



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

## Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Επιστημονικός  
υπεύθυνος:

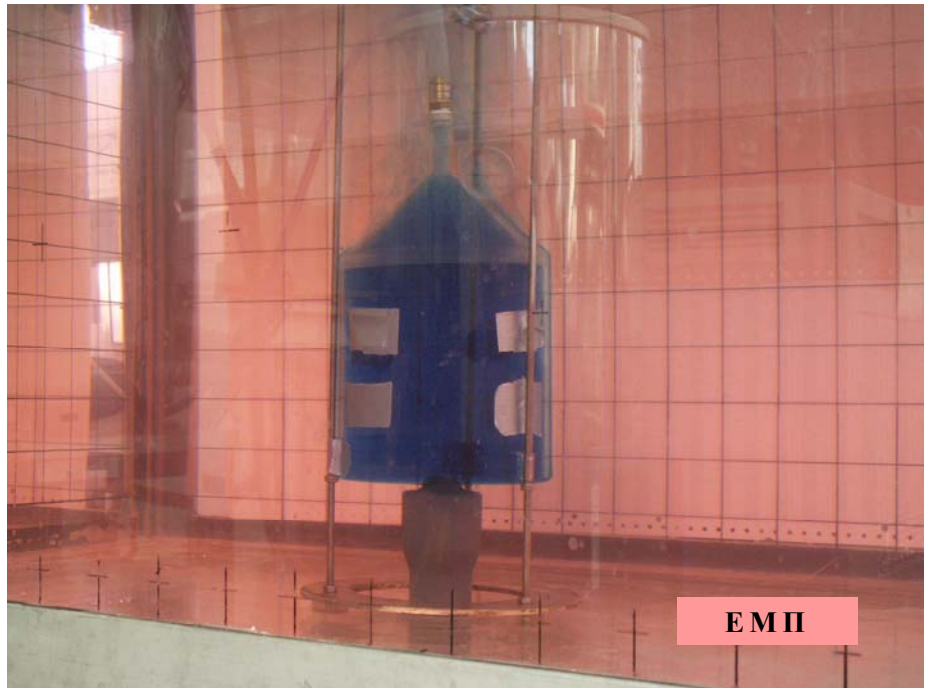
**Δ. Κουτσογιάννης,**  
Καθηγητής ΕΜΠ

**ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΚΑΙ ΧΕΡΣΑΙΑ  
ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ  
ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ, ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ  
ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΩΝ  
ΑΝΑΒΛΥΣΕΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΤΟΥΠΙΑΣ ΤΟΥ  
ΔΗΜΟΥ ΛΕΥΚΤΡΟΥ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΜΕΣΣΗΝΙΑΣ**

**ΤΕΥΧΟΣ Ι**

Σύνταξη:

**Η. Παπακωνσταντής  
Π. Παπανικολάου  
Β. Κοτσιώνη  
Μ. Χονδρός  
Κ. Μέμος  
Δ. Κουτσογιάννης**



**ΕΜΠ**

**Αθήνα, Μάιος 2010**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν Τεύχος Ι αποτελεί το πρώτο παραδοτέο της Ερευνητικής Ομάδας του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, σύμφωνα με την Προγραμματική Σύμβαση της 11<sup>ης</sup> Μαΐου 2009, που είναι προϊόν της ολοκλήρωσης της 2<sup>ης</sup> Φάσης του Έργου.

Τα μέλη της Ερευνητικής Ομάδας που εργάστηκαν στην παρούσα φάση του έργου είναι τα εξής:

- Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής – Επιστημονικός Υπεύθυνος
- Κ. Μέμος, Καθηγητής
- Π. Παπανικολάου, Επ. Καθηγητής
- Ε. Καστρινάκης, Αν. Καθηγητής ΑΠΘ, σε Εκπαιδευτική Άδεια
- Α. Ευστρατιάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Υδρολόγος
- Η. Παπακωνσταντής, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Ρευστομηχανικός
- Β. Κοτσιώνη, Πολιτικός Μηχανικός
- Μ. Χονδρός, Πολιτικός Μηχανικός
- Μ. Λασηθιωτάκης, ΕΕΔΙΠ
- Ι. Πατσέλης, Τεχνικός Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής

Τη σύνταξη του Τεύχους Ι επιμελήθηκαν οι

- Η. Παπακωνσταντής
- Π. Παπανικολάου
- Β. Κοτσιώνη
- Μ. Χονδρός
- Ε. Καστρινάκης
- Κ. Μέμος
- Δ. Κουτσογιάννης

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ.....	3
1.1 Γενικά.....	3
1.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση.....	4
2. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ.....	9
2.1 Αξιολόγηση βαθυμετρίας και γεωτεχνικής αποτύπωσης.....	9
2.1.1 Βαθυμετρία.....	9
2.1.2 Γεωτεχνικά στοιχεία.....	11
2.2 Ανεμολογικά στοιχεία.....	13
2.3 Στοιχεία ρευμάτων.....	17
2.4 Πρόγνωση κυματισμών στα βαθειά νερά.....	21
2.4.1 Μεθοδολογία πρόγνωσης κυματισμού σύμφωνα με το Coastal Engineering Manual.....	21
2.4.2 Πρόγνωση κυματισμού με βάση τα δεδομένα του σταθμού της Καλαμάτας.....	28
2.4.3 Πρόγνωση κυματισμού με βάση τα δεδομένα του σταθμού της Μεθώνης.....	30
2.4.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	32
2.4.5 Πρόγνωση κυματισμού με το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ.....	33
2.4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων και επιλογή κύματος προσομοίωσης.....	34
2.5 Κυματική προσομοίωση στην παράκτια ζώνη με το πρόγραμμα MIKE 21.....	36
2.5.1 Κυματικό μοντέλο – Nearshore Spectral Wave Model.....	37
2.5.2 Υδροδυναμικό μοντέλο - MIKE 21 Flow Model / Hydrodynamic Module.....	48
2.6 Εκτίμηση στερεοπαροχής.....	56
2.6.1 Κίνηση ιζήματος στην περιοχή της ανάβλυσης.....	56
2.6.2 Στερεοπαροχή κατά μήκος της ακτής.....	60
2.7 Συμπεράσματα.....	61
3. ΑΠΟΛΗΨΗ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	62
3.1 Θεωρητική προσέγγιση ανάβλυσης.....	62
3.2 Ανωστικές φλέβες (buoyant jets).....	62
3.2.1 Ορισμοί.....	62
3.2.2 Χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους της ροής.....	63
3.3 Αξιολόγηση χαρακτηριστικών της υπό μελέτη ανάβλυσης.....	65
3.3.1 Χαρακτηριστικά εκροής.....	65
3.3.2 Αραίωση του νερού της ανάβλυσης στην επιφάνεια της θάλασσας.....	66
3.4 Εναλλακτικές διατάξεις απόληψης νερού.....	69
3.5 Παραδοχές πειραματικής προσομοίωσης.....	70
4. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΟΜΟΙΩΜΑ.....	71
4.1 Περιγραφή διάταξης.....	71
4.2 Όργανα μέτρησης.....	75
4.2.1 Μέτρηση παροχής.....	75
4.2.2 Μέτρηση παροχής απόληψης.....	76
4.2.3 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης (Αγωγιμόμετρο).....	76
4.3 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	78
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ.....	81
5.1 Παράμετροι πειραμάτων.....	81
5.2 Αποτελέσματα πειραμάτων.....	85
5.2.1 Κατακόρυφη φλέβα νερού σε αλατόνερο.....	85
5.2.2 Οριζόντια εκροή.....	90
6. ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΡΓΩΝ.....	91

6.1 Διάταξη απόληψης νερού .....	91
6.2 Περιγραφή δυνητικής διάταξης έργων .....	91
6.3 Αγωγός μεταφοράς νερού στην ακτή .....	92
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	95
7.1 Συμπεράσματα .....	95
7.2 Προτάσεις .....	95
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	97
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Μέσες μηνιαίες συχνότητες ανέμων.....	101
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αρχή λειτουργίας σημειακού αγωγιμομέτρου για τη μέτρηση της συγκέντρωσης NaCl σε υδατικό διάλυμα .....	107

## 1. ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

### 1.1 Γενικά

Το φαινόμενο της καρστικοποίησης εμφανίζεται κυρίως σε ανθρακούχα πετρώματα, όπως τα ασβεστολιθικά, λόγω τεκτονικών και φυσικοχημικών διεργασιών και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών, αυλακώσεων, καταβοθρών, θυλάκων ή κλειστών λεκανών απορροής και πηγαδιών. Κάτω από την επιφάνεια αναπτύσσονται συστήματα με υπόγεια ροή γλυκού νερού που ονομάζονται καρστικοί υδροφορείς. Η ροή ομοιάζει με αυτήν ενός πολύπλοκου συστήματος αγωγών.

Αρκετοί καρστικοί υδροφορείς εμφανίζονται σε παράκτιες περιοχές. Οι παράκτιοι καρστικοί υδροφορείς αποτελούν σημαντικό μέρος των υδατικών πόρων, μερικές φορές μάλιστα είναι οι μόνοι διαθέσιμοι πόροι για ύδρευση και κάλυψη των σχετικών αναγκών σε παράκτιες περιοχές. Η εκμετάλλευση λοιπόν τέτοιων υδατικών πόρων είναι ιδιαίτερα σημαντική αλλά όχι εύκολη υπόθεση. Άλλωστε οι παράκτιοι υδροφορείς συχνά συνδέονται με τη θάλασσα με αποτέλεσμα τη δημιουργία υποθαλάσσιων αναβλύσεων γλυκού νερού αλλά και τη διείσδυση του θαλάσσιου νερού μέσω των καρστικών ανοιγμάτων (Fleurey et al. 2007). Η ύπαρξη υποθαλάσσιων πηγών γλυκού νερού έχει διαπιστωθεί πολλά χρόνια πριν. Για παράδειγμα οι Φοίνικες χρησιμοποιούσαν νερό τέτοιων πηγών περίπου χίλια χρόνια πριν. Πολλές υποθαλάσσιες πηγές παραμένουν ανεκμετάλλευτες, ενώ τώρα τελευταία εντείνονται οι προσπάθειες απόληψης νερού. Μια τέτοια περίπτωση είναι και οι υποθαλάσσιες πηγές γλυκού νερού στην περιοχή της Στούπας Μεσσηνίας.

Στην παρούσα έκθεση περιγράφεται η διεθνής εμπειρία από ανάλογα προβλήματα εκμετάλλευσης υποθαλάσσιων καρστικών πηγών, γίνεται αποτίμηση-αξιολόγηση των συνθηκών στην υπό μελέτη περιοχή της μεγάλης ανάβλυσης Στούπας Μεσσηνίας και παρουσιάζονται διατάξεις για την απόληψη του νερού καθώς και αποτελέσματα από πειραματικές δοκιμές σε σχετικό εργαστηριακό ομοίωμα τέτοιας διάταξης. Τέλος, συνάγονται συμπεράσματα για τις δυνατότητες εκμετάλλευσης της συγκεκριμένης ανάβλυσης.

## 1.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Οι μελέτες υποθαλάσσιων πηγών από καρστικούς υδροφορείς είναι λίγες και συνήθως αφορούν σε σημειακές εκτιμήσεις της παροχής και όχι στη βαθύτερη διερεύνηση της λειτουργίας των υδροφόρων συστημάτων με υποθαλάσσιες εκροές. Επίσης μικρή σημασία έχει δοθεί στη μελέτη της διείσδυσης θαλάσσιου νερού (αλάτινης σφήνας) που μετατρέπει το γλυκό νερό σε υφάλμυρο. Μελέτη σχετικά με τη δημιουργία της ροής, τους μηχανισμούς που διέπουν τη ροή και τα αποτελέσματά τους παρουσιάστηκε από τους Fleury et al. (2007). Συγκεκριμένα η εργασία περιλαμβάνει παραδείγματα αλληλεπίδρασης θαλάσσιου νερού με το γλυκό νερό καρστικών υδροφόρων που παρουσιάζουν πηγές πάνω ή κάτω από τη στάθμη της θάλασσας και αναφορά σε σχετικές εργασίες. Πολλά μάλιστα από τα παραδείγματα αφορούν στον Ελληνικό χώρο.

Συγκεκριμένα πηγές καρστικών συστημάτων πάνω από τη στάθμη της θάλασσας υπάρχουν στην Κεφαλονιά, στον Αλμυρό του Αγίου Νικολάου Κρήτης και στον Αλμυρό Ηρακλείου Κρήτης. Αρκετές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί για τις πηγές της Κεφαλονιάς, π.χ. από τους Maurin & Zoelt (1965), Crosby & Crosby (1896), Fuller (1906), Glanz (1965), Zötl (1974), Stringfield & LeGrand (1969), Drogue (1989). Μάλιστα ο Zötl (1974) χρησιμοποίησε δείκτες για να διερευνήσει τη λειτουργία του συστήματος. Το νερό της πηγής φαίνεται να είναι υφάλμυρο, γεγονός που οφείλεται στο ότι υπάρχει σύνδεση μεταξύ του τμήματος που απορροφά θαλάσσιο νερό και της πηγής. Στον Αλμυρό του Αγίου Νικολάου σχετική μελέτη έχει παρουσιαστεί από τους Mangin et al. (1996), ενώ στον Αλμυρό Ηρακλείου από τους Arfib (2001a,b), Arfib et al. (2002, 2007), Arfib & Ganoulis (2004), Arfib & de Marsily (2004), Lambrakis et al. (2000), Maramathas et al. (2003), Maramathas (2006), Breznik (1998). Αρκετά είναι τα παραδείγματα και από το διεθνή χώρο, π.χ. Βεγγάζη-Λιβύη, Κροατία, Γαλλία κλπ.

Από τις πηγές που εκρέουν πάνω από τη στάθμη της θάλασσας προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα (Fleury et al. 2007). Οι καρστικοί υδροφορείς παρουσιάζουν ροή σε «σωλήνες» με ανοίγματα προς τη θάλασσα. Οι αγωγοί κατεβαίνουν συχνά πολύ κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Η διείσδυση του θαλάσσιου νερού μπορεί εύκολα να συμβεί είτε στην εκροή του συστήματος είτε σε κάποιο άλλο άνοιγμα-σύνδεση του καρστικού συστήματος με τη θάλασσα. Το θαλάσσιο νερό που διεισδύει αναμιγνύεται με το γλυκό νερό και η ροή διέπεται από τη διαφορά πυκνότητας γλυκού και θαλάσσιου νερού. Ο Bonacci (1987) διέκρινε την περίπτωση υφαλμύρωσης ενός υδροφορέα με

ρηγό και βαθύ τμήμα. Όταν η παροχή της πηγής είναι μικρή οι πηγές με κλάδο που φτάνει σχετικά μικρό βάθος (μέχρι 100 m) παρουσιάζουν πιθανώς κάποια απότομη αύξηση στην αλατότητα επειδή λειτουργούν ως σίφωνες. Όταν το τμήμα του συστήματος είναι βαθύτερο τότε παρουσιάζεται πιο ομαλή λειτουργία. Έτσι εξηγείται η παρουσία αλμυρού νερού στην εκροή παράκτιων καρστικών συστημάτων και πηγών πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, των οποίων το νερό γίνεται υφάλμυρο κάποιο διάστημα του έτους.

Υποθαλάσσιες καρστικές πηγές υπάρχουν πολλές στον κόσμο αλλά και στον Ελλαδικό χώρο. Αρκετές εργασίες έχουν πραγματοποιηθεί για τον Ανάβαλο στο Κιβέρι Αργολίδας, στην Πελοπόννησο. Συγκεκριμένα υπάρχουν τέσσερις παράκτιες και υποθαλάσσιες πηγές σε βάθος μέχρι 7 m και μερικές δεκάδες μέτρα από την ακτή. Η αλατότητα είναι γενικά μικρή, μικρότερη από 0.3 g/L στην παράκτια πηγή και μεταξύ 0.3 g/L και 2.5 g/L (Wolfgang 1972, Pulido Bosch 1999, Milanovic 2000, Argyriadis 2003) στις υποθαλάσσιες πηγές. Η συνολική παροχή είναι μεγαλύτερη από 10 m<sup>3</sup>/s. Προκειμένου να διαχωριστεί από το θαλάσσιο νερό η ροή γλυκού νερού από τον υδροφορέα κατασκευάστηκε φράγμα εντός του οποίου αντλείται το γλυκό νερό. Αν και δεν υπάρχουν γεωλογικά δεδομένα για τον υδροφορέα πιθανολογείται ότι οι πηγές είναι οι εκροές ενός καλά αναπτυγμένου καρστικού συστήματος. Στο διεθνή χώρο ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση της υποθαλάσσιας πηγής Port-Miou, νοτιοανατολικά της Μασσαλίας στη Γαλλία. Η πηγή εκρέει 12 m κάτω από τη στάθμη της θάλασσας και η παροχή κυμαίνεται από 1 ως 10 m<sup>3</sup>/s. Το σύστημα είναι καλά αναπτυγμένο και ανοικτό προς τη θάλασσα σε διάφορα βάθη. Προκειμένου να εμποδιστεί η δημιουργία αλάτινης σφήνας κατασκευάστηκε φράγμα στην περιοχή το οποίο αποτέλεσε έναυσμα για τη διερεύνηση των μηχανισμών δημιουργίας σφήνας (Potié and Ricour 1974) οι οποίοι συνδέονται με τη γεωμετρία του συστήματος. Πάντως μέχρι και σήμερα δεν έχει αποφευχθεί η ανάμιξη με το θαλάσσιο νερό.

Το βάθος των υποθαλάσσιων πηγών εξαρτάται από το φορτίο της καρστικής ροής. Από τις μελέτες διαφόρων περιπτώσεων που παρουσιάστηκαν από τους Fleury et al. (2007) προκύπτει ότι το βάθος των πηγών φτάνει περίπου μέχρι 150 m. Το νερό των πηγών μπορεί να είναι γλυκό (π.χ. Κιβέρι) ή υφάλμυρο (π.χ. Port Miou). Στη δεύτερη περίπτωση η αλατότητα εξαρτάται και από την βροχόπτωση και τον υπόγειο υδροφορέα. Κάποιες πηγές παρουσιάζουν εποχική λειτουργία ενώ το υπόλοιπο διάστημα απορροφούν θαλάσσιο νερό.

Η εκμετάλλευση των υποθαλάσσιων πηγών απαιτεί την οριοθέτησή τους και την κατανόηση της λειτουργίας τους. Κάτι τέτοιο φυσικά για να επιτευχθεί χρειάζεται υδρογεωλογική μελέτη που να περιλαμβάνει αξιόπιστες μετρήσεις. Οι Fleury et al. (2007) παρουσίασαν τρία συγκεκριμένα παραδείγματα από τον Ευρωπαϊκό χώρο.

Προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία λήψης αποφάσεων για το κατά πόσο είναι εφικτή η εκμετάλλευση μιας υποθαλάσσιας πηγής έχει γίνει προσπάθεια ώστε οι καρστικοί υδροφορείς να ταξινομηθούν σε κατηγορίες (π.χ. για τους υδροφορείς της Μεσογείου έχει γίνει ταξινόμηση από το COST 621 Group, 2005). Σύμφωνα με τους Fleury et al. (2007) οι καρστικοί υδροφορείς μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες (α) συστήματα με ελάχιστη καρστικοποίηση αλλά χωρίς ιδιαίτερη επικοινωνία με το θαλάσσιο νερό, (β) καρστικοποιημένα συστήματα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας αλλά με επικοινωνία προς αυτήν και (γ) καρστικοποιημένα συστήματα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας με μερική ή χωρίς καθόλου σύνδεση με τη θάλασσα (π.χ. Κιβέρι). Ασφαλώς απ' ευθείας άντληση του νερού μπορεί να γίνει μόνο για την 1<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> κατηγορία λόγω μικρότερης αλατότητας. Συγκεκριμένα υδροφορείς της 1<sup>ης</sup> κατηγορίας παρουσιάζουν συνήθως μικρές παροχές οπότε μπορούν μόνο τοπικά να αξιοποιηθούν. Τα συστήματα της 2<sup>ης</sup> κατηγορίας απαιτούν την εύρεση λύσης απομόνωσης του γλυκού νερού από το αλμυρό μέσω κάποιας τεχνικής, π.χ. κατασκευή διαφράγματος ώστε να εμποδιστεί η είσοδος θαλάσσιου νερού στο καρστικό σύστημα. Πάντως δεν υπάρχει κάποια γνωστή απολύτως επιτυχημένη λύση. Η 3<sup>η</sup> κατηγορία υδροφόρων συστημάτων είναι πιο αξιόπιστη για την άντληση γλυκού νερού μιας και έχουν συνήθως μεγάλες παροχές και γλυκό νερό. Βέβαια η περίπτωση της αλάτινης διείδυσης στην εκροή παραμένει ως πρόβλημα όπως στο Κιβέρι όπου κατασκευάστηκε ειδικό φράγμα.

Οι Bakalowicz et al. (2003) παρουσίασαν μεθοδολογία για τη διερεύνηση και την καταγραφή των χαρακτηριστικών μιας υποθαλάσσιας πηγής σε καρστικούς υδροφορείς της Μεσογείου καθώς και για την απόληψη του νερού. Η διερεύνηση περιλαμβάνει δύο κατευθύνσεις, η μία έχει να κάνει με τη συλλογή και καταγραφή δεδομένων όπως η αλατότητα (ή η αγωγιμότητα), η θερμοκρασία και η παροχή του πλουμίου γλυκού νερού, ενώ η δεύτερη αφορά στα έργα για την απόληψη του νερού.

Η πρώτη ουσιαστική προσπάθεια κατασκευής ειδικής διάταξης απόληψης γλυκού νερού από υποθαλάσσια πηγή (με εξαίρεση τις παλιότερες στο Κιβέρι και το Port Μίου) έγινε από τη Γαλλική εταιρία Nymphaea Water (Geocyan group). Το σύστημα που



χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ γλυκού και θαλάσσιου νερού, μιας και το ελαφρύτερο γλυκό νερό ανέρχεται προς τα πάνω. Συγκεκριμένα η εκροή του νερού της πηγής μεταφέρεται υψηλότερα μέσω κάποιου αγωγού-«καμινάδας» χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργία του καρστικού συστήματος. Το νερό συγκεντρώνεται μέσα σε μια ημισφαιρική διάταξη (Σχήμα 1-1) και αντλείται από το άνω μέρος της διάταξης αυτής. Η διάταξη δοκιμάστηκε σε Ιταλική πηγή η οποία προέρχεται από καλά καρστικοποιημένο σύστημα, σε βάθος 36 m.



Σχήμα 1-1: Διάταξη συλλογής νερού από υποθαλάσσια πηγή (φωτογραφία από Bakalowicz et al. 2003).

Το σύστημα αυτό εξελίχθηκε περαιτέρω και αποτελείται από στερεά άκαμπτα υλικά ώστε να ενισχυθεί η αξιοπιστία και η αντοχή του στο χρόνο. Συγκεκριμένα περιλαμβάνει έναν κύλινδρο ο οποίος περικλείει την πηγή και η βάση του ακολουθεί την κλίση του πυθμένα. Η «καμινάδα» που οδηγεί το νερό της πηγής μέσα στον κύλινδρο περιλαμβάνει δύο αγωγιμόμετρα, το ένα για τη μέτρηση της αγωγιμότητας, αλατότητας και θερμοκρασίας και το δεύτερο της συγκέντρωσης ραδονίου. Επίσης περιλαμβάνει ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο για τη μέτρηση της παροχής. Έτσι το όλο σύστημα παρέχει και τη δυνατότητα για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με την πηγή. Σχετικές πληροφορίες για τις δραστηριότητες της εταιρίας μπορούν να βρεθούν στο <http://www.nymphea.fr>.

Πρόσφατα, έγινε υποβολή πατέντας (Argyriadis, 2007) σχετικής με την υδρομάστευση πηγών γλυκού νερού που εκβάλλουν είτε στην περιοχή της ακτής είτε σε μεγαλύτερα βάθη στον πυθμένα της θάλασσας. Στην πρώτη περίπτωση προτείνεται η συλλογή του γλυκού ή υφάλμυρου νερού να γίνεται σε ένα φράγμα με εύκαμπτα τοιχώματα, του οποίου το ύψος μπορεί να μεταβάλλεται με ένα σύστημα πλωτήρων εγκατεστημένων την περιοχή του γλυκού νερού. Παράλληλα η περίσσεια του νερού που δεν αντλείται 'υπερχειλίζει' από το κατώτερο τμήμα του φράγματος κοντά στον πυθμένα, υποβοηθούμενη από την πίεση του υπερκείμενου γλυκού νερού. Η διεπιφάνεια ανάμεσα στο γλυκό νερό και το νερό της θάλασσας παρουσιάζεται σχηματικά να έχει κάποια κλίση μέσα στο φράγμα, πράγμα το οποίο, κατά την άποψή μας, δεν είναι πιθανό να συμβαίνει επειδή οι ταχύτητες του νερού στο φράγμα είναι πολύ μικρές και δεν δικαιολογούν την εμφάνιση 'σφήνας' αλατόνευρου στον πυθμένα. Στην περίπτωση της υποθαλάσσιας πηγής, προτείνεται κάλυψη αυτής με κώδωνα του οποίου το χείλος εφάπτεται στον πυθμένα, ενώ στο ανώτερο σημείο τοποθετείται αντλία για την απόληψη του γλυκού νερού που στη συνέχεια οδηγείται στη δεξαμενή αποδέκτη. Και στη διάταξη αυτή υπάρχει δυνατότητα 'υπερχείλισης' του γλυκού νερού από εύκαμπτες θύρες που εφαρμόζονται στο πλευρικό τοίχωμα του κώδωνα κοντά στον πυθμένα. Ωστόσο, και για τις δύο προτεινόμενες διατάξεις δεν υπάρχει διαστασιολόγηση των επί μέρους στοιχείων των, καθώς επίσης δεν δίδεται τρόπος υπολογισμού σχετικός με την προβλεπόμενη παροχή απόληψης του γλυκού νερού. Η προταθείσα πατέντα φαίνεται ότι δεν έχει εγκριθεί για τους λόγους ότι: (1) δεν θεωρήθηκε ότι στη μεθοδολογία υπάρχει κάτι καινούριο (novelty) και (2) το κείμενο που υποβλήθηκε για την υποστήριξη της πατέντας θεωρήθηκε ως 'μη ιδιαίτερος σχετικό'.

## 2. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

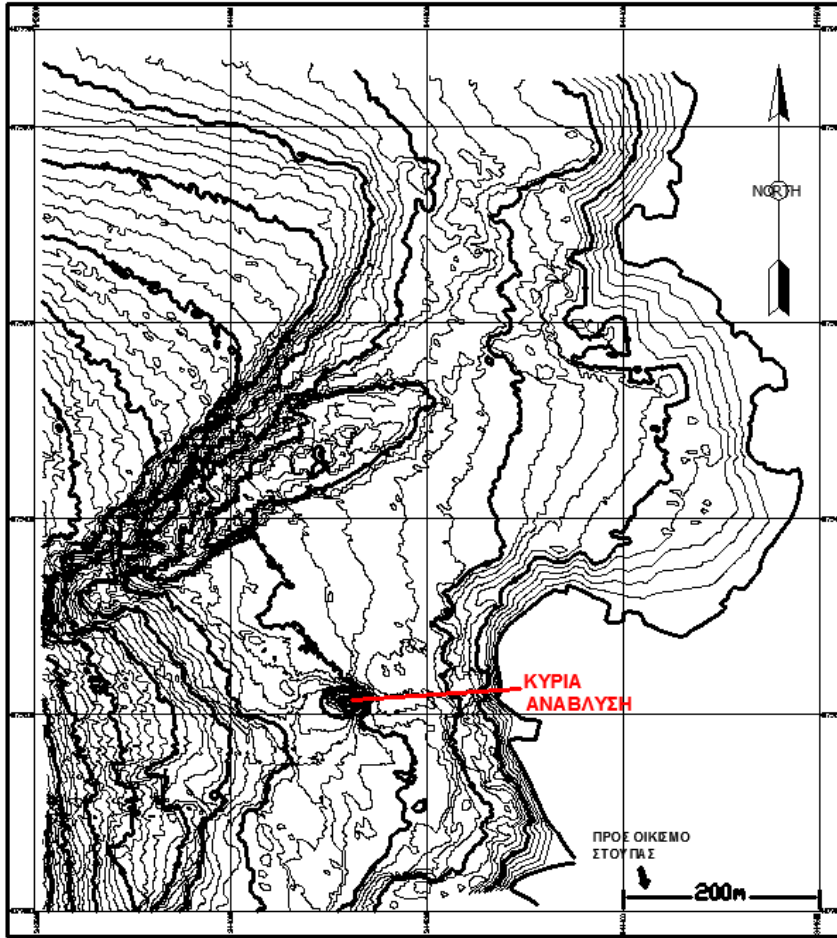
### 2.1 Αξιολόγηση βαθυμετρίας και γεωτεχνικής αποτύπωσης

#### 2.1.1 Βαθυμετρία

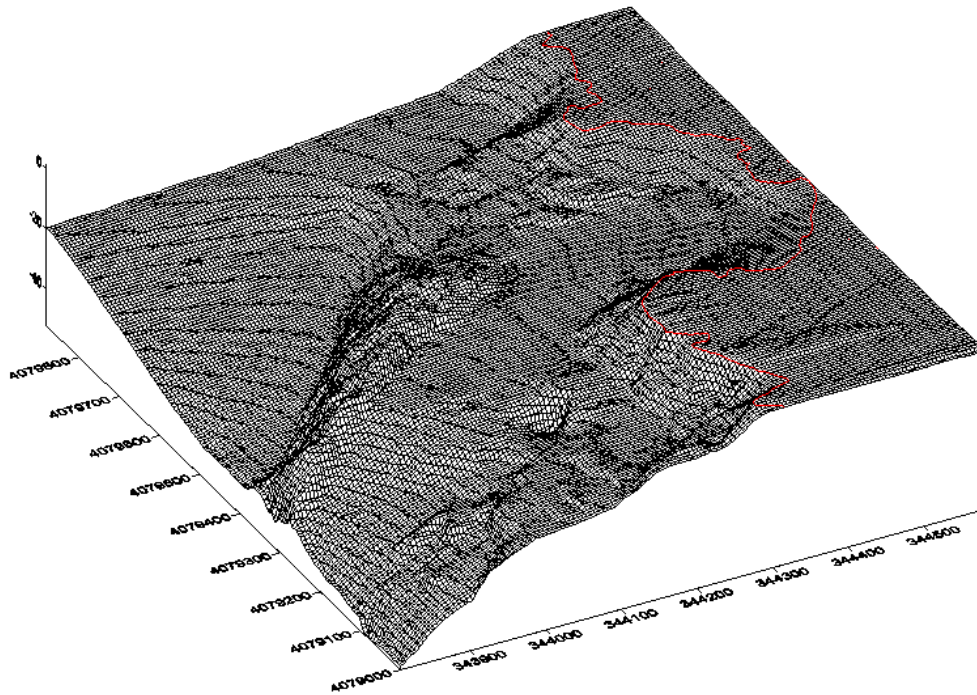
Η βαθυμετρική αποτύπωση στην ευρύτερη περιοχή της ανάβλυσης και η αποτύπωση της ακτογραμμής εκτελέστηκε από το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε (Σχήμα 2-1). Αρχικά πραγματοποιήθηκε επίγεια τοπογραφική αποτύπωση της ακτογραμμής και ακολούθησε βυθομετρική και γεωλογική αποτύπωση στην περιοχή της ανάβλυσης, η οποία καλύπτει έκταση 1000 m × 800 m περίπου. Η ακρίβεια εκατοστού με την οποία έγινε η αποτύπωση της βαθυμετρίας επαρκεί πλήρως τόσο για την προσομοίωση της παράκτιας εξέλιξης των κυματισμών, της κυκλοφορίας και της στερεομεταφοράς όσο και ενδεχόμενα για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό των έργων υδρομάστευσης των υποθαλάσσιων πηγών. Ο βαθυμετρικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής της ανάβλυσης ο αντίστοιχος χάρτης έχει κλίμακα 1:3000 με ισοδιάσταση 1 m, και στην περιοχή της ανάβλυσης έχει κλίμακα 1:500 με ισοδιάσταση 0.4 m. Και οι δύο χάρτες είναι ενταγμένοι στο κρατικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1, η βαθυμετρία της αποτυπωμένης περιοχής χαρακτηρίζεται από ομαλές κλίσεις με εξαίρεση μια σημαντική καταβύθιση του πυθμένα στην περιοχή της ανάβλυσης και μια επιμήκη υπερύψωση με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. Η υπερύψωση αυτή του πυθμένα έχει συνολικό μήκος περίπου 460 m, απότομες κλίσεις και μεγάλες βαθυμετρικές διαφορές που φτάνουν και τα 20 m. Ενδεικτικό είναι το Σχήμα 2-2 όπου απεικονίζεται η υπό μελέτη περιοχή σε τρισδιάστατο μοντέλο. Με κόκκινη γραμμή απεικονίζεται η ακτογραμμή.

Η καταβύθιση στην περιοχή της ανάβλυσης είναι της τάξης των 10 m σε σχέση με το επίπεδο του περιβάλλοντος πυθμένα, με κλίση έως και 1:1.4 (κατ.:οριζ.). Η καταβύθιση αυτή έχει σχήμα οβάλ, μήκους περίπου 45 m και πλάτους 22 m, με κύρια διεύθυνση Δ-Α και δευτερεύουσα Β-Ν. Ο πυθμένας της καταβύθισης αυτής εμφανίζει στο δυτικό και στο ανατολικό της άκρο τα μέγιστα βάθη με τιμές 29 m και 27 m αντίστοιχα. Τα πρανή της είναι ιδιαίτερα απότομα στα Δ και στα Α. Γύρω από την ανάβλυση ο πυθμένας έχει ομαλή και ήπια κλίση μέχρι την ισοβαθή των 20 m, περίπου 1:30, και στη συνέχεια γίνεται αρκετά πιο απότομη, περίπου 1:5.



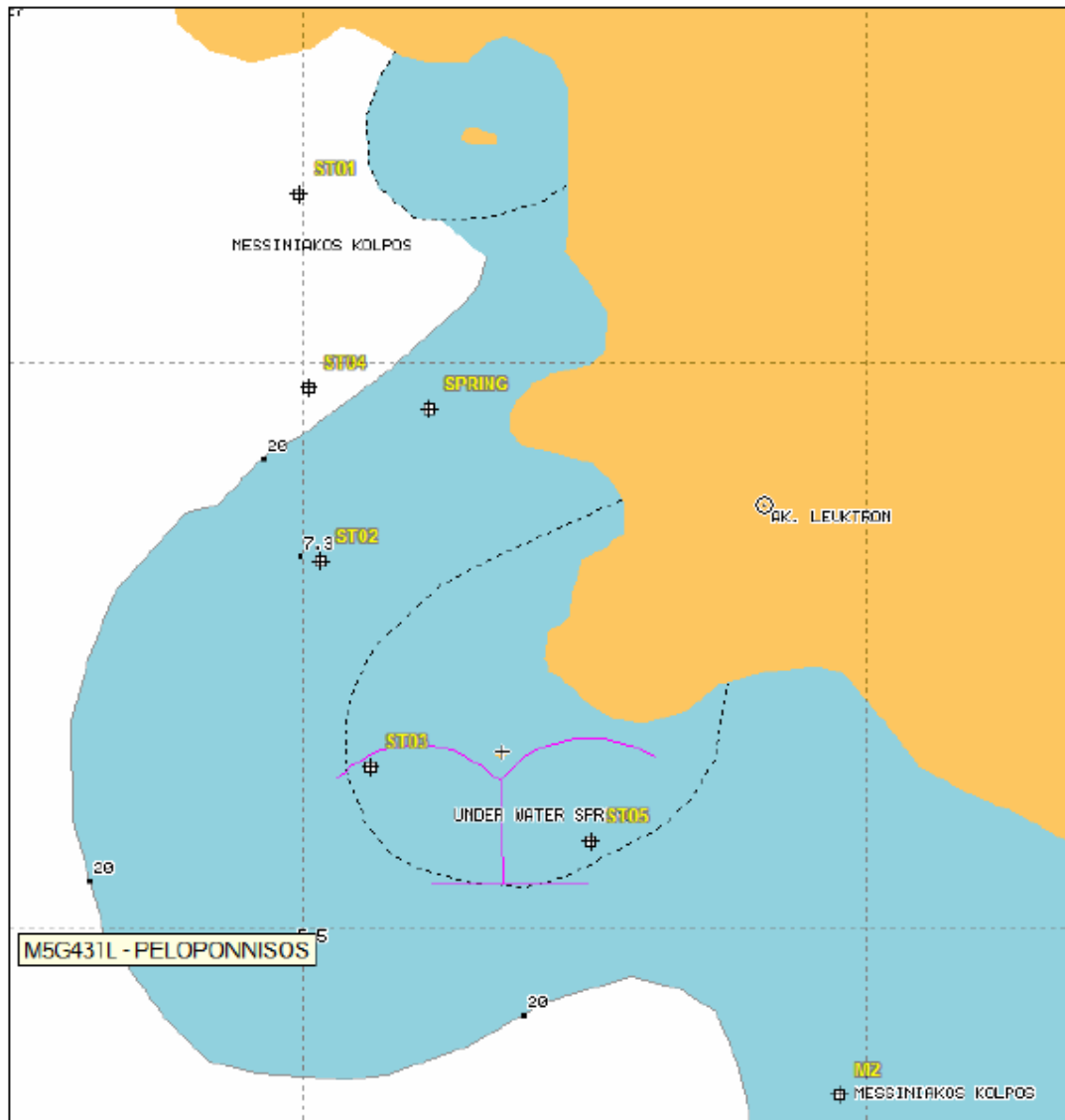
Σχήμα 2-1: Βυθομετρική αποτύπωση της περιοχής μελέτης



Σχήμα 2-2: Τρισδιάστατη απεικόνιση της βυθομετρίας

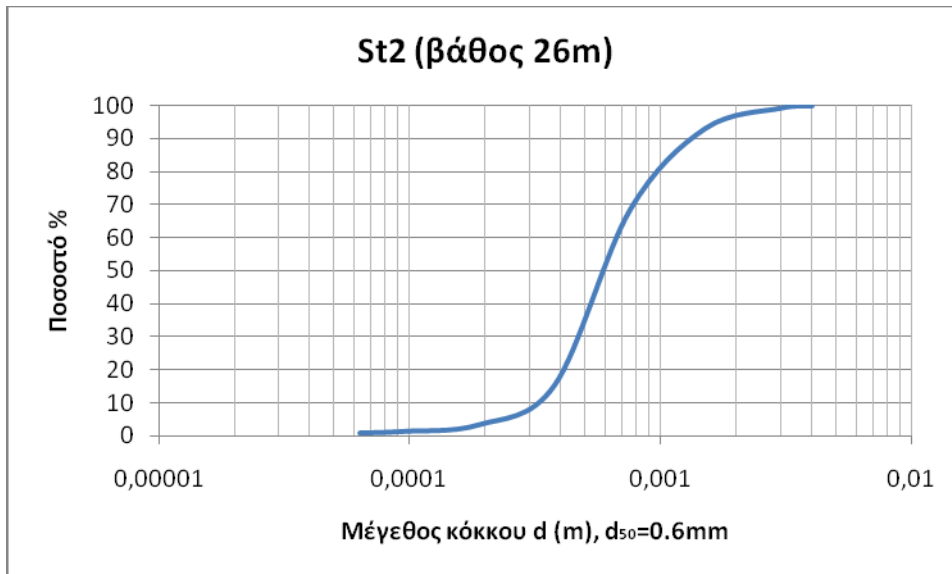
### 2.1.2 Γεωτεχνικά στοιχεία

Με βάση τις δειγματοληψίες ιζημάτων που διενεργήθηκαν από το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. στον πυθμένα της ευρύτερης περιοχής μελέτης, έγινε κοκκομετρική ανάλυση ιζήματος. Στο Σχήμα 2-3 σημειώνονται οι θέσεις δειγματοληψίας του ιζήματος.

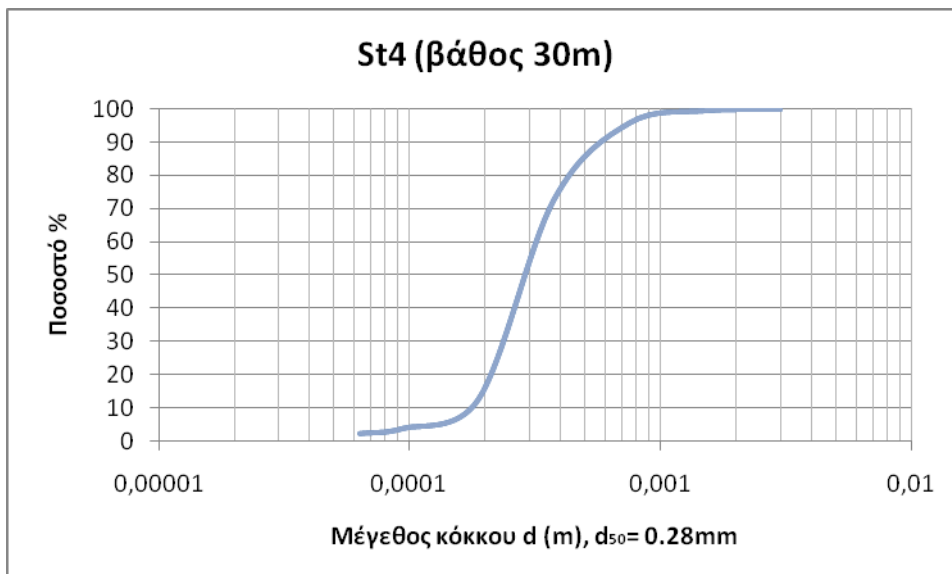


Σχήμα 2-3: Θέσεις δειγματοληψίας του ιζήματος του πυθμένα

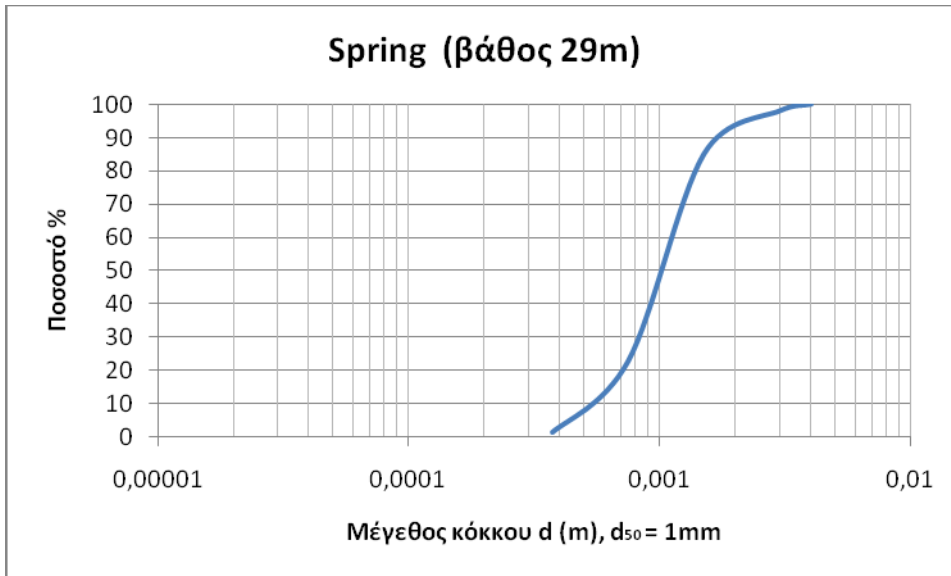
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες ιζημάτων των αντίστοιχων σταθμών δειγματοληψίας. Η διάμετρος  $d_{50}$  δηλώνει τη διάμετρο σπής κοσκίνου απ' όπου διέρχεται το 50% κατά βάρος του δείγματος.



Σχήμα 2-4: Κοκκομετρική καμπύλη ιζήματος στη θέση St2



Σχήμα 2-5: Κοκκομετρική καμπύλη ιζήματος στη θέση St4



Σχήμα 2-6: Κοκκομετρική καμπύλη ιζήματος στη θέση της πηγής

## 2.2 Ανεμολογικά στοιχεία

Η κύρια προέλευση των κυματισμών που φορτίζουν τα θαλάσσια έργα είναι ανεμογενής. Η κυματογένεση γίνεται με το πέρασμα της ενέργειας από τα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα στην επιφάνεια της θάλασσας. Η πρόγνωση του κύματος στηρίζεται σε στατιστικούς νόμους με βάση τη μετεωρολογική πρόβλεψη. Για το λόγο αυτό συλλέχθηκαν τα διαθέσιμα ανεμολογικά δεδομένα από την ΕΜΥ από τους πλησιέστερους στην περιοχή μελέτης σταθμούς.

Οι πλησιέστεροι μετεωρολογικοί σταθμοί της ΕΜΥ στην περιοχή της Στούπας βρίσκονται στην Καλαμάτα (γεωγραφικό πλάτος:  $37^{\circ}04'$ , γεωγραφικό μήκος:  $22^{\circ}00'$ , υψόμετρο: +11.1 m) και στην Μεθώνη (γεωγραφικό πλάτος:  $36^{\circ}50'$ , γεωγραφικό μήκος:  $21^{\circ}42'$ , υψόμετρο: +52.4 m). Τα ανεμολογικά δεδομένα που διαθέτει η ΕΜΥ είναι οι μέσες ετήσιες και μέσες μηνιαίες συχνότητες πνοής για κάθε διεύθυνση και ένταση ανέμου σε κλίμακα Beaufort και βασίζονται σε μετρήσεις και στατιστικές αναλύσεις για τα έτη 1978-2001, χρονικό διάστημα ικανοποιητικό για να δώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα της διάταξης των ανέμων που επικρατούν. Στον Πίνακα 2-1 που ακολουθεί παρατίθενται οι μέσες ετήσιες συχνότητες ανέμων. Οι αντίστοιχες μηνιαίες παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

Πίνακας 2-1-1: Ανεμολογικά στοιχεία από το μετεωρολογικό σταθμό ‘Μεθώνη’

**ΣΤΑΘΜΟΣ ΜΕΘΩΝΗΣ**

Μέσες ετήσιες συχνότητες ανέμων %

BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALM	SUM
0									4.702	4.702
1	0.438	0.767	0.252	0.131	0.131	0.307	0.471	0.263		2.760
2	3.353	7.999	2.202	1.381	0.811	1.940	4.536	4.175		26.397
3	2.400	4.504	1.918	1.677	0.745	2.038	6.980	7.309		27.571
4	0.844	1.063	1.929	1.633	0.515	1.523	7.835	8.328		23.670
5	0.153	0.088	0.909	0.690	0.186	0.800	3.550	3.057		9.433
6	0.033	0.033	0.559	0.329	0.066	0.405	1.446	1.194		4.065
7	0.011	0.011	0.164	0.066	0.011	0.164	0.394	0.208		1.029
8	0.000	0.000	0.033	0.011	0.011	0.077	0.142	0.044		0.318
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011	0.011		0.033
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011		0.022
>11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000
SUM	7.232	14.465	7.966	5.918	2.476	7.265	25.376	24.600	4.702	100.000

Πίνακας 2-1-2: Ανεμολογικά στοιχεία από το μετεωρολογικό σταθμό ‘Καλαμάτα’

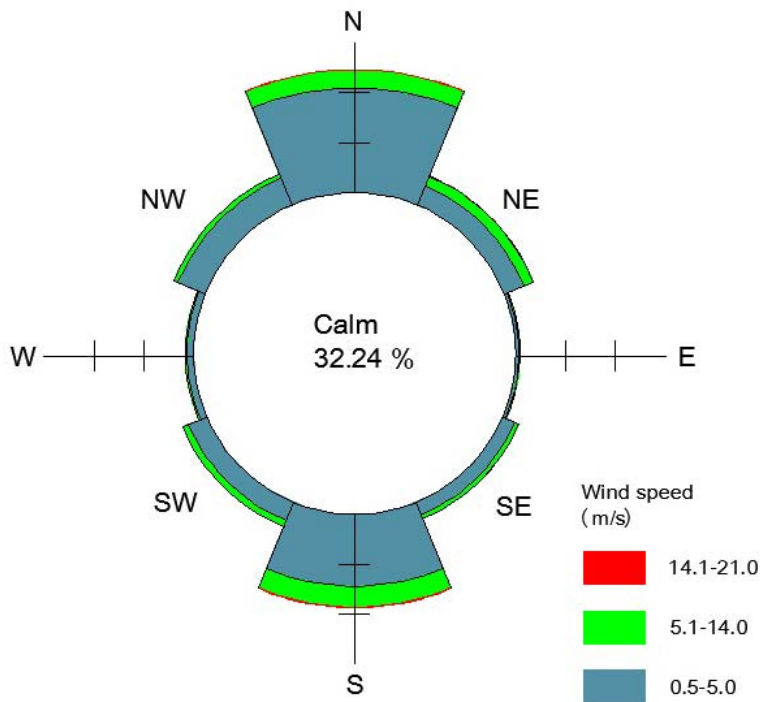
**ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ**

Μέσες ετήσιες συχνότητες ανέμων %

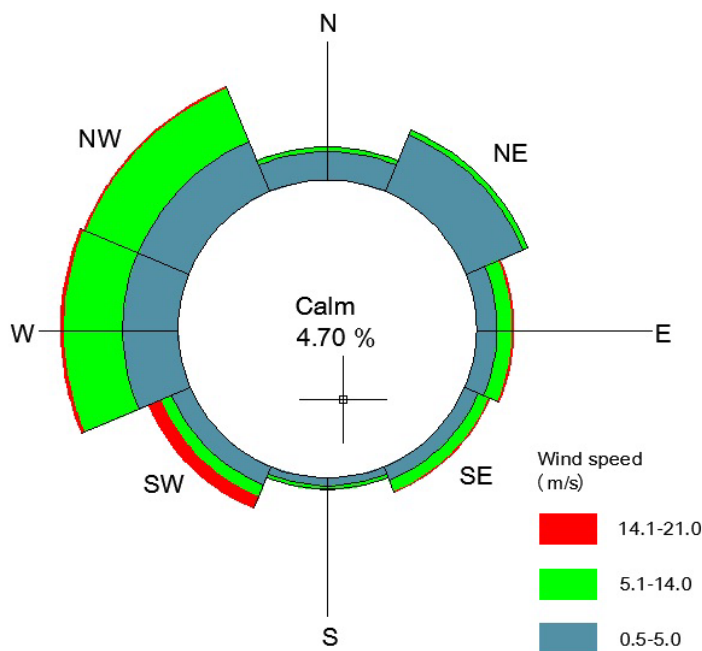
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALM	SUM
0									32.244	4.702
1	2.367	0.175	0.033	0.099	1.502	0.077	0.099	0.384		4.736
2	11.223	1.797	0.362	1.249	6.105	1.534	0.767	3.244		26.281
3	7.365	2.17	0.208	1.315	6.795	2.335	0.482	2.159		22.829
4	2.959	1.589	0.142	0.658	3.518	1.140	0.263	0.800		11.069
5	0.570	0.406	0.055	0.132	0.526	0.142	0.044	0.164		2.039
6	0.088	0.11	0.022	0.088	0.175	0.033	0.011	0.033		0.560
7	0.011	0.033	0.011	0.011	0.044	0.011	0.000	0.011		0.132
8	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.000	0.000		0.066
9	0.000	0.011	0.000	0.011	0.011	0.000	0.000	0.000		0.033
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000	0.000	0.000		0.011
>11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000
SUM	24.594	6.302	0.844	3.574	18.698	5.283	1.666	6.795	32.244	100.000



Από τα ετήσια στοιχεία κάθε σταθμού δημιουργήθηκε ένα ροδόγραμμα που αναπαριστά το ανεμολογικό καθεστώς της περιοχής. Για την υπό μελέτη περιοχή μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι άνεμοι του τομέα από τα Βορειοδυτικά έως τα Νότια, λόγω του προσανατολισμού της και της δυνατότητας κυματογένεσης κατά μήκος του αντίστοιχου τομέα πελάγους.



Σχήμα 2-7: Ροδόγραμμα σταθμού Καλαμάτας



Σχήμα 2-8: Ροδόγραμμα σταθμού Μεθώνης

Τα ανεμολογικά δεδομένα της ΕΜΥ, παρότι αξιόπιστα, δεν είναι ιδιαίτερα διαφωτιστικά όσον αφορά την καταγραφή ακραίων καιρικών συνθηκών. Η συλλογή των ανεμολογικών δεδομένων αποσκοπεί τελικά στη χρησιμοποίησή τους κατά τον υπολογισμό των κυματισμών και εν συνεχεία των υδροδυναμικών φορτίων, συγκεκριμένα των μέγιστων φορτίων, που ασκούνται σε ενδεχόμενες κατασκευές. Συνεπώς, για μια ασφαλή διαστασιολόγηση θα ήταν χρήσιμη η καταγραφή της διάρκειας και της έντασης ακραίων καιρικών συνθηκών και όχι μόνον οι μέσες τιμές τους.

Στον ελλαδικό χώρο τέτοιες καταγραφές διαθέτει μόνο το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. στα πλαίσια του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ. Το σύστημα αυτό, χάρη σε ένα δίκτυο πλωτών σταθμών μέτρησης, δίνει πληροφορίες για την μέση ταχύτητα  $U_w$ , την κατεύθυνση  $\theta_{wind}$  και την ριπή  $u_{gust}$  του ανέμου. Ο πλησιέστερος στην περιοχή της Στούπας σταθμός μέτρησης βρίσκεται στην Καλαμάτα.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα από το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ εισάγονται στο κυματικό μοντέλο προσομοίωσης WAM. Το μοντέλο WAM είναι μοντέλο 3<sup>ης</sup> γενιάς (περιλαμβάνει μη-γραμμικότητες, γενικά φάσματα) και είναι επίσημο ευρωπαϊκό μοντέλο προσομοίωσης κυματισμών. Το WAM καλύπτει με αδρό πλέγμα το Αιγαίο με ανάλυση  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ . Η περιοχή της Στούπας είναι κοντά σε τρία σημεία του πλέγματος ( $\phi_1=36.85^\circ$   $\lambda_1=22.2^\circ$ ,  $\phi_2=36.75^\circ$   $\lambda_2=22.2^\circ$ ,  $\phi_3=36.75^\circ$   $\lambda_3=22.3^\circ$ ). Για τα σημεία αυτά, με βάση την προσομοίωση του WAM, γνωρίζουμε για το χρονικό διάστημα 1995-2004 ανά τρεις ώρες τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου που υπολογίσθηκαν καθώς και το σημαντικό ύψος κύματος  $H_S$ , την κατεύθυνση και την περίοδο  $T_p$  της κορυφής του φάσματος. Τα σημεία φαίνονται στην παρακάτω δορυφορική Εικόνα 2-9. Λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων παραθέτουμε ενδεικτικά τη μέση και μέγιστη τιμή τους (Πίνακας 2-2).

Για την εκτίμηση του κυματικού κλίματος χρησιμοποιήθηκαν τόσο τα δεδομένα της ΕΜΥ όσο και τα δεδομένα από το ΕΛΚΕΘΕ μέσω της κυματικής πρόγνωσης του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ για πιο ασφαλή αποτελέσματα.



Σχήμα 2-9: Τα πλησιέστερα στην ανάβλυση σημεία (1,2,3) του πλέγματος του WAM

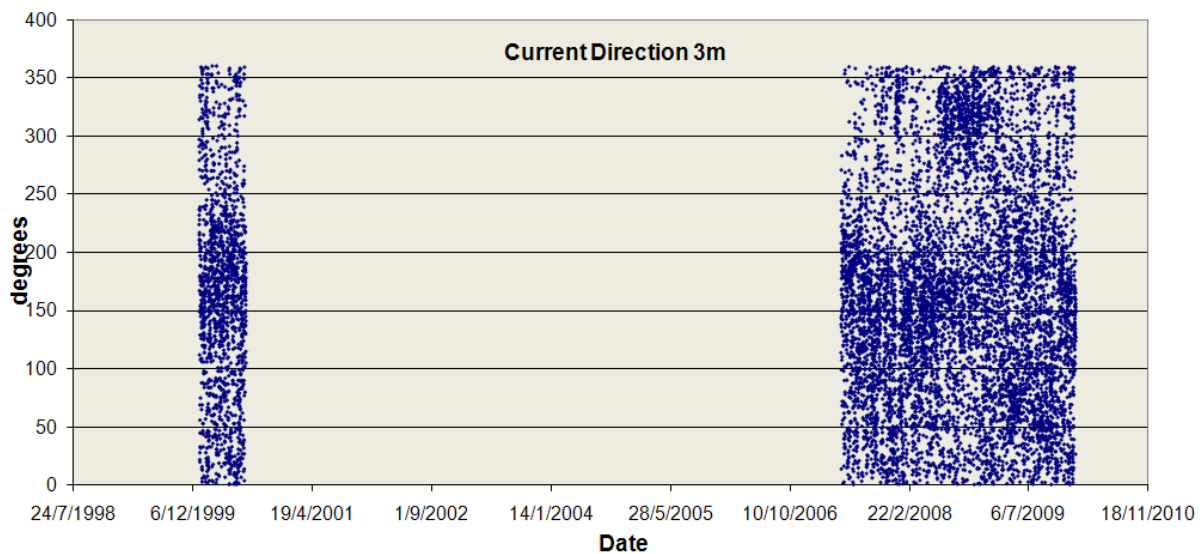
Πίνακας 2-2: Μέγιστες και μέσες τιμές των αποτελεσμάτων της κυματικής προσομοίωσης με το WAM για τα σημεία 1,2,3

	$H_s$ (m)		$T_p$ (s)		$H_{dir}$ (β)	Wind dir (β)	Wind velocity (m/s)	
	Max	Average	Max	Average	Average	Average	Max	Average
1	3.91	0.42	16.08	5.00	224.26	201.37	15.73	2.48
2	4.37	0.52	16.08	5.45	229.2	212.57	15.67	2.45
3	4.49	0.52	16.08	5.53	231.28	211.55	16.08	3.02

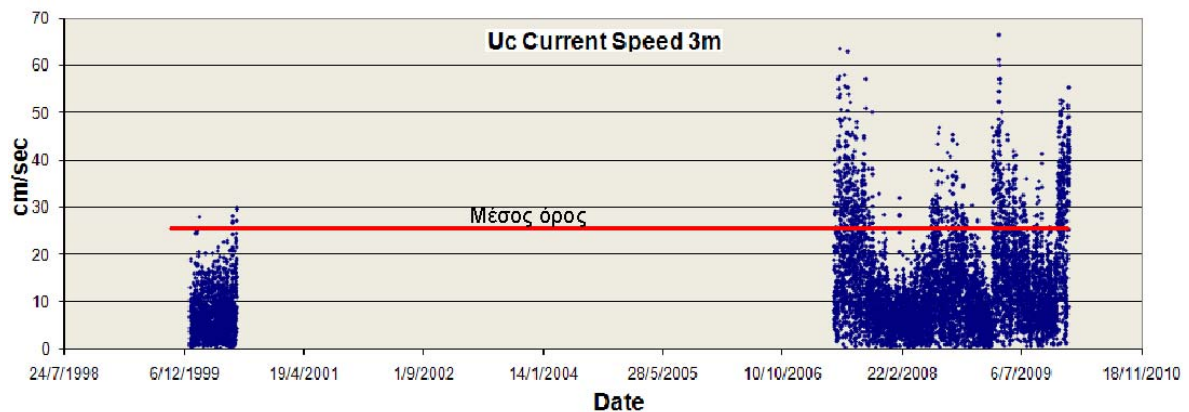
### 2.3 Στοιχεία ρευμάτων

Η κυκλοφορία των παράκτιων υδάτων στην περιοχή συναποτελείται από επί μέρους συνιστώσες ρευμάτων που αναπτύσσονται στο υδάτινο σώμα, όπως για παράδειγμα των ανεμογενών, των κυματογενών, των παλιρροιακών, της γενικής ωκεάνιας κυκλοφορίας, κλπ. Το πεδίο ταχυτήτων που προκύπτει αλλά και η συνακόλουθη διαφοροποίηση της ελεύθερης στάθμης σε σχέση με τη Μέση Στάθμη Ηρεμίας, επιβάλλουν υδροδυναμικές φορτίσεις στα παράκτια έργα και επιδρούν στη μορφολογία των ακτών.

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήματα 2-10 και 2-11) απεικονίζονται οι μετρήσεις που διενήργησε το ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ. αναφορικά με την κατεύθυνση και την ταχύτητα των ρευμάτων στο σταθμό της Καλαμάτας, βόρεια της υπόψη περιοχής μελέτης. Οι λήψεις των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν σε βάθος 3 μέτρων από την ίσαλο γραμμή, με περίοδο τριών ωρών στη διάρκεια της μέρας (8 καταγραφές). Στο σχήμα 2-10 διακρίνονται σημειακά οι διαθέσιμες μετρήσεις για δυο περιόδους: 1/1/2000-15/7/2000 και 11/5/2007-18/1/2010, οι οποίες δεν παρατίθενται αναλυτικά λόγω του μεγάλου όγκου τους, αλλά έχει γίνει επεξεργασία τους.



Σχήμα 2-10: Κατεύθυνση ρευμάτων στο σταθμό Καλαμάτας

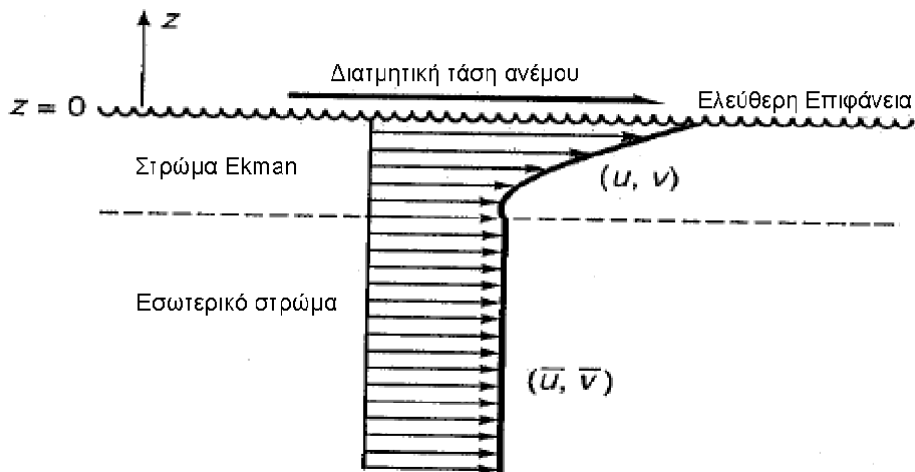


Σχήμα 2-11: Ταχύτητα ρευμάτων  $u_c$  στο σταθμό Καλαμάτας

Ο μέσος όρος της ταχύτητας, με στατιστική επεξεργασία των δεδομένων, προκύπτει ίσος με  $u_c = 25.1$  cm/s και η μέγιστη τιμή της  $u_{max} = 66.5$  cm/s. Τόσο για τον υπολογισμό

του πεδίου ταχυτήτων όσο και για τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς (φορτίο αιώρησης και πυθμένα) στα επόμενα κεφάλαια, η τιμή υπολογισμού του ρεύματος για τη συγκεκριμένη περιοχή της μελέτης επιλέχθηκε ίση με  $u_{cb} = 10 \text{ cm/s}$  κοντά στον πυθμένα σύμφωνα με το προφίλ μείωσης της ταχύτητας που λήφθηκε υπόψη.

Η επιφανειακή ζώνη θαλάσσιων ανεμογενών ρευμάτων δίνεται από το προφίλ του Σχήματος 2-12.



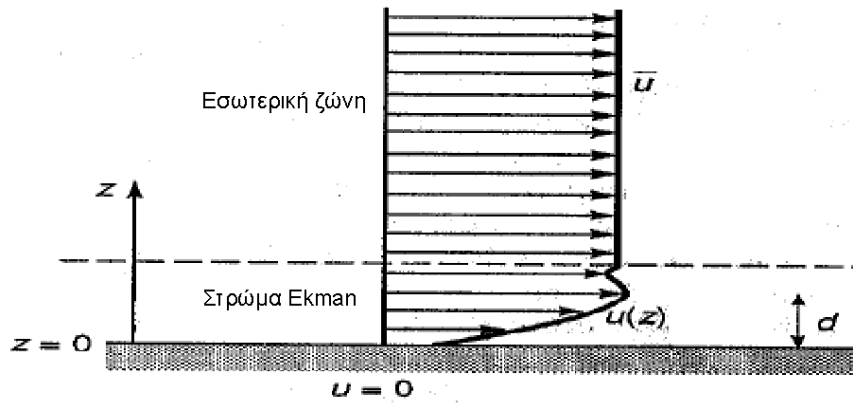
Σχήμα 2-12: Στρώμα Ekman στην επιφανειακή ζώνη.

Αντίστοιχα το προφίλ των ταχυτήτων του στρώματος Ekman στον πυθμένα (απεικονίζεται στο Σχήμα 2-13) δίνεται από τις σχέσεις:

$$-fv = \nu_T \frac{d^2u}{dz^2} \quad (2-1)$$

$$f(u - \bar{u}) = \nu_T \frac{d^2v}{dz^2} \quad (2-2)$$

Όπου  $u, v$  οι οριζόντιες ταχύτητες,  $\nu_T$  ο συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας και  $f$  η παράμετρος Coriolis.



Σχήμα 2-13: Στρώμα Ekman κοντά στον πυθμένα.

Για ομογενές ρευστό με επίπεδο πυθμένα και μηδενικές οριζόντιες κλίσεις ο αριθμός Ekman  $E_k = R/R_o = \text{αριθμός Reynolds}/\text{αριθμός Rossby} = \Omega d^2/\nu$ .

Στο στρώμα κοντά στον πυθμένα ο τοπικός αριθμός  $E_k \sim O(1)$ . Συνεπώς,  $\Omega d^2/\nu=1$  και  $d=(\nu/\Omega)^{1/2}$ , όπου  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα και  $\Omega$  η ταχύτητα περιστροφής της γης.

Για τον υπολογισμό του προφίλ της ταχύτητας κοντά στον πυθμένα χρησιμοποιούμε την παρακάτω λογαριθμική προσέγγιση (Soulsby 1997):

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \quad (2-3)$$

όπου  $u_*$  η ταχύτητα τριβής (ισούται με την τετραγωνική ρίζα της διατμητικής τάσης πυθμένα δια την πυκνότητα του νερού  $=(\tau_o/\rho)^{1/2}$ ),  $z_o$  η τραχύτητα πυθμένα και  $\kappa$  η σταθερά Von Karman=0.4

Το εύρος των βαθών που ισχύει η παραπάνω προσέγγιση είναι από λίγα εκατοστά πάνω από το θαλάσσιο πυθμένα έως 20-30% του συνολικού βάθους νερού (περίπου 2-3 m) για τα ρηχά νερά, ή 20-30% του οριακού στρώματος στα βαθιά νερά (περίπου 20-30 m).

Μια έκφραση που αποτυπώνει ικανοποιητικά την τραχύτητα πυθμένα είναι (Christoffersen and Jonsson, 1985):

$$z_o = \frac{k_s}{30} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-u_* k_s}{27\nu}\right) \right] + \frac{\nu}{9u_*} \quad (2-4)$$

όπου  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα και  $k_s$  ο αριθμός Nikuradse (ίσος με  $2d_{50}$ ). Η διατμητική τάση πυθμένα  $\tau_o$  που σχετίζεται με τη μέση κατά βάθος ταχύτητα ρεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_o = \rho C_D \bar{U}^2 \quad (2-5)$$

όπου ο συντελεστής σύρσεως  $C_D$  είναι ίσος με:

$$C_D = \frac{gn^2}{h^{1/3}},$$

ενώ  $n$  είναι ο συντελεστής Manning και  $h$  το βάθος νερού.

## 2.4 Πρόγνωση κυματισμών στα βαθειά νερά

### 2.4.1 Μεθοδολογία πρόγνωσης κυματισμού σύμφωνα με το Coastal Engineering Manual

Για τον υπολογισμό του κυματικού κλίματος στα ανοιχτά της περιοχής γίνεται η εκτίμηση του σημαντικού ύψους κύματος  $H_o$  και της περιόδου αιχμής  $T_p$  σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνεται από το Coastal Engineering Manual (C.E.M. 2008, Part II, Chapter 2).

Η επίδραση του ανέμου μιας συγκεκριμένης κατεύθυνσης θεωρείται ότι προκαλεί κυματογένεση σε ένα τομέα  $\pm 22.5^\circ$ , σύμφωνα με το CEM. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά μεγέθη των ανεμογενών κυματισμών είναι συναρτήσεις των εξής ανεξάρτητων μεταξύ τους μεταβλητών:

$F_{eff}$ : Ενεργό μήκος αναπτύγματος (fetch). Η γραμμική διάσταση του θαλάσσιου πεδίου από ακτή σε ακτή κατά μήκος της οποίας αναπτύσσεται ο κυματισμός. Επειδή ο άνεμος επιδρά σε ένα τομέα  $\pm 22.5^\circ$ , το ισοδύναμο μήκος αναπτύγματος ορίζεται ως εξής (SPM, 84):

$$F_{eff} = \frac{\sum_i F_i (\cos \alpha_i)^2}{\sum_i \cos \alpha_i} \quad (2-6)$$

$t_D$ : Διάρκεια πνοής του ανέμου

$U_{10}$ : Η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας.

Η ανάπτυξη του κύματος εξαρτάται και από τις τρεις παραπάνω παραμέτρους και διακρίνεται, ανάλογα με τις τιμές τους, στις εξής περιπτώσεις:

1. Συνθήκες fetch-limited: όταν ο άνεμος πνέει κατά μήκος του αναπτύγματος για χρονικό διάστημα  $t_D$  ικανό ώστε να επιτευχθούν οι μέγιστοι δυνατοί κυματισμοί για τις υπόψη συνθήκες.

2. Συνθήκες time-limited: όταν ο άνεμος επενεργεί για σχετικά μικρό χρονικό διάστημα σε μια περιοχή, με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσεται ο μέγιστος δυνατός κυματισμός.
3. Συνθήκες πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας: Στην περίπτωση αυτή η μεταφορά της ενέργειας από τον άνεμο στη θάλασσα δεν περιορίζεται ούτε από το ανάπτυγμα ούτε από τον χρόνο πνοής του ανέμου. Γνωρίζοντας το ύψος κύματος στην πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα γνωρίζουμε την μέγιστη τιμή που μπορεί αυτό να πάρει, για την υπόψη ένταση ανέμου.

Ο χρόνος  $t_D$  που απαιτείται για να αναπτυχθούν συνθήκες fetch-limited είναι:

$$t_{x,u} = 77.23 \cdot \frac{F_{eff}^{0.67}}{u_{10}^{0.34} g^{0.33}} \quad (2-7)$$

Εάν ο χρόνος πνοής είναι  $t_D > t_{x,u}$  τότε:

$$\frac{gH_o}{u_*^2} = 4.13 \cdot 10^{-2} \cdot \left( \frac{gF_{eff}}{u_*^2} \right)^{1/2} \quad (2-8)$$

$$\frac{gT_p}{u_*} = 0.751 \cdot \left( \frac{gF_{eff}}{u_*^2} \right)^{1/3} \quad (2-9)$$

όπου

$$u_* = C_D^{1/2} \cdot U_{10} \quad (2-10)$$

$$C_D = 0.001(1.1 + 0.035U_{10}) \quad (2-11)$$

ενώ  $H_o$  είναι το σημαντικό ύψος κύματος (m) (μέση τιμή του 1/3 των μεγαλύτερων κυμάτων που έχουν καταγραφεί),  $C_D$  ο συντελεστής σύρσεως και  $u_*$  η ταχύτητα τριβής του ανέμου

Εάν ο χρόνος πνοής  $t_D < t_{x,u}$  τότε έχουμε ανάπτυξη του κυματισμού με περιορισμό χρόνου και αντικαθιστούμε το fetch  $F$  με το ισοδύναμο  $F'$ :

$$\frac{gF'}{u_*^2} = 5.23 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{gt_D}{u_*} \right)^{3/2} \quad (2-12)$$

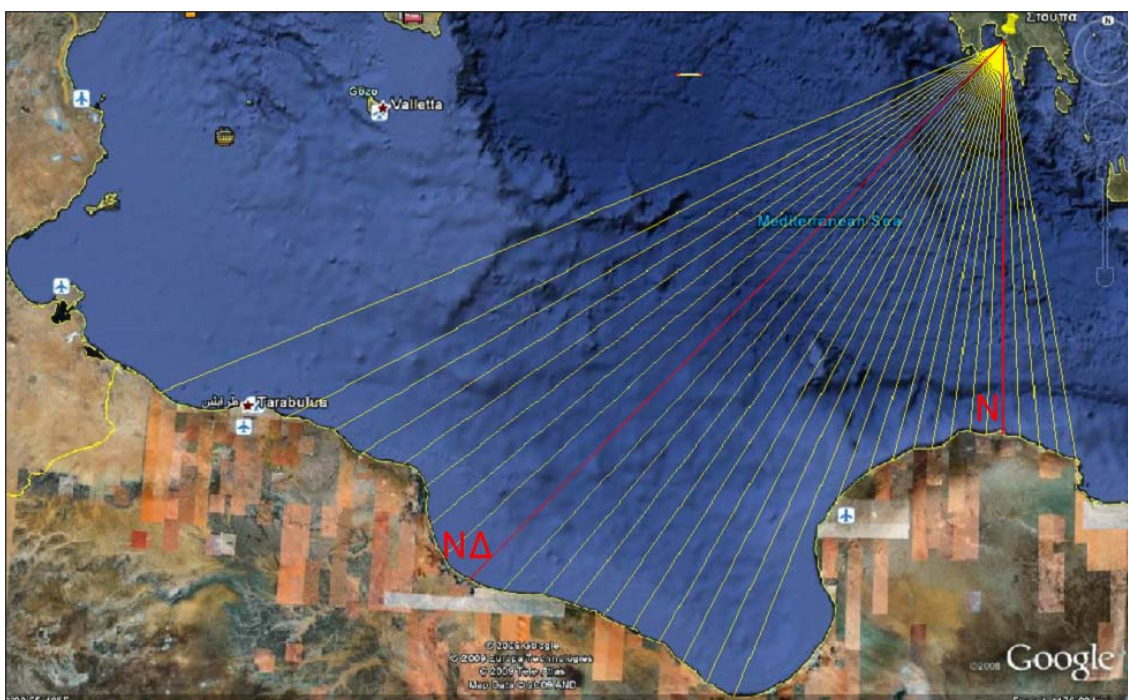
Για συνθήκες πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας έχουμε:

$$\frac{gH_o}{u_*^2} = 2.115 \cdot 10^2 \quad (2-13)$$



$$\frac{gT_p}{u_*} = 2.398 \cdot 10^2 \quad (2-14)$$

Η περιοχή της Στούπας είναι εκτεθειμένη σε νότιους, νοτιοδυτικούς, δυτικούς και βορειοδυτικούς ανέμους. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 2-15, η περιοχή δέχεται την κυματική ενέργεια που αναπτύσσεται ακόμα και από τις ακτές της Αφρικής, ενώ είναι γνωστό εμπειρικά ότι ο N-ΝΔ άνεμος πνέει συνεχόμενα για αρκετό χρονικό διάστημα. Για τον υπολογισμό του ενεργού μήκους αναπτύγματος των κυματισμών που επιδρούν στην περιοχή της Στούπας χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης XEE 22 INT 3418 της Υδρογραφικής Υπηρεσίας κλίμακας 1:250.000, καθώς και δορυφορικές εικόνες (Σχήμα 2-15).



Σχήμα 2-14: Πεδίο ανάπτυξης κυματισμών για την υπό μελέτη περιοχή

Το ενεργό μήκος ανάπτυξης του κυματισμού για κάθε διεύθυνση ανέμου υπολογίστηκε χωρίζοντας το πεδίο δράσης του ανά  $2,5^\circ$  με βάση τη σχέση (2-6), όπως φαίνεται στον Πίνακα 2-3.

Πίνακας 2-3: Ενεργό μήκος ανάπτυξης κυματισμών για Ν, ΝΔ, Δ και ΒΔ ανέμους.

ai	cosai	ΝΟΤΙΟΣ		ΝΟΤΙΟΔΥΤΙΚΟΣ		ΔΥΤΙΚΟΣ		ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΟΣ	
		Fi (m)	Fi*(cosai) <sup>2</sup>	Fi (m)	Fi*(cosai) <sup>2</sup>	Fi (m)	Fi*(cosai) <sup>2</sup>	Fi (m)	Fi*(cosai) <sup>2</sup>
-22,5	0,9239	791570	791570	1023786	873856,0	30603	26121,3	4265	3640,4
-20	0,9397	544543	544543	35687	31512,4	30102	26580,7	6987	6169,7
-17,5	0,9537	504203	504203	909558	827312,1	29884	27181,8	7167	6518,9
-15	0,9659	483471	483471	869565	811315,2	30052	28038,9	7207	6724,2
-12,5	0,9763	465796	465796	855369	815298,3	29814	28417,3	8790	8378,2
-10	0,9848	460806	460806	823731	798892,5	29542	28651,2	8788	8523,0
-7,5	0,9914	447718	447718	818889	804937,5	29634	29129,1	8975	8822,1
-5	0,9962	437265	437264	841237	834846,9	29247	29024,8	8780	8713,3
-2,5	0,9990	438840	438840	853108	851484,8	29044	28988,7	8866	8849,1
0	1,0000	437019	437019	849143	849143,0	28579	28579,0	9273	9273,0
2,5	0,9990	442958	442958	832856	831271,4	28647	28592,5	8814	8797,2
5	0,9962	454303	454304	806294	800169,3	28281	28066,2	8842	8774,8
7,5	0,9914	463962	463961	793561	780041,0	27196	26732,7	9396	9235,9
10	0,9848	473503	473503	784824	761158,7	26059	25273,2	31424	30476,5
12,5	0,9763	35289	473503	776794	740404,2	29134	27769,2	32137	30631,5
15	0,9659	35017	473503	774465	722585,7	29524	27546,3	32654	30466,6
17,5	0,9537	34827	473503	782306	711566,8	31318	28486,1	32531	29589,4
20	0,9397	26953	473503	790276	697831,3	34901	30818,4	31076	27440,8
22,5	0,9239	24230	473503	791570	675647,3	1023786	873856,0	30604	26122,1
Σ	18,4620		9213471		14219274,3		1377853,4		277146,9
<b>Feff (km)=</b>		<b>499,05</b>		<b>770,19</b>		<b>74,63</b>		<b>15,01</b>	

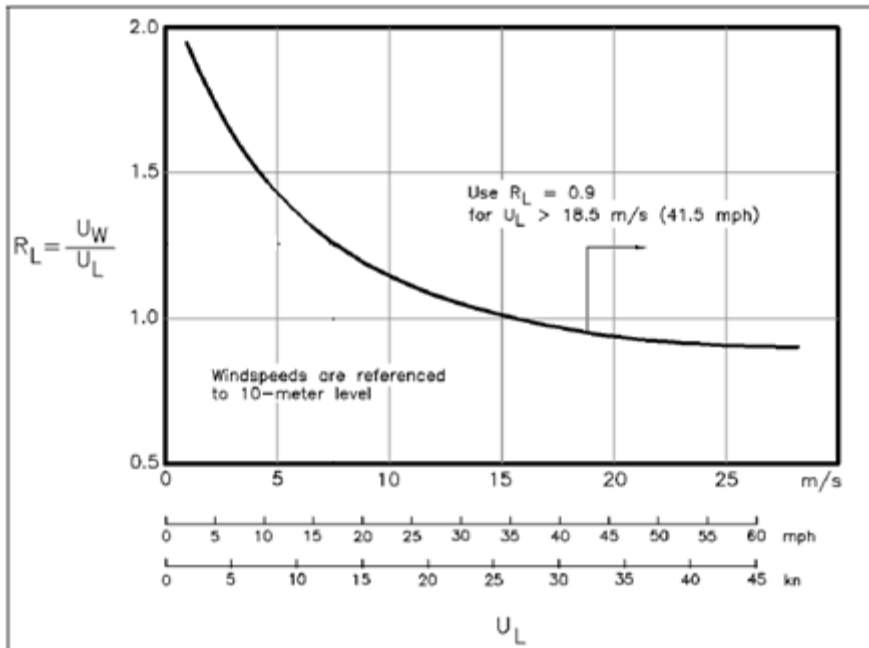
Η αντιστοιχία της έντασης των ανέμων σε κλίμακα Beaufort με την ταχύτητα  $U_{10}$  φαίνεται στον Πίνακα 2-4:

Πίνακας 2-4

Κλίμακα Beaufort	Ταχύτητα ανέμου (m/s)
0	<0.5
1	0.5-1.5
2	2.1-3.1
3	3.6-5.1
4	5.7-8.2
5	8.7-10.8
6	11.3-13.9
7	14.4-17.0
8	17.5-20.6
9	21.1-24.2

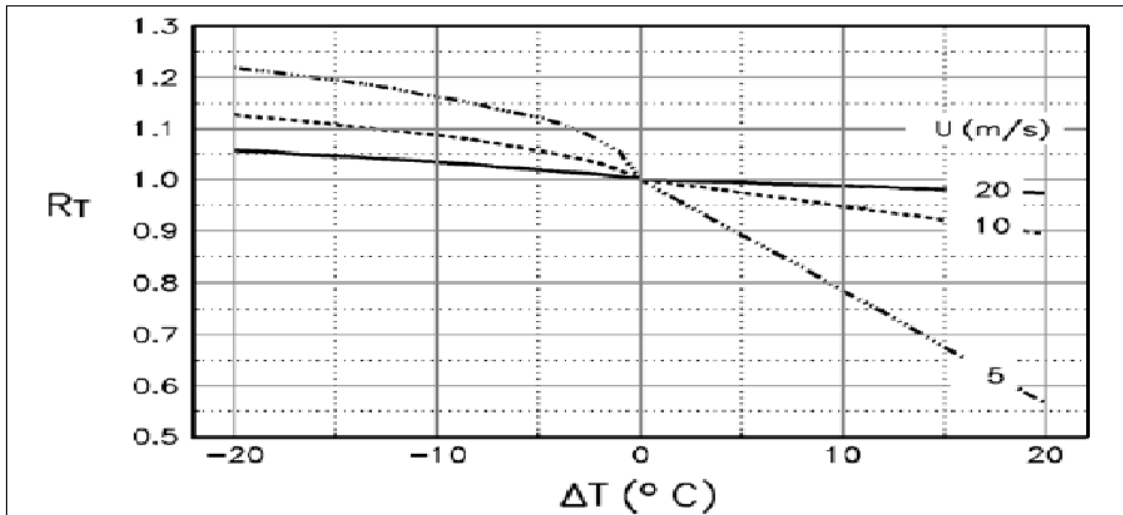
Στη συνέχεια προσαρμόζουμε την ταχύτητα  $U_{10}$  όταν αυτή δεν μετρείται επάνω από τη θάλασσα αλλά στη στεριά και ισχύει ότι το  $F_{eff} > 16$  km, δηλ. για τον νότιο, νοτιοδυτικό και δυτικό άνεμο, σύμφωνα με το Σχήμα 2-13, με βάση τη σχέση

$$R_L = \left( \frac{U_{10sea}}{U_{10land}} \right).$$



Σχήμα 2-15: Συντελεστής διόρθωσης  $R_L$

Τέλος, γίνεται διόρθωση στη ταχύτητα  $U_{10}$  εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ θαλασσινού νερού και ατμοσφαιρικού αέρα, πολλαπλασιάζοντας με τον συντελεστή  $R_T$ . Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας προκαλεί αστάθεια του οριακού στρώματος επάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, με αποτέλεσμα κατά τους χειμερινούς μήνες μια επαύξηση των ταχυτήτων ανέμου. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας θάλασσας και ατμοσφαιρικού αέρα είναι άγνωστη προτείνεται από το CEM η τιμή  $R_T=1.1$ .



Σχήμα 2-16: Συντελεστής διόρθωσης  $R_T$

Η ταχύτητα  $U_{10}$  με την οποία τελικά θα γίνει η πρόγνωση του κυματισμού δίνεται στον Πίνακα 2-5:

Πίνακας 2-5: Ταχύτητα  $U_{10}$  (m/s)

	$U_{10}$ (m/s)			
	BΔ	Δ	NΔ	N
beauf 3	6.73	7.57	7.57	7.57
beauf 4	10.82	10.37	10.37	10.37
beauf 5	14.26	12.47	12.47	12.47
beauf 6	18.35	15.29	15.29	15.29
beauf 7	22.44	16.83	16.83	16.83
beauf 8	27.19	20.39	20.39	20.39
beauf 9	31.94	23.96	23.96	23.96

Ως διάρκεια πνοής ανέμου  $t_D$  (για κάθε διεύθυνση και ένταση ανέμου) έχουμε θεωρήσει τη διάρκεια που προκύπτει από τη μέγιστη μηνιαία συχνότητα, με βάση τα ανεμολογικά δεδομένα της EMY, ανάγοντάς την σε χρόνο (h). Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε πως λόγω της μικρής μηνιαίας συχνότητας πνοής ισχυρών ανέμων που μας δίνουν τα ανεμολογικά στοιχεία της EMY, η μεθοδολογία της πρόγνωσης κυματισμού ακολουθήθηκε και για διάρκεια πνοής  $t_D$  ίση με το άθροισμα της διάρκειας πνοής των δύο δυσμενέστερων συνεχόμενων μηνών (για κάθε διεύθυνση και ένταση ανέμου) καθώς και για διάρκεια πνοής  $t_D = t_{x,u}$ , δηλαδή για fetch-limited συνθήκες. Σκοπός της επιλογής αυτής είναι το αντιστάθμισμα της έλλειψης καταγραφών ακραίων καιρικών

φαινομένων και η απόκτηση μιας εικόνας για μια πιθανή ακραία κατάσταση της θάλασσας.

Γνωρίζοντας τις παραμέτρους  $F_{\text{eff}}$ ,  $t_D$ ,  $U_{10}$ , ακολουθούμε τη μεθοδολογία πρόγνωσης κυματισμών του CEM (σχέσεις 2-7 έως 2-14). Σημειώνεται ότι η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το ύψος  $H$  και η περίοδος  $T$  του κύματος για κάθε ένταση ανέμου περιορίζεται από τις τιμές που μας δίνουν οι σχέσεις (2-13) και (2-14) για πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα. Καταλήγουμε λοιπόν στους παρακάτω κυματισμούς (Πίνακες 2-6 και 2-7) με βάση τα ανεμολογικά στοιχεία των δύο σταθμών, Καλαμάτα και Μεθώνη.

2.4.2 Πρόγνωση κυματισμού με βάση τα δεδομένα του σταθμού της Καλαμάτας

Πίνακας 2-6-1: Πρόγνωση κυματισμού με βάση τα δεδομένα του σταθμού της Καλαμάτας, για  $t_D$  ίσο με τη μέγιστη μηνιαία διάρκεια πνοής.

	$F_{eff}$ (km)		$u_*$ (m/s)	$t_D$ (h)	$t_{x,u}$ (h)		$g X/u_*^2$	$g H_{mo}/u_*^2$	$g T_p/u_*$	$H_{mo}$ (m)	$T_p$ (s)
BΔ	14.48	beauf 3	0.246	22.53	3.24	$t > t_{x,u}$	2346747.9	63.27	99.80	0.39	2.50
		beauf 4	0.416	9.14	2.76	$t > t_{x,u}$	819862.1	37.40	70.29	0.66	2.98
		beauf 5	0.570	2.79	2.51	$t > t_{x,u}$	437123.9	27.31	57.00	0.90	3.31
		beauf 6	0.766	0.64	2.30	$t < t_{x,u}$	242196.1	6.73	22.41	0.40	1.75
		beauf 7	0.974	0.08	2.15	$t < t_{x,u}$	149619.6	1.17	6.98	0.11	0.69
		beauf 8	1.232	0.00	2.01	$t < t_{x,u}$	-	-	-	-	-
Δ	71.78	beauf 3	0.280	5.12	9.09	$t < t_{x,u}$	8993391.2	68.06	104.78	0.54	2.99
		beauf 4	0.397	3.44	8.17	$t < t_{x,u}$	4473042.8	38.89	72.15	0.62	2.92
		beauf 5	0.489	0.70	7.68	$t < t_{x,u}$	2945119.9	10.05	29.27	0.24	1.46
		beauf 6	0.618	0.31	7.16	$t < t_{x,u}$	1842043.5	4.58	17.35	0.18	1.09
		beauf 7	0.692	0.00	6.93	$t < t_{x,u}$	-	-	-	-	-
		beauf 8	0.869	0.00	6.49	$t < t_{x,u}$	-	-	-	-	-
NΔ	721.15	beauf 3	0.280	23.62	42.67	$t < t_{x,u}$	90353636.8	214.25	225.06	1.69	6.42
		beauf 4	0.397	14.56	38.34	$t < t_{x,u}$	24976153.3	114.71	148.39	1.84	6.00
		beauf 5	0.489	2.02	36.01	$t < t_{x,u}$	9530873.7	22.26	49.74	0.54	2.48
		beauf 6	0.618	0.68	33.61	$t < t_{x,u}$	3744408.5	8.24	25.63	0.32	1.62
		beauf 7	0.692	0.16	32.53	$t < t_{x,u}$	894130.5	2.54	11.71	0.12	0.83
		beauf 8	0.869	0.08	30.47	$t < t_{x,u}$	297304.1	1.27	7.39	0.10	0.65
N	295.52	beauf 3	0.280	70.01	23.47	$t > t_{x,u}$	12871623.7	484.07	387.51	1.69	6.84
		beauf 4	0.397	54.52	21.09	$t > t_{x,u}$	9366169.7	308.80	287.16	2.84	8.02
		beauf 5	0.489	6.79	19.81	$t < t_{x,u}$	2070922.4	55.35	91.29	1.35	4.55
		beauf 6	0.618	3.23	18.49	$t < t_{x,u}$	368765.6	26.56	55.96	1.04	3.53
		beauf 7	0.692	1.32	17.89	$t < t_{x,u}$	35262.8	12.48	33.82	0.61	2.38
		beauf 8	0.869	0.64	16.76	$t < t_{x,u}$	7617.2	6.13	21.05	0.47	1.86
		beauf 9	1.055	0.08	15.87	$t < t_{x,u}$	711.41	1.10	6.70	0.12	0.72

Πίνακας 2-6-2: Πρόγνωση κυματισμού με βάση τα δεδομένα του σταθμού της Καλαμάτας, για  $t_D$  ίσο με το άθροισμα της διάρκειας πνοής των δύο δυσμενέστερων συνεχόμενων μηνών.

	$F_{eff}$ (km)		$u_*$ (m/s)	$t_D$ (h)	$t_{x,u}$ (h)		$g X/u_*^2$	$g H_{mo}/u_*^2$	$g T_p/u_*$	$H_{mo}$ (m)	$T_p$ (s)
BΔ	14.48	beauf 3	0.246	42.53	3.24	$t > t_{x,u}$	2346747.9	63.27	99.80	0.39	2.50
		beauf 4	0.416	18.17	2.76	$t > t_{x,u}$	819862.1	37.40	70.29	0.66	2.98
		beauf 5	0.570	5.10	2.51	$t > t_{x,u}$	437123.9	27.31	57.00	0.90	3.31
		beauf 6	0.766	1.03	2.30	$t < t_{x,u}$	242196.1	9.61	28.41	0.57	2.22
		beauf 7	0.974	0.08	2.15	$t < t_{x,u}$	149619.6	1.17	6.98	0.11	0.69
		beauf 8	1.232	0.00	2.01	$t < t_{x,u}$	-	-	-	-	-
Δ	71.78	beauf 3	0.280	8.99	9.09	$t < t_{x,u}$	8993391.2	103.86	138.88	0.83	3.96
		beauf 4	0.397	5.30	8.17	$t < t_{x,u}$	4473042.8	53.76	89.54	0.86	3.62
		beauf 5	0.489	1.04	7.68	$t < t_{x,u}$	2945119.9	13.51	35.66	0.33	1.78
		beauf 6	0.618	0.47	7.16	$t < t_{x,u}$	1842043.5	6.24	21.31	0.24	1.34
		beauf 7	0.692	0.00	6.93	$t < t_{x,u}$	-	-	-	-	-
		beauf 8	0.869	0.00	6.49	$t < t_{x,u}$	-	-	-	-	-

	$F_{\text{eff}}$ (km)		$u^*$ (m/s)	$t_D$ (h)	$t_{x,u}$ (h)		$g X/u_*^2$	$g H_{mo}/u_*^2$	$g T_p/u_*$	$H_{mo}$ (m)	$T_p$ (s)
		beauf 9	1.055	0.00	6.15	$t < t_{x,u}$	-	-	-	-	-
NΔ	721.15	beauf 3	0.280	46.33	42.67	$t > t_{x,u}$	90353636.8	392.58	336.99	1.69	6.84
		beauf 4	0.397	28.66	38.34	$t < t_{x,u}$	24976153.3	190.63	208.19	3.06	8.42
		beauf 5	0.489	3.54	36.01	$t < t_{x,u}$	9530873.7	33.98	65.93	0.83	3.29
		beauf 6	0.618	1.18	33.61	$t < t_{x,u}$	3744408.5	12.50	33.86	0.49	2.13
		beauf 7	0.692	0.16	32.53	$t < t_{x,u}$	894130.5	2.54	11.71	0.12	0.83
		beauf 8	0.869	0.08	30.47	$t < t_{x,u}$	297304.1	1.27	7.39	0.10	0.65
		beauf 9	1.055	0.00	28.85	$t < t_{x,u}$	-	-	-	-	-
N	295.52	beauf 3	0.280	136.55	23.47	$t > t_{x,u}$	12871623.7	251.31	250.31	1.69	6.84
		beauf 4	0.397	98.82	21.09	$t > t_{x,u}$	9366169.7	177.23	198.32	2.84	8.02
		beauf 5	0.489	12.34	19.81	$t < t_{x,u}$	2070922.4	86.64	123.07	2.11	6.13
		beauf 6	0.618	6.17	18.49	$t < t_{x,u}$	368765.6	43.21	77.39	1.68	4.88
		beauf 7	0.692	1.88	17.89	$t < t_{x,u}$	35262.8	16.29	40.39	0.79	2.85
		beauf 8	0.869	0.80	16.76	$t < t_{x,u}$	7617.2	7.23	23.50	0.56	2.08
		beauf 9	1.055	0.08	15.87	$t < t_{x,u}$	711.4	1.10	6.70	0.12	0.72

Πίνακας 2-6-3: Πρόγνωση κυματισμού με βάση τα δεδομένα του σταθμού της Καλαμάτας, για  $t_D$  ίσο με  $t_{x,u}$ , δηλαδή για fetch-limited συνθήκες.

	$F_{\text{eff}}$ (km)		$u^*$ (m/s)	$t_D=t_{x,u}$ (h)	$g X/u_*^2$	$g H_{mo}/u_*^2$	$g T_p/u_*$	$H_{mo}$ (m)	$T_p$ (s)
BΔ	14.48	beauf 3	0.246	3.24	2346747.9	63.27	99.80	0.39	2.50
		beauf 4	0.416	2.76	819862.1	37.40	70.29	0.66	2.98
		beauf 5	0.570	2.51	437123.9	27.31	57.00	0.90	3.31
		beauf 6	0.766	2.30	242196.1	20.33	46.81	1.22	3.65
		beauf 7	0.974	2.15	149619.6	15.98	39.87	1.55	3.96
		beauf 8	1.232	2.01	53770.0	12.64	34.10	1.95	4.28
		beauf 9	1.504	1.91	2267.2	10.35	29.85	2.39	4.58
Δ	71.78	beauf 3	0.280	9.09	8993391.2	123.85	156.18	0.99	4.45
		beauf 4	0.397	8.17	4473042.8	87.35	123.74	1.40	5.00
		beauf 5	0.489	7.68	2945119.9	70.88	107.65	1.73	5.37
		beauf 6	0.618	7.16	1842043.5	56.05	92.06	2.18	5.80
		beauf 7	0.692	6.93	2161939.9	50.10	85.43	2.44	6.02
		beauf 8	0.869	6.49	460116.5	39.90	73.40	3.07	6.50
		beauf 9	1.055	6.15	14049.9	32.86	64.48	3.73	6.93
NΔ	721.15	beauf 3	0.280	42.67	90353636.8	392.58	336.99	1.69	6.84
		beauf 4	0.397	38.34	24976153.3	276.86	267.00	3.39	9.70
		beauf 5	0.489	36.01	9530873.7	224.65	232.28	5.15	11.95
		beauf 6	0.618	33.61	3744408.5	177.67	198.65	6.92	12.52
		beauf 7	0.692	32.53	894130.5	158.82	184.33	7.75	13.00
		beauf 8	0.869	30.47	297304.1	126.47	158.37	9.73	14.02
		beauf 9	1.055	28.85	3696.6	104.14	139.13	11.81	14.96
N	295.52	beauf 3	0.280	23.47	12871623.7	251.31	250.31	1.69	6.84
		beauf 4	0.397	21.09	9366169.7	177.23	198.32	2.84	8.02
		beauf 5	0.489	19.81	2070922.4	143.81	172.53	3.51	8.60
		beauf 6	0.618	18.49	368765.6	113.73	147.55	4.43	9.30
		beauf 7	0.692	17.89	35262.8	101.67	136.92	4.96	9.65
		beauf 8	0.869	16.76	7617.2	80.96	117.63	6.23	10.41
		beauf 9	1.055	15.87	711.4	66.66	103.34	7.56	11.11

### 2.4.3 Πρόγνωση κυματισμού με βάση τα δεδομένα του σταθμού της Μεθώνης

Πίνακας 2-7-1: Πρόγνωση κυματισμού με βάση τα δεδομένα του σταθμού της Μεθώνης, για  $t_D$  ίσο με τη μέγιστη μηνιαία διάρκεια πνοής.

	$F_{eff}$ (km)		$u_*$ (m/s)	$t_D$ (h)	$t_{x,u}$ (h)		$g X/u_*^2$	$g H_{mo}/u_*^2$	$g T_p/u_*$	$H_{mo}$ (m)	$T_p$ (s)
BΔ	14.48	beauf 3	0.246	88.63	3.24	$t > t_{x,u}$	2346747.9	63.27	99.80	0.39	2.50
		beauf 4	0.416	105.47	2.76	$t > t_{x,u}$	819862.1	37.40	70.29	0.66	2.98
		beauf 5	0.570	40.44	2.51	$t > t_{x,u}$	437123.9	27.31	57.00	0.90	3.31
		beauf 6	0.766	14.09	2.30	$t > t_{x,u}$	242196.1	20.33	46.81	1.22	3.65
		beauf 7	0.974	3.18	2.15	$t > t_{x,u}$	149619.6	15.98	39.87	1.55	3.96
		beauf 8	1.232	0.93	2.01	$t < t_{x,u}$	53770.0	6.23	21.28	0.96	2.67
		beauf 9	1.504	0.09	1.91	$t < t_{x,u}$	2267.2	0.90	5.86	0.21	0.90
Δ	71.78	beauf 3	0.280	91.27	9.09	$t > t_{x,u}$	8993391.2	123.85	156.18	0.99	4.45
		beauf 4	0.397	99.50	8.17	$t > t_{x,u}$	4473042.8	87.35	123.74	1.40	5.00
		beauf 5	0.489	39.74	7.68	$t > t_{x,u}$	2945119.9	70.88	107.65	1.73	5.37
		beauf 6	0.618	16.72	7.16	$t > t_{x,u}$	1842043.5	56.05	92.06	2.18	5.80
		beauf 7	0.692	7.04	6.93	$t > t_{x,u}$	2161939.9	50.10	85.43	2.44	6.02
		beauf 8	0.869	3.10	6.49	$t < t_{x,u}$	460116.5	19.96	46.25	1.53	4.10
		beauf 9	1.055	0.32	6.15	$t < t_{x,u}$	14049.9	3.12	13.43	0.35	1.44
NΔ	721.15	beauf 3	0.280	22.01	42.67	$t < t_{x,u}$	90353636.8	203.23	217.27	1.62	6.20
		beauf 4	0.397	18.81	38.34	$t < t_{x,u}$	24976153.3	139.04	168.69	2.23	6.82
		beauf 5	0.489	11.38	36.01	$t < t_{x,u}$	9530873.7	81.51	118.16	1.99	5.89
		beauf 6	0.618	7.43	33.61	$t < t_{x,u}$	3744408.5	49.66	84.92	1.94	5.35
		beauf 7	0.692	3.72	32.53	$t < t_{x,u}$	894130.5	27.15	56.77	1.32	4.00
		beauf 8	0.869	1.86	30.47	$t < t_{x,u}$	297304.1	13.61	35.83	1.05	3.17
		beauf 9	1.055	0.16	28.85	$t < t_{x,u}$	3696.6	1.85	9.48	0.21	1.02
N	295.52	beauf 3	0.280	8.32	23.47	$t < t_{x,u}$	12871623.7	98.00	133.61	0.78	3.81
		beauf 4	0.397	10.61	21.09	$t < t_{x,u}$	9366169.7	90.46	126.66	1.45	5.12
		beauf 5	0.489	4.10	19.81	$t < t_{x,u}$	2070922.4	37.94	70.97	0.92	3.54
		beauf 6	0.618	1.63	18.49	$t < t_{x,u}$	368765.6	15.90	39.74	0.62	2.50
		beauf 7	0.692	0.39	17.89	$t < t_{x,u}$	35262.8	5.00	18.37	0.24	1.30
		beauf 8	0.869	0.00	16.76	$t < t_{x,u}$	-	-	-	-	-
		beauf 9	1.055	0.00	15.87	$t < t_{x,u}$	-	-	-	-	-

Πίνακας 2-7-2: Πρόγνωση κυματισμού με βάση τα δεδομένα του σταθμού της Μεθώνης, για  $t_D$  ίσο με το άθροισμα της διάρκειας πνοής των δύο δυσμενέστερων συνεχόμενων μηνών.

	$F_{eff}$ (km)		$u_*$ (m/s)	$t_D$ (h)	$t_{x,u}$ (h)		$g X/u_*^2$	$g H_{mo}/u_*^2$	$g T_p/u_*$	$H_{mo}$ (m)	$T_p$ (s)
BΔ	14.48	beauf 3	0.246	176.01	3.24	$t > t_{x,u}$	2346747.9	63.27	99.80	0.39	2.50
		beauf 4	0.416	205.50	2.76	$t > t_{x,u}$	819862.1	37.40	70.29	0.66	2.98
		beauf 5	0.570	75.88	2.51	$t > t_{x,u}$	437123.9	27.31	57.00	0.90	3.31
		beauf 6	0.766	26.97	2.30	$t > t_{x,u}$	242196.1	20.33	46.81	1.22	3.65
		beauf 7	0.974	6.24	2.15	$t > t_{x,u}$	149619.6	15.98	39.87	1.55	3.96
		beauf 8	1.232	1.65	2.01	$t < t_{x,u}$	53770.0	9.58	28.35	1.48	3.56
		beauf 9	1.504	0.24	1.91	$t < t_{x,u}$	2267.2	1.97	9.87	0.45	1.51
Δ	71.78	beauf 3	0.280	172.58	6.19	$t > t_{x,u}$	8993391.2	123.85	156.18	0.99	4.45
		beauf 4	0.397	184.52	6.78	$t > t_{x,u}$	4473042.8	87.35	123.74	1.40	5.00
		beauf 5	0.489	77.91	7.15	$t > t_{x,u}$	2945119.9	70.88	107.65	1.73	5.37



	$F_{\text{eff}}$ (km)		$u_*$ (m/s)	$t_D$ (h)	$t_{x,u}$ (h)		$g X/u_*^2$	$g H_{mo}/u_*^2$	$g T_p/u_*$	$H_{mo}$ (m)	$T_p$ (s)
		beauf 6	0.618	26.71	7.56	$t > t_{x,u}$	1842043.5	56.05	92.06	2.18	5.80
		beauf 7	0.692	13.07	7.76	$t > t_{x,u}$	1471843.802	50.10	85.43	2.44	6.02
		beauf 8	0.869	5.22	8.17	$t < t_{x,u}$	460116.5	28.01	57.98	2.15	5.13
		beauf 9	1.055	0.56	8.52	$t < t_{x,u}$	14049.9	4.90	18.12	0.56	1.95
NΔ	721.15	beauf 3	0.280	42.70	42.67	$t > t_{x,u}$	90353636.8	392.58	336.99	1.69	6.84
		beauf 4	0.397	31.86	38.34	$t < t_{x,u}$	24976153.3	206.40	219.52	3.31	8.88
		beauf 5	0.489	20.66	36.01	$t < t_{x,u}$	9530873.7	127.50	159.23	3.11	7.94
		beauf 6	0.618	14.01	33.61	$t < t_{x,u}$	3744408.5	79.92	116.62	3.11	7.35
		beauf 7	0.692	6.03	32.53	$t < t_{x,u}$	894130.5	39.05	72.35	1.90	5.10
		beauf 8	0.869	3.64	30.47	$t < t_{x,u}$	297304.1	22.52	50.12	1.73	4.44
		beauf 9	1.055	0.24	28.85	$t < t_{x,u}$	3696.6	2.51	11.61	0.28	1.25
N	295.52	beauf 3	0.280	14.44	23.47	$t < t_{x,u}$	12871623.7	148.17	176.00	1.18	5.02
		beauf 4	0.397	16.57	21.09	$t < t_{x,u}$	9366169.7	126.40	158.30	2.03	6.40
		beauf 5	0.489	7.47	19.81	$t < t_{x,u}$	2070922.4	59.43	95.73	1.45	4.77
		beauf 6	0.618	2.99	18.49	$t < t_{x,u}$	368765.6	25.08	53.85	0.98	3.39
		beauf 7	0.692	0.70	17.89	$t < t_{x,u}$	35262.8	7.76	24.63	0.38	1.74
		beauf 8	0.869	0.32	16.76	$t < t_{x,u}$	7617.2	3.60	14.78	0.28	1.31
		beauf 9	1.055	0.00	15.87	$t < t_{x,u}$	-	-	-	-	-

Πίνακας 2-7-3: Πρόγνωση κυματισμού με βάση τα δεδομένα του σταθμού της Μεθώνης, για  $t_D$  ίσο με  $t_{x,u}$ , δηλαδή για fetch-limited συνθήκες.

	$F_{\text{eff}}$ (km)		$u_*$ (m/s)	$t_D=t_{x,u}$ (h)	$g X/u_*^2$	$g H_{mo}/u_*^2$	$g T_p/u_*$	$H_{mo}$ (m)	$T_p$ (s)
BΔ	14.48	beauf 3	0.246	3.24	2346747.9	63.27	99.80	0.39	2.50
		beauf 4	0.416	2.76	819862.1	37.40	70.29	0.66	2.98
		beauf 5	0.570	2.51	437123.9	27.31	57.00	0.90	3.31
		beauf 6	0.766	2.30	242196.1	20.33	46.81	1.22	3.65
		beauf 7	0.974	2.15	149619.6	15.98	39.87	1.55	3.96
		beauf 8	1.232	2.01	53770.0	12.64	34.10	1.95	4.28
		beauf 9	1.504	1.91	2267.2	10.35	29.84	2.39	4.58
Δ	71.78	beauf 3	0.280	6.19	8993391.2	123.85	156.18	0.99	4.45
		beauf 4	0.397	6.78	4473042.8	87.35	123.74	1.40	5.00
		beauf 5	0.489	7.15	2945119.9	70.88	107.65	1.73	5.37
		beauf 6	0.618	7.56	1842043.5	56.05	92.06	2.18	5.80
		beauf 7	0.692	7.76	2161939.9	50.10	85.43	2.44	6.02
		beauf 8	0.869	8.17	460116.5	39.90	73.40	3.07	6.50
		beauf 9	1.055	8.52	14049.9	32.85	64.48	3.73	6.93
NΔ	721.15	beauf 3	0.280	42.67	90353636.8	392.58	336.99	1.69	6.84
		beauf 4	0.397	38.34	24976153.3	276.86	267.00	3.39	9.70
		beauf 5	0.489	36.01	9530873.7	224.65	232.28	5.15	11.58
		beauf 6	0.618	33.61	3744408.5	177.67	198.65	6.92	12.52
		beauf 7	0.692	32.53	894130.5	158.82	184.33	7.75	13.00
		beauf 8	0.869	30.47	297304.1	126.47	158.37	9.73	14.02
		beauf 9	1.055	28.85	3696.6	104.14	139.13	11.81	14.96
N	295.52	beauf 3	0.280	23.47	12871623.7	251.31	250.31	1.69	6.84
		beauf 4	0.397	21.09	9366169.7	177.23	198.32	2.84	8.02
		beauf 5	0.489	19.81	2070922.4	143.81	172.53	3.51	8.60
		beauf 6	0.618	18.49	368765.6	113.73	147.55	4.43	9.30

	$F_{\text{eff}}$ (km)		$u_*$ (m/s)	$t_D=t_{x,u}$ (h)	$g X/u_*^2$	$g H_{m0}/u_*^2$	$g T_p/u_*$	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)
		beauf 7	0.692	17.89	35262.8	101.67	136.92	4.96	9.65
		beauf 8	0.869	16.76	7617.2	80.96	117.63	6.23	10.41
		beauf 9	1.055	15.87	711.4	66.66	103.34	7.56	11.11

#### 2.4.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Τα κύματα που φαίνονται στους παραπάνω πίνακες έχουν υπολογιστεί με την υπόθεση ότι (i) ο άνεμος πνέει αδιάκοπα κάθε μήνα για χρονικό διάστημα ανάλογο με την αντίστοιχη μέγιστη μηνιαία συχνότητα πνοής, (ii) ο άνεμος πνέει αδιάκοπα για χρονικό διάστημα ανάλογο με το άθροισμα των μέγιστων συνεχόμενων συχνοτήτων πνοής δύο μηνών και (iii) ο άνεμος πνέει για συνθήκες fetch-limited, δηλαδή πνέει κατά μήκος του αναπτύγματος για χρονικό διάστημα  $t_D$  ικανό ώστε να επιτευχθούν οι μέγιστοι δυνατοί κυματισμοί για τις υπόψη συνθήκες.

Η παραπάνω διερεύνηση έγινε, όπως προαναφέραμε, για να αποκτήσουμε μια εικόνα ακόμα και για μία πιθανολογικά πολύ σπάνια περίπτωση δημιουργίας κύματος. Με τον τρόπο αυτό κατά μία έννοια αντισταθμίζουμε την έλλειψη στοιχείων για τη διάρκεια μεμονωμένων ακραίων ανεμολογικών επεισοδίων, καθώς και την αδυναμία της παραπάνω μεθοδολογίας να προβλέψει τον κυματισμό όταν πνέει άνεμος με μια συγκεκριμένη ένταση και έχει προηγηθεί πνοή ανέμου με μικρότερη ένταση, όπως συνήθως συμβαίνει στη φύση, προκαλώντας επιπλέον ενίσχυση του κύματος. Φυσικά ο σχεδιασμός ενδεχόμενων έργων θα γίνει συνδυάζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με τα αποτελέσματα της κυματική πρόγνωσης του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της πρόγνωσης για  $t_D$  ίσο με το άθροισμα των δύο μέγιστων συνεχόμενων μηνιαίων συχνοτήτων πνοής ανηγμένων σε χρόνο.

Πίνακας 2-8: Αποτελέσματα πρόγνωσης με βάση το CEM

	ΚΑΛΑΜΑΤΑ		ΜΕΘΩΝΗ	
	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)
ΒΔ	0.9	3.31	1.55	3.96
Δ	0.86	3.62	2.44	6.85
ΝΔ	3.06	8.42	3.31	8.88
Ν	2.84	8.02	2.03	6.4

#### 2.4.5 Πρόγνωση κυματισμού με το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ

Οι καταγραφές των κυμάτων που πραγματοποιούνται με το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., αν και για μικρό σχετικά διάστημα, είναι χρήσιμες για τη διαμόρφωση μιας εικόνας της πραγματικής κατάστασης της θάλασσας, πέρα από την στατιστική πρόγνωση που έγινε στο εδάφιο 2.4.1. Οι καταγραφές του συστήματος αυτού τροφοδοτούν το κυματικό μοντέλο προσομοίωσης κυματισμών WAM. Το κυματικό μοντέλο WAM είναι ένα από τα αρτιότερα και πιο διαδεδομένα κυματικά μοντέλα στον κόσμο. Είναι κυματικό μοντέλο τρίτης γενιάς, τροποποιημένο έτσι ώστε να είναι εφικτή η χρησιμοποίησή του τόσο από πλευράς ακρίβειας όσο και από πλευράς απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος σε εφαρμογές υψηλής χωρικής διακριτοποίησης. Το μοντέλο WAM επιλύει την χωροχρονική εξέλιξη του δισδιάστατου κυματικού φάσματος λαμβάνοντας υπόψη τη δράση του ανέμου, τις μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις των κυματισμών και την κυματική απόσβεση. Οι μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις αφορούν σε φαινόμενα συντονισμού σε κυματικές τετράδες, ενώ η κυματική απόσβεση περιλαμβάνει την απόσβεση λόγω θραύσης και την απόσβεση λόγω τριβής πυθμένα.

Συνοπτικά στο WAM λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα κυματικά φαινόμενα:

- Κυματική διάδοση στο χρόνο και στο χώρο
- Δημιουργία κύματος λόγω ανέμου
- Διάθλαση κυματισμών (λόγω μεταβολής βαθυμετρίας ή παρουσίας ρεύματος)
- Τετραδικές μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις κυματισμών
- Θραύση κυματισμών
- Επιδράσεις τριβής βυθού

Όπως προαναφέραμε το WAM καλύπτει με αδρό πλέγμα το Αιγαίο με ανάλυση  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  και η περιοχή της Στούπας είναι κοντά σε τρία σημεία του πλέγματος ( $\varphi_1=36.85^\circ$   $\lambda_1=22.2^\circ$ ,  $\varphi_2=36.75^\circ$   $\lambda_2=22.2^\circ$ ,  $\varphi_3=36.75^\circ$   $\lambda_3=22.3^\circ$ ) τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 2-9. Τα μέγιστα ύψη κύματος με τις αντίστοιχες περιόδους που προκύπτουν στα σημεία 1, 2 και 3 ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης του WAM δίνονται στον Πίνακα 2-9.

Πίνακας 2-9: Αποτελέσματα προσομοίωσης με το μοντέλο WAM

	WAM							
	Βορειοδυτικός		Δυτικός		Νοτιοδυτικός		Νότιος	
	H <sub>mo</sub> (m)	T <sub>p</sub> (sec)	H <sub>mo</sub> (m)	T <sub>p</sub> (sec)	H <sub>mo</sub> (m)	T <sub>p</sub> (sec)	H <sub>mo</sub> (m)	T <sub>p</sub> (sec)
<b>1</b>	1.83	9.98	3.71	8.25	3.91	9.07	2.38	10.98
<b>2</b>	<b>2.10</b>	<b>9.98</b>	<b>3.75</b>	<b>8.25</b>	4.37	14.62	2.71	10.98
<b>3</b>	1.92	9.98	3.59	8.25	<b>4.49</b>	<b>14.62</b>	<b>2.89</b>	<b>10.98</b>

#### 2.4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων και επιλογή κύματος προσομοίωσης

Από τα στοιχεία που παρατέθηκαν πιο πάνω φαίνεται ότι η πρόγνωση του κυματισμού που προτείνεται από το CEM με δεδομένα από τον σταθμό της Μεθώνης μας δίνει μεγαλύτερους κυματισμούς από τον αντίστοιχο της Καλαμάτας για Βορειοδυτικό, Δυτικό και Νοτιοδυτικό άνεμο και μικρότερους μόνο για Νότιο άνεμο, γεγονός αναμενόμενο με βάση τα ροδογράμματα ανέμου.

Τα κύματα που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της παράκτιας εξέλιξής τους κοντά στις πηγές της Στούπας με το πρόγραμμα MIKE21 θα είναι τα αποτελέσματα του WAM ενώ τα αποτελέσματα της πρόγνωσης με βάση τα ανεμολογικά στοιχεία της EMY θα λειτουργούν ως έλεγχος .

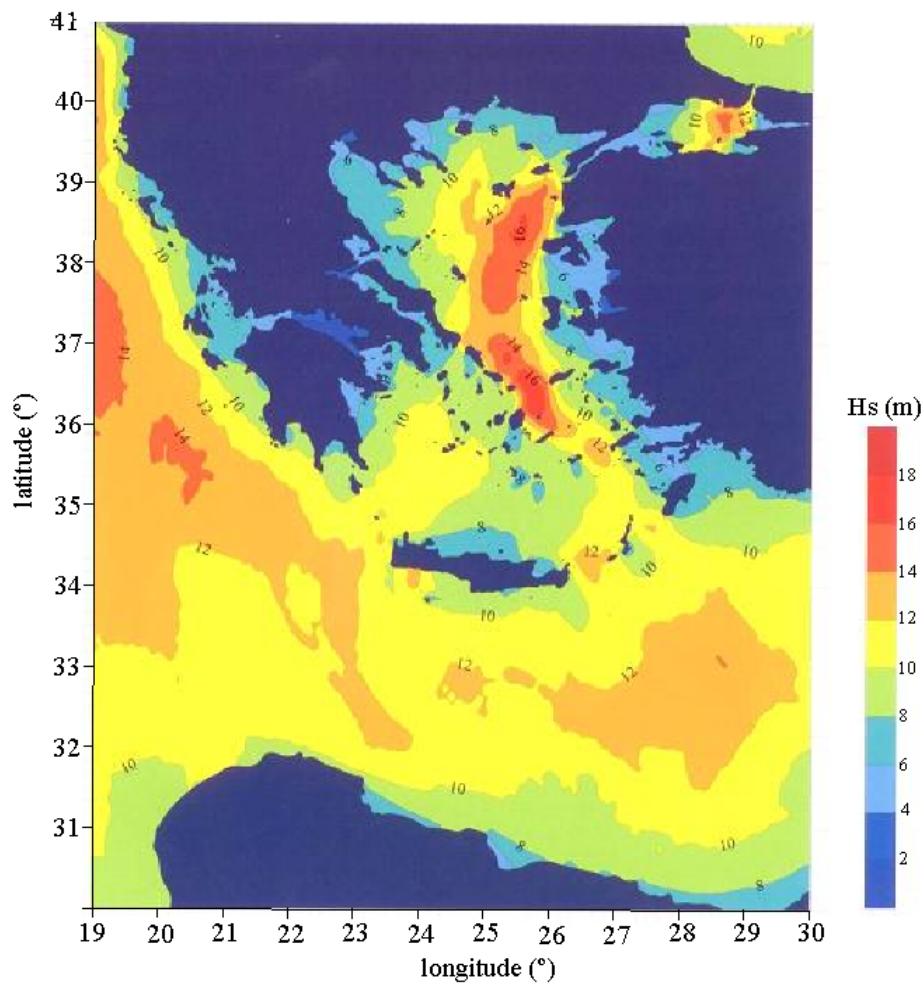
Πίνακας 2-10: Χαρακτηριστικοί κυματισμοί που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της παράκτιας εξέλιξής τους

	ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΟΣ	ΔΥΤΙΚΟΣ	ΝΟΤΙΟΔΥΤΙΚΟΣ	ΝΟΤΙΟΣ
H <sub>o</sub> (m)	2.10	3.75	4.50	2.90
T <sub>p</sub> (s)	10,0	8.25	14.6	11,00

Πρέπει να αναφέρουμε ότι οι παραπάνω τιμές που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω κατά την κυματική προσομοίωση στην παράκτια ζώνη, έχουν περίοδο επαναφοράς 10 έτη καθώς 10 έτη είναι τα δεδομένα των μετρήσεων που εισάγονται στο WAM. Επιλέξαμε τα κύματα αυτά για την προσομοίωση τους στην παράκτια ζώνη γιατί παρέχουν ικανοποιητική ασφάλεια επειδή προκύπτουν από κυματικό μοντέλο ευρύτατα αποδεκτό με δεδομένα εισόδου ακριβή στοιχεία από μετρήσεις πεδίου. Σε περίπτωση

ενδεχόμενων κατασκευών με απαίτηση για περίοδο σχεδιασμού μεγαλύτερη των 10 ετών θα γίνει κατάλληλη προσαρμογή των αποτελεσμάτων της παρούσας διερεύνησης.

Στο Σχήμα 2-17 δίδεται ένας χάρτης τιμών σημαντικού ύψους κύματος περιόδου επαναφοράς 50 ετών που έχει προκύψει από στατιστική επεξεργασία ανεμολογικών και κυματικών παραμέτρων, αποτέλεσμα συνδυασμού του ατμοσφαιρικού μη-υδροστατικού μοντέλου SKIRON-ETA και του κυματικού μοντέλου WAM.



Σχήμα 2-17: Σημαντικό ύψος κύματος 50 ετών

Από το σχήμα αυτό (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., 2007) προκύπτει ότι το σημαντικό ύψος κύματος 50 ετών είναι της τάξης των 8-10m για την υπό εξέταση περιοχή.

## **2.5 Κυματική προσομοίωση στην παράκτια ζώνη με το πρόγραμμα MIKE 21**

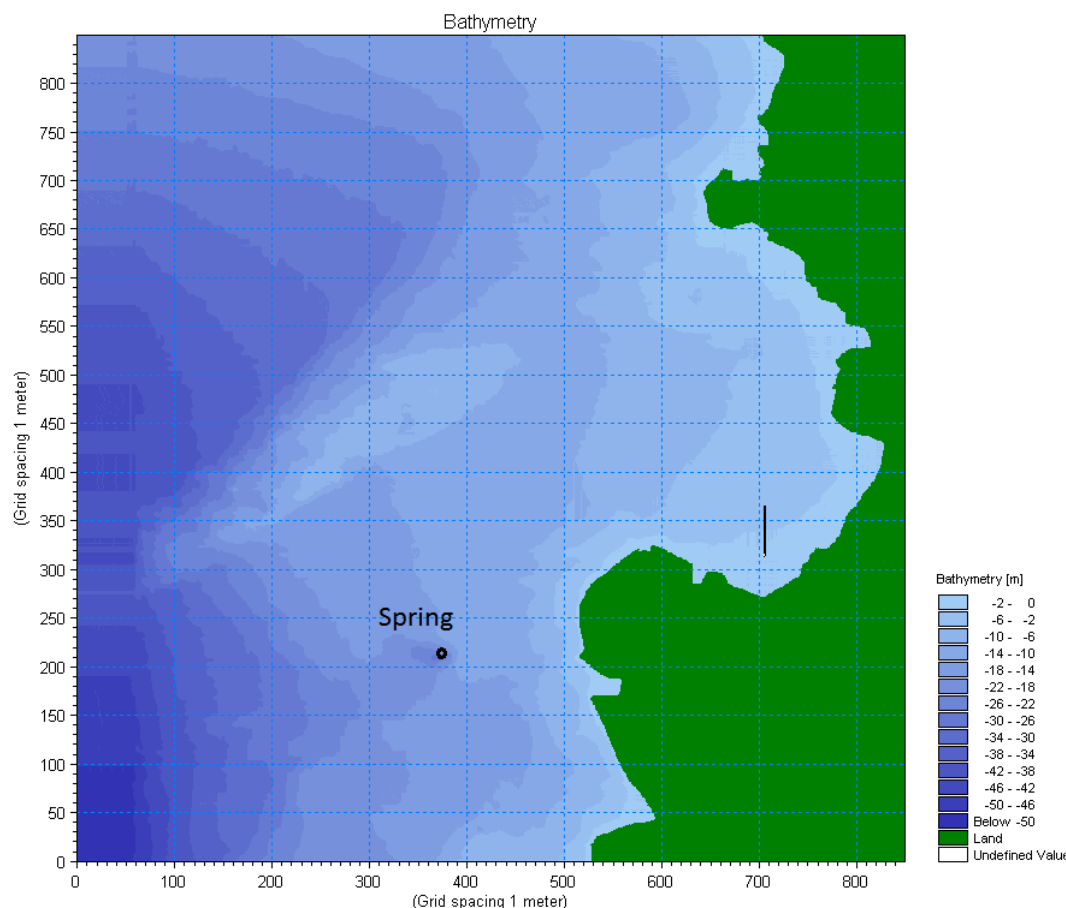
Η παράκτια διάδοση του κυματισμού και των κυματογενών ρευμάτων προσομοιώθηκε με το λογισμικό MIKE 21 της DHI (Danish Hydraulic Institute), έκδοσης 2007. Η DHI είναι διεθνής ερευνητικός οργανισμός με αντικείμενο την προώθηση της τεχνολογικής εξέλιξης στον τομέα του νερού.

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης έρευνας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο παράκτιας φασματικής εξέλιξης των κυματισμών (NSW) και το υδροδυναμικό μοντέλο δισδιάστατης ανάλυσης (HD).

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για το σύνολο των κατευθύνσεων του ανέμου για τις οποίες είναι δυνατή η ανάπτυξη κυματισμού (S, SW, W, NW) και για το μέγιστο κύμα κάθε κατεύθυνσης, εφόσον τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό ενδεχόμενων θαλάσσιων έργων.

Στο πρώτο στάδιο της προσομοίωσης εισήχθη η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης με βάση το βυθομετρικό χάρτη που εκπονήθηκε για τις ανάγκες του έργου από το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. Η περιοχή προσομοίωσης οριοθετήθηκε ουσιαστικά από την ιδιαίτερη μορφολογία της περιοχής μελέτης, καθώς και από τις απαιτήσεις του μοντέλου και των οριακών συνθηκών.

Το μοντέλο αποτελείται από τετραγωνικά στοιχεία διάστασης 1 m για την κυματική συνιστώσα και 10 m για την υδροδυναμική συνιστώσα, μεγέθη τα οποία κρίνονται ικανοποιητικά για την κλίμακα της περιοχής μελέτη και για το σκοπό χρήσης των αποτελεσμάτων. Στο Σχήμα 2-18 με πράσινο χρώμα σημειώνεται η στεριά, με θαλασσί τα ρηγά νερά και με μπλε τα βαθειά.



Σχήμα 2-18: Αποτύπωση της βαθυμετρίας στο MIKE21

### 2.5.1 Κυματικό μοντέλο – *Nearshore Spectral Wave Model*

2.5.1.1 Γενική περιγραφή. Το MIKE21 NSW είναι ένα πρότυπο αριθμητικό μοντέλο ανεμογενών κυματισμών το οποίο περιγράφει την διάδοση, ανάπτυξη και εξασθένηση βραχέων (μικρής περιόδου – short-period) και κατευθυντικών (short-crested) κυμάτων σε παράκτιες περιοχές. Το μοντέλο λαμβάνει κύρια υπόψη του τα φαινόμενα της διάθλασης (refraction) και της ρήχωσης (shoaling) λόγω μεταβαλλόμενης βαθυμετρίας, τοπικής γένεσης κυματισμών εξαιτίας του ανέμου και ενεργειακών απωλειών εξαιτίας τριβής στο πυθμενικό στερεό όριο και θραύσης των κυματισμών. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη και το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης κύματος-ρεύματος (wave-current interaction).

Το MIKE21 NSW είναι ένα μόνιμο (χρονικά ανεξάρτητο), κατευθυντικά αποσυζευγμένο, παραμετρικό μοντέλο. Οι βασικές του εξισώσεις προκύπτουν από την αρχή διατήρησης της φασματικής ενεργειακής ροής της κυματικής δράσης (conservation law of the spectral wave action density), έτσι ώστε να είναι δυνατός ο

συνυπολογισμός της επίδρασης των ρευμάτων. Διεξάγεται παραμετροποίηση της εξίσωσης συνέχειας στο πεδίο των συχνοτήτων με την εισαγωγή της μηδενικής και της πρώτηςροπής του (ενεργειακού) φάσματος ροής κυματικής δράσης ως εξαρτημένων μεταβλητών.

Το φάσμα των συχνοτήτων θεωρείται ότι έχει μία κορυφή (single-peaked), πράγμα το οποίο σημαίνει ότι μικτές καταστάσεις κυματικού πεδίου (όπως ανεμογενή κύματα μαζί με αποθάλασσα-swell) δεν είναι δυνατό να προσομοιωθούν.

Οι βασικές μερικές διαφορικές εξισώσεις επιλύονται μέσω διακριτοποίησης με τη χρήση μιας τεχνικής πεπερασμένων διαφορών τύπου Euler. Η μηδενική και η πρώτη ροπή του (ενεργειακού) φάσματος ροής κυματικής δράσης υπολογίζονται πάνω σε ορθογωνικό κάναβο με σταθερό χωρικό βήμα για έναν αριθμό διακριτών κατευθύνσεων. Το τελικό προκύπτον σύστημα μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων επιλύεται εφαρμόζοντας μια «μία και έξω» (once-through) σάρωση του πεδίου στην κυρίαρχη κατεύθυνση της κυματικής διάδοσης (κατεύθυνση  $x$ ). Αυτή η διαδικασία περιορίζει την γωνία ανάμεσα στον άξονα  $x$  και τη διεύθυνση της κυματικής διάδοσης σε λιγότερο από  $90^\circ$ . Στην πράξη αυτή η γωνία δεν μπορεί να ξεπερνάει τις  $60^\circ$  για λόγους σταθερότητας του αριθμητικού μοντέλου.

Το βασικό υπολογιστικό αποτέλεσμα (output) είναι κάποιες ολοκληρωμένες κυματικές παράμετροι όπως το σημαντικό ύψος κύματος, η μέση περίοδος, η μέση κατεύθυνση του κύματος, η (κατευθυντική) τυπική απόκλιση από την κύρια διεύθυνση και οι τάσεις ακτινοβολίας. Επιπρόσθετα, μπορεί να αποδοθεί ακόμα φασματικό output/υπολογιστικό αποτέλεσμα στη μορφή κατανομής της κυματικής ενέργειας σε διακριτοποιημένες κατευθύνσεις και ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων του κανάβου. Για τους παραπάνω λόγους το μοντέλο είναι κατάλληλο να εφαρμοστεί στη μελέτη κυματικής διείδυσης σε παράκτιες περιοχές. Ο υπολογισμός των κυματικών συνθηκών είναι καθοριστικής σημασίας τόσο για την εκτίμηση των παραμέτρων σχεδιασμού θαλασσίων έργων όσο και για την εκτίμηση των επιδράσεων που υφίσταται η ακτογραμμή. Ο υπολογισμός της κίνησης των ιζημάτων (στερεομεταφοράς), καθορίζεται κατά πολύ από τα χαρακτηριστικά του κυματικού πεδίου και τα σχετιζόμενα κυματογενή ρεύματα. Τα τελευταία ως γνωστόν προκαλούνται από τις κλίσεις στις τάσεις ακτινοβολίας που προκύπτουν στη ζώνη θραύσης και το MIKE21 NSW παρέχει αυτή την πληροφορία.

Συνολικά το MIKE21 NSW μπορεί να λάβει υπόψη του τα εξής φαινόμενα:



- διάθλαση (refraction)
- ρήγωση (shoaling)
- απόσβεση στον πυθμένα (bottom dissipation)
- θραύση κυμάτων (wave breaking)
- γένεση κυμάτων λόγω ανέμου (wind generation)
- διασπορά συχνοτήτων (frequency spreading)
- κατευθυντική διασπορά (directional spreading)
- αλληλεπίδραση κύματος-ρεύματος (wave-current interaction)

2.5.1.2 Βασικές εξισώσεις. Αναφορικά με τις βασικές εξισώσεις, η περιγραφή των όρων πηγής (source terms) και ως ένα σημείο των αριθμητικών μεθόδων επίλυσης, το MIKE21 NSW βασίζεται στην προσέγγιση που προτείνεται από τους Holthuijsen et al. (1989). Οι διάφοροι μετασχηματισμοί των ανεμολογικών δεδομένων παρουσιάζονται από τον Johnson (1998). Οι παραπάνω διαδικασίες οδηγούν στο ακόλουθο ζεύγος μερικών διαφορικών εξισώσεων:

$$\frac{\partial(c_{gx}m_o)}{\partial x} + \frac{\partial(c_{gy}m_o)}{\partial y} + \frac{\partial(c_{\theta}m_o)}{\partial \theta} = T_o \quad (2-15)$$

$$\frac{\partial(c_{gx}m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(c_{gy}m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(c_{\theta}m_o)}{\partial \theta} = T_1 \quad (2-16)$$

όπου

- $m_0(x,y,\theta)$ : μηδενική ροπή του φάσματος ροής κυματικής δράσης  
 $m_1(x,y,\theta)$ : πρώτη ροπή του φάσματος ροής κυματικής δράσης  
 $c_{gx}, c_{gy}$ : συνιστώσες στην κατά  $x$  και κατά  $y$  διεύθυνση της αντίστοιχης ταχύτητας ομάδας  $c_g$  (group velocity)  
 $c_{\theta}$ : ταχύτητα διάδοσης στη διεύθυνση  $\theta$   
 $x,y$ : καρτεσιανές συντεταγμένες  
 $\theta$ : διεύθυνση κυματικής διάδοσης  
 $T_0, T_1$ : όροι πηγής

και οι ροπές  $m_n(\theta)$  ορίζονται ως:

$$m_n(\theta) = \int_0^{\infty} \omega^n A(\omega, \theta) d\omega \quad (2-17)$$

όπου  $\omega$  είναι η κυκλική συχνότητα και  $A$  είναι η πυκνότητα της φασματικής ροής κυματικής δράσης. Οι ταχύτητες διάδοσης  $c_{gx}$ ,  $c_{gy}$  και  $c_\theta$  υπολογίζονται από τη γραμμική θεωρία κυματισμών.

Το αριστερό σκέλος των εξισώσεων λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα της διάθλασης και της ρήχωσης. Οι όροι πηγής  $T_0$  και  $T_1$  περιγράφουν το φαινόμενο της τοπικής ανάπτυξης ανεμογενούς κυματισμού και της απώλειας ενέργειας λόγω θραύσης και πυθμενικής τριβής. Η επίδραση των ρευμάτων σε αυτές τις διεργασίες συμπεριλαμβάνεται στους συγκεκριμένους όρους.

Το αριθμητικό σχήμα επίλυσης που χρησιμοποιείται στη χωρική διακριτοποίηση είναι ένα σχήμα πεπερασμένων διαφορών τύπου Euler. Στη διεύθυνση  $x$  εφαρμόζονται γραμμικές κατάντη διαφορές, ενώ στις διευθύνσεις  $\theta$  και  $y$  είναι δυνατή η επιλογή μεταξύ γραμμικών ανάντη διαφορών, κεντρικών διαφορών και δευτέρου βαθμού ανάντη διαφορών. Τα καλύτερα αποτελέσματα παρέχονται συνήθως με τη χρήση γραμμικών ανάντη διαφορών στις διευθύνσεις  $\theta$  και  $y$ . Οι όροι πηγής  $T_0$  και  $T_1$  λόγω τοπικής ανεμογένεσης εισάγονται ρητά, ενώ οι αντίστοιχοι λόγω θραύσης και πυθμενικής απόσβεσης εισάγονται με πεπλεγμένο τρόπο.

2.5.1.3 Οριακές συνθήκες. Στο MIKE21 NSW το κυματικό πεδίο που διαδίδεται μέσα στην περιοχή προσομοίωσης εισάγεται στο μοντέλο διαμέσου του ανοικτού ορίου (offshore boundary), το οποίο θεωρείται πάντα ως δυτικό όριο. Τα βόρεια και νότια όρια (lateral boundaries) συμπληρώνουν τις οριακές συνθήκες του υπολογιστικού πεδίου. Ειδικότερα, η εισερχόμενη από το ανοικτό όριο ενέργεια στο πεδίο προσομοίωσης, καθορίζεται από ορισμένα χαρακτηριστικά του επερχόμενου κυματισμού, όπως το σημαντικό ύψος κύματος  $H_{m0}$ , η μέση περίοδος  $T_m$ , η μέση διεύθυνση της κυματικής διάδοσης MWD, ο βαθμός διασποράς της κατεύθυνσης του κύματος  $n$ , η μέγιστη απόκλιση από τη μέση διεύθυνση κυματικής διάδοσης MDWD και η τυπική απόκλιση από την κύρια κατεύθυνση DSD. Το ανοικτό όριο μπορεί να θεωρηθεί στερεό όριο (land boundary), με συνέπεια σε αυτή την περίπτωση τα κύματα να θεωρούνται τοπικά ανεμογενή κύματα. Τα εγκάρσια βόρεια και νότια όρια θεωρούνται σχεδόν πάντα συμμετρικά (symmetrical) με την έννοια ότι η κλίση των κυματικών συνθηκών κατά μήκος του ορίου είναι μηδενική ή ότι τα κάθετα στο όριο διαφορικά των εξαρτημένων μεταβλητών,  $m_0$  και  $m_1$ , τίθενται ίσα με μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι οι ισοβαθείς θεωρούνται τοπικά ισαπέχουσες και παράλληλες κοντά στο

όριο. Υπάρχει ακόμα η περίπτωση να θεωρηθούν τα όρια απορροφητικά (absorbing), με την έννοια ότι τα επερχόμενα κύματα στο όριο απορροφώνται πλήρως, χωρίς ανακλάσεις.

Η σχέση μεταξύ του  $n$  και του DSD προσδιορίζεται από τις επόμενες εκφράσεις:

$$DSD = \sigma = \sqrt{2 \cdot \left(1 - \left(\sqrt{a^2 + b^2}\right)\right)} \quad (2-18)$$

$$a = \int_0^{2\pi} \cos \theta D(\theta) d\theta \quad (2-19)$$

$$b = \int_0^{2\pi} \sin \theta D(\theta) d\theta \quad (2-20)$$

Δεδομένων των κυματικών παραμέτρων, η κατευθυντική κατανομή της κυματικής ενέργειας στο όριο είναι:

$$E(\theta_i) = E_1 D(\theta_i), \text{ με } i = 1, \text{ ndir} \quad (2-21)$$

όπου ndir είναι ο αριθμός των διακριτών κατευθύνσεων,  $E_1 = H_{m0}^2/16$  είναι η συνολική ενέργεια του διακριτού ενεργειακού φάσματος και η εξίσωση κατευθυντικής κατανομής  $D$  ορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$D(\theta_i) = \beta \cos^n(\theta_m - \theta_i), |\theta_m - \theta_i| \leq \theta_d \quad (2-22)$$

$$D(\theta_i) = 0, |\theta_m - \theta_i| > \theta_d \quad (2-23)$$

όπου  $\beta$  είναι παράγων κανονικοποίησης και  $\theta_m$  είναι η μέγιστη γωνία μετάδοσης κυματικής ενέργειας.

Το MIKE21 NSW περιορίζεται σε εφαρμογή μόνο για κύματα με περίοδο  $T=0,2\sim 30\text{sec}$ .

#### 2.5.1.4 Λοιπά στοιχεία υπολογισμού.

Ο σχηματισμός του κυματικού πεδίου λόγω ύπαρξης πεδίου ανέμου βασίζεται σε εμπειρικές εκφράσεις. Γίνεται η υπόθεση ότι η κατευθυντική διασπορά της παρεχόμενης από τον άνεμο ενέργειας ακολουθεί μία κατανομή  $\cos^n \theta$ . Η μέση συχνότητα είναι ανεξάρτητη από την κατεύθυνση.

Το MIKE21 NSW εμπεριέχει τους ακόλουθους πέντε ανεμολογικούς μετασχηματισμούς (Johnson, 1998):

- SPM73/HBH, βασισμένος σε εκφράσεις προερχόμενες από τον μετασχηματισμό του SPM (1973) για ανάπτυξη κύματος σε θαλάσσιες συνθήκες fetch-limited σε

βαθεία νερά με συντελεστές όπως τους περιγράφουν οι Holthuijsen, Booij and Herbers (1989).

- SPM84, βασισμένος σε εκφράσεις προερχόμενες από τον μετασχηματισμό του SPM (1984).
- Kahma & Calkoen, βασισμένος σε εκφράσεις προερχόμενες από μετασχηματισμούς για ανάπτυξη κύματος σε θαλάσσιες συνθήκες fetch-limited σε βαθεία νερά με συντελεστές όπως τους περιγράφουν οι Kahma & Calkoen (1994).
- SPM73, βασισμένος στο SPM (1973).
- JONSWAP, όπως στο SPM84, όμως χρησιμοποιώντας την  $U_{10}$  αντί για την  $U_a$ , όπου  $U_a$  είναι η ταχύτητα ανέμου όπως αυτή ορίζεται στο SPM.

Οι ολοκληρωμένες κυματικές παράμετροι που προκύπτουν ως αποτέλεσμα των υπολογισμών του μοντέλου είναι:

Το σημαντικό ύψος κύματος  $H_{m0}$ , ορίζεται ως:

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (2-24)$$

όπου η συνολική ενέργεια  $m_0 = E_1$  είναι:

$$m_0 = E_1 = \int_0^{2\pi} E(\theta) d\theta \quad (2-25)$$

Η μέση κυματική περίοδος  $T_m$  ορίζεται ως:

$$T_m = \frac{2\pi}{\omega_1} \quad (2-26)$$

όπου

$$\omega_1 = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty \omega \cdot E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^\infty E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \quad (2-27)$$

Η μέση διεύθυνση κύματος  $\theta_m$  και η κατευθυντική τυπική απόκλιση  $\sigma$  ορίζονται ως:

$$\theta_m = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2-28)$$

$$\sigma = \sqrt{2 \cdot \left(1 - \sqrt{a^2 + b^2}\right)} \quad (2-29)$$

όπου

$$a = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \cos \theta \cdot E(\theta) d\theta \quad (2-30)$$

$$b = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \sin \theta \cdot E(\theta) d\theta \quad (2-31)$$

Η μέση κυματική διεύθυνση σε αυτές τις εκφράσεις ορίζεται σχετικά με τον άξονα  $x$  του μοντέλου θεωρούμενο θετικό κατά την αντιωρολογιακή φορά. Αποτελέσματα μπορούν να αντληθούν στη μορφή δυσδιάστατων διανυσμάτων που περιέχουν τις συνιστώσες  $x$  και  $y$  του διανύσματος  $U=(u,v)$  με

$$u = H_{m0} \cos \theta_m$$

$$v = H_{m0} \sin \theta_m$$

Το γράφημα των διανυσμάτων  $U=(u,v)$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει τη μέση κυματική κατεύθυνση στην περιοχή υπό εξέταση.

Επίσης το μοντέλο παρέχει χάρτες αποτελεσμάτων με τάσεις ακτινοβολίας  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$  οι οποίες ορίζονται ως:

$$S_{xx} = (1/2) \rho g (F_u + F_p) \quad (2-32)$$

$$S_{xy} = (1/2) \rho g (F_{uv}) \quad (2-33)$$

$$S_{yy} = (1/2) \rho g (F_v + F_p) \quad (2-34)$$

Στο αρχείο αποτελεσμάτων οι τάσεις ακτινοβολίας είναι διαιρεμένες με  $\rho$  και οι  $F_u$ ,  $F_{uv}$ ,  $F_v$  και  $F_p$  ορίζονται ως:

$$F_u = \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta \cdot (1 + G) E(\theta) d\theta \quad (2-35)$$

$$F_v = \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta \cdot (1 + G) E(\theta) d\theta \quad (2-36)$$

$$F_{uv} = \int_0^{2\pi} \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot (1 + G) E(\theta) d\theta \quad (2-37)$$

$$F_p = \int_0^{2\pi} G \cdot E(\theta) d\theta \quad (2-38)$$

όπου το  $G$  δίνεται ως:

$$G = \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \quad (2-39)$$

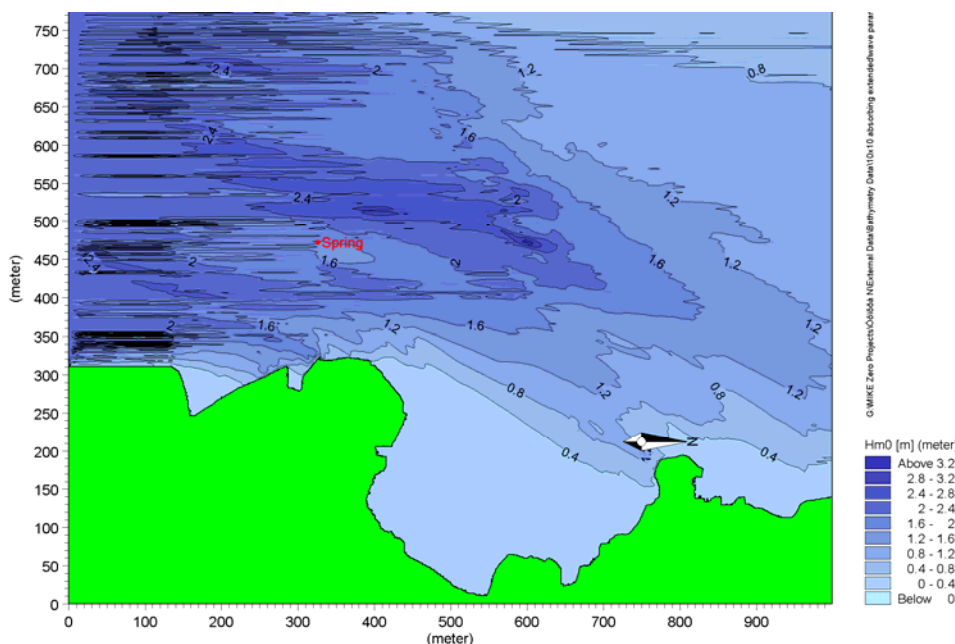
ενώ  $d$  είναι το βάθος θαλάσσης και  $k$  ο κυματαριθμός.

2.5.1.4 Αποτελέσματα μοντέλου NSW. Στα σχήματα (2-15 έως 2-18) απεικονίζεται η χωρική μεταβολή του ύψους των κυματισμών για τις διευθύνσεις ανεμογενών κυματισμών που επηρεάζουν την περιοχή (N, NΔ, Δ, ΒΔ). Η περιοχή περιστρέφεται για κάθε διεύθυνση έτσι ώστε η πρόσπτωση του κυματισμού να γίνεται από την αριστερή πλευρά του κανάβου, όπως απαιτείται από το πρόγραμμα. Όπως φαίνεται και στα σχήματα, ο εισερχόμενος κυματισμός έχει το αντίστοιχο ύψος που έχει αναπτυχθεί στα ανοιχτά. Λόγω των φαινομένων διάθλασης, ρήξης και θραύσης παρατηρείται μεταβολή του ύψους. Στην περιοχή της ανάβλυσης το κύμα έχει τα ύψη που δίνονται στον Πίνακα 2-11 για τις αντίστοιχες διευθύνσεις.

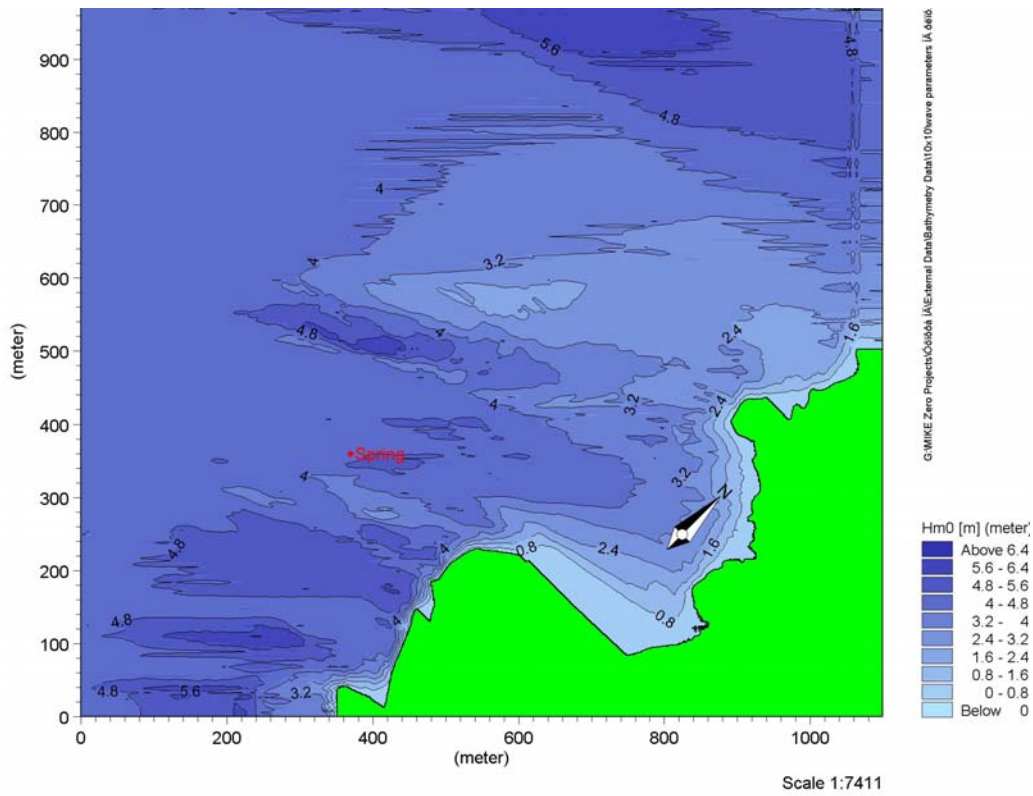
Πίνακας 2-11: Ύψος και περίοδος κύματος στην περιοχή της ανάβλυσης

Μεταβολή ύψους κυματισμού	ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ			
	N	NΔ	Δ	ΒΔ
Εισερχόμενο ύψος κυματισμού $H_s$ (m)	2.90	4.50	3.75	2.10
Ύψος κυματισμού $H_s$ στην ανάβλυση (m)	2.34	4.61	3.05	1.48

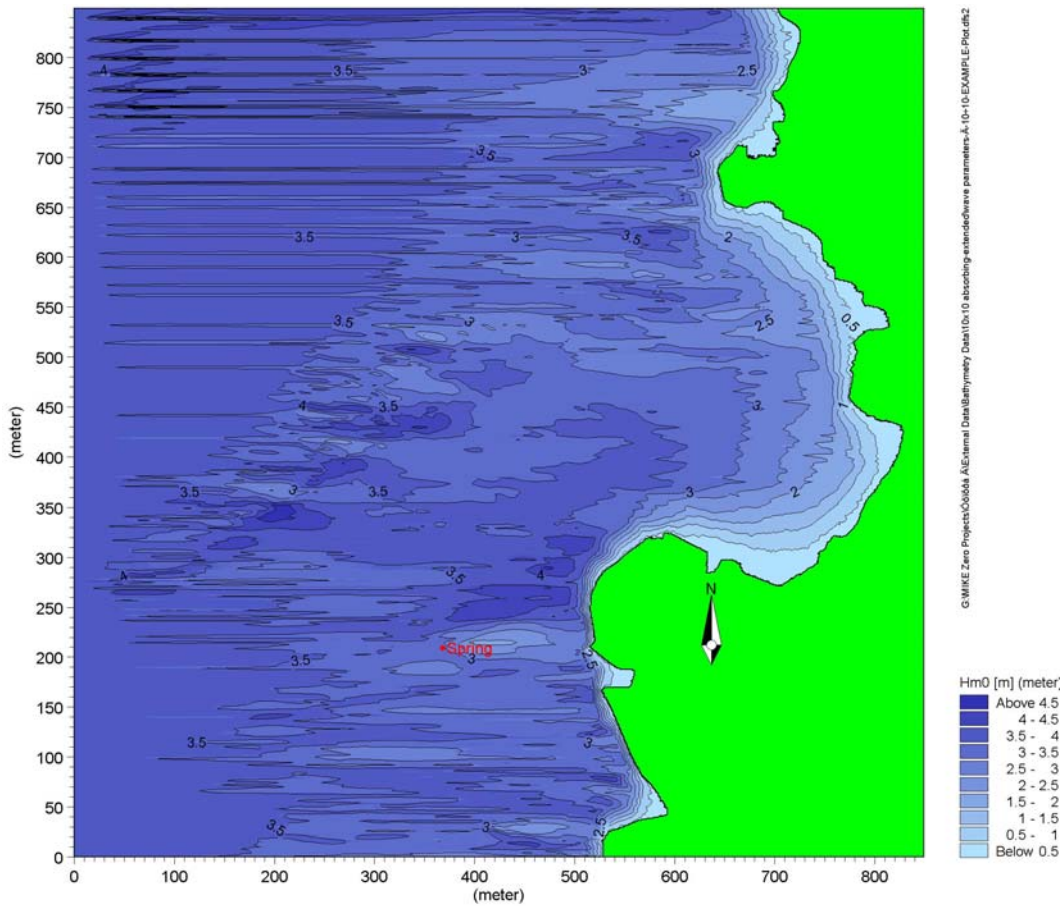
Στα σχήματα (2-20 έως 2-22) απεικονίζονται οι τάσεις ακτινοβολίας  $S_{xx}$  και  $S_{yy}$ . Η κατά την κύρια κατεύθυνση του κυματισμού μεταφορά οριζόντιας ορμής ολοκληρωμένη στο βάθος εισέρχεται στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης για τον υπολογισμό του πεδίου ταχυτήτων στα ενδιάμεσα και ρηγά νερά ( $d/L < 0.5$ ) επηρεάζοντας και τη στερεομεταφορά.



Σχήμα 2-19: Χωρική μεταβολή ύψους κυματισμού από το Νότο,  $H_s=2.90$  m,  $T_p=9.70$  s.

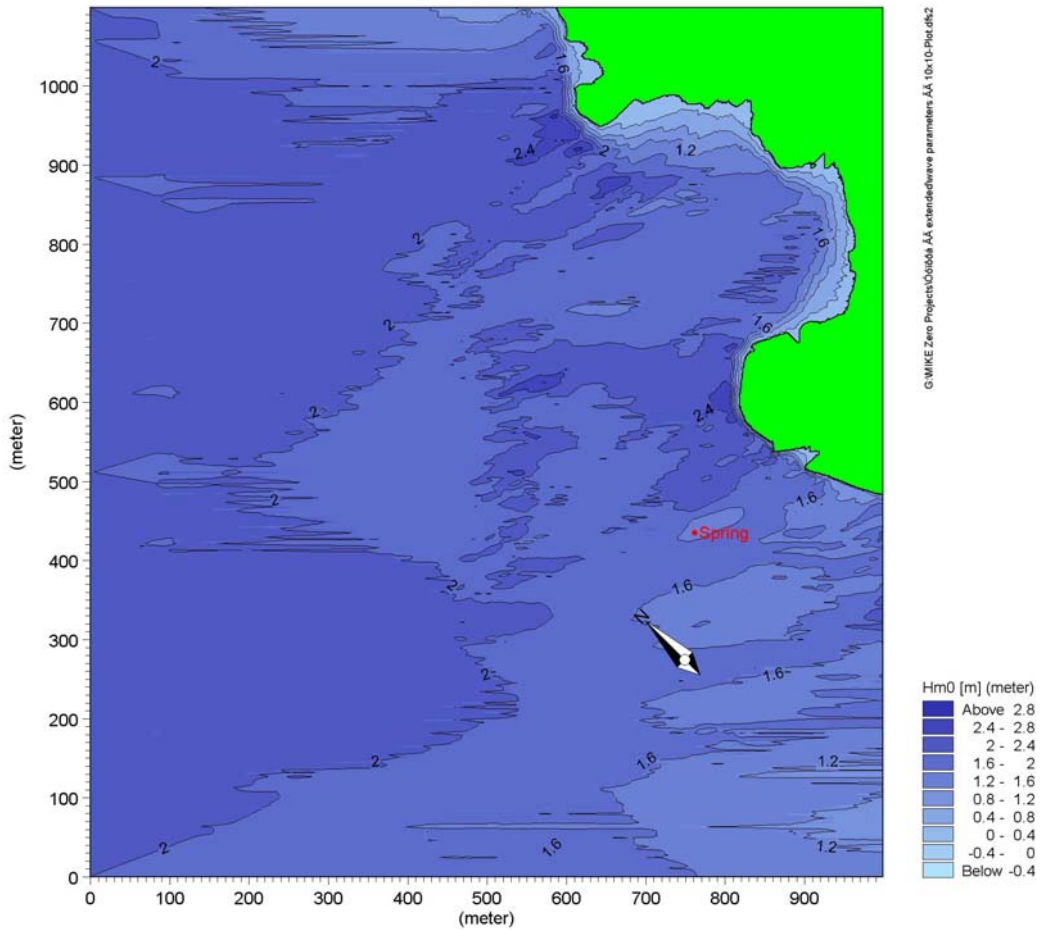


Σχήμα 2-20: Χωρική μεταβολή ύψους κυματισμού από τα ΝΔ,  $H_s=4,50$  m,  $T_p=14,62$  s.

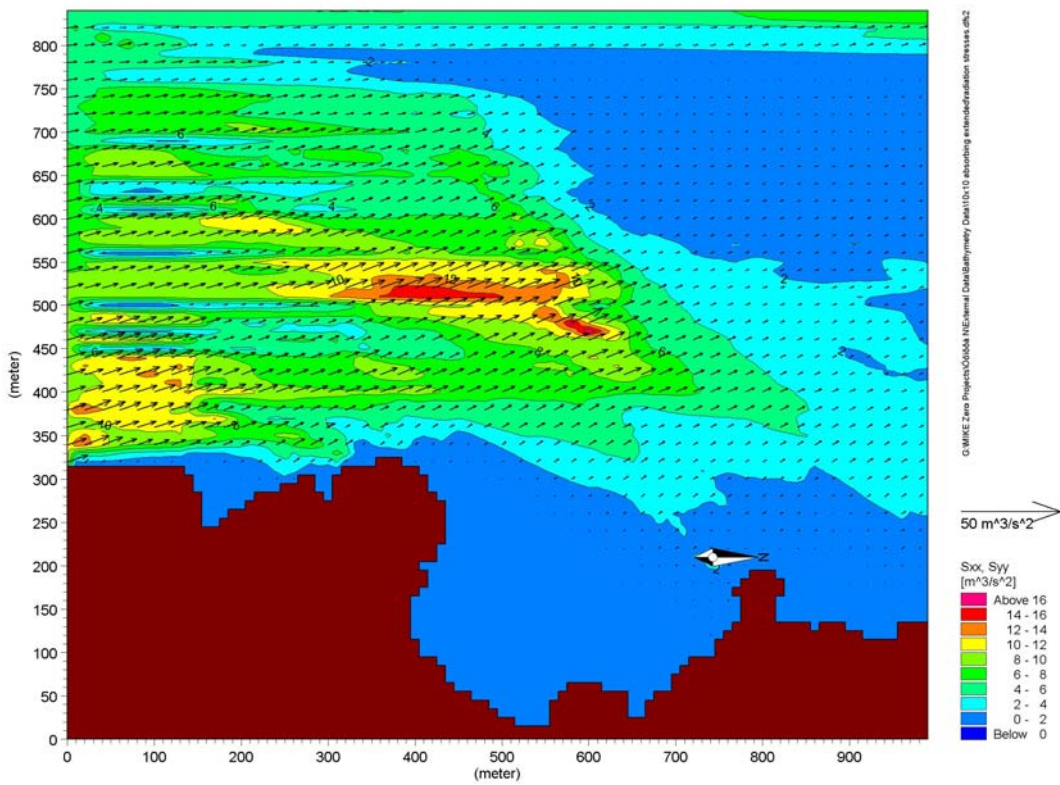


Σχήμα 2-21: Χωρική μεταβολή ύψους κυματισμού από τα Δ,  $H_s=3,75$  m,  $T_p=8,25$  s.



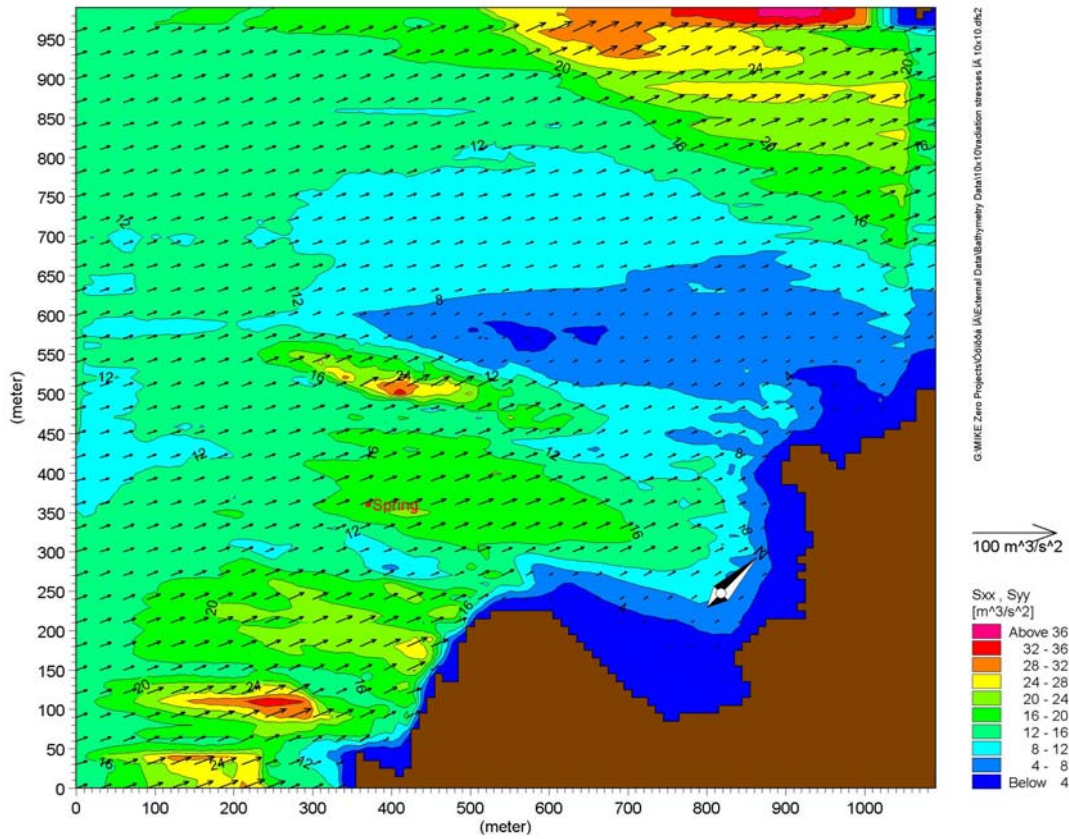


Σχήμα 2-22: Χωρική μεταβολή ύψους κυματισμού από τα ΒΔ,  $H_s=2.10$ ,  $T_p=9.98$  s.

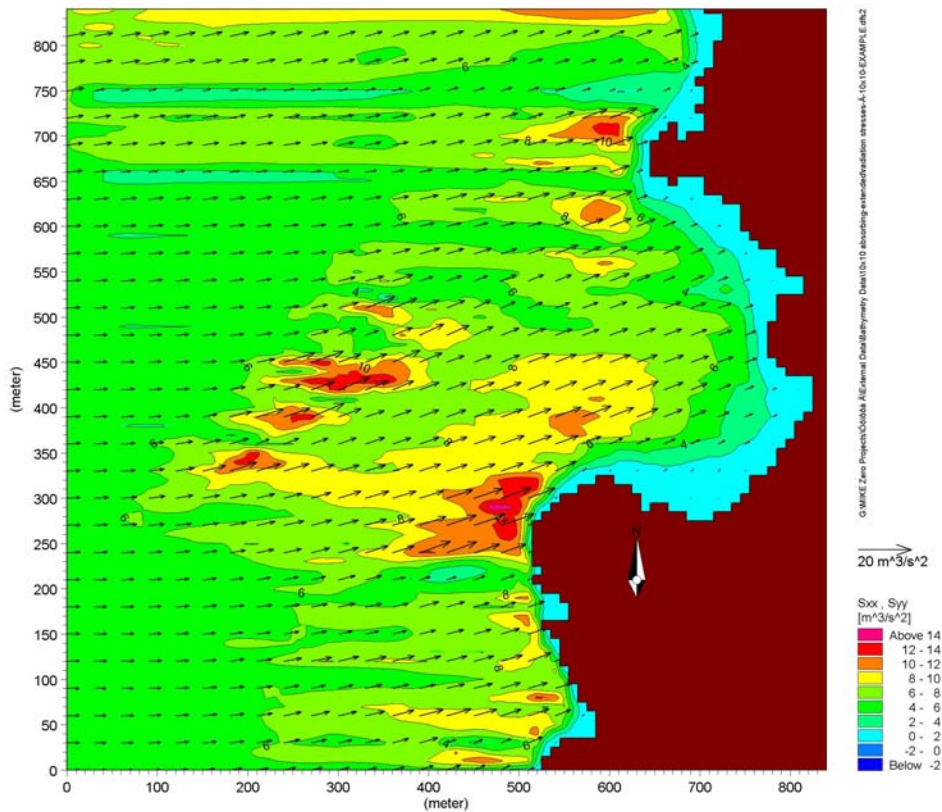


Σχήμα 2-23: Τάσεις ακτινοβολίας για κυματισμό από τα νότια

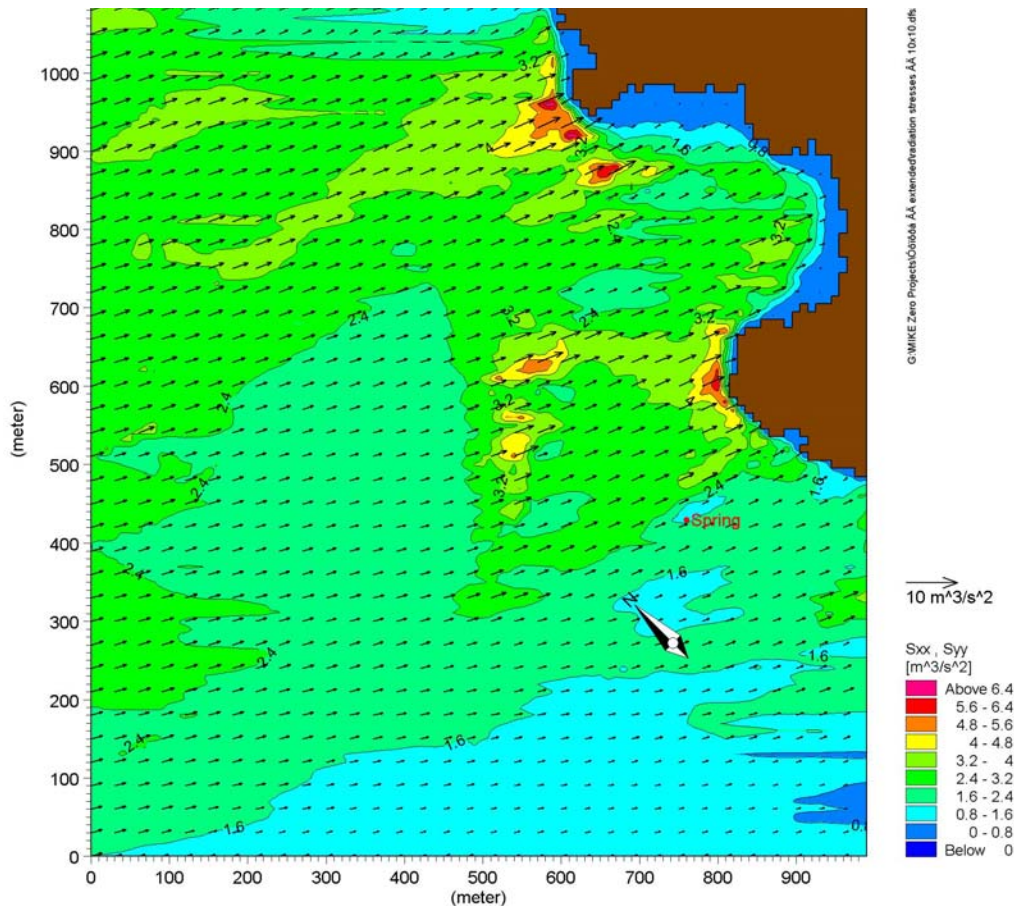




Σχήμα 2-24: Τάσεις ακτινοβολίες για κυματισμό από τα νοτιοδυτικά



Σχήμα 2-25: Τάσεις ακτινοβολίες για κυματισμό από τα δυτικά



Σχήμα 2-26: Τάσεις ακτινοβολίες για κυματισμό από τα βορειοδυτικά

### 2.5.2 Υδροδυναμικό μοντέλο - MIKE 21 Flow Model / Hydrodynamic Module

2.5.2.1 Γενική περιγραφή. Το MIKE 21 Flow Model είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης δισδιάστατων ροών με ελεύθερη επιφάνεια και μπορεί να περιγράψει τις υδραυλικές και τις περιβαλλοντικές διεργασίες που συμβαίνουν σε εκβολές ποταμών, λίμνες, κόλπους, παράκτιες περιοχές και στην ανοιχτή θάλασσα. Μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις περιπτώσεις στις οποίες είναι δυνατό να αγνοηθεί η στρωμάτωση των υδάτινων σωμάτων καθώς και να προσομοιώσει ένα ευρύ φάσμα φαινομένων όπως η παλίρροια, τα ανεμογενή και κυματογενή ρεύματα κλπ. Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε η έκδοση της δισδιάστατης ανάλυσης του υδροδυναμικού μοντέλου, εφόσον το ενδιαφέρον μας ως προς τη διαίτα της κυματογενούς κυκλοφορίας εστιάζεται στην παράκτια ζώνη.

Το υδροδυναμικό μοντέλο (HD) είναι ένα αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, με σταθερές αποστάσεις κανάβου στους άξονες  $x$  και  $y$ , που περιγράφει τη

δισδιάστατη μη μόνιμη ροή προσομοιώνοντας την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και τη ροή κατά τις δύο διευθύνσεις, σε κάθε σημείο του κανάβου.

Στους υδροδυναμικούς υπολογισμούς που εκτελούνται με το MIKE 21 λαμβάνονται υπόψη:

- η διατμητική τάση που αναπτύσσεται στον πυθμένα
- η διατμητική τάση που προκαλεί ο άνεμος στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού
- η μεταβολή του βαρομετρικού πεδίου
- η δύναμη Coriolis
- η διασπορά της ορμής
- η εξάτμιση
- η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας
- τα σημεία παροχών εισόδου και εξόδου (πηγές και καταβόθρες)

καθώς και άλλες παράμετροι, οι οποίες αναφέρονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

2.5.2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο Υδροδυναμικού Μοντέλου. Οι εξισώσεις στις οποίες βασίζεται η επίλυση του υδροδυναμικού μοντέλου είναι η εξίσωση συνέχειας και οι εξισώσεις ποσότητας της κίνησης κατά  $x$  και  $y$ , ολοκληρωμένες καθ' ύψος ( $z$ ), όπως φαίνονται παρακάτω:

1) Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (2-40)$$

2) Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά  $x$ :

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fV V_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_\alpha) = 0 \quad (2-41)$$

3) Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά  $y$ :

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega p - fV V_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_\alpha) = 0 \quad (2-42)$$

$h(x,y,t)$ : βάθος νερού (=  $\zeta-d$ , m)  
 $d(x,y,t)$ : συνολικό βάθος (m)  
 $\zeta(x,y,t)$ : ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας (m)

$p(x,y,t)$ :	ποσότητα κίνησης στη διεύθυνση $x$ ( $m^3/m/s$ )
$q(x,y,t)$ :	ποσότητα κίνησης στη διεύθυνση $y$ ( $m^3/m/s$ )
$C(x,y)$ :	συντελεστής τριβής κατά Chezy ( $m^{0.5}/s$ )
$g$ :	επιτάχυνση βαρύτητας ( $= 9,81m/s^2$ )
$f(V)$ :	συντελεστής τριβής ανέμου
$V_x, V_y(x,y,t)$ :	συνιστώσες ταχύτητας ανέμου κατά $x$ και $y$ ( $m/s$ )
$\Omega(x, y)$	συντελεστής Coriolis ( $s^{-1}$ )
$p_a(x,y,t)$ :	ατμοσφαιρική πίεση ( $kg/m/s^2$ )
$\rho_w$ :	πυκνότητα νερού ( $kg/m^3$ )
$x, y$ :	χωρικές συντεταγμένες ( $m$ )
$t$ :	χρόνος ( $s$ )
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ :	συνιστώσες ενεργών τάσεων ακτινοβολίας

Το μοντέλο MIKE 21 FM (HD) χρησιμοποιεί τον Αλγόριθμο Εναλλασσόμενης Κατεύθυνσης (Alternating Direction Implicit - ADI) για τη χρονική και χωρική ολοκλήρωση των παραπάνω εξισώσεων. Τα μητρώα εξισώσεων που προκύπτουν για κάθε κατεύθυνση και κάθε μεμονωμένη γραμμή πλέγματος επιλύονται από έναν αλγόριθμο διπλών περασμάτων (Double Sweep - DS).

2.5.2.3 Αποτελέσματα μοντέλου HD. Στα Σχήματα 2-23 έως 2-26 απεικονίζεται το υδροδυναμικό πεδίο για κάθε διεύθυνση ανεμογενούς κυματισμού. Οι τιμές της ποσότητας ροής κίνησης,  $P$  και  $Q$ , έχουν προσομοιωθεί με δεδομένα εισόδου τα ύψη κυματισμού και τις τάσεις ακτινοβολίας που προέκυψαν από το κυματικό μοντέλο. Επίσης παρατίθενται τα σχήματα (2-27 έως 2-30) με τις μέσες κατά βάθος ταχύτητες κυκλοφορίας,  $U$  και  $V$ .

Με άσπρο χρώμα σημαίνεται η περιοχή της ξηράς και με κόκκινο η ακριβής τοποθεσία της ανάβλυσης. Στα σχήματα διακρίνεται η φορά και το μέγεθος των διανυσμάτων, σύμφωνα με βέλος αναφοράς και το εύρος των διαστημάτων της βαθμονομημένης κλίμακας. Σημειώνουμε ξανά ότι η προσομοίωση αφορά ακραία καιρικά φαινόμενα. Στον Πίνακα 2-12 δίδονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τη θέση της ανάβλυσης.

Πίνακας 2-12: Αποτέλεσμα προσομοίωσης στη θέση της ανάβλυσης

Οριζόντια και κάθετη ροή και ταχύτητα στην υδάτινη στήλη στο σημείο της ανάβλυσης	ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ			
	N	ΝΔ	Δ	ΒΔ
P (m <sup>3</sup> /sm)	14.631	-24.468	0.683	0.669
Q (m <sup>3</sup> /sm)	2.632	-3.554	0.186	-0.931
U (m/s)	0.661	-1.571	0.027	0.028
V (m/s)	0.123	-0.225	0.008	-0.038

Συμπληρωματικά γίνεται αναφορά στις ταχύτητες ροής που θα προκαλούσε ενδεχόμενη ανάπτυξη σεισμογενούς θαλάσσιου κυματισμού. Ως γνωστόν η υπό εξέταση περιοχή βρίσκεται κοντά στο ‘ελληνικό τόξο’, το όριο δηλαδή μεταξύ των τεκτονικών πλακών της Αφρικής και του Αιγαίου, όπου κατά τεκμήριο εκδηλώνεται έκλυση σεισμικής ενέργειας. Για τη δημιουργία τσουνάμι χρειάζεται να ισχύουν ορισμένοι περιορισμοί, όπως μικρό εστιακό βάθος, ένταση πάνω από κάποιο όριο γύρω στο 6,5 R, κλπ. Έτσι η εκδήλωση τέτοιου φαινομένου παρόλο που δεν μπορεί να αποκλεισθεί συναρτάται γενικά με μικρή πιθανότητα εμφάνισης. Για τις ανάγκες σχεδιασμού ενδεχόμενων έργων απόληψης νερού σκόπιμο είναι παρά ταύτα να έχουμε μία κατά προσέγγιση έστω εκτίμηση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών ενός τέτοιου κύματος.

Είναι γνωστό ότι λόγω της μεγάλης περιόδου των κυμάτων τσουνάμι, τα τελευταία συμπεριφέρονται ως μακρά κύματα σε όλα τα βάθη θαλάσσης της Γης. Ως εκ τούτου η φασική τους ταχύτητα είναι κοντά στην τιμή  $(gd)^{1/2}$ , όπου  $d$  το βάθος. Για την περιοχή μελέτης η ταχύτητα αυτή θα είναι επομένως περί τα 16 m/s. Η αντίστοιχη ταχύτητα των υγρών μορίων εκτιμάται με βάση τη θεωρία του μοναχικού κύματος με το οποίο προσομοιάζεται συνήθως η υδροδυναμική συμπεριφορά ενός κύματος τσουνάμι. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή η μέγιστη πυθμενική ταχύτητα  $u_{\max}$  μπορεί να εκφρασθεί συναρτήσει της φασικής ταχύτητας  $c$  όπως παρακάτω (SPM, 1975):

$$u_{b,\max} = c \cdot N / 2$$

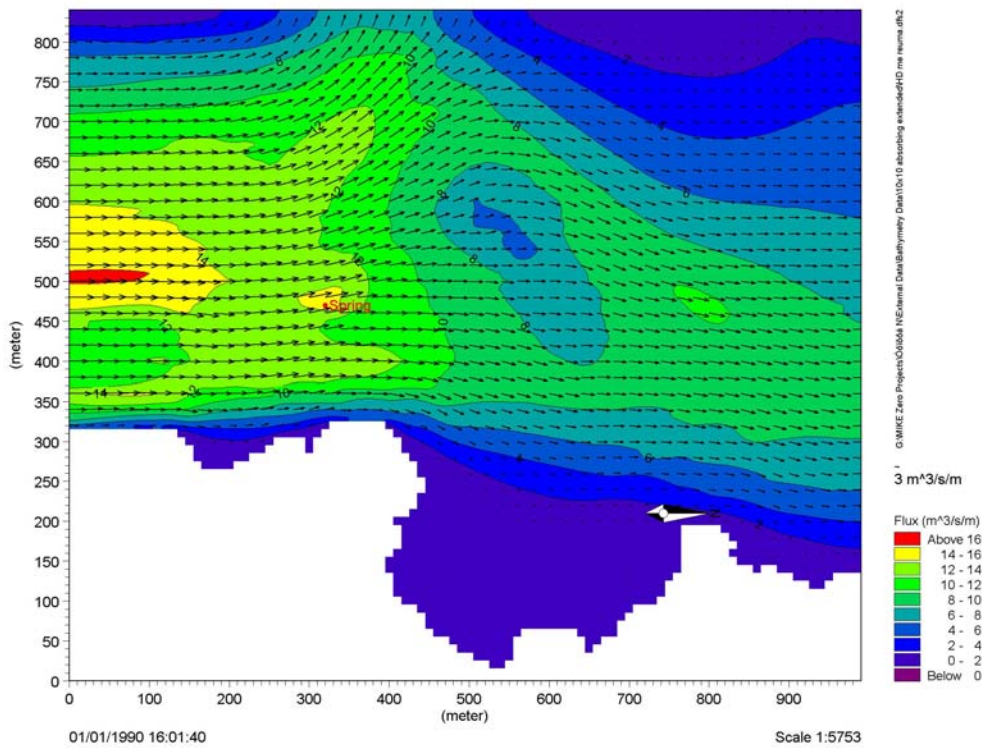
όπου  $N$  παράμετρος που εξαρτάται από το λόγο  $H/h$  (ύψος κύματος/βάθος).

Για ένα πιθανό ύψος κύματος της τάξης του 0,5 m προκύπτει για την περιοχή μελέτης (Munk, 1949),  $N=0,03$  και επομένως  $u_{b,\max} = 0,25$  m/s.

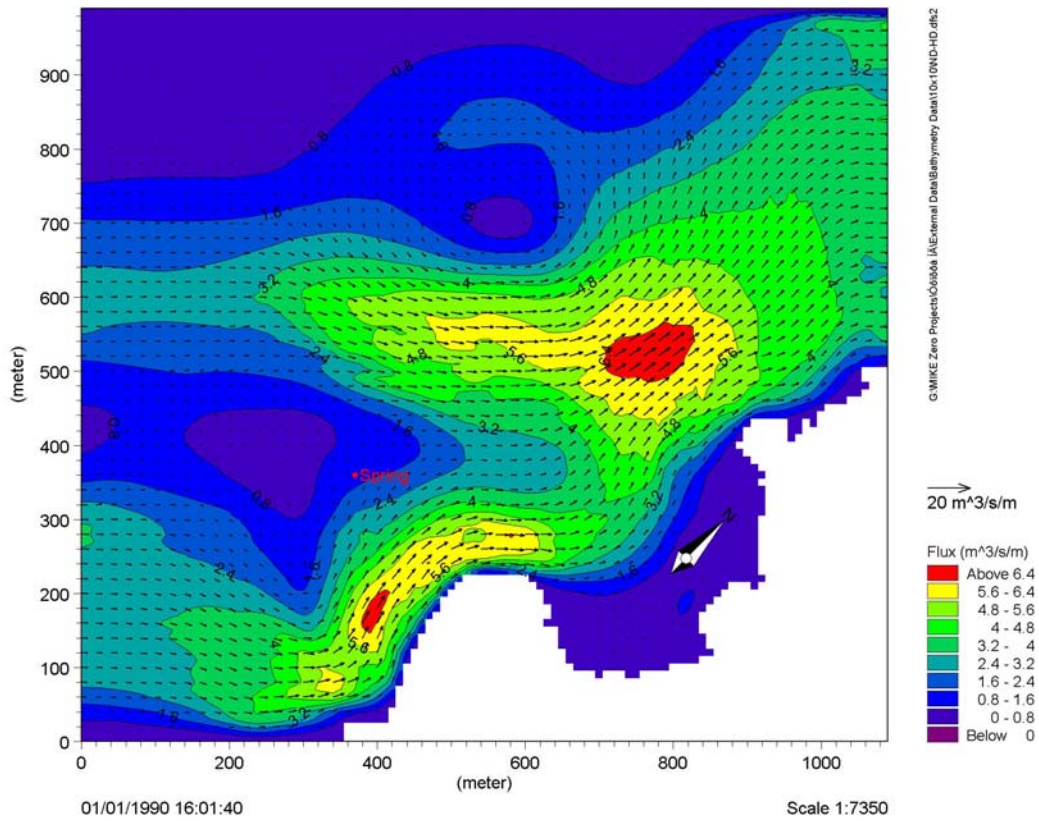
Καθ’ ύψος της υγρής στήλης η μέγιστη ταχύτητα είναι διπλάσια της πυθμενικής, επομένως  $u_{b,\max} = 0,50$  m/s.



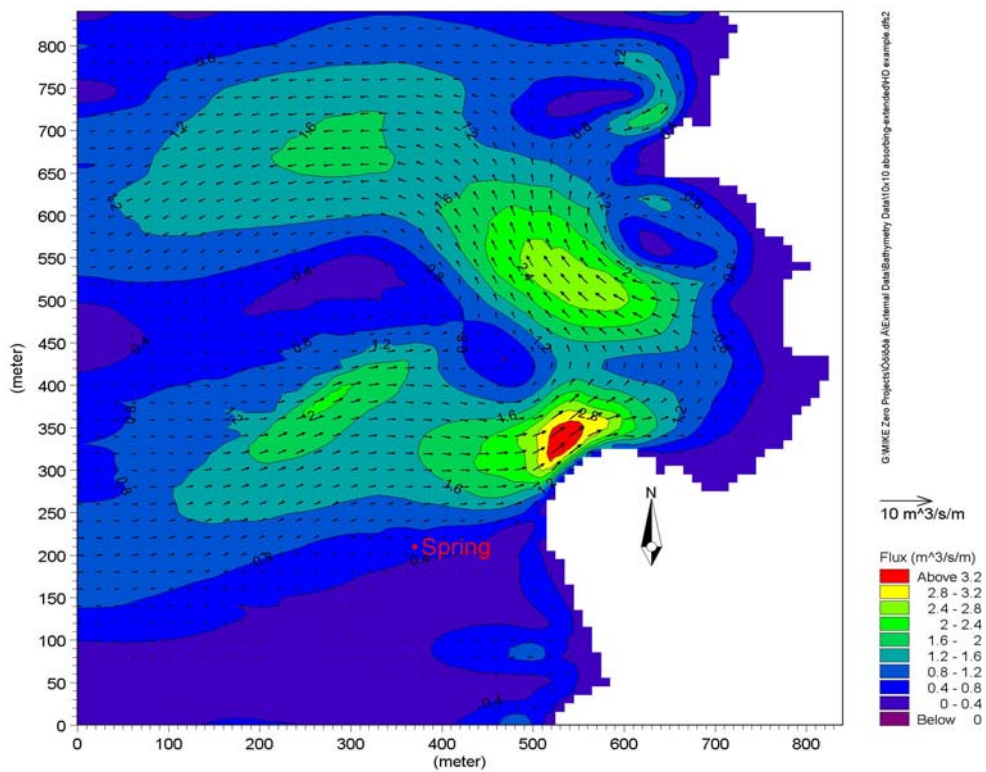
Οι πιο πάνω ταχύτητες είναι συνδεδεμένες με πολύ μικρές συχνότητες επαναφοράς της τάξεως του 1 ανά 500 έτη, μπορούν όμως να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό των τεχνικών έργων λαμβάνοντας υπόψη αντίστοιχα μειωμένους συντελεστές ασφαλείας.



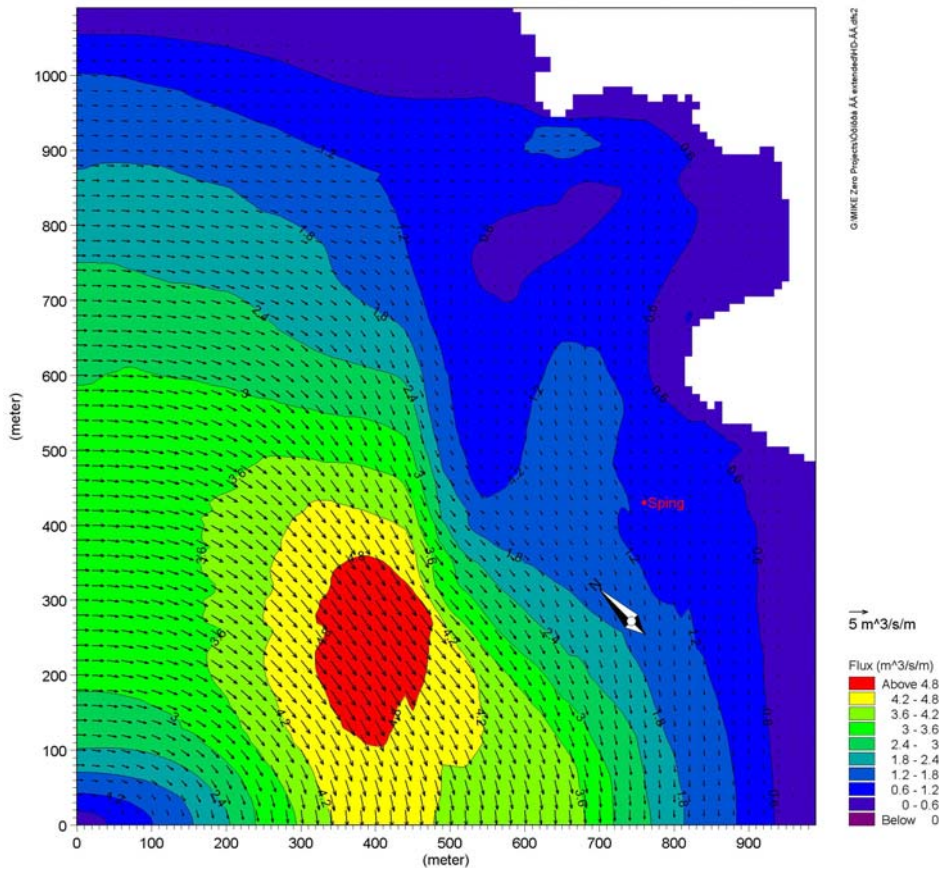
Σχήμα 2-27: Ποσότητα κίνησης για κύμα από το Νότο,  $H_s = 3.40$  m,  $T_p = 9.70$  s.



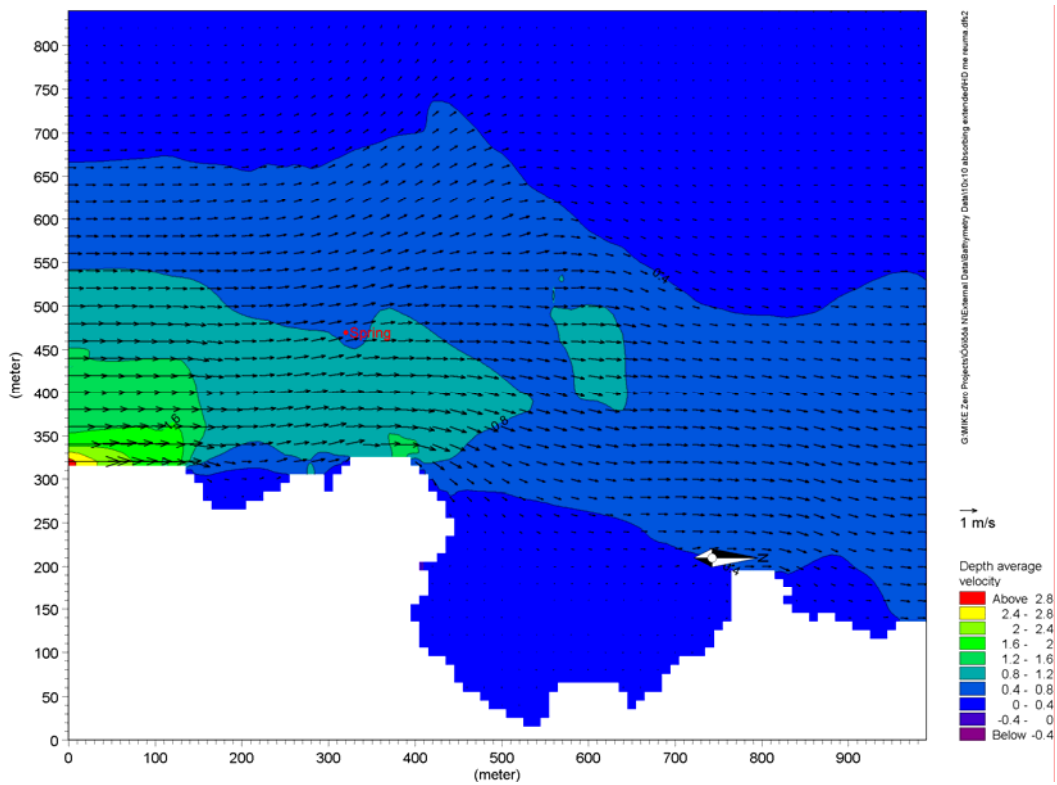
Σχήμα 2-28: Ποσότητα κίνησης για κύμα από ΝΔ,  $H_s=4,50$  m,  $T_p=14,62$  s.



2-29: Ποσότητα κίνησης για κύμα από Δ,  $H_s=3,75$ m,  $T_p=8,25$  s.

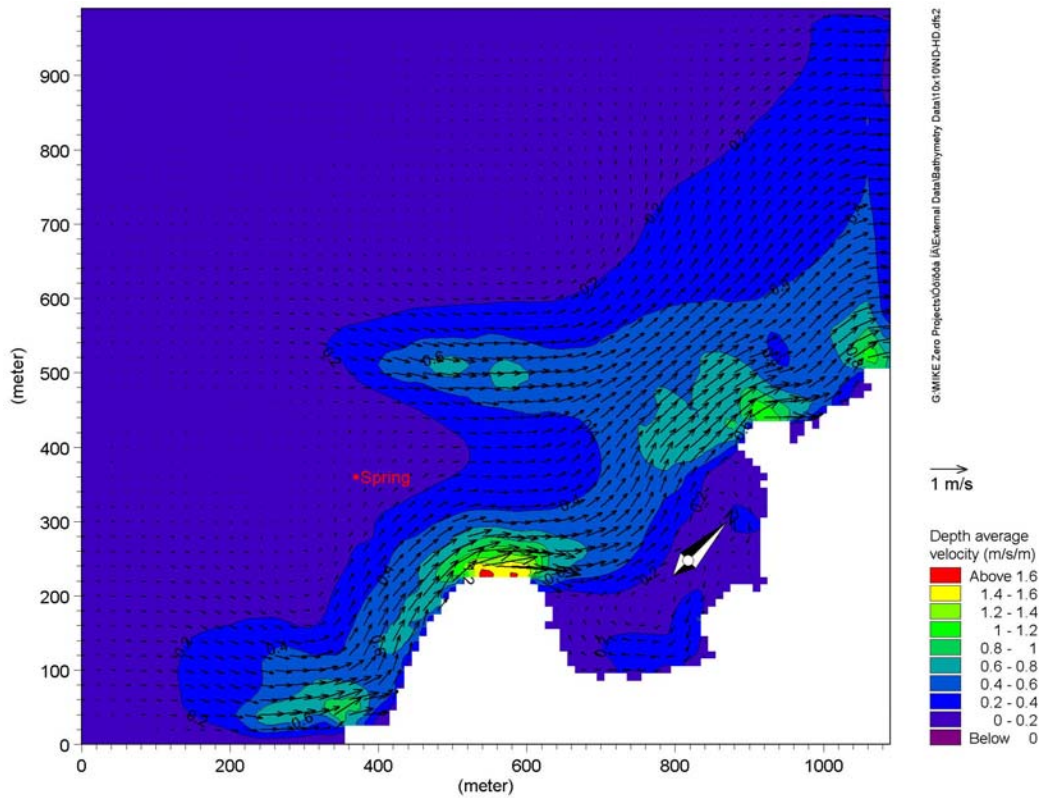


Σχήμα 2-30: Ποσότητα κίνησης για κύμα από ΒΔ,  $H_s = 2,10$  m,  $T_p = 9,98$  s.

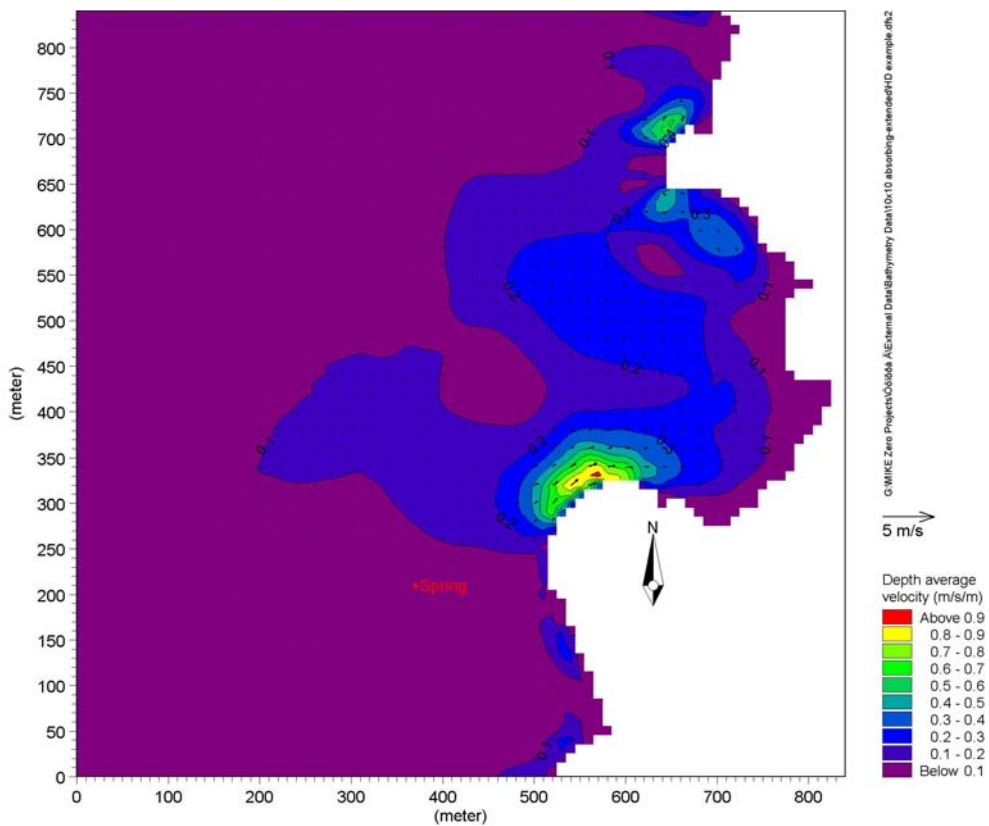


Σχήμα 2-31: Μέση κατά βάθος ταχύτητα κυκλοφορίας για κύμα από Ν,  $H_s = 2,10$  m,  $T_p = 9,98$  s.

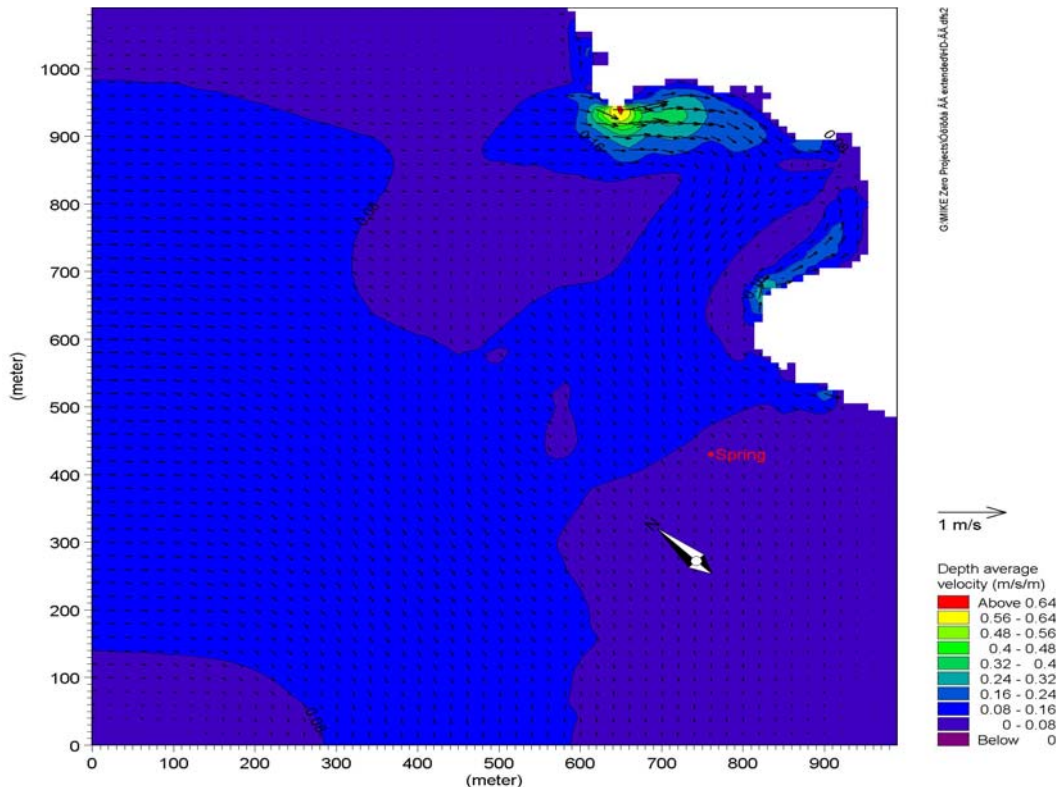




Σχήμα 2-32: Μέση κατά βάθος ταχύτητα κυκλοφορίας για κύμα από ΝΔ,  $H_s = 4,50$  m,  $T_p = 14,6$  s.



Σχήμα 2-33: Μέση κατά βάθος ταχύτητα κυκλοφορίας για κύμα από Δ,  $H_s = 3,75$  m,  $T_p = 8,25$  s.



Σχήμα 2-34: Μέση κατά βάθος ταχύτητα κυκλοφορίας για κύμα από ΒΔ,  $H_s = 2.10$  m,  $T_p = 9.98$  s.

## 2.6 Εκτίμηση στερεοπαροχής

### 2.6.1 Κίνηση ιζήματος στην περιοχή της ανάβλυσης

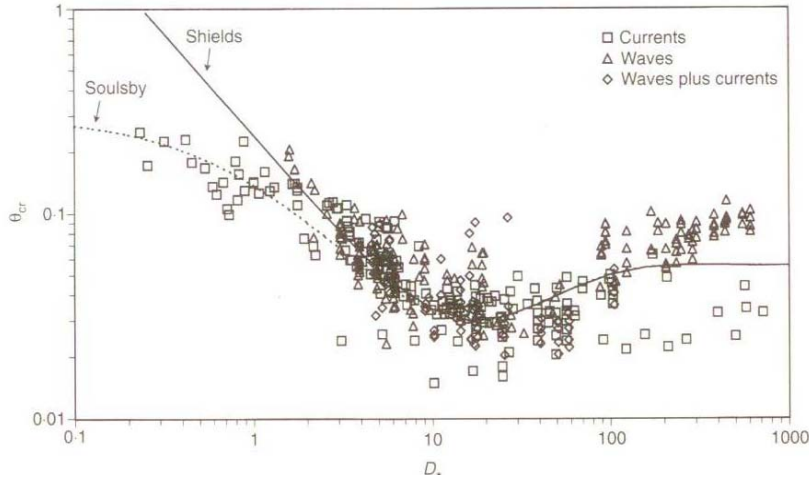
Για τον υπολογισμό της κίνησης των ιζημάτων στον πυθμένα της περιοχής ακολουθείται διαδικασία με βάση το διάγραμμα του Shields (1936), η οποία αναπτύχθηκε σε όρους του ποσοστού της διατμητικής τάσης που ασκείται στον κόκκο άμμου του πυθμένα λόγω της συνδυασμένης κίνησης κύματος και ρεύματος και του βάρους του κόκκου στο νερό. Κατά τον υπολογισμό της κίνησης του ιζήματος χρησιμοποιήθηκε το μέσο κύμα (με βάση τις ετήσιες συχνότητες) σύμφωνα με τη μέθοδο πρόγνωσης κυματισμού που προτείνεται από το CEM. Η παράμετρος Shields  $\theta_{cr}$  ορίζεται ως:

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho)d}, \quad (2-43)$$

όπου  $\tau_{cr}$  η διατμητική τάση πυθμένα,  $g$  η επιτάχυνση βαρύτητας,  $\rho_s$  η πυκνότητα κόκκου,  $\rho$  η πυκνότητα νερού και  $d$  η διάμετρος κόκκου. Η παράμετρος απεικονίζεται στο Σχήμα 2-35 συγκριτικά με το αδιάστατο μέγεθος κόκκου:

$$D_* = \left[ \frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} d \quad (2-44)$$

όπου  $v$  η κινηματική συνεκτικότητα του νερού και  $s = \rho_s/\rho$ .

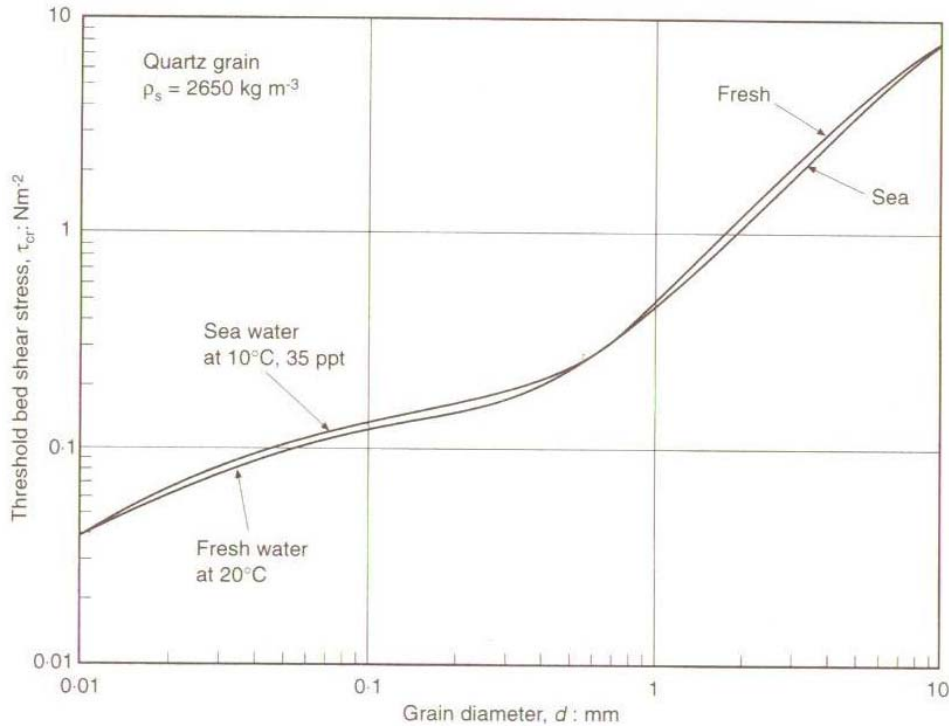


Σχήμα 2-35: Η παράμετρος Shields  $\theta_{cr}$  σε σχέση με το αδιάστατο μέγεθος κόκκου  $D_*$ , Soulsby (1997).

Η έκφραση του Shields η οποία αναφέρεται σε σταθερή ροή ρεύματος μπορεί να επεκταθεί για κυματισμούς, όπως επίσης και για συνδυασμό ρεύματος και κυματισμών. Οι Soulsby και Whitehouse (1997) έδωσαν μια αλγεβρική έκφραση της παραμέτρου Shields  $\theta_{cr}$  που ταιριάζει στην παραπάνω καμπύλη:

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2D_*} + 0.055[1 - \exp(-0.02D_*)] \quad (2-45)$$

Στο Σχήμα 2-37 αποτυπώνονται οι καμπύλες της κρίσιμης διατμητικής τάσης σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου για γλυκό και αλμυρό νερό.



Σχήμα 2-36: Διάγραμμα κρίσιμης διατμητικής τάσης  $\tau_{cr}$  ( $\text{Nm}^{-2}$ ) σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου  $d$  (mm) (Soulsby, 1997).

Για τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης στον πυθμένα από τη συνδυασμένη δράση κυματισμών και ρεύματος χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\tau_{cw} = \frac{1}{2} \rho f_{cw} u_b^2 \quad (2-46)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα νερού,  $f_{cw}$  ο συντελεστής τριβής πυθμένα για συνδυασμό ρεύματος και κυματισμών, και  $u_b$  η ταχύτητα κύματος και ρεύματος στον πυθμένα. Ο συντελεστής τριβής για συνδυασμό ρεύματος και κυματισμών είναι:

$$f_{cw} = \lambda f_c + (1 - \lambda) f_w \quad (2-47)$$

όπου  $f_c, f_w$  οι συντελεστές τριβής ρεύματος και κύματος αντίστοιχα,  $\lambda$  παράμετρος που δίνεται από τη σχέση  $\lambda = u/(u+u_0)$ ,  $u$  η ταχύτητα ρεύματος, και  $u_0$  η ταχύτητα ρευστού σωματιδίου στον πυθμένα λόγω κύματος ( $=\pi H/T \sinh kh$ ).

Οι συντελεστές τριβής μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$f_c = 2g/C^2, \quad (2-48)$$

όπου  $C$  ο συντελεστής Chezy,

$$C = 18 \log(12h/k_s); \quad (\text{m}^{1/2}/\text{s}) \quad (2-49)$$

$$f_w = \exp\left\{5.213\left(\frac{k_s}{\xi}\right)^{0.19} - 5.977\right\} \quad (2-50)$$

ενώ  $\xi = u_o T / 2\pi$ ,  $T$  η περίοδος κυματισμού και  $k_s = 2.5 \cdot d_{50}$ .

Η εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας υπολογισμού της κίνησης των ιζημάτων στον πυθμένα της περιοχής φαίνεται στον Πίνακα 2-13. Για κάθε διεύθυνση (N, ΝΔ, Δ, ΒΔ) και για κυματισμό μέσης έντασης αλλά μεγάλης συχνότητας υπολογίστηκε το μέγεθος του κόκκου πάνω από το οποίο δεν έχουμε κίνηση ιζήματος για τις δεδομένες συνθήκες ροής.

Πίνακας 2-13: Εφαρμογή ελέγχου κίνησης ιζήματος

	N	ΝΔ	Δ	ΒΔ
Βάθος $h$ (m)	26			
Ύψος κύματος $H$ (m)	1.61	2.62	1.165	0.55
Περίοδος $T$ (s)	5.83	6.09	4.7	2.8
Μήκος κύματος $L$ (m)	53.07	57.9	34.49	12.24
Ετήσια συχν. εμφάνισης %	3.518	1.114	3.55	8.328
Ταχύτητα ρεύματος $u_c$ (m/s)	0.05	0.05	0.05	0.05
Ταχύτητα κύματος $u_o$ (m/s)	0.08	0.161	0.013	1.97E-06
Πυθμενική ταχύτητα $u_b$ (m/s)	0.094	0.169	0.052	0.05
$k_s$ (m)	$1.25 \cdot 10^{-5}$	0.0008	1.625E-06	3.75E-08
$\xi$ (m)	0.074	0.156	0.01	8.8E-07
$C$ (m <sup>1/2</sup> /s)	133.15	100.64	149.1	178.5622
$f_c$	0.001	0.0019	0.001	0.000615
$\lambda$	0.384	0.236	0.785	0.999961
$f_w$	0.007	0.017	0.007	0.044398
$f_{cw}$	0.004	0.014	0.002	0.000617
$\vartheta_{cr}$	0.267	0.041	0.295	0.3
$D^*$	0.101	6.497	0.013	0.0003
$s$	2.578	2.578	2.578	2.578
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$1.36 \cdot 10^{-6}$	$1.36 \cdot 10^{-6}$	$1.36 \cdot 10^{-6}$	$1.36 \cdot 10^{-6}$
$\tau_{cr} = \tau_{cw}$ (N/m <sup>2</sup> )	0.021	0.207	0.003	0.00075
<b><math>d_{cr}</math> (mm)</b>	<b>0.005</b>	<b>0.32</b>	<b>0.00065</b>	<b>0.000015</b>

Όπως είδαμε και προηγουμένως η διάμετρος του μέσου κόκκου  $d_{50}$  στη θέση της πηγής είναι 1 mm. Σύμφωνα με τον παραπάνω έλεγχο κίνησης ιζήματος θα έχουμε μετακίνηση κόκκου αλλά σε ποσοστό αρκετά μικρότερο από 50%. Από τα στοιχεία του Πίνακα 2-13 προκύπτει ότι η ουσιαστική κίνηση ιζημάτων προκαλείται από ΝΔ

κυματισμούς για τα βάρη που ισχύουν στη θέση της ανάβλυσης και επομένως η κατεύθυνση κίνησής τους είναι προς την ακτή στην εν λόγω περιοχή.

Για το λόγο αυτό, σε περίπτωση κατασκευής έργων υδροληψίας στην ανάβλυση, θα απαιτηθεί η δημιουργία τάφρου παγίδευσης του ιζήματος περιμετρικά των έργων και σε κάποια απόσταση από αυτά.

### 2.6.2 Στερεοπαροχή κατά μήκος της ακτής

Η συνολική μεταφορά ιζήματος κατά μήκος της ακτής δίνεται από την εξίσωση ( $m^3$ ):

$$Q = 1290 P_1 \quad (2-51)$$

όπου  $P_1$  κινούμενο υγρό (ενέργεια/χρόνο  $\times$  απόσταση) σε μοναδιαίο μήκος κατά μήκος της ακτής και υπολογίζεται από τη σχέση

$$P_1 = 0.0884 \rho g^{3/2} H_{sb}^{5/2} \sin a_{sb} \quad (J/m \cdot sec): \quad (2-52)$$

όπου  $H_{sb}$  (m) το σημαντικό ύψος κύματος στο σημείο της θραύσης και  $a_{sb}$  η αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσής του.

Η ετήσια δυνητική παροχή στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής προκύπτει έτσι  $Q = 121.855 m^3/year$ .

## 2.7 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης τα ύψη των χαρακτηριστικών κυματισμών στο σημείο της ανάβλυσης πλησιάζουν τα 4,0 m για περίοδο επαναφοράς 10 έτη με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται αξιόλογες δράσεις σε ενδεχόμενα σταθερά εμπόδια. Ωστόσο οι μελλοντικές κατασκευές θα γίνει προσπάθεια να κατασκευασθούν ύφαλεις, ώστε να προκύψει κατά το δυνατόν απομείωση των κυματικών δράσεων επάνω σε αυτές.

Επιπρόσθετα, οι διατμητικές τάσεις που ασκούνται στον πυθμένα από τη συνδυασμένη δράση ρευμάτων και κυματισμών επιφέρουν μετακίνηση μόνο του λεπτόκοκκου κλάσματος του ιζήματος που βρίσκεται στην περιοχή της υποθαλάσσιας πηγής. Η γενική κατεύθυνση του πλέον χονδρόκοκκου από το μετακινούμενο ίζημα ( $d > 0.3\text{mm}$ ) είναι προς τα ΒΑ. Για να αποτραπεί η παρεμπόδιση των όποιων έργων από τις κινήσεις αυτές, σε περίπτωση κατασκευής έργων, θα απαιτηθεί κατάλληλη διάταξη που να δρα ως ‘παγίδα ιζήματος’, περιμετρικά και σε κάποια απόσταση από την ανάβλυση για αποφυγή μελλοντικής πρόσχωσής της.

### 3. ΑΠΟΛΗΨΗ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΠΗΓΕΣ

#### 3.1 Θεωρητική προσέγγιση ανάβλυσης

Οι υποθαλάσσιες πηγές γλυκού νερού είναι δυνατόν να προσομοιωθούν με κατακόρυφες ανωστικές φλέβες οπής ή σχισμής από τον πυθμένα της θάλασσας. Ως φλέβες ορίζονται γενικά οι εκροές ρευστού μέσα σε ένα ρευστό περιβάλλον. Για την περίπτωση της υπό εξέταση ανάβλυσης στη Στούπα Μεσσηνίας, όπου υπάρχει ανάβλυση που καλύπτεται από ένα βράχο, η υποθαλάσσια ανάβλυση είναι δυνατόν να προσομοιωθεί ως σημειακή πηγή, αμελώντας την ύπαρξη του βράχου, η οποία προκαλεί σημαντική ανάμειξη με το θαλασσινό νερό και κατά συνέπεια καθιστά μη εκμεταλλεύσιμη άμεσα την πηγή.

Έστω ότι έχουμε μια πηγή με επιφάνεια διατομής  $A$  η οποία λειτουργεί πλήρης, δηλαδή υπάρχει κατακόρυφη ροή γλυκού νερού από ολόκληρη την επιφάνεια της πηγής. Εάν η παροχή (όγκος ανά μονάδα χρόνου) της πηγής είναι  $Q_0$ , τότε για αλατότητα 38‰, η πυκνότητα του θαλασσινού νερού είναι περίπου  $\rho_a=1027.2$  g/L. Η πυκνότητα του γλυκού νερού για θερμοκρασίες περί τους 20°C όπως μετρήθηκαν κατά τους καλοκαιρινούς μήνες από το ΕΛΚΕΘΕ (Εκθεση Δεκεμβρίου 2009) είναι  $\rho_0=998.2$  g/L, οπότε η πυκνομετρική διαφορά ανάμεσα στο γλυκό και θαλασσινό νερό είναι περίπου 29 g/L ή η σχετική διαφορά ( $\Delta\rho/\rho \approx 3\%$ ). Η διαφορά συγκέντρωσης είναι της τάξης των 40 g/L. Στη συνέχεια παρουσιάζονται βασικά στοιχεία θεωρίας ανωστικών φλεβών (Fischer et al. 1979) χρήσιμα στην περαιτέρω ανάλυση.

#### 3.2 Ανωστικές φλέβες (buoyant jets)

##### 3.2.1 Ορισμοί

Ως ανωστική φλέβα ορίζεται η εκροή ρευστού μέσα σε αποδέκτη με ρευστό διαφορετικής πυκνότητας. Έστω μία κατακόρυφη ανωστική φλέβα που εκρέει από κυκλικό στόμιο διαμέτρου  $D$  με πυκνότητα  $\rho_0$  μέσα σε ήρεμο ομογενή αποδέκτη με μεγαλύτερη πυκνότητα  $\rho_a$  ( $\rho_a > \rho_0$ ). Η αρχική ογκομετρική παροχή της φλέβας  $Q_0$ , η ειδική, ανά μονάδα μάζας του ρέοντος ρευστού, ορμή  $M_0$  (specific mass flux) και η κινηματική ή ειδική, ανά μονάδα μάζας του ρέοντος ρευστού, άνοση  $B_0$  (specific buoyancy flux) καθώς και οι αντίστοιχες διαστάσεις τους εκφράζονται από τις σχέσεις:



$$Q_o = \frac{\pi D^2}{4} W \quad [\text{L}^3/\text{T}] \quad (3-1)$$

$$M_o = Q_o W \quad [\text{L}^4/\text{T}^2] \quad (3-2)$$

$$B_o = \frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_a} g Q_o \quad [\text{L}^4/\text{T}^3] \quad (3-3)$$

αντίστοιχα, όπου  $W$  είναι η αρχική μέση ταχύτητα εξόδου και  $\rho_o$  είναι η πυκνότητα του ρευστού της φλέβας στο ακροφύσιο.

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς και αρχικές συνθήκες της φλέβας, μπορούμε να ορίσουμε σαν απλή φλέβα (jet) αυτή για την οποία αρχικά  $B_o = 0$  (ή εναλλακτικά  $M_o \gg B_o$ ,  $B_o \rightarrow 0$ ), σαν πλούμιο (plume) τη φλέβα για την οποία αρχικά  $M_o = 0$  (ή εναλλακτικά  $B_o \gg M_o$ ,  $M_o \rightarrow 0$ ) και σαν ανωστική φλέβα αυτή η οποία αρχικά έχει σημαντικό μέγεθος ειδική ορμή και άνωση ( $M_o \neq 0$  και  $B_o \neq 0$ ).

Όταν αρχικά  $M_o \gg B_o$ , τότε στη ροή υπερισχύει η αρχική ορμή με αποτέλεσμα να συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα κοντά στην εκροή. Όταν  $B_o \gg M_o$ , τότε στη φλέβα υπερισχύει η ορμή που προήλθε από την ανωστική δύναμη με αποτέλεσμα να συμπεριφέρεται σαν πλούμιο. Όταν  $M_o$  και  $B_o$  είναι της ίδιας τάξης μεγέθους η φλέβα συμπεριφέρεται σαν ανωστική φλέβα. Ωστόσο κάθε ανωστική φλέβα μακριά από την πηγή μεταπίπτει σε πλούμιο δηλαδή διέπεται από την άνωση και η ορμή που δημιουργείται από αυτήν είναι πολύ μεγαλύτερη από την αρχική ορμή.

### 3.2.2 Χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους της ροής

Σε μια απλή κυκλική φλέβα τα αρχικά χαρακτηριστικά είναι μόνο η παροχή  $Q_o$  και η ειδική ορμή  $M_o$ , με βάση τις οποίες οι Fischer *et al.* (1979) προτείνουν μια χαρακτηριστική κλίμακα μήκους  $l_Q$  που ορίζεται ως

$$l_Q = \frac{Q_o}{\sqrt{M_o}} \quad (3-4)$$

και είναι ίση με την τετραγωνική ρίζα της επιφάνειας του ακροφυσίου. Σε μια ανωστική φλέβα (με αρχικά χαρακτηριστικά  $Q_o$ ,  $M_o$ ,  $B_o$ ) οι ίδιοι συγγραφείς ορίζουν μια δεύτερη κλίμακα μήκους  $l_M$  που εμπεριέχει εκτός από τα αδρανειακά και τα ανωστικά χαρακτηριστικά της φλέβας ως

$$l_M = \frac{M_o^{3/4}}{B_o^{1/2}} \quad (3-5)$$

Για αποστάσεις από την πηγή (εκροή) μεγαλύτερες από  $l_Q$  η παροχή που δημιουργείται από την συμπαράσυρση είναι μεγαλύτερη από την αρχική παροχή. Επίσης για αποστάσεις μεγαλύτερες από  $l_M$  η ορμή που οφείλεται στην άνωση είναι μεγαλύτερη από την αρχική ορμή.

Ο λόγος των δύο παραπάνω κλιμάκων μήκους ονομάζεται αρχικός αριθμός Richardson της φλέβας και ορίζεται ως

$$Ri_o = \frac{l_Q}{l_M} = Q_o B_o^{1/2} M_o^{-5/4} = (\pi/4)^{1/4} / F_o; \quad F_o = W / \sqrt{g_o' D} \quad (3-6)$$

Στην παραπάνω σχέση  $F_o$  είναι ο πυκνομετρικός αριθμός του Froude και  $g_o' = [(\Delta\rho)_o/\rho_a]g$  η φαινομενική επιτάχυνση της βαρύτητας. Για μεγάλους αριθμούς  $F_o$  κυριαρχεί η ορμή στην εκροή της φλέβας ενώ για πολύ μικρούς αριθμούς  $F_o$  η ροή συμπεριφέρεται ως πλούμιο από την εκροή της φλέβας. Πρακτικά για  $F_o > 10$  είναι  $z/l_M < 1$  οπότε έχουμε κυριαρχία της ορμής στην εκροή ενώ για  $F_o \sim 1$  η ροή ομοιάζει με τη ροή πλουμίου από την εκροή.

Ο Wilkinson (1988) εξέτασε την διείσδυση αλατόνερου σε φλέβες από σωλήνα και ακροφύσια λεπτής ακμής σαν συνάρτηση του αρχικού αριθμού Froude της ροής καθώς επίσης και του προσανατολισμού της φλέβας (από κατακόρυφη έως οριζόντια). Ο Σκανδάλης (2005) μελέτησε τις συνθήκες διείσδυσης θαλασσινού νερού σε στόμια κατακόρυφων φλεβών, τα οποία εκτός από κυκλική διατομή είχαν τετραγωνική, ισόπλευρη τριγωνική και ορθογωνική με στρογγυλεμένες γωνίες. Οι δύο αυτές εργασίες έδειξαν ότι για αριθμούς Reynolds της φλέβας

$$Re = \frac{W \times 4R}{\nu}; \quad R = A/P \quad (3-7)$$

που υπερβαίνουν το 2000, περιβάλλον ρευστό αρχίζει να διεισδύει όταν ο αριθμός του Richardson υπερβαίνει μια τιμή περί το 0.65. Στην παραπάνω εξίσωση  $R$  είναι η υδραυλική ακτίνα της διατομής του ακροφυσίου, δηλαδή ο λόγος της επιφάνειας  $A$  προς το μήκος της περιφέρειας  $P$ .

Η προσέγγιση της ανάβλυσσης υπό τη μορφή ανωστικής φλέβας προϋποθέτει ότι η υποθαλάσσια πηγή γλυκού νερού ρέει πλήρης, δηλαδή αναβλύζει γλυκό νερό από ολόκληρη τη διατομή έτσι ώστε να μην υπάρχει ανάμειξη με θαλασσινό νερό στο

«σωλήνα-δίοδο» από τον υποκείμενο καρστικό σχηματισμό μέχρι τον πυθμένα της θάλασσας όπου εμφανίζεται η ανάβλυση.

### 3.3 Αξιολόγηση χαρακτηριστικών της υπό μελέτη ανάβλυσης

#### 3.3.1 Χαρακτηριστικά εκροής

Με βάση τα παραπάνω γίνεται ένας πρώτος έλεγχος σχετικά με το κατά πόσο η πηγή στην εκροή της ενδέχεται να ρέει πλήρης. Από τις μετρήσεις του ΕΛΚΕΘΕ στην «εκβολή» της υποθαλάσσιας ανάβλυσης παρατηρήθηκαν ταχύτητες στην περιοχή 0.20 ~ 1.20 m/s, ενώ οι αλατότητες που μετρήθηκαν ήταν περίπου 22 g/L τον Αύγουστο 2009 και μηδενικές τον Νοέμβριο του ίδιου έτους (μετά τις έντονες βροχοπτώσεις του Οκτωβρίου). Εάν θεωρήσουμε ότι  $D = 4R$ , για να είναι ο αρχικός αριθμός Richardson της φλέβας μικρότερος του 0.65 πρέπει να ισχύουν τα εξής:

$$W = 0.20 \text{ m/s} \Rightarrow 4R = D = \left[ 0.65 \left( \frac{4}{\pi} \right)^{1/4} \frac{W}{\sqrt{g'_o}} \right]^2 = 0.067 \text{ m}$$

$$W = 1.20 \text{ m/s} \Rightarrow 4R = D = \left[ 0.65 \left( \frac{4}{\pi} \right)^{1/4} \frac{W}{\sqrt{g'_o}} \right]^2 = 2.41 \text{ m}$$

όπου η φαινομενική βαρύτητα (ανωστική επιτάχυνση) είναι

$$g'_o = \frac{\Delta\rho}{\rho_o} g = \frac{1027.2 - 998.2}{998.2} \times 9.81 = 0.285 \text{ m/s}^2.$$

Συνεπώς για ταχύτητα εκροής 0.20 m/s η διάμετρος εκροής δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0.067 m ενώ για ταχύτητα 1.20 m/s η διάμετρος δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 2.41 m ώστε να μην διεισδύει θαλάσσιο νερό στην πηγή της ανάβλυσης.

Ωστόσο θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπερκείμενος βράχος δημιουργεί δυσχέρειες στην παρακολούθηση της πηγής και στη συγκέντρωση δεδομένων και συνεπώς οι μετρημένες τιμές θα πρέπει να αντιμετωπιστούν με επιφύλαξη.

Θεωρώντας μια αρχική ιδεατή διάμετρο εκροής 0.5 m τότε για εύρος ταχυτήτων 0.20 m/s ως 1.20 m/s προκύπτει  $0.27 < F_o < 4$  και  $50000 < Re < 750000$ . Για διάμετρο της τάξης του 1 m προκύπτει  $0.19 < F_o < 2.9$  και  $100000 < Re < 1500000$ . Είναι προφανές ότι η ροή είναι τυρβώδης και ότι ο αριθμός  $F_o$  αναμένεται να είναι μικρός δηλαδή η ροή

γίνεται σύντομα όμοια με αυτήν πλουμίου. Επίσης για  $F_o < 1.5$  ( $Ri > 0.65$ ) ενδέχεται να υπάρχει διείσδυση θαλάσσιου νερού στην εκροή της πηγής.

### 3.3.2 Αραίωση του νερού της ανάβλυσης στην επιφάνεια της θάλασσας

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να εκτιμηθεί η αλατότητα στην επιφάνεια της θάλασσας πάνω από την μεγάλη ανάβλυση της Στούπας. Από τα δεδομένα του ΕΛΚΕΘΕ (Εκθεση Δεκεμβρίου 2009, σελ. 42) προέκυψε ότι η αλατότητα στην επιφάνεια της θάλασσας στην περιοχή της ανάβλυσης είναι περίπου 37.6 g/L. Εάν η ανάβλυση θεωρηθεί κατακόρυφη σε βάθος περίπου 26 m από την επιφάνεια, είναι δυνατή η πρόβλεψη της αλατότητας στην επιφάνεια σε περίπτωση που είναι γνωστή η αλατότητα του νερού που αναβλύζει (πλήρης ροή σε όλη τη διατομή). Θεωρούμε ότι αναβλύζει γλυκό νερό (μηδενική αλατότητα), ενώ η αλατότητα του θαλασσινού νερού είναι 39 g/L.

Η μέση αλατότητα στην επιφάνεια της θάλασσας προκύπτει εάν θεωρήσουμε την ανάβλυση κατακόρυφη με βάση τη γενικευμένη θεωρία των List & Imberger (1973) και τις παραμέτρους των Papanicolaou & List (1988) από τη σχέση (3-8)

$$\frac{\mu}{Q_o} = \frac{z}{z_o} \left\{ 1 + \left( \frac{Ri_o}{Ri_p} \right)^2 \left[ \left( \frac{z}{z_o} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{1/3} \quad (3-8)$$

όπου

$Q_o, \mu$  παροχή ανάβλυσης και παροχή φλέβας στην επιφάνεια

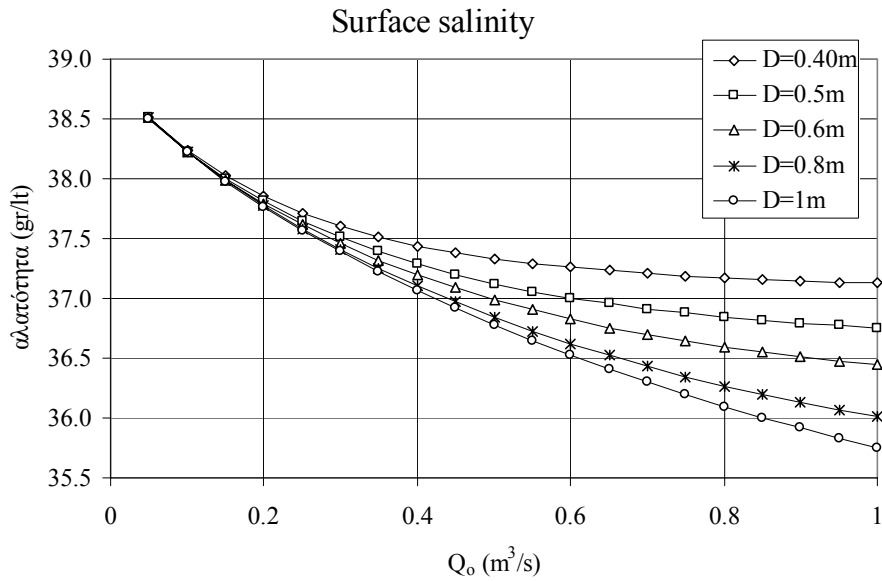
$Ri_o$  αρχικός αριθμός Richardson της φλέβας

$Ri_p$  οριακός αριθμός Richardson ενός πλουμίου (=0.63)

$z_o$  (=3.28D) απόσταση (από πυθμένα) του νοητού σημείου ανάβλυσης

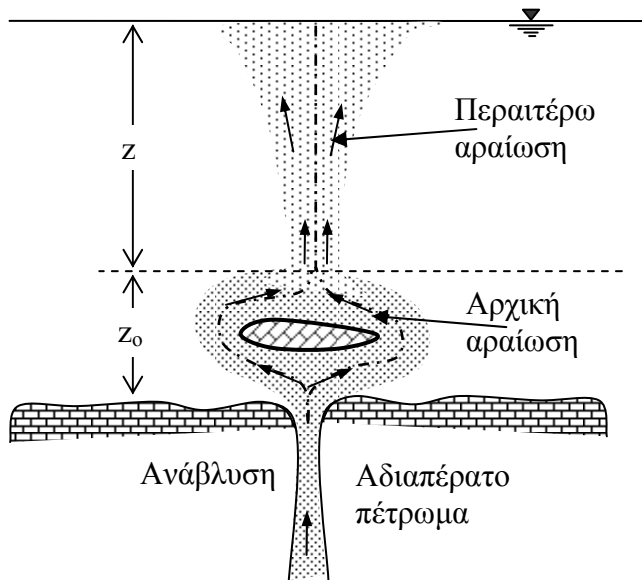
$z$  ( $\cong 26$ m) βάθος θάλασσας πάνω από την ανάβλυση

Στο διάγραμμα του Σχήματος 3-1 φαίνονται οι υπολογισμένες αλατότητες στην επιφάνεια της θάλασσας πάνω από την ανάβλυση, αν θεωρήσουμε ότι η ροή είναι ανεμπόδιστη, για ισοδύναμες διαμέτρους εκροής μεταξύ 0.40 m και 1.0 m και παροχές από 0.05 m<sup>3</sup>/s έως 1.0 m<sup>3</sup>/s. Παρατηρούμε ότι αλατότητα περίπου 37.50 g/L πάνω από την ανάβλυση προκύπτει για όλες τις διαμέτρους όταν η παροχή μεταβάλλεται από 0.3 έως 0.4 m<sup>3</sup>/s. Το αποτέλεσμα είναι συμβατό με τις μετρημένες αλατότητες από το ΕΛΚΕΘΕ για τον Οκτώβριο 2009 (σ. 42, Έκθεσης Δεκεμβρίου 2009).



Σχήμα 3-1: Μεταβολή της αλατότητας στην επιφάνεια ως συνάρτηση της παροχής της ανάβλυσης για διάφορες (ισοδύναμες) διαμέτρους.

Ωστόσο ο υπερκείμενος βράχος εμποδίζει την κατακόρυφη ανάπτυξη και διάχυση της ανάβλυσης δημιουργώντας ροή της μορφής του Σχήματος 3-2. Συγκεκριμένα η φλέβα εκρέει περίπου οριζόντια κάτω από το βράχο και στη συνέχεια αναβλύζει κατακόρυφα από ένα νοητό κέντρο πάνω από το βράχο.



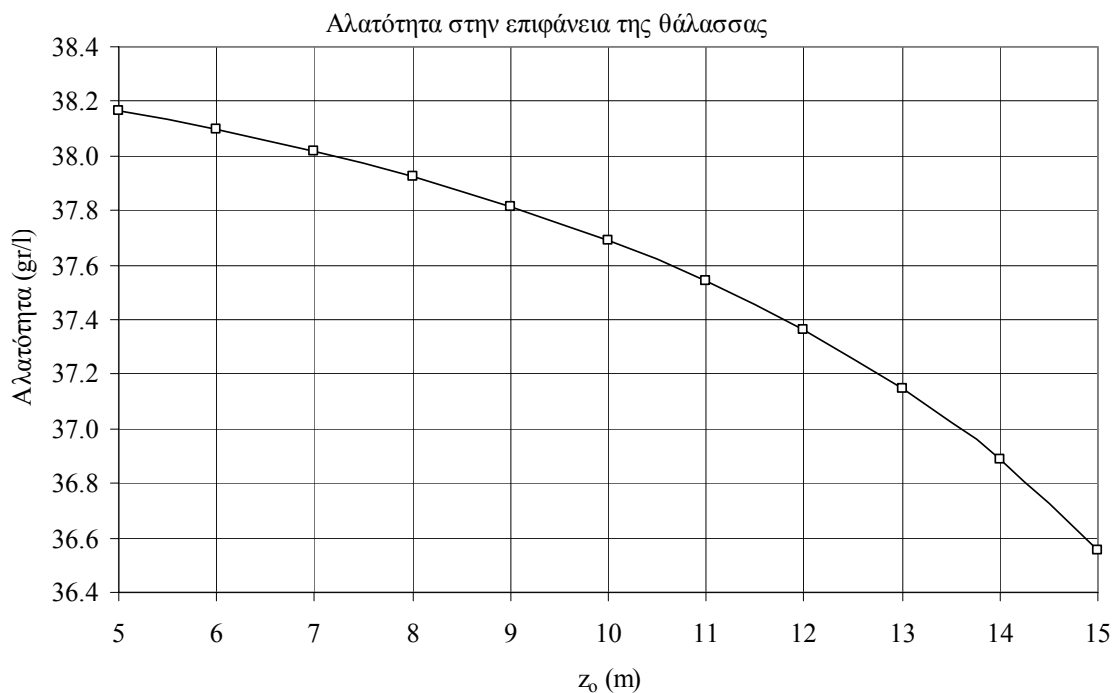
Σχήμα 3-2: Σχηματική παράσταση της αλληλεπίδρασης της ανάβλυσης με τον υπερκείμενο βράχο.

Επειδή η φλέβα του νερού εξέρχεται «οριζόντια» κάτω από το βράχο, θεωρούμε ότι συμπεριφέρεται σαν πλούμιο, επομένως από την παραπάνω σχέση των List & Imberger (1973) προκύπτει η ασυμπτωτική σχέση που δίνει την αραίωση πλουμίου

$$\frac{\mu}{Q_0} = \left( \frac{z}{z_0} \right)^{5/3} \quad (3-9)$$

Εκτιμούμε ότι η απόσταση  $z_0$  του νοητού κέντρου του πλουμίου είναι περίπου 5 – 10 m με βάση το μέγεθος του υπερκείμενου βράχου. Η αραίωση της φλέβας στην επιφάνεια της θάλασσας προκύπτει από τον συνδυασμό της αρχικής αραίωσης μέχρι το νοητό κέντρο της φλέβας (σε απόσταση  $z_0$  από την εκροή) πάνω από το βράχο λόγω ανάμειξης του νερού της ανάβλυσης με τη θάλασσα και της αραίωσης της κατακόρυφης φλέβας από το νοητό κέντρο μέχρι την επιφάνεια.

Σαν μήκος ανάμειξης από τον πυθμένα μέχρι το  $z_0$  μπορούμε να θεωρήσουμε το μήκος ενός ημικυκλίου διαμέτρου  $z_0$ . Στη συνέχεια, το μήκος ανάμειξης της κατακόρυφης φλέβας είναι  $z-z_0$ . Από τους υπολογισμούς προκύπτει ότι η αλατότητα στην επιφάνεια είναι ανεξάρτητη της παροχής της ανάβλυσης και όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 3-3 αντιστοιχεί σε  $z_0 \approx 10$  m.



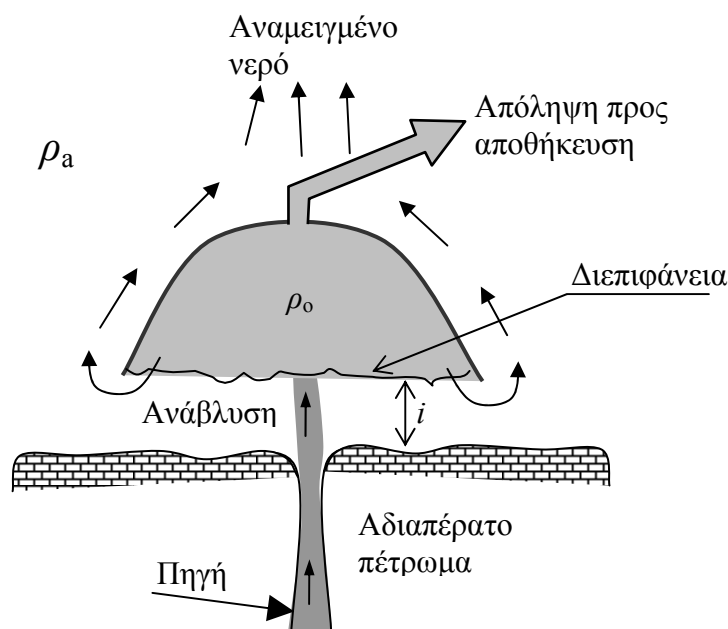
Σχήμα 3-3: Υπολογισμός της αλατότητας στην επιφάνεια της θάλασσας πάνω από την πηγή σαν συνάρτηση του νοητού κέντρου της ανάβλυσης πάνω από το βράχο.

### 3.4 Εναλλακτικές διατάξεις απόληξης νερού

Για τον προσδιορισμό της μεθοδολογίας σύλληψης του νερού της πηγής μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον με τη μικρότερη δυνατή ανάμειξη, μπορούν να γίνουν οι παρακάτω επεμβάσεις:

(1) Πλήρης κάλυψη της πηγής με μεταλλικό άκαμπτο κωνικό στοιχείο αγκυρωμένο στον πυθμένα, από το οποίο θα αντλείται η συνολική παροχή της πηγής από σωλήνα του οποίου το άκρο εισόδου θα είναι στην περιοχή της κορυφής του κώνου.

(2) Τοποθέτηση «ομπρέλας» (εύκαμπτης ή άκαμπτης κοιλότητας) πάνω από την ανάβλυση, στο εσωτερικό της οποίας θα εγκλωβίζεται το νερό που αναβλύζει, και αφού εκτοπίσει το θαλασσινό νερό μια ποσότητα θα μπορεί να αντλείται από το ανώτερο τμήμα της «ομπρέλας», η δε περίσσεια θα διαφεύγει οριζόντια από το κατώτερο μέρος αυτής και θα καταλήγει στην επιφάνεια της θάλασσας αφού αναμειχθεί με θαλασσινό νερό. Στο κατώτερο όριο της «ομπρέλας» εμφανίζεται η διεπιφάνεια μεταξύ νερού της πηγής και της θάλασσας όπως φαίνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 3-4. Η απόσταση της διεπιφάνειας  $i$  από την εκροή εξαρτάται από την παροχή της ανάβλυσης και από τις διαστάσεις της «ομπρέλας».



Σχήμα 3-4: Σκαρίφημα διάταξης απόληξης νερού από την υποθαλάσσια πηγή.

### 3.5 Παραδοχές πειραματικής προσομοίωσης

Η προσέγγιση του προβλήματος με βάση το Σχήμα 3-4 επιτρέπει την κατασκευή εργαστηριακού ομοιώματος για την περαιτέρω μελέτη της διάταξης απόληψης νερού και τις δυνατότητές της. Οι παραδοχές που έγιναν για το σχεδιασμό και υλοποίηση της εργαστηριακής προσομοίωσης της ανάβλυσης και σύλληψης γλυκού νερού μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον συνοψίζονται παρακάτω.

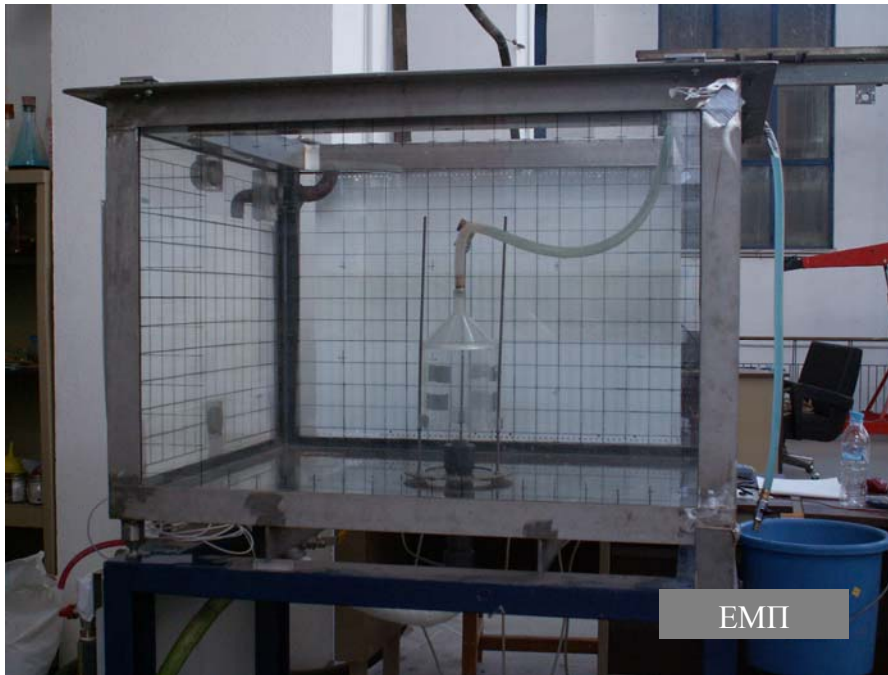
1. Η διατομή της πηγής ρέει πλήρης, δηλαδή  $Ri_o \leq 0.65$ , ενώ η ταχύτητα του νερού είναι τέτοια που η διεπιφάνεια μπορεί να είναι οριζόντια ή διαταραγμένη από εσωτερικά κύματα λόγω της πυκνομετρικής διαφοράς εκατέρωθεν και ταχύτητας εισόδου (ορμής) της φλέβας του γλυκού νερού.
2. Το νερό που εξέρχεται από το στόμιο της ανάβλυσης είναι γλυκό.
3. Ο πυθμένας είναι οριζόντιος.
4. Η διάταξη σύλληψης του νερού είναι ανεστραμμένο δοχείο με κωνικό το ανώτερο τμήμα του απ' όπου αντλείται το νερό της πηγής.
5. Η διεπιφάνεια γλυκού-θαλασσινού νερού απέχει κάποια απόσταση από την πηγή και θεωρείται δεδομένη.
6. Η παροχή απόληψης είναι μικρότερη από την παροχή της πηγής, έτσι ώστε η θέση της διεπιφάνειας να είναι δεδομένη.
7. Τα οριζόντια ρεύματα του πυθμένα είναι ασθενή και δεν επηρεάζουν την ανάμειξη του νερού της ανάβλυσης.
8. Η όποια ανάμειξη οφείλεται στη συμπαράσυρση θαλασσινού νερού λόγω διατμητικών τάσεων που εμφανίζονται στην κατακόρυφη διεπιφάνεια μεταξύ φλέβας γλυκού νερού και θάλασσας.



## 4. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΟΜΟΙΩΜΑ

### 4.1 Περιγραφή διάταξης

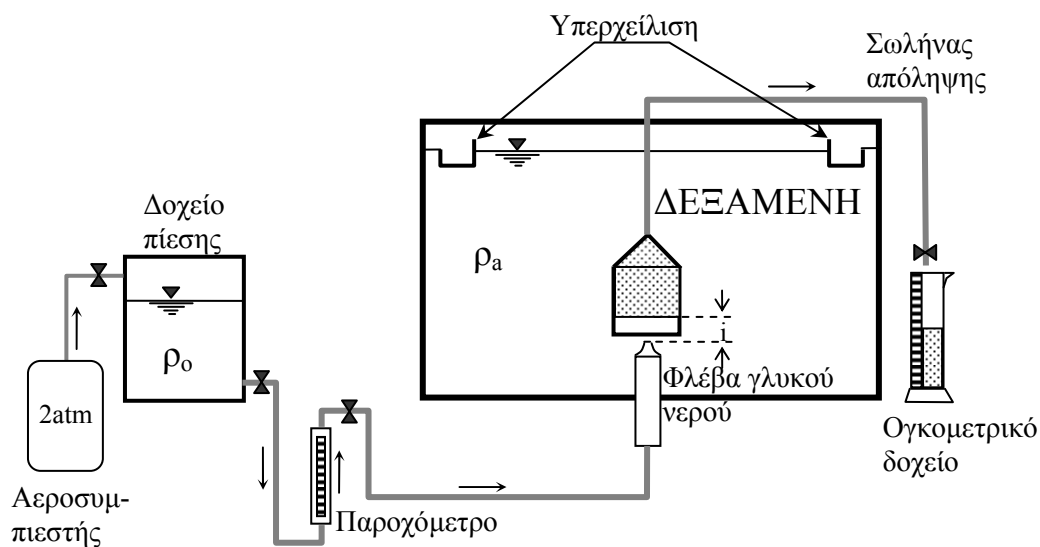
Ομοίωμα της λειτουργίας της διάταξης απόληψης γλυκού νερού μέσα από το θαλάσσιο περιβάλλον κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ με βάση τη θεωρητική προσέγγιση που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Γενική άποψη της διάταξης φαίνεται στη φωτογραφία του Σχήματος 4-1.



Σχήμα 4-1: Γενική άποψη της πειραματικής διάταξης.

Το θαλάσσιο περιβάλλον προσομοιώνεται με ορθογωνική δεξαμενή διαστάσεων 1.00 m  $\times$  0.80 m και βάθους 0.70 m, κατασκευασμένη από σκελετό ανοξείδωτου χάλυβα, με διαφανή τοιχώματα από γυαλί (3 πλευρές) και plexiglas (μια πλευρά και πυθμένας). Υποστηρίζεται με βάση από χαλύβδινο σκελετό και η στάθμη του πυθμένα βρίσκεται 0.80 m πάνω από το δάπεδο του Εργαστηρίου. Έτσι διευκολύνεται η παρατήρηση και η τοποθέτηση της διάταξης παροχέτευσης της φλέβας που προσομοιώνει την πηγή στον πυθμένα. Στο ανώτερο ύψος της δεξαμενής έχει τοποθετηθεί περιμετρικός υπερχειλιστής με σχισμές V (V-notch weir) για την απομάκρυνση της περίσσειας νερού κατά τη διάρκεια του πειράματος, ώστε η στάθμη του νερού στη δεξαμενή να διατηρείται σταθερή.

Στο κέντρο του πυθμένα μπορεί να στερεωθεί στεγανά η διάταξη δημιουργίας της κατακόρυφης κυκλικής φλέβας, η διάμετρος της οποίας εξαρτάται από το ακροφύσιο που χρησιμοποιείται. Οι διάμετροι των ακροφυσίων που χρησιμοποιήθηκαν είναι 0.5 cm, 1.0 cm και 1.5 cm. Η τροφοδοσία της φλέβας γίνεται από δοχείο χωρητικότητας 40 L το οποίο συμπιέζεται με αέρα στις 2 - 2.5 atm από ένα αεροσυμπιεστή με ρυθμιστή πίεσης εξόδου. Έτσι η πιεζομετρική διαφορά ανάμεσα στη δεξαμενή τροφοδοσίας και το ακροφύσιο είναι περίπου 20 μέτρα στήλης νερού ( $\approx 2$  atm). Η παροχή της φλέβας ρυθμίζεται με βάνια ακριβείας με βερνιέρο, ενώ μετριέται με ρυθμισμένο παροχόμετρο, με ακρίβεια  $\pm 2\%$ . Η διάταξη δημιουργίας της φλέβας μπορεί να μετακινηθεί κατακόρυφα, ώστε το επίπεδο εξόδου του νερού στο ακροφύσιο να τοποθετείται στην επιθυμητή απόσταση από τη διεπιφάνεια ανάμεσα στο γλυκό νερό και το αλατόνερο της δεξαμενής. Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο Σχήμα 4-2.

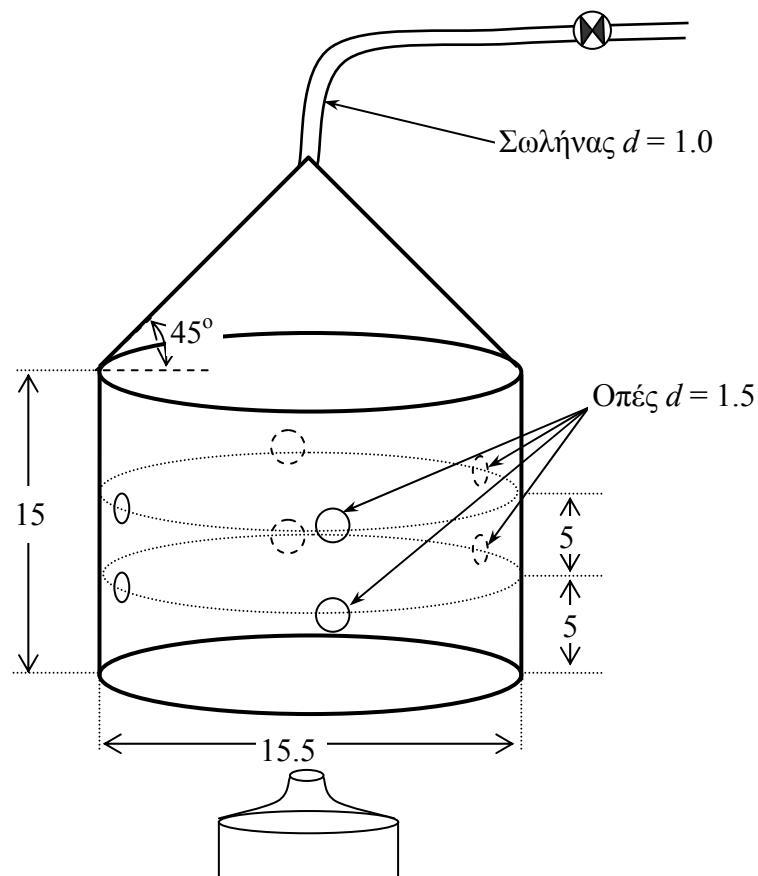


Σχήμα 4-2: Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης.

Η διάταξη σύλληψης του νερού είναι ένα ανεστραμμένο δοχείο με κωνικό το ανώτερο τμήμα του από plexiglas (Σχήμα 4-3). Το κατώτερο κυλινδρικό τμήμα του έχει ύψος 15 cm και διάμετρο 15.5 cm. Το ανώτερο κωνικό τμήμα με γωνία κορυφής  $90^\circ$  είναι κατασκευασμένο και αυτό από plexiglas, στη δε κορυφή του συγκολλήθηκε ειδικό μεταλλικό τμήμα σωλήνα στο οποίο μπορούσε να στερεωθεί εύκαμπτος σωλήνας απόληξης γλυκού νερού διαμέτρου 1 cm. Στο άλλο άκρο του εύκαμπτου σωλήνα είχε

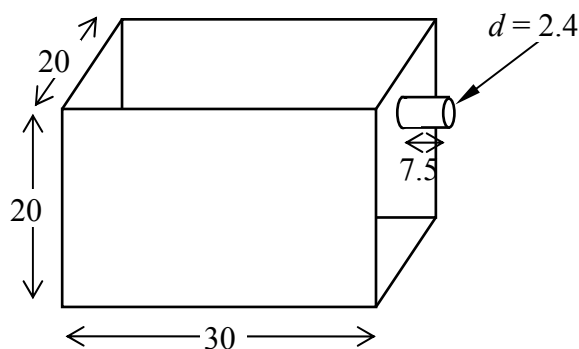
προσαρμοστεί βάνα για τη ρύθμιση της παροχής απόληξης. Η παροχή αυτή μετρούνταν ογκομετρικά με κατάλληλα διαβαθμισμένο κυλινδρικό δοχείο. Η διάταξη σύλληψης είχε τη δυνατότητα κατακόρυφης μετακίνησης με ένα σύστημα τριών κοχλιωτών στηριγμάτων τοποθετημένων πάνω σε μεταλλικό δακτύλιο που εφάπτονταν στον πυθμένα της δεξαμενής.

Στο κυλινδρικό τμήμα της συσκευής σύλληψης του γλυκού νερού και σε αποστάσεις 5 cm και 10 cm από το κατώτερο άκρο του ανοίχθηκαν 4 συμμετρικά τοποθετημένες οπές διαμέτρου 1.5 cm η κάθε μια. Απομονώνοντας τις κατάλληλες οπές η διεπιφάνεια γλυκού νερού – αλατόνερου δημιουργούνταν στο επιθυμητό επίπεδο της συσκευής σύλληψης. Τελικά, από τα πειράματα προέκυψε ότι η «υπερχείλιση» του γλυκού νερού από τις πλαϊνές οπές ή το κατώτερο όριο της συσκευής σύλληψης δεν είχε σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του νερού που λαμβανόταν συγκριτικά με τη θέση της διεπιφάνειας ως προς το επίπεδο του στομίου.



Σχήμα 4-3: Διάταξη απόληξης γλυκού νερού (διαστάσεις σε cm).

Η παραπάνω κατασκευή σύλληψης του νερού και διαχωρισμού του από το αλατόνερο αφορά στην περίπτωση που η φλέβα ρέει πλήρης στη διατομή εκροής. Σε περίπτωση όμως κατά την οποία η παροχή της πηγής είναι μειωμένη, τότε για  $Re_o > 0.65$  ( $F_o < 1.5$ ) έχουμε διείσδυση του θαλασσινού νερού στον καρστικό υδροφόρο απ' όπου εξέρχεται το γλυκό νερό, μέσα από τον ίδιο σωλήνα που συνδέει την υποκείμενη «δεξαμενή» γλυκού νερού με τον πυθμένα της θάλασσας. Για την προσομοίωση αυτής της περίπτωσης κατασκευάστηκε κλειστό ορθογωνικό δοχείο διατομής 20 cm × 30 cm και ύψους 20 cm, στο ανώτερο τμήμα του οποίου μπορούσε να προσαρμοστεί οριζόντιος σωλήνας διαμέτρου 2.4 cm με διάφορα μήκη (Σχήμα 4-4).



Σχήμα 4-4: Δοχείο γλυκού νερού και πηγή (διαστάσεις σε cm)

Το δοχείο πληρωνόταν με γλυκό νερό και βυθιζόταν στη δεξαμενή του αλμυρού νερού. Στη συνέχεια απομακρύναμε την τάπα του σωλήνα και αφήναμε ελεύθερη την ανταλλαγή γλυκού νερού από το δοχείο με αλατόνερο της δεξαμενής, για να μελετήσουμε την ανάμειξη στη διεπιφάνεια γλυκού νερού και αλατόνερου κατά μήκος του σωλήνα. Η εκβολή του γλυκού νερού τοποθετούνταν κάτω από τη διάταξη σύλληψης του νερού της πηγής, για να μελετηθεί η ποιότητα του νερού που είναι δυνατόν να ληφθεί. Χαρακτηριστική άποψη της διάταξης με το δοχείο γλυκού νερού φαίνεται στη φωτογραφία του Σχήματος 4-5.

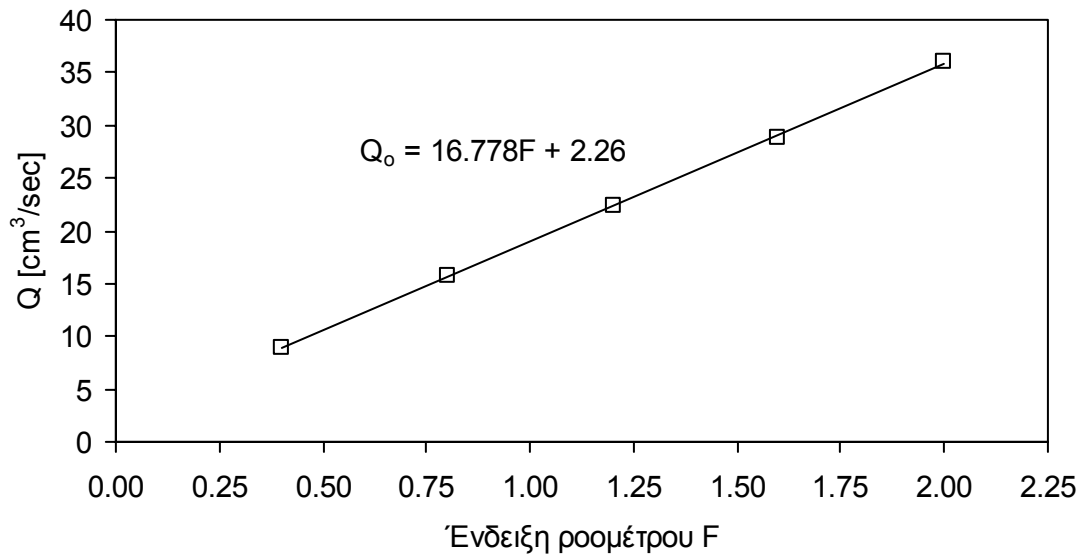


Σχήμα 4-5: Άποψη της διάταξης με το δοχείου γλυκού νερού βυθισμένο στη δεξαμενή με το αλατόνερο.

## 4.2 Όργανα μέτρησης

### 4.2.1 Μέτρηση παροχής

Για τη μέτρηση της παροχής εισόδου της φλέβας χρησιμοποιήθηκε ροόμετρο (πλωτήρα με σφαίρα) δυναμικότητας 0.2 ως 2 L/min. Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του οργάνου δηλαδή η ένδειξη του ροομέτρου συσχετίστηκε με την παροχή της φλέβας. Συγκεκριμένα για διάφορες ενδείξεις προσδιορίστηκε η παροχή ως ο λόγος μετρημένου όγκου νερού προς το χρόνο. Η συσχέτιση προέκυψε με εξαιρετική ακρίβεια γραμμική όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6.



Σχήμα 4-6: Καμπύλη βαθμονόμησης οργάνου μέτρησης παροχής φλέβας.

#### 4.2.2 Μέτρηση παροχής απόληξης

Για την εκτίμηση της παροχής απόληξης μετρούνταν με χρονόμετρο ο χρόνος που απαιτείται για τη λήψη συγκεκριμένου όγκου νερού και προσδιοριζόταν η παροχή. Πραγματοποιούνταν διαδοχικές ογκομετρήσεις έτσι ώστε η παροχή να προσδιοριστεί με ακρίβεια.

#### 4.2.3 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης (Αγωγιμόμετρο)

Για τη μέτρηση της αλατότητας του νερού που συλλέγεται μέσω της διάταξης χρησιμοποιήθηκε αγωγιμόμετρο που η αρχή λειτουργίας του παρουσιάστηκε από τους Gibson & Schwarz (1963) και το οποίο αναπτύχθηκε σε πιο εξελιγμένη μορφή στο Εργαστήριο Α Χημικής Μηχανικής του Τμήματος Χημικών Μηχανικών ΑΠΘ, υπό την επιμέλεια των κ.κ. Καστρινάκη και Νυχά. Στοιχεία σχετικά με τη λειτουργία του οργάνου δίνονται στο Παράρτημα Β.

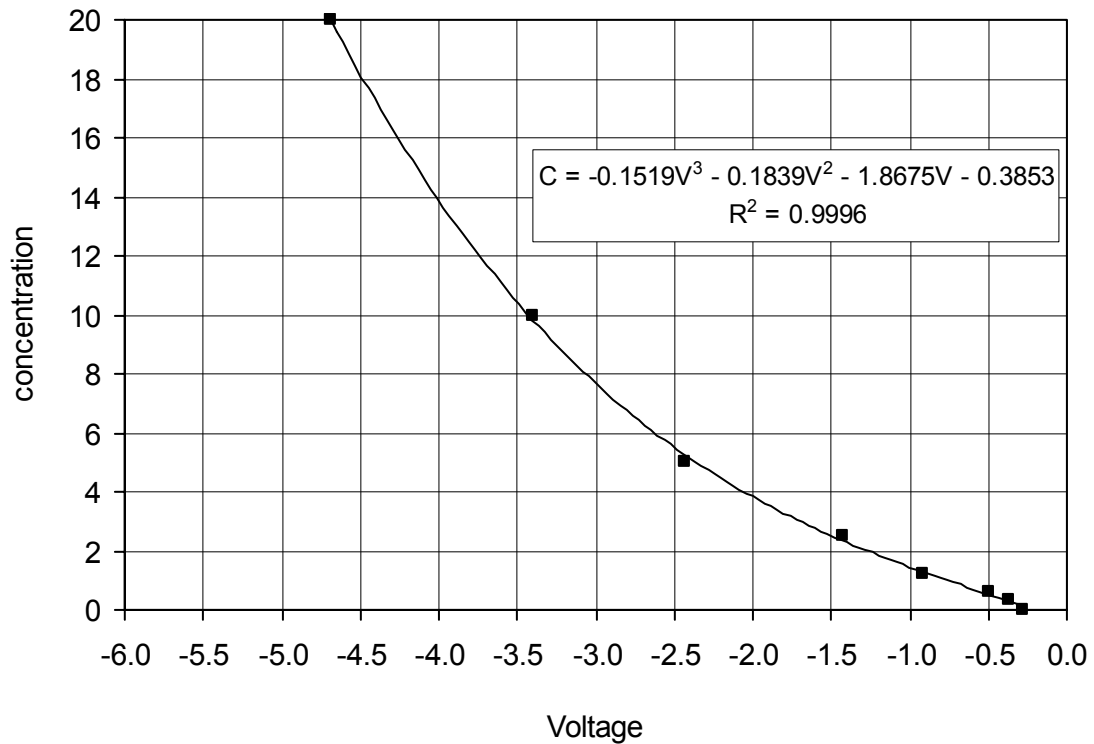
Το αγωγιμόμετρο δίνει αναλογικό σήμα, που μετατρέπεται σε ψηφιακό μέσω ενός μετατροπέα (A/D converter) 16-bit της εταιρίας Measurement Computing (μοντέλο USB-1608FS), που συνδέεται με Η/Υ μέσω θύρας USB, του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής ΕΜΠ. Για τη συλλογή και καταγραφή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Das-Wizard που συνδυάζεται με το λογισμικό Microsoft® Excel οπότε οι μετρημένες τάσεις μεταφέρονται απ' ευθείας σε φύλλο

εργασίας του Excel. Χαρακτηριστική άποψη του συστήματος μέτρησης και συλλογής των μετρήσεων δίνεται στο Σχήμα 4-7.



Σχήμα 4-7: Άποψη του συστήματος μέτρησης και καταγραφής των πειραματικών μετρήσεων.

Για τη βαθμονόμηση του οργάνου παρασκευάζονταν διαλύματα αλατόνευρου με γνωστή συγκέντρωση σε αλάτι (αλατότητα) προσθέτοντας συγκεκριμένη ποσότητα αλατιού (προσδιορισμένη με ζυγαριά ακριβείας) σε συγκεκριμένο όγκο νερού. Σε κάθε διάλυμα αλατόνευρου καθώς και στο νερό της φλέβας (διάλυμα με μηδενική συγκέντρωση NaCl) γινόταν δειγματοληψία με το αγωγιμόμετρο. Λαμβάνονταν περίπου 100 τιμές τάσης (παραπλήσιες αφού κάθε διάλυμα ήταν ομογενές) και προσδιοριζόταν μια μέση τάση. Από τα ζεύγη τιμών τάσης  $V$  και συγκέντρωσης  $C$  χαράσσονταν η καμπύλη βαθμονόμησης του οργάνου. Σε όλες τις περιπτώσεις βρέθηκε ότι μια πολωνυμική καμπύλη 3<sup>ου</sup> βαθμού περνά με εξαιρετική ακρίβεια από τα μετρημένα ζεύγη τιμών ( $C$ ,  $V$ ). Τυπική καμπύλη βαθμονόμησης του αγωγιμομέτρου φαίνεται στο Σχήμα 4-8.



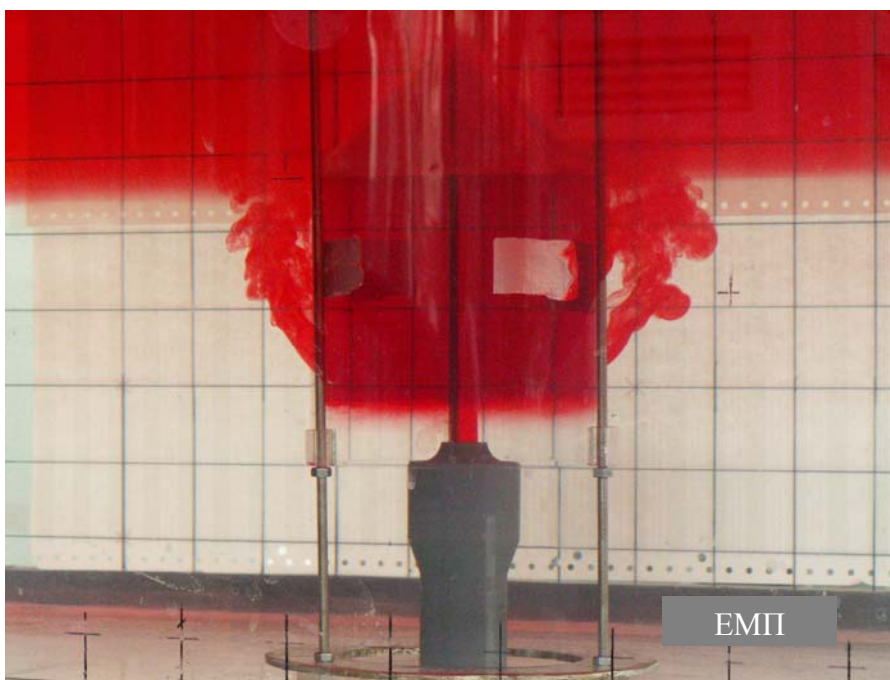
Σχήμα 4-8: Τυπική καμπύλη βαθμονόμησης αγωγιμομέτρου.

#### 4.3 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Η δεξαμενή γεμιζόταν με νερό στο οποίο γινόταν προσθήκη αλατιού (στις περισσότερες περιπτώσεις περίπου 10 kg) και αναδευόταν μέχρι να ομογενοποιηθεί το υγρό. Το υγρό του αποδέκτη αφήνονταν ικανό χρονικό διάστημα να ηρεμήσει. Το υγρό της φλέβας ήταν γλυκό νερό (από το δίκτυο του Εργαστηρίου) χρωματισμένο με ειδική χρωστική (food dye) προκειμένου να είναι ορατό. Για την παροχέτευση της φλέβας χρησιμοποιήθηκαν τρία κατακόρυφα κυκλικά στόμια με διαμέτρους 0.5 cm, 1 cm και 1.5 cm. Στη συνέχεια πραγματοποιούνταν η βαθμονόμηση του αγωγιμομέτρου σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω (βλ. 4.2). Ρυθμιζόταν μια συγκεκριμένη παροχή εισόδου φλέβας γλυκού νερού και αφού γέμιζε η κατασκευή διαχωρισμού γλυκού και αλατισμένου νερού με το γλυκό νερό της φλέβας (κόκκινο χρώμα) ξεκινούσε η απόληψη νερού μέσω του εύκαμπτου σωλήνα από την κορυφή της κατασκευής. Ειδική μέριμνα δινόταν ώστε η παροχή απόληξης να είναι μικρότερη από την παροχή εισόδου της φλέβας. Αφού σταθεροποιούνταν η διεπιφάνεια γλυκού νερού και αλατόνερου μέσα στην ειδική κατασκευή (Σχήμα 4-9), γινόταν διαδοχικές ογκομετρήσεις για τον προσδιορισμό της παροχής απόληξης και παράλληλα



μετρούνταν μέσω του αγωγιμομέτρου η συγκέντρωση (αλατότητα) του νερού που λαμβανόταν. Μετά από μερικές απολήψεις η συγκέντρωση σταθεροποιούνταν οπότε πρακτικά το πείραμα τερματιζόταν. Μεταβάλλοντας το ύψος του στομίου παροχέτευσης της φλέβας μεταβαλλόταν η θέση της διεπιφάνειας και οι μετρήσεις συνεχιζόταν για διάφορες θέσεις της διεπιφάνειας ως προς το επίπεδο του στομίου εκροής της φλέβας γλυκού νερού.



Σχήμα 4-9: Χαρακτηριστικό στιγμιότυπο πειράματος (με κόκκινο χρώμα το γλυκό νερό).

Σχετικά με το πείραμα της εκροής γλυκού νερού από μια οπή στην οποία πραγματοποιείται ταυτόχρονα διείδυση αλατόνευρου η διαδικασία έχει ως εξής: Η δεξαμενή προετοιμαζόταν όπως περιγράφηκε παραπάνω. Έπειτα βυθιζόταν στη δεξαμενή το δοχείο με το χρωματισμένο γλυκό νερό στο στόμιο του οποίου τοποθετούνταν φελλός για να εμποδίσει αρχικά τη διείδυση του αλατόνευρου της δεξαμενής. Στην κατασκευή διαχωρισμού γλυκού και αλμυρού νερού υπήρχε αρχικά γλυκό νερό ώστε να αποφευχθεί η ανάμιξη του νερού που λαμβανόταν με αλατόνευρο. Την έναρξη του πειράματος σηματοδοτούσε η αφαίρεση του φελλού. Έτσι παρατηρούνταν εκροή γλυκού νερού μέσα στην κατασκευή απόληψης γλυκού νερού. Η απόληψη νερού γινόταν όπως περιγράφηκε παραπάνω και στη συνέχεια πραγματοποιούνταν διαδοχικές μετρήσεις της παροχής και της συγκέντρωσης

(αλατότητα). Χαρακτηριστική εικόνα πειράματος της κατηγορίας αυτής φαίνεται στο Σχήμα 4-10.



Σχήμα 4-10: Χαρακτηριστική εικόνα πειράματος σχετικά με τη μελέτη της ροής γλυκού νερού από στόμιο όπου παρατηρείται διείσδυση αλατόνερου από τον αποδέκτη.

## 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

### 5.1 Παράμετροι πειραμάτων

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν καλύπτουν σημαντικό εύρος πυκνομετρικών αριθμών Froude και θέσεων διεπιφάνειας ως προς το στόμιο της φλέβας. Οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων δίνονται στον Πίνακα 5-1. Επίσης σε αδιάστατη μορφή δίνονται και τα αποτελέσματα των πειραμάτων δηλαδή η συγκέντρωση  $C$  του νερού που λαμβάνεται ανηγμένη ως προς την αρχική συγκέντρωση του υγρού της δεξαμενής  $C_0$  και η αντίστοιχη αδιάστατη παροχή  $Q/Q_0$  ( $Q$  η παροχή που λαμβάνεται και  $Q_0$  η αρχική παροχή εισόδου της φλέβας). Σημειώνεται ότι η πυκνομετρική διαφορά που εφαρμόστηκε ήταν από 1%-2% περίπου, η οποία μπορεί να είναι διαφορετική από την πραγματική, ωστόσο η πειραματική μελέτη βασίζεται στην ομοιότητα κατά Froude η οποία εφαρμόζεται ευρέως στα προβλήματα ανωστικών φλεβών. Ο αριθμός  $F_0$  κυμάνθηκε από 1.5 ως 23 περίπου (χωρίς διείσδυση αλατόνευρου στο στόμιο), δηλαδή καλύπτει την περίπτωση ροής που ομοιάζει από την πηγή με πλούμιο αλλά και την περίπτωση ανωστικής φλέβας στην οποία κυριαρχεί η ποσότητα κίνησης (ορμή) στην πηγή (σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του εδαφίου 3.3). Ο αριθμός Reynolds κυμάνθηκε μεταξύ 800 και 3000 περίπου καλύπτοντας την περίπτωση τυρβώδους ροής στην εκροή της φλέβας. Η μέγιστη απόσταση της διεπιφάνειας από το στόμιο ήταν τέσσερις διάμετροι ( $4D$ ) και δεν χρειάστηκε να μελετηθεί μεγαλύτερη αφού όπως θα σχολιαστεί και στη συνέχεια, σε τέτοιες αποστάσεις η ανάμιξη που παρατηρήθηκε είναι σημαντική. Το αρνητικό πρόσημο στην απόσταση της διεπιφάνειας δηλώνει ότι η διεπιφάνεια βρίσκεται κάτω από το επίπεδο του στομίου παροχέτευσης.

Πίνακας 5-1: Αρχικές παράμετροι πειραμάτων και αποτελέσματα

a/a	D[cm]	$Q_0$ [cm <sup>3</sup> /s]	$\rho_0$ [g/L]	$\rho_a$ [g/L]	$\Delta\rho_0/\rho_a$ [%]	$g_0'$ [cm/s <sup>2</sup> ]	$F_0$	Re	Interface [cm]	$i/D$	$Q$ [cm <sup>3</sup> /s]	$C_0$ [g/L]	$C$ [g/L]	$Q/Q_0$	$C/C_0$	Sequence
1	1.5	9.64	998.3	1008.0	0.96	9.45	1.4	805	2.0	1.33	7.84		999.78	0.81	0.153	1
2	1.5	14.84	998.3	1008.0	0.96	9.45	2.2	1240	1.5	1.00	11.18		999.16	0.75	0.089	2
	1.5	14.84	998.3	1008.0	0.96	9.45	2.2	1240	1.5	1.00	11.33		999.21	0.76	0.095	3
3	1.5	21.55	998.3	1008.0	0.96	9.45	3.2	1800	3.0	2.00	14.41		1000.25	0.67	0.201	4
4	1.5	21.55	998.3	1020.0	2.13	20.88	2.2	1800	0.5	0.33	16.02		1002.76	0.74	0.206	1
	1.5	21.55	998.3	1020.0	2.13	20.88	2.2	1800	0.5	0.33	5.85		1000.64	0.27	0.108	2
	1.5	21.55	998.3	1020.0	2.13	20.88	2.2	1800	0.5	0.33	6.01		999.81	0.28	0.070	3
5	1.5	22.39	998.3	1020.0	2.13	20.88	2.3	1870	3.0	2.00	5.98		1000.99	0.27	0.124	4
6	1.5	20.72	998.3	1020.0	2.13	20.88	2.1	1730	3.0	2.00	5.99		1001.06	0.29	0.127	5
7	1.5	21.55	998.3	1020.0	2.13	20.88	2.2	1800	0.3	0.20	5.91		1000.34	0.27	0.094	6
8	1.5	21.55	998.3	1020.0	2.13	20.88	2.2	1800	0.5	0.33	12.85		1001.09	0.60	0.129	7
	1.5	21.55	998.3	1020.0	2.13	20.88	2.2	1800	0.5	0.33	12.81		1001.49	0.59	0.147	8
9	1.5	29.10	998.3	1020.0	2.13	20.88	2.9	2431	0.3	0.20	17.25		1001.64	0.59	0.154	9
10	1.5	14.00	998.6	1014.5	1.57	15.39	1.6	1128	1.0	0.67	9.52	19.14	1.68	0.68	0.088	1
	1.5	14.00	998.6	1014.5	1.57	15.39	1.6	1128	1.0	0.67	9.70	19.14	0.76	0.69	0.040	2
	1.5	14.00	998.6	1014.5	1.57	15.39	1.6	1128	1.0	0.67	9.74	19.14	0.80	0.70	0.042	3
11	1.5	19.04	998.6	1014.5	1.57	15.39	2.2	1534	0.4	0.27	9.75	19.14	0.56	0.51	0.029	4
	1.5	19.04	998.6	1014.5	1.57	15.39	2.2	1534	0.3	0.20	9.81	19.14	0.56	0.52	0.029	5
	1.5	19.04	998.6	1014.5	1.57	15.39	2.2	1534	0.1	0.07	2.82	19.14	0.14	0.15	0.008	6
	1.5	19.04	998.6	1014.5	1.57	15.39	2.2	1534	0.1	0.07	4.74	19.14	0.28	0.25	0.015	7
	1.5	19.04	998.6	1014.5	1.57	15.39	2.2	1534	0.1	0.07	6.49	19.14	0.30	0.34	0.016	8
12	1.5	24.07	998.6	1013.5	1.47	14.43	2.9	1939			18.45	17.82	1.03	0.77	0.058	9
	1.5	24.07	998.6	1013.5	1.47	14.43	2.9	1939			8.63	17.82	0.69	0.36	0.039	10
13	1.5	23.23	998.6	1013.5	1.47	14.43	2.8	1872			8.56	17.82	0.55	0.37	0.031	11
	1.5	23.23	998.6	1013.5	1.47	14.43	2.8	1872			8.53	17.82	0.48	0.37	0.027	12
	1.5	23.23	998.6	1013.5	1.47	14.43	2.8	1872			13.72	17.82	0.52	0.59	0.029	13
	1.5	23.23	998.6	1013.5	1.47	14.43	2.8	1872			13.59	17.82	0.53	0.59	0.030	14
	1.5	23.23	998.6	1013.5	1.47	14.43	2.8	1872			16.91	17.82	0.58	0.73	0.032	15
	1.5	23.23	998.6	1013.5	1.47	14.43	2.8	1872			16.92	17.82	0.60	0.73	0.034	16
14	1.5	28.60	998.6	1013.5	1.47	14.43	3.5	2304			16.90	17.82	0.59	0.59	0.033	17

a/a	D[cm]	$Q_0$ [cm <sup>3</sup> /s]	$\rho_o$ [g/L]	$\rho_a$ [g/L]	$\Delta\rho_o/\rho_a$ [%]	$g_o'$ [cm/s <sup>2</sup> ]	$F_o$	Re	Interface [cm]	$i/D$	$Q$ [cm <sup>3</sup> /s]	$C_o$ [g/L]	$C$ [g/L]	$Q/Q_o$	$C/C_o$	Sequence
15	1.5	21.89	998.8	1014.0	1.50	14.73	2.6	1721	1.5	1.00	8.33	19.70	1.12	0.38	0.057	1
	1.5	21.89	998.8	1014.0	1.50	14.73	2.6	1721	1.5	1.00	7.78	19.70	0.92	0.36	0.047	2
	1.5	21.89	998.8	1014.0	1.50	14.73	2.6	1721	1.5	1.00	7.95	19.70	0.90	0.36	0.046	3
	1.5	21.89	998.8	1014.0	1.50	14.73	2.6	1721	0.0	0.00	7.92	19.70	0.43	0.36	0.022	4
	1.5	21.89	998.8	1014.0	1.50	14.73	2.6	1721	0.0	0.00	7.89	19.70	0.29	0.36	0.015	5
	1.5	21.89	998.8	1014.0	1.50	14.73	2.6	1721	0.0	0.00	7.90	19.70	0.24	0.36	0.012	6
16	1.5	22.39	998.8	1014.0	1.50	14.73	2.7	1761	-1.5	-1.00	8.24	19.70	0.22	0.37	0.011	7
	1.5	22.39	998.8	1014.0	1.50	14.73	2.7	1761	-1.5	-1.00	8.24	19.70	0.19	0.37	0.010	8
17	1.5	22.06	998.8	1013.5	1.45	14.25	2.7	1734	0.2	0.13	12.16	19.25	0.37	0.55	0.019	1
	1.5	22.06	998.8	1013.5	1.45	14.25	2.7	1734	1.5	1.00	12.10	19.25	0.74	0.55	0.039	2
	1.5	22.06	998.8	1013.5	1.45	14.25	2.7	1734	1.5	1.00	12.05	19.25	1.12	0.55	0.058	3
18	1.5	21.14	998.8	1013.5	1.45	14.25	2.6	1662	1.5	1.00	12.22	19.25	1.16	0.58	0.060	4
	1.5	21.14	998.78	1013.50	1.45	14.25	2.6	1662	1.5	1.00	12.09	19.25	1.21	0.57	0.063	5
	1.5	21.14	998.78	1013.50	1.45	14.25	2.6	1662	0.0	0.00	12.06	19.25	0.33	0.57	0.017	6
	1.5	21.14	998.78	1013.50	1.45	14.25	2.6	1662	0.0	0.00	12.05	19.25	0.06	0.57	0.003	7
19	1.5	21.72	998.8	1012.5	1.36	13.30	2.8	1708	0.0	0.00	13.94	13.21	0.38	0.64	0.028	1
	1.5	21.72	998.8	1012.5	1.36	13.30	2.8	1708	0.0	0.00	13.76	13.21	0.09	0.63	0.007	2
20	1.5	20.72	998.8	1012.5	1.36	13.30	2.6	1629	1.5	1.00	13.83	13.21	0.15	0.67	0.011	3
	1.5	20.72	998.8	1012.5	1.36	13.30	2.6	1629	1.5	1.00	13.88	13.21	0.35	0.67	0.027	4
	1.5	20.72	998.8	1012.5	1.36	13.30	2.6	1629	1.5	1.00	14.02	13.21	0.74	0.68	0.056	5
	1.5	20.72	998.8	1012.5	1.36	13.30	2.6	1629	1.5	1.00	13.95	13.21	0.75	0.67	0.057	6
21	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	2.0	4.00	6.04	19.51	6.97	0.49	0.357	1
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	2.0	4.00	5.80	19.51	8.02	0.47	0.411	2
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	2.0	4.00	5.75	19.51	7.69	0.47	0.394	3
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	2.0	4.00	5.87	19.51	7.47	0.48	0.383	4
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	2.0	4.00	5.81	19.51	7.35	0.47	0.377	5
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	0.0	0.00	5.76	19.51	5.08	0.47	0.260	6
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	0.0	0.00	5.74	19.51	3.23	0.47	0.165	7
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	0.0	0.00	5.89	19.51	2.52	0.48	0.129	8
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	0.0	0.00	5.78	19.51	1.95	0.47	0.100	9
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	0.0	0.00	5.80	19.51	1.57	0.47	0.080	10
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	0.0	0.00	5.86	19.51	1.40	0.48	0.072	11

a/a	D[cm]	$Q_0$ [cm <sup>3</sup> /s]	$\rho_0$ [g/L]	$\rho_a$ [g/L]	$\Delta\rho_0/\rho_a$ [%]	$g_0'$ [cm/s <sup>2</sup> ]	$F_0$	Re	Interface [cm]	$i/D$	$Q$ [cm <sup>3</sup> /s]	$C_0$ [g/L]	$C$ [g/L]	$Q/Q_0$	$C/C_0$	Sequence
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	0.0	0.00	5.79	19.51	1.28	0.47	0.066	12
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	0.0	0.00	5.84	19.51	1.23	0.47	0.063	13
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	-1.0	-2.00	5.83	19.51	0.86	0.47	0.044	14
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	-1.0	-2.00	5.85	19.51	0.54	0.47	0.028	15
	0.5	12.33	998.8	1014.0	1.50	14.73	23.1	2908	-1.0	-2.00	5.75	19.51	0.35	0.47	0.018	16
22	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	2.0	2.00	10.10	100.00	12.81	0.45	0.128	1
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	2.0	2.00	10.18	100.00	11.51	0.45	0.115	2
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	2.0	2.00	10.14	100.00	11.06	0.45	0.111	3
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	2.0	2.00	10.11	100.00	10.76	0.45	0.108	4
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	2.0	2.00	10.08	100.00	10.18	0.45	0.102	5
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	2.0	2.00	10.15	100.00	10.18	0.45	0.102	6
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	2.0	2.00	10.11	100.00	10.00	0.45	0.100	7
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	0.0	0.00	10.45	100.00	7.64	0.47	0.076	8
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	0.0	0.00	10.53	100.00	3.42	0.47	0.034	9
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	0.0	0.00	10.52	100.00	2.10	0.47	0.021	10
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	0.0	0.00	10.55	100.00	0.62	0.47	0.006	11
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	1.0	1.00	10.57	100.00	3.33	0.47	0.033	12
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	1.0	1.00	10.49	100.00	5.31	0.47	0.053	13
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	1.0	1.00	10.51	100.00	6.54	0.47	0.065	14
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	1.0	1.00	10.40	100.00	6.78	0.46	0.068	15
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	1.0	1.00	10.40	100.00	6.90	0.46	0.069	16
	1.0	22.39	998.8	1013.8	1.48	14.54	7.5	2641	1.0	1.00	10.40	100.00	6.67	0.46	0.067	17

$Q_0$ : αρχική παροχή φλέβας

$Q$ : παροχή απόληψης νερού

$i/D$ : αδιάστατη απόσταση διεπιφάνειας γλυκού νερού και αλατόνευρο από το επίπεδο του στομίου παροχέτευσης

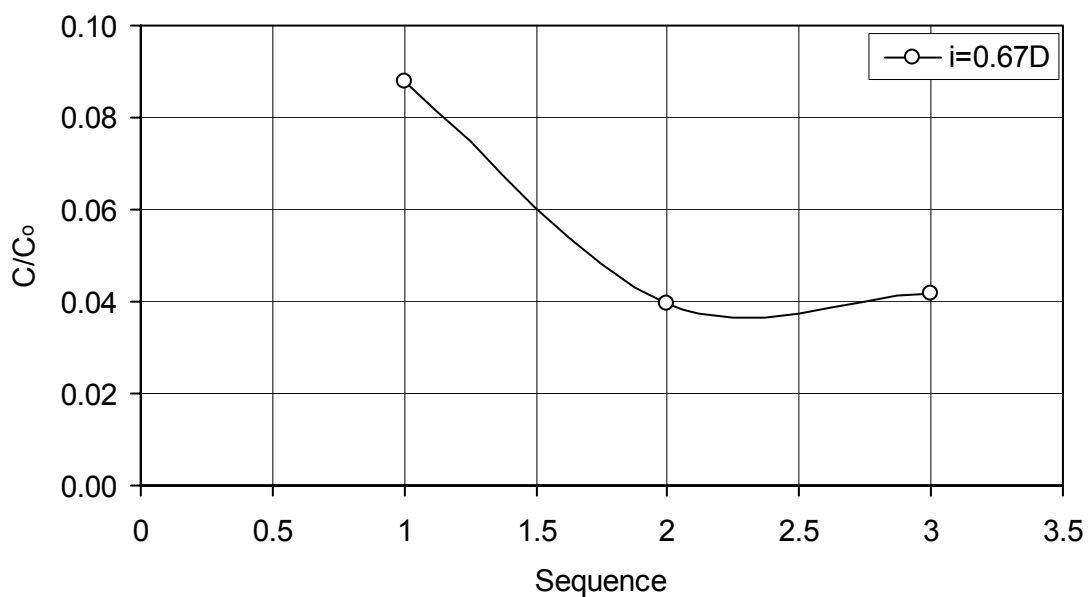
$C$ : συγκέντρωση (αλατότητα) νερού που λαμβάνεται

$C_0$ : συγκέντρωση (αλατότητα) υγρού αποδέκτη

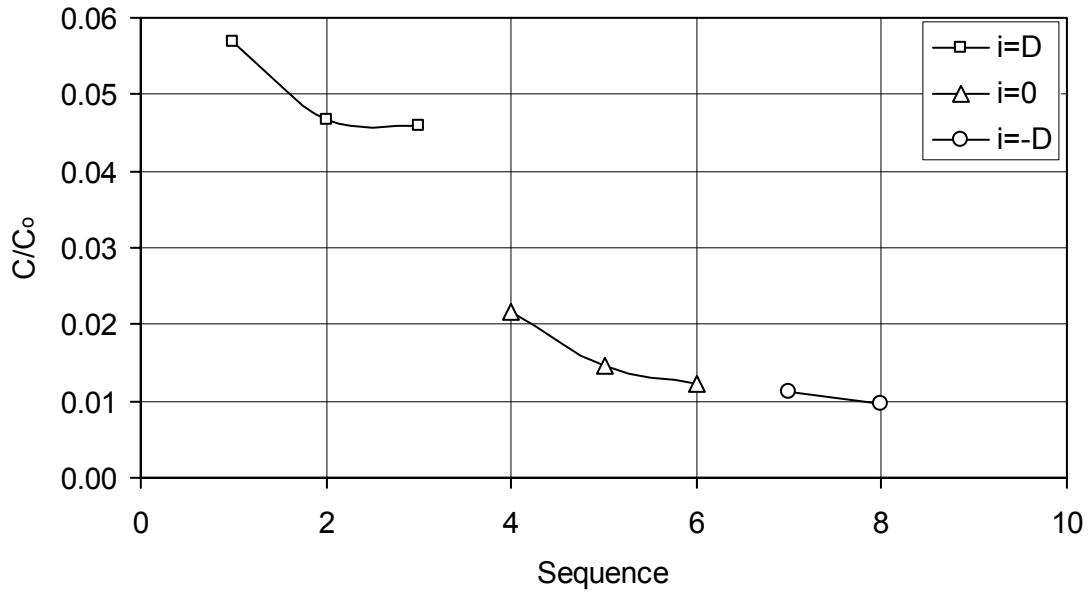
## 5.2 Αποτελέσματα πειραμάτων

### 5.2.1 Κατακόρυφη φλέβα νερού σε αλατόνερο

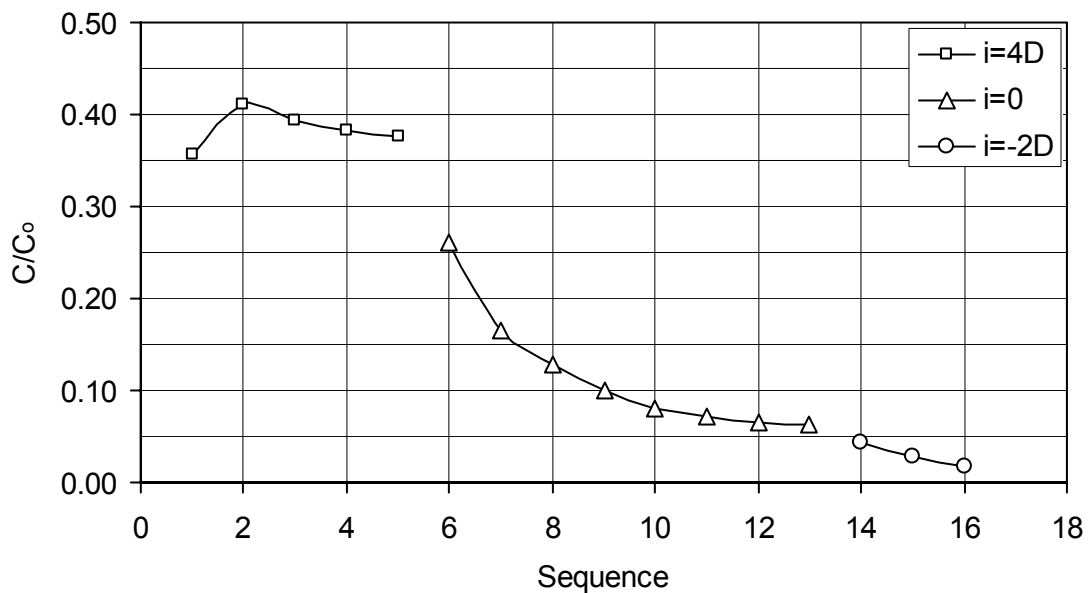
Σε κάθε πείραμα με συγκεκριμένο αριθμό Froude  $F_o$  για συγκεκριμένη παροχή απόληψης  $Q$  και σταθερή απόσταση  $i$  της διεπιφάνειας από το στόμιο παροχέτευσης της φλέβας (βλ. Σχήμα 4-9), πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές μετρήσεις συγκέντρωσης μέχρι αυτή να προκύψει σταθερή. Χαρακτηριστικά είναι τα Σχήματα 5-1 ως 5-4 όπου φαίνεται η εξέλιξη της αδιάστατης συγκέντρωσης (αλατότητας)  $C$  ως προς την αρχική συγκέντρωση  $C_o$  του αποδέκτη.



Σχήμα 5-1: Χρονική ακολουθία της συγκέντρωσης του νερού που λαμβάνεται από την πηγή ( $F_o = 1.6$ ,  $Re = 1128$ ,  $Q/Q_o = 0.69$ ) όταν η διεπιφάνεια βρίσκεται  $i = 0.67D$  υψηλότερα από το στόμιο παροχέτευσης της φλέβας.

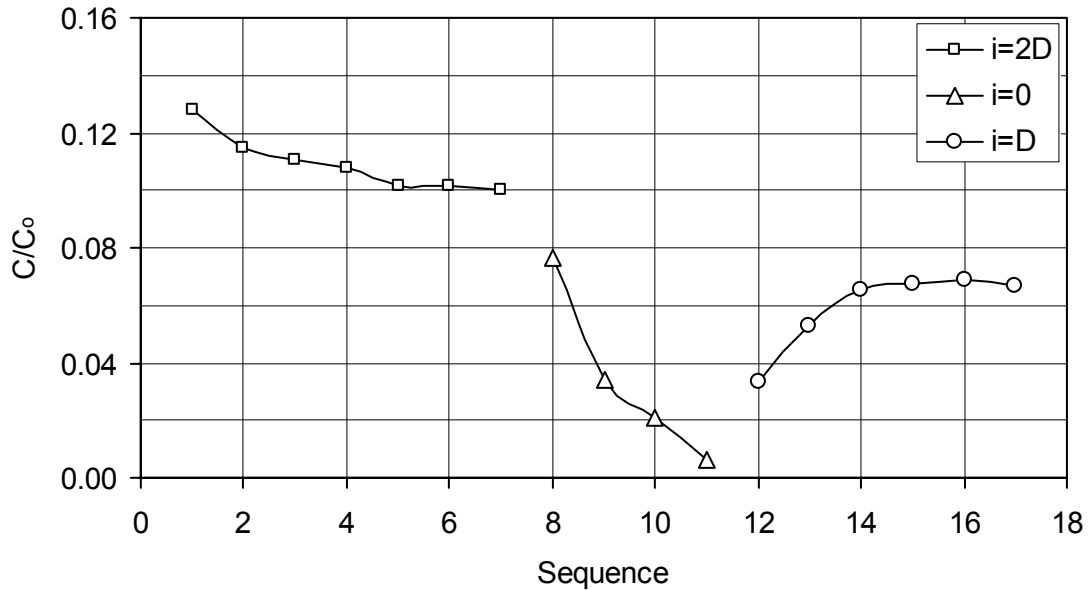


Σχήμα 5-2: Χρονική ακολουθία της συγκέντρωσης του νερού που λαμβάνεται από την πηγή ( $F_o = 2.6$ ,  $Re = 1721$ ,  $Q/Q_o = 0.36$ ) για διάφορες θέσεις της διεπιφάνειας ως προς το στόμιο παροχέτευσης της φλέβας. (Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η διεπιφάνεια βρισκόταν κάτω από το στόμιο της φλέβας).



Σχήμα 5-3: Χρονική ακολουθία της συγκέντρωσης του νερού που λαμβάνεται από την πηγή ( $F_o = 23.1$ ,  $Re = 2908$ ,  $Q/Q_o = 0.47$ ) για διάφορες θέσεις της διεπιφάνειας ως προς το στόμιο παροχέτευσης της φλέβας.





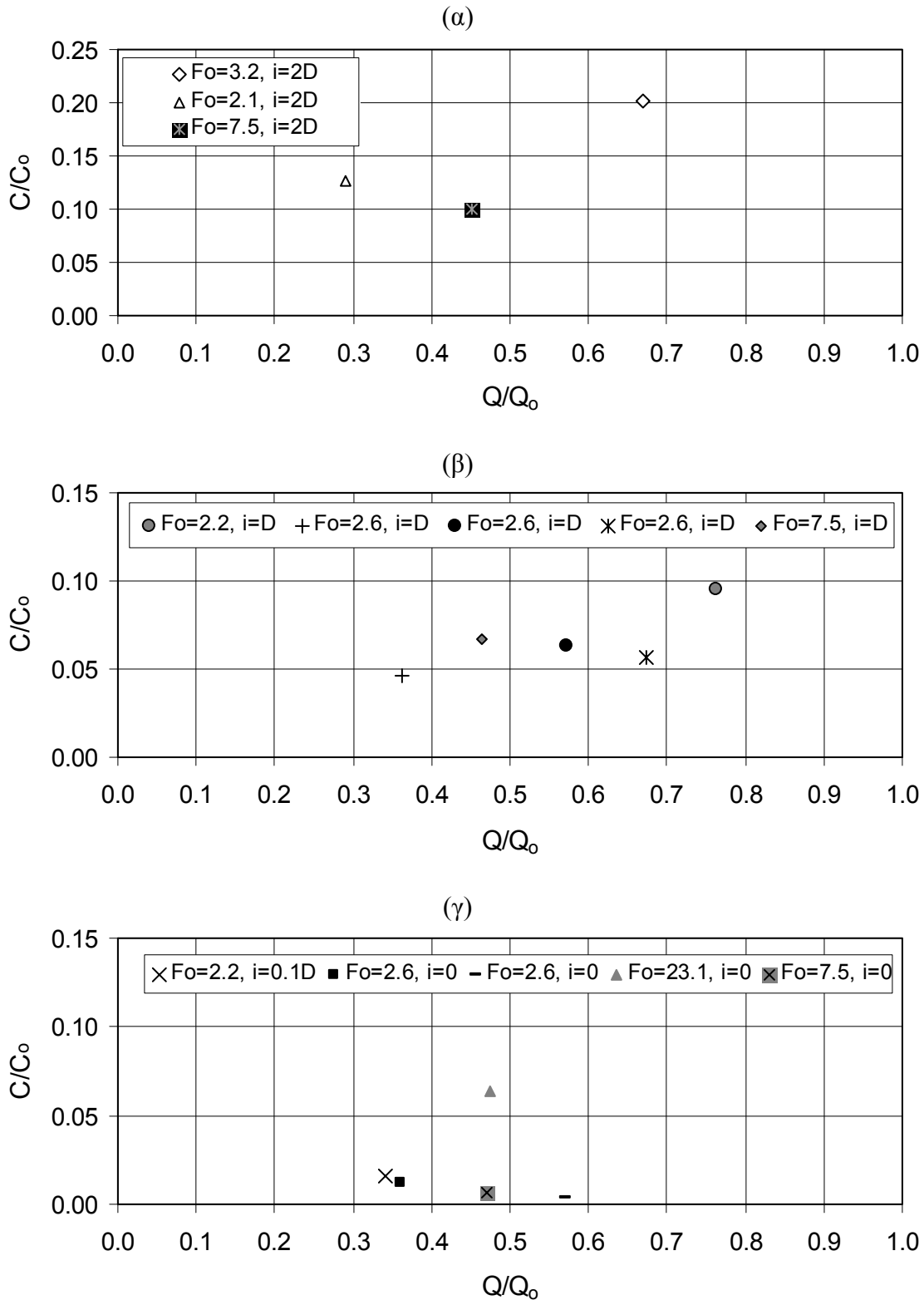
Σχήμα 5-4: Χρονική ακολουθία της συγκέντρωσης του νερού που λαμβάνεται από την πηγή ( $F_o = 7.5$ ,  $Re = 2641$ ,  $Q/Q_o = 0.46$ ) για διάφορες θέσεις της διεπιφάνειας ως προς το στόμιο παροχέτευσης της φλέβας.

Από τα προηγούμενα σχήματα προκύπτει ότι τελικά η συγκέντρωση του νερού που λαμβάνεται σταθεροποιείται σε μια συγκεκριμένη τιμή όταν η παροχή απόληψης και η θέση της διεπιφάνειας είναι σταθερές ( $Q/Q_o = \text{σταθ.}$ ,  $i/D = \text{σταθ.}$ ). Είναι προφανές ότι αυτή η τιμή μειώνεται όσο πλησιέστερα βρίσκεται η διεπιφάνεια στο επίπεδο του στομίου παροχέτευσης της φλέβας. Συνεπώς προκειμένου να περιοριστεί η ανάμιξη του παροχετευόμενου γλυκού νερού με το αλατόνερο του αποδέκτη θα πρέπει η διεπιφάνεια να βρίσκεται κατά το δυνατόν πλησιέστερα στο στόμιο εκροής. Επίσης φαίνεται ότι για μεγάλους πυκνομετρικούς αριθμούς  $F_o$  (π.χ.  $F_o = 23.1$ ) η συγκέντρωση διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα απ' ότι για μικρότερους αριθμούς  $F_o$ . Ενδεικτικά είναι τα Σχήματα 5-2, 5-3 και 5-4 όπου για  $i = 0$  φαίνεται ότι η αλατότητα τείνει στο μηδέν για  $F_o = 2.6$  και  $F_o = 7.5$ , ενώ παραμένει γύρω στο 5% της συγκέντρωσης του αποδέκτη για  $F_o = 23.1$ . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι φλέβες με μεγάλη αρχική ορμή μεταπίπτουν ταχύτερα σε τυρβώδη ροή οπότε η συμπαράσυρση υγρού από τον αποδέκτη ακόμα και κοντά στην εκροή της φλέβας είναι αναπόφευκτη.

Χρησιμοποιώντας την τελική τιμή της συγκέντρωσης σε κάθε πείραμα (δηλαδή την τιμή στην οποία σταθεροποιείται η συγκέντρωση μετά από κάποιο χρόνο) μπορεί να

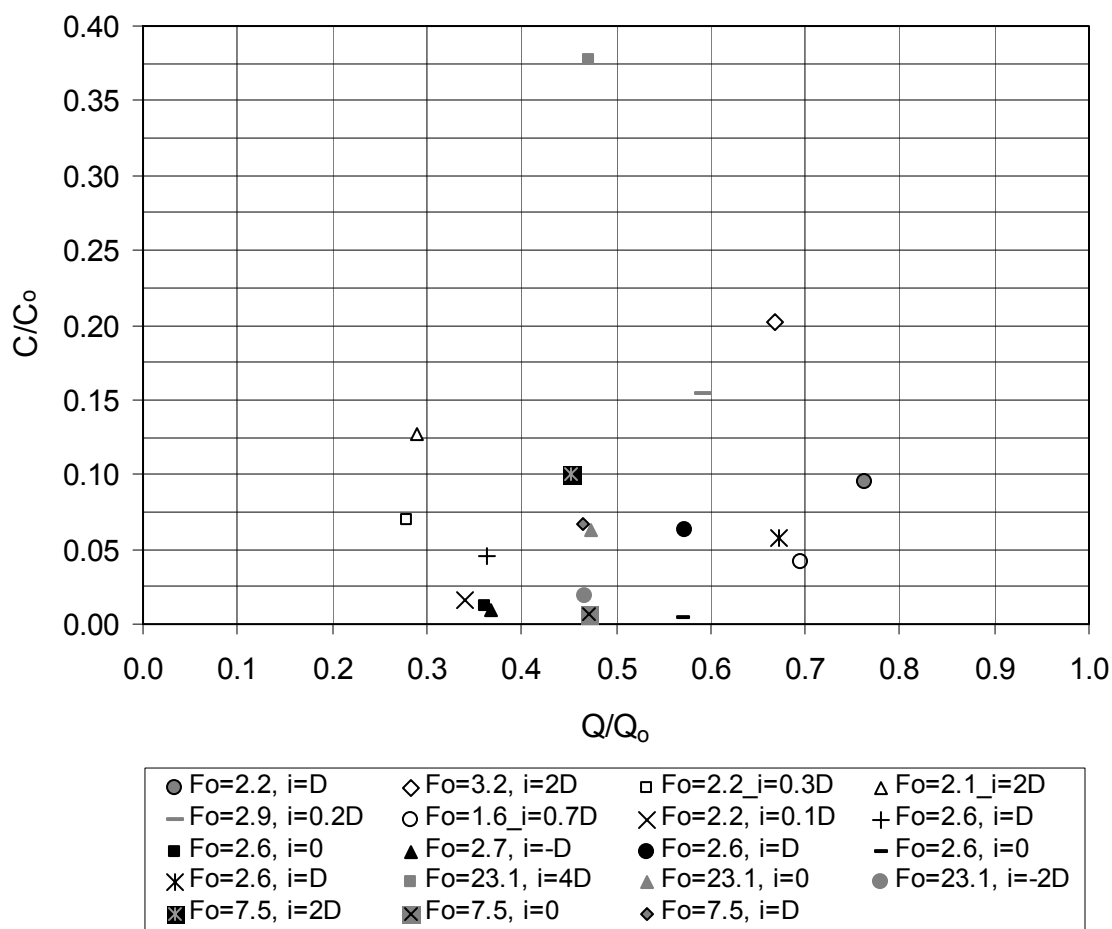
μελετηθεί η μεταβολή της συγκέντρωσης σε συνάρτηση με την παροχή απόληψης. Για λόγους γενίκευσης των αποτελεσμάτων η συγκέντρωση αδιαστατοποιείται ως προς τη συγκέντρωση του αποδέκτη  $C_0$ , ενώ η παροχή απόληψης  $Q$  με την παροχή εισόδου της φλέβας  $Q_0$ . Τα αποτελέσματα δίνονται για διάφορες θέσεις της διεπιφάνειας (Σχήμα 5-5).

Από τα γραφήματα γίνεται φανερό ότι στην περίπτωση που η διεπιφάνεια βρίσκεται υψηλότερα από το στόμιο περίπου  $2D$  ( $D$  η διάμετρος του στομίου), η συγκέντρωση του νερού που λαμβάνεται είναι μεγαλύτερη ή ίση από 10% της αρχικής συγκέντρωσης του αποδέκτη. Όταν η διεπιφάνεια πλησιάσει στο επίπεδο του στομίου ( $i = D$ ) τότε παρατηρούνται και μικρότερες συγκεντρώσεις γύρω στο 6% της αρχικής συγκέντρωσης του αποδέκτη. Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση μεγάλου πυκνομετρικού αριθμού Froude  $F_0$  όπου η ροή υπόκειται σε ανάμιξη από την εκροή. Οι τιμές συγκέντρωσης μειώνονται αισθητά στην περίπτωση που η διεπιφάνεια φτάνει ακριβώς στο επίπεδο του στομίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-5(γ) και πλέον λαμβάνεται πρακτικά το γλυκό νερό της εισερχόμενης φλέβας. Είναι προφανές ότι κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται ακόμα ευκολότερα αν η διεπιφάνεια κατέβει κάτω από το επίπεδο του στομίου έτσι ώστε η φλέβα να εκρέει σε περιβάλλον γλυκού νερού. Είναι χαρακτηριστικό ότι σ' αυτήν την περίπτωση ακόμα και για  $F_0 = 23.1$  η αλατότητα βρίσκεται πολύ χαμηλά



Σχήμα 5-5: Μεταβολή της συγκέντρωσης του νερού που λαμβάνεται συναρτήσει της παροχής απόληξης για διάφορους πυκνομετρικούς αριθμούς Froude  $F_o$  με τη διεπιφάνεια να βρίσκεται (α)  $2D$  πάνω από το στόμιο, (β)  $D$  πάνω από το στόμιο και (γ) στο επίπεδο του στομίου της φλέβας.

Το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων δίνεται στο Σχήμα 5-6.



Σχήμα 5-6: Μεταβολή της συγκέντρωσης συναρτήσει της παροχής απόληξης σε αδιάστατους όρους για διάφορους πυκνομετρικούς αριθμούς Froude  $F_o$  και θέσεις  $i$  της διεπιφάνειας γλυκού και αλμυρού νερού.

### 5.2.2 Οριζόντια εκροή

Στην περίπτωση της οριζόντιας εκροής γλυκού νερού μέσα από δοχείο (Σχήμα 4-10) παρατηρήθηκε διείσδυση αλατόνευρου από τον αποδέκτη. Αν και η απόληξη του γλυκού νερού ήταν περίπου ίση ή μικρότερη από την εκροή γλυκού νερού από το δοχείο τροφοδοσίας, η συγκέντρωση του νερού που λαμβανόταν προέκυψε μεγάλη ( $C/C_0 = 0.24-0.33$ ) σε όλες τις μετρήσεις. Το γεγονός αυτό είναι ενδεικτικό του ότι η ανάμιξη είναι σημαντική στην εκροή του γλυκού νερού. Συνεπώς σε περίπτωση που η εκροή είναι αδύναμη και δεν εξασφαλίζεται πλήρης ροή στη διατομή της εκροής, πραγματοποιείται διείσδυση νερού από τον αποδέκτη στο στόμιο εκροής και κατά συνέπεια η ανάμιξη είναι αναπόφευκτη.

## **6. ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΡΓΩΝ**

### **6.1 Διάταξη απόληψης νερού**

Για την προτεινόμενη διάταξη των έργων θεωρείται ως προϋπόθεση ότι η ανάβλυση έχει επαρκή παροχή και κατάλληλη ποιότητα νερού κατά τους θερινούς μήνες. Η διάταξη πλήρους κάλυψης της πηγής (βλ. 1<sup>η</sup> διάταξη παράγραφος 3.4) αποφεύγεται ώστε η περίσσεια του γλυκού νερού να εκρέει ελεύθερα στη θάλασσα χωρίς να αλληλεπιδρά με την κατασκευή. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για την προστασία της κατασκευής κατά την περίοδο των μεγάλων παροχών που ενδέχεται να προκαλέσουν δυσλειτουργίες ή και καταστροφή της διάταξης απόληψης. Θεωρείται λοιπόν καταλληλότερη η σύλληψη του νερού της ανάβλυσης μέσω διάταξης «ομπρέλας» που επιτρέπει την απομάκρυνση της περίσσειας του γλυκού νερού στο θαλάσσιο περιβάλλον (βλ. παράγραφο 3.4). Με βάση τη θεωρητική προσέγγιση και τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι για υποθαλάσσια απόληψη γλυκού νερού χωρίς την πλήρη απομόνωση της πηγής θα πρέπει το νερό της ανάβλυσης να οδηγείται είτε στο επίπεδο διαχωρισμού γλυκού-αλμυρού νερού είτε υψηλότερα μέσα στην «ομπρέλα» όπου υπάρχει ήδη γλυκό νερό.

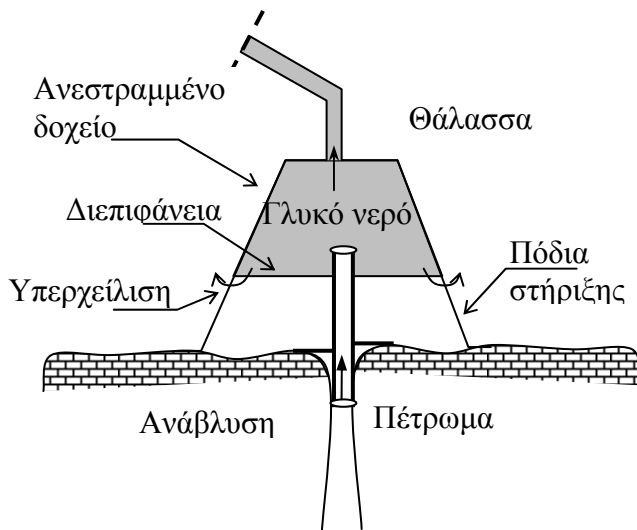
### **6.2 Περιγραφή δυνητικής διάταξης έργων**

Σε περίπτωση που οι μετρήσεις αλατότητας στο φυσικό σύστημα έδειχναν ότι το αναβλύζον νερό είναι γλυκό ακόμη και την κρίσιμη θερινή περίοδο, οπότε θα είχε νόημα η κατασκευή διάταξης απόληψης, το σύστημα λήψης του νερού της ανάβλυσης θα μπορούσε αποτελείται από τις εξής επιμέρους μονάδες (Σχήμα 6-1):

- Σωλήνα προέκτασης της ανάβλυσης από τον πυθμένα σε υψηλότερη στάθμη
- Διάταξη εγκλωβισμού-διαχωρισμού του γλυκού νερού από το θαλάσσιο νερό μορφής ανεστραμμένου δοχείου (ομπρέλας) που εδράζεται με ειδικά στηρίγματα (πόδια) επί του πυθμένα. Το χείλος του ανεστραμμένου δοχείου θα βρίσκεται σε ικανή απόσταση από τον πυθμένα επιτρέποντας την απομάκρυνση της περίσσειας του γλυκού νερού.
- Σωλήνα από το ανώτερο σημείο της διάταξης απόληψης για τη μεταφορά του νερού στην ακτή, σε δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης.

Το σύστημα θα περιλάμβανε επίσης αντλία υποβοήθησης για τη μεταφορά του νερού στην δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης στην ακτή και σύστημα ελέγχου στάθμης της δεξαμενής.

Για λόγους αντοχής και αξιοπιστίας ο σωλήνας επέκτασης της ανάβλυσης και το ανεστραμμένο δοχείο θα έπρεπε να κατασκευαστούν από ανοξείδωτο χάλυβα.

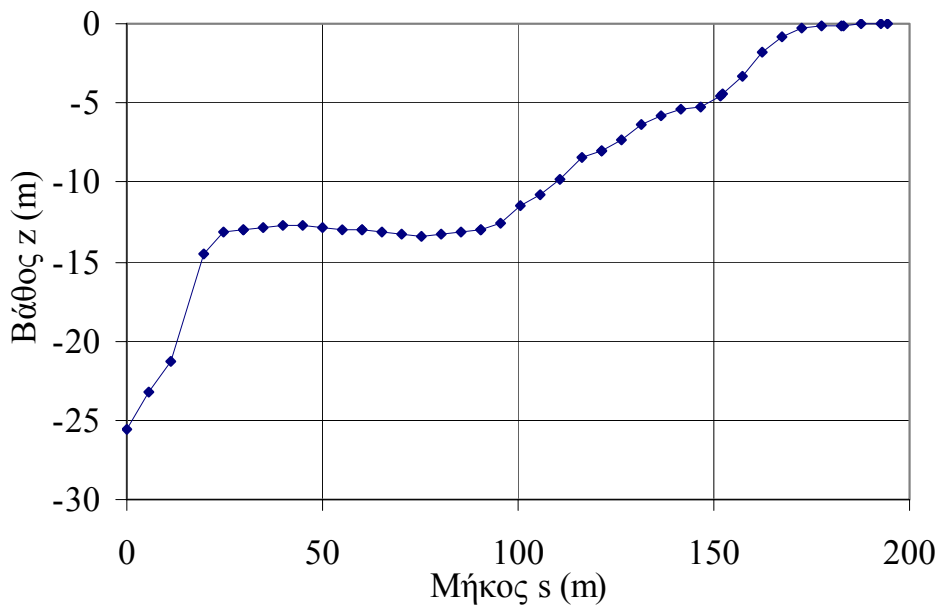


Σχήμα 6-1: Σκαρίφημα του συστήματος απόληξης γλυκού νερού.

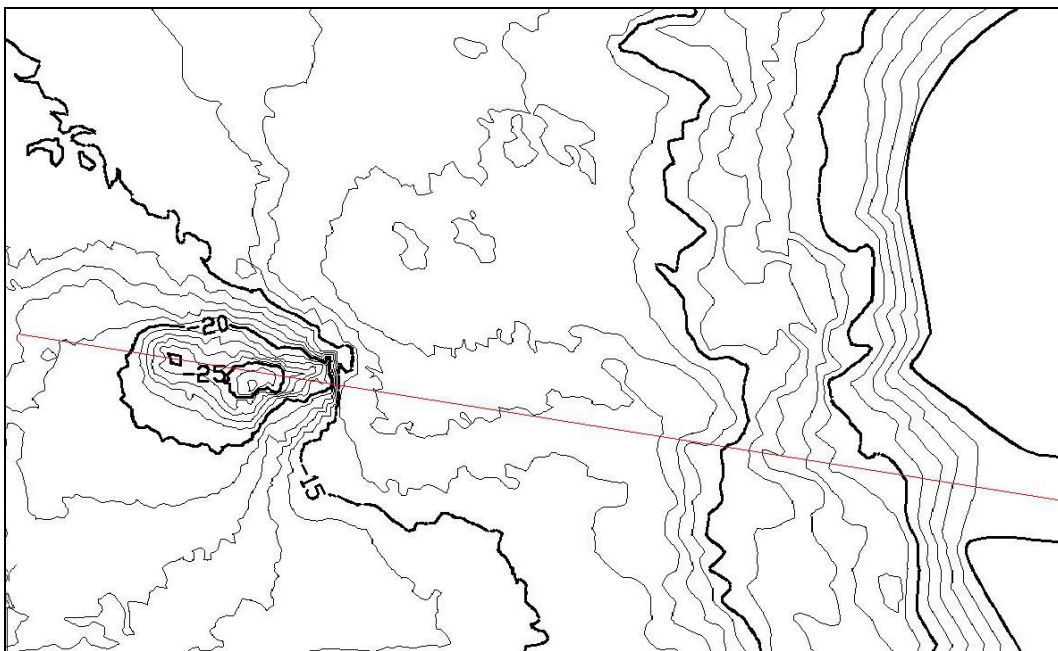
### 6.3 Αγωγός μεταφοράς νερού στην ακτή

Οι απαιτήσεις του Δήμου Λεύκτρου σε νερό ύδρευσης υπαγορεύουν την προοπτική απόληξης ημερήσιας παροχής περίπου  $6500 \text{ m}^3$ , με προοπτικές επάρκειας για τις επόμενες τρεις δεκαετίες. Σύμφωνα με την πρακτική λειτουργίας 18 ωρών όσον αφορά σε αντλητικά συγκροτήματα, η παροχή που θα έπρεπε να αντλείται είναι  $0.10 \text{ m}^3/\text{s}$  ή  $100 \text{ L/s}$ . Αυτό σημαίνει ότι η παροχή της υποθαλάσσιας πηγής θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από  $100 \text{ L/s}$  σε ολόκληρη την περίοδο λειτουργίας, δηλαδή κατά τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο του έτους. Η παροχή αυτή μπορεί να εξυπηρετήσει πληθυσμό της τάξης των 20000 έως 25000 κατοίκων, θεωρώντας ότι η μέση ημερήσια καλοκαιρινή κατανάλωση ανά κάτοικο είναι 250 έως 300 L/d.

Η απόσταση της πηγής από την ακτογραμμή είναι περίπου 200 m, με βάση ενδεικτικές μηκοτομές (βλ. Σχήματα 6-2, 6-3) που έγιναν από την πηγή προς την ακτή σύμφωνα με το βυθομετρικό υπόβαθρο το οποίο μας παρέιχε το ΕΛΚΕΘΕ, από την βυθομετρική αποτύπωση που υλοποίησε.



Σχήμα 6-2: Τυπική μηκοτομή πυθμένα σύμφωνα με μια πιθανή πορεία του αγωγού.



Σχήμα 6-3: Γραμμή τυπικής μηκοτομής στο βυθομετρικό υπόβαθρο του πυθμένα σύμφωνα με μια πιθανή πορεία του αγωγού.

Για το σχεδιασμό των έργων απόληξης του νερού της υποθαλάσσιας πηγής, δηλαδή την μεταφορά του από την περιοχή της πηγής μέχρι τη δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης στην κατά το δυνατόν κοντινότερη ακτή, έγινε υπολογισμός των γραμμικών απωλειών φορτίου που φαίνεται στον Πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1: Υδραυλικός υπολογισμός αγωγού μεταφοράς νερού

$D$ m	$Q$ m <sup>3</sup> /s	$k_s$ m	$L$ m	$f$	$V$ m/s	Re $VD/\nu$	$J_E$ m/m	$h_f$ m
0.20	0.1	0.0005	250	0.0251	3.18	636 620	0.065	16.22
0.25	0.1	0.0005	250	0.0238	2.04	509 296	0.020	5.04
0.30	0.1	0.0005	250	0.0229	1.41	424 414	0.008	1.94
0.35	0.1	0.0005	250	0.0222	1.04	363 783	0.003	0.87
0.20	0.05	0.0005	280	0.0254	1.59	318 310	0.016	4.59
0.25	0.05	0.0005	280	0.0242	1.02	254 648	0.005	1.43
0.30	0.05	0.0005	280	0.0234	0.71	212 207	0.002	0.56
0.35	0.05	0.0005	280	0.0228	0.52	181 892	0.001	0.25

Ο υπολογισμός έχει γίνει για πραγματικό μήκος αγωγού περίπου 250 m, ώστε τυχόν τοπικές απώλειες να λαμβάνονται υπόψη. Επίσης, ο υπολογισμός έγινε και για τη μισή παροχή απόληψης, δεδομένου ότι η ελάχιστη παροχή της πηγής κατά τους καλοκαιρινούς μήνες δεν είναι επαρκώς τεκμηριωμένη. Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι: (1) Για παροχή απόληψης 100 L/s η υποβοήθηση με αντλία θα είναι πολύ μικρή, εάν η διάμετρος του αγωγού μεταφοράς είναι περίπου 0.30 m – 0.35 m. (2) Για παροχή απόληψης 50 L/s η υποβοήθηση με αντλία θα είναι πολύ μικρή, εάν η διάμετρος του αγωγού μεταφοράς είναι περίπου 0.25 m – 0.30 m.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι σε περίπτωση που η στάθμη της δεξαμενής προσωρινής αποθήκευσης βρίσκεται περίπου 1-1.50 m κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, τότε αγωγός διαμέτρου 0.25 m ή 0.30 m μπορεί να μεταφέρει στην ακτή παροχή 50 L/s ή 100 L/s πρακτικά χωρίς άντληση.



## **7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

### **7.1 Συμπεράσματα**

Από την πειραματική μελέτη συνάγονται τα εξής συμπεράσματα που για την περίπτωση της υποθαλάσσιας ανάβλυσης της Στούπας:

- Αν η πηγή δεν ρέει πλήρης τότε η διείσδυση θαλάσσιου νερού στην πηγή είναι αναπόφευκτη.
- Εφόσον η πηγή ρέει πλήρης είναι δυνατή η απόληψη νερού ελάχιστα αναμειγμένου με το νερό του αποδέκτη εφόσον η σχηματιζόμενη διεπιφάνεια γλυκού και θαλάσσιου νερού παραμένει στο επίπεδο της εκροής ή κάτω από αυτό.

Οι μετρημένες παροχές από το ΕΛΚΕΘΕ οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει πλήρης ροή αλλά κάτι τέτοιο δεν είναι βέβαιο τους θερινούς μήνες που υπάρχει αισθητή μείωση της παροχής. Τότε επίσης δεν μπορεί να αποκλειστεί το ενδεχόμενο ότι υπάρχει διείσδυση θαλάσσιου νερού και σε άλλα ανοίγματα του καρστικού συστήματος οπότε το νερό της πηγής είναι έτσι κι αλλιώς υφάλμυρο. Οι μετρήσεις ΕΛΚΕΘΕ δεν οδηγούν σε αποκλεισμό αυτού του ενδεχομένου.

### **7.2 Προτάσεις**

Για την υλοποίηση του έργου εκμετάλλευσης της πηγής απαιτείται η ακριβής περιγραφή των συνθηκών γύρω από την εκροή και των χαρακτηριστικών της. Τα σημερινά δεδομένα δημιουργούν ερωτηματικά σχετικά με την παροχή και ποιότητα του νερού. Η προσφάτως διαπιστωμένη κάλυψη της πηγής από υπερκείμενο βράχο μεγάλων διαστάσεων δυσχεραίνει τις όποιες προσπάθειες συλλογής δεδομένων και εξακρίβωσης των συνθηκών εκροής. Επίσης δεν επιτρέπει την τοποθέτηση συστήματος για την απόληψη γλυκού νερού. Για το λόγο αυτό θα ήταν σκόπιμη η απομάκρυνση του βράχου που καλύπτει την πηγή. Εφόσον η πηγή αποκαλυφθεί θα μπορούσαν να υλοποιηθούν τα εξής:

- ο Ακριβής προσδιορισμός των γεωμετρικών της χαρακτηριστικών (διαστάσεις)
- ο Συλλογή δεδομένων σχετικών με την παροχή και την ποιότητα του νερού ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο υπό τις νέες συνθήκες.
- ο Κατασκευή του συστήματος απόληψης γλυκού νερού στο θαλάσσιο περιβάλλον, εφόσον τα παραπάνω δεδομένα είναι θετικά.

Με τα σημερινά δεδομένα οποιαδήποτε παρέμβαση ή κατασκευή θεωρείται παρακινδυνευμένη, ενώ και η τυχόν απομάκρυνση του βράχου δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι θα οδηγήσει υποχρεωτικά σε θετική λύση, επειδή τα καρστικά συστήματα είναι πολύπλοκα και ευαίσθητα.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Arfib, B. (2001a). Etude des circulation d'eaux souterraines en aquifere karstique cotier: observations et modelisation de la source saumatre Almyros d'Heraklion, Crete (Grece). These de troisieme cycle, Universite Paris VI, p. 337.
- Arfib, B. (2001b). Ecoulement preferentiels en aquiferes karstiques cotiers: impacts sur la salinite de l'eau dans le systeme de l'Almyros d'Heraklion, Crete, Grece. 7e Colloque en Pays calcaire et Milieu Fissure, pp. 13–16.
- Arfib, B., de Marsily, G., Ganoulis, J. (2002). Les sources karstiques cotieres en mediterranee: etude des mecanismes de pollution saline de l'Almyros d'Heraklion (Crete), observations et modelisations. Bull. Soc. geol. France 173 (3), 245–253.
- Arfib, B., de Marsily, G., Ganoulis, G. (2007). Locating the zone of saline intrusion in a coastal karst aquifer using springflow data. Groundwater 45 (1), 28–35.
- Arfib, B., Ganoulis, J. (2004). Modelisation physique de l'intrusion d'eau de mer dans un aquifere karstique: cas de l'Almyros d'Heraklion (Crete). Comptes Rendus Geoscience 336 (11), 999–1006.
- Arfib, B., de Marsily, G. (2004). Modeling the salinity of an inland coastal brackish karstic spring with a conduit-matrix model. Water Resources Research 40, W11506. doi:10.1029/2004WR00314.
- Argyriadis, I. (2003). Une realisation industrielle d'exploitation de resurgences sous-marines d'eau douce. Geologues 136, 42–46.
- Argyriadis, I. (2007). Device for trapping subsea fresh water resurgences and method for the operation thereof, Organisation Mondiale de la Propriete Intellectuelle, WO 2007/017703 A1.
- Bakalowicz, M., Fleury, P., Jouvencel, B., Prome, J.J., Becker, P., Carlin, T., Dorfliger, N., Seidel, J.L., Sergent, P. (2003b). Coastal karst aquifers in mediterranean regions. A methodology for exploring, exploiting and monitoring submarine springs. In: Instituto Geologico y Minero de Espana Publ., Tecnologia de la Intrusion de Agua de mar en Acuiferos Costeros: pais mediterraneos (TIAC). Hydrogeologia y aguas subterraneas no. 8, Alicante, 2, pp. 673–680.
- Bonacci, O. (1987). Karst Hydrology. With Special Reference to the Dinaric Karst Springer Series in Physical Environment, vol. 2. Springer-Verlag, New York, 184p.
- Breznik, M. (1998). Storage Reservoirs and Deep Wells in Karst Regions. Balkema, Rotterdam, Brookfield, p. 251.
- CEM (2008). "Coastal Engineering Manual", Coastal Engineering Research Center (CERC), USACE, Vicksburg, Mississippi, USA. (<http://chl.erd.c.usace.army.mil/CHL.aspx?p=s&a=ARTICLES;104>)
- Christoffersen, J.B. and Jonsson, I. G. (1985). Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion. Ocean Eng., 12 (5), 387-423

- Crosby, F.W., Crosby, W.O. (1896). The sea mills of Cephalonia. Technol. Q. Proc. Soc., Mass. Inst. Technol. (Boston) 9 (1), 6–23.
- Drogue, C. (1989). Continuous inflow of seawater and outflow of brackish water in the substratum of the karstic island of Cephalonia, Greece. *Journal of Hydrology* 106, 147–153.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H. (1979). Mixing in inland and coastal waters. Academic.
- Fleury, P., Bakalowicz, M., Marsily, G. (2007). Submarine springs and coastal karst aquifers: A review. *J. Hydrology* 339, 79-92.
- Fuller, M.L. (1906). Condition of circulation at the sea mills of Cephalonia. *Geological Society of America* 18, 221–232.
- Gibson, C. H., Schwarz, W. H. (1963). Detection of conductivity fluctuations in a turbulent flow field, *Journal of Fluid Mechanics*, pp. 357-364.
- Glanz, T. (1965). Das Phanomen der Meermuhlen von Argostolion. *Steir. Beitr. Hydrogeol., Austria* 17, 117–127
- Holthuijsen, L.H, Booij, N. And Herbers, T.H.C. (1989). A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, *Coastal Engineering*, Vol. 13, pp. 23-54.
- Johnson, H.K. (1998). On modelling wind-waves in shallow and fetch limited areas using the method of Holthuijsen, Booij and Herbers. *J. Of Coastal Research*. Vol14, No.3, pp.917-932.
- Kahma, K.K. and Calkoen, C.J. (1994). Growth curve observations, in: *Dynamics and modelling of Ocean waves by Komen et al.*, pp. 174-182. Cambridge University Press.
- Lambrakis, N., Andreou, A.S., Polydoropoulos, P., Georgopoulos, E., Bountis, T. (2000). Nonlinear analysis and forecasting of a brackish karstic spring. *Water Resources Research* 36 (4), 875–884.
- List, E.J. & Imberger, J. (1973). Turbulent entrainment in buoyant jets and plumes. *J. Hyd. Div. ASCE* 99 (9), 1461 - 1474.
- Mangin, A., Knithakis, M., Bakalowicz, M., Papadopoulos, C., D’Hulst, D. (1996). Hydrogeologie des aquiferes carbonates de la region d’ Agios Nikolaos (Crete, Grece), IGME (Grece) & CNRS (France), Rethymnon (Crete, Grece) & Moulis (Ariege, France), 50p.
- Maramathas, A., Maroulis, Z., Marinos-Kouris, D. (2003). Brackish karstic springs model: application to Almiros Spring in Crete. *Ground Water* 41 (5), 608–619.
- Maramathas, A. (2006). A new approach for the development and management of brackish karst springs. *Hydrogeology Journal* 14(7), 1360–1366.
- Maurin, V., Zoelt, J. (1965). Salt Water Encroachment in the Low Altitude Karst Water Horizons of the Island of Kephallinia (Ionian Islands), *Hydrologie des roches fissurees*, vol. 2. AIHS, Dubrovnik, pp. 423–438.

- MIKE21 NSW Manual, 2007
- MIKE21 HD Manual, 2007
- Milanovic, P.T. (2000). Geological Engineering in Karst, Dams, Reservoirs, Grouting, Groundwater Protection, Water Tapping, Tunnelling. Zebra Publishing, Belgrade, 347p.
- Munk, W.H. 1949. The solitary wave theory and its application to surf problems, Annals New York Acad. Sci., Vol. 51, pp. 376-423.
- Papanicolaou, P.N., List, E.J. (1988). Investigations of round vertical turbulent buoyant jets. J. Fluid Mech., 195, 341-391.
- Potie, L., Ricour, J. (1974). Etude et captage de resurgences d' eau douce sous-marines. Ressources en eau, pp. 5–26.
- Pulido Bosch, A. (1999). Karst water exploitation. In: Drew, D., Hotzl, H. (Eds.), Karst Hydrogeology and Human activities, International Contribution to Hydrogeology, vol. 20. IAH, pp.225–256.
- Shields, A., 1936, Anwendung der Ahnlichkeits-Mechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Preussische Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, Vol. 26, Berlin
- Stringfield, V.T., LeGrand, H.E. (1969). Relation of sea water to fresh water in carbonate rocks in coastal areas, with special reference to Florida, USA, and Cephalonia (Kephallinia), Greece. Journal of Hydrology 9, 387–404.
- Soulsby R. L., 1997, Dynamics of marine sands.
- Soulsby R. L. and Whitehouse, R.J.S.W., 1997, Threshold of sediment motion in coastal environments. Proc.Pacific Coasts and Ports '97 Conf., Christchurch, 1, p.p. 149-54. University of Canterbury, New Zealand
- U.S. Army. Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual, 1984.
- U.S. Army. Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual, 1975.
- Wilkinson, D.L. (1988). Avoidance of seawater intrusion into ports of ocean outfalls. J. Hyd. Eng., ASCE, 123(1), 65-72.
- Wolfgang (1972). Anavalos Kiveri, la source d'eau douce sousmarine, [www.Argolis.de/AnavalosKiveri.htm](http://www.Argolis.de/AnavalosKiveri.htm).
- Zotl, J. (1974). Karsthydrogeologie. Springer, Berlin, pp. 192–197.
- ΕΛΚΕΘΕ, ΙΕΣΕ, ΕΜΥ, (2007). Άτλαντας Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών
- Σκανδάλης, Π. (2005). Κατακόρυφες φλέβες με θετική και αρνητική άνωση. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.
- ΕΛΚΕΘΕ (2009). Ολοκληρωμένη θαλάσσια & χερσαία μελέτη για τη διερεύνηση της ποσότητας, ποιότητας και υδρομάστευσης των υποθαλάσσιων αναβλύσεων της περιοχής Στούπας του Δήμου Λεύκτρου Ν. Μεσσηνίας. Έκθεση προόδου 2:

Βαθυμετρικές και γεωφυσικές μετρήσεις – ωκεανογραφικές μετρήσεις –  
ιζηματολογικές αναλύσεις. Δεκέμβριος 2009.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΑΝΕΜΩΝ

ΣΤΑΘΜΟΣ ΜΕΘΩΝΗΣ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	5.409	9.667	2.828	2.151	1.075	1.387	2.968	4.032
4	1.871	2.398	2.914	2.226	0.828	1.882	3.473	4.828
5	0.301	0.086	1.204	0.796	0.366	1.366	2.129	1.774
6	0.054	0.043	0.720	0.495	0.140	1.032	1.624	1.151
7	0.000	0.000	0.151	0.118	0.043	0.484	0.978	0.441
8	0.000	0.000	0.075	0.000	0.022	0.247	0.355	0.129
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	4.140	8.102	3.102	2.300	0.861	2.040	4.010	3.703
4	1.828	2.300	3.255	2.713	0.790	2.123	4.328	5.437
5	0.377	0.177	1.380	1.132	0.259	1.474	3.255	2.465
6	0.059	0.035	0.731	0.590	0.035	0.767	1.981	1.215
7	0.000	0.000	0.354	0.236	0.024	0.330	0.837	0.425
8	0.000	0.000	0.024	0.000	0.000	0.200	0.295	0.094
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035	0.012
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΜΑΡΤΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	2.722	3.959	2.496	2.399	1.000	2.356	5.519	5.185
4	1.119	1.517	2.861	2.453	0.570	1.441	6.315	6.530
5	0.215	0.140	1.915	1.183	0.151	0.742	3.270	2.722
6	0.065	0.140	1.334	0.473	0.086	0.506	1.388	1.119
7	0.000	0.022	0.420	0.108	0.011	0.097	0.602	0.301
8	0.000	0.000	0.097	0.097	0.022	0.097	0.430	0.118
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.011
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΑΠΡΙΛΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	1.055	1.844	2.799	2.299	0.689	2.000	6.499	7.110
4	0.378	0.411	2.799	2.188	0.355	1.844	8.587	8.032
5	0.078	0.033	1.711	0.922	0.100	0.911	4.010	3.355
6	0.033	0.033	1.100	0.811	0.022	0.289	2.322	1.255
7	0.000	0.011	0.233	0.122	0.000	0.078	0.389	0.189
8	0.000	0.000	0.044	0.022	0.000	0.011	0.078	0.011
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΜΑΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW

3	0.430	0.785	1.387	1.441	0.527	1.667	9.840	9.818
4	0.172	0.280	1.882	1.613	0.215	1.237	10.894	10.356
5	0.011	0.043	0.656	0.581	0.075	0.387	4.388	3.054
6	0.011	0.022	0.355	0.323	0.000	0.054	1.366	0.903
7	0.000	0.011	0.129	0.022	0.000	0.032	0.194	0.075
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΙΟΥΝΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	0.300	0.311	0.800	0.789	0.311	1.545	10.713	12.136
4	0.278	0.178	0.756	0.567	0.089	0.745	11.703	13.892
5	0.056	0.033	0.233	0.189	0.022	0.233	5.046	4.923
6	0.000	0.011	0.156	0.144	0.000	0.022	1.578	1.534
7	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000	0.011	0.133	0.167
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΙΟΥΛΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	0.366	0.345	0.162	0.108	0.248	1.347	12.677	12.310
4	0.377	0.108	0.140	0.151	0.097	0.593	13.819	14.649
5	0.162	0.022	0.011	0.032	0.000	0.280	5.519	5.616
6	0.043	0.000	0.043	0.022	0.000	0.000	1.531	1.789
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.162	0.119
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	0.613	0.645	0.280	0.323	0.398	2.581	11.292	11.033
4	0.430	0.215	0.118	0.054	0.151	0.936	11.808	12.259
5	0.075	0.054	0.032	0.032	0.032	0.290	5.302	4.667
6	0.022	0.022	0.000	0.000	0.000	0.043	1.903	1.957
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.140	0.161
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	1.412	2.167	0.811	0.978	1.023	3.057	7.536	8.581
4	0.478	0.289	0.534	0.700	0.367	1.689	10.203	10.715
5	0.100	0.033	0.167	0.167	0.056	0.522	3.490	3.023
6	0.000	0.000	0.044	0.033	0.022	0.033	0.822	0.889
7	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.122	0.111
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.089	0.011
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	3.626	7.274	2.572	2.658	0.850	2.873	6.155	5.402
4	0.936	1.614	2.324	2.034	0.635	1.420	4.918	4.746
5	0.054	0.129	0.947	0.958	0.075	0.613	1.840	1.431
6	0.011	0.032	0.560	0.172	0.011	0.161	0.430	0.484
7	0.000	0.000	0.258	0.043	0.000	0.097	0.097	0.043
8	0.000	0.000	0.022	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	4.313	8.747	2.790	2.590	1.156	1.934	3.779	4.290
4	0.956	1.667	2.790	2.601	0.667	1.812	3.812	3.990
5	0.122	0.133	1.489	1.423	0.467	1.289	2.101	1.789
6	0.056	0.022	0.867	0.367	0.189	0.645	1.034	1.034
7	0.000	0.011	0.144	0.044	0.011	0.322	0.411	0.278
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.156	0.245	0.111
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.044	0.011
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	4.473	10.375	3.086	2.172	0.774	1.720	2.494	3.849
4	1.344	1.839	2.828	2.419	1.473	2.613	3.903	4.354
5	0.280	0.140	1.236	0.849	0.570	1.580	2.236	1.849
6	0.032	0.032	0.817	0.559	0.226	1.301	1.344	1.043
7	0.011	0.000	0.312	0.086	0.054	0.516	0.710	0.247
8	0.000	0.000	0.097	0.011	0.022	0.258	0.226	0.118
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011

## ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	10.659	2.130	0.247	1.345	3.442	0.860	0.506	2.560
4	3.259	1.463	0.215	0.592	1.560	0.430	0.215	0.710
5	0.904	0.527	0.097	0.344	0.613	0.075	0.086	0.161
6	0.258	0.247	0.022	0.215	0.409	0.043	0.011	0.011
7	0.032	0.054	0.011	0.032	0.054	0.000	0.000	0.011
8	0.011	0.032	0.000	0.011	0.043	0.011	0.000	0.000
9	0.000	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	9.033	2.653	0.377	1.415	5.189	1.474	0.425	2.748
4	2.842	1.238	0.295	0.601	2.028	0.590	0.307	0.884
5	0.531	0.460	0.118	0.307	0.943	0.212	0.047	0.212
6	0.094	0.271	0.118	0.106	0.448	0.094	0.000	0.012
7	0.012	0.094	0.035	0.024	0.059	0.000	0.000	0.000
8	0.012	0.094	0.047	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	0.000	0.000	0.000
ΜΑΡΤΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	7.583	2.431	0.323	1.495	6.626	2.743	0.538	2.560
4	2.409	1.129	0.215	0.624	2.313	1.033	0.247	0.710
5	0.355	0.376	0.108	0.151	0.581	0.280	0.097	0.140
6	0.086	0.140	0.032	0.161	0.247	0.043	0.043	0.032
7	0.022	0.108	0.032	0.022	0.097	0.011	0.000	0.011
8	0.000	0.011	0.011	0.011	0.022	0.011	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΑΠΡΙΛΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	5.580	1.745	0.233	1.400	6.758	3.079	0.711	2.056
4	2.534	1.278	0.022	0.556	3.301	1.312	0.478	0.722
5	0.456	0.311	0.000	0.111	0.445	0.178	0.044	0.133
6	0.022	0.044	0.011	0.078	0.200	0.011	0.022	0.033
7	0.000	0.022	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΜΑΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	5.076	2.172	0.129	1.097	8.055	3.280	0.527	1.355
4	2.710	1.807	0.054	0.495	4.710	1.473	0.258	0.710
5	0.548	0.355	0.097	0.032	0.409	0.118	0.075	0.172

6	0.086	0.043	0.022	0.011	0.054	0.022	0.011	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΙΟΥΝΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	6.109	2.233	0.144	1.333	9.241	3.155	0.522	1.855
4	5.376	2.877	0.078	0.544	4.299	1.677	0.355	1.255
5	1.055	0.700	0.000	0.022	0.233	0.111	0.022	0.322
6	0.100	0.056	0.000	0.011	0.033	0.000	0.000	0.089
7	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΙΟΥΛΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	5.970	2.291	0.129	1.194	9.724	2.442	0.312	1.829
4	4.130	2.474	0.151	0.968	6.153	1.958	0.226	1.269
5	0.968	0.506	0.000	0.054	0.484	0.075	0.032	0.387
6	0.108	0.043	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.054
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	5.615	2.366	0.226	1.517	8.992	2.549	0.312	1.463
4	3.356	2.248	0.108	1.076	7.572	2.022	0.183	0.828
5	0.688	0.581	0.011	0.043	0.280	0.097	0.000	0.258
6	0.022	0.075	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.054
7	0.000	0.032	0.011	0.000	0.022	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	5.767	2.561	0.189	1.536	9.486	3.151	0.479	1.481
4	2.383	1.837	0.111	0.590	4.153	1.425	0.267	0.635
5	0.367	0.301	0.011	0.000	0.245	0.078	0.033	0.089
6	0.089	0.078	0.022	0.022	0.022	0.000	0.000	0.011
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW

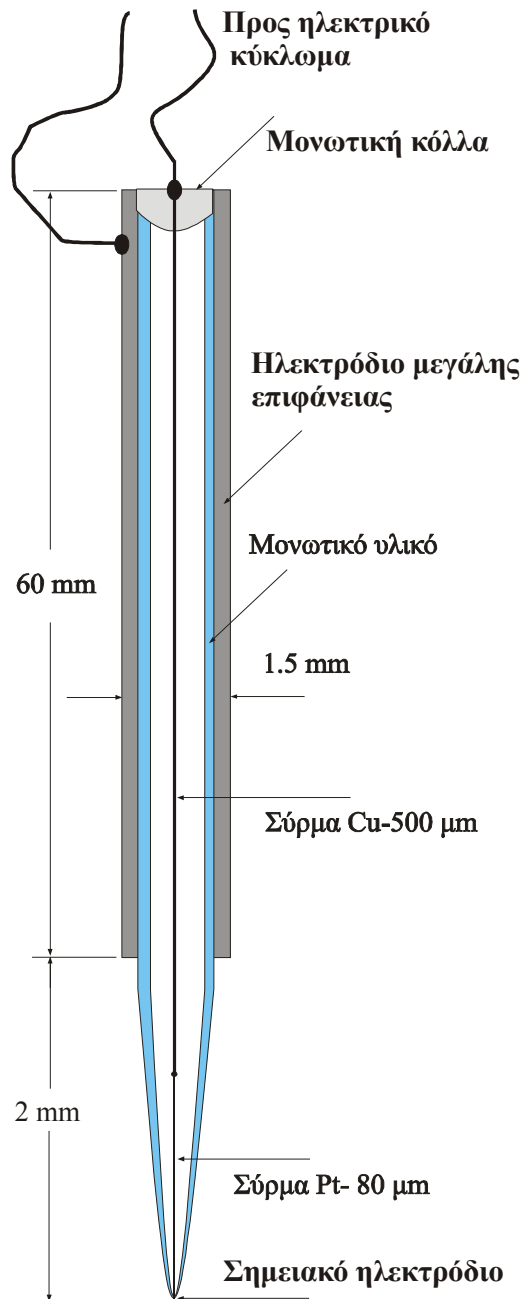
3	7.021	2.014	0.172	1.034	6.784	2.886	0.388	2.164
4	1.798	0.991	0.140	0.495	1.981	0.754	0.075	0.463
5	0.280	0.226	0.097	0.075	0.366	0.108	0.000	0.011
6	0.086	0.086	0.011	0.086	0.075	0.011	0.000	0.011
7	0.011	0.054	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
NOEMBPIOΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	9.524	1.778	0.156	1.289	3.979	1.567	0.433	2.778
4	1.867	0.611	0.100	0.511	1.834	0.522	0.189	0.545
5	0.133	0.156	0.056	0.133	0.811	0.167	0.033	0.044
6	0.011	0.089	0.000	0.033	0.256	0.089	0.022	0.011
7	0.033	0.033	0.000	0.000	0.078	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.011	0.089	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ								
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	10.473	1.731	0.140	1.183	3.172	0.731	0.591	3.129
4	2.817	1.065	0.247	0.785	2.172	0.409	0.376	0.903
5	0.516	0.344	0.075	0.355	0.903	0.172	0.054	0.043
6	0.075	0.172	0.032	0.280	0.430	0.075	0.022	0.011
7	0.000	0.032	0.032	0.075	0.183	0.022	0.000	0.000
8	0.000	0.054	0.011	0.000	0.022	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΗΜΕΙΑΚΟΥ ΑΓΩΓΙΜΟΜΕΤΡΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ NaCl ΣΕ ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ

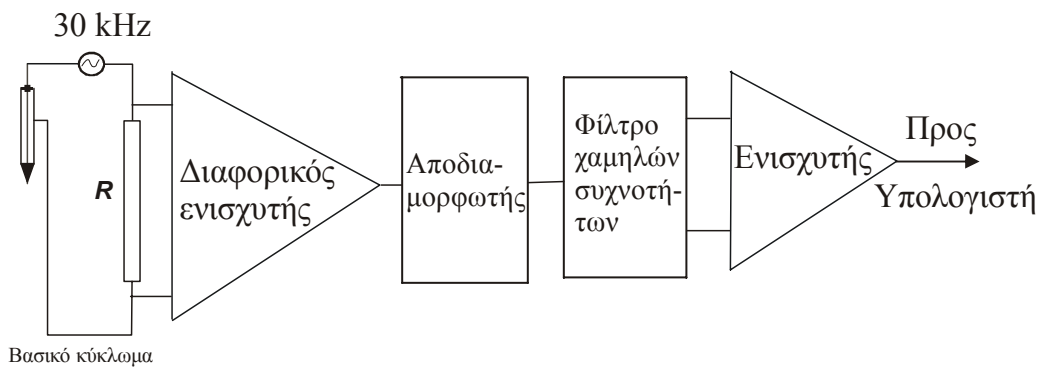
Το σημειακό αγωγιμόμετρο είναι ένα σχετικά απλό αισθητήριο για τη μέτρηση της συγκέντρωσης NaCl ή άλλων ηλεκτρολυτών σε υδατικά διαλύματα. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί στη μελέτη διεργασιών ανάμιξης μεταξύ ενός ηλεκτρολυτικού διαλύματος και ενός μη ηλεκτρολυτικού υγρού [1], [2], [3], [4]. Επίσης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί στη μελέτη διαφασικών ροών υγρού (νερού)-αερίου εξαιτίας της διαφοράς αγωγιμότητας που υπάρχει μεταξύ του υγρού και του αερίου [5]. Όπως περιγράφεται παρακάτω, εξαιτίας της απλότητας στην κατασκευή ενός σημειακού αγωγιμομέτρου είναι δυνατή η κατασκευή του στο εργαστήριο.

Στο Σχήμα Π-1 φαίνεται ένα σκίτσο του σημειακού αγωγιμομέτρου το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις παρούσες μετρήσεις. Αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια από τα οποία το ένα είναι το σημειακό ηλεκτρόδιο (πολύ μικρής επιφάνειας), το οποίο είναι και το αισθητήριο μέτρησης της συγκέντρωσης του χλωριούχου νατρίου (NaCl). Το δεύτερο ηλεκτρόδιο είναι εκτεταμένης επιφάνειας σε σχέση με αυτή του σημειακού ηλεκτροδίου. Έτσι βασικά η αντίσταση στη δίοδο του ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων κύρια οφείλεται στη δίοδο μέσα από την μικρή επιφάνεια του σημειακού ηλεκτροδίου, γεγονός στο οποίο στηρίζεται η αρχή λειτουργίας του. Παρακάτω περιγράφεται με σχετική λεπτομέρεια ο τρόπος λειτουργίας του σημειακού αγωγιμομέτρου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα Π-2 το σημειακό αγωγιμόμετρο συνδέεται στο βασικό ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο αποτελείται από μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας 30 kHz (φέρουσα συχνότητα) και από μια αντίσταση  $R$  πολύ μικρότερης αντίστασης από αυτήν που παρουσιάζει το ηλεκτρολυτικό διάλυμα και το σημειακό αγωγιμόμετρο (π.χ. 50  $\Omega$ ). Ο λόγος ύπαρξης της γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος είναι η αποφυγή ηλεκτρολυτικών φαινομένων πάνω στα ηλεκτρόδια και κύρια πάνω στο σημειακό ηλεκτρόδιο. Η τάση που επικρατεί στα άκρα της αντίστασης  $R$  ενισχύεται με τη βοήθεια του διαφορικού ενισχυτή. Σημειώνεται ότι η τάση η οποία καταγράφεται στα άκρα της αντίστασης  $R$  είναι εναλλασσόμενη της οποίας το πλάτος εξαρτάται από την αγωγιμότητα που μετρείται στη θέση του σημειακού ηλεκτροδίου.



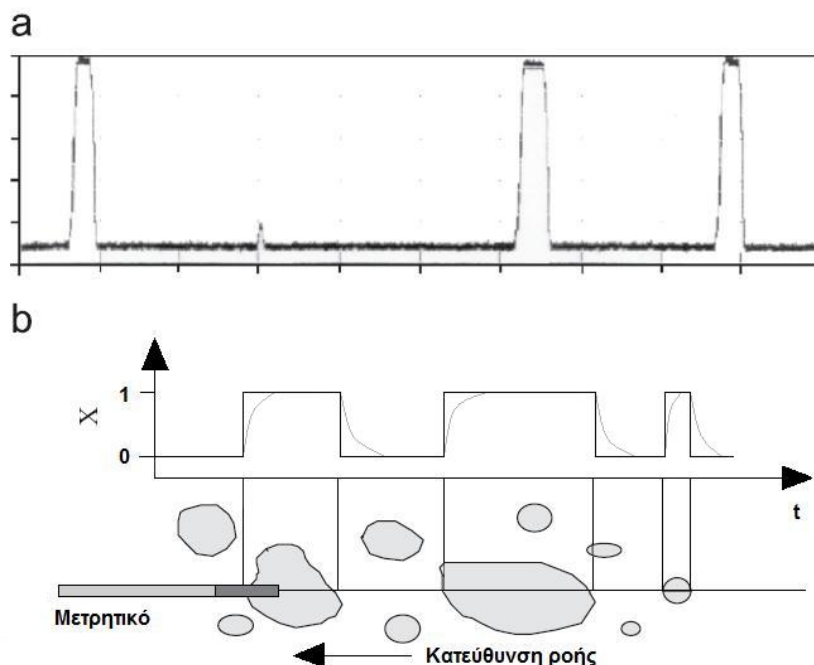
Σχήμα Π-1. Σκίτσο του σημειακού αγωγιμομέτρου.



Σχήμα Π-2: Ηλεκτρονικό κύκλωμα για μετρήσεις με το σημειακό αγωγιμόμετρο.

Η χρήσιμη πληροφορία που υπάρχει στην εναλλασσόμενη τάση μεταβαλλόμενου πλάτους που καταγράφεται στην έξοδο του διαφορικού ενισχυτή είναι ακριβώς η μεταβολή του πλάτους της. Αυτή η πληροφορία λαμβάνεται με τη χρήση του αποδιαμορφωτή, ο οποίος αφαιρεί το αρνητικό μέρος της εναλλασσόμενης τάσης και «γεμίζει» την εναπομείνασα εναλλασσόμενη τάση, έτσι ώστε στην έξοδο του αποδιαμορφωτή να υπάρχει ένα σήμα στο οποίο καταγράφεται μόνο η μεταβολή του πλάτους της εναλλασσόμενης τάσης. Επειδή όμως δεν αφαιρείται πλήρως η συχνότητα των 30 kHz απαιτείται στη συνέχεια και η χρησιμοποίηση ενός φίλτρου το οποίο αφαιρεί τις υψηλές συχνότητες, όπως αυτή των 30 kHz (low pass-filter) και έτσι στην έξοδο του φίλτρου λαμβάνεται ένα ηλεκτρικό σήμα το οποίο αντιστοιχεί στην στιγμιαία συγκέντρωση NaCl στη θέση του σημειακού ηλεκτροδίου. Στη συνέχεια το σήμα ενισχύεται με τον ενισχυτή που φαίνεται στο Σχήμα Π-2 και οδηγείται στον μετατροπέα A/D όπου ψηφιοποιείται και στη συνέχεια αποθηκεύεται στη μνήμη ενός υπολογιστή.

Στο Σχήμα Π-3 φαίνεται σχηματικά ο τρόπος με τον οποίο το σημειακό αγωγιμόμετρο αντιδρά στην περίπτωση όπου μια περιοχή με αυξημένη συγκέντρωση ηλεκτρολύτη συναντά το σημειακό αγωγιμόμετρο.



Σχήμα Π-3. Τυπική συμπεριφορά σημειακού αγωγιμομέτρου μέσα σε ένα πεδίο ανάμιξης σε αρχικό στάδιο ανάμιξης.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του σημειακού αγωγιμόμετρου είναι η ελάχιστη χωρική διακριτικότητα και το πόσο γρήγορα ανταποκρίνεται στις αλλαγές της συγκέντρωσης στο πεδίο ροής.

### **Βιβλιογραφία**

1. Ncube, F., Kastrinakis, E.G., Nychas, S.G, Lavdakis, K.E. (1991). Drifting behaviour of a conductivity probe. *Journal of hydraulic research*, 29(5): 643-654.
2. Gibson, C.H., Schwarz, W.H. (1963). Detection of conductivity fluctuations in a turbulent flow field. *Journal of Fluid Mechanics*, pp. 357-364.
3. Alonso, C.V. (1971). Comparative study of electrical conductivity probes. *Journal of Hydraulic Research* 9(1): 1-10.
4. Chua, S.K., Cleaver, J.W., Millward J.-M. (1986). The measurement of salt concentration in a plume using a conductivity probe. *Journal of Hydraulic Research* 25(3): 171-178.
5. Moisidis, C.T., Kastrinakis, E.G. (2010). Pressure behavior in the riser tube of an airlift pump of short length. *Journal of Hydraulic Research* 48(01): 65-73.