



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ  
ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ  
ΠΕΡΙΟΧΕΣ**



**Ανθούλα Β. Γκεσούλη**

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**Επιβλέπων: Α. Ι. Στάμου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	i
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
EXTENDED ABSTRACT.....	vi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας .....	1
1.3. Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας .....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	3
2.1. Εισαγωγή .....	3
2.2. Στοιχεία λειτουργίας του Ενεργειακού Κέντρου Μαντουδίου .....	5
2.3. Βαθυμετρία περιοχής μελέτης .....	5
2.4. Μετεωρολογικά στοιχεία .....	5
2.4.1. Στοιχεία μετεωρολογικού σταθμού Κυμασίου .....	5
2.4.2. Συχνότητα και διάρκεια εμφάνισης δυσμενών ανέμων για τη λειτουργία του Ε.Κ.....	7
2.5. Χαρακτηριστικά του αποδέκτη.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ .....	12
3.1. Όρια περιοχών του έργου .....	12
3.2. Εφαρμοζόμενα αριθμητικά πλέγματα.....	13
3.2.1. Κύρια χαρακτηριστικά των αριθμητικών πλεγμάτων .....	13
3.2.2. Όρια και χαρακτηριστικά στρωμάτων του αριθμητικού πλέγματος της περιοχής μελέτης.....	14
3.3. Αναμενόμενα χαρακτηριστικά των πεδίων ροής και θερμοκρασιών .....	15
3.4. Μεθοδολογία υπολογισμών .....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	17
4.1. Το μοντέλο CORMIX.....	17
4.1.1. Εισαγωγή .....	17

---

4.1.2. Περιοχές κοντινού και μακρινού πεδίου .....	18
4.1.3. Κλίμακες μήκους .....	19
4.1.4. Αδιάστατοι αριθμοί.....	21
4.1.5. Ταξινόμηση της ροής.....	21
4.1.6. Χαρακτηρισμός του αποδέκτη .....	22
4.1.7. Προσκόλληση στην ακτή .....	22
4.1.8. Προσκόλληση στον πυθμένα .....	22
4.2. Το μοντέλο FLOW-3DL.....	23
4.2.1. Εισαγωγή .....	23
4.2.2. Διαφορικές εξισώσεις πεδίου ροής .....	24
4.2.3. Διαφορικές εξισώσεις συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων.....	25
4.2.4. Οριακές συνθήκες.....	26
4.2.5. Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής και της συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων .....	28
4.3. Μεθοδολογία σύνδεσης των δύο μοντέλων.....	31
4.3.1. Γενικά.....	31
4.3.2. Μεθοδολογία σύνδεσης .....	31
4.3.3. Μοντέλο κοντινού πεδίου.....	31
4.3.4. Μοντέλο μακρινού πεδίου .....	34
4.3.5. Αλγόριθμος σύνδεσης.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FLOW-3DL .....	37
5.1. Γενικά.....	37
5.2. Ανεμογενής Κυκλοφορία.....	37
5.2.1. Περιγραφή.....	37
5.2.2. Δεδομένα.....	37
5.2.3. Αποτελέσματα .....	39
5.3. Διαφορές Πυκνότητας .....	41

---

5.3.1. Περιγραφή.....	41
5.3.2. Δεδομένα.....	41
5.3.3. Αποτελέσματα .....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ .....	47
6.1. Σενάρια και παραδοχές υπολογισμών κοντινού πεδίου .....	47
6.1.1. Σενάρια υπολογισμών.....	47
6.1.2. Παραδοχές υπολογισμών.....	48
6.2. Υπολογισμοί στο κοντινό πεδίο .....	50
6.2.1. Χαρακτηριστικά μεγέθη της φλέβας των θερμών νερών .....	50
6.2.2. Υπολογισμοί .....	50
6.3. Σενάρια και παραδοχές υπολογισμών μακρινού πεδίου .....	69
6.3.1. Σενάρια υπολογισμών.....	69
6.3.2. Παραδοχές υπολογισμών.....	69
6.4. Αναλυτικοί υπολογισμοί πεδίων ροής (στο μακρινό πεδίο) .....	70
6.4.1. Αποτελέσματα .....	70
6.4.2. Σχολιασμός αποτελεσμάτων .....	79
6.5. Αναλυτικοί υπολογισμοί θερμοκρασίας νερού (στο μακρινό πεδίο) .....	79
6.5.1. Αποτελέσματα .....	79
6.5.2. Σχολιασμός αποτελεσμάτων .....	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	95
7.1. Δεδομένα και παραδοχές .....	95
7.2. Συμπεράσματα.....	95
7.3. Προτάσεις .....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	98

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την παρουσία του επιβλέποντος Καθηγητή Ε.Μ.Π. Αναστ. Στάμου τον οποίο ευχαριστώ θερμά όχι μόνο για το επιστημονικό περιβάλλον που δημιούργησε, μέσα από το οποίο κατόρθωσα να ολοκληρώσω το θέμα, αλλά και για την πολύτιμη καθοδήγηση και συμπαράστασή του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου.

Θερμά ευχαριστώ επίσης τον Υ.Δ. κ. Ι. Νικηφοράκη για την πολύτιμη βοήθειά του.

Ευχαριστώ ακόμα τον Υ.Δ. κ. Π. Δημητριάδη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράστασή τους.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας που βρίσκονται κοντά σε παράκτιες περιοχές χρησιμοποιούν συχνά μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού για την ψύξη των μηχανημάτων τους και στη συνέχεια διαθέτουν τα θερμά νερά στη θάλασσα.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία γίνεται διερεύνηση των συνθηκών του παράκτιου περιβάλλοντος στην περιοχή Μαντούδι της Νότιας Εύβοιας. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η υδροδυναμική συμπεριφορά και η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας στην ευρύτερη παράκτια περιοχή διάθεσης των θερμών νερών σε περίπτωση κατασκευής αγωγού απόληψης και διάθεσης νερών που θα χρησιμοποιηθούν για την ψύξη των μηχανημάτων του Ενεργειακού Κέντρου Μαντουδίου. Η διερεύνηση των επιπτώσεων της διάθεσης των θερμών νερών με αγωγό μονού στομίου στη θερμοκρασία του νερού στις περιοχές απόληψης και περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος (π.χ. ακτές) αποτελούν στόχο της εργασίας.

Η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε δύο επί μέρους πεδία μελέτης στα οποία η παράκτια κυκλοφορία και η εξέλιξη της θερμοκρασιακής μεταβολής είναι αποτέλεσμα διαφορετικών μηχανισμών και διεργασιών. Στο κοντινό πεδίο η ροή επηρεάζεται κυρίως από τα αρχικά χαρακτηριστικά της φλέβας των θερμών νερών ενώ στο μακρινό πεδίο η ροή επηρεάζεται κυρίως από την κίνηση του αποδέκτη.

Στο μακρινό πεδίο οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τον υπολογιστικό κώδικα FLOW-3DL που έχει δομηθεί στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. Η βασική δομή του κώδικα στηρίζεται στις εξισώσεις τριών διαστάσεων συνέχειας και διατήρησης της ορμής για μη μόνιμη ροή, διατυπωμένες για στρώματα νερού σταθερού πάχους, στα οποία υποδιαιρείται το εξεταζόμενο πεδίο. Οι διαφορικές εξισώσεις επιλύονται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Το συνεχές πεδίο υπολογισμού διακριτοποιείται σε μικρές ορθογωνικές περιοχές (διαφορικοί όγκοι). Στους διαφορικούς όγκους γίνεται η ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων κατά βάθος και προκύπτουν οι αριθμητικές λύσεις. Ο κώδικας FLOW- 3DL χρησιμοποιεί ρητό (explicit) σχήμα επίλυσης με έκκεντρο κάνναβο στο χώρο και με εμπρόσθιες διαφορές στο χρόνο.

Για τους υπολογισμούς στο κοντινό πεδίο και τη σύνδεσή τους με τους υπολογισμούς στο μακρινό πεδίο προστέθηκε στον κώδικα FLOW-3DL μια νέα υπολογιστική διαδικασία (υπορουτίνα) που η ανάπτυξή της στηρίχτηκε στις εξισώσεις του μοντέλου CorJet (Jirka, 2004). Στόχος ήταν η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου μαθηματικής προσομοίωσης θερμικής ρύπανσης. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν αρχικοί υπολογισμοί με το μοντέλο κοντινού πεδίου CORMIX.

# EXTENDED ABSTRACT

## 1. INTRODUCTION

Power plants located in the coastal zone use normally large quantities of cooling waters that are discharged into the marine environment. The size and location of the water intake and discharge systems are selected aiming at the following: (a) to avoid relatively large temperature differences in regions of significant ecological interest, such as sensitive coral reefs, thus minimizing the potential environmental damages, and (b) to avoid heat build-up by the thermal plume at the water intake region, which may reduce significantly the operational efficiency of the cooling system.

In thermal discharges there exists a wide range of space and time scales in the main regions of flow that is the near field (NF) that covers an area ranging from a few meters to a few hundred meters (including the intermediate region) and the far field (FF) that extends a few kilometers.

Integrated models consist of a FF model and a NF model that are connected via a coupling algorithm that incorporates the NF effects of the thermal discharge and the corresponding volume and thermal fluxes in the FF model. This coupling should be able to describe the interaction between thermal discharges and the flow field in the FF, because the large flow rates involved in thermal discharges may affect significantly the flow field in FF and vice versa.

## 2. METHODS

### 2.1 *The modeling procedure*

The integrated modeling procedure, applied in the present study, consists of the following 6 steps.

Step 1: The characteristics of area of the study are collected and the design scenarios are set; i.e. combinations of thermal discharge characteristics (e.g. location of discharge) and environmental conditions (e.g. velocity of coastal currents).

Step 2: Preliminary calculations including the characterization of the NF region and length scale analysis are performed with the NF model for all design scenarios to determine the main characteristics of the NF; these are mainly the approximate dimensions of the NF region including the range of widths and depths of the thermal plume at the surface.

Step 3: The computational domains of the areas of study and their boundaries and the locations of the thermal discharge and the sea water abstraction are defined. Usually, the areas of study are the greater area of study and the main area of study; a part of the latter is the approximate NF region that was estimated in step 2. The main area of study is selected in such a way so that its boundaries are not affected significantly by the presence of the thermal discharge.



**Step 4:** The numerical grids of the areas of study are constructed using the information of the first two steps; usually, a coarse grid is employed in the greater area and a fine grid in the main area of study. The selection of the horizontal grid sizes (dx and dy) is based on the approximate dimensions of the NF region and the expected width of the plume, while the vertical is based on the estimated heights of the plume at the surface. Boundary conditions are defined at the boundaries of the computation domains. The locations of monitoring points at the regions of interest are selected.

**Step 5:** Preliminary hydrodynamic calculations are performed in the FF without the presence of the thermal discharge to determine “steady state undisturbed flow fields” for all design scenarios; “cold start” can be used as initial condition in these calculations.

**Step 6:** Final hydrodynamic and thermodynamic calculations are performed in the FF with the presence of the thermal discharge to determine flow and excess temperature fields for all design scenarios; “steady state undisturbed flow fields” can be used as initial condition in these calculations.

## 2.2 The NF model

In the present investigation the jet integral model CorJet (Jirka, 2004) is used; only, single thermal discharges in non-stratified coastal waters are considered. The main input data and characteristics are shown in Tables 1 and 2, respectively.

The equations of CorJet are formulated for a jet control volume of length  $ds=s_2-s_1$  (centered on its trajectory) that has an upstream point 1 at  $s_1 (x_1,y_1,z_1)$  where the variables are known and denoted by subscript ‘1’ and a downstream point 2 at  $s_2 (x_2,y_2,z_2)$  where the variables are unknown and denoted by subscript ‘2’. There are eight equations for the following eight variables: flow rate (Q), axial momentum fluxes  $M_x$ ,  $M_y$  and  $M_z$  in the directions x, y and z of a Cartesian co-ordinate system, respectively, excess temperature ( $\Delta T$ ) and co-ordinates of centerline of the jet (X,Y,Z), that are written as follows.

Continuity equation

$$\frac{dQ}{ds} = \frac{Q_2 - Q_1}{ds} = E \quad (1)$$

Momentum equations

$$\frac{dM_x}{ds} = \frac{M_{x2} - M_{x1}}{ds} = EU_a + F_D \sqrt{1 - \cos^2 \theta} \cos^2 \sigma \quad (2)$$

$$\frac{dM_y}{ds} = \frac{M_{y2} - M_{y1}}{ds} = -F_D \frac{\cos^2 \theta \cdot \sin \sigma \cdot \cos \sigma}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \sigma}} \quad (3)$$

$$\frac{dM_z}{ds} = \frac{M_{z2} - M_{z1}}{ds} = \frac{4.524b^2 J_0}{Q_{\Delta T}} - F_D \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \cos \sigma}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \sigma}} \quad (4)$$

Equation for excess temperature ( $\Delta T$ )

$$\frac{d(Q_{\Delta T} \Delta T)}{ds} = \frac{Q_{\Delta T 2} \Delta T_2 - Q_{\Delta T 1} \Delta T_1}{ds} = 0 \quad (5)$$

Equations for jet position

$$\frac{dX}{ds} = \frac{X_2 - X_1}{ds} = \cos \theta \cdot \cos \sigma \quad (6)$$

$$\frac{dY}{ds} = \frac{Y_2 - Y_1}{ds} = \cos \theta \cdot \sin \sigma \quad (7)$$

$$\frac{dZ}{ds} = \frac{Z_2 - Z_1}{ds} = \sin \theta \quad (8)$$

where  $E$  is the entrainment rate,  $U_a$  is the velocity of the coastal current,  $F_D$  is the jet drag,  $\theta$  is the vertical angle of discharge,  $\sigma$  is the horizontal angle of discharge,  $Q_{\Delta T}$  is the flow rate weighted by  $\Delta T$  that is commonly called “scalar weighted volume flux” (Jirka, 2004), and  $J_0$  is the inlet specific buoyancy flux; it is noted that for an ambient environment with uniform density the buoyancy flux ( $J$ ) is preserved, i.e.  $dJ/ds=0$ .

Equations (1) to (8) can be easily solved using a low order ‘upstream’ discretisation scheme and very low value of  $ds$  to determine the values of the variables at  $s_2$ ; for example equation (1) can be solved to determine  $Q_2$  as follows

$$Q_2 = Q_1 + E_1(s_2 - s_1) = Q_1 + E_1 ds \quad (9)$$

i.e. the right hand side of all equations are calculated at the upstream point 1.

Equations (2), (3), (4), (6), (7) and (8) can be combined to produce equations (10), (11) and (12) that are used for the calculations of three additional variables that are  $\sigma_2$ ,  $\theta_2$  and  $M_2$  (total momentum), respectively.

$$\sigma_2 = \tan^{-1} \left( \frac{M_{y2}}{M_{x2}} \right) \quad (10)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{M_{z2} \cdot \sin \sigma_2}{M_{y2}} \right) \quad (11)$$

$$M_2 = \frac{M_{z2}}{\sin \theta_2} = \left( M_{x2}^2 + M_{y2}^2 + M_{z2}^2 \right)^{1/2} \quad (12)$$

The starting point of the above mentioned calculation procedure is the end of the zone of flow establishment (ZOFE), where the values of the eight variables are given by equations (13) to (20).

$$Q_e = \sqrt{2}Q_0 \quad (13)$$

$$M_{xe} = M_0 \cos \theta_e \cdot \cos \sigma_e \quad (14)$$

$$M_{ye} = M_0 \cos \theta_e \cdot \sin \sigma_e \quad (15)$$

$$M_{ze} = M_0 \sin \theta_e \quad (16)$$

$$\Delta T_e = \Delta T_0 \quad (17)$$

$$X_e = L_e \cos\left(\frac{\theta_0 + \theta_e}{2}\right) \cos\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_e}{2}\right) \quad (18)$$

$$Y_e = L_e \cos\left(\frac{\theta_0 + \theta_e}{2}\right) \sin\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_e}{2}\right) \quad (19)$$

$$Z_e = Z_0 + L_e \sin\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_e}{2}\right) \quad (20)$$

The additional three variables  $\theta_e$ ,  $\sigma_e$  and  $M_e$  at the end of ZOFE are given by equations (21) to (23).

$$\theta_e = \sin^{-1}(\sin \gamma_e \sin \delta_0) \quad (21)$$

$$\sigma_e = \tan^{-1}(\sin \gamma_e \cos \delta_0 / \cos \gamma_e) \quad (22)$$

$$M_e = M_0 \quad (23)$$

where  $L_e$  is the modified ZOFE length,  $\gamma_0$  is the transverse discharge angle relative to the ambient current direction,  $\delta_0$  is the projection of  $\gamma_0$  onto the x-y plane and  $\gamma_e$  is the value of the angle  $\gamma_0$  at the end of ZOFE that are calculated by equations (24) to (27).

$$L_e = 5 \cdot D_0 \cdot (1 - 3.22 \sin \gamma_0 / R) \cdot (1 - e^{-2Fr_0/4.67}) \quad (24)$$

$$\gamma_e = \sin^{-1}\left(\sqrt{1 - \cos^2 \theta_0 \cdot \cos^2 \sigma_0}\right) \quad (25)$$

$$\delta_0 = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \theta_0}{\sin \sigma_0} \right) \quad (26)$$

$$\gamma_e = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \gamma_0}{\cos \gamma_0 - (\sqrt{2} - 1) / R} \right) \quad (27)$$

where  $D_0$  is the initial diameter of the jet,  $R$  is a crossflow parameter and  $F_{r0}$  is the densimetric Froude number.

### 2.3 The FF model

The integrated FF 3-D model consists of a hydrodynamic and a water quality sub-model. The hydrodynamic model FLOW-3DL (Stamou et al., 1999a) involves the 3-D non-steady state continuity and momentum equations, expressed in layer formulation. Using fixed permeable interfaces between layers, the equations of the model are vertically integrated over a depth range  $h_i$ , corresponding to the computational layer “i” of that thickness. The following assumptions are made: (i) the distribution of the pressure ( $p$ ) is hydrostatic, (ii) the Boussinesq approximation is valid, and (iii)  $p$  at the surface is set equal to the atmospheric (zero). The equations of the model read as follows.

Continuity equation

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (28)$$

Momentum equations

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = f \cdot V - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_v \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (29)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -f \cdot U - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_v \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (30)$$

Pressure distribution

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho \cdot g \quad \text{or} \quad P(z) = -\rho \cdot g \cdot (\zeta - z) \quad (31)$$

The variables of the equations are the layer-averaged velocity components  $U$ ,  $V$  and  $W$ , along axes  $x$ ,  $y$  and  $z$ , respectively, of a Cartesian coordinate system, and the free surface elevation  $\zeta$ . Axis  $z$  is taken as positive downward from the sea surface,  $\nu_h$  and  $\nu_v$  are the horizontal and vertical eddy viscosity coefficients, respectively,  $f$  is the Coriolis parameter,  $g$  is the gravitational acceleration, and  $\rho$  is the water density.

The water quality sub-model TEMPE-3DL (Stamou et al., 1999b) involves the convection-diffusion equation for a conservative pollutant that is written in the following layer formulation.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (32)$$

where T is the layer-averaged temperature and  $D_h$  and  $D_v$  are the horizontal and vertical diffusion coefficients for T, respectively. The source term  $S_T$  can be written as follows.

$$S_T = -\frac{k_T \cdot T}{\rho \cdot c_p \cdot h_1} \quad (33)$$

where  $k_T$  is the coefficient of heat transfer between the surface of water and the air,  $h_1$  is the height of the surface layer and  $c_p$  is the specific heat conductivity of water.

## 2.4 The solution procedure

The solution procedure in FLOW-3DL and TEMPE-3DL is the following.

- 1) For the initial conditions and given vertical density distribution  $\rho$ , the pressure P is determined by equation (31) via subroutine CALCP.
- 2) Boundary conditions are defined for U, V, W,  $\zeta$  and T via subroutine BOUND.
- 3) The horizontal velocities U and V are calculated by the momentum equations (29) and (30) via subroutines CALCU and CALCV, respectively; the vertical velocities W are deduced via subroutine CALCW by solving equation (28) successively for each layer starting from the bottom, where the boundary condition  $W=0$  is used. At the surface layer equation (28) is solved to determine  $\zeta$  via subroutine CALCZ.
- 4) The thermal equation is solved via subroutine TEMPE to determine values of T.
- 5) When buoyancy effects are present, the subroutine CALDEN is employed to calculate density values; subsequently, these are used to calculate via CALCP the new distribution of pressure that is starting point of the solution procedure.

## 2.5 The coupling algorithm and coupling details

The coupling of NF and FF is materialised via the introduction of a new subroutine (CORJET) into the solution procedure that performs the following actions.

- 1) Solution of the equations of the CORJET to determine the characteristics of the thermal plume, such as the jet trajectory, the axial flow rates, the thermal fluxes, the dimensions, the flow rate and the fluxes on the surface using the local co-ordinate system of CORMIX.
- 2) Transformation of the local CORMIX coordinates into global FLOW-3DL coordinates. The transformation equations are the following:

$$x = X_{0c} + X \cos \varphi - Y \sin \varphi \quad (34)$$

$$y = Y_{0c} + X \sin \varphi - Y \cos \varphi \quad (35)$$

$$z = H - Z \quad (36)$$

where  $X_{0c}$  and  $Y_{0c}$  are the perpendicular distances from the origin of the local CORMIX system to Y and X axis of the Cartesian system, respectively,  $\phi$  is the angle through which the axes of the CORMIX system must be rotated to make them coincide with the axes of the Cartesian system, and H is the total depth of the region of discharge.

- 3) Identification of the faces of the control volumes that are intersected with the jet trajectory; these control volumes are called “jet control volumes” and the corresponding surface area of the calculation domain is called “jet surface area”.
- 4) Calculation of the values of flow velocities (U, V and W) and temperature (T) at the jet control volumes that were identified in (3). In the solution procedure these values are set as “fixed” and are automatically translated into flow rates and thermal fluxes in the continuity (CALCW) and thermal transport equation (TEMPE), respectively, i.e. practically, they are treated as additional quantities that are added as source terms in the equations of continuity and thermal transport, respectively.

### 3. APPLICATION

#### 3.1 Step 1: Area of the study.

The main characteristics of the thermal discharge and the coastal waters are shown in Table 1, together with the values of the case study. The assumptions made are the following: (1) flow and concentration fields are in steady state, (2) the ambient water is not stratified, (3) there are no tidal effects, (4) the discharge is performed via a single port of diameter  $D_o$ , and (5) a coastal current exists in the form of a cross flow with velocity equal to  $U_a$ .

**Table 1.** Main characteristics of the coastal waters and the thermal discharge

<b>Characteristics of the coastal waters</b>	<b>Symbol (Units)</b>	<b>Values of the case study</b>
Temperature	$T_a$ (°C)	21.8
Density	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	1026.48
Velocity of the coastal current	$U_a$ (m/s)	0.10
Average depth	$H_o$ (m)	12.0
<b>Discharge characteristics</b>		
Discharge or volume flux	$Q_o$ (m <sup>3</sup> /h)	72000
	(m <sup>3</sup> /s)	20.0
Distance of the discharge location from the coast	L(m)	110.0
Diameter of diffuser	$D_o$ (m)	2.8
Area of discharge	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	6.16
Discharge velocity	$u_o$ (m/s)	3.25
Vertical angle of discharge	$\theta_o$ (°)	30
Horizontal angle of discharge	$\sigma_o$ (°)	270
Water depth	$H_D$ (m)	12.0
Height of the port of the diffuser	$h_o$ (m)	1.0
Temperature	$T_o$ (°C)	29.8
Density	$\rho_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	1023.24

The scenarios examined include the search of the impact of the velocity of coastal current ( $U_a$ ), the impact of the vertical ( $\theta$ ) and the horizontal ( $\sigma$ ) angle of discharge and the impact of the location of discharge ( $L$ ,  $H_D$ ). Uniform conditions are considered since stratification practically appears below the depth of 20 meters. In the FFR scenarios S0, S12 and S14 were performed for the case of SE and NE wind since these are “worst case” scenarios for the efficiency of the intake of cool water and environmental harm, respectively. All the scenarios are shown in Table 2 and 3.

**Table 2.** Scenarios for the NFR

Scenario	$U_a$ (m/s)	$\theta$ (°)	$\sigma$ (°)	L (m)	$H_D$ (m)	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )
S0	0.10	30	270	110	12.0	1026.48
S1	<b>0.05</b>	30	270	110	12.0	1026.48
S2	<b>0.15</b>	30	270	110	12.0	1026.48
S3	0.10	<b>45</b>	270	110	12.0	1026.48
S4	0.10	30	<b>225</b>	110	12.0	1026.48
S5	0.10	30	<b>315</b>	110	12.0	1026.48
S6	0.10	30	270	110	12.0	<b>1025.61-1027.90</b>
S7	0.10	30	270	<b>70</b>	<b>8.5</b>	1026.48
S8	0.10	30	270	<b>80</b>	<b>9.0</b>	1026.48
S9	0.10	30	270	<b>90</b>	<b>10.0</b>	1026.48
S10	0.10	30	270	<b>100</b>	<b>11.0</b>	1026.48
S11	0.10	30	270	<b>120</b>	<b>12.5</b>	1026.48
S12	0.10	30	270	<b>130</b>	<b>13.0</b>	1026.48
S13	0.10	30	270	<b>140</b>	<b>14.0</b>	1026.48
S14	0.10	30	270	<b>150</b>	<b>16.0</b>	1026.48

**Table 3.** Scenarios for the FFR

Scenario	L, $H_D$ (m,m)	Wind Direction (-)	Average $\Delta T$ in surface (°C)
S0	110, 12	SE	3.33
S12	130, 13	SE	3.08
S14	150, 16	SE	2.42
S0-1	110, 12	NE	3.33
S12-1	130, 13	NE	3.08
S14-1	150, 16	NE	2.42

### 3.2 Step 2: Preliminary calculations in the NF region.

#### 3.2.1 Characterization of the NFR – Length scale analysis

For all the design scenarios, in order to determine the main characteristics of the NF, preliminary calculations were performed using the NF model; the main parameters and length scales for the case study are shown in Table 4. The approximate dimensions of the NF region, including the range of widths and depths of the thermal plume at the surface, were also calculated. For the scenario S0, the depth and the width of the jet at the surface are equal to  $BV=2.82$  m and  $2BH=5.64$  m, respectively.

**Table 4.** Main characteristics of the NFR

Parameter	Equation	Units	Values of the case study
Specific momentum flux	$M_o = u_o^2 A_o$	$m^4/s^2$	64.96
Specific buoyancy flux	$J_o = g_o' Q_o = g \frac{\rho_\alpha - \rho_o}{\rho_\alpha} Q_o$	$m^4/s^3$	0.6191
Volume flux length	$L_Q = \frac{Q_o}{M_o^{1/2}}$	m	2.48
Momentum length scale	$L_M = \frac{M_o^{3/4}}{J_o^{1/2}}$	m	29.08
Cross flow length scale for the jet	$L_m = \frac{M_o^{1/2}}{u_\alpha}$	m	80.60
Cross flow length scale for the plume	$L_b = \frac{J_o}{u_\alpha^3}$	m	619.08
Densimetric Froude number	$Fr_o = \frac{u_o}{\sqrt{g_o' A_o^{1/2}}} = \frac{L_M}{L_Q}$	-	11.03
Richardson number	$R_o = \frac{1}{Fr_o} = \frac{L_Q}{L_M}$	-	0.091

From the parameters and length scales shown in Table 4 the main conclusions drawn are listed below:

- 1) Region close to discharge pipe. At small distances the diameter of the pipe regulates the width of the jet and  $L_Q = 2.48$  m is the effective scale. Since  $Fr_o = 11.03$  or equivalently  $R_o = 1/11.03 = 0.09$ , i.e. the buoyant jet is expected to behave like a plume.
- 2) Effect of buoyancy. At distances greater than  $L_M = 29.08$  m, buoyancy dominates momentum. At smaller distances, the buoyancy is not significant and the flow is characterized as a jet.
- 3) Trajectory of the jet. Since  $L_m > H_D$ , the cross-flow is weak, its deflecting effect is not significant and the buoyant will impinge on the water surface.

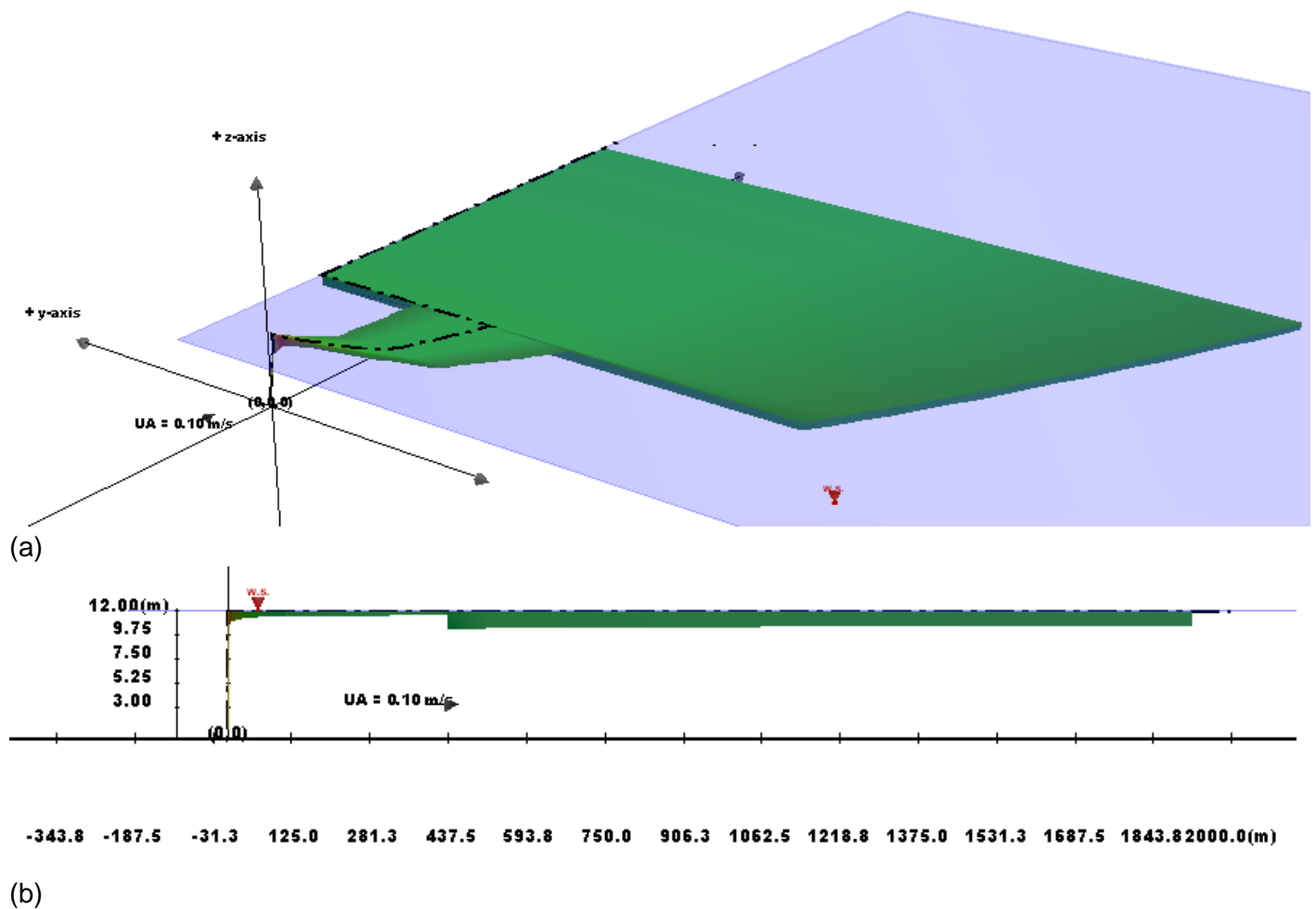


- 4) Effect of cross-flow. The jet is strongly deflected by the cross flow after  $L_m = 80.60$  m. The downward flotation distance beyond which the plume becomes strongly affected by the cross flow is equal to  $L_b = 619.08$  m.
- 5) Effect of heat exchange. Heat exchange takes place via the free surface (radiation, evaporation - condensation and conduction) and the bed material (conduction) and in the present study is ignored (conservative assumption).

### 3.2.2 Preliminary calculations with CORMIX

Preliminary calculations with the model CORMIX were used for the estimation of the width and depth of the thermal plume at the surface in order to determine the main area of the study since it should be selected in such a way so that its boundaries are not affected significantly by the presence of the thermal discharge. The expected width of the plume was also used for the selection of the horizontal grid sizes ( $dx$  and  $dy$ ) and the expected depth of the plume was used for the selection of the vertical grid size ( $dz$ ).

A 3D view and a side view of the plume for scenario S0 is shown in Figure 1.



**Figure 1.** (a) 3D view of the plume and (b) side view of the plume via Cormix.

### 3.3 Step 3: The computational domains.

The computational domains include two areas: the greater area of the study and the main area of the study covering 744 km<sup>2</sup> and 6.76 km<sup>2</sup>, respectively. Both the location of the thermal discharge and the sea water abstraction were defined. Sea water abstraction is placed more westerly and northerly compared to the location of the thermal discharge. The main area of the study with the locations of the abstraction and thermal discharge is shown in Figure 2.



Figure 2. Main area of the study

### 3.4 Step 4: The computational grids.

Two space-staggered computational grids were used; the first is a coarse grid covering the greater study area and the second is a fine grid covering the main study area. The communication of the fine grid region with the greater region is achieved via three open-sea boundaries (eastern, northern and southern); the boundary conditions (flow velocities and water elevations) at these open sea boundaries were determined from the calculations performed on the coarse grid.

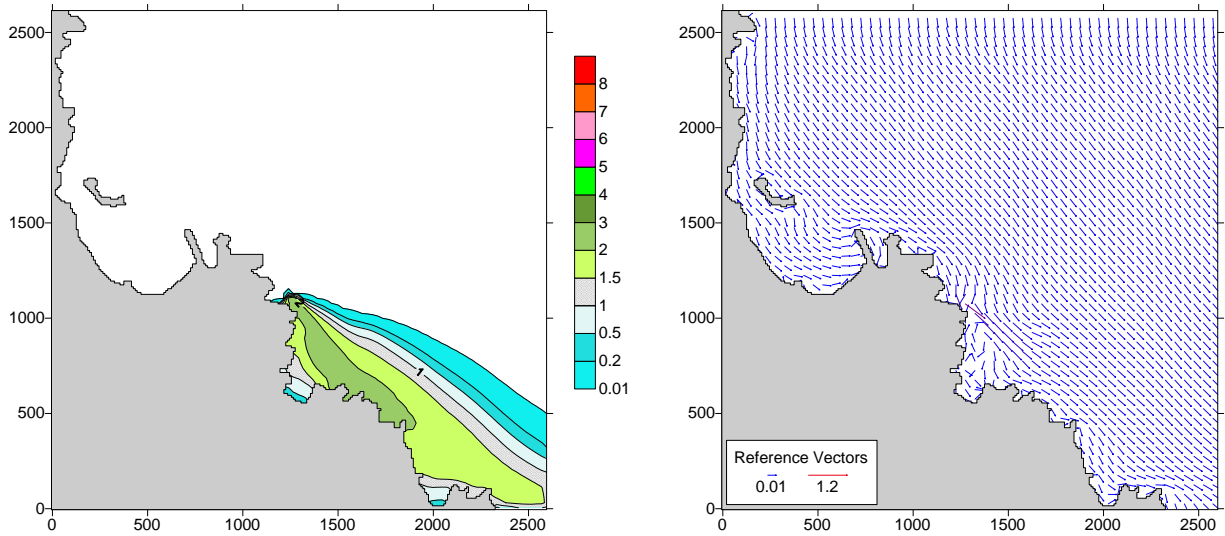
The fine staggered rectangular grid consisted of 262 x 262 control volumes with resolution equal to 10 m and 10 layers in the z-direction. The thicknesses of the 10 horizontal layers were (starting from surface): (1) 2.00 m, (2) 2.00 m, (3) 4.00 m, (4) 2.00 m, (5) 2.00 m, (6) 3.00 m, (7) 10.00 m, (8) 10.00 m, (9) 10.00 and (10) 85.00 m.

### 3.5 Step 5: Preliminary hydrodynamic calculations.

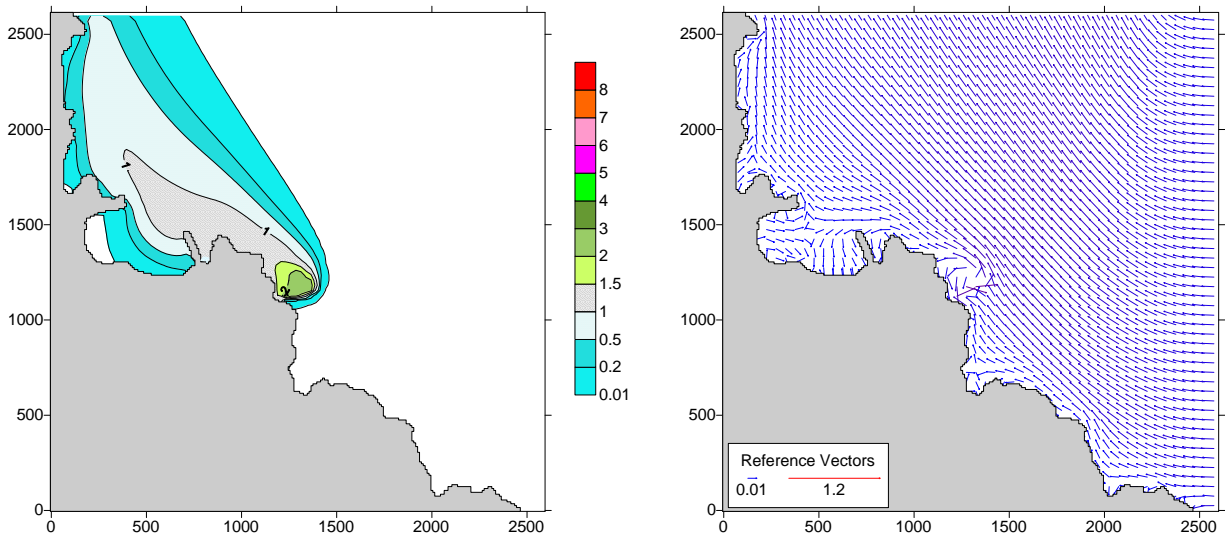
Preliminary hydrodynamic calculations were performed in the FF for all the design scenarios without the presence of the thermal discharge. “Cold start” was used as initial condition in these calculations and a small time step equal to 0.10 s was applied for the solution of the involved hydrodynamic equations. “Steady state undisturbed flow fields” were determined.

### 3.6 Step 6: Final hydrodynamic and thermodynamic calculations.

Using “steady state undisturbed flow fields” by the preliminary hydrodynamic calculations as initial condition, final calculations were executed. Both the constant flow rate of the thermal discharge and the flow rate of cool water abstraction were added as inputs in the calculations. Flow and excess temperature came as a result of the combination of the final hydrodynamic and thermodynamic calculations in the FF. The excess temperature in the surface and in the third layer were used to evaluate the impact on the coasts of the region and the effectiveness of the construction of the “cool” sea water intake, respectively. Excess temperatures and flow velocities for the first layer (S0-1) and the third layer (S0) are shown in Figures 3 and 4 respectively.



**Figure 3.** Excess temperatures and flow velocities for the first (surface) layer (Scenario S0-1).



**Figure 4.** Excess temperatures and flow velocities for the third layer (Scenario S0).

#### **4. RESULTS AND DISCUSSION**

In Figure 3 and Figure 4, the excess temperatures and the flow velocities for the first (surface) layer (S0-1) and for the third layer (S0) are shown for the main area of the study. Figures 3 and 4 demonstrate the following: (1) excess temperatures are less than 2.0 °C in the nearby coasts and (2) excess temperatures are less than 1.0 °C - 0.5 °C at the location of the sea water abstraction for the “worst case” scenarios examined. In all layers above the fifth layer, where the discharge is taking place, the excess of temperature has the same value and spatial extent according to all the calculations performed.

#### **5. CONCLUSIONS**

An integrated modeling procedure was presented and discussed for the calculation of the hydrodynamics and the excess temperature of coastal waters, during the discharge of cooling waters from power stations. The procedure, which consists of six steps as described above, involved the use of two models. The first model is applied in the Near Field Region (NFR) and the second in the Far Field Region (FFR); the calculations of these models are connected via a coupling algorithm. The coupling of NF and FF was materialised via the introduction of a new subroutine (CORJET) into the model suite FLOW-3DL. Preliminary calculations were also performed with the model CORMIX. The procedure was applied to a case study using the integrated model FLOW-3DL (consists of NF model CORJET and FF model FLOW-3DL) and the following conclusions were drawn: (1) excess temperatures are less than 1.0 °C - 0.5 °C at the location of the sea water abstraction and (2) excess temperatures are less than 2.0 °C in the nearby coasts. In all layers above the fifth layer, where the discharge is taking place, the excess of temperature has the same value and spatial extent according to all the calculations performed.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Γενικά

Η προστασία των υδατικών πόρων από κάθε μορφή ρύπανσης αποτελούσε ανέκαθεν μείζον θέμα και βρισκόταν στο επίκεντρο της επιστημονικής έρευνας. Η ραγδαία τεχνολογική πρόοδος και η βιομηχανική ανάπτυξη των τελευταίων ετών καθιστά ακόμα περισσότερο αναγκαία την ορθολογική διαχείριση των υδάτων, καθώς το νερό είναι ένας περιορισμένος φυσικός πόρος.

Η ανάπτυξη της βιομηχανίας συνδέεται άμεσα με τη ρύπανση των υδάτων η οποία μπορεί να είναι οργανική (π.χ. από βιομηχανίες τροφίμων), ρύπανση με θρεπτικά (π.χ. από βιομηχανίες λιπασμάτων), ρύπανση με βαρέα μέταλλα (π.χ. από βιομηχανίες χημικών) ή θερμική.

Με τον όρο θερμική ρύπανση εννοούμε τη διάθεση θερμών νερών σε υδάτινους αποδέκτες, που μέσω του μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας, οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος νερού. Τα θερμά νερά προέρχονται συνήθως από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν νερό για την ψύξη των μηχανημάτων τους. Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού στον αποδέκτη οδηγεί στη μείωση της διαλυτότητας του οξυγόνου, στην αύξηση του μεταβολισμού των μικροοργανισμών του οικοσυστήματος, στην αύξηση της τοξικότητας των χημικών ρυπαντών και στην αδυναμία ανάπτυξης των ποικιλόθερμων οργανισμών λόγω μεγάλων και συχνών αλλαγών στη θερμοκρασία ([itia.ntua.gr/~nikos/metsovo/diafaneies\\_ripansi\\_a.doc](http://itia.ntua.gr/~nikos/metsovo/diafaneies_ripansi_a.doc)).

Τα μαθηματικά ομοιώματα, στα οποία επιλύονται οι βασικές εξισώσεις ροής (συνέχειας και ποσότητας κίνησης) και μεταφοράς-διάχυσης των ποιοτικών χαρακτηριστικών των νερών ενός αποδέκτη, δίνουν τη δυνατότητα προσομοίωσης της κυκλοφορίας των νερών καθώς και της ποιοτικής τους κατάστασης (ρύπανση). Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μαθηματική προσομοίωση της θερμικής ρύπανσης σε παράκτιες περιοχές με στόχο την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των έργων απόληψης - διάθεσης νερών και την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη λειτουργία τους.

### 1.2. Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μαθηματική προσομοίωση της θερμικής ρύπανσης στην παράκτια περιοχή του Μαντουδίου, στη Νότια Εύβοια. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η υδροδυναμική συμπεριφορά και η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας του παράκτιου περιβάλλοντος σε περίπτωση κατασκευής αγωγού απόληψης και διάθεσης νερών που θα χρησιμοποιηθούν για ψύξη μηχανημάτων του Ενεργειακού Κέντρου Μαντουδίου. Στόχο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης της διάθεσης των θερμών νερών με αγωγό μονού στομίου στη θερμοκρασία του νερού στις περιοχές (α) απόληψης και (β) περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος (π.χ. ακτές).

### 1.3. Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 8 Κεφάλαια.

Στο **1ο Κεφάλαιο** γίνεται μια εισαγωγή για τη θερμική ρύπανση και το σκοπό της διπλωματικής εργασίας.

Στο **2ο Κεφάλαιο** γίνεται μια γενική περιγραφή της παράκτιας περιοχής του Μαντουδίου, με ιδιαίτερη αναφορά στα στοιχεία λειτουργίας του Ενεργειακού Κέντρου, στα μετεωρολογικά στοιχεία και στα χαρακτηριστικά του αποδέκτη.

Στο **3ο Κεφάλαιο** περιγράφονται τα όρια των περιοχών μελέτης και τα αριθμητικά πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις του μαθηματικού μοντέλου FLOW-3DL. Ακολουθεί ανάλυση της μεθοδολογίας υπολογισμών και γίνεται αναφορά στα αναμενόμενα χαρακτηριστικά των πεδίων ροής και θερμοκρασιών.

Στο **4ο Κεφάλαιο** περιγράφονται τα μαθηματικά μοντέλα CORMIX και FLOW-3DL που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς του κοντινού και μακρινού πεδίου καθώς και η μεθοδολογία σύνδεσης των δυο μοντέλων (ανάπτυξη υπολογιστικής διαδικασίας –υπορουτίνας-CORJET σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN) που εφαρμόστηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο **5ο Κεφάλαιο** περιγράφονται οι έλεγχοι που έγιναν για να διαπιστωθεί η ικανότητα του μοντέλου FLOW-3DL να προσομοιώνει την παράκτια κυκλοφορία λόγω ανέμου και διαφορών πυκνότητας.

Στο **6ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων τόσο για το κοντινό όσο και για το μακρινό πεδίο ροής. Τα αποτελέσματα του κοντινού πεδίου περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά μεγέθη της φλέβας τη χρονική στιγμή που φτάνει στην επιφάνεια (π.χ. διαφορά θερμοκρασίας, διάλυση κτλ.) ενώ τα αποτελέσματα στο μακρινό πεδίο αφορούν στο πεδίο ροής και στην εξέλιξη της θερμικής ρύπανσης, δηλαδή στα πεδία θερμοκρασιών.

Στο **7ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Κεφ. 6) και προτείνονται κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο **8ο Κεφάλαιο** παρατίθεται η χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 2.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται έρευνα των συνθηκών του παράκτιου περιβάλλοντος του Ενεργειακού Κέντρου (Ε.Κ.) Μαντουδίου Εύβοιας με στόχους (1) τον ορθολογικό σχεδιασμό του και (2) τη λειτουργία του με τις ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

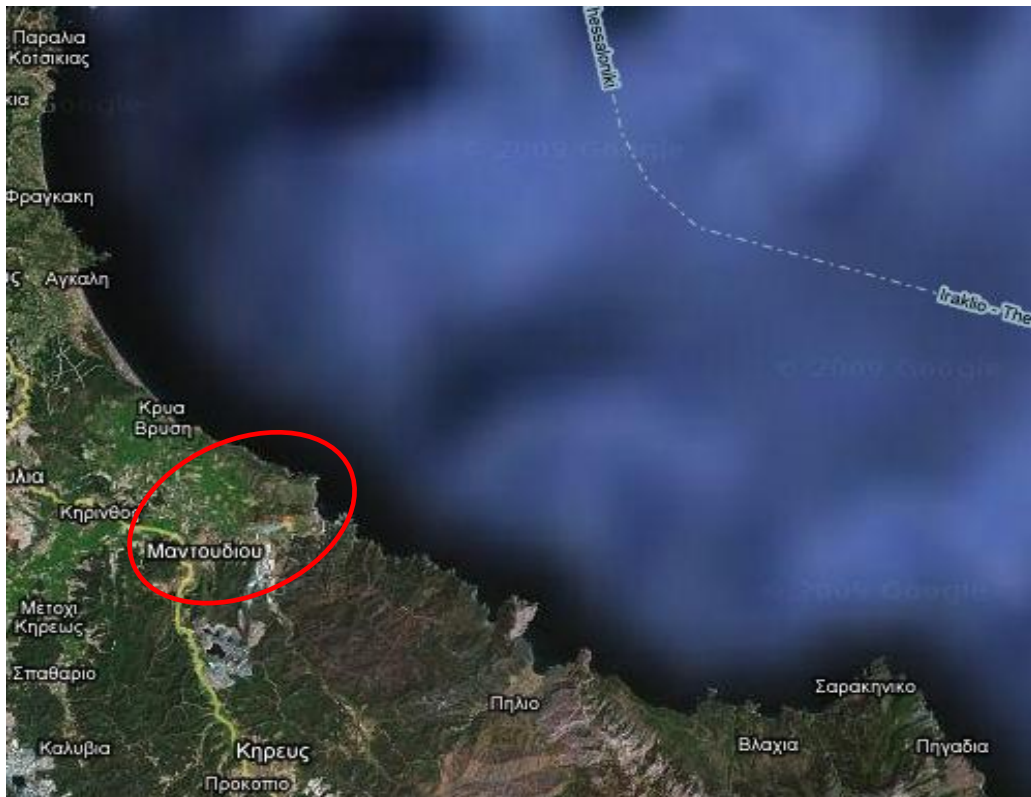
Το Μαντούδι είναι η έδρα του δήμου Κηρέως και είναι κτισμένο δίπλα στον Κηρέα. Σε απόσταση 5 km βρίσκεται η παραλία του Κυμασίου, στο Αιγαίο πέλαγος, όπως φαίνεται στις Εικόνες 2.1-1, 2.1-2 και 2.1-3. Νότια του Μαντουδίου υψώνονται οι ορεινοί όγκοι του Κανδηλίου και του Πυξαριά, που χωρίζουν τη βόρεια με την κεντρική Εύβοια.

Τα στοιχεία της περιοχής μελέτης περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

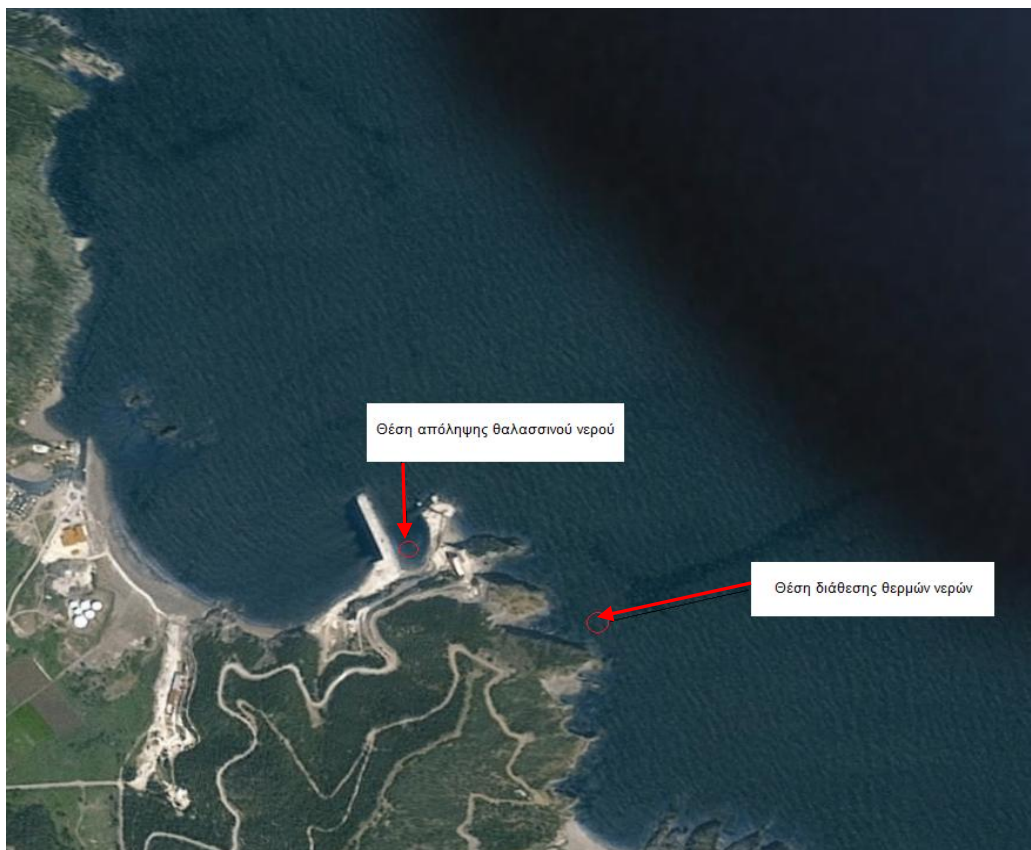
- 1) Στοιχεία λειτουργίας του Ε.Κ. Μαντουδίου.
- 2) Βαθυμετρία της περιοχής μελέτης.
- 3) Μετεωρολογικά στοιχεία.
- 4) Χαρακτηριστικά του αποδέκτη (θερμοκρασία, αλατότητα και πυκνότητα).



Εικόνα 2.1-1. Ευρύτερη περιοχή - Αιγαίο Πέλαγος  
(Πηγή: <http://www.mapgr.gr/mapgr/frame-set.htm>)



Εικόνα 2.1-2. Ευρύτερη περιοχή μελέτης (Πηγή: [www.google.com](http://www.google.com))



Εικόνα 2.1-3. Περιοχή μελέτης με τις θέσεις απόληξης θαλασσινού νερού και διάθεσης των θερμών νερών του Ε.Κ. Μαντουδίου (Πηγή: [www.google.com](http://www.google.com))



## **2.2. Στοιχεία λειτουργίας του Ενεργειακού Κέντρου Μαντουδίου**

Τα βασικά στοιχεία λειτουργίας του Ενεργειακού Κέντρου Μαντουδίου, τα οποία λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας, είναι συνοπτικά τα ακόλουθα:

- 1) Η παροχή διάθεσης των θερμών νερών είναι ίση με 72000 m<sup>3</sup>/h.
- 2) Η διαφορά θερμοκρασίας των θερμών νερών από το περιβάλλον θαλασσινό νερό είναι ίση με 8 °C.
- 3) Η απόληψη του θαλασσινού νερού και η διάθεση των θερμών νερών προβλέπεται να γίνουν στις θέσεις που φαίνονται στην Εικόνα 2.1-3.

## **2.3. Βαθυμετρία περιοχής μελέτης**

Στην παρούσα εργασία θεωρούνται 2 επιμέρους περιοχές:

- 1) Η ευρύτερη περιοχή μελέτης, και
- 2) Η περιοχή μελέτης.

Για τον προσδιορισμό της βαθυμετρίας των περιοχών αυτών χρησιμοποιήθηκαν χάρτες και μετρήσεις βαθυμετρικής αποτύπωσης. Στην Εικόνα 2.5-1 φαίνεται ενδεικτικά η περιοχή της βαθυμετρίας ενώ η περιγραφή των περιοχών αυτών γίνεται στο Κεφάλαιο 3.1.

## **2.4. Μετεωρολογικά στοιχεία**

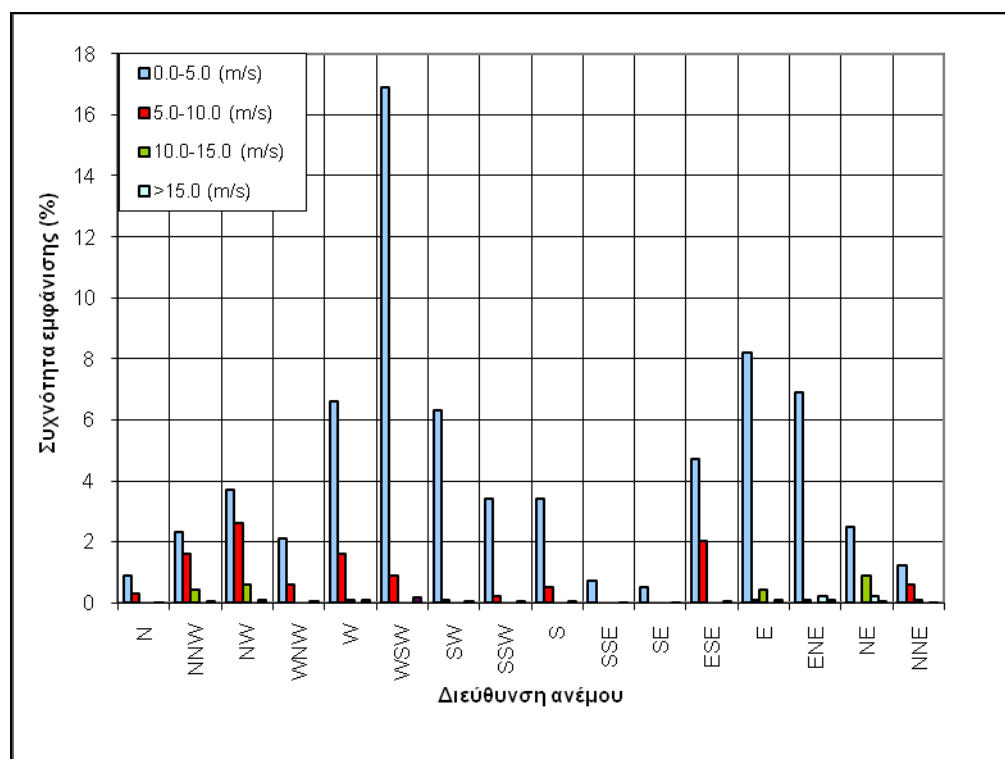
### **2.4.1. Στοιχεία μετεωρολογικού σταθμού Κυμασίου**

Τα μετεωρολογικά στοιχεία (ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου), που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, προέρχονται από τις καταγραφές του μετεωρολογικού σταθμού Κυμασίου, που βρίσκεται στην περιοχή του Ε.Κ.

Στον Πίνακα 2.4-1 παρουσιάζονται οι τιμές των συχνοτήτων παρατήρησης των διευθύνσεων του ανέμου βάσει του μετεωρολογικού σταθμού Κυμασίου, κατά τη χρονική περίοδο 09/2007 - 06/2010 και σε υψόμετρο 22.3 m. Οι συχνότητες αυτές έχουν υπολογιστεί για τέσσερις περιοχές παρατήρησης ταχυτήτων ανέμου (α) 0.0-5.0 m/s, (β) 5.0-10.0 m/s, (γ) 10.0-15.0 m/s και (δ) μεγαλύτερες από 15.0 m/s. Τα στοιχεία του Πίνακα 2.4-1 παρουσιάζονται και στο Σχήμα 2.4-1.

Πίνακας 2.4-1. Τιμές συχνοτήτων παρατήρησης (%) διευθύνσεων ανέμου, κατά την περίοδο 09/2007 - 06/2010, στο μετεωρολογικό σταθμό Κυμασίου

Ταχύτητα/ Άνεμος	0.0-5.0 (m/s)	5.0-10.0 (m/s)	10.0-15.0 (m/s)	>15.0 (m/s)	Άθροισμα
N	0.9	0.3	0.0	0.0	1.2
NNW	2.3	1.6	0.4	0.0	4.3
NW	3.7	2.6	0.6	0.0	6.9
WNW	2.1	0.6	0.0	0.0	2.7
W	6.6	1.6	0.1	0.0	8.3
WSW	16.9	0.9	0.0	0.0	17.8
SW	6.3	0.1	0.0	0.0	6.4
SSW	3.4	0.2	0.0	0.0	3.6
S	3.4	0.5	0.0	0.0	3.9
SSE	0.7	0.0	0.0	0.0	0.7
SE	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
ESE	4.7	2.0	0.0	0.0	6.7
E	8.2	0.1	0.4	0.0	8.7
ENE	6.9	0.1	0.0	0.2	7.2
NE	2.5	0.0	0.9	0.2	3.6
NNE	1.2	0.6	0.1	0.0	1.9
<b>Σύνολο</b>	<b>70.3</b>	<b>11.2</b>	<b>2.5</b>	<b>0.4</b>	<b>84.4</b>



Σχήμα 2.4-1. Ιστόγραμμα συχνοτήτων παρατήρησης (%) διευθύνσεων ανέμου, κατά την περίοδο 09/2007 - 06/2010, στο μετεωρολογικό σταθμό Κυμασίου

Από τα στοιχεία του Πίνακα 2.4-1 και το Σχήμα 2.4-1 διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- 1) Οι επικρατούντες άνεμοι είναι Δ-ΔΝΔ-ΝΔ-ΝΝΔ & Ν (W-WSW-SW-SSW & S), με συνολική συχνότητα εμφάνισης ίση με 40.0%. Οι άνεμοι αυτοί είναι κυρίως μικρής έντασης (συχνότητα εμφάνισης ίση με 36.6% για ταχύτητες 0.0-5.0 m/s) και μέτριας έντασης (συχνότητα εμφάνισης ίση με 3.3% για ταχύτητες 5.0-10.0 m/s).
- 2) Οι ΒΒΑ-ΒΑ-ΑΒΑ & Α άνεμοι (ΝΝΕ-ΝΕ-ΕΝΕ & Ε) έχουν συνολική συχνότητα εμφάνισης ίση με 21.4% και είναι κυρίως μικρής έντασης (συχνότητα εμφάνισης 18.8% για ταχύτητες 0.0-5.0 m/s). Επίσης, σε πολύ μικρά ποσοστά, 0.8%, 1.4% και 0.4% εμφανίζονται άνεμοι μέτριας (5.0-10.0 m/s), μεγάλης (10.0-15.0 m/s) και πολύ μεγάλης έντασης (>15.0 m/s), αντίστοιχα.
- 3) Οι ΒΒΔ-ΒΔ & ΑΝΑ άνεμοι (ΝΝW-NW & ΕSΕ) έχουν συνολική συχνότητα εμφάνισης ίση με 17.9% και είναι κυρίως μικρής έντασης (συχνότητα εμφάνισης 10.7% για ταχύτητες 0.0-5.0 m/s) και μέτριας έντασης (συχνότητα εμφάνισης 6.2% για ταχύτητες 5.0-10.0 m/s). Επίσης, σε πολύ μικρό ποσοστό πνέουν άνεμοι μεγάλης έντασης (συχνότητα εμφάνισης 1.0% για ταχύτητες 10.0-15.0 m/s).
- 4) Στις υπόλοιπες διευθύνσεις εμφανίζονται άνεμοι με πολύ μικρή συχνότητα (μέχρι 2.7%), οι οποίοι στο μεγαλύτερό τους ποσοστό έχουν μικρή ένταση.

#### **2.4.2. Συχνότητα και διάρκεια εμφάνισης δυσμενών ανέμων για τη λειτουργία του Ε.Κ.**

Η περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού αναμένεται να επηρεαστεί κυρίως από Ν-ΝΝΑ-ΝΑ-ΑΝΑ & Α (S-SSE-SE-ESE & Ε) ανέμους που αντιστοιχούν σε γωνίες διεύθυνσης από 90° μέχρι 180° (συντηρητική θεώρηση). Οι άνεμοι αυτοί χαρακτηρίζονται ως «δυσμενείς άνεμοι» γιατί είναι εκείνοι που μπορεί να οδηγήσουν τη φλέβα των θερμών νερών προς την περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού. Σύμφωνα με τα μετεωρολογικά στοιχεία οι «δυσμενείς άνεμοι» έχουν συνολική συχνότητα εμφάνισης ίση με 20.5 % και μέση ταχύτητα (ένταση) ίση με 3.3 m/s.

Στους Πίνακες 2.4-2 και 2.4-3 φαίνεται ο μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών με συνεχόμενη πνοή «δυσμενών ανέμων» επικρατούσας έντασης 0-5 m/s, 6-12 hr και 12-18 hr, αντίστοιχα. Τα ίδια στοιχεία φαίνονται και στο Σχήμα 2.4-2. Στους Πίνακες 2.4-4 και 2.4-5 φαίνεται ο μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών με συνεχόμενη πνοή «δυσμενών ανέμων» επικρατούσας έντασης 5-10 m/s, 6-12 hr και 12-18 hr, αντίστοιχα. Τα ίδια στοιχεία φαίνονται και στο Σχήμα 2.4-3.

Πίνακας 2.4-2. Μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών με συνεχόμενη πνοή «δυσμενών ανέμων» 6-12 hr και ένταση 0-5 m/s

ΕΤΟΣ	ΙΑΝ.	ΦΕΒΡ.	ΜΑΡΤ.	ΑΠΡ.	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.	ΣΕΠΤ.	ΟΚΤ.	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ.
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	3	3	3	2
2008	3	7	3	10	6	7	1	-	-	-	-	-
2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	2
2010	2	4	5	4	5	2	-	-	-	-	-	-
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>2.5</b>	<b>5.5</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>5.5</b>	<b>4.5</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3.5</b>	<b>2</b>

Πίνακας 2.4-3. Μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών με συνεχόμενη πνοή «δυσμενών ανέμων» 12-18 hr και ένταση 0-5 m/s

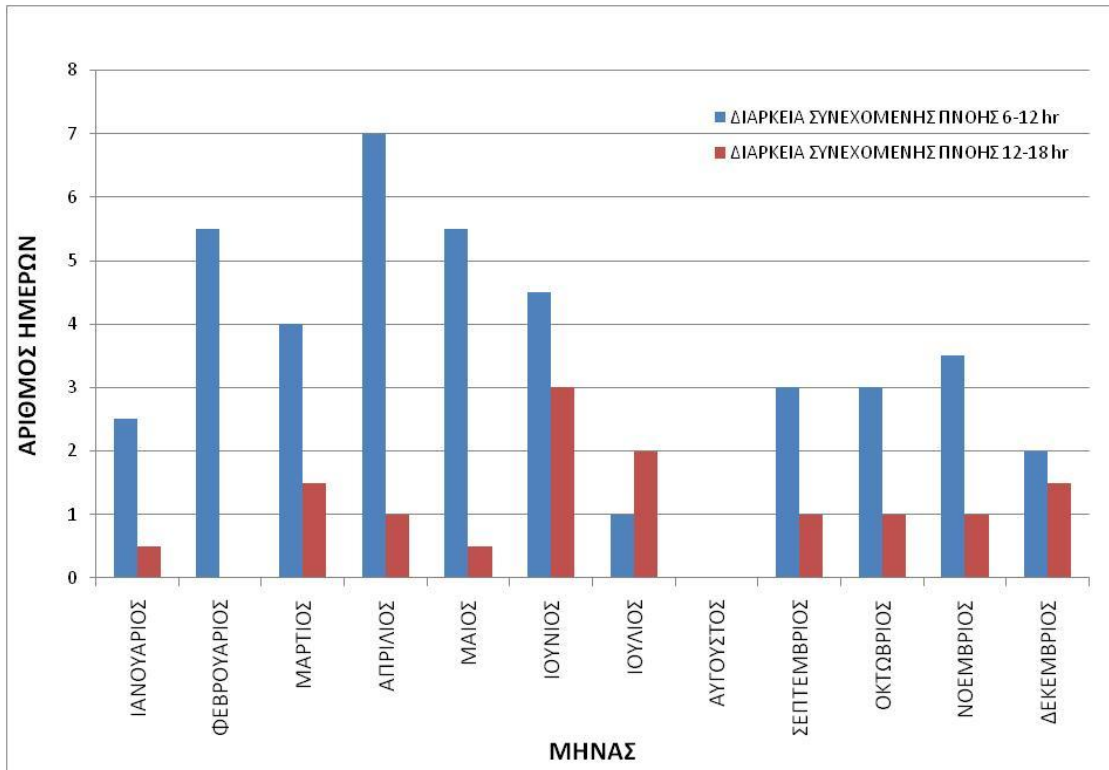
ΕΤΟΣ	ΙΑΝ.	ΦΕΒΡ.	ΜΑΡΤ.	ΑΠΡ.	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.	ΣΕΠΤ.	ΟΚΤ.	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ.
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	0	0
2008	1	0	2	1	0	4	2	-	-	-	-	-
2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	3
2010	0	0	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0.5</b>	<b>0</b>	<b>1.5</b>	<b>1</b>	<b>0.5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1.5</b>

Πίνακας 2.4-4. Μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών με συνεχόμενη πνοή «δυσμενών ανέμων» 6-12 hr και ένταση 5-10 m/s

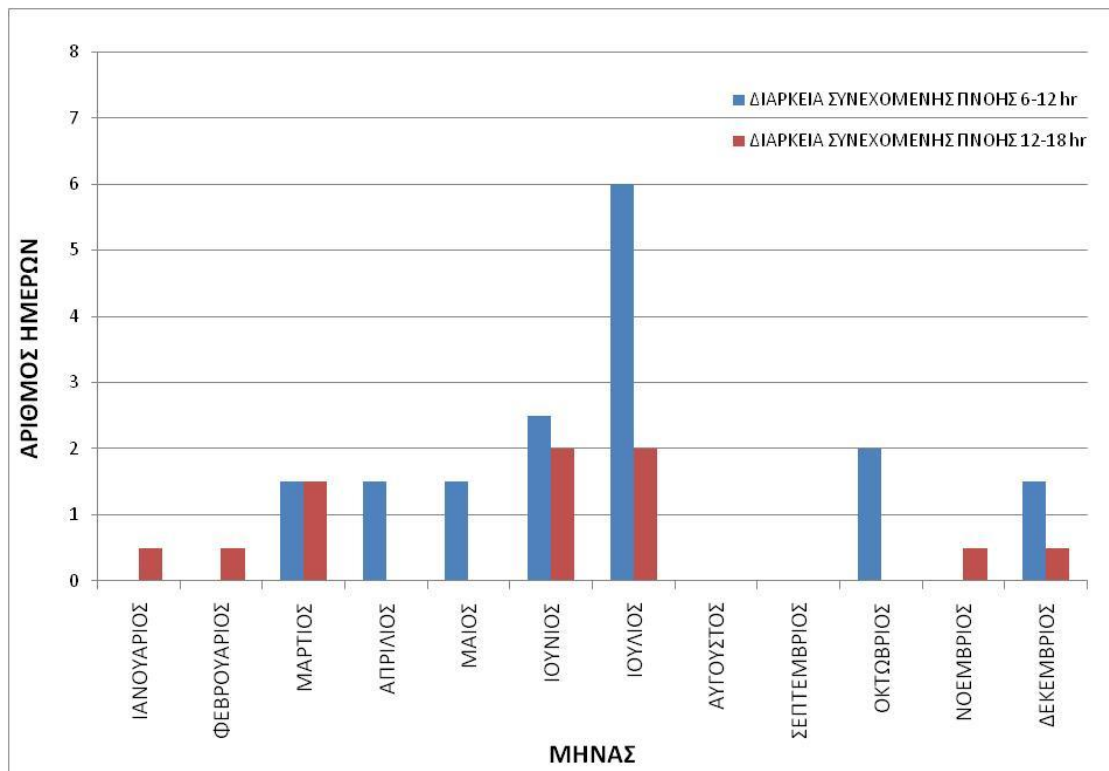
ΕΤΟΣ	ΙΑΝ.	ΦΕΒΡ.	ΜΑΡΤ.	ΑΠΡ.	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.	ΣΕΠΤ.	ΟΚΤ.	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ.
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	0	2	0	2
2008	0	0	0	2	3	4	6	-	-	-	-	-
2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	1
2010	0	0	3	1	0	1	-	-	-	-	-	-
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>	<b>1.5</b>	<b>2.5</b>	<b>6</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1.5</b>

Πίνακας 2.4-5. Μέσος μηνιαίος αριθμός ημερών με συνεχόμενη πνοή «δυσμενών ανέμων» 12-18 hr και ένταση 5-10 m/s

ΕΤΟΣ	ΙΑΝ.	ΦΕΒΡ.	ΜΑΡΤ.	ΑΠΡ.	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.	ΣΕΠΤ.	ΟΚΤ.	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ.
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	1	1
2008	1	0	2	0	0	3	2	-	-	-	-	-
2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
2010	0	1	1	0	0	1	-	-	-	-	-	-
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>1.5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>



Σχήμα 2.4-2. Ιστογράμμα μέσου μηνιαίου αριθμού ημερών με συνεχόμενη πνοή «δυσμενών ανέμων», επικρατούσας έντασης 0-5 m/s, 6-12 & 12-18 hr



Σχήμα 2.4-3. Ιστογράμμα μέσου μηνιαίου αριθμού ημερών με συνεχόμενη πνοή «δυσμενών ανέμων», επικρατούσας έντασης 5-10 m/s, 6-12 & 12-18 hr

Από τα στοιχεία των Πινάκων 2.4-2 μέχρι 2.4-5 και τα Σχήματα 2.4-2 και 2.4-3 διαπιστώνονται τα ακόλουθα σχετικά με την εμφάνιση «δυσμενών ανέμων»:

- 1) Πνέουν συνεχώς για 6-12 ώρες και έχουν ταχύτητα 0-5 m/s: 42 περιστατικά στη διάρκεια ενός χρόνου (11.5 %).
- 2) Πνέουν συνεχώς για 6-12 ώρες και έχουν ταχύτητα 5-10 m/s: 17 περιστατικά στη διάρκεια ενός χρόνου (4.7 %).
- 3) Πνέουν συνεχώς για 12-18 ώρες και έχουν ταχύτητα 0-5 m/s: 13 περιστατικά στη διάρκεια ενός χρόνου (3.6 %).
- 4) Πνέουν συνεχώς για 12-18 ώρες και έχουν ταχύτητα 5-10 m/s: 8 περιστατικά στη διάρκεια ενός χρόνου (2.2 %).
- 5) Πνέουν συνεχώς για περισσότερες από 6 ώρες με μεγάλη ταχύτητα (>10 m/s): Κανένα περιστατικό.
- 6) Πνέουν συνεχώς για περισσότερες από 18 ώρες με οποιαδήποτε ταχύτητα: Κανένα περιστατικό.

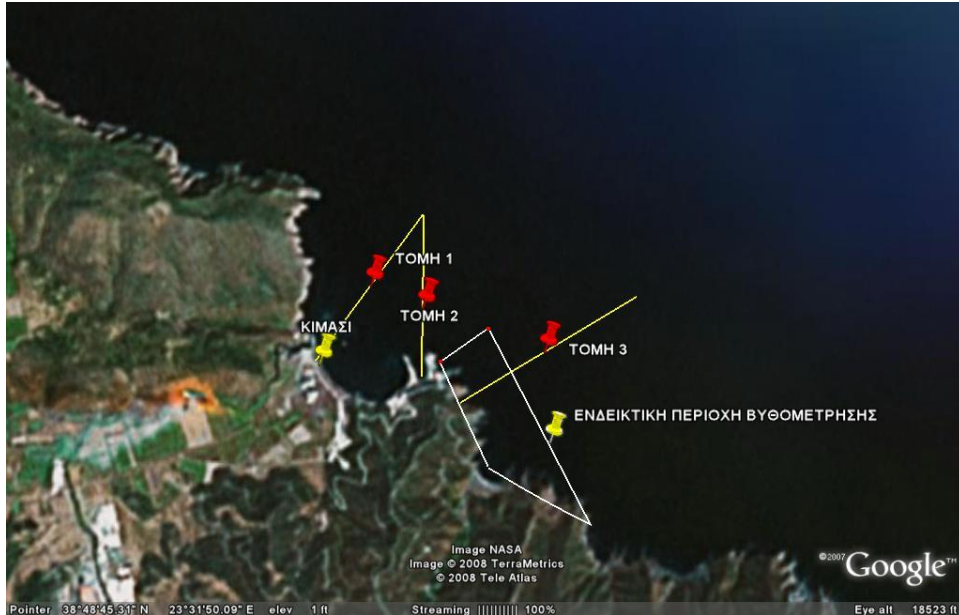
Με βάση τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι οι «δυσμενείς άνεμοι» στην περιοχή έχουν:

- 1) μέση ένταση (ταχύτητα) της τάξης των 2-5 m/s, και
- 2) μέγιστη συνεχόμενη διάρκεια πνοής μικρότερη από 18 ώρες.

Οι άνεμοι αυτοί αναμένεται να δημιουργήσουν παράκτιο ρεύμα με διεύθυνση προς τα ΒΔ, που μπορεί να οδηγήσει τη φλέβα των θερμών νερών από την περιοχή διάθεσης προς την περιοχή απόληξης του θαλασσινού νερού, με ταχύτητες που αντιστοιχούν σε περίπου 1-2% της ταχύτητας του ανέμου, δηλ. από 2 μέχρι 10 cm/s.

## 2.5. Χαρακτηριστικά του αποδέκτη

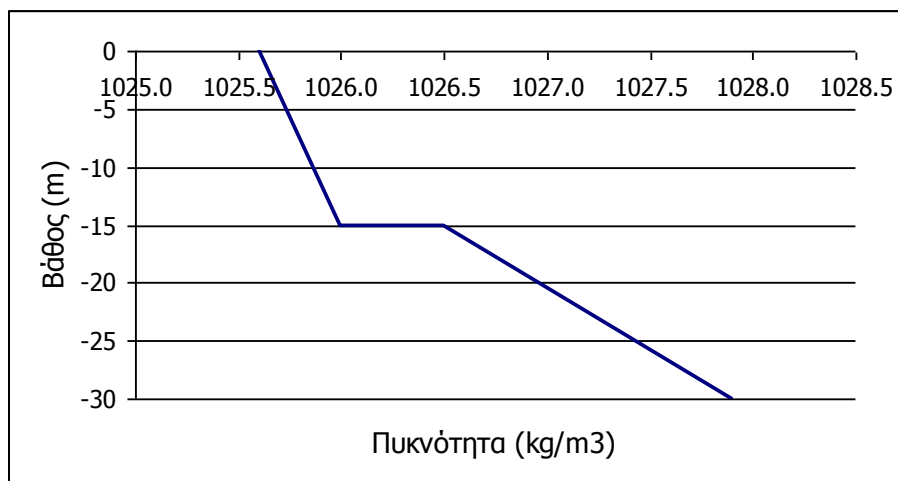
Τα στοιχεία για τη θερμοκρασία, την αλατότητα και την πυκνότητα του αποδέκτη προέκυψαν από δυο σειρές μετρήσεων (06-08-2008 και 01-10-2008) που έχουν πραγματοποιηθεί από ομάδα του Πανεπιστημίου Αθηνών. Στην Εικόνα 2.5-1 παρουσιάζονται ενδεικτικές θέσεις των τομών που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.



Εικόνα 2.5-1. Ενδεικτικές θέσεις των τομών πραγματοποίησης των μετρήσεων πεδίου και της περιοχής βυθομέτρησης (Πηγή: [www.google.com](http://www.google.com))

Από τις μετρήσεις πεδίου διαπιστώθηκαν δυο περιπτώσεις χαρακτηριστικών του αποδέκτη.

- 1) Ομογενής (μη-στρωματωμένος) αποδέκτης με πυκνότητα  $\rho_a=1026.48 \text{ kg/m}^3$ .
- 2) Στρωματωμένος αποδέκτης με την κατανομή πυκνότητας που φαίνεται στο Σχήμα 2.5-1.



Σχήμα 2.5-1. Κατανομή της πυκνότητας συναρτήσεως του βάρους για τον στρωματωμένο αποδέκτη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

### 3.1. Όρια περιοχών του έργου

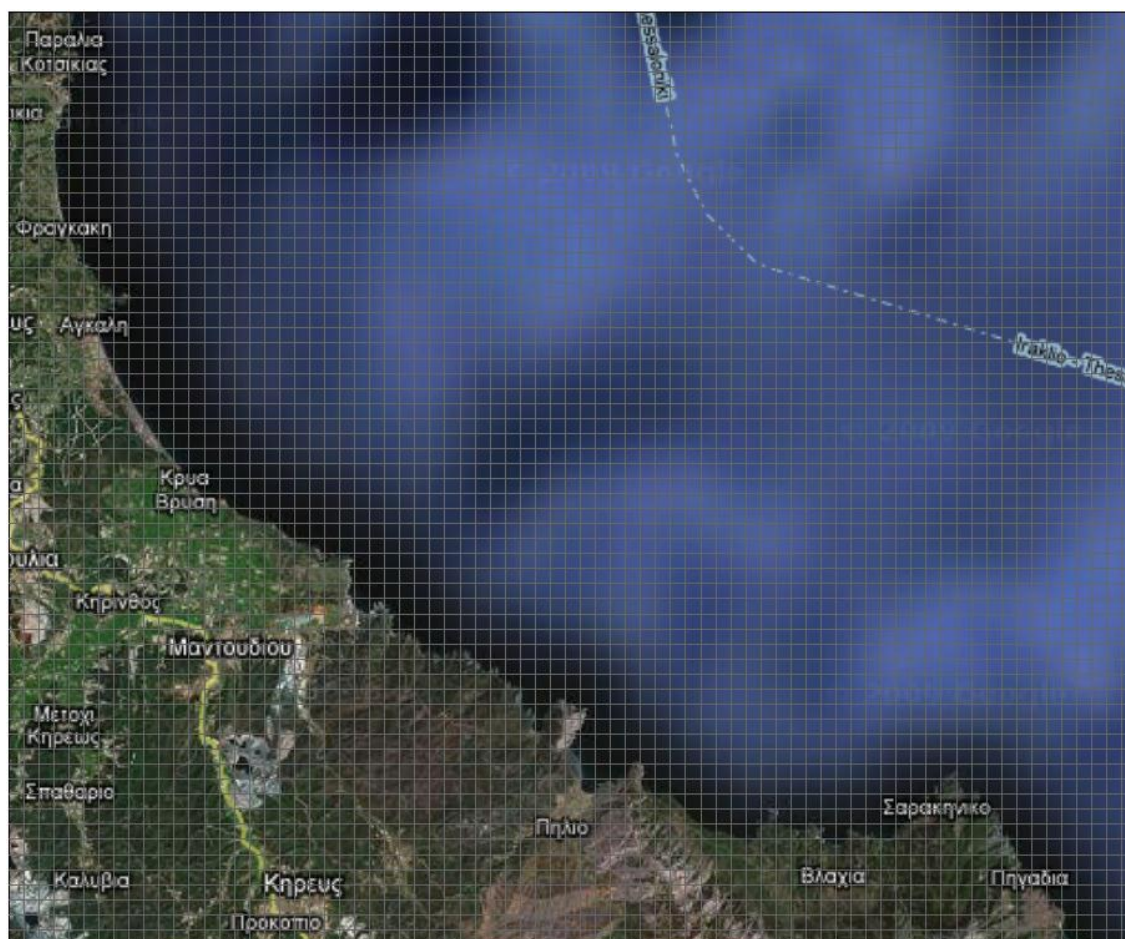
Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η παρουσίαση της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε.

Κατ' αρχήν, θεωρούνται 2 επιμέρους περιοχές:

- 1) Η ευρύτερη περιοχή μελέτης, και
- 2) Η περιοχή μελέτης.

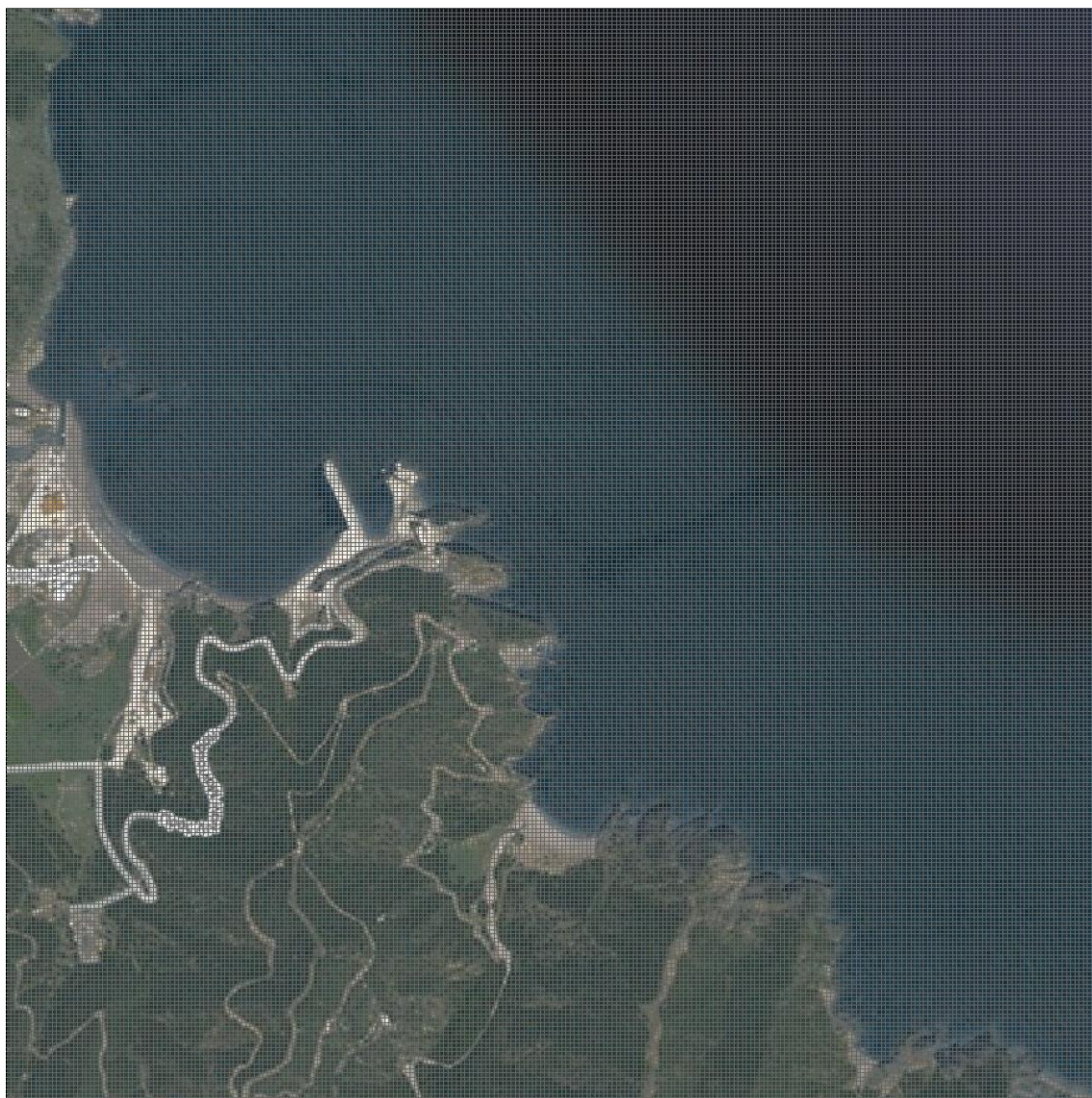
Η ευρύτερη περιοχή μελέτης, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 3.1-1, έχει διαστάσεις 30.0 km X 24.8 km και περιορίζεται κατά το οριζόντιο επίπεδο Οχυ από τα φυσικά στερεά όρια των ακτών και τα "νοητά" όρια της ανοικτής θάλασσας.

Η περιοχή μελέτης, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 3.1-2, έχει διαστάσεις 2.6 km X 2.6 km και περιορίζεται κατά το οριζόντιο επίπεδο Οχυ από τα φυσικά στερεά όρια των ακτών και τα "νοητά" όρια της ανοικτής θάλασσας, που αποτελούν και τις οριακές συνθήκες των εξισώσεων του μαθηματικού μοντέλου FLOW-3DL.



Εικόνα 3.1-1. Ευρύτερη περιοχή μελέτης (Πηγή: [www.google.com](http://www.google.com))





Εικόνα 3.1-2. Άμεση περιοχή μελέτης (Πηγή: [www.google.com](http://www.google.com))

### **3.2. Εφαρμοζόμενα αριθμητικά πλέγματα**

#### **3.2.1. Κύρια χαρακτηριστικά των αριθμητικών πλεγμάτων**

Στις 2 περιοχές (ευρύτερη περιοχή μελέτης και περιοχή μελέτης) εφαρμόζεται το μαθηματικό μοντέλο σε διαφορετικά αριθμητικά πλέγματα (μοντέλο MM1 και MM2, αντίστοιχα) για διαφορετικούς σκοπούς.

Στους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται 2 βασικά αριθμητικά πλέγματα ακολουθώντας την τεχνική των πολλαπλών πλεγμάτων (multi-grid method). Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης επιλέγεται χωρικό βήμα κατά τις οριζόντιες διαστάσεις X και Y ίσο με 400.0 m. Κατά την κατακόρυφη διάσταση ο αποδέκτης χωρίζεται σε 7 στρώματα. Συνεπώς, ο αριθμός των διαφορικών όγκων προκύπτει ίσος με  $75 \times 62 \times 7 = 32550$ . Αντίστοιχα, στην περιοχή μελέτης επιλέγεται χωρικό βήμα κατά τις οριζόντιες διαστάσεις X και Y ίσο με 10.0 m. Κατά την κατακόρυφη διάσταση ο αποδέκτης χωρίζεται σε 10 στρώματα. Συνεπώς, ο αριθμός των

διαφορικών όγκων προκύπτει ίσος με  $262 \times 262 \times 10 = 686440$ . Τα χαρακτηριστικά των περιοχών και των βασικών αριθμητικών πλεγμάτων φαίνονται και στον Πίνακα 3.2-1.

Πίνακας 3.2-1. Χαρακτηριστικά περιοχών και βασικών αριθμητικών πλεγμάτων

Πλέγμα	Διαστάσεις εφαρμοζόμενης περιοχής (km X km)	Αριθμός διαφορικών όγκων (-)	Οριζόντιες διαστάσεις πλέγματος (m X m)	Ανοικτά όρια
1	30.0 X 24.8	75 X 62 X 7 = 32550	400 X 400	3 - Ανοιχτή θάλασσα
2	2.6 X 2.6	262 X 262 X 10 = 686440	10.0 X 10.0	3 - Ανοιχτή θάλασσα

Για λόγους ελέγχου (κυρίως ανεξαρτησίας των αποτελεσμάτων από τις διαστάσεις των πλεγμάτων) και δοκιμαστικών υπολογισμών πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί χρησιμοποιώντας διάφορα πλέγματα δοκιμών. Τα πλέγματα αυτά ήταν αδρομερή – «αραιά». Σε όλες τις περιπτώσεις τα πλέγματα ήταν ομοιόμορφα σε οριζόντιο επίπεδο, δηλαδή ίδιων διαστάσεων κατά x και y.

### 3.2.2. Όρια και χαρακτηριστικά στρωμάτων του αριθμητικού πλέγματος της περιοχής μελέτης

Οι υπολογισμοί με το μοντέλο MM2 γίνονται στο βασικό αριθμητικό πλέγμα που εφαρμόζεται στην περιοχή μελέτης και έχει 10 στρώματα κατά την κατακόρυφη διεύθυνσή του με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 3.2-2.

Πίνακας 3.2-2. Χαρακτηριστικά στρωμάτων πλέγματος της περιοχής μελέτης

Στρώμα (-)	Πάχος στρώματος (m)	Βάθος (m)	Χαρακτηριστική θέση (-)
1	2.0	0.0-2.0	-
2	2.0	2.0-4.0	-
3	4.0	4.0-8.0	Θέση απόληψης
4	2.0	8.0-10.0	-
5	2.0	10.0-12.0	Θέση διάθεσης
6	3.0	12.0-15.0	-
7	10.0	15.0-25.0	-
8	10.0	25.0-35.0	-
9	10.0	35.0-45.0	-
10	85.0	45.0-130.0	-

Τα όρια της εξεταζόμενης περιοχής μελέτης καθορίζονται ως εξής:

- 1) Κατά την κατακόρυφη διεύθυνση η περιοχή περιορίζεται από τον πυθμένα και την ελεύθερη επιφάνεια.
- 2) Το δυτικό όριο και τμήμα του νότιου και βόρειου ορίου της εξεταζόμενης περιοχής είναι στερεά όρια (ακτές).
- 3) Το μεγαλύτερο τμήμα του βόρειου ορίου, μικρό τμήμα του νότιου ορίου και το ανατολικό όριο αποτελούν τα 3 όρια ανοικτής θάλασσας.
- 4) Όριο «εκροής» είναι η θέση στον υδάτινο αποδέκτη, από όπου αντλείται η απαραίτητη παροχή του θαλασσινού νερού προς το Ε.Κ. Μαντουδίου.
- 5) Όριο «εισροής» είναι η θέση στον υδάτινο αποδέκτη στην οποία διατίθεται η παροχή των θερμών νερών του Ε.Κ. Μαντουδίου.

Συνοπτικά, η εξεταζόμενη περιοχή του Μαντουδίου έχει 3 στερεά όρια ακτών, 3 όρια ανοικτής θάλασσας, 1 όριο «εισροής» και 1 όριο «εκροής».

Σημειώνεται ότι ο συνδυασμός του χρησιμοποιούμενου ρητού σχήματος επίλυσης των εξισώσεων (βλ. Κεφάλαιο 4) και των πολύ μικρών διαστάσεων του πλέγματος οδήγησε στην εφαρμογή πολύ μικρού χρονικού βήματος, της τάξης των 0.10 s.

### **3.3. Αναμενόμενα χαρακτηριστικά των πεδίων ροής και θερμοκρασιών**

Από τους πραγματοποιηθέντες υπολογισμούς στην ευρύτερη περιοχή μελέτης με το μοντέλο FLOW-3DL (MM1) και τους προκαταρκτικούς υπολογισμούς στην περιοχή μελέτης με τα μοντέλα CORMIX και FLOW-3DL αναμένονται τα ακόλουθα:

- 1) Πολυπλοκότητα και μεταβλητότητα του πεδίου ροής.  
Η θαλάσσια κυκλοφορία στην περιοχή μελέτης, που καθορίζει τη μεταφορά και διάχυση των θερμών νερών, αναμένεται να είναι σύνθετη και χρονικά ευμετάβλητη παρουσιάζοντας τοπικές αλλαγές σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Τα ρεύματα που δημιουργούνται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, εξαιτίας κυρίως των ανέμων, «μεταφέρονται» ως κυματισμοί μεγάλου μήκους κύματος μέσω των «ορίων ανοικτής θάλασσας» της περιοχής μελέτης στην παράκτια περιοχή και επηρεάζουν την τοπική κυκλοφορία και την κίνηση της φλέβας των θερμών νερών. Έτσι, οι θαλάσσιες μάζες της παράκτιας περιοχής μελέτης συμμετέχουν και επηρεάζονται από τη θαλάσσια κυκλοφορία της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

- 2) Γενεσιουργά αίτια της κυκλοφορίας των νερών.  
Το προκύπτον πεδίο ροής στην περιοχή μελέτης αποτελεί το αποτέλεσμα της επίδρασης διάφορων παραγόντων, όπως ο άνεμος, η παλίρροια και οι διαφορές πυκνότητας.

Στην εξεταζόμενη περίπτωση αναμένεται να είναι σημαντικότερη η επίδραση των ανέμων στην ευρύτερη περιοχή, ενώ λιγότερο σημαντική κρίνεται η επίδραση των διαφορών πυκνότητας, κυρίως στην περιοχή της αρχικής κίνησης της φλέβας των θερμών νερών. Η επίδραση της παλίρροιας δεν κρίνεται ως σημαντική.

3) «Τυπικά» παράκτια πεδία ροής.

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το σύνθετο πεδίο ροής επιχειρήθηκε να «τυποποιηθεί» με βάση τα επικρατούντα χαρακτηριστικά του και ιδιαίτερα τη «συσσωρευμένη» επίδραση των επικρατούντων ανέμων.

Με βάση τους υπολογισμούς των μαθηματικών μοντέλων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης διακρίνονται 2 βασικά τυπικά παράκτια πεδία ροής με βάση τη διεύθυνση προς την οποία κατευθύνονται: ο τύπος πεδίου ΒΔ και ο τύπος πεδίου ΝΑ.

*Τύπος παράκτιου πεδίου ΒΔ.* Το πεδίο αυτό προκαλείται από την επίδραση ανέμων με κύρια ΝΑ διεύθυνση, οι οποίοι δημιουργούν ρεύματα προς ΒΔ. Τα ρεύματα αυτά κινούνται προς τα ΒΔ παράλληλα με την ακτή και ένα τμήμα τους εισέρχεται στην περιοχή άντλησης θαλασσινού νερού δημιουργώντας ένα αριστερόστροφο στρόβιλο. Το υπόλοιπο συνεχίζει την κίνησή του κατά μήκος των ακτών προς τα Β-ΒΔ.

*Τύπος παράκτιου πεδίου ΝΑ.* Το πεδίο αυτό προκαλείται από την επίδραση ανέμων με κύρια ΒΔ διεύθυνση, οι οποίοι δημιουργούν ρεύματα κατά μήκος των ακτών που κινούνται προς τα ΝΑ.

4) Σημασία του τύπου των πεδίων ροής ανάλογα με την επίδρασή τους στην κατανομή της θερμοκρασίας στην περιοχή απόληψης.

Ο τύπος πεδίου ΒΔ είναι ο δυσμενέστερος τύπος ροής για την εξεταζόμενη περίπτωση, γιατί είναι αυτός που μπορεί να οδηγήσει τα θερμά νερά προς την περιοχή άντλησης του θαλασσινού νερού. Σύμφωνα με τους αρχικούς υπολογισμούς με τα μοντέλα CORMIX και FLOW-3DL, η φλέβα των θερμών νερών «προσκολλάται» στην ακτή κοντά στην περιοχή διάθεσης και συνεχίζει την κίνησή της προς τον όρμο που βρίσκεται η άντληση του θαλασσινού νερού.

Ο τύπος πεδίου ροής ΝΑ θεωρείται ως ευμενής για την εξεταζόμενη περίπτωση, γιατί δεν συνεισφέρει στην καθοδήγηση των θερμών νερών προς την περιοχή άντλησης θαλασσινού νερού. Ωστόσο αυτός ο τύπος του πεδίου ροής είναι ο δυσμενέστερος όσον αφορά στην αύξηση της θερμοκρασίας των νερών στις παρακείμενες ακτές που βρίσκονται ΝΑ.

### **3.4. Μεθοδολογία υπολογισμών**

Πριν από την πραγματοποίηση των υπολογισμών έλαβαν χώρα οι ακόλουθες προκαταρκτικές εργασίες:

- 1) Δομήθηκε η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης.
- 2) Δομήθηκε το αριθμητικό πλέγμα στην περιοχή μελέτης.
- 3) Καθορίστηκαν τα σενάρια υπολογισμών με βάση τις συνθήκες λειτουργίας του Ε.Κ. Μαντουδίου και τις συνθήκες του αποδέκτη. Τα σενάρια αυτά περιγράφονται στα Κεφάλαια 6.1-1 και 6.3-1.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε το ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο.

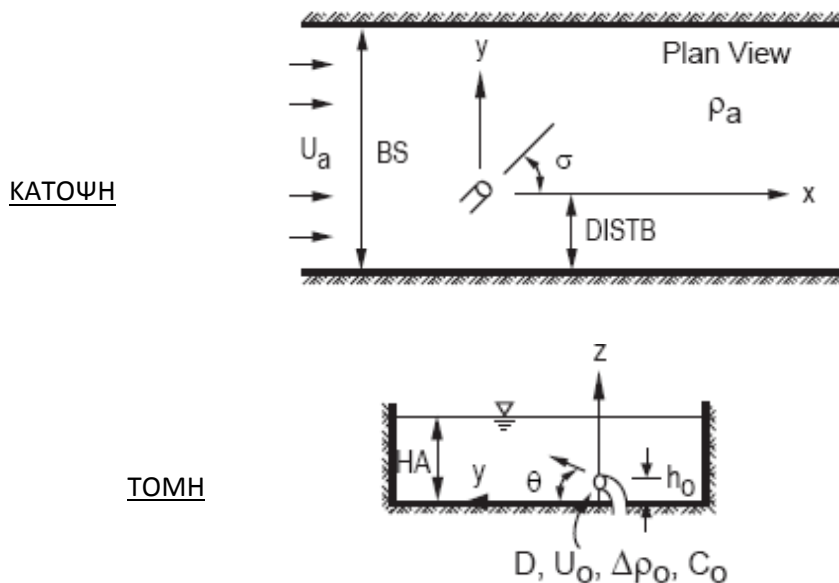
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

### 4.1. Το μοντέλο CORMIX

#### 4.1.1. Εισαγωγή

Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της φλέβας των θερμών νερών μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια θεωρητικών-εμπειρικών εξισώσεων, οι οποίες εφαρμόζονται και στο μοντέλο CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System) του Πανεπιστημίου Cornell των ΗΠΑ.

Θεωρείται η σχηματική απεικόνιση (κάτοψη και τομή) της παροχετευόμενης φλέβας των θερμών νερών και της γεωμετρίας του αποδέκτη του Σχήματος 4.1-1.



Σχήμα 4.1-1. Σχηματική απεικόνιση της διάθεσης κυκλικής φλέβας και του αποδέκτη (Πηγή: Jones et al., 2007)

Στο Σχήμα 4.1-1  $u_a$  είναι η ταχύτητα του παράκτιου ρεύματος,  $BS$  είναι το πλάτος του αποδέκτη,  $DISTB$  είναι η απόσταση του στομίου από το στερεό όριο,  $\rho_a$  είναι η πυκνότητα του αποδέκτη,  $\sigma$  είναι η οριζόντια γωνία (δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή του στομίου στο οριζόντιο επίπεδο και τη διεύθυνση του παράκτιου ρεύματος),  $HA$  είναι το βάθος του αποδέκτη στη θέση διάθεσης,  $\theta$  είναι η κατακόρυφη γωνία (δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του στομίου και του οριζόντιου άξονα  $Y$ ),  $h_0$  είναι η απόσταση του στομίου από τον πυθμένα,  $D$  είναι η διάμετρος του στομίου,  $u_0$  είναι η ταχύτητα διάθεσης,  $\Delta\rho_0$  είναι η διαφορά πυκνότητας μεταξύ της φλέβας των θερμών νερών και του περιβάλλοντος θαλασσινού νερού,  $C_0$  είναι η αρχική διαφορά θερμοκρασίας και  $x$ ,  $y$  και  $z$  είναι οι άξονες του τοπικού συστήματος συντεταγμένων του CORMIX.

Η περιοχή του υδάτινου αποδέκτη στην οποία πραγματοποιείται η αρχική ανάμιξη της φλέβας των θερμών νερών με το περιβάλλον νερό κυρίως εξαιτίας της τυρβώδους διάχυσης (turbulent diffusion) και της συμπαράσυρσης (entrainment) του περιβάλλοντος νερού από τη φλέβα ορίζεται ως ζώνη ανάμιξης (mixing zone). Συνήθως, στο τέλος της ζώνης ανάμιξης η φλέβα των

θερμών νερών πρέπει να ικανοποιεί κάποια χαρακτηριστικά ως προς την επιτυγχανόμενη διάλυση, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς ή τις απαιτήσεις του έργου.

Για την ανάλυση του προβλήματος της διάθεσης θερμών νερών σε ακίνητους ή κινούμενους υδάτινους αποδέκτες γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- 1) Η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη τυρβώδης.
- 2) Ισχύει η παραδοχή Boussinesq.

Το μοντέλο στηρίζεται στις υδροδυναμικές εξισώσεις συνέχειας, ποσότητας κίνησης και στην εξίσωση διατήρησης μάζας των διακινουμένων ρύπων (π.χ. αλατότητα, θερμότητα). Οι εξισώσεις επιλύονται σταδιακά κατά μήκος της φλέβας, για μόνιμες συνθήκες, και μπορούν να εφαρμοστούν για:

- συντηρητικούς ρύπους,
- μη συντηρητικούς ρύπους,
- θερμικούς ρύπους,
- διάθεση άλμης και
- απόθεση φερτών υλικών.

Από την επίλυση προκύπτει τόσο η τροχιά της φλέβας (στο σύστημα συντεταγμένων του CORMIX) όσο και οι συγκεντρώσεις των ρύπων κατά μήκος του άξονά της. Η κατανομή των ρύπων εγκάρσια του άξονα θεωρείται ότι ακολουθεί την κατανομή Gauss.

Ως προς τον τύπο εκροής, το CORMIX αποτελείται από 3 επί μέρους προγράμματα που προσομοιώνουν:

- εκροές από διαχυτήρα απλού στομίου (CORMIX 1),
- εκροές από διαχυτήρα πολλαπλών στομίων (CORMIX 2) και
- επιφανειακές εκροές (CORMIX 3), (<http://www.cormix.info/>).

#### 4.1.2. Περιοχές κοντινού και μακρινού πεδίου

Σημαντικό ρόλο στο συγκεκριμένο μοντέλο παίζει η αλληλεπίδραση της φλέβας με τα όρια (επιφάνεια, πυθμένας, στρωματωμένος αποδέκτης). Το σημείο επαφής με τα όρια είναι εκείνο που συνήθως σηματοδοτεί τη μετάβαση από το «κοντινό πεδίο ροής (near field)» στο «μακρινό πεδίο ροής (far field)», δύο περιοχές στις οποίες η ανάμιξη είναι αποτέλεσμα διαφορετικών διεργασιών.

##### Κοντινό πεδίο ροής (near field)

Στο κοντινό πεδίο ροής η ανάμιξη εξαρτάται κυρίως από τα αρχικά χαρακτηριστικά της φλέβας και συγκεκριμένα από τις κινηματικές εισροές παροχής  $Q_0$ , ποσότητας κίνησης  $M_0$  και άνωσης  $J_0$ . Οι εισροές αυτές, για τη διάθεση τρισδιάστατης φλέβας, ορίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$Q_o = u_o A_o \quad (4.1-1)$$

$$M_o = u_o^2 A_o \quad (4.1-2)$$

$$J_o = g_o' Q_o = g \frac{\rho_\alpha(0) - \rho_o(0)}{\rho_\alpha(0)} Q_o \quad (4.1-3)$$

όπου  $u_o$  η ταχύτητα διάθεσης,  $A_o$  το εμβαδό της αρχικής διατομής της φλέβας,  $\rho_\alpha(0)$  η αρχική πυκνότητα του αποδέκτη στη θέση διάθεσης,  $\rho_o(0)$  η αρχική πυκνότητα της φλέβας και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας. Το μέγεθος  $g_o'$  ονομάζεται φαινόμενη πυκνότητα.

Ανάλογα με τα αρχικά χαρακτηριστικά της φλέβας και τα χαρακτηριστικά του αποδέκτη, η φλέβα μπορεί να ρέει ελεύθερα, χωρίς να επηρεάζεται από τα στερεά όρια ή να προσκολλάται σε αυτά.

#### Μακρινό πεδίο ροής (far field)

Στο μακρινό πεδίο ροής η ανάμιξη της φλέβας με τον αποδέκτη εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αποδέκτη (ταχύτητα αποδέκτη, τύρβη, στρωμάτωση κ.α.).

#### **4.1.3. Κλίμακες μήκους**

Στην πραγματικότητα η μετάβαση από το κοντινό στο μακρινό πεδίο δεν είναι απότομη. Πρακτικά, μπορεί να θεωρηθεί ένα προσεγγιστικό σημείο στο οποίο πραγματοποιείται η μετάβαση, το οποίο μπορεί να εκτιμηθεί με τη βοήθεια κατάλληλων κλιμάκων μήκους.

Οι κλίμακες μήκους χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των περιοχών της φλέβας στις οποίες επικρατεί μια διεργασία έναντι κάποιας άλλης, δηλαδή πραγματοποιείται σύγκριση της σχετικής «ισχύος» των αρχικών κινηματικών εισροών μάζας  $Q_o$ , ποσότητας κίνησης  $M_o$ , άνωσης  $J_o$  και της ταχύτητας του αποδέκτη  $u_\alpha$ .

Για τις περιπτώσεις διάθεσης φλεβών σε ακίνητους ή κινούμενους αποδέκτες ορίζονται οι ακόλουθες 4 κλίμακες μήκους:

- 1) Κλίμακα μήκους παροχής  $L_Q$ , η οποία συγκρίνει τις ποσότητες  $Q_o$  και  $M_o$ .

$$L_Q = \frac{Q_o}{M_o^{1/2}} \quad (4.1-4)$$

Για αποστάσεις πολύ μικρότερες του  $L_Q$ , η εισροή όγκου στη θέση διάθεσης είναι σημαντική και η εξεταζόμενη περιοχή καλείται «περιοχή ανάπτυξης της ροής».

- 2) Κλίμακα μήκους φλέβας ποσότητας κίνησης - απλής φλέβας  $L_M$ , η οποία συγκρίνει τις ποσότητες  $M_o$  και  $J_o$ .

$$L_M = \frac{M_o^{3/4}}{J_o^{1/2}} \quad (4.1-5)$$

Για αποστάσεις πολύ μικρότερες του  $L_M$ , η ποσότητα κίνησης είναι σημαντική, ενώ για αποστάσεις μεγαλύτερες από  $L_M$ , επικρατεί η άνωση. Πρακτικά, όσο σημαντικότερο είναι το μήκος στο οποίο επικρατούν οι δυνάμεις ποσότητας κίνησης, τόσο μεγαλύτερη είναι η προκύπτουσα διάλυση. Όσο αυξάνεται η «ισχύς» των δυνάμεων άνωσης, τόσο η ροή χαρακτηρίζεται από έντονη διάχυση, εγκάρσια στη διεύθυνση της ροής.

- 3) Κλίμακα μήκους φλέβας ποσότητας κίνησης σε σχέση με τη ροή του αποδέκτη  $L_m$ , η οποία αποτελεί μέτρο της σχετικής «ισχύος» των  $M_o$  και  $u_\alpha$  και της μετάβασης από μικρή σε έντονη καμπύλωση της φλέβας εξαιτίας της ταχύτητας ροής του αποδέκτη ( $u_\alpha$ ).

$$L_m = \frac{M_o^{1/2}}{u_\alpha} \quad (4.1-6)$$

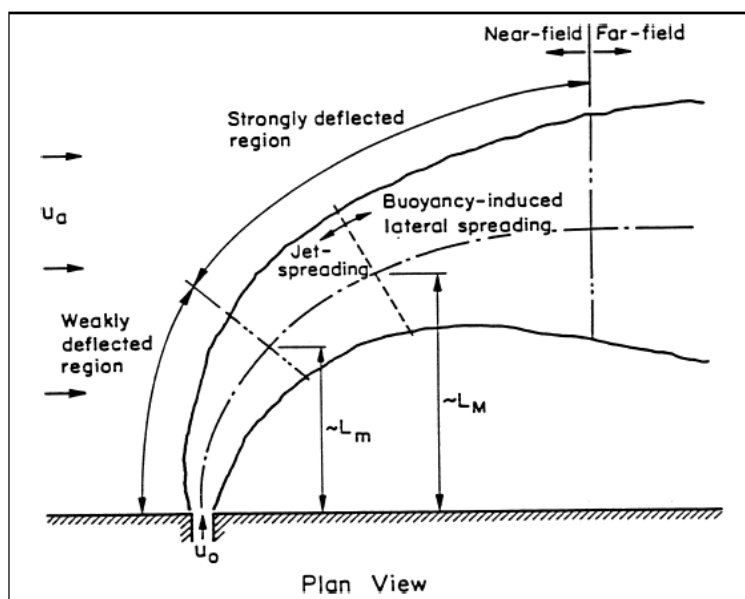
- 4) Κλίμακα μήκους απλής φλέβας σε σχέση με τη ροή του αποδέκτη  $L_b$ , η οποία αποτελεί μέτρο της σχετικής «ισχύος» των  $J_o$  και  $u_\alpha$ .

$$L_b = \frac{J_o}{u_\alpha^3} \quad (4.1-7)$$

Η κλίμακα αυτή έχει πρακτικό ενδιαφέρον γιατί σχετίζεται με την περιοχή εντονότερης οριζόντιας εγκάρσιας διάχυσης και λεπτότερης στρώσης κατά την κατακόρυφη διάσταση.

Στο Σχήμα 4.1-2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής των κλιμάκων μήκους για το χαρακτηρισμό περιοχών επιφανειακής φλέβας παροχετευόμενης σε κινούμενο αποδέκτη, χωρίς να υπάρχει επίδραση των στερεών ορίων.





Σχήμα 4.1-2. Παράδειγμα εφαρμογής των κλιμάκων μήκους για ελεύθερη επιφανειακή φλέβα σε κινούμενο αποδέκτη (Πηγή: Jones et al., 1996)

#### 4.1.4. Αδιάστατοι αριθμοί

Οι συνηθέστεροι αδιάστατοι αριθμοί παρουσιάζονται στη συνέχεια.

- 1) Πυκνομετρικός αριθμός Froude.

$$Fr_o = \frac{u_o}{\sqrt{g_o' H_o}} \quad (4.1-8)$$

$$Fr_o' = \frac{u_o}{\sqrt{g_o' A_o^{1/2}}} = \frac{L_M}{L_Q} \quad (4.1-9)$$

- 2) Λόγος ταχυτήτων.

$$R = \frac{u_o}{u_\alpha} = \frac{L_m}{L_Q} \quad (4.1-10)$$

#### 4.1.5. Ταξινόμηση της ροής

Οι παραπάνω κλίμακες μήκους, σε συνδυασμό με τη γεωμετρία του αποδέκτη, καθορίζουν πλήρως το πεδίο ροής. Στην παρούσα ανάλυση, η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση της ροής είναι η προτεινόμενη από τους Jirka et al. (1981), όπως εφαρμόζεται και στο μοντέλο CORMIX (<http://www.cormix.info/>).

#### 4.1.6. Χαρακτηρισμός του αποδέκτη

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο χαρακτηρισμός του αποδέκτη ως βαθέως ή αβαθούς. Η μέγιστη κατακόρυφη διείσδυση  $h_{\max}$  της επιφανειακής φλέβας και η θέση  $y_{\max}$ , στην οποία αυτή παρατηρείται, συνδέονται με την κλίμακα μήκους  $L_M$  με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{h_{\max}}{L_M} \cong 0.25 \quad \text{και} \quad \frac{y_{\max}}{L_M} \cong 3.9 \quad (4.1-11)$$

Το κριτήριο για το χαρακτηρισμό ενός αποδέκτη ως αβαθούς εκφράζεται με την εξίσωση(4.1-12).

$$h_{\max} \geq 0.75H \quad (4.1-12)$$

όπου  $H$  το βάθος του αποδέκτη στη θέση μέγιστης κατακόρυφης διείσδυσης. Από τις εξισώσεις (4.1-11) και (4.1-12) προκύπτει ότι ένας αποδέκτης θεωρείται αβαθής όταν ισχύει η εξίσωση (4.1-13).

$$\frac{L_M}{H} \geq 3.0 \quad (4.1-13)$$

#### 4.1.7. Προσκόλληση στην ακτή

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της φλέβας και την ταχύτητα του αποδέκτη, η φλέβα είναι δυνατόν να προσκολληθεί στο κατάντη στερεό όριο και να δημιουργηθεί μια περιοχή ανακυκλοφορίας του ρευστού της φλέβας. Κριτήριο για την προσκόλληση ή μη της επιφανειακής φλέβας αποτελεί η παράμετρος  $C_4$ , η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση (4.1-14).

$$C_4 = (1 + \cos \sigma) \frac{L_Q}{L_m} \left( \frac{L_M}{H} \right)^{3/2} = \frac{1 + \cos \sigma}{R} \left( \frac{L_M}{H} \right)^{3/2} \quad (4.1-14)$$

Η επιφανειακή φλέβα προσκολλάται στο όριο όταν  $C_4 > 0.25$  (<http://www.cormix.info/>).

#### 4.1.8. Προσκόλληση στον πυθμένα

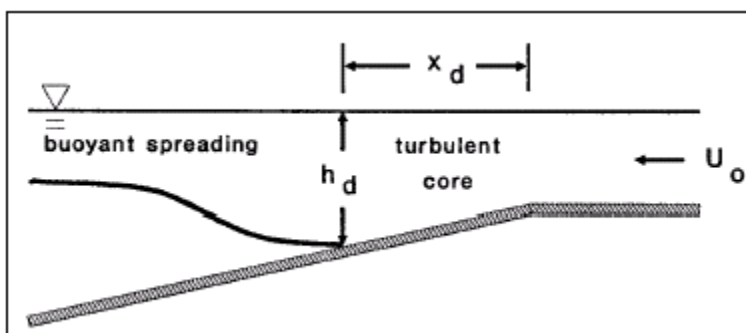
Στην περίπτωση που ο πυθμένας παρουσιάζει μικρή κλίση αμέσως μετά τη θέση διάθεσης, είναι δυνατόν η φλέβα να παραμείνει προσκολλημένη στον πυθμένα για κάποιο μήκος και στη συνέχεια να αποκολληθεί.

Η περιοχή προσκόλλησης χαρακτηρίζεται από έντονη τύρβη και πλευρική συμπάρσωση, ενώ επικρατούν οι δυνάμεις αδράνειας. Στη συνέχεια η φλέβα αποκολλάται από τον πυθμένα και εξαπλώνεται υπό την επίδραση των δυνάμεων άνωσης. Το φαινόμενο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1-3.

Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες στο αντικείμενο αυτό είναι οι εργασίες των Atkinson (1993) και Okely (2001). Σύμφωνα με τον Jirka (2007) η επιφανειακή φλέβα αποκολλάται από τον πυθμένα όταν ο τοπικός πυκνομετρικός αριθμός Froude γίνει ίσος με 1.5 και προτείνει την εξίσωση (4.1-15) για την εκτίμηση της θέσης αποκόλλησης.

$$\frac{h_d}{L_M} = (0.6 \pm 0.3) S^{1/4}, \quad 1\% < S < 4\% \quad (4.1-15)$$

όπου  $S$  είναι η κλίση του πυθμένα και  $h_d$  το βάθος στο σημείο αποκόλλησης.  $x_d$  είναι το μήκος στη θέση αποκόλλησης μετρούμενο από την αρχή της κλίσης του αποδέκτη. Η σχέση αυτή δεν λαμβάνει υπόψη την κίνηση του αποδέκτη.



Σχήμα 4.1-3. Προσκόλληση επιφανειακής φλέβας στον πυθμένα (Πηγή: Atkinson, 1993)

## 4.2. Το μοντέλο FLOW-3DL

### 4.2.1. Εισαγωγή

Το μαθηματικό μοντέλο FLOW-3DL (Stamou et al., 1999a) έχει δομηθεί στο Υπολογιστικό Κέντρο του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ με την επιστημονική ευθύνη του Καθηγητή Αναστάσιου Ι. Στάμου.

Το FLOW-3DL είναι ένας κώδικας γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει την τρισδιάστατη υδροδυναμική συμπεριφορά και τις βασικές διεργασίες (μεταφορά, διάχυση, φυσικοχημικές και βιολογικές αντιδράσεις), οι οποίες καθορίζουν την ποιότητα των νερών στους υδάτινους αποδέκτες. Αποτελείται από επτά υπολογιστικές διαδικασίες (υπορουτίνες boundaries.FOR, fishes.FOR, main.FOR, print.FOR, rest.FOR, sand.FOR και temp.FOR) στις οποίες ο χρήστης μπορεί να επέμβει κάνοντας τις απαραίτητες τροποποιήσεις ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση.

Ο κώδικας στηρίζεται στις εξισώσεις του πεδίου ροής και των ποιοτικών παραμέτρων, περιλαμβανομένης της εξίσωσης μεταφοράς-διάχυσης της θερμότητας που εφαρμόζεται στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, οι οποίες επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

### 4.2.2. Διαφορικές εξισώσεις πεδίου ροής

Οι θεμελιώδεις εξισώσεις που επιλύει το μοντέλο FLOW-3DL για τον υπολογισμό του πεδίου ροής είναι οι τρισδιάστατες διαφορικές εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης σε μη μόνιμη κατάσταση, διατυπωμένες για στρώματα σταθερού πάχους, στα οποία διαιρείται το εξεταζόμενο πεδίο.

Θεωρώντας σταθερές διαπερατές διεπιφάνειες μεταξύ των στρωμάτων, οι εξισώσεις του μοντέλου ολοκληρώνονται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση στο βάθος  $h$ , που αντιστοιχεί σε ένα υπολογιστικό στρώμα με το ίδιο πάχος.

Για την κατανομή της πίεσης γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- 1) η κατανομή της πίεσης είναι υδροστατική,
- 2) ισχύει η προσέγγιση Boussinesq, και
- 3) η πίεση στην επιφάνεια είναι ίση με την ατμοσφαιρική (σχετική πίεση ίση με μηδέν).

Οι μεταβλητές του υδροδυναμικού μοντέλου είναι:

- 1) οι μέσες κατά βάθος συνιστώσες της ταχύτητας  $u$ ,  $v$  και  $w$  [L/T] κάθε στρώματος κατά τους άξονες  $x$ ,  $y$  και  $z$ , αντίστοιχα, ενός καρτεσιανού συστήματος αξόνων, και
- 2) η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ( $\zeta$ ).

Ο άξονας  $z$  θεωρείται θετικός κάτω από τη στάθμη ηρεμίας της ελεύθερης επιφάνειας.

Οι εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης γράφονται ως εξής:

#### Εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.2-1)$$

#### Εξισώσεις ποσότητας κίνησης

Κατά τη διεύθυνση  $x$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (4.2-2)$$

Κατά τη διεύθυνση  $y$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (4.2-3)$$

Κατά τη διεύθυνση  $z$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (4.2-4)$$

όπου:  $t$  [T] είναι ο χρόνος,  
 $u$ ,  $v$  και  $w$  [L/T] είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά τις διευθύνσεις  $x$ ,  $y$  και  $z$ , αντίστοιχα,  
 $p$  [F/A] είναι η πίεση,  
 $\nu_h$  και  $\nu_v$  [L<sup>2</sup>/T] είναι ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας, αντίστοιχα,  
 $f$  είναι η παράμετρος Coriolis,  
 $g$  [L/T<sup>2</sup>] είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και  
 $\rho$  [M/L<sup>3</sup>] είναι η πυκνότητα του νερού, η οποία υπολογίζεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας.

Για δεδομένη κατά βάθος κατανομή της πυκνότητας, η πίεση  $p$  μπορεί να προσδιορισθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.2-4.

Στη συνέχεια οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας ( $u$  και  $v$ ) υπολογίζονται από τις εξισώσεις 4.2-2 και 4.2-3.

Οι κάθετες ταχύτητες ( $w$ ) υπολογίζονται από την εξίσωση συνέχειας 4.2-1 για κάθε στρώμα αρχίζοντας από τον πυθμένα, όπου ισχύει η οριακή συνθήκη  $w = 0$ .

Στην ελεύθερη επιφάνεια, η εξίσωση συνέχειας (4.2-1) γράφεται ως μια γραμμικοποιημένη οριακή κινηματική συνθήκη για τον προσδιορισμό της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} u_\zeta + \frac{\partial \zeta}{\partial y} v_\zeta = w_\zeta \quad (4.2-5)$$

όπου ο δείκτης «ζ» συμβολίζει τις τιμές των ταχυτήτων στην ελεύθερη επιφάνεια.

### 4.2.3. Διαφορικές εξισώσεις συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων

#### 4.2.3.1. Γενικά

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία θεωρούνται οι ακόλουθες ποιοτικές παράμετροι:

- 1) Θερμοκρασία νερού.
- 2) Αλατότητα.

Οι παραπάνω ποιοτικές παράμετροι υπολογίζονται στο μοντέλο FLOW-3DL από εξισώσεις μεταφοράς-διάχυσης. Θεωρούνται οι ίδιες τιμές συντελεστών τυρβώδους διάχυσης για όλες τις εξεταζόμενες ποιοτικές παραμέτρους.

#### 4.2.3.2. Εξίσωση θερμοκρασίας νερού

Η θερμοκρασία του νερού υπολογίζεται από την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης της θερμότητας, η οποία γράφεται με την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (4.2-6)$$

όπου:  $T$  είναι η θερμοκρασία,

$D_h [L^2/T]$  είναι ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , και

$D_v [L^2/T]$  είναι ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση  $z$ .

Ο όρος  $S_T$  εκφράζει την ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον και γράφεται με την ακόλουθη μορφή:

$$S_T = -\frac{k_T \cdot \Delta T}{\rho \cdot c_p \cdot h_1} \quad (4.2-7)$$

όπου:  $k_T$  είναι ο γραμμικοποιημένος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας διεπιφάνειας νερού-αέρα,

$\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας,

$h_1$  είναι το πάχος του επιφανειακού στρώματος,

$c_p$  είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού, και

$\rho$  η πυκνότητα του νερού.

#### 4.2.3.3. Εξίσωση αλατότητας

Η αλατότητα υπολογίζεται από την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης της αλατότητας, η οποία γράφεται με την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (4.2-8)$$

όπου:  $S$  είναι η αλατότητα,

$D_h [L^2/T]$  είναι ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , και

$D_v [L^2/T]$  είναι ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση  $z$ .

#### 4.2.4. Οριακές συνθήκες

##### 4.2.4.1. Γενικά

Για να επιλυθούν οι εξισώσεις του πεδίου ροής και των ποιοτικών παραμέτρων χρειάζεται να ορισθούν οριακές συνθήκες στα ακόλουθα όρια:

- (1) στην ελεύθερη επιφάνεια,
- (2) στον πυθμένα,
- (3) στα στερεά όρια, και
- (4) στα όρια ανοικτής θάλασσας.

**4.2.4.2. Ελεύθερη επιφάνεια**

Στην ελεύθερη επιφάνεια η διατμητική τάση που οφείλεται στον άνεμο υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=-\zeta} = C_s u_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \quad (4.2-9)$$

$$\frac{\tau_{sy}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=-\zeta} = C_s v_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \quad (4.2-10)$$

όπου:  $\tau_{sx}$  και  $\tau_{sy}$  [ $M/LT^2$ ] είναι οι οριζόντιες συνιστώσες της διατμητικής τάσης κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα, στην ελεύθερη επιφάνεια,  
 $u_{10}$  και  $v_{10}$  [ $L/T$ ] είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 m από την ελεύθερη επιφάνεια, κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα, και  
 $C_s$  είναι ο συντελεστής (αδιάστατος) διατμητικής τάσης στην ελεύθερη επιφάνεια, ο οποίος εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου.

**4.2.4.3. Πυθμένας**

Στον πυθμένα η διατμητική τάση υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=H} = C_b u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (4.2-11)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=H} = C_b v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (4.2-12)$$

όπου:  $\tau_{bx}$  και  $\tau_{by}$  [ $M/LT^2$ ] είναι οι οριζόντιες συνιστώσες της διατμητικής τάσης που δρα στον πυθμένα κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα,  
 $C_b$  είναι ο (αδιάστατος) συντελεστής διατμητικής τάσης στον πυθμένα,  
 $u_b$  και  $v_b$  [ $L/T$ ] είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας ροής στον πυθμένα κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα, και  
 $H$  είναι το συνολικό βάθος.

**4.2.4.4. Διεπιφάνειες μεταξύ των στρωμάτων**

Στις διεπιφάνειες μεταξύ των οριζοντίων στρωμάτων του νερού η επιβαλλόμενη διατμητική τάση υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\tau_{ix}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h_i} = C_i (u_u - u_d) \sqrt{(u_u - u_d)^2 + (v_u - v_d)^2} \quad (4.2-13)$$

$$\frac{\tau_{iy}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=h_i} = C_i (v_u - v_d) \sqrt{(u_u - u_d)^2 + (v_u - v_d)^2} \quad (4.2-14)$$

όπου:  $\tau_{ix}$  και  $\tau_{iy}$  είναι οι οριζόντιες συνιστώσες της διατμητικής τάσης κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα, στη διεπιφάνεια μεταξύ των στρωμάτων,  
 $C_i$  είναι ο (αδιάστατος) συντελεστής διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια,  
 $u_u$  και  $v_u$  είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στο υπερκείμενο στρώμα κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα,  
 $u_d$  και  $v_d$  είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στο υποκείμενο στρώμα κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα, και  
 $h_i$  είναι το βάθος της διεπιφάνειας.

#### 4.2.4.5. Στερεά όρια

Οι εγκάρσιες προς τα στερεά όρια συνιστώσες της ταχύτητας τίθενται ίσες με μηδέν. Η συνθήκη αυτή προϋποθέτει μη κατακλυσμό των χερσαίων ζωνών πέρα από την αρχική ακτογραμμή.

#### 4.2.4.6. Όρια ανοικτής θάλασσας

Μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες συνθήκες:

- 1) Ελεύθερη (χωρίς ανάκλαση) διάβαση (για τις εγκάρσιες στα όρια ανοικτής θάλασσας συνιστώσες της ταχύτητας).
- 2) Γνωστή διακύμανση της ελεύθερης επιφάνειας ή των ταχυτήτων ροής (π.χ. περιοδική διακύμανση στάθμης, εξαιτίας παλίρροιας).
- 3) Συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων (π.χ. της ελεύθερης επιφάνειας, των ταχυτήτων ροής ή των ποιοτικών παραμέτρων), από μετρήσεις πεδίου.

### 4.2.5. Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής και της συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων

#### 4.2.5.1. Γενικά

Οι διαφορικές εξισώσεις του πεδίου ροής και της συμπεριφοράς των παραμέτρων ποιότητας, οι οποίες παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 4.2.2 και 4.2.3, αντίστοιχα, γράφονται με την ακόλουθη γενική διαφορική μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho U\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S_\Phi \quad (4.2-15)$$

Θέτοντας

- 1)  $\Phi=1$  προκύπτει η εξίσωση συνέχειας,
- 2)  $\Phi = u, v$  ή  $w$  προκύπτουν οι εξισώσεις ποσότητας κίνησης και
- 3)  $\Phi=T$  ή  $S$  προκύπτει η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης της ποιοτικής παραμέτρου συγκέντρωσης  $C$ .



Στη συντριπτική πλειοψηφία των πρακτικών εφαρμογών οι διαφορικές εξισώσεις της μορφής (4.2-15) δεν επιλύονται αναλυτικά. Η επίλυσή τους γίνεται με αριθμητικές μεθόδους, οι σημαντικότερες εκ των οποίων είναι:

- 1) Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών ή διαφορικών όγκων.
- 2) Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.
- 3) Η μέθοδος των οριακών στοιχείων.

Στο μοντέλο FLOW-3DL χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών ή διαφορικών όγκων. Στη μέθοδο αυτή το συνεχές πεδίο υπολογισμού των διαφορικών εξισώσεων αντικαθιστάται από μικρές περιοχές υπολογισμού, οι οποίες καλούνται «διαφορικοί όγκοι (δ.ο.)». Στους δ.ο. γίνεται η ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων και προκύπτουν οι αριθμητικές εξισώσεις. Στη συνέχεια οι αριθμητικές εξισώσεις επιλύονται άμεσα με ρητό (explicit) σχήμα επίλυσης.

Σημειώνεται, ότι οι αριθμητικές εξισώσεις που προκύπτουν δεν είναι απόλυτα ακριβείς, όπως οι διαφορικές εξισώσεις, γιατί (α) ο καθορισμός της μορφής μεταβολής των τιμών των συναρτήσεων μεταξύ των δ.ο. (σχήμα μεταβολής) ή (β) η αντικατάσταση των όρων των διαφορικών εξισώσεων από προσεγγιστικές εκφράσεις εισάγουν σφάλματα υπολογισμού.

#### 4.2.5.2. Διακριτοποίηση του πεδίου

Στο FLOW-3DL για την αριθμητική επίλυση γίνεται διακριτοποίηση του πεδίου κατά τις οριζόντιες, αλλά και κατά την κατακόρυφη διάσταση, με ορθογωνικό πλέγμα διαστάσεων  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  και  $\Delta z$ , αντίστοιχα.

Τα πλευρικά όρια των ακτών και της ανοικτής θάλασσας προσεγγίζονται τμηματικά με πλευρές δ.ο, οι οποίες είναι παράλληλες προς τις διευθύνσεις  $Ox$  ή  $Oy$ .

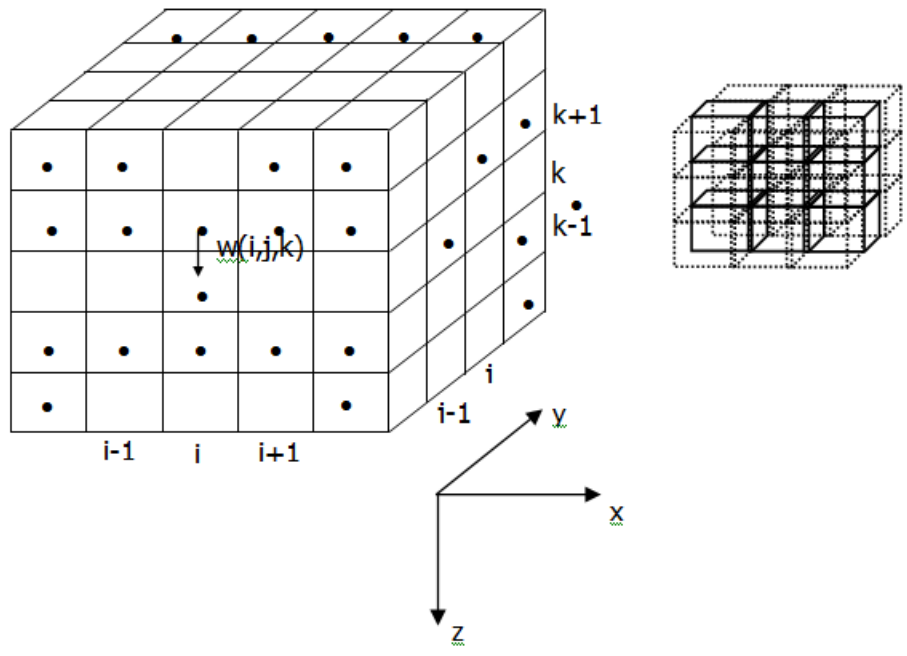
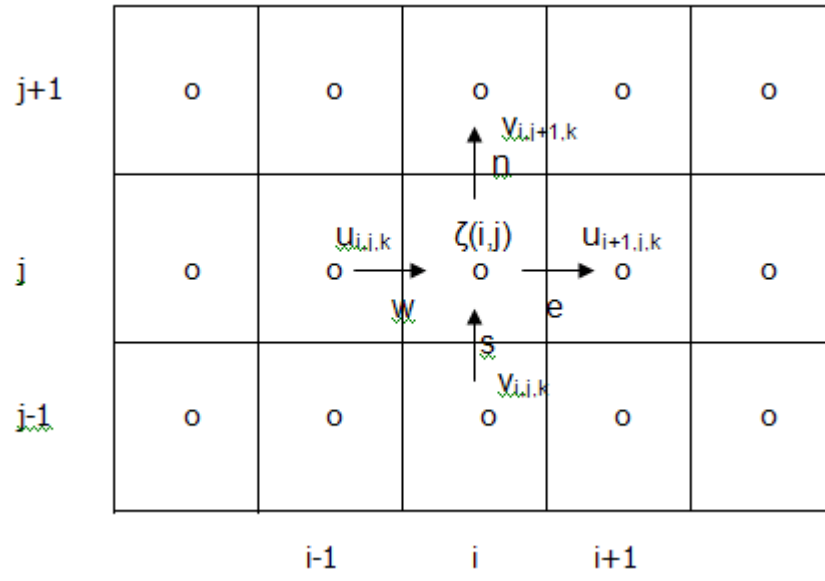
Το πλέγμα στο FLOW-3DL είναι έκκεντρο. Οι ταχύτητες ( $u$ ,  $v$  και  $w$ ) και τα βαθμωτά μεγέθη (η ανύψωση  $\zeta$  της ελεύθερης επιφάνειας και οι ποιοτικές παράμετροι,  $\Phi$ ), υπολογίζονται σε χαρακτηριστικές θέσεις του έκκεντρου πλέγματος. Πιο συγκεκριμένα:

- 1) οι ταχύτητες  $u$ ,  $v$  και  $w$  υπολογίζονται στις πλευρές των δ.ο. που είναι παράλληλες προς τις διευθύνσεις  $Ox$ ,  $Oy$  και  $Oz$ , αντίστοιχα, και
- 2) η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας  $\zeta$  και οι ποιοτικές παράμετροι  $\Phi$  υπολογίζονται στο κέντρο των δ.ο.

Επίσης, χαρακτηρίζονται με δείκτες ή εκθέτες που αντιστοιχούν στις τιμές των μεταβλητών  $x$ ,  $y$ ,  $z$  και  $t$ . Πιο συγκεκριμένα:

- 1) ο δείκτης  $i$  αναφέρεται στην τετμημένη  $Ox$  ( $x_i=i\Delta x$ ),
- 2) ο δείκτης  $j$  αναφέρεται στην τετμημένη  $Oy$  ( $y_j=j\Delta y$ ),
- 3) ο δείκτης  $k$  αναφέρεται στην τεταγμένη  $Oz$  ( $z_k=k\Delta z$ ), και
- 4) ο εκθέτης  $n$  αναφέρεται στο χρόνο ( $t^n=n\Delta t$ ).

Οι θέσεις υπολογισμού των  $u$ ,  $v$ ,  $w$  και  $\zeta$  στο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων  $Oxyz$  και οι επισημάνσεις τους με δείκτες φαίνονται στο Σχήμα 4.2-1. Τα σύμβολα  $n$ ,  $s$ ,  $w$  και  $e$  χρησιμοποιούνται για την επισήμανση της βόρειας, νότιας, δυτικής και ανατολικής πλευράς των διαφορικών όγκων, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.2-1. Σκαρίφημα αριθμητικού πλέγματος για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων

### 4.3. Μεθοδολογία σύνδεσης των δύο μοντέλων

#### 4.3.1. Γενικά

Τα ολοκληρωμένα μοντέλα (Integrated models) προσομοίωσης θερμικής ρύπανσης αποτελούνται από ένα μοντέλο για τους υπολογισμούς στο κοντινό πεδίο και από ένα μοντέλο για τους υπολογισμούς στο μακρινό πεδίο που συνδέονται μεταξύ τους με κάποιον αλγόριθμο σύνδεσης. Ο αλγόριθμος αυτός συνδέει τα τελικά χαρακτηριστικά της φλέβας των θερμών νερών στο κοντινό πεδίο (π.χ. όγκος που καταλαμβάνει, βάθος και πλάτος επιφανειακής φλέβας κτλ.) με τη ροή θερμότητας στο μακρινό πεδίο.

#### 4.3.2. Μεθοδολογία σύνδεσης

Η μεθοδολογία σύνδεσης των μοντέλων αποτελείται από τα εξής βήματα:

**Βήμα 1:** Αρχικά συλλέγονται τα στοιχεία που αφορούν στα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και καθορίζονται τα σενάρια διάθεσης των θερμών νερών. Τα σενάρια αυτά σχετίζονται τόσο με τα χαρακτηριστικά του τρόπου διάθεσης των θερμών νερών (π.χ. θέση διάθεσης, κατακόρυφη γωνία στομίου διάθεσης) όσο και με τις συνθήκες που επικρατούν στο παράκτιο περιβάλλον (π.χ. ταχύτητα και διεύθυνση παράκτιου ρεύματος).

**Βήμα 2:** Πραγματοποιούνται αρχικοί υπολογισμοί που περιλαμβάνουν το χαρακτηρισμό του κοντινού πεδίου βάσει των κλιμάκων μήκους. Καθορίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της φλέβας (πλάτος και βάθος της επιφανειακής φλέβας).

**Βήμα 3:** Καθορίζονται οι περιοχές μελέτης του έργου, τα όρια τους και οι θέσεις απόληψης θαλασσινού νερού και διάθεσης των θερμών νερών. Οι περιοχές που εξετάζονται είναι δύο: η ευρύτερη περιοχή μελέτης και η περιοχή μελέτης. Το κοντινό πεδίο ροής που καθορίζεται στο Βήμα 2 περιέχεται στην περιοχή μελέτης. Η περιοχή αυτή καθορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε τα όρια της να μην επηρεάζονται από τη φλέβα των θερμών νερών.

**Βήμα 4:** Κατασκευάζονται τα αριθμητικά πλέγματα των δύο περιοχών λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες των δύο πρώτων βημάτων. Επιλέγονται τα οριζόντια χωρικά βήματα ( $\Delta X$  και  $\Delta Y$ ) των δύο πλεγμάτων λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις που προκύπτουν από τους αρχικούς υπολογισμούς με το CORMIX στο κοντινό πεδίο για το πλάτος της φλέβας. Το βάθος των οριζόντιων στρωμάτων επιλέγεται με βάση το υπολογιζόμενο βάθος της επιφανειακής φλέβας που προκύπτει από το CORMIX. Ταυτόχρονα καθορίζονται τα σημεία παρακολούθησης.

**Βήμα 5:** Πραγματοποιούνται αρχικοί υδροδυναμικοί υπολογισμοί με το μοντέλο του μακρινού πεδίου χωρίς τη φλέβα των θερμών νερών μέχρι να επιτευχθούν μόνιμες συνθήκες ροής.

**Βήμα 6:** Πραγματοποιούνται οι τελικοί υδροδυναμικοί υπολογισμοί και οι υπολογισμοί ροής θερμότητας με το μοντέλο μακρινού πεδίου με την παρουσία της φλέβας των θερμών νερών για όλα τα σενάρια. Ως αρχική συνθήκη θεωρείται το μόνιμο πεδίο ροής που υπολογίστηκε στο Βήμα 5.

#### 4.3.3. Μοντέλο κοντινού πεδίου

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο CORJET (Jirka, 2004). Εξετάζεται μόνο η περίπτωση των αγωγών μονού στομίου για διάθεση θερμών νερών σε μη στρωματωμένους αποδέκτες.

Οι εξισώσεις του CORJET επιλύονται για κάθε διαφορικό όγκο της φλέβας μήκους  $ds=s_2-s_1$  (ο άξονας του όγκου συμπίπτει με την τροχιά της φλέβας) όπου με  $s_1 (x_1, y_1, z_1)$  συμβολίζεται το ανάντη σημείο του δ.ο. και οι μεταβλητές με δείκτη '1' είναι γνωστές και με  $s_2 (x_2, y_2, z_2)$

συμβολίζεται το κατάντη σημείο και οι μεταβλητές με δείκτη '2' είναι άγνωστες. Υπάρχουν οκτώ εξισώσεις για τις ακόλουθες οκτώ μεταβλητές: παροχή (Q), αξονική ποσότητα κίνησης  $M_x$ ,  $M_y$  και  $M_z$  κατά τις διευθύνσεις x, y και z ενός καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, αντίστοιχα, διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) και συντεταγμένες του άξονα της φλέβας (X,Y,Z), όπου γράφονται ως εξής:

Εξίσωση συνέχειας

$$\frac{dQ}{ds} = \frac{Q_2 - Q_1}{ds} = E \quad (4.3-1)$$

Εξισώσεις ποσότητας κίνησης

$$\frac{dM_x}{ds} = \frac{M_{x2} - M_{x1}}{ds} = EU_a + F_D \sqrt{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \sigma} \quad (4.3-2)$$

$$\frac{dM_y}{ds} = \frac{M_{y2} - M_{y1}}{ds} = -F_D \frac{\cos^2 \theta \cdot \sin \sigma \cdot \cos \sigma}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \sigma}} \quad (4.3-3)$$

$$\frac{dM_z}{ds} = \frac{M_{z2} - M_{z1}}{ds} = \frac{4.524b^2 J_0}{Q_{\Delta T}} - F_D \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \cos \sigma}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \sigma}} \quad (4.3-4)$$

Εξίσωση για την αύξηση της θερμοκρασίας ( $\Delta T$ )

$$\frac{d(Q_{\Delta T} \Delta T)}{ds} = \frac{Q_{\Delta T2} \Delta T_2 - Q_{\Delta T1} \Delta T_1}{ds} = 0 \quad (4.3-5)$$

Εξισώσεις για τη θέση της φλέβας

$$\frac{dX}{ds} = \frac{X_2 - X_1}{ds} = \cos \theta \cdot \cos \sigma \quad (4.3-6)$$

$$\frac{dY}{ds} = \frac{Y_2 - Y_1}{ds} = \cos \theta \cdot \sin \sigma \quad (4.3-7)$$

$$\frac{dZ}{ds} = \frac{Z_2 - Z_1}{ds} = \sin \theta \quad (4.3-8)$$

όπου E είναι η συμπαράσυρση,  $U_a$  είναι η ταχύτητα του παράκτιου ρεύματος,  $F_D$  είναι η αντίσταση της φλέβας,  $\theta$  είναι η κατακόρυφη γωνία διάθεσης,  $\sigma$  είναι η οριζόντια γωνία διάθεσης,  $Q_{\Delta T}$  είναι η παροχή σταθμισμένη από τη διαφορά θερμοκρασίας ("scalar weighted volume flux", Jirka, 2004), και  $J_0$  είναι η άνωση. Σημειώνεται ότι για ομογενείς αποδέκτες η άνωση διατηρείται ( $dJ/ds=0$ ).

Οι εξισώσεις (1) έως (8) μπορούν να λυθούν με ένα χαμηλής τάξης 'ανάπτυξη' σχήμα διακριτοποίησης και πολύ μικρή τιμή του χωρικού βήματος  $ds$  για να υπολογιστεί η τιμή της μεταβλητής στη θέση  $s_2$ . Για παράδειγμα η εξίσωση (1) μπορεί να λυθεί ως προς  $Q_2$  ως εξής:

$$Q_2 = Q_1 + E_1(s_2 - s_1) = Q_1 + E_1 ds \quad (4.3-9)$$

Το δεξιό μέλος των εξισώσεων αναφέρεται στο ανάπτυξη σημείο 1.

Οι εξισώσεις (2), (3), (4), (6), (7) και (8) συνδυάζονται και προκύπτουν οι εξισώσεις (10), (11) και (12) που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι τρεις επιπλέον μεταβλητές  $\sigma_2$ ,  $\theta_2$  και  $M_2$  (συνολική ποσότητα κίνησης), αντίστοιχα.

$$\sigma_2 = \tan^{-1} \left( \frac{M_{y2}}{M_{x2}} \right) \quad (4.3-10)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{M_{z2} \cdot \sin \sigma_2}{M_{y2}} \right) \quad (4.3-11)$$

$$M_2 = \frac{M_{z2}}{\sin \theta_2} = \left( M_{x2}^2 + M_{y2}^2 + M_{z2}^2 \right)^{1/2} \quad (4.3-12)$$

Το σημείο έναρξης των παραπάνω υπολογισμών είναι το τέλος της ζώνης αποκατάστασης (ανάπτυξης) της ροής, όπου οι τιμές των οκτώ μεταβλητών υπολογίζονται από τις εξισώσεις (13) έως (20).

$$Q_e = \sqrt{2} Q_0 \quad (4.3-13)$$

$$M_{xe} = M_0 \cos \theta_e \cdot \cos \sigma_e \quad (4.3-14)$$

$$M_{ye} = M_0 \cos \theta_e \cdot \sin \sigma_e \quad (4.3-15)$$

$$M_{ze} = M_0 \sin \theta_e \quad (4.3-16)$$

$$\Delta T_e = \Delta T_0 \quad (4.3-17)$$

$$X_e = L_e \cos \left( \frac{\theta_0 + \theta_e}{2} \right) \cos \left( \frac{\sigma_0 + \sigma_e}{2} \right) \quad (4.3-18)$$

$$Y_e = L_e \cos \left( \frac{\theta_0 + \theta_e}{2} \right) \sin \left( \frac{\sigma_0 + \sigma_e}{2} \right) \quad (4.3-19)$$

$$Z_e = Z_0 + L_e \sin\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_e}{2}\right) \quad (4.3-20)$$

Οι τρεις επιπλέον μεταβλητές  $\theta_e$ ,  $\sigma_e$  και  $M_e$  στο τέλος της ζώνης αποκατάστασης της ροής δίνονται από τις εξισώσεις (21) έως (23).

$$\theta_e = \sin^{-1}(\sin \gamma_e \sin \delta_0) \quad (4.3-21)$$

$$\sigma_e = \tan^{-1}(\sin \gamma_e \cos \delta_0 / \cos \gamma_e) \quad (4.3-22)$$

$$M_e = M_0 \quad (4.3-23)$$

όπου  $L_e$  είναι το μήκος της ζώνης αποκατάστασης της ροής,  $\gamma_0$  είναι η εγκάρσια γωνία διάθεσης σε σχέση με τη διεύθυνση του παράκτιου ρεύματος,  $\delta_0$  είναι η προβολή της  $\gamma_0$  στο επίπεδο x-y και  $\gamma_e$  είναι η τιμή της γωνίας  $\gamma_0$  στο τέλος της ζώνης αποκατάστασης της ροής και υπολογίζονται από τις εξισώσεις (24) έως (27).

$$L_e = 5 \cdot D_0 \cdot (1 - 3.22 \sin \gamma_0 / R) \cdot (1 - e^{-2F_{r0}/4.67}) \quad (4.3-24)$$

$$\gamma_0 = \sin^{-1}\left(\sqrt{1 - \cos^2 \theta_0 \cdot \cos^2 \sigma_0}\right) \quad (4.3-25)$$

$$\delta_0 = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \theta_0}{\sin \sigma_0}\right) \quad (4.3-26)$$

$$\gamma_e = \tan^{-1}\left(\frac{\sin \gamma_0}{\cos \gamma_0 - (\sqrt{2} - 1) / R}\right) \quad (4.3-27)$$

όπου  $D_0$  είναι η αρχική διάμετρος της φλέβας,  $R$  είναι μια παράμετρος της ροής και  $F_{r0}$  είναι ο πυκνομετρικός αριθμός Froude.

#### 4.3.4. Μοντέλο μακρινού πεδίου

Το μοντέλο FLOW-3DL χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς στο μακρινό πεδίο. Όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.2 το μοντέλο FLOW-3DL αποτελείται από ένα υδροδυναμικό μοντέλο και ένα υπομοντέλο ποιότητας (υπολογισμός ροής θερμοκρασίας) που στηρίζονται στην επίλυση των τρισδιάστατων διαφορικών εξισώσεων συνέχειας και ποσότητας κίνησης σε μη μόνιμη κατάσταση διατυπωμένων για στρώματα σταθερού πάχους, στα οποία διαιρείται το εξεταζόμενο πεδίο. Αναφέρονται συνοπτικά οι εξισώσεις του μοντέλου που έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.2.

Εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (4.3-28)$$

Εξισώσεις ποσότητας κίνησης

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = f \cdot V - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_v \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (4.3-29)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -f \cdot U - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_v \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (4.3-30)$$

Κατανομή της πίεσης

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho \cdot g \text{ οπ } P(z) = -\rho \cdot g \cdot (\zeta - z) \quad (4.3-31)$$

Το υπομοντέλο ποιότητας TEMPE-3DL (Stamou et al., 1999b) στηρίζεται στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης για συντηρητικούς ρύπους:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (4.3-32)$$

και

$$S_T = -\frac{k_T \cdot T}{\rho \cdot c_p \cdot h_1} \quad (4.3-33)$$

Η διαδικασία επίλυσης με το μοντέλο FLOW-3DL (που περιλαμβάνει το TEMPE-3DL) είναι η εξής:

- 1) Για τις αρχικές συνθήκες και για δεδομένη κατανομή πυκνότητας  $\rho$ , η πίεση  $P$  υπολογίζεται από την εξίσωση 4.3-31 μέσω της υπολογιστικής διαδικασίας (υπορουτίνας) CALCP.
- 2) Οι οριακές συνθήκες για τις ταχύτητες  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας  $\zeta$  και τη θερμοκρασία  $T$  καθορίζονται στην υπολογιστική διαδικασία (υπορουτίνα) BOUND.
- 3) Οι οριζόντιες ταχύτητες  $U$  και  $V$  υπολογίζονται από τις εξισώσεις ποσότητας κίνησης (4.3-29) και (4.3-30) μέσω των υπολογιστικών διαδικασιών (υπορουτινών) CALCU και CALCV, αντίστοιχα. Η κατακόρυφη ταχύτητα  $W$  προκύπτει από την υπολογιστική διαδικασία (υπορουτίνα) CALCW λύνοντας την εξίσωση (4.3-28) για κάθε στρώμα αρχίζοντας από τον πυθμένα, όπου ισχύει η οριακή συνθήκη  $W=0$ . Στην επιφάνεια η εξίσωση (4.3-28) λύνεται για να υπολογιστεί η τιμή της ανύψωσης  $\zeta$  μέσω της υπολογιστικής διαδικασίας (υπορουτίνας) CALCZ.
- 4) Η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης της θερμότητας επιλύεται με την υπολογιστική διαδικασία (υπορουτίνα) TEMPE για τον υπολογισμό της τιμής της θερμοκρασίας  $T$ .

- 5) Για την περίπτωση διαφορών πυκνότητας, όπως στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, καλείται η υπολογιστική διαδικασία (υπορουτίνα) CALDEN που υπολογίζει τις νέες τιμές της πυκνότητας που στη συνέχεια χρησιμοποιούνται από την υπολογιστική διαδικασία (υπορουτίνα) CALCP για τον υπολογισμό της νέας κατανομής της πίεσης.

#### 4.3.5. Αλγόριθμος σύνδεσης

Η σύνδεση των μοντέλων του κοντινού και μακρινού πεδίου επιτυγχάνεται μέσω της εισαγωγής στον κώδικα FLOW-3DL μιας νέας υπολογιστικής διαδικασίας υπορουτίνας (CORJET). Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- 1) Επίλυση των εξισώσεων του CORJET για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της φλέβας των θερμών νερών, όπως η τροχιά της φλέβας, οι αξονικές παροχές και οι διαστάσεις της φλέβας στην επιφάνεια χρησιμοποιώντας το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του CORMIX.
- 2) Μετασχηματισμός του τοπικού συστήματος συντεταγμένων του CORMIX στο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιεί το FLOW-3DL. Οι εξισώσεις μετασχηματισμού είναι οι εξής:

$$x = X_{0c} + X \cos \varphi - Y \sin \varphi \quad (4.3-34)$$

$$y = Y_{0c} + X \sin \varphi - Y \cos \varphi \quad (4.3-35)$$

$$z = H - Z \quad (4.3-36)$$

όπου  $X_{0c}$  και  $Y_{0c}$  είναι οι κάθετες αποστάσεις της αρχής του τοπικού συστήματος συντεταγμένων του CORMIX από τους άξονες  $Y$  και  $X$  του Καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, αντίστοιχα,  $\varphi$  είναι η σχετική γωνία μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων και  $H$  είναι το συνολικό βάθος στην περιοχή διάθεσης.

- 3) Καθορισμός των πλευρών των διαφορικών όγκων στους οποίους εκτείνεται ο άξονας της φλέβας των θερμών νερών.
- 4) Υπολογισμός των ταχυτήτων ροής ( $U$ ,  $V$  και  $W$ ) και της θερμοκρασίας ( $T$ ) στους διαφορικούς όγκους που εκτείνεται η φλέβα των θερμών νερών που καθορίστηκαν στο βήμα (3). Στον κώδικα αυτές οι τιμές είναι σταθερές και μετατρέπονται αυτόματα σε παροχές και ροές θερμότητας στην εξίσωση συνέχειας (CALCW) και στην εξίσωση διάχυσης της θερμότητας (TEMPE), αντίστοιχα. Πρακτικά, οι ροές αυτές προστίθενται σαν επιπλέον όροι των εξισώσεων.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FLOW-3DL

### 5.1. Γενικά

Στο παρόν Κεφάλαιο 5 πραγματοποιούνται έλεγχοι του υπολογιστικού μοντέλου FLOW-3DL με σκοπό την επαλήθευση της ικανότητάς του να προσομοιώνει την παράκτια κυκλοφορία. Οι δοκιμές ελέγχου που πραγματοποιούνται αφορούν στην ανεμογενή κυκλοφορία και στη ροή λόγω διαφορών πυκνότητας, καθώς αποτελούν τα βασικά αίτια δημιουργίας κίνησης στο παράκτιο περιβάλλον του Μαντουδίου. Ο έλεγχος βασίζεται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου FLOW-3DL, των αναλυτικών λύσεων των προβλημάτων που εξετάζονται και των λύσεων των υπολογιστικών πακέτων SEOM και ROMS (για τον έλεγχο των διαφορών πυκνότητας).

### 5.2. Ανεμογενής Κυκλοφορία

#### 5.2.1. Περιγραφή

Ο πρώτος έλεγχος του μοντέλου αφορά στην περίπτωση ανεμογενούς κυκλοφορίας στο εσωτερικό κλειστού ορθογωνικού καναλιού εξαιτίας της δράσης σταθερής τάσης ανέμου στην επιφάνεια. Ο άνεμος μέσω των διατμητικών τάσεων στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού προκαλεί μεταφορά του επιφανειακού νερού κατά τη διεύθυνση πνοής του ανέμου. Στην περίπτωση που η μεταφορά περιορίζεται από στερεά όρια, οι ταχύτητες στην επιφάνεια έχουν τη φορά του ανέμου ενώ στην περιοχή του πυθμένα αναπτύσσονται ταχύτητες αντίθετης φοράς ώστε να ικανοποιείται η αρχή διατήρησης της μάζας.

#### 5.2.2. Δεδομένα

Η περίπτωση που εξετάζεται είναι εκείνη που αναφέρεται στον Koutitas (1980). Θεωρείται μόνιμη, ομοιόμορφη, μονοδιάστατη ροή σε κλειστό ορθογωνικό κανάλι με διαστάσεις 1000 m X 20 m και ενιαίο βάθος 10 m. Σε αυτή την περίπτωση είναι εφικτός ο αναλυτικός υπολογισμός των αναπτυσσόμενων ταχυτήτων λόγω ανεμογενούς κυκλοφορίας.

Η διατμητική ταχύτητα στην επιφάνεια (water surface shear velocity)  $u_{*s}$  μπορεί να υπολογιστεί βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

$$S = \rho u_{*s}^2 \quad (5.2-1)$$

όπου S είναι η επιφανειακή διατμητική τάση λόγω ανέμου και  $\rho$  η πυκνότητα.

Οι διατμητικές τάσεις  $\tau_{zx}$  υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$\tau_{zx} = S - \tau_b^* (1 - n) \quad (5.2-2)$$

όπου:

$$\tau_b^* = \rho g H \frac{\partial H}{\partial x} \quad (5.2-3)$$

και  $n$  είναι το αδιάστατο βάθος ροής μετρούμενο από τον πυθμένα,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $H$  το βάθος και  $x$  η διεύθυνση ροής. Το μέγεθος  $\tau_b^*$  είναι η ισοδύναμη διατμητική τάση που σχετίζεται με την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας (equivalent shear stress related to surface slope, Koutitas, 1980).

Ολοκληρώνοντας κατά βάθος την εξίσωση 5.2-2 και θεωρώντας τον κατακόρυφο συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας σταθερό και το ύψος τραχύτητας του πυθμένα μικρό σε σχέση με το βάθος ροής (δηλαδή  $z_b \ll H$  ή  $n_o = z_b/H \ll 1$ ), προκύπτει η εξίσωση:

$$u = \frac{Hn}{\rho\nu_v} \left[ (S - \tau_b^*) + \frac{\tau_b^* n}{2} \right] \quad (5.2-4)$$

Δεδομένου ότι η μέση κατά βάθος ταχύτητα εγκάρσια στα όρια πρέπει να μηδενίζεται και  $u=0$  για  $n=n_o$ , ισχύει ότι:

$$\int_{n_o}^1 u dn = 0 \quad (5.2-5)$$

Από την εξίσωση 5.2-5 προκύπτει ότι:

$$S = \frac{2}{3} \tau_b^* \quad (5.2-6)$$

ή

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{3S}{2\rho gH} \quad (5.2-7)$$

Επομένως, η εξίσωση 5.2-4 μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$u = \frac{SHn}{4\rho\nu_v} (3n - 2) \quad (5.2-8)$$

Από την εξίσωση 5.2-8 προκύπτει το προφίλ των ταχυτήτων.

Στην εξεταζόμενη περίπτωση η διατμητική ταχύτητα στην επιφάνεια είναι ίση με  $u_{*s}=0.162$  m/s και ο κατακόρυφος συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας είναι  $\nu_v=0.1$  m<sup>2</sup>/s (Koutitas, 1980).

**5.2.3. Αποτελέσματα**Αναλυτική λύση

Από την εξίσωση 5.2-1 προκύπτει ότι:

$$\frac{S}{\rho} = u_{*s}^2 = 0.162^2 = 0.026244 \frac{m^2}{s^2}$$

Αντικαθιστώντας τον όρο S/ρ στην εξίσωση 5.2-8 προκύπτει ότι:

$$u = 0.026244 \frac{10n}{4 * 0.1} (3n - 2) = 0.6561n(3n - 2) \quad (5.2-9)$$

Προκειμένου να υπολογίσουμε το προφίλ των ταχυτήτων της ροής «χωρίζουμε» το κανάλι σε 10 στρώματα βάθους 1.0 m. Στη συνέχεια, διαιρούμε το βάθος τους με το συνολικό βάθος (H=10 m) για να υπολογίσουμε το αδιάστατο βάθος ροής n σε κάθε θέση. Αντικαθιστώντας το n στην εξίσωση 5.2-9 προκύπτουν οι ταχύτητες σε σχέση με το βάθος που φαίνονται στον Πίνακα 5.2-1. Σημειώνεται ότι στον Πίνακα 5.2-1 φαίνεται και ο λόγος των ταχυτήτων – μέγιστης ταχύτητας που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του FLOW-3DL.

*Πίνακας 5.2-1. Ταχύτητα ροής και λόγος ταχύτητας ροής – μέγιστης ταχύτητας ροής συναρτήσει του βάθους (μετρούμενου από τον πυθμένα) βάσει της αναλυτική λύσης*

ΒΑΘΟΣ ΡΟΗΣ (m)	ΑΔΙΑΣΤΑΤΟ ΒΑΘΟΣ ΡΟΗΣ n (-)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΡΟΗΣ u (m/s)	u/umax (-)
0,5	0,05	-0,06	-0,11
1,5	0,15	-0,15	-0,29
2,5	0,25	-0,21	-0,39
3,5	0,35	-0,22	-0,41
4,5	0,45	-0,19	-0,36
5,5	0,55	-0,13	-0,24
6,5	0,65	-0,02	-0,04
7,5	0,75	0,12	0,23
8,5	0,85	0,31	0,58
9,5	0,95	0,53	1,00

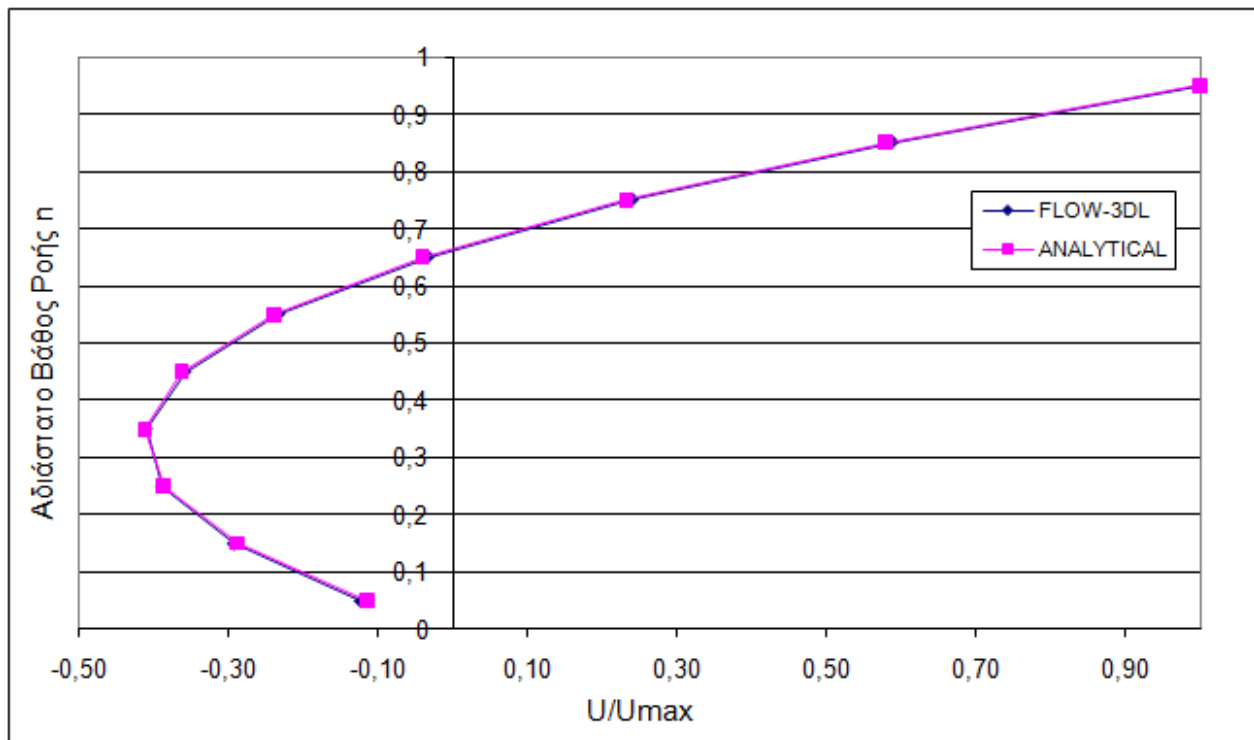
Προσομοίωση με τον κώδικα FLOW-3DL

Προκειμένου να εφαρμοστεί ο κώδικας FLOW-3DL στην περίπτωση του ορθογωνικού καναλιού που περιγράφεται στην Παράγραφο 5.2-1, για να ελεγχθεί η ικανότητά του να προσομοιώνει την ανεμογενή κυκλοφορία, αρχικά έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις των υπολογιστικών διαδικασιών (υπορουτίνων) του κώδικα. Στη συνέχεια, έγινε διακριτοποίηση του πεδίου με χωρικό βήμα ΔX=100 m, ΔY=2 m, ΔZ=1 m και χρονικό βήμα dt=0.1 s. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στον Πίνακα 5.2-2.

Πίνακας 5.2-2. Ταχύτητα ροής και λόγος ταχύτητας ροής – μέγιστης ταχύτητας ροής συναρτήσεως του βάθους (μετρούμενου από τον πυθμένα) βάσει του μοντέλου FLOW-3DL

ΒΑΘΟΣ ΡΟΗΣ (m)	ΑΔΙΑΣΤΑΤΟ ΒΑΘΟΣ ΡΟΗΣ n (-)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΡΟΗΣ u (m/s)	u/umax (-)
0,5	0,05	-0,06	-0,12
1,5	0,15	-0,15	-0,29
2,5	0,25	-0,21	-0,39
3,5	0,35	-0,22	-0,41
4,5	0,45	-0,19	-0,36
5,5	0,55	-0,12	-0,23
6,5	0,65	-0,02	-0,03
7,5	0,75	0,13	0,24
8,5	0,85	0,31	0,59
9,5	0,95	0,53	1,01

Από τη σύγκριση των ταχυτήτων και των λόγων των ταχυτήτων των Πινάκων 5.2-1 και 5.2-2 προκύπτει ότι το μοντέλο FLOW-3DL μπορεί να προσομοιώσει την κυκλοφορία λόγω δράσης ανέμου. Η σύγκριση των λόγων ταχυτήτων φαίνεται και στο Σχήμα 5.2-1.



Σχήμα 5.2-1. Λόγος ταχύτητας ροής – μέγιστης ταχύτητας ροής συναρτήσεως του βάθους (μετρούμενου από τον πυθμένα) βάσει της αναλυτικής λύσης και του μοντέλου FLOW-3DL

### 5.3. Διαφορές Πυκνότητας

#### 5.3.1. Περιγραφή

Ο δεύτερος έλεγχος του μοντέλου αφορά στην περίπτωση κίνησης λόγω διαφορών πυκνότητας. Προκειμένου να εξακριβωθεί η ικανότητα του υπολογιστικού κώδικα FLOW-3DL να προσομοιώνει αυτό το είδος κίνησης γίνεται εφαρμογή του κλασσικού προβλήματος «ροής εναλλαγής» μεταξύ δύο υγρών με διαφορά πυκνότητας.

Δύο υγρά βρίσκονται ακίνητα σε ορθογωνικό κανάλι και χωρίζονται με έναν κατακόρυφο τοίχο τύπου θυροφράγματος στη μέση του καναλιού. Όλοι οι τοίχοι είναι λείοι (μηδενική τριβή). Τη χρονική στιγμή  $t=0$  το θυρόφραγμα αφαιρείται απότομα, τα δύο υγρά έρχονται σε επαφή και αρχίζουν να κινούνται λόγω διαφοράς πυκνότητας. Δημιουργούνται δύο ρεύματα πυκνότητας, με το βαρύτερο (ψυχρότερο) υγρό να κινείται σε σχέση με τον πυθμένα με μέση ταχύτητα μετώπου (average phase speed):

$$u = \frac{1}{2} \sqrt{g' h} \quad (5.3-1)$$

$$\text{όπου: } g' = g \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \quad (5.3-2)$$

και  $g'$  είναι η φαινόμενη πυκνότητα,  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\Delta \rho$  είναι η αρχική διαφορά πυκνότητας των υπό μελέτη υγρών,  $\rho_0$  είναι η πυκνότητα του ελαφρύτερου (θερμότερου) υγρού και  $h$  είναι το βάθος του καναλιού.

Αντίστοιχα, το ελαφρύτερο (θερμότερο) υγρό αναμένεται να κινηθεί σε σχέση με τη διεπιφάνεια αέρα-υγρού με μέση ταχύτητα μετώπου  $u$  αντίθετης όμως κατεύθυνσης.

#### 5.3.2. Δεδομένα

Στο παρόν πρόβλημα θεωρείται ορθογωνικό κανάλι μήκους 64 km, πλάτους 6 km και βάθους 20 m. Τα δύο υγρά έχουν αρχική διαφορά πυκνότητας  $\Delta \rho = 5 \text{ kg/m}^3$ . Θεωρώντας κοινή αλατότητα για τα δύο υγρά ίση με  $S=38 \text{ ppt}$ , το ψυχρότερο υγρό έχει θερμοκρασία ίση με  $T=10^\circ\text{C}$  και πυκνότητα ίση με  $\rho_1=1029.323 \text{ kg/m}^3$  και το θερμότερο υγρό έχει θερμοκρασία ίση με  $T=29.072^\circ\text{C}$  και πυκνότητα ίση με  $\rho_0=1024.323 \text{ kg/m}^3$  (<http://marine.rutgers.edu/po/tests/grav/index.html>).

#### 5.3.3. Αποτελέσματα

##### Αναλυτική λύση

Κάθε ρεύμα πυκνότητας αναμένεται να κινηθεί με ταχύτητα:

$$u = \frac{1}{2} \sqrt{g' h} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho_0} h} = \frac{1}{2} \sqrt{9,8 \frac{5}{1024.323} 20} = 0.489 \text{ m/s}$$

Προσομοίωση με τον κώδικα FLOW-3DL

Προκειμένου να εφαρμοστεί ο κώδικας FLOW-3DL στην περίπτωση του ορθογωνικού καναλιού που περιγράφεται στην Παράγραφο 5.3-1, για να ελεγχθεί η ικανότητά του να προσομοιώνει την κίνηση λόγω διαφορών πυκνότητας, έγιναν τροποποιήσεις των υπολογιστικών διαδικασιών (υπορουτίνων) του κώδικα.

Στη συνέχεια, έγινε διακριτοποίηση του πεδίου με χωρικό βήμα  $\Delta X=\Delta Y=500$  m,  $\Delta Z=1$  m και χρονικό βήμα  $\Delta t=25$  s. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων αστάθειας κατά την επίλυση λόγω απότομης μεταβολής της συγκέντρωσης από  $\rho_0$  σε  $\rho_1=\rho_0+\Delta\rho$  χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω οριακή συνθήκη:

$$\rho = \frac{\Delta\rho}{2} \left[ 1.0 - \tanh\left(\frac{x-x_0}{1000}\right) \right] + \rho_0 \quad (5.3-3)$$

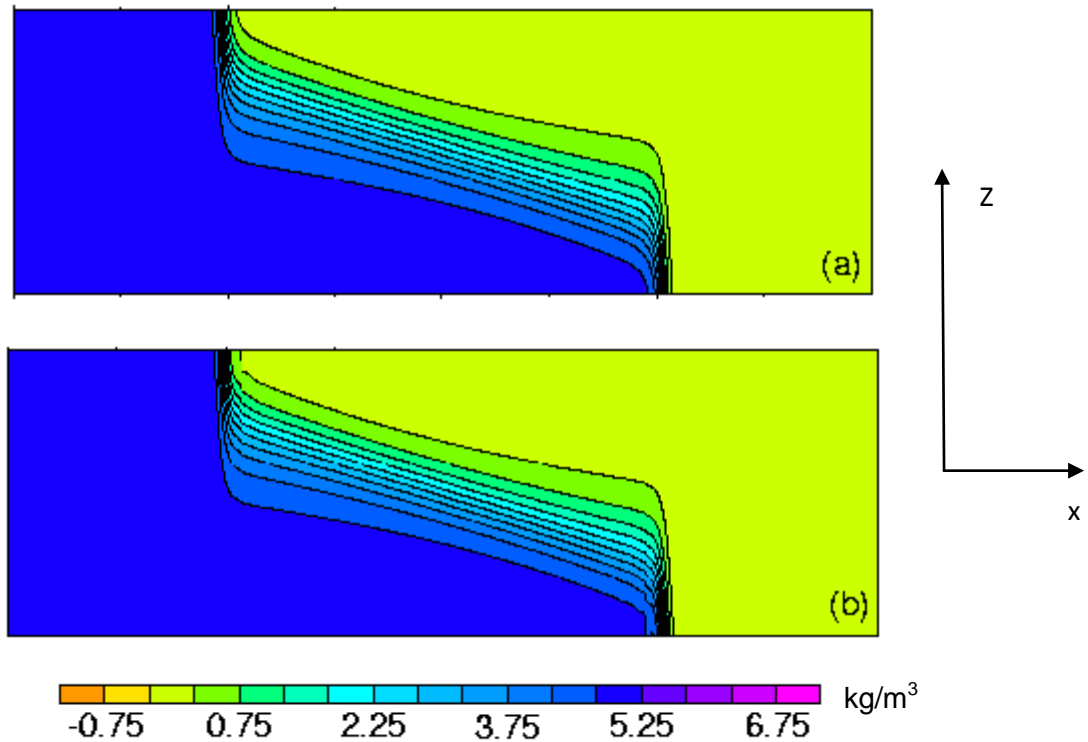
όπου  $\Delta\rho$  είναι η αρχική διαφορά πυκνότητας,  $x$  η απόσταση από την αρχή των αξόνων,  $x_0$  το κέντρο του ορθογωνικού καναλιού (32 km), δηλαδή η θέση στην οποία είναι αρχικά τοποθετημένο το θυρόφραγμα, και  $\rho_0$  η αρχική πυκνότητα του ελαφρύτερου υγρού.

Πραγματοποιήθηκαν δυο σενάρια εφαρμογών, όσον αφορά στον οριζόντιο συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας  $\nu_h$  και στον οριζόντιο συντελεστή διάχυσης  $D_h$ , έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων του κώδικα όχι μόνο με τα αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης αλλά και με τα αποτελέσματα των υπολογιστικών πακέτων SEOM και ROMS. Οι κατακόρυφοι συντελεστές τυρβώδους συνεκτικότητας  $\nu_v$  και διάχυσης  $D_v$  θεωρούνται μηδενικοί.

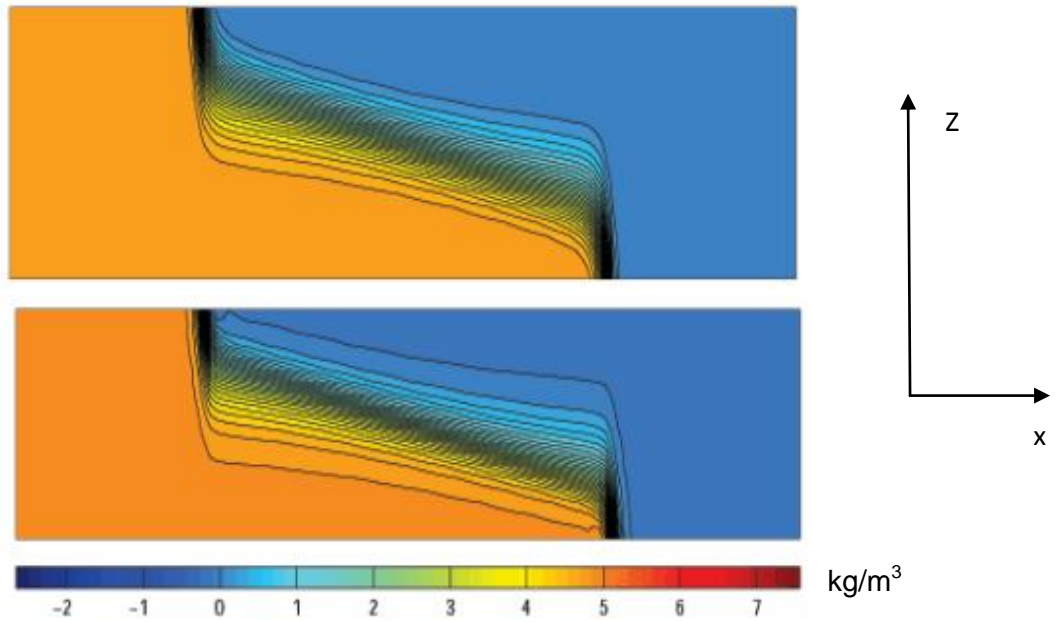
Για τον έλεγχο του μοντέλου στο τέλος της επίλυσης, δηλαδή όταν  $t=10$ h, υπολογίζονται η μέγιστη και η ελάχιστη διαφορά πυκνότητας στο κανάλι ( $\Delta\rho=\rho-\rho_0$ , όπου  $\rho$  η πυκνότητα στο κανάλι στο τέλος της επίλυσης και  $\rho_0$  η αρχική πυκνότητα του ελαφρύτερου υγρού). Οι διαφορές αυτές (αρχείο FLOW-3DL: DENTX.dat) πρέπει να είναι ίσες με  $5.0 \text{ kg/m}^3$  και  $0.0 \text{ kg/m}^3$ , αντίστοιχα.

Στα Σχήματα 5.3-1 έως 5.3-3 φαίνονται τα αποτελέσματα των SEOM, ROMS και FLOW-3DL για  $\nu_h= D_h= 100 \text{ m}^2/\text{sec}$ , αντίστοιχα, και στα σχήματα 5.3-4 έως 5.3-6 φαίνονται τα αποτελέσματα των SEOM, ROMS και FLOW-3DL για  $\nu_h= D_h= 40 \text{ m}^2/\text{sec}$ , αντίστοιχα, μετά από  $t=10$  h από την απομάκρυνση του θυροφράγματος. Σημειώνεται ότι στα εμπορικά πακέτα SEOM και ROMS αντιστοιχούν δύο εικόνες γιατί χρησιμοποιούν περισσότερα τους ενός αριθμητικά σχήματα επίλυσης.

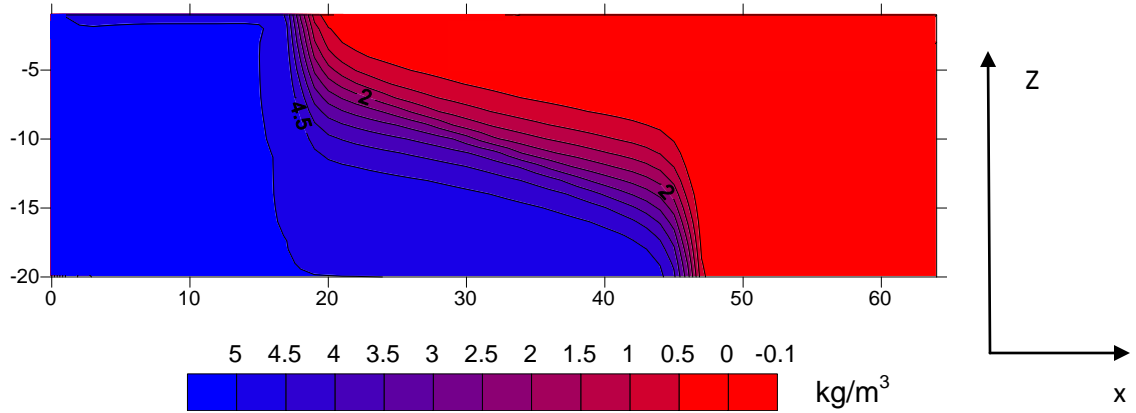
- Περίπτωση Α:  $v_h = D_h = 100 \text{ m}^2/\text{sec}$



Σχήμα 5.3-1. Αποτελέσματα μοντέλου SEOM για  $v_h = D_h = 100 \text{ m}^2/\text{sec}$   
 (Πηγή: <http://marine.rutgers.edu/po/tests/grav/index.html>)

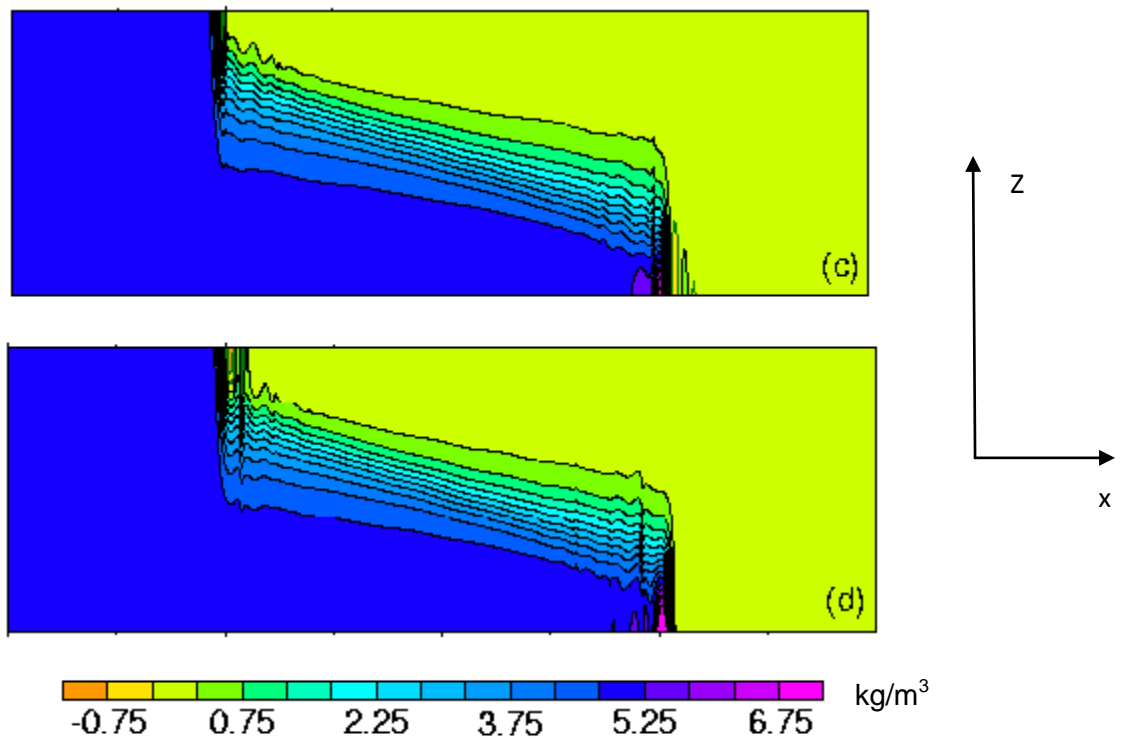


Σχήμα 5.3-2. Αποτελέσματα μοντέλου ROMS για  $v_h = D_h = 100 \text{ m}^2/\text{sec}$   
 (Πηγή: <http://marine.rutgers.edu/po/tests/grav/index.html>)



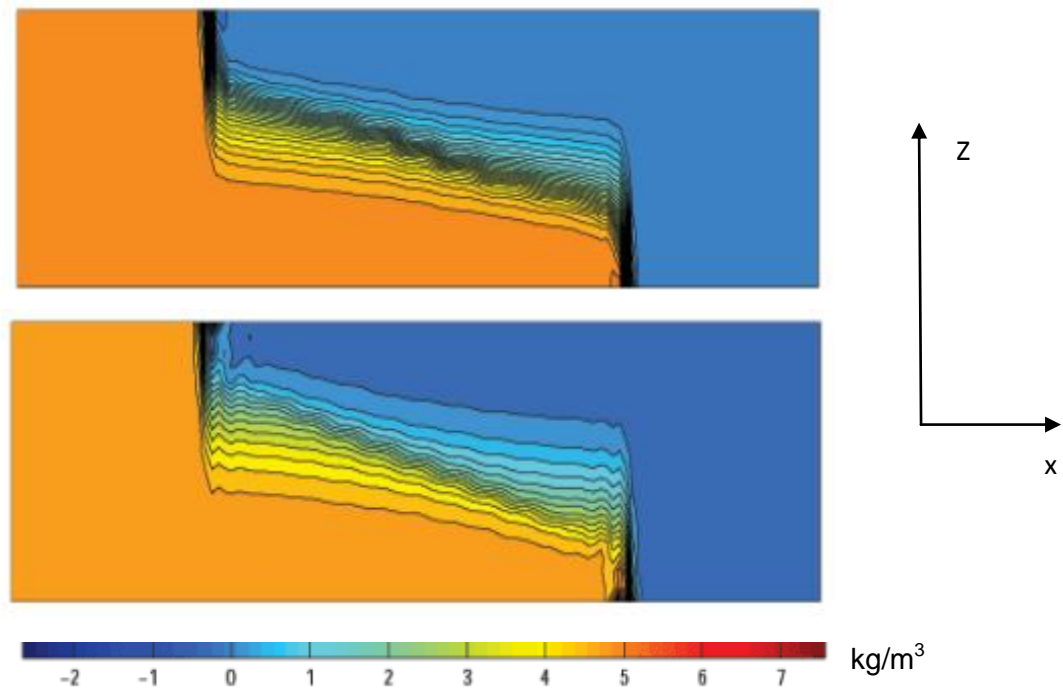
Σχήμα 5.3-3. Αποτελέσματα μοντέλου FLOW-3DL για  $v_h = D_h = 100 \text{ m}^2/\text{sec}$

- Περίπτωση Β:  $v_h = D_h = 40 \text{ m}^2/\text{sec}$

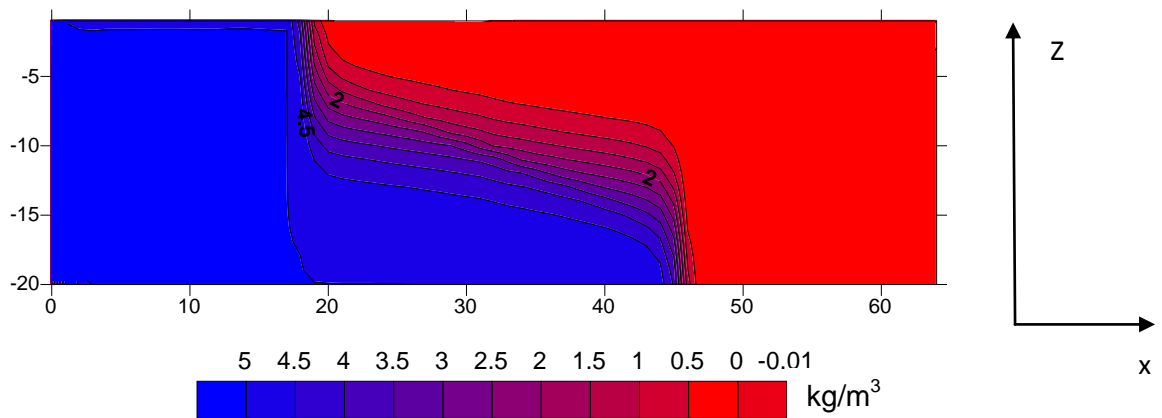


Σχήμα 5.3-4. Αποτελέσματα μοντέλου SEOM για  $v_h = D_h = 40 \text{ m}^2/\text{sec}$   
(Πηγή: <http://marine.rutgers.edu/po/tests/grav/index.html>)





Σχήμα 5.3-5. Αποτελέσματα μοντέλου ROMS για  $v_h = D_h = 40 \text{ m}^2/\text{sec}$   
 (Πηγή: <http://marine.rutgers.edu/po/tests/grav/index.html>)



Σχήμα 5.3-6. Αποτελέσματα μοντέλου FLOW-3DL για  $v_h = D_h = 40 \text{ m}^2/\text{sec}$

Επίσης, υπολογίζεται η ταχύτητα του ρεύματος πυκνότητας (αρχείο FLOW-3DL: TAXYT.dat), η οποία προκύπτει ως η μέση ταχύτητα του συνόλου των διαφορικών όγκων στο τέλος της επίλυσης. Στον Πίνακα 5.3-1 φαίνονται τα αποτελέσματα των λογισμικών SEOM και ROMS (<http://marine.rutgers.edu/po/tests/grav/index.html>), του μοντέλου FLOW-3DL και της αναλυτικής λύσης ( $c = \sqrt{g'h} = 2*u = 2*0.489 = 0.978 \text{ m/s}$ , κεφάλαιο.5.3-1).

Πίνακας 5.3-1. Αποτελέσματα μοντέλων SEOM, ROMS, FLOW-3DL και αναλυτικής λύσης κλασσικού προβλήματος «ροής εναλλαγής» μεταξύ δύο υγρών με διαφορά πυκνότητας

ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	$v_h - D_h$ (m <sup>2</sup> /sec)	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ( $\Delta\rho=\rho-\rho_0$ )	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ( $\Delta\rho=\rho-\rho_0$ )	$c / \sqrt{g'h}$
SEOM 1	100 - 100	-0.001	5.001	0.923
SEOM 2	100 -100	0.000	5.000	0.921
SEOM 1	40 - 40	-1.104	6.805	0.951
SEOM 2	40 – 40	-1.201	8.863	0.949
ROMS 1	100 – 100	0.000	5.000	0.936
ROMS 2	100 – 100	-0.168	5.153	0.949
ROMS 1	40 - 40	-0.269	5.301	0.953
ROMS 2	40 – 40	-2.662	7.567	0.965
FLOW-3DL	100 – 100	-0.042	5.007	0.926
FLOW-3DL	40 - 40	-0.087	5.008	0.924
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΥΣΗ	-	0.000	5.000	1

Τόσο από τα Σχήματα 5.3-1 έως 5.3-6 όσο και από τα στοιχεία του Πίνακα 5.3-1 προκύπτει ότι ο κώδικας FLOW-3DL μπορεί να προσομοιώσει τη ροή λόγω διαφορών πυκνότητας.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ****6.1. Σενάρια και παραδοχές υπολογισμών κοντινού πεδίου****6.1.1. Σενάρια υπολογισμών**

Για την πλήρη διερεύνηση του θέματος πραγματοποιήθηκαν 15 σενάρια προκαταρκτικών υπολογισμών με το μοντέλο CORMIX, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1-1. Τα σενάρια αναφέρονται σε αγωγό διάθεσης με ένα στόμιο (single port: Σ). Ως τυπικό σενάριο (σενάριο βάσης) υπολογισμών θεωρείται το σενάριο Σ0.

*Πίνακας 6.1-1. Χαρακτηριστικά των σεναρίων υπολογισμών*

Σενάριο	$U_a$ (m/s)	$\theta$ ( $^\circ$ )	$\sigma$ ( $^\circ$ )	L (m)	$H_D$ (m)	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )
Σ0	0.10	30	270	110	12.0	1026.48
Σ1	<b>0.05</b>	30	270	110	12.0	1026.48
Σ2	<b>0.15</b>	30	270	110	12.0	1026.48
Σ3	0.10	<b>45</b>	270	110	12.0	1026.48
Σ4	0.10	30	<b>225</b>	110	12.0	1026.48
Σ5	0.10	30	<b>315</b>	110	12.0	1026.48
Σ6	0.10	30	270	110	12.0	<b>1025.61-1027.90</b>
Σ7	0.10	30	270	<b>70</b>	<b>8.5</b>	1026.48
Σ8	0.10	30	270	<b>80</b>	<b>9.0</b>	1026.48
Σ9	0.10	30	270	<b>90</b>	<b>10.0</b>	1026.48
Σ10	0.10	30	270	<b>100</b>	<b>11.0</b>	1026.48
Σ11	0.10	30	270	<b>120</b>	<b>12.5</b>	1026.48
Σ12	0.10	30	270	<b>130</b>	<b>13.0</b>	1026.48
Σ13	0.10	30	270	<b>140</b>	<b>14.0</b>	1026.48
Σ14	0.10	30	270	<b>150</b>	<b>16.0</b>	1026.48

Στα σενάρια αυτά διερευνήθηκε η επίδραση των ακόλουθων παραγόντων:

- 1) Ταχύτητα του παράκτιου ρεύματος ( $U_a$ ).
- 2) Κατακόρυφη γωνία διάθεσης ( $\theta$ ).
- 3) Οριζόντια γωνία διάθεσης ( $\sigma$ ).
- 4) Θέση διάθεσης, δηλ. απόσταση από την ακτή (L) και βάθος διάθεσης ( $H_D$ ).
- 5) Στρωμάτωση του αποδέκτη.

Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν σε κάθε σενάριο φαίνονται στον Πίνακα 6.1-2.

Πίνακας 6.1-2. Παράμετροι που διερευνήθηκαν

Σενάριο	$U_a$ (m/s)	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	$\sigma$ ( $^{\circ}$ )	L, $H_D$ (m)	Στρωμάτωση (-)
Σ0	0.10	30	270	110, 12.0	
Σ1	0.05				
Σ2	0.15				
Σ3		45			
Σ4			225		
Σ5			315		
Σ6					Ναι
Σ7				70, 8.5	
Σ8				80, 9.0	
Σ9				90, 10.0	
Σ10				100, 11.0	
Σ11				120, 12.5	
Σ12				130, 13.0	
Σ13				140, 14.0	
Σ14				150, 16.0	

### 6.1.2. Παραδοχές υπολογισμών

Στου υπολογισμούς γίνονται οι εξής παραδοχές:

- 1) Διαφορά θερμοκρασίας και πυκνότητας μεταξύ της φλέβας των θερμών νερών και του υδάτινου αποδέκτη.  
Σε όλα τα σενάρια υπολογισμών η θερμοκρασία των θερμών νερών είναι ίση με  $T_o=29.8$  °C και η πυκνότητά είναι ίση με  $\rho_o=1023.24$  kg/m<sup>3</sup>. Η θερμοκρασία του αποδέκτη είναι ίση με  $T_a=21.8$  °C και η πυκνότητά του είναι ίση με  $\rho_a=1026.48$  kg/m<sup>3</sup> (στην περίπτωση του ομογενούς αποδέκτη). Συνεπώς, η διαφορά θερμοκρασίας προκύπτει ίση με  $\Delta T=8$  °C και η διαφορά πυκνότητας ίση με  $\Delta\rho=3.24$  kg/m<sup>3</sup>. Η διαφορά πυκνότητας μεταξύ της φλέβας των θερμών νερών και του υδάτινου αποδέκτη οδηγεί τη φλέβα των θερμών νερών προς την επιφάνεια (φλέβα θετικής άνωσης).
- 2) Παροχή θερμών νερών.  
Η τιμή της παροχής των θερμών νερών είναι ίση με 72000 m<sup>3</sup>/h.
- 3) Χαρακτηριστικά του αποδέκτη.  
Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις χαρακτηριστικών του αποδέκτη. Στην πρώτη περίπτωση ο αποδέκτης θεωρείται ως ομογενής και στη δεύτερη περίπτωση ως στρωματωμένος. Η πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται σε όλα τα σενάρια υπολογισμών με εξαίρεση το σενάριο Σ6, όπου εφαρμόζεται η δεύτερη για την εξέταση της επίδρασης της στρωμάτωσης. Πρακτικά όμως στρωμάτωση δεν υπάρχει καθώς η κατανομή της πυκνότητας κατά βάθος είναι μικρή.

Στους υπολογισμούς κοντινού πεδίου η ταχύτητα του παράκτιου ρεύματος εκτιμήθηκε με βάση προκαταρκτικούς υπολογισμούς με το μαθηματικό μοντέλο FLOW-3DL ότι είναι της τάξης του  $U_a=0.10$  m/s. Για λόγους σύγκρισης πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για μια

μικρή τιμή ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος ( $U_a=0.05$  m/s) στο σενάριο Σ1, καθώς και για μια μεγάλη τιμή ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος ( $U_a=0.15$  m/s) στο σενάριο Σ2.

4) Χαρακτηριστικά του αγωγού διάθεσης.

Ο αγωγός διάθεσης (απλού στομίου) έχει κυκλική διατομή διαμέτρου  $D=2.8$  m και το στόμιο διάθεσης βρίσκεται σε ύψος ίσο με  $h_o=1.00$  m από τον πυθμένα. Στο βασικό σενάριο (Σ0) ο αγωγός διάθεσης έχει μήκος ίσο με  $L=110$  m, στη θέση του στομίου διάθεσης το βάθος της θάλασσας είναι ίσο με  $H_D=12.00$  m, η οριζόντια γωνία  $\sigma$  είναι ίση με  $\sigma=270^\circ$  και η κατακόρυφη γωνία  $\theta$ , μεταξύ του στομίου εκροής και του οριζόντιου επιπέδου, είναι ίση με  $\theta=30^\circ$ . Η γωνία αυτή επιλέχθηκε για τη μείωση της πιθανότητας επίδρασης της φλέβας των θερμών νερών στον πυθμένα και την αποφυγή προσκόλλησής της σε αυτόν (βλ. Κεφάλαιο 4.1.8) ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που η διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T$  μεταξύ της φλέβας των θερμών νερών και του υδάτινου αποδέκτη ενδέχεται να λαμβάνει μικρές τιμές.

Για τη μελέτη της επίδρασης της κατακόρυφης γωνίας  $\theta$  διερευνήθηκε μια ακόμα τιμή της ίση με  $45^\circ$  (σενάριο Σ3).

Για τη μελέτη της επίδρασης της οριζόντιας γωνίας  $\sigma$  διερευνήθηκαν δύο πρόσθετες τιμές ίσες με  $225^\circ$  και  $315^\circ$  στα σενάρια Σ4 και Σ5, αντίστοιχα.

Για τη μελέτη της επίδρασης της θέσης του αγωγού διάθεσης πραγματοποιήθηκαν τα σενάρια Σ7 μέχρι Σ14.

5) Ταχύτητα διάθεσης των θερμών νερών.

Η ταχύτητα διάθεσης (εξόδου) της φλέβας από τον αγωγό υπολογίζεται με βάση την παροχή των θερμών νερών ( $Q_o=72000$  m<sup>3</sup>/h = 20.0 m<sup>3</sup>/s) ίση με:

$$U_o = \frac{4Q_o}{\pi D^2} = \frac{4.0 \times 20.0 \text{ m}^3/\text{s}}{3.14 \times 2.8^2 \text{ m}^2} = 3.25 \text{ m/s}$$

6) Χαρακτηριστικά της θέσης απόληξης θαλασσινού νερού.

Η απόληξη του θαλασσινού νερού γίνεται σε επαφή με τον υφιστάμενο μόλο (πρόβολο) με ορθογωνικό αγωγό τύπου «Π». Το πλάτος του ορθογωνικού αγωγού είναι ίσο με 40 m και το ύψος του ίσο με 4.0 m. Η στάθμη του πυθμένα βρίσκεται σε βάθος 8.0 m και της οροφής του σε βάθος 4.0 m.

Οι μεγάλες διαστάσεις του αγωγού εξασφαλίζουν τη σχετικά μικρή ταχύτητα εισόδου του θαλασσινού νερού για περιβαλλοντικούς και οικολογικούς λόγους. Η ταχύτητα εισόδου υπολογίζεται ίση με:

$$U_{in} = \frac{20.0 \text{ m}^3/\text{s}}{40.0 \times 4.0 \text{ m}^2} = 0.125 \text{ m/s}$$

7) Απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον.

Χάριν ασφάλειας οι απώλειες θεωρήθηκαν μηδενικές.

**6.2. Υπολογισμοί στο κοντινό πεδίο****6.2.1. Χαρακτηριστικά μεγέθη της φλέβας των θερμών νερών**

Στον Πίνακα 6.2-1 παρουσιάζονται οι υπολογιζόμενες κλίμακες μήκους και οι χαρακτηριστικοί αδιάστατοι αριθμοί της φλέβας για όλα τα σενάρια υπολογισμών.

Πίνακας 6.2-1. Κλίμακες μήκους και χαρακτηριστικοί αδιάστατοι αριθμοί της φλέβας

Σενάριο	$g_0'$ ( $m/s^2$ )	$M_0$ ( $m^4/s^2$ )	$J_0$ ( $m^4/s^3$ )	$L_Q$ (m)	$L_M$ (m)	$L_m$ (m)	$L_b$ (m)	$Fr_0'$ (-)	$Fr_0$ (-)	R (-)
Σ0	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	80.60	619.08	11.726	11.03	32.48
Σ1	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	161.20	Πολύ μεγάλη τιμή	11.726	11.03	64.96
Σ2	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	53.73	183.43	11.726	11.03	21.65
Σ3	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	80.60	619.08	11.726	11.03	32.48
Σ4	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	80.60	619.08	11.726	11.03	32.48
Σ5	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	80.60	619.08	11.726	11.03	32.48
Σ6	0.03095	64.96	0.619	2.48	32.93	80.60	482.80	13.278	12.49	32.48
Σ7	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	80.60	619.08	11.726	11.03	32.48
Σ8	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	80.60	619.08	11.726	11.03	32.48
Σ9	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	80.60	619.08	11.726	11.03	32.48
Σ10	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	80.60	619.08	11.726	11.03	32.48
Σ11	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	80.60	619.08	11.726	11.03	32.48
Σ12	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	80.60	619.08	11.726	11.03	32.48
Σ13	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	80.60	619.08	11.726	11.03	32.48
Σ14	0.03095	64.96	0.619	2.48	29.08	80.60	619.08	11.726	11.03	32.48

**6.2.2. Υπολογισμοί****6.2.2.1. Βασικό σενάριο Σ0**

Στο Σχήμα 6.2-1 φαίνεται η πορεία της φλέβας των θερμών νερών για το βασικό σενάριο Σ0.

Η φλέβα εξέρχεται από τον αγωγό διαμέτρου  $D_0=2.80$  m με παροχή ίση με  $Q_0=72000$  m<sup>3</sup>/h=20.00 m<sup>3</sup>/s και ταχύτητα ίση με  $U_0=3.25$  m/s. Στη συνέχεια ακολουθεί ανοδική πορεία προς την επιφάνεια (εξαιτίας της διαφοράς πυκνότητάς της από το περιβάλλον θαλασσινό νερό,  $\Delta\rho=3.24$  kg/m<sup>3</sup>) και φτάνει σε αυτή μετά από χρόνο 3.49 s. Η διάμετρος της φλέβας κοντά στην επιφάνεια είναι ίση με 4.66 m και η επιφάνειά της είναι ίση με  $\pi(4.66)^2/4=17.05$  m<sup>2</sup>.

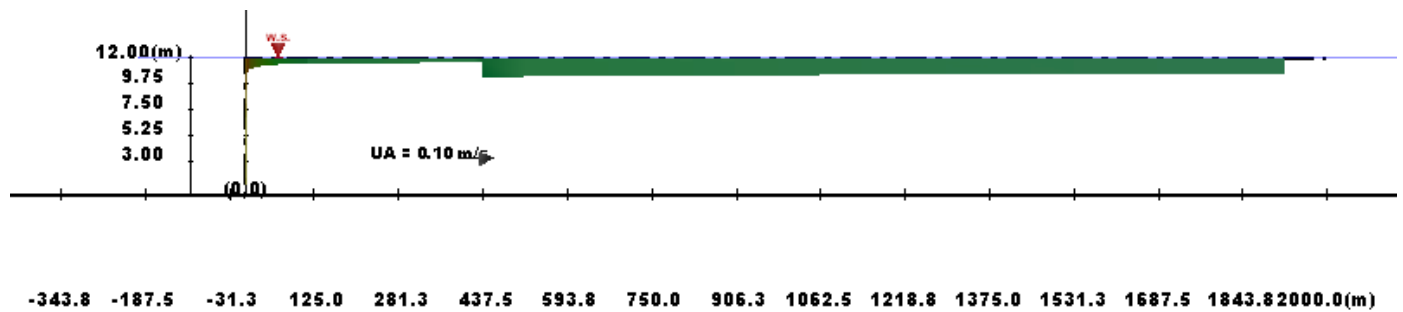
Η αρχική διαφορά θερμοκρασίας κοντά στο στόμιο του σωλήνα διάθεσης είναι ίση με  $\Delta T=C_0=8$  °C. Στην επιφάνεια η υπολογιζόμενη διάλυση είναι ίση με 1.4 στον άξονα της φλέβας και η μέση τιμή της είναι ίση με 2.4, οπότε οι αντίστοιχες τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας είναι ίσες με  $8/1.4=5.68$  °C (στον άξονα) και  $8/2.4=3.33$  °C (μέση τιμή).

Με βάση τη μέση τιμή της διάλυσης στην επιφάνεια υπολογίζεται η ολική παροχή της φλέβας στην επιφάνεια ίση με  $2.4 \times 20.00=48.00$  m<sup>3</sup>/s, οπότε η παροχή που εισέρχεται στη φλέβα από το περιβάλλον θαλασσινό νερό είναι ίση με  $1.4 \times 20.00=28.00$  m<sup>3</sup>/s. Κοντά στην επιφάνεια η ταχύτητα της φλέβας είναι ίση με  $48.00/17.05=2.82$  m/s.

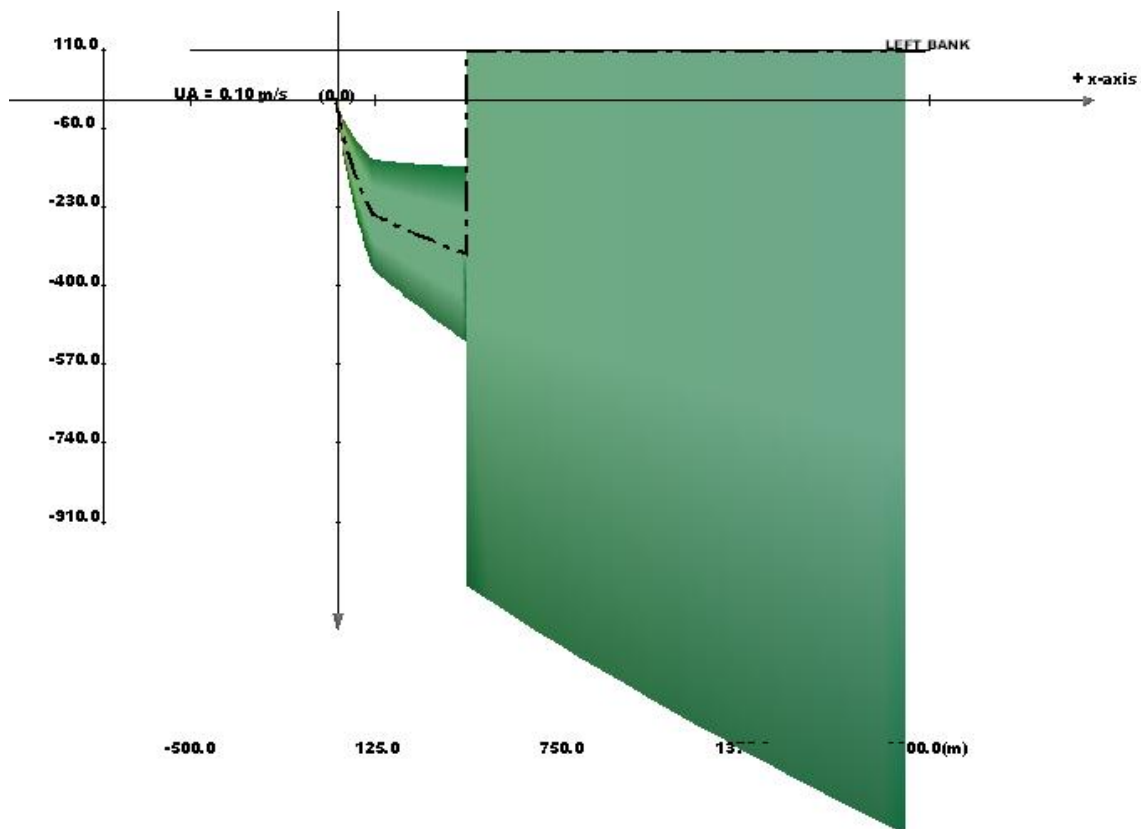
Στην επιφάνεια η φλέβα θεωρείται ότι διαμορφώνεται ως μια επιφανειακή φλέβα πλάτους  $2BH=5.64$  m, η οποία εκτείνεται σε βάθος περίπου ίσο με  $BV=2.82$  m. Η φλέβα αυτή θεωρείται

κατά προσέγγιση ως το όριο εκκίνησης των υπολογισμών της περιοχής του μακρινού πεδίου ροής με το μοντέλο FLOW-3DL.

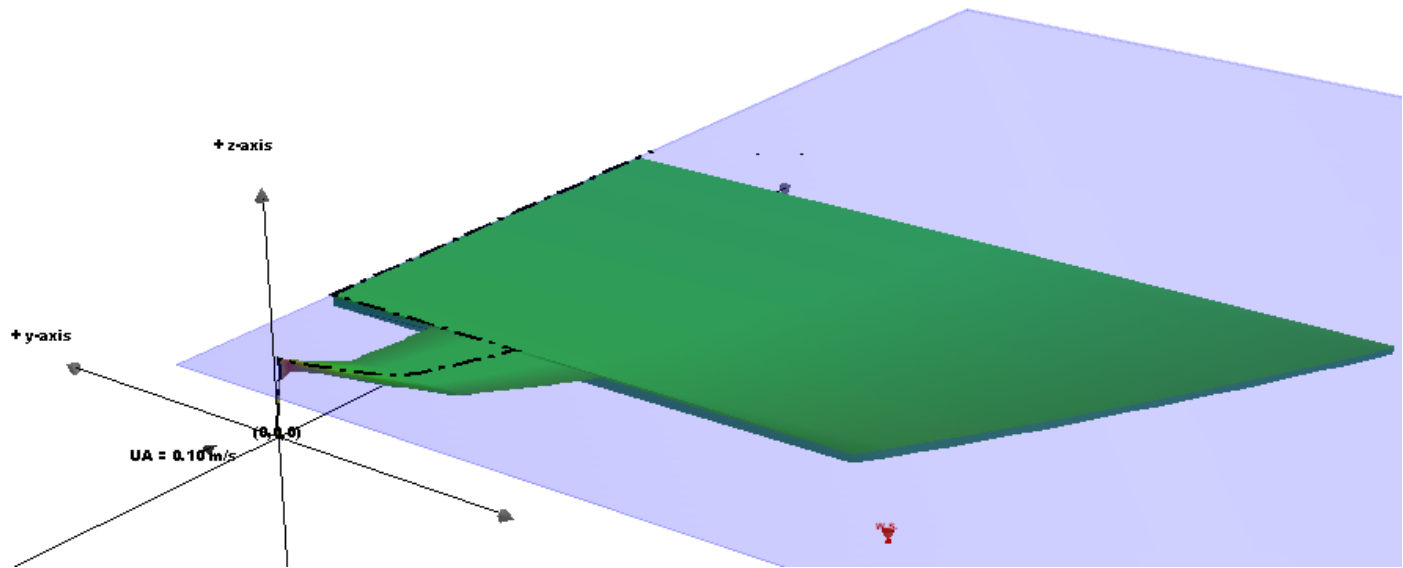
Σημειώνεται ότι πρακτικά μετά την περιοχή ανάπτυξης της ροής δημιουργούνται δύο διακριτές περιοχές: (1) στην πρώτη επικρατούν οι δυνάμεις ποσότητας κίνησης και η φλέβα παρουσιάζει μικρή καμπύλωση (περιορισμένη επίδραση της ροής του αποδέκτη) και (2) στη δεύτερη η επίδραση της ροής του αποδέκτη προκαλεί έντονη καμπύλωση της φλέβας.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 6.2-1. Πορεία της φλέβας για το σενάριο Σ0  
 (α) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xz  
 (β) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xy  
 (γ) Τρισδιάστατη απεικόνιση της πορείας της φλέβας

### 6.2.2.2. Επίδραση της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος

Η επίδραση της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος εξετάζεται στα σενάρια Σ0, Σ1 και Σ2. Η πορεία της φλέβας για τα σενάρια Σ1 και Σ2 φαίνεται στα Σχήματα 6.2-2 και 6.2-3, αντίστοιχα.

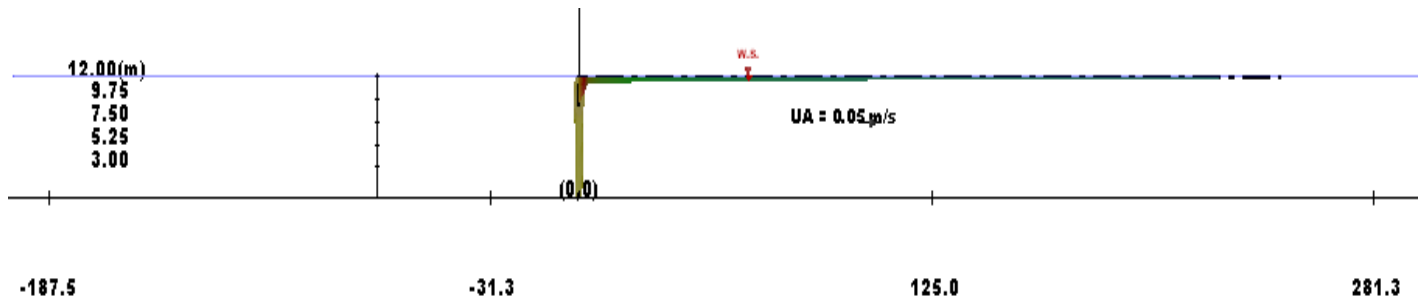
Σημειώνεται, ότι οι υπολογισμοί δεν είναι ακριβείς για πολύ μικρές ταχύτητες ροής του αποδέκτη, όπως π.χ. για το σενάριο Σ1, οι υπολογισμοί του οποίου λαμβάνονται υπόψη στη σύγκριση μόνο ποιοτικά.

Με την αύξηση της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος παρατηρούνται τα ακόλουθα:

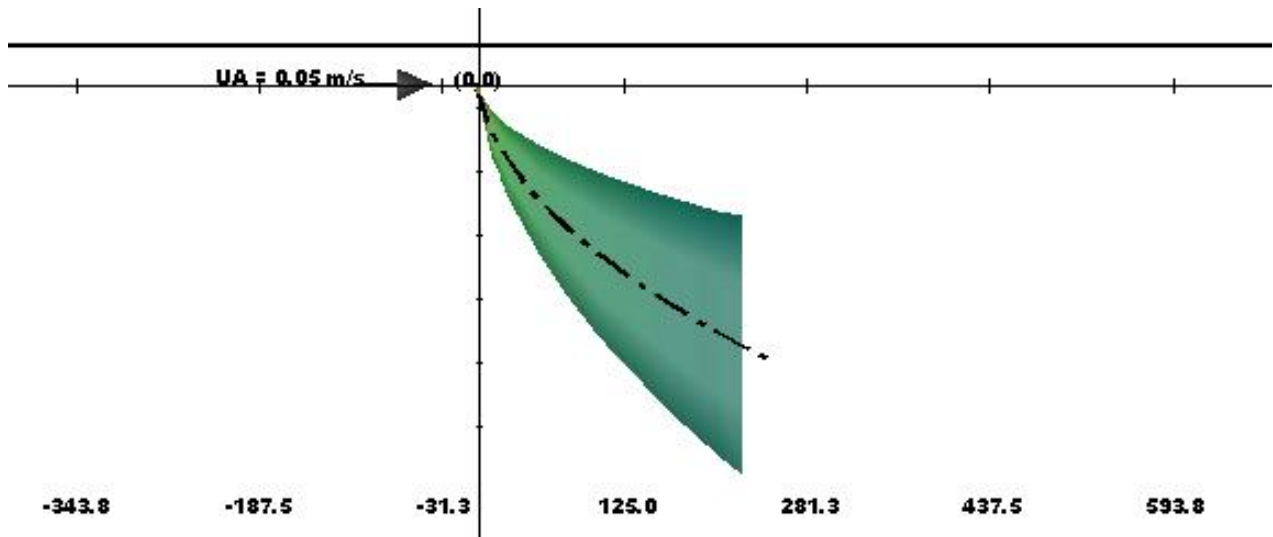
- 1) Η διάμετρος της φλέβας κοντά στην επιφάνεια αυξάνεται και συνεπώς αυξάνεται και το εμβαδό της. Πιο συγκεκριμένα, για ταχύτητα ίση με 0.05 m/s, 0.10 m/s και 0.15 m/s η διάμετρος είναι ίση με 4.64 m, 4.66 m και 4.94 m, αντίστοιχα.
- 2) Η υπολογιζόμενη μέση τιμή της διάλυσης στην επιφάνεια παρουσιάζει αυξητική τάση και πιο συγκεκριμένα λαμβάνει τιμές ίσες με 2.40, 2.40 και 2.50 για τα σενάρια Σ1, Σ0 και Σ2, αντίστοιχα. Συνεπώς, η μέση τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας στην επιφάνεια παρουσιάζει πτωτική τάση και λαμβάνει τιμές ίσες με 3.33 °C, 3.33 °C και 3.20 °C, αντίστοιχα. Οι τιμές της ολικής παροχής της φλέβας στην επιφάνεια είναι ίσες με 48.0 m<sup>3</sup>/s, 48.0 m<sup>3</sup>/s και 50.0 m<sup>3</sup>/s, αντίστοιχα.
- 3) Οι διαστάσεις της επιφανειακής φλέβας αυξάνονται. Το πλάτος (2BH) και το βάθος της επιφανειακής φλέβας (BV) είναι ίσα με α) 2BH =5.46 m, BV= 2.73 m, β) 2BH=5.64 m,



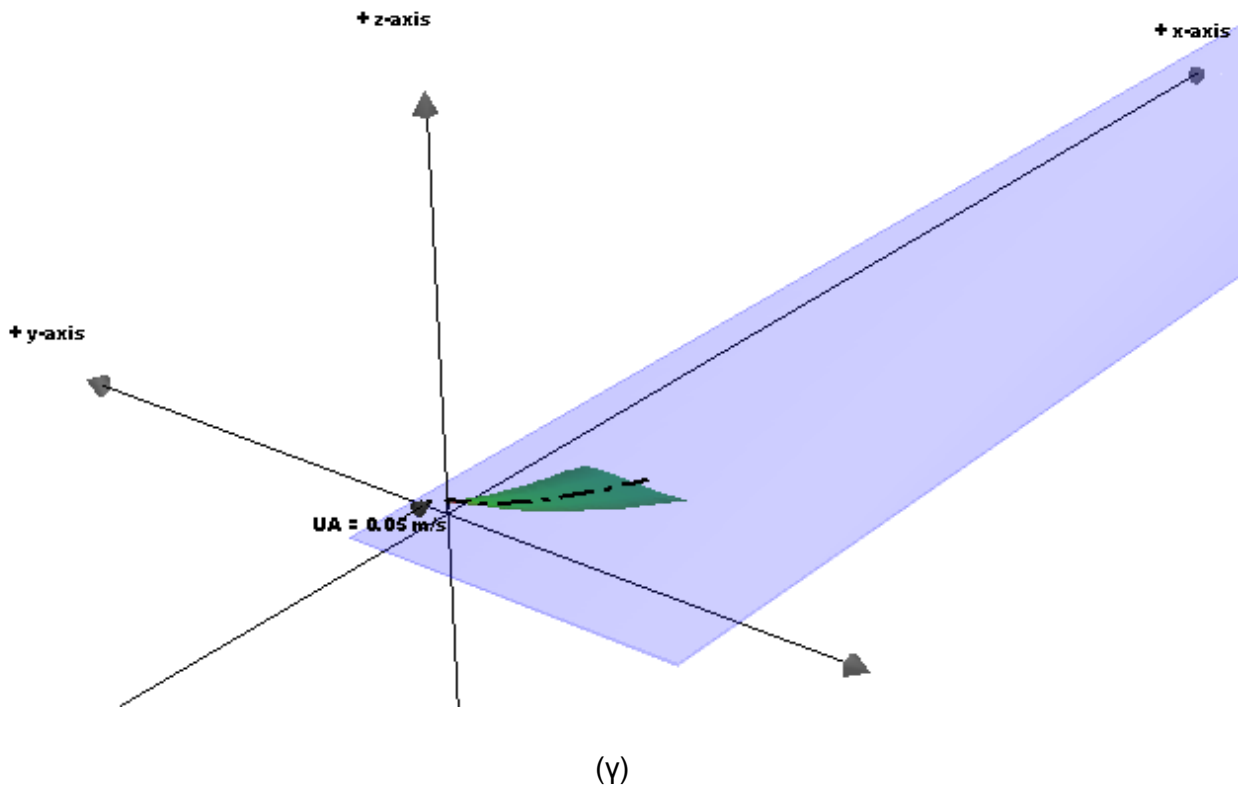
BV=2.82 m και γ) 2BH=5.80 m, BV=2.90 m, για ταχύτητα του παράκτιου ρεύματος ίση με 0.05 m/s, 0.10 m/s και 0.15 m/s, αντίστοιχα.



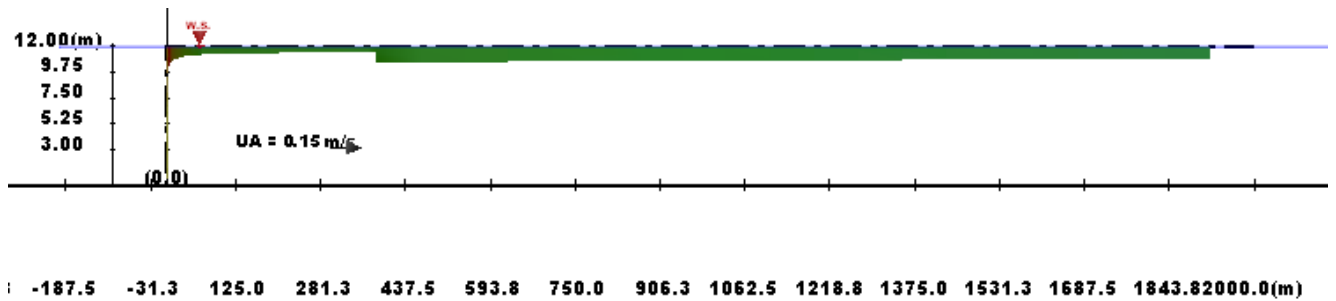
(α)

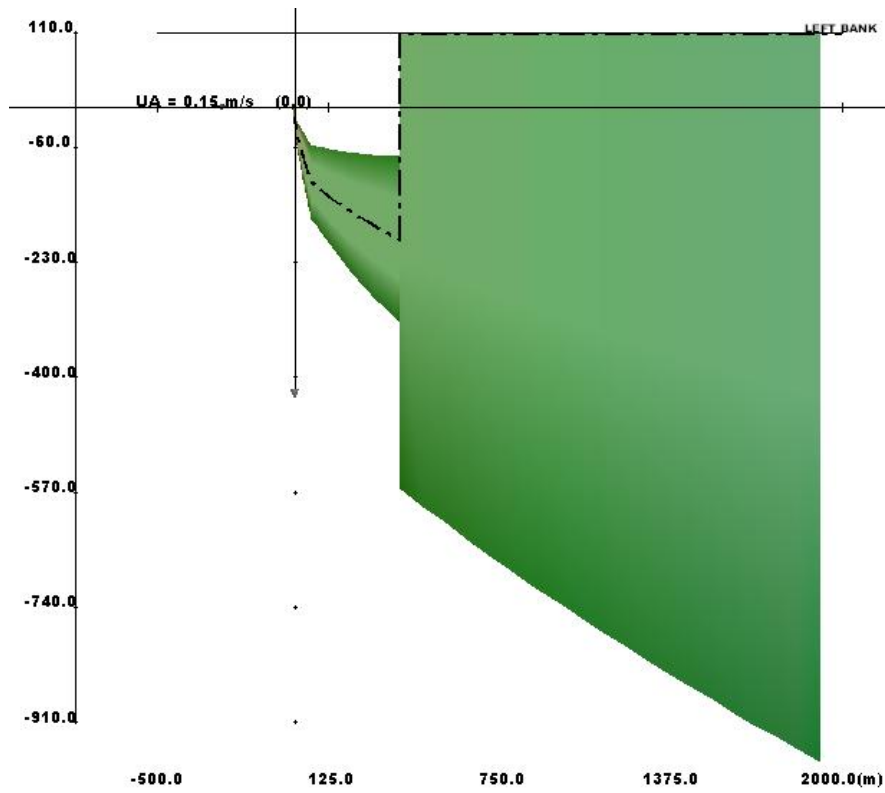


(β)

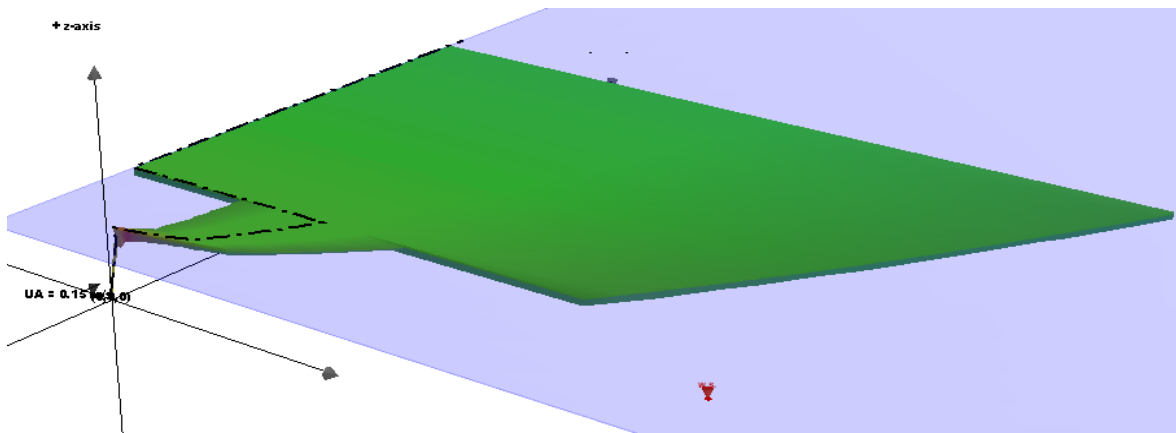


Σχήμα 6.2-2. Πορεία της φλέβας για το σενάριο Σ1  
 (α) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xz  
 (β) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xy  
 (γ) Τρισδιάστατη απεικόνιση της πορείας της φλέβας





(β)



(γ)

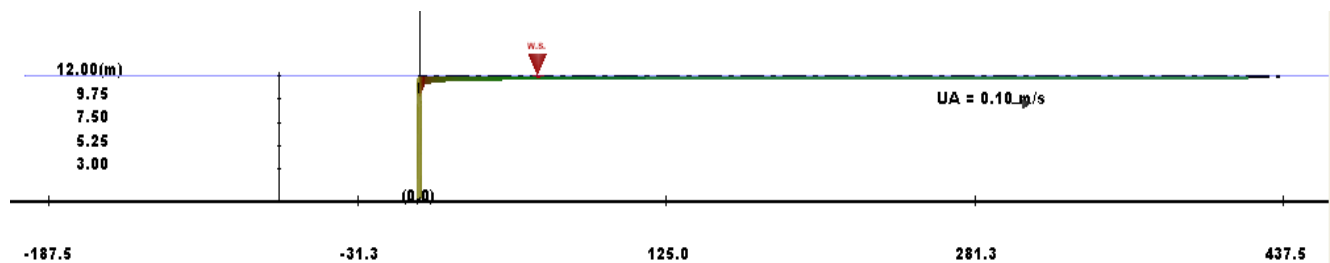
Σχήμα 6.2-3. Πορεία της φλέβας για το σενάριο Σ2  
 (α) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xz  
 (β) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xy  
 (γ) Τρισδιάστατη απεικόνιση της πορείας της φλέβας

### 6.2.2.3. Επίδραση της κατακόρυφης γωνίας διάθεσης ( $\theta$ )

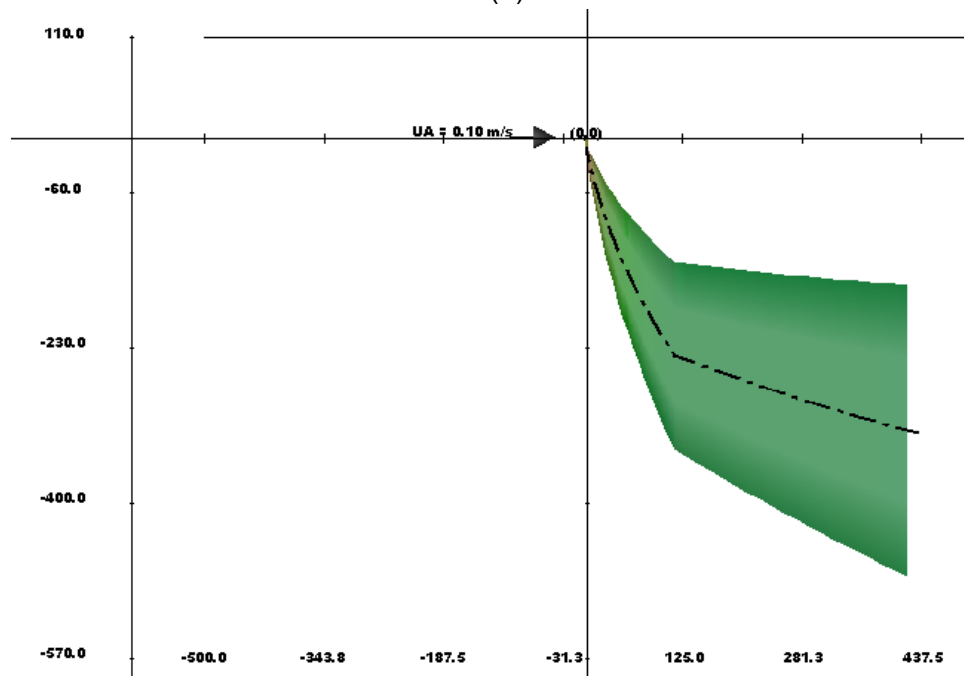
Η επίδραση της μεταβολής της κατακόρυφης γωνίας του στομίου εκροής εξετάζεται στα σενάρια Σ0 και Σ3. Η πορεία της φλέβας για το σενάριο Σ3 φαίνεται στο Σχήμα 6.2-4.

Με την αύξηση της κατακόρυφης γωνίας διάθεσης παρατηρούνται τα ακόλουθα:

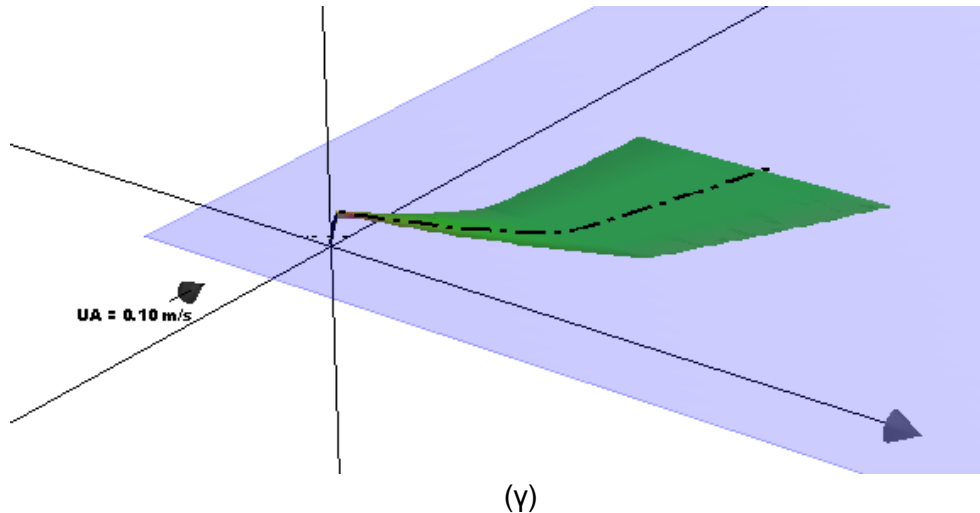
- 1) Η διάμετρος της φλέβας κοντά στην επιφάνεια μειώνεται και αντίστοιχα μειώνεται και η τιμή του εμβαδού της. Πιο συγκεκριμένα, για γωνίες  $\theta=30^\circ$  και  $\theta=45^\circ$  η διάμετρος είναι ίση με 4.66 m και 3.32 m, αντίστοιχα.
- 2) Η υπολογιζόμενη μέση τιμή της διάλυσης στην επιφάνεια μειώνεται και είναι ίση με 2.4 και 1.7 για γωνίες  $\theta=30^\circ$  και  $\theta=45^\circ$ , αντίστοιχα. Συνεπώς, η μέση τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας στην επιφάνεια αυξάνεται και είναι ίση με  $3.3^\circ\text{C}$  και  $4.7^\circ\text{C}$ , για τα σενάρια Σ0 και Σ3, αντίστοιχα. Οι τιμές της ολικής παροχής της φλέβας στην επιφάνεια είναι ίσες με  $48.0\text{ m}^3/\text{s}$  (Σ0) και  $34.0\text{ m}^3/\text{s}$  (Σ3).
- 3) Οι διαστάσεις της επιφανειακής φλέβας μειώνονται. Το πλάτος (2BH) και το βάθος της επιφανειακής φλέβας (BV) είναι ίσα με α)  $2\text{BH}=5.64\text{ m}$ ,  $\text{BV}=2.82\text{ m}$  και β)  $2\text{BH}=4.24$ ,  $\text{BV}=2.12\text{ m}$ , για τα Σ0 και Σ3, αντίστοιχα.



(α)



(β)



Σχήμα 6.2-4. Πορεία της φλέβας για το σενάριο Σ3  
 (α) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xz  
 (β) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xy  
 (γ) Τρισδιάστατη απεικόνιση της πορείας της φλέβας

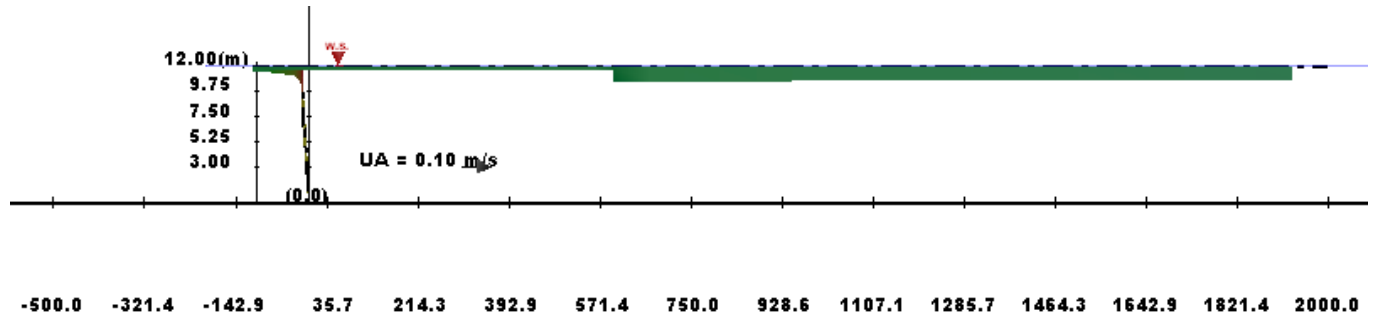
#### 6.2.2.4. Επίδραση της οριζόντιας γωνίας διάθεσης ( $\sigma$ )

Η επίδραση της μεταβολής της οριζόντιας γωνίας διάθεσης εξετάζεται στα σενάρια Σ0, Σ4 και Σ5. Στο σενάριο Σ0 η  $\sigma$  είναι ίση με  $270^\circ$  και στα σενάρια Σ4 και Σ5 η  $\sigma$  είναι ίση με  $225^\circ$  και  $315^\circ$ , αντίστοιχα. Η πορεία της φλέβας για τα σενάρια Σ4 και Σ5 φαίνεται στα Σχήματα 6.2-5 και 6.2-6, αντίστοιχα.

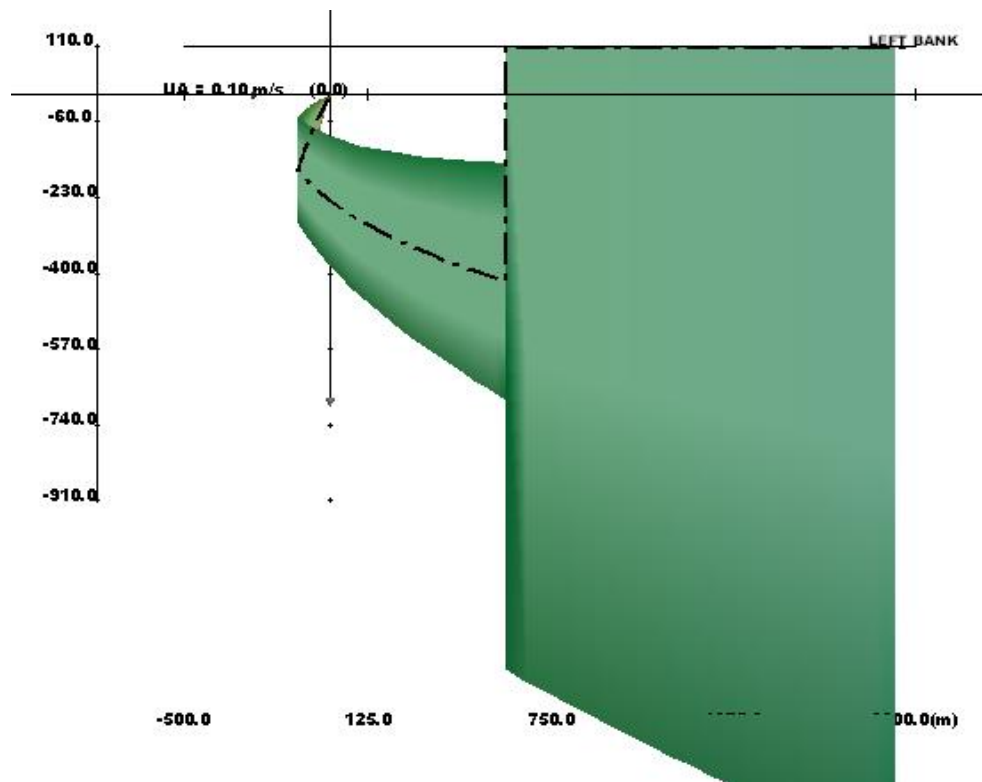
Με τη μεταβολή της οριζόντιας γωνίας διάθεσης παρατηρούνται τα ακόλουθα:

- 1) Η διάμετρος της φλέβας κοντά στην επιφάνεια παρουσιάζει ελάχιστη τιμή (4.66 m) όταν η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση διάθεσης της φλέβας με αυτή του παράκτιου ρεύματος είναι  $270^\circ$ . Από τις δυο άλλες συμμετρικές, ως προς τη  $\sigma=270^\circ$ , θέσεις ( $\sigma=225^\circ$  και  $315^\circ$ ) που εξετάστηκαν, η διάμετρος της φλέβας είναι μικρότερη (4.80 m) όταν η διεύθυνση διάθεσης ακολουθεί (και δεν αντισθίεται σε) αυτή του παράκτιου ρεύματος ( $\sigma=315^\circ$ ), καθόσον η φλέβα στην περίπτωση αυτή ακολουθεί μικρότερη και συντομότερη διαδρομή μέχρι την επιφάνεια. Για  $\sigma=225^\circ$  η διάμετρος της φλέβας είναι ίση με 4.94 m. Με τον ίδιο τρόπο μεταβάλλονται και οι τιμές του εμβαδού της φλέβας κοντά στην επιφάνεια.
- 2) Η υπολογιζόμενη μέση διάλυση, η μέση διαφορά θερμοκρασίας και η ολική παροχή της φλέβας στην επιφάνεια αναμένεται να παρουσιάσουν ελάχιστη τιμή (2.4), μέγιστη τιμή (3.3  $^\circ\text{C}$ ) και ελάχιστη τιμή (48.0  $\text{m}^3/\text{s}$ ) όταν η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση διάθεσης της φλέβας με αυτή του παράκτιου ρεύματος είναι ίση με  $270^\circ$ . Στις άλλες δυο θέσεις ( $\sigma=225^\circ$  και  $315^\circ$ ) η μέση τιμή της διάλυσης, της διαφοράς θερμοκρασίας και η παροχή στην επιφάνεια είναι πρακτικά οι ίδιες και ίσες με α) 2.5, 3.2  $^\circ\text{C}$ , 48.0  $\text{m}^3/\text{s}$  και β) 2.5, 3.2  $^\circ\text{C}$ , 48.0  $\text{m}^3/\text{s}$ , αντίστοιχα.

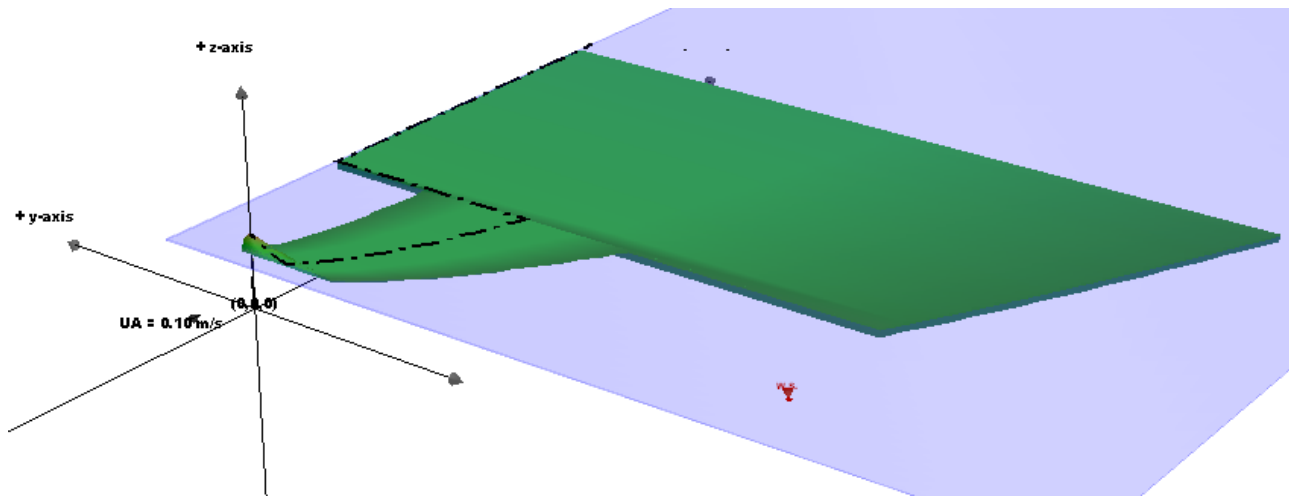
- 3) Οι διαστάσεις της επιφανειακής φλέβας παίρνει ελάχιστες τιμές ( $2BH=5.64$  m και  $BV=2.82$  m) για το σενάριο Σ0. Στα σενάρια Σ4 και Σ5 οι τιμές των διαστάσεων είναι πρακτικά οι ίδιες και ίσες με α)  $2BH=5.72$  m,  $BV=2.85$  m και β)  $2BH=5.70$  m,  $BV=2.85$  m, αντίστοιχα.



(α)

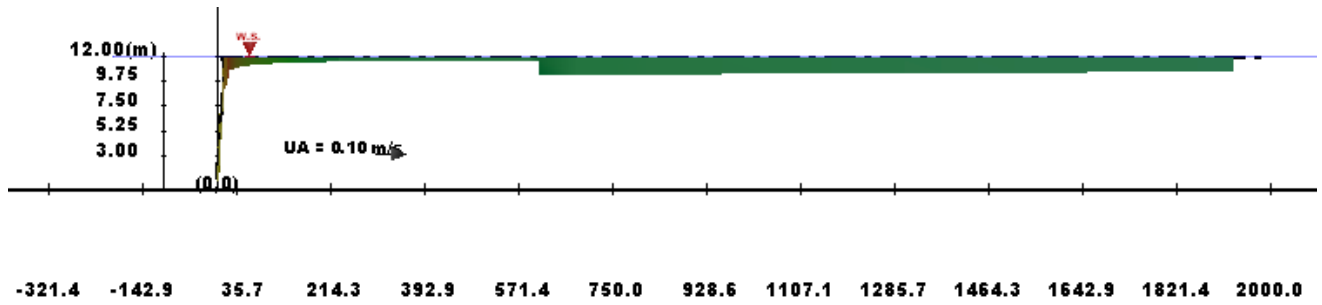


(β)

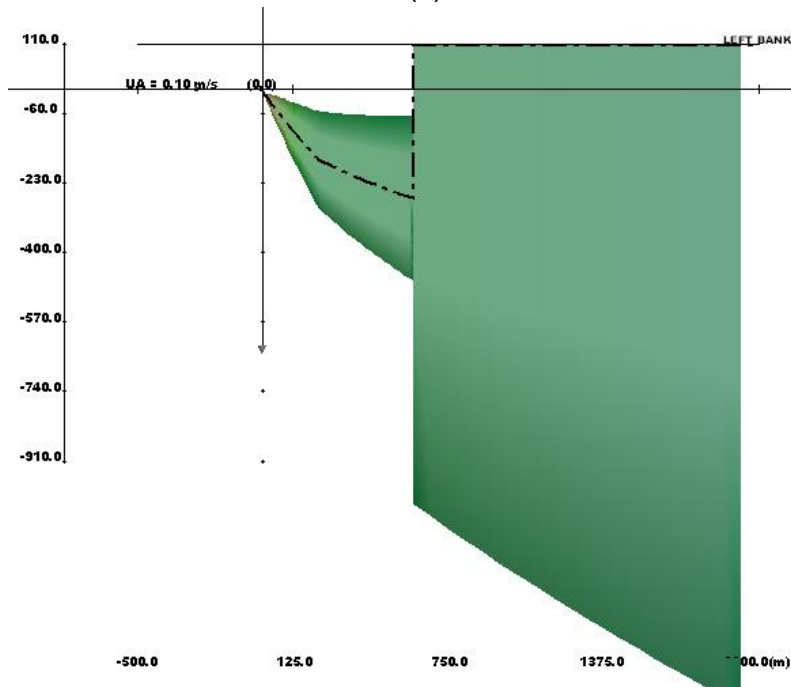


(γ)

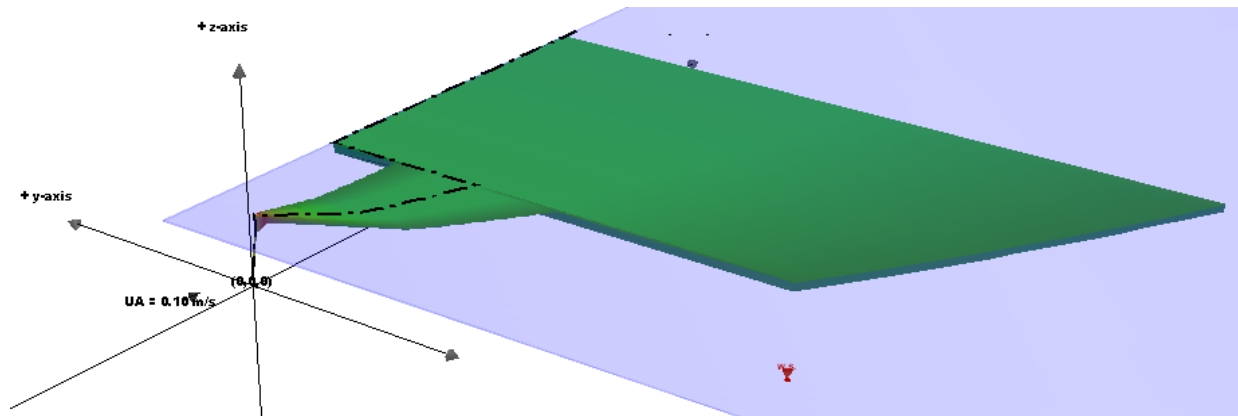
Σχήμα 6.2-5. Πορεία της φλέβας για το σενάριο Σ4  
 (α) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xz  
 (β) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xy  
 (γ) Τρισδιάστατη απεικόνιση της πορείας της φλέβας



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 6.2-6. Πορεία της φλέβας για το σενάριο Σ5  
 (α) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xz  
 (β) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xy  
 (γ) Τρισδιάστατη απεικόνιση της πορείας της φλέβας

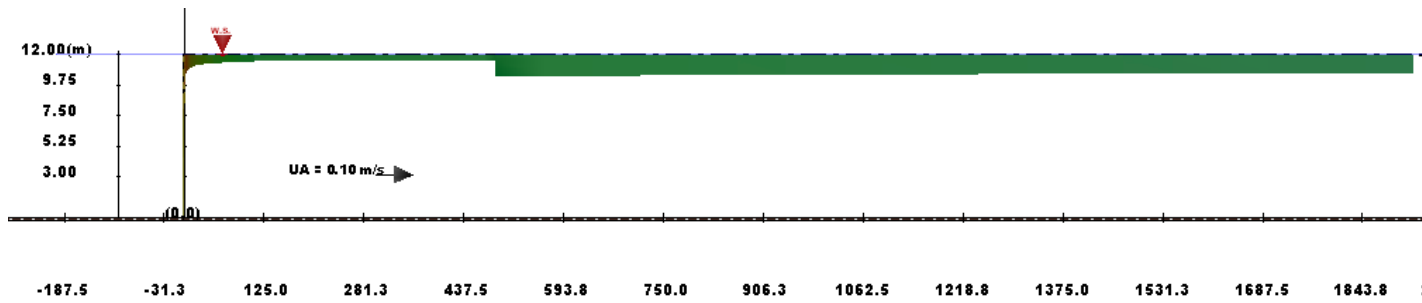


**6.2.2.5. Επίδραση της στρωμάτωσης του αποδέκτη**

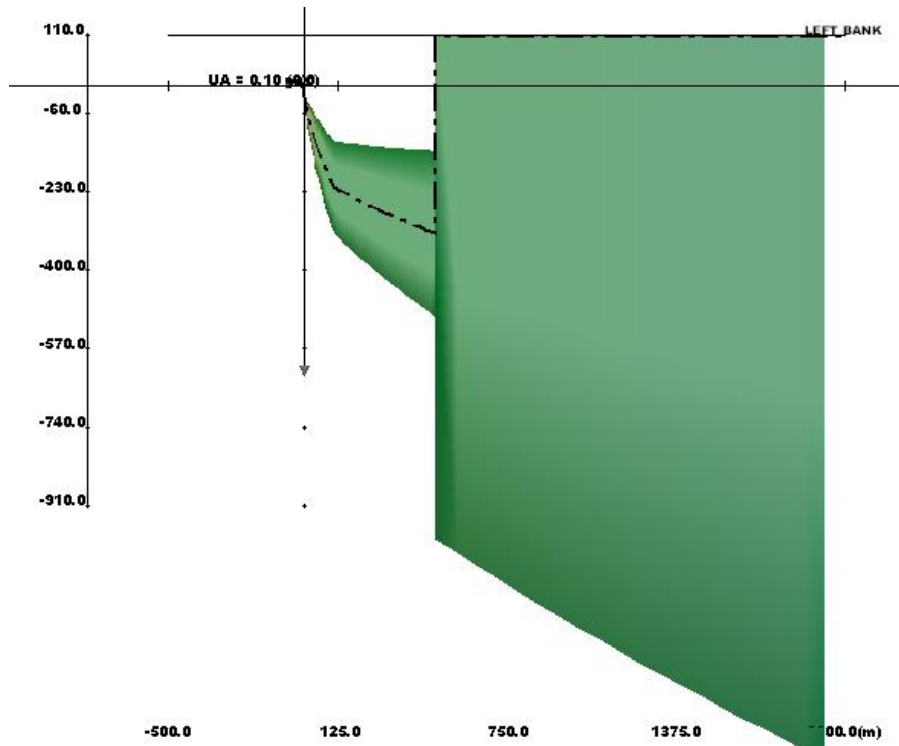
Η επίδραση της στρωμάτωσης του αποδέκτη στη φλέβα των θερμών νερών εξετάζεται στα σενάρια Σ0 και Σ6. Η πορεία της φλέβας για το σενάριο Σ6, οι υπολογισμοί του οποίου πραγματοποιήθηκαν με στρωμάτωση του αποδέκτη (βλ. Σχήμα 2.5-1), φαίνεται στο Σχήμα 6.2-7.

Από την εξέταση των σεναρίων Σ0 και Σ6 προκύπτει ότι δεν υπάρχει αισθητή επίδραση της στρωμάτωσης εξαιτίας του περιορισμένου βάθους διάθεσης. Αναλυτικότερα, παρατηρούνται τα ακόλουθα:

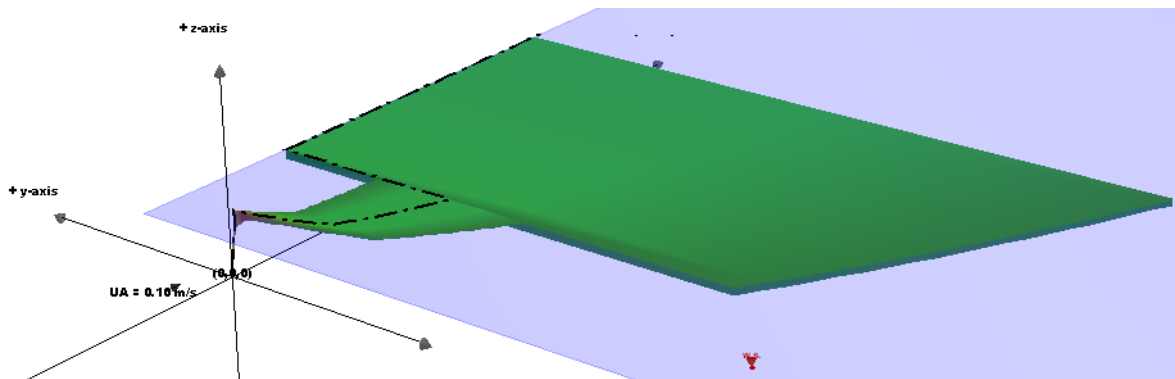
- 1) Η διάμετρος της φλέβας κοντά στην επιφάνεια παραμένει σταθερή και ίση με 4.66 m για ομοιόμορφες συνθήκες και συνθήκες στρωμάτωσης και ομοίως οι τιμές του εμβαδού της παραμένουν αμετάβλητες.
- 2) Η υπολογιζόμενη μέση τιμή της διάλυσης στην επιφάνεια είναι ίση με 2.4 και στις δύο περιπτώσεις. Αντίστοιχα, η μέση τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας στην επιφάνεια παραμένει ίση με 3.3 °C και η ολική παροχή της φλέβας στην επιφάνεια είναι ίση με 48.0 m<sup>3</sup>/s.
- 3) Οι διαστάσεις της επιφανειακής φλέβας, το πλάτος (2BH) και το βάθος της (BV), παραμένουν πρακτικά αμετάβλητες και είναι ίσες με 2BH=5.64 m και BV=2.82 m για ομοιόμορφες συνθήκες, και ίσες με 2BH=5.62 m και BV=2.81 για συνθήκες στρωμάτωσης στον αποδέκτη.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 6.2-7. Πορεία της φλέβας για το σενάριο Σ6  
 (α) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xz  
 (β) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xy  
 (γ) Τρισδιάστατη απεικόνιση της πορείας της φλέβας

**6.2.2.6. Επίδραση της θέσης διάθεσης**

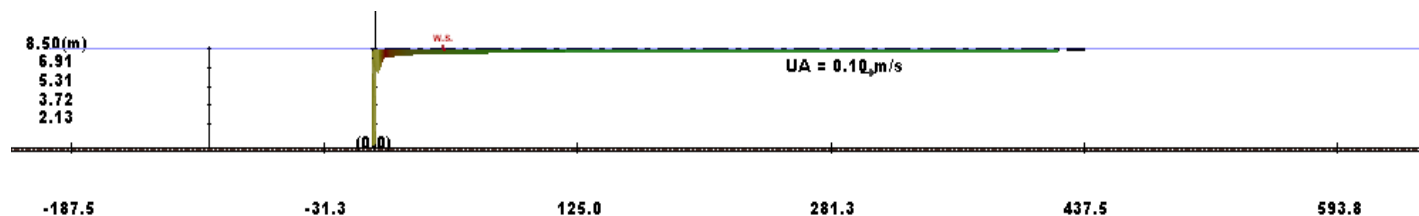
Η επίδραση της θέσης διάθεσης των θερμών νερών (απόσταση από την ακτή L και βάθος διάθεσης  $H_D$ ) εξετάζεται στα σενάρια Σ0 και Σ7 μέχρι Σ14. Στον Πίνακα 6.2-2 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της φλέβας για τα σενάρια αυτά. Επίσης, στα Σχήματα 6.2-8 και 6.2-9 φαίνεται ενδεικτικά, η πορεία της φλέβας για τα σενάρια Σ7 (ελάχιστο εξεταζόμενο μήκος αγωγού=70 m) και Σ14 (μέγιστο εξεταζόμενο μήκος αγωγού=150 m), αντίστοιχα.

Από τους υπολογισμούς διαπιστώθηκε ότι με την αύξηση του μήκους του αγωγού (που συνοδεύεται με αύξηση της απόστασης της θέσης διάθεσης από την ακτή L και αύξηση του βάθους διάθεσης,  $H_D$ ), παρατηρούνται τα ακόλουθα:

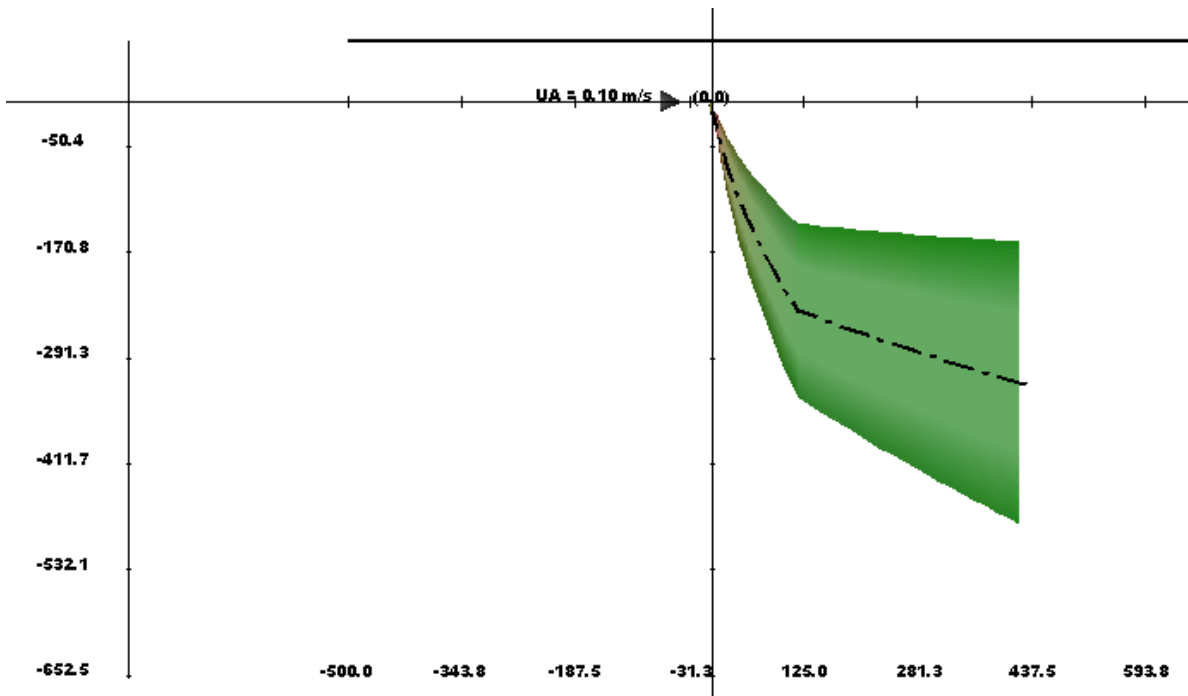
- 1) αύξηση της διαμέτρου της φλέβας με αντίστοιχη αύξηση του εμβαδού της,
- 2) αύξηση της μέσης τιμής της διάλυσης (S),
- 3) μείωση της μέσης τιμής της διαφοράς θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ),
- 4) αύξηση της παροχής της φλέβας (Q), και
- 5) αύξηση των διαστάσεων της επιφανειακής φλέβας (2BH και BV).

Πίνακας 6.2-2 Χαρακτηριστικά της φλέβας για διάφορες θέσεις διάθεσης

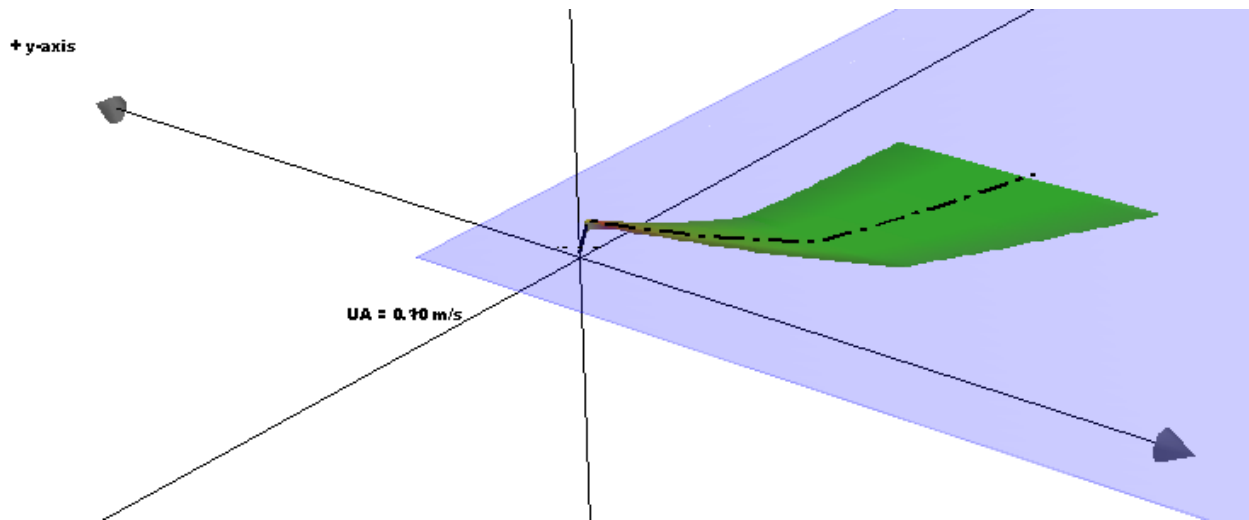
Σενάριο	L (m)	$H_D$ (m)	S (-)	$\Delta T$ (°C)	Q (m <sup>3</sup> /s)	2BH (m)	BV (m)
Σ7	70	8.5	1.70	4.71	34	3.96	1.98
Σ8	80	9.0	1.70	4.71	34	4.14	2.07
Σ9	90	10.0	2.00	4.00	40	4.64	2.32
Σ10	100	11.0	2.20	3.64	44	5.14	2.57
Σ0	110	12.0	2.40	3.33	48	5.64	2.82
Σ11	120	12.5	2.60	3.08	52	5.88	2.94
Σ12	130	13.0	2.60	3.08	52	6.12	3.06
Σ13	140	14.0	2.90	2.76	58	6.60	3.30
Σ14	150	16.0	3.30	2.42	66	7.54	3.77



(α)

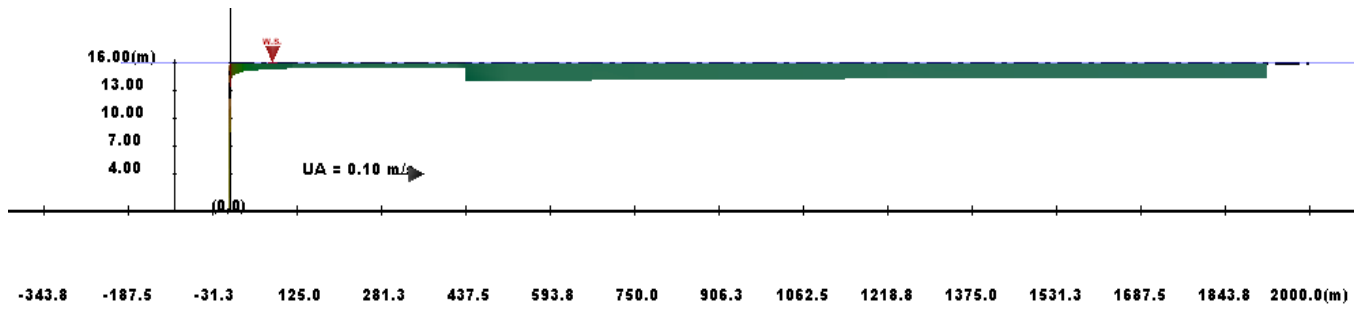


(β)

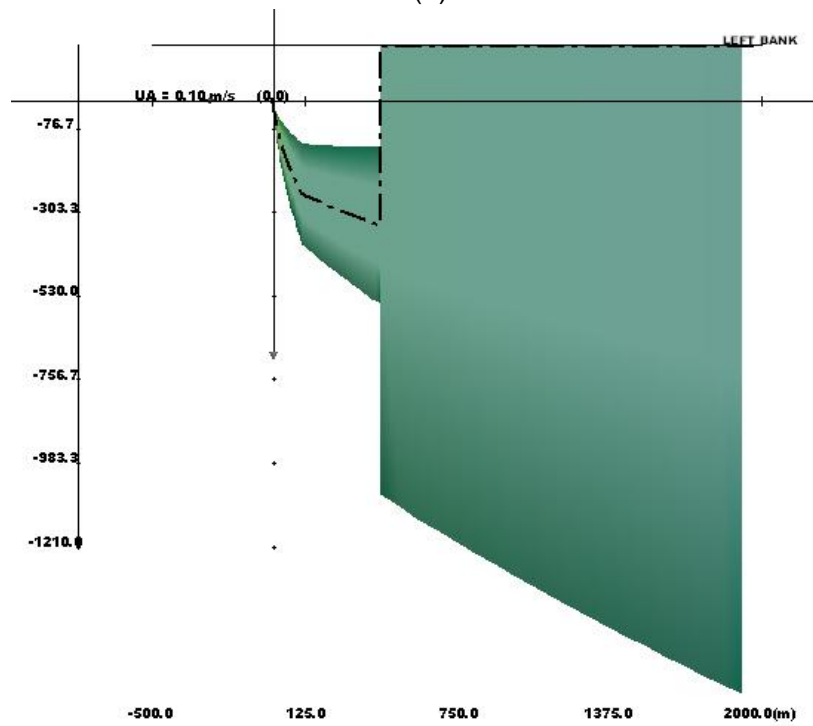


(γ)

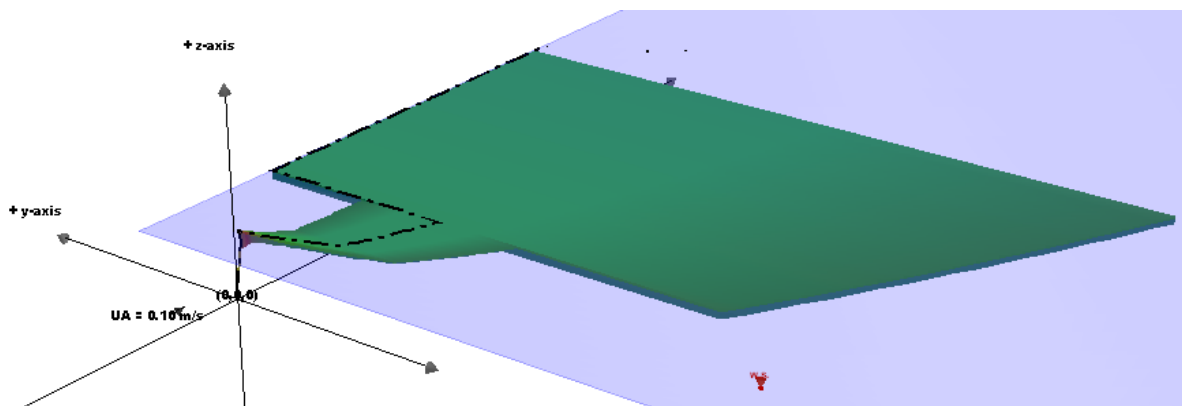
Σχήμα 6.2-8. Πορεία της φλέβας για το σενάριο Σ7  
 (α) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xz  
 (β) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xy  
 (γ) Τρισδιάστατη απεικόνιση της πορείας της φλέβας



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 6.2-9. Πορεία της φλέβας για το σενάριο Σ14  
 (α) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xz  
 (β) Πορεία της φλέβας στο επίπεδο xy  
 (γ) Τρισδιάστατη απεικόνιση της πορείας της φλέβας

**6.2.2.7. Εκτιμώμενη συμπεριφορά της φλέβας στο μακρινό πεδίο**

Στους Πίνακες 6.2-3 μέχρι 6.2-8 παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις της εξέλιξης του μισού πλάτους της φλέβας (BH), του βάθους της φλέβας (BV) και των διαφορών θερμοκρασίας στο μακρινό πεδίο για όλα τα σενάρια (Σ0 μέχρι Σ14) βάσει των προκαταρκτικών υπολογισμών του CORMIX.

Πίνακας 6.2-3. Εκτιμώμενη εξέλιξη του μισού πλάτους της φλέβας BH (m) στο μακρινό πεδίο

Απόσταση (m) / Σενάριο	250	500	750	1000	1500
Σ0	149	1190	1285	1375	1567
Σ1	366	-	-	-	-
Σ2	98	724	795	862	985
Σ3	128	-	-	-	-
Σ4	198	247	1449	1546	1703
Σ5	124	179	1185	1298	1478
Σ6	131	1032	1178	1285	1434

Πίνακας 6.2-4. Εκτιμώμενη εξέλιξη του βάθους της φλέβας BV (m) στο μακρινό πεδίο

Απόσταση (m) / Σενάριο	250	500	750	1000	1500
Σ0	0.38	1.60	1.52	1.46	1.35
Σ1	0.24	-	-	-	-
Σ2	0.46	1.28	1.21	1.16	1.09
Σ3	0.28	-	-	-	-
Σ4	0.35	0.34	1.34	1.30	1.23
Σ5	0.43	0.36	1.65	1.55	1.43
Σ6	0.41	1.60	1.52	1.44	1.36

Πίνακας 6.2-5. Εκτιμώμενες διαφορές θερμοκρασίας (°C) στο μακρινό πεδίο

Απόσταση (m) / Σενάριο	250	500	750	1000	1500
Σ0	0.86	0.84	0.82	0.80	0.76
Σ1	0.50	-	-	-	-
Σ2	1.20	1.18	1.11	1.10	0.99
Σ3	0.84	-	-	-	-
Σ4	0.85	0.84	0.82	0.80	0.76
Σ5	0.85	0.84	0.82	0.80	0.76
Σ6	0.93	0.92	0.89	0.86	0.92

Πίνακας 6.2-6. Εκτιμώμενη εξέλιξη του μισού πλάτους της φλέβας ΒΗ (m) στο μακρινό πεδίο για διάφορα μήκη διάθεσης

Απόσταση (m) / Σενάριο	L (m)	250	500	750	1000	1500
Σ7	70	158	-	-	-	-
Σ8	80	158	-	-	-	-
Σ9	90	169	-	-	-	-
Σ10	100	176	1173	1268	1357	1549
Σ0	110	183	1190	1285	1375	1567
Σ11	120	186	1203	1298	1387	1580
Σ12	130	190	1216	1310	1400	1592
Σ13	140	196	1232	1326	1416	1608
Σ14	150	207	1251	1346	1436	1631

Πίνακας 6.2-7. Εκτιμώμενη εξέλιξη του βάθους της φλέβας ΒV (m) στο μακρινό πεδίο για διάφορα μήκη διάθεσης

Απόσταση (m) / Σενάριο	L (m)	250	500	750	1000	1500
Σ7	70	0.26	-	-	-	-
Σ8	80	0.27	-	-	-	-
Σ9	90	0.31	-	-	-	-
Σ10	100	0.34	1.50	1.43	1.37	1.27
Σ0	110	0.38	1.60	1.52	1.46	1.35
Σ11	120	0.40	1.64	1.56	1.49	1.38
Σ12	130	0.42	1.68	1.60	1.53	1.42
Σ13	140	0.46	1.77	1.68	1.61	1.49
Σ14	150	0.55	1.95	1.86	1.78	1.65

Πίνακας 6.2-8. Εκτιμώμενες διαφορές θερμοκρασίας (°C) στο μακρινό πεδίο για διάφορα μήκη διάθεσης

Απόσταση (m) \ Σενάριο	L (m)	250	500	750	1000	1500
Σ7	70	1.12	-	-	-	-
Σ8	80	0.96	-	-	-	-
Σ9	90	0.99	-	-	-	-
Σ10	100	0.93	0.91	0.88	0.86	0.81
Σ0	110	0.86	0.84	0.82	0.80	0.76
Σ11	120	0.83	0.81	0.79	0.77	0.73
Σ12	130	0.80	0.78	0.76	0.75	0.71
Σ13	140	0.75	0.74	0.72	0.70	0.67
Σ14	150	0.66	0.65	0.64	0.62	0.59

Από τα στοιχεία των Πινάκων 6.2-3 μέχρι 6.2-8 διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- 1) Για όλα τα σενάρια οι τιμές του μισού πλάτους της φλέβας (BH) μετά τα 400 m υπερβαίνουν τα 150 m, με αποτέλεσμα η επιφανειακή φλέβα να προσκολλάται στο αριστερό (κατά τη φορά της κίνησης του παράκτιου ρεύματος) στερεό όριο, δηλ. την ακτή της παράκτιας περιοχής του Μαντουδίου.
- 2) Για όλα τα σενάρια οι τιμές του βάθους της φλέβας (BV) σε απόσταση περίπου 750 - 1000 m από τη θέση διάθεσης, που βρίσκεται κατ' εκτίμηση η περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού, είναι ίσες ή μικρότερες από περίπου 2 m. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι σε κανονικές συνθήκες η φλέβα των θερμών νερών αναμένεται συνήθως να περιορίζεται στο επιφανειακό στρώμα και το αντλούμενο θαλασσινό νερό να μην υφίσταται την επίδραση των θερμών νερών.
- 3) Οι τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας στη θέση απόληψης μειώνονται όσο αυξάνεται η απόσταση της θέσης διάθεσης από την ακτή, δηλ. όσο αυξάνεται το μήκος του αγωγού διάθεσης. Οι τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας στην επιφάνεια της περιοχής απόληψης του θαλασσινού νερού, είναι ίσες ή μικρότερες από περίπου 1 °C για όλα τα σενάρια.
- 4) Για το βασικό σενάριο Σ0 (μήκος αγωγού=110 m) στην περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού (α) το βάθος της φλέβας είναι της τάξης του 1.5 m, (β) το πλάτος της φλέβας είναι ίσο με περίπου 1300 m, και (γ) η διαφορά θερμοκρασίας στην επιφάνεια είναι της τάξης του 0.8 °C. Οι αντίστοιχες τιμές για το σενάριο Σ14 (μήκος αγωγού=150 m) είναι 1.8-1.9 m, 1400 m και 0.8 °C. Και για τα δυο σενάρια σε βάθος 4-8 m που βρίσκεται η διάταξη απόληψης του θαλασσινού νερού η διαφορά θερμοκρασίας είναι πρακτικά μηδενική.

#### 6.2.2.8. Συμπεράσματα

Από τους υπολογισμούς στο κοντινό πεδίο διαπιστώθηκε ότι οι τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας στην επιφάνεια μειώνονται με (α) την αύξηση της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος, (β) τη μείωση της κατακόρυφης γωνίας διάθεσης, (γ) την ελαχιστοποίηση της οριζόντιας γωνίας που σχηματίζει η διεύθυνση διάθεσης της φλέβας με αυτή του παράκτιου ρεύματος, και (δ) την αύξηση της απόστασης του στομίου διάθεσης από την ακτή, ενώ δεν μεταβάλλονται εξαιτίας της στρωμάτωσης.

Από τις προσεγγιστικές εκτιμήσεις για το μακρινό πεδίο με το CORMIX διαπιστώθηκαν τα ακόλουθα:

- 1) Για όλα τα σενάρια:
  - ✓ παρατηρείται προσκόλληση της φλέβας στην ακτή μετά τα πρώτα 400 m της πορείας της,
  - ✓ η διαφορά θερμοκρασίας στην επιφάνεια της περιοχής απόληψης του θαλασσινού νερού, είναι μικρότερη από 1.1 °C, και
  - ✓ το βάθος της φλέβας στην περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού, είναι μικρότερο από 1.9 m. Έτσι, σε βάθος 4-8 m (που βρίσκεται η διάταξη απόληψης του θαλασσινού νερού) η διαφορά θερμοκρασίας είναι πρακτικά μηδενική, οπότε το αντλούμενο θαλασσινό νερό αναμένεται να μην υφίσταται την επίδραση των θερμών νερών.



- 2) Για το βασικό σενάριο απλού στομίου με μήκος αγωγού=110 m (Σ0) στην περιοχή απόληξης του θαλασσινού νερού τα εκτιμώμενα βασικά μεγέθη της φλέβας είναι τα ακόλουθα: (α) βάθος φλέβας = 1.5 m, (β) πλάτος φλέβας = 1300 m και (γ) διαφορά θερμοκρασίας στην επιφάνεια = 0.8 °C. Οι αντίστοιχες εκτιμώμενες τιμές για μήκος αγωγού ίσο με 150 m (Σ14) είναι 1.8-1.9 m, 1400 m και 0.6 °C.

Σημειώνεται, ότι οι εκτιμήσεις για το μακρινό πεδίο με το μοντέλο CORMIX είναι εντελώς προσεγγιστικές και πρέπει πάντα να ελέγχονται με αναλυτικούς υπολογισμούς κατάλληλων τρισδιάστατων μαθηματικών μοντέλων, όπως στην παρούσα διπλωματική εργασία μέσω του μοντέλου FLOW-3DL.

### 6.3. Σενάρια και παραδοχές υπολογισμών μακρινού πεδίου

#### 6.3.1. Σενάρια υπολογισμών

Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί με το μοντέλο FLOW-3DL για 6 σενάρια. Τα χαρακτηριστικά όλων των σεναρίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3-1.

Πίνακας 6.3-1. Χαρακτηριστικά των σεναρίων υπολογισμών

Σενάριο	L, H <sub>D</sub> (m,m)	Διεύθυνση Ανέμου	ΔT στην επιφάνεια (μέση τιμή) (°C)
Σ0	110, 12	NA	3.33
Σ12	130, 13	NA	3.08
Σ14	150, 16	NA	2.42
Σ0-1	110, 12	ΒΔ	3.33
Σ12-1	130, 13	ΒΔ	3.08
Σ14-1	150, 16	ΒΔ	2.42

#### 6.3.2. Παραδοχές υπολογισμών

Στους υπολογισμούς θεωρήθηκαν τα ακόλουθα:

- 1) Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της φλέβας των θερμών νερών και του υδάτινου αποδέκτη (θαλασσινό νερό) θεωρείται σε όλα τα σενάρια υπολογισμών ίση με  $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$ .
- 2) Η παροχή των θερμών νερών ( $Q_0$ ) είναι ίση με  $72000 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- 3) Στα 3 σενάρια υπολογισμών «δυσμενούς ανέμου» Σ0, Σ12 και Σ14, ο άνεμος είναι NA και οδηγεί τη φλέβα των θερμών νερών προς την περιοχή απόληξης του θαλασσινού νερού δημιουργώντας παράκτιο ρεύμα ταχύτητας της τάξης των 2 μέχρι 10 cm/s. Στα υπόλοιπα σενάρια Σ0-1, Σ12-1 και Σ14-1, ο άνεμος είναι ΒΔ και οδηγεί τη φλέβα των θερμών νερών προς τις κοντινές ακτές.
- 4) Η απόληξη του θαλασσινού νερού γίνεται σε επαφή με τον υφιστάμενο μόλο (πρόβολο) με ορθογωνικό αγωγό τύπου «Π». Το πλάτος του ορθογωνικού αγωγού είναι ίσο με 40 m και το ύψος του ίσο με 4.0 m. Η στάθμη του πυθμένα βρίσκεται σε βάθος 8.0 m και της οροφής του σε βάθος 4.0 m. Οι μεγάλες διαστάσεις του αγωγού εξασφαλίζουν τη σχετικά

μικρή ταχύτητα εισόδου του θαλασσινού νερού για περιβαλλοντικούς - οικολογικούς λόγους. Σε όλα τα σενάρια ( $Q_0 = 72000 \text{ m}^3/\text{h} = 20.00 \text{ m}^3/\text{s}$ ) η ταχύτητα εισόδου υπολογίζεται ίση με  $0.125 \text{ m/s}$  (βλ. Κεφάλαιο 6.1.2).

Με βάση τους υπολογισμούς στο κοντινό πεδίο επιλέχθηκαν τα ακόλουθα:

- 1) Η κατακόρυφη γωνία  $\theta$  μεταξύ του στομίου εκροής και του οριζόντιου επιπέδου είναι ίση με  $\theta = 30^\circ$ . Η γωνία αυτή επιλέχθηκε για τη μείωση της πιθανότητας επίδρασης της φλέβας των θερμών νερών στον πυθμένα και την αποφυγή προσκόλλησής της σε αυτόν, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που η διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T$  μεταξύ της φλέβας των θερμών νερών και του υδάτινου αποδέκτη λαμβάνει μικρές τιμές.
- 2) Στο βασικό σενάριο απλού στομίου Σ0 η τοποθέτηση του αγωγού διάθεσης γίνεται σε απόσταση  $L = 110 \text{ m}$  από την ακτή και το βάθος της θάλασσας στη θέση διάθεσης είναι ίσο με  $H_D = 12.0 \text{ m}$ . Παράλληλα, εξετάστηκαν 2 εναλλακτικές θέσεις διάθεσης στα σενάρια Σ12 και Σ14 σε αποστάσεις  $130 \text{ m}$  και  $150 \text{ m}$ , αντίστοιχα.
- 3) Ο αποδέκτης θεωρείται ως ομογενής καθόσον η δημιουργούμενη στρωμάτωση δεν επηρεάζει την κίνηση της φλέβας των θερμών νερών.

Στους υπολογισμούς με το μοντέλο FLOW-3DL έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές χάριν ασφάλειας, δηλ. για λόγους υπολογισμού συντηρητικής τιμής θερμοκρασίας των νερών στην περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού:

- 1) Αγνοούνται οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον.
- 2) Η τιμή του συντελεστή κατακόρυφης διάχυσης ( $D_v$ ) της θερμότητας επιλέχθηκε ίση με  $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ . Η τιμή αυτή επιτρέπει τη διάχυση της θερμότητας στην περιοχή μελέτης από τα επιφανειακά στρώματα προς τα χαμηλότερα βάθη της περιοχής απόληψης του θαλασσινού νερού και οδηγεί στον υπολογισμό συντηρητικών τιμών θερμοκρασιών στην περιοχή απόληψης.

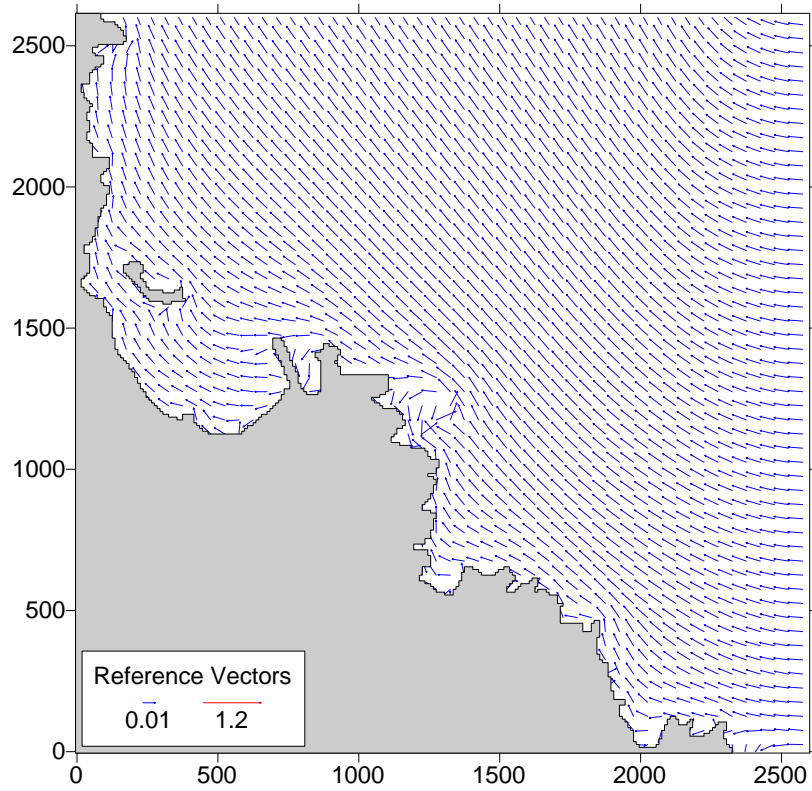
#### **6.4. Αναλυτικοί υπολογισμοί πεδίων ροής (στο μακρινό πεδίο)**

##### **6.4.1. Αποτελέσματα**

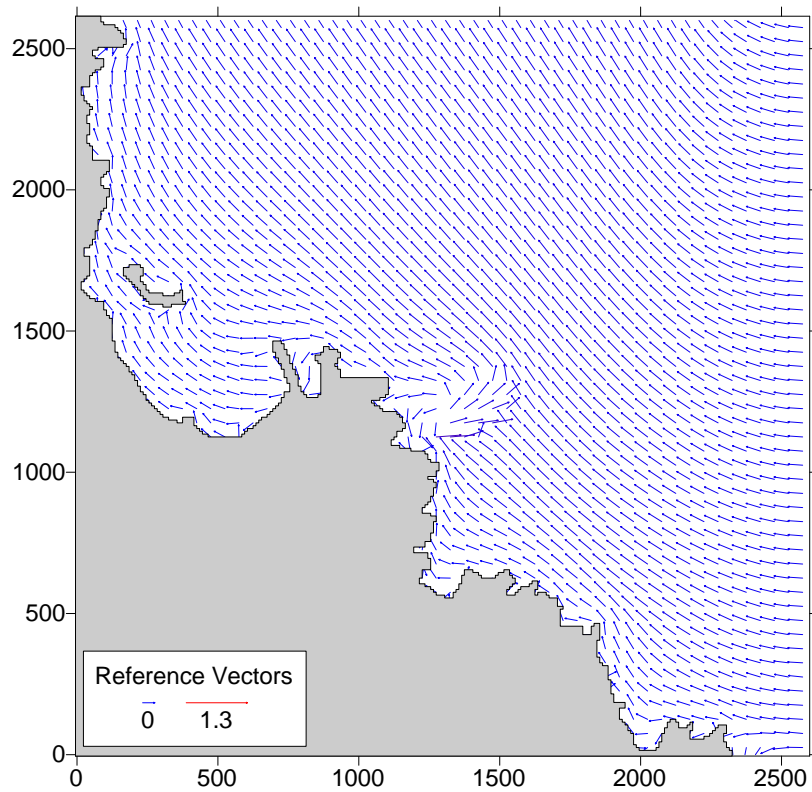
Στα Σχήματα 6.4-1 μέχρι 6.4-6 παρουσιάζονται τα μόνιμα πεδία ροής του στρώματος 1 για τα σενάρια Σ0, Σ12, Σ14, Σ0-1, Σ12-1 και Σ14-1, αντίστοιχα.

Στα Σχήματα 6.4-7 μέχρι 6.4-12 παρουσιάζονται τα μόνιμα πεδία ροής του στρώματος 3 για τα σενάρια Σ0, Σ12, Σ14, Σ0-1, Σ12-1 και Σ14-1, αντίστοιχα.

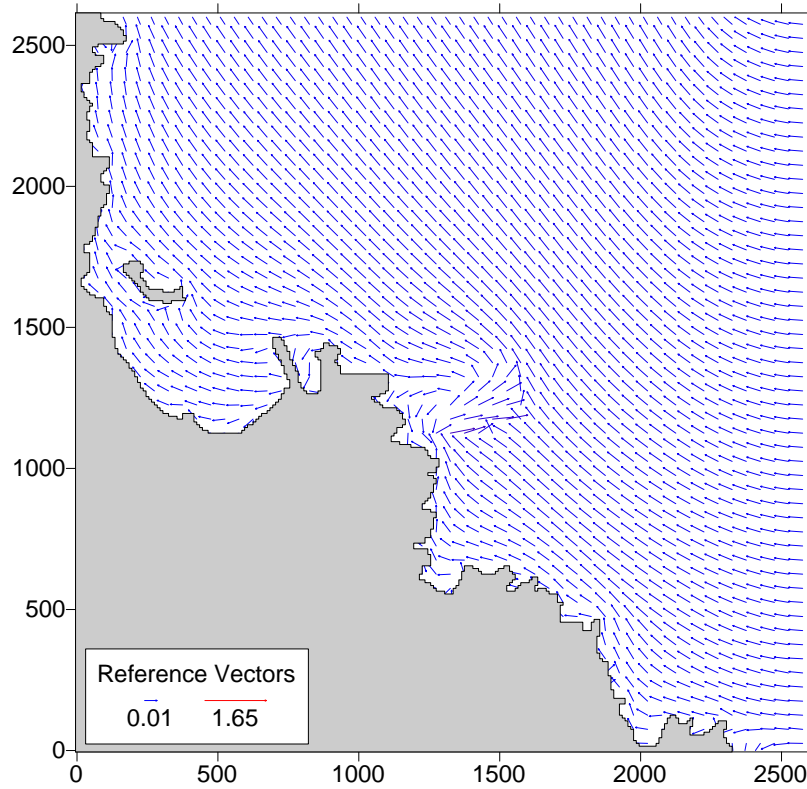
Στα Σχήματα 6.4-13 και 6.4-14 παρουσιάζονται τα μόνιμα πεδία ροής στην περιοχή διάθεσης (στρώμα 1) και στην περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού (στρώμα 3), αντίστοιχα, για τα σενάρια Σ0, Σ12 και Σ14.



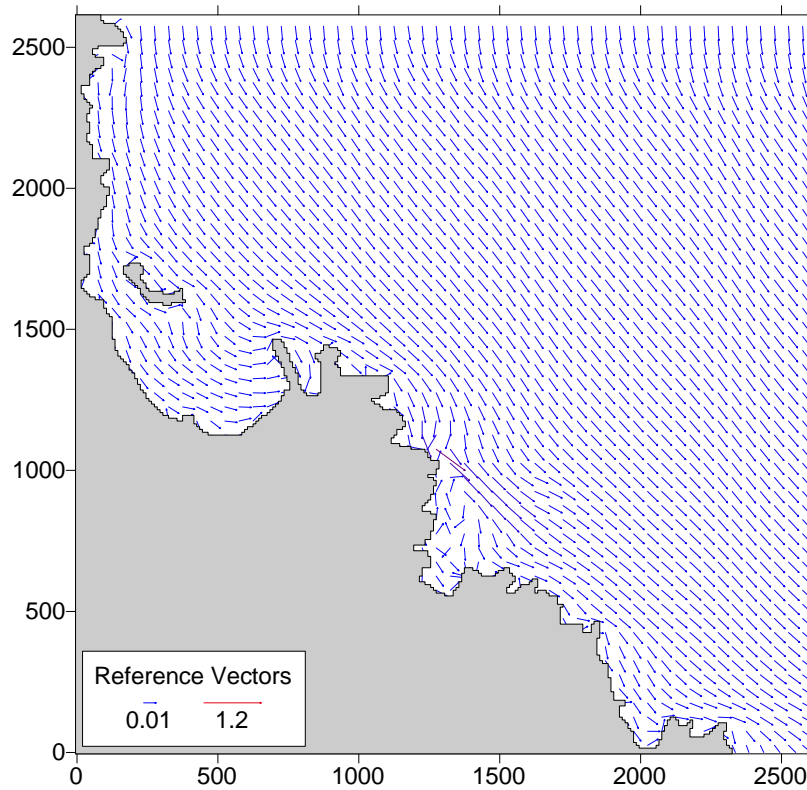
Σχήμα 6.4-1. Ταχύτητες ροής 1<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ0



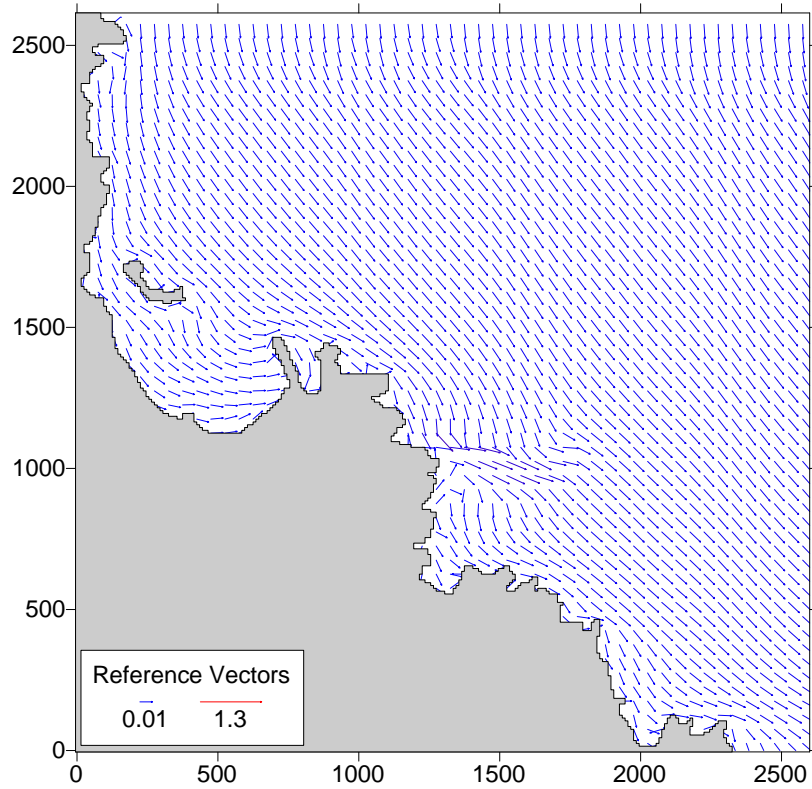
Σχήμα 6.4-2. Ταχύτητες ροής 1<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ12



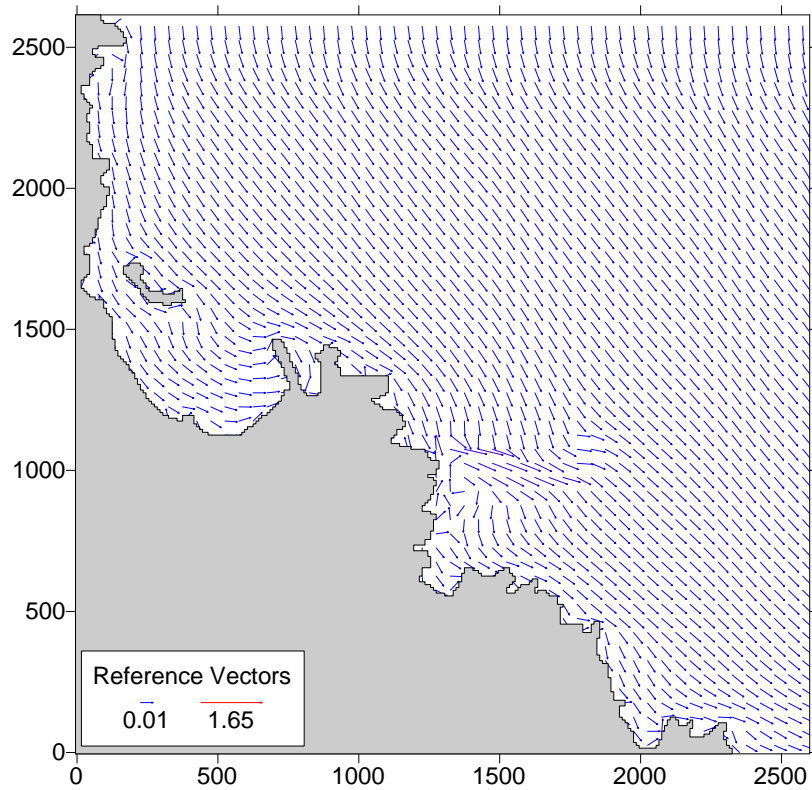
Σχήμα 6.4-3. Ταχύτητες ροής 1<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ14



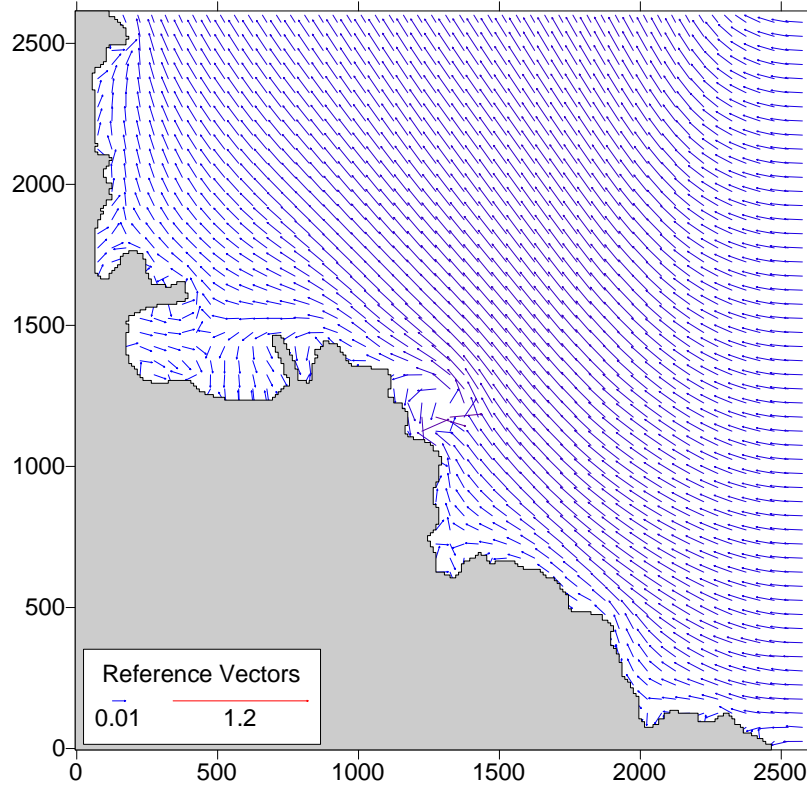
Σχήμα 6.4-4. Ταχύτητες ροής 1<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ0-1



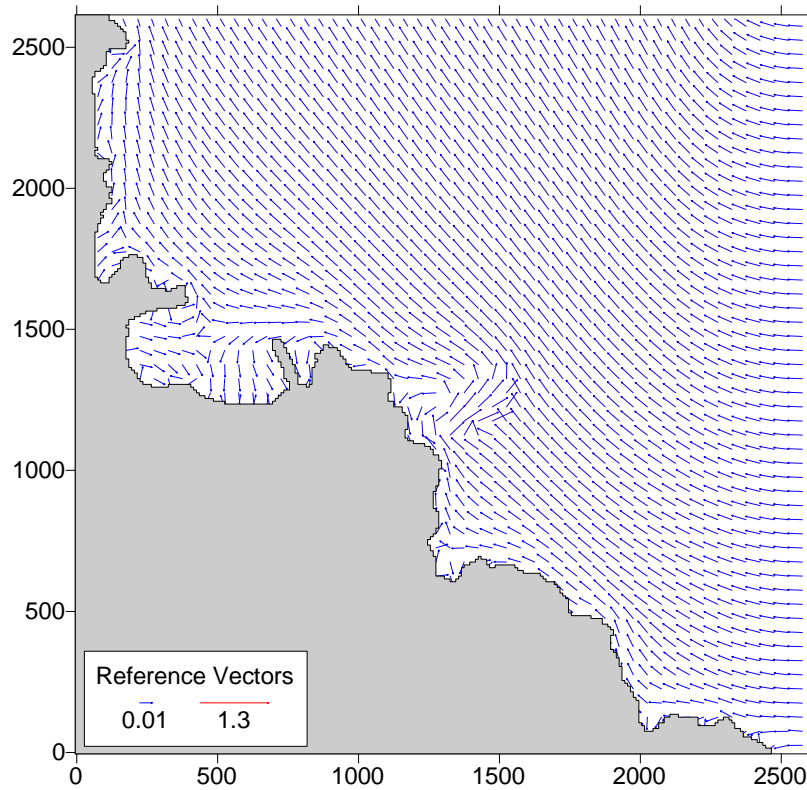
Σχήμα 6.4-5. Ταχύτητες ροής 1<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ12-1



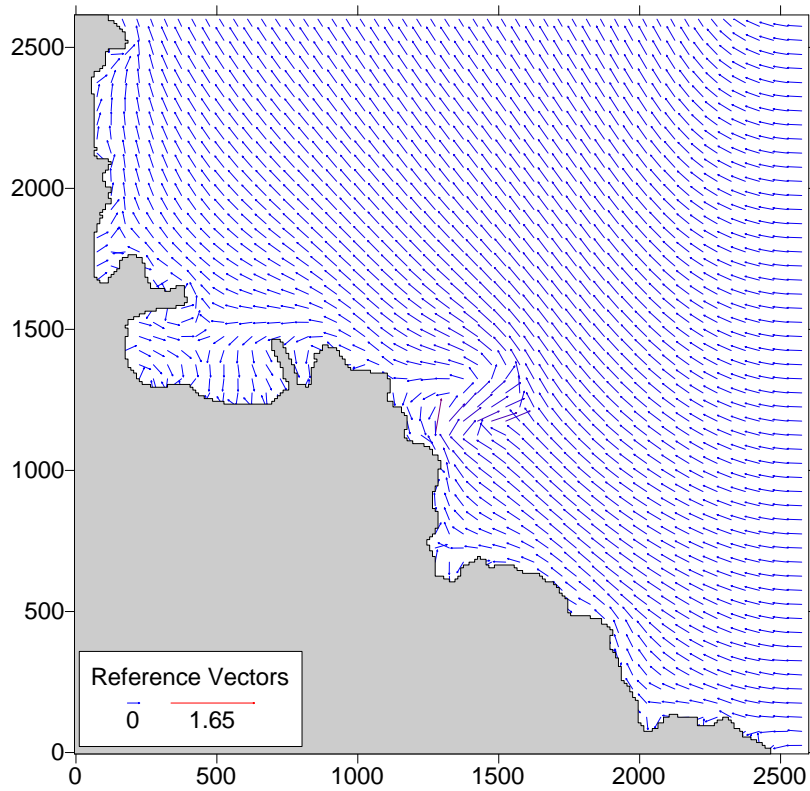
Σχήμα 6.4-6. Ταχύτητες ροής 1<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ14-1



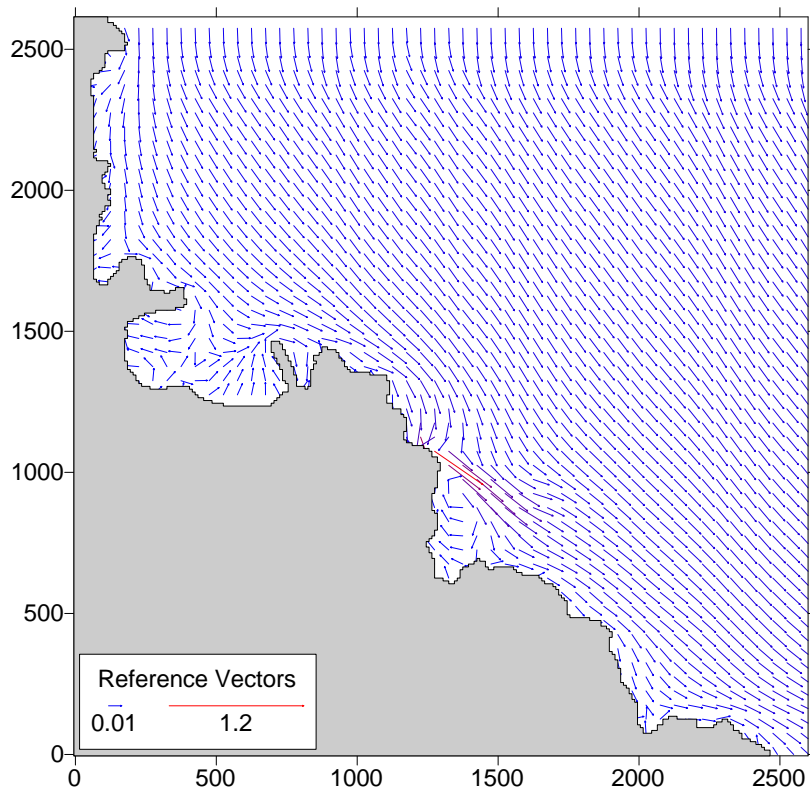
Σχήμα 6.4-7 Ταχύτητες ροής 3<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ0



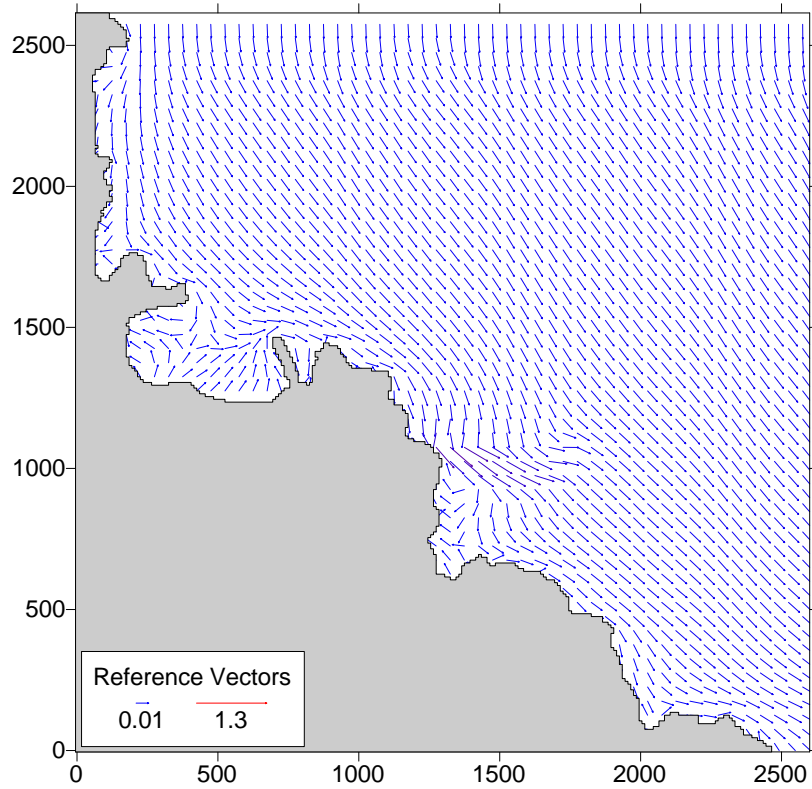
Σχήμα 6.4-8. Ταχύτητες ροής 3<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ12



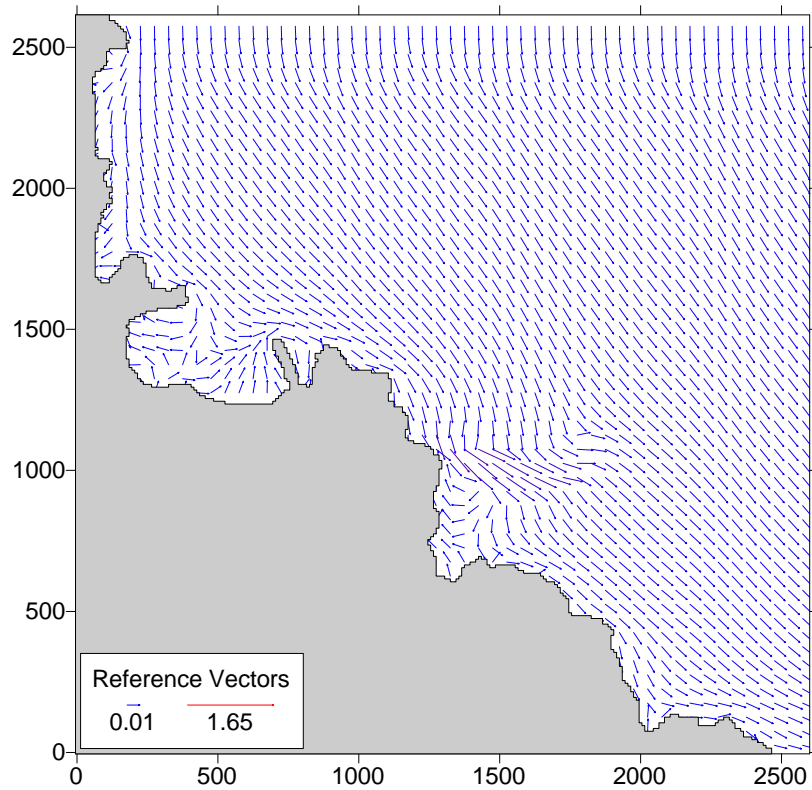
Σχήμα 6.4-9. Ταχύτητες ροής 3<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ14



Σχήμα 6.4-10. Ταχύτητες ροής 3<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ0-1

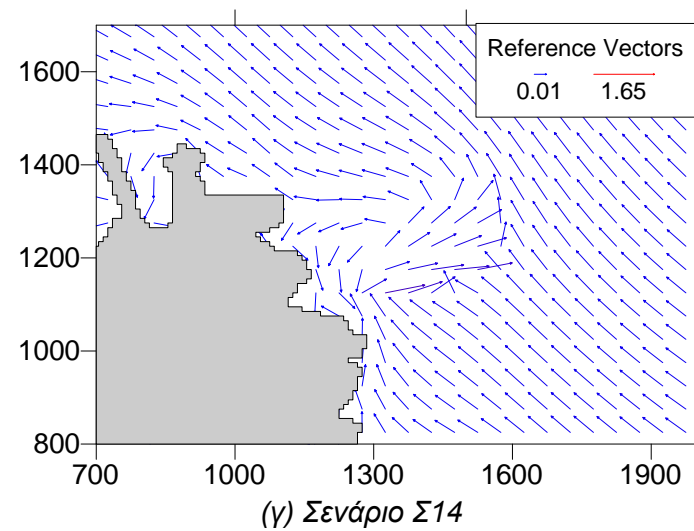
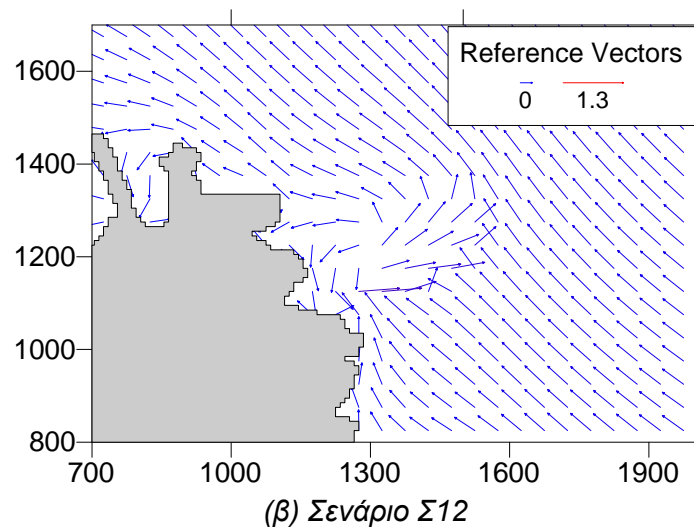
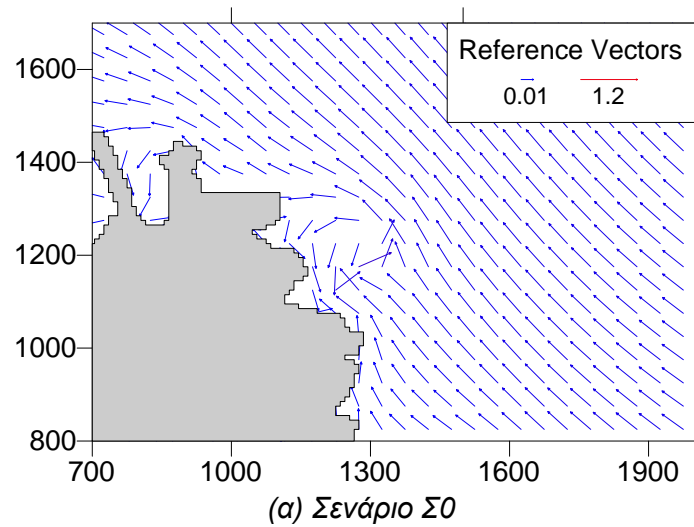


Σχήμα 6.4-11. Ταχύτητες ροής 3<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ12-1

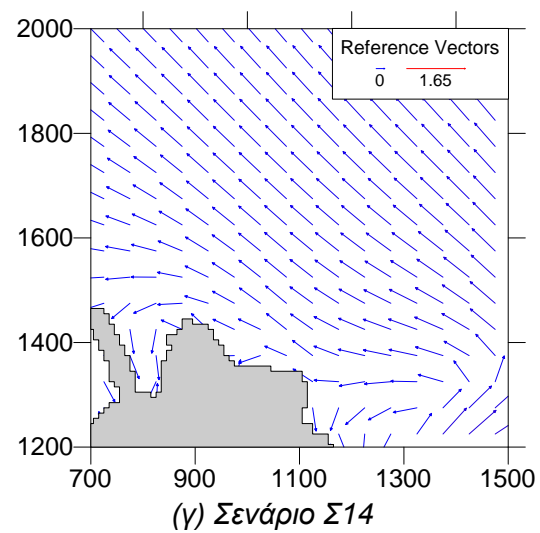
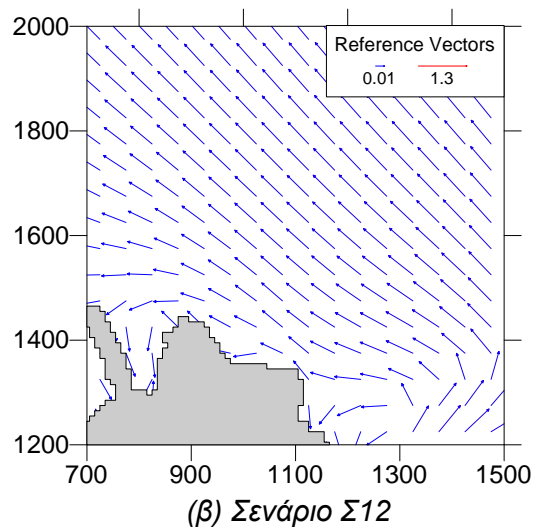
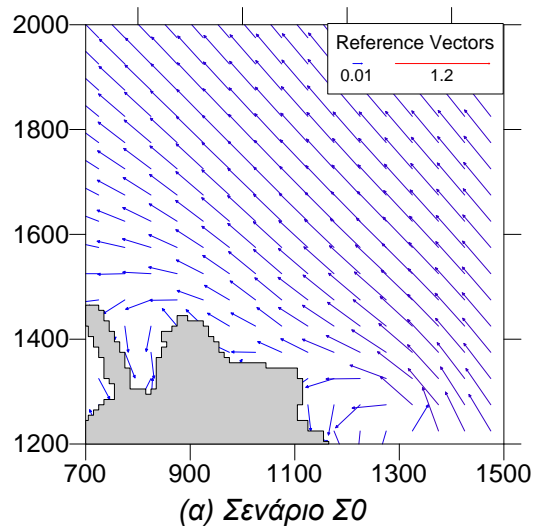


Σχήμα 6.4-12. Ταχύτητες ροής 3<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ14-1





Σχήμα 6.4-13. Ταχύτητες ροής 1<sup>ου</sup> στρώματος στην περιοχή διάθεσης των θερμών νερών για τα σενάρια Σ0, Σ12 και Σ14



Σχήμα 6.4-14. Ταχύτητες ροής 3<sup>ου</sup> στρώματος στην περιοχή απόληξης του θαλασσινού νερού για τα σενάρια Σ0, Σ12 και Σ14

**6.4.2. Σχολιασμός αποτελεσμάτων**

Από τα Σχήματα 6.4-1 μέχρι 6.4-14 και τους λοιπούς υπολογισμούς που πραγματοποιηθήκαν διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- 1) Στην περίπτωση του ΝΑ ανέμου το επιφανειακό ρεύμα κινείται προς τα ΒΔ παράλληλα με την ακτή. Ένα τμήμα του εισέρχεται στον όρμο της περιοχής απόληψης του θαλασσινού νερού και το υπόλοιπο συνεχίζει την κίνησή του κατά μήκος της ακτής προς τα ΒΔ. Στην περίπτωση του ΒΔ ανέμου η κίνηση του επιφανειακού ρεύματος γίνεται προς Ν. Οι ταχύτητες των επιφανειακών παράκτιων ρευμάτων είναι της τάξης των 2-10 cm/s.
- 2) Τα υπολογιζόμενα πεδία χαρακτηρίζονται εν γένει από ομοιομορφία κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.
- 3) Στην περιοχή της θέσης διάθεσης των θερμών νερών η αλληλεπίδραση της φλέβας των θερμών νερών με το παράκτιο ρεύμα δημιουργεί μια περιοχή ανακυκλοφορίας, η έκταση της οποίας εξαρτάται από τη θέση διάθεσης, που επηρεάζει την παροχή συμπάραισης και την τελική παροχή των θερμών νερών. Η εξάρτηση αυτή φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 6.3-13. Το δημιουργούμενο πεδίο ροής αναμένεται να επηρεάσει την κατανομή των θερμών νερών.
- 4) Στην περιοχή της θέσης απόληψης του θαλασσινού νερού, η μορφή του πεδίου ροής δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη θέση διάθεσης των θερμών νερών. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 6.3-14.

**6.5. Αναλυτικοί υπολογισμοί θερμοκρασίας νερού (στο μακρινό πεδίο)****6.5.1. Αποτελέσματα**

Στα Σχήματα 6.5-1 μέχρι 6.5-6 παρουσιάζονται τα μόνιμα πεδία θερμοκρασίας του νερού του στρώματος 1 για τα σενάρια Σ0, Σ12, Σ14, Σ0-1, Σ12-1 και Σ14-1, αντίστοιχα. Ως μόνιμα πεδία θερμοκρασίας θεωρούνται τα πεδία μετά από χρόνο 24 h. Υπενθυμίζεται ότι οι «δυσμενείς άνεμοι» δεν πνέουν στην περιοχή μελέτης για συνεχές διάστημα μεγαλύτερο από 18 h (βλ. Κεφάλαιο 2.4.2).

Στα Σχήματα 6.5-7 μέχρι 6.5-12 παρουσιάζονται τα μόνιμα πεδία θερμοκρασίας του νερού του στρώματος 3 για τα σενάρια Σ0, Σ12, Σ14, Σ0-1, Σ12-1 και Σ14-1, αντίστοιχα.

Στα Σχήματα 6.5-13 μέχρι 6.5-18 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της θερμοκρασίας νερού του στρώματος 1 για τα σενάρια Σ0, Σ12, Σ14, Σ0-1, Σ12-1 και Σ14-1, αντίστοιχα.

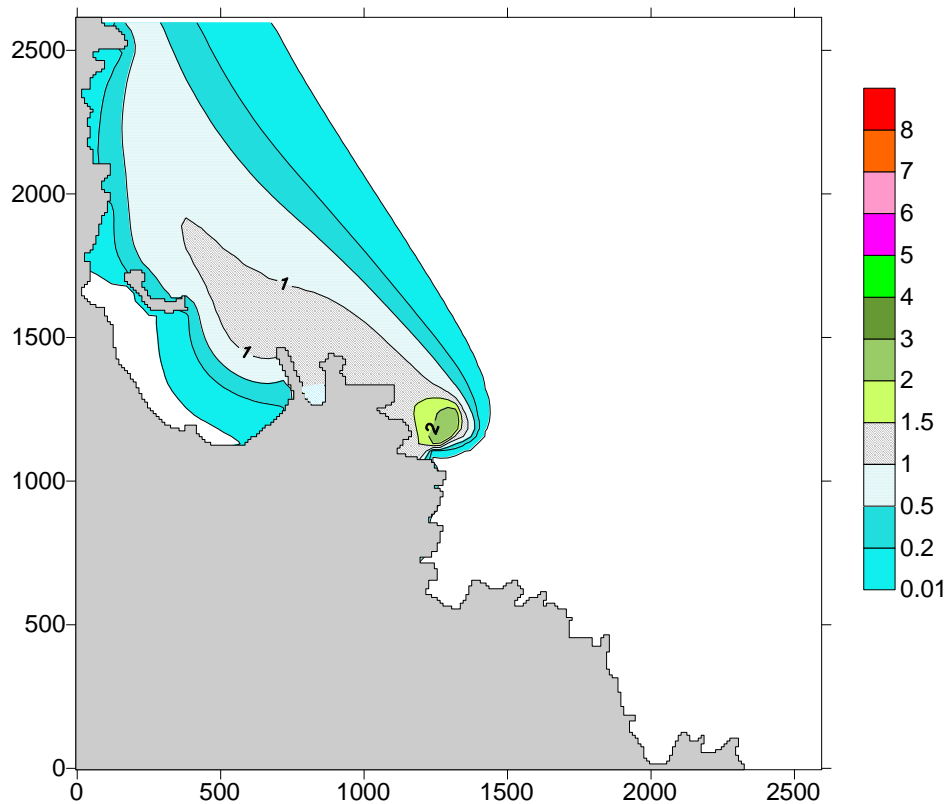
Στο Σχήμα 6.5-19 φαίνεται η επίδραση της θέσης διάθεσης των θερμών νερών στο μόνιμο πεδίο θερμοκρασιών νερού του στρώματος 1 στην περιοχή διάθεσης των θερμών νερών.

Σημειώνεται ότι σε όλα τα σχήματα του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζεται η κατανομή της διαφοράς θερμοκρασίας στην περιοχή μελέτης, που προκύπτει λόγω της διάθεσης των θερμών νερών, και όχι η απόλυτη θερμοκρασία.

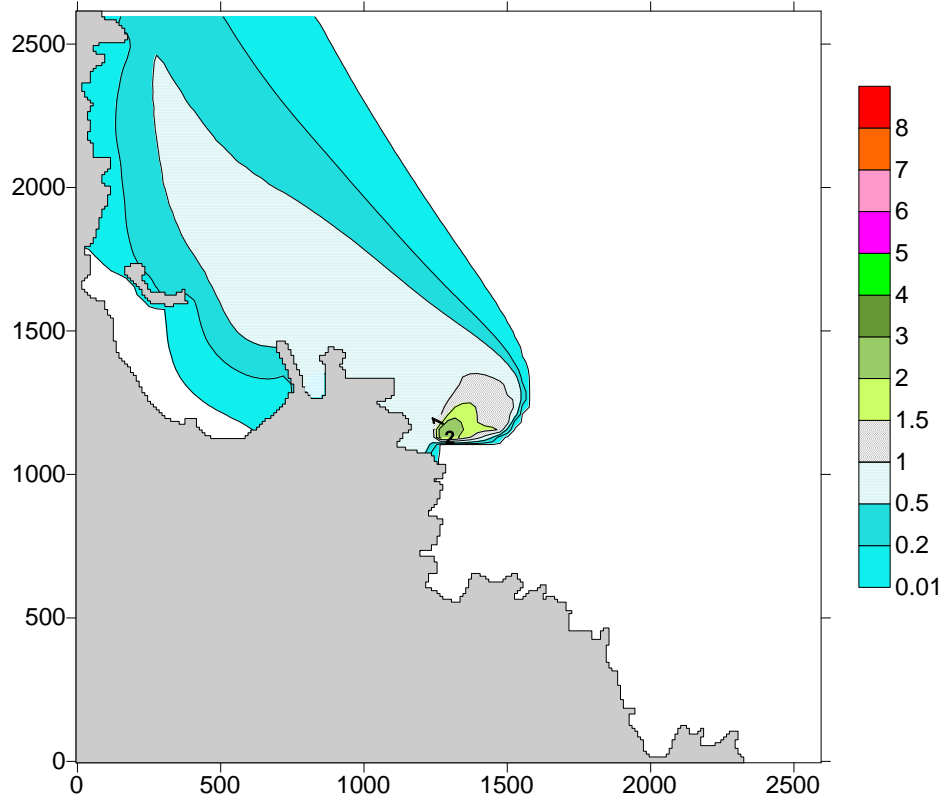
Στον Πίνακα 6.5-1 παρουσιάζονται οι διαφορές θερμοκρασίας στη θέση απόληξης του θαλασσινού νερού, όπως αυτές υπολογίστηκαν με το μοντέλο FLOW-3DL, καθώς και οι εκτιμήσεις του μοντέλου CORMIX σε απόσταση 750-1000 m από τη θέση διάθεσης (βλ. Κεφάλαιο 6.2.2.7).

Πίνακας 6.5-1. Διαφορές θερμοκρασίας (°C) στη θέση απόληξης του θαλασσινού νερού

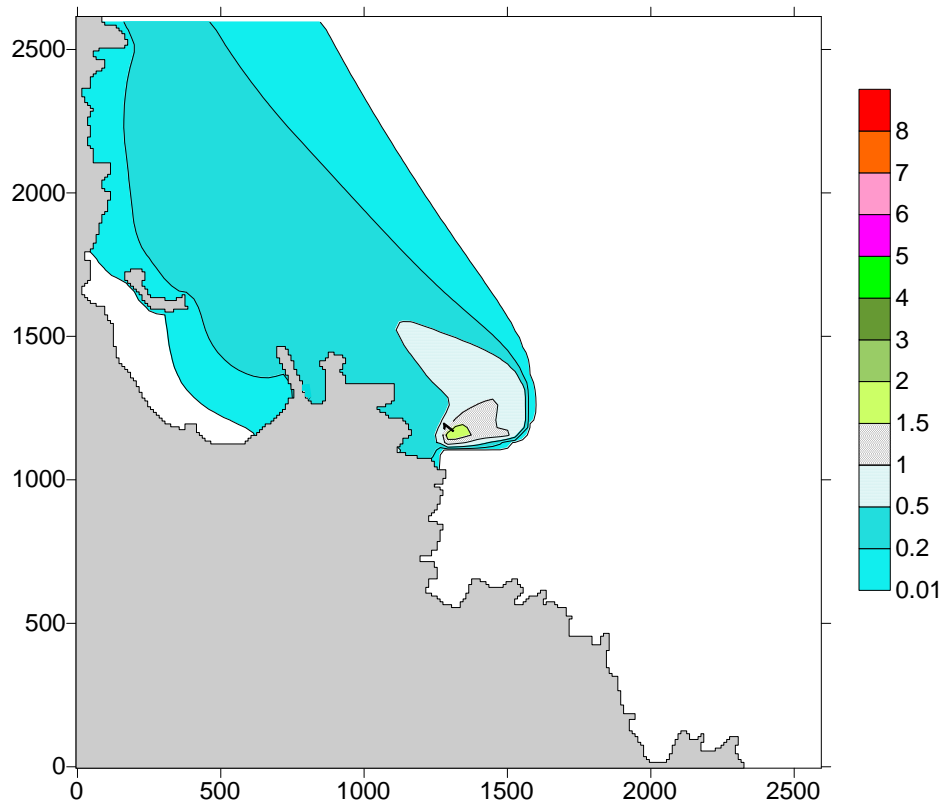
Σενάριο	Μήκος διάθεσης (m)	$\Delta T$ (°C) βάσει FLOW-3DL	$\Delta T$ (°C) βάσει CORMIX
<b>Σ0</b>	110	1.0-1.5	0.80-0.82
<b>Σ12</b>	130	0.5-1.0	0.75-0.76
<b>Σ14</b>	150	0.2-0.5	0.62-0.64



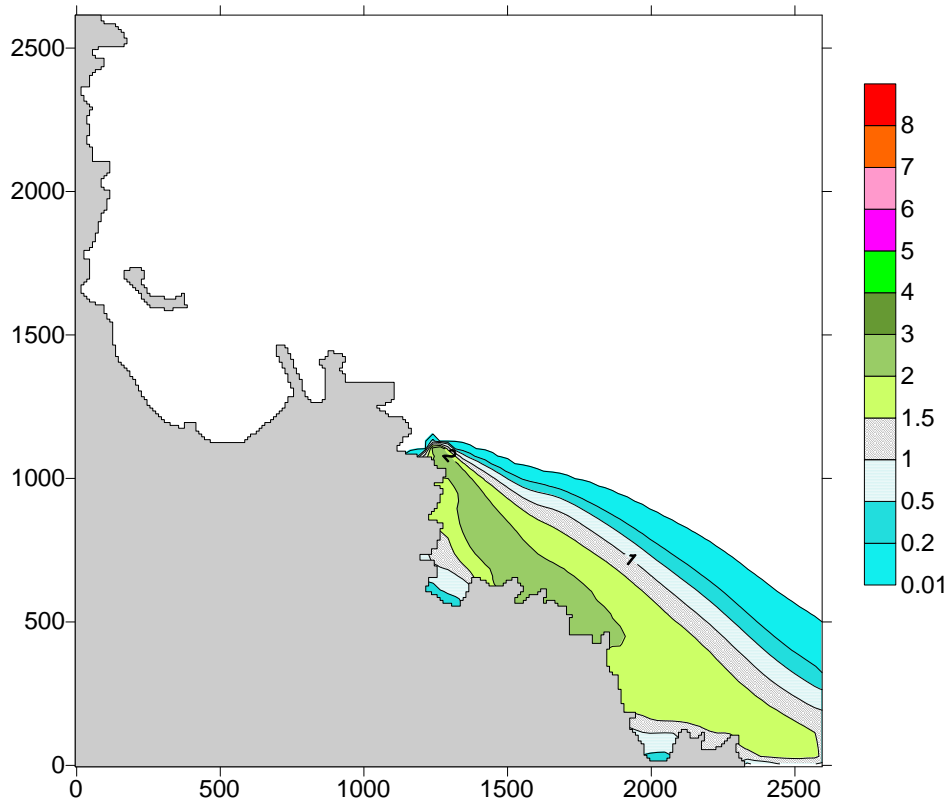
Σχήμα 6.5-1. Διαφορές θερμοκρασίας νερού 1<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ0



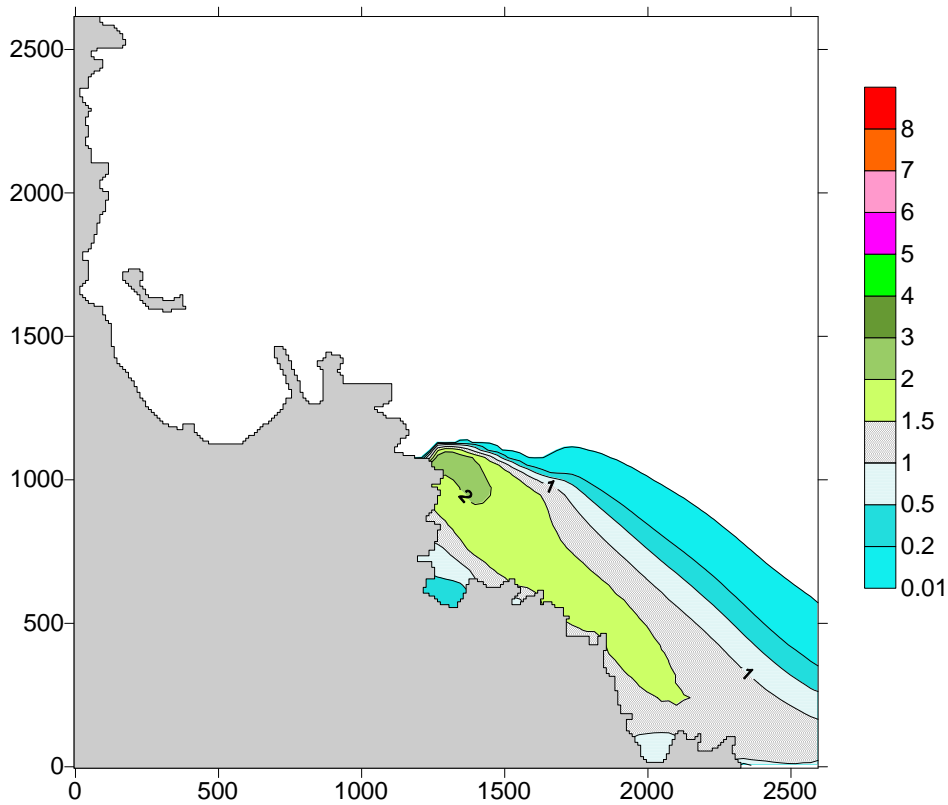
Σχήμα 6.5-2. Διαφορές θερμοκρασίας νερού 1<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ12



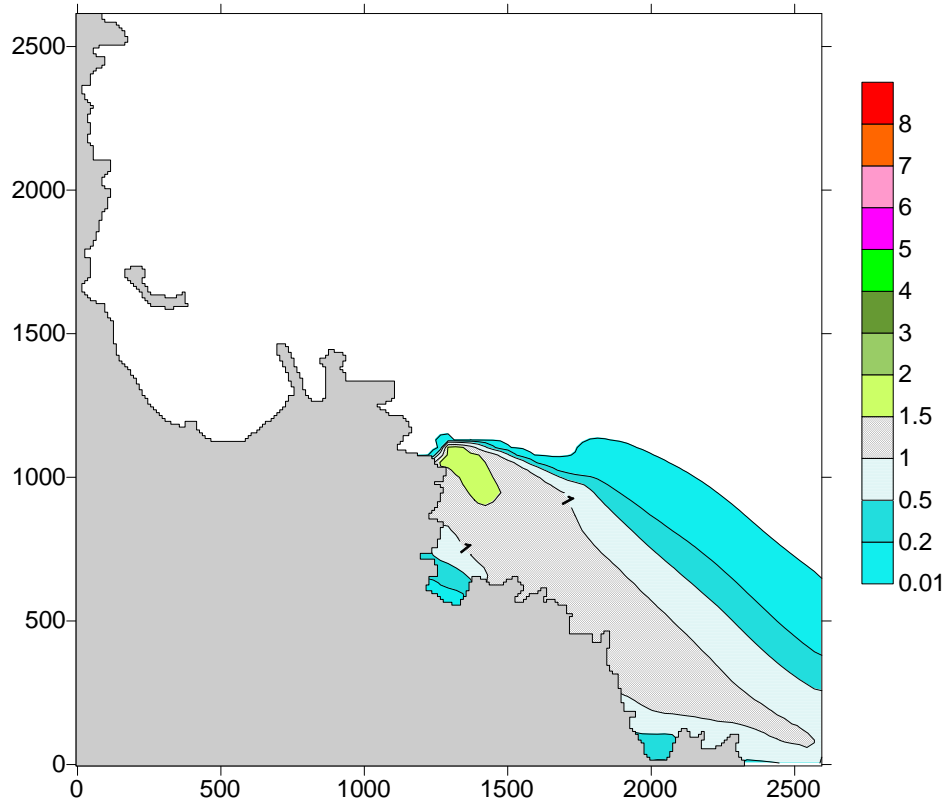
Σχήμα 6.5-3. Διαφορές θερμοκρασίας νερού 1<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ14



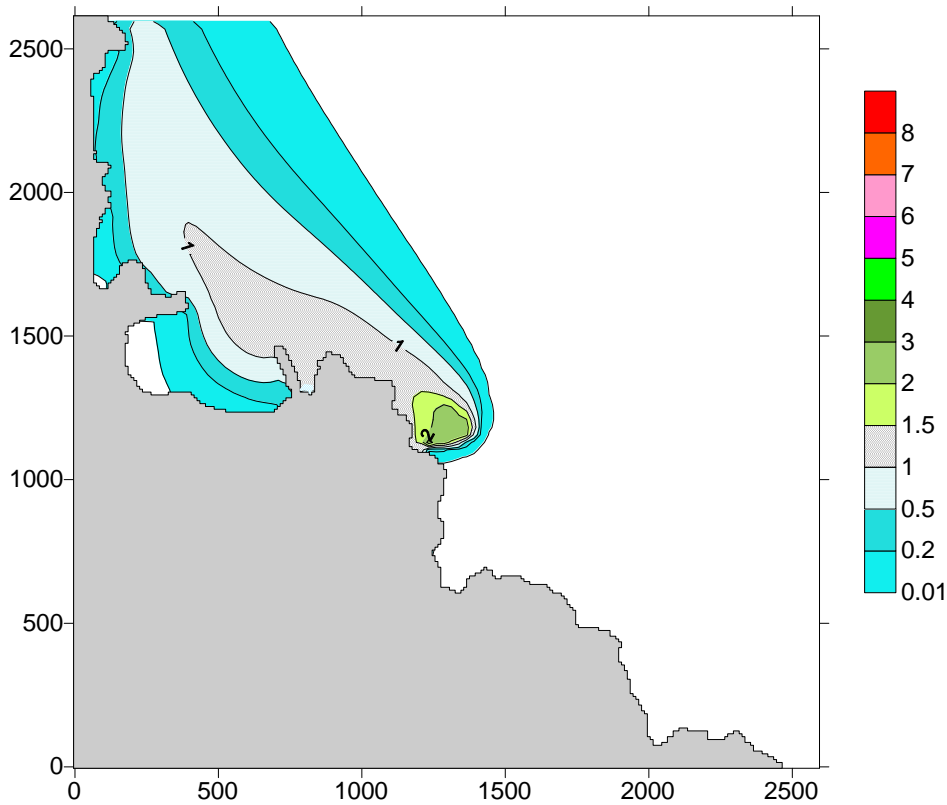
Σχήμα 6.5-4. Διαφορές θερμοκρασίας νερού 1<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ0-1



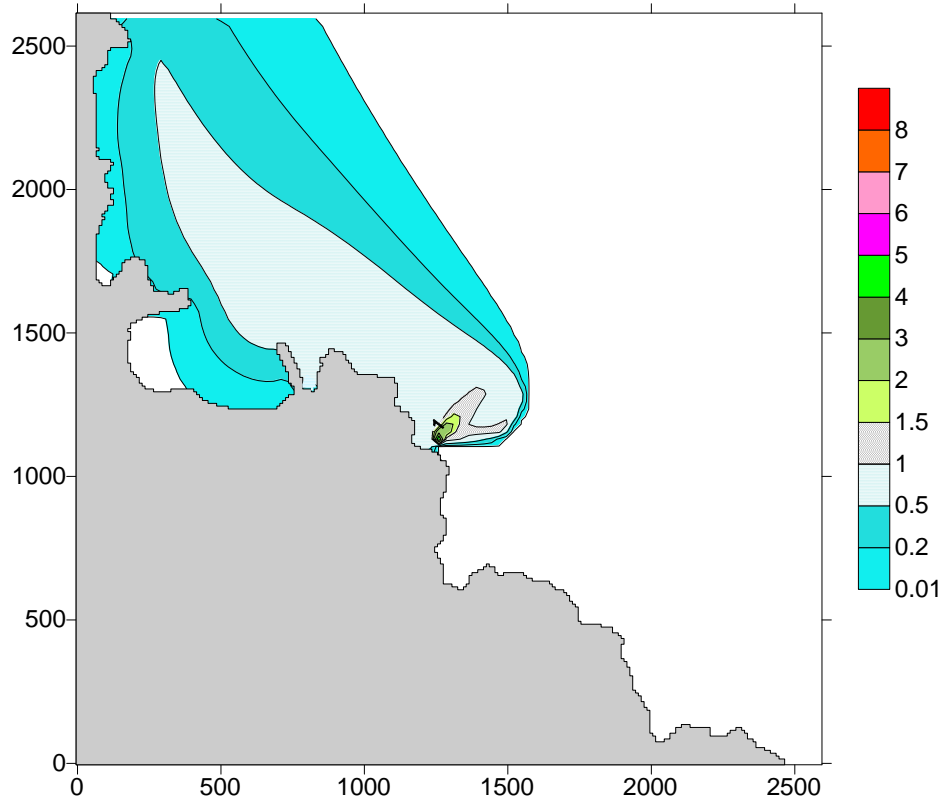
Σχήμα 6.5-5. Διαφορές θερμοκρασίας νερού 1<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ12-1



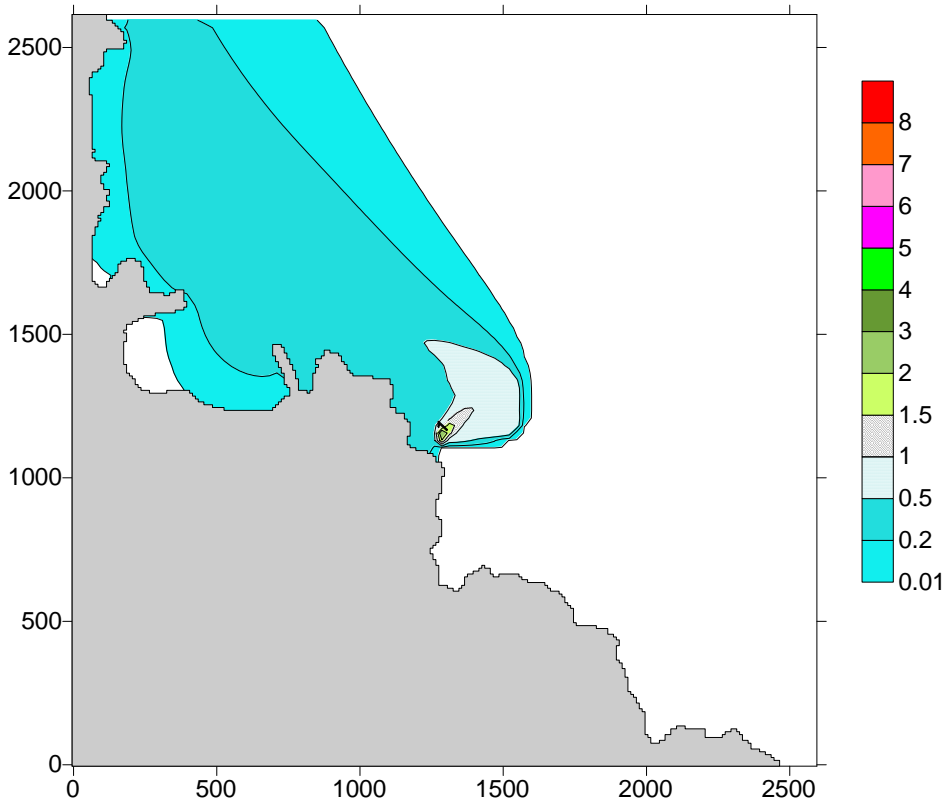
Σχήμα 6.5-6. Διαφορές θερμοκρασίας νερού 1<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ14-1



Σχήμα 6.5-7. Διαφορές θερμοκρασίας νερού 3<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ0

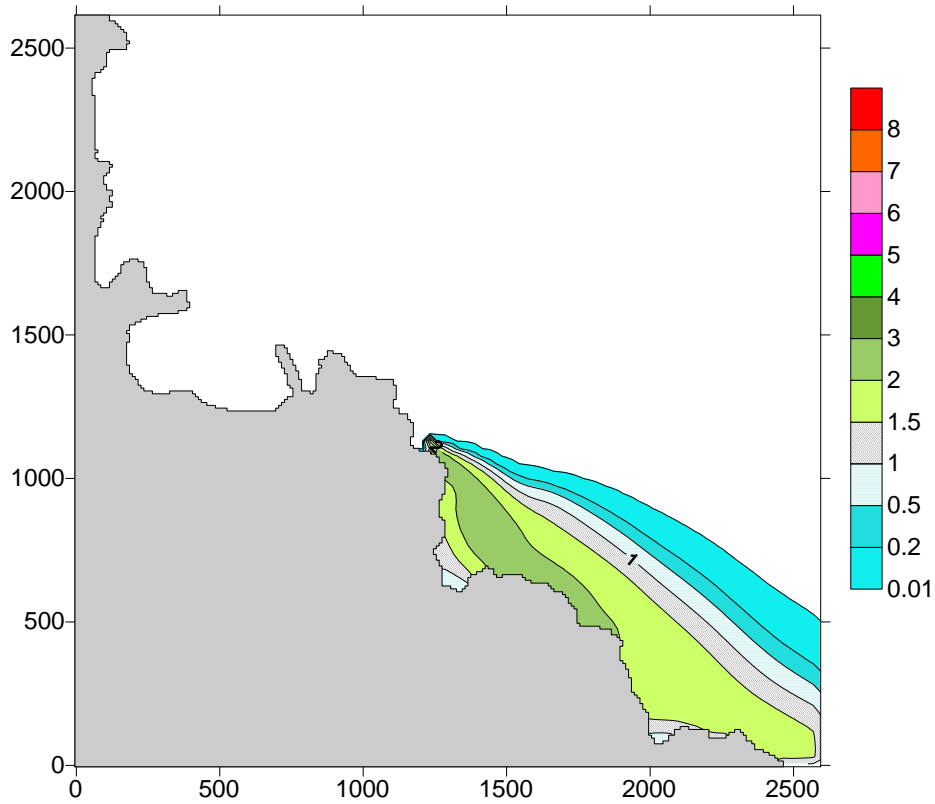


Σχήμα 6.5-8. Διαφορές θερμοκρασίας νερού 3<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ12

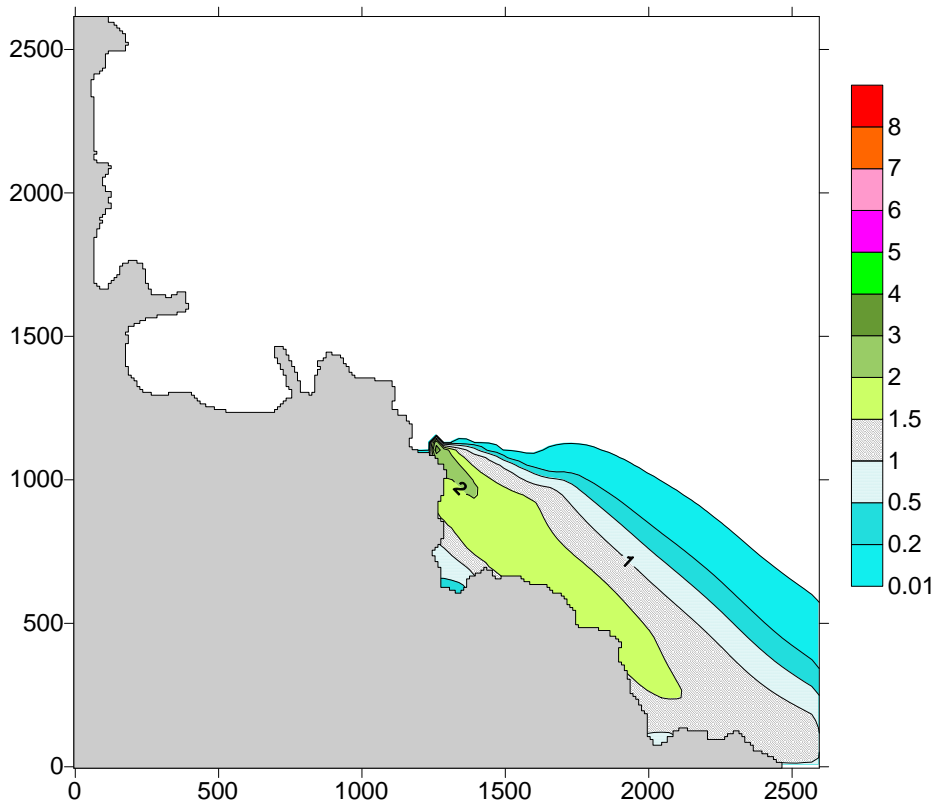


Σχήμα 6.5-9. Διαφορές θερμοκρασίας νερού 3<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ14

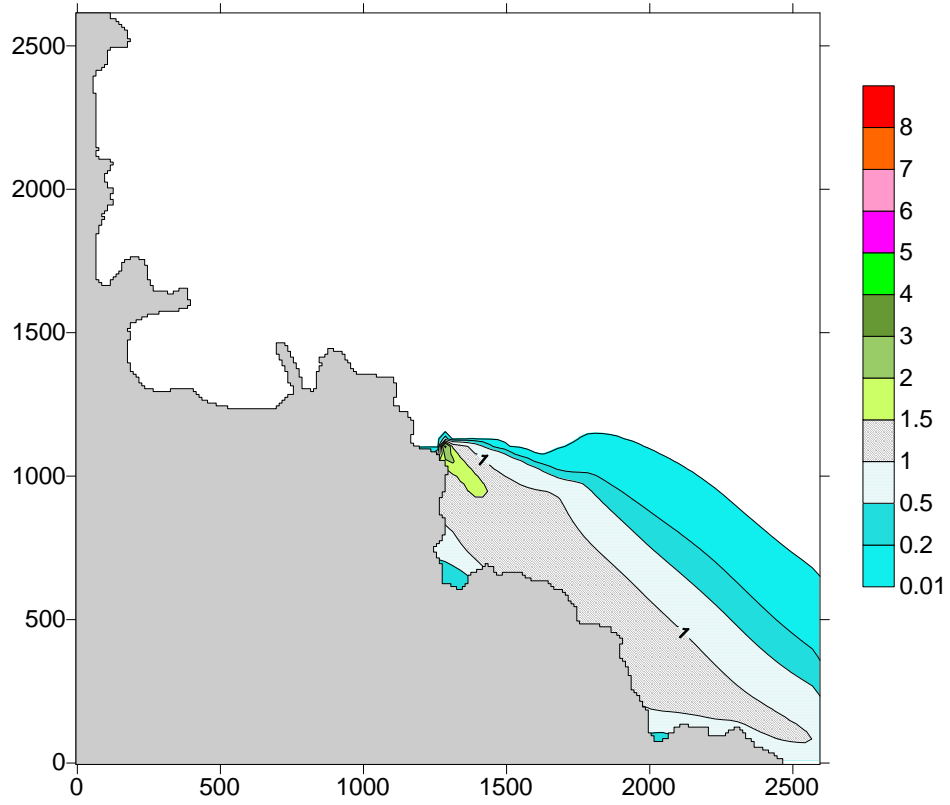




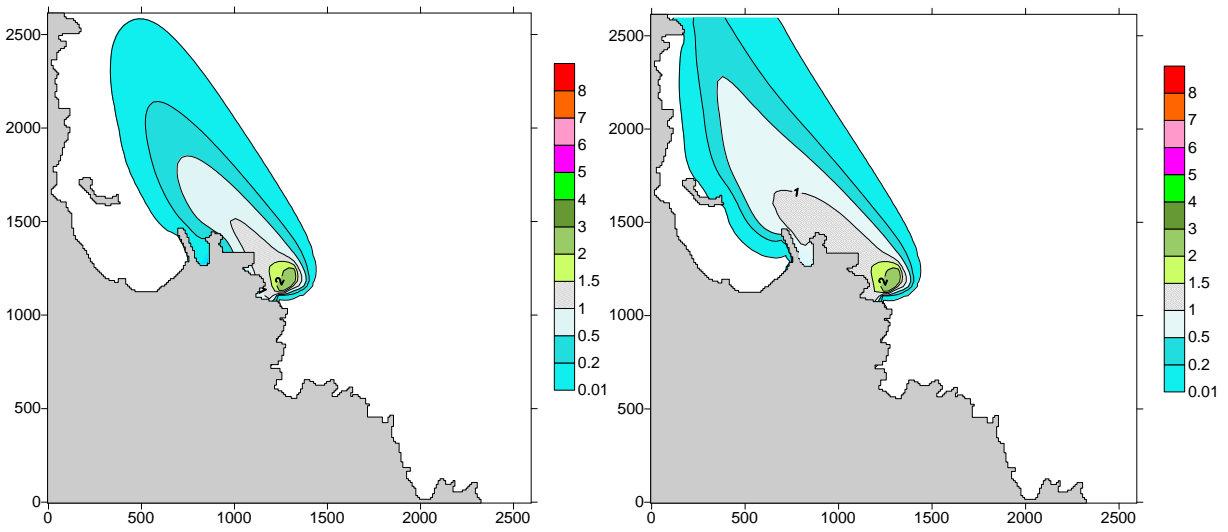
Σχήμα 6.5-10. Διαφορές θερμοκρασίας νερού 3<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ0-1



Σχήμα 6.5-11. Διαφορές θερμοκρασίας νερού 3<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ12-1

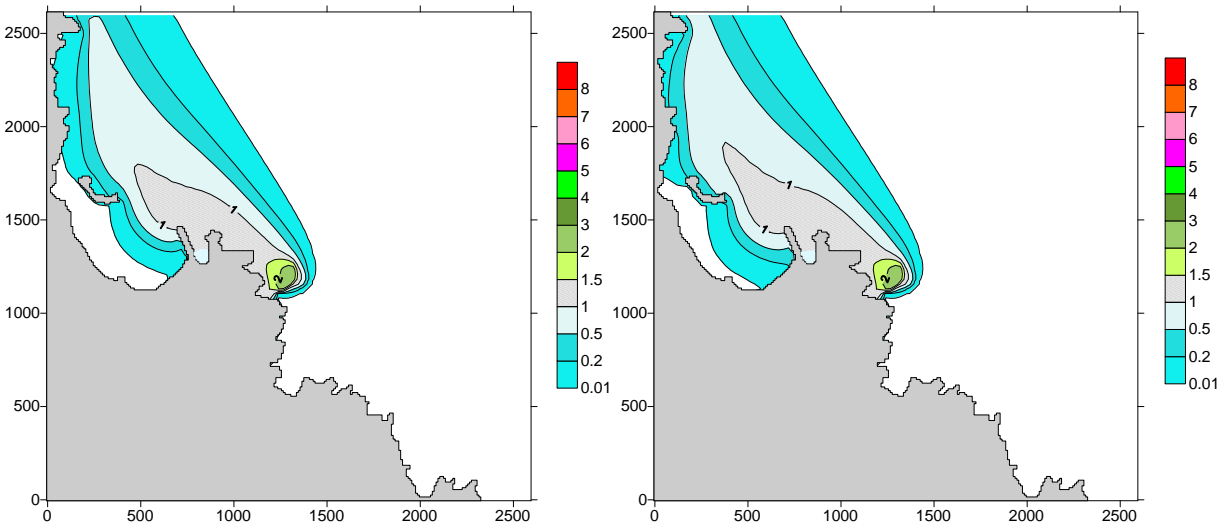


Σχήμα 6.5-12. Διαφορές θερμοκρασίας νερού 3<sup>ου</sup> στρώματος για το σενάριο Σ14-1



(α)  $t=6h$

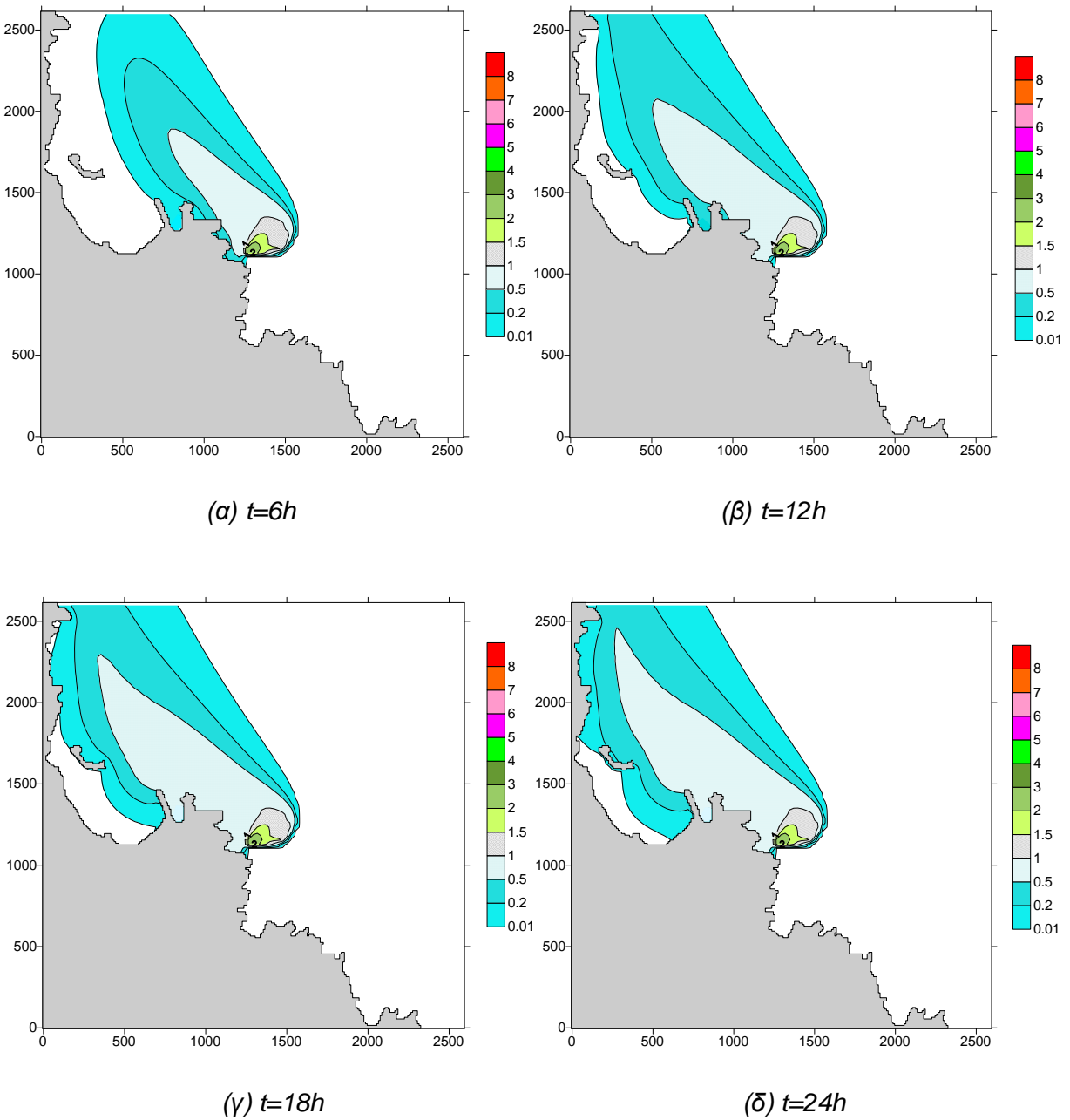
(β)  $t=12h$



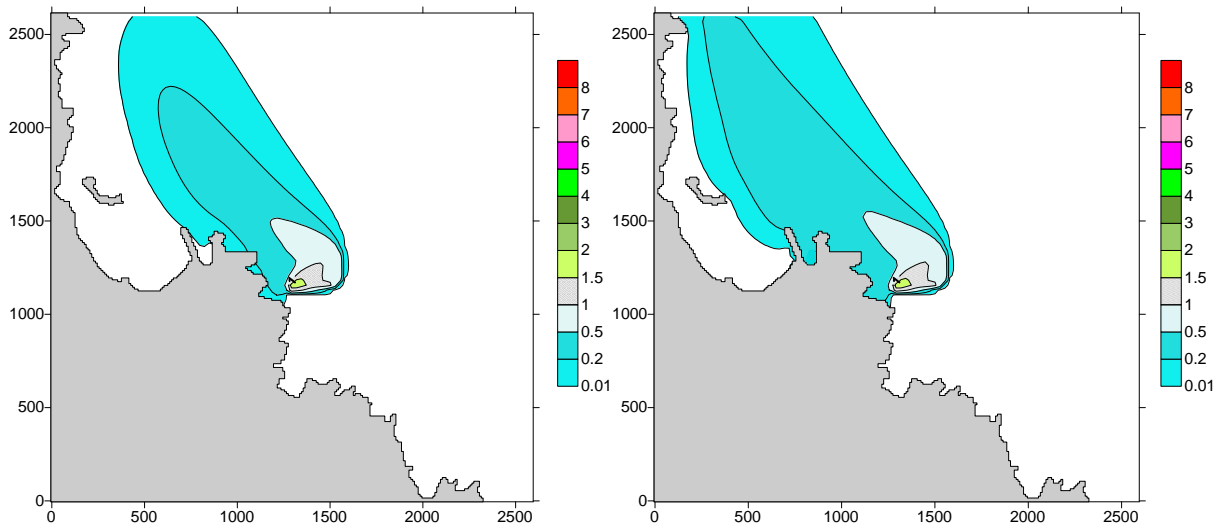
(γ)  $t=18h$

(δ)  $t=24h$

Σχήμα 6.5-13. Χρονική εξέλιξη διαφορών θερμοκρασίας νερού του 1<sup>ου</sup> στρώματος (σενάριο Σ0)

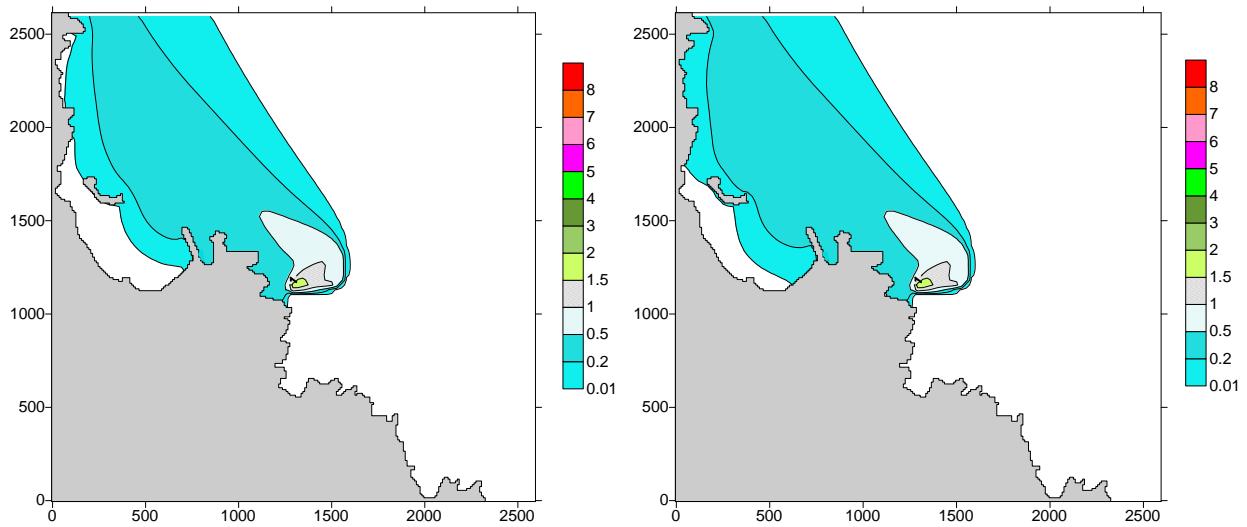


Σχήμα 6.5-14. Χρονική εξέλιξη διαφορών θερμοκρασίας νερού του 1<sup>ου</sup> στρώματος (σενάριο Σ12)



(α)  $t=6h$

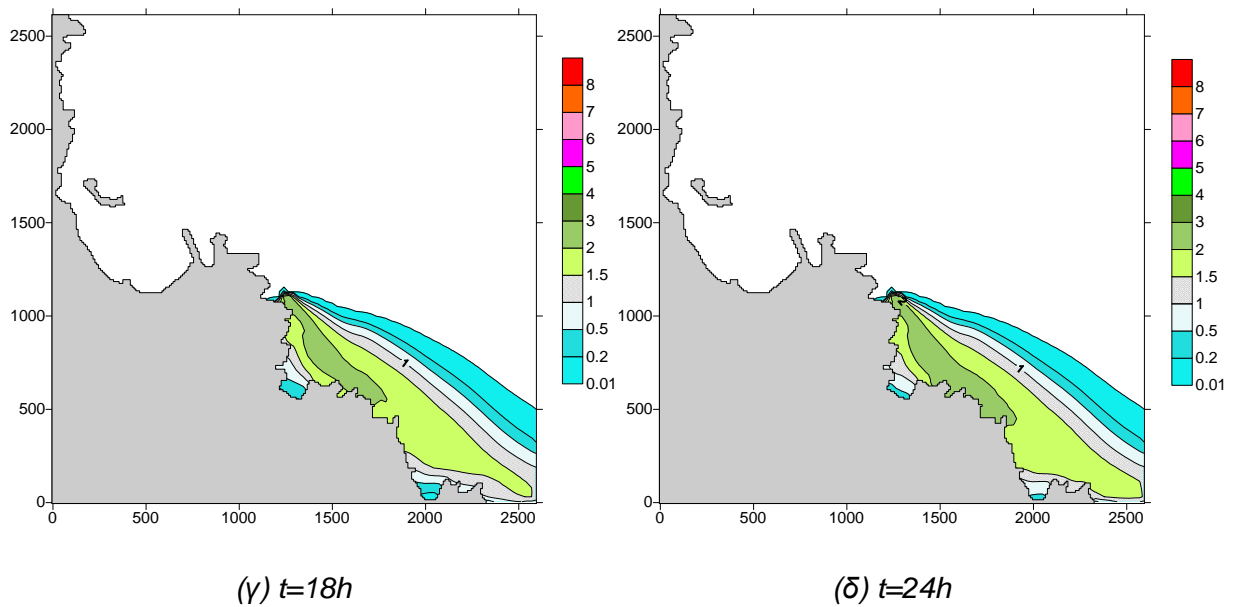
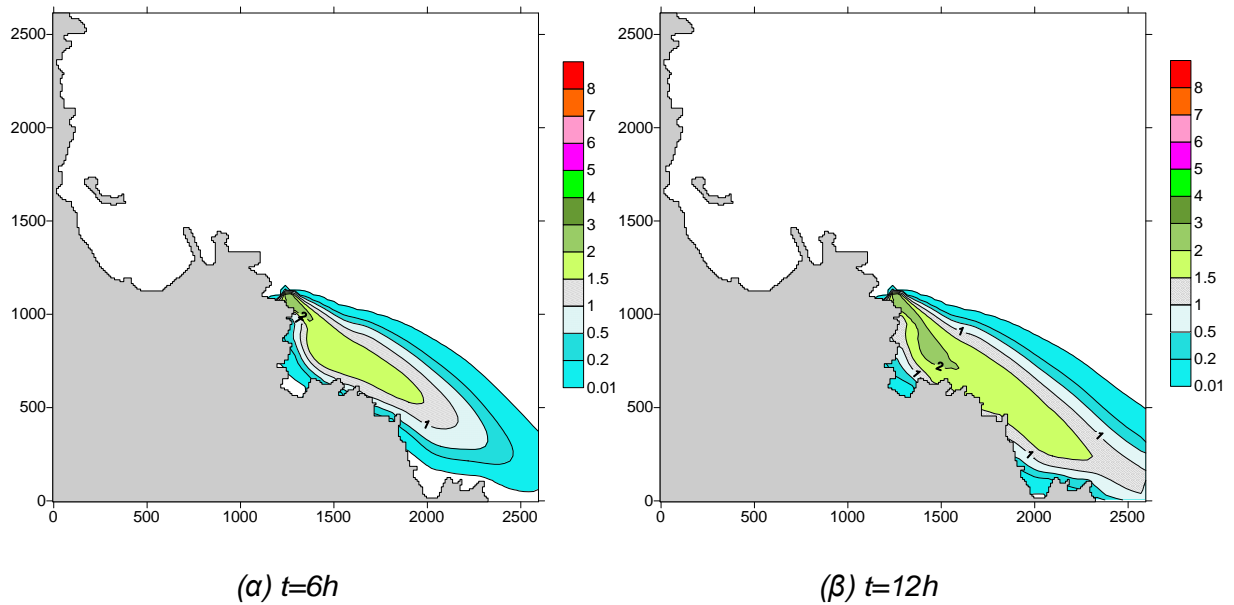
(β)  $t=12h$



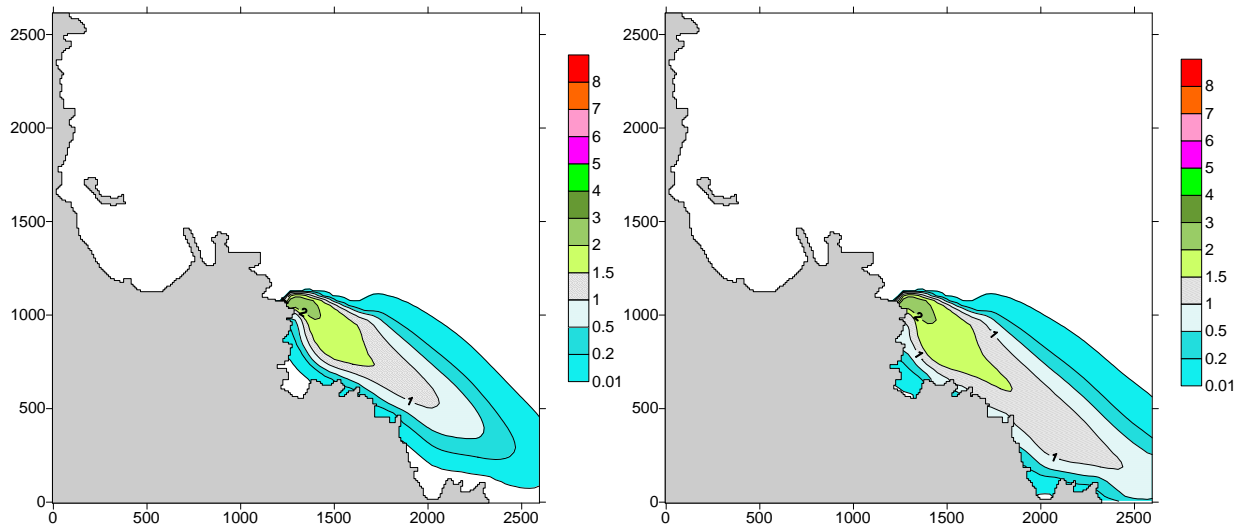
(γ)  $t=18h$

(δ)  $t=24h$

Σχήμα 6.5-15. Χρονική εξέλιξη διαφορών θερμοκρασίας νερού του 1<sup>ου</sup> στρώματος (σενάριο Σ14)

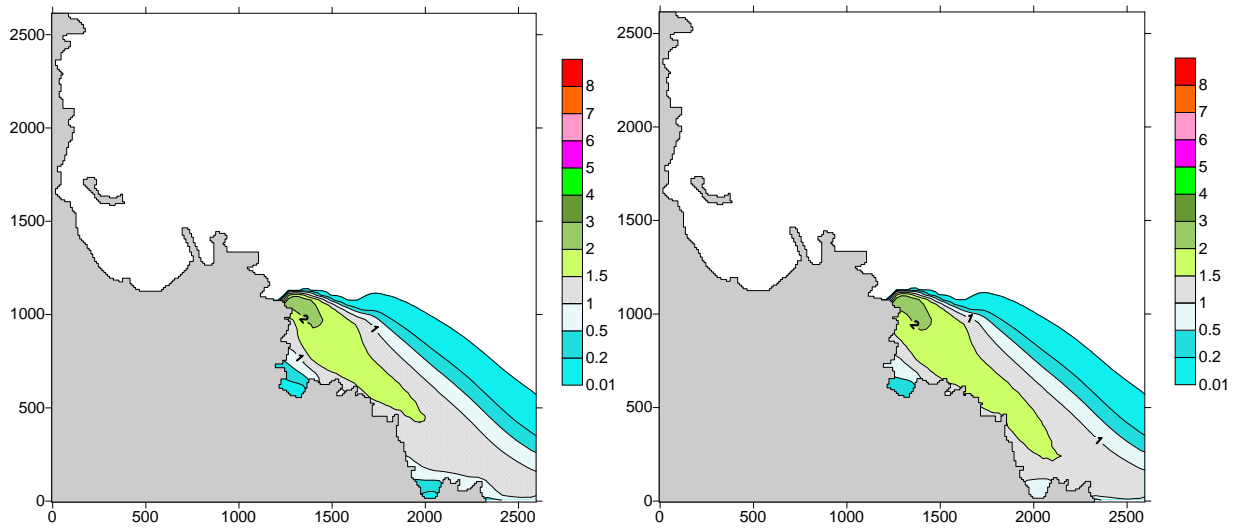


Σχήμα 6.5-16. Χρονική εξέλιξη διαφορών θερμοκρασίας νερού του 1<sup>ου</sup> στρώματος (σενάριο Σ0-1)



(α)  $t=6h$

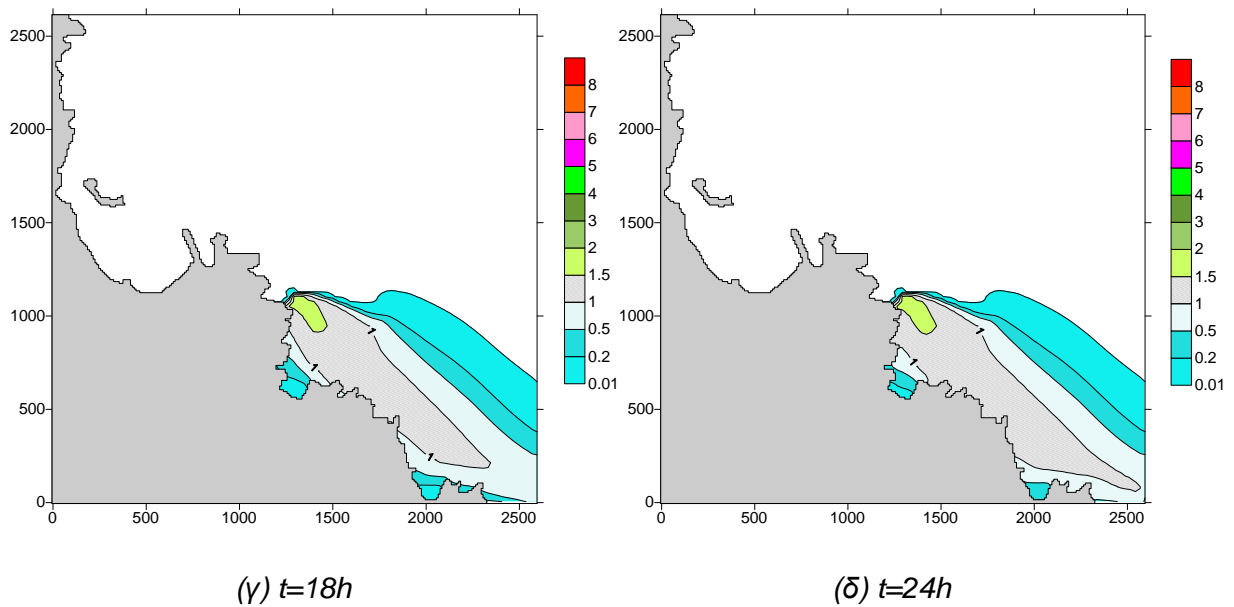
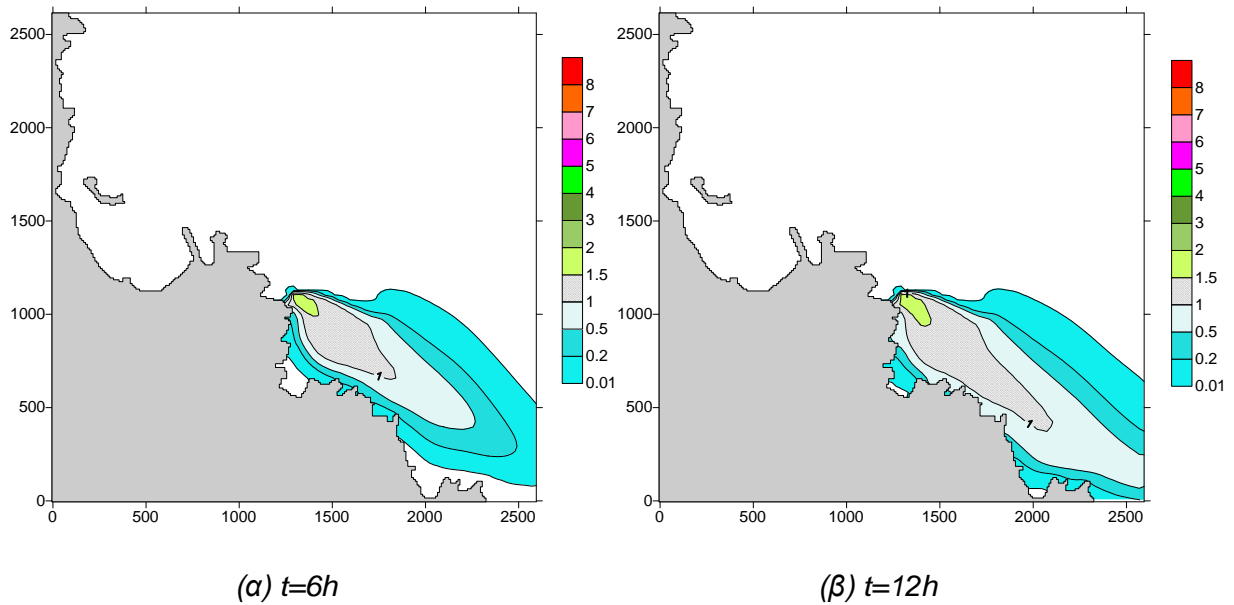
(β)  $t=12h$



(γ)  $t=18h$

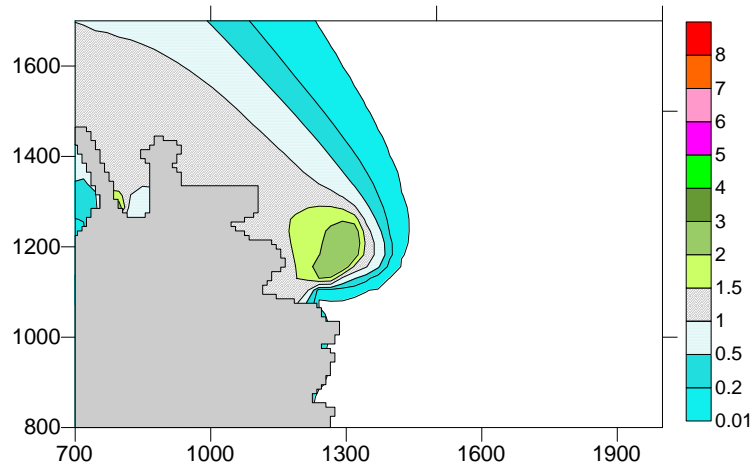
(δ)  $t=24h$

Σχήμα 6.5-17. Χρονική εξέλιξη διαφορών θερμοκρασίας νερού του 1<sup>ου</sup> στρώματος (σενάριο Σ12-1)

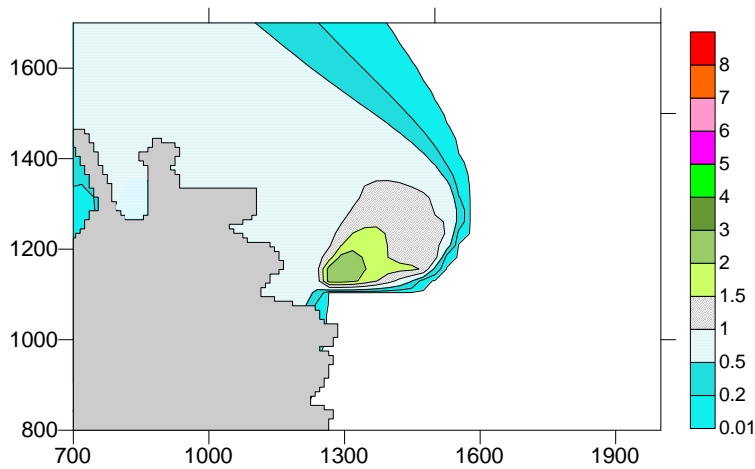


Σχήμα 6.5-18. Χρονική εξέλιξη διαφορών θερμοκρασίας νερού του 1<sup>ου</sup> στρώματος (σενάριο Σ14-1)

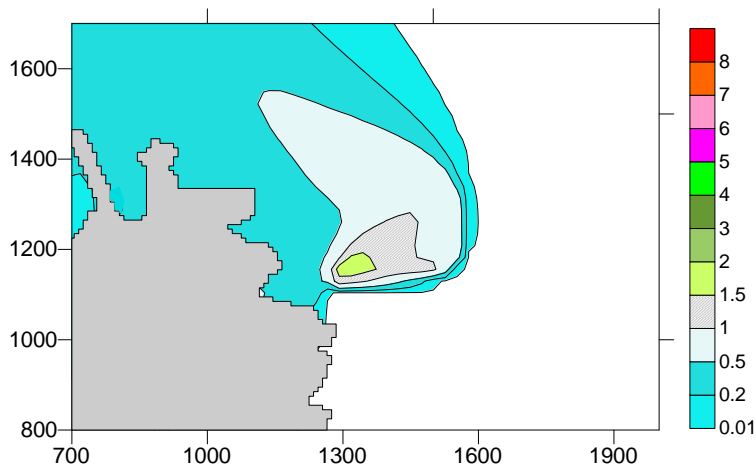




(α) Σενάριο Σ0



(β) Σενάριο Σ12



(γ) Σενάριο Σ14

Σχήμα 6.5-19. Επίδραση της θέσης διάθεσης των θερμών νερών στο μόνιμο πεδίο θερμοκρασιών νερού του 1<sup>ου</sup> στρώματος στην περιοχή διάθεσης των θερμών νερών

**6.5.2. Σχολιασμός αποτελεσμάτων**

Από τα Σχήματα 6.5-1 μέχρι 6.5-19, τον Πίνακα 6.5-1 και όλους τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώνονται τα ακόλουθα (στο σχολιασμό των αποτελεσμάτων θεωρούνται χάριν ασφάλειας οι διαφορές θερμοκρασίας των μόνιμων πεδίων):

- 1) Η κίνηση της φλέβας των θερμών νερών επηρεάζεται από το πεδίο ροής. Σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν η φλέβα των θερμών νερών προσκολλάται κατά ένα τμήμα της στην ανατολική ακτή της περιοχής Μαντουδίου. Στην περίπτωση των «δυσμενών ανέμων» (άνεμος ΝΑ) η φλέβα των θερμών νερών φτάνει στην περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού σε λιγότερο από 2 ώρες. Υπενθυμίζεται ότι οι «δυσμενείς (ΝΑ) άνεμοι» δεν πνέουν στην περιοχή μελέτης για συνεχές διάστημα μεγαλύτερο από 18 ώρες (βλ. Κεφάλαιο 2.4.2). Τα μόνιμα πεδία θερμοκρασιών νερού εγκαθίστανται μετά από περίπου 24 ώρες.
- 2) Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση της θέσης διάθεσης από την ακτή, δηλ. όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του αγωγού, τόσο μεγαλύτερη είναι η παροχή των θερμών νερών (εξαιτίας της συμπαράσυρσης του περιβάλλοντος νερού από τη φλέβα, entrainment) και τόσο μεγαλύτερη πορεία διαγράφει η φλέβα των θερμών νερών μέχρι να φτάσει στην περιοχή απόληψης. Η μεγαλύτερη πορεία έχει ως αποτέλεσμα (α) τη μεγαλύτερη σχετική διάλυση των θερμών νερών της φλέβας και (β) τη μεγαλύτερη εξάπλωσή της με αποτέλεσμα τη μείωση της τοπικής διαφοράς θερμοκρασίας στην περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού.
- 3) Για το βασικό σενάριο απλού στομίου (Σ0) με μήκος αγωγού ίσο με 110 m η διαφορά θερμοκρασίας στην περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού υπολογίζεται ίση με 1.0-1.5 °C. Τα αντίστοιχα διαστήματα τιμών για μήκη αγωγού 130 m (Σ12) και 150 m (Σ14) είναι 0.5-1.0 °C και 0.2-0.5 °C, αντίστοιχα. Οι εκτιμήσεις του μοντέλου CORMIX ήταν 0.80-0.82 °C, 0.75-0.76 °C και 0.62-0.64 °C, για τα σενάρια Σ0, Σ12 και Σ14, αντίστοιχα.
- 4) Οι υπολογιζόμενες μέγιστες τιμές διαφοράς θερμοκρασίας στη μεγαλύτερη περιοχή των ακτών είναι μικρότερες από 2.0 °C στο σενάριο απλού στομίου (Σ0-1).
- 5) Σημειώνεται ότι οι παραπάνω υπολογισμοί είναι συντηρητικοί, καθόσον (α) πραγματοποιήθηκαν για μηδενικό συντελεστή απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον, (β) θεωρήθηκαν τα μόνιμα πεδία θερμοκρασιών και (γ) χρησιμοποιήθηκε συντηρητική τιμή του συντελεστή κατακόρυφης διάχυσης. Κατά συνέπεια, οι πραγματικές τιμές διαφοράς θερμοκρασίας αναμένεται να είναι μικρότερες των παραπάνω.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 7.1. Δεδομένα και παραδοχές

Στους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση των συνθηκών του παράκτιου περιβάλλοντος της περιοχής Μαντούδι (πεδία ροής και ισοκατανομές διαφοράς θερμοκρασίας) θεωρήθηκε ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της φλέβας των θερμών νερών, σταθερής παροχής 72000 m<sup>3</sup>/h, και του υδάτινου αποδέκτη είναι ίση με 8 °C.

Ως προς το είδος του αγωγού διάθεσης εξετάστηκε μόνο η περίπτωση αγωγού με απλό στόμιο διαμέτρου 2.8 m. Το βασικό σενάριο που εξετάστηκε αφορούσε αγωγό μήκους 110 m, με κατακόρυφη και οριζόντια γωνία διάθεσης 30° και 270°, αντίστοιχα. Η εκβολή γίνεται σε βάθος 12.0 m και το στόμιο απέχει από τον πυθμένα 1 m.

Ως προς τον αγωγό απόληψης του θαλασσινού νερού θεωρήθηκε ότι γίνεται σε επαφή με τον υφιστάμενο μόλο (πρόβολο) με ορθογωνικό αγωγό τύπου «Π». Το πλάτος του ορθογωνικού αγωγού θεωρήθηκε ίσο με 40 m και το ύψος του ίσο με 4.0 m. Ο πυθμένας του αγωγού απόληψης βρίσκεται σε βάθος 8.0 m. Οι μεγάλες διαστάσεις του αγωγού εξασφαλίζουν τη σχετικά μικρή ταχύτητα εισόδου του θαλασσινού νερού για περιβαλλοντικούς-οικολογικούς λόγους η οποία υπολογίστηκε ίση με 0.125 m/s.

Ως προς την κατεύθυνση του ανέμου διερευνήθηκαν δύο περιπτώσεις. Η περίπτωση του νοτιοανατολικού ανέμου, που χαρακτηρίζεται ως «δυσμενής» άνεμος για τη θέση απόληψης του θαλασσινού νερού, καθόσον οδηγεί τη φλέβα των θερμών νερών προς την περιοχή απόληψης, και η περίπτωση του βορειοδυτικού ανέμου, που χαρακτηρίζεται ως «δυσμενής» άνεμος για τις παρακείμενες ακτές. Το ανεμογενές παράκτιο ρεύμα θεωρήθηκε ότι έχει ταχύτητα 2-10 cm/s (συντηρητική προσέγγιση) με βάση τα διαθέσιμα μετεωρολογικά στοιχεία.

### 7.2. Συμπεράσματα

Οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αφορούν σε υπολογισμούς στο κοντινό πεδίο ροής, για τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών της φλέβας των θερμών νερών, και σε υπολογισμούς στο μακρινό πεδίο ροής, για την εκτίμηση των πεδίων ροής (ταχύτητες ροής) και των κατανομών της διαφοράς θερμοκρασίας.

Στο κοντινό πεδίο για το βασικό σενάριο Σ0 (μήκος αγωγού 110 m) η μέση τιμή της διάλυσης που επιτυγχάνεται στην επιφάνεια της θάλασσας υπολογίστηκε ίση με 2.4 και η μέση διαφορά θερμοκρασίας ίση με 3.33 °C.

Από τη διερεύνηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών του αγωγού διάθεσης στη μέση τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας στην επιφάνεια διαπιστώθηκε ότι σημειώνεται μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας με:

- (α) την αύξηση της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος,
- (β) τη μείωση της κατακόρυφης γωνίας διάθεσης,
- (γ) την ελαχιστοποίηση της οριζόντιας γωνίας διάθεσης, και
- (δ) την αύξηση της απόστασης διάθεσης από την ακτή.

Η διαφορά θερμοκρασίας δεν μεταβάλλεται εξαιτίας της στρωμάτωσης.

Από τις εκτιμήσεις του μοντέλου CORMIX στο μακρινό πεδίο φάνηκε ότι η φλέβα των θερμών νερών προσκολλάται στην ακτή μετά τα πρώτα 400 m της πορεία της. Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας στην επιφάνεια στην περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού προέκυψε ίση με 1.1 °C και το βάθος της φλέβας σε αυτή την περιοχή ήταν μικρότερο από 1.9 m. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι σε βάθος 4-8 m, που προβλέπεται να βρίσκεται η διάταξη απόληψης του θαλασσινού νερού, δεν θα υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας με αποτέλεσμα το αντλούμενο θαλασσινό νερό να μην επηρεάζεται. Για το βασικό σενάριο Σ0 στην περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού το βάθος της φλέβας εκτιμήθηκε ίσο με 1.46-1.52 m και η διαφορά θερμοκρασίας στην επιφάνεια ίση με 0.80-0.82 °C. Οι αντίστοιχες εκτιμώμενες τιμές για το μέγιστο μήκος αγωγού που εξετάστηκε (150 m) ήταν ίσες με 1.78-1.86 m και 0.62-0.64 °C.

Οι εκτιμήσεις του μακρινού πεδίου με το CORMIX είναι προσεγγιστικές και δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν αναλυτικοί υπολογισμοί με το τρισδιάστατο μαθηματικό μοντέλο FLOW-3DL στο οποίο ενσωματώθηκε ο αλγόριθμος σύνδεσης των δύο μοντέλων.

Από τους υπολογισμούς στο μακρινό πεδίο με το FLOW-3DL διαπιστώθηκαν τα ακόλουθα:

#### A.) Πεδία ροής

Από τους αναλυτικούς υπολογισμούς για τη διερεύνηση του προκύπτοντος πεδίου ροής διαπιστώθηκε ότι η κίνηση της φλέβας των θερμών νερών επηρεάζεται από τις αναπτυσσόμενες ταχύτητες.

Από τη διερεύνηση επίδρασης της θέσης διάθεσης προέκυψε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση διάθεσης από την ακτή (δηλ. για μεγαλύτερο μήκος αγωγού), τόσο μεγαλύτερη πορεία διαγράφει η φλέβα των θερμών νερών μέχρι να φτάσει στην περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού με συνέπεια τη μεγαλύτερη συμπαράσυρση του περιβάλλοντος νερού και άρα τη μεγαλύτερη παροχή της φλέβας των θερμών νερών. Η μεγαλύτερη παροχή της φλέβας συνεπάγεται αφενός τη μεγαλύτερη σχετική διάλυση των θερμών νερών και αφετέρου τη μεγαλύτερη εξάπλωσή της με αποτέλεσμα τη μείωση της τοπικής διαφοράς θερμοκρασίας.

#### A.) Πεδία θερμοκρασιών

Στην περίπτωση πνοής «δυσμενών ανέμων» για την περιοχή απόληψης (NA άνεμοι) η φλέβα των θερμών νερών φτάνει στην περιοχή απόληψης του θαλασσινού νερού σε λιγότερο από 2 ώρες και η υπολογιζόμενη μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας είναι 1.0-1.5 °C που σημειώνεται στην περίπτωση αγωγού 110 m. Τα διαστήματα τιμών για μήκη αγωγού 130 m και 150 m είναι 0.5-1.0 °C και 0.2-0.5 °C, αντίστοιχα.

Στην περίπτωση πνοής «δυσμενών ανέμων» για τις παρακείμενες ακτές (ΒΔ άνεμοι) η υπολογιζόμενη μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας είναι 2.0 °C, που σημειώνεται στην περίπτωση αγωγού 110 m (δυσμενέστερη εξεταζόμενη θέση διάθεσης).

Σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια τμήμα της φλέβας προσκολλάται στην ανατολική ακτή της περιοχής του Μαντουδίου.

Σημειώνεται ότι οι παραπάνω υπολογισμοί είναι συντηρητικοί, καθόσον (α) πραγματοποιήθηκαν για μηδενικό συντελεστή απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον, (β) θεωρήθηκαν τα μόνιμα πεδία θερμοκρασιών και (γ) χρησιμοποιήθηκε συντηρητική τιμή του συντελεστή κατακόρυφης διάχυσης ( $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ ). Κατά συνέπεια, οι πραγματικές τιμές διαφοράς θερμοκρασίας αναμένεται να είναι μικρότερες των παραπάνω υπολογισθέντων τιμών.

Κατά συνέπεια, προκύπτει ότι το βασικό σενάριο αγωγού απλού στομίου μήκους 110 m που εξετάστηκε (Σ0) ικανοποιεί σε γενικές γραμμές τις λειτουργικές απαιτήσεις του έργου και τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις δεδομένου ότι:

- 1) Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας στη θέση απόληξης του θαλασσινού νερού είναι 1.0-1.5 °C, σύμφωνα με το μοντέλο FLOW-3DL, και 0.80-0.82 °C, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του μοντέλου CORMIX.
- 2) Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας στη μεγαλύτερη έκταση των επηρεαζόμενων ακτών είναι μικρότερη από 2.0 °C.

### **7.3. Προτάσεις**

Προτείνεται η διερεύνηση της κατανομής θερμοκρασίας στην περίπτωση διάθεσης των θερμών νερών με αγωγό πολλαπλών στομίων (multiport diffusers).

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1) Atkinson, J.F., 1993, "Detachment of Buoyant Surface Jets Discharged over Slope", *J. Hydraulic Engineering*, 119, No. 8, 878-894.
- 2) Jirka, G.H., 2004, "Integral Model for Turbulent Buoyant Jets in Unbounded Stratified Flows. Part I: Single Round Jet", *Environmental Fluid Mechanics*, 4, No. 1, 1-56.
- 3) Jirka, G.H., 2007, "Buoyant Surface Discharges into Water Bodies. II: Jet Integral Model", *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, No. 9, 1021-1036.
- 4) Jones, G.R., Nash, J.D. and Jirka, G.H., 1996, "CORMIX 3: An Expert System for Mixing Zone Analysis and Prediction of Buoyant Surface Discharges", Tech. Rep., *DeFrees Hydraulics Lab.*, Cornell University (also published by U.S. Env. Protection Agency, Office of Water, Washington, DC).
- 5) Jones, G.R., Nash, J.D., Doneker, R.L. and Jirka, G.H., 2007, "Buoyant Surface Discharges into Water Bodies. I: Flow Classification and Prediction Methodology", *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, No. 9, 1010-1020.
- 6) Koutitas, C. and O'connor, B., 1980, "Modeling Three-Dimensional Wind-Induced Flows", *Journal of Hydraulics Division*, 106, No. 11, 1843-1865.
- 7) Okely, P., 2001, "Numerical Modelling Of Buoyant Surface Discharge Characteristics In Koombana Bay", Center for Water Research, Department of Environmental Engineering, The University of Western Australia.
- 8) Stamou, A.I., Noutsopoulos, C., Pipilis, K.G., Gavalaki, E. and Andreadakis, A., 1999a, "Hydrodynamic and Water Quality Modeling of Southern Evoikos Gulf – Greece", *The International Journal of Global Nest*, 1, No. 2, 131-141.
- 9) Stamou A. I., Memos K. and Pipilis K., (1999b). "Mathematical Modelling of Thermal Discharges in Coastal Regions", 28th IAHR Congress, Graz, Austria.

**Διαδικτυακές Πηγές:**

- 1) [itia.ntua.gr/~nikos/metsovo/diafaneies\\_ripansi\\_a.doc](http://itia.ntua.gr/~nikos/metsovo/diafaneies_ripansi_a.doc)
- 2) <http://www.mapgr.gr/mapgr/frame-set.htm>
- 3) [www.google.com](http://www.google.com)
- 4) <http://www.cormix.info/>
- 5) <http://marine.rutgers.edu/po/tests/grav/index.html>