

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΔΙΑ ΜΕΣΟΥ ΥΦΑΛΩΝ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΩΝ

Χ. Β. Μακρής⁽¹⁾, Υποψήφιος Διδάκτορας Α.Π.Θ., Ε.Θ.Υ.Θ.Ε.
Κ. Δ. Μέμος⁽²⁾, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Ε.Λ.Ε.

⁽¹⁾Εργαστήριο Θαλάσσιας Υδραυλικής & Θαλασσιών Έργων (Ε.Θ.Υ.Θ.Ε.),
Τομέας Υδραυλικής & Τεχνικής Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.),
54124, Τηλ-Fax: 2310 995668-49, e-mail: cmakris@civil.auth.gr

⁽²⁾Εργαστήριο Λιμενικών Έργων (Ε.Λ.Ε.),
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π.),
Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15780 Ζωγράφος, Τηλ-Fax: 210 7722851-3,
e-mail: memos@hydro.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις μέρες μας, νέες μορφές παρακτίων έργων ερευνώνται, λαμβάνοντας υπόψη την αισθητική αξία του παράκτιου τοπίου. Ανάμεσα σε αυτές, οι Ύφαλοι Κυματοθραύστες (Υ/Κ) προσελκύουν όλο και περισσότερο την προσοχή των μελετητών για προφανείς λόγους. Η μετάδοση του κυματικού πεδίου κατάντη τέτοιων κατασκευών έχει μελετηθεί στο πρόσφατο παρελθόν, κυρίως σε εργαστηριακές διατάξεις και λιγότερο με υπολογιστικές μεθόδους. Μία πλευρά του ζητήματος που δεν έχει μελετηθεί εκτενώς είναι η επίδραση του πορώδους της κατασκευής στον παραπάνω συντελεστή κυματικής μετάδοσης. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται μία επισκόπηση των μεθόδων υπολογισμού του πιο πάνω συντελεστή σε Υ/Κ, βασισμένη στη χρήση διαφόρων ημι-εμπειρικών εκφράσεων και αριθμητικών προσομοιωμάτων, στο πλαίσιο μιας πρωτότυπης εφαρμογής δύο συγγραμικών αποσπασμένων Υ/Κ για την προστασία ελαφρών παράκτιων κατοικιών πάνω σε πασσάλους. Στόχος είναι η αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων και των σχέσεων, η επισήμανση της μελλοντικής ερευνητικής πορείας πάνω στο αντικείμενο και η ανάδειξη χρήσιμων τεχνικών συστάσεων προς τον μελετητή μηχανικό. Παράλληλα, εξετάζεται η επιρροή της διαπερατότητας του Υ/Κ και της τριβής του νερού στην εξωτερική στρώση θωράκισης, στον υπολογισμό του συντελεστή κυματικής μετάδοσης. Βρέθηκε πρώτον ότι η ικανότητα πρόβλεψης των προσομοιώσεων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη θεώρηση του κατάλληλου μοντέλου θραύσης των κυματισμών και δεύτερον ότι το πορώδες της κατασκευής παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του συντελεστή. Ο τελευταίος φαίνεται ότι μπορεί να συναχθεί ικανοποιητικά από ένα κυματικό μοντέλο και μία εμπειρική σχέση. Η τριβή στην επιφάνεια του Υ/Κ, αποδεικνύεται ότι έχει μικρότερη επίδραση από την διαπερατότητά του, στον υπολογισμό του συντελεστή μετάδοσης.

WAVE TRANSMISSION THROUGH SUBMERGED BREAKWATERS

C. V. Makris⁽¹⁾, PhD Candidate AUTH, LMHMW
C. D. Memos⁽²⁾, Professor NTUA, LHW

⁽¹⁾Laboratory of Maritime Hydraulics & Maritime Works (LMHMW),
Division of Hydraulics & Environmental Engineering, Dept. of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH), Macedonia, Greece
54124, Tel-Fax: +30 2310 995668-49, e-mail: cmakris@civil.auth.gr

⁽²⁾Laboratory of Harbour Works (LHW),
School of Civil Engineering, National Technical University of Athens (NTUA),
5 Heroon Polytechniou, 15780 Zografos, Greece, Tel-Fax: 210 7722851-3,
e-mail: memos@hydro.ntua.gr

ABSTRACT

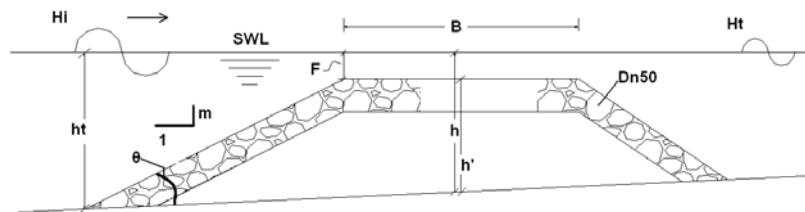
New forms of coastal structures are being investigated nowadays, catering also for the aesthetic value of the nearshore landscape. Among those structures, the submerged breakwater (S/B) is becoming attractive to the coastal engineer for obvious reasons. The wave transmission behind such structures and the associated coefficient has been studied extensively in the recent past, mostly through laboratory experimental configurations and to a lesser extent through computational simulations of wave – structure interaction. However, an aspect not thoroughly investigated so far is the effect of the structure porosity on the above coefficient. In this paper a review of the calculation methods for the transmission coefficient over submerged breakwaters is given, as well as application of several semi-empirical formulas and numerical models to an unconventional case project, comprising two co-linear detached S/B aiming at the protection of light coastal residences, built on piles. The objective is to assess the performance of these tools, pinpoint research paths for their improvement and formulate useful technical recommendations for the designer engineer. Simultaneously, the influence that the permeability of S/Bs and the friction along the external armour layer of S/Bs have on the wave transmission coefficient, is being investigated. Firstly, it was found that the prediction capability of computational simulations depends essentially on the proper implementation of the wave breaking module and secondly, that porosity can have a significant effect on the calculation of the transmission coefficient. In this relevance, it seems that the latter can be adequately described by one of the wave models tested and by an empirical formula. The bed friction was found to have a smaller effect on the wave transmission coefficient than permeability has.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προστασία της παράκτιας ζώνης αποτελεί προκλητικό πεδίο έρευνας λόγω της πολυπλοκότητας των φυσικών διεργασιών, οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε αυτήν. Στην εποχή μας, το ζήτημα περιπλέκεται ακόμα περισσότερο, καθώς ο λειτουργικός σχεδιασμός των σύγχρονων παράκτιων έργων προστασίας μετατρέπεται ολοένα και πιο πολύ σε ένα ερευνητικό πεδίο, όπου περιβαλλοντικά ζητήματα μπορούν να θέσουν αυστηρά κριτήρια σχεδιασμού αναφορικά με τη μορφή των κατασκευών, τα χρησιμοποιούμενα υλικά κτλ. Σε αυτό το πλαίσιο μία από τις κύριες περιβαλλοντικές μέριμνες σχετίζεται με τον περιορισμό της οπτικής επαφής με τον θαλάσσιο ορίζοντα, ο οποίος προκαλείται π.χ. από παραδοσιακού τύπου έξαλους κυματοθραύστες. Συνεκδοχικά νέες ηπιότερες μορφές ή «έξυπνες» παραλλαγές των παραδοσιακών κατασκευών ερευνώνται και λαμβάνουν κυρίαρχη θέση στο τεχνικό οπλοστάσιο του μηχανικού της παράκτιας ζώνης. Μεταξύ αυτών, οι κατασκευές χαμηλής στέψης (Low-Crested Structures, LCS) και ειδικότερα οι Ύφαλοι Κυματοθραύστες (Υ/Κ) ξεχωρίζουν.

Η κυματική μετάδοση πάνω και μέσα από το σώμα τέτοιων κατασκευών αποτελεί την βασική παράμετρο αποτίμησης γενικότερα της παρεχόμενης προστασίας στην υπήνεμη πλευρά των έργων αυτών και ειδικότερα του παράκτιου κυματικού πεδίου, της κίνησης των ιζημάτων, της μεταβολής της παράκτιας μορφολογίας κτλ. Πρωταρχικός παράγοντας εκτίμησης της αποτελεσματικότητας ενός τέτοιου έργου αποτελεί ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης $K_t = H_t/H_i$, δηλαδή ο λόγος του μεταδιδόμενου ύψους κύματος H_t στην υπήνεμη πλευρά της κατασκευής προς το επερχόμενο ύψος κύματος H_i στην προσήνεμη πλευρά του έργου (Σχ. 1). Σε πρόσφατη επιστημονική δημοσίευση (Makris & Memos, 2007) υπεδείχθη ότι η μετάδοση κυματικού πεδίου σε Υ/Κ μπορεί να συναχθεί ικανοποιητικά είτε από ημι-εμπειρικούς τύπους ή από υπολογιστικά προσομοιώματα διάδοσης κυματισμών.

Η παρούσα δημοσίευση επιχειρεί την αξιολόγηση των ημι-εμπειρικών τύπων, συγκρίνοντάς τους μεταξύ τους και σε σχέση με αποτελέσματα από κατάλληλες υπολογιστικές προσομοιώσεις (Makris & Memos, 2007). Ερευνάται ο ρόλος του πορώδους στον υπολογισμό του K_t ερευνάται και αξιολογείται η επίδρασή του. Επιπρόσθετα μελετάται η επιρροή της τριβής της μάζας του νερού, περιμετρικά της εξωτερικής στοιβάδας θωράκισης του Υ/Κ, στην κυματική μετάδοση.



Σχήμα 1. Τυπική διατομή Ύφαλου Κυματοθραύστη – Χαρακτηριστικά μεγέθη
Figure 1. Typical section of Submerged Breakwater – Characteristic features

2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Για την εκτίμηση του συντελεστή κυματικής μετάδοσης έγινε χρήση τριών προσομοιωμάτων εξέλιξης κυματικού πεδίου. Δύο εξ αυτών, τα PMS και BW, αποτελούν υπολογιστικά εργαλεία του ευρύτερου λογισμικού πακέτου MIKE 21 (DHI, 2005) και έχουν παρουσιαστεί εκτενώς σε προηγούμενη δημοσίευση (Makris & Memos, 2007). Σημειώνεται ότι η ροή διήθησης μέσα από το σώμα διαπερατών βυθισμένων κατασκευών, όπως Y/K από λιθορριπή, δεν συμπεριλαμβάνεται στο MIKE21 και αυτό μπορεί να εισάγει κάποιο ποσοστό λάθους στην ανάλυση, που γίνεται σημαντικό ειδικά για υψηλές τιμές του συντελεστή K_t . Το μοντέλο τρίτης γενιάς NSW του MIKE21 παραλείπεται από την έρευνα, καθώς βασίζεται στην αρχή διατήρησης της φασματικής ενεργειακής ροής της κυματικής δράσης και δεν μπορεί να λάβει υπόψη του την ανάκλαση του κυματικού πεδίου από ανάλογες κατασκευές, πράγμα σημαντικό στην έρευνά μας.

Το τρίτο μοντέλο, BWA, είναι ένα αναβαθμισμένο κυματικό μοντέλο τύπου Boussinesq για πορώδεις ύφαλες κατασκευές (Avgeris et al., 2004). Πρόκειται για ένα αριθμητικό προσομοίωμα με εξισώσεις ανώτερης τάξης και βελτιωμένα χαρακτηριστικά (γραμμικής) διασποράς, το οποίο συμπεριλαμβάνει επιπλέον όρους αλληλεπίδρασης του επερχόμενου κυματικού πεδίου και της ροής μέσα στο πορώδες σώμα της κατασκευής. Οι κυρίαρχες εξισώσεις ποσότητας κίνησης, τύπου Boussinesq, συνδυάζονται στην περιοχή του Y/K με μία ολοκληρωμένη κατά το βάθος εξίσωση ορμής Darcy-Forchheimer, η οποία περιγράφει τη ροή σε αδρομερές πορώδες μέσο, εσωτερικά του Y/K.

2.1 ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΡΑΥΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Ο υπολογισμός των ενεργειακών απωλειών λόγω θραύσης των κυματισμών αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα για την ορθή βαθμονόμηση των μοντέλων κυματικής διάδοσης σε ρηχά νερά. Για το μοντέλο PMS εξετάστηκαν τέσσερις προσεγγίσεις θραύσης λόγω περιορισμού του βάθους θάλασσας, τύπου αντίστροφου υδραυλικού άλματος (bore). Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν η βασική σχέση των Battjes & Janssen (BJ, 1978), η τροποποίηση των Battjes & Stive (BS, 1985), η μετατροπή κατά τον Nelson (1987) και τελικά αυτή του Johnson (2006). Οι πρώτες τρεις έχουν αναπτυχθεί για θραύση κυματισμών σε ακτές με σχετικά ήπια κλίση πυθμένα, ενώ η τελευταία για κυματική θραύση πάνω από ύφαλες κατασκευές με σχετικά απότομες κλίσεις πρανών. Οι εκφράσεις των παραπάνω υπολογιστικών εργαλείων εφαρμόστηκαν «εξωτερικά» στο κυματικό μοντέλο PMS, Makris & Memos (2007).

Στο υπολογιστικό προσομοίωμα BW, η θραύση των κυμάτων εισάγεται στη βάση της υπόθεσης 'επιφανειακού κυλίνδρου' για θραυόμενους κυματισμούς τύπου υπερχειλίσσης (spilling breakers) κατά Madsen et al. (1997). Η έναρξη της θραύσης λαμβάνει χώρα όταν η τοπική κλίση της E/E υπερβεί τις 20° ($\sim 10^\circ$ για Y/K). Στις περιοχές όπου δεν μπορεί να επιλυθεί η προηγούμενη εφαρμογή, χρησιμοποιείται ρητό αριθμητικό φίλτρο αφαίρεσης υψίσυχων αρμονικών. Αντίστοιχα στο μοντέλο BWA γίνεται χρήση της μεθόδου θραύσης με βάση την τυρβώδη συνεκτικότητα των Kennedy et al. (2000). Οι πρόσθετοι όροι ενεργειακών απωλειών λόγω θραύσης στην εξίσωση ποσότητας κίνησης εξαρτώνται από τον συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας, ο οποίος είναι με τη σειρά του συνάρτηση της θέσης και του χρόνου. Οι εμπειρικές τιμές των παραμέτρων ελέγχου έναρξης και πάσης της διεργασίας της θραύσης $\eta_t^{(D)}$ και $\eta_t^{(F)}$ τίθενται ίσες με $0.35(gh)^{1/2}$ και $0.15(gh)^{1/2}$

αντίστοιχα, όπου h το βάθος θάλασσας στην περιοχή, Kirby et al. (1998). Τέλος εφαρμόζεται εργαλείο αριθμητικής εξομάλυνσης υψίσυχνων ασταθειών (Sharifo, 1970).

2.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΤΡΙΒΗΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ

Στο μοντέλο PMS ο ρυθμός της ενεργειακής σκέδασης λόγω τριβής στον πυθμένα μορφοποιείται με την εισαγωγή ενός όρου απωλειών στην κυρίαρχη εξίσωση. Τα μοντέλα BW και BWA συνδυάζονται με τον κλασσικό νόμο τριβής, ο οποίος εκφράζει την διατμητική τάση στο στερεό πυθμενικό όριο με βάση το τετράγωνο της ταχύτητας. Αμφότερες οι σχέσεις ανάγονται στον υπολογισμό του συντελεστή τριβής στον πυθμένα λόγω κυμάτων f_w , ο οποίος σε ακτές λαμβάνει τυπικές τιμές από 10^{-3} έως 10^{-2} για λεπτόκοκκο και αδρομερές πυθμενικό υλικό αντίστοιχα. Στην περιοχή του Y/K ο f_w διαφοροποιείται από τις συνήθεις τιμές και υπολογίστηκε μέσω των εκφράσεων των Madsen & White (1976). Στο υπόλοιπο υπολογιστικό πεδίο, χωρίς έντονες αλλαγές βαθυμετρίας, λήφθηκε από την εμπειρική σχέση των Svendsen & Jonsson (1980), μέσω της παραμέτρου τραχύτητας κατά Nikuradse $k_N=2.5D_{n50}$ (Nielsen, 1979), όπου D_{n50} η μέση διάμετρος κόκκου πυθμενικού ιζήματος.

3. ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΥΦΑΛΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ

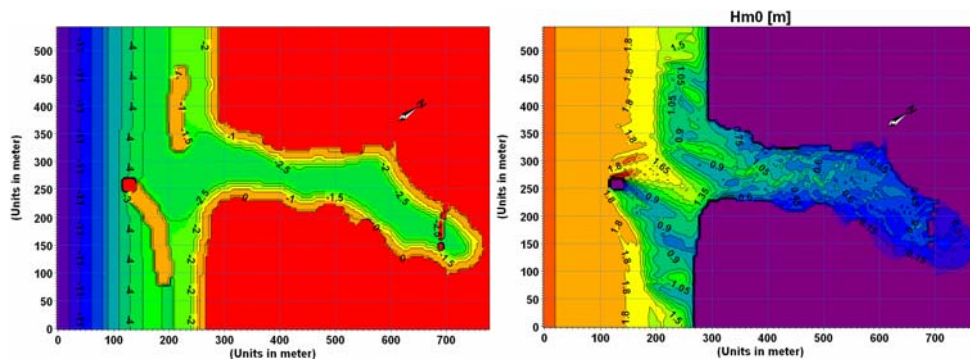
Στην παρούσα έρευνα εφαρμόστηκαν τέσσερις σχέσεις υπολογισμού του K_t , Μακρής (2007). Η συνέπεια των αποτελεσμάτων ελέγχθηκε ως προς την επίδοσή τους σε σχέση με τις υπολογιστικές προσομοιώσεις, κύρια σε σχέση με το πορώδες του Y/K. Χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις των VdMeer & d'Angremond (1991), των D'Angremond et al. (1996), των Seabrook & Hall (1998) και των Friebel & Harris (2003). Επίσης εφαρμόζεται ο εμπειρικός κανόνας (RoT) των Burcharth et al. (2006) για γρήγορη εκτίμηση του D_{n50} μέσω της έκφρασης $D_{n50} \geq 0.29(h-F)$.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Η εφαρμογή αφορά έργο στην Άκαμπα της Ιορδανίας στις ακτές της βόρειας Ερυθράς Θάλασσας. Πρόκειται για μία τεχνητή κόλπωση 6.2 εκταρίων για δραστηριότητες αναψυχής. Στο Σχ. 2α φαίνεται η κάτοψη της περιοχής και των δύο Y/K που στόχο έχουν τη μείωση της κυματικής όχλησης παράκτιων κατασκευών και την προστασία της ακτογραμμής από διάβρωση. Στο Σχ.2β δίδεται τυπικό διάγραμμα κυματικής αναταραχής σύμφωνα με το μοντέλο PMS.

4.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟΥΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ

Οι τιμές των βασικών μεγεθών στην έρευνα περιγράφονται εκτενώς από τους Makris & Memos (2007). Η τιμή του D_{n50} , για τον υπολογισμό του K_t από τις εμπειρικές σχέσεις στον Y/K, υπολογίστηκε σύμφωνα με VdMeer (1991) από 0.52m έως 0.56m για τις διάφορες υδρογραφικές συνθήκες υπό εξέταση και 0.51m έως 0.55m από τον RoT.



Σχήμα 2. α) Κάτοψη περιοχής β) Αντίστοιχα αποτέλεσμα από 2D PMS για 10yr H_s
Figure 2. a) Reference plan b) Representative results of 2D PMS for 10yr H_s

4.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

Επιπρόσθετα σε όλα τα μοντέλα λήφθηκε συντελεστής τριβής $f_w=0.15$ στην περιοχή του Υ/Κ, ακολουθώντας την πρόταση του Van Gent (1995), ενώ εκτιμήθηκε η παράμετρος τραχύτητας κατά Nikuradse $k_N=0.3\text{mm}$ ($f_w \approx 0.006$) για τον πυθμένα από μετρήσεις. Η παράμετρος ελέγχου της θραύσης λόγω περιορισμού του βάθους κατά Johnson (2006) για το μοντέλο PMS υπολογίστηκε και εφαρμόστηκε εξωτερικά ως $\gamma_2=1.262$ για 10yr και $\gamma_2=1.355$ για 50yr περίοδο επαναφοράς. Για το μοντέλο BWA θεωρήθηκε στον Υ/Κ $D_{n50}=0.52\text{m}$, πορώδες $\phi=0.5$, $\alpha=1100$, $\beta=1.2$. Η επιλογή για το ϕ είναι αντιπροσωπευτική για Υ/Κ με μία κατασκευαστική στρώση θωράκισης σε φυσικά εργαστηριακά μοντέλα. Οι εμπειρικές παράμετροι α και β σχετίζονται με τον τύπο του υλικού πλήρωσης, τη διάμετρο των κόκκων και τα χαρακτηριστικά της ροής και προτείνονται από τον Van Gent (1995).

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Στον Πιν. 1 παρουσιάζεται ο συντελεστής κυματικής μετάδοσης K_t που υπολογίστηκε από τις τέσσερις προαναφερθείσες σχέσεις, για τέσσερις ξεχωριστές κυματικές συνθήκες. Η σχέση των Seabrook & Hall (1998) περιλαμβάνει την παράμετρο D_{n50} και παράγει αποτελέσματα που αντιστοιχούν περίπου στη μέση τιμή των αποτελεσμάτων K_t για τις τέσσερις συνθήκες υπό έλεγχο, όπως έχει υποδειχθεί και σε παλαιότερη έρευνα (Maktis & Memos, 2007). Συνεπώς αυτή η σχέση διατηρείται στη συνέχεια ως η πιο κατάλληλη για σύγκριση με τα μοντέλα, κύρια σε σχέση με την επιρροή της διαπερατότητας του Υ/Κ.

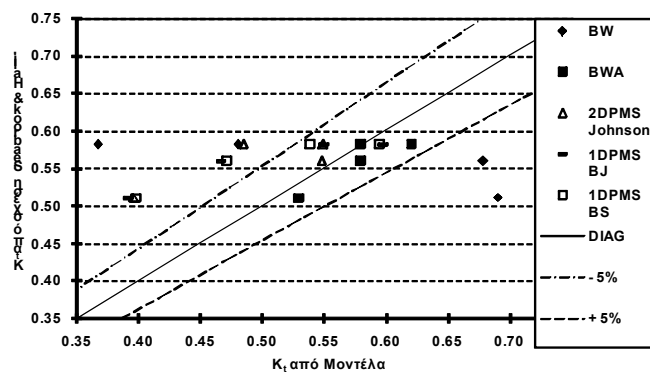
5.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΕ ΤΥΠΟΥΣ

Σύγκριση ανάμεσα σε αποτελέσματα του K_t που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις και από την εφαρμογή της έκφρασης των Seabrook & Hall (1998) παρουσιάζεται στο Σχ. 3. Στο σχήμα αυτό έχουν χαραχθεί και γραμμές απόκλισης κατά $\pm 5\%$. Σημειώνεται ότι το

μοντέλο BWA συμπεριφέρεται ικανοποιητικά εφόσον ανταποκρίνεται στην απαίτηση προσομοίωσης της ροής σε πορώδεις Υ/Κ.

Πίνακας 1. Συντελεστές κυματικής μετάδοσης από εμπειρικούς τύπους και μοντέλα
Table 1. Wave transmission coefficients by empirical formulas and models

Εμπειρική Σχέση		H_s 10yr	H_{max} 10yr	H_s 50yr	H_{max} 50yr
VdMeer & d'Angremond		0.695	0.631	0.677	0.652
D'Angremond et al.		0.342	0.425	0.503	0.474
Seabrook & Hall (RoT)	$M\sigma H$	0.551	0.482	0.540	0.518
	K/P	0.581	0.511	0.581	0.559
Friebel & Harris		0.472	0.417	0.526	0.508
Υπολογιστικό Μοντέλο		H_s 10yr	H_{max} 10yr	H_s 50yr	H_{max} 50yr
1D PMS	BJ	0.550	0.393	0.598	0.466
	B S	0.539	0.399	0.595	0.472
	Nelson	0.443	0.392	0.484	0.467
	Johnson	0.688	0.448	0.725	0.464
2D PMS	BJ	0.464	0.369	0.431	0.525
	BS	0.460	0.373	0.431	0.531
	Nelson	0.384	0.317	0.337	0.573
	Johnson	0.549	0.396	0.484	0.548
BW		0.367	0.690	0.480	0.678
BWA		0.580	0.530	0.620	0.580



Σχήμα 3. Σύγκριση ανάμεσα σε K_t από μοντέλα με K_t από σχέση Seabrook & Hall
Figure 3. Comparison between K_t from models and K_t from Seabrook & Hall formula

Αντίθετα το μοντέλο BW παρέχει αποτελέσματα, τα οποία εντοπίζονται όλα εκτός της αποδεκτής ζώνης απόκλισης $\pm 5\%$. Οι διάφορες εκφράσεις του μοντέλου PMS δίνουν

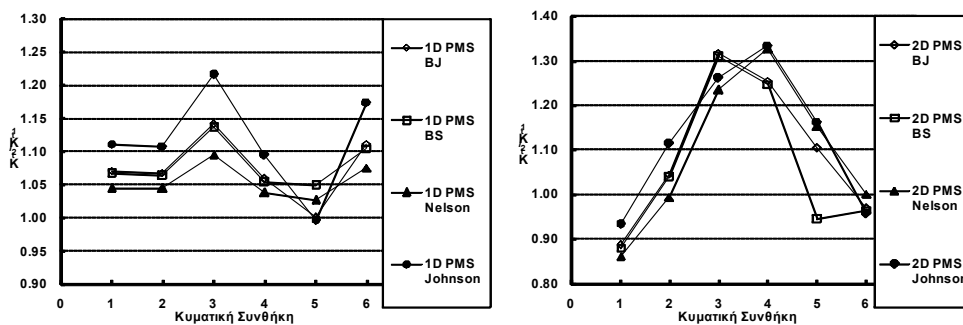
αποτελέσματα περίπου στο μέσο ανάμεσα στα δύο άκρα. Ειδικότερα το μοντέλο του Johnson (2006) σε συνδυασμό με το 2D PMS προβλέπει πολύ καλά τις τιμές του K_t , καθώς έχει επί της ουσίας βαθμονομηθεί για αυτό το σκοπό, ενώ γενικά υποεκτιμά το ποσοστό των ενεργειακών απωλειών λόγω θραύσης (Makris & Memos, 2007). Αναφορικά με το 1D PMS μπορεί να παρατηρηθεί ότι αποδίδει ικανοποιητικά με τα μοντέλα BJ και BS. Αυτά έχουν παραχθεί αρχικά για θραύση κυμάτων σε σχετικά ήπιες κλίσεις ακτών και συνεπώς πρέπει να υπερεκτιμούν τη θραύση σε απότομα πρανή Y/K . Την ίδια στιγμή οι Makris & Memos (2007) έχουν δείξει ότι το 1D PMS υπερεκτιμά τον συντελεστή K_t , σε σχέση με το 2D PMS, όταν αγνοείται η διεργασία της θραύσης. Συνακόλουθα είναι εύλογο οι δύο αντίθετες διεργασίες να αλληλοεξουδετερώνονται και δύο από τα αποτελέσματα του 1D PMS να βρίσκονται σε συμφωνία με τις τιμές της εμπειρικής σχέσης υπό δοκιμή.

5.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΥΘΜΕΝΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ ΣΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ K_t

Εκτός από την επιρροή της διαπερατότητας του Y/K στην κυματική μετάδοση εξετάζεται και η τριβή της μάζας του νερού στην περίμετρο της τυπικής διατομής του έργου μέσω των μοντέλων PMS και BW. Εφαρμόζονται τα εξής δύο σύνολα τιμών:

- (i) $k_N=0.3\text{mm}$ (στον πυθμένα πεδίου), $k_N=12.5\text{mm}$ ή $f_w \approx 0.02$ (στον Y/K)
- (ii) $k_N=0.3\text{mm}$ (στον πυθμένα πεδίου), $f_w=0.15$ (στον Y/K)

Αν δηλώσουμε ως K_{t1} και K_{t2} τους συντελεστές κυματικής μετάδοσης λόγω $f_w=0.15$ και $f_w=0.02$ αντίστοιχα, τότε ο λόγος K_{t2}/K_{t1} για το μοντέλο PMS παρουσιάζεται στο Σχ. 4 για διάφορες κυματικές συνθήκες και προσεγγίσεις της θραύσης. Οι συνθήκες 1, 2, 3 αντιστοιχούν στο σημαντικό ύψος κύματος H_s από φάσματα Jonswap και TMA και το μέγιστο ύψος H_{max} μονοχρωματικού κύματος για 10yr, ενώ οι 4, 5, 6 ανάλογα για 50yr.



Σχήμα 4. Αλλαγή του K_t λόγω μεταβολής του συντελεστή τριβής για 1D, 2D μοντέλο PMS
Figure 4. Change in K_t due to frictional variation for 1D, 2D PMS model

Όπως ήταν αναμενόμενο, ο παραπάνω συντελεστής είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις. Το ίδιο ισχύει και για τα αποτελέσματα του μοντέλου BW, για το οποίο όμως το εν λόγω κλάσμα δεν ξεπερνά την τιμή 1.1, σε αντίθεση με τις τιμές από το PMS οι οποίες φτάνουν μέχρι 1.2~1.3. Σε κάθε περίπτωση, ο ρυθμός αύξησης του συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t είναι πολύ μικρότερος από τον αντίστοιχο μείωσης του συντελεστή τριβής f_w , όπως διαφαίνεται στο Σχ. 4.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε και συγκρίθηκε η απόδοση υπολογιστικών προσομοιωμάτων και ημι-εμπειρικών αναλυτικών σχέσεων αναφορικά με τον συντελεστή κυματικής μετάδοσης σε Y/K , ειδικά σε σχέση με τη διαπερατότητα και την τραχύτητα της επιφανειακής στρώσης θωράκισης μέσω πρωτότυπης μελέτης εφαρμογής. Τα ακόλουθα συμπεράσματα μπορούν να διατυπωθούν:

- a) Η κυματική μετάδοση κατάντη Y/K αποτελεί ένα πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο δεν μπορεί να περιγραφεί πλήρως ούτε από εμπειρικές σχέσεις ούτε από προσομοιώσεις.
- b) Πρόσφατες ημι-εμπειρικές εκφράσεις συμπεριφέρονται ικανοποιητικά λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το πλάτος στέψης, τον τύπο του θραυόμενου κυματισμού, το μέγεθος των φυσικών ογκολίθων θωράκισης κτλ.
- c) Η θραύση των κυματισμών στο υπήνεμο πρανάς και τη στέψη του Y/K αποτελεί την κύρια διεργασία επιρροής της κυματικής μετάδοσης. Συμπερασματικά το ελεύθερο ύψος και το πλάτος στέψης του Y/K παίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο στον K_t .
- d) Ακολούθως η διαπερατότητα και το πορώδες του Y/K έχουν σημαντική επίδραση στον υπολογισμό του συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t .
- e) Ο εμπειρικός τύπος των Seabrook & Hall (1998) δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα πρόβλεψης του K_t και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με εμπιστοσύνη σε Y/K .
- f) Το κυματικό μοντέλο, ανάμεσα σε αυτά που εξετάστηκαν, το οποίο ενδείκνυται για αξιόπιστη προσομοίωση κυματικής μετάδοσης σε διαπερατούς Y/K είναι το μονοδιάστατο ακαδημαϊκό μοντέλο τύπου Boussinesq των Avgeris et al. (2004)
- g) Το μονοδιάστατο εμπορικό μοντέλο τύπου Boussinesq του MIKE21 δεν προβλέπει σωστά τον K_t στις συγκεκριμένες συνθήκες. Η χρήση του συναφούς αριθμητικού φίλτρου αποκοπής υψίσυχων αρμονικών δεν είναι ξεκάθαρη στις οδηγίες του προγράμματος, χρήζει περαιτέρω έρευνας και πρέπει να χρησιμοποιείται προσεκτικά.
- h) Το εμπορικό μοντέλο PMS του MIKE21 συμπεριφέρεται αρκετά ικανοποιητικά, ιδιαίτερα στην δισδιάστατη παραλλαγή του εξοπλισμένο με την προσέγγιση κατά Johnson (2006) για τη θραύση.
- i) Η τριβή στον πυθμένα κατά μήκος της περιμέτρου της διατομής του Y/K είναι λιγότερο καθοριστικός παράγοντας από το πορώδες στον υπολογισμό του K_t .
- j) Σημαντική αδυναμία των σύγχρονων εμπορικών μοντέλων είναι η έλλειψη προσέγγισης προσομοίωσης της διηθητικής ροής μέσα από το αδρομερές πορώδες σώμα των Y/K . Αυτή η απαίτηση καλύπτεται από σύγχρονα ακαδημαϊκά μοντέλα.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Προς τον Πολ.Μηχ. Ι. Αυγέρη (ΑΠΘ), τον Δρ. Α. Τουμαζή (Κύπρος) και τους KWLtd (Αγγλία) και LACECO (Λίβανος), για τη συμβολή τους στην παρούσα έρευνα.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Avgeris, I., Th.V. Karambas & P. Prinos. (2004). "Boussinesq Modeling of Wave Interaction with Porous Submerged Breakwaters", *Proc. of the 29th ICCE*, ASCE, 604-616.

- Battjes, J.A. & J.P.F.M. Janssen. (1978). "Energy Loss & Set-up due to Breaking of Random Waves", *Proc. 16th ICCE*, ASCE, Hamburg, Germany, 569-587.
- Battjes, J.A. & M.J.F. Stive. (1985). "Calibration and Verification of a Dissipation Model for Random Breaking Waves", *J. of Geophysical Research*, Vol. 90 (C5), 9159-9167.
- Burcharth, H.F., M. Kramer, A. Lamberti & B. Zanuttigh. (2006). "Structural Stability of Detached Low Crested Breakwaters", *Coastal Engineering*, Vol. 53, 381-394.
- DHI. (2005). "*MIKE21 User Guide and Reference Manual*", Danish Hydraulic Institute
- D'Angremond, K., J.W. Van der Meer & R.J. De Jong. (1996). "Wave Transmission at Low-crested Structures", *Proc. 25th Int. Conf. on Coast. Engng*, Orlando, USA, 2418-2426.
- Friebel, H.C. & L.E. Harris. (2003). "Re-evaluation of Wave Transmission Coefficient Formulae from Submerged Breakwater Physical Models", Index paper, Internet version.
- Johnson, H.K. (2006). "Wave Modelling in the Vicinity of Submerged Breakwaters", *Coastal Engineering*, Vol. 53, 39-48.
- Kennedy, A.B., Q. Chen, J.T. Kirby & R.A. Dalrymple. (2000). "Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking, and Runup. I: 1D", *J. of WPCOE*, Vol. 126, No. 1, 39-47.
- Kirby, J.T., G. Wei, Q. Chen, A.B. Kennedy & R.A. Dalrymple. (1998). "FUNWAVE 1.0, Fully nonlinear Boussinesq wave model, Documentation and user's manual", Research Report no. CACR-98-06, University of Delaware, 1-80.
- Madsen, P.A., O.R. Sørensen & H.A. Schäffer. (1997). "Surf Zone Dynamics Simulated by a Boussinesq Type Model", *Coastal Engineering*, Vol. 32, 255-320.
- Madsen, O.S. & S.M. White. (1976). "Energy dissipation on a rough slope", *Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Div.*, ASCE, 102 (WWI), 31-48.
- Makris, C.V. & C.D. Memos (2007). "Wave Transmission over Submerged Breakwaters: Performance of Formulae and Models", *Proc. 17th ISOPE Conference*, ISOPE, Lisbon, Portugal, 2613-2620.
- Makris, C.V., I. Avgeris & C.D. Memos (2007). "Hydraulic Behaviour of Submerged Breakwaters", *Proc. 4th PDCE Conference*, BSCA, Varna, Bulgaria, 269-278.
- Μακρής, Χ.Β. (2007). "*Μετάδοση Κυματισμού Κατόντι Υφாலου Κυματοθραύστη*", Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία (Κ. Μέμος), ΔΠΜΣ ΕΤΥΠ, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Nielsen, P. (1979). "Some Basic Concepts of Wave Sediment Transport," Inst. of Hydrodynamic & Hydraulic Engineering (ISVA), TU Denmark, Series Paper No. 20.
- Nelson, R.C. (1987). "Design Wave Heights on Very Mild Slopes: an Experimental Study," *Civil Engineering Transactions*, Institute of Engineering, Australia, Vol. 29, 157-161.
- Seabrook, S.R. & K.R. Hall (1998). "Wave Transmission at Submerged Rubble Mound Breakwaters", *Proc. 26th Int. Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, 2000-2013.
- Shapiro, R. (1970). "Smoothing, filtering and boundary effects", *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 8, 359-387.
- Svendsen, L.A. & I. Jonsson. (1980). "*Hydrodynamics of Coastal Regions*", TU Denmark.
- Van der Meer, J.W. & K. D'Angremond. (1991). "Wave transmission at low-crested structures", *Coastal structures and breakwaters*, Thomas Telford, London, England, 25-42.
- Van der Meer, J.W. (1991). "Stability and Transmission at Low-Crested Structures", Publication Report No. 453, Delft Hydraulics, Netherlands.
- Van Gent, M.R.A. (1995). "*Wave interaction with permeable coastal structures*", PhD Thesis, Delft University, Delft, The Netherlands.