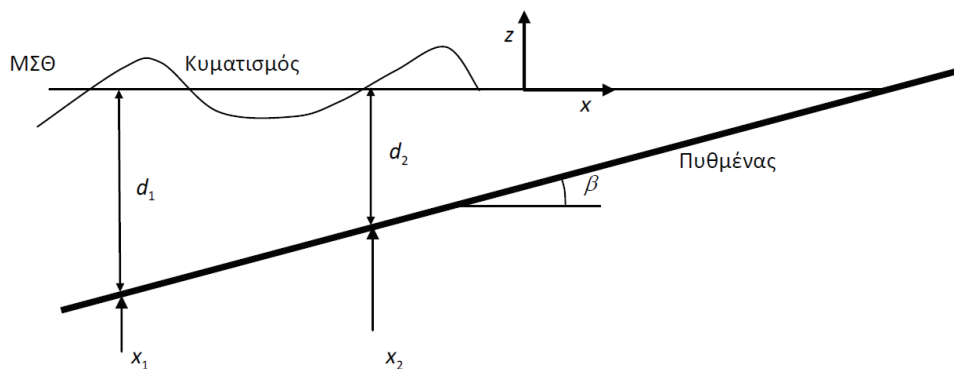


3

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΤΟΝ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΧΩΡΟ

3.1 Ρήχωση κυματισμών

Θεωρείται απλοποιημένη μορφολογία ακτής με ευθεία ακτογραμμή και πυθμένα σταθερής κλίσης $\tan\beta$ στο επίπεδο xz (Σχήμα 3.1), η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της συμπεριφοράς κυμάτων στην παράκτια ζώνη. Όταν οι κυματισμοί διαδίδονται στα βαθιά νερά ($d/L \geq 0.5$), τα υλικά σημεία του νερού κινούνται μόνο μέχρι βάρους ίσου με $L_o/2$ από την επιφάνεια (Κεφάλαιο 2). Επομένως, το βάθος d της θάλασσας δεν επηρεάζει τη διάδοση των κυματισμών και δε μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά τους. Όταν οι κυματισμοί πλησιάζουν την ακτή, σε βάθη $d < 0.5L$, τα υλικά σημεία κινούνται σε όλη τη στήλη του νερού και συνεπώς το βάθος d της θάλασσας οδηγεί σε μεταβολή των χαρακτηριστικών τους. Εφόσον στους αρμονικούς κυματισμούς που εξετάζονται, η περίοδος του κυματισμού παραμένει σταθερή, οι μεταβολές του βάρους d συνεπάγονται μεταβολές στην ταχύτητα διάδοσης C και στο μήκος L του κυματισμού (Εξ. 2.19 και 2.20).



Σχήμα 3.1. Σκαρίφημα διατομής απλοποιημένης παράκτιας ζώνης με ευθεία ακτογραμμή και πυθμένα σταθερής κλίσης $\tan\beta$.

Κατά τη διάδοση κυματισμών εγκάρσια στην ακτή, και θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας (λόγω τριβής πυθμένα, τύρβης, θραύσης) και ανακλάσεις στην περιοχή μεταξύ δύο τυχαίων σημείων x_1 και x_2 (Σχήμα 3.1), η αρχή διατήρησης της ισχύος, με χρήση της Εξ. (2.32), γράφεται:

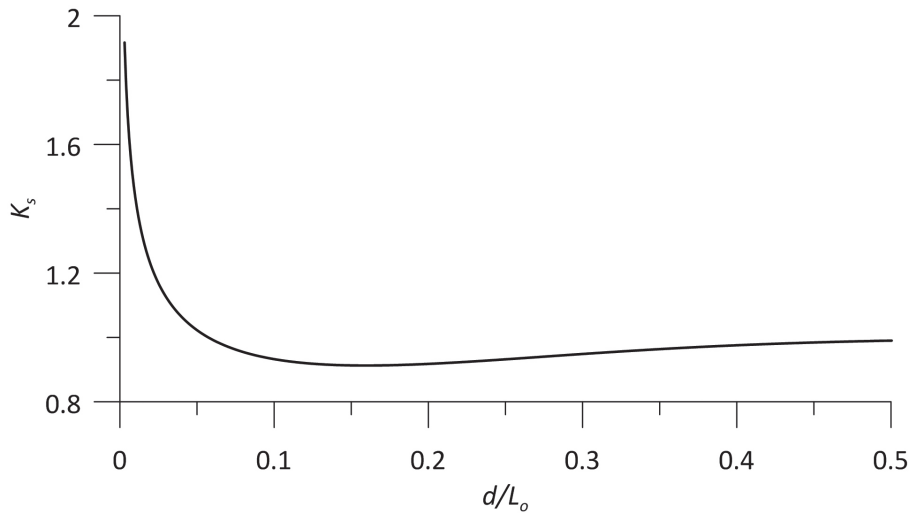
$$P_w = [nC\bar{E}]_1 = [nC\bar{E}]_2 \Rightarrow \frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{n_1 L_1}{n_2 L_2}} \quad (3.1)$$

Εάν και τα δύο σημεία, x_1 και x_2 , είναι στα βαθιά νερά, ισχύει $L_1 = L_2 = L_o$ και $n_1 = n_2 = n_o = 0.5$. Συνεπώς, από την Εξ. (3.1) προκύπτει $H_1 = H_2 = H_o$. Εάν το σημείο x_1 είναι στα βαθιά ύδατα και το σημείο x_2 είναι στην παράκτια ζώνη σε βάθος $d_2 < 0.5L_2$ (Σχήμα 3.1), από την Εξ. (3.1) προκύπτει:

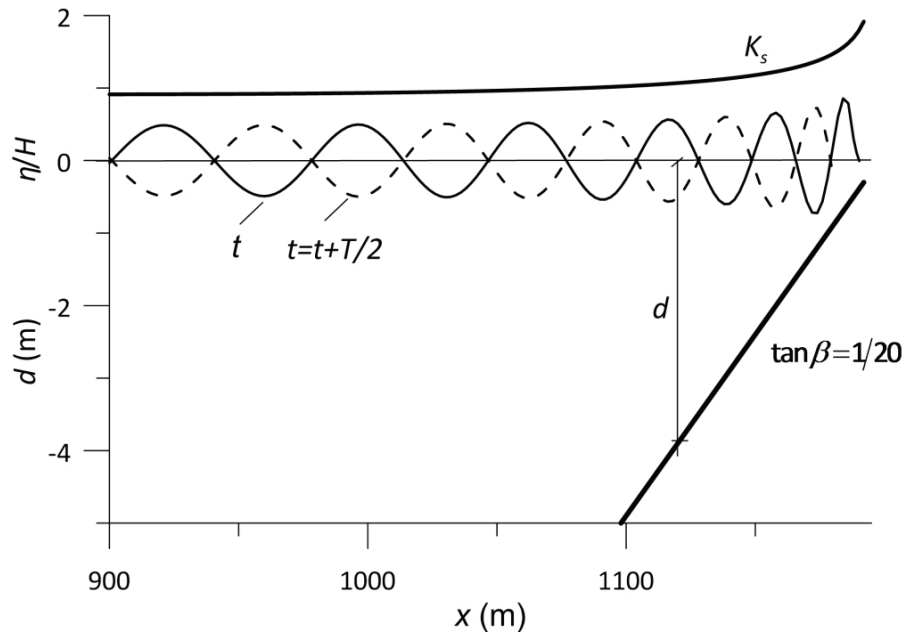
$$\frac{H}{H_o} = K_s = \sqrt{\frac{n_o L_o}{n L}} = \sqrt{\frac{L_o}{2nL}} = \left(\left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \tanh(kd) \right)^{-0.5} \quad (3.2)$$

όπου K_s ο συντελεστής ρήχωσης. Ο συντελεστής αυτός συνδέει τη μεταβολή του ύψους κύματος με τη μεταβολή του μήκους κύματος λόγω μεταβολής του βάθους πυθμένα. Στην Εξ. (3.2) ο δείκτης 2 για τα μεγέθη που σχετίζονται με το σημείο x_2 έχει παραληφθεί για λόγους απλότητας και γενίκευσης.

Η μεταβολή του K_s σύμφωνα με την Εξ. (3.2) ως προς το d/L_o δίνεται στο Σχήμα 3.2. Καθώς ο κυματισμός εισέρχεται στην παράκτια ζώνη, ο συντελεστής ρήχωσης αρχικά μειώνεται ελαφρώς μέχρι το βάθος $d/L_o \approx 0.157$. Για μικρότερα βάθη, το ύψος κύματος αρχίζει πάλι να αυξάνει και φτάνει την τιμή $K_s = 1$ σε βάθος $d/L_o \approx 0.06$. Για ακόμα πιο ρηχά νερά, το ύψος κύματος μεγαλώνει σημαντικά. Το φαινόμενο της ρήχωσης παρουσιάζεται με συγκεκριμένο παράδειγμα στο Σχήμα 3.3 για κυματισμό ύψους $H_o = 1$ m, περιόδου $T = 8$ s και μήκους $L_o = 99.9$ m σε ακτή με κλίση πυθμένα $\tan \beta = 1/20$. Στο βάθος $d = 15$ m ($x = 900$ m) όπου $d/L_o = 0.15$, ο συντελεστής ρήχωσης είναι ελαφρώς μικρότερος της μονάδας. Καθώς μειώνεται το βάθος, το ύψος κύματος αρχίζει να αυξάνει σχετικά ήπια μέχρι το βάθος $d = 6$ m ($x = 1080$ m), όπου $K_s = 1$. Στα πολύ ρηχά νερά, το ύψος κύματος μεγαλώνει σημαντικά έως ότου η κυματομορφή γίνει ασταθής και επέλθει θραύση, φαινόμενο που θα παρουσιασθεί παρακάτω.



Σχήμα 3.2. Μεταβολή συντελεστή ρήχωσης, $K_s = H/H_o$, ως προς d/L_o .



Σχήμα 3.3. Παράδειγμα ρήχωσης γραμμικού αρμονικού κυματισμού ($H_o = 1$ m, $T = 8$ s και $L_o = 99.9$ m) σε ακτή με κλίση πυθμένα $\tan \beta = 1/20$: στιγμιαία ανύψωση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας και μεταβολή του συντελεστή ρήχωσης, K_s , για $d/L_o \leq 0.15$.

Στα ρηχά νερά, όταν η κλίση του κύματος λάβει υψηλές τιμές $\varepsilon = H/L > 0.04$, η γραμμική θεωρία της ρήχωσης παύει να ισχύει και συνεπώς η εφαρμογή της Εξ. (3.2) θα πρέπει να γίνεται με σχετική επιφύλαξη. Μία σχέση, η οποία περιλαμβάνει την επίδραση της μη-γραμμικότητας στον συντελεστή ρήχωσης K_s , δίνεται από τον Le Roux (2008):

$$K_{s\text{-nonlinear}} = A_s \exp\left(B_s \frac{H_o}{L_o}\right) \quad (3.3)$$

όπου

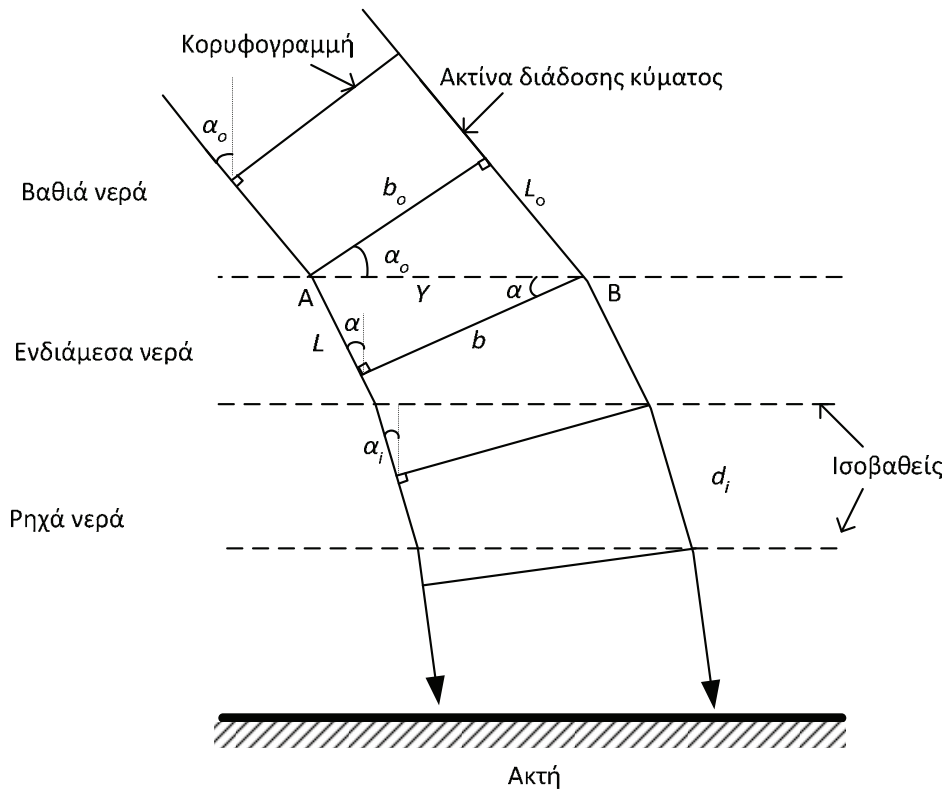
$$A_s = \begin{cases} 0.5875(d/L_o)^{-0.18} & d/L_o \leq 0.0844 \\ 0.9672(d/L_o)^2 - 0.5013(d/L_o) + 0.9672 & \text{για } 0.0844 < d/L_o \leq 0.6 \\ 1 & d/L_o > 0.6 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$B_s = 0.0042(d/L_o)^{-2.3211}$$

Η τιμή του ύψους κύματος που προκύπτει από τις Εξ. (3.3) και (3.4) είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη από αυτήν της γραμμικής θεωρίας και πιο κοντά στην πραγματικότητα.

3.2 Διάθλαση κυματισμών

Στο θαλάσσιο περιβάλλον, οι κυματισμοί δεν περιορίζονται στο κατακόρυφο επίπεδο xz , που εξετάστηκε στο Κεφάλαιο 2, αλλά είναι τρισδιάστατοι στον χώρο. Ακόμα και στην απλοποιημένη παράκτια ζώνη με ευθεία ακτογραμμή και ευθείες ισοβαθείς (Σχήμα 3.4), η πλάγια πρόσπτωση των κυματισμών δημιουργεί τρισδιάστατη συμπεριφορά αυτών λόγω του φαινομένου της διάθλασης. Η διάθλαση είναι το φαινόμενο της αλλαγής της διεύθυνσης των κυματισμών που προσπίπτουν πλάγια σε μία ακτή, όταν η ταχύτητα διάδοσής τους μεταβάλλεται λόγω μεταβολής του βάθους (Εξ. 2.19). Δεδομένου ότι η ταχύτητα κύματος μειώνεται με το βάθος, κάθε τμήμα της κορυφογραμμής του κύματος, που βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος από το γειτονικό του, κινείται ταχύτερα προς την ακτή και άρα στο ίδιο χρονικό διάστημα διανύει μεγαλύτερη απόσταση (Σχήμα 3.4). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η κορυφογραμμή να τείνει να γίνει παράλληλη προς τις ισοβαθείς καμπύλες του πυθμένα και η γωνία πρόσπτωσης να μειώνεται συνεχώς τείνοντας στο μηδέν (εγκάρσια πρόσπτωση στην ακτογραμμή) στα πάρα πολύ μικρά βάθη. Ως γωνία πρόσπτωσης ορίζεται η γωνία α , που σχηματίζεται από την κορυφογραμμή και τις ισοβαθείς ή ομοίως ως η γωνία που σχηματίζεται από την κάθετη στην κορυφογραμμή του κύματος με την κάθετη στις ισοβαθείς. Η γωνία τείνει στο μηδέν στα πάρα πολύ μικρά βάθη.



Σχήμα 3.4. Μετασχηματισμός κυματισμού λόγω διάθλασης κατά τη διάδοση στην απλοποιημένη παράκτια ζώνη με ευθεία ακτογραμμή και ευθείες ισοβαθείς. Οι κορυφογραμμές κάμπτονται και τείνουν να γίνουν παράλληλες με τις ισοβαθείς, ενώ η διεύθυνση του κυματισμού τείνει να γίνει κάθετη προς τις ισοβαθείς.

Στο παράκτιο περιβάλλον, οι ισοβαθείς και η ακτογραμμή δεν είναι ευθείες (Σχήμα 3.5). Λόγω της διάθλασης, οι κορυφογραμμές των κυματισμών τείνουν να παραλληλιστούν με τις ισοβαθείς του πυθμένα, συνεπώς, ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να αποκλίνουν, π.χ. σε έναν κόλπο, ή να συγκλίνουν, π.χ. σε ένα ακρωτήριο (Σχήμα 3.5). Στην πρώτη περίπτωση θα έχουμε μείωση του ύψους του κύματος, ενώ στη δεύτερη αύξηση αυτού.

7

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΡΓΩΝ ΜΕ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

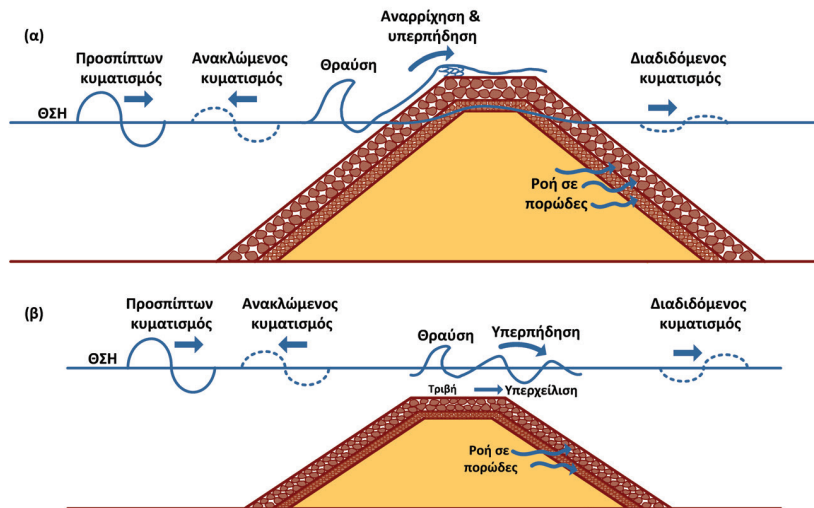
7.1 Κυματοθραύστες με κεκλιμένα πρηνή

7.1.1 Ανάκλαση, μετάδοση, αναρρίχηση και υπερπήδηση

Η αλληλεπίδραση κυματισμών με κυματοθραύστες κεκλιμένων πρηνών αντιστοιχεί σε μία αρκετά συνθέτη διεργασία. Λόγω της παρουσίας των έργων αυτών, ένα τμήμα της ενέργειας των προσπίπτοντων κυματισμών ανακλάται πίσω στην ανοικτή θάλασσα, ένα τμήμα της αποσβένεται και, τέλος, ένα τμήμα της ενέργειας αυτής μεταδίδεται μέσω υπερπήδησης των κυματισμών ή/και ροής στην πορώδη κατασκευή (Σχήμα 7.1) και διαδίδεται στην υπήνεμη περιοχή του έργου. Η απόσβεση της προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσω της θραύσης του κυματισμού επάνω στον κυματοθραύστη ή/και μέσω των τυρβωδών ροών στην επιφάνεια (τριβή) και της ροής στην πορώδη κατασκευή. Ο βαθμός ενεργοποίησης των παραπάνω μηχανισμών εξαρτάται από τα γεωμετρικά και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του έργου (π.χ. ύψος στέψης, κλίση πρηνών), καθώς και από τα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κυματισμού.

Η σημαντική απόσβεση της κυματικής ενέργειας στην περίπτωση κυματοθραυστών με κεκλιμένα πρηνή συνεπάγεται μερική ανάκλαση των κυματισμών, την ανάπτυξη, δηλαδή, ανακλώμενου κυματισμού με ύψος μικρότερο από εκείνο του προσπίπτοντος κυματισμού και κατ' επέκταση τη διαμόρφωση μερικώς στάσιμου κυματισμού στην ανάντη παρειά της κατασκευής. Για τον υπολογισμό του ανακλώμενου κυματισμού χρησιμοποιείται ο συντελεστής ανάκλασης C_r , που ορίζεται ως εξής:

$$C_r = \frac{H_{s,r}}{H_{s,i}} \quad (7.1)$$



Σχήμα 7.1. Σκαρίφημα αλληλεπίδρασης κυματισμών με κυματοθραύστη με κεκλιμένα πρανά: (α) Κυματοθραύστης με έξαλο τμήμα και (β) Ύφαλος (βυθισμένος) κυματοθραύστης.

όπου $H_{s,r}$ το σημαντικό ύψος του ανακλώμενου κυματισμού και $H_{s,i}$ το σημαντικό ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού στον ανάντη πόδα του έργου (σημείο Α Σχήματα 7.2 και 7.4).

Ο συντελεστής C_r στο προσήνεμο πρανάς του κυματοθραύστη υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εμπειρική σχέση (Zannutigh and van der Meer 2006, Zannutigh and van der Meer 2008):

$$C_r = \tanh(c_1 \xi^{c_2}) \quad (7.2)$$

όπου ξ ο αριθμός Irribaren, σύμφωνα με την Εξ. (7.3), και c_1, c_2 παράμετροι εξαρτώμενες από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής με τιμές που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 7.1. Στην Εξ. (7.3), a είναι η κλίση των πρανών και $T_{m-1,0}$ η φασματική περίοδος (Εξ. 4.43).

$$\xi = \frac{\tan a}{\sqrt{\frac{2\pi H_{s,i}}{g T_{m-1,0}^2}}} \quad (7.3)$$

Για περιπτώσεις κυματοθραυστών χαμηλής στέψης, ο συντελεστής C_r υπολογίζεται ως εξής:

$$C_r = \tanh(c_1 \xi^{c_2}) \left(0.67 + 0.37 \frac{R_c}{H_{s,i}} \right) \quad (7.4)$$

όπου R_c το ύψος στέψης του κυματοθραύστη επάνω από τη Θαλάσσια Στάθμη Ηρεμίας (ΘΣΗ). Η Εξ. (7.4) εφαρμόζεται για $-1.0 \leq R_c / H_{s,i} \leq 0.5$, με τις αρνητικές τιμές να υποδηλώνουν ύφαλο κυματοθραύστη.

Πίνακας 7.1. Τιμές παραμέτρων c_1 , c_2 για υπολογισμό συντελεστή ανάκλασης σε κυματοθραύστη με κεκλιμένα πρηνή.

Χαρακτηριστικά κατασκευής	c_1	c_2
Κυματοθραύστης με φυσικούς ογκόλιθους και διαπερατό πρηνή	0.12	0.87
Κυματοθραύστης με φυσικούς ογκόλιθους και αδιαπερατό πρηνή	0.14	0.90
Κυματοθραύστης με τεχνητούς ογκόλιθους	0.12	0.87
Επίπεδη κεκλιμένη επιφάνεια	0.16	1.43

Σχετικά με τους διαδιδόμενους κυματισμούς στην υπήνεμη περιοχή ενός κυματοθραύστη με κεκλιμένα πρηνή, διακρίνονται τρεις τρόποι μετάδοσης αυτών. Ο πρώτος τρόπος αντιστοιχεί στη μετάδοση των κυματισμών υπεράνω της κατασκευής, μέσω υπερπήδησης και υπερχειλίσης, όταν η στέψη του έργου είναι βυθισμένη κάτω από τη ΘΣΗ (Σχήμα 7.1β). Σημειώνεται πως στην περίπτωση αυτή σημαντικό ποσοστό της ενέργειας του διαδιδόμενου κυματισμού αντιστοιχεί σε μικρότερες περιόδους (υψηλότερες συχνότητες) από την περίοδο του προσπίπτοντος κυματισμού. Συνεπώς, η μετάδοση κυματισμού στην υπήνεμη περιοχή ύφαλου κυματοθραύστη συνεπάγεται μείωση της μέσης περιόδου αυτού. Ο δεύτερος τρόπος αφορά τη μετάδοση κυματισμών μέσω αναρρίχησης και υπερπήδησης, όταν η στέψη του κυματοθραύστη βρίσκεται επάνω από τη ΘΣΗ (Σχήμα 7.1α). Πιο συγκεκριμένα, οι προσπίπτοντες κυματισμοί προκαλούν υπερπήδηση ρευστού επάνω από τη στέψη του έργου, το οποίο ρευστό διαταράσσει την ελεύθερη επιφάνεια και δημιουργεί κυματισμό στην υπήνεμη περιοχή του έξαλου κυματοθραύστη. Τέλος, ο τρίτος τρόπος αντιστοιχεί στη μετάδοση ποσοστού της ενέργειας των προσπίπτοντων κυματισμών μέσα από την πορώδη κατασκευή (Σχήμα 7.1), κυρίως όταν η διατομή του κυματοθραύστη είναι αρκετά διαπερατή. Για την ποσοτικοποίηση της διάδοσης κυματισμών στην υπήνεμη περιοχή ενός κυματοθραύστη με κεκλιμένα πρηνή χρησιμοποιείται ο συντελεστής μετάδοσης C_t , που ορίζεται ως εξής:

$$C_t = \frac{H_{s,t}}{H_{s,i}} \quad (7.5)$$

όπου $H_{s,t}$ το σημαντικό ύψος του κυματισμού στον υπήνεμο πόδα του έργου.

Ο συντελεστής C_t σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία υπολογίζεται ως ακολούθως (van der Meer et al. 2005):

$$C_t = \begin{cases} -0.4 \frac{R_c}{H_{s,i}} + 0.64 \left(\frac{B}{H_{s,i}} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5\xi}) & \text{για } \frac{B}{H_{s,i}} \leq 8 \\ -0.35 \frac{R_c}{H_{s,i}} + 0.51 \left(\frac{B}{H_{s,i}} \right)^{-0.65} (1 - e^{-0.41\xi}) & \text{για } \frac{B}{H_{s,i}} \geq 12 \end{cases} \quad (7.6)$$

όπου B το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη και ξ ο αριθμός Iribaren, σύμφωνα με την Εξ. (7.3). Στην Εξ. (7.6) το μέγεθος R_c λαμβάνει θετικές τιμές όταν η στέψη του έργου βρίσκεται επάνω από τη ΘΣΗ (έξαλος κυματοθραύστης) και αρνητικές όταν η στέψη του έργου βρίσκεται κάτω από τη ΘΣΗ (ύφαλος κυματοθραύστης). Στην περίπτωση που $8 < B/H_{s,i} < 12$, ο συντελεστής C_t υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών που προκύπτουν από την Εξ. (7.6) για $B/H_{s,i} = 8$ και $B/H_{s,i} = 12$. Επιπλέον, για $B/H_{s,i} \leq 8$, η Εξ. (7.6) εφαρμόζεται θέτοντας ελάχιστη και μέγιστη επιτρεπτή τιμή C_t ίσες με 0.075 και 0.8, αντίστοιχα. Για $B/H_{s,i} \geq 12$, η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή του C_t λαμβάνεται ίση με 0.05, ενώ η μέγιστη επιτρεπτή τιμή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\max C_t = -0.006 \frac{B}{H_{s,i}} + 0.93 \quad (7.7)$$

Το άνω όριο που θέτει η Εξ. (7.7) αφορά κυρίως περιπτώσεις ύφαλων κυματοθραυστών, για τους οποίους εμφανίζονται σχετικά μεγάλες τιμές C_t .

Για την ποσοτικοποίηση της αναρρίχησης των κυματισμών στο προσήνεμο πρανές κυματοθραύστη χρησιμοποιείται το ύψος αναρρίχησης $R_{u2\%}$. Το μέγεθος αυτό (Σχήμα 7.2) ορίζεται ως η κατακόρυφη από τη ΘΣΗ απόσταση, επάνω από την οποία διέρχεται το άνω 2% (ως προς το ύψος κύματος) των προσπιπτόντων κυματισμών και υπολογίζεται μέσω χρήσης των ακόλουθων εμπειρικών σχέσεων που προτείνονται στο εγχειρίδιο EurOtop (EurOtop 2018):

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{s,i}} = 1.75 \gamma_b \gamma_f \gamma_\theta \xi \quad (7.8)$$

με μέγιστη τιμή:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{s,i}} = 1.7 \left[\gamma_f + \frac{1}{8.2} (\xi - 1.8) (1 - \gamma_f) \right] \gamma_\theta \left(4 - \frac{1.5}{\sqrt{\gamma_b \xi}} \right) \quad (7.9)$$

Στις Εξ. (7.8) – (7.9), ξ είναι ο αριθμός Iribaren, που υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ. (7.3), και γ_b , γ_f , γ_θ είναι συντελεστές που εκφράζουν την επίδραση δια-