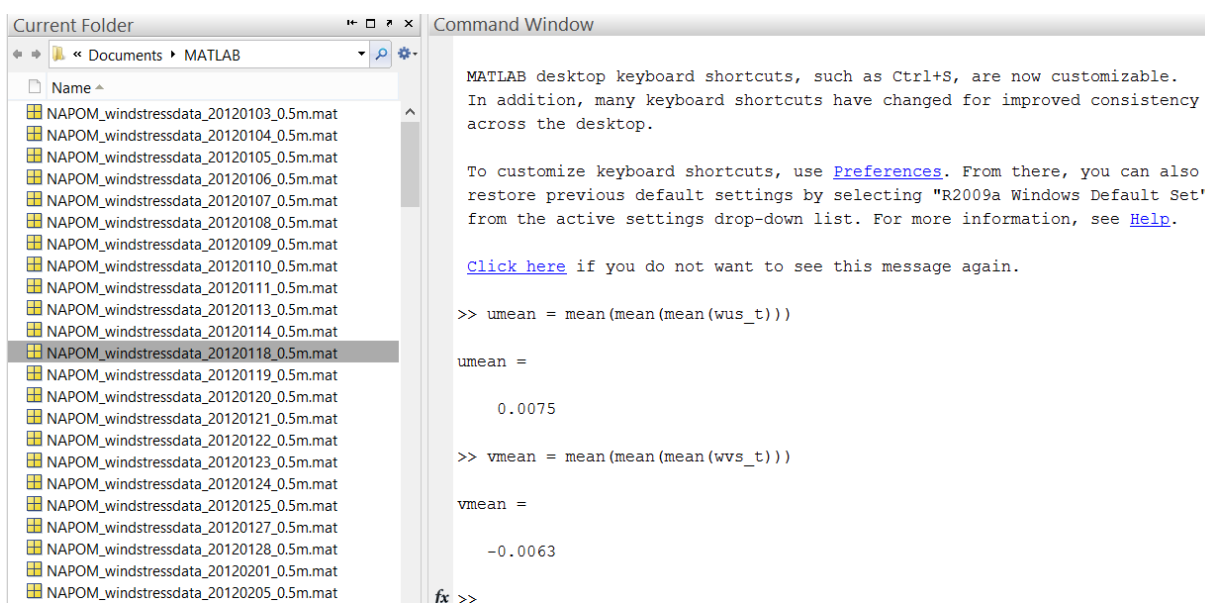
u je pri tem komponenta hitrosti v smeri osi x , v pa v smeri y .

Podatke komponent urnih vetrnih površinskih napetosti na vodni gladini (model izpisuje vrednosti v enotah m^2/s^2 , kot kvocient vetrnih napetosti ter zmnožka gostote zraka in koeficienta vleka) smo pridobili iz rezultatov atmosferskega modela ALADIN in jih v programu Matlab povprečili v dnevne vrednosti (slika 20).

Posamezni komponenti vetra v smereh koordinatnega sistema (vzhod-zahod in sever-jug) smo združili v absolutno (skalarno) vrednost po enačbi $\sigma = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}$, s temi vrednostmi pa smo iskali mogoče korelacije med vetrnimi napetostmi σ in zadrževalnimi časi T_R . V orodju Excel smo izvedli regresijsko analizo – k parom vrednosti $\sigma - T_R$ smo izračunali linearno trendno črto in iz vrednotili R^2 – število med 0 in 1, ki razkriva, kako blizu so ocenjene vrednosti trendne črte dejanskim podatkom. Povezava je »dobra«, kadar je R^2 blizu 1. Preverili smo naslednje zveze med vetrnimi napetostmi in T_R :

- absolutne vrednosti vetrnih napetosti σ in T_R za celotni nabor podatkov
- σ in T_R pri močnejšem vetru ($\sigma > 0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$)
- σ in T_R pri šibkejšem vetru ($\sigma < 0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$)
- absolutni vrednosti posameznih komponent napetosti: horizontalno $|\sigma_u|$ in vertikalno $|\sigma_v|$ za celotni nabor podatkov
- absolutni vrednosti komponent napetosti pri močnejšem vetru $|\sigma_{u,v}| > 0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$

- absolutni vrednosti komponent napetosti pri šibkejšem vetru $|\sigma_{u,v}| < 0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$
- relativne vrednosti posameznih komponent napetosti: σ_u in σ_v za celotni nabor podatkov
- relativne vrednosti komponent, pozitivne in negativne vrednosti posebej
- kontrola korelacije za posamezne kvadrante: $\sigma_u < 0$ in $\sigma_v < 0$ (značilna burja); $\sigma_u < 0$ in $\sigma_v > 0$; $\sigma_u > 0$ in $\sigma_v > 0$; $\sigma_u > 0$ in $\sigma_v < 0$
- kontrola korelacije za posamezne kvadrante – z absolutnimi vrednostmi vetrnih napetosti



Slika 20: Primer računa povprečne dnevne vetrne napetosti v programu Matlab. V levem podoknu so podane matrice (*.mat datoteke), ki vsebujejo podrobne podatke komponent vetrnih napetosti (wus_t – napetost v u-smeri, wvs_t – napetost v v-smeri). Povprečno dnevno vrednost za posamezni dan dobimo z ukazoma umean in vmean, prikazanima v desnem ukaznem podoknu.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Zadrževalni čas v celotnem vodnem stolpcu

Preglednica 1 prikazuje izvedene simulacije po datumu njihovega začetka z intervali upoštevanih D_v in pripadajočih, na podlagi umerjanja D_v , izračunanih zadrževalnih časov. Z upoštevanjem mejnih vrednosti D_v (princip je podrobneje opisan v poglavju 2.3.5) dobimo nabor možnih zadrževalnih časov: T_{Rmin} pri največjem in T_{Rmax} pri najmanjšem D_v . Večji kot je koeficient vertikalne turbulentne difuzije, bolj intenzivno je vertikalno mešanje v vodnem stolpcu, s tem pa se skrajša T_R . Na abscisni osi grafa na sliki 21 so podani datumi pričetka posamezne simulacije, na ordinatnih oseh pa T_R in D_v , ki sta za posamezno računsko obdobje opredeljena kot konstantni vrednosti: T_R je pri tem dobljen ob koncu simulacije, D_v pa je umerjen glede na začetne korake in velja za celotno trajanje določene simulacije, vse do pričetka naslednje. Primer: pri simulaciji, začeti 8. januarja, znaša zadrževalni čas pri izbranem $D_v = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ $T_R = 18$ dni, kar pomeni, da ima Tržaški zaliv manj kot 37% začetnega števila delcev 18 dni kasneje, tj. 26. januarja. Datum začetka prihodnje simulacije določimo po principu drsečega zaporedja intervalov, in sicer s prepolovitvijo T_R izračunanega v predhodni simulaciji. Naslednja simulacija se začne torej 18/2 ali 9 dni za prejšnjo, tj. 17. januarja.

Razpon umerjenih koeficientov vertikalne turbulentne difuzije je večji, koeficienti pa so nižji kot jih navaja Knauss (1997) za oceane, skladen pa s podatki za manjša območja in predhodnimi simulacijami z modelom PCFLOW3D (Četina, 1992; Rajar in sod., 1997) in se giblje med 10^{-4} in 10^{-6} z višjimi vrednostmi v zimskih časih (med $3 \cdot 10^{-5}$ in $7,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) in nižjimi v poletnem obdobju (med $1 \cdot 10^{-6}$ in $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$). V poletnih simulacijah je bil preizkušen tudi koeficient velikostnega reda 10^{-7} , vendar je v tem primeru prihajalo zgolj do izrazitega podaljšanja zadrževalnega časa ob zanemarljivi spremembi maksimalnega oz. minimalnega odstopanja od začetnega števila delcev v posameznem sloju.

Slika 21 prikazuje nabor umerjenih D_v in izračunanih zadrževalnih časov T_R , katerih vrednosti so odvisne od izbranega D_v . V obdobju, ki sovпада s pojavom močne burje med 29. januarjem in 2. februarjem (slika 22), je moč opaziti za velikostni razred spreminjajoči se interval D_v (med 10^{-5} in $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$), hkrati pa minimalno oz. skoraj nično spremembo v zadrževalnih časih. Minimalni in maksimalni T_R se razlikujeta za 13% T_R pri simulaciji, pričeti 29. januarja, oz. 41% T_R pri simulaciji, pričeti 1. februarja (preglednica 1). V tem obdobju je prevladujoč vpliv advekcije in spremembe v koeficientih turbulentne difuzije manj pripomorejo k hitrejšemu ali počasnejšemu iztekanju delcev iz računskega območja. V tem obdobju so

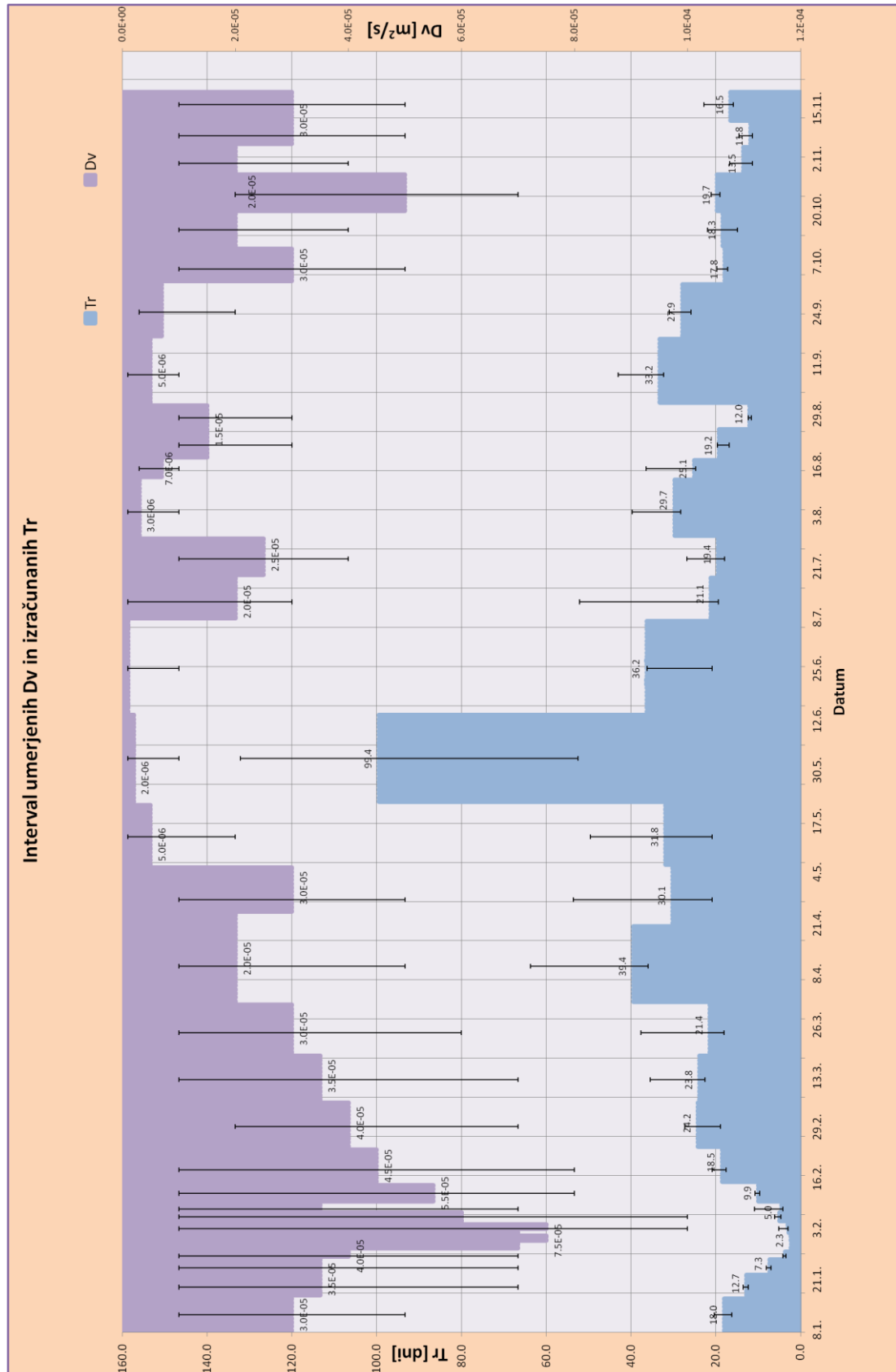
simulacije zanesljivejše in lahko rezultatom modela zaupamo z večjo verjetnostjo, saj ima spreminjajoči se D_v zanemarljivo majhen vpliv na velikost T_R . Popolnoma drugačno je npr. obdobje simulacije, ki se prične 22. maja: interval D_v smo ponovno spreminjali za cel velikostni red (med 10^{-6} in 10^{-5} m²/s), a se že pri neznatnem zmanjšanju (povečanju) D_v zadrževalni čas T_R izrazito podaljša (skrajša). Minimalni in maksimalni T_R se 22. maja med seboj razlikujeta za 79,7 dni oz. 2,6 meseca (80% T_R). Spremembe D_v v primeru šibkejšega vetra očitno močneje vplivajo na dolžino zadrževalnega časa, zanesljivost teh rezultatov pa je vprašljiva.

Sklepamo, da je izvedeni način računanja z obstoječim modelom razmeroma zanesljiv zgolj takrat, ko so zadrževalni časi kratki, vpliv advekcije pa prevladuje nad turbulentno difuzijo. V tem primeru spreminjanje D_v le malo vpliva na zadrževalni čas. Poudariti želimo, da je potrebno za večjo zanesljivost rezultatov v model Nafta3D vgraditi model turbulence z dvema enačbama (npr. k- ϵ) ali v model vgraditi dodatni vmesnik, ki bo lahko horizontalne, predvsem pa vertikalne koeficiente turbulentne difuzije prebral iz rezultatov hidrodinamičnega modela. Zlasti v obdobjih šibkega vetra prevladuje vpliv turbulentne difuzije - D_v se lahko v obdobjih daljših simulacij spremeni tudi za velikostni razred. Zgolj z eno konstantno vrednostjo D_v , ki jo umerimo glede na hitrosti v začetnem delu simulacije, boljših rezultatov ne moremo dobiti.

Na sliki 22 je prikazana zveza med izračunanimi zadrževalnimi časi in vetrnimi napetostmi, od koder je moč zaslediti obratno sorazmerje: ob močnejšem vetru imamo krajše T_R (konec januarja – začetek februarja) in obratno (april - junij). V nadaljevanju bomo zato z regresijsko analizo poskusili poiskati, če so te povezave dovolj močne, da bi bile uporabne za napovedovanje dolžine zadrževalnega časa iz jakosti (in smeri) vetra.

Preglednica 1: Prikaz izvedenih simulacij po datumu začetka in izračunanih zadrževalnih časov glede na umerjene D_v . Prikazujemo še minimalne in maksimalne vrednosti D_v ter pripadajoče zadrževalne čase. V zadnjem stolpcu je podana tudi relativna vrednost odstopanja $T_{Rmax} - T_{Rmin}$ glede na izračunani T_R .

Datum	Mesec	T_R [dni]	D_v [m^2/s]	T_{Rmax} [dni]	T_{Rmin} [dni]	D_{vmin} [m^2/s]	D_{vmax} [m^2/s]	Odstopanje (% T_R)
8.1.	januar	18.0	3.0E-05	20.3	16.2	1.00E-05	5.00E-05	23
17.1.		12.7	3.5E-05	13.6	12.3	1.00E-05	7.00E-05	10
23.1.		7.3	3.5E-05	8.0	6.9	1.00E-05	7.00E-05	15
27.1.		3.6	4.0E-05	4.1	3.5	1.00E-05	7.00E-05	18
29.1.		2.3	7.0E-05	2.5	2.2	3.00E-05	1.00E-04	13
30.1.		2.2	7.0E-05	2.5	2.1	3.00E-05	1.00E-04	15
31.1.		2.3	7.5E-05	2.8	2.2	1.00E-05	1.00E-04	29
1.2.	februar	2.3	7.5E-05	3.2	2.2	1.00E-05	1.00E-04	41
2.2.		2.8	7.0E-05	3.7	2.6	1.00E-05	1.00E-04	40
3.2.		3.0	7.5E-05	5.2	2.9	1.00E-05	1.00E-04	76
5.2.		5.0	6.0E-05	6.1	4.6	1.00E-05	1.00E-04	30
8.2.		4.5	3.5E-05	10.8	4.1	1.00E-05	7.00E-05	149
10.2.		9.9	5.5E-05	10.7	9.6	1.00E-05	8.00E-05	11
15.2.		18.5	4.5E-05	20.8	17.6	1.00E-05	8.00E-05	17
24.2.	24.2	4.0E-05	27.3	18.9	2.00E-05	7.00E-05	35	
7.3.	marec	23.8	3.5E-05	35.4	22.5	1.00E-05	7.00E-05	54
19.3.		21.4	3.0E-05	37.7	18.0	1.00E-05	6.00E-05	92
1.4.	april	39.4	2.0E-05	63.7	36.0	1.00E-05	5.00E-05	70
21.4.		30.1	3.0E-05	53.6	20.8	1.00E-05	5.00E-05	109
6.5.	maj	31.8	5.0E-06	49.6	20.8	1.00E-06	2.00E-05	91
22.5.		99.4	2.0E-06	132.2	52.5	1.00E-06	1.00E-05	80
14.6.	junij	36.2	1.0E-06	36.2	20.9	1.00E-06	1.00E-05	42
8.7.	julij	21.1	2.0E-05	52.1	19.4	1.00E-06	3.00E-05	155
19.7.		19.4	2.5E-05	26.8	17.9	1.00E-05	4.00E-05	46
29.7.		29.7	3.0E-06	39.7	28.3	1.00E-06	1.00E-05	38
13.8.	avgust	25.1	7.0E-06	36.4	24.7	3.00E-06	1.00E-05	47
18.8.		19.2	1.5E-05	19.6	16.8	1.00E-05	3.00E-05	15
26.8.		12.0	1.5E-05	12.3	11.6	1.00E-05	3.00E-05	6
1.9.	september	33.2	5.0E-06	43.0	32.3	1.00E-06	1.00E-05	32
18.9.		27.9	7.0E-06	31.0	25.8	3.00E-06	2.00E-05	19
2.10.	oktober	17.8	3.0E-05	19.7	17.2	1.00E-05	5.00E-05	14
11.10.		18.3	2.0E-05	21.9	14.9	1.00E-05	4.00E-05	38
20.10.		19.7	5.0E-05	21.1	19.0	2.00E-05	7.00E-05	11
30.10.		13.5	2.0E-05	16.7	11.3	1.00E-05	4.00E-05	40
6.11.	november	11.8	3.0E-05	14.5	11.3	1.00E-05	5.00E-05	27
12.11.		16.5	3.0E-05	22.8	15.9	1.00E-05	5.00E-05	42
20.11.		17.3	3.0E-05	17.3	16.8	3.0E-05	4.00E-05	3



Slika 21: Intervalni prikaz umerjenih D_v (od zgoraj navzdol) in izračunanih T_R (od spodaj navzgor)

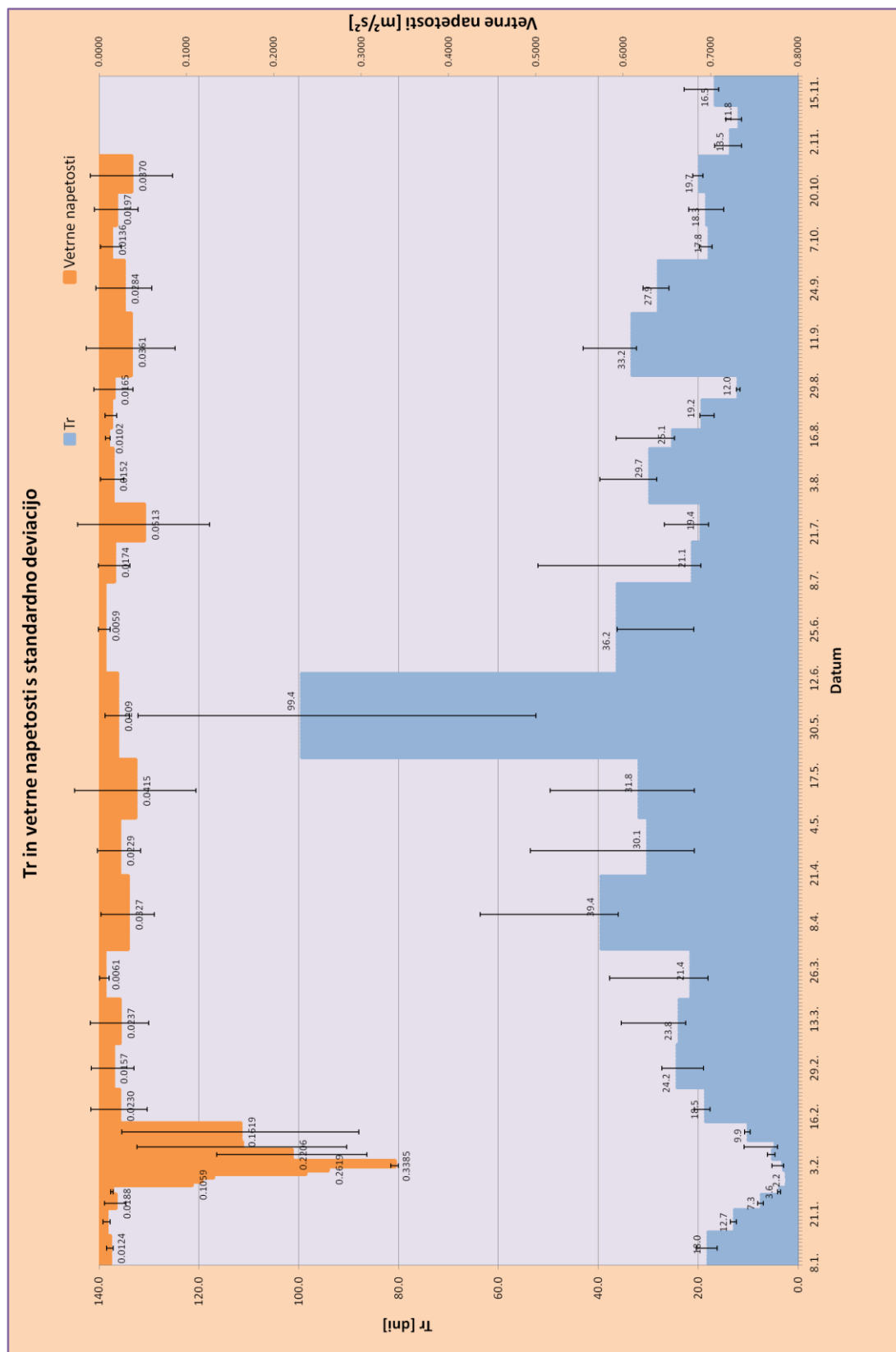
Pri računih zadrževalnega časa smo ocenili tudi možno povezavo med razponom minimalnih in maksimalnih vrednosti T_R ter razpršenostjo (standardno deviacijo) jakosti vetra. Iz slike 22 lahko sklepamo, da izrazita povezava med tema spremenljivkama ne obstaja, da torej razpršenost jakosti vetra v obdobju posameznega računa ne vpliva pomembno na zadrževalni čas.

Med umerjanjem modela (postopek je podrobno opisan v poglavju 2.3.5) smo opazovali tudi, kaj se ob maksimalnem odstopanju trenutnega števila delcev od prvotnega števila v (praviloma) vrhnjem sloju na začetku simulacije dogaja v ostalih globinah. Izrazito povečanje števila delcev se je pojavilo v spodnjih 10 m globine, in sicer v poletnih in jesenskih simulacijah, ko so tudi zadrževalni časi praviloma daljši in D_v vsaj za velikostni red manjši kot v zimskih simulacijah. Povezava med T_R in odstopanju števila delcev pa ni sorazmerna (maksimalno povečanje števila delcev v spodnjih 10 m ne sovpada z najdaljšim zadrževalnim časom). Največje odstopanje bi v primeru sorazmerne zveze pričakovali pri najdaljšem T_R (simulacija, začeta 22. maja, ko znaša zadrževalni čas 99 dni), a je odstopanje zgolj 142,7%. Največje odstopanje pokaže simulacija, začeta 18.9., kjer znaša 228% glede na začetno število, izračunani zadrževalni čas pa je 28 dni pri umerjenem $D_v = 7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

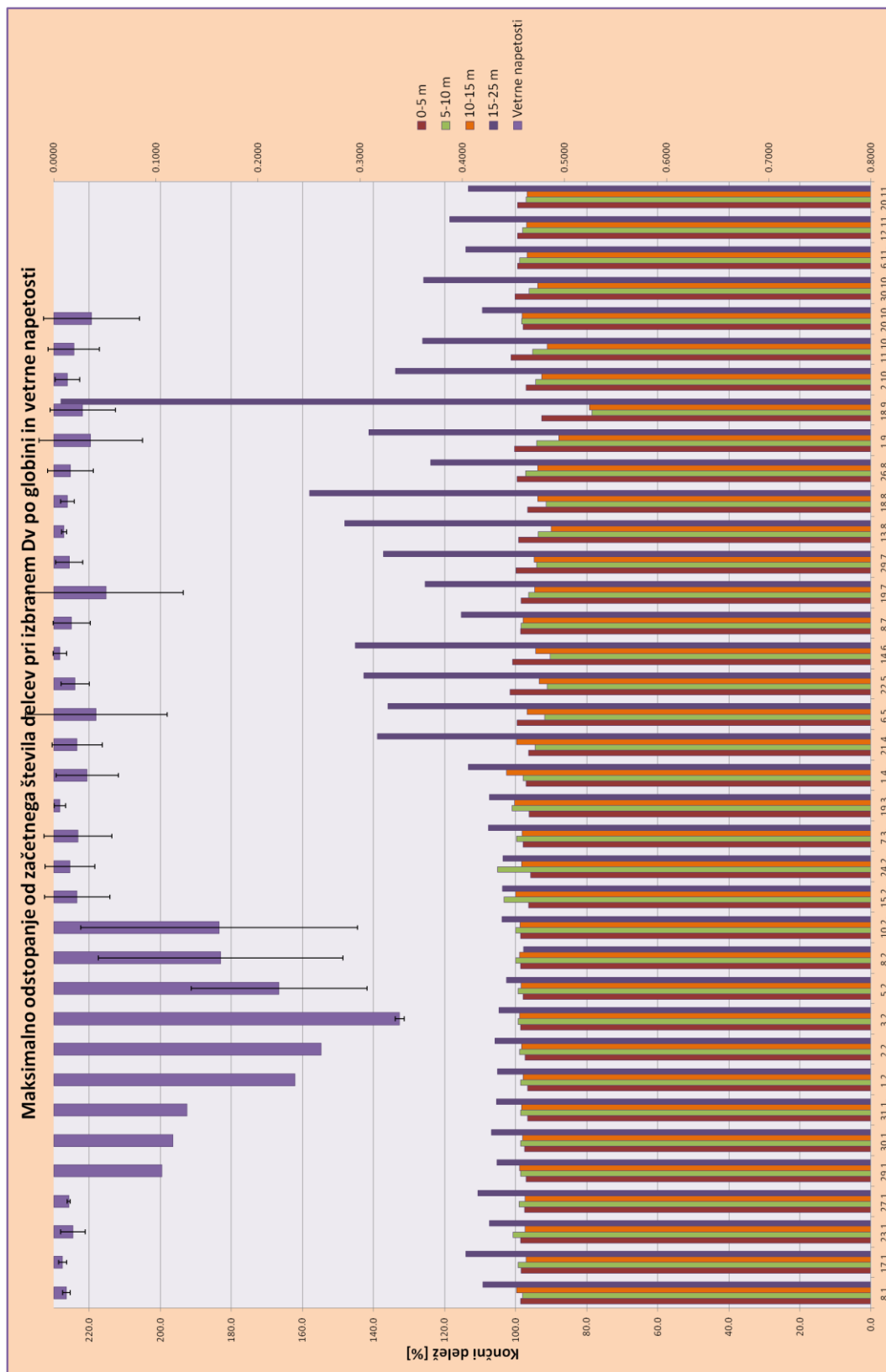
Preverili smo tudi zvezo med razpršenostjo jakosti vetrnih napetosti in povečanjem števila delcev po globini. Izkaže se, da je razpršenost jakosti vetrnih napetosti največja ob večjih vetrnih napetostih (ob pojavu orkanske burje konec januarja) in s tem najkrajših zadrževalnih časih, ko je delež delcev po globini razporejen enakomerno glede na prvi korak izračuna.

Poudariti je treba, da se maksimalno odstopanje trenutnega števila delcev od začetnega pojavlja v različnih korakih posameznih simulacij: s podaljševanjem trajanja določene simulacije smo z umerjanjem D_v glede na začetno odstopanje povečevali netočnost izračuna, saj je D_v tokom računa odvisen od hitrostnih polj. Na sliki 23 je opazno postopno povečevanje odstopanja od aprilskih vse do septembrskih simulacij z vrhom 18. septembra. S krajšanjem zadrževalnih časov se v jesenskih mesecih odstopanje postopoma zmanjšuje.

Tudi tukaj smo preverili povezavo med razpršenostjo (standardno deviacijo) jakosti vetrnih napetosti in odstopanjem od začetnega števila delcev (slika 23), ki pa že na prvi pogled ne kaže nobene povezave. Sklepamo lahko le to, da so rezultati zanesljivejši v primerih, kjer so razlike med minimalnimi in maksimalnimi T_R in umerjenimi D_v majhne, torej pri kratkih zadrževalnih časih v zimskih mesecih.



Slika 22: Grafični prikaz izračunanih T_R (po ordinati od spodaj navzgor) in povprečnih vetrnih napetosti ter njihovih standardnih deviacij v posameznih obdobjih računa (od zgoraj navzdol). Do največje razpršenosti jakosti vetrnih napetosti prihaja v obdobju močne burje konec januarja, maja in konec julija.



Slika 23: Maksimalno odstopanje od začetnega števila delcev pri izbranem D_v je obravnavano v 5 m debelih slojih na začetku vsake simulacije. Število delcev v spodnjih 10 m globine se od aprila naprej izrazito povečuje. Vrh doseže 18. septembra. Prikazane so še jakosti vetrnih napetosti in njihove standardne deviacije v posameznih obdobjih.

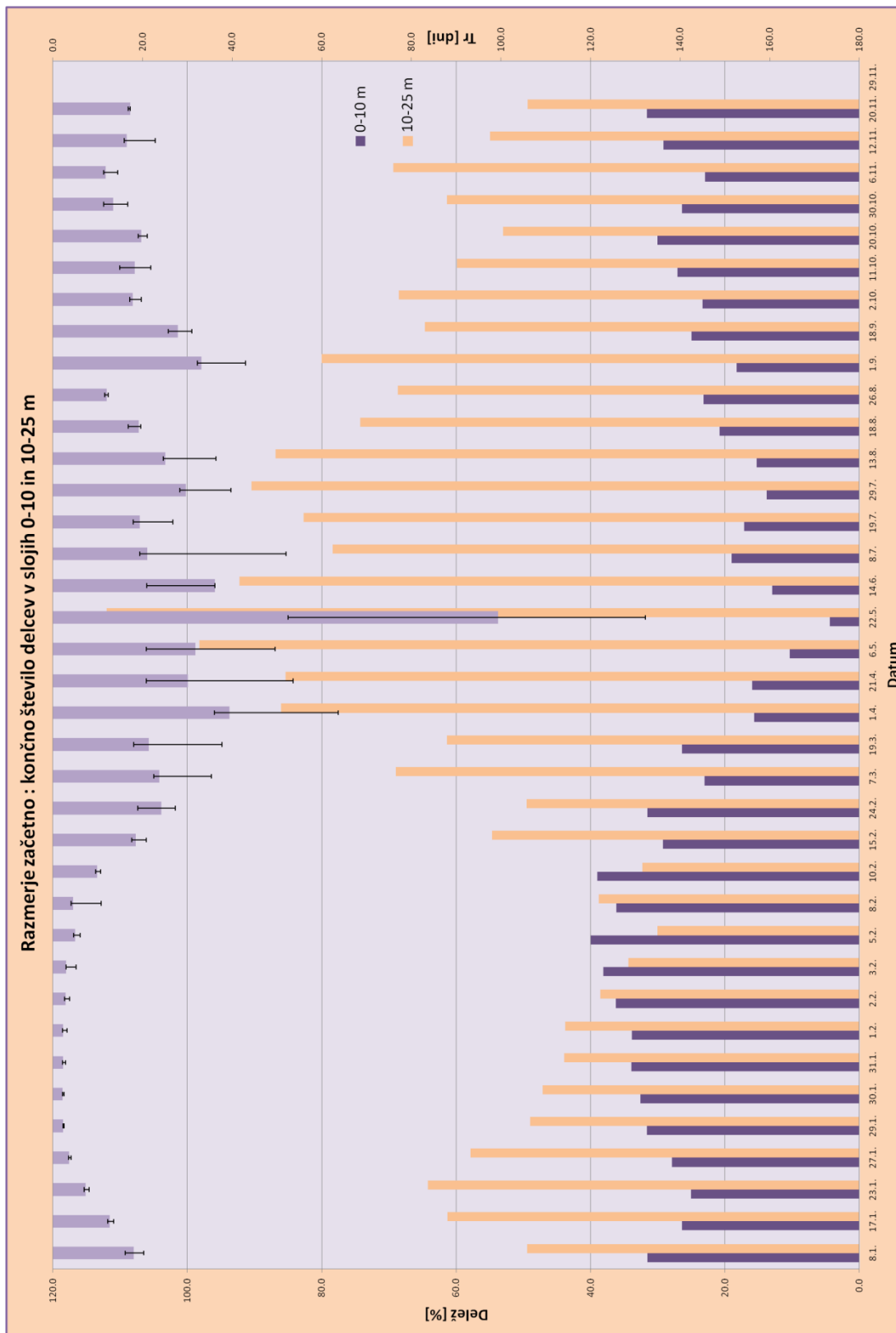
3.2 Zadrževalni čas ob gladini in ob dnu

Zelo pomembna delovna hipoteza je bila, da je zadrževalni čas v Tržaškem zalivu ob površju krajši kot v pridnenih slojih. Zadrževalni čas vpliva na bilanco hranil in onesnažil, ki se lahko v primeru različnih zadrževalnih časov v pridnenih slojih zadržujejo dlje ter pomembno vplivajo na kvaliteto vode in številne biološke procese. Nekatere nedavne objave kažejo, da se v Tržaškem zalivu mikrobne združbe na površini in na dnu med seboj pomembno razlikujejo, razlika med površinskimi in pridnenimi združbami pa je najbolj izrazita v poletnih mesecih, ko je stratifikacija vodnega stolpca najizrazitejša (Tinta et al., 2014). Rezultati diplomskega dela so torej v skladu z že znanimi opažanji.

Poleg maksimalnega odstopanja od začetnega števila delcev v posameznem sloju (v začetnih korakih simulacije) smo za vsako izvedeno simulacijo izračunali še razmerje med začetnim in končnim številom delcev, sprva po posameznih tanjših slojih debeline 1 m, nato kot seštevek zgornjih 10 m in preostalih 15 m globine. S slike 24 je razvidno, da je v obdobjih močnega vetra, ko so zadrževalni časi kratki, odstotek preostalih delcev približno enak v obeh opazovanih slojih. To ni presenetljivo, saj je ob močnem vetru vodni stolpec povsem premešan. Nasprotno pa je razlika v deležu preostalih delcev zelo velika v obdobjih šibkega vetra, ko so zadrževalni časi dolgi. Pri simulaciji z najdaljšim zadrževalnim časom se je gornji sloj praktično izpraznil, preostalo je le 4,4% začetnega števila delcev, v spodnjem sloju pa rezultat kaže 112% začetnega števila delcev. Temu rezultatu sicer ne moremo verjeti zaradi razmeroma slabe zanesljivosti simulacij v tem obdobju, vendar pa je razlika med številom preostalih delcev med slojema podobna pri vseh simulacijah, razen v obdobju izrazito močnega vetra konec januarja in v začetku februarja. Mogoče je, da k večji razliki v odstotku preostalih delcev med slojema pripomore tudi stratifikacija, saj v stratificiranem morju izrazita piknoklina omejuje vertikalna gibanja. Iz modela NAPOM lahko »izvozimo« tudi podatke o gostoti vode in potek sezonske piknokline, a v trenutni različici modela Nafta3D teh podatkov (še) ni mogoče uporabiti. Zato v modelu Nafta3D nimamo mehanizma, s katerim bi omejili prehajanje delcev prek piknokline.

Praviloma se razlika v odstotku preostalih delcev med slojema povečuje sorazmerno z zadrževalnim časom. Zelo izrazit je še primer simulacije, začete 5.2., ko je v zgornjem sloju ostalo 40% prvotnega števila delcev, v spodnjem pa le 30%. Zaradi močne burje je tokovanje ob gladini usmerjeno proti zahodu proti odprtemu robu zaliva, zato se pojavijo kompenzacijski tokovi v spodnjih slojih in »upwelling«, voda iz spodnjega sloja se dviguje proti gladini. Pojav je seveda najizrazitejši pri največjem vertikalnem koeficientu turbulentne difuzije in najmanj izrazit pri najmanjšem D_v .

Iz rezultatov prikazanih na sliki 24 lahko torej sklepamo, da je večji del leta, ko ne pihajo izrazito močni vetrovi, T_R v zgornjih slojih znatno krajši kakor v globljih plasteh, s čimer smo potrdili zastavljeno hipotezo.



Slika 24: Preostalo število delcev ob gladini (0-10 m) in pri dnu (10-25 m) ob koncu posamezne simulacije. Na sekundarni ordinatni osi so podani izračunani T_R .

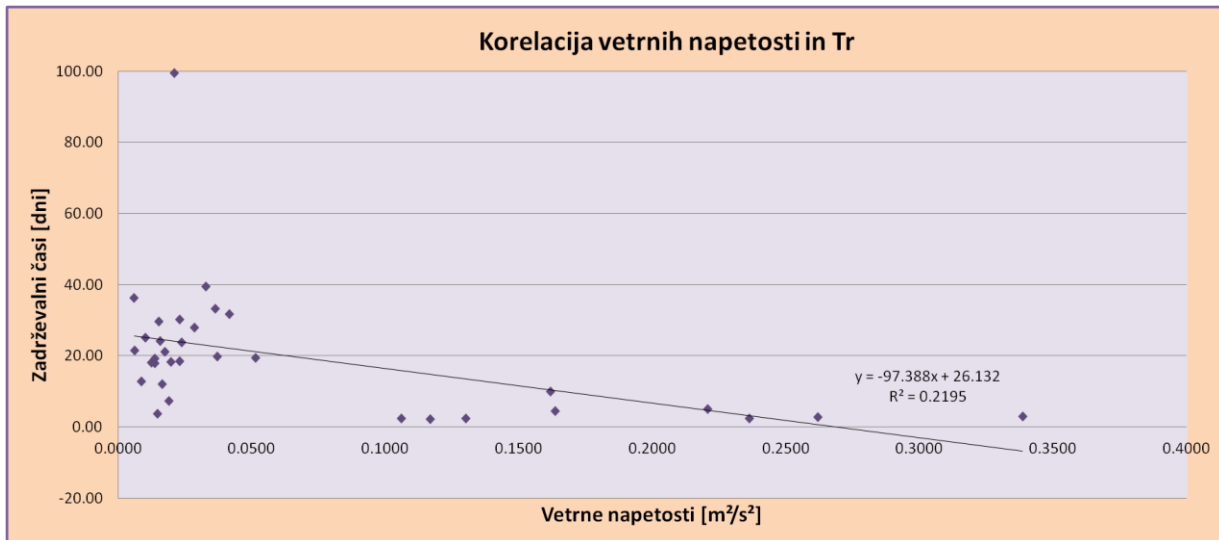
3.3 Povezava zadrževalnih časov z vetrnimi napetostmi

Zaradi na videz jasne zveze med močnejšim vetrom in krajšimi zadrževalnimi časi, ki so najbolj očitni v obdobju močnega vetra konec januarja, smo skušali poiskati korelacijo med jakostjo vetra in dolžino zadrževalnega časa v obliki linearne enačbe. Visok koeficient korelacije regresijske premice bi omogočil približno napovedovanje zadrževalnega časa zgolj na osnovi podanih vetrnih napetosti. Sprva smo preverili korelacijo pri absolutni jakosti vetrnih napetosti (slika 25), ki pa daje nizko zvezo med spremenljivkama ($R^2 = 0,22$). Iz rezultatov (slika 22) je razvidno, da je zadrževalni čas pri vetrnih napetostih nad $0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ krajši od 5 dni, pri nižjih pa večinoma nad 20 dni. Zato smo skušali ugotoviti, ali je korelacija med spremenljivkama višja, če vetrne napetosti razdelimo na »velike« in »majhne«, saj sta tudi na sliki 25 razvidni dve značilni porazdelitvi podatkov, z mejo pri vetrnih napetostih približno $0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Rezultati so prikazani na slikah 26 in 27. V obeh primerih dobimo zelo nizko vrednost R^2 , iz česar lahko sklepamo, da ni močne povezave med absolutnimi jakostmi vetra in zadrževalnimi časi v nobenem od prikazanih primerov. V nadaljevanju smo poskušali ugotoviti še korelacijo med komponentami vetrnih napetosti in zadrževalnim časom ter na takšen način preveriti, ali ima morda smer vetra večji vpliv na T_R . Opazovali smo možne povezave pri absolutnih vrednostih komponent, najprej za celotni interval jakosti, nato znova pri močnejšem oz. šibkejšem vetru, za vsako komponento posebej. Zaradi ponovne nizke korelacije (vrednosti R^2 od 0,12 do 0,38) smo kot zadnji primer obravnavali še možno povezavo med absolutno jakostjo vetra glede na predznak posameznih komponent vetrnih napetosti in jih tako umestili v 4 kvadrante koordinatnega sistema. S tem smo želeli predvsem preveriti morebiten vpliv burje, kjer sta obe komponenti negativni. V tem primeru se je dejansko pokazala najvišja korelacija (slika 28, $R^2 = 0,45$), ki pa je vseeno prenizka, da bi lahko na osnovi dobljene linearne enačbe napovedovali zadrževalni čas iz vetrnih napetosti. Poleg tega je premica zelo strma in že pri vrednosti vetrnih napetosti 0,3 podaja negativne zadrževalne čase. Zaradi nizkih korelacij rezultatov vseh naštetih primerov ne prikazujemo na slikah, temveč v preglednici 2.

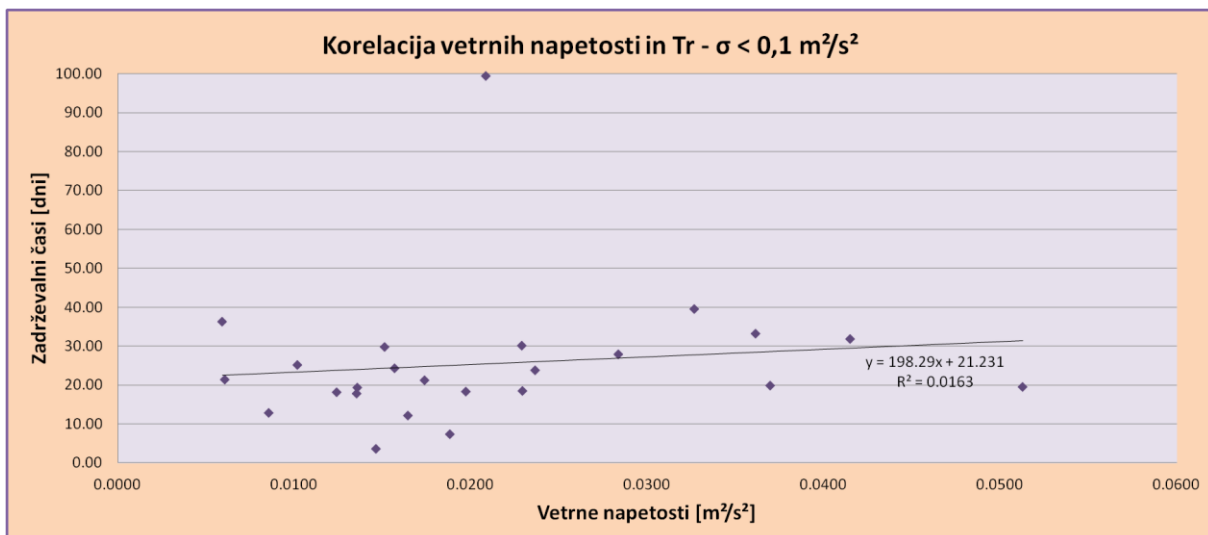
Sklepamo lahko torej, da močnejši veter ne povzroča nujno hitrejšega odtekanja delcev iz zaliva, ampak zelo verjetno vpliva na njihovo prerazporejanje, vrtinčenje in mešanje. Edina povezava s korelacijskim koeficientom nad 0,4 se je pokazala v primeru burje, ko veter piha iz severovzhodne smeri skoraj pravokotno na odprti rob zaliva. Hkrati je potrebno dodati še, da je količina podatkov in rezultatov simulacij za resno iskanje korelacije med burjo in zadrževalnim časom nezadostna, bi pa jo bilo smiselno preveriti v prihodnje, ob vgrajenem modelu turbulence, izboljšanem robnem pogoju ob dnu in večletnemu naboru podatkov.

Preglednica 2: Rezultati regresijskih premic ob analizi korelacije med zadrževalnimi časi in vetrnimi napetostmi. Najboljša povezava se izkaže v primeru burje (točki 4.3 in 5.3). Manjkajoče vrednosti v točkah 4.1, 4.4, 5.1 in 5.4 so posledica premajhnega števila podatkov.

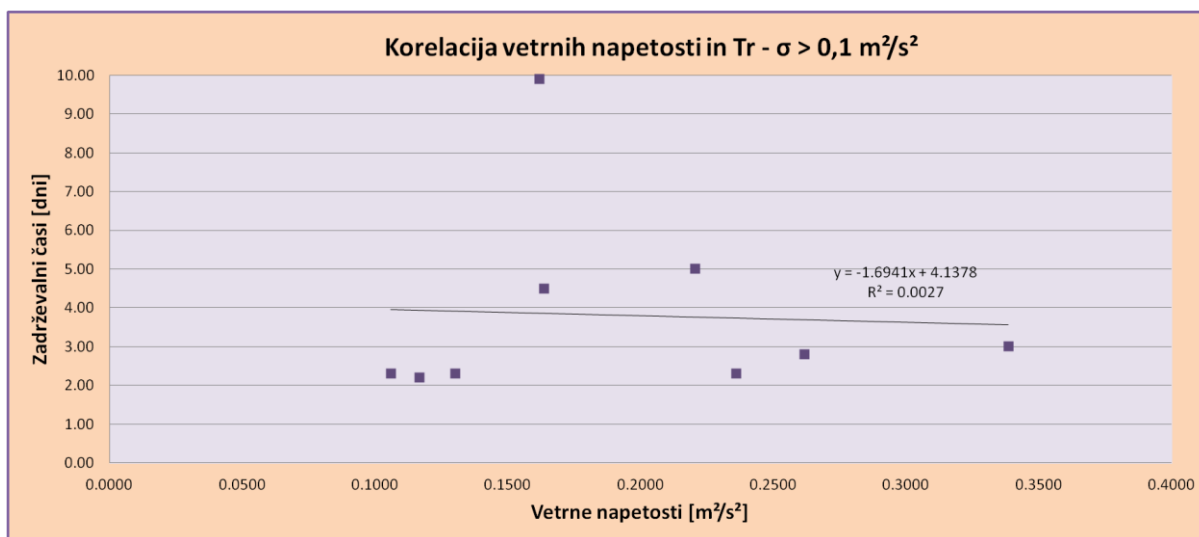
$\sigma = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}$		Obravnavane napetosti	Opombe	R ²
1	1.1	σ		0,22
	1.2	σ	$\sigma > 0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$	0,02
	1.3	σ	$\sigma < 0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$	0
2	2.1	$ \sigma_u $		0,24
		$ \sigma_v $		0,18
	2.2	$ \sigma_u $	$ \sigma_{u,v} > 0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$	0,01
		$ \sigma_v $		0
	2.3	$ \sigma_u $	$ \sigma_{u,v} < 0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$	0
		$ \sigma_v $		0,09
3	3.1	σ_u		0,24
		σ_v		0,26
	3.2	σ_u	$\sigma_{u,v} > 0$	0,13
		σ_v		0,12
	3.3	σ_u	$\sigma_{u,v} < 0$	0,27
		σ_v		0,38
4	4.1	σ_u	$\sigma_u > 0 \text{ in } \sigma_v > 0$	/
		σ_v		/
	4.2	σ_u	$\sigma_u < 0 \text{ in } \sigma_v > 0$	0,09
		σ_v		0,29
	4.3	σ_u	$\sigma_u < 0 \text{ in } \sigma_v < 0$	0,45
		σ_v		0,40
	4.4	σ_u	$\sigma_u > 0 \text{ in } \sigma_v < 0$	/
		σ_v		/
5	5.1	σ	$\sigma_u > 0 \text{ in } \sigma_v > 0$	/
	5.2	σ	$\sigma_u < 0 \text{ in } \sigma_v > 0$	0
	5.3	σ	$\sigma_u < 0 \text{ in } \sigma_v < 0$	0,45
	5.4	σ	$\sigma_u > 0 \text{ in } \sigma_v < 0$	/



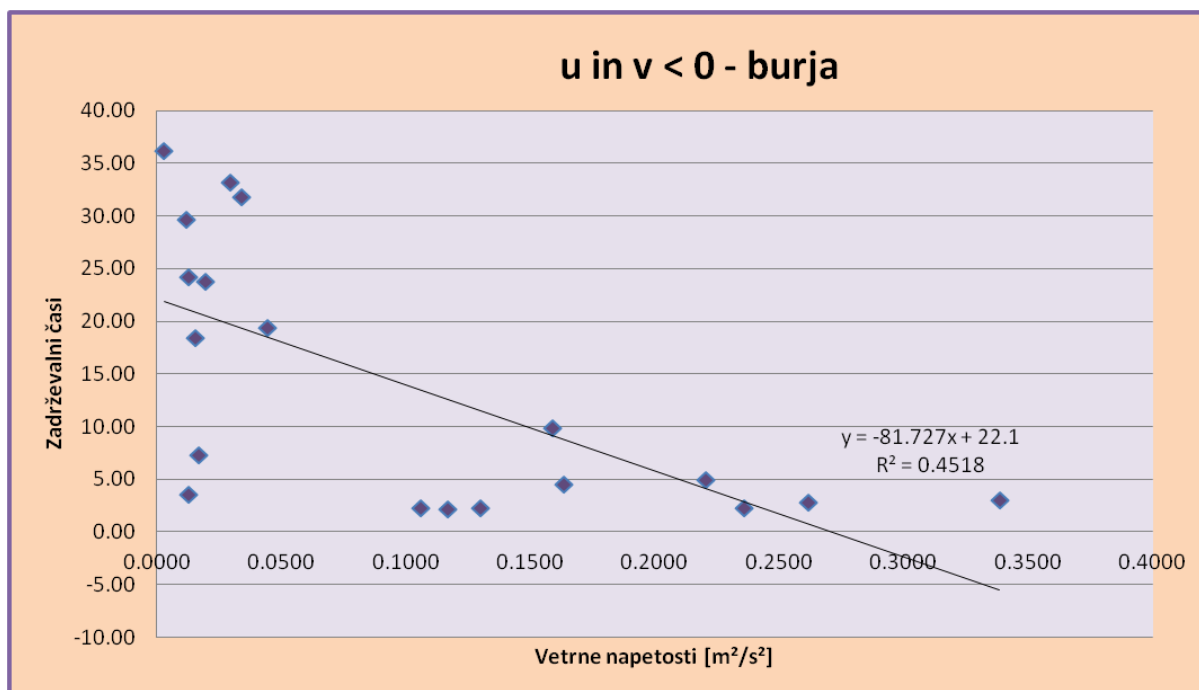
Slika 25: Zveza med vetrnimi napetostmi in zadrževalnimi časi, upoštevamo vse rezultate (absolutne vrednosti jakosti vetra)



Slika 26: Zveza med šibkejšimi (absolutnimi) vetrnimi napetostmi (pod $0,1 m^2/s^2$) in zadrževalnimi časi. Regresijska premica ima naraščajoč trend, za kar ni fizikalne utemeljitve.



Slika 27: Zveza med močnejšimi (absolutnimi) vetrnimi napetostmi (nad $0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$) in zadrževalnimi časi.



Slika 28: Zveza med vetrnimi napetostmi in zadrževalnimi časi v primeru vetra iz tretjega kvadranta izkazuje najvišjo korelacijo med spremenljivkama.

4 ZAKLJUČKI

S prireditvijo transportno-disperzijskega modela Nafta3D ter podanimi dnevnimi hitrostnimi polji in vetrnimi napetostmi za leto 2012 smo prvič doslej izvedli račun zadrževalnih časov vode v Tržaškem zalivu. Osredotočili smo se na:

- prikaz letnih vrednosti zadrževalnih časov T_R pri umerjenih vertikalnih koeficientih turbulentne difuzije D_v
- primerjavo zadrževalnih časov po globini – ali so ob dnu drugačni (višji) kot v vrhnjih slojih
- vpliv jakosti vetrnih napetosti na dolžino T_R .

Ugotovitve lahko strnemo v:

- zadrževalni čas se pomembno razlikuje tako glede na letni čas kakor glede na vremenske razmere. S simulacijami, izvedenimi z obstoječim modelom brez vgrajenega modela turbulence, po principu umerjanja D_v , lahko govorimo o zadovoljivi natančnosti zgolj v primeru krajših zadrževalnih časov, ki se pojavijo pozimi in/ali v primeru močne burje.
- zadrževalni čas se razlikuje po globini, saj je večji del leta, ko ne pihajo izrazito močni vetrovi, T_R v zgornjih slojih znatno krajši kakor v globljih plasteh. To je pomembno tako za zadrževanje onesnažil v Tržaškem zalivu kot tudi za nadaljnje modeliranje trofičnih procesov, saj se v različnih globinah dogajajo različni biogeokemični procesi.
- izvedene statistične analize in izračunani korelacijski koeficienti med jakostmi vetrnih napetosti in zadrževalnimi časi niso pokazale močne povezave med tema spremenljivkama, čeprav na prvi pogled povezava med krajšimi (daljšimi) zadrževalnimi časi in močnejšim (šibkejšim) vetrom obstaja. Najmočnejša povezava se je pokazala v primeru burje.

Sklepamo, da je izvedeni način računanja z obstoječim modelom razmeroma zanesljiv zgolj takrat, ko so zadrževalni časi kratki, vpliv advekcije pa prevladuje nad turbulentno difuzijo. Poudariti želimo, da je potrebno za večjo zanesljivost rezultatov v model Nafta3D vgraditi model turbulence z dvema enačbama (npr. $k-\epsilon$) ali v model vgraditi dodatni vmesnik, ki bo lahko horizontalne, predvsem pa vertikalne koeficiente turbulentne difuzije prebral iz rezultatov hidrodinamičnega modela. Zlasti v obdobjih šibkega vetra prevladuje vpliv turbulentne difuzije, D_v pa se v daljših obdobjih spreminja tudi za velikostni razred. Zgolj z

eno konstantno vrednostjo D_v , ki jo umerimo glede na hitrosti toka v začetnem delu simulacije, boljših rezultatov ne moremo dobiti.

Potrebno bi bilo tudi podrobno preučiti in izboljšati robni pogoj ob dnu, saj se v slojih, ki imata največjo stično površino z dnom, ne glede na izbrani vertikalni koeficient turbulentne viskoznosti zadrži veliko število delcev – proces nima fizikalne osnove in verjetno bi z drugačnim robnim pogojem ob dnu dosegli fizikalno bolj utemeljene rezultate.

Ugotovili smo, da močnejši veter ne povzroča nujno hitrejšega odtekanja delcev iz zaliva, ampak zelo verjetno vpliva na njihovo prerazporejanje, vrtinčenje in mešanje. Edina povezava s korelacijskim koeficientom nad 0,4 se je pokazala v primeru burje, ko veter piha iz severovzhodne smeri skoraj pravokotno na odprti rob zaliva. Hkrati je potrebno dodati še, da je količina podatkov in rezultatov simulacij za resno iskanje korelacije med burjo in zadrževalnim časom nezadostna, bi pa jo bilo smiselno preveriti v prihodnje, ob vgrajenem modelu turbulence, izboljšanem robnem pogojem ob dnu in večletnemu naboru podatkov.

VIRI

Ascione Kenov, I., Sámano M.L., Bárcena, J.F., Del Campo, A., Garcia, A., Neves, R., Pita, G., Santos, A., Ventura, J. 2012. Modelling procedure for the evaluation of water renewal in harbour areas. Portonovo project final Report: 1–30.

Basu, B.K., Pick, F.R. 1996. Factors regulating phytoplankton and zooplankton biomass in temperate rivers. *Limnology and Oceanography* 41: 1572–1577.

Bogunović, B., Malačič, V. 2009. Circulation in the Gulf of Trieste: Measurements and model results. *Il nuovo cimento Online First*. doi: [10.1393/ncc/i2008-10310-9](https://doi.org/10.1393/ncc/i2008-10310-9).

Boukthir, M., Barnier, B. 2000. Seasonal and inter-annual variations in the surface freshwater flux in the Mediterranean Sea from the ECMWF re-analysis project. *Journal of Marine Systems* 24: 343–354.

Braunschweig, F., Martins, F., Chambel, P., Neves, R. 2003. A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case, *Ocean Dynamics* 53: 137–145

Cerco, C., Cole, T. 1993. Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay. *ASCE Journal of Environmental Engineering* 119, 6: 1006-1025.

Choi, K.W., Lee, J.H.W., Cheung, Y.K. 1989. A numerical study of tidal flushing in a typhoon shelter. In: Ko, N.W.M., Kot, S.C. (Eds.): *Proc. 4th Asian Fluid Mech. Congress*, vol. 1. Dept. Of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong: B32–B35.

Choi, K.W., Lee, J.H.W. 2004. Numerical determination of flushing time for stratified water bodies. *Journal of Marine Systems* 50: 261– 81.

Christensen, D.L., Carpenter, S.R., Cottingham, K.L., Knight, S.E., LeBouton, J.P., Schindler, D.E., Voichick, N. 1996. Pelagic responses to changes in dissolved organic carbon following division of a seepage lake. *Limnology and Oceanography* 41: 553–559.

Crise, A., Querin, S., Malačič, V. 2006. A strong bora event in the Gulf of Trieste: a numerical study of wind driven circulation in stratified conditions with a preoperational model. *Acta Adriatica* 47 (Suppl.): 185–206.

Četina, M. 1992. Tridimenzionalni matematični baroklini model za izračun tokov v jezerih in morju. Doktorska disertacija. Ljubljana, FAGG (samozaložba M. Četina): 254 str.

Den Heyer, C., Kalff J. 1998. Organic matter mineralization rates and sediments: A within- and among-lake study. *Limnology and Oceanography* 43: 695–705.

- Dyer, K.R. 1973. *Estuaries: A Physical Introduction*. New York, John Wiley & Sons: 140 str.
- Eshleman, K.N., Hemond, H.F. 1988. Alkalinity and major ion budgets for a Massachusetts reservoir and watershed. *Limnology and Oceanography* 33: 174–185.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H. 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. New York, Academic Press: 483 str.
- Galuf, S. 2005. Simulacija razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Ljubljana, UL FGG (samozaložba S. Galuf): 71 str.
- Hamilton, S.K., Lewis, W.M. 1987. Causes of seasonality in the chemistry of a lake on the Orinoco River floodplain, Venezuela. *Limnology and Oceanography* 32: 1277–1290.
- Hecky, R.E., Campbell, P., Hendzel L.L. 1993. The stiochiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in particulate matter of lakes and oceans. *Limnology and Oceanography* 38: 709–724.
- Herczeg, A.L., Imboden, D. M. 1988. Tritium hydrologic studies in four closed-basin lakes in the Great Basin, U.S.A. *Limnology and Oceanography* 43: 695–705.
- Jeglič, T. 2010. Modeliranje razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomaska naloga. Ljubljana, UL FGG (samozaložba T. Jeglič): 51 str.
- Ketchum, B.H. 1951. The exchanges of fresh and salt waters in tidal estuaries. *Journal of Marine Research* 10, 1: 18–38.
- Knauss, J. A. 1997. *Introduction to Physical Oceanography – 2nd ed.* Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall: 309 str.
- Koutitas, C., O'Connor, B. 1980. Modeling three-dimensional wind induced flows. *Journal of the Hydraulics Division* 106, HY11: 1843–1865.
- Ličer, M., Žagar, D., Jeromel, M., Vodopivec, M. 2012. Numerični modeli za določanje stanja morja v Jadranskem morju, *Ujma* 26: 164–167.
- Luff, R., Pohlmann, T. 1995. Calculation of water exchange times in the ICES-boxes with a Eulerian dispersion model using a half-life time approach. *Deutsche Hydrographic Zeitschrift* 47, 287–299.
- Malhadas, M.S., Leitao, P.C., Silva A., Neves, R. 2009. Effect of the bathymetric changes on the hydrodynamic and residence time in Obidos Lagoon (Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI56: 549–553.

Maslo, A., Panjan, J., Žagar, D. 2014. Large-scale oil spill simulation using the lattice Boltzmann method, validation on the Lebanon oil spill case. *Marine pollution bulletin* 84, 1-2: 225-235.

Mellor, G.L. 2004. Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, Princeton NJ 08544-0710: 56 str.

Mellor, G.L., Blumberg, A.F. 1985. Modeling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system. *Monthly Weather Review* 113, 8: 1379-1383.

Mellor, G.L., Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Reviews of Geophysics* 20, 4: 851-875.

Miranda, R., Braunschweig, F., Leitao, P., Neves, R., Martins, F., Santos, A. 2000. MOHID 2000 – a coastal integrated object-oriented model. *Hydraulic Engineering Software VIII S*: 405–415.

Monsen, N.E., Cloern, J.E., Lucas, L.V. 2002. A comment on the use of flushing time, residence time and age as transport time scales. *Limnology and Oceanography* 47, 5: 1545–1553.

Prandle, D.A. 1984. A modeling study of the mixing of ¹³⁷Cs in the sea of the European continental shelf. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London* 310: 407–436.

Rajar, R., Četina, M. 1997. Hydrodynamic and Water Quality Modelling: An Experience. *Ecological Modelling* 101: 195–207.

Rajar, R., Četina, M., Širca, A. 1997. Hydrodynamic and Water Quality Modelling: Case Studies. *Ecological Modelling* 101: 209–228.

Rajar, R., Četina, M., Horvat, M., Žagar, D. 2007. Mass balance of mercury in the Mediterranean Sea. *Marine Chemistry* 107: 89–102.

Signell, R.P., Butman, B. 1992. Modelling tidal exchange and dispersion in Boston Harbour. *Journal of Geophysical Research – Oceans* 97, C10: 15591–15606.

Stewart, R.H. 2008. Introduction To Physical Oceanography. Texas A & M University, Department of Oceanography: 353 str.

Širca, A. 1992. Modeliranje transporta polutantov po metodi sledenja delcev. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FAGG (samozaložba A. Širca): 87 str.

Tartinville B., Deleersnijder E., Rancher J. 1997. The water residence time in the Mururoa atoll lagoon: sensitivity analysis of a three-dimensional model. *Coral Reefs* 16: 193–203.

Tinta, T., Vojvoda, J., Mozetič, P., Talaber, I., Vodopivec, M., Malfatti, F., Turk, V. 2014. Bacterial community shift is induced by dynamic environmental parameters in a changing coastal ecosystem (northern Adriatic, northeastern Mediterranean Sea) – a 2-year time-series study. *Environmental Microbiology*. doi: [10.1111/1462-2920.12519](https://doi.org/10.1111/1462-2920.12519)

Wang, C.F., Hsu, M. H. in Kuo, A.Y. 2004. Residence time of the Danshuei River estuary, Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 60: 381–93.

Žagar, D. 1994. Tridimenzijski model za simulacijo širjenja nafte. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FAGG (samozaložba D. Žagar): 67 str.

Žagar, D. 1999. Razvoj in aplikacija tridimenzionalnega modela za simulacijo transporta in procesov pretvorb živega srebra v Tržaškem zalivu. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer (samozaložba D. Žagar): 113 str.

Žagar, D., Rajar, R., Širca, A., Horvat, M., Četina, M. 2001. Dolgotrajna 3D simulacija transporta in disperzije živega srebra v Tržaškem zalivu, *Acta hydrotechnica* 19/30: 25-43.

Žagar, D., Četina, M. 2011. Končno poročilo o izdelavi strokovne naloge NAFTA3D. Poročilo UL FGG. Ljubljana, Katedra za mehaniko tekočin: 22 str.

Žagar, D., Ramšak, V., Ličer, M., Petelin, B., Malačič, V. 2012. Uporaba numeričnih modelov ob razlitjih nafte na morju, *Ujma* 26: 168–174.