



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

**ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΖΗΜΙΩΝ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΩΝ - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΛΙΜΕΝΑ ΕΥΔΗΛΟΥ ΙΚΑΡΙΑΣ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Επιβλέπουσα: Βασιλική Τσουκαλά, Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2020

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Επιβλέπουσα: Βασιλική Τσουκαλά, Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2020

iii

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα λιμενικά έργα κατασκευάζονται για χρονικό ορίζοντα που συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 50 και 100 ετών. Κατά τη διάρκεια ζωής αυτών των έργων εάν δεν γίνεται περιοδικός έλεγχος και συντήρηση είναι λογικό να παρουσιαστούν διαφόρων ειδών φθορές. Ορισμένες από αυτές είναι οι πάσης προέλευσης υποσκαφές της υπήνεμης ή προσήνεμης πλευράς της κατασκευής, η διάβρωση των μεταλλικών στοιχείων της κατασκευής, η χημική προσβολή των στοιχείων της, ζημιές λόγω σεισμικής δράσης, ζημιές από έντονα καιρικά φαινόμενα όπως είναι οι πλημμύρες πυρκαγιές και έντονες καταιγίδες, καθώς και φθορές από ανθρωπογενή αίτια, όπως πρόσκρουση πλοίων επί κυματοθραυστών ή η υπερφόρτωση των καταστροφμάτων.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι οι μέθοδοι επισκευής και ενίσχυσης λιμενικών έργων. Οι τεχνικές επισκευής καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από απλές επικαλύψεις συντήρησης, μάτισμα φθαρμένων στοιχείων, χρήση ανοδίων, αντικατάσταση τμημάτων, επικάλυψη μεταλλικών στοιχείων με σκυρόδεμα, έως την πλήρη αντικατάσταση των φθαρμένων στοιχείων της κατασκευής.

Ως εφαρμογή μελετάται ο λιμένας Ευδήλου Ικαρίας, όπου ο υφιστάμενος κυματοθραύστης με πρηνή υπέστη σοβαρές ζημιές κατά τη θεομηνία που έπληξε την περιοχή τον Ιανουάριο του 2018. Αρχικά ελέγχεται η επάρκεια της διατομής έναντι του χαρακτηριστικού ύψους κύματος. Επίσης, ελέγχονται τα υφιστάμενα τμήματά της ως προς την τήρηση των κανονισμών και τις προδιαγραφές της μελέτης επέκτασης του 2010. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι η κατασκευή ικανοποιεί όλους τους ελέγχους, όχι όμως και τον έλεγχο της παροχής υπερπήδησης. Επίσης, είναι αρκετές οι κατασκευαστικές παραβλέψεις που και αυτές με την σειρά τους μειώνουν την σταθερότητα. Τέλος, προτείνονται δύο εναλλακτικές σχετικά με την ανακατασκευή και την ενίσχυση του κυματοθραύστη και συγκρίνονται ως προς τα κόστη κατασκευής του.

Λέξεις – κλειδιά: Κυματοθραύστης, επισκευή, αποκατάσταση, διάβρωση

Abstract

Port structures are usually constructed for a timescale between 50 and 100 years. During the life of these structures, if it is not periodically inspected and maintained, it is reasonable to incur various forms of damage. Some of these are excavations of all kinds on the leeward or windward side of the structure, corrosion of the metallic elements of the structure, chemical damage to its components, earthquake damage, damages from intense weather conditions such as flood, fires and heavy storms, as well as damage from anthropogenic causes, such as an impact of a ship on breakwater or overloading of structures' deck.

The subject of this thesis is the repair and reinforcement methods in port structures. Repair techniques cover a wide range from simple maintenance renders, splicing of damaged metals, use of anodes, replacement of parts, overlaying of metallic elements with concrete, until complete replacement of damaged parts of structure.

Case study of this thesis is the port of Evdilos in Ikaria island, where the existing breakwater has been damaged in a high level during a natural disaster that struck the area in January 2018. The adequacy of cross section against the characteristic wave height is first checked. Existing sections are also checked for compliance with the 2010 expansion planning regulations and specifications. These results show that the structure satisfiew all controls, except from the overtopping control. There is also a number of manufacturing fails that in turn reduce stability. Finally, two alternatives are proposed for the reconstruction and reinforcement of the breakwater and compared with the costs of its contstruction.

Key-words: Breakwater, repair, rehabilitation, corrosion

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	ix
Πίνακας Σχημάτων	xi
Πίνακας Πινάκων	xv
1. Εισαγωγή	1
1.1 Τοποθέτηση προβλήματος	1
1.2 Αντικείμενο – Σκοπός	1
1.3 Μεθοδολογία	2
1.4 Περιεχόμενο Εργασίας	3
2. Θεωρητικά στοιχεία	5
2.1 Ορισμός και Χαρακτηριστικά ανεμογενών κυμάτων	5
2.1.1 Μέθοδος SMB – Ανάπτυγμα πελάγους (Fetch)	6
2.1.2 Πρόγραμμα Mike 21 Spectral wave DHI	9
2.1.2.1 Γενικά στοιχεία μοντέλου	9
2.1.2.2 Θεωρητικά στοιχεία μοντέλου	10
2.2 Λιμενικά έργα - Ορισμοί	12
2.2.1 Θαλάσσια λιμενικά έργα	13
2.2.2 Χερσαία λιμενικά έργα	14
2.3 Μηχανισμοί αστοχίας	15
2.3.1 Αστοχία – Ευστάθεια κυματοθραυστών	15
2.4 Μέθοδοι επισκευής ζημιών σε λιμενικά έργα	17
2.5 Επισκευή και συντήρηση κυματοθραυστών με πρανή	21
2.5.1 Μονάδες θωράκισης	23
2.5.1.1 Τοπική αντικατάσταση κατεστραμμένων ή εκτοπισμένων φυσικών ή τεχνητών ογκολίθων	23
2.5.1.2 Επικάλυψη υπαρχόντων μονάδων θωράκισης	25
2.5.1.3 Αντικατάσταση στρώσης θωράκισης	25
2.6 Μέθοδοι ενίσχυσης κυματοθραυστών με πρανή	26
2.7 Μέθοδοι ενίσχυσης κυματοθραυστών με κατακόρυφο μέτωπο	29
2.8 Έλεγχος ευστάθειας κυματοθραύστη	36
2.8.1 Αναρρίχηση - Υπερπήδηση	36
2.8.2 Εξίσωση του Hudson	39
2.8.3 Εξίσωση του Van der Meer	40

2.8.3.1	Εξίσωση του Van der Meer – Βαθειά νερά	40
2.8.3.2	Εξίσωση του Van der Meer – Ρηχά νερά	43
3.	Διερεύνηση εφαρμογής: Λιμένας Ευδήλου Ικαρίας	45
3.1	Γενικές πληροφορίες – Εύδηλος Ικαρίας	45
3.1.1	Περιοχή διερεύνησης	47
3.2	Κακοκαιρία της 18 ^{ης} Ιανουαρίου 2018	54
4.	Εφαρμογή βιβλιογραφίας - Εύδηλος Ικαρίας	57
4.1	Κυματικό κλίμα περιοχής	57
4.1.1	Εφαρμογή μοντέλου MIKE 21 SW	58
4.2	Κριτήρια ελέγχου	67
4.2.1	Ευστάθεια θωράκισης	67
4.2.2	Ευστάθεια πόδα έργου	67
4.2.3	Έλεγχος μέσης παροχής και μέγιστου όγκου υπερπήδησης	69
4.2.4	Έλεγχος κατασκευαστικών προβλημάτων	70
5.	Προτάσεις	77
5.1	Προτάσεις ενίσχυσης – επισκευής	77
5.1.1	Προσθήκη στρώσης θωράκισης	77
5.1.2	Εξομάλυνση της κλίσης του πρανούς	77
5.1.3	Αύξηση πλάτους στέψης	78
5.1.4	Κατασκευή ύφαλου κυματοθραύστη ανάντη	82
5.2	Κοστολόγηση προτάσεων	86
5.2.1	Κοστολόγηση αύξησης πλάτους στέψης	86
5.2.2	Κοστολόγηση ύφαλου κυματοθραύστη ανάντη	92
6.	Συμπεράσματα	93
	Βιβλιογραφία	95
	Ξενόγλωσση βιβλιογραφία	95
	Ελληνική βιβλιογραφία	96
	Παράρτημα	99
	Σχέδια	105

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1:	Σηματική παράσταση κύματος με τι παραμέτρους του. (Πηγή:Εργαστήριο Ναυτιλίας και Θαλάσσιων Επιστημών)	6
Σχήμα 2:	Τυπική διατομή κυματοθραύστη (Πηγή: Rock Manual, 2012).	14
Σχήμα 3:	Μηχανισμοί αστοχίας κυματοθραύστη με πρηνή	16
Σχήμα 4:	Μηχανισμοί αστοχίας κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο	16
Σχήμα 5:	Διάβρωση οπλισμού σκυροδέματος σε επαφή με θαλασσινό νερό (Πηγή:Vector Corrosion Services, 2017)	18
Σχήμα 6:	Tidal Jacket (Πηγή: V.C.S.).	19
Σχήμα 7:	Επισκευή με καθοδική προστασία με εξωτερικό ρεύμα (Πηγή: V.C.S.).	20
Σχήμα 8:	Σκαρηφίματα αναβάθμισης έξαλων κυματοθραυστών με πρηνή	28
Σχήμα 9:	Αναβάθμιση ύφαλου κυματοθραύστη – αύξηση πλάτους	29
Σχήμα 10:	Αναβάθμιση ύφαλου κυματοθραύστη – αύξηση στέψης	29
Σχήμα 11:	Σκαρίφημα κυματοθραύστη με ανύψωση τοίχου	30
Σχήμα 12:	Σκαρίφημα κυματοθραύστη με γωνιώδη παραπετάσματα (Πηγή: Eurutor II 2016)	31
Σχήμα 13:	Κυματοθραύστης με γωνιώδη παραπετάσματα (Πηγή: Eurotop II 2016)	31
Σχήμα 14:	Μορφή διάτρητου κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο (Πηγή: Eurutor II 2016)	32
Σχήμα 15:	Μορφή διάτρητου κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο (Πηγή: Eurutor II 2016)	33
Σχήμα 16:	Κυματοθραύστης τύπου Jarlan. (Πηγή: Steven Feys 2008-2009)	33
Σχήμα 17:	Wave-breaking type caisson JP6002316 (Πηγή: Steven Feys, 2008-2009)	34
Σχήμα 18:	Caisson καταστροφής ενέργειας κυμάτων (Πηγή: Steven Feys (2008-2009))	34
Σχήμα 19:	Κυματοθραύστης απόσβεσης κυμάτων (Πηγή: Steven Feys (2008-2009))	35
Σχήμα 20:	Κυματοθραύστης με κελία καταστροφής κυματισμών. (Πηγή: Steven Feys 2008-2009)	35
Σχήμα 21:	Seperating and combining type (Πηγή: Steven Feys 2008-2009)	35
Σχήμα 22:	Ενδεικτικές τιμές του P για τον τύπο του Van der Meer	42
Σχήμα 23:	Θέση Ικαρίας στον χάρτη της Ελλάδας (Πηγή: Βικιπαιδεία)	46
Σχήμα 24:	Χάρτης Ικαρίας (Πηγή: Βικιπαιδεία)	47

Σχήμα 25: Tetrapod	48
Σχήμα 26: Λιμένας Ευδήλου Ικαρίας πριν την επέκταση του μώλου (Πηγή: Φράγκου, 2010)	49
Σχήμα 27: Κάτοψη λιμένα με την προέκταση (Πηγή: Φράγκου, 2010)	50
Σχήμα 28: Προέκταση μώλου λιμένα Ευδήλου (Πηγή: Φράγκου, 2010)	51
Σχήμα 29: Τεχνητός ογκόλιθος τύπου Accropode (Πηγή: C.L.I, 2015)	51
Σχήμα 30: Τυπική διατομή (Πηγή: Φράγκου, 2010)	53
Σχήμα 31: Κατά τη διάρκεια της κακοκαιρίας	54
Σχήμα 32: Υποχώρηση υπήνεμης πλευράς λιμένα	54
Σχήμα 33: Σημείο υποχώρησης κρηπιδότοιχου	55
Σχήμα 34: Σταθμοί Ε.Μ.Υ. Ικαρίας, Σάμου και Χίου (Πηγή: Google Earth, 2019)	55
Σχήμα 35: Υπολογισμός του αναπτύγματος πελάγους του Ευδήλου μέσω του Navionics Web App	58
Σχήμα 36: Επιλογή Mesh Generator από το κεντρικό μενού	58
Σχήμα 37: Επιλογή συστήματος αναφοράς	59
Σχήμα 38: Εισαγωγή αρχείων (.xyz) στο Mesh Generator	59
Σχήμα 39: Επιλογή ενδεικτικού πολυγώνου	60
Σχήμα 40: Επιλογή είδους πύκνωσης	60
Σχήμα 41: Επιλογή MIKE 21 SW από το κεντρικό μενού.	61
Σχήμα 42: Εισαγωγή κυματικού κλίματος στα βαθειά.	61
Σχήμα 43: Απόσπασμα από Mesh Generator MIKE Zero 21 SW	63
Σχήμα 44: Απεικόνιση τελικής βαθυμετρίας (Interpolation).	64
Σχήμα 45: Κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος στην περιοχή του έργου για Βόρειο άνεμο.	65
Σχήμα 46: Κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος στην περιοχή του έργου για Βορειοδυτικό άνεμο.	66
Σχήμα 47: Σκαρίφημα πόδα (Toe=πόδας, Core=πυρήνας, Under layer=υπόστρωμα, Armour layer=στρώση θωράκισης, Scour protection=προστασία υποσκαφής) (Πηγή: Rock Manual, 2012)	68
Σχήμα 48: Ρηγμάτωση στο βασικό Σ.Τ.Ο. στη δεύτερη στήλη από τη συναρμογή (Πηγή: Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).	71
Σχήμα 49: Μικρών διαστάσεων εσοχές/εξοχές των Τ.Ο. και τοπικές θραύσεις των γωνιών τους (Πηγή: Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).	71

Σχήμα 50: Άποψη της γωνίας της υπήνεμης πλευράς του ακρομωλίου (Πηγή: Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π.,2018).	72
Σχήμα 51: Άποψη της κεφαλής του ακρομωλίου. Αριστερά διακρίνεται το τριγωνικό τμήμα χωρίς θωράκιση (Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).	72
Σχήμα 52: Λίθοι σε ακάλυπτα από ακρόποδα τμήματα του πρανούς (Πηγή: Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π.,2018).	73
Σχήμα 53: Διαπίστωση ύπαρξης μικρού ύψους berm, με λίθους μικρότερης διαβάθμισης από την προβλεπόμενη (Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π.,2018)	73
Σχήμα 54: Άποψη του λιμένα Ευδήλου από ψηλά μετά την αστοχία. (Πηγή: Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π.,2018).	75
Σχήμα 55: Ελλιπείς κάλυψη και πλέξη ακρόποδων (Πηγή: Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π.,2018).	76
Σχήμα 56: Διατομή Π4 – Π4' κατά την αυτοψία (Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π.,2018).	79
Σχήμα 57: Διατομή Π4-Π4' – εκσκαφές.	79
Σχήμα 58: Διατομή Π4 – Π4' – επέκταση πλάτους στέψης και επισκευή.	79
Σχήμα 59: Διατομή Π0-Π0' – εκσκαφές.	80
Σχήμα 60: Διατομή Π0-Π0' – τελική διατομή	80
Σχήμα 61: Διατομή Π5-Π5' κατά την αυτοψία (Πηγή Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).	81
Σχήμα 62: Διατομή Π5-Π5' – εκσκαφές.	82
Σχήμα 63: Διατομή Π5-Π5' – τελική διατομή.	82
Σχήμα 64: Διατομή Π6-Π6' κατά την αυτοψία (Πηγή Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).	82
Σχήμα 65: Διατομή Π6-Π6' – τελική διατομή.	82
Σχήμα 66: Ύψος κύματος κατάντη ύφαλου κυματοθραύστη από MIKE 21 SW.	84
Σχήμα 67: Τυπική διατομή ύφαλου κυματοθραύστη	85

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1: Επιλογές για επισκευή κυματοθραυστών με πρανή (Πηγή: Pope,1992).	22
Πίνακας 2: Υπόμνημα σχήματος 12	31
Πίνακας 3: Συνάρτηση ποσοστού βλάβης $D\%$ ως προς $H_s/H_{s,D=0}$.(Πηγή:Rock Manual ,2012).	40
Πίνακας 4: Ανεμολογικά δεδομένα του σταθμού της Ε.Μ.Υ. στη Ικαρία. (Πηγή: Ε.Μ.Υ.,2018)	57
Πίνακας 5: Έλεγχος ευστάθειας θωράκισης	67
Πίνακας 6: Έλεγχος ευστάθειας πόδα	68
Πίνακας 7: Πίνακας αποδεκτών τιμών μέσης παροχής και μέγιστου όγκου υπερπήδησης (Πηγή: Eurotop II,2016).	69
Πίνακας 8: Πίνακας υπολογισμού τελικού κόστους έργου ενίσχυσης με αύξηση πλάτους στέψης.	86
Πίνακας 9: Πίνακας κοστολόγησης διατομής Π0-Π0'.	87
Πίνακας 10: Πίνακας κοστολόγησης διατομής Π1-Π1'.	88
Πίνακας 11: Πίνακας κοστολόγησης διατομής Π4-Π4'.	89
Πίνακας 12: Πίνακας κοστολόγησης διατομής Π5-Π5'.	90
Πίνακας 13: Πίνακας κοστολόγησης διατομής Π6-Π6'.	91
Πίνακας 14: Πίνακας υπολογισμού τελικού κόστους πρότασης 2.	92
Πίνακας 15: Πίνακας υπολογισμού χαρακτηριστικών κύματος για Βόρειο άνεμο.	99
Πίνακας 16: Κυματικό κλίμα στα βαθιά από SMB για Βόρειο άνεμο.	99
Πίνακας 17: Χαρακτηριστικά κύματος για Βόρειο άνεμο χωρίς περιορισμό της διάρκειας πνοής	99
Πίνακας 18: Πίνακας υπολογισμού χαρακτηριστικών κύματος για Βορειοδυτικό άνεμο.	99
Πίνακας 19: Κυματικό κλίμα στα βαθιά από SMB για Βορειοδυτικό άνεμο.	100
Πίνακας 20: Χαρακτηριστικά κύματος για Βορειοδυτικό άνεμο χωρίς περιορισμό της διάρκειας πνοής.	100
Πίνακας 21: Πίνακας υπολογισμού q_{mean} και V_{max} .	101
Πίνακας 22: Υπερπήδηση με αύξηση πλάτους στέψης κατά 1,90 m.	102
Πίνακας 23: Πίνακας υπολογισμού γεωμετρίας ύφαλου κυματοθραύστη	103

1. Εισαγωγή

1.1 Τοποθέτηση προβλήματος

Όπως σε όλο τον κατασκευαστικό κλάδο, έτσι και στο τομέα των λιμενικών και παράκτιων κατασκευών οι φθορές τόσο από το πέρασμα του χρόνου όσο και από τυχόν παραβλέψεις, είναι αναπόφευκτες. Ειδικά στον κλάδο των λιμενικών και των παράκτιων έργων που το κανονιστικό πλαίσιο δεν είναι συγκεκριμένο και από τον υπολογισμό των φορτίσεων της εκάστοτε κατασκευής μέχρι τη στατική της μελέτη το περιθώριο σφάλματος και η αβεβαιότητα είναι σε αρκετά υψηλά επίπεδα, οδηγούν πολλές φορές στην υπερτίμηση των συνθηκών και υπερθωράκιση και υπερτιμολόγηση του έργου αλλά και αρκετές φορές στην υποτίμηση αυτών και στην αστοχία του έργου. Επομένως, η ανάγκη για παρακολούθηση, αποκατάσταση, και επισκευή αυτών είναι επιτακτική.

Το ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια επικεντρώνεται στη μεταβολή των κυματικών χαρακτηριστικών στις παράκτιες ζώνες και τα λιμενικά έργα, καθώς παρατηρείται αλλαγή στην ένταση και τη διάρκειά τους. Τα συνεχώς αυξανόμενα ακραία γεγονότα, που σύμφωνα με τους επιστήμονες είναι αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής, σε συνδυασμό με τους υπόλοιπους παράγοντες που αναφέρθηκαν στην παραπάνω παράγραφο, δρα δυσμενώς αθροιστικά στην ευστάθεια των λιμενικών έργων .

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας επικεντρώνεται στην εύρεση και παρουσίαση των διαφόρων μορφών αστοχίας λιμενικών έργων καθώς και στους τρόπους αναβάθμισης και ενίσχυσης αυτών για τα τωρινά αλλά και τα μελλοντικά δεδομένα. Η μελέτη εφαρμογής έχει ως αντικείμενο το λιμάνι του Ευδήλου Ικαρίας όπου μετά την κακοκαιρία της 18ης Ιανουαρίου 2018 διαβρώθηκε η εξωτερική θωράκιση με αποτέλεσμα ο μώλος να κοπεί στα δύο. Τα προτεινόμενα έργα κοστολογήθηκαν και επιλέχθηκε ο πλέον οικονομικότερος τρόπος αποκατάστασης.

1.2 Αντικείμενο – Σκοπός

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι οι μέθοδοι αποκατάστασης και επισκευής ζημιών σε λιμενικά έργα. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η συμπεριφορά, η ενίσχυση αλλά και η ανακατασκευή κατόπιν αστοχίας μεικτής διατομής κυματοθραυστών έναντι ακραίων καιρικών συνθηκών. Γίνεται καταγραφή των διαφόρων μορφών αστοχίας αλλά και των μεθόδων αποκατάστασης αυτών σε κυματοθραύστες σύνθετης διατομής. Συγκεκριμένα γίνεται εφαρμογή των μεθόδων αυτών στο λιμάνι του Ευδήλου της Ικαρίας. Αναλυτικότερα διερευνάται η υφιστάμενη κατάσταση των λιμενικών υποδομών μετά την εκδήλωση αστοχιών, γίνεται έλεγχος κατά πόσο η μελέτη προέβλεπε κατασκευές που θα μπορούσαν να αντιμετωπίσουν τα συνήθη αλλά και τα έκτακτα καιρικά φαινόμενα και τις

αντίστοιχες φορτίσεις, καθώς και το βαθμό κατά τον οποίο εφαρμόστηκε η τελική μελέτη.

Σκοπός της εργασίας είναι η εύρεση, η συγκέντρωση και η παράθεση των μεθόδων αποκατάστασης ζημιών που μπορούν να προκληθούν από φυσικά ή ανθρωπογενή αίτια σε λιμενικά έργα.

1.3 Μεθοδολογία

Από τη μελέτη του έργου επέκτασης του λιμένα ξεκίνησε η ανάγνωση και κατανόηση αυτής ώστε να υπάρχει μια αρχική εικόνα για την ταυτότητα του υπάρχοντος λιμενικού έργου.

Αρχικά ανακτήθηκαν τα μέσα ετήσια ανεμολογικά δεδομένα από την συλλογή ανεμολογικών δεδομένων για τον μετεωρολογικό σταθμό της Ικαρίας από την Ε.Μ.Υ. Σκοπός η εύρεση του κυματικού κλίματος της περιοχής για τις ημερομηνίες της κακοκαιρίας, δηλ η εύρεση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος (H_s) και της περιόδου του (T). Επόμενο βήμα ήταν η εύρεση αυτού του κυματισμού στα ρηχά και την περιοχή του έργου. Αυτό έγινε με την βοήθεια των προγραμμάτων MIKE ZERO , AutoCAD και της εφαρμογής Navionics. Αρχικά έγινε η αποτύπωση της περιοχής του έργου και της βυθομετρίας τόσο από τα δεδομένα της εφαρμογής όσο και από μετρήσεις που διεξήχθησαν κατά την έλευση κλιμακίων για αποτύπωση της καταστροφής απ' ευθείας στο έργο. Μετατρέποντας την αποτύπωση αυτή σε σημεία συντεταγμένων (x,y,z) του Ελληνικού Γεωδαιτικού Συστήματος Αναφοράς (Ε.Γ.Σ.Α '87) τα εισήχθησαν στο πρόγραμμα MIKE ZERO και με την βοήθεια πλέον αυτού πάρθηκαν τα αποτελέσματα για το κυματικό κλίμα στην περιοχή του έργου.

Στη συνέχεια από τα χαρακτηριστικά κύματος στην περιοχή του έργου πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος ευστάθειας της διατομής του λιμένα η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτών της μελέτης. Αναλυτικότερα υπολογίστηκε η υπερπήδηση και το ύψος αναρρίχησης με τη βοήθεια του EurOtop II 2016. Η διαστασιολόγηση και ο έλεγχος της προσήνεμης πλευράς και του κυματοθραύστη έγινε με την χρήση του Rock manual και συγκεκριμένα με χρήση του τύπου του Hudson και του Van der Meer. Για τον έλεγχο των τεχνητών ογκολίθων της εξωτερικής στρώσης θωράκισης χρησιμοποιήθηκαν οι προδιαγραφές από την εταιρία CLI (Concrete Layer Innovations).

1.4 Περιεχόμενο Εργασίας

- Στο παρόν Κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή για το θέμα της διπλωματικής εργασίας. Γίνεται μια τοποθέτηση σχετικά με το πρόβλημα που τίθεται προς επίλυση. Αναφέρεται το αντικείμενο και ο σκοπός της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.
- Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στα θεωρητικά στοιχεία που βασίστηκε η εργασία. Γίνεται μια αναφορά στους διάφορους τρόπους με τους οποίους ένα λιμενικό έργο μπορεί να αστοχήσει, όπως είναι οι υποσκαφές, η διάβρωση των μεταλλικών στοιχείων της κατασκευής, η χημική προσβολή της καθώς και η δράση των δυσμενών καιρικών συνθηκών όπως σεισμοί, πλημμύρες και πυρκαγιές. Παρουσιάζονται αναλυτικά επίσης οι μέθοδοι με τις οποίες μπορούν να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω αστοχίες.
- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η περιοχή εφαρμογής ως προς τη γεωμορφολογία της και την θέση της στον χάρτη της Ελλάδας. Γίνεται επίσης μια πλήρης περιγραφή της κατάστασης του λιμένα πριν και μετά την μεγάλη κακοκαιρία της 18^{ης} Ιανουαρίου 2018.
- Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η ανάλυση και ο υπολογισμός των διαφόρων μεταβλητών για τον έλεγχο και ανακατασκευή του λιμένα χρησιμοποιώντας το θεωρητικό υπόβαθρο του Κεφαλαίου 2. Απεικονίζεται η περιοχή του έργου σε τριγωνικό κάναβο στο πρόγραμμα Mike Zero ώστε να υπολογιστεί η ρήγωση και η διάθλαση στον πόδα του έργου. Επίσης γίνεται ο έλεγχος ευστάθειας της θωράκισης, του πόδα της κατασκευής καθώς και οι έλεγχοι έναντι υπερπήδησης και μέγιστου όγκου παροχής. Τέλος ελέγχονται και οι κατασκευαστικές ατέλειες της κατασκευής.
- Στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται οι προτάσεις αποκατάστασης. Η πρώτη είναι η προσθήκη στρώσης θωράκισης. Ως δεύτερη προτείνεται η εξομάλυνση της κλίσης του πρανούς. Τρίτη είναι η αύξηση του πλάτους της στέψης του κυματοθραύστη και τέλος η κατασκευή ύφαλου κυματοθραύστη ανάντη της υπάρχουσας κατασκευής. Επίσης γίνεται η κοστολόγηση αυτών και η σύγκρισή τους ώστε να αποφανθεί η βέλτιστη.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα συμπεράσματα.

2. Θεωρητικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια λεπτομερής καταγραφή των θεωρητικών στοιχείων και εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας. Αρχικά γίνεται αναφορά στην έννοια του κύματος ως φυσικό φαινόμενο. Αναφέρονται κάποιες μέθοδοι εύρεσης του χαρακτηριστικού κύματος περιοχής αλλά παρουσιάζονται και τα θεωρητικά στοιχεία του προγράμματος MIKE21 SW που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του κύματος στην περιοχή του έργου. Γίνεται αναφορά στα λιμενικά έργα γενικότερα ως κατασκευές, ως ορισμοί αλλά και στον ρόλο τους ως έργα. Δίνεται έμφαση στα εξωτερικά λιμενικά έργα, δηλαδή τους κυματοθραύστες, και παρουσιάζονται οι μορφές αστοχίας τους αλλά και οι μέθοδοι και τεχνικές με τις οποίες μπορούν να επισκευαστούν.

2.1 Ορισμός και Χαρακτηριστικά ανεμογενών κυμάτων

Η ταυτόχρονη δράση δυνάμεων απομάκρυνσης των υδάτινων σωματιδίων της θαλάσσιας μάζας από τη θέση ηρεμίας τους και δυνάμεων επαναφοράς των σωματιδίων στις αρχικές θέσεις τους, σε συνδυασμό με τη μεγάλη κινητικότητα των σωματιδίων, προκαλεί κάτω από ορισμένες συνθήκες τη δημιουργία κινήσεων ταλαντώσεων στα σωματίδια. Η συνισταμένη διαταραχή της θαλάσσιας μάζας από τις ταλαντώσεις των σωματιδίων οδηγεί στα θαλάσσια κύματα.

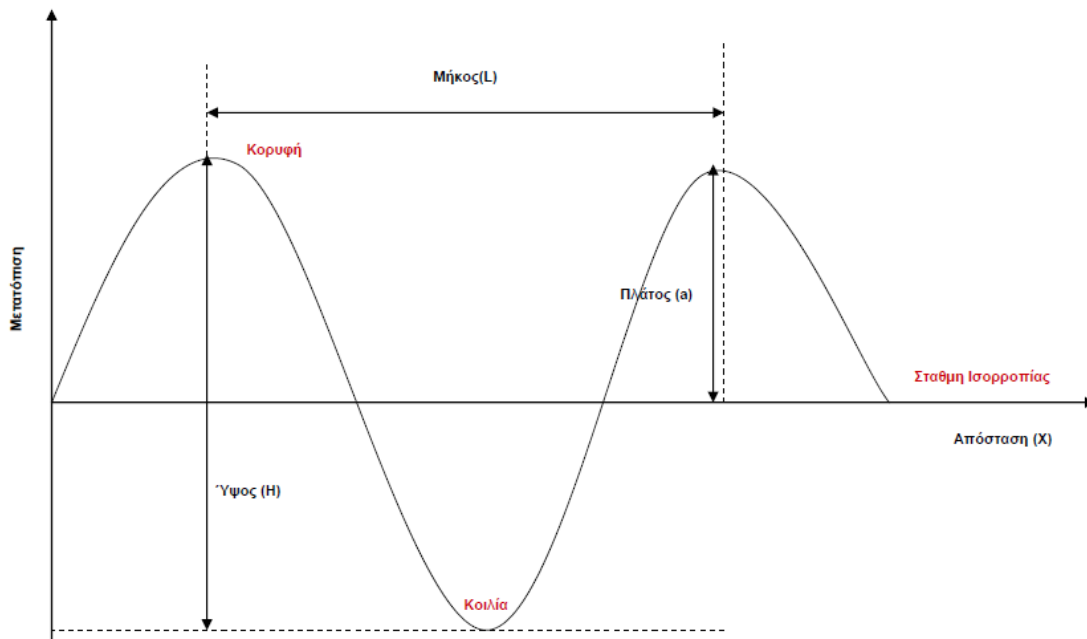
Τα κυριότερα γενεσιουργά αίτια των κυμάτων είναι ο άνεμος (ανεμογενείς κυματισμοί), οι σεισμικές δονήσεις, οι γρήγορες μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης και η έλξη από την σελήνη.

Οι κυριότερες επαναφέρουσες δυνάμεις προέρχονται από τη βαρύτητα, τη δύναμη Coriolis και την επιφανειακή τάση. Στους κυματισμούς μικρής περιόδου ($T < 30 \text{sec}$) η γενεσιουργός δύναμη προέρχεται από τον άνεμο και η επαναφέρουσα δύναμη από τη βαρύτητα.

Τα κύματα γενικώς χωρίζονται σε δυο διαφορετικούς τύπους:

- Τα κύματα διαδόσεως που τα μόριά τους δεν έχουν κίνηση προς τα μπρος, αλλά κινούνται γύρω από τη μέση θέση ηρεμίας τους και μεταδίδουν μόνο ενέργεια.
- Τα κύματα μεταφοράς που τα μόριά τους έχουν προς τα μπροστά κίνηση και έτσι εγκαταλείπουν οριστικά τις αρχικές θέσεις της ηρεμίας τους και απομακρύνονται από αυτές.

Τα κύρια χαρακτηριστικά στοιχεία που προσδιορίζουν ένα κύμα είναι:



Σχήμα 1 : Σχηματική παράσταση κύματος με τι παραμέτρους του. (Πηγή:Εργαστήριο Ναυτιλίας και Θαλάσσιων Επιστημών)

- Το ύψος κύματος **H** όπου είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής και της κοιλίας αυτού.
- Το μήκος του κύματος **L** όπου είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών
- Η περίοδος του κύματος **T** όπου είναι η χρονική διάρκεια που χρειάζεται να περάσουν δύο διαδοχικές κορυφές ή δύο διαδοχικές κοιλίες του κύματος.

2.1.1 Μέθοδος SMB – Ανάπτυγμα πελάγους (Fetch)

Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του κύματος συναρτήσει των χαρακτηριστικών του ανέμου, το πιο διαδεδομένο καθοριστικό μοντέλο βραχυπρόθεσμης περιγραφής της κατάστασης διαταραχής της θαλάσσιας επιφάνειας είναι το μοντέλο SMB (Sverdrup - Munk - Bretschneider), (Μουτζούρης, 2009). Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο τα κύματα διαιρούνται σε τρεις κατηγορίες:

- Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα κύματα πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας. Δημιουργούνται από την πνοή ανέμου μακράς διάρκειας κατά μήκος μεγάλου αναπτύγματος πελάγους.
- Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα κύματα, που δημιουργούνται από την μακρά πνοή ανέμου κατά μήκος περιορισμένου αναπτύγματος πελάγους.
- Στην Τρίτη κατηγορία ανήκουν τα κύματα, που δημιουργούνται από την πνοή ανέμου σύντομης διάρκειας κατά μήκος μεγάλου αναπτύγματος πελάγου.

Τα χαρακτηριστικά (μήκος και ύψος) κύματος μεγαλώνουν με την διάρκεια πνοής του ανέμου και το ανάπτυγμα πελάγους. Για το λόγο αυτό τα μεγαλύτερα κύματα ανήκουν στην πρώτη κατηγορία.

Με το μοντέλο SMB υπολογίζονται το ύψος H_s και η περίοδος T_s του χαρακτηριστικού κύματος σαν μονοσήμαντες συναρτήσεις της ταχύτητας U του ανέμου, του αναπτύγματος πελάγους (fetch) F και της διάρκειας πνοής του ανέμου D . Χρησιμοποιούνται οι παρακάτω αδιάστατες εξισώσεις.

$$g * \frac{H_s}{U^2} = 0.283 * \tanh(0.0125 * \Phi^{0.42}) \quad (2.1)$$

$$g * \frac{T_s}{U} = 7.540 * \tanh(0.077 * \Phi^{0.25}) \quad (2.2)$$

$$g * \frac{D}{U} = 6.588 * \exp((0.0161 \ln(\Phi)^2 - 0.369 \ln(\Phi) + 2.2024)^{0.5} + 0.8798 \ln(\Phi)) \quad (2.3)$$

Όπου Φ είναι ο συντελεστής αναπτύγματος πελάγους

$$\Phi = g * \frac{f}{U^2} \quad (2.4)$$

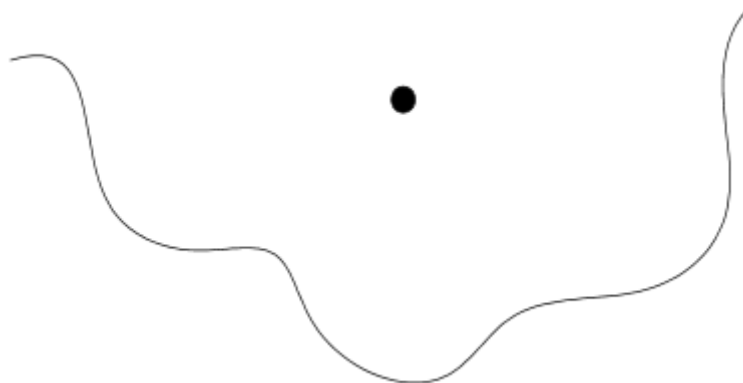
Το ανάπτυγμα πελάγους είναι ένα μέγεθος το οποίο έχει μονάδες μήκους και εκφράζει κατά κάποιο τρόπο την απόσταση από την ακτή που αναπτύσσεται το κύμα.

Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η σχέση:

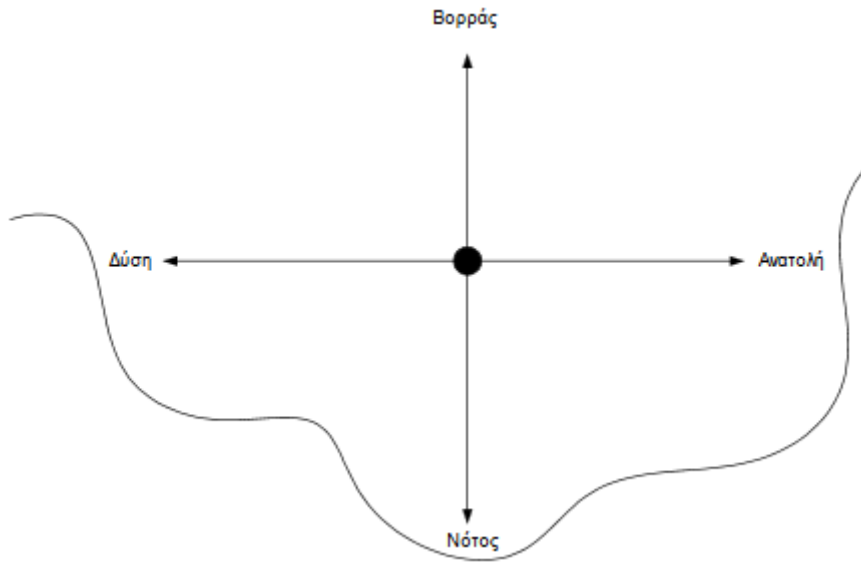
$$F = \frac{\Sigma R \cos^2(a)}{\Sigma \cos(a)} \quad (2.5)$$

και ακολουθεί η παρακάτω διαδικασία:

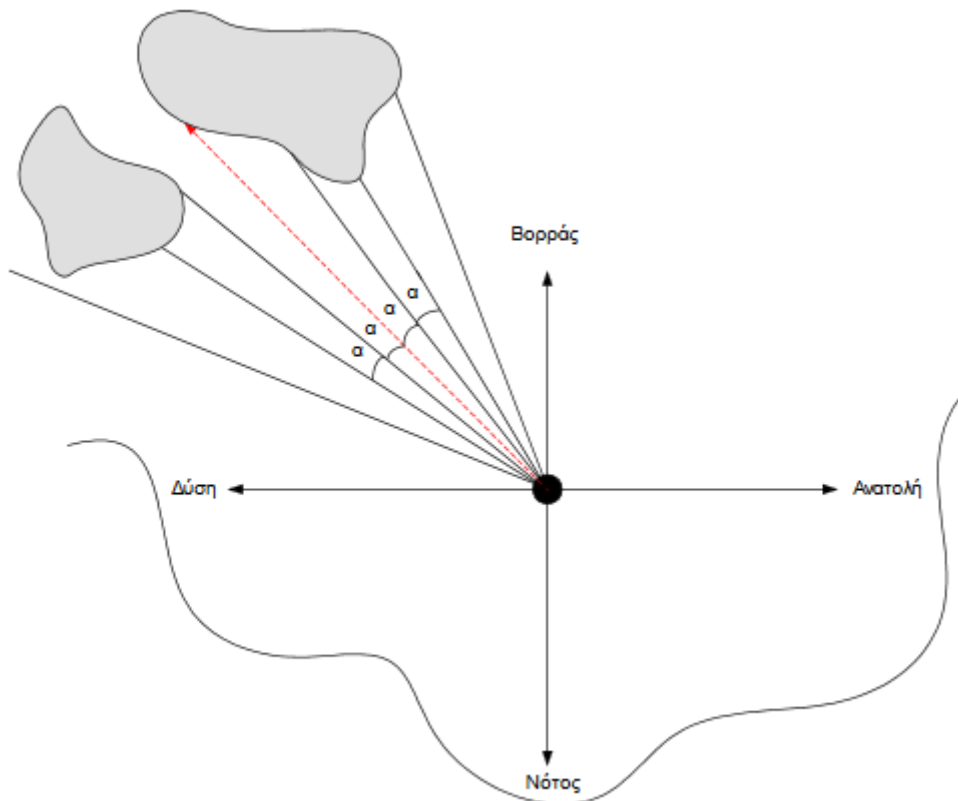
- Επιλέγεται ένα σημείο στην υπό μελέτη ακτή στην περιοχή βαθέων υδάτων.



- Στο σημείο αυτό χαράζονται οι ευθείες που παριστούν τις τέσσερις διευθύνσεις Βορρά, Νότο, Δύση και Ανατολή.



- Εντοπίζεται από τα ανεμολογικά και τοπογραφικά μας στοιχεία ποιες διευθύνσεις ανέμου επηρεάζουν την ακτή που μελετάται. Απομονώνονται και για κάθε μια από αυτές ακολουθείται η εξής διαδικασία.
 - Από το σημείο που έχει επιλέχθει φέρονται διαδοχικές ευθείες που σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία $\alpha=5^\circ$, 45° μοίρες δεξιά και αριστερά της κατεύθυνσης ανέμου που μας ενδιαφέρει.
 - Επεκτείνονται τις ευθείες αυτές μέχρι να συναντήσουν στεριά και προσδιορίζεται το μήκος τους R_i .



- Με βάση τα παραπάνω υπολογίζονται τα μεγέθη *cosa*, *Ricos2a* και τα αθροίσματά τους και εφαρμόζεται η Εξίσωση 2.5. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται το ανάπτυγμα πελάγους για τη συγκεκριμένη κατεύθυνση ανέμου. Ανάλογα με τις διευθύνσεις των ανέμων που επηρεάζουν την ακτή μας υπολογίζεται το *fetch* για κάθε έναν από αυτούς.

2.1.2 Πρόγραμμα Mike 21 Spectral wave DHI

Για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MIKE 21 DHI (Danish Hydraulic Institute, 2013) με το οποίο έγινε η προσομοίωση της θαλάσσιας περιοχής του Εύδηλου Ικαρίας και ο υπολογισμός της ρήχωσης και της διάθλασης από τα βαθιά στα ρηχά ύδατα.

2.1.2.1 Γενικά στοιχεία μοντέλου

Το MIKE 21 SW είναι ένα τρίτης γενιάς φασματικό μοντέλο κυμάτων και ανέμων, το οποίο προσομοιώνει την ανάπτυξη, την απόσβεση και τον μετασχηματισμό των ανεμογενών κυμάτων στη ζώνη των βαθέων υδάτων και τις παράκτιες περιοχές. Το μοντέλο περιλαμβάνει δυο διαφορετικά είδη σύνθεσης:

- Πλήρως φασματική ανάπτυξη
- Κατευθυντική ανάλυση μεμονωμένων παραμέτρων

Η πλήρως φασματική ανάπτυξη βασίζεται στην εξίσωσης διατήρησης της κυματικής δράσης όπως περιγράφεται από τους Komen (1994) και Young (1999). Η κατευθυντική ανάλυση μεμονωμένων παραμέτρων βασίζεται στην παραμετροποίηση της εξίσωσης διατήρησης της κυματικής δράσης. Η παραμετροποίηση αυτή πραγματοποιείται στο χώρο των συχνοτήτων εισάγοντας τη μηδενική και την αρχική στιγμή του φάσματος της κυματικής ενέργειας.

Τα φαινόμενα που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς του MIKE 21 SW είναι:

- Η ανάπτυξη των κυματισμών από τη δράση των ανέμων
- Η μη γραμμική αλληλεπίδραση των κυμάτων
- Η διασπορά λόγω της θραύσης στην ανοιχτή θάλασσα
- Η διασπορά λόγω της τριβής του πυθμένα
- Η διασπορά λόγω της θραύσης των κυματισμών
- Η διάθλαση και η ρήχωση του κύματος
- Η αλληλεπίδραση κύματος και ρεύματος
- Η επίδραση του χρονικά μεταβαλλόμενου βάθους του νερού
- Η επίδραση του πάγου στη περιοχή των κυμάτων

Το MIKE 21 SW χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του κυματικού κλίματος στη περιοχή των βαθέων υδάτων και στις παράκτιες περιοχές σε hindcast και forecast προσομοιώσεις. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως στον σχεδιασμό έργων

ανοικτής θαλάσσης καθώς και παράκτιων και λιμενικών έργων όπου η ακριβής εκτίμηση των κυματικών χαρακτηριστικών είναι πολύ σημαντική για τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό αυτών των κατασκευών.

2.1.2.2 Θεωρητικά στοιχεία μοντέλου

Στο μοντέλο MIKE 21 SW, τα ανεμογενή κύματα αναπαριστώνται από τη φασματική πυκνότητα της κυματικής δράσης $N(\sigma, \theta)$. Ως ανεξάρτητες παράμετροι έχουν επιλεγεί η σχετική γωνιακή συχνότητα ($\sigma=2\pi f$) και η διεύθυνση του προσπίπτοντος κυματισμού θ . Η σχέση μεταξύ της σχετικής γωνιακής συχνότητας και της απόλυτης γωνιακής συχνότητας ω δίνεται από τη γραμμική σχέση διασποράς:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} = \omega - \bar{k}U \quad (2.6)$$

Όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, d το βάθος του νερού, \bar{U} το διάνυσμα της ταχύτητας του ρεύματος και \bar{k} το διάνυσμα του κύματος με μέτρο k και διεύθυνση θ . Η πυκνότητα δράσης $N(\sigma, \theta)$ σχετίζεται με την πυκνότητα της ενέργειας $E(\sigma, \theta)$ μέσω της σχέσης:

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (2.7)$$

- Πλήρως φασματική ανάπτυξη

Η εξίσωση που διέπει το MIKE 21 SW είναι η εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης σε καρτεσιανές ή σφαιρικές συντεταγμένες. Στις οριζόντιες καρτεσιανές συντεταγμένες, η εξίσωση διατήρησης της κυματικής δράσης είναι η εξής:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla(\bar{v}N) = \frac{s}{\sigma} \quad (2.8)$$

όπου $N=(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$ είναι η πυκνότητα δράσης, t ο χρόνος, $\bar{x}=(x, y)$ είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες, $\bar{v}=(c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ είναι η ταχύτητα διάδοσης ομάδας κυμάτων σε τεσσάρων διαστάσεων χώρο, S η πηγή για την εξίσωση ισορροπίας της κυματικής ενέργειας, ∇ ο τεσσάρων διαστάσεων διαφορικός τελεστής στο χώρο \bar{x} , σ , θ . Οι συνιστώσες των ταχυτήτων διάδοσης δίνονται από τις γραμμικές κινηματικές σχέσεις:

$$(C_x, C_y) = \frac{dx}{dt} = \bar{C}_t + \bar{U} = \frac{1}{2} \left(\frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) + \bar{U} \quad (2.9)$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \nabla x d \right] - C_g \bar{k} \frac{\partial U}{\partial s} \quad (2.10)$$

$$C_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -1/k \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \frac{\partial U}{\partial m} \right] \quad (2.11)$$

όπου s είναι η χωρική συντεταγμένη της διεύθυνσης θ του κυματισμού, m είναι η συντεταγμένη κάθετη στο s , ∇_x είναι ο δισδιάστατος διαφορικός τελεστής στο χώρο x .

- Εξίσωση πηγής

Ο όρος της πηγής στο β' μέλος της εξίσωσης 2.8 διατήρησης της κυματικής δράσης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_0)}{\partial \theta} = T_0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_1)}{\partial \theta} = T_1 \quad (2.13)$$

Όπου $m_0(x,y,\theta)$ και $m_1(x,y,\theta)$ είναι η μηδενική και η αρχική στιγμή του φάσματος δράσης $N(x,y,\sigma,\theta)$, $T_0(x,y,\theta)$ και $T_1(x,y,\theta)$ είναι οι συναρτήσεις πηγής στο φάσμα δράσης. Τα στιγμιότυπα $m_n(x,y,\theta)$ ορίζονται με τη σχέση:

$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^\infty \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega \quad (2.14)$$

Οι συναρτήσεις πηγής T_0 και T_1 λαμβάνουν υπόψιν την επίδραση της δημιουργίας των τοπικών ανέμων (για την λειτουργία στάσιμων κυμάτων (stationary)) και της διασποράς της ενέργειας λόγω της τριβής στον πυθμένα και της θραύσης των κυματισμών. Επιπρόσθετα περιλαμβάνεται το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των κυμάτων-ρευμάτων. Οι συναρτήσεις πηγής για την τοπική δημιουργία ανέμων προέρχονται από την εμπειρικές σχέσεις εξέλιξης Johnson (1998).

- Βασικές παράμετροι εισόδου

Για την προσομοίωση σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες είναι απαραίτητο να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στις εξής παραμέτρους του προγράμματος που αποτελούν και τα βασικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου. Αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής ομάδες:

- Πεδίο μελέτης και χρονικές παράμετροι
 - Κάναβος περιοχής μελέτης
 - Τύπος συντεταγμένων (καρτεσιανές ή σφαιρικές)
 - Χρόνος προσομοίωσης και χρονικό βήμα
- Εξισώσεις, διακριτοποίηση και μέθοδος επίλυσης
 - Μέθοδος σύνθεσης
 - Συχνότητα και κατευθυντική διακριτοποίηση
 - Αριθμός ομάδων χρονικών βημάτων
- Κινητήριες παράμετροι
 - Δεδομένα στάθμης θαλάσσιας επιφάνειας
 - Δεδομένα ρευμάτων
 - Δεδομένα ανέμων

- Δεδομένα κάλυψης πάγου
- Παράμετροι συναρτήσεων πηγής
 - Μη γραμμική μετάδοση ενέργειας
 - Θραύση κυματισμών
 - Τριβή πυθμένα
 - Θραύση στα ανοιχτά
- Αρχικές συνθήκες
 - Μηδενικό φάσμα
 - Εμπειρικά δεδομένα
 - Δεδομένα αρχεία από προηγούμενο μοντέλο προσομοίωσης
- Οριακές συνθήκες
 - Κλειστά όρια
 - Ανοιχτά όρια (περιγραφή συνθηκών και δεδομένα κυματικών χαρακτηριστικών στο ανοιχτό όριο)

2.2 Λιμενικά έργα - Ορισμοί

Λιμενικά έργα ονομάζονται όλα τα έργα τα οποία κατασκευάζονται μέσα στο χερσαία και θαλάσσια ζώνη του λιμένα με σκοπό:

- να διασφαλίζουν την ηρεμία της λιμενολεκάνης
- να δημιουργούν συνθήκες ασφαλούς εισόδου-εξόδου, πλεύρισης και παραμονής του πλοίου μέσα στο λιμάνι
- να παρέχουν ασφαλή παραμονή, διακίνηση και διανομή των φορτίων και των εμπορευμάτων.

Τα λιμενικά έργα μπορούν να διαιρεθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

- τα θαλάσσια λιμενικά έργα και
- τα χερσαία λιμενικά έργα

Τα θαλάσσια λιμενικά έργα κατασκευάζονται μέσα στη θάλασσα και έχουν σκοπό να προφυλάξουν τη λεκάνη του λιμανιού από τα στοιχεία της φύσης όπως κύματα, ρεύματα, παλίρροιες κ.α.

Τα χερσαία λιμενικά έργα κατασκευάζονται πίσω από την οριογραμμή της λιμενολεκάνης με σκοπό τη ασφαλή διεκπεραίωση, προστασία, και διακίνηση των φορτίων και των εμπορευμάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχολείται με τα θαλάσσια λιμενικά έργα.

2.2.1 Θαλάσσια λιμενικά έργα

Τα θαλάσσια λιμενικά έργα διαιρούνται και αυτά σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

- στα εξωτερικά λιμενικά έργα και
- στα εσωτερικά λιμενικά έργα

Τα εξωτερικά λιμενικά έργα είναι στενοί αλλά πολύ ισχυροί και ανθεκτικοί βραχίονες που κατασκευάζονται μέσα στη θάλασσα και προορίζονται για να αναχαιτίζουν τα κύματα και να προφυλάξουν την ηρεμία αλλά και τις γεωμετρικές διαστάσεις της λεκάνης του λιμανιού.

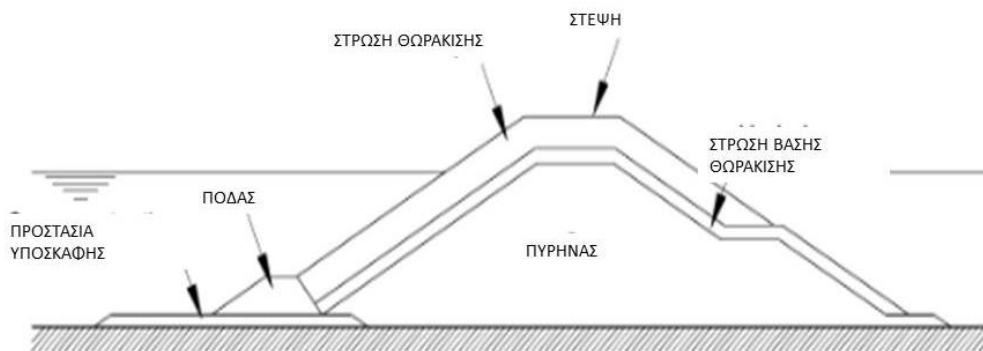
Τα έργα αυτά τα οποία μπορούν ή όχι να συνδέονται με την ακτή λέγονται **κυματοθραύστες (breakwaters) ή μώλοι (moles)**, και αποτελούν τις σπουδαιότερες λιμενικές μονάδες τεχνητής προστασίας και μόρφωσης ενός λιμανιού που κατασκευάζεται σε εκτεθειμένη, στα κύματα του πελάγους, ακτή. Οι **κυματοθραύστες** καθορίζουν την οριογραμμή της λεκάνης του λιμανιού προς την μεριά της θάλασσας η οποία και αποτελεί το εξωτερικό όριο της λιμενολεκάνης (Μέμος, 2013).

Η κεκλιμένη προς το πέλαγος παρειά συνιστά μηχανισμό απορρόφησης της ενέργειας των κυματισμών μέσω της θραύσης που προκαλεί, πλεονεκτώντας ως προς το κατακόρυφο μέτωπο που προκαλεί μόνιμο εξ ανακλάσεως κυματισμό. Σε μερική αστοχία του έργου, η μορφή του μεταβάλλεται ομαλά από τις δυνάμεις του περιβάλλοντος και η επισκευή της διατομής είναι σχετικά εύκολη.

Σαν βασικό μειονέκτημα θα μπορούσε να αναφερθεί ο μεγάλος όγκος υλικών που απαιτείται, λόγω των μεγάλων διαστάσεων του έργου η βάση του οποίου μπορεί εύκολα να φτάσει τα 100m.

Από άποψη μορφής της διατομής των έργων με πρηνή μπορούμε να διακρίνουμε τους παρακάτω τύπους:

- Συμβατικής μορφής, όπου οι λιθορριπές τοποθετούνται σε επάλληλες στρώσεις που διαμορφώνουν και τη στέψη του έργου
- Με στηθαίο και πλάκα επικάλυψης για διαμόρφωση της στέψης
- Σύνθετης μορφής, όπου συνυπάρχουν πρηνή στην προσήνεμη πλευρά και κατακόρυφο μέτωπο στην υπήνεμη.



Σχήμα 2: Τυπική διατομή κυματοθραύστη (Πηγή: *Rock Manual*, 2012).

Ως εσωτερικά λιμενικά έργα εννοούμε τα κάθε είδους κρηπιδώματα παραβολής των σκαφών στην προστατευόμενη λιμενολεκάνη.

Τα **κρηπιδώματα** χρησιμεύουν για την πρόσδεση των σκαφών, ώστε να είναι δυνατές οι κάθε είδους κινήσεις φορτοεκφόρτωσης εμπορευμάτων ή/και αποεπιβίβασης επιβατών. Για το σκοπό αυτό διαμορφώνεται ένα υπαρκτό ή νοητό κατακόρυφο μέτωπο, το μέτωπο παραβολής, στο οποίο πλευρίζει, πρυμνοδετεί ή γενικά προσδένει το σκάφος για να ακινητοποιηθεί. Το κατακόρυφο αυτό μέτωπο οριοθετεί την λιμενολεκάνη ενώ παράλληλα συγκρατεί τις γαίες που διαμορφώνουν τους χερσαίους χώρους του λιμένα. Η διαμόρφωση αυτή γίνεται μέσω προκατασκευασμένων ογκολίθων που τοποθετούνται ο ένας επί του άλλου. Επειδή ο τρόπος δόμησης μοιάζει με κατασκευή τοιχοποιίας, το έργο αυτό ονομάζεται **κρηπιδότοιχος** (Μέμος, 2013).

Διακρίνουμε διάφορους τύπους κρηπιδοτοιχών ανάλογα με τη μορφή και τη λειτουργία τους. Οι κυριότεροι μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

- Έργα βαρύτητας
- Εύκαμπτα διαφράγματα
- Κρηπιδότοιχοι ανοικτού τύπου

Τα έργα βαρύτητας αντιμετωπίζουν τις ωθήσεις γαιών κυρίως μέσω του ίδιου βάρους τους και της συνεπαγόμενης αντίστασης σε ολίσθηση. Δύο τυπικοί εκπρόσωποι της κατηγορίας αυτής είναι ο κλασικός κρηπιδότοιχος με προκατασκευασμένους συμπαγείς ογκολίθους από σκυρόδεμα και τα προκατασκευασμένα κιβώτια (caissons).

2.2.2 Χερσαία λιμενικά έργα

Στην κατηγορία των χερσαίων λιμενικών έργων περιλαμβάνονται τα κτίρια, τα υπόστεγα, οι αποθήκες, οι δρόμοι, οι ειδικές κτιριακές εγκαταστάσεις, όλα τα δίκτυα και γενικά οποιοδήποτε έργο και οποιαδήποτε εγκατάσταση που βρίσκεται μέσα στη

χερσαία ζώνη του λιμανιού και που έχει σχέση με την εξυπηρέτηση του φορτίου, του πλοίου και των υπηρεσιών του λιμανιού.

2.3 Μηχανισμοί αστοχίας

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε αναφορά στις έννοιες των κυματοθραυστών και των κρηπιδότοιχων, τη μορφή αλλά και τον ρόλο τους σε ένα λιμένα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στους μηχανισμούς με τους οποίους αστοχούν οι κυματοθραύστες αλλά και οι κρηπιδότοιχοι.

2.3.1 Αστοχία – Ευστάθεια κυματοθραυστών

Ο σχεδιασμός ενός κυματοθραύστη απαιτεί υδραυλική, στατική και γεωτεχνική ανάλυση. Εκεί κρύβονται όλες οι πιθανές αστοχίες.

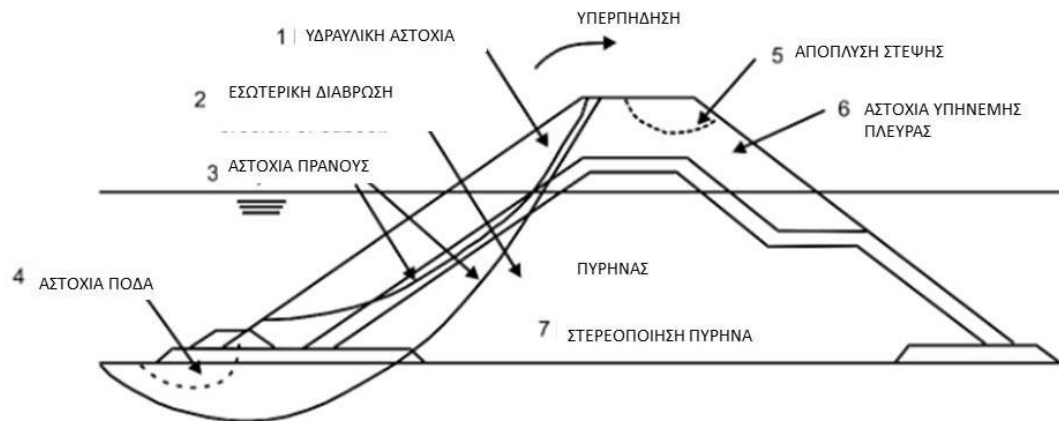
Οι αστοχίες καθορίζονται από την υπέρβαση των οριακών καταστάσεων λειτουργικότητας και αστοχίας. Η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας αναφέρεται στην αντοχή της κατασκευής έναντι φυσιολογικών συνθηκών και γενικά καθορίζει την λειτουργία που πρέπει να εκτελεί η κατασκευή. Για παράδειγμα, ένας κυματοθραύστης πρέπει να παρέχει τέτοια προστασία έναντι ισχυρών κυματισμών έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ηρεμία της λιμενολεκάνης. Είναι καλό να αναφερθεί ότι η υπέρβαση της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας δεν συνάδει την αστοχία της κατασκευής.

Η οριακή κατάσταση αστοχίας αναφέρεται στη έκθεση της κατασκευής σε ακραίες συνθήκες, και γενικά στην ικανότητα της κατασκευής να ‘επιβιώσει’ κάτω από πολύ ακραίες και έντονες συνθήκες. Η υπέρβαση της οριακής κατάστασης αστοχίας οδηγεί στον ‘τραυματισμό’ και πιθανόν σε αστοχία της κατασκευής. Για παράδειγμα, η υπέρβαση του κύματος σχεδιασμού μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία της εξωτερικής θωράκισης έπειτα της εσωτερικής, με κίνδυνο την ολική αστοχία της κατασκευής.

Για τους κυματοθραύστες η αστοχία προκαλείται γενικά από τη δράση των κυμάτων και από γεωτεχνικούς παράγοντες όπως, η πρισματική αστοχία (βλ εικόνα 3 , 3 slope failure), αστοχία θεμελιώσεως και εσωτερική διάβρωση οι οποίες προκαλούνται από τα ίδια βάρη της κατασκευής και από σεισμικές δράσεις.

Οι πιο συνήθεις αστοχίες κυματοθραυστών είναι:

- Αστοχία θωράκισης
- Αστοχία αντερείσματος ποδός
- Θραύση μεμονωμένης μονάδας θωράκισης
- Αστοχία λόγω υπερπήδησης κυματισμού

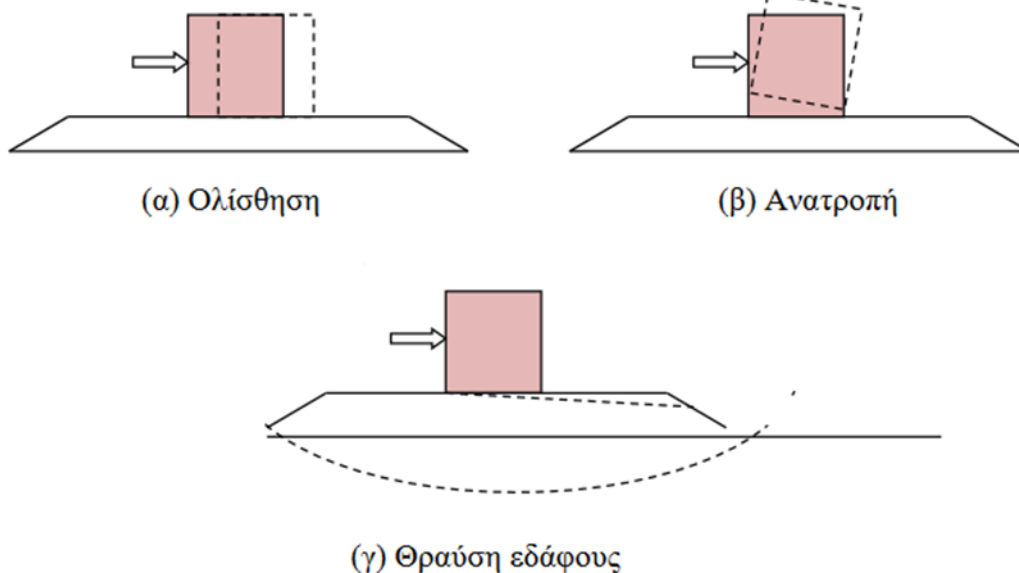


Σχήμα 3: Μηχανισμοί αστοχίας κυματοθραύστη με πρανή (Πηγή: *Rock Manual*, 2012).

Αστοχίες έχουν παρατηρηθεί από κατακόρυφους σύνθετους κυματοθραύστες εξαιτίας των πολύ υψηλών δυνάμεων που προκαλούν οι θραυόμενοι κυματισμοί, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια της δομής της βάσης του κρηπιδότοιχου.

Οι πιο συνήθεις αστοχίες κρηπιδότοιχων είναι:

- Αστοχία σε ανατροπή (βλ. σχήμα 4β)
- Αστοχία σε ολίσθηση (βλ. σχήμα 4α)
- Αστοχία τάσεων έδρασης (θραύση εδάφους) (βλ. σχήμα 4γ)



Σχήμα 4 : Μηχανισμοί αστοχίας κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο (Πηγή: *Rock Manual*, 2012).

2.4 Μέθοδοι επισκευής ζημιών σε λιμενικά έργα

Κατά τη διάρκεια ζωής των έργων είναι απαραίτητο να γίνεται περιοδικός έλεγχος και συντήρησή τους, έτσι ώστε να αποφεύγονται αστοχίες και δαπανηρές επισκευές.

Οι περιοχές των κατασκευών που πάσχουν περισσότερο και φθείρονται ταχύτερα είναι τα υποθαλάσσια τμήματα των έργων και κυρίως αυτά από οπλισμένο σκυρόδεμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο **οπλισμός** συνήθως **προσβάλλεται χημικά**, διογκώνεται και προκαλεί αποκόλληση της επικάλυψης σκυροδέματος. Η αντιμετώπιση τέτοιας φύσεως προβλημάτων γίνεται με μόρφωση **μανδύα από ταχύπηκτο σκυρόδεμα** στην περιοχή που παρουσιάζει βλάβες. Εάν η περιοχή αυτή είναι στο μέτωπο κρηπιδότοιχων βαρύτητας, τότε ο μανδύας μπορεί να στηριχθεί σε σύστημα πασσάλων ή σε άλλη πρόσφορη διάταξη (Μέμος, 2013)

Μεταλλικοί ή ξύλινοι πάσσαλοι και πασσαλοσανίδες υποφέρουν επίσης από αποσύνθεση ιδιαίτερα στη ζώνη διαβροχής.

Οι τεχνικές επισκευής καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από απλές επικαλύψεις συντήρησης, «μάτισμα» φθαρμένων στοιχείων, αντικατάσταση τμημάτων, επικάλυψη μεταλλικών στοιχείων με σκυρόδεμα, έως την πλήρη αντικατάσταση των στοιχείων της κατασκευής. Η μέθοδος που θα επιλεγεί πρέπει να βασίζεται στο μέγεθος της φθοράς σε σχέση με τις απαιτούμενες διαστάσεις του στοιχείου, στη διάρκεια ζωής του έργου και στις σχετικές οικονομικές παραμέτρους.

Μια αιτία φθοράς σε κρηπιδότοιχους βαρύτητας που απαιτεί επισκευή είναι οι πάσης φύσεως **υποσκαφές** της κατασκευής. Η ριζική θεραπεία αυτού του προβλήματος απαιτεί άρση των τεχνητών ογκολίθων που συνθέτουν τη στήλη με το πρόβλημα της υποσκαφής, με κύρια εκδήλωσή του την απόκλιση του μετώπου από την κατακόρυφο, επισκευή της θεμελίωσης με **σακκολίθους, έγχυτο σκυρόδεμα ή πλάκες τεχνητών ογκολίθων** και τελικά επανατοποθέτηση της στήλης (Μέμος, 2013).

Όσον αφορά τα έξαλα τμήματα των λιμενικών έργων και ιδίως των κρηπιδωμάτων, ο έλεγχος θα πρέπει να εστιάζεται στα ξύλινα ή ελαστικά τμήματα των προσκρουστήρων, στη **διάβρωση των μεταλλικών** εξαρτημάτων και στις αποκολλήσεις τεμαχίων σκυροδέματος. Η αντιμετώπιση των φθορών αυτών γίνεται με χρήση προστατευτικών επικαλύψεων των μεταλλικών μερών και με τοπικές αντικαταστάσεις σκυροδέματος και εξαρτημάτων εν γένει.



*Σχήμα 5: Διάβρωση οπλισμού σκυροδέματος σε επαφή με θαλασσινό νερό
(Πηγή: Vector Corrosion Services, 2017)*

Η αποσύνθεση των λιμενικών κατασκευών προέρχεται κυρίως από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Διάβρωση των μεταλλικών μερών περιλαμβανομένου του σιδηρού οπλισμού του σκυροδέματος.
- Βιοαποσύνθεση, όπως αυτή που προκαλείται από τους θαλάσσιους μικροοργανισμούς.
- Φυσικοχημικές διεργασίες, όπως η προσβολή του σκυροδέματος από το θείο.
- Μηχανική φθορά που συμβαίνει είτε από υπερφόρτιση των κατασκευών είτε από άλλες αιτίες.

Η διάβρωση οφείλεται στην οξείδωση των ατόμων του μετάλλου και παρουσιάζει μέγιστη τιμή στη ζώνη διαβροχής, ενώ παράλληλα η ύπαρξη ρευμάτων αυξάνει σημαντικά την ταχύτητα της διάβρωσης. Η διάβρωση επίσης ευνοείται από σχετικά πολύπλοκη γεωμετρία της μεταλλικής διατομής, όπως αυτής του γράμματος Η σε αντίθεση με τις κυκλικές διατομές που παρουσιάζουν τη μικρότερη διάβρωση.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού στα λιμενικά έργα γίνεται κυρίως με χρήση προστατευτικών επιστρώσεων Tidal Jacket (V.C.S.), ή με σύστημα καθοδικής προστασίας. Οι προστατευτικές επιστρώσεις έχουν σκοπό να απομονώσουν τα χαλύβδινα μέρη από τη διαβρωτική δράση του περιβάλλοντος. Ένα υλικό που συνήθως χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό είναι η λιθανθρακόπισσα σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη. Η επάλειψη γίνεται σε πάχος πάνω από 0,5 mm με επαύξηση του στη ζώνη διαβροχής (Μέμος, 2013). Το απλό σύστημα λιθανθρακόπισσας έχει μειονεκτήματα, όπως η εύκολη διεϊσδυσή του από μικροοργανισμούς και η μειωμένη

αποτελεσματικότητα όταν συνδυάζεται με συστήματα καθοδικής προστασίας (V.C.S.) Αντίθετα τα απλά εποξειδικά συστήματα προσφέρουν καλές ιδιότητες και ανθεκτικότητα στο νερό από την πρώτη στιγμή της εφαρμογής τους (Μέμος, 2013).



Σχήμα 6: Tidal Jacket (Πηγή: V.C.S.).

Το σύστημα καθοδικής προστασίας αποσκοπεί στο να προμηθεύσει με ηλεκτρόνια τα υπό διάβρωση μεταλλικά μέρη. Η βασική ιδέα είναι να θεωρηθεί το θαλάσσιο νερό ως ηλεκτρολύτης και τα προς προστασία μεταλλικά στοιχεία ως κάθοδοι. Επομένως η καθοδική προστασία μπορεί να λειτουργήσει μόνο για μεταλλικές επιφάνειες που βρίσκονται μέσα στο νερό (Μέμος, 2013).



Σχήμα 7: Επισκευή με καθοδική προστασία με εξωτερικό ρεύμα (Πηγή: V.C.S.).

Η βιοαποσύνθεση αφορά ξύλινα στοιχεία λιμενικών έργων που βρίσκονται μέσα στο νερό και προσβάλλονται από μικροοργανισμούς. Η φθορά του ξύλου μπορεί να είναι είτε επιφανειακή είτε εσωτερική.

Η φυσικοχημική αποσύνθεση αφορά το σκυρόδεμα που υπόκειται σε φθορές φυσικής προέλευσης (π.χ. παγετός) ή σε προσβολή χημικών ουσιών (χλωρίου, θείου, κλπ). Συνέπεια της τελευταίας είναι η διάβρωση του οπλισμού λόγω διείδυσης ιόντων χλωρίου και οξυγόνου μέσα από τη μάζα του σκυροδέματος. Βασικός παράγοντας προφύλαξης είναι η καλή ποιότητα σκυροδέματος με επιλεγμένη κοκκομετρία των αδρανών και κατάλληλο τύπο τσιμέντου καθώς και ικανό πάχος επικάλυψης (τουλάχιστον 8cm) (Μέμος, 2013).

Οι γενικές οδηγίες συντήρησης για την επισκευή και αποκατάσταση κατασκευών είναι λιγότερο ανεπτυγμένες από ότι για την κατασκευή νέων έργων. Αυτό συμβαίνει γιατί οι βλάβες και οι φθορές είναι συχνά τοπικές και συγκεκριμένες για την εκάστοτε κατασκευή, η οποία μπορεί να απαιτεί καινοτόμες προσεγγίσεις. Παρακάτω στην ενότητα αυτή θα αναφερθούν κάποιες γενικές οδηγίες που μπορούν να εφαρμοστούν γενικότερα σε πολλές κατασκευές.

Κάθε επισκευή ή αναμόρφωση είναι μοναδική. Παρ' όλα αυτά, οι παρακάτω οδηγίες μπορούν να εφαρμοστούν σε αρκετές κατασκευές.

- Έλεγχος των αρχικών κριτηρίων σχεδιασμού και των προδιαγραφών του έργου. Τα σχέδια είναι ιδιαίτερα σημαντικά, επειδή τεκμηριώνουν αυτό που πραγματικά κατασκευάστηκε και εντοπίζουν τυχόν αλλαγές που υπαγορεύτηκαν κατά την διάρκεια του σχεδιασμού.
- Προσδιορισμός της αιτίας του προβλήματος. Μπορεί να είναι προφανές το πρόβλημα, όπως μια μεγάλη καταγίδα, αλλά μερικές φορές η αιτία δεν

καθορίζεται τόσο εύκολα. Για παράδειγμα, οι ογκόλιθοι θωράκισης ενδέχεται να καταστραφούν λόγω ακραίων γεγονότων, είτε με την θραύση τους σε μικρότερα κομμάτια είτε με την πτώση ολόκληρου του στρώματος θωράκισης. Είναι βέβαια σημαντικό να επισημανθεί ότι η ζημιά ή η αστοχία μπορεί να προκληθεί και από συνδυασμό περιστάσεων. Αν δεν εντοπιστεί η πραγματική αιτία βλάβης, υπάρχει κίνδυνος να παρουσιαστούν μελλοντικά ζημιές με τον ίδιο τρόπο. Τέλος, το ιστορικό της κατασκευής είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί δείχνει τις διάφορες μεθόδους επισκευής ή κατασκευής που έχουν χρησιμοποιηθεί.

- Εάν η ζημιά μπορεί να αποδοθεί σε έναν και μόνο παράγοντα, όπως για παράδειγμα σε μια σφοδρή καταιγίδα, οι ακριβείς εκτιμήσεις της είναι κρίσιμες στο σχεδιασμό.
- Διερευνώντας τα υπάρχοντα σχέδια και συγκρίνοντάς τα με την κατασκευή γίνεται εντοπισμός πιθανών αποκλίσεων. Αυτό βοηθάει στην απομόνωση των προβληματικών περιοχών καθώς και στην αναγνώριση περιοχών όπου ενδέχεται να αναπτυχθούν μελλοντικά προβλήματα.
- Τέλος γίνεται ο σχεδιασμός μιας επισκευής που λύνει το πρόβλημα με ή χωρίς εκτεταμένες τροποποιήσεις.

Σε πολλά έργα συχνά κατά την επισκευή αξιοποιούνται και επαναχρησιμοποιούνται κάποια ή όλα τα στοιχεία του έργου. Σύμφωνα με το Rock manual, 2012 οι επιλογές για την παροχή μονάδων θωράκισης για επισκευή είναι τρεις:

1. Επαναχρησιμοποίηση των υπαρχόντων μονάδων θωράκισης
2. Χρήση καινούριων μονάδων θωράκισης
3. Βελτίωση της σταθερότητας των υπαρχόντων μονάδων θωράκισης

Δεδομένου ότι οι μονάδες θωράκισης μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, οι εργασίες επιδιόρθωσης μπορούν να περιλαμβάνουν μόνο την ανάκτηση των παρασυρμένων ογκολίθων και την τοποθέτηση αυτών ξανά στο πρανά, όπου είναι η πρόσβαση δυνατή. Στην επισκευή θα πρέπει να διασφαλιστεί η καλή αλληλοσύνδεση των μονάδων θωράκισης, ώστε να μειωθεί η πιθανότητα επανεμφάνισης ζημιών. Σε άλλη περίπτωση απαιτείται τοποθέτηση νέων μονάδων θωράκισης. Ωστόσο, είναι πολύ δαπανηρό να εισάγονται πρόσθετες μονάδες θωράκισης, ειδικά όταν η πηγή είναι απομακρυσμένη.

2.5 Επισκευή και συντήρηση κυματοθραυστών με πρανά

Η επισκευή εξετάζεται σε δύο κύριες κατηγορίες (USACE, 2003):

- Επισκευή – φτιάχνοντας τα τμήματα του έργου που έχουν υποστεί ζημιές από κύματα, ανέμους, ρεύματα, ή σεισμική δραστηριότητα.
- Αποκατάσταση ή ενίσχυση – επαναφορά των κατεστραμμένων τμημάτων της κατασκευής στην αρχική κατάσταση ή αναβάθμιση της κατασκευής ώστε να αντέχει σε μεγαλύτερα φορτία σχεδιασμού.

Οι επισκευές κυματοθραυστών με πρανή περιλαμβάνουν γενικά είτε την επανατοποθέτηση των μονάδων θωράκισης ή την αντικατάσταση αυτών. Σε μερικές περιπτώσεις η επισκευή μπορεί να επιτευχθεί με ενέματα σκυροδέματος ή ασφάλτου.

Οι παρακάτω θεωρήσεις διακρίνουν τον σχεδιασμό επισκευής έναντι τον σχεδιασμό νέας κατασκευής.

- Οι επισκευές γίνονται σε υπάρχον έργο που μπορεί να έχει υποστεί ζημιά από δυνάμεις καταιγίδας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μείωση της στέψης ή αλλοίωση των κλίσεων πρανών σε σχέση με αυτές που είχαν αρχικά σχεδιαστεί.
- Η αρχική θωράκιση μπορεί να αναμιχθεί με το υπόστρωμα.
- Είναι δύσκολη η αλλαγή κλίσης πρανούς ώστε να ταιριάζει στις παραμέτρους σχεδιασμού.
- Η ενσωμάτωση και η ασφάλεια μια νέας κλίσης στον πόδα είναι πιο δύσκολή σε υπάρχουσα παρά σε νέα κατασκευή.
- Οι μεταβάσεις μεταξύ του τμήματος επισκευής και της υπάρχουσας άθικτης κλίσης πρέπει να επιτυγχάνεται χωρίς να δημιουργούνται αδυναμίες στο στρώμα των ογκολίθων.
- Για την έναρξη των επισκευών, είναι συνήθως απαραίτητο να αφαιρεθεί μέρος ή ολόκληρη η πληγείσα θωράκιση.
- Η έγχυση σκυροδέματος ή ασφάλτος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επισκευές όταν η υπάρχουσα μονάδα είναι μικρή και δεν υπάρχει άμεσα διαθέσιμη σε μεγαλύτερο μέγεθος.

Ανάλογα με την έκταση της βλάβης ή της φθοράς σε έναν κυματοθραύστη με πρανή, οι επιλογές επισκευής κυμαίνονται από την ελαφριά επένδυση του στρώματος της κύριας θωράκισης μέχρι την ολοκληρωτική αντικατάσταση της δομής. Ο Pore (1992) ανέφερε τις πιο κοινές επιλογές για την επιδιόρθωση αυτών των κατασκευών.

Πίνακας 1 :Επιλογές για επισκευή κυματοθραυστών με πρανή (Πηγή: Pore, 1992).

Περιοχή προβλήματος	Επιλογές επισκευής
Κλίση πρανούς / Στέψη	<ul style="list-style-type: none"> • Προσαρμογή της επιφάνειας των μονάδων θωράκισης συνδέοντάς τες με μικρότερα υλικά, επανάστρωση κλίσης • Προσθήκη μονάδων θωράκισης • Ανακατασκευή στρώσης • Ανύψωση στέψης • Ταφή υπάρχοντος μονάδας θωράκισης
Πόδας έργου	<ul style="list-style-type: none"> • Ανακατασκευή ποδός • Απόπλυση και καθαίρεση ποδός

	<ul style="list-style-type: none"> • Προσθήκη berm
Πυρήνας / Αποφυγή κενών	<ul style="list-style-type: none"> • Προκατασκευή μονάδων σκυροδέματος • Φίλτρο υφάσματος (γεωύφασμα) • Ενέματα
Ολοκληρωτική αστοχία	<ul style="list-style-type: none"> • Αντικατάσταση της κατασκευής • Ολοκληρωτική αφαίρεση της υπάρχουσας κατασκευής

2.5.1 Μονάδες θωράκισης

Υπάρχουν τέσσερις γενικές κατηγορίες για επισκευή μονάδων θωράκισης (Rock Manual, 2012):

1. Τοπική αντικατάσταση κατεστραμμένων ή εκτοπισμένων ογκολίθων ή μονάδων θωράκισης από σκυρόδεμα
2. Επικάλυψη των υπαρχόντων μονάδων θωράκισης
3. Αντικατάσταση των στρώσεων θωράκισης
4. Ανακατασκευή της στρώσης

2.5.1.1 Τοπική αντικατάσταση κατεστραμμένων ή εκτοπισμένων φυσικών ή τεχνητών ογκολίθων

Στρώση θωράκισης

Όταν το κύριο στρώμα θωράκισης έχει υποστεί βλάβη λόγω της μετατόπισης των μεμονωμένων μονάδων θωράκισης και όταν το ποσοστό των εκτοπισμένων μονάδων είναι μικρότερο από 5%, είναι συχνά δυνατό να επισκευαστεί το στρώμα της θωράκισης αντικαθιστώντας τις αποδιοργανωμένες, μονάδες με μονάδες παρόμοιου τύπου και μεγέθους (Groeneveld et al,1985). Είναι αποδεκτή η πρακτική της επαναχρησιμοποίησης μετατοπισμένων λίθων ή συμπλήρωσης νέων, υπό την προϋπόθεση ότι οι παλιές μονάδες είναι ακόμα υγιείς και δεν έχουν υποστεί ζημιές ή κάποιο σπάσιμο σε μικρότερα κομμάτια. Εάν η ζημιά έχει προκληθεί από συχνά φαινόμενα καταιγίδας, τότε η επισκευή με παρόμοιες μονάδες μπορεί να μην παρέχει επαρκή μακροχρόνια προστασία (USACE, 2003).

Η τοπική αντικατάσταση ή η αντικατάσταση των μονάδων θωράκισης που έχουν υποστεί ζημιά είναι η λιγότερο δαπανηρή από τις επιλογές επισκευής, διότι απαιτεί μικρότερο χρόνο στο χώρο του έργου, το κόστος υλικών είναι χαμηλότερο και απαιτείται λιγότερη ανακατασκευή υπάρχουσας θωράκισης. Ωστόσο, το κόστος ανά μονάδα αντικατάστασης είναι πολύ υψηλό λόγω του υψηλού κόστους μετακίνησης. Οι μεμονωμένες μονάδες θωράκισης γενικά υφίστανται ζημιές κοντά στη επιφάνεια της θάλασσας και η επισκευή τους μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας συνεργία στη στέψη της κατασκευής, όπου είναι προσβάσιμη, ή με υδραυλικές μηχανές που να φτάνουν το πρανές. Η μεταφορά μεγάλων μονάδων θωράκισης είναι δύσκολη και πολλές φορές απαγορευτική για μονάδες μεγαλύτερων των 6 τόνων. Η μεταφορά τους θα πρέπει να γίνεται με προσοχή γιατί είναι πολύ εύκολη η πρόκληση ζημιών στα φορτηγά μεταφοράς. Για τις κατασκευές τις οποίες η πρόσβαση δεν είναι εύκολη

από τη στέψη της κατασκευής και η κατασκευή προσωρινών δρόμων είναι δύσκολή, οι επισκευές μπορούν να πραγματοποιηθούν με πλωτά συνεργεία. Αυτό βέβαια είναι ιδιαίτερα δαπανηρό εάν δεν είναι κάποιο πλωτό συνεργείο διαθέσιμο στην περιοχή (Rock Manual, 2012).

Πριν ξεκινήσουν οι επισκευές, πρέπει να αφαιρεθούν οι κατεστραμμένες μονάδες θωράκισης από την περιοχή του έργου που υπέστη ζημιά. Τα κενά μετά συμπληρώνονται με νέες μονάδες θωράκισης. Οι γειτονικές μονάδες που είναι ανεπηρέαστες, αναπροσανατολίζονται ώστε να παρέχουν καλή διασύνδεση με τις νέες. Οι τοπικές συνθήκες είναι πιθανόν να επιτρέψουν την απομάκρυνση ενός τμήματος σε σχήμα V της άνω στρώσης της θωράκισης για να διευκολυνθεί μια τέτοια επιδιόρθωση, διατηρώντας παράλληλα την αλληλοσύνδεση, η οποία απαιτείται σε μεγάλες κλίσεις. Εναλλακτικά, οι υπάρχοντες ογκόλιθοι μπορούν να μεταφερθούν και να κλείσουν το κενό από κάτω προς τη στέψη της κατασκευής, όπου και θα τοποθετηθούν οι νέοι ογκόλιθοι. (Ward and Markle, 1984).

Αυτή η μέθοδος βοηθάει στην καλή επαφή ανάμεσα στις παλαιές μονάδες θωράκισης και τις καινούριες. Οι κύριες δυσκολίες είναι να βρεθούν ίδιου μεγέθους ογκόλιθοι και σε ίδιο σχήμα με αυτούς που απομακρύνθηκαν για να καλύψουν το κενό καθώς επίσης και η καλή αλληλοσύνδεση τους. Αυτή η μέθοδος εξαλείφει επίσης τον πολλαπλό χειρισμό του εξοπλισμού και την ανάγκη για αποθήκευση των υπαρχόντων μονάδων. Εάν μια υπάρχουσα μονάδα θωράκισης που έχει υποστεί ζημιά είναι καλά συνδεδεμένη με μια άλλη γειτονική που είναι υγιής και την μετατοπίσει κατά την επισκευή μπορεί να προκαλέσει νέες αδυναμίες στο στρώμα της θωράκισης. Ομοίως, για να επιτευχθεί σωστή επισκευή θα πρέπει οι νέες μονάδες να τοποθετούνται καλά στην δομή και να διασφαλίζουν την αλληλοεμπλοκή τους με τις διπλανές (USACE, 2003).

Οι υποβρύχιες επιδιορθώσεις σε έργα με πρανή είναι εξαιρετικά δύσκολες. Είναι συνήθως ανέφικτο να αποκολληθεί το στρώμα της θωράκισης και να ξανασχεδιαστεί το σχεδιαστικό προφίλ. Αντί αυτού, η θωράκιση τοποθετείται συνήθως κατευθείαν και γύρω από την κενή περιοχή και η αλληλοσύνδεση επιτυγχάνεται κάνοντας μικρές αναπροσαρμογές και προσθέτοντας περισσότερο υλικό. Αυτό συνήθως οδηγεί σε τοπική αλλαγή στο προφίλ σχεδιασμού και τη συνεχιζόμενη ευπάθεια. Οι επιτόπιες επισκευές που απαιτούν την κινητοποίηση πλωτών εγκαταστάσεων είναι πολύ δαπανηρές και πραγματοποιούνται συνήθως μόνο όταν υπάρχει σημαντικός κίνδυνος για την ευστάθεια και την λειτουργικότητα του έργου.

Οι Turk και Melby (1997) προτείνουν δύο μεθόδους για την επιδιόρθωση μονάδων θωράκισης:

1. Τη μέθοδο της επιτόπου επισκευής, η οποία χρησιμοποιείται για επισκευή ενός μικρού συγκροτήματος σπασμένων μονάδων θωράκισης. Οι μονάδες που καταστράφηκαν απομακρύνονται και αντικαθίστανται από νέες μονάδες.

2. Τη μέθοδο επισκευής V-notch, η οποία είναι πιο εκτεταμένη επειδή η θωράκιση απομακρύνεται από το σημείο της βλάβης προς την στέψη της κλίσης του πρανούς σε σχήμα V που διευρύνεται προς την στέψη του πρανούς. Η εγκοπή μετά συμπληρώνεται είτε με εξ ολοκλήρου νέες μονάδες είτε με συνδυασμό νέων και παλιών μονάδων θωράκισης.

2.5.1.2 Επικάλυψη υπαρχόντων μονάδων θωράκισης

Σε περίπτωση που υπάρχει μεγάλη ζημιά στο στρώμα της θωράκισης, που προκαλεί την μετατόπιση ή την πτώση τους, μπορεί να είναι εφικτή η επισκευή της δομής προσθέτοντας μια επικάλυψη που αποτελείται από παρόμοιες ή διαφορετικές μονάδες θωράκισης. Οι επικαλύψεις επίσης να χρησιμοποιηθούν για να αυξηθεί η ανύψωση της στέψης για να μειωθεί η υπερπήδηση ή να διαμορφώσουν ηπιότερη κλίση για καλύτερη σταθερότητα της κατασκευής. Η κατασκευή επικάλυψης είναι δαπανηρή λόγω της απαιτούμενης ποσότητας της νέας θωράκισης, αλλά είναι λιγότερο δαπανηρή από την πλήρη αντικατάσταση της στρώσης της θωράκισης.

Ο σχεδιασμός της επικάλυψης απαιτεί κατανόηση της αιτίας της ζημιάς. Αν προκύψει η αστοχία από αστάθεια των μονάδων θωράκισης, η επικάλυψη θα πρέπει να αποτελείται από ογκολίθους ικανούς να αντισταθούν στη φόρτιση του κύματος. Αυτό συνεπάγεται επικάλυψη με ογκολίθους που είναι μεγαλύτεροι από την αρχική θωράκιση ή σε τοποθέτηση πιο επίπεδης κλίσης. Όπου δεν είναι διαθέσιμοι φυσικοί ογκολίθοι πολλών τόνων, οι τεχνητοί είναι η μόνη επιλογή.

Για μονή στρώση επικάλυψης δεν έχουν υπολογιστεί συντελεστές σταθερότητας και δεν είναι σωστό να χρησιμοποιηθούν συντελεστές που προορίζονται είτε για στρώματα θωράκισης δύο επιπέδων είτε για νέα κατασκευή μονής στρώσης. Θα πρέπει να χρησιμοποιούνται δοκιμές φυσικού μοντέλου για την βελτιστοποίηση ενός σταθερού σχεδιασμού επικάλυψης ενός επιπέδου.

Για διπλή στρώση επικάλυψης οι περισσότεροι συντελεστές σταθερότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν με την προϋπόθεση ότι θα ληφθεί μέριμνα ώστε να δημιουργηθεί μια σταθερή διεπαφή με τους υπάρχοντες ογκολίθους.

Τυπικά αυτό αναφέρεται στην επικάλυψη μιας υπάρχουσας κατασκευής με φυσικούς ογκολίθους, με θωράκιση από τεχνητούς ογκολίθους. Ο στόχος είναι να βελτιωθεί η σταθερότητα μέσω καλύτερης εμπλοκής, μεγαλύτερης μάζας ή και τον συνδυασμό και των δύο. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο σχεδιασμός της επικάλυψης βασίστηκε σε καθοδήγηση σχεδιασμού για νέες κατασκευές, αξιολόγηση δοκιμών μοντέλων ανάλογων δομών, δοκιμών μοντέλων για συγκεκριμένες τοποθεσίες, κρίσεις μηχανικού ή πρωτότυπη εμπειρία (Rock Manual, 2012).

2.5.1.3 Αντικατάσταση στρώσης θωράκισης

Μια πιο δαπανηρή εναλλακτική λύση για την κατασκευή μιας επικάλυψης είναι η πλήρης αντικατάσταση ή ανακατασκευή της στρώσης του στρώματος πάνω από ένα τμήμα της δομής. Όταν η αρχική θωράκιση έχει αποδειχθεί ανεπαρκής είτε δομικά είτε λειτουργικά, μπορεί να χρειαστεί να αντικατασταθεί το στρώμα θωράκισης. Η

αντικατάσταση είναι επίσης μια πιθανότητα όπου υπάρχουν υπερβολικά σπασμένες πέτρες ή μονάδες θωράκισης, υλικά κάτω από το απαιτούμενο μέγεθος, υπερπήδηση κύματος ή υπερβολική μετάδοση κύματος. Η ανακατασκευή της στρώσης θωράκισης είναι ενδεδειγμένη μόνο όταν μπορεί να διαπιστωθεί ότι η ζημία προκλήθηκε από κάτι άλλο εκτός από την αστάθεια των ογκολίθων, όπως ελαττωματική κατασκευή ή σεισμικά συμβάντα.

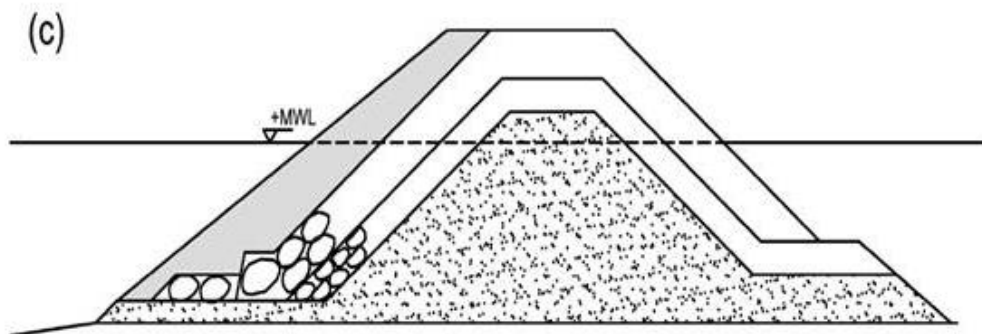
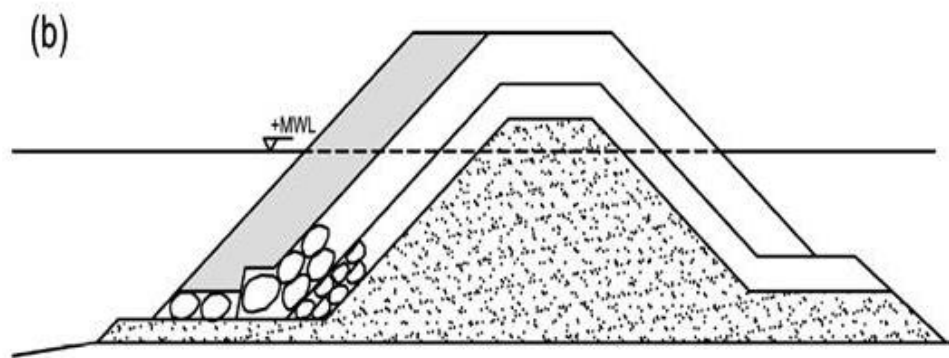
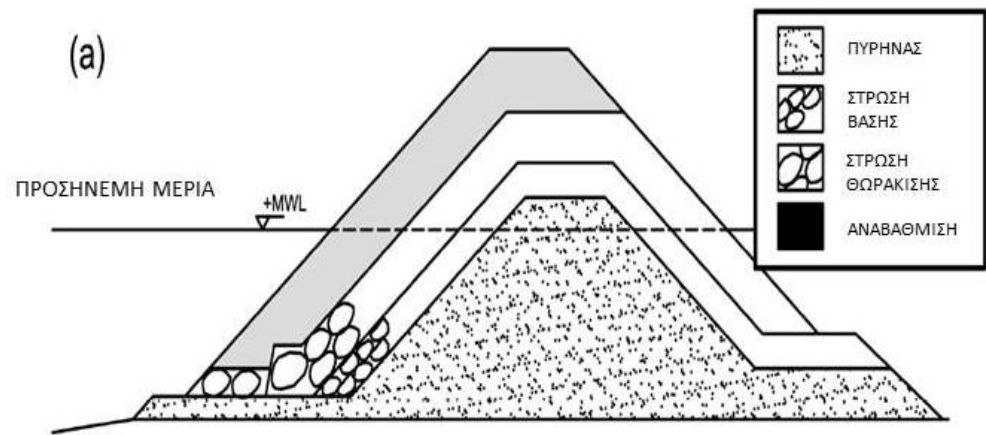
Αν και είναι πολύ ακριβό, η αντικατάσταση ή η ανακατασκευή στρώματος θωράκισης είναι δικαιολογημένη εάν το κόστος εκτιμάται ότι είναι μικρότερο από το μελλοντικό κόστος συντήρησης. Οι στρώσεις θωράκισης αντικατάστασης θα πρέπει να σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας τις οδηγίες που είναι διαθέσιμες για νέες κατασκευές. Το υπάρχον υπόστρωμα επί του οποίου θα τοποθετηθεί η νέα θωράκιση θα πρέπει να αποτρέπει την απώλεια υποστρώματος διαμέσου κενών στην πρωτεύουσα θωράκιση. Η κατασκευή των στρώσεων θωράκισης αντικατάστασης απαιτεί την αφαίρεση όλων των υφιστάμενων ογκολίθων και την αντικατάστασή τους με νέες μονάδες θωράκισης στο αναθεωρημένο σχέδιο. Η κατασκευή ξεκινάει από τον πόδα της κατασκευής και καταλήγει στην στέψη της.

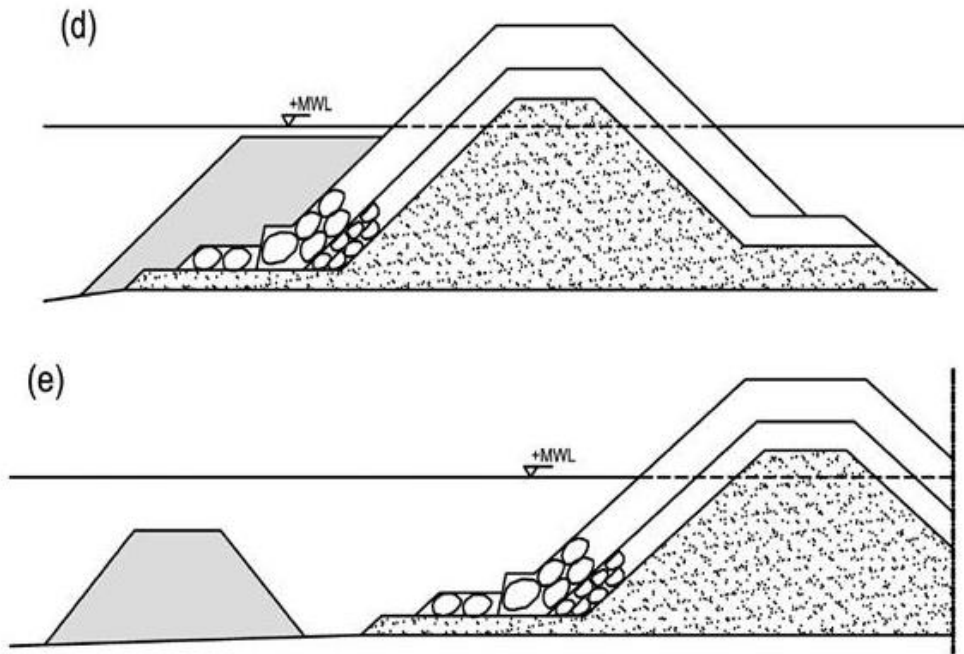
Η διάθεση της αρχικής μονάδας θωράκισης συνεπάγεται σημαντική δαπάνη. Εάν είναι δυνατόν, οι παλιές θωρακίσεις πρέπει να ανακυκλωθούν για να ελαχιστοποιηθούν τα έξοδα χειρισμού. Μια επιλογή θα μπορούσε να είναι η τοποθέτηση κατεστραμμένων και μικρότερου μεγέθους από το προβλεπόμενο φυσικών ή τεχνητών ογκολίθων στον πόδα της δομής, για να δημιουργηθεί ένα berm που χρησιμεύει ως βάση για την νέα στρώση. Ίσως χρειαστεί να αντικατασταθεί, να προστεθεί ή να προσαρμοστεί τμήμα του υπάρχοντος στρώματος που θα υποδεχθεί την νέα στρώση. Το υπόστρωμα πρέπει να ελεγχθεί για το σωστό πάχος και τη συμπύκνωση. Εάν το νέο στρώμα θωράκισης αποτελείται από μονάδες θωράκισης μεγαλύτερης εμβέλειας, μπορεί να χρειαστεί να αυξηθεί η ταξινόμηση της θωράκισης στο υπόστρωμα για να αποφευχθεί η απώλεια υλικού μέσα από τα κενά.

2.6 Μέθοδοι ενίσχυσης κυματοθραυστών με πρανή

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα η αστοχίας ενός κυματοθραύστη με πρανή εμφανίζεται κυρίως στην στέψη, στην πλαγία του καθώς και στον πόδα του. Στη συνέχεια παρουσιάζονται σύμφωνα με τους Πρίνος, Καραμπάς, Κόφτης, 2015 πέντε μορφές ενίσχυσης λιμενικών έργων.

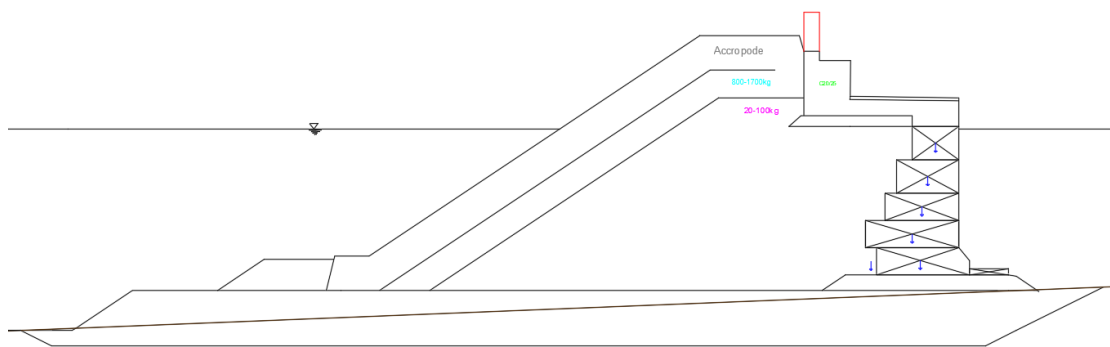
1. Αύξηση του ύψους της στέψης και ταυτόχρονη προσθήκη επιπλέον στρώσης θωράκισης.
2. Προσθήκη μιας επιπλέον στρώσης θωράκισης.
3. Εφαρμογή μεγαλύτερης κλίσης της υπάρχουσας εξωτερικής θωράκισης
4. Δημιουργία αναβαθμού στην βάση του πόδα της κατασκευής.
5. Κατασκευή ενός ύφαλου πλέον κυματοθραύστη μπροστά απ τον υπάρχον ως φράγμα για την μείωση της δράσης των κυματισμών.





Σχήμα 8: Σκαρηφίματα αναβάθμισης έξαλων κυματοθραυστών με πρανή (Πηγή: Πρίνος, 2015).

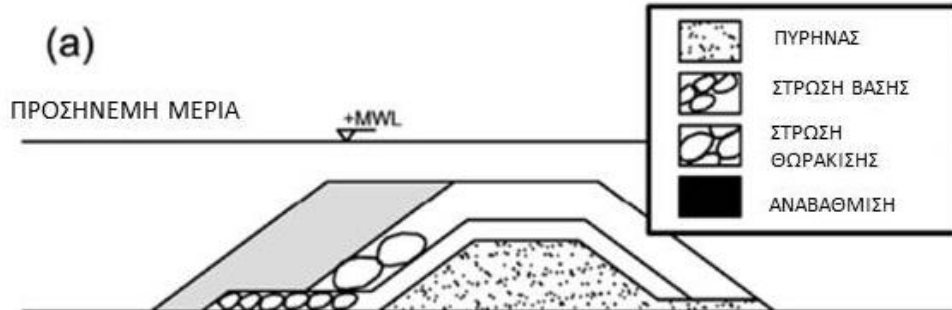
Επιπλέον αυτών των λύσεων, μια ακόμη δυνατή λύση θα ήταν η υπερύψωση του προφυλακτήριου τοίχου που φαίνεται στο παρακάτω σκαρίφημα ώστε να ελαττώσει την παροχή υπερπήδησης. Βέβαια θα πρέπει να γίνει σωστή η επιλογή του ύψους του τοίχου διότι μια υπερβολική αύξηση του προφυλακτήριου τοίχου θα έχει αρνητικές συνέπειες λόγω της αυξημένης έκθεσής του στα ακραία καιρικά φαινόμενα και στις απ' ευθείας δυνάμεις των κυμάτων.



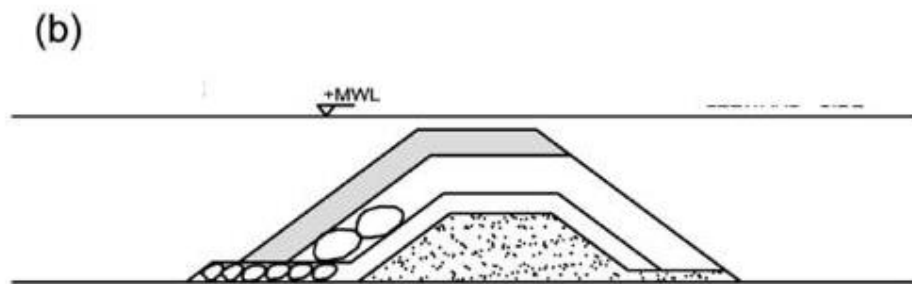
Σχήμα 9: Υπερύψωση προφυλακτήριου τοίχου

Εκτός από τους έξαλλους κυματοθραύστες υπάρχουν και οι ύφαλοι, οι οποίοι έχουν έναν βασικό περιορισμό ως προς την ανακατασκευή. Μετά την ανακατασκευή θα πρέπει να παραμείνουν ύφαλοι. Επομένως υπάρχουν δύο λύσεις ενίσχυσης αυτών.

1. Αύξηση του πλάτους της κατασκευής προσθέτοντας δομικό υλικό στην εξωτερική στρώση.
2. Η υπερύψωση της στέψης εάν και εφόσον υπάρχει δυνατότητα και χώρος.



Σχήμα 10: Αναβάθμιση ύφαλου κυματοθραύστη – αύξηση πλάτους (Πηγή: Πρίνος, 2015).



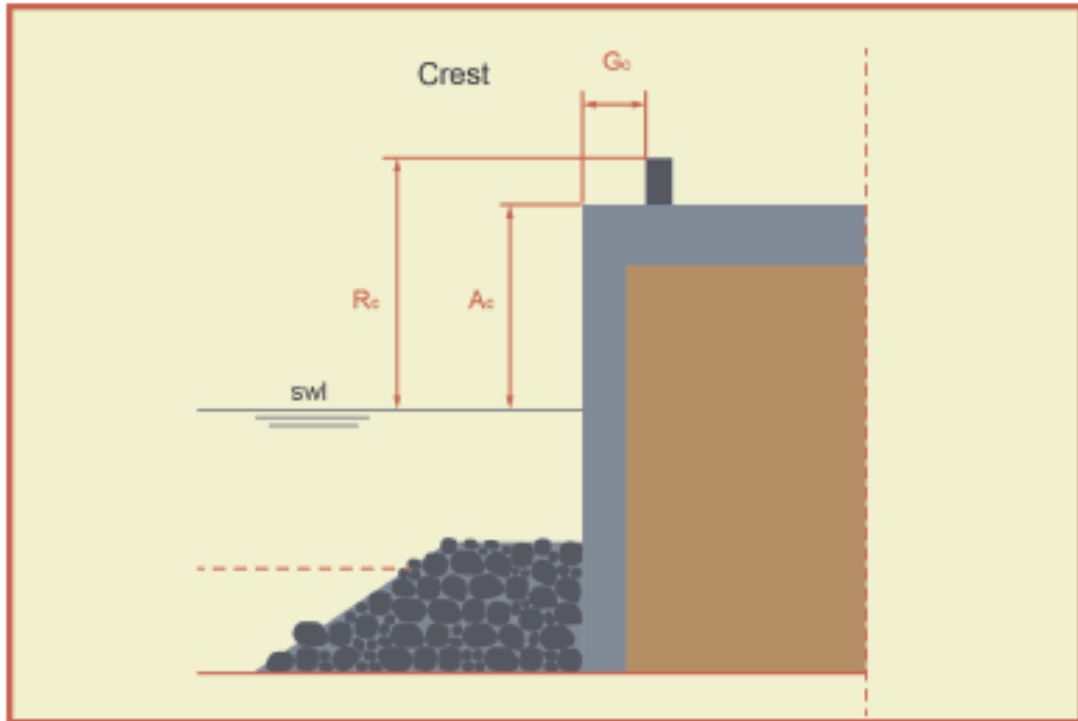
Σχήμα 11: Αναβάθμιση ύφαλου κυματοθραύστη – αύξηση στέψης (Πηγή: Πρίνος, 2015).

2.7 Μέθοδοι ενίσχυσης κυματοθραυστών με κατακόρυφο μέτωπο

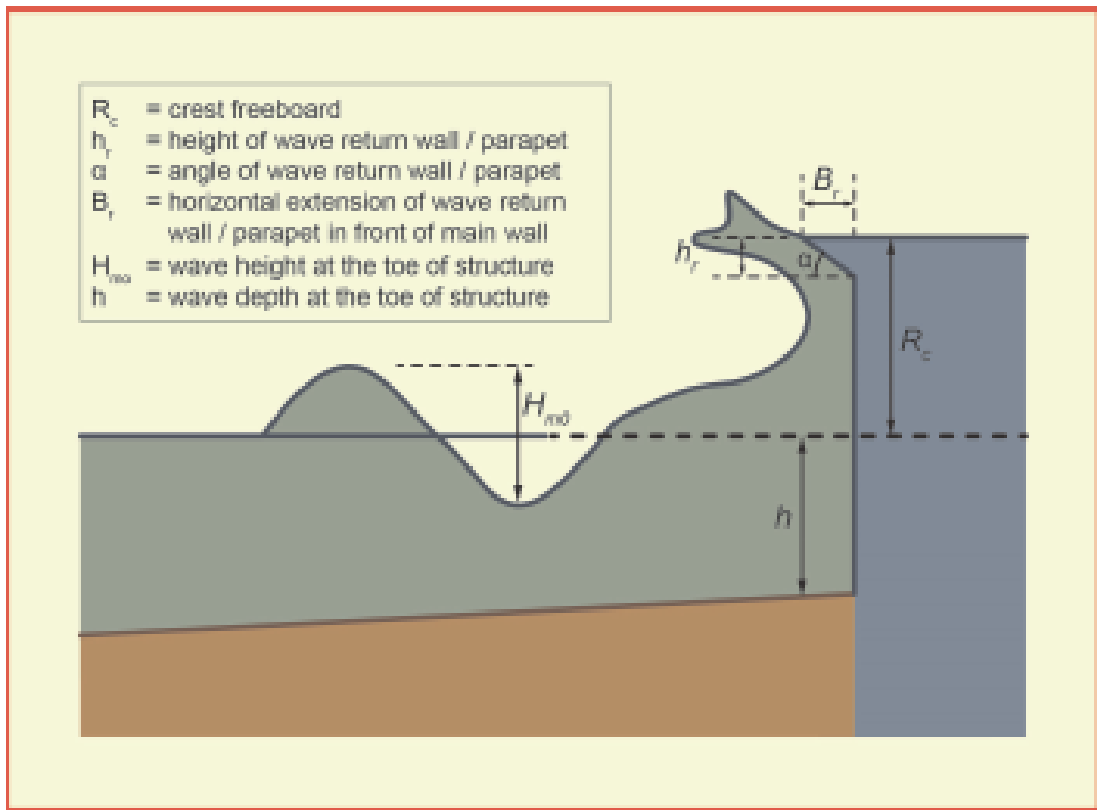
Οι κυματοθραύστες με κατακόρυφο μέτωπο όπως είναι και εύκολο να παρατηρήσει κανείς από το σχήμα τους έρχονται σε άμεση επαφή με τη δύναμη του κυματισμού χωρίς καμία απορρόφηση της ενέργειας. Επομένως μια λύση ενίσχυσης είναι η βελτίωση της προσήνεμης πλευράς τους για μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας.

Η πιο διαδεδομένη και ευρέως γνωστή μέθοδος είναι η δημιουργία μεικτού κυματοθραύστη. Δηλαδή, από την υπήνεμη πλευρά είναι με κατακόρυφο μέτωπο και από την προσήνεμη πλευρά κατασκευάζεται με πρηνή ώστε να γίνεται απορρόφηση της ενέργειας των κυμάτων.

Ένας άλλος τρόπος ενίσχυσης κυματοθραυστών με κατακόρυφο μέτωπο είναι η δημιουργία προφυλακτικού τοίχου για την ελάττωση της υπερπήδησης αλλά και δημιουργία κοιλάματος στην κορυφή ή με γωνιώδη παραπετάσματα ώστε να επιτευχθεί η επιστροφή των κυμάτων στην θάλασσα.



Σχήμα 12: Σκαρίφημα κυματοθραύστη με ανύψωση τοίχου (Πηγή: Eurotop II, 2016).



Σχήμα 13: Σκαρίφημα κυματοθραύστη με γωνιώδη παραπετάσματα (Πηγή: Eurotop II 2016)



Σχήμα 14: Κυματοθραύστης με γωνιώδη παραπετάσματα (Πηγή: Eurotop II 2016)

Πίνακας 2: Υπόμνημα σχήματος 12

R_c	Ύψος στέψης
h_r	Ύψος παραπετάσματος ανάκλασης κύματος
α	Γωνία παραπετάσματος ανάκλασης κύματος

B_r	Πλάτος παραπετάσματος ανάκλασης κύματος
H_{m0}	Ύψος κύματος στον πόδα την κατασκευής
h	Βάθος πυθμένα στον πόδα της κατασκευής

Επιπλέον, μια ακόμη μέθοδος είναι οι διάτρητοι κυματοθραύστες. Παρόλο που τέτοιες κατασκευές είναι πολύ συνηθισμένες, ιδίως στην Ιαπωνία, την Ιταλία και την Ισπανία, υπάρχουν λίγες μελέτες που δίνουν την απάντησή τους για την υπερπήδηση. Σε γενικές γραμμές, σε σύγκριση με συμπαγή κατακόρυφα μέτωπα, οι διατρήσεις μειώνουν την αντανάκλαση των κυμάτων και την υπερπήδηση. Η υπερπήδηση στους διάτρητους τοίχους εξαρτάται από πολλές δομικές παραμέτρους όπως το πορώδες του τοίχου, το πλάτος και το ύψος του θαλάμου απορρόφησης και η παρουσία οποιωνδήποτε εξαερισμών. Περαιτέρω επιρροές ως προς την υπερπήδηση προκύπτουν λόγω της τριβής επαφής κύματος με τοίχο, της τύρβης που δημιουργείται εντός των διατρήσεων και φυσικά από τις συνθήκες του προσπίπτοντος κύματος, δηλαδή την γωνία πρόσπτωσης και το μήκος του.

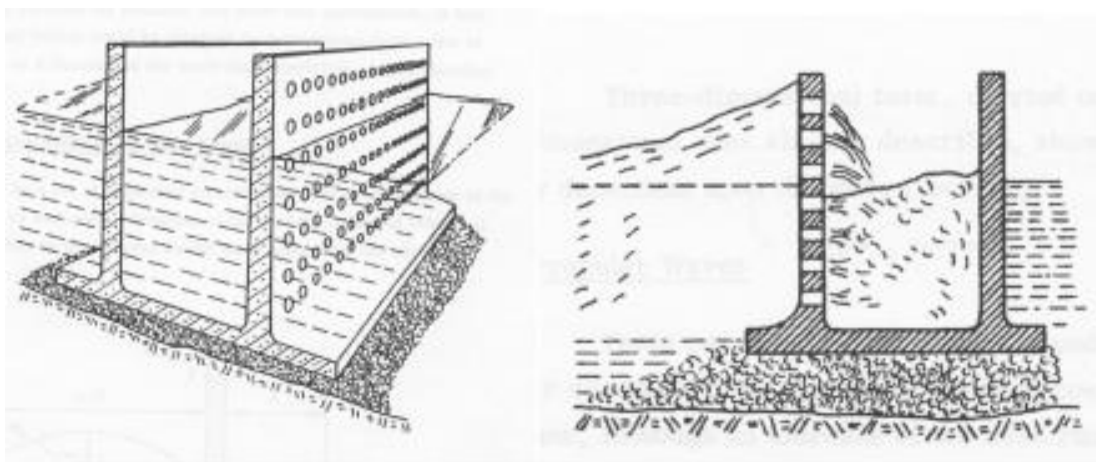


Σχήμα 15: Μορφή διάτρητου κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο (Πηγή: Eurotop II 2016)



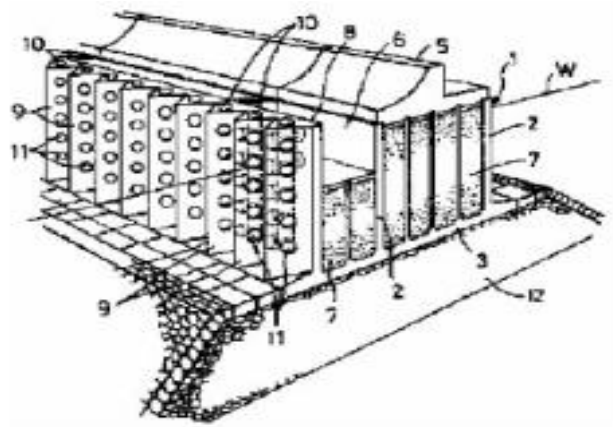
Σχήμα 16: Μορφή διάτρητου κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο (Πηγή: Eurotop II 2016)

Ακόμα, υπάρχει ο κυματοθραύστης που ονομάζεται ‘τύπου Jarlan’ ο οποίος λειτουργεί ως εξής. Όταν το κύμα συγκρουστεί με τον απορροφητικό τοίχο, ένα μέρος της ενέργειας ανακλάται προς την θάλασσα και ένα μέρος μπαίνει μέσα στον κενό κυματοθραύστη μέσω των στρογγυλών οπών που υπάρχουν στον κατακόρυφο τοίχο. Από αυτή την ενέργεια μια ποσότητα διαχέεται λόγω του ιξώδους στις διατρήσεις και ένα άλλο μέρος στροβιλίζεται μέσα στο θάλαμο μεταξύ του διάτρητου και του αδιαπέρατου τοίχου.

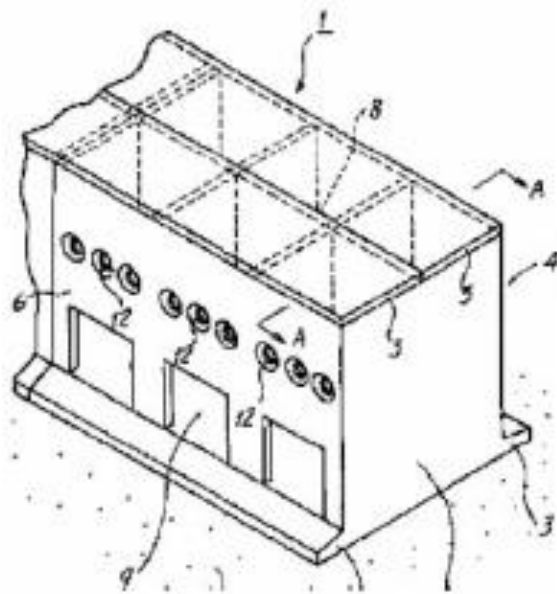


Σχήμα 17: Κυματοθραύστης τύπου Jarlan. (Πηγή: Steven Feys 2008-2009)

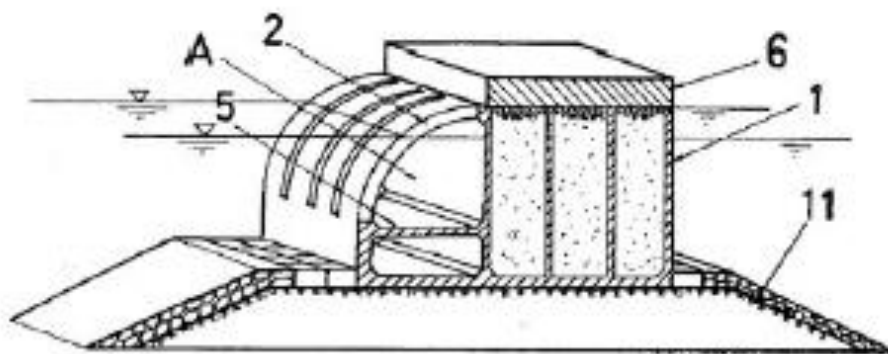
Ακολούθως παρουσιάζονται κάποιοι ακόμα τύποι κυματοθραυστών που έχουν ως στόχο να διαλύσουν ή να απορροφήσουν τις δυνάμεις των κυμάτων που προσπίπτουν σε αυτούς.



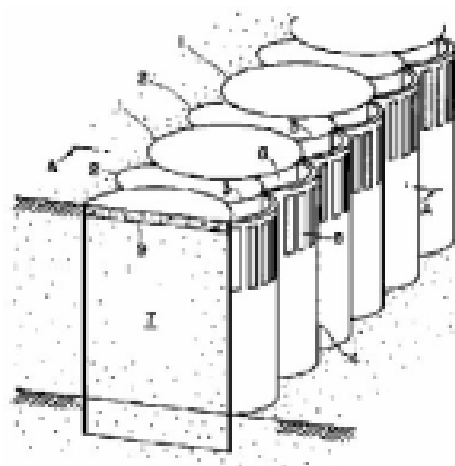
Σχήμα 18: Wave-breaking type caisson JP6002316 (Πηγή: Steven Feys, 2008-2009)



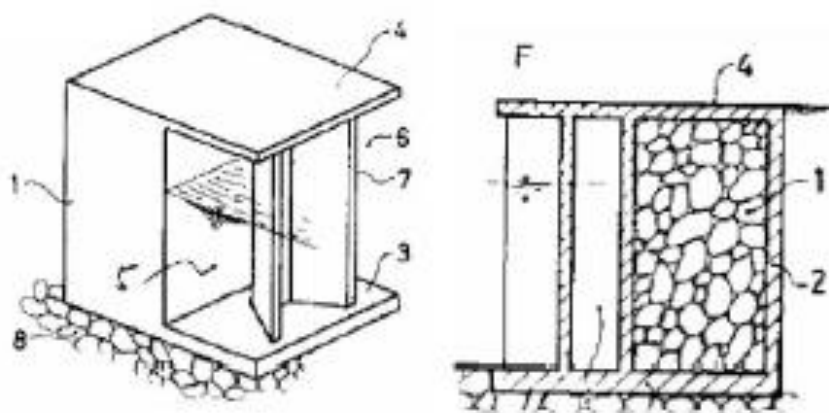
Σχήμα 19: Caisson κατασροφής ενέργειας κυμάτων (Πηγή: Steven Feys (2008-2009))



Σχήμα 20: Κυματοθραύστης απόσβεσης κυμάτων (Πηγή: Steven Feys (2008-2009))



Σχήμα 21: Κυματοθραύστης με κελιά καταστροφής κυματισμών. (Πηγή: Steven Feys 2008-2009)



Σχήμα 22: Separating and combining type (Πηγή: Steven Feys 2008-2009)

Γενικά, οι παραπάνω πέντε τύποι κυματοθραυστών είναι δύσκολο να εκπληρώσουν τα κριτήρια λειτουργικότητας των σημερινών κατασκευαστικών διαδικασιών και συνεπώς η κατασκευή τους οδηγεί σε υπερβολικά κόστη. (Steven Feys 2008-2009)

2.8 Έλεγχος ευστάθειας κυματοθραύστη

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα της μεθοδολογίας, για τον έλεγχο της ευστάθειας της προσήνεμης πλευράς του κυματοθραύστη έγινε χρήση του τύπου του Hudson και του τύπου του Van der Meer. Παρακάτω θα αναφερθούν αναλυτικά αυτοί οι δύο τύποι καθώς και όλες οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της ευστάθειας κυματοθραύστη.

2.8.1 Αναρρίχηση - Υπερπήδηση

Το ύψος κύματος που χρησιμοποιείται στην αναρρίχηση και την κυματική υπερπήδηση στον Eurotop II (2016) είναι το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_{m0} ή H_s ή $H_{1/3}$.

Διάφορες περίοδοι κύματος μπορούν να οριστούν για ένα κύμα ή ένα φάσμα κύματος. Οι πιο συνήθεις είναι η περίοδος αιχμής T_p (η περίοδος που δίνει την κορυφή του φάσματος), η μέση περίοδος T_m (υπολογίζεται από το φάσμα αλλά κατά προτίμηση από την καταγραφή του κύματος) και η χαρακτηριστική περίοδος κύματος $T_{1/3}$ (ο μέσος όρος του 1/3 των υψηλότερων κυμάτων). Η σχέση T_p/T_m είναι συνήθως μεταξύ 1,1 και 1,25 και η σχέση $T_p/T_{1/3}$ είναι σχεδόν ταυτόσημες.

Η περίοδος κύματος που χρησιμοποιείται για ορισμένους τύπους αναρρίχησης και υπερπήδησης είναι η φασματική περίοδος $T_{m-1,0}=m_{-1}/m_0$. Αυτή η περίοδος δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στις μεγαλύτερες περιόδους του φάσματος ανεξαρτήτως του είδους του φάσματος, δίνοντας παρόμοια αποτελέσματα αναρρίχησης και υπερπήδησης για τις ίδιες τιμές $T_{m-1,0}$ και τα ίδια ύψη κύματος. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να είναι εύκολος ο καθορισμός της αναρρίχησης και της υπερπήδησης στα δισδιάστατα και πεπλατυσμένα φάσματα, χωρίς να χρειάζονται άλλες δύσκολες διαδικασίες.

Στην περίπτωση ομοιόμορφου (μονής κορυφής) φάσματος υπάρχει μια αρκετά σταθερή σχέση μεταξύ της φασματικής περιόδου $T_{m-1,0}$ και της περιόδου αιχμής T_p . Ένας συντελεστής μετατροπής είναι $T_p=1.1 \cdot T_{m-1,0}$ για την περίπτωση που η περίοδος αιχμής είναι γνωστή αλλά όχι η φασματική περίοδος.

Το ύψος αναρρίχησης δίνεται από το $R_{u2\%}$. Αυτό είναι το ύψος κύματος που μετράται κατακόρυφα από τη μέση στάθμη ηρεμίας του νερού της θάλασσας, το οποίο υπερπηδείται μόνο από το 2% των προσπίπτων κυμάτων. Ο αριθμός των κυμάτων

που υπερβαίνουν αυτό το επίπεδο σχετίζεται με τον αριθμό των εισερχόμενων κυμάτων και όχι με τον αριθμό που αναρριχώνται στην κλίση του πρανούς.

Η αναρρίχηση είναι σχετική για ομαλές κλίσεις και αναχώματα καθώς και μερικές φορές για τραχιές κλίσεις με θωράκιση από φυσικούς ή τεχνητούς ογκολίθους. Για κάθετες κλίσεις δεν έχει ισοδύναμη παράμετρο.

Με βάση την ιστορία του Πολιτικού Μηχανικού η αναρρίχηση και κυρίως η αναρρίχηση στο 2% των κυμάτων ($R_{u2\%}$) ήταν σημαντική για το σχεδιασμό των κυματοθραυστών και των παράκτιων επιχωμάτων. Μέχρι πρόσφατα το $R_{u2\%}$ κάτω από συνθήκες σχεδιασμού θεωρείται ως μια καλή μέτρηση για το ύψος στέψης. Με την υπερπήδηση μόνο του 2% των κυμάτων το φορτίο στην στέψη και την εσωτερική πλευρά θεωρήθηκε τόσο μικρό που δεν υπήρχε ιδιαίτερη ανησυχία για να ληφθούν μετρήσεις όσον αφορά την αντοχή αυτών των τμημάτων του κυματοθραύστη. Πρόσφατα, οι απαιτήσεις για τους κυματοθραύστες άλλαξαν και επιτρέπουν υπερπήδηση κυμάτων, καθιστώντας το $R_{u2\%}$ λιγότερο σημαντική στην πράξη.

Η αναρρίχηση του κύματος είναι λιγότερο σημαντική για κλίσεις με βράχους και για κυματοθραύστες με πρανή. Το ύψος στέψης αυτών των κατασκευών είναι βασισμένο κυρίως σε επιτρεπόμενη υπερπήδηση κυμάτων, ή και ακόμα σε επιτρεπόμενη μετάδοση κυμάτων (κατασκευές χαμηλής στέψης). Ακόμα μια εκτίμηση ή πρόβλεψη μιας αναρρίχησης κύματος είναι χρήσιμη αφού δίνει μια πρόβλεψη ενός ποσοστού κυμάτων που θα προσεγγίσουν την στέψη της κατασκευής και τελικά θα δώσουν την υπερπήδηση. Αυτός ο αριθμός είναι χρήσιμος για την καλή πρόβλεψη του όγκου υπερπήδησης κύματος.

Παρακάτω δίνεται η εξίσωση υπολογισμού της αναρρίχησης.

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.65 * \gamma_b * \gamma_f * \gamma_\beta * \xi_{m-1,0} \quad (2.15)$$

με μέγιστη τιμή την

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.00 * \gamma_{f\text{surging}} * \gamma_b \left(4.0 - \frac{1.5}{\sqrt{\gamma_b * \xi_{m-1,0}}} \right) \quad (2.16)$$

$$\gamma_{f\text{surging}} = \gamma_f + (\xi_{m-1,0} - 1.8) * (1 - \gamma_f) / 8.2 \quad (2.17)$$

Μέγιστη τιμή για αδιαπέρατες κατασκευές

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 3 \quad (2.18)$$

και για διαπερατές κατασκευές

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 2 \quad (2.19)$$

Ο συντελεστής 1,65 στην παραπάνω εξίσωση μπορεί να θεωρηθεί ως στοχαστική μεταβλητή με μέση τιμή 1,65 και τυπική απόκλιση $\sigma=0,10$. Αυτή είναι η προσέγγιση

της μέσης τιμής. Για σχεδιασμό ή προσεγγιστική αξιολόγηση πρέπει κανείς να χρησιμοποιήσει την τιμή του 1,75. Ο συντελεστής 1,0 μπορεί να θεωρηθεί και αυτός ως στοχαστική μεταβλητή με τυπική απόκλιση $\sigma=0,07$. Για τις ανάγκες του σχεδιασμού πρέπει να χρησιμοποιηθεί η τιμή 1,07.

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.75 * \gamma_b * \gamma_f * \gamma_\beta * \xi_{m-1,0} \quad (2.20)$$

Από $\xi_{m-1,0}=1,8$ ο συντελεστής τραχύτητας $\gamma_{f\text{surging}}$ αυξάνεται στην τιμή 1 για $\xi_{m-1,0}=10$:

$$\gamma_{f\text{surging}} = \gamma_f + (\xi_{m-1,0} - 1.8) * (1 - \gamma_f) / 8.2 \quad (2.21)$$

Μέγιστη τιμή για αδιαπέρατες κατασκευές

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 3.21 \quad (2.22)$$

και για διαπερατές κατασκευές

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 2.14 \quad (2.23)$$

Η υπερπήδηση των κυμάτων είναι η μέση παροχή ανά μέτρο πλάτους δηλαδή μετριέται σε $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$. Οι παρακάτω μέθοδοι που περιγράφονται υπολογίζουν όλες τις εκκενώσεις υπερπίεσης σε $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά. Είναι ωστόσο πιο βολικό να πολλαπλασιάσετε κατά 1000 και να αναφέρεται η παροχή σε $\text{l}/\text{s}/\text{m}$.

Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει σταθερή παροχή πάνω από τη στέψη της κατασκευής κατά την υπερπήδηση. Η διαδικασία της υπερπήδησης είναι πολύ τυχαία στον χρόνο, στον χώρο και στον όγκο. Τα υψηλότερα κύματα θα ωθήσουν μια μεγαλύτερη μάζα νερού πάνω από την στέψη της κατασκευής σε λιγότερο χρονικό διάστημα (λιγότερο από μια περίοδο) ενώ τα χαμηλότερα κύματα μπορεί να μην παράξουν καμία υπερπήδηση.

Μια μέση υπερπήδηση δεν περιγράφει ακόμη πόσα κύματα θα υπερπηδήσουν και πόσος όγκος νερού θα περάσει για κάθε κύμα. Ο όγκος υπερπήδησης V , ο οποίος περνά πάνω από την στέψη της κατασκευής δίδεται σε m^3 ανά κύμα ανά μέτρο πλάτους. Γενικά, τα περισσότερα από τα κύματα υπερπλήρωσης είναι αρκετά μικρά, αλλά ένας μικρός αριθμός δίνει σημαντικά μεγάλους όγκους υπερπήδησης.

Ο μέγιστος όγκος υπερπήδησης σε θαλάσσιο περιβάλλον εξαρτάται από την παροχή υπερπήδησης q , την διάρκεια της καταιγίδας και το ποσοστό υπερπήδησης των κυμάτων. Δίνεται μέθοδος με την οποία η κατανομή του όγκου υπερπήδησης μπορεί να υπολογιστεί για συγκεκριμένες συνθήκες κύματος και μέση παροχή υπερπήδησης. Μια μεγαλύτερη διάρκεια καταιγίδας δίνει περισσότερα κύματα που υπερπηδούν την κατασκευή καθώς και στατιστικά μεγαλύτερους όγκους υπερπήδησης. Πολλά μικρά κύματα υπερπήδησης (όπως για ποτάμια και αναχώματα) μπορεί να δημιουργήσουν τον ίδιο αριθμό παροχής όπως και τα μεγάλα για δύσκολες θαλάσσιες συνθήκες. Ο

μέγιστος όγκος υπερπήδησης θα είναι, ωστόσο, πολύ μεγαλύτερος για μεγάλο κύμα και για δύσκολες θαλάσσιες συνθήκες.

2.8.2 Εξίσωση του Hudson

Ο Hudson (1953, 1959) ανέπτυξε την ακόλουθη εξίσωση η οποία είναι βασισμένη σε δοκιμές μοντέλων με κανονικά κύματα πάνω σε μη υπερβατές κατασκευές με διαπερατό πυρήνα. Δίνει την σχέση μεταξύ του μέσου βάρους του ογκολίθου (W_{50}) και του ύψους κύματος στον πόδα του έργου (H_s) και των διαφορών δομικών παραμέτρων. Αυτός ο τύπος ελέγχου ευστάθειας και διαστασιολόγησης παρουσιάζεται εδώ σε μονάδες SI.

$$W_{50} = \frac{\rho_r * g * H^3}{K_D * \Delta^3 * \cot(a)} \quad (2.24)$$

Όπου,

W_{50} είναι το απαιτούμενο μέσο βάρος του ογκολίθου στη στρώση θωράκισης, με περίπου 50% του πλήθους των λίθων να ζυγίζουν πάνω από W

K_D είναι συντελεστής ευστάθειας, που εξαρτάται κυρίως από το σχήμα των ογκολίθων και τη δυνατότητα αλληλοεμπλοκής των μονάδων θωράκισης, το θραυόμενο ή μη των κυματισμών και τη θέση της διατομής στο ακρομώλιο ή τον κορμό του έργου.

ρ_r είναι η πυκνότητα του πετρώματος των ογκολίθων

H είναι το ύψος κύματος στον πόδα του έργου

a είναι η γωνία του πρανούς ως προς την οριζόντιο. Τιμές της $\cot(a)$ μικρότερες του 1,5 δεν συνιστώνται, ενώ ελάχιστες τιμές γύρω από το 2 είναι καταλληλότερες για προσήνεμα πρανή σοβαρών έργων

Δ δίνεται από τον τύπο

$$\Delta = (\delta - 1)^3 \quad (2.25)$$

Όπου δ ο λόγος γ/γ_v όπου γ_v είναι το ειδικό βάρος του νερού στην περιοχή του έργου

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η απλότητα και η ευρεία γκάμα από φυσικούς ή τεχνητούς ογκολίθους και διαμορφώσεων για τις οποίες προέκυψαν τιμές K_D , ωστόσο έχει και περιορισμούς:

- χρήση μόνο των κανονικών κυμάτων
- δεν λαμβάνονται υπόψη η περίοδος κύματος και η διάρκεια της καταγίδας
- καμία περιγραφή του επιπέδου βλάβης
- γίνεται χρήση μόνο μη υπερβατών και διαπερατών κατασκευών

Για πρακτική εφαρμογή, τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν εξαιτίας αυτών των περιορισμών μπορούν να επανέλθουν χρησιμοποιώντας διάφορες ειδικές τιμές του συντελεστή σταθερότητας K_D . Αυτό ισχύει ιδιαίτερος για τη διαπερατότητα της δομής και τα ακανόνιστα κύματα.

Ο αρχικός τύπος του Hudson εξίσωση, (...), μπορεί να ξαναγραφεί χρησιμοποιώντας το $H_{1/10} = 1.27 \cdot H_s$ από την άποψη της παραμέτρου $N_s = H_s / (\Delta \cdot D_{n50})$. Η παρακάτω εξίσωση δίνει την σχέση μεταξύ του αριθμού σταθερότητας, της κλίσης της κατασκευής καθώς και τον συντελεστή σταθερότητας K_D . Έχει γίνει χρήση της σχέσης μεταξύ της ονομαστικής διαμέτρου, D_{n50} , και της μέσης μάζας του πυρήνα.

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \frac{K_D \cdot \cot(a)^{\frac{1}{3}}}{1.27} \quad (2.26)$$

Ένα μέγεθος ογκολίθου μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση αλλά μόνο όταν χρησιμοποιούνται οι τιμές K_D που παράγονται για χρήση με $H_{1/10}$ ($K_D = 2,0$ για θραυόμενους κυματισμούς και $K_D = 4,0$ για μη θραυόμενους κυματισμούς), που αντιστοιχούν σε 0-5% ποσοστό ζημιών. Μεγαλύτερες επιτρεπόμενες τιμές βλάβης έχουν καθοριστεί ως συνάρτηση του ύψους των κυμάτων για διάφορους τύπους μονάδων. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει το $H_s/H_{s,D=0}$ ως συνάρτηση του ποσοστού βλάβης D (%). H_s είναι το χαρακτηριστικό ύψος κύματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε ζημιά D και $H_{s,D=0}$ είναι το ύψος κύματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε ζημιά από 0-5%, που γενικά αναφέρεται ως η κατάσταση χωρίς ζημιές.

Πίνακας 3: Συνάρτηση ποσοστού βλάβης $D\%$ ως προς $H_s/H_{s,D=0}$. (Πηγή: Rock Manual ,2012).

ΕΙΔΟΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ	ΣΧΕΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	ΑΣΤΟΧΙΑ D ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΖΗΜΙΑΣ Sd						
		0-5 Sd=2	5-10 Sd=6	10-15 Sd=10	15-20 Sd=14	20-30 Sd=20	30-40 Sd=28	40-50 Sd=36
ΛΕΙΟΣ ΟΓΚΟΛΙΘΟΣ	$H_s/H_{s,d=0}$	1.00	1.08	1.14	1.20	1.29	1.41	1.54
ΤΡΑΧΗΣ ΟΓΚΟΛΙΘΟΣ	$H_s/H_{s,d=0}$	1.00	1.08	1.19	1.27	1.37	1.47	1.56

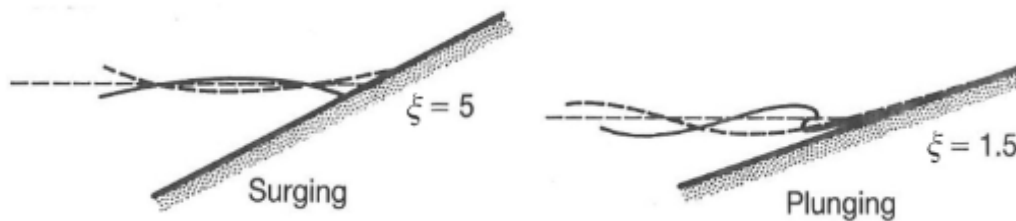
2.8.3 Εξίσωση του Van der Meer

Ο Van der Meer ασχολήθηκε επίσης με τη ευστάθεια των κυματοθραυστών και έδωσε κάποιους τύπους υπολογισμού για συνθήκες βαθέων υδάτων και τύπους για συνθήκες ρηχών υδάτων. Οι τύποι αυτοί αναλύονται παρακάτω.

2.8.3.1 Εξίσωση του Van der Meer – Βαθεία νερά

Για τις βαθιές συνθήκες του νερού, ο Van der Meer (1988) έδωσε τύπους για την πρόβλεψη της σταθερότητας ογκολίθων θωράκισης σε ομοιόμορφες κλίσεις με στέψη που να είναι ψηλότερα από το μέγιστο ύψος υπερπήδησης. Οι τύποι αυτοί βασίστηκαν, μεταξύ άλλων, σε παλαιότερη δουλειά των Thompson and Shuttler

(1975) και σε μια μεγάλη ποσότητα δοκιμών, η πλειονότητα των οποίων πραγματοποιήθηκε με σχετικά βαθύ νερό στον πόδα της κατασκευής, δηλ $h > 3H_{s-toe}$. Αυτοί οι τύποι σταθερότητας είναι πιο περίπλοκοι από τον τύπο του Hudson, αλλά – ως ένα μεγάλο πλεονέκτημα – περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα της διάρκειας της καταιγίδας, της περιόδου του κύματος, της διαπερατότητας της κατασκευής καθώς και ενός καθορισμένου επιπέδου βλάβης. Οι τύποι κάνουν χρήση της διάκρισης ανάμεσα σε plunging waves και surging waves.



Για plunging waves ($\xi_m < \xi_{cr}$):

$$\frac{Hs}{\Delta \cdot Dn50} = cpl * P^{0.18} * \left(\frac{sd}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} * \xi m^{-0.5} \quad (2.27)$$

και για surging waves ($\xi_m \geq \xi_{cr}$):

$$\frac{Hs}{\Delta \cdot Dn50} = cs * P^{-0.13} * \left(\frac{sd}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} * \sqrt{\cot(a)} * \xi m^P \quad (2.28)$$

Όπου:

N είναι το πλήθος των κυμάτων μηδενικής διάβασης που προσπίπτουν στην κατασκευή

H_s είναι το χαρακτηριστικό ύψος κύματος σχεδιασμού

ξ_m είναι ο αριθμός Iribarren που χρησιμοποιεί την μέση περίοδο, T_m από την ανάλυση χρονικού πεδίου.

$$\xi m = \frac{\tan(a)}{\sqrt{2 * \frac{\pi}{g} * \frac{Hs}{Tm^2}}} \quad (2.29)$$

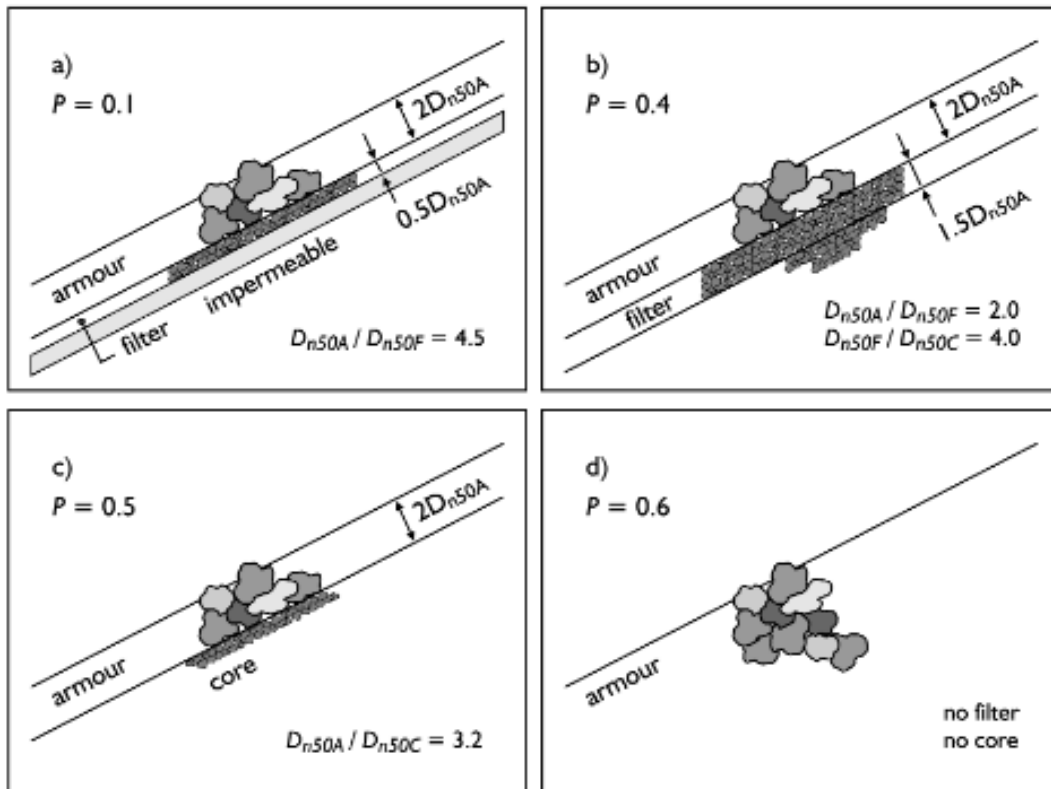
a είναι γωνία της κλίσης του πρανούς

Δ δίνεται από τον τύπο

$$\Delta = (\delta - 1)^3 \quad (2.30)$$

Όπου δ ο λόγος γ/γ_0 όπου γ_0 είναι το ειδικό βάρος του νερού στην περιοχή του έργου

P θεωρητικός συντελεστής διαπερατότητας της κατασκευής. Η τιμή αυτής της παραμέτρου θα πρέπει να είναι μεταξύ 0,1 και 0,6. Ενδεικτικές τιμές για τον τύπο του Van der Meer δίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 23: Ενδεικτικές τιμές του P για τον τύπο του Van der Meer (Πηγή: *Rock Manual*, 2012).

c_{pl} 6,2

c_s 1,0

s_d δείκτης ζημιών ($= \frac{A_e}{Dn^2}$)

A_e η διαβρωμένη επιφάνεια επί της διατομής του έργου

Πίνακας 4: Επίπεδο ζημιάς πρανούς (Πηγή: *Rock Manual*, 2012).

Κλίση cota	Επίπεδο ζημιάς		
	Εναρξη ζημιάς	Ενδιάμεσο επίπεδο ζημιάς	Τελική αστοχία
1.5	2	3-5	8
2	2	4-6	8
3	2	6-9	12
4	3	8-12	17
6	3	8-12	17

Η μετάβαση από plunging σε surging waves αυξάνεται από την κλίση της κατασκευής και όχι από την κλίση της ακτής και μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μια κρίσιμη τιμή της παραμέτρου ξ_{cr} .

$$\xi_{cr} = \left[\frac{cpl}{c_s} * P^{0.31} * sqrt \right]^{\frac{1}{P+0.5}} \quad (2.31)$$

Για $\xi_m < \xi_{cr}$ έχουμε plunging waves

Για $\xi_m > \xi_{cr}$ έχουμε surging waves

2.8.3.2 Εξίσωση του Van der Meer – Ρηγά νερά

Οι μέθοδοι του Van der Meer χρησιμοποιούνται ευρέως και δοκιμάζονται από το 1988. Οι περισσότερες μελέτες σχετικά με τη σταθερότητα των στρώσεων θωράκισης έχουν συμφωνήσει με τις γενικές τάσεις των τύπων του Van der Meer, αν και έχουν παραχθεί ορισμένες τροποποιήσεις για να εκτιμηθεί η επίδραση άλλων παραμέτρων, όπως το σχήμα της πέτρας και η πυκνότητα συσκευασίας που αποκλίνουν από τις εξεταζόμενες συνθήκες.

Σε συνθήκες ρηχών υδάτων το φορτίο κυμάτων αλλάζει. Η κατανομή των υψών των κυμάτων αποκλίνει από την κατανομή Rayleigh. Το σχήμα των μεταβολών του φάσματος και το ίδιο το κύμα γίνεται πιο αιχμηρό και στρεβλωμένο. Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της μεταβαλλόμενης κατανομής των κυμάτων, η σταθερότητα της στρώσης θωράκισης θα μπορούσε να περιγραφεί καλύτερα σε αυτές τις συνθήκες περιορισμένου βάθους χρησιμοποιώντας το ύψος κύματος 2%, $H_{2\%}$, από το σημαντικό ύψος κύματος. Με τη γνωστή αναλογία $H_{2\%}/H_s=1,4$ για βαθιές συνθήκες ύδατος, ο τύπος του Van der Meer για βαθύ νερό μπορεί απλώς να ξαναγραφεί για να προσδιοριστούν οι τύποι σταθερότητας για συνθήκες με κατανομές υδάτων αβαθούς ύδατος, δηλ οι συντελεστές c_{pl} και c_s να αυξηθούν σε $c_{pl}=8.7$ και $c_s=1,4$.

Με βάση την ανάλυση της σταθερότητας των ογκολίθων θωράκισης για πολλές καταστάσεις, που ασχολούνται κυρίως με συνθήκες σε ρηχές ακτές, προτάθηκε από τον Van Gent et al (2004) να διαμορφώσουν τους τύπους του Van der Meer για να επεκτείνουν το πεδίο εφαρμογής τους. Μια από τις προσαρμογές στους αρχικούς τύπους σχεδιασμού είναι να χρησιμοποιηθεί μια διαφορετική περίοδος κύματος για να ληφθεί υπόψη η επίδραση του σχήματος των φασμάτων ενέργειας κύματος, δηλ με τη χρήση της φασματικής περιόδου κύματος, $T_{m-1,0}$, αντί της μέσης περιόδου κύματος T_m . Είναι δύσκολο να υπολογιστούν τα c_{pl} και c_s καθώς η κορυφή και η ακαμψία των κυμάτων αλλάζουν όταν ταξιδεύουν στο εσωτερικό του νερού. Ως εκ τούτου, αυτοί οι συντελεστές πρέπει να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας δοκιμές με συνθήκες αβαθούς ύδατος. Με βάση τις δοκιμές του Van Gent et al (2004), οι συντελεστές καθορίζονται με ανάλυση παλινδρόμησης. Αυτό οδήγησε σε τροποποιημένους τύπους σταθερότητας, που δίδονται παρακάτω.

Για plunging waves:

$$\frac{Hs}{\Delta \cdot Dn50} = cpl * P^{0.18} * \left(\frac{sd}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} * \left(\frac{Hs}{H2\%}\right) * (\xi s - 1,0)^{-0.5} \quad (2.32)$$

Για surging waves:

$$\frac{Hs}{\Delta \cdot Dn50} = cS * P^{-0.13} * \left(\frac{sd}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} * \left(\frac{Hs}{H2\%}\right) * \sqrt{\cot(a)} * (\xi s - 1,0)^P \quad (2.33)$$

Όπου,

N είναι το πλήθος των κυμάτων μηδενικής διάβασης που προσπίπτουν στην κατασκευή

H_s είναι το χαρακτηριστικό ύψος κύματος σχεδιασμού

c_{pl} 6,2

c_s 1,0

s_d δείκτης ζημιών ($= \frac{Ae}{Dn^2}$)

A_e η διαβρωμένη επιφάνεια επί της διατομής του έργου

P θεωρητικός συντελεστής διαπερατότητας της κατασκευής. Η τιμή αυτής της παραμέτρου θα πρέπει να είναι μεταξύ 0,1 και 0,6.

ξ_{s-1,0} είναι ο αριθμός Iribarren που χρησιμοποιεί την φασματική περίοδο , T_{s-1,0} από την ανάλυση χρονικού πεδίου.

$$\xi(s - 1,0) = \frac{\tan(a)}{\sqrt{2 \cdot \frac{\pi}{g} \cdot \frac{Hs}{T(m-1,0)^2}}} \quad (2.34)$$

Η μετάβαση από plunging σε surging waves γίνεται με τον υπολογισμό της κρίσιμης τιμής της παραμέτρου ξ_{cr}.

Η εικόνα (...) δείχνει τα δεδομένα μετρήσεων για τις αβαθείς ακτές (Van Gent et al,2004) και τα βαθιά ύδατα (Van der Meer,1988), σε σύγκριση με τους τροποποιημένους τύπους του Van der Meer για ρηγά νερά. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι στην περίπτωση ίσων φασμάτων στον πόδα του έργου οι κατασκευές σε ρηχές ακτές και plunging waves συνήθως χρειάζονται ισχυρότερη θωράκιση από εκείνες που είναι τοποθετημένες σε βαθιά νερά, εάν εφαρμοστεί το ίδιο επίπεδο βλάβης.

3. Διερεύνηση εφαρμογής: Λιμένας Ευδήλου Ικαρίας

Σε αυτό το κεφάλαιο διερευνάται η περίπτωση του λιμένα του Ευδήλου Ικαρίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται εφαρμογή των μεθόδων ενίσχυσης που αναφέρθηκαν στα υποκεφάλαια 2.6 και 2.7 για την αποκατάσταση και ενίσχυση του κυματοθραύστη με πρανή, ο οποίος αστόχησε κατά την θεομηνία που έπληξε την περιοχή της 18^η Ιανουαρίου του 2018, μόλις 3 χρόνια μετά την ολοκλήρωση της επέκτασής του.

Στο υποκεφάλαιο 3.1 δίνονται γενικές πληροφορίες για την περιοχή του έργου, τις ανάγκες που εξυπηρετεί και την κατάστασή του πριν και μετά την επέκταση του προσήνεμου μώλου το 2015.

Στο υποκεφάλαιο 3.2 διερευνάται η αστοχία του κεντρικού τμήματος του προσήνεμου μώλου και εξετάζονται οι συνθήκες υπό τις οποίες καταστράφηκε. Επίσης ελέγχεται η επάρκεια της διατομής του κυματοθραύστη.

3.1 Γενικές πληροφορίες – Εύδηλος Ικαρίας

Η Ικαρία είναι ένα από τα μεγαλύτερα νησιά του ανατολικού Αιγαίου, με 255 τετραγωνικά χιλιόμετρα σε έκταση και με 160 χιλιόμετρα ακτογραμμή. Ο πληθυσμός της ανέρχεται σε 8.423 κατοίκους, σύμφωνα με την απογραφή του 2011 (στην απογραφή του 2001 ο πληθυσμός ανέρχονταν σε 8.312 κατοίκους). Η Ικαρία μαζί με τις γειτονικές νησίδες Φούρνοι αποτελούν την Περιφερειακή Ενότητα Ικαρίας. Ο Δήμος Ικαρίας δημιουργήθηκε το 2011 με το Πρόγραμμα Καλλικράτης, από την συνένωση των τριών προϋπαρχόντων δήμων του νησιού, των δήμων Αγίου Κηρύκου, Ραχών και Ευδήλου. Πρωτεύουσα ορίστηκε ο Άγιος Κήρυκος Ικαρίας.



Σχήμα 24: Θέση Ικαρίας στον χάρτη της Ελλάδας (Πηγή: Βικιπαιδεία)

Η τοπογραφία της παρουσιάζει αντιθέσεις, καθώς εμφανίζει καταπράσινες πλαγιές και γυμνούς απότομους βράχους. Το νησί είναι ορεινό στο μεγαλύτερο μέρος του. Διασχίζεται από την οροσειρά του Αθήρα (Πράμνος), του οποίου η υψηλότερη κορυφή είναι 1.041 μέτρα. Η πλειονότητα των χωριών χαρακτηρίζονται ορεινά, κάτι που οφείλεται στην ανάγκη προστασίας των κατοίκων από τις πειρατικές επιδρομές στο Μεσαίωνα. Η Ικαρία έχει παράδοση στην παραγωγή ενός δυνατού κόκκινου κρασιού, γνωστού από τον Όμηρο ως «Πράμνειος Οίνος». Το νησί είναι σε μεγάλο κομμάτι του καλυμμένο από βλάστηση, κουμαριές, πρίνους και πευκοδάση. Υπάρχει αφθονία νερού, ενώ έχει χτιστεί και φράγμα στο Πέζι για συγκράτηση των υδάτων και ύδρευση του νησιού. Στα δυτικά βρίσκεται το δάσος του Ράντη, ένα από τα σπανιότερα χαρακτηριστικά μεσογειακά προϊστορικά δάση. Μέρος του νησιού είχε καταστραφεί από φονική πυρκαγιά το 1993. Υπάρχουν σπάνια και μοναδικά είδη ζώων στο νησί, όπως η σαύρα «κορκόφυλας», αλλά και ιδιαίτερη χλωρίδα. Εκτός από συνηθισμένα ζώα, χαρακτηριστικά είναι τα ημιάγρια κατσίκια ελευθέρως βοσκής (τα λεγόμενα «ρασκά» = ορεσκά, ορεσίβια), τα οποία συναντώνται παντού, διαταράσσοντας την χλωρίδα του νησιού με την υπερβόσκηση. Το κλίμα της Ικαρίας υπάγεται στον κλιματικό τύπο του μεσογειακού παράκτιου, δηλαδή ξηρό και σχετικά θερμό καλοκαίρι με υγρούς και ήπιους χειμώνες.

Οι μεγαλύτερες πόλεις και οικισμοί του νησιού είναι ο Άγιος Κήρυκος, ο Εύδηλος και ο Χριστός Ραχών. Άλλα μεγάλα χωριά και τουριστικά μέρη είναι ο Αρμενιστής, το Καραβόσταμο, το Γαλισκάρι, ο Μαγγανίτης και ο Κάμπος. Οι κάτοικοι δεν είναι συγκεντρωμένοι, αλλά κατοικούν σχεδόν στο σύνολο του νησιού. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση από το Καρκινάγρι, το οποίο μέχρι αρκετά πρόσφατα επικοινωνούσε με το υπόλοιπο νησί μόνο μέσω θαλάσσης και όταν ο καιρός το επέτρεπε, αφού δεν υπήρχε δρόμος που να το συνδέει.

3.1.1 Περιοχή διερεύνησης

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στον όρμο του Ευδήλου, ο οποίος βρίσκεται στα βόρεια παράλια της νήσου Ικαρίας. Υπάγεται διοικητικά στο Δήμο Ευδήλου του Νομού Σάμου. Ο οικισμός του Ευδήλου, μαζί με τους οικισμούς Αγία Κυριακή, Δεκάκια, Δρούτσουλας, Κεραμείον, Κυπαρίσσιον, Ξανθή και Φύτεμα αποτελούν το ομώνυμο Δημοτικό διαμέρισμα του Δήμου Ευδήλου. Ο Δήμος αυτός έχει πληθυσμό 2831 κατοίκους, σύμφωνα με απογραφή του 2001 και έκταση 78790 στρέμματα. Έδρα του Δήμου είναι ο Εύδηλος.



Σχήμα 25: Χάρτης Ικαρίας (Πηγή: Βικιπαιδεία)

Ο λιμένας Ευδήλου βρίσκεται στα βορειοδυτικά παράλια του ομώνυμου όρμου, μπροστά στον οικισμό του Ευδήλου, ο οποίος αναπτύσσεται αμφιθεατρικά. Αποτελεί το δεύτερο λιμένα της Ικαρίας, με το επίνειο να είναι ο Άγιος Κήρυκος σε απόσταση περίπου 40 χιλιομέτρων, και εξυπηρετεί κυρίως τη βόρεια πλευρά του νησιού. Βρίσκεται στο κέντρο του Ευδήλου με τα καταστήματα, τα καταλύματα και τα εστιατόρια και απέχει περίπου 35 χιλιόμετρα από τον Κρατικό Αερολιμένα Ικαρίας «Ίκαρο». Ο λιμένας συνδέει το νησί με τους Φούρνους, τη Σάμο, τη Χίο, τη Νάξο, την Πάρο, τη Μύκονο, τη Σύρο, τη Λέσβο, τη Λήμνο, την Καβάλα και δύο φορές την

εβδομάδα με τον Πειραιά. Εξυπηρετεί και εμπορικά πλοία. Εσωτερικά του υπάρχει μαρίνα που εξυπηρετεί μικρά σκάφη και βάρκες, καθώς και αλιευτικό καταφύγιο.

Τα υφιστάμενα έργα του λιμένα του Ευδήλου Ικαρίας, αφορούν τον προσήνεμο μώλο, τα παραλιακά κρηπιδώματα νότια του προσήνεμου μώλου, τα παραλιακά κρηπιδώματα και τον προβλήτα στο αλιευτικό καταφύγιο.

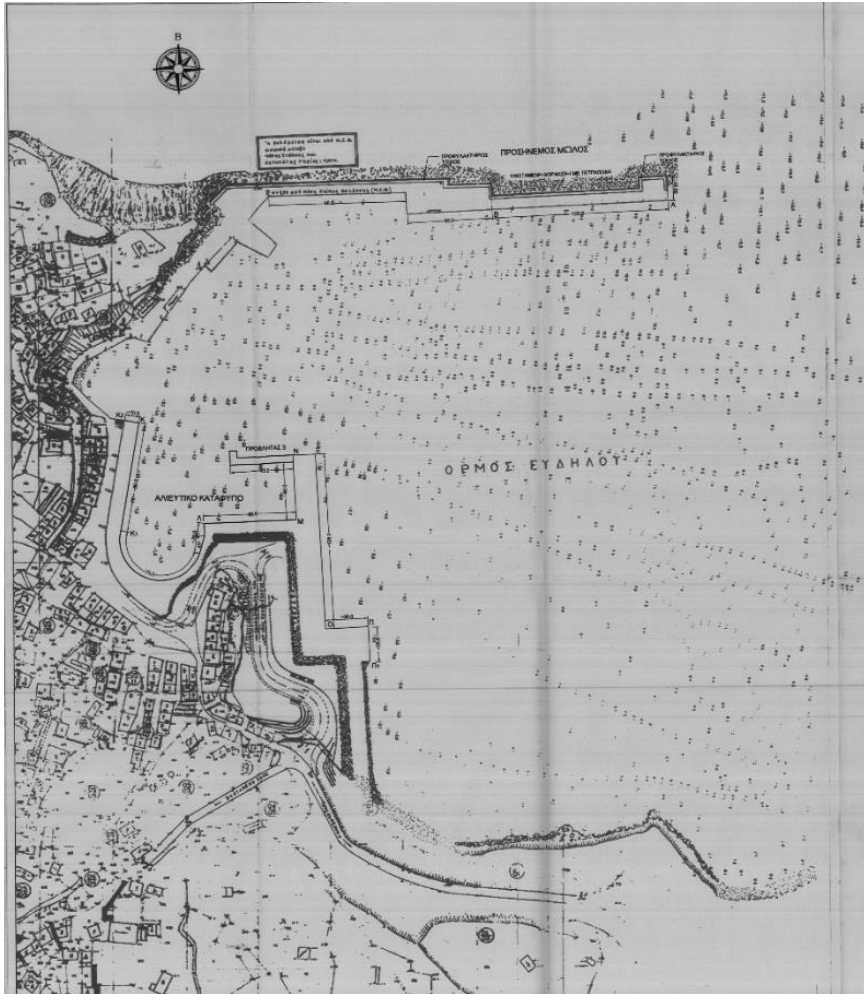
Ο προσήνεμος μώλος μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη. Το ένα είναι το τμήμα του μώλου πριν την επέκταση και το δεύτερο μετά την επέκταση του μώλου.

Όσον αφορά το τμήμα του μώλου που κατασκευάστηκε πριν την επέκταση του 2015 έχει συνολικό μήκος περίπου 275,0m. Εσωτερικά φέρει κρηπίδωμα και εξωτερικά θωράκιση από φυσικούς ογκολίθους και τεχνητούς ογκολίθους τύπου Tetrapod.



Σχήμα 26: Tetrapod (Πηγή: Wikipedia).

Ο προσανατολισμός του προσήνεμου μώλου είναι από δυτικά προς ανατολικά. Προς την εξωτερική πλευρά του κρηπιδώματος του προσήνεμου μώλου, έχει κατασκευαστεί τοιχίο για την αντιστήριξη της εξωτερικής θωράκισης. Νότια – νοτιοδυτικά του προσήνεμου μώλου υπάρχει κρηπίδωμα συνολικού μήκους 138 m. Σε απόσταση 23 m από το πέρας του, έχει κατασκευαστεί προβλήτας τραπεζοειδούς διατομής, με πλάτος 11 m στην κορυφή του και 17,5 m στη βάση του. Στην περιοχή του αλιευτικού καταφυγίου έχουν κατασκευαστεί παραλιακά κρηπιδώματα μήκους 400 m και ένας προβλήτας μήκους 45 m (Φράγκου,2010).

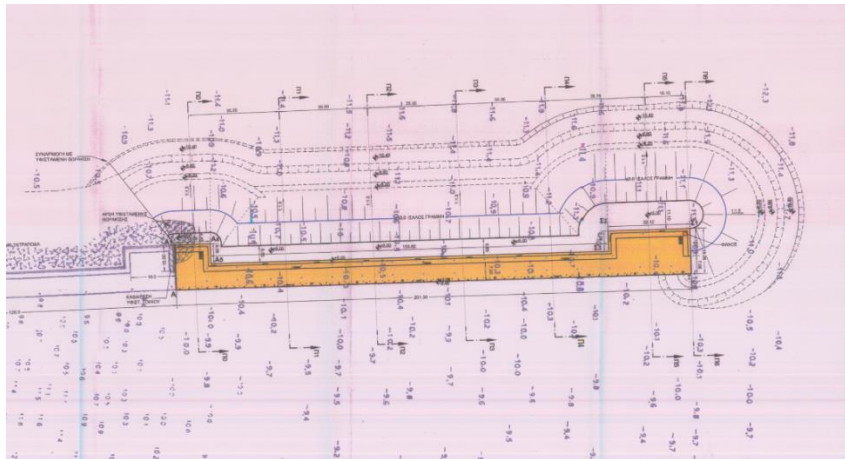


Σχήμα 27: Λιμένας Ευδήλου Ικαρίας πριν την επέκταση του μώλου (Πηγή: Φράγκου, 2010)

Όσον αφορά το τμήμα του μώλου της επέκτασης έχει συνολικό μήκος 201,3 m, η οποία εκτείνεται στην ίδια διεύθυνση με το υφιστάμενο τμήμα, δηλαδή έχει προσανατολισμό από δυτικά προς ανατολικά. Εδράζεται στο μεγαλύτερο τμήμα του σε βάθος περίπου 11,0 m. Σκοπός του έργου αυτού ήταν η προστασία της λιμενολεκάνης από τον εισερχόμενο κυματισμό κυρίως από τον Βορά, καθώς και η δυνατότητα ελλιμενισμού μεγαλύτερων πλοίων και μικρών κρουαζιερόπλοιων. Η επέκταση του προσήνεμου μώλου διακρίνεται σε τρία τμήματα. Το πρώτο τμήμα Α1Α4, μήκους 14 m, το οποίο αποτελεί την συναρμογή του παλιού λιμένα με τον καινούριο, το δεύτερο τμήμα Α5Σ3, μήκους 155,6 m, το οποίο αποτελεί το κεντρικό τμήμα της επέκτασης (Φράγκου,2010).

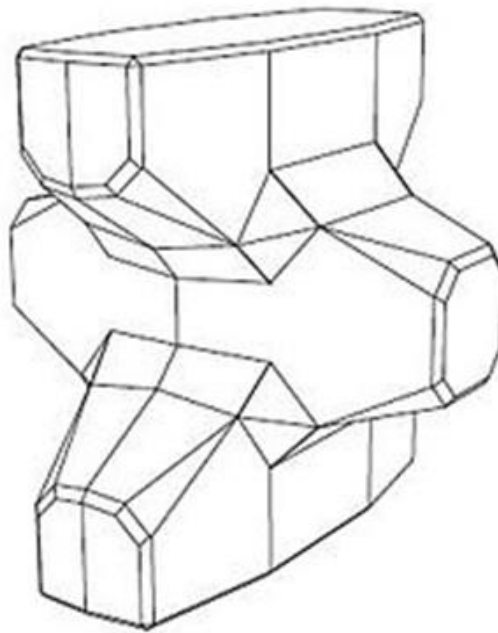


Σχήμα 28: Κάτοψη λιμένα με την προέκταση (Πηγή: Φράγκου, 2010)



Σχήμα 29: Προέκταση μώλου λιμένα Ευδήλου (Πηγή: Φράγκου, 2010)

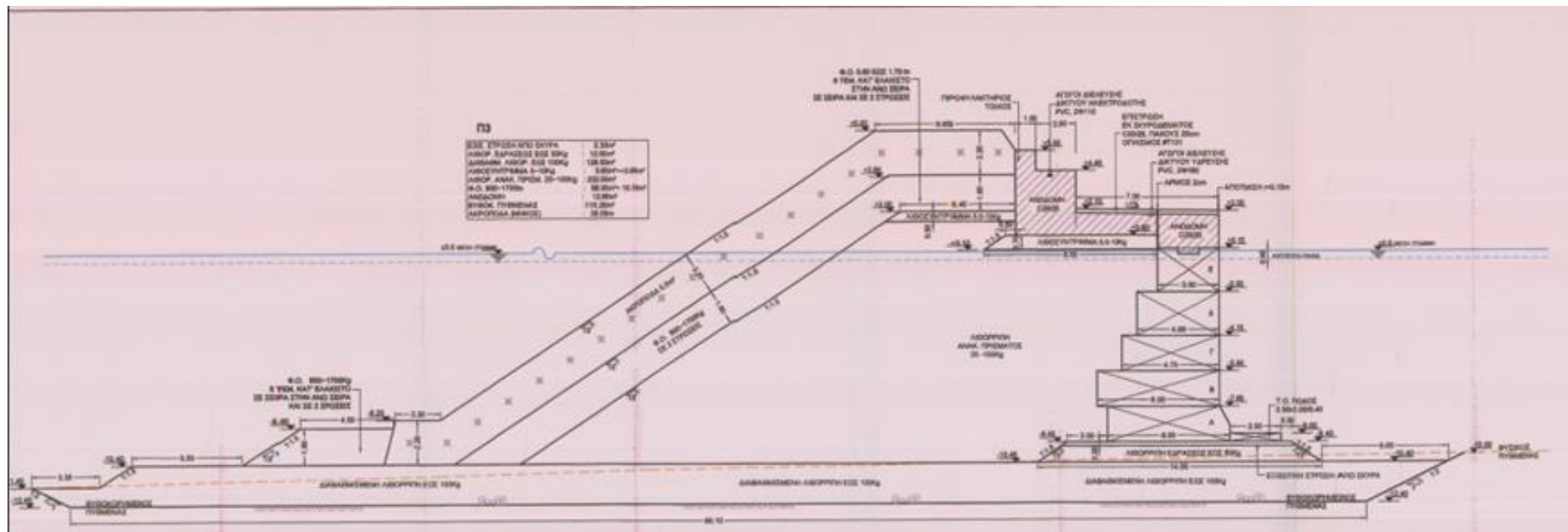
Η διατομή της επέκτασης του προσήνεμου μώλου είναι μικτή, δηλαδή εσωτερικά φέρει κρηπίδωμα από τεχνητούς ογκόλιθους από σκυρόδεμα και εξωτερικά φέρει θωράκιση από τεχνητούς ογκόλιθους τύπου Accropode. (Φράγκου, 2010)



Σχήμα 30: Τεχνητός ογκόλιθος τύπου Accropode (Πηγή: C.L.I, 2015)

Τα accropode εισήχθησαν από τον Sogreah το 1981. Ήταν η πρώτη μονάδα θωράκισης μονής στρώσης και τυχαίας τοποθέτησης και αναπτύχθηκε πολύ για τα επόμενα 20 χρόνια. Έχει αναπτυχθεί πάνω από διακόσιες φορές σε 48 χώρες. Είναι απλή, στιβαρή, αξιόστη και εύκολη στην κατασκευή χρησιμοποιώντας βασικές τεχνικές. Μπορεί να προσαρμοστεί άψογα σε όλους τους τύπους κατασκευών. Όπως συμβαίνει με όλες τις μονάδες CLI, έχει υψηλό συντελεστή σταθερότητας που

προκύπτει από το σχήμα του καθώς και από τις συναφείς τεχνικές τοποθέτησης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δομές όλων των τύπων από παράκτιες θωρακίσεις σε ρηγά νερά έως μεγάλους κυματοθραύστες σχεδιασμένους για την προστασία λιμένων ή πυρηνικών εγκαταστάσεων. Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, είναι μια τεχνολογία με ελάχιστο κόστος συντήρησης, δεδομένου ότι αυτές οι δομές προορίζονται συνήθως να αντέχουν στο σχεδιαστικό κύμα χωρίς να υποστούν βλάβη (C.L.I.). Έχουν συμπαγές σχήμα που παρέχει σχετικά μεγάλη σταθερότητα στην κατασκευή. Η βασική ιδέα του Accropode ήταν μια ισορροπία μεταξύ της σύμπλεξης και της σταθερότητας της κατασκευής (Peter Bakker, et al.).



Σχήμα 31: Τοπική διατομή (Πηγή: Φράγκου, 2010)

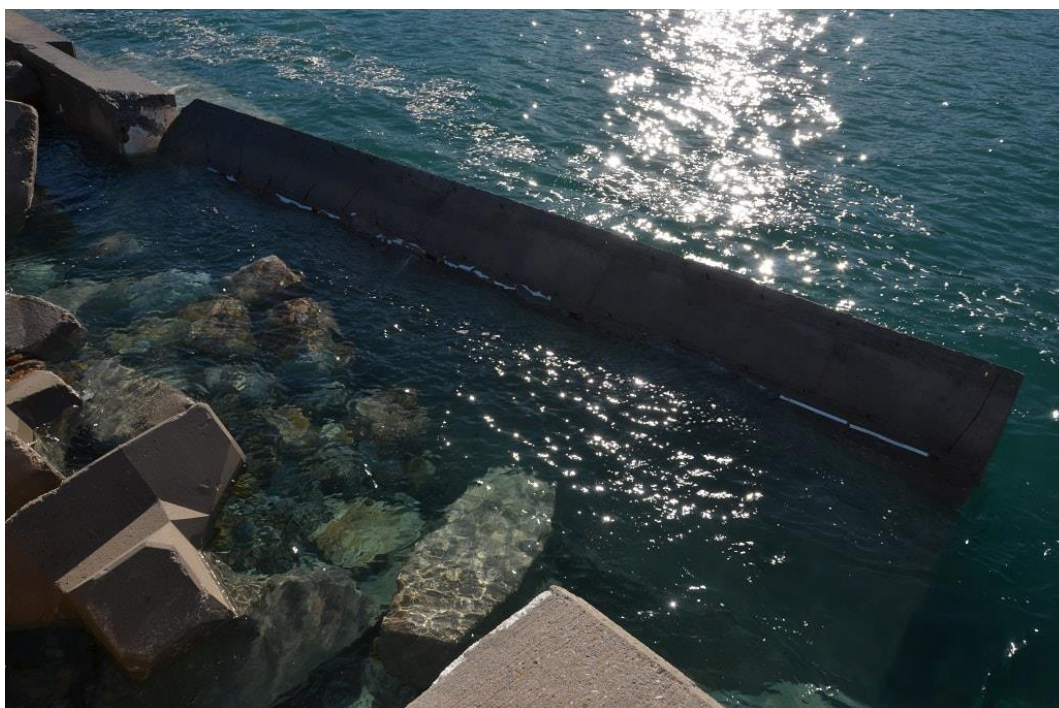
3.2 Κακοκαιρία της 18^{ης} Ιανουαρίου 2018

Την 18^η Ιανουαρίου 2018 στην περιοχή της Ικαρίας επικράτησαν άνεμοι με μέγιστη ταχύτητα τα 10.6 μονάδες της κλίμακας Beaufort, με βάση τις τριώρες καταγραφές της Ε.Μ.Υ. για τον σταθμό της Ικαρίας. Καταγραφή αρκετά υψηλότερη από τη μέση ένταση ανέμου στην περιοχή.



Σχήμα 32: Κατά τη διάρκεια της κακοκαιρίας (Πηγή: Wikipedia).

Μετά την κακοκαιρία της 18^{ης} Ιανουαρίου 2018 μεγάλο κομμάτι του νέου μώλου έχει υποχωρήσει και κοπεί στην μέση. Έχει υποχωρήσει το κρηπίδωμα με αποτέλεσμα μεγάλος όγκος των τεχνιτών ογκολίθων (Accroprode) να έχουν βρεθεί στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

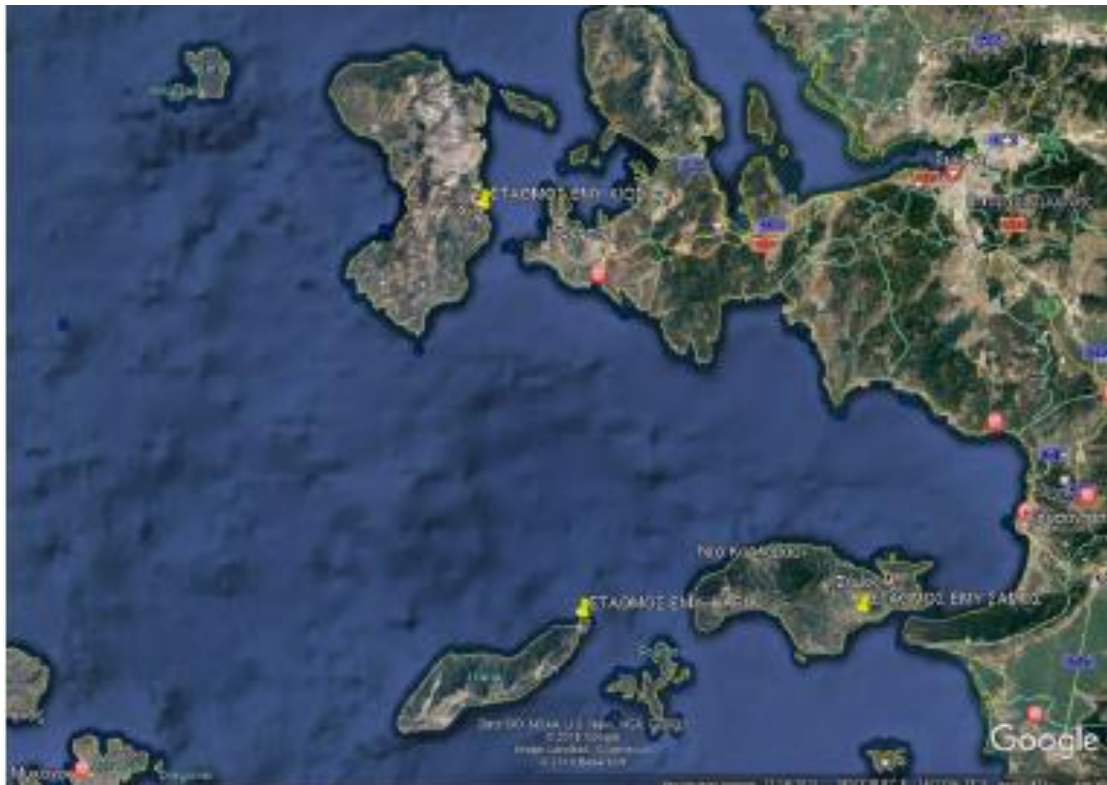


Σχήμα 33: Υποχώρηση υπήνεμης πλευράς λιμένα (Πηγή: Wikipedia).



Σχήμα 34: Σημείο υποχώρησης κρηπιδότοιχου (Πηγή: Wikipedia).

Η μέγιστη ένταση ανέμου από τις τριώρες καταγραφές της Ε.Μ.Υ. στους σταθμούς της Χίου και της Σάμου ήταν 8.6 και 8.2 Beaufort αντίστοιχα, με διεύθυνση Βόρεια-Βορειοδυτική. Οι διαφορές στις μετρήσεις των τριών σταθμών, εκ των οποίων αυτός της Ικαρίας είναι ο πλέον εκτεθειμένος σε Βόρειους-Βορειοδυτικούς ανέμους, μπορούν να εξηγηθούν αν ληφθεί υπόψη η γεωγραφική τους θέση.



Σχήμα 35: Σταθμοί Ε.Μ.Υ. Ικαρίας, Σάμου και Χίου (Πηγή: Google Earth, 2019)

4. Εφαρμογή βιβλιογραφίας - Εύδηλος Ικαρίας

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η εφαρμογή της βιβλιογραφίας που αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 2, στο λιμένα του Ευδήλου Ικαρίας. Ελέγχεται η ευστάθεια της διατομής όπως προέκυψε από την μελέτη επέκτασης του μώλου το 2010 και προτείνονται και υπολογίζονται οι διάφορες λύσεις για την ανακατασκευή του έργου.

4.1 Κυματικό κλίμα περιοχής

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3 για τον υπολογισμό του κλιματικού κλίματος χρησιμοποιήθηκαν τα μέσα ετήσια ανεμολογικά δεδομένα από το σταθμό της Ικαρίας. Ο σταθμός της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας στην Ικαρία βρίσκεται στην περιοχή του αεροδρομίου και σε υψόμετρο 18 m.

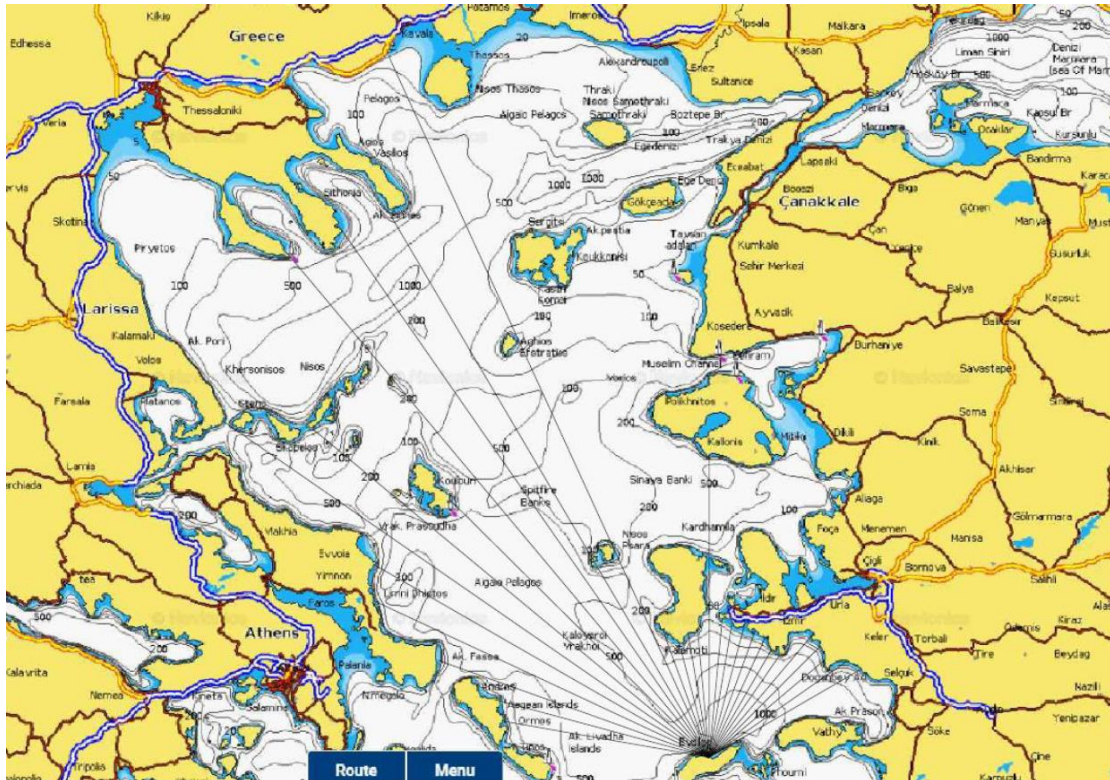
Στον Πίνακα 3 δίνονται τα ανεμολογικά δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας για την περίοδο από 1/1/1995 μέχρι την 31/12/2017. Παρατηρείται ότι η κύρια διεύθυνση πνοής ανέμου στην Ικαρία είναι με μεγάλη διαφορά η Βορειοδυτική και ακολουθεί η Βόρεια. Προκύπτει επίσης ότι τους χειμερινούς μήνες κυριαρχεί ο Βόρειος άνεμος και ακολουθεί ο Βορειοδυτικός, ενώ για τους υπόλοιπους ισχύει το αντίστροφο.

Διεύθυνση Ανέμου	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	NHNEMI	SUM %
Beaufort 0	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	3,87	3,93
Beaufort 1	0,06	0,02	0,07	0,21	0,06	0,05	0,09	0,08	1,06	1,69
Beaufort 2	1,48	0,30	0,26	1,52	1,36	0,46	1,02	2,19	0,60	9,20
Beaufort 3	3,05	0,22	0,33	2,64	3,57	0,64	1,84	7,70	0,01	20,01
Beaufort 4	5,32	0,17	0,27	2,97	4,92	0,52	3,17	17,78	0,00	35,13
Beaufort 5	4,35	0,06	0,10	1,38	3,07	0,24	2,10	10,95	0,00	22,25
Beaufort 6	1,62	0,02	0,01	0,59	1,02	0,03	0,64	2,89	0,00	6,82
Beaufort 7	0,30	0,00	0,00	0,14	0,16	0,00	0,06	0,21	0,00	0,87
Beaufort 8	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03	0,00	0,10
Beaufort ≥ 9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SUM %	16,22	0,80	1,05	9,47	14,18	1,96	8,93	41,83	5,54	100,00

Πίνακας 5: Ανεμολογικά δεδομένα του σταθμού της Ε.Μ.Υ. στη Ικαρία. (Πηγή: Ε.Μ.Υ., 2018)

Από τον προσανατολισμό του λιμένα, προκύπτει ότι οι διευθύνσεις ανέμου που τον επηρεάζουν είναι η Βορειοδυτική, η Βόρεια και η Βορειοανατολική. Με τη βοήθεια της εφαρμογής Navionics υπολογίζονται τα ενεργά αναπτύγματα πελάγους για αυτές τις διευθύνσεις ανέμου σύμφωνα με την εξίσωση (2.5).

Προκύπτει ότι κρίσιμες διευθύνσεις ανέμου είναι η Βορειοδυτική, με ενεργό ανάπτυγμα 140,37 km και η Βόρεια με ενεργό ανάπτυγμα πελάγους ίσο με 116,17 km.



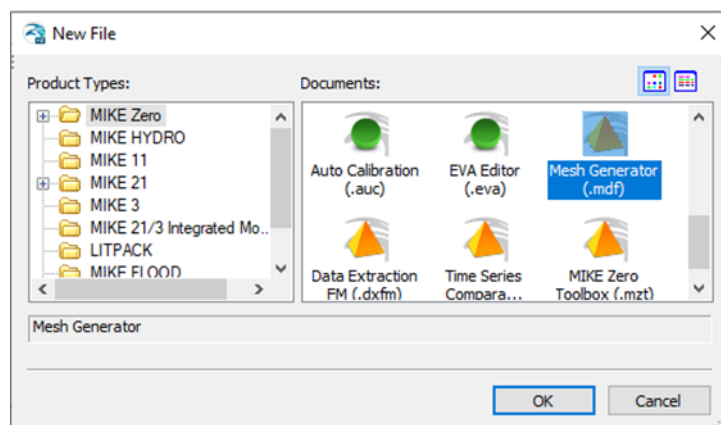
Σχήμα 36: Υπολογισμός του αναπτύγματος πελάγους του Ευδήλου μέσω του Navionics Web App

Για κάθε μια από αυτές τις κύριες διευθύνσεις υπολογίζεται με την μέθοδο S.M.B. το χαρακτηριστικό ύψος κύματος στα βαθειά. (βλ. Πίνακα 15,16,17,18,19,20).

Λόγω της σημαντικής αύξησης της διάρκειας πνοής ανέμων υψηλών εντάσεων, μπορεί να γίνει η παραδοχή πλήρως αναπτυγμένων κυματισμών.

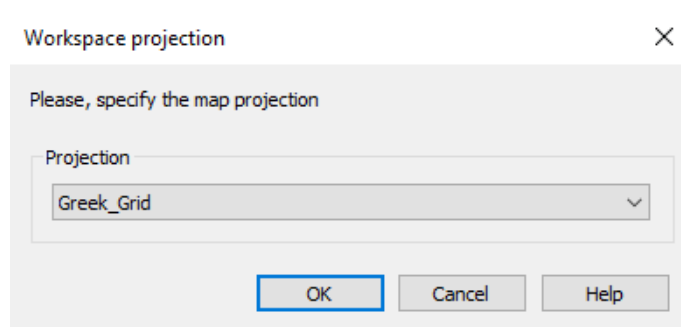
4.1.1 Εφαρμογή μοντέλου MIKE 21 SW

Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός του κυματικού κλίματος στην περιοχή του έργου. Ο υπολογισμός αυτός έγινε με χρήση του προγράμματος MIKE Zero και του Mesh Generator.



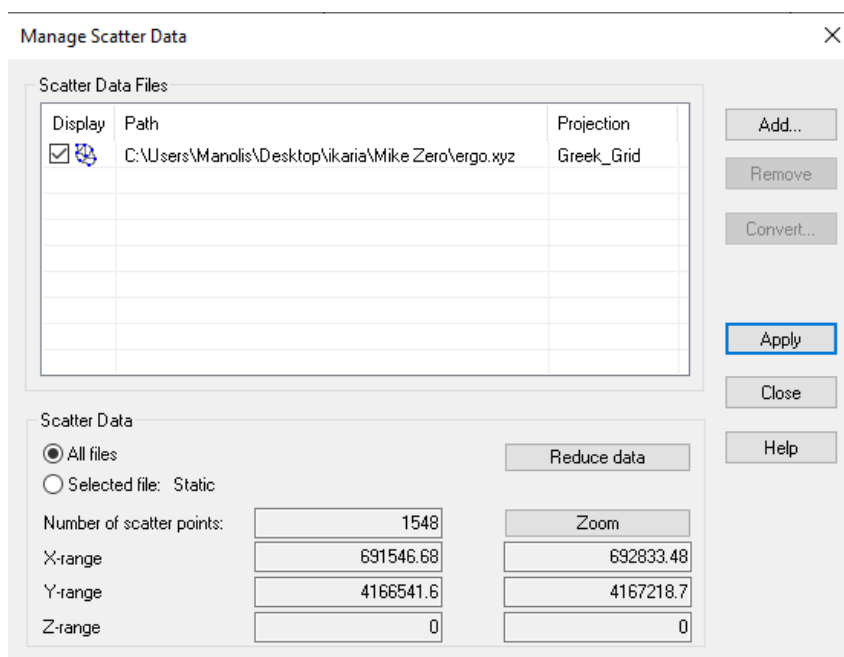
Σχήμα 37: Επιλογή Mesh Generator από το κεντρικό μενού

Επιλέχθηκε ως σύστημα αναφοράς το Greek_Grid το οποίο είναι σύμφωνα με το ΕΓΣΑ '87.



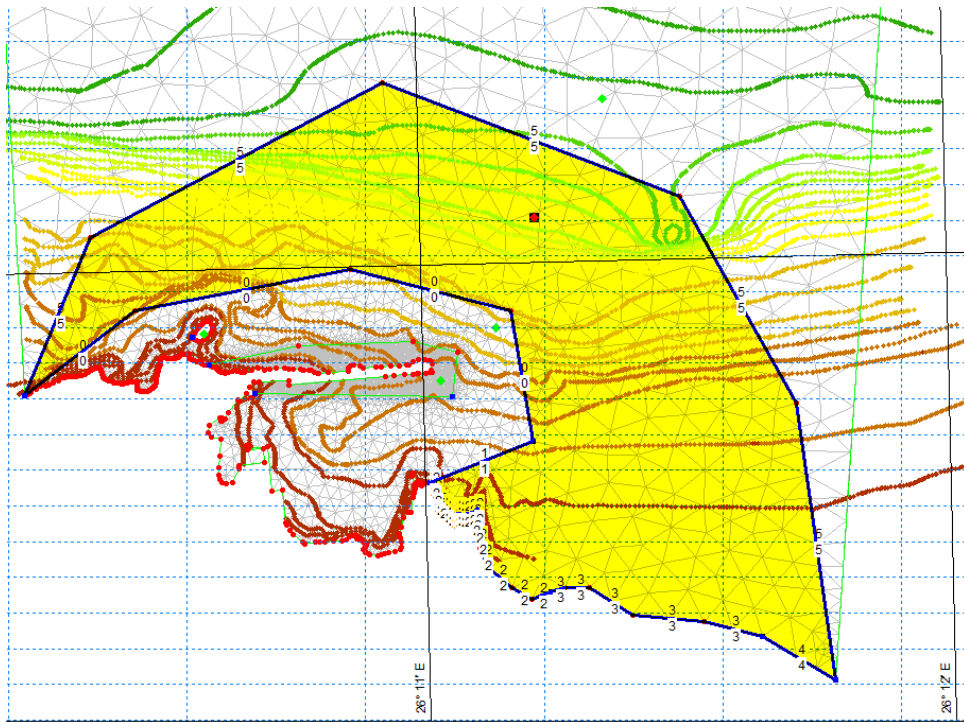
Σχήμα 38: Επιλογή συστήματος αναφοράς

Για την ψηφιοποίηση της περιοχής του έργου αρχικά δημιουργήθηκε αρχείο (.xyz) στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Autocad. Για την δημιουργία του τριγωνικού μη δομημένου πλέγματος (flexible mesh) εισήχθη στο εργαλείο Mesh Generator του MIKE Zero, το (.xyz) αρχείο που αποτυπώνει τις βαθυμετρικές καμπύλες, το έργο και την ακτογραμμή από το ψηφιοποιημένο σε Autocad χάρτη της περιοχής.

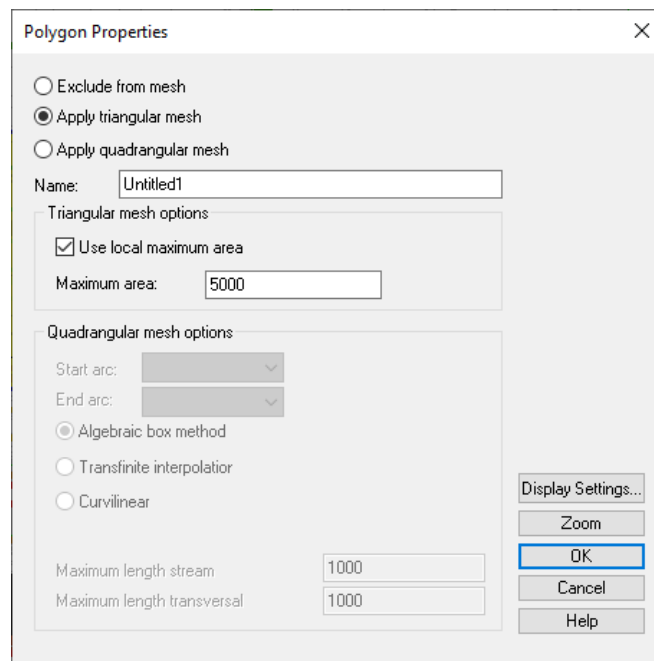


Σχήμα 39: Εισαγωγή αρχείων (.xyz) στο Mesh Generator

Ορίζοντας τα όρια της περιοχής μελέτης δημιουργήθηκε ο κάναβος που είναι ανεξάρτητος της βαθυμετρίας. Ακολούθως, σχεδιάστηκε ένα πολύγωνο και ορίστηκε ένα σημείο του στο κέντρο περίπου του κάναβου που βάσει των ιδιοτήτων του επιτυγχάνεται το είδος της πύκνωσης και η λεπτομέρεια που επιθυμείται.



Σχήμα 40: Επιλογή ενδεικτικού πολυγώνου

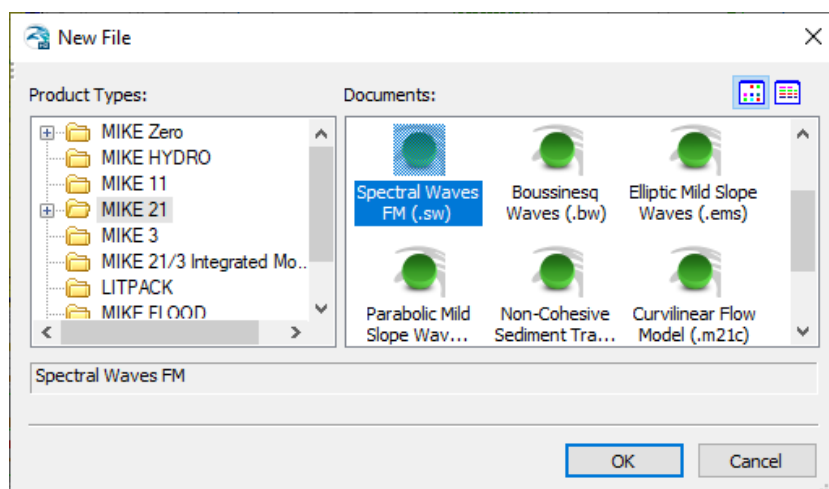


Σχήμα 41: Επιλογή είδους πύκνωσης

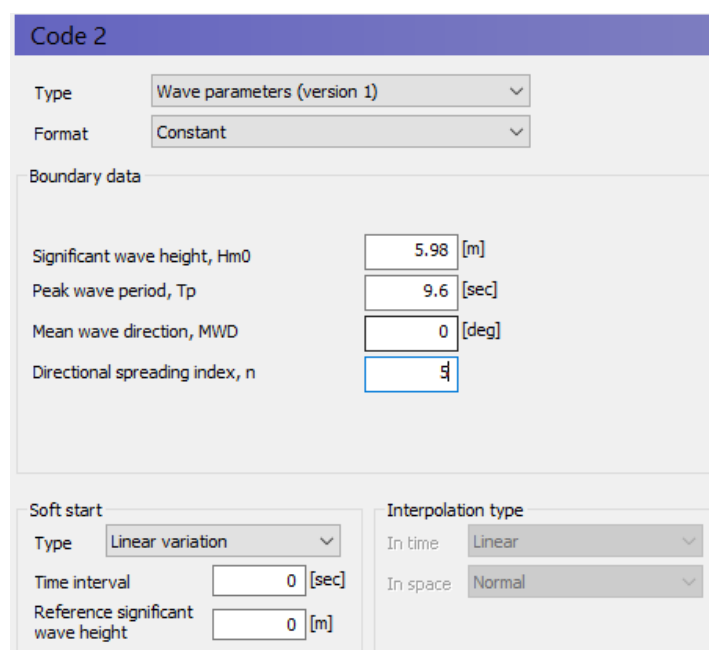
Τέλος, παράχθηκε η τελική βαθυμετρία σε αρχείο με πύκνωση κοντά στη ξηρά και με επαρκή λεπτομέρεια για να πληροί τις ανάγκες της εργασίας (Σχήμα 43).

Με βάση την βαθυμετρία εισήχθηκε το αρχείο 'Interpolation' στο πρόγραμμα MIKE 21 SW, ορίστηκαν οι συνθήκες ορίων το χρονικό βήμα και εισήχθησαν τα μέγιστα

κυματικά δεδομένα για τον Βόρειο και τον Βορειοδυτικό άνεμο ώστε να υπολογιστεί το κυματικό κλίμα στην περιοχή του έργου.



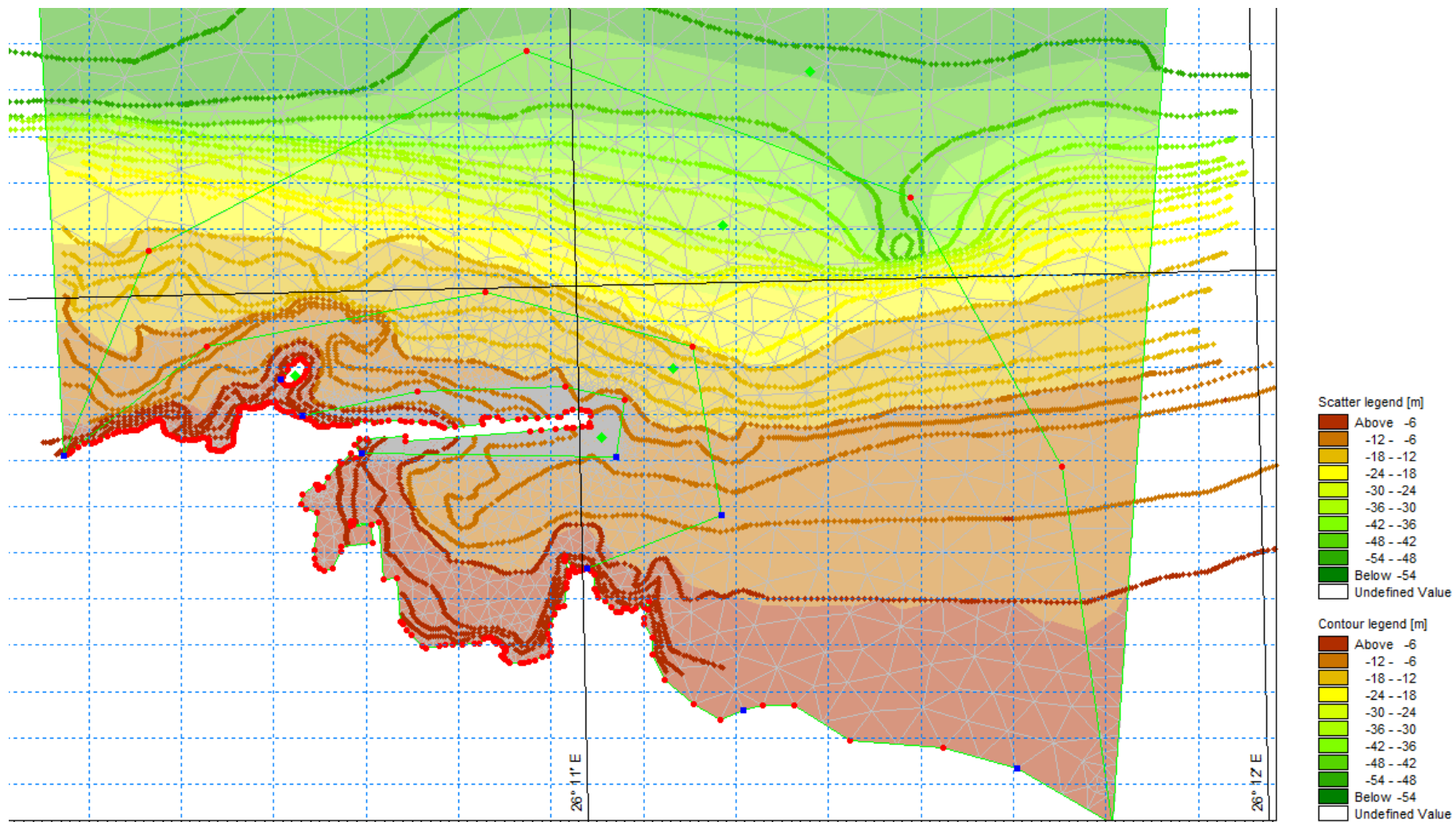
Σχήμα 42: Επιλογή MIKE 21 SW από το κεντρικό μενού.



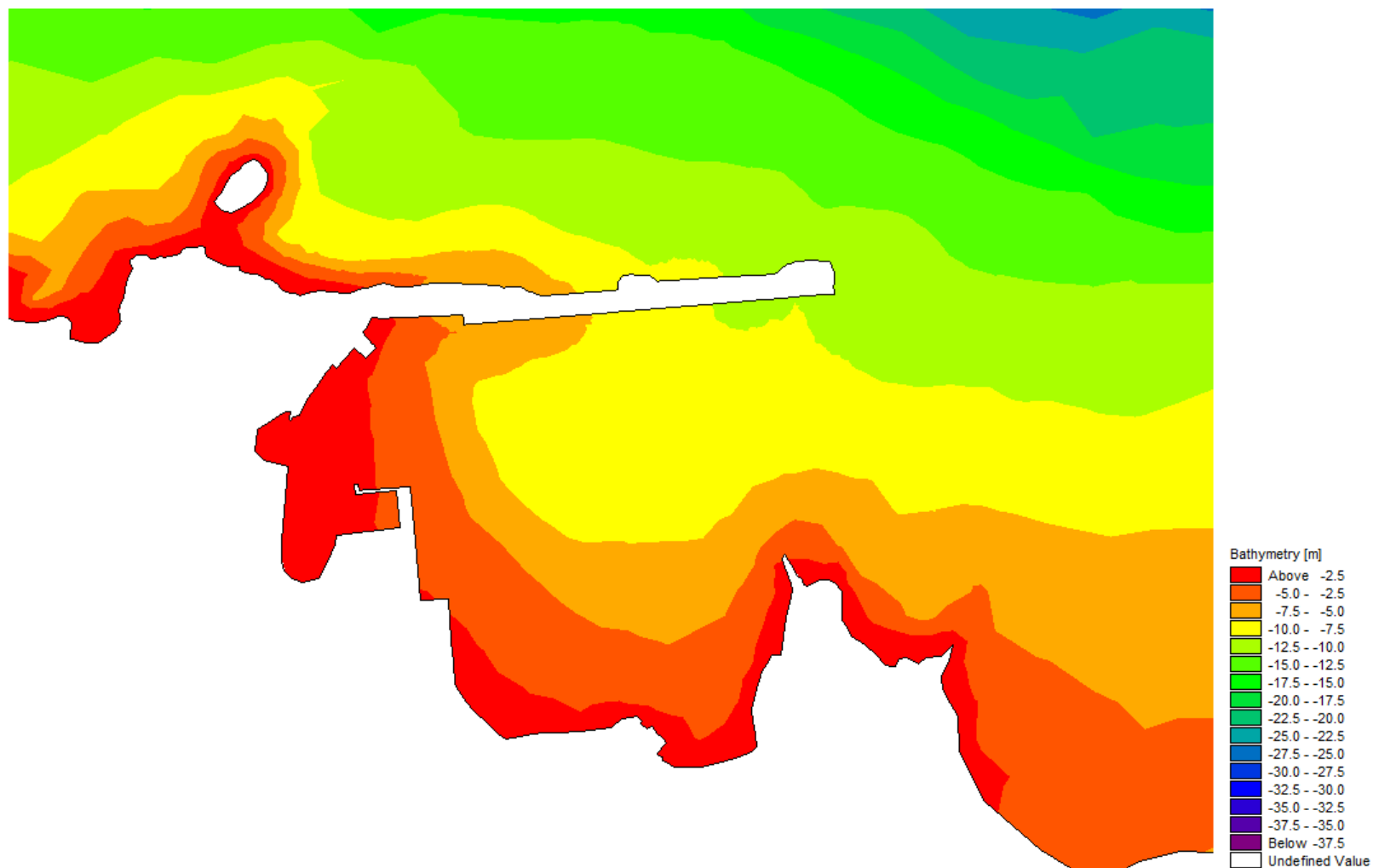
Σχήμα 43: Εισαγωγή κυματικού κλίματος στα βαθειά.

Όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες, τα ύψη κύματος σχεδιασμού που προκύπτουν από το πρόγραμμα MIKE 21 SW για Βόρειο και Βορειοδυτικό άνεμο είναι 5,35 m και 4,0 m αντίστοιχα ενώ τα κύματα στα βαθειά νερά ήταν 5,98 m και 6,92 m αντίστοιχα. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην διάθλαση που συμβαίνει κατά την μεταφορά του κύματος από τα Βορειοδυτικά. Επομένως παρόλο που η μεγαλύτερη

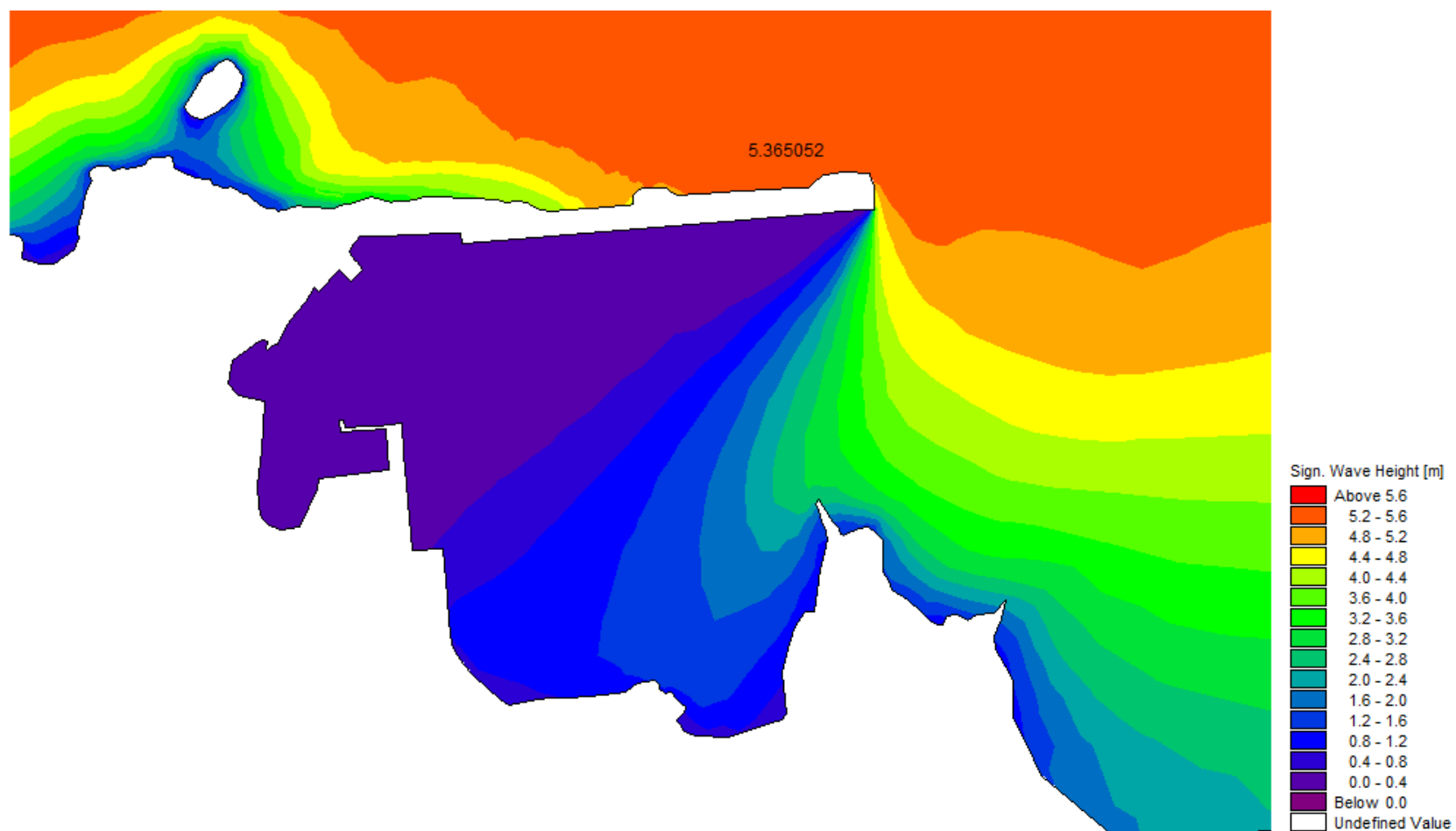
ένταση ανέμου και κύματος βρίσκεται από τα Βορειοδυτικά, όπως προκύπτει στην περιοχή του έργου χρησιμοποιείται η Βόρεια διεύθυνση ως κρίσιμη, διότι δίνει μεγαλύτερο κυματισμό κοντά στο έργο. Είναι λοιπόν εύλογο να γίνει ο έλεγχος της κατασκευής με ύψος κύματος τα 5,35 m και διεύθυνση το Βορρά.



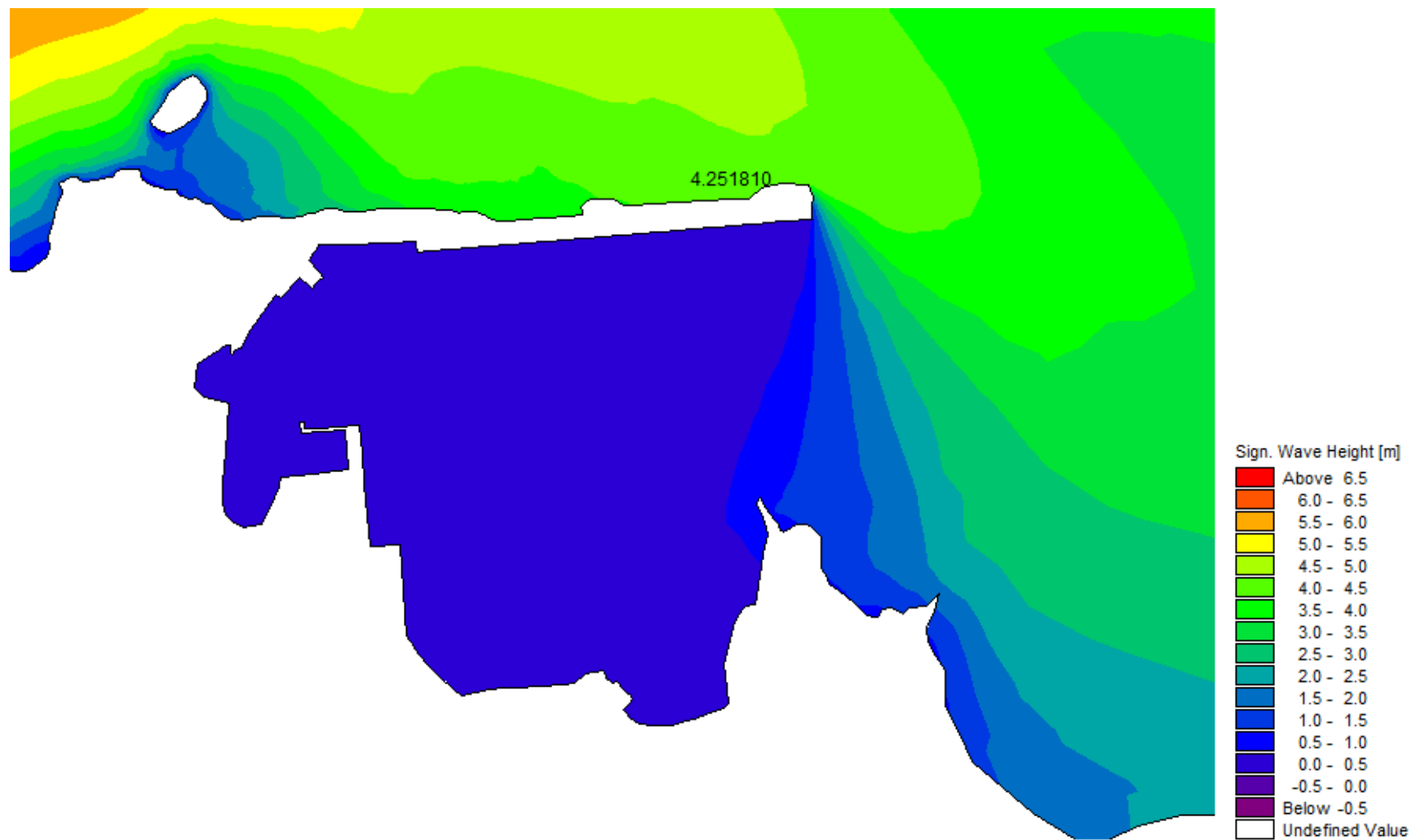
Σχήμα 44: Απόσπασμα από Mesh Generator MIKE Zero 21 SW



Σχήμα 45: Απεικόνιση τελικής βαθυμετρίας (Interpolation).



Σχήμα 46: Κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος στην περιοχή του έργου για Βόρειο άνεμο.



Σχήμα 47: Κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος στην περιοχή του έργου για Βορειοδυτικό άνεμο.

4.2 Κριτήρια ελέγχου

Η επάρκεια του υφιστάμενου κυματοθραύστη ελέγχεται με τα εξής κριτήρια:

- την ευστάθεια της θωράκισης
- την ευστάθεια του πόδα
- τη μέση παροχή υπερπήδησης και το μέγιστο όγκο υπερπήδησης
- τον έλεγχο των κατασκευαστικών προβλημάτων

4.2.1 Ευστάθεια θωράκισης

Ο συντελεστής ευστάθειας κατά Hudson K_D ορίζεται με βάση το ποσοστό ζημιών που θεωρείται αποδεκτό να υποστεί η θωράκιση. Τα δύο αυτά μεγέθη είναι θετικά συσχετισμένα, αφού όσο μεγαλύτερο είναι το αποδεκτό επίπεδο ζημιών, τόσο μεγαλύτερη είναι και η τιμή του K_D .

Με βάση την εταιρία που προδιαγράφει τους τεχνητούς ογκολίθους και τον πίνακα σχεδιασμού (CLI, 2012) τα ακρόποδα είναι σχεδιασμένα για συντελεστή ευστάθειας κατά Hudson ίσο με 11, για βάθος μη θραυόμενων κυματισμών και κλίση πυθμένα 4%. Το έργο βρίσκεται σε βάθος 11,5 m και είναι βάθος μη θραυόμενων κυματισμών.

$$\frac{H_s}{h} = \frac{5,35}{11,5} = 0,465 < 0,8 \quad (4.1)$$

Από την Εξίσωση (2.24) προκύπτει:

$$K_D = \frac{H_s^3}{\Delta^3 \cot \alpha V} < 11 \quad (CLI, 2012) \quad (4.2)$$

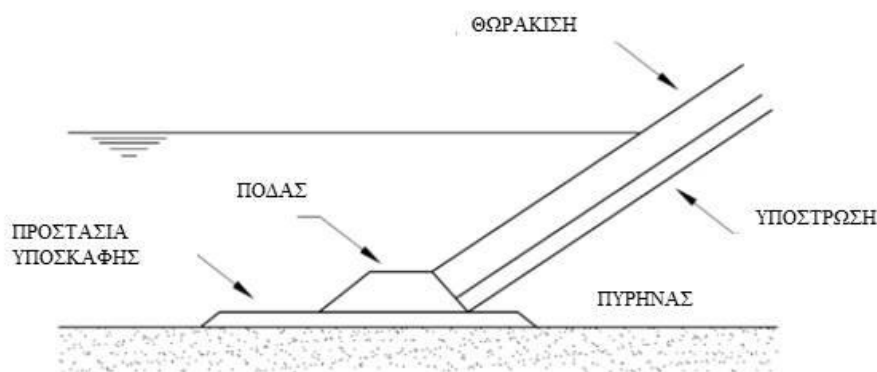
Εφόσον λοιπόν ο συντελεστής ευστάθειας είναι μικρότερος από την τιμή 11, τότε η θωράκιση επαρκεί.

Πίνακας 6: Έλεγχος ευστάθειας θωράκισης

Έλεγχος ευστάθειας πρανούς					
H_s	γ_s	D_n (σύμφωνα με CLI)	V (Σύμφωνα με CLI) m^3	K_D	$K_D \leq 11$ (CLI)
5,35	2,35	1,71	5	9,45	OK

4.2.2 Ευστάθεια πόδα έργου

Ο πόδας του έργου συνήθως προστατεύεται από έναν αναβαθμό φυσικών ογκολίθων όπως φαίνεται στο Σχήμα 47.



Σχήμα 48: Σκαρίφημα πόδα (Πηγή: Rock Manual, 2012)

Η κατασκευή αυτή προστατεύει ολόκληρη την κατασκευή από το φαινόμενο της απόπλυσης. Η αστοχία του πόδα μπορεί να επιταχύνει ή ακόμα και να προκαλέσει την ολική αστοχία της κύριας θωράκισης. Επομένως, είναι πολύ σημαντική η εξέταση της ευστάθειας του αναβαθμού του.

Στην περίπτωση του λιμένα του Ευδήλου Ικαρίας η λιθορριπή έδρασης διαμορφώνεται από διαβαθμισμένους φυσικούς ογκολίθους βάρους 100 kg, ενώ στον πόδα της εξωτερικής θωράκισης για τον εγκιβωτισμό των ακρόποδων και την προστασία τους έναντι των κυματισμών, κατασκευάζεται πρίσμα από φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 800 έως 1700 kg, με στάθμη στέψης στα -8,6 m (Φράγκου, 2010).

Για τον έλεγχο της ευστάθειας ποδός που αποτελείται από δύο στρώσεις φυσικών ογκολίθων, χρησιμοποιείται η εξίσωση (4.3) (USACE, 2011).

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n,ποδα}} = (0,24 \frac{h_b}{D_{n,ποδα}} + 1,6) N_{od}^{0.15} \quad (4.3)$$

Από την παραπάνω εξίσωση υπολογίζεται το επίπεδο ζημιών και ελέγχεται με βάση την εξίσωση 4.4.

$$N_{od} = \begin{cases} 0,5 & \text{μηδενικές ζημιές} \\ 2 & \text{αποδεκτή ζημιά} \\ 4 & \text{σοβαρή ζημιά} \end{cases} \quad (4.4)$$

Πίνακας 7: Έλεγχος ευστάθειας πόδα

Έλεγχος ευστάθειας ποδός					
Hs	γs	Dn (συμφωνα με την μελέτη Φράγκου, 2010)	No	ht/Dn	No <= 2
5,35	2,6	0,90	0,73	9,55	OK

Το επίπεδο ζημιών του πόδα της κατασκευής είναι κάτω από 2, επομένως ο πόδας επαρκεί.

4.2.3 Έλεγχος μέσης παροχής και μέγιστου όγκου υπερπήδησης

Για τους κυματοθραύστες με πρηνή, η παροχή υπερπήδησης μπορεί να είναι κρίσιμη για το σχεδιασμό και μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές αστοχίες, όπου ακόμα και ολόκληρος ο κυματοθραύστης μπορεί να καταρρεύσει. Επομένως, ακόμα και σχετικά μικρή παροχή υπερπήδησης μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή ζημιά στη στέψη του έργου ή την πίσω πλευρά του. Σε κάθε περίπτωση, αν μια κατασκευή σχεδιαστεί ως υπερπηδητή, και η πίσω πλευρά της θα πρέπει προφανώς να είναι σχεδιασμένη γι' αυτό (Eurotop II,2016).

Η παροχή υπερπήδησης δεν δίνει πληροφορίες για την ένταση της εκτόνωσης του κάθε υπερπηδόντος κύματος. Ωστόσο, και η πληροφορία αυτή είναι πολύ σημαντική γιατί οι μεγαλύτερες ζημιές προκαλούνται από την υπερπήδηση αυτών των μεμονωμένων κυμάτων (USACE, 2011).

Σε ό,τι αφορά τη μέγιστη αποδεκτή τιμή της μέσης παροχής q_{mean} και το μέγιστο αποδεκτό όγκο υπερπήδησης V_{max} , επιλέγονται οι τιμές 5-10 l/s/m και 10000-20000 l/m, αντίστοιχα, δηλαδή το επιτρεπόμενο από το Eurotop διάστημα για υπερπηδητό κυματοθραύστη, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.

Πίνακας 8: Πίνακας αποδεκτών τιμών μέσης παροχής και μέγιστου όγκου υπερπήδησης (Πηγή: Eurotop II,2016).

ΕΙΔΟΣ ΠΡΑΝΟΥΣ	ΜΕΣΗ ΠΑΡΟΧΗ q (l/s/m)	ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΟΓΚΟΣ V_{max} (l/m)
ΜΕ ΟΓΚΟΛΙΘΟΥΣ, $H_{m0} > 5\text{m}$, ΠΡΟΣΗΝΕΜΗ ΠΛΕΥΡΑ ΣΕΔΙΑΣΜΕΝΗ ΓΙΑ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗ	5-10	10000-20000

Για προφυλακτήριο τοίχο χαμηλότερο από τη στέψη της θωράκισης, ως ελεύθερο περιθώριο του κυματοθραύστη R_c λαμβάνεται αυτό της στέψης της θωράκισης, A_c .

$$R_c = A_c$$

Αντίθετα, για προφυλακτήριο τοίχο ψηλότερο από τη στέψη της θωράκισης, στο ελεύθερο περιθώριο του κυματοθραύστη περιλαμβάνεται το ύψος του τοίχου h_{wall} . (Eurotop II,2016).

$$R_c = A_c + h_{\text{wall}} \quad (4.5)$$

Για πλάτος θωράκισης στη στέψη μεγαλύτερο από τρεις ονομαστικές διαμέτρους ογκολίθων, το Eurotop προβλέπει απομείωση της μέσης τιμής και της τιμής σχεδιασμού της παροχής υπερπήδησης κατά τον συντελεστή C_T :

$$C_r = \min \left(\frac{3.06 \exp(-1.5 \frac{G_c}{H_{m0}})}{1} \right) \quad (4.6)$$

Συνοψίζοντας, εφόσον οι τιμές της μέσης παροχής υπερπήδησης q_{mean} και του μέγιστου όγκου υπερπήδησης V_{max} προκύπτουν μεταξύ 5 - 10 l/s/m και 10000 - 20000 l/m αντίστοιχα, η διατομή επαρκεί έναντι υπερπήδησης (βλ. Πίνακα 21).

Παρατηρείται ότι η υπάρχουσα διατομή του λιμένα Ευδήλου δεν ικανοποιεί τα κριτήρια της μέσης παροχής υπερπήδησης, επομένως δεν επαρκεί έναντι υπερπήδησης.

$$q_{mean} = 16,63 \text{ l/s/m} > 10 \text{ l/s/m}$$

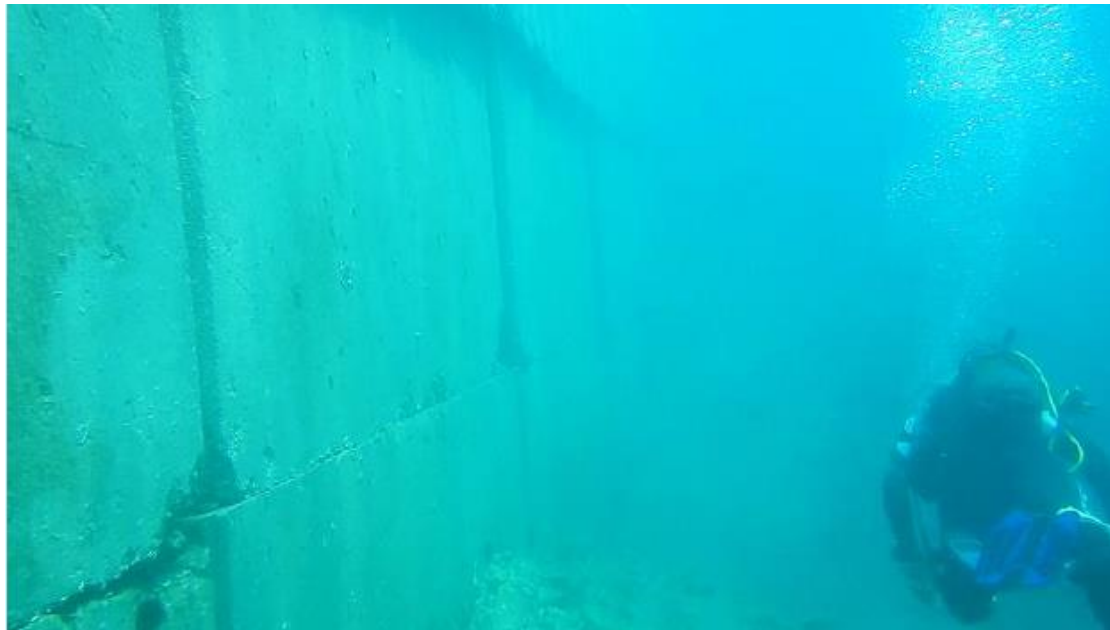
4.2.4 Έλεγχος κατασκευαστικών προβλημάτων

Πολλές φορές η αστοχία σε έργα δεν προκαλείται από ακραία καιρικά φαινόμενα ή τη μελέτη του έργου. Αρκετές είναι οι φορές που η αστοχία έρχεται και από κατασκευαστικές ατέλειες, παραβάσεις ή και από υποεκτίμηση των φυσικών παραμέτρων κατά τη φάση σχεδιασμού. Στην περίπτωση του λιμένα του Ευδήλου Ικαρίας παρατηρήθηκαν κάποια κατασκευαστικά προβλήματα που είναι πολύ πιθανόν να οδήγησαν και στη κατάρρευσή του.

Από τους ελέγχους Ε.Σ.Π.Ε.Λ. (απ.17442/Α.Πλ.2682/10-04-2014) προέκυψε, ότι τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων θλιπτικής αντοχής πυρήνων σκυροδέματος, οι οποίοι ελήφθησαν από συμπαγείς τεχνητούς ογκολίθους, οι 11 από τους 15 δειγματοληπτικούς ελέγχους που διενέργησε είναι κατώτερης κατηγορίας σκυροδέματος από την προδιαγεγραμμένη στη σύμβαση του έργου. Συγκεκριμένα βρέθηκαν μια κατηγορία κατώτερη από την απαιτούμενη (C16/20 αντί C20/25) σε επτά τεχνητούς ογκολίθους (Δ18,Γ21,Ε14,Δ19,Α18,Α19) και δύο κατηγορίες κατώτερη από την απαιτούμενη (C12/15 αντί C20/25) σε τέσσερις τεχνητούς ογκολίθους (Β17,Α21,Β19,Α22).



Σχήμα 49: Ρηγματώση στο βασικό Σ.Τ.Ο. στη δεύτερη στήλη από τη συναρμογή (Πηγή: Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).



Σχήμα 50: Μικρών διαστάσεων εσοχές/εξοχές των Τ.Ο. και τοπικές θραύσεις των γωνιών τους (Πηγή: Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).

Η στέψη της λιθορριπής στη γωνία του ακρομωλίου βρίσκεται σε βάθος -7,7 m, ενώ τα ακρόποδα καλύπτουν μέχρι και τη στάθμη των -6.5 m, αφήνοντας χωρίς θωράκιση ένα ακάλυπτο τριγωνικό μέτωπο στην κεφαλή του ακρομωλίου.



Σχήμα 51: Αποψη της γωνίας της υπήνεμης πλευράς του ακρομωλίου (Πηγή: Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).



Σχήμα 52: Αποψη της κεφαλής του ακρομωλίου. Αριστερά διακρίνεται το τριγωνικό τμήμα χωρίς θωράκιση (Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).

Επιπλέον, υπάρχουν αρκετά τμήματα τα οποία είναι ακάλυπτα από τη βασική θωράκιση. Τέτοια τμήματα βρέθηκαν τόσο στο τμήμα του ακρομωλίου όσο και σε τμήματα του πρανούς του κυματοθραύστη.



Σχήμα 53: Λίθοι σε ακάλυπτα από ακρόποδα τμήματα του πρανούς (Πηγή: Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π.,2018).

Ακόμη, εντοπίστηκαν τμήματα του κυματοθραύστη με μικρότερο από το απαιτούμενο ή και με καθόλου διαβάθμιση berm στον πόδα του πρανούς.

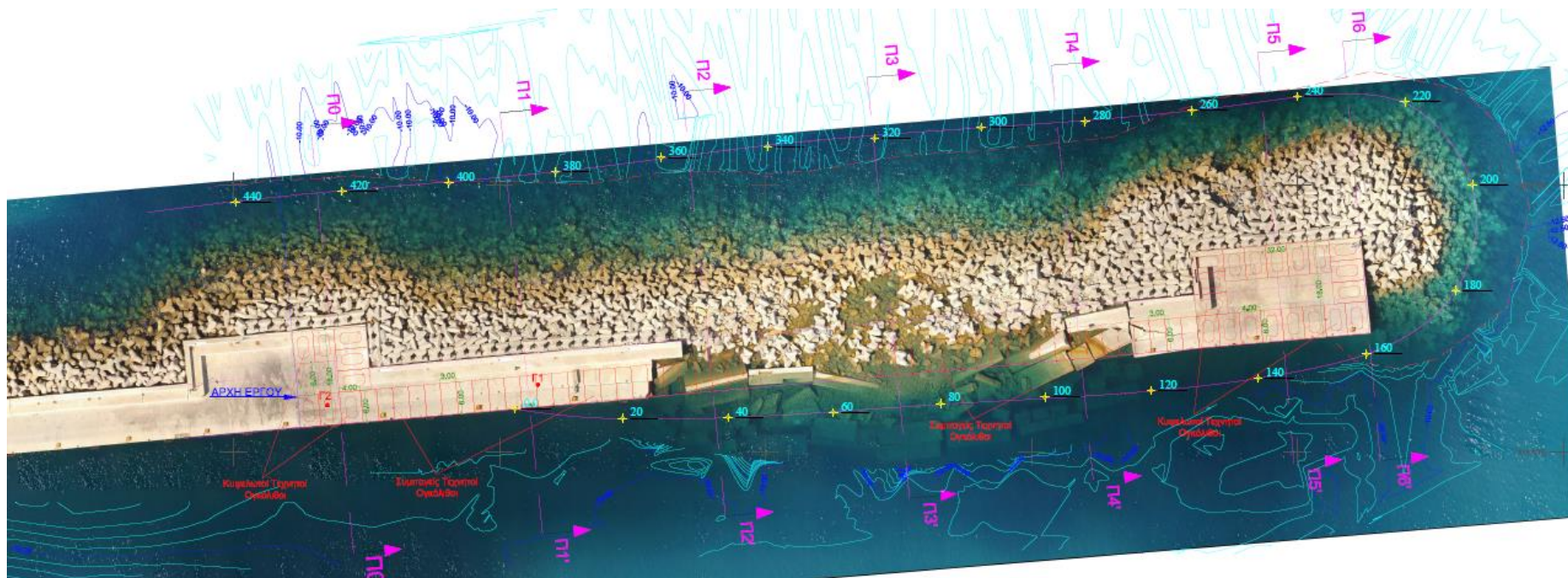


Σχήμα 54: Διαπίστωση ύπαρξης μικρού ύψους berm, με λίθους μικρότερης διαβάθμισης από την προβλεπόμενη (Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π.,2018)

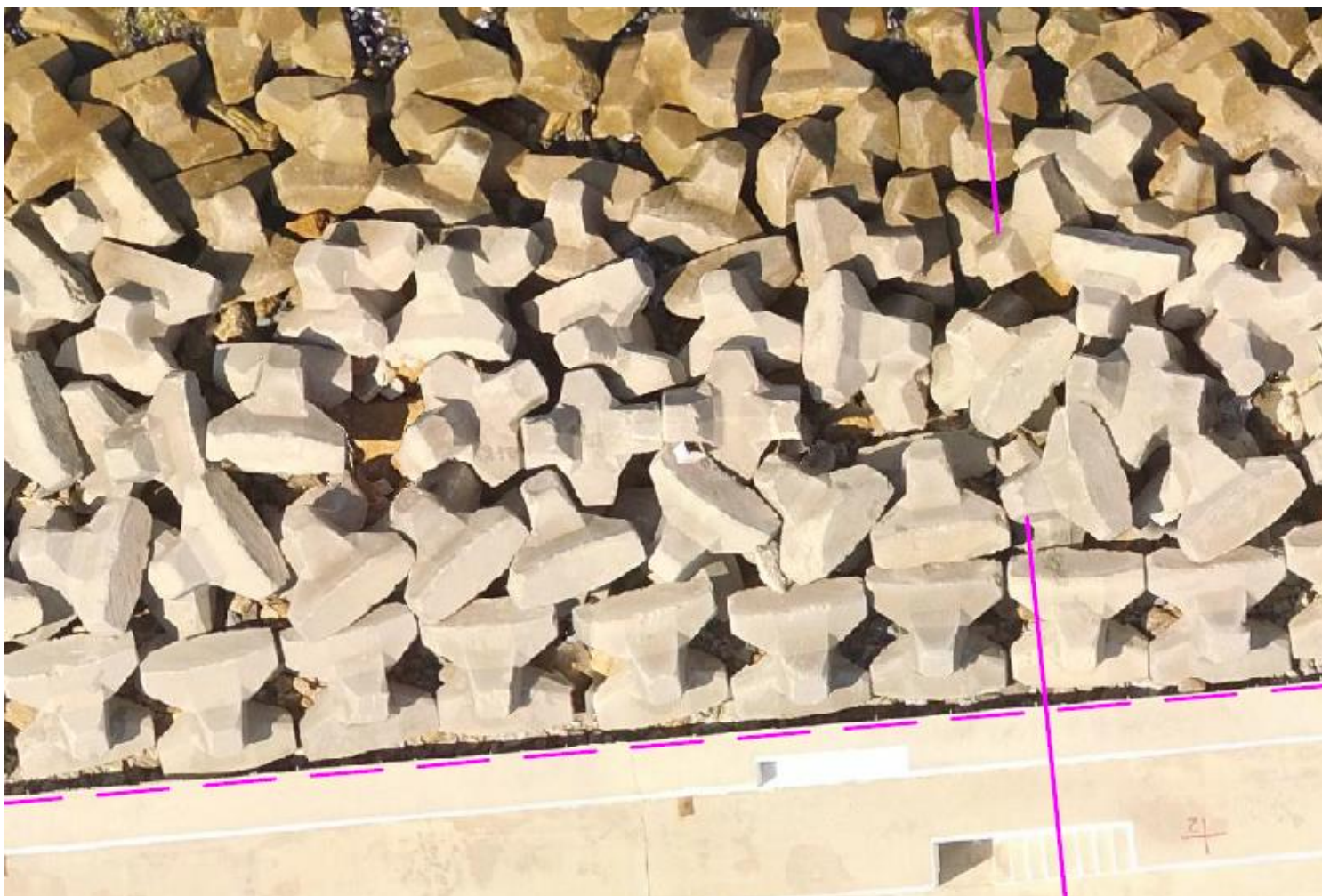
Οι μονάδες θωράκισης του συγκεκριμένου (Acropodes) τύπου βασίζουν την ευστάθειά τους στον τρόπο και τη διάταξη “πλέξης” μεταξύ τους που οφείλει να είναι μη κανονική και με συγκεκριμένο τρόπο περιστροφής και τοποθέτησης. Η ορθή και σύμφωνα με τις οδηγίες της εταιρίας (CLI 2012) τοποθέτηση των μονάδων θωράκισης εξασφαλίζει την εμπλοκή τους αφενός και αφετέρου τον περιορισμό των

κενών μεταξύ των μονάδων παράμετρο κρίσιμη για την αποφυγή έκπλυσης του υποκείμενου υλικού φίλτρου , στοιχείο απαραίτητο για την ευστάθεια της διατομής του έργου.

Με βάση την εικόνα του έργου όπως προέκυψε ότι η τοποθέτηση των μονάδων θωράκισης στα παρακείμενα τμήματα του έργου είναι πλημμελής με αποτέλεσμα να καταγράφονται κενά της τάξης του 1.0 m έως και 1.5 m. Σημειώνεται ότι η υποκείμενη στρώση λιθορριπών φίλτρου έχει προδιαγραφεί με διαβάθμιση 800 - 1700 kg, δηλαδή μέση διάμετρο λίθων 84– 108 cm με συνέπεια να είναι δυνατή η διαρροή του υλικού διαμέσου των κενών της θωράκισης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην αποσύνθεση της διατομής και υποχώρηση της στέψης θωράκισης με αποτέλεσμα να εκτεθεί ο προφυλακτήριος τοίχος σε απευθείας φόρτιση από τους κυματισμούς.



Σχήμα 55: Αποψη του λιμένα Ευδήλου μετά την αστοχία. (Πηγή: Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).



Σχήμα 56: Ελλιπείς κάλυψη και πλέξη ακρόποδων (Πηγή: Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π.,2018).

5. Προτάσεις

Όπως αναφέρθηκαν και σε προηγούμενο κεφάλαιο τα προβλήματα στον λιμένα του Ευδήλου ήταν αρκετά και ποικίλων μορφών, από θέματα μελέτης μέχρι κατασκευής και ποιότητας υλικών.

5.1 Προτάσεις ενίσχυσης – επισκευής

Κατά τον έλεγχο της επάρκειας της κατασκευής παρατηρήθηκε ότι η κατασκευή είναι ανεπαρκής έναντι υπερπήδησης κυμάτων. Για την επίτευξη αυτή υπάρχουν τα εξής σενάρια αναβάθμισης.

- προσθήκη στρώσης θωράκισης
- εξομάλυνση της κλίσης του πρανούς
- αύξηση πλάτους στέψης
- κατασκευή ύφαλου κυματοθραύστη ανάντη

Σε κάθε περίπτωση υπάρχουν κάποια στάδια τα οποία είναι κοινά πριν την εφαρμογή ή όχι των προτάσεων αναβάθμισης. Αρχικά προτείνονται τα εξής βήματα:

- καθαίρεση όλων των μονάδων θωράκισης οι οποίες μετακινήθηκαν στην λιμενολεκάνη
- καθαίρεση της λιθορριπής ανακλαστικού πρίσματος η οποία έπεσε και εκείνη στην λιμενολεκάνη
- καθαίρεση όλων των τμημάτων του κρηπιδότοιχου που βρίσκονται στην λιμενολεκάνη
- όποια στοιχεία είναι υγιή αποθηκεύονται για επαναχρησιμοποίηση

5.1.1 Προσθήκη στρώσης θωράκισης

Τα ακρόποδα λειτουργούν ως μία στρώση, η τοποθέτησή τους είναι πολύ αυστηρή, και η αλληλοεμπλοκή τους είναι κρίσιμη για τη λειτουργία της στρώσης. Κάθε μονάδα πρέπει να βρίσκεται σε ποσοστό τουλάχιστον 33% εκτός στρώσης και ταυτόχρονα σε επαφή με την από κάτω στρώση (CLI, 2015). Επομένως, η προσθήκη στρώσης θωράκισης απορρίπτεται στην προκειμένη περίπτωση.

5.1.2 Εξομάλυνση της κλίσης του πρανούς

Η εξομάλυνση της κλίσης του κυματοθραύστη έχει θετική επίδραση στην υπερπήδηση. Όσο πιο απότομη η κλίση, τόσο μικρότερη η απορροφητικότητα της διατομής και άρα μεγαλύτερη η υπερπήδηση που επιτρέπει. Ωστόσο, στις μονές στρώσεις θωράκισης, η βαρύτητα παίζει καθοριστικό ρόλο στην αλληλοεμπλοκή των μονάδων και την ευστάθεια της στρώσης. Οι κλίσεις που υποδεικνύονται για τα ακρόποδα από την κατασκευαστική εταιρεία είναι 1:1.5 και 1:1.33. Κλίσεις ομαλότερες από 1:1.5 είναι δυσμενείς για την ευστάθεια και δεν προτείνονται. Άρα στην προκειμένη περίπτωση, ο κυματοθραύστης είναι κατασκευασμένος με την ηπιότερη δυνατή κλίση (CLI, 2012).

5.1.3 Αύξηση πλάτους στέψης

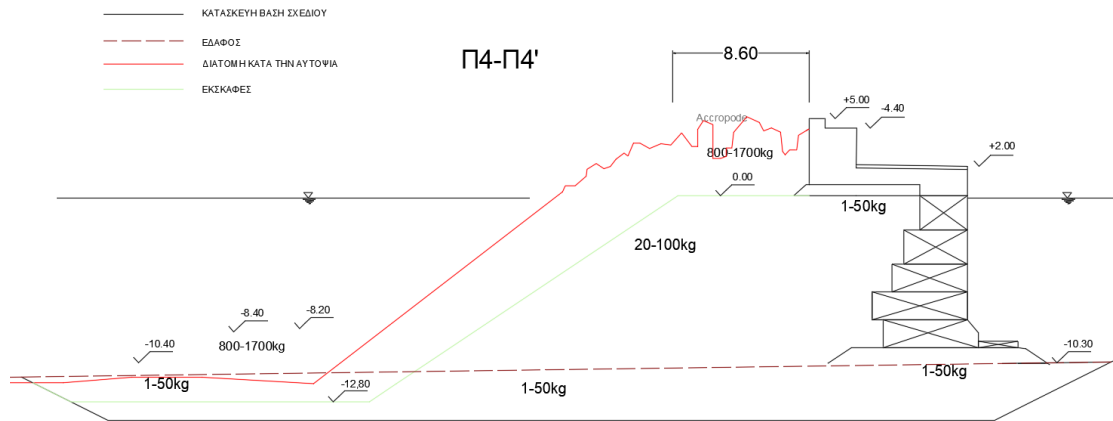
Παρατηρήθηκε στην κατασκευή ότι στην στέψη ήταν τοποθετημένα μόνο δύο ακρόποδα. Σύμφωνα με τις συστάσεις της εταιρίας Concrete Layer Innovations (CLI) η οποία είναι υπεύθυνη για τις Τεχνικές Προδιαγραφές της εφαρμογής των συγκεκριμένων μονάδων, τα ακρόποδα (Accropode) πρέπει να τοποθετούνται έτσι ώστε στη στέψη της θωράκισης να ευρίσκονται κατ' ελάχιστον 3 ακρόποδα (ACCROPODE Design Guidelines). Οι συστάσεις αυτές, που αποτελούν και τη διεθνή πρακτική, οδηγούν σε μεγαλύτερο μήκος διαδρομής επί της στέψης του προσπίπτοντος κυματισμού, με αποτέλεσμα την απόσβεση ικανού ποσοστού της ενέργειάς του και την περιορισμένη φόρτιση του προφυλακτήριου τοίχου, ενώ παράλληλα συμβάλλουν στην καλύτερη ευστάθεια της διατομής.

Κατά τους νέους υπολογισμούς με μία αύξηση της στέψης του έργου κατά 1,9 m επιτυγχάνονται τα κριτήρια υπερπήδησης (βλ. Πίνακα 22).

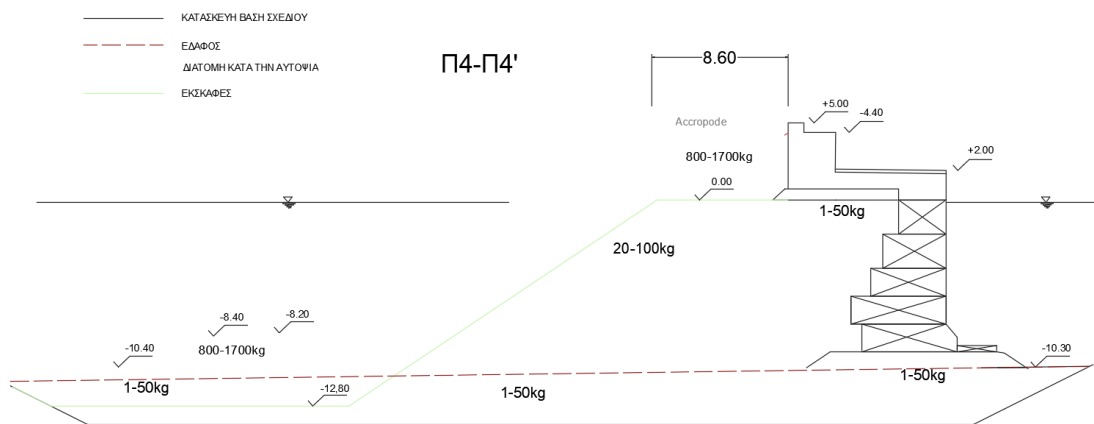
$$q_{mean} = 9,88 \text{ l/s/m} < 10,00 \text{ l/s/m}$$

Ως προς την διατομή Π4-Π4' (βλ. Σχήμα 55) του μώλου προτείνεται:

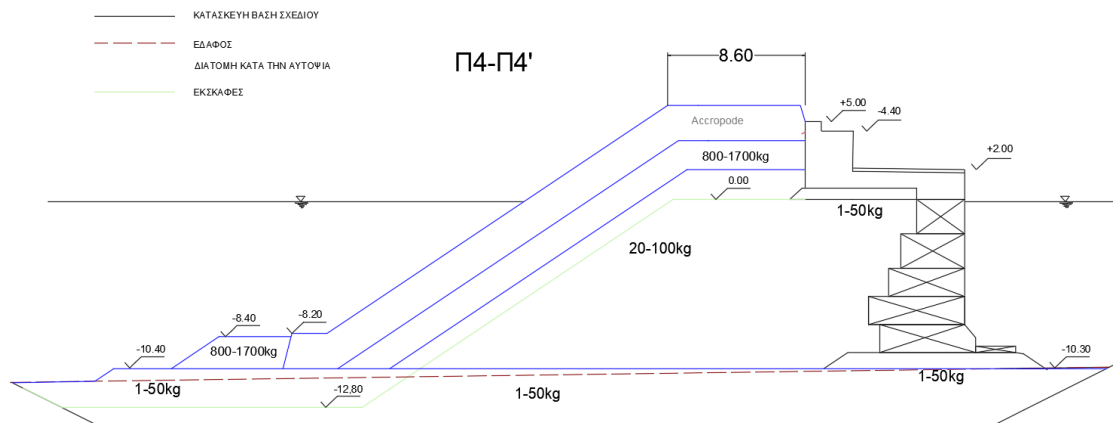
- Η αφαίρεση των τμημάτων της εξωτερικής θωράκισης (Accropodes) και επανατοποθέτησής τους σε κλίση 1:1.5 και πλάτος στέψης 8,60 m προσθέτοντας δηλαδή δύο ακόμα ακρόποδα.
- Η αφαίρεση της στρώσης φίλτρου από φυσικούς ογκολίθους διαβάθμισης 800-1700 kg και επανατοποθέτησής της με ακρίβεια στην διαβάθμισή τους όπως περιγράφεται στην μελέτη Φράγκου 2010 με κλίση 1:1,5 και πλάτος στέψης στα 7,93 m
- Ο έλεγχος της λιθορριπής ανακουφιστικού πρίσματος, η πλήρωση πιθανών κενών λόγω διαφοροποίησης των μεγεθών με ενέματα σκυροδέματος ή ασφάλτου και η συμπλήρωση του με αυστηρή διαβάθμιση στα 20 – 100 kg, όπως προβλέπεται από την αρχική μελέτη επέκτασης, όπου υπολείπονται τμήματα. Με κλίση 1:1.5 και πλάτος στέψης 7,4 m.
- Η αφαίρεση των συμπαγών τεχνητών ογκολίθων που διαμορφώνουν τον κρηπιδότοιχο, καθώς και των πλακών προστασίας ποδός και η ανακατασκευή τους σύμφωνα με την μελέτη.
- Διαμόρφωση του πόδα σύμφωνα με την μελέτη επέκτασης χρησιμοποιώντας πρώτα ογκολίθους που αφαιρέθηκαν από το στρώμα φίλτρου.
- Έλεγχος της λιθορριπής εδράσεως ως προς την ύπαρξη και την καλή διαβάθμιση των λίθων.



Σχήμα 57: Διατομή Π4 – Π4' κατά την αυτοψία (Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).



Σχήμα 58: Διατομή Π4-Π4' – εκσκαφές.



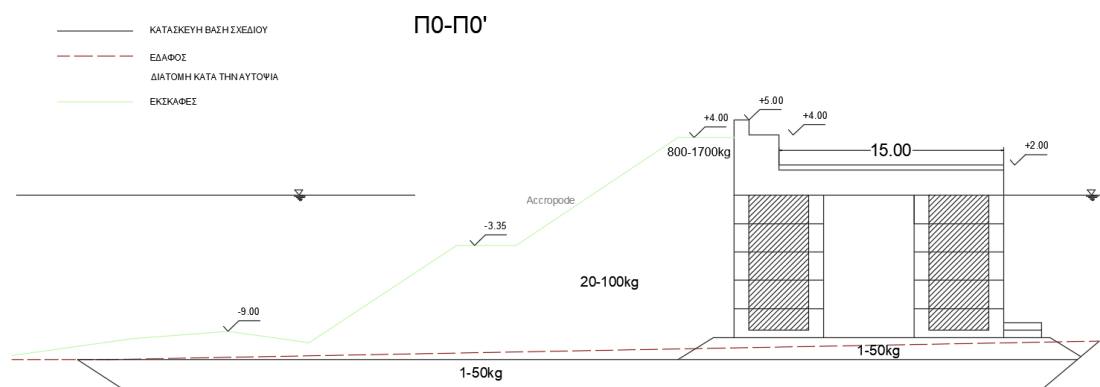
Σχήμα 59: Διατομή Π4 – Π4' – επέκταση πλάτους στέψης και επισκευή.

Ως προς της διατομές Π2 – Π2' και Π3 – Π3' οι οποίες είναι οι πλέον κατεστραμμένες οι προτάσεις είναι σύμφωνες με της Π4-Π4'.

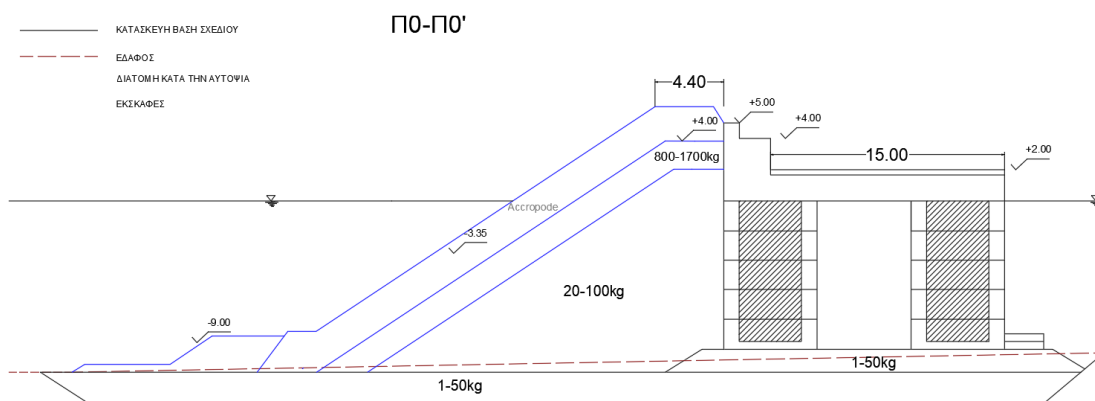
Ως προς την διατομή Π0-Π0' του μώλου προτείνεται:

- η άρση των μονάδων εξωτερικής θωράκισης μέχρι την στάθμη -3,35 m
- ο έλεγχος της στρώσης φίλτρου ως προς της διαστάσεις των φυσικών ογκολίθων
- η άρση και η τοποθέτηση φυσικών ογκολίθων από την στρώση φίλτρου στον πόδα του έργου.
- η συμπλήρωση των κενών με νέους φυσικούς ογκολίθους ίδιων διαστάσεων
- η επανατοποθέτηση των εξωτερικών μονάδων θωράκισης

Σημειώνεται πως σε αυτή την διατομή δεν προτείνεται κάποια αύξηση του πλάτους της στέψης της διατομής.



Σχήμα 60: Διατομή Π0-Π0' – εκσκαφές.



Σχήμα 61: Διατομή Π0-Π0' – τελική διατομή

Σημειώνεται πως είναι πολύ σημαντική η καλή διαβάθμιση στις στρώσεις λιθορριπής και φίλτρου καθώς και η καλή πλέξη των ακρόποδων ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια της κατασκευής. Προτείνεται επίσης η επαναχρησιμοποίηση μονάδων θωράκισης ή φυσικών ογκολίθων στρώσης φίλτρου και λιθορριπής που είναι υγιή και σωστά διαβαθμισμένα αντίστοιχα σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

Λόγω περιορισμένου χώρου μετακινήσεως στον λιμένα και περιορισμό στην μεταφοράς με μηχανικά μέσα ογκολίθων πάνω από 6 τόνους κατά Rock Manual η μεταφορά και καθαίρεση αυτών γίνεται με πλωτά συνεργεία και γεραμούς.

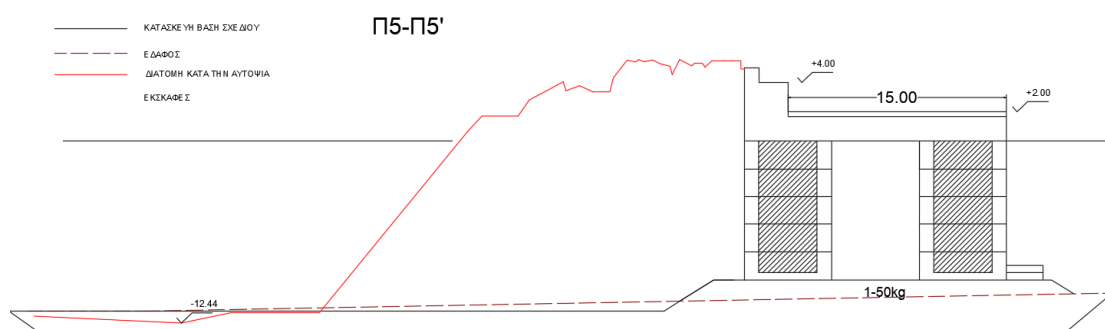
Ως προς την διεύρυνση του πλάτους της στέψης στα τμήματα της διατομής που δεν υπέστησαν σοβαρές ζημιές παρά μόνο κάποιες αναδιατάξεις στις μονάδες της εξωτερικής θωράκισης ο τρόπος επισκευής είναι λίγο διαφορετικός. Προτείνεται η καθαίρεση και αποθήκευση των μονάδων εξωτερικής θωράκισης προς επανατοποθέτησής τους. Επίσης, απαιτείται η καθαίρεση και της στρώσης φίλτρου ώστε να διαμορφωθεί η λιθορριπή ανακουφιστικού πρίσματος στο κατάλληλο πάχος. Οι φυσικοί ογκολίθοι στα σημεία που απαιτείται διεύρυνση του πόδα ή ακόμα και δημιουργία πόδα λόγω έλλειψης, προτείνεται να τοποθετούνται κατά την διαδικασία της αφαίρεσης κατ' ευθείαν στην θέση του πόδα ώστε να μειωθούν οι μετακινήσεις και τα κόστη. Τα κενά που θα προκύψουν στην άνω παρειά συμπληρώνονται με νέους φυσικούς ογκολίθους ίδιας χαρακτηριστικής διαμέτρου όπως και οι προηγούμενοι.

Πιθανά κενά στο στρώμα της λιθορριπής ή της στρώσης φίλτρου μπορούν να πληρωθούν με ενέματα σκυροδέματος ή ασφάλτου για την επίτευξη της σταθερότητας (Rock Manual, 2012).

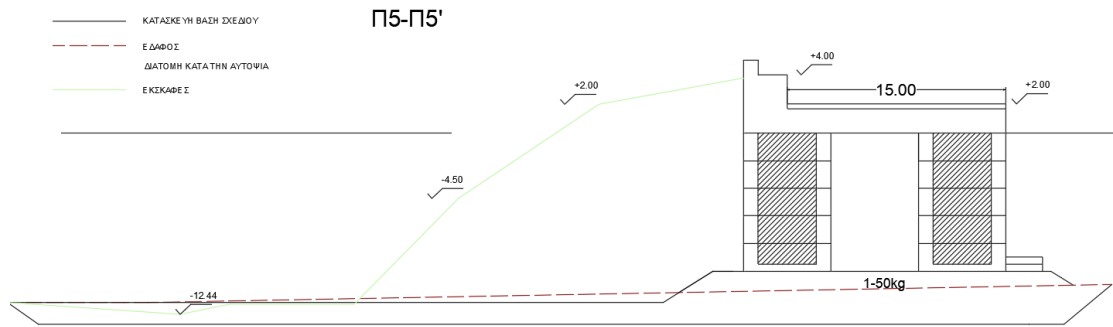
Ως προς την διατομή Π5-Π5' προτείνεται:

- η άρση των μονάδων της εξωτερικής θωράκισης μέχρι την στάθμη της στρώσης φίλτρου
- η συμπλήρωση της στρώσης φίλτρου ώστε να δημιουργηθεί κλίση 1:1,5 βάση μελέτης
- η δημιουργία πόδα
- η επανατοποθέτηση των μονάδων εξωτερικής θωράκισης

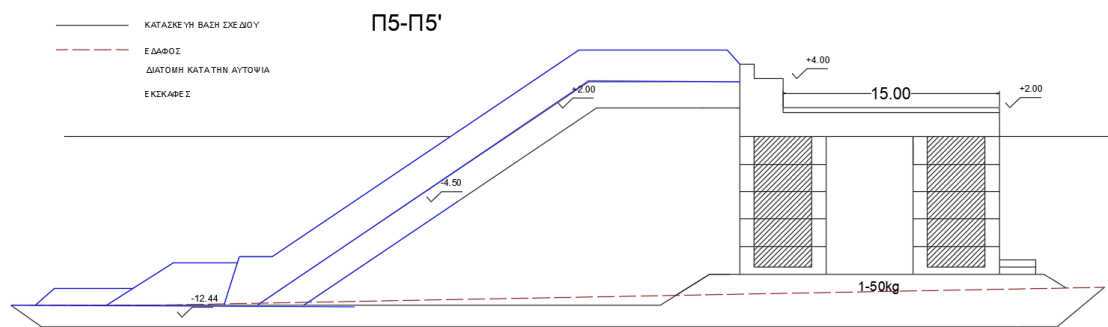
Δεν προτείνεται κάποια μεταβολή στο πλάτος της στέψης.



Σχήμα 62: Διατομή Π5-Π5' κατά την αυτοψία (Πηγή Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).

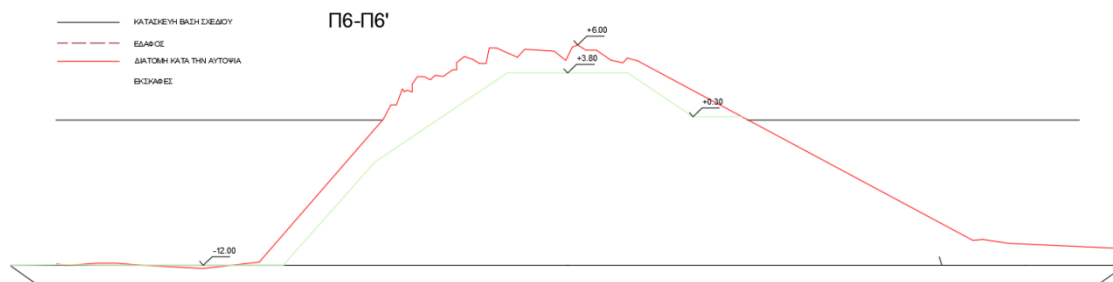


Σχήμα 63: Διατομή Π5-Π5' – εκσκαφές.

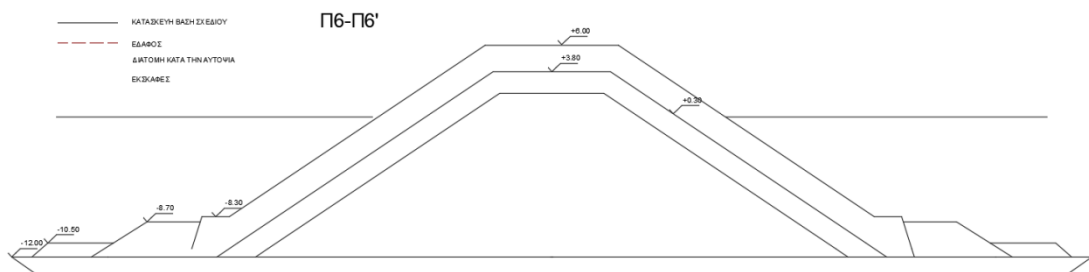


Σχήμα 64: Διατομή Π5-Π5' – τελική διατομή.

Ως προς το ακρομόλιο οι προτάσεις είναι οι εξής:



Σχήμα 65: Διατομή Π6-Π6' κατά την αυτοψία (Πηγή Ε.Λ.Ε. Ε.Μ.Π., 2018).



Σχήμα 66: Διατομή Π6-Π6' – τελική διατομή.

5.1.4 Κατασκευή ύφαλου κυματοθραύστη ανάντη

Ένας άλλος τρόπος μείωσης της κυματικής υπερπήδησης και προστασίας του λιμένα είναι η κατασκευή ύφαλου κυματοθραύστη ανάντη. Η επιλογή του ύφαλου έναντι του

έξαλλου κυματοθραύστη έγινε αφενός για αισθητικούς λόγους αλλά και για εξοικονόμηση υλικών λόγω μικρότερης διατομής. Αυτό βέβαια μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα στην ναυσιπλοΐα.

Για την εύρεση των χαρακτηριστικών του ύφαλου κυματοθραύστη, και εφόσον για το κύμα ισχύει η Εξίσωση (5.1), ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία.

$$0,01 < s_{op} = \frac{H_o}{L_o} < 0.05 \quad (\text{Εξίσωση 5.1})$$

Το ύψος του ύφαλου κυματοθραύστη ορίζεται από τον περιορισμό (USACE, 2011):

$$-2 < \frac{R_{c,v\phi}}{D_{n,v\phi}} < 6 \quad (\text{Εξίσωση 5.2})$$

Η εκτίμηση των απαιτούμενων διαστάσεων των λίθων θωράκισης μπορεί να γίνει με την παρακάτω έκφραση (Van der Meer) για μηδενικό ποσοστό ζημιών (Μέμος, 2013):

$$\frac{h_c}{h} = 2,1 \exp(-0.14 N_{s*}) \quad (\text{Εξίσωση 5.3})$$

$$N_{s*} = \frac{H_s}{\Delta D_{n,v\phi} s_p^3} \quad (\text{Εξίσωση 5.4})$$

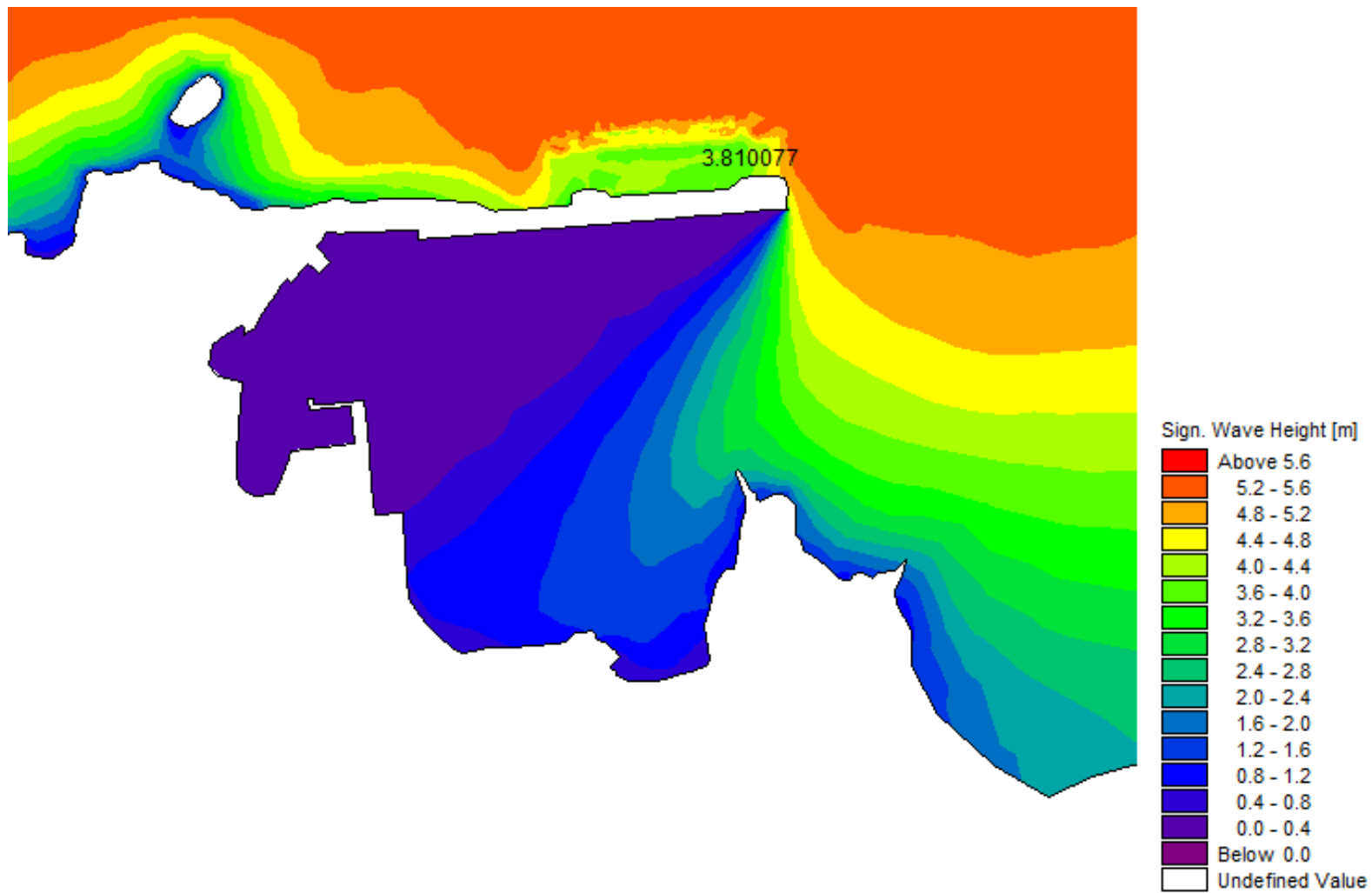
$$s_p = \frac{H_s}{L} \quad (\text{Εξίσωση 5.5})$$

Για τους ύφαλους κυματοθραύστες ισχύει ότι, για να είναι πιο αποτελεσματικοί, η στέψη τους πρέπει να βρίσκεται όσο γίνεται πιο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια. Αυτό, όμως, συνεπάγεται μεγάλους όγκους υλικών και υψηλά κόστη κατασκευής, ειδικά σε περιοχές μεγάλου βάθους, όπως στην προκειμένη περίπτωση (Μέμος, 2013).

Το πλάτος της στέψης προκύπτει ίσο με 5.9 m και βρίσκεται από την Εξίσωση (5.6) για $n=3$ ογκολίθους κατά μήκος της στέψης και $ks=1.1$ συντελεστή στρώσης για τραχείς φυσικούς ογκολίθους (Μουτζούρης, 2005):

$$B = n K_s D_{n,v\phi} \quad (\text{Εξίσωση 5.6})$$

Για τον υπολογισμό του ύψους κύματος κατάντη του κυματοθραύστη έγινε προσομοίωση στο πρόγραμμα MIKE 21 SW από το οποίο προέκυψε το εξής αποτέλεσμα $H_s=3,8$ m (βλ. Πίνακα 23).



Σχήμα 67: Ύψος κύματος κατάντη ύφαλου κυματοθραύστη από MIKE 21 SW.

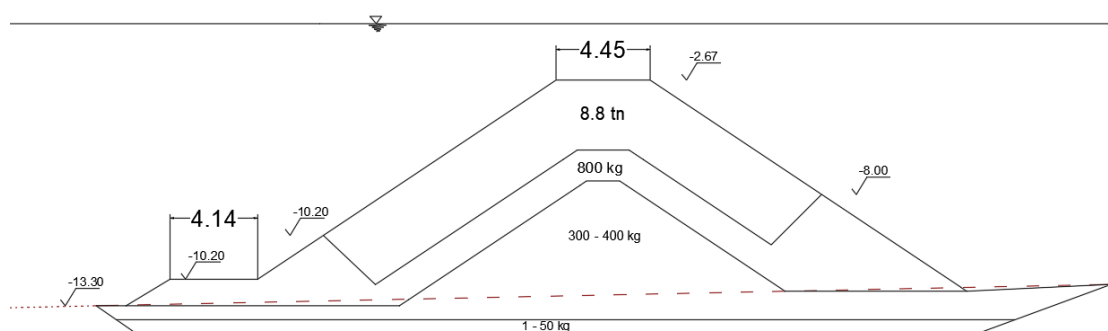
Ως προς την επισκευή του μώλου οι προτάσεις είναι κοινές με την πρόταση της επέκτασης του πλάτους της στέψης του μώλου με την μόνη διαφορά ότι δεν πραγματοποιείται καμία επέκταση.

Επιπλέον ως προς την κατασκευή του ύφαλου κυματοθραύστη προτείνεται:

- η βυθοκόρηση τμήματος του πυθμένα και η δημιουργία εξυγιαντικής στρώσης έδρασης με λίθους μεγέθους 1-50kg.
- η δημιουργία πυρήνα με λιθορριπή μεγέθους 300-400 kg.
- μια στρώση φίλτρου με φυσικούς ογκολίθους 800 kg
- και τέλος η στρώση εξωτερικής θωράκισης με φυσικούς ογκολίθους μεγέθους 8780 kg.

Ο ύφαλος κυματοθραύστης κατασκευάζεται σε απόσταση 70 m από τον πόδα του έργου, σε βάθος 13,00 m με πλάτος στέψης στα 4,95 m και βύθισμα στα 2,69 m. Το πάχος εξωτερικής στρώσης υπολογίζεται στα 3,30 m και της εσωτερικής στα 1,46 m.

ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΥΦΑΛΟΥ



Σχήμα 68: Τυπική διατομή ύφαλου κυματοθραύστη

5.2 Κοστολόγηση προτάσεων

Η κοστολόγηση των προτάσεων ενίσχυσης έγινε με βάση το ΦΕΚ 1746/Β/19-5-2017 και την υπουργική απόφαση ΔΝΣγ/οικ.35577/ΦΝ 466/2017. Ο υπολογισμός περιλαμβάνει το κόστος Γενικών Εξόδων και Οφέλους Αναδόχου Γ.Ε. & Ο.Ε. ύψους 18% καθώς και το Φόρο Προστιθέμενης Αξίας Φ.Π.Α.24%. Στις τιμές αυτές δεν περιλαμβάνονται μεταφορές και τυχόν αυξήσεις λόγω ειδικών καταστάσεων.

Επίσης, για την εκπόνηση της εργασίας και την μη δυνατότητα της πρόσβασης στο έργο, μέτρησης και δημιουργίας περισσότερων αντιπροσωπευτικών διατομών, έγινε η θεώρηση ότι αυτές ο διατομές έχουν μια περιοχή επιρροής.

5.2.1 Κοστολόγηση αύξησης πλάτους στέψης

Για την διατομή Π0-Π0', η οποία είναι στην συναρμογή μεταξύ νέου και παλαιού λιμένα, η ζώνη επιρροής της είναι περί τα 13,50 m.

Για την διατομή Π1-Π1' η επιφάνεια επιρροής της είναι περί τα 52,50 m.

Για τις διατομές Π2-Π2', Π3-Π3' οι οποίες μαζί με την Π4-Π4' είναι οι πλέον κατεστραμμένες η επιφάνεια επιρροής τους είναι περί τα 102 m.

Για την διατομή Π5-Π5' η επιφάνεια επιρροής της είναι 20 m.

Τέλος για την περιοχή του ακρομωλίου ισχύει η διατομή Π6-Π6' η οποία υπολογίζεται στο 1 m.

Πίνακας 9: Πίνακας υπολογισμού τελικού κόστους έργου ενίσχυσης με αύξηση πλάτους στέψης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΡΓΟΥ ΧΩΡΙΣ ΜΤΦ	ΚΟΣΤΟΣ/m	ΜΕΤΡΑ	
		ΕΠΙΡΡΟΗ Σ m	ΚΟΣΤΟΣ
Κόστος Π0-Π0	4.940,29 €	13,50	66.693,87 €
Κόστος Π1-Π1	4.305,72 €	52,50	226.050,51 €
Κόστος Π4-Π4	24.744,64 €	102,00	2.523.952,87 €
Κόστος Π5-Π5	9.580,03 €	20,00	191.600,60 €
Κόστος Π6-Π6	10.501,26 €	1,00	10.501,26 €
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ			3.018.799,10 €

Πίνακας 10: Πίνακας κοστολόγησης διατομής Π0-Π0'

ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΥΠΟΥ Π0-Π0'							
Αριθμ. Τιμολ.	Σύντομη περιγραφή αντικειμένου	Άρθρο Αναθεώρ.	Μονάδα	Τιμή μονάδος €	Ποσότητα	Τελικό ποσό	€/m
1. ΚΑΘΑΙΡΕΣΕΙΣ							
Άρθρο 1.01	Υφαλες καθαίρεσεις τμημάτων κατασκευών λιμενικών έργων χωρίς τη χρήση εκρηκτικών υλών	ΛΙΜ 1112	m ³	16,00	115,00	1840,00	
Άρθρο 1.03	Εξαλες καθαίρεσεις τμημάτων κατασκευών λιμενικών έργων χωρίς τη χρήση εκρηκτικών υλών	ΛΙΜ 1123	m ³	15,00	78,64	1179,60	
2. ΒΥΘΟΚΟΡΗΣΕΙΣ							
Άρθρο 2.03.01	Εκκαφή σε εδάφη κατηγορίας Γ χωρίς την χρήση δράγας με κοπτική κεφαλή	ΛΙΜ 1230	m ³	12,00	23,25	279,00	
Άρθρο 2.07	Θαλάσσιες μεταφορές	--	m ³ .Nmile	0,35		0,00	
3. ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ ΕΞΑΛΕΣ ΚΑΙ ΥΦΑΛΕΣ							
Άρθρο 3.01	Υφαλες επιχώσεις με προϊόντα δανειοθαλάμου	ΛΙΜ 1312	m ³	3,00		0,00	
Άρθρο 3.02	Εξαλες επιχώσεις με προϊόντα δανειοθαλάμου	ΛΙΜ 1321	m ³	2,80		0,00	
Άρθρο 3.06	Διαμόρφωση ύφαλων επιχώσεων δια βυθοκορημάτων ή προϊόντων καθαίρεσεων	ΛΙΜ 1311	m ³	0,45		0,00	
4. ΛΙΘΟΡΡΙΠΕΣ - ΦΥΣΙΚΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ - ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ - ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΑ							
Άρθρο 4.04	Λιθορριπές εδράσεως ατομικού βάρους λίθων 0,5 - 50 kg	ΛΙΜ 2210	m ³	12,00		0,00	
Άρθρο 4.07	Λιθορριπές ανακουφιστικού πρίσματος ατομικού βάρους 20 -100 kg	ΛΙΜ 2230	m ³	11,50		0,00	
Άρθρο 4.08	Θωράκιση λιμενικών έργων με φυσικούς ογκολίθους προέλευσης λατομείου						
4.08.01	Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 200-1500 kg	ΛΙΜ 2310	m ³	13,00		0,00	
Άρθρο 4.12	Κατασκευές με φυσικούς ογκολίθους εξ ανελκύσεως						
4.12.01	Κατασκευές με φυσικούς ογκολίθους ατ. βάρους 200-1500	ΛΙΜ 2310	m ³	8,50	15,35	130,48	
5. ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΚΙΒΩΤΙΑ							
Άρθρο 5.01	Συμπαγείς τεχνητοί ογκόλιθοι από σκυρόδεμα						
5.01.01	Συμπαγείς τεχνητοί ογκόλιθοι βάρους μέχρι 35ton	ΛΙΜ 3110	m ³	95,00		0,00	
Άρθρο 5.03	Ειδικοί τεχνητοί ογκόλιθοι θωράκισης	ΛΙΜ 3400	m ³	120,00		0,00	
Άρθρο 5.04	Προκατασκευασμένα στοιχεία ανωδομών από οπλισμένο σκυρόδεμα						
5.05.01	Προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25	ΛΙΜ 4240	m ³	150,00		0,00	
Άρθρο 5.08	Άρση και επανατοποθέτηση ειδικών τεχνητών ογκολίθων θωράκισης	ΛΙΜ 3110	m ³	25,00	2,00	50,00	
8. ΕΞΑΛΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ - ΔΑΠΕΔΑ							
Άρθρο 8.01	Ανωδομές λιμενικών έργων από άοπλο ή ελαφρώς οπλισμένο, έγχυτο επί τόπου σκυρόδεμα						
8.01.02	Ανωδομές λιμενικών έργων από άοπλο ή ελαφρώς οπλισμένο, έγχυτο επί τόπου σκυρόδεμα, κατηγορίας C20/25	ΛΙΜ 4240	m ³	90,00		0,00	
Άρθρο 8.03	Επιστρώσεις δαπέδων με άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα						
8.03.02	Επιστρώσεις δαπέδων με άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα, κατηγορίας C20/25	ΛΙΜ 4300	m ³	95,00		0,00	
Άρθρο 8.05	Επεξεργασία τελικής επιφάνειας επιστρώσεων με επίταση σκληρυντικού υλικού	ΛΙΜ 4300	m ²	6,00		0,00	
ΣΥΝΟΛΟ						3.479,08 €	
Φ.Π.Α. 24%						834,98 €	
ΓΕ & ΟΕ 18%						626,23 €	
ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ						4.940,29 €	

Πίνακας 11: Πίνακας κοστολόγησης διατομής ΠΙ-ΠΙ΄.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΥΠΟΥ ΠΙ-ΠΙ΄						
Αριθμ. Τιμολ.	Σύντομη περιγραφή αντικειμένου	Αρθρο Αναθεώρ.	Μονάδα	Τιμή μονάδος €	Ποσότητα	Τελικό ποσό €/m
1. ΚΑΘΑΙΡΕΣΕΙΣ						
Αρθρο 1.01	Υφάλεις καθαρέσεις τμημάτων κατασκευών λιμενικών έργων χωρίς τη χρήση εκρηκτικών υλών	ΛΙΜ 1112	m ³	16,00	41,70	667,20
Αρθρο 1.03	Εξάλεις καθαρέσεις τμημάτων κατασκευών λιμενικών έργων χωρίς τη χρήση εκρηκτικών υλών	ΛΙΜ 1123	m ³	15,00	15,2	228,00
2. ΒΥΘΟΚΟΡΗΣΕΙΣ						
Αρθρο 2.03.01	Εκσκαφή σε εδάφη κατηγορίας Γ χωρίς την χρήση δράγας με κοπτική κεφαλή	ΛΙΜ 1230	m ³	12,00	0,00	0,00
Αρθρο 2.07	Θαλάσσιες μεταφορές	--	m ³ .Nmile	0,35		0,00
3. ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ ΕΞΑΛΕΣ ΚΑΙ ΥΦΑΛΕΣ						
Αρθρο 3.01	Υφάλεις επιχώσεις με προϊόντα δανειοθαλάμου	ΛΙΜ 1312	m ³	3,00		0,00
Αρθρο 3.02	Εξάλεις επιχώσεις με προϊόντα δανειοθαλάμου	ΛΙΜ 1321	m ³	2,80		0,00
Αρθρο 3.06	Διαμόρφωση ύφαλων επιχώσεων δια βυθοκορημάτων ή προϊόντων καθαρέσεων	ΛΙΜ 1311	m ³	0,45		0,00
4. ΛΙΘΟΡΡΙΠΕΣ - ΦΥΣΙΚΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ - ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ - ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΑ						
Αρθρο 4.04	Λιθορριπές εδράσεως ατομικού βάρους λίθων 0,5 - 50 kg	ΛΙΜ 2210	m ³	12,00		0,00
Αρθρο 4.07	Λιθορριπές ανακουφιστικού πρίσματος ατομικού βάρους 20 -100 kg	ΛΙΜ 2230	m ³	11,50		0,00
Αρθρο 4.08	Θωράκιση λιμενικών έργων με φυσικούς ογκολίθους προέλευσης λατομείου					
4.08.01	Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 200-1500 kg	ΛΙΜ 2310	m ³	13,00	34,00	442,00
Αρθρο 4.12	Κατασκευές με φυσικούς ογκολίθους εξ ανελκύσεως					
4.12.01	Κατασκευές με φυσικούς ογκολίθους ατ. Βάρους 200-1500	ΛΙΜ 2310	m ³	8,50		0,00
5. ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΚΙΒΩΤΙΑ						
Αρθρο 5.01	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι από σκυρόδεμα					
5.01.01	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι βάρους μέχρι 35ton	ΛΙΜ 3110	m ³	95,00		0,00
Αρθρο 5.03	Ειδικοί τεχνητοί ογκολίθοι θωράκισης	ΛΙΜ 3400	m ³	120,00	11,00	1320,00
Αρθρο 5.04	Προκατασκευασμένα στοιχεία ανοδομών από οπλισμένο σκυρόδεμα					
5.05.01	Προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25	ΛΙΜ 4240	m ³	150,00		0,00
Αρθρο 5.08	Άρση και επανατοποθέτηση ειδικών τεχνητών ογκολίθων θωράκισης	ΛΙΜ 3110	m ³	25,00	15,00	375,00
8. ΕΞΑΛΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ - ΔΑΠΕΔΑ						
Αρθρο 8.01	Ανοδομές λιμενικών έργων από άοπλο ή ελαφρώς οπλισμένο, έγχυτο επί τόπου σκυρόδεμα					
8.01.02	Ανοδομές λιμενικών έργων από άοπλο ή ελαφρώς οπλισμένο, έγχυτο επί τόπου σκυρόδεμα, κατηγορίας C20/25	ΛΙΜ 4240	m ³	90,00		0,00
Αρθρο 8.03	Επιστρώσεις δαπέδων με άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα					
8.03.02	Επιστρώσεις δαπέδων με άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα, κατηγορίας C20/25	ΛΙΜ 4300	m ³	95,00		0,00
Αρθρο 8.05	Επεξεργασία τελικής επιφάνειας επιστρώσεων με επίαση σκληρυντικού υλικού	ΛΙΜ 4300	m ²	6,00		0,00
ΣΥΝΟΛΟ						3.032,20 €
Φ.Π.Α. 24%						727,73 €
ΓΕ & ΟΕ 18%						545,80 €
ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ						4.305,72 €

Πίνακας 12: Πίνακας κοστολόγησης διατομής Π4-Π4'

ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΥΠΟΥ Π4-Π4'						
Αριθμ. Τιμολ.	Σύντομη περιγραφή αντικειμένου	Άρθρο Αναθεώρ	Μονάδα	Τιμή μονάδος €	Ποσότητα	Τελικό ποσό €/m
1. ΚΑΘΑΙΡΕΣΕΙΣ						
Άρθρο 1.01	Υφαλες καθαίρεσης τμημάτων κατασκευών λιμενικών έργων χωρίς τη χρήση εκρηκτικών υλών	ΛΙΜ 1112	m ³	16,00	13,60	217,60
Άρθρο 1.03	Εξάλειψη καθαιρέσεις τμημάτων κατασκευών λιμενικών έργων χωρίς τη χρήση εκρηκτικών υλών	ΛΙΜ 1123	m ³	15,00	17	255,00
2. ΒΥΘΟΚΟΡΗΣΕΙΣ						
Άρθρο 2.03.01	Εκσκαφή σε εδάφη κατηγορίας Γ χωρίς την χρήση δράγας με κοπτική κεφαλή	ΛΙΜ 1230	m ³	12,00	22,00	264,00
Άρθρο 2.07	Θαλάσσιες μεταφορές	--	m3.Nmile	0,35		0,00
3. ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ ΕΞΑΛΕΣ ΚΑΙ ΥΦΑΛΕΣ						
Άρθρο 3.01	Υφαλες επιχώσεις με προϊόντα δανειοθαλάμου	ΛΙΜ 1312	m ³	3,00		0,00
Άρθρο 3.02	Εξάλειψη επιχώσεις με προϊόντα δανειοθαλάμου	ΛΙΜ 1321	m ³	2,80		0,00
Άρθρο 3.06	Διαμόρφωση ύφαλων επιχώσεων δια βυθοκορημάτων ή προϊόντων καθαίρεσεων	ΛΙΜ 1311	m ³	0,45		0,00
4. ΛΙΘΟΡΡΙΠΕΣ - ΦΥΣΙΚΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ - ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ - ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΑ						
Άρθρο 4.04	Λιθορριπές εδράσεως ατομικού βάρους λίθων 0,5 - 50 kg	ΛΙΜ 2210	m ³	12,00	49,85	598,20
Άρθρο 4.07	Λιθορριπές ανακουφιστικού πρίσματος ατομικού βάρους 20 -100 kg	ΛΙΜ 2230	m ³	11,50	70,00	805,00
Άρθρο 4.08	Θωράκιση λιμενικών έργων με φυσικούς ογκολίθους προέλευσης λατομείου					
4.08.01	Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 200-1500 kg	ΛΙΜ 2310	m ³	13,00	44,00	572,00
Άρθρο 4.12	Κατασκευές με φυσικούς ογκολίθους εξ ανελκύσεως					
4.12.01	Κατασκευές με φυσικούς ογκολίθους ατ. Βάρους 200-1500	ΛΙΜ 2310	m ³	8,50	44,00	374,00
5. ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΚΙΒΩΤΙΑ						
Άρθρο 5.01	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι από σκυρόδεμα					
5.01.01	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι βάρους μέχρι 35ton	ΛΙΜ 3110	m ³	95,00	35,00	3325,00
Άρθρο 5.03	Ειδικοί τεχνητοί ογκολίθοι θωράκισης	ΛΙΜ 3400	m ³	120,00	42,00	5040,00
Άρθρο 5.04	Προκατασκευασμένα στοιχεία ανωδομών από οπλισμένο σκυρόδεμα					
5.05.01	Προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25	ΛΙΜ 4240	m ³	150,00	15,00	2250,00
Άρθρο 5.08	Άρση και επανατοποθέτηση ειδικών τεχνητών ογκολίθων θωράκισης	ΛΙΜ 3110	m ³	25,00	70,00	1750,00
8. ΕΞΑΛΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ - ΔΑΠΕΛΑ						
Άρθρο 8.01	Ανωδομές λιμενικών έργων από άοπλο ή ελαφρώς οπλισμένο, έγχυτο επί τόπου σκυρόδεμα					
8.01.02	Ανωδομές λιμενικών έργων από άοπλο ή ελαφρώς οπλισμένο, έγχυτο επί τόπου σκυρόδεμα, κατηγορίας C20/25	ΛΙΜ 4240	m ³	90,00	20,00	1800,00
Άρθρο 8.03	Επιστρώσεις δαπέδων με άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα					
8.03.02	Επιστρώσεις δαπέδων με άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα, κατηγορίας C20/25	ΛΙΜ 4300	m ³	95,00	1,40	133,00
Άρθρο 8.05	Επεξεργασία τελικής επιφάνειας επιστρώσεων με επίσηση σκληρυντικού υλικού	ΛΙΜ 4300	m ²	6,00	7,00	42,00
ΣΥΝΟΛΟ						17.425,80 €
Φ.Π.Α. 24%						4.182,19 €
ΓΕ & ΟΕ 18%						3.136,64 €
ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ						24.744,64 €

Πίνακας 13: Πίνακας κοστολόγησης διατομής Π5-Π5’.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΥΠΟΥ Π5-Π5’						
Αριθμ. Τιμολ.	Σύντομη περιγραφή αντικειμένου	Αρθρο Αναθεώρ	Μονάδα	Τιμή μονάδος €	Ποσότητα	Τελικό ποσό €/m
1. ΚΑΘΑΙΡΕΣΕΙΣ						
Αρθρο 1.01	Υφάλεις καθαρέσεις τιμημάτων κατασκευών λιμενικών έργων χωρίς τη χρήση εκρηκτικών υλών	ΛΙΜ 1112	m ³	16,00	45,00	720,00
Αρθρο 1.03	Εξάλεις καθαρέσεις τιμημάτων κατασκευών λιμενικών έργων χωρίς τη χρήση εκρηκτικών υλών	ΛΙΜ 1123	m ³	15,00	44	660,00
2. ΒΥΘΟΚΟΡΗΣΕΙΣ						
Αρθρο 2.03.01	Εκσκαφή σε εδάφη κατηγορίας Γ χωρίς την χρήση δράγας με κοπτική κεφαλή	ΛΙΜ 1230	m ³	12,00		0,00
Αρθρο 2.07	Θαλάσσιες μεταφορές	--	m ³ .Nmile	0,35		0,00
3. ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ ΕΞΑΛΕΣ ΚΑΙ ΥΦΑΛΕΣ						
Αρθρο 3.01	Υφάλεις επιχώσεις με προϊόντα δανειοθαλάμου	ΛΙΜ 1312	m ³	3,00		0,00
Αρθρο 3.02	Εξάλεις επιχώσεις με προϊόντα δανειοθαλάμου	ΛΙΜ 1321	m ³	2,80		0,00
Αρθρο 3.06	Διαμόρφωση ύφαλων επιχώσεων δια βυθοκορημάτων ή προϊόντων καθαρέσεων	ΛΙΜ 1311	m ³	0,45		0,00
4. ΛΙΘΟΡΡΙΠΕΣ - ΦΥΣΙΚΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ - ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ - ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΑ						
Αρθρο 4.04	Λιθορριπές εδράσεως ατομικού βάρους λίθων 0,5 - 50 kg	ΛΙΜ 2210	m ³	12,00		0,00
Αρθρο 4.07	Λιθορριπές ανακουφιστικού πρίσματος ατομικού βάρους 20 -100 kg	ΛΙΜ 2230	m ³	11,50		0,00
Αρθρο 4.08	Θωράκιση λιμενικών έργων με φυσικούς ογκολίθους προέλευσης λατομείου					
4.08.01	Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 200-1500 kg	ΛΙΜ 2310	m ³	13,00	23,00	299,00
Αρθρο 4.12	Κατασκευές με φυσικούς ογκολίθους εξ ανελκύσεως					
4.12.01	Κατασκευές με φυσικούς ογκολίθους ατ. Βάρους 200-1500	ΛΙΜ 2310	m ³	8,50	55,00	467,50
5. ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΚΙΒΩΤΙΑ						
Αρθρο 5.01	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι από σκυρόδεμα					
5.01.01	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι βάρους μέχρι 35ton	ΛΙΜ 3110	m ³	95,00		0,00
Αρθρο 5.03	Ειδικοί τεχνητοί ογκολίθοι θωράκισης	ΛΙΜ 3400	m ³	120,00		0,00
Αρθρο 5.04	Προκατασκευασμένα στοιχεία ανωδομών από οπλισμένο σκυρόδεμα					
5.05.01	Προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25	ΛΙΜ 4240	m ³	150,00	15,00	2250,00
Αρθρο 5.08	Άρση και επανατοποθέτηση ειδικών τεχνητών ογκολίθων θωράκισης	ΛΙΜ 3110	m ³	25,00	94,00	2350,00
8. ΕΞΑΛΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ - ΔΑΠΕΔΑ						
Αρθρο 8.01	Ανωδομές λιμενικών έργων από άοπλο ή ελαφρώς οπλισμένο, έγχυτο επί τόπου σκυρόδεμα					
8.01.02	Ανωδομές λιμενικών έργων από άοπλο ή ελαφρώς οπλισμένο, έγχυτο επί τόπου σκυρόδεμα, κατηγορίας C20/25	ΛΙΜ 4240	m ³	90,00		0,00
Αρθρο 8.03	Επιστρώσεις δαπέδων με άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα					
8.03.02	Επιστρώσεις δαπέδων με άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα, κατηγορίας C20/25	ΛΙΜ 4300	m ³	95,00		0,00
Αρθρο 8.05	Επεξεργασία τελικής επιφάνειας επιστρώσεων με επίαση σκληρυντικού υλικού	ΛΙΜ 4300	m ²	6,00		0,00
ΣΥΝΟΛΟ						6.746,50 €
Φ.Π.Α. 24%						1.619,16 €
ΓΕ & ΟΕ 18%						1.214,37 €
ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ						9.580,03 €

Πίνακας 14: Πίνακας κοστολόγησης διατομής Π6-Π6΄.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΥΠΟΥ Π6-Π6΄							
Αριθμ. Τιμολ.	Σύντομη περιγραφή αντικειμένου	Αρθρο Αναθεώρ	Μονάδα	Τιμή μονάδος €	Ποσότητα	Τελικό ποσό €/m	
1. ΚΑΘΑΙΡΕΣΕΙΣ							
Αρθρο 1.01	Υφάλεις καθαρέσεις τμημάτων κατασκευών λιμενικών έργων χωρίς τη χρήση εκρηκτικών υλών	ΔΙΜ 1112	m ³	16,00	30,00	480,00	
Αρθρο 1.03	Εξάλεις καθαρέσεις τμημάτων κατασκευών λιμενικών έργων χωρίς τη χρήση εκρηκτικών υλών	ΔΙΜ 1123	m ³	15,00	54	810,00	
2. ΒΥΘΟΚΟΡΗΣΕΙΣ							
Αρθρο 2.03.01	Εκσκαφή σε εδάφη κατηγορίας Γ χωρίς την χρήση δράγας με κοπτική κεφαλή	ΔΙΜ 1230	m ³	12,00		0,00	
Αρθρο 2.07	Θαλάσσιες μεταφορές	--	m ³ .Nmile	0,35		0,00	
3. ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ ΕΞΑΛΕΣ ΚΑΙ ΥΦΑΛΕΣ							
Αρθρο 3.01	Υφάλεις επιχώσεις με προϊόντα δανειοθαλάμου	ΔΙΜ 1312	m ³	3,00		0,00	
Αρθρο 3.02	Εξάλεις επιχώσεις με προϊόντα δανειοθαλάμου	ΔΙΜ 1321	m ³	2,80		0,00	
Αρθρο 3.06	Διαμόρφωση ύφαλων επιχώσεων δια βυθοκορημάτων ή προϊόντων καθαρέσεων	ΔΙΜ 1311	m ³	0,45		0,00	
4. ΛΙΘΟΡΡΙΠΕΣ - ΦΥΣΙΚΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ - ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ - ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΑ							
Αρθρο 4.04	Λιθορριπές εδράσεως ατομικού βάρους λίθων 0,5 - 50 kg	ΔΙΜ 2210	m ³	12,00		0,00	
Αρθρο 4.07	Λιθορριπές ανακουφιστικού πρίσματος ατομικού βάρους 20 - 100 kg	ΔΙΜ 2230	m ³	11,50	2,50	28,75	
Αρθρο 4.08	Θωράκιση λιμενικών έργων με φυσικούς ογκολίθους προέλευσης λατομείου						
4.08.01	Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 200-1500 kg	ΔΙΜ 2310	m ³	13,00	24,00	312,00	
Αρθρο 4.12	Κατασκευές με φυσικούς ογκολίθους εξ ανελκυσέως						
4.12.01	Κατασκευές με φυσικούς ογκολίθους ατ. Βάρους 200-1500	ΔΙΜ 2310	m ³	8,50	17,00	144,50	
5. ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΚΥΦΕΛΩΤΑ ΚΙΒΩΤΙΑ							
Αρθρο 5.01	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι από σκυρόδεμα						
5.01.01	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι βάρους μέχρι 35ton	ΔΙΜ 3110	m ³	95,00		0,00	
Αρθρο 5.03	Ειδικοί τεχνητοί ογκολίθοι θωράκισης	ΔΙΜ 3400	m ³	120,00	31,00	3720,00	
Αρθρο 5.04	Προκατασκευασμένα στοιχεία ανοδομών από οπλισμένο σκυρόδεμα						
5.05.01	Προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25	ΔΙΜ 4240	m ³	150,00		0,00	
Αρθρο 5.08	Άρση και επανατοποθέτηση ειδικών τεχνητών ογκολίθων θωράκισης	ΔΙΜ 3110	m ³	25,00	76,00	1900,00	
8. ΕΞΑΛΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ - ΔΑΠΕΔΑ							
Αρθρο 8.01	Ανοδομές λιμενικών έργων από άοπλο ή ελαφρώς οπλισμένο, έγχυτο επί τόπου σκυρόδεμα						
8.01.02	Ανοδομές λιμενικών έργων από άοπλο ή ελαφρώς οπλισμένο, έγχυτο επί τόπου σκυρόδεμα, κατηγορίας C20/25	ΔΙΜ 4240	m ³	90,00		0,00	
Αρθρο 8.03	Επιστρώσεις δαπέδων με άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα						
8.03.02	Επιστρώσεις δαπέδων με άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα, κατηγορίας C20/25	ΔΙΜ 4300	m ³	95,00		0,00	
Αρθρο 8.05	Επεξεργασία τελικής επιφάνειας επιστρώσεων με επίαση σκληρυντικού υλικού	ΔΙΜ 4300	m ²	6,00		0,00	
ΣΥΝΟΛΟ						7.395,25 €	
Φ.Π.Α. 24%						1.774,86 €	
ΓΕ & ΟΕ 18%						1.331,15 €	
ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ						10.501,26 €	

5.2.2 Κοστολόγηση ύφαλου κυματοθραύστη ανάντη

Για την κοστολόγηση του ύφαλου έγιναν οι εξής παραδοχές στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας:

- Η τυπική διατομή είναι σταθερή σε όλο το μήκος του κυματοθραύστη.
- Η ανακατασκευή του υπάρχοντος μώλου πλέον δεν δέχεται τις ίδιες δυνάμεις από το κύμα, λόγω της ύπαρξης του ύφαλου, επομένως δεν χρειάζεται τόση σχολαστικότητα στην επισκευή. Επιπλέον, δεν είναι αναγκαία και η επέκταση του πλάτους της στέψης με αποτέλεσμα να γίνεται η παραδοχή ότι το κόστος των εργασιών και η πληθώρα υπολογίζονται και δουλεύουν αντίστοιχα στο 60%.

Πίνακας 15: Πίνακας υπολογισμού τελικού κόστους πρότασης 2.

ΠΕΡΙΟΧΗ ΥΦΑΛΟΥ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ							
Αριθμ. Τιμολ.	Σύντομη περιγραφή αντικειμένου	Αρθρο Αναθεώρ	Μονάδα	Τιμή μονάδος €	Ποσότητα	Τελικό ποσό €/m	
2.ΒΥΘΟΚΟΡΗΣΕΙΣ							
Άρθρο 2.03.01	Εκσκαφή σε εδάφη κατηγορίας Γ χωρίς την χρήση δράγας με κοπτική κεφαλή	ΛΙΜ 1230	m ³	12,00	79,30	951,60	
Άρθρο 2.07	Θαλάσσιες μεταφορές	--	m ³ .Nmile	0,35		0,00	
3.ΕΠΙΧΩΣΕΙΣ ΕΞΑΛΕΣ ΚΑΙ ΥΦΑΛΕΣ							
Άρθρο 3.01	Υφαλες επιχώσεις με προϊόντα δανειοθαλάμου	ΛΙΜ 1312	m ³	3,00	79,30	237,90	
4. ΛΙΘΟΡΡΙΠΕΣ - ΦΥΣΙΚΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ - ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ - ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΑ							
Άρθρο 4.04	Λιθορριπές εδράσεως ατομικού βάρους λίθων 0,5 - 50 kg	ΛΙΜ 2210	m ³	12,00	27,27	327,24	
Άρθρο 4.08	Θωράκιση λιμενικών έργων με φυσικούς ογκολίθους προέλευσης λατομείου						
4.08.01	Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 200-1500 kg	ΛΙΜ 2310	m ³	13,00	175,00	2275,00	
4,12,04	Κατασκευές με φυσικούς ογκολίθους ατ. Βάρους άνω των 4000 kg	ΛΙΜ 2330	m ³	12,00	81,5	978,00	
ΣΥΝΟΛΟ						4.769,74 €	
Φ.Π.Α. 24%						1.144,74 €	
ΓΕ & ΟΕ 18%						858,55 €	
ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ						6.773,03 €	
ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ						200,00	
ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ						1.354.606,16 €	
ΤΕΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ						3.165.885,62 €	

Παρατηρείται ότι και με αυτή την ακραία δεύτερη παραδοχή το κόστος υλοποίησης της πρότασης 2 είναι μεγαλύτερο από την πρόταση 1.

6. Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασία αποτελεί η επισκόπηση των μεθόδων που εφαρμόζονται για την αποκατάσταση πιθανών ζημιών αλλά και για την ενίσχυση υφιστάμενων διατομών για την αποφυγή μελλοντικών αστοχιών και για την βελτιστοποίηση της λειτουργικότητάς τους. Οι μεθοδολογίες που παρουσιάστηκαν, εφαρμόστηκαν στο λιμένα Ευδήλου Ικαρίας.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν, επικεντρώνονται στην μελέτη, την κατασκευή και τη συστηματική παρακολούθηση και συντήρηση του έργου κατά την διάρκεια της ζωής του.

Αρχικά, σχετικά με την κατασκευή ενός λιμενικού έργου επιβάλλεται να βασίζεται τόσο στην σωστή και όσο γίνεται πληρέστερη μελέτη, όσο και στην άρτια και έντεχνη κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα, κατά το στάδιο αυτό είναι σημαντική η ανάλυση των παραμέτρων και των εκάστοτε αναγκών της εκάστοτε κατασκευής.

Ως προς τα ανεμολογικά δεδομένα, τα οποία αποτελούν ένα βασικό παράγοντα για την μελέτη λιμενικών έργων, είναι επιτακτική η χρήση των πιο πρόσφατων αλλά και πιο έγκυρων ως προς την τοποθεσία του σταθμού μέτρησης. Στην περίπτωση του λιμένα του Ευδήλου Ικαρίας σύμφωνα με την μελέτη επέκτασης του μώλου Φράγκου 2010, γίνεται χρήση των ανεμολογικών δεδομένων περιόδου 1973-1995 από τον σταθμό της Χίου ο οποίος κλείνεται στα δυτικά από βουνό, με αποτέλεσμα να δίνει χαμηλές συχνότητες ανέμου. Σε αντίθεση με αυτό στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν τα δεδομένα περιόδου 1995 – 2017 από τον σταθμό του αεροδρομίου της Ικαρίας. Υπολογίστηκε το χαρακτηριστικό ύψος κύματος με την μέθοδο SMB καθώς και με περιορισμό του αναπτύγματος πελάγους για τη Βόρεια και Βορειοδυτική διεύθυνση με τα αποτελέσματα να δίνουν 5,98m ύψος κύματος για την βόρεια διεύθυνση και 6,92m για την Βορειοδυτική στα βαθιά ύδατα. Με το μοντέλο Mike Zero SW υπολογίστηκε το χαρακτηριστικό ύψος κύματος στον πόδα του έργου και για τις δύο διευθύνσεις με την Βόρεια, λόγω του ότι βρίσκεται κάθετα το λιμένα, να δίνει μεγαλύτερη τιμή στον πόδα. Το ύψος σχεδιασμού επιλέχθηκε στα 5,36m, 36cm μεγαλύτερο από αυτό της μελέτης Φράγκου 2010, και παρότι ικανοποιεί τους ελέγχους επάρκειας ποδός, εξωτερικής θωράκισης, αλλά και τους αντισεισμικούς ελέγχους, δεν ικανοποιεί τον έλεγχο της μέσης παροχής υπερπήδησης, καθιστώντας τη διατομή ανεπαρκή.

Για την αναβάθμιση του έργου, εξετάστηκαν πέντε τυπικές διατομές στις οποίες προτάθηκαν η προσθήκη στρώσης θωράκισης, η εξομάλυνση της κλίσης του πρανούς, η αύξηση του πλάτους της στέψης και η κατασκευή ύφαλου κυματοθραύστη ανάντη. Οι δύο πρώτες απορρίφθηκαν διότι ο τύπος τεχνητού ογκολίθου που υπάρχει στο λιμένα δε το επιτρέπει. Από τον έλεγχο της μέσης παροχής υπερπήδησης υπολογίστηκε πως χρειάζεται μια αύξηση του πλάτους της στέψης κατά 1,90m το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή ενός επιπλέον τεχνητού ογκολίθου στην στέψη. Για την κοστολόγηση αυτού θεωρήθηκε πως η κάθε διατομή έχει μια

επιφάνεια επιρροής. Οι διατομές Π2-Π2' , Π3-Π3' και Π4Π4' όπως φαίνεται στο σχήμα 54 χρήζουν μεγαλύτερης επισκευής καθώς έχουν πληγεί ολοκληρωτικά. Το κόστος επισκευής αυτής της λύσης υπολογίστηκε σε 3.018.799,10 € και παρατηρείται πως το 83% του συνολικού κόστους αφορά τις παραπάνω διατομές (2.523.952,87 €). Με την προσθήκη ύφαλου κυματοθραύστη υπολογίζεται πως το μεταδιδόμενο κύμα έχει ύψος 3,81m, όπως φαίνεται και στο σχήμα 66, το οποίο ικανοποιεί όλους τους ελέγχους επάρκειας της υπάρχουσας κατασκευής. Για την κοστολόγηση αυτού, πλέον του ύφαλου κυματοθραύστη, θεωρήθηκε πως το κόστος ανακατασκευής του λιμένα για την επαναφορά του στην αρχική του μορφή, είναι το 60% της πρότασης της επέκτασης της στέψης. Με αυτή την ακραία παραδοχή, το κόστος ύφαλου κυματοθραύστη υπολογίστηκε σε 3.165.885,62€. Ως βέλτιστη λύση κοστολογικά αλλά και για θέματα λειτουργικότητας, κρίθηκε η αύξηση πλάτους της στέψης, καθώς η κατασκευή ύφαλου κυματοθραύστη καταλαμβάνει αρκετό θαλάσσιο χώρο και εμποδίζει τη ναυσιπλοΐα.

Ο λιμένας Ευδήλου Ικαρίας επίσης ελέγχθηκε ως προς το κατασκευαστικό μέρος και παρατηρήθηκε πως σε πολλά σημεία δεν υπήρχε επάρκεια του ύψους και του πλάτους του πόδα, καθώς και έλλειψη αυτού σε πολλά σημεία. Επίσης, υπήρχε ελλιπής κάλυψη της στρώσης βάσης από την εξωτερική θωράκιση. Ακόμα, παρατηρήθηκε ελλιπής πλέξη αλλά και καθόλου πλέξη, σε αρκετά σημεία της στέψης της κατασκευής, των μονάδων εξωτερικής θωράκισης.

Η τήρηση των κατασκευαστικών προδιαγραφών κρίθηκε πολύ σημαντική ως αιτία της αστοχίας του κυματοθραύστη, καθώς οι τιμές υπέρβασης στις τιμές υπερπήδησης ήταν πολύ κοντά στις τιμές ασφαλείας.

Επομένως, η κατασκευή θα πρέπει να εστιάζεται στη χρήση κατάλληλων, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, υλικών με εφαρμογή τους σύμφωνα με την εκάστοτε μελέτη. Τέλος, είναι επιτακτική, η χρήση εργαστηριακών μοντέλων και η καταγραφή των αποτελεσμάτων για την καλύτερη προσαρμογή στις πραγματικές συνθήκες αλλά και συλλογή και επεξεργασία ανεμολογικών δεδομένων με μεγάλο χρονικό αλλά και πιο πρόσφατο διάστημα καταγραφής.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- CIRIA, CUR, CETMEF, *The Rock Manual, The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*, C683, CIRIA, London, 2007 (επανεκδοση 2012)
- CLI, *ACCROPODE™ Design Guide Table*, 2012. [Online] Available at: www.concretelayer.com/sites/default/files/ACCROPODE%E2%84%A2_Design_Table_2012_0.pdf
- CLI, *ACCROPODE™ Basic Specifications*, 2015. [Online] Available at: www.concretelayer.com/sites/default/files/2019-05/ACCROPODE%E2%84%A2_Basic-%20Specifications_Version%20D_0.pdf
- CLI, *ACCROPODE™ Brochure 2015, the benchmark in single-layer armouring technology*, 2015. [Online] Available at: www.concretelayer.com/sites/default/files/2019-05/ACCROPODE_Brochure_2015.pdf
- Memos, C., ASCE, F., Bouckovalas, G., ASCE, M., Tsiachris, A., *Stability of Rubble-Mound Breakwaters under Seismic Action, 27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE)*, pp 1585-1598, 2001.
- Jentsje van der Meer, *Design aspects of breakwaters and sea defences, 5th International Short Conference on Applied Coastal Research*, 2011 [Online] Available at: www.vandermeerconsulting.nl/downloads/stability_a/2011_sacr-van_der_meer.pdf
- Pailes, B., *Seminars, Corrosion Issues for Port Facilities*, Vector Corrosion Services, 2017. [Online] Available at: <http://aapa.files.cms-plus.com/2017Seminars/17-Facilities/Brian%20Pailes.pdf>
- Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhuis, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., *EurOtop, Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application (2nd edition)*, 2016. [Online] Available at: www.overtopping-manual.com/assets/downloads/EurOtop_-_II_2016_Pre-release_October_2016.pdf
- M. W. Owen, A. A. J. Steele, HR Wallingford, *Effectiveness of recurved wave return walls*, 1991, Revised 1993. [Online] Available at: <http://eprints.hrwallingford.co.uk/586/1/SR261.pdf>
- N. W. H. Allsop, D. Vicinanza, J. E. McKenna, HR Wallingford, *Wave Forces on Vertical and Composite Breakwaters*, 1995, Revised 1996. [Online] Available at: <http://eprints.hrwallingford.co.uk/946/1/SR443-Waves-forces-vertical-composite-breakwaters-HRWallingford.pdf>

- D.H.I., *MIKE 21 SW FM User Guide and Scientific Documentation*, Danish Hydraulic Institute, 2013. Available at: <https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast-and-Sea/MIKE21SW.pdf>
- D.H.I., *MIKE 21 HD FM User Guide and Scientific Documentation*, Danish Hydraulic Institute, 2015. Available at: <https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast-and-Sea/M21HD.pdf>
- Kazuaki Zen, Corrosion and life cycle management of port structures, *International Symposium on Corrosion and Protection of Marine Structures—in memory of the late Professor Toshihei Misawa*, Japan, 2005. [Online] Available at: <https://people.utm.my/mohammad/files/2012/09/Corrosion-Management-of-Port.pdf>
- Feys, F., Master of civil engineering: *Design of a new anti-reflective caisson*, Universidad Politecnica de Valencia, 2008. [Online] Available at: https://lib.ugent.-be/fulltxt/RUG01/001/418/239/RUG01-001418239_2010_0001_AC.pdf
- Takeshi I., Tanaka, E., Okuzono, H., Permeable Seawall with Reservoir and the Use of “Warock”, *15th International Conference on Coastal Engineering*, 1976 [Online] Available at: https://scholar.google.com/scholar?hl=el&as_sdt=0%2C5&-q=warock+takeshi&btnG
- Turk, G.F., Melby, J.A., Preliminary 3-D testing of Core-Loc™ as a repair concrete armour unit for dolos-armoured breakwater slopes. *Technical Report REMR-CO-18, US Army Engineer Waterways Experiment Station*, Vicksburg, MS, 1997. [Online] Available at: https://pdfs.semanticscholar.org/f337/690a9a49f0d1ab6e4fd-e2f4972976209cff5.pdf?_ga=2.130854025.740365401.1581501815-1540666708.1581501815
- USACE, CEM PART VI Chapter 5: Fundamentals of Design. In: *Coastal Engineering Manual (CEM)*. Washington, DC: USACE, 2011.
- Ward, D.L., Markle, D.G., Repair of localized armour rock damage on rubble-mound structures, *Technical Report REMR-CO-14, US Army Engineer Waterways Experiment Station*, Vicksburg, MS, 1984.

Ελληνική βιβλιογραφία

- Δασκαλάκης, Κ.Ε., Αντισεισμικός Υπολογισμός Κρηπιδότοιχων Βαρύτητας Μέθοδος Δέλτα, *Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, I*, (τεύχ. 2-3), , 2004 [Ηλεκτρονικό Διαθέσιμο σε: http://library.tee.gr/digital/techr/2004/techr_2004_i_2_3_21.pdf
- Δασκαλάκης, Κ.Ε., *ΛΙΜΑΝΙΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΚΥΜΑΤΑ ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ*, Τόμος Α', Γ' Έκδοση, Τσέλκα-4Μ εκδοτική, Αθήνα, 2009.
- Δασκαλάκης, Κ.Ε., *ΛΙΜΑΝΙΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΚΥΜΑΤΑ ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ*, Τόμος Β', Γ' Έκδοση, Τσέλκα-4Μ εκδοτική, Αθήνα, 2009.
- Μέμος, Κ., *Εισαγωγή στα λιμενικά έργα*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2013.

- Μουτζούρης, Κ.Ι., *Εισαγωγή στην ακτομηχανική*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα., 2005.
- Μουτζούρης, Κ.Ι., *Θαλάσσια Υδραυλική*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009.
- Πρίνος, Π., Καραμπάς, Θ., Κόφτης, Εκτίμηση Των Επιπτώσεων Της Κλιματικής Αλλαγής Και Αναβάθμισης Λιμενικών Και Παράκτιων Κατασκευών, *ΘΑΛΗΣ-CCSEAWAVS*, 3η Ετήσια Συνάντηση Θεσσαλονίκη, 2015.
- Σκαρλάτου Ε., Διπλωματική εργασία: *‘Διερεύνηση ακτομηχανικών διεργασιών λαμβάνοντας υπόψη ακραίες κυματικές συνθήκες- Εφαρμογή περιοχή Ρεθύμνου’*, 2016
- Τσουκαλά, Β., Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής στο σχεδιασμό των παράκτιων έργων Πρόβλεψη και Αντιμετώπιση, Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδας, *Ημερίδα: «Διάβρωση ακτών Αίτια Αντιμετώπιση Θεσμικό Πλαίσιο»*, 2017. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο σε: http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/hmerida-diavrosi-akton/tsoukala.pdf
- Φράγκου, Μ., Οριστική Μελέτη Έργου *"Επέκταση Προσήνεμου Μώλου Λιμένα Ευδήλου Ικαρίας"*, Πειραιάς, Ελληνική Δημοκρατία, Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Σάμου, Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών, Αθήνα, 2010.
- ΦΕΚ 1746/Β/19-5-2017, *Εφημερίς της Κυβερνήσεως*, s.l.:Ελληνική Δημοκρατία.

Παράρτημα

Πίνακας 16: Πίνακας υπολογισμού χαρακτηριστικών κύματος για Βόρειο άνεμο.

beaufort	m/s	Φ1	Συχνότητα %	D	gD/U	Φ2	min(Φ1,Φ2)
1	1,5	506501,6112	0,017	5236,03	34243,6	34243	10530,5
2	3,3	104649,0932	0,060	18988,6	56448	56447	19662,5
3	5,4	39081,91445	1,481	467063	848498	848497	430089
4	7,9	18260,35291	3,053	962696	1195449	1195449	616038
5	10,7	9953,957771	5,321	1677873	1538312	1538312	800598
6	13,8	5984,187278	4,347	1371013	974611	974611	497557
7	17,1	3897,36543	1,618	510310	292757	292756	136291
8	20,7	2659,63879	0,299	94328,6	44703,6	44703	14714,9
9	24,4	1914,184066	0,029	9201,68	3699,53	3699	596,017

Πίνακας 17: Κυματικό κλίμα στα βαθιά από SMB για Βόρειο άνεμο.

ΕΝΤΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ (Bf)	Ho (m)	To (s)	Lo (m)
1	0,04	0,75	0,88
2	0,21	1,83	5,24
3	0,66	3,30	16,96
4	1,17	4,33	29,34
5	1,77	5,32	44,12
6	2,46	6,26	61,09
7	3,22	7,14	79,52
8	4,08	8,00	99,89
9	3,11	6,81	72,40

Πίνακας 18: Χαρακτηριστικά κύματος για Βόρειο άνεμο χωρίς περιορισμό της διάρκειας πνοής

ΕΝΤΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ (Bf)	Ho (m)	To (s)	Lo (m)
1	0,06	1,12	1,94
2	0,29	2,24	7,81
3	0,66	3,30	16,96
4	1,17	4,33	29,34
5	1,77	5,32	44,12
6	2,46	6,26	61,09
7	3,22	7,14	79,52
8	4,08	8,00	99,89
9	4,98	8,80	121,00
10	5,98	9,60	143,95

Πίνακας 19: Πίνακας υπολογισμού χαρακτηριστικών κύματος για Βορειοδυτικό άνεμο.

beaufort	m/s	Φ1	Συχνότητα %	D	gD/U	Φ2	min(Φ1,Φ2)
1	1,5	612033,126	0,075	23699,8	154997	154996	66157,6
2	3,3	126453,1252	2,192	691414	2055385	2055385	1079874
3	5,4	47224,77824	7,701	2428709	4412155	4412155	2359621
4	7,9	22064,96609	17,775	5605652	6960942	6960942	3749126
5	10,7	12027,90229	10,949	3453001	3165789	3165789	1681858
6	13,8	7231,015194	2,892	911926	648260	648260	323372
7	17,1	4709,396168	0,205	64651,4	37089,5	37089	11644,5
8	20,7	3213,784531	0,033	10314,1	4887,99	4887	857,629
9	24,4	2313,011512	0,003	946,08	380,371	380,37	29,953

Πίνακας 20: Κυματικό κλίμα στα βαθειά από SMB για Βορειοδυτικό άνεμο.

ΕΝΤΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ (Bf)	Ho (m)	To (s)	Lo (m)
1	0,06	0,97	1,48
2	0,30	2,27	8,07
3	0,69	3,37	17,77
4	1,23	4,46	31,06
5	1,88	5,49	47,06
6	2,63	6,48	65,51
7	3,46	7,41	85,62
8	2,60	6,27	61,40
9	0,89	3,34	17,44

Πίνακας 21: Χαρακτηριστικά κύματος για Βορειοδυτικό άνεμο χωρίς περιορισμό της διάρκειας πνοής.

ΕΝΤΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ (Bf)	Ho (m)	To (s)	Lo (m)
1	0,06	1,12	1,97
2	0,30	2,27	8,07
3	0,69	3,37	17,77
4	1,23	4,46	31,06
5	1,88	5,49	47,06
6	2,63	6,48	65,51
7	3,46	7,41	85,62
8	4,39	8,31	107,89
9	5,37	9,16	131,00
10	6,92	10,34	166,87

Πίνακας 22: Πίνακας υπολογισμού q_{mean} και V_{max} .

N	
Δεδομένα	
Ho (m)	5,98
Tp,o (s)	9,6
Lo (m)	143,89
ελεύθερο περιθώριο Rc (m)	5,65
Υπερπήδηση κατά Eurotop II 2016	
Hs (m)	5,35
Hm0 (m)	5,62
Tp (s)	7,78
Tm-1,0 (s)	7,07
Tm (s)	6,48
ξ m-1,0	2,486
β (°)	2
μέση αναρρίχηση Ru2% mean (m)	8,54
αναρρίχηση σχεδιασμού Ru2% design (m)	9,14
μέσο ποσοστό υπερπηδόντων κυμάτων %	18,06
ποσοστό σχεδιασμού υπερπηδόντων κυμάτων %	22,43
μέση παροχή υπερπήδησης q (l/s/m)	16,63
παροχή υπερπήδησης σχεδιασμού q (l/s/m)	35,19
όγκος υπερπήδησης V (l/m)	1001,32
μέγιστος όγκος υπερπήδησης Vmax (l/m)	1053,59
a	1025,85
b	66,67
διάρκεια καταιγίδας (s)	10800
αριθμός κυμάτων Nw	1665,81
αριθμός υπερπηδόντων κυμάτων Now	374
συντελεστής τραχύτητας γ_f	0,46
επαυξημένος συντελεστής τραχύτητας $\gamma_f, surging$	0,51
συντελεστής πλάτους θωράκισης στέψης Cr	0,52
συντελεστής αναβαθμού γ_b	1
συντελεστής λοξότητας κυμάτων γ_β	0,987
πλάτος θωράκισης στη στέψη Gc (m)	6,65

Πίνακας 23: Υπερπήδηση με αύξηση πλάτους στέψης κατά 1,90 m.

N	
Δεδομένα	
Ho (m)	5,98
Tp,o (s)	9,6
Lo (m)	143,89
ελεύθερο περιθώριο Rc (m)	5,65
Υπερπήδηση κατά Eurotop II 2016	
Hs (m)	5,35
Hm0 (m)	5,62
Tp (s)	7,78
Tm-1,0 (s)	7,07
Tm (s)	6,48
ξ m-1,0	2,486
β (°)	2
μέση αναρρίχηση Ru2% mean (m)	8,54
αναρρίχηση σχεδιασμού Ru2% design (m)	9,14
μέσο ποσοστό υπερπηδόντων κυμάτων %	18,06
ποσοστό σχεδιασμού υπερπηδόντων κυμάτων %	22,43
μέση παροχή υπερπήδησης q (l/s/m)	9,88
παροχή υπερπήδησης σχεδιασμού q (l/s/m)	20,91
όγκος υπερπήδησης V (l/m)	585,94
μέγιστος όγκος υπερπήδησης Vmax (l/m)	646,85
a	614,16
b	34,30
διάρκεια καταιγίδας (s)	10800
αριθμός κυμάτων Nw	1665,81
αριθμός υπερπηδόντων κυμάτων Now	374
συντελεστής τραχύτητας γf	0,46
επαυξημένος συντελεστής τραχύτητας γf,surgig	0,51
συντελεστής πλάτους θωράκισης στέψης Cr	0,31
συντελεστής αναβαθμού γb	1
συντελεστής λοξότητας κυμάτων γβ	0,987
πλάτος θωράκισης στη στέψη Gc (m)	8,6

Πίνακας 24: Πίνακας υπολογισμού γεωμετρίας ύφαλου κυματοθραύστη

Υπολογισμός ύφαλου κυματοθραύστη	
Hs (m)	5,35
L (m)	143,95
hc/h	0,793
Βάθος πυθμένα h (m)	13
Ύψος κατασκευής hc (m)	10,31
Rc (m)	-2,69
Δ	1,54
Dn (m)	1,5
Sp	0,04
$1 < Hs/Dn < 6$	3,57
$-2 < Rc/Dn < 6$	-1,79
n	3
Ks	1,1
B (m)	4,95
r (m)	3,3
W (t)	8,78
r εσωτερικής στιβάδας	1,46
Ct	0,56
Ht	3,02
Sop	0,04
b	0,56

Σχέδια