



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ-ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**Μοντέλο υπολογισμού στερεοπαροχής σε ακτή από
συνεκτικό και μεικτό υλικό**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Βατίστας

**Δ.Π.Μ.Σ.
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ
ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Μέμος, Ομ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Μοντέλο υπολογισμού στερεοπαροχής σε ακτή από συνεκτικό και μεικτό υλικό

Λέξεις - κλειδιά: διάβρωση, παράκτια ζώνη, στερεομεταφορά, στερεοπαροχή, συνεκτικά ιζήματα, μεικτά ιζήματα, κροκίδωση, φορτίο υπό αιώρηση.

Sediment discharge calculation model in cohesive and mixed sediment shore

Keywords: erosion, coastal zone, sediment transport, sediment discharge, cohesive sediments, mixed sediments, flocculation, suspended load.

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων δημοσιευμένου ή μη γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Ευχαριστίες

Στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Μέμο, για την ανάθεση της εργασίας, για τις ιδέες του, τις συμβουλές του και την άρτια καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον δρ. Γιώργο Κλωνάρη για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε στην κατάρτιση του μοντέλου υπολογισμού.

Τέλος, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στη σύντροφό μου, που πιστεύουν σε μένα και με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια σε κάθε μου προσπάθεια.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	ix
Abstract	xi
Extended summary.....	xiii
1. Introduction	xiii
2. Theoretical background.....	xiii
2.1. Non-cohesive sediment transport	xiv
2.2. Cohesive sediment transport.....	xv
2.3. Mixed sediment transport	xvii
3. Basic equations and numerical schemes.....	xviii
3.1. Basic equations	xviii
3.2. Numerical schemes.....	xix
4. Sediment transport models.....	xix
4.1. Non-cohesive sediment model	xix
4.2. Cohesive sediment model.....	xxi
4.3. Mixed sediment model	xxiii
5. Application results	xxiv
5.1. Non-cohesive sediment transport model results	xxv
5.2. Cohesive sediment transport model results.....	xxviii
5.3. Mixed sediment transport model results	xxxi
6. Conclusions	xxxii
1. Εισαγωγή	1
1.1. Αντικείμενο της εργασίας.....	1
1.2. Διάρθρωση μεταπτυχιακής εργασίας	3
2. Θεωρητικά στοιχεία στερεομεταφοράς	5
2.1. Γενικά χαρακτηριστικά στερεομεταφοράς	5
2.1.1. Μηχανισμοί στερεομεταφοράς	5
2.1.2. Μορφές στερεομεταφοράς.....	8
2.1.3. Βασικές ιδιότητες ιζημάτων	9
2.2. Στερεομεταφορά μη συνεκτικών ιζημάτων	11
2.2.1. Φύση μη συνεκτικών ιζημάτων.....	11
2.2.2. Κατώφλι κίνησης	13
2.2.3. Σχηματισμοί πυθμένα	17
2.2.4. Ίζημα υπό αιώρηση	19

2.3.	Στερεομεταφορά συνεκτικών ιζημάτων	22
2.3.1.	Φύση συνεκτικών ιζημάτων	22
2.3.2.	Αντοχή σε διάβρωση-έναρξη κίνησης.....	29
2.3.3.	Κροκίδωση (flocculation)	31
2.3.4.	Ίζημα υπό αιώρηση	34
2.4.	Στερεομεταφορά μεικτών ιζημάτων	40
3.	Θεωρητικό υπόβαθρο και αριθμητικά σχήματα ροής.....	45
3.1.	Θεωρητικό υπόβαθρο	45
3.1.1.	Εξίσωση συνέχειας	45
3.1.2.	Εξίσωση ποσότητας κίνησης	45
3.2.	Αριθμητικά σχήματα επίλυσης	47
3.2.1.	Εξίσωση συνέχειας	47
3.2.2.	Εξίσωση ποσότητας κίνησης	48
4.	Μοντέλα στερεομεταφοράς	53
4.1.	Μοντέλο μη συνεκτικών ιζημάτων	53
4.1.1.	Φορτίο πυθμένα.....	54
4.1.2.	Φορτίο υπό αιώρηση	55
4.2.	Μοντέλο συνεκτικών ιζημάτων.....	57
4.2.1.	Φορτίο πυθμένα.....	58
4.2.2.	Φορτίο υπό αιώρηση	59
4.3.	Μοντέλο μεικτού ιζήματος.....	63
4.4.	Χρονικά εξαρτώμενη στερεομεταφορά.....	64
5.	Παρουσίαση εφαρμογής.....	67
5.1.	Βασικά χαρακτηριστικά πεδίου εφαρμογής.....	67
5.1.1.	Παρουσίαση χαρακτηριστικών παράκτιας ζώνης.....	67
5.1.2.	Παρουσίαση χαρακτηριστικών παράκτιας ζώνης με λιμενικό έργο.....	69
5.2.	Κυματικό μοντέλο	70
5.2.1.	Χρονικό βήμα	71
5.2.2.	Όδευση κυματισμών	71
5.2.3.	Συμβολή πεδίου ταχυτήτων στη στερεομεταφορά.....	74
5.3.	Αποτελέσματα στερεομεταφοράς μη συνεκτικού ιζήματος	74
5.3.1.	Δεδομένα εισαγωγής	75
5.3.2.	Στερεοπαροχή	75
5.3.3.	Βασικά μεγέθη.....	78

5.3.4.	Ανανέωση βαθυμετρίας.....	78
5.4.	Αποτελέσματα στερεομεταφοράς συνεκτικού ιζήματος.....	80
5.4.1.	Δεδομένα εισαγωγής	80
5.4.2.	Στερεοπαροχή	81
5.4.3.	Βασικά μεγέθη.....	84
5.4.4.	Ανανέωση βαθυμετρίας.....	85
5.5.	Αποτελέσματα στερεομεταφοράς μεικτού ιζήματος	86
5.6.	Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων	88
6.	Σύνοψη	91
6.1.	Βασικά συμπεράσματα	91
6.2.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	93
7.	Βιβλιογραφία.....	95

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 2-1: Ταξινόμηση ιζημάτων συναρτήσει του κοκκομετρικού μεγέθους σύμφωνα με την Αμερικανική Γεωφυσική Ένωση (Πηγή: Van Rijn, 1993 - Κλωνάρης, 2016).....	9
Πίνακας 2-2: Βασικοί σχηματισμοί και ιδιότητες αργιλικών ορυκτών (Πηγή: Mitchell, 1976; Winterwerp και Van Kesteren, 2004).....	25
Πίνακας 2-3: Βασικές μορφές ιζήματος συναρτήσει των συγκεντρώσεων του ιζήματος (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004).....	29
Πίνακας 5-1: Διαστάσεις πλέγματος καννάβου σε μέτρα.....	67
Πίνακας 5-2: Βάθη στο κέντρο των κόμβων του πλέγματος σε μέτρα	68
Πίνακας 5-3: Κυματικά χαρακτηριστικά ανά βάθος κόμβου	72
Πίνακας 5-4: Συντελεστές περίθλασης εντός και πλησίον της λιμενολεκάνης.....	73
Πίνακας 5-5: Ύψη κύματος εντός και πλησίον της λιμενολεκάνης	74
Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα μοντέλου στερεομεταφοράς μεικτών ιζημάτων για ίζημα με περιεκτικότητα κατά βάρος σε συνεκτικό υλικό 5%, 10% και 15%.....	87
Πίνακας 5-7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μοντέλων στερεομεταφοράς σε απλή ακτή.....	88

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Δυνάμεις που ασκούνται στον κόκκο (Πηγή: Fredsøe et al., 1993)	5
Σχήμα 2-2: Μεταφορά Ιζήματος σε ακτή στην Καλιφόρνια (Πηγή: https://pubs.usgs.gov/sir/2007/5254/)	6
Σχήμα 2-3: Τυπική εικόνα παραγωγής ρευμάτων κοντά στην ακτή (Πηγή: http://www.cityoforangebeach.com/pages/know_your_beach/ripcurrents/near_shore_formation/print.htm)	7
Σχήμα 2-4: Κοκκομετρική διαβάθμιση της παραλίας της Βιρτζίνια (Πηγή: CEM, 2002)	12
Σχήμα 2-5: Ισοροπία δυνάμεων κατά την έναρξη της κίνησης (Πηγή: van Rijn, 1993).....	13
Σχήμα 2-6: Έναρξη κίνησης σε πυθμένα χωρίς κλίση $\theta_{cr}=f(Re^*)$ (Πηγή: Van Rijn, 1993 και Shields, 1936)	14
Σχήμα 2-7: Οριακή ταχύτητα για την έναρξη κίνησης ιζήματος $u_{w,cr}$ υπό την επίδραση κυματισμών (Πηγή: Soulsby, 1997)	15
Σχήμα 2-8: Οριακή τιμή της παραμέτρου κινητικότητας, θ_{cr} για την έναρξη κίνησης ιζήματος υπό την επίδραση κυματισμών ή/και ρευμάτων (Πηγή: Soulsby, 1997)	16
Σχήμα 2-9: Σχηματισμοί πυθμένα (Πηγή: Simons και Richardson, 1966 & Van Rijn, 1993) ..	18
Σχήμα 2-10: Κατανομή κατά βάθος ταχύτητας, συγκέντρωσης και υπό αιώρηση φορτίου (Πηγή: Van Rijn, 1993).....	22
Σχήμα 2-11: Κατανομές μεγέθους σωματιδίων (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004)	23
Σχήμα 2-12: Βασικοί σχηματισμοί αργιλικών ορυκτών, G: γυψίτης, B: βρουσίτης (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004).....	24
Σχήμα 2-13: Σχηματική αναπαράσταση δεσμού κατιόντων (Πηγή: Partheniades, 2009)	26
Σχήμα 2-14: Διάγραμμα δείκτη πλαστιμότητας (PI) συναρτήσει του ορίου υδαρότητας (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004).....	27
Σχήμα 2-15: Προφίλ συγκεντρώσεων υπό αιώρηση ιζήματος κατά βάθος και ταχύτητες για συνθήκες υψηλών συγκεντρώσεων (Πηγή: Ross και Mehta, 1989).....	28
Σχήμα 2-16: Κρίσιμη διατμητική τάση για διάβρωση συναρτήσει του δείκτη πλαστιμότητας (Πηγή: Winterwerp et al., 2012)	30
Σχήμα 2-17: Διάγραμμα ελκτικών και απωστικών δυνάμεων μεταξύ των σωματιδίων αργίλου, συναρτήσει της συγκέντρωσης κατιόντων (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004).....	31
Σχήμα 2-18: Ποιοτικό διάγραμμα κροκίδωσης (Πηγή: Dyer, 1989)	33
Σχήμα 2-19: Τυπικές τιμές παραμέτρου ρυθμού διάτμησης G σε ροή ανοικτού αγωγού (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004)	33
Σχήμα 2-20: Ταχύτητα καθίζησης συναρτήσει του μεγέθους των κροκίδων (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004).....	36
Σχήμα 2-21: Ταχύτητα καθίζησης συναρτήσει του μεγέθους των κροκίδων (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004).....	40
Σχήμα 2-22: Μηχανισμοί διάβρωσης σε μεικτό ιζήμα (Πηγή: Wiberg και Smith, 1987)	42
Σχήμα 2-23: Κρίσιμη διατμητική τάση μεικτού ιζήματος (Πηγή: Panagiotopoulos et al., 1997).....	42
Σχήμα 3-1: Έκκεντρο πλέγμα (Πηγή: Stamou, 2016)	47
Σχήμα 5-1: Παράκτια ζώνη εφαρμογής με έκκεντρο πλέγμα.....	67

Σχήμα 5-2: Βαθυμετρία παράκτιας ζώνης	69
Σχήμα 5-3: Παράκτια ζώνη εφαρμογής με λιμενικό έργο, με έκκεντρο πλέγμα	69
Σχήμα 5-4: Βαθυμετρία παράκτιας ζώνης με λιμενικό έργο	70
Σχήμα 5-5: Συνολική στερεοπαροχή σε απλή ακτή ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)	76
Σχήμα 5-6: Συνολική στερεοπαροχή σε ακτή με λιμενικό έργο ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$).....	77
Σχήμα 5-7: Ανανεωμένη βαθυμετρία σε απλή ακτή	79
Σχήμα 5-8: Ανανεωμένη βαθυμετρία σε ακτή με λιμενικό έργο	80
Σχήμα 5-9: Συνολική στερεοπαροχή σε απλή ακτή ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)	82
Σχήμα 5-10: Συνολική στερεοπαροχή σε ακτή με λιμενικό έργο ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$).....	83
Σχήμα 5-11: Ανανεωμένη βαθυμετρία σε απλή ακτή	85
Σχήμα 5-12: Ανανεωμένη βαθυμετρία σε ακτή με λιμενικό έργο	86

Περίληψη

Η παράκτια ζώνη αποτελεί χώρο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τον άνθρωπο ανά τους αιώνες, συγκεντρώνοντας εμπορικές, ναυτιλιακές, τουριστικές και λοιπές δραστηριότητες. Στις παράκτιες περιοχές λαμβάνει χώρα πληθώρα φυσικών διεργασιών, οι οποίες τείνουν να μεταβάλλουν τα φυσικά όρια της ακτογραμμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση φαινομένων διάβρωσης σε αυτήν, τα οποία εντείνονται λόγω της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής και άλλων παραγόντων τα τελευταία χρόνια. Για την προστασία των ακτών και κατ' επέκταση των δραστηριοτήτων που συντελούνται σε αυτές κρίνεται κρίσιμη η ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση του φαινομένου της στερεομεταφοράς. Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την ανάπτυξη σχέσεων και μοντέλων υπολογισμού της στερεοπαροχής των μη συνεκτικών ιζημάτων. Τα αντίστοιχα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για τα συνεκτικά ιζήματα υπολογίζουν τους ρυθμούς διάβρωσης και απόθεσης και όχι τις στερεοπαροχές. Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου υπολογισμού της στερεοπαροχής για συνεκτικά ιζήματα.

Αναλύεται επομένως, αρχικά, η υφιστάμενη μεθοδολογία υπολογισμού για τα μη συνεκτικά ιζήματα. Στη συνέχεια διερευνάται αναλυτικά το θεωρητικό υπόβαθρο που διέπει τη συμπεριφορά των δυο διαφορετικών τύπων ιζημάτων και παρουσιάζονται τα βασικά σημεία στα οποία η υφιστάμενη μεθοδολογία δύναται να τροποποιηθεί για τα συνεκτικά ιζήματα. Τα σημεία αυτά οφείλονται στις διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες των συνεκτικών ιζημάτων και αφορούν το φορτίο πυθμένα, τον σχηματισμό κροκίδων, την ταχύτητα καθίζησης και τη συγκέντρωση των σωματιδίων στο νερό, που επηρεάζουν το φορτίο υπό αιώρηση. Συνδυάζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά των δυο ειδών ιζημάτων προτείνεται επιπλέον μεθοδολογία υπολογισμού της στερεοπαροχής μεικτών ιζημάτων.

Ακολούθως καταρτίζονται αλγόριθμοι υπολογισμού στερεοπαροχής σε συνεκτικά και μεικτά ιζήματα, στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Fortran. Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων των αλγορίθμων χρησιμοποιούνται δυο μοντέλα ακτών, μια απλή ακτή και μια ακτή με λιμενικό έργο. Τα προκύπτοντα αποτελέσματα αναλύονται, σχολιάζονται και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα για τα μη συνεκτικά ιζήματα. Κατά την εφαρμογή των μοντέλων παρατηρείται ότι οι τιμές των στερεοπαροχών και οι συγκεντρώσεις ιζήματος στο νερό παρουσιάζονται σημαντικά μεγαλύτερες στα συνεκτικά ιζήματα. Αντιθέτως, οι ταχύτητες καθίζησης παρουσιάζονται αρκετά μικρότερες στα συνεκτικά ιζήματα. Ανάλογη εικόνα παρατηρείται και στα αποτελέσματα των μοντέλων για τα μεικτά ιζήματα, με την αύξηση του ποσοστού του συνεκτικού ιζήματος στο μεικτό. Τέλος, για κάθε μοντέλο παρουσιάζεται η ανανεωμένη βαθυμετρία, έπειτα από ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα.

Η μεθοδολογία που προτείνεται στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία δύναται να συνεισφέρει σημαντικά στον υπολογισμό της μεταβολής της μορφολογίας των ακτών, παρέχοντας μια ικανοποιητική πρώτη εκτίμηση του φαινομένου της στερεομεταφοράς.

Abstract

The coastal zone is historically important, gathering many commercial, shipping, tourist and other activities. Numerous processes take place, that tend to modify the natural borders of the coastline. As a result, erosion is caused in the coastal zone, a phenomenon that is getting more and more intense due to climate change. For the protection of the coastal zone and its activities, it is critical to assess quantitatively and qualitatively the phenomenon of sediment transport. Many researchers have developed models for the calculation of the discharge of non-cohesive sediments. However, the corresponding models for the cohesive sediments calculate the erosion and deposition rates and not the sediment discharge. The subject of the present Master's thesis is the development of a model that calculates the cohesive sediment discharge.

Initially, the present methodology on the calculation of the non-cohesive sediment discharge is presented in detail. Subsequently, the theoretical background on the behavior of the two different types of sediments is investigated and the basic points that can be modified in the present methodology for the cohesive sediments are presented. These points regard the different physicochemical properties of the cohesive sediment, and specifically the bed load, the flocculation process, the settling velocity and the particles concentration in water, which affect the suspended load. Combining the basic characteristics of the two categories of sediments, a methodology for the calculation of mixed sediment discharge is proposed.

In the context of the present Master's thesis, two algorithms are developed in Fortran, for the calculation of the sediment discharge in cohesive and mixed sediments. In order to assess the algorithms' results, two shore models are used; one simple shore and one containing a port. The results are analyzed, commented and compared to the subsequent results of the non-cohesive sediments. In the models' results it is ascertained that the sediment discharge and the concentration of the sediment particles in the water are much greater for the cohesive sediments. On the other hand, the settling velocity of the particles is observed quite smaller. Similar behavior is observed for the mixed sediment models' results, while the cohesive sediment percentage is increased in the mixture. Last but not least, the renewed bathymetry is presented after a certain time period.

The proposed methodology could attribute importantly in calculating the modification of the coastline's morphology, providing a satisfying first estimation of the sediment transport phenomenon.

Extended summary

1. Introduction

The coastal zone is historically important, gathering many commercial, shipping, tourist and other activities. In Greece, the coastal zone is of paramount importance, regarding the economic, environmental and cultural aspect. Greece is the country that has the longest coastline in the Mediterranean Sea, with a total length of 16.000 km. This length corresponds to 25% of the total coastline length in the EU. In the narrow coastal zone (2km from the sea) the 33% of Greece's population is concentrated, while the 85% of Greece's population lives in the wider coastal zone (50km from the sea).

Numerous processes take place in the coastal zone, that tend to modify the natural borders of the coastline. As a result, erosion is caused, a phenomenon that is getting more and more intense due to climate change. For the protection of the coastal zone and its activities, it is critical to assess quantitatively and qualitatively the phenomenon of sediment transport. Sediment transport results in the loss of sediment from one place (erosion) and its concentration (deposition) to another. Many researchers studied the initiation of motion of non-cohesive sediments and the calculation of bed and suspended load, while others conducted experimental research.

The majority of the researchers studied the transport of non-cohesive sediments. Regarding cohesive sediments, which are the main subject of the present thesis, Partheniades and Winterwerp and Van Kesteren have extensively studied their physicochemical properties and transport in water.

Furthermore, many researchers have developed several models, in order to calculate sediment discharge, for non-cohesive sediments. On the other hand, the models for cohesive sediments calculate exclusively the erosion and deposition rates and not the sediment discharge. As a result, in the context of the present thesis, an expansion of the sediment discharge model for non-cohesive, to cohesive sediments is attempted. In that way, the user of this model could calculate the exact sediment discharge, under the effect of time-stable velocities. The model is expanded further for mixed sediments.

2. Theoretical background

Wave action is the main factor of the grains' agitation, while afterwards the various currents are responsible for their horizontal transport. From a hydrodynamic point of view the main mechanisms of sediment transport are:

- The longshore currents generated by wave breaking, which transports sediments parallel to the shore.
- The asymmetry in the horizontal water particle velocities at the sea bed.
- Gravity, acting downslope and in a seaward direction for a monotonic profile.

- Secondary currents (three-dimensional undertow) that cause an offshore directed sediment transport.
- Currents generated in the wave bottom boundary layer.

Sediment transport can be divided into three modes:

- Bed load, which is in continuous contact with the bed.
- Suspended load, which involves the sediment in suspension.
- Wash load, that consists of very small particles transported with water motion.

2.1. Non-cohesive sediment transport

Sediment motion is caused when the water force acting on the grain exceeds the total friction and weight force. Shields (1936) introduced a mobility parameter, expressing the critical value for the initiation of motion, according to the grain's diameter:

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{b,cr}}{g(\rho_s - \rho)d} \quad (2.1)$$

where $\tau_{b,cr}$ is the critical shear stress for the initiation of motion. Shields presented a chart, which expressed θ_{cr} according to the Reynolds number. Van Rijn expressed Shields' chart with the following formula:

$$\theta_{cr} = \begin{cases} 0.24d_*^{-1} & \text{για } 1 < d_* \leq 4 \\ 0.14d_*^{-0.64} & \text{για } 4 < d_* \leq 10 \\ 0.04d_*^{-0.1} & \text{για } 10 < d_* \leq 20 \\ 0.013d_*^{0.29} & \text{για } 20 < d_* \leq 150 \\ 0.055 & \text{για } d_* > 150 \end{cases} \quad (2.2)$$

where d_* is the non-dimensional diameter, $d_* = \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} d$, g is the gravitational acceleration, d is the average grain diameter, v is the kinematic viscosity and s is the sediment to the water density ratio.

The criterion for the sediments' suspension is expressed as:

$$u_{*s} \geq w_s \quad (2.3)$$

where u_{*s} is the skin-friction velocity and w_s is the grain's settling velocity.

Numerous formulae had been introduced for the calculation of settling velocity. Soulsby (1997) presented a recent formula, which takes into account the effect of sediment concentration c , as follows:

$$w_s = \frac{v}{d_{50}} \left[\sqrt{10.36^2 + 1.049(1-c)^{4.7} d_*^3} - 10.36 \right] \quad (2.4)$$

The suspended sediment load is formulated as:

$$q_{s,c} = \int_a^h uc \, dz \quad (2.5)$$

where $q_{s,c}$ is the suspended sediment load (m^2/s) and u is the flow velocity at a distance z from the bottom.

2.2. Cohesive sediment transport

Numerous formulae had been presented in order to calculate the critical shear stress for the initiation of motion of cohesive sediments. Critical shear stress depends either on the soil's degree of consolidation (density), or on the soil's plasticity. In the context of the present thesis, the critical shear stress, τ_{ce} is expressed as follows:

$$\tau_{ce} = 0.1628 (PI)^{0.84} \quad (2.6)$$

where τ_{ce} is the critical shear stress in Pascal.

The most characteristic property of the cohesive sediment is the formation of flocs (flocculation). Flocculation or aggregation is the joining or break up of sediment particles in groups (flocs), due to the attractive or repulsive forces developing between the cohesive sediment particles.

From a hydrodynamic point of view, flocculation is caused by three main processes:

1. The Brownian motions caused by the collision of particles.
2. The differential settling between particles with different settling velocities.
3. The turbulent flows, that cause the collision of particles.

The calculation of the floc size is conducted by complex mathematical models, among which, the most commonly used are the Lagrangean and the Eulerian model. In the context of the present thesis, a simple formula was used for the calculation of the equilibrium floc diameter, $D_{f,e}$, as follows:

$$D_{f,e} = D_p + \frac{k_A c}{k_B \sqrt{G}} = \left(D_p + \frac{k_A \lambda_0}{k_B \sqrt{v}} \right) \quad (2.7)$$

where D_p is the cohesive particles diameter, k_A (m^2/kg) is the dimensional aggregation parameter and k_B ($s^{1/2}/m^2$) is the floc break up parameter. They are calculated as follows:

$$k_A = k'_A \frac{D_p^{n_f-3}}{n_f f_s \rho_s} \quad (2.8)$$

$$k_B = k'_B \frac{D_p^{-p}}{n_f} \left(\frac{\mu}{F_y} \right)^q \quad (2.9)$$

Where n_f is the fractal dimension of mud flocs, the parameters p and q are calculated as $p=3-n_f$ and $q=1/2$ (Winterwerp, 1998), μ is the dynamic viscosity and F_y is the yield strength of flocs.

Flocs can be considered as porous but effectively impermeable entities in the calculation process of settling velocity. According to Winterwerp and Van Kesteren (2004), the formula that calculates the floc's settling velocity is expressed as follows:

$$w_{s,r} = \frac{\alpha}{18\beta} \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\mu} D_p^{3-n_f} \frac{D_f^{n_f-1}}{1+0.15\text{Re}_f^{0.687}} \quad (2.10)$$

where D_p and D_f are the particle's and floc's diameter respectively, Re_f is the floc's Reynolds number and μ is the dynamic viscosity. For spherical ($\alpha=\beta=1$) Euclidean ($n_f=3$) particles in Stokes regime, $\text{Re}_f \ll 1$ the settling velocity formula is obtained as:

$$w_{s,r} = \frac{(\rho_s - \rho_w)gD_f^2}{18\mu} \quad (2.11)$$

The formulae presented above can be applied only in case of low sediment concentration in water. When the (volumetric) concentration increases ($\geq 3\text{g/l}$), flocs tend to obstruct the other flocs' movement. This phenomenon is called hindered settling. When the volumetric concentration increases further, the flocs develop a network and they cannot settle further, except as a result of self-weight consolidation. The settling velocity of cohesive sediment could be calculated as:

$$W_s^m = \frac{(1-\varphi_f^m)(1-\varphi_s^m)}{1+2.5\varphi_f^m} W_{s,r}^m \quad (2.12)$$

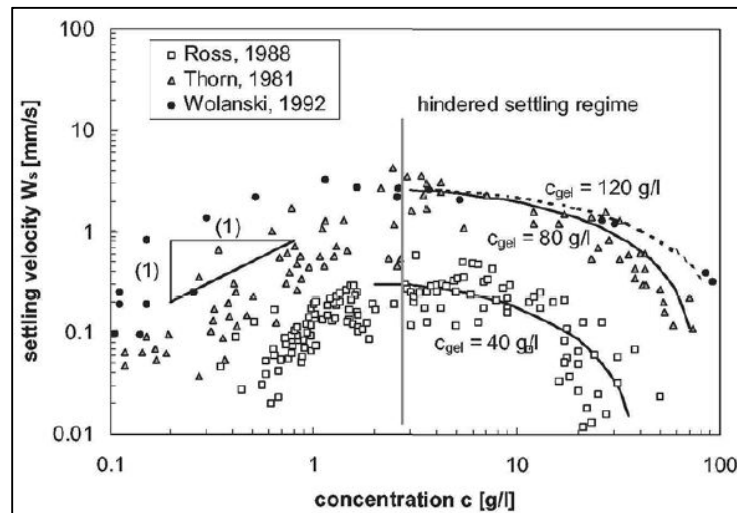
where:

$$\varphi_s^m = \frac{c^m}{\rho_s}$$

$$\varphi_f^m = \frac{c^m}{c_{gel}} \quad (2.13)$$

where c^m is the mud's concentration in water, c_{gel} is the gelling velocity and ρ_s is the sediment's density.

The following scheme presents the settling velocity depending on the sediment's volumetric concentration in water.



Scheme 2-1: Settling velocity depending on the sediments' volumetric concentration (Source: Winterwerp and Van Kesteren, 2004)

Scheme 2-1, presents an increase of the settling velocity, with a simultaneous increase of the volumetric concentration, c . As the volumetric concentration increases up to the value of 3 g/l the settling velocity reaches a maximum value. As the volumetric concentration increases further, the settling velocity decreases due to the phenomenon of hindered settling.

2.3. Mixed sediment transport

In nature, apart from non-cohesive or cohesive shores, shores with mixed sediment are very common. For the spherical understanding of the sediment transport mechanism, it is extremely important for one to understand the bed erosion mechanism. Until today, the majority of the research conducted deal with the investigation of the erosion mechanism of mixed sediment beds (Mitchener and Torfs, 1995; Torfs et al., 1995; Panagiotopoulos et al., 1997; Van Ledden et al., 2003). The most important conclusions were the following:

- The critical shear stress for erosion increases as either non-cohesive sediment is added in cohesive sediment or vice versa. The addition of non-cohesive sediment, up to 50% by weight, could double the value of the critical shear stress for erosion. On the other hand, the addition of cohesive sediment, up to 30% by weight, could increase the critical shear stress for erosion up to 10 times.

- For mixed sediments with non-cohesive sediment content about 70-100% by weight, the critical shear strength depends not only on the size of the sediment's grain but also on the physicochemical properties of the cohesive sediment.
- The addition of cohesive sediment in non-cohesive increases importantly the value of the critical shear stress for erosion. Its maximum value accrues for a non-cohesive sediment content, about 50-70% by weight.
- In case a specific amount of cohesive sediment is added to non-cohesive, then the bed is behaving as the former. Mitchener and Torfs (1995) concluded that mixed sediment with mud contents greater than 15% behave as cohesive, while when mud contents are lower than 3%, then the bed behaves as non-cohesive. When mud contents are between 3%-15%, then mixed sediment bed follows a transitional behavior.

3. Basic equations and numerical schemes

3.1. Basic equations

Two basic groups of differential equations describe the velocity field of a model. Those are the continuity and momentum equations.

Continuity equation is a differential equation that expresses the principle of quantity retention. In the context of the present thesis, a homogenous in depth field is selected for the analysis and the continuity equation can be expressed as follows:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

where ζ is the vertical distance between the surface of the sea and the average sea level (because of the wave setup), U is the depth average flow velocity in the x axis, while V is the depth average flow velocity in the y axis and h is the bed's depth.

The x and y -momentum equations express the principle of momentum retention, in a certain fluid volume.

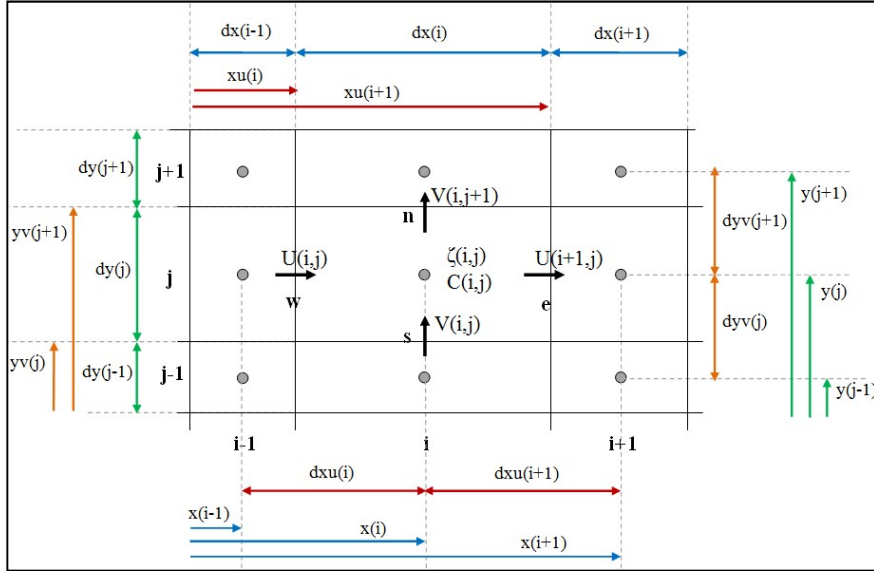
x -momentum equation could be expressed as:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - A_x + v_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho h} \quad (3.2)$$

where ζ is the vertical distance between the surface of the sea and the average sea level (because of the wave setup), U is the depth average flow velocity in the x axis, while V is the depth average flow velocity in the y axis, h is the bed's depth and ρ is the fluid's density. The parameter A_x expresses a stimulation term, such as the radiation stresses. Furthermore, g is the gravitational acceleration and v_h is the horizontal diffusion coefficient. y -momentum equation can be expressed likewise.

3.2. Numerical schemes

In the numerical process, a finite differences scheme in a staggered grid is used. The wave heights and bed depths are defined in the center of the elements, while flow velocities are defined upstream in the western and southern limits of the elements. The staggered grid is presented in the following Scheme.



Scheme 3-1: Staggered grid (Source: Stamou, 2016)

4. Sediment transport models

The basic equation for sediment transport is:

$$\frac{d\zeta_b}{dt} + \frac{d}{dx}(q_{sx} + q_{bx}) + \frac{d}{dy}(q_{sy} + q_{by}) = S \quad (4.1)$$

where ζ_b is the bed level and q_{bx} and q_{by} is the bed load in the directions x and y respectively. q_{sx} and q_{sy} are the suspended load in the directions x and y respectively, while S is the possible addition or loss of sediment.

In the models developed in the context of the present thesis:

1. The waves are linear.
2. The velocity field is not affected by the change of the bathymetry.
3. The wave currents are developed under steady state conditions.

4.1. Non-cohesive sediment model

The total sediment transport equals to:

$$q_t = q_b + q_s \quad (4.2)$$

where q_b, q_s are the vectors for bed and suspended load respectively.

In order to calculate the bed load, in the context of the present thesis the empirical formula of Meyer-Peter (& Muller modified) is used:

$$\frac{\langle q_{bx} \rangle}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}} = 11 \langle |\theta| - \theta_{cr} \rangle \frac{\theta_x}{|\theta|} \quad (4.3)$$

where d_{50} is the average grain diameter, ν is the kinematic viscosity, ρ_s is the sediment's density, ρ is the sea water's density and $\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$.

θ_{cr} is the critical mobility parameter, for the initiation of motion. The absolute value of the parameter θ is calculated as follows:

$$|\theta| = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2} \quad (4.4)$$

where θ_x and θ_y are the components of the Shields parameter, in the x and y directions:

$$\theta_x = \frac{\tau_{bx}}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50}} \quad (4.5)$$

$$\theta_y = \frac{\tau_{by}}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50}}$$

where, τ_{bx} and τ_{by} are the components of the shear bed stress in the x and y directions respectively. The shear bed stresses are responsible for the initiation of motion of the sediment. They are calculated with the following formulae:

$$\tau_{bx} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f_w \cdot \langle u_b \cdot \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \rangle \quad (0.1)$$

$$\tau_{by} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f_w \cdot \langle v_b \cdot \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \rangle$$

where f_w is the wave friction coefficient.

The suspended load is calculated by the following integrals:

$$q_{sx} = \int_{-h}^0 u(z) \cdot c(z) dz = U \int_{-h}^0 c(z) dz \quad (4.7)$$

$$q_{sy} = \int_{-h}^0 v(z) \cdot c(z) dz = V \int_{-h}^0 c(z) dz$$

The quantity of the suspended load depends on the depth average flow velocity and the volumetric concentration, c . The volumetric concentration is calculated by the following formula:

$$C(z) = C_a \cdot \exp\left(\frac{-w_s \cdot z}{\varepsilon_v}\right) \quad (4.8)$$

where, ε_v is the vertical diffusion coefficient and w_s is the particles' settling velocity. C_a is the reference volumetric concentration:

$$C_a = 0.49 \cdot \theta^{1.77} \cdot \left(\frac{d_{50}}{w_s \cdot T \cdot f_w}\right) \quad (4.9)$$

and the settling velocity:

$$w_s = \frac{\Delta \cdot g \cdot d_{50}^2}{\nu} \cdot C_1 + C_2 \cdot \sqrt{\Delta \cdot g \cdot d_{50}} \quad (4.10)$$

where C_1 and C_2 are coefficients calculated by the following formulae:

$$\begin{aligned} C_1 &= 0.055 \cdot \tanh\left(12D'^{-0.59} \cdot e^{-0.0004D'}\right) \\ C_2 &= 1.06 \cdot \tanh\left(0.016 \cdot D'^{0.5} \cdot e^{\frac{120}{D'}}\right) \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\text{and } D' = \frac{\Delta \cdot g \cdot d_{50}^3}{\nu^2}.$$

Finally, the depth integrated volumetric concentration is as follows:

$$C_t = C_a \cdot \frac{\varepsilon_v}{w_s} \left[1 - \exp\left(-\frac{w_s \cdot h}{\varepsilon_v}\right)\right] \quad (4.12)$$

4.2. Cohesive sediment model

In the context of the cohesive sediment models, there are some basic alterations regarding the physicochemical properties of cohesive sediments.

The cohesive sediments are not transported as bed load. Thus, there are no formulae for the calculation of bed load available in the bibliography. However, when the top bed layer consists of fluid mud, then the total mass of the mud behaves as a dense viscous fluid. This layer moves according to the bed's inclination. When the bed's inclination increases up to a

critical angle α_e , then the fluid mud slides on the bed with gravity. The critical angle is calculated as follows:

$$\alpha_e = \arctan \left[2.5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\rho}{1000} \right)^{4.7} \right] \quad (4.13)$$

where, ρ is the bed's density in g/m^3 .

The fluid mud's sliding is expressed by the following dispersion equation (Teisson 1991):

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = K_{sx} \frac{\partial^2 z_b}{\partial x^2} + K_{sy} \frac{\partial^2 z_b}{\partial y^2} \quad (4.14)$$

where z_b is the bed's depth and K_{sx} , K_{sy} are dispersion coefficients. In the context of the present thesis, fluid mud transport is not taken into account.

The model for the calculation of the cohesive sediment discharge is modified by taking into account 4 basic parameters:

1. The bed's critical shear stress for erosion.
2. The flocculation phenomenon.
3. The hindered settling phenomenon.
4. The calculation process of the volumetric concentration.

Critical shear stress for erosion

In cohesive sediments, when the bed shear stresses reach a critical point, then the sediment starts to move as suspended load. The critical shear stress for erosion depends on the plasticity index of the bed's top layer, and it is calculated as follows:

$$\tau_{ce} = 0.1628 (PI)^{0.84} \quad (4.15)$$

where PI is the plasticity index. This empirical formula provides the critical shear stress for erosion in Pascal.

Flocculation

In cohesive beds, the sediment particles form flocs. As a result, the suspended sediment does not consist of sediment particles, but flocs, which affects the suspended load calculation process.

The calculation of the floc size is conducted by complex mathematical models, among which, the most commonly used are the Lagrangean and the Eulerean model. In the context of the present thesis, a simple formula was used for the calculation of the equilibrium floc size, $D_{f,e}$:

$$D_{f,e} = D_p + \frac{k_A c}{k_B \sqrt{G}} \quad (4.16)$$

where D_p is the cohesive particles diameter, k_A (m^2/kg) is the dimensional aggregation parameter, k_B ($s^{1/2}/m^2$) is the floc break up parameter and G is the shear rate parameter.

Hindered settling

When the (volumetric) concentration increases ($\geq 3g/l$), flocs tend to obstruct the other flocs' movement. This phenomenon is called hindered settling. When the volumetric concentration increases further, the flocs develop a network and they cannot settle further, except as a result of self-weight consolidation. The settling velocity of cohesive sediment could be calculated as:

$$W_s^m = \frac{(1 - \varphi_f^m)(1 - \varphi_s^m)}{1 + 2.5\varphi_f^m} W_{s,r}^m \quad (4.17)$$

where the floc diameter D_f is equal to the equilibrium floc diameter $D_{f,e}$, and

$$\varphi_s^m = \frac{c^m}{\rho_s}$$

$$\varphi_f^m = \frac{c^m}{c_{gel}} \quad (4.18)$$

Volumetric concentration

In order to calculate the depth average volumetric concentration and the reference concentration, the average grain diameter d_{50} in the formula (4.9) was substituted by the floc's diameter, D_f . In the calculation process of cohesive sediment discharge, the parameters c , w_s and D_f depend on one another. In order to overcome this dependence between those basic parameters, an iterative process was developed, in which the volumetric concentration increased by a small step ($dc=0.000001kg/m^3$). Afterwards, w_s and D_f are defined. According to the above, a concentration c_1 is calculated, either for normal, or hindered settling. When $|c_1 - c| \leq 0.01kg/m^3$ then the iterative process is terminated.

4.3. Mixed sediment model

In nature, apart from non-cohesive or cohesive shores, shores with mixed sediment are very common. For the definition of the erosion type of the bed, the research results of Mitchener and Torfs (1995) were taken into account. When the mud fraction in the mixed sediment is smaller than 3% then the bed gets eroded as non-cohesive, while when it is greater than 15%, the bed behaves as cohesive. When the mud fraction is between 3%-15% by weight, then the bed follows a transitional behavior.

As a result, in the model that was developed:

- ❖ When the mud fraction was smaller than 3%, then the sediment discharge was calculated by the non-cohesive sediment model.
- ❖ When the mud fraction was greater than 15%, then the sediment discharge was calculated by the cohesive sediment model.
- ❖ When the mud fraction was between 3%-15% then the sediment discharge was calculated as follows.

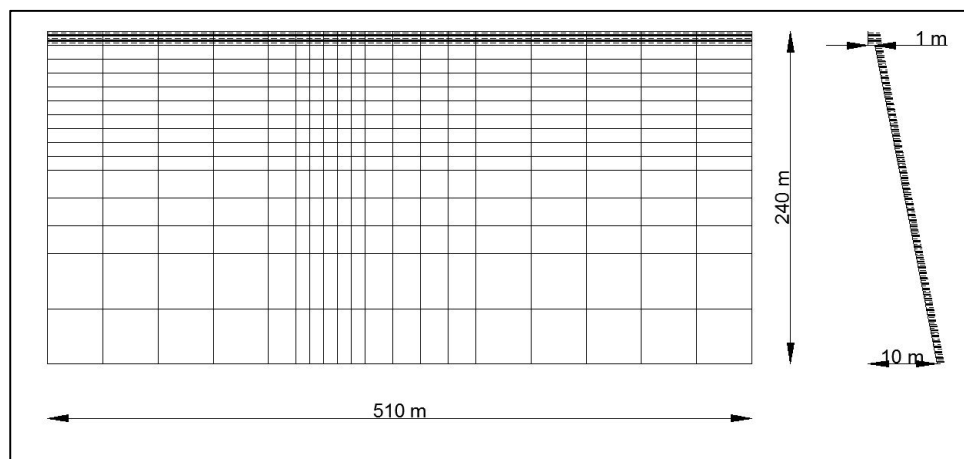
In order to define the critical shear stress for erosion, an average value of 0.047 Pa was used. Then the sediment discharge q_b , q_s and q_t were calculated for both cohesive and non-cohesive sediments. The sediment discharge for the mixed sediment was calculated as follows:

$$\begin{aligned} q_b &= (s)q_{bs} + (m)q_{bm} \\ q_s &= (s)q_{ss} + (m)q_{sm} \\ q_t &= (s)q_{ts} + (m)q_{tm} \end{aligned} \quad (4.19)$$

where s and m are the by weight percentage of non-cohesive and cohesive sediment in the mixture, respectively.

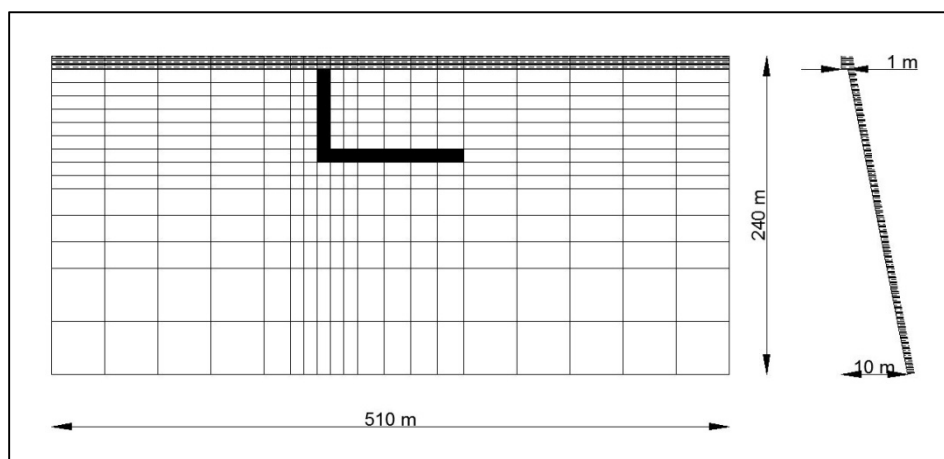
5. Application results

In order to apply the sediment transport models presented in §4, two shore models are used. The first one concerned a simple shore, 510m x 240m, with 3.75% bed incline, presented in the Scheme 5-1 above:



Scheme 5-1: Simple shore model

The second shore model is identical to the first, but it also contains a port, as it is presented at the following Scheme.



Scheme 5-2: Shore model containing a port

5.1. Non-cohesive sediment transport model results

Input Data

The input data in the non-cohesive sediment transport model are as follows:

Sediment: It consists of sand, with $d_{50}=0.2$ mm, while $\Delta = \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} = 1.6$.

Kinematic viscosity: The kinematic viscosity, ν is equal to $1.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

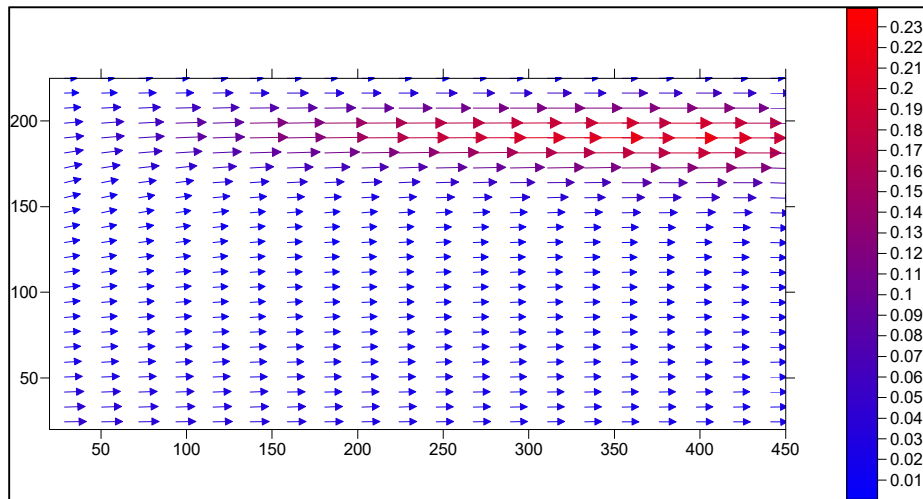
Wave model: The waves characteristics are $T=7$ s, $H_0=2.20$ m with southeastern wind direction 45° .

Time step for the bathymetry update: The time step is equal to 100s.

Sediment discharge

The basic output of the produced models is the sediment discharge. Regarding **the simple shore**, the bed load results in the direction of the x-axis, $q_{bx}=3.10 \cdot 10^{-5} - 7.94 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$. On the y-axis $q_{by}=1.53 \cdot 10^{-7} - 3.78 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2\text{s}$. As far as the suspended load is concerned, on the x-axis, $q_{sx}=6.18 \cdot 10^{-5} - 2.42 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^2\text{s}$. On the other hand, on the y-axis $q_{sy}=3.02 \cdot 10^{-7} - 5.80 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$. The total sediment discharge results in $q_{tx}=5.69 \cdot 10^{-4} - 2.47 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^2\text{s}$, while $q_{ty}=1.80 \cdot 10^{-7} - 5.87 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$.

The results regarding the total sediment transport in the simple shore are presented graphically in the following Scheme.

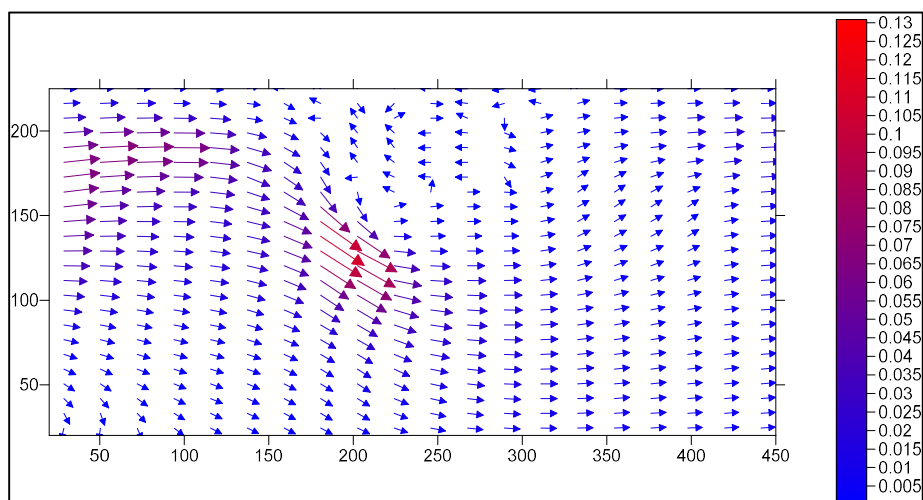


Scheme 5-3: Total sediment transport in the simple shore model

As it can be observed in the Scheme 5-3, the total sediment discharge is in the direction of the x-axis, because the values of q_{tx} are much higher than the corresponding values of q_{ty} . The direction of q_t agrees with the direction of the wind, that is from the southwestern to the northeastern. In addition, the increasing of the flow velocities in the surf zone, and the direction of the velocities of the flow field, result in much greater values of q_t near the coast, specifically in the eastern boundary of the field.

On the other hand, regarding the **shore with the port**, the bed load results in the direction of the x-axis, $q_{bx}=4.14 \cdot 10^{-7} - 3.72 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$. On the y-axis $q_{by}=2.52 \cdot 10^{-7} - 1.10 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$. As far as the suspended load is concerned, on the x-axis, $q_{sx}=2.24 \cdot 10^{-25} - 1.14 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^2\text{s}$. On the other hand, on the y-axis $q_{sy}=9.15 \cdot 10^{-19} - 1.05 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^2\text{s}$. The total sediment discharge results in $q_{tx}=1.12 \cdot 10^{-25} - 1.00 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^2\text{s}$, while $q_{ty}=4.57 \cdot 10^{-19} - 9.31 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^2\text{s}$.

The results regarding the total sediment transport in the shore containing the port are presented graphically in the following Scheme.



Scheme 5-4: Total sediment transport in the shore containing the port model

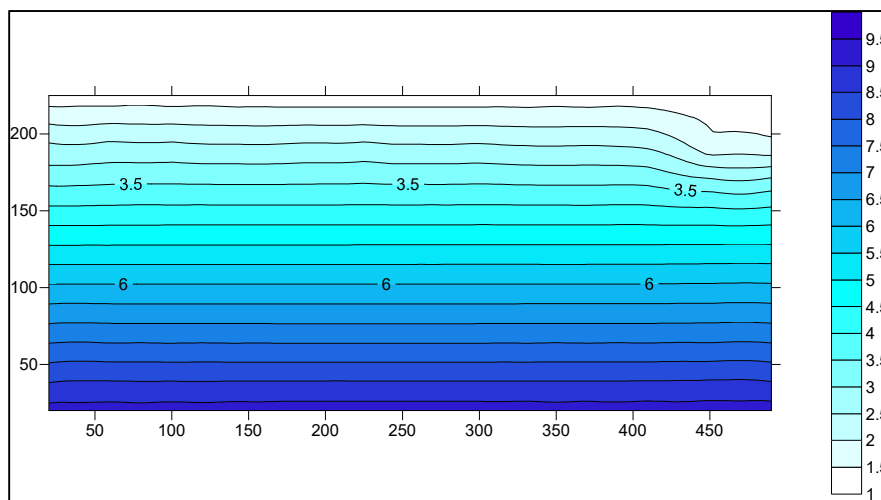
As it can be observed in the Scheme 5-4, q_t gets its maximum value near the corner, where the horizontal jetty meets the vertical. Furthermore, the port behaves as a breakwater, collecting sediment upstream and reducing the sediment discharge downstream (inside the port). The reduction of the sediment discharge inside the port is also caused by the increased depth inside it (5 m).

Basic parameters

The model for the calculation of non-cohesive sediment discharge also calculates some other basic parameters, such as the volumetric concentration of the sediment in the water, c and the settling velocity, w_s . In the application, $c=2.17 \cdot 10^{-4} - 1.67 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^3$, while $w_s=2.16 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ for the simple shore model. As far as the shore containing the port model is concerned, $c=3.27 \cdot 10^{-20} - 1.32 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^3$, while w_s has a consistent value of $2.16 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$, because it depends on the sediment grain value.

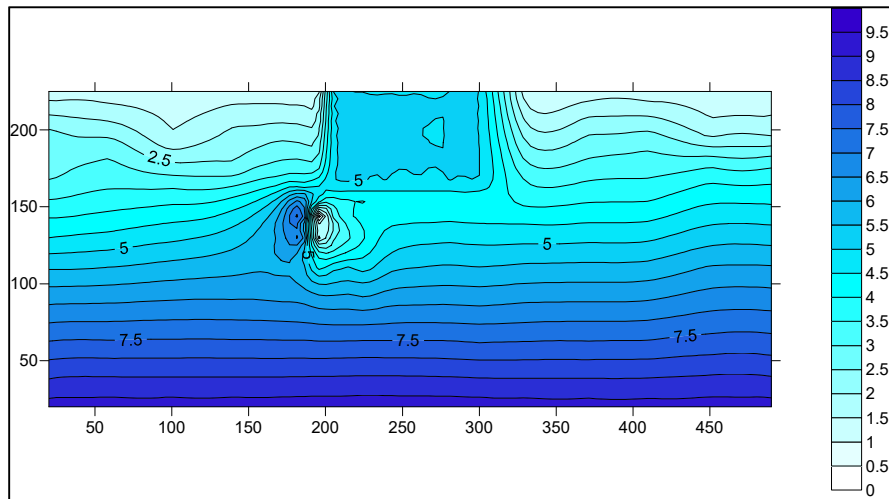
Updated bathymetry

Apart from the parameters above, the model provides the updated bathymetry, under the effect of a certain stable velocity field, after a specific time step (DT). The updated bathymetry for the simple shore and the shore containing a port model, are presented graphically in the following Schemes.



Scheme 5-5: Updated bathymetry of the simple shore model

In the case of the simple shore, it can be observed that the sediment is concentrated evenly near the coast, while the deposition is bigger near the northeastern boarder of the grid, because this is the point where q_t reaches its maximum value.



Scheme 5-6: Updated bathymetry of the shore containing a port model

In the case of the shore containing a port, the sediment is deposited near the corner of the vertical and the horizontal jetty, because of the high values of q_t , at this point. However, the deposition of the sediment is higher upstream than downstream, because of the port's effect to the hydrodynamic field and as a result to the sediment transport.

5.2. Cohesive sediment transport model results

The cohesive sediment transport model is the modification of the non-cohesive sediment transport model.

Input Data

The input data in the cohesive sediment transport model are as follows:

Sediment: It consists of middle size particles of silt, with $d_{50}=4 \mu\text{m}$, and $\rho_s=2650\text{kg/m}^3$.

Kinematic viscosity: The kinematic viscosity, ν is equal to $1.2 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$.

Dynamic viscosity: The dynamic viscosity, μ is equal to $10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$.

Shear rate parameter: The shear rate parameter, G is equal to $G=3 \text{s}^{-1}$.

Plasticity index: The plasticity index, PI is equal to $PI=30\%$.

Aggregation and floc break up parameter: The aggregation parameter, k_A is equal to $k_A=14.6 \text{m}^2/\text{kg}$, while the floc break up parameter, k_B is equal to $k_B=14.6 \text{s}^{1/2}/\text{m}^2$.

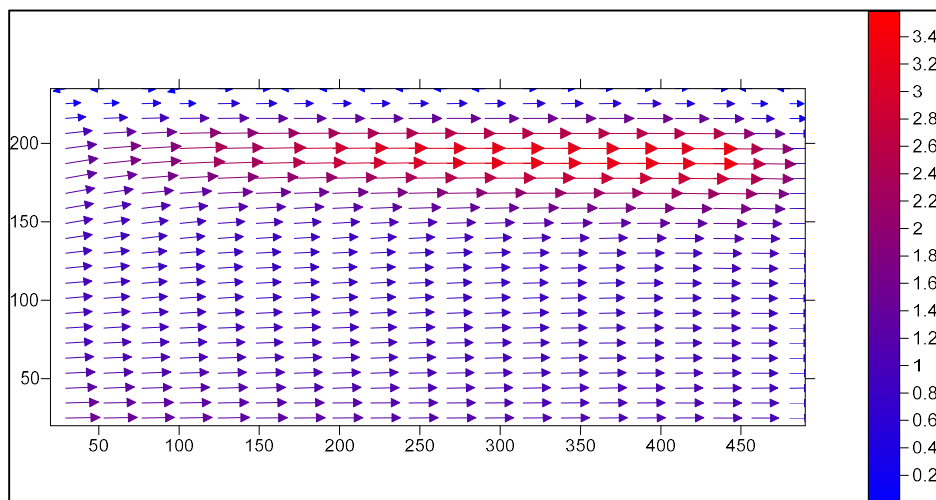
Wave model: The waves characteristics are $T=7 \text{s}$, $H_0=2.20 \text{m}$, with a southeastern wind direction 45° .

Time step for the bathymetry update: The time step is equal to 5s .

Sediment discharge

The basic output of the produced models is the sediment discharge. Regarding **the simple shore**, the suspended load on the x-axis, $q_{sx}=2.08 \cdot 10^{-1} - 3.63 \text{ kg/m}^2\text{s}$. On the other hand, on the y-axis $q_{sy}=2.78 \cdot 10^{-6} - 2.62 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^2\text{s}$. The total sediment discharge results are equal to the suspended sediment results, because the bed load discharge is not defined in cohesive sediments.

The results regarding the total sediment transport in the simple shore are presented graphically in the following Scheme.

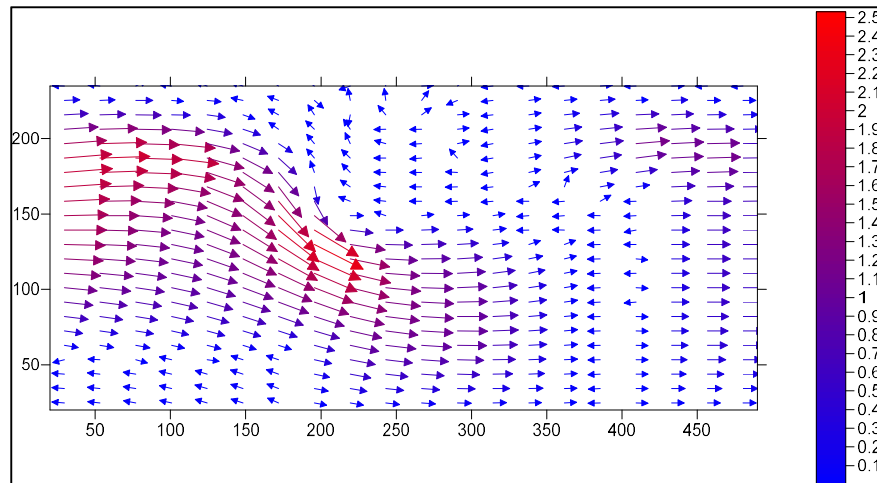


Scheme 5-7: Total sediment transport in the simple shore model

As it can be observed in the Scheme 5-7, the total sediment discharge has the direction of the x-axis, because the values of q_{tx} are much higher than the corresponding values of q_{ty} . The direction of q_t agrees with the direction of the wind, that is from the southwestern to the northeastern. In addition, the increasing of the flow velocities in the surf zone, and the direction of the velocities of the flow field, result in much greater values of q_t near the coast, specifically in the eastern boundary of the field.

On the other hand, regarding the **shore with the port**, the suspended load on the x-axis, $q_{sx}=1.26 \cdot 10^{-1} - 2.12 \text{ kg/m}^2\text{s}$. On the other hand, on the y-axis $q_{sy}=1.88 \cdot 10^{-6} - 1.93 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^2\text{s}$. The total sediment discharge results are equal to the suspended sediment results, because the bed load discharge is not defined in cohesive sediments.

The results regarding the total sediment transport in the shore containing the port are presented graphically in the following Scheme.



Scheme 5-8: Total sediment transport in the shore containing the port model

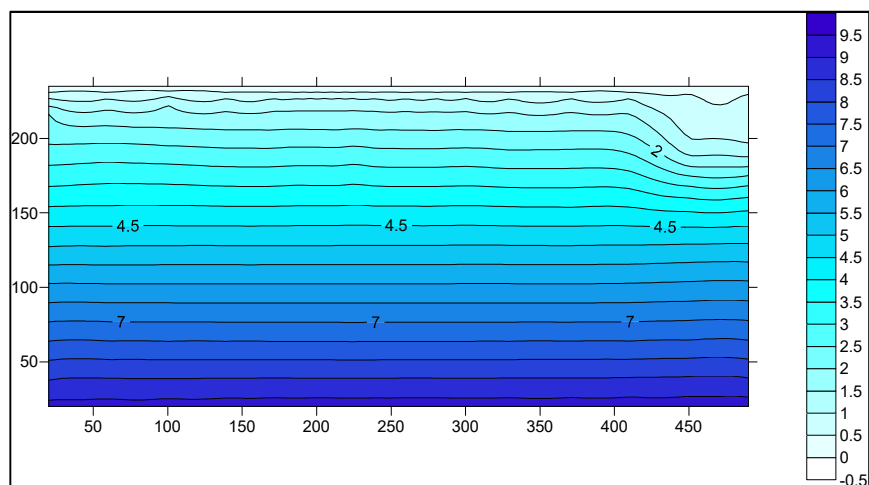
As it can be observed in the Scheme 5-8, q_t gets its maximum value near the corner, where the horizontal jetty meets the vertical. Furthermore, the port behaves as a breakwater, collecting sediment upstream and reducing the sediment discharge downstream. The reduction of the sediment discharge is also caused by the increased depth inside it (5 m).

Basic parameters

The model for the calculation of cohesive sediment discharge also calculates the volumetric concentration of the sediment in the water c , the settling velocity, w_s and the flocs' diameter D_f . In the application, $c=6.76 \cdot 10^{-1} - 2.52 \text{ kg/m}^3$, while $w_s=1.42 \cdot 10^{-5} - 2.98 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ and $D_f=4-787 \text{ }\mu\text{m}$, for the simple shore model. As far as the shore containing the port model is concerned, $c=7.44 \cdot 10^{-1} - 2.35 \text{ kg/m}^3$, while $w_s=1.42 \cdot 10^{-5} - 2.79 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ and $D_f=4-787 \mu\text{m}$.

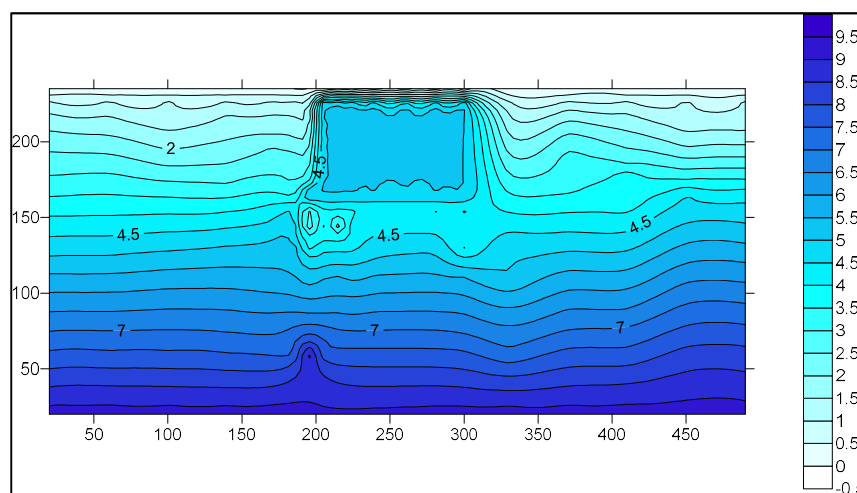
Updated bathymetry

The model provides the updated bathymetry, under the effect of a certain stable velocity field, after a specific time step (DT). The updated bathymetry for the simple shore and the shore containing a port model, are presented graphically in the following Schemes.



Scheme 5-9: Updated bathymetry of the simple shore model

In the case of the simple shore, it can be observed that the sediment is concentrated evenly near the coast, while the deposition is bigger near the northeastern border of the grid, because this is the point where q_t reaches its maximum value.



Scheme 5-10: Updated bathymetry of the shore containing a port model

In the case of the shore containing a port, the sediment is deposited near the corner of the vertical and the horizontal jetty, because of the high values of q_t in this point. However, the deposition of the sediment is higher upstream than downstream, because of the port's effect to the hydrodynamic field and as a result to the sediment transport.

5.3. Mixed sediment transport model results

In the context of the present thesis, the analysis involved mixed sediment with mud content between 3-15% by weight. Specifically, three different types of sediment are examined in the analysis, with mud content of 5%, 10% and 15%. The results are presented at the Table above.

Parameter	Mud content in the mixed sediment (%)		
	5%	10%	15%
q_b (kg/m ² s)	$5 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4} - 6.5 \cdot 10^{-3}$
q_s (kg/m ² s)	0.02-0.40	0.05-0.55	0.05-0.75
q_t (kg/m ² s)	0.02-0.40	0.05-0.55	0.05-0.75
c (kg/m ³)	0.01-0.29	0.03-0.40	0.04-0.53
D_f (μm)	4.00-857.00	4.00-857.00	4.00-857.00

From the results presented above, it can be concluded that the bed load q_b is not affected by the mud content. Furthermore, q_s defines the value of q_t , because it is by far higher than the corresponding value of q_b .

In addition, the value of q_s increases while the mud content increases too, as the suspended load in cohesive sediments is up to ten times higher than the one in non-cohesive

sediments. The volumetric concentration c also increases, with the increase of the mud content, while the flocs' diameter D_f tends to remain unchanged.

6. Conclusions

The subject of the present Master's thesis is the modification of the existing cohesive sediment discharge calculation model for cohesive and mixed sediments. The conclusions drawn from the applications presented in the previous chapters, are in brief the below:

1. In cohesive sediments, the bed load sediment discharge, q_b is not defined. However, when the top bed layer consists of fluid mud, then the total mass of the layer behaves as a dense viscous fluid, which moves according to the bed's inclination.
2. As far as suspended load is concerned, cohesive sediments behave in a totally different way, due to their different physicochemical properties. The cohesive sediments' particles form aggregates (flocs) that affect the values of settling velocity, w_s and the volumetric concentration of sediments in the water.
3. In cohesive sediments, when the volumetric concentration, c exceeds a maximum value (3g/l), then the phenomenon of hindered settling takes place, affecting the settling velocities, w_s and the suspended sediment load, q_s .
4. In the cohesive sediment transport model, the results regarding the suspended sediment were about ten times higher, than the corresponding in the non-cohesive sediment transport model.
5. The values of the volumetric concentration, c were about one thousand times higher in the case of cohesive sediments. On the other hand, the corresponding values for the settling velocity, w_s were approximately ten to one thousand times lower than the ones for non-cohesive sediments.
6. The behavior described above was expanded to the results of mixed sediments, as when the mud content increased, so did q_t and c , while w_s reduced.
7. In mixed sediments, when the mud fraction:
 - ❖ Is smaller than 3%, then the sediment discharge can be calculated by the non-cohesive sediment model.
 - ❖ Is greater than 15%, then the sediment discharge can be calculated by the cohesive sediment model.
 - ❖ Is between 3%-15% then the sediment discharge can be calculated by a combination of the two aforementioned models, as it follows a transitional behavior.
8. The updated bathymetry provides a fair estimation concerning the qualitative behavior of sediment transport. However, a much more realistic image could be produced, if a time dependent sediment transport model is developed.

1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο της εργασίας

Η παράκτια ζώνη αποτελεί χώρο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για τον άνθρωπο ανά τους αιώνες. Συγκεντρώνει πληθώρα δραστηριοτήτων ανά τον κόσμο, με τις σημαντικότερες από αυτές να είναι το εμπόριο, η ναυτιλία, η βιομηχανία, ο τουρισμός και η αναψυχή. Στις παράκτιες περιοχές συγκεντρώνεται πάνω από το 40% του παγκόσμιου πληθυσμού, καθώς πλησίον αυτών έχει οικοδομηθεί ένας σημαντικός αριθμός μητροπόλεων ανά τον κόσμο. Η Ελλάδα δε θα μπορούσε να αποτελεί εξαίρεση σε αυτόν τον τομέα. Η παράκτια ζώνη της είναι ιδιαίτερα σημαντική από οικονομική, αναπτυξιακή, περιβαλλοντική και πολιτιστική σκοπιά. Το πολύτιμο στοιχείο της Ελληνικής παράκτιας ζώνης αναδεικνύεται μεταξύ άλλων και από τα στατιστικά δεδομένα της. Η Ελλάδα διαθέτει τη μεγαλύτερη ακτογραμμή της ΕΕ και τη δεύτερη μεγαλύτερη από τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ηπείρου μετά τη Νορβηγία, με συνολικό μήκος άνω των 16.000 km. Το μήκος αυτό αντιστοιχεί περίπου στο 25% του συνόλου των ακτών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στη στενή παράκτια ζώνη (δηλαδή σε βάθος έως και 2km) συγκεντρώνεται το 33% του πληθυσμού της Ελλάδας, ενώ στην ευρύτερη παράκτια ζώνη (δηλαδή σε βάθος έως και 50km) συγκεντρώνεται το 85% περίπου του πληθυσμού.

Στις παράκτιες περιοχές λαμβάνει χώρα πληθώρα φυσικών διεργασιών, οι οποίες τείνουν να μεταβάλλουν τα φυσικά όρια της ακτογραμμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση φαινομένων διάβρωσης σε αυτήν. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ολοένα αυξανόμενη εκδήλωση αυτών των φαινομένων, τα οποία οφείλονται σε διάφορα αίτια. Τα σημαντικότερα από αυτά αφορούν την αύξηση της στάθμης της θάλασσας, την επίδραση της κλιματικής αλλαγής αλλά και την κατασκευή λιμενικών έργων και εγκαταστάσεων, τα οποία μπορεί να εντείνουν τα φαινόμενα διάβρωσης στην ακτίνα επιρροής τους.

Για την προστασία των ακτών και κατ' επέκταση των δραστηριοτήτων που συντελούνται σε αυτές κρίνεται εξαιρετικά κρίσιμη η ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση του φαινομένου της στερεομεταφοράς. Στερεομεταφορά είναι η παράκτια μεταφορά φορτίου ιζήματος, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την απώλειά του από ένα σημείο (διάβρωση) και την απόθεσή του σε κάποιο άλλο. Η μεταφορά ιζήματος προϋποθέτει την έναρξη της κίνησης του ιζήματος, με την οποία ασχολήθηκε αρχικά ο Brahms (1753). Ο Brahms πρότεινε μια σχέση, η οποία συμπεριλάμβανε στοιχεία της ροής και το απαιτούμενο βάρος μιας πέτρας ώστε αυτή να παραμείνει ακίνητη. Στη συνέχεια, ο Dubuat (1743-1809) εισήγαγε την έννοια της κρίσιμης διατμητικής τάσης πυθμένα και οι Hagen (1797-1884) και DuPuit (1804-1866) έδωσαν ποιοτικές περιγραφές για την κίνηση των σωματιδίων του ιζήματος τόσο στον πυθμένα όσο και σε αιώρηση.

Οι πρώτες σχέσεις υπολογισμού του φορτίου στερεομεταφοράς πυθμένα παρουσιάστηκαν από τον DuBoys (1847-1924) στη Γαλλία. Ο τελευταίος εξέφρασε τη στερεομεταφορά ως

μια κίνηση των σωματιδίων σε διαφορετικά επίπεδα. Γύρω στο 1900 παρουσιάστηκαν μοντέλα μεταφοράς του ιζήματος του πυθμένα από τον Fargue (1827-1910) στην Γαλλία και από τον Reynolds (1842-1912) στην Αγγλία. Εργαστηριακή έρευνα σχετικά με τη στερεομεταφορά πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Engels (1854-1945) στη Γερμανία και τον Gilbert (1843-1918) στις ΗΠΑ. Σημαντική θεωρητική έρευνα παράχθηκε από τους Forchheimer (1852-1933) και Schoklitsch (1888-1969) στη Γερμανία. Ο τελευταίος (1914) ανέπτυξε μια σχέση για την κρίσιμη διατμητική τάση για την κίνηση ενός σωματιδίου ιζήματος. Από τις σημαντικότερες συνεισφορές στον κλάδο είχε ο Shields (1936), ο οποίος ανέπτυξε μια καμπύλη που εκφράζει την κρίσιμη διατμητική τάση για την έναρξη κίνησης του ιζήματος, σε συνάρτηση με το μέγεθός του. Η καμπύλη αυτή, που είναι ευρέως γνωστή με το όνομα «Shields», προσεγγίστηκε με σχέσεις από τον van Rijn (1984) και επεκτάθηκε στη συνέχεια με τα πειραματικά δεδομένα του Soulsby (1997).

Για τον υπολογισμό των στερεοπαροχών φορτίου πυθμένα και αιώρησης οι επικρατέστερες σχέσεις που χρησιμοποιούνται έως και σήμερα είναι αυτές των Bagnold και Leonteyev. Επίσης, οι Kalinske και Frijlink και οι Peter και Meyer ανέπτυξαν σχέσεις υπολογισμού της στερεοπαροχής φορτίου πυθμένα.

Όλοι οι παραπάνω ασχολήθηκαν κατά κύριο λόγο με την στερεομεταφορά μη συνεκτικών ιζημάτων, όπως οι άμμοι. Όσον αφορά στα συνεκτικά ιζήματα (άργιλοι, ιλύες) που αποτελούν και το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, σημαντική είναι η συνεισφορά του Partheniades και των Winterwerp και Van Kesteren. Οι ερευνητές αυτοί ασχολήθηκαν εκτεταμένα με τις φυσικοχημικές ιδιότητες των συνεκτικών ιζημάτων και την επιρροή τους στη στερεομεταφορά. Τα συνεκτικά ιζήματα καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας της γης (με μοναδική εξαίρεση τις ερήμους), είτε καθαρά είτε σε διάφορες περιεκτικότητες και επομένως κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η μελέτη τους στο φαινόμενο της στερεομεταφοράς.

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία που παρατίθενται παραπάνω, πληθώρα ερευνητών έχει ασχοληθεί με τη στερεομεταφορά των ιζημάτων, τους τελευταίους τρεις αιώνες. Στα πλαίσια των ερευνών αυτών έχουν αναπτυχθεί μοντέλα, τα οποία υπολογίζουν τη στερεοπαροχή για τα μη συνεκτικά ιζήματα. Τα αντίστοιχα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για τα συνεκτικά ιζήματα υπολογίζουν τους ρυθμούς διάβρωσης και απόθεσης και όχι τις στερεοπαροχές. Η κίνηση του συνεκτικού ιζήματος στα μοντέλα αυτά θεωρείται ότι ακολουθεί την εξίσωση μετάθεσης-διασποράς, θέτοντας κάποιους περιορισμούς στο μέγεθος της στερεομεταφοράς.

Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας επιχειρείται η επέκταση των μοντέλων υπολογισμού στερεοπαροχής των μη συνεκτικών ιζημάτων στα συνεκτικά. Σκοπός της επέκτασης αυτής είναι ο χρήστης ενός τέτοιου μοντέλου να είναι σε θέση να υπολογίζει τις ακριβείς τιμές της στερεοπαροχής στην ακτή που μελετά, υπό την επίδραση ενός σταθερού στο χρόνο πεδίου ταχυτήτων. Το μοντέλο αυτό επεκτείνεται στη

συνέχεια και για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής μεικτών ιζημάτων σε διάφορες περιεκτικότητες συνεκτικού ιζήματος.

1.2. Διάρθρωση μεταπτυχιακής εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία περιλαμβάνει εκτός από την Εισαγωγή (Κεφάλαιο 1^ο) πέντε ακόμα κεφάλαια.

Στο 2^ο Κεφάλαιο πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στα θεωρητικά στοιχεία που διέπουν τη στερεομεταφορά των μη συνεκτικών, των συνεκτικών και των μεικτών ιζημάτων. Αναφέρονται στοιχεία σχετικά με τη φύση των ιζημάτων, τους μηχανισμούς στερεομεταφοράς και τις βασικές τους ιδιότητες, όσον αφορά στο αντικείμενο της εργασίας.

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που διέπει την επίλυση ενός πεδίου ροής και τα αριθμητικά σχήματα που χρησιμοποιούνται σε αυτήν. Τα στοιχεία του πεδίου ροής εισάγονται ως δεδομένα στα μοντέλα υπολογισμού της στερεοπαροχής και είναι εξαιρετικά σημαντικά, καθώς επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ποιοτική και ποσοτική εξέλιξη του φαινομένου της στερεομεταφοράς.

Στο 4^ο Κεφάλαιο αρχικά παρουσιάζονται οι αριθμητικές σχέσεις που διέπουν το μοντέλο υπολογισμού στερεοπαροχής μη συνεκτικών ιζημάτων, το οποίο και χρησιμοποιείται ως αφετηρία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά σημεία που τροποποιήθηκαν, ώστε να προκύψουν τα μοντέλα υπολογισμού στερεοπαροχής για συνεκτικά και μεικτά ιζήματα. Τέλος παρουσιάζονται για λόγους βιβλιογραφικής πληρότητας οι βασικές παράμετροι που διέπουν ένα μοντέλο χρονικά εξαρτώμενης στερεομεταφοράς.

Στο 5^ο Κεφάλαιο αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά δεδομένα εισαγωγής των μοντέλων υπολογισμού της στερεοπαροχής. Αυτά αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δυο απλοποιημένων μοντέλων ακτών και τα χαρακτηριστικά του πεδίου ταχυτήτων. Στη συνέχεια υπολογίζονται για τα δυο μοντέλα ακτών οι στερεοπαροχές, οι συγκεντρώσεις του ιζήματος στο νερό, οι ταχύτητες καθίζησης και οι ανανεωμένες βαθυμετρίες. Τα παραπάνω αποτελέσματα υπολογίζονται επίσης στο μοντέλο ακτής χωρίς λιμενικό έργο για μεικτά ιζήματα με διαφορετικές περιεκτικότητες σε άργιλο. Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και σχολιάζονται στο τέλος του Κεφαλαίου.

Στο 6^ο Κεφάλαιο συνοψίζονται οι βασικές ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά συμπεράσματα. Ολοκληρώνοντας συνιστώνται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2. Θεωρητικά στοιχεία στερεομεταφοράς

2.1. Γενικά χαρακτηριστικά στερεομεταφοράς

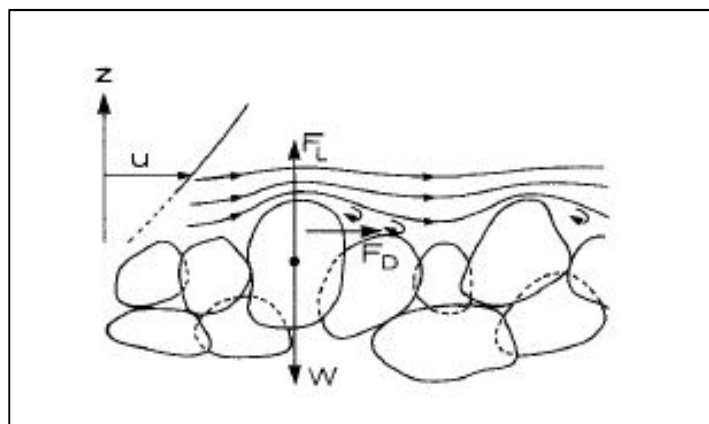
2.1.1. Μηχανισμοί στερεομεταφοράς

Η διάβρωση των ακτών προκαλείται από το φαινόμενο της παράκτιας μεταφοράς ιζήματος. Η δυναμική της κίνησης των κόκκων στο μηχανισμό της διάβρωσης είναι αρκετά δύσκολο να καθορισθεί, λόγω του μικρού μεγέθους τους και της αβεβαιότητας που υπάρχει γύρω από αυτούς (σχήμα, μέγεθος, κ.λπ.).

Η εκκίνηση του φαινομένου αυτού επηρεάζεται σημαντικά από τις εξής παραμέτρους:

- Ορθές και διατμητικές τάσεις που προκαλούνται από τη δυναμική της ροής του νερού στον πυθμένα.
- Το σύνολο των κόκκων που συνθέτουν τον πυθμένα και οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις κατά την επίδραση των διαβρωτικών δυνάμεων.
- Συγκρούσεις και δεσμοί συνοχής μεταξύ των κόκκων του ιζήματος του πυθμένα.
- Υδροδυναμική υποπίεση που προκαλείται λόγω της διήθησης του νερού στο σώμα του πυθμένα.
- Το φαινόμενο του wave run up στην ακτή.
- Την επίδραση των κυματογενών ρευμάτων στην ακτή.

Η κίνηση των κόκκων και κατ' επέκταση η έναρξη του φαινομένου της διάβρωσης είναι αποτέλεσμα της ισορροπίας δυνάμεων που προκαλούνται από τις παραπάνω επιδράσεις. Πέραν των παραπάνω δράσεων, στα σωματίδια των συνεκτικών ιζημάτων (άργιλοι και λύες) ασκούνται και μοριακές δυνάμεις. Αυτές καθιστούν δυσκολότερη την έναρξη της κίνησης του ιζήματος, ειδικά στην περίπτωση που το υλικό του πυθμένα έχει υποστεί υψηλό βαθμό στερεοποίησης. Τα συνεκτικά ιζήματα αποτελούν το βασικό αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και οι ιδιότητές τους θα αναλυθούν στη συνέχεια.



Σχήμα 2-1: Δυνάμεις που ασκούνται στον κόκκο (Πηγή: Fredsøe et al., 1993)

Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζονται σχηματικά οι επιδράσεις των φαινομένων που παρατέθηκαν παραπάνω στον εκάστοτε κόκκο ιζήματος. Με W συμβολίζεται το βάρος του σωματιδίου, με F_L οι ανωστικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτόν και με F_D οι δυνάμεις έλξης. Οι δυνάμεις αυτές παρουσιάζονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

Οι κυματικές επιδράσεις αποτελούν το βασικότερο παράγοντα ανάδευσης του ιζήματος, ενώ τα ρεύματα είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά του. Η τύρβη που προκαλείται από τη παράλληλη δράση των κυμάτων και των ρευμάτων συνεισφέρει, μαζί με τις τροχιακές ταχύτητες, στη κατακόρυφη διασπορά του υπό αιώρηση ιζήματος. Επομένως, ένα τμήμα της ενέργειας των κυματισμών καταναλώνεται από την ανάδευση του ιζήματος και την κατακόρυφη διάχυσή του. Στο Σχήμα 2-2 γίνεται εμφανές και οπτικά το φαινόμενο της μεταφοράς ιζήματος, σε μια ακτή στην Καλιφόρνια.



Σχήμα 2-2: Μεταφορά Ιζήματος σε ακτή στην Καλιφόρνια

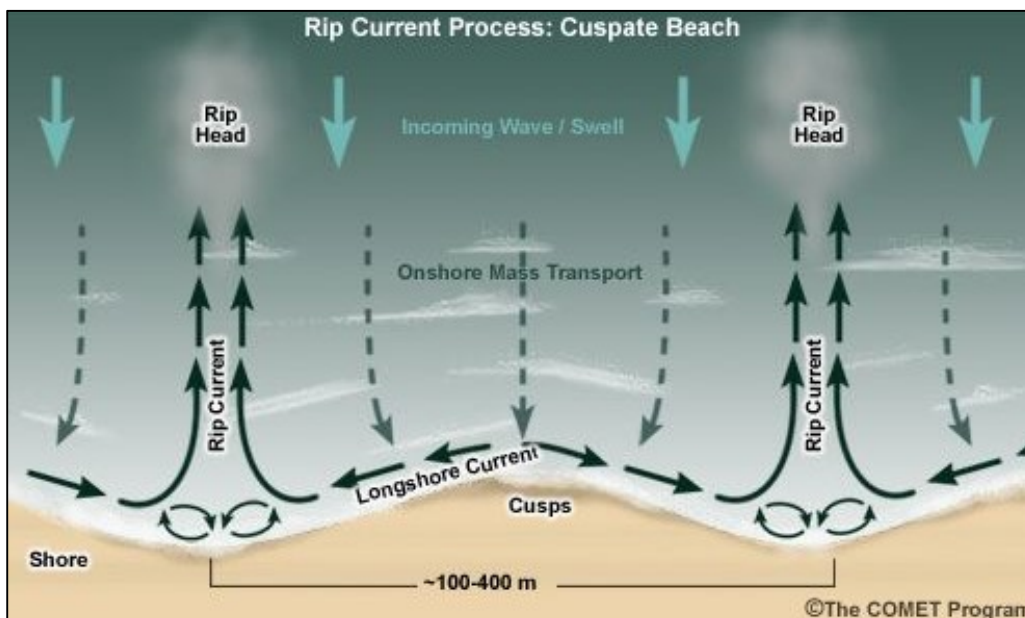
(Πηγή: <https://pubs.usgs.gov/sir/2007/5254/>)

Από υδροδυναμικής σκοπιάς οι βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς του ιζήματος μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- **Μεταφορά λόγω θραύσης κυματισμών στα ρηγά και παράκτιων κυματογενών ρευμάτων.** Στην παράκτια ζώνη όπου οι (θραυόμενοι και μη) κυματισμοί συνυπάρχουν

με το παράκτιο κυματογενές ρεύμα, η ροή κοντά στον πυθμένα αποσταθεροποιεί και θέτει σε κίνηση τους κόκκους των ιζημάτων. Αφού ξεκινήσει η κίνηση των κόκκων, αυτοί μεταφέρονται προς την κατεύθυνση των επιδρώντων ρευμάτων, σύμφωνα με τη μέση ταχύτητα ροής. Ο μηχανισμός αυτός ενδέχεται να μεταφέρει το ίζημα είτε προς την ακτή είτε προς τα ανοικτά, ανάλογα τη διεύθυνση πνοής.

- **Μεταφορά λόγω κυματικής ασυμμετρίας.** Λόγω της μη συμμετρίας των κυματισμών στα ρηχά η κίνηση των φερτών είναι και αυτή ασύμμετρη. Κάτω από την κορυφή του κύματος, όπου η ταχύτητα είναι μεγάλη και με κατεύθυνση προς την ακτή, πραγματοποιείται η μεγαλύτερη μεταφορά φερτών προς την ακτή. Κάτω από την κοιλιά, η ταχύτητα είναι μικρότερη και με φορά προς τα ανοιχτά και κατ' επέκταση η στερεομεταφορά πραγματοποιείται προς τα ανοιχτά. Σαν συνολικό αποτέλεσμα (μέσω ως προς την περίοδο του κύματος) έχουμε τη μεταφορά φερτών στη διεύθυνση μετάδοσης των κυματισμών (προς την ακτή).
- **Μεταφορά λόγω βαρύτητας.** Αποτελεί σημαντικότερη παράμετρο καθώς μεταφέρει το ίζημα προς την κλίση του βυθού δηλαδή προς τα ανοικτά. Παρόλα αυτά, σε προφίλ βυθού με λοφίσκους και εμπόδια, η βαρύτητα μπορεί να κινήσει το ίζημα προς τη κατεύθυνση της ακτής. Γενικά η βαρύτητα τείνει να εξομαλύνει τις όποιες ανωμαλίες ενδέχεται να προκύψουν στον πυθμένα.
- **Μεταφορά λόγω δευτερογενών κυματογενών ρευμάτων:**
 - ❖ Του ρεύματος επαναφοράς (undertow), με κατεύθυνση προς τα ανοιχτά.
 - ❖ Του ρεύματος κοντά στον πυθμένα, δηλαδή στο οριακό στρώμα του κυματισμού, με κατεύθυνση αυτήν της μετάδοσης του κυματισμού.



Σχήμα 2-3: Τυπική εικόνα παραγωγής ρευμάτων κοντά στην ακτή (Πηγή: http://www.cityoforangebeach.com/pages/know_your_beach/ripcurrents/near_shore_formation/print.htm)

Στο Σχήμα 2-3 απεικονίζεται μια τυπική εικόνα παραγωγής ρευμάτων στην παράκτια ζώνη. Αρχικά παρουσιάζεται η όδευση των κυματισμών από τα βαθιά στα ρηχά, η οποία προκαλεί κυματογενή ρεύματα παράλληλα στην ακτή (longshore currents). Στην περίπτωση που δυο ρεύματα παράλληλα στην ακτή έχουν αντίθετη κατεύθυνση, λόγω της γεωμετρίας της ακτής, τότε ενδέχεται να συγκρουστούν και να δημιουργήσουν τα λεγόμενα rip currents, τα οποία αποκτούν κατεύθυνση προς τα ανοικτά. Τα τελευταία είναι πολύ σημαντικά στο φαινόμενο της διάβρωσης των ακτών, καθώς μεταφέρουν ίζημα στα βαθιά, όπου και είναι αδύνατο αυτό να μεταφερθεί ξανά στην ακτή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μικρή ή και μηδαμινή επίδραση των κυματισμών στο βυθό, στα ανοικτά.

2.1.2. Μορφές στερεομεταφοράς

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται οι βασικές έννοιες της στερεομεταφοράς ιζημάτων. Είναι σχετικά συνήθης ο διαχωρισμός του μηχανισμού της στερεομεταφοράς ιζημάτων σε τρεις βασικές μορφές:

1. Μεταφορά φορτίου πυθμένα.
2. Μεταφορά φορτίου υπό αιώρηση.
3. Μεταφορά φορτίου υπό έκπλυση.

Το συνολικό φορτίο στερεομεταφοράς αποτελείται από το **φορτίο πυθμένα** και το **φορτίο υπό αιώρηση**. Παρόλο που δεν έχουν δοθεί ακριβείς ορισμοί για τις έννοιες αυτές, ο διαχωρισμός τους βασίζεται στους διαφορετικούς μηχανισμούς μεταφοράς που τους διέπουν.

Ως **φορτίο πυθμένα** ορίζεται το μέρος του συνολικού φορτίου που βρίσκεται σε συνεχή επαφή με τον πυθμένα καθ' όλη τη διάρκεια της στερεομεταφοράς. Ουσιαστικά περιλαμβάνει κόκκους οι οποίοι μεταφέρονται με περιστροφή, ολίσθηση ή και αναπήδηση, στην επιφάνεια του πυθμένα. Επομένως, το φορτίο πυθμένα, επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από την ασκούμενη διατμητική τάση στο βυθό, η οποία επιδρά απευθείας στην επιφάνεια του υλικού του.

Ως **φορτίο υπό αιώρηση** ορίζεται το μέρος του συνολικού φορτίου στερεομεταφοράς που μεταφέρεται χωρίς να βρίσκεται σε επαφή με τον πυθμένα. Η κίνησή του οφείλεται κατά κύριο λόγο στην επίδραση των ταχυτήτων που προκαλούνται στο σώμα του ρευστού.

Ως **φορτίο υπό έκπλυση** ορίζεται αυτό που αποτελείται από τα πολύ μικρά σωματίδια που μεταφέρονται με την κίνηση του νερού και περιέχονται στον πυθμένα. Η γνώση της σύστασης του πυθμένα δεν δύναται να παρέχει κάποια πληροφορία για την εκτίμησή του φορτίου υπό έκπλυση. Επομένως, στις διάφορες μεθόδους υπολογισμού του συνολικού φορτίου στερεομεταφοράς που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, το φορτίο αυτό αγνοείται.

2.1.3. Βασικές ιδιότητες ιζημάτων

Προέλευση και κοκκομετρικά χαρακτηριστικά

Οι φυσικές παραλίες αποτελούνται συνήθως από ανόργανα υλικά με φυσικές ιδιότητες που επηρεάζουν τις διεργασίες μεταφοράς του ιζήματος. Τα ιζήματα αυτά σχηματίζονται κυρίως από φυσικές ή/και χημικές διαβρώσεις των βραχωδών υλικών του φλοιού της γης. Ως προς τη σύστασή τους, τα κυριότερα ιζήματα αποτελούνται από χαλαζιακά και αργιλικά ορυκτά. Βασισμένα στη γενετική τους προέλευση μπορούν να ταξινομηθούν σε λιθογενή, βιογενή, υδρογενή (ή αυθιγενή) και κοσμογενή ιζήματα (Δασενάκης et al., 2015). Τα λιθογενή ιζήματα είναι αυτά που αποτελούνται κυρίως από χαλαζία (SiO_2), ενώ τα βιογενή προέρχονται από υπολείμματα σκληρού ιστού νεκρών οργανισμών. Τα υδρογενή (ή αυθιγενή) ιζήματα είναι αυτά που δημιουργούνται από τα διαλυμένα συστατικά του θαλασσινού νερού και τέλος τα κοσμογενή είναι αυτά που προέρχονται από το διάστημα. Πρόκειται δηλαδή για σώματα που συνελήφθησαν από το βαρυτικό πεδίο της γης και έφτασαν στη θάλασσα χωρίς να εξαερωθούν πλήρως στην ατμόσφαιρα της γης.

Το ίζημα της παράκτιας ζώνης αποτελείται από σωματίδια που ποικίλουν σε μεγέθη και ιδιότητες. Περιλαμβάνει από τα μεγαλύτερα σωματίδια όπως χάλικες και άμμοι μέχρι τα μικρότερα σωματίδια όπως ιλύες, άργιλοι και κολλοειδή.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο Πίνακας 2-1, της Αμερικανικής Γεωφυσικής Ένωσης (American Geophysical Union), ο οποίος απεικονίζει τη ταξινόμηση των ιζημάτων, συναρτήσει του κοκκομετρικού μεγέθους τους.

Πίνακας 2-1: Ταξινόμηση ιζημάτων συναρτήσει του κοκκομετρικού μεγέθους σύμφωνα με την Αμερικανική Γεωφυσική Ένωση (Πηγή: Van Rijn, 1993 - Κλωνάρης, 2016)

Κοκκομετρικό κλάσμα	Διάμετρος σε mm	Διάμετρος σε μm	Παράμετρος ϕ
Ογκόλιθοι (Boulders)	> 256		< -8
Κροκάλες (Cobbles)	256 - 64		-8 έως -6
Χάλικες (Gravel)	64 - 2		-6 έως -1
Πολύ χονδρόκοκκη άμμος (Very coarse sand)	2.0 – 1.0	2000 – 1000	-1 έως 0
Χονδρόκοκκη άμμος (Coarse sand)	1.0 – 0.5	1000 – 500	0 έως +1
Μεσόκοκκη άμμος (Medium sand)	0.5 – 0.25	500 - 250	+1 έως +2
Λεπτόκοκκη άμμος (Fine sand)	0.25 – 0.125	250 - 125	+2 έως +3
Πολύ λεπτόκοκκη άμμος (Very fine sand)	0.125 – 0.062	125 - 62	+3 έως +4
Χονδρόκοκκη ιλύς (Coarse silt)	0.062 – 0.031	62 - 31	+4 έως +5

Κοκκομετρικό κλάσμα	Διάμετρος σε mm	Διάμετρος σε μm	Παράμετρος φ
Μεσόκοκκη ιλύς (Medium silt)	0.031 – 0.016	31 - 16	+5 έως +6
Λεπτόκοκκη ιλύς (Fine silt)	0.016 – 0.008	16 - 8	+6 έως +7
Πολύ λεπτόκοκκη ιλύς (Very fine silt)	0.008 – 0.004	8 - 4	+7 έως +8
Χονδρόκοκκη άργιλος (Coarse clay)	0.004 – 0.0020	4 - 2	+8 έως +9
Μεσόκοκκη άργιλος (Medium clay)	0.0020 – 0.0010	2 - 1	+9 έως +10
Λεπτόκοκκη άργιλος (Fine clay)	0.0010 – 0.0005	1 – 0.5	+10 έως +11
Πολύ λεπτόκοκκη άργιλος (Very fine clay)	0.0005 – 0.00024	0.5 – 0.25	+11 έως +12
Κολλοειδή (Colloids)	< 0.00024	< 0.24	> +12

Η ταξινόμηση των ιζημάτων ανά μέγεθος κόκκου ορίζεται σε δυνάμεις των 2mm (\log_2), με τη χρήση της παραμέτρου φ:

$$\varphi = -\log_2 d \quad (0.2)$$

όπου d η διάμετρος του εκάστοτε σωματιδίου σε mm.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία θα μελετηθούν οι διαφορετικοί μηχανισμοί στερεομεταφοράς των συνεκτικών ιζημάτων (ιλύες και άργιλοι) συγκριτικά με τα μη συνεκτικά ιζήματα (άμμοι).

Ειδική πυκνότητα

Η ειδική πυκνότητα γ_s των κόκκων αποτελεί την παράμετρο που παρουσιάζει τη μικρότερη διαφοροποίηση σε φυσικές συνθήκες.

Ο λόγος

$$s = \frac{\gamma_s}{\gamma} \quad (0.3)$$

προσεγγίζει συνήθως τη τιμή 2.65 για φυσικά ιζήματα. Με γ συμβολίζεται η ειδική πυκνότητα του νερού σε θερμοκρασία 4° C.

Πορώδες

Ως πορώδες n_p ορίζεται ο λόγος του όγκου των κενών μιας εδαφικής στρώσης προς το συνολικό όγκο της. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$n_p = \frac{V_v}{V_{tot}} \quad (0.4)$$

όπου V_v είναι ο όγκος των κενών και V_{tot} ο συνολικός όγκος της εδαφικής στρώσης.

Το πορώδες συγγέεται κυρίως με το ιστορικό της απόθεσης του ιζήματος στον πυθμένα. Ιζήματα με τυχαία κατανομή κοκκομετρίας δύναται να έχουν πορώδες από 0.36-0.40. Τα φυσικά ιζήματα με διαφορετικές διαμέτρους κόκκων έχουν σχετικά μικρή τιμή πορώδους, καθώς τα κενά που δημιουργούνται από τα χονδρόκοκκα υλικά συμπληρώνονται από τα πιο λεπτόκοκκα. Μια όχι καλά διαβαθμισμένη άμμος μπορεί να έχει πορώδες 0.40 ενώ μια καλύτερα διαβαθμισμένη άμμος 0.45. Οι αποθέσεις συνεκτικών ιζημάτων που περιλαμβάνουν και άργιλο, ιλύ, άμμο και λοιπά οργανικά υλικά παρουσιάζουν ομαλή κοκκομετρική διαβάθμιση και δύναται να έχουν υψηλή τιμή πορώδους έως και 0.80.

2.2. Στερεομεταφορά μη συνεκτικών ιζημάτων

2.2.1. Φύση μη συνεκτικών ιζημάτων

Τα μη συνεκτικά ιζήματα προέρχονται κυρίως από τη μηχανική αποσάθρωση των βράχων, σε αντίθεση με τα συνεκτικά που προέρχονται από τη χημική αποσάθρωση των εδαφών. Τα μη συνεκτικά ιζήματα αφορούν σωματίδια που περιλαμβάνουν από τις άμμους (0.06mm έως 2mm) έως τους χάλικες (2 mm έως 20 mm).

Βασικό χαρακτηριστικό των κόκκων των μη συνεκτικών ιζημάτων είναι το σχήμα τους, που είναι γενικά σφαιροειδές. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη από την ελάχιστη διάσταση τους δεν διαφέρει σημαντικά. Ακόμα και στην περίπτωση των πεπλατυσμένων κόκκων ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη διάμετρο δεν υπερβαίνει την τιμή πέντε (5). Η επιφάνειά τους μπορεί να είναι είτε λεία (στην περίπτωση που έχει λειανθεί από διάφορους διαβρωτικούς παράγοντες) είτε γωνιώδης (στη περίπτωση πρόσφατα δημιουργημένων κλαστικών ιζημάτων). Τα παράκτια ιζήματα είναι στην πλειοψηφία τους λεία, καθώς η επίδραση των κυματισμών λειτουργεί ως διαβρωτικός παράγοντας.

Με βάση την ορυκτολογική και χημική τους σύσταση οι άμμοι μπορούν να διακριθούν στις εξής βασικές κατηγορίες:

1. Πυριτικές.
2. Ανθρακικές.
3. Γυψιτικές.

Οι πυριτικές άμμοι αποτελούνται κυρίως από χαλαζίες και αστρίους που είναι εξαιρετικά αδιάλυτοι στο νερό, σε αντίθεση με τις ανθρακικές άμμους που παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερο βαθμό διαλυτότητας. Βασικό συστατικό των ανθρακικών άμμων είναι το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) και προέρχονται από όστρακα όπως κοχύλια και κοράλλια. Όσον αφορά στις γυψιτικές άμμους, αυτές αποτελούνται από κρυσταλλικές μορφές γύψου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) που είναι μετρίως διαλυτά στο νερό ορυκτά.

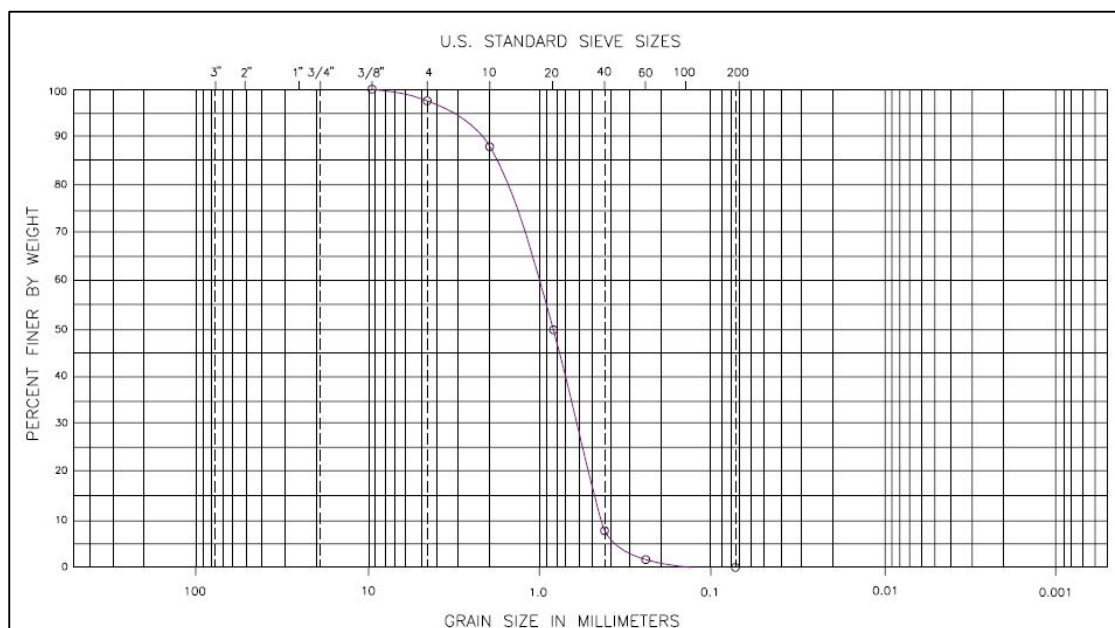
Από υδραυλικής άποψης, οι πιο σημαντικές ιδιότητες των ιζημάτων συνδέονται με το μέγεθος, το σχήμα και το ειδικό βάρος τους. Ο προσδιορισμός της κατανομής των μεγεθών

των κόκκων (κοκκομετρική διαβάθμιση) γίνεται για τους χάλικες και τις άμμους με τη λεγόμενη «κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα» για κόκκους διαμέτρου μεγαλύτερης των 0.06 mm.

Η ανάλυση με κόσκινα πραγματοποιείται με τη μηχανική δόνηση δείγματος του εδαφικού υλικού και διαμέσου σειράς κοσκίνων με βαθμιαία μείωση της διάστασης της οπής τους. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μέτρηση του βάρους του υλικού που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο. Τα πρότυπα μεγέθη (διαστάσεις οπής) των κοσκίνων ποικίλουν. Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κόσκινα που ακολουθούν τις Αμερικάνικες Προδιαγραφές ASTM D422-1980.

Η κατανομή του μεγέθους των κόκκων, όπως προκύπτει από την κοκκομετρική ανάλυση, παρουσιάζεται συνήθως σε διάγραμμα αθροιστικής συχνότητας εμφάνισης ως προς το μέγεθος του κόκκου (σε λογαριθμική κλίμακα). Από διαγράμματα αυτού του τύπου μπορούν να προσδιοριστούν ποσοτικά μεγέθη ιδιαίτερου ενδιαφέροντος όπως το εύρος των μεγεθών των διάφορων κόκκων ενός υλικού και το κατά βάρος ποσοστό του που είναι μικρότερο από κάποια διάμετρο. Επίσης, από αυτό το διάγραμμα υπολογίζονται η διάμετρος d_{10} (το μέγεθος του κόκκου από τον οποίο το 10% του υλικού έχει μικρότερο μέγεθος) και η διάμετρος d_{60} (το μέγεθος του κόκκου από τον οποίο το 60% του υλικού έχει μικρότερο μέγεθος). Κυριότερα μπορεί να υπολογιστεί μέση διάμετρος σωματιδίου d_{50} , η οποία αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του ιζήματος και χρησιμοποιείται ως βασική ιδιότητα του ιζήματος στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

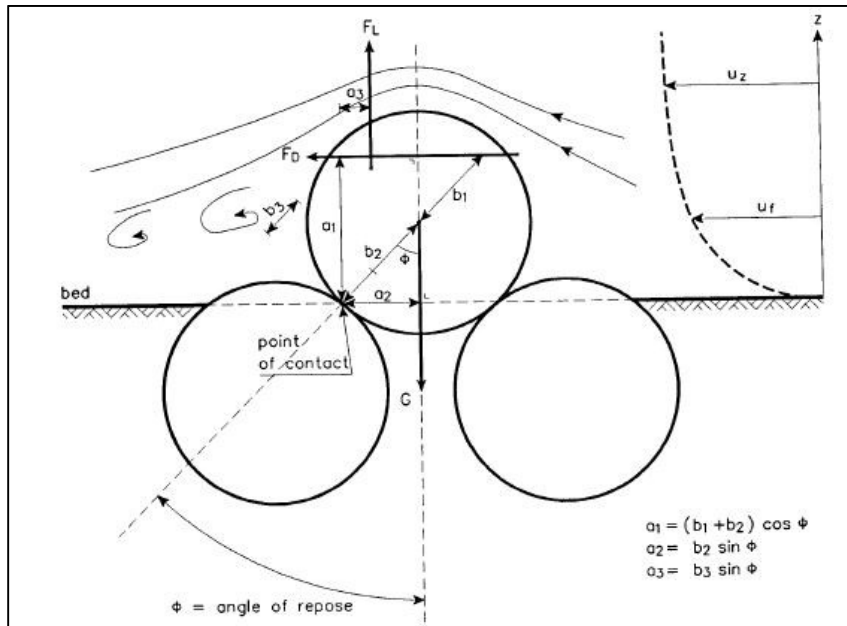
Παράδειγμα ενός τέτοιου διαγράμματος παρατίθεται με το Σχήμα 2-4, όπου παρουσιάζεται η κοκκομετρική ανάλυση του ιζήματος μιας παραλίας στη Βιρτζίνια των Η.Π.Α, σύμφωνα με τις Αμερικάνικες Προδιαγραφές.



Σχήμα 2-4: Κοκκομετρική διαβάθμιση της παραλίας της Βιρτζίνια (Πηγή: CEM, 2002)

2.2.2. Κατώφλι κίνησης

Η κίνηση του ιζήματος προκαλείται όταν η δύναμη που ασκείται στον κόκκο από την ροή του νερού υπερβαίνει την συνισταμένη της δύναμης του ίδιου βάρους του σωματιδίου και της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ αυτού και των γειτονικών του (Σχήμα 2-5). Οι δυνάμεις που την προκαλούν συνδέονται κυρίως με τις ταχύτητες ροής που αναπτύσσονται κοντά στον πυθμένα. Παρόλα αυτά, η διακύμανση της τύρβης και οι διαφορές του μεγέθους, του σχήματος και της θέσης των ιζημάτων καθιστούν τη κίνηση του σωματιδίου ένα τυχηματικό φαινόμενο.



Σχήμα 2-5: Ισορροπία δυνάμεων κατά την έναρξη της κίνησης

(Πηγή: van Rijn, 1993)

Ο πρώτος που ασχολήθηκε με την έναρξη της κίνησης του ιζήματος ήταν ο Brahms (1753), ο οποίος πρότεινε μια σχέση που συμπεριλάμβανε τη ροή και το απαιτούμενο βάρος μιας πέτρας ώστε αυτή να παραμείνει σταθερή. Στη συνέχεια, ο Dubuat εισήγαγε την έννοια της κρίσιμης διατμητικής τάσης πυθμένα.

Ακολούθως, οι Sternberg (1875) και Hjulström (1935) παρήγαγαν κάποιες ευρέως διαδεδομένες έως και σήμερα σχέσεις που συμπεριλάμβαναν την κρίσιμη (μέση κατά βάθος) ταχύτητα ρεύματος και τη διάμετρο του σωματιδίου.

Πιο πρόσφατα οι van Rijn (1984a,b,c) και Soulsby (1997) επίσης πρότειναν σχέσεις με την κρίσιμη (μέση κατά βάθος) ταχύτητα ρεύματος, η οποία βασιζόταν στην έννοια της κρίσιμης διατμητικής τάσης στον πυθμένα.

Η κρίσιμη διατμητική τάση του πυθμένα παρέχει μια ακριβή μέτρηση του κατωφλίου της κίνησης του ιζήματος. Η θεώρηση αυτή βασίζεται στην παράμετρο κινητικότητας του

Shields, σύμφωνα με την οποία η κρίσιμη τιμή για την έναρξη της κίνησης ενός σωματιδίου με διάμετρο d δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{b,cr}}{g(\rho_s - \rho)d} \quad (0.5)$$

όπου η $\tau_{b,cr}$ είναι η κρίσιμη διατμητική τάση για την κίνηση του ιζήματος και ρ_s και ρ οι πυκνότητες του υλικού του πυθμένα και του νερού αντίστοιχα.

Η κρίσιμη παράμετρος κινητικότητας εξαρτάται από τις υδραυλικές συνθήκες κοντά στον πυθμένα, το σχήμα και το μέγεθος του σωματιδίου και από τη θέση του σε σχέση με τα λοιπά σωματίδια.

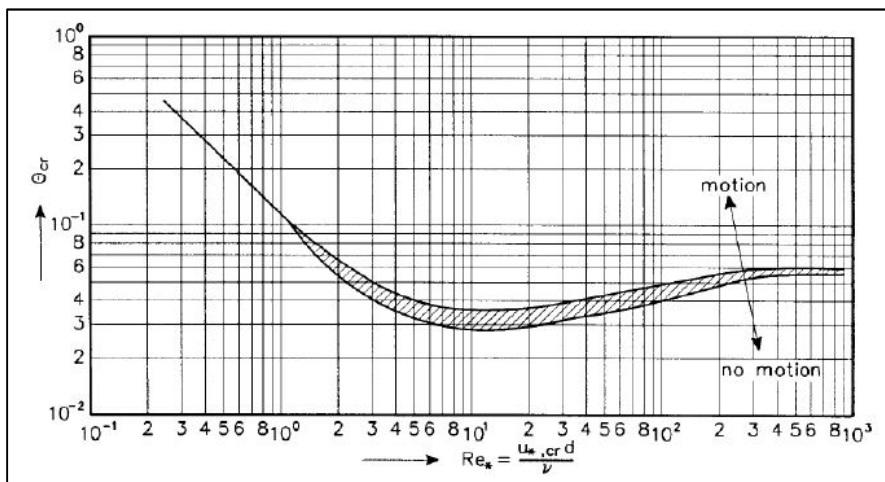
Οι υδραυλικές συνθήκες πλησίον του πυθμένα εκφράζονται από τον αριθμό Reynolds:

$$Re_* = \frac{u_{*,cr}d}{\nu} \quad (0.6)$$

όπου ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα και $u_{*,cr}$ είναι η κρίσιμη ταχύτητα τριβής του πυθμένα που ορίζεται ως εξής:

$$u_{*,cr} = \sqrt{\tau_{b,cr}/\rho} \quad (0.7)$$

Ο Shields (1936) πραγματοποίησε πειράματα σε πυθμένα χωρίς κλίση και παρουσίασε γραφικά την εξάρτηση της θ_{cr} από τον αριθμό Reynolds του κόκκου (Re_*), για σταθερή επίδραση ρεύματος. Το αποτέλεσμα των πειραμάτων απεικονίζεται στο Σχήμα 2-6:



Σχήμα 2-6: Έναρξη κίνησης σε πυθμένα χωρίς κλίση $\theta_{cr}=f(Re_*)$

(Πηγή: Van Rijn, 1993 και Shields, 1936)

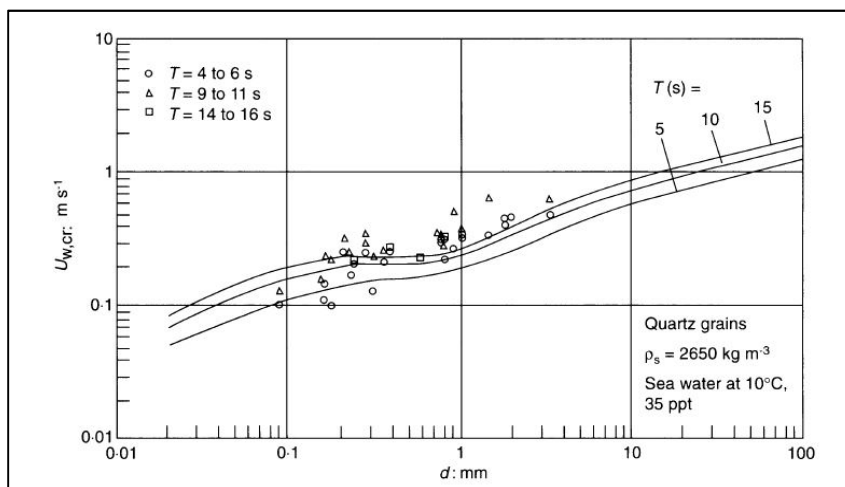
Το Σχήμα 2-6 ουσιαστικά απεικονίζει την κρίσιμη διατμητική τάση στον πυθμένα ($\tau_{b,cr}$) ως συνάρτηση της διαμέτρου του σωματιδίου για θερμοκρασίες νερού ίσες με 10° , 20° και

30°C. Η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά σωματίδια με διαμέτρους μικρότερες των 600 μm . Για σωματίδια με διαμέτρους μεγαλύτερες των 7000 μm (7mm), η κρίσιμη διατμητική τάση στον πυθμένα ($\tau_{b,cr}$) είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας (και κατ επέκταση του ιζήδους του νερού).

Ο van Rijn χρησιμοποίησε τη μέση διάμετρο σωματιδίου d_{50} ως χαρακτηριστική ιδιότητα του ιζήματος και εξέφρασε τη καμπύλη του Shields για τον υπολογισμό της κρίσιμης παραμέτρου ως εξής:

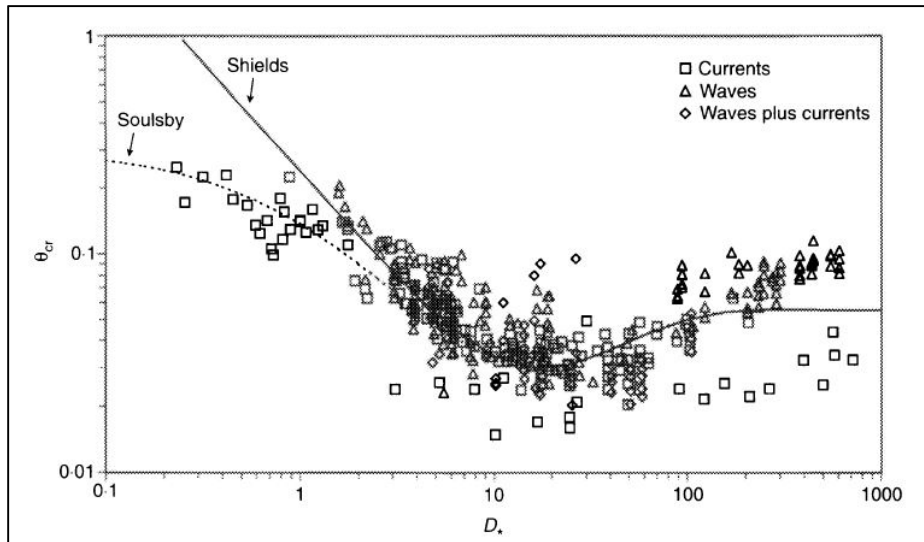
$$\theta_{cr} = \begin{cases} 0.24d_*^{-1} & \text{για } 1 < d_* \leq 4 \\ 0.14d_*^{-0.64} & \text{για } 4 < d_* \leq 10 \\ 0.04d_*^{-0.1} & \text{για } 10 < d_* \leq 20 \\ 0.013d_*^{0.29} & \text{για } 20 < d_* \leq 150 \\ 0.055 & \text{για } d_* > 150 \end{cases} \quad (0.8)$$

Ποικίλες σχέσεις καταρτίστηκαν μετέπειτα για την έναρξη της κίνησης του ιζήματος υπό την επίδραση των κυματισμών, αλλά καμία από αυτές δε χρήζει γενικής αποδοχής (Bagnold, 1947; Manohar, 1955; Vincent, 1957; Goddet, 1960; Eagleson και Dean, 1961; Ishihara και Sawaragi, 1962; Bonnefille και Pernecker, 1965; Carstens et al., 1967; Rance και Warren, 1968). Η σχέση που αναπτύχθηκε από τους Komar και Miller (1975) είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη και λαμβάνει υπόψη της την κρίσιμη τροχιακή ταχύτητα. Η αρχική έρευνα του Shields (1936) λάμβανε υπόψη της την επίδραση σταθερών και μονής διεύθυνσης ρευμάτων. Παρόλα αυτά αποδείχθηκε ότι μπορεί να επεκταθεί και για την επίδραση κυματισμών ή συνδυασμού ρευμάτων και κυματισμών (van Rijn, 1993; Soulsby, 1997; Soulsby και Whitehouse, 1997). Το διάγραμμα των Soulsby και Whitehouse (1997) για την έναρξη της κίνησης του ιζήματος υπό την επιρροή των κυματισμών απεικονίζεται στο Σχήμα 2-7.



Σχήμα 2-7: Οριακή ταχύτητα για την έναρξη κίνησης ιζήματος $u_{w,cr}$ υπό την επίδραση κυματισμών (Πηγή: Soulsby, 1997)

Σε αυτό απεικονίζεται η οριακή ταχύτητα ροής στον πυθμένα υπό την επίδραση κυματισμών, για την έναρξη της κίνησης του ιζήματος. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το διάγραμμα αυτό επεκτάθηκε και για την επίδραση ρευμάτων και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-8.



Σχήμα 2-8: Οριακή τιμή της παραμέτρου κινητικότητας, θ_{cr} για την έναρξη κίνησης ιζήματος υπό την επίδραση κυματισμών ή/και ρευμάτων (Πηγή: Soulsby, 1997)

Όπως φαίνεται, στο διάγραμμα αυτό προβάλλεται η καμπύλη του Shields (1936) και η επέκτασή της με βάση τα πειραματικά δεδομένα του Soulsby (1997), για την επίδραση κυμάτων, ρευμάτων και για συνδυασμό κυμάτων και ρευμάτων. Απεικονίζει την οριακή τιμή της παραμέτρου κινητικότητας του Shields θ_{cr} , συναρτήσει της αδιάστατης διαμέτρου d_* , η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$d_* = \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} d \quad (0.9)$$

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, v είναι η κινηματική συνεκτικότητα του νερού, d η μέση διάμετρος των κόκκων και s ο λόγος των πυκνοτήτων του ιζήματος προς αυτήν του νερού.

Όπως διατυπώθηκε και στη συνέχεια (Fredsoe και Deigaard, 1992; van Rijn, 1993; Soulsby, 1997) η κρίσιμη παράμετρος Shields εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι το σχήμα, η κοκκομετρική διαβάθμιση και το μέγεθος. Άλλοι παράμετροι που την επηρεάζουν είναι η ύπαρξη συνεκτικού ιζήματος, η γεωμετρία και η φύση του πυθμένα.

2.2.3. Σχηματισμοί πυθμένα

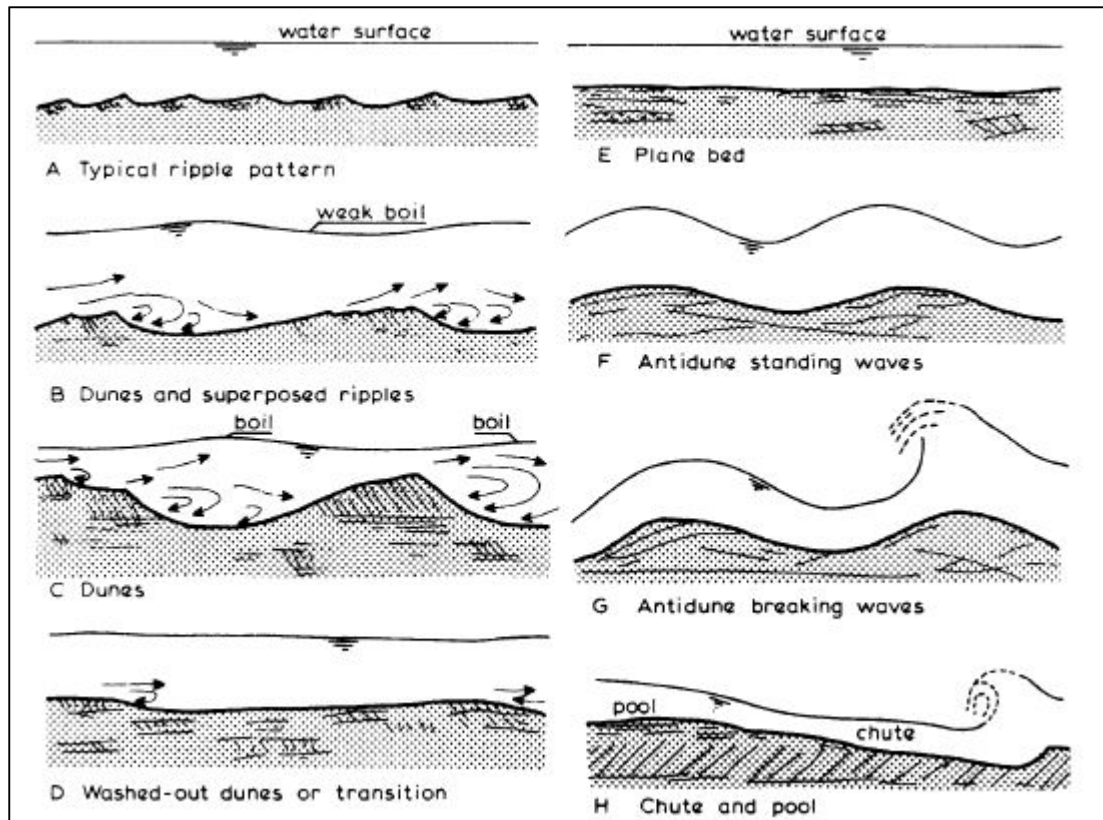
Στους πυθμένες ασκούνται διαβρωτικές επιδράσεις από διάφορους παράγοντες (π.χ. κυματισμοί, ρεύματα κ.λπ.) και κατ'επέκταση προκαλούνται διάφοροι σχηματισμοί. Όταν οι δυνάμεις που ασκούνται στο ίζημα ξεπεράσουν το κατώφλι κίνησης, τότε η μορφολογία του πυθμένα αποσταθεροποιείται. Σε πυθμένες από λεπτόκοκκο ίζημα σχηματίζονται κυρίως μικρά κυμάτια, ενώ στην περίπτωση περισσότερο χονδρόκοκκου ιζήματος σχηματίζονται μικρές θίνες (λοφίσκοι).

Τα κυμάτια (ripples) είναι μικροί τριγωνικοί σχηματισμοί, που δεν υπερβαίνουν σε διαστάσεις τα 60 mm ύψος και τα 0.6 m μήκος. Το μήκος του εκάστοτε αμμοκυματίου εξαρτάται από το μέγεθος του ιζήματος και είναι ανεξάρτητο του βάθους της θάλασσας. Στην περίπτωση που οι υδραυλικές συνθήκες της ροής είναι ομαλές, σχηματίζεται κάτω από την επιφάνεια του αμμοκυματίου ένα παχύρρευστο υπόστρωμα. Ο Bagnold (1946) όρισε δύο είδη κυματίων. Τα δισδιάστατα κυμάτια που οφείλονται στην κύλιση των κόκκων του ιζήματος και τα τρισδιάστατα που οφείλονται στις τυρβώδεις κινήσεις. Τα πρώτα σχηματίζονται σε χαμηλές τιμές της παραμέτρου Shields, δηλαδή λίγο μικρότερες από την κρίσιμη τιμή της, ενώ τα δεύτερα για μεγαλύτερες τιμές της. Οι στρόβιλοι που σχηματίζονται στην τελευταία περίπτωση μεταφέρουν σημαντικό όγκο ιζήματος, αυξάνοντας έτσι την υπό αιώρηση ποσότητά του.

Οι θίνες (dunes) από την άλλη σχηματίζονται σε περισσότερο τραχείς βυθούς. Αποτελούν μεγάλους, ακανόνιστης μορφής σχηματισμούς που διαμορφώνονται κατά κύριο λόγο σε φυσικούς χείμαρρους. Το προφίλ τους είναι έντονα τριγωνικό, με την ανάντη της ροής επιφάνειά τους να είναι ηπίως καμπύλη. Η κατάντη επιφάνειά τους διαθέτει κλίση περίπου ίση με την εσωτερική γωνία τριβής του ιζήματος σε υδατικό περιβάλλον. Στην κορυφή της θίνας πραγματοποιείται αποκόλληση της ροής, η οποία επανασυνδέεται στη βάση της. Στο πάνω τμήμα της δημιουργείται τύρβη, η οποία μετακινεί το ίζημα από την κορυφή της θίνας στη βάση της, ακόμα και αν η τιμή της ασκούμενης διατμητικής τάσης είναι μικρότερη της κρίσιμης (Raudkivi, 1963).

Σε περίπτωση που η ροή είναι μεγάλης ισχύος οι θίνες τείνουν να απαλειφθούν, γεγονός το οποίο συνεπάγεται σημαντική μείωση τόσο της υδραυλικής αντίστασης όσο και του βάθους του νερού. Εάν η ισχύς της ροής βρίσκεται σε πολύ υψηλά επίπεδα, τότε σχηματίζονται οι λεγόμενες αντιθίνες (antidunes). Η μορφή τους ομοιάζει με το σχήμα μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης.

Στο Σχήμα 2-9 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι βασικές μορφές των σχηματισμών πυθμένα, που οφείλονται στις επιδράσεις ρευμάτων και κυμάτων, όπως αυτές διατυπώθηκαν από τους Simons και Richardson (1966).



Σχήμα 2-9: Σχηματισμοί πυθμένα (Πηγή: Simons και Richardson, 1966 & Van Rijn, 1993)

Στην περίπτωση που η ροή οφείλεται αποκλειστικά στη δράση των κυματισμών, οι σχηματισμοί του πυθμένα είναι διαφορετικοί από αυτούς που σχηματίζονται σε μονοδιάστατες ροές. Για κυματισμούς μικρής περιόδου, ο όγκος του ιζήματος που μεταφέρεται παλινδρομικά είναι μικρός συγκριτικά με τον όγκο της άμμου, που περιέχεται σε ένα αμμοκυμάτιο. Επομένως, το σχήμα του πυθμένα μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά σταθερό, με μικρές διακυμάνσεις στην περίοδο του κύματος. Αυτό δε συμβαίνει στην περίπτωση της επίδρασης μακρών κυματισμών ή της ύπαρξης πολύ λεπτόκοκκου ιζήματος στον πυθμένα.

Από τη θραύση των κυματισμών στα ρηχά δημιουργούνται παράλληλοι στην ακτή και διαμήκεις σχηματισμοί, οι οποίοι εμφανίζονται κυρίως στη ζώνη θραύσης. Οι βασικοί μηχανισμοί που προκαλούν την εμφάνισή τους είναι η επίδραση των ταχυτήτων με κατεύθυνση προς την ακτή και η αναστροφή της ταχύτητας ροής στον πυθμένα (undertow) στη ζώνη θραύσης. Όταν οι ακτές αποτελούνται από λεπτόκοκκο υλικό (0.2-0.3 mm) δημιουργούνται δυο ή περισσότεροι παράλληλοι σχηματισμοί. Αντιθέτως, στις ακτές από χονδρόκοκκο ίζημα (>0.5 mm) δεν δημιουργούνται καθόλου τέτοιοι σχηματισμοί. Η μορφή τους επηρεάζεται σημαντικά από την αλληλεπίδραση των κυματισμών με το βουβό κύμα (swell).

Για συνδυασμένα κύματα και ρεύματα δημιουργούνται ποικίλοι λοιποί σχηματισμοί (συμμετρικά και ασύμμετρα κυμάτια, αύλακες, λοφίσκοι κ.λπ.), το σχήμα των οποίων εξαρτάται από τη σχετική ισχύ των κυματισμών και των ρευμάτων.

2.2.4. Ίζημα υπό αιώρηση

Όταν η τιμή της διατμητικής τάσης που ασκείται στον πυθμένα υπερβεί τη κρίσιμη τιμή για την έναρξη της κίνησης του ιζήματος, τότε τα σωματίδια αρχίζουν να κινούνται σε επαφή με τον πυθμένα. Για μεγαλύτερες τιμές της διατμητικής τάσης και κατ' επέκταση της ταχύτητας του νερού κοντά στον πυθμένα, τα σωματίδια αρχίζουν να κινούνται με άλματα. Στην περίπτωση που η τιμή της ταχύτητας υπερβεί την αντίστοιχη της ταχύτητας καθίζησης του ιζήματος, τα σωματίδια αρχίζουν να μεταφέρονται σε υψηλότερα επίπεδα, στα οποία οι τυρβώδεις επιδράσεις είναι συγκρίσιμες ή και μεγαλύτερες από το βάρος του σωματιδίου. Η διαμήκης ταχύτητα του σωματιδίου σχεδόν ισούται με την αντίστοιχη ταχύτητα ροής του νερού.

Το κριτήριο για την αιώρηση του ιζήματος είναι το εξής:

$$u_{*s} \geq w_s \quad (0.10)$$

όπου u_{*s} είναι η ταχύτητα τριβής του πυθμένα (skin-friction velocity) και w_s είναι η ταχύτητα καθίζησης του κόκκου του ιζήματος.

Ταχύτητα καθίζησης (πτώσης)

Η ταχύτητα καθίζησης/πτώσης (settling/fall/terminal velocity) των κόκκων άμμου εξαρτάται κυρίως από τη διάμετρό τους, αλλά και από την πυκνότητα και το ιξώδες του νερού. Στις πιο λεπτόκοκκες άμμους ($d=62 \mu\text{m}$) οι κόκκοι «καθιζάνουν» σύμφωνα με το νόμο του Stokes (1851). Σύμφωνα με το νόμο αυτό, για σχετικά μικρές ταχύτητες, η δύναμη της τριβής που δυσχεραίνει την κίνηση του σώματος εξαρτάται από το σχήμα τους, τη ταχύτητα κίνησής και το ιξώδες του υγρού μέσου. Όσον αφορά στις πιο χονδρόκοκκες άμμους ($d=2 \text{mm}$), καθιζάνουν περισσότερο ως σφαιρικά ογκώδη σώματα (bluff bodies). Τα ενδιάμεσα μεγέθη «καθιζάνουν» ακολουθώντας μια ενδιάμεση κατάσταση.

Υπάρχουν αρκετές σχέσεις που υπολογίζουν τη ταχύτητα καθίζησης (πτώσης) μεμονωμένων σωματιδίων σε ακίνητα νερά. Μερικές από αυτές χρησιμοποιούν την αδιάστατη διάμετρο κόκκου d^* .

Υποθέτοντας την αιώρηση ενός σφαιρικού σωματιδίου διαμέτρου d , η ταχύτητα καθίζησης για μια κατάσταση ισορροπίας των δυνάμεων τριβής του υγρού με τις βαρυτικές δυνάμεις που ασκούνται στο σωματίδιο προκύπτει ως εξής:

$$w_s = \sqrt{\frac{4(s-1)gd}{3C_D}} \quad (0.11)$$

όπου C_D είναι ο συντελεστής αντίστασης σώματος (drag coefficient), που είναι σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds, ο οποίος προκύπτει από τη σχέση:

$$Re = \frac{w_s d}{\nu} \quad (0.12)$$

Για χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds ($Re < 1$) μπορεί να εφαρμοστεί ο νόμος του Stokes (1851). Ο συντελεστής αντίστασης σώματος υπολογίζεται από τον τύπο $C_D = \frac{24}{Re}$ δίνοντας για την ταχύτητα καθίζησης:

$$w_s = \frac{(s-1)gd^2}{18\nu} \quad (0.13)$$

Εκτός του πεδίου εφαρμογής του νόμου του Stokes δε δύναται να εφαρμοστεί η απλή σχέση για τον συντελεστή αντίστασης σώματος. Η τιμή του μειώνεται συνεχώς και γίνεται πρακτικά σταθερή για $10^3 < Re < 10^5$. Για σφαιρικά σωματίδια λαμβάνει την τιμή 0.39 ενώ για φυσικά σωματίδια που συναντώνται στη φύση λαμβάνει τιμές από 1 έως 1.3.

Πολλές ημι-εμπειρικές σχέσεις έχουν αναπτυχθεί για να υπολογίσουν την ταχύτητα πτώσης (Hallermeier, 1981; van Rijn, 1993; Κουτίτας, 1994; Julien, 1995; Cheng, 1997; Ahrens, 2000; Kamphuis, 2000; Guo, 2002; Jimenez and Madsen, 2003; Camenen, 2007). Ο Soulsby (1997) πρότεινε την απλή σχέση:

$$w_s = \frac{\nu}{d_{50}} \left[\sqrt{10.36^2 + 1.049d_*^3} - 10.36 \right] \quad (0.14)$$

Εάν η συγκέντρωση του υπό αιώρηση ιζήματος αυξηθεί, η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων μειώνεται λόγω της ροής που προκαλείται από τα γειτονικά σωματίδια. Βασιζόμενοι σε πειραματικά δεδομένα οι Richardson και Zaki (1954) συμπεριέλαβαν την επιρροή της υψηλής συγκέντρωσης στην εκτίμηση της ταχύτητας καθίζησης.

Στη συνέχεια ο Soulsby (1997) τροποποίησε την δική του σχέση ώστε να συμπεριλαμβάνει την επιρροή της συγκέντρωσης, c .

$$w_s = \frac{\nu}{d_{50}} \left[\sqrt{10.36^2 + 1.049(1-c)^{4.7} d_*^3} - 10.36 \right] \quad (0.15)$$

Άλλοι παράμετροι που επηρεάζουν την ταχύτητα καθίζησης είναι το σχήμα των κόκκων και η θερμοκρασία του νερού. Η επιρροή της θερμοκρασίας του νερού εκφράζεται μέσω της κινηματικής συνεκτικότητας.

Συγκέντρωση ιζήματος

Η συμπεριφορά του υπό αιώρηση ιζήματος περιγράφεται επίσης σε όρους συγκέντρωσης, η οποία εκφράζει τον όγκο του στερεού (m^3) ανά μονάδα όγκου του υγρού μέσου (m^3) ή τη μάζα του στερεού (kg) ανά μονάδα όγκου του υγρού μέσου (m^3).

Από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί έχει προκύψει ότι οι συγκεντρώσεις του υπό αιώρηση φορτίου μειώνονται όσο αυξάνεται η απόσταση από τον πυθμένα. Ο ρυθμός μείωσης εξαρτάται από το λόγο της ταχύτητας καθίζησης προς τη διατμητική ταχύτητα του πυθμένα (w_s/u^*). Η ολοκληρωμένη κατά βάθος στερεομεταφορά του υπό αιώρηση φορτίου ($q_{s,c}$) ορίζεται ως το ολοκλήρωμα του γινομένου της ταχύτητας (u) με την συγκέντρωση (c), από το οριακό στρώμα ($z=a$) έως την επιφάνεια του νερού ($z=h$).

$$q_{s,c} = \int_a^h u c \, dz \quad (0.16)$$

όπου $q_{s,c}$ η υπό αιώρηση στερεοπαροχή (m^2/s), u η ταχύτητα ροής του νερού σε ύψος z από τον πυθμένα και c η συγκέντρωση του ιζήματος σε ύψος z από τον πυθμένα.

Σε κάποιες περιπτώσεις, η στερεομεταφορά του υπό αιώρηση φορτίου δίνεται ως μια μέση ογκομετρική συγκέντρωση, η οποία ορίζεται από τον λόγο του υπό αιώρηση ιζήματος στερεοπαροχής προς την παροχή της ροής:

$$c_{mean} = \frac{q_{s,c}}{q} \quad (0.17)$$

Για πολύ λεπτόκοκκα ιζήματα, η μέση συγκέντρωση (c_{mean}) είναι περίπου ίση με τη μέση κατά βάθος συγκέντρωση \bar{c} .

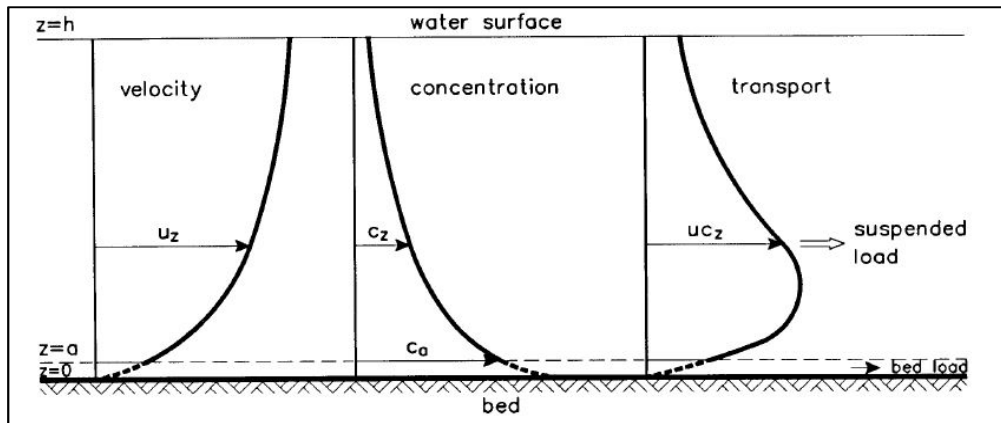
Η συγκέντρωση, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μπορεί επίσης να εκφραστεί ως κατά βάρος συγκέντρωση (c_g) σε kg/m^3 ή ως κατ' όγκο συγκέντρωση (c_v) σε m^3/m^3 . Η τελευταία μπορεί επίσης να εκφραστεί ως ποσοστό όγκου εάν πολλαπλασιαστεί με 100%. Οι παραπάνω μεταξύ τους συνδέονται με τη σχέση:

$$c_g = \rho_s \cdot c_v \quad (0.18)$$

όπου ρ_s είναι η πυκνότητα του ιζήματος.

Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί πολλά αναλυτικά μοντέλα που περιγράφουν την κατανομή της συγκέντρωσης του ιζήματος ως προς το βάθος. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χωριστούν σε:

- Μοντέλα διάχυσης
- Μοντέλα ενέργειας (Bogardi, 1974)
- Στοχαστικά μοντέλα (Ashida-Fujita, 1986).



Σχήμα 2-10: Κατανομή κατά βάθος ταχύτητας, συγκέντρωσης και υπό αιώρηση φορτίου
(Πηγή: Van Rijn, 1993)

Στο Σχήμα 2-10 παρουσιάζεται η κατανομή των ταχυτήτων ροής, των συγκεντρώσεων ιζήματος και του υπό αιώρηση φορτίου, που εκφράζεται ως το γινόμενο τους. Παρατηρείται ότι οι ταχύτητες και οι συγκεντρώσεις ακολουθούν παραβολική και ασυμπτωτική κατανομή αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση οι ταχύτητες ροής αυξάνουν προς την ελεύθερη επιφάνεια του νερού ενώ οι συγκεντρώσεις αυξάνουν προς τον πυθμένα.

2.3. Στερομεταφορά συνεκτικών ιζημάτων

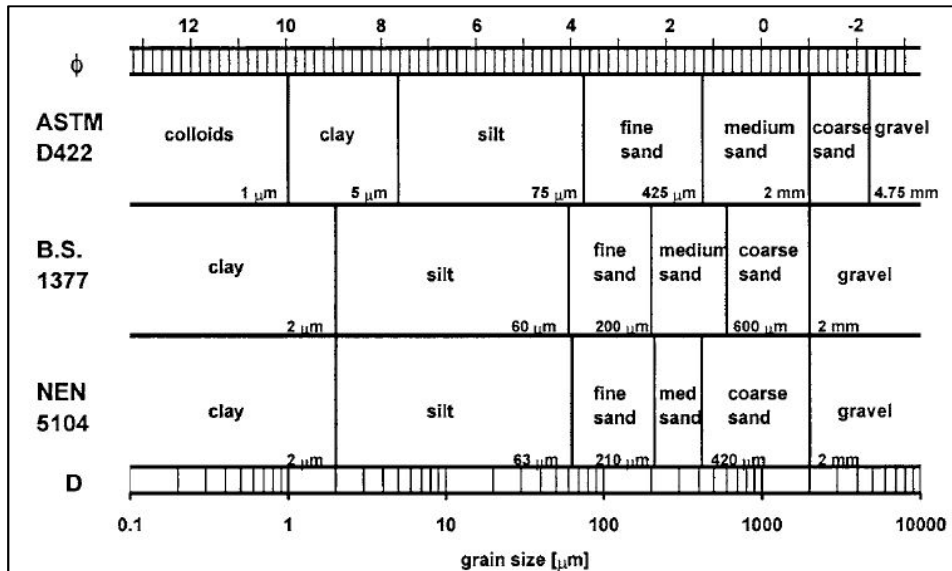
Ο όρος συνεκτικό ίζημα σχετίζεται συνήθως με τα κολλώδη και λασπώδη ιζήματα και δηλώνει την εύπλαστη συμπεριφορά τους. Όλα τα συνεκτικά ιζήματα αποτελούνται από κοκκώδη οργανικά ή και μεταλλικά στερεά σε μια υδαρή φάση. Στη πλειοψηφία των περιπτώσεων το υγρό που περιλαμβάνουν είναι το νερό, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να περιλαμβάνουν και μη υδατικά υγρά. Η συνεκτική συμπεριφορά του ιζήματος εξαρτάται είτε από τη φύση του στερεού είτε από τη χρονική κλίμακα της ροής της υγρής φάσης.

2.3.1. Φύση συνεκτικών ιζημάτων

Εξ ορισμού, το συνεκτικό ίζημα (ή λάσπη - "mud" - όπως συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία) αποτελείται από μια μίξη αργίλου, ιλύος, πολύ λεπτόκοκκης άμμου, οργανικών υλικών, νερού και κάποιες φορές αερίων. Η σύστασή του και κατ'επέκταση η συμπεριφορά του διαφέρει στο χρόνο και στο χώρο και διέπεται από τη διαθεσιμότητα του ιζήματος και των συστατικών του, τις μετεωρολογικές - υδροδυναμικές συνθήκες, τις βιολογικές διεργασίες, το ιστορικό των επιδράσεων στον πυθμένα (π.χ. δράσεις στερεοποίησης) κ.λπ. Τα αργιλικά σωματίδια και τα οργανικά υλικά με τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες κατά την υγρή φάση καθορίζουν τη συνεκτική συμπεριφορά του ιζήματος.

Μέγεθος σωματιδίων

Όπως αναφέρθηκε και στην §2.1.3, η στερεή φάση του υλικού του πυθμένα καθορίζεται από την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Για πρακτικούς λόγους έχουν γίνει πολλές κατηγοριοποιήσεις στα μεγέθη των σωματιδίων, με διεθνή πρότυπα όπως τα Αμερικανικά, τα Βρετανικά και τα Ολλανδικά. Οι κατανομές τους παρουσιάζονται στη συνέχεια στο Σχήμα 2-11.



Σχήμα 2-11: Κατανομές μεγέθους σωματιδίων (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004)

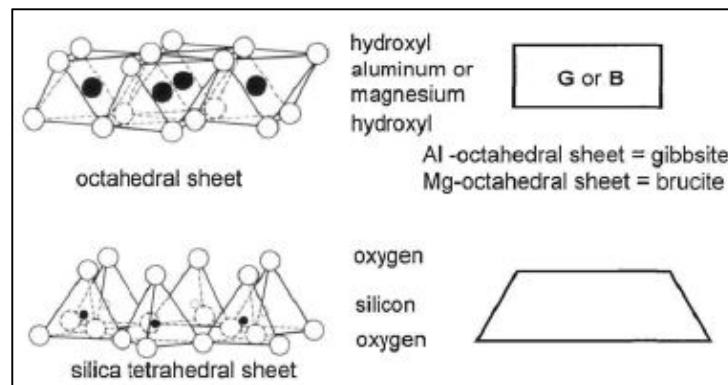
Όλα τα ιζήματα διακρίνονται σε αργίλους, ιλύες, άμμους και χάλικες. Στα συνεκτικά ιζήματα το κλάσμα των χάλικων είναι απών ή πολύ μικρό. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι ονομασίες των κλασμάτων αναφέρονται στο μέγεθος και δεν διακρίνουν τη σύσταση των σωματιδίων.

Στο κλάσμα της αργίλου μπορεί να διακριθεί και ένα υπό-κλάσμα το οποίο δεν κατακάθεται στο νερό λόγω της κίνησης Brown (Brownian motion), δηλαδή το κολλοειδές κλάσμα. Η τάξη μεγέθους των κολλοειδών σωματιδίων είναι περίπου 0.1 μm ή μικρότερη. Παρά την παρουσία του στο νερό ως στερεό, συχνά εμφανίζεται ως διαλυμένη ύλη, καθώς η συγκέντρωση των υπό αιώρηση στερεών μετράται ως το κλάσμα που δε διέρχεται από το φίλτρο των 0.45 μm.

Σύσταση συνεκτικών ιζημάτων

Τα αργιλικά ιζήματα είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνα για την συνοχή του υλικού των πυθμένων. Αυτή οφείλεται στο μέγεθος και το επίπεδο σχήμα των σωματιδίων, τα οποία διαθέτουν μια ειδική επιφάνεια και κατανομή ηλεκτρικού φορτίου, που αλληλεπιδρά με το νερό του μέσου στο οποίο βρίσκονται (δίπολα). Σε αντίθεση με τους αστρίους και τους χαλαζίες, οι οποίοι αποτελούνται από τρισδιάστατα πυριτικά τετράεδρα, τα αργιλικά ιζήματα σχηματίζονται από τις εξής βασικές δομές: το τετράεδρο του πυριτίου και το

οκτάεδρο του αργιλίου (γυψίτης-G) ή του μαγνησίου (βρουσίτης-B). Τα παραπάνω μπορούν να συνδυαστούν σε διάφορες μορφές για να σχηματίσουν διαφορετικά αργιλικά ορυκτά.



Σχήμα 2-12: Βασικοί σχηματισμοί αργιλικών ορυκτών, G: γυψίτης, B: βρουσίτης (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004)

Οι άργιλοι διακρίνονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες ορυκτών με βάση τους μηχανισμούς συγκράτησης των στοιβάδων τους. Την ομάδα του καολινίτη, την ομάδα του μοντμοριλλονίτη, την ομάδα του ιλλίτη και την ομάδα των χλωριτών.

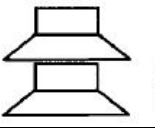
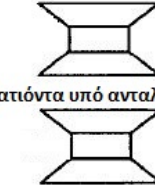
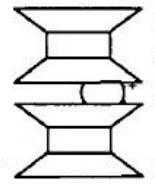
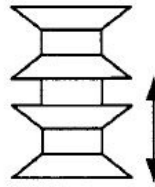
Η κρυσταλλική δομή του **καολινίτη** αποτελείται από ένα τετραεδρικό φύλλο πυριτίου και έναν οκταεδρικό γυψίτη, που συγχωνεύονται σε μια στοιβάδα. Ο διαχωρισμός των στοιβάδων δεν αποτελεί εύκολη υπόθεση και παρουσιάζει μικρή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων. Το πλέγμα του είναι ουδέτερο ηλεκτρικά και δε διογκώνεται κατά την ύγρανση. Η ειδική επιφάνειά του, που αποτελεί μέτρο των επιφανειακών δυνάμεων σε σχέση με τις δυνάμεις βαρύτητας είναι μικρή (5-20 m²/g).

Η κρυσταλλική δομή του **μοντμοριλλονίτη** αποτελείται από δυο τετραεδρικά φύλλα πυριτίου και ένα οκταεδρικό φύλλο γυψίτη στο εσωτερικό τους. Εμφανίζει μεγάλη ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων λόγω σημαντικού βαθμού ισόμορφης αντικατάστασης και συγκράτησης μορίων νερού, ενώ διαθέτει μεγάλη ειδική επιφάνεια (600-1000 m²/g).

Η κρυσταλλική δομή του **ιλλίτη** αποτελείται από ένα οκταεδρικό φύλλο γυψίτη μεταξύ δυο τετραεδρικών φύλλων πυριτίου. Λόγω αντικατάστασης κατιόντων Al³⁺ του γυψίτη με κατιόντα μικρότερου σθένους (Ca²⁺, Mg²⁺) παρουσιάζεται πλεόνασμα αρνητικών φορτίων και κατ'επέκταση δέσμευση ελεύθερων κατιόντων. Η ειδική του επιφάνεια κυμαίνεται από 50-100 m²/g.

Τέλος, η κρυσταλλική δομή της ομάδας των **χλωριτών** αποτελείται από ένα οκταεδρικό φύλλο γυψίτη ανάμεσα σε δυο τετραεδρικά φύλλα πυριτίου. Οι χλωρίτες περιέχουν αργίλιο στις τετραεδρικές θέσεις ενώ στις οκταεδρικές θέσεις περιέχουν αργίλιο, μαγνήσιο, δισθενή και τρισθενή σίδηρο (Θεοδωρίκας, 1997). Αποτελούν ένυδρες πυριτικές ενώσεις και εμφανίζουν ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων που κυμαίνεται από 10-40 meq/100 g.

Πίνακας 2-2: Βασικοί σχηματισμοί και ιδιότητες αργιλικών ορυκτών
(Πηγή: Mitchell, 1976; Winterwerp και Van Kesteren, 2004)

Αργιλικό Ορυκτό	Βασικές Στρώσεις	Αποστάσεις	ρ_s (kg/m ³)	A_s (m ² /kg)	CEC (meq/100g)
Καολινίτης		0.72 nm	2670±10	15±5	9±6
Μοντμοριλλονίτης	 κατιόντα υπό ανταλλαγή	> 0.96 nm	2530±170	Πρωτ: 85±35 Δευτ: 770±70	115±35
Ιλλίτης		1.00 nm	2800±200	80±20	25±15
Χλωρίτες		1.40 nm	2800±200		25±15
A_s : Ειδική επιφάνεια CEC: Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (Cation Exchange Capacity)					

Διασωματιδιακοί δεσμοί

Βασικό χαρακτηριστικό των συνεκτικών ιζημάτων σε σχέση με τα μη συνεκτικά είναι η ανάπτυξη ηλεκτροχημικών δεσμών, μεταξύ των σωματιδίων τους. Οι δεσμοί μεταξύ ατόμων ή/και σωματιδίων υλικών μπορούν να διακριθούν σε δυο βασικές κατηγορίες:

- Τους ατομικούς ή πρωτεύοντες δεσμούς.
- Τους δευτερεύοντες δεσμούς.

Οι πρώτοι δεσμοί είναι με διαφορά οι ισχυρότεροι και ενεργούν μεταξύ των ατόμων της ύλης. Οι δεύτεροι είναι οι δεσμοί που αναπτύσσονται μέσω έμμεσης αλληλεπίδρασης ηλεκτρονίων σε γειτονικά άτομα ή μόρια και είναι ασθενέστεροι από τους πρώτους. Οι ελκτικές και απωστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των κολλοειδών ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία.

Οι ατομικοί ή πρωτεύοντες δεσμοί αποτελούνται από τους:

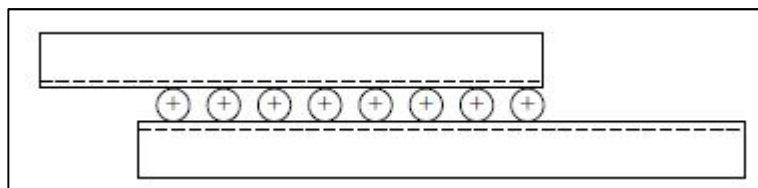
- **Ετεροπολικούς ή ιοντικούς δεσμούς.** Αναπτύσσονται μεταξύ ιόντων που προέρχονται από ετεροάτομα, συνήθως μεταξύ ενός μετάλλου (στοιχείου δηλαδή που έχει την τάση

να αποβάλλει ηλεκτρόνια) και ενός αμετάλλου (στοιχείου δηλαδή που έχει την τάση να προσλαμβάνει ηλεκτρόνια).

- **Ομοιοπολικούς δεσμούς.** Αναπτύσσονται μεταξύ εκείνων των ατόμων που «μοιράζονται» κάποια ηλεκτρόνια, συνήθως κατά ζεύγη.

Οι δευτερεύοντες δεσμοί αποτελούνται από τους:

- **Δεσμούς υδρογόνου.** Αναπτύσσονται μεταξύ δύο μερικών ηλεκτρικών φορτιών αντίθετης πολικότητας, λόγω ανισομερούς κατανομής του ηλεκτρικού φορτίου των μορίων.
- **Δεσμούς van der Waals.** Αναπτύσσονται όταν ουδέτερα άτομα και μόρια τα οποία δεν έχουν διαθέσιμα ηλεκτρόνια σθένους προς δημιουργία ιοντικού, ομοιοπολικού ή μεταλλικού δεσμού δείχνουν μια ασθενή έλξη το ένα για το άλλο, όταν βρεθούν πολύ κοντά. Οι δεσμοί van der Waals είναι αποκλειστικά ελκτικοί και αποτελούν βασικό γενεσιουργό αίτιο του φαινομένου της κροκίδωσης, που θα αναλυθεί στη συνέχεια.
- **Δεσμούς κατιόντων.** Αναπτύσσονται όταν αρνητικά φορτισμένα σωματίδια προσελκύουν κατιόντα. Οι δεσμοί αυτοί είναι εξαιρετικά συχνοί σε σωματίδια μοντομοριλλονίτη, με συνδετικά υλικά κατιόντα καλίου και νατρίου. Οι δεσμοί κατιόντων είναι ασθενέστεροι από τους δεσμούς υδρογόνου και μπορούν πολύ εύκολα να διαλυθούν με την απορρόφηση νερού από τις αργίλους.



Σχήμα 2-13: Σχηματική αναπαράσταση δεσμού κατιόντων (Πηγή: Partheniades, 2009)

Στο Σχήμα 2-13 παρουσιάζεται μικροσκοπικά η δομή ενός δεσμού κατιόντος. Τα διαμήκη ορθογωνικού σχήματος σωματίδια είναι τα αργιλικά πλακίδια. Τα σωματίδια αυτά είναι αρνητικά φορτισμένα προσελκύνοντας έτσι τα θετικά φορτισμένα κατιόντα (καλίου ή νατρίου), τα οποία αποτελούν και το συνδετικό υλικό μεταξύ τους.

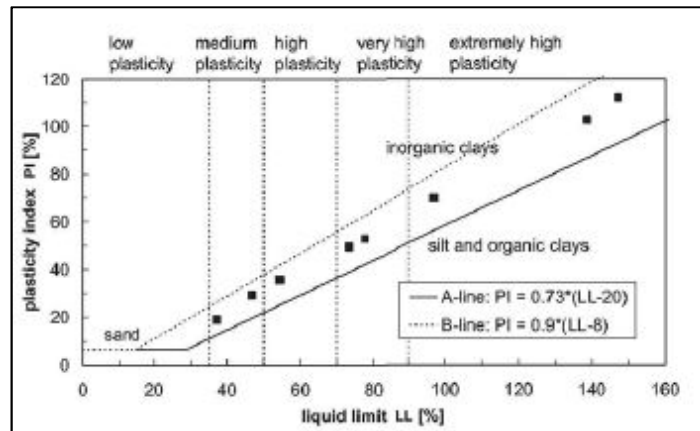
Γεωτεχνική ταξινόμηση συνεκτικών ιζημάτων

Από τις σημαντικότερες γεωτεχνικές παραμέτρους των συνεκτικών ιζημάτων αποτελούν τα όρια Atterberg, δηλαδή το όριο πλαστιμότητας (PL) και το όριο υδαρότητας (LL). Από τα όρια αυτά προκύπτει ο δείκτης πλαστιμότητας (PI) ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$PI = PL - LL \quad (0.19)$$

Τα παραπάνω μεγέθη ορίζονται σε ποσοστά επί τις 100. Ουσιαστικά, ο δείκτης πλαστιμότητας αποτελεί παράμετρο μέτρησης του νερού που περιλαμβάνεται στο ίζημα, υπό συγκεκριμένες συνθήκες τάσεων και αντοχής του υλικού του πυθμένα. Η ιδιότητα

αυτή απεικονίζεται στο διάγραμμα του δείκτη πλαστιμότητας, όπου ο δείκτης πλαστιμότητας (PI) αποτυπώνεται ως συνάρτηση του δείκτη υδαρότητας (LL). Το διάγραμμα του δείκτη πλαστιμότητας παρουσιάζεται στη συνέχεια στο Σχήμα 2-14.



Σχήμα 2-14: Διάγραμμα δείκτη πλαστιμότητας (PI) συναρτήσει του ορίου υδαρότητας (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004)

Στο Σχήμα 2-14, το διάγραμμα χρησιμοποιείται για να κατηγοριοποιήσει το έδαφος μεταξύ ανόργανων και πλούσιων σε οργανικά εδαφών, σε διαφορετικά επίπεδα πλαστιμότητας και σε συνεκτικά και μη συνεκτικά ιζήματα. Η γραμμή - A (A-line) διακρίνει τις ανόργανες αργίλους από τις αργίλους που είναι πλούσιες σε οργανικά και ιλύες, ενώ κάτω από τη γραμμή -B (B-line) διακρίνονται τα ιζήματα που μπορούν να βρεθούν με τη φυσική τους μορφή στο περιβάλλον. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το διάγραμμα, μεγάλες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας, σε υψηλές τιμές του ορίου υδαρότητας παραπέμπουν σε ανόργανες ή οργανικές αργίλους και ιλύες. Αντιθέτως, οι άμμοι παρουσιάζουν χαμηλές τιμές του δείκτη πλαστιμότητας.

Ιδιότητες στο θαλάσσιο περιβάλλον

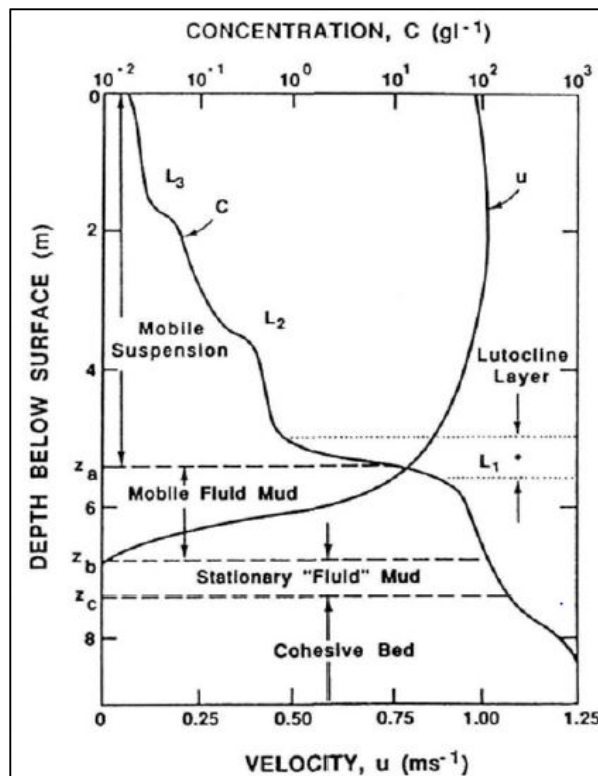
Η γεωτεχνική ταξινόμηση περιγράφει τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες του ιζήματος σε μικροσκοπικό επίπεδο. Παρόλα αυτά, σε μακροσκοπική κλίμακα η συμπεριφορά του ιζήματος δεν εξαρτάται μόνο από τις φυσικό-χημικές ιδιότητες του ιζήματος, αλλά και από παραμέτρους του περιβάλλοντός του.

Κατ'επέκταση, το συνεκτικό ιζήμα συναντάται σε διαφορετικές μορφές, όπως φορτίο υπό έκπλυση σε ποταμούς, θάλασσες και εκβολές, στρώσεις υγρής λάσπης (fluid mud), αποθέσεις υψηλής πυκνότητας κ.λπ. Η μορφή του ιζήματος εξαρτάται από το είδος του, το νερό που περιέχεται στους πόρους του, τις υδροδυναμικές συνθήκες που επικρατούν, αλλά και το ιστορικό φόρτισης του πυθμένα.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ταξινόμηση των συνεκτικών ιζημάτων σύμφωνα με τη συγκέντρωσή τους. Η ταξινόμηση αυτή βασίζεται στην έρευνα των Ross και Mehta (1989) και στην πιο πρόσφατη ταξινόμηση που προτάθηκε από το Bruens (2003). Παρόλα

αυτά σε αυτή δεν ορίζονται απόλυτες τιμές συγκέντρωσης, καθώς αυτές εξαρτώνται από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι διάφορες μορφές συνεκτικών ιζημάτων ανάλογα τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον μπορούν να οριστούν ως εξής:

- ❖ Χαμηλής Συγκέντρωσης Αιωρήσεις Συνεκτικού Ιζήματος (Low-Concentration Mud Suspensions-LCMS). Συναντώνται σε φυσικά περιβάλλοντα, όπως ποτάμια, εκβολές ποταμών και παράκτιες περιοχές. Οι συγκεντρώσεις ιζήματος σε αυτές είναι τόσο μικρές που δεν επηρεάζουν το πεδίο ροής.
- ❖ Υψηλής Συγκέντρωσης Αιωρήσεις Συνεκτικού Ιζήματος (High-Concentration Mud Suspensions-HCMS). Συναντώνται σε περιοχές εκβολών ποταμών με ισχυρά τυρβώδεις ροές και κοντά σε αποθέσεις συνεκτικού ιζήματος σε παράκτια ύδατα. Το πεδίο ροής σε αυτές τις περιπτώσεις επηρεάζεται σημαντικά από το υπό αιώρηση ίζημα.
- ❖ «Θολά» ρεύματα (turbidity currents), δηλαδή ρεύματα που περιέχουν υπό αιώρηση ίζημα. Συναντώνται σε υποθαλάσσια πρηνή, σε μεγάλα βάθη π.χ. σε ηπειρωτικές εξάρσεις.
- ❖ Υγρή λάσπη (fluid mud), η οποία μπορεί να βρεθεί σε πολλούς υφαλαύλακες πλοήγησης και λιμενολεκάνες ανά τον κόσμο. Επίσης, μπορεί να δημιουργηθεί στα υποθαλάσσια πρηνή των ηπειρωτικών ανυψωμάτων.
- ❖ Στερεοποιημένοι ή υπό στερεοποίηση πυθμένες, οι οποίοι σχηματίζονται σε οποιονδήποτε πυθμένα διαθέτει συνεκτικό ίζημα.



Σχήμα 2-15: Προφίλ συγκεντρώσεων υπό αιώρηση ιζήματος κατά βάθος και ταχύτητες για συνθήκες υψηλών συγκεντρώσεων (Πηγή: Ross και Mehta, 1989)

Η παραπάνω ταξινόμηση αναλύεται ποιοτικά στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 2-3: Βασικές μορφές ιζήματος συναρτήσει των συγκεντρώσεων του ιζήματος
(Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004)

Μορφή Ιζήματος	Συγκέντρωση
LCMS	$C \ll C_{gel}$
HCMS	$C < C_{gel}$
Θολό ρεύμα	$C \approx C_{gel}$
Κινητή υγρή λάσπη	$C \approx C_{gel}$
Στατική υγρή λάσπη	$C \approx C_{gel}$
Πυθμένας υπό στερεοποίηση	$C > C_{gel}$
Στερεοποιημένος πυθμένας	$C \gg C_{gel}$

Η c_{gel} αποτελεί τη συγκέντρωση πηκτωματοποίησης (gelling concentration), δηλαδή τη συγκέντρωση κατά την οποία η μορφή του ιζήματος διαθέτει μια δομή. Στην περίπτωση αυτή, τα σωματίδια του ιζήματος ή οι κροκίδες (για τις οποίες γίνεται εκτενέστερη αναφορά στη συνέχεια) έρχονται σε επαφή μεταξύ τους αποκτώντας συνοχή και αντοχή.

2.3.2. Αντοχή σε διάβρωση-έναρξη κίνησης

Για την αντοχή σε διάβρωση πυθμένα από συνεκτικό ίζημα έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες. Παρόλα αυτά, πολύ λίγες έχουν λάβει υπόψη τους τις πολύπλοκες συνθήκες ροής που εμφανίζονται στις παραλιακές ζώνες.

Η διαβρωσιμότητα των συνεκτικών ιζημάτων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τους δεσμούς που αναπτύσσονται μεταξύ των σωματιδίων τους. Από έρευνες που διεξήχθησαν σε αναζυμωμένα ιζήματα εξήχθη το συμπέρασμα ότι οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τους δεσμούς και κατ'επέκταση τη διαβρωσιμότητα των ιζημάτων είναι ο βαθμός στερεοποίησης και οι φυσικοχημικές ιδιότητες του περιβάλλοντος (Croad, 1981; Arulanandan et al., 1975). Τέτοιες ιδιότητες μπορεί να είναι η θερμοκρασία, το pH, η αλατότητα και η συγκέντρωση του νερού σε κατιόντα.

Από πιο πρόσφατες έρευνες έχει βρεθεί ότι τα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής του πυθμένα (ρωγμές, σχισμές και στρώσεις από μη συνεκτικά υλικά στις συναρμογές) επηρεάζουν εξίσου σημαντικά τη διαβρωσιμότητα του υλικού (Lefebvre et al., 1985; Hutchinson 1986). Η φυσική δομή του ιζήματος του πυθμένα επηρεάζεται από τις συνθήκες απόθεσης και σχηματισμού του υλικού του.

Η διαβρωσιμότητα του εδάφους συνήθως εκφράζεται μέσω του μεγέθους της κρίσιμης διατμητικής τάσης για διάβρωση, δηλαδή της ασκούμενης τάσης η οποία θα προκαλέσει την εκκίνηση του ιζήματος.

Η κρίσιμη διατμητική τάση για διάβρωση (τ_{ce}) μπορεί να εκφραστεί είτε συναρτήσει της πυκνότητας της επιφανειακής στρώσης του πυθμένα, είτε συναρτήσει του δείκτη

πλαστιμότητας. Για την πρώτη παράμετρο συναντάται στη βιβλιογραφία η εξίσωση Migniot, όπου η τ_{ce} εκφράζεται σε $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ ως εξής:

$$\tau_{ce} = N \rho_s^M \quad (0.20)$$

όπου ρ_s είναι η πυκνότητα της επιφανειακής στρώσης ιζήματος του πυθμένα σε kg/m^3 και M , N σταθερές που καθορίζονται από τις ιδιότητες του ιζήματος και του νερού. Η παράμετρος M είναι αδιάστατη και λαμβάνει τιμές μικρότερες του 1, ενώ η παράμετρος N παίρνει τιμές στο διάστημα μεταξύ 10^{-1} και 10^{-2} σε μονάδες του SI, ανάλογα με την εκάστοτε τιμή της παραμέτρου M στον εκθέτη.

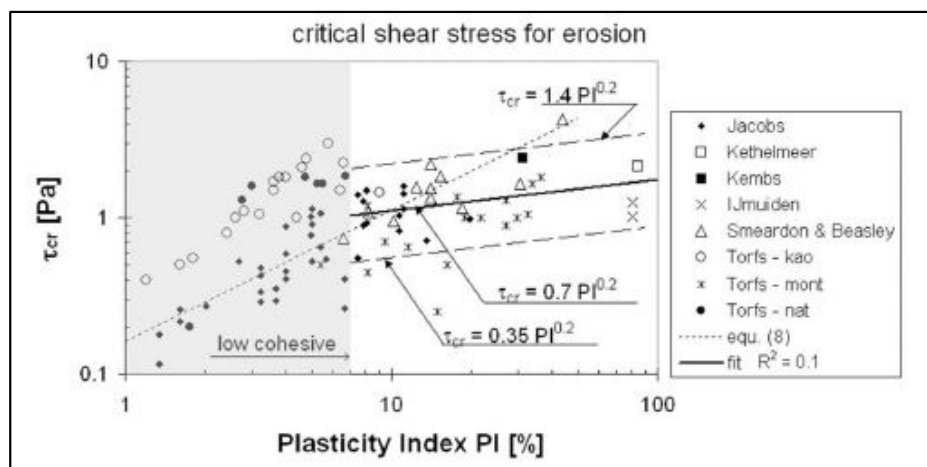
Οι Smerdon και Beasley (1959) διεξήγαγαν μια σειρά από δοκιμές σε ανοικτό αγωγό, με χαλαρές αποθέσεις συνεκτικού ιζήματος. Όρισαν την κρίσιμη διατμητική τάση για διάβρωση ως την τάση κατά την οποία «το υλικό του πυθμένα βρίσκεται σε γενικότερη κίνηση». Η τάση αυτή αργότερα συνδέθηκε με τον δείκτη πλαστιμότητας του ιζήματος του πυθμένα, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\tau_{ce} = 0.0034 (PI)^{0.84} \quad (0.21)$$

Η παραπάνω σχέση δίνει την κρίσιμη διατμητική τάση για διάβρωση μετρούμενη σε μονάδες Psf (Pounds per Square foot), η οποία μπορεί να μετατραπεί δίνοντας αποτελέσματα σε Pascal ($\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$) ως εξής:

$$\tau_{ce} = 0.1628 (PI)^{0.84} \quad (0.22)$$

Όμοια, οι Winterwerp et al. (2012) υποστήριξαν ότι η κρίσιμη διατμητική τάση για διάβρωση συνδέεται με το δείκτη πλαστιμότητας. Επιπλέον πρόσθεσαν ότι εξαρτάται από τη συνοχή και την αντοχή του ιζήματος σε στραγγισμένες συνθήκες.



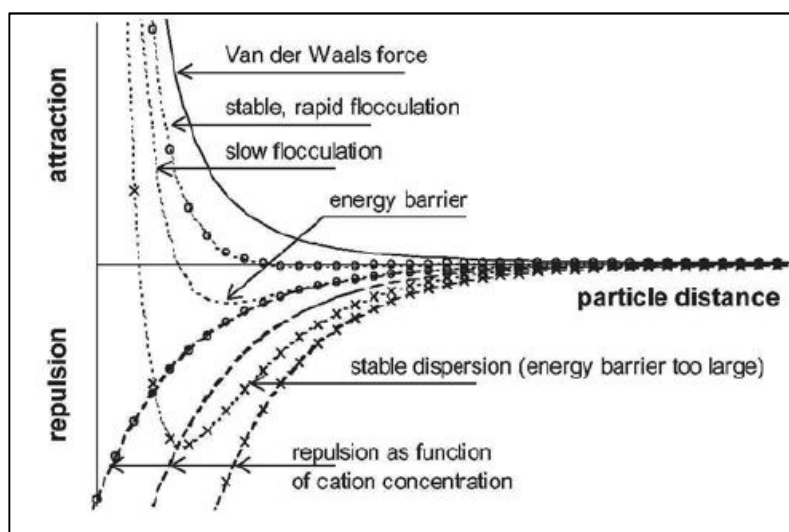
Σχήμα 2-16: Κρίσιμη διατμητική τάση για διάβρωση συναρτήσει του δείκτη πλαστιμότητας (Πηγή: Winterwerp et al., 2012)

2.3.3. Κροκίδωση (flocculation)

Η βασικότερη και πιο χαρακτηριστική ιδιότητα του συνεκτικού ιζήματος είναι ότι τα σωματίδιά του μπορούν να σχηματίσουν μεταξύ τους κροκίδες, όταν έρθουν σε επαφή με ένα ρευστό (π.χ. νερό). Στην πραγματικότητα, σχεδόν όλα τα συνεκτικά ιζήματα που βρίσκονται σε θαλάσσιο περιβάλλον βρίσκονται σε μια κατάσταση κροκίδωσης.

Ως κροκίδωση ή συσσωμάτωση (flocculation/aggregation) των αργιλικών σωματιδίων ορίζεται η συνένωσή τους εντός του νερού σε συστοιχίες (κροκίδες), η οποία προκαλείται από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους.

Τέτοιες δυνάμεις είναι και οι δυνάμεις έλξης Van der Waals, οι οποίες πρέπει να υπερκεράσουν τις απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Οι απωστικές αυτές δυνάμεις προκαλούνται από την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια των σωματιδίων της αργίλου. Τα αρνητικά φορτία εξουδετερώνονται μέσω των κατιόντων (π.χ. ιόντα νατρίου) στο θαλασσινό νερό. Τα κατιόντα στην υγρή φάση σχηματίζουν μια διπλή στρώση (Van Olphen, 1977) γύρω από τα σωματίδια της αργίλου, η οποία αποφορτίζει το αρνητικά φορτισμένο σωματίδιο σε μια απόσταση από αυτό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την έλξη μεταξύ των σωματιδίων σε μια συγκεκριμένη συγκέντρωση κατιόντων και το σχηματισμό κροκίδων.



Σχήμα 2-17: Διάγραμμα ελκτικών και απωστικών δυνάμεων μεταξύ των σωματιδίων αργίλου, συναρτήσει της συγκέντρωσης κατιόντων (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004)

Οι κροκίδες που σχηματίζονται μπορούν να χαρακτηριστούν ως ανοικτές δομές από αργιλικά σωματίδια (ακόμα και χιλιάδες), με υψηλή συγκέντρωση νερού (αποτελεί το 80-90% του όγκου τους).

Η φυσική συμπεριφορά των κροκίδων στο νερό διαφέρει σημαντικά από αυτήν των σωματιδίων που τις σχηματίζουν. Αυτό οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητά τους σε

νερό, λόγω της οποίας σχηματίζουν πολύ ανοικτές δομές, με πυκνότητες ελάχιστα μεγαλύτερες από αυτές του νερού.

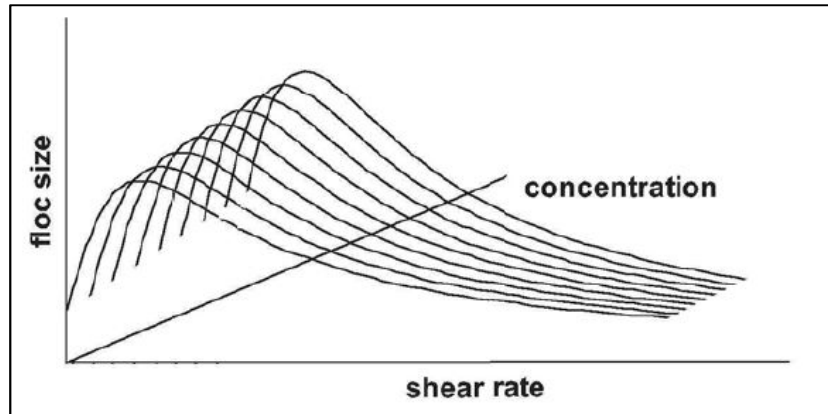
Η συσσωμάτωση είναι το αποτέλεσμα συγκρούσεων και προσκόλλησης των σωματιδίων του συνεκτικού ιζήματος. Αντιθέτως, η διάλυσή των κροκίδων (floc break-up) προκαλείται από ασκούμενες τυρβώδεις τάσεις και συγκρούσεις μεταξύ τους. Από υδροδυναμικής σκοπιάς, η κροκίδωση διέπεται από τρεις βασικές διαδικασίες:

1. Τις κινήσεις Brown, που προκαλούν τη σύγκρουση των σωματιδίων μεταξύ τους και κατ' επέκταση τον σχηματισμό συσσωματωμάτων.
2. Τη διαφορική καθίζηση των σωματιδίων με μεγαλύτερες ταχύτητες καθίζησης, σε σχέση με αυτά με μικρότερες.
3. Την τυρβώδη ροή, η οποία προκαλεί τη σύγκρουση των σωματιδίων και κατ' επέκταση τον σχηματισμό κροκίδων. Γενικά συναντάται στη βιβλιογραφία ως κροκίδωση λόγω φαινομένων διάτμησης.

Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για την κροκίδωση σε συνάρτηση με την κατανομή μεγέθους της υπό αιώρηση ύλης (Winterwerp, 1999 & 2002; McAnally, 1999). Πολλές φυσικό-μαθηματικές σχέσεις έχουν δημοσιευτεί για τις συγκρούσεις των σωματιδίων, εξαιτίας των παραπάνω τριών παραγόντων (McCave, 1984; Van Leussen, 1994). Από τις μελέτες των Krone (1962), O'Melia (1980), McCave (1984) και Van Leussen (1994) συμπεραίνεται ότι η συσσωμάτωση που προκαλείται λόγω της κίνησης Brown είναι αμελητέα σε παράκτιες περιοχές και εκβολές ποταμών.

Οι Stolzenbach και Elimelech (1994), από την άλλη, μελέτησαν την επίδραση του φαινομένου της διαφορικής καθίζησης. Ανέλυσαν τα θεωρητικά αποτελέσματα των Wacholder και Sather (1974) και διεξήγαγαν επιπλέον πειράματα σε στήλη καθίζησης. Απέδειξαν ότι η δυνατότητα ένα καταπίπτων μεγάλο, αλλά λιγότερο πυκνό σωματίδιο, να συγκρουστεί με ένα μικρότερο, αλλά πιο συμπυκνωμένο, είναι πολύ μικρή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τροχιά του μικρότερου σωματιδίου εκτρέπεται από τη τροχιά του μεγαλύτερου. Συμπέραναν επίσης ότι η επίδραση της διαφορικής καθίζησης στη συσσωμάτωση είναι πολύ μικρότερη από ότι εκτιμάται από το υπάρχον θεωρητικό υπόβαθρο ενώ σε κάποιες περιπτώσεις μάλιστα είναι απύσχα.

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών, μπορεί εύκολα να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η επίδραση της κίνησης Brown και της διαφορικής καθίζησης είναι σχετικά μικρή σε παράκτιες περιοχές και εκβολές ποταμών. Επομένως, στην περίπτωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, το βασικό φαινόμενο που επηρεάζει την κροκίδωση των αργλικών σωματιδίων είναι η τυρβώδης ροή. Μια ποιοτική εικόνα της επίδρασης του φαινομένου αυτού παρουσιάστηκε από τον Dyer (1989), η οποία και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-18 που ακολουθεί.



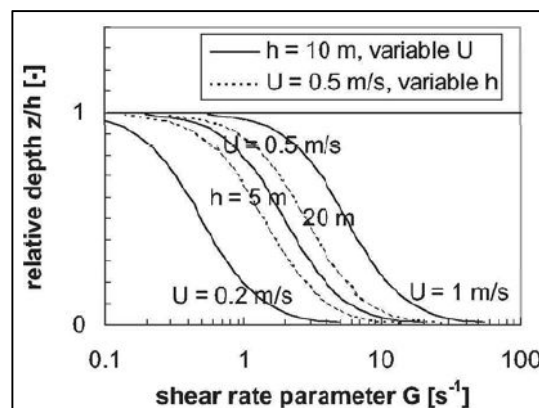
Σχήμα 2-18: Ποιοτικό διάγραμμα κροκίδωσης (Πηγή: Dyer, 1989)

Ο Dyer (1989) όπως φαίνεται και στο παραπάνω Σχήμα απέδειξε ότι το μέσο μέγεθος των κροκίδων εξαρτάται από τον ρυθμό διάτμησης λόγω της τυρβώδους ροής. Συγκεκριμένα, το ποιοτικό διάγραμμα δείχνει ότι το μέσο μέγεθος των κροκίδων αυξάνει με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης έως μια μέγιστη τιμή, ενώ στη συνέχεια μειώνεται. Αντίστοιχη πορεία ακολουθεί και το μέγεθος των κροκίδων, με την αύξηση της συγκέντρωσης του υπό αιώρηση ιζήματος στο νερό.

Ο ρυθμός διάτμησης εκφράζεται μέσω της παραμέτρου G , η οποία λαμβάνει τιμές από 0.1 έως 10 s^{-1} και ορίζεται ως εξής:

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} = \frac{\nu}{\lambda_0^2} \quad (0.23)$$

όπου ε είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα και ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα. Ως λ_0 ορίζεται η τυρβώδης μικροκλίμακα Kolmogorov που υπολογίζεται με τη σχέση $\lambda_0 = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/4}$. Οι τυπικές τιμές της παραμέτρου λ_0 ποικίλουν από 100 έως 1000μm και εξαρτώνται από το βάθος του νερού και τη ταχύτητα της ροής.



Σχήμα 2-19: Τυπικές τιμές παραμέτρου ρυθμού διάτμησης G σε ροή ανοικτού αγωγού (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004)

Στο Σχήμα 2-19 φαίνεται ότι η παράμετρος G εξαρτάται τόσο από το βάθος του νερού όσο και από την ταχύτητα της ροής. Ειδικότερα, αύξηση του βάθους προκαλεί και αύξηση της παραμέτρου G , η οποία κοντά στον πυθμένα παίρνει την τιμή 10 s^{-1} .

Ο υπολογισμός του μεγέθους των κροκίδων πραγματοποιείται με την εφαρμογή πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων, με επικρατέστερα τα μοντέλα Lagrange και Euler. Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας για τον υπολογισμό του μεγέθους των κροκίδων λήφθηκε η διάμετρος ισορροπίας, $D_{f,e}$ η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$D_{f,e} = D_p + \frac{k_A c}{k_B \sqrt{G}} = \left(D_p + \frac{k_A \lambda_0}{k_B \sqrt{v}} \right) \quad (0.24)$$

όπου D_p είναι η διάμετρος των σωματιδίων αργίλου, k_A είναι η παράμετρος συσσωμάτωσης (σε m^2/kg) και k_B η παράμετρος διάσπασης των κροκίδων (σε $\text{s}^{1/2}/\text{m}^2$). Αυτές υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$k_A = k'_A \frac{D_p^{n_f-3}}{n_f f_s \rho_s} \quad (0.25)$$

$$k_B = k'_B \frac{D_p^p}{n_f} \left(\frac{\mu}{F_y} \right)^q \quad (0.26)$$

όπου n_f είναι η μορφοκλασματική διάσταση που εξηγείται αναλυτικότερα στη συνέχεια, p και q είναι παράμετροι που παίρνουν τις τιμές $p=3-n_f$ και $q=1/2$ (Winterwerp, 1998), μ είναι η δυναμική συνεκτικότητα και F_y είναι η αντοχή διαρροής των κροκίδων.

Σύμφωνα με τα μοντέλα κροκίδωσης του Winterwerp (1998, 1999, 2002), για συνεκτικό ίζημα με $D_p=4\mu\text{m}$, $\rho_s=2650 \text{ kg/m}^3$ και $n_f=2$ μπορεί να προκύψει $k_A=14.6\text{m}^2/\text{kg}$, $k'_A=0.31$,

$$k_B=14.0 \cdot 10^3 \text{ s}^{1/2}/\text{m}^2 \text{ και } \sqrt{\frac{\mu}{F_y}} = 5.6 \cdot 10^3 \text{ s}^{1/2}/\text{m}.$$

2.3.4. Ίζημα υπό αιώρηση

Ο μηχανισμός της αιώρησης των κροκίδων του ιζήματος εξαρτάται σημαντικά από παραμέτρους όπως το μέγεθος, το σχήμα, η πυκνότητά τους κ.λπ. Η ταχύτητα καθίζησης της κάθε κροκίδας σε ομογενές ρευστό προκύπτει ως αποτέλεσμα της ισορροπίας μεταξύ των βαρυτικών δυνάμεων και των δυνάμεων έλξης F_g και F_d (Batchelor, 1983). Οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται ως εξής:

$$F_g = \alpha \frac{\pi}{6} D_f^3 g \Delta \rho_f \text{ και } F_d = \beta c_D \frac{1}{2} \rho_w \frac{\pi}{4} D_f^2 W_{s,r}^2 \quad (0.27)$$

όπου α και β είναι παράμετροι που οι τιμές τους εξαρτώνται από το σχήμα των σωματιδίων (σφαιρικότητα). Σύμφωνα με τους Vanoni (1977), Raudkivi (1976) και Graf (1977) η σχέση που δίνει το συντελεστή έλξης c_D ταιριάζει με τα εμπειρικά δεδομένα που προκύπτουν για μη συνεκτικά ιζήματα με $Re_p \leq 800$:

$$c_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + 0.15 Re_p^{0.687} \right) \quad (0.28)$$

όπου Re_p είναι ο αριθμός Reynolds των σωματιδίων ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$Re_p = w_{s,r} \frac{D_p}{\nu} \quad (0.29)$$

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας λαμβάνεται η παραδοχή ότι η σχέση αυτή ισχύει και για τις κροκίδες που σχηματίζονται στα συνεκτικά ιζήματα, καθώς δεν υπάρχουν αντίστοιχα δεδομένα στη βιβλιογραφία για το συντελεστή έλξης.

Μια ακόμα βασική παραδοχή που γίνεται είναι ότι το υγρό ρέει γύρω από τις κροκίδες και όχι εντός τους. Οι Johnson et al. (1996) ασχολήθηκαν με τη μελέτη του αντικειμένου αυτού. Θεώρησαν ότι όσο μεγαλύτερες σε μέγεθος είναι οι κροκίδες, τόσο σημαντικότερη είναι η διαπερατότητά τους και κατ'επέκταση η ροή μέσα από αυτές. Από τα πειράματά τους, προέκυψε επίσης ότι η ταχύτητα καθίζησης και η πυκνότητα των κροκίδων μπορούν να εκφραστούν ως συνάρτηση του μεγέθους τους. Για να προσδιορίσουν την επιρροή της διαπερατότητάς τους σε σχέση με την ταχύτητα πτώσης, διενέργησαν πειράματα με κροκίδες όμοιου μεγέθους και μάζας. Σε αυτά, η ταχύτητα καθίζησης των διαπερατών κροκίδων προέκυψε ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτήν των αδιαπεράτων, αν και η λογική επιτάσσει το αντίθετο, λόγω της αυξημένης ειδικής επιφάνειας, πάνω στην οποία ασκούνται δυνάμεις τριβής. Παρόλα αυτά, δεν μπόρεσαν να καθορίσουν την αιτία αυτής της διαφοροποίησης.

Ο Gregory (1997) υπέδειξε ότι τα συσσωματώματα είναι πρακτικά αδιαπέρατα για $n_f=2$. Η διαπερατότητα αυξάνεται δραματικά όσο μειώνεται η n_f .

Η n_f είναι η μορφοκλασματική διάσταση που προκύπτει από την περιγραφή ενός σχήματος με γραμμικό μέγεθος L_α και όγκο $V(L_\alpha)$. Ως α ορίζεται το γραμμικό μέγεθος του πρωτογενούς σωματιδίου (Viscek, 1992). Ως εκ τούτου η μορφοκλασματική διάσταση ορίζεται ως εξής:

$$n_f = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\ln[N(L)]}{\ln(L)} \quad (0.30)$$

όπου N είναι ο αριθμός των πρωτογενών σωματιδίων.

Σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι κροκίδες μπορούν να θεωρηθούν πορώδεις αλλά πρακτικά αδιαπέρατες οντότητες στον υπολογισμό της ταχύτητας πτώσης. Σύμφωνα με τους Winterwerp και Van Kesteren (2004) η σχέση που υπολογίζει την ταχύτητα καθίζησης μιας κροκίδας στο νερό είναι η εξής:

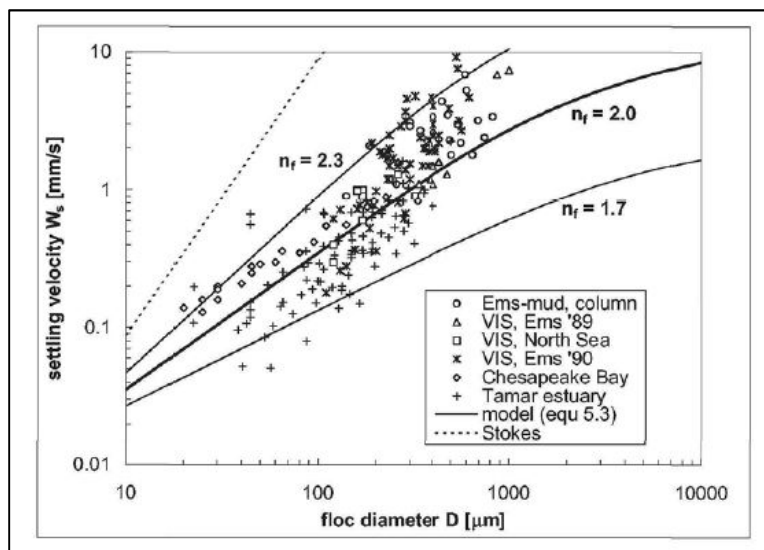
$$w_{s,r} = \frac{\alpha}{18\beta} \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\mu} D_p^{3-n_f} \frac{D_f^{n_f-1}}{1 + 0.15\text{Re}_f^{0.687}} \quad (0.31)$$

όπου D_p και D_f είναι η διάμετρος του σωματιδίου και της κροκίδας αντίστοιχα, Re_f είναι ο αριθμός Reynolds που αντιστοιχεί στην κροκίδα και μ είναι η δυναμική συνεκτικότητα. Για σφαιρικά ($\alpha=\beta=1$) Ευκλείδεια ($n_f=3$) σωματίδια σε συνθήκες Stokes με $\text{Re}_f \ll 1$ προκύπτει η εξής σχέση για την ταχύτητα καθίζησης:

$$w_{s,r} = \frac{(\rho_s - \rho_w)gD_f^2}{18\mu} \quad (0.32)$$

Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι η θερμοκρασία του νερού έχει σημαντικότερη επίδραση στο ιξώδες του, και κατ' επέκταση στην ταχύτητα καθίζησης των κροκίδων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-20 διάγραμμα της ταχύτητας καθίζησης συναρτήσει της διαμέτρου των κροκίδων. Οι τιμές του διαγράμματος προκύπτουν από την εφαρμογή της σχέσης των Winterwerp και Van Kesteren (2004) για $\alpha=\beta=1$, $D_p=4\mu\text{m}$, $\rho_s=2650\text{ kg/m}^3$, $\rho_w=1020\text{ kg/m}^3$ και $\mu=10^{-3}\text{ Pa}$, για τρεις διαφορετικές τιμές του n_f (1.7, 2 και 2.3), ενώ περιλαμβάνει και παρατηρήσεις διαφόρων πειραμάτων. Οι παρατηρήσεις των πειραμάτων δεν περιλαμβάνουν τιμές για μεγάλες διαμέτρους κροκίδων και μικρή ταχύτητα καθίζησης. Για αυτόν τον λόγο δεν υπάρχει αντιστοιχία στα πειραματικά δεδομένα και στα αποτελέσματα της σχέσης υπολογισμού σε όλα τα εύρη δεδομένων.



Σχήμα 2-20: Ταχύτητα καθίζησης συναρτήσει του μεγέθους των κροκίδων (Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004)

Το βασικό ποιοτικό συμπέρασμα που προκύπτει από τις τιμές του διαγράμματος είναι ότι όσο αυξάνεται η διάμετρος των κροκίδων τόσο αυξάνεται και η ταχύτητα καθίζησης τους.

Συγκεντρώσεις κατ όγκο

Για την συνέχεια της ανάλυσης πρέπει να οριστούν οι παρακάτω ποσότητες:

$$\begin{aligned}\varphi_s^m &= c^m / \rho_s \\ \varphi_f^m &= c^m / c_{gel} \\ \varphi_s^{sa} &= c^{sa} / \rho_s\end{aligned}\tag{0.33}$$

που αντιστοιχούν στη συγκέντρωση κατ όγκο των σωματιδίων συνεκτικού ιζήματος, των κροκίδων και των σωματιδίων της άμμου αντίστοιχα.

Εμποδιζόμενη καθίζηση

Η παραπάνω θεωρία για την αιώρηση των σωματιδίων είναι εφαρμόσιμη μόνο σε περιπτώσεις χαμηλών συγκεντρώσεων ιζήματος στο νερό. Όταν η συγκέντρωση αυξάνεται ($\geq 3\text{g/l}$), οι κροκίδες αρχίζουν να εμποδίζουν η μια την κίνηση της άλλης κατά την καθίζησή τους. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται εμποδιζόμενη καθίζηση (hindered settling). Όταν η συγκέντρωση του υπό αιώρηση ιζήματος αυξηθεί παραπάνω, τότε οι κροκίδες έρχονται σε συνεχή επαφή μεταξύ τους, αποκτώντας δομή. Στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να υπάρξει επιπλέον πτώση του ιζήματος προς τον πυθμένα, παρά μόνο όταν αυτό καθιζάνει λόγω στερεοποίησης.

Ο Scott (1984) πραγματοποίησε μια εκτεταμένη και ενδελεχή παρουσίαση του φαινομένου, μέρος της οποίας δημοσιεύτηκε από τους Mandersloot et al. (1986). Οι τελευταίοι παρουσίασαν αρκετές εμπειρικές και θεωρητικές μελέτες επί του φαινομένου. Η παρουσίαση επικεντρώνεται στη συμπεριφορά ευκλείδιων σωματιδίων (άμμοι), αλλά παρόλα αυτά χρησιμοποιείται ως οδηγός στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Σύμφωνα με τους Winterwerp και Van Kesteren (2004) μπορούν να ταυτοποιηθούν επτά διαδικασίες που επηρεάζουν την ταχύτητα καθίζησης των ατομικών σωματιδίων σε αιώρηση:

- 1. Ίχνος ροής.** Κάθε σωματίδιο όταν πέφτει αφήνει ένα ίχνος ροής. Όταν τα υπόλοιπα σωματίδια που γειτνιάζουν με αυτό βρίσκονται στο ίχνος ροής του, επηρεάζεται η ενεργός ταχύτητα αιώρησής τους (σχετικά με ένα σταθερό πλαίσιο αναφοράς). Κατ επέκταση η συνολική ενεργός ταχύτητα καθίζησης του ιζήματος θα μειωθεί κατά ένα παράγοντα $(1-\phi_f)$. Για τα ευκλείδεια σωματίδια $\phi_f = \phi_s$, όπου ϕ_s είναι η ογκομετρική

συγκέντρωση των βασικών σωματιδίων ($\phi_s=c/\rho_s$), ενώ για τα συνεκτικά ιζήματα το ϕ_f αφορά την ογκομετρική συγκέντρωση των συσσωματωμάτων. Παρόλα αυτά, εάν ένα δεύτερο σωματίδιο εγκλωβιστεί στο ίχνος ενός υπό πτώση σωματιδίου, η ταχύτητα αιώρησής του θα αυξηθεί (Reed και Anderson, 1980). Το τελευταίο φαινόμενο αγνοείται συνήθως αλλά δύναται να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα καθορισμού της ταχύτητας καθίζησης.

2. **Δυναμικά φαινόμενα ή φαινόμενα ροής.** Αρκετοί ερευνητές (Smith, 1998 ; Darcovich et al., 1996) τονίζουν τον ρόλο των γειτνιαζόντων σωματιδίων στις συνιστώσες της ταχύτητας καθίζησης ενός σωματιδίου. Τα γειτνιάζοντα σωματίδια προκαλούν μεταβολή της κατανομής πίεσης γύρω από αυτά και κατ' επέκταση επηρεάζεται η υδροδυναμική συμπεριφορά τους. Μερικές από τις θεωρητικές και αριθμητικές έρευνες για την εμποδιζόμενη καθίζηση εστιάζουν στην αξιολόγηση αυτών των διεργασιών (Reed και Anderson, 1980; Smith, 1998; Darcovich et al., 1996). Οι επιρροές τους συχνά εκφράζονται μέσω ενός συντελεστή κινηματικής συνεκτικότητας.
3. **Σωματιδιακές συγκρούσεις.** Οι συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων προκαλούν επιπρόσθετες δυνάμεις στην αιώρηση. Όπως τόνισε ο Bagnold (1954) το φαινόμενο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι επηρεάζει την κινηματική συνεκτικότητα. Συνεπώς, η καθίζηση σωματιδίων εμποδίζεται και επομένως η ενεργός ταχύτητα καθίζησης μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό φυσικά γίνεται πιο έντονο σε υψηλότερες συγκεντρώσεις (Buscall, 1990). Πρέπει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο αυτό δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικό για συνεκτικά ιζήματα υπό αιώρηση, καθώς τα τελευταία δεν παρουσιάζουν ελαστική συμπεριφορά. Οι συγκρούσεις μεταξύ των κροκίδων έχουν ως αποτέλεσμα την πρόκληση πλαστικών παραμορφώσεων και συνεπώς τη διάλυσή τους.
4. **Σωματιδιακές αλληλεπιδράσεις.** Ο Batchelor (1982) επικεντρώθηκε στον ρόλο των αμοιβαίων ελκτικών και απωστικών ηλεκτρικών φορτίων μεταξύ των σωματιδίων. Στην περίπτωση των συνεκτικών ιζημάτων, οι ελκτικές και απωστικές δυνάμεις έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κροκίδων ή μιας σταθερής διασποράς του ιζήματος, στην περίπτωση που το υγρό μέσο δεν ευνοεί τον σχηματισμό τους.
5. **Συνεκτικότητα.** Ο Einstein ήταν ο πρώτος που συνειδητοποίησε ότι η παρουσία σωματιδίων σε ένα ρευστό αυξάνει την συνεκτικότητα του. Πολλές έρευνες έχουν δημοσιευθεί και βασίζονται σε αυτό το φαινόμενο, ενώ μια συνοπτική ερμηνεία δόθηκε από τον Scott (1984). Κάθε σωματίδιο υπό αιώρηση θεωρείται ότι αφήνει κατά την πτώση του ένα ίχνος τροχιάς, το οποίο παρουσιάζει αυξημένη συνεκτικότητα. Αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει μείωση της ταχύτητας καθίζησης των σωματιδίων. Η προσέγγιση του Einstein και όλων των μεταγενέστερων που συμμερίστηκαν τις απόψεις του αφορούν μόνο ευκλείδεια σωματίδια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι κροκίδες παραμορφώνονται κάτω από την επίδραση των τάσεων του ρευστού, διαχέοντας έτσι ενέργεια στο περιβάλλον.
6. **Άνωση ή μειωμένη βαρύτητα.** Στην περίπτωση αυτή η ενεργός ταχύτητα καθίζησης μειώνεται κατά έναν παράγοντα $(1 - \phi_s)$.

7. “Σχηματισμός νέφους” ή μεταγωγή καθίζησης. Οι Darcovich et al. (1996) και οι Tacker και Lavelle (1997) δίνουν έμφαση στο “σχηματισμό νέφους”. Τα σωματίδια του ιζήματος δύναται να παρασυρθούν στον απόηχο της κίνησης άλλων σωματιδίων. Ο απόηχος αυτών των σωματιδίων με τη σειρά του προσελκύει και άλλα σωματίδια σχηματίζοντας ένα “νέφος”. Ο σχηματισμός αυτός δύναται να συμπεριφέρεται ενιαία, προκαλώντας αύξηση της ενεργού συνεκτικότητας του υπό αιώρηση ιζήματος.

Ο συνδυασμός των παραπάνω διαδικασιών (εκτός της διαδικασίας 7) έχει ως αποτέλεσμα την έκφραση της ενεργού ταχύτητας καθίζησης, w_s ως εξής:

$$w_s = W_{s,r} (1 - k\phi_s)^n \quad (0.34)$$

Η παραπάνω σχέση προτάθηκε από τον Scott (1984), λαμβάνοντας υπόψη την ημι-εμπειρική σχέση των Richardson και Zaki (1954), στις οποίες $k \approx 1$ και ο συντελεστής n (συνάρτηση του αριθμού Reynolds του σωματιδίου) παίρνει τιμές $2.5 \leq n \leq 5.5$. Η σχέση των Richardson και Zaki προέκυψε από διαστατική ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη τις σχετικές παραμέτρους της εμποδιζόμενης καθίζησης και ένα μεγάλο εύρος πειραματικών δεδομένων. Στα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια με διαφορετικά σχήματα και αριθμό Reynolds.

Όσον αφορά στην εμποδιζόμενη καθίζηση για συνεκτικό ίζημα, μπορεί να ληφθεί υπόψη και η συμμετοχή κλάσματος άμμου. Αρχικά, γίνονται δύο βασικές υποθέσεις:

- Η συνεκτικότητα του υγρού μίγματος επηρεάζεται μόνο από το συνεκτικό ίζημα.
- Η άνωση επηρεάζεται και από τα δυο κλάσματα ιζήματος.

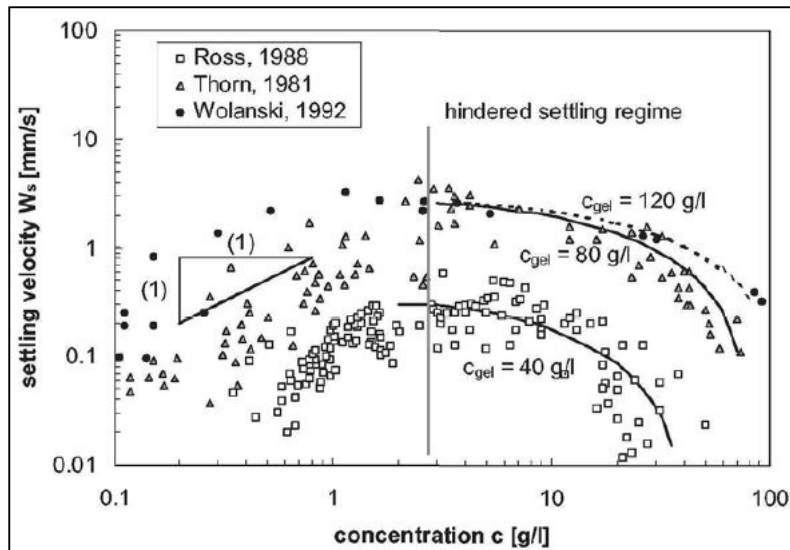
Η εμποδιζόμενη καθίζηση σε μεικτό ίζημα χαρακτηρίζεται από τη διαφορά στην ταχύτητα καθίζησης των συνεκτικών και των μη συνεκτικών ιζημάτων. Αυτή έχει ως αποτέλεσμα των διαχωρισμό κατά βάθος των δυο κλασμάτων.

Αγνοώντας την επιρροή του μη συνεκτικού κλάσματος μπορεί να προκύψει μια σχέση υπολογισμού εμποδιζόμενης καθίζησης:

$$W_s^m = \frac{(1 - \phi_f^m)(1 - \phi_s^m)}{1 + 2.5\phi_f^m} W_{s,r}^m \quad (0.35)$$

Η σχέση υπολογισμού της εμποδιζόμενης καθίζησης συγκρίνεται με δεδομένα από τους Thorn (1981), Ross (1988) και Wolanski et al. (1992).

Στο Σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται με συνεχή γραμμή τα δεδομένα που προκύπτουν από την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης για χαρακτηριστικές τιμές της συγκέντρωσης c_{gel} . Αυτά συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα των Thorn (1981), Ross (1988) και Wolanski (1992), αποδίδοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα.



Σχήμα 2-21: Ταχύτητα καθίζησης συναρτήσει του μεγέθους των κροκίδων
(Πηγή: Winterwerp και Van Kesteren, 2004)

Στο Σχήμα 2-21, το διάγραμμα παρουσιάζει για ίζημα με συγκεντρώσεις μικρότερες των 3g/l σταδιακή αύξηση της ταχύτητας καθίζησης, με την αύξηση της συγκέντρωσης. Η ταχύτητα φτάνει σε μια μέγιστη τιμή κοντά στο όριο των 3g/l ενώ περαιτέρω αύξησή της έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας καθίζησης.

2.4. Στερεομεταφορά μεικτών ιζημάτων

Στη φύση εκτός από τις ακτές που αποτελούνται από συνεκτικό ή μη συνεκτικό ίζημα συναντώνται συχνά και ακτές που αποτελούνται από μεικτό ίζημα (συνεκτικό-μη συνεκτικό) σε διάφορες περιεκτικότητες. Για την κατανόηση του μηχανισμού μεταφοράς του ιζήματος αποτελεί βασική προϋπόθεση η κατανόηση του μηχανισμού διάβρωσης του πυθμένα.

Μέχρι και σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί εκτενείς έρευνες για το κατώφλι κίνησης του ιζήματος σε πυθμένες από συνεκτικά υλικά (Raudkivi, 1990; Dade et al., 1992; Mehta, 1993; Mehta και Lee, 1994) ή από άμμο (Miller et al., 1977; Sleath, 1984; Dyer, 1986; Voulgaris et al., 1995). Παρόλα αυτά λίγοι είναι αυτοί που έχουν εξετάσει συνδυασμούς των δυο τύπων ιζημάτων, ενώ οι έρευνές τους έχουν διεξαχθεί κατά κύριο λόγο στο εργαστήριο.

Από τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για την διερεύνηση της διαβρωσιμότητας πυθμένων από μεικτό ίζημα (Mitchener και Torfs, 1995; Torfs et al., 1995; Panagiotopoulos et al., 1997; Van Ledden et al., 2003) εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

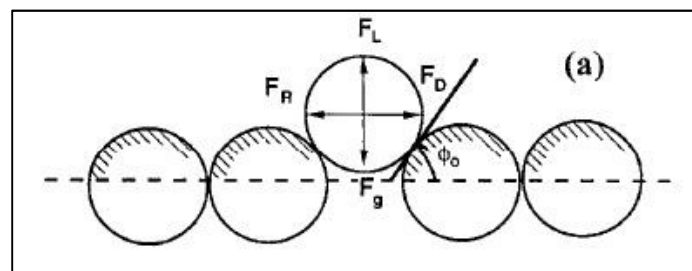
- Η κρίσιμη διατμητική τάση για διάβρωση του πυθμένα αυξάνεται τόσο όταν προστίθεται συνεκτικό ίζημα σε άμμο, όσον όταν η άμμος προστίθεται σε συνεκτικό ίζημα. Η προσθήκη άμμου σε ποσοστό 50% κατά βάρος μπορεί έως και να διπλασιάσει την κρίσιμη διατμητική τάση για διάβρωση. Από την άλλη, η προσθήκη συνεκτικού

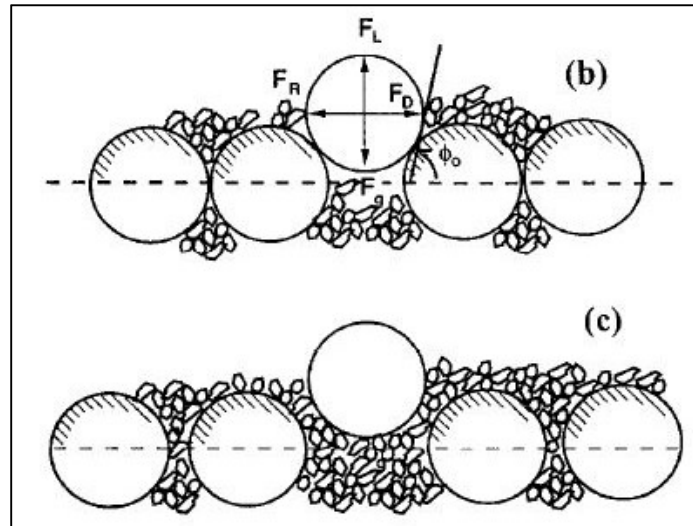
ιζήματος σε ποσοστό 30% κατά βάρος σε άμμο μπορεί έως και να δεκαπλασιάσει την κρίσιμη διατμητική τάση.

- Σε άμμο με ποσοστό 70%-100% κατά βάρος, η κρίσιμη διατμητική τάση για διάβρωση εξαρτάται τόσο από το μέγεθος των κόκκων του ιζήματος όσο και από τις ιδιότητες του συνεκτικού ιζήματος.
- Η προσθήκη συνεκτικού ιζήματος σε άμμο αυξάνει σημαντικά την κρίσιμη διατμητική τάση για διάβρωση του πυθμένα, με τη μέγιστη τιμή της να προκύπτει για περιεκτικότητα σε άμμο 50%-70% κατά βάρος.
- Στην περίπτωση που προστεθεί ικανή ποσότητα συνεκτικού ιζήματος στην άμμο, τότε η διάβρωση του πυθμένα πραγματοποιείται σαν αυτός να αποτελείται αποκλειστικά από συνεκτικό ίζημα. Από την έρευνα των Mitchener και Torfs (1995) προκύπτει ότι ο πυθμένας από μεικτό ίζημα συμπεριφέρεται ως συνεκτικός για περιεκτικότητα συνεκτικού υλικού (αργίλου, ιλύος) μεγαλύτερη του 15%. Σε περιεκτικότητες συνεκτικού υλικού μικρότερες του 3% ο πυθμένας συμπεριφέρεται ως αμμώδης κατά τη διάβρωσή του, ενώ κατά το διάστημα 3%-15% παρουσιάζει μια μεταβατική συμπεριφορά.

Στην έρευνα των Panagiotopoulos et al. (1997) αναφέρεται ότι το όριο συμπεριφοράς του πυθμένα ως συνεκτικός είναι 30% για άργιλο και ιλύ και 11%-14% για καθαρό αργιλικό υλικό. Οι τελευταίοι προσπάθησαν να εξηγήσουν τους μηχανισμούς εκκίνησης της διάβρωσης για μεικτό ίζημα βασιζόμενοι στην έρευνα των Wiberg και Smith (1987). Για το σκοπό αυτό, όρισαν για κάθε κόκκο το βάρος (F_g), τη δύναμη ανύψωσης (F_L), τη δύναμη έλξης (F_D) και τη δύναμη αντίστασης (F_R). Επίσης όρισαν την εσωτερική γωνία τριβής (ϕ_0) της άμμου. Όλα τα παραπάνω μεγέθη απεικονίζονται στο Σχήμα 2-22.

Σε αυτό αρχικά απεικονίζεται μια κατάσταση όπου το ίζημα είναι αποκλειστικά αμμώδες (a). Στην περίπτωση αυτή το ίζημα πρέπει να υπερβεί την εσωτερική γωνία τριβής του, ώστε να αρχίσει να κινείται σύμφωνα με το μηχανισμό της περιστροφής. Στην περίπτωση (b), στο ίζημα του πυθμένα περιέχονται και σωματίδια συνεκτικού ιζήματος (αργίλου ή ιλύος) με αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής γωνίας τριβής, η οποία και δυσχεραίνει την εκκίνηση του σωματιδίου. Τέλος στην περίπτωση (c) το συνεκτικό ίζημα στο μείγμα του πυθμένα είναι σε ποσοστό μεγαλύτερο του 30% και κατ' επέκταση ο πυθμένας διαβρώνεται σύμφωνα με το μηχανισμό διάβρωσης των συνεκτικών ιζημάτων.





Σχήμα 2-22: Μηχανισμοί διάβρωσης σε μεικτό ίζημα (Πηγή: Wiberg και Smith, 1987)

Κρίσιμη διατμητική τάση διάβρωσης

Στις §2.2.2 και 2.3.2 αναφέρθηκαν οι τρόποι υπολογισμού της κρίσιμης διατμητικής τάσης για διάβρωση σε πυθμένες με μη συνεκτικό και συνεκτικό ίζημα αντίστοιχα. Όπως επισημάνθηκε, στην περίπτωση των μη συνεκτικών ιζημάτων (άμμοι) βασικό ρόλο στον υπολογισμό της κρίσιμης διατμητικής τάσης για διάβρωση είναι η μέση διάμετρος του ιζήματος (d_{50}). Αντιθέτως, στα συνεκτικά ιζήματα βασικό ρόλο παίζει ο βαθμός στερεοποίησης της εδαφικής στρώσης του πυθμένα αλλά και η πλαστιμότητα του ιζήματος που περιέχει.

Για τον ορισμό του μεγέθους αυτού στα μεικτά ιζήματα οι Panagiotopoulos et al. (1997) πραγματοποίησαν πειραματικές δοκιμές για άμμους διαμέτρων 152.5 και 215 μm , και με περιεκτικότητες σε συνεκτικό ίζημα 5, 10, 20, 30, 40, 50% υπό κυματισμούς με περιόδους 2.0-6.7 sec. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-23.

Sand size (μm)	Mud (%)	T (s)	U_b (cm s^{-1})	τ_w (N m^{-2})	T (s)	U_b (cm s^{-1})	τ_w (N m^{-2})	T (s)	U_b (cm s^{-1})	τ_w (N m^{-2})	T (s)	U_b (cm s^{-1})	τ_w (N m^{-2})
152.5	0	3.9	22.9	0.045	4.5	26.7	0.054	5.6	26.1	0.049	6.4	27.9	0.053
	5	3.8	23.6	0.047	4.3	27.6	0.058	5.6	26.1	0.049	6.4	27.7	0.053
	10	3.7	24.2	0.049	4.5	26.3	0.053	5.6	26.1	0.049	6.4	27.9	0.053
	20	3.8	23.8	0.048	4.5	26.5	0.054	5.5	27.0	0.052	6.3	28.5	0.056
	30	3.7	24.3	0.049	4.5	26.1	0.053	5.3	27.9	0.055	6.4	28.0	0.054
	40	2.5	36.4	0.100	3.5	33.4	0.081	4.5	33.0	0.075	5.6	31.8	0.067
	50	2.0	43.8	0.139	3.0	39.4	0.108	4.1	35.5	0.085	5.6	32.0	0.068
215	0	4.0	22.4	0.043	4.9	24.1	0.045	5.8	25.5	0.048	6.6	26.8	0.050
	5	4.1	21.6	0.040	4.7	25.2	0.049	5.9	24.9	0.046	6.7	26.7	0.049
	10	4.1	21.9	0.041	5.1	23.0	0.042	5.6	26.3	0.050	6.4	28.0	0.054
	20	3.9	22.6	0.044	5.0	23.6	0.044	5.7	25.7	0.048	6.3	28.2	0.055
	30	4.0	22.2	0.042	4.5	26.3	0.053	5.8	25.2	0.047	6.4	27.8	0.053
	40	3.2	28.0	0.063	3.6	33.3	0.080	4.9	30.0	0.063	5.8	31.0	0.064
	50	3.1	28.3	0.065	3.7	32.2	0.076	5.0	29.4	0.061	5.9	30.5	0.062

Σχήμα 2-23: Κρίσιμη διατμητική τάση μεικτού ιζήματος (Πηγή: Panagiotopoulos et al., 1997)

Στο Σχήμα 2-23 απεικονίζεται πίνακας, στον οποίον παρατηρείται ότι για καθαρές άμμους η κρίσιμη διατμητική τάση για διάβρωση κυμαίνεται μεταξύ 0.045-0.053 Pa για $d_{50}=152.5$ μm και μεταξύ 0.043-0.050 Pa για $d_{50}=215$ μm . Επίσης είναι εμφανής η αύξηση της κρίσιμης τάσης με την προσθήκη αργίλου στην άμμο. Τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της εφαρμογής της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας για την εκτίμηση της κρίσιμης διατμητικής τάσης για διάβρωση, στο μοντέλο μεικτού ιζήματος που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

3. Θεωρητικό υπόβαθρο και αριθμητικά σχήματα ροής

3.1. Θεωρητικό υπόβαθρο

Για την επίλυση ενός πεδίου ροής είναι απαραίτητες δύο ομάδες διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες και περιγράφουν το πεδίο ταχυτήτων του. Αυτές είναι οι εξισώσεις συνέχειας και οι εξισώσεις ποσότητας κίνησης κατά την κατεύθυνση της ροής. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αναπτύσσονται τα θεωρητικά στοιχεία που περιγράφουν τις εξισώσεις αυτές.

Τα στοιχεία αυτά αφορούν στο κυματικό μοντέλο, τα αποτελέσματα του οποίου (πεδίο ταχυτήτων) χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την εκτίμηση της στερεοπαροχής.

3.1.1. Εξίσωση συνέχειας

Η εξίσωση συνέχειας είναι μια διαφορική εξίσωση που εκφράζει την αρχή διατήρησης της ποσότητας της μάζας ενός ρευστού. Ουσιαστικά δηλαδή δηλώνει ότι σε ένα τρισδιάστατο πεδίο ροής και για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα dt , όση ποσότητα της μάζας του ρευστού εισέρχεται εντός ενός διαφορικού όγκου, τόση και εξέρχεται.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιλέγεται ομοιογενές κατά το βάθος του πεδίο ροής. Στην περίπτωση αυτή, η εξίσωση συνέχειας μπορεί να εκφραστεί κατά τις δύο διαστάσεις και αμελώντας τη διάσταση του βάθους ως εξής:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0 \quad (1.1)$$

όπου ζ είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της στάθμης ηρεμίας της ελεύθερης επιφάνειας και του επιπέδου της μέσης στάθμης της θάλασσας (λόγω wave setup), U είναι η μέση καθ' ύψος ταχύτητα ροής κατά τον άξονα x , V είναι η μέση καθ' ύψος ταχύτητα ροής κατά τον άξονα y και h είναι το βάθος του πυθμένα.

Ερμηνεύοντας ποιοτικά τους όρους της εξίσωσης, ο πρώτος όρος που περιέχει την κατακόρυφη απόσταση ζ εκφράζει την μεταβολή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου. Ο δεύτερος και ο τρίτος όρος, που περιέχουν τις μέσες ταχύτητες U, V και το βάθος του πυθμένα h εκφράζουν τη διατήρηση της μάζας του ρευστού για κίνηση κατά τους άξονες x και y αντίστοιχα.

3.1.2. Εξίσωση ποσότητας κίνησης

Οι δύο υπόλοιπες εξισώσεις που περιγράφουν την ομοιογενή κατά βάθος κίνηση του ρευστού είναι οι εξισώσεις ποσότητας κίνησης κατά τις διευθύνσεις x και y . Οι εξισώσεις αυτές εκφράζουν την αρχή διατήρησης της ορμής σε στοιχειώδη όγκο του ρευστού. Ουσιαστικά δηλαδή εκφράζουν το γεγονός ότι ο ρυθμός μεταβολής της ορμής είναι

ανάλογος με την συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στον ιδεατό όγκο του ρευστού.

Η κατά τον άξονα x εξίσωση ποσότητας κίνησης (x -momentum equation) για την περίπτωση της ροής της παρούσας εργασίας μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - A_x + v_h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho h} \quad (1.2)$$

όπου ζ είναι η ανύψωση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας, U είναι η μέση ταχύτητα ροής κατά τον άξονα x , V είναι η μέση ταχύτητα ροής κατά τον άξονα y , h είναι το βάθος του πυθμένα και ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού. Επιπλέον, η παράμετρος A_x εκφράζει τον όρο του διεγέρτη, όπως η δύναμη Coriolis η οποία λαμβάνεται υπόψη για μεγάλο πεδίο ροής. Στην περίπτωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας η παράμετρος αυτή αγνοείται καθώς το πεδίο ροής της ακτής εφαρμογής είναι σχετικά μικρό σε έκταση. Άλλη παράμετρος διεγέρτη είναι οι τάσεις ακτινοβολίας, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παρούσα εφαρμογή. Ακόμα, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, v_h είναι ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης κατά την οριζόντια έννοια, τ_{sx} και τ_{bx} είναι οι διατμητικές τάσεις που ασκούνται στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού και στο ρευστό από τον πυθμένα αντίστοιχα κατά τον άξονα x .

Ερμηνεύοντας ποιοτικά τους όρους της εξίσωσης, οι όροι του πρώτου μέλους αφορούν τη μεταβολή της μέσης ταχύτητας ροής (U). Ειδικότερα, ο πρώτος όρος εκφράζει τη χρονική μεταβολή της U κατά x , ενώ οι δύο επόμενοι όροι αφορούν τη μεταβολή της ταχύτητας U ως προς τις διευθύνσεις των αξόνων x και y αντίστοιχα. Οι όροι στο δεύτερο μέρος κατά σειρά γραφής στην εξίσωση αφορούν τη μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας ως προς τον άξονα x , την επιρροή του διακινητή, την τυρβώδη διάχυση και τις διατμητικές τάσεις που ασκούνται στα άνω και κάτω όρια του ιδεατού όγκου του ρευστού (ελεύθερη επιφάνεια και πυθμένα αντίστοιχα).

Η κατά τον άξονα y εξίσωση ποσότητας κίνησης (y -momentum equation) για την περίπτωση της ροής της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας μπορεί να εκφραστεί όμοια ως εξής:

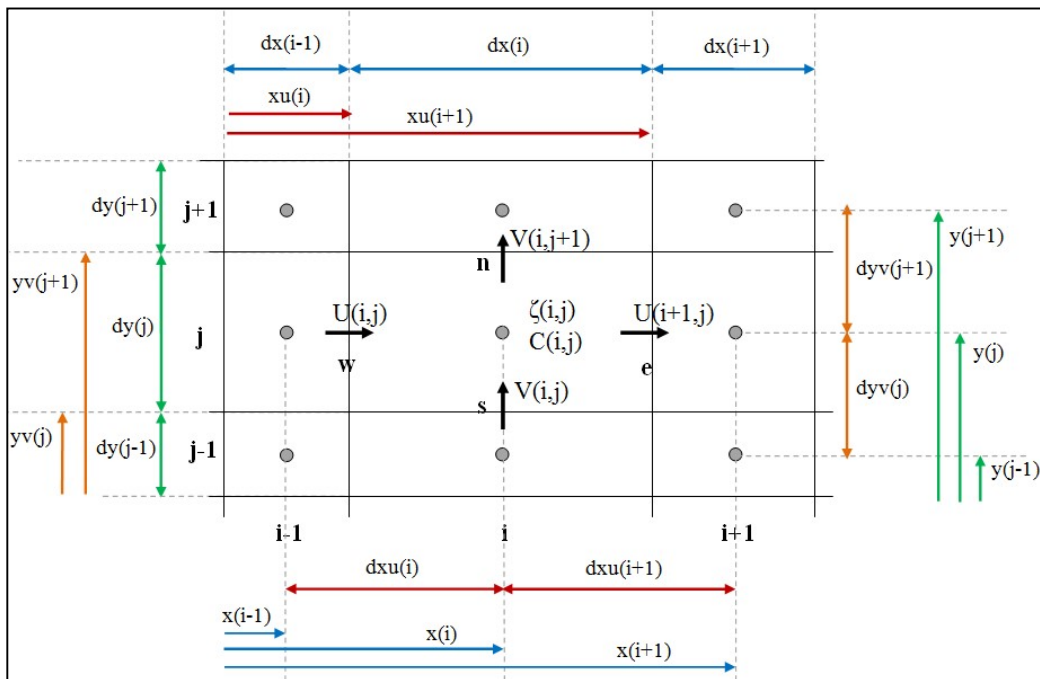
$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - A_y + v_h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho h} \quad (1.3)$$

Επιπλέον των παραπάνω παραμέτρων, η παράμετρος A_y εκφράζει τον όρο του διακινητή κατά τη διεύθυνση του άξονα y , ενώ τ_{sy} και τ_{by} είναι οι διατμητικές τάσεις που ασκούνται στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού και στο ρευστό από τον πυθμένα αντίστοιχα κατά τον άξονα y . Οι όροι της εξίσωσης (1.3) μπορούν να ερμηνευτούν σε αντιστοιχία με τους όρους της εξίσωσης (1.2).

3.2. Αριθμητικά σχήματα επίλυσης

Για την υπολογιστική διαδικασία γίνεται χρήση αριθμητικού σχήματος πεπερασμένων διαφορών σε έκκεντρο πλέγμα (staggered grid). Ο κάρναβος που θα χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι μεταβλητού χωρικού βήματος ανά θέση και διαστάσεων 510 m x 240 m. Σε κάθε στοιχείο του πλέγματος (ορθογωνίου σχήματος) ορίζονται σε συγκεκριμένες θέσεις τα χαρακτηριστικά της ροής. Συγκεκριμένα στο κέντρο των στοιχείων ορίζονται οι ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας, ενώ ανάντη των κόμβων στα όρια των στοιχείων, western και southern ορίζονται οι ταχύτητες ροής κατά x (U) και κατά y (V) αντίστοιχα.

Στο σχήμα που ακολουθεί, απεικονίζεται ενδεικτικά ένα τέτοιο πλέγμα, με μεταβλητά dx και dy για κάθε στοιχείο του.



Σχήμα 3-1: Έκκεντρο πλέγμα (Πηγή: Stamou, 2016)

3.2.1. Εξίσωση συνέχειας

Για να εισαχθούν οι διαφορικές εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης στην υπολογιστική διαδικασία πρέπει να μετατραπούν σε διακριτοποιημένες εξισώσεις. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση αριθμητικών σχημάτων. Τα αριθμητικά σχήματα αυτά χρησιμοποιούν τη θεωρία των δυναμοσειρών Taylor. Όσον αφορά στην εξίσωση συνέχειας, οι όροι της μπορούν να διακριτοποιηθούν ως εξής:

$$\frac{\zeta(i,j) - \zeta^0(i,j)}{dt} + \frac{(UH)_e - (UH)_w}{dx(i)} + \frac{(UH)_n - (UH)_s}{dy(j)} = 0 \quad (1.4)$$

Οι ταχύτητες στα όρια του κάθε κόμβου υπολογίζονται λαμβάνοντας την τιμή του ανάντη κόμβου, ως εξής:

$$\begin{aligned} U_e &= U^0(i+1, j) \\ U_w &= U^0(i, j) \\ V_n &= V^0(i, j+1) \\ V_s &= V^0(i, j) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Οι παραπάνω σχέσεις ορίζουν τις ταχύτητες U και V κατά τις διευθύνσεις x και y για τα ανατολικά, δυτικά, βόρεια και νότια όρια των κόμβων αντίστοιχα.

Ο υπολογισμός των βαθών στα όρια των κόμβων πραγματοποιείται με γραμμική παρεμβολή, η οποία αποτελεί απλοποιητική παραδοχή.

$$\begin{aligned} H_e &= 0.5 \cdot (H(i, j) + H(i+1, j)) \\ H_w &= 0.5 \cdot (H(i-1, j) + H(i, j)) \\ H_n &= 0.5 \cdot (H(i, j) + H(i, j+1)) \\ H_s &= 0.5 \cdot (H(i, j-1) + H(i, j)) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Στις παραπάνω σχέσεις παρουσιάζονται τα βάρη στα ανατολικά, δυτικά, βόρεια και νότια όρια των κόμβων αντίστοιχα.

3.2.2. Εξίσωση ποσότητας κίνησης

Για τις εξισώσεις ποσότητας κίνησης, ακολουθείται πανομοιότυπη διαδικασία διακριτοποίησης. Ορίζοντας τους όρους της εξίσωσης (T_1-T_7) πέραν αυτού της μεταβολής της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου, η εξίσωση αποκτά την εξής μορφή:

$$\frac{U(i, j) - U^0(i, j)}{dt} = -T_1 - T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 \quad (1.7)$$

Επιλύοντας ως προς την ταχύτητα $U(i, j)$ η σχέση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$U(i, j) = U^0(i, j) + (-T_1 - T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7) dt \quad (1.8)$$

όπου οι όροι T_{1-7} αναλύονται στη συνέχεια. Ο όρος T_1 ορίζεται ως εξής:

$$T_1 = U_m \frac{\partial U}{\partial x} \quad (1.9)$$

με τις επιμέρους παραμέτρους να ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}
U_m &= U^0(i, j) \\
\frac{\partial U}{\partial x} &= \frac{U_e - U_w}{dx} \\
U_e &= 0.5 \cdot (U^0(i, j) + U^0(i+1, j)) \\
U_w &= 0.5 \cdot (U^0(i-1, j) + U^0(i, j))
\end{aligned} \tag{1.10}$$

Ομοίως, ο όρος T_2 προκύπτει ως εξής:

$$T_2 = V_m \frac{\partial U}{\partial y} \tag{1.11}$$

με τις επιμέρους παραμέτρους να ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}
V_m &= 0.25 \cdot (V^0(i-1, j) + V^0(i-1, j+1) + V^0(i, j) + V^0(i, j+1)) \\
\frac{\partial U}{\partial y} &= \frac{U_n - U_s}{dy} \\
U_n &= 0.5 \cdot (U^0(i, j) + U^0(i, j+1)) \\
U_s &= 0.5 \cdot (U^0(i, j-1) + U^0(i, j))
\end{aligned} \tag{1.12}$$

Όσον αφορά στους όρους T_{3-5} εκφράζονται ως εξής:

$$T_3 = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \tag{1.13}$$

όπου

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{\zeta_e - \zeta_w}{dx} = \frac{\zeta^0(i, j) - \zeta^0(i-1, j)}{dx} \tag{1.14}$$

$$T_4 = -\frac{T_{bx}}{\rho h} = -g \frac{n^2}{H_m^{4/3}} \cdot U_m^2 \cdot \sqrt{U_m^2 + V_m^2} \tag{1.15}$$

όπου

$$H_m = 0.5 \cdot (H(i, j) - H(i-1, j)) \tag{1.16}$$

$$T_5 = \frac{1}{\rho H_m} \left(\frac{S_{xxe} - S_{xxw}}{dx} + \frac{S_{xyn} - S_{xys}}{dy} \right) \tag{1.17}$$

στον όρο T_5 , S_{xx} , S_{xy} είναι οι τάσεις ακτινοβολίας στα όρια (ανατολικά, δυτικά, βόρεια, νότια) των στοιχείων του καννάβου. Ο όρος T_6 , ορίζεται ως εξής:

$$T_6 = v_h \left(\frac{\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_e - \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_w}{dx} \right) \quad (1.18)$$

με τις επιμέρους παραμέτρους να ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_e &= \frac{U^0(i+1, j) - U^0(i, j)}{dx} \\ \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_w &= \frac{U^0(i, j) - U^0(i-1, j)}{dx} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Τέλος ορίζεται η παράμετρος T_7 ,

$$T_7 = v_h \left(\frac{\left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_n - \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_s}{dy} \right) \quad (1.20)$$

με τις επιμέρους παραμέτρους να ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_n &= \frac{U^0(i, j+1) - U^0(i, j)}{dy} \\ \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_s &= \frac{U^0(i, j) - U^0(i, j-1)}{dy} \end{aligned} \quad (1.21)$$

Ανάλογη διαδικασία ακολουθείται και στην εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά y , η οποία μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\frac{V(i, j) - V^0(i, j)}{dt} = -S_1 - S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7 \quad (1.22)$$

Επιλύοντας ως προς την ταχύτητα $V(i, j)$ η σχέση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$V(i, j) = V^0(i, j) + (-S_1 - S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7) dt \quad (1.23)$$

όπου οι όροι S_{1-7} ορίζονται κατά τα παρακάτω:

$$S_1 = U_m \frac{\partial V}{\partial x} \quad (1.24)$$

με τις επιμέρους παραμέτρους να ορίζονται ως εξής:

$$U_m = 0.25 \cdot (U^0(i, j-1) + U^0(i, j) + U^0(i+1, j-1) + U^0(i+1, j))$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V_e - V_w}{dx} \quad (1.25)$$

$$V_e = 0.5 \cdot (V^0(i, j) + V^0(i+1, j))$$

$$V_w = 0.5 \cdot (V^0(i-1, j) + V^0(i, j))$$

Ο όρος S_2 προκύπτει ως εξής:

$$S_2 = V_m \frac{\partial V}{\partial y} \quad (1.26)$$

με τις επιμέρους παραμέτρους να ορίζονται ως εξής:

$$V_m = V^0(i, j)$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = \frac{V_n - V_s}{dy} \quad (1.27)$$

$$V_n = 0.5 \cdot (V^0(i, j) + V^0(i, j+1))$$

$$V_s = 0.5 \cdot (V^0(i, j-1) + V^0(i, j))$$

Αντίστοιχα οι όροι S_{3-5} εκφράζονται ως εξής:

$$S_3 = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (1.28)$$

Όπου

$$\frac{\partial \zeta}{\partial y} = \frac{\zeta_n - \zeta_s}{dy} = \frac{\zeta^0(i, j) - \zeta^0(i, j-1)}{dy} \quad (1.29)$$

$$S_4 = -\frac{T_{by}}{\rho h} = -g \frac{n^2}{H_m^{4/3}} \cdot V_m^2 \cdot \sqrt{U_m^2 + V_m^2} \quad (1.30)$$

$$S_5 = \frac{1}{\rho H_m} \left(\frac{S_{xye} - S_{xyw}}{dx} + \frac{S_{yyn} - S_{yys}}{dy} \right) \quad (1.31)$$

όπου

$$H_m = 0.5 \cdot (H(i, j) - H(i, j+1)) \quad (1.32)$$

στον όρο S_5 , S_{yy} , S_{xy} είναι οι τάσεις ακτινοβολίας στα όρια (ανατολικά, δυτικά, βόρεια, νότια) των στοιχείων του καννάβου. Ο όρος S_6 προκύπτει:

$$S_6 = v_h \left(\frac{\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)_e - \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)_w}{dx} \right) \quad (1.33)$$

με τις επιμέρους παραμέτρους να ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)_e &= \frac{V^0(i+1, j) - V^0(i, j)}{dx} \\ \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)_w &= \frac{V^0(i, j) - V^0(i-1, j)}{dx} \end{aligned} \quad (1.34)$$

Τέλος ορίζεται η παράμετρος S_7 ,

$$S_7 = v_h \left(\frac{\left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)_n - \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)_s}{dy} \right) \quad (1.35)$$

με τις επιμέρους παραμέτρους να ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)_n &= \frac{V^0(i, j+1) - V^0(i, j)}{dy} \\ \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)_s &= \frac{V^0(i, j) - V^0(i, j-1)}{dy} \end{aligned} \quad (1.36)$$

4. Μοντέλα στερεομεταφοράς

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται παρουσίαση των βασικών σχέσεων που περιγράφουν το φαινόμενο της στερεομεταφοράς. Η παρουσίαση αυτή πραγματοποιείται αρχικά για μη συνεκτικά ιζήματα και στη συνέχεια τροποποιείται για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής συνεκτικών ιζημάτων. Πρόσθετα, στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας τα παραπάνω μοντέλα συνδυάζονται για να προκύψει ένα μοντέλο υπολογισμού στερεοπαροχής μεικτού ιζήματος (περιλαμβάνει συνεκτικό και μη συνεκτικό ίζημα). Τέλος, παρουσιάζονται για λόγους πληρότητας οι βασικές προϋποθέσεις δημιουργίας ενός μοντέλου που εξετάζει τις χρονικές μεταβολές στο κυματικό πεδίο και στη βυθομετρία.

Για τη στερεομεταφορά στην παράκτια ζώνη η βασική εξίσωση που επιλύεται θεωρώντας πυθμένα ήπιας κλίσης και ολοκληρώνοντας κατά βάθος είναι η εξής:

$$\frac{d\zeta_b}{dt} + \frac{d}{dx}(q_{sx} + q_{bx}) + \frac{d}{dy}(q_{sy} + q_{by}) = S \quad (2.1)$$

όπου ζ_b είναι η στάθμη του πυθμένα και q_{bx} και q_{by} είναι το φορτίο πυθμένα κατά τις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα, τα οποία δεν ενσωματώνουν την τυρβώδη διάχυση. Επιπλέον, q_{sx} και q_{sy} είναι το φορτίο υπό αιώρηση κατά τις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα, τα οποία ενσωματώνουν την τυρβώδη διάχυση ενώ με S συμβολίζεται η πιθανή προσθήκη ή απώλεια υλικού.

Τα μοντέλα που θα αναφερθούν στις επόμενες ενότητες εξετάζουν τον υπολογισμό της στερεοπαροχής λόγω της κυματογενούς κυκλοφορίας. Στα πλαίσια αυτά λήφθηκαν οι εξής βασικές απλοποιητικές παραδοχές:

1. Οι κυματισμοί είναι γραμμικοί.
2. Το κυματικό πεδίο που επικρατεί στην υπό εξέταση ακτή παραμένει αναλλοίωτο παρά την αλλαγή της βαθυμετρίας.
3. Στα κυματογενή ρεύματα έχουν επέλθει συνθήκες ισορροπίας (steady state).

4.1. Μοντέλο μη συνεκτικών ιζημάτων

Η συνολική στερεομεταφορά ισούται με το διανυσματικό άθροισμα:

$$q_t = q_b + q_s \quad (2.2)$$

Όπου q_b , q_s είναι τα διανυσματικά μεγέθη για το φορτίο πυθμένα και το φορτίο υπό αιώρηση αντίστοιχα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι σχέσεις υπολογισμού του φορτίου πυθμένα και του φορτίου υπό αιώρηση αντίστοιχα.

4.1.1. Φορτίο πυθμένα

Για το φορτίο πυθμένα στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας προτείνεται η χρήση της εμπειρικής σχέσης των Meyer-Peter (& Muller τροποποιημένη).

$$\frac{\langle q_{bx} \rangle}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}} = 11 \left| \theta \right| - \theta_{cr} > \frac{\theta_x}{\left| \theta \right|} \quad (2.3)$$

όπου d_{50} είναι η μέση διάμετρος κόκκου του υλικού του ιζήματος, ν η κινηματική συνεκτικότητα του νερού, ρ_s η πυκνότητα του ιζήματος και ρ η πυκνότητα του θαλασσινού

$$\text{νερού και } \Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}.$$

Η θ_{cr} είναι η κρίσιμη παράμετρος κινητικότητας, η οποία υπολογίζεται προσεγγιστικά από το διάγραμμα Shields, όπως αυτό παρουσιάστηκε στην §2.2.2. Η απόλυτη τιμή της παραμέτρου Shields δίνεται από τη σχέση:

$$\left| \theta \right| = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2} \quad (2.4)$$

όπου θ_x και θ_y είναι οι τιμές της παραμέτρου Shields κατά τις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα. Οι παράμετροι αυτοί υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\theta_x = \frac{\tau_{bx}}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50}} \quad (2.5)$$

$$\theta_y = \frac{\tau_{by}}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50}}$$

Στις παραπάνω σχέσεις υπολογισμού οι παράμετροι τ_{bx} και τ_{by} είναι οι συνιστώσες των διατμητικών τάσεων τριβής που ασκούνται από τη ροή στον πυθμένα και κατ επέκταση στα σωματίδιά του. Οι τάσεις αυτές είναι υπεύθυνες σε ένα μεγάλο βαθμό για την έναρξη κίνησης του ιζήματος. Υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \tau_{bx} &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f_w \cdot \langle u_b \cdot \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \rangle \\ \tau_{by} &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f_w \cdot \langle v_b \cdot \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \rangle \end{aligned} \quad (2.6)$$

Από τις σχέσεις υπολογισμού των διατμητικών τάσεων τριβής του πυθμένα, η παράμετρος f_w αποτελεί το συντελεστή τριβής λόγω της δράσης των κυματισμών, η οποία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f_w = \exp \left[5.213 \cdot \left(\frac{\bar{K}_s}{\Xi} \right)^{0.194} - 5.977 \right] \quad (2.7)$$

Στην τελευταία σχέση, Ξ είναι το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στον πυθμένα σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία και \bar{K}_s είναι ο συντελεστής τραχύτητας του πυθμένα που εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου $\theta_{2.5}$ κατά την εξής σχέση:

$$\bar{K}_s = \begin{cases} \frac{8\eta^2}{\lambda} + 0.170 \cdot d_{50} \cdot (\theta_{2.5} - 0.05)^{0.5}, & \text{για } \theta_{2.5} > 0.05 \\ 2.5 \cdot d_{50}, & \text{για } \theta_{2.5} \leq 0.05 \end{cases} \quad (2.8)$$

Ο όρος $\frac{8\eta^2}{\lambda}$ προϋποθέτει την ύπαρξη αμμοκυματίων στον πυθμένα. Με η συμβολίζεται το ύψος των αμμοκυματίων και με λ το μήκος τους. Η παράμετρος $\theta_{2.5}$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\theta_{2.5} = \frac{1}{2} \cdot f_{2.5} \cdot \Psi \quad (2.9)$$

$$\text{με } f_{2.5} = \exp \left[5.213 \left(\frac{2.5 \cdot d_{50}}{\Xi} \right)^{0.194} - 5.977 \right] \text{ και} \quad (2.10)$$

$$\Psi = \frac{U_0^2}{g \cdot \Delta \cdot d_{50}} \quad (2.11)$$

Η παράμετρος Ψ παίρνει τιμές στο διάστημα $240 > \Psi > 10$. Για τιμές της παραμέτρου Ψ εκτός του διαστήματος αυτού τα αμμοκυμάτια εξαφανίζονται. Στις παραπάνω σχέσεις U_0 είναι το ημι-εύρος της ταχύτητας ταλάντωσης των υγρών μορίων στον πυθμένα, σύμφωνα με την γραμμική θεωρία πρώτης τάξης. Υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$U_0 = \pi \frac{H_s}{T \sinh(kh)} \quad (2.12)$$

όπου H_s είναι το χαρακτηριστικό ύψος του κυματισμού και h το βάθος του πυθμένα.

4.1.2. Φορτίο υπό αιώρηση

Το φορτίο υπό αιώρηση υπολογίζεται κατά τις διευθύνσεις x και y από τα ολοκληρώματα:

$$\begin{aligned}
 q_{sx} &= \int_{-h}^0 u(z) \cdot c(z) dz = U \int_{-h}^0 c(z) dz \\
 q_{sy} &= \int_{-h}^0 v(z) \cdot c(z) dz = V \int_{-h}^0 c(z) dz
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Στις παραπάνω σχέσεις παρατηρείται ότι η ποσότητα του φορτίου υπό αιώρηση εξαρτάται από τη μέση κατά βάθος ταχύτητα ροής και από τη συγκέντρωση του ιζήματος $c(z)$. Η συγκέντρωση του ιζήματος συναρτήσει του βάθους υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C(z) = C_a \cdot \exp\left(\frac{-W_s \cdot z}{\varepsilon_v}\right)
 \tag{2.14}$$

όπου ε_v είναι ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης κατά την κατακόρυφο που μπορεί να εκτιμηθεί από τα χαρακτηριστικά του θραυόμενου κυματισμού και του ρεύματος. Δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_v = 0.083 \cdot \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \cdot h + 0.025 \cdot h \cdot \left(\frac{D'}{e}\right)^{1/3}
 \tag{2.15}$$

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης αφορά στην τύρβη που αναπτύσσεται λόγω της ροής κοντά στον πυθμένα ενώ ο β' όρος στη θραύση των κυματισμών. Με τον όρο τ_b ορίζεται η συνολική διατμητική τάση που αναπτύσσεται στον πυθμένα ενώ D' είναι η απώλεια ενέργειας λόγω της θραύσης των κυματισμών που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$D' = \frac{1}{4} \cdot Q_b \cdot f \cdot \rho \cdot g \cdot H_m^2
 \tag{2.16}$$

Στη σχέση αυτή $f = 1/T_p$ είναι η συχνότητα και T_p είναι η περίοδος κορυφής του φάσματος κυματισμών, H_m είναι το μέγιστο ύψος κύματος σε τυχαίους κυματισμούς και Q_b είναι το ποσοστό θραυόμενων κυμάτων με παραδοχή κατανομής Rayleigh:

$$Q_b = 1 - \exp\left[\left(-\frac{H_{rms}}{H_s}\right)^2\right]
 \tag{2.17}$$

με H_{rms} το μέσο τετραγωνικό ύψος κύματος.

Επίσης, c_a είναι η συγκέντρωση αναφοράς του ιζήματος, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_a = 0.49 \cdot \theta^{1.77} \cdot \left(\frac{d_{50}}{w_s \cdot T \cdot f_w}\right)
 \tag{2.18}$$

Η ταχύτητα καθίζησης w_s δίνεται από τη σχέση:

$$w_s = \frac{\Delta \cdot g \cdot d_{50}^2}{\nu} \cdot C_1 + C_2 \cdot \sqrt{\Delta \cdot g \cdot d_{50}} \quad (2.19)$$

όπου οι συντελεστές C_1 και C_2 υπολογίζονται από τις αριθμητικές σχέσεις:

$$C_1 = 0.055 \cdot \tanh\left(12D'^{-0.59} \cdot e^{-0.0004D'}\right)$$

$$C_2 = 1.06 \cdot \tanh\left(0.016 \cdot D'^{0.5} \cdot e^{-\frac{120}{D'}}\right) \quad (2.20)$$

Και η παράμετρος D' δίνεται από τη σχέση:

$$D' = \frac{\Delta \cdot g \cdot d_{50}^3}{\nu^2} \quad (2.21)$$

Τέλος ολοκληρώνοντας τη συγκέντρωση $C(z)$ κατά βάθος, από τη σχέση (2.14), προκύπτει:

$$C_t = C_a \cdot \frac{\varepsilon_v}{w_s} \left[1 - \exp\left(-\frac{w_s \cdot h}{\varepsilon_v}\right) \right] \quad (2.22)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι πέραν των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν στο παρόν υποκεφάλαιο και θα παρουσιαστούν στην §4.2, για την ανανέωση της βαθυμετρίας χρησιμοποιείται αριθμητικό σχήμα εμπρόσθιων διαφορών ως εξής:

$$\zeta_b^{t_0+dt} = \zeta_b^{t_0} + \frac{dt}{1-n} \left[\left(q_{tx}^{i+1,j} - q_{tx}^{i,j} \right) dx^{i,j} + \left(q_{tx}^{i,j+1} - q_{tx}^{i,j} \right) dy^{i,j} \right] \quad (2.23)$$

Παρόλα αυτά, για την περίπτωση της εφαρμογής που παρουσιάζεται στην §5.1 στο δεξί όριο του καννάβου χρησιμοποιείται η διακριτοποιημένη εξίσωση ανανέωσης της βαθυμετρίας με την μέθοδο των οπίσθιων διαφορών. Η μέθοδος αυτή δε μπορεί να εφαρμοστεί σε όρια καννάβου όπου δεν υπάρχουν άλλα κελιά μπροστά από αυτό. Η εξίσωση αυτή διακριτοποιείται ως εξής:

$$\zeta_b^{t_0+dt} = \zeta_b^{t_0} + \frac{dt}{1-n} \left[\left(q_{tx}^{i,j} - q_{tx}^{i-1,j} \right) dx^{i,j} + \left(q_{tx}^{i,j} - q_{tx}^{i,j-1} \right) dy^{i,j} \right] \quad (2.24)$$

4.2. Μοντέλο συνεκτικών ιζημάτων

Στην περίπτωση των μοντέλων στερεομεταφοράς συνεκτικών ιζημάτων παρουσιάζονται κάποιες βασικές διαφοροποιήσεις ως προς τις μεθόδους υπολογισμού της στερεοπαροχής. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στις φυσικοχημικές ιδιότητες των συνεκτικών ιζημάτων. Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία η διαδικασία πρόβλεψης της κίνησης

του συνεκτικού ιζήματος υπολογίζει τους ρυθμούς διάβρωσης και απόθεσης και όχι τη στερεοπαροχή του ιζήματος, όπως συμβαίνει στα υφιστάμενα μοντέλα για τα μη συνεκτικά ιζήματα.

Οι υπολογιστικές μέθοδοι σε μη συνεκτικά ιζήματα βασίζονται περισσότερο σε περιορισμούς στερεομεταφοράς, υποθέτοντας ότι υπάρχει παροχή ιζήματος για να εξισώσει το δυναμικό της. Αντιθέτως, οι υπάρχουσες υπολογιστικές μέθοδοι των συνεκτικών ιζημάτων βασίζονται σε περιορισμούς παροχής και υποθέτουν ότι η ροή μπορεί να μεταφέρει όλο το ιζημα.

Βασικό αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η επέκταση του μοντέλου στερεομεταφοράς των μη συνεκτικών ιζημάτων που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, στα συνεκτικά ιζήματα. Οι βασικές διαφοροποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στη συνέχεια.

4.2.1. Φορτίο πυθμένα

Στην περίπτωση των μη συνεκτικών ιζημάτων πραγματοποιείται αναλυτικός υπολογισμός της ποσότητας του φορτίου που κινείται στον πυθμένα. Μια από τις διαθέσιμες μεθοδολογίες υπολογισμού παρουσιάστηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Αντιθέτως, **στη βιβλιογραφία δεν ορίζεται στερεοπαροχή ιζήματος στον πυθμένα, στην περίπτωση των συνεκτικών ιζημάτων.**

Παρόλα αυτά, στην περίπτωση που η επιφανειακή στρώση του πυθμένα αποτελείται από υγρή λάσπη (fluid mud), τότε παρατηρείται μια μορφή μεταφοράς ιζήματος σε αυτόν. Ως υγρή λάσπη ορίζεται μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ της αιώρησης και της απόθεσης του συνεκτικού ιζήματος, η οποία δημιουργείται ως αποτέλεσμα της υπερβολικής πίεσης των πόρων του πυθμένα. Η υπερβολική πίεση των πόρων προκαλείται είτε από την εμποδιζόμενη καθίζηση είτε από την επίδραση των κυματισμών. Το νερό δεν μπορεί να διαφύγει εξαιτίας των αποθέσεων του ιζήματος στον πυθμένα, σχηματίζοντας έτσι υπερπίεσεις για να μπορέσει να στηρίξει το βάρος του υπερκείμενου ιζήματος. Η όλη μάζα του ιζήματος και το παγιδευμένο νερό αποτελούν την υγρή λάσπη, η οποία συμπεριφέρεται ως ένα ενιαίο πυκνό και ιξώδες υγρό.

Η στρώση αυτή του εδάφους κινείται είτε σύμφωνα με την κατεύθυνση της ροής του ρευστού είτε ολισθαίνει σύμφωνα με τις κλίσεις του βυθού. Για τη δεύτερη περίπτωση, ουσιαστικά όταν οι γεωμετρικές κλίσεις της βαθυμετρίας του πυθμένα ξεπερνούν μια κρίσιμη τιμή α_c , τότε πραγματοποιείται ολίσθηση του αδύναμου στρώματος της υγρής λάσπης πάνω σε αυτόν.

Η κρίσιμη κλίση υπολογίζεται με τον εξής τύπο:

$$\alpha_e = \arctan \left[2.5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\rho}{1000} \right)^{4.7} \right] \quad (2.25)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα της εδαφικής στρώσης του πυθμένα σε g/m^3 .

Η διαδικασία της ολίσθησης της υγρής λάσπης μπορεί να μοντελοποιηθεί από την εξίσωση διασποράς (Teisson 1991).

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = K_{sx} \frac{\partial^2 z_b}{\partial x^2} + K_{sy} \frac{\partial^2 z_b}{\partial y^2} \quad (2.26)$$

όπου z_b είναι το βάθος του πυθμένα και K_{sx} , K_{sy} είναι οι εκάστοτε συντελεστές διασποράς.

Στο πλαίσιο της εφαρμογής της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας η επίδραση αυτού του φαινομένου αγνοείται, καθώς δεν παρουσιάζεται το φαινόμενο σχηματισμού υγρής λάσπης στην επιφάνεια του πυθμένα.

4.2.2. Φορτίο υπό αιώρηση

Όπως αναφέρθηκε και στην §4.2.1, στο μοντέλο που προέκυψε από την τροποποίηση του μοντέλου στερεοπαροχής συνεκτικών ιζημάτων, η στερεοπαροχή φορτίου πυθμένα θεωρείται μηδενική.

Στον υπολογισμό του φορτίου αιώρησης λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες και οι φυσικοχημικές ιδιότητες των μη συνεκτικών ιζημάτων που αναφέρθηκαν αναλυτικά στις §2.3.2, 2.3.3 και 2.3.4. Οι βασικοί άξονες γύρω από τους οποίους τροποποιείται το μοντέλο είναι:

1. Η αντοχή της επιφανειακής εδαφικής στρώσης του πυθμένα σε διάβρωση.
2. Το φαινόμενο του σχηματισμού κροκίδων.
3. Η ύπαρξη του φαινομένου της εμποδιζόμενης καθίζησης.
4. Η διαδικασία υπολογισμού της συγκέντρωσης του ιζήματος στο νερό.

Στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές τροποποιήσεις για κάθε μια από αυτές τις παραμέτρους ξεχωριστά.

Αντοχή σε διάβρωση

Όπως αναφέρθηκε στην §2.3.2 σε πυθμένες από συνεκτικά ιζήματα η κρίσιμη διατμητική τάση για διάβρωση του πυθμένα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως ο βαθμός στερεοποίησής του και η πλαστιμότητα του υλικού από το οποίο αποτελείται. Στην περίπτωση του μοντέλου υπολογισμού στερεοπαροχής συνεκτικών ιζημάτων χρησιμοποιείται η σχέση υπολογισμού της κρίσιμης διατμητικής τάσης ώστε να διερευνηθεί εάν οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται λόγω των κυματικών επιδράσεων την υπερβαίνουν. Η σχέση αυτή είναι η εξής:

$$\tau_{ce} = 0.1628(PI)^{0.84} \quad (2.27)$$

όπου PI είναι ο δείκτης πλαστιμότητας. Η εμπειρική σχέση αυτή δίνει αποτελέσματα σε Pascal.

Σε περίπτωση που οι αναπτυσσόμενες τάσεις την υπερβαίνουν τότε θεωρείται ότι προκαλείται αιώρηση ιζήματος και υπολογίζεται το αντίστοιχο φορτίο υπό αιώρηση.

Η προσέγγιση αυτή διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη στα μη συνεκτικά ιζήματα. Στην περίπτωση των μη συνεκτικών ιζημάτων, μέσω της παραμέτρου Shields κρίνεται εάν προκαλείται κίνηση του ιζήματος, το οποίο και μεταφέρεται ως φορτίο πυθμένα και υπό αιώρηση.

Σχηματισμός κροκίδων

Στους πυθμένες από συνεκτικό ίζημα, τα σωματίδιά τους όταν έρθουν σε επαφή με το νερό σχηματίζουν κροκίδες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το υλικό υπό αιώρηση να βρίσκεται σε μορφή κροκίδων και όχι σωματιδίων του υλικού. Το γεγονός αυτό επηρεάζει σημαντικά τις σχέσεις υπολογισμού της ταχύτητας καθίζησης του υλικού στο μοντέλο, καθώς πλέον λαμβάνονται υπόψη και οι διάμετροι των κροκίδων και όχι μόνο των σωματιδίων όπως στις άμμους.

Όπως αναφέρθηκε και στην §2.3.3 στις περισσότερες των περιπτώσεων ο υπολογισμός του μεγέθους των κροκίδων πραγματοποιείται με την εφαρμογή πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων. Επικρατέστερα αυτών είναι τα μοντέλα Lagrange και Euler. Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας για τον υπολογισμό του μεγέθους των κροκίδων λήφθηκε η διάμετρος ισορροπίας, $D_{f,e}$ η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$D_{f,e} = D_p + \frac{k_A c}{k_B \sqrt{G}} \quad (2.28)$$

όπου D_p είναι η διάμετρος των σωματιδίων του συνεκτικού ιζήματος του πυθμένα, c είναι η μέση καθ' ύψος συγκέντρωση των σωματιδίων στο νερό (σε kg/m^3) και G είναι ο ρυθμός διάτμησης. Ο τελευταίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} = \frac{\nu}{\lambda_0^2} \quad (2.29)$$

όπου λ_0 είναι η τυρβώδης μικροκλίμακα Kolmogorov που υπολογίζεται με τη σχέση

$\lambda_0 = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/4}$, με τις τυπικές τιμές της να ποικίλουν από 100 έως 1000 μm , ε είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα και ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα. Στο μοντέλο που

αναπτύχθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκαν ποικίλες τιμές του G από τη βιβλιογραφία.

Ακολούθως από τη σχέση (2.28) k_A είναι η παράμετρος συσσωμάτωσης (σε m^2/kg) και k_B η παράμετρος διάσπασης των κροκίδων (σε $s^{1/2}/m^2$) που υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$k_A = k'_A \frac{D_p^{n_f-3}}{n_f f_s \rho_s} \quad (2.30)$$

$$k_B = k'_B \frac{D_p^p}{n_f} \left(\frac{\mu}{F_y} \right)^q \quad (2.31)$$

όπου n_f είναι η μορφοκλασματική διάσταση που εξηγείται αναλυτικότερα στη συνέχεια, p και q είναι παράμετροι που παίρνουν τις τιμές $p=3-n_f$ και $q=1/2$ (Winterwerp, 1998), μ είναι η δυναμική συνεκτικότητα και F_y είναι η αντοχή διαρροής των κροκίδων.

Για τις παραμέτρους διάσπασης και συσσωμάτωσης, στο παρόν μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από το μοντέλο του Winterwerp (1998, 1999, 2002), όπου για συνεκτικό ίζημα με $D_p=4\mu m$, $\rho_s=2650 kg/m^3$ και $n_f=2$ προκύπτει $k_A=14.6m^2/kg$, $k'_A=0.31$,

$$k_B=14.0 \cdot 10^3 s^{1/2}/m^2 \text{ και } \sqrt{\frac{\mu}{F_y}} = 5.6 \cdot 10^3 s^{1/2}/m.$$

Εμποδιζόμενη καθίζηση

Όσον αφορά στην καθίζηση του ιζήματος, στο τροποποιημένο μοντέλο των συνεκτικών ιζημάτων λήφθηκε υπόψη το φαινόμενο της εμποδιζόμενης καθίζησης. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε εντός του μοντέλου το όριο μιας μέσης καθ' ύψος συγκέντρωσης $3g/l$ (ή kg/m^3) ιζήματος στο νερό. Για μέσες συγκεντρώσεις μικρότερες από αυτήν, θεωρήθηκε ότι η καθίζηση των κροκίδων του ιζήματος πραγματοποιείται κανονικά. Για τιμές μέσης καθ' ύψος συγκέντρωσης μεγαλύτερες ή και ίσες των $3 g/l$ θεωρήθηκε ότι οι κροκίδες εκτελούν εμποδιζόμενη καθίζηση.

Το φαινόμενο αυτό έχει άμεση επίδραση στο μοντέλο μέσω της σχέσης που εισάγεται για τον υπολογισμό της ταχύτητας καθίζησης. Στην περίπτωση της κανονικής καθίζησης για τον υπολογισμό της ταχύτητας καθίζησης των κροκίδων χρησιμοποιείται η σχέση:

$$w_{s,r} = \frac{\alpha}{18\beta} \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\mu} D_p^{3-n_f} \frac{D_f^{n_f-1}}{1 + 0.15Re_f^{0.687}} \quad (2.32)$$

Όπου στη σχέση αυτή και στο υπόλοιπο του κειμένου, ως διάμετρος των κροκίδων D_f ορίζεται η διάμετρος ισορροπίας $D_{f,e}$ που υπολογίστηκε παραπάνω.

Αντιθέτως, στην περίπτωση που οι κροκίδες του ιζήματος εκτελούν εμποδιζόμενη καθίζηση χρησιμοποιείται η σχέση:

$$W_s^m = \frac{(1 - \varphi_f^m)(1 - \varphi_s^m)}{1 + 2.5\varphi_f^m} W_{s,r}^m \quad (2.33)$$

όπου όπως ορίστηκε και στην §2.3.4

$$\varphi_s^m = \frac{c^m}{\rho_s}$$

$$\varphi_f^m = \frac{c^m}{c_{gel}} \quad (2.34)$$

Συγκέντρωση

Για τον υπολογισμό της μέσης καθ' ύψος συγκέντρωσης του ιζήματος υπό αιώρηση, χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.22). Για τον ορισμό της συγκέντρωσης αναφοράς του ιζήματος c_a μέσω της σχέσης (2.18) η παράμετρος της μέσης διαμέτρου του μη συνεκτικού ιζήματος d_{50} αντικαταστάθηκε από την εκάστοτε διάμετρο των κροκίδων D_f . Η αντικατάσταση αυτή πραγματοποιήθηκε καθώς θεωρείται ότι στην περίπτωση συνεκτικού ιζήματος αιώρηση εκτελούν οι κροκίδες που σχηματίζονται και όχι τα σωματίδια του ιζήματος.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω, οι νέες παράμετροι που διαφοροποιήθηκαν c , w_s και D_f είναι αλληλοεξαρτώμενες. Ειδικότερα:

- Η μέση καθ' ύψος συγκέντρωση c εξαρτάται από την ταχύτητα καθίζησης w_s και κατ' επέκταση από τη διάμετρο των κροκίδων D_f .
- Η ταχύτητα καθίζησης w_s εξαρτάται από τη διάμετρο των κροκίδων D_f και κατ' επέκταση από τη μέση καθ' ύψος συγκέντρωση c .
- Η διάμετρος των κροκίδων D_f εξαρτάται από τη μέση καθ' ύψος συγκέντρωση c και κατ' επέκταση από την ταχύτητα καθίζησης w_s .

Λόγω της εξάρτησης αυτής, η ταχύτητα καθίζησης δε μπορεί να υπολογιστεί από την αρχή για να οριστεί στη συνέχεια η μέση καθ' ύψος συγκέντρωση, όπως στο μοντέλο των μη συνεκτικών ιζημάτων (και κατ' επέκταση η διάμετρος των κροκίδων στο μοντέλο των συνεκτικών ιζημάτων).

Για να ξεπεραστεί ο σκόπελος αυτής της αλληλοεξάρτησης των παραμέτρων καταρτίζεται επαναληπτική διαδικασία, κατά την οποία δίνονται τιμές στη συγκέντρωση c με μικρό σχετικά βήμα ($dc=0.000001\text{kg/m}^3$). Η ταχύτητα καθίζησης και η διάμετρος των κροκίδων ορίζονται συναρτήσει της τιμής αυτής της συγκέντρωσης. Ακολούθως υπολογίζεται μια συγκέντρωση c_1 σύμφωνα με την ταχύτητα καθίζησης που δίνεται από τη σχέση (2.32) για

κανονική καθίζηση και (2.33) για εμποδιζόμενη καθίζηση. Η επαναληπτική διαδικασία σταματάει όταν η υπολογιζόμενη συγκέντρωση c_1 και η τιμή της συγκέντρωσης c αποκτήσουν απόκλιση μικρότερη των 0.01kg/m^3 .

Η επαναληπτική διαδικασία πραγματοποιείται δυο φορές, μια για την κανονική και μια για την εμποδιζόμενη καθίζηση του ιζήματος. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές της ταχύτητας καθίζησης και της διαμέτρου των κροκίδων, ανάλογα με τη συγκέντρωση c που υπολογίστηκε από τις διαδικασίες αυτές.

4.3. Μοντέλο μεικτού ιζήματος

Στη φύση παρόλα αυτά, σπάνια συναντώνται καθαρά συνεκτικά ιζήματα σε παράκτιες περιοχές. Σε πολλές περιπτώσεις οι ακτές με αργιλικό υλικό ή ιλύ εμπεριέχουν κλάσμα μη συνεκτικού ιζήματος (άμμου) και αντίστροφα. Για το λόγο αυτό κρίθηκε δόκιμο να καταρτιστεί μοντέλο για μεικτά ιζήματα, στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Για την κατάρτιση του μοντέλου αυτού λήφθηκαν υπόψη τα αποτελέσματα των ερευνών των Mitchener και Torfs, 1995; Torfs et al., 1995; Panagiotopoulos et al., 1997; Van Ledden et al., 2003, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην §2.4. Ειδικότερα για τον καθορισμό της μορφής διάβρωσης του πυθμένα χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της έρευνας των Mitchener και Torfs (1995). Από την έρευνα αυτή προέκυψε ότι ο πυθμένας από μεικτό ίζημα συμπεριφέρεται ως συνεκτικός για κατά βάρος περιεκτικότητα συνεκτικού υλικού (αργίλου, ιλύος) μεγαλύτερη του 15%. Σε περιεκτικότητες συνεκτικού υλικού μικρότερες του 3% ο πυθμένας συμπεριφέρεται ως αμμώδης κατά τη διάβρωσή του, ενώ κατά το διάστημα 3%-15% παρουσιάζει μια μεταβατική συμπεριφορά.

Κατ' επέκταση στο μοντέλο που καταρτίστηκε θεωρήθηκε ότι για ίζημα με περιεκτικότητα κατά βάρος:

- ❖ μικρότερη του 3% σε συνεκτικό υλικό χρησιμοποιείται το μοντέλο των μη συνεκτικών ιζημάτων της §4.1 για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής,
- ❖ μεγαλύτερη του 15% σε συνεκτικό υλικό χρησιμοποιείται το μοντέλο των συνεκτικών ιζημάτων της §4.2 για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής και
- ❖ μεγαλύτερη του 3% και μικρότερη του 15% χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός των δυο παραπάνω μοντέλων, ο οποίος περιγράφεται ακολούθως.

Αρχικά λαμβάνεται υπόψη το ποσοστό του συνεκτικού ιζήματος που εμπεριέχεται στο μεικτό ίζημα της εκάστοτε παράκτιας ζώνης και του πυθμένα της. Στην περίπτωση που είναι μεγαλύτερο του 3% και μικρότερο του 15% λαμβάνεται ως όριο της κρίσιμης διατμητικής τάσης για διάβρωση μια μέση τιμή της από τον πίνακα που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-23. Στην προκειμένη περίπτωση λήφθηκε η τιμή των 0.047 Pa .

Στη συνέχεια πραγματοποιείται υπολογισμός σύμφωνα με τα μοντέλα συνεκτικών και μη συνεκτικών ιζημάτων, από όπου υπολογίζονται τα μεγέθη q_{bs} , q_{ss} και q_{ts} δηλαδή οι στερεοπαροχές πυθμένα, αιώρησης και το σύνολό τους αντίστοιχα για το μη συνεκτικό ίζημα και q_{bm} , q_{sm} και q_{tm} οι αντίστοιχες στερεοπαροχές για το συνεκτικό ίζημα.

Από αυτά τα μεγέθη υπολογίζονται για το μεικτό ίζημα τα αντίστοιχα μεγέθη ως εξής:

$$\begin{aligned} q_b &= (s)q_{bs} + (m)q_{bm} \\ q_s &= (s)q_{ss} + (m)q_{sm} \\ q_t &= (s)q_{ts} + (m)q_{tm} \end{aligned} \quad (2.35)$$

όπου q_s , q_b και q_t είναι οι στερεοπαροχές πυθμένα, αιώρησης και το σύνολό τους αντίστοιχα για το μεικτό ίζημα και s, m το ποσοστό επί τις εκατό του μη συνεκτικού ιζήματος και του συνεκτικού ιζήματος στο μείγμα, αντίστοιχα.

Η υπόλοιπη διαδικασία πραγματοποιείται όπως και στα δυο παραπάνω μοντέλα.

4.4. Χρονικά εξαρτώμενη στερεομεταφορά

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, στα πλαίσια των προαναφερθέντων μοντέλων λαμβάνονται οι εξής βασικές απλοποιητικές παραδοχές:

1. Οι κυματισμοί είναι γραμμικοί.
2. Το κυματικό πεδίο που επικρατεί στην υπό εξέταση ακτή παραμένει αναλλοίωτο παρά την αλλαγή της βαθυμετρίας.
3. Στα κυματογενή ρεύματα έχουν επέλθει συνθήκες ισορροπίας.

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται για λόγους πληρότητας αναφορά στο επιστημονικό πλαίσιο που διέπει την ανάπτυξη ενός δυναμικού μοντέλου υπολογισμού της στερεοπαροχής. Στο μοντέλο αυτό είναι έντονη η εξάρτηση της μεταβολής του πυθμένα από τις κυματικές συνθήκες που μεταβάλλονται στο χρόνο. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου δεν κινείται εντός του πλαισίου της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Η βασική λογική του μοντέλου της χρονικά εξαρτώμενης στερεομεταφοράς περιλαμβάνει τη μεταβολή του κυματικού πεδίου στο χρόνο, σε παράλληλη εξάρτηση με τη μεταβαλλόμενη βαθυμετρία. Στην περίπτωση αυτή το κυματικό πεδίο παραμένει σταθερό έως ότου επέλθουν συνθήκες ισορροπίας. Στη συνέχεια επιβάλλεται άλλο κυματικό πεδίο (σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην §3), έως ότου και πάλι επέλθουν συνθήκες ισορροπίας.

Η ανανέωση του κυματικού πεδίου μπορεί να εφαρμόζεται με τους εξής τρόπους:

- α. Με την εφαρμογή επαναληπτικής διαδικασίας για πεπερασμένο αριθμό βημάτων στην οποία επαναυπολογίζονται τα ύψη κύματος και τα βάθη σε κάθε σημείο του καννάβου.

Σε κάθε βήμα θεωρείται σταθερό γραμμικό κυματικό πεδίο έως ότου επέλθουν συνθήκες ισορροπίας. Η περίπτωση αυτή προϋποθέτει το ταίριασμα ενός μοντέλου στερεομεταφοράς (§4) και ενός μοντέλου κυματογενούς κυκλοφορίας (§3). Η διαδικασία αυτή ακολουθείται σε λογισμικά υπολογισμού στερεοπαροχής του εμπορίου (π.χ. ΜΙΚΕ).

- β. Μέσω ενός συζευγμένου μη-γραμμικού μοντέλου (π.χ. ένα μοντέλο τύπου Boussinesq), σε συνδυασμό με ένα μοντέλο στερεομεταφοράς, έως ότου επέλθουν συνθήκες ισορροπίας.

Εξίσου σημαντικές παράμετροι για την ανανέωση της εικόνας της στερεομεταφοράς σύμφωνα με τη μεταβολή της κυματικής εικόνας είναι:

- i. Η επίλυση της τρισδιάστατης εξίσωσης μετάθεσης-διάχυσης για το ίζημα σε αιώρηση. Σημαντικό ρόλο παίζει η χρονική και χωρική μεταβολή του συντελεστή διάχυσης, η οποία δύναται για ακρίβεια να λαμβάνεται σε σύζευξη με ένα μοντέλο διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας.
- ii. Σε μοντέλα υπολογισμού στερεομεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων, για τον υπολογισμό του φορτίου πυθμένα απαιτείται η πλήρης επίλυση του τυρβώδους και μη σταθερού οριακού στρώματος του πυθμένα. Η επίλυση του οριακού στρώματος του πυθμένα επηρεάζεται σημαντικά από τις ταυτόχρονες επιδράσεις κυμάτων-ρευμάτων.

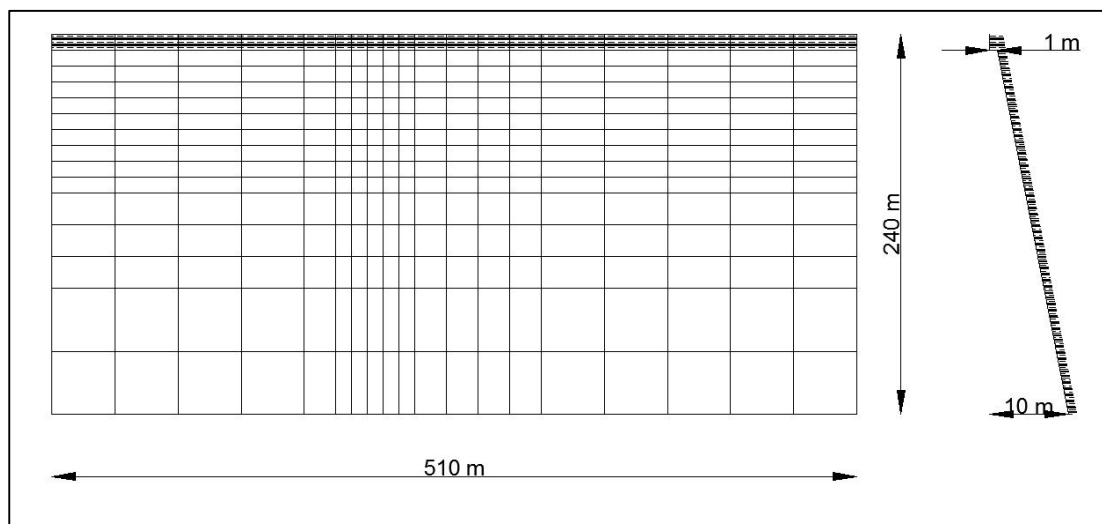
5. Παρουσίαση εφαρμογής

Στην παρούσα ενότητα γίνεται παρουσίαση αρχικά του πεδίου στο οποίο εφαρμόζονται τα μοντέλα που αναφέρθηκαν στην §4. Η παρουσίαση αυτή περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά της κλίσης και της γεωμετρίας του βυθού και την εισαγωγή των δεδομένων που προκύπτουν από την επίλυση ενός κυματικού πεδίου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που παράγονται από τα μοντέλα στερεομεταφοράς, για κάθε τύπο ιζήματος.

5.1. Βασικά χαρακτηριστικά πεδίου εφαρμογής

5.1.1. Παρουσίαση χαρακτηριστικών παράκτιας ζώνης

Για την εφαρμογή των μοντέλων στερεομεταφοράς χρησιμοποιήθηκε το ακόλουθο μοντέλο παράκτιας ζώνης:



Σχήμα 5-1: Παράκτια ζώνη εφαρμογής με έκκεντρο πλέγμα

Το τμήμα της ακτής που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη και τη δοκιμή των εφαρμογών στερεομεταφοράς έχει διαστάσεις 510 m x 240 m. Η κλίση του όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από το Σχήμα 5-1 είναι $i = \frac{9}{240} = 0.0375 = 3.75\%$.

Το πλέγμα του καννάβου είναι έκκεντρο, δηλαδή τα κελιά του δε διαθέτουν σταθερές διαστάσεις. Ο Πίνακας 5-1 που παρατίθεται ακολούθως απεικονίζει τις διαστάσεις των κελιών του καννάβου DX και DY.

Πίνακας 5-1: Διαστάσεις πλέγματος καννάβου σε μέτρα

DX (I=1,19)	DY (J=1,15)
40	40
40	40

DX (I=1,19)	DY (J=1,15)
40	20
40	20
20	20
10	10
10	10
10	10
10	10
20	10
20	10
20	10
20	10
40	-
40	-
40	-
40	-

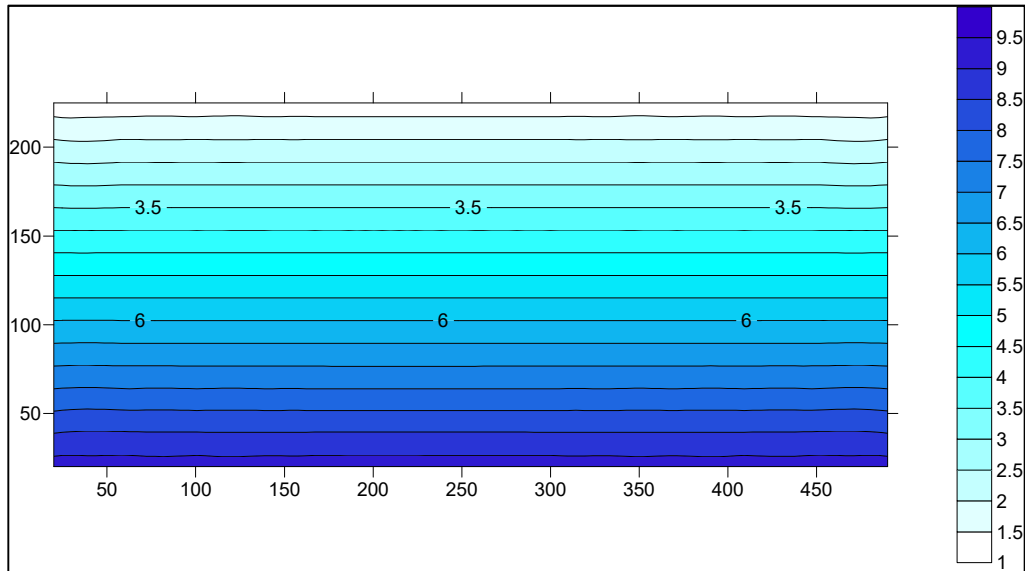
Η εκκεντρότητα του πλέγματος οφείλεται στο γεγονός ότι στη συνέχεια της εφαρμογής θα εξεταστεί και η εφαρμογή λιμενικού έργου, στα σημεία που ο κάνναβος πυκνώνει. Η πυκνωση του καννάβου εξυπηρετεί τη διενέργεια της ανάλυσης με μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια στα όρια του έργου. Για την κατανόηση του σχήματος της παράκτιας ζώνης πρέπει να σημειωθεί ότι ο κόμβος (1,1) του πλέγματος αντιστοιχεί στο κάτω δεξιά κόμβο της ακτής που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-1.

Λαμβάνοντας υπόψη τόσο την κλίση του πυθμένα όσο και τις διαστάσεις της παράκτιας ζώνης υπολογίζονται τα βάθη στα κέντρα των κόμβων του πλέγματος ως εξής:

Πίνακας 5-2: Βάθη στο κέντρο των κόμβων του πλέγματος σε μέτρα

	I=1,19
J=1,15	0.00
	1.20
	1.59
	1.98
	2.37
	2.76
	3.15
	3.54
	3.93
	4.33
	4.91
	5.70
	6.48
	7.65
	9.22

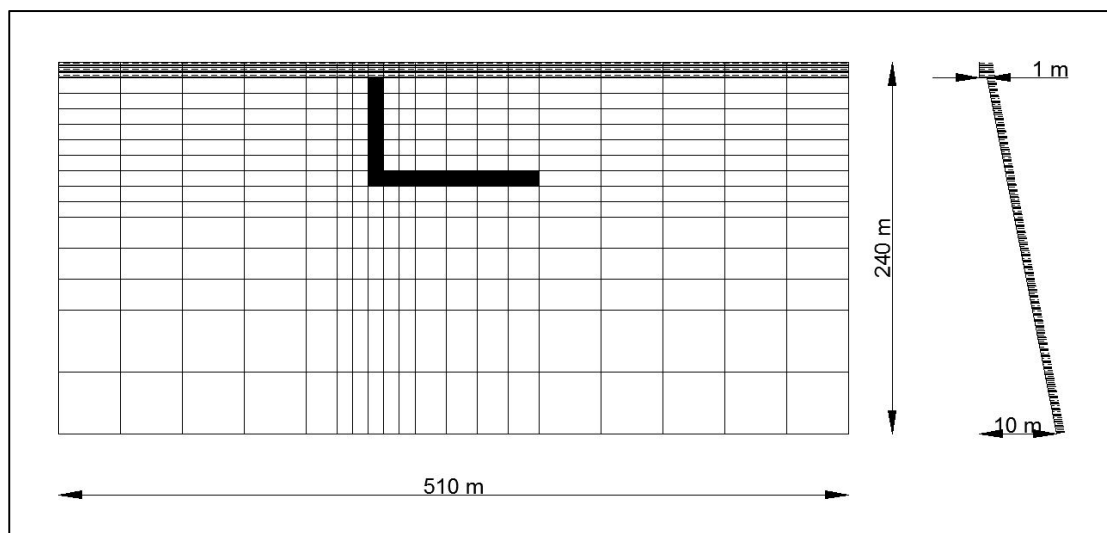
Όπως γίνεται σαφές από τις ενδείξεις του πίνακα οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε κάθε κόμβο της διάστασης X, στην περίπτωση της απλής ακτής χωρίς το λιμενικό έργο. Ο Πίνακας 5-2 παρουσιάζει τιμές που βρίσκονται σε συμφωνία με το Σχήμα 5-1, όπου το τελευταίο βάθος αντιστοιχεί πρώτη αριθμημένη σειρά του καννάβου (J=1, κάτω σειρά). Στη συνέχεια, το Σχήμα 5-2 απεικονίζει τη βαθυμετρία της παράκτιας ζώνης.



Σχήμα 5-2: Βαθυμετρία παράκτιας ζώνης

5.1.2. Παρουσίαση χαρακτηριστικών παράκτιας ζώνης με λιμενικό έργο

Στην περίπτωση της παράκτιας ζώνης με λιμενικό έργο χρησιμοποιείται το ακόλουθο μοντέλο:

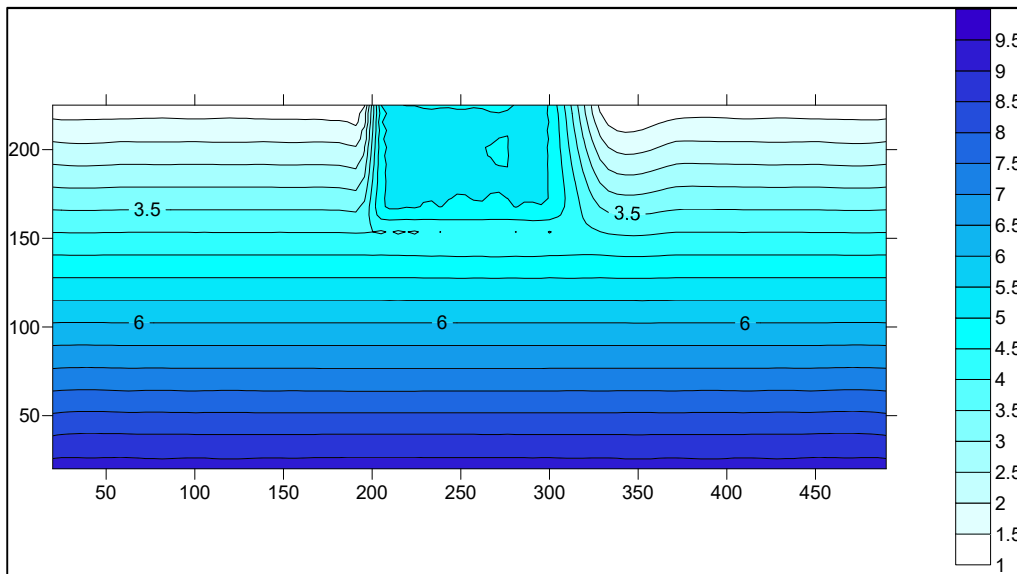


Σχήμα 5-3: Παράκτια ζώνη εφαρμογής με λιμενικό έργο, με έκκεντρο πλέγμα

Το μοντέλο αυτό είναι σχεδόν πανομοιότυπο με το προηγούμενο μοντέλο όσον αφορά στην κλίση του πυθμένα και κατ'επέκταση τα βάθη του. Στην παράκτια ζώνη υφίσταται ένα

λιμενικό έργο σχήματος Γ, με δυο κάθετους μεταξύ τους λιμενοβραχίονες. Ο κάθετος στην ακτή λιμενοβραχίονας έχει μήκος 80 m και πλάτος 10 m, ενώ ο παράλληλος στην ακτή λιμενοβραχίονας έχει μήκος 110 m και πλάτος 10 m.

Για την περίπτωση της παράκτιας ζώνης με λιμενικό έργο ισχύουν όλα τα προαναφερθέντα στοιχεία της γεωμετρίας της με μια βασική εξαίρεση. Εντός της λιμενολεκάνης που οριοθετείται από το λιμενικό έργο ο πυθμένας για λόγους ελλιμενισμού έχει βάθος 5 m. Στο Σχήμα 5-4 παρουσιάζεται η βαθυμετρία της παράκτιας ζώνης με το λιμενικό έργο.



Σχήμα 5-4: Βαθυμετρία παράκτιας ζώνης με λιμενικό έργο

5.2. Κυματικό μοντέλο

Για τη λειτουργία των μοντέλων στερεομεταφοράς που παρουσιάζονται στη συνέχεια αρχικά πραγματοποιείται αναφορά στα βασικά δεδομένα που εισήχθησαν σε αυτά. Από τα σημαντικότερα δεδομένα που εισήχθησαν αποτελούν οι παράμετροι του πεδίου ταχυτήτων. Για τον προσδιορισμό του πεδίου ταχυτήτων χρησιμοποιήθηκε μοντέλο, τα βασικά χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάστηκαν στο πλαίσιο του μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι στην Παράκτια Ζώνη», του Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, από τους δρ. Κωνσταντίνο Μέμο και δρ. Γιώργο Κλωνάρη.

Δεδομένου ότι το μοντέλο αυτό δεν αναπτύσσεται στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας δεν παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του. Παρόλα αυτά, στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία του, τα οποία κρίνονται απαραίτητα για την κατανόηση των δεδομένων εισαγωγής στα μοντέλα στερεομεταφοράς. Το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο που διέπει το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται στην §3.1, ενώ τα αριθμητικά σχήματα που χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων και διέπουν τη λειτουργία του μοντέλου παρουσιάζονται στην §3.2.

Για τον προσδιορισμό του πεδίου ταχυτήτων της υπό εξέταση παράκτιας περιοχής θεωρείται ανεμογενές πεδίο διευθύνσεως 45° , με προέλευση από τα νοτιοδυτικά. Αυτό αντιστοιχεί σε κύματα περιόδου $T=7$ s και ύψους $H_0=2.20$ m.

Στη συνέχεια αναφέρονται κάποιες βασικές διαδικασίες εισαγωγής δεδομένων, για τον ακριβή προσδιορισμό του υδροδυναμικού πεδίου που θα καθορίσει τα δεδομένα εισαγωγής των μοντέλων στερεομεταφοράς.

5.2.1. Χρονικό βήμα

Για την επιλογή του χρονικού βήματος DT , σύμφωνα με το οποίο τρέχει το μοντέλο, χρησιμοποιείται το κριτήριο ευστάθειας:

$$\frac{c \cdot DT}{\sqrt{2} \cdot DX} \leq 1 \quad \text{ή} \quad \frac{c \cdot DT}{\sqrt{2} \cdot DY} \leq 1 \quad (3.1)$$

όπου $c = \sqrt{g \cdot h}$ είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στα ρηγά, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και h το βάθος του πυθμένα στην περιοχή μελέτης. Για τα χωρικά βήματα DX και DY του καννάβου ορίζεται το δυσμενέστερο χωρικό βήμα, δηλαδή το μικρότερο, που είναι ίσο με 10 m. Για το βάθος πυθμένα h ορίζεται το βαθύτερο σημείο (κόμβος) του καννάβου, που είναι ίσο με 9.22 m. Με βάση τη συνθήκη αυτή προκύπτουν αποδεκτά χρονικά βήματα $DT \leq 5.95$ s, για την ευστάθεια του μοντέλου και επιλέγεται η διενέργεια της ανάλυσης με $DT=0.05$ s.

5.2.2. Όδευση κυματισμών

Για την όδευση των κυματισμών στα ρηγά, γίνεται η παραδοχή ότι τα χαρακτηριστικά του κύματος ανήκουν σε απλό και μονοχρωματικό κυματισμό. Κατά τη διαδικασία αυτή λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα ρήξης και διάθλασης που προκύπτουν κατά τη διόδευση του κύματος στα ρηγά.

Για τη διόδευση ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία που έχει προγραμματιστεί σε υπολογιστικό φύλλο του Excel και η οποία περιγράφεται ως εξής:

- Υποτίθεται μια τιμή για τη γωνία πρόσπτωσης στο εκάστοτε βάθος.
- Υπολογίζεται το μήκος κύματος στο βάθος αυτό με χρήση του νόμου του Snell.

$$\frac{\sin \theta}{L} = \frac{\sin \theta_0}{L_0} \quad (3.2)$$

όπου η γωνία θ_0 είναι η γωνία πρόσπτωσης στα βαθιά και L_0 είναι το μήκος κύματος στα βαθιά που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_0 = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (3.3)$$

- Στην συνέχεια υπολογίζεται η ποσότητα $ky \cdot \tanh(ky) = \frac{4\pi^2 \cdot y}{gT^2}$ από την εξίσωση διασποράς.
- Τέλος υπολογίζεται η τιμή της ποσότητας ky , από την σχέση:

$$ky = \frac{2\pi}{L} \cdot y \quad (3.4)$$

- Μέσω της οποίας υπολογίζεται η τιμή της ποσότητας $ky \cdot \tanh(ky)$, για την οποία πραγματοποιούνται δοκιμές, έως ότου εξισωθεί με την ποσότητα που υπολογίζεται από την εξίσωση διασποράς.

Για τις δεδομένες γωνίες πρόσπτωσης θ που υπολογίζονται για κάθε βάθος προκύπτει η ταχύτητα διάδοσης του κύματος $c=L/T$ και μέσω των συντελεστών διάθλασης και ρήχωσης υπολογίζεται το ύψος του κύματος στην εξεταζόμενη θέση. Οι συντελεστές διάθλασης K_r και ρήχωσης K_s υπολογίστηκαν αντίστοιχα από τους τύπους:

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}} \quad (3.5)$$

$$K_s = \sqrt{\frac{c_0}{2nc}} = 0.989 \quad (3.6)$$

Όπου c_0 είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στα βαθιά και η παράμετρος n υπολογίζεται με τον τύπο:

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2ky}{\sinh(2ky)} \right) \quad (3.7)$$

Τελικά ελέγχοντας με το κριτήριο θραύσης για σύνθετους κυματισμούς (Πίνακας 5-3-προτελευταία στήλη) προκύπτουν τα εξής χαρακτηριστικά για τα βάθη της περιοχής μελέτης:

Πίνακας 5-3: Κυματικά χαρακτηριστικά ανά βάθος κόμβου

J	Βάθος h_j (m)	L_j (m)	θ_j (°)	n_j	K_s	K_r	$H_j=K_s \cdot K_r \cdot H_0$ (m)	$H_{bj}=0.7 \cdot h_j$ (m)	$H_j \leq H_{bj}$ (m)
14	1.20	23.60	12.60	0.968	1.294	0.851	2.42	0.84	0.84
13	1.59	27.00	14.45	0.957	1.217	0.855	2.29	1.11	1.11
12	1.98	30.00	16.10	0.947	1.160	0.858	2.19	1.38	1.38
11	2.37	32.62	17.55	0.937	1.119	0.861	2.12	1.66	1.66

J	Βάθος h_j (m)	L_j (m)	θ_j (°)	n_j	K_s	K_r	$H_j=K_s \cdot K_r \cdot H_o$ (m)	$H_{bj}=0.7 \cdot h_j$ (m)	$H_j \leq H_{bj}$ (m)
10	2.76	35.05	18.90	0.927	1.085	0.865	2.06	1.93	1.93
9	3.15	37.18	20.10	0.917	1.059	0.868	2.02	2.21	2.02
8	3.54	39.21	21.25	0.907	1.037	0.871	1.99	2.48	1.99
7	3.93	41.11	22.33	0.897	1.018	0.874	1.96	2.75	1.96
6	4.33	42.88	23.35	0.887	1.003	0.878	1.94	3.03	1.94
5	4.91	45.30	24.75	0.873	0.983	0.882	1.91	3.44	1.91
4	5.70	48.28	26.50	0.855	0.963	0.889	1.88	3.99	1.88
3	6.48	50.88	28.05	0.837	0.948	0.895	1.87	4.53	1.87
2	7.65	54.26	30.10	0.810	0.933	0.904	1.86	5.36	1.86
1	9.22	58.18	32.53	0.777	0.920	0.916	1.85	6.45	1.85

Ο Πίνακας 5-3 παρουσιάζει τα στοιχεία κυματισμών, όπως αυτά προκύπτουν ανά βάθος πυθμένα. Στην προτελευταία στήλη υπολογίζεται το ύψος θραύσης του κύματος, για το ανάλογο βάθος, H_{bj} και στην τελευταία στήλη πραγματοποιείται ο έλεγχος σύμφωνα με το κριτήριο θραύσης. Δηλαδή, εάν το ύψος κύματος που προκύπτει από την όδευση των κυματισμών είναι μεγαλύτερο του κύματος που προκύπτει από το κριτήριο θραύσης, τότε αυτό ισούται με το ύψος θραύσης του κυματισμού.

Τα στοιχεία αυτά ισχύουν για την περίπτωση όπου δεν υπάρχει λιμενικό έργο και για την όδευση του κυματισμού κυριαρχούν τα φαινόμενα της ρήξης και της διάθλασης. Στην περίπτωση της ύπαρξης του λιμενικού έργου εντός της λιμενολεκάνης σχηματίζονται φαινόμενα περίθλασης, τα οποία τροποποιούν τα ύψη κύματος.

Οι συντελεστές περίθλασης για κάθε σημείο εντός και στα όρια του έργου υπολογίζονται με τη χρήση των διαγραμμάτων Wiegell, με γραμμική παρεμβολή για γωνία πρόσπτωσης σε στερεό όριο ίση με 111.25° (Coastal Engineering Manual) και λαμβάνεται υπόψη εντός του έργου και στα στοιχεία του πλέγματος δίπλα από την είσοδο της λιμενολεκάνης.

Πίνακας 5-4: Συντελεστές περίθλασης εντός και πλησίον της λιμενολεκάνης

	i=9	10	11	12	13	14	15
j=14	0.141	0.147	0.153	0.187	0.226	0.285	0.489
13	0.136	0.144	0.147	0.174	0.232	0.296	0.636
12	0.136	0.136	0.158	0.177	0.227	0.316	0.673
11	0.138	0.136	0.151	0.171	0.240	0.321	0.778
10	0.129	0.134	0.151	0.174	0.227	0.347	0.894
9	0.129	0.134	0.149	0.174	0.218	0.347	1.000
8							1.000

Οι συντελεστές αυτοί τροποποιούν τα ύψη κύματος εντός και στα όρια της λιμενολεκάνης πολλαπλασιάζοντας το ύψος κύματος στο βάθος του ακρομολίου με τον συντελεστή περίθλασης. Στα όρια εκτός της λιμενολεκάνης, έγινε έλεγχος των αποτελεσμάτων που

προέκυψαν από την περίθλαση με τα μέγιστα ύψη θραυόμενου κυματισμού για κάθε βάθος πυθμένα, και τα τελικά ύψη προέκυψαν ως εξής:

Πίνακας 5-5: Ύψη κύματος εντός και πλησίον της λιμενολεκάνης

	i=9	10	11	12	13	14	15
j=14	0.280	0.292	0.304	0.372	0.449	0.566	0.837
13	0.271	0.285	0.293	0.345	0.460	0.587	1.111
12	0.271	0.271	0.315	0.351	0.450	0.627	1.337
11	0.274	0.270	0.300	0.340	0.476	0.638	1.547
10	0.256	0.267	0.300	0.345	0.452	0.690	1.777
9	0.256	0.267	0.295	0.345	0.433	0.690	1.987
8							1.987

Από τη διαδικασία αυτή προέκυψαν οι ταχύτητες των υγρών μορίων και οι διατμητικές τάσεις, οι οποίες είναι εξαιρετικά σημαντικές για την έναρξη της κίνησης του ιζήματος.

5.2.3. Συμβολή πεδίου ταχυτήτων στη στερεομεταφορά

Η στερεομεταφορά εξαρτάται άμεσα από τις ταχύτητες των υγρών μορίων, καθώς η κίνηση του ιζήματος προκαλείται κατά κύριο λόγο από τις επικρατούσες ταχύτητες ροής. Σημαντικότερο ρόλο παίζουν οι ταχύτητες που αναπτύσσονται κοντά στο οριακό στρώμα, δηλαδή κοντά στον πυθμένα.

Ωστόσο, ανάλογα με το βάθος στην περιοχή ροής, το πεδίο ταχυτήτων μπορεί να μεταβάλλεται όχι μόνο αναφορικά με τα μεγέθη, αλλά και με την διεύθυνση. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ροής προκαλούνται αντίρροπες ταχύτητες κοντά στο οριακό στρώμα (undertow) οι οποίες προκαλούν με τη σειρά τους αντίρροπη μεταφορά ιζήματος, σε σχέση με τη διεύθυνση των κυματισμών.

Η ολοκλήρωση κατά το βάθος του πεδίου ροής αποκρύπτει αυτά τα φαινόμενα αντίρροπων διευθύνσεων κατά το βάθος, καθώς οι ταχύτητες που προκύπτουν απεικονίζουν την συνισταμένη της κίνησης των υγρών μορίων και όχι κατ' αποκλειστικότητα τη διεύθυνση των ταχυτήτων κοντά στον πυθμένα, όπου πραγματοποιείται κατά σημαντικό βαθμό το φαινόμενο της στερεομεταφοράς. Παρόλα αυτά, η γνώση του πεδίου των ολοκληρωμένων κατά το βάθος ταχυτήτων (μέσες κατά βάθος ταχύτητες) συμβάλει σε μια ποιοτική εκτίμηση της στερεομεταφοράς, καθώς έχει διαπιστωθεί ότι το φαινόμενο αυτό ακολουθεί στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τη μέση διεύθυνση του πεδίου ροής.

5.3. Αποτελέσματα στερεομεταφοράς μη συνεκτικού ιζήματος

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου υπολογισμού στερεοπαροχής για το μη συνεκτικό ίζημα. Αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά δεδομένα που εισάγονται αναφορικά με το πεδίο ταχυτήτων και το ίζημα. Στη συνέχεια παρατίθενται σε μορφή διαγράμματος και αριθμητικά τα αποτελέσματα που αφορούν το πεδίο

στερεοπαροχής και την ανανεωμένη βαθυμετρία ως αποτέλεσμα της στερεοπαροχής και τέλος παρουσιάζονται οι τιμές της μέσης κατά βάθος συγκέντρωσης ιζήματος c .

5.3.1. Δεδομένα εισαγωγής

Στο μοντέλο στερεομεταφοράς μη συνεκτικού ιζήματος, το οποίο θα τροποποιηθεί στη συνέχεια για συνεκτικά ιζήματα εισάγονται τα εξής δεδομένα:

Ίζημα. Για το ίζημα του πυθμένα εισάγεται άμμος μέσης διαμέτρου $d_{50}=0.2$ mm, ενώ ορίστηκε η παράμετρος $\Delta = \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} = 1.6$.

Κινηματική συνεκτικότητα. Στην κινηματική συνεκτικότητα, ν δίνεται η τιμή $\nu=1.2 \cdot 10^{-6}$ m²/s.

Κυματικό μοντέλο. Λαμβάνονται υπόψη οι κυματισμοί της §5.2, με περίοδο $T=7$ s, ύψος $H_0=2.20$ m και διεύθυνση πνοής ανέμου 45°, δηλαδή νοτιοδυτική.

Χρονικό βήμα ανανέωσης βαθυμετρίας. Για σκοπούς κατανόησης του φαινομένου της στερεομεταφοράς, σε κάθε περίπτωση ιζήματος λαμβάνεται χρονικό βήμα ανανέωσης βαθυμετρίας τέτοιο ώστε να γίνονται εύκολα ορατά τα αποτελέσματα της στο αντίστοιχο διάγραμμα. Το βήμα αυτό διαφέρει από μοντέλο σε μοντέλο. Στην περίπτωση του μη συνεκτικού ιζήματος λαμβάνεται ίσο με 100 s.

5.3.2. Στερεοπαροχή

Το βασικότερο αποτέλεσμα που προκύπτει από τα μοντέλα στερεομεταφοράς είναι ο υπολογισμός της στερεοπαροχής. Στο μοντέλο για το μη συνεκτικό ίζημα αρχικά υπολογίζονται οι στερεοπαροχές πυθμένα, q_b για τις δυο διευθύνσεις κίνησης της ροής x και y και στη συνέχεια οι αντίστοιχες στερεοπαροχές αιώρησης, q_s . Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα παραπάνω μεγέθη και τα διαγράμματα συνολικής στερεοπαροχής, για την περίπτωση της απλής ακτής και για την περίπτωση της ακτής με λιμενικό έργο.

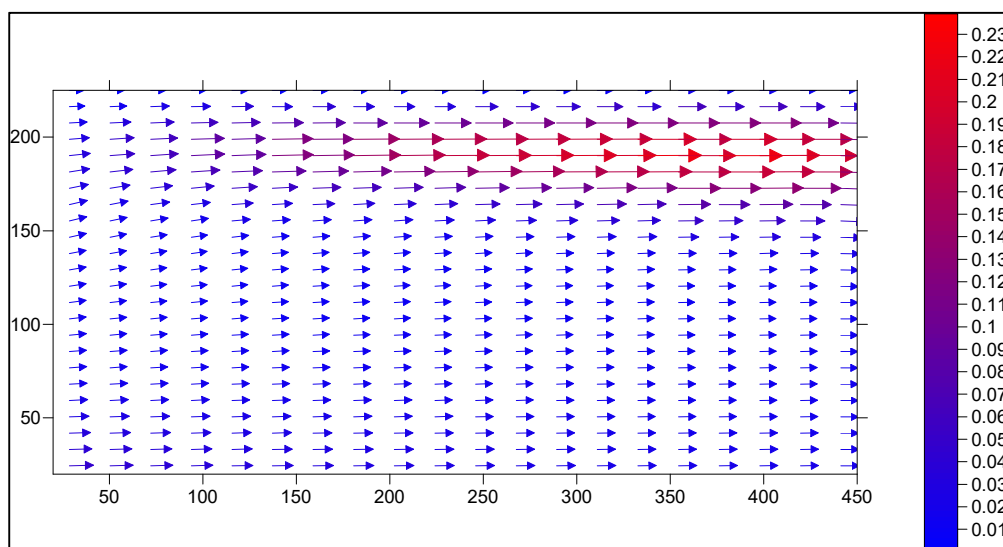
Απλή ακτή

Τα αποτελέσματα των στερεοπαροχών προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου στερεομεταφοράς και σύμφωνα με τα δεδομένα του πεδίου ταχυτήτων που εισάγονται.

Η στερεοπαροχή φορτίου πυθμένα στον άξονα x , q_{bx} παίρνει τιμές στο διάστημα από $3.10 \cdot 10^{-5}$ έως $7.94 \cdot 10^{-3}$ kg/m²s. Από την άλλη, η αντίστοιχη στερεοπαροχή πυθμένα κατά τον άξονα y , q_{by} λαμβάνει τιμές με εύρος μεγέθους από $1.53 \cdot 10^{-7}$ έως $3.78 \cdot 10^{-4}$ kg/m²s.

Η στερεοπαροχή φορτίου υπό αιώρηση στον άξονα x , q_{sx} παίρνει τιμές με εύρος μεγέθους από $6.18 \cdot 10^{-5}$ έως $2.42 \cdot 10^{-1}$ kg/m²s. Από την άλλη, η αντίστοιχη στερεοπαροχή φορτίου υπό αιώρηση κατά τον άξονα y q_{sy} λαμβάνει τιμές στο εύρος από $3.02 \cdot 10^{-7}$ έως $5.80 \cdot 10^{-3}$ kg/m²s.

Τα παραπάνω αποτελέσματα δίνουν συνολική στερεοπαροχή στον άξονα x , q_{tx} που λαμβάνει τιμές στο διάστημα από $5.69 \cdot 10^{-4}$ έως $2.47 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^2\text{s}$. Η αντίστοιχη συνολική στερεοπαροχή κατά τον άξονα y , q_{ty} παίρνει τιμές από $1.80 \cdot 10^{-7}$ έως $5.87 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{s}$.



Σχήμα 5-5: Συνολική στερεοπαροχή σε απλή ακτή ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω μεγεθών απεικονίζεται διαγραμματικά η συνολική στερεοπαροχή στο Σχήμα 5-5. Όπως παρατηρείται και από τις τιμές που ορίστηκαν παραπάνω για τις επιμέρους στερεοπαροχές, οι κατά τον άξονα x τιμές υπερिशύουν σημαντικά αυτών κατά τον άξονα y . Για το λόγο αυτό στο Σχήμα 5-5 οι συνισταμένες συνολικές στερεοπαροχές, q_t έχουν διεύθυνση κατά τον άξονα x . Επιπλέον παρατηρείται ότι η κατεύθυνση τους συμφωνεί με τη κατεύθυνση της πνοής του ανέμου, που είναι από τα νοτιοδυτικά προς τα βορειοανατολικά.

Οι μεγαλύτερες τιμές των στερεοπαροχών παρουσιάζονται στα ρηχά, και ειδικότερα στο ανατολικό τμήμα του πεδίου προς την ακτή. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται σε δύο βασικούς λόγους:

1. Στην αύξηση των ταχυτήτων ροής και της επιρροής της ροής στον πυθμένα, κοντά στην ακτή, στη ζώνη θραύσης.
2. Στη διεύθυνση πνοής του ανέμου και κατ επέκταση στο πεδίο ταχυτήτων που αναπτύσσεται, ως αποτέλεσμα των προσπιπτόντων κυματισμών.

Πλησιάζοντας προς την ακτή, ενώ η συνισταμένη της συνολικής στερεοπαροχής έχει φτάσει σε ένα μέγιστο επίπεδο της τάξης περίπου των $2.30 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^2\text{s}$, οι τιμές της αρχίζουν να μειώνονται. Η μείωση αυτή οφείλεται στην απώλεια ενέργειας από τη θραύση των κυματισμών στα ρηχά και κατ επέκταση στη μείωση των ταχυτήτων ροής στην περιοχή αυτή.

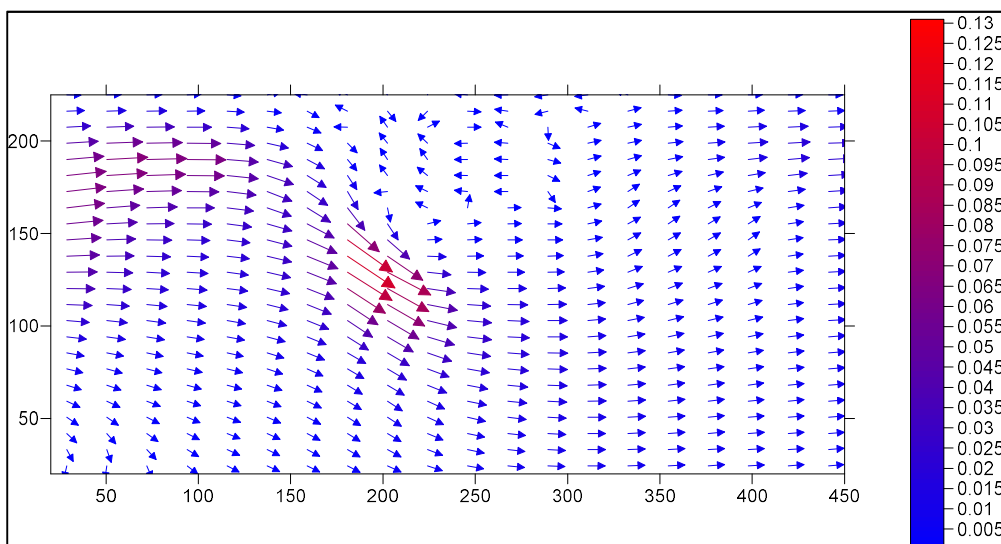
Ακτή με λιμενικό έργο

Όμοια με την απλή ακτή, στην περίπτωση της ακτής με λιμενικό έργο τα αποτελέσματα των στερεοπαροχών προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου στερεομεταφοράς και σύμφωνα με τα δεδομένα του πεδίου ταχυτήτων που εισάγονται. Παρόλα αυτά, η ύπαρξη του λιμενικού έργου προκαλεί κάποιες σημαντικές αλλαγές στο πεδίο ταχυτήτων και κατ' επέκταση στις ποσότητες ιζήματος που μεταφέρονται.

Η στερεοπαροχή φορτίου πυθμένα στον άξονα x , q_{bx} παίρνει τιμές στο διάστημα από $4.14 \cdot 10^{-7}$ έως $3.72 \cdot 10^{-3}$ $\text{kg/m}^2\text{s}$. Η αντίστοιχη στερεοπαροχή πυθμένα κατά τον άξονα y q_{by} παίρνει τιμές από $2.52 \cdot 10^{-7}$ έως $1.10 \cdot 10^{-3}$ $\text{kg/m}^2\text{s}$. Φυσικά ανά τμήματα του πεδίου υπάρχει μηδενική στερεοπαροχή, καθώς οι ταχύτητες που αναπτύσσονται και κατ' επέκταση οι διατμητικές τάσεις στον πυθμένα δεν είναι σε θέση να προκαλέσουν έναρξη της κίνησης του ιζήματος.

Η στερεοπαροχή φορτίου υπό αιώρηση στον άξονα x , q_{sx} παίρνει τιμές με στο διάστημα από $2.24 \cdot 10^{-25}$ έως $1.14 \cdot 10^{-1}$ $\text{kg/m}^2\text{s}$. Από την άλλη, η αντίστοιχη στερεοπαροχή φορτίου υπό αιώρηση κατά τον άξονα y , q_{sy} λαμβάνει τιμές με εύρος από $9.15 \cdot 10^{-19}$ έως $1.05 \cdot 10^{-1}$ $\text{kg/m}^2\text{s}$. Και σε αυτήν την περίπτωση, σε κάποια σημεία του καννάβου παρουσιάζεται μηδενική στερεοπαροχή υπό αιώρηση. Σε αυτά δεν υπάρχει έναρξη κίνησης του ιζήματος και κατ' επέκταση συγκέντρωση ιζήματος υπό αιώρηση στην υδατική στήλη.

Τα παραπάνω αποτελέσματα, πέραν των μηδενικών στοιχείων, δίνουν συνολική στερεοπαροχή στον άξονα x , q_{tx} που λαμβάνει τιμές στο διάστημα από $1.12 \cdot 10^{-25}$ έως $1.00 \cdot 10^{-1}$ $\text{kg/m}^2\text{s}$. Από την άλλη, η αντίστοιχη συνολική στερεοπαροχή κατά τον άξονα y , q_{ty} παίρνει τιμές από $4.57 \cdot 10^{-19}$ έως $9.31 \cdot 10^{-2}$ $\text{kg/m}^2\text{s}$.



Σχήμα 5-6: Συνολική στερεοπαροχή σε ακτή με λιμενικό έργο ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω μεγεθών απεικονίζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 5-6 η συνισταμένη της συνολικής στερεοπαροχής, q_t . Όπως παρατηρείται, στα σημεία του

καννάβου που υπάρχει το λιμενικό έργο διαταράσσεται η κατεύθυνση της q_t . Συγκεκριμένα, παρατηρούνται τα εξής:

1. Η q_t αυξάνεται σημαντικά στο σημείο που ενώνονται ο εγκάρσιος με τον παράλληλο πρόβολο του λιμενικού έργου.
2. Η κατεύθυνση της στερεοπαροχής ακολουθεί αυτήν της ροής του ρευστού στην περιοχή του λιμενικού έργου. Συγκεκριμένα κινείται παράλληλα με το λιμενικό έργο στο σημείο που παρεμβάλλεται της πορείας της ροής και εισέρχεται στη λιμενολεκάνη, επηρεαζόμενη από το φαινόμενο της περίθλασης των προσπιπτόντων κυματισμών στα όρια του έργου.
3. Στα δυτικά κοντά στην ακτή, ανάντη του λιμενικού έργου, η q_t ομοιάζει με αυτήν στην περίπτωση της απλής ακτής. Παρόλα αυτά, το λιμενικό έργο λειτουργεί ως «κυματοθραύστης» μειώνοντας σημαντικά τις τιμές της στερεοπαροχής κατάντη του.
4. Οι τιμές της q_t παρουσιάζονται σημαντικά μειωμένες εντός της λιμενολεκάνης. Αυτή η μείωση οφείλεται τόσο στη σημαντική μείωση της ροής, όσο και στο μεγάλο βάθος του πυθμένα εντός της, το οποίο ελαττώνει σημαντικά την εκκίνηση του ιζήματος.
5. Κοντά στην ακτή, η q_t φτάνει σε τιμές της τάξης των $9 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^2\text{s}$, ανάντη του λιμενικού έργου, ενώ κατάντη κοντά στην ακτή προσεγγίζει τις ελάχιστες τιμές της. Στη γωνία που σχηματίζουν οι δυο πρόβολοι μεταξύ τους, η q_t πλησιάζει τιμές της τάξης των $1,3 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^2\text{s}$.

5.3.3. Βασικά μεγέθη

Στην περίπτωση του μοντέλου υπολογισμού στερεοπαροχής συνεκτικού ιζήματος, πέραν της στερεομεταφοράς και της ανανεωμένης βαθυμετρίας υπολογίζεται επίσης η μέση κατά βάθος συγκέντρωση του υπό αιώρηση ιζήματος c , σε κάθε κόμβο του καννάβου. Η συγκέντρωση αποτελεί εξαιρετικά σημαντική παράμετρο για τον υπολογισμό του φορτίου υπό αιώρηση q_s . Από το μοντέλο προέκυψαν τιμές της c της τάξεως των $2.17 \cdot 10^{-4}$ έως $1.67 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^3$, στην περίπτωση της απλής ακτής και από $3.27 \cdot 10^{-20}$ έως $1.32 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^3$ σε ακτή με λιμενικό έργο. Η μεγάλη αυτή απόκλιση οφείλεται στις πολύ μικρές τιμές της συγκέντρωσης εντός της λιμενολεκάνης, λόγω της μηδαμινής στερεομεταφοράς που συντελείται σε αυτήν.

Πέραν της μέσης συγκέντρωσης του ιζήματος c , στο πλαίσιο του μοντέλου υπολογίζεται και η ταχύτητα καθίζησης w_s . Η τιμή της προκύπτει από τη σχέση (2.19), στην οποία εξαρτάται αποκλειστικά από το μέγεθος των κόκκων του ιζήματος. Για το λόγο αυτό, λαμβάνει τη σταθερή τιμή των $2.16 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ σε κάθε σημείο του καννάβου.

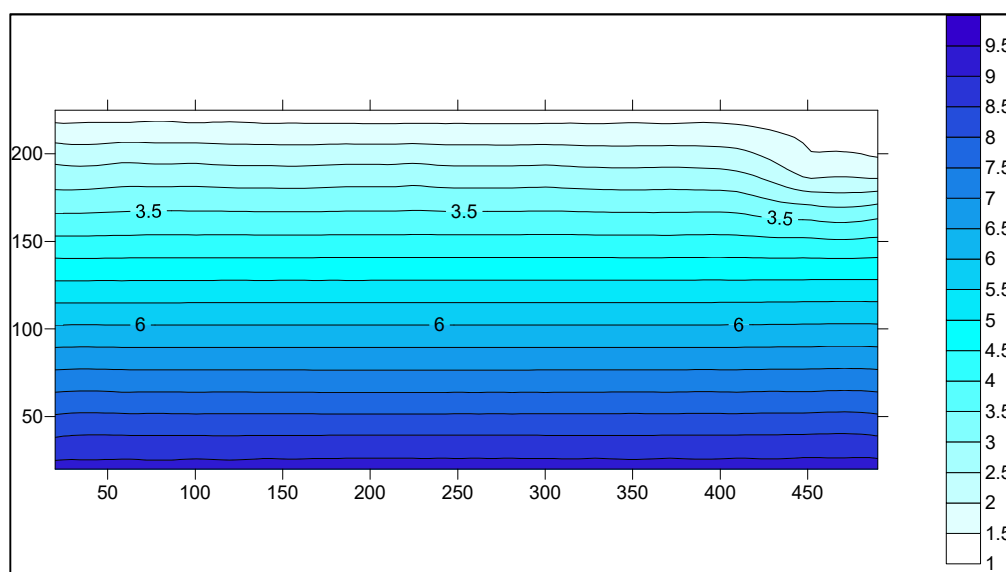
5.3.4. Ανανέωση βαθυμετρίας

Εκτός της q_t , από το μοντέλο υπολογισμού της στερεοπαροχής για μη συνεκτικά ιζήματα πραγματοποιείται και ο υπολογισμός της ανανεωμένης βαθυμετρίας. Η εικόνα της ανανεωμένης βαθυμετρίας, για σταθερές στο χρόνο συνθήκες ροής, προκύπτει από τις

σχέσεις (2.23) και (2.24), που παρουσιάστηκαν στην §4.1.2. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο για την περίπτωση της απλής ακτής, όσο και για την ακτή με το λιμενικό έργο.

Απλή ακτή

Στην περίπτωση της απλής ακτής παρατηρείται γενικά μια ομοιόμορφη μεταβολή της βαθυμετρίας, με μια ανεπαίσθητη αύξηση του ιζήματος στα σημεία που βρίσκονται κοντά στην παράκτια ζώνη. Η ποσότητα του ιζήματος συσσωρεύεται λίγο παραπάνω στο βορειοανατολικό άκρο του καννάβου, καθώς εκεί προκύπτει και η μεγαλύτερη τιμή της q_t . Η εικόνα αυτή παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο Σχήμα 5-7 που ακολουθεί.

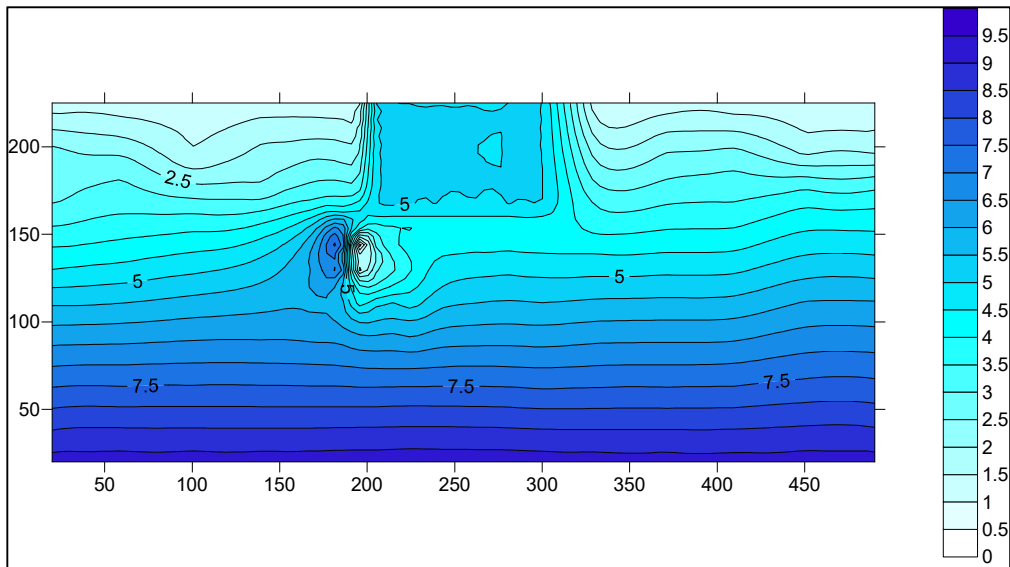


Σχήμα 5-7: Ανανεωμένη βαθυμετρία σε απλή ακτή

Ακτή με λιμενικό έργο

Στην περίπτωση της ακτής με το λιμενικό έργο, η μεταβολή της βαθυμετρίας ακολουθεί σε σημαντικό βαθμό την εικόνα του διαγράμματος της q_t , στο Σχήμα 5-6. Συγκεκριμένα παρατηρείται σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης στη γωνία που σχηματίζουν οι δυο πρόβολοι του λιμενικού έργου. Αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερα αυξημένη στερεοπαροχή που παρουσιάζεται στο σημείο αυτό. Ανάντη του σημείου αυτού παρουσιάζεται μια σχετική έλλειψη ιζήματος, λόγω της συσσώρευσής του στη γωνία του λιμενικού έργου.

Επίσης παρατηρείται σχετικά μεγαλύτερη συγκέντρωση ιζήματος ανάντη του λιμενικού έργου και μικρότερη κατόντη, λόγω της επιρροής του στο υδροδυναμικό πεδίο και κατ' επέκταση στη μεταφορά του ιζήματος. Εντός της λιμενολεκάνης δε παρατηρείται κάποια αύξηση της συγκέντρωσης του ιζήματος, καθώς η επίδραση του υδροδυναμικού πεδίου στο ιζήμα του πυθμένα της είναι μηδαμινή.



Σχήμα 5-8: Ανανεωμένη βαθυμετρία σε ακτή με λιμενικό έργο

5.4. Αποτελέσματα στερεομεταφοράς συνεκτικού ιζήματος

Στην παρούσα ενότητα, αναλόγως με την §5.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου υπολογισμού στερεοπαροχής για το συνεκτικό ίζημα. Αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά δεδομένα που εισάγονται αναφορικά με το πεδίο ταχυτήτων και το ίζημα. Στη συνέχεια παρατίθενται σε μορφή διαγράμματος και αριθμητικά τα αποτελέσματα που αφορούν το πεδίο στερεοπαροχής και την ανανεωμένη βαθυμετρία, ως αποτέλεσμα της στερεοπαροχής. Τέλος παρουσιάζονται οι τιμές των λοιπών μεγεθών που προκύπτουν από την ανάλυση, δηλαδή η μέση κατά βάθος συγκέντρωση του ιζήματος, c , η ταχύτητα καθίζησης w_s και η διάμετρος ισορροπίας των κροκίδων σε κάθε σημείο του καννάβου D_f .

5.4.1. Δεδομένα εισαγωγής

Στο μοντέλο στερεομεταφοράς συνεκτικού ιζήματος, το οποίο αποτελεί τροποποίηση του αντίστοιχου μοντέλου για μη συνεκτικό ίζημα, εισάγονται τα εξής δεδομένα:

Ίζημα. Για το ίζημα του πυθμένα θεωρείται ιλύς μέσης διαμέτρου $d_{50}=4 \mu\text{m}$ και πυκνότητα $\rho_s=2650 \text{ kg/m}^3$.

Κινηματική συνεκτικότητα. Η κινηματική συνεκτικότητα, ν όπως και στο μοντέλο για τα μη συνεκτικά ιζήματα λαμβάνει την τιμή $\nu=1.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Δυναμική συνεκτικότητα. Όσον αφορά στη δυναμική συνεκτικότητα, μ , η οποία εκφράζει την «αντίστασή» του ρευστού στην επιβολή διατμητικής τάσης, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία της δίνεται η τιμή $\mu=10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$.

Ρυθμός διάτμησης. Για το ρυθμό διάτμησης, G , λαμβάνεται μια μέση κατά βάθος στήλης ύδατος τιμή ίση με $G=3 \text{ s}^{-1}$.

Δείκτης πλαστιμότητας. Ο δείκτης πλαστιμότητας, PI αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους για τον ορισμό της κρίσιμης διατμητικής τάσης για διάβρωση του πυθμένα. Στην περίπτωση του μοντέλου θεωρείται μια ιλύς χαμηλής πλαστιμότητας $PI=30$.

Κυματικό μοντέλο. Λαμβάνονται υπόψη οι κυματισμοί της §5.2, με περίοδο $T=7$ s, ύψος $H_0=2.20$ m και διεύθυνση πνοής ανέμου 45° , δηλαδή νοτιοδυτική, όπως και στην περίπτωση του μοντέλου για το μη συνεκτικό ίζημα.

Παράμετρος συσσωμάτωσης. Στην παράμετρο συσσωμάτωσης k_A δίνεται η τιμή $k_A=14.6$ m^2/kg .

Παράμετρος διάσπασης. Στην παράμετρο διάσπασης των κροκίδων k_B δίνεται η τιμή $k_B=14.6$ $s^{1/2}/m^2$.

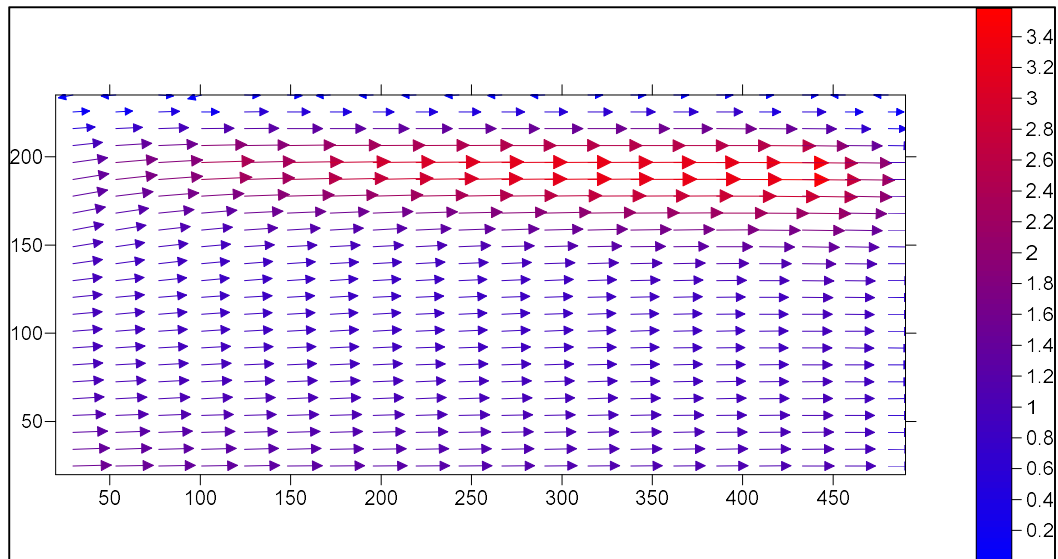
Χρονικό βήμα ανανέωσης βαθυμετρίας. Για σκοπούς κατανόησης του φαινομένου της στερεομεταφοράς, σε κάθε περίπτωση ιζήματος λαμβάνεται χρονικό βήμα ανανέωσης βαθυμετρίας τέτοιο ώστε να γίνονται εύκολα ορατά τα αποτελέσματα της στο αντίστοιχο διάγραμμα. Το βήμα αυτό διαφέρει από μοντέλο σε μοντέλο. Στην περίπτωση του μοντέλου συνεκτικού ιζήματος λαμβάνεται ίσο με 5 s.

5.4.2. Στερεοπαροχή

Στο μοντέλο για το συνεκτικό ίζημα αρχικά υπολογίζονται οι στερεοπαροχές φορτίου υπό αιώρηση, q_s για τις δυο διευθύνσεις κίνησης της ροής x και y . Οι στερεοπαροχές πυθμένα, q_b δεν υφίστανται στην περίπτωση των αργίλων και των ιλύων, όπως αναφέρθηκε και στην §4.2.1. Κατ' επέκταση ισχύει ότι $q_s=q_t$ στην περίπτωση των συνεκτικών ιζημάτων. Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη συνολική στερεοπαροχή q_t και τα αντίστοιχα διαγράμματα, τόσο για την περίπτωση της απλής ακτής όσο και για την περίπτωση της ακτής με λιμενικό έργο.

Απλή ακτή

Η στερεοπαροχή φορτίου υπό αιώρηση στον άξονα x , q_{sx} παίρνει τιμές στο διάστημα από $2.08 \cdot 10^{-1}$ έως 3.63 kg/m^2s . Η αντίστοιχη στερεοπαροχή φορτίου υπό αιώρηση κατά τον άξονα y , q_{sy} λαμβάνει τιμές στο διάστημα από $2.78 \cdot 10^{-6}$ έως $2.62 \cdot 10^{-1}$ kg/m^2s . Σε κάποια σημεία του καννάβου παρουσιάζεται μηδενική στερεοπαροχή υπό αιώρηση. Σε αυτά δεν υπάρχει έναρξη κίνησης του ιζήματος και κατ' επέκταση συγκέντρωση ιζήματος υπό αιώρηση στην υδατική στήλη.



Σχήμα 5-9: Συνολική στερεοπαροχή σε απλή ακτή ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

Στο Σχήμα 5-9 παρουσιάζεται διαγραμματικά η συνολική στερεοπαροχή για την περίπτωση της απλής ακτής από συνεκτικό ίζημα. Διαπιστώνεται ότι οι τιμές που λαμβάνει βρίσκονται στο εύρος από $2.00 \cdot 10^{-1}$ έως $3.4 \text{ kg/m}^2\text{s}$, δηλαδή περίπου μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για τα μη συνεκτικά ιζήματα.

Όπως και στην περίπτωση των μη συνεκτικών ιζημάτων, οι κατά τον άξονα x τιμές υπερσχύουν σημαντικά αυτών κατά τον άξονα y . Για το λόγο αυτό και στο Σχήμα 5-9 οι συνισταμένες συνολικές στερεοπαροχές, q_t έχουν διεύθυνση κατά τον άξονα x . Επιπλέον και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ότι η κατεύθυνση τους συμφωνεί με τη κατεύθυνση της πνοής του ανέμου, που είναι από τα νοτιοδυτικά προς τα βορειοανατολικά.

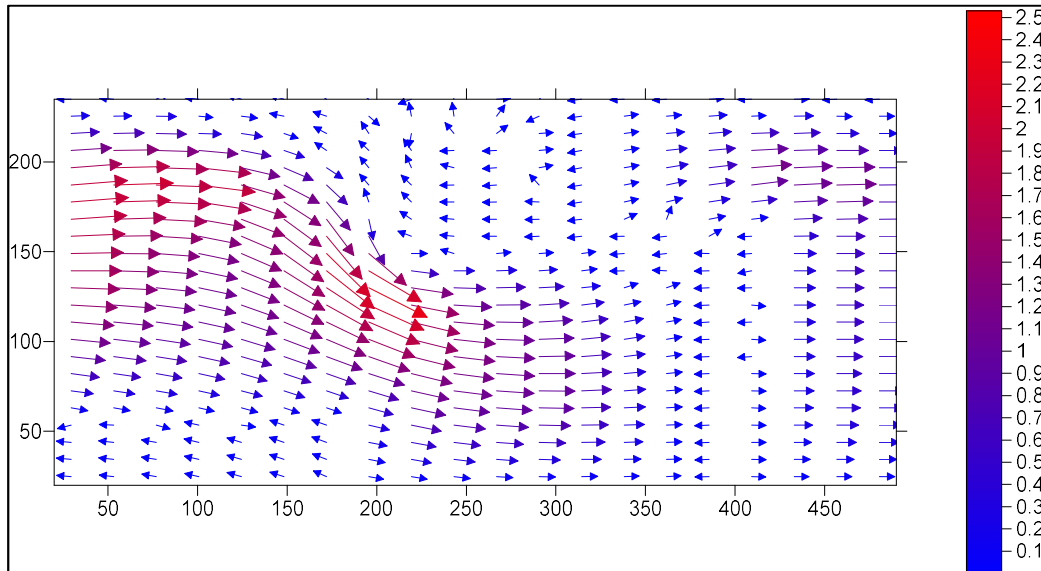
Ακόμα, οι μεγαλύτερες τιμές των στερεοπαροχών παρουσιάζονται στα ρηχά, και ειδικότερα στο ανατολικό τμήμα του πεδίου προς την ακτή, για τους ίδιους λόγους που αναλύθηκαν στην **§Error! Reference source not found.**

Πλησιάζοντας προς την ακτή, ενώ η συνισταμένη της συνολικής στερεοπαροχής έχει φτάσει σε ένα μέγιστο επίπεδο της τάξης περίπου των $3.4 \text{ kg/m}^2\text{s}$, οι τιμές της αρχίζουν να μειώνονται. Η μείωση αυτή οφείλεται στην απώλεια ενέργειας από τη θραύση των κυματισμών στα ρηχά και κατ' επέκταση στη μείωση των ταχυτήτων ροής στην περιοχή αυτή.

Ακτή με λιμενικό έργο

Στην περίπτωση αυτή, η ύπαρξη του λιμενικού έργου προκαλεί κάποιες σημαντικές αλλαγές στο υδροδυναμικό πεδίο ταχυτήτων και κατ' επέκταση στις μεταφερόμενες ποσότητες ιζήματος.

Η στερεοπαροχή φορτίου υπό αιώρηση στον άξονα x , q_{sx} παίρνει τιμές στο εύρος από $1.26 \cdot 10^{-1}$ έως $2.12 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Από την άλλη, η αντίστοιχη στερεοπαροχή φορτίου υπό αιώρηση κατά τον άξονα y , q_{sy} λαμβάνει τιμές στο διάστημα από $1.88 \cdot 10^{-6}$ έως και $1.93 \cdot 10^{-1} \text{ kg/m}^2\text{s}$. Σε κάποια σημεία του καννάβου παρουσιάζεται μηδενική στερεοπαροχή υπό αιώρηση. Σε αυτά δεν υπάρχει έναρξη κίνησης του ιζήματος και κατ' επέκταση συγκέντρωση ιζήματος υπό αιώρηση στην υδατική στήλη.



Σχήμα 5-10: Συνολική στερεοπαροχή σε ακτή με λιμενικό έργο ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω μεγεθών απεικονίζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 5-10 η συνισταμένη της συνολικής στερεοπαροχής, q_t . Όπως παρατηρείται, στα σημεία του καννάβου που τοποθετείται το λιμενικό έργο διαταράσσεται η κατεύθυνση της q_t . Συγκεκριμένα, παρατηρούνται τα εξής:

1. Η q_t αυξάνεται σημαντικά στο βορειοδυτικό τμήμα του καννάβου κοντά στην ακτή και στο σημείο που ενώνονται ο εγκάρσιος με τον παράλληλο λιμενοβραχίονα.
2. Η κατεύθυνση της στερεοπαροχής ακολουθεί αυτήν της ροής του ρευστού στην περιοχή του λιμενικού έργου. Συγκεκριμένα κινείται παράλληλα με αυτό στο σημείο που παρεμβάλλεται της πορείας της ροής και εισέρχεται εντός της λιμενολεκάνης, επηρεαζόμενη από το φαινόμενο της περίθλασης των προσπιπτόντων κυματισμών στα όρια του έργου.
3. Στα δυτικά κοντά στην ακτή, ανάντη του λιμενικού έργου, οι διευθύνσεις και τα μεγέθη της q_t ομοιάζουν με αυτά στην περίπτωση της απλής ακτής. Παρόλα αυτά, το λιμενικό έργο λειτουργεί ως «κυματοθραύστης» μειώνοντας σημαντικά τις τιμές της στερεοπαροχής κατάντη του.
4. Σημαντικά μειωμένες είναι οι τιμές της q_t εντός της λιμενολεκάνης. Αυτή η μείωση οφείλεται τόσο στη σημαντική μείωση της ροής, όσο και στο μεγάλο βάθος του πυθμένα εντός της, το οποίο ελαττώνει σημαντικά την εκκίνηση του ιζήματος.

Κοντά στην ακτή, η q_t φτάνει σε τιμές της τάξης των $2 \text{ kg/m}^2\text{s}$, ανάντη του λιμενικού έργου, ενώ κατάντη κοντά στην ακτή προσεγγίζει τις ελάχιστες τιμές της. Στη γωνία που σχηματίζουν οι δυο πρόβολοι μεταξύ τους, η q_t πλησιάζει τις μέγιστες τιμές της δηλαδή τα $2.5 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

5.4.3. Βασικά μεγέθη

Από το μοντέλο υπολογισμού της στερεοπαροχής των συνεκτικών ιζημάτων προκύπτουν αποτελέσματα για τη μέση κατά βάθος συγκέντρωση του υπό αιώρηση ιζήματος c , την ταχύτητα καθίζησης w_s και τη διάμετρο ισορροπίας των κροκίδων D_f . Παρακάτω τα αποτελέσματα αυτά παρατίθενται αναλυτικότερα.

Συγκέντρωση ιζήματος υπό αιώρηση, c

Από το μοντέλο προέκυψαν τιμές της c της τάξεως των $6.76 \cdot 10^{-1}$ έως 2.52 kg/m^3 , στην περίπτωση της απλής ακτής και από $7.44 \cdot 10^{-1}$ έως 2.35 kg/m^3 στην ακτή με λιμενικό έργο. Στην δεύτερη περίπτωση δεν παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση στις τιμές της συγκέντρωσης καθώς εντός της λιμενολεκάνης λαμβάνει μηδενικές τιμές.

Η τάξη μεγέθους που προέκυψε και στις δυο περιπτώσεις ακτών μπορεί να επαληθευθεί από τις τάξεις μεγέθους στο Σχήμα 2-21, όπου προβάλλονται τα πειραματικά δεδομένα των Thorn (1981), Ross (1988) και Wolanski (1992). Οι μεγαλύτερες τιμές της συγκέντρωσης παρουσιάζονται ασφαλώς στα σημεία που συγκεντρώνονται οι μεγαλύτερες τιμές της στερεοπαροχής, και στα δυο μοντέλα ακτών.

Ταχύτητα καθίζησης, w_s

Η ταχύτητα καθίζησης w_s εξαρτάται τόσο από τη διάμετρο των σωματιδίων του ιζήματος και των κροκίδων που σχηματίζονται από αυτό, όσο και από τη μέση συγκέντρωση του υπό καθίζηση σωματιδίου. Από το μοντέλο προέκυψαν τιμές της w_s της τάξεως από $1.42 \cdot 10^{-5}$ έως $2.98 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, στην περίπτωση της απλής ακτής και από $1.42 \cdot 10^{-5}$ έως $2.79 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ στην ακτή με λιμενικό έργο. Η τάξη μεγέθους που προκύπτει επιβεβαιώνεται και από τα πειραματικά δεδομένα στο Σχήμα 2-20 και στο Σχήμα 2-21.

Διάμετρος κροκίδων, D_f

Η διάμετρος των κροκίδων με τη σειρά της εξαρτάται από τη συγκέντρωση του υπό αιώρηση ιζήματος c , την ταχύτητα καθίζησης w_s και τη μέση διάμετρο των σωματιδίων του υλικού. Από το μοντέλο προέκυψαν τιμές της D_f της τάξεως από $4 \mu\text{m}$, που σημαίνει ότι δε σχηματίστηκαν καθόλου κροκίδες, έως $787 \mu\text{m}$, στην περίπτωση της απλής ακτής. Στην περίπτωση της ακτής με λιμενικό έργο προέκυψαν επίσης τιμές από $4 \mu\text{m}$ έως $787 \mu\text{m}$.

Η τάξη μεγέθους επιβεβαιώνεται και από τα πειραματικά δεδομένα στο Σχήμα 2-20. Το μέγεθος των κροκίδων αυξάνεται σημαντικά στα σημεία που παρατηρείται αύξηση της

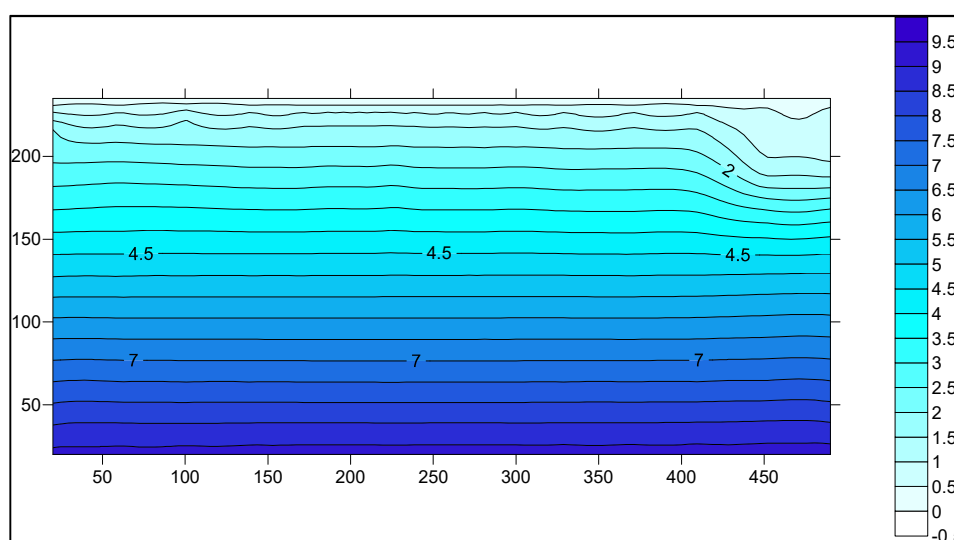
συγκέντρωσης c . Η ποιοτική αυτή συμπεριφορά επιβεβαιώνεται και από τον τύπο υπολογισμού της διαμέτρου (2.28) που εισήχθηκε στο μοντέλο.

5.4.4. Ανανέωση βαθυμετρίας

Η εικόνα της ανανεωμένης βαθυμετρίας, για σταθερές στο χρόνο συνθήκες ροής, προκύπτει και για τα συνεκτικά ιζήματα από τις σχέσεις (2.23) και (2.24), που παρουσιάστηκαν στην §4.1.2. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι ανανεωμένες βαθυμετρίες τόσο για την περίπτωση της απλής ακτής, όσο και για την ακτή με το λιμενικό έργο.

Απλή ακτή

Στην περίπτωση της απλής ακτής παρατηρείται γενικά μια ομοιόμορφη μεταβολή της βαθυμετρίας, με μια ανεπαίσθητη αύξηση του ιζήματος στα σημεία που βρίσκονται κοντά στην παράκτια ζώνη. Η ποσότητα του ιζήματος συσσωρεύεται λίγο παραπάνω στο βορειοανατολικό άκρο του καννάβου, καθώς εκεί προκύπτει και η μεγαλύτερη τιμή της q_b . Η εικόνα αυτή παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο Σχήμα 5-11 που ακολουθεί.



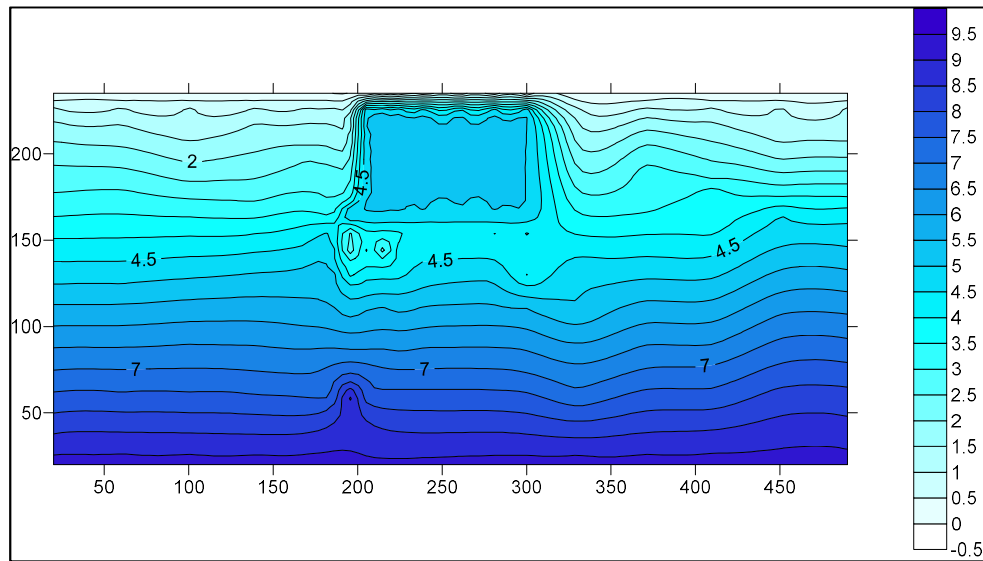
Σχήμα 5-11: Ανανεωμένη βαθυμετρία σε απλή ακτή

Ακτή με λιμενικό έργο

Στην περίπτωση της ακτής με το λιμενικό έργο, η μεταβολή της βαθυμετρίας ακολουθεί σε σημαντικό βαθμό την εικόνα του διαγράμματος της q_b στο Σχήμα 5-10. Συγκεκριμένα παρατηρείται σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης στη γωνία που σχηματίζουν οι δυο πρόβολοι του λιμενικού έργου. Αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερα αυξημένη στερεοπαροχή που παρουσιάζεται στο σημείο αυτό.

Επίσης παρατηρείται σχετικά μεγαλύτερη συγκέντρωση ιζήματος ανάντη του λιμενικού έργου και μικρότερη κατάντη, λόγω της επιρροής του στο υδροδυναμικό πεδίο και κατ' επέκταση στη μεταφορά του ιζήματος.

Εντός της λιμενολεκάνης δε παρατηρείται κάποια αύξηση της συγκέντρωσης του ιζήματος, καθώς η επίδραση του υδροδυναμικού πεδίου στο ιζημα του πυθμένα της είναι μηδαμινή.



Σχήμα 5-12: Ανανεωμένη βαθυμετρία σε ακτή με λιμενικό έργο

Η εικόνα της ανανεωμένης βαθυμετρίας που παρουσιάστηκε και στις δύο περιπτώσεις ακτών δεν είναι απόλυτα ακριβής, καθώς υπολογίζει το αποτέλεσμα της επίδρασης ενός σταθερού στο χρόνο υδροδυναμικού πεδίου σε μια ακτή. Ειδικότερα, υπολογίζει την επίδραση του υδροδυναμικού πεδίου στην ακτή, εάν αυτό δρούσε αναλλοίωτο, για χρονικό διάστημα ίσο με το DT που λαμβάνεται κάθε φορά.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παρουσίαση μεγάλων επιδράσεων και αλλαγών στη μορφολογία της ακτής, για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα DT. Μια πιο αληθοφανής εικόνα θα μπορούσε να προκύψει από τη διαδικασία που αναφέρθηκε ποιοτικά στην §4.4. Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου χρονικά εξαρτώμενης στερεομεταφοράς κινείται εκτός του πλαισίου της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Παρόλα αυτά, η ανανεωμένη βαθυμετρία που προκύπτει στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί μια ενδεικτική εικόνα για την ποιοτική συμπεριφορά της μεταφοράς του ιζήματος μιας ακτής, στην περίπτωση της επίδρασης μιας συγκεκριμένης κυματικής εικόνας.

5.5. Αποτελέσματα στερεομεταφοράς μεικτού ιζήματος

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου για το μεικτό ιζημα κρίνεται δόκιμο να εξεταστούν οι περιεκτικότητες σε συνεκτικό ίζημα στο διάστημα από 3% έως 15% κατά βάρος. Συγκεκριμένα, λήφθηκαν τιμές περιεκτικότητας 5%, 10% και 15%. Ποσότητες συνεκτικού ιζήματος μικρότερες του 3% και μεγαλύτερες του 15% δεν εξετάστηκαν, καθώς η συμπεριφορά τους ομοιάζει με αυτή του μη συνεκτικού και του συνεκτικού ιζήματος αντίστοιχα.

Επίσης, στο πλαίσιο του μοντέλου του μεικτού ιζήματος δεν κρίθηκε δόκιμη η εφαρμογή δυο μοντέλων ακτών, δηλαδή μιας απλής και μιας με λιμενικό έργο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι επιθυμείται η εξέταση της επιρροής των διαφορετικών ποσοστών συνεκτικού ιζήματος στα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου και όχι η ποιοτική επιρροή του λιμενικού έργου σε αυτά. Ο Πίνακας 5-6 που ακολουθεί παρουσιάζει τα αποτελέσματα του μοντέλου στερεοπαροχής, για ποσοστά συνεκτικών ιζημάτων κατά βάρος 5%, 10% και 15%.

Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα μοντέλου στερεομεταφοράς μεικτών ιζημάτων για ιζημα με περιεκτικότητα κατά βάρος σε συνεκτικό υλικό 5%, 10% και 15%

Μέγεθος	Ποσοστό συνεκτικού ιζήματος στο μεικτό (%)		
	5%	10%	15%
q_b (kg/m ² s)	$5 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4} - 6.5 \cdot 10^{-3}$
q_s (kg/m ² s)	0.02-0.40	0.05-0.55	0.05-0.75
q_t (kg/m ² s)	0.02-0.40	0.05-0.55	0.05-0.75
c (kg/m ³)	0.01-0.29	0.03-0.40	0.04-0.53
D_f (μm)	4.00-857.00	4.00-857.00	4.00-857.00

Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό ότι η στερεοπαροχή πυθμένα q_b δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη μεταβολή της περιεκτικότητας του μεικτού ιζήματος, ενώ δεν είναι σημαντικά μεγάλη σε σχέση με την συνολική στερεοπαροχή υπό αιώρηση q_s . Η τάξη μεγέθους της τελευταίας ορίζει και την τιμή της συνολικής στερεοπαροχής q_t , η τιμή της οποίας πρακτικά διπλασιάζεται για περιεκτικότητα συνεκτικού υλικού 15%, σε σχέση με αυτήν για περιεκτικότητα 5%.

Η q_s παρουσιάζεται να αυξάνεται κατά την αύξηση του ποσοστού συνεκτικού ιζήματος στο μεικτό. Η αύξηση αυτή δικαιολογείται καθώς, όπως παρατηρήθηκε και στις §5.2 και 5.3, η q_s σε συνεκτικά ιζήματα πρακτικά δεκαπλασιάζεται σε σχέση με αυτή στα μη συνεκτικά ιζήματα. Η αύξηση αυτή προκύπτει κατ' επέκταση και στη συνολική στερεοπαροχή q_t . Όμοια συμπεριφορά ακολουθεί και η μέση κατά βάθος συγκέντρωση του ιζήματος c . Ειδικότερα παρατηρείται ότι με την αύξηση του ποσοστού συνεκτικού ιζήματος στο μεικτό αυξάνεται και η c . Όσον αφορά στη διάμετρο των κροκίδων D_f , αυτή παραμένει σχετικά αμετάβλητη για τις μεταβολές αυτές της συγκέντρωσης του ιζήματος.

Όσον αφορά στην ταχύτητα καθίζησης, w_s επιλέχθηκε ο Πίνακας 5-6 να μην την περιλαμβάνει, καθώς δεν αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος ανά περιεκτικότητα ιζήματος. Συγκεκριμένα, λαμβάνει διαφορετικές τιμές ανάλογα το υλικό του αιωρούμενου σωματιδίου, προσεγγίζοντας σε τάξη μεγέθους αυτή των μη συνεκτικών ιζημάτων, για κόκκους μη συνεκτικού υλικού και αυτή των συνεκτικών ιζημάτων, για κροκίδες συνεκτικού υλικού.

5.6. Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Έπειτα από τις αναλύσεις όλων των παραπάνω μοντέλων στερεομεταφοράς παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τις στερεοπαροχές, τη συγκέντρωση και τη διάμετρο των κροκίδων, για την περίπτωση της απλής ακτής.

Πίνακας 5-7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μοντέλων στερεομεταφοράς σε απλή ακτή

Μέγεθος	Μη συνεκτικό ίζημα	Συνεκτικό ίζημα	Ποσοστό συνεκτικού ιζήματος στο μεικτό (%)		
			5%	10%	15%
q_b (kg/m ² s)	$5 \cdot 10^{-4} - 7.5 \cdot 10^{-3}$	-	$5 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4} - 6.5 \cdot 10^{-3}$
q_s (kg/m ² s)	0.01 - 0.23	0.2 - 3.4	0.02-0.40	0.05-0.55	0.05-0.75
q_t (kg/m ² s)	0.01 - 0.23	0.2 - 3.4	0.02-0.40	0.05-0.55	0.05-0.75
c (kg/m ³)	$2.2 \cdot 10^{-4} - 1.7 \cdot 10^{-1}$	$6.8 \cdot 10^{-1} - 2.5$	0.01-0.29	0.03-0.40	0.04-0.55
w_s (m/s)	$2.16 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$	-	-	-
D_f (μm)	-	4 - 787	4 - 857	4 - 857	4 - 857

Αρχικά παρατηρείται ότι η τάξη μεγέθους της στερεοπαροχής πυθμένα q_b δε μεταβάλλεται σημαντικά στην περίπτωση μη συνεκτικού ιζήματος και στην περίπτωση μεικτού ιζήματος με περιεκτικότητες 5%, 10% και 15% κατά βάρος σε συνεκτικό ίζημα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα συντριπτικά μεγαλύτερα ποσοστά του μη συνεκτικού ιζήματος (95%, 90% και 85% αντίστοιχα) που επηρεάζουν αποκλειστικά την τιμή της q_b . Παρόλα αυτά, όσο αυξάνεται η κατά βάρος περιεκτικότητα σε συνεκτικό υλικό παρατηρείται μικρή μείωση της q_b , η οποία οφείλεται στη μειωμένη ποσότητα του μη συνεκτικού υλικού στο ίζημα.

Όσον αφορά στην στερεοπαροχή υπό αιώρηση q_s παρατηρείται σημαντική αύξηση της τάξης μεγέθους για τα συνεκτικά ιζήματα, καθώς παρουσιάζεται σχεδόν 20 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τα μη συνεκτικά. Στην περίπτωση του μεικτού ιζήματος παρατηρείται ότι η q_s αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του ποσοστού του συνεκτικού ιζήματος, λόγω του αυξημένου φορτίου υπό αιώρηση που το χαρακτηρίζει.

Ακόμα παρατηρείται ότι η συνολική στερεοπαροχή q_t είναι ίση με την q_s σε όλες τις περιπτώσεις ιζημάτων καθώς η q_s είναι σημαντικά μεγαλύτερη της q_b .

Στην περίπτωση της συγκέντρωσης c παρατηρείται επίσης ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του συνεκτικού ιζήματος στον πυθμένα τόσο αυξάνεται και η c . Ειδικά για πυθμένα από συνεκτικό ίζημα η c παρουσιάζεται έως και τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από ότι για πυθμένα από μη συνεκτικό ίζημα. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί και τις αρκετά μεγαλύτερες q_s , στην περίπτωση ιζημάτων με μεγάλες συγκεντρώσεις συνεκτικού ιζήματος.

Η ταχύτητα καθίζησης w_s στην περίπτωση μη συνεκτικού ιζήματος είναι σταθερή σε κάθε σημείο του καννάβου καθώς η τιμή της προκύπτει από τη σχέση (2.19), που εξαρτάται αποκλειστικά από το μέγεθος των κόκκων του ιζήματος. Η τιμή αυτή είναι περίπου έως και τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες στο συνεκτικό. Το γεγονός αυτό οφείλεται:

1. Στο αυξημένο βάρος των υπό αιώρηση κροκίδων που σχηματίζονται στην περίπτωση των συνεκτικών ιζημάτων.
2. Στις αυξημένες συγκεντρώσεις ιζήματος που δυσχεραίνουν την αιώρηση των σωματιδίων, στην περίπτωση συνεκτικού υλικού.

Τέλος, όσον αφορά στη διάμετρο των κροκίδων, D_f παρατηρείται ότι λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της για μεικτό ίζημα. Το γεγονός αυτό δύναται να οφείλεται στις αυξημένες συγκεντρώσεις στα συνεκτικά ιζήματα, που έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μικρότερων κροκίδων.

6. Σύνοψη

6.1. Βασικά συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας διερευνήθηκε το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο που διέπει τη στερεομεταφορά των μη συνεκτικών και των συνεκτικών ιζημάτων. Σκοπός της διερεύνησης αυτής ήταν η μετατροπή ενός βασικού μοντέλου υπολογισμού της στερεοπαροχής μη συνεκτικών ιζημάτων σε αντίστοιχο μοντέλο υπολογισμού για συνεκτικά ιζήματα.

Για το λόγο αυτό αρχικά εντοπίστηκαν οι βασικές διαφορές στη φυσική και στη μηχανική του φαινομένου της στερεομεταφοράς, για τις δυο διαφορετικές ομάδες υλικών. Οι διαφορές αυτές οφείλονται κυρίως στις φυσικοχημικές ιδιότητες των υλικών και αφορούν:

1. Στο μηχανισμό της έναρξης της κίνησης και της μεταφοράς ιζήματος στον πυθμένα.
2. Στο μηχανισμό μεταφοράς ιζήματος υπό αιώρηση.

Για το φορτίο πυθμένα διαπιστώθηκε ότι στα μη συνεκτικά ιζήματα υφίσταται αναλυτική μέθοδος υπολογισμού, για την οποία και παρουσιάστηκε αναλυτική μεθοδολογία. Αντιθέτως, στα συνεκτικά ιζήματα δεν ορίζεται στη βιβλιογραφία στερεομεταφορά ιζήματος πυθμένα, πέραν της μεταφοράς μιας επιφανειακής στρώσης υγρής λάσπης, λόγω των ισχυρών ηλεκτροστατικών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των σωματιδίων τους.

Στο φορτίο υπό αιώρηση διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά των δύο ομάδων ιζημάτων, οι οποίες οφείλονται στη φύση των συνεκτικών σωματιδίων και στις ηλεκτροστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Ειδικότερα στα συνεκτικά ιζήματα:

- Τα επιμέρους σωματίδια συνενώνονται σε συστοιχίες (κροκίδες), σε αντίθεση με τα μη συνεκτικά όπου τα σωματίδιά τους αιωρούνται αυτόνομα στο νερό. Η κροκίδωση συμβαίνει σε υψηλές συγκεντρώσεις συνεκτικών σωματιδίων στο νερό, καθώς τότε πλησιάζουν και συγκρούονται με αποτέλεσμα τη συνένωσή τους. Η συμπεριφορά αυτή επηρεάζει σημαντικές παραμέτρους του φαινομένου της στερεομεταφοράς, όπως:
 - ❖ η συγκέντρωση των σωματιδίων του υλικού στο νερό c ,
 - ❖ η ταχύτητα καθίζησης w_s και
 - ❖ η διάμετρος των κροκίδων D_f .
- Κατά τον σχηματισμό υψηλών συγκεντρώσεων c επικρατεί το φαινόμενο της εμποδιζόμενης καθίζησης. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει σημαντικά τις τιμές της w_s , καθώς αύξηση της συγκέντρωσης c προκαλεί ταυτόχρονη αύξηση της w_s . Εάν όμως η c υπερβεί ένα ανώτατο όριο, τότε περαιτέρω αύξησή της λειτουργεί αντίστροφα, προκαλώντας μείωση στη w_s . Έπειτα από διερεύνηση στη βιβλιογραφία, για την εμφάνιση του φαινομένου της εμποδιζόμενης καθίζησης ορίστηκε το όριο

συγκέντρωσης των 3kg/m^3 , πέραν του οποίου ακολουθήθηκε διαφορετική μέθοδος υπολογισμού της w_s .

Στη συνέχεια καταρτίστηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Fortran μοντέλο για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής σε ακτές από συνεκτικό ίζημα. Το εν λόγω μοντέλο βασίστηκε σε μοντέλο υπολογισμού στερεοπαροχής μη συνεκτικών ιζημάτων, το οποίο παρουσιάστηκε στο πλαίσιο του μαθήματος «Υπολογιστικές Μέθοδοι στην Παράκτια Ζώνη», του Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, από τους δρ. Κωνσταντίνο Μέμο και δρ. Γιώργο Κλωνάρη. Κατά την τροποποίηση του μοντέλου εφαρμόστηκαν οι εξής βασικές διαφοροποιήσεις:

1. Στον υπολογισμό του φορτίου στερεοπαροχής, καθώς στη στερεομεταφορά συνεκτικών ιζημάτων δεν υφίσταται φορτίο πυθμένα και κατ' επέκταση μέθοδος υπολογισμού της αντίστοιχης στερεοπαροχής, q_b .
2. Στη μέθοδο υπολογισμού της αντοχής της επιφανειακής εδαφικής στρώσης του πυθμένα σε διάβρωση, σύμφωνα με υπάρχουσες σχέσεις στη βιβλιογραφία για τα συνεκτικά ιζήματα. Οι σχέσεις αυτές λαμβάνουν υπόψη το βαθμό στερεοποίησης και τη πλαστιμότητα του συνεκτικού υλικού του πυθμένα.
3. Στη διάμετρο των υπό αιώρηση σωματιδίων, καθώς στα συνεκτικά ιζήματα επικρατεί το φαινόμενο της κροκίδωσης.
4. Στον τρόπο υπολογισμού της συγκέντρωσης των υπό αιώρηση σωματιδίων, καθώς για μεγάλες συγκεντρώσεις ($c > 3\text{kg/m}^3$) επικρατεί το φαινόμενο της εμποδιζόμενης καθίζησης στα συνεκτικά υλικά.

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τα μοντέλα μη συνεκτικών και συνεκτικών ιζημάτων αναπτύχθηκε μοντέλο για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής σε μεικτά ιζήματα, σύμφωνα με την υφιστάμενη βιβλιογραφία. Διαπιστώθηκε ότι για μεικτό ίζημα με περιεκτικότητα κατά βάρος:

- ❖ Μικρότερη του 3% σε συνεκτικό υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο των μη συνεκτικών ιζημάτων της §4.1 για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής, καθώς τότε η συμπεριφορά του μεικτού ιζήματος ομοιάζει με αυτή του μη συνεκτικού ιζήματος.
- ❖ Μεγαλύτερη του 15% σε συνεκτικό υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο των συνεκτικών ιζημάτων της §4.2 για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής, καθώς τότε η συμπεριφορά του μεικτού ιζήματος ομοιάζει με αυτή του συνεκτικού ιζήματος.
- ❖ Μεγαλύτερη του 3% και μικρότερη του 15% μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός των δυο παραπάνω μοντέλων, καθώς το μεικτό ίζημα ακολουθεί μια μεταβατική συμπεριφορά. Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, κατά τη μεταβατική αυτή συμπεριφορά του ιζήματος, τα μεγέθη q_b , q_s και q_t υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας τα αντίστοιχα μεγέθη των συνεκτικών και μη ιζημάτων με την κατά βάρος περιεκτικότητά τους στο μεικτό.

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων των παραπάνω μοντέλων χρησιμοποιήθηκε ένα απλό μοντέλο ακτής και ένα μοντέλο ακτής με λιμενικό έργο, με την ίδια κυματική κατάσταση. Από τα αποτελέσματα και στα δύο μοντέλα ακτών προέκυψαν τα εξής για τα συνεκτικά ιζήματα:

- Οι τιμές των στερεοπαροχών, q_t είναι περίπου κατά μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες στα συνεκτικά ιζήματα σε σχέση με τα μη συνεκτικά.
- Οι συγκεντρώσεις ιζήματος στο νερό, c προκύπτουν σημαντικά μεγαλύτερες κατά μια με τρεις τάξεις μεγέθους, στα συνεκτικά ιζήματα.
- Οι ταχύτητες καθίζησης w_s παρουσιάζονται κατά μια έως και τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερες στα συνεκτικά ιζήματα σε σχέση με τις αντίστοιχες στα μη συνεκτικά.

Τα παραπάνω αποτελέσματα εκτιμήθηκε ότι οφείλονται:

1. Στο αυξημένο βάρος των υπό αιώρηση κροκίδων που σχηματίζονται στην περίπτωση των συνεκτικών ιζημάτων.
2. Στις αυξημένες συγκεντρώσεις ιζήματος που δυσχεραίνουν την αιώρηση των σωματιδίων, στην περίπτωση του συνεκτικού υλικού.

Ανάλογη εικόνα παρουσίασαν και τα αποτελέσματα του μοντέλου των μεικτών ιζημάτων, καθώς παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του ποσοστού συνεκτικού ιζήματος προκαλεί αύξηση:

- Της συνολικής στερεοπαροχής, q_t .
- Της συγκέντρωσης των υπό αιώρηση σωματιδίων, c .

Σε κάθε μοντέλο ιζήματος και ακτής υπολογίστηκε η ανανεωμένη βαθυμετρία. Η εικόνα της ανανεωμένης βαθυμετρίας και στις δύο περιπτώσεις ιζημάτων και ακτών είναι αντιπροσωπευτική ως προς την ποιοτική συμπεριφορά της μεταφοράς του ιζήματος, στην περίπτωση επίδρασης μιας συγκεκριμένης κυματικής εικόνας. Ωστόσο δε μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα ακριβής, καθώς υπολογίζει το αποτέλεσμα της επίδρασης ενός σταθερού στο χρόνο υδροδυναμικού πεδίου σε μια ακτή. Συγκεκριμένα, υπολογίζει την επίδραση του υδροδυναμικού πεδίου στην ακτή, εάν αυτό δρούσε αναλλοίωτο, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παρουσίαση μεγάλων αλλαγών στη μορφολογία της ακτής, για μικρό χρονικό διάστημα. Μια πιο ακριβής εικόνα θα μπορούσε να προκύψει από τη διαδικασία που αναφέρθηκε ποιοτικά στην §4.4. Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου χρονικά εξαρτώμενης στερεομεταφοράς κινείται εκτός του πλαισίου της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

6.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αφορά μια βασική εκτίμηση των στερεοπαροχών υπό την επίδραση ενός σταθερού στο χρόνο πεδίου ταχυτήτων. Η μεθοδολογία αυτή παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την ποιοτική εκτίμηση της μεταβολής της βαθυμετρίας, για μια συγκεκριμένη κυματική εικόνα. Ωστόσο,

για μια περισσότερο ολοκληρωμένη προσέγγιση υπολογισμού της μεταβολής της βαθυμετρίας θα πρέπει να εφαρμοστεί μια επαναληπτική διαδικασία, στην οποία θα επαναυπολογίζονται τα ύψη κύματος και τα βάθη σε κάθε σημείο του καννάβου. Στη διαδικασία αυτή, σε κάθε βήμα θα πρέπει να θεωρείται σταθερό γραμμικό κυματικό πεδίο έως ότου επέλθουν συνθήκες ισορροπίας. Για κάθε κυματική εικόνα θα υπολογίζεται η στερεοπαροχή, η οποία θα μεταβάλλεται, ανάλογα τα κυματικά χαρακτηριστικά που επικρατούν.

Επομένως προτείνεται για μελλοντική έρευνα η προσπάθεια εφαρμογής του μοντέλου που αναπτύχθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, με την επαναληπτική διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται ότι θα παράγονται ακριβέστερα αποτελέσματα για την ανανεωμένη βαθυμετρία, καθώς θα λαμβάνεται υπόψη η έντονη εξάρτηση της μεταβολής του πυθμένα από τις κυματικές συνθήκες που διαφοροποιούνται στο χρόνο.

7. Βιβλιογραφία

Dyer, K.R., 1989. Sediment processes in estuaries: future research requirements. *Journal of Geophysical Research*, 94 (C10) 14,327 - 14,339.

Fredsøe, J., 1993. Modelling of non-cohesive sediment transport processes in the marine environment. *Coastal Engineering*, 21, 71-103.

Fredsøe, J., and R. Deigaard, 1992. *Mechanics of coastal sediment transport - Advanced Series on Ocean Engineering - Volume 3*. World Scientific Publishing.

Klonaris, G. Th., 2016. *Morphodynamics in a beach with submerged breakwaters*. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy submitted to School of Civil Engineering of National Technical University of Athens.

Ledden, Van M., and W.G.M. van Kesteren, J.C. Winterwerp, 2004. A conceptual framework for the erosion behavior of sand–mud mixtures. *Continental Shelf Research* 24, 1–11.

Mitchener, H., and H. Torfs, 1996. Erosion of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering* 29, 1-25.

Panagiotopoulos, I., G. Voulgaris, and M.B. Collins, 1997. The influence of clay on the threshold of movement of fine sandy beds. *Coastal Engineering* 32, 19-43

Partheniades, E, 2009. *Cohesive Sediments in Open Channels - Properties, Transport, and Applications*. Butterworth-Heinemann publications.

Rakha, K. A. , R. Deigaard, and I. Brørker, 1997. A phase-resolving cross shore sediment transport model for beach profile evolution. *Coastal Engineering* 31, 231-261.

Rijn, Van L. C., 1984. Sediment Transport, Part I Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, No. 10.

Rijn, Van L. C., 1984. Sediment Transport, Part II Suspended Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, No. 10.

Rijn, Van L. C., 1989. *Handbook on Sediment Transport by Current and Waves*. Delft Hydraulics, Report H461, pp. 12.1-12.27.

Rijn, Van L. C., 1993. *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.

Rijn, Van L.C., 1985. Mathematical models for sediment concentration profiles in steady flow. Invited Lecture for *Euromech* 192.

Simons, D. B., and E. V. Richardson, 1966. *Resistance to Flow in Alluvial Channels*. Geological Survey Professional Paper 422-J.

Soulsby, R., 1997. Dynamics of marine sands, a manual for practical applications. Thomas Telford, H.R. Wallingford, England, 249 pp.

Stamou, A. I., 2016. Draft notes in mathematical modeling of hydrodynamics and water quality in coastal regions.

Teisson, C., 1991. Cohesive suspended sediment transport: feasibility and limitations of numerical modeling. *Journal of Hydraulic Research* 29, 755-769.

Torfs, H., H. Mitchener, H. Huysentruyt, and E. Toorman, 1996. Settling and consolidation of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering* 29, 27-45.

US Army Corps of Engineers, 2002. Coastal Engineering Manual.

Weiming, W., 2008. Computational River Dynamics. Taylor & Francis Group, London, UK.

Wilberg, P .L., Smith, J. D., 1987. Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water Resour. Res.* 23 (8). 1481 - 1493.

Winterwerp, J. C., A.J. Manning, C. Martens, T. de Mulder, and J. Vanlede, 2006. A heuristic formula for turbulence - induced flocculation of cohesive sediment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 68, 195-207.

Winterwerp, J. C., and W. G. M. van Kesteren, 2004. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment. Elsevier B. V.

Winterwerp, J. C., W. G. M. van Kesteren, B. van Prooijen, and W. Jacobs, 2012. A conceptual framework for shear flow–induced erosion of soft cohesive sediment beds. *J. Geophys. Res.*, 117, C10020.

<https://pubs.usgs.gov/sir/2007/5254/>

http://www.cityoforangebeach.com/pages/know_your_beach/ripcurrents/near_shore_formation/print.htm

Παράρτημα

ι. Κώδικας σε FORTRAN για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής μη συνεκτικών ιζημάτων

```

Program non_cohesive
IMPLICIT NONE
REAL DX(200,200),DY(200,200), X(200,200),Y(200,200),UMAX(200,200),VMAX(200,200)
REAL ZMAX(200,200),U(200,200),V(200,200),Z(200,200),DEPTHS(200,200),B(200,200)
REAL HR(200,200),HMAX(200,200),Qb(200,200),Ut(200,200),A(200,200),thx(200,200)
REAL F25(200,200),th25(200,200),KS(200,200),FW(200,200),TBX(200,200),TBY(200,200)
REAL TB(200,200),thy(200,200),th(200,200),qbx(200,200),qby(200,200),DZB(200,200)
REAL DV(200,200),Ct(200,200),qsx(200,200),qsy(200,200),USTAR(200,200),D2(200,200)
REAL qtx(200,200),qty(200,200)
REAL PER,PI,W,d50,s,g,r,Vh,DT,POR,DS,ThC,D1,C1,C2,WF,Ca
INTEGER I,J,NI,NJ

NI=19
NJ=15
PER=7
PI=3.141592654
W=2*PI/PER
d50=0.0002
s=2.6
g=9.81
r=1025.0
Vh=0.0000012
DT=100
POR=0.4

! READ UMAX
OPEN(1,file='resumax2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    READ(1,*) X(I,J),Y(I,J),UMAX(I,J)
  END DO
END DO
CLOSE(1)

! READ VMAX
OPEN(2,file='resvmax2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    READ(2,*) X(I,J),Y(I,J),VMAX(I,J)
  END DO
END DO
CLOSE(2)

! READ ZMAX
OPEN(3,file='reszmax2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ

```



```
        READ(3,*) X(I,J),Y(I,J),ZMAX(I,J)
    END DO
END DO
CLOSE(3)

! READ HORIZONTAL VELOCITIES

OPEN(4,file='UPLOT2.txt')
DO I=1,NI
    DO J=1,NJ
        READ(4,*) X(I,J),Y(I,J),U(I,J)

        END DO
    END DO
CLOSE(4)

!READ VERTICAL VELOCITIES

OPEN(5,file='VPLOT2.txt')
DO I=1,NI
    DO J=1,NJ
        READ(5,*) X(I,J),Y(I,J),V(I,J)
    END DO
END DO
CLOSE(5)

OPEN(6,file='elev2.txt')
DO I=1,NI
    DO J=1,NJ-1
        READ(6,*) X(I,J),Y(I,J),Z(I,J)

        END DO
    END DO
CLOSE(6)

! INSERT DEPTHS
    open(7,file='depths.txt')
        DO J=NJ,1,-1
            READ(7,*) (DEPTHS(I,J),I=1,NI)

        ENDDO
    CLOSE(7)

! INSERT DX

OPEN(8,file='DX.txt')
DO J=NJ,1,-1
    READ(8,*) (DX(I,J),I=1,NI)
END DO
CLOSE(8)

! INSERT DY
```

```

OPEN(9,file='DY.txt')
DO J=NJ,1,-1
    READ(9,*) (DY(I,J),I=1,NI)
END DO
CLOSE(9)

! COORDINATES
DO J=1,NJ
    X(1,J)=20
    DO I=2,NI
        X(I,J)=X(I-1,J)+(DX(I,J)+DX(I-1,J))/2
    END DO
END DO

DO I=1,NI
    Y(I,1)=20
    DO J=2,NJ
        Y(I,J)=Y(I,J-1)+(DY(I,J)+DY(I,J-1))/2
    END DO
END DO

DO J=1,NJ
DO I=1,NI
    HR(I,J)=2.0*ZMAX(I,J)
    HMAX(I,J)=0.7*DEPTHS(I,J)
END DO
END DO

! BREAKING WAVES
DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
    Qb(I,J)=1-EXP(-(HR(I,J)/HMAX(I,J))**2.0)
END DO
END DO

! BED LOAD
DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
    Ut(I,J)=(UMAX(I,J)**2+VMAX(I,J)**2)**0.5
    A(I,J)=Ut(I,J)/W
    B(I,J)=(A(I,J)*W)**2/(g*(s-1)*d50)
END DO
END DO

DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
    IF (A(I,J).GT.0.01) THEN
        F25(I,J)=EXP(5.213*(2.5*d50/A(I,J))**0.194-5.977)
        th25(I,J)=0.5*F25(I,J)*B(I,J)
        IF (th25(I,J).GT.0.05) THEN

```

```

KS(I,J)=170*d50*(th25(I,J)-0.05)**0.5
FW(I,J)=EXP(5.213*(KS(I,J)/A(I,J))**0.194-5.977)
ELSE
KS(I,J)=2.5*d50
FW(I,J)=EXP(5.213*(KS(I,J)/A(I,J))**0.194-5.977)
END IF
END IF

IF(FW(I,J).GT.0.1) FW(I,J)=0.1

TBX(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*U(I,J)
TBY(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*V(I,J)
TB(I,J)=(TBX(I,J)**2+TBY(I,J)**2)**0.5
thx(I,J)=TBX(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
thy(I,J)=TBY(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
th(I,J)=TB(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
IF (FW(I,J).LE.0.001) FW(I,J)=0.001

TBX(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*U(I,J)
TBY(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*V(I,J)
TB(I,J)=(TBX(I,J)**2+TBY(I,J)**2)**0.5
thx(I,J)=TBX(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
thy(I,J)=TBY(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
th(I,J)=TB(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
END DO
END DO

DS=d50*(g*(s-1)/Vh**2)**(1.0/3.0)
IF(DS.LE.4) THEN
ThC=0.24/DS
ELSE IF(DS.LE.10) THEN
ThC=0.14*DS**(-0.64) ! CRITICAL ANGLE TH
ELSE IF (DS.LE.20) THEN
ThC=0.04*DS**(-0.14)
ELSE IF (DS.LE.150) THEN
ThC=0.013*DS**0.29
ELSE
ThC=0.055
END IF

DO I=1,NI
DO J=1,NJ-1
IF(th(I,J).GE.ThC) THEN
qbx(I,J)=((s-1)*g*d50**3)**0.5*11*(thx(I,J)/th(I,J))*(th(I,J)-ThC)**1.65
qby(I,J)=((s-1)*g*d50**3)**0.5*11*(thy(I,J)/th(I,J))*(th(I,J)-ThC)**1.65
ELSE
qbx(I,J)=0
qby(I,J)=0
END IF
END DO
END DO

```

! SUSPENDED LOAD

$D1=(s-1)*g*d50^{**3}/Vh^{**2}$

$C1=0.055*TANH(12*D1^{**(-0.59)})*EXP(-0.0004*D1)$

$C2=1.06*TANH(0.016*D1^{**0.5}*EXP(-120/D1))$

$WF=((s-1)*g*d50^{**2}/Vh)*C1+C2*((s-1)*g*d50)^{**0.5}$

DO J=1,NJ-1

DO I=1,NI

$Ca=0.49*th(I,J)^{**1.77}*(d50/(WF*PER*FW(I,J)))^{**1.77}$

$D2(I,J)=0.25*Qb(I,J)*(1/PER)*r*g*HMAX(I,J)^{**2}$

$USTAR(I,J)=(TB(I,J)/r)^{**0.5}$

$DV(I,J)=0.083*USTAR(I,J)*DEPTHS(I,J)+0.025*DEPTHS(I,J)*(D2(I,J)/r)^{**0.3333}$

IF(DV(I,J).LT.Vh) THEN

DV(I,J)=Vh

ELSE

END IF

$Ct(I,J)=Ca*(DV(I,J)/WF)*(1-EXP(-WF*DEPTHS(I,J)/DV(I,J)))$

$qsx(I,J)=Ct(I,J)*U(I,J)$

$qsy(I,J)=Ct(I,J)*V(I,J)$

$qtx(I,J)=qbx(I,J)+qsx(I,J)$

$qty(I,J)=qby(I,J)+qsy(I,J)$

END DO

END DO

! UPDATE DEPTHS

DO I=1,NI-1

DO J=1,NJ-1

$DEPTHS(I,J)=DEPTHS(I,J)+DT*(1/(1-POR))*((qtx(I+1,J)-qtx(I,J))/DX(I,J)+(qty(I,J+1)&-qty(I,J))/DY(I,J))$

END DO

END DO

! EASTERN BOUNDARY

DO J=1,NJ

$DEPTHS(NI,J)=DEPTHS(NI,J)+DT*(1/(1-POR))*((qtx(NI,J)-qtx(NI-1,J))/DX(NI,J)+(qty(NI,J)&-qty(NI,J-1))/DY(NI,J))$

END DO

! INITIAL EROSION RATE

DO I=1,NI

DO J=1,NJ

$DZB(I,J)=-DT*(1/(1-POR))*((qtx(I+1,J)-qtx(I,J))/DX(I,J)+(qty(I,J+1)-qty(I,J))/DY(I,J))$

END DO

END DO

! RESULTS

OPEN(10,file='STEREOPAROXISINOLIKIX.txt')

DO I=1,NI-1

DO J=1,NJ-1

```
WRITE(10,*) X(I,J),Y(I,J),0.5*(qtx(I+1,J)+qtx(I,J))
END DO
END DO
```

```
OPEN(16,file='STEREOPAROXISINOLIKIY.txt')
DO I=1,NI-1
DO J=1,NJ-1
WRITE(16,*) X(I,J),Y(I,J),0.5*(qty(I,J+1)+qty(I,J))
END DO
END DO
```

```
OPEN(11,file='STEREOPAROXIAIORY.txt')
DO I=1,NI-1
DO J=1,NJ-1
WRITE(11,*) X(I,J),Y(I,J),qsy(I,J)
END DO
END DO
```

```
OPEN(12,file='STEREOPAROXIAIORX.txt')
DO I=1,NI-1
DO J=1,NJ-1
WRITE(12,*) X(I,J),Y(I,J),qsx(I,J)
END DO
END DO
```

```
OPEN(13,file='STEREOPAROXIPITMHX.txt')
DO I=1,NI-1
DO J=1,NJ-1
WRITE(13,*) X(I,J),Y(I,J),qbx(I,J)
END DO
END DO
```

```
OPEN(14,file='STEREOPAROXIPITMHY.txt')
DO I=1,NI-1
DO J=1,NJ-1
WRITE(14,*) X(I,J),Y(I,J),qby(I,J)
END DO
END DO
```

```
OPEN(15,file='DEPTHNEW.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ-1
WRITE(15,*) X(I,J),Y(I,J),DEPTHS(I,J)
END DO
END DO
CLOSE(15)
```

```
OPEN(16,file='CONCENTR.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ-1
WRITE(16,*) X(I,J),Y(I,J),Ct(I,J)
```

```
END DO
END DO
CLOSE(16)

OPEN(17,file='FALL_VEL.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ-1
WRITE(17,*) X(I,J),Y(I,J),WF
END DO
END DO
CLOSE(17)

STOP
END
```

ii. Κώδικας σε FORTRAN για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής συνεκτικών ιζημάτων

```

Program cohesive
IMPLICIT NONE
REAL DX(200,200),DY(200,200), X(200,200),Y(200,200),UMAX(200,200),VMAX(200,200)
REAL ZMAX(200,200),U(200,200),V(200,200),Z(200,200),DEPTHS(200,200),HR(200,200)
REAL HMAX(200,200),Qb(200,200),Ut(200,200),TBY(200,200),TB(200,200),thx(200,200)
REAL A(200,200),B(200,200),F25(200,200),th25(200,200),KS(200,200),FW(200,200)
REAL TBX(200,200),D2(200,200),DEPTHSNEW(200,200), DF(200,200),WF(200,200)
REAL USTAR(200,200),DV(200,200),thy(200,200),th(200,200),qbx(200,200),qby(200,200)
REAL C(200,200),C1(200,200),C2(200,200), CFIN(200,200),qsx(200,200),qsy(200,200)
REAL qtx(200,200),qty(200,200),DZB(200,200),TCE(200,200)
REAL PL,a1,kA,kA1,kB,MFY,nf,Ref,aeb
REAL PER,PI,W,Dp,s,g,r,rs,Vh,DT,POR,DS,DC,G1,GM
INTEGER I,J,NI,NJ,K,L
NI=19
NJ=15
PER=7
PI=3.141592654
W=2*PI/PER
Dp=0.000004 !4μm
s=2.6
g=9.81
G1=3.0
rs=2650.0
r=1025.0
Vh=0.0000012
DT=5
POR=0.8
PL=30
!a'
a1=1.0/18.0
kA=14.6 !m**2/kg
!kA'
kA1=0.31
kB=14.0*10**3 !s**1/2/m**2
aeb=2*10**(-5)
!sqrt(μ/Fy)
MFY=5.6*10**3
nf=2.0
Ref=0.0001
GM=0.001 !greek m (=μ)

! READ UMAX
OPEN(1,file='resumax2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    READ(1,*) X(I,J),Y(I,J),UMAX(I,J)
  END DO
END DO

```

```
CLOSE(1)

! READ VMAX
OPEN(2,file='resvmax2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    READ(2,*) X(I,J),Y(I,J),VMAX(I,J)
  END DO
END DO
CLOSE(2)

! READ ZMAX
OPEN(3,file='reszmax2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    READ(3,*) X(I,J),Y(I,J),ZMAX(I,J)
  END DO
END DO
CLOSE(3)

! READ HORIZONTAL VELOCITIES
OPEN(4,file='UPLOT2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    READ(4,*) X(I,J),Y(I,J),U(I,J)
  END DO
END DO
CLOSE(4)

! READ VERTICAL VELOCITIES
OPEN(5,file='VPLOT2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    READ(5,*) X(I,J),Y(I,J),V(I,J)
  END DO
END DO
CLOSE(5)

OPEN(6,file='elev2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ-1
    READ(6,*) X(I,J),Y(I,J),Z(I,J)
  END DO
END DO
CLOSE(6)

! INSERT DEPTHS
OPEN(7,file='depths.txt')
DO J=NJ,1,-1
  READ(7,*) (DEPTHS(I,J),I=1,NI)
ENDDO
```



```

CLOSE(7)

! INSERT DX
OPEN(8,file='DX.txt')
DO J=NJ,1,-1
  READ(8,*) (DX(I,J),I=1,NI)
END DO
CLOSE(8)

! INSERT DY
OPEN(9,file='DY.txt')
DO J=NJ,1,-1
  READ(9,*) (DY(I,J),I=1,NI)
END DO
CLOSE(9)

! COORDINATES
DO J=1,NJ
  X(1,J)=20
  DO I=2,NI
    X(I,J)=X(I-1,J)+(DX(I,J)+DX(I-1,J))/2
  END DO
END DO

DO I=1,NI
  Y(I,1)=20
  DO J=2,NJ
    Y(I,J)=Y(I,J-1)+(DY(I,J)+DY(I,J-1))/2
  END DO
END DO

! WAVE HEIGHT & MAXIMUM BREAKING WAVE
DO J=1,NJ
DO I=1,NI
  HR(I,J)=2.0*ZMAX(I,J)
  HMAX(I,J)=0.7*DEPTHS(I,J)
END DO
END DO

! CALCULATE BREAKING WAVE
DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
  Qb(I,J)=1-EXP(-(HR(I,J)/HMAX(I,J))**2.0)
END DO
END DO

! BED VELOCITY
DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
  Ut(I,J)=(UMAX(I,J)**2+VMAX(I,J)**2)**0.5
  A(I,J)=Ut(I,J)/W

```

```

B(I,J)=(A(I,J)*W)**2/(g*(s-1)*Dp)
END DO
END DO

DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
IF (A(I,J).GT.0.01) THEN
F25(I,J)=EXP(5.213*(2.5*Dp/A(I,J))**0.194-5.977)
th25(I,J)=0.5*F25(I,J)*B(I,J)
IF (th25(I,J).GT.0.05) THEN
KS(I,J)=170*Dp*(th25(I,J)-0.05)**0.5
FW(I,J)=EXP(5.213*(KS(I,J)/A(I,J))**0.194-5.977)
ELSE
KS(I,J)=2.5*Dp
FW(I,J)=EXP(5.213*(KS(I,J)/A(I,J))**0.194-5.977)
END IF
END IF
END DO

IF(FW(I,J).GT.0.1) FW(I,J)=0.1
TBX(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*U(I,J)
TBY(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*V(I,J)
TB(I,J)=(TBX(I,J)**2+TBY(I,J)**2)**0.5
thx(I,J)=TBX(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
thy(I,J)=TBY(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
th(I,J)=TB(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
IF (FW(I,J).LE.0.001) FW(I,J)=0.001
TBX(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*U(I,J)
TBY(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*V(I,J)
TB(I,J)=(TBX(I,J)**2+TBY(I,J)**2)**0.5
thx(I,J)=TBX(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
thy(I,J)=TBY(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
th(I,J)=TB(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
END DO
END DO

! ZERO BED LOAD
DO I=1,NI
DO J=1,NJ-1
qbx(I,J)=0
qby(I,J)=0
END DO
END DO

! CRITICAL SHEAR FOR EROSION
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
TCE(I,J)=0.162792*PL**0.84 !Pascal
END DO
END DO
! EROSION TEST
DO I=1,NI

```

```

DO J=1,NJ
  USTAR(I,J)=(TB(I,J)/r)**0.5
  DV(I,J)=0.083*USTAR(I,J)*DEPTHS(I,J)+0.025*DEPTHS(I,J)*(D2(I,J)/r)**0.3333
  IF(DV(I,J).LT.Vh) THEN
    DV(I,J)=Vh
  ELSE
    END IF
  IF(TB(I,J).LE.TCE(I,J)) THEN
    qsx(I,J)=0
    qsy(I,J)=0
  ELSE
    ! START NUMERICAL PROCESS
    C(I,J)=0.0
    DC=0.000001

    ! NORMAL SETTLING
    DO K=1,3000
    100  C(I,J)=C(I,J)+DC
        !C'=F(C) FOR NORMAL SETTLING
        C1(I,J)=0.49*th(I,J)**1.77*(Dp/(((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)/&
(kB*SQRT(G1))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))*PER*FW(I,J))**1.77*(DV(I,J)/((rs-r)*&
g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687)))&
*(1-EXP(-((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))**(nf-1))/(1+0.15&
*Ref**0.687))*DEPTHS(I,J)/DV(I,J)))
        IF (ABS(C(I,J)-C1(I,J)).GT.0.01) GOTO 100
        WRITE(*,*) C1(I,J)
    END DO

    ! HINDERED SETTLING
    C(I,J)=0.0
    DO L=1,3000
    200  C(I,J)=C(I,J)+DC
        !C'=F(C) FOR HINDERED SETTLING
        C2(I,J)=0.49*th(I,J)**1.77*(Dp/(((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)/&
(kB*SQRT(G1))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))*(1-(C(I,J)/rs))*(1-(C(I,J)/rs*(Dp/(Dp+kA&
*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))**(3-nf)))/(1+2.5*(C(I,J)/rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))&
**3-nf))))*PER*FW(I,J))**1.77*(DV(I,J)/((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)/(kB&
*SQRT(G1))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))*(1-(C(I,J)/rs))*(1-(C(I,J)/rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)&
/(kB*SQRT(G1))**(3-nf)))/(1+2.5*(C(I,J)/rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))**(3-nf)) &
)))*(1-EXP(-((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))**(nf-1))/(1+ &
0.15*Ref**0.687))*(1-(C(I,J)/rs))*(1-(C(I,J)/rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))**(3-nf)&
)))/(1+2.5*(C(I,J)/rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))**(3-nf))))*DEPTHS(I,J)/DV(I,J)))
        IF (ABS(C(I,J)-C2(I,J)).GT.0.01) GOTO 200
        WRITE(*,*) C2(I,J)
    END DO

    ! CALCULATE CONCENTRATION FOR NORMAL OR HINDERED SETTLING
    IF (C1(I,J).GE.3.0) THEN
      CFIN(I,J)=C2(I,J)
    ELSE
      CFIN(I,J)=C1(I,J)

```

```

END IF

! FOR NORMAL SETTling
qsx(I,J)=CFIN(I,J)*U(I,J)
qsy(I,J)=CFIN(I,J)*V(I,J)
END IF
END DO
END DO

DO I=1,NI
DO J=1,NJ
DF(I,J)=(Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G)))
IF (CFIN(I,J).GE.3.0) THEN
WF(I,J)=((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G)))**(nf-1))&
(1+0.15*Ref**0.687))*(1-(CFIN(I,J)/rs))*(1-(CFIN(I,J)/rs*(Dp/(Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*&
SQRT(G))))**(3-nf)))/(1+2.5*(CFIN(I,J)/rs*(Dp/(Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G))))**(3-nf))))
ELSE
WF(I,J)=((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G)))**(nf-1))&
/(1+0.15*Ref**0.687))
ENDIF
END DO
END DO

DO I=1,NI
DO J=1,NJ
qtx(I,J)=qbx(I,J)+qsx(I,J)
qty(I,J)=qby(I,J)+qsy(I,J)
END DO
END DO

! UPDATE DEPTHS
DO I=1,NI-1
DO J=1,NJ
DEPTHSNEW(I,J)=DEPTHS(I,J)+DT*(1/(1-POR))*((qtx(I+1,J)-qtx(I,J))/DX(I,J)+(qty(I,J+1)-&
qty(I,J))/DY(I,J))
END DO
END DO

! EASTERN BOUNDARY
DO J=1,NJ
DEPTHSNEW(NI,J)=DEPTHS(NI,J)+DT*(1/(1-POR))*((qtx(NI,J)-qtx(NI-1,J))/DX(I,J)+(qty(NI,J)&
-qty(NI,J-1))/DY(I,J))
END DO

! RESULTS
OPEN(10,file='STPAROXISINOLX.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
WRITE(10,*) X(I,J),Y(I,J),0.5*(qtx(I+1,J)+qtx(I,J))
END DO
END DO

```

```
CLOSE(10)

OPEN(12,file='STPAROXISINOLY.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
WRITE(12,*) X(I,J),Y(I,J),0.5*(qty(I+1,J)+qty(I,J))
END DO
END DO
CLOSE(12)

!OPEN(11,file='STEREOPAROXIAIORY .txt')
!DO I=1,NI-1
! DO J=1,NJ-1
! WRITE(11,*) X(I,J),Y(I,J),qsy(I,J)
! END DO
!END DO

!OPEN(12,file='STEREOPAROXIAIORX.txt')
!DO I=1,NI-1
! DO J=1,NJ-1
! WRITE(12,*) X(I,J),Y(I,J),qsx(I,J)
! END DO
!END DO

! OPEN(13,file='STEREOPAROXIPITMHX.txt')
!DO I=1,NI-1
! DO J=1,NJ-1
! WRITE(13,*) X(I,J),Y(I,J),qbx(I,J)
! END DO
!END DO

! OPEN(14,file='STEREOPAROXIPITMHY.txt')
!DO I=1,NI-1
! DO J=1,NJ-1
! WRITE(14,*) X(I,J),Y(I,J),qby(I,J)
! END DO
!END DO

OPEN(15,file='DEPTHNEW.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
WRITE(15,*) X(I,J),Y(I,J),DEPTHSNEW(I,J)
END DO
END DO
CLOSE(15)

OPEN(17,file='CONCENTR.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
WRITE(17,*) X(I,J),Y(I,J),CFIN(I,J)
END DO
```

```
END DO
CLOSE(17)

OPEN(19,file='DEPTHOLD.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
WRITE(19,*) X(I,J),Y(I,J),DEPTHS(I,J)
END DO
END DO
CLOSE(19)

OPEN(20,file='FALLVEL.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
WRITE(20,*) X(I,J),Y(I,J),WF(I,J)
END DO
END DO
CLOSE(20)

OPEN(21,file='FLOCDIAM.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
WRITE(21,*) X(I,J),Y(I,J),DF(I,J)
END DO
END DO
CLOSE(21)

STOP
END
```

iii. Κώδικας σε FORTRAN για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής μεικτών ιζημάτων

```

Program mixed
IMPLICIT NONE
REAL DX(200,200),DY(200,200), X(200,200),Y(200,200),UMAX(200,200),VMAX(200,200)
REAL ZMAX(200,200),U(200,200),V(200,200),Z(200,200),DEPTHS(200,200),HR(200,200),
REAL HMAX(200,200),Qb(200,200),Ut(200,200),TBX(200,200),TBY(200,200),TB(200,200)
REAL A(200,200),B(200,200),F25(200,200),th25(200,200),KS(200,200),FW(200,200)
REAL thy(200,200),th(200,200),qbx(200,200),qby(200,200),D2(200,200),USTAR(200,200),
REAL C(200,200),C1(200,200),C2(200,200), CFIN(200,200),qsx(200,200),qsy(200,200),
REAL DEPTHSNEW(200,200), DF(200,200), WF(200,200),DV(200,200),thx(200,200)
REAL qtx(200,200),qty(200,200),DZB(200,200),TCE(200,200),Ct(200,200),ThCMIX(200,200)
REAL qbsx(200,200),qbsy(200,200),qssx(200,200),qssy(200,200),qtsx(200,200),qtsy(200,200)
! sand discharge
REAL qbm(200,200),qbm(200,200),qsmx(200,200),qsm(200,200),qtmx(200,200)
REAL qtmy(200,200)
! mud discharge
REAL PL,a1,kA,kA1,kB,MFY,nf,Ref,aeb
REAL PER,PI,W,Dp,s,g,r,rs,Vh,DT,POR,DS,DC,G1,GM,d50,ThC,D1,C1S,C2S,WFS,Ca,
REAL MUD,SAND !C1S,C2S for Sand concentration computation
INTEGER I,J,NI,NJ,K,L

NI=19
NJ=15
PER=7
PI=3.141592654
W=2*PI/PER
Dp=0.000004 !4μm
d50=0.0002 !0.2mm
s=2.6
g=9.81
G1=3.0
rs=2650.0
r=1025.0
Vh=0.0000012
DT=100
POR=0.4
PL=30
!a'
a1=1.0/18.0
kA=14.6 !m**2/kg
!kA'
kA1=0.31
kB=14.0*10**3 !s**1/2/m**2
aeb=2*10**(-5)
!sqrt(μ/Fy)
MFY=5.6*10**3
nf=2.0
Ref=0.0001
GM=0.001 !greek m (=μ)

```

```
! READ UMAX
OPEN(1,file='resumax2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    READ(1,*) X(I,J),Y(I,J),UMAX(I,J)
  END DO
END DO
CLOSE(1)
```

```
! READ VMAX
OPEN(2,file='resvmax2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    READ(2,*) X(I,J),Y(I,J),VMAX(I,J)
  END DO
END DO
CLOSE(2)
```

```
! READ ZMAX
OPEN(3,file='reszmax2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    READ(3,*) X(I,J),Y(I,J),ZMAX(I,J)
  END DO
END DO
CLOSE(3)
```

```
! READ HORIZONTAL VELOCITIES
OPEN(4,file='UPLOT2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    READ(4,*) X(I,J),Y(I,J),U(I,J)
  END DO
END DO
CLOSE(4)
```

```
! READ VERTICAL VELOCITIES
OPEN(5,file='VPLOT2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ
    READ(5,*) X(I,J),Y(I,J),V(I,J)
  END DO
END DO
CLOSE(5)
```

```
OPEN(6,file='elev2.txt')
DO I=1,NI
  DO J=1,NJ-1
    READ(6,*) X(I,J),Y(I,J),Z(I,J)
  END DO
END DO
```



```
CLOSE(6)

! INSERT DEPTHS
OPEN(7,file='depths.txt')
DO J=NJ,1,-1
  READ(7,*) (DEPTHS(I,J),I=1,NI)
ENDDO
CLOSE(7)

! INSERT DX
OPEN(8,file='DX.txt')
DO J=NJ,1,-1
  READ(8,*) (DX(I,J),I=1,NI)
END DO
CLOSE(8)

! INSERT DY
OPEN(9,file='DY.txt')
DO J=NJ,1,-1
  READ(9,*) (DY(I,J),I=1,NI)
END DO
CLOSE(9)

! COORDINATES
DO J=1,NJ
  X(1,J)=20
  DO I=2,NI
    X(I,J)=X(I-1,J)+(DX(I,J)+DX(I-1,J))/2
  END DO
END DO

DO I=1,NI
  Y(I,1)=20
  DO J=2,NJ
    Y(I,J)=Y(I,J-1)+(DY(I,J)+DY(I,J-1))/2
  END DO
END DO

! WAVE HEIGHT & MAXIMUM BREAKING WAVE
DO J=1,NJ
DO I=1,NI
  HR(I,J)=2.0*ZMAX(I,J)
  HMAX(I,J)=0.7*DEPTHS(I,J)
END DO
END DO

! CALCULATE BREAKING WAVES
DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
  Qb(I,J)=1-EXP(-(HR(I,J)/HMAX(I,J))**2.0)
END DO
```

```

END DO

WRITE (*,*) 'MUD WEIGHT PERCENTAGE IS'
READ(*,*) MUD
SAND=1-MUD
IF (MUD.GT.0.15) THEN
GOTO 600
ELSE IF (MUD.LT.0.03) THEN
GOTO 500
ELSE
GOTO 700
ENDIF

! SAND TRANSPORT ONLY
! BED LOAD
500 DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
Ut(I,J)=(UMAX(I,J)**2+VMAX(I,J)**2)**0.5
A(I,J)=Ut(I,J)/W
B(I,J)=(A(I,J)*W)**2/(g*(s-1)*d50)
END DO
END DO

DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
IF (A(I,J).GT.0.01) THEN
F25(I,J)=EXP(5.213*(2.5*d50/A(I,J))**0.194-5.977)
th25(I,J)=0.5*F25(I,J)*B(I,J)
IF (th25(I,J).GT.0.05) THEN
KS(I,J)=170*d50*(th25(I,J)-0.05)**0.5
FW(I,J)=EXP(5.213*(KS(I,J)/A(I,J))**0.194-5.977)
ELSE
KS(I,J)=2.5*d50
FW(I,J)=EXP(5.213*(KS(I,J)/A(I,J))**0.194-5.977)
END IF
END IF
END IF

IF(FW(I,J).GT.0.1) FW(I,J)=0.1
TBX(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*U(I,J)
TBY(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*V(I,J)
TB(I,J)=(TBX(I,J)**2+TBY(I,J)**2)**0.5
thx(I,J)=TBX(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
thy(I,J)=TBY(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
th(I,J)=TB(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
IF (FW(I,J).LE.0.001) FW(I,J)=0.001
TBX(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*U(I,J)
TBY(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*V(I,J)
TB(I,J)=(TBX(I,J)**2+TBY(I,J)**2)**0.5
thx(I,J)=TBX(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
thy(I,J)=TBY(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
th(I,J)=TB(I,J)/((s-1)*r*g*d50)

```

```

END DO
END DO
DS=d50*(g*(s-1)/Vh**2)**(1.0/3.0)
IF(DS.LE.4) THEN
  ThC=0.24/DS
ELSE IF(DS.LE.10) THEN
  ThC=0.14*DS**(-0.64) ! CRITICAL ANGLE TH
ELSE IF (DS.LE.20) THEN
  ThC=0.04*DS**(-0.14)
ELSE IF (DS.LE.150) THEN
  ThC=0.013*DS**0.29
ELSE
  ThC=0.055
END IF

DO I=1,NI
DO J=1,NJ-1
  IF(th(I,J).GE.ThC) THEN
    qbsx(I,J)=((s-1)*g*d50**3)**0.5*11*(thx(I,J)/th(I,J))*(th(I,J)-ThC)**1.65
    qbsy(I,J)=((s-1)*g*d50**3)**0.5*11*(thy(I,J)/th(I,J))*(th(I,J)-ThC)**1.65
  ELSE
    qbsx(I,J)=0
    qbsy(I,J)=0
  END IF
END DO
END DO

! SUSPENDED LOAD
D1=(s-1)*g*d50**3/Vh**2
C1S=0.055*TANH(12*D1**(-0.59))*EXP(-0.0004*D1)
C2S=1.06*TANH(0.016*D1**0.5*EXP(-120/D1))
WFS=((s-1)*g*d50**2/Vh)*C1S+C2S*((s-1)*g*d50)**0.5

DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
  Ca=0.49*th(I,J)**1.77*(d50/(WFS*PER*FW(I,J)))**1.77
  D2(I,J)=0.25*Qb(I,J)*(1/PER)*r*g*HMAX(I,J)**2
  USTAR(I,J)=(TB(I,J)/r)**0.5
  DV(I,J)=0.083*USTAR(I,J)*DEPTHS(I,J)+0.025*DEPTHS(I,J)*(D2(I,J)/r)**0.3333
  IF(DV(I,J).LT.Vh) THEN
    DV(I,J)=Vh
  ELSE
    END IF

  Ct(I,J)=Ca*(DV(I,J)/WFS)*(1-EXP(-WFS*DEPTHS(I,J)/DV(I,J)))
  qssx(I,J)=Ct(I,J)*U(I,J)
  qssy(I,J)=Ct(I,J)*V(I,J)
  qtsx(I,J)=qbsx(I,J)+qssx(I,J)
  qtsy(I,J)=qbsy(I,J)+qssy(I,J)
END DO

```

```

END DO

GOTO 800

! MUD TRANSPORT ONLY
! BED VELOCITY
600 DO J=1,NJ-1
  DO I=1,NI
    Ut(I,J)=(UMAX(I,J)**2+VMAX(I,J)**2)**0.5
    A(I,J)=Ut(I,J)/W
    B(I,J)=(A(I,J)*W)**2/(g*(s-1)*Dp)
  END DO
END DO

DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
  IF (A(I,J).GT.0.01) THEN
    F25(I,J)=EXP(5.213*(2.5*Dp/A(I,J))**0.194-5.977)
    th25(I,J)=0.5*F25(I,J)*B(I,J)
  IF (th25(I,J).GT.0.05) THEN
    KS(I,J)=170*Dp*(th25(I,J)-0.05)**0.5
    FW(I,J)=EXP(5.213*(KS(I,J)/A(I,J))**0.194-5.977)
  ELSE
    KS(I,J)=2.5*Dp
    FW(I,J)=EXP(5.213*(KS(I,J)/A(I,J))**0.194-5.977)
  END IF
END IF

  IF(FW(I,J).GT.0.1) FW(I,J)=0.1
    TBX(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*U(I,J)
    TBY(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*V(I,J)
    TB(I,J)=(TBX(I,J)**2+TBY(I,J)**2)**0.5
    thx(I,J)=TBX(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
    thy(I,J)=TBY(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
    th(I,J)=TB(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
  IF (FW(I,J).LE.0.001) FW(I,J)=0.001
    TBX(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*U(I,J)
    TBY(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*V(I,J)
    TB(I,J)=(TBX(I,J)**2+TBY(I,J)**2)**0.5
    thx(I,J)=TBX(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
    thy(I,J)=TBY(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
    th(I,J)=TB(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
  END DO
END DO

! ZERO BED LOAD (NOT FLUID MUD TRANSPORT)

DO I=1,NI
DO J=1,NJ-1
  qbmx(I,J)=0
  qbmy(I,J)=0

```

```

END DO
END DO

! CRITICAL SHEAR FOR EROSION
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
TCE(I,J)=0.162792*PL**0.84 !Pascal
END DO
END DO

! EROSION TEST
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
USTAR(I,J)=(TB(I,J)/r)**0.5
DV(I,J)=0.083*USTAR(I,J)*DEPTHS(I,J)+0.025*DEPTHS(I,J)*(D2(I,J)/r)**0.3333
IF(DV(I,J).LT.Vh) THEN
DV(I,J)=Vh
ELSE
END IF

IF(TB(I,J).LE.TCE(I,J)) THEN
qsmx(I,J)=0
qsmv(I,J)=0
ELSE
END IF

! START NUMERICAL PROCESS
C(I,J)=0.0
DC=0.000001

! NORMAL SETTLING
DO K=1,3000
100 C(I,J)=C(I,J)+DC
!C'=F(C) FOR NORMAL SETTLING
C1(I,J)=0.49*th(I,J)**1.77*(Dp/(((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)&
/(kB*SQRT(G1)))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))*PER*FW(I,J))**1.77*(DV(I,J)/((rs-r)*&
g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1)))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687)))&
*(1-EXP(-((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1)))**(nf-1))/(1+0.15&
*Ref**0.687))*DEPTHS(I,J)/DV(I,J)))
IF (ABS(C(I,J)-C1(I,J)).GT.0.01) GOTO 100
WRITE(*,*) C1(I,J)
END DO

! HINDERED SETTLING
C(I,J)=0.0
DO L=1,3000
200 C(I,J)=C(I,J)+DC
!C'=F(C) FOR HINDERED SETTLING
C2(I,J)=0.49*th(I,J)**1.77*(Dp/(((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+Ka*C(I,J)&
/(kB*SQRT(G1)))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))*(1-(C(I,J)/rs))*(1-(C(I,J)/(rs*(Dp/(Dp&
+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1)))**(3-nf)))/(1+2.5*(C(I,J)/(rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)/&
(kB*SQRT(G1)))**(3-nf))))*PER*FW(I,J))**1.77*(DV(I,J)/((rs-r)*g/(18*GM)*&
Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1)))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))*(1-(C(I,J)/rs))&

```

```

*(1-(C(I,J)/(rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))))**(3-nf)))/(1+2.5*(C(I,J)/(rs*(Dp&
/(Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))))**(3-nf))))*(1-EXP(-((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*&
((Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))*(1-(C(I,J)/rs))*(1-(C(I,J)&
/(rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))))**(3-nf)))/(1+2.5*(C(I,J)/(rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)&
(kB*SQRT(G1))))**(3-nf))))*DEPTHS(I,J)/DV(I,J))
IF (ABS(C(I,J)-C2(I,J)).GT.0.01) GOTO 200
WRITE(*,*) C2(I,J)
END DO

```

```

! CALCULATE C FOR NORMAL OR HINDERED SETTLING
IF (C1(I,J).GE.3.0) THEN
CFIN(I,J)=C2(I,J)
ELSE
CFIN(I,J)=C1(I,J)
END IF
qsmx(I,J)=CFIN(I,J)*U(I,J)
qsmv(I,J)=CFIN(I,J)*V(I,J)
END IF
END DO
END DO

```

```

DO I=1,NI
DO J=1,NJ
DF(I,J)=(Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G)))
IF (CFIN(I,J).GE.3.0) THEN
WF(I,J)=((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G))))**(nf-
1))/(1+0.15*Ref**0.687))*(1-(CFIN(I,J)/rs))*(1-
(CFIN(I,J)/(rs*(Dp/(Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G))))**(3-
nf)))))/(1+2.5*(CFIN(I,J)/(rs*(Dp/(Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G))))**(3-nf))))
ELSE
WF(I,J)=((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G))))**(nf-
1))/(1+0.15*Ref**0.687))
ENDIF
END DO
END DO

```

```

DO I=1,NI
DO J=1,NJ
qtmx(I,J)=qbm(I,J)+qsmx(I,J)
qtmv(I,J)=qbm(I,J)+qsmv(I,J)
END DO
END DO

```

```
GOTO 800
```

```

! MIXED SEDIMENT (MUD AND SAND TRANSPORT)
! CRITICAL SHEAR FOR EROSION IN MIXED SEDIMENT
700 DO I=1,NI
DO J=1,NJ
TCE(I,J)=0.047 !Average critical shear stress in Pascal
ThCMIX(I,J)=TCE(I,J)/((s-1)*r*g*d50)

```

```

END DO
END DO

! Sand Part in Mixed Sediment
! BED LOAD
DO J=1,NJ-1
  DO I=1,NI
    Ut(I,J)=(UMAX(I,J)**2+VMAX(I,J)**2)**0.5
    A(I,J)=Ut(I,J)/W
    B(I,J)=(A(I,J)*W)**2/(g*(s-1)*d50)
  END DO
END DO

DO J=1,NJ-1
  DO I=1,NI
    IF (A(I,J).GT.0.01) THEN
      F25(I,J)=EXP(5.213*(2.5*d50/A(I,J))**0.194-5.977)
      th25(I,J)=0.5*F25(I,J)*B(I,J)
      IF (th25(I,J).GT.0.05) THEN
        KS(I,J)=170*d50*(th25(I,J)-0.05)**0.5
        FW(I,J)=EXP(5.213*(KS(I,J)/A(I,J))**0.194-5.977)
      ELSE
        KS(I,J)=2.5*d50
        FW(I,J)=EXP(5.213*(KS(I,J)/A(I,J))**0.194-5.977)
      END IF
    END IF
  END DO

  IF(FW(I,J).GT.0.1) FW(I,J)=0.1
    TBX(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*U(I,J)
    TBY(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*V(I,J)
    TB(I,J)=(TBX(I,J)**2+TBY(I,J)**2)**0.5
    thx(I,J)=TBX(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
    thy(I,J)=TBY(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
    th(I,J)=TB(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
  IF (FW(I,J).LE.0.001) FW(I,J)=0.001
    TBX(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*U(I,J)
    TBY(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*V(I,J)
    TB(I,J)=(TBX(I,J)**2+TBY(I,J)**2)**0.5
    thx(I,J)=TBX(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
    thy(I,J)=TBY(I,J)/((s-1)*r*g*d50)
    th(I,J)=TB(I,J)/((s-1)*r*g*d50)

  END DO
END DO
DS=d50*(g*(s-1)/Vh**2)**(1.0/3.0)
IF(DS.LE.4) THEN
  ThC=0.24/DS
ELSE IF(DS.LE.10) THEN
  ThC=0.14*DS**(-0.64) ! CRITICAL ANGLE TH
ELSE IF (DS.LE.20) THEN
  ThC=0.04*DS**(-0.14)

```

```

ELSE IF (DS.LE.150) THEN
  ThC=0.013*DS**0.29
ELSE
  ThC=0.055
END IF

DO I=1,NI
DO J=1,NJ-1
  IF(th(I,J).GE.ThC) THEN
    qbsx(I,J)=((s-1)*g*d50**3)**0.5*11*(thx(I,J)/th(I,J))*(th(I,J)-ThC)**1.65
    qbsy(I,J)=((s-1)*g*d50**3)**0.5*11*(thy(I,J)/th(I,J))*(th(I,J)-ThC)**1.65
  ELSE
    qbsx(I,J)=0
    qbsy(I,J)=0
  END IF
END DO
END DO

! SUSPENDED LOAD
D1=(s-1)*g*d50**3/Vh**2
C1S=0.055*TANH(12*D1**(-0.59))*EXP(-0.0004*D1)
C2S=1.06*TANH(0.016*D1**0.5*EXP(-120/D1))
WFS=((s-1)*g*d50**2/Vh)*C1S+C2S*((s-1)*g*d50)**0.5

DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
  Ca=0.49*th(I,J)**1.77*(d50/(WFS*PER*FW(I,J)))**1.77
  D2(I,J)=0.25*Qb(I,J)*(1/PER)*r*g*HMAX(I,J)**2
  USTAR(I,J)=(TB(I,J)/r)**0.5
  DV(I,J)=0.083*USTAR(I,J)*DEPTHS(I,J)+0.025*DEPTHS(I,J)*(D2(I,J)/r)**0.3333
  IF(DV(I,J).LT.Vh) THEN
    DV(I,J)=Vh
  ELSE
    END IF

  Ct(I,J)=Ca*(DV(I,J)/WFS)*(1-EXP(-WFS*DEPTHS(I,J)/DV(I,J)))
  qssx(I,J)=Ct(I,J)*U(I,J)
  qssy(I,J)=Ct(I,J)*V(I,J)
  qtsx(I,J)=qbsx(I,J)+qssx(I,J)
  qtsy(I,J)=qbsy(I,J)+qssy(I,J)
END DO
END DO

! Mud Part in Mixed Sediment!
! BED VELOCITY
DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
  Ut(I,J)=(UMAX(I,J)**2+VMAX(I,J)**2)**0.5
  A(I,J)=Ut(I,J)/W
  B(I,J)=(A(I,J)*W)**2/(g*(s-1)*Dp)
END DO

```



```

END DO

DO J=1,NJ-1
DO I=1,NI
IF (A(I,J).GT.0.01) THEN
  F25(I,J)=EXP(5.213*(2.5*Dp/A(I,J))**0.194-5.977)
  th25(I,J)=0.5*F25(I,J)*B(I,J)
IF (th25(I,J).GT.0.05) THEN
  KS(I,J)=170*Dp*(th25(I,J)-0.05)**0.5
  FW(I,J)=EXP(5.213*(KS(I,J)/A(I,J))**0.194-5.977)
ELSE
  KS(I,J)=2.5*Dp
  FW(I,J)=EXP(5.213*(KS(I,J)/A(I,J))**0.194-5.977)
END IF
END IF

IF(FW(I,J).GT.0.1) FW(I,J)=0.1
  TBX(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*U(I,J)
  TBY(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*V(I,J)
  TB(I,J)=(TBX(I,J)**2+TBY(I,J)**2)**0.5
  thx(I,J)=TBX(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
  thy(I,J)=TBY(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
  th(I,J)=TB(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
IF (FW(I,J).LE.0.001) FW(I,J)=0.001
  TBX(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*U(I,J)
  TBY(I,J)=0.5*r*FW(I,J)*Ut(I,J)*V(I,J)
  TB(I,J)=(TBX(I,J)**2+TBY(I,J)**2)**0.5
  thx(I,J)=TBX(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
  thy(I,J)=TBY(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
  th(I,J)=TB(I,J)/((s-1)*r*g*Dp)
END DO
END DO

! ZERO BED LOAD (NOT FLUID MUD TRANSPORT)
DO I=1,NI
DO J=1,NJ-1
  qbmx(I,J)=0
  qbmy(I,J)=0
END DO
END DO

! CRITICAL SHEAR FOR EROSION
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
  TCE(I,J)=0.162792*PL**0.84 !Pascal
END DO
END DO

! EROSION TEST
DO I=1,NI
DO J=1,NJ

```

```

USTAR(I,J)=(TB(I,J)/r)**0.5
DV(I,J)=0.083*USTAR(I,J)*DEPTHS(I,J)+0.025*DEPTHS(I,J)*(D2(I,J)/r)**0.3333
IF(DV(I,J).LT.Vh) THEN
  DV(I,J)=Vh
ELSE
  END IF

IF(TB(I,J).LE.TCE(I,J)) THEN
  qsmx(I,J)=0
  qsmv(I,J)=0
ELSE

! START NUMERICAL PROCESS
C(I,J)=0.0
DC=0.000001

! NORMAL SETTLING
DO K=1,3000
900  C(I,J)=C(I,J)+DC
      !C'=F(C) FOR NORMAL SETTLING
      C1(I,J)=0.49*th(I,J)**1.77*(Dp/(((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)&
      /(kB*SQRT(G1)))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))*PER*FW(I,J)))**1.77*(DV(I,J)/((rs-r)*&
      g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1)))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687)))&
      *(1-EXP(-((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1)))**(nf-1))/(1+0.15&
      *Ref**0.687))*DEPTHS(I,J)/DV(I,J)))
      IF (ABS(C(I,J)-C1(I,J)).GT.0.01) GOTO 100
      WRITE(*,*) C1(I,J)
END DO

! HINDERED SETTLING
C(I,J)=0.0
DO L=1,3000
1000 C(I,J)=C(I,J)+DC
      !C'=F(C) FOR HINDERED SETTLING
      C2(I,J)=0.49*th(I,J)**1.77*(Dp/(((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)&
      /(kB*SQRT(G1)))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))*(1-(C(I,J)/rs))*(1-(C(I,J)/rs*(Dp/(Dp&
      +kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))))**(3-nf)))/(1+2.5*(C(I,J)/(rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)/&
      (kB*SQRT(G1))))**(3-nf))))*PER*FW(I,J)))**1.77*(DV(I,J)/((rs-r)*g/(18*GM)*&
      Dp**(3-nf)*((Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1)))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))*(1-(C(I,J)/rs))&
      *(1-(C(I,J)/rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))))**(3-nf)))/(1+2.5*(C(I,J)/(rs*(Dp&
      /(Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))))**(3-nf))))*(1-EXP(-((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*&
      ((Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1)))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))*(1-(C(I,J)/rs))*(1-(C(I,J)&
      /rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)/(kB*SQRT(G1))))**(3-nf)))/(1+2.5*(C(I,J)/(rs*(Dp/(Dp+kA*C(I,J)/&
      (kB*SQRT(G1))))**(3-nf))))*DEPTHS(I,J)/DV(I,J)))
      IF (ABS(C(I,J)-C2(I,J)).GT.0.01) GOTO 200
      WRITE(*,*) C2(I,J)
END DO

! CALCULATE C FOR NORMAL OR HINDERED SETTLING
IF (C1(I,J).GE.3.0) THEN
  CFIN(I,J)=C2(I,J)

```

```

ELSE
CFIN(I,J)=C1(I,J)
END IF
qsmx(I,J)=CFIN(I,J)*U(I,J)
qsmx(I,J)=CFIN(I,J)*V(I,J)
END IF
END DO
END DO

DO I=1,NI
DO J=1,NJ
DF(I,J)=(Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G)))
IF (CFIN(I,J).GE.3.0) THEN
WF(I,J)=((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G)))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))*(1-(CFIN(I,J)/rs))*(1-(CFIN(I,J)/rs*(Dp/(Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G))))**(3-nf)))/(1+2.5*(CFIN(I,J)/rs*(Dp/(Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G))))**(3-nf))))
ELSE
WF(I,J)=((rs-r)*g/(18*GM)*Dp**(3-nf)*((Dp+kA*CFIN(I,J)/(kB*SQRT(G)))**(nf-1))/(1+0.15*Ref**0.687))
ENDIF
END DO
END DO

DO I=1,NI
DO J=1,NJ
qtmx(I,J)=qbm(I,J)+qsmx(I,J)
qtmx(I,J)=qbm(I,J)+qsmx(I,J)
END DO
END DO

! CALCULATION OF qtx,y
800 IF (MUD.GE.0.15) THEN
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
qsx(I,J)=qsmx(I,J)
qbx(I,J)=qbm(I,J)
qtx(I,J)=qtmx(I,J)
qsy(I,J)=qsmx(I,J)
qby(I,J)=qbm(I,J)
qty(I,J)=qtmx(I,J)
END DO
END DO
ELSE IF (MUD.LE.0.03) THEN
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
qsx(I,J)=qssx(I,J)
qbx(I,J)=qbsx(I,J)
qtx(I,J)=qtsx(I,J)
qsy(I,J)=qssy(I,J)
qby(I,J)=qbsy(I,J)

```

```

        qty(I,J)=qtsy(I,J)
    END DO
END DO
ELSE
DO I=1,NI
    DO J=1,NJ
        qsx(I,J)=SAND*qssx(I,J)+MUD*qsmx(I,J)
        qbx(I,J)=SAND*qbsx(I,J)+MUD*qbm(I,J)
        qtx(I,J)=SAND*qtsx(I,J)+MUD*qtmx(I,J)
        qsy(I,J)=SAND*qssy(I,J)+MUD*qsmy(I,J)
        qby(I,J)=SAND*qbsy(I,J)+MUD*qbmy(I,J)
        qty(I,J)=SAND*qtsy(I,J)+MUD*qtm(I,J)
    END DO
END DO
ENDIF

! RESULTS
! UPDATE VATHI NORMAL SETTLING
DO I=1,NI-1
    DO J=1,NJ
        DEPTHSNEW(I,J)=DEPTHS(I,J)+DT*(1/(1-POR))*((qtx(I+1,J)-qtx(I,J))/DX(I,J)+(qty(I,J+1)&-
qty(I,J))/DY(I,J))
    END DO
END DO

! EASTERN BOUNDARY
DO J=1,NJ
    DEPTHSNEW(NI,J)=DEPTHS(NI,J)+DT*(1/(1-POR))*((qtx(NI,J)-qtx(NI-1,J))/DX(I,J)+(qty(NI,J)&-
-qty(NI,J-1))/DY(I,J))
END DO

! INITIAL EROSION RATE
DO I=1,NI
    DO J=1,NJ
        DZB(I,J)=-DT*(1/(1-POR))*((qtx(I+1,J)-qtx(I,J))/DX(I,J)+(qty(I,J+1)-qty(I,J))/DY(I,J))
    END DO
END DO

! PRINT RESULTS
OPEN(9,file='STPAROXISINOLX.txt')
    DO I=1,NI
        DO J=1,NJ
            WRITE(9,*) X(I,J),Y(I,J),0.5*(qtx(I+1,J)+qtx(I,J))
        END DO
    END DO
CLOSE(9)

OPEN(10,file='STPAROXISINOLY.txt')
DO I=1,NI
    DO J=1,NJ
        WRITE(10,*) X(I,J),Y(I,J),0.5*(qty(I+1,J)+qty(I,J))
    END DO
END DO

```

```
END DO
END DO
CLOSE(10)

OPEN(11,file='STEREOPAROXIAIORY.txt')
DO I=1,NI-1
DO J=1,NJ-1
WRITE(11,*) X(I,J),Y(I,J),qsy(I,J)
END DO
END DO

OPEN(12,file='STEREOPAROXIAIORX.txt')
DO I=1,NI-1
DO J=1,NJ-1
WRITE(12,*) X(I,J),Y(I,J),qsx(I,J)
END DO
END DO

OPEN(13,file='STEREOPAROXPITMHX.txt')
DO I=1,NI-1
DO J=1,NJ-1
WRITE(13,*) X(I,J),Y(I,J),qbx(I,J)
END DO
END DO

OPEN(14,file='STEREOPAROXPITMHY.txt')
DO I=1,NI-1
DO J=1,NJ-1
WRITE(14,*) X(I,J),Y(I,J),qby(I,J)
END DO
END DO

OPEN(15,file='DEPTHNEW.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
WRITE(15,*) X(I,J),Y(I,J),DEPTHSNEW(I,J)
END DO
END DO
CLOSE(15)

OPEN(17,file='CONCENTRMUD.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
WRITE(17,*) X(I,J),Y(I,J),CFIN(I,J)
END DO
END DO
CLOSE(17)

OPEN(19,file='DEPTHOLD.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
```

```
WRITE(19,*) X(I,J),Y(I,J),DEPTHS(I,J)
END DO
END DO
CLOSE(19)

OPEN(20,file='FALLVELMUD.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
WRITE(20,*) X(I,J),Y(I,J),WF(I,J)
END DO
END DO
CLOSE(20)

OPEN(21,file='FLOCDIAM.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ
WRITE(21,*) X(I,J),Y(I,J),DF(I,J)
END DO
END DO
CLOSE(21)

OPEN(22,file='CONCENTRSAND.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ-1
WRITE(22,*) X(I,J),Y(I,J),Ct(I,J)
END DO
END DO
CLOSE(22)

OPEN(23,file='CONCENTRMIX.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ-1
WRITE(23,*) X(I,J),Y(I,J),Ct(I,J)*SAND+CFIN(I,J)*MUD
END DO
END DO
CLOSE(23)

OPEN(24,file='FALL_VELSAND.txt')
DO I=1,NI
DO J=1,NJ-1
WRITE(24,*) X(I,J),Y(I,J),WFS
END DO
END DO
CLOSE(24)

STOP
END
```

iv. Αποτελέσματα μοντέλου στερεοπαροχής μη συνεκτικού ιζήματος σε ακτή χωρίς λιμενικό έργο

X(m)	Y(m)	qbx (kg/m ² s)	qby (kg/m ² s)	qsx (kg/m ² s)	qsy (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)
20	20	1.38E-03	3.32E-05	5.65E-02	1.36E-03	5.29E-02	1.29E-03
20	60	7.78E-04	4.48E-05	1.98E-02	1.14E-03	2.06E-02	1.20E-03
20	90	7.53E-04	5.29E-05	1.64E-02	1.15E-03	1.67E-02	1.42E-03
20	110	8.17E-04	7.54E-05	1.69E-02	1.56E-03	1.63E-02	2.05E-03
20	130	9.25E-04	1.19E-04	1.82E-02	2.35E-03	1.68E-02	2.92E-03
20	145	1.01E-03	1.71E-04	1.88E-02	3.20E-03	1.73E-02	3.82E-03
20	155	1.09E-03	2.23E-04	1.97E-02	4.06E-03	1.84E-02	4.79E-03
20	165	1.18E-03	2.85E-04	2.07E-02	5.01E-03	2.05E-02	5.72E-03
20	175	1.30E-03	3.51E-04	2.16E-02	5.80E-03	2.52E-02	5.87E-03
20	185	1.39E-03	3.78E-04	1.91E-02	5.21E-03	3.05E-02	4.68E-03
20	195	1.19E-03	3.05E-04	1.35E-02	3.47E-03	3.12E-02	2.66E-03
20	205	7.14E-04	1.64E-04	5.94E-03	1.37E-03	1.89E-02	9.07E-04
20	215	2.65E-04	5.00E-05	1.24E-03	2.34E-04	5.93E-03	1.47E-04
20	225	3.10E-05	3.44E-06	6.18E-05	6.86E-06	5.69E-04	5.15E-06
60	20	1.22E-03	2.68E-05	4.66E-02	1.02E-03	4.42E-02	1.06E-03
60	60	7.80E-04	4.10E-05	1.98E-02	1.04E-03	2.04E-02	1.08E-03
60	90	7.23E-04	4.86E-05	1.54E-02	1.03E-03	1.57E-02	1.20E-03
60	110	7.32E-04	6.45E-05	1.42E-02	1.25E-03	1.41E-02	1.52E-03
60	130	7.71E-04	9.16E-05	1.37E-02	1.63E-03	1.34E-02	1.95E-03
60	145	8.27E-04	1.22E-04	1.39E-02	2.05E-03	1.39E-02	2.42E-03
60	155	9.13E-04	1.52E-04	1.50E-02	2.50E-03	1.59E-02	2.99E-03
60	165	1.08E-03	1.89E-04	1.80E-02	3.13E-03	2.07E-02	3.91E-03
60	175	1.49E-03	2.44E-04	2.60E-02	4.25E-03	3.36E-02	5.01E-03
60	185	2.22E-03	3.04E-04	3.82E-02	5.23E-03	5.51E-02	5.38E-03
60	195	2.61E-03	2.86E-04	4.51E-02	4.94E-03	6.99E-02	3.92E-03
60	205	2.08E-03	1.74E-04	2.90E-02	2.44E-03	4.75E-02	1.60E-03
60	215	1.07E-03	6.08E-05	9.29E-03	5.28E-04	1.62E-02	3.09E-04
60	225	2.26E-04	6.08E-06	8.20E-04	2.20E-05	1.59E-03	1.41E-05
100	20	1.10E-03	2.17E-05	3.94E-02	7.77E-04	3.80E-02	8.76E-04
100	60	7.71E-04	3.64E-05	1.94E-02	9.16E-04	1.99E-02	9.52E-04
100	90	6.97E-04	4.36E-05	1.45E-02	9.08E-04	1.49E-02	1.01E-03
100	110	6.76E-04	5.44E-05	1.26E-02	1.01E-03	1.28E-02	1.16E-03
100	130	6.89E-04	7.09E-05	1.16E-02	1.19E-03	1.19E-02	1.41E-03
100	145	7.68E-04	9.12E-05	1.24E-02	1.47E-03	1.32E-02	1.75E-03
100	155	9.13E-04	1.12E-04	1.50E-02	1.83E-03	1.68E-02	2.26E-03
100	165	1.21E-03	1.39E-04	2.12E-02	2.44E-03	2.52E-02	3.17E-03
100	175	1.92E-03	1.82E-04	3.77E-02	3.58E-03	4.69E-02	4.32E-03
100	185	3.19E-03	2.23E-04	6.66E-02	4.66E-03	8.45E-02	4.73E-03
100	195	4.05E-03	2.02E-04	8.79E-02	4.37E-03	1.11E-01	3.38E-03
100	205	3.41E-03	1.16E-04	6.06E-02	2.07E-03	7.68E-02	1.32E-03
100	215	1.82E-03	3.77E-05	2.02E-02	4.18E-04	2.60E-02	2.38E-04
100	225	3.90E-04	3.52E-06	1.75E-03	1.58E-05	2.47E-03	9.66E-06
140	20	1.01E-03	1.55E-05	3.45E-02	5.29E-04	3.40E-02	6.30E-04
140	60	7.55E-04	2.76E-05	1.88E-02	6.87E-04	1.93E-02	7.22E-04
140	90	6.78E-04	3.39E-05	1.39E-02	6.96E-04	1.44E-02	7.46E-04
140	110	6.48E-04	3.97E-05	1.18E-02	7.22E-04	1.23E-02	7.89E-04
140	130	6.62E-04	4.69E-05	1.09E-02	7.69E-04	1.16E-02	9.01E-04
140	145	7.78E-04	5.75E-05	1.26E-02	9.29E-04	1.38E-02	1.12E-03
140	155	9.89E-04	6.93E-05	1.68E-02	1.18E-03	1.89E-02	1.47E-03
140	165	1.41E-03	8.48E-05	2.67E-02	1.60E-03	3.05E-02	2.08E-03
140	175	2.37E-03	1.08E-04	5.18E-02	2.36E-03	5.96E-02	2.80E-03
140	185	4.02E-03	1.27E-04	9.52E-02	3.01E-03	1.09E-01	2.98E-03
140	195	5.12E-03	1.11E-04	1.25E-01	2.71E-03	1.41E-01	2.06E-03
140	205	4.29E-03	6.26E-05	8.54E-02	1.25E-03	9.63E-02	7.89E-04
140	215	2.26E-03	2.03E-05	2.78E-02	2.50E-04	3.20E-02	1.41E-04
140	225	4.77E-04	1.93E-06	2.33E-03	9.42E-06	2.96E-03	5.67E-06
170	20	9.58E-04	1.38E-05	3.16E-02	4.56E-04	3.19E-02	5.60E-04

X(m)	Y(m)	qbx (kg/m ² s)	qby (kg/m ² s)	qsx (kg/m ² s)	qsy (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)
170	60	7.41E-04	2.54E-05	1.83E-02	6.26E-04	1.89E-02	6.59E-04
170	90	6.69E-04	3.12E-05	1.36E-02	6.36E-04	1.42E-02	6.79E-04
170	110	6.41E-04	3.62E-05	1.16E-02	6.55E-04	1.22E-02	7.14E-04
170	130	6.66E-04	4.22E-05	1.10E-02	6.95E-04	1.17E-02	8.23E-04
170	145	8.11E-04	5.18E-05	1.34E-02	8.58E-04	1.45E-02	1.04E-03
170	155	1.07E-03	6.27E-05	1.90E-02	1.11E-03	2.07E-02	1.39E-03
170	165	1.57E-03	7.62E-05	3.14E-02	1.52E-03	3.44E-02	1.95E-03
170	175	2.67E-03	9.47E-05	6.23E-02	2.21E-03	6.78E-02	2.55E-03
170	185	4.51E-03	1.07E-04	1.14E-01	2.70E-03	1.24E-01	2.56E-03
170	195	5.69E-03	8.68E-05	1.46E-01	2.24E-03	1.57E-01	1.65E-03
170	205	4.72E-03	4.50E-05	9.83E-02	9.36E-04	1.06E-01	5.79E-04
170	215	2.46E-03	1.29E-05	3.15E-02	1.65E-04	3.47E-02	9.21E-05
170	225	5.16E-04	1.07E-06	2.60E-03	5.39E-06	3.15E-03	3.23E-06
185	20	9.34E-04	1.34E-05	3.03E-02	4.34E-04	3.08E-02	5.42E-04
185	60	7.35E-04	2.50E-05	1.80E-02	6.12E-04	1.87E-02	6.45E-04
185	90	6.65E-04	3.06E-05	1.35E-02	6.21E-04	1.41E-02	6.64E-04
185	110	6.39E-04	3.55E-05	1.16E-02	6.41E-04	1.22E-02	7.04E-04
185	130	6.70E-04	4.17E-05	1.11E-02	6.89E-04	1.18E-02	8.27E-04
185	145	8.31E-04	5.19E-05	1.39E-02	8.72E-04	1.50E-02	1.07E-03
185	155	1.11E-03	6.33E-05	2.02E-02	1.15E-03	2.18E-02	1.44E-03
185	165	1.66E-03	7.69E-05	3.41E-02	1.58E-03	3.67E-02	2.01E-03
185	175	2.82E-03	9.39E-05	6.79E-02	2.26E-03	7.27E-02	2.55E-03
185	185	4.75E-03	1.02E-04	1.24E-01	2.65E-03	1.32E-01	2.43E-03
185	195	5.95E-03	7.70E-05	1.56E-01	2.03E-03	1.66E-01	1.44E-03
185	205	4.90E-03	3.49E-05	1.04E-01	7.40E-04	1.11E-01	4.41E-04
185	215	2.54E-03	7.67E-06	3.29E-02	9.94E-05	3.58E-02	5.47E-05
185	225	5.26E-04	3.90E-07	2.67E-03	1.98E-06	3.20E-03	1.18E-06
195	20	9.18E-04	1.32E-05	2.95E-02	4.24E-04	3.00E-02	5.32E-04
195	60	7.31E-04	2.46E-05	1.79E-02	6.02E-04	1.85E-02	6.34E-04
195	90	6.62E-04	3.01E-05	1.34E-02	6.11E-04	1.41E-02	6.52E-04
195	110	6.38E-04	3.48E-05	1.15E-02	6.29E-04	1.22E-02	6.92E-04
195	130	6.72E-04	4.10E-05	1.11E-02	6.78E-04	1.18E-02	8.18E-04
195	145	8.44E-04	5.12E-05	1.43E-02	8.66E-04	1.53E-02	1.07E-03
195	155	1.14E-03	6.25E-05	2.11E-02	1.15E-03	2.27E-02	1.44E-03
195	165	1.72E-03	7.55E-05	3.59E-02	1.58E-03	3.86E-02	1.99E-03
195	175	2.92E-03	9.10E-05	7.18E-02	2.23E-03	7.68E-02	2.49E-03
195	185	4.91E-03	9.63E-05	1.30E-01	2.56E-03	1.39E-01	2.30E-03
195	195	6.12E-03	7.04E-05	1.63E-01	1.88E-03	1.73E-01	1.31E-03
195	205	5.01E-03	3.02E-05	1.07E-01	6.47E-04	1.14E-01	3.81E-04
195	215	2.58E-03	6.10E-06	3.36E-02	7.95E-05	3.65E-02	4.36E-05
195	225	5.29E-04	2.68E-07	2.68E-03	1.36E-06	3.22E-03	8.14E-07
205	20	9.03E-04	1.30E-05	2.88E-02	4.13E-04	2.93E-02	5.21E-04
205	60	7.27E-04	2.43E-05	1.77E-02	5.92E-04	1.84E-02	6.23E-04
205	90	6.60E-04	2.97E-05	1.34E-02	6.01E-04	1.40E-02	6.42E-04
205	110	6.37E-04	3.43E-05	1.15E-02	6.19E-04	1.21E-02	6.80E-04
205	130	6.75E-04	4.01E-05	1.12E-02	6.67E-04	1.19E-02	8.07E-04
205	145	8.58E-04	5.02E-05	1.47E-02	8.58E-04	1.57E-02	1.06E-03
205	155	1.18E-03	6.14E-05	2.20E-02	1.15E-03	2.36E-02	1.43E-03
205	165	1.78E-03	7.38E-05	3.79E-02	1.57E-03	4.07E-02	1.97E-03
205	175	3.03E-03	8.80E-05	7.58E-02	2.20E-03	8.09E-02	2.43E-03
205	185	5.07E-03	9.17E-05	1.37E-01	2.48E-03	1.46E-01	2.21E-03
205	195	6.28E-03	6.59E-05	1.70E-01	1.78E-03	1.80E-01	1.24E-03
205	205	5.11E-03	2.79E-05	1.11E-01	6.05E-04	1.17E-01	3.57E-04
205	215	2.61E-03	5.78E-06	3.42E-02	7.59E-05	3.71E-02	4.17E-05
205	225	5.31E-04	2.95E-07	2.70E-03	1.50E-06	3.24E-03	8.97E-07
215	20	8.88E-04	1.28E-05	2.81E-02	4.03E-04	2.86E-02	5.11E-04
215	60	7.23E-04	2.39E-05	1.76E-02	5.82E-04	1.83E-02	6.13E-04
215	90	6.58E-04	2.92E-05	1.33E-02	5.91E-04	1.40E-02	6.31E-04
215	110	6.37E-04	3.37E-05	1.15E-02	6.08E-04	1.21E-02	6.68E-04

X(m)	Y(m)	qbx (kg/m ² s)	qby (kg/m ² s)	qsx (kg/m ² s)	qsy (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)
215	130	6.78E-04	3.93E-05	1.13E-02	6.55E-04	1.20E-02	7.97E-04
215	145	8.73E-04	4.93E-05	1.51E-02	8.50E-04	1.61E-02	1.05E-03
215	155	1.21E-03	6.03E-05	2.29E-02	1.14E-03	2.46E-02	1.42E-03
215	165	1.84E-03	7.22E-05	3.99E-02	1.57E-03	4.28E-02	1.95E-03
215	175	3.14E-03	8.53E-05	7.99E-02	2.17E-03	8.52E-02	2.38E-03
215	185	5.23E-03	8.76E-05	1.44E-01	2.41E-03	1.52E-01	2.13E-03
215	195	6.44E-03	6.22E-05	1.77E-01	1.70E-03	1.86E-01	1.18E-03
215	205	5.21E-03	2.62E-05	1.14E-01	5.73E-04	1.20E-01	3.39E-04
215	215	2.64E-03	5.54E-06	3.48E-02	7.30E-05	3.77E-02	4.02E-05
215	225	5.33E-04	3.06E-07	2.72E-03	1.56E-06	3.26E-03	9.31E-07
225	20	8.74E-04	1.25E-05	2.74E-02	3.91E-04	2.78E-02	4.98E-04
225	60	7.20E-04	2.34E-05	1.75E-02	5.68E-04	1.81E-02	6.00E-04
225	90	6.56E-04	2.86E-05	1.33E-02	5.79E-04	1.39E-02	6.17E-04
225	110	6.36E-04	3.28E-05	1.15E-02	5.93E-04	1.22E-02	6.52E-04
225	130	6.82E-04	3.83E-05	1.14E-02	6.40E-04	1.22E-02	7.82E-04
225	145	8.88E-04	4.81E-05	1.55E-02	8.38E-04	1.67E-02	1.04E-03
225	155	1.24E-03	5.91E-05	2.39E-02	1.14E-03	2.59E-02	1.42E-03
225	165	1.90E-03	7.09E-05	4.20E-02	1.57E-03	4.54E-02	1.94E-03
225	175	3.25E-03	8.32E-05	8.41E-02	2.16E-03	9.03E-02	2.34E-03
225	185	5.39E-03	8.40E-05	1.50E-01	2.35E-03	1.60E-01	2.04E-03
225	195	6.59E-03	5.75E-05	1.83E-01	1.59E-03	1.94E-01	1.09E-03
225	205	5.30E-03	2.29E-05	1.17E-01	5.04E-04	1.24E-01	2.95E-04
225	215	2.66E-03	4.44E-06	3.53E-02	5.89E-05	3.84E-02	3.23E-05
225	225	5.35E-04	2.15E-07	2.73E-03	1.10E-06	3.29E-03	6.55E-07
240	20	8.54E-04	1.19E-05	2.65E-02	3.69E-04	2.68E-02	4.69E-04
240	60	7.14E-04	2.21E-05	1.73E-02	5.35E-04	1.79E-02	5.67E-04
240	90	6.54E-04	2.72E-05	1.32E-02	5.49E-04	1.38E-02	5.82E-04
240	110	6.37E-04	3.08E-05	1.15E-02	5.57E-04	1.22E-02	6.05E-04
240	130	6.90E-04	3.49E-05	1.16E-02	5.87E-04	1.25E-02	7.12E-04
240	145	9.12E-04	4.30E-05	1.61E-02	7.58E-04	1.75E-02	9.40E-04
240	155	1.29E-03	5.23E-05	2.53E-02	1.03E-03	2.76E-02	1.27E-03
240	165	1.99E-03	6.23E-05	4.49E-02	1.41E-03	4.88E-02	1.74E-03
240	175	3.39E-03	7.31E-05	8.98E-02	1.93E-03	9.68E-02	2.12E-03
240	185	5.59E-03	7.56E-05	1.59E-01	2.15E-03	1.70E-01	1.94E-03
240	195	6.79E-03	5.64E-05	1.91E-01	1.59E-03	2.03E-01	1.14E-03
240	205	5.41E-03	2.71E-05	1.20E-01	6.04E-04	1.28E-01	3.70E-04
240	215	2.71E-03	7.59E-06	3.61E-02	1.01E-04	3.94E-02	5.65E-05
240	225	5.41E-04	6.48E-07	2.77E-03	3.32E-06	3.36E-03	1.98E-06
260	20	8.31E-04	1.12E-05	2.55E-02	3.45E-04	2.58E-02	4.40E-04
260	60	7.06E-04	2.08E-05	1.70E-02	5.03E-04	1.76E-02	5.35E-04
260	90	6.52E-04	2.58E-05	1.32E-02	5.20E-04	1.38E-02	5.50E-04
260	110	6.41E-04	2.89E-05	1.16E-02	5.25E-04	1.24E-02	5.68E-04
260	130	7.03E-04	3.23E-05	1.20E-02	5.49E-04	1.29E-02	6.64E-04
260	145	9.45E-04	3.93E-05	1.70E-02	7.07E-04	1.84E-02	8.76E-04
260	155	1.35E-03	4.76E-05	2.72E-02	9.58E-04	2.96E-02	1.18E-03
260	165	2.10E-03	5.62E-05	4.87E-02	1.31E-03	5.26E-02	1.60E-03
260	175	3.56E-03	6.54E-05	9.69E-02	1.78E-03	1.04E-01	1.94E-03
260	185	5.82E-03	6.75E-05	1.70E-01	1.97E-03	1.80E-01	1.77E-03
260	195	7.01E-03	5.07E-05	2.01E-01	1.45E-03	2.12E-01	1.05E-03
260	205	5.56E-03	2.50E-05	1.25E-01	5.63E-04	1.33E-01	3.46E-04
260	215	2.76E-03	7.17E-06	3.72E-02	9.67E-05	4.06E-02	5.38E-05
260	225	5.51E-04	6.21E-07	2.85E-03	3.21E-06	3.43E-03	1.92E-06
280	20	8.09E-04	1.07E-05	2.45E-02	3.25E-04	2.49E-02	4.14E-04
280	60	6.99E-04	1.97E-05	1.68E-02	4.73E-04	1.74E-02	5.05E-04
280	90	6.50E-04	2.44E-05	1.31E-02	4.93E-04	1.38E-02	5.21E-04
280	110	6.46E-04	2.72E-05	1.18E-02	4.97E-04	1.25E-02	5.36E-04
280	130	7.18E-04	3.00E-05	1.24E-02	5.17E-04	1.33E-02	6.24E-04
280	145	9.79E-04	3.63E-05	1.80E-02	6.65E-04	1.95E-02	8.22E-04
280	155	1.42E-03	4.37E-05	2.92E-02	9.00E-04	3.16E-02	1.11E-03

X(m)	Y(m)	qbx (kg/m ² s)	qby (kg/m ² s)	qsx (kg/m ² s)	qsy (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)
280	165	2.20E-03	5.12E-05	5.23E-02	1.22E-03	5.64E-02	1.49E-03
280	175	3.72E-03	5.91E-05	1.04E-01	1.64E-03	1.11E-01	1.78E-03
280	185	6.03E-03	6.06E-05	1.79E-01	1.80E-03	1.90E-01	1.61E-03
280	195	7.21E-03	4.54E-05	2.10E-01	1.32E-03	2.21E-01	9.46E-04
280	205	5.68E-03	2.22E-05	1.30E-01	5.06E-04	1.37E-01	3.10E-04
280	215	2.82E-03	6.27E-06	3.83E-02	8.53E-05	4.15E-02	4.74E-05
280	225	5.60E-04	5.29E-07	2.91E-03	2.75E-06	3.49E-03	1.64E-06
300	20	7.90E-04	1.05E-05	2.36E-02	3.15E-04	2.40E-02	4.01E-04
300	60	6.92E-04	1.91E-05	1.65E-02	4.58E-04	1.71E-02	4.90E-04
300	90	6.50E-04	2.37E-05	1.32E-02	4.79E-04	1.38E-02	5.07E-04
300	110	6.52E-04	2.63E-05	1.20E-02	4.85E-04	1.28E-02	5.23E-04
300	130	7.35E-04	2.90E-05	1.28E-02	5.07E-04	1.39E-02	6.13E-04
300	145	1.01E-03	3.50E-05	1.90E-02	6.55E-04	2.07E-02	8.07E-04
300	155	1.48E-03	4.18E-05	3.12E-02	8.82E-04	3.41E-02	1.07E-03
300	165	2.30E-03	4.79E-05	5.60E-02	1.17E-03	6.09E-02	1.38E-03
300	175	3.87E-03	5.28E-05	1.10E-01	1.50E-03	1.18E-01	1.56E-03
300	185	6.23E-03	5.00E-05	1.88E-01	1.51E-03	2.01E-01	1.28E-03
300	195	7.39E-03	3.30E-05	2.17E-01	9.70E-04	2.30E-01	6.60E-04
300	205	5.79E-03	1.32E-05	1.33E-01	3.04E-04	1.41E-01	1.79E-04
300	215	2.85E-03	2.74E-06	3.90E-02	3.75E-05	4.25E-02	2.06E-05
300	225	5.65E-04	1.53E-07	2.95E-03	7.97E-07	3.55E-03	4.75E-07
330	20	7.67E-04	9.62E-06	2.27E-02	2.85E-04	2.31E-02	3.50E-04
330	60	6.82E-04	1.63E-05	1.63E-02	3.88E-04	1.69E-02	4.18E-04
330	90	6.49E-04	2.02E-05	1.32E-02	4.11E-04	1.39E-02	4.37E-04
330	110	6.61E-04	2.26E-05	1.23E-02	4.20E-04	1.32E-02	4.56E-04
330	130	7.58E-04	2.49E-05	1.35E-02	4.43E-04	1.47E-02	5.39E-04
330	145	1.06E-03	3.02E-05	2.04E-02	5.79E-04	2.24E-02	7.19E-04
330	155	1.56E-03	3.65E-05	3.39E-02	7.93E-04	3.71E-02	9.72E-04
330	165	2.43E-03	4.26E-05	6.10E-02	1.07E-03	6.62E-02	1.29E-03
330	175	4.07E-03	4.86E-05	1.19E-01	1.42E-03	1.27E-01	1.51E-03
330	185	6.49E-03	4.89E-05	2.01E-01	1.51E-03	2.12E-01	1.34E-03
330	195	7.63E-03	3.60E-05	2.28E-01	1.08E-03	2.39E-01	7.67E-04
330	205	5.93E-03	1.74E-05	1.38E-01	4.05E-04	1.45E-01	2.48E-04
330	215	2.91E-03	4.92E-06	4.01E-02	6.79E-05	4.32E-02	3.77E-05
330	225	5.73E-04	4.19E-07	3.01E-03	2.20E-06	3.59E-03	1.31E-06
370	20	7.46E-04	8.46E-06	2.19E-02	2.48E-04	2.24E-02	2.80E-04
370	60	6.75E-04	1.22E-05	1.61E-02	2.91E-04	1.67E-02	3.01E-04
370	90	6.53E-04	1.40E-05	1.34E-02	2.86E-04	1.41E-02	2.90E-04
370	110	6.78E-04	1.41E-05	1.28E-02	2.67E-04	1.37E-02	2.66E-04
370	130	7.91E-04	1.31E-05	1.44E-02	2.39E-04	1.56E-02	2.59E-04
370	145	1.12E-03	1.28E-05	2.22E-02	2.53E-04	2.40E-02	2.78E-04
370	155	1.65E-03	1.24E-05	3.70E-02	2.78E-04	4.01E-02	2.81E-04
370	165	2.56E-03	1.01E-05	6.63E-02	2.62E-04	7.13E-02	2.24E-04
370	175	4.26E-03	5.73E-06	1.27E-01	1.71E-04	1.35E-01	7.22E-05
370	185	6.69E-03	-9.98E-07	2.11E-01	-3.14E-05	2.22E-01	-1.17E-04
370	195	7.79E-03	-6.47E-06	2.35E-01	-1.95E-04	2.47E-01	-1.78E-04
370	205	6.01E-03	-6.32E-06	1.41E-01	-1.48E-04	1.48E-01	-9.79E-05
370	215	2.93E-03	-2.79E-06	4.06E-02	-3.86E-05	4.35E-02	-2.17E-05
370	225	5.74E-04	-3.14E-07	3.02E-03	-1.65E-06	3.57E-03	-9.82E-07
410	20	7.34E-04	8.07E-06	2.15E-02	2.36E-04	2.24E-02	2.54E-04
410	60	6.71E-04	1.06E-05	1.60E-02	2.53E-04	1.68E-02	2.72E-04
410	90	6.57E-04	1.30E-05	1.35E-02	2.68E-04	1.45E-02	2.94E-04
410	110	6.90E-04	1.53E-05	1.32E-02	2.92E-04	1.43E-02	3.33E-04
410	130	8.17E-04	1.83E-05	1.52E-02	3.40E-04	1.66E-02	4.34E-04
410	145	1.17E-03	2.40E-05	2.36E-02	4.85E-04	2.57E-02	6.19E-04
410	155	1.73E-03	3.04E-05	3.98E-02	6.98E-04	4.26E-02	8.65E-04
410	165	2.68E-03	3.65E-05	7.10E-02	9.66E-04	7.47E-02	1.15E-03
410	175	4.42E-03	4.11E-05	1.35E-01	1.25E-03	1.39E-01	1.28E-03
410	185	6.89E-03	3.83E-05	2.20E-01	1.22E-03	2.23E-01	9.98E-04

X(m)	Y(m)	qbx (kg/m ² s)	qby (kg/m ² s)	qsx (kg/m ² s)	qsy (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)
410	195	7.94E-03	2.33E-05	2.42E-01	7.11E-04	2.44E-01	4.59E-04
410	205	6.07E-03	7.44E-06	1.43E-01	1.75E-04	1.43E-01	9.62E-05
410	215	2.93E-03	6.63E-07	4.05E-02	9.18E-06	4.16E-02	4.74E-06
410	225	5.69E-04	-5.77E-08	2.98E-03	-3.02E-07	3.40E-03	-1.80E-07
450	20	7.36E-04	6.03E-06	2.18E-02	1.79E-04	2.31E-02	1.29E-04
450	60	6.73E-04	2.93E-06	1.62E-02	7.04E-05	1.79E-02	3.03E-05
450	90	6.71E-04	-5.86E-07	1.40E-02	-1.23E-05	1.64E-02	-8.20E-05
450	110	7.17E-04	-7.33E-06	1.41E-02	-1.44E-04	1.73E-02	-2.72E-04
450	130	8.56E-04	-1.96E-05	1.63E-02	-3.74E-04	1.93E-02	-6.11E-04
450	145	1.22E-03	-3.81E-05	2.53E-02	-7.89E-04	2.65E-02	-1.16E-03
450	155	1.79E-03	-6.08E-05	4.19E-02	-1.42E-03	3.85E-02	-2.01E-03
450	165	2.73E-03	-9.18E-05	7.30E-02	-2.45E-03	5.85E-02	-3.35E-03
450	175	4.42E-03	-1.32E-04	1.34E-01	-4.02E-03	9.37E-02	-4.74E-03
450	185	6.75E-03	-1.64E-04	2.13E-01	-5.17E-03	1.33E-01	-4.92E-03
450	195	7.64E-03	-1.45E-04	2.29E-01	-4.35E-03	1.35E-01	-3.22E-03
450	205	5.76E-03	-8.09E-05	1.32E-01	-1.86E-03	7.58E-02	-1.15E-03
450	215	2.75E-03	-2.47E-05	3.70E-02	-3.33E-04	2.12E-02	-1.85E-04
450	225	5.34E-04	-2.14E-06	2.72E-03	-1.09E-05	1.70E-03	-6.53E-06

ν. Αποτελέσματα μοντέλου στερεοπαροχής συνεκτικού ιζήματος σε ακτή χωρίς λιμενικό έργο

X(m)	Y(m)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	ws (m/s)	Df (m)	c (kg/m ³)
20	20	1.631349	3.76E-02	2.38E-03	6.71E-04	2.004311
20	60	1.080436	5.95E-02	1.80E-03	5.09E-04	1.517329
20	90	9.86E-01	6.77E-02	1.69E-03	4.77E-04	1.419497
20	110	9.75E-01	8.81E-02	1.67E-03	4.71E-04	1.40389
20	130	9.86E-01	1.23E-01	1.67E-03	4.71E-04	1.40329
20	145	9.96E-01	1.59E-01	1.66E-03	4.68E-04	1.392834
20	155	1.022331	1.91E-01	1.66E-03	4.68E-04	1.392758
20	165	1.072555	2.24E-01	1.66E-03	4.67E-04	1.391554
20	175	1.193926	2.55E-01	1.66E-03	4.68E-04	1.394892
20	185	1.356771	2.62E-01	1.63E-03	4.59E-04	1.367957
20	195	1.325165	2.16E-01	1.46E-03	4.11E-04	1.222538
20	205	9.97E-01	1.31E-01	1.13E-03	3.18E-04	9.44E-01
20	215	3.97E-01	2.26E-02	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
20	225	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
20	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
60	20	1.50854	3.15E-02	2.27E-03	6.41E-04	1.914024
60	60	1.077015	5.37E-02	1.80E-03	5.10E-04	1.518263
60	90	9.60E-01	6.23E-02	1.66E-03	4.69E-04	1.397341
60	110	9.14E-01	7.72E-02	1.60E-03	4.52E-04	1.346588
60	130	8.91E-01	9.91E-02	1.56E-03	4.40E-04	1.308893
60	145	9.07E-01	1.21E-01	1.54E-03	4.34E-04	1.290794
60	155	9.63E-01	1.39E-01	1.55E-03	4.37E-04	1.2996
60	165	1.086695	1.56E-01	1.59E-03	4.50E-04	1.339229
60	175	1.373531	1.73E-01	1.73E-03	4.89E-04	1.456907
60	185	1.807608	1.79E-01	1.93E-03	5.44E-04	1.621881
60	195	1.982984	1.49E-01	1.95E-03	5.50E-04	1.638686
60	205	1.628904	8.93E-02	1.68E-03	4.74E-04	1.410406
60	215	9.69E-01	3.45E-02	1.21E-03	3.41E-04	1.013258
60	225	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
60	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
100	20	1.411988	2.49E-02	2.18E-03	6.16E-04	1.837591
100	60	1.065285	4.47E-02	1.80E-03	5.07E-04	1.511514
100	90	9.40E-01	5.29E-02	1.64E-03	4.63E-04	1.378131
100	110	8.77E-01	6.23E-02	1.55E-03	4.39E-04	1.306011
100	130	8.47E-01	7.37E-02	1.49E-03	4.21E-04	1.253519
100	145	8.89E-01	8.55E-02	1.49E-03	4.21E-04	1.253417
100	155	9.92E-01	9.49E-02	1.54E-03	4.36E-04	1.296245
100	165	1.194514	1.03E-01	1.66E-03	4.68E-04	1.394207
100	175	1.611372	1.10E-01	1.90E-03	5.36E-04	1.59864
100	185	2.213696	1.09E-01	2.21E-03	6.24E-04	1.860611
100	195	2.486898	8.58E-02	2.30E-03	6.50E-04	1.938781
100	205	2.072291	4.89E-02	2.03E-03	5.72E-04	1.706186
100	215	1.238245	1.79E-02	1.48E-03	4.18E-04	1.24194
100	225	2.08E-01	8.41E-04	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
100	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
140	20	1.346581	2.01E-02	2.11E-03	5.96E-04	1.778688
140	60	1.051302	3.73E-02	1.78E-03	5.03E-04	1.499254
140	90	9.26E-01	4.48E-02	1.62E-03	4.58E-04	1.3634
140	110	8.62E-01	5.08E-02	1.53E-03	4.32E-04	1.284644
140	130	8.37E-01	5.62E-02	1.47E-03	4.15E-04	1.233337
140	145	9.07E-01	6.24E-02	1.50E-03	4.23E-04	1.257436
140	155	1.04796	6.73E-02	1.59E-03	4.48E-04	1.333846
140	165	1.306879	7.07E-02	1.75E-03	4.96E-04	1.476205
140	175	1.803711	7.28E-02	2.06E-03	5.80E-04	1.731165
140	185	2.491063	6.84E-02	2.41E-03	6.81E-04	2.033573
140	195	2.790674	5.11E-02	2.52E-03	7.11E-04	2.122098
140	205	2.314836	2.77E-02	2.21E-03	6.25E-04	1.865119

X(m)	Y(m)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	ws (m/s)	Df (m)	c (kg/m ³)
140	215	1.373206	9.69E-03	1.61E-03	4.54E-04	1.351473
140	225	4.27E-01	1.29E-03	8.11E-04	2.29E-04	6.76E-01
140	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
170	20	1.311113	1.88E-02	2.07E-03	5.85E-04	1.743631
170	60	1.041837	3.56E-02	1.77E-03	5.00E-04	1.48903
170	90	9.20E-01	4.27E-02	1.61E-03	4.56E-04	1.356068
170	110	8.58E-01	4.80E-02	1.52E-03	4.30E-04	1.279497
170	130	8.40E-01	5.28E-02	1.47E-03	4.15E-04	1.235657
170	145	9.28E-01	5.86E-02	1.52E-03	4.29E-04	1.277371
170	155	1.091194	6.31E-02	1.63E-03	4.61E-04	1.373787
170	165	1.380026	6.55E-02	1.83E-03	5.16E-04	1.537793
170	175	1.915168	6.59E-02	2.15E-03	6.07E-04	1.812449
170	185	2.637032	5.93E-02	2.52E-03	7.12E-04	2.125404
170	195	2.937645	4.14E-02	2.62E-03	7.40E-04	2.209622
170	205	2.423501	2.01E-02	2.30E-03	6.48E-04	1.935416
170	215	1.429082	5.88E-03	1.66E-03	4.69E-04	1.397551
170	225	4.41E-01	6.19E-04	8.35E-04	2.36E-04	6.96E-01
170	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
185	20	1.292236	1.85E-02	2.05E-03	5.79E-04	1.726896
185	60	1.036881	3.51E-02	1.76E-03	4.98E-04	1.484192
185	90	9.17E-01	4.19E-02	1.61E-03	4.55E-04	1.353082
185	110	8.57E-01	4.71E-02	1.52E-03	4.30E-04	1.278082
185	130	8.43E-01	5.19E-02	1.47E-03	4.16E-04	1.238271
185	145	9.40E-01	5.79E-02	1.53E-03	4.33E-04	1.28896
185	155	1.11678	6.23E-02	1.66E-03	4.69E-04	1.395073
185	165	1.422065	6.43E-02	1.86E-03	5.26E-04	1.568839
185	175	1.977409	6.37E-02	2.20E-03	6.21E-04	1.851638
185	185	2.715922	5.57E-02	2.57E-03	7.26E-04	2.167946
185	195	3.0132	3.68E-02	2.67E-03	7.53E-04	2.248148
185	205	2.474599	1.63E-02	2.33E-03	6.58E-04	1.963912
185	215	1.451088	3.91E-03	1.68E-03	4.75E-04	1.413584
185	225	4.45E-01	2.77E-04	8.41E-04	2.37E-04	7.01E-01
185	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
195	20	1.277407	1.84E-02	2.04E-03	5.75E-04	1.715779
195	60	1.033094	3.47E-02	1.76E-03	4.97E-04	1.481137
195	90	9.15E-01	4.14E-02	1.61E-03	4.54E-04	1.351267
195	110	8.56E-01	4.64E-02	1.52E-03	4.29E-04	1.277204
195	130	8.45E-01	5.09E-02	1.48E-03	4.17E-04	1.239889
195	145	9.51E-01	5.66E-02	1.54E-03	4.36E-04	1.296783
195	155	1.138031	6.08E-02	1.68E-03	4.73E-04	1.409631
195	165	1.456784	6.23E-02	1.89E-03	5.33E-04	1.590051
195	175	2.028187	6.10E-02	2.23E-03	6.29E-04	1.878249
195	185	2.779038	5.23E-02	2.60E-03	7.35E-04	2.196463
195	195	3.07163	3.38E-02	2.69E-03	7.61E-04	2.273145
195	205	2.51154	1.44E-02	2.35E-03	6.64E-04	1.981052
195	215	1.464835	3.36E-03	1.69E-03	4.77E-04	1.421641
195	225	4.46E-01	2.37E-04	8.42E-04	2.38E-04	7.02E-01
195	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
205	20	1.262953	1.81E-02	2.02E-03	5.72E-04	1.704878
205	60	1.029373	3.42E-02	1.76E-03	4.96E-04	1.478144
205	90	9.13E-01	4.08E-02	1.61E-03	4.53E-04	1.349582
205	110	8.55E-01	4.56E-02	1.52E-03	4.29E-04	1.276505
205	130	8.48E-01	4.98E-02	1.48E-03	4.17E-04	1.241821
205	145	9.62E-01	5.53E-02	1.55E-03	4.38E-04	1.30491
205	155	1.159832	5.92E-02	1.69E-03	4.78E-04	1.424479
205	165	1.491931	6.03E-02	1.91E-03	5.41E-04	1.611384
205	175	2.078675	5.84E-02	2.26E-03	6.38E-04	1.904549
205	185	2.840413	4.94E-02	2.64E-03	7.45E-04	2.224071
205	195	3.127023	3.15E-02	2.72E-03	7.69E-04	2.296749

X(m)	Y(m)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	ws (m/s)	Df (m)	c (kg/m ³)
205	205	2.545425	1.34E-02	2.37E-03	6.69E-04	1.996622
205	215	1.476964	3.19E-03	1.70E-03	4.80E-04	1.428539
205	225	4.47E-01	2.52E-04	8.44E-04	2.38E-04	7.03E-01
205	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
215	20	1.248903	1.79E-02	2.01E-03	5.68E-04	1.694206
215	60	1.025697	3.36E-02	1.75E-03	4.95E-04	1.475184
215	90	9.11E-01	4.01E-02	1.60E-03	4.53E-04	1.34801
215	110	8.55E-01	4.46E-02	1.52E-03	4.29E-04	1.276019
215	130	8.51E-01	4.85E-02	1.48E-03	4.18E-04	1.244116
215	145	9.73E-01	5.38E-02	1.56E-03	4.41E-04	1.313365
215	155	1.181916	5.76E-02	1.71E-03	4.83E-04	1.439553
215	165	1.527163	5.85E-02	1.94E-03	5.48E-04	1.632674
215	175	2.128633	5.62E-02	2.29E-03	6.47E-04	1.930293
215	185	2.90009	4.69E-02	2.67E-03	7.53E-04	2.250512
215	195	3.179631	2.92E-02	2.75E-03	7.76E-04	2.318851
215	205	2.576645	1.21E-02	2.39E-03	6.74E-04	2.010871
215	215	1.487839	2.80E-03	1.71E-03	4.82E-04	1.434784
215	225	4.48E-01	2.18E-04	8.45E-04	2.39E-04	7.05E-01
215	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
225	20	1.232522	1.74E-02	2.00E-03	5.65E-04	1.6838
225	60	1.021073	3.24E-02	1.75E-03	4.94E-04	1.472251
225	90	9.10E-01	3.87E-02	1.60E-03	4.52E-04	1.346565
225	110	8.55E-01	4.27E-02	1.52E-03	4.29E-04	1.275768
225	130	8.56E-01	4.57E-02	1.48E-03	4.19E-04	1.246642
225	145	9.88E-01	5.00E-02	1.57E-03	4.44E-04	1.321914
225	155	1.208841	5.32E-02	1.73E-03	4.88E-04	1.454549
225	165	1.568912	5.38E-02	1.96E-03	5.55E-04	1.653687
225	175	2.186479	5.15E-02	2.32E-03	6.55E-04	1.955513
225	185	2.96774	4.32E-02	2.70E-03	7.62E-04	2.276136
225	195	3.238339	2.76E-02	2.77E-03	7.83E-04	2.339824
225	205	2.611611	1.22E-02	2.40E-03	6.78E-04	2.02394
225	215	1.501009	3.36E-03	1.71E-03	4.84E-04	1.440283
225	225	4.51E-01	3.61E-04	8.46E-04	2.39E-04	7.06E-01
225	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
240	20	1.211543	1.66E-02	1.98E-03	5.60E-04	1.669482
240	60	1.014544	3.07E-02	1.74E-03	4.93E-04	1.467726
240	90	9.07E-01	3.68E-02	1.60E-03	4.52E-04	1.344763
240	110	8.57E-01	4.00E-02	1.52E-03	4.29E-04	1.276486
240	130	8.65E-01	4.17E-02	1.49E-03	4.21E-04	1.251871
240	145	1.009274	4.48E-02	1.59E-03	4.48E-04	1.334968
240	155	1.245316	4.71E-02	1.75E-03	4.95E-04	1.475723
240	165	1.622967	4.71E-02	2.00E-03	5.64E-04	1.682112
240	175	2.258677	4.50E-02	2.36E-03	6.66E-04	1.988558
240	185	3.049816	3.83E-02	2.74E-03	7.73E-04	2.308915
240	195	3.309235	2.57E-02	2.80E-03	7.92E-04	2.36653
240	205	2.655711	1.26E-02	2.42E-03	6.84E-04	2.041285
240	215	1.520134	4.11E-03	1.72E-03	4.86E-04	1.448951
240	225	4.55E-01	5.29E-04	8.50E-04	2.40E-04	7.09E-01
240	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
260	20	1.189587	1.59E-02	1.96E-03	5.54E-04	1.651922
260	60	1.007189	2.91E-02	1.74E-03	4.91E-04	1.461697
260	90	9.06E-01	3.49E-02	1.60E-03	4.51E-04	1.342947
260	110	8.61E-01	3.75E-02	1.52E-03	4.30E-04	1.27892
260	130	8.77E-01	3.84E-02	1.50E-03	4.24E-04	1.260827
260	145	1.034244	4.06E-02	1.61E-03	4.55E-04	1.353207
260	155	1.285649	4.24E-02	1.79E-03	5.04E-04	1.503014
260	165	1.680367	4.21E-02	2.04E-03	5.76E-04	1.716861
260	175	2.332869	3.99E-02	2.40E-03	6.79E-04	2.027304
260	185	3.132186	3.38E-02	2.78E-03	7.85E-04	2.346227

X(m)	Y(m)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	ws (m/s)	Df (m)	c (kg/m ³)
260	195	3.380156	2.28E-02	2.84E-03	8.02E-04	2.396905
260	205	2.701165	1.13E-02	2.45E-03	6.91E-04	2.062045
260	215	1.541218	3.72E-03	1.74E-03	4.90E-04	1.460757
260	225	4.60E-01	4.77E-04	8.55E-04	2.42E-04	7.13E-01
260	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
280	20	1.169497	1.56E-02	1.94E-03	5.49E-04	1.635877
280	60	1.000134	2.79E-02	1.73E-03	4.89E-04	1.455825
280	90	9.05E-01	3.34E-02	1.60E-03	4.51E-04	1.34179
280	110	8.66E-01	3.57E-02	1.53E-03	4.31E-04	1.282611
280	130	8.90E-01	3.62E-02	1.51E-03	4.27E-04	1.271016
280	145	1.059559	3.79E-02	1.63E-03	4.61E-04	1.371495
280	155	1.324939	3.92E-02	1.82E-03	5.13E-04	1.528806
280	165	1.734586	3.83E-02	2.08E-03	5.86E-04	1.748372
280	175	2.401117	3.54E-02	2.44E-03	6.90E-04	2.061408
280	185	3.206241	2.89E-02	2.82E-03	7.96E-04	2.378492
280	195	3.442573	1.85E-02	2.87E-03	8.11E-04	2.423123
280	205	2.740236	8.47E-03	2.47E-03	6.97E-04	2.080282
280	215	1.558617	2.48E-03	1.75E-03	4.94E-04	1.471399
280	225	4.65E-01	2.82E-04	8.61E-04	2.43E-04	7.18E-01
280	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
300	20	1.148367	1.49E-02	1.93E-03	5.44E-04	1.620933
300	60	9.92E-01	2.56E-02	1.72E-03	4.87E-04	1.450267
300	90	9.04E-01	3.05E-02	1.60E-03	4.51E-04	1.341263
300	110	8.73E-01	3.25E-02	1.53E-03	4.33E-04	1.287147
300	130	9.07E-01	3.28E-02	1.53E-03	4.31E-04	1.281845
300	145	1.089597	3.43E-02	1.65E-03	4.67E-04	1.389954
300	155	1.370453	3.53E-02	1.85E-03	5.21E-04	1.5541
300	165	1.796426	3.44E-02	2.11E-03	5.96E-04	1.778569
300	175	2.47788	3.16E-02	2.48E-03	7.01E-04	2.093417
300	185	3.288251	2.56E-02	2.85E-03	8.06E-04	2.408077
300	195	3.510159	1.61E-02	2.90E-03	8.19E-04	2.446268
300	205	2.78114	7.27E-03	2.48E-03	7.02E-04	2.095332
300	215	1.575859	2.09E-03	1.76E-03	4.97E-04	1.479184
300	225	4.68E-01	2.35E-04	8.64E-04	2.44E-04	7.20E-01
300	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
330	20	1.126127	1.35E-02	1.90E-03	5.38E-04	1.603003
330	60	9.84E-01	2.06E-02	1.72E-03	4.84E-04	1.442896
330	90	9.06E-01	2.38E-02	1.60E-03	4.50E-04	1.34082
330	110	8.85E-01	2.43E-02	1.54E-03	4.35E-04	1.293926
330	130	9.30E-01	2.29E-02	1.54E-03	4.36E-04	1.297044
330	145	1.127838	2.23E-02	1.68E-03	4.75E-04	1.414578
330	155	1.424693	2.18E-02	1.89E-03	5.32E-04	1.58712
330	165	1.866232	1.98E-02	2.16E-03	6.09E-04	1.817673
330	175	2.560102	1.68E-02	2.53E-03	7.15E-04	2.134732
330	185	3.371413	1.23E-02	2.90E-03	8.18E-04	2.446207
330	195	3.57481	6.87E-03	2.93E-03	8.28E-04	2.476098
330	205	2.817827	2.63E-03	2.51E-03	7.08E-04	2.114885
330	215	1.590063	5.82E-04	1.77E-03	5.00E-04	1.489557
330	225	4.71E-01	4.33E-05	8.68E-04	2.45E-04	7.24E-01
330	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
370	20	1.109329	1.24E-02	1.88E-03	5.32E-04	1.586046
370	60	9.78E-01	1.66E-02	1.71E-03	4.82E-04	1.436555
370	90	9.10E-01	1.87E-02	1.60E-03	4.51E-04	1.34365
370	110	8.98E-01	1.93E-02	1.55E-03	4.39E-04	1.305909
370	130	9.54E-01	1.86E-02	1.57E-03	4.43E-04	1.318254
370	145	1.165144	1.87E-02	1.72E-03	4.85E-04	1.443905
370	155	1.476034	1.86E-02	1.93E-03	5.44E-04	1.6224
370	165	1.930784	1.71E-02	2.20E-03	6.22E-04	1.855537
370	175	2.634244	1.42E-02	2.57E-03	7.27E-04	2.170907

X(m)	Y(m)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	ws (m/s)	Df (m)	c (kg/m ³)
370	185	3.44307	9.41E-03	2.93E-03	8.28E-04	2.476061
370	195	3.625391	3.86E-03	2.96E-03	8.35E-04	2.496581
370	205	2.840672	2.58E-04	2.52E-03	7.12E-04	2.126215
370	215	1.594212	-5.79E-04	1.78E-03	5.01E-04	1.494095
370	225	4.70E-01	-1.53E-04	8.69E-04	2.45E-04	7.25E-01
370	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
410	20	1.104186	1.06E-02	1.87E-03	5.29E-04	1.576471
410	60	9.77E-01	9.85E-03	1.70E-03	4.81E-04	1.433238
410	90	9.18E-01	8.61E-03	1.60E-03	4.52E-04	1.346616
410	110	9.15E-01	5.24E-03	1.57E-03	4.42E-04	1.315301
410	130	9.80E-01	-5.91E-04	1.59E-03	4.48E-04	1.33417
410	145	1.199742	-6.88E-03	1.74E-03	4.92E-04	1.466762
410	155	1.517118	-1.29E-02	1.96E-03	5.54E-04	1.650986
410	165	1.973575	-2.00E-02	2.24E-03	6.33E-04	1.887881
410	175	2.668836	-2.75E-02	2.61E-03	7.38E-04	2.203715
410	185	3.452759	-3.20E-02	2.97E-03	8.38E-04	2.504179
410	195	3.60145	-2.84E-02	2.98E-03	8.41E-04	2.515159
410	205	2.79874	-1.76E-02	2.53E-03	7.15E-04	2.134014
410	215	1.560292	-6.68E-03	1.78E-03	5.01E-04	1.493899
410	225	4.58E-01	-9.22E-04	8.66E-04	2.44E-04	7.22E-01
410	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
450	20	1.115543	7.90E-03	1.87E-03	5.29E-04	1.577868
450	60	1.002137	2.12E-03	1.71E-03	4.82E-04	1.435476
450	90	9.70E-01	-4.07E-04	1.61E-03	4.56E-04	1.357438
450	110	9.92E-01	-4.74E-03	1.59E-03	4.48E-04	1.334376
450	130	1.048769	-1.14E-02	1.62E-03	4.56E-04	1.35838
450	145	1.216561	-1.90E-02	1.77E-03	5.01E-04	1.492069
450	155	1.444674	-2.61E-02	1.99E-03	5.61E-04	1.673386
450	165	1.742245	-3.34E-02	2.26E-03	6.37E-04	1.902191
450	175	2.152503	-3.99E-02	2.61E-03	7.38E-04	2.203444
450	185	2.553766	-4.17E-02	2.94E-03	8.31E-04	2.484298
450	195	2.492268	-3.38E-02	2.94E-03	8.29E-04	2.478288
450	205	1.833392	-1.93E-02	2.48E-03	7.00E-04	2.091
450	215	7.63E-01	-6.86E-03	1.73E-03	4.90E-04	1.458321
450	225	2.24E-01	-8.98E-04	8.46E-04	2.39E-04	7.05E-01
450	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
490	20	5.63E-01	3.37E-03	1.89E-03	5.35E-04	1.5944
490	60	5.13E-01	-3.68E-06	1.75E-03	4.94E-04	1.473039
490	90	5.07E-01	-3.36E-06	1.70E-03	4.80E-04	1.429465
490	110	5.28E-01	-3.44E-06	1.71E-03	4.82E-04	1.434844
490	130	5.51E-01	-3.56E-06	1.71E-03	4.82E-04	1.436946
490	145	6.08E-01	-3.79E-06	1.77E-03	5.00E-04	1.489702
490	155	6.77E-01	-4.06E-06	1.85E-03	5.23E-04	1.559982
490	165	7.49E-01	-4.32E-06	1.93E-03	5.45E-04	1.624988
490	175	8.19E-01	-4.60E-06	1.99E-03	5.63E-04	1.678205
490	185	8.40E-01	-4.70E-06	1.98E-03	5.60E-04	1.669687
490	195	7.16E-01	-4.11E-06	1.77E-03	5.01E-04	1.492893
490	205	4.60E-01	-2.78E-06	1.35E-03	3.82E-04	1.135483
490	215	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
490	225	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00
490	235	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-05	4.00E-06	0.00E+00

ν. Αποτελέσματα μοντέλου στερεοπαροχής μεικτού ιζήματος διαφορετικών περιεκτικότητας σε ακτή χωρίς λιμενικό έργο

Χ(m)	Υ (m)	Κ.β. Ποσοστό αργίλου στο μεικτό ίζημα					
		5%		10%		15%	
		qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)
20	20	1.32E-01	3.06E-03	2.12E-01	4.89E-03	2.92E-01	6.72E-03
20	60	7.44E-02	4.10E-03	1.28E-01	7.07E-03	1.82E-01	1.00E-02
20	90	6.61E-02	4.55E-03	1.16E-01	7.95E-03	1.65E-01	1.13E-02
20	110	6.55E-02	5.92E-03	1.15E-01	1.04E-02	1.64E-01	1.48E-02
20	130	6.66E-02	8.29E-03	1.16E-01	1.45E-02	1.66E-01	2.07E-02
20	145	6.77E-02	1.08E-02	1.18E-01	1.88E-02	1.68E-01	2.69E-02
20	155	7.02E-02	1.32E-02	1.22E-01	2.28E-02	1.74E-01	3.25E-02
20	165	7.48E-02	1.57E-02	1.29E-01	2.70E-02	1.84E-01	3.84E-02
20	175	8.55E-02	1.82E-02	1.46E-01	3.11E-02	2.06E-01	4.40E-02
20	185	9.79E-02	1.86E-02	1.65E-01	3.17E-02	2.33E-01	4.48E-02
20	195	9.76E-02	1.54E-02	1.64E-01	2.62E-02	2.30E-01	3.70E-02
20	205	6.95E-02	8.74E-03	1.20E-01	1.54E-02	1.71E-01	2.21E-02
20	215	3.43E-02	3.09E-03	6.26E-02	5.75E-03	9.09E-02	8.40E-03
20	225	8.99E-03	4.04E-04	1.74E-02	7.89E-04	2.58E-02	1.17E-03
20	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
60	20	1.18E-01	2.47E-03	1.92E-01	4.01E-03	2.66E-01	5.55E-03
60	60	7.41E-02	3.69E-03	1.28E-01	6.37E-03	1.81E-01	9.05E-03
60	90	6.39E-02	4.15E-03	1.12E-01	7.28E-03	1.60E-01	1.04E-02
60	110	6.03E-02	5.09E-03	1.06E-01	8.98E-03	1.53E-01	1.29E-02
60	130	5.85E-02	6.51E-03	1.04E-01	1.15E-02	1.49E-01	1.65E-02
60	145	5.99E-02	8.02E-03	1.06E-01	1.42E-02	1.52E-01	2.03E-02
60	155	6.48E-02	9.36E-03	1.14E-01	1.64E-02	1.63E-01	2.35E-02
60	165	7.58E-02	1.08E-02	1.31E-01	1.87E-02	1.86E-01	2.66E-02
60	175	1.03E-01	1.28E-02	1.72E-01	2.16E-02	2.41E-01	3.03E-02
60	185	1.44E-01	1.40E-02	2.33E-01	2.29E-02	3.22E-01	3.17E-02
60	195	1.68E-01	1.23E-02	2.66E-01	1.96E-02	3.64E-01	2.70E-02
60	205	1.29E-01	6.89E-03	2.11E-01	1.14E-02	2.93E-01	1.59E-02
60	215	6.57E-02	2.29E-03	1.15E-01	4.05E-03	1.65E-01	5.81E-03
60	225	1.75E-02	2.84E-04	3.34E-02	5.44E-04	4.93E-02	8.04E-04
60	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
100	20	1.07E-01	1.89E-03	1.77E-01	3.11E-03	2.46E-01	4.33E-03
100	60	7.30E-02	3.06E-03	1.26E-01	5.29E-03	1.79E-01	7.51E-03
100	90	6.21E-02	3.50E-03	1.09E-01	6.16E-03	1.57E-01	8.82E-03
100	110	5.71E-02	4.06E-03	1.01E-01	7.21E-03	1.46E-01	1.04E-02
100	130	5.48E-02	4.77E-03	9.77E-02	8.51E-03	1.41E-01	1.22E-02
100	145	5.84E-02	5.61E-03	1.04E-01	9.95E-03	1.49E-01	1.43E-02
100	155	6.71E-02	6.41E-03	1.17E-01	1.12E-02	1.68E-01	1.60E-02
100	165	8.56E-02	7.33E-03	1.46E-01	1.25E-02	2.06E-01	1.77E-02
100	175	1.27E-01	8.63E-03	2.08E-01	1.41E-02	2.88E-01	1.96E-02
100	185	1.92E-01	9.33E-03	3.00E-01	1.46E-02	4.08E-01	2.00E-02
100	195	2.33E-01	7.90E-03	3.54E-01	1.21E-02	4.76E-01	1.63E-02
100	205	1.80E-01	4.18E-03	2.83E-01	6.62E-03	3.86E-01	9.05E-03
100	215	8.90E-02	1.27E-03	1.52E-01	2.18E-03	2.15E-01	3.09E-03
100	225	2.26E-02	1.43E-04	4.27E-02	2.72E-04	6.28E-02	4.00E-04
100	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
140	20	1.00E-01	1.49E-03	1.66E-01	2.48E-03	2.33E-01	3.47E-03
140	60	7.17E-02	2.54E-03	1.24E-01	4.40E-03	1.77E-01	6.26E-03
140	90	6.10E-02	2.95E-03	1.08E-01	5.20E-03	1.54E-01	7.46E-03
140	110	5.59E-02	3.29E-03	9.94E-02	5.86E-03	1.43E-01	8.42E-03
140	130	5.40E-02	3.63E-03	9.65E-02	6.47E-03	1.39E-01	9.32E-03
140	145	5.98E-02	4.11E-03	1.06E-01	7.28E-03	1.52E-01	1.04E-02
140	155	7.20E-02	4.62E-03	1.25E-01	8.03E-03	1.78E-01	1.14E-02
140	165	9.64E-02	5.20E-03	1.62E-01	8.76E-03	2.28E-01	1.23E-02
140	175	1.49E-01	6.01E-03	2.39E-01	9.63E-03	3.29E-01	1.33E-02
140	185	2.30E-01	6.29E-03	3.50E-01	9.61E-03	4.71E-01	1.29E-02

X(m)	Y (m)	Κ.β. Ποσοστό αργίλου στο μεικτό ίζημα					
		5%		10%		15%	
		qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)
140	195	2.77E-01	5.05E-03	4.12E-01	7.54E-03	5.48E-01	1.00E-02
140	205	2.11E-01	2.52E-03	3.25E-01	3.89E-03	4.40E-01	5.26E-03
140	215	1.02E-01	7.15E-04	1.71E-01	1.21E-03	2.41E-01	1.70E-03
140	225	2.50E-02	7.59E-05	4.71E-02	1.43E-04	6.91E-02	2.10E-04
140	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
170	20	9.64E-02	1.39E-03	1.61E-01	2.31E-03	2.25E-01	3.24E-03
170	60	7.09E-02	2.42E-03	1.23E-01	4.20E-03	1.75E-01	5.97E-03
170	90	6.05E-02	2.81E-03	1.07E-01	4.95E-03	1.53E-01	7.10E-03
170	110	5.56E-02	3.11E-03	9.89E-02	5.54E-03	1.42E-01	7.96E-03
170	130	5.43E-02	3.41E-03	9.69E-02	6.09E-03	1.40E-01	8.77E-03
170	145	6.16E-02	3.89E-03	1.09E-01	6.86E-03	1.56E-01	9.83E-03
170	155	7.59E-02	4.39E-03	1.31E-01	7.57E-03	1.86E-01	1.08E-02
170	165	1.04E-01	4.92E-03	1.73E-01	8.22E-03	2.43E-01	1.15E-02
170	175	1.63E-01	5.60E-03	2.58E-01	8.87E-03	3.53E-01	1.21E-02
170	185	2.51E-01	5.65E-03	3.79E-01	8.51E-03	5.06E-01	1.14E-02
170	195	2.99E-01	4.22E-03	4.41E-01	6.22E-03	5.83E-01	8.22E-03
170	205	2.25E-01	1.87E-03	3.45E-01	2.87E-03	4.65E-01	3.86E-03
170	215	1.07E-01	4.40E-04	1.79E-01	7.38E-04	2.52E-01	1.04E-03
170	225	2.60E-02	3.64E-05	4.87E-02	6.84E-05	7.15E-02	1.00E-04
170	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
185	20	9.44E-02	1.35E-03	1.58E-01	2.27E-03	2.22E-01	3.18E-03
185	60	7.04E-02	2.38E-03	1.22E-01	4.14E-03	1.74E-01	5.89E-03
185	90	6.03E-02	2.76E-03	1.06E-01	4.87E-03	1.53E-01	6.98E-03
185	110	5.55E-02	3.05E-03	9.88E-02	5.44E-03	1.42E-01	7.82E-03
185	130	5.45E-02	3.36E-03	9.73E-02	5.99E-03	1.40E-01	8.63E-03
185	145	6.26E-02	3.86E-03	1.10E-01	6.79E-03	1.58E-01	9.72E-03
185	155	7.82E-02	4.36E-03	1.35E-01	7.51E-03	1.91E-01	1.07E-02
185	165	1.08E-01	4.89E-03	1.80E-01	8.12E-03	2.51E-01	1.13E-02
185	175	1.71E-01	5.49E-03	2.69E-01	8.65E-03	3.67E-01	1.18E-02
185	185	2.63E-01	5.39E-03	3.94E-01	8.08E-03	5.25E-01	1.08E-02
185	195	3.11E-01	3.80E-03	4.57E-01	5.58E-03	6.02E-01	7.36E-03
185	205	2.33E-01	1.53E-03	3.55E-01	2.33E-03	4.76E-01	3.13E-03
185	215	1.09E-01	2.94E-04	1.83E-01	4.92E-04	2.56E-01	6.90E-04
185	225	2.62E-02	1.63E-05	4.91E-02	3.07E-05	7.21E-02	4.50E-05
185	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
195	20	9.30E-02	1.34E-03	1.56E-01	2.24E-03	2.19E-01	3.14E-03
195	60	7.01E-02	2.35E-03	1.22E-01	4.08E-03	1.73E-01	5.81E-03
195	90	6.01E-02	2.72E-03	1.06E-01	4.80E-03	1.52E-01	6.88E-03
195	110	5.54E-02	3.00E-03	9.87E-02	5.35E-03	1.42E-01	7.69E-03
195	130	5.47E-02	3.29E-03	9.76E-02	5.87E-03	1.40E-01	8.45E-03
195	145	6.35E-02	3.78E-03	1.12E-01	6.65E-03	1.60E-01	9.52E-03
195	155	8.02E-02	4.28E-03	1.38E-01	7.35E-03	1.95E-01	1.04E-02
195	165	1.12E-01	4.78E-03	1.85E-01	7.91E-03	2.58E-01	1.10E-02
195	175	1.77E-01	5.32E-03	2.77E-01	8.34E-03	3.78E-01	1.14E-02
195	185	2.73E-01	5.13E-03	4.07E-01	7.65E-03	5.40E-01	1.02E-02
195	195	3.21E-01	3.53E-03	4.69E-01	5.15E-03	6.17E-01	6.78E-03
195	205	2.38E-01	1.36E-03	3.61E-01	2.07E-03	4.85E-01	2.79E-03
195	215	1.11E-01	2.53E-04	1.85E-01	4.23E-04	2.59E-01	5.93E-04
195	225	2.63E-02	1.39E-05	4.93E-02	2.62E-05	7.23E-02	3.84E-05
195	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
205	20	9.16E-02	1.32E-03	1.54E-01	2.21E-03	2.16E-01	3.10E-03
205	60	6.98E-02	2.32E-03	1.21E-01	4.03E-03	1.73E-01	5.73E-03
205	90	6.00E-02	2.68E-03	1.06E-01	4.73E-03	1.52E-01	6.78E-03
205	110	5.54E-02	2.95E-03	9.86E-02	5.26E-03	1.42E-01	7.56E-03
205	130	5.49E-02	3.23E-03	9.79E-02	5.75E-03	1.41E-01	8.28E-03
205	145	6.45E-02	3.71E-03	1.13E-01	6.51E-03	1.62E-01	9.31E-03
205	155	8.22E-02	4.20E-03	1.41E-01	7.18E-03	1.99E-01	1.02E-02

X(m)	Y (m)	Κ.β. Ποσοστό αργίλου στο μεικτό ίζημα					
		5%		10%		15%	
		qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)
205	165	1.16E-01	4.67E-03	1.90E-01	7.70E-03	2.65E-01	1.07E-02
205	175	1.84E-01	5.16E-03	2.86E-01	8.04E-03	3.89E-01	1.09E-02
205	185	2.82E-01	4.91E-03	4.19E-01	7.29E-03	5.56E-01	9.67E-03
205	195	3.30E-01	3.32E-03	4.81E-01	4.84E-03	6.31E-01	6.35E-03
205	205	2.43E-01	1.27E-03	3.68E-01	1.93E-03	4.93E-01	2.59E-03
205	215	1.12E-01	2.41E-04	1.86E-01	4.02E-04	2.61E-01	5.64E-04
205	225	2.64E-02	1.49E-05	4.95E-02	2.79E-05	7.26E-02	4.09E-05
205	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
215	20	9.02E-02	1.29E-03	1.52E-01	2.17E-03	2.13E-01	3.06E-03
215	60	6.95E-02	2.28E-03	1.21E-01	3.96E-03	1.72E-01	5.64E-03
215	90	5.98E-02	2.63E-03	1.06E-01	4.65E-03	1.52E-01	6.67E-03
215	110	5.54E-02	2.89E-03	9.86E-02	5.15E-03	1.42E-01	7.40E-03
215	130	5.52E-02	3.15E-03	9.83E-02	5.61E-03	1.41E-01	8.07E-03
215	145	6.54E-02	3.62E-03	1.15E-01	6.35E-03	1.64E-01	9.07E-03
215	155	8.43E-02	4.11E-03	1.44E-01	7.02E-03	2.04E-01	9.92E-03
215	165	1.19E-01	4.57E-03	1.96E-01	7.51E-03	2.72E-01	1.04E-02
215	175	1.90E-01	5.02E-03	2.95E-01	7.80E-03	4.00E-01	1.06E-02
215	185	2.92E-01	4.72E-03	4.31E-01	6.97E-03	5.70E-01	9.22E-03
215	195	3.39E-01	3.11E-03	4.92E-01	4.52E-03	6.45E-01	5.92E-03
215	205	2.47E-01	1.16E-03	3.74E-01	1.75E-03	5.00E-01	2.34E-03
215	215	1.13E-01	2.13E-04	1.88E-01	3.54E-04	2.63E-01	4.96E-04
215	225	2.64E-02	1.29E-05	4.96E-02	2.42E-05	7.28E-02	3.54E-05
215	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
225	20	8.87E-02	1.25E-03	1.49E-01	2.11E-03	2.10E-01	2.96E-03
225	60	6.91E-02	2.19E-03	1.20E-01	3.81E-03	1.71E-01	5.43E-03
225	90	5.97E-02	2.54E-03	1.05E-01	4.49E-03	1.51E-01	6.44E-03
225	110	5.54E-02	2.77E-03	9.86E-02	4.93E-03	1.42E-01	7.09E-03
225	130	5.56E-02	2.97E-03	9.90E-02	5.28E-03	1.42E-01	7.60E-03
225	145	6.67E-02	3.38E-03	1.17E-01	5.91E-03	1.67E-01	8.45E-03
225	155	8.68E-02	3.82E-03	1.48E-01	6.51E-03	2.09E-01	9.19E-03
225	165	1.24E-01	4.25E-03	2.03E-01	6.94E-03	2.81E-01	9.64E-03
225	175	1.98E-01	4.66E-03	3.06E-01	7.20E-03	4.14E-01	9.74E-03
225	185	3.03E-01	4.40E-03	4.45E-01	6.47E-03	5.87E-01	8.54E-03
225	195	3.49E-01	2.97E-03	5.05E-01	4.29E-03	6.60E-01	5.62E-03
225	205	2.52E-01	1.18E-03	3.81E-01	1.78E-03	5.09E-01	2.38E-03
225	215	1.14E-01	2.56E-04	1.90E-01	4.26E-04	2.66E-01	5.96E-04
225	225	2.66E-02	2.13E-05	4.99E-02	3.99E-05	7.31E-02	5.86E-05
225	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
240	20	8.67E-02	1.19E-03	1.47E-01	2.01E-03	2.06E-01	2.83E-03
240	60	6.86E-02	2.07E-03	1.19E-01	3.61E-03	1.70E-01	5.14E-03
240	90	5.95E-02	2.41E-03	1.05E-01	4.26E-03	1.51E-01	6.12E-03
240	110	5.56E-02	2.60E-03	9.89E-02	4.62E-03	1.42E-01	6.64E-03
240	130	5.63E-02	2.72E-03	1.00E-01	4.83E-03	1.44E-01	6.95E-03
240	145	6.86E-02	3.04E-03	1.20E-01	5.30E-03	1.71E-01	7.57E-03
240	155	9.04E-02	3.42E-03	1.53E-01	5.79E-03	2.16E-01	8.16E-03
240	165	1.30E-01	3.77E-03	2.11E-01	6.13E-03	2.92E-01	8.49E-03
240	175	2.08E-01	4.14E-03	3.19E-01	6.35E-03	4.30E-01	8.57E-03
240	185	3.16E-01	3.96E-03	4.62E-01	5.79E-03	6.08E-01	7.63E-03
240	195	3.62E-01	2.81E-03	5.20E-01	4.04E-03	6.79E-01	5.27E-03
240	205	2.59E-01	1.23E-03	3.89E-01	1.85E-03	5.19E-01	2.47E-03
240	215	1.16E-01	3.14E-04	1.93E-01	5.21E-04	2.70E-01	7.29E-04
240	225	2.69E-02	3.12E-05	5.04E-02	5.86E-05	7.39E-02	8.59E-05
240	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
260	20	8.46E-02	1.13E-03	1.43E-01	1.92E-03	2.02E-01	2.71E-03
260	60	6.80E-02	1.96E-03	1.18E-01	3.42E-03	1.69E-01	4.87E-03
260	90	5.94E-02	2.29E-03	1.05E-01	4.04E-03	1.51E-01	5.80E-03
260	110	5.59E-02	2.44E-03	9.94E-02	4.34E-03	1.43E-01	6.24E-03

X(m)	Y (m)	Κ.β. Ποσοστό αργίλου στο μεικτό ίζημα					
		5%		10%		15%	
		qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)
260	130	5.73E-02	2.51E-03	1.02E-01	4.46E-03	1.46E-01	6.41E-03
260	145	7.08E-02	2.78E-03	1.23E-01	4.83E-03	1.75E-01	6.89E-03
260	155	9.43E-02	3.11E-03	1.59E-01	5.24E-03	2.24E-01	7.38E-03
260	165	1.37E-01	3.42E-03	2.20E-01	5.52E-03	3.04E-01	7.62E-03
260	175	2.18E-01	3.73E-03	3.33E-01	5.69E-03	4.48E-01	7.65E-03
260	185	3.30E-01	3.56E-03	4.80E-01	5.18E-03	6.29E-01	6.80E-03
260	195	3.74E-01	2.53E-03	5.36E-01	3.62E-03	6.98E-01	4.71E-03
260	205	2.65E-01	1.11E-03	3.98E-01	1.67E-03	5.30E-01	2.23E-03
260	215	1.18E-01	2.85E-04	1.96E-01	4.73E-04	2.74E-01	6.60E-04
260	225	2.72E-02	2.82E-05	5.10E-02	5.29E-05	7.48E-02	7.75E-05
260	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
280	20	8.28E-02	1.10E-03	1.41E-01	1.87E-03	1.99E-01	2.64E-03
280	60	6.74E-02	1.88E-03	1.17E-01	3.28E-03	1.67E-01	4.68E-03
280	90	5.94E-02	2.19E-03	1.05E-01	3.88E-03	1.50E-01	5.56E-03
280	110	5.64E-02	2.33E-03	1.00E-01	4.13E-03	1.44E-01	5.94E-03
280	130	5.84E-02	2.38E-03	1.04E-01	4.21E-03	1.49E-01	6.04E-03
280	145	7.30E-02	2.61E-03	1.27E-01	4.53E-03	1.80E-01	6.44E-03
280	155	9.83E-02	2.90E-03	1.65E-01	4.87E-03	2.32E-01	6.84E-03
280	165	1.43E-01	3.15E-03	2.29E-01	5.06E-03	3.16E-01	6.97E-03
280	175	2.28E-01	3.36E-03	3.46E-01	5.10E-03	4.64E-01	6.83E-03
280	185	3.43E-01	3.09E-03	4.96E-01	4.47E-03	6.49E-01	5.85E-03
280	195	3.85E-01	2.07E-03	5.50E-01	2.95E-03	7.14E-01	3.83E-03
280	205	2.71E-01	8.38E-04	4.06E-01	1.25E-03	5.40E-01	1.67E-03
280	215	1.20E-01	1.91E-04	1.99E-01	3.16E-04	2.78E-01	4.41E-04
280	225	2.75E-02	1.67E-05	5.15E-02	3.12E-05	7.55E-02	4.58E-05
280	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
300	20	8.09E-02	1.05E-03	1.38E-01	1.78E-03	1.95E-01	2.52E-03
300	60	6.68E-02	1.72E-03	1.16E-01	3.00E-03	1.66E-01	4.28E-03
300	90	5.94E-02	2.01E-03	1.05E-01	3.54E-03	1.50E-01	5.08E-03
300	110	5.70E-02	2.12E-03	1.01E-01	3.77E-03	1.45E-01	5.42E-03
300	130	5.98E-02	2.16E-03	1.06E-01	3.83E-03	1.52E-01	5.49E-03
300	145	7.58E-02	2.38E-03	1.31E-01	4.11E-03	1.86E-01	5.84E-03
300	155	1.03E-01	2.65E-03	1.72E-01	4.43E-03	2.41E-01	6.20E-03
300	165	1.50E-01	2.88E-03	2.40E-01	4.59E-03	3.29E-01	6.31E-03
300	175	2.40E-01	3.06E-03	3.61E-01	4.60E-03	4.82E-01	6.15E-03
300	185	3.57E-01	2.78E-03	5.14E-01	4.00E-03	6.70E-01	5.21E-03
300	195	3.98E-01	1.83E-03	5.65E-01	2.59E-03	7.32E-01	3.36E-03
300	205	2.78E-01	7.26E-04	4.14E-01	1.08E-03	5.50E-01	1.44E-03
300	215	1.22E-01	1.62E-04	2.01E-01	2.68E-04	2.81E-01	3.74E-04
300	225	2.77E-02	1.39E-05	5.19E-02	2.61E-05	7.61E-02	3.82E-05
300	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
330	20	7.90E-02	9.44E-04	1.35E-01	1.61E-03	1.91E-01	2.28E-03
330	60	6.62E-02	1.39E-03	1.15E-01	2.42E-03	1.65E-01	3.46E-03
330	90	5.96E-02	1.57E-03	1.05E-01	2.76E-03	1.51E-01	3.96E-03
330	110	5.80E-02	1.59E-03	1.03E-01	2.82E-03	1.47E-01	4.05E-03
330	130	6.18E-02	1.52E-03	1.09E-01	2.68E-03	1.56E-01	3.84E-03
330	145	7.93E-02	1.56E-03	1.36E-01	2.69E-03	1.93E-01	3.82E-03
330	155	1.09E-01	1.65E-03	1.80E-01	2.75E-03	2.52E-01	3.84E-03
330	165	1.59E-01	1.68E-03	2.52E-01	2.66E-03	3.44E-01	3.65E-03
330	175	2.52E-01	1.64E-03	3.77E-01	2.46E-03	5.02E-01	3.28E-03
330	185	3.72E-01	1.35E-03	5.33E-01	1.93E-03	6.93E-01	2.52E-03
330	195	4.10E-01	7.82E-04	5.80E-01	1.11E-03	7.50E-01	1.44E-03
330	205	2.83E-01	2.63E-04	4.21E-01	3.92E-04	5.59E-01	5.20E-04
330	215	1.23E-01	4.51E-05	2.04E-01	7.45E-05	2.84E-01	1.04E-04
330	225	2.79E-02	2.56E-06	5.22E-02	4.80E-06	7.65E-02	7.03E-06
330	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
370	20	7.76E-02	8.67E-04	1.33E-01	1.48E-03	1.88E-01	2.10E-03

X(m)	Y (m)	Κ.β. Ποσοστό αργίλου στο μεικτό ίζημα					
		5%		10%		15%	
		qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)
370	60	6.58E-02	1.12E-03	1.15E-01	1.95E-03	1.64E-01	2.78E-03
370	90	6.00E-02	1.23E-03	1.06E-01	2.18E-03	1.52E-01	3.12E-03
370	110	5.91E-02	1.27E-03	1.05E-01	2.24E-03	1.50E-01	3.22E-03
370	130	6.39E-02	1.25E-03	1.12E-01	2.19E-03	1.60E-01	3.13E-03
370	145	8.28E-02	1.33E-03	1.42E-01	2.27E-03	2.00E-01	3.22E-03
370	155	1.14E-01	1.44E-03	1.88E-01	2.37E-03	2.62E-01	3.31E-03
370	165	1.67E-01	1.49E-03	2.63E-01	2.33E-03	3.59E-01	3.18E-03
370	175	2.64E-01	1.42E-03	3.92E-01	2.11E-03	5.21E-01	2.80E-03
370	185	3.86E-01	1.06E-03	5.49E-01	1.51E-03	7.12E-01	1.95E-03
370	195	4.19E-01	4.50E-04	5.92E-01	6.33E-04	7.64E-01	8.17E-04
370	205	2.87E-01	2.66E-05	4.26E-01	3.92E-05	5.64E-01	5.18E-05
370	215	1.24E-01	-4.50E-05	2.04E-01	-7.42E-05	2.85E-01	-1.03E-04
370	225	2.78E-02	-9.04E-06	5.21E-02	-1.69E-05	7.63E-02	-2.48E-05
370	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
410	20	7.74E-02	7.42E-04	1.32E-01	1.27E-03	1.87E-01	1.80E-03
410	60	6.59E-02	6.63E-04	1.15E-01	1.16E-03	1.64E-01	1.65E-03
410	90	6.08E-02	5.68E-04	1.07E-01	1.00E-03	1.53E-01	1.44E-03
410	110	6.07E-02	3.44E-04	1.07E-01	6.09E-04	1.53E-01	8.74E-04
410	130	6.62E-02	-4.71E-05	1.16E-01	-7.66E-05	1.65E-01	-1.06E-04
410	145	8.61E-02	-5.05E-04	1.47E-01	-8.51E-04	2.07E-01	-1.20E-03
410	155	1.19E-01	-1.02E-03	1.94E-01	-1.67E-03	2.70E-01	-2.32E-03
410	165	1.73E-01	-1.76E-03	2.70E-01	-2.75E-03	3.68E-01	-3.74E-03
410	175	2.69E-01	-2.77E-03	3.99E-01	-4.10E-03	5.29E-01	-5.44E-03
410	185	3.87E-01	-3.56E-03	5.51E-01	-5.08E-03	7.14E-01	-6.60E-03
410	195	4.15E-01	-3.24E-03	5.86E-01	-4.59E-03	7.58E-01	-5.94E-03
410	205	2.80E-01	-1.74E-03	4.17E-01	-2.60E-03	5.54E-01	-3.46E-03
410	215	1.20E-01	-5.11E-04	1.99E-01	-8.48E-04	2.78E-01	-1.19E-03
410	225	2.71E-02	-5.44E-05	5.07E-02	-1.02E-04	7.44E-02	-1.50E-04
410	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
450	20	7.88E-02	5.57E-04	1.34E-01	9.51E-04	1.90E-01	1.34E-03
450	60	6.82E-02	1.43E-04	1.18E-01	2.50E-04	1.69E-01	3.56E-04
450	90	6.53E-02	-2.70E-05	1.14E-01	-4.76E-05	1.63E-01	-6.81E-05
450	110	6.74E-02	-3.16E-04	1.17E-01	-5.55E-04	1.68E-01	-7.95E-04
450	130	7.23E-02	-7.74E-04	1.25E-01	-1.35E-03	1.78E-01	-1.93E-03
450	145	8.78E-02	-1.37E-03	1.49E-01	-2.33E-03	2.10E-01	-3.29E-03
450	155	1.11E-01	-2.05E-03	1.83E-01	-3.35E-03	2.56E-01	-4.66E-03
450	165	1.45E-01	-2.93E-03	2.32E-01	-4.58E-03	3.19E-01	-6.23E-03
450	175	2.00E-01	-4.02E-03	3.05E-01	-5.96E-03	4.11E-01	-7.90E-03
450	185	2.56E-01	-4.65E-03	3.79E-01	-6.63E-03	5.01E-01	-8.60E-03
450	195	2.55E-01	-3.86E-03	3.76E-01	-5.47E-03	4.96E-01	-7.07E-03
450	205	1.67E-01	-1.92E-03	2.57E-01	-2.86E-03	3.48E-01	-3.81E-03
450	215	7.02E-02	-5.25E-04	1.19E-01	-8.72E-04	1.68E-01	-1.22E-03
450	225	1.56E-02	-5.30E-05	2.95E-02	-9.94E-05	4.34E-02	-1.46E-04
450	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
490	20	3.99E-02	2.39E-04	6.80E-02	4.07E-04	9.61E-02	5.75E-04
490	60	3.52E-02	-2.53E-07	6.09E-02	-4.37E-07	8.66E-02	-6.22E-07
490	90	3.46E-02	-2.29E-07	6.02E-02	-3.98E-07	8.57E-02	-5.67E-07
490	110	3.65E-02	-2.38E-07	6.31E-02	-4.12E-07	8.98E-02	-5.85E-07
490	130	3.85E-02	-2.49E-07	6.63E-02	-4.28E-07	9.41E-02	-6.08E-07
490	145	4.38E-02	-2.73E-07	7.44E-02	-4.64E-07	1.05E-01	-6.55E-07
490	155	5.07E-02	-3.04E-07	8.48E-02	-5.08E-07	1.19E-01	-7.12E-07
490	165	5.82E-02	-3.36E-07	9.58E-02	-5.53E-07	1.33E-01	-7.69E-07
490	175	6.52E-02	-3.66E-07	1.06E-01	-5.96E-07	1.47E-01	-8.26E-07
490	185	6.48E-02	-3.62E-07	1.06E-01	-5.95E-07	1.48E-01	-8.27E-07
490	195	5.23E-02	-3.01E-07	8.81E-02	-5.06E-07	1.24E-01	-7.12E-07
490	205	3.03E-02	-1.83E-07	5.37E-02	-3.24E-07	7.72E-02	-4.66E-07
490	215	1.17E-02	-7.59E-08	2.21E-02	-1.43E-07	3.25E-02	-2.11E-07

X(m)	Y (m)	Κ.β. Ποσοστό αργίλου στο μεικτό ίζημα					
		5%		10%		15%	
		qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)	qtx (kg/m ² s)	qty (kg/m ² s)
490	225	2.38E-03	-1.19E-08	4.69E-03	-2.33E-08	7.00E-03	-3.48E-08
490	235	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00