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 program Gradbeništvo, Hidrotehniška smer

Kandidat: Aljaž Maslo

Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D

Diplomska naloga št.: 3084

Mentor: doc. dr. Dušan Žagar

Somentor: prof. dr. Matjaž Četina

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Aljaž Maslo izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, _____2009

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLE EK

UDK: 519.61/.64:532.5:551.46(043.2) Avtor: Aljaž Maslo Mentor: doc. dr. Dušan Žagar Somentor: prof. dr. Matjaž etina Naslov: Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D Obseg in oprema: 86 strani, 10 preglednic, 175 slik, 31 ena b Klju ne besede: matemati ni model, tridimenzionalni model, hidrodinami ni modul, PCFLOW3D, Tržaški zaliv, krajevno spremenljiv veter, povpre en veter.

Izvle ek

Diplomsko delo primerja sliko tokov vsled krajevno spremenljivega vetra s tokovi zaradi krajevno nespremenljivega vetra na obmo ju Tržaškega zaliva. Vse dosedanje simulacije dinamike tokov na omenjenem obmo ju, z izjemo seminarske naloge Vanje Ramšak (2007), so bile opravljene s povpre nimi, torej krajevno nespremenljivimi vetrovi. V nalogi smo želeli ugotoviti ob utljivost tokov na bolj realne, torej krajevno spremenljive vetrove. Za najboljši približek realnih vetrov so bili uporabljeni rezultati modela Aladin. Analizirali smo primer vetra juga in burje. Iz izbranih krajevno spremenljivih vetrov smoizra unalinjihove enakovredne povpre ne razli ice. Za dolo itev optimalnega robnega pogoja na odprtem robu je bilo s PCFLOW3D opravljenih ve simulacij. Iz opravljenih simulacij je bilo razvidno, da bodo za nadaljne analize najbolj primerni rezultati, dobljeni s plimnim robnim pogojem. Rezultati simulacij krajevno nespremenljivega in povpre nega vetra so bili med seboj primerjani grafi no in numeri no. Za numeri no analizo se je izkazala kot najbolj zanesljiva ocena ujemanja povpre na absolutna napaka. Z grafi no analizo so bili kasneje interpretirani rezultati numeri ne analize. Iz analize je razvidno, da so razlike med cirkulacijo v primeru krajevno spremenljivega vetra in povpre nega vetra precejšnje. Na koncu naloge so rezultati opravljenih simulacij primerjani z meritvami. Kljub majhni koli ini meritev je bilo ugotovljeno boljše ujemanje rezultatov krajevno spremenljvega vetra v primerjavi z rezultati povpre nega.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 519.61/.64:532.5:551.46(043.2) Author: Aljaž Maslo Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dušan Žagar Cosupervisor: Prof. Dr. Matjaž etina Title: The influence of space variable wind on the currents in the Gulf of Trieste, simulations with PCFLOW3D model Notes: 86 pages, 10 tables, 175 figures, 31 equations Keywords: mathematical model, three-dimensional model, hydrodynamic module, PCFLOW3D, the Gulf of Trieste, space variable wind, uniform wind.

Abstract

The study compares currents due to space variable wind with the ones due to space invariable wind in the Gulf of Trieste. All previous simulations of circulation in that area with the exception of the study of Vanja Ramšak (2007) were carried out with the uniform or space invariable winds. We wanted to determine the sensitivity of circulation to more realistic, space variable winds. The results of the Aladin metorological model were used as an approximation of the real winds. We analyzed two cases: scirocco and bora wind. From selected space variable winds, we also calculated their uniform spatially averaged versions. In order to determine the optimal boundary conditions at the open boundary several simulations with PCFLOW3D model were performed. Their results sugested that tidal boundary condition brought the most relevant results. Therefore, all further analyses were performed using the tidal open boundary condition. The results of simulations using space variable and uniform winds were compared graphically and numerically. The average absolute error has been identified as the most reliable estimate of precision for numerical analysis evaluation. Graphical analyses were then used for the interpretation of numerical results. The analyses shows that the differences between the circulation of the space variable and uniform wind are significant. At the end of the thesis, simulation results were compared to measurements. Despite the small number of measurements we found a better agreement between the results of the space variable wind as using the uniform winds results.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Dušanu Žagarju ter somentorju prof. dr. Matjažu etini za trud, as in nasvete, ki sta mi jih namenila med pisanjem diplomske naloge. Zahvaljujem se tudi Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO) in Nacionalnemu inštitutu za biologijo – Morski biološki postaji Piran (NIB-MBP) za posredovanje potrebnih podatkov za diplomsko nalogo.

Še posebej se zahvaljujem tudi mojima staršema, ki sta me v asu študija in ob nastajanju diplomske naloge podpirala in mi ves as stala ob strani.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	OPIS MODELA PCFLOW3D	9
2.1	Hidrodinami ni (HD) modul	9
2.1.1	Osnovne ena be hidrodinami nega modula	10
2.1.2	Modeli turbulence	13
2.1.3	Metode reševanja	17
2.2	Transportno disperzijski (TD) modul	20
2.3	Sedimentacijski (SD) modul	21
2.4	Bio-geokemi ni (BGK) modul	22
3	IZRA UN KRAJEVNO NESPREMENLJIVIH-POVPRE NIH	
	VETROV IZ KRAJEVNO SPREMENLJIVIH	23
3.1	Izpeljava formule za dolo itev komponent krajevno nespremenljive	ga-
	povpre nega vetra	26
4	VHODNI PODATKI IN SIMULACIJE	29
5	PRIMERJAVA TOKOVNIH SLIK	35
5.1	Numeri na primerjava tokovnih slik	35
5.1.1	Rezultati numeri ne analize	39
5.2	Grafi na primerjava tokovnih slik	43
5.2.1	Primerjava vektorskih slik tokov vetra jugo	47
5.2.2	Primerjava vektorskih slik tokov burje	55
5.2.3	Grafi razlike vektorjev – grafi kompas	62
5.2.4	Grafi napake smeri	67
5.2.5	Grafi relativne napake hitrosti	72
5.2.6	Grafi relativne napake	77
5.3	Primerjava rezultatov simulacij z meritvami	82
6	ZAKLJU KI IN NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO	85
	VIRI	87

VIII

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Pomen oznak	36
Preglednica 2: Povpre ne hitrosti BURJA	39
Preglednica 3: Povpre ne hitrosti JUGO	39
Preglednica 4: Napaka razlike vektorjev burja	40
Preglednica 5: Napaka razlike vektorjev jugo	40
Preglednica 6: Povpre ni vmesni kot BURJA	41
Preglednica 7: Povpre ni vmesni kot JUGO	41
Preglednica 8: Napaka velikosti hitrosti burja	42
Preglednica 9: Napaka velikosti hitrosti jugo	42
Preglednica 10: Primerjava rezultatov simulacij z meritvami	84

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz obravnavanega obmo ja	7
Slika 2: Prikaz turbulence in potovanja barvila znotraj laminarnega in turbulentnega toka	14
Slika 3: Diskretizacija ra unskega podro ja (aksonometri ni pogled) (etina, 1992)	18
Slika 4: Simulacije vetra burje z modelom Aladin	24
Slika 5: Simulacije vetra jugo z modelom Aladin	24
Slika 6: Primerjava velikosti obmo ja izpisanih rezultatov modela Aladin z velikostjo	
obmo ja izvršenih simulacij	25
Slika 7: Primerjava grobe mreže modela Aladin z bolj fino mrežo izvršenih simulacij	25
Slika 8: Primerjava linearne (modra barva) ter kubi ne interpolacije(rde a barva)	26
Slika 9: Naklju ne to ke	26
Slika 10: Triangulacija	26
Slika 11: Pregled ali izpolnjuje Delaunayev pogoj	26
Slika 12: Skica celotnega obmo ja in podobmo ij na katerih delujeta krajevno spremenljiv	' ter
povpre en veter	27
Slika 13: Skica poteka vertikalnega prereza	30
Slika 14: Prikaz obmo ja za prikaz tokov ob odprtem robu	30
Slika 15: Tokovi na obmo ju odprtega roba pri radiaciskem robnem pogoju ob burji krajev	vno
spremenljive smeri	31
Slika 16: Dodatno pove ano obmo je ozna eno na sliki 15	31
Slika 17: Tokovi na obmo ju odprtega roba pri kontinuitetnem robnem pogoju ob burji	
krajevno spremenljive smeri	31
Slika 18: Dodatno pove ano obmo je, ozna eno na sliki 17	31
Slika 19: Tokovi na obmo ju odprtega roba pri plimnem robnem pogoju ob burji krajevno	I
spremenljive smeri	32
Slika 20: Tokovi na obmo ju odprtega roba pri radiaciskem robnem pogoju ob jugu krajev	'no
spremenljive smeri	32
Slika 21: Dodatno pove ano obmo je, ozna eno na sliki 20	32
Slika 22: Tokovi na obmo ju odprtega roba pri kontinuitetnem robnem pogoju ob jugu	
krajevno spremenljive smeri	33
Slika 23: Dodatno pove ano obmo je, ozna eno na sliki 22	33

Х

Slika 24: Tokovi na obmo ju odprtega roba pri plimnem robnem pogoju ob jugu krajevno spremenljive smeri 33 Slika 25: Skica pomena vektorskih oznak 35 Slika 26: Primerjava razpršenosti rezultatov MAE ter RMSE 39 Slika 27: Primer grafa kompas 44 Slika 28: Primer grafa pred povpre enjem rezultatov 45 Slika 29: Primer grafa s prikazom rezultatov spremenljivega in povpre nega vetra po povpre enju rezultatov 45 Slika 30: Primer grafa RNR 45 Slika 31: Primer grafa RNH 46 Slika 32: Primer grafa NS 47 Slika 33: Primerjava povpre ne ter spremenljive smeri vetra juga 47 Slika 34: Primerjava tokov ob jugu na globini 0,5 m 48 Slika 35: Primerjava tokov ob jugu na globini 1,5 m 48 Slika 36: Primeriava tokov ob jugu na globini 2.5 m 49 Slika 37: Primerjava tokov ob jugu na globini 4,5 m 49 Slika 38: Primerjava tokov ob jugu na globini 6,5 m 50 Slika 39: Primerjava tokov ob jugu na globini 8,5 m 50 Slika 40: Primerjava tokov ob jugu na globini 10,5 m 51 51 Slika 41: Primerjava tokov ob jugu na globini 12,5 m Slika 42: Primerjava tokov ob jugu na globini 14,5 m 52

Slika 42: Primerjava tokov ob jugu na globini 14,5 m Slika 43: Primerjava tokov ob jugu na globini 16,5 m Slika 44: Primerjava tokov ob jugu na globini 19,5 m Slika 45: Primerjava tokov ob jugu na globini 22,5 m Slika 46: Primerjava tokov srednjih hitrosti po globini ob jugu Slika 47: Primerjava povpre ne ter spremenljive smeri vetra burje Slika 48: Primerjava tokov ob burji na globini 0,5 m Slika 49: Primerjava tokov ob burji na globini 1,5 m Slika 50: Primerjava tokov ob burji na globini 2,5 m Slika 51: Primerjava tokov ob burji na globini 4,5 m Slika 52: Primerjava tokov ob burji na globini 6,5 m

Slika 53: Primerjava tokov ob burji na globini 8,5 m

52

53

53

54

55

55

56

56

57

57

58

Slika 54: Primerjava tokov ob burji na globini 10,5 m	58
Slika 55: Primerjava tokov ob burji na globini 12,5 m	59
Slika 56: Primerjava tokov ob burji na globini 14,5 m	59
Slika 57: Primerjava tokov ob burji na globini 16,5 m	60
Slika 58: Primerjava tokov ob burji na globini 19,5 m	60
Slika 59: Primerjava tokov ob burji na globini 22,5 m	61
Slika 60: Primerjava tokov srednjih hitrosti po globini ob burji	61
Slika 61: Graf kompas za veter jugo	62
Slika 62: Graf kompas za veter burjo	62
Slika 63: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 0,5 m	62
Slika 64: Graf kompas ob burji za tokove na globini 0,5 m	62
Slika 65: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 1,5 m	63
Slika 66: Graf kompas ob burji za tokove na globini 1,5 m	63
Slika 67: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 2,5 m	63
Slika 68: Graf kompas ob burji za tokove na globini 2,5 m	63
Slika 69: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 4,5 m	63
Slika 70: Graf kompas ob burji za tokove na globini 4,5 m	63
Slika 71: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 6,5 m	64
Slika 72: Graf kompas ob burji za tokove na globini 6,5 m	64
Slika 73: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 8,5 m	64
Slika 74: Graf kompas ob burji za tokove na globini 8,5 m	64
Slika 75: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 10,5 m	64
Slika 76: Graf kompas ob burji za tokove na globini 10,5 m	64
Slika 77: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 12,5 m	65
Slika 78: Graf kompas ob burji za tokove na globini 12,5 m	65
Slika 79: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 14,5 m	65
Slika 80: Graf kompas ob burji za tokove na globini 14,5 m	65
Slika 81: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 16,5 m	65
Slika 82: Graf kompas ob burji za tokove na globini 16,5 m	65
Slika 83: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 19,5 m	66
Slika 84: Graf kompas ob burji za tokove na globini 19,5 m	66
Slika 85: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 22,5 m	66

XII

Slika 86: Graf kompas ob burji za tokove na globini 22,5 m	66
Slika 87: Graf kompas za tokove srednjih hitrosti po globini ob jugu	66
Slika 88: Graf kompas za tokove srednjih hitrosti po globini ob burji	66
Slika 89: Prikaz napake smeri za veter jugo	67
Slika 90: Prikaz napake smeri za veter burjo	67
Slika 91: Prikaz napake smeri na globini 0,5 m ob jugu	67
Slika 92: Prikaz napake smeri na globini 0,5 m ob burji	67
Slika 93: Prikaz napake smeri na globini 1,5 m ob jugu	68
Slika 94: Prikaz napake smeri na globini 1,5 m ob burji	68
Slika 95: Prikaz napake smeri na globini 2,5 m ob jugu	68
Slika 96: Prikaz napake smeri na globini 2,5 m ob burji	68
Slika 97: Prikaz napake smeri na globini 4,5 m ob jugu	68
Slika 98: Prikaz napake smeri na globini 4,5 m ob burji	68
Slika 99: Prikaz napake smeri na globini 6,5 m ob jugu	69
Slika 100: Prikaz napake smeri na globini 6,5 m ob burji	69
Slika 101: Prikaz napake smeri na globini 8,5 m ob jugu	69
Slika 102: Prikaz napake smeri na globini 8,5 m ob burji	69
Slika 103: Prikaz napake smeri na globini 10,5 m ob jugu	69
Slika 104: Prikaz napake smeri na globini 10,5 m ob burji	69
Slika 105: Prikaz napake smeri na globini 12,5 m ob jugu	70
Slika 106: Prikaz napake smeri na globini 12,5 m ob burji	70
Slika 107: Prikaz napake smeri na globini 14,5 m ob jugu	70
Slika 108: Prikaz napake smeri na globini 14,5 m ob burji	70
Slika 109: Prikaz napake smeri na globini 16,5 m ob jugu	70
Slika 110: Prikaz napake smeri na globini 16,5 m ob burji	70
Slika 111: Prikaz napake smeri na globini 19,5 m ob jugu	71
Slika 112: Prikaz napake smeri na globini 19,5 m ob burji	71
Slika 113: Prikaz napake smeri na globini 22,5 m ob jugu	71
Slika 114: Prikaz napake smeri na globini 22,5 m ob burji	71
Slika 115: Prikaz napake smeri srednjih hitrosti po globini ob jugu	71
Slika 116: Prikaz napake smeri srednjih hitrosti po globini ob burji	71
Slika 117: Prikaz relativne napake hitrosti za veter jugo	72

XIII

Maslo, A. 2009. Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D. Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Hidrotehni na smer.

Slika 118: Prikaz relativne napake hitrosti za veter burjo	72
Slika 119: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 0,5 m ob jugu	72
Slika 120: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 0,5 m ob burji	72
Slika 121: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 1,5 m ob jugu	73
Slika 122: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 1,5 m ob burji	73
Slika 123: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 2,5 m ob jugu	73
Slika 124: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 2,5 m ob burji	73
Slika 125: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 4,5 m ob jugu	73
Slika 126: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 4,5 m ob burji	73
Slika 127: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 6,5 m ob jugu	74
Slika 128: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 6,5 m ob burji	74
Slika 129: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 8,5 m ob jugu	74
Slika 130: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 8,5 m ob burji	74
Slika 131: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 10,5 m ob jugu	74
Slika 132: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 10,5 m ob burji	74
Slika 133: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 12,5 m ob jugu	75
Slika 134: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 12,5 m ob burji	75
Slika 135: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 14,5 m ob jugu	75
Slika 136: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 14,5 m ob burji	75
Slika 137: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 16,5 m ob jugu	75
Slika 138: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 16,5 m ob burji	75
Slika 139: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 19,5 m ob jugu	76
Slika 140: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 19,5 m ob burji	76
Slika 141: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 22,5 m ob jugu	76
Slika 142: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 22,5 m ob burji	76
Slika 143: Prikaz relativne napake hitrosti srednjih hitrosti po globini ob jugu	76
Slika 144: Prikaz relativne napake hitrosti srednjih hitrosti po globini ob burji	76
Slika 145: Prikaz relativne napake za veter jugo	77
Slika 146: Prikaz relativne napake za veter burjo	77
Slika 147: Prikaz relativne napake na globini 0,5 m ob jugu	77
Slika 148: Prikaz relativne napake na globini 0,5 m ob burji	77
Slika 149: Prikaz relativne napake na globini 1,5 m ob jugu	78

XIV

Slika 150: Prikaz relativne napake na globini 1,5 m ob burji	78
Slika 151: Prikaz relativne napake na globini 2,5 m ob jugu	78
Slika 152: Prikaz relativne napake na globini 2,5 m ob burji	78
Slika 153: Prikaz relativne napake na globini 4,5 m ob jugu	78
Slika 154: Prikaz relativne napake na globini 4,5 m ob burji	78
Slika 155: Prikaz relativne napake na globini 6,5 m ob jugu	79
Slika 156: Prikaz relativne napake na globini 6,5 m ob burji	79
Slika 157: Prikaz relativne napake na globini 8,5 m ob jugu	79
Slika 158: Prikaz relativne napake na globini 8,5 m ob burji	79
Slika 159: Prikaz relativne napake na globini 10,5 m ob jugu	79
Slika 160: Prikaz relativne napake na globini 10,5 m ob burji	79
Slika 161: Prikaz relativne napake na globini 12,5 m ob jugu	80
Slika 162: Prikaz relativne napake na globini 12,5 m ob burji	80
Slika 163: Prikaz relativne napake na globini 14,5 m ob jugu	80
Slika 164: Prikaz relativne napake na globini 14,5 m ob burji	80
Slika 165: Prikaz relativne napake na globini 16,5 m ob jugu	80
Slika 166: Prikaz relativne napake na globini 16,5 m ob burji	80
Slika 167: Prikaz relativne napake na globini 19,5 m ob jugu	81
Slika 168: Prikaz relativne napake na globini 19,5 m ob burji	81
Slika 169: Prikaz relativne napake na globini 22,5 m ob jugu	81
Slika 170: Prikaz relativne napake na globini 22,5 m ob burji	81
Slika 171: Prikaz relativne napake srednjih hitrosti po globini ob jugu	81
Slika 172: Prikaz relativne napake srednjih hitrosti po globini ob burji	81
Slika 173: Položaj oceanografske boje Vida	82
Slika 174: Primerjava vektorjev hitrosti pod bojo Vida ob burji	83
Slika 175: Primerjava vektorjev hitrosti pod bojo Vida ob jugu	83

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

и	komponenta hitrosti v x smeri	
v	komponenta hitrosti v y smeri	
W	vertikalna hitrost	
Wb	komponenta hitrosti v z smeri na spodnjem robu kontrolnega	
	volumna	
W _t	komponenta hitrosti v z smeri na gornjem robu kontrolnega	
	volumna	
h	debelina posameznega sloja	
$h_{ m min}$	debelina najtanjšega sloja	
Н	celotna globina vode od dna do trenutne gladine	
$f = 2\omega \sin \varphi$	parameter Coriolisove sile, kjer je kotna hitrost zemlje in	
	zemljepisna širina	
t	as	
p_a	atmosferski tlak	
Zb	kota dna	
N_h	horizontalni koeficient turbulentne viskoznosti	
N_{v}	vertikalni koeficient turbulentne viskoznosti	
	gostota	
wx	strižna napetost na površini vrhnjega sloja zaradi vetra v x smeri	
wy	strižna napetost na površini vrhnjega sloja zaradi vetra v y smeri	
bx	strižna napetost na dnu spodnjega sloja zaradi hrapavosti v x	
	smeri	
by	strižna napetost na dnu spodnjega sloja zaradi hrapavosti v y	
	smeri	
Ν	število horizontalnih slojev, gledano v z smeri	
h_a	globina vode v površinskem sloju	
Т	temperatura	
S	slanost	
D_h	horizontalni koeficient turbulentne difuzije	
D_{v}	vertikalni koeficient turbulentne difuzije	

R	penetracija kratkovalovnega sevanja preko vodne gladine
<i>x</i> , <i>y</i> , <i>z</i>	dimenzije kontrolnega volumna
C _{smaH}	brezdimenzijski koeficient Smagorinskega, ki se dolo a
	empiri no
С	koncentracija poljubnega nekonservativnega polutanta
<i>x</i> , <i>y</i> , <i>z</i>	koordinatne smeri
SRC	izvorno/ponorni len
D	difuzijski koeficient
W _s	hitrost usedanja delcev plavin (sedimentacijska hitrost)
v _T	turbulentna viskoznost
k	turbulentna kineti na energija
l	dolžinsko merilo
β	koeficient volumenskega raztezanja vode
φ	vzgon (skalar)
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_{\varepsilon}, \sigma_{t,}C_{\mu}$	empiri ne konstante
g	gravitacijski pospešek
ρ	gostota
σ_{T}	Prandtl-ovo število
\vec{F}_i	vektor spremenljivega vetra
$ec{F}$	vektor povpre nega vetra
Pi	napovedana vrednost
Oi	opazovana vrednost
<i>v</i> _{s,i}	hitrost – rezultati simulacije s spremenljivim vetrom
$\vec{\mathcal{V}}_{p,i}$	hitrost – rezultati simulacije s povpre nim vetrom
\overline{O}	povpre na vrednost opazovanih vrednosti
$\overline{\mathcal{V}}_p$	povpre na vrednost opazovanih vrednosti hitrosti
n	število vseh opazovanih ali napovedanih vrednosti
MAE	povpre na absolutna napaka
RMSE	koren povpre ne vrednosti kvadratov napake

Maslo, A. 2009. Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D. Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Hidrotehni na smer.

d	indeks ujemanja
α	povpre en vmesni kot
$\overline{\mathcal{V}}_p$	povpre na velikost toka kot posledica povpre nega vetra
\overline{v}_{s}	povpre na velikost toka kot posledica krajevno spremenljivega
	vetra
$\frac{MAE}{\overline{O}}, \frac{MAE}{\overline{v}_p}$	relativna povpre na napaka
$\vec{v}_{s,i}$	rezultati simulacije s krajevno spremenljivim vetrom
$\vec{v}_{p,i}$	rezultati simulacije s povpre nim vetrom
$\Delta \vec{v}_i$	razlika vektorjev
α_i	notranji kot
RNR	relativna napaka razlike
RNH	relativna napaka hitrosti
NS	napaka smeri

1 UVOD

Cilj modeliranja je podrobno preu evanje obravnavanega procesa, oziroma s simulacijami prikazati koli ine ali dogodke, ki bi jih bilo težko ali celo nemogo e izmeriti. Primer je ekstremni visokovodni dogodek ali pa zelo mo an veter. V teh pogojih je izvajanje meritev bodisi nevarno bodisi nemogo e. Zato matemati no modeliranje po eni strani prispeva k boljšim in natan nejšim rešitvam problemov, po drugi strani pa predstavlja tudi ob uten ekonomski prihranek. Tako lahko s pomo jo razvitega in verificiranega modela ter z izvedenimi meritvami simuliramo razne primere, ki se v naravi še niso zgodili, kot je npr. razlitje nafte v Tržaškem zalivu ali napovedovanje širjenja živega srebra znotraj zaliva. V osnovi poznamo dve vrsti modeliranja: matemati no in fizi no.

• Matemati no modeliranje je simuliranje naravnega pojava s pomo jo za ta namen razvitih matemati nih metod. Te metode so obi ajno zapisane v obliki kode, ki tvori ra unalniški program. Program simulira dolo en fizikalni pojav, na primer tokovno cirkulacijo in prenos polutanta v Tržaškem zalivu. Zavedati se moramo, da je zaradi kompleksnosti pojava in zato velike koli ine spremenljivk, ki jih želimo izra unati, simulacija le približek realnega procesa v naravi. Vendar tak približek za inženirsko prakso obi ajno zadostuje. To pa ne pomeni, da se bomo v prihodnje lahko izognili dragim in asovno potratnim meritvam v naravi, kajti meritve potrebujemo za umerjanje, verificiranje in validacijo modela. Šele tak model lahko služi kot merodajno orodje za simulacijo dolo enega pojava. Po drugi strani pa lahko matemati ni model ponudi boljše informacije o vseh detajlih toka in porazdelitvi koncentracij polutanta, kot samo opravljene meritve.

• Fizi no modeliranje je bilo aktualno pred nastopom hitrih in sodobnih ra unalnikov, zdaj pa se ve inoma uporablja v kombinaciji z matemati nimi modeli (umerjanje in preverjanje) ali za izrazito zapletene probleme, ki jih z matemati nimi modeli ne moremo zajeti. Fizi no modeliranje poteka tako, da preu evano obmo je (npr. zaliv) izdelamo v pomanjšanem merilu v hidravli nem laboratoriju, kjer rpamo vodo na model ter pri tem merimo hitrosti in ostale pomembne koli ine, ki v modelu nastopajo. Upoštevamo fizikalne zakone in podobnosti med modelom in naravo. Pri tem na inu modeliranja se pojavijo naslednje omejitve:

• visoka cena izgradnje modela;

- veliko prostora, kjer model poganjamo;
- nezmožnost modeliranja velikih obmo ij (oceanov);
- nezmožnost modeliranja biokemi nih procesov;
- veliko asa, ki ga potrebujemo za izgradnjo modela in izvršitev potrebnih poskusov;
- ko model enkrat podremo, poskusov ni ve mogo e ponoviti oziroma dopolniti.

Simulacije smo opravili s hišnim tridimenzionalnim modelom PCFLOW3D, ki bo podrobneje opisan v drugem poglavju. Omenjeni model se na Katedri za mehaniko teko in razvija in v praksi uporablja že od leta 1985. Namenjen je preu evanju procesov v ve jih vodnih telesih, na primer v jezerih in morjih, kjer so horizontalne komponente hitrosti za red velikosti ve je od vertikalnih komponent. Model se nenehno dopolnjuje in je bil v zadnjih letih poleg hidrodinami nega in transportnega modula dograjen še s sedimentacijskim in bio geokemi nim modulom za nekatere polutante (predvsem živo srebro), tako da predstavlja današnja oblika modela PCFLOW3D celostni ekološki matemati ni model. Uporabljen je bil pri številnih študijah hidrodinamike toka in transporta ter disperzije polutantov tako pri nas kot v tujini.

V Tržaškem zalivu je simulacija hidrodinamike že desetletja predmet razli nih raziskav, ki pogosto potekajo tudi v obliki mednarodnih projektov. V zadnjih dveh desetletjih je bilo za obmo je Tržaškega zaliva izdelanih ve študij, v katerih so bili uporabljeni matemati ni modeli cirkulacije.

V Rajar in etina (1990) je opisano modeliranje vpliva plime in vetra na tok in disperzijo v Severnem Jadranu. Za verifikacijo modela so bile uporabljene meritve, opravljene v letih 1984 - 1986. Ujemanje rezultatov je bilo relativno dobro. Z istim 3D modelom je bil simuliran tok, ki ga povzro ita veter ter transport in disperzija vode reke Pad v severnem Jadranu. Istega leta so tudi italijanski strokovnjaki z numeri nim modeliranjem preu ili transport in difuzijo radionuklidov v Tržaškem zalivu (Longo in sod., 1990). Tudi tu so kot vzrok cirkulacije upoštevali veter in plimo. Na osnovi 3D modela, ki je bil uporabljen pri simulacijah v Severnem Jadranu, je bil izdelan 3D model SIMON (SImulacijski MOdel Nafta) za simulacijo širjenja nafte (Žagar, 1994). Rezultati modeliranja razlitja nafte v Tržaškem zalivu so bili objavljeni naslednje leto (Rajar in sod., 1995a; Rajar in sod., 1995b). Rezultati 3D modela so se dobro ujemali z rezultati 2D metod, za primerjavo pa je bil uporabljen tudi model MIKE-SAW (Spill Analysis Workstation) Danskega hidravli nega inštituta.

Širca (1996) je razvil 2D model za ra un transporta in disperzije živega srebra STATRIM, kjer je tokove v Tržaškem zalivu ra unal z modeloma MIKE-21 (DHI) in LMTe-2D (FGG). 2D model STATRIM je obravnaval le stacionarno nestratificirano stanje in ni podrobneje opisoval dnevne in letne dinamike cirkulacije Tržaškega zaliva.

V naslednjih letih je bil modeliran vpliv vetra na povpre no cirkulacijo in dolgotrajno disperzijo onesnažil v Tržaškem zalivu (Širca in Rajar, 1997b). Preverjena je bila uspešnost in uporabnost dveh metod (metodi VERANDA in VECTRA). Izkazalo se je, da sta obe metodi dovolj natan ni za uporabo. Izvedeno je bilo tudi dodatno umerjanje 2D modela transporta živega srebra STATRIM (Širca in Rajar, 1997a). V simulacijah je bil upoštevan povpre ni letni veter.

Rajar in etina (1997) ter Rajar in sod. (1997) so predstavili modeliranje hidrodinamike in kvalitete vode v dveh prispevkih, kjer je opisan model PCFLOW3D in so predstavljeni rezultati modeliranja Bohinjskega jezera in dveh simulacij v Tržaškem zalivu, razlitja nafte in transporta in disperzije živega srebra.

Rajar in sod. (1998) in Žagar in sod. (1999) so modelirali transport živega srebra v Tržaškem zalivu z 2D in 3D modeli, naslednje leto pa so napisali študijo o onesnaženju z živim srebrom v vodnem okolju ter študijo o transportu živega srebra in njegovem vplivu na Tržaški zaliv. Istega leta je bila ocenjena tudi prva masna bilanca živega srebra v Tržaškem zalivu (Širca in sod., 1999a) ter transport živega srebra v Tržaškem zalivu (Širca in sod., 1999b), Horvat in sod. (1999) pa so predstavili preu evanje posledic onesnaženja z živim srebrom na mo no onesnaženih priobalnih obmo jih. V vseh navedenih študijah je bila cirkulacija na obmo ju Tržaškega zaliva izra unana z 2D in 3D modeli, razvitimi na FGG.

V doktorski disertaciji je Žagar (1999) predstavil nadgraditev tridimenzionalnega baroklinega matemati nega modela PCFLOW3D z novima 3D moduloma za ra un transporta lebde ih plavin in živega srebra v morskem okolju. Kot verifikacija sedimentacijskega modula je bila izvedena primerjava z rešitvami analiti nih ena b, meritev v laboratoriju in naravi ter rezultati sorodnega modela. Tokrat je bila cirkulacija modelirana nestacionarno po sezonah in zaradi uporabe 3D modela je bilo mogo e simulirati stratificirano stanje.

Potrebo po ve dimenzionalnem modeliranju tokov in uporabi modelov cirkulacije pri simulacijah v morju je podrobneje predstavil Rajar (2000). Podani so tudi primeri ra una cirkulacije Sredozemlja in Tržaškega zaliva.

Rajar in sod. (2000) so opisali izvedeno 3D modeliranje kroženja živega srebra v Tržaškem zalivu na osnovi modela PCFLOW3D, Žagar in sod. (2000 in 2001) pa dolgotrajno 3D simulacijo transporta in disperzije živega srebra v raztopljeni in na delce vezani obliki, prav tako na primeru Tržaškega zaliva. V 3D modelu so upoštevali gibanje vode zaradi vpliva vetra, plimovanja in gibalne koli ine rek, ki vtekajo v zaliv, ter stratifikacijo. Za verifikacijo in umerjanje modela so uporabili meritve in opazovanja iz let 1995 – 1997. Doseženo je bilo kvalitativno dobro ujemanje rezultatov in meritev.

Brecelj (2002) je izdelal uporabniški vmesnik za model PCFLOW3D ter ga preizkusil. Program PCFLOW3D je z vmesnikom pridobil na prijaznosti do uporabnika, vendar pa je vmesnik že zastarel. Model PCFLOW3D se namre ves as spreminja, uporabniški vmesnik pa ne sledi posodobitvam modela.

Rajar in sod. (2004a in 2004b) so izvedli simulacijo 3D kroženja živega srebra na priobalnih obmo jih (Tržaški zaliv in zaliv Minamata na Japonskem), kjer so cirkulacijo na posameznih definicijskih obmo jih ponovno ra unali z modelom PCFLOW3D.

Naslednje leto sta bila ponovno simulirana transport in disperzija živega srebra z modelom PCFLOW3D v Tržaškem zalivu za obdobje nekajdnevnega mo nega vetra v zimskih razmerah (Rozman, 2005). Pri tem je bil poudarek na primerjavi modelov turbulence, razlike

pa so bile minimalne, saj so bili vsi ra uni izvedeni v zimskih razmerah. Galuf (2005) je v diplomski nalogi predstavil simulacijo razlitja nafte v Tržaškem zalivu s prenovljenim modelom SIMON2, Žagar (2005) pa simulacije transporta in disperzije živega srebra v vodnem okolju, pri emer je bilo modelirano celo Sredozemlje.

Pri ekspertizi ezmejnega vpliva na rtovanih plinskih terminalov (etina in sod., 2006) se je ponovno izkazalo, da je le 3D modeliranje cirkulacije ustrezno za dolo itev nadaljnjih parametrov transporta in ekološkega modeliranja v priobalnih obmo jih, pri emer je bil uporabljen model PCFLOW3D. Podroben opis sprememb na modelu (dodatni modeli turbulence) in primerjavo simulacij z modelom Cormix je podala Kovš a (2007).

Z izpopolnjenim modelom PCFLOW3D je bila izvedena še študija hidrodinamike s krajevno spremenljivim vetrom (Ramšak, 2007). Vse dotedanje simulacije so bile izvedene s asovno spremenljivim vetrom, v nobenem primeru pa se kot vhodni podatek ni uporabil krajevno spremenljiv veter. Za potrebe simulacij so zaliv razdelili na severni in južni del. V severnem delu zaliva so kot vetra spreminjali, v južnemu delu pa je bila njegova smer konstantna. Jakost vetra je bila tako v južnem kakor v severnem delu zaliva enaka 4 m/s. Za etna smer vetra je bila 303°, nato pa so jo v severnem delu zaliva spreminjali, in sicer za +10, +20, +30, -10, -20 in -30°. S pomo jo modela je bilo izvedenih ve simulacij, iz katerih je bilo razvidno, da ima krajevno spremenljiv veter velik vpliv na tokove in razporeditev slanosti v vseh slojih. Zaradi pomembnega vpliva krajevno spremenljivega vetra na tokove so bile predlagane nadaljnje raziskave na tem podro ju.

Model PCFLOW3D je bil v letu 2007 še posodobljen. Zadnje posodobitve in modeliranje cirkulacije ter transporta in pretvorb živega srebra v Sredozemlju so opisane v Žagar in sod. (2007) ter Rajar in sod. (2007). Kot zadnja študija hidrodinamike v Tržaškem zalivu je bila preverjena možnost uporabe modela MIKE 3 za simulacije hidrodinamike v Tržaškem zalivu (Dori , 2008).

Moja želja je bila narediti diplomsko nalogo, ki bi bila na nek na in povezana z morjem. Predlaganih je bilo ve možnih raziskav. Ena od teh bi obravnavala vpliv ra unske mreže in batimetrije na sliko tokov v Tržaškem zalivu. Vendar je vsaka od teh raziskav temeljila na osnovi nekega povpre nega, prostorsko nespremenljivega vetra. Znano je, da veter v realnosti ni nikoli prostorsko nespremenljiv. Zato smo sklenili natan neje raziskati, kako pomembna oziroma nepomembna je napaka, ki jo storimo z aproksimacijo krajevno spremenljivega vetra s povpre nim.

Na smer in jakost vetra vpliva veliko dejavnikov: vrtenje zemlje, termika, cikloni, anticikloni, obala ... Velik vpliv ima nedvomno tudi relief, saj pod Velebitom ne piha enaka burja kot v Piranskem zalivu. Jadralci tako vedno upoštevamo relief obale, da bi videli, iz katere smeri lahko pri akujemo nekoliko ugodnejši veter. Ponekod se vpliv reliefa kaže kot pove ana jakost vetra, drugje povzro a zatišje pred vetrom. Vpliv reliefnih zna ilnosti površja na razvoj obalnega vetra je dokaj kompleksen. Kjer se zaledje strmo dviguje v višje leže e planote, se vpliv reliefa najbolj odraža prek interakcije med obalnimi in pobo nimi vetrovi. Velik vpliv na hitrost imajo vzdolžno izoblikovane doline, ki kanalizirajo in usmerjajo gibanje zra nih mas v prizemnih plasteh tik nad površjem. Pri spuš anju zra nih mas v reliefnih zožitvah razlika pritiskov pred in v zožitvi pospeši gibanje zra nih mas. Pri vrednotenju vpliva tal in hrapavosti površja je pomembno dejstvo, da so obalni vetrovi omejeni na kilometer do dva debelo plast atmosfere pri tleh. Hitrost vetra zmanjšuje poraš enost terena, v najve ji meri so to gozdne površine ter gosta pozidanost obalnega predela. Veter se odkloni že pred oviro, motnje pa so opazne še na razdalji do dvajsetkratne dolžine objekta in segajo do dvakratne višine. Vpliv izoblikovanosti površja na zna ilnosti vetra je posebej izrazit v primerih, ko se zra ne mase gibljejo tik nad površjem, kar velja tudi za obalno zra no cirkulacijo. Vsaka mikroreliefna zna ilnost mo no vpliva na veter, ga preusmeri, zaustavlja in povzro a vrtin enje, zato so razmere na posameznih obmo jih zelo specifi ne. To velja tudi za celotno obmo je Tržaškega zaliva (Pagon, 2008). V nobenem primeru ni veter enakomerno razporejen po celotnem zalivu. Vedno je precejšen del zaliva zaš iten pred vplivi vetra ne glede na njegovo smer. Vse to je dobro razvidno tudi iz kart vremenske napovedi, ki jih dnevno izdaja ARSO.

Vse simulacije so potekale na obmo ju Tržaškega zaliva (Slika 1). Ta predstavlja severovzhodni del Jadranskega morja. Z morske strani ga omejuje rta, ki povezuje rt Savudrijo in Gradež (Grado) v Italiji. Dolga je približno 21 km in dolo a površino zaliva na 551 km². Tretjino vse površine (180 km²) zavzema slovenski del. Pomembna zna ilnost zaliva je njegova plitvost. Ta povzro a njegove kontinentalne poteze - hitro segrevanje in

notranjega dela pa do 10 metrov. Najve ja izmerjena globina morja je ob piranski Punti (rt Madona) in meri 37,25 m; poimenovali so jo "podvodni Triglav". Rob Tržaškega zaliva je raz lenjen s štirimi manjšimi zalivi: Tržiškim (*it*. Baia di Panzano), Miljskim (*it*. Baia di Muggia), Koprskim in Piranskim. Na severnem ustju Tržaškega zaliva je plitva Gradeška laguna (*it*. Laguna di Grado), ki se nadaljuje v Maransko laguno (*it*. Laguna di Marano) [Moje tvoje morje Slovensko, 2002].



Slika 1: Prikaz obravnavanega obmo ja

Najnovejši posnetek reliefa morskega dna, posredovanega od Nacionalnega inštituta za biologijo - Morske biološka postaje Piran (MBP), je veliko bolj natan en od predhodnega. Vsebuje približno 15-krat ve meritev globine kakor predhodni, zaradi esar je bil tudi potrebni ra unski as nekoliko daljši. Na tem obmo ju je bilo izvršenih že veliko študij hidrodinamike morskih tokov. Velik pomen ima dejstvo, da so vse študije, razen nedavne seminarske naloge Vanje Ramšak (2007), potekale na krajevno nespremenljivih vetrovih. Naloga bo pokazala, kakšna je ob utljivost tokov na krajevno spremenljiv veter.

Glavni cilji diplomske naloge so bili:

- izra unati povpre ne vetrove iz krajevno spremenljivih,
- izvesti simulacije cirkulacije tokov v Tržaškem zalivu na podlagi krajevno spremenljivih vetrov,
- izvesti simulacije cirkulacije tokov v Tržaškem zalivu na podlagi povpre nih vetrov,
- grafi no in numeri no primerjati rezultate simulacij in
- primerjati rezultate z meritvami.

V nadaljevanju bodo opisane teoreti ne osnove, na katerih temelji tridimenzionalni model PCFLOW3D, teoreti ne osnove izra una povpre nega vetra iz prostorsko spremenljivega, izvedene simulacije ter primerjava izvedenih simulacij med seboj in z meritvami.

2 OPIS MODELA PCFLOW3D

Za modeliranje je bil uporabljen model PCFLOW3D, to je tridimenzionalni nestacionarni nelinearni baroklini matemati ni model, ki je bil razvit na Katedri za mehaniko teko in na FGG. Model je sestavljen iz štirih podmodelov oziroma modulov: hidrodinami nega modula (HD), transportno-disperzijskega modula (TD), sedimentacijskega modula (ST) in biogeokemi nega modula (BGC). Ti moduli omogo ajo izvedbo simulacij razli nih fizikalnih, bioloških in kemi nih procesov.

2.1 Hidrodinami ni (HD) modul

HD modul izra unava polje hitrosti ob so asnem izra unu temperature in slanosti. Ta dva parametra vplivata na gostoto vode, le-ta pa povratno na hitrost ter smer toka. Zaradi te lastnosti pravimo, da je model baroklini. Ena be hidrodinami nega modula za opis baroklinega toka so zapisane v Kartezijevem koordinatnem sistemu, tako da sta x in y osi v horizontalni in z os v vertikalni smeri. Ra unsko obmo je je razdeljeno na ve slojev debeline h, ki so med seboj lo eni s horizontalnimi mejnimi ploskvami. Debeline posameznih slojev so lahko razli ne. Zgornja plast ima prosti zgornji rob, kar pomeni, da je debelina sloja ha spremenljivka po asu in prostoru, medtem ko imajo vsi ostali sloji fiksno debelino. Posledi no imajo nekateri parametri v spodnjih ena bah razli no interpretacijo za vrhnji sloj v primerjavi z ostalimi (Rajar in etina, 1997). V vsakem kontrolnem volumnu se na podlagi kontinuitetne in treh dinami nih ena b ter kinemati nega robnega pogoja za vrhnji sloj izra unajo komponente hitrosti u, v, w, tlak p ter gladina vode v površinskem sloju h_a . Izra unane komponente hitrosti se v nadaljevanju uporabijo za reševanje advekcijskodifuzijske ena be, ki dolo a porazdelitev temperature in slanosti. Neenakomerna porazdelitev temperature in slanosti vpliva na gostoto vode in posredno tudi na hitrostno polje, zato se v naslednji iteraciji pri izra unu komponent hitrosti upošteva spremenjena gostota vode.

2.1.1 Osnovne ena be hidrodinami nega modula

• kontinuitetna ena ba za posamezni sloj debeline h, z izjemo površinskega

$$\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + w_t - w_b = 0$$
(2.1)

pomen oznak:

- *u* komponenta hitrosti v *x* smeri
- *v* komponenta hitrosti v *y* smeri
- w_b komponenta hitrosti v z smeri na spodnjem robu kontrolnega volumna
- w_t komponenta hitrosti v z smeri na gornjem robu kontrolnega volumna
- *h* debelina posameznega sloja

Dinami na ena ba v x, y in z smeri

• dinami na ena ba v X smeri

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} + \frac{\partial(huw)}{\partial z} = + fvh - \frac{h\partial p}{\rho\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hN_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hN_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hN_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \tau_{wx} - \frac{1}{\rho} \tau_{bx}$$
(2.2)

• dinami na ena ba v Y smeri

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + \frac{\partial(hvw)}{\partial z} = -fuh - \frac{h\partial p}{\rho\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hN_h \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hN_h \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hN_v \frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{1}{\rho} \tau_{yx} - \frac{1}{\rho} \tau_{by}$$
(2.3)

• dinami na ena ba v Z smeri

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = o \longrightarrow p = p_a + g \int_{z_b}^{z_b + H} \rho dz$$
(2.4)

Pomen oznak:

h	debelina posameznega sloja
Н	celotna gladina vode od dna do trenutne gladine
и, v	vertikalno povpre ne horizontalne hitrosti v posameznem sloju
w	vertikalna hitrost
p_{a}	atmosferski tlak na površini vode
N_h	horizontalni kinemati ni koeficient turbulentne viskoznosti
N_v	vertikalni kinemati ni koeficient turbulentne viskoznosti
τ_{wx} , τ_{wy}	strižna napetost na površini vode v smereh X in Y
τ_{bx} , τ_{by}	strižna napetost zaradi trenja ob dnu v smereh X in Y

Ker se model PCFLOW3D uporablja predvsem za analizo priobalnih morij in jezer, kjer so vertikalne komponente dimenzij in hitrosti za red velikosti manjše v primerjavi s tistimi v horizontalni smeri, je pri tretji dinami ni ena bi uporabljena poenostavitev. Tlak *p* se izra una na podlagi hidrostati ne ena be, pri emer je upoštevano spreminjanje gostote po globini.

• Kinemati ni robni pogoj za površinski sloj

$$\frac{\partial h_a}{\partial t} = -\sum_{K=1}^{N} \left(\frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} \right)$$
(2.5)

Pomen oznak:

N število horizontalnih slojev, gledano v z smeri

 h_a gladina vode v površinskem sloju

Advekcijsko-difuzijski ena bi

Ena bi služita za izra un asovne in prostorske porazdelitve temperature T in slanosti s (lahko tudi poljubnega polutanta), zato spadata bolj v transportno-disperzijski modul, ki je opisan v nadaljevanju. V modelu PCFLOW3D sta upoštevani ena bi tudi v hidrodinami nem modulu, saj je potrebno celoten sistem ena b reševati hkrati, ker porazdelitev temperature in slanosti

vpliva na gostoto, ta pa nazaj na hidrodinami ne koli ine, ki so kon ni rezultat hidrodinami nega modula (baroklini model).

• advekcijsko-difuzijska ena ba za temperaturo T

$$\frac{\partial(hT)}{\partial t} + \frac{\partial(huT)}{\partial x} + \frac{\partial(hvT)}{\partial y} + \frac{\partial(hwT)}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial(hR)}{\rho c_p \partial z} \right)$$
(2.6)

• advekcijsko-difuzijska ena ba za slanost s

$$\frac{\partial(hs)}{\partial t} + \frac{\partial(hus)}{\partial x} + \frac{\partial(hvs)}{\partial y} + \frac{\partial(hws)}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial(hs)}{dt} \right)_{površje}$$
(2.7)

Pomen oznak:

T temperatura [°C]

s slanost

- D_h koeficient vertikalne turbulentne difuzije
- D_{v} koeficient horizontalne turbulentne difuzije
- *R* penetracija kratkovalovnega sevanja preko vodne gladine
- C_p specifi na toplota

Difuzijska koeficienta sta s koeficientoma turbulentne viskoznosti povezana preko Prandtlovega in Schmidtovega (σ_s, σ_T) števila. V PCFLOW3D je omogo en vnos razli nih vrednosti Prandtl ter Schmidtovega števila za *x*, *y* in *z* smer. Maslo, A. 2009. Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D. Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Hidrotehni na smer.

$$D_h = \frac{N_h}{\sigma_T} \text{ oz. } D_h = \frac{N_h}{\sigma_S}$$
(2.8a)

$$D_{v} = \frac{N_{v}}{\sigma_{T}} \text{ oz. } D_{v} = \frac{N_{v}}{\sigma_{s}}$$
(2.8b)

V ra unu je lahko zajet tudi vpliv toplotne izmenjave med teko ino in okoliškim zrakom. Ta je pomemben v simulacijah, ki ponazarjajo asovno dolge procese (ve sezonske ali ve letne), pri katerih nenehno segrevanje in ohlajanje ozra ja povzro a spremembo temperature in posledi no gostote vode. V ve jih morjih lahko taka asovno spremenljiva razporeditev temperature in gostote povzro i znatna gostotna gibanja vodnih mas (npr. Japonsko morje, Rajar in sod., 1997). Vpliv toplotne izmenjave med vodo in zrakom je upoštevan v zadnjem lenu transportno-disperzijske ena be in ga moramo upoštevati tudi pri dolo anju robnih pogojev. V zadnjem lenu advekcijsko-disperzijske ena be za slanost je upoštevan vpliv vtoka oziroma izhlapevanja sladke vode preko površja in vpliv izlo anja soli pri zmrzovanju (Rajar in etina, 1997).

• ena ba stanja

Gostota je odvisna od porazdelitve temperature T, slanosti s in koncentracije poljubnega polutanta C.

$$\rho = \rho(T, s, C) \tag{2.9}$$

2.1.2 Modeli turbulence

Na dolo itev hitrostnega polja (u, v, w) in tlakov p ali višine vode h_a poleg robnih pogojev vpliva tudi prisotnost turbulence. Turbulenco povzro ajo strižne sile med sloji teko ine in na sti iš u teko ine in obale. Nastane stanje, izraženo z mešanjem, vrtin enjem in pulzacijami hitrosti, ki povzro ajo velike izgube energije (dušenje toka). Vpliv turbulence opišemo s koeficienti turbulentne viskoznosti N_v in N_h ter koeficienti turbulentne difuzije D_{vT} , D_{vs} , D_{hT} in D_{hs} . Ti se dolo ijo na podlagi dodatnih ena b, s tako imenovanimi modeli turbulence. Koeficienti turbulentne viskoznosti in difuzije so odvisni od lastnosti toka in ne teko ine, zato so odvisni od kraja in asa v toku. Za turbulentni transport polutanta ali toplote je pomemben predvsem pojav difuzije, ki je posledica mikroturbulence in povzro a, da se koncentracija

snovi razprši po teko ini (etina, 1992). Model PCFLOW3D se uporablja predvsem za simuliranje procesov v ve jih vodnih telesih, kjer so dimenzije v horizontalnih smereh navadno za red velikosti ve je od tistih v vertikalni, zato se koeficienti turbulentne viskoznosti in difuzije obravnavajo lo eno za horizontalno in vertikalno ravnino. Vertikalni koeficienti turbulentne viskoznosti N_v oziroma difuzije D_{vT} in D_{vs} so odvisni tudi od vpliva stratifikacije in se lahko v primeru stabilne stratifikacije bistveno zmanjšajo. V modelu je stopnja stratifikacije opisana z Richardsovim številom *Ri* (etina, 1992). Koeficienta turbulentne viskoznosti in difuzije sta med seboj povezana preko Prandtlovega oziroma Schmidtovega števila, zato se v modelih turbulence obi ajno izra unava samo koeficient turbulentne viskoznosti. Osnovna delitev modelov turbulence je delitev na podlagi števila vsebovanih transportnih ena b, s katerimi se dolo ijo karakteristi ne turbulentne koli ine.



Slika 2: Prikaz turbulence in potovanja barvila znotraj laminarnega in turbulentnega toka

Slika 2 prikazuje »prijaznejšo« razlago delovanja turbulence ter njenega vpliva na polutante (barvilo) ali ostale fizikalne koli ine (temperatura, slanost, hitrost ...). Paralelne rne puš ice ponazarjajo tokovnice, ki so povsod vzporedne glavnemu toku. V laminarnem toku delci teko ine potujejo vzporedno s tokovnicami. V turbulentnem toku pa se pojavljajo vrtinci razli nih velikosti. Ko barvilo vstopi v podro je turbulentnega toka, poskuša slediti tako tokovnicam kot nastalim vrtincem. Ve ji vrtinci potisnejo barvilo mo no lateralno, pre no na tokovnice. Manjši vrtinci pa ustvarijo manjše, a burnejše gibanje, ki barvilo razprši (difuzija).

• model brez transportnih ena b

Konstantne vrednosti turbulentnih koeficientov podamo v vertikalni in horizontalni smeri, ki jih dolo imo na podlagi meritev na fizi nem modelu, ali pa z umerjanjem. Model se uporablja

predvsem v horizontalni smeri (N_h in D_h), saj v vertikalni smeri ne daje dovolj natan nih rezultatov (etina, 1992). Razmeroma še uporabne rezultate daje za tokove v velikih vodnih telesih, kjer ni bistveno pove anih lokalnih hitrosti. Z razvojem ra unalniške tehnologije se na tržiš u pojavljajo vse hitrejši in zmogljivejši ra unalniki. Ker s tem postajajo tudi ra unsko zelo zahtevni problemi bolj obvladljivi in se as ra unanja skrajšuje, se uporaba modelov brez transportnih ena b opuš a.

• Prandtlov model mešalne dolžine

Koeficient turbulentne viskoznosti se dolo i na podlagi karakteristi ne dolžine turbulentnega toka, t.i. mešalne dolžine (l_m), in gradienta hitrosti. Mešalna dolžina je odvisna od vrste toka in se spreminja od primera do primera. Za obravnavo 3D problemov v jezerih in v morjih je model mešalne dolžine manj primeren, zato se v modelu PCFLOW3D ne uporablja (etina, 1992).

• model z eno transportno ena bo – Koutitas vertikalno

Modeli z eno ena bo se uporabljajo predvsem za izra un koeficientov v vertikalni smeri. Turbulentni tok je izražen s turbulentno kineti no energijo k, ki predstavlja neposredno merilo za intenziteto turbulence. V modelu PCFLOW3D je vgrajen t.i. model turbulence Koutitas (etina, 1992 po Koutitas in O`Connor 1980), ki vsebuje poenostavljeno transportno ena bo za k v vertikalni ravnini:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{N_v}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) - N_v \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \epsilon = 0$$
(2.10)

 $_{\rm k}$ je empiri na konstanta, pa disipacija turbulentne kineti ne energije. V ve jih vodnih telesih, kot so morja in jezera, kjer je glavna gonilna sila plimovanje in/ali veter, se po Koutitasovi metodi predpostavi paraboli no porazdelitev vertikalnega koeficienta turbulentne viskoznosti N_{ν} po globini, z vrednostjo ni ob dnu in na površini ter maksimalno vrednostjo na višini 0,6 *H* (etina,1992). Model Koutitas se uporablja v kombinaciji z modelom Smagorinsky ali modelom brez transportnih ena b v horizontalni smeri. eprav je model v osnovi izpeljan za tokove, ki jih inducira veter, se je v modelu PCFLOW3D v asih uporabljal tudi za simulacijo tokov zaradi dotokov ali iztokov, saj se tudi v takem primeru pojavijo najve je turbulence v osrednjem predelu globine, tako da se lahko upošteva paraboli na porazdelitev N_{ν} po vertikali.

• model z dvema transportnima ena bama – k- model

Model vsebuje dodatno transportno ena bo, s katero lahko natan neje dolo imo dolžino disipacije l_0 . Model k- se zelo veliko uporablja na podro ju 2D in 3D tokov. Vgrajen je v model PCFLOW2D, medtem ko v PCFLOW3D še ni bil vgrajen.

• model Smagorinsky-horizontalno

Model Smagorinsky je osnovan na eni ena bi. V modelu PCFLOW3D se uporablja za izra un nelinearnih turbulentnih koeficientov v horizontalni smeri v kombinaciji z modeli Mellor-Yamada, Smagorinsky vertikalno ali izjemoma tudi s Koutitasovim modelom za vertikalno smer. Pri tem modelu lahko spreminjamo brezdimenzijski koeficient C_{smaH} , s katerim uravnavamo izra un koeficienta turbulentne viskoznost zaradi gradientov hitrosti v horizontalni ravnini. Ena ba za horizontalno ravnino je tako:

$$N_{h} = C_{smaH} \Delta x \Delta y \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$
(2.11)

Pomen oznak:

 Δx , Δy dimenzije kontrolnega volumna

 C_{smaH} brezdimenzijski koeficient Smagorinsky, ki se dolo a empiri no

Prednost metode Smagorinsky je v tem, da je koeficient C_{smaH} brezdimenzijska empiri na konstanta, iz esar sledi, da je turbulentna viskoznost funkcija gostote lokalne numeri ne mreže (Δx in Δy) in srednjih gradientov hitrosti v horizontalni ravnini.

• model z dvema transportnima ena bama – Mellor-Yamada

Osnovni model, t.i. model etrte stopnje, vsebuje ve je število ena b, s katerimi so izražene hitrosti ter tlaki turbulentnih fluktacij, turbulentna viskoznost, disipacijske dolžine in empiri ne konstante. Ker je ta model za prakti no uporabo preve zapleten, so bile izvedene dolo ene poenostavitve in tako so nastali modeli 3, 2,5 in 2 stopnje. Nižja kot je stopnja modela, manjše je število uporabljenih ena b, manjša je natan nost, a hitrejši je potek izra una (Mellor in Yamada, 1982). Model, ki se v praksi najve uporablja (druge stopnje), je

tako po številu uporabljenih ena b podoben *k*- modelu. Model Mellor–Yamada je vgrajen v program PCFLOW3D in velja za najbolj natan nega, kar pa za sabo prinese tudi bolj zahtevne in težje dolo ljive robne pogoje. eprav model omogo a ra unanje koeficientov turbulentne viskoznosti tako v horizontalni kot v vertikalni smeri, se v modelu PCFLOW3D uporablja tudi v kombinaciji s preprostejšim modelom Smagorinsky za horizontalno smer.

• model turbulence Smagorinsky-vertikalno

Model Smagorinsky je na podro ju ra unalniškega modeliranja turbulentnih tokov v horizontalni ravnini dobro poznan in veliko uporabljan. Trenutno pa je še v fazi preizkušanja t.i. model Smagorinsky-vertikalno. Po analogiji iz ena be za horizontalno smer se ena bi za ravnino xz in yz glasita:

$$N_{v,x} = C_{smaV} \Delta x \Delta z \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$N_{v,y} = C_{smaV} \Delta y \Delta z \left[\left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$
(2.12)
$$(2.13)$$

Tu je potrebno poudariti, da je PCFLOW3D sicer tridimenzionalni model, saj se upošteva komponente hitrosti v vseh treh smereh, ker pa so komponente hitrosti v vertikalni smeri w skoraj vedno za red velikosti manjše kot v horizontalnih smereh, smo gradiente vertikalne komponente po x in y lahko zanemarili, ne da bi s tem povzro ili bistvene neto nosti. Koeficient C_{smaV} je mo no odvisen od topografije, zato se ga dolo a z umerjanjem. Model Smagorinsky-vertikalno je najnovejši vgrajeni model, a je še v fazi preizkušanja. Prvi rezultati kažejo, da je model zelo zanesljiv in stabilen in je razmeroma natan en za dolo anje hitrosti, manj natan en pa je za izra une disperzije polutantov (Kovšca, 2007).

2.1.3 Metode reševanja

Ra unsko obmo je se s pomo jo numeri nih shem diskretizira na kontrolne volumne z dimenzijami Δx in Δy , medtem ko so volumni po višini enaki debelini posameznega sloja *h*. Reševanje ena b poteka po numeri ni metodi kon nih volumnov, ki je izpeljanka numeri ne metode kon nih razlik. Numeri na mreža je premaknjena v horizontalni smeri. Spremenljivke p, , T, s in C se ra unajo v središ u kontrolnega volumna. Hitrosti u, v in w pa se ra unajo na premaknjenih pozicijah. Princip je splošno uveljavljen in zagotavlja boljše rezultate kot z ra unom vseh koli in v istih to kah numeri ne mreže (etina, 1992).



Slika 3: Diskretizacija ra unskega podro ja (aksonometri ni pogled) (etina, 1992)

Diferencialne ena be nato pretvorimo v diferen ne, tako da jih integriramo znotraj kontrolnih volumnov. Za diskretizacijo v posamezni smeri uporabimo izbrano numeri no shemo. V modelu PCFLOW3D sta na voljo dve numeri ni shemi:

• *HIBRIDNA* shema je kombinacija *centralno-diferen ne* sheme in sheme *gorvodnih razlik* (*UPWIND*). Prva je drugega reda to nosti, a ni primerna za ra unanje konvekcijskih lenov v ena bah. Zato se uporablja v kombinaciji z enostavno interpolacijsko shemo prvega reda to nosti *UPWIND*, pri kateri je privzeto, da je interpolirana vrednost vmesne to ke kontrolnega volumna enaka vrednosti v gorvodni to ki. Numeri na shema *UPWIND* nastopa samo v primerih, ko advekcija proti toku prevlada nad difuzijo, sicer pa poteka ra un po *centralno-diferen ni* shemi. *HIBRIDNA* shema se zaradi enostavnosti in stabilnosti še vedno uporablja, in sicer tudi v primerih z bolj zapletenimi robnimi pogoji in geometrijo. Njena glavna pomanjkljivost pa je pojav numeri ne difuzije, ki lahko v dolo enih primerih (predvsem pri obravnavanju transportno-difuzijskih procesov) znatno vpliva na rezultate. V preteklosti so bile v PCFLOW3D vgrajene nekatere izboljšane razli ice *HIBRIDNE* sheme z namenom zmanjšanja numeri ne difuzije; *NONDIF* in *CONDIF* (etina, 1992).

• *QUICK* (Quadratic Upstream Interpolation Convective Kinematic) shema je kompleksnejša shema tretjega reda to nost in povzro a bistveno manjšo napako zaradi numeri ne difuzije kot *HIBRIDNA* shema, zato se v zadnjih letih veliko uporablja. Slabi lastnosti QUICK sheme sta, da je programiranje in dolo anje robnih pogojev zahtevno ter da se pojavljajo težave s stabilnostjo. Podaljša se tudi ra unski as, kar pa v zadnjem asu, zaradi razvoja vse zmogljivejših ra unalnikov, ni ve problemati no.

• Problem numeri ne difuzije

Pri numeri nem reševanju transportnih ena b po metodi kon nih razlik se pojavijo težave s t.i. numeri no difuzijo. Pri aproksimaciji konvekcijskih lenov se v vsaki iteraciji naredi dolo ena napaka, ki se med potekom izra una pove uje. Napaka predstavlja dolo en pribitek h koeficientom turbulentne viskoznosti in difuzije, zato se gibalna koli ina ali kontaminant širi v ve ji meri kot je fizikalno realno. Pojavlja se samo pri ve dimenzionalnih modelih, in sicer v primeru, ko se smer toka ne ujema s smerjo ene od koordinatnih osi. Možno jo je zmanjšati z zgoš evanjem numeri ne mreže (etina, 1992). Teoreti no bi bilo najbolje ra unati s im ve zelo tankimi enako debelimi sloji, vendar pa bi takšni ra uni hitro prekora ili zmožnosti razpoložljivih procesorjev ali trajali predolgo.

• Izbira asovnega koraka

Prav tako je pomembna tudi pravilna izbira optimalnega asovnega koraka (ustrezne dolžine), s pomo jo katerega zagotovimo numeri no stabilnost in zadovoljivo to nost simulacij. Pri prekratkem asovnem koraku je namre skupni as nesprejemljivo dolg, numeri ne napake iz posameznih asovnih korakov pa se seštevajo in lahko precej vplivajo na kon no to nost ra una, navzgor pa je asovni korak ra una zaradi stabilnosti uporabljene numeri ne metode omejen z naslednjim pogojem:

$$\Delta t \le \frac{h_{\min}^2}{2 \cdot N_v} \tag{2.14}$$

kjer je:

 h_{\min} debelina najtanjšega sloja

 N_{v} koeficient turbulentne viskoznosti v vertikalni smeri
Ena ba 2.14 velja v primeru, ko se koeficienti turbulentne viskoznosti ra unajo po Koutitasu in so po celem sloju enaki. Pri tem je lahko Courantovo število tudi mnogo ve je od 1 (do 15). Pri modelu v nadaljevanju opisane turbulence Mellor-Yamada pa so vertikalni koeficienti v posameznih celicah istega sloja razli ni in je obi ajno Δt potrebno zmanjšati, sicer postane metoda hitro nestabilna in je potrebno vsaj približno izpolniti Courant-Friedrich-Levyjev pogoj; pri tem je Courantovo število lahko najve 3 do 5. Pri modeliranju se obi ajno ra una z 10 do 25 sloji, kar je odvisno od vrste obravnavanega problema, globine vode, to nosti vhodnih podatkov in zahtevane to nosti ra una. Numeri na difuzija povzro a težave predvsem pri metodi kon nih razlik oziroma metodi kon nih volumnov. Pri reševanju pasivnih polutantov (TD modul) lahko uporabimo metodo sledenja delcev (Širca, 1992), pri katerem se numeri na difuzija ne pojavlja.

2.2 Transportno disperzijski (TD) modul

Ker je PCFLOW3D baroklini model, sta dve advekcijsko–difuzijski ena bi vsebovani že v HD modulu, saj se pri hidravli nem izra unu upošteva vpliv temperature in slanosti na gostoto vode in posredno na hitrostno polje. Ena bi sta v skoraj enaki obliki uporabni tudi za ra un transporta in disperzije poljubnega aktivnega polutanta. Zato je bil model PCFLOW3D dopolnjen s samostojnim TD modulom, v katerem so dodatne advekcijsko-difuzijske ena be zapisane za koncentracijo poljubnega nekonzervativnega polutanta *C*. Zadnji len na desni strani ena be predstavlja izvorno/ponorni len, s katerim so opisane biokemi ne reakcije razgradnje ali nastajanja, ki se vršijo v nekonservativnih polutantih (Žagar,1999).

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} + \frac{\partial(hwC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(hD_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) + SRC$$
(2.15)

- *h* debelina obravnavanega sloja
- *u*, *v* horizontalne hitrosti v posameznem sloju
- w vertikalna hitrost
- Dh horizontalni difuzijski koeficient
- Dv vertikalni difuzijski koeficient,
- *C* koncentracija poljubnega nekonservativnega polutanta

x,y,z koordinatne smeri *SRC* izvorno/ponorni len

t as

TD je samostojni modul, ki se za aktivne polutante, ki vplivajo na hidrodinami ne koli ine, rešuje v sklopu s HD. Za pasivne polutante pa ena bo rešujemo v okviru transportnodisperzijskega modula, pri emer sta na voljo dve razli ni metodi. Ena be za izbrani koordinatni sistem lahko namre izpeljemo na dva na ina, in sicer na Eulerjev in Lagrangeov na in. Eulerjev na in (metoda kon nih volumnov) je bolj razširjen in temelji na preu evanju kontrolnega volumna, ki je zapolnjen z gibajo o se teko ino (preu ujemo vektorska in skalarna polja). Drugi na in pa je Lagrangeov (metoda sledenja delcev) i n temelji na preu evanju delcev teko ine. V modelu je direktno vgrajena metoda kontrolnih volumnov, medtem ko je metoda sledenja delcev v posebnem programu, vendar model PCFLOW3D daje rezultate v taki obliki, da so kompatibilni za uporabo v metodi sledenja delcev. Obe metodi sta podrobneje opisani v literaturi (etina, 1992; Širca, 1996)

2.3 Sedimentacijski (SD) modul

Poleg raztopljenih snovi se v vodi nahajajo tudi suspendirani delci lebde ih plavin, ki lahko nase vežejo razli ne polutante in tako posredno vplivajo na kakovost vode. Koncentracija lebde ih plavin vpliva tudi na stopnjo insolacije in s tem na vršitev fotosinteze in drugih bioloških procesov. Sedimentacijski modul, ki omogo a simulacijo transporta nekohezivnih delcev lebde ih plavin, je osnovan na ena bah iz literature (Žagar, 1999 po van Rijn, 1993), na podlagi katerih se dolo i sedimentacijska hitrost, in na tridimenzionalni advekcijsko– disperzijski ena bi, ki je za posamezni sloj debeline h:

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huC) + \frac{\partial}{\partial y}(hvC) + \frac{\partial}{\partial z}((w - W_s)hC) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x}(hD_h\frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(hD_h\frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(hD_v\frac{\partial C}{\partial z})$$
(2.16)

Pomen oznak:

u, *v* horizontalne hitrosti v posameznem sloju

w vertikalna hitrost

- *h* debelina posameznega sloja
- D difuzijski koeficient
- W_s hitrost usedanja delcev plavin (sedimentacijska hitrost)
- *C* koncentracija lebde ih plavin
- *x*,*y*,*z* koordinatne smeri

Reševanje transportno-disperzijske ena be za lebde e plavine ob ustreznih robnih pogojih poteka enako kot reševanje enake ena be za temperaturo, slanost ali koncentracijo poljubnega polutanta. Ra unamo lahko transport plavin v rekah, jezerih in morju, transport polutantov, vezanih na delce plavin, pa tudi dolgoro ne geomorfološke procese v okolju. Dodan je tudi vpliv valovanja na strižne napetosti ob dnu, saj je prav kombiniran vpliv tokov in valovanja ob mo nih vetrovih poglavitni vzrok za resuspendiranje usedlega materiala. Upoštevamo lahko tudi razli ne hidrodinami ne robne pogoje, vgrajeno je usedanje in resuspendiranje delcev ter ra un debeline sedimentacije oziroma erozije (Žagar, 1999). Zaradi velike raznolikosti med posameznimi tipi plavin je potrebno uporabiti razli ne ena be, ki opisujejo ustrezen tip plavin. Ta modul zaenkrat ne omogo a simulacije rinjenih plavin ob dnu.

2.4 Bio-geokemi ni (BGK) modul

Zaenkrat je ta modul prirejen samo za simulacijo procesov pretvorb nekaterih komponent živega srebra (Hg0, HgII, MMHg), ki je lahko raztopljen v vodi, vezan na delce plavin ali na plankton. Modul upošteva bio-geokemi ne procese pretvorb (metilacijo, demetilacijo, redukcijo in oksidacijo), izmenjavo med vodo in zrakom ter med vodo in sedimentom. Ena be v BGK modulu so sicer razmeroma enostavne. Koeficienti reakcij pa so odvisni od okoljskih parametrov ter spremenljivi v prostoru in asu, tako da lahko z njimi opišemo procese pretvorb v naravnem okolju (Žagar, 2007).

3 IZRA UN KRAJEVNO NESPREMENLJIVIH-POVPRE NIH VETROV IZ KRAJEVNO SPREMENLJIVIH

Namen naloge je bil primerjati dinamiko tokov, ki jih povzro i krajevno spremenljiv veter, s tistimi, ki jih povzro i krajevno nespremenljiv veter. Da bi bila primerjava sploh smiselna, je razumljivo predpostaviti, da morata biti povpre ni vrednosti obeh vetrov po smeri in velikosti enaki. Najboljše za primerjavo bi bilo, e bi lahko primerjali realen veter nad Tržaškim zalivom s tistim povpre nim. Vendar trenutno tehnologija, ki bi lahko izmerila veter na daljavo in zajela celoten zaliv, še ne obstaja. Zato smo približek realnega vetra dolo ili s pomo jo rezultatov numeri nega meteorološkega modela Aladin, ki nam jih je posredovala Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO). Aladin je zapleten ra unalniški program, ki simulira vreme na izbranem obmo ju. Za napoved vremenskih parametrov uporablja matemati no-fizikalne ena be, ki opisujejo procese v ozra ju in njihovo interakcijo s tlemi. Robne pogoje predstavljajo rezultati globalnega meteorološkega modela.

Od ARSO smo prejeli rezultate simulacij za primer vetra burje (Slika 4) ter vetra jugo (Slika 5). Simulacija juga je bila izvedena za dan 3. marec 2009 in zapisana po urah 18.00, 21.00 in 24.00, simulacija burje pa za dan 25. februar 2009 in ure 6.00, 9.00, 12.00. Želeli smo imeti primer, kjer je veter po smeri dokaj konstanten in bolj spremenljive jakosti (jugo) ter primer vetra manj spremenljive jakosti in bolj spremenljive smeri (burja). Tem zahtevam sta najbolj ustrezala jugo ob 24. uri in burja ob 12. uri. Tako bi lahko kasneje med drugim ugotovili, kaj ima na tok ve ji vpliv - spremenljiva smer ali spremenljiva jakost vetra. Vse kasnejše simulacije krajevno spremenljivega vetra smo torej izvajali le z jugom, napovedanim za 3. marec ob 24.00, in burjo, simulirano za 25. februar ob 12.00.



Slika 4: Simulacije vetra burje z modelom Aladin



Slika 5: Simulacije vetra jugo z modelom Aladin

Ko sta bila vetrova izbrana, je prišla na vrsto obdelava rezultatov modela Aladin. Tako Aladin kakor PCFLOW3D delujeta tako, da neko obmo je razdelita na veliko manjših kvadratnih podobmo ij, imenovanih tudi kontrolni volumni. Obmo ju, sestavljenem iz takih kvadratov, pravimo mreža. Aladin je izpisal rezultate simulacij za obmo je, po velikosti ve je od celotne

Slovenije (Slika 6). Zato je bilo razumljivo, da njegova mreža podatkov ni bila tako gosta kakor naša, ki obravnava le Tržaški zaliv (Slika 7). Zato je bilo podatke potrebno interpolirati iz bolj grobe mreže modela Aladin na bolj fino mrežo, s katero je operiral PCFLOW3D. e bi primerjali le obmo je Tržaškega zaliva, bi imela naša mreža približno 350-krat ve podatkov kakor Aladinova.



Slika 6: Primerjava velikosti obmo ja izpisanih rezultatov modela Aladin z velikostjo obmo ja izvršenih simulacij



Slika 7: Primerjava grobe mreže modela Aladin z bolj fino mrežo izvršenih simulacij

Interpolacija je v matematiki definirana kot približna vrednost funkcije znotraj obsega znanih nepovezanih vrednosti neodvisne spremenljivke. Interpolirali smo s pomo jo ra unalniškega orodja Matlab. To je program za numeri no ra unanje, matemati no modeliranje in vizualizacijo podjetja MathWorks. Matlab ima v sebi shranjenih že veliko uporabnih funkcij. Ena izmed teh je tudi funkcija, imenovana GRIDDATA, kar bi lahko prevedli kot mreženje podatkov. GRIDDATA je funkcija, ki skozi podane to ke v prostoru Ti(Xi,Yi,Zi) napne ploskev Z(x,y). Nato ji podamo koordinate to ke (X,Y), za katero ne poznamo koordinate Z, funkcija pa jih od ita na tej napeti ploskvi. Griddata ima možnost izbire napete površine. Lahko izberemo gladko površino (cubic-kubi na interpolacija) ali površino, sestavljeno iz ploskvic trikotnikov (linear-linearna interpolacija) (Slika 8). Kubi na interpolacija temelji na interpolaciji s pomo jo polinomov. Temelji na dejstvu, da lahko skozi 4 interpolacijske to ke vedno položimo polinom tretje stopnje. Celotno obmo je interpoliramo tako, da ga razdelimo na podintervale s po štirimi to kami ter upoštevamo prestopne pogoje iz enega podintervala v drugega, kot so zveznost, dovedljivost itd. (Bronštenj in sod., 1997)

Maslo, A. 2009. Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D. Dipl. nal. - UNI. Ljubljana, UL, FGG, Hidrotehni na smer.



Slika 8: Primerjava linearne (modra barva) ter kubi ne interpolacije(rde a barva)

Obe metodi temeljita na Delaunayevi triangulaciji. Delaunayeva triangulacija se imenuje po ruskem matematiku Borisu Nikolajevi u Delaunayu, ki jo je opisal leta 1934. Triangulacija je Delaunayeva, e izpolnjuje Delaunayev pogoj, ki pravi, da v nobenem krogu, ki bi bil o rtan nekemu trikotniku triangulacije, ne sme biti nobene to ke (Slike 9 do 11). S tem dobimo triangulacijo, ki ima najmanjše število tankih trikotnikov (trikotnikov z majhnimi notranjimi koti), kar je nezaželeno in povzro a nevše nosti v praksi. Veliko se uporablja za modeliranje terena ter drugih površin v ra unalništvu (Wikipedia, 2008).



izpolnjuje Delaunayev pogoj

Ker vemo, da veter v naravi nima ostrih robov, je bila izbrana metoda gladke površine. Tako so bili vhodni podatki spremenljivega vetra pripravljeni.

Izpeljava formule za dolo itev komponent krajevno nespremenljivega-3.1 povpre nega vetra

Imejmo površino P, ki jo razdelimo na enaka podobmo ja p (Slika 12). Na vsako celico p deluje veter z neko površinsko strižno silo. Celotno silo, ki deluje na površino P, dobimo, e seštejemo zmnožke površin celice p s pripadajo imi vektorji. Sila krajevno spremenljivega vektorja mora biti enaka sili, ki jih povzro a povpre en veter. Vpliva spremenljivega vetra in povpre nega vetra morata biti enaka.



Slika 12: Skica celotnega obmo ja in podobmo ij na katerih delujeta krajevno spremenljiv ter povpre en veter

Enakost sil - vplivov

$$p \cdot \vec{F}_{1} + p \cdot \vec{F}_{2} + p \cdot \vec{F}_{3} + \dots + p \cdot \vec{F}_{n-1} + p \cdot \vec{F}_{n} = n \cdot p \cdot \vec{F}$$
(3.1)

Pomen oznak:

i1, 2, 3,...,nnštevilo vseh podobmo ij – celic p na katerega razdelimo celotno obmo je P
$$\vec{F}_i$$
vektor spremenljivega vetra, ki deluje na omejenem obmo ju p $\left[\frac{N}{m^2}\right]$ \vec{F} vektor povpre nega vetra, ki deluje na omejenem obmo ju p $\left[\frac{N}{m^2}\right]$ ppodobmo je obmo ja P na katerem delujeta vektorja \vec{F}_i in \vec{F} $\left[m^2\right]$

V ena bi (3.1) pokrajšamo površine p in dobimo

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_{n-1} + \vec{F}_n = n \cdot \vec{F}$$
(3.2)

Enakost mora veljati tako za smer X kakor smer Y. Izpeljana bo le komponenta povpre nega vetra v smeri X, ker je postopek za smer Y povsem enak. Ena bo (3.2) pomnožimo z enotskim vektorjem $\vec{e}_x = (1,0,0)$ in dobimo ena bo, v kateri nastopa F_x , to je komponenta povpre nega vetra v smeri X

$$F_{1,X} + F_{2,X} + F_{3,X} + \dots + F_{n-1,X} + F_{n,X} = n \cdot F_X$$
(3.3)

Sedaj moramo le še preoblikovati ena bo (3.3)

$$F_{X} = \frac{F_{1,X} + F_{2,X} + F_{3,X} + \dots + F_{n-1,X} + F_{n,X}}{n}$$
(3.4)

Ali druga e

$$F_{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Fi_{X}}{n}$$
 komponenta povpre nega vetra v smeri X (3.5)

$$F_{Y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Fi_{Y}}{n}$$
 komponenta povpre nega vetra v smeri Y (3.6)

$$\vec{F} = (F_X, F_Y)$$
 vektor povpre nega vetra, ki deluje na obmo ju *p* (3.7)

S pomo jo ena b (3.5) in (3.6) sta bila izbrana krajevno spremenljiva vetrova, jugo in burja pretvorjena na povpre na vetrova. Glavni vhodni podatki za model PCFLOW3D so bili izra unani na tak na in.

4 VHODNI PODATKI IN SIMULACIJE

Pri simulacijah smo se osredoto ili zgolj na vpliv vetra na dinamiko tokov. Zato pri hidrodinami nih izra unih niso bili upoštevani vplivi, kot so slanost, temperatura, vtok So e, plimovanje, ki bi po nepotrebnem daljšali as simulacij ter povzro ali manjšo jasnost rezultatov. Za potrebe primerjave bi bilo dovolj, e se vsi vhodni podatki razen vetra primerjanih simulacij ne bi razlikovali. Podatki, potrebni za ra un toka, so tako ostali: topografija, numeri na mreža, model, uporabljen za upoštevanje turbulence, podatki o vetru ter robni pogoji.

• Mreža

Za izra un hidrodinami nih koli in je potrebno izbrati ustrezno numeri no mrežo. Ta naj bi bila im gostejša, saj je tako mogo e topografijo obale in dna opisati bolj natan no, pa tudi opis hitrostnega polja v posameznih kontrolnih volumnih je bolj natan en. Vendar pa se z zgoš evanjem numeri ne mreže podaljšuje tudi as ra una. Zato vedno iš emo kompromis, da im bolje zadostimo obema pogojema. Za simulacije smo uporabili enakomerno mrežo, ki je v tlorisu obsegala 163×231 celic, dolžina in širina vsake celice je bila približno 140×130 metrov. Po globini pa je definicijsko obmo je razdeljeno na 29 slojev z debelinami 1 - 4,4 metra. Ker je celic z globino, ve jo od 25 m, le kakšnih 30, so sloji pri dnu nekoliko debelejši. Tako si vrstijo debeline slojev, e za nemo pri dnu: 4,4 m, 3,3 m, 2,2 m, 1,5 m ter nato debeline enega metra vse do površine. To je nekoliko skrajšalo as izra unov, na to nost rezultatov pa ni imelo ve jega vpliva.

• Ra unski as

Za kon ni as simulacije smo vzeli as, ki je bil potreben, da so se hitrostna polja nekoliko ustalila. To je pomenilo, da se je v naslednjih urah cirkulacija vrhnjega sloja, ki je najbolj podvržena vplivom vetra le minimalno spremenila. Ra unski as je bil pri vetru jugo precej ve ji kot pri burji. To pa zato, ker je bila jakost juga nekoliko manjša kakor jakost burje. jugo 30 ur burja 20 ur

Viskoznost

Vpliv turbulence smo upoštevali z modelom Mellor-Yamada v vertikalni smeri ter modelom Smagorinsky v horizontalni smeri.

• Veter

Uporabili smo izra unani krajevno spremenljivi in povpre en veter, kot je opisano v prejšnjem poglavju.

• Odprti rob

Zahodni del obravnavanega obmo ja, ki je prosto povezan s Severnim Jadranom, imenujemo odprti rob (Sliki 13 in 14). PCFLOW3D ima še nekoliko težav z zanesljivostjo simulacij hidrodinamike na odprtem robu. Model ima vgrajene tri vrste robnega pogoja na odprtem robu: plimni pogoj, radiacijski robni pogoj ter kontinuitetni robni pogoj. Plimni robni pogoj smo uporabili tako, da smo vstavil plimo s konstantno višino vode. Za izbiro robnega pogoja smo izvedli tri simulacije za jugo in tri simulacije za burjo za krajevno spremenljiv veter ter enako število simulacij še za povpre en veter. Simulacije so dale med seboj zelo razli ne rezultate.





Slika 13: Skica poteka vertikalnega prereza

Slika 14: Prikaz obmo ja za prikaz tokov ob odprtem robu



Slika 15: Tokovi na obmo ju odprtega roba pri radiaciskem robnem pogoju ob burji krajevno spremenljive smeri



Slika 17: Tokovi na obmo ju odprtega roba pri kontinuitetnem robnem pogoju ob burji krajevno spremenljive smeri



Slika 16: Dodatno pove ano obmo je ozna eno na sliki 15



Slika 18: Dodatno pove ano obmo je, ozna eno na sliki 17

Maslo, A. 2009. Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D. Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Hidrotehni na smer.



Slika 19: Tokovi na obmo ju odprtega roba pri plimnem robnem pogoju ob burji krajevno spremenljive smeri



Slika 20: Tokovi na obmo ju odprtega roba pri radiaciskem robnem pogoju ob jugu krajevno spremenljive smeri



Slika 21: Dodatno pove ano obmo je, ozna eno na sliki 20

Maslo, A. 2009. Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D. Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Hidrotehni na smer.





Slika 22: Tokovi na obmo ju odprtega roba pri kontinuitetnem robnem pogoju ob jugu krajevno spremenljive smeri

Slika 23: Dodatno pove ano obmo je, ozna eno na sliki 22



Slika 24: Tokovi na obmo ju odprtega roba pri plimnem robnem pogoju ob jugu krajevno spremenljive smeri

Na podlagi prikazanih hitrostnih polj v vertikalnih prerezih (Slike 15 do 24) je bilo mogo e sklepati, da daje najbolj pravilne rezultate plimni robni pogoj. Ta je edini dal rezultate, za

katere se je videlo kontinuiteto toka v prav vsakem kontrolnem volumnu. Pri ostalih dveh bi bilo potrebno definicijsko obmo je toliko pove ati, da vpliv motnje ne bi segel v prvotno definicijsko obmo je. Potem pa bi bilo verjetno bolj smiselno uporabiti v praksi že velikokrat preizkušen sistem in pove ano definicijsko obmo je še dodatno zapreti zaradi mogo ih nestabilnosti, ki bi lahko vplivale na notranjost podro ja. Vse nadaljnje simulacije so bile zato izvedene s plimnim robnim pogojem.

5 PRIMERJAVA TOKOVNIH SLIK

5.1 Numeri na primerjava tokovnih slik

Konkretna primerjava rezultatov je temeljila na ugotovitvah prispevkov, ki so obravnavali primerjave vektorskih polj ali ocene natan nosti ra unalniških modelov. Prispevki so bili v obliki lankov: Some coments on the evaluation of the model performance (Willmott, 1982), Uncertainty in air quality modeling (Fox, 1982), Statistics for the evaluation and comparison of models (Willmott in sod., 1985), Judging air quality model performance (Fox, 1980) in diplomske naloge Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D za simulacije hidrodinamike v Tržaškem zalivu (Dori , 2008). Vsem lankom je bilo skupno, da so primerjali rezultate dveh ra unalniških modelov z obsežnimi meritvami. Primerjana modela sta simulirala napoved za dolo eno merilno mesto skozi daljše asovno obdobje. Na koncu so avtorji preverili natan nost ujemanja napovedanih rezultatov z merjenimi in dolo ili boljši model.

Ugotovitve lanka o ovrednotenju delovanja modelov (Wilmott, 1982) smo zaradi njegove konkretnosti vzeli za osnovo numeri ne primerjave rezultatov. V omenjenem lanku je zapisano, da so edini pravi uporabni pokazatelji modelove natan nosti v nadaljevanju opisani izrazi MAE, RMSD, RMSDs, RMSDu ter indeks ujemanja *d*. Ker nismo imeli na voljo obsežnih meritev, smo želeli primerjati tudi rezultate vetra burje in juga med seboj. Zato smo uporabil tudi v literaturi le redko omenjen izraz $\frac{MAE}{\overline{O}}$, ki normira rezultate v primeru razli ne

jakosti vetrov.



Slika 25: Skica pomena vektorskih oznak

Preglednica 1: Pomen oznak		
literatura	uporabljene ozna be	
Pi	$\vec{v}_{s,i}$	napovedana vrednost - V našem primeru rezultati
		simulacije s krajevno spremenljivim vetrom. Zaradi
		jasnosti smo jo ozna ili z $\vec{v}_{s,i}$. Indeks s pove, da gre za
		hitrost kot posledico spremenljivega vetra.
Oi	$\vec{v}_{p,i}$	opazovana vrednost, rezultati simulacije s povpre nim vetrom
\overline{O}	$\overline{\mathcal{V}}_p$	povpre na vrednost opazovanih vrednosti
n		število vseh opazovanih ali napovedanih vrednosti

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |Pi - Oi|}{n} \dots \text{povpre na absolutna napaka (mean absolute error)}$$
(5.1)
RMSE koren povpre ne vrednosti kvadratov napake (root mean square error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Pi - Oi)^2}{n}}$$
(5.2)

RMSE lahko razdelimo na sistemati ni RMSEs in nesistemati ni del RMSEu. Sistemati ni ter nesistemati ni del nam pokažeta velikost linearne/nelinearne napake, ki jo je mogo e s spremembo kode programa dokaj enostavno odpraviti. To je podatek, ki nam pokaže potencial programa.

$$RMSE^{2} = RMSEs^{2} + RMSEu^{2}$$
(5.3)

RMSEs in RMSEu nismo ra unali, ker smo simulacije opravljali vedno z istim ra unalniškim modelom, zato je bila sistemati na/nesistemati na napaka v vseh ra unih enaka. V primeru testiranja dveh razli nih matemati nih modelov izra una te napake nikakor ne bi smeli izpustiti.

d...Indeks ujemanja

Maslo, A. 2009. Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D. Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Hidrotehni na smer.

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (Pi - Oi)^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (Pi - \overline{O} | + |Oi - \overline{O} |)^{2}}\right)$$
(5.4)

Indeks ujemanja je mišljen kot nadomestek izraza $\frac{MAE}{\overline{O}}$, v primeru da je \overline{O} zelo majhen, blizu ni . Ker tega v našem primeru ni bilo, indeksa ujemanja v svojih izra unih nismo uporabljali.

V nalogi smo želeli ugotoviti tudi, kaj je bolj ob utljivo na spremembe vetra - smer toka ali njegova jakost. Zato smo z MAE ra unali dve vrsti napake, in sicer obi ajno napako razlike vektorjev ter še razliko velikosti hitrosti. Z napako velikosti hitrosti ter povpre nimi vmesnimi koti smo lahko podali kvalitetno oceno vpliva jakosti in smeri na kon ne rezultate

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| \vec{v}_{s,i} - \vec{v}_{p,i} \right|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| \Delta \vec{v}_{i} \right|}{n} \dots \text{povpre na absolutna napaka razlike vektorjev}$$
(5.5)

$$MAE_{v} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left\| \vec{v}_{s,i} \right\| - \left\| \vec{v}_{p,i} \right\|}{n} \dots \text{povpre na absolutna napaka velikosti hitrosti}$$
(5.6)

$$\overline{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i}{n} \dots \text{povpre en vmesni kot}$$
(5.7)

$$\overline{v}_{p} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| \vec{v}_{p,i} \right|}{n} \dots \text{povpre na velikost toka kot posledica povpre nega vetra}$$
(5.6)

$$\overline{v}_{s} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |\vec{v}_{s,i}|}{n}$$
 ...povpre na velikost toka kot posledica krajevno

spremenljivega vetra

n

$$\frac{MAE}{\overline{O}}, \frac{MAE}{\overline{v}_p} \dots \text{ relativna povpre na napaka}$$
(5.8)

Relativno povpre no napako smo izbrali kot najbolj primeren izraz za primerjavo rezultatov vetra jugo in burje med seboj. V primeru, da MAE ne bi delili z \overline{O} , bi bilo nesmiselno

37

(5.7)

primerjati rezultate med seboj, ker je povpre na jakost burje nekoliko ve ja od povpre ne jakosti juga. Tako smo normirali rezultate.

Vedno kadar primerjamo rezultate simulacije krajevno spremenljivega vetra s povpre nim, uporabljamo besedo napaka. Vendar to ni napaka ra unalniškega modela. Razumemo jo kot napako, ki jo storimo, e namesto, da bi upoštevali realen veter, upoštevamo povpre nega.

Iz lankov ni bilo mo razbrati, kateri od izrazov je odlo ujo za oceno natan nosti modela. MAE in RMSE sta merilo za približno isto stvar, zato nismo vedeli, katerega bi upoštevali v primeru, da bi kazala nasprotujo e si rezultate. Po naklju ju pa smo na medmrežju odkrili zanimiv lanek, ki pod naslovom Revisiting a 90-year old debate: the advantages of the mean deviation (Gorard, 2004) obravnava devetdeset let staro diskusijo o prednostih in slabostih povpre ne deviacije nad standardno deviacijo. Povpre na deviacija ni enako kakor MAE ter standardna deviacija ni isto kakor RMSE, vendar je zadeva zelo podobna. Tako smolahko ugotovitve omenjenega lanka nekoliko predelali in uporabil tudi za MAE ter RMSE. lanek pravi, da se danes v statistiki množi no uporablja standardna deviacija le zato, ker je bolj zanesljiva ocena razpršenosti rezultatov okoli povpre ne vrednosti kakor povpre na absolutna napaka v primeru Gaussove - normalne porazdelitve meritev. V primeru enakomerne porazdelitve in normalne porazdelitve z upoštevanjem dolo ene napake pa se izkaže za bolj zanesljivo povpre na absolutna napaka. Velika prednost MAE pred RMSE je v predstavljivosti rezultatov. V lanku je teorija podkrepljena s primerom. Ta isti primer smo uporabili tudi za testiranje zanesljivosti MAE ter RMSD. Narejenih je bilo 3000 vzorcev po 10 naklju no enakomerno porazdeljenih števil od 1 do 6 (Slika 26). Povpre na RMSE vrednost celotnega vzorca je znašala 2,42, povpre na MAE vrednost celotnega vzorca pa 1,95 Standardna deviacija 3000 ocenjenih RMSE vzorcev okoli njihove skupne povpre ne vrednosti je znašala 0,459, standardna deviacija 3000 ocenjenih MAE vzorcev okoli njihove skupne povpre ne vrednosti pa 0,452. Enak poizkus smo ponovili še za normalno porazdelitev. Standardna deviacija RMSE je pri normalni porazdelitvi znašala 0,534, standardna deviacija MAE pa 0,441. Ker je bila v obeh poizkusih povpre na razpršenost rezultatov MAE okoli prave povpre ne vrednosti malenkost manjša kakor pri RMSE, je bil to zadosten dokaz, da je MAE enako ali še bolj zanesljiv pokazatelj natan nosti modela kakor RMSE. Zato smo pri numeri nih primerjavah uporabljali le MAE.



Slika 26: Primerjava razpršenosti rezultatov MAE ter RMSE

Preglednica 2: Povpre ne hitrosti BURJA				
globina [m]	\overline{v}_p [m/s]	\overline{v}_s [m/s]		
veter	3,372	4,001		
0,5	0,047	0,073		
1,5	0,033	0,056		
2,5	0,026	0,047		
4,5	0,018	0,038		
6,5	0,015	0,032		
8,5	0,014	0,029		
10,5	0,014	0,026		
12,5	0,015	0,026		
14,5	0,017	0,023		
16,5	0,018	0,024		
19,5	0,019	0,024		
22,5	0,018	0,022		
25,7	0,007	0,009		
srednje hitrosti po globini	0,015	0,031		
povpre je obravnavanih slojev	0,022	0,038		

5.1.1 Rezultati numeri ne analize

Preglednica 3: Povpre ne hitrosti JUGO				
globina [m]	\overline{v}_p [m/s]	\overline{v}_s [m/s]		
veter	3,085	3,105		
0,5	0,042	0,055		
1,5	0,029	0,043		
2,5	0,022	0,038		
4,5	0,015	0,032		
6,5	0,012	0,029		
8,5	0,011	0,027		
10,5	0,011	0,026		
12,5	0,012	0,026		
14,5	0,012	0,023		
16,5	0,013	0,025		
19,5	0,013	0,025		
22,5	0,013	0,021		
25,7	0,005	0,022		
srednje hitrosti po globini	0,012	0,027		
povpre je obravnavanih slojev	0,018	0,033		

Preglednica 4: Napaka razlike vektorjev burja			Preglednica 5: Napaka razlike vektorjev jugo		
globina [m]	MAE [m/s]	$\mathbf{MAE}/\overline{v}_{p}[\%]$	globina [m]	MAE [m/s]	MAE / \overline{v}_p [%]
veter	2,271	67	veter	1,281	42
0,5	0,053	113	0,5	0,037	89
1,5	0,043	129	1,5	0,031	106
2,5	0,038	146	2,5	0,027	120
4,5	0,031	171	4,5	0,024	160
6,5	0,026	180	6,5	0,024	199
8,5	0,023	167	8,5	0,023	209
10,5	0,02	143	10,5	0,022	199
12,5	0,018	117	12,5	0,022	182
14,5	0,016	96	14,5	0,021	168
16,5	0,015	82	16,5	0,019	155
19,5	0,013	66	19,5	0,017	129
22,5	0,008	45	22,5	0,012	88
25,7	0,014	188	25,7	0,016	300
srednje hitrosti	0,026	173	srednje hitrosti	0,021	183
po globini			po globini	, 	
povpre je			povpre je		
obravnavanih	0,028	128	obravnavanih	0,025	135
slojev			slojev		

Preglednica 6: Povpre ni			
vmesni kot BURJA			
globina [m]	$lpha$ $^{\circ}$		
veter	30		
0,5	36		
1,5	41		
2,5	46		
4,5	43		
6,5	46		
8,5	46		
10,5	44		
12,5	41		
14,5	40		
16,5	40		
19,5	37		
22,5	21		
25,7	101		
srednje hitrosti	53		
po globini			
povpre je			
obravnavanih	41		
slojev			

Preglednica 7: Povpre ni vmesni kot JUGO			
globina [m]	α°		
veter	6		
0,5	26		
1,5	32		
2,5	31		
4,5	37		
6,5	53		
8,5	53		
10,5	48		
12,5	44		
14,5	39		
16,5	34		
19,5	28		
22,5	19		
25,7	18		
srednje hitrosti	51		
po globini	51		
povpre je			
obravnavanih	39		
slojev			

Preglednica 8: Napaka velikosti hitrosti			Ì	Preglednica 9: Napaka velikosti hitrosti		
burja				jugo		
alahina [m]	MAE _v	$\mathbf{MAE_v}/\overline{v}_p$		globina [m]	MAE _v	$\mathbf{MAE_v}/\overline{v}_p$
giobilia [iii]	[m/s]	[%]			[m/s]	[%]
veter	1,26	37		veter	1,236	40
0,5	0,038	80		0,5	0,03	73
1,5	0,031	93		1,5	0,024	84
2,5	0,027	105		2,5	0,022	97
4,5	0,023	126		4,5	0,02	132
6,5	0,019	132		6,5	0,019	158
8,5	0,017	123		8,5	0,018	164
10,5	0,014	104		10,5	0,017	152
12,5	0,012	82		12,5	0,016	136
14,5	0,01	62		14,5	0,016	128
16,5	0,008	48		16,5	0,015	120
19,5	0,007	35		19,5	0,014	103
22,5	0,005	27		22,5	0,009	69
25,7	0,005	69		25,7	0,016	293
srednje hitrosti po globini	0,018	118		srednje hitrosti po globini	0,018	154
povpre je obravnavanih slojev	0,02	91		povpre je obravnavanih slojev	0,02	107

• Komentar rezultatov numeri ne analize

Naloga je dala zelo zanimive in nepri akovane rezultate. Za glavne pokazatelje podobnosti smo vzeli povpre je obravnavanih slojev. Povpre je obravnavanih slojev vsebuje najve jo število simuliranih podatkov. Srednje hitrosti po globini so pomemben podatek, vendar niso pravi pokazatelj razlike med primerjanimi vektorskimi polji. Na primer: imejmo dve vektorski polji, ki naj bosta med seboj razli ni, vendar naj imata enaki sliki srednjih hitrosti. Napaka

primerjanih srednjih hitrosti bo enaka ni , eprav sta si vektorski polji razli ni. Ta primer jasno kaže, da srednje hitrosti po globini niso najboljši pokazatelj razlik med dvema vektorskima poljema. Razlika med povpre nim in krajevno spremenljivim tokom burje MAE je znašala velikih 2,8 cm/s (Preglednica 4), kar je presegalo samo povpre no velikost toka z 2,2 cm/s (Preglednica 2). Jugo je dal zelo podobne rezultate, in sicer 2,5 cm/s (Preglednica 5) s povpre no velikostjo toka 1,8 cm/s (Preglednica 3). Že ta dva podatka sta po moji oceni dovolj velik razlog, da se v nadaljnje simulacije vstavi bolj detaljirana slika vetrov. Z globino so se napake zmanjševale, kar lahko pripišemo usmerjevalnemu u inku morskega dna.

Drugo, kar smo želeli ugotoviti, je bilo, na kaj ima spremenljiv veter ve ji vpliv - na velikost morskega toka ali na njegovo smer. Na eni strani smo imeli nekoliko bolj konstantne velikosti ter zelo krajevno spremenljivo burjo s povpre nim odstopanjem od srednje smeri 30° (Preglednica 6), na drugi strani pa jugo s povpre nim odstopanjem le 6° (Preglednica 7) ter bolj spremenljive jakosti. Glede na te podatke bi bilo razumljivo pri akovati, da bodo tudi rezultati simulacij pri burji bolj spremenljive smeri ter konstantne jakosti, pri jugu pa obratno. Vendar je analiza pokazala zelo podobno sliko. Povpre ni vmesni koti pri jugu so znašali 39° (Preglednica 7) pri burji pa le 2° ve , torej 41° (Preglednica 6). Nekoliko ve ja razlika je bila v napaki hitrosti - burja 91% (Preglednica 8), jugo pa 107% (Preglednica 9). Glede na te podatke bi lahko trdili, da imata smer ter jakost krajevno spremenljivega vetra približno enako odlo ujo vpliv na kon ne rezultate.

5.2 Grafi na primerjava tokovnih slik

Sama numeri na analiza veliko pove o natan nosti simulacije, ni pa ne pove o možnih vzrokih takšnih rezultatov. Da bi ugotovili vzroke takih razlik, s mo si pomagali tudi z grafi no analizo. Za oceno ujemanja tokov s pomo jo vizualne primerjave smo naredili pet vrst grafov: kompas graf, prikaz tokov v vektorski obliki, RNR, RNH in NS. Vsi grafi so opisani v nadaljevanju.

pomen oznak:

 $\vec{v}_{s,i}$ rezultati simulacije s krajevno spremenljivim vetrom

- $\vec{v}_{p,i}$ rezultati simulacije s povpre nim vetrom
- α_i notranji kot

$$\Delta \vec{v}_i = \vec{v}_{s,i} - \vec{v}_{p,i} \qquad \text{razlika vektorjev}$$

Graf kompas (Slika 27) zriše polje vektorjev napak $\Delta \vec{v}_i$ v izhodiš u koordinatnega sistema. Ta graf nam omogo a hkratno analizo napake hitrosti in smeri. Tako lahko že na prvi pogled vidimo velikost napake ter njeno razpršenost, tj. ali gre za enakomerno ali neenakomerno, sistemati no razporeditev napake.



Slika 27: Primer grafa kompas

Iz prikaza vektorskih polj $\vec{v}_{s,i}$ in $\vec{v}_{p,i}$ lahko z direktno primerjavo presodimo, na katerem mestu je prišlo do najve jih razlik ter zakaj je do njih prišlo. Ker je bila mreža zelo gosta in se iz nje ni razlo no videlo poteka tokov (Slika 28), je bil narejen kratek ra unalniški program. Ta je nadomestil obmo ja s po sto vektorji z njihovo povpre no vrednostjo. Na ta na in smo dobili, kot je razvidno iz slike 29 veliko bolj jasno sliko dinamike tokov. Z rde o barvo so obarvani tokovi krajevno spremenljivega vetra, z zeleno pa tokovi povpre nega vetra



Slika 28: Primer grafa pred povpre enjem rezultatov



Slika 29: Primer grafa s prikazom rezultatov spremenljivega in povpre nega vetra po povpre enju rezultatov

Relativna napaka razlike
$$RNR = \frac{\left|\Delta \vec{v}_i\right|}{\left|\vec{v}_{p,i}\right|}$$
 nam pokaže dejanski delež napake in najve

pove o to nosti simulacije. Barve na sliki 30 predstavljajo oceno ujemanja. Najbolj živo zelena predstavlja dobro ujemanje vektorjev z RNR<20%, najbolj živo rde a pa zelo slabo ujemanje z RNR > 60%. Skrajni meji 20% in 60% so bili povzeti po diplomski nalogi Elvire Dori (2008). Ostali odtenki so linearno razporejeni med tema dvema skrajnostma. RNR je neke vrste presek relativne napake hitrosti in napake smeri.



Slika 30: Primer grafa RNR

Relativno napako hitrosti

$$RNH = \frac{\left\| \vec{v}_{s,i} \right\| - \left\| \vec{v}_{p,i} \right\|}{\left\| \vec{v}_{p,i} \right\|}$$

smo ra unali, ker nas je

zanimalo, kaj je bolj ob utljivo na spremembe vetra - smer toka ali njegova jakost. Kriterij ujemanja je enak kakor pri RNR, le da ne upoštevamo vmesnega kota. RNH lahko imamo za RNR, pri kateri nas ne zanima smer in zato vzamemo, da sta enake smeri. Kakor pri RNR barve na sliki 31 predstavljajo oceno ujemanja. Najbolj živo zelena predstavlja dobro ujemanje hitrosti z RNH<20%, najbolj živo rde a pa zelo slabo ujemanje z RNH > 60%.



Slika 31: Primer grafa RNH

Graf napake smeri nam jasno pokaže, v katerem delu zaliva je prišlo do najve jih smernih odstopanj. Kriterij ujemanja je enak kakor pri RNR, le da ne upoštevamo razlike jakosti hitrosti. RNH lahko razumemo kot RNR, pri kateri nas zanima le smer in zato vzamemo, da sta primerjana vektorja enake jakosti. Živo rde a barva pomeni, da gre za slabo ujemanje rezultatov. Notranji kot α_i je v tem primeru ve ji od 34,9°. Ta kot dobimo, e vzamemo dva vektorja enake dolžine z RNR = 60%. Živo zelena barva na sliki 32 kaže odli no ujemanje, notranji kot α_i je manjši od 11,5°. Takrat je RNR dveh enako dolgih vektorjev enak 20%

Maslo, A. 2009. Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D. Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Hidrotehni na smer.



Rezultati grafi ne analize

5.2.1 Primerjava vektorskih slik tokov vetra jugo



Slika 33: Primerjava povpre ne ter spremenljive smeri vetra juga



























Slika 46: Primerjava tokov srednjih hitrosti po globini ob jugu

• Komentar vektorskih slik tokov juga (Slike 33 do 46)

Glavni vzrok tako velike razlike v rezultatih krajevno spremenljivega in povpre nega vetra se vidi iz slike veter (Slika 33) in slike površinski sloj (Slika 34). Ob zahodnem robu imamo približno enake smeri simulacij spremenljivega in povpre nega vetra. Nato ta tok zadane ob italijansko obalo, ki ga preusmeri proti vzhodu. Pred Tržiškim (monfalkonskim) zalivom tok krajevno spremenljivega vetra ohranja svojo smer proti vzhodu. Tok povpre nega vetra pa spremeni smer v notranjost Tržiškega zaliva (Slika 34). Ta razlika se je zgodila zato, ker jakost krajevno spremenljivega vetra juga na severnem delu zaliva nekoliko pade in posledi no veter nima ve potrebne energije, da bi tok preusmeril v zaliv. Drugi prav tako pomemben razlog pa je ta, da ima tok krajevno spremenljivega vetra ob italijanski obali veliko ve jo hitrost kakor tok povpre nega vetra. To hitrost je pridobil na jugu zaliva, kjer je bil spremenljiv veter mo nejši kakor povpre en veter. Mo nejši tok pa se po asneje odziva na vplive vetra. Te razlike, ki so se ustvarile na površinskem sloju, se potem odražajo po vsej globini (Slike 34 do 45).

5.2.2 Primerjava vektorskih slik tokov burje





Slika 48: Primerjava tokov ob burji na globini 0,5 m
Maslo, A. 2009. Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D. Dipl. nal. - UNI. Ljubljana, UL, FGG, Hidrotehni na smer.





Maslo, A. 2009. Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D. Dipl. nal. - UNI. Ljubljana, UL, FGG, Hidrotehni na smer.



















Slika 60: Primerjava tokov srednjih hitrosti po globini ob burji

• Komentar vektorskih slik tokov burje (Slike 47 do 60)

Glavni vzrok velike razlike v simulacijah krajevno spremenljivega in povpre nega vetra se vidi iz slike 47-veter. V Tržiškem zalivu burja za ne kot zahodnik in potem po asi rotira proti

severovzhodu. Na podoben na in se obnaša površinski sloj krajevno spremenljivega vetra (Slika 48). Smer krajevno spremenljive burje se tako mo no razlikuje od povpre nega vetra, da ni bilo smiselno pri akovati podobnosti simulacij.

5.2.3 Grafi razlike vektorjev – grafi kompas

Razlika vektorjev jugo (levo)



Slika 61: Graf kompas za veter jugo

Razlika vektorjev burja (desno)



Slika 62: Graf kompas za veter burjo



Slika 63: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 0,5 m



Slika 64: Graf kompas ob burji za tokove na globini 0,5 m



Slika 65: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 1,5 m



Slika 67: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 2,5 m



Slika 69: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 4,5 m



Slika 66: Graf kompas ob burji za tokove na globini 1,5 m



Slika 68: Graf kompas ob burji za tokove na globini 2,5 m



Slika 70: Graf kompas ob burji za tokove na globini 4,5 m



Slika 71: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 6,5 m



Slika 72: Graf kompas ob burji za tokove na globini 6,5 m



Slika 73: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 8,5 m



Slika 75: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 10,5 m



Slika 74: Graf kompas ob burji za tokove na globini 8,5 m



Slika 76: Graf kompas ob burji za tokove na globini 10,5 m



Slika 77: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 12,5 m



Slika 79: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 14,5 m



Slika 81: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 16,5 m



Slika 78: Graf kompas ob burji za tokove na globini 12,5 m



Slika 80: Graf kompas ob burji za tokove na globini 14,5 m



Slika 82: Graf kompas ob burji za tokove na globini 16,5 m



Slika 83: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 19,5 m



Slika 85: Graf kompas ob jugu za tokove na globini 22,5 m



Slika 87: Graf kompas za tokove srednjih hitrosti po globini ob jugu



Slika 84: Graf kompas ob burji za tokove na globini 19,5 m



Slika 86: Graf kompas ob burji za tokove na globini 22,5 m



Slika 88: Graf kompas za tokove srednjih hitrosti po globini ob burji

• Komentar razlike vektorjev - compass plot (Slike 61 do 88)

Iz slike vetra je razvidno, kako je burja (Slika 62) veliko bolj razpršena kakor jugo (Slika 61). Jugo ima vse vektorje $\Delta \vec{v}_i$ približno v isti smeri, razlikujejo se bolj v velikosti. Iz slike vetra bi bilo razumljivo pri akovati podobno sliko tudi za površinski sloj. Vendar je ravno obratno. Pri burji se površinska sloja razlikujeta bolj v velikosti (Slika 64). Pri jugu pa je razlika bolj enakomerne jakosti in imamo ve ja odstopanja v smeri (Slika 63). Kot je razvidno iz slik 63 do 86 se razpršenost in usmerjenost razlike z globino bistveno ne spreminja, zmanjšuje se le njena velikost.

5.2.4 Grafi napake smeri

Napaka smeri jugo (levo)



Slika 89: Prikaz napake smeri za veter jugo





Slika 90: Prikaz napake smeri za veter burjo



Slika 91: Prikaz napake smeri na globini 0,5 m ob jugu



Slika 92: Prikaz napake smeri na globini 0,5 m ob burji

liramare

a <11.5°



Slika 94: Prikaz napake smeri na globini 1,5 m ob burji



Slika 93: Prikaz napake smeri na globini 1,5

m ob jugu

α

>34.9

Slika 95: Prikaz napake smeri na globini 2,5 m ob jugu



Slika 96: Prikaz napake smeri na globini 2,5 m ob burji





Slika 98: Prikaz napake smeri na globini 4,5 m ob burji



Slika 97: Prikaz napake smeri na globini 4,5 m ob jugu



Slika 100: Prikaz napake smeri na globini 6,5 m ob burji



Slika 102: Prikaz napake smeri na globini 8,5 m ob burji



Slika 99: Prikaz napake smeri na globini 6,5 m ob jugu



Slika 101: Prikaz napake smeri na globini 8,5 m ob jugu



Slika 103: Prikaz napake smeri na globini 10,5 m ob jugu



Slika 104: Prikaz napake smeri na globini 10,5 m ob burji



Slika 105: Prikaz napake smeri na globini 12,5 m ob jugu



Slika 106: Prikaz napake smeri na globini 12,5 m ob burji



Slika 107: Prikaz napake smeri na globini 14,5 m ob jugu



Slika 108: Prikaz napake smeri na globini 14,5 m ob burji



Slika 109: Prikaz napake smeri na globini 16,5 m ob jugu



Slika 110: Prikaz napake smeri na globini 16,5 m ob burji



Slika 111: Prikaz napake smeri na globini 19,5 m ob jugu



Slika 112: Prikaz napake smeri na globini 19,5 m ob burji



Slika 113: Prikaz napake smeri na globini 22,5 m ob jugu



Slika 115: Prikaz napake smeri srednjih hitrosti po globini ob jugu



Slika 114: Prikaz napake smeri na globini 22,5 m ob burji



Slika 116: Prikaz napake smeri srednjih hitrosti po globini ob burji

• Komentar napake smeri (Slike 89 do 116)

Na sliki veter lahko vidimo, da je pri jugu (Slika 89) skoraj celotno obmo je obarvano zeleno. To pomeni, da je razlika v smeri povpre nega in krajevno spremenljivega vetra manjša od 11°. Pri burji (Slika 90) pa prevladuje rde e obmo je ($\alpha_i > 35^\circ$). Ko pa pogledamo sliki toka površinskega sloja (Sliki 91 in 92), opazimo, da sta zelena in rde a barva tako pri jugu kakor pri burji izena eni. To razmerje se nadaljuje tudi v ostalih slojih po globini.

5.2.5 Grafi relativne napake hitrosti

Relativna napaka hitrost jugo (levo)



Slika 117: Prikaz relativne napake hitrosti za veter jugo



Relativna napaka hitrosti burja (desno)

Slika 118: Prikaz relativne napake hitrosti za veter burjo



Slika 119: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 0,5 m ob jugu



Slika 120: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 0,5 m ob burji



Slika 121: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 1,5 m ob jugu





Slika 123: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 2,5 m ob jugu



Slika 125: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 4,5 m ob jugu

RNH>60% RNH<20%

Slika 124: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 2,5 m ob burji



Slika 126: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 4,5 m ob burji

Miramare



Slika 127: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 6,5 m ob jugu



Slika 129: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 8,5 m ob jugu



Slika 131: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 10,5 m ob jugu



Slika 128: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 6,5 m ob burji



Slika 130: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 8,5 m ob burji



Slika 132: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 10,5 m ob burji



Slika 133: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 12,5 m ob jugu



Slika 135: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 14,5 m ob jugu



Slika 137: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 16,5 m ob jugu



Slika 134: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 12,5 m ob burji



Slika 136: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 14,5 m ob burji



Slika 138: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 16,5 m ob burji

75



Slika 139: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 19,5 m ob jugu



Slika 141: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 22,5 m ob jugu



Slika 143: Prikaz relativne napake hitrosti srednjih hitrosti po globini ob jugu



Slika 140: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 19,5 m ob burji



Slika 142: Prikaz relativne napake hitrosti na globini 22,5 m ob burji



Slika 144: Prikaz relativne napake hitrosti srednjih hitrosti po globini ob burji

• Komentar napake hitrosti (Slike 117 do 144)

Na sliki vetra vidimo, da se povpre en in krajevno spremenljiv jugo po velikosti ujemata v osrednjem delu zaliva (Slika 117). Prav tako vidimo, da je delež zelene barve pri burji (Slika 118) nekoliko ve ji kakor pri jugu, kar pomeni, da je burja bila nekoliko bolj konstantne jakosti. V slikah tokov (Slike 119 do 142) vidimo, da v glavnem prevladuje rde a barva (RNH>60%), katera se z globino nekoliko zmanjšuje. V ve jih globinah so ujemanja vektorjev po jakosti nekoliko boljša.

5.2.6 Grafi relativne napake

Relativna napaka jugo (levo)



Slika 145: Prikaz relativne napake za veter jugo



Relativna napaka burja (desno)

Slika 146: Prikaz relativne napake za veter burjo



Slika 147: Prikaz relativne napake na globini 0,5 m ob jugu



Slika 148: Prikaz relativne napake na globini 0,5 m ob burji



Slika 149: Prikaz relativne napake na globini 1,5 m ob jugu



Slika 151: Prikaz relativne napake na globini 2,5 m ob jugu



Slika 153: Prikaz relativne napake na globini 4,5 m ob jugu



Slika 150: Prikaz relativne napake na globini 1,5 m ob burji



Slika 152: Prikaz relativne napake na globini 2,5 m ob burji



Slika 154: Prikaz relativne napake na globini 4,5 m ob burji



Slika 155: Prikaz relativne napake na globini 6,5 m ob jugu



Slika 156: Prikaz relativne napake na globini 6,5 m ob burji



Slika 157: Prikaz relativne napake na globini 8,5 m ob jugu



Slika 159: Prikaz relativne napake na globini 10,5 m ob jugu



Slika 158: Prikaz relativne napake na globini 8,5 m ob burji



Slika 160: Prikaz relativne napake na globini 10,5 m ob burji



Slika 161: Prikaz relativne napake na globini 12,5 m ob jugu



Slika 163: Prikaz relativne napake na globini 14,5 m ob jugu



Slika 165: Prikaz relativne napake na globini 16,5 m ob jugu



Slika 162: Prikaz relativne napake na globini 12,5 m ob burji



Slika 164: Prikaz relativne napake na globini 14,5 m ob burji



Slika 166: Prikaz relativne napake na globini 16,5 m ob burji



Slika 167: Prikaz relativne napake na globini 19,5 m ob jugu



Slika 168: Prikaz relativne napake na globini 19,5 m ob burji



Slika 169: Prikaz relativne napake na globini 22,5 m ob jugu



Slika 170: Prikaz relativne napake na globini 22,5 m ob burji



Slika 171: Prikaz relativne napake srednjih hitrosti po globini ob jugu



Slika 172: Prikaz relativne napake srednjih hitrosti po globini ob burji

• Komentar relativne napake razlike (Slike 145 do 172)

Relativna napaka razlike je nekakšen presek napake smeri in relativne napake hitrosti. Je najboljša ocena dejanskega ujemanja opravljenih simulacij. Iz slike vetrov vidimo, da ima veter jugo (Slika 145) v primerjavi z burjo (Slika 146) nekaj ve zelene barve (RNR<20%). Ko pa pogledamo ujemanje tokov po slojih (Slike 147 do170), opazimo, da zelo prevladuje rde a barva (RNR>60%), kar pomeni zelo slabo ujemanje tako simulacij krajevno spremenljivega kakor povpre nega vetra.

5.3 Primerjava rezultatov simulacij z meritvami

Boja, pod katero so bile opravljene meritve, je od piranskega rta v smeri proti Gradežu oddaljena za 2,28 km (slika 173). Na dnu se nahaja akusti ni tokomer, ki meri velikost in smer morskega toka v slojih enega metra.



Slika 173: Položaj oceanografske boje Vida

Maslo, A. 2009. Vpliv krajevno spremenljivega vetra na sliko tokov v Tržaškem zalivu, simulacije z modelom PCFLOW3D. Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Hidrotehni na smer.



Slika 174: Primerjava vektorjev hitrosti pod bojo Vida ob burji



Slika 175: Primerjava vektorjev hitrosti pod bojo Vida ob jugu

	<u>o</u> [cm/s]	<u>P</u> [cm/s]	MAE [cm/s]	MAE/ 0 [%]
rezultati povpre nega vetra juga	4,1	1,5	3,7	90,3
rezultati spremenljivega vetra juga		5,4	3,7	89,9
rezultati povpre nega vetra burje	6,2	1,7	5,7	92,5
rezultati spremenljivega vetra burje		6,0	3,0	49,0

Preglednica 10: Primerjava rezultatov simulacij z meritvami

Pomen oznak:

 \overline{O} povpre na vrednost merjenih vrednosti

 \overline{P} povpre na vrednost simuliranih vrednosti

• Komentar primerjave meritev z rezultati simulacij

Na voljo smo imeli le eno to ko, v kateri smo lahko primerjali rezultate. Pri burji (Slika 174) se vidi razmeroma dobro ujemanje simulacije krajevno spremenljivega vetra z meritvami. Razvidno je tudi veliko odstopanje rezultatov povpre nega vetra. Pri jugu so rezultati nekoliko slabši. Velikost napake spremenljivega vetra in povpre nega vetra je skoraj enaka. Vendar se vizuelno rezultati spremenljivega vetra bolje ujemajo z meritvami. Pri dnu so tokovi povpre nega vetra usmerjeni v povsem drugo smer kakor rezultati meritev. To na velikost napake ni bistveno vplivalo, ker so pri dnu tokovi zelo šibki. Primerjava je torej v obeh primerih pokazala boljše ujemanje rezultatov krajevno spremenljivega vetra z meritvami.

6 ZAKLJU KI IN NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO

Vse dosedanje simulacije dinamike tokov v Tržaškem zalivu, z izjemo seminarske naloge Vanje Ramšak (2007), so se izvajale s prostorsko povpre nimi vetrovi. Želeli smo ugotoviti ob utljivost tokov na bolj realne, torej krajevno spremenljive vetrove. Kot najboljši približek realnim vetrovom smo uporabili rezultate meteorološkega modela Aladin. Analizirali smo primer vetrov juga in burje. Iz izbranih krajevno spremenljivih vetrov smo izra unali njihove povpre ne razli ice. Z modelom PCFLOW3D smo opravili ve simulacij. Na za etku smo z analizo rezultatov ve izvedenih simulacij ugotovili, da je plimni robni pogoj najprimernejši na odprtem robu. Samo pri uporabi plimnega robnega pogoja je bila v vsakem kontrolnem volumnu ob odprtem robu vidna kontinuiteta toka. Izvedeno je bilo še povpre enje vetra na celotnem obmo ju Tržaškega zaliva za potrebe simulacij in kon ne primerjave rezultatov.

Izvedene so bile simulacije tokov s krajevno nespremenljivim in spremenljivim vetrom. Ker pretekla objavljena dela numeri ni primerjavi tokov ve inoma niso posve ala posebne pozornosti, s mo nekoliko raziskali tudi to podro je. Ugotovili s mo, da je za numeri no primerjavo vektorskih polj istega ra unalniškega modela najbolj primerna povpre na absolutna napaka. Vrednosti le-te pa so bile v izvedenih primerjavah zelo velike. Povpre na absolutna napaka simulacij povpre nega in krajevno spremenljivega vetra je tako za veter jugo kakor burjo dala ve je vrednosti od povpre nih velikosti hitrosti toka. Tako velikih odstopanj nismo pri akovali. Na podlagi te analize lahko zaklju imo, da naj se v prihodnje za natan nejšo oceno dinamike tokov v Tržaškem zalivu uporablja bolj detajlna slika vetrov.

Numeri na primerjava veliko pove o ujemanju, ni esar pa ne pove o možnih vzrokih za takšne rezultate. Zato smo opravljene simulacije analizirali tudi grafi no. Zaradi nejasne slike samih tokov smo vpeljali nekaj novih oblik grafi ne primerjave, za katere mislimo, da bodo lahko v prihodnje še s pridom uporabljene. Na podlagi grafi ne analize smo ugotovili, da se je krajevno spremenljiva burja zelo razlikovala od povpre ne burje in da so zato tako velike razlike v toku pri akovane. Pri jugu pa je veliko vlogo odigrala oblika obale in razporeditev jakosti vetra. Na koncu naloge smo rezultate opravljenih simulacij primerjali z meritvami. Kljub majhni koli ini meritev je bilo ugotovljeno boljše ujemanje rezultatov krajevno spremenljivega vetra v primerjavi z rezultati povpre nega vetra.

V nalogi smo pokazali, da je vpliv krajevno spremenljivih vetrov pomemben, zato bi bilo v prihodnje potrebno dolo iti tipi ne vzorce krajevno spremenljivih vetrov za vse smeri vetrov v Tržaškem zalivu. V vseh nadaljnjih raziskavah dinamike tokov bi bilo torej kljub razmeroma majhnemu definicijskemu obmo ju, ki ga zajema Tržaški zaliv, priporo ljivo uporabljati spremenljive in im bolj detajlne slike vetrov.

VIRI

Bronštenj, I.N., Semendjajew, K.A., Musiol, G. Muhling, H. 1997. Matemati ni priro nik. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 967 str.

Brecelj, M. 2002. Izdelava uporabniškega vmesnika za PCFLOW3D. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehni na smer: 92 f.

etina, M. 1992. Tridimenzionalni matemati ni baroklini model za izra un tokov v jezerih in morju. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za akademijo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehni na smer: 72 f.

etina, M., Rajar, R., Širca, A., Žagar, D. 1999. PCFLOW3D. User's Manual. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko teko in: 294 str.

etina, M., Rajar, R., Krzyk, M., Zakrajšek, M., Žagar, D. 2006. Eksperimentalna analiza ezmejnega vpliva projektov plinskega terminala v Tržaškem zalivu in plinskega terminala v Žavljah in študije presoje vplivov na okolje v Republiki Sloveniji za projekt plinskega terminala v Tržaškem zalivu in plinskega terminala v Žavljah. Kon no poro ilo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko teko in z laboratorijem: 23 f.

Delaunayeva triangulacija. Wikipedia, The free Encyclopedia. http://sl.wikipedia.org/wiki/Delaunayeva_triangulacija (2. 2. 2009)

Dori , E. 2008. Primerjava modelov MIKE 3 in PCFLOW3D za simulacije hidrodinamike v Tržaškem zalivu. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 76 f. Fox, D.G. 1980. Judging air quality model performance. Bulletin American Meteorological Society, Vol. 62, št. 5: 599-609. http://ams.allenpress.com/archive/1520-0477/62/5/pdf/i1520-0477-62-5-599.pdf (29. 2. 2009)

Fox, D.G. 1982. Uncertainty in air quality modeling . Bulletin American Meteorological Society, Vol. 65, št. 1: 27-36.

http://ams.allenpress.com/archive/1520-0477/65/1/pdf/i1520-0477-65-1-27.pdf (20. 1. 2009)

Galuf, S. 2005. Simulacija razlitja nafte v Tržaškem zalivu. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehni na smer: 69 f.

Gorard, S. 2004. Revisiting a 90-year-old debate: the advantages of the mean deviation. British Educational Research Association Annual Conference: 9 str. http://www.leeds.ac.uk/educol/documents/00003759.htm (5. 9. 2008)

Horvat, M., Covelli, S., Faganeli, J., Logar, M., Mandi , V., Rajar, R., Širca, A., Žagar, D. 1999. Mercury in contaminated coastal environments. A case study: the Gulf of Trieste. Science of the Total Environment: str. 43-56.

Kovšca, J. 2007. Dopolnitve modela PCFLOW3D za simulacijo tokov in širjenja polutantov. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehni na smer: 67 f.

Longo, R., Raicich, F., Mosetti, F. 1990. A numerical model of transport and fate of radionuclides in the Gulf of Trieste. Bollettino di Oceanologia Teorica ed Applicata 1 (January): str. 13-24.

Mellor, G.L., Yamada, T. 1982. Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems. Reviews of Geoohysics and Space Phisics, Vol. 20, št. 4: 851-875.

http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/FTPbackup/PAPERS/ (17.4. 2008)

Moje tvoje morje Slovensko. 2002. Sredozemlje in trajnostni razvoj. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije, Ljubljana, 28 str.

Pagon, P. 2008. Jutranji termi ni veter v Barkovljah pri Trstu. Geografski vestnik 80: str. 9– 31.

http://zgds.zrc-sazu.si/GV2008/gv80-1/gv80-1-pagon.pdf (12. 8. 2008)

Rajar, R. 1980. Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 279 str.

Rajar, R., etina, M. 1990. Modelling of tidal and wind induced currents and dispersion in the Northern Adriatic. Acta Adriatica 2: str. 785-812.

Rajar, R., etina, M., Žagar, D. 1995a. Three-dimensional modelling of oil spill in the Adriatic. V: WROBEL, L. C. (ur.), BREBBIA, C. A. (ur.), TRAVERSONI, L. (ur.). Computer modelling of seas and coastal regions II. Southampton. Boston, Computational Mechanics Publications: str. 95-102.

Rajar, R., etina, M., Žagar, D., Širca, A. 1995b. 3D matemati ki model za simulaciju razlijevanja nafte u moru. V: GEREŠ, Dragutin (ur.). Održivi razvoj i upravljanje vodama. Zbornik radova. Zagreb, Hrvatska vodoprivreda: str. 385-391.

Rajar, R., etina, M. 1997. Hydrodynamic and Water Quality Modelling. An Experience. Ecological Modelling 101: str. 195-207.

Rajar, R., etina, M., Širca, A. 1997. Hydrodynamic and Water Quality Modelling. Case Studies. Ecological Modelling 101: str. 209-228.

Rajar, R., Žagar, D., Širca, A., Horvat, M. 1998. Two- and three-dimensional modelling of mercury transport in the Gulf of Trieste. V: BREBBIA, C. A. (ur.). Second International Conference on Environmental Coastal Regions held in Cancun. Mexico, Environmental coastal regions, Environmental studies. Boston, Southampton, WIT Press, 1998: str. 289-300.

Rajar, R. 1999. Hidromehanika. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 141 str.

Rajar, R. 2000. Numerical modeling of currents. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 9 str.

Rajar, R., Žagar, D., Širca, A., Horvat, M. 2000. Three-dimensional modelling of mercury cycling in the gulf of Trieste. The Science of the Total Environment 260: str. 109-123.

Rajar, R., Žagar, D., etina, M., Akagi, H., Yano, S., Tomiyasu, T., Horvat, M. 2004a. Application of three-dimensional mercury cycling model to coastal seas. Ecological Modelling 171: str. 139-155.

Rajar, R., Yano, S., Tada, A., Akagi, H., Oshikawa, H., Žagar, D., etina, M., Krzyk, M., Brecelj, M. 2004b. Measurements and three-dimensional modelling of mercury cycling in Minamata Bay and in the Gulf of Trieste. RMZ-mater. geoenviron. 2: str. 1328-1331.

Rajar, R., etina, M., Horvat, M., Žagar, D. 2007. Mass balance of mercury in the Mediterranean sea. Mar. Chem.: str. 1-14.

Ramšak, V. 2007. Simulacija hidrodinamike s spremenljivim vetrom z modelom PCFLOW3D. Seminarska naloga na podiplomskem študiju. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehni na smer: 28 f.

Rozman, S. 2005. Simulacija transporta in disperzije živega srebra v Tržaškem zalivu z modelom PCFLOW3D. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 91 f.

Širca, A. 1992. Modeliranje transporta polutantov po metodi sledenja delcev, Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehni na smer: 87 f.

Širca, A. 1996. Modeliranje hidromehanike in transporta živosrebrovih spojin v Tržaškem Zalivu. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehni na smer: 164 f.

Širca, A., Rajar, R. 1997a. Modelling the effect of wind on average circulation and long-term pollutant dispersion in the Gulf of Trieste. Acta Adriatica 2: str. 45-59.

Širca, A., Rajar, R. 1997b. Calibration of a 2D mercury transport and fate model of the Gulf of Trieste. In Water Pollution 97, Rajar, R. and Brebbia, M. (Eds.). Computational Mechanics Publication, WIT, Southampton: str. 503-512.

Širca, A., Horvat, M., Rajar, R., Covelli, S., Žagar, D., Faganeli, J. 1999a. Estimation of mercury mass balance in the Gulf of Trieste. Acta Adriatica 2: str. 75-85.

Širca, A., Rajar, R., Harris, R. C., Horvat, M. 1999b. Mercury transport and fate in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic) – a two-dimensional approach. Environmental Modelling & Software 14: str. 645-655.

Willmott, C.J. 1982. Some coments on the evaluation of the model performance. Bulletin American Meteorological Society, Vol. 63, št. 11: 13091313. http://climate.geog.udel.edu/~climate/publication_html/Pdf/W_BAMS_82.pdf (20. 1. 2009)
Willmott C.J., Ackleson, S.A., Davis, R.E., Feddema, J.J. in sod. 1985. Satistics for the evaluation and comparison of models. Journal of geophysical research, Vol. 90, št. C5: 8995 9005.

http://climate.geog.udel.edu/~climate/publication_html/Pdf/WADFKLO_JGROceans_85.pdf (7. 2. 2009)

Žagar, D. 1994. Tridimenzijski model za simulacijo širjenja nafte. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehni na smer: 63 f.

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, Hidrotehni na smer: 101 f.

Žagar, D., Rajar, R., Širca, A., Horvat, M., etina, M. 2000. Three-dimensional model of dispersion of mercury in marine environment. V: RODRÍGUEZ, G. R. (ur.), BREBBIA, C. A. (ur.), PÉREZ-MARTELL, E. (ur.). Environmental coastal regions III. Boston, Environmental studies, WIT Press: str. 205-215.

Žagar, D., Rajar, R., Širca, A., Horvat, M., etina, M. 2001. Dolgotrajna 3D simulacija transporta in disperzije živega srebra v Tržaškem zalivu. Acta hydrotech 30: str. 25-43.

Žagar, D. 2005. Mercury in the aquatic environment – an integrated modelling approach. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 8 str.

Žagar, D., Petkovšek, G., Rajar, R., Sirnik, N., Horvat, M., Voudouri, A., Kallos, G., etina, M. 2007. Modelling of mercury transport and transformations in the water compartment of the Mediterranean Sea. Marine Chemistry 107: str. 64-88.