



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

**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ  
ΠΛΟΥΜΙΟΥ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ  
ΑΠΟ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΒΥΘΟΚΟΡΗΣΗ**



*Δήμητρα Δ. Ρούμπα*

Αθήνα, Μάρτιος 2012

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

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

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η υλοποίηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την ουσιαστική συμβολή του επιβλέποντος Καθηγητή Ε.Μ.Π. Α. Ι. 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 και τη Διδάκτορα κ. Αικατερίνη Σπανουδάκη για την πολύτιμη βοήθειά τους.

Ευχαριστώ ακόμα την Υ.Δ. κ. Ανθούλα Γκεσούλη και την Υ.Δ. κ. Γεωργία Παπαδονικολάκη για τις χρήσιμες συμβουλές και παρατηρήσεις τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	i
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	ii
EXTENDED ABSTRACT.....	vii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Γενικά- Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας .....	3
2 ΠΛΟΥΜΙΟ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ.....	5
2.1 Γενικά .....	5
2.2 Χαρακτηριστικά του υλικού πυθμένα .....	5
2.2.1 Μέγεθος.....	5
2.2.2 Σχήμα.....	6
2.2.3 Πυκνότητα, ειδικό βάρος .....	6
2.2.4 Ταχύτητα καθίζησης.....	6
2.2.5 Επίδραση του σχήματος.....	7
2.2.6 Επίδραση της συγκέντρωσης των σωματιδίων .....	8
2.3 Δυνάμεις που ασκούνται στο υλικό του πυθμένα .....	9
2.3.1 Εισαγωγή.....	9
2.3.2 Ανυψωτικές δυνάμεις .....	9
2.3.3 Δύναμη συνεκτικότητας.....	10
2.3.4 Δύναμη διασποράς .....	11
2.3.5 Δύναμη διήθησης.....	11
2.4 Προϋποθέσεις κίνησης των φερτών .....	11
2.5 Μορφές Πυθμένα .....	14
2.5.1 Γενικά .....	14
2.5.2 Αμμοκυμάτια (ripples) .....	15
2.5.3 Αμμόλοφοι (dunes) .....	16
2.5.4 Αμμοκύματα-Σπάσιμο κυμάτων (sand waves-breaking waves, antidunes).....	16
2.6 Τρόπος υπολογισμού συγκεντρώσεων και στερεοπαροχών .....	18
2.6.1 Στερεοπαροχή σε αιώρηση .....	19
2.6.2 Φορτίο Πυθμένα .....	20

2.6.3	Εξέλιξη της στάθμης του πυθμένα.....	22
3	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ FLOW-3DL .....	23
3.1	Γενικά .....	23
3.2	Διαφορικές εξισώσεις πεδίου ροής.....	23
3.3	Διαφορικές εξισώσεις πεδίου αιωρούμενων στερεών και της στερεομεταφοράς του πυθμένα. ....	24
3.4	Οριακές συνθήκες.....	25
3.4.1	Γενικά .....	25
3.4.2	Ελεύθερη επιφάνεια .....	26
3.4.3	Πυθμένας .....	26
3.4.4	Διεπιφάνειες μεταξύ στρωμάτων.....	26
3.4.5	Στερεά Όρια.....	27
3.4.6	Όρια ανοικτής θάλασσας.....	27
3.5	Αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ροής και της συμπεριφοράς ποιοτικών παραμέτρων. ....	27
3.5.1	Γενικά .....	27
3.5.2	Διακριτοποίηση του πεδίου ροής.....	28
3.6	Διακριτοποίηση του πεδίου αιωρούμενων στερεών, στερεοπαροχής και μεταβολής της στάθμης του πυθμένα στο μοντέλο FLOW-3DL. ....	29
3.6.1	Μεταφορά και διάχυση στην κατεύθυνση x και y .....	31
3.6.2	Μεταφορά και διάχυση στην κατεύθυνση z .....	33
3.6.3	Υπολογισμός της ποιοτικής παραμέτρου της συγκέντρωσης του πλουμίου των αιωρούμενων στερεών (C) στον κόμβο (i,j,k) στο μοντέλο FLOW-3DL.....	36
4	ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FLOW-3DL.....	37
4.1	Γενικά .....	37
4.2	Ανεμογενής Κυκλοφορία .....	37
4.2.1	Περιγραφή.....	37
4.2.3	Αποτελέσματα αναλυτικής λύσης .....	38
4.2.4	Προσομοίωση με κώδικα FLOW-3DL.....	39
4.3	Διάδοση παλιρροϊκού κύματος .....	40
4.3.1	Περιγραφή.....	40
4.3.2	Θεωρητικό υπόβαθρο.....	40
4.3.3	Προσομοίωση με κώδικα FLOW-3DL.....	41

4.4 Κατανομή της συγκέντρωσης των φερτών με το βάθος για μόνιμη και ομοιόμορφη ροή.....	43
4.4.1 Περιγραφή.....	43
4.4.2 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	43
4.4.3 Προσομοίωση με κώδικα FLOW-3DL.....	44
4.5 Υπολογισμός ρυθμού μεταβολής της στάθμης του πυθμένα σε κανάλι σχήματος Γ (γωνιακό).....	46
4.5.1 Περιγραφή.....	46
4.5.2 Προσομοίωση σε κώδικα FLOW-3DL.....	47
4.6 Συμπεράσματα .....	49
5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	50
5.1 Γενικά Χαρακτηριστικά .....	50
5.2 Χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.....	50
5.2.1 Περιοχή μελέτης.....	50
5.2.2 Γεωγραφική θέση του έργου – Συντεταγμένες οριοθέτησης ορύγματος.....	52
5.2.3 Βαθυμετρία .....	53
5.2.4 Μετεωρολογικά στοιχεία.....	53
5.2.5 Στοιχεία παλίρροιας.....	55
5.3 Χαρακτηριστικά στερεών .....	56
5.3.1 Κοκκομετρική σύνθεσης και κλάσεις στερεών .....	56
5.3.2 Ταχύτητες καθίζησης κλάσεων στερεών .....	57
5.4 Υπολογισμοί προσομοίωσης των πεδίων ροής της περιοχής .....	58
5.4.1 Μεθοδολογία υπολογισμών προσομοίωσης πεδίων.....	58
5.4.2 Καθορισμός των ορίων της ευρύτερης περιοχής μελέτης και του αριθμητικού πλέγματος υπολογισμών .....	58
5.4.3 Σειρές και σενάρια υπολογισμών .....	60
5.4.4 Χαρακτηριστικά πεδίων ροής .....	62
5.5 Υπολογισμοί προσομοίωσης μεταφοράς φερτών υλικών και συνθηκών επαναπλήρωσης του υποβρύχιου ορύγματος .....	68
5.5.1 Μεθοδολογία υπολογισμού μεταφοράς φερτών υλικών .....	68
5.6 Σενάρια υπολογισμών μεταφοράς φερτών υλικών .....	68
5.6.1 Εξισώσεις υπολογισμού μεταφοράς φερτών υλικών.....	69
5.6.2 Υπολογισμοί μεταφοράς φερτών υλικών και σχολιασμός τους .....	73

---

5.7 Μοντέλο εκτίμησης χρόνων επαναπλήρωσης του υποβρύχιου ορύγματος .....	74
5.8 Εκτίμηση χρόνων επαναπλήρωσης του υποβρύχιου ορύγματος .....	76
5.9 Υπολογισμοί προσομοίωσης της ποιότητας των θαλάσσιων νερών κατά την απόληψη υλικών .....	77
5.9.1 Μεθοδολογία .....	77
5.9.2 Καθορισμός των ορίων της κύριας περιοχής μελέτης και του αριθμητικού πλέγματος υπολογισμών .....	77
5.9.3 Παραδοχές υπολογισμών .....	80
5.10 Υπολογισμοί μόνιμων πεδίων ροής .....	82
5.11 Υπολογισμοί πεδίων συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών .....	84
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ .....	92
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	93

## Περίληψη

Η εκσκαφή του πυθμένα της θάλασσας προκειμένου να ληφθεί αμμώδες υλικό, προοριζόμενο για διάφορες χρήσεις π.χ. ως υλικό επιχωμάτωσης ή ως υλικό πλήρωσης τεχνητής παραλίας στην ακτή, αποτελεί μια συχνή ανθρώπινη παρέμβαση στον παράκτιο χώρο της θάλασσας.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία γίνεται διερεύνηση των συνθηκών του παράκτιου περιβάλλοντος στην περιοχή της Επανομής στον Θερμαϊκό Κόλπο. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η υδροδυναμική συμπεριφορά και η συμπεριφορά του πλουμίου των αιωρούμενων στερεών που έχουν προέλθει από βυθοκόρηση του πυθμένα ώστε να χρησιμοποιηθεί ως υλικό για την προέκταση ενός προβλήτα στο Λιμένα Θεσσαλονίκης, καθώς και ο χρόνος επαναπλήρωσης του ορύγματος. Η διερεύνηση των επιπτώσεων της συμπεριφοράς του πλουμίου των αιωρούμενων στερεών από τις περιοχές του ορύγματος και περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος (π.χ. ακτές) αποτελούν στόχο της εργασίας.

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 κάρναβο στο χώρο και με εμπρόσθιες διαφορές στο χρόνο.

Στη συνέχεια, από την εφαρμογή του μοντέλου υπολογίστηκε ο ρυθμός επαναπλήρωσης κατά τις διευθύνσεις του βάθους και μήκους μιας λωρίδας μήκους 200 m του υποβρυχίου ορύγματος που έχει βάθος 2.0 m, χρησιμοποιώντας τα υδροδυναμικά πεδία που προέκυψαν για την ευρύτερη περιοχή του Θερμαϊκού Κόλπου.

Τέλος, για τους υπολογισμούς προσομοίωσης της ποιότητας των θαλάσσιων νερών κατά την απόληψη υλικών προσδιορίστηκε η κατανομή των συγκεντρώσεων των στερεών στη περιοχή που καταλαμβάνει το ορύγμα και εξετάστηκε η εξάπλωση τους από το κέντρο του ορύγματος.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του μοντέλου για όλα τα σενάρια, είναι πως η πορεία της φλέβας των αιωρούμενων στερεών ακολουθεί, όπως αναμενόταν, το παράκτιο ρεύμα. Στην περιοχή της θέσης βυθοκόρησης η μέγιστη τιμή της ολικής συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών είναι ίση με περίπου 184 mg/L. Ακολουθώντας την πορεία του πλουμίου ( ή του ρεύματος) σε απόσταση περίπου ίση με  $x=400$  m από τη θέση βυθοκόρησης η ολική συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών έχει μειωθεί δραστικά και κυμαίνεται από 0.6 μέχρι 9.0 mg/L. Επιπρόσθετα, οι μέγιστες τιμές των μέσων χρονικά τιμών των συγκεντρώσεων στερεών, που είναι αυτές που ενδιαφέρουν πρακτικά, σε αποστάσεις  $x=50$  m και  $x=100$  m από τη θέση βυθοκόρησης δεν ξεπερνούν τα 22.9 και 7.2 mg/L, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι μικρές εξαιτίας της εφαρμοζόμενης μη συνεχούς διεργασίας βυθοκόρησης (2 ώρες σε κάθε 6 ώρες του πραγματικού χρόνου), αλλά και της διεύθυνσης των παράκτιων ρευμάτων και

δείχνουν ότι η επίδραση της διεργασίας της βυθοκόρησης στην ποιότητα των νερών αναμένεται να είναι περιορισμένη.



## EXTENDED ABSTRACT

### 1. INTRODUCTION

Marine aggregate mining for construction and fill purposes is an activity that unavoidably has impacts on the environment. During the operation of aggregate dredging sand is drawn from the seabed to the vessel. Within the dredged area, the persistence of physical impacts depends on the characteristics of the dredged material and the potential for natural disturbances that may infill the pits or scours formed by the activity.

The study of sediment plumes can be performed with the use of mathematical models, which predict the flow field and the sediment concentration with the plume and the sediment transport. In the present thesis a mathematical model is applied to determine the fate of the sediment plume during dredging in the coastal region of the Inner Thermaikos Gulf in Thessalonica. The dredged materials will be used in the construction of the extension of a pier of the Harbour of Thessalonica.

### 2. MATHEMATICAL MODEL

In the present work the suite model FLOW- 3DL was applied. FLOW –DI involves the 3-D non-steady equations for (i) the flow field and (ii) the concentration fields for all classes of sediments, expressed in the 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:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Momentum equations:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = f \cdot V - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_v \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -f \cdot U - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_v \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Pressure distribution:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho \cdot g \quad \text{or} \quad P(z) = -\rho \cdot g \cdot (\zeta - z) \quad (4)$$

Mass transport equations for the concentration of sediments for each class “j”:

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} + u \frac{\partial C_j}{\partial x} + v \frac{\partial C_j}{\partial y} + w \frac{\partial C_j}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial C_j}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial C_j}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial C_j}{\partial z} \right) + S_{Cj} \quad (5)$$

The source term takes into account the process of settling and is written as follows

$$S_{Cj} = -W_{set,j} \cdot C_j \quad (6)$$

Where the  $W_{set,j}$  is the settling velocity of the class “j” of the sediments.

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  $\zeta$  and the concentration of sediments  $C_j$  for each class “j”. Axis  $z$  is taken as positive downward from the sea surface,  $v_h$  and  $v_v$  are the horizontal and vertical eddy viscosity coefficients, respectively,  $D_h$  and  $D_v$  are the corresponding horizontal and vertical diffusivities for  $C$ ,  $f$  is the Coriolis parameter,  $g$  is the gravitational acceleration, and  $\rho$  is the water density. In the present work value of  $D_h$  was chosen to  $0.10 \text{ m}^2/\text{s}$ .

To solve equations (1) to (5) boundary conditions need to be defined: (i) at the free surface, (ii) at the sea bed, (iii) at the interfaces between layers, iv) at the open sea boundaries, and (v) at the coastal boundaries – shorelines.

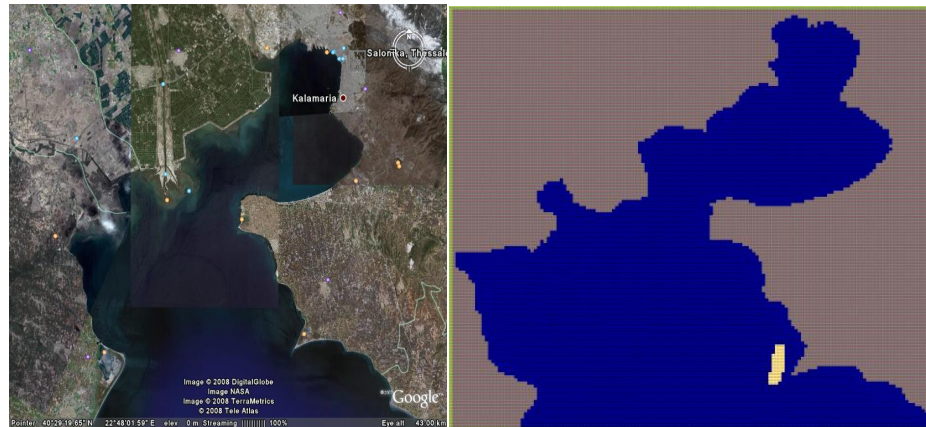
The solution procedure is as follows:

- 1) For the given vertical density variation, the pressure  $p$  is determined using equation (4).
- 2) The horizontal velocities ( $u$  and  $v$ ) are calculated by the momentum equations (2) and (3).
- 3) The vertical velocity ( $w$ ) are deducted by solving equation (1) successively for each layer starting from the bottom, where the boundary condition  $w=0$  is used. At the surface, the continuity equation (1) can be written as a linearized kinetic boundary condition whereby the surface elevation can be deduced (equation 7); subscript “ $\zeta$ ” denotes values at the surface layer:

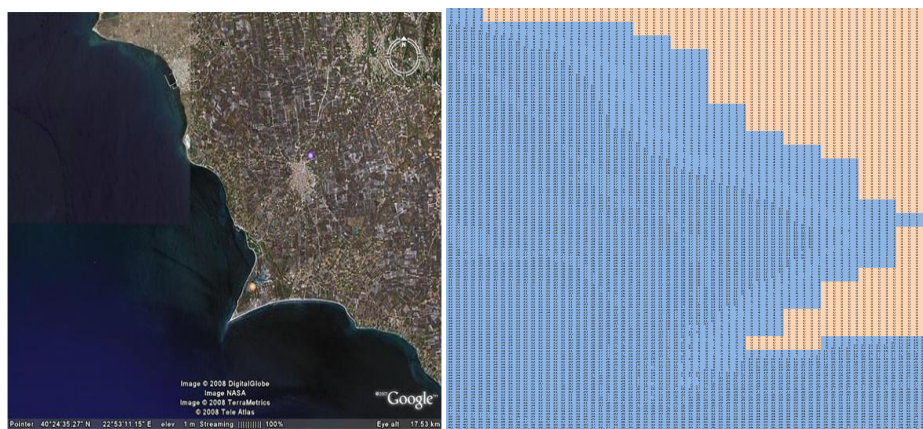
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \cdot u_\zeta + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \cdot v_\zeta = w_\zeta \quad (7)$$

### 3. CALCULATIONS PERFORMED

Two areas of study were defined: (i) the greater area of study shown in Figure 1 with dimensions 37.5 km x 34.5 km, which covers the greatest part of the inner Thermaikos Gulf, and (ii) the main area of study shown Figure 2 with dimensions 3.3 km x 7.8 km, where dredging is performed a pit with depth equal to 2 m.



**Figure 1** (a) Greater area of study and (b) the corresponding numerical grid



**Figure 2** (a) The main area of study and (b) the corresponding numerical grid

The following modeling procedure has been applied:

- 1) Flow field calculations were performed in the greater area of study for various wind characteristics, to determine typical wind-driven steady flow fields. In these calculations a space staggered variable rectangular grid was employed (see Figure 1b), consisting of 150x138 control volumes, one layer in vertical direction and constant resolution equal to 250 mx250 m.
- 2) Flow field calculations were performed in the main area study to determine steady state fields. A space staggered variable rectangular grid was employed, consisting of 66x156 control volumes, one layer in vertical direction and constant resolution equal to 50 mx50 m. The calculations in the greater area of study were used to specify the boundary conditions in the two open sea boundaries.
- 3) Sediment transport calculations were performed in the main area study to determine total sediment concentration fields. The suspended matter consisted of 10 classes with characteristics that are shown in Table 1.

In calculations the following assumptions were made: (i) the capacity of dredged sediments, which escapes in the marine environment, is 12.1 kg/h and (ii) a complete

mixing regime with no settling (conservative assumption) of sediments occurs in the grid cells, where dredging is performed.

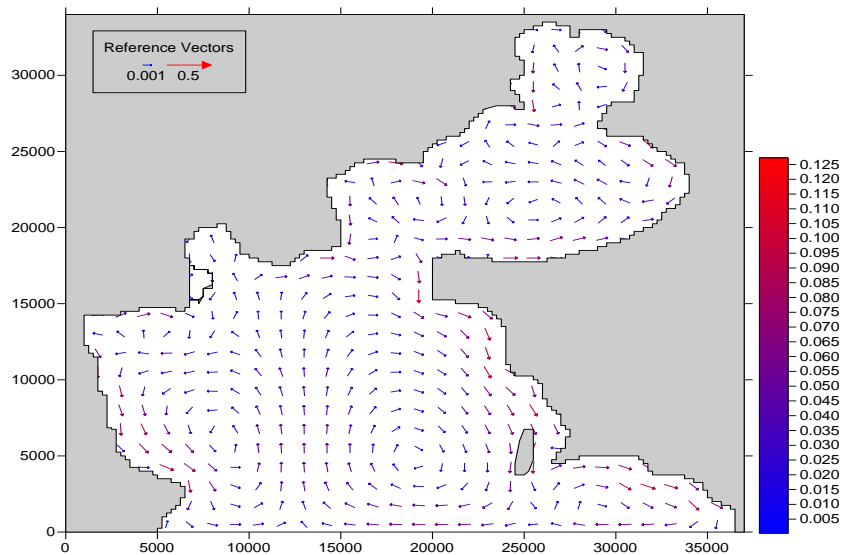
#### 4. RESULTS

##### 4.1. Flow field calculations

The calculated flow for a NW wind in the greater area and the main area of study are shown in Figure 3 and Figure 4, respectively. The NW wind conditions, which are the prevailing ones, drive the sediment plume towards the sensitive area of Epanomis.

**Table 1** Characteristics of the 10 sediment classes

Class (-)	Diameter (mm)	Percentage (%)	Settling Velocity (m/s)
1	31.75	3.4	0.771
2	22.23	0.8	0.645
3	15.88	1.2	0.545
4	11.12	1.9	0.456
5	7.15	3.3	0.366
6	3.38	7.4	0.252
7	1.50	6.7	0.168
8	0.71	13.3	0.092
9	0.28	26.6	0.040
10	0.11	35.4	0.009
Sum		100.0	
D <sub>50</sub>	0.30		0.043
D <sub>90</sub>	5.63		0.293



**Figure 3** Flow field in the greater area study for NW wind

4.2. Sediment calculations

The total steady-state sediment concentration field for the flow filed of Figure 3 and Figure 4 is shown in Figure 5. In Figure 6 the reduction of the total sediment concentration with the distance from the center of the dredged pit is shown. From the sediment calculations for all classes and Figures 4 and 5 the following conclusions are drawn:

- 1) The sediment plume followed the direction of coastal current, as expected.
- 2) The effect of settling of the settling velocity of each class influences significantly the distribution of sediment concentrations. The sediment concentration at distances (x) from the center of dredging area greater than 200 m in different scenarios varies from 10.4 to 22.8 mg/L.

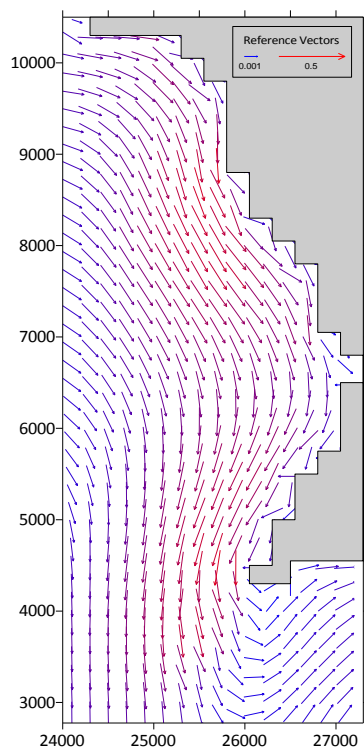


Figure 4 Flow field for NW wind

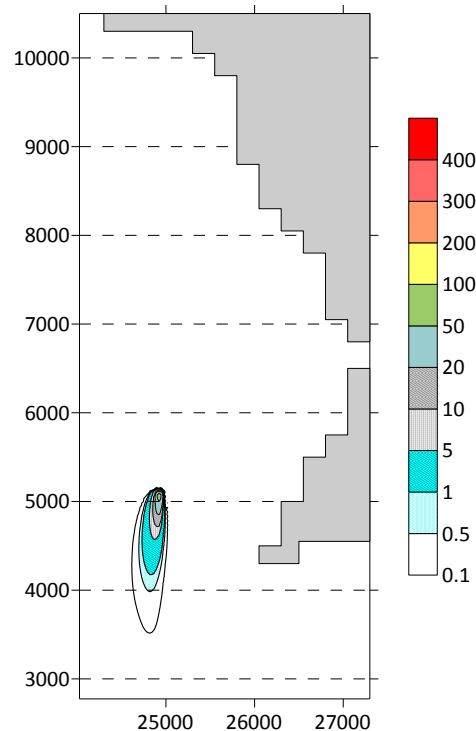
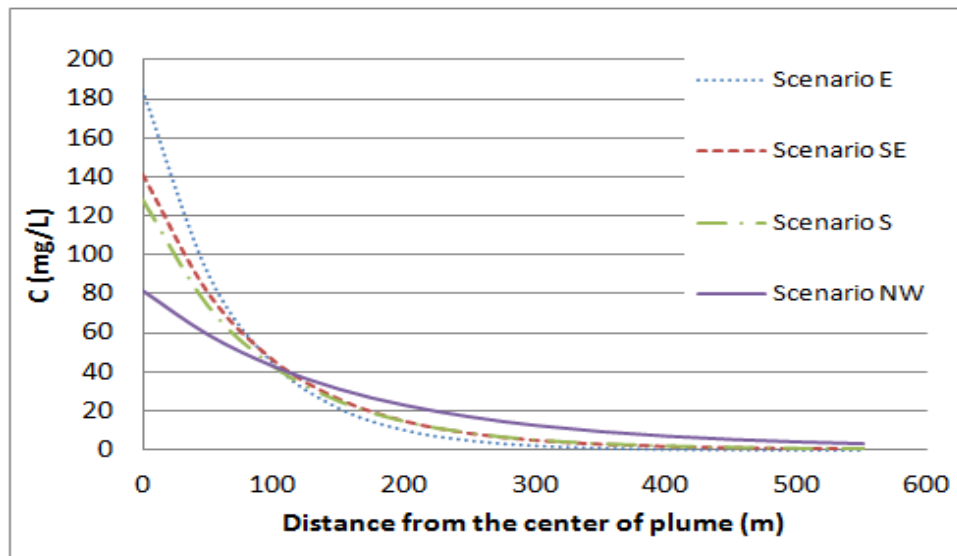


Figure 5 Calculated total steady- state sediment concentration values in mg/L

- 3) In the region (cells) of dredging the total sediment concentration was equal to 184 mg/L .At the downstream distances approximately to  $x=200$  m, the total concentration was 22.78 mg/L.



**Figure 6** Reduction of the total concentration with the distance from the center of dredged pit.

## 5. CONCLUSIONS

From the calculations of the present study it is concluded that the physical impacts of dredging, i.e. the total sediment concentration is less than 5 mg/L, is restricted to a distance smaller than approximately 350 m. This conclusion is generally in accordance with the finds of similar studies.

Moreover, it is shown that the sediment plume followed the direction of coastal current, as expected and the effect of settling of the settling velocity of each class influences significantly the distribution of sediment concentrations. The sediment concentration at distances (x) from the center of dredging area greater than 200 m in different scenarios varies from 10.4 to 22.8 mg/L.

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά- Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Τα τελευταία χρόνια ο παράκτιος χώρος της θάλασσας χαρακτηρίζεται από την έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα, με την κατασκευή τεχνικών έργων και άλλων παρεμβάσεων. Η εκσκαφή του πυθμένα της θάλασσας προκειμένου να ληφθεί αμμώδες υλικό, προοριζόμενο για διάφορες χρήσεις π.χ. ως υλικό επιχωμάτωσης ή ως υλικό πλήρωσης τεχνητής παραλίας στην ακτή, αποτελεί μια συχνή παρέμβαση.

Οποιαδήποτε ανθρώπινη παρέμβαση στον παράκτιο χώρο οφείλει να είναι ήπιας μορφής, περιβαλλοντικά σύμφωνη με την νομοθεσία και να μην προκαλεί διαταραχές στην ισορροπία τόσο του θαλάσσιου οικοσυστήματος όσο και της ακτής. Σε αντίθετη περίπτωση οι δυσμενείς επιπτώσεις που θα προκληθούν μπορεί να αποβούν καταστρεπτικές και μη αναστρέψιμες.

Ο αρμόδιος μηχανικός, που αναλαμβάνει τη μελέτη τέτοιων έργων, θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των τεχνικών παρεμβάσεων που σχεδιάζει και να φροντίσει την εξασφάλιση της προστασίας του περιβάλλοντος. Για το σωστό σχεδιασμό τέτοιων έργων, ο μηχανικός έχει στη διάθεση του μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τα φυσικά φαινόμενα, μέσω επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων με κατάλληλες αριθμητικές τεχνικές.

Οι αριθμητικές αυτές προσεγγίσεις μπορούν εύκολα και γρήγορα να εκτελεστούν σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, σε αντίθεση με τα φυσικά ομοιώματα που είναι περισσότερο δαπανηρά και απαιτούν υλικά, χρήση προσωπικού, μεγαλύτερο χρόνο εκτέλεσης κλπ.

Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης αριθμητικών επιλύσεων είναι ότι μπορούν να εκτελεστούν σε εκτεταμένες θαλάσσιες περιοχές με μικρή διακριτικότητα πεδίου με αποτέλεσμα να παρέχουν σημαντικό όγκο πληροφοριών, που είναι σχεδόν αδύνατο να πραγματοποιηθεί είτε με απευθείας μετρήσεις στο πεδίο είτε στο εργαστήριο με πειραματικές διατάξεις.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η χρήση μαθηματικών ομοιωμάτων αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο. Μαθηματικά ομοιώματα χρησιμοποιούνται εκτενώς για τη μελέτη της ανεμογενούς κυκλοφορίας, τη μεταφορά φερτών και τη συμπεριφορά του πλουμίου των αιωρούμενων στερεών που δημιουργούνται από θαλάσσια βυθοκόρηση. Συγκεκριμένα, στη προκειμένη εργασία χρησιμοποιείται το υδροδυναμικό μοντέλο και μοντέλο φερτών FLOW-3DL, για να δοθεί μια τεκμηριωμένη απάντηση στο κατά πόσο θα αναπληρωθεί με φυσικές δυνάμεις το τεχνητό όρυγμα που δημιουργήθηκε από τη βυθοκόρηση στον πυθμένα της θαλάσσιας περιοχής της Επανομής στο Θερμαϊκό Κόλπο και πόσο θα επηρεάσει την γύρω περιοχή.

Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη διεκπεραίωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι :

Εργασία 1 : Μελέτη και κατανόηση των εξισώσεων του μοντέλου FLOW- 3DL.

Εργασία 2 : Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την αναζήτηση εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά του πλουμίου των αιωρούμενων στερεών από θαλάσσια βυθοκόρηση και εξισώσεων για την προσομοίωση της ποιότητας των θαλάσσιων νερών από την απόληψη των υλικών.

Εργασία 3 : Ένταξη των εξισώσεων στον κώδικα του μοντέλου FLOW- 3DL και έλεγχος της ικανότητας του τροποποιημένου κώδικα να προσομοιώνει την παράκτια κυκλοφορία. Σύγκριση των αποτελεσμάτων με αναλυτικές λύσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Εργασία 4 : Προσομοίωση μεγάλου τμήματος του Θερμαϊκού Κόλπου διαστάσεων 37.5 km x 34.5 km, για να διερευνηθούν τα όρια της περιοχής του ορύγματος που θα δημιουργηθεί από τη βυθοκόρηση. Χρειάστηκε δημιουργία ομοιόμορφου αριθμητικού πλέγματος με διαστάσεις 250 m x 250 m (150 x 138 διαφορετικοί όγκοι). Το αριθμητικό πλέγμα δημιουργήθηκε σε υπολογιστικό φύλλο EXCEL, τα δεδομένα για τη γεωμετρία και βυθομετρία της περιοχής ελήφθησαν από χάρτη της Υδρογραφικής Υπηρεσίας κλίμακας 1:250.000, καθώς και χάρτες της ΓΥΣ 1:50.000. Από υπάρχουσα μελέτη ανάλυσης της κοκκομετρικής σύνθεσης των στερεών σε τρία δείγματα από την περιοχή του ορύγματος έγινε κατηγοριοποίηση τους σε 10 κλάσεις και υπολογίστηκε η ταχύτητα καθίζησης τους με βάση τη διάμετρο των κόκκων.

Εκτέλεση της υπορουτίνας του μοντέλου FLOW-3DL για δημιουργία των υδροδυναμικών πεδίων της περιοχής. Τα σενάρια που επιλέχθηκαν για να εφαρμοστούν στο μοντέλο FLOW- 3DL, ήταν είκοσι έξι. Τα 8 σενάρια αφορούν όλους τους πιθανούς ανέμους της περιοχής με τη μέση τιμή τους (1-11 Beauforts), σταθμισμένα ως προς τη συχνότητα εμφάνισή τους, τα υπόλοιπα δεκαοκτώ ήταν για ισχυρούς ανέμους ( $\geq 7$  Beauforts) με τη μέση τιμή τους. Έγινε απεικόνιση των υδροδυναμικών πεδίων με το πρόγραμμα Surfer. Η απεικόνιση βοήθησε στην κατανόηση της διεύθυνσης και της έντασης των ρευμάτων τόσο στην ευρύτερη περιοχή του Θερμαϊκού Κόλπου, όσο και στην περιοχή που βρίσκεται το όρυγμα.

Εργασία 5 : Προσομοίωση της μεταφοράς φερτών υλικών, χρησιμοποιώντας την τροποποιημένη υπορουτίνα των φερτών του μοντέλου FLOW-3DL, που περιλαμβάνει τις εξισώσεις που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία. Η προσομοίωση της μεταφοράς φερτών έγινε για τα είκοσι έξι σενάρια του βήματος 4, λαμβάνοντας υπόψη τα κυματικά χαρακτηριστικά τους και τα χαρακτηριστικά των στερεών. Ακόμα χρησιμοποιήθηκαν τα υπολογισμένα πεδία ροής του βήματος 4. Υπολογίστηκε έτσι το φορτίο πυθμένα, το φορτίο σε αιώρηση, καθώς και το συνολικό φορτίο των φερτών υλικών. Με βάση τη συχνότητα εμφάνισης του κάθε σεναρίου προέκυψαν οι αντιπροσωπευτικές τιμές της μεταφοράς φερτών υλικών στην περιοχή του υποβρυχίου ορύγματος.

Εργασία 6: Υπολογισμός του χρόνου αναπλήρωσης του υποβρυχίου ορύγματος. Επιλέχθηκε ένα μονοδιάστατο, μορφολογικό μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Kraus and Larson (2002), το οποίο περιγράφει τις βασικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα όρυγμα. Επιλύοντας τις εξισώσεις του μοντέλου με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιώντας ανάντη ρητό σχήμα διακριτοποίησης και



χρησιμοποιώντας τις αντιπροσωπευτικές τιμές της μεταφοράς φερτών (Εργασία 5), σε ένα υπολογιστικό φύλλο EXCEL, υπολογίστηκε ο χρόνος που χρειάζεται να αναπληρωθεί το υποβρύχιο όρυγμα, καθώς και πως μεταβάλλεται το πλάτος και το βάθος του ορύγματος με το χρόνο.

Εργασία 7 : Προσομοίωση της ποιότητας των νερών κατά την απόληψη υλικών. Δημιουργία νέου αριθμητικού πλέγματος που περιλάμβανε μόνο την περιοχή του ορύγματος, διαστάσεων 3.3 km x 7.8 km. Η διάσταση του ομοιόμορφου πλέγματος ήταν 50 m x 50 m και αποτελείτο από 66 x 156 διαφορετικούς όγκους. Τα σενάρια για τα οποία πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί ήταν τέσσερα, περιελάμβαναν μόνο τα σενάρια ΒΔ, Ν, ΝΑ, Α ανέμου που θεωρήθηκαν τα επικρατέστερα και τα δυσμενέστερα για την εξεταζόμενη περιοχή του υποβρυχίου ορύγματος. Έγινε η συντηρητική παραδοχή ότι οι διαστάσεις του πλουμίου ήταν 50 m x 50 m, οπότε κάλυπτε και την περιοχή ενός διαφορετικού όγκου. Η θέση της πηγής εκπομπής τοποθετήθηκε κεντροβαρικά στην περιοχή του υποβρυχίου ορύγματος. Υπολογίστηκε το φορτίο των στερεών κατά τη διάρκεια της απόληψης των στερεών (2 ώρες), κατά το συνολικό χρόνο της διαδικασίας απόληψης – μεταφοράς – επιστροφής στο όρυγμα (6 ώρες) και κατά τον πραγματικό χρόνο που αφορά 5.5 ώρες της διαδικασίας. Χάριν ασφαλείας στους υπολογισμούς έγιναν αρχικά συντηρητικοί υπολογισμοί μόνιμων πεδίων συγκεντρώσεων στερεών θεωρώντας τα μόνιμα πεδία ροής και το μέσο φορτίο λειτουργίας. Στη συνέχεια έγιναν υπολογισμοί θεωρώντας την πραγματική χρονική μεταβολή του φορτίου.

Εργασία 8 : Εξαγωγή συμπερασμάτων για τα συνολικά ερωτήματα της παρούσας εργασίας.

## 1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι δομημένη σε 7 κεφάλαια:

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή για τη θαλάσσια βυθοκόρηση και το σκοπό της διπλωματικής εργασίας.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των βασικών παραγόντων που καθορίζουν τις αιτίες και τα χαρακτηριστικά του πλουμίου των αιωρούμενων στερεών, καθώς και της μεταφοράς των φερτών. Δίνονται επίσης αναλυτικά οι μαθηματικές σχέσεις που έχουν προταθεί για την περιγραφή του φαινομένου της μεταφοράς στερεών υλικών.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του μοντέλου FLOW-3DL. Παρουσιάζονται οι διαφορικές εξισώσεις (πεδίου ροής, αιωρούμενων στερεών, στερεοπαροχής και μεταβολής του πυθμένα) που χρησιμοποιεί το μοντέλο και ακολούθως η αριθμητική τους επίλυση. Επεξηγούνται αναλυτικά οι οριακές συνθήκες που καθιστούν δυνατή την επίλυση των ανωτέρω εξισώσεων.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιέχονται σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την επιτυχή προσομοίωση συγκεκριμένων φυσικών φαινομένων με το μοντέλο FLOW-3DL. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτά τα πειράματα.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η εφαρμογή του μοντέλου στην περιοχή της Επανομής στον Θερμαϊκό κόλπο. Χωρίζεται σε 3 ενότητες. Η πρώτη περιορίζεται στο να δώσει συνοπτικά τα απαιτούμενα στοιχεία και δεδομένα για την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας. Στη δεύτερη ενότητα εμπεριέχονται τα πλήρη αποτελέσματα από τους υπολογισμούς της επαναπλήρωσης του ορύγματος και στη τρίτη ενότητα τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τους υπολογισμούς της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο βρίσκονται τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση.

Στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρατίθεται η χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία.

## 2 ΠΛΟΥΜΙΟ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ

### 2.1 Γενικά

Η βυθοκόρηση είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της απομάκρυνσης υλικού από τον πυθμένα, συνήθως με χρήση ειδικών πλωτών εγκαταστάσεων, των βυθοκόρων. Κατά τη διάρκεια των εργασιών της βυθοκόρησης δημιουργούνται ορισμένες δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον που συνδέονται με την απομάκρυνση του υλικού από τον πυθμένα, όπως είναι η υποβάθμιση της ποιότητας του νερού και η αύξηση της θολερότητας. Βασικός παράγοντας που επηρεάζει την διαδικασία της βυθοκόρησης είναι το υλικό του πυθμένα.

### 2.2 Χαρακτηριστικά του υλικού πυθμένα

Τα βασικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυθμένα είναι το μέγεθος των κόκκων, το σχήμα, η πυκνότητα και το βάρος του.

#### 2.2.1 Μέγεθος

Το μέγεθος των κόκκων των στερεών όπως είναι φυσικό ποικίλει, συνεπώς και τα δείγματα των φερτών αποτελούνται από ποικιλία κόκκων με διαφορετικό μέγεθος το καθένα. Ο Sleath (1984) προτείνει να λαμβάνονται ως μέτρο σύγκρισης μεταξύ των κόκκων οι παρακάτω παράμετροι:

- (α) η διάμετρος του κόσκινου από το οποίο διέρχονται οι κόκκοι
- (β) η διάμετρος της σφαίρας με το ίδιο μέγεθος
- (γ) το μήκος του μικρού, μέσου ή μεγάλου άξονα των κόκκων ή κάποιος συνδυασμός αυτών των μηκών
- (δ) η διάμετρος της αντίστοιχης λείας σφαίρας με την ίδια πυκνότητα και την ίδια ταχύτητα καθίζησης.

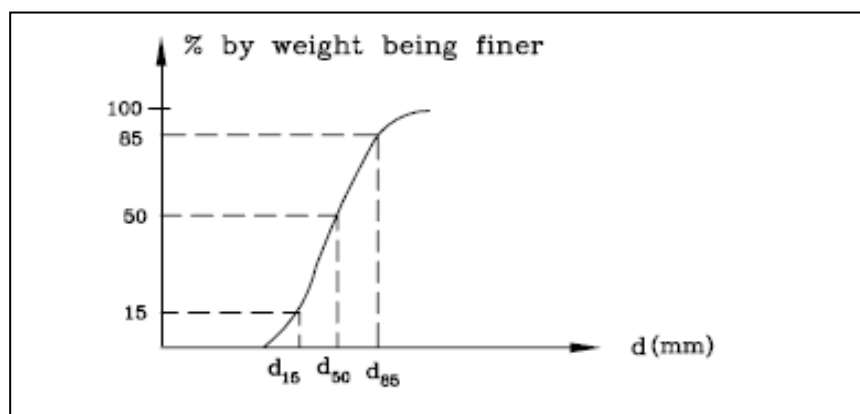
Ο Sleath, ακόμα, προτείνει να χρησιμοποιείται ένα συγκεκριμένο μέθοδος που θα χαρακτηρίζει το σύνολο των κόκκων κάθε δείγματος. Τα πιο συνήθη μεγέθη που χρησιμοποιούνται είναι:

- (α) η μέση διάμετρος  $D_{50}$  των κόκκων
- (β) το μέγεθος των κόκκων αναφερόμενο σε κάποιο συγκεκριμένο ποσοστό κόκκων όπως  $D_{90}, D_{65}$
- (γ) γεωμετρικό μέσο  $D_g$ .

Η μέση διάμετρος των κόκκων ορίζεται ως το μέγεθος από το οποίο το 50 % κατά βάρος των κόκκων είναι μικρότερο. Αντίστοιχα ορίζονται και οι διάμετροι  $D_{90}, D_{65}$ . Σημειώνεται ότι είναι δυνατό να συναντώνται και άλλες διάμετροι όπως  $D_{10}, D_{16}, D_{84}$ . Ο γεωμετρικός μέσος είναι ένας όρος που δίνεται ως:

$$D_g = (D_{84.1} D_{15.1})^{1/2} \quad (2.1)$$

όπου  $D_{84.1}$ ,  $D_{15.1}$  το μέγεθος από το οποίο το 84.1% και το 15.1 % αντίστοιχα είναι μικρότερο κατά βάρος.



**Σχήμα 2.1** Κατανομή του μεγέθους των κόκκων, ανάλυση Sieve (Liu, 2001)

### 2.2.2 Σχήμα

Γενικά, το σχήμα των κόκκων περιγράφεται ως τριαξονικό ελλειψοειδές, με διάμετρο κατά το μικρό, τον μέσο και τον κατακόρυφο άξονα των κόκκων  $D_a$ ,  $D_b$  και  $D_c$  αντίστοιχα.

Στη διεθνή βιβλιογραφία πολλές είναι οι σχέσεις που προτείνονται για το χαρακτηρισμό του σχήματος των κόκκων, αλλά καμία δεν είναι απολύτως ικανοποιητική. Η πιο συνηθισμένη είναι:

$$S.F. = \frac{D_a}{(D_b D_c)^{1/2}}, \text{ όπου } S.F. = \text{παράγοντας σχήματος} \quad (2.2)$$

όπου  $D_a$ ,  $D_b$ ,  $D_c$  τα μήκη του μικρού, μέσου και μεγάλου κατακόρυφου άξονα των κόκκων.

### 2.2.3 Πυκνότητα, ειδικό βάρος

Η πυκνότητα και το ειδικό βάρος των κόκκων εξαρτάται από το πορώδες  $n$  του δείγματος και από το αν οι πόροι είναι γεμάτοι από νερό ή αέρα. Αν  $\rho_1$  η πυκνότητα στο στρώμα του πυθμένα,  $\rho_s$  αυτή των σωματιδίων και  $\rho$  η πυκνότητα του νερού που διέρχεται από τους πόρους τότε ισχύει:

$$\rho_1 = (1 - n) \cdot \rho_s + n \cdot \rho \quad (2.3)$$

Η παραπάνω σχέση προϋποθέτει ότι οι πόροι είναι γεμάτοι με το ίδιο ρευστό, είτε νερό είτε αέρα. Σε περίπτωση που αυτό δεν ισχύει, η πυκνότητα  $\rho$  πρέπει να θεωρηθεί ως η μέση τιμή της πυκνότητας του νερού και της αντίστοιχης του αέρα που γεμίζει τα κενά. Για τις άμμους στα νερά της Ευρώπης έχει βρεθεί ότι η πυκνότητα  $\rho_s$  είναι ίση με  $2650 \text{ kg/m}^3$  (Soulsby, 1997).

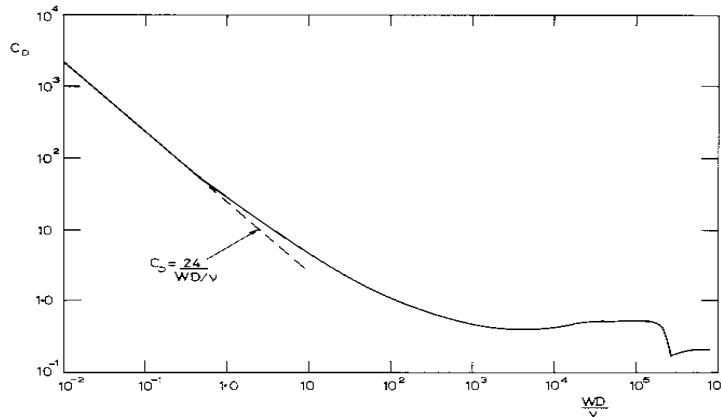
### 2.2.4 Ταχύτητα καθίζησης

Ως ταχύτητα καθίζησης ( $W$ ) ορίζεται η ταχύτητα με την οποία καθιζάνουν τα σωματίδια όταν βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας. Σε αυτή την κατάσταση η συρτική δύναμη που

ασκείται από το νερό πρέπει να εξισορροπεί τη βαρυτική δύναμη που τείνει να μετακινήσει τα σωματίδια προς τα κάτω. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται από τη σχέση (Sleath, 1984):

$$\frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g = C_D \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \rho \cdot \frac{W^2}{2} \quad (2.4)$$

$C_D$ : ονομάζεται ο συρτικός συντελεστής ο οποίος μεταβάλλεται με τον αριθμό Reynolds όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



**Σχήμα 2.2** Μεταβολή του συρτικού συντελεστή  $C_D$  με τον αριθμό Reynolds για απεριόριστο ρευστό (Sleath, 1984)

Για αριθμούς Reynolds  $=WD/v < 0.1$  όπου  $W$  η ταχύτητα καθίζησης, ο συντελεστής  $C_D$  είναι:

$$C_D = \frac{24}{(W \cdot D / \nu)} \quad (2.5)$$

ενώ για τιμές Reynolds στο διάστημα  $400 < WD/v < 200000$  δίνουν  $C_D$  περίπου σταθερό και εφαρμόζοντας την εξίσωση (2.4) η ταχύτητα καθίζησης είναι:

$$W = const \cdot \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot g \cdot D \right) \quad (2.6)$$

Η ταχύτητα καθίζησης ( $W$ ) των φερτών αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για την περιγραφή της κίνησης και μεταφοράς των φερτών.

### 2.2.5 Επίδραση του σχήματος

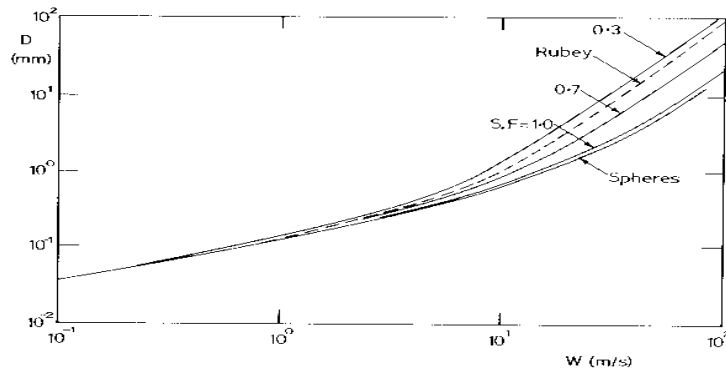
Η ταχύτητα καθίζησης των κόκκων εξαρτάται από το σχήμα τους. Το Σχήμα 2.3 δείχνει πως ο παράγοντας S.F (shape factor) επιδρά στην ταχύτητα καθίζησης. Παρατηρείται ότι για μικρά μεγέθη (μικρές διαμέτρους) η επιρροή του σχήματος στην ταχύτητα καθίζησης δεν είναι μεγάλη. Κάτι αξιοσημείωτο ακόμα είναι πως η καμπύλη που αντιστοιχεί στο σφαιρικό σχήμα δεν είναι ταυτόσημη με την καμπύλη για S.F ίσο με 1. Αυτό μπορεί να υποδηλώνει ότι το σχήμα είναι κύβος ή οτιδήποτε άλλο και όχι απαραίτητα σφαιρικό. Στο ίδιο σχήμα παρατίθεται επίσης η γνωστή καμπύλη του Rubey (1933) για σωματίδια άμμου.

Παρακάτω δίνονται κάποιες σχέσεις που μπορούν να εξαχθούν από το σχήμα και συνδέουν τον παράγοντα του σχήματος (S.F) με την ταχύτητα καθίζησης :

$$\text{για } 90 > D > 3 \text{ mm και } S.F=1.0 \quad W=6.5 D^{1/2}$$

$$\text{ενώ για } D < 0.1 \text{ mm} \quad W=92 * 10^4 D^2$$

Στα παραπάνω, το άνω όριο της διαμέτρου αναφέρεται στη τιμή  $WD/v=200000$ , αφού για μεγαλύτερες τιμές του Reynolds ο συντελεστής  $C_D$  δεν είναι πια σταθερός, εξαιτίας της τυρβώδους ροής κι έτσι δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί μία σχέση για μεγαλύτερες διαμέτρους που να είναι ακριβής.

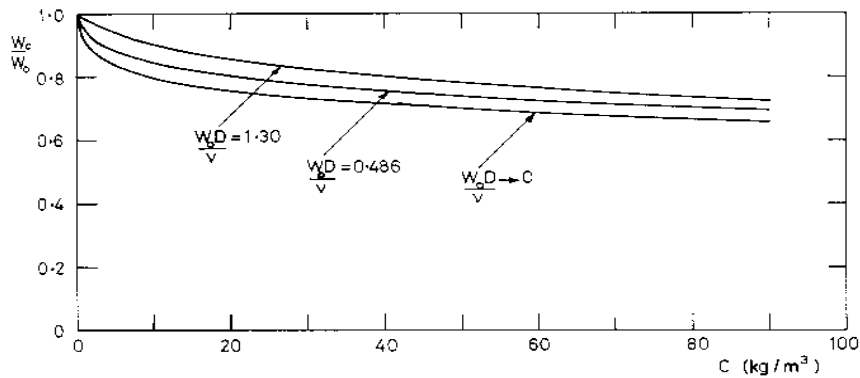


**Σχήμα 2.3** Επίδραση της συγκέντρωσης στην ταχύτητα καθίζησης (McNown and Lin, 1952)

### 2.2.6 Επίδραση της συγκέντρωσης των σωματιδίων

Τα φερτά είναι μάζα διαφορετικών κόκκων. Η ποικιλία των κόκκων επηρεάζει την τιμή της  $W$ . Μία μικρή μάζα φερτών καθιζάνει πιο γρήγορα από ότι ένα μεμονωμένο σωματίδιο. Από την άλλη μεριά σε μια ομοιόμορφη αιώρηση, η ταχύτητα καθίζησης κάθε σωματιδίου θα είναι μικρότερη από την ταχύτητα καθίζησης ενός αντίστοιχου σωματιδίου σε ένα «καθαρό» (χωρίς την παρουσία άλλων κόκκων) πεδίο. Αυτό οφείλεται στο ότι η πτώση ενός κόκκου προκαλεί άνοδο της ροής σε κάποιο άλλο σημείο του πεδίου παρεμποδίζοντας έτσι την πτώση και άλλων κόκκων.

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η πιο συνηθισμένη κατάσταση που συναντάμε, που είναι αυτή της διάχυσης και διασποράς των φερτών σε όλο το πεδίο. Το συγκεκριμένο σχήμα βασίζεται σε θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τους McNown and Lin (1952). Αν και θεωρητικά τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ικανοποιητική συμφωνία με πειραματικές μετρήσεις για τιμές συγκεντρώσεων από 1 έως 60  $\text{kg/m}^3$ . Στο Σχήμα 2.4,  $W_c$  είναι η ταχύτητα καθίζησης για συγκέντρωση  $C$  και  $W_o$  είναι η εκείνη για καθαρό πεδίο. Συμπερασματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι μικρές συγκεντρώσεις δίνουν μεγάλες ταχύτητες  $W$ .



**Σχήμα 2.4** Επίδραση της συγκέντρωσης στην ταχύτητα καθίζησης (McNown and Lin, 1952)

## 2.3 Δυνάμεις που ασκούνται στο υλικό του πυθμένα

### 2.3.1 Εισαγωγή

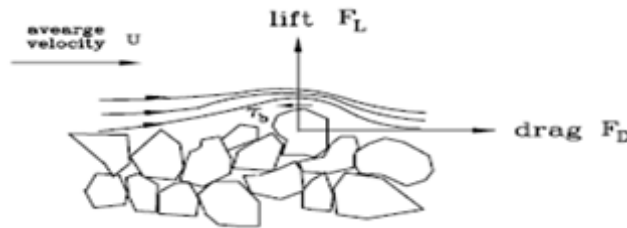
Η ροή του νερού πάνω σε πυθμένα που περιλαμβάνει φερτά έχει σαν αποτέλεσμα να ασκούνται πάνω στα σωματίδια μία ανυψωτική δύναμη (lift force) και μία συρτική στον πυθμένα (drag force). Σε αντιδιαστολή με αυτές, σε λεπτόκοκκα ιζήματα επιδρά μεταξύ των σωματιδίων μία δύναμη συνεκτικότητας που σε συνδυασμό με τη βαρυτική αντιδρά στην κινητοποίηση των κόκκων. Εάν έχουμε κίνηση στη ζώνη του πυθμένα (και όχι σε αιώρηση) τότε αναπτύσσεται μία δύναμη διασποράς ανάμεσα στους κόκκους των φερτών η οποία ασκεί πίεση στον πυθμένα και τελικά ενισχύει τη σταθερότητα του. Σε περίπτωση που το υπόγειο νερό έχει διαφορετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά (πυκνότητα, θερμοκρασία κ.α.) από το νερό της επιφάνειας τότε τα φερτά του πυθμένα καταπονούνται και από δυνάμεις διήθησης που οφείλονται σε αυτή τη διαφορά.

### 2.3.2 Ανυψωτικές δυνάμεις

Καθώς πραγματοποιείται η ροή, αναπτύσσεται δύναμη τριβής  $F_1$  (Σχήμα 2.5) κατά τη διεύθυνση της ροής στο τμήμα των σωματιδίων που βρίσκεται σε επαφή με τον πυθμένα. Αρχικά, επειδή μόνο το πάνω τμήμα των κόκκων ενεργοποιείται από το νερό, η  $F_1$  δεν ασκείται στο κέντρο τους. Εάν ο αριθμός Reynolds ( $U_* D/v$ ), όπου  $U_*$  είναι η ταχύτητα τριβής,  $D$  η διάμετρος των κόκκων και  $v$  ο συντελεστής κινηματικής συνεκτικότητας, είναι μικρότερος του 3.5, η δύναμη τριβής είναι η μόνη δύναμη που επιδρά. Εάν είναι μεγαλύτερος, τότε επιδρούν άλλοι μηχανισμοί που προκαλούν μία διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών της επιφάνειας των κόκκων και έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη της δύναμης  $F_2$ . Σε περίπτωση που ο κόκκος είναι σφαιρικός, η  $F_2$  εφαρμόζεται στο κέντρο τους. Ο συνδυασμός των  $F_1$  και  $F_2$  σχηματίζουν την  $F_D$  που αντιπροσωπεύει την δύναμη που τείνει να σύρει τα φερτά από τον πυθμένα.

Οι ταχύτητες που αναπτύσσονται στην κορυφή και το κάτω μέρος ενός κόκκου δεν είναι ίδιες. Εκείνη που υπάρχει στην κορυφή είναι η ταχύτητα του πεδίου ροής στον πυθμένα, ενώ η άλλη είναι η ταχύτητα διήθησης του νερού στο στρώμα του πυθμένα.

Η τελευταία είναι αρκετά μικρότερη. Το γεγονός αυτό (διαφορετικές ταχύτητες) δημιουργεί διαφορά πίεσης στην κορυφή και τον πυθμένα και των κόκκων. Η πίεση στην κορυφή είναι αρκετά μικρότερη από την υδροστατική εξαιτίας των μεγάλων ταχυτήτων, ενώ στη βάση των κόκκων είναι υδροστατική. Εντέλει η διαφορά πίεσης οδηγεί σε μία δύναμη ανύψωσης  $F_L$  που ασκείται στα σωματίδια. Στα σωματίδια σφαιρικού τύπου έχει σημείο εφαρμογής το κέντρο τους. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στο Σχήμα 2.5.



**Σχήμα 2.5** Δυνάμεις που ασκούνται στους κόκκους του πυθμένα (Liu, 2001)

Η ανυψωτική δύναμη δεν είχε αναγνωρισθεί ευρέως στο παρελθόν και στις αρχικές έρευνες προσμετρούταν μόνο η συρτική δύναμη των φερτών. Οι δύο δυνάμεις μπορούν να δοθούν γενικά από τις σχέσεις:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot U^2 \quad (2.7)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot U^2 \quad (2.8)$$

όπου  $C_D$  και  $C_L$  είναι συντελεστές που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της ροής γύρω από τα σωματίδια,  $U$  η ταχύτητα κοντά στα σωματίδια και  $A$  το εμβαδόν των κόκκων.

### 2.3.3 Δύναμη συνεκτικότητας

Γενικά για μη συνεκτικά εδάφη το βάρος των κόκκων αντιστέκεται στις δυνάμεις που τείνουν να τους θέσουν σε κίνηση. Για συνεκτικά ιζήματα ευθύνεται και μία δύναμη συνοχής για την αντίδραση στις κινητήριες δυνάμεις. Αν παρομοιάσουμε τους κόκκους με δύο παράλληλα μεταξύ τους πιάτα τότε γίνεται αντιληπτό ότι για να κινηθεί το από κάτω «πιάτο» χρειάζεται να υπερνικήσει όχι μόνο το βάρος του αλλά και την δύναμη  $N$  που ασκείται από τον πάνω κόκκο.

$$N = \gamma \cdot (h_a + h) \cdot A \quad (2.9)$$

όπου  $h$  το βάθος του νερού,  $h_a$  το στρώμα του νερού στο οποίο η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική και  $A$  η επιφάνεια επαφής.

Στα φερτά, ως επιφάνεια επαφής θα πρέπει να λογιστεί μία επιφάνεια ανάλογη με τη διάμετρο και τα κενά των κόκκων. Έτσι η εξίσωση (2.9) μετατρέπεται στην:

$$N \sim D^2 \cdot \frac{1}{D^m} \cdot \gamma \cdot (h + h_a) \quad (2.10)$$

και ο εκθέτης  $m$  λαμβάνεται συνήθως ίσος με 0.72.



### 2.3.4 Δύναμη διασποράς

Καθώς ένα σωματίδιο αρχίζει να κινείται στον πυθμένα, σταδιακά η δύναμη  $F_D$  μεγαλώνει όσο αυτό μεταφέρεται σε πεδία με μεγαλύτερες ταχύτητες και ελαττώνεται η δύναμη  $F_L$ . Η μείωση της  $F_L$  οφείλεται στη πτώση της διαφοράς πίεσης στη κορυφή και τη βάση των κόκκων, εφόσον αυτά με την κίνηση τους ανέρχονται σε σημεία ψηλότερα του πυθμένα. Ωστόσο, επειδή τα σωματίδια δεν κινούνται μεμονωμένα αλλά ως ένα ενιαίο συσσωμάτωμα, δημιουργείται αλληλεπίδραση μεταξύ των κόκκων και της ροής. Η κίνηση τους επηρεάζεται από την κίνηση του ρεύματος γύρω από αυτά. Έτσι εμφανίζεται μία δύναμη  $P$  μεταξύ των κόκκων κάθετη στη ροή. Όσο πιο κοντά είναι τα σωματίδια τόσο μεγαλύτερη είναι αυτή η δύναμη:

$$\frac{P}{F_D} = \frac{0.15D}{s} \quad (2.11)$$

όπου  $s$  είναι η απόσταση μεταξύ των κόκκων

Επειδή κάποια από τα φερτά κινούνται γρηγορότερα από κάποια άλλα, είναι αναπόφευκτο να γίνονται μικρές «κατολισθήσεις» οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση της ροής. Οι κατολισθήσεις αυτές προκαλούν αυτή τη δύναμη  $P$  η οποία μεταφέρεται στον πυθμένα και λειτουργεί σαν επιπλέον βάρος και ενισχύει τη σταθερότητά του ενάντια στις κινητήριες δυνάμεις.

### 2.3.5 Δύναμη διήθησης

Διήθηση πραγματοποιείται όταν ως γνωστόν ο πυθμένας είναι διαπερατός και το νερό μπορεί να κινείται και στο έδαφος. Η ταχύτητα διήθησης δίνεται ως:

$$u_s = -K \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.12)$$

$K$  είναι ο συντελεστής διαπερατότητας του υλικού του πυθμένα και  $\partial h / \partial y$  το πιεζομετρικό φορτίο.

Η δύναμη διήθησης σε κάθε κόκκο δίνεται :

$$F_s = -C \cdot (1 + e) \cdot \gamma \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.13)$$

όπου  $\gamma$  το ειδικό βάρος του νερού,  $e$  το πορώδες του πυθμένα,  $C$  συντελεστής με τιμές από 0.35-0.5.

## 2.4 Προϋποθέσεις κίνησης των φερτών

Όταν η ένταση της ροής φτάνει σε μία κρίσιμη τιμή, τα φερτά αρχίζουν να κινούνται. Παρουσιάζονται όμως αρκετές δυσκολίες στο να καθοριστούν επακριβώς οι συνθήκες που προκαλούν την κίνηση για κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Ο πυθμένας, συνήθως, περιλαμβάνει πλήθος κόκκων με διαφορετικούς συνδυασμούς μεγεθών, σχήματος, ειδικού βάρους και άλλων παραγόντων από θέση σε θέση. Εξάλλου και η ίδια η ροή έχει κυμαινόμενα χαρακτηριστικά. Για αυτό το λόγο και οι δυνάμεις που ασκούνται κάθε φορά

στα σωματίδια μεταβάλλονται με το χρόνο ακόμα και αν εξεταστούν οι κόκκοι στην ίδια τοποθεσία. Συνήθως οι μεγαλύτεροι σε μέγεθος κόκκοι αρχικά παραμένουν στον πυθμένα και οι μικρότεροι κινούνται, χωρίς όμως να μπορούν να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά τους. Παρατηρείται ακόμα το φαινόμενο κάποιες φορές τα φερτά σε μία θέση να κινούνται και σε μια άλλη χρονική στιγμή κάτω από τις ίδιες γενικά συνθήκες να παραμένουν ακίνητα. Θα μπορούσε να περιγραφεί το φαινόμενο της έναρξης της κίνησης των φερτών σαν ένα στοχαστικό φαινόμενο. Ο Kramer πρότεινε την περιγραφή της μεταφοράς φερτών στον πυθμένα σε τέσσερα στάδια (Κουτίτας, 1985):

(α) καμία μεταφορά φερτών: όλα τα σωματίδια βρίσκονται ακίνητα στον πυθμένα,

(β) αραιή μεταφορά: λίγα μόνο σωματίδια σύρονται αραιά σε κάποιες θέσεις,

(γ) μέση μεταφορά :κινούνται μόνο κόκκοι που έχουν διάμετρο μικρότερη από τη μέση  $D_{50}$  σε όλη τη ζώνη του πυθμένα αλλά τόσο έντονα που δεν είναι δυνατό να βρεθεί ο αριθμός τους και

(δ) έντονη μεταφορά: όλα τα σωματίδια κινούνται και η στάθμη του πυθμένα μεταβάλλεται.

Η αρχική κίνηση των φερτών εξαρτάται από την αλληλεπίδραση δύο μεταβλητών παραγόντων ως εξής:

(α) κάθε κόκκος στο πυθμένα θα αρχίσει να κινείται μόλις ασκηθεί πάνω του μία κρίσιμη τιμή της διατμητικής τάσης του πυθμένα. Ακόμα και σε ομοιόμορφες ροές οι κρίσιμες αυτές τιμές είναι διαφορετικές μεταξύ τους για κάθε κόκκο ξεχωριστά λόγω της διαφορετικής θέσης του καθενός. Αν συνυπολογιστούν και άλλοι παράγοντες όπως μέγεθος, σχήμα, διαβάθμιση και προσανατολισμός των κόκκων, τότε η κρίσιμη τάση  $\tau_c$  μεταβάλλεται ακολουθώντας στατιστικά κριτήρια.

(β) η τύρβη κοντά στον πυθμένα προκαλεί τη διακύμανση της διατμητικής τάσης. Ο προσδιορισμός και αυτής της διακύμανσης μόνο στοχαστικά μπορεί να γίνει ενώ επηρεάζει και τα χαρακτηριστικά της ροής.

Στην απλούστερη περίπτωση θεωρείται ότι η ροή κοντά στον πυθμένα είναι στρωτή και η τάση που ασκείται συμβολίζεται με  $\tau_0$ . Για κάποιες τιμές ροής αρχίζουν να μετακινούνται τα πρώτα σωματίδια και καθώς η τιμή της αυξάνεται, αυξάνεται και ο αριθμός των σωματιδίων που βρίσκονται σε κίνηση. Ασφαλώς με την πάροδο του χρόνου και η ίδια η ροή γίνεται πιο έντονη. Όμως, η ροή τις περισσότερες φορές δεν είναι στρωτή αλλά τυρβώδης κοντά στον πυθμένα. Ακόμα κι αν ο πυθμένας περιλαμβάνει λείο υπόστρωμα όπου η ροή είναι στρωτή, εισέρχονται μικροί στρόβιλοι από την υπόλοιπη ροή και προκαλούν διακυμάνσεις. Και σε αυτή την περίπτωση ο καθορισμός της τοποθεσίας όπου θα παρατηρηθεί αρχικά μεταφορά είναι στοχαστικός.

Συμπερασματικά οι παράγοντες που καθορίζουν την έναρξη της μεταφοράς των φερτών υλικών είναι: η διατμητική τάση του πυθμένα και η μέση ταχύτητα του ρεύματος του νερού.

Ο καθορισμός της κρίσιμης τάσης  $\tau_c$  γίνεται γενικά με το νόμο του Shields. Ο Shields θεωρεί απλοποιητικά τους κόκκους ομοιόμορφους και σφαιρικούς έτσι ώστε το βάρος τους να μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (2.14):

$$W = (\gamma_s - \gamma) \cdot \frac{\pi \cdot D^3}{6} \quad (2.14)$$

Οι δυνάμεις που επιδρούν πάνω στους κόκκους όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα είναι κυρίως η συρτική και η ανυψωτική δύναμη.

Με βάση τα παραπάνω η συνθήκη που πρέπει να ισχύει για να αρχίσουν τα φερτά να κινούνται είναι :

$$F_D = f(W - F_L) \quad (2.15)$$

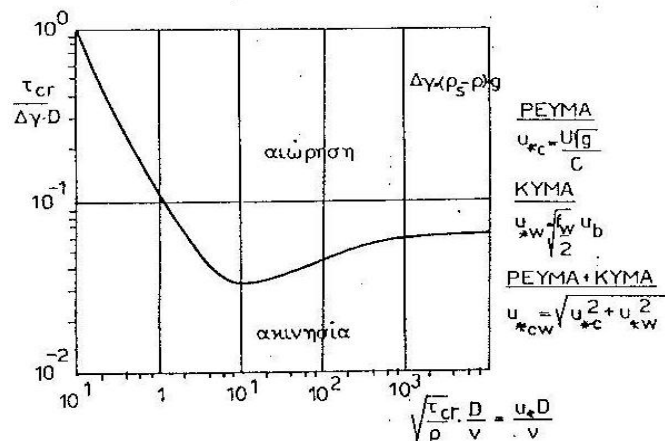
όπου  $f$  είναι ο συντελεστής τριβής ανάμεσα στους κόκκους. Αντικαθιστώντας τις δυνάμεις στην εξίσωση (2.15) αυτή μετατρέπεται ως εξής:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D} = \frac{4}{3} \frac{f}{(C_D + fC_L) \cdot \left[ f_2 \cdot \left( \frac{U_* D}{\nu} \right) \right]^2} \quad (2.16)$$

Όμως ο συντελεστής  $C_D$  εξαρτάται από το σχήμα των κόκκων και τον αριθμό Reynolds. Εφόσον το σχήμα είναι σφαιρικό, τότε ο  $C_D$  εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Reynolds. Το ίδιο ισχύει και για τον  $C_L$  οπότε:

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D} = f \cdot \left( \frac{U_* \cdot D}{\nu} \right) \quad (2.17)$$

Αυτή είναι και η σχέση του Shields από την οποία υπολογίζεται η  $\tau_c$ . Σχηματικά αυτή μπορεί να δοθεί και από το Σχήμα 2.6.



**Σχήμα 2.6** Διάγραμμα του Shields: Υπολογισμός της κρίσιμης διατμητικής τάσης  $\tau_c$  (Κουτίτας, 1985)

Στο παραπάνω διάγραμμα δίνονται τα ζεύγη των ταχυτήτων τριβής με τις αντίστοιχες διατμητικές τάσεις του πυθμένα πέρα από τις οποίες κινητοποιούνται τα φερτά. Άνωθεν της γραμμής τα φερτά βρίσκονται σε αιώρηση και κάτω από αυτή είναι ακινητοποιημένα. Παρατηρείται επίσης ότι η ταχύτητα τριβής περιγράφεται ως το διανυσματικό άθροισμα των ταχυτήτων ρεύματος και κύματος. Στην περίπτωση που έχουμε μόνο την επίδραση του ρεύματος τότε αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$u_{*c} = \frac{U \cdot \sqrt{g}}{C} \quad (2.18)$$

U: η μέση ταχύτητα του ρεύματος (m/s)

g: επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s<sup>2</sup>)

C: συντελεστής τριβής Chezy

Η μέση ταχύτητα του ρεύματος υπολογίζεται με το ολοκλήρωμα:

$$U = \frac{1}{h} \int_0^h u(z) dz \quad (2.19)$$

όπου h το βάθος του νερού,  $u(z)$  η τιμή της ταχύτητας σε βάθος z από τον πυθμένα.

Η σχέση που συνδέει την ταχύτητα τριβής με την τάση  $\tau_0$  είναι:

$$\tau_0 = \rho \cdot u_*^2 \quad (2.20)$$

Συμπερασματικά, αποδεικνύει ότι η ταχύτητα τριβής δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας εναλλακτικός τρόπος να περιγράψουμε την τάση σε μονάδες ταχύτητας. Ως τάση  $\tau_0$  λοιπόν θεωρείται η δύναμη τριβής ανά μονάδα επιφάνειας που ασκείται στο υλικό του πυθμένα από την επίδραση του ρεύματος και είναι, όπως αποδείχθηκε από τα παραπάνω ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, ενδεικτικός της επιρροής της ροής των φερτών πάνω στον πυθμένα. Μία ακόμα σχέση που δεν πρέπει να παραλείψουμε είναι αυτή που συνδέει την  $\tau_0$  με την μέση ταχύτητα και το συντελεστή  $C_D$ :

$$\tau_0 = \rho \cdot C_D \cdot \bar{U}^2 \quad (2.21)$$

Η μελέτη του Shields αφορούσε τυρβώδη ροή.

## 2.5 Μορφές Πυθμένα

### 2.5.1 Γενικά

Στον πυθμένα δημιουργούνται διάφοροι σχηματισμοί από τη στιγμή που η διατμητική τάση του πυθμένα ξεπερνά τη κρίσιμη τιμή και τα φερτά αρχίζουν να κινούνται και να μεταφέρονται είτε σε αιώρηση είτε σε επαφή με τον πυθμένα. Οι μορφές αυτών των σχηματισμών εξαρτώνται από την ένταση και την αιτία που έχει προκαλέσει την ροή: ρεύμα, παλίρροια, κύματα ή συνδυασμός όλων αυτών. Τα ρεύματα σχηματίζουν γενικά αμμοκυμάτια (ripples) και αμμόλοφους (dunes). Η παλίρροια προκαλεί τους ίδιους σχηματισμούς πυθμένα με τα ρεύματα, ωστόσο η ταλάντωσή της μετασχηματίζει διαρκώς το πυθμένα δίνοντας πιο συμμετρικές μορφές των παραπάνω τύπων. Τα κύματα στις

περιοχές που αποτελούν την κυρίαρχη αιτία ροής του νερού, προκαλούν τα λεγόμενα κυματογενή αμμοκυμάτια που έχουν αρκετά διαφορετικό σχήμα από τα αντίστοιχα των ρευμάτων.

Γενικότερα, οι διάφορες μορφές του πυθμένα που οφείλονται στην κίνηση του υλικού του έχουν σοβαρή επίδραση στα χαρακτηριστικά τριβής και τύρβης της ροής και επηρεάζουν είτε άμεσα (κίνηση στη ζώνη του πυθμένα), είτε έμμεσα (αιώρηση) τη μεταφορά των φερτών.

### 2.5.2 Αμμοκυμάτια (ripples)

Όταν ο πυθμένας είναι αρχικά επίπεδος (flat bed) και οι ταχύτητες του νερού κοντά σε αυτόν είναι χαμηλές, τότε δεν παρατηρείται μετακίνηση φερτών. Υπάρχει όμως μία κρίσιμη τιμή πέραν από την οποία ξεκινούν τα πρώτα σωματίδια να κινούνται. Αμέσως μετά παρατηρείται μία συσσώρευση ορισμένων από αυτών που σχηματίζουν μικρές στρώσεις, τα λεγόμενα αμμοκυμάτια (ripples). Το μέγεθος τους συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.5 cm μέχρι 2 cm και εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων του υλικού. Τα αμμοκυμάτια αποτελούν τον απλούστερο σχηματισμό που παρατηρείται στον πυθμένα. Η εμφάνιση τους οφείλεται στις ασταθείς συνθήκες που επικρατούν κοντά στην οριακή στοιβάδα. Ο σχηματισμός τους είναι δυνατός τόσο στα βαθιά όσο και σε ρηχά νερά.

Από παρατηρήσεις έχει προκύψει ότι το τυπικό ύψος των αμμοκυμάτων και μήκος δίνεται από:

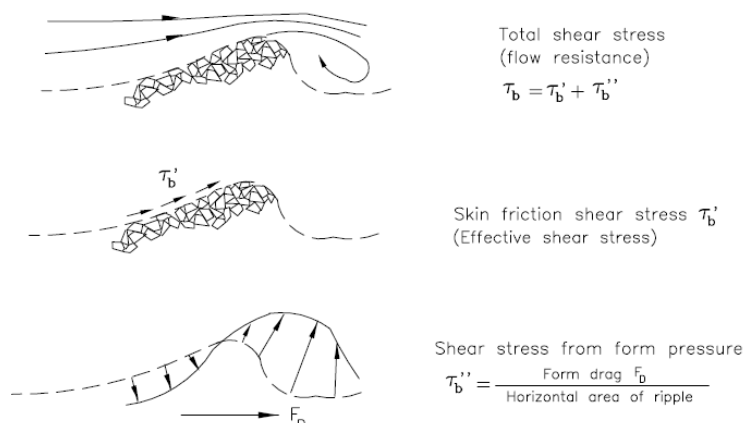
$$H_r \approx 100 \cdot d_{50} \quad (2.21)$$

$$L_r \approx 1000 \cdot d_{50} \quad (2.22)$$

Στην περίπτωση των αμμοκυμάτων, η αντίσταση της ροής αποτελείται από δύο μέρη, η μια οφείλεται στην επιφανειακή τριβή, ενώ η άλλη στην μορφή πίεσης των αμμοκυμάτων.

$$\tau_b = \tau'_b + \tau''_b \quad (2.23)$$

όπου  $\tau'_b$  είναι η διατμητική τάση η οποία ενεργεί στο ίζημα.



**Σχήμα 2.7** Αντίσταση της ροής σε πυθμένα από αμμοκυμάτια (Liu, 2001)

Όταν ο πυθμένας είναι επίπεδος τότε  $\tau_b''=0$  και η τριβή πυθμένα ισούται με  $2.5D_{50}$  και η διατμητική τάση υπολογίζεται ως:

$$\tau_b' = \tau_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f' \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left( \frac{0.06}{\left( \log \left( \frac{12 \cdot h}{2.5 \cdot d_{50}} \right) \right)} \right) \cdot U^2 \quad (2.24)$$

Όπου  $h$  το βάθος,  $U$  η μέση ταχύτητα ρεύματος και  $f$  ο συντελεστής τριβής των κόκκων.

Εάν ο πυθμένας έχει την μορφή αμμοκυμάτων, το  $\tau_b'$  υπολογίζεται με τη σχέση (2.24), ενώ η ολική διατμητική τάση είναι μεγαλύτερη εξαιτίας της μορφής πίεσης:

$$\tau_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left( \frac{0.06}{\left( \log \left( \frac{12 \cdot h}{H_r} \right) \right)} \right) \cdot U^2 \quad (2.25)$$

Με  $H_r$  το ύψος των αμμοκυμάτων.

### 2.5.3 Αμμόλοφοι (dunes)

Τα αμμοκυμάτια και οι αμμόλοφοι σχηματίζονται αμέσως μόλις τα πρώτα σωματίδια αρχίζουν να κινούνται και πριν επικρατήσει έντονη μετακίνηση και μεταφορά φερτών σε όλο το πεδίο. Ενδιάμεσα των δύο αυτών φάσεων η συγκέντρωση των στερεών κοντά στον πυθμένα είναι χαμηλή. Κρίσιμος παράγοντας για τη μετάβαση από το στάδιο των αμμοκυματίων σε αυτό των αμμολόφων (θίνες) είναι ο αριθμός Reynolds. Εάν είναι πολύ μεγάλος, δεν σχηματίζονται αμμοκυμάτια αλλά ο πυθμένας περνά κατευθείαν στο στάδιο των αμμολόφων. Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται προοδευτικά, το σχήμα των αμμολόφων μεταβάλλεται από ευθείες γραμμές σε καμπύλες. Είναι δυνατό επίσης να προκληθεί πτώση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού σε σημεία που σχηματίζονται κορυφές αμμολόφων και ανύψωση σε σημεία που αυτά υποχωρούν. Οι αμμόλοφοι είναι γενικά μεγαλύτεροι σε μέγεθος και επηρεάζονται από οποιαδήποτε αλλαγή στο βάθος της ροής.

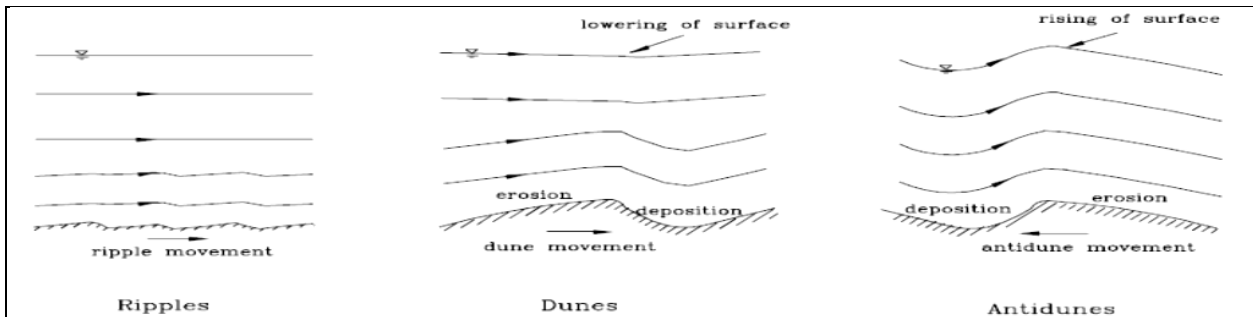
### 2.5.4 Αμμοκύματα-Σπάσιμο κυμάτων (sand waves-breaking waves, antidunes)

Όταν οι αμμόλοφοι φτάνουν σε ένα συγκεκριμένο ύψος και η ταχύτητα ροής εξακολουθεί να αυξάνεται παρατηρείται μείωση του ύψους και αύξηση του μήκους τους. Έτσι σταδιακά ο πυθμένας γίνεται ξανά επίπεδος. Αν υποθεθεί ότι εξακολουθεί η άνοδος των τιμών των ταχυτήτων σε σημείο που η ροή γίνεται υπερκρίσιμη ο πυθμένας μετασχηματίζεται σε αμμοκύματα. Σε αυτό το στάδιο τα κύματα του πυθμένα έχουν την ίδια φάση με τα κύματα στην επιφάνεια και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Συνοπτικά οι διαφορές τους με τους αμμόλοφους είναι ότι ενώ οι αμμόλοφοι δεν είναι συμμετρικοί και οι γραμμές ροής διαφοροποιούνται στις κορυφές των αμμολόφων, τα αμμοκύματα έχουν συμμετρική μορφή και δεν παρουσιάζεται διαχωρισμός των γραμμών ροής. Τα αμμοκύματα είναι δυνατό να μεταφέρονται στην ίδια κατεύθυνση με το σύνολο της ροής αλλά και αντίθετα αυτής. Πολλές φορές παρατηρείται το φαινόμενο ενώ τα σωματίδια των φερτών μεμονωμένα κινούνται σύμφωνα με τη ροή, τα αμμοκύματα ως σύνολο κινούνται αντίθετα. Επειδή τέτοιου είδους ροή εμφανίζεται σε ρηχά νερά το εύρος

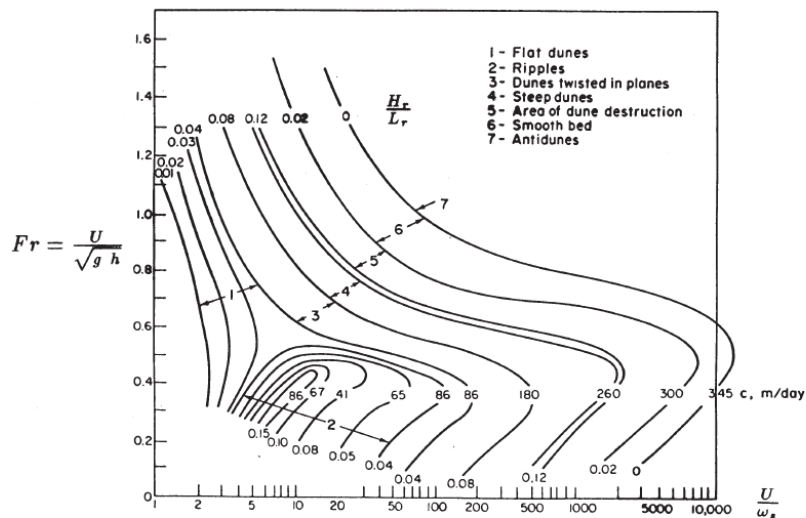
των αμμοκυμάτων είναι συγκριτικά μεγάλο και εμποδίζει τη ροή να εξελιχθεί κατάντη της κορυφής των αμμοκυμάτων. Έτσι μεγάλο μέρος των φερτών σε εκείνο το σημείο καθιζάνει. Αντίθετα, στα ανάντη συγκεντρώνεται μεγάλο μέρος ενέργειας με συνέπεια να σηκώνονται κι άλλα φερτά από τον πυθμένα πίσω από τις κορυφές των αμμοκυμάτων. Αυτός είναι ο λόγος που φαίνεται σαν να κινούνται συνολικά τα αμμοκύματα αντίθετα με τις ταχύτητες του πεδίου ροής. Με την εξέλιξη όμως του φαινομένου τα επιφανειακά κύματα μπορούν να υπερβούν σε εύρος τα αντίστοιχα του πυθμένα έτσι ώστε ορισμένα να βρίσκονται πίσω από την κορυφή των αμμοκυμάτων. Όμως σε αυτή την περίπτωση τα αμμοκύματα γίνονται ασταθή και θραύονται (όπως γίνεται και στα κύματα κοντά στην ακτή). Τη στιγμή που σπάει το κύμα, η ταχύτητα στον πυθμένα μηδενίζεται ενώ ταυτόχρονα τα αμμοκύματα εξαφανίζονται και η ροή επανέρχεται στις αρχικές τις συνθήκες.

Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζονται οι ροές πάνω από τις τρεις μορφές του πυθμένα και η κίνηση τους.



Σχήμα 2.8 Ροή πάνω στις διάφορες μορφές πυθμένα (Liu, 2001)

Πολλές φορές, γνωρίζοντας τη μέση ταχύτητα ρεύματος, το βάθος και το μέγεθος των κόκκων, η μορφή του πυθμένα μπορεί να προβλεφθεί από εμπειρικά διαγράμματα όπως αυτό του Znamenskaya (Liu, 2001).



Σχήμα 2.9 Εμπειρικό διάγραμμα Znamenskaya (Liu, 2001)

## 2.6 Τρόπος υπολογισμού συγκεντρώσεων και στερεοπαροχών

Όταν η κίνηση τους έχει επεκταθεί σε όλο το πεδίο, τα φερτά είναι δυνατό να κυλιούνται ή να σύρονται πάνω σε ένα στρώμα του πυθμένα ως φορτίο του πυθμένα ή να μετακινούνται σε μικρότερα βάθη από την επιφάνεια ως φορτίο σε αιώρηση. Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής, δηλαδή του όγκου φερτών ανά μονάδα πλάτους και χρόνου, που είτε υπολογίζουν μόνο το φορτίο πυθμένα είτε το συνολικό. Ωστόσο θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι απαραίτητο να βρίσκεται κάθε φορά πρώτα το φορτίο πυθμένα καθώς από εκεί ξεκινά η στερεομεταφορά. Το ίδιο απαραίτητη είναι και η εύρεση των συγκεντρώσεων των φερτών σε διάφορα βάθη.

Είναι εύλογο να αναρωτηθεί κανείς γιατί παρατηρούνται φερτά σε αιώρηση, αφού οι κόκκοι είναι βαρύτεροι από το νερό και θα έπρεπε να καθιζάνουν. Ο λόγος είναι οι τυρβώδεις στρόβιλοι που μεταφέρουν τα φερτά από ένα σημείο σε άλλο. Εξάλλου καθώς η συγκέντρωση στον πυθμένα αυξάνει, μεγαλώνει το ποσοστό φερτών που αποκολλάται από αυτόν και εισέρχεται προς την υπόλοιπη ροή συγκριτικά με αυτό που καθιζάνει. Επιπλέον, η τύρβη της ροής δημιουργεί ένα δίκτυο φερτών το οποίο εμποδίζει άλλα φερτά να πέσουν προς τα κάτω.

Η διαδικασία αυτή μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά εάν υποτεθεί ότι η μέση ταχύτητα ροής σε ένα νέφος της τύρβης είναι ίση με  $u'$ . Η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων θεωρείται ίση με  $W_s$ , έτσι ώστε αν αυτά κινούνται προς τα πάνω να κινούνται με ταχύτητα  $u' - W$  και στην αντίθετη περίπτωση με ταχύτητα  $u' + W$ . Θεωρείται ένας διαφορικός όγκος εμβαδού  $A$ , σε απόσταση  $y$  από τον πυθμένα και ότι το ύψος των στροβίλων της τύρβης είναι ίσο με  $l$ . Στην κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή όταν ο ρυθμός ανόδου των φερτών είναι ίσος με τον ρυθμό καθόδου, ισχύει η σχέση:

$$C_{y-l} \cdot (u' - W_s) \cdot \frac{A}{2} = C_{y+l} \cdot (u' + W_s) \cdot \frac{A}{2} \quad (2.26)$$

όπου  $C_{y-l}$  και  $C_{y+l}$  οι συγκεντρώσεις στα αντίστοιχα επίπεδα  $y-l$  (ροή προς τα πάνω) και  $y+l$  (ροή προς τα κάτω).

Χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα του Taylor και αμελώντας τους όρους του  $l$  η σχέση μετασηματίζεται ως :

$$W \cdot C + \varepsilon \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \quad (2.27)$$

όπου  $\varepsilon$  συντελεστής διάχυσης.

Με διάφορους μετασηματισμούς που αφορούν τον συντελεστή διάχυσης παίρνουμε την:

$$\frac{C}{C_a} = \left( \frac{d-y}{d-y_a} \frac{y_a}{y} \right)^{\frac{W}{K u_s}} \quad (2.28)$$

Από την οποία υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των στερεών σε αιώρηση.



Ως  $C_a$  θεωρείται η συγκέντρωση σε μία απόσταση  $y_a$  από τον πυθμένα. Ο συντελεστής  $K$  είναι ο συντελεστής Von Karman και η τιμή του λαμβάνεται συνήθως ίση με 0.4.

Έχει γίνει προσπάθεια από αρκετούς να τελειοποιήσουν την εξίσωση :

Οι Itakura and Kishi (1980) πρότειναν:

$$\frac{C}{C_a} = \left[ \left( \frac{d-y}{d-y_a} \right)^\Phi \frac{y_a}{y} \right]^{\frac{W}{Ku^*}} \quad (2.29)$$

όπου :

$\Phi = 7Kg \left( \frac{p_s - p}{p} \right) \frac{W\bar{C}D}{u_*^{-3}}$  και  $\bar{C}$  είναι η μέση τιμή της συγκέντρωσης σε όλο το βάθος.

### 2.6.1 Στερεοπαροχή σε αιώρηση

Θεωρώντας τη στερεοπαροχή σε δύο διευθύνσεις ( $x$  και  $y$ ), το φορτίο σε αιώρηση υπολογίζεται γενικά από τα ολοκληρώματα:

$$q_{sx} = \int_{-h+a}^0 ucdz \quad [m^3/m/s] \quad (2.30)$$

$$q_{sy} = \int_{-h+a}^0 vcdz \quad [m^3/m/s] \quad (2.31)$$

Όπου  $u$ ,  $v$  οι ταχύτητες με τις οποίες κινούνται τα φερτά και  $c$  οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις τους. Η ολοκλήρωση δε γίνεται σε όλο το βάθος αλλά μέχρι την στάθμη  $a$  του πυθμένα (είναι ίση με τον όρο  $y_a$ ).

Ως  $a$  θεωρείται η ζώνη του πυθμένα στην οποία τα φερτά κινούνται ως φορτίο πυθμένα και τα διαχωρίζει από αυτά που βρίσκονται σε αιώρηση. Το ύψος αυτής της ζώνης θεωρείται συνήθως ίσο με 2-3  $D$ , όπου  $D$  η διάμετρος των κόκκων. Για να γίνει χρήση των εξισώσεων (2.30, 2.31) θα πρέπει να είναι γνωστή η συγκέντρωση σε αυτό το ύψος. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές εξισώσεις για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης, όμως καμία δεν είναι απολύτως ικανοποιητική. Ο Einstein (1950) πρότεινε την εξής σχέση:

$$C_a = \frac{11.6Q_b}{2u_*D} \quad (2.32)$$

ενώ ο Bijker (1967) προτείνει:

$$C_a = \frac{Q_b}{6.34u_*k_s} \quad (2.33)$$

όπου  $Q_b$  η στερεοπαροχή στον πυθμένα,  $u_*$  η ταχύτητα τριβής και  $k_s$  ο συντελεστής τραχύτητας του Nikuradse. Προτείνονται και πάλι διάφορες τιμές για το  $k_s$ , συναρτήσει

των χαρακτηριστικών διαμέτρων των κόκκων (π.χ.  $D_{35}$ ,  $D_{65}$ ,  $D_{50}$ ). Συνήθως προτιμάται η τιμή του να είναι ίση με  $2.5D_{50}$ .

Θεωρώντας λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας και αντικαθιστώντας με τη σχέση (2.28) η στερεοπαροχή σε αιώρηση μπορεί να υπολογιστεί ως (Liu,2001):

$$q_s = \int_a^h u(z) \cdot c(z) dz = \int_a^h \left( \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot C_a \cdot \left(\frac{h-z}{z} \cdot \frac{a}{h-a}\right)^{\frac{w_s}{\kappa \cdot u_*}} \right) dz$$

$$\Rightarrow q_s = 11.6 \cdot u_* \cdot C_a \cdot \left( I_1 \cdot \ln\left(\frac{h}{0.033 \cdot k_s}\right) + I_2 \right) \quad (2.34)$$

Τα  $I_1$  και  $I_2$  είναι τα ολοκληρώματα του Einstein όπου:

$$I_1 = 0.216 \cdot \frac{A^{(z_*-1)}}{(1-A)^{z_*}} \cdot \int_A^1 \left(\frac{1-B}{B}\right)^{z_*} dB \quad (2.35)$$

$$I_2 = 0.216 \cdot \frac{A^{(z_*-1)}}{(1-A)^{z_*}} \cdot \int_A^1 \left(\frac{1-B}{B}\right)^{z_*} \cdot \ln B \cdot dB \quad (2.36)$$

$$\text{Με } A = \frac{k_s}{h}, \quad B = \frac{z}{h}, \quad z_* = \frac{w_s}{\kappa \cdot u_*}$$

(z η απόσταση από τον πυθμένα και h το βάθος)

Αντικαθιστώντας στη συνέχεια με την εξίσωση (2.33) προκύπτει:

$$q_s = 1.83 \cdot q_B \cdot \left( I_1 \cdot \ln\left(\frac{h}{0.033 \cdot k_s}\right) + I_2 \right) \quad (2.37)$$

Το  $q_B$  είναι το φορτίο πυθμένα που υπολογίζεται παρακάτω.

### 2.6.2 Φορτίο Πυθμένα

Τα φερτά που βρίσκονται κοντά στον πυθμένα δεν επηρεάζονται πολύ από τους τυρβώδεις στροβίλους, σε αυτούς συνήθως οφείλεται η αιώρηση των κόκκων. Περισσότερο συγκρατούνται κοντά σε αυτή τη ζώνη από τις δυνάμεις που δέχονται από τους γειτονικούς κόκκους και την αντίδραση του πυθμένα. Αυτό το είδος φορτίου πιο πολύ θα μπορούσαμε να πούμε ότι κυλιέται ή σέρνεται στη ζώνη α. Ένας τρόπος υπολογισμού του έχει δοθεί από τους Kalinske-Frijnik είναι (Liu, 2001):

$$q_b = \frac{5 \cdot D \cdot U \cdot \sqrt{g}}{C} \exp\left(\frac{-0.27 \cdot \Delta \cdot D \cdot C^2}{\mu \cdot U^2}\right) \quad (2.38)$$

όπου:

$D=D_{50}$ : μέση διάμετρος των κόκκων

$U$ :  $\sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}}$  μέση ταχύτητα του ρεύματος

C:  $18 \log \frac{12h}{K_s}$  αριθμός Chezy

$K_s$ : συντελεστής απόλυτης τραχύτητας =  $H_r$

$\Delta = \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho}$  σχετική πυκνότητα

$\mu$ : συντελεστής που φανερώνει την επίδραση των αμμοκυματιών ίσος με  $(C/C')^{3/2}$

όπου  $C' = 18 \log \left( \frac{12h}{K_{SN}} \right)$

$K_{SN}$ : τραχύτητα πυθμένα κατά Nikuradse =  $2.5D_{50}$

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

Η διατμητική τάση και η ολική διατμητική τάση υπολογίζεται από τη εξίσωση (2.24) και (2.25).

Στην περίπτωση συνύπαρξης ρεύματος και κυματισμών ο τύπος Kalinske- Frijlink μπορεί να τροποποιηθεί για να ληφθεί υπόψη η επίδραση των παλινδρομικών ταχυτήτων που επιπροσθέτουν στο ρεύμα οι κυματισμοί. Η μέθοδος Bijker (Liu, 2001) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς από ρεύμα και κύματα, όπου φαίνεται πως το ρεύμα συμβάλει στην μεταφορά του ιζήματος, ενώ τα κύματα στην ανάμιξη.

Η διατμητική τάση πυθμένα λόγω κύματος, σύμφωνα με τον ορισμό του Jonsson δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{w,max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f_w \cdot U_b^2 \quad (2.39)$$

όπου  $U_b$  είναι η μέγιστη οριζόντια ταχύτητα των μορίων του νερού στον πυθμένα, σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία των κυματισμών ισούται:

$$U_b = \frac{\pi \cdot H}{T} \cdot \frac{1}{\sinh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right)} \quad (2.40)$$

(H το ύψος κύματος, T η περίοδος κύματος, L το μήκος κύματος, h το βάθος)

Το  $f_w$  είναι ο συντελεστής τριβής λόγω κύματος:

$$f_w = \exp(5.5 \cdot (K_s/a_b)^{0.2} - 6.3) \quad (2.41)$$

Με  $a_b$  το πλάτος ταλάντωσης του νερού κοντά στον πυθμένα

$$a_b = \frac{H}{2} \cdot \left( \frac{1}{\sinh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{L}\right)} \right) \quad (2.42)$$

Η ολική διατμητική τάση για το συνδυασμό ρεύματος και κύματος είναι:

$$\tau_{w,c} = \tau_c + \frac{1}{2} \cdot \tau_{w,max} \quad (2.43)$$

Η αντικατάσταση της (2.43) στην εξίσωση Kalinske-Frijnlik οδηγεί στην τροποποιημένη εξίσωση στερεοπαροχής:

$$q_b = 5 \cdot D \cdot \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \cdot \left[ \exp\left(\frac{-0.27 \cdot \Delta \cdot D \cdot C^2}{\mu \cdot U_{*cw}^2}\right) \right] \quad (2.44)$$

### 2.6.3 Εξέλιξη της στάθμης του πυθμένα

Για την πρόβλεψη της εξέλιξης της στάθμης του πυθμένα σε μια παράκτια περιοχή με έντονη στερεομεταφορά το μαθηματικό ομοίωμα που διαθέτουμε προέρχεται από την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της μάζας του κινούμενου υλικού.

Αν οριστούν σαν  $q_{sx}$ ,  $q_{sy}$ ,  $q_{bx}$ ,  $q_{by}$  αντίστοιχα οι παροχές συνολικού όγκου φερτών υλών σε αιώρηση (s=suspension) και σαν φορτίο πυθμένα (b=bed) ανά μονάδα πλάτους ροής (ειδικές παροχές  $m^3/ms$ ) τότε η εξέλιξη της στάθμης  $z_b$  ενός περίπου οριζόντιου (ή με μικρές κλίσεις) πυθμένα με το χρόνο δίνεται συναρτήσει των παροχών των φερτών από την εξίσωση (Κουτίτας, 1985):

$$(1-n) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (q_{sx} + q_{bx}) + \frac{\partial}{\partial y} (q_{sy} + q_{by}) = S = D - E \quad (2.45)$$

όπου:

D, E: είναι οι ρυθμοί καθίζησης και αιώρησης η είναι το πορώδες του υλικού του πυθμένα.  
S: είναι ο όρος πηγής –φρέατος φερτών υλών. Εκφράζει τη μεταβολή της αποθήκευσης φερτών υλών σε αιώρηση στη θέση που μετριέται το  $z_b$ .

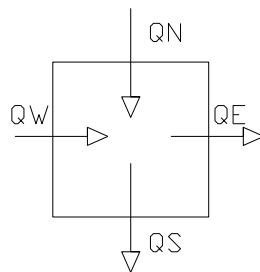
Δίνεται από τη σχέση:

$$S = \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^0 cz \quad (2.46)$$

Ως  $c(x,y,z,t)$  ορίζεται η συγκέντρωση φερτών υλών σε όγκο φερτών στη μονάδα όγκου.

Ο όρος S στην κατάσταση ισορροπίας μηδενίζεται (D=E).

Στο Σχήμα 2.10 περιγράφεται το ισοζύγιο μάζας σε έναν δ.ο όπως εφαρμόζεται στην εξίσωση (2.45). Με Q συμβολίζονται οι συνολικές παροχές ( $q_s + q_b$ ) όγκου φερτών στις πλευρές του δ.ο. Ισχύει  $Q=QN-QS+QW-QE$  για κάθε δ. ο.



**Σχήμα 2.10** Ισοζύγιο μάζας στο διαφορικό όγκο.

### 3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ FLOW-3DL

#### 3.1 Γενικά

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το μαθηματικό μοντέλο FLOW-3DL (Stamou et al., 1999a), το οποίο 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 πεπερασμένων διαφορών γραμμένος σε γλώσσα FORTRAN. Έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει υδροδυναμική κυκλοφορία και φαινόμενα στερεομεταφοράς ενώ επιπλέον μπορεί να υπολογίζει συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών και τη μεταβολή της στάθμης του πυθμένα, καθώς επίσης και 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.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι εξισώσεις του πεδίου ροής, της μεταφοράς και διάχυσης των φερτών και της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών. Δίνονται επίσης και τα αριθμητικά πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν.

#### 3.2 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 θεωρούνται οι ακόλουθες παραδοχές:

- (α) η κατανομή της πίεσης είναι υδροστατική,
- (β) ισχύει η προσέγγιση Boussinesq και
- (γ) η πίεση στην επιφάνεια είναι ίση με την ατμοσφαιρική (μηδέν).

Οι μεταβλητές του υδροδυναμικού μοντέλου είναι:

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

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

Οι εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης γράφονται ως εξής:

### Εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

### Εξισώσεις ποσότητας κίνησης κατά τις διευθύνσεις x, y και z

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (3.4)$$

όπου:

t [s] είναι ο χρόνος,

$v_h$  και  $v_z$  [ $m^2/s$ ] είναι ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας, αντίστοιχα,

f είναι η παράμετρος Coriolis,

g [ $m/s^2$ ] είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και

$\rho$  [ $kg/m^3$ ] η πυκνότητα του νερού, η οποία υπολογίζεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας.

Για δεδομένη κατά ύψος κατανομή της πυκνότητας, η πίεση p μπορεί να προσδιορισθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.4).

Στη συνέχεια οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας (u και v) υπολογίζονται από τις εξισώσεις (3.2) και (3.3).

Οι κάθετες ταχύτητες (w) υπολογίζονται από την εξίσωση συνέχειας (3.1) για κάθε στρώμα αρχίζοντας από τον πυθμένα όπου χρησιμοποιείται η οριακή συνθήκη  $w = 0$ .

Στην ελεύθερη επιφάνεια, η εξίσωση συνέχειας (3.1) μπορεί να γραφεί ως μια γραμμικοποιημένη οριακή κινηματική συνθήκη για τον προσδιορισμό της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} u_\zeta + \frac{\partial \zeta}{\partial y} v_\zeta = w_\zeta \quad (3.5)$$

όπου με το δείκτη «ζ» συμβολίζονται οι τιμές στην ελεύθερη επιφάνεια.

### **3.3 Διαφορικές εξισώσεις πεδίου αιωρούμενων στερεών και της στερεομεταφοράς του πυθμένα.**

Το πεδίο συγκεντρώσεων των αιωρούμενων στερεών υπολογίζεται από την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης-καθίζησης των αιωρούμενων στερεών, η οποία γράφεται με την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial c}{\partial z} \right) + S_c \quad (3.6)$$

όπου :

$C$  είναι η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$D_h$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] είναι ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις  $x$  και  $y$  και

$D_v$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] είναι ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση  $z$ .

Ο όρος  $S_c$  εκφράζει την διεργασία της καθίζησης και γράφεται με την ακόλουθη μορφή:

$$S_c = -W_{set}C \quad (3.7)$$

όπου  $W_{set}$  είναι η ταχύτητα καθίζησης [ $\text{m}/\text{s}$ ] των αιωρούμενων στερεών (π.χ. άμμου).

Η ολική στερεομεταφορά του πυθμένα είναι το άθροισμα των αιωρούμενων στερεών και του φορτίου πυθμένα:

$$Q_T = Q_b + Q_s \quad (3.8)$$

Για τον υπολογισμό του φορτίου πυθμένα χρησιμοποιείται η εξίσωση των Kalinske and Frijlink (Κουτίτας, 1985):

$$Q_b = \left[ 5.0 \cdot D_{50} \cdot \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \right] \cdot \left[ \exp\left(\frac{-0.27 \cdot \Delta \cdot D_{50} \cdot C^2}{\mu_r \cdot U^2}\right) \right] \quad (3.9)$$

όπου:

$q_b$  είναι το φορτίο πυθμένα [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$\tau_c$  είναι η διατμητική τάση του πυθμένα λόγω ρεύματος [ $\text{N}/\text{m}^2$ ],

$C$  είναι ο συντελεστής Chezy [ $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ]

$\rho$  είναι η πυκνότητα του νερού

$\Delta$  είναι συντελεστής ίσος με  $\rho_s/\rho - 1 = 2650/1000 - 1 = 1.65$ .

$D_{50}$  είναι η διάμετρος των κόκκων

$\mu_r$  είναι ο συντελεστής επίδρασης των αμμοκυμάτων

$U$  η μέση ταχύτητα ρεύματος

Το φορτίο των αιωρούμενων στερεών υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Q_s = 1.83 \cdot Q_B \cdot (I_1 \cdot \ln\left(\frac{h}{0.033 \cdot k_s}\right) + I_2) \quad (3.10)$$

### 3.4 Οριακές συνθήκες

#### 3.4.1 Γενικά

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

(α) στην ελεύθερη επιφάνεια,

(β) στον πυθμένα,

(γ) στα στερεά όρια και

(δ) στα όρια ανοικτής θάλασσας.

### 3.4.2 Ελεύθερη επιφάνεια

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

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=-\zeta} = C_s u_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \quad (3.11)$$

$$\frac{\tau_{sy}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=-\zeta} = C_s v_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \quad (3.12)$$

όπου:

$\tau_{sx}$  και  $\tau_{sy}$  [M/LT<sup>2</sup>] είναι οι οριζόντιες συνιστώσες της διατμητικής τάσης τάσεις 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.

Ο συντελεστής τριβής επιφάνειας ( $C_s$ ) έχει σημαντική επίδραση στις τιμές των ταχυτήτων. Η μείωση της τιμής του συντελεστή τριβής επιφάνειας προκαλεί μείωση του μέτρου των ταχυτήτων με τάση προς απόσβεση των στροβιλισμών στις πολύ μικρές τιμές του.

### 3.4.3 Πυθμένας

Στον πυθμένα η διατμητική τάση υπολογίζεται από :

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=H} = C_b u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (3.13)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=H} = C_b v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (3.14)$$

όπου:

$\tau_{bx}$  και  $\tau_{by}$  [M/LT<sup>2</sup>] είναι οι οριζόντιες συνιστώσες της διατμητικής τάσης που δρά στον πυθμένα κατά τις διευθύνσεις x και y, αντίστοιχα,

$C_b$  είναι ο 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.

### 3.4.4 Διεπιφάνειες μεταξύ στρωμάτων

Στις διεπιφάνειες μεταξύ των οριζοντίων στρωμάτων του νερού η επιβαλλόμενη διατμητική τάση υπολογίζεται ως :

$$\frac{\tau_{ix}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h_i} = C_i (u_u - u_d) \sqrt{(u_u - u_d)^2 + (v_u - v_d)^2} \quad (3.15)$$

$$\frac{\tau_{iy}}{\rho} = \nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=h_i} = C_i (v_u - v_d) \sqrt{(u_u - u_d)^2 + (v_u - v_d)^2} \quad (3.16)$$



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 συντελεστής διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια,

$u_u$  και  $v_u$  οι συνιστώσες της ταχύτητας στο υπερκείμενο στρώμα κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$  αντίστοιχα και

$u_d$  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.

### 3.4.5 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.

### 3.4.6 Όρια ανοικτής θάλασσας

Στα όρια ανοικτής θάλασσας μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες συνθήκες (Κρεστενίτης, 1988):

(α) Ελεύθερη (χωρίς ανάκλαση) διάβαση (για τις εγκάρσιες στα όρια ανοικτής θάλασσας συνιστώσες της ταχύτητας).

(β) Γνωστή διακύμανση της ελεύθερης επιφάνειας ή των ταχυτήτων ροής (π.χ. περιοδική διακύμανση στάθμης, εξαιτίας παλίρροιας).

(γ) Συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων (π.χ. της ελεύθερης επιφάνειας, των ταχυτήτων ροής ή των ποιοτικών παραμέτρων), από μετρήσεις πεδίου.

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

### 3.5.1 Γενικά

Οι διαφορικές εξισώσεις του πεδίου ροής και ποιοτικών παραμέτρων, οι οποίες παρουσιάστηκαν παραπάνω, γράφονται με την ακόλουθη γενική διαφορική μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho U\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S_\Phi \quad (3.17)$$

Θέτοντας:

(α)  $\Phi=1$  προκύπτει η εξίσωση συνέχειας,

(β)  $\Phi = u, v$  ή  $w$  προκύπτουν οι εξισώσεις ποσότητας κίνησης και

(γ)  $\Phi=T$  ή  $S$  προκύπτει η εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης της ποιοτικής παραμέτρου συγκέντρωσης  $C$ .

Στη συντριπτική πλειοψηφία των πρακτικών εφαρμογών οι διαφορικές εξισώσεις της μορφής (3.6) δεν επιλύονται αναλυτικά. Η επίλυσή τους γίνεται με αριθμητικές μεθόδους, οι σημαντικότερες των οποίων είναι:

- (α) πεπερασμένων διαφορών ή διαφορικών όγκων,  
 (β) πεπερασμένων στοιχείων, και  
 (γ) 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», δο. Στους δο γίνεται η ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων και προκύπτουν οι αριθμητικές εξισώσεις. Στη συνέχεια οι αριθμητικές εξισώσεις επιλύονται άμεσα με ρητό (explicit) σχήμα επίλυσης ανάντη διαφορών.

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

### 3.5.2 Διακριτοποίηση του πεδίου ροής

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 ακτών και ανοικτής θάλασσας προσεγγίζονται τμηματικά με πλευρές δο, οι οποίες είναι παράλληλες προς την  $Ox$  ή την  $Oy$ .

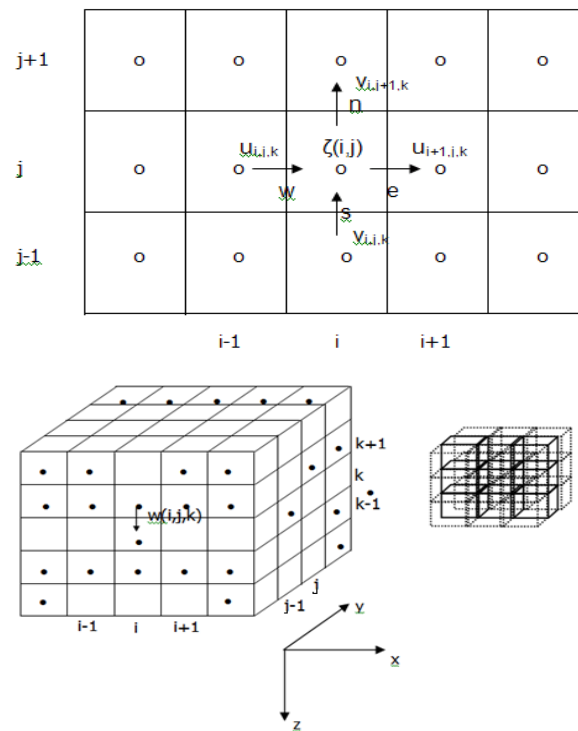
Το πλέγμα στο FLOW-3DL είναι έκκεντρο (staggered grid). Οι ταχύτητες ( $u$ ,  $v$  και  $w$ ) και τα βαθμωτά μεγέθη ( $\eta$  ανύψωση  $\zeta$  της επιφάνειας και οι ποιοτικές παράμετροι,  $\Phi$ ), υπολογίζονται σε χαρακτηριστικές θέσεις του έκκεντρου πλέγματος:

- (α) οι  $u$ ,  $v$  και  $w$  στις πλευρές των δο που είναι παράλληλες προς τις  $Ox$ ,  $Oy$  και  $Oz$ , αντίστοιχα και  
 (β) τα  $\zeta$  και  $\Phi$  στο κέντρο των δο.

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

- (α) ο δείκτης  $i$  αναφέρεται στην τετμημένη  $Ox$  ( $x_i=i\Delta x$ ),  
 (β) ο δείκτης  $j$  αναφέρεται στην τετμημένη  $Oy$  ( $y_j=j\Delta y$ ),  
 (γ) ο δείκτης  $k$  αναφέρεται στην τεταγμένη  $Oz$  ( $z_k=k\Delta z$ ), και  
 (δ) 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 3.1. Τα σύμβολα  $n$ ,  $s$ ,  $w$  και  $e$  χρησιμοποιούνται για την επισήμανση της βόρειας, νότιας, δυτικής και ανατολικής πλευράς των διαφορικών όγκων, αντίστοιχα.

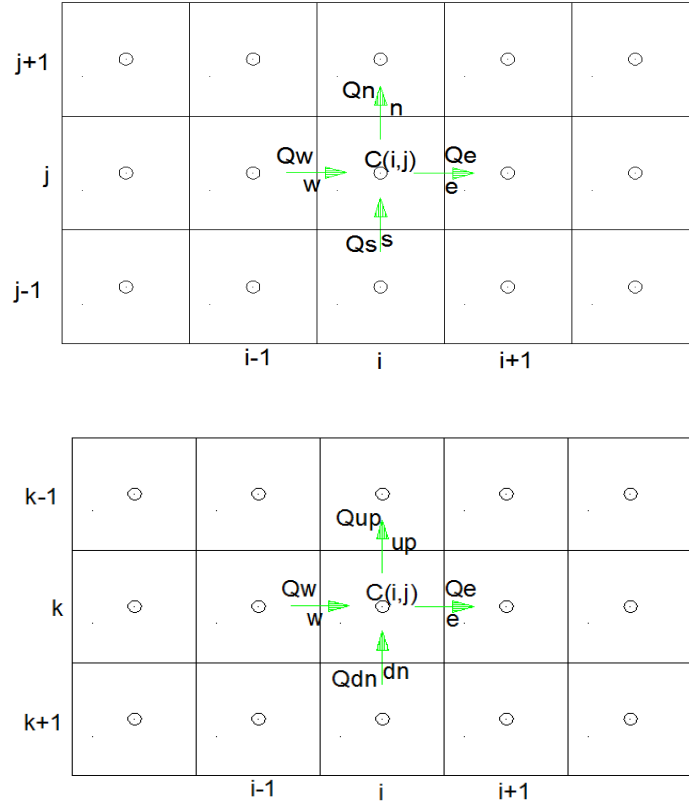


**Σχήμα 3.1** Σκαρίφημα αριθμητικού πλέγματος για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων.

### 3.6 Διακριτοποίηση του πεδίου αιωρούμενων στερεών, στερεοπαροχής και μεταβολής της στάθμης του πυθμένα στο μοντέλο FLOW- 3DL.

Η διακριτοποίηση του πεδίου αιωρούμενων στερεών, στερεοπαροχής και μεταβολής της στάθμης του πυθμένα προκύπτει ολοκληρώνοντας την εξίσωση (3.6) στον όγκο ελέγχου και στο χρόνο.

$$\begin{aligned}
 \int_{\delta o}^{t+dt} \int_t \frac{\partial C}{\partial t} dt dV &= - \int_t^{t+dt} \int_{\delta o} u \frac{\partial C}{\partial x} dV dt - \int_t^{t+dt} \int_{\delta o} v \frac{\partial C}{\partial y} dV dt - \int_t^{t+dt} \int_{\delta o} w \frac{\partial C}{\partial z} dV dt \\
 &+ \int_t^{t+dt} \int_{\delta o} \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) dV dt + \int_t^{t+dt} \int_{\delta o} \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) dV dt \\
 &+ \int_t^{t+dt} \int_{\delta o} \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) dV dt + \int_t^{t+dt} \int_{\delta o} S_c dV dt
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$



**Σχήμα 3.2** Σκαρίφημα αριθμητικού πλέγματος για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων της εξίσωσης (3.6)

μετά από πράξεις στην εξίσωση (3.18) προκύπτει:

$$\begin{aligned} \frac{C - C^0}{dV} = & -(Q_e C_e - Q_w C_w)dt - (Q_n C_n - Q_s C_s)dt - (Q_{up} C_{up} - Q_{dn} C_{dn})dt \\ & + \left( D_h A \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_e - D_h A \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_w \right) dt + \left( D_h A \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_n - D_h A \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_s \right) dt \\ & + \left( D_v A \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{up} - D_v A \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{dn} \right) dt + S_c V dt \end{aligned} \quad (3.19)$$

Η εξίσωση (3.19) εκφρασμένη με μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στον κώδικα FLOW 3DL γράφεται:

$$\begin{aligned} \frac{C - C^0}{VOL} = & -(CONU_e - CONU_w)dt - (CONV_n - CONV_s)dt - (CONW_u - CONW_d)dt \\ & + (DIFU_e - DIFU_w)dt + (DIFV_n - DIFV_s)dt + (DIFW_u - DIFW_d)dt + S_c V dt \end{aligned} \quad (3.20)$$

Στα εδάφια 3.6.1 και 3.6.2 παρουσιάζονται αναλυτικά οι εξισώσεις μεταφοράς και διάχυσης όπως εμφανίζονται στο μοντέλο FLOW- 3DL.

## 3.6.1 Μεταφορά και διάχυση στην κατεύθυνση x και y

Πίνακας 3.1 Εξισώσεις μεταφοράς – διάχυσης στο μοντέλο FLOW-3DL στη κατεύθυνση x

Μεταφορά στην κατεύθυνση x	Αρίθμηση Σχέσεων
$CONU = CONU_e - CONU_w$	(3.21)
$CONU_e = Q_e \cdot C_e$	(3.22)
$CONU_w = Q_w \cdot C_w$	(3.23)
$Q_e = u^o(i+1, j, k) \cdot 0.50 \cdot (depo(i+1, j, k) + depo(i, j, k)) \cdot dym$	(3.24)
$C_e = 0.50 \cdot (C^o(i, j, k) + C^o(i+1, j, k))$	(3.25)
$Q_w = u^o(i, j, k) \cdot 0.50 \cdot (depo(i-1, j, k) + depo(i, j, k)) \cdot dym$	(3.26)
$C_w = 0.50 \cdot (C^o(i, j, k) + C^o(i-1, j, k))$	(3.27)
$Q_e \geq 0.0$ τότε $C_e = C^o(i, j, k)$	(3.28)
$Q_e < 0.0$ τότε $C_e = C^o(i+1, j, k)$	(3.29)
$Q_w > 0.0$ τότε $C_w = C^o(i-1, j, k)$	(3.30)
$Q_w < 0.0$ τότε $C_w = C^o(i, j, k)$	(3.31)
Στο αρχικό όριο κατά x $C_w = C^o(1, j, k)$	(3.32)
<b>Διάχυση στην κατεύθυνση x</b>	
$DIFU = DIFU_e + DIFU_w$	(3.33)
$DIFU_e = difht \cdot 0.50 \cdot (depo(i+1, j, k) + depo(i, j, k)) \cdot dym \cdot DCDX_e$	(3.34)
$DIFU_w = -difht \cdot 0.50 \cdot (depo(i-1, j, k) + depo(i, j, k)) \cdot dym \cdot DCDX_w$	(3.35)
$DCDX_e = \frac{(C^o(i+1, j, k) - C^o(i, j, k))}{dxm}$	(3.36)
Εάν $Q_e = 0.0$ τότε $DCDX_e = 0.0$	(3.37)
$DCDX_w = \frac{(C^o(i, j, k) - C^o(i-1, j, k))}{dxm}$	(3.37)
Εάν $Q_w = 0.0$ τότε $DCDX_w = 0.0$	(3.38)

Πίνακας 3.2 Εξισώσεις μεταφοράς – διάχυσης στο μοντέλο FLOW-3DL στη κατεύθυνση  $y$ 

Μεταφορά στην κατεύθυνση $y$	Αρίθμηση Σχέσεων
$CONV = CONV_n - CONV_s$	(3.39)
$CONV_n = Q_n \cdot C_n$	(3.40)
$CONV_s = Q_s \cdot C_s$	(3.41)
$Q_n = v^o(i, j+1, k) \cdot 0.50 \cdot (depo(i, j+1, k) + depo(i, j, k)) \cdot dxm$	(3.42)
$C_n = 0.50 \cdot (C^o(i, j, k) + C^o(i, j+1, k))$	(3.43)
$Q_s = v^o(i, j, k) \cdot 0.50 \cdot (depo(i, j-1, k) + depo(i, j, k)) \cdot dxm$	(3.44)
$C_s = 0.50 \cdot (C^o(i, j, k) + C^o(i, j-1, k))$	(3.45)
$Q_n \geq 0.0$ τότε $C_n = C^o(i, j, k)$	(3.46)
$Q_n < 0.0$ τότε $C_n = C^o(i, j+1, k)$	(3.47)
$Q_s > 0.0$ τότε $C_s = C^o(i, j-1, k)$	(3.48)
$Q_s < 0.0$ τότε $C_s = C^o(i, j, k)$	(3.49)
<b>Διάχυση στην κατεύθυνση <math>y</math></b>	
$DIFV = DIFV_n + DIFV_s$	(3.50)
$DIFV_n = difht \cdot 0.50 \cdot (depo(i, j+1, k) + depo(i, j, k)) \cdot dxm \cdot DCDY_n$	(3.51)
$DIFV_s = -difht \cdot 0.50 \cdot (depo(i, j-1, k) + depo(i, j, k)) \cdot dxm \cdot DCDY_s$	(3.52)
$DCDY_n = \frac{(C^o(i, j+1, k) - C^o(i, j, k))}{dym}$	(3.53)
Εάν $Q_s = 0.0$ τότε $DCDY_s = 0.0$ $DCDY_s = \frac{(C^o(i, j, k) - C^o(i, j-1, k))}{dym}$	(3.54)
Εάν $Q_s = 0.0$ τότε $DCDY_s = 0.0$	(3.55)

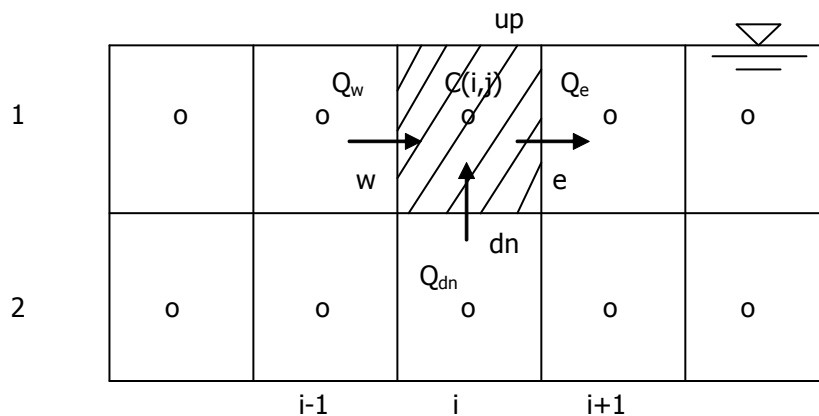
## 3.6.2 Μεταφορά και διάχυση στην κατεύθυνση z

**Πίνακας 3.3** Εξισώσεις μεταφοράς – διάχυσης στο μοντέλο FLOW-3DL στη διεύθυνση z, για ενδιάμεσα στρώματα

<b>Μεταφορά στην διεύθυνση z</b>	<b>Αρίθμηση Σχέσεων</b>
$CONW = CONW_u - CONW_d$	(3.56)
$CONW_u = Q_u \cdot C_u$	(3.57)
$CONW_d = Q_d \cdot C_d$	(3.58)
$Q_u = w^0(i, j, k+1) \cdot dxm \cdot dym$	(3.59)
$Q_d = w^0(i, j, k) \cdot dxm \cdot dym$	(3.60)
$C_d = 0.50 \cdot (C^0(i, j, k) + C^0(i, j, k+1))$ Εάν (QD.GE.0.0) τότε CD= CO(I,J,K+1) και (QD.LT.0.0) τότε CD= CO(I,J,K)	(3.61)
Εάν (QU.GE.0.0) τότε CU= CO(I,J,K) Εάν (QU.LT.0.0) τότε CU= CO(I,J,K-1)	(3.62)
<b>Διάχυση στην διεύθυνση z</b>	
$DIFW = DIFW_u + DIFW_d$	(3.63)
$DIFW_u = difvt \cdot dxm \cdot dym \cdot DCDZ_u$	(3.64)
$DIFW_d = -difvt \cdot dxm \cdot dym \cdot DCDZ_d$	(3.65)
$DCDZ_d = \frac{C^0(i, j, k) - C^0(i, j, k+1)}{dzd}$	(3.66)
$dzd = 0.50 \cdot (depo(i, j, k) + depo(i, j, k+1))$	(3.67)
$DCDZ_u = \frac{C^0(i, j, k-1) - C^0(i, j, k)}{dzu}$	(3.68)
$dzu = 0.50 \cdot (depo(i, j, k) + depo(i, j, k-1))$	(3.69)

**Πίνακας 3.4** Εξισώσεις μεταφοράς – διάχυσης στο μοντέλο FLOW-3DL στη διεύθυνση z, για το επιφανειακό στρώμα

Μεταφορά στην διεύθυνση z	Αρίθμηση Σχέσεων
$CONW = CONW_u - CONW_d$	(3.70)
$CONW_u = 0.0$	(3.71)
$CONW_d = Q_d \cdot C_d$	(3.72)
$Q_d = w^0(i, j, 2) \cdot dxm \cdot dym$	(3.73)
$C_d = 0.50 \cdot (C^0(i, j, 1) + C^0(i, j, 2))$	(3.74)
IF(QD.GE.0.0) CD=CO(I,J,2) IF(QD.LT.0.0) CD=CO(I,J,1)	(3.75)
<b>Διάχυση στην διεύθυνση z</b>	(3.76)
$DIFW = DIFW_u + DIFW_d$	(3.77)
$DIFW_u = 0.0$	(3.78)
$DIFW_d = -difvt \cdot dxm \cdot dym \cdot DCDZ_d$	(3.79)
$DCDZ_d = \frac{(C^0(i, j, 1) - C^0(i, j, 2))}{dzd}$	(3.80)
$dzd = 0.50 \cdot (depo(i, j, 1) + depo(i, j, 2))$	(3.81)

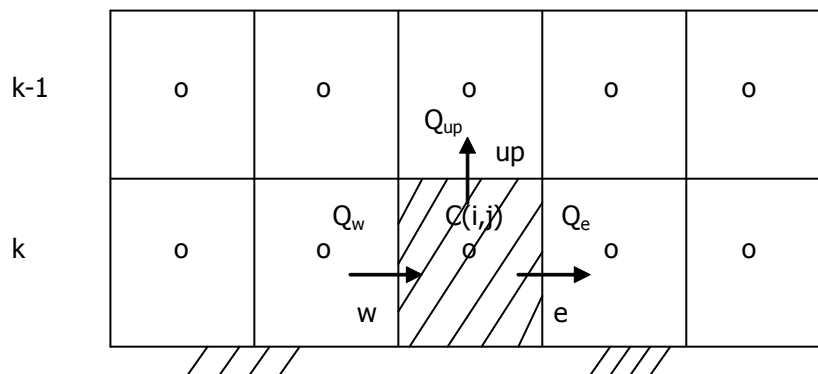


**Σχήμα 3.3** Σκαρίφημα αριθμητικού πλέγματος για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων της εξίσωσης στη διεύθυνση z, για το επιφανειακό στρώμα



**Πίνακας 3.5** Εξισώσεις μεταφοράς – διάχυσης στο μοντέλο FLOW-3DL στη διεύθυνση z, στο στρώμα του πυθμένα

Μεταφορά στην διεύθυνση z	Αρίθμηση Σχέσεων
$CONW = CONW_u - CONW_d$	(3.82)
$CONW_u = Q_u \cdot C_u$	(3.83)
$CONW_d = 0.0$	(3.84)
$Q_u = w^0(i, j, k) \cdot dxm \cdot dym$	(3.85)
$C_u = 0.50 \cdot (C^0(i, j, k) + C^0(i, j, k-1))$	(3.86)
Εάν $Q_u \geq 0.0$ τότε $C_u = C^0(i, j, k)$	(3.87)
<b>Διάχυση στην διεύθυνση z</b>	(3.88)
$DIFW = DIFW_u + DIFW_d$	(3.89)
$DIFW_d = 0.0$	(3.90)
$DIFW_u = difvt \cdot dxm \cdot dym \cdot DCDZ_u$	(3.91)
$DCDZ_u = \frac{(C^0(i, j, k-1) - C^0(i, j, k))}{dzu}$	(3.92)
$dzu = 0.50 \cdot (depo(i, j, k) + depo(i, j, k-1))$	(3.93)



**Σχήμα 3.4** Σκαρίφημα αριθμητικού πλέγματος για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων της εξίσωσης στη διεύθυνση z, για το στρώμα του πυθμένα

3.6.3 Υπολογισμός της ποιοτικής παραμέτρου της συγκέντρωσης του πλουμίου των αιωρούμενων στερεών (C) στον κόμβο (i,j,k) στο μοντέλο FLOW-3DL

Η συγκέντρωση του πλουμίου των αιωρούμενων στερεών (C) στον κόμβο (i,j,k) εκφρασμένη με μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στον κώδικα FLOW 3DL γράφεται:

$$C(i, j, k) = C^o(i, j, k) + dt \cdot (DIFU + DIFV + DIFW - CONU - CONV - CONW + xload) / VOL \quad (3.94)$$

όπου:

η ποσότητα του πλουμίου των αιωρούμενων στερεών είναι:

$$Xload = S_{\phi} \cdot VOL \quad (3.95)$$

Ο όγκος του διαφορικού όγκου ισούται με:

$$VOL = dxm \cdot dym \cdot depo(i, j, k) \quad (3.96)$$

## 4 ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FLOW-3DL

### 4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιούνται έλεγχοι του υπολογιστικού μοντέλου FLOW-3DL με σκοπό την επαλήθευση της ικανότητας του να προσομοιώνει διάφορα φυσικά φαινόμενα που περιγράφουν την παράκτια κυκλοφορία. Οι δοκιμές ελέγχου, που πραγματοποιούνται, αφορούν τα πειράματα της ανεμογενούς κυκλοφορίας, της διάδοσης παλιρροϊκού κύματος, την κατανομή συγκέντρωσης φερτών με το βάθος και της μεταβολής της στάθμης πυθμένα σε γωνιακό κανάλι. Ο έλεγχος βασίζεται σε σύγκριση των αποτελεσμάτων του κώδικα του μοντέλου FLOW-3DL και των αναλυτικών λύσεων που προκύπτουν από τη διεθνή βιβλιογραφία.

### 4.2 Ανεμογενής Κυκλοφορία

#### 4.2.1 Περιγραφή

Η εξέταση για την ακρίβεια της προσομοίωσης της ανεμογενούς κυκλοφορίας θεωρείται σημαντική, καθώς ο άνεμος είναι το γενεσιουργό αίτιο που προκαλεί κυκλοφορία στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, 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 της διατήρησης της μάζας.

#### 4.2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Η περίπτωση που εξετάζεται είναι εκείνη που αναφέρεται στον Κουτίτας (1985). Θεωρείται μόνιμη, ομοιόμορφη, μονοδιάστατη ροή σε κλειστό ορθογωνικό κανάλι με διαστάσεις 2 km X 0.80 km 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 εξίσωσης (4.1):

$$S = \rho \cdot u_{*s}^2 \quad (4.1)$$

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

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

$$\tau_{zx} = S - \tau_b^* \cdot (1 - n) \quad (4.2)$$

όπου:

$$\tau_b^* = \rho g H \frac{\partial H}{\partial x} \quad (4.3)$$

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, Κουτίτας, 1985).

Ολοκληρώνοντας κατά βάθος την εξίσωση (4.2) 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  $n_0 = z_b/H \ll 1$ ), προκύπτει η εξίσωση (4.4):

$$u = \frac{H n}{\rho \nu_v} \left[ (S - \tau_b^*) + \frac{\tau_b^* n}{2} \right] \quad (4.4)$$

Δεδομένου ότι η μέση κατά βάθος ταχύτητα εγκάρσια στα όρια πρέπει να μηδενίζεται και  $u = 0$  για  $n = n_0$ , ισχύει ότι:

$$\int_{n_0}^1 u \, dn = 0 \quad (4.5)$$

Από την εξίσωση (4.4) προκύπτει ότι:

$$S = \frac{2}{3} \tau_b^* \quad (4.6)$$

ή

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{3S}{2\rho g H} \quad (4.7)$$

Επομένως, η εξίσωση (4.4) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$u = \frac{S \cdot H \cdot n}{4 \cdot \rho \cdot \nu_v} \cdot (3n - 2) \quad (4.8)$$

Από την εξίσωση (4.8) 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  $\nu_v = 0.1 \, m^2/s$  (Κουτίτας, 1984).

#### 4.2.3 Αποτελέσματα αναλυτικής λύσης

Για την αναλυτική λύση προκύπτει σύμφωνα με την εξίσωση (4.1) ότι :

$$\frac{S}{\rho} = u_{*S}^2 = 0.162^2 = 0.026244 \, m^2/s^2 \quad (4.9)$$

Με αντικατάσταση του όρου  $S/\rho$  στην εξίσωση (4.8) προκύπτει ότι :

$$u = 0.026244 \frac{10n}{4 \cdot 0.1} (3n - 2) = 0.6561n(3n - 2) \quad (4.10)$$

Το προφίλ των ταχυτήτων της ροής υπολογίζεται, έχοντας προηγουμένως 'χωρίσει' το κανάλι σε 10 στρώματα βάθους 1.0 m το καθένα. Στη συνέχεια, υπολογίζεται το αδιάστατο

βάθος ροής  $h$  σε κάθε θέση, διαιρώντας το βάθος του κάθε στρώματος με το συνολικό βάθος  $H = 10.0 \text{ m}$ . Αντικαθιστώντας το  $h$  στην εξίσωση (4.10) προκύπτουν οι ταχύτητες σε σχέση με το βάθος που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

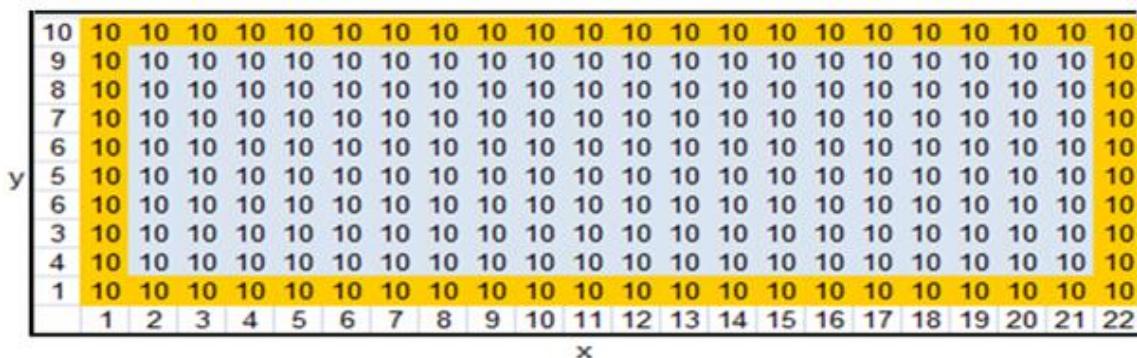
#### 4.2.4 Προσομοίωση με κώδικα FLOW-3DL

Προκειμένου να εφαρμοστεί ο κώδικας FLOW-3DL στην περίπτωση του ορθογωνικού καναλιού που περιγράφεται στο εδάφιο 4.2.2, 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 ίσο με  $100 \text{ m}$  ( $\Delta X = \Delta Y$ ) με αποτέλεσμα το πλέγμα να αποτελείται από 22 κόμβους κατά  $x$  και 10 κατά  $y$  (Σχήμα 4.1). Το χρονικό βήμα ( $\Delta t$ ) λαμβάνεται ίσο με  $5.0 \text{ s}$ . Ο συντελεστής  $\epsilon_z = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$  και πυκνότητα  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ .

Το μοντέλο ξεκινά από μηδενική κατάσταση μεταβλητών (cold start) και επιβάλλεται η σταθερή τάση του ανέμου σε όλα τα σημεία του. Ύστερα από έναν αριθμό ανακυκλώσεων επιτυγχάνεται τελικά σύγκλιση της αριθμητικής λύσης και η ροή καθίσταται μόνιμη (σταθερή ενέργεια του συστήματος). Όταν συμβεί αυτό, τότε, καταγράφονται οι πειραματικές τιμές στο σημείο, που έχει ορισθεί ως σημείο παρακολούθησης (monitoring) για κάθε ένα από τα δέκα στρώματα όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1.

Σαν οριακές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν :

```
C***** Gia koutitas test*****
Do K=1,NK
  Do j=1,8
    UO(2,j,k)=0.0
    UO(1,j,k)=UO(2,j,k)
    U(2,j,k)=0.0
    U(1,j,k)=U(2,j,k)
    UO(NI-1,j,k)=0.0
    UO(NI-1,j,k)=UO(NI,j,k)
    U(NI-1,j,k)=0.0
    U(NI-1,j,k)=UO(NI,j,k)
  enddo
enddo
```

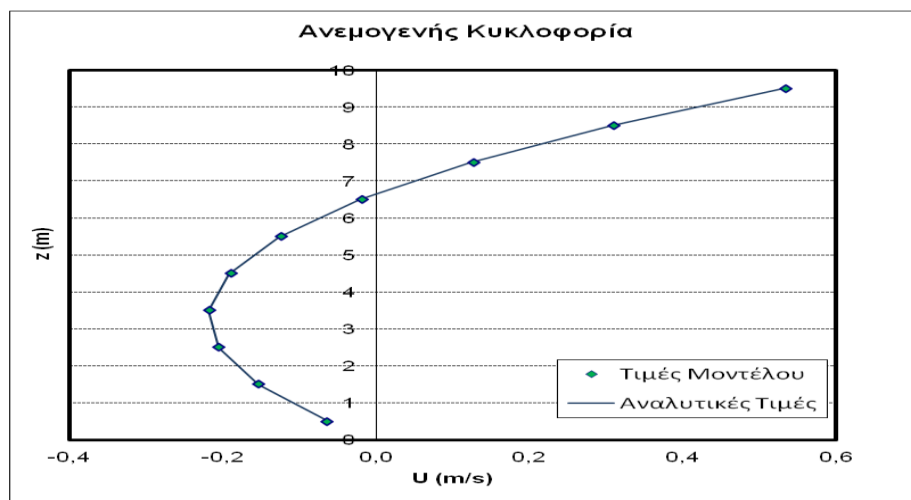


Σχήμα 4.1 Γεωμετρία του καναλιού σε οριζόντιο επίπεδο

Στον Πίνακα 4.1 καταγράφονται οι πειραματικές τιμές στο σημείο, που έχει ορισθεί ως σημείο παρακολούθησης (monitoring) για κάθε ένα από τα δέκα στρώματα.

**Πίνακας 4.1** Αναλυτικές και πειραματικές τιμές των ταχυτήτων σε βάθος z

$U_{\text{analytical}}$ (m/s)	$U_{\text{model}}$ (m/s)	Βάθος z (m)	$U_{\text{analytical}}$ (m/s)	$U_{\text{model}}$ (m/s)	Βάθος z (m)
0.530	0.534	9.5	-0.192	-0.19	4.5
0.307	0.31	8.5	-0.218	-0.217	3.5
0.123	0.127	7.5	-0.205	-0.205	2.5
-0.021	-0.0181	6.5	-0.153	-0.154	1.5
-0.126	-0.124	5.5	-0.061	-0.0643	0.5



**Σχήμα 4.2** Σύγκριση των αναλυτικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων

Συγκρίνοντας τα θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα, διαπιστώνεται ότι οι τιμές των ταχυτήτων εμφανίζουν την ίδια μορφή μεταβολής κατά το βάθος. Συνεπώς, η συμπεριφορά του μοντέλου για τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι επαρκής.

### 4.3 Διάδοση παλιρροϊκού κύματος

#### 4.3.1 Περιγραφή

Σε αυτό το πείραμα προσομοιώνεται η διάδοση παλιρροϊκού κύματος στο εσωτερικό ορθογωνικού καναλιού. Το κύμα εισέρχεται από το ανοικτό όριο στα δεξιά του καναλιού και ανακλάται στο αριστερό, στερεό όριο του καναλιού (Σχήμα 4.3).

#### 4.3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Οι αναλυτικές λύσεις για τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας ( $\zeta$ ) και της μέσης στο βάθος ταχύτητας  $U(x,t)$  θα υπολογισθούν από τις εξισώσεις του Ippen (1966):

$$\zeta = A \cos(\omega t) \quad (4.11)$$

$$U(x, t) = \frac{A \omega x}{h} \sin(\omega t) \quad (4.12)$$

όπου:

A: εύρος του κύματος (amplitude) ίσο με 0.5

$\omega$ : γωνιακή συχνότητα ίση με  $\left(\frac{2\pi}{T}\right)$

h: το συνολικό βάθος (m)

x: η απόσταση από το αριστερό όριο (m)

T: η περίοδος του κύματος (s)

#### 4.3.3 Προσομοίωση με κώδικα FLOW-3DL

Επαναλαμβάνεται το πείραμα των Shankar et al.(2001), που αναφέρεται σε δεξαμενή βάθους 10 m, μήκους 3400 m και πλάτους 1400 m. Η γεωμετρία του προβλήματος και το οριζόντιο πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε φαίνονται στο Σχήμα 4.3. Τη χρονική στιγμή  $t=0$  εισάγεται ο ημιτονοειδής κυματισμός της παλίρροιας (εξίσωση 4.11) στο δεξιό ανοιχτό όριο και αρχίζουν οι υπολογισμοί του μοντέλου από αρχική κατάσταση (cold start).

Το πεδίο ροής χωρίζεται σε 36 κόμβους κατά x και 16 κατά y με χωρικό βήμα ( $\Delta X=\Delta Y=100\text{m}$ ), ενώ κατά τον άξονα z επιλέχτηκε ο διαχωρισμός σε 7 στρώματα ίσου βάθους ( $\Delta z=1.428\text{ m}$ ). Το χρονικό βήμα ( $\Delta t$ ) λαμβάνεται ίσο με 5.0 s. Ο συντελεστής κατακόρυφης συνεκτικότητας  $\varepsilon_z=0,01\text{ m}^2/\text{s}$ , η πυκνότητα  $\rho=1000\text{ kg/m}^3$  και η περίοδος παλίρροιας  $T = 12\text{ h}$ .

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν :

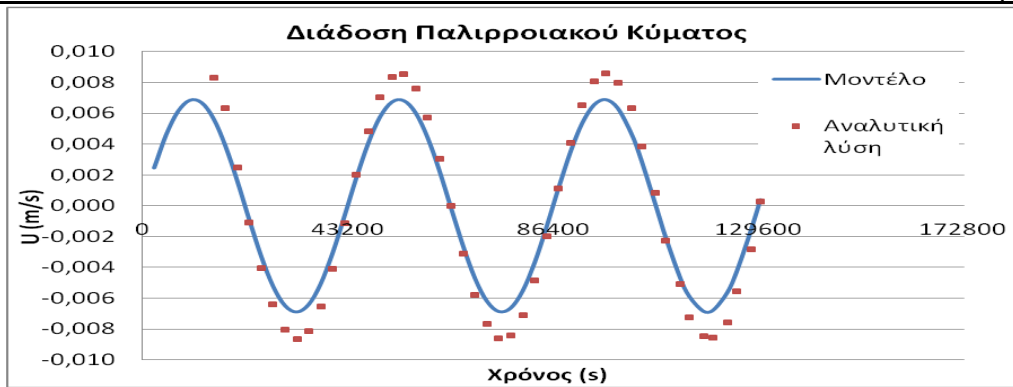
```

DO K=1, NK
  DO J=2, 15
    ELO (NI-1, J)=0.5*cos((2*3.1415/(12*3600))*TIME)
    ELO (NI, J)=ELO (NI-1, J)
    EL (NI-1, J)=0.5*cos((2*3.1415/(12*3600))*TIME)
    EL (NI, J)=EL (NI-1, J)
    U (NI, J, K)=U (NI-1, J, K)
    UO (NI, J, K)=UO (NI-1, J, K)
  ENDDO
ENDDO

```







**Σχήμα 4.4** Σύγκριση των αναλυτικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων

Από το Σχήμα 4.4 προκύπτει ότι η προσομοίωση του παλιρροϊκού κύματος από το μοντέλο είναι αρκετά ικανοποιητική.

#### 4.4 Κατανομή της συγκέντρωσης των φερτών με το βάθος για μόνιμη και ομοιόμορφη ροή

##### 4.4.1 Περιγραφή

Ο συγκεκριμένος έλεγχος πραγματοποιείται με σκοπό να εξακριβωθεί η ικανότητα του μοντέλου να υπολογίζει με ακρίβεια τη κατανομή στο βάθος της συγκέντρωσης στερεών υλικών στην περίπτωση της μόνιμης και ομοιόμορφης ροής για σταθερό βάθος.

##### 4.4.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Οι αναλυτικές λύσεις για τη συγκέντρωση των φερτών υπολογίζονται από την εξίσωση μεταφοράς- διάχυσης, η οποία περιγράφει την εξέλιξη της συγκέντρωσης των φερτών στο χώρο και στο χρόνο.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - W_f \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (4.12)$$

Στην παραπάνω εξίσωση έχουν αγνοηθεί η κάθετη ταχύτητα ροής  $w$  και οι οριζόντιοι όροι διάχυσης των φερτών .

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.12) τις συνθήκες για μόνιμη και ομοιόμορφη ροή (

$\frac{\partial c}{\partial t} = 0, \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \frac{\partial c}{\partial y} = 0$ ) και λαμβάνοντας σταθερή τιμή για το συντελεστή κατακόρυφης

διάχυσης, η εξίσωση γράφεται:

$$-W_f \frac{\partial c}{\partial z} = D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (4.13)$$

Η οριακή συνθήκη του πυθμένα θεωρώντας κατάσταση ισορροπίας ( $D=E$ ) γίνεται:

$$-Dz \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=-h+a} = W_f c_a \quad (4.14)$$

ενώ η συνθήκη στην επιφάνεια:

$$-Dz \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0} = W_f c \Big|_{z=0} \quad (4.15)$$

όπου  $c_a$  η συγκέντρωση των φερτών σε στρώμα του πυθμένα πάχους  $a$ .

Επιλύοντας την εξίσωση (4.13) και αντικαθιστώντας με τις εξισώσεις των οριακών συνθηκών (4.14) και (4.15) προκύπτει :

$$\frac{c}{c_a} = e^{-\frac{W_f}{Dz}(h+z-a)} \quad (4.16)$$

όπου  $c$  η συγκέντρωση των φερτών,  $c_a$  η συγκέντρωση στον πυθμένα σε μια απόσταση  $a$  από τον πυθμένα,  $W_f$  η ταχύτητα καθίζησης των φερτών,  $h$  το συνολικό βάθος και  $z$  η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια.

#### 4.4.3 Προσομοίωση με κώδικα FLOW-3DL

Θεωρείται ορθογωνικό κανάλι, με ανοιχτά όρια, διαστάσεων 1000 m μήκος, 500 m πλάτος και 12 m βάθος στο οποίο ενεργεί ρεύμα σταθερής ταχύτητας 1 m/s.

Η ταχύτητα καθίζησης των στερεών ισούται με  $W_f = 0.02$  m/s και συντελεστής κατακόρυφης διάχυσης  $D_z = 0.12$  m<sup>2</sup>/s. Το χωρικό βήμα είναι  $\Delta X = 50$  m κατά τον άξονα  $x$  και  $\Delta Y = 50$  m κατά τον άξονα  $y$ . Το χρονικό βήμα επιλέχθηκε ίσο με 2 s. Το πεδίο ροής χωρίζεται κατά τον άξονα  $z$  σε 12 ίσα στρώματα.

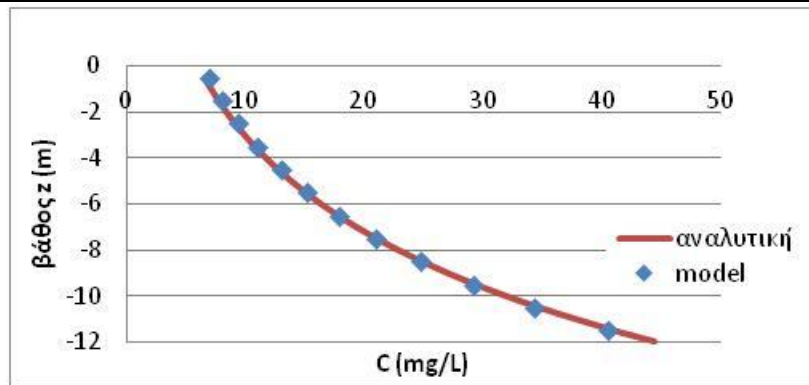
Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν :

```

C***** TEST FOR SOLIDS *****
C*****
c-----inlet(i=2 for U and i=1 for SS)
  DO K=1,NK
    DO J=2,12
      U(2,J,K) = 1.0
      UO(2,J,K) = 1.0
      U(1,J,K) = U(2,J,K)
      UO(1,J,K) = UO(2,J,K)
      C(1,J,K) = C(2,J,K)
      CO(1,J,K) = CO(2,J,K)
      CBED(I,1) = CBED(I,2)
    ENDDO
  ENDDO
c-----outlet
  DO K=1,NK
    DO J=2,12
      U(NI,J,K) = U(NI-1,J,K)
      UO(NI,J,K) = UO(NI-1,J,K)
      C(NI,J,K) = C(NI-1,J,K)
      CO(NI,J,K) = CO(NI-1,J,K)
      CBED(I,NJ) = CBED(I,NJ-1)
    ENDDO
  ENDDO

```





**Σχήμα 4.6** Σύγκριση των αναλυτικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων

Παρατηρείται πως υπάρχει εξαιρετική ταύτιση των τιμών του μοντέλου με αυτές της αναλυτικής λύσης.

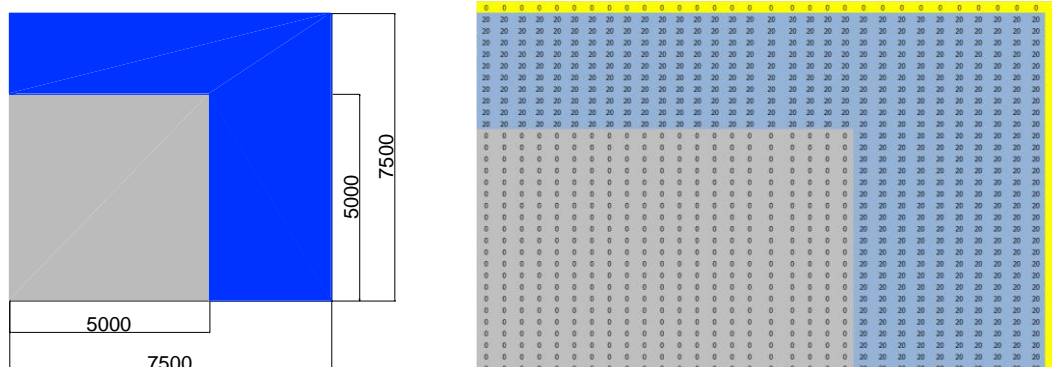
Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η συγκέντρωση των φερτών είναι μικρότερη σε μικρά βάθη σε σχέση με τις τιμές που εμφανίζονται στον πυθμένα.

#### 4.5 Υπολογισμός ρυθμού μεταβολής της στάθμης του πυθμένα σε κανάλι σχήματος Γ (γωνιακό)

##### 4.5.1 Περιγραφή

Το πείραμα που ακολουθεί πραγματοποιείται με σκοπό την απεικόνιση της μόνιμης ροής στο εσωτερικό ενός καναλιού σχήματος Γ που δημιουργείται από σταθερή διαφορά στάθμης μεγέθους 0.05 m μεταξύ του ορίου εισόδου στο νότιο τμήμα του και του ορίου εξόδου του στο δυτικό (Σχήμα 4.7). Η μόνιμη αυτή ροή προκαλεί μετακίνηση του στερεού υλικού του πυθμένα και αντίστοιχη μεταβολή της στάθμης του η οποία επίσης υπολογίζεται.

Ο πυθμένας του καναλιού θεωρείται οριζόντιος και τοποθετείται σε βάθος 20 m από την ελεύθερη επιφάνεια. Στο Σχήμα 4.7 δίνεται η γεωμετρία του καναλιού, το οποίο έχει τετραγωνικό σχήμα διαστάσεων 7500 m x 7500 m ενώ μια περιοχή του καλύπτεται όπως φαίνεται στο σχήμα (γκρι χρώμα) από στεριά σε όλο το βάθος του πεδίου με διαστάσεις 5000 m x 5000 m.



**Σχήμα 4.7** Γεωμετρία του καναλιού σε σχήμα Γ σε οριζόντιο επίπεδο

## 4.5.2 Προσομοίωση σε κώδικα FLOW-3DL

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι: υλικό του πυθμένα  $D_{50} = 0.150$  mm, το χωρικό βήμα επιλέγεται ίσο με  $\Delta X = \Delta Y = 50$  m και ως εκ τούτου το πλέγμα χωρίζεται σε 150 κόμβους κατά τους άξονες x και y. Λαμβάνεται οριζόντιος συντελεστής συνεκτικότητας ( $\epsilon_v$ )  $3 \text{ m}^2/\text{s}$  και το χρονικό βήμα είναι ίσο με  $\Delta t = 2$  s. Η αντίσταση του πυθμένα εκφράζεται από τον αριθμό Manning που στην περίπτωση μας επιλέγεται να είναι  $0.03125 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Το πεδίο ροής χωρίζεται κατά τον κατακόρυφο άξονα σε 8 στρώματα ίσου βάθους (2.5 m).

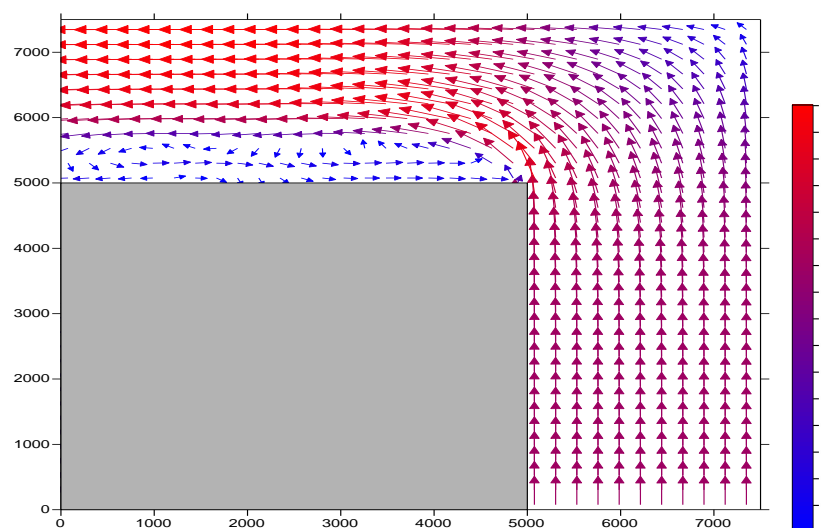
Το ανατολικό και το βόρειο όριο του καναλιού θεωρούνται στερεά ( $u=0 \text{ m/s}$ ). Στο νότιο και το δυτικό όριο, όπου δεν υπάρχει στεριά, ισχύει η συνθήκη ελεύθερης διάβασης της ροής:

$$u_{i,j} = u_{i,j+1} \quad \text{για το νότιο και}$$

$$u_{i,j} = u_{i+1,j} \quad \text{για το δυτικό όριο}$$

όπου u η ταχύτητα του νερού και i,j ο αριθμός των κόμβων του πεδίου κατά x και y αντίστοιχα.

Ύστερα από ορισμένο αριθμό ανακυκλώσεων, επικρατούν μόνιμες συνθήκες και προκύπτει το πεδίο ροής του Σχήματος (4.8) για το 1<sup>ο</sup> στρώμα (στην επιφάνεια):

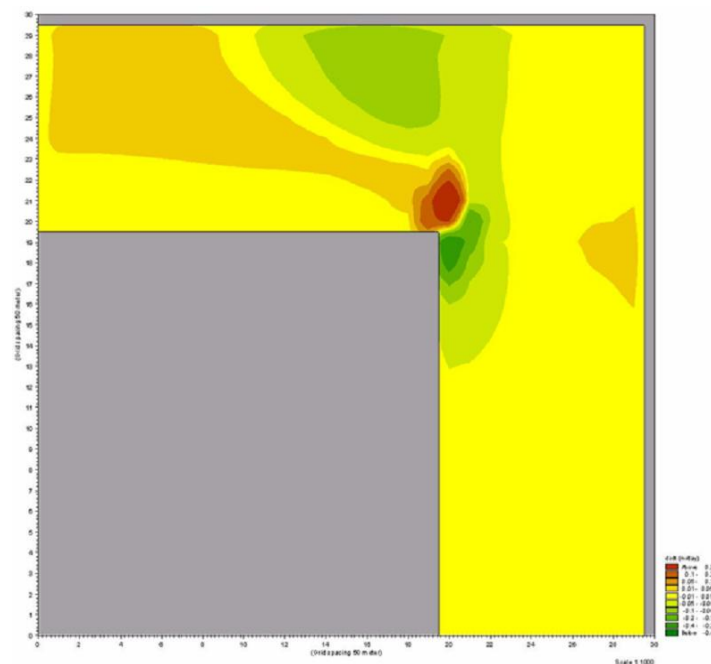


**Σχήμα 4.8** Υπολογιζόμενο πεδίο ροής για το 1<sup>ο</sup> στρώμα

Τα βέλη αντιστοιχούν στις ταχύτητες που υπολογίζονται για το 1<sup>ο</sup> στρώμα με βάση τα παραπάνω δεδομένα. Τα χρώματά τους δείχνουν το μέγεθός τους ανάλογα με την κλίμακα χρώματος (colour scale) που βρίσκεται δεξιά του γραφήματος. Παρατηρείται ότι η ροή ξεκινά από το νότιο άκρο (όριο όπου επιβάλλεται η στάθμη των 0.05 m) με κατεύθυνση προς τα πάνω (προς βορρά) με μία μέση ταχύτητα της τάξης των 0.5 m/s. Μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας εμφανίζονται, όπως αναμενόταν, στη περιοχή σχηματισμού της γωνίας και κατάντη αυτής (~0.8-0.9 m/s). Παρατηρείται επίσης αποκόλληση της ροής πίσω από τη γωνία και προς το δυτικό όριο εξόδου, καθώς ένα μεγάλο μέρος των ταχυτήτων αλλάζει διεύθυνση και γυρίζει προς τα πίσω με χαμηλότερες τιμές (μικρότερη τιμή στα 0.05 m/s).

Σε δεύτερο στάδιο μελετάται η συμπεριφορά των φερτών του πυθμένα εξαιτίας του αναπτυσσόμενου πεδίου ροής (Σχήμα 4.9) επιλύοντας την εξίσωση μεταβολής του πυθμένα





**Σχήμα 4.10** Πρότυπο Surfer για το γωνιακό κανάλι (MIKE 21,DHI)

#### 4.6 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν για τον κώδικα FLOW-3DL είναι τα παρακάτω:

- (α) Ο κώδικας FLOW-3DL έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει ικανοποιητικά την παράκτια κυκλοφορία που ως αίτιο δημιουργίας κίνησης έχει τον άνεμο και την παλίρροια.
- (β) Το μοντέλο υπολογίζει σωστά το πεδίο ροής στην περίπτωση παλιρροϊκού κύματος σε ορθογωνικό κανάλι.
- (γ) Υπολογίζει με ακρίβεια την κατανομή των φερτών για μόνιμη και ομοιόμορφη ροή στην περίπτωση που θεωρείται σταθερός κατακόρυφος συντελεστής συνεκτικότητας.
- (δ) Προσομοιώνει με επιτυχία φαινόμενα στερεομεταφοράς σε γωνιακό κανάλι. Υπολογίζει σωστά το πεδίο ροής που προκύπτει λόγω υψομετρικής διαφοράς στην είσοδο του καναλιού και δίνει μεταβολή της στάθμης του πυθμένα που συμφωνεί με την προβλεπόμενη εξέλιξη από το υπολογισθέν πεδίο ροής.

## **5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ**

### **5.1 Γενικά Χαρακτηριστικά**

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της περιοχής που εφαρμόστηκε το μοντέλο FLOW-3DL. Δίνονται οι διαστάσεις των περιοχών που έγιναν υπολογισμοί, η γεωγραφική θέση του έργου, τα στοιχεία βυθομετρίας και στοιχεία για την παλίρροια και τέλος δίνονται τα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων στερεών στην περιοχή εκτέλεσης του έργου. Το μοντέλο εφαρμόστηκε στον κόλπο του Θερμαϊκού για την περίπτωση απόληψης υλικών στην περιοχή της Επανομής. Η απόληψη των υλικών έγινε για να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή ενός έργου επέκτασης του βου προβλήτα του ΟΛΘ. Για το σκοπό αυτό διανοίγεται όρυγμα βάθους 2 m, απέναντι από την ακτή της Επανομής. Η θέση αυτή έχει επιλεγεί επειδή θεωρείται ότι στον πυθμένα υπάρχει υλικό ικανοποιητικής ποιότητας για τις ανάγκες του έργου. Έχει επίσης επιβεβαιωθεί προηγουμένως ότι δεν θα παρατηρηθεί μεταβολή της ακτογραμμής εξαιτίας της απολήψεως και ότι δεν θα παρακλυθεί η εγκάρσια μεταφορά φερτών. Επειδή η θέση του ορύγματος βρίσκεται έξω από την ζώνη θραύσης αλλά και λόγω του μεγάλου βάθους (35 m) δεν επηρεάζονται οι κυματισμοί. Έτσι στους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη μόνο κίνηση εξαιτίας ανεμογενούς ρεύματος.

### **5.2 Χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης**

#### *5.2.1 Περιοχή μελέτης*

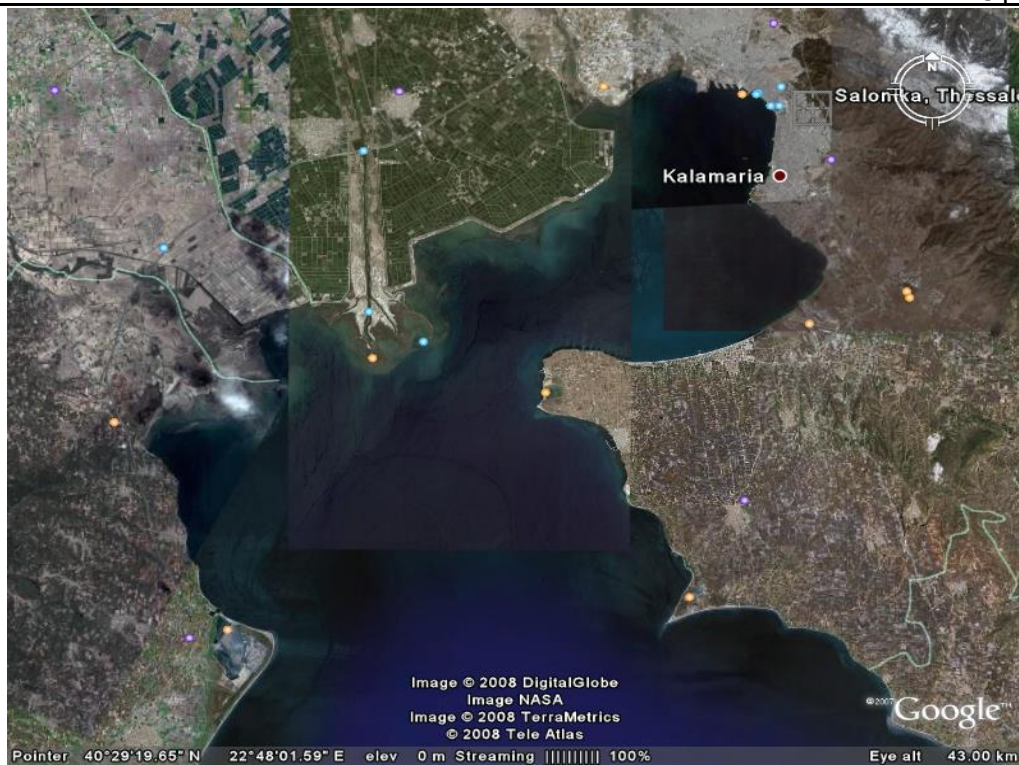
Στην παρούσα εργασία θεωρούνται δυο επιμέρους περιοχές:

- (α) η ευρύτερη περιοχή μελέτης και
- (β) η κύρια περιοχή μελέτης.

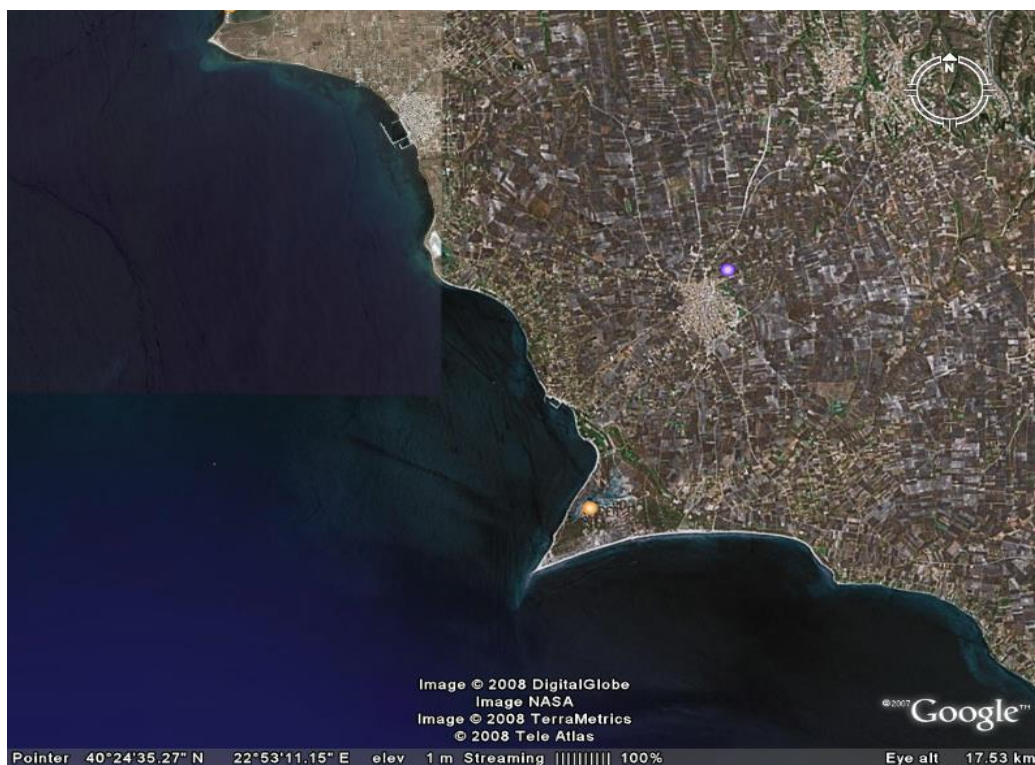
Η ευρύτερη περιοχή μελέτης, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 5.1, καλύπτει ένα σημαντικό τμήμα του Θερμαϊκού Κόλπου και έχει διαστάσεις 37.5 km x 34.5 km.

Η κύρια περιοχή μελέτης, η οποία περιλαμβάνει την παράκτια περιοχή του υποβρύχιου ορύγματος για την απόληψη υλικών, φαίνεται στο Σχήμα 5.2 και έχει διαστάσεις 3.3 km x 7.8 km.





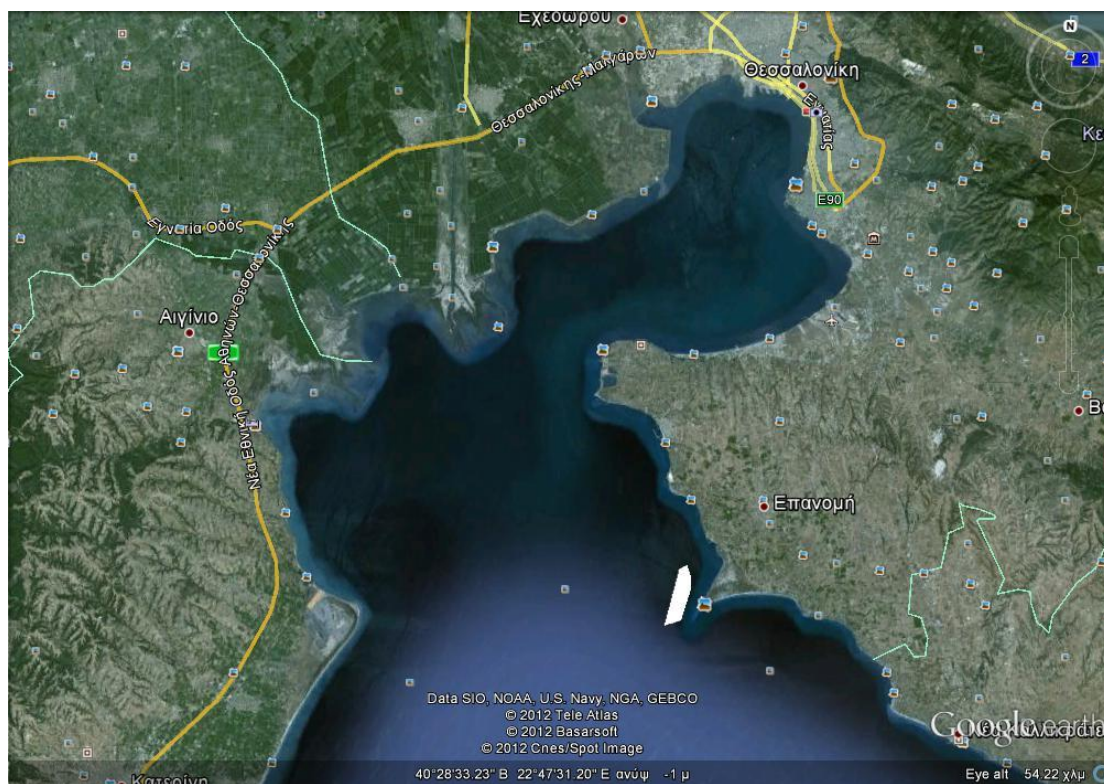
Σχήμα 5.1 Φωτογραφία ευρύτερης περιοχής μελέτης (Google Earth)



Σχήμα 5.2 Φωτογραφία κύριας περιοχής μελέτης (Google Earth)

5.2.2 Γεωγραφική θέση του έργου – Συντεταγμένες οριοθέτησης ορύγματος

Το όρυγμα σημειώνεται με λευκό χρώμα στο Σχήμα 5.3 και οι συντεταγμένες οριοθέτησής του φαίνονται στον Πίνακα 5.1.



Σχήμα 5.3 Οριοθέτηση του υποβρύχιου ορύγματος

Πίνακας 5.1 Συντεταγμένες οριοθέτησης του υποβρύχιου ορύγματος

ΕΓΣΑ 87		WGS '84	
x	y	E	N
404187,11	4471997,71	22°52'22"	40°23'44"
404825,49	4472140,16	22°52'49"	40°23'49"
405041,44	4471532,05	22°52'58"	40°23'30"
405033,83	4470712,12	22°52'59"	40°23'03"
404564,94	4469024,88	22°52'40"	40°22'08"
403646,38	4468720,32	22°52'01"	40°21'58"

### 5.2.3 Βαθυμετρία

Τα στοιχεία γεωμετρίας-βαθυμετρίας της ευρύτερης περιοχής μελέτης του Θερμαϊκού Κόλπου ελήφθησαν από το χάρτη της Υδρογραφικής Υπηρεσίας «Βόρειος Ευβοϊκός μέχρι κόλπος Καβάλας» κλίμακας 1:250.000, καθώς και τους χάρτες της ΓΥΣ 1:50.000 με ονομασίες «Βασιλικά» και «Επανομή».

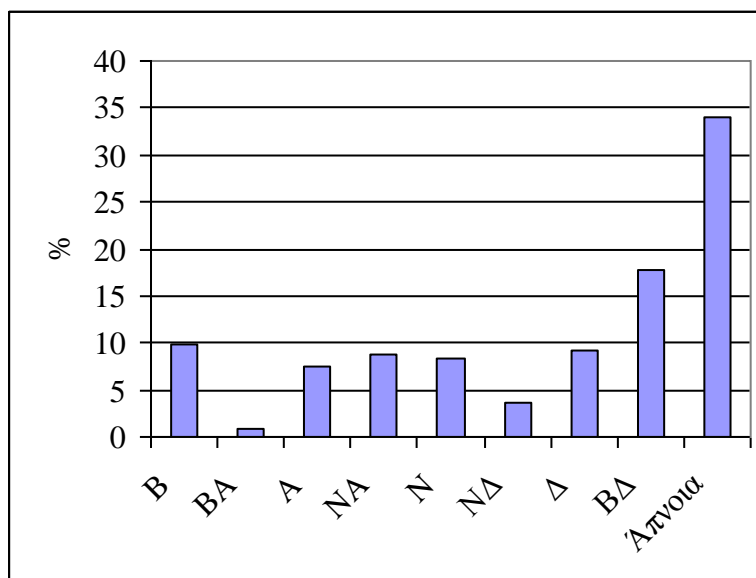
### 5.2.4 Μετεωρολογικά στοιχεία

Τα μετεωρολογικά στοιχεία, που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, ελήφθησαν από το Σταθμό ΜΙΚΡΑ (622) της Ε.Μ.Υ. (Γεωγραφικό πλάτος: 40° 31' N, Γεωγραφικό μήκος: 22° 58' E, Υψόμετρο: 4.8 m) και την περίοδο 1959-2001.

Στον Πίνακα 5.2 και στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζονται οι τιμές των συχνοτήτων παρατήρησης διευθύνσεων-εντάσεων του ανέμου. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι συχνότητες παρατήρησης διευθύνσεων-εντάσεων των ισχυρών ανέμων.

**Πίνακας 5.2** Συχνότητες παρατήρησης διευθύνσεων-εντάσεων ανέμου

Beaufort	B	BA	A	NA	N	ΝΔ	Δ	ΒΔ	Άπνοια	Σύνολο
0									34.041	34.041
1	0.307	0.099	1.042	1.086	0.548	0.263	0.625	1.097		5.067
2	1.711	0.472	5.012	4.880	3.137	1.524	4.255	5.484		26.475
3	2.347	0.186	1.108	1.897	3.257	1.382	3.246	5.089		18.512
4	2.972	0.099	0.318	0.658	1.261	0.494	0.834	3.542		10.178
5	1.338	0.022	0.077	0.132	0.154	0.044	0.099	1.217		3.083
6	0.768	0.011	0.011	0.044	0.022	0.011	0.033	0.812		1.712
7	0.230	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.263		0.559
8	0.088	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.175		0.274
9	0.011	0.000	0.011	0.011	0.000	0.000	0.011	0.033		0.077
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011		0.011
>11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011		0.011
Άθροισμα	9.772	0.900	7.590	8.719	8.390	3.729	9.125	17.734	34.041	100.000
Διάρκεια (ημέρες/έτος)	35.18	3.24	27.32	31.39	30.20	13.42	32.85	63.84	122.55	360.00



**Σχήμα 5.4** Συχνότητες παρατήρησης διευθύνσεων ανέμου

Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 5.4 και στον Πίνακα 5.2, οι επικρατούντες άνεμοι είναι κατά σειρά οι ΒΔ (18%), Β(10%), ΝΑ (9%), Δ(9%), Α(8%) και Ν(8%), δηλ. κυρίως οι Β-ΒΔ (28%) και Ν-ΝΑ (17%).

**Πίνακας 5.3** Συχνότητες παρατήρησης διευθύνσεων-εντάσεων ισχυρών ανέμων

Μήνας	≥ 6B	≥ 8B	Επικρατούσα διεύθυνση
Ιανουάριος	2.7	0.4	ΒΔ
Φεβρουάριος	2.3	0.3	ΒΔ
Μάρτιος	1.7	0.3	ΒΔ
Απρίλιος	1.3	0.1	ΒΔ
Μάιος	0.7	0.1	ΒΔ
Ιούνιος	1.1	0.1	ΒΔ
Ιούλιος	1.4	0.2	ΒΔ
Αύγουστος	1.1	0.1	Ν
Σεπτέμβριος	1.1	0.1	ΒΔ
Οκτώβριος	1.1	0.2	ΒΔ
Νοέμβριος	1.7	0.4	ΒΔ
Δεκέμβριος	2.3	0.4	ΒΔ

Από τους Πίνακες 5.2 και 5.3 υπολογίζονται

(α) η ετήσια συχνότητα εμφάνισης των ισχυρών ΒΔ ανέμων και

(β) η αντίστοιχη μέση-σταθμισμένη ταχύτητά τους

και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

**Πίνακας 5.4** Χαρακτηριστικά ισχυρών ΒΔ ανέμων

<b>Χαρακτηριστικό</b>	<b>≥ 6B</b>	<b>≥ 7B</b>	<b>≥ 8B</b>
Συχνότητα (%)	1.31	0.49	0.23
Συχνότητα (days/year)	4.8	1.8	0.8
Μέση ταχύτητα ανέμου (Beaufort)	6.62	7.64	8.38
Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	14.24	17.67	20.29

### 5.2.5 Στοιχεία παλίρροιας

Στην περιοχή μελέτης οι μικρές ταχύτητες ροής, που προκαλούνται από τις μικρές μεταβολές της μέσης στάθμης θάλασσας εξαιτίας της παλίρροιας, δεν αναμένεται να επηρεάσουν τους υπολογισμούς.

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι τιμές των κύριων χαρακτηριστικών της παλίρροιας στην περιοχή μελέτης. Το υδρογραφικό υπόβαθρο με τα μετρημένα βάθη ως προς την Κατωτάτη Ρηχία, έχουν ληφθεί από το χάρτη Νο. 255 της Υδρογραφικής Υπηρεσίας κλίμακας 1:50,000 με τίτλο «Θερμαϊκός Κόλπος». Στις τιμές των βαθών αυτών προστίθεται και η στάθμη των 0.87 m όπως μετρήθηκε από τον παλιρροιογράφο του Λιμένα Θεσσαλονίκης, ώστε τα βάθη να αναφερθούν ως προς τη Μέση Στάθμη Θάλασσας.

**Πίνακας 5.5** Κύρια χαρακτηριστικά της παλίρροιας στην περιοχή μελέτης (1967-σήμερα)

<b>Χαρακτηριστικό</b>	<b>Τιμή</b>
Μέγιστη πλήμμη	1.52
Μέση πλήμμη	0.99
Μέση στάθμη	0.87
Μέση ρηχία	0.74
Κατωτάτη ρηχία	0.00

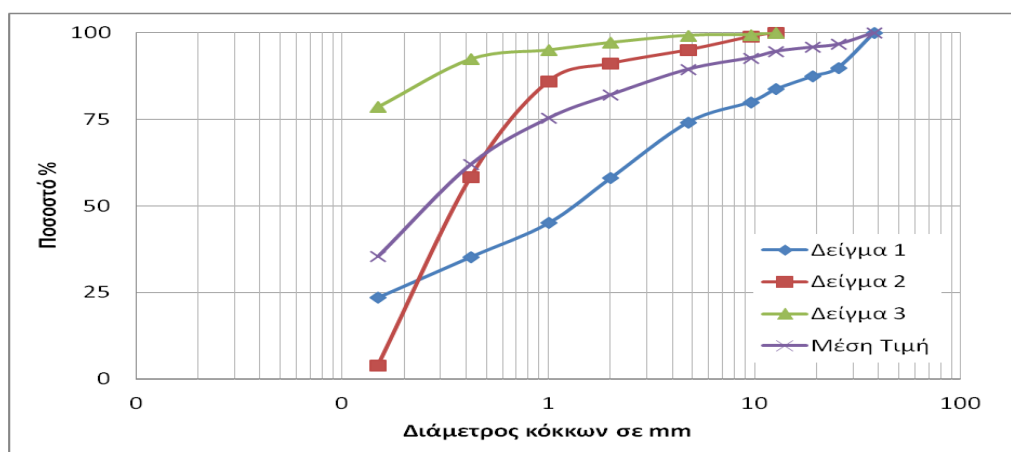
### 5.3 Χαρακτηριστικά στερεών

#### 5.3.1 Κοκκομετρική σύνθεση και κλάσεις στερεών

Τα χαρακτηριστικά της ανάλυσης της κοκκομετρικής σύνθεσης των στερεών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6 και προέρχονται από μελέτη για την κοκκομετρική σύνθεση των στερεών σε τρία δείγματα από την περιοχή της εκσκαφής.

**Πίνακας 5.6** Χαρακτηριστικά ανάλυσης της κοκκομετρικής σύνθεσης στερεών στην περιοχή του ορύγματος

Διάμετρος (mm)	1 <sup>ο</sup> δείγμα (%)	2 <sup>ο</sup> δείγμα (%)	3 <sup>ο</sup> δείγμα (%)	Μέση τιμή (%)
38.100	100.0	100.0	100.0	100.0
25.400	89.9	100.0	100.0	96.6
19.050	87.3	100.0	100.0	95.8
12.700	83.7	100.0	100.0	94.6
9.530	79.9	98.8	99.4	92.7
4.760	74.1	95.0	99.2	89.4
2.000	58.0	91.0	97.1	82.0
1.000	45.0	85.9	95.0	75.3
0.420	35.3	58.4	92.3	62.0
0.149	23.6	4.0	78.6	35.4
0.074	0.0	0.0	0.0	0.0



**Σχήμα 5.5** Κοκκομετρικές καμπύλες διαβάθμισης των στερεών στην περιοχή της εκσκαφής

Σύμφωνα με τις αναλύσεις το υλικό στην περιοχή του ορύγματος περιλαμβάνει κυρίως άμμο, αλλά και άργιλο σε μικρό ποσοστό. Το μέσο μέγεθος των κόκκων στο σύνολο της περιοχής  $D_{50}$  κυμαίνεται από 200 μέχρι 750  $\mu$  και μπορεί να χαρακτηριστεί ως μέση άμμος (medium sand). Από τα ανάλυση των δεδομένων υπολογίστηκαν οι ακόλουθες τιμές:

$D_{50}=0.30$  mm και  $D_{90}=5.63$  mm, οι οποίες προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή στο Σχήμα 5.5 για τα δεδομένα της καμπύλης που αντιστοιχεί στη μέση τιμή.

Επιπλέον, η πυκνότητα των αιωρούμενων στερεών της άμμου θεωρείται ίση με  $\rho_s = 2650$  kg/m<sup>3</sup> και το πορώδες της ίσο με 0.40.

Το σύνολο των στερεών διαχωρίστηκε σε 10 κλάσεις με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 5.7.

**Πίνακας 5.7** Κλάσεις στερεών στην περιοχή του ορύγματος

Κλάση (-)	Διάμετρος (mm)	Ποσοστό (%)
1	31.75	3.4
2	22.23	0.8
3	15.88	1.2
4	11.12	1.9
5	7.15	3.3
6	3.38	7.4
7	1.50	6.7
8	0.71	13.3
9	0.28	26.6
10	0.11	35.4
Άθροισμα		100.0

### 5.3.2 Ταχύτητες καθίζησης κλάσεων στερεών

Για τις 10 κλάσεις των στερεών του Πίνακα 5.8 προσδιορίστηκαν οι αντίστοιχες ταχύτητες καθίζησης σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις (Κουτίτας, 1985)

$$w_s = \frac{(s-1)gd_s^2}{18\nu} \quad 1 < d_s \leq 100\mu m \quad (5.1)$$

$$w_s = \frac{10\nu}{d_s} \left[ \left( 1 + \frac{0.01(s-1)gd_s^3}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \quad 100 < d_s \leq 1000\mu m \quad (5.2)$$

$$w_s = 1.1[(s-1)gd_s]^{0.5} \quad d_s \geq 1000\mu m \quad (5.3)$$

όπου:

$s$  είναι η σχετική πυκνότητα της άμμου,  
 $g$  είναι η επιτάχυνση της ταχύτητας της βαρύτητας,  
 $\nu$  είναι ο συντελεστής κινηματικής συνεκτικότητας, και  
 $d$  είναι η διάμετρος των κόκκων.

Οι τιμές των ταχυτήτων καθίζησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8.

**Πίνακας 5.8** Κλάσεις στερεών και ταχύτητες καθίζησης

Κλάση (-)	Διάμετρος (mm)	Ποσοστό (%)	Ταχύτητα καθίζησης (m/s)
1	31.75	3.4	0.771
2	22.23	0.8	0.645
3	15.88	1.2	0.545
4	11.12	1.9	0.456
5	7.15	3.3	0.366
6	3.38	7.4	0.252
7	1.50	6.7	0.168
8	0.71	13.3	0.092
9	0.28	26.6	0.040
10	0.11	35.4	0.009
Άθροισμα		100.0	
D <sub>50</sub>	0.30		0.043
D <sub>90</sub>	5.63		0.293

#### 5.4 Υπολογισμοί προσομοίωσης των πεδίων ροής της περιοχής

Παρακάτω δίνεται αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμών που ακολουθήθηκε για την εύρεση των υδροδυναμικών πεδίων που δημιουργούνται στην περιοχή.

##### 5.4.1 Μεθοδολογία υπολογισμών προσομοίωσης πεδίων

Στους υπολογισμούς προσομοίωσης των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της ευρύτερης περιοχής μελέτης εφαρμόζεται η ακόλουθη μεθοδολογία:

(α) Βήμα 1. Καθορίζονται τα όρια της ευρύτερης περιοχής μελέτης και το αριθμητικό πλέγμα υπολογισμού.

(β) Βήμα 2. Καθορίζονται οι σειρές και τα σενάρια υπολογισμών.

(γ) Βήμα 3. Υπολογίζονται τα πεδία ροής και τα χαρακτηριστικά τους για κάθε σενάριο υπολογισμών.

##### 5.4.2 Καθορισμός των ορίων της ευρύτερης περιοχής μελέτης και του αριθμητικού πλέγματος υπολογισμών

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης εφαρμόζεται το μαθηματικό μοντέλο FLOW-3DL στο αριθμητικό πλέγμα, τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον Πίνακα 5.9. Οι διαστάσεις της ευρύτερης περιοχής είναι 37.5 km x 34.5 km.

Η κάτοψη του πλέγματος σε μορφή αρχείου EXCEL παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6.



**Πίνακας 5.9** Χαρακτηριστικά αριθμητικού πλέγματος της ευρύτερης περιοχής μελέτης

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Αριθμός διαφ. όγκων	150X138
Μορφή πλέγματος	Ομοιόμορφο
Αριθμός στρωμάτων	1
Διαστάσεις πλέγματος	250 m X 250 m

Τα όρια της εξεταζόμενης περιοχής μελέτης καθορίζονται ως εξής:

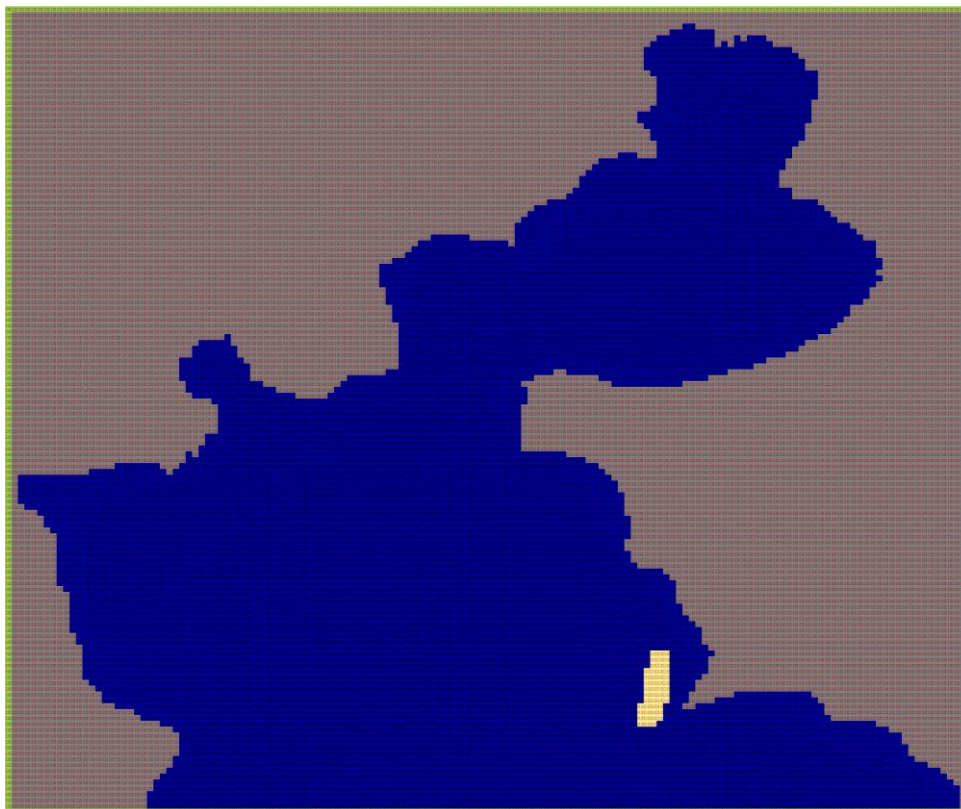
(α) Κατά την κατακόρυφη διεύθυνση η περιοχή περιορίζεται από τον πυθμένα και την ελεύθερη επιφάνεια.

(β) Το ανατολικό όριο, το βόρειο όριο και το δυτικό όριο της εξεταζόμενης περιοχής είναι στερεά όρια των ακτών.

(γ) Το νότιο όριο αποτελεί το όριο ανοικτής θάλασσας.

Συνοπτικά, η εξεταζόμενη περιοχή έχει 3 στερεά όρια ακτών και 1 όριο ανοικτής θάλασσας.

Στο νότιο όριο ανοικτής θάλασσας εφαρμόζεται η συνθήκη της ελεύθερης διάβασης (Κρεστενίτης, 1988).



**Σχήμα 5.6** Αριθμητικό πλέγμα υπολογισμών ευρύτερης περιοχής μελέτης. Με κίτρινο χρώμα σημειώνεται η θέση του σκάμματος.

### 5.4.3 Σειρές και σενάρια υπολογισμών

Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί των σεναρίων της 1<sup>ης</sup> σειράς για :

(α) όλες τις πιθανές διευθύνσεις ανέμων (8 σενάρια) και

(β) τις μέσες ταχύτητες ανέμων (σταθμισμένες με τη συχνότητα εμφάνισής τους), που καλύπτουν όλο το εύρος ταχυτήτων των ανέμων (1-11 Beauforts).

Τα χαρακτηριστικά των 8 σεναρίων υπολογισμών της 1<sup>ης</sup> σειράς υπολογισμών φαίνονται στον Πίνακα 5.10.

**Πίνακας 5.10** Χαρακτηριστικά των 8 σεναρίων της 1<sup>ης</sup> σειράς υπολογισμών

α/α σεναρίου	Σενάριο	Διεύθυνση ανέμου	Μέση ταχύτητα ανέμου (Beaufort)
1	B	B	3.72
2	BA	BA	2.50
3	A	A	2.15
4	NA	NA	2.32
5	N	N	2.70
6	NΔ	NΔ	2.63
7	Δ	Δ	2.54
8	BΔ	BΔ	3.16

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί των 18 σεναρίων της 2<sup>ης</sup> σειράς για ισχυρούς ανέμους ( $\geq 7$  Beauforts) και τις μέσες ταχύτητές τους. Τα χαρακτηριστικά των σεναρίων της 2<sup>ης</sup> σειράς υπολογισμών φαίνονται στον Πίνακα 5.11.

Πίνακας 5.11 Χαρακτηριστικά των 18 σεναρίων της 2<sup>ης</sup> σειράς υπολογισμών

α/α σεναρίου	Σενάριο	Διεύθυνση ανέμου	Μέση ταχύτητα ανέμου (Beaufort)
1	B7	B	7
2	B8	B	8
3	B9	B	9
4	BA7	BA	7
5	A7	A	7
6	A9	A	9
7	NA7	NA	7
8	NA9	NA	9
9	N7	N	7
10	NΔ7	NΔ	7
11	Δ7	Δ	7
12	Δ8	Δ	8
13	Δ9	Δ	9
14	BΔ7	BΔ	7
15	BΔ8	BΔ	8
16	BΔ9	BΔ	9
17	BΔ10	BΔ	10
18	BΔ11	BΔ	11

#### 5.4.4 Χαρακτηριστικά πεδίων ροής

Στα Σχήματα 5.12 μέχρι 5.19 παρουσιάζονται τα ανύσματα των μέσων κατά βάθος ταχυτήτων ροής και οι μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας για τα 8 σενάρια της πρώτης σειράς. Στον Πίνακα 5.12 παρουσιάζονται τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά όλων των σεναρίων.

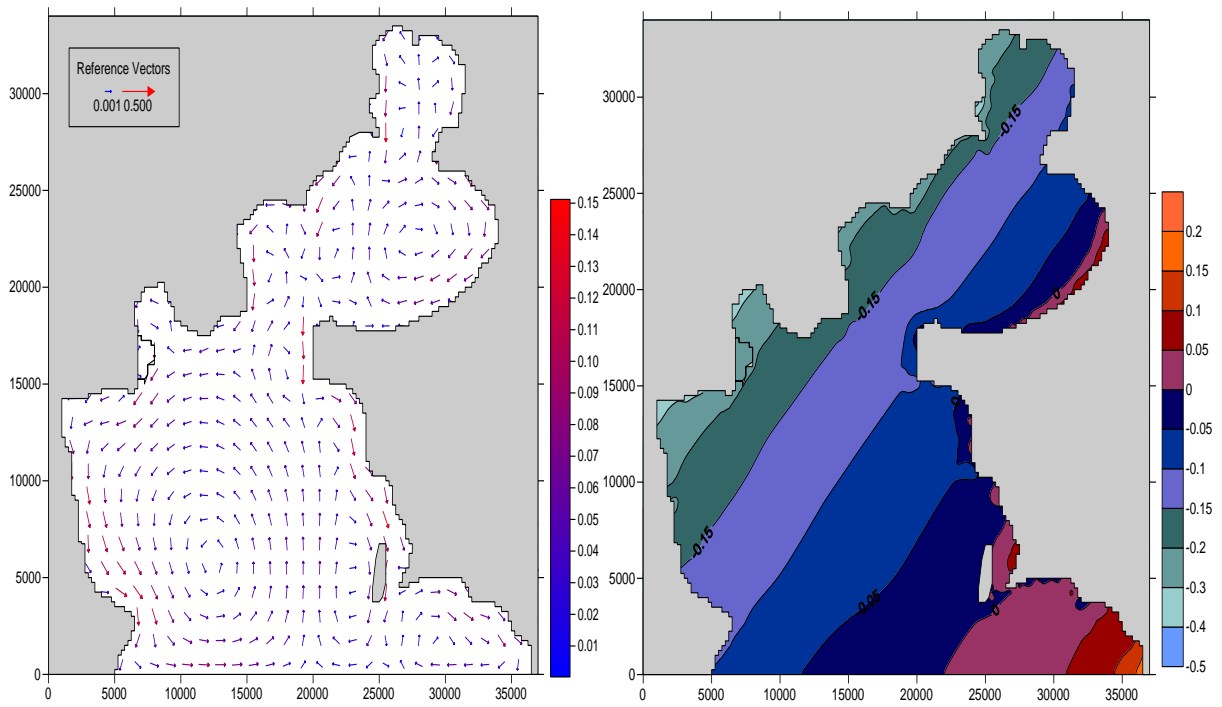
Από τα Σχήματα 5.12 μέχρι 5.19 και τους λοιπούς υπολογισμούς διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

(α) Όπως αναμενόταν, τα μέσα κατά βάθος πεδία ροής και οι στρόβιλοι που δημιουργούνται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης καθορίζονται από τη διεύθυνση του ανέμου και τη βαθυμετρία της περιοχής.

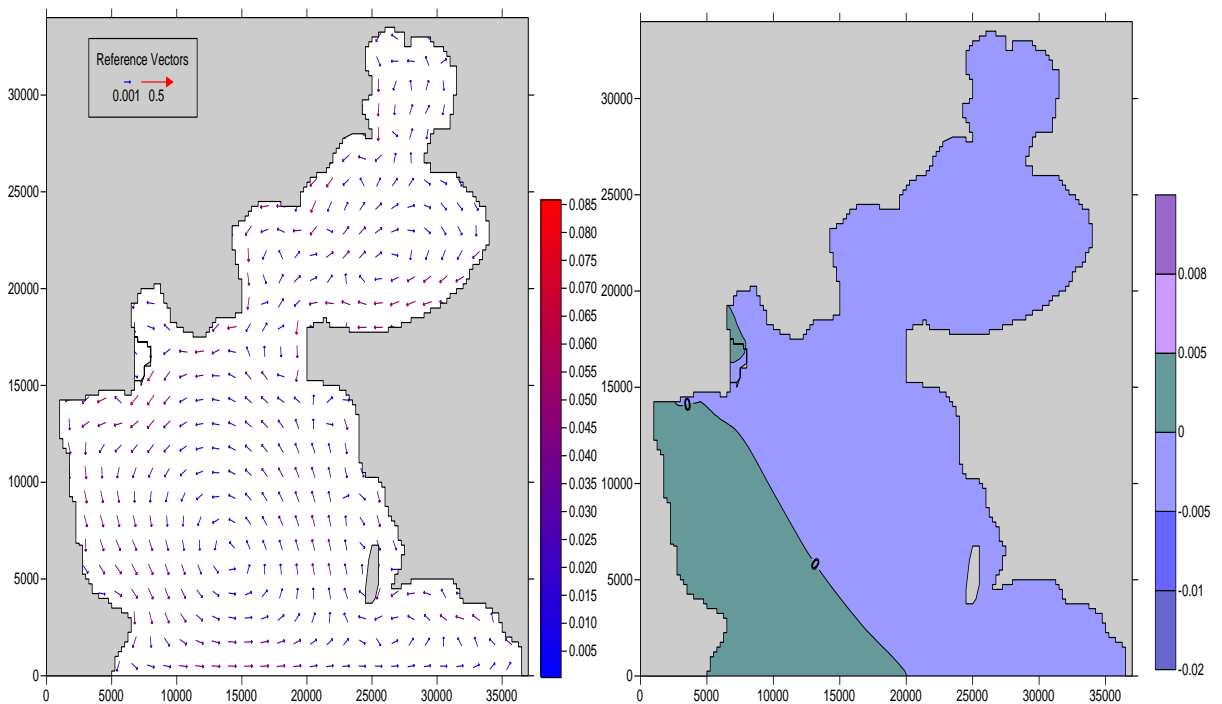
(β) Η διεύθυνση του παράκτιου ρεύματος στην κύρια περιοχή μελέτης εξαρτάται από τη διεύθυνση του ανέμου. Το παράκτιο ρεύμα κινείται προς Β για τα σενάρια ΝΑ, Ν και ΝΔ, δηλ. για όσα σενάρια έχουν Ν συνιστώσα, και προς Ν για τα υπόλοιπα σενάρια (Β, ΒΑ, Α, Δ και ΒΔ).

(γ) Στην περιοχή του υποβρυχίου ορύγματος η ταχύτητα ροής του παράκτιου ρεύματος υπολογίστηκε της τάξης του 0.7 μέχρι 1.4 % της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου, δηλ. κυμαίνεται από μερικά cm/s μέχρι περίπου 50 cm/s στην ακραία περίπτωση του ΒΔ ανέμου 11 Beaufort.

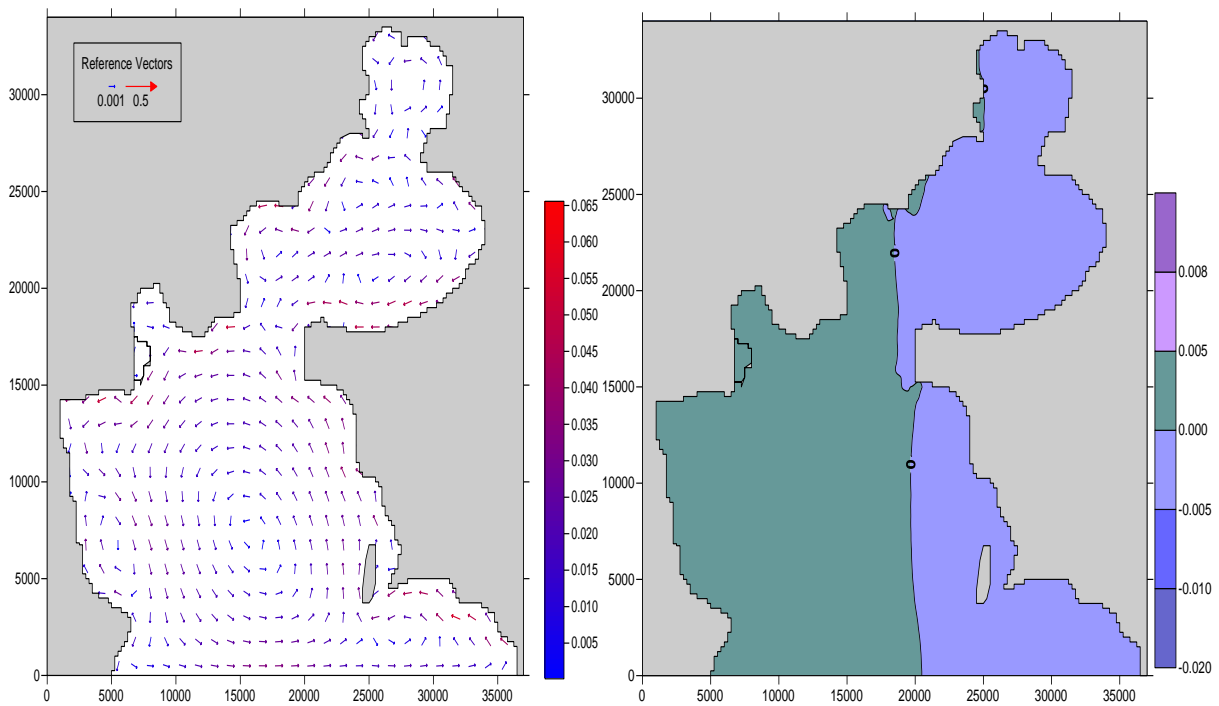
(δ) Η μορφή και η τάξη μεγέθους των ταχυτήτων των υπολογιζόμενων πεδίων ροής βρίσκεται σε συμφωνία με ανάλογους υπολογισμούς άλλων ερευνητών στην περιοχή του Θερμαϊκού (Κρεστενίτης, 1988 και Αυγέρης, 2006).



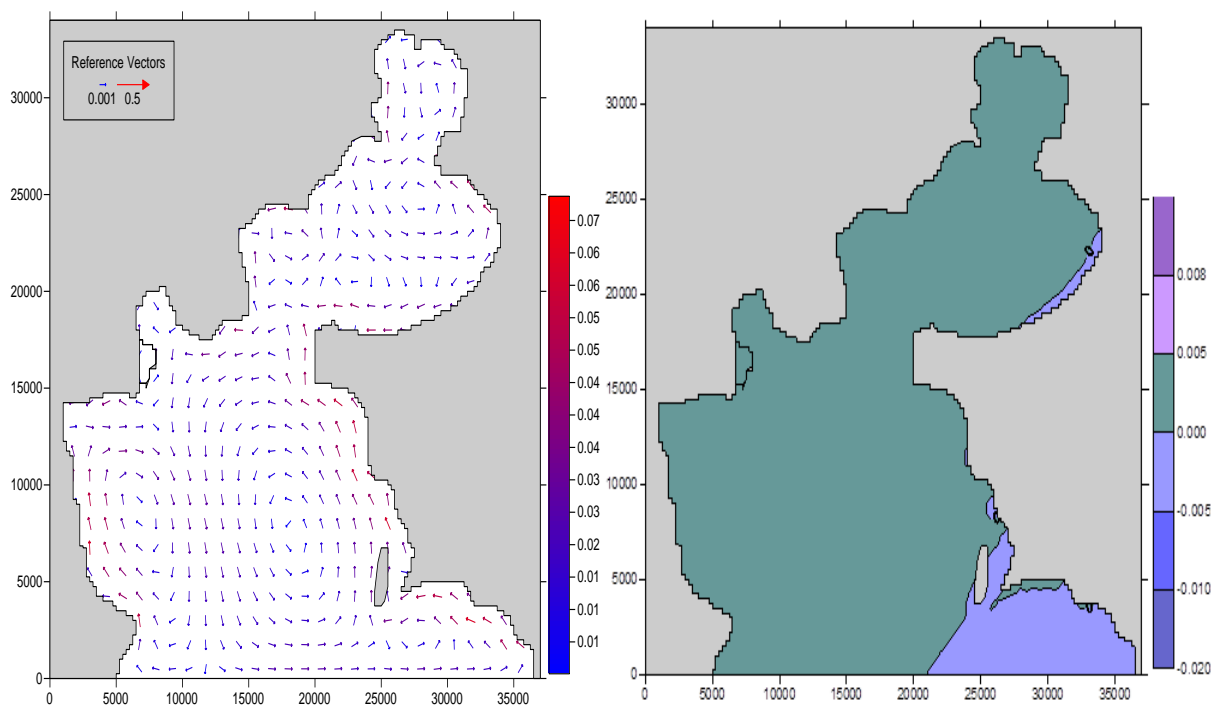
Σχήμα 5.12 Πεδίο ροής και μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας για το σενάριο Β (Β άνεμος)



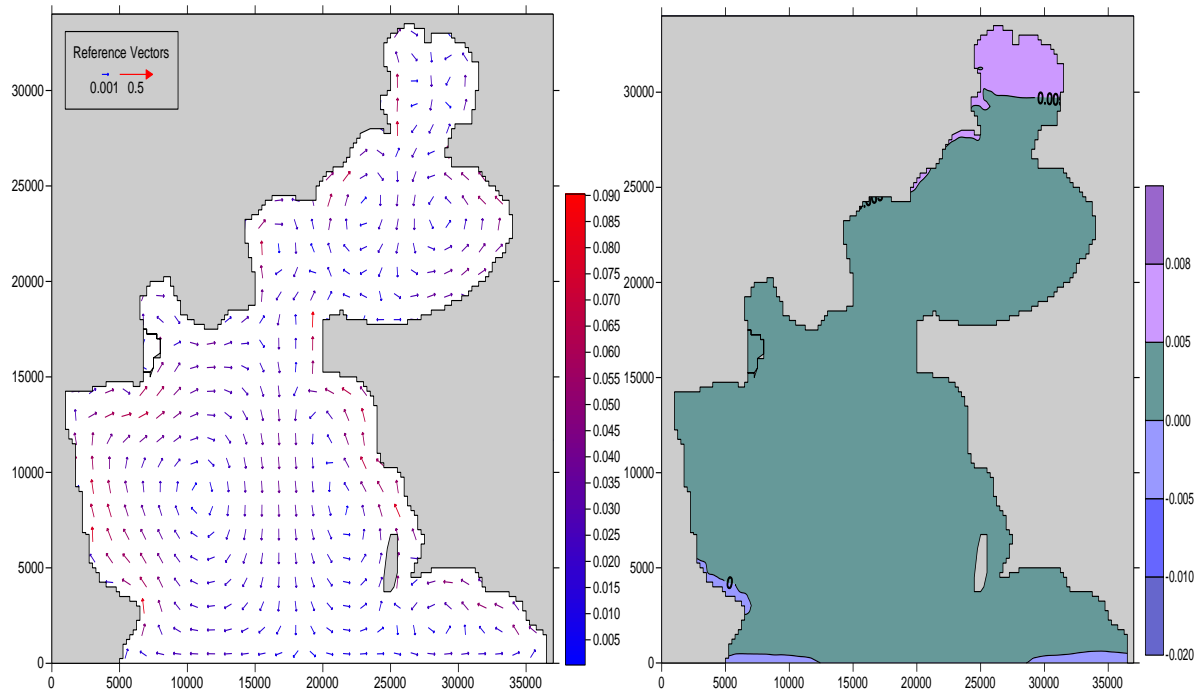
Σχήμα 5.13 Πεδίο ροής και μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας για το σενάριο ΒΑ (ΒΑ άνεμος)



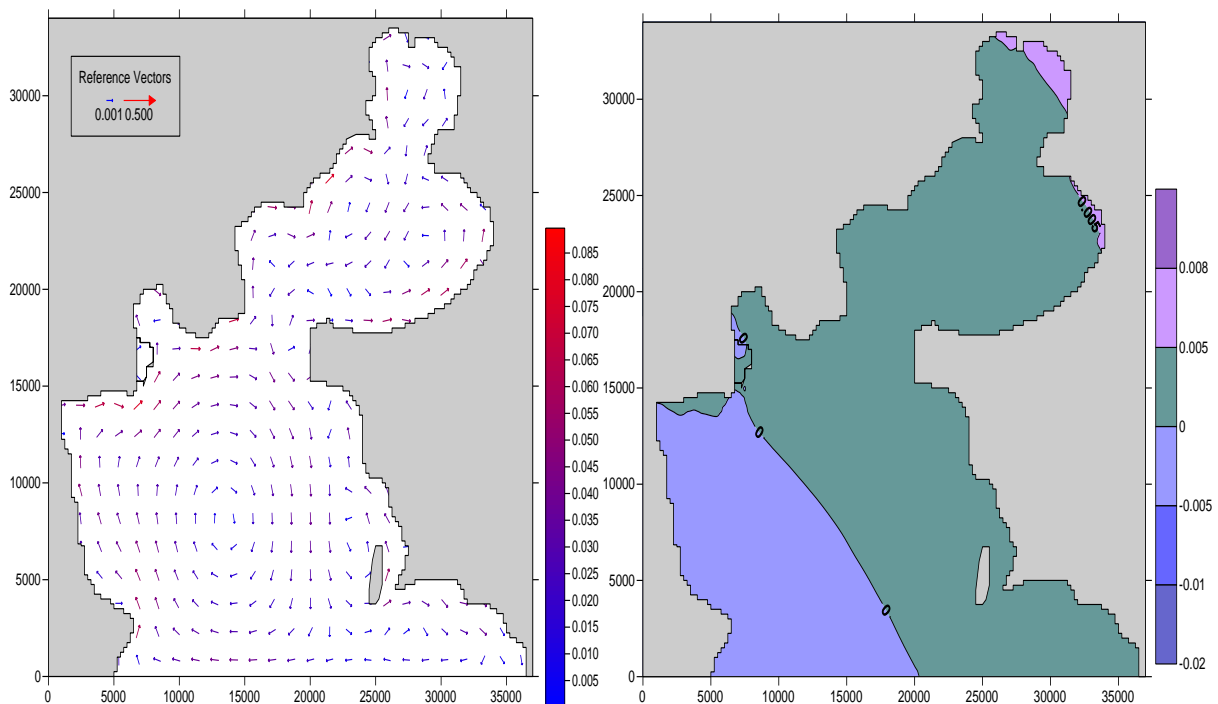
Σχήμα 5.14 Πεδίο ροής και μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας για το σενάριο A (A άνεμος)



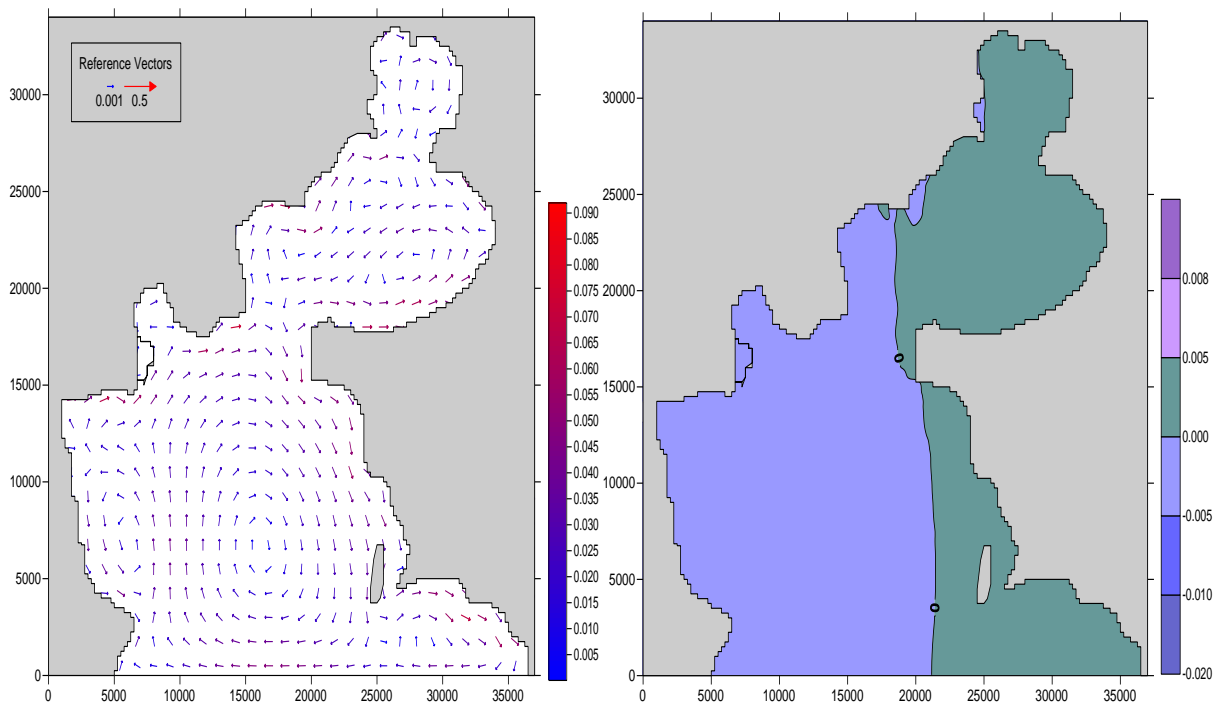
Σχήμα 5.15 Πεδίο ροής και μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας για το σενάριο NA (NA άνεμος)



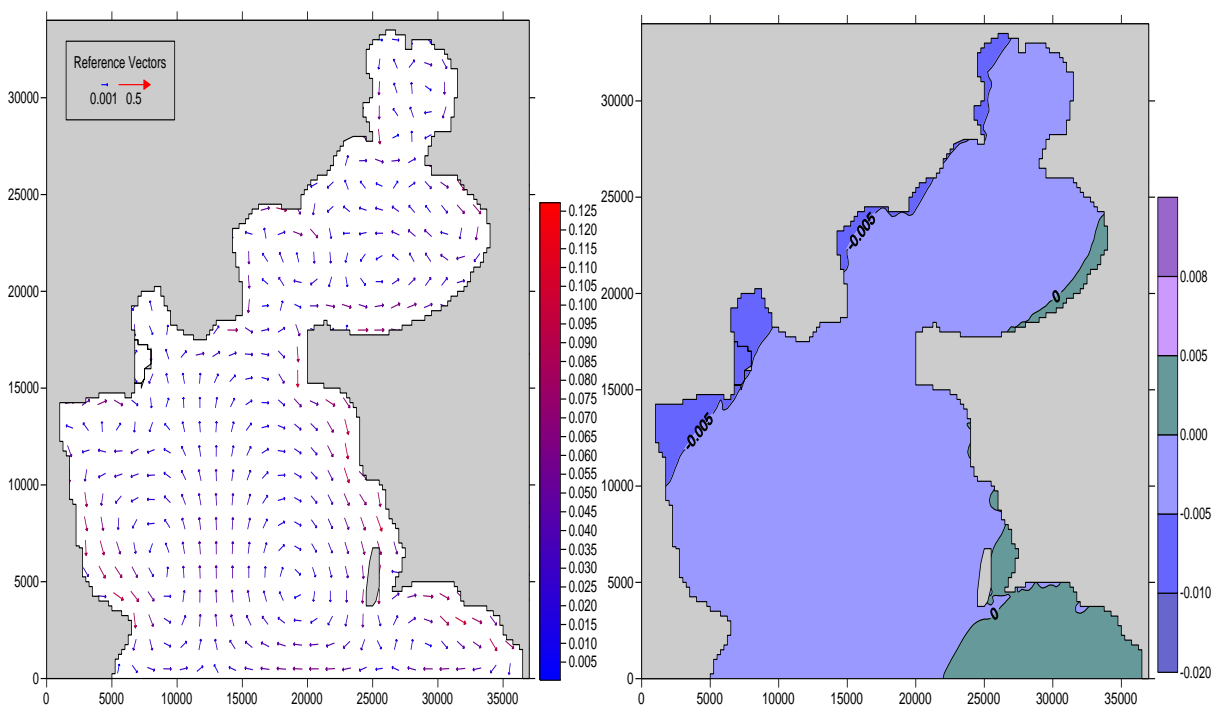
Σχήμα 5.16 Πεδίο ροής και μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας για το σενάριο N (N άνεμος)



Σχήμα 5.17 Πεδίο ροής και μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας για το σενάριο NΔ (NΔ άνεμος)



**Σχήμα 5.18** Πεδίο ροής και μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας για το σενάριο Δ (Δ άνεμος)



**Σχήμα 5.19** Πεδίο ροής και μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας για το σενάριο ΒΔ (ΒΔ άνεμος)



Πίνακας 5.12 Υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των 26 σεναρίων

Σενάριο	Διεύθυνση ανέμου	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Μέγιστη ταχύτητα ρεύματος (m/s)	Μέγιστη ταχύτητα ρεύματος/ ταχύτητα ανέμου (%)	Μέγιστη ταπείνωση επιφάνειας (m)	Μέγιστη ανύψωση επιφάνειας (m)
B	B	6.00	0.15	2.5	-0.017	0.003
BA	BA	3.30	0.09	2.6	-0.006	0.003
A	A	2.64	0.07	2.5	-0.003	0.003
NA	NA	2.32	0.07	3.0	-0.100	0.900
N	N	3.71	0.09	2.4	-0.001	0.007
NΔ	NΔ	3.57	0.09	2.4	-0.003	0.007
Δ	Δ	3.38	0.09	2.7	-0.010	0.005
BΔ	BΔ	4.70	0.13	2.7	-0.013	0.005
B7	B	15.48	0.40	2.6	-0.12	0.02
B8	B	18.92	0.48	2.5	-0.17	0.02
B9	B	22.57	0.55	2.4	-0.24	0.03
BA7	BA	15.48	0.40	2.6	-0.11	0.06
A7	A	15.48	0.40	2.6	-0.08	0.12
A9	A	22.57	0.60	2.7	-0.18	0.26
NA7	NA	15.48	0.40	2.6	-0.04	0.13
NA9	NA	22.57	0.60	2.7	-0.08	0.30
N7	N	15.48	0.38	2.5	-0.01	0.12
NΔ7	NΔ	15.48	0.40	2.6	-0.05	0.11
Δ7	Δ	15.48	0.44	2.8	-0.11	0.09
Δ8	Δ	18.92	0.54	2.9	-0.16	0.12
Δ9	Δ	22.57	0.65	2.9	-0.22	0.20
BΔ7	BΔ	15.48	0.42	2.7	-0.13	0.05
BΔ8	BΔ	18.92	0.52	2.7	-0.20	0.08
BΔ9	BΔ	22.57	0.60	2.7	-0.28	0.12
BΔ10	BΔ	26.44	0.70	2.6	-0.38	0.16
BΔ11	BΔ	30.50	0.85	2.8	-0.50	0.20

## 5.5 Υπολογισμοί προσομοίωσης μεταφοράς φερτών υλικών και συνθηκών επαναπλήρωσης του υποβρύχιου ορύγματος

### 5.5.1 Μεθοδολογία υπολογισμού μεταφοράς φερτών υλικών

Στους υπολογισμούς προσομοίωσης της μεταφοράς φερτών υλικών και των συνθηκών επαναπλήρωσης του υποβρυχίου ορύγματος εφαρμόζεται η ακόλουθη μεθοδολογία:

(α) Βήμα 1. Καθορίζονται τα σενάρια υπολογισμών.

(β) Βήμα 2. Πραγματοποιούνται υπολογισμοί της μεταφοράς φερτών υλικών. Οι εξισώσεις υπολογισμού παρουσιάζονται στο εδάφιο 5.6.1. Αναλυτικότερα, πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

- i. Υπολογίζονται στο σύνολο της περιοχής υπολογισμού η μεταφορά των φερτών υλικών του πυθμένα, των φερτών υλικών σε αιώρηση και η συνολική μεταφορά φερτών υλικών (πυθμένα και σε αιώρηση).
- ii. Υπολογίζονται στην περιοχή του υποβρύχιου ορύγματος οι μέσες τιμές μεταφοράς των φερτών υλικών. Στους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη η σημαντική παρουσία τμήματος λεπτόκοκκων φερτών υλικών που αυξάνει το φορτίο σε αιώρηση.
- iii. Υπολογίζονται οι αντιπροσωπευτικές ετήσιες τιμές μεταφοράς των φερτών υλικών στην περιοχή του υποβρύχιου ορύγματος που θα χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση των χρόνων επαναπλήρωσης του υποβρυχίου ορύγματος. Στην εκτίμηση αυτή λαμβάνεται υπόψη η αναμενόμενη συχνότητα εμφάνισης των σεναρίων υπολογισμού.

(γ) Βήμα 3. Εκτιμάται το ποσοστό των φερτών υλικών σε αιώρηση που αναμένεται να καθιζάνει στο όρυγμα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Van Rijn (1986).

(δ) Βήμα 4. Εφαρμόζεται η μέθοδος των Kraus and Larson (2002) για την εκτίμηση των χρόνων επαναπλήρωσης του υποβρύχιου ορύγματος.

## 5.6 Σενάρια υπολογισμών μεταφοράς φερτών υλικών

Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί της μεταφοράς φερτών υλικών και για τα 26 σενάρια των υπολογισμών των πεδίων ροής (βλ. Πίνακες 5.3 και 5.4) με κύρια δεδομένα

(α) τις ταχύτητες των υπολογισθέντων πεδίων ροής,

(β) τα κυματικά χαρακτηριστικά του κάθε σεναρίου που λήφθηκαν από τους υπολογισμούς προσομοίωσης των ακτομηχανικών συνθηκών,

(γ) τα χαρακτηριστικά των στερεών.

Τα χαρακτηριστικά όλων των σεναρίων υπολογισμών φαίνονται στον Πίνακα 5.13.

**Πίνακας 5.13** Χαρακτηριστικά των 26 σεναρίων υπολογισμών μεταφοράς φερτών υλικών

Σενάριο	Διεύθυνση ανέμου	Μέση ταχύτητα ανέμου (Beaufort)	Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	$H_s$ (m)	Περίοδος κύματος TP (m)	H (m)	Μήκος κύματος L(m)
B	B	3.72	-	-	-	-	-
BA	BA	2.50	-	-	-	-	-
A	A	2.15	-	-	-	-	-
NA	NA	2.32	-	-	-	-	-
N	N	2.70	-	-	-	-	-
NΔ	NΔ	2.63	-	-	-	-	-
Δ	Δ	2.54	-	-	-	-	-
BΔ	BΔ	3.16	-	-	-	-	-
B7	B	7	-	-	-	-	-
B8	B	8	-	-	-	-	-
B9	B	9	-	-	-	-	-
BA7	BA	7	-	-	-	-	-
A7	A	7	-	-	-	-	-
A9	A	9	-	-	-	-	-
NA7	NA	7	-	-	-	-	-
NA9	NA	9	-	-	-	-	-
N7	N	7	16.0	2.56	7.05	2.05	74.30
NΔ7	NΔ	7	16.0	1.85	5.69	1.85	50.30
Δ7	Δ	7	16.0	1.32	4.55	1.32	32.40
Δ8	Δ	8	19.0	1.57	4.83	1.57	36.40
Δ9	Δ	9	22.0	1.81	5.07	1.81	40.10
BΔ7	BΔ	7	16.0	1.29	4.49	1.03	31.60
BΔ8	BΔ	8	19.0	1.53	4.76	1.23	35.96
BΔ9	BΔ	9	22.0	1.78	5.01	1.42	39.00
BΔ10	BΔ	10	26.0	2.10	5.30	1.68	43.80
BΔ11	BΔ	11	30.0	2.42	5.57	1.94	48.80

### 5.6.1 Εξισώσεις υπολογισμού μεταφοράς φερτών υλικών

Οι εξισώσεις υπολογισμού της μεταφοράς φερτών υλικών συνοψίζονται στον Πίνακα 5.14. Σημειώνεται ότι η μεταφορά φερτών υλικών πυθμένα υπολογίζεται από την εξίσωση (5.19) όταν λαμβάνεται υπόψη μόνο το ρεύμα, ενώ όταν συνυπάρχει ρεύμα και κυματισμός χρησιμοποιείται η εξίσωση (5.27), η μεταφορά φερτών υλικών σε αιώρηση από την εξίσωση (5.34), και η συνολική μεταφορά φερτών υλικών (πυθμένα και σε αιώρηση) από την εξίσωση (5.35).

Πίνακας 5.14 Μεθοδολογία και εξισώσεις υπολογισμού μεταφοράς φερτών υλικών

Μεταβλητή (ή συντελεστής), συμβολισμός και εξίσωση υπολογισμού	Μονάδες	Σύμβολο που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα υπολογισμού
Πυκνότητα νερού, $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	DEN
Πυκνότητα άμμου, $\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	DSAND
Ταχύτητα κατά τη διεύθυνση x, u	m/s	UAVNK
Ταχύτητα κατά τη διεύθυνση y, v	m/s	VAVNK
Βάθος νερού, h	m	H
Διάμετρος κόκκων, $D_{50}$	m	D50
Διάμετρος κόκκων, $D_{90}$	m	D90
Συντελεστής για εξ. Kalinske-Frijlink, $C_{KF}$	-	-
Σταθερά Von Karman $\kappa$	-	-
Ύψος κύματος, $h_w$	m	WAVEH
Περίοδος Κύματος, $T_w$	s	WAVET
Μήκος Κύματος, $L_w$	m	WAVEL
Σχετική πυκνότητα $\Delta$ , $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho} - 1$ (5.4)	-	DELTA
Μέση ταχύτητα, $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ (5.5)	m/s	VELOC
Ύψος Αμμοκυματίων, $H_r = 100 \cdot d_{50}$ (5.6)	m	RHEIGHT
Συντελεστής Τραχύτητα κατά Nikuradse, $k_{sN} = 2.5 \cdot d_{50}$ (5.7)	m	ROUGHGRAIN
Τραχύτητα πυθμένα, $k_s = H_r$ (5.8)	m	ROUGHBED
Ενεργός αριθμός Chezy, $C' = 18 \log\left(\frac{12h}{k_{sN}}\right)$ (5.9)	m <sup>1/2</sup> /s	CZEFF
Αριθμός Chezy, $C = 18 \log\left(\frac{12h}{k_s}\right)$ (5.10)	m <sup>1/2</sup> /s	CZTOT
Ενεργός συντελεστής τριβής, $f' = 2g / C'^2$ (5.11)	-	CFEFF
Συνολικός συντελεστής τριβής, $f = 2g / C^2$ (5.12)	-	CFTOT

**Πίνακας 5.14** Μεθοδολογία και εξισώσεις υπολογισμού μεταφοράς φερτών υλικών (συνέχεια)

Μεταβλητή (ή συντελεστής), συμβολισμός και εξίσωση υπολογισμού	Μονάδες	Σύμβολο
Ενεργή διατμητική τάση πυθμένα, $\tau'_c = \frac{1}{2} \rho \cdot f' \cdot U^2$ (5.13)	N/m <sup>2</sup>	TBEFF
Συνολική διατμητική τάση πυθμένα, $\tau_c = \frac{1}{2} \rho \cdot f \cdot U^2$ (5.14)	N/m <sup>2</sup>	TBTOT
Ταχύτητα διάτμησης, $U_{*c} = \sqrt{\frac{\tau'_c}{\rho}}$ (5.15)	m/s	USTAR
Συντελεστής επίδρασης αμμοκυματίων, $\mu_r = \frac{\tau'_c}{\tau_c} = \left(\frac{C}{C'}\right)^{3/2}$ (5.16)	-	CMR
Παράγοντας μεταφοράς, $trf = C_{FK} \cdot D_{50} \cdot \sqrt{\frac{\tau'_c}{\rho}} = C_{FK} \cdot D_{50} \cdot U_{*c}$ (5.17)	m <sup>3</sup> /ms	TRANS
Παράγοντας ανάμιξης, $stfc = \exp\left(\frac{-0.27\Delta D_{50}C^2}{\mu_r U^2}\right) = \exp\left(\frac{-0.27\Delta D_{50}\rho g}{\mu_r \tau_c}\right)$ (5.18)	-	STIRC
Φορτίο πυθμένα λόγω ρεύματος, $q_b = \left[C_{FK} \cdot D_{50} \cdot \sqrt{\frac{\tau'_c}{\rho}}\right] \cdot \left[\exp\left(\frac{-0.27\Delta D_{50}C^2}{\mu_r U^2}\right)\right] = trf \cdot stfc$ (5.19)	m <sup>3</sup> /ms	QBC
Amplitude of water particle at the bottom $a_b = \frac{h}{2} \cdot \frac{1}{\sinh\left(2\pi h/L\right)}$ (5.20)	m	ABOT
Μέγιστη ταχύτητα των μορίων του νερού στον πυθμένα $U_b = a_b \cdot \frac{2\pi}{T}$ (5.21)	m/s	UBOT
Συντελεστής τριβής λόγω κύματος $f_w = \exp\left(5.5 \cdot \left(\frac{ks}{a_b}\right)^{0.2} - 6.3\right)$ (5.22)	-	CFW
Μέγιστη διατμητική τάση πυθμένα λόγω κύματος $\tau_{w,max} = \frac{1}{2} \rho \cdot f_w \cdot U_b^2$ (5.23)	N/m <sup>2</sup>	TBWAV
Μέση διατμητική τάση λόγω ρεύματος και κυματισμού $\tau_{cw} = \tau_c + \frac{1}{2} \tau_{w,max}$ (5.24)	N/m <sup>2</sup>	TBTOT
Διατμητική ταχύτητα λόγω ρεύματος κ' κύματος, $U_{*cw} = \sqrt{\frac{\tau_{cw}}{\rho}}$ (5.25)	m/s	USTARCW

**Πίνακας 5.14** Μεθοδολογία και εξισώσεις υπολογισμού μεταφοράς φερτών υλικών (συνέχεια)

Μεταβλητή (ή συντελεστής), συμβολισμός και εξίσωση υπολογισμού	Μονάδες	Σύμβολο
Παράγοντας ανάμιξης λόγω ρεύματος κ κυματισμού $stfcw = \exp\left(\frac{-0.27\Delta D_{50}C^2}{\mu_r U^2}\right) = \exp\left(\frac{-0.27\Delta D_{50}\rho g}{\mu_r \tau_{cw}}\right) \quad (5.26)$	-	STIRCW
Φορτίο πυθμένα για ρεύμα και κυματισμό $q_b = \left[ C_{PK} \cdot D_{50} \cdot \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \right] \cdot \left[ \exp\left(\frac{-0.27\Delta D_{50}C^2}{\mu_r U^2}\right) \right] = trf \cdot stfcw \quad (5.27)$	m <sup>3</sup> /ms	QB
Παράμετρος A, $A = \frac{k_s}{h} \quad (5.28)$	-	PARA
Ταχύτητα καθίζησης για D <sub>50</sub>	m/s	WSET
Παράμετρος για δυνατότητα μεταφοράς αιωρούμενων φερτών, $z_* = \frac{W_s}{\kappa \cdot U_{*CW}} \quad (5.29)$	-	PARZ
Συντελεστής C12, $C12 = 0.216 \cdot \frac{A^{(z_*-1)}}{(1-A^{z_*})} \quad (5.30)$	-	C12
Ολοκλήρωμα Einstein $I_1 = 0.216 \cdot \frac{A^{(z_*-1)}}{(1-A^{z_*})} \cdot \int_A^1 \left(\frac{1-B}{B}\right)^{z_*} dB \quad (5.31)$		EINI1
Ολοκλήρωμα Einstein $I_2 = 0.216 \cdot \frac{A^{(z_*-1)}}{(1-A^{z_*})} \cdot \int_A^1 \left(\frac{1-B}{B}\right)^{z_*} \cdot \ln B dB \quad (5.32)$		EINI2
Παράμετρος B, $PARB = 1.83 \cdot \left( I_1 \cdot \ln\left(\frac{h}{0.033 \cdot k_s}\right) + I_2 \right) \quad (5.33)$		PARB
Φορτίο αιωρούμενων στερεών, Q <sub>S</sub> $q_s = 1.83 \cdot q_b \cdot \left( I_1 \cdot \ln\left(\frac{h}{0.033 \cdot k_s}\right) + I_2 \right) = q_b \cdot PARB \quad (5.34)$	m <sup>3</sup> /ms	QSU
Ολική στερεομεταφορά $q_T = q_b + q_s = q_b \cdot \left( 1 + 1.83 \cdot \left( I_1 \cdot \ln\left(\frac{h}{0.033 \cdot k_s}\right) + I_2 \right) \right) \quad (5.35)$	m <sup>3</sup> /ms	QT

## 5.6.2 Υπολογισμοί μεταφοράς φερτών υλικών και σχολιασμός τους

Στον Πίνακα 5.15 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές μεταφοράς των φερτών υλικών στην περιοχή του υποβρύχιου ορύγματος. Από τις τιμές του Πίνακα 5.15 και τους λοιπούς υπολογισμούς διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

(α) Τα πεδία ροής που προκαλούνται από ανέμους μικρότερους από 7 Beaufort δημιουργούν πολύ μικρές μεταφορές φερτών υλικών στην περιοχή του υποβρυχίου ορύγματος.

(β) Οι μέγιστες τιμές μεταφοράς των φερτών υλικών του πυθμένα, σε αιώρηση και συνολική στην ακραία περίπτωση του σεναρίου ΒΔ11 φτάνουν τα 1.43, 28.51 και 29.94  $\times 10^{-6}$   $m^3/m s$ , αντίστοιχα.

(γ) Λαμβάνοντας υπόψη τη συχνότητα εμφάνισης των σεναρίων υπολογισμού προσδιορίζονται οι ακόλουθες αντιπροσωπευτικές τιμές μεταφοράς των φερτών υλικών στην περιοχή του υποβρύχιου ορύγματος:

$$Q_b=0.78 \text{ m}^3/\text{m year}, Q_s= 12.30 \text{ m}^3/\text{m year} \text{ και } Q_t=13.07 \text{ m}^3/\text{m year}$$

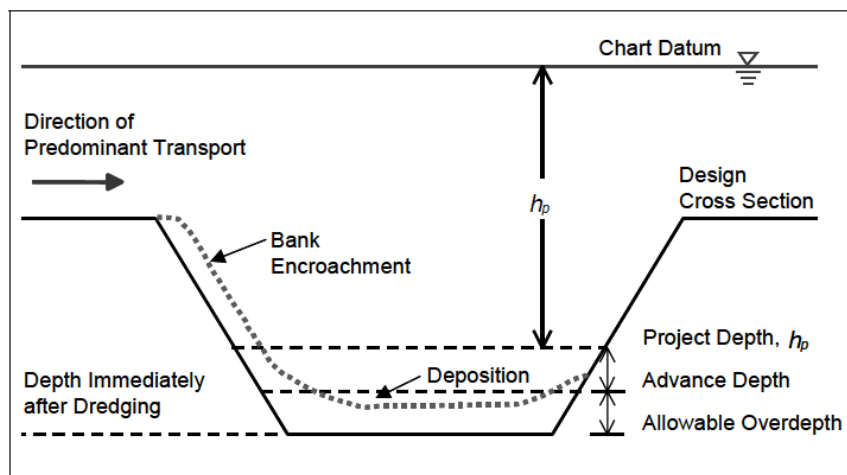
**Πίνακας 5.15** Μέσες τιμές μεταφοράς των φερτών υλικών στην περιοχή του υποβρύχιου ορύγματος ( $\times 10^6$   $m^3/m s$ ) για κάθε σενάριο

Σενάριο	$Q_b$	$Q_s$	$Q_t=Q_b+Q_s$
B7	0.0004	0.0004	0.0009
B8	0.0075	0.0000	0.0075
B9	0.0447	0.1434	0.1886
BA7	0.0000	0.0000	0.0000
A7	0.0000	0.0000	0.0000
A9	0.0039	0.0041	0.0078
NA7	0.0000	0.0000	0.0000
NA9	0.0019	0.0013	0.0032
N7	0.2873	6.5518	6.8390
NΔ7	0.0189	0.1192	0.1380
Δ7	0.0000	0.0000	0.0001
Δ8	0.0060	0.0071	0.0132
Δ9	0.0523	0.1395	0.1929
BΔ7	0.0031	0.0026	0.0064
BΔ8	0.0418	0.0939	0.1361
BΔ9	0.1889	0.9261	1.1147
BΔ10	0.6035	6.1980	6.8022
BΔ11	1.4314	28.5057	29.9371

### 5.7 Μοντέλο εκτίμησης χρόνων επαναπλήρωσης του υποβρύχιου ορύγματος

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί διάφορες εμπειρικές και αναλυτικές μέθοδοι και μοντέλα για τον υπολογισμό της ποσότητας των φερτών υλικών που αποτίθενται σε ορύγματα. Αρκετά από τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε δεδομένα πεδίου και λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των διαφόρων διεργασιών.

Γενικά, δεν υπάρχει ένα μοντέλο που είναι γενικά αποδεκτό. Στην παρούσα μελέτη επιλέγεται ένα σχετικά απλό μονοδιάστατο, μορφολογικό μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Kraus and Larson (2002), το οποίο περιγράφει τις βασικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα ορύγμα, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 5.20.



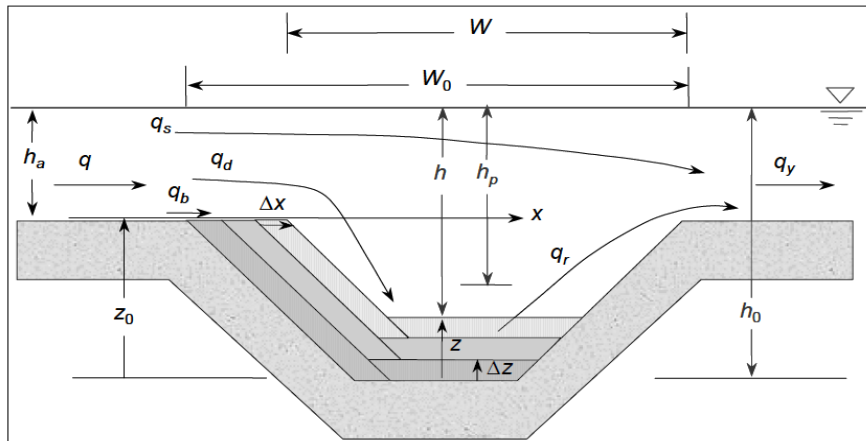
**Σχήμα 5.20** Σχηματική απεικόνιση των διεργασιών πλήρωσης του ορύγματος. Από την εργασία των Kraus and Larson (2002).

Η πλήρωση του ορύγματος με φερτά υλικά πραγματοποιείται τόσο με τα υλικά του πυθμένα, όσο και με αυτά που αιωρούνται. Το φορτίο πυθμένα συμβάλει στην πλήρωση του ορύγματος κατά πλάτος του και το φορτίο των αιωρούμενων στερεών συνεισφέρει στην κατά βάθος.

Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 5.21, το συνολικό φορτίο της στερεομεταφοράς  $q$  ισούται με το φορτίο του πυθμένα  $q_b$ , το φορτίο των αιωρούμενων που μεταφέρονται  $q_s$  και το φορτίο των αιωρούμενων στερεών που αποτίθενται στον πυθμένα  $q_d$ .

$$q = q_b + q_s + q_d \quad (5.36)$$





**Σχήμα 5.21** Σχηματική απεικόνιση των παραμέτρων του μοντέλου των Kraus and Larson (2002)

Το φορτίο πυθμένα, το φορτίο των αιωρούμενων στερεών που μεταφέρονται και των αιωρούμενων στερεών που καθιζάνουν αποτελούν ποσοστό του ολικού φορτίου θεωρώντας ένα συντελεστή συμμετοχής για το καθένα σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις

$$q_b = \alpha_b \cdot q \quad (5.37)$$

$$q_s = \alpha_s \cdot q \quad (5.38)$$

$$q_d = \alpha_d \cdot q \quad (5.39)$$

$$\text{όπου } \alpha_b + \alpha_s + \alpha_d = 1 \quad (5.40)$$

Το τμήμα των φερτών που αποτίθεται στον πυθμένα και επαναιωρείται ( $q_r$ ) υπολογίζεται από την εξίσωση

$$q_r = \frac{z}{z_0} \cdot q_d \quad (5.41)$$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21, το αρχικό πλάτος του ορύγματος (μετά τη βυθοκόρηση) είναι ίσο με  $W_0$ , το βάθος του είναι  $h_0$  και  $h_a$  είναι το βάθος στη περιοχή γύρω από το ορύγμα. Με  $z$  συμβολίζεται το υψόμετρο της επιφανείας του ορύγματος μετρούμενο από τον πυθμένα.

Η μεταβολή  $\Delta z$  της στάθμης του πυθμένα του ορύγματος σε χρόνο  $\Delta t$  υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$(W_0 - x) \cdot \Delta z = q_b \cdot \Delta t \quad (5.42)$$

$$\Rightarrow \frac{dz}{dt} = \frac{q_d - q_r}{W_0 - x} \quad \text{για } z(0)=0 \quad (5.43)$$

Αντίστοιχα, η μεταβολή  $\Delta x$  του πλάτους του ορύγματος σε χρόνο  $\Delta t$  υπολογίζεται από την εξίσωση (5.44):

$$(z_0 - z) \cdot \Delta x = q_b \cdot \Delta t \quad (5.44)$$

$$\Rightarrow \frac{dx}{dt} = \frac{q_b}{z_0 - z} \quad \text{για } x(0)=0 \quad (5.45)$$

Οι εξισώσεις (5.43) και (5.45) επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιώντας ανάντη ρητό σχήμα διακριτοποίησης και προκύπτουν οι διακριτοποιημένες εξισώσεις (5.46) και (5.47):

$$\frac{z^{n+1} - z^n}{dt} = \frac{1}{W_0 - x^n} \cdot \left(1 - \frac{z^n}{z_0}\right) \cdot q_b \quad \text{ή} \quad z^{n+1} = z^n + \frac{dt}{W_0 - x^n} \cdot \left(1 - \frac{z^n}{z_0}\right) \cdot q_b \quad (5.46)$$

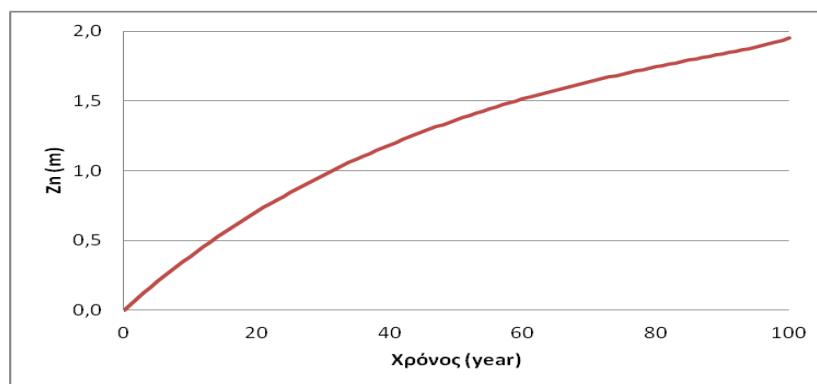
$$x^{n+1} = x^n + \frac{q_b \cdot dt}{z_0 - z^n} \quad (5.47)$$

οι οποίες επιλύονται εύκολα σε περιβάλλον EXCEL.

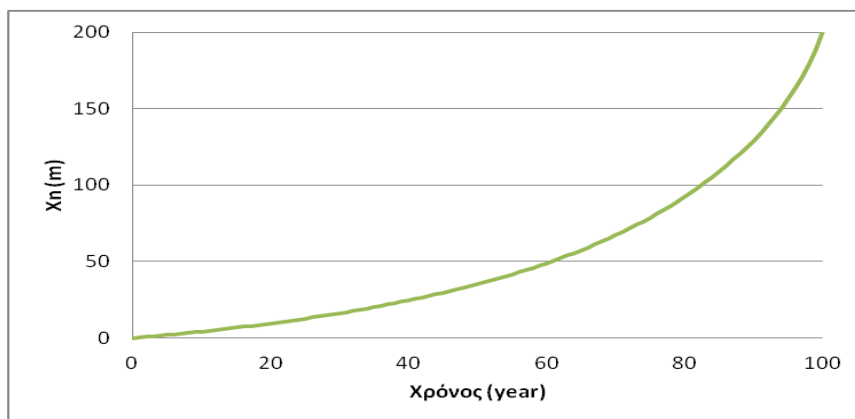
Για την εφαρμογή του μοντέλου πρέπει να εκτιμηθεί το ποσοστό των αιωρούμενων στερεών που καθιζάνει στο όρυγμα. Σύμφωνα με πραγματοποιηθείσες έρευνες, το ποσοστό αυτό εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως η γωνία με την οποία προσκρούει το ρεύμα στο όρυγμα, η ταχύτητα του ρεύματος, η ταχύτητα καθίζησης των στερεών, ο συντελεστής τριβής πυθμένα, η κλίση των τοιχωμάτων του ορύγματος, το μήκος κύματος κ.α. Σύμφωνα με τον Van Rijn (1986) που χρησιμοποίησε το μοντέλο SURTRENCH και σύγκρινε τα αποτελέσματα του μοντέλου με πειραματικά δεδομένα, το ποσοστό αυτό είναι της τάξης του 25 % για ταχύτητες παράκτιου ρεύματος από 0.8 μέχρι 1.2 m/s. Όταν η γωνία πρόσπτωσης του ρεύματος είναι ίση με 30° το ποσοστό αυξάνεται σε 50 %, ενώ όταν αυξάνει περαιτέρω η γωνία πρόσπτωσης του ρεύματος το ποσοστό αυξάνει σε πολύ μεγαλύτερες τιμές.

### 5.8 Εκτίμηση χρόνων επαναπλήρωσης του υποβρύχιου ορύγματος

Από την εφαρμογή του μοντέλου υπολογίστηκε ο ρυθμός επαναπλήρωσης κατά τις διευθύνσεις του βάθους και μήκους μιας λωρίδας μήκους 200 m του υποβρυχίου ορύγματος που έχει βάθος 2.0 m και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.22 και 5.23.



Σχήμα 5.22 Ρυθμός επαναπλήρωσης κατά τη διεύθυνση του βάθους του ορύγματος



**Σχήμα 5.23** Ρυθμός επαναπλήρωσης κατά τη διεύθυνση του μήκους του ορύγματος

Από τα Σχήματα 5.22 και 5.23 διαπιστώνεται ότι η επαναπλήρωση της λωρίδας ορύγματος γίνεται με ένα μέσο ρυθμό περίπου 10.0 cm/year και ο χρόνος επαναπλήρωσης της εκτιμάται ότι είναι της τάξης των 100 ετών. Με δεδομένο το μονοδιάστατο χαρακτήρα του μοντέλου, τα αποτελέσματα αυτά θεωρούνται ιδιαίτερα συντηρητικά και στην πράξη οι χρόνοι επαναπλήρωσης αναμένονται να είναι μικρότεροι.

## 5.9 Υπολογισμοί προσομοίωσης της ποιότητας των θαλάσσιων νερών κατά την απόληψη υλικών

### 5.9.1 Μεθοδολογία

Στους υπολογισμούς προσομοίωσης της ποιότητας των θαλάσσιων νερών κατά την απόληψη υλικών εφαρμόζεται η ακόλουθη μεθοδολογία:

(α) Βήμα 1. Καθορίζεται η έκταση της περιοχής μελέτης στην περιοχή του υποβρυχίου ορύγματος και το αριθμητικό πλέγμα υπολογισμού.

(β) Βήμα 2. Καθορίζονται οι συνθήκες υπολογισμού, που περιλαμβάνουν (i) τις παραδοχές υπολογισμού κατά τη διαδικασία απόληψης των υλικών και (ii) τα χαρακτηριστικά των στερεών υλικών.

(γ) Βήμα 3. Υπολογίζεται το πεδίο ροής στην περιοχή μελέτης για τις συνθήκες υπολογισμού. Ο υπολογισμός γίνεται αφού καθοριστούν οι οριακές συνθήκες στα όρια ανοικτής θάλασσας της περιοχής μελέτης χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα (πεδίο ροής) της ευρύτερης περιοχής μελέτης (βλ. Σχήμα 5.6).

(δ) Βήμα 4. Προσδιορίζεται η κατανομή των συγκεντρώσεων των στερεών στην περιοχή μελέτης και στις ειδικότερες περιοχές ενδιαφέροντος (π.χ. Natura).

### 5.9.2 Καθορισμός των ορίων της κύριας περιοχής μελέτης και του αριθμητικού πλέγματος υπολογισμών

Στην κύρια περιοχή μελέτης εφαρμόζεται το μαθηματικό μοντέλο στο αριθμητικό πλέγμα, τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον Πίνακα 5.16.

**Πίνακας 5.16** Χαρακτηριστικά αριθμητικού πλέγματος της ευρύτερης περιοχής μελέτης

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Διαστάσεις περιοχής	3.3 km x 7.8 km
Αριθμός διαφ. όγκων	66 X 156
Μορφή πλέγματος	Ομοιόμορφο
Αριθμός στρωμάτων	1
Διαστάσεις πλέγματος	50 m X 50 m

Η κάτοψη του πλέγματος σε μορφή αρχείου EXCEL παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.24.

Τα όρια της εξεταζόμενης περιοχής μελέτης καθορίζονται ως εξής:

(α) Κατά την κατακόρυφη διεύθυνση η περιοχή περιορίζεται από τον πυθμένα και την ελεύθερη επιφάνεια.

(β) Το βόρειο όριο της εξεταζόμενης περιοχής σχεδόν στο σύνολό του αποτελεί στερεό όριο (ακτή).

(γ) Το δυτικό όριο και τμήμα του νότιου και ανατολικού ορίου αποτελούν όρια ανοικτής θάλασσας.

Στα όρια ανοικτής θάλασσας οι ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας τίθενται ίσες με αυτές που προέκυψαν από τους υπολογισμούς στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, εφαρμόζοντας την τεχνική των πολλαπλών πλεγμάτων (multi grids).

Σχήμα 5.24 Αριθμητικό πλέγμα υπολογισμών της κύριας περιοχής μελέτης

### 5.9.3 Παραδοχές υπολογισμών

Στους υπολογισμούς θεωρούνται τα ακόλουθα:

(α) Σενάρια υπολογισμών. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για τα σενάρια (α) ΒΔ και (β) Ν, (γ) ΝΑ και (δ) Α ανέμου που αποτελούν τα επικρατέστερα, αλλά και ενδεχομένως τα δυσμενέστερα στην εξεταζόμενη περίπτωση (πιθανή πορεία ρευμάτων προς την λιμνοθάλασσα Επανομής).

(β) Διαστάσεις πηγής εκπομπής στερεών. Σύμφωνα με εμπειρικές παρατηρήσεις, οι διαστάσεις του πλουμίου των στερεών είναι της τάξης των 50-75 m. Στην εξεταζόμενη περίπτωση γίνεται η συντηρητική παραδοχή ότι οι διαστάσεις του πλουμίου είναι ίσες 50 m x 50 m, οπότε το πλούμιο των στερεών καλύπτει την περιοχή ενός διαφορικού όγκου.

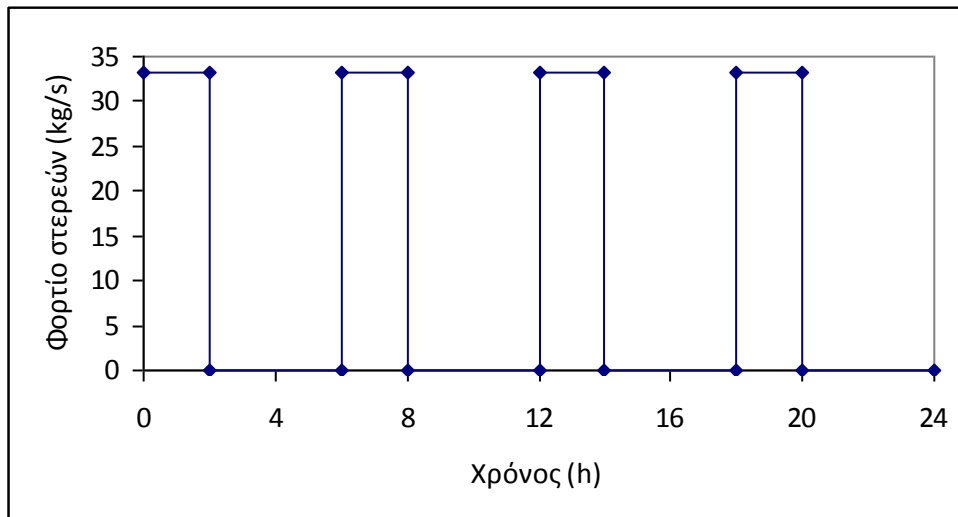
(γ) Θέση πηγής εκπομπής στερεών. Εφαρμόζοντας τη συνήθη πρακτική, η πηγή του φορτίου στερεών τοποθετείται κεντροβαρικά στην περιοχή του ορύγματος. Στη θαλάσσια στήλη της θέσης αυτής θεωρείται ότι υπάρχει καθεστώς πλήρους ανάμιξης.

(δ) Χαρακτηριστικά των στερεών. Σύμφωνα με εμπειρικές παρατηρήσεις το ποσοστό των στερεών που διαφεύγει στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι 12 %. Γίνεται η συντηρητική παραδοχή ότι τα στερεά αυτά ανήκουν αποκλειστικά στην κλάση 10 που έχουν το μικρότερο μέγεθος και την μικρότερη ταχύτητα καθίζησης. Επιπλέον, γίνεται μια πρόσθετη συντηρητική παραδοχή ότι η ταχύτητα καθίζησης των στερεών είναι ίση με μηδέν.

(ε) Φορτίο στερεών. Ο υπολογισμός του φορτίου των στερεών φαίνεται στον Πίνακα 5.17. Από τον υπολογισμό αυτό διαπιστώνεται το μέγιστο φορτίο των στερεών σωματιδίων υπολογίζεται ίσο με  $M=33.2$  kg/s και αφορά στο 2-ωρο διάστημα της διεργασία της απόληψης υλικών. Το μέσο φορτίο της διαδικασίας υπολογίζεται ίσο με 12.1 kg/s και αφορά στις 5.5 ώρες της διαδικασίας, ενώ το πραγματικό μέσο φορτίο υπολογίζεται για το συνολικό πραγματικό χρόνο των 6 ωρών ίσο με 10.4 kg/s. Χάριν ασφαλείας στους υπολογισμούς γίνονται αρχικά συντηρητικοί υπολογισμοί μόνιμων πεδίων συγκεντρώσεων στερεών θεωρώντας τα μόνιμα πεδία ροής και το μέσο φορτίο λειτουργίας των 12.1 kg/s. Στη συνέχεια γίνονται υπολογισμοί θεωρώντας την πραγματική χρονική μεταβολή του φορτίου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.25.

Πίνακας 5.17 Υπολογισμός του φορτίου των στερεών

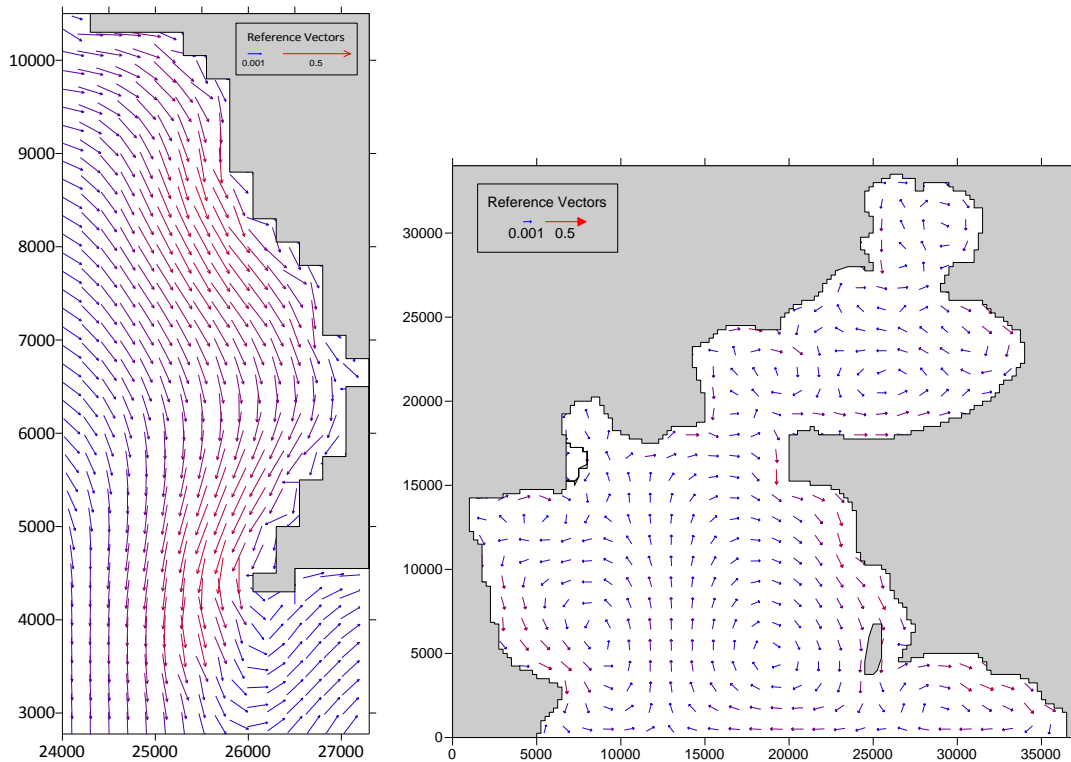
<b>Παράμετρος</b>		
Ποσοστό λεπτόκοκκων στερεών	12	%
Μέσος όγκος δεξαμενής συγκέντρωσης φερτών TSHD (HAM 310)	8918	m <sup>3</sup>
Συντελεστής επιτόπιας διόγκωσης	0.93	
Μέσος χρόνος φόρτισης	120	min
Μέσος χρόνος κύκλου διεργασιών	330	min
Ποσοστό στερεών που διασπείρεται στην υδάτινη στήλη	15%	
Χρόνος διεργασιών κάθε εβδομάδα από το σύνολο των 168h	145	h
<b>Μέγιστο φορτίο στερεών</b>		
Όγκος στερεών που υπερχειλίζει 8918 m <sup>3</sup> X 0,93 X 12 %	995.2	m <sup>3</sup>
Όγκος στερεών σε αιώρηση στην υδάτινη στήλη= 995.2 m <sup>3</sup> X 15 %	149.3	m <sup>3</sup>
Μάζα στερεών σε αιώρηση στην υδάτινη στήλη	238860	kg
Περίοδος φόρτισης	7200	s
Μέγιστο φορτίο στερεών = 238860/7200	33.2	kg/s
<b>Μέσο φορτίο στερεών κατά την περίοδο λειτουργίας</b>		
Όγκος στερεών που υπερχειλίζει 8918 m <sup>3</sup> X 0,93 X 12 %	995.2	m <sup>3</sup>
Όγκος στερεών σε αιώρηση στην υδάτινη στήλη= 995.2 m <sup>3</sup> X 15 %	149.3	m <sup>3</sup>
Μάζα στερεών σε αιώρηση στην υδάτινη στήλη	238860	kg
Περίοδος φόρτισης (5.5 ώρες)	19800	s
Μέγιστο φορτίο στερεών = 238860/19800	12.1	kg/s
<b>Μέσο φορτίο στερεών σε πραγματικό χρόνο</b>		
Όγκος στερεών που υπερχειλίζει 8918 m <sup>3</sup> X 0,93 X 12 %	995.2	m <sup>3</sup>
Όγκος στερεών σε αιώρηση στην υδάτινη στήλη= 995.2 m <sup>3</sup> X 15 %	149.3	m <sup>3</sup>
Μάζα στερεών σε αιώρηση στην υδάτινη στήλη	238860	kg
Πραγματικός χρόνος (6 ώρες)	21600	s
Μέγιστο φορτίο στερεών = 238860/21600	10.4	kg/s



**Σχήμα 5.25** Χρονική μεταβολή του φορτίου των στερεών. Η απόληψη υλικών γίνεται μόνο στο πρώτο 2-ωρο κάθε εξαώρου.

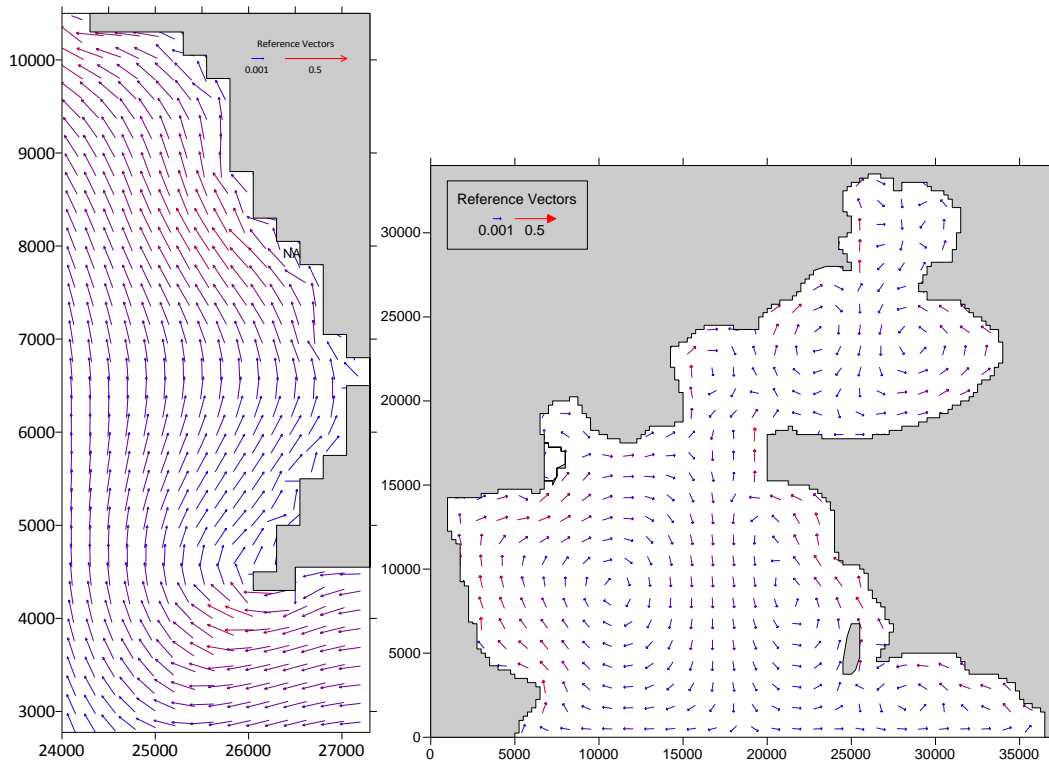
### 5.10 Υπολογισμοί μόνιμων πεδίων ροής

Τα υπολογισθέντα μόνιμα πεδία ροής (διανύσματα ταχυτήτων ροής) για τα επικρατέστερα σενάρια παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.26 μέχρι 5.29, μαζί με τα αντίστοιχα υπολογισθέντα πεδία ροής στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Όπως αναμενόταν, το παράκτιο ρεύμα στην περιοχή μελέτης είναι ίδιο με αυτό που παρατηρείται στους υπολογισμούς του πεδίου ροής της ευρύτερης περιοχής.

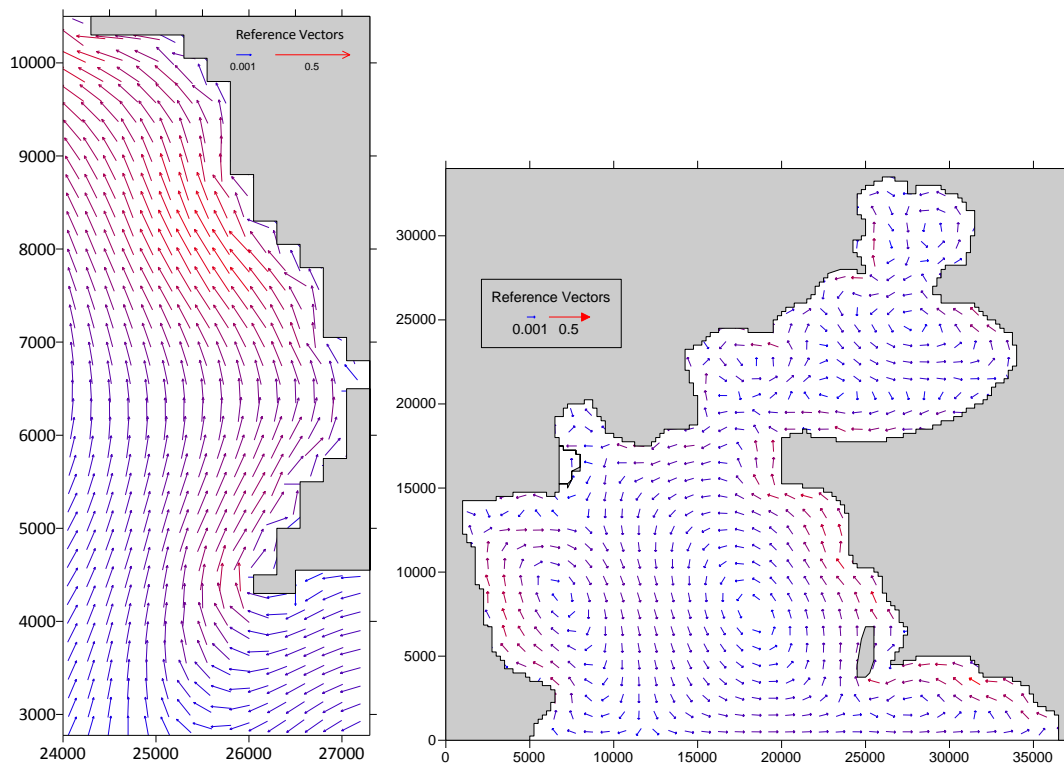


**Σχήμα 5.26** Πεδίο ροής στην περιοχή του ορύγματος για ΒΔ άνεμο

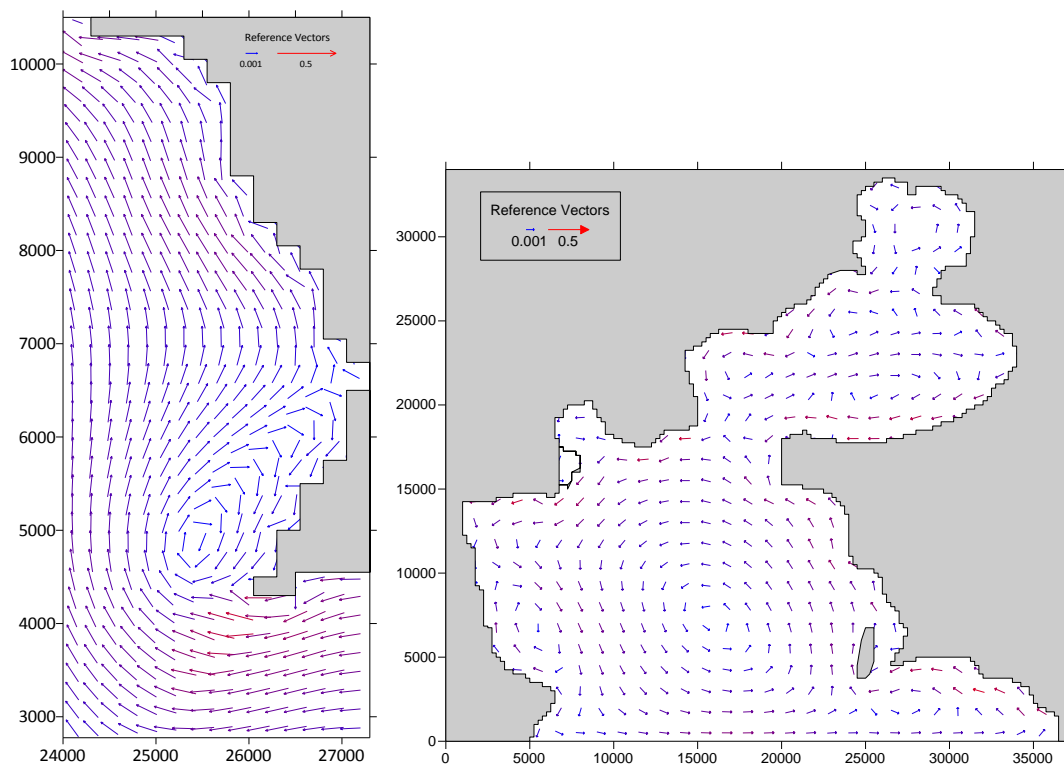




Σχήμα 5.27 Πεδίο ροής στην περιοχή του ορύγματος για N άνεμο



Σχήμα 5.28 Πεδίο ροής στην περιοχή του ορύγματος για NA άνεμο



**Σχήμα 5.29** Πεδίο ροής στην περιοχή του ορύγματος για Α άνεμο

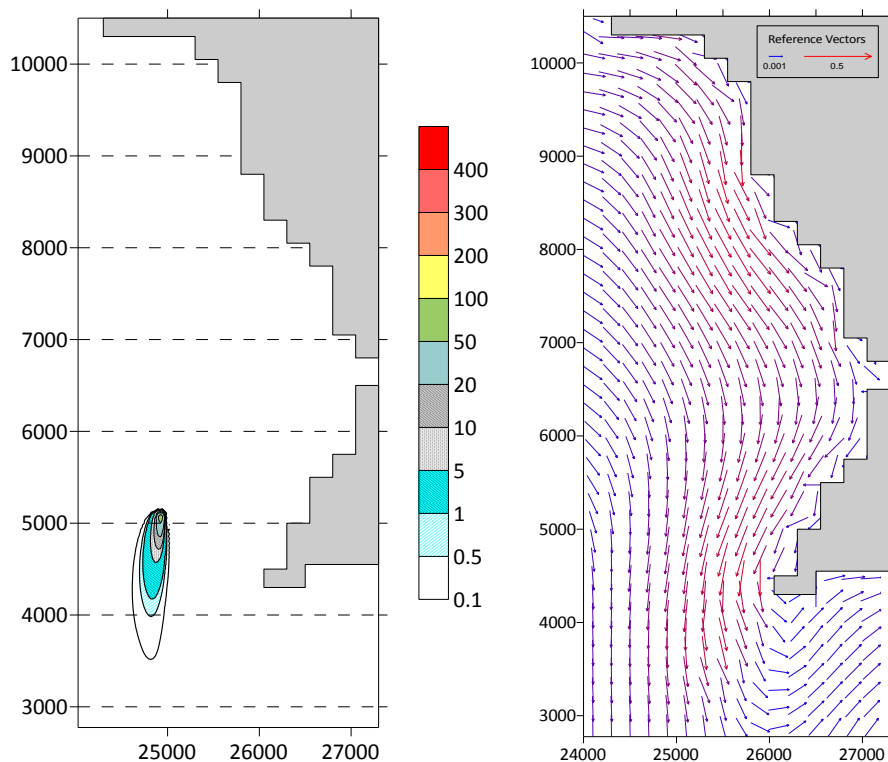
### 5.11 Υπολογισμοί πεδίων συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών

Στα Σχήματα 5.26, 5.27, 5.28 και 5.29 παρουσιάζονται τα υπολογιζόμενα μόνιμα πεδία των συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών για τα σενάρια ΒΔ, Ν, ΝΑ και Α, αντίστοιχα.

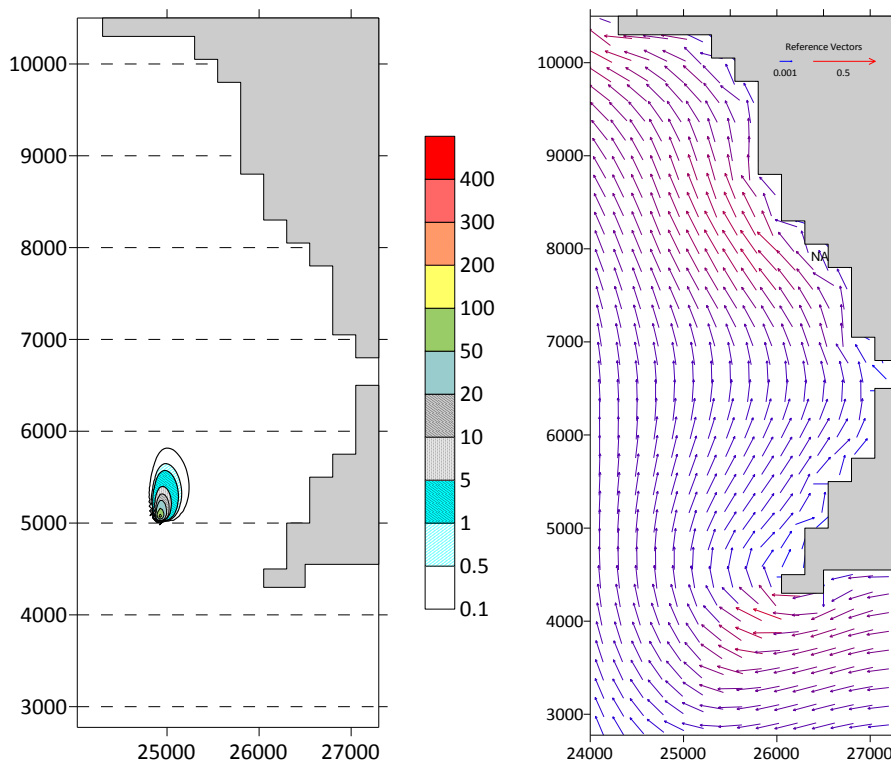
Στα Σχήματα 5.30, 5.31, 5.32 και 5.33 παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή των μέσων συγκεντρώσεων στερεών σε αποστάσεις  $x=50$  m, 100 m, 150 m, 200 m, 250 m και 300 m από τη θέση βυθοκόρησης για τα σενάρια ΒΔ, Ν, ΝΑ και Α, αντίστοιχα. Οι αποστάσεις μετρούνται προς τη διεύθυνση της ακτής και οι τιμές των συγκεντρώσεων στερεών αποτελούν μέσες αντιπροσωπευτικές τιμές μιας παράκτιας λωρίδας μήκους 200 m που είναι παράλληλη προς την ακτή, προς τη διεύθυνση της πορείας του πλουμίου των στερεών.

Στον Πίνακα 5.18 παρουσιάζονται οι χρονικά μέσες τιμές των συγκεντρώσεων των στερεών των Σχημάτων 5.34, 5.35, 5.36 και 5.37, δηλ. είναι οι αντιπροσωπευτικές τιμές των στερεών σε διάφορες αποστάσεις ( $x=50$  m, 100 m, 150 m, 200 m, 250 m και 300 m) από τη θέση βυθοκόρησης για κάθε σενάριο.

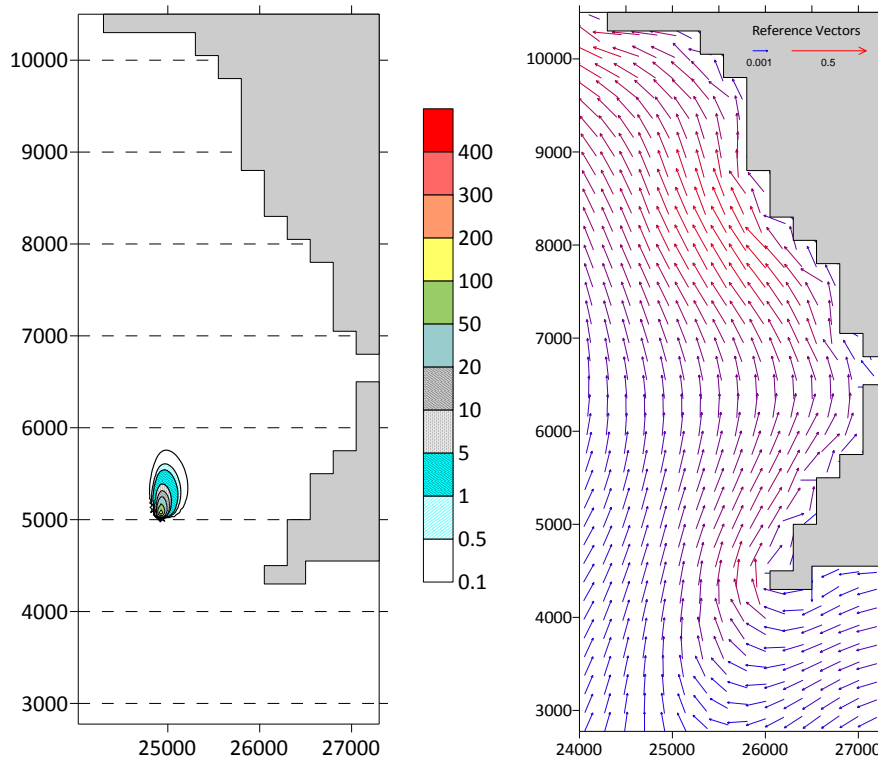
Στο Σχήμα 5.38 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης στερεών με την απόσταση  $x$  από τη θέση βυθοκόρησης κατά τη διεύθυνση του ρεύματος (ή του πλουμίου) για όλα τα σενάρια. Τα ίδια στοιχεία παρουσιάζονται και στον Πίνακα 5.19.



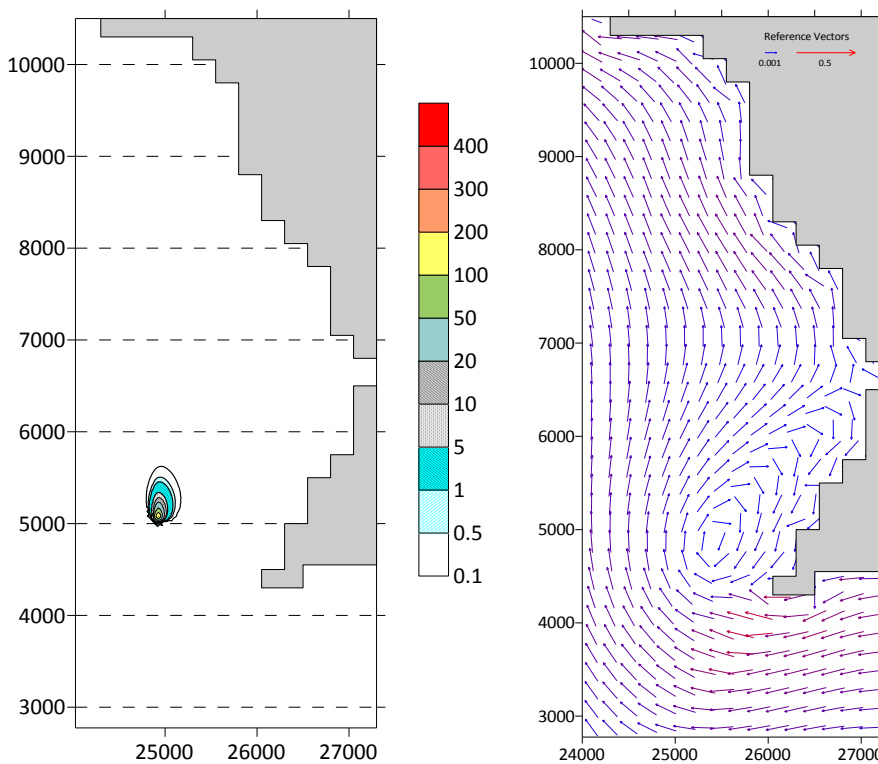
Σχήμα 5.30 Πεδίο συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών (mg/L) για το σενάριο ΒΔ



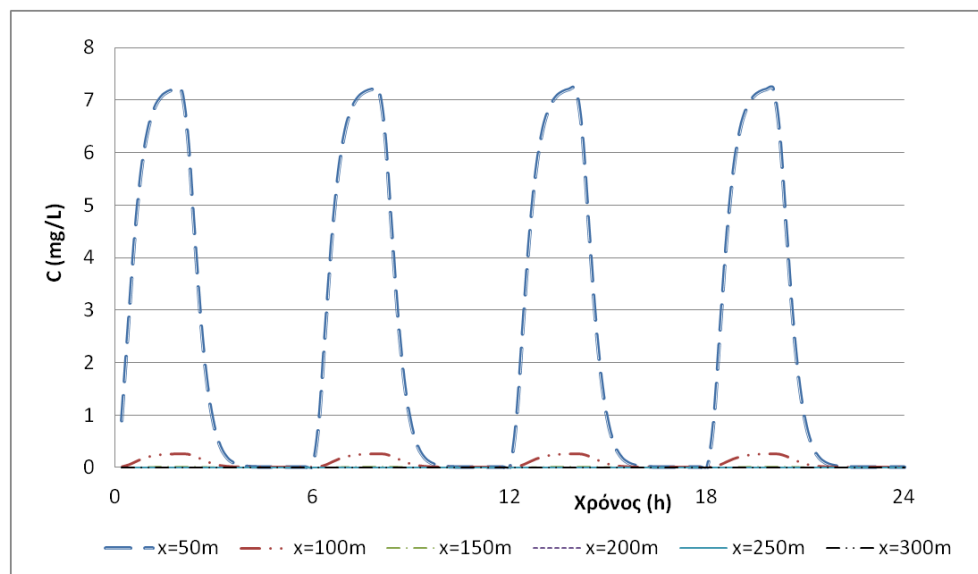
Σχήμα 5.31 Πεδίο συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών (mg/L) για το σενάριο N



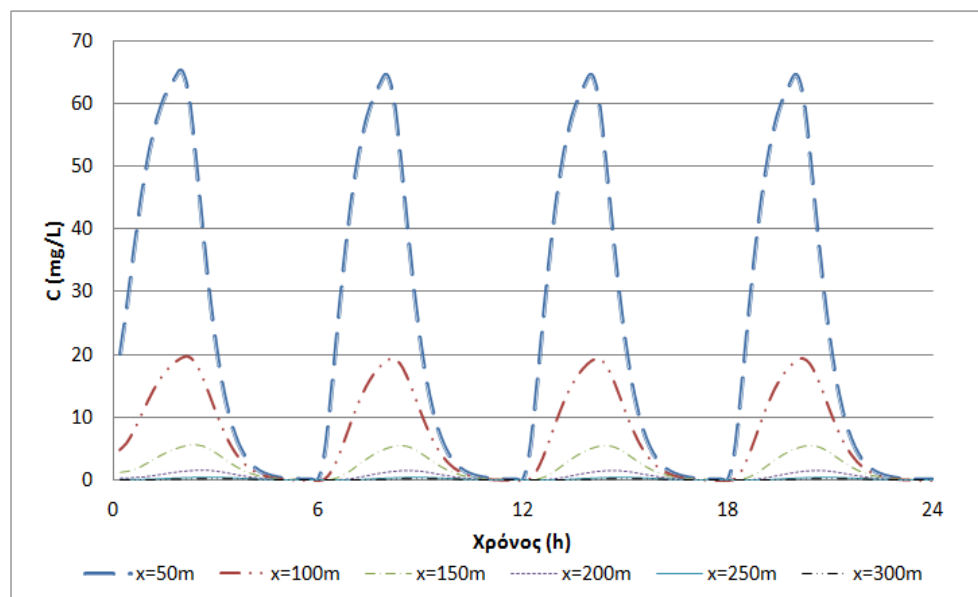
Σχήμα 5.32 Πεδίο συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών (mg/L) για το σενάριο NA



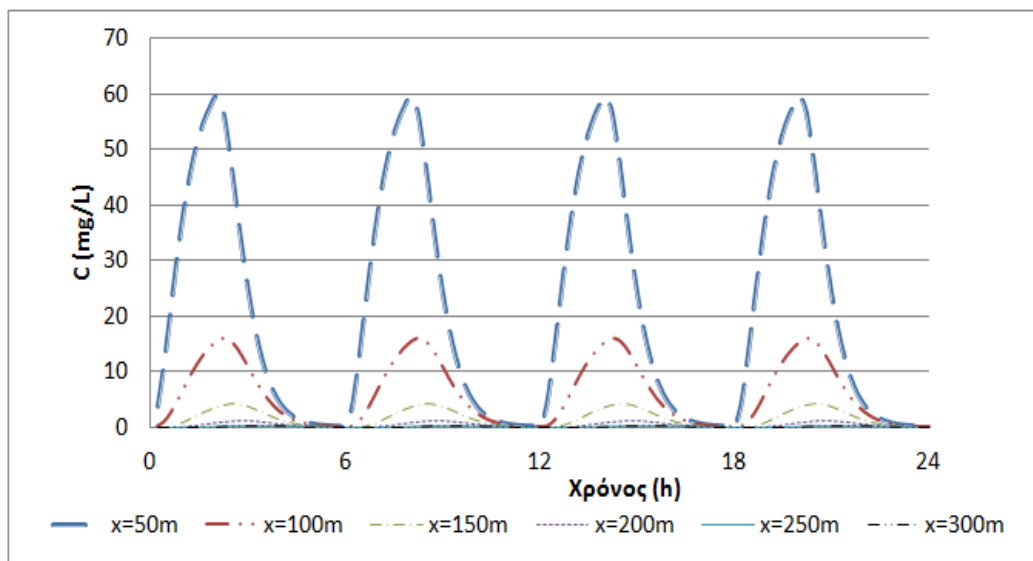
Σχήμα 5.33 Πεδίο συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών (mg/L) για το σενάριο A



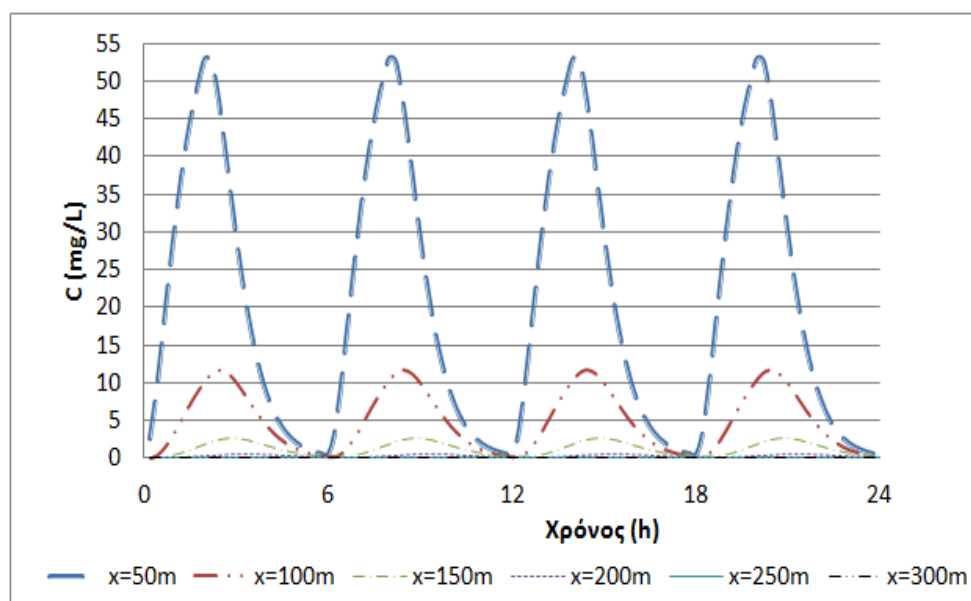
**Σχήμα 5.34** Χρονική μεταβολή μέσων συγκεντρώσεων στερεών σε διάφορες αποστάσεις  $x$  από τη θέση βυθοκόρησης για το σενάριο ΒΔ



**Σχήμα 5.35** Χρονική μεταβολή μέσων συγκεντρώσεων στερεών σε διάφορες αποστάσεις  $x$  από τη θέση βυθοκόρησης για το σενάριο N



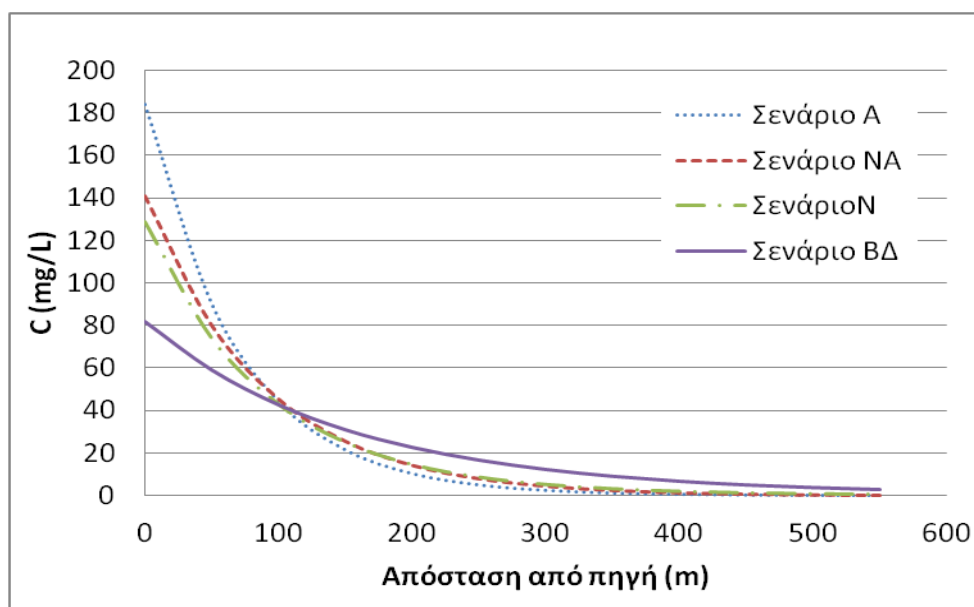
**Σχήμα 5.36** Χρονική μεταβολή μέσων συγκεντρώσεων στερεών σε διάφορες αποστάσεις  $x$  από τη θέση βυθοκόρησης για το σενάριο NA



**Σχήμα 5.37** Χρονική μεταβολή μέσων συγκεντρώσεων στερεών σε διάφορες αποστάσεις  $x$  από τη θέση βυθοκόρησης για το σενάριο A

**Πίνακας 5.19** Μέσες χρονικά τιμές συγκεντρώσεων στερεών σε διάφορες αποστάσεις  $x$  από τη θέση βυθοκόρησης για όλα τα σενάρια

Σενάριο	ΒΔ		N		NA		A	
	Προς Β	Προς N	Προς Β	Προς N	Προς Β	Προς N	Προς Β	Προς N
50	0.47	2.41	22.91	6.49	21.23	6.11	20.60	7.31
100	0.01	0.09	7.24	1.33	6.01	1.13	4.98	1.21
150	0.00	0.00	2.16	0.28	1.67	0.22	1.19	0.21
200	0.00	0.00	0.63	0.06	0.46	0.05	0.28	0.04
250	0.00	0.00	0.18	0.01	0.13	0.01	0.06	0.01
300	0.00	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00



**Σχήμα 5.38** Μεταβολή της μέσης συγκέντρωσης στερεών με την απόσταση  $x$  από τη θέση βυθοκόρησης κατά τη διεύθυνση του ρεύματος για όλα τα σενάρια

**Πίνακας 5.20** Τιμές μέσης συγκέντρωσης στερεών με την απόσταση  $x$  από τη θέση βυθοκόρησης κατά τη διεύθυνση του παράκτιου ρεύματος

Απόσταση $x$ (m)	Σενάριο			
	ΒΔ	N	NA	A
0	81.77	128.56	141.00	184.15
50	59.08	73.77	80.15	90.31
100	42.76	42.74	45.53	44.25
150	31.05	24.82	25.69	21.50
200	22.78	14.41	14.41	10.36
250	16.81	8.46	8.13	5.02
300	12.44	5.03	4.62	2.45
350	9.23	3.01	2.64	1.20
400	6.88	1.79	1.49	0.58
450	5.17	1.08	0.85	0.28
500	3.91	0.64	0.48	0.14
550	2.97	0.38	0.27	0.06

Από τους υπολογισμούς, τα Σχήματα 5.30 μέχρι 5.38 και τους Πίνακες 5.19 και 5.20 διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

(α) Σε όλα τα σενάρια η πορεία της φλέβας των αιωρούμενων στερεών ακολουθεί, όπως αναμενόταν, το παράκτιο ρεύμα.

(β) Σε όλα τα σενάρια, το μόνιμο πεδίο του πλουμίου των αιωρούμενων στερεών καλύπτει μια έκταση μέγιστου μήκους της τάξης των 500 m.

(γ) Στην περιοχή της θέσης βυθοκόρησης η μέγιστη τιμή της ολικής συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών είναι ίση με περίπου 184 mg/L. Ακολουθώντας την πορεία του πλουμίου (ή του ρεύματος) σε απόσταση περίπου ίση με  $x=200$  m από τη θέση βυθοκόρησης η ολική μέση συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών για τα διάφορα σενάρια κυμαίνεται από 10.4 μέχρι 22.8 mg/L. Σε απόσταση περίπου ίση με  $x=400$  m από τη θέση βυθοκόρησης η ολική συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών έχει μειωθεί δραστικά και κυμαίνεται από 0.6 μέχρι 9.0 mg/L.

(δ) Οι μέγιστες τιμές των μέσων χρονικά τιμών των συγκεντρώσεων στερεών, που είναι αυτές που ενδιαφέρουν πρακτικά, σε αποστάσεις  $x=50$  m και  $x=100$  m από τη θέση βυθοκόρησης δεν ξεπερνούν τα 22.9 και 7.2 mg/L, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι μικρές εξαιτίας της εφαρμοζόμενης μη συνεχούς διεργασίας βυθοκόρησης (2 ώρες σε κάθε 6 ώρες του πραγματικού χρόνου), αλλά και της διεύθυνσης των παράκτιων ρευμάτων και δείχνουν ότι η επίδραση της διεργασίας της βυθοκόρησης στην ποιότητα των νερών αναμένεται να είναι περιορισμένη.



Τα παραπάνω συμπεράσματα βρίσκονται σε συμφωνία με άλλες παρόμοιες μελέτες. Οι Hitchcock and Dearnaley (1995) πραγματοποίησαν δειγματοληψία (και όχι υπολογιστική μελέτη) και διαπίστωσαν ότι σε αποστάσεις  $x > 100$  m από τη θέση βυθοκόρησης οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων στερεών κυμαίνονταν από 480 μέχρι 611 mg/L στο κατώτερο τμήμα της θαλάσσιας στήλης και από 80 μέχρι 340 mg/L στο ανώτερο τμήμα. Τα αιωρούμενα στερεά (κυρίως άμμος), τα οποία είχαν μια ταχύτητα καθίζησης ίση με 0.032 m/s (σημειώνεται ότι στην εξεταζόμενη περίπτωση το 81 % περίπου των στερεών έχει ταχύτητα καθίζησης μεγαλύτερη από 0.032 m/s), έφτασαν τα επίπεδα τιμών του ανεπηρέαστου περιβάλλοντος (background levels) σε απόσταση μικρότερη από 250 m. Τα μικρά σωματίδια της αργίλου έφτασαν τα επίπεδα τιμών του ανεπηρέαστου περιβάλλοντος σε απόσταση περίπου ίση με 480 m. Οι Aker et al (1990) αναφέρουν ότι δεν 'ανίχνευσαν' τη θολερότητα μετά από 'μερικές εκατοντάδες μέτρα' από τη θέση βυθοκόρησης.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιεί το υδροδυναμικό μοντέλο FLOW-3DL για τον προσδιορισμό της αναπτυσσόμενης ανεμογενούς κυκλοφορίας στο εσωτερικό υποβρύχιου ορύγματος στα ανοιχτά της Επανομής στο Θερμαϊκό κόλπο. Η διάνοιξη του ορύγματος αποσκοπεί στην απόληψη αμμώδους υλικού που θα χρησιμοποιηθεί ως υλικό επίχωσης για την κατασκευή τεχνικών έργων του λιμένα Θεσσαλονίκης.

Ο προσδιορισμός της ανεμογενούς κυκλοφορίας στο εσωτερικό του ορύγματος και των συναφών ταχυτήτων νερού είναι απαραίτητος, διότι προέκυψε ότι η διατμητική τάση των πνεόντων ανέμων της περιοχής είναι το μοναδικό γενεσιουργό αίτιο για τη μετακίνηση φερτών υλικών του πυθμένα με στόχο την αναπλήρωση του ορύγματος. Πράγματι, η παλίρροια της περιοχής διαπιστώθηκε ότι έχει εξαιρετικά μικρό εύρος, ενώ οι κυματισμοί ανέμου της περιοχής έχουν μικρό ύψος και μήκος και δεν επηρεάζονται από τον πυθμένα. Το αποτέλεσμα είναι τα δύο αυτά φυσικά αίτια να μην αναπτύσσουν αξιόλογες ταχύτητες νερού σε σύγκριση με την ανεμογενή κυκλοφορία.

Ο υπολογισμός των ταχυτήτων νερού στην περιοχή του ορύγματος εξαιτίας του ανέμου (υδροδυναμικό μοντέλο FLOW-3DL) ακολουθείται από υπολογισμό της μετακίνησης φερτών στην περιοχή από το μοντέλο μεταφοράς- διάχυσης της συγκέντρωσης φερτών (FLOW-3DL). Η εφαρμογή του μοντέλου αυτού μας επιτρέπει τον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής του πυθμένα του ορύγματος, και συνεπώς, του χρόνου αναπλήρωσης του ορύγματος που αποτελεί καίριο περιβαλλοντικό ερώτημα.

Τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι τα ακόλουθα:

(α) Η διάνοιξη του υποβρυχίου ορύγματος βάθους 2.0 m θα έχει ασήμαντη έως μηδενική επίδραση στο υδροδυναμικό καθεστώς της παράκτιας περιοχής της Επανομής, όπως προέκυψε για όλα τα σενάρια που προσομοιάστηκαν.

(β) Από τους υπολογισμούς προσομοίωσης της ποιότητας των θαλάσσιων νερών κατά την απόληψη υλικών διαπιστώνεται ότι η επίδραση της απόληψης υλικών σε απόσταση μεγαλύτερη από περίπου 100 m είναι περιορισμένη, ακόμα και για τα πιο δυσμενή σενάρια όπου η πιθανή πορεία των ρευμάτων είναι προς την λιμνοθάλασσα της Επανομής. Οι μέγιστες τιμές των μέσων χρονικά τιμών των συγκεντρώσεων στερεών σε αποστάσεις  $x=50$  m και  $x=100$  m από τη θέση βυθοκόρησης δεν ξεπερνούν τα 22.9 και 7.2 mg/L, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι μικρές εξαιτίας της εφαρμοζόμενης μη συνεχούς διεργασίας βυθοκόρησης (2 ώρες σε κάθε 6 ώρες του πραγματικού χρόνου), αλλά και της διεύθυνσης των παράκτιων ρευμάτων. Επομένως η ποιότητα των θαλάσσιων νερών της παράκτιας περιοχής της Επανομής δεν επηρεάζεται από τη διαδικασία της απόληψης των υλικών, συνεπώς οι δραστηριότητες που πραγματοποιούνται στην συγκεκριμένη περιοχή παραμένουν ανεπηρέαστες και μπορούν να συνεχιστούν κανονικά.

## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Αυγέρης, Ι., 2006. Έργο: Αμμοληψία για τις ανάγκες της επέκτασης του διαδρόμου προσαπογειώσεων αεροσκαφών 10-28 κρατικού αερολιμένα Θεσσαλονίκης «Μακεδονία», Προκαταρκτική Ακτομηχανική Έκθεση, Θεσσαλονίκη.
- Κουτίτας, Χρ., 1984. *Εισαγωγή στη Μηχανική Ακτών και Λιμένων*, Θεσσαλονίκη.
- Κουτίτας, Χρ., 1985. *Μαθηματικά Ομοιώματα στην Παράκτια Μηχανική*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Κουτίτας, Χρ., 1996. *Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Κρεστενίτης, Ι.Ν., 1988. Αριθμητική Μελέτη της Ανεμογενούς Παράκτιας Κυκλοφορίας και Διερεύνηση των Συνθηκών στο Όριο Ανοικτής Θάλασσας. Εφαρμογή στο Θερμαϊκό Κόλπο. *Τεχνικά Χρονικά*, Α, 8 (4), pp. 29-60.
- Τζαφέρης, Β., και Κουτίτας Χρ., 2006. Ανάλυση της αποτελεσματικότητας των πετασμάτων ιλύος στην κατασκευή του διαδρόμου 10-28 του αεροδρομίου «Μακεδονία» - Πρόταση τεχνικής λύσης, Θεσσαλονίκη.
- Åker, K., Häkkinen, A., and Winterhalter B., 1990. Submarine sand and gravel studies in the Eastern Gulf of Finland during the years 1983–1985, In: Nielsen, P.E., Konradi, P.B., Kauranne, L.K, and Konigsson, L.K. Quaternary Economic Geology in the Nordic Countries, *Striae*, 29, pp. 3-38.
- Bijker, E.W., 1967. Some considerations about scales for coastal models with movable bed, Delft Hydraulics Laboratory, Publication No 50.
- Einstein, H.A., 1950. The bed load function for sediment transport in open channel flows, U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bulletin, 1026.
- Hitchcock, D. R., and Dearnaley, M. P., 1995. Investigation of benthic & surface plumes associated with marine aggregate production in the United Kingdom : Overview of Year One. *Proceedings of XVth Information Transfer Meeting*, Gulf Coast Region INTER-MAR, New Orleans, USA, 10 pp.
- Ippen, A.T., 1966. *Estuary and Coastline Hydrodynamics*, McGraw Hill, New York.
- Itakura, T., and Kishi, T., 1980. Open channel flow with suspended sediments, *Journal of the Hydraulics Division*, 106, pp. 1325-1343.
- Kraus, N. C., and Larson, M., 2002. Analytical model of navigation channel infilling by cross-channel transport, *Proceeding 28<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference World Scientific Press*.
- Liu, Z., 2001. Sediment transport, Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning, Instituttet for Vand, Jord og Miljøteknik. Aalborg Universitet, 71 pp.
- McNown, J.S., and Lin, P.N., 1952. Sediment concentration and fall velocity. *Proceedings of the 2nd Midwestern Conference of Fluid Mechanics*, Ohio State University, pp. 401-411.
- Rijn, L.C. van, 1986. Sedimentation of dredged channels by currents and wave, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 112 (5), pp. 541-559.

- Rubey, W.W., 1933. Settling velocities of gravel and silt particles, *American Journal of Science*, 25 (148), pp. 325-338.
- Shankar, N.J., Chan, E.S., and Zhang, Q.Y., 2001. Three-dimensional numerical simulation for an open channel flow with a constriction, *Journal of Hydraulic Research*, 39 (2), pp. 187-201.
- Shi, Z., Meyers, S., and Luther, M. E., 2003. Modeling of wind wave-induced bottom currents and fine sand transport in Tampa Bay, Florida, USA, *International Conference on Estuaries and Coasts*, Hangzhou, China.
- Sleath, J.F.A., 1984. *Sea Bed Mechanics*, Wiley, New York.
- Soulsby, R.L., 1997. *Dynamics of Marine Sands*, Thomas Telford Publications, London.
- Stamou, A. I., Memos, K., and Pipilis, K., 1999. Mathematical Modeling of Thermal Discharges in Coastal Regions, *Proceedings of the 28th IAHR Congress*, Graz, Austria, ISBN 3-901351-34-5).
- Stamou, A. I., Noutsopoulos, C., Pipilis, K. G., Gavalaki, E., and Andreadakis, A., 1999. Hydrodynamic and Water Quality Modelling of Southern Evoikos Gulf- Greece, *GLOBAL NEST: the International Journal*, 1 (2), pp. 5-15.
- Stamou, A.I., Memos, C. D., and Kapetanaki, M. E., 2007. Modelling Water Renewal in a Coastal Embayment, *Proceedings of ICE - Maritime Engineering*, 160 (MA3), pp. 93-104.
- Stamou, A.I., Memos, C. D., and Spanoudaki, K., 2007. Estimating Water Renewal Times in Semi-enclosed Coastal Areas with Complicated Geometry using a Hydrodynamic Model, *Journal of Coastal Research*, 50, pp. 282-286.