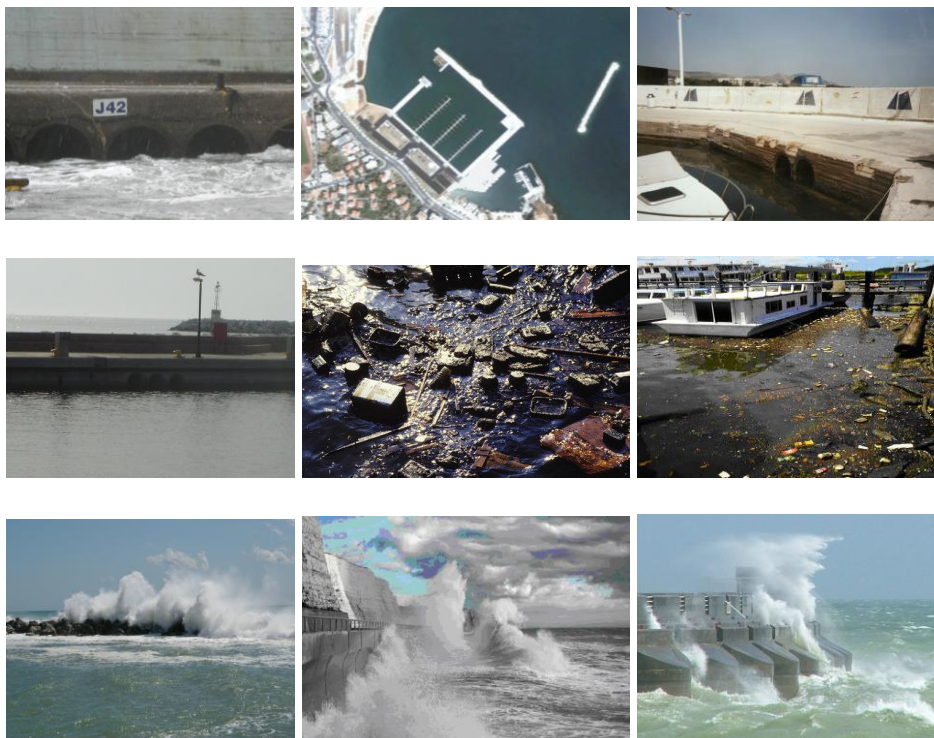


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



Διπλωματική εργασία

**Διερεύνηση κυματικής διείσδυσης, από αγωγό ανανέωσης υδάτων, σε
λιμενολεκάνη.**



Ευάγγελος Ν. Κουρής

Επιβλέπων: Καρατζάς Γεώργιος, Καθηγητής Π.Κ.
Συνεπιβλέπουσα: Τσουκαλά Βασιλική, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Χανιά, Ιούνιος, 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, σε συνεργασία με το Εργαστήριο Λιμενικών Έργων της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της κυματικής διείσδυσης διαμέσου αγωγών ανανέωσης υδάτων σε λιμενολεκάνη.

Πέραν όμως από τη προσωπική μου ενασχόληση, κατά τη διάρκεια της προσπάθειας υπήρξαν κάποιοι άνθρωποι των οποίων η συμβολή ήταν καθοριστική για την πραγματοποίηση και ολοκλήρωση της και θεωρώ υποχρέωση μου να τους ευχαριστήσω.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή και Πρόεδρο του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος κ. Γ. Καρατζά για το προσωπικό του ενδιαφέρον και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στη Λέκτορα του Ε.Μ.Π. κα Β. Τσουκαλά, για την προθυμία της για συνεργασία, για την πολύτιμη καθοδήγησή της και για τη συνεχή και πρόθυμη ανταπόκριση της σε κάθε πρόβλημα.

Τέλος, ευχαριστώ ολόψυχα την οικογένεια μου τους φίλους μου και όλους όσους πίστεψαν σε εμένα.

Κουρής Ευάγγελος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
1.2 ΓΕΝΙΚΑ.....	2
1.2.1 Ακτή, περιβάλλον και ανθρώπινος παράγοντας.....	2
1.2.2 Ανανέωση υδάτων.....	7
1.2.3 Αγωγοί ανανέωσης υδάτων.....	10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	12
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
2.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	13
2.2.1 Κυματισμοί.....	13
2.2.2 Έννοιες - χαρακτηριστικά κύματος και γενικές εξισώσεις.....	14
2.2.3 Κυματικά φαινόμενα λόγω του αγωγού ανανέωσης.....	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	25
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	25
3.2 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ.....	25
3.2.1 Αριθμητική προσομοίωση- Μοντέλα.....	25
3.2.2 Πειραματική προσομοίωση.....	27
3.3 ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΑΠΟ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	27
3.3.1 Διάδοση κυματισμών διαμέσου βυθισμένων διακένων.....	27
3.3.2 Διέλευση κυματισμών πάνω από ύφαλη κατασκευή.....	30
3.3.3 Επίδραση στένωσης στη ροή των κυματισμών.....	31
3.4 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΤΟΥ Ε.Μ.Π.....	34
3.4.1 Αριθμητική προσομοίωση.....	34
3.4.2 Πειραματική προσομοίωση.....	37
3.4.2.1 Πειραματικές μετρήσεις σε δισδιάστατη διώρυγα δοκιμών.....	37
3.4.2.2 Τρισδιάστατα φυσικά ομοιώματα σε δεξαμενές δοκιμών.....	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°

ΣΥΝΟΨΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	56
---	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	62
5.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	63
5.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΑΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ....	73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΞΕΥΡΕΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ.....	94
6.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ.....	94
6.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ.....	94
6.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ–ΠΡΟΤΑΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.....	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΦΥΣΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.....	112
7.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ, ΣΤΙΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ 29 ΚΑΙ 30.....	112
7.2 ΤΕΛΙΚΗ ΠΡΟΤΑΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ.....	118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	119
--------------------------------------	------------

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	123
--------------------------	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	126
-------------------------	------------

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΟ ΑΓΩΓΟ ΑΝΑΝΕΩΣΗΣ ΥΔΑΤΩΝ ΣΕ ΛΙΜΕΝΟΛΕΚΑΝΗ.

Η ακτή αποτελεί μία ζώνη εύθραυστης ισορροπίας μεταξύ των οικοσυστημάτων ξηράς και θάλασσας, που η ανθρώπινη παρέμβαση με τις παράκτιες κατασκευές και τις αναπτυσσόμενες εμπορικές, τουριστικές, οικονομικές δραστηριότητες, έρχεται συχνά βίαια να διαταράξει.

Οι λιμενολεκάνες, λόγω του σχετικά κλειστού σχήματός τους, των έργων κυματικής προστασίας και των αναπτυσσόμενων σε αυτές δραστηριοτήτων, αποτελούν ιδιαίτερα επιβαρυνμένες περιοχές.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από τους μηχανικούς κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή των λιμενικών έργων, είναι η ποιότητα του νερού εντός της λιμενολεκάνης, η οποία εξαρτάται από τη δυνατότητα ανταλλαγής υδάτων μεταξύ του λιμένα και του υδάτινου περιβάλλοντος.

Ένας συνηθισμένος στη χώρα μας τρόπος βελτίωσης της ποιότητας του νερού μέσα στη λιμενολεκάνη, με χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας, είναι η διαμόρφωση αγωγών ανανέωσης των υδάτων επί των έργων προστασίας του λιμένα. Παράλληλα με τις ευεργετικές επιπτώσεις που έχει η παρουσία των αγωγών ανανέωσης στην ποιότητα των νερών των λιμενολεκανών, επιφέρει και αύξηση της κυματικής διαταραχής εντός του λιμένα, που στη περίπτωση ανεπαρκούς σχεδιασμού μπορεί να δημιουργήσει δυσλειτουργίες στο λιμένα.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο τα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κυματισμού και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών ανανέωσης, σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του διεισδύοντος κυματισμού. Τελικός σκοπός είναι η εξεύρεση εμπειρικής εξίσωσης που να υπολογίζει τον συντελεστή κυματικής διείσδυσης δια μέσου αγωγών ανανέωσης στην λιμενολεκάνη ή πρακτικότερα να μπορεί να προκύπτει η επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών ανανέωσης σε σχέση με το επιτρεπόμενο ύψος κύματος στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης.

Προς το σκοπό αυτό, μετά από μία θεωρητική παράθεση με βάση την υφιστάμενη βιβλιογραφία των βασικών κυματικών φαινομένων που απαντώνται σε μία λιμενολεκάνη και ειδικότερα κατά τη διέλευση των κυματισμών διαμέσου αγωγών ανανέωσης, περιγράφεται συνοπτικά η έρευνα που έχει διεξαχθεί στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π., σχετικά με τους αγωγούς ανανέωσης μέσω αριθμητικών και πειραματικών προσομοιώσεων.

Με αφετηρία τα αποτελέσματα μιας σειράς πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε δισδιάστατη διώρυγα δοκιμών και σε τρισδιάστατη δεξαμενή του Ε.Λ.Ε., κάτω από διαφορετικές κλίμακες και με αγωγούς ανανέωσης διαφορετικών χαρακτηριστικών, διερευνήθηκε πώς μεταβάλλεται ο συντελεστής κυματικής διείσδυσης K_b , δηλαδή ο λόγος ύψους διεισδύοντος κύματος προς το λόγο του προσπίπτοντος κύματος, όταν μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κυματισμού και όταν μεταβάλλονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού ανανέωσης.

Πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη παραμετρική ανάλυση προκειμένου να διερευνηθεί με ποιο τρόπο οι φυσικές μεταβλητές (πλάτος, μήκος και ύψος αγωγού ανανέωσης, βάθος νερού, ύψος και περίοδος προσπίπτοντος κυματισμού), αλλά και μια σειρά αδιάστατων παραμέτρων που προτείνονται από τη βιβλιογραφία ή προκύπτουν από συνδυασμούς αυτών, επηρεάζουν το φαινόμενο της κυματικής διείσδυσης. Τεκμηριώθηκε με παράθεση σχετικών διαγραμμάτων, τόσο στην περίπτωση των δυσδιάστατων πειραμάτων όσο και στην περίπτωση των τρισδιάστατων πειραμάτων, ότι επηρεάζουν τον συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t κατ' αντίστοιχο τρόπο, παρά τις διαφοροποιημένες συνθήκες κάτω απ' τις οποίες πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. Διαπιστώθηκε επίσης ότι η επιρροή αυτή ήταν συμβατή με τα αναφερόμενα στη βιβλιογραφία και λογικά ερμηνεύσιμη.

Στη συνέχεια αφού επιλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία μαθηματικές εξισώσεις, που είχε διαπιστωθεί στα πλαίσια επιμέρους μελετών ότι δίνουν μια ικανοποιητική έκφραση του πολυπαραμετρικού χαρακτήρα του συντελεστή κυματικής διείσδυσης, τροποποιήθηκαν και συμπληρώθηκαν και με άλλες παραμέτρους απ' τις εξετασθείσες στη παραμετρική ανάλυση και διαμορφώθηκαν έτσι 30 μαθηματικά μοντέλα. Με χρήση της ίδιας βάσης δεδομένων των αποτελεσμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στη παραμετρική ανάλυση και με τη μέθοδο της μη γραμμικής ανάλυσης παλινδρόμησης (χρήση στατιστικού λογισμικού SPSS), διερευνήθηκαν κατά πόσο οι διαμορφωθείσες μαθηματικές εξισώσεις μπορεί ικανοποιητικά να εκφράσουν το συντελεστή κυματικής διείσδυσης με βάση τα χαρακτηριστικά του κυματισμού και του αγωγού ανανέωσης.

Συσχετίστηκε κατ' αρχήν ο συντελεστής κυματικής διείσδυσης K_t όπως προέκυψε από τα πειράματα με το συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_{t_model} που προκύπτει από κάθε μαθηματικό μοντέλο. Έτσι προσδιορίστηκαν εκείνες οι μαθηματικές εκφράσεις που έδωσαν ικανοποιητικούς στατιστικούς δείκτες από πλευρές στατιστικής προσέγγισης.

Παράλληλα διερευνήθηκαν οι μαθηματικές εξισώσεις με ικανοποιητικούς στατιστικούς δείκτες και έκφραση που περιελάμβανε κατά το δυνατό περισσότερες παραμέτρους, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο η μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων πραγματοποιείται κατά τρόπο φυσικά ερμηνεύσιμο που να αντιστοιχεί στις διαπιστώσεις της προηγούμενης παραμετρικής ανάλυσης. Η επιβεβαίωση της φυσικής ερμηνείας της μεταβολής του K_t σε σχέση με την μεταβολή των υπεισερχόμενων στις μαθηματικές εξισώσεις παραμέτρων, τεκμηριώνεται με πίνακες και σχετικά διαγράμματα.

Η εργασία ολοκληρώνεται με αναλυτική παρουσίαση 2 μαθηματικών εξισώσεων από τις παραπάνω που κρίνονται ικανοποιητικές από στατιστικής προσέγγισης και απολύτως ικανοποιητικές από πλευράς μορφής, πληρότητας και φυσικής ερμηνείας και την τελική πρόταση της βέλτιστης εξ' αυτών.

Σε περίπτωση που η εξίσωση επιβεβαιωθεί και από περαιτέρω έρευνα, θα είναι δυνατό με βάση αυτή και τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κυματισμού να μπορεί να γίνει κατάλληλη διαμόρφωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών ανανέωσης, ώστε τα χαρακτηριστικά του κυματισμού εντός της λιμενολεκάνης να μην υπερβαίνουν τα επιθυμητά όρια.

SUMMARY

INVESTIGATION OF WAVE TRANSMISSION IN HARBOR BASINS THROUGH FLUSHING CULVERTS.

The coastline constitutes an area of extremely fragile balance between land and sea ecosystems, an area where human interference, with coastal construction and developing trade, tourism, economic activities, often violently upsets this abovementioned sensitive balance.

Harbor basins, due to their relatively closed shape, wave protection projects and developing these activities, are particularly sensitive areas.

A significant feature that should be taken into account by engineers in the design and construction of port works is the quality of water within the basin, which depends on the exchange of water between the port and the aquatic environment.

A common method implemented in Greece to improve water quality within the basin, via low construction and operating costs, is shaping the renewal of flushing culverts in the works protecting the port. Along with the beneficial effects of the presence of flushing culverts to the water quality of the basin, there is also a detrimental increase in the wave disturbance in the port, which in case of inadequate planning can cause dysfunctions within the port itself.

This paper investigates how the characteristics of the incident wave and the geometrical characteristics of flushing culverts are related to the characteristics of the transmitted wave. The ultimate goal is to find an empirical equation to calculate the rate of wave transmission through flushing culverts to the basin, or more practical, to show the choice of the geometrical characteristics of flushing culverts in a relation with the allowable wave height inside the basin.

To this end, after a theoretical quote based on existing literature of basic wave phenomena occurring in a basin, and especially when crossing the wakes through natural renewal, research has been conducted in the Laboratory of Harbour Works of N.T.U.A., of flushing culverts by numerical and experimental simulations.

Building on the results of a series of experiments on two-dimensional canal tests and three-dimensional tank in the Laboratory of Harbour Works under different circumstances and with different characteristics of flushing culverts, we investigated how a change in the wave transmission coefficient K_t , the ratio of transmitted wave to the incident wave, when changing the characteristics of the incident wave, and when changing the geometry of the flushing culvert.

An extensive parametric analysis to investigate how the physical variables (latitude, longitude and height of the flushing culvert, water depth, height and incident wave period), and a series of dimensionless parameters suggested by the literature or derived from combinations thereof, affect the phenomenon of wave transmission. Substantiated with quote relevant charts, both in the case of two-dimensional experiments and in the case of three-dimensional experiments that affect the transmission coefficient K_t per equivalent, despite differing circumstances from

which they were experiments. Also found that the influence was consistent with the reported literature and logically explained.

After they were selected from literature mathematical equations, which were established in various studies that give a good expression of the multivariate nature of the transmission coefficient, amended and supplemented with other factors than those examined in the parametric analysis and so structured 30 mathematical models. Using the same results database used in parametric analysis and the method of nonlinear regression analysis (using statistical software SPSS), investigated whether the principles developed mathematical equations can adequately express the wave transmission coefficient based on the characteristics of wave and the flushing culvert.

Correlated the wave transmission coefficient K_t as shown by experiments with the transmission coefficient K_{t_model} resulting from any mathematical model. This identified those mathematical expressions that have adequate statistical indicators from the sides statistical approach.

In parallel investigated the mathematical equations with satisfactory statistical indicators and expressions included in the possible number of parameters to determine whether the change of parameters is such Interpretable course that corresponds with the findings of the previous parametric analysis. The confirmation of the physical interpretation of the change in K_t with respect to the change in bringing together mathematical equations parameters documented with tables and charts on.

The work concludes with a detailed presentation of 2 mathematical equations, which are satisfactory of the statistical approach and entirely satisfactory in terms of physical interpretation and final proposal of the best of them.

If the equation is confirmed by further research, it will be possible on this and the expected characteristics of the incident wave can be suitable configuration of the geometrical characteristics of the flushing culverts, so the characteristics of the wave in the basin should not exceed the desired limits.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της κυματικής διείσδυσης σε λιμενολεκάνη διαμέσου αγωγών ανανέωσης υδάτων.

Οι λιμενολεκάνες, λόγω του σχετικά κλειστού σχήματος τους και των αναπτυσσόμενων σε αυτές δραστηριοτήτων, αποτελούν ιδιαίτερα επιβαρυνμένες περιβαλλοντικά περιοχές.

Ένας συνηθισμένος στη χώρα μας τρόπος βελτίωσης των περιβαλλοντικών συνθηκών μέσα στις λιμενολεκάνες, είναι η κατασκευή αγωγών ανανέωσης επί των εξωτερικών λιμενικών έργων.

Οι αγωγοί ανανέωσης επιτρέπουν τη διείσδυση εξωτερικών υδάτων στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης, με αποτέλεσμα την επιζητούμενη μείωση του χρόνου ανανέωσης και τη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων, αλλά ταυτόχρονα επιφέρουν αύξηση της κυματικής διαταραχής, γεγονός που δυσχεραίνει τη λειτουργικότητα του λιμένα. Επιπλέον μέσω των ανοιγμάτων είναι πιθανό να εισέρχονται και να αποτίθενται στο λιμάνι φερτές ύλες που επιβαρύνουν περισσότερο την κατάσταση.

Το Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κάνει προσπάθειες, μέσω διεξαγωγής πειραμάτων σε δισδιάστατη διώρυγα δοκιμών και σε τρισδιάστατες δεξαμενές δοκιμών, να διερευνήσει τη συμπεριφορά του φαινομένου της κυματικής διείσδυσης διαμέσου αγωγών ανανέωσης. Επιδιώκεται να κατανοηθεί με το ποιο τρόπο ο κυματισμός εκτός λιμενολεκάνης και τα χαρακτηριστικά των αγωγών ανανέωσης επηρεάζουν τη διεισδύουσα στο λιμάνι κυματική ενέργεια.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έχουν συγκεντρωθεί όλες οι διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων (Ε.Λ.Ε.), με στόχο τη προσέγγιση μέσω πολυπαραμετρικής ανάλυσης μιας μαθηματικής έκφρασης που να συσχετίζει τον συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) μέσω αγωγού ανανέωσης με τα κυματικά χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κυματισμού καθώς επίσης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού ανανέωσης.

Με αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατόν ο Μηχανικός, γνωρίζοντας τα κυματικά χαρακτηριστικά που επικρατούν σε μια περιοχή, να σχεδιάζει τους αγωγούς ανανέωσης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά που να εξασφαλίζουν την επιθυμητή κυματική διείσδυση στη λιμενολεκάνη.

Για το σκοπό αυτό έγινε συνδυασμός πειραματικών μετρήσεων που εκτελέστηκαν σε

- α) δισδιάστατη διώρυγα κυματισμών και
- β) τρισδιάστατη δεξαμενή κυματισμών

Η ανάλυση μη γραμμικής παλινδρόμησης έγινε με τη χρήση του στατιστικού προγράμματος SYSTAT v.13.0. (SPSS, 2004)

Η διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής :

Το παρόν Κεφάλαιο ολοκληρώνεται με γενικές αναφορές στα περιβαλλοντικά προβλήματα των λιμενολεκανών και στον τρόπο αντιμετώπισής τους με ιδιαίτερη έμφαση στους αγωγούς ανανέωσης.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται το φυσικό φαινόμενο και τα χαρακτηριστικά των κυματισμών με ιδιαίτερη έμφαση στα κυματικά φαινόμενα που αναπτύσσονται λόγω της ύπαρξης αγωγών ανανέωσης επί των κατασκευών προστασίας της λιμενολεκάνης από τους κυματισμούς.

Στο Κεφάλαιο 3 περιλαμβάνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση με ιδιαίτερη αναφορά στη σχετική έρευνα που αναπτύχθηκε στο Ε.Λ.Ε. του ΕΜΠ.

Στο Κεφάλαιο 4 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που αποτελούν τον «οδηγό» για τις περαιτέρω αναλύσεις.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται ανάλυση των πειραματικών δεδομένων που επελέγησαν για επεξεργασία, με τη σύνταξη διαγραμμάτων που αποτυπώνουν την επιρροή διαφόρων παραμέτρων πάνω στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η προσπάθεια για την εξεύρεση στατιστικά ικανοποιητικής μαθηματικής εξίσωσης που να συσχετίζει τον συντελεστή κυματικής διείσδυσης δια μέσου αγωγού ανανέωσης, με τα κυματικά χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κυματισμού και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού ανανέωσης.

Στο Κεφάλαιο 7 επιλέγονται 2 μαθηματικές εξισώσεις (μοντέλα) που θεωρήθηκαν ικανοποιητικές, προκειμένου να διερευνηθεί αναλυτικά και διαγραμματικά η φυσική ερμηνεία και συμβατότητα των υπεισερχόμενων παραμέτρων. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την πρόταση του καταλληλότερου μαθηματικού μοντέλου.

Τέλος στο Κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση της ελληνικής και ξένης Βιβλιογραφίας και με το ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1.2 ΓΕΝΙΚΑ

1.2.1 Ακτή, περιβάλλον και ανθρώπινος παράγοντας

Η ακτή είναι η ενδιάμεση ζώνη μεταξύ ξηράς και θάλασσας και αποτελεί μια περιοχή με έντονες ιδιαιτερότητες.

Η μελέτη της παράκτιας μηχανικής και των λιμενικών έργων προϋποθέτει τη γνώση των μηχανισμών αλλά και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται σε αυτή τη ζώνη.

Οι κύριοι φυσικοί μηχανισμοί δημιουργίας μίας ακτής είναι:

- Οι φερτές ύλες από ποτάμια, κατακρημνίσματα, πλημμύρες κλπ.
- Οι νεκροί θαλάσσιοι οργανισμοί (στη Φλόριδα των Η.Π.Α. το 40% των παραλιών προέρχεται από θαλάσσιους οργανισμούς όπως κοχύλια, κοράλλια κλπ).
- Τα ίδια τα ιζήματα της περιοχής που διαβρώνονται από τα φυσικά φαινόμενα.
- Η κίνηση και μεταφορά των παράκτιων ιζημάτων.

Η ακτή αποτελεί μία μεταβατική φάση μεταξύ των οικοσυστημάτων της ξηράς και της θάλασσας (Τσουκαλά, 2000) και ως εκ τούτου η ισορροπία της είναι ευαίσθητη και εύθραυστη καθώς τα οικολογικά χαρακτηριστικά της προέρχονται από την επικάλυψη των οικοσυστημάτων που χωρίζει. Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της (όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η αλατότητα κλπ) επηρεάζονται και από τις δύο περιοχές και έχουν ενδιάμεσες τιμές. Επίσης τα βιολογικά είδη που απαντώνται προέρχονται τόσο απ' το χερσαίο όσο και το θαλάσσιο περιβάλλον, καθώς επίσης υπάρχουν και άλλα βιολογικά είδη που είναι χαρακτηριστικά και απαντώνται στα παράκτια ενδιαίτηματα. Στο περιβάλλον της παράκτιας ζώνης φιλοξενούνται ευαίσθητα οικοσυστήματα τα οποία σφύζουν από ζωή με μεγάλη ποικιλία ειδών και πυκνότητα πληθυσμών εφόσον οι τροφικές συνθήκες είναι πολύ ικανοποιητικές για τους οργανισμούς (Μονιούδη, 2006).

Η ανθρώπινη παρέμβαση με την κατασκευή παράκτιων έργων διαμορφώνει καταλυτικά τη δυναμική ισορροπία του χώρου αυτού.

Η Ελλάδα είναι μία χώρα με πολύ έντονη παρουσία του θαλάσσιου στοιχείου. Αυτό σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της ναυσιπλοΐας, του εμπορίου, της βιομηχανίας, του τουρισμού αλλά και της αύξησης του πληθυσμού στις παραθαλάσσιες περιοχές οδηγεί σε μια αναπόφευκτη υπερφόρτωση της παράκτιας ζώνης από οχλούσες δραστηριότητες. Οι δραστηριότητες αυτές αποτελούν τη βασική αιτία ρύπανσης της παράκτιας ζώνης. Ειδικά σε περιοχές με μειωμένη δυνατότητα αυτοκαθαρισμού μέσω της ανανέωσης υδάτων, όπως σε κλειστούς κόλπους και λιμενολεκάνες, το πρόβλημα γίνεται εντονότερο.

Τα παράκτια έργα μπορούν να επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στα οικοσυστήματα αλλοιώνοντας τη χλωρίδα και την πανίδα άμεσα και μακροχρόνια αλλά και στο ίδιο το προφίλ της ακτής (διάβρωση) σε περίπτωση που παρεμποδίζονται οι φυσικοί τρόποι αναπλήρωσης της παραλίας. Δυστυχώς ο σχεδιασμός των παράκτιων έργων γίνεται με κυρίαρχο κριτήριο την κατά το δυνατό με μικρότερο κόστος ικανοποίηση των άμεσων κοινωνικών και αναπτυξιακών αναγκών. Συχνά έχει ως στόχο το άμεσο

αποτέλεσμα, χωρίς επαρκή συνεκτίμηση και άλλων σημαντικών παραμέτρων (πολυκριτηριακή ανάλυση). Αυτό έχει ως επακόλουθο τη δημιουργία μίας τεχνητής κατάστασης, που συχνά υποβαθμίζει το φυσικό περιβάλλον και η οποία ικανοποιεί κατά συνέπεια μόνο ως ένα βαθμό τις άμεσες κοινωνικές ανάγκες αφού έτσι τελικά περιορίζεται η κοινωνική ανάγκη και το συνταγματικά κατοχυρωμένο δικαίωμα του πολίτη για ποιότητα ζωής και για ένα υγιεινό και ισορροπημένο φυσικό περιβάλλον.

Τέτοια παράκτια έργα των οποίων ο σχεδιασμός πρέπει να στοχεύει στη μικρότερη δυνατή περιβαλλοντική επιβάρυνση, ώστε να αλλοιώνονται όσο το δυνατόν λιγότερο τα παράκτια οικοσυστήματα, πρέπει να αποτελούν τα λιμενικά έργα (Μονιούδη, 2006).

Η επιστήμη των λιμενικών έργων στα πρώτα της βήματα ασχολήθηκε σχεδόν αποκλειστικά με την ευστάθεια των έργων σε συνδυασμό με την εδαφομηχανική αγνοώντας τη θάλασσα. Αυτό όμως αποδείχθηκε πως δεν ήταν αρκετό, αφού δεν εξετάζονταν πολύ σημαντικοί παράμετροι όπως οι θαλάσσιες φορτίσεις που δέχονταν οι κατασκευές και υπήρχε η τάση να λαμβάνονται εμπειρικά ως δεδομένες. Αυτό οφειλόταν στην έλλειψη επαρκών γνώσεων θαλάσσιας υδραυλικής. Το θαλάσσιο σύστημα της διαταραχής ήταν ένα μαύρο κουτί της επιστήμης (Μουτζούρης, 1999). Ένα ακόμα σημείο το οποίο δεν ελάμβαναν υπόψη κατά το σχεδιασμό των λιμένων (εμπορικών, επιβατικών, πολεμικών αλιευτικών, τουριστικών), ήταν η ποιότητα των υδάτων και η υποβάθμισή τους από την ανεπαρκή τους ανανέωση.

Ειδικά για την περίπτωση των λιμενολεκανών τουριστικών μαρίνων, η ποιότητα των υδάτων αποτελεί πλέον μείζον ζήτημα. Καθορίζεται από κανονισμούς και είναι σημαντικός παράγοντας που απασχολεί τους κατασκευαστές και τους φορείς διαχείρισης. Επαρκής ανανέωση υδάτων πρέπει να παρέχεται ώστε να διασφαλίζεται η ποιότητα νερού σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές και να ελαχιστοποιείται η συλλογή φερτών υλών (Blankenship and Yang).

Η συνεχής αύξηση των παράκτιων δραστηριοτήτων όπως αναφέρθηκε και της παράκτιας αστικής ανάπτυξης καθώς και το μέγεθος των σύγχρονων λιμενικών έργων καθιστούν το πρόβλημα της υποβάθμισης της ποιότητας των υδάτων ολοένα και κρισιμότερο. Ολοκληρωμένα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της ροής στις λιμενολεκάνες έχουν αναπτυχθεί με τη βοήθεια της υπολογιστικής υδραυλικής προκειμένου να βελτιστοποιήσουν τα χαρακτηριστικά ανανέωσης των υδάτων και ποικίλες τεχνικές ενσωματώνονται πλέον στα λιμενικά έργα (Blankenship and Yang).

Έτσι λοιπόν ο μηχανικός περιβάλλοντος μπορεί να έχει ως στόχο τη μελέτη και επίβλεψη του θαλάσσιου περιβάλλοντος αλλά και το σωστό σχεδιασμό περιβαλλοντικών έργων με στόχο την προστασία του.

Το ρυπαντικό φορτίο που εισέρχεται σε μία λιμενολεκάνη μπορεί να προέρχεται είτε από ρύπους που δημιουργούνται από δραστηριότητες μέσα σε αυτή, όπως η συντήρηση των σκαφών ή πλοίων (π.χ. διάβρωση, καθαρισμός, συντήρηση μηχανών), ο ανεφοδιασμός των σκαφών καθώς και η παράνομη εναπόθεση αποβλήτων εντός της λιμενολεκάνης από τα σκάφη, είτε από εξωγενείς παράγοντες όπως η εισροή υδάτων από χερσαίο τμήμα του λιμένα ή και τυχόν εκβολές χειμάρρων εντός της λιμενολεκάνης που είναι πιθανό να μεταφέρουν ρύπους (Τσέκος και Δρέττας, 2000). Οι ρυπογόνες ουσίες εγκλωβίζονται στο εσωτερικό της

λιμενολεκάνης εξαιτίας της παρουσίας των κυματοθραυστών. Ο ρόλος των κυματοθραυστών είναι να εξασφαλίζουν τη λειτουργικότητα της λιμενολεκάνης και την προστασία των λιμενικών εγκαταστάσεων από τους κυματισμούς, παράλληλα όμως συντελούν στην μη ικανοποιητική κυκλοφορία των υδάτων στη λιμενολεκάνη και συνεπώς στη ανεπαρκή ανανέωση των υδάτων στο εσωτερικό της (Μονιούδη, 2006).

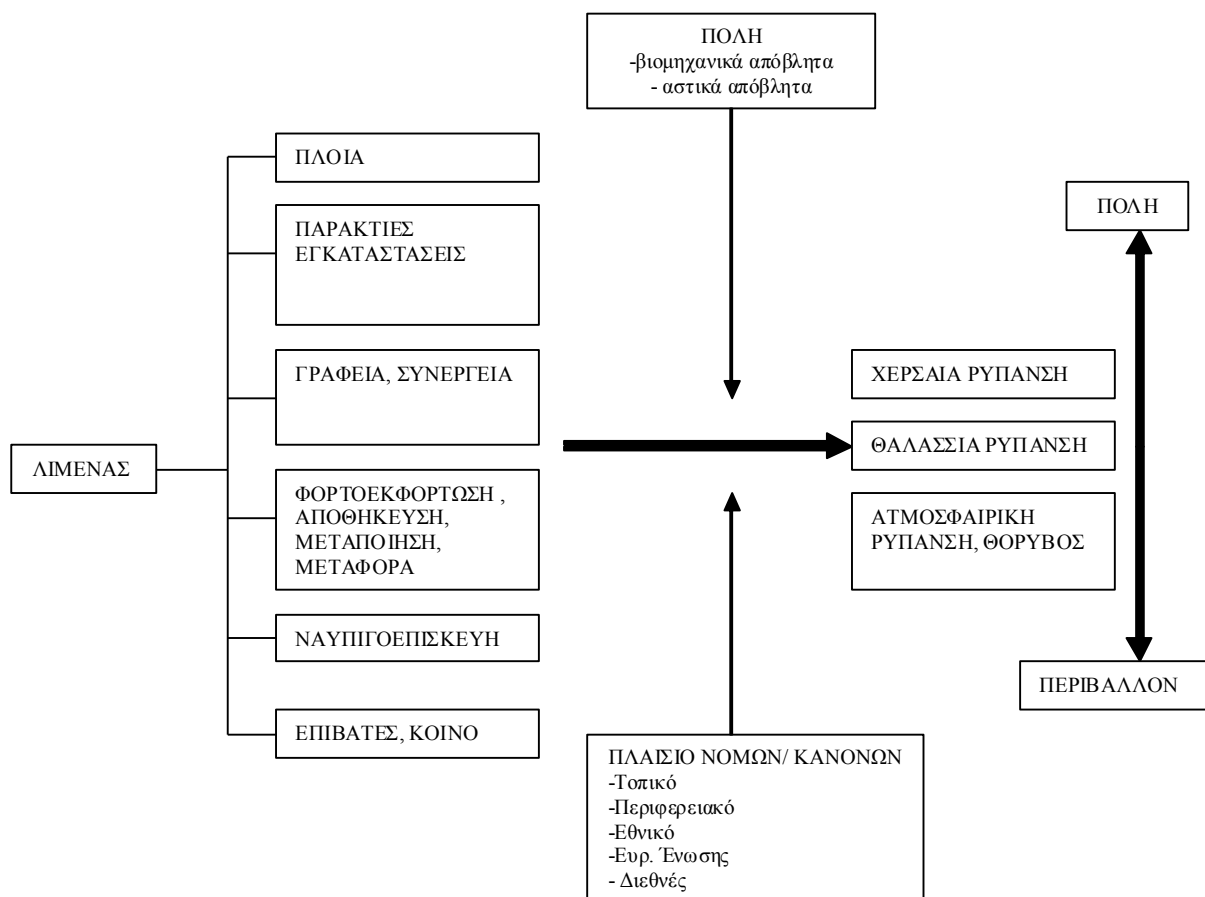
Η εξασφάλιση της ποιότητας του νερού μέσα στη λεκάνη είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς έχει ιδιαίτερη αξία για την υγεία και την περιβαλλοντική ποιότητα, ειδικά στα θερμότερα κλίματα όπου οι βιολογικές διαδικασίες επιταχύνονται. Ο επιτυχής έλεγχος της ποιότητας του νερού μέσα στη λεκάνη εξαρτάται συνήθως από την περιοδική ανταλλαγή του λιμενικού νερού με το κύριο σώμα νερού που εξυπηρετεί το λιμάνι (Dunham and Finn 2002). Η μη αντιμετώπιση ενός τέτοιου ζητήματος μπορεί να οδηγήσει σε στάσιμο νερό μέσα στη λιμενολεκάνη διατηρώντας έτσι τη ρύπανσή της (Stamou et al., 2004).

Αποτέλεσμα της συγκέντρωσης ρυπογόνων ουσιών και της δημιουργίας περιοχών με στάσιμα νερά στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης είναι: η υψηλή τοξικότητα των υδάτων, οι υψηλές συγκεντρώσεις ρυπογόνων ουσιών στους οργανισμούς και στα ιζήματα, οι αυξημένες συγκεντρώσεις θρεπτικών συστατικών οι οποίες συντελούν στην αύξηση του πληθυσμού των αλγών και στη μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου (ευτροφισμός), τα θολά και δύσοσμα νερά και τέλος τα υψηλά επίπεδα παθογόνων μικροοργανισμών. Η ποιοτική αυτή υποβάθμιση της περιοχής του έργου μπορεί να οδηγήσει στη φυσική καταστροφή των ευαίσθητων οικοσυστημάτων (Stamou et al., 2004).

Από όλα τα παραπάνω λοιπόν γίνεται σαφές πως το πρόβλημα (άρα και η αντιμετώπιση) της ρύπανσης των υδάτων στη λιμενολεκάνη είναι πολυδιάστατο και ιδιαίτερης σημασίας:

- Οφείλεται σε πολλούς και διαφορετικούς παράγοντες εξωγενείς και ενδογενείς
- Μπορεί να υπάρξει πληθώρα μορφών ρύπανσης και ρύπων
- Εξαρτάται από το είδος, τη διαμόρφωση και τις αναπτυσσόμενες λειτουργίες στο λιμένα και στην ευρύτερη περιοχή κ.ά.
- Επηρεάζεται από την οικιστική και βιομηχανική ανάπτυξη της ευρύτερης περιοχής, από την καθημερινή λειτουργία της πόλης, από τις επικρατούσες συνθήκες περιβάλλοντος και από την ισχύουσα νομοθεσία και κανονισμούς και
- Μπορεί να επηρεάζει σε πολλά επίπεδα ανθρώπους και περιβάλλον

Χρήζει συνεπώς μίας γενικότερης ολοκληρωμένης περιβαλλοντικής διαχείρισης.



Σχήμα 1.1 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης λιμένα – περιβάλλοντος (πηγή: Ο.Λ.Θ. Α.Ε.)

Η διεθνής και ευρωπαϊκή εμπειρία και πρακτική στον τομέα της πρόληψης, αντιμετώπισης και διαχείρισης των περιβαλλοντικών ζητημάτων στους λιμένες διέπεται από μια δυναμική που, σε συνδυασμό με τις τρέχουσες εξελίξεις στις επιταγές προστασίας του περιβάλλοντος, έχει οδηγήσει στο να εισαχθεί σταδιακά η περιβαλλοντική διάσταση στην επιχειρησιακή πολιτική του φορέα λειτουργίας και εκμετάλλευσης των λιμένων με διάφορους τρόπους:

- αντιμετωπίζοντας αυτόνομα και, ίσως, αποσπασματικά, κάθε περιβαλλοντικό ζήτημα, ανάλογα με τη σημασία του,
- έχοντας προχωρήσει σε επίπεδο χώρας, ή και ηπείρου ακόμα, στη σύναψη στρατηγικών πρωτοβουλιών και συνενώσεων, που αφορούν την κοινή περιβαλλοντική διαχείρισή των λιμένων (π.χ. ECOPORTS),
- εφαρμόζοντας σταδιακά κάποιο σχέδιο ή σύστημα περιβαλλοντικής διαχείρισης (PERS, ISO 14001, EMAS).

Όμως η εφαρμογή μιας ολοκληρωμένης περιβαλλοντικής πολιτικής στους λιμένες δεν είναι πρόσφορο να γίνει με τρόπο άμεσο αποσπασματικό και περιοριστικό, αλλά στο πλαίσιο μιας σταδιακής ενσωμάτωσης των περιβαλλοντικών αρχών σε όλο το φάσμα των δραστηριοτήτων και λειτουργιών του λιμένα, με τρόπο οικονομικά και επιχειρησιακά βιώσιμο (Βαφάκη Ε., ΟΛΘ ΑΕ).

1.2.2 Ανανέωση υδάτων

Οι μελέτες έχουν δείξει ότι η επαρκής ανανέωση βελτιώνει την ποιότητα του νερού, μειώνει τη στασιμότητα των υδάτων και συμβάλλει στη διατήρηση της βιολογικής παραγωγικότητας και καλαισθησίας (Schwartz and Imberger, 1988; Schwartz 1989). Η ανανέωση ενδέχεται να μειώσει τις συγκεντρώσεις ρυπαντικών φορτίων στις λεκάνες κατά 70-90% σε διάρκεια 24 ωρών (Cardwell and Koons, 1981). Η ανανέωση των υδάτων μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρησιμοποίηση του όρου «μέσος χρόνος ανανέωση» ή «χρόνος παραμονής» που ορίζεται ως η μέση διάρκεια του χρόνου που ένας ρύπος από μία συγκεκριμένη πηγή παραμένει εντός της υδάτινης μάζας (Stamou et al., 2004).

Χρόνος ανανέωσης είναι, θεωρητικά, ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου να απομακρυνθεί, με ανταλλαγή μάζας νερού μέσω του ανοίγματος προς την ανοικτή θάλασσα, ο συνολικός όγκος του υπάρχοντος ύδατος της λιμενολεκάνης και να αντικατασταθεί με καθαρό νερό του πελάγους. Ο χρόνος αυτός για ένα λιμενικό έργο μπορεί να κυμαίνεται από μερικές ώρες μέχρι αρκετές ημέρες ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν και τη σειρά εμφάνισης των κλιματολογικών φαινομένων. Για λιμένες μονής εισόδου, ένας μέσος όρος καθημερινής ανταλλαγής νερού αντίστοιχος περίπου του ενός τρίτου του μέσου όγκου του νερού του λιμένα είναι συνήθως αρκετός για να αποτραπεί η στασιμότητα του νερού (Dunham and Finn, 2002).

Η ανανέωση των υδάτων στις λιμενολεκάνες επιτυγχάνεται μέσω της παράκτιας κυκλοφορίας λόγω φυσικών παραγόντων και μπορεί να ενισχυθεί με ειδικές τεχνικές μεθόδους.

Κύριοι **φυσικοί παράγοντες** που επηρεάζουν την ανανέωση των υδάτων είναι η παλίρροια, η κυματογενής και ανεμογενής κυκλοφορία (παλιρροιακά, ανεμογενή και κυματογενή ρεύματα). Στον ελλαδικό χώρο, βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την ανανέωση είναι η κυκλοφορία που δημιουργείται από τον άνεμο και από το κύμα. Σημειώνεται εδώ ότι η διάρκεια του φαινομένου της κυκλοφορίας παίζει σημαντικό ρόλο καθώς εξελίσσεται σε διάφορες κλίμακες της τάξης των δευτερολέπτων, των ωρών, των ημερών ή ακόμη και των εποχών κατά τη διάρκεια του έτους (Μονιούδη, 2006).

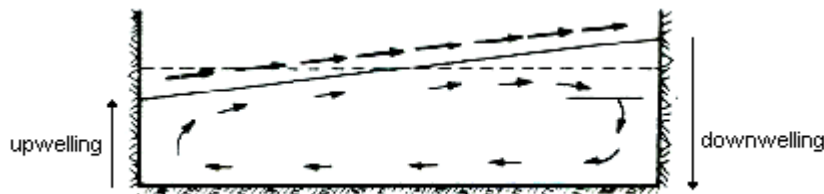
- Παλιρροιακά ρεύματα

Η περιοδική διαφοροποίηση της επίδρασης της μάζας της Σελήνης στη διαμόρφωση του συντελεστή g στις θαλάσσιες μάζες συνεπάγεται κατακόρυφες περιοδικές μετακινήσεις μαζών νερού στους ωκεανούς. Οι μάζες αυτές για να συμπληρωθούν ή να εκτονωθούν οριζόντια συνεπάγονται οριζόντιες μεταφορές μαζών από παράκτιες λεκάνες, που γίνονται αισθητές σαν παλιρροιακά ρεύματα (tidal currents) (Κουτίτας, 1994). Σε πλατύς κόλπους και σε στενές εκβολές ποταμών τα παλιρροιακά ρεύματα ανανεώνουν τη μάζα του νερού μέσω της εναλλαγής νερού από την ανοικτή θάλασσα προς την παράκτια ζώνη και αντιστρόφως, οπότε ανανεώνουν και καθαρίζουν τον παράκτιο χώρο. Στην Ελλάδα λόγω των χαμηλών παλιρροιακών ευρών, τα παλιρροιακά ρεύματα είναι πολύ μικρής σημασίας (Σουκισιάν, 2002).

- Ανεμογενή ρεύματα

Τα ρεύματα αυτά δημιουργούνται από την επιφανειακή τάση που επάγει η ροή του ανέμου πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας.

Κοντά στις ακτές, οι κινήσεις των ρευμάτων περιορίζονται λόγω της ύπαρξης του ορίου και οδηγούν στη συσσώρευση μαζών νερού και άρα στην δημιουργία κλίσης της επιφάνειας η οποία μπορεί να επεκταθεί σε μεγάλη απόσταση μακριά από την ακτή. Οι επιφανειακές κλίσεις με τη σειρά τους δημιουργούν μεταβολή στη πίεση κατά την οριζόντια διεύθυνση η οποία τελικά θα οδηγήσει στη δημιουργία ρευμάτων που θα προστεθούν στο αρχικό ανεμογενές ρεύμα. Τα ρεύματα κλίσης μπορεί να είναι αντίθετα στις ανεμογενείς κινήσεις και να οδηγήσουν έτσι σε αντιστροφές της επιφανειακής κυκλοφορίας σε βάθος (Κορρές, 2000).



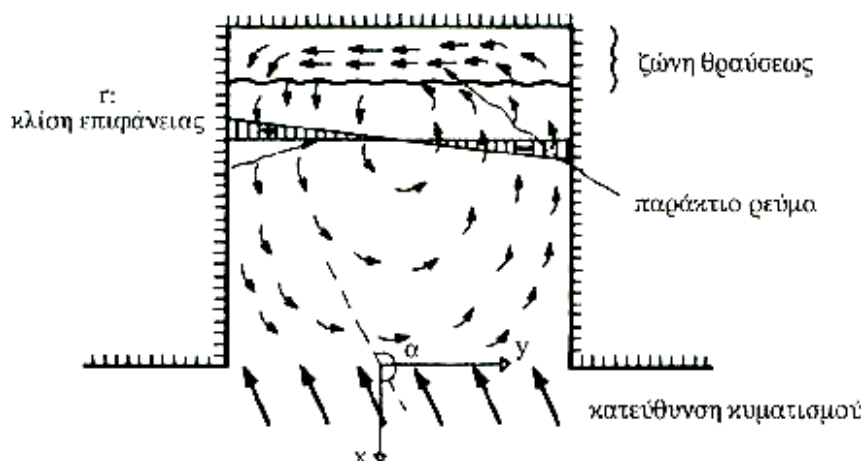
Σχήμα 1.2 Διαμόρφωση του ανεμογενούς ρεύματος σε περιορισμένο πεδίο (Καραμπάς, 2004).

Γενικά οι άνεμοι που πνέουν κατά μήκος προς την ακτή προκαλούν συνήθως :

1. μεταφορά μαζών θαλασσινού νερού από την παράκτια ζώνη προς την ανοικτή θάλασσα και ανάδυση νερού από μεγάλο βάθος προς την επιφάνεια (upwelling) είτε
2. μεταφορά μαζών θαλασσινού νερού από την ανοικτή θάλασσα προς την παράκτια ζώνη και βύθιση επιφανειακού νερού στα βαθιά (downwelling), ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου και το γήινο ημισφαίριο (Σουκισιάν 2002).

- Κυματογενή ρεύματα

Η θραύση και η διάθλαση των κυματισμών καθώς αυτοί προσεγγίζουν μια επίκλινη ακτή αποτελούν τις κύριες αιτίες δημιουργίας του συστήματος της παράκτιας κυκλοφορίας. Η γωνία που σχηματίζει το κυματικό μέτωπο με την ακτή τη στιγμή της θραύσης καθώς και η παράκτια μορφολογία καθορίζουν το είδος και τα χαρακτηριστικά των αναπτυσσόμενων ρευμάτων. Η κίνηση του νερού υπό τη μορφή παράκτιων ρευμάτων οφείλεται στην πλεονάζουσα υδάτινη μάζα, η οποία για τη διατήρηση της ισορροπίας μετακινείται κατά μήκος προς την ακτή, μέχρις ότου το πλεονάζον νερό μετακινηθεί τελικά προς την ανοικτή θάλασσα και η όλη διαδικασία αρχίσει από την αρχή (Σουκισιάν, 2002). Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται πως διαμορφώνεται η κυματογενής κυκλοφορία σε μια παράκτια λεκάνη.

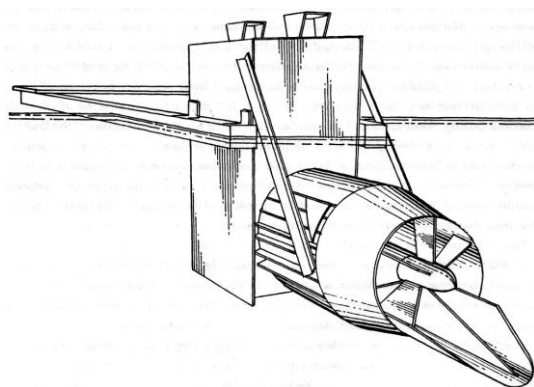


Σχήμα 1.3 Κυματογενής κυκλοφορία σε παράκτια λεκάνη (Κουτίτας, 1994).

Στις λιμενολεκάνες όπως αυτές έχουν διαμορφωθεί από την ανθρώπινη παρέμβαση με τα σχετικά λιμενικά έργα η ανανέωση των υδάτων μέσω των φυσικών παραγόντων είναι συχνά ανεπαρκείς και απαιτείται ανάπτυξη ειδικών τεχνικών μεθόδων

Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί διάφορες **τεχνικές μέθοδοι για την ανανέωση των υδάτων** στο εσωτερικό των παράκτιων έργων όπως (EPA, 2001)

- Αναδευτήρες, οι οποίοι δημιουργούν τεχνητά κυκλοφορία μέσα στο λιμάνι.



Σχήμα 1.4 Αναδευτήρας (Dunham and Finn, 2002).

- Σύστημα αναβλυστήρων σε εκχυτήρα, όπου τοποθετούνται κατά μήκος του προβλήτα προκειμένου να εισαχθεί καθαρό ύδωρ εντός της λιμενολεκάνης.
- Αντλίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της αμπώτιδας, αντλώντας με τη βοήθεια πλοίου καθαρό νερό από την περιοχή εκτός της λιμενολεκάνης.
- Μηχανικοί αεριστήρες (Stamou et al., 2004).
- Διαπερατοί κυματοθραύστες από φυσικούς ογκόλιθους, που χρησιμοποιούνται για έργα προστασίας οι οποίοι μπορούν να συμβάλλουν θετικά στη ποιότητα των υδάτων καθώς αυξάνεται η οξυγόνωση με τη θραύση των κυμάτων πάνω τους. Οι διαπερατοί κυματοθραύστες έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τους αδιαπέρατους. Είναι αποτελεσματικότεροι στην ελάττωση της αναρρίχησης των

κυμάτων, μειώνουν περισσότερο το ύψος των ανακλώμενων κυματισμών και τις πιέσεις που δρουν πάνω στον κυματοθραύστη. Επίσης η κατασκευή τους συνιστάται, όταν η προστατευόμενη περιοχή έχει μεγάλο βάθος και αποτελείται από ασθενές έδαφος (Φιλιππόπουλος, 2002). Αντίστοιχα βέβαια αυξάνεται και η κυματική ενέργεια που εισέρχεται. Επίσης οι κατασκευές αυτού του τύπου πολλές φορές παρέχουν βιότοπο για τα μικρά θαλάσσια είδη που μπορούν να κολυπήσουν ή και να διαμείνουν στα διάκενα των λίθων.

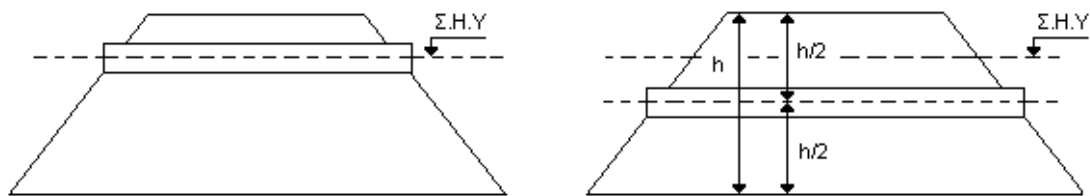
- Δημιουργία δεύτερου ανοίγματος- εισόδου λιμένα, ώστε τα ρεύματα που δημιουργούνται από τον αέρα ή τα παλιρροιακά ρεύματα, όσο ασθενή και αν είναι να κινούνται συνεχώς εντός του λιμένα.
- Υπερχειλιστές, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποβολή επιφανειακών λυμάτων (πετρέλαιο, κλπ) κατά τη διάρκεια της πλημμυρίδας. (Yin et al, 1998, Ozhan, 1989).
- Αγωγοί ανανέωσης υδάτων στα έργα προστασίας, οι οποίοι επιτρέπουν την διέλευση ενός μέρους της κυματικής ενέργειας που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού ροής που εισέρχεται στον λιμένα και της ταχύτητας των σωματιδίων του νερού. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη διάνοιξη στομιών ή την κατασκευή αγωγών στα έργα προστασίας και η αποτελεσματικότητά της εκτός από συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά εξαρτάται και από το τοπικό κυματικό καθεστώς το διαφορετικό βάθος πυθμένα καθώς και από άλλους παράγοντες που συνθέτουν τη μοναδικότητα κάθε περιοχής. (Dunham and Finn, 2002).

1.2.3 Αγωγοί ανανέωσης υδάτων

Η κατασκευή αγωγών ανανέωσης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφού πρόκειται για μία πολύ οικονομική μέθοδο με σχετικά μικρό κόστος κατασκευής και μηδενικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Σκοπός της κατασκευής τους είναι μέσω της ενίσχυσης του πεδίου ταχύτητας εντός της λεκάνης να κάνουν αποτελεσματικότερη και ταχύτερη (10-32%) (Stamou et al., 2004) την ανανέωση των υδάτων.

Ο ορθός σχεδιασμός των αγωγών ανανέωσης προϋποθέτει την επιλογή της σωστής θέσης, του κατάλληλου αριθμού αγωγών, της καλύτερης διάταξης και φυσικά τη μελέτη των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών (βέλτιστη διατομή), ώστε να εξασφαλιστεί η εισαγωγή της επιθυμητής ποσότητας υδάτων εντός του λιμένα και συνεπώς να αυξηθεί η κυκλοφορία των υδάτων (λαμβάνοντας υπ' όψη και το θέμα της επικείμενης κυματικής διαταραχής). Ο μηχανισμός λειτουργίας τους βασίζεται στη μετακίνηση της ποσότητας του ύδατος και οφείλεται στη διαφοράς στάθμης εντός και εκτός του λιμένα.

Οι αγωγοί ανανέωσης κατασκευάζονται είτε α) κοντά στην επιφάνεια, με την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία (ΣΗΥ- στάθμη ηρεμούντος ύδατος) να βρίσκεται στο μέσο ύψος του αγωγού, είτε β) ως υποθαλάσσιοι αγωγοί στο μέσο ύψος περίπου του μόλου.



Σχήμα 1.5 (α) Αγωγός ανανέωσης κοντά στην επιφάνεια (β) Αγωγός ανανέωσης στο μέσο του ύψους του μόλου.

Για τα ελληνικά δεδομένα είναι προτιμότερη η πρώτη περίπτωση αφού ο άνεμος που κινητοποιεί τα επιφανειακά στρώματα της θάλασσας είναι σημαντικότερο αίτιο κυκλοφορίας απ' ότι η παλιρροιακή δράση (Fountoulis and Memos, 2005 ; Memos, 1999). Τέλος ένας ακόμα λόγος που οι μηχανικοί προτιμούν τη πρώτη περίπτωση είναι το ότι οι αγωγοί ανανέωσης δε πρέπει να τοποθετούνται σε μεγάλο βάθος ώστε να αποφεύγεται η μεταφορά και εναπόθεση ιζημάτων εντός του λιμανιού.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω γίνεται κατανοητό σε τι συνίσταται το πρόβλημα καθώς για να επιτευχθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός θα πρέπει να έχουμε τη μέγιστη δυνατή ανανέωση των υδάτων σε σύντομο χρόνο με την ελάχιστη όμως δυνατή κυματική διαταραχή στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης αφού το λιμάνι πρέπει να είναι και λειτουργικό διευκολύνοντας τη ναυσιπλοΐα τον ελλιμενισμό όλων των τύπων σκαφών (Tsoukala and Moutzouris, 2009) και αποτρέποντας την είσοδο και εναπόθεση των φερτών υλών στο πυθμένα του λιμένα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε εθνικό επίπεδο τα στάδια με τα οποία αντιμετωπίζεται το θέμα της ποιότητας των υδάτων (The Costal Research and Monitoring Strategy Workgroup, 2000) είναι:

- Η έρευνα και η συλλογή στοιχείων με σκοπό το χαρακτηρισμό της οικολογικής καταστροφής (χαρακτηρισμός του προβλήματος).
- Η διεξαγωγή συγκεκριμένων μελετών ώστε να προσδιοριστεί το αίτιο και το εύρος του αποτελέσματος (διάγνωση αιτιών) και
- Η ανάλυση των μηχανισμών με σκοπό την επίλυση του προβλήματος (αντιμετώπιση).

Σε διεθνές επίπεδο εφαρμόζονται κυρίως μέθοδοι που χρησιμοποιούν τη παλιρροιακή δράση ως μέθοδο για την ανανέωση των υδάτων. Στην περίπτωση αυτή, η υδροδυναμική των κυμάτων αποτελεί τον κύριο μηχανισμό ανανέωσης.

Στην Ελλάδα υπάρχουν περισσότερα από 600 λιμάνια ποικίλων μεγεθών και λειτουργιών και η κατασκευή αγωγών ανανέωσης είναι αρκετά συνηθισμένη (Tsoukala and Moutzouris 2009). Όπως ήδη έχει αναφερθεί στην Ελλάδα συνηθίζεται η τοποθέτηση των αγωγών ανανέωσης με τρόπο τέτοιο ώστε η ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας (Σ.Η.Υ.) να βρίσκεται στο μέσο του ύψους των αγωγών, δεδομένης της μικρής παλιρροιακής δράσης. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του τρόπου τοποθέτησης των αγωγών είναι ότι δίνουν τη δυνατότητα κινητοποίησης των επιφανειακών θαλασσίων στρωμάτων. Επιπρόσθετα η κυματικές διαταραχές στην επιφάνεια συνοδεύονται από στροβιλισμό του νερού και παραγωγή φουσαλίδων αέρα με αποτέλεσμα την αύξηση της οξυγόνωσης των υδάτων (Δημητρακοπούλου, 2005). Επίσης η τυρβώδης ροή λόγω των κυμάτων παράγει υγρά σωματίδια που εκτοξεύονται στον αέρα και επιστρέφουν εμπλουτισμένα με οξυγόνο στη θάλασσα, αυξάνοντας τον συντελεστή μεταφοράς (Ακύλας, 2006).

Στη συνέχεια δίνεται συνοπτικά το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στα είδη των κυματισμών, τα φαινόμενα γένεσής τους και οι μηχανισμοί επαναφοράς τους. Επίσης περιγράφονται τα γενικά χαρακτηριστικά των ανεμογενών κυματισμών δίνονται οι αντίστοιχες εξισώσεις.

Ακολούθως η εργασία επικεντρώνεται στα κυματικά φαινόμενα που περιγράφουν την κυματική διείσδυση μέσω αγωγού ανανέωσης (αρχικώς τα φαινόμενα που γενικά εμφανίζονται και στη συνέχεια ειδικότερα για την κάθε πλευρά του αγωγού).

2.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.2.1 Κυματισμοί

Γενικά κύματα μπορούν να εμφανιστούν οποτεδήποτε ένα σύστημα, κάποιου συνεχόμενου παραμορφώσιμου μέσου, διαταράσσεται από τη θέση ισορροπίας και η διαταραχή «ταξιδεύει» από μια περιοχή σε μία άλλη (Συνολάκης, 2008).

Η προέλευση των κυματισμών στη φύση διαφοροποιείται σημαντικά. Οι κυριότερες αιτίες γέννησης επιφανειακών ή εσωτερικών κυματισμών στη θάλασσα είναι οι εξής:

- η επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας που δημιουργεί τους **ανεμογενείς κυματισμούς**
- οι διαφοροποιήσεις της βαρομετρικής πίεσης (seiches)
- η έλξη της σελήνης που δημιουργεί την αστρονομική **παλίρροια**
- οι υποβρύχιες κατολισθήσεις και οι υποθαλάσσιοι σεισμοί (τσουνάμια)
- οι διαφοροποιήσεις πυκνότητας των θαλασσίων μαζών

Εκτός από τις γενεσιουργές δυνάμεις των κυμάτων υπάρχουν και οι δυνάμεις επαναφοράς δηλαδή οι δυνάμεις που επαναφέρουν ένα κύμα στην αρχική του θέση. Αυτές είναι:

- η βαρύτητα
- η δύναμη Coriolis (υπαισέρχεται στους κυματισμούς μεγάλης κλίμακας), η επιφανειακή τάση (υπαισέρχεται σε κυματισμούς πολύ μικρής κλίμακας με μήκος κύματος μερικά εκατοστά μόνο)
- η τριβή

Κάθε κύμα ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας του έχει και διαφορετική περίοδο (T). Για περιόδους μεγαλύτερες των 5min οι κυματισμοί ονομάζονται μεγάλης περιόδου. Οι κυματισμοί μικρότερων περιόδων – και ιδιαίτερα περιόδων $T < 30$ sec-ονομάζονται κυματισμοί μικρής περιόδου.

Στους κυματισμούς μικρής περιόδου περιλαμβάνονται και οι ανεμογενείς κυματισμοί με περίοδο $T = 5-15$ sec.

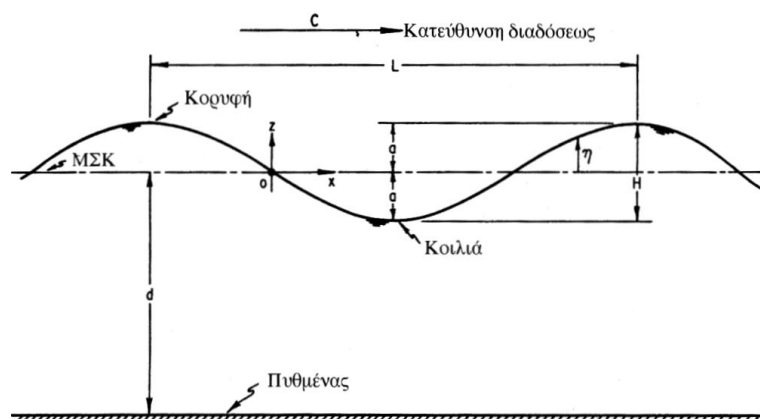
Οι ανεμογενείς κυματισμοί ονομάζονται και κυματισμοί βαρύτητας αφού αυτή είναι η δύναμη επαναφοράς τους. Οι ανεμογενείς είναι οι πιο κοινοί κυματισμοί στη φύση και είναι αυτοί οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των λιμενικών έργων. Είναι τέλος μαζί με τους παλιρροιακούς αυτοί που συγκεντρώνουν τα μεγαλύτερα ποσά δυναμικής ενέργειας σύμφωνα με την κατάταξη των κυμάτων κατά Kinsman, 1965.

Το μέγεθος των ανεμογενών κυμάτων εξαρτάται:

- 1) από την ένταση του αέρα (ταχύτητα ανέμου)
- 2) τη διάρκεια που φυσάει ο άνεμος
- 3) το ανάπτυγμα του πελάγους (fetch) δηλαδή το μέγεθος της ανοιχτής επιφάνειας πάνω στην οποία φυσάει ο αέρας.

2.2.2 Έννοιες - χαρακτηριστικά κύματος και γενικές εξισώσεις

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός κύματος όπως σχηματοποιούνται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.1) δίνονται στο πίνακα που ακολουθεί:



Σχήμα 2.1 Απλή περιοδική ημιτονοειδής μορφή κύματος (Κουτίτας 1994).

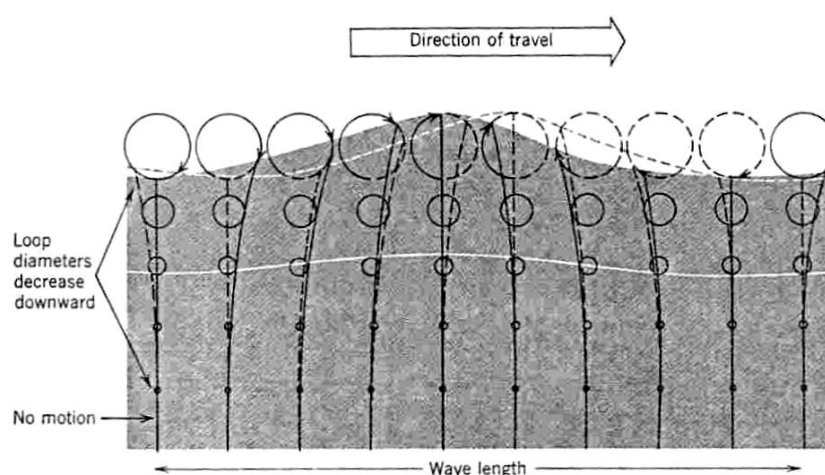
Πίνακας 2.1 Βασικά χαρακτηριστικά κύματος - Ορισμοί

Μήκος κύματος [m]	L	Η απόσταση μεταξύ δύο σωματιδίων, που βρίσκονται στην ίδια φάση ταλαντώσεως (απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κοιλιών ή κορυφών κατά μήκος της κατεύθυνσης διαδόσεως).
Ύψος κύματος [m]	H	Η απόσταση μεταξύ κοιλιάς και κορυφής του κύματος.
Καμπυλότητα κύματος	γ	Ο λόγος του ύψους κύματος προς το μήκος κύματος. ($=H/L$)
Περίοδος κύματος [sec]	T	Ο χρόνος μιας πλήρους ταλάντωσης των σωματιδίων, δηλαδή η χρονική απόσταση ανάμεσα στην εμφάνιση δύο διαδοχικών κορυφών στην ίδια θέση.
Κυκλική συχνότητα [Hz]	f	($=1/T$). Η γωνιακή συχνότητα σ ή ω σχετίζεται από την περίοδο και την κυκλική συχνότητα $\sigma = 2\pi/T = 2\pi f$.
Ταχύτητα κύματος ή φασική ταχύτητα [m/sec]	C	Η απόσταση που διανύει το μέτωπο του κύματος στη μονάδα του χρόνου. ($=L/T$)
Ενέργεια κύματος	E	($=(1/8)*\rho*g*H^2*L$)
Μέτωπο του κύματος		Είναι ένα επίπεδο κάθετο προς το επίπεδο ταλαντώσεως και εφαπτόμενο στη διατομή του κύματος.
Διεύθυνση μετάδοσης ή ακτίνα κύματος		Είναι η κάθετη γραμμή προς το μέτωπο του κύματος.
u, v, w [m/sec]		Οι συνιστώσες ταχύτητας των μορίων του νερού στο εσωτερικό του που είναι γενικά διαφορετικές του C.

η ή ζ [m]		Η απόσταση της στάθμης της επιφάνειας από την μέση στάθμη κύματος (Μ.Σ.Κ). Η Μ.Σ.Κ μπορεί να συμπίπτει ή όχι με την στάθμη ηρεμούντος ύδατος (Σ.Η.Υ). Η παρουσία κυματισμών συνεπάγεται συνήθως μία διαφοροποίηση προς τα πάνω ή προς τα κάτω σε σχέση με την αρχική Σ.Η.Υ.
Βάθος νερού [m]	d	Το βάθος νερού από την αρχική κατάσταση, δηλαδή η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας σε ηρεμία πάνω από τον πυθμένα.
Σχετικό βάθος νερού	d/L	Αποτελεί σημαντική παράμετρο που χαρακτηρίζει τη θαλάσσια περιοχή σε βαθειά νερά ($d/L \geq 0.5$), ενδιάμεσα νερά ($0.04 < d/L < 0.5$), και ρηχά νερά ($d/L \leq 0.04$).

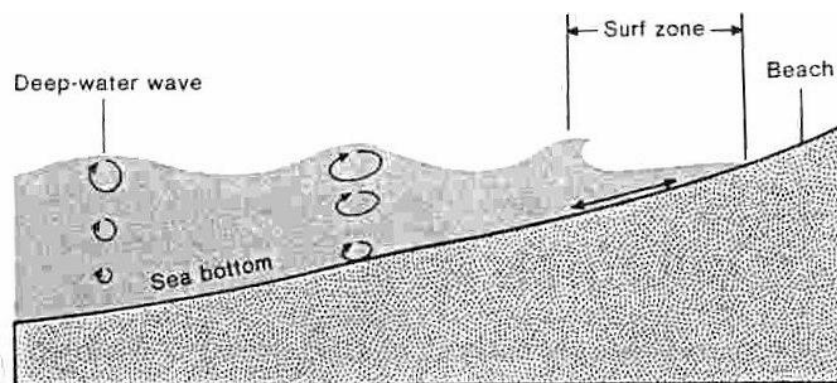
Η κίνηση των σωματιδίων του νερού εξαρτάται από το μήκος του κύματος, το ύψος του κύματος αλλά και το βάθος του νερού.

Τα κύματα σε βάθος νερού μεγαλύτερα από το $1/2$ του μήκους του κύματος δεν επηρεάζονται από το βάθος του νερού. Τα σωματίδια στα κύματα αυτά κινούνται σε σχεδόν κυκλικές τροχιές, αλλά διατηρούν περίπου την ίδια θέση. Τα σωματίδια της επιφάνειας κινούνται σε τροχιές των οποίων η διάμετρος είναι περίπου ίση με το ύψος του κύματος, αλλά μειώνεται πολύ γρήγορα (εκθετικά) με το βάθος (Gilluly et al., 1975). Σε βάθη ίσα με το μισό του μήκους του κύματος ($L/2$) οι διάμετροι των τροχιών των σωματιδίων έχουν γίνει τόσο μικρές ώστε η κίνηση του νερού να είναι σχεδόν μηδενική (Flint & Skinner, 1977). Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η κίνηση των μορίων του νερού για την περίπτωση ενός κύματος που διαδίδεται στην περιοχή των βαθιών νερών.



Σχήμα 2.2. Η κίνηση των μορίων του νερού κατά τη διάδοση ενός κύματος. Με τις διακεκομμένες γραμμές αναπαριστάνονται η μορφή του κύματος και η κίνηση των σωματιδίων του νερού σε μετέπειτα χρονική στιγμή ίση με το $1/8$ της περιόδου του κύματος (Flint & Skinner, 1977).

Όταν το κύμα διαδίδεται σε βάθη μικρότερα ή ίσα με το μισό του μήκους κύματος ($L/2$) τότε το κύμα αρχίζει να “αισθάνεται τον πυθμένα” και η κίνηση των μορίων του νερού γίνεται βαθμιαία ελλειπτική (Σχήμα 2.2). Η μορφή των κυματισμών αρχίζει να αλλάζει. Το μήκος του κύματος μικραίνει ενώ το ύψος του αυξάνει με αποτέλεσμα το κύμα να γίνεται πιο απότομο (steeper) (Flint & Skinner, 1977).



Σχήμα 2.3. Στο σχήμα αυτό φαίνεται πως οι τροχιές των σωματιδίων του νερού πλαταινουν καθώς το κύμα πλησιάζει στην ακτή και αρχίζει να “αισθάνεται τον πυθμένα” (Montgomery, 2000).

Οι **μαθηματικές εξισώσεις** (Κουτίτας, 1994) που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των κυμάτων θεωρούν ότι οι ταλαντώσεις των σωματιδίων είναι μόνιμες χωρίς απόσβεση και επομένως ότι τα κύματα μεταδίδονται εκτός τις περιοχής γενέσεως αναπτύξεως ή αποσβέσεως. Επίσης κάνουμε την παραδοχή ότι το υγρό που γίνονται οι ταλαντώσεις είναι ομοιογενές και ασυμπίεστο με ελεύθερη επιφάνεια και δεν υπάρχουν τριβές.

Η κλασική **θεωρία γραμμικών κυματισμών απειροστού πλάτους (κυματισμοί Stokes 1^{ης} τάξεως ή Airy)** βασίζεται στις παραδοχές μικρών τιμών των λόγων $\varepsilon = H/d$ και H/L και αμελητέων δυνάμεων ιξώδους και μπορεί να εφαρμοστεί για όλες τις τιμές σχετικού βάθους d/L .

Σύμφωνα με την παραπάνω θεωρία η ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας διακυμαίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad \text{ή} \quad \eta = \frac{H}{2} \cos(x - \sigma)$$

και όπου $k = \frac{2\pi}{L}$ (αριθμός κύματος) και $\sigma = \omega = \frac{2\pi}{T}$ (σταθερά περιοδικότητας).

Από την παραπάνω προκύπτουν οι εξισώσεις που ισχύουν γενικά για τα C , L τα παράγωγα μεγέθη u , w που προκύπτουν απ' το δυναμικό Φ και τα αντίστοιχα ολοκληρώματά τους γύρω από τη θέση ισορροπίας ξ , ζ :

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kd)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd)$$

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh(k(d+z))}{\sinh(kd)} \cos(kx - \sigma t)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\sinh(k(d+z))}{\sinh(kd)} \sin(kx - \sigma t)$$

$$\xi = \int u dt = \frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh(k(d+z))}{\sinh(kd)} \sin(kx - \sigma t)$$

$$\zeta = \int w dt = \frac{H}{2} \cdot \frac{\sinh(k(d+z))}{\sinh(kd)} \cos(kx - \sigma t)$$

Πίνακας 2.2 Εξισώσεις βαθειών και ρηχών νερών

d/L	Βαθεία νερά, d/L > 0.5	Ρηχά νερά, d/L < 0.05
Ταχύτητα κύματος	$C_0 = \frac{gT}{2\pi}$	$C = \sqrt{gd}$
Μήκος κύματος	$L_o = C_0 T = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi}$	$L = CT = T\sqrt{gd}$
Οριζόντια ταχύτητα σωματιδίων	$u = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$	$u = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{kd} \cos(kx - \sigma t)$
Κατακόρυφη ταχύτητα σωματιδίων	$w = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$	$w = \frac{\pi H}{T} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \sin(kx - \sigma t)$
Συνιστώσα μετατοπίσεως ξ	$\xi = \frac{H}{2} e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$	$\xi = \frac{H}{2} \frac{1}{kd} \sin(kx - \sigma t)$
Συνιστώσα μετατοπίσεως ζ	$\zeta = \frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$	$\zeta = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos(kx - \sigma t)$

2.2.3 Κυματικά φαινόμενα λόγω του αγωγού ανανέωσης

Τα **στερεά όρια**, που μπορεί να συναντήσει ένας κυματισμός κατά τη διαδικασία διάδοσής του και να επιδράσουν στα χαρακτηριστικά του, είναι:

ο πυθμένας, οπότε τα φαινόμενα που μπορούν να παρατηρηθούν είναι η παραμόρφωση της διατομής του κύματος, η διάθλαση του κύματος και η θραύση του κύματος.

ή η ύπαρξη ενός στερεού μετώπου στο πεδίο ροής των κυματισμών, οπότε και διαταράσσει τη ροή. Το βασικό χαρακτηριστικό της διαταραχής είναι, ότι το μέτωπο λειτουργεί ως πηγή δημιουργίας άλλων κυματισμών, που μεταδίδονται και σε κατεύθυνση διαφορετική από τη διεύθυνση μεταδόσεως του προσπίπτοντος κύματος. (Μουτζούρης, 1999). Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα μπορεί να είναι η

ανάκλαση, η περίθλαση, η θραύση, η γέννηση υψηλών αρμονικών (που πλέον το κύμα δε μπορεί να περιγραφεί από την θεωρία του Airy) κ.α.

Η περίπτωση ενός κύματος που προσπίπτει σε κυματοθραύστη με αγωγό ανανέωσης που καλούμαστε να μελετήσουμε στην παρούσα εργασία αποτελεί ουσιαστικά μια ειδική περίπτωση μετώπου.

Κυματικά φαινόμενα σε μέτωπο (γενικά)

Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα στοιχεία για το φαινόμενο της ανάκλασης, της περίθλασης και της θραύσης ενός κύματος καθώς προσπίπτει σε ένα μέτωπο.

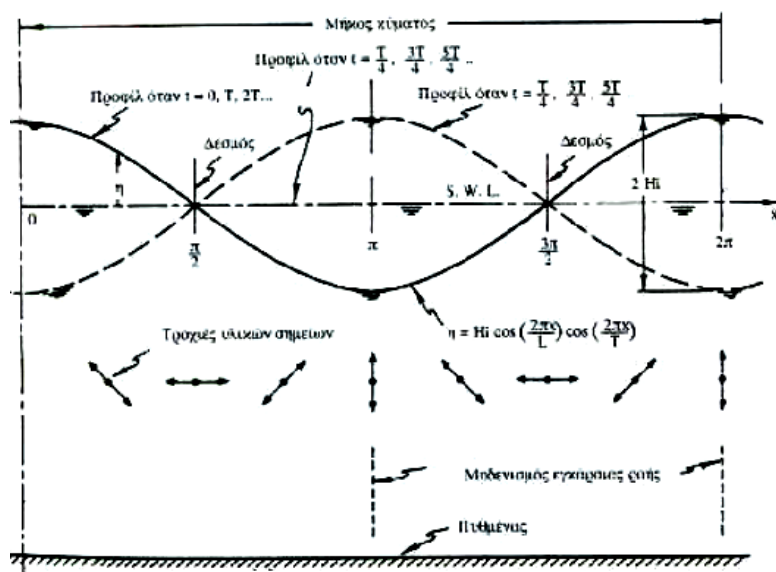
• Ανάκλαση

Η ενέργεια ενός κυματισμού, που προσπίπτει σε ένα στερεό μέτωπο, υφίσταται ανάκλαση. Αν θεωρηθούν αμελητέες η τραχύτητα και η διαπερατότητα του μετώπου, τότε η ανάκλαση είναι ολική για την περίπτωση του κατακόρυφου μετώπου και μερική για την περίπτωση του κεκλιμένου μετώπου. Στην ολική ανάκλαση όλη η ενέργεια του προσπίπτοντος κυματισμού ανακλάται, ενώ στη μερική ανάκλαση μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε ενέργεια θραύσεως και / ή τριβής.

Στην ολική ανάκλαση το ανακλώμενο ύψος H_r είναι ίσο με το ύψος του προσπίπτοντος κύματος H_i . Στη μερική ανάκλαση ο λόγος H_r/H_i είναι μικρότερος της μονάδας.

Η επαλληλία του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος δίνει ένα στάσιμο κύμα. Το στάσιμο κύμα είναι τέλει (ή ολικό) σε περίπτωση ολικής ανάκλασης ενός κύματος με μηδενική γωνία πρόσπτωσης.

Στην περίπτωση της ολικής ανάκλασης το ύψος του στάσιμου κύματος είναι ίσο με το διπλάσιο του ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού ($2H_i$) (γένεση υψηλών αρμονικών), ενώ το μήκος του είναι ίσο με το μήκος του προσπίπτοντος κυματισμού. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η μορφή του τέλει στάσιμου κύματος σε διάφορες χρονικές στιγμές.

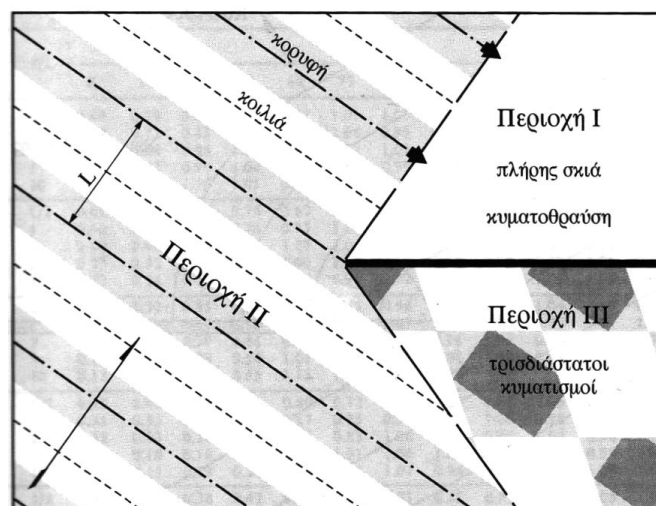


Σχήμα 2.4 Διαμόρφωση στάσιμου κύματος (Καραμπάς, 2004)

Η θαλάσσια επιφάνεια στις θέσεις των κόμβων δεν απομακρύνεται ποτέ από τη θέση ηρεμίας. Στις ίδιες θέσεις η ταχύτητα των σωματιδίων έχει μόνο οριζόντια συνιστώσα. Αντίθετα, στις θέσεις των κοιλίων η ταχύτητα έχει μόνο κατακόρυφη συνιστώσα. Στις ενδιάμεσες θέσεις η ταχύτητα έχει οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα.

- Περίθλαση

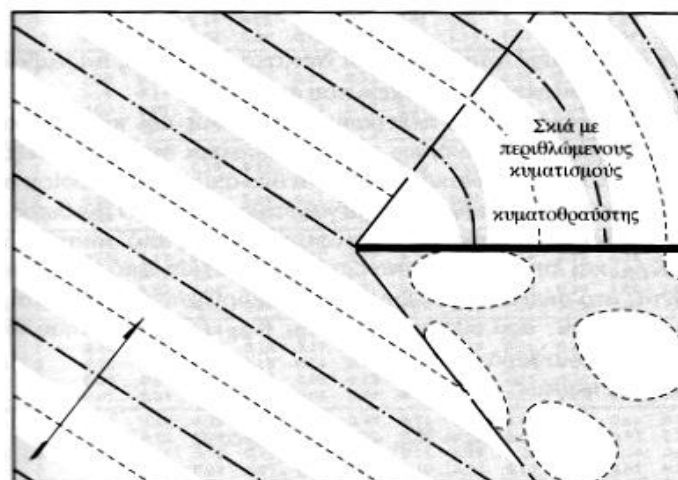
Εάν η ενέργεια των κυματισμών παρέμενε διατηρούμενη μεταξύ διαδοχικών ορθογωνίων τότε η παρουσία μιας κατασκευής στο χώρο διαδόσεως θα σήμαινε πλήρη «σκιά» κυματισμών πίσω από το άκρο της.



a. No diffraction

Σχήμα 2.5 Προσέγγιση κύματος χωρίς περίθλαση (Κουτίτας 1994)

Αυτό όμως δε συμβαίνει λόγω του φαινομένου της περιθλάσεως. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση κυματισμών σε θαλάσσια περιοχή προστατευμένη από θαλάσσιο έργο που κανονικά θα έπρεπε να ηρεμούσε. Οι κυματοκορυφές διαμορφώνονται κυκλικά στη σκιά της κατασκευής σαν να αποτελούσε η άκρη της κατασκευής σημειακή πηγή κυματισμών.



b. Diffraction effects

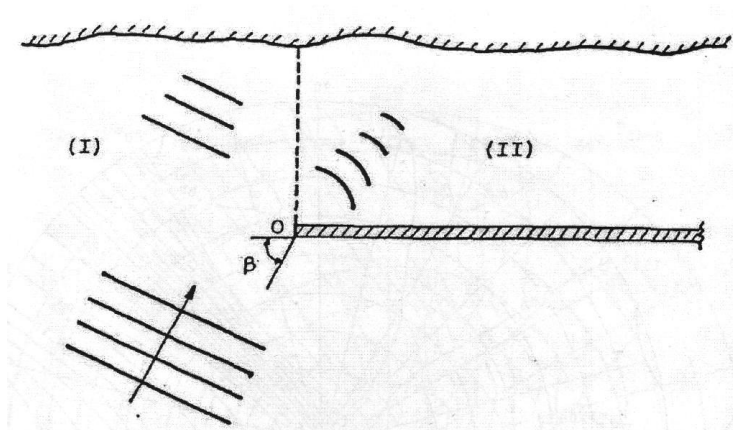
Σχήμα 2.6 Προσέγγιση κύματος με περίθλαση (Κουτίτας 1994)

Η περιοχή των κυματισμών από περίθλαση το ύψος κύματος H υπολογίζεται από την σχέση:

$$H = k_d H_0$$

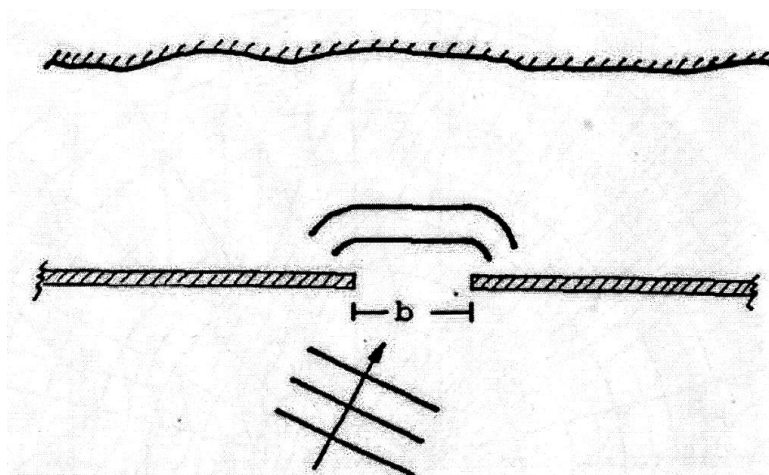
όπου H_0 είναι το ύψος κύματος στη περιοχή προ της κατασκευής, που δημιουργεί την περίθλαση και k_d ο συντελεστής περιθλάσεως.

- Ο Wiegel το 1962 μελέτησε θεωρητικά την περίπτωση της περίθλασης από μία επιμήκη μεμονωμένη κατασκευή και κατέληξε στην διαμόρφωση διαγραμμάτων για τον υπολογισμό του συντελεστή περίθλασης k_d σε εξάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης και την απόσταση από το σημείο O στην άκρη της κατασκευής.



Σχήμα 2.7 Περίθλαση γύρω από μεμονωμένη επιμήκη κατασκευή (Μουτζούρης)

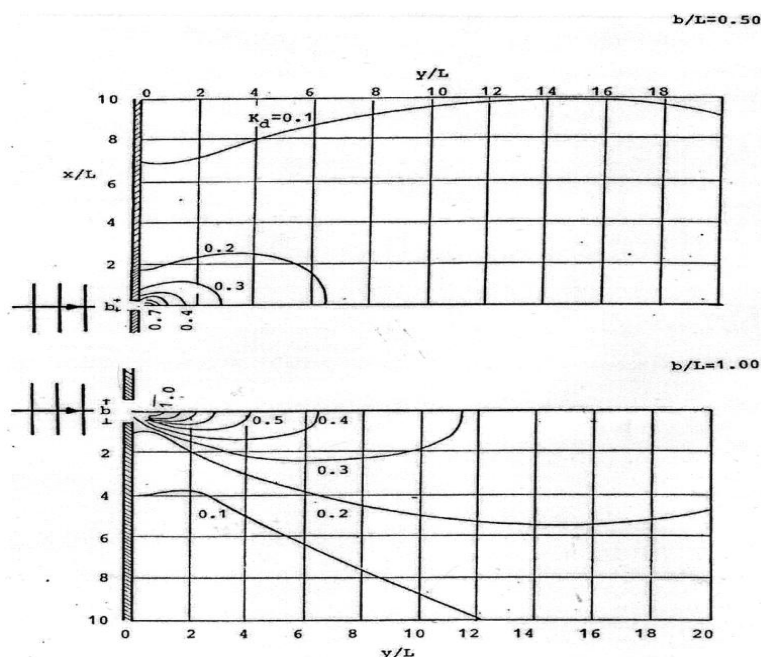
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία παρουσιάζει η περίπτωση του συνδυασμού δύο επιμηκών μεμονωμένων κατασκευών που χωρίζονται από ένα άνοιγμα.



Σχήμα 2.8. Περίθλαση γύρω από δύο επιμήκεις κατασκευές (Μουτζούρης)

Στην περίπτωση αυτή ο Johnson (1952) (από Shore Protection Manual) κατέληξε στα παρακάτω διαγράμματα για τον υπολογισμό του συντελεστή k_d για γωνία

πρόσπτωσης 90° και για δύο διαφορετικές τιμές b/L μικρότερες και μεγαλύτερες της μονάδας.



Σχήμα 2.9 Συντελεστές περιθλάσεως κατά Johnson (Μουτζούρης)

- **Θραύση**

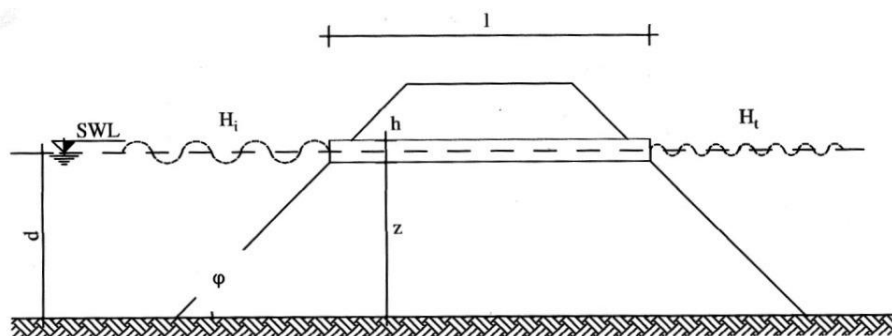
Ο μηχανισμός της θραύσης αποτελεί τη κύρια εκδήλωση υδροδυναμικής αστάθειας και επέρχεται στη περίπτωση που ξεπεραστούν κάποιες οριακές τιμές των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κυμάτων. Και στη περίπτωση του μετώπου που μας αφορά, η θραύση είναι αποτέλεσμα της απότομης αλλαγής της διατομής που διέρχεται ο κυματισμός λόγω της πρόσκρουσης. Η θραύση έχει μεγάλη σημασία για τα λιμενικά έργα καθώς με την πρόσκρουση του κύματος πάνω σε μία λιμενική κατασκευή αναπτύσσονται υψηλές πιέσεις.

Κυματικά φαινόμενα σε κυματοθραύστη με αγωγό ανανέωσης

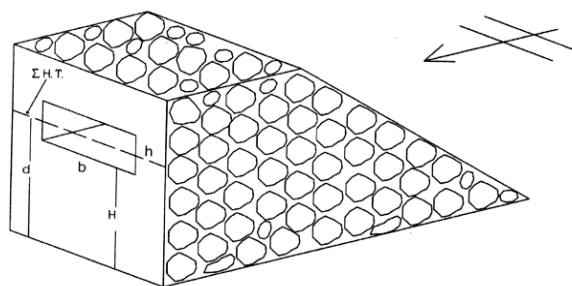
Η μετάδοση κυματισμών μέσα από αγωγούς ανανέωσης μπορεί να λάβει χώρα κάτω από διάφορες, όχι πάντα διακριτές μεταξύ τους, συνθήκες ροής: είτε υπό συνθήκες ελεύθερης ροής σε ανοιχτό αγωγό, είτε ροής υπό πίεση σε κλειστό αγωγό, είτε με συνδυασμό των δύο. Στη τελευταία περίπτωση το φαινόμενο είναι εξαιρετικά σύνθετο. Η ύπαρξη κυματικού πεδίου καθιστά την οποιαδήποτε ροή εντός του αγωγού μη ομοιόμορφη. Ανάλογα με το ύψος των προσπίπτοντων κυμάτων στον αγωγό, οι συνθήκες μπορεί να μεταπίπτουν από εκείνες ροής κλειστού αγωγού σε ροή ανοιχτού (Βατερλάτου, 2006).

Εξαιτίας της παρουσίας του αγωγού ανανέωσης, μέρος της προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας διεισδύει και μεταδίδεται πίσω από τον κυματοθραύστη. Το μεταδιδόμενο κύμα έχει αρκετά μικρότερο ύψος και μήκος σε σχέση με το προσπίπτον. Το αποτέλεσμα της διείσδυσης των κυμάτων αποτιμάται ποσοτικά με τη χρήση του **συντελεστή κυματικής διείσδυσης** ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του ύψους του μεταδιδόμενου κύματος (H_t) προς το ύψος του προσπίπτοντος κύματος (H_i) δηλαδή:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i}$$



Σχήμα 2.10 Σχηματική απεικόνιση αγωγού ανανέωσης τοποθετημένου σε κυματοθραύστη (Tsoukala et al., 2009)



Σχήμα 2.11 Τομή κυματοθραύστη με αγωγό ανανέωσης και χρησιμοποιούμενες διαστάσεις.

Πίνακας 2.3 Πίνακας συμβόλων που χρησιμοποιούνται για αγωγό ανανέωσης

b	πλάτος αγωγού ανανέωσης	L₀	Μήκος κύματος στα βαθειά
d	βάθος νερού	L	μήκος κύματος
g	επιτάχυνση της βαρύτητας (g=9,81 m/s ²)	R	Συντελεστής συσχέτισης
h	ύψος αγωγού ανανέωσης	SWL	Επίπεδο επιφάνειας νερού
h_s	βυθισμένο ύψος αγωγού ανανέωσης	tanφ	κλίση πρσανούς κυματοθραύστη
H_i	ύψος προσπίπτοντος κύματος (incident)	T	Περίοδος κύματος
H_t	ύψος διεισδύοντος κύματος (transmitted)	α	γωνία πρόσπτωσης
K_t	συντελεστή κυματικής διείσδυσης	ξ	Παράμετρος Iribarren (έκφραση καμπυλότητας) $\xi = \tan\phi / (2\pi H_i / (gT^2))$
l	μήκος αγωγού ανανέωσης		

Στο σημείο αυτό η διπλωματική εργασία θα επικεντρωθεί στο πως τα φαινόμενα που προαναφερθήκαν και αναλύθηκαν για τη γενική περίπτωση του μετώπου,

εμφανίζονται στις δύο πλευρές του αγωγού ανανέωσης (προσήνεμη και υπήνεμη) όταν έχουμε κεκλιμένο κυματοθραύστη.

- Φαινόμενα στην προσήνεμη πλευρά της κατασκευής

Η ενέργεια των κυμάτων μειώνεται στην προσήνεμη πλευρά καθώς ένας κυματισμός προσπίπτει σε ένα κεκλιμένο κυματοθραύστη με αγωγό ανανέωσης. Ένα μέρος της ενέργειας ανακλάται, ένα μέρος μετατρέπεται σε ενέργεια θραύσης και / ή τριβής (λόγω κεκλιμένου μετώπου) και ένα μέρος συνεχίζει να διαβιβάζεται μέσω του αγωγού στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη. Κατά τη μελέτη του φαινομένου τυχόν υπέρβαση του ύψους του κυματοθραύστη δε μπορεί να γίνει αποδεκτή.

Λαμβάνοντας υπόψη την τραχύτητα και τη διαπερατότητα του μετώπου η ανάκλαση (reflection) είναι μερική και άρα όπως έχει αναφερθεί ο λόγος του ύψους του ανακλώμενου κύματος (H_r) προς το ύψος του προσπίπτοντος κύματος (H_i) είναι μικρότερος της μονάδας ($H_r/H_i < 1$). Λόγω της ανάκλασης μέρους της κυματικής ενέργειας που προσπίπτει στον κυματοθραύστη, παρατηρείται η δημιουργία μη τέλειου στάσιμου κύματος, με ύψος μεγαλύτερο από εκείνο του παραγόμενου κυματισμού. (Κουτίτας, 1994).

Επίσης όταν ο λόγος του ύψους του εισερχόμενου στον αγωγό κύματος προς το βάθος του νερού ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή (~ 0.8) επέρχεται θραύση (breaking) του κύματος (Κουτίτας, 1994).

Η θραύση θεωρείται σύνηθες φαινόμενο στους αγωγούς ανανέωσης που τοποθετούνται κοντά στην επιφάνεια, με την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία (ΣΗΥ- στάθμη υρεμούντος ύδατος) να βρίσκεται στο μέσο ύψος του αγωγού, αφού το βάθος του νερού μέσα στον αγωγό ισούται με το μισό του ύψους του ανοίγματος (Μιχαλοπούλου, 2008).

- Φαινόμενα στην υπήνεμη πλευρά της κατασκευής – αποσύνθεση κύματος

Ο κυματοθραύστης θεωρείται ότι λειτουργεί σαν ύφαλο εμπόδιο με στένωση στη ροή κυματισμών και ο αγωγός δεν «πλημμυρίζει». (δηλ. ύψος κύματος μικρότερο από το ύψος του αγωγού).

Η μη γραμμική αλληλεπίδραση κύματος – ύφαλου εμποδίου πραγματοποιείται όταν ο αριθμός Ursell (Ur) είναι μεγάλος (Losada et al., 1997). Όταν $Ur \gg 1$ τότε η ενέργεια που διανέμεται από τη βασική συνιστώσα (χαμηλής συχνότητας) στις συνιστώσες υψηλότερης συχνότητας είναι σημαντική.

$$Ur = \frac{HL^2}{h^3}, \text{ όπου } H \text{ το ύψος κύματος, } L \text{ το μήκος κύματος, και } h \text{ το βάθος του νερού}$$

πάνω από το εμπόδιο (Μιχαλοπούλου, 2008).

Καθώς τα κύματα διαδίδονται μέσα από την περιοχή των ρηχών νερών μέσα στον αγωγό ανανέωσης ένα μέρος της ενέργειας κύματος μεταφέρεται από μια πρωταρχική κυματική συνιστώσα στις υψηλότερες αρμονικές του (δε μπορεί πλέον να περιγραφεί απ' τη θεωρία του Airy), που οφείλεται στην αύξηση της μη γραμμικότητας των κυμάτων. Η αποσύνθεση στα κοντύτερα σε μήκος κύματα εμφανίζεται αμέσως μετά τη μετάβαση στην υπήνεμη πλευρά της κατασκευής καθώς το κύμα περνάει στα βαθύτερα νερά, δεδομένου ότι η ταχύτητα φάσης διαφέρει σημαντικά μεταξύ του αρχικού κύματος και των υψηλότερων αρμονικών του και τα δεσμευμένα κύματα

(bound waves) δε μπορούν πλέον να υπάρξουν. Έτσι τα διαβιβασθέντα κύματα διαδίδονται ως μη-μόνιμα κύματα που αποτελούνται από συνιστώσες διαφορετικών συχνοτήτων (Ohyama et al, 1995; Losada et al, 1997). Τα κύματα που διαβιβάζονται μέσω ενός αγωγού ανανέωσης μπορούν να παράγουν δύο ή περισσότερα κύματα από την υπήνεμη όψη. Το αποτέλεσμα είναι ότι ένα μεγάλο τμήμα της ενέργειας μεταφέρεται απότομα στις ελεύθερες υψηλότερες αρμονικές από ότι στο συνεχές φάσμα.(Tsoukala et al, 2009).

Τέλος ένα φαινόμενο που εμφανίζεται και παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη υπήνεμη πλευρά του αγωγού ανανέωσης είναι αυτό της περίθλασης. Αφού παρατηρούνται κυματικές διαταραχές και στις δύο μεριές του ανοίγματος (Βλ. περίπτωση του συνδυασμού δύο επιμηκών μεμονωμένων κατασκευών, σχήμα 2.8). Οι διαταραχές στις πλευρές του ανοίγματος διαχέονται η μία ανεξάρτητα της άλλης και καθώς τα κύματα διαδίδονται στο εσωτερικό του λιμένα, η περιοχή που επηρεάζεται από την περίθλαση τείνει προς τη μεσοκάθετο του διακένου (Μιχαλοπούλου, 2008).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το φαινόμενο της κυματικής διείσδυσης σε λιμενολεκάνη μέσω αγωγών ανανέωσης, δεν έχει επαρκώς μέχρι σήμερα μελετηθεί. Παρόλα αυτά επιχειρείται βιβλιογραφική αναφορά σε αποτελέσματα από έρευνα που έχει διεξαχθεί και αναφέρεται σε προβλήματα μετάδοσης κυματισμών σε λιμενολεκάνη μέσω των παράκτιων τεχνικών έργων.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι υφιστάμενες μεθοδολογίες προσέγγισης (αριθμητική και πειραματική) με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου της βιβλιογραφικής ανασκόπησης παρουσιάζονται

- δημοσιεύσεις και έρευνες σχετικές με συναφή, προς τους αγωγούς ανανέωσης, προβλήματα κυματικής διείσδυσης όπως: διάδοσης κυματισμών μέσω βυθισμένων διακένων ή διαπερατών κατασκευών, διέλευσης κυματισμών πάνω από ύψαλη κατασκευή, επίδρασης στένωσης στη ροή των κυματισμών (είσοδοι λιμένων, κανάλια, αγωγοί). Καθώς και
- έρευνες και εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του ΕΜΠ και αφορούν ειδικότερα στους αγωγούς ανανέωσης υδάτων (αριθμητικές προσομοιώσεις και πειραματικές μετρήσεις σε 2D και 3D διαστάσεις)

Στο τέλος του κεφαλαίου, συνοψίζοντας, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, αναγκαία στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3.2 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ

Η μελέτη της ανανέωσης των υδάτων στη λιμενολεκάνη και της διεισδύουσας κυματικής διαταραχής προσεγγίζεται με:

- **αριθμητική προσομοίωση** με τη χρήση κατάλληλων αριθμητικών μοντέλων (μονοδιάστατα, διςδιάστατα και τριςδιάστατα μοντέλα),
- **πειραματική προσομοίωση** χρησιμοποιώντας φυσικά ομοιώματα, τα ομοιώματα μπορεί να είναι:
 - 2D σε διώρυγα δοκιμών.
 - 3D δεξαμενή δοκιμών όπου μπορεί να μεταβάλλεται η γωνία πρόσπτωσης.

3.2.1 Αριθμητική προσομοίωση - Μοντέλα

Μοντέλο είναι ένα κατασκευάσμα που ποσοτικοποιεί και περιγράφει ή είναι ανάλογο χημικών, φυσικών ή βιολογικών φαινομένων. Το μοντέλο είναι δηλαδή μια

μαθηματική περιγραφή της συμπεριφοράς ενός φυσικού συστήματος. (Νικολαΐδης Ν., 2007)

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης μοντέλων στα προβλήματα έχουν να κάνουν με: το μικρό κόστος κατάστροφης του προβλήματος, το μικρό απαιτούμενο χρόνο και χώρο υλοποίησης των απαραίτητων υπολογισμών, την εύκολη προσαρμογή των μοντέλων σε νέες διαφορετικές παραμέτρους απ' τις αρχικές και τέλος τη δυνατότητά τους να προσομοιώνει τις πραγματικές διαστάσεις της περιοχής μελέτης.

Τα μειονεκτήματα για τη χρήση τους είναι ότι: απαιτούν ειδικευμένο προσωπικό, η ύπαρξη πολύπλοκων διαφορικών εξισώσεων που εκτός από την απαίτηση για ανώτερες γνώσεις μαθηματικών μπορεί να παρουσιάσει προβλήματα κατά την επίλυση, επίσης σε περίπτωση απόπειρας απλούστευσης του λογισμικού τους ώστε να γίνουν πιο φιλικά στο χρήστη υπάρχει ο κίνδυνος απλοποιήσεων που στερούν τη δυνατότητα χρήση τους ενώ παράλληλα στερούν τη δυνατότητα απ' το χρήστη να παρέμβει στον κώδικα και να προσαρμόσει το μοντέλο στις δικές του απαιτήσεις.

Μέχρι σήμερα για την προσομοίωση της ροής και της κυματικής διείδουσας εντός λιμενολεκάνης μέσω αγωγών ανανέωσης υδάτων έχουν χρησιμοποιηθεί:

- Το μονοδιάστατο **μοντέλο των Τζέκου και Δρέττα** (Τσέκος και Δρέτας 2000) που εφαρμόστηκε στη μελέτη επέκτασης του Λιμένα της Αλεξανδρούπολης με κύριο στόχο τη διερεύνηση του χρόνου ανανέωσης της λιμενολεκάνης. Το υπόψη μοντέλο είναι χρονικά ολοκληρωμένο, δηλαδή η ποσότητα και η συγκέντρωση των ρύπων αναφέρονται στον συνολικό όγκο ύδατος της λιμενολεκάνης υπονοώντας ότι σε κάθε στιγμή υπάρχει πλήρης ανάμιξη των ρύπων εντός της λιμενολεκάνης και συνεπώς η συγκέντρωση δεν μεταβάλλεται χωρικά.
- Το μοντέλο **MIKE** (Blankenship and Yang) που έχει αναπτυχθεί από το Δανικό Ινστιτούτο Υδραυλικής και είναι εμπορικά διαθέσιμο. Τα επίπεδα και οι ροές επιλύονται πάνω σε ορθογώνιο κάναβο καλύπτοντας την περιοχή ενδιαφέροντος. Το μοντέλο λύνει πλήρως χρονικά εξαρτημένη μη γραμμική εξίσωση συνέχειας και διατήρηση της ορμής. Το μοντέλο περιλαμβάνει διάφορες εφαρμογές που μπορούν να εφαρμοστούν και για τους αγωγούς ανανέωσης όπως: το κυματικό μοντέλο MIKE 21 PMS, το υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 21 HD και το μοντέλο κυματικής διαταραχής MIKE 21 BW.
- Το μοντέλο **CFX-5**, (AEA Technology, 1999). Το μοντέλο CFX-5 υπολογίζει το τρισδιάστατο πεδίο ροής, με επίλυση των εξισώσεων της συνέχειας και της ποσότητας κίνησης.
- Το εμπορικό μοντέλο **Flow 3D** που χρησιμοποιεί τη γραμμική θεωρία κυμάτων. (www.flow3d.com/).
- **Flow 3DL** που χρησιμοποιεί τη γραμμική θεωρία κυμάτων (www.hydro.ntua.gr/ydor-3dl/), και έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ.
- Το μοντέλο **wave tank model** των Ohyama and Nadaoka (1994), για τη προσομοίωση των μη γραμμικών κυμάτων πάνω από ύψαλη κατασκευή.
- **Οι Shankar et al (2001)** ανέπτυξαν τρισδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο που είναι αποτελεσματικό και μπορεί να εφαρμοστεί για την προσομοίωση της ροής διαμέσου ενός ανοίγματος

3.2.2 Πειραματική προσομοίωση

Τα πλεονεκτήματά της είναι: οι πολύ χρήσιμες πληροφορίες που προκύπτουν σε θέματα σχεδιασμού.

Τα μειονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση φυσικών ομοιωμάτων είναι: οι μεγάλοι χρόνοι υλοποίησης, οι μεγάλες απαιτήσεις σε χώρο, το υψηλό κόστος, η μικρή ευελιξία για αλλαγή παραμέτρων του προβλήματος και η μελέτη του φαινομένου σε διαφορετικές από τις πραγματικές συνθήκες.

3.3 ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΑΠΟ ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

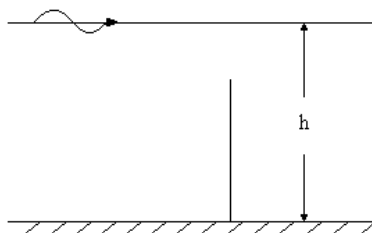
3.3.1 Διάδοση κυματισμών διά μέσου βυθισμένων διακένων

Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση προέκυψε ότι μελετήθηκε θεωρητικά (με διερεύνηση περιπτώσεων κυματικής διείσδυσης, κατάστροψη και επίλυση εξισώσεων και τελικά αριθμητική προσομοίωση – μοντελοποίηση προβλημάτων), η διάδοση των κυματισμών διά μέσου:

- ενός ή περισσότερων διακένων επί αδιαπέρατου κάθετου εμποδίου,
- μηδενικού, άπειρου ή περιορισμένου πάχους
- σε άπειρο ή ορισμένο βάθος νερού.

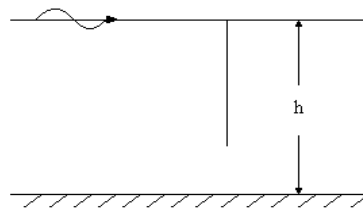
Σε κάποιες περιπτώσεις επιχειρήθηκε πειραματική προσομοίωση ή και σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής και πειραματικής προσομοίωσης.

Πιο συγκεκριμένα ο **Dean (1945)** μελέτησε θεωρητικά τη μετάδοση και την ανάκλαση των κυματισμών για την περίπτωση ενός κάθετου εμποδίου σε απεριόριστο βάθος νερού το οποίο ξεκινάει από τον πυθμένα αλλά δεν φτάνει μέχρι την επιφάνεια (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 Κάθετο μηδενικού πάχους εμπόδιο το οποίο ξεκινάει από τον πυθμένα και αφήνει κενό από την επιφάνεια.

Αντίστοιχα το φαινόμενο της επίδρασης στους επιφανειακούς κυματισμούς ενός κάθετου εμποδίου, το οποίο ξεκινάει από την επιφάνεια αλλά δεν φτάνει μέχρι τον πυθμένα, αφήνοντας ένα μικρό κενό μεταξύ εμποδίου και πυθμένα (Σχήμα 3.2), μελετήθηκε θεωρητικά από τον **Ursell (1947)**. Το ρευστό στην περιοχή του εμποδίου θεωρήθηκε επίσης απείρου βάθους.



Σχήμα 3.2 Κάθετο μηδενικού πάχους εμπόδιο το οποίο ξεκινάει από την επιφάνεια και αφήνει κενό από τον πυθμένα.

Τα δύο παραπάνω προβλήματα για την περίπτωση του πεπερασμένου βάθους επιλύθηκαν αριθμητικά από τους **Mei & Black (1969)**.

Εν τω μεταξύ οι **Lewin (1963)** και **Mei (1966)** είχαν ασχοληθεί με την αντανάκλαση των κυμάτων από κάθετο εμπόδιο μηδενικού πάχους, με ένα ή περισσότερα οριζόντια διάκενα οποιουδήποτε πλάτους, για άπειρο βάθος νερού, χωρίς να καταλήξουν σε αριθμητικά αποτελέσματα.

Ο **Tuck (1971)** μελέτησε θεωρητικά τη διάδοση των κυματισμών δια μέσου βυθισμένων διακένων σε αδιαπέρατο κάθετο εμπόδιο μηδενικού πάχους, για άπειρο βάθος νερού. Η εξίσωση στην οποία κατάληξε, προβλέπει ότι, ένα αξιοσημείωτα μεγάλο ποσοστό της προσπίπτουσας ενέργειας μεταδίδεται διαμέσου αρκετά μικρών διακένων. Η θεωρία στην οποία κατάληξε αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως η θεωρία των μικρών διακένων του Tuck.

Οι **Peckham** και **Williams (1972)** κατέληξαν σε εξισώσεις μετάδοσης κυματισμών διαμέσου μικρού διακένου σε ορισμένο βάθος. Η εξίσωση που δίνουν είναι ελαφρώς διαφοροποιημένη, αλλά ισοδύναμη με αυτή του Tuck (1971).

Ο **Guiney (1972)** και ο **Porter (1972)** κατέληξαν σε εξισώσεις μέσω αριθμητικής προσομοίωσης για μεμονωμένο διάκενο επί κάθετου εμποδίου. Η λύση όμως για το συντελεστή μετάδοσης, στις εξισώσεις που κατέληξαν ο καθένας τους, ήταν αρκετά περίπλοκη και περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό ολοκληρώσεων.

Συνεχίζοντας τη θεωρία του Tuck, οι **Guiney et al. (1972)**, μελέτησαν θεωρητικά την επίδραση του πάχους ενός εμποδίου με διάκενο και προέβησαν παράλληλα σε σειρά πειραματικών μετρήσεων, επιδιώκοντας τη σύγκριση και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής με την πειραματική προσομοίωση. Μελετήθηκε ο συντελεστής μετάδοσης ενέργειας σε σχέση με τον λόγο του πλάτους του αγωγού προς το βάθος του νερού (πυθμένα) b/d για διαφορετικές τιμές του λόγου μήκος αγωγού προς το ύψος αγωγού l/h . Έτσι κατέληξαν στο ότι :

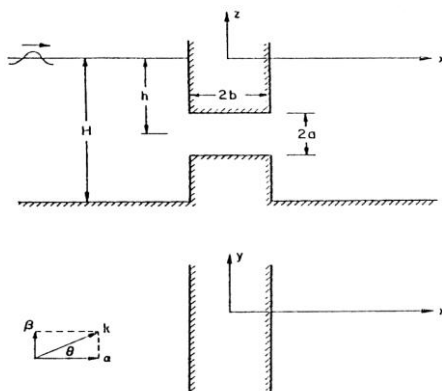
1. Η αύξηση του λόγου μήκος αγωγού/ ύψος αγωγού συνεπάγεται μείωση του συντελεστή μετάδοσης ενέργειας
2. Η αύξηση του λόγου πλάτος αγωγού/ βάθος νερού, συνεπάγεται μείωση του συντελεστή μετάδοσης ενέργειας.

Ο **Macaskill (1979)** μελέτησε την μετάδοση και ανάκλαση θαλασσιών κυμάτων η οποία οφείλεται σε διαπερατές θαλάσσιες κατασκευές και ανέπτυξε μία μαθηματική εξίσωση για την περιγραφή του φαινομένου. Η εξίσωση περιγράφει την μετάδοση και ανάκλαση των κυματισμών από ένα λεπτό κάθετο διαπερατό εμπόδιο και μπορεί να

συμπεριλάβει όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις που αναφέρθηκαν (Tuck, 1971; Lewin, 1963; Mei, 1966; Porter, 1972; Guiney, 1972; Ursell, 1947; Dean, 1945) (για την περίπτωση του κάθετου εμποδίου) καθώς και τις περιπτώσεις άπειρου και πεπερασμένου βάθους του ρευστού στην περιοχή του εμποδίου (Mei & Black, 1969). Η φόρμουλα αυτή δίνει επίσης την δυνατότητα υπολογισμού των ακριβών αριθμητικών λύσεων. Το σκεπτικό είναι ότι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το εμπόδιο είναι διαπερατό με γνωστή διαπερατότητα η οποία μπορεί να ποικίλει με το βάθος. Η διαπερατότητα αυτή μπορεί να οριστεί ως $1/C$ όπου C είναι ένας αδιάστατος συντελεστής που δείχνει πόσο ‘γεμάτο’ είναι το εμπόδιο και εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εμποδίου. Με άλλα λόγια μπορούμε να θεωρήσουμε το εμπόδιο σαν να είναι διάτρητο από πολλούς μικρούς πόρους, με τους πόρους να είναι μικρού μεγέθους όταν ο συντελεστής C είναι μεγάλος (χαμηλή διαπερατότητα) και μεγάλου μεγέθους όταν ο συντελεστής C είναι μικρός (υψηλή διαπερατότητα). Χρησιμοποιώντας μεταβλητή διαπερατότητα είναι δυνατόν να περιγραφούν οι περιπτώσεις διαπερατών εμποδίων με ένα ή περισσότερα διάκενα. Δύο παραδείγματα είναι οι περιπτώσεις που περιγράφονται από τους Ursell (1947) και Dean (1945). Για τις ίδιες τιμές του συντελεστή C και θεωρώντας αυτή τη φορά ότι το βάθος του νερού στην περιοχή του εμποδίου είναι πεπερασμένο προκύπτουν οι δύο περιπτώσεις που μελέτησαν οι Mei & Black (1969).

Οι **Liu et al. (1986)** επεξέτειναν τις προαναφερθείσες θεωρίες των Tuck (1971) και Guiney et al. (1972), λαμβάνοντας υπ’ όψη τη γωνία πρόσπτωσης.

Συνεχίζοντας την έρευνα που είχαν διεξάγει Liu και Wu (1986) με την υπόθεση άπειρου βάθους νερού, οι **Liu et al. (1987)** εξέτασαν την επίδραση πεπερασμένου βάθους. Μελετήθηκε η μετάδοση κυμάτων που προσπίπτουν πλάγια σε εμπόδιο άπειρου μήκους, με μικρό οριζόντιο βυθισμένο άνοιγμα (Σχήμα 3.3). Το βάθος του νερού θεωρήθηκε σταθερό εκατέρωθεν του εμποδίου ενώ το πλάτος του ανοίγματος είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος του προσπίπτοντος κυματισμού.



Σχήμα 3.3 Γεωμετρία απλής μορφής διαπερατού κυματοθραύστη με οριζόντιο βυθισμένο άνοιγμα.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα αυτή είναι τα ακόλουθα:

1. Για μεγάλα βάθη νερού, τα αποτελέσματα προσεγγίζουν αυτά της έρευνας των Liu and Wu (1986) για άπειρο βάθος νερού.
2. Η μεταδιδόμενη κυματική ενέργεια μειώνεται για μεγαλύτερο πάχος εμποδίου και μεγαλύτερο βάθος ανοίγματος.

3. Η μεταδιδόμενη ενέργεια αυξάνει όσο αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης του κύματος κοντά στη περιοχή των 90° , ενώ για πρόσπτωση παράλληλα με το εμπόδιο, ο συντελεστής μετάδοσης πέφτει απότομα στο μηδέν.
4. Η μέθοδος φαίνεται να έχει πολύ καλή εφαρμογή και για μικρά πάχη εμποδίου, εφόσον διατηρείται η υπόθεση μικρού σχετικά ανοίγματος.
5. Το εμπόδιο (κυματοθραύστης) γίνεται πιο αποτελεσματικό (μικραίνει ο συντελεστής μετάδοσης), όταν μεγαλώνει το πάχος του ή μικραίνει το άνοιγμα, εξαρτάται όμως άμεσα από τη γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών.

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους συγγραφείς (the method of matched asymptotic expansion), χρησιμοποιείται για να αναπτύξει θεωρητικές λύσεις για την περίθλαση από προσπίπτοντα πλάγια κύματα μέσω ενός απειροστού κατακόρυφου διαφράγματος με μία μικρή βυθισμένη σχισμή σε σταθερό βάθος νερού.

Οι **Mandal et al. (1989)** επιβεβαίωσαν επίσης την αρχική θεωρία του Tuck, μελετώντας ξανά την περίπτωση μικρού οριζόντιου βυθισμένου διακένου σε κατακόρυφο αδιαπέρατο εμπόδιο μηδενικού πάχους, για κυματισμούς που προσπίπτουν με τυχαία γωνία.

Η έρευνα της κυματικής διείσδυσης στις λιμενολεκάνες επεκτάθηκε και σε άλλα προβλήματα που συνδυάζονται με την ύπαρξη συγκεκριμένων λιμενικών έργων, όπως ύφαλες κατασκευές με ή χωρίς την παρουσία στένωσης, κυματοθραύστες διαπερατοί ή με διάκενα, είσοδοι λιμανιών, κανάλια και αγωγοί ανανέωσης.

3.3.2 Διέλευση κυματισμών πάνω από ύφαλη κατασκευή

Μελετήθηκε η διέλευση κυματισμών πάνω από ύφαλες διαπερατές ή μη διαπερατές κατασκευές, σε μικρότερη ή μεγαλύτερη απόσταση από την επιφάνεια, για διάφορα πλάτη.

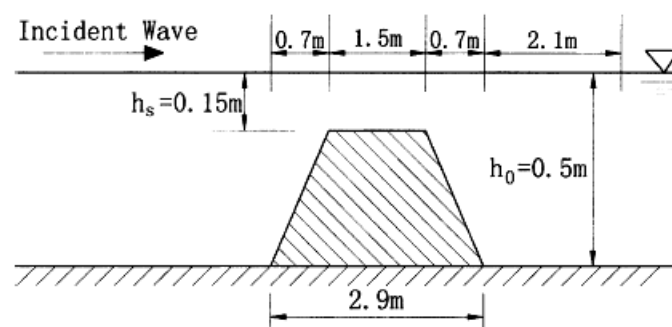
Συγκεκριμένα οι **Ohyama and Nadaoka (1994)** μελέτησαν τη παραμόρφωση της κυματικής μορφής κατά τη διέλευση χωρίς θραύση πάνω από ύφαλο αδιαπέρατο εμπόδιο μεταβλητού πλάτους. Δημιούργησαν επίσης το μοντέλο wave tank model το οποίο προσομοιάζει τη διάδοση και των μη γραμμικών κυμάτων.

Στη συνέχεια οι **Ohyama et al. (1995)** εφάρμοσαν 3 διαφορετικά μοντέλα για την εξέλιξη της κυματικής μορφής κατά τη διέλευση πάνω από ύφαλο αδιαπέρατο εμπόδιο σε μικρό βάθος από την επιφάνεια της θάλασσας.

Οι **Losada et al. (1997)** μελέτησαν την διέλευση κυματισμών πάνω από ύφαλη κατασκευή διαπερατή ή αδιαπέρατη (σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια) και συγκεκριμένα το φαινόμενο της αποσύνθεσης των μονοχρωματικών κυματισμών. Οι συγγραφείς ανέπτυξαν παράλληλα και ένα γραμμικό μοντέλο και σύγκριναν πειραματικά δεδομένα με αυτά του μοντέλου.

Με την ίδια περίπτωση μελέτης κυματισμών πάνω από ύφαλη κατασκευή, της εργασίας των Ohyama et al. (1995), ασχολήθηκαν και οι **Shen et al. (2004)**. Έγινε μαθηματική προσομοίωση για μη γραμμικούς κυματισμούς, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο VOF (Volume Of Fluid) για την περιγραφή της ελεύθερης επιφάνειας και το

μοντέλο τύρβης k-ε. Η τεχνική VOF έχει υιοθετηθεί ευρέως σε διάφορες τεχνικές εφαρμογές που αφορούν την αριθμητική προσομοίωση της ροής σε ελεύθερη επιφάνεια. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πειραματικές μετρήσεις (Σχήμα 3.4).

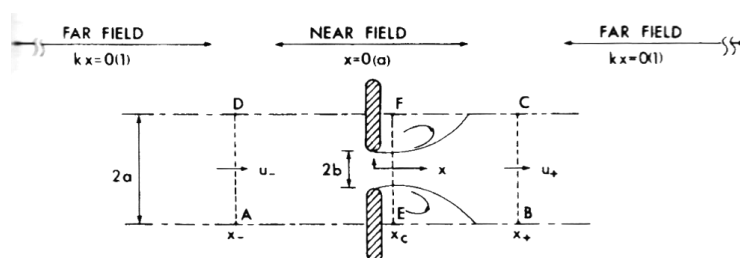


Σχήμα 3.4 Σκίτσο βυθισμένου εμποδίου (ύψαλη κατασκευή) και θέσεις των μετρητών κυμάτων που χρησιμοποίησαν στα πειράματά τους

3.3.3 Επίδραση στένωσης στη ροή των κυματισμών

Οι **Mei et al. (1985)** μελέτησαν θεωρητικά τη σκέδαση των κυματισμών, όταν αυτοί διέρχονται διαμέσου ενός διάκενου σε οριζόντιο εμπόδιο. Στην ιδανική θεωρία της σκέδασης των κυματισμών, συνήθως θεωρείται ότι η ροή είναι πάντα εφαπτομενική στο στερεό όριο ενός τοιχώματος ή μιας κατασκευής. Στην πραγματικότητα μια δυσμενής βαθμίδα πίεσης και το ιζώδες μπορούν να επιβραδύνουν το ρευστό κοντά σε μία απότομη κυρτή γωνία, αναγκάζοντας τη ροή να διαχωριστεί και να σχηματίσει στροβίλους υψηλής δινότητας, προκαλώντας σημαντικές απώλειες ενέργειας.

Οι Mei et al. (1985) αναπτύσσουν μια μαθηματική εξίσωση για την προσομοίωση της ροής στην περίπτωση της απότομης συστολής και διαστολής από την ύπαρξη ενός λεπτού οριζόντιου εμποδίου με ένα κάθετο διάκενο όπως αυτό του Σχήματος 3.5. Σε μια τέτοια περίπτωση το πεδίο χωρίζεται σε μακρινό και κοντινό, όπου στο μακρινό πεδίο η ροή είναι σταθερή και μονοδιάστατη, ενώ στο κοντινό πεδίο η ροή είναι αρκετά περίπλοκη καθώς επηρεάζεται από την παρουσία του εμποδίου.



Σχήμα 3.5. Οριζόντιο εμπόδιο με διάκενο, το οποίο προκαλεί απότομη συστολή και διαστολή της ροής

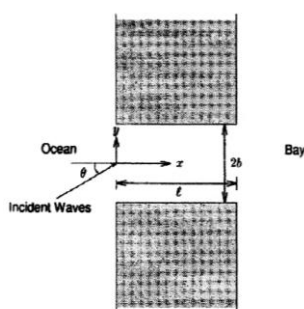
Η εξίσωση που αναπτύσσεται καταλήγει στον προσδιορισμό του συντελεστή κυματικής μετάδοσης καθώς και του συντελεστή ανάκλασης για την περίπτωση ενός τέτοιου εμποδίου. Η φόρμουλα είναι αρκετά γενικευμένη και με μικρές τροποποιήσεις μπορεί να συμπεριλάβει τις περιπτώσεις ενός διαπερατού

κυματοθραύστη, ενός κυματοθραύστη με διάκενα καθώς και την περίπτωση της εισόδου ενός λιμένα.

Οι Kirby et al (1994) και οι Dalrymple et al (1994) εξέτασαν τη διάδοση του νερού σε αγωγούς με διάφορες μορφές, όπως καμπύλα κανάλια.

Οι Dalrymple and Martin (1996) μελέτησαν τη μετάδοση των προσπιπτόντων κυματισμών σε διάκενα απείρου μήκους ορθογωνικής διατομής.

Αφού το 1996 είχαν μελετήσει την περίπτωση για διάκενα άπειρου μήκους ορθογωνικής διατομής, οι Dalrymple and Martin (2000), εφάρμοσαν τις αριθμητικές προσεγγίσεις στις οποίες είχαν προηγουμένως καταλήξει και για την περίπτωση καναλιών ορισμένου μήκους.



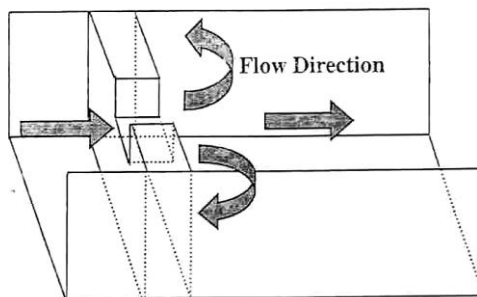
Σχήμα 3.6. Κάτοψη ανοίγματος ορισμένου μήκους

Οι ερευνητές κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα:

1. Ο περιορισμός του μήκους του ανοίγματος επιτρέπει την αλληλεπίδραση μεταξύ των κυματισμών στο εσωτερικό του ανοίγματος και των διαταραχών στη λιμενολεκάνη.
2. Η διάδοση της κυματικής ενέργειας στο κανάλι και η διεύθυνση μετάδοσης στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης.
3. Η ποσότητα ενέργειας στην είσοδο του διακένου δε διαφέρει σημαντικά από την ενέργεια στην έξοδό του.

Οι Bowen and McIver (2000) ασχολήθηκαν με τη μελέτη της μετάδοσης της κυματικής ενέργειας μέσω διακένου σε έναν ημιάπειρο (απ' τη μια πλευρά σταθερό όριο, απ' την άλλη άπειρο) διαπερατό κυματοθραύστη. Παράλληλα παρουσιάστηκε μια εμπεριστατωμένη προσεγγιστική λύση για περιπτώσεις μεγάλων διακένων. Τα αποτελέσματα δίνονται για να διευκρινιστεί η επιρροή της διαπερατότητας και η μεταβολή της γωνίας των προσπιπτόντων κυμάτων.

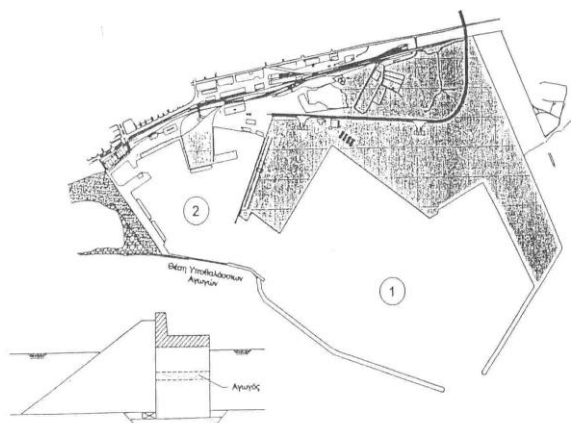
Με σκοπό την παρατήρηση της επίδρασης στένωσης (Σχήμα 3.7.) στη ροή των κυματισμών, έγινε χρήση από τους Shankar et al. (2001) ενός τρισδιάστατου μοντέλου.



Σχήμα 3.7. Κανάλι με απότομη μεταβολή της διατομής του (άνοιγμα)

Στην παραπάνω περίπτωση παρατηρείται απότομη συστολή και διαστολή της ροής. Όταν το νερό ρέει διαμέσου ενός ανοίγματος, στην ανάντη πλευρά θα καθοδηγηθεί από τα πλευρικά τοιχώματα και από τον πυθμένα του ανοίγματος με αποτέλεσμα τη γρήγορη αύξηση της ταχύτητας της ροής. Πίσω από το άνοιγμα θα επακολουθήσει διαχωρισμός της ροής από τα στερεά όρια και θα σχηματιστούν μεγάλης κλίμακας στρόβιλοι τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Στη μελέτη αυτή των Shankar *et al.* αναπτύσσεται ένα αποτελεσματικό και απλό τρισδιάστατο, πολλαπλών επιπέδων μοντέλο πεπερασμένων διαφορών. Στο μοντέλο αυτό το βάθος της ροής διαχωρίζεται σε πολλά επίπεδα όπου στο κάθε επίπεδο εφαρμόζεται ένα δισδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί τους μέσους όρους των παραμέτρων ως προς το βάθος. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα έδειξε ότι υπάρχει συμφωνία των δύο αυτών μεθόδων σε αποδεκτό βαθμό και συνεπώς το τρισδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο που ανέπτυξαν οι Shankar *et al.* είναι αποτελεσματικό και μπορεί να εφαρμοστεί για την προσομοίωση της ροής διαμέσου ενός ανοίγματος.

Οι Τσέκος και Δρέτας (2000) ασχολήθηκαν με την επέκταση του μαθηματικού μοντέλου μίας λιμενολεκάνης σε ένα σύστημα δύο συνεχόμενων λιμενολεκανών. Με την εργασία αυτή αποσκοπούσαν ακόμα στην εκτίμηση της ικανότητας ανανέωσης των υδάτων της λιμενολεκάνης, αποκλειστικά με τη βοήθεια φυσικών παραγόντων (παλίρροια, περατότητα κυματοθραυστών) και στη συμβολή συστήματος υποθαλάσσιων αγωγών στην αύξηση του ρυθμού ανανέωσης υδάτων. Παράλληλα πραγματοποίησαν και μία εφαρμογή για την επέκταση του λιμένα της Αλεξανδρουπόλεως με τη δημιουργία νέας εξωτερικής λιμενολεκάνης (Σχήμα 3.8.). Η επέκταση αυτή ήταν αναμενόμενο να δημιουργήσει προβλήματα ρύπανσης στην υπάρχουσα λιμενολεκάνη (λιμενολεκάνη 2 του Σχήματος 3.8.) στο εσωτερικό του λιμένα.



Σχήμα 3.8 Ο λιμένας της Αλεξανδρουπόλεως.

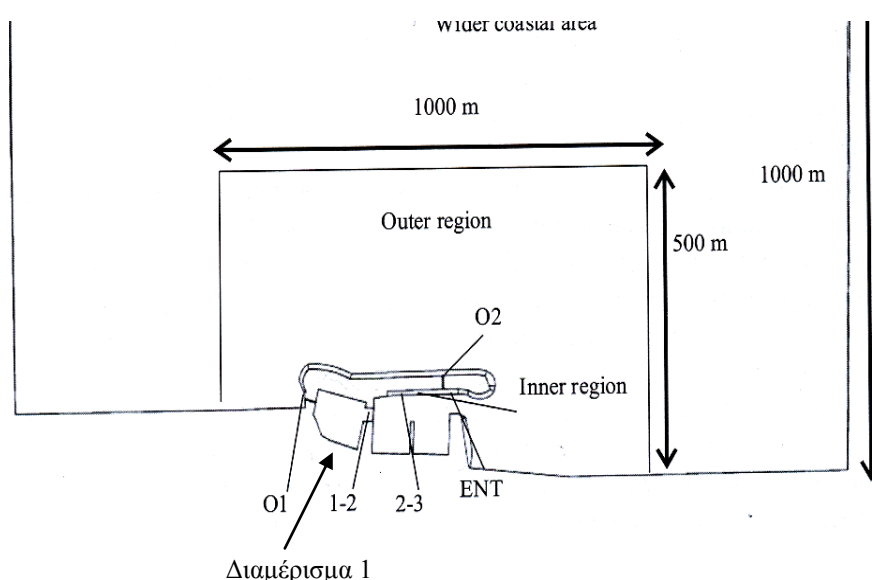
Κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η εγκατάσταση υποθαλάσσιων αγωγών ανανέωσης επιφέρει σημαντική βελτίωση της ποιότητας των νερών.

3.4 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΤΟΥ Ε.Μ.Π

Στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π την τελευταία δεκαετία διερευνάται το φαινόμενο της κυματικής διείσδυσης διαμέσου λιμενικών κατασκευών καθώς επίσης και η δυνατότητα ανανέωσης των υδάτων σε λιμένες, τόσο σε αριθμητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο.

3.4.1 Αριθμητική προσομοίωση

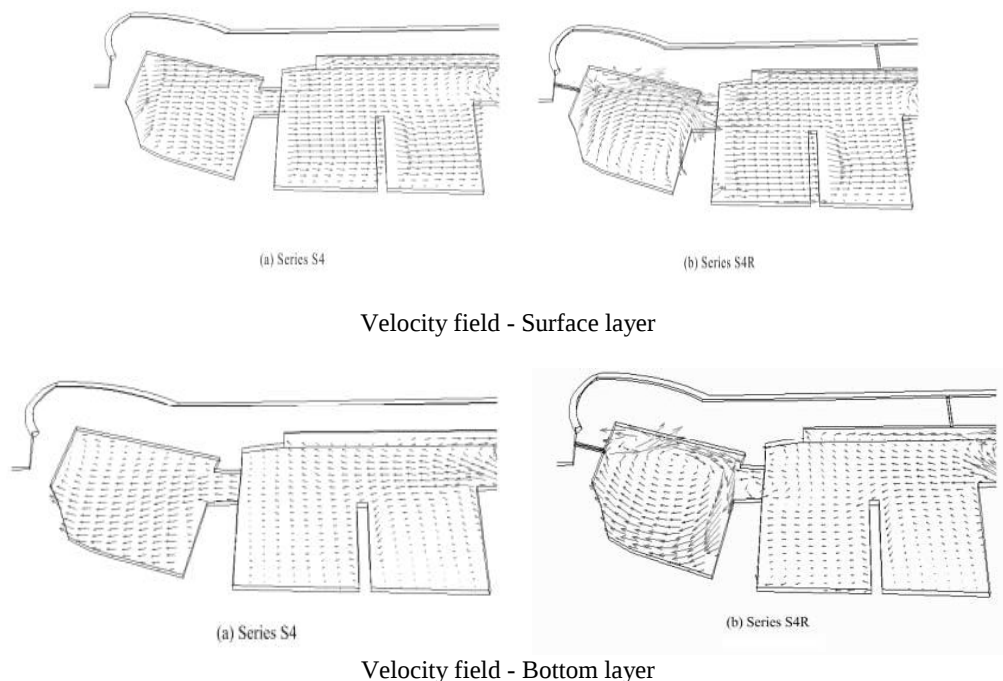
Οι **Stamou *et al.* (2004)**, ασχολήθηκαν με τη βελτίωση της τεχνολογίας σχεδιασμού των μαρίνων χρησιμοποιώντας υδροδυναμικά μοντέλα. Συγκεκριμένα εφάρμοσαν το **μοντέλο CFX-5** (AEA Technology, 1999) στη μαρίνα Λάτση στην Κύπρο. Η περιοχή μελέτης, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.9., αποτελείται από τις ακόλουθες υποπεριοχές : α) την περιοχή της μαρίνας (εσωτερική και εξωτερική) και β) την ευρύτερη παράκτια περιοχή (wider coastal area). Η εσωτερική περιοχή της μαρίνας (inner region) η οποία επικοινωνεί με την εξωτερική περιοχή (outer region) διαμέσου της εισόδου (ENT) της, αποτελείται από τρία διαμερίσματα αριθμημένα ως 1, 2 και 3 στο Σχήμα 3.9. Τα διαμερίσματα αυτά επικοινωνούν μεταξύ τους διαμέσου των ανοιγμάτων 1-2 και 2-3.



Σχήμα 3.9. Κάτοψη του πεδίου εφαρμογής, μαρίνας Λατσίου.

Το μικρό πλάτος της εισόδου της μαρίνας καθώς και η θέση της δεν επιτρέπουν την εισροή και εκροή σημαντικών ποσοτήτων νερού με αποτέλεσμα να παρατηρούνται υψηλές τιμές του χρόνου ανανέωσης και συνεπώς σημαντικά προβλήματα ανανέωσης του νερού ιδιαίτερα στο διαμέρισμα 1 (Σχήμα 3.9). Μεταξύ διάφορων εναλλακτικών

λύσεων, η κατασκευή δύο ανοιγμάτων (αγωγών ανανέωσης) θεωρήθηκε ως η πιο απλή και η πιο οικονομική. Τα ανοίγματα αυτά τα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.9. ως O_1 και O_2 . Για την μελέτη της επίδρασης των ανοιγμάτων αυτών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο CFX-5. Στις εξισώσεις της ποσότητας κίνησης λήφθηκε υπ' όψη και την επίδραση του ανέμου (Σχήμα 3.10). Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις σειρές υπολογισμών για τέσσερις διευθύνσεις του ανέμου (NE, NW, E, W) και για διάφορες τιμές της έντασης του. Τα χαρακτηριστικά αυτά που εξετάστηκαν επιλέχθηκαν με βάση τους επικρατούντες ανέμους στην περιοχή. Οι τέσσερις αυτές σειρές επαναλήφθηκαν και για την περίπτωση που κατασκευαστούν στην μαρίνα τα δύο ανοίγματα.



Σχήμα 3.10 Πεδία ταχύτητας

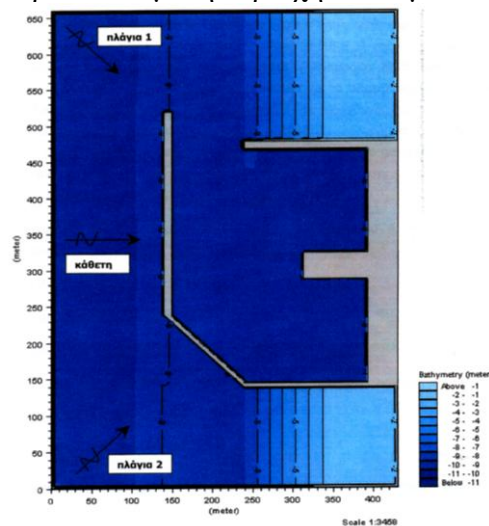
Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη αυτή έχουν ως εξής:

Το πρώτο άνοιγμα παίζει σημαντικό ρόλο στην ανανέωση των υδάτων στο εσωτερικό της μαρίνας, ενώ η επίδραση του δεύτερου ανοίγματος είναι μόνο τοπική και δευτερεύουσας σημασίας. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στον προσανατολισμό και στη θέση των δύο ανοιγμάτων σε σχέση με την είσοδο της μαρίνας.

Όπως έχει αναφερθεί ξανά ο βέλτιστος σχεδιασμός της διάταξης των στομιών μπορεί να γίνει με γνώμονα δύο αλληλοαναιρούμενα κριτήρια, τα οποία είναι ο χρόνος ανανέωσης (ή βαθμός ανανέωσης) και η κυματική διαταραχή (ή ο παρεχόμενος βαθμός προστασίας). Με το θέμα της βελτιστοποίησης διατάξεων αγωγών ανανέωσης ασχολήθηκαν οι **Φουντούλης και Μέμος (2004)**. Στην έρευνά τους έγινε χρήση μαθηματικών μοντέλων που διατίθενται στην αγορά. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το **κυματικό μοντέλο MIKE 21 PMS** το **υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 21 FM (HD)**, και το μοντέλο κυματικής διαταραχής **MIKE 21 BW**.

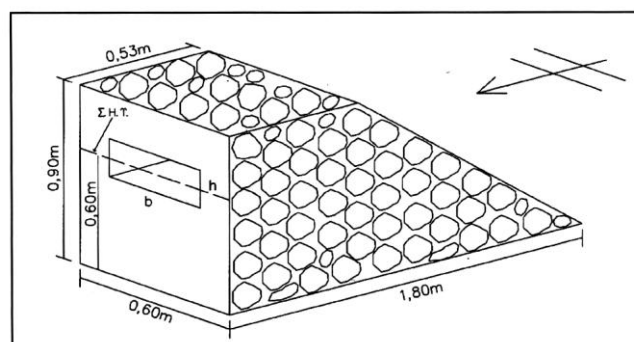
Η εν λόγω μεθοδολογία αναπτύχθηκε σε ένα τυπικό λιμένα όπου εξετάστηκαν διάφορες διατάξεις αγωγών ανανέωσης ως προς τη θέση και τον αριθμό τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η λύση των δύο διακένων, το ένα επί του προσήνεμου μόλου και το άλλο κοντά στη ρίζα του μόλου θεωρήθηκε ότι αποτελεί μία αρκετά

ικανοποιητική λύση. Η διάνοιξη ενός διάκενου στην εκτιθέμενη περιοχή του μόλου δεν ήταν η ενδεδειγμένη, καθώς προκαλούνταν έντονη διαταραχή, ενώ η ανανέωση των υδάτων δεν είναι η απαιτούμενη. Οι ερευνητές κατέληξαν ότι σημαντικό κριτήριο στο προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης αποτελεί η επικρατούσα διεύθυνση ανέμου. Έτσι λοιπόν έκριναν πως η λύση της διάνοιξης δύο διακένων ενδείκνυται στην περίπτωση όπου η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου είναι αυτή η οποία προσβάλλει την είσοδο του λιμένα, ενώ η λύση της διάταξης του ενός διακένου στη ρίζα του μόλου προτιμάται στην περίπτωση που η κύρια διεύθυνση του ανέμου είναι αυτή που προσβάλλει την προστατευμένη περιοχή του λιμένα.



Σχήμα 3.11 Ψηφιακή απεικόνιση οριζοντιογραφίας τυπικού λιμένα εφαρμογής και κύριες διευθύνσεις ανέμου και κύματος που εξετάστηκαν

Η **Μιχαλοπούλου (2008)** διερεύνησε και συνέκρινε δύο μοντέλα ως προς τη δυνατότητα να προσομοιώνουν τη διέλευση κυματισμού διαμέσου αγωγού ανανέωσης με ικανοποιητική ακρίβεια. Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το **FLOW-3D** και ο εμπορικός κώδικας **FLOW-3D**. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με αντίστοιχα από πειραματικές μετρήσεις (Ακύλας, 2006) που είχαν διεξαχθεί στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π. Κατά την προσομοίωση ο αγωγός ανανέωσης ήταν συγκεκριμένων διαστάσεων ($b \times h \times l = 24\text{cm} \times 12\text{cm} \times 100\text{cm}$), τοποθετημένος σε κυματοθραύστη με κεκλιμένη την προσήνεμη παρεία και κατακόρυφη την υπήνεμη (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12 Σκαρίφημα του φυσικού ομοιώματος του κυματοθραύστη με αγωγό ανανέωσης ύδατος.

Επίσης ο κυματισμός που αναπτύχθηκε είχε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Τα συμπεράσματα από την εφαρμογή του υπολογιστικού κώδικα **FLOW-3DL** είναι:

Για τους υπολογισμούς που έγιναν στη γεωμετρία με τον κυματοθραύστη και τον αγωγό ανανέωσης, διαπιστώθηκε ότι ο κώδικας στην υπάρχουσα μορφή του έχει κάποιες αδυναμίες, οι οποίες είναι:

1. Δεν διαθέτει τη δυνατότητα προσομοίωσης διαπερατών κατασκευών, στοιχείο το οποίο, σε φαινόμενα αυτής της κλίμακας, είναι σημαντικό.
2. Δεν διαθέτει εξισώσεις υπολογισμού της ανύψωσης τη ελεύθερης επιφάνειας ικανή να περιγράψει πολύπλοκα κυματικά προφίλ όπως αυτά αναπτύσσονται κατάντη του αγωγού ανανέωσης.

Τα συμπεράσματα από την εφαρμογή του υπολογιστικού κώδικα **FLOW-3D** είναι:

A) Από τους προκαταρτικούς υπολογισμούς που έγιναν διαπιστώθηκε ότι:

1. Ο κώδικας έχει τη δυνατότητα ανάπτυξης και διάδοσης βραχέων κυματισμών με ικανοποιητική ακρίβεια.
2. Για τα δεδομένα βάθη ροής, οι τιμές επιφανειακής τραχύτητας των στερεών ορίων επηρεάζουν σε μικρό βαθμό τα αποτελέσματα.

B) Όσον αφορά στην αλληλεπίδραση των κυμάτων με τον κυματοθραύστη και τη διέλευση μέσα από τον αγωγό ανανέωσης, διαπιστώθηκε ότι:

1. Ο κώδικας μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια το πολύπλοκο κυματικό προφίλ που αναπτύσσεται στην υπήνεμη πλευρά του αγωγού, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη μέχρι και 2 υβώσεων πέραν της κύριας κορυφής μέσα σε μία κυματική περίοδο.
2. Για σταθερές διαστάσεις αγωγού, τα χαρακτηριστικά της κατασκευής (διαπερατότητα, τραχύτητα) είναι αυτά που καθορίζουν κατά κύριο λόγο τη μορφή της ελεύθερης επιφάνειας.
3. Στην περίπτωση διαπερατού κυματοθραύστη, η ροή μέσα από το σώμα του τείνει να ομαλοποιήσει την ελεύθερη επιφάνεια στην υπήνεμη πλευρά, μειώνοντας το αναπτυσσόμενο ύψος κύματος.

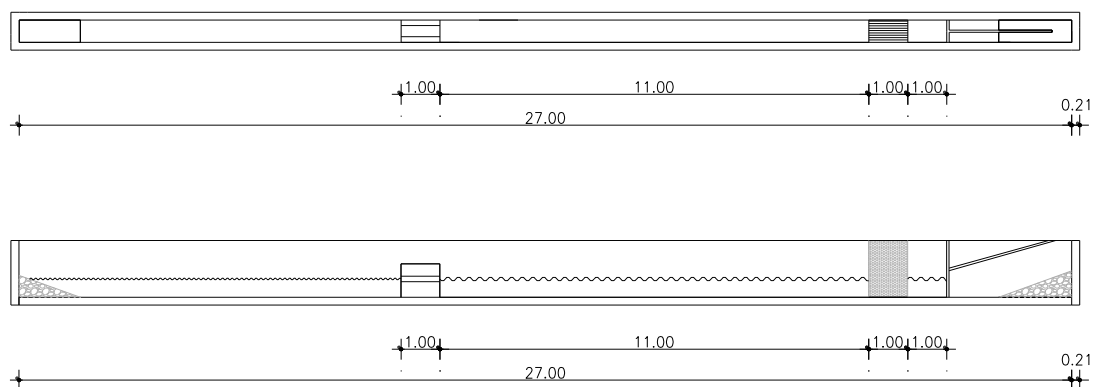
3.4.2 Πειραματική προσομοίωση

3.4.2.1 Πειραματικές μετρήσεις σε δισδιάστατη διώρυγα δοκιμών

Τα πειράματα διεξήχθησαν στη διώρυγα κυματισμών «Δημήτρης Κοιλάκος» του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π.



Σχήμα 3.13 Φωτογραφία της διώρυγας κυματισμών βαρύτητας «Δημήτρης Κοιλάκος».



Σχήμα 3.14 Σχέδιο διώρυγας δοκιμών (κάτοψη και τομή)

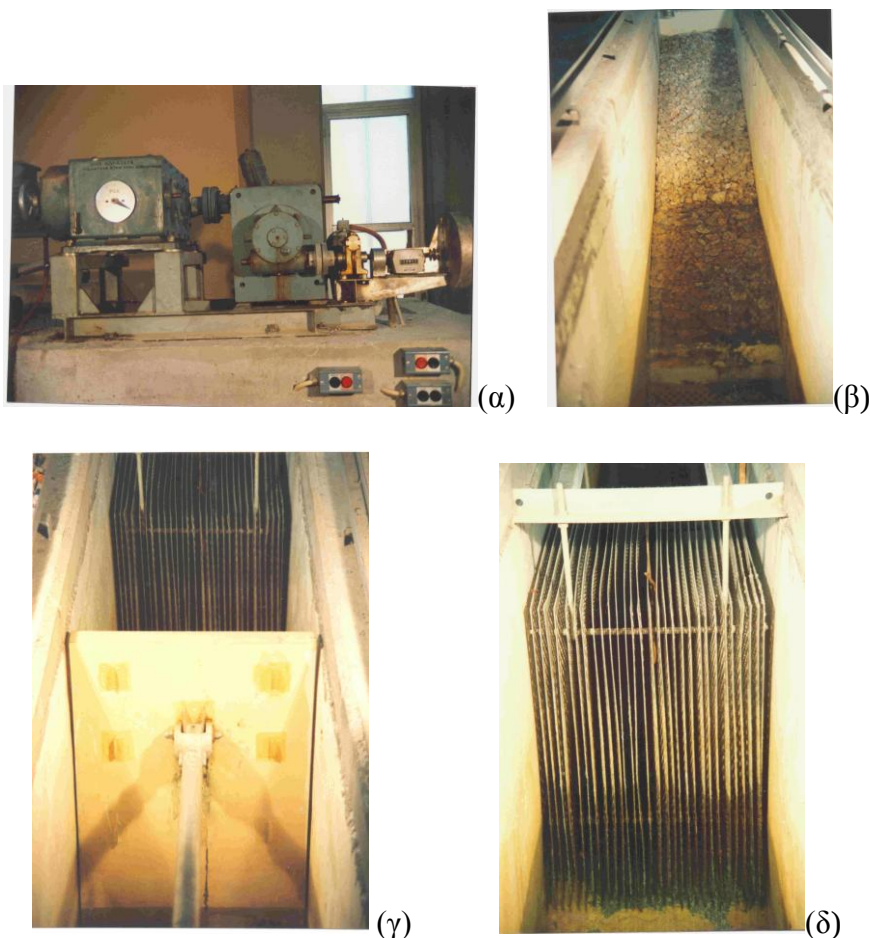
Η διώρυγα κυματισμών βαρύτητας του Ε.Λ.Ε έχει σχήμα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με εσωτερικές διαστάσεις 27,00m * 0,60m * 1,50m και πάχος τοιχίου 0,21m.

Στο δεξιό άκρο της διώρυγας είναι τοποθετημένη κυματογεννήτρια (Σχήμα 3.15.α) η οποία έχει τη δυνατότητα παραγωγής δισδιάστατων μονοχρωματικών κυματισμών.

Η περίοδος των κυμάτων καθορίζεται από την ταχύτητα της κυματογεννήτριας, ενώ το ύψος κύματος από την εκκεντρότητα της κυματογεννήτριας.

Η διώρυγα είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα με διατομή ανεστραμμένου Π και στηρίζεται σαν συνεχής δοκός σε βάθρα από οπλισμένο

σκυρόδεμα. Στο αριστερό άκρο της διώρυγας υπάρχει αποσβεστήρας κυμάτων ο οποίος συνίσταται από πρανές με κροκάλες που καλύπτεται με ψιλό συρματόπλεγμα έτσι ώστε να εμποδίζεται η αποκόλληση τους (Σχήμα 3.15.β). Ο ίδιος αποσβεστήρας υπάρχει και στο δεξιό άκρο της διώρυγας πίσω από το πτερύγιο του κυματιστήρα. Στο δεξιό άκρο της διώρυγας, ένα μέτρο περίπου από το πτερύγιο της κυματογεννήτριας (Σχήμα 3.15.γ) και κατά μήκος της διώρυγας, υπάρχει κατασκευή από παράλληλες διάτρητες μεταλλικές πλάκες (Σχήμα 3.15.δ) διαστάσεων 1,0m x 1,0m, για την απόσβεση των πλευρικών διαταραχών και την αποκατάσταση της δισδιάστατης ροής.



Σχήμα 3.15. (α) Η κυματογεννήτρια (β) Αποσβεστήρας κυμάτων (γ) Το πτερύγιο του κυματιστήρα (δ) Διάτρητες μεταλλικές πλάκες.

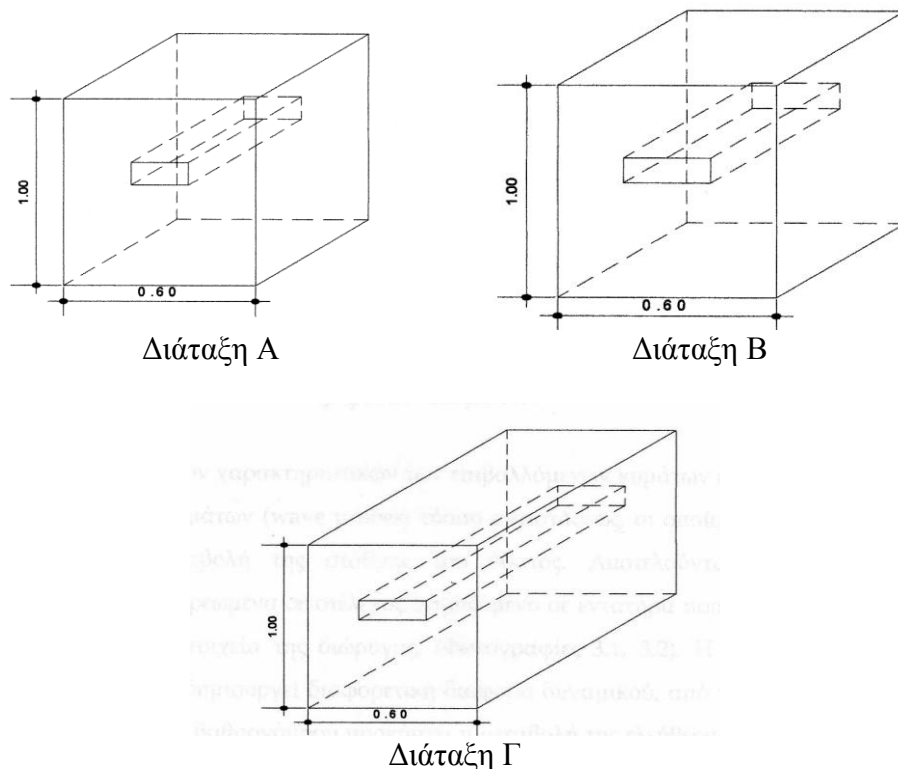
Αγωγοί ανανέωσης

Για τη μελέτη του φαινομένου της κυματικής διεύθυνσης μέσω αγωγών ανανέωσης έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις, για δύο είδη λιμενικών κατασκευών:

- Κυματοθραύστης με κατακόρυφο μέτωπο (Γιαννάκη, 2005)
- Κυματοθραύστης από φυσικούς ογκόλιθους με κεκλιμένο πρανές (Ακύλας, 2006; Μονιούδη, 2006; Μπρέμπος και Ντεβές, 2007)

A. Κυματοθραύστης με κατακόρυφο μέτωπο

Στη περίπτωση αυτή έγιναν μετρήσεις σε ομοίωμα κυματοθραύστη δύο διαφορετικών διαστάσεων και για τρεις συνολικά διαφορετικές διαστάσεις αγωγού ανανέωσης (Γιαννάκη, 2005) (Σχήμα 3.16.).



Σχήμα 3.16. Σκαριφήματα πειραματικών διατάξεων για κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο.

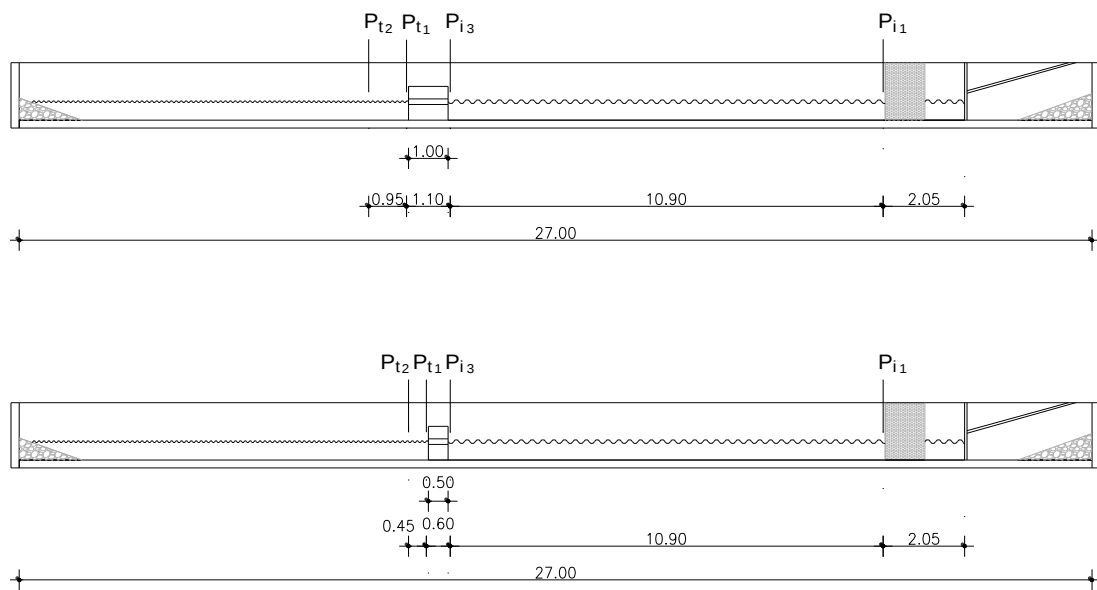
Τα στοιχεία των πειραματικών διαστάσεων που ελέχθησαν δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγωγού ανανέωσης

Διαστάσεις αγωγού ανανέωσης				
Κωδικός διάταξης	Ύψος κατασκευής (m)	Μήκος l (m)	Πλάτος b (m)	Ύψος h (m)
A	1,00	0,50	0,18	0,12
B	1,00	0,50	0,24	0,12
Γ	1,00	1,00	0,24	0,12

Σε όλες τις περιπτώσεις η Στάθμη Ηρεμούντος Ύδατος βρίσκονταν στο μέσο του ύψους του αγωγού ανανέωσης ($S = 0$).

Για κάθε διάταξη εξετάστηκαν 16 διαφορετικοί κυματισμοί. Για την καταγραφή των χαρακτηριστικών του κύματος χρησιμοποιήθηκαν 4 μετρητές τύπου αντιστάσεως από τους οποίους οι δύο τοποθετήθηκαν σε σταθερές θέσεις από το περύγιο της κυματογεννήτριας, ενώ οι άλλοι δύο που βρίσκονταν στη υπήνεμη πλευρά του ομοιώματος άλλαξαν θέση ανάλογα με το μήκος του αγωγού και τη διάταξη που εξετάζονταν.



Σχήμα 3.17 Θέση μετρητών στη διώρυγα δοκιμών για μήκος αγωγού 1m και 0,50m αντίστοιχα, για την περίπτωση κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω μελέτη έχουν ως εξής:

1. Με την αύξηση του πλάτους του αγωγού ανανέωσης αυξάνει το ύψος του διεισδύοντος κυματισμού και μείωση του χρόνου ανάκτησης του διαλυμένου οξυγόνου της υπήνεμης πλευράς.
2. Με την αύξηση του μήκους του αγωγού παρατηρείται μείωση του ύψους του διεισδύοντος κυματισμού και αύξηση του χρόνου ανάκτησης του διαλυμένου οξυγόνου της υπήνεμης πλευράς.
3. Με την αύξηση του ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού, αυξάνει το ύψος του διεισδύοντος κυματισμού και μειώνεται ο χρόνος ανάκτησης του διαλυμένου οξυγόνου της υπήνεμης πλευράς και για τις τρεις διατάξεις.
4. Με την αύξηση της περιόδου του προσπίπτοντος κυματισμού, αυξάνει το ύψος του διεισδύοντος κυματισμού και για τις τρεις διατάξεις.
5. Ο συντελεστής κυματικής διείσδυσης, μειώνεται με την αύξηση της καμπυλότητας του προσπίπτοντος κυματισμού.

B. Κυματοθραύστης από φυσικούς ογκόλιθους με κεκλιμένο πρανές

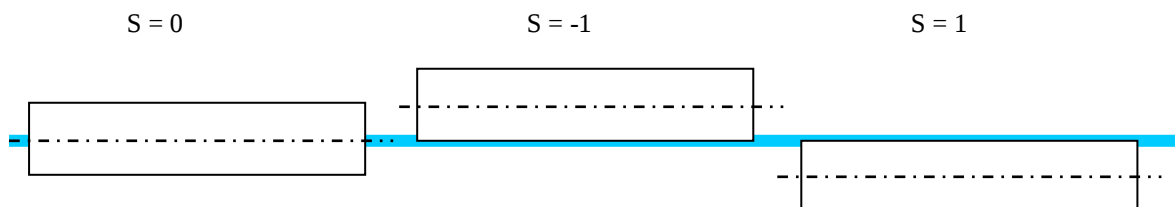
Για τη μελέτη της κυματικής διείσδυσης μέσω αγωγού ανανέωσης σε κυματοθραύστη από φυσικούς ογκόλιθους διεξήχθησαν συνολικά 660 μετρήσεις (Ακύλας, 2006; Μονιούδη, 2006; 12 διατάξεις X 15 κυματισμούς και Μπρέμπος-Ντεβές, 2007; 15 διατάξεις X 32 κυματισμούς).

Πιο συγκεκριμένα κατασκευάστηκε στη διώρυγα κυματισμών Δημήτρης Κοιλάκος φυσικό ομοίωμα κυματοθραύστη από φυσικούς ογκόλιθους με κλίση πρανών 1:1,5, στον οποίο τοποθετήθηκαν συνολικά 12 αγωγοί ανανέωσης διαφορετικών γεωμετρικών διαστάσεων.

Το βάθος του νερού ήταν για όλες τις πειραματικές μετρήσεις $d=60\text{cm}$ (απόσταση της Σ.Η.Υ. από τον πυθμένα).

Αρχικά ο άξονας του αγωγού ανανέωσης τοποθετήθηκε στην Στάθμη Ηρεμούντος Ύδατος ($S=0$) (Μονιούδη, 2006; Ακύλας, 2006).

Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στο ομοίωμα του κυματοθραύστη 15 αγωγοί ανανέωσης διαφορετικών γεωμετρικών διαστάσεων (Μπρέμπος και Ντεβές, 2007) και ακολούθησαν μετρήσεις, εκτός της περίπτωσης για $S = 0$ και για τις περιπτώσεις που η Σ.Η.Υ βρίσκεται στη βάση $S = -1$ ή στο άνω όριο $S = 1$ του αγωγού ανανέωσης.



Σχήμα 3.18 Εξεταζόμενες θέσεις αγωγού ανανέωσης σε σχέση με Σ.Η.Υ.

Οι διαφορετικές διατάξεις αγωγών ανανέωσης που μελετήθηκαν για τις διαφορετικές διαστάσεις (b , h , l) των αγωγών ανανέωσης και για τις διαφορετικές θέσεις των αγωγών σε σχέση με τη Σ.Η.Υ., συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά εξεταζόμενων διατάξεων αγωγών ανανέωσης

α/α διάταξης	Διαστάσεις αγωγού			Θέση άξονα αγωγού σε σχέση με Σ.Η.Υ.		
	Πλάτος b (cm)	Ύψος h (cm)	Μήκος l (cm)	S = 0	S = -1	S = 1
1	30	18	100	√		
2	24			√		
3	18			√		
4	12			√		
5	30	15		√	√	√
6	24			√		
7	18			√	√	√
8	12			√		
9	30	12		√	√	√
10	24			√		
11	18			√	√	√
12	12			√	√	√

Σχετικά με τον άνω πίνακα διευκρινίζεται ότι υπήρξαν 5 διατάξεις αγωγών ανανέωσης για $S = 0$, κοινές και στις τρεις προαναφερθείσες εργασίες. Υπήρξαν επί πλέον 7 διατάξεις αγωγών ανανέωσης για $S = 0$, κοινές στις δύο από τις τρεις εργασίες (Ακύλας, Μονιούδη). Τέλος υπήρξαν 10 ακόμη διατάξεις αγωγών ανανέωσης για $S = -1$ και $S = 1$, της τρίτης εργασίας, χωρίς να υπάρχει κάτι αντίστοιχο στις προηγούμενες εργασίες.

Για κάθε διάταξη αγωγού ανανέωσης μελετήθηκαν από 15 έως και 32 διαφορετικοί μονοχρωματικοί προσπίπτοντες κυματισμοί.

Στις δύο πρώτες εργασίες (Ακύλας, Μονιούδη) επιλέχθηκαν 15 διαφορετικά κύματα τα οποία ομαδοποιούνται σε τρεις διαφορετικές περιόδους, όπου κάθε περίοδος συνδυάζεται με πέντε διαφορετικά ύψη κύματος. Στην τρίτη εργασία (Μπρέμπος-

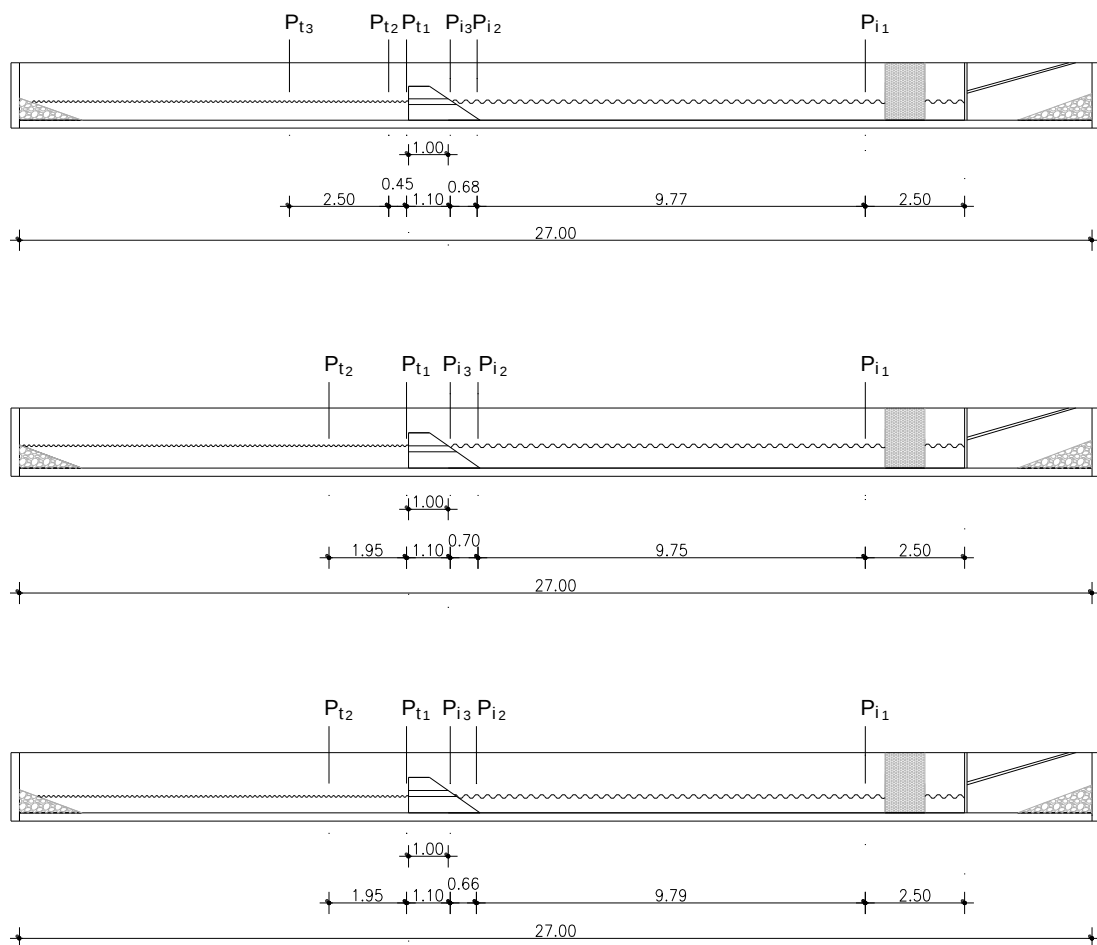
Ντεβές) μελετήθηκαν 32 διαφορετικοί μονοχρωματικοί προσπίπτοντες κυματισμοί (οι 14 εξ' αυτών είχαν χρησιμοποιηθεί και στις δύο πρώτες εργασίες)..

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά (T, H₀) των παραγόμενων κυματισμών για τις 33 διαφορετικές ρυθμίσεις της κυματογεννήτριας (ταχύτητα, εκκεντρότητα)

Πίνακας 3.3 Ρυθμίσεις κυματογεννήτριας και χαρακτηριστικά παραγόμενου κυματισμού

α/α	Ταχύτητα κυματογεννήτριας	Εκκεντρότητα κυματογεννήτριας	Περίοδος κύματος T (sec)	Ύψος κύματος H ₀ (cm)
Κύμα 1	2	250	1,48	1,3
Κύμα 2	2	500	1,48	2,7
Κύμα 3	2	600	1,48	3,5
Κύμα 4	2	750	1,48	3,9
Κύμα 5	2	1000	1,48	5,2
Κύμα 6	2	1250	1,48	6,5
Κύμα 7	2	1500	1,48	8,7
Κύμα 8	2	2000	1,48	11,1
Κύμα 9	3	250	1,25	2,3
Κύμα 10	3	500	1,25	4,2
Κύμα 11	3	600	1,25	5,1
Κύμα 12	3	750	1,25	6,2
Κύμα 13	3	1000	1,25	7,8
Κύμα 14	3	1250	1,25	9,5
Κύμα 15	3	1500	1,25	10,6
Κύμα 16	3	2000	1,25	13,1
Κύμα 17	4	250	1,06	2,3
Κύμα 18	4	500	1,06	4,6
Κύμα 19	4	1000	1,06	9,8
Κύμα 20	4	1500	1,06	12,7
Κύμα 21	4	1600	1,06	14,2
Κύμα 22	4	1750	1,06	14,3
Κύμα 23	4	2000	1,06	14,6
Κύμα 24	4	2250	1,06	14,7
Κύμα 25	4	2500	1,06	15,4
Κύμα 26	5	250	0,90	2,5
Κύμα 27	5	500	0,90	4,6
Κύμα 28	5	750	0,90	6,6
Κύμα 29	5	1000	0,90	8,6
Κύμα 30	5	1200	0,90	9,2
Κύμα 31	5	1400	0,90	10,1
Κύμα 32	5	1600	0,90	10,2
Κύμα 33	5	1800	0,90	10,6

Για την καταγραφή των κυματικών χαρακτηριστικών (ύψος H και περίοδος T) χρησιμοποιήθηκαν έως και 6 μετρητές τύπου αντιστάσεως, σε διαφορετικές αποστάσεις από το περύγιο της κυματογεννήτριας.



Σχήμα 3.19 Θέση μετρητών στη διώρυγα δοκιμών, για μήκος αγωγού 1m, σε διαφορετικές περιπτώσεις πειραμάτων με κυματοθραύστη κεκλιμένου μετώπου

Στα πειράματά τους οι **Ακύλας (2006)** και **Μονιούδη (2006)** ασχολήθηκαν με το θέμα της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού ανανέωσης. Στα πειράματά τους οι **Μπρέμπος και Ντεβές (2007)** προσπάθησαν να διερευνήσουν και την επιρροή της θέσης του αγωγού ανανέωσης σε σχέση με την επιφάνεια του ύδατος. Στη συνέχεια ακολούθησε προσπάθεια με επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων μέσω διαστατικής ανάλυσης και με το στατιστικό λογισμικό πακέτο SYSTAT v13.0 (SPSS, 2004) προκειμένου να προκύψει εξίσωση η οποία περιγράφει τη μεταβολή του συντελεστή κυματικής διείδυσης συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού.

Στην περίπτωση που ο αγωγός ανανέωσης τοποθετείται με τον άξονά του στη Στάθμη Ηρεμούντος Ύδατος ($S = 0$), η περιβάλλουσα των συμπερασμάτων των τριών εργασιών, συνοψίζεται στα ακόλουθα :

α) Σε σχέση με την επιρροή της κλίσης του μετώπου του κυματοθραύστη διαπιστώθηκε ότι :

- Στην περίπτωση που το μέτωπο του προσήνεμου μώλου στον οποίο έχει τοποθετηθεί αγωγός ανανέωσης είναι κατακόρυφο παρατηρείται εισροή

μεγαλύτερης ποσότητας υδάτων, διαμέσου του αγωγού, από ότι στην περίπτωση που το μέτωπο του προσήνεμου μώλου είναι κεκλιμένο (στην περίπτωση του κεκλιμένου μετώπου, μέρος της κυματικής ενέργειας που προσπίπτει μετατρέπεται σε ενέργεια τριβής, ενώ στην περίπτωση του κατακόρυφου μετώπου δεν χάνεται ενέργεια λόγω τριβών και επομένως μεγαλύτερο ποσοστό της προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας διεισδύει μέσα από τον αγωγό).

- Σε κατασκευές με μικρότερη κλίση του εξωτερικού τους πρανούς παρατηρείται μεγαλύτερη διείσδυση από ότι σε κατασκευές με μεγαλύτερη κλίση εξωτερικού πρανούς (πάνω στο μέτωπο με τη μικρότερη κλίση, λόγω μεγαλύτερης διαδρομής, παρουσιάζονται μεγαλύτερες απώλειες της κυματικής ενέργειας λόγω τριβών).
- Στην περίπτωση του κατακόρυφου μετώπου παρατηρείται μεγαλύτερη ανάκλαση κατά την πρόσπτωση των κυματισμών σε σχέση με το κεκλιμένο.

β) Σε σχέση με την επιρροή των διαστάσεων του αγωγού ανανέωσης στην κυματική διείσδυση (συνεπώς και στον συντελεστή K_t) διαπιστώθηκε ότι :

- Αγωγοί ανανέωσης μεγαλύτερης διατομής εμφανίζουν μεγαλύτερο ποσοστό κυματικής διείσδυσης από αγωγούς μικρότερης διατομής.
- Με την ελάττωση του πλάτους b του αγωγού ανανέωσης, το ποσοστό της κυματικής ενέργειας ελαττώνεται, δηλαδή μειώνεται ο συντελεστής K_t , ενώ με την αύξηση του πλάτους το K_t αυξάνεται.
- Η κυματική ενέργεια που εισέρχεται στην λιμενολεκάνη επηρεάζεται από το ύψος του αγωγού ανανέωσης και αυξάνεται ο K_t με την αύξηση του ύψους h της διατομής (Μπρέμπος-Ντεβές). Κατ' άλλον (Ακύλας), από τις διατάξεις που δοκίμασε, τα υψηλότερα ποσοστά διεισδύοντος κυματισμού παρατηρήθηκαν σε αυτές με μεσαίο ύψος αγωγού.
- Για το ίδιο εμβαδόν διατομής, όσο αυξάνει ο λόγος του ύψους του αγωγού προς το πλάτος του (h/b), ο συντελεστής κυματικής διείσδυσης (H_t/H_i) μειώνεται.
- Αγωγοί ανανέωσης μεγαλύτερου μήκους εμφανίζουν ελαφρώς μικρότερο ποσοστό διερχόμενου κυματισμού από αγωγούς μικρότερου μήκους. Άρα το μήκος του αγωγού φαίνεται να μην έχει σημαντική επίδραση στο φαινόμενο της κυματικής διείσδυσης.

γ) Σε σχέση με την επιρροή των χαρακτηριστικών του προσπίπτοντος κυματισμού στην κυματική διείσδυση, διαπιστώθηκε γενικώς ότι :

- Με την αύξηση του προσπίπτοντος κυματισμού αυξάνεται το ύψος του διεισδύοντος κυματισμού μέχρι ενός σημείου (για κύματα ύψους μεγαλύτερου από μια τιμή, η είσοδος του αγωγού κατακλύζεται από το διεισδύον κύμα, οπότε περαιτέρω αύξηση του ύψους του κύματος δεν επιτρέπει εισροή επιπλέον ποσότητας υδάτων. Η τιμή αυτή του ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού, πέρα από την οποία δεν παρατηρείται εισροή επιπλέον ποσότητας ύδατος διαφέρει ανάλογα με την περίοδο του κύματος).
- Όσο αυξάνει το ύψος του κύματος, ο ρυθμός μείωσης του συντελεστή κυματικής διείσδυσης σε συνάρτηση με την παράμετρο h/b ελαττώνεται και μάλιστα για μεγάλα ύψη κύματος ο συντελεστής κυματικής διείσδυσης είναι σχεδόν σταθερός για τις διάφορες τιμές της παραμέτρου h/b . Για μεγάλα συνεπώς ύψη κύματος το ποσοστό του διερχόμενου κυματισμού παύει πλέον να εξαρτάται από τη σχέση h/b της διατομής του αγωγού.

- Με την αύξηση της καμπυλότητας του προσπίπτοντος κυματισμού το ποσοστό του διεισδύοντος κυματισμού (H_t/H_i) ελαττώνεται.
- Κύματα μεγαλύτερης περιόδου (δηλαδή μεγαλύτερου μήκους L) και συνεπώς μικρότερης καμπυλότητας ($\gamma=H/L$) παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανάκλαση κατά την πρόσπτωση τους πάνω στο κεκλιμένο μέτωπο.
- Για κύματα με μεγαλύτερη καμπυλότητα το φαινόμενο της ανάκλασης είναι ασθενές με εξαίρεση τις πολύ μικρές διατομές του αγωγού όπου το φαινόμενο γίνεται εντονότερο, εξαιτίας της μεγαλύτερης επιφάνειας του πρηνούς και του μικρότερου ποσοστού διείσδυσης. Παρατηρήθηκε επίσης ότι για πολύ μικρές διατομές του αγωγού το φαινόμενο της ανάκλασης επηρεάζει τον μετρητή 2 ανάντη όχι όμως και τον μετρητή 1 πλησίον της κυματογεννήτριας.
- Το ύψος του διεισδύοντος κυματισμού είναι δυνατόν να περιγραφεί συναρτήσει του προσπίπτοντος κυματισμού μέσω εξίσωσης της μορφής : $H_t = a \cdot H_i^b$

Αναφορικά με την επιρροή των χαρακτηριστικών του κύματος, σε συνάρτηση με τη σχετική θέση του αγωγού ανανέωσης ως προς την Σ.Η.Υ., στη μεταβολή του συντελεστή κυματικής διείσδυσης $K_t = H_t/H_i$, διαπιστώθηκε ότι :

- Όταν η στάθμη ύδατος βρίσκεται στη βάση του αγωγού και όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές διατηρηθούν σταθερές, με την αύξηση του ύψους H_i του προσπίπτοντος κυματισμού, παρατηρείται αύξηση του συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t .
- Όταν η στάθμη ύδατος βρίσκεται στο μέσο του αγωγού και όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές διατηρηθούν σταθερές, με την αύξηση του ύψους H_i του προσπίπτοντος κυματισμού, παρατηρείται μείωση του συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t . Για το συγκεκριμένο βάθος νερού, κύματα με μικρά ύψη επηρεάζονται λιγότερο από τον πυθμένα του αγωγού ανανέωσης από αυτά με μεγαλύτερα ύψη. Τα υψηλότερα κύματα επηρεάζονται περισσότερο από τη διάθλαση, τη θραύση και τις απώλειες λόγω τριβών στην είσοδο του αγωγού, δίνοντας μικρότερες τιμές του K_t .
- Όταν η στάθμη ύδατος βρίσκεται στο άνω όριο του αγωγού και όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές διατηρηθούν σταθερές, με την αύξηση του ύψους H_i του προσπίπτοντος κυματισμού, παρατηρείται αύξηση του συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t .
- Παρατηρήθηκε μία μικρή τάση μείωσης του K_t με την μείωση της T , στην περίπτωση που η στάθμη του ύδατος βρίσκεται στο άνω όριο του αγωγού (γεγονός όμως που δεν επιβεβαιώθηκε σε όλες τις διαστάσεις).
- Όταν η στάθμη του ύδατος είναι στη βάση του αγωγού ανανέωσης, με την αύξηση της αδιάστατης παραμέτρου καμπυλότητας H_i/gT^2 , παρατηρείται αύξηση στο συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t .
- Όταν η στάθμη του ύδατος είναι στο μέσο του αγωγού ανανέωσης, με την αύξηση της αδιάστατης παραμέτρου καμπυλότητας H_i/gT^2 , παρατηρείται μείωση στο συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t .
- Όταν η στάθμη του ύδατος είναι στο άνω όριο του αγωγού ανανέωσης, δεν προέκυψε σαφές συμπέρασμα για την επίδραση της αδιάστατης παραμέτρου καμπυλότητας H_i/gT^2 , στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t .

3.4.2.2 Τρισδιάστατα φυσικά ομοιώματα σε δεξαμενές δοκιμών

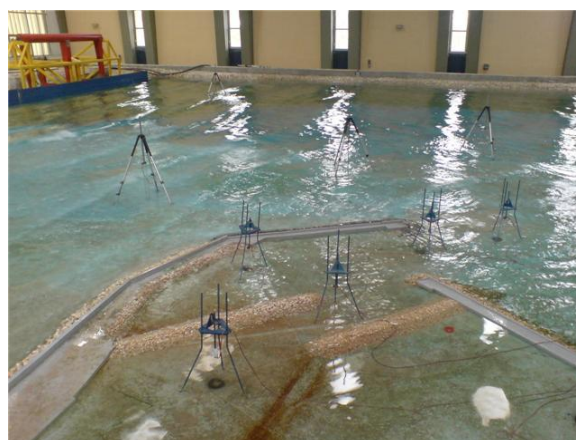
Στις δεξαμενές που διαθέτει το Ε.Λ.Ε. του Ε.Μ.Π. κατασκευάζονται ομοιώματα από λιμένες ή άλλες παράκτιες περιοχές, προκειμένου να μελετηθούν τα κυματικά φαινόμενα και οι επιδράσεις τους. (σχήμα 3.20).

Μέσα στη δεξαμενή κατασκευάζεται υπό κλίμακα το αντίστοιχο φυσικό ομοίωμα και μελετώνται οι επιδράσεις σε αυτό των κυματισμών που δημιουργούνται με τη βοήθεια ενός υδραυλικού συστήματος κυματιστήρων. Τα ύψη των κυμάτων μετρώνται με κατάλληλους μετρητές.



Σχήμα 3.20. Κατασκευή φυσικού ομοιώματος εντός τρισδιάστατης δεξαμενής στο Ε.Λ.Ε. του Ε.Μ.Π.

Στις δεξαμενές του Ε.Λ.Ε. μελετήθηκαν πειραματικά περιπτώσεις διάβρωσης παράκτιων ζωνών καθώς και προβλήματα που δημιουργούνται σε συγκεκριμένες λιμενολεκάνες από την κατασκευή λιμενικών έργων σε συνδυασμό με τα αναπτυσσόμενα κυματικά φαινόμενα (κυματική υπερπήδηση, εγκλωβισμός κυματικής ενέργειας, έντονος κυματισμός εντός της λεκάνης, ανεπαρκής ανανέωση υδάτων, κ.α.) (σχήμα 3.21.).



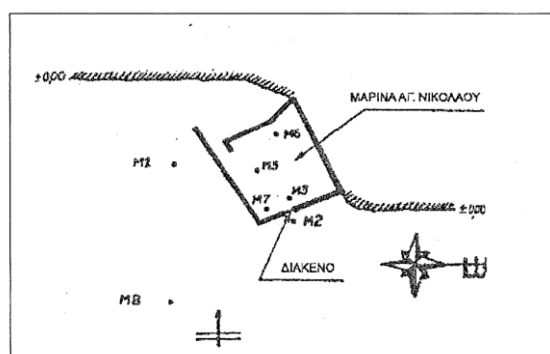
Σχήμα 3.21. Μελέτη προβλημάτων κυματικής υπερπήδησης και εγκλωβισμού της κυματικής ενέργειας σε φυσικό ομοίωμα του λιμένα Κυπαρισσίας σε δεξαμενή του Ε.Λ.Ε.

Τα πειράματα που πραγματοποιούνται στα φυσικά ομοιώματα, έχουν σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων που θα συμβάλουν στη βελτίωση του σχεδιασμού των λιμενικών έργων και την αποτελεσματικότερη προστασία των παράκτιων περιοχών.

Αγωγοί ανανέωσης

Για την καλύτερη μελέτη του φαινομένου της κυματικής διείσδυσης διαμέσου αγωγών ανανέωσης, πραγματοποιήθηκαν πειράματα στις δεξαμενές του Ε.Λ.Ε., στα πλαίσια διπλωματικών εργασιών, σε φυσικά ομοιώματα της μαρίνας Αγίου Νικολάου Νομού Λασιθίου, του καταφυγίου τουριστικών σκαφών Αγίου Κήρυκου Ικαρίας και του καταφυγίου τουριστικών σκαφών στο Κολυμβάρι Νομού Χανίων.

Ο **Παπαϊωάννου κ.α. (1999)** μελέτησε τη κυματική διείσδυση εντός της μαρίνας του Αγίου Νικολάου, μέσω κατασκευής τεχνητού διακένου στο προσήνεμο μόλο του λιμένα, που σκοπό είχε τη δημιουργία συστήματος ανανέωσης των υδάτων. Το φυσικό ομοίωμα της μαρίνας κατασκευάστηκε σε κλίμακα 1:60, και χρησιμοποιήθηκαν 8 μετρητές τύπου αντιστάσεως για την καταγραφή των κυματισμών. Εξετάστηκε η επίδραση των διαστάσεων του αγωγού στα χαρακτηριστικά του διεισδύοντος κυματισμού (Σχήμα 3.22.)

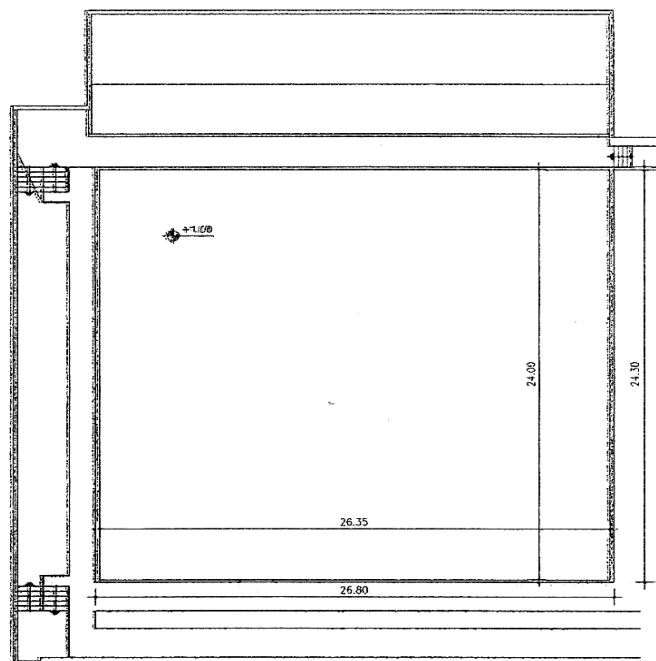


Σχήμα 3.22 Σκαρίφημα μαρίνας Αγίου Νικολάου στο Λασιθί της Κρήτης και θέση μετρητών.

Από την καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων προέκυψε ότι :

- Με την αύξηση του πλάτους b του ανοίγματος του αγωγού, αυξάνεται το ύψος του διεισδύοντος κυματισμού (ανεξαρτήτως θέσεως αγωγού)
- Η αύξηση του ύψους του διεισδύοντος κυματισμού, επηρεάζεται από τη σχέση b/L (όπου L το μήκος του προσπίπτοντος κυματισμού) και πραγματοποιείται μέχρις ότου ο λόγος $b/L = 1$
- Για τιμές $b/L > 1$ παρατηρείται σταθεροποίηση του ύψους του διεισδύοντος κυματισμού.

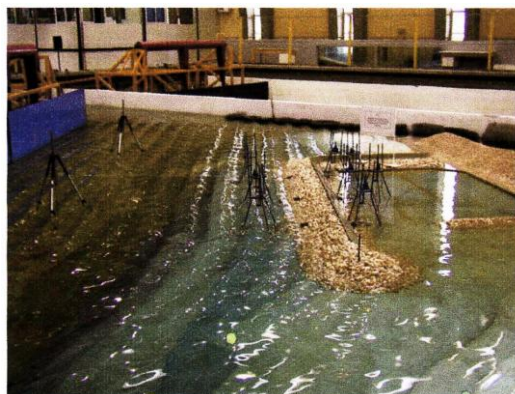
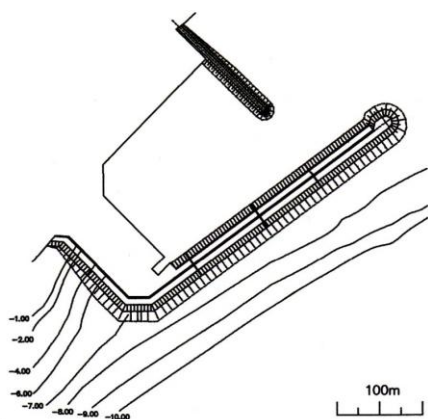
Για περαιτέρω μελέτη του φαινομένου της κυματικής διείσδυσης μέσω αγωγών ανανέωσης, ακολούθησε μια πλήρης σειρά εργαστηριακών πειραμάτων στα φυσικά ομοιώματα των λιμένων Αγ. Κήρυκου και Κολυμβαρίου, που δημιουργήθηκαν σε μια από τις τρεις δεξαμενές του Ε.Λ.Ε. του Ε.Μ.Π. Η δεξαμενή είχε εξωτερικές διαστάσεις 26,80m x 24,30m (εσωτερικές 26,35m x 24,00m) και βάθος 1,0m (σχήμα 3.23.).



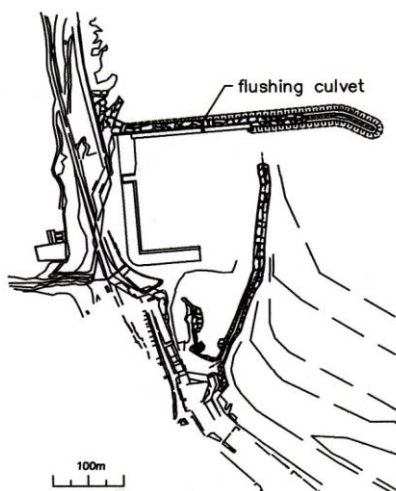
Σχήμα 3.23 Κάτοψη δεξαμενής δοκιμών Ε.Λ.Ε. (πηγή: Σιγαλός).

Για τη δημιουργία κυμάτων χρησιμοποιήθηκε σύστημα γεννήτριας, που ενεργοποιείται με σήματα εισόδου μέσω ειδικού λογισμικού και δύο υδραυλικά κινούμενων πτερυγίων, πλάτους 6,0m το καθένα, τοποθετημένων σε παράπλευρη διάταξη. Η γεννήτρια μπορεί να παράγει κανονικά και μη κανονικά κύματα, όμως στα πλαίσια των εξεταζόμενων πειραμάτων παράγονταν μόνο κανονικά κύματα. Τα παραγόμενα κύματα είχαν ύψος έως 0,5m και κυκλική συχνότητα 0,3 έως 3,0 Hz. Δεν υπήρξε σύστημα ενεργού απορρόφησης επί των πτερυγίων κυματισμού, αλλά υπήρξε σύστημα παθητικής απορρόφησης των κυμάτων, με ειδικές κατασκευές, στην πίσω και στις πλαϊνές πλευρές της δεξαμενής.

Τα δύο φυσικά ομοιώματα, του λιμένα Αγ. Κήρυκου Ικαρίας (φυσικό ομοίωμα 1; Δημητρακοπούλου, 2005; Μπαλάσκα, 2005) και του λιμένα Κολυμβαρίου Χανίων (φυσικό ομοίωμα 2; Μπαλάσκα, 2005; Σιγαλός, 2006), κατασκευάστηκαν σε κλίμακες 1:100 και 1:60 αντίστοιχα. (βλέπε σχήματα 3.24 και 3.25)



Σχήμα 3.24 Σκαρίφημα και φυσικό ομοίωμα λιμένα Αγ. Κήρυκου Ικαρίας (φυσικό ομοίωμα 1)



Σχήμα 3.25 Σκαρίφημα και φυσικό ομοίωμα λιμένα Κολυμβαρίου Κρήτης (φυσικό ομοίωμα 2)

Οι κυματοθραύστες σε όλες τις περιπτώσεις είχαν την ίδια δομή. Στο φυσικό ομοίωμα 1 οι κλίσεις πρηνούς του κυματοθραύστη προς την προσήνεμη πλευρά ήταν 1:2,5, ενώ στο φυσικό ομοίωμα 2 ήταν 1:1,5. Οι κλίσεις πρηνούς του κυματοθραύστη προς την υπήνεμη πλευρά ήταν και στις δύο περιπτώσεις 1:1,5. Στο φυσικό ομοίωμα 1 τοποθετήθηκαν 3 αγωγοί ανανέωσης στον προσήνεμο κυματοθραύστη, ενώ στο φυσικό ομοίωμα 2 τοποθετήθηκε 1 αγωγός ανανέωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις τοποθετήθηκαν οι αγωγοί ανανέωσης, έτσι ώστε η ελεύθερη επιφάνεια του νερού (Σ.Η.Υ.) να συμπίπτει με τον άξονα του αγωγού, δηλαδή να είναι στο μέσο του ύψους της διατομής των αγωγών ($S=0$).

Σε κάθε ένα φυσικό ομοίωμα έγιναν πειράματα για διαφορετικές διαστάσεις αγωγών ανανέωσης. Οι τελικά επιλεγείσες για περαιτέρω ανάλυση διαφορετικές διατάξεις με τις διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν, φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί, και στον οποίο είναι διακριτός ο στόχος κάθε πειράματος σε σχέση με τη μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών ανανέωσης. Στον ίδιο πίνακα φαίνεται επίσης το βάθος του νερού (d), δηλαδή η απόσταση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού από τον πυθμένα και η γωνία (α) του προσπίπτοντος κύματος με την προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη (εφαρμόστηκαν κύματα από διαφορετικές διευθύνσεις δηλαδή διαφορετικής γωνίας πρόσπτωσης στον κυματοθραύστη).

Πίνακας 3.4 Πειραματικές διατάξεις αγωγών ανανέωσης σε φυσικά ομοιώματα 3D

Φυσικό ομοίωμα	Αριθμός αγωγών ανανέωσης	Πείραμα	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αγωγών ανανέωσης			Βάθος νερού d (m)	Γωνία πρόσπτωσης κύματος α (°)
			b (m)	h (m)	l (m)		
Φυσικό ομοίωμα 1	-	Αγ. Κήρυκος	-	-	-	0,23	90
	3	Αγ. Κήρυκος – Δ1	0,025	0,025	0,375 0,375 0,375 0,375		
		Αγ. Κήρυκος – Δ2	0,050				
		Αγ. Κήρυκος – Δ3	0,075				
		Αγ. Κήρυκος – Δ4	0,100				

Φυσικό ομοίωμα 2	-	Κολυμβάρι	-	-	-	0,25	90 60
	1	Κολυμβάρι –Μ- Σ1	0,050	0,025	0,160		
		Κολυμβάρι –Μ- Σ2			0,320		
		Κολυμβάρι –Μ- Σ3		0,030	0,160		

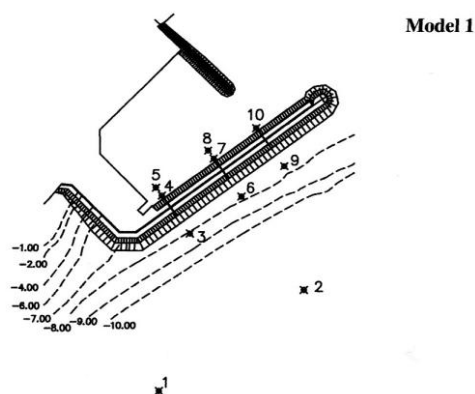
Η επίδραση του πλάτους των αγωγών ανανέωσης επάνω στον K_t διερευνήθηκε μέσω διαφορετικών συνθηκών κυμάτων για τέσσερα επιμέρους πλάτη αγωγού ανανέωσης, μέσω των πειραμάτων που έγιναν στο φυσικό ομοίωμα 1.

Η επίδραση, επί του K_t , του μήκους, του ύψους του αγωγού ανανέωσης και της γωνίας πρόσπτωσης των κυμάτων, διερευνήθηκαν στο φυσικό ομοίωμα 2, τόσο για γωνία πρόσπτωσης 90° όσο και για 60° .

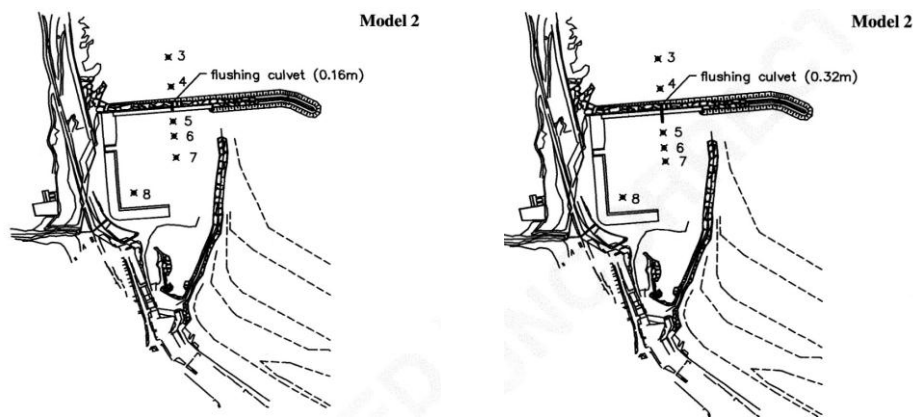
Χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ένα φυσικό ομοίωμα και για κάθε διαφορετική γωνία πρόσπτωσης και πειραματικές σειρές που πραγματοποιήθηκαν χωρίς τα φυσικά ομοιώματα λιμένων στη λεκάνη κυματισμού, προκειμένου να εκτιμηθούν ορθότερα τα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κύματος (επειδή λόγω μη χρησιμοποίησης ενεργού απορρόφησης επί των πτερυγίων, παρουσιάζονταν το φαινόμενο της επιστροφής στη γεννήτρια του προσπίπτοντος κυματισμού).

Για τον προσδιορισμό σε κάθε μια δοκιμή των χαρακτηριστικών των κυμάτων, χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες μέτρησης τύπου αντίστασης (σταθμήμετρα) κατάλληλα βαθμονομημένοι, που λειτουργούν με ακρίβεια $\pm 2\%$. Η παρουσιαζόμενη αντίσταση μετατρέπονταν σε τάση και στη συνέχεια με κατάλληλους συντελεστές μετατρέπονταν σε στάθμη ύδατος. Πριν από κάθε πείραμα γίνονταν το απαραίτητο καλιμπράρισμα των σταθμήμετρων.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη μετρητών τύπου αντίστασης, ένας για μέτρηση των κυμάτων στα βαθιά νερά και ένας για μέτρηση των κυματικών διαταραχών κοντά στον κυματοθραύστη, εντός ή εκτός της λιμενολεκάνης. Ο αριθμός και οι θέσεις των αγωγών ανανέωσης και των μετρητών για κάθε φυσικό ομοίωμα φαίνονται στα σχήματα 3.26 και 3.27 που ακολουθούν.



Σχήμα 3.26 Σκαρίφημα λιμένα Αγ. Κήρυκου με διάταξη 3 αγωγών ανανέωσης και θέσεις μετρητών



Σχήμα 3.27 Σκαριφήματα λιμένα Κολυμβαρίου με διάταξη 1 αγωγού ανανέωσης και θέσεις μετρητών – Διαφοροποίηση στο μήκος αγωγού ανανέωσης (0,16m και 0,32m)

Για κάθε διεύθυνση πρόσπτωσης των κυμάτων και για κάθε διατομή των αγωγών ανανέωσης, εφαρμόστηκε σε κάθε φυσικό ομοίωμα ένας αριθμός διαφορετικών μονοχρωματικών (ημιτονοειδών) κυμάτων. Το πλήθος των διαφορετικών κυματισμών, με διαφορετικά ύψη κύματος και περιόδους, που εφαρμόστηκαν σε κάθε φυσικό ομοίωμα, στα πλαίσια των αντίστοιχων διπλωματικών εργασιών, ήταν 20 για τον Αγ. Κήρυκο και 30 για το Κολυμβάρι.

Για την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών των κυμάτων, καθώς και για την επιλογή των τελικών συνθηκών των κυμάτων, είχαν διεξαχθεί προκαταρκτικά πειράματα. Απορρίφθηκαν κύματα που δημιουργούσαν ανεπιθύμητα φαινόμενα (ανάδευσης, περίθλασης, κ.α.), αποφασίστηκε η χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων στο φυσικό ομοίωμα 1 μόνο από τον μεσαίο αγωγό ανανέωσης, ενώ διαφοροποιήθηκε η διαμόρφωση του πυθμένα της προς το πέλαγος πλευράς του κυματοθραύστη στο φυσικό ομοίωμα 2.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των πειραμάτων που έγιναν στα πλαίσια διπλωματικών εργασιών (Δημητρακοπούλου, 2005; Μπαλάσκα, 2005; Σιγαλός, 2006) στα προαναφερθέντα δύο φυσικά ομοιώματα λιμένων Αγ. Κηρύκου και Κολυμβαρίου, αξιολογήθηκαν και αναλύθηκαν και στα πλαίσια της μελέτης **Tsoukala and Moutzouris (2009)**, για τη μετάδοση των κυματισμών μέσω αγωγών ανανέωσης, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας των νερών στις λιμενολεκάνες. Ο μετασχηματισμός του ύψους των κυμάτων μέσω αγωγού ανανέωσης όπως μετρήθηκε από τα σταθμήμετρα, για ποικίλους συνδυασμούς κυμάτων και διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού, υποβλήθηκε σε επεξεργασία και ανάλυση για όλες τις πειραματικές συνθήκες. Ιδιαίτερα διερευνήθηκε η ευαισθησία του συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t σε σχέση με άλλες διαστατικές ή αδιάστατες παραμέτρους, προκειμένου να προσδιορισθούν εκείνες που μπορούν κατά τον αποτελεσματικότερο τρόπο να εκτιμήσουν τον συντελεστή.

Από τις πραγματοποιηθείσες δοκιμές, διαχωρίστηκαν για περαιτέρω ανάλυση συνολικά 105 δοκιμές, που πραγματοποιήθηκαν υπό διαφορετικούς συνδυασμούς για 24 μονοχρωματικά κύματα.

Στον Πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι συνθήκες των κυμάτων για τους 24 επιλεγέντες συνδυασμούς. Επιλέχθηκε οι περίοδοι των κυμάτων να είναι μεγαλύτερες των 0,35 sec για την αποφυγή ανεπιθύμητων φαινομένων. Έγινε φασματική ανάλυση των σημάτων που καταγράφηκαν από τους αισθητήρες, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά της στάθμης της επιφάνειας των υδάτων και των κυμάτων που διαδίδονται κατά μήκος της λεκάνης κυματισμού και αποκλείστηκαν από την περαιτέρω ανάλυση δοκιμές που δημιουργούσαν κύματα υψηλότερων αρμονικών συνιστωσών υψηλότερων συχνοτήτων.

Πίνακας 3.5 Χαρακτηριστικά χρησιμοποιηθέντων κυματισμών σε φυσικά ομοιώματα 3D

α/α	Φυσικό ομοίωμα	Χαρακτηριστικά κύματος			
		Περίοδος T (s)	Ύψος H_i (m)	Μήκος L_0 (m)	Καμπυλότητα H_i/L_0
1	1	0,52	0,006	0,42	0,014
2	1	0,52	0,014	0,42	0,033
3	1	0,52	0,018	0,42	0,043
4	1	0,52	0,023	0,42	0,054
5	1	0,75	0,012	0,88	0,014
6	1	0,75	0,017	0,88	0,019
7	1	0,75	0,023	0,88	0,026
8	1	1,00	0,022	1,56	0,014
9	1	1,00	0,030	1,56	0,019
10	2	0,40	0,004	0,25	0,014
11	2	0,40	0,007	0,25	0,028
12	2	0,40	0,010	0,25	0,040
13	2	0,40	0,014	0,25	0,056
14	2	0,40	0,018	0,25	0,072
15	2	0,40	0,023	0,25	0,092
16	2	0,40	0,025	0,25	0,100
17	2	0,50	0,005	0,39	0,013
18	2	0,50	0,008	0,39	0,020
19	2	0,50	0,011	0,39	0,028
20	2	0,50	0,015	0,39	0,038
21	2	0,50	0,020	0,39	0,051
22	2	0,67	0,012	0,70	0,017
23	2	0,67	0,017	0,70	0,024
24	2	0,67	0,025	0,70	0,036

Στην ανάλυση που έγινε για τη μελέτη των αποτελεσμάτων των πειραμάτων που είχαν διεξαχθεί στο εργαστήριο του Ε.Λ.Ε., ο υπολογισμός του προσπίπτοντος κύματος έγινε με βάση την ολική ενέργεια του κύματος που προσεγγίζει τον κυματοθραύστη, ενώ για το μέσο ύψος των μεταδιδόμενων δια του αγωγού ανανέωσης κυμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι από τις οποίες δεν προέκυψε ουσιαστική διαφοροποίηση και επιλέχτηκε τελικά ο υπολογισμός του μέσου ύψους σε κάθε αισθητήρα με βάση την απλή στατιστική μέθοδο.

Ο συντελεστής μετάδοσης K_t υπολογίστηκε ως ο λόγος του μέσου ύψους του μεταδιδόμενου δια του αγωγού ανανέωσης κύματος προς το ύψος του προσπίπτοντος κύματος.

Η ανάλυση του συντελεστή μετάδοσης και της επίδρασης επ' αυτού των επί μέρους διαστατών και αδιάστατων μεταβλητών διερευνήθηκε, για την εκτεταμένη σειρά πειραμάτων που διεξήχθησαν στο εργαστήριο του Ε.Λ.Ε., μέσω διαγραμμάτων και με στατιστικές μεθόδους.

Προέκυψε από τις γραφικές αναπαραστάσεις ότι :

- ο συντελεστής μετάδοσης K_t αυξάνεται με την αύξηση
 - του βυθισμένου βάθους του πυθμένα του αγωγού ανανέωσης (h_s)
 - του πλάτους του αγωγού ανανέωσης (b) και
 - της περιόδου του προσπίπτοντος κύματος (T),
- ενώ το K_t μειώνεται με την αύξηση
 - του μήκους του αγωγού ανανέωσης (l) και
 - του ύψους του προσπίπτοντος κύματος (H_i).
- Ο K_t διαπιστώθηκε επίσης ότι ήταν υψηλότερος για κάθετη γωνία πρόσπτωσης.

Τα παραπάνω συμπεράσματα αποτελούν ήδη ένα οδηγό για τη διάταξη και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών ανανέωσης. Επιχειρήθηκε στη συνέχεια αποτελεσματικότερη συσχέτιση παραμέτρων και συντελεστού διείσδυσης, έπειτα από διαστατική ανάλυση με προσδιορισμό και χρησιμοποίηση αδιάστατων παραμέτρων ώστε να εκφρασθεί τελικά το K_t ως συνάρτηση των ακόλουθων αδιάστατων παραμέτρων.

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = f\left(\frac{h_s}{H_i}, \frac{H_i}{l}, \frac{l}{L_0}, \frac{b}{H_i}, \xi \text{ or } \frac{L_0}{H_i}, \sin a\right)$$

Η ανάλυση της επίδρασης των αδιάστατων παραμέτρων, έδειξε ότι ο συντελεστής μετάδοσης K_t επηρεάζεται αναλόγως κατά σειρά σημαντικότητας από τις αδιάστατες παραμέτρους (b/H_i), (h_s/H_i), (L_0/H_i) και (H_i/l).

Με βάση τα συμπεράσματα από τις γραφικές και στατιστικές αναλύσεις και την επιλογή των αδιάστατων παραμέτρων της προαναφερθείσας σχέσης ως ανεξάρτητων μεταβλητών, επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός κατάλληλου τύπου που να προσδιορίζει τον συντελεστή K_t . Χρησιμοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν 4 διαφορετικές μορφές εμπειρικών συναρτήσεων και διερευνήθηκαν 10 μοντέλα προσδιορισμού του συντελεστή διείσδυσης, για τα οποία έγινε στατιστική αξιολόγηση, μέσω υπολογισμού συγκεκριμένων στατιστικών δεικτών, προκειμένου να διαπιστωθεί η καλύτερη δυνατή συσχέτισή τους με τα χαρακτηριστικά των κυμάτων και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού ανανέωσης. Η μελέτη κατέληξε στην πρόταση της ακόλουθης σχέσης για υπολογισμό του συντελεστή κυματικής διείσδυσης μέσω αγωγών ανανέωσης, κατ' αρχήν στις περιπτώσεις που το ύψος προσπίπτοντος κύματος υπό πραγματικές συνθήκες είναι από 0,4 έως 2,5m, η περίοδός του από 4,0 έως 7,8s και ο διαμήκης άξονάς τους βρίσκεται στη στάθμη ηρεμούντος ύδατος (χαρακτηριστικά που αντιστοιχούν σε αυτά των συνθηκών πραγματοποίησης των πειραμάτων).

$$K_t = \left[0,1 \left(\frac{h_s}{H_i} \right)^{0,76} + \left[2,64 \left(\frac{l}{H_i} \right)^{0,032} - 3 \left(\frac{b}{H_i} \right)^{-0,05} \right] (1 - \exp(0,21\xi)) \right] \sin a^{2/3}$$

Επειδή όμως η άνω εξίσωση προέρχεται από εργαστηριακά πειράματα, τα αποτελέσματα ενέχουν την αβεβαιότητα πιθανών επιδράσεων λόγω κλίμακας. Γι' αυτό προτείνεται από τους συντάκτες της μελέτης η πραγματοποίηση περαιτέρω πειραμάτων και υπό άλλες μεγαλύτερες κλίμακες, τόσο για κανονικά όσο και μη-κανονικά κύματα, καθώς και η διενέργεια φυσικών μετρήσεων για την επικύρωση της προτεινόμενης εξίσωσης και τη βελτιστοποίηση των συντελεστών που έχουν προκύψει από την ανάλυση παλινδρόμησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΣΥΝΟΨΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Από την ανασκόπηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις εκτελεσθείσες πειραματικές μετρήσεις στο ΕΛΕ, προκύπτουν κάποια συμπεράσματα σχετικά με τις παραμέτρους που επηρεάζουν το συντελεστή κυματικής διείσδυσης, που είναι κοινά ή συμβατά, ανάλογα με το εύρος διερεύνησης που διαπραγματεύονταν κάθε εργασία (άλλη εργασία διαπραγματεύονταν κατά κύριο λόγο την επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών ανανέωσης, άλλη τη σχετική τους θέση, άλλη τη γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών, κ.ο.κ.).

Ο συντελεστής κυματικής διείσδυσης τεκμηριώθηκε ότι επηρεάζεται από το είδος του μετώπου της κατασκευής και τη διαμόρφωση του πυθμένα, από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τη σχετική θέση του αγωγού ανανέωσης, από τα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κυματισμού.

Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες διεξήχθησαν οι πειραματικές μετρήσεις ήταν διαφορετικές ανά περίπτωση (π.χ. κυματοθραύστης με κατακόρυφο ή κεκλιμένο πρυνές, διαφορετικές σχετικές θέσεις αγωγού ανανέωσης σε σχέση με τη Στάθμη Ηρεμούντος Ύδατος, κ.α.) και είναι φυσικό να προκύπτουν και μη συγκλίνουσες έως και διαφοροποιημένες διαπιστώσεις.

Οι περισσότερες σειρές πειραματικών δεδομένων, αναφέρονται σε αποτελέσματα επί φυσικών ομοιωμάτων 2D και 3D με κεκλιμένο πρυνές κυματοθραύστη και τοποθέτηση άξονα αγωγού ανανέωσης στη ΣΗΥ ($S=0$).

Σε γενικές γραμμές όμως, διαπιστώθηκε συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων στις δισδιάστατες συνθήκες (διώρυγα) με τα αποτελέσματα των μετρήσεων στις τρισδιάστατες συνθήκες (δεξαμενή), με την προϋπόθεση ότι συγκρίνονται φυσικά ομοιώματα με ίδια κλίση εξωτερικού πρυνούς, κύματα με ίδια γωνία πρόσπτωσης και αγωγοί ανανέωσης με παρόμοιες διαστάσεις.

Για τις περιπτώσεις αυτές που υπάρχει και η μεγαλύτερη σύγκλιση συμπερασμάτων, σχετικά με το ποιες παράμετροι επηρεάζουν το συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t , τα συμπεράσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες που ακολουθούν.

Ο πρώτος πίνακας παρουσιάζει το πώς επηρεάζεται ο συντελεστής K_t από μια σειρά παραμέτρων, που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού ανανέωσης, τα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κυματισμού, τη σχετική θέση του αγωγού ανανέωσης ως προς την ελεύθερη επιφάνεια του νερού και την γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού στον κυματοθραύστη (δηλαδή αν αυξάνεται $\uparrow$ ή μειώνεται $\downarrow$ ο K_t , όταν αυξάνεται $\uparrow$ η παράμετρος).

Πίνακας 4.1 Μεταβολή του συντελεστή K_t με τη μεταβολή των χαρακτηριστικών προσπίπτοντος κυματισμού και τη μεταβολή θέσης και γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού ανανέωσης.

α/α	Παράμετρος	Μεταβολή παραμέτρου	Μεταβολή συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t)	Διαπιστώσεις – Σχόλια
Μεταβολή γεωμετρικών χαρακτηριστικών αγωγών ανανέωσης				
1	Πλάτος αγωγού ανανέωσης (b m)	↑	↑	• Με την αύξηση της διατομής αυξάνεται η διεισδύουσα κυματική ενέργεια, συνεπώς και ο συντελεστής κυματικής διείσδυσης.
2	Ύψος αγωγού ανανέωσης (h m)	↑	↑	• Στις περισσότερες εργασίες διαπιστώνεται ότι με την αύξηση του ύψους του αγωγού ανανέωσης, αυξάνεται το ύψος του διερχόμενου κύματος, συνεπώς και ο συντελεστής κυματικής διείσδυσης
3	Μήκος αγωγού ανανέωσης (l m)	↑	↓	• Με την αύξηση του αγωγού ανανέωσης, μειώνεται ο συντελεστής κυματικής διείσδυσης (Τσουκαλά, Μουτζούρης 2009; Γιαννάκη, 2005) • Σημειώνεται ότι σε ορισμένες πειραματικές μετρήσεις (Σιγαλός, 2006; Μπαλάσκα, 2006), δεν παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτες μεταβολές στη τιμή του συντελεστή κυματικής διείσδυσης
Μεταβολή θέσης αγωγού σε σχέση με ΣΗΥ				
4	Βύθιση πυθμένα αγωγού ανανέωσης (h_s m)	↑	↑	• Οι περισσότερες μετρήσεις έχουν γίνει για $h_s = h/2$ ($S=0$)

Μεταβολή χαρακτηριστικών προσπίπτοντος κυματισμού				
5	Ύψος προσπίπτοντος κύματος (H_i m)	↑	↓	• Ισχύει για την περίπτωση που ο άξονας του αγωγού έχει τοποθετηθεί στη ΣΗΥ ($h_s = h/2$) • Αν η ΣΗΥ βρίσκεται στη βάση του αγωγού ή στο άνω όριο του αγωγού, με την αύξηση του H_i παρατηρείται αύξηση του K_i • Η αύξηση του διεισδύοντος κυματισμού συμβαίνει μέχρι ενός ορίου και η εισερχόμενη κυματική ενέργεια δεν μεταβάλλεται έπειτα από μια ορισμένη τιμή ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού (Ακύλας, 2006; Μονιούδη, 2006; Σιγαλός, 2006) γιατί η είσοδος του αγωγού κατακλύζεται από το διεισδύον κύμα • Το κρίσιμο όριο είναι όταν το μισό του ύψους του προσπίπτοντος κύματος, γίνεται μεγαλύτερο από το μισό του ύψους του αγωγού ανανέωσης, οπότε και δεν επιτυγχάνεται περαιτέρω διείσδυση
6	Περίοδος προσπίπτοντος κύματος (T s)	↑	↑	
7	Μήκος προσπίπτοντος κύματος (L_0 m)	↑	↑	• Φυσικό συμπέρασμα της προηγούμενης διαπίστωσης (α/α 6), αφού $L_0 = gT^2/2\pi$ (βαθιά νερά) • Ο συντελεστής κυματικής διείσδυσης επηρεάζεται και από τη σχέση μήκους κύματος L_0 και μήκους αγωγού ανανέωσης l • Ο K_i είναι μεγαλύτερος για μήκη κύματος που υπερβαίνουν το μήκος του αγωγού ανανέωσης

8	Γωνία προσπίπτοντος κύματος (α°)	↑	↑	• Στα 2D πειράματα η γωνία πρόσπτωσης είναι 90° συνεπώς τα συμπεράσματα προέκυψαν από πειράματα 3D • Η μεγαλύτερη διείδυση παρατηρείται για κάθετες γωνίες πρόσπτωσης ($\alpha = 90^\circ$) • Σε ορισμένες πειραματικές μετρήσεις, υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης του κύματος, ενώ σε κάποια άλλα τα αποτελέσματα δεν έδειχναν αξιοσημείωτη μεταβολή
---	--	---	---	---

Τα προβλήματα της ρευστοδυναμικής σε φυσική κλίμακα, περιλαμβάνουν συνήθως περίπλοκες γεωμετρίες και μη γραμμική ροή και σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται η δημιουργία κάποιου μοντέλου για να μπορέσουμε να το μελετήσουμε και να το κατανοήσουμε. Η πειραματική εξίσωση που θα καταστρωθεί σε επίπεδο μοντέλου θα πρέπει να είναι σε θέση να δίνει μια αξιόπιστη εκδοχή του φυσικού νόμου και το αποτέλεσμα με τη μορφή εξισώσεων ή διαγραμμάτων να μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις όμοιες περιπτώσεις.

Η χρησιμοποίηση αδιάστατων παραμέτρων, κατόπιν διαστατικής ανάλυσης, αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τις πειραματικές έρευνες καθώς επιτρέπει α) τη μείωση του αριθμού των μεταβλητών β) οι εξισώσεις να είναι ανεξάρτητες των μονάδων που χρησιμοποιούνται γ) κατανόηση σε βάθος των φαινομένων της ροής των ρευστών και δυνατότητα επέκτασης (γενίκευσης) των αποτελεσμάτων των πειραμάτων σε περιπτώσεις με διαφορετικές φυσικές διαστάσεις και ακόμα με διαφορετικές ιδιότητες ρευστού. Το φαινόμενο συνεπώς μπορεί να περιγραφεί στο σύνολό του και δε περιορίζεται στο συγκεκριμένο πείραμα που έλαβε χώρα. Με το τρόπο αυτό εξοικονομούνται χρήματα, γιατί χρειάζονται λιγότερα αλλά ειδικά επιλεγμένα πειράματα για την επίλυση του προβλήματος.

Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων σειράς πειραμάτων που εκτελέστηκαν στη δεξαμενή του ΕΛΕ, διερευνήθηκε επίσης η επίδραση αδιάστατων παραμέτρων στην μεταβολή του συντελεστή της κυματικής διείδυσης K_t , όπως αυτές προσδιορίστηκαν μέσω διαστατικής ανάλυσης, που κατέληξε στην πρόταση των ακόλουθων συναρτήσεων :

- $K_t = \frac{H_i}{H_t} = f\left(\frac{H_i}{gT^2}, \frac{h}{d}, \frac{b}{d}, \tan \phi\right)$ (Μπρέμπος–Ντεβές, 2007)
- $K_t = \frac{H_t}{H_i} = f\left(\frac{h_s}{H_i}, \frac{H_i}{l}, \frac{l}{L_0}, \frac{b}{H_i}, \xi \text{ or } \frac{L_0}{H_i}, \sin a\right)$ (Τσουκαλά–Μουτζούρης, 2009)

Στη συνέχεια στον Πίνακα δίνεται η μεταβολή του συντελεστή κυματικής διείδυσης συναρτήσει αδιάστατων κυματικών παραμέτρων, με βάση τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων.

Πίνακας 4.2 Μεταβολή του συντελεστή K_t με τη μεταβολή αδιάστατων παραμέτρων.

α/α	Αδιάστατη παράμετρος	Μεταβολή παραμέτρου	Μεταβολή συντελεστή κυματικής διείδυσης (K_t)	Διαπιστώσεις - Σχόλια
9	Λόγος ύψους προσπίπτοντος κύματος προς πλάτος αγωγού ανανέωσης (H_i/b)	↑	↓	•Για αγωγούς ανανέωσης μεγαλύτερου πλάτους η επίδραση στον K_t γίνεται πιο έντονη
10	Λόγος καταβύθισης (h_s/H_i)	↑	↑	•Όσο αυξάνεται ο λόγος καταβύθισης, τόσο μειώνονται οι απώλειες κατά τη διέλευση των κυμάτων από τον αγωγό ανανέωσης (άρα αυξάνεται ο K_t) •Η επιρροή είναι μεγαλύτερη για αγωγούς ανανέωσης μεγαλύτερου μήκους.
11	Λόγος ύψους προς μήκος προσπίπτοντος κύματος ή καμπυλότητα του κύματος (H_i/L_0)	↑	↓	•Με την αύξηση της καμπυλότητας αυξάνεται η θραύση κυμάτων και συνεπώς παρατηρείται σημαντική απώλεια ενέργειας. •Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο αριθμός Iribarren ξ

12	Λόγος ύψους κύματος προς μήκος αγωγού ανανέωσης (H/l)	↑	↓	• Τα υψηλότερα κύματα επηρεάζονται περισσότερο από τη διάθλαση, τη θραύση και τις απώλειες λόγω τριβών στην είσοδο του αγωγού • Με υψηλότερα κύματα κατακλύζεται ο αγωγός και εμποδίζεται η διείσδυση επί πλέον ποσότητας ύδατος • Με αύξηση του μήκους αγωγού ανανέωσης αυξάνεται η απώλεια ενέργειας μέσα στον αγωγό
13	Λόγος μήκους αγωγού ανανέωσης προς μήκος προσπίπτοντος κύματος (l/L_0)	↑	↓	• Η επιρροή στον K_t είναι μεγαλύτερη για τιμές του λόγου <1 και μικρότερη για μακρύτερους αγωγούς ανανέωσης. • Η διακύμανση του πλάτους της στέψης του κυματοθραύστη έχει περιορισμένη επιρροή στον K_t για αγωγούς ανανέωσης μακρύτερους από το μήκος του προσπίπτοντος κύματος
14	Ημίτονο γωνίας προσπίπτοντος κύματος και προσήνεμης πλευράς κυματοθραύστη ($\sin \alpha$)	↑	↑	• Σύγκριση μεταξύ 60° και 90° • Η κάθετη πρόσπτωση διευκολύνει τη διέλευση των κυματισμών και περιορίζει τα δευτερεύοντα φαινόμενα εντός του αγωγού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα συμπεράσματα που συνοψίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και που προέκυψαν στα πλαίσια διαφορετικών πειραμάτων, που διεξήχθησαν στη δισδιάστατη διώρυγα μετρήσεων (Μπρέμπος-Ντεβές, 2007; Μονιούδη, 2006; Ακύλας, 2006) και στα φυσικά ομοιώματα λιμένων στη τρισδιάστατη δεξαμενή δοκιμών του ΕΛΕ (Δημητρακοπούλου, 2008; Μπαλάσκα, 2005; Σιγαλός, 2006; Tsoukala, et al, 2008), επιχειρείται στο παρόν κεφάλαιο να συσχετισθούν και να επιβεβαιωθούν διαγραμματικά ως ενιαίο σύνολο αποτελεσμάτων τόσο για τα πειράματα 2D όσο και για τα πειράματα 3D. Στα πλαίσια των πειραμάτων που είχαν πραγματοποιηθεί στο ΕΛΕ, δεν είχε επιχειρηθεί ενιαία διερεύνηση.

Επελέγησαν αποτελέσματα μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε κεκλιμένο πρανές και για στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στο μέσο του ύψους του αγωγού ανανέωσης ($S=0$), δεδομένου ότι στις περισσότερες από τις παραπάνω περιπτώσεις είχαν πραγματοποιηθεί πειράματα μόνο υπό αυτές τις συνθήκες.

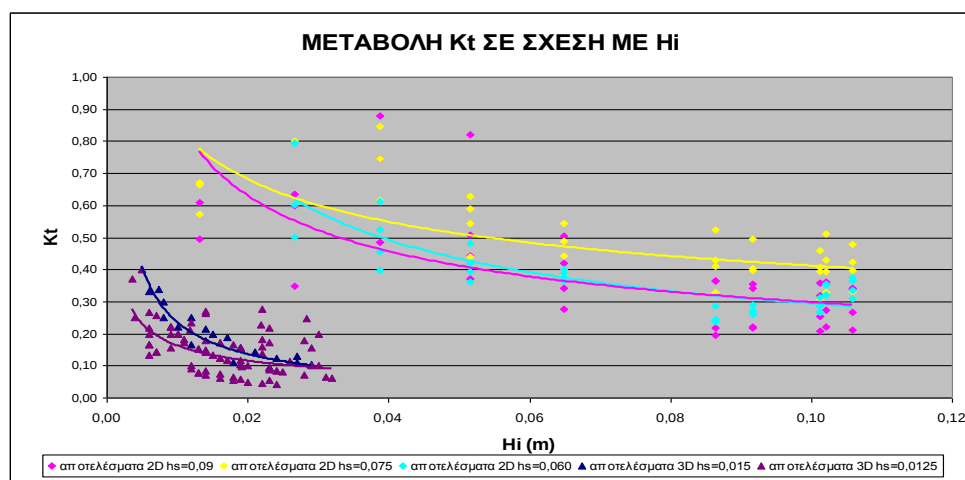
Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ δίνεται ο πίνακας με τα πειραματικά δεδομένα που τελικά χρησιμοποιήθηκαν, όπως προέκυψε μετά την επεξεργασία και την αξιολόγηση των αρχικών δεδομένων. Δεν χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα που αναφέρονταν σε διατάξεις του αγωγού ανανέωσης με ΣΗΥ στον πυθμένα του αγωγού ($S=-1$) ή στο άνω μέρος του αγωγού ($S=1$). Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι κατά την αξιολόγηση των μετρήσεων και τον έλεγχο της ορθότητας των αποτελεσμάτων, αφαιρέθηκαν επιπρόσθετα σειρές αποτελεσμάτων με ελλιπή στοιχεία καθώς και μονοψήφιος αριθμός σειρών με αποτελέσματα ακραία μη φυσικά ερμηνεύσιμα, που ενδεχόμενα οφείλονταν σε πειραματικά σφάλματα ή σφάλματα καταγραφής.

Συνολικά τα τελικά αξιοποιήσιμα αποτελέσματα πρωτογενών μετρήσεων είναι 105 σειρές από πειράματα που εκτελέστηκαν σε 3D διατάξεις και 109 σειρές από πειράματα που εκτελέστηκαν σε 2D διατάξεις, συνολικά 214 σειρές αποτελεσμάτων. Για διευκόλυνση της επεξεργασίας τα αποτελέσματα των μετρήσεων οργανώθηκαν σε βάση δεδομένων με πεδία τις διάφορες φυσικές ή αδιάστατες παραμέτρους και εγγραφές τις παραπάνω σειρές αποτελεσμάτων.

Διερευνήθηκε στη συνέχεια, με σύνταξη κατάλληλων διαγραμμάτων που παρατίθενται ακολούθως, αν με αυτό το σετ των δεδομένων επιβεβαιώνονται τα βασικά συμπεράσματα της θεωρίας και της βιβλιογραφίας που παρατίθεται, για τον τρόπο επιρροής των διαφόρων παραμέτρων στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t .

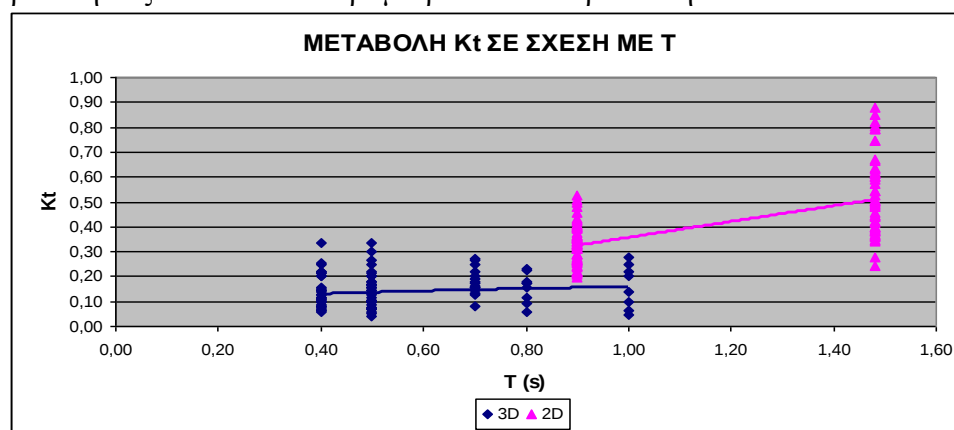
5.1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Α) ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή ύψους κύματος (H_i) προσπίπτοντος κυματισμού.

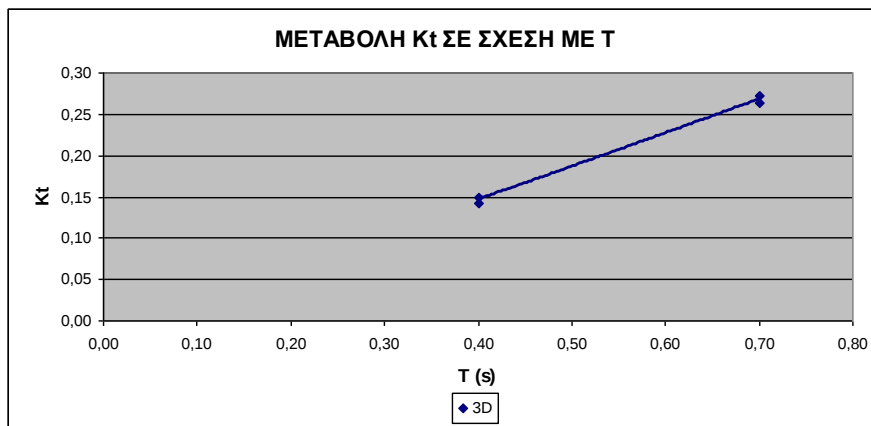
Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή του ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού (H_i) στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t), τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D, (δηλαδή όταν $\uparrow$ το H_i , $\downarrow$ ο K_t), παρά τις διαφοροποιήσεις των λοιπών παραμέτρων κατά περίπτωση.



Σχήμα 5.2 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή περιόδου κύματος (T) προσπίπτοντος κυματισμού.

Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή της περιόδου του προσπίπτοντος κυματισμού (T) στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t), τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ η T , $\uparrow$ ο K_t), παρά τις διαφοροποιήσεις των λοιπών παραμέτρων κατά περίπτωση.

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της μεταβολής της περιόδου, δεδομένου και του πολυπαραμετρικού χαρακτήρα του K_t , περιορίζω στα διαγράμματα τις μεταβλητές παραμέτρους.

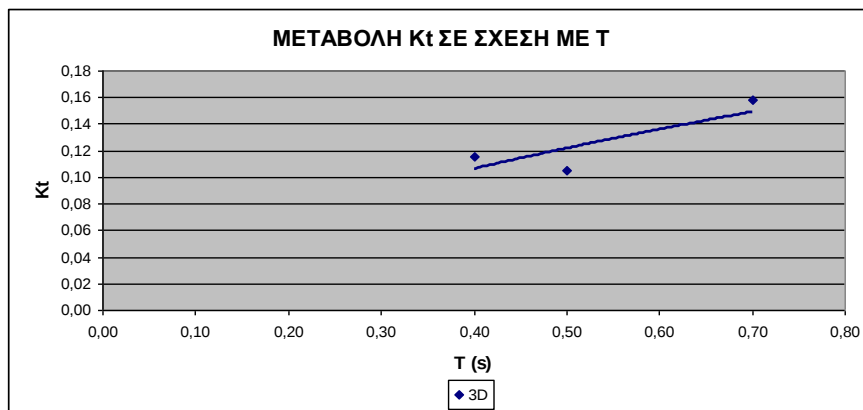


(1o)

$h_s = 0,013$ m

$l = 0,16$ m

$H_i = 0,014$ m

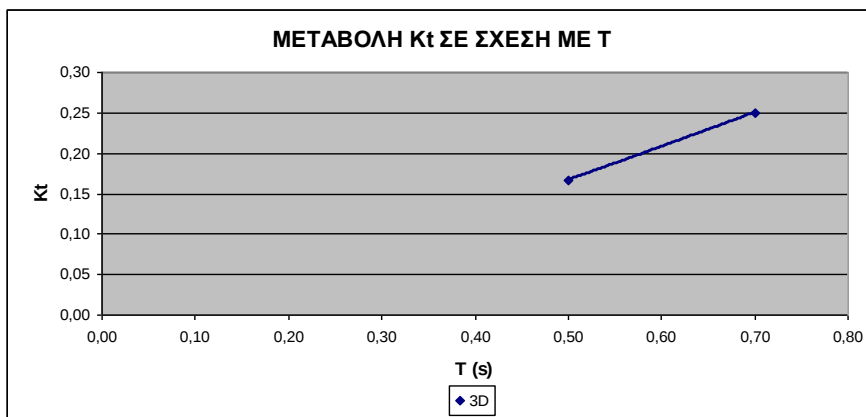


(2o)

$h_s = 0,013$ m

$l = 0,16$ m

$H_i = 0,019$ m

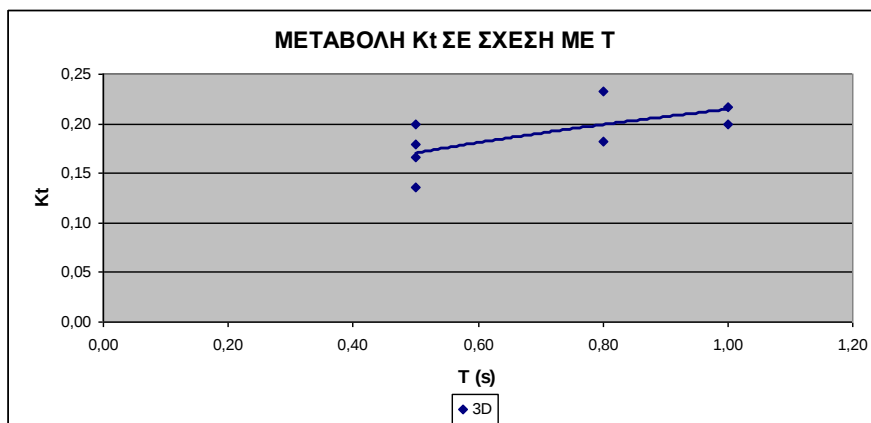


(3o)

$h_s = 0,015$ m

$l = 0,16$ m

$H_i = 0,012$ m

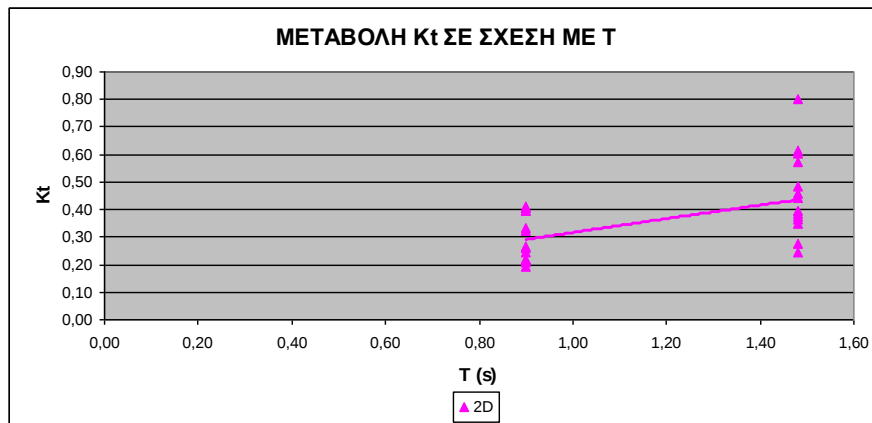


(4o)

$h_s = 0,013$ m

$l = 0,38$ m

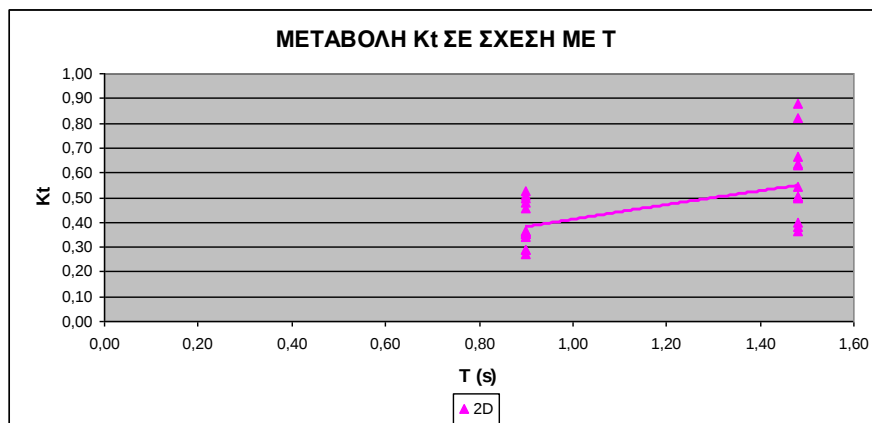
$b = 0,075$ m



(5o)

$l = 1,00$ m

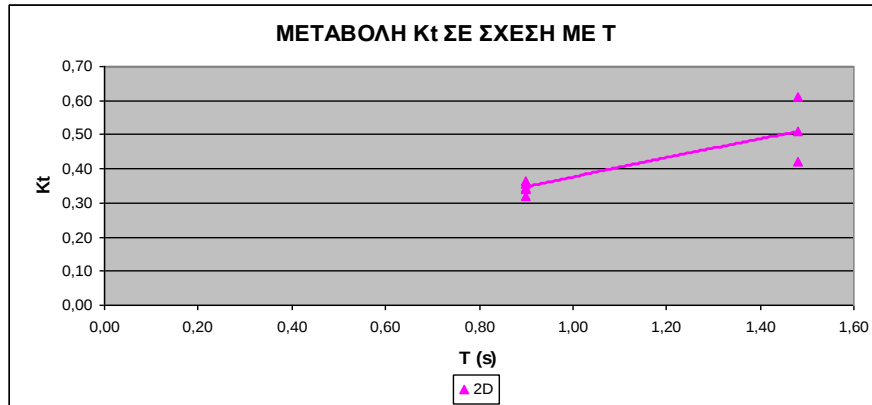
$b = 0,120$ m



(6o)

$l = 1,00$ m

$b = 0,240$ m



(7o)

$h_s = 0,090$ m

$l = 1,00$ m

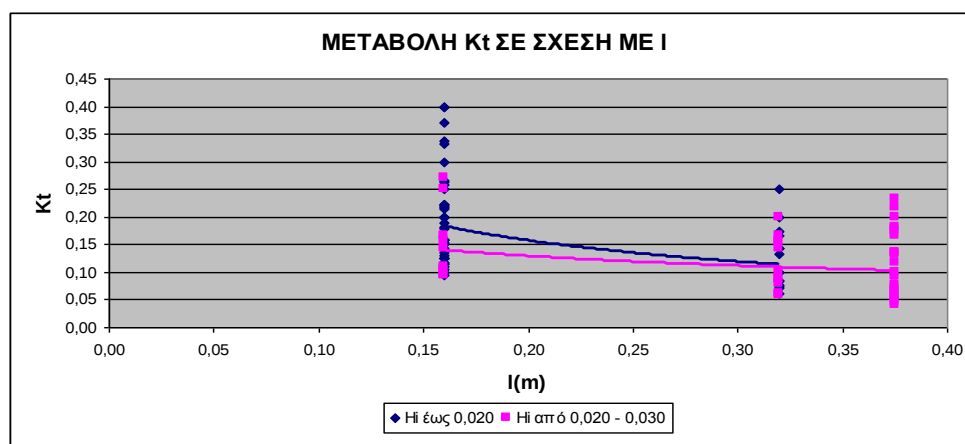
$b = 0,300$ m

Σχήμα 5.3 Διαγράμματα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με την περίοδο (T) του προσπίπτοντος κυματισμού, με περιορισμένες μεταβλητές παραμέτρους.

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων 1^{ου} και 2^{ου}, διαπιστώνεται και η μείωση του συντελεστή K_t με την αύξηση του ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού.

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων 5^{ου} και 6^{ου}, φαίνεται ότι η αύξηση του πλάτους του αγωγού ανανέωσης επιφέρει αύξηση του συντελεστή K_t .

Β) ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΤΗ ΒΥΘΙΣΗ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΑΝΑΝΕΩΣΗΣ ΥΔΑΤΩΝ



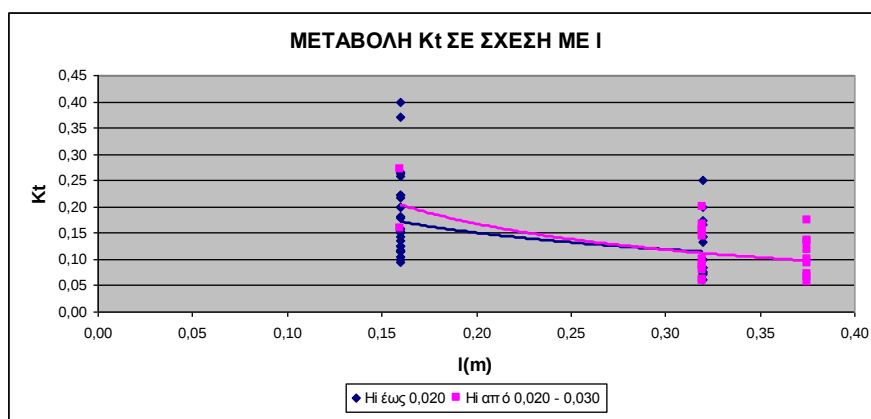
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή μήκους (l) αγωγού ανανέωσης.

Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται σύμπτωση συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή του μήκους του αγωγού ανανέωσης στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης (δηλαδή όταν $\uparrow$ το l , $\downarrow$ ο K_t), παρά τις διαφοροποιήσεις των λοιπών παραμέτρων κατά περίπτωση. Μεταβολή απολύτως λογική αφού σε μεγαλύτερου μήκους αγωγούς, παρουσιάζεται μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας.

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της μεταβολής του μήκους αγωγού ανανέωσης, περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα πειράματα 2D και 3D πραγματοποιήθηκαν για έντονα διαφορετικά μήκη αγωγού. Επίσης να σημειωθεί ότι τα πειράματα 2D πραγματοποιήθηκαν μόνο για ένα μήκος αγωγού (1m) και δεν μπορούν να συναχθούν ασφαλή συμπεράσματα κατ' αντιστοιχία.

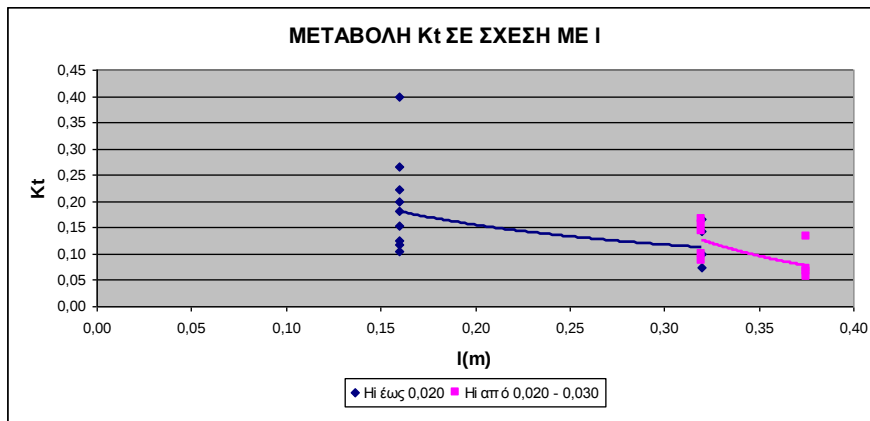
Συσχέτιση δοκιμών 2D και 3D με διαφορετικά χαρακτηριστικά κύματος και διαφορετικό μήκος αγωγού, με δεδομένο τον πολυπαραμετρικό χαρακτήρα του K_t και το ότι επηρεάζεται και από τη σχέση μεταξύ L_0 (άρα και του T) του προσπίπτοντος κυματισμού και l αγωγού, δεν μπορούν να οδηγήσουν σε αξιολογήσιμα στοιχεία.



(1^ο)

$h_s = 0,013 \text{ m}$

$b = 0,050 \text{ m}$

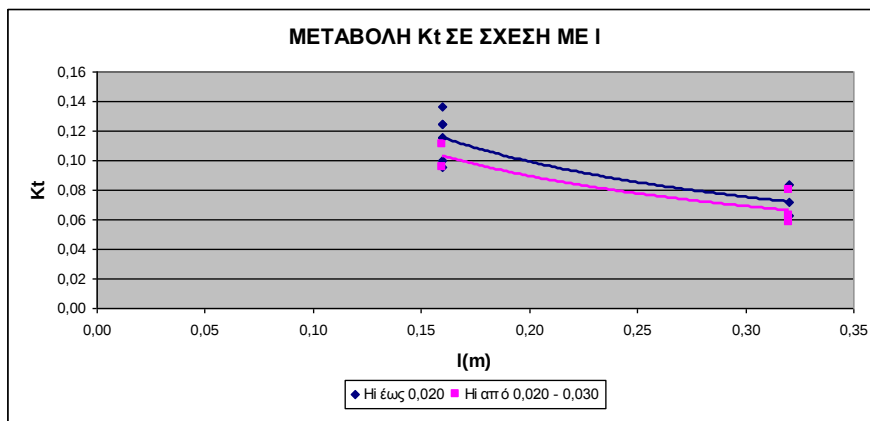


(2°)

$h_s = 0,013 \text{ m}$

$b = 0,050 \text{ m}$

$T = 0,50 \text{ s}$



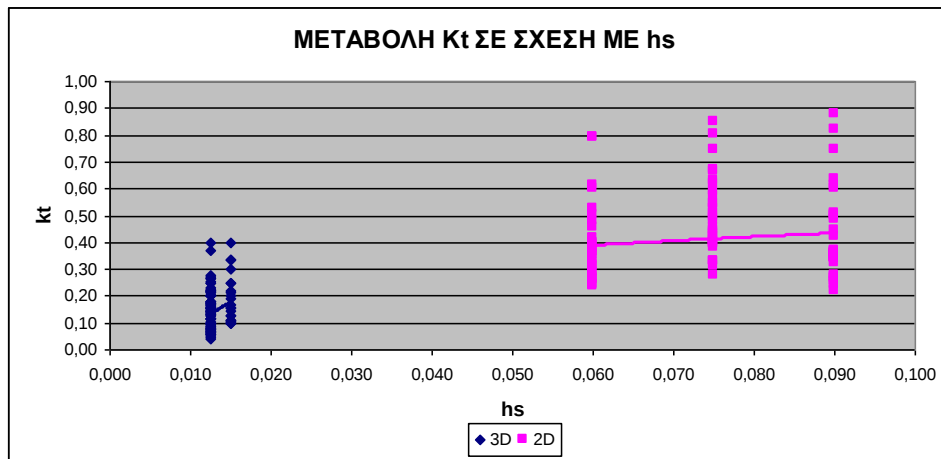
(3°)

$b = 0,050 \text{ m}$

$L_o = 0,2375 \text{ m}$

Σχήμα 5.5

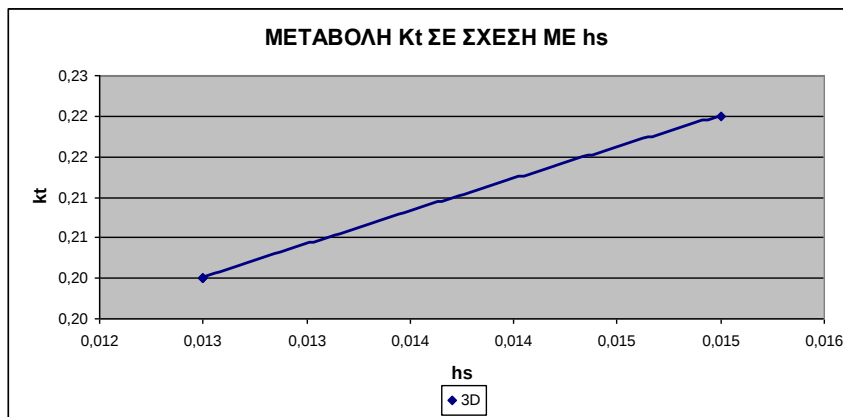
Διαγράμματα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή του μήκους (l) του αγωγού ανανέωσης, με περιορισμένες μεταβλητές παραμέτρους



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή του βάθους νερού στον πυθμένα του αγωγού ανανέωσης (h_s), κατά συνέπεια και του ύψους (h) του αγωγού ανανέωσης, αφού για όλα τα εξεταζόμενα πειράματα $h_s = h/2$ ($S=0$).

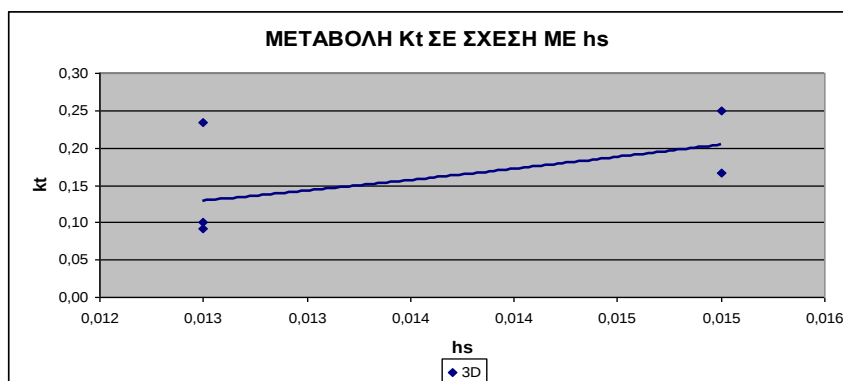
Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή του βάθους νερού στον πυθμένα του αγωγού ανανέωσης επί του συντελεστή κυματικής διείσδυσης, τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ το h_s , $\uparrow$ ο K_t) παρά τις διαφοροποιήσεις των λοιπών παραμέτρων κατά περίπτωση.

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της μεταβολής του βάθους νερού στον πυθμένα αγωγού ανανέωσης, περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν :



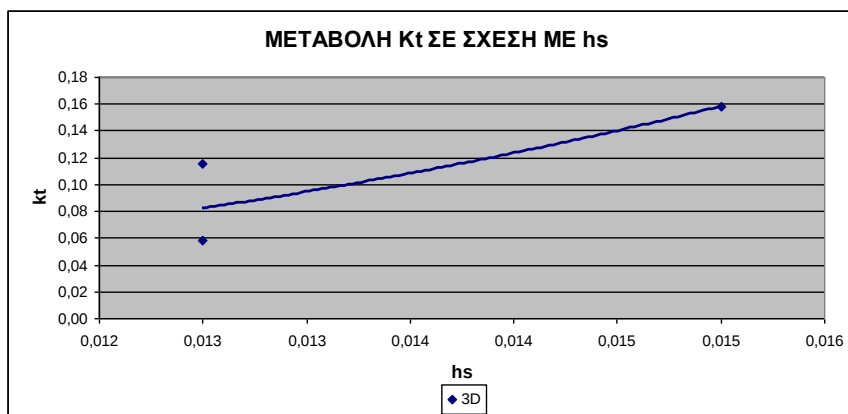
(1^ο)

$H_i = 0,010 \text{ m}$



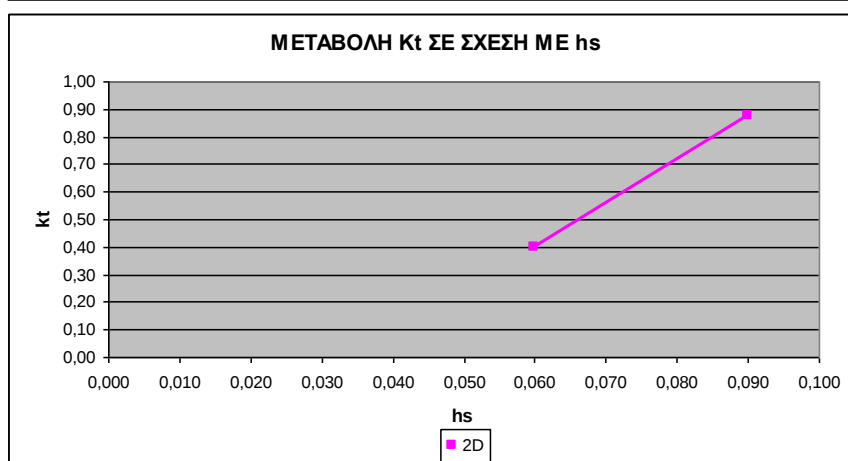
(2^ο)

$H_i = 0,012 \text{ m}$
($H_i < h_s$)



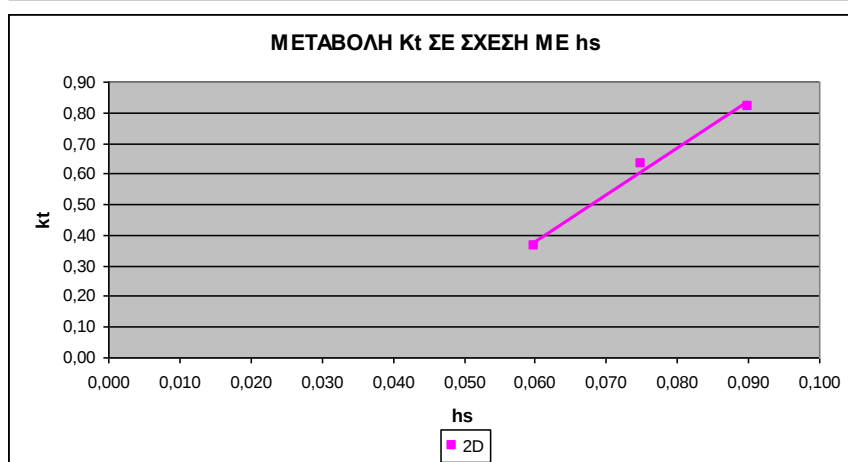
(3°)

$H_i = 0,019 \text{ m}$
 $T = 0,40 \text{ s}$
 $(H_i > h_s)$



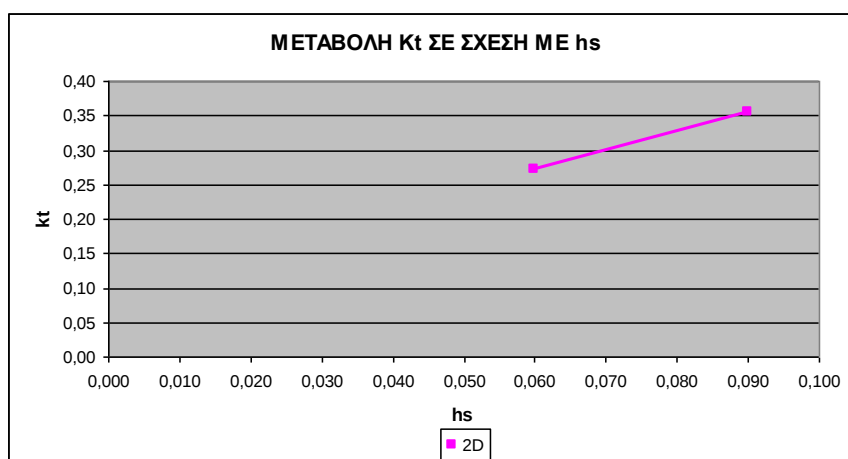
(4°)

$H_i = 0,0388 \text{ m}$
 $b = 0,240 \text{ m}$
 $(H_i < h_s)$



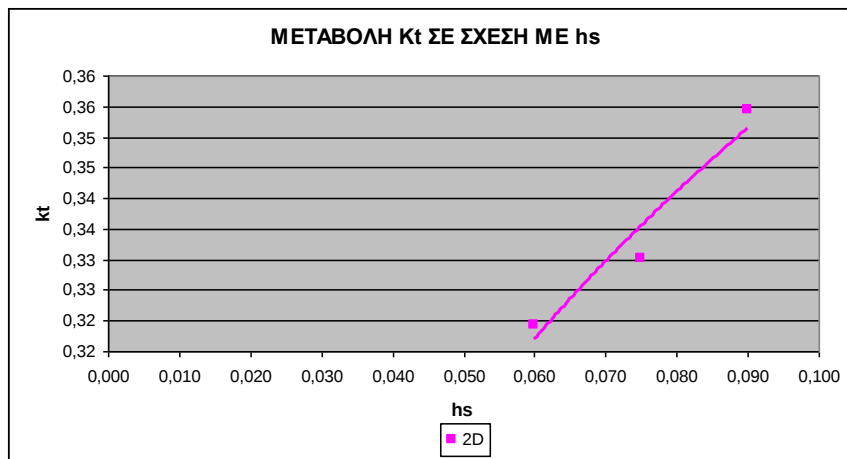
(5°)

$H_i = 0,0516 \text{ m}$
 $b = 0,240 \text{ m}$
 $(H_i < h_s)$



(6°)

$H_i = 0,0917 \text{ m}$
 $b = 0,240 \text{ m}$
 $(H_i > h_s)$

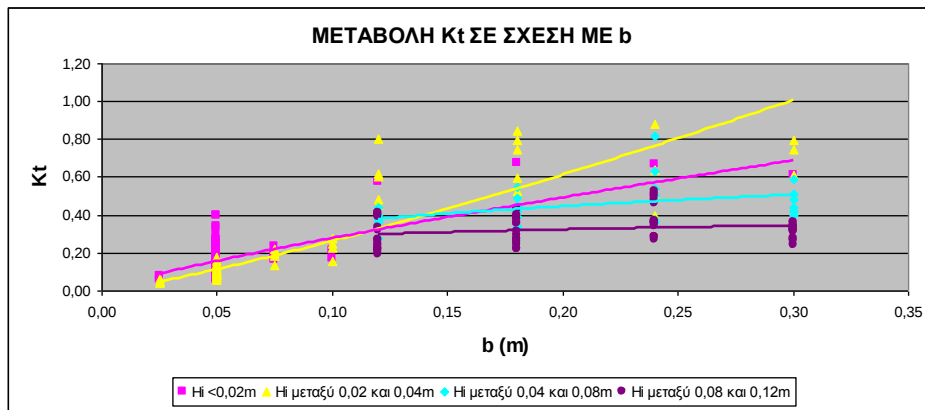


(7^ο)

$H_i = 0,1021 \text{ m}$
 $b = 0,300 \text{ m}$
 $(H_i > h_s)$

Σχήμα 5.7 Διαγράμματα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή βάθους νερού στον πυθμένα (h_s) αγωγού ανανέωσης, με περιορισμένες μεταβλητές παραμέτρους.

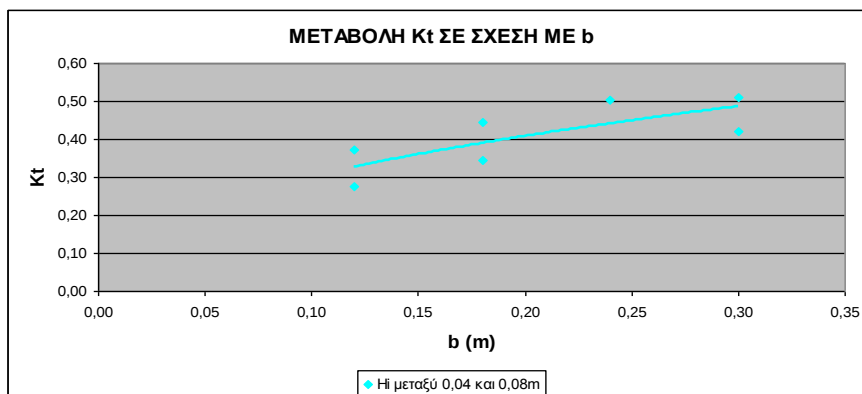
Από τη σύγκριση 4^{ου}, 5^{ου} και 6^{ου} διαγράμματος στα 2D, φαίνεται η μείωση του K_t με την αύξηση του H_i (για τις ίδιες τιμές b και h_s). Ανάλογο συμπέρασμα προκύπτει από τη σύγκριση της γραμμής τάσης του 1^{ου} και 2^{ου} διαγράμματος στα 3D.



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή του πλάτους (b) του αγωγού ανανέωσης

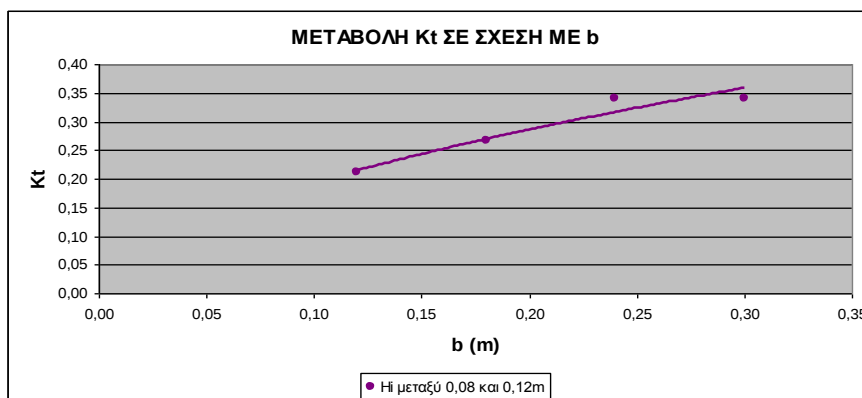
Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή του πλάτους του αγωγού ανανέωσης, τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ το b , $\uparrow$ ο K_t), για όλες τις περιοχές ύψους προσπίπτοντος κυματισμού και παρά τις διαφοροποιήσεις των λοιπών παραμέτρων κατά περίπτωση.

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της μεταβολής του πλάτους b του αγωγού ανανέωσης στον συντελεστή K_t , περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν :



(1°)

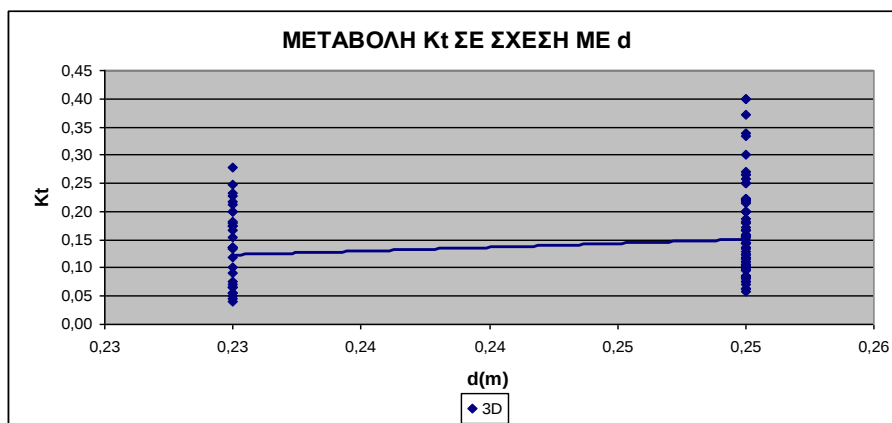
$h_s = 0,09 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$
 $T = 1,48 \text{ s}$



(2°)

$H_i = 0,1058 \text{ m}$
 $h_s = 0,09 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$
 $T = 0,90 \text{ s}$

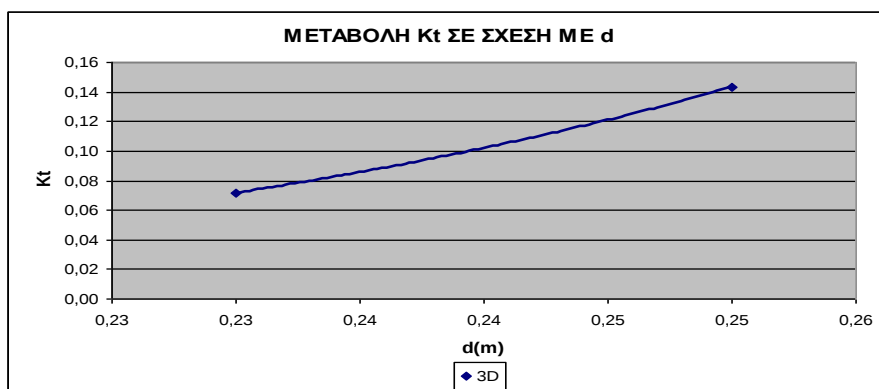
Σχήμα 5.9 Διαγράμματα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή πλάτους b του αγωγού ανανέωσης, με περιορισμένες μεταβλητές παραμέτρους.



Σχήμα 5.10 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή του βάθους d (m) του νερού.

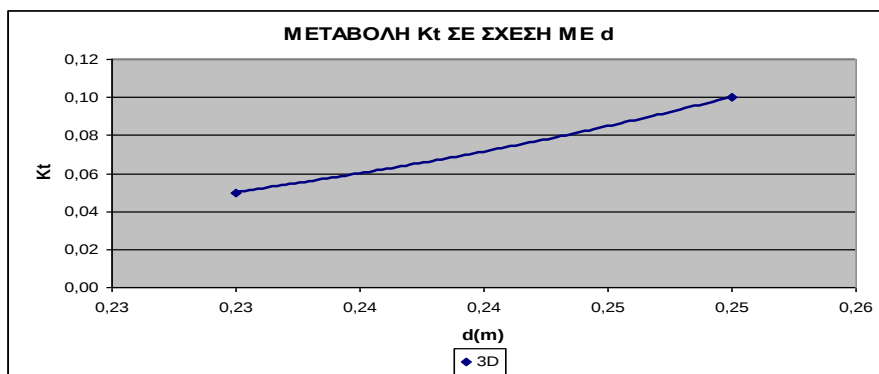
Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η επιρροή του βάθους του νερού (απόσταση ΣΗΥ από πυθμένα) για τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D (δηλαδή όταν $\uparrow$ το d , $\uparrow$ ο K_t) παρά τις διαφοροποιήσεις των λοιπών παραμέτρων κατά περίπτωση. Όλα τα πειράματα 2D πραγματοποιήθηκαν για σταθερό βάθος νερού 0,60 m.

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της μεταβολής του βάθους νερού d στον συντελεστή K_t , περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν :



(1^ο)

$H_i = 0,0140$ m
 $h_s = 0,013$ m
 $b = 0,50$ m
 $T = 0,50$ s



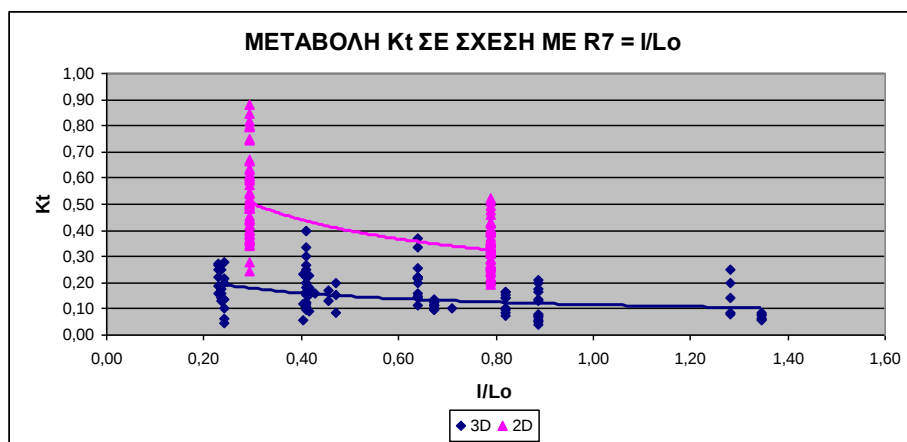
(2^ο)

$H_i = 0,020$ m
 $h_s = 0,013$ m
 $T = 0,50$ s

Σχήμα 5.11 Διαγράμματα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή βάθους d νερού, με περιορισμένες μεταβλητές παραμέτρους.

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων 1^{ου} και 2^{ου} διαπιστώνεται η μείωση του συντελεστή K_t με την αύξηση του ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού H_i .

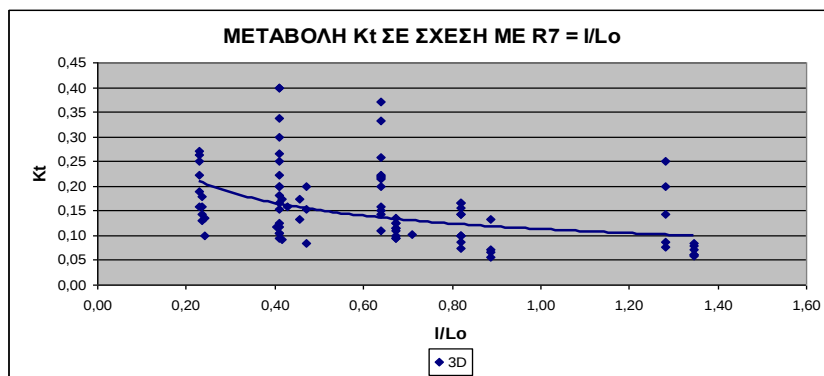
5.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΑΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ



Σχήμα 5.12 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή της αδιάστατης παραμέτρου $R_7 = l/L_0$.

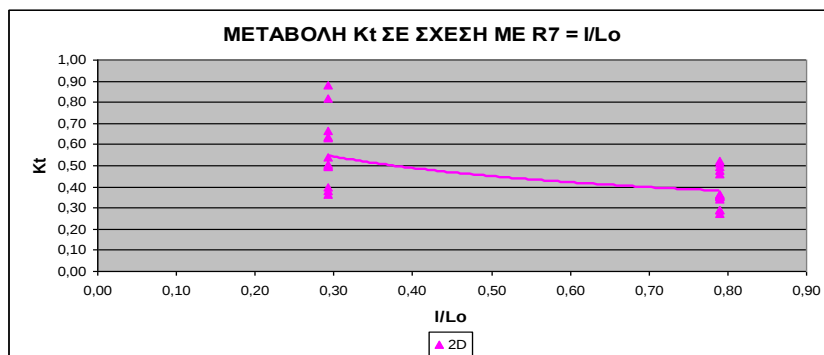
Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή της αδιάστατης παραμέτρου του λόγου μήκους αγωγού ανανέωσης προς μήκος προσπίπτοντος κύματος ($R_7 = l/L_0$), στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t), τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ ο l/L_0 , $\downarrow$ ο K_t) παρά τις διαφοροποιήσεις των λοιπών παραμέτρων κατά περίπτωση.

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της μεταβολής του λόγου l/L_0 , περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν :



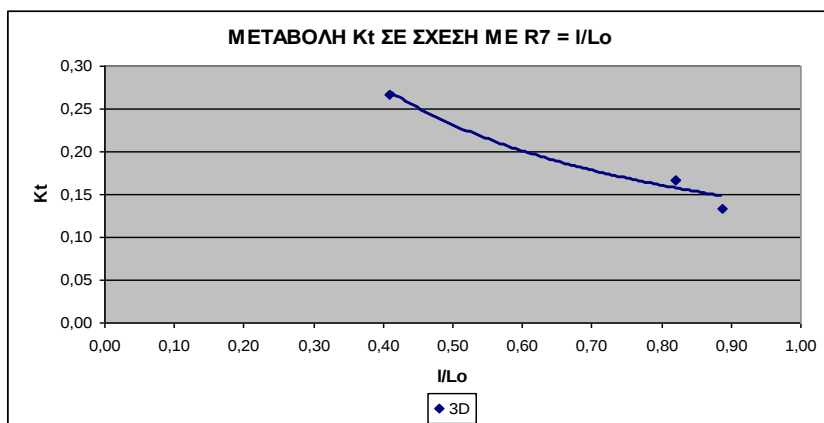
(1o)

$b = 0,050 \text{ m}$



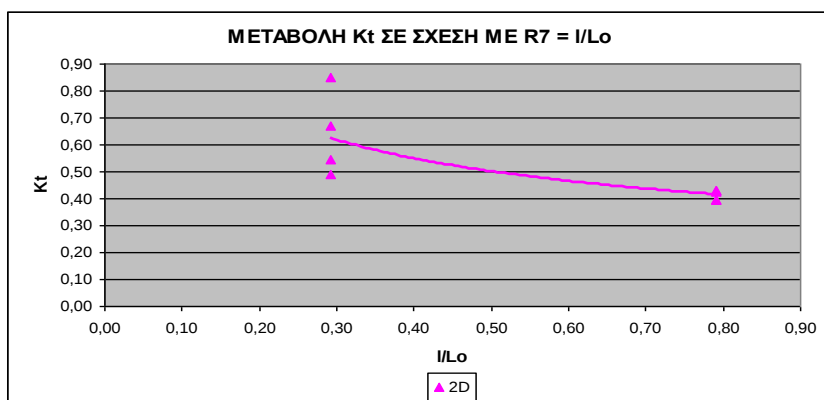
(2o)

$b = 0,240 \text{ m}$



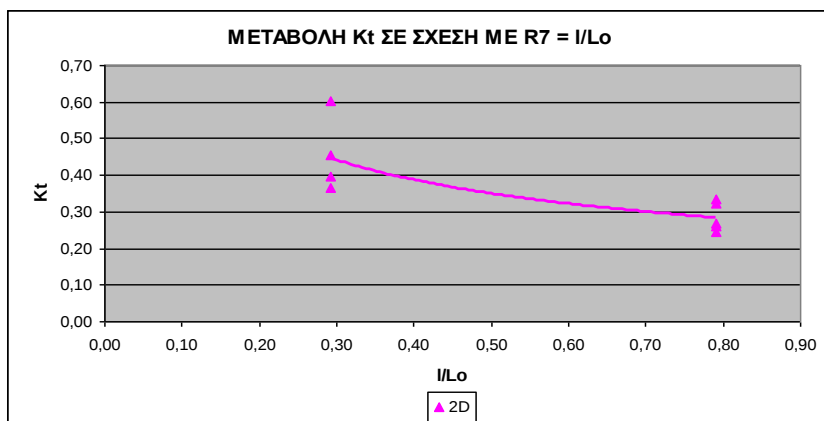
(3^ο)

$H_i = 0,006 \text{ m}$
 $b = 0,050 \text{ m}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$
 $T = 0,50 \text{ sec}$



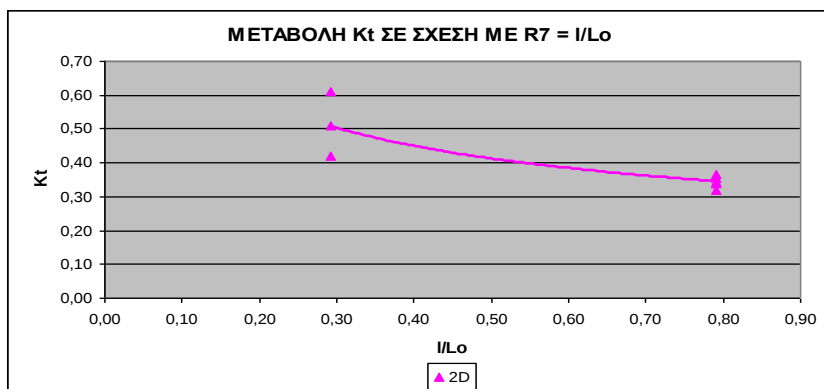
(4ο)

$l = 1,00 \text{ m}$
 $b = 0,180 \text{ m}$
 $h_s = 0,075 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$



(5ο)

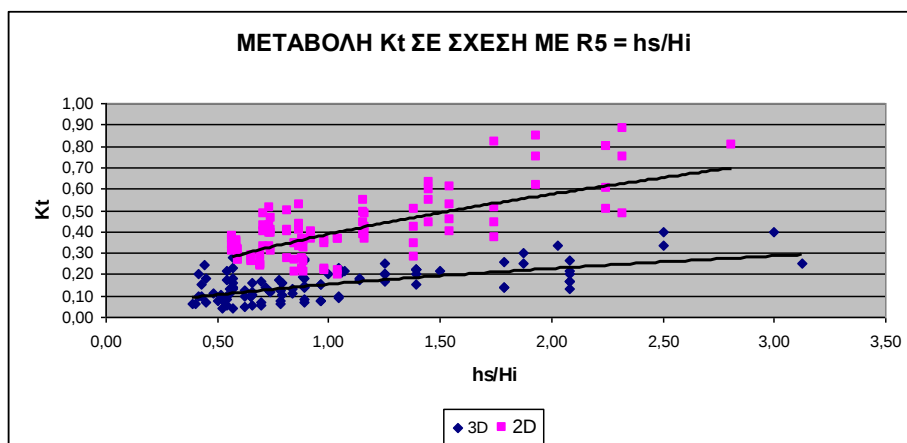
$b = 0,120 \text{ m}$
 $h_s = 0,060 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$



(6ο)

$b = 0,300 \text{ m}$
 $h_s = 0,090 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$

Επιβεβαιώνεται από τα άνω διαγράμματα, ότι η επιρροή του λόγου l/L_0 στον K_t είναι μεγαλύτερη για τιμές $(l/L_0) < 1$, δηλαδή όταν $l < L_0$.

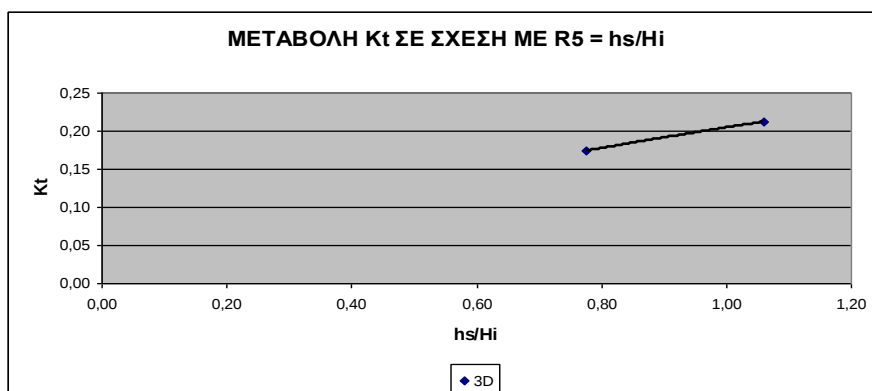


Σχήμα 5.13 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή του λόγου καταβύθισης $R_5 = h_s/H_i$.

Από τα άνω διαγράμματα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή της αδιάστατης παραμέτρου του λόγου καταβύθισης h_s/H_i , στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης, τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ ο h_s/H_i , $\uparrow$ ο K_t), παρά τις διαφοροποιήσεις των λοιπών παραμέτρων κατά περίπτωση.

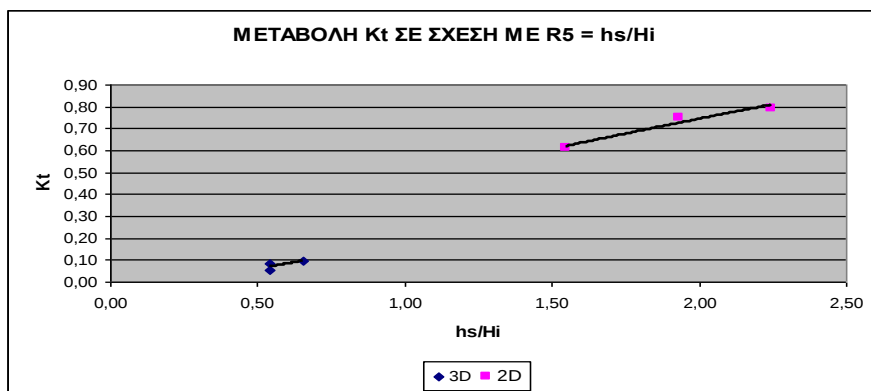
Όμως όταν το ύψος h_s είναι πολλαπλάσιο του ύψους κύματος H_i , παρουσιάζεται σε μια ομάδα αποτελεσμάτων αντιστροφή της μεταβολής, χωρίς θεωρητική τεκμηρίωση.

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της μεταβολής του λόγου καταβύθισης h_s/H_i , περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν. Επιβεβαιώνεται ότι με αύξηση του R_5 αυξάνεται ο K_t για διάφορες τιμές των λοιπών παραμέτρων.



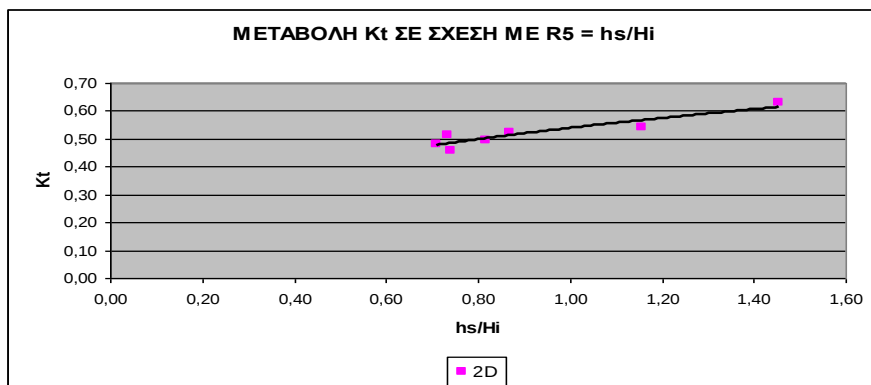
(1o)

$H_i < 0,02 \text{ m}$
 $b = 0,100 \text{ m}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$



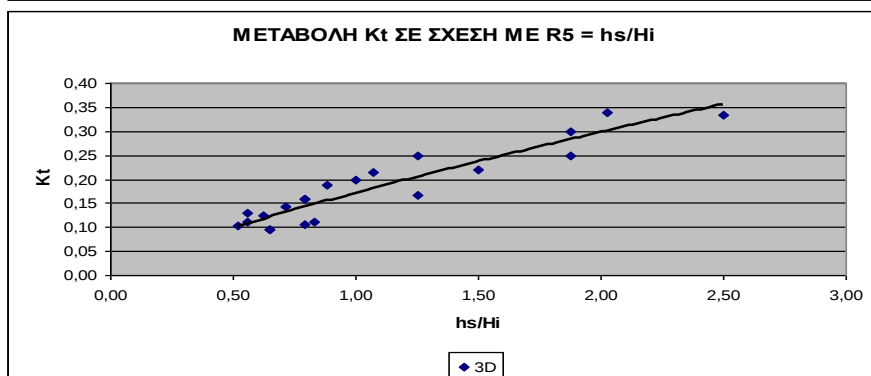
(20)

$0,02 \text{ m} < H_i < 0,05 \text{ m}$
 $b = 0,05 \text{ m}$ OR $0,30 \text{ m}$
 $T = 0,5 \text{ sec}$ OR $1,48 \text{ sec}$



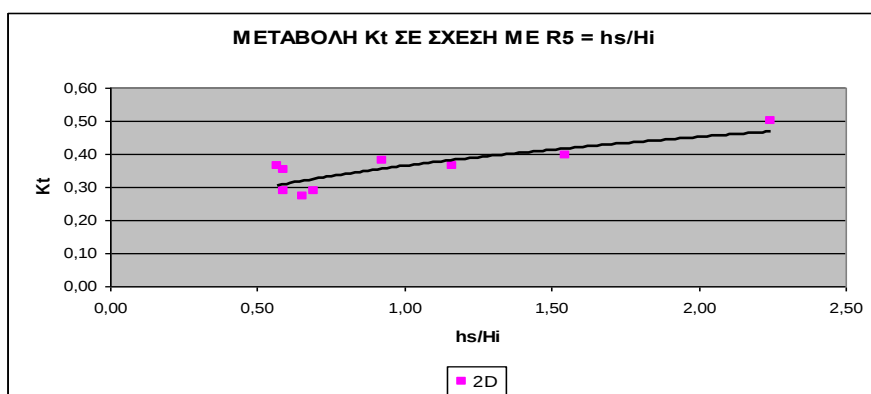
(30)

$0,05 \text{ m} < H_i$
 $b = 0,240 \text{ m}$
 $h_s = 0,075 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$



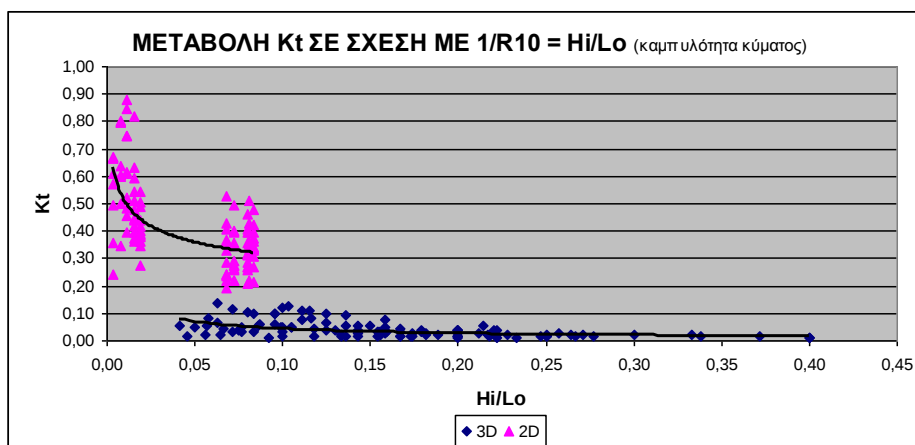
(50)

$h_s = 0,015 \text{ m}$
 $l = 0,160 \text{ m}$
 $d = 0,25 \text{ m}$
 $b = 0,050 \text{ m}$



(60)

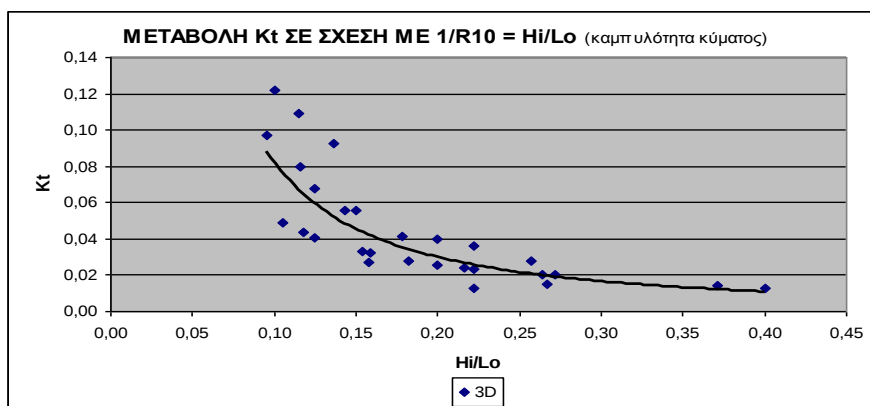
$h_s = 0,060 \text{ m}$
 $b = 0,240 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$



Σχήμα 5.14 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με μεταβολή της καμπυλότητας H_i/L_0 του προσπίπτοντος κύματος.

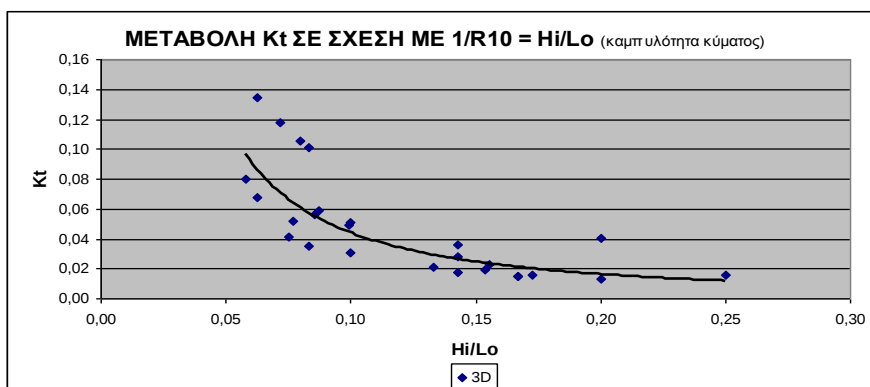
Από τα άνω διαγράμματα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή της αδιάστατης παραμέτρου της καμπυλότητας H_i/L_0 , στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης, τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ ο H_i/L_0 , $\downarrow$ ο K_t). Γεγονός που αναμένονταν, καθώς με την αύξηση της καμπυλότητας, αυξάνεται η θραύση των κυμάτων και συνεπώς παρατηρείται σημαντική απώλεια ενέργειας.

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της μεταβολής της καμπυλότητας του προσπίπτοντος κύματος, περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν.



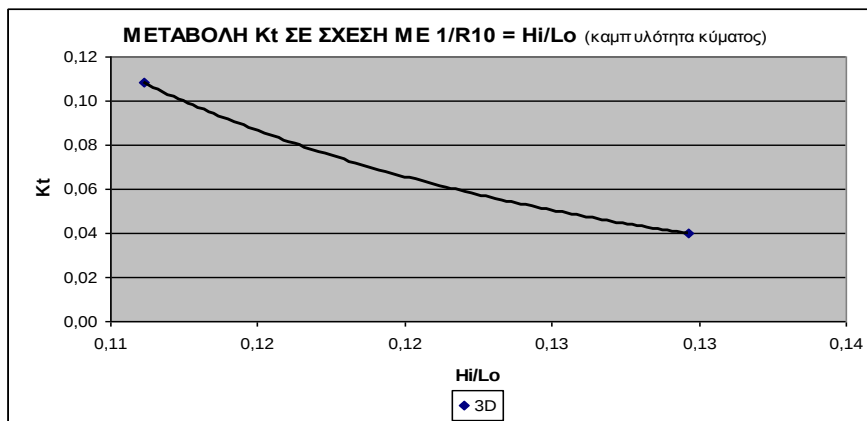
(1o)

$l = 0,160 \text{ m}$
 $d = 0,25 \text{ m}$
 $b = 0,050 \text{ m}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$



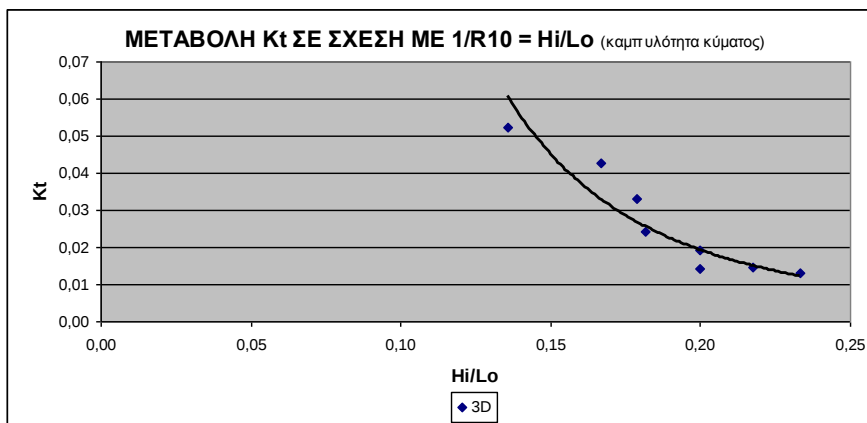
(2o)

$l = 0,320 \text{ m}$
 $d = 0,25 \text{ m}$
 $b = 0,050 \text{ m}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$



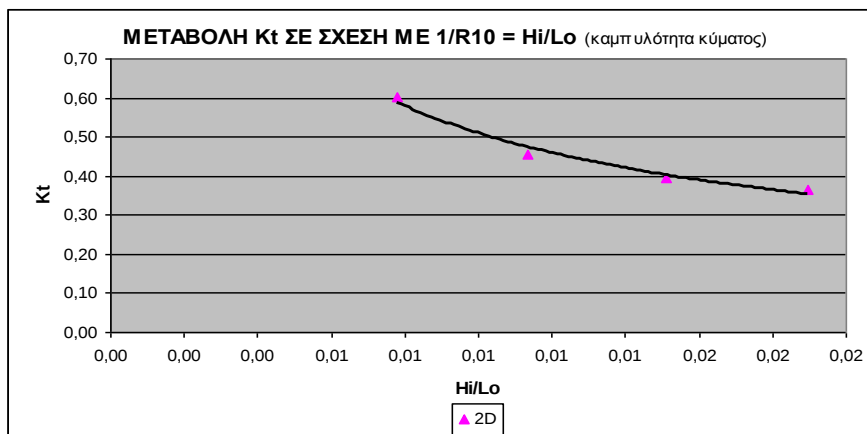
(3o)

$H_i = 0,027 \text{ m}$
 $h_s = 0,015 \text{ m}$
 $d = 0,25 \text{ m}$
 $l = 0,160 \text{ m}$
 $b = 0,050 \text{ m}$



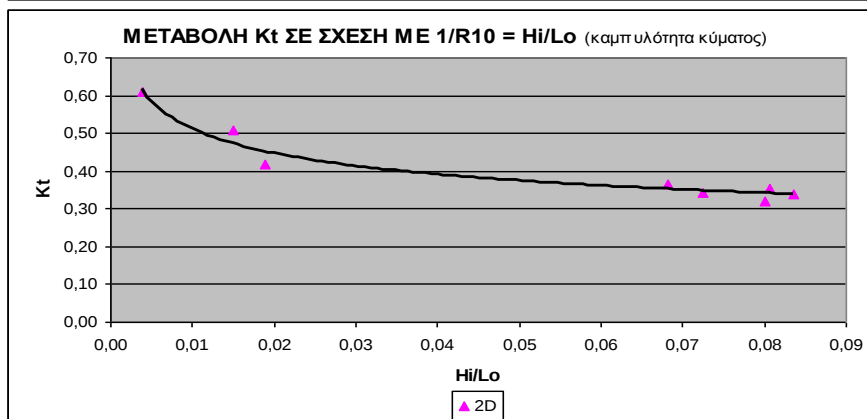
(4o)

$b = 0,075 \text{ m}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$
 $d = 0,23 \text{ m}$
 $l = 0,380 \text{ m}$



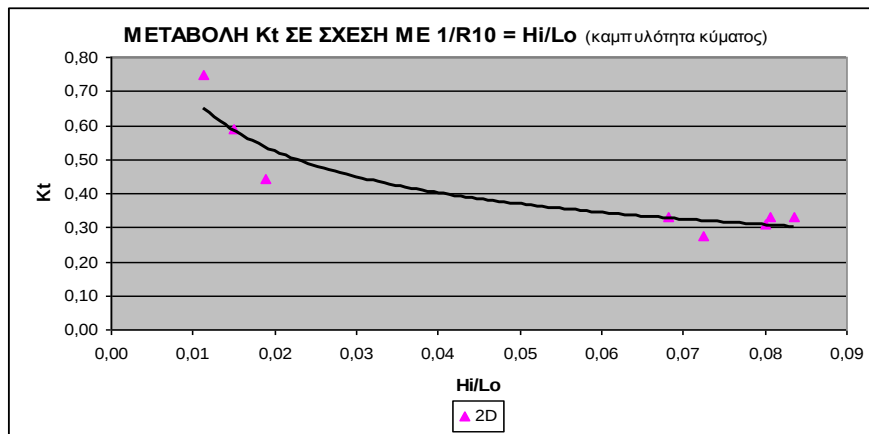
(5o)

$l = 1,000 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$
 $b = 0,120 \text{ m}$
 $h_s = 0,060$
 $T = 1,48 \text{ sec}$



(6o)

$h_s = 0,090 \text{ m}$
 $b = 0,300 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$



(7ο)

$h_s = 0,075 \text{ m}$

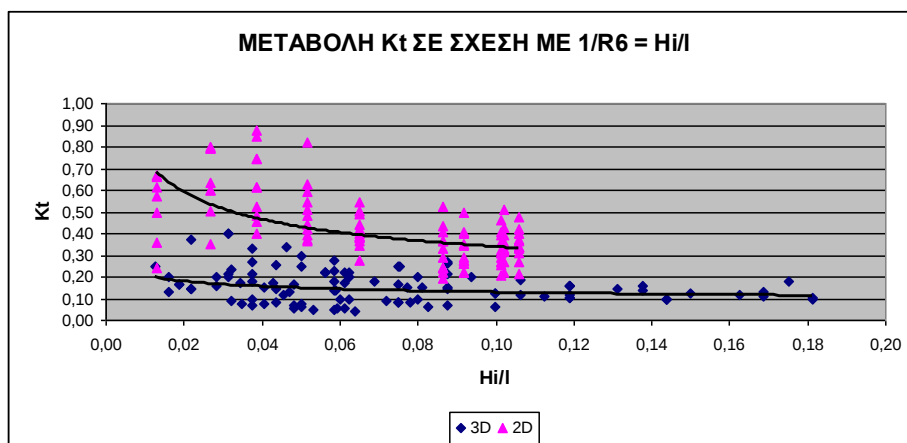
$b = 0,300 \text{ m}$

$d = 0,60 \text{ m}$

$l = 1,00 \text{ m}$

Από σύγκριση 1^{ου} και 2^{ου} διαγράμματος στα 3D, διαπιστώνεται ως αναμένονταν μείωση του K_t για αύξηση του l .

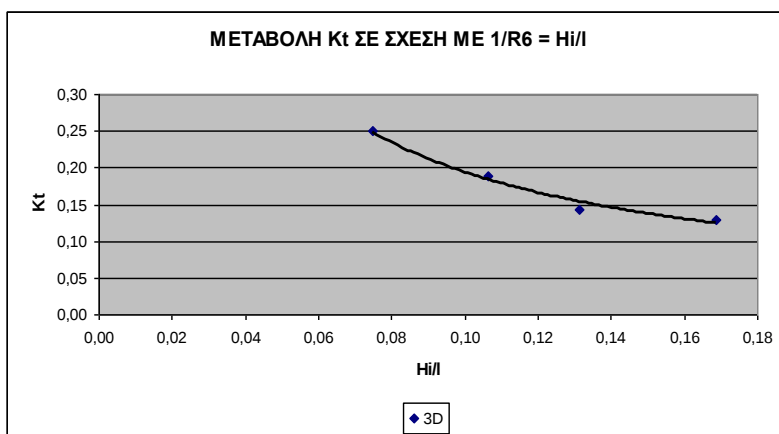
Από τη σύγκριση του 6^{ου} και 7^{ου} διαγράμματος, διαπιστώνεται ως αναμένονταν η αύξηση του K_t για αύξηση του h_s .



Σχήμα 5.15 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με το λόγο ύψους προσπίπτοντος κύματος προς το μήκος αγωγού ανανέωσης $1/R_6 = H_i/l$.

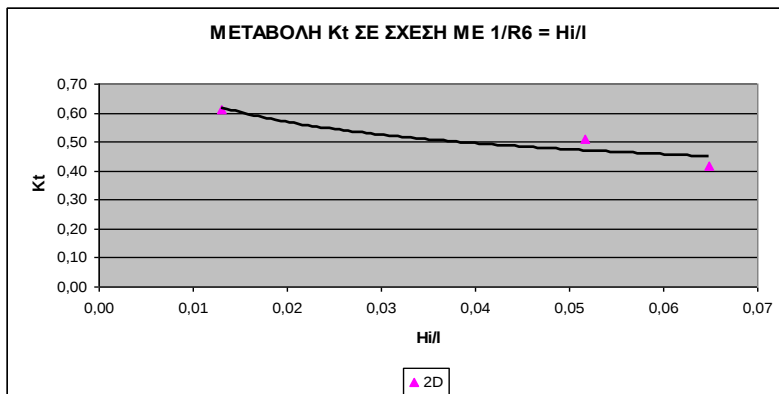
Από τα άνω διαγράμματα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή της αδιάστατης παραμέτρου του λόγου ύψους προσπίπτοντος κύματος προς το μήκος αγωγού (H_i/l), στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t), τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ ο H_i/l , $\downarrow$ ο K_t).

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της μεταβολής της καμπυλότητας του προσπίπτοντος κύματος, περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν.



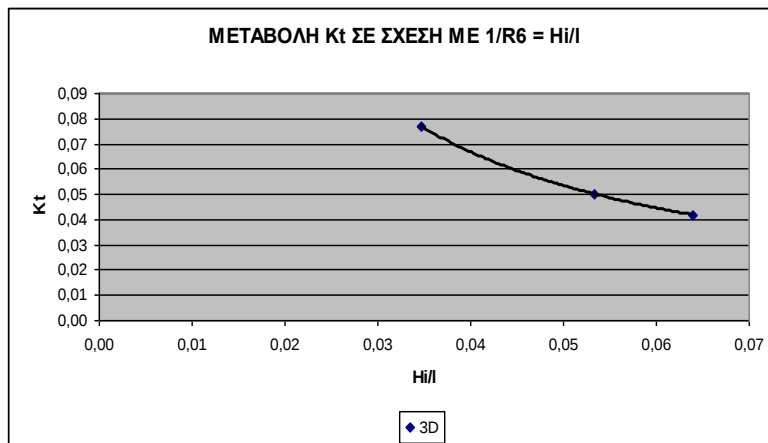
(1o)

$T = 0,70 \text{ sec}$
 $l = 0,16 \text{ m}$
 $h_s = 0,015 \text{ m}$
 $b = 0,050 \text{ m}$
 $d = 0,25 \text{ m}$



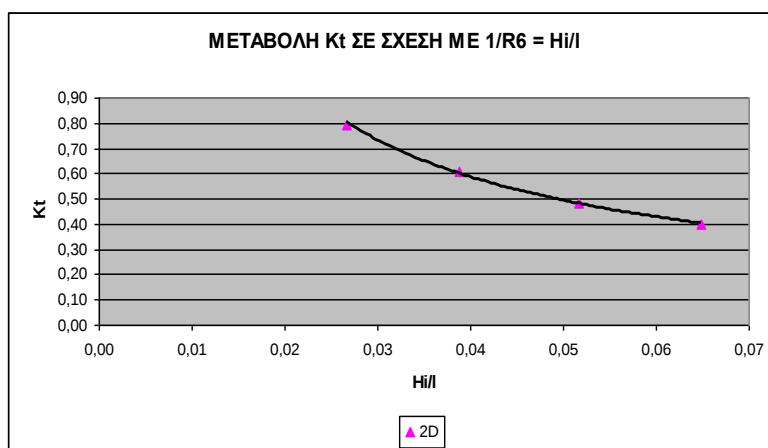
(2o)

$T = 1,48 \text{ s}$
 $h_s = 0,09 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $b = 0,300 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$



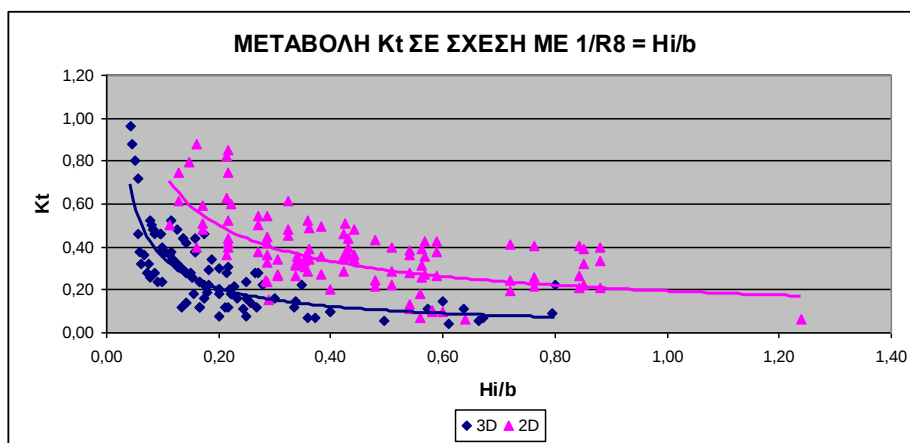
(3o)

$h_s = 0,013 \text{ m}$
 $b = 0,025 \text{ m}$
 $l = 0,380 \text{ m}$
 $d = 0,23 \text{ m}$
 $T = 0,50 \text{ sec}$
 $Lo = 0,4222 \text{ m}$



(4o)

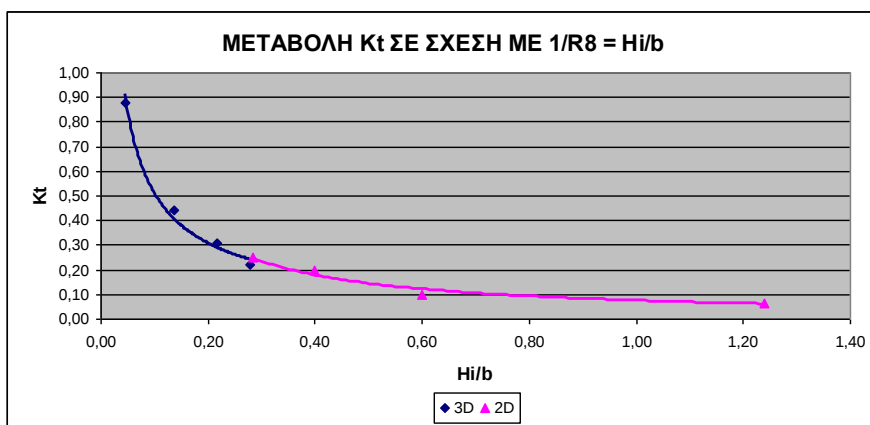
$b = 0,300 \text{ m}$
 $h_s = 0,06 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$
 $T = 1,48 \text{ sec}$
 $l = 1,00 \text{ m}$



Σχήμα 5.16 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με το λόγο ύψους προσπίπτοντος κύματος προς το πλάτος του αγωγού ανανέωσης $1/R_8 = H_t/b$.

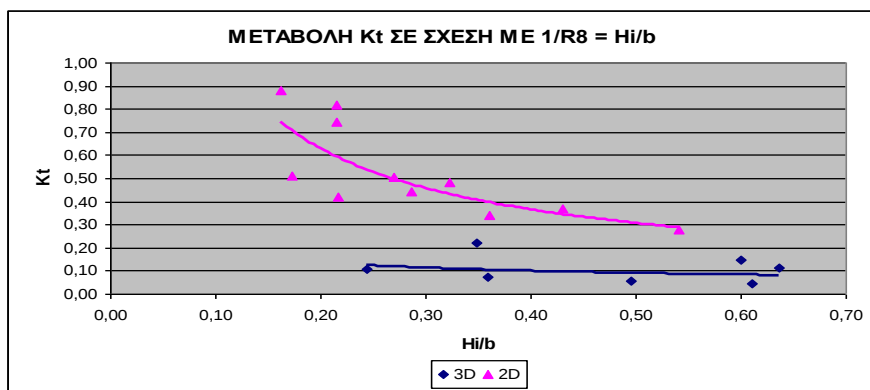
Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή της αδιάστατης παραμέτρου του λόγου ύψους προσπίπτοντος κύματος προς το πλάτος αγωγού (H_t/b), στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t), τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ ο H_t/b , $\downarrow$ ο K_t).

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της αδιάστατης παραμέτρου του λόγου ύψους προσπίπτοντος κύματος προς το πλάτος αγωγού, περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν.



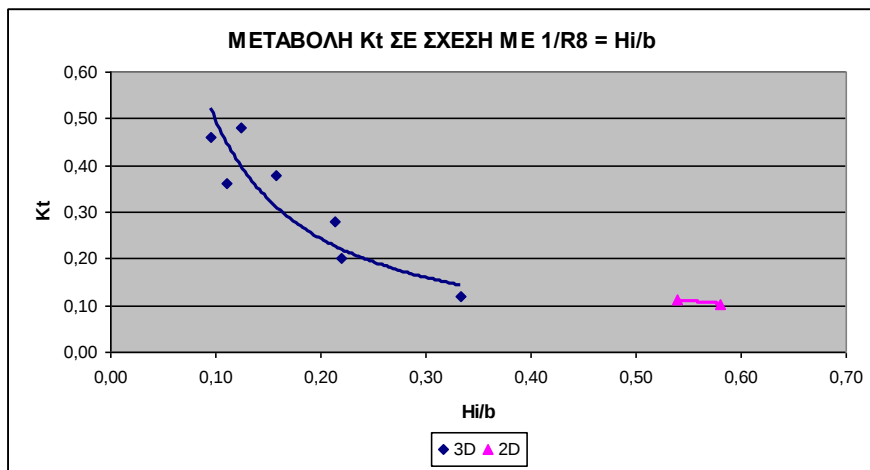
(1o)

$T = 1,00 \text{ sec}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$
 $l = 0,380 \text{ m}$
 $d = 0,23 \text{ m}$



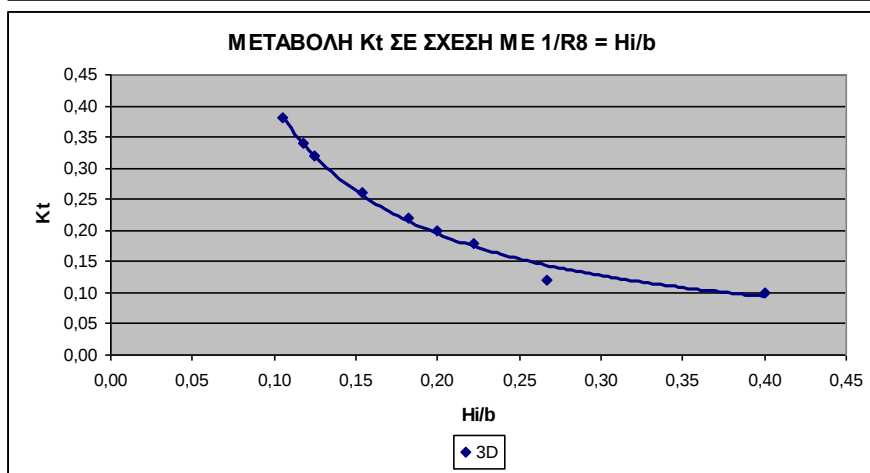
(2o)

$d = 0,60 \text{ m}$
 $T = 1,48 \text{ sec}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $h_s = 0,090 \text{ m}$



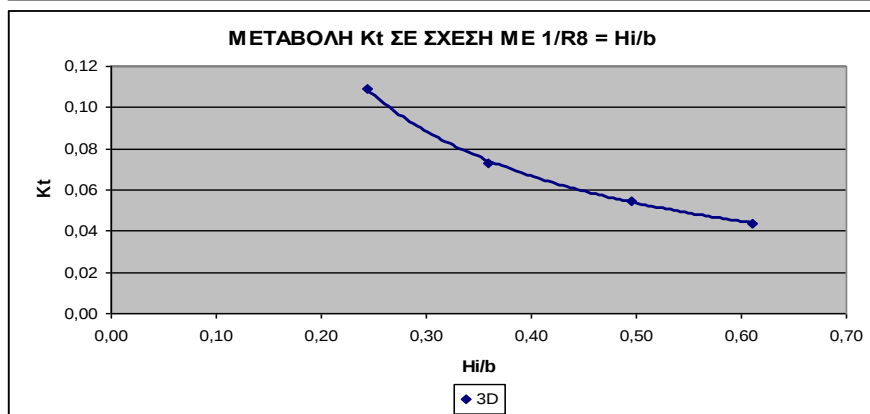
(30)

$l = 0,16 \text{ m}$
 $h_s = 0,015 \text{ m}$
 $d = 0,25 \text{ m}$
 $T = 0,40 \text{ sec}$



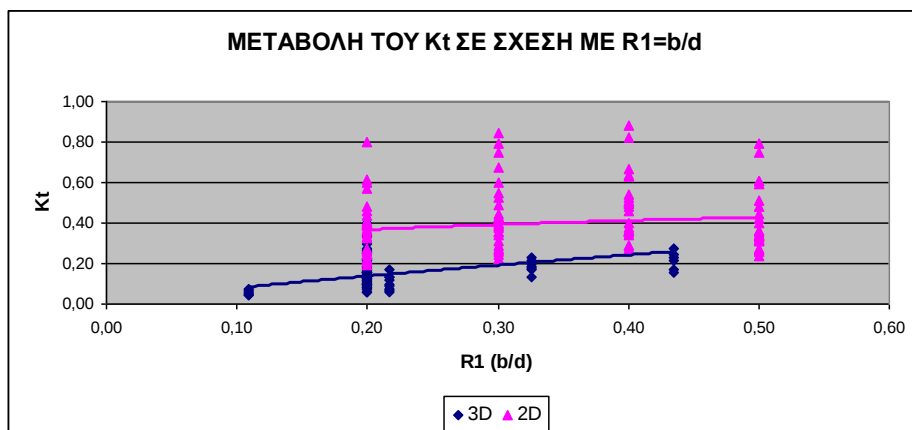
(40)

$h_s = 0,013 \text{ m}$
 $l = 0,160 \text{ m}$
 $d = 0,25 \text{ m}$
 $T = 0,50 \text{ sec}$



(50)

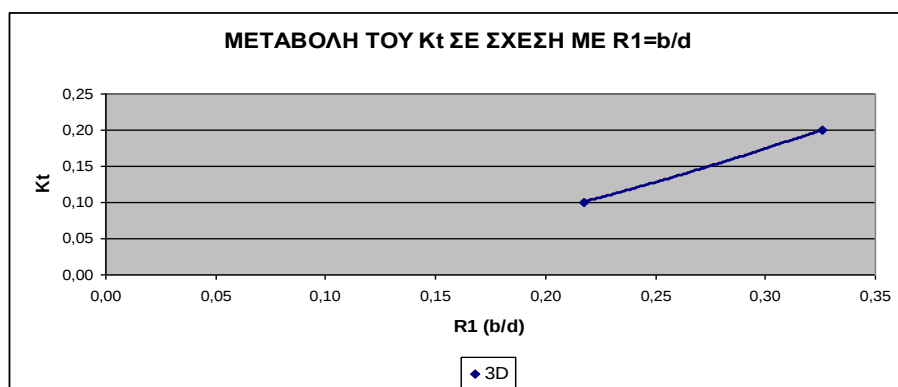
$H_i = 0,0131 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $h_s = 0,090 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$
 $T = 1,48 \text{ sec}$



Σχήμα 5.17 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με το λόγο πλάτους του αγωγού ανανέωσης προς βάθος νερού ($R_1 = b/d$)

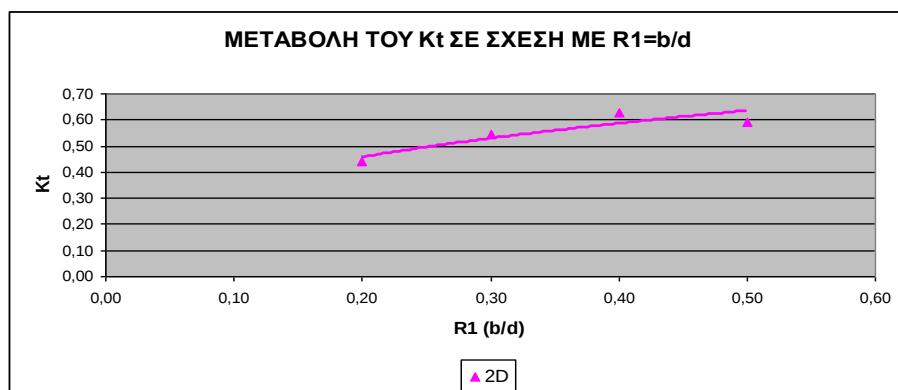
Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή της αδιάστατης παραμέτρου του λόγου πλάτους αγωγού προς βάθος νερού (b/d), στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t), τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ ο b/d , $\uparrow$ ο K_t).

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της αδιάστατης παραμέτρου του λόγου πλάτους αγωγού προς βάθος νερού, περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν.



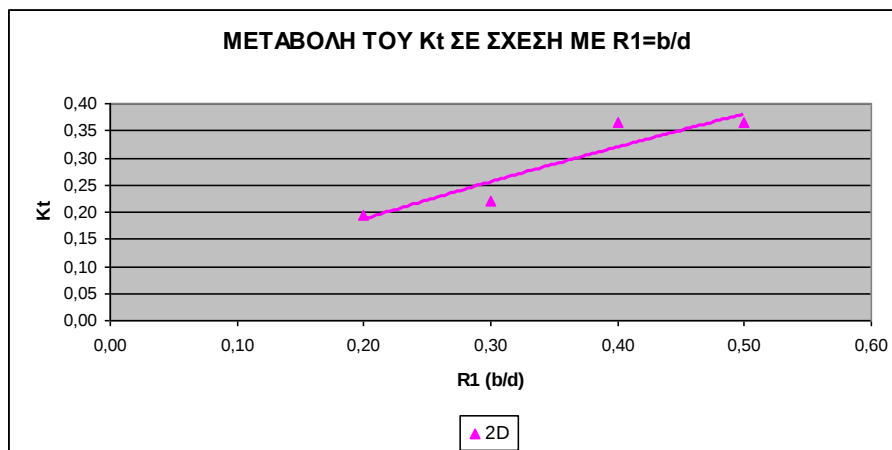
(1o)

$l = 0,38 \text{ m}$
 $T = 1,00 \text{ sec}$
 $H_i = 0,03 \text{ m}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$



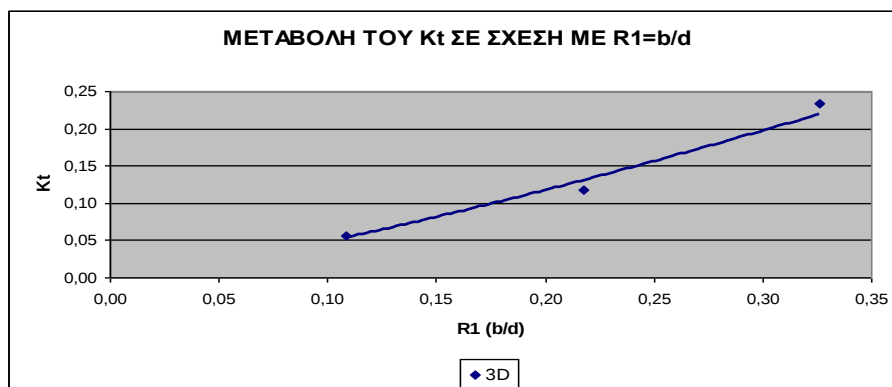
(2o)

$l = 1,00 \text{ m}$
 $T = 1,48 \text{ sec}$
 $H_i = 0,0516 \text{ m}$
 $h_s = 0,075 \text{ m}$



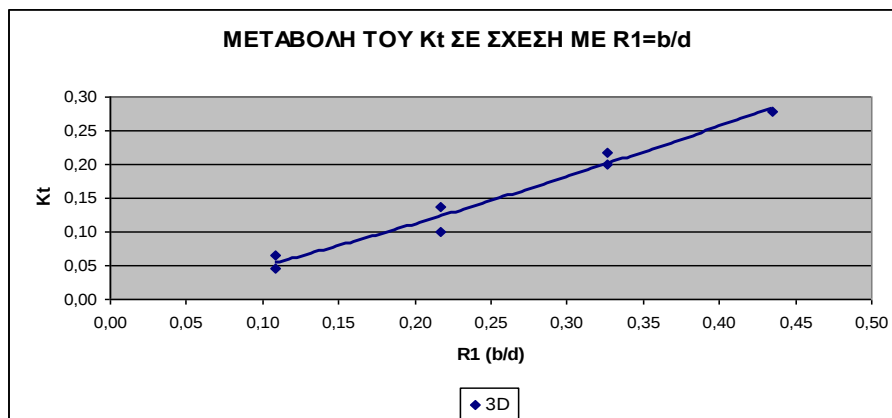
(3o)

$l = 1,00 \text{ m}$
 $T = 0,90 \text{ sec}$
 $H_i = 0,0863 \text{ m}$
 $h_s = 0,090 \text{ m}$



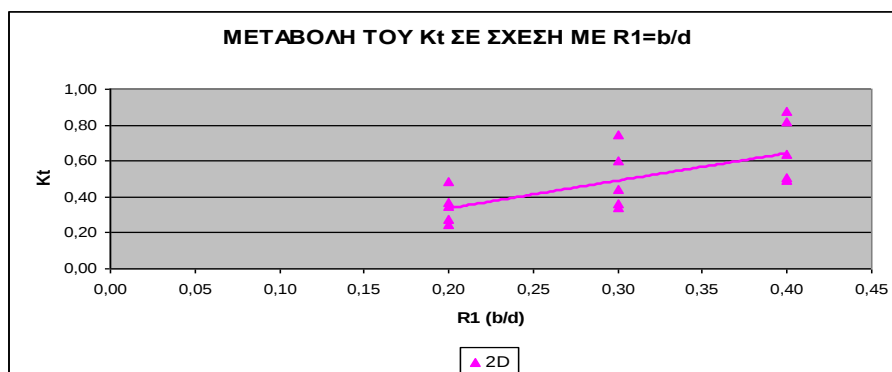
(4o)

$l = 0,38 \text{ m}$
 $L_o = 0,9257 \text{ m}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$



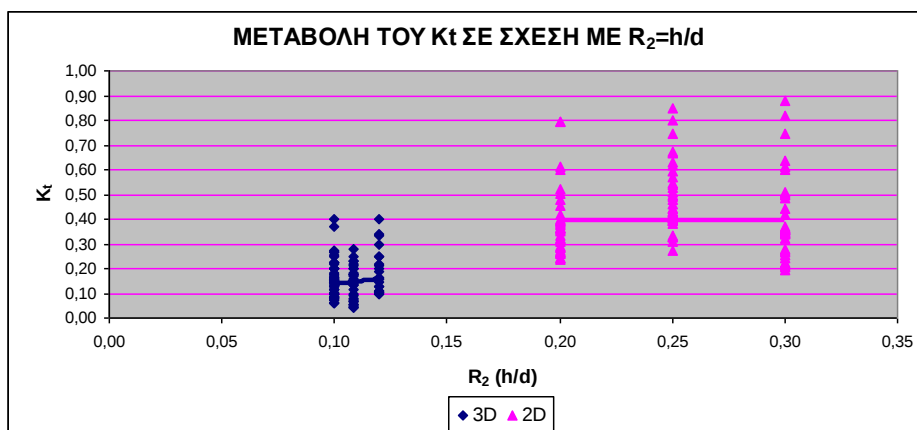
(5o)

$l = 0,38 \text{ m}$
 $L_o = 1,5613 \text{ m}$
 $h_s = 0,013$



(6o)

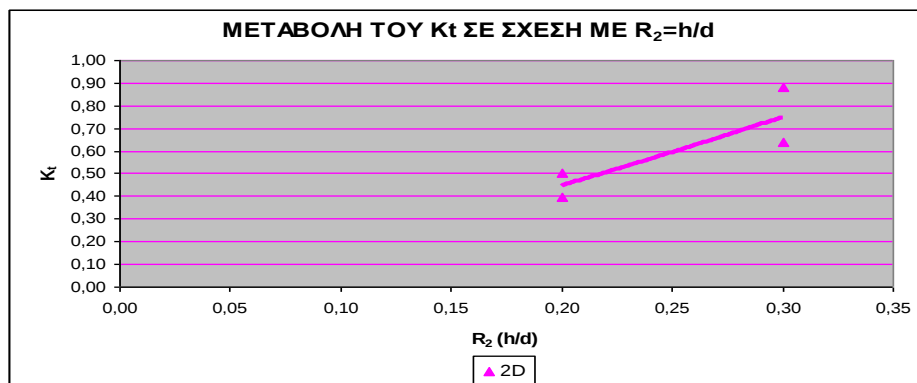
$l = 1,00 \text{ m}$
 $T = 1,48 \text{ sec}$
 $h_s = 0,090 \text{ m}$



Σχήμα 5.18 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διεύθυνσης (K_t) σε σχέση με το λόγο ύψους του αγωγού ανανέωσης προς βάθος νερού ($R_2 = h/d$)

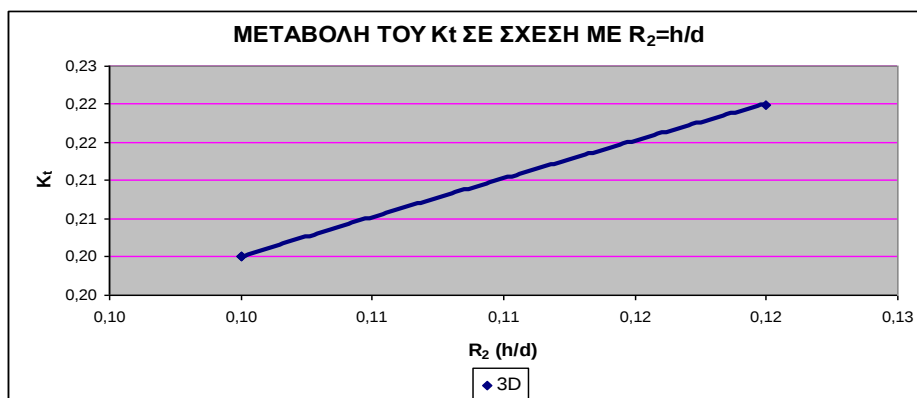
Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή της αδιάστατης παραμέτρου του λόγου ύψους αγωγού προς βάθος νερού (h/d), στον συντελεστή κυματικής διεύθυνσης (K_t), τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ ο h/d , $\uparrow$ ο K_t).

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της αδιάστατης παραμέτρου του λόγου ύψους αγωγού προς βάθος νερού, περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν.



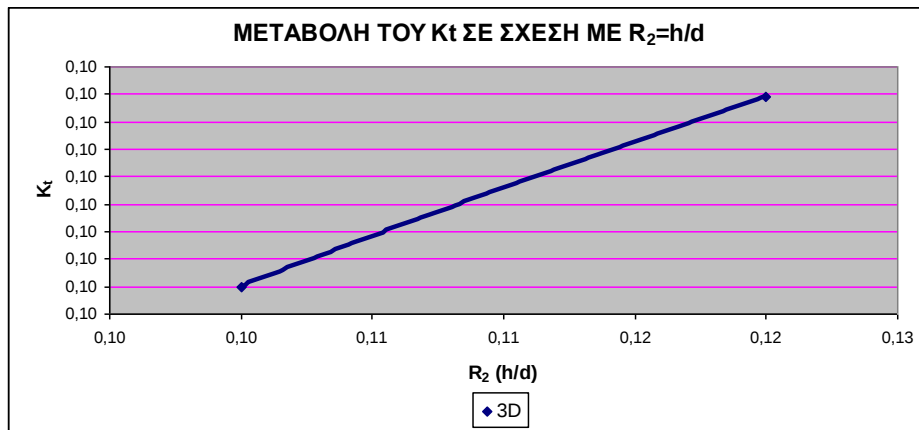
(1ο)

$0,02 \text{ m} < H_i < 0,05 \text{ m}$
 $b = 0,240 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $T = 1,48 \text{ sec}$



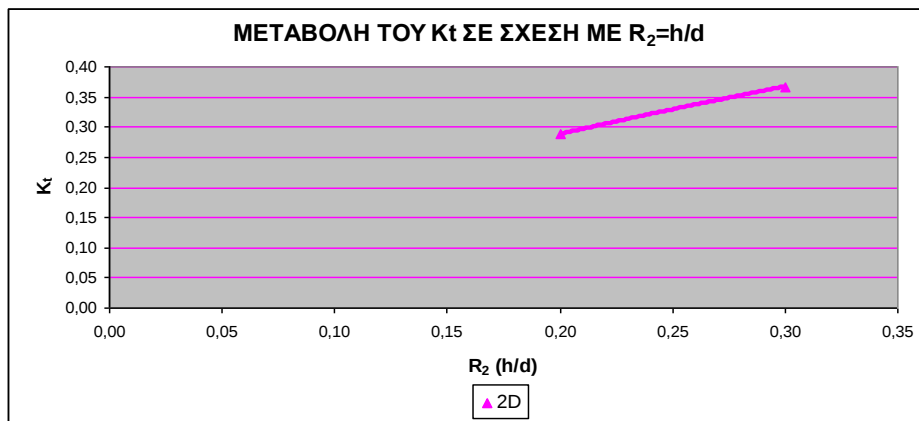
(2ο)

$b = 0,05 \text{ m}$
 $l = 0,160 \text{ m}$
 $H_i = 0,010 \text{ m}$
 $T = 0,50 \text{ sec}$



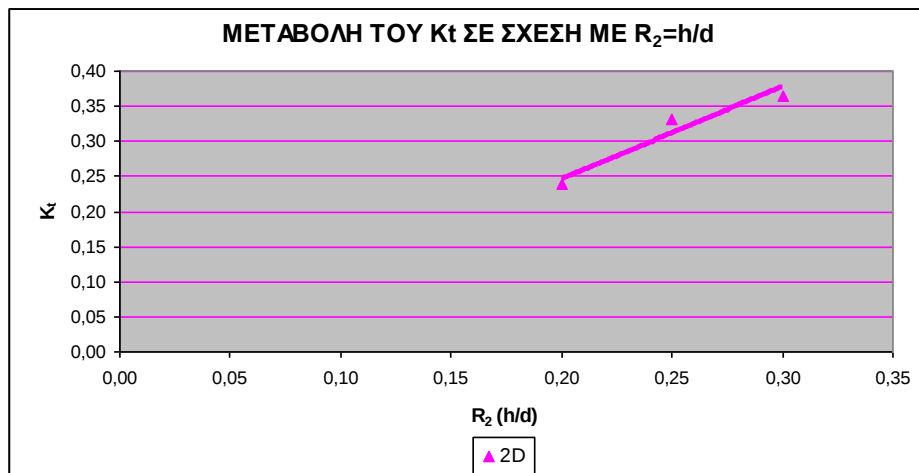
(3o)

$b = 0,05 \text{ m}$
 $l = 0,160 \text{ m}$
 $H_i = 0,029 \text{ m}$
 $T = 0,40 \text{ sec}$



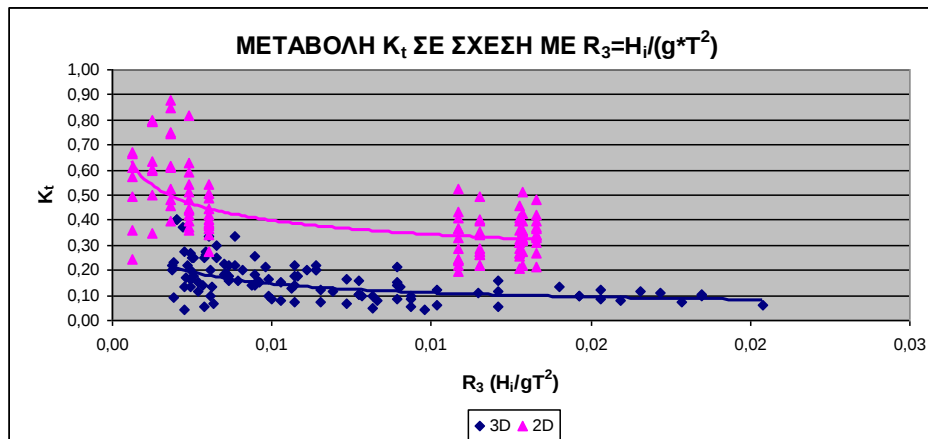
(4o)

$b = 0,240 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $H_i = 0,0863 \text{ m}$
 $T = 0,90 \text{ sec}$



(5o)

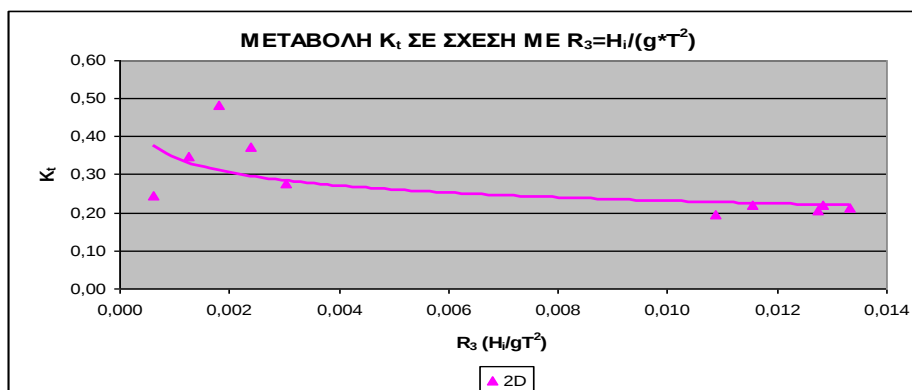
$b = 0,300 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $H_i = 0,0863 \text{ m}$
 $T = 0,90 \text{ sec}$



Σχήμα 5.19 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με την αδιάστατη παράμετρο $R_3 = H_l/gT^2$.

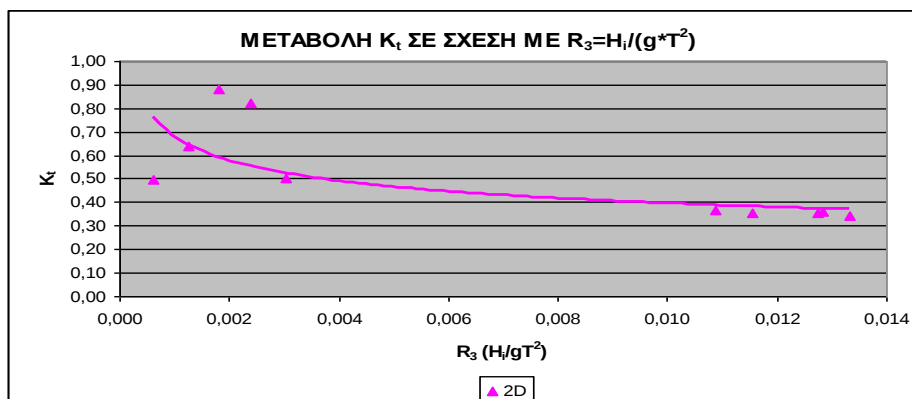
Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή της αδιάστατης παραμέτρου R_3 (έκφραση της καμπυλότητας του προσπίπτοντος κυματισμού, δεδομένου ότι $\text{καμπυλότητα} = H_l/L_0 = H_l/(gT^2/2\pi) = 2\pi \cdot H_l/gT^2 = 2\pi \cdot R_3$), στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t), τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ η καμπυλότητα, $\downarrow$ ο K_t). Βλέπε και διαγράμματα μεταβολής του K_t σε σχέση με αδιάστατη παράμετρο $1/R_{10}$.

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της αδιάστατης παραμέτρου καμπυλότητας του προσπίπτοντος κυματισμού, περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν.



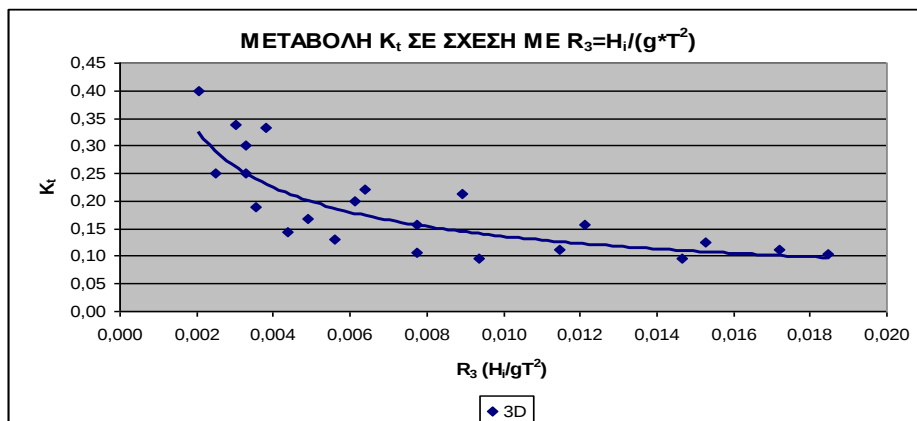
(10)

$b = 0,120 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $h_s = 0,090 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$



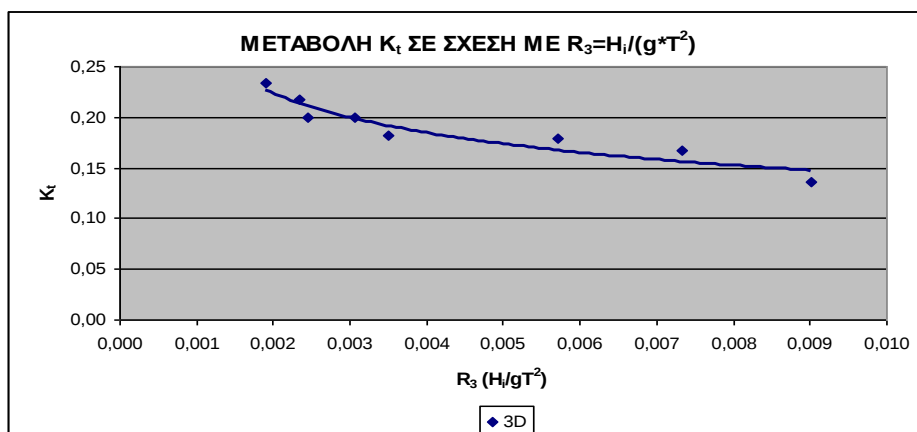
(20)

$b = 0,240 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $h_s = 0,090 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$



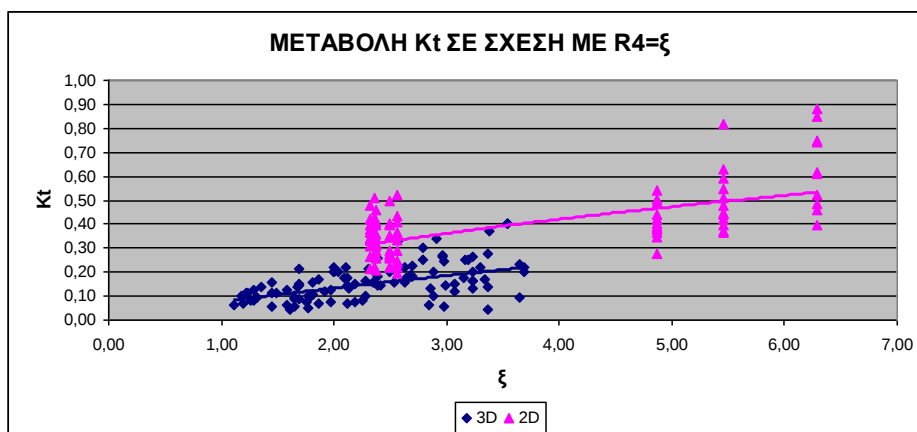
(3o)

$l = 0,16 \text{ m}$
 $b = 0,050 \text{ m}$
 $d = 0,25 \text{ m}$
 $hs = 0,015 \text{ m}$



(4o)

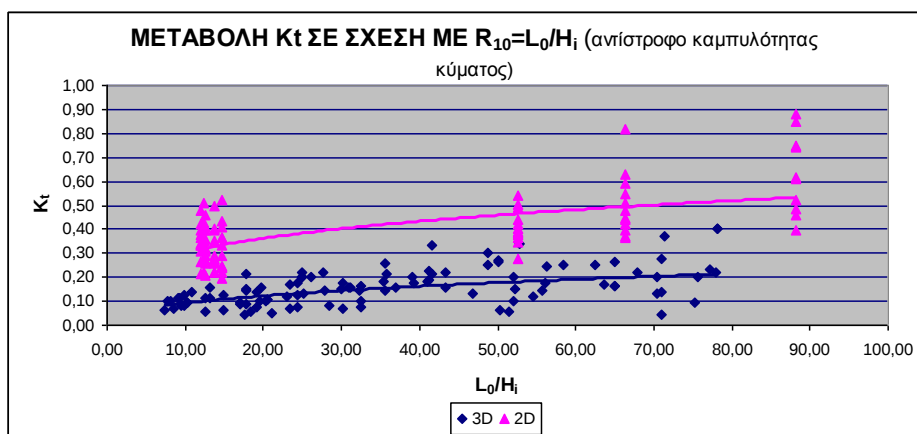
$l = 0,38 \text{ m}$
 $b = 0,075 \text{ m}$
 $d = 0,23 \text{ m}$
 $hs = 0,013 \text{ m}$



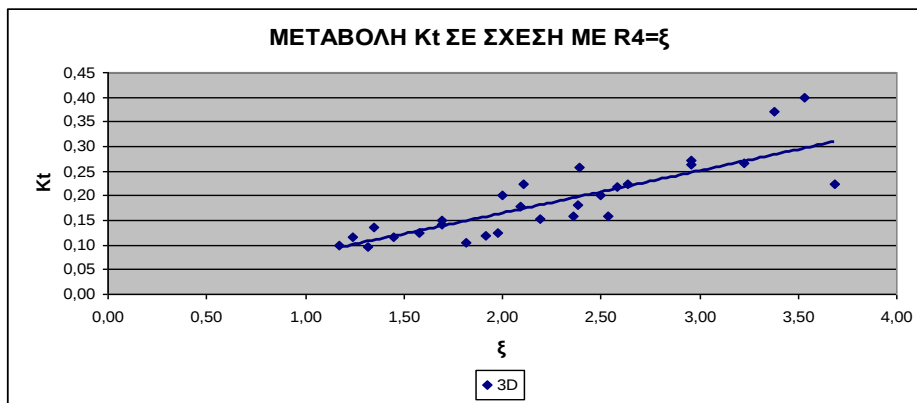
Σχήμα 5.20 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείδυσης (K_t) σε σχέση με αριθμό Iribarren ξ

Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή της αδιάστατης παραμέτρου του αριθμού Iribarren ξ (που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έκφραση της καμπυλότητας του προσπίπτοντος κυματισμού), στον συντελεστή κυματικής διείδυσης (K_t), τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ ο ξ , $\uparrow$ ο K_t).

Το άνω διάγραμμα είναι απόλυτα συμβατό με το επόμενο διάγραμμα επιρροής της αδιάστατης παραμέτρου R_{10} (αντίστροφο καμπυλότητας προσπίπτοντος κυματισμού), τόσο στα αποτελέσματα πειραμάτων 3D όσο και στα 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ ο R_{10} , $\uparrow$ ο K_t).

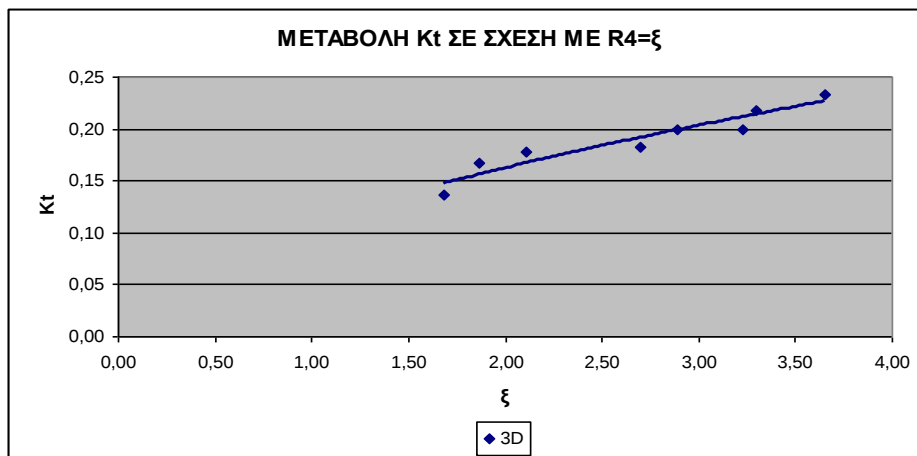


Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της αδιάστατης παραμέτρου του αριθμού Iribarren ξ , περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν.



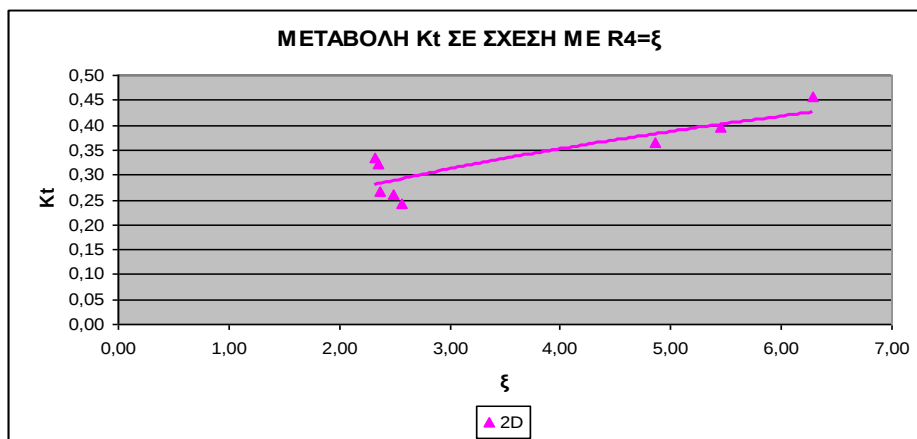
(10)

$b = 0,05 \text{ m}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$
 $l = 0,160 \text{ m}$
 $d = 0,25 \text{ m}$



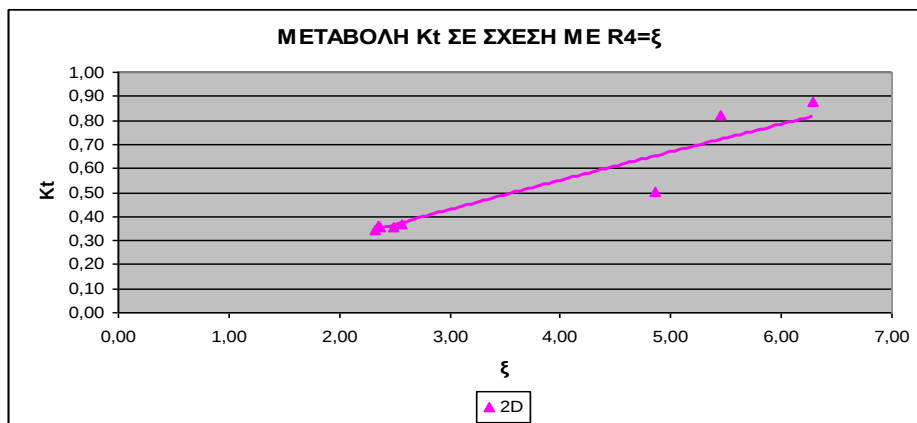
(20)

$b = 0,075 \text{ m}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$
 $l = 0,380 \text{ m}$
 $d = 0,23 \text{ m}$



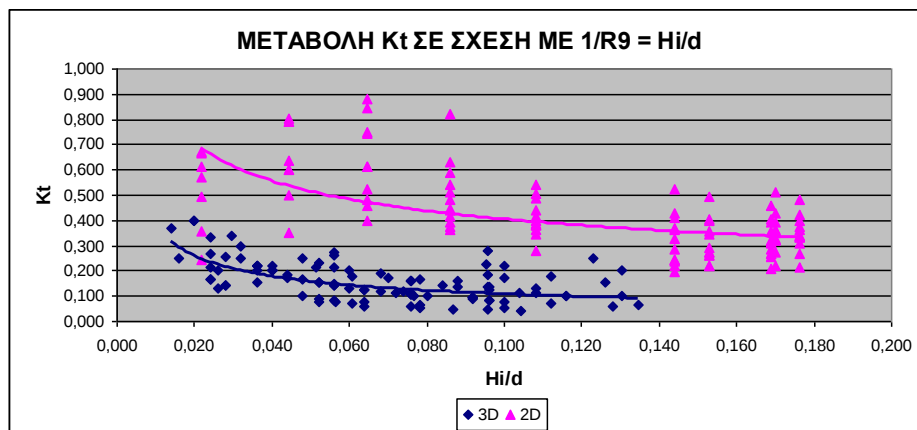
(30)

$b = 0,120 \text{ m}$
 $h_s = 0,060 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$



(40)

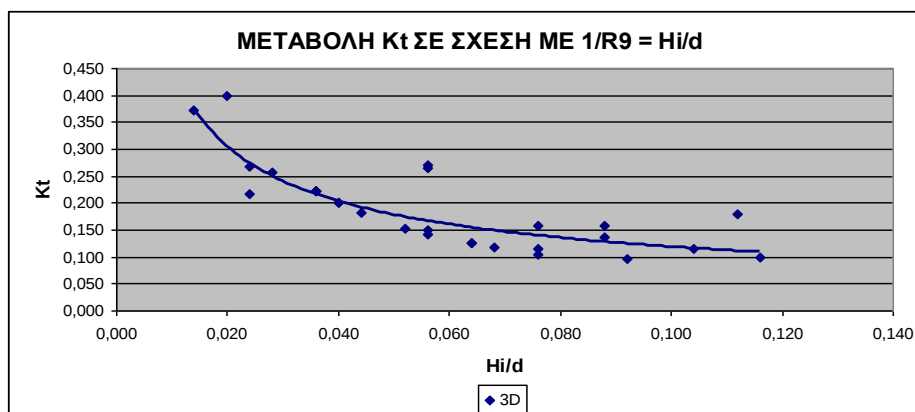
$b = 0,240 \text{ m}$
 $h_s = 0,090 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $d = 0,60 \text{ m}$



Σχήμα 5.21 Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t) σε σχέση με το λόγο μήκους κύματος προσπίπτοντος κυματισμού προς βάθος (H_l/d)

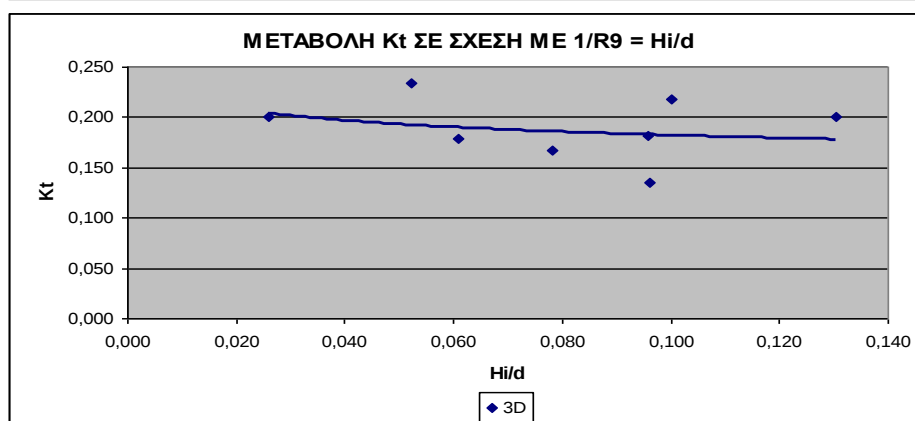
Από το άνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται η σύμπτωση των συμπερασμάτων σε σχέση με την επιρροή της αδιάστατης παραμέτρου του λόγου του μήκους κύματος του προσπίπτοντος κυματισμού προς το βάθος ($1/R_9 = H_l/d$), στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης (K_t), τόσο από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D όσο και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων 2D (δηλαδή όταν $\uparrow$ ο λόγος H_l/d , $\downarrow$ ο K_t).

Για ευκρινέστερη απεικόνιση της επιρροής της αδιάστατης παραμέτρου του λόγου H_l/d , περιορίζω τις μεταβλητές παραμέτρους στα διαγράμματα που ακολουθούν.



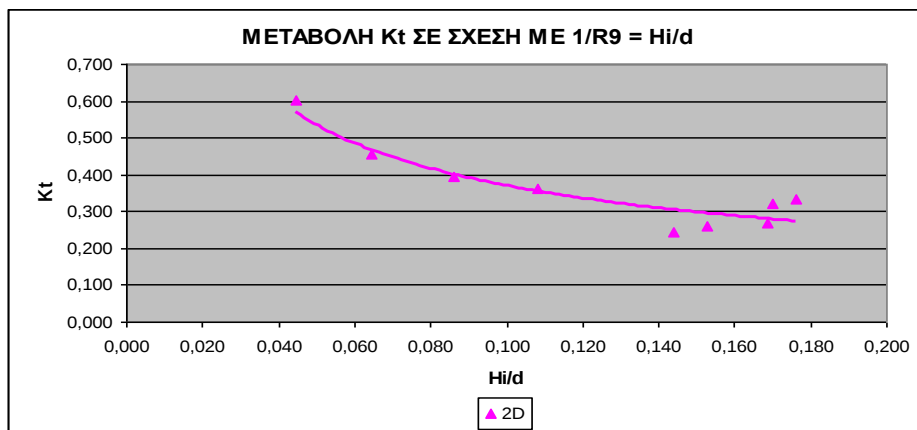
(1o)

$b = 0,050 \text{ m}$
 $l = 0,160 \text{ m}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$



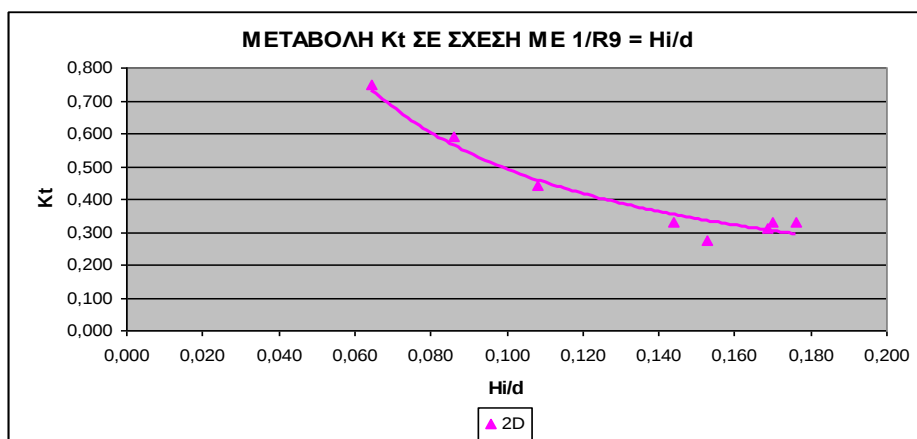
(2o)

$b = 0,075 \text{ m}$
 $l = 0,380 \text{ m}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$



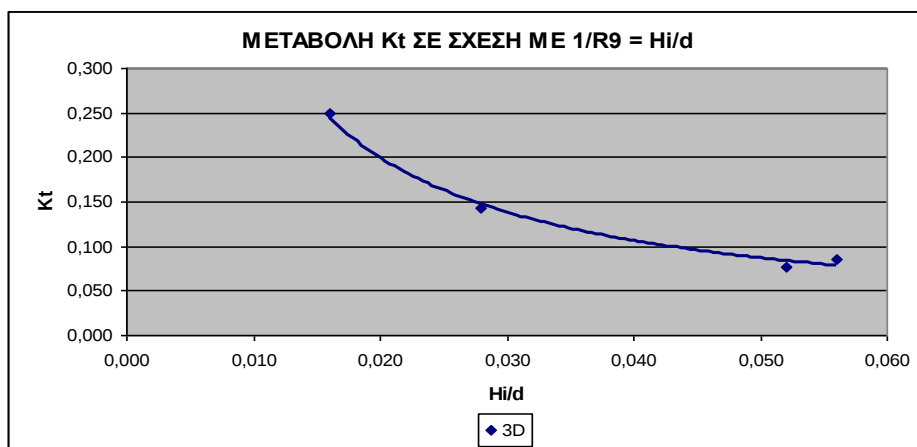
(3o)

$b = 0,120 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $h_s = 0,060 \text{ m}$



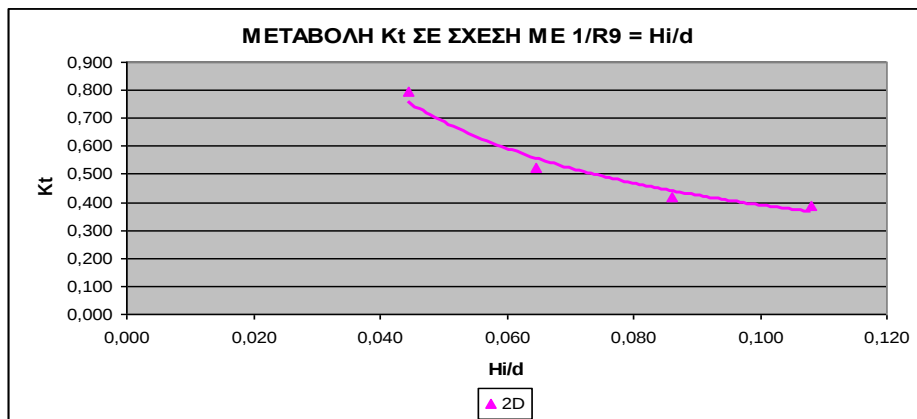
(4o)

$b = 0,300 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $h_s = 0,075 \text{ m}$



(5o)

$T = 0,40 \text{ sec}$
 $Lo = 0,2498 \text{ m}$
 $b = 0,050 \text{ m}$
 $l = 0,320 \text{ m}$
 $h_s = 0,013 \text{ m}$



(6o)

$T = 1,48 \text{ sec}$
 $Lo = 3,4199 \text{ m}$
 $b = 0,180 \text{ m}$
 $l = 1,00 \text{ m}$
 $h_s = 0,060 \text{ m}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΞΕΥΡΕΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε, αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η κατάστρωση εμπειρικής μαθηματικής εξίσωσης (μοντέλου) η οποία θα συσχετίζει το συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t με τα κυματικά χαρακτηριστικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού ανανέωσης.

Το φαινόμενο της κυματικής διείσδυσης μέσω αγωγού ανανέωσης είναι ιδιαίτερος δύσκολο να ερμηνευτεί με φυσική προσέγγιση, καθώς οι εμπλεκόμενες διεργασίες δεν έχουν κατανοηθεί και εξηγηθεί σε βάθος.

Στην παρούσα διπλωματική αρχικά επιχειρείται μια στατιστική προσέγγιση του φαινομένου, δοκιμάζονται μια σειρά από μαθηματικές εξισώσεις (μοντέλα) τα οποία αξιολογούνται με στατιστικούς δείκτες. Σύμφωνα με τις τιμές των δεικτών επιλέγονται τα καλύτερα μαθηματικά πρότυπα και γίνεται προσπάθεια φυσικής αξιολόγησης αυτών.

Η μεθοδολογία ανάλυσης των δεδομένων που εφαρμόστηκε είναι η μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης μέσω του στατιστικού λογισμικού πακέτου SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) (SPSS v.13). Οθόνες για τον τρόπο λειτουργίας του προγράμματος παρατίθενται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

6.1 Ανάλυση μη γραμμικής παλινδρόμησης

Στην ανάλυση παλινδρόμησης θεωρούμε μια σχέση της μορφής

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$$

όπου η εξαρτημένη μεταβλητή K_t συνδέεται με τις ανεξάρτητες μεταβλητές $X_1, X_2, \dots, X_n$.

Για παράδειγμα στην απλή γραμμική παλινδρόμηση ορίζεται η σχέση

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon$$

όπου β_0 και β_1 είναι άγνωστοι συντελεστές και ε ονομάζεται σφάλμα.

Στόχος είναι να προσδιορίσουμε την ευθεία παλινδρόμησης $\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1$, δηλαδή τους συντελεστές, $\hat{\beta}_0$ και $\hat{\beta}_1$, με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων $e = Y - \hat{Y}$.

Στη μη γραμμική παλινδρόμηση η σχέση μεταξύ των εμπλεκόμενων μεταβλητών είναι μη γραμμική.

6.2 Μαθηματικές εξισώσεις

Οι παράμετροι που ελήφθησαν υπ' όψιν είναι:

H_0 = αρχικό ύψος προσπίπτοντος κύματος (m)

H_4 = ύψος διεισδύοντος κύματος (m)

b = πλάτος αγωγού (m)

h_s = βυθισμένο ύψος αγωγού (m)

h = ύψος αγωγού (m) = $2 \cdot h_s$ (για $S = 0$)

l = μήκος αγωγού (m)
 d = βάθος νερού (m)
 $g = 9.81 \text{ m/sec}^2$ (σταθερά επιτάχυνση βαρύτητας)
 T = περίοδος κύματος (sec)
 $\tan\phi$ = κλίση πρανούς
 L_0 = μήκος κύματος για βαθειά νερά = $\frac{gT^2}{2\pi}$ (m)

Οι αδιάστατες παράμετροι (μεταβλητές) που εμπλέκονται στις εξεταζόμενες μαθηματικές εξισώσεις είναι :

Πίνακας 6.1 Πίνακας αδιάστατων παραμέτρων

$K_t = \frac{H_4}{H_0}$	
$R_1 = \frac{b}{d}$	$R_6 = \frac{l}{H_0}$
$R_2 = \frac{h}{d}$	$R_7 = \frac{l}{L_0}$
$R_3 = \frac{H_0}{gT^2}$	$R_8 = \frac{b}{H_0}$
$R_4 = \xi = \frac{\tan\phi}{\sqrt{2\pi R_3}} = \frac{\tan\phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}}$	$R_9 = \frac{d}{H_0}$
$R_5 = \frac{h_s}{H_0}$	$R_{10} = \frac{L_0}{H_0}$

Συντελεστής Pearson μεταξύ της K_t και των μεταβλητών R_i

Ο συντελεστής συσχέτισης είναι ένα μέτρο της γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών και παίρνει τιμές από -1 (πλήρης αρνητική συσχέτιση των μεταβλητών, αν αυξάνεται η μια η άλλη μειώνεται, και αντίστροφα), έως +1 (πλήρης θετική συσχέτιση των μεταβλητών, αν αυξάνεται μια αυξάνεται και η άλλη, και αντίστροφα, αν μειώνεται η μια μειώνεται και η άλλη). Τιμή του συντελεστή 0 σημαίνει ασυσχέτιστες μεταβλητές.

Αν και ο συντελεστής συσχέτισης δεν είναι ένδειξη μη γραμμικής σχέσης ανάμεσα στις μεταβλητές, παρ' όλα αυτά, μπορεί να παρέχει μια γενική ένδειξη της συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών R_i με την εξαρτημένη μεταβλητή K_t .

Οι τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή συσχέτισης και αποτελούν ένδειξη του βαθμού επιρροής των αδιάστατων παραμέτρων επί του K_t είναι:

Πίνακας 6.2 Συντελεστής συσχέτισης ανάμεσα στο K_t και στις παραμέτρους R_i

Αδιάστατη παράμετρος	Συντελεστής συσχέτισης
R_1	0.495
R_2	0.678
R_3	-0.316
R_4	0.704
R_5	0.458
R_6	0.272
R_7	-0.405
R_8	0.352
R_9	0.081
R_{10}	0.485

Τα άνω αποτελέσματα που προέκυψαν από το στατιστικό πρόγραμμα SPSS, για τα διάφορα R (αδιάστατες παραμέτρους ή μεταβλητές), είναι απολύτως συμβατά με τη μορφή των διαγραμμάτων επιρροής των αδιάστατων παραμέτρων πάνω στον συντελεστή κυματικής διείδυσης που εκτέθηκαν στη παραμετρική ανάλυση. Επιβεβαιώνεται έτσι ο τρόπος επιρροής του κάθε R στον συντελεστή K_t .

Οι μαθηματικές εξισώσεις που δοκιμάστηκαν είναι οι εξής:

Μαθηματική εξίσωση-1

$$K_t = b_0 + b_1 R_1 + b_2 R_2 + b_3 R_3 = b_0 + b_1 \frac{b}{d} + b_2 \frac{h}{d} + b_3 \frac{H_0}{gT^2}$$

Μαθηματική εξίσωση-2

$$K_t = (b_1 R_1 + b_2 R_2) R_3^{b_3} = \left(b_1 \frac{b}{d} + b_2 \frac{h}{d} \right) \left(\frac{H_0}{gT^2} \right)^{b_3}$$

Μαθηματική εξίσωση-3

$$K_t = (R_1^{b_1} + R_2^{b_2}) R_3^{b_3} = \left[\left(\frac{b}{d} \right)^{b_1} + \left(\frac{h}{d} \right)^{b_2} \right] \left(\frac{H_0}{gT^2} \right)^{b_3}$$

Μαθηματική εξίσωση-4

$$K_t = (b_0 + R_1^{b_1} + R_2^{b_2}) R_3^{b_3} = \left[b_0 + \left(\frac{b}{d} \right)^{b_1} + \left(\frac{h}{d} \right)^{b_2} \right] \left(\frac{H_0}{gT^2} \right)^{b_3}$$

Μαθηματική εξίσωση-5

$$K_t = b_0 + (R_1^{b_1} + R_2^{b_2}) R_3^{b_3} = b_0 + \left[\left(\frac{b}{d} \right)^{b_1} + \left(\frac{h}{d} \right)^{b_2} \right] \left(\frac{H_0}{gT^2} \right)^{b_3}$$

Μαθηματική εξίσωση-6

$$K_t = R_1^{b_1} R_2^{b_2} R_3^{b_3} = \left(\frac{b}{d}\right)^{b_1} \left(\frac{h}{d}\right)^{b_2} \left(\frac{H_0}{gT^2}\right)^{b_3}$$

Μαθηματική εξίσωση-7

$$K_t = R_1^{b_1} + R_2^{b_2} + R_3^{b_3} = \left(\frac{b}{d}\right)^{b_1} + \left(\frac{h}{d}\right)^{b_2} + \left(\frac{H_0}{gT^2}\right)^{b_3}$$

Μαθηματική εξίσωση-8

$$K_t = b_0 + b_1 R_1^{b_2} + b_3 R_2^{b_4} + b_5 R_3^{b_6} = b_0 + b_1 \left(\frac{b}{d}\right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{h}{d}\right)^{b_4} + b_5 \left(\frac{H_0}{gT^2}\right)^{b_6}$$

Μαθηματική εξίσωση-9

$$K_t = b_0 + b_1 R_1 + b_2 R_2 + b_3 R_4 = b_0 + b_1 \frac{b}{d} + b_2 \frac{h}{d} + b_3 \frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}}$$

Μαθηματική εξίσωση-10

$$K_t = (b_1 R_1 + b_2 R_2) R_4^{b_3} = \left(b_1 \frac{b}{d} + b_2 \frac{h}{d}\right) \left(\frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}}\right)^{b_3}$$

Μαθηματική εξίσωση-11

$$K_t = (R_1^{b_1} + R_2^{b_2}) R_4^{b_3} = \left[\left(\frac{b}{d}\right)^{b_1} + \left(\frac{h}{d}\right)^{b_2}\right] \left(\frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}}\right)^{b_3}$$

Μαθηματική εξίσωση-12

$$K_t = (b_0 + R_1^{b_1} + R_2^{b_2}) R_4^{b_3} = \left[b_0 + \left(\frac{b}{d}\right)^{b_1} + \left(\frac{h}{d}\right)^{b_2}\right] \left(\frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}}\right)^{b_3}$$

Μαθηματική εξίσωση-13

$$K_t = b_0 + (R_1^{b_1} + R_2^{b_2}) R_4^{b_3} = b_0 + \left[\left(\frac{b}{d}\right)^{b_1} + \left(\frac{h}{d}\right)^{b_2}\right] \left(\frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}}\right)^{b_3}$$

Μαθηματική εξίσωση-14

$$K_t = R_1^{b_1} R_2^{b_2} R_4^{b_3} = \left(\frac{b}{d}\right)^{b_1} \left(\frac{h}{d}\right)^{b_2} \left(\frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}}\right)^{b_3}$$

Μαθηματική εξίσωση-15

$$K_t = R_1^{b_1} + R_2^{b_2} + R_4^{b_3} = \left(\frac{b}{d}\right)^{b_1} + \left(\frac{h}{d}\right)^{b_2} + \left(\frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}}\right)^{b_3}$$

Μαθηματική εξίσωση-16

$$K_t = b_0 + b_1 R_1^{b_2} + b_3 R_2^{b_4} + b_5 R_4^{b_6} = b_0 + b_1 \left(\frac{b}{d}\right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{h}{d}\right)^{b_4} + b_5 \left(\frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}}\right)^{b_6}$$

Μαθηματική εξίσωση-17

$$K_t = b_1 R_1^{b_2} + b_3 R_2^{b_4} + (1 - \exp(b_5 R_4)) = b_1 \left(\frac{b}{d}\right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{h}{d}\right)^{b_4} + \left(1 - \exp\left(b_5 \frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}}\right)\right)$$

Μαθηματική εξίσωση-18

$$K_t = b_1 R_1^{b_2} + b_3 R_2^{b_4} * (1 - \exp(b_5 R_4)) = b_1 \left(\frac{b}{d}\right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{h}{d}\right)^{b_4} * \left(1 - \exp\left(b_5 \frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}}\right)\right)$$

Μαθηματική εξίσωση-19

$$K_t = b_1 R_1^{b_2} * (1 - \exp(b_3 R_4)) + b_4 R_2^{b_5} = b_1 \left(\frac{b}{d}\right)^{b_2} * \left(1 - \exp\left(b_3 \frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}}\right)\right) + b_4 \left(\frac{h}{d}\right)^{b_5}$$

Μαθηματική εξίσωση-20

$$K_t = b_0 + b_1 R_1 + b_2 R_2 + b_3 R_3 + b_4 R_4 + b_5 R_5 + b_6 R_6 + b_7 R_7 + b_8 R_8 + b_9 R_9 + b_{10} R_{10}$$

Μαθηματική εξίσωση-21

$$\begin{aligned} K_t &= b_1 R_5^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_{10}^{b_6} + b_7 R_7^{b_8} + b_9 R_8^{b_{10}} = \\ &= b_1 \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 \left(\frac{L_0}{H_0} \right)^{b_6} + b_7 \left(\frac{l}{L_0} \right)^{b_8} + b_9 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_{10}} \end{aligned}$$

Μαθηματική εξίσωση-22

$$\begin{aligned} K_t &= b_1 R_5^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_4^{b_6} + b_7 R_7^{b_8} + b_9 R_8^{b_{10}} = \\ &= b_1 \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 (\xi)^{b_6} + b_7 \left(\frac{l}{L_0} \right)^{b_8} + b_9 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_{10}} \end{aligned}$$

Μαθηματική εξίσωση-23

$$\begin{aligned} K_t &= b_1 R_5^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} * (1 - \exp(b_5 R_4)) + b_6 R_8^{b_7} = \\ &= b_1 \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} * (1 - \exp(b_5 \xi)) + b_6 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_7} \end{aligned}$$

Μαθηματική εξίσωση-24

$$\begin{aligned} K_t &= b_1 R_5^{b_2} + [b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_8^{b_6}] * (1 - \exp(b_7 R_4)) = \\ &= b_1 \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{b_2} + \left[b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_6} \right] * (1 - \exp(b_7 \xi)) \end{aligned}$$

Μαθηματική εξίσωση-25

$$\begin{aligned} K_t &= b_1 R_9^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_{10}^{b_6} + b_7 R_7^{b_8} + b_9 R_8^{b_{10}} \\ &= b_1 \left(\frac{d}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 \left(\frac{L_0}{H_0} \right)^{b_6} + b_7 \left(\frac{l}{L_0} \right)^{b_8} + b_9 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_{10}} \end{aligned}$$

Μαθηματική εξίσωση-26

$$\begin{aligned} K_t &= b_1 R_9^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_4^{b_6} + b_7 R_7^{b_8} + b_9 R_8^{b_{10}} \\ &= b_1 \left(\frac{d}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 (\xi)^{b_6} + b_7 \left(\frac{l}{L_0} \right)^{b_8} + b_9 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_{10}} \end{aligned}$$

Μαθηματική εξίσωση-27

$$\begin{aligned} K_t &= b_1 R_9^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} * (1 - \exp(b_5 R_4)) + b_6 R_8^{b_7} \\ &= b_1 \left(\frac{d}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} * (1 - \exp(b_5 \xi)) + b_6 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_7} \end{aligned}$$

Μαθηματική εξίσωση-28

$$K_t = b_1 R_9^{b_2} + [b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_8^{b_6}] * (1 - \exp(b_7 R_4))$$
$$= b_1 \left(\frac{d}{H_0} \right)^{b_2} + \left[b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_6} \right] * (1 - \exp(b_7 \xi))$$

Μαθηματική εξίσωση-29

$$K_t = b_1 R_5^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_4^{b_6} + b_7 R_7^{b_8} + b_9 R_8^{b_{10}} + b_{11} R_9^{b_{12}}$$
$$= b_1 \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 (\xi)^{b_6} + b_7 \left(\frac{l}{L_0} \right)^{b_8} + b_9 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_{10}} + b_{11} \left(\frac{d}{H_0} \right)^{b_{12}}$$

Μαθηματική εξίσωση-30

$$K_t = [b_1 R_5^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_8^{b_6}] * (1 - \exp(b_7 R_4)) + b_8 R_9^{b_9}$$
$$= \left[b_1 \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_6} \right] * (1 - \exp(b_7 \xi)) + b_8 \left(\frac{d}{H_0} \right)^{b_9}$$

Αρχικά δοκιμάστηκε το μοντέλο (1) που είναι γραμμικό (η πιο απλή μορφή εξίσωσης) και είχε εξεταστεί στη Διπλωματική Μπρέμπου-Ντεβέ (2007) σε 2D δεδομένα και περιλαμβάνει τις αδιάστατες παραμέτρους R_1 , R_2 , R_3 . Το γραμμικό μοντέλο όμως δεν μπορεί να περιγράψει ένα πολύπλοκο φαινόμενο όπως το αυτό που εξετάζουμε. Στη συνέχεια δοκιμάστηκαν τα μοντέλα (2) έως (8) στα οποία εμπλέκονται οι ίδιες παράμετροι με μη γραμμικό τρόπο.

Στα μοντέλα (9) έως (16) έχει αντικατασταθεί η παράμετρος R_3 με την τροποποιημένη της μορφή R_4 η οποία είναι ο συντελεστής ξ (αριθμός Iribarren). Η αδιάστατη αυτή παράμετρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση της καμπυλότητας του κύματος, επειδή κατά κανόνα χρησιμοποιείται για την ανάλυση της θραύσης των κυμάτων στη ζώνη αναρρίχησης, όπου $\tan \phi$ είναι η κλίση του κυματοθραύστη. Τα μοντέλα (17) έως (19) εμπεριέχουν πάλι τις μεταβλητές R_1 , R_2 , R_4 αλλά με τον όρο ξ στη μορφή $\exp(\xi)$.

Στην συνέχεια λαμβάνονται υπ' όψιν και άλλοι αδιάστατοι όροι R_4 , R_5 , R_6 , R_7 , R_8 , R_9 , R_{10} που προέκυψαν από συνδυασμούς των προηγούμενων παραμέτρων αλλά και προσθήκη των μεγεθών μήκους αγωγού l , μήκους κύματος προσπίπτοντος κυματισμού L_0 και βυθισμένο ύψος αγωγού ανανέωσης h_s . Αρχικά δοκιμάστηκε το γραμμικό μοντέλο (20) που περιέχει και τις δέκα παραμέτρους λόγω της σημασίας τους στη διερεύνηση του προβλήματος, αλλά το μοντέλο απορρίπτεται σαν απλοϊκό για το μη γραμμικό φαινόμενο που εξετάζουμε.

Τα μοντέλα (21) έως (24) είναι τέσσερα από τα μοντέλα που θεωρήθηκαν στο άρθρο (Τσουκαλά κ.ά. 2009) το οποίο αφορούσε σε πειράματα 3D διαστάσεων. Τα μοντέλα (25) έως (28) που δοκιμάστηκαν είναι τα προηγούμενα τέσσερα με τη διαφορά ότι αντί του λόγου R_5 χρησιμοποιείται ο όρος R_9 , δηλαδή η παράμετρος h_s (βυθισμένο ύψος αγωγού) έχει αντικατασταθεί από την d (βάθος νερού).

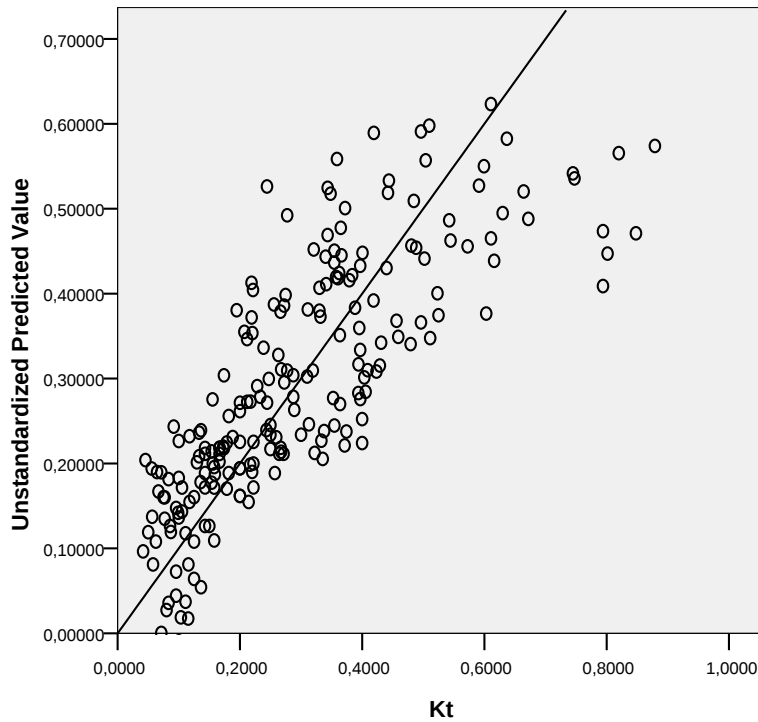
Τέλος, δοκιμάστηκαν το μοντέλο (29) που είναι παραλλαγή των μοντέλων (22) με επιπλέον τη μεταβλητή R_9 ώστε να ενσωματωθεί και η παράμετρος d , και το μοντέλο (30) το οποίο είναι το μοντέλο (28) με επιπλέον τη παράμετρο h_s .

Από όλα τις παραπάνω μαθηματικές εξισώσεις που δοκιμάστηκαν, τα πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα προέκυψαν για αυτές που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ περιλαμβάνονται οι εκτιμήσεις για τους συντελεστές των παραμέτρων, που προκύπτουν από το στατιστικό πρόγραμμα (στο παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνονται μόνο οι συντελεστές για τις δύο τελικά προτεινόμενες μαθηματικές εξισώσεις).

1^η Μαθηματική εξίσωση

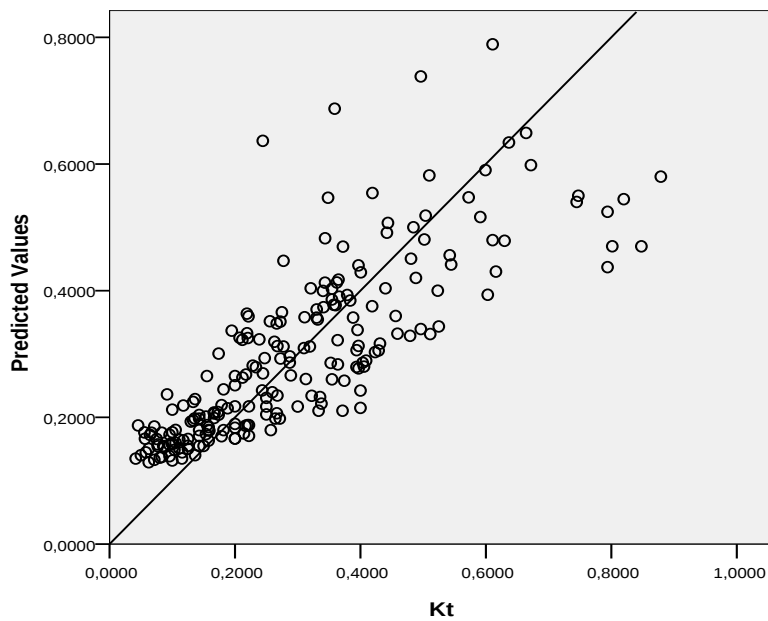
$$K_t = b_0 + b_1 R_1 + b_2 R_2 + b_3 R_3 = b_0 + b_1 \frac{b}{d} + b_2 \frac{h}{d} + b_3 \frac{H_0}{gT^2}$$



$R^2 = 0,637$

2^η Μαθηματική εξίσωση

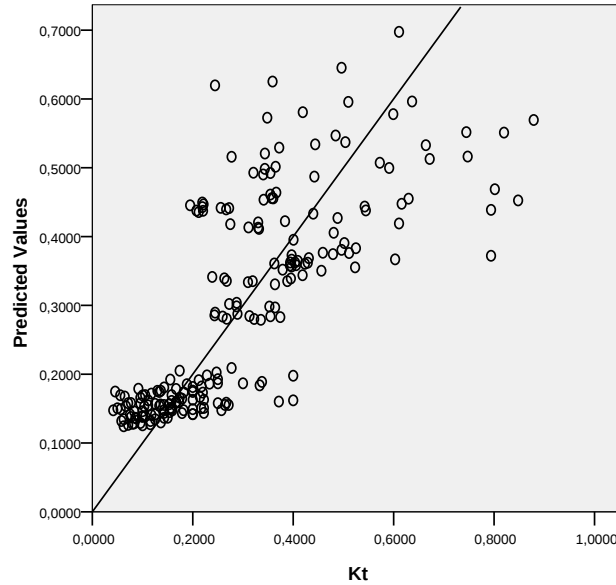
$$K_t = (b_1 R_1 + b_2 R_2) R_3^{b_3} = \left(b_1 \frac{b}{d} + b_2 \frac{h}{d} \right) \left(\frac{H_0}{gT^2} \right)^{b_3}$$



$R^2 = 0,655$

3^η Μαθηματική εξίσωση

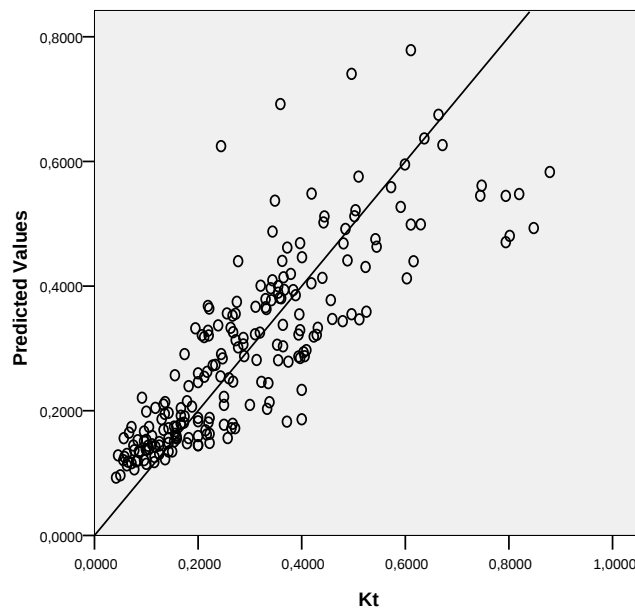
$$K_t = (R_1^{b_1} + R_2^{b_2}) R_3^{b_3} = \left[\left(\frac{b}{d} \right)^{b_1} + \left(\frac{h}{d} \right)^{b_2} \right] \left(\frac{H_0}{gT^2} \right)^{b_3}$$



$$R^2 = 0.578$$

4^η Μαθηματική εξίσωση

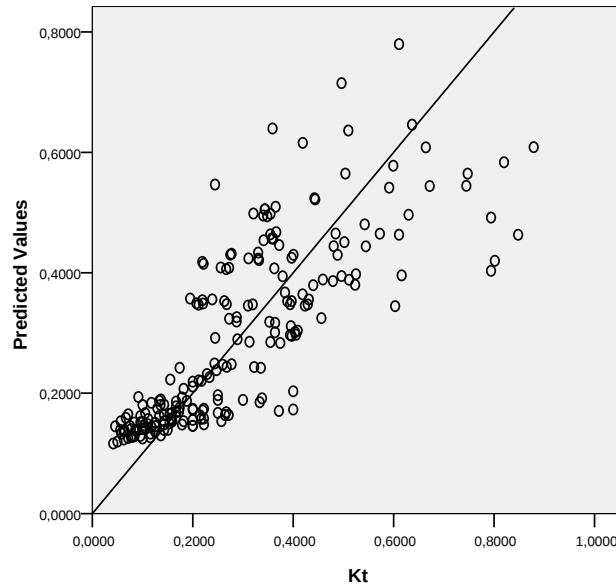
$$K_t = (b_0 + R_1^{b_1} + R_2^{b_2}) R_3^{b_3} = \left[b_0 + \left(\frac{b}{d} \right)^{b_1} + \left(\frac{h}{d} \right)^{b_2} \right] \left(\frac{H_0}{gT^2} \right)^{b_3}$$



$$R^2 = 0.693$$

6^η Μαθηματική εξίσωση

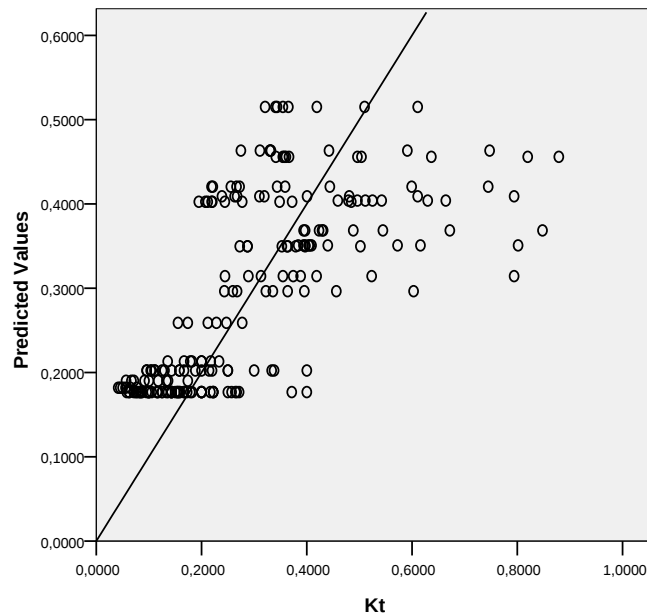
$$K_t = R_1^{b_1} R_2^{b_2} R_3^{b_3} = \left(\frac{b}{d}\right)^{b_1} \left(\frac{h}{d}\right)^{b_2} \left(\frac{H_0}{gT^2}\right)^{b_3}$$



$$R^2 = 0.633$$

7^η Μαθηματική εξίσωση

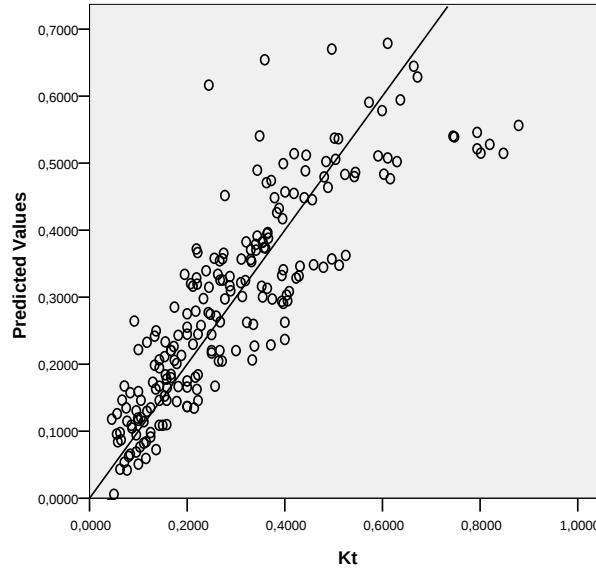
$$K_t = R_1^{b_1} + R_2^{b_2} + R_3^{b_3} = \left(\frac{b}{d}\right)^{b_1} + \left(\frac{h}{d}\right)^{b_2} + \left(\frac{H_0}{gT^2}\right)^{b_3}$$



$$R^2 = 0.470$$

16^η Μαθηματική εξίσωση

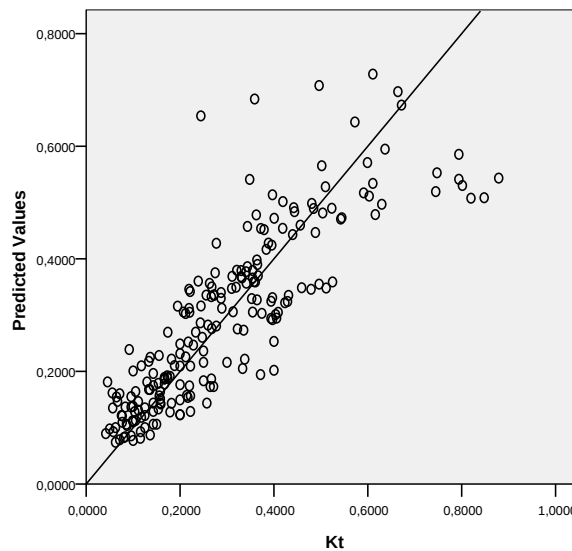
$$K_t = b_0 + b_1 R_1^{b_2} + b_3 R_2^{b_4} + b_5 R_4^{b_6} = b_0 + b_1 \left(\frac{b}{d} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{h}{d} \right)^{b_4} + b_5 \left(\frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}} \right)^{b_6}$$



$$R^2 = 0.728$$

17^η Μαθηματική εξίσωση

$$K_t = b_1 R_1^{b_2} + b_3 R_2^{b_4} + (1 - \exp(b_5 R_4)) = b_1 \left(\frac{b}{d} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{h}{d} \right)^{b_4} + \left(1 - \exp \left(b_5 \frac{\tan \phi}{\sqrt{2\pi \frac{H_0}{gT^2}}} \right) \right)$$

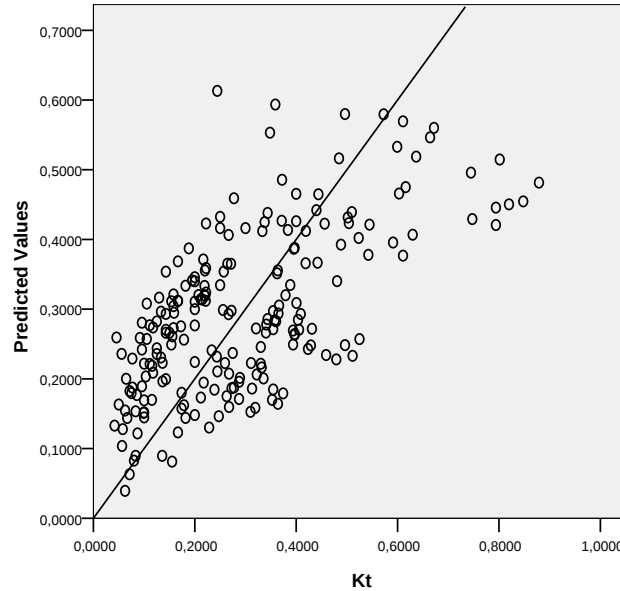


$$R^2 = 0.721$$

21^η Μαθηματική εξίσωση

$$K_t = b_1 R_5^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_{10}^{b_6} + b_7 R_7^{b_8} + b_9 R_8^{b_{10}} =$$

$$= b_1 \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 \left(\frac{L_0}{H_0} \right)^{b_6} + b_7 \left(\frac{l}{L_0} \right)^{b_8} + b_9 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_{10}}$$

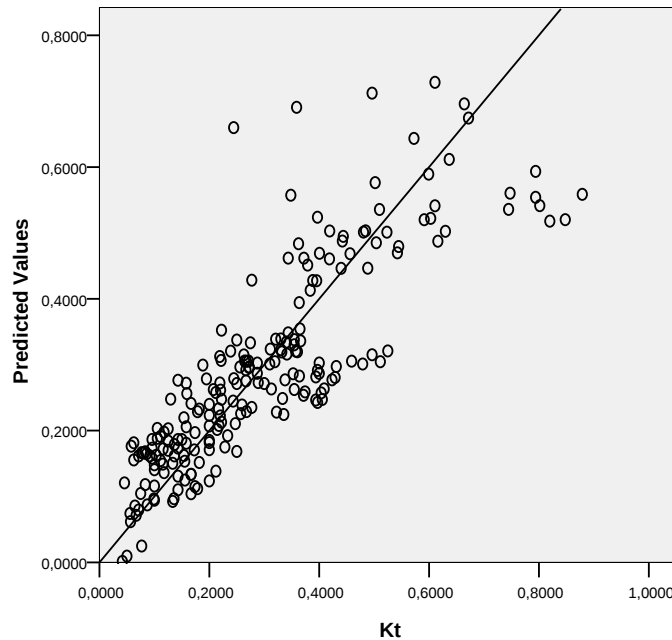


$$R^2 = 0.417$$

22^η Μαθηματική εξίσωση

$$K_t = b_1 R_5^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_4^{b_6} + b_7 R_7^{b_8} + b_9 R_8^{b_{10}} =$$

$$= b_1 \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 (\xi)^{b_6} + b_7 \left(\frac{l}{L_0} \right)^{b_8} + b_9 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_{10}}$$

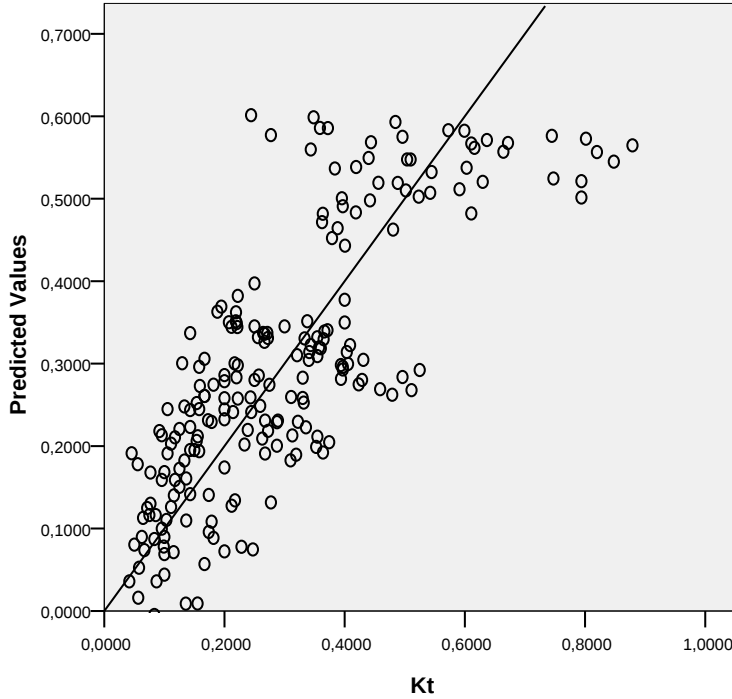


$$R^2 = 0.713$$

23^η Μαθηματική εξίσωση

$$K_t = b_1 R_5^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} * (1 - \exp(b_5 R_4)) + b_6 R_8^{b_7} =$$

$$= b_1 \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} * (1 - \exp(b_5 \xi)) + b_6 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_7}$$

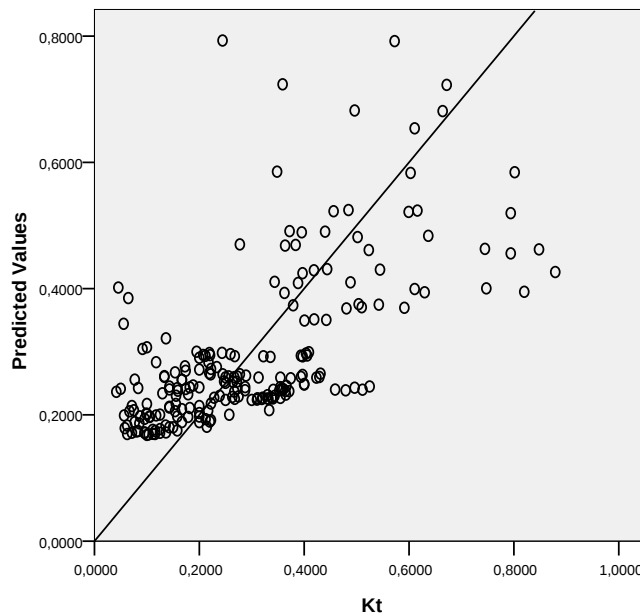


$$R^2 = 0.609$$

24^η Μαθηματική εξίσωση

$$K_t = b_1 R_5^{b_2} + [b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_8^{b_6}] * (1 - \exp(b_7 R_4)) =$$

$$= b_1 \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{b_2} + \left[b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_6} \right] * (1 - \exp(b_7 \xi))$$

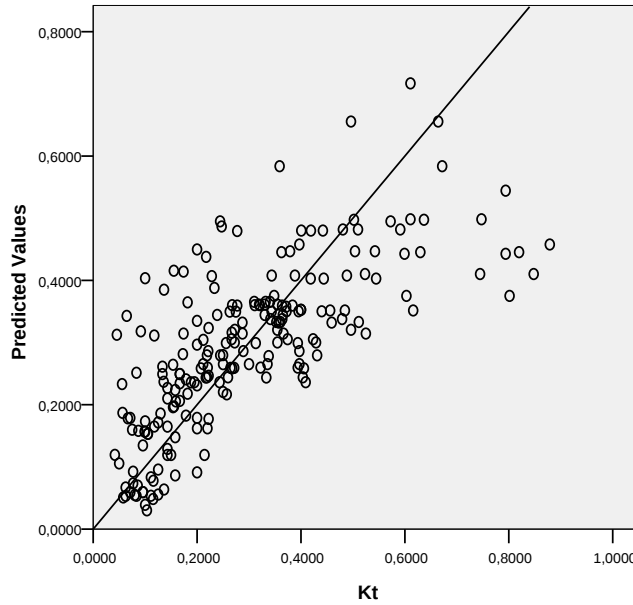


$$R^2 = 0.430$$

25^η Μαθηματική εξίσωση

$$K_t = b_1 R_9^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_{10}^{b_6} + b_7 R_7^{b_8} + b_9 R_8^{b_{10}} =$$

$$= b_1 \left(\frac{d}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 \left(\frac{L_0}{H_0} \right)^{b_6} + b_7 \left(\frac{l}{L_0} \right)^{b_8} + b_9 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_{10}}$$

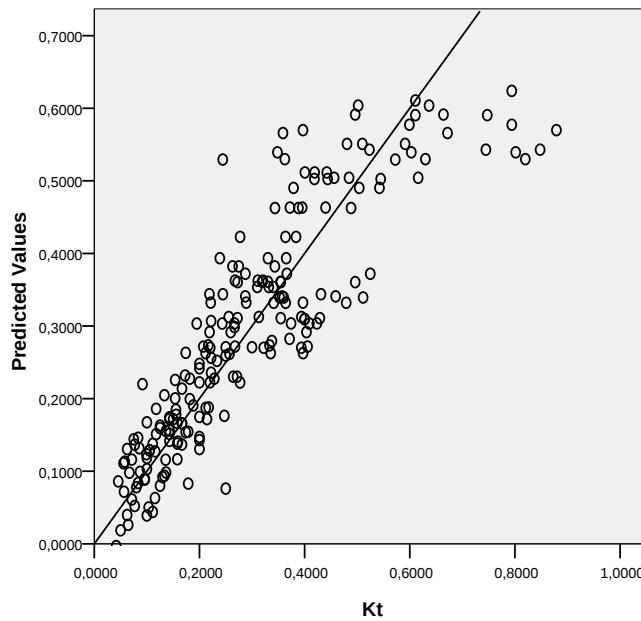


$R^2 = 0.532$

26^η Μαθηματική εξίσωση

$$K_t = b_1 R_9^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_4^{b_6} + b_7 R_7^{b_8} + b_9 R_8^{b_{10}}$$

$$= b_1 \left(\frac{d}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 (\xi)^{b_6} + b_7 \left(\frac{l}{L_0} \right)^{b_8} + b_9 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_{10}}$$

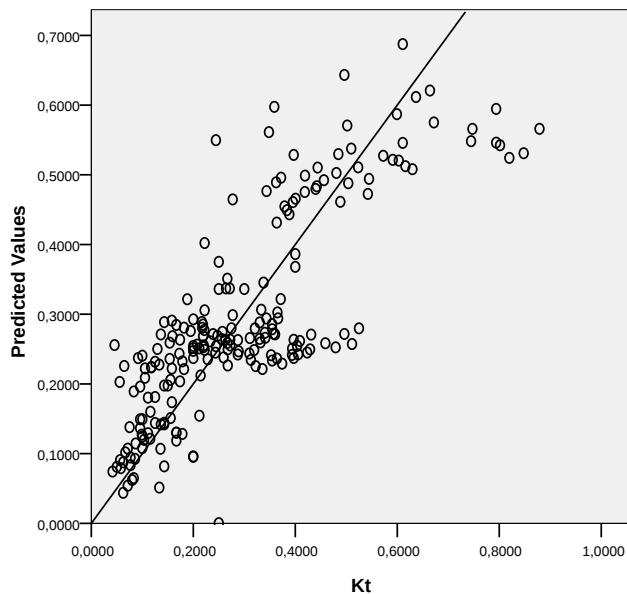


$R^2 = 0.776$

29^η Μαθηματική εξίσωση

$$K_t = b_1 R_5^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_4^{b_6} + b_7 R_7^{b_8} + b_9 R_8^{b_{10}} + b_{11} R_9^{b_{12}} =$$

$$= b_1 \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 (\xi)^{b_6} + b_7 \left(\frac{l}{L_0} \right)^{b_8} + b_9 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_{10}} + b_{11} \left(\frac{d}{H_0} \right)^{b_{12}}$$



$$R^2 = 0.664$$

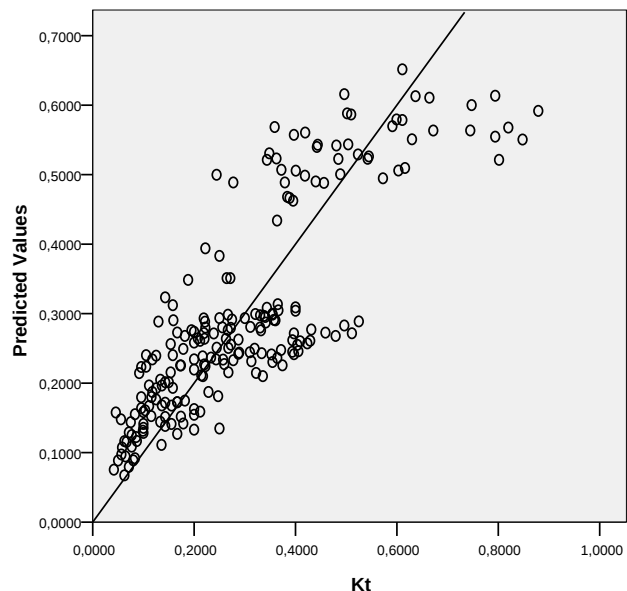
Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	,341	1,249	-2,121	2,803
b2	,233	,800	-1,344	1,811
b3	-,013	,024	-,061	,035
b4	,899	,361	,186	1,611
b5	,368	,608	-,830	1,566
b6	,451	,413	-,363	1,266
b7	-,545	562,662	-1109,990	1108,899
b8	,010	10,431	-20,558	20,578
b9	,016	,034	-,051	,084
b10	,871	,668	-,446	2,189
b11	,010	562,654	-1109,418	1109,438
b12	,010	547,060	-1078,670	1078,690

30^η Μαθηματική εξίσωση

$$K_t = [b_1 R_5^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_8^{b_6}] * (1 - \exp(b_7 R_4)) + b_8 R_9^{b_9} =$$

$$= \left[b_1 \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{b_2} + b_3 \left(\frac{l}{H_0} \right)^{b_4} + b_5 \left(\frac{b}{H_0} \right)^{b_6} \right] * (1 - \exp(b_7 \xi)) + b_8 \left(\frac{d}{H_0} \right)^{b_9}$$



$$R^2 = 0.693$$

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	,695	2,529	-4,291	5,681
b2	-1,443	,739	-2,899	,013
b3	-17,560	57,745	-131,411	96,290
b4	-,240	,203	-,639	,159
b5	5,987	22,157	-37,698	49,672
b6	-,091	,104	-,295	,114
b7	,030	,093	-,153	,213
b8	,010	,073	-,135	,155
b9	,010	2,382	-4,685	4,705

6.3 Αξιολόγηση μαθηματικών εξισώσεων – πρόταση εξισώσεων

Για την αξιολόγηση των μαθηματικών εξισώσεων (μοντέλων), εκτιμήθηκαν οι εξής στατιστικοί δείκτες:

- συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient)

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (X_c - \bar{X}_c)(X_m - \bar{X}_m)_i \right]^2}{\sum_{i=1}^N (X_c - \bar{X}_c)_i^2 \sum_{i=1}^N (X_m - \bar{X}_m)_i^2} \quad (\text{επιθυμητή τιμή: } 1)$$

- (bias ή distortion)

$$\beta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_c}{X_m} \right)_i \quad (\text{επιθυμητή τιμή: } 1)$$

- αριθμός Wilmott (Wilmott number)

$$I_w = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_c - X_m)_i^2}{\sum_{i=1}^N (|X_c - \bar{X}_c|_i + |X_m - \bar{X}_m|_i)^2} \quad (\text{επιθυμητή τιμή: } 1)$$

- μέσο τετραγωνικό σφάλμα (root mean square error)

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_c - X_m}{X_m} \right)_i^2 \right]^{1/2} \quad (\text{επιθυμητή τιμή: } 0)$$

- συνάρτηση σφάλματος (error function)

$$\varepsilon = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (X_c - X_m)_i^2}{\sum_{i=1}^N (X_m^2)_i} \right]^{1/2} \quad (\text{επιθυμητή τιμή: } 0)$$

όπου,

N = ο αριθμός δεδομένων ($N = 214$)

X_c = οι εκτιμώμενες τιμές, της ποσότητας K_t , από το εκάστοτε μοντέλο

X_m = οι πραγματικές μετρήσεις της ποσότητας K_t

Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα στατιστικών δεικτών για διάφορες εξισώσεις

Μαθηματική εξίσωση	R ²	B	I _w	RMSE	ε
M1	0.637	1.15	0.88	0.59	0.32
M2	0.655	1.22	0.88	0.59	0.31
M3	0.578	1.17	0.86	0.56	0.34
M4	0.693	1.15	0.90	0.45	0.29
M6	0.633	1.16	0.88	0.49	0.32
M7	0.470	1.28	0.77	0.71	0.38
M16	0.728	1.09	0.92	0.42	0.27
M17	0.721	1.12	0.91	0.46	0.28
M21	0.417	1.30	0.76	0.80	0.40
M22	0.713	1.11	0.91	0.46	0.28
M23	0.609	1.10	0.88	0.58	0.33
M24	0.430	1.35	0.77	0,70	0.40
M25	0.532	1.21	0.83	0.80	0.36
M26	0.776	1.06	0.93	0.35	0.25
M29	0.664	1.16	0.89	0.58	0.30
M30	0.693	1.16	0.90	0.48	0.29

Από τις εξισώσεις που δοκιμάστηκαν, οι δύο τελευταίες (29 και 30), κρίνονται από στατιστικής άποψης ως ικανοποιητικές και είναι οι πιο πλήρεις καθώς εμπεριέχονται σε αυτές οι βασικές παράμετροι. Οι εξισώσεις αυτές με βάση τις εκτιμήσεις των παραμέτρων (bi) που προκύπτουν από το στατιστικό πρόγραμμα SPSS, διαμορφώνονται ως εξής :

Αριθμητική εξίσωση 29

$$\begin{aligned}
 K_t &= b_1 R_5^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_4^{b_6} + b_7 R_7^{b_8} + b_9 R_8^{b_{10}} + b_{11} R_9^{b_{12}} = \\
 &= 0.341 * \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{0.233} - 0.013 * \left(\frac{l}{H_0} \right)^{0.899} + 0.368 * (\xi)^{0.451} - 0.545 * \left(\frac{l}{L_0} \right)^{0.01} + \\
 &+ 0.016 * \left(\frac{b}{H_0} \right)^{0.871} + 0.01 * \left(\frac{d}{H_0} \right)^{0.01}
 \end{aligned}$$

Αριθμητική εξίσωση 30

$$\begin{aligned}
 K_t &= [b_1 R_5^{b_2} + b_3 R_6^{b_4} + b_5 R_8^{b_6}] * (1 - \exp(b_7 R_4)) + b_8 R_9^{b_9} = \\
 &= \left[0.695 * \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{-1.443} - 17.560 * \left(\frac{l}{H_0} \right)^{-0.240} + 5.987 * \left(\frac{b}{H_0} \right)^{-0.91} \right] * (1 - \exp(0.3 * \xi)) + \\
 &+ 0.01 * \left(\frac{d}{H_0} \right)^{0.01}
 \end{aligned}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΦΥΣΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

7.1. Διερεύνηση μεταβολής φυσικών μεταβλητών, στις εξισώσεις 29 και 30

Οι μαθηματικές εξισώσεις που έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα από πλευράς στατιστικής προσέγγισης, στη συνέχεια ελέγχθηκαν ως προς το κατά πόσο είναι συμβατά από άποψη φυσικής ερμηνείας με τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου φαινομένου της κυματικής διείδυσης. Για κάθε μια μαθηματικής εξίσωσης, συντάχθηκαν διαγράμματα που να αποτυπώνουν την επιρροή κάθε μιας από τις φυσικές παραμέτρους, που υπεισέρχονται στην εξίσωση, πάνω στη μεταβολή του συντελεστή κυματικής διείδυσης K_t . Διερευνήθηκε αν η μορφή του κάθε ενός διαγράμματος επιβεβαιώνει γραφικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από την ανάλυση της βιβλιογραφίας και την παραμετρική ανάλυση και που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα.

Από τις μαθηματικές εξισώσεις που εξετάστηκαν, άλλες έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα, άλλες έδωσαν μη αναμενόμενα αποτελέσματα ως προς τον τρόπο επιρροής κάποιας από τις παραμέτρους στον συντελεστή K_t .

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές του K_t , όπως υπολογίστηκαν από 2 μαθηματικές εξισώσεις, με αύξοντα αριθμό 29 και 30 που διαπιστώθηκε ότι ήταν απολύτως συμβατά από άποψη φυσικής ερμηνείας, ως προς το σύνολο των υπεισέρχόμενων παραμέτρων. Προηγουμένως είχαν ελεγχθεί μοντέλα με περισσότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα από στατιστική προσέγγιση, που όμως δεν έδωσαν διαγράμματα με ικανοποιητική φυσική ερμηνεία για κάποια από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν.

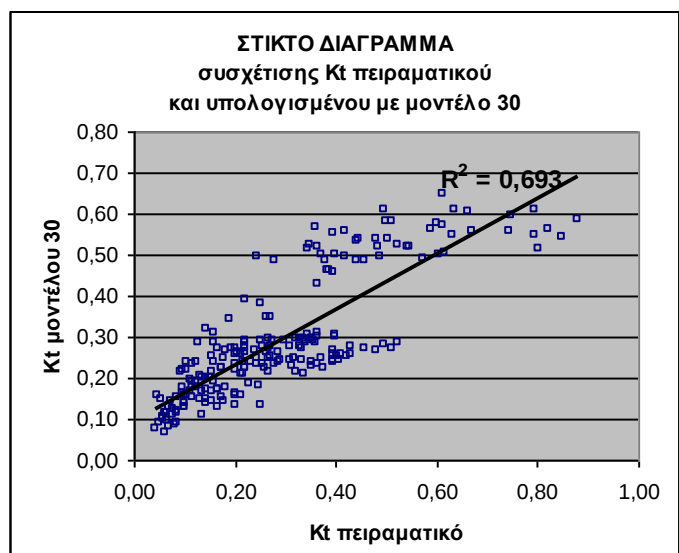
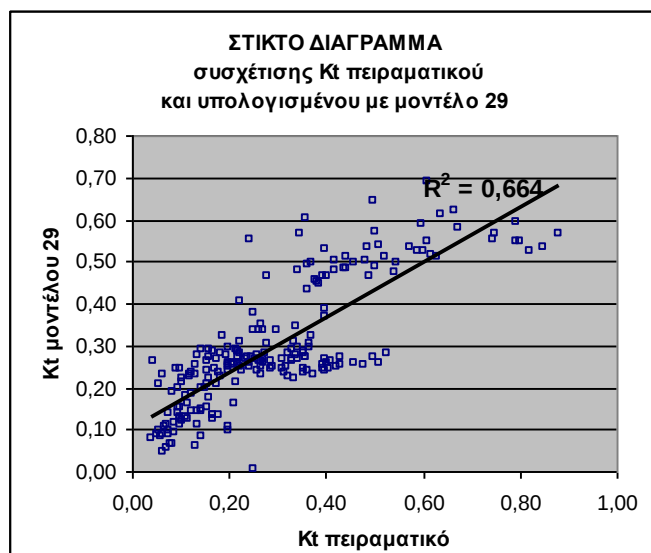
Οι τιμές του αναλυτικά υπολογισμένου K_t για τις προαναφερθείσες μαθηματικές εξισώσεις, προσεγγίζουν για το σύνολο των πειραματικών σειρών τόσο για τα πειράματα 2D όσο και για τα 3D, λιγότερο ή περισσότερο τις αντίστοιχες τιμές του K_t όπως αυτές προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις.

<i>Index 3D</i>	<i>K_t</i> <i>πειραματικό</i>	<i>K_t</i> <i>μοντέλου</i> <i>29</i>	<i>K_t</i> <i>μοντέλου</i> <i>30</i>	<i>Index 2D</i>	<i>K_t</i> <i>πειραματικό</i>	<i>K_t</i> <i>μοντέλου</i> <i>29</i>	<i>K_t</i> <i>μοντέλου</i> <i>30</i>
1	0,3714	0,3222	0,2458	106	0,6107	0,6879	0,6467
2	0,2571	0,2753	0,2318	107	0,5097	0,5384	0,5807
3	0,2000	0,2377	0,2175	108	0,4191	0,4997	0,5548
4	0,1500	0,1984	0,1993	109	0,3650	0,3033	0,3105
5	0,1158	0,1608	0,1782	110	0,3435	0,2947	0,3053
6	0,1364	0,1427	0,1662	111	0,3208	0,2803	0,2963
7	0,1154	0,1220	0,1509	112	0,3546	0,2792	0,2956
8	0,4000	0,3685	0,3015	113	0,3403	0,2741	0,2922
9	0,2222	0,3063	0,2773	114	0,4962	0,6447	0,6112
10	0,1538	0,2599	0,2537	115	0,6367	0,6128	0,6073
11	0,1250	0,2325	0,2371	116	0,8789	0,5671	0,5861
12	0,1176	0,2244	0,2318	117	0,8198	0,5253	0,5621
13	0,2643	0,3378	0,3475	118	0,5039	0,4889	0,5380
14	0,1579	0,2916	0,3090	119	0,3662	0,2950	0,3017
15	0,1786	0,2331	0,2467	120	0,3544	0,2867	0,2968
16	0,2500	0,0035	0,1340	121	0,3574	0,2731	0,2882
17	0,1429	0,0842	0,1374	122	0,3604	0,2720	0,2874
18	0,2000	0,0980	0,1320	123	0,3412	0,2671	0,2842

19	0,0769	0,0961	0,1242	124	0,3588	0,6000	0,5645
20	0,0625	0,0890	0,1155	125	0,5993	0,5888	0,5741
21	0,0833	0,0663	0,0911	126	0,7448	0,5498	0,5581
22	0,0714	0,0553	0,0789	127	0,4438	0,5118	0,5376
23	0,1667	0,1326	0,1714	128	0,3436	0,4779	0,5159
24	0,1429	0,1443	0,1706	129	0,2190	0,2863	0,2901
25	0,1000	0,1511	0,1571	130	0,2214	0,2785	0,2855
26	0,0750	0,1396	0,1426	131	0,2557	0,2655	0,2773
27	0,0990	0,1288	0,1304	132	0,2723	0,2645	0,2767
28	0,1727	0,2452	0,2236	133	0,2665	0,2598	0,2736
29	0,1333	0,2292	0,2031	134	0,2443	0,5534	0,4965
30	0,0833	0,1905	0,1539	135	0,3483	0,5637	0,5258
31	0,3333	0,3069	0,2409	136	0,4845	0,5317	0,5175
32	0,2200	0,2533	0,2247	137	0,3721	0,4976	0,5019
33	0,2143	0,2128	0,2092	138	0,2773	0,4663	0,4837
34	0,1579	0,1745	0,1913	139	0,1947	0,2773	0,2733
35	0,1250	0,1446	0,1748	140	0,2192	0,2700	0,2691
36	0,1111	0,1300	0,1654	141	0,2073	0,2577	0,2616
37	0,4000	0,3868	0,3063	142	0,2204	0,2567	0,2610
38	0,3378	0,3459	0,2940	143	0,2117	0,2523	0,2582
39	0,3000	0,3367	0,2909	144	0,7474	0,5667	0,5943
40	0,2000	0,2552	0,2558	145	0,5911	0,5222	0,5641
41	0,1579	0,2228	0,2378	146	0,4422	0,4844	0,5343
42	0,2500	0,3758	0,3793	147	0,3302	0,2890	0,2947
43	0,1882	0,3222	0,3450	148	0,2748	0,2805	0,2887
44	0,1296	0,2509	0,2855	149	0,3110	0,2665	0,2781
45	0,2167	0,2894	0,2364	150	0,3301	0,2654	0,2772
46	0,2222	0,2494	0,2222	151	0,3318	0,2604	0,2732
47	0,1429	0,1984	0,1993	152	0,6641	0,6225	0,6063
48	0,1250	0,1819	0,1907	153	0,6298	0,5091	0,5455
49	0,0957	0,1372	0,1623	154	0,5424	0,4736	0,5175
50	0,1000	0,1086	0,1399	155	0,5249	0,2807	0,2860
51	0,2667	0,3515	0,2957	156	0,4962	0,2726	0,2801
52	0,2000	0,2934	0,2713	157	0,4590	0,2593	0,2699
53	0,1818	0,2814	0,2653	158	0,5113	0,2582	0,2691
54	0,1053	0,2096	0,2213	159	0,4792	0,2534	0,2652
55	0,2222	0,4028	0,3902	160	0,6718	0,5778	0,5595
56	0,2714	0,3378	0,3475	161	0,8479	0,5325	0,5452
57	0,1591	0,2692	0,2874	162	0,5446	0,4956	0,5209
58	0,0857	0,0941	0,1213	163	0,4884	0,4626	0,4954
59	0,0579	0,0807	0,1064	164	0,4311	0,2720	0,2744
60	0,0800	0,0635	0,0881	165	0,3969	0,2644	0,2688
61	0,0625	0,0450	0,0667	166	0,3939	0,2518	0,2591
62	0,1667	0,1326	0,1714	167	0,4290	0,2507	0,2583
63	0,1556	0,1531	0,1664	168	0,4234	0,2462	0,2546
64	0,1429	0,1459	0,1500	169	0,5725	0,5312	0,4915
65	0,1000	0,1260	0,1273	170	0,8015	0,5449	0,5165
66	0,0870	0,1160	0,1157	171	0,6160	0,5144	0,5046
67	0,2000	0,2495	0,2324	172	0,4399	0,4815	0,4852
68	0,1538	0,2376	0,2136	173	0,3837	0,4510	0,4632
69	0,1111	0,1810	0,1947	174	0,4090	0,2630	0,2575
70	0,0957	0,1500	0,1780	175	0,4035	0,2558	0,2524
71	0,1034	0,1205	0,1593	176	0,4057	0,2439	0,2434
72	0,2500	0,3367	0,2909	177	0,3937	0,2429	0,2426
73	0,1667	0,2852	0,2702	178	0,3970	0,2386	0,2391
74	0,1053	0,2230	0,2378	179	0,7940	0,5953	0,6081
75	0,0957	0,1968	0,2210	180	0,6108	0,5465	0,5731
76	0,1429	0,2894	0,3201	181	0,4806	0,5034	0,5367
77	0,0769	0,0893	0,1095	182	0,4006	0,4665	0,5007
78	0,0500	0,0854	0,0894	183	0,2387	0,2723	0,2689
79	0,0417	0,0781	0,0763	184	0,2628	0,2641	0,2613
80	0,0556	0,2076	0,1492	185	0,2675	0,2504	0,2481
81	0,0455	0,2598	0,1593	186	0,3193	0,2494	0,2470
82	0,0645	0,2290	0,0965	187	0,3100	0,2445	0,2420
83	0,1333	0,0611	0,1457	188	0,5019	0,5720	0,5829
84	0,0714	0,1123	0,1297	189	0,3969	0,5297	0,5520
85	0,0667	0,1060	0,1161	190	0,3624	0,4903	0,5181
86	0,0565	0,0943	0,0980	191	0,3790	0,4558	0,4839
87	0,0917	0,2427	0,2156	192	0,2874	0,2639	0,2601
88	0,1176	0,2287	0,1882	193	0,2726	0,2561	0,2528
89	0,1739	0,2072	0,1528	194	0,2873	0,2432	0,2399

90	0,1364	0,2747	0,1978	195	0,3526	0,2421	0,2389
91	0,1000	0,2436	0,1372	196	0,3639	0,2375	0,2340
92	0,1786	0,1328	0,1424	197	0,7940	0,5480	0,5497
93	0,1667	0,1225	0,1274	198	0,5232	0,5124	0,5240
94	0,1357	0,1103	0,1117	199	0,4186	0,4768	0,4935
95	0,2333	0,2663	0,2376	200	0,3883	0,4447	0,4617
96	0,1818	0,2246	0,1757	201	0,2445	0,2553	0,2485
97	0,2174	0,2838	0,2112	202	0,2890	0,2479	0,2415
98	0,2000	0,2541	0,1559	203	0,3129	0,2356	0,2291
99	0,2000	0,1040	0,1639	204	0,3546	0,2347	0,2281
100	0,2119	0,1590	0,1595	205	0,3743	0,2302	0,2234
101	0,1739	0,2672	0,2261	206	0,6030	0,5229	0,5014
102	0,2283	0,2384	0,1880	207	0,4562	0,4943	0,4834
103	0,1552	0,2083	0,1423	208	0,3953	0,4626	0,4578
104	0,2773	0,3018	0,2340	209	0,3636	0,4331	0,4295
105	0,2473	0,2716	0,1824	210	0,2433	0,2463	0,2317
				211	0,2595	0,2394	0,2251
				212	0,2675	0,2278	0,2134
				213	0,3222	0,2269	0,2124
				214	0,3355	0,2227	0,2079
Min 3D	0,0417	0,0035	0,0667	Min 2D	0,1947	0,2227	0,2079
Max 3D	0,4000	0,4028	0,3902	Max 2D	0,8789	0,6879	0,6467
Average3D	0,1592	0,2027	0,1956	Average2D	0,4205	0,3792	0,3847
				Min	0,0417	0,0035	0,0667
				Max	0,8789	0,6879	0,6467
				Average	0,2923	0,2926	0,2919
				R^2		0,664	0,693

Ακολουθούν τα στικτά διαγράμματα συσχέτισης των αποτελεσμάτων του συντελεστού κυματικής διείδυσης K_t όπως μετρήθηκε από τα πραγματοποιηθέντα στο ΕΛΕ πειράματα, με τον συντελεστή που υπολογίστηκε αντίστοιχα αναλυτικά από την εφαρμογή των μαθηματικών εξισώσεων 29 και 30. Τα διαγράμματα δείχνουν καλύτερη στατιστική ανταπόκριση στα αποτελέσματα των πειραμάτων 3D σε σχέση με εκείνα των 2D.



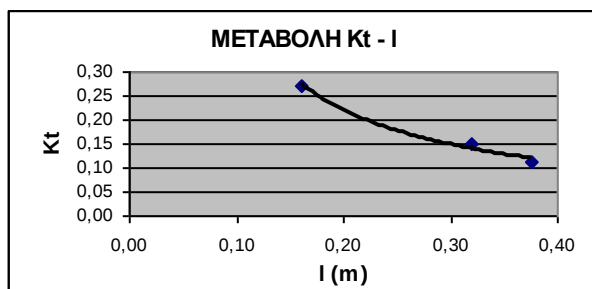
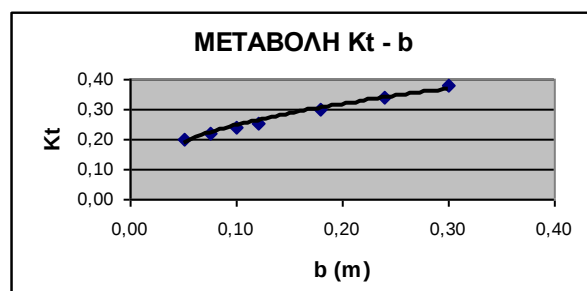
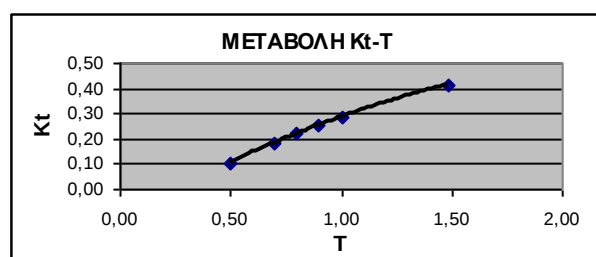
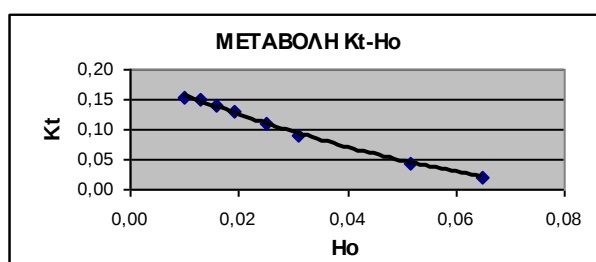
Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για να διερευνηθεί η φυσική ερμηνεία των μοντέλων, μέσω διαγραμματικής απεικόνισης της επιρροής των παραμέτρων στον συντελεστή κυματικής διείδυσης K_t , χρησιμοποιήθηκε η ίδια με αυτήν της παραμετρικής ανάλυσης αρχικά οργανωμένη βάση δεδομένων, με πεδία όλες τις παραμέτρους (μεταξύ αυτών και όλες τις αδιάστατες παραμέτρους R) που υπεισέρχονται στα

αντίστοιχα μοντέλα και εγγραφές το σύνολο των 214 τελικά επιλεγέντων σειρών αποτελεσμάτων πειραμάτων 2D και 3D.

Για την διερεύνηση της φυσικής ερμηνείας του μαθηματικού μοντέλου, λαμβάνονταν δεδομένα μιας πραγματικής σειράς αποτελεσμάτων, διαφοροποιούνταν κάθε φορά μία παράμετρος με τις υπόλοιπες παραμέτρους να παραμένουν σταθερές και παρατηρείτο η μεταβολή του συντελεστή κυματικής διείδυσης.

Παρατίθενται οι πίνακες μεταβολής παραμέτρων και τα αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση των μοντέλων 29 και 30.

Διαγραμματική απεικόνιση μεταβολής K_t 29 σε σχέση με εξεταζόμενη παράμετρο



Πίνακας μεταβολής τιμών Παραμέτρου- K_t 29

K_t	H_0
0,153686369	0,01
0,148719088	0,013
0,139297975	0,016
0,129459732	0,019
0,109482192	0,025
0,091472965	0,031
0,044011289	0,052
0,021547507	0,065

Αναμενόμενη φυσική συσχέτιση

$H_0 \uparrow K_t \downarrow$

K_t	T
0,105954503	0,5
0,185786036	0,7
0,220981498	0,8
0,253835142	0,9
0,284739641	1,00
0,413538951	1,48

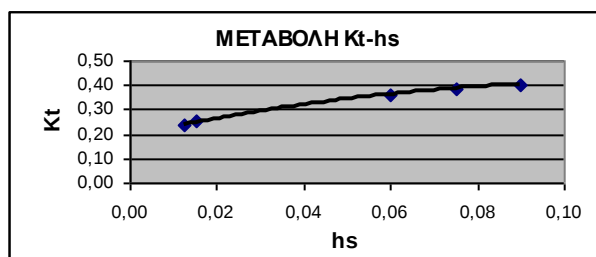
$T \uparrow K_t \uparrow$

K_t	b
0,198366548	0,05
0,218904602	0,075
0,238560738	0,100
0,253823682	0,120
0,297851108	0,180
0,339987966	0,240
0,380772603	0,300

$b \uparrow K_t \uparrow$

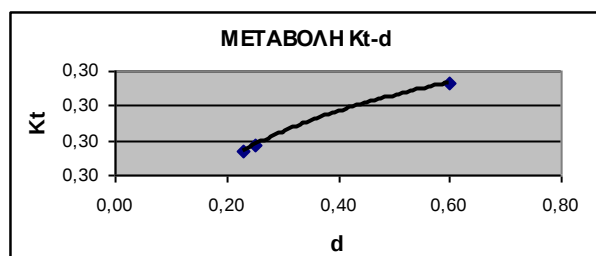
K_t	l
0,270242094	0,16
0,151095714	0,32
0,112099795	0,38

$l \uparrow K_t \downarrow$



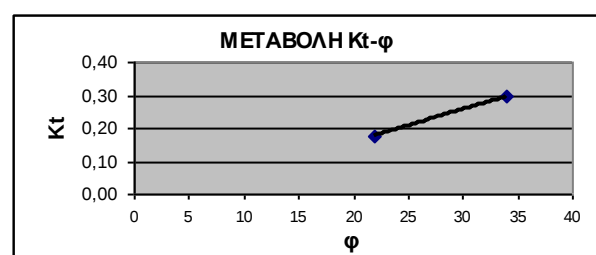
Kt	hs
0,238501533	0,013
0,250868917	0,015
0,364242948	0,060
0,38616267	0,075
0,40493798	0,090

$h_s \uparrow K_t \uparrow$



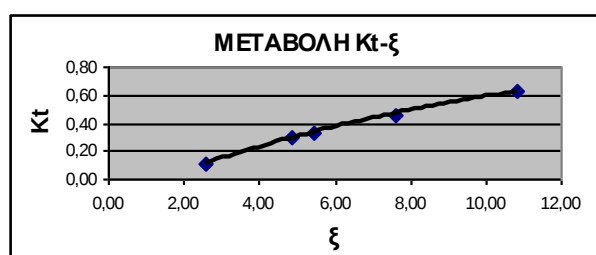
Kt	d
0,301784434	0,23
0,301792974	0,25
0,301883068	0,6

$d \uparrow K_t \uparrow$



Kt	φ °
0,178170807	22
0,294976703	34

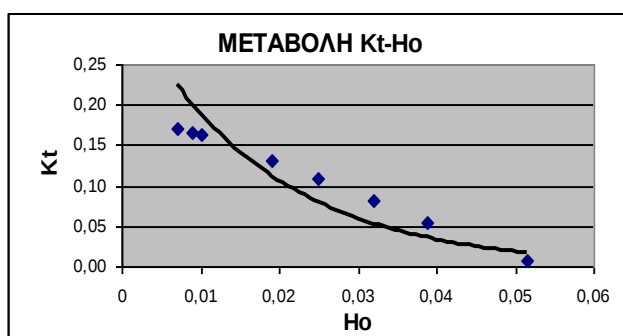
$\varphi \uparrow K_t \uparrow$



Kt	ξ
0,107821892	2,565
0,29609557	4,864
0,335956157	5,455
0,46264104	7,583
0,622464378	10,83

$\xi \uparrow K_t \uparrow$

Διαγραμματική απεικόνιση μεταβολής K_t σε σχέση με εξεταζόμενη παράμετρο

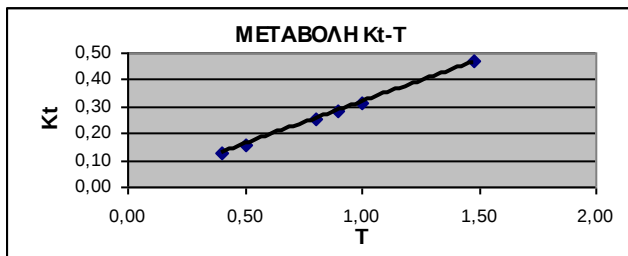


Πίνακας μεταβολής τιμών Παραμέτρου- K_t 30

Ho	Kt
0,007	0,170588188
0,009	0,166413503
0,01	0,16357586
0,019	0,131126213
0,025	0,107971671
0,032	0,081162807
0,0388	0,055557151
0,0516	0,008542081

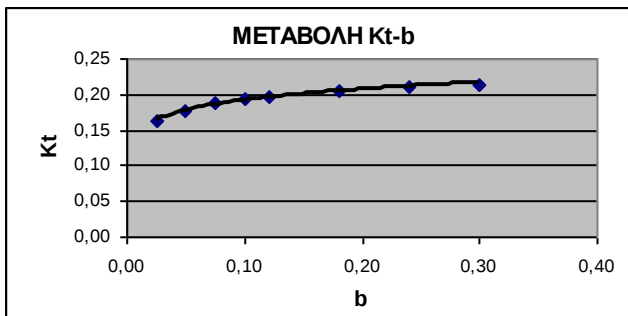
Αναμενόμενη φυσική συσχέτιση

$H_o \uparrow K_t \downarrow$



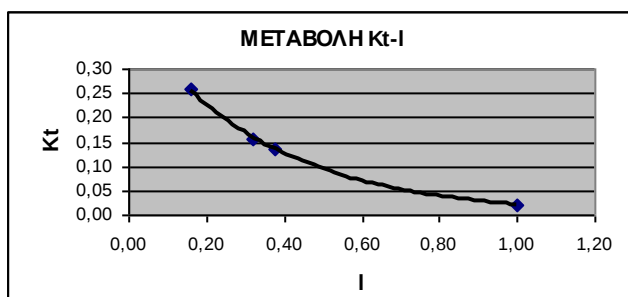
T	Kt
0,4	0,129614009
0,5	0,160054613
0,8	0,252799483
0,9	0,284194936
1	0,315833746
1,48	0,471147508

$T \uparrow K_t \uparrow$



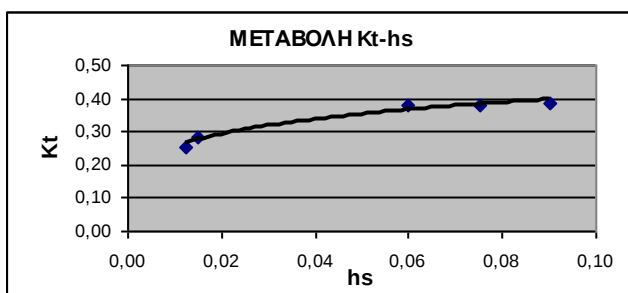
b	Kt
0,025	0,162319907
0,05	0,178194297
0,075	0,187026493
0,1	0,193098313
0,12	0,196864911
0,18	0,205020766
0,24	0,210627626
0,3	0,214876679

$b \uparrow K_t \uparrow$



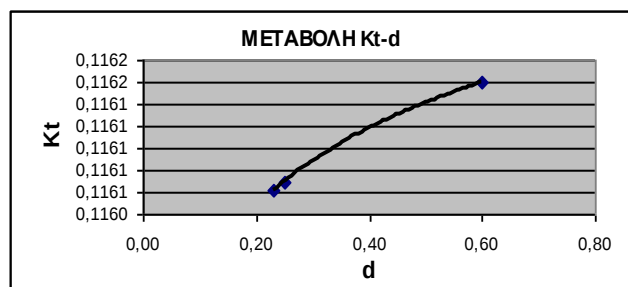
l	Kt
0,16	0,259472503
0,32	0,157095048
0,38	0,135968331
1,00	0,021758755

$l \uparrow K_t \downarrow$



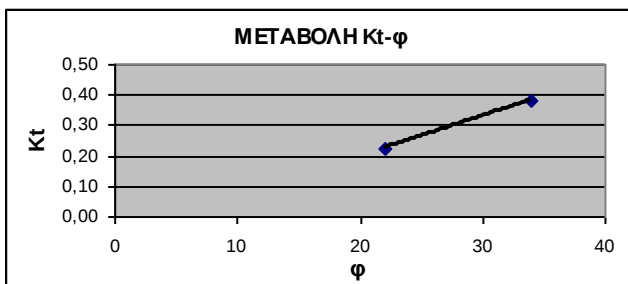
hs	Kt
0,0125	0,253271828
0,0150	0,285491037
0,0600	0,378068641
0,0750	0,382055782
0,0900	0,384483748

$h_s \uparrow K_t \uparrow$



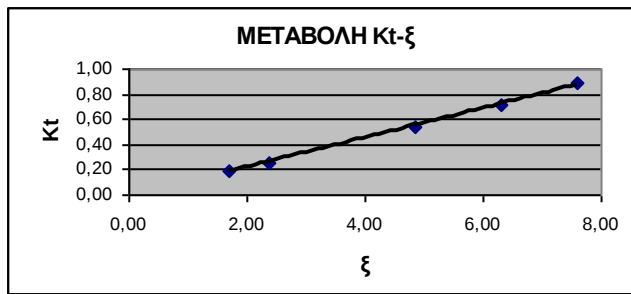
d	Kt
0,23	0,116061251
0,25	0,116069808
0,6	0,116160083

$d \uparrow K_t \uparrow$



φ°	Kt
22	0,226144504
34	0,383834212

$\varphi \uparrow K_t \uparrow$



ξ	Kt
1,681	0,186888269
2,3673	0,261630176
4,8636	0,54685304
6,2902	0,719706899
7,5827	0,882831745

ξ ↑ Kt ↑

Παρατηρώ ότι το σύνολο των άνω διαγραμμάτων που προκύπτουν από τα μοντέλα 29 και 30, έχουν την αναμενόμενη μορφή για το σύνολο των παραμέτρων, όπως αυτή καταγράφεται στη σχετική βιβλιογραφία και προκύπτει από την παραμετρική ανάλυση που προηγήθηκε.

7.2. Τελική πρόταση εμπειρικής εξίσωσης

Μετά τη διερεύνηση της μεταβολής των φυσικών μεταβλητών, που περιγράφουν το σύνθετο φαινόμενο της κυματικής διείσδυσης μέσω αγωγών ανανέωσης και της χρήσης μη γραμμικής πολλαπλής συσχέτισης, προτείνεται ως βέλτιστη εμπειρική εξίσωση η με αριθμό 30, με καλύτερο συντελεστή συσχέτισης και από άποψη δομής πλησιέστερη προς τα προτεινόμενα από τη σχετική βιβλιογραφία.

$$\begin{aligned}
 K_t &= [b_1 * R_5^{b_2} + b_3 * R_6^{b_4} + b_5 * R_8^{b_6}] * (1 - \exp(b_7 * R_4)) + b_8 * R_9^{b_3} = \\
 &= \left[0.695 * \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{-1.443} - 17.560 * \left(\frac{l}{H_0} \right)^{-0.240} + 5.987 * \left(\frac{b}{H_0} \right)^{-0.91} \right] * (1 - \exp(0.3 * \xi)) + \\
 &+ 0.01 * \left(\frac{d}{H_0} \right)^{0.01}
 \end{aligned}$$

Η άνω εξίσωση εκτιμάται ότι μπορεί ικανοποιητικά να υπολογίσει το συντελεστή κυματικής διείσδυσης, μέσω αγωγών ανανέωσης σε λιμενολεκάνη, συναρτήσει των κυματικών χαρακτηριστικών του προσπίπτοντος κυματισμού και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού ανανέωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με τη μετάδοση των κυματισμών διαμέσου των αγωγών ανανέωσης που τοποθετούνται στις κατασκευές προστασίας από τους κυματισμούς, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων των λιμενολεκανών, με παράλληλη διασφάλιση ότι δε θα εμφανίζονται μέσα στη λιμενολεκάνη κυματικές συνθήκες που να δημιουργούν προβλήματα στη λειτουργία της.

Επιχειρήθηκε να διερευνηθεί πως μεταβάλλεται το ύψος του διεισδύοντος κυματισμού σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών ανανέωσης και τα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κυματισμού. Προς το σκοπό αυτό μελετήθηκε η επιρροή που έχουν οι διάφοροι παράμετροι στον συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t , που είναι ο λόγος του διεισδύοντος κυματισμού προς το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού.

Αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα μιας εκτεταμένης έρευνας που έχει διεξαχθεί στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π, τόσο σε συνθήκες 2D στην υπάρχουσα διάρρυα, όσο και σε συνθήκες 3D στις υπάρχουσες δεξαμενές.

Χρησιμοποιήθηκαν έπειτα από αξιολόγηση και επιλογή, 214 σειρές αποτελεσμάτων μετρήσεων 2D και 3D, με κοινό χαρακτηριστικό τη θέση του αγωγού ως προς την επιφάνεια του νερού ($S=0$) και το κεκλιμένο της προσήνεμης πλευράς του κυματοθραύστη. Τα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κυματισμού, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών ανανέωσης και η κλίμακα κάτω από την οποία διεξήχθησαν τα πειράματα διέφεραν κατά περίπτωση.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων οργανώθηκαν σε βάση δεδομένων και αξιοποιήθηκαν ως ενιαίο σύνολο τόσο στη παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, όσο και στη μετέπειτα εμπειρική επιλογή κατάλληλης μαθηματικής εξίσωσης (εμπειρικό μοντέλο), που να μπορεί να εκφράσει ικανοποιητικά, τόσο από πλευράς στατιστικής προσέγγισης όσο και από πλευράς φυσικής ερμηνείας, τον συντελεστή κυματικής διείσδυσης K_t .

Από την παραμετρική ανάλυση τεκμηριώθηκε ότι τόσο για τα αποτελέσματα 2D όσο και για τα 3D ο συντελεστής κυματικής διείσδυσης :

αυξάνεται με την αύξηση

- του **πλάτους (b)** του αγωγού ανανέωσης,
- του **ύψους (h)** του αγωγού ανανέωσης,
- του **βάθους (d)** του νερού
- την **περίοδο (T)** του προσπίπτοντος κυματισμού,

ενώ μειώνεται με την αύξηση

- του **μήκους (l)** του αγωγού ανανέωσης
- του **ύψους (H_i)** του προσπίπτοντος κύματος.

Δεδομένου του πολυπαραμετρικού χαρακτήρα του K_t , επιχειρήθηκε ανάλυση της επίδρασης αδιάστατων παραμέτρων πάνω στο συντελεστή κυματικής διείσδυσης, με στόχο να μειωθούν οι μεταβλητές και να προκύψει σχέση που να έχει ευρύτερη εφαρμογή σε παρόμοιες περιπτώσεις, ανεξάρτητα από τις χρησιμοποιούμενες μονάδες.

Η επιλογή των αδιάστατων παραμέτρων, έγινε από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, όπως αυτές έχουν προκύψει έπειτα από διαστατική ανάλυση.

Η ανάλυση της επίδρασης των αδιάστατων παραμέτρων επί του συντελεστή κυματικής διείσδυσης έδειξε ότι ο K_t :

αυξάνει με την αύξηση

- του αριθμού Iribarren (ξ),
- του λόγου ύψους αγωγού ανανέωσης προς βάθος νερού $\left(\frac{h}{d}\right)$,
- του λόγου πλάτους αγωγού ανανέωσης προς βάθος νερού $\left(\frac{b}{d}\right)$,
- του αντίστροφου της καμπυλότητας του κύματος $\left(\frac{L_0}{H_i}\right)$,
- του λόγου καταβύθισης $\left(\frac{h_s}{H_i}\right)$.

Αντίστροφα ο K_t :

μειώνεται με την αύξηση

- του λόγου μήκους αγωγού ανανέωσης προς μήκος προσπίπτοντος κύματος $\left(\frac{l}{L_0}\right)$,
- του λόγου ύψους προσπίπτοντος κύματος προς πλάτος αγωγού ανανέωσης $\left(\frac{H_i}{b}\right)$,
- της αδιάστατης έκφρασης της καμπυλότητας του προσπίπτοντος κυματισμού $\left(\frac{H_i}{gT^2}\right)$,
- του λόγου ύψους προσπίπτοντος κύματος προς μήκος αγωγού ανανέωσης $\left(\frac{H_i}{l}\right)$,
- του λόγου ύψους προσπίπτοντος κύματος προς βάθος νερού $\left(\frac{H_i}{d}\right)$.

Για να εκφρασθεί μαθηματικά η επίδραση των αδιάστατων παραμέτρων στον συντελεστή K_t , διερευνήθηκαν διαφορετικές εμπειρικές εξισώσεις μέσω μη-γραμμικής παλινδρόμησης με τη χρησιμοποίηση του στατιστικού λογισμικού SPSS. Η διατύπωση των μαθηματικών εξισώσεων πήρε ως βάση εξισώσεις που είχαν

προταθεί μεμονωμένα για περιπτώσεις είτε 2D πειραμάτων είτε 3D πειραμάτων, στα πλαίσια της βιβλιογραφίας που εξετάστηκε, και οι οποίες συμπληρώθηκαν με άλλες αδιάστατες παραμέτρους που προέκυψαν από συνδυασμό των ήδη χρησιμοποιηθέντων, με την προϋπόθεση να έχουν κάποια φυσική σημασία. Αναζητήθηκε η καλύτερη δυνατή συσχέτιση μέσω των μαθηματικών εξισώσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών και των χαρακτηριστικών του προσπίπτοντος κύματος με τον K_t .

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που έδωσε η εφαρμογή των αριθμητικών εξισώσεων για το σύνολο των 214 πειραματικών μετρήσεων (με διαφορετικά χαρακτηριστικά κύματος και αγωγού), πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια 5 στατιστικών δεικτών.

Οι εξισώσεις που έδωσαν ικανοποιητική στατιστική προσέγγιση, διερευνήθηκαν παράλληλα ως προς τη φυσική ερμηνεία των υπεισερχομένων μεγεθών. Και για τη διερεύνηση αυτή χρησιμοποιήθηκε η ίδια βάση δεδομένων αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων και συντάχθηκαν πίνακες και διαγράμματα ώστε να διαπιστωθεί ότι η επιρροή κάθε παραμέτρου, που υπεισέρχεται στην εξίσωση, πάνω στον K_t , είναι απολύτως φυσικά ερμηνεύσιμη και συμβατή με τα πορίσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και της παραμετρικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων των πειραμάτων που είχε προηγηθεί.

Από την παραμετρική ανάλυση των φυσικών μεταβλητών που περιγράφουν το φαινόμενο της κυματικής διείσδυσης μέσω αγωγού ανανέωσης και τη χρήση μη γραμμικής πολλαπλής συσχέτισης (SPSS, v.13, 2004), προέκυψαν δύο εξισώσεις ικανοποιητικής μορφής και πληρότητας παραμέτρων σε σχέση με τα αναγραφόμενα στη σχετική βιβλιογραφία. Οι δύο αυτές εξισώσεις που παρουσιάζονται αναλυτικά στη διπλωματική εργασία, έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα από πλευράς στατιστικής προσέγγισης και απολύτως συμβατά αποτελέσματα με τη φυσική ερμηνεία της μεταβολής του συνόλου των υπεισερχομένων παραμέτρων σε σχέση με το K_t .

Από τις δύο εξισώσεις προτείνεται τελικά ως βέλτιστη η :

$$K_t = \left[0.695 * \left(\frac{h_s}{H_0} \right)^{-1.443} - 17.560 * \left(\frac{l}{H_0} \right)^{-0.240} + 5.987 * \left(\frac{b}{H_0} \right)^{-0.91} \right] * (1 - \exp(0.3 * \xi)) + 0.01 * \left(\frac{d}{H_0} \right)^{0.01}$$

Η εξίσωση αυτή είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για μια κατ' αρχήν εκτίμηση του συντελεστή κυματικής διείσδυσης για δεδομένα χαρακτηριστικά προσπίπτοντος κυματισμού και αγωγών ανανέωσης και πρακτικά, στα πλαίσια του σχεδιασμού των λιμενικών έργων, είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί για επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αγωγών ανανέωσης σε σχέση με το επιτρεπόμενο ύψος κύματος στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης.

Σύμφωνα με την κλίμακα των φυσικών ομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πρόβλεψη για προσπίπτοντα κύματα με

χαρακτηριστικά που αντιστοιχούν στο ύψος και την περίοδο των κυματισμών που δημιουργήθηκαν στα υπό κλίμακα φυσικά ομοιώματα και για αγωγούς ανανέωσης που ο κεντρικός άξονάς τους βρίσκεται στη Σ.Η.Υ. ($S=0$).

Δεδομένου όμως ότι η εξίσωση προέρχεται από πειραματικές μετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν με κυματισμούς διαφορετικών χαρακτηριστικών και υπό διαφορετικές κλίμακες, μπορεί να έχουν υπεισέλθει σφάλματα λόγω κλίμακας ή λόγω καταγραφών και απαιτείται επιβεβαίωση σε μεγαλύτερο δείγμα με περαιτέρω πειράματα και σε άλλες κλίμακες.

Απαιτείται επίσης η διενέργεια νέων μετρήσεων στη φύση για επιβεβαίωση της προτεινόμενης εξίσωσης και για διερεύνηση ενδεχόμενης περαιτέρω βελτίωσης των συντελεστών που έχουν προκύψει από την ανάλυση παλινδρόμησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 Blankenship, T.K., Yang, G. Water quality at marinas: flushing, Costal Systems International, vol. 4.
- 2 Bowen M.K., McIver P., 2000. Diffraction by a gap in an infinity permeable breakwater. Port, Coast., and Oc. Engineering, vol. 128, pp 2-9 (January/ February 2002).
- 3 Cardwell, R. D., Koons, R. R., 1981. Biological consideration for the siting and design of marina and affiliated structures in Puget sound. Technical Report no. 60, State of Washington, Department of Fisheries.
- 4 Dalrymple, R.A., Martin, P.A., 1996. Water waves incident on an infinitely long rectangular inlet. Appl. Oceans Res., 18, 1-11.
- 5 Dalrymple, R.A., Martin, P.A., 2000. Waves in rectangular inlet with reflecting or absorbing walls. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering.
- 6 Dean W. R., 1945. On the reflection of surface waves by a submerged plane barrier. Proc. Camp. Phil. Soc. 41, 231-238.
- 7 Dunham, J. W., Finn. A. A., 2002. Small-Craft Harbors: Design, Construction and Operation, Fredonia Books.
- 8 Flint R.F. and Skinner B., 1977. Physical Geology, John Wiley & Sons, 2nd edition, pp. 259-261.
- 9 Guiney D.C., 1972. Some flows through a wall in viscous and non- viscous fluids. Ph. D. Thesis, University of Adelaide.
- 10 Guiney D.C., Noye B.J., Tuck E.O., 1972. Transmission of water waves through small apertures. J. Fluid Mech. (1972), Vol. 55, part 1, pp.149-161.
- 11 Howitt, D., Cramer, D., 2006. Στατιστική με το SPSS 13. Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- 12 Lewin, M., 1963. The effect of vertical barriers on progressive waves. J. Math. And Phys. 42, 287-300.
- 13 Liu P.L., Wu J., 1986. Transmission of Oblique Waves through submerged apertures, Applied Ocean Research, 8 (3), pp.144-150.
- 14 Losada I.J., Patterson M.D., Losada M.A., 1997. Harmonic generation past a submerged porous step, Coastal Engineering, 31, pp.281-304.
- 15 Macaskill, C., 1979. Reflection of water waves by a permeable barrier. J. Fluid Mech., 95, 141-157.
- 16 Mandal B.N, Kundu P.K., 1989. A note on the transmission of oblique waves through small apertures, Computers Math. Applic., 21 (4), pp. 17-22.
- 17 Mei C., Stiassnie M., Yue D., 1985. Theory and applications of ocean surface waves- Part 1: Linear aspects, Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 23, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- 18 Mei C.C & Black J.I., 1969. Scattering of surface waves by rectangular obstacles in waters of finite depth, J. Fluid Mech., 38, 499-511.
- 19 Mei, C.C., 1966. Radiation and scattering of transient gravity waves by vertical plates. Quart. J. Mech. Appl. Math. 19, 417-440.
- 20 Montgomery C., 2000. Environmental Geology, Wm.C. Brown Publishers 5th edition, pp. 168.
- 21 Ohyama T., Kioka W., Tada A., 1995. Applicability of numerical models to nonlinear dispersive waves, Coastal Engineering, 24, pp. 297-313.

- 22 Ohyama T., Nadaoka K. 1994. Transformation of a nonlinear wave train passing over a submerged shelf without breaking, *Coastal Engineering*, 24, pp. 1-22.
- 23 Peckham, B.A., Williams, W.E., 1972. A note on the transmission of water waves through small apertures, *J. Inst. Maths. Applics.*, 10, 176-184.
- 24 Porter D., 1972. The transmission of surface waves through a gap in a vertical barrier. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 71, 411-421.
- 25 Schwartz, R. A., 1989. The flushing characteristics of Hillarys boat harbor, M. Eng. Sc. Thesis, University of Western Australia, Centre for Water Research Reference ED, 259 RS.
- 26 Schwartz. R. A, Imberger, J., 1988. Flushing behavior of a coastal marina, In *Proceedings of the 21st International Coastal Engineering Conference*, Spain, ED 439.
- 27 Shankar N.J., Chan E.S., Zhang Q.Y., 2001. Three- dimensional numerical simulation for an open channel flow with a constriction. *J. of Hydraulic Research*, 39 (2), pp. 187-201.
- 28 Shen Y.M., Ng C.O., Zheng Y.H., 2004. Simulation of wave propagation over a submerged bar using the VOF method with a two-equation k-ε turbulence modeling, *Ocean Engineering*, 31, pp. 87-95
- 29 Stamou, A. I., Katsiris, I. K., Moutzouris, C. I., Tsoukala, V. K., 2004. Improvement of marina design technology models. *Global Nest* 6 (1), 63-72.
- 30 Streeter, Wylie, Bedford. *Μηχανική ρευστών*.
- 31 Tsoukala, K. V., Moutzouris, I. C., 2009. Wave transmission in harbours through flushing culverts. *Ocean Engineering* (2009).
- 32 Tuck E.O., 1971. Matching problems involving flow through small holes. In *advances in applied mechanics* (ed C.S), Vol. 15, pp 89-158. New York: Academic.
- 33 U.S Environmental Protection Agency, 2001. National management measures guidance to control non-pointsource pollution from marinas and recreational boating.
- 34 Ursell E., 1947. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 43, 374-382.
- 35 Ακύλας Α., 2006. Πειραματική διερεύνηση της εισερχόμενης κυματικής διαταραχής σε λιμενολεκάνη από αγωγό ανανέωσης υδάτων – μέρος Ι. *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 36 Βατερλάτου, Σ., 2006. Παραμετρική ανάλυση κυματικής διείδουσας από αγωγούς ανανέωσης υδάτων. *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 37 Βαφάκη, Ε., Υπεύθυνη Τμήματος Περιβάλλοντος, Υγιεινής & Ασφάλειας ΟΛΘ ΑΕ. (http://hermes.civil.auth.gr/pgtransport/docs/vafaki_litourgia_limenon_peribalontikoi_periorismoi.pdf).
- 38 Γιαννάκη Τ., 2005. Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης των αγωγών ανανέωσης ύδατος στα κυματικά χαρακτηριστικά και την οξυγόνωση της εσωτερικής περιοχής των παράκτιων έργων. *Διπλωματική Εργασία*, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 39 Δημητρακοπούλου Δ., 2005. Πειραματική διερεύνηση κυματικής διείδουσας σε λιμενολεκάνη από αγωγούς ανανέωσης ύδατος, *Διπλωματική εργασία*, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 40 Καραμπάς, Θ., 2004. Στοιχεία Κυματομηχανικής, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Μυτιλήνη.

- 41 Κορρές, Γ., 2000. Εισαγωγή στη Θαλάσσια Μετεωρολογία και Κλιματολογία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Μυτιλήνη.
- 42 Κουτίτας, Χ. Γ., 1994. Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα, Ζήτη.
- 43 Μιχαλοπούλου Π., 2008. Υπολογιστική διερεύνηση διάδοσης κυματικής διαταραχής σε παράκτια έργα μέσω αγωγών ανανέωσης. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 44 Μονιούδη Ι, 2006. Πειραματική διερεύνηση της εισερχόμενης κυματικής διαταραχής σε λιμενολεκάνη από αγωγό ανανέωσης υδάτων – μέρος ΙΙ. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 45 Μουτζούρης Κ., 1999. Παράκτια Μηχανική, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις.
- 46 Μπαλάσκα Δ., 2005. Πειραματική διερεύνηση κυματικής διείσδυσης σε λιμενολεκάνη από αγωγούς ανανέωσης ύδατος σε δύο λιμενολεκάνες (Αγ. Κήρυκος- Ν. Ικαρίας , Κολυμβάρι Ν. Κρήτης. Μεταπτυχιακή Εργασία, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 47 Μπρέμπος Ε., Ντεβές Δ., 2007. Πειραματική διερεύνηση κυματικής διείσδυσης από αγωγό ανανέωσης υδάτων σε λιμενολεκάνη. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 48 Νικολαΐδης Π. Νικόλαος, 2007. Environmental modeling notes.
- 49 Παπαϊωάννου Α.Ι., Αζοράκος Σ., Μουτζούρης Κ.Ι., 1999. Πειραματική Διερεύνηση Κυματικής Ενέργειας Σε Λιμενολεκάνη από Διάκενο Προσήνεμο Μόλο. Πρακτικά 1^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου Διαχείρισης και Βελτίωσης Παράκτιων Ζωνών, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π, Αθήνα.
- 50 Ρετινιώτης, Ν., Σταμάτης (2004). Στατιστική από τη θεωρία στη πράξη με το SPSS 11.0. Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών.
- 51 Σιγαλός, Λ., (2006). Πειραματική διερεύνηση κυματικής διείσδυσης σε λιμενολεκάνη από αγωγούς ανανέωσης ύδατος στη λιμενολεκάνη του Κολουμβαρίου Ν. Κρήτης. Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 52 Σουκισιάν, Τ., 2002. Στοιχεία Θαλάσσιας Κυματικής και Παράκτιας Κυματικής, Ε.Κ.Θ.Ε..
- 53 Συνολάκης, Κ., 2008. Παράκτια Μηχανική, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- 54 Τσέκος, Χ., Δρέττας, Π., 2000. Μονοδιάστατο μαθηματικό μοντέλο ανανέωσης ύδατος λιμενολεκάνης – μία εφαρμογή, Δεύτερο Πανελλήνιο Συνέδριο Λιμενικών Έργων.
- 55 Τσουκαλά Β., 2000. Κυματογενής διείσδυση του οξυγόνου στην παράκτια ζώνη. Διδακτορική εργασία.
- 56 Φουντούλης Γ. Δ., Μέμος, 2004. Βελτιστοποίηση Διάταξης Στομίων Ανανέωσης Υδάτων σε Λιμενολεκάνη. Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι – Θέσεις μετρητών στα 2D πειράματα

	Απόσταση μετρητών (m) από πτερύγιο κυματογεννήτριας																			
	i1		i2										i3	t1 (t4)			t2 (t5)			t3
	1ος	2ος	3ος	4ος	5ος	6ος	7ος	8ος	9ος	10ος	11ος	12ος	13ος	14ος	15ος	16ος	17ος	18ος	19ος	20ος
	Απόσταση (m) από πτερύγιο κυματογεννήτριας																			
ΠΑΝΝΑΚΗ (Κατακόρυφο εμπόδιο, Αγωγός 1m)	2,05											12,95			14,05			15		
ΠΑΝΝΑΚΗ (Κατακόρυφο εμπόδιο, Αγωγός 0,5m)	2,05											12,95	13,55			14,00				
ΜΟΝΙΟΥΔΗ (Κεκλιμένο εμπόδιο, Αγωγός 1m)		2,5		12,27								12,95			14,05		14,5			17
								12,57												
										12,68										
ΜΠΡΕΜΠΟΣ-ΝΤΕΒΕΣ Στάθμη νερού στο άνω όριο (Κεκλιμένο εμπόδιο, Αγωγός 1m)		2,5	12				12,41					12,95			14,05				16	
								12,57												
										12,68										
ΜΠΡΕΜΠΟΣ-ΝΤΕΒΕΣ Στάθμη νερού στη βάση (Κεκλιμένο εμπόδιο, Αγωγός 1m)		2,5			12,29							12,95			14,05				16	
							12,44													
								12,58												
											12,69									

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II – Βάση δεδομένων (πεδία οι παράμετροι και εγγραφές τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων)

index	Ho ή H1 (m)	H4 (m)	b (m)	h (m)	hs (m)	l (m)	d (m)	T1 (sec)	tanφ	Kt	R1=b/d	R2=h/d	R3=Ho/gT ²	R4=ξ	R5=hs/Ho	R6=l/Ho	R7=l/Lo	R8=b/Ho	R9=d/Ho	R10=Lo/Ho
1	0,0035	0,0013	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,3714	0,2000	0,1000	0,0022	3,3793	3,5714	45,7143	0,6405	14,2857	71,4286	71,3714
2	0,0070	0,0018	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,2571	0,2000	0,1000	0,0045	2,3895	1,7857	22,8571	0,6405	7,1429	35,7143	35,6857
3	0,0100	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,2000	0,2000	0,1000	0,0064	1,9992	1,2500	16,0000	0,6405	5,0000	25,0000	24,9800
4	0,0140	0,0021	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,1500	0,2000	0,1000	0,0089	1,6897	0,8929	11,4286	0,6405	3,5714	17,8571	17,8429
5	0,0190	0,0022	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,1158	0,2000	0,1000	0,0121	1,4504	0,6579	8,4211	0,6737	2,6316	13,1579	12,5000
6	0,0220	0,0030	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,1364	0,2000	0,1000	0,0140	1,3479	0,5682	7,2727	0,6737	2,2727	11,3636	10,7955
7	0,0260	0,0030	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,1154	0,2000	0,1000	0,0166	1,2399	0,4808	6,1538	0,6737	1,9231	9,6154	9,1346
8	0,0050	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,50	0,40	0,4000	0,2000	0,1000	0,0020	3,5342	2,5000	32,0000	0,4099	10,0000	50,0000	78,0600
9	0,0090	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,50	0,40	0,2222	0,2000	0,1000	0,0037	2,6342	1,3889	17,7778	0,4099	5,5556	27,7778	43,3667
10	0,0130	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,50	0,40	0,1538	0,2000	0,1000	0,0053	2,1918	0,9615	12,3077	0,4099	3,8462	19,2308	30,0231
11	0,0160	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,50	0,40	0,1250	0,2000	0,1000	0,0065	1,9757	0,7813	10,0000	0,4099	3,1250	15,6250	24,3938
12	0,0170	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,50	0,40	0,1176	0,2000	0,1000	0,0069	1,9167	0,7353	9,4118	0,4099	2,9412	14,7059	22,9588
13	0,0140	0,0037	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,70	0,40	0,2643	0,2000	0,1000	0,0029	2,9569	0,8929	11,4286	0,2283	3,5714	17,8571	50,0643
14	0,0190	0,0030	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,70	0,40	0,1579	0,2000	0,1000	0,0040	2,5382	0,6579	8,4211	0,2283	2,6316	13,1579	36,8895
15	0,0280	0,0050	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,70	0,40	0,1786	0,2000	0,1000	0,0058	2,0909	0,4464	5,7143	0,2353	1,7857	8,9286	24,2893
16	0,0040	0,0010	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,40	0,40	0,2500	0,2000	0,1000	0,0025	3,1611	3,1250	80,0000	1,2810	12,5000	62,5000	62,4500
17	0,0070	0,0010	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,40	0,40	0,1429	0,2000	0,1000	0,0045	2,3895	1,7857	45,7143	1,2810	7,1429	35,7143	35,6857
18	0,0100	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,40	0,40	0,2000	0,2000	0,1000	0,0064	1,9992	1,2500	32,0000	1,2810	5,0000	25,0000	24,9800
19	0,0130	0,0010	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,40	0,40	0,0769	0,2000	0,1000	0,0083	1,7534	0,9615	24,6154	1,2810	3,8462	19,2308	19,2154
20	0,0160	0,0010	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,40	0,40	0,0625	0,2000	0,1000	0,0102	1,5805	0,7813	20,0000	1,3474	3,1250	15,6250	14,8438
21	0,0240	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,40	0,40	0,0833	0,2000	0,1000	0,0153	1,2905	0,5208	13,3333	1,3474	2,0833	10,4167	9,8958
22	0,0280	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,40	0,40	0,0714	0,2000	0,1000	0,0178	1,1948	0,4464	11,4286	1,3474	1,7857	8,9286	8,4821
23	0,0060	0,0010	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,50	0,40	0,1667	0,2000	0,1000	0,0024	3,2263	2,0833	53,3333	0,8199	8,3333	41,6667	65,0500
24	0,0070	0,0010	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,50	0,40	0,1429	0,2000	0,1000	0,0029	2,9869	1,7857	45,7143	0,8199	7,1429	35,7143	55,7571
25	0,0120	0,0012	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,50	0,40	0,1000	0,2000	0,1000	0,0049	2,2813	1,0417	26,6667	0,8199	4,1667	20,8333	32,5250
26	0,0160	0,0012	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,50	0,40	0,0750	0,2000	0,1000	0,0065	1,9757	0,7813	20,0000	0,8199	3,1250	15,6250	24,3938
27	0,0192	0,0019	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,50	0,40	0,0990	0,2000	0,1000	0,0078	1,8035	0,6510	16,6667	0,8199	2,6042	13,0208	20,3281
28	0,0110	0,0019	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,70	0,40	0,1727	0,2000	0,1000	0,0023	3,3358	1,1364	29,0909	0,4566	4,5455	22,7273	63,7182
29	0,0150	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,70	0,40	0,1333	0,2000	0,1000	0,0031	2,8566	0,8333	21,3333	0,4566	3,3333	16,6667	46,7267
30	0,0240	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,70	0,40	0,0833	0,2000	0,1000	0,0050	2,2584	0,5208	13,3333	0,4705	2,0833	10,4167	28,3375
31	0,0060	0,0020	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,40	0,40	0,3333	0,2000	0,1200	0,0038	2,5810	2,5000	26,6667	0,6405	8,3333	41,6667	41,6333

32	0,0100	0,0022	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,40	0,40	0,2200	0,2000	0,1200	0,0064	1,9992	1,5000	16,0000	0,6405	5,0000	25,0000	24,9800
33	0,0140	0,0030	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,40	0,40	0,2143	0,2000	0,1200	0,0089	1,6897	1,0714	11,4286	0,6405	3,5714	17,8571	17,8429
34	0,0190	0,0030	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,40	0,40	0,1579	0,2000	0,1200	0,0121	1,4504	0,7895	8,4211	0,6405	2,6316	13,1579	13,1474
35	0,0240	0,0030	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,40	0,40	0,1250	0,2000	0,1200	0,0153	1,2905	0,6250	6,6667	0,6737	2,0833	10,4167	9,8958
36	0,0270	0,0030	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,40	0,40	0,1111	0,2000	0,1200	0,0172	1,2167	0,5556	5,9259	0,6405	1,8519	9,2593	9,2519
37	0,0050	0,0020	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,50	0,40	0,4000	0,2000	0,1200	0,0020	3,5342	3,0000	32,0000	0,4099	10,0000	50,0000	78,0600
38	0,0074	0,0025	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,50	0,40	0,3378	0,2000	0,1200	0,0030	2,9051	2,0270	21,6216	0,4099	6,7568	33,7838	52,7432
39	0,0080	0,0024	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,50	0,40	0,3000	0,2000	0,1200	0,0033	2,7940	1,8750	20,0000	0,4099	6,2500	31,2500	48,7875
40	0,0150	0,0030	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,50	0,40	0,2000	0,2000	0,1200	0,0061	2,0405	1,0000	10,6667	0,4099	3,3333	16,6667	26,0200
41	0,0190	0,0030	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,50	0,40	0,1579	0,2000	0,1200	0,0077	1,8130	0,7895	8,4211	0,4268	2,6316	13,1579	19,7316
42	0,0120	0,0030	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,70	0,40	0,2500	0,2000	0,1200	0,0025	3,1938	1,2500	13,3333	0,2283	4,1667	20,8333	58,4083
43	0,0170	0,0032	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,70	0,40	0,1882	0,2000	0,1200	0,0035	2,6834	0,8824	9,4118	0,2283	2,9412	14,7059	41,2294
44	0,0270	0,0035	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,70	0,40	0,1296	0,2000	0,1200	0,0056	2,1292	0,5556	5,9259	0,2353	1,8519	9,2593	25,1889
45	0,0060	0,0013	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,2167	0,2000	0,1000	0,0038	2,5810	2,0833	26,6667	0,6405	8,3333	41,6667	41,6333
46	0,0090	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,2222	0,2000	0,1000	0,0057	2,1074	1,3889	17,7778	0,6405	5,5556	27,7778	27,7556
47	0,0140	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,1429	0,2000	0,1000	0,0089	1,6897	0,8929	11,4286	0,6405	3,5714	17,8571	17,8429
48	0,0160	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,1250	0,2000	0,1000	0,0102	1,5805	0,7813	10,0000	0,6737	3,1250	15,6250	14,8438
49	0,0230	0,0022	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,0957	0,2000	0,1000	0,0147	1,3183	0,5435	6,9565	0,6737	2,1739	10,8696	10,3261
50	0,0290	0,0029	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,40	0,40	0,1000	0,2000	0,1000	0,0185	1,1740	0,4310	5,5172	0,6737	1,7241	8,6207	8,1897
51	0,0060	0,0016	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,50	0,40	0,2667	0,2000	0,1000	0,0024	3,2263	2,0833	26,6667	0,4099	8,3333	41,6667	65,0500
52	0,0100	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,50	0,40	0,2000	0,2000	0,1000	0,0041	2,4990	1,2500	16,0000	0,4099	5,0000	25,0000	39,0300
53	0,0110	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,50	0,40	0,1818	0,2000	0,1000	0,0045	2,3827	1,1364	14,5455	0,4099	4,5455	22,7273	35,4818
54	0,0190	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,50	0,40	0,1053	0,2000	0,1000	0,0077	1,8130	0,6579	8,4211	0,4099	2,6316	13,1579	20,5421
55	0,0090	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,70	0,40	0,2222	0,2000	0,1000	0,0019	3,6879	1,3889	17,7778	0,2283	5,5556	27,7778	77,8778
56	0,0140	0,0038	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,70	0,40	0,2714	0,2000	0,1000	0,0029	2,9569	0,8929	11,4286	0,2283	3,5714	17,8571	50,0643
57	0,0220	0,0035	0,050	0,025	0,013	0,16	0,25	0,70	0,40	0,1591	0,2000	0,1000	0,0046	2,3588	0,5682	7,2727	0,2353	2,2727	11,3636	30,9136
58	0,0140	0,0012	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,40	0,40	0,0857	0,2000	0,1000	0,0089	1,6897	0,8929	22,8571	1,2810	3,5714	17,8571	17,8429
59	0,0190	0,0011	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,40	0,40	0,0579	0,2000	0,1000	0,0121	1,4504	0,6579	16,8421	1,3474	2,6316	13,1579	12,5000
60	0,0250	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,40	0,40	0,0800	0,2000	0,1000	0,0159	1,2644	0,5000	12,8000	1,3474	2,0000	10,0000	9,5000
61	0,0320	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,40	0,40	0,0625	0,2000	0,1000	0,0204	1,1176	0,3906	10,0000	1,3474	1,5625	7,8125	7,4219
62	0,0060	0,0010	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,50	0,40	0,1667	0,2000	0,1000	0,0024	3,2263	2,0833	53,3333	0,8199	8,3333	41,6667	65,0500
63	0,0090	0,0014	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,50	0,40	0,1556	0,2000	0,1000	0,0037	2,6342	1,3889	35,5556	0,8199	5,5556	27,7778	43,3667
64	0,0140	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,50	0,40	0,1429	0,2000	0,1000	0,0057	2,1121	0,8929	22,8571	0,8199	3,5714	17,8571	27,8786
65	0,0200	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,50	0,40	0,1000	0,2000	0,1000	0,0082	1,7671	0,6250	16,0000	0,8199	2,5000	12,5000	19,5150
66	0,0230	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,50	0,40	0,0870	0,2000	0,1000	0,0094	1,6478	0,5435	13,9130	0,8199	2,1739	10,8696	16,9696

67	0,0090	0,0018	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,70	0,40	0,2000	0,2000	0,1000	0,0019	3,6879	1,3889	35,5556	0,4705	5,5556	27,7778	75,5667
68	0,0130	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,32	0,25	0,70	0,40	0,1538	0,2000	0,1000	0,0027	3,0685	0,9615	24,6154	0,4705	3,8462	19,2308	52,3154
69	0,0180	0,0020	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,40	0,40	0,1111	0,2000	0,1200	0,0115	1,4901	0,8333	8,8889	0,6737	2,7778	13,8889	13,1944
70	0,0230	0,0022	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,40	0,40	0,0957	0,2000	0,1200	0,0147	1,3183	0,6522	6,9565	0,6737	2,1739	10,8696	10,3261
71	0,0290	0,0030	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,40	0,40	0,1034	0,2000	0,1200	0,0185	1,1740	0,5172	5,5172	0,7095	1,7241	8,6207	7,7759
72	0,0080	0,0020	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,50	0,40	0,2500	0,2000	0,1200	0,0033	2,7940	1,8750	20,0000	0,4099	6,2500	31,2500	48,7875
73	0,0120	0,0020	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,50	0,40	0,1667	0,2000	0,1200	0,0049	2,2813	1,2500	13,3333	0,4099	4,1667	20,8333	32,5250
74	0,0190	0,0020	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,50	0,40	0,1053	0,2000	0,1200	0,0077	1,8130	0,7895	8,4211	0,4099	2,6316	13,1579	20,5421
75	0,0230	0,0022	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,50	0,40	0,0957	0,2000	0,1200	0,0094	1,6478	0,6522	6,9565	0,4099	2,1739	10,8696	16,9696
76	0,0210	0,0030	0,050	0,030	0,015	0,16	0,25	0,70	0,40	0,1429	0,2000	0,1200	0,0044	2,4143	0,7143	7,6190	0,2353	2,3810	11,9048	32,3857
77	0,0130	0,0010	0,025	0,025	0,013	0,38	0,23	0,50	0,40	0,0769	0,1087	0,1087	0,0053	2,1918	0,9615	28,8462	0,8882	1,9231	17,6923	32,4769
78	0,0200	0,0010	0,025	0,025	0,013	0,38	0,23	0,50	0,40	0,0500	0,1087	0,1087	0,0082	1,7671	0,6250	18,7500	0,8882	1,2500	11,5000	21,1100
79	0,0240	0,0010	0,025	0,025	0,013	0,38	0,23	0,50	0,40	0,0417	0,1087	0,1087	0,0098	1,6131	0,5208	15,6250	0,8882	1,0417	9,5833	17,5917
80	0,0180	0,0010	0,025	0,025	0,013	0,38	0,23	0,80	0,40	0,0556	0,1087	0,1087	0,0029	2,9803	0,6944	20,8333	0,4051	1,3889	12,7778	51,4278
81	0,0220	0,0010	0,025	0,025	0,013	0,38	0,23	1,00	0,40	0,0455	0,1087	0,1087	0,0022	3,3697	0,5682	17,0455	0,2402	1,1364	10,4545	70,9682
82	0,0310	0,0020	0,025	0,025	0,013	0,38	0,23	1,00	0,40	0,0645	0,1087	0,1087	0,0032	2,8387	0,4032	12,0968	0,2402	0,8065	7,4194	50,3645
83	0,0060	0,0008	0,050	0,025	0,013	0,38	0,23	0,50	0,40	0,1333	0,2174	0,1087	0,0024	3,2263	2,0833	62,5000	0,8882	8,3333	38,3333	70,3667
84	0,0140	0,0010	0,050	0,025	0,013	0,38	0,23	0,50	0,40	0,0714	0,2174	0,1087	0,0057	2,1121	0,8929	26,7857	0,8882	3,5714	16,4286	30,1571
85	0,0180	0,0012	0,050	0,025	0,013	0,38	0,23	0,50	0,40	0,0667	0,2174	0,1087	0,0073	1,8627	0,6944	20,8333	0,8882	2,7778	12,7778	23,4556
86	0,0230	0,0013	0,050	0,025	0,013	0,38	0,23	0,50	0,40	0,0565	0,2174	0,1087	0,0094	1,6478	0,5435	16,3043	0,8882	2,1739	10,0000	18,3565
87	0,0120	0,0011	0,050	0,025	0,013	0,38	0,23	0,80	0,40	0,0917	0,2174	0,1087	0,0019	3,6501	1,0417	31,2500	0,4158	4,1667	19,1667	75,1500
88	0,0170	0,0020	0,050	0,025	0,013	0,38	0,23	0,80	0,40	0,1176	0,2174	0,1087	0,0027	3,0667	0,7353	22,0588	0,4051	2,9412	13,5294	54,4529
89	0,0230	0,0040	0,050	0,025	0,013	0,38	0,23	0,80	0,40	0,1739	0,2174	0,1087	0,0037	2,6365	0,5435	16,3043	0,4158	2,1739	10,0000	39,2087
90	0,0220	0,0030	0,050	0,025	0,013	0,38	0,23	1,00	0,40	0,1364	0,2174	0,1087	0,0022	3,3697	0,5682	17,0455	0,2402	2,2727	10,4545	70,9682
91	0,0300	0,0030	0,050	0,025	0,013	0,38	0,23	1,00	0,40	0,1000	0,2174	0,1087	0,0031	2,8857	0,4167	12,5000	0,2402	1,6667	7,6667	52,0433
92	0,0140	0,0025	0,075	0,025	0,013	0,38	0,23	0,50	0,40	0,1786	0,3261	0,1087	0,0057	2,1121	0,8929	26,7857	0,8882	5,3571	16,4286	30,1571
93	0,0180	0,0030	0,075	0,025	0,013	0,38	0,23	0,50	0,40	0,1667	0,3261	0,1087	0,0073	1,8627	0,6944	20,8333	0,8882	4,1667	12,7778	23,4556
94	0,0221	0,0030	0,075	0,025	0,013	0,38	0,23	0,50	0,40	0,1357	0,3261	0,1087	0,0090	1,6810	0,5656	16,9683	0,8882	3,3937	10,4072	19,1041
95	0,0120	0,0028	0,075	0,025	0,013	0,38	0,23	0,80	0,40	0,2333	0,3261	0,1087	0,0019	3,6501	1,0417	31,2500	0,4051	6,2500	19,1667	77,1417
96	0,0220	0,0040	0,075	0,025	0,013	0,38	0,23	0,80	0,40	0,1818	0,3261	0,1087	0,0035	2,6958	0,5682	17,0455	0,4158	3,4091	10,4545	40,9909
97	0,0230	0,0050	0,075	0,025	0,013	0,38	0,23	1,00	0,40	0,2174	0,3261	0,1087	0,0023	3,2956	0,5435	16,3043	0,2402	3,2609	10,0000	67,8826
98	0,0300	0,0060	0,075	0,025	0,013	0,38	0,23	1,00	0,40	0,2000	0,3261	0,1087	0,0031	2,8857	0,4167	12,5000	0,2402	2,5000	7,6667	52,0433
99	0,0060	0,0012	0,075	0,025	0,013	0,38	0,23	0,50	0,40	0,2000	0,3261	0,1087	0,0024	3,2263	2,0833	62,5000	0,8882	12,5000	38,3333	70,3667
100	0,0118	0,0025	0,100	0,025	0,013	0,38	0,23	0,50	0,40	0,2119	0,4348	0,1087	0,0048	2,3006	1,0593	31,7797	0,8882	8,4746	19,4915	35,7797
101	0,0161	0,0028	0,100	0,025	0,013	0,38	0,23	0,80	0,40	0,1739	0,4348	0,1087	0,0026	3,1512	0,7764	23,2919	0,4158	6,2112	14,2857	56,0124

102	0,0219	0,0050	0,100	0,025	0,013	0,38	0,23	0,80	0,40	0,2283	0,4348	0,1087	0,0035	2,7019	0,5708	17,1233	0,4158	4,5662	10,5023	41,1781
103	0,0290	0,0045	0,100	0,025	0,013	0,38	0,23	0,80	0,40	0,1552	0,4348	0,1087	0,0046	2,3480	0,4310	12,9310	0,4158	3,4483	7,9310	31,0966
104	0,0220	0,0061	0,100	0,025	0,013	0,38	0,23	1,00	0,40	0,2773	0,4348	0,1087	0,0022	3,3697	0,5682	17,0455	0,2402	4,5455	10,4545	70,9682
105	0,0283	0,0070	0,100	0,025	0,013	0,38	0,23	1,00	0,40	0,2473	0,4348	0,1087	0,0029	2,9711	0,4417	13,2509	0,2354	3,5336	8,1272	56,2792
106	0,0131	0,0080	0,300	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,6107	0,5000	0,3000	0,0006	10,8254	6,8702	76,3359	0,2924	22,9008	45,8015	261,0611
107	0,0516	0,0263	0,300	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,5097	0,5000	0,3000	0,0024	5,4545	1,7442	19,3798	0,2924	5,8140	11,6279	66,2771
108	0,0649	0,0272	0,300	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,4191	0,5000	0,3000	0,0030	4,8636	1,3867	15,4083	0,2924	4,6225	9,2450	52,6949
109	0,0863	0,0315	0,300	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3650	0,5000	0,3000	0,0109	2,5648	1,0429	11,5875	0,7907	3,4762	6,9525	14,6547
110	0,0917	0,0315	0,300	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3435	0,5000	0,3000	0,0115	2,4882	0,9815	10,9051	0,7907	3,2715	6,5431	13,7917
111	0,1013	0,0325	0,300	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3208	0,5000	0,3000	0,0127	2,3673	0,8885	9,8717	0,7907	2,9615	5,9230	12,4847
112	0,1021	0,0362	0,300	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3546	0,5000	0,3000	0,0128	2,3580	0,8815	9,7943	0,7907	2,9383	5,8766	12,3869
113	0,1058	0,0360	0,300	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3403	0,5000	0,3000	0,0133	2,3164	0,8507	9,4518	0,7907	2,8355	5,6711	11,9537
114	0,0131	0,0065	0,240	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,4962	0,4000	0,3000	0,0006	10,8254	6,8702	76,3359	0,2924	18,3206	45,8015	261,0611
115	0,0267	0,0170	0,240	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,6367	0,4000	0,3000	0,0012	7,5827	3,3708	37,4532	0,2924	8,9888	22,4719	128,0861
116	0,0388	0,0341	0,240	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,8789	0,4000	0,3000	0,0018	6,2902	2,3196	25,7732	0,2924	6,1856	15,4639	88,1418
117	0,0516	0,0423	0,240	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,8198	0,4000	0,3000	0,0024	5,4545	1,7442	19,3798	0,2924	4,6512	11,6279	66,2771
118	0,0649	0,0327	0,240	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,5039	0,4000	0,3000	0,0030	4,8636	1,3867	15,4083	0,2924	3,6980	9,2450	52,6949
119	0,0863	0,0316	0,240	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3662	0,4000	0,3000	0,0109	2,5648	1,0429	11,5875	0,7907	2,7810	6,9525	14,6547
120	0,0917	0,0325	0,240	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3544	0,4000	0,3000	0,0115	2,4882	0,9815	10,9051	0,7907	2,6172	6,5431	13,7917
121	0,1013	0,0362	0,240	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3574	0,4000	0,3000	0,0127	2,3673	0,8885	9,8717	0,7907	2,3692	5,9230	12,4847
122	0,1021	0,0368	0,240	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3604	0,4000	0,3000	0,0128	2,3580	0,8815	9,7943	0,7907	2,3506	5,8766	12,3869
123	0,1058	0,0361	0,240	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3412	0,4000	0,3000	0,0133	2,3164	0,8507	9,4518	0,7907	2,2684	5,6711	11,9537
124	0,0131	0,0047	0,180	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,3588	0,3000	0,3000	0,0006	10,8254	6,8702	76,3359	0,2924	13,7405	45,8015	261,0611
125	0,0267	0,0160	0,180	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,5993	0,3000	0,3000	0,0012	7,5827	3,3708	37,4532	0,2924	6,7416	22,4719	128,0861
126	0,0388	0,0289	0,180	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,7448	0,3000	0,3000	0,0018	6,2902	2,3196	25,7732	0,2924	4,6392	15,4639	88,1418
127	0,0516	0,0229	0,180	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,4438	0,3000	0,3000	0,0024	5,4545	1,7442	19,3798	0,2924	3,4884	11,6279	66,2771
128	0,0649	0,0223	0,180	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,3436	0,3000	0,3000	0,0030	4,8636	1,3867	15,4083	0,2924	2,7735	9,2450	52,6949
129	0,0863	0,0189	0,180	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2190	0,3000	0,3000	0,0109	2,5648	1,0429	11,5875	0,7907	2,0857	6,9525	14,6547
130	0,0917	0,0203	0,180	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2214	0,3000	0,3000	0,0115	2,4882	0,9815	10,9051	0,7907	1,9629	6,5431	13,7917
131	0,1013	0,0259	0,180	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2557	0,3000	0,3000	0,0127	2,3673	0,8885	9,8717	0,7907	1,7769	5,9230	12,4847
132	0,1021	0,0278	0,180	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2723	0,3000	0,3000	0,0128	2,3580	0,8815	9,7943	0,7907	1,7630	5,8766	12,3869
133	0,1058	0,0282	0,180	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2665	0,3000	0,3000	0,0133	2,3164	0,8507	9,4518	0,7907	1,7013	5,6711	11,9537
134	0,0131	0,0032	0,120	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,2443	0,2000	0,3000	0,0006	10,8254	6,8702	76,3359	0,2924	9,1603	45,8015	261,0611
135	0,0267	0,0093	0,120	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,3483	0,2000	0,3000	0,0012	7,5827	3,3708	37,4532	0,2924	4,4944	22,4719	128,0861
136	0,0388	0,0188	0,120	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,4845	0,2000	0,3000	0,0018	6,2902	2,3196	25,7732	0,2924	3,0928	15,4639	88,1418

137	0,0516	0,0192	0,120	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,3721	0,2000	0,3000	0,0024	5,4545	1,7442	19,3798	0,2924	2,3256	11,6279	66,2771
138	0,0649	0,0180	0,120	0,180	0,090	1,00	0,60	1,48	0,67	0,2773	0,2000	0,3000	0,0030	4,8636	1,3867	15,4083	0,2924	1,8490	9,2450	52,6949
139	0,0863	0,0168	0,120	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,1947	0,2000	0,3000	0,0109	2,5648	1,0429	11,5875	0,7907	1,3905	6,9525	14,6547
140	0,0917	0,0201	0,120	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2192	0,2000	0,3000	0,0115	2,4882	0,9815	10,9051	0,7907	1,3086	6,5431	13,7917
141	0,1013	0,0210	0,120	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2073	0,2000	0,3000	0,0127	2,3673	0,8885	9,8717	0,7907	1,1846	5,9230	12,4847
142	0,1021	0,0225	0,120	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2204	0,2000	0,3000	0,0128	2,3580	0,8815	9,7943	0,7907	1,1753	5,8766	12,3869
143	0,1058	0,0224	0,120	0,180	0,090	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2117	0,2000	0,3000	0,0133	2,3164	0,8507	9,4518	0,7907	1,1342	5,6711	11,9537
144	0,0388	0,0290	0,300	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,7474	0,5000	0,2500	0,0018	6,2902	1,9330	25,7732	0,2924	7,7320	15,4639	88,1418
145	0,0516	0,0305	0,300	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,5911	0,5000	0,2500	0,0024	5,4545	1,4535	19,3798	0,2924	5,8140	11,6279	66,2771
146	0,0649	0,0287	0,300	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,4422	0,5000	0,2500	0,0030	4,8636	1,1556	15,4083	0,2924	4,6225	9,2450	52,6949
147	0,0863	0,0285	0,300	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3302	0,5000	0,2500	0,0109	2,5648	0,8691	11,5875	0,7907	3,4762	6,9525	14,6547
148	0,0917	0,0252	0,300	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2748	0,5000	0,2500	0,0115	2,4882	0,8179	10,9051	0,7907	3,2715	6,5431	13,7917
149	0,1013	0,0315	0,300	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3110	0,5000	0,2500	0,0127	2,3673	0,7404	9,8717	0,7907	2,9615	5,9230	12,4847
150	0,1021	0,0337	0,300	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3301	0,5000	0,2500	0,0128	2,3580	0,7346	9,7943	0,7907	2,9383	5,8766	12,3869
151	0,1058	0,0351	0,300	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3318	0,5000	0,2500	0,0133	2,3164	0,7089	9,4518	0,7907	2,8355	5,6711	11,9537
152	0,0131	0,0087	0,240	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,6641	0,4000	0,2500	0,0006	10,8254	5,7252	76,3359	0,2924	18,3206	45,8015	261,0611
153	0,0516	0,0325	0,240	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,6298	0,4000	0,2500	0,0024	5,4545	1,4535	19,3798	0,2924	4,6512	11,6279	66,2771
154	0,0649	0,0352	0,240	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,5424	0,4000	0,2500	0,0030	4,8636	1,1556	15,4083	0,2924	3,6980	9,2450	52,6949
155	0,0863	0,0453	0,240	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,5249	0,4000	0,2500	0,0109	2,5648	0,8691	11,5875	0,7907	2,7810	6,9525	14,6547
156	0,0917	0,0455	0,240	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,4962	0,4000	0,2500	0,0115	2,4882	0,8179	10,9051	0,7907	2,6172	6,5431	13,7917
157	0,1013	0,0465	0,240	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,4590	0,4000	0,2500	0,0127	2,3673	0,7404	9,8717	0,7907	2,3692	5,9230	12,4847
158	0,1021	0,0522	0,240	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,5113	0,4000	0,2500	0,0128	2,3580	0,7346	9,7943	0,7907	2,3506	5,8766	12,3869
159	0,1058	0,0507	0,240	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,4792	0,4000	0,2500	0,0133	2,3164	0,7089	9,4518	0,7907	2,2684	5,6711	11,9537
160	0,0131	0,0088	0,180	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,6718	0,3000	0,2500	0,0006	10,8254	5,7252	76,3359	0,2924	13,7405	45,8015	261,0611
161	0,0388	0,0329	0,180	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,8479	0,3000	0,2500	0,0018	6,2902	1,9330	25,7732	0,2924	4,6392	15,4639	88,1418
162	0,0516	0,0281	0,180	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,5446	0,3000	0,2500	0,0024	5,4545	1,4535	19,3798	0,2924	3,4884	11,6279	66,2771
163	0,0649	0,0317	0,180	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,4884	0,3000	0,2500	0,0030	4,8636	1,1556	15,4083	0,2924	2,7735	9,2450	52,6949
164	0,0863	0,0372	0,180	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,4311	0,3000	0,2500	0,0109	2,5648	0,8691	11,5875	0,7907	2,0857	6,9525	14,6547
165	0,0917	0,0364	0,180	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3969	0,3000	0,2500	0,0115	2,4882	0,8179	10,9051	0,7907	1,9629	6,5431	13,7917
166	0,1013	0,0399	0,180	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3939	0,3000	0,2500	0,0127	2,3673	0,7404	9,8717	0,7907	1,7769	5,9230	12,4847
167	0,1021	0,0438	0,180	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,4290	0,3000	0,2500	0,0128	2,3580	0,7346	9,7943	0,7907	1,7630	5,8766	12,3869
168	0,1058	0,0448	0,180	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,4234	0,3000	0,2500	0,0133	2,3164	0,7089	9,4518	0,7907	1,7013	5,6711	11,9537
169	0,0131	0,0075	0,120	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,5725	0,2000	0,2500	0,0006	10,8254	5,7252	76,3359	0,2924	9,1603	45,8015	261,0611
170	0,0267	0,0214	0,120	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,8015	0,2000	0,2500	0,0012	7,5827	2,8090	37,4532	0,2924	4,4944	22,4719	128,0861
171	0,0388	0,0239	0,120	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,6160	0,2000	0,2500	0,0018	6,2902	1,9330	25,7732	0,2924	3,0928	15,4639	88,1418

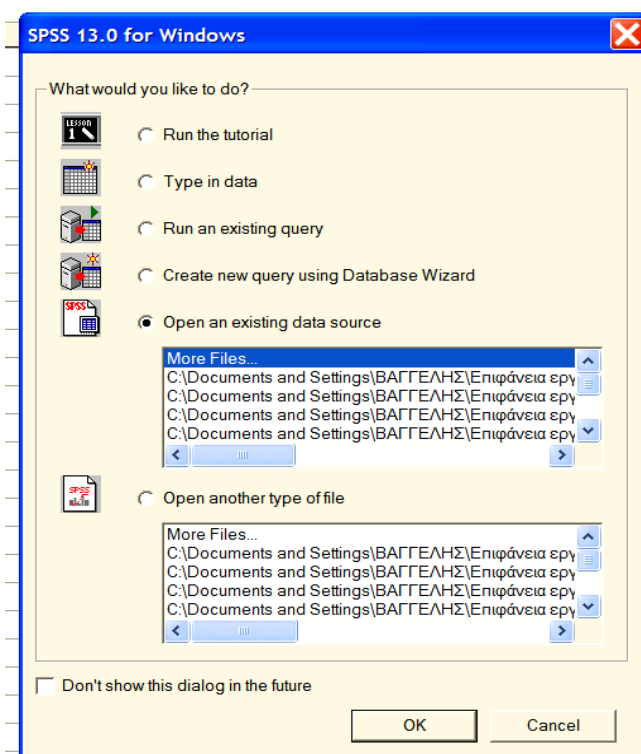
172	0,0516	0,0227	0,120	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,4399	0,2000	0,2500	0,0024	5,4545	1,4535	19,3798	0,2924	2,3256	11,6279	66,2771
173	0,0649	0,0249	0,120	0,150	0,075	1,00	0,60	1,48	0,67	0,3837	0,2000	0,2500	0,0030	4,8636	1,1556	15,4083	0,2924	1,8490	9,2450	52,6949
174	0,0863	0,0353	0,120	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,4090	0,2000	0,2500	0,0109	2,5648	0,8691	11,5875	0,7907	1,3905	6,9525	14,6547
175	0,0917	0,0370	0,120	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,4035	0,2000	0,2500	0,0115	2,4882	0,8179	10,9051	0,7907	1,3086	6,5431	13,7917
176	0,1013	0,0411	0,120	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,4057	0,2000	0,2500	0,0127	2,3673	0,7404	9,8717	0,7907	1,1846	5,9230	12,4847
177	0,1021	0,0402	0,120	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3937	0,2000	0,2500	0,0128	2,3580	0,7346	9,7943	0,7907	1,1753	5,8766	12,3869
178	0,1058	0,0420	0,120	0,150	0,075	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3970	0,2000	0,2500	0,0133	2,3164	0,7089	9,4518	0,7907	1,1342	5,6711	11,9537
179	0,0267	0,0212	0,300	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,7940	0,5000	0,2000	0,0012	7,5827	2,2472	37,4532	0,2924	11,2360	22,4719	128,0861
180	0,0388	0,0237	0,300	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,6108	0,5000	0,2000	0,0018	6,2902	1,5464	25,7732	0,2924	7,7320	15,4639	88,1418
181	0,0516	0,0248	0,300	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,4806	0,5000	0,2000	0,0024	5,4545	1,1628	19,3798	0,2924	5,8140	11,6279	66,2771
182	0,0649	0,0260	0,300	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,4006	0,5000	0,2000	0,0030	4,8636	0,9245	15,4083	0,2924	4,6225	9,2450	52,6949
183	0,0863	0,0206	0,300	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2387	0,5000	0,2000	0,0109	2,5648	0,6952	11,5875	0,7907	3,4762	6,9525	14,6547
184	0,0917	0,0241	0,300	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2628	0,5000	0,2000	0,0115	2,4882	0,6543	10,9051	0,7907	3,2715	6,5431	13,7917
185	0,1013	0,0271	0,300	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2675	0,5000	0,2000	0,0127	2,3673	0,5923	9,8717	0,7907	2,9615	5,9230	12,4847
186	0,1021	0,0326	0,300	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3193	0,5000	0,2000	0,0128	2,3580	0,5877	9,7943	0,7907	2,9383	5,8766	12,3869
187	0,1058	0,0328	0,300	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3100	0,5000	0,2000	0,0133	2,3164	0,5671	9,4518	0,7907	2,8355	5,6711	11,9537
188	0,0267	0,0134	0,240	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,5019	0,4000	0,2000	0,0012	7,5827	2,2472	37,4532	0,2924	8,9888	22,4719	128,0861
189	0,0388	0,0154	0,240	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,3969	0,4000	0,2000	0,0018	6,2902	1,5464	25,7732	0,2924	6,1856	15,4639	88,1418
190	0,0516	0,0187	0,240	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,3624	0,4000	0,2000	0,0024	5,4545	1,1628	19,3798	0,2924	4,6512	11,6279	66,2771
191	0,0649	0,0246	0,240	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,3790	0,4000	0,2000	0,0030	4,8636	0,9245	15,4083	0,2924	3,6980	9,2450	52,6949
192	0,0863	0,0248	0,240	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2874	0,4000	0,2000	0,0109	2,5648	0,6952	11,5875	0,7907	2,7810	6,9525	14,6547
193	0,0917	0,0250	0,240	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2726	0,4000	0,2000	0,0115	2,4882	0,6543	10,9051	0,7907	2,6172	6,5431	13,7917
194	0,1013	0,0291	0,240	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2873	0,4000	0,2000	0,0127	2,3673	0,5923	9,8717	0,7907	2,3692	5,9230	12,4847
195	0,1021	0,0360	0,240	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3526	0,4000	0,2000	0,0128	2,3580	0,5877	9,7943	0,7907	2,3506	5,8766	12,3869
196	0,1058	0,0385	0,240	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3639	0,4000	0,2000	0,0133	2,3164	0,5671	9,4518	0,7907	2,2684	5,6711	11,9537
197	0,0267	0,0212	0,180	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,7940	0,3000	0,2000	0,0012	7,5827	2,2472	37,4532	0,2924	6,7416	22,4719	128,0861
198	0,0388	0,0203	0,180	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,5232	0,3000	0,2000	0,0018	6,2902	1,5464	25,7732	0,2924	4,6392	15,4639	88,1418
199	0,0516	0,0216	0,180	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,4186	0,3000	0,2000	0,0024	5,4545	1,1628	19,3798	0,2924	3,4884	11,6279	66,2771
200	0,0649	0,0252	0,180	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,3883	0,3000	0,2000	0,0030	4,8636	0,9245	15,4083	0,2924	2,7735	9,2450	52,6949
201	0,0863	0,0211	0,180	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2445	0,3000	0,2000	0,0109	2,5648	0,6952	11,5875	0,7907	2,0857	6,9525	14,6547
202	0,0917	0,0265	0,180	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2890	0,3000	0,2000	0,0115	2,4882	0,6543	10,9051	0,7907	1,9629	6,5431	13,7917
203	0,1013	0,0317	0,180	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3129	0,3000	0,2000	0,0127	2,3673	0,5923	9,8717	0,7907	1,7769	5,9230	12,4847
204	0,1021	0,0362	0,180	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3546	0,3000	0,2000	0,0128	2,3580	0,5877	9,7943	0,7907	1,7630	5,8766	12,3869
205	0,1058	0,0396	0,180	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3743	0,3000	0,2000	0,0133	2,3164	0,5671	9,4518	0,7907	1,7013	5,6711	11,9537
206	0,0267	0,0161	0,120	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,6030	0,2000	0,2000	0,0012	7,5827	2,2472	37,4532	0,2924	4,4944	22,4719	128,0861

207	0,0388	0,0177	0,120	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,4562	0,2000	0,2000	0,0018	6,2902	1,5464	25,7732	0,2924	3,0928	15,4639	88,1418	
208	0,0516	0,0204	0,120	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,3953	0,2000	0,2000	0,0024	5,4545	1,1628	19,3798	0,2924	2,3256	11,6279	66,2771	
209	0,0649	0,0236	0,120	0,120	0,060	1,00	0,60	1,48	0,67	0,3636	0,2000	0,2000	0,0030	4,8636	0,9245	15,4083	0,2924	1,8490	9,2450	52,6949	
210	0,0863	0,0210	0,120	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2433	0,2000	0,2000	0,0109	2,5648	0,6952	11,5875	0,7907	1,3905	6,9525	14,6547	
211	0,0917	0,0238	0,120	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2595	0,2000	0,2000	0,0115	2,4882	0,6543	10,9051	0,7907	1,3086	6,5431	13,7917	
212	0,1013	0,0271	0,120	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,2675	0,2000	0,2000	0,0127	2,3673	0,5923	9,8717	0,7907	1,1846	5,9230	12,4847	
213	0,1021	0,0329	0,120	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3222	0,2000	0,2000	0,0128	2,3580	0,5877	9,7943	0,7907	1,1753	5,8766	12,3869	
214	0,1058	0,0355	0,120	0,120	0,060	1,00	0,60	0,90	0,67	0,3355	0,2000	0,2000	0,0133	2,3164	0,5671	9,4518	0,7907	1,1342	5,6711	11,9537	
										min	0,0417	0,1087	0,1000	0,0006	1,1176	0,3906	5,5172	0,2283	0,8065	5,6711	7,4219
										max	0,8789	0,5000	0,3000	0,0204	10,8254	6,8702	80,0000	1,3474	22,9008	71,4286	261,0611

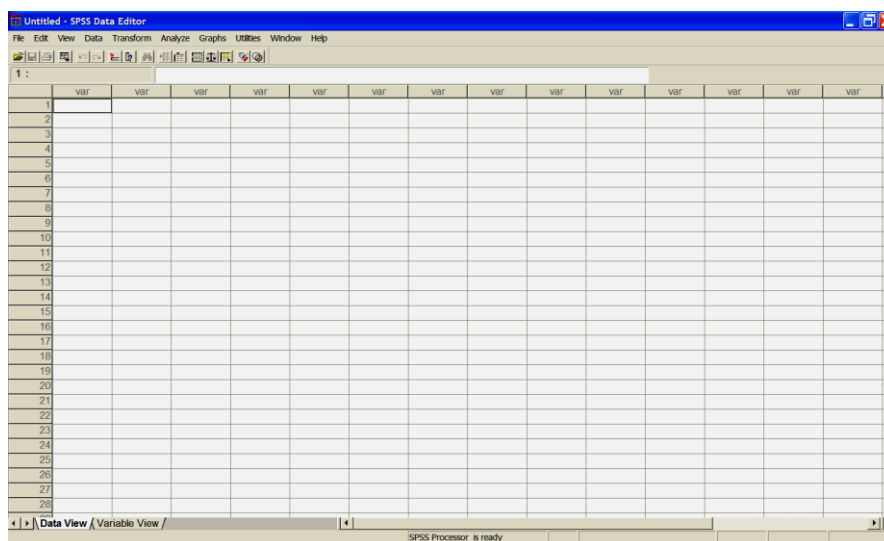
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ – Στατιστικό λογισμικό πακέτου SYSTAT 13.0 for Windows

Στο Παράρτημα αυτό περιγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη χρήση του προγράμματος SPSS, Statistical Package for the Social Sciences (SPSS v.13, 2004). για την ανάλυση μη γραμμικής παλινδρόμησης.

Με την εκκίνηση του προγράμματος, μεταβαίνουμε στο παράθυρο διαλόγου από το οποίο κατ' αρχήν επιλέγουμε την εργασία που θέλουμε να κάνουμε.



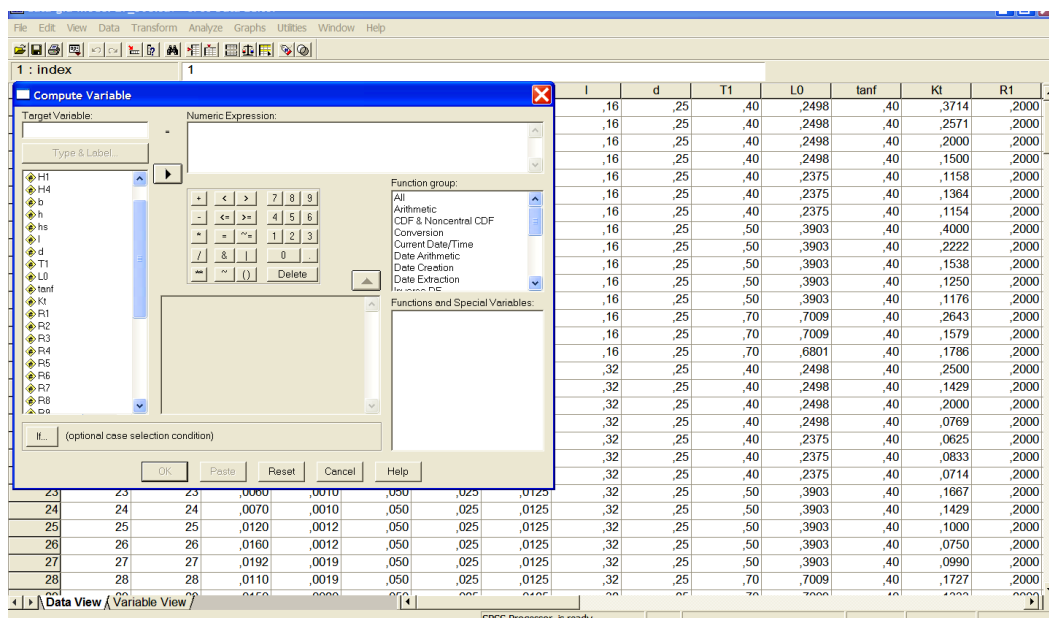
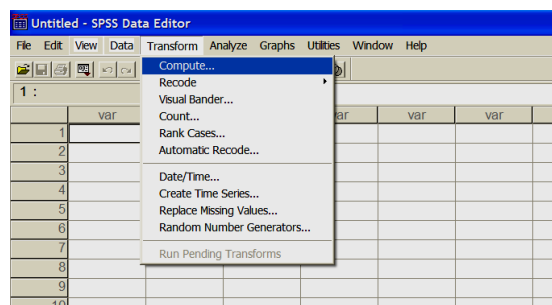
Επιλέγοντας την εντολή **Type in data** μεταβαίνουμε στο κεντρικό παράθυρο του προγράμματος, που είναι με τη μορφή Excel και εύκολα μπορεί να εισαχθούν οι τιμές των μεταβλητών, στα κελιά του φύλλου εργασίας.



Μετά την εισαγωγή των στοιχείων το παράθυρο παίρνει την ακόλουθη μορφή.

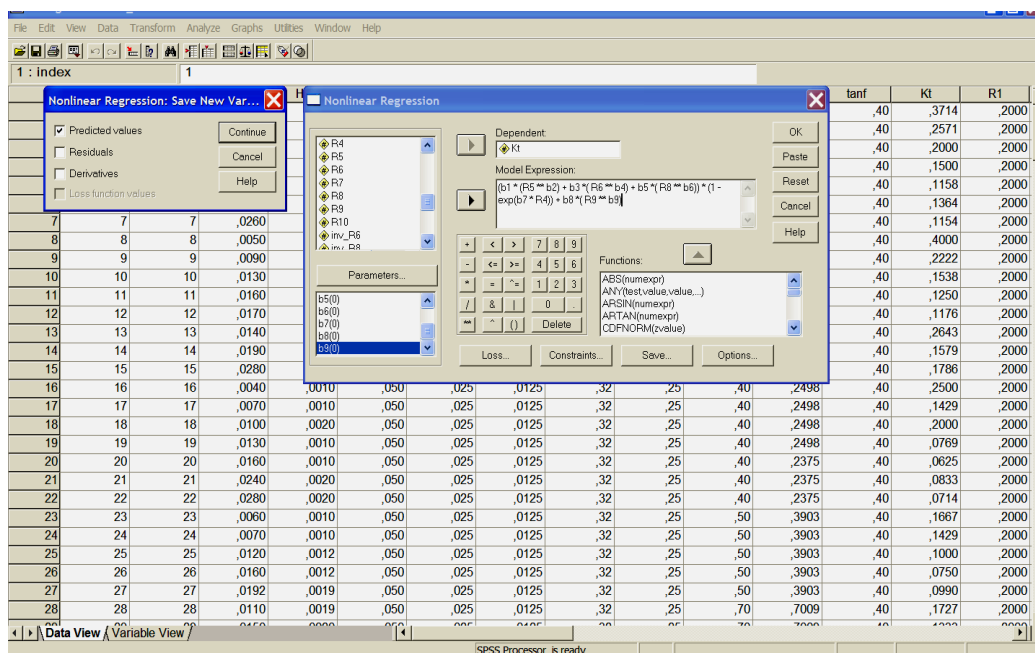
index	H1	H4	b	h	hs	l	d	T1	tanf	Kt	R1	R2	R3	R4	R5	R6
1	.0035	.0013	.050	.025	.0125	.16	.25	.40	.40	.3714	.2000	.1000	.0022	3.3793	3.5714	45.714
2	.0070	.0018	.050	.025	.0125	.16	.25	.40	.40	.2571	.2000	.1000	.0045	2.3895	1.7857	22.857
3	.0100	.0020	.050	.025	.0125	.16	.25	.40	.40	.2000	.2000	.1000	.0064	1.9992	1.2500	16.000
4	.0140	.0021	.050	.025	.0125	.16	.25	.40	.40	.1500	.2000	.1000	.0089	1.6897	.8929	11.428
5	.0190	.0022	.050	.025	.0125	.16	.25	.40	.40	.1158	.2000	.1000	.0121	1.4504	.6579	8.421
6	.0220	.0030	.050	.025	.0125	.16	.25	.40	.40	.1364	.2000	.1000	.0140	1.3479	.5682	7.272
7	.0260	.0030	.050	.025	.0125	.16	.25	.40	.40	.1154	.2000	.1000	.0166	1.2399	.4808	6.153
8	.0050	.0020	.050	.025	.0125	.16	.25	.50	.40	.4000	.2000	.1000	.0020	3.5342	2.5000	32.000
9	.0090	.0020	.050	.025	.0125	.16	.25	.50	.40	.2222	.2000	.1000	.0037	2.6342	1.3889	17.777
10	.0130	.0020	.050	.025	.0125	.16	.25	.50	.40	.1538	.2000	.1000	.0053	2.1918	.9615	12.307
11	.0160	.0020	.050	.025	.0125	.16	.25	.50	.40	.1250	.2000	.1000	.0065	1.9757	.7813	10.000
12	.0170	.0020	.050	.025	.0125	.16	.25	.50	.40	.1176	.2000	.1000	.0069	1.9167	.7353	9.411
13	.0140	.0037	.050	.025	.0125	.16	.25	.70	.40	.2643	.2000	.1000	.0029	2.9569	.8929	11.428
14	.0190	.0030	.050	.025	.0125	.16	.25	.70	.40	.1579	.2000	.1000	.0040	2.5382	.6579	8.421
15	.0280	.0050	.050	.025	.0125	.16	.25	.70	.40	.1786	.2000	.1000	.0058	2.0909	.4464	5.714
16	.0040	.0010	.050	.025	.0125	.32	.25	.40	.40	.2500	.2000	.1000	.0025	3.1611	3.1250	80.000
17	.0070	.0010	.050	.025	.0125	.32	.25	.40	.40	.1429	.2000	.1000	.0045	2.3895	1.7857	45.714
18	.0100	.0020	.050	.025	.0125	.32	.25	.40	.40	.2000	.2000	.1000	.0064	1.9992	1.2500	32.000
19	.0130	.0010	.050	.025	.0125	.32	.25	.40	.40	.0769	.2000	.1000	.0083	1.7534	.9615	24.615
20	.0160	.0010	.050	.025	.0125	.32	.25	.40	.40	.0625	.2000	.1000	.0102	1.5805	.7813	20.000
21	.0240	.0020	.050	.025	.0125	.32	.25	.40	.40	.0833	.2000	.1000	.0153	1.2905	.5208	13.333
22	.0280	.0020	.050	.025	.0125	.32	.25	.40	.40	.0714	.2000	.1000	.0178	1.1948	.4464	11.428
23	.0060	.0010	.050	.025	.0125	.32	.25	.50	.40	.1667	.2000	.1000	.0024	3.2263	2.0833	53.333
24	.0070	.0010	.050	.025	.0125	.32	.25	.50	.40	.1429	.2000	.1000	.0029	2.9869	1.7857	45.714
25	.0120	.0012	.050	.025	.0125	.32	.25	.50	.40	.1000	.2000	.1000	.0049	2.2813	1.0417	26.666
26	.0160	.0012	.050	.025	.0125	.32	.25	.50	.40	.0750	.2000	.1000	.0065	1.9757	.7813	20.000
27	.0192	.0019	.050	.025	.0125	.32	.25	.50	.40	.0990	.2000	.1000	.0078	1.8035	.6510	16.666
28	.0110	.0019	.050	.025	.0125	.32	.25	.70	.40	.1727	.2000	.1000	.0023	3.3358	1.1364	29.090

Με την εντολή **Tranform→Compute**, δημιουργώ καινούργιες μεταβλητές (R1, R2,)
Με το **Target variable** ονομάζω την μεταβλητή που πρόκειται να δημιουργήσω.
Με το **Numeric Expression** επιλέγω από τη λίστα αριστερά τις παραμέτρους που χρειαζομαι και τις μεταφέρω στο πεδίο δεξιά δημιουργώντας τη σχέση για τη νέα μεταβλητή.



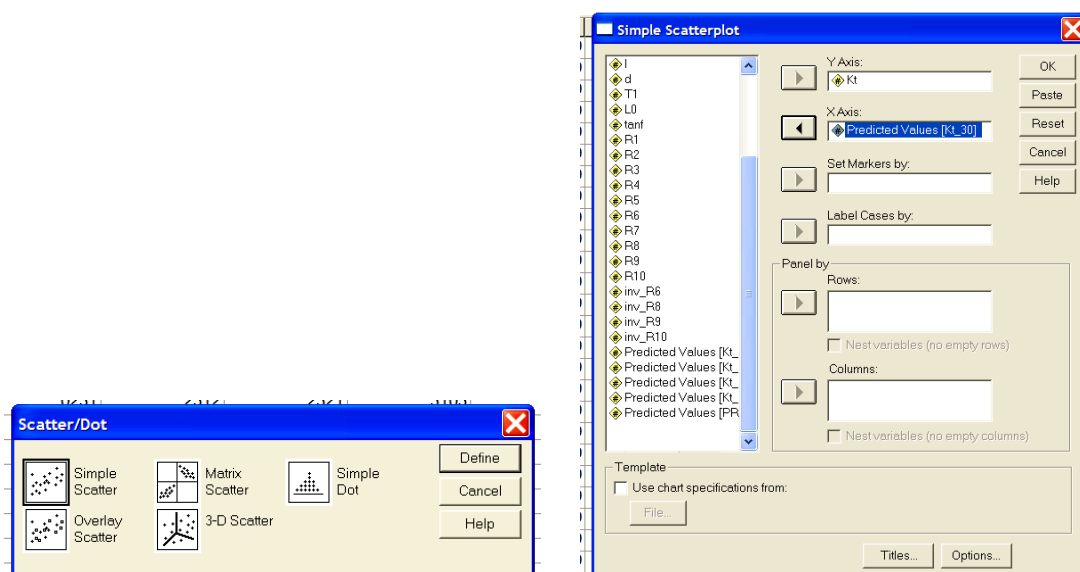
Με την εντολή **Analyze → Regression** δημιουργώ το μοντέλο
Non linear επιλέγω για μη γραμμική παλινδρόμηση
Dependent εισάγω την εξαρτημένη μεταβλητή Kt
Parameters εισάγω τους συντελεστές των παραμέτρων bi με τις τιμές τους

Model expression δημιουργώ για παράδειγμα την εξίσωση του μοντέλου 30



Save → επιλέγω **Predicted values** (για να δώσει και τη στήλη του Kt model) και τρέχει το συγκεκριμένο μοντέλο

Από το **Variable view** δίνω το όνομα της μεταβλητής (Kt model) και τα δεκαδικά ψηφία που επιθυμώ



Το πρόγραμμα δίνει τους πίνακες με τις εκτιμήσεις των παραμέτρων συσχέτισης και τον πίνακα με την ανάλυση διακύμανσης, όπου αναγράφεται και το τετράγωνο του συντελεστή συσχέτισης R^2

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	,695	2,529	-4,291	5,681
b2	-1,443	,739	-2,899	,013
b3	-17,560	57,745	-131,411	96,290
b4	-,240	,203	-,639	,159
b5	5,987	22,157	-37,698	49,672
b6	-,091	,104	-,295	,114
b7	,030	,093	-,153	,213
b8	,010	,073	-,135	,155
b9	,010	2,382	-4,685	4,705

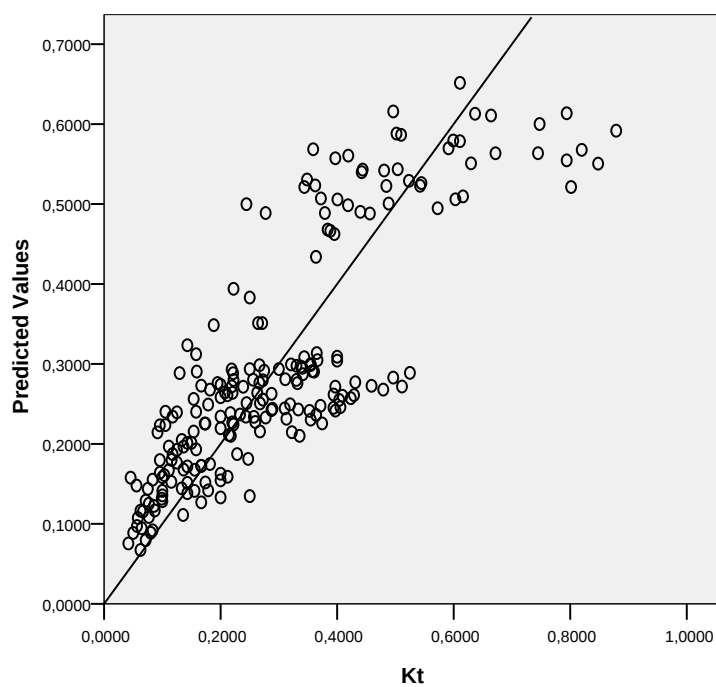
ANOVA^a

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	23,072	9	2,564
Residual	2,124	205	,010
Uncorrected Total	25,196	214	
Corrected Total	6,917	213	

Dependent variable: Kt

a. R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = ,693.

Από την εντολή **Graphs** → **Scatter/Dot** → **simple scatter** → **Define** για δημιουργία του γραφήματος. Σε x axis θέτω Kt και σε y axis Kt_model.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV – Συντελεστές παραμέτρων για τις διάφορες εξισώσεις όπως προκύπτουν από τη ανάλυση μη γραμμικής παλινδρόμησης.

Μοντέλο-1

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,798 ^a	,637	,632	,1093786

a. Predictors: (Constant), R3, R1, R2

b. Dependent Variable: Kt

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	,046	,024		1,935	,054
	R1	,323	,078	,200	4,136	,000
	R2	1,412	,112	,613	12,622	,000
	R3	-14,155	1,533	-,386	-9,232	,000

a. Dependent Variable: Kt

Μοντέλο-2

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	,100	,021	,058	,142
b2	,350	,055	,241	,459
b3	-,220	,022	-,262	-,177

Μοντέλο-3

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	4,886	,655	3,595	6,177
b2	1,100	,057	,988	1,212
b3	-,114	,015	-,143	-,084

Μοντέλο-4

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	,035	,008	,019	,051
b2	,080	,014	,052	,107
b3	-,218	,020	-,257	-,178
b0	-1,730	,035	-1,799	-1,661

Μοντέλο-6

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	,388	,068	,254	,522
b2	,887	,061	,767	1,007
b3	-,147	,014	-,174	-,119

Μοντέλο-7

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	3,061	,375	2,323	3,800
b2	,771	,034	,704	,837
b3	6,962	,000	6,962	6,962

Μοντέλο-16

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	-,008	,013	-,033	,017
b2	-1,467	,692	-2,832	-,102
b3	178,338	197817,5	-389816,927	390173,603
b0	-178,869	197817,5	-390174,228	389816,491
b4	,001	,878	-1,730	1,731
b5	,965	1,687	-2,360	4,291
b6	,156	,226	-,290	,602

Μοντέλο-17

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	,349	,064	,224	,475
b2	,342	,132	,082	,603
b3	-,004	,011	-,025	,017
b4	-1,695	1,082	-3,827	,438
b5	-,061	,007	-,075	-,047

Μοντέλο-21

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	-1,362	2,171	-5,643	2,919
b2	-,192	,300	-,784	,400
b3	,706	14,351	-27,589	29,001
b4	-,170	2,437	-4,974	4,635
b5	-,088	33,722	-66,577	66,400
b6	-,016	9,981	-19,696	19,663
b7	,079	2,481	-4,813	4,970
b8	-,638	8,252	-16,908	15,631
b9	1,236	29,534	-56,995	59,468
b10	-,043	1,083	-2,179	2,092

Μοντέλο-22

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	2,160	15,049	-27,512	31,832
b2	,039	,272	-,497	,575
b3	-,604	,659	-1,904	,695
b4	,227	,147	-,062	,517
b5	,445	,227	-,002	,893
b6	,487	,146	,199	,775
b7	,155	,042	,072	,238
b8	1,639	,550	,554	2,724
b9	-1,668	15,098	-31,436	28,099
b10	-,052	,493	-1,023	,920

Μοντέλο-23

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	-,500	,273	-1,039	,039
b2	-,500	,246	-,986	-,014
b3	-15,223	38,017	-90,172	59,727
b4	-,865	,260	-1,379	-,352
b5	,054	,142	-,227	,334
b6	,605	,253	,106	1,104
b7	-,076	,044	-,163	,011

Μοντέλο-24

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	,091	,059	-,025	,208
b2	,050	,341	-,623	,723
b3	-,050	,387	-,813	,713
b4	,500	1,768	-2,985	3,985
b5	-1,595	5,368	-12,178	8,987
b6	-,500	,533	-1,552	,552
b7	,050	,138	-,223	,323

Μοντέλο-25

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	2,196	,652	,910	3,482
b2	-,736	,297	-1,321	-,151
b3	-1,552	1,234	-3,986	,882
b4	-,859	,713	-2,265	,547
b5	,000	,002	-,004	,004
b6	1,221	3,071	-4,834	7,275
b7	-,408	,218	-,838	,023
b8	,500	,401	-,291	1,291
b9	,228	,257	-,278	,734
b10	,381	,281	-,174	,936

Μοντέλο-26

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
b1	1,173	12,841	-24,144	26,491
b2	,030	,306	-,573	,633
b3	-,116	,069	-,253	,020
b4	,524	,109	,309	,739
b5	2,387	1,305	-,186	4,959
b6	,191	,081	,031	,351
b7	-1,457	3,352	-8,067	5,153
b8	-,139	,286	-,702	,425
b9	-1,905	12,316	-26,188	22,378
b10	-,054	,367	-,778	,670