

Διδακτορική Διατριβή Α': Αριθμητική προσομοίωση της τρισδιάστατης τυρβώδους ροής θραυομένων κυμάτων στην παράκτια ζώνη απόσβεσης

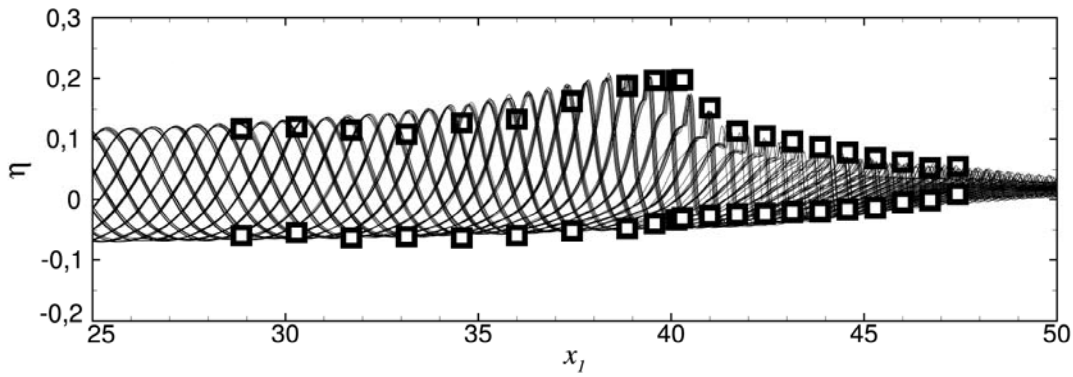
Στη διδακτορική διατριβή παρουσιάζεται η αριθμητική μέθοδος προσομοίωσης μεγάλων κυμάτων, για τη μελέτη της τυρβώδους ροής που αναπτύσσεται κατά τη θραύση κυμάτων (θραύση εκχείλισης) πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης. Η επαλήθευση της μεθόδου πραγματοποιείται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικές μετρήσεις και με τα αποτελέσματα του μοντέλου επιφανειακού στροβίλου.

Εξισώσεις ροής και αριθμητική μέθοδος επίλυσης

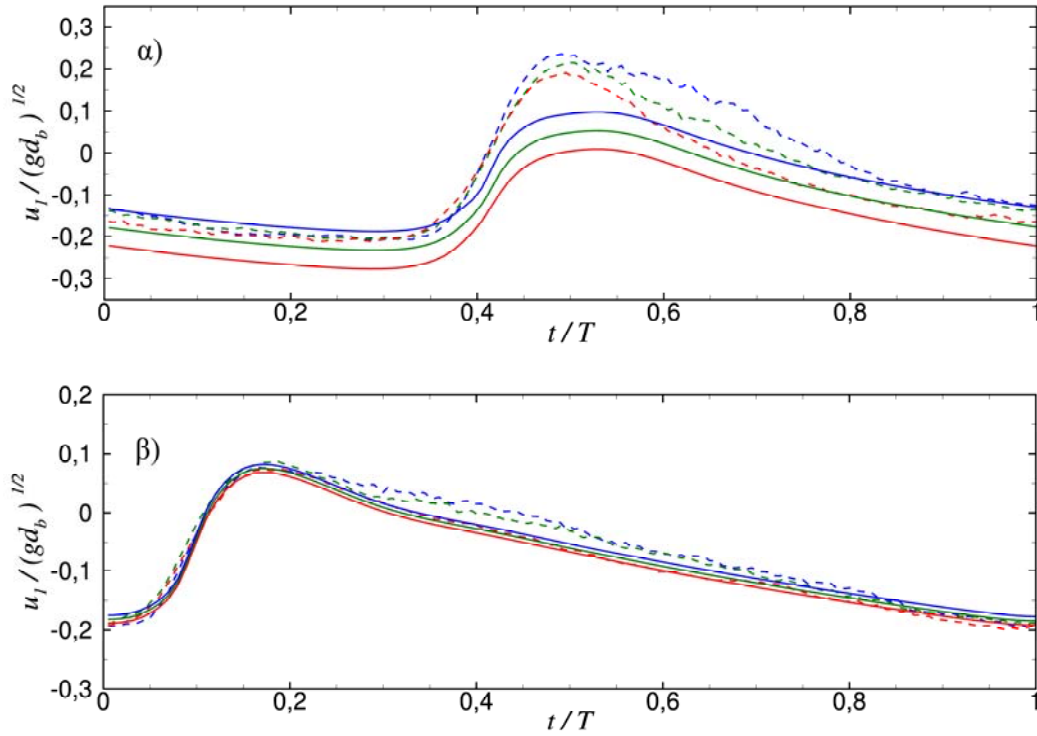
Το μοντέλο βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των αδιάστατων εξισώσεων Euler, για ασυμπίεστη, τρισδιάστατη, μη συνεκτική ροή, σε συνδυασμό με πλήρως μη γραμμικές οριακές συνθήκες για την ελεύθερη επιφάνεια. Το σχήμα αριθμητικής επίλυσης αποτελείται από κλασματική μέθοδο χρονικής ολοκλήρωσης σε δυο στάδια και υβριδικό σχήμα χωρικής διακριτοποίησης. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις δισδιάστατης ροής κατά τη διάδοση και θραύση κυμάτων κάθετα στην ακτογραμμή, πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης ($1/50$, $1/35$, $1/20$) και τρισδιάστατης ροής, κατά τη διάδοση και θραύση κυμάτων κάθετα και υπό γωνία ως προς την ακτογραμμή, πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης ($1/35$).

Μοντέλο Επιφανειακού Στροβίλου

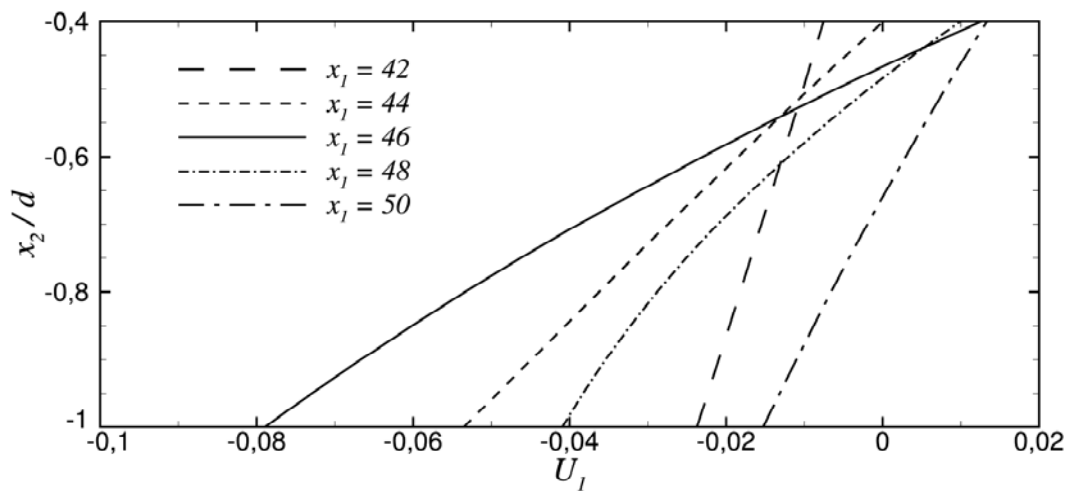
Κατά τη θραύση εκχείλισης αναπτύσσεται μια περιοχή ανακυκλοφορίας της ροής στο μέτωπο του κύματος (Duncan 1981), η οποία καλείται επιφανειακός στρόβιλος ή στρόβιλος θραύσης. Ο επιφανειακός στρόβιλος δεν επιλύεται αριθμητικά και η επίδρασή του λαμβάνεται υπόψη με τη χρήση πρόσθετων όρων στη δυναμική συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας (Cointe & Tulin 1994). Η διαστασιολόγηση του επιφανειακού στροβίλου πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας εμπειρική μέθοδο (Schaffer et al 1993). Τα αποτελέσματα ελεύθερης επιφάνειας και των ταχυτήτων, τα οποία προκύπτουν από την προσομοίωση δισδιάστατης ροής πάνω από πυθμένα κλίσης $1/35$ (Σχ.1, 2), εμφανίζουν εξαιρετική συμφωνία κατά τη σύγκριση τους με πειραματικές μετρήσεις (Ting & Kirby 1994,1996). Το μοντέλο προβλέπει επίσης τη δημιουργία κυματογενούς ρεύματος κάθετα στην ακτογραμμή (Σχ. 3).



Σχήμα 1: Στιγμιότυπα της ελεύθερης επιφάνειας κατά τη διάδοση και θραύση κυμάτων πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης 1/35 κατά την προσομοίωση με μοντέλο επιφανειακού στροβίλου. Τα τετράγωνα σύμβολα αντιστοιχούν σε πειραματικές μετρήσεις (Ting & Kirby 1994).



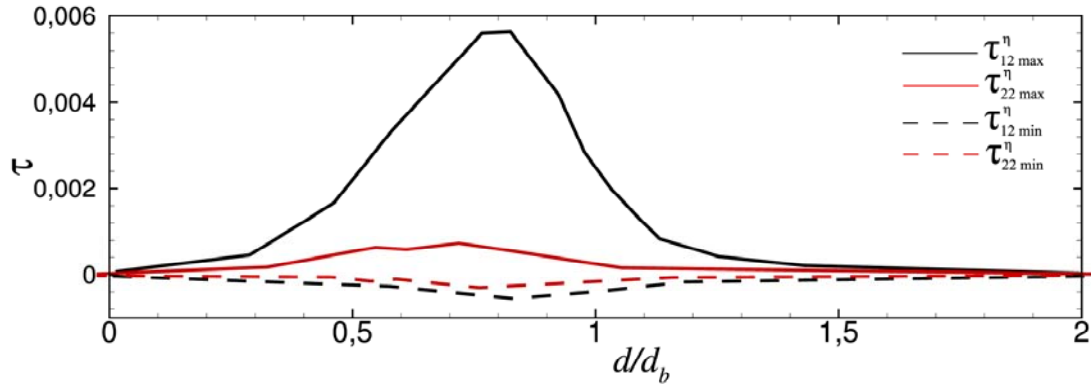
Σχήμα 2: Μέση, κατά φάση, οριζόντια ταχύτητα ροής στις θέσεις α) $d/d_b = 0,775$, και β) $d/d_b = 0,495$, κατά τη διάδοση και θραύση κυμάτων πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης 1/35, σε βάθος $x_2/d = 0,7$ (κυανές γραμμές), $x_2/d = 0,5$ (πράσινες γραμμές) και $x_2/d = 0,25$ (ερυθρές γραμμές). Οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν στα αποτελέσματα του μοντέλου επιφανειακού στροβίλου και οι διακεκομμένες στις πειραματικές μετρήσεις (Ting & Kirby 1996).



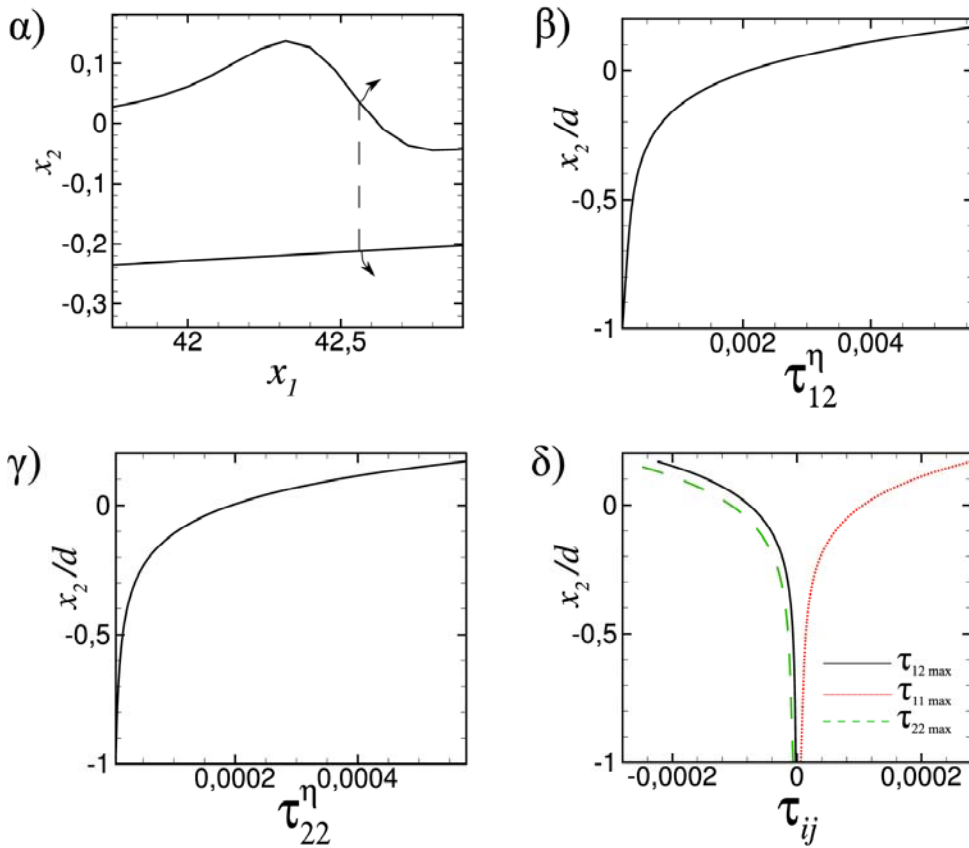
Σχήμα 3: Κατακόρυφο προφίλ του κυματογενούς ρεύματος κάθετα στην ακτογραμμή, σε διάφορες θέσεις. Η έναρξη της θραύσης συμβαίνει στη θέση $x_2 = 44$.

Μέθοδος Προσομοίωσης Μεγάλων Κυμάτων (LWS)

Η μέθοδος Προσομοίωσης Μεγάλων Κυμάτων (Large Wave Simulation ή LWS) αναπτύχθηκε αρχικά για τη δισδιάστατη προσομοίωση της θραύσης εκχείλισης κυμάτων μεγάλου βάθους (Dimas & Fialkowski, 2000). Στην παρούσα εργασία η μέθοδος LWS επεκτείνεται για την τρισδιάστατη προσομοίωση θραυομένων κυμάτων στην παράκτια ζώνη. Κατά τη μέθοδο LWS επιλύονται οι μεγάλες κλίμακες της ροής, ενώ οι μικρές κλίμακες λαμβάνονται υπόψη με ένα υποπλεγματικό (Sub-grid Scale ή SGS) μοντέλο τάσεων, ανάλογο της μεθόδου Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation ή LES). Η πρωτοτυπία της μεθόδου LWS έγκειται στο διαχωρισμό των διακυμάνσεων της ελεύθερης επιφάνειας σε επιλυόμενες και υποπλεγματικές και στη χρήση αντιστοίχου SGS μοντέλου για τις τυρβώδεις διακυμάνσεις της ελεύθερης επιφάνειας κύματος. Τα αποτελέσματα του μοντέλου επαληθεύονται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικές μετρήσεις (Ting & Kirby 1994,1996), κατά τη διάδοση και θραύση κυμάτων πάνω από πυθμένα κλίσης 1/35. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της μεθόδου LWS συμφωνούν με τις προβλέψεις του μοντέλου επιφανειακού στροβίλου. Οι SGS τάσεις κύματος που προκύπτουν από το μοντέλο, προσομοιώνουν ικανοποιητικά τη μεταβατική ροή η οποία αναπτύσσεται κατά την έναρξη της θραύσης, καθώς γίνονται σημαντικές λίγο πριν τη θέση θραύσης, αυξάνονται στη ζώνη απόσβεσης και εξασθενούν με την ολοκλήρωση της απόσβεσης του κύματος (Σχ. 4). Οι SGS τάσεις κύματος και δίνης είναι σημαντικές στην περιοχή του στροβίλου θραύσης (Σχ. 5). Η δράση των SGS τάσεων κύματος παράγει δεξιόστροφη στροβιλότητα και δημιουργούν το στρόβιλο θραύσης, ενώ οι SGS τάσεις δίνης προκύπτουν από το στρώμα μίξης της ροής που αναπτύσσεται στην περιοχή του στροβίλου (Σχ. 6).



Σχήμα 4: Περιβάλλουσες των SGS τάσεων κύματος (τ_{12}^{η} και τ_{22}^{η}) κατά τη διάδοση και θραύση κυμάτων πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης 1/35.



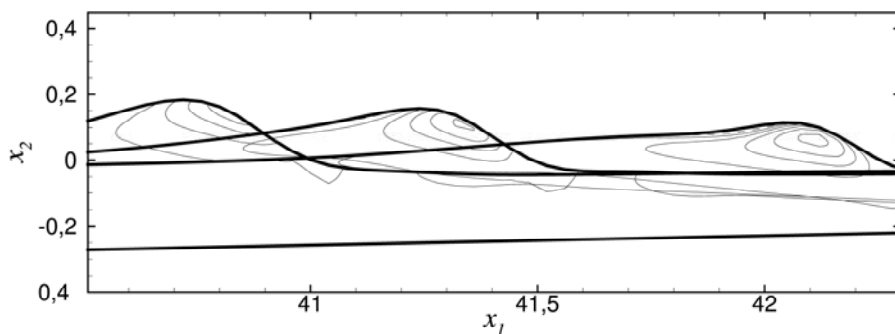
Σχήμα 5: Κατακόρυφο προφίλ των SGS τάσεων (β) τ_{12}^{η} , (γ) τ_{22}^{η} , και (δ) τ_{11} , τ_{12} και τ_{22} πάνω από πυθμένα κλίσης 1/35, στη θέση που σημειώνεται στο σκαρίφημα (α), με βάθος $d / d_b = 0,8$.



Σχήμα 6: Διατμητικές τάσεις στην θραυόμενη κορυφή και δημιουργία του στροβίλου θραύσης.

Παραγωγή στροβιλότητας στη ζώνη απόσβεσης

Η δράση των SGS τάσεων δημιουργεί το στρόβιλο θραύσης και παράγει στροβιλότητα στο μέτωπο της θραυόμενης κορυφής. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι ισοϋψείς της στροβιλότητας, σε τρία στιγμιότυπα της ελεύθερης επιφάνειας στη ζώνη απόσβεσης, κατά τη τρισδιάστατη προσομοίωση θραυομένων κυμάτων που διαδίδονται κάθετα στην ακτογραμμή, πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης 1/35. Κατά την έναρξη της θραύσης, παράγεται στροβιλότητα στην θραυόμενη κορυφή και στη συνέχεια, δημιουργείται η χαρακτηριστική δομή του στροβίλου θραύσης, όπου το μέγιστο της στροβιλότητας βρίσκεται κάτωθεν της ελεύθερης επιφάνειας. Η σταδιακή κάθοδος του μεγίστου της κατανομής της στροβιλότητας (Σχ. 7) οφείλεται στην τάνυση του στροβίλου θραύσης, ως προς τον παράλληλο στην ακτογραμμή άξονα. Η στροβιλότητα μεταφέρεται, λόγω των ταχυτήτων και της διάχυσης, προς τον πυθμένα και τον ομόρρου θραύσης.

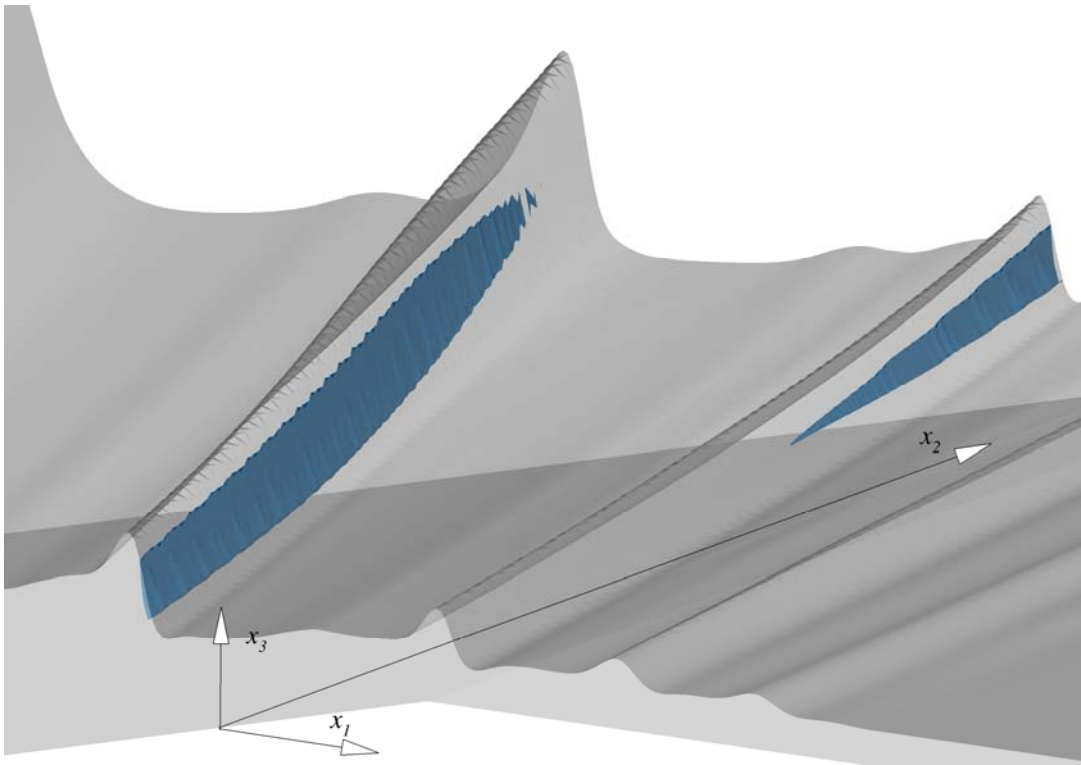


Σχήμα 7: Ισοϋψείς στροβιλότητας στη ζώνη απόσβεσης, πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης 1/35. Το πρώτο στιγμιότυπο λαμβάνεται κατά την διέλευση της κορυφής από τη θέση βάθους $0,95d_b$ και τα δυο επόμενα μετά από χρόνο $0,1T$ και $0,15T$, αντίστοιχα. Το ελάχιστο των ισοϋψών είναι -1, το μέγιστο 9 και το βήμα 2. Οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν σε θετική (δεξιόστροφη) στροβιλότητα, ενώ οι διακεκομμένες σε αρνητική (αριστερόστροφη).

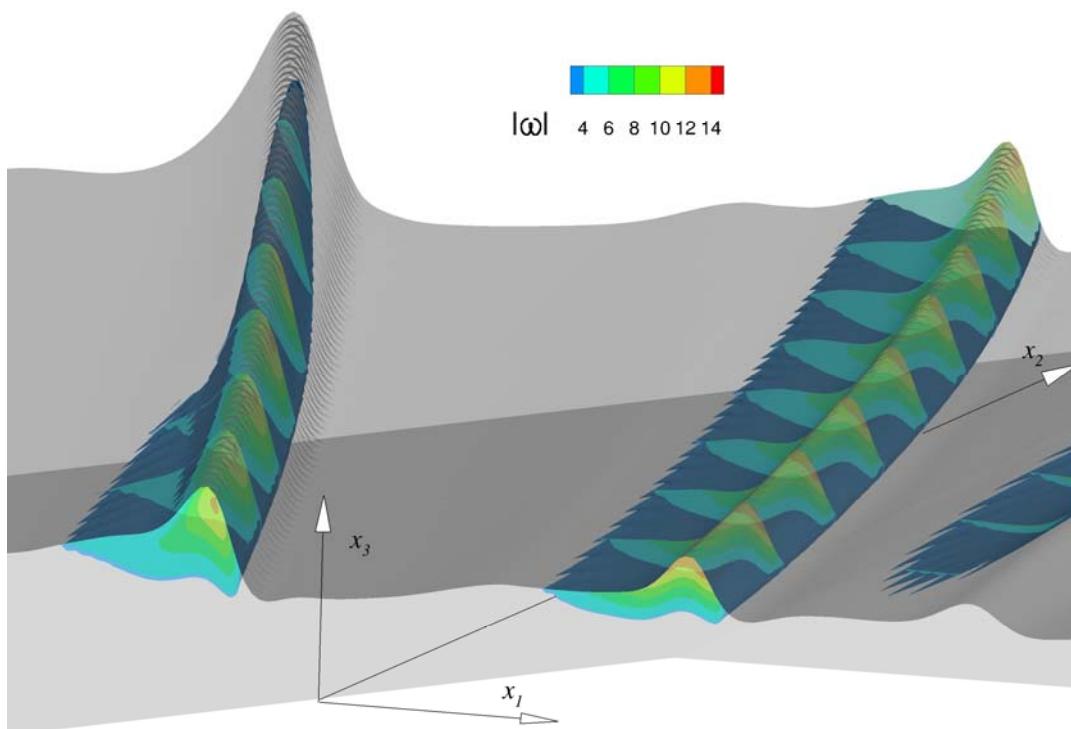
Διάδοση, διάθλαση και θραύση κυμάτων πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης

Το μοντέλο προβλέπει τη συμπεριφορά των κυμάτων που διαδίδονται υπό γωνία, πάνω από πυθμένα σταθερής κλίσης με παράλληλες ισοβαθείς προς την ακτογραμμή. Το μοντέλο επαληθεύεται για την προσομοίωση διάθλασης μη θραυόμενου γραμμικού κύματος, πάνω από πυθμένα κλίσης 1/50, σε σύγκριση με το νόμο του Snell.

Κατά τη θραύση κυμάτων υπό γωνία προς την ακτογραμμή (πυθμένας κλίσης 1/35), οι κορυφογραμμές του κύματος θραύονται σταδιακά και η δράση των SGS τάσεων παράγει εγκάρσια και διαμήκη στροβιλότητα (Σχ. 8 και 9). Ο στρόβιλος θραύσης αναπτύσσεται κατά μήκος των θραυομένων κορυφογραμμών, με γωνία προσανατολισμού αντίστοιχη της γωνίας πρόσπτωσης στη θέση θραύσης. Ο στρόβιλος θραύσης εκτείνεται σε περίπου δύο μήκη κύματος στην παράκτια ζώνη απόσβεσης.



Σχήμα 8: Στιγμιότυπο της ελεύθερης επιφάνειας και κατανομή της SGS τάσης κύματος τ''_{13} , με τη χρήση ισοϋψούς επιφάνειας $\tau''_{13} = 0,004$



Σχήμα 9: Στιγμιότυπο της ελεύθερης επιφάνειας και κατανομή του μέτρου της στροβιλότητας $|\omega|$. Με το κυανό χρώμα απεικονίζεται η ισοϋψής επιφάνεια $|\omega| = 4$. Εντός της ισοϋψούς επιφάνειας διακρίνεται η κατανομή του $|\omega|$, σε χαρακτηριστικές τομές του πεδίου ροής.

Βιβλιογραφία

Cointe, R. and Tulin, M. P. (1994), “Theory of steady breakers”, Journal of Fluid Mechanics 276, 1-20.

Dimas, A. A. and Fialkowski, L. T. (2000), “Large-wave simulation (LWS) of free-surface flows developing weak spilling breaking waves”, Journal of Computational Physics 159(2), 172-196.

Duncan, J. H. (1981), “An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil”, Proceedings of Royal Society of London A 377, 331-348.

Schaffer, H. A., Madsen, P. A. and Deigaard, R. (1993), “A Boussinesq model for waves breaking in shallow water”, Coastal Engineering 20(3-4), 185-202.

Ting, F. C. K. and Kirby, J. T. (1994), “Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone”, Coastal Engineering 24(1-2), 51-80.

Ting, F. C. K. and Kirby, J. T. (1996), "Dynamics of surf-zone turbulence in a spilling breaker", *Coastal Engineering* 27(3-4), 131-160.