

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ
ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ SPH**
Χρήστος Β. Μακρής, Γιάννης Ν. Κρεστενίτης

Εργαστήριο Θαλάσσιας Τεχνικής και Θαλάσσιων Έργων, Τομέας Υδραυλικής
και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική
Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσ/νίκης, 54124 Θεσ/νίκη
cmakris@civil.auth.gr, ynkrest@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται διερεύνηση της θραύσης κυματισμών τύπου ασθενούς κατάδυσης (weak plunging), πάνω σε ήπιας κλίσης ακτές εργαστηριακής κλίμακας, μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης. Ως αριθμητικό εργαλείο χρησιμοποιείται η σωματιδιακή μέθοδος Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) και συγκεκριμένα η πρόσφατα ενισχυμένη εκδοχή του ακαδημαϊκού ‘ανοιχτού’ πηγαίου κώδικα SPHysics v.2. Επιχειρείται ενδελεχής βαθμονόμηση, μέσω λεπτομερούς χωρικής διακριτοποίησης, με βάση πρόσφατα διεξοδικά εργαστηριακά δεδομένα. Στόχος είναι να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα του Υπο-Σωματιδιακής Κλίμακας μοντέλου για το ‘κλείσιμο’ της τύρβης τύπου Smagorinsky, το οποίο υπολογίζει την ενεργειακή σκέδαση των σχηματιζόμενων δινών στις μη επιλυόμενες από το μοντέλο χωρικές κλίμακες ροής. Η εξαιρετική οπτική αναπαραγωγή των έντονων παραμορφώσεων της ελεύθερης επιφάνειας συμπληρώνεται στην παρούσα εργασία με εξόχως ευλογοφανή αποτελέσματα, που αφορούν σε κλασσικά υδροδυναμικά και πολύπλοκα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής εντός της ζώνης θραύσης των παράκτιων κυματισμών καθώς και σε εγκάρσια στην ακτή κυματογενή ρεύματα.

**NUMERICAL SIMULATION OF THE HYDRODYNAMIC
FEATURES OF NEAR-SHORE SURF ZONE WITH SPH METHOD**
Christos V. Makris, Yannis N. Krestenitis

Laboratory of Maritime Engineering and Maritime Works, Division of
Hydraulics and Environmental Engineering, Department of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, GR-54124
Thessaloniki, Greece

ABSTRACT

Computational modeling aspects of weak plunging wave breaking, over a relatively mild sloping laboratory beach, are investigated in the present paper. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method is implemented as a numerical tool and specifically the recently enhanced version of the academic ‘open source’ code SPHysics v.2 is used. Thorough calibration of the model is attempted through fine spatial resolution, based on recent elaborate experimental data. Basic goal is to enhance the effectiveness of the Sub-Particle Scale Smagorinsky-type turbulence closure model that treats energy dissipation of eddy formations for the unresolved flow scales. Fine visual reproduction of the violent free-surface deformations is supplemented with plausible results concerning classic wave dynamics characteristics and sophisticated turbulent surf-zone features as well as wave-induced cross-shore currents.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φαινόμενα της θραύσης των κυματισμών στην παράκτια ζώνη, της συνακόλουθης τυρβώδους μεταφοράς σε αυτή και της τελικής διαμόρφωσης των παράκτιων κυματογενών ρευμάτων αποτελούσαν ανέκαθεν κρίσιμα ζητήματα για τους επιστήμονες και τους μηχανικούς που ασχολούνται με τις παράκτιες διεργασίες. Ειδικά μέσα στη Ζώνη Θραύσης (ΖΘ), το κυματικό πεδίο υπόκειται εξαιρετικά απότομων μεταβολών, ιδιαίτερα κατά τη θραύση τύπου κατάδυσης (plunging). Η φυσική προσομοίωση του φαινομένου, σε ήπιας κλίσης ακτές εργαστηριακής κλίμακας (Ting & Kirby, 1994), έχει θέσει τις βάσεις για τη βαθύτερη κατανόησή του. Παρ' όλα αυτά, οι πειραματικές προσπάθειες συνήθως σχετίζονται με αυστηρά υδραυλικά χαρακτηριστικά και περιοριστικές γεωμετρίες εφαρμογής. Στη σημερινή εποχή η χρήση προχωρημένων υπολογιστικών μοντέλων επιβάλλεται για λόγους ευελιξίας και οικονομίας. Συνεπώς η ενδελεχής αξιολόγησή τους, έναντι πειραματικών αποτελεσμάτων, ξεχωρίζει ανάμεσα στις ερευνητικές προσπάθειες στο πεδίο της παράκτιας υδροδυναμικής.

Σε αυτό το πλαίσιο, ποικίλες ερευνητικές προσπάθειες έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια, οι οποίες αφορούν σε διάφορα μαθηματικά μοντέλα, όπως η Μέθοδος Οριακών Στοιχείων (BEM), η μέθοδος των ολοκληρωμένων κατά Reynolds εξισώσεων Navier-Stokes (RANS), η τεχνική Level Set Method, η Υπο-Πλεγματοκή Κλίμακας (SGS) προσέγγιση για την προσομοίωση των ανεπίλυτων από τα μοντέλα τυρβωδών δινών και τα συζυγή μοντέλα προσομοίωσης μεγάλων δινών (LES). Η πλειοψηφία των παραπάνω μεθόδων αποτελούν παραδοσιακές μεθόδους τύπου Euler που στηρίζονται στη χρήση υπολογιστικού πλέγματος ή καννάβου. Σε αυτές, η ακριβής προσομοίωση των έντονων παραμορφώσεων, που υπόκειται η υδάτινη ελεύθερη επιφάνεια (ΕΕ) κατά τη θραύση των παράκτιων κυματισμών, αποτελεί ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα, απαιτητικό σε υπολογιστικούς πόρους. Στην παρούσα εργασία, ακολουθώντας προηγούμενες σχετικές ερευνητικές προσπάθειες (Makris et al, 2009, 2010a, 2010b, 2011) πάνω στο ζήτημα, επιχειρείται η βελτίωσή τους με την ενσωμάτωση νεότερων, πιο περίτεχνων εκδοχών ενός πρωτότυπου υπολογιστικού προσομοιώματος χωρίς τη χρήση υπολογιστικού πλέγματος (mesh-free). Η μέθοδος Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), που επινοήθηκε και παρουσιάστηκε ενδελεχώς από τον Monaghan (2005), χρησιμοποιείται και βαθμονομείται με βάση εκλεπτυσμένη χωρική ανάλυση έναντι πειραματικών δεδομένων. Στόχος είναι η επικύρωση της ικανότητας της μεθόδου να προβλέπει τις λεπτομέρειες όλων των διεργασιών κατά τη θραύση των παράκτιων κυματισμών.

Στην πρόσφατη βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων SPH, παρόλο που είναι οπτικά εντυπωσιακά (Gómez-Gesteira et al, 2010b και Dalrymple & Rogers, 2006), στερούνται εκτενούς επιβεβαίωσης αναφορικά με τα υπολογιζόμενα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής. Σε αυτό το πλαίσιο, οι Shao & Ji (2006) παρουσίασαν μία προσέγγιση τύπου LES για SPH, με τη χρήση Υπο-Σωματιδιακής Κλίμακας (SPS) μοντέλου για το 'κλείσιμο' της τύρβης. Τα αποτελέσματά τους ήταν αξιοσημείωτα, αλλά αφορούσαν μόνο σε μετακινήσεις της ΕΕ και τυρβώδεις εντάσεις. Οι Khayyer et al (2008) αναπαρήγαγαν μια διορθωμένη εκδοχή της μεθόδου για ασυμπιεστο ρευστό, με κύριο σκοπό την ακριβή απεικόνιση της παραμόρφωσης της ΕΕ. Επέμειναν μόνο στην εκλέπτυνση της χωρικής ανάλυσης και προσπάθησαν να δικαιολογήσουν τη σύγκλιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειραματικά, βασισμένοι μόνο στην τοπολογία της καταδύμενης φλέβας κατά τη θραύση. Συνεκδοχικά στην παρούσα εργασία παρέχονται πιο εκλεπτυσμένες αριθμητικές προσομοιώσεις, με τη χρήση ενός συζευγμένου μοντέλου SPH-SPS, για τη θραύση μονοχρωματικών μη γραμμικών κυμάτων υπό μορφή ασθενούς κατάδυσης. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα και διάφορα πολύπλοκα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής εντός ΖΘ αναλύονται εκτενώς.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ SPH

Η SPH είναι μια σχετικά πρόσφατη αριθμητική μέθοδος τύπου Lagrange για την προσομοίωση υδροδυναμικών ροών. Λαμβάνει υπόψη σωματιδιακού τύπου χωρική διακριτοποίηση για το υπολογιστικό πεδίο και εφαρμόζει ολοκληρωτικούς τελεστές εξομάλυνσης για τον υπολογισμό των πλήρων εξισώσεων Navier-Stokes. Η τεχνική της σωματιδιακής διακριτοποίησης επιτρέπει την απρόσκοπτη προσομοίωση ροών με ΕΕ, οι οποίες υπόκεινται έντονων παραμορφώσεων και χαρακτηρίζονται ως βίαια φαινόμενα, χωρίς κάποιο ειδικό χειρισμό για την οριακή συνθήκη της ΕΕ (Dalrymple & Rogers, 2006 και Gómez-Gesteira et al, 2010b). Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της μεθόδου είναι η αναλυτική αναπαράσταση οποιουδήποτε μεγέθους $A(\mathbf{r})$ (βαθμωτού ή διανυσματικού) και των οποιασδήποτε τάξης διαφορικών τελεστών του, σε ένα συγκεκριμένο κόμβο του υπολογιστικού πεδίου, μέσω ολοκληρωτικής παρεμβολής στους περιβάλλοντες κόμβους. Έτσι οποιαδήποτε συνάρτηση $A(\mathbf{r})$ των ιδιοτήτων του υπολογιστικού πεδίου αναπαράγεται αριθμητικά σε ολοκληρωτική (ασθενή) μορφή και εν τέλει σε διακριτοποιημένη μορφή τύπου αθροίσματος, ως εξής:

$$A(\mathbf{r}) = \int A(\mathbf{r}')W(\mathbf{r}-\mathbf{r}',h)d\mathbf{r}' \Rightarrow A(\mathbf{r}) = \sum_j A_j(m_j/\rho_j)W_j \quad (2.1)$$

όπου h είναι το μήκος εξομάλυνσης, \mathbf{r} και \mathbf{r}' είναι η θέση τυχαίου σωματιδίου και η απόσταση μεταξύ δύο τυχαίων σωματιδίων αντίστοιχα, $W(\mathbf{r},h)$ είναι μία συνάρτηση στάθμισης κωδωνοειδούς τύπου, εξαρτώμενη από την απόσταση \mathbf{r} και το μήκος εξομάλυνσης h , η οποία ονομάζεται kernel (W_j για σωματιδιακή διακριτοποίηση), m_j και ρ_j είναι η σταθερή μάζα και η πυκνότητα τυχαίου σωματιδίου j αντίστοιχα. Λεπτομερής ανάλυση της μεθόδου SPH παρουσιάζεται από τον Monaghan (2005). Κρίσιμες παραδοχές της αριθμητικής προσέγγισης, που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία παρέχονται από τους Makris et al (2009) και Gómez-Gesteira et al (2010b).

2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SPHysics - ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΡΒΗΣ SPS

Σε αυτό το πλαίσιο έχει επιλεχθεί εδώ και καιρό η χρήση του εύρωστου ακαδημαϊκού υπολογιστικού μοντέλου SPHysics με «ανοιχτό πηγαίο κώδικα». Ακολουθώντας την επιχειρηματολογία των Makris et al (2011), γίνεται χρήση της πρόσφατης εκδοχής v.2 (Gómez-Gesteira et al, 2010a). Εκτεταμένη βαθμονόμηση των παλαιότερων εκδοχών μπορούν να εντοπιστούν στα άρθρα των Makris et al (2010a, b) και οι αριθμητικές παραδοχές της παρούσας εργασίας παρέχονται από τους Makris et al (2011). Παρόμοια λεπτομερής χωρική ανάλυση εφαρμόζεται στην παρούσα ανάλυση, εμπλουτισμένη με περισσότερα ποσοτικά αποτελέσματα και σχολιασμό, ρίχνοντας περαιτέρω φως στα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ΖΘ.

Η διαχείριση της συνεκτικότητας στην παρούσα ανάλυση βασίζεται στην SPS προσέγγιση των Gotoh et al (2001), η οποία είναι παρόμοια με τα διάφορα LES-SGS μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις παραδοσιακές μεθόδους με χρήση υπολογιστικού καννάβου. Πρόκειται για ένα μοντέλο που αφορά στο 'κλείσιμο' της τύρβης, δηλ. στο χειρισμό των τυρβωδών δινών για τις μη επιλυόμενες από το μοντέλο SPH χωρικές κλίμακες, με τυπική διάσταση μικρότερη από το χωρικό βήμα διακριτοποίησης Δx . Ο τανυστής των τάσεων SPS υπολογίζεται με βάση την υπόθεση τυρβώδους κινηματικής συνεκτικότητας κατά Boussinesq, η οποία υποστηρίζεται από μία τεχνική τεχνητής συμπίεστότητας με τη χρήση μεσοστάθμισης τύπου Favre για την υπολογιζόμενη

πυκνότητα. Ένα μη-δυναμικό μοντέλο Smagorinsky εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της τυρβώδους κινηματικής συνεκτικότητας ν_t , ως εξής:

$$\nu_t = \left[\min(C_s \Delta l) \right]^2 |\tilde{\mathbf{S}}_{ij}| \quad (2.2)$$

όπου ο συντελεστής Smagorinsky C_s κρατείται σταθερός σε όλο το υπολογιστικό πεδίο, Δl είναι η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων και \mathbf{S}_{ij} είναι ο SPS τανυστής του ρυθμού μεταβολής της τροπής, για τον οποίο ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$|\tilde{\mathbf{S}}_{ij}| = (2\tilde{\mathbf{S}}_{ij}\tilde{\mathbf{S}}_{ij})^{1/2}, \tilde{\mathbf{S}}_{ij} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.3)$$

όπου \mathbf{u} είναι το διανυσματικό πεδίο των ταχυτήτων και η περισπωμένη (\sim) υποδηλώνει μεσοστάθμιση τύπου Favre. Τα παραπάνω καλύπτονται εκτενέστατα από τους Gómez-Gesteira et al (2010a). Το μοντέλο επικουρείται από ένα αριθμητικό φίλτρο μεσοστάθμισης των πυκνοτήτων κατά Shepard, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί φυσικά ευλογοφανής (ομαλή) αναπαράσταση της ανύψωσης της ΕΕ (Makris et al, 2009).

2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ – ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Τα πειραματικά δεδομένα, που χρησιμοποιούνται για συγκρίσεις με τα αντίστοιχα των αριθμητικών προσομοιώσεων, συγκεντρώθηκαν από τη μελέτη των Stansby & Feng (2005) [SF05]. Η έρευνά τους καλύπτει ποικιλοτρόπως τη θραύση τύπου ασθενούς κατάδυσης για παράκτιους μη γραμμικούς κυματισμούς και τη συνακόλουθη μεταφορά της τύρβης υπό αυτών εντός ΖΘ σε ακτή εργαστηριακής κλίμακας. Τα χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης και τα εξαγόμενα της ανάλυσης, που χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για τη διαμόρφωση του αριθμητικού καναλιού, στο οποίο έλαβαν χώρα οι προσομοιώσεις με τον κώδικα SPHysics v.2, έχουν παρουσιαστεί παλαιότερα από τους Makris et al (2009 και 2010a,b). Εκτεταμένη σχετική περιγραφή μπορεί να εντοπιστεί στη μελέτη των SF05.

Ακολουθώντας την παλαιότερη ανάλυση των Makris et al (2011), οι περιπτώσεις ελέγχου βασίζονται κυρίως στη χωρική ανάλυση του υπολογιστικού πεδίου και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η περίπτωση 6 αφορά σε μία χρονοβόρα προσπάθεια να καταγραφούν 50 προσομοιωμένες κυματικές περίοδοι, με σκοπό να εντοπιστεί η επιρροή της μακροπρόθεσμης καταγραφής στη φασματική ανάλυση κατά Fourier των τυρβωδών συνιστωσών των ταχυτήτων. Για να λειτουργήσει ορθά το μοντέλο SPS, πρέπει να προηγηθεί κατάλληλη βαθμονόμηση της χωρικής ανάλυσης του μοντέλου SPHysics v.2, ιδιαίτερα για την περιοχή έναρξης της θραύσης, όπου κυριαρχούν έντονα διατμητικά φαινόμενα. Συνεπώς η σωματιδιακή διακριτοποίηση Δx οφείλει να είναι ίση ή μικρότερη της ολοκληρωτικής (integral) κλίμακας μήκους της τύρβης της πραγματικής ροής. Οι περιπτώσεις 9 ως 11 αντιστοιχούν σε αυτήν την απαίτηση. Οι Cox et al (1994) έχουν εκτιμήσει ότι η ανωτέρω κλίμακα κυμαίνεται από 0.04 ως 0.18 του βάθους του νερού, στην περιοχή έναρξης της θραύσης και την περιοχή της εσώτερης ΖΘ αντίστοιχα. Υπολογίζεται ότι αυτές οι τιμές ποικίλουν από 5.92 ως 6.32 mm και από 1.35 ως 1.71 cm για την εξωτερική και την εσώτερη ΖΘ αντίστοιχα για τα στοιχεία του πειράματος των SF05. Για σχεδόν όλες τις περιπτώσεις προσομοίωσης (εκτός από τις πρώτες δύο) χρησιμοποιείται πιο λεπτομερής χωρική διακριτοποίηση, σε σχέση με την ολοκληρωτική κλίμακα μήκους της τύρβης στην εσώτερη ΖΘ. Οι

περιπτώσεις 1 και 2 περιλαμβάνουν περίπου $2 \cdot 10^4$ σωματίδια, ενώ οι περιπτώσεις ελέγχου 3 ως 13 αφορούν σε προσομοιώσεις από περίπου $5 \cdot 10^4$ έως $2 \cdot 10^5$ σωματίδια.

Πίνακας 1. Διακριτές περιπτώσεις προσομοίωσης βασισμένες στη χωρική διακριτοποίηση Δx και λοιπούς παράγοντες βαθμονόμησης

Περιπτώσεις Ελέγχου	Δx (m)	Παράγοντες Βαθμονόμησης	Περιπτώσεις Ελέγχου	Δx (m)	Παράγοντες Βαθμονόμησης
1	0.02	$\Delta x/h = 0.77$	7	0.005	$\Delta x/h = 0.77$
2	0.02	$\Delta x/h = 0.58$	8	0.006	$\Delta x/h = 0.77$
3	0.015	$\Delta x/h = 0.77$	9	0.00592	$\Delta x/h = 0.77$
4	0.01	$\Delta x/h = 0.77$	10	0.00632	$\Delta x/h = 0.77$
5	0.01	$\Delta x/h = 0.58$	11	0.0061	$\Delta x/h = 0.77$
6	0.01	t = 121 sec $\Delta x/h = 0.77$	12	0.004	$\Delta x/h = 0.77$
			13	0.003	$\Delta x/h = 0.77$

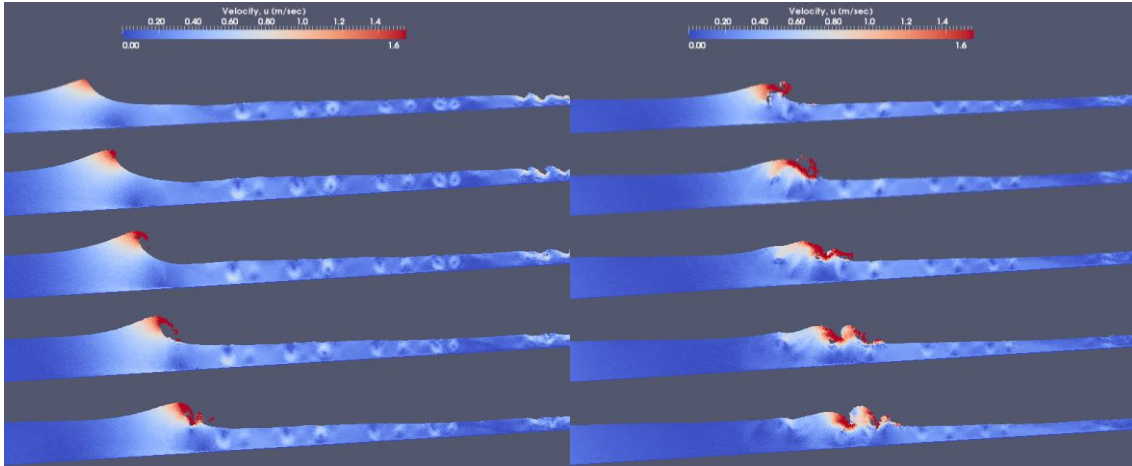
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα, τα οποία ποικίλουν από απεικονίσεις της θραύσης τύπου κατάδυσης έως συγκριτικά κυματικά χαρακτηριστικά και αναπαραστάσεις εκλεπτυσμένων τυρβωδών γνωρισμάτων της ροής εντός ΖΘ.

3.1 ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΤΥΠΟΥ ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η ακολουθία στιγμιαίων απεικονίσεων των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τον κώδικα SPHysics για λεπτομερή σωματιδιακή ανάλυση. Το χρονικό βήμα προβολής είναι 0.1 sec. Η ποιοτική συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι επαρκής, καθώς το επεισόδιο της κυματικής θραύσης τύπου ασθενούς κατάδυσης (SF05) έχει αναπαραχθεί πιστά. Συγκεκριμένα, στην περιοχή της κορυφής του προελαύνοντος κύματος δημιουργείται ένας επιφανειακός στρόβιλος (surface roller), ο οποίος σταδιακά εμφανίζει λοξό μυτερό υδάτινο εξόγκωμα στην κορυφή του. Αυτό εξαναγκάζεται, από την περίσσεια ορμής, στο σχηματισμό μιας προεξέχουσας φλέβας νερού. Ακολούθως η τελευταία αναποδογυρίζει και καταδύεται στην εμπρόσθια κοιλία του κύματος, προσκρούοντας στην περιοχή του πόδα του επιφανειακού στροβίλου. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό δημιουργίας και ενίσχυσης του πεδίου της στροβιλότητας και παραγωγής της τύρβης στην περιοχή. Μετέπειτα εμφανίζεται παφλασμός που οδηγεί στη δημιουργία μιας μικρότερης υδάτινης γλώσσας, η οποία με τη σειρά της αναπηδά και καταδύεται ακριβώς μπροστά από τον εν τω μεταξύ δημιουργημένο επιφανειακό τυρβώδη στρόβιλο (turbulent bore). Ο τελευταίος έχει τη μορφή αντίστροφου υδραυλικού άλματος και μεταδίδεται ευσταθώς, δημιουργώντας ένα απότομο μέτωπο. Αυτό αναγκάζει τη μάζα του νερού, που βρίσκεται μπροστά του, στο σχηματισμό ενός δευτερεύοντος εξογκώματος μπροστά από τον θραυόμενο επιφανειακό στρόβιλο και προς την ακτή. Στη συνέχεια μια μικρότερη καταδύομενη φλέβα επανεμφανίζεται επί του νέου μετώπου. Διαδοχικές διακριτές κοιλότητες κάνουν την εμφάνισή τους, έως ότου το διπλό υδάτινο εξόγκωμα να καταλαγιάσει και να εκφυλιστεί σε ρυτιδώσεις στην παράκτια ζώνη διαβροχής. Η χρωματική κλίμακα στο Σχήμα 1 αναφέρεται σε τιμές ταχύτητας, οι οποίες φτάνουν στην προελαύνουσα κορυφή του θραυόμενου κύματος και το μέτωπο του τυρβώδους στροβίλου τη μέγιστη τιμή της 1.6 φορές της θεωρητικής φασικής ταχύτητας σε ρηγά νερά, $c_f = (g \cdot d)^{1/2}$. Αυτή η τιμή είναι ελαφρά μεγαλύτερη σε σύγκριση με την πειραματικά μετρημένη ταχύτητα,

1.32· c_t (SF05). Η τελευταία είναι παραδόξως κοντά στην τιμή που υπολογίστηκε από τον Stive (1984) για θραυόμενους κυματισμούς τύπου υπερχειλίσης και όχι κατάδυσης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για πιο αδρομερή χωρική ανάλυση αποκαλύπτουν καλύτερη συμφωνία πειραμάτων και προσομοιώσεων αναφορικά με αυτές τις τιμές. Παρ' όλα αυτά η λεπτομερής διακριτοποίηση παραπέμπει σε καλύτερη αναπαράσταση της μορφής των καταδυόμενων θραυόμενων κυμάτων. Ακόμα ένα ενδιαφέρον στοιχείο του Σχήματος 1 είναι η αναπαράσταση τεσσάρων ζευγών από αποσυνδεδεμένες κατακόρυφες περιδινήσεις αντι-ωρολογιακής φοράς στην περιοχή του απόρρου της θραύσης. Είναι σχετικά μεγάλης κλίμακας και μετακινούνται αβίαστα προς το επόμενο επερχόμενο θραυόμενο κύμα, ώσπου να αναμιχθούν με τις τυρβώδεις κινήσεις εκεί.

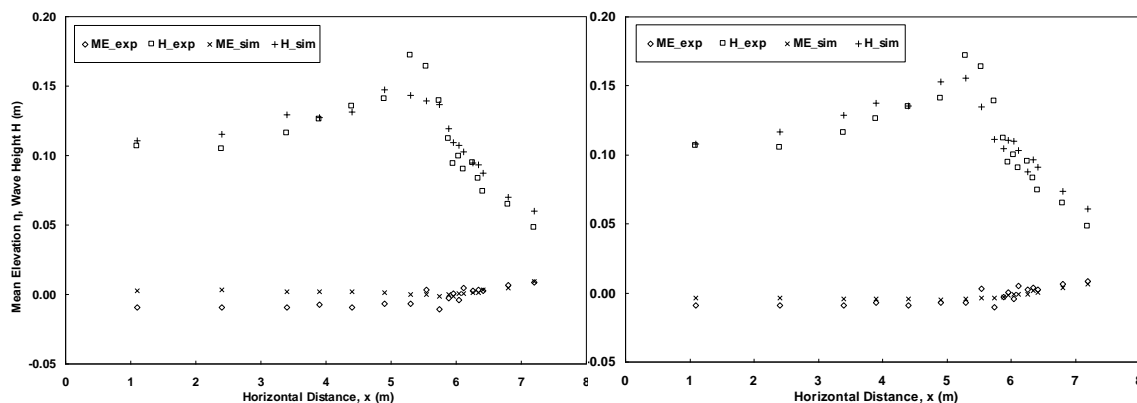


Σχήμα 1: Διαδοχικά ρεαλιστικά στιγμιότυπα των προσομοιώσεων του μοντέλου SPHysics με λεπτομερή χωρική διακριτοποίηση για τη θραύση κυματισμών τύπου ασθενούς κατάδυσης και την προέλαση του αντίστροφου υδραυλικού άλματος (bore). Η χρωματική κλίμακα αναφέρεται σε 'ακατέργαστες' τιμές ταχυτήτων.

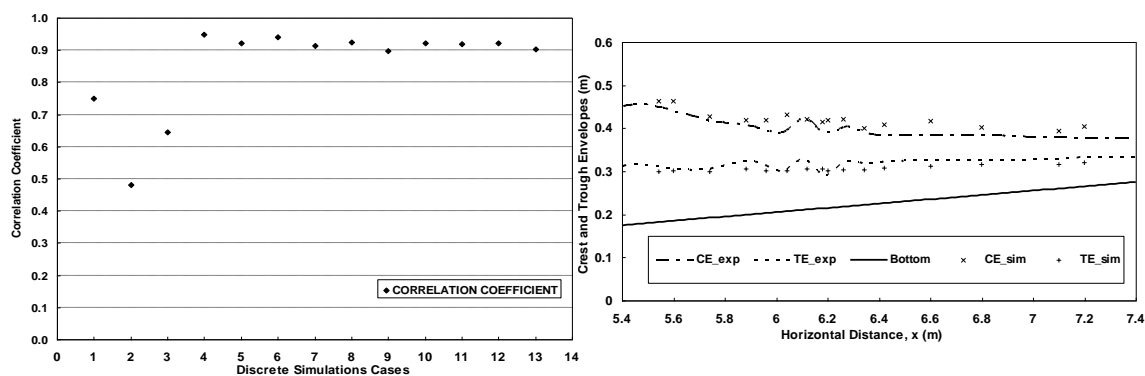
3.2 ΥΨΗ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΥΨΩΣΗ ΜΕΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

Στο Σχήμα 2 επιχειρούνται συγκρίσεις των υψών κύματος και της κυματογενούς μέσης ανύψωσης της ΕΕ από πειράματα και προσομοιώσεις για μικρή (αριστερό γράφημα) και μεγάλη (δεξιό γράφημα) χωρική ανάλυση. Η συμφωνία μεταξύ των τιμών είναι αποδεκτή για όλες τις περιπτώσεις με $\Delta x \leq 1 \text{ cm}$. Αυτό τεκμηριώνεται από το ότι οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson (Σχήμα 3, αριστερό γράφημα), για την κατανομή των υψών κύματος σε όλο το υπολογιστικό πεδίο, είναι της τάξης του 0.9 και υψηλότεροι. Όσο πιο λεπτομερής γίνεται η χωρική ανάλυση, τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα για την πρόβλεψη των υψών κύματος στην περιοχή της αρχικής ΖΘ, όπου παρατηρούνται έντονα διατμητικά φαινόμενα. Αυτή η περιοχή ήταν προβληματική στις παλαιότερες προσομοιώσεις (Makris et al, 2009 & 2010a). Για τις άλλες περιοχές του πεδίου, διαφορετικές επιλογές διακριτοποίησης θα μπορούσαν να δώσουν εξίσου αποδεκτά αποτελέσματα βασισμένες σε βελτιστοποιημένες τιμές του αδιάστατου όρου χωρικού βήματος $\Delta x/h$. Ο τελευταίος χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, γιατί όσο αυξάνεται (δηλ. συγκριτικά μικρό μήκος εξομάλυνσης), τόσο περισσότερες είναι οι παρατηρημένες υδροδυναμικές αστάθειες στο υπολογιστικό πεδίο και τόσο μεγαλύτερη η εξασθένιση των αριθμητικών οφελών της μεθόδου SPH. Από την άλλη πλευρά, χαμηλές τιμές $\Delta x/h$ (συγκριτικά μεγάλο μήκος εξομάλυνσης) οδηγούν σε υπέρμετρη εξομάλυνση των υπολογιζόμενων μεγεθών της ροής με αποτέλεσμα να παρατηρείται παράλογη αύξηση της ενεργειακής απόσβεσης στο σύστημα. Εντούτοις η μέση κυματογενής ανύψωση της ΕΕ εντός ΖΘ προβλέπεται με εντυπωσιακό τρόπο

ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις με λεπτομερή χωρική ανάλυση. Στο Σχήμα 3 (δεξιό γράφημα), παρατίθενται οι περιβάλλουσες των κορυφών και των κοιλιών των κυματισμών εντός ΖΘ, για το πείραμα των SF05 και τις αντίστοιχες προσομοιώσεις με το μοντέλο SPHysics v.2. Αφορούν σε περίπτωση ελέγχου με λεπτομερή διακριτοποίηση και η σύμπτωση των κατανομών κρίνεται σχετικά ικανοποιητική.



Σχήμα 2: Συγκρίσεις κατανομών υψών κύματος ‘H’ και μέσης κυματογενούς ανύψωσης της ΕΕ ‘ME’ μεταξύ πειραμάτων (exp) και προσομοιώσεων (sim) για τις περιπτώσεις ελέγχου 4 [αριστερά] & 13 [δεξιά].



Σχήμα 3: Συντελεστές συσχέτισης Pearson για συγκρίσεις κατανομών υψών κύματος μεταξύ πειραμάτων και προσομοιώσεων για διακριτές περιπτώσεις ελέγχου [αριστερά]. Περιβάλλουσες κορυφών ‘CE’ και κοιλιών ‘TE’ των κυματισμών εντός ΖΘ για πειράματα (exp) και προσομοιώσεις (sim) και την περίπτωση ελέγχου 12 [δεξιά].

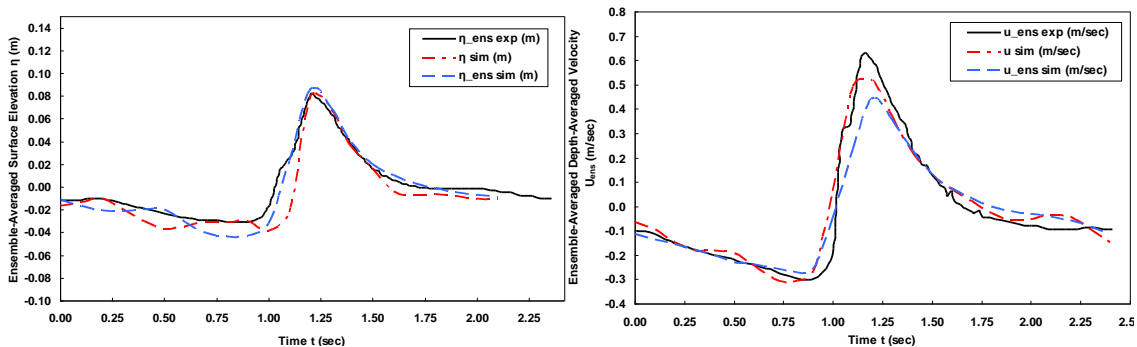
3.3 ΤΙΜΕΣ ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ ΤΩΝ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Η ευρετική προσέγγιση για την ανάλυση των χαρακτηριστικών του πεδίου τυρβώδους ροής κάτω από θραυόμενους κυματισμούς, κατά Nadaoka et al (1989), χρησιμοποιείται για τον ορισμό της τιμής δειγματικού μέσου, όπως π.χ. της μέσης κατά το βάθος ταχύτητας U , $\langle U \rangle$ ως εξής:

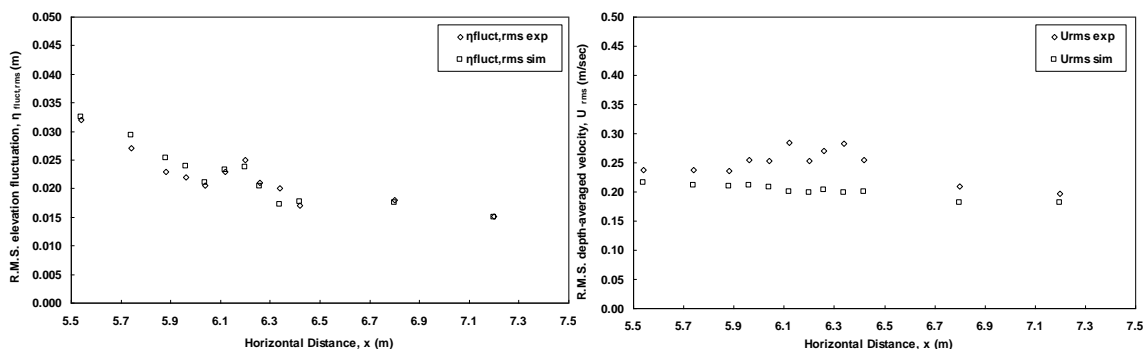
$$\langle U(\mathbf{x}, \zeta t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} U(\mathbf{x}, \zeta(t+iT)) \quad (3.1)$$

όπου $\langle \cdot \rangle$ είναι το σύμβολο του τελεστή μεσοστάθμισης κατά τη φάση του κύματος, N ο μέγιστος αριθμός του πλήθους του δείγματος παρόμοιος με το πλήθος των κυματικών κύκλων ($N \geq 10$), T η περίοδος του κύματος, ζ η γωνιακή συχνότητα του κύματος, \mathbf{x} το διάνυσμα θέσης και t ο χρόνος. Η ίδια σχέση (3.1) εφαρμόζεται επίσης για την

ανύψωση της ΕΕ, η . Στο Σχήμα 4 παρέχονται οι σχετικές τιμές, σε συγκεκριμένο μετρητή εντός της κορεσμένης ΖΘ, μαζί με ενδεικτικές ακατέργαστες τιμές της ταχύτητας. Ακολουθώντας τη λογική των Makris et al (2011), πολύ καλή συμφωνία έχει επιτευχθεί έναντι των πειραματικών αποτελεσμάτων των SF05, εκτός των άλλων περιοχών και στο μέσο της ΖΘ, πάντοτε με εκλεπτυσμένη χωρική ανάλυση. Στις περιοχές που κυριαρχούν τα έντονα διατμητικά φαινόμενα, η $\langle U \rangle$ έχει υποεκτιμηθεί σχετικά, πιθανότατα εξαιτίας έλλειψης κατάλληλης αντιμετώπισης της τριβής στο στερεό πυθμενικό όριο και στην οριακή στοιβάδα στις προσομοιώσεις τύπου SPH ή λόγω ανάγκης για πιο λεπτομερή χωρική διακριτοποίηση Δx , εγγύτερα στις κλίμακες Kolmogorov. Στο Σχήμα 5 δίνονται οι τιμές τετραγωνικού μέσου (rms) της διακυμαινόμενης ανύψωσης της ΕΕ, $\eta_{\text{fluct}} = \langle \eta \rangle - \eta_{\text{mean}}$ (η_{mean} είναι η μέση στο χρόνο ανύψωση της ΕΕ) και της U για την περίπτωση ελέγχου 12 κατά μήκος της ΖΘ. Οι συγκρίσεις έναντι πειραματικών δεδομένων (Σχήμα 5) και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης Pearson, με τιμές ~ 0.9 , παρέχουν αξιοσημείωτη σύμπτωση για τις τιμές $\eta_{\text{fluct,rms}}$ και τις περιπτώσεις εκλεπτυσμένης χωρικής ανάλυσης. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την U_{rms} , με συντελεστή συσχέτισης ~ 0.5 , είναι συζητήσιμα. Το τελευταίο ισχύει κυρίως στο μέσο της ΖΘ, όπου σχηματίζονται τα απότομα μέτωπα των επιφανειακών τυρβωδών στροβίλων και όχι στην περιοχή έναρξης της θραύσης ή την εσωτερη ΖΘ. Παρ' όλα αυτά ο κώδικας SPHysics v.2 αποδίδει εμφανέστατα πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το μοντέλο τύπου RANS, των ολοκληρωμένων κατά το βάθος εξισώσεων ρηχών νερών, που χρησιμοποιήθηκε από τους SF05.



Σχήμα 4: Τιμές δειγματικού μέσου (κυανή τετμημένη γραμμή) και ακατέργαστες τιμές σε πραγματικό χρόνο (ερυθρή εστιγμένη-τετμημένη γραμμή) της ανύψωσης της ΕΕ ‘ η ’ [αριστερά] και της μέσης στο βάθος ταχύτητας ‘ U ’ [δεξιά] στο μέσο της ΖΘ, από πειράματα (exp) (μαύρη πλήρης γραμμή) και από προσομοιώσεις (sim).

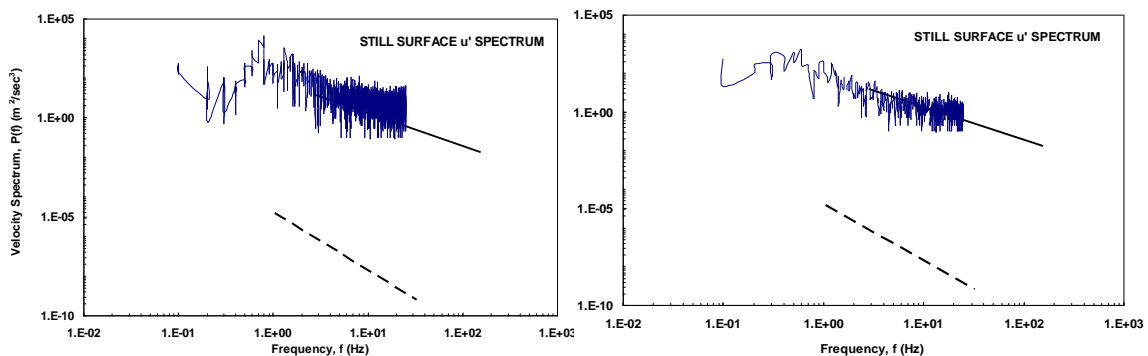


Σχήμα 5: Συγκρίσεις πειραματικών (exp) έναντι προσομοιωμένων (sim) τιμών τετραγωνικού μέσου (rms) για τη διακύμανση της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας ‘ $\eta_{\text{fluct,rms}}$ ’ [αριστερά] και την ολοκληρωμένη στο βάθος ταχύτητα ‘ U_{rms} ’ [δεξιά].

3.4 ΤΥΡΒΩΔΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ

3.4.1. Φάσματα Fourier των τυρβωδών διακυμάνσεων των ταχυτήτων

Στο Σχήμα 6 φαίνονται τα φάσματα Fourier $P_u(f)$ (f είναι η συχνότητα) των διακυμάνσεων των οριζόντιων συνιστωσών των ταχυτήτων $\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \langle \mathbf{u} \rangle$ στο επίπεδο της Μέσης Στάθμης Ηρεμίας (ΜΣΗ). Αυτά έχουν εξαχθεί από το διανυσματικό πεδίο των ταχυτήτων για τις περιπτώσεις 6 (αριστερό γράφημα) και 13 (δεξιό γράφημα), στην περιοχή έναρξης της θραύσης και την εσωτερη ΖΘ αντίστοιχα. Όλα τα φάσματα ακολουθούν τάση με κλίση $-5/3$ σε διλογαριθμικό διάγραμμα, τυπική της ισοτροπικής τύρβης (αδρανειακής υπο-κλίμακας), μέχρι $f=10\text{Hz}$. Αυτή η τάση κατά κάποιο τρόπο συνεχίζει ως το όριο του φίλτρου Nyquist $f=25\text{Hz}$ για τις περιπτώσεις λεπτομερούς χωρικής ανάλυσης και αποκλίνει οριζοντίως για τις περιπτώσεις αδρομερούς χωρικής διακριτοποίησης. Οι τυχαίες τυρβώδεις διακυμάνσεις πάνω από το όριο Nyquist έχουν χαθεί στη διαδικασία της μεσοστάθμισης κατά Nadaoka et al (1989). Βελτίωση των προηγούμενων σχετικών αποτελεσμάτων (Makris et al, 2010b & 2011) είναι εμφανής για τις υψηλές μπάντες συχνοτήτων (χωρικές διαστάσεις της ροής SPS) ή για τις μικρότερες από τις μεγάλες δίνες, τις οποίες επιλύει το μοντέλο SPH. Η λεπτομερής χωρική ανάλυση και το απαραίτητο πλήθος των κυματικών περιόδων καταγραφής, σε σχέση με παλαιότερες προσομοιώσεις, συνεισφέρουν θετικά στην αναβάθμιση των αποτελεσμάτων. Η χαρακτηριστική κλίση -3 στο διλογαριθμικό διάγραμμα, τυπική της δισδιάστατης πάγιας τύρβης (Lessieur, 1990), απεικονίζεται επίσης όπως και στους SF05, παρόλο που δεν αναπαράγεται σε κανένα μετρητή και βάθος. Οι SF05 αναφέρουν, ότι οι τυρβώδεις ποσότητες που υπολογίζουν, είναι μόνο οι υπερτεθειμένες τιμές υπολοίπων, σχετικά υψηλών συχνοτήτων f , που δεν αντιπροσωπεύουν όλη την τυρβώδη ενέργεια. Για αυτό το λόγο, η μελλοντική ενδελεχής ανάλυση των ορθών και διατμητικών τάσεων Reynolds και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας θα οριστικοποιήσει αν η υπολειμματική τύρβη πλησιάζει ή όχι στην ισοτροπία.

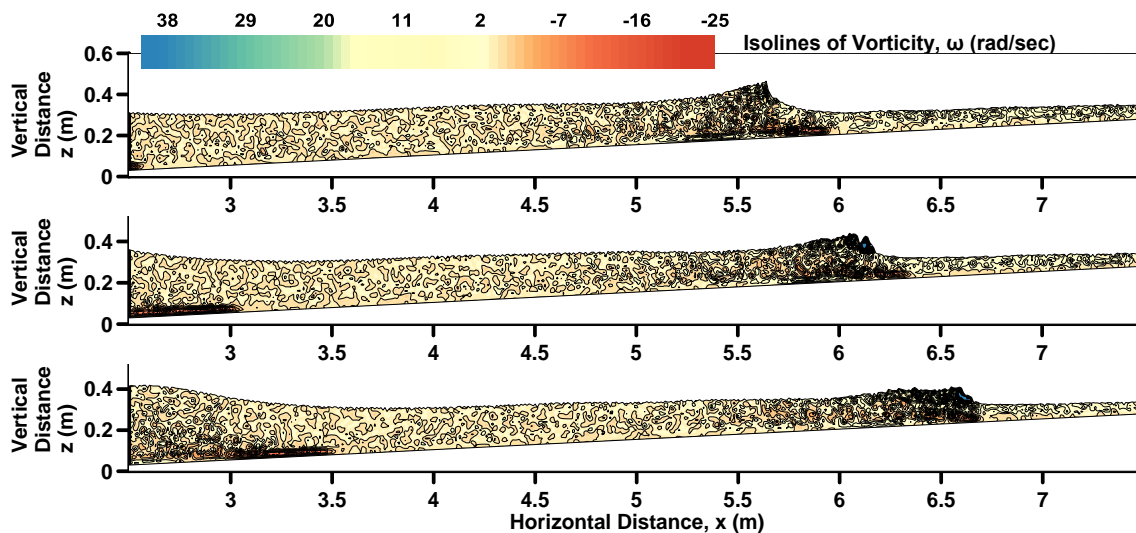


Σχήμα 6: Φάσματα Fourier των προσομοιωμένων τυρβωδών συνιστωσών των οριζόντιων ταχυτήτων u' για την περιοχή έναρξης της θραύσης της περίπτωσης 6 [αριστερό γράφημα]. Ίδιο μέγεθος για την εσωτερη ΖΘ της περίπτωσης 13 [δεξιό γράφημα]. Μετρήσεις στο επίπεδο της ΜΣΗ.

3.4.2. Συνεκτικές τυρβώδεις δομές

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται, σε δισδιάστατες κατακόρυφες διατομές, τα μορφώματα της στροβιλότητας, η οποία εμφανίζεται περιοδικά με το πέρασμα των μονοχρωματικών κυμάτων. Αυτές οι διατάξεις αποτελούν συνεκτικές τυρβώδεις δομές, που εμπεριέχουν από μεγάλης κλίμακας στροβίλους μέχρι μέσης κλίμακας περιδινήσεις και μικρότερης κλίμακας δίνες. Η στροβιλότητα λαμβάνει αξιοπρόσεκτες τιμές στον

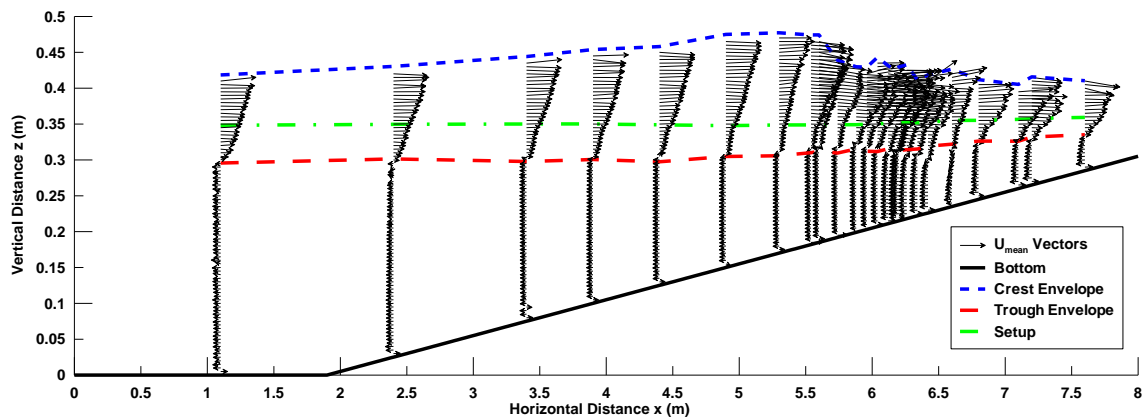
πόδα του επιφανειακού στροβίλου, όπως ακριβώς αναφέρεται και από τους Peregrine & Svendsen (1978). Ακολουθώς η συγκεντρωμένη στροβιλότητα διασπείρεται σε όλη την περιοχή του επιφανειακού στροβίλου μέχρι την έναρξη της διεργασίας της θραύσης τύπου κατάδυσης. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας, διακριτές πολλαπλές στροβιλώδεις δομές γίνονται εμφανείς. Πολύ γρήγορα αυτές απλώνονται και καταλαμβάνουν το χώρο κοντά και κατά μήκος της ΕΕ, καθώς ο σχηματισμός τύπου αντίστροφου υδραυλικού άλματος μορφοποιείται μετά τη θραύση. Στη συνέχεια οι εν λόγω δίνες εφελκούνται οριζόντια, όπως ακριβώς αναφέρεται και από τους SF05. Ταυτόχρονα εμφανίζεται ένα πυκνό και παχύ στρώμα θετικής στροβιλότητας (δηλ. ωρολογιακής φοράς περιδινήσεις), το οποίο εκτείνεται από την ΕΕ ως το επίπεδο της κοιλίας του κύματος. Παράλληλα ένα λεπτό στρώμα πυκνής αρνητικής στροβιλότητας (δηλ. αντι-ωρολογιακής φοράς περιδινήσεις) κυριαρχεί κοντά στον πυθμένα, όπως αναφέρεται από τους SF05 και Nadaoka et al (1989). Στην περιοχή έναρξης της θραύσης και τον πόδα του θραυόμενου κύματος, η μέγιστη προσομοιωμένη ακατέργαστη στροβιλότητα είναι διπλάσια σε σύγκριση με τη μέση στροβιλότητα (65 sec^{-1}) στα πειράματα των SF05. Αυτή απομειώνεται γρήγορα περίπου στο μισό και διατηρεί την τιμή της στην περιοχή προέλασης του αντίστροφου υδραυλικού άλματος, όπου οι συνεκτικές δίνες διασπείρονται αισθητά κατά μήκος της ΕΕ, όπως και στους SF05. Σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές του υπολογιστικού πεδίου, η ροή είναι σχεδόν αστρόβιλη εκτός από την περιοχή ανάντι του θραυόμενου κύματος, όπου παρατηρούνται ποσότητες αργά μεταφερόμενης υπολειμματικής στροβιλότητας χαμηλών τιμών, λόγω του περάσματος των προηγούμενων κυματισμών (Σχήμα 1). Παραμένουσες διαμήκειες δομές αρνητικής στροβιλότητας, όμοιες με στρώμα ανάμιξης, παρατηρούνται κοντά στον πυθμένα μπροστά από τον επιφανειακό στρόβιλο (SF05 και Nadaoka et al, 1989). Η τοπολογία, τα ποιοτικά και τα ποσοτικά χαρακτηριστικά αυτών των συνεκτικών δομών εντός ΖΘ είναι πολύ σημαντικά για την ανακίνηση και την αώρηση του πυθμενικού ιζήματος. Οι εν λόγω δομές δρουν ως περικλειστοί θύλακες, οι οποίοι μεταφέρουν το ίζημα, διαμορφώνοντας έτσι τη στερεομεταφορά εγκάρσια στην ακτή.



Σχήμα 7: Στιγμιότυπα του πεδίου στροβιλότητας για τη θραύση παράκτιων κυματισμών τύπου κατάδυσης από τις προσομοιώσεις με το μοντέλο SPHysics. Συνεκτικές τυρβώδεις δομές για δίνες μεγάλης και μεσαίας κλίμακας.

3.5 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΣΤΗΝ ΑΚΤΗ ΚΥΜΑΤΟΓΕΝΗ ΡΕΥΜΑΤΑ

Επιπρόσθετα γίνεται εστίαση στην προσομοίωση των κυματογενών μέσων στο χρόνο ροών εντός ΖΘ, συγκεκριμένα το εγκάρσιο στην ακτή ρεύμα επιστροφής (undertow) και την εγκάρσια προς την ακτή ροή μεταφοράς μάζας (ρεύμα Stokes). Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται τα μέσα στο χρόνο κινηματικά χαρακτηριστικά για όλο το υπολογιστικό πεδίο και την περίπτωση ελέγχου 11. Το ρεύμα Stokes πάνω από το επίπεδο της κοιλίας και το ρεύμα επιστροφής κάτω από αυτό, είναι ευκρινώς ορατά. Ακόμα και η αναστροφή της ροής στην οριακή στοιβάδα κοντά στον πυθμένα προς την ακτή αναπαράγεται ποιοτικά ευλογοφανώς. Η μεσοστάθμιση του διανυσματικού πεδίου των ταχυτήτων γίνεται για τη 'βρεγμένη' περίοδο (δηλ. το χρόνο για τον οποίο ένα σημείο είναι βυθισμένο στο νερό μέσα στη διάρκεια μιας κυματικής περιόδου) προκαλώντας έτσι την εμφάνιση των μέγιστων τιμών στο επίπεδο της περιβάλλουσας των κορυφών του κύματος ακριβώς όπως και στους SF05. Ολοκληρώνοντας κατά την πραγματική κυματική περίοδο οι κατακόρυφες κατανομές των μέσων ταχυτήτων συγκλίνουν σε μηδενικές τιμές στην περιβάλλουσα των κυματοκορυφών, όπως παρουσιάζεται και από τους Svendsen & Lorenz (1989). Οι μέγιστες τιμές για αυτές τις κατανομές εντοπίζονται κατά τη διάρκεια της έναρξης της θραύσης και διατηρούνται υψηλές κατά την προέλαση του αντίστροφου υδραυλικού άλματος. Τα μεγέθη τους ελαττώνονται σε πολύ μικρές τιμές στο επίπεδο της περιβάλλουσας των κοιλίων και κάτω από αυτήν, αφού η 'βρεγμένη' περίοδος καταγραφής ταυτίζεται με την πραγματική κυματική περίοδο T , σε αυτήν την περιοχή. Ακόμα μια θετική απόδοση του μοντέλου SPHysics είναι η αποτύπωση της προελαύνουσας μη γραμμικότητας των κυματισμών μέχρι το σημείο έναρξης της θραύσης. Το επίπεδο της μέσης παράκτιας κυματογενούς ανύψωσης της ΕΕ βρίσκεται σε αληθοφανές σημείο σε σχέση με τις περιβάλλουσες των κοιλίων και των κορυφών των κυματισμών για όλο το εύρος του πεδίου. Η περιοχή της ΖΘ στο Σχήμα 8 εμφανίζει πολύ μεγάλες ομοιότητες με την αντίστοιχη αναπαράσταση στο άρθρο των SF05.



Σχήμα 8: Κατακόρυφες κατανομές των διανυσμάτων των μέσων στο χρόνο 'βρεγμένων' ταχυτήτων από διακριτούς μετρητές σε όλο το πεδίο. Διάκριση των ρευμάτων επιστροφής και Stokes, οριοθετημένων από τις περιβάλλουσες της κοιλίας (ερυθρή ευρεία τετμημένη γραμμή), της κορυφής (κυανή βραχεία τετμημένη γραμμή) και της κυματογενούς ανύψωσης της ΕΕ (πράσινη εστιγμένη-τετμημένη γραμμή).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ενδελεχώς η υδροδυναμική συμπεριφορά παράκτιων μη γραμμικών μονοχρωματικών κυματισμών, που θραύονται με μορφή ασθενούς κατάδυσης πάνω σε ήπια κεκλιμένη αδιαπέρατη επιφάνεια. Γίνεται χρήση της

μεθόδου αριθμητικής προσομοίωσης SPH σε συνδυασμό με ένα μοντέλο SPS για το 'κλείσιμο' της τύρβης, παρομοίως με τα μοντέλα τύπου LES-SGS. Επιχειρείται βαθμονόμηση, μέσω λεπτομερούς χωρικής διακριτοποίησης, της πιο πρόσφατης εκδοχής του μοντέλου SPHysics v.2 έναντι των πειραματικών δεδομένων των Stansby & Feng (2005). Επιτυγχάνεται συμφωνία αναφορικά με την κατανομή των υψών κύματος, τη μέση κυματογενή ανύψωση της ΕΕ, τις περιβάλλουσες των κορυφών και των κοιλίων των κυμάτων, τις τιμές δειγματικού και τετραγωνικού μέσου της ανύψωσης της ΕΕ και των μέσων στο βάθος ταχυτήτων. Επιπρόσθετα διερευνώνται τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της υδροδυναμικής ροής εντός της ΖΘ. Τα φάσματα Fourier των τυρβωδών συνιστωσών των ταχυτήτων αποκαλύπτουν ιστροπική συμπεριφορά της τύρβης για σχετικά υψηλές συχνότητες μόνο σε περιοχές με έντονα διατμητικά φαινόμενα, όπως η ΕΕ στην περιοχή έναρξης της θραύσης. Συνεκτικές τυρβώδεις δομές και επαναλαμβανόμενα μορφώματα στροβιλότητας αναπαράγονται με πολύ ικανοποιητικό τρόπο σε σύγκριση με αντίστοιχες πειραματικές μελέτες (Nadaoka et al, 1989 και Stansby & Feng, 2005). Επιπλέον οι μέσες στο χρόνο τιμές των αριθμητικών κινηματικών χαρακτηριστικών της ροής δείχνουν, ότι οι μέσες κυματογενείς ροές (ρεύμα Stokes και επιστροφής) προσομοιώνονται ικανοποιητικά, αφού αποδίδονται παρόμοια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα πειραματικά των Stansby & Feng (2005).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Cox, D.T., Kobayashi, N. and Okayasu, A., 1994. *Vertical Variations of Fluid Velocities and Shear Stress in Surf Zones*. Proc. 24th ICCE, Kobe, ASCE, pp. 98-112.
- Dalrymple, R.A. and Rogers, B.D., 2006. *Numerical Modeling of Water Waves with the SPH Method*. Coast. Eng., Vol. 53, pp. 141-147.
- Gómez-Gesteira, M., Rogers, B.D., Dalrymple, R.A., Crespo, A.J.C. and Narayanaswamy, M., 2010a. *User Guide for the SPHysics Code v2.0*.
- Gómez-Gesteira, M., Rogers, B.D., Dalrymple, R.A. and Crespo, A.J.C., 2010b. *State-of-the-art of Classical SPH for Free-Surface Flows*. J. Hydr. Res., Vol. 48, pp. 6-27.
- Khayyer, A., Gotoh, H. and Shao, S.D., 2005. *Corrected Incompressible SPH Method for Accurate Water-Surface Tracking in Breaking Waves*. Coast. Eng., Vol. 55, pp. 236-250.
- Lesieur, M., 1990. *Turbulence in Fluids*, 2nd Ed., Kluwer.
- Makris, C.V., Memos, C.D. and Krestenitis, Y.N., 2009. *Numerical Simulation of Near-Shore Wave Breaking Using SPH Method*. Proc. 4th Int. Short Conf. on Applied Coast. Res. (SCACR), Barcelona, pp. 241-252.
- Makris, C.V., Krestenitis, Y.N. and Memos, C.D., 2010a. *SPH Numerical Simulation of Surf Zone Characteristics*. Proc. 6th Int. Symp. on Env. Hydr., Athens, Vol. 1, pp. 445-450.
- Makris, C.V., Krestenitis, Y.N. and Memos, C.D., 2010b. *SPHysics Code Validation Against a Near-shore Wave Breaking Experiment*. Proc. 5th Int. SPH Eur. Res. Interest Community Workshop, Manchester, pp. 245-252.
- Makris, C.V., Memos, C.D. and Krestenitis, Y.N., 2011. *Modeling of Breaking Wave Dynamics, Surf Zone Turbulence and Wave-Induced Mean Flows with the SPH Numerical Method*. Proc. 5th Int. Short Conf. on Applied Coast. Res., Aachen, pp. 507-514.
- Monaghan, J.J., 2005. *Smoothed Particle Hydrodynamics*. Rep. Prog. Phys., Vol. 68, pp. 1703-1759.

- Nadaoka, K., Hino, M. and Koyano, Y., 1989. *Structure of the Turbulent Flow Field Under Breaking Waves in the Surf Zone*. J. Fluid Mech., 204: 359-387.
- Peregrine, D.H. and Svendsen, I.A., 1978. *Spilling Breakers, Bores and Hydraulic Jumps*. Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng., Hamburg, ASCE, pp. 540-550.
- Shao, S. and Ji, C., 2006. *SPH Computation of Plunging Waves Using a 2-D Sub-Particle Scale (SPS) Turbulence Model*. Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 51, pp. 913-936.
- Stansby, P.K. and Feng, T., 2005. *Kinematics and Depth-Integrated Terms in Surf Zone Waves from Laboratory Measurement*. J. Fluid Mech., Vol. 529, pp. 279-310.
- Stive, M.J.F., 1984. *Energy Dissipation in Waves Breaking on Gentle Slopes*. Coast. Eng., Vol. 8, pp. 99-127.
- Svendsen, I.A. and Lorenz, R.S., 1989. *Velocities in Combined Undertow and Longshore Currents*. Coast. Eng., Vol. 13, pp. 55-79.
- Ting, F.C.K. and Kirby, J.T., 1994. *Observation of Undertow and Turbulence in a Laboratory Surf Zone*. Coast. Eng., Vol. 24, pp. 51-80.