



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΡΩΣΕΩΝ  
ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΣΕ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ.**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΑΡΛΑΤΗΡΑΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ ΠΟΛΥΖΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ**  
**ΜΑΪΟΣ, 2024**

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Κατασκευή και επιμέτρηση στρώσεων λιθορριπής σε  
κυματοθραύστη.

Γεώργιος Καρλατήρας

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημοσθένης Πολύζος

Σ.Ε.Π. Ε.Α.Π.

Συν-Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Διονυσία-Πηνελόπη Κοντονή

Σ.Ε.Π. Ε.Α.Π.

Πάτρα, Μάιος 2024

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ~~αυτή~~ παρουσιάζεται η εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων κατασκευής και επιμέτρησης στρώσεων λιθορριπής σε έργο κυματοθραύστη. Συγκεκριμένα περιγράφονται η διαδικασία τοποθέτησης και χρήσης συστήματος καθοδήγησης σε φορηγίδες για την κατασκευή των στρώσεων λιθορριπής, η αποτύπωση των εργασιών με ηχοβολιστικό σύστημα πολλαπλής δέσμης και η επιμέτρηση των εργασιών με χρήση λογισμικού που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των μέσων επιφανειών. Από την εφαρμογή των μεθόδων αυτών, χωρίς να απαιτούνται σημαντικές επενδύσεις, προκύπτουν σημαντικά οφέλη σε σχέση με παραδοσιακές μεθόδους. Τα κυριότερα από αυτά είναι η μείωση του απαιτούμενου χρόνου των εργασιών, ο καλύτερος έλεγχος τους, η βελτίωση της κατασκευαστικής ακρίβειας και η εργασία με περιορισμένο ή καθόλου φως. Επίσης στην εργασία αυτή αναφέρονται οι περιορισμοί και τα προβλήματα που διαπιστώθηκαν και προτείνονται τρόποι αντιμετώπισης τους.

### Λέξεις – Κλειδιά

Λιμενικά έργα, κυματοθραύστης, λιθορριπή, σύστημα καθοδήγησης, ηχοβολιστικό πολλαπλής δέσμης.

## Construction and quantity take off of Riprap Layers in Breakwaters

Georgios Karlatiras

### **Abstract**

This thesis presents the application of modern methods in the construction and measurement of riprap layers in a breakwater project. Specifically, the paper describes the procedure for placing and using a guidance system on barges for the construction of riprap layers, the mapping of the works with a multi-beam echo sounder system, and the measurement of the works using software that employs the mean surface method. The application of these methods, without requiring significant investments, results in significant benefits compared to traditional methods. The most important of these are the reduction of the required time for the works, better control of them, the improvement of construction accuracy, and work with limited or no light. The limitations and problems that were found are also reported in this thesis, and ways to address them are proposed.

### **Keywords**

Marine works, breakwater, riprap, guidance system, multi-beam echo sounder.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
Περιεχόμενα .....	vi
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων .....	vii
Κατάλογος Πινάκων .....	x
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xi
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο .....	1
1.2 Προσδιορισμός του προβλήματος .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.3 Σπουδαιότητα του προβλήματος .....	1
1.4 Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε .....	2
1.5 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας .....	3
1.6 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	3
2 Γενικές πληροφορίες για τους κυματοθραύστες .....	5
2.1 Χρησιμότητα των κυματοθραυστών. ....	5
2.2 Είδη κυματοθραυστών.....	5
2.3 Οι κυματοθραύστες μορφής αναχώματος. ....	7
3 Μεθοδολογία - εξοπλισμός .....	11
3.1 Πλωτός εξοπλισμός .....	11
3.1.1 Γενικά .....	11
3.1.2 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός. ....	12
3.2 Το σύστημα καθοδήγησης.....	14
3.2.1 Γενικά – αρχές λειτουργίας.....	14
3.2.2 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός καθοδήγησης.....	17
3.2.3 Εγκατάσταση του συστήματος καθοδήγησης .....	19
3.2.4 Ρύθμιση των δεκτών GNSS .....	26
3.2.5 Περιγραφή - Ρύθμιση του λογισμικού.....	28
3.3 Υδρογραφικός εξοπλισμός .....	33
3.4 Μεθοδολογία επιμετρήσεων – εξοπλισμός. ....	41
4 Εφαρμογή μεθόδου .....	47
4.1 Περιγραφή έργου – αντικείμενο εργασιών.....	47
4.2 Εκμάθηση, εφαρμογή και αξιολόγηση του συστήματος καθοδήγησης. ....	50
4.3 Εφαρμογή και αξιολόγηση των αποτυπώσεων με ηχοβολιστικό πολλαπλής δέσμης.....	56
4.4 Εφαρμογή και αξιολόγηση της μεθόδου επιμέτρησης. ....	58
5 Συμπεράσματα.....	62
Βιβλιογραφία.....	65

## Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1. Τύποι κυματοθραυστών (Angremond & Van Roode, 2004).....	6
Εικόνα 2. Υποκατηγορίες κυματοθραύστη μορφής αναχώματος με λιθορριπές (Andersen, 2006). ....	7
Εικόνα 3. Ενδεικτική τυπική διατομή κυματοθραύστη με μορφή αναχώματος (Andersen, 2006). ....	8
Εικόνα 4. Πιθανοί τρόποι αστοχίας ενός κυματοθραύστη μορφής αναχώματος (Andersen, 2006).....	9
Εικόνα 5. Τεχνητοί ογκόλιθοι από σκυρόδεμα, τύπου Xbloc, στο πρανές κυματοθραύστη .....	9
Εικόνα 6. Φορτηγίδα- κλαπέ με ανοιχτό κύτος .....	12
Εικόνα 7. Δορυφορική εικόνα του χώρου φόρτωσης από το google earth.....	13
Εικόνα 8. Φόρτωση υλικών κατηγορίας 0 - 300 Kg. ....	13
Εικόνα 9. Φόρτωση υλικών κατηγορίας 300-1000 Kg.....	14
Εικόνα 10. Συνδεσμολογία συστήματος καθοδήγησης. ....	19
Εικόνα 11. Το σύστημα κατά την στιγμή ολοκλήρωσης της συνδεσμολογίας στη MARIANNA XX. ....	20
Εικόνα 12. Το σύστημα με εγκατεστημένο το λογισμικό στη MARIANNA XIII.....	21
Εικόνα 13. Άποψη της γέφυρας φορτηγίδας με εγκατεστημένες τις κεραίες GNSS. ....	24
Εικόνα 14. Πλάγια όψη της γέφυρας με εγκατεστημένες τις κεραίες GNSS. Στα δεξιά διακρίνεται τοποθετημένη και η κεραία UHF. ....	25
Εικόνα 15. Εναλλακτικός τρόπος τοποθέτησης της κεραίας GNSS σε περιβάλλον με εμπόδια. ....	25
Εικόνα 16. Η οθόνη ρυθμίσεων που αφορούν τις κεραίες GNSS στον Web Server των δεκτών rover. ....	27
Εικόνα 17. Η οθόνη ρυθμίσεων που αφορούν την εξαγόμενη πληροφορία στον Η/Υ. ....	27
Εικόνα 18. Η βάση του base στην ξηρά. ....	28
Εικόνα 19. Πραγματοποιημένες (κόκκινη διαγράμμιση) και προγραμματισμένες ρίψεις (μαύρα παραλληλόγραμμα). ....	30
Εικόνα 20. Τα περιεχόμενα του αρχείου ASCII με τα στοιχεία των ρίψεων. ....	30
Εικόνα 21. Το παράθυρο των ρυθμίσεων έργου.....	31
Εικόνα 22. Τα παράθυρα ορισμού τοπικών συντεταγμένων και προεπισκόπησης της κάτοψης και των σημείων. ....	32
Εικόνα 23. Το παράθυρο επιλογής του διαθέσιμου εξοπλισμού. ....	32
Εικόνα 24. Το παράθυρο πραγματικού χρόνου. ....	33
Εικόνα 25. Μέτρηση της ταχύτητας του ήχου (αριστερά) και ενδεικτικό διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας του ήχου στο νερό συναρτήσει του βάθους (δεξιά), (Makar, 2019). ....	40
Εικόνα 26. Τρίγωνα ΨΜΕ περιοχής θαλάσσιου πυθμένα από κάρτα σημείων πλευράς 1μ. (αριστερά) και ισοβαθείς ανά 20 εκατοστά με χρωματική κλίμακα (ανάλογη με το απόλυτο υψόμετρό τους) δημιουργημένες από το ΨΜΕ (δεξιά). ....	43
Εικόνα 27. Σελίδα αναφοράς υπολογισμού όγκων από το λογισμικό Prost. ....	44

Εικόνα 28. Τμήμα του αρχείου dwg με τις απορρίψεις. Τα παραλληλόγραμμα αντιπροσωπεύουν την θέση της χοάνη των φορτηγίδων κατά την στιγμή της απόρριψης και έχουν συντεταγμένες στο προβολικό σύστημα του έργου. ....	45
Εικόνα 29. Το master plan της μελέτης του έργου. ....	47
Εικόνα 30. Ενδεικτικές έξαλες τυπικές διατομές της μελέτης. ....	48
Εικόνα 31. Ενδεικτικές ύφαλες τυπικές διατομές της μελέτης. ....	49
Εικόνα 32. Αποτύπωση απόρριψης από τη φορτηγίδα Μαριάννα ΧΧ σε σχεδόν επίπεδο πυθμένα βάθους 18 μέτρων περίπου. Με μπλε χρώμα δίνεται το περίγραμμα της χοάνης κατά τη στιγμή της απόρριψης. ....	52
Εικόνα 33. Τομή κατά μήκος της απόρριψης. ....	52
Εικόνα 34. Τομή κατά πλάτος της απόρριψης. ....	52
Εικόνα 35. Ενδεικτικές διατομές επιμέτρησης υλικών πυρήνα στις οποίες φαίνονται οι γραμμές της μελέτης (μαύρο χρώμα), η γραμμή του πυθμένα (πράσινο χρώμα), η γραμμή του πυρήνα (κόκκινο χρώμα) και η γραμμή της στρώσης ποδός με μπλε χρώμα. ....	55
Εικόνα 36. Το σκάφος που χρησιμοποιήθηκε για τις αποτυπώσεις. ....	56
Εικόνα 37. Διάκριση περιοχών διαφορετικών υλικών κατασκευής από τις ισοϋψείς. Το βυθομετρικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τη μορφή κανάβου πλευράς 0,5 μέτρων και η ισοδιάσταση είναι 0,20 μέτρα. ....	57
Εικόνα 38. Διατομή με γραμμές αποτυπώσεων δυο διαφορετικών ημερών (κόκκινη και μπλε). Οι δυο αποτυπώσεις είναι σχεδόν παράλληλες αλλά διαφέρουν περίπου 40 εκατοστά. Στην περιοχή που δεν έχουν γίνει απορρίψεις η μπλε γραμμή είναι χαμηλότερα από τον φυσικό πυθμένα (πράσινη γραμμή). Αντίθετα στην αποτύπωση που απεικονίζεται με κόκκινη γραμμή υπάρχει ταύτιση με το φυσικό πυθμένα. ....	58
Εικόνα 39. Στρώση πυρήνα πριν (πράσινη γραμμή) και μετά από κακοκαιρία (κόκκινη γραμμή). ....	61
Εικόνα 40. Επιμέτρηση πυρήνα μετά από την μετατόπιση άξονα κατά 28 μ. περίπου. Η τελευταία αποτύπωση πριν τη μετακίνηση (πράσινη γραμμή) χρησιμοποιείται σαν νέο έδαφος. ....	61
Σχήμα 1. Τομή φορτηγίδας κλαπέ. ....	11
Σχήμα 2. Υπολογισμός γωνιακής απόκλισης κεραιών GNSS και άξονα φορτηγίδας (Trimble Inc) ....	22
Σχήμα 3. Απόκλιση της διεύθυνσης και πραγματοποιούμενοι υπολογισμοί για διάφορες θέσεις των κεραιών GNSS (Trimble Inc). ....	22
Σχήμα 4. Σφάλμα στον υπολογισμό της διεύθυνσης ανάλογα με την απόσταση των βάσεων (Μπλε γραμμή χωρίς σφάλματα πολυανάκλασης, κόκκινη γραμμή με σφάλματα πολυανάκλασης, Trimble Inc). ....	22
Σχήμα 5. Το φαινόμενο της πολυανάκλασης σήματος (Schofield & Breach, 2007, σελ. 345). ....	24
Σχήμα 6. Κάτοψη μιας από τις φορτηγίδες με τα σημεία αποτύπωσης. ....	26
Σχήμα 7. Αρχή λειτουργίας ηχοβολιστικού συστήματος πολλαπλής δέσμης (Zwolak, 2015). ....	34
Σχήμα 8. Ονοματολογία κινήσεων πλοίου (Αθανασούλης & Μπελιμπασάκης, 2012). ....	35



Σχήμα 9. Επίδραση του προνευτασμού στην μέτρηση του βάθους (Παλληκάρης κ.α., 2016) .....	36
Σχήμα 10. Επίδραση του διατοιχισμού στην μέτρηση του βάθους (Παλληκάρης κ.α., 2016). .....	36
Σχήμα 11. Καθίζηση (Παλληκάρης κ.α., 2011).....	37
Σχήμα 12. Δυναμική διαγωγή (Παλληκάρης κ.α., 2011). .....	37
Σχήμα 13. Διάθλαση του ήχου κατά την διάδοσή του σε μέσα με ταχύτητες $C_1$ και $C_2$ (ΙΗΟ, 2011, σελ.130). .....	39
Σχήμα 14. Τροχιά ηχητικού κύματος σε στρωματοποιημένο μέσο, με αρχική ταχύτητα $C_0$ και γωνία $\theta_0$ ως προς την κατακόρυφο, συναρτήσει του κατακόρυφου προφίλ ταχύτητας (ΙΗΟ, 2011, σελ.176). .....	39
Σχήμα 15. Όγκος με τη μέθοδο των μέσων επιφανειών (Ghiliani & Wolf, 2012). .....	41

## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 1. Ονοματολογία κινήσεων πλοίου. ....	35
-----------------------------------------------	----

## Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ΔΕ	Διπλωματική Εργασία
ΕΑΠ	Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
ΘΕ	Θεματική Ενότητα
ΠΣ	Πρόγραμμα Σπουδών
ΣΥΝ	Συντονιστής/Συντονίστρια
ΜΣΘ	Μέση στάθμη της Θάλασσας
ΨΜΕ	Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους
DGN	Design file
DWG	Drawing file
DXF	Drawing Exchange Format
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communications
LAN	Local Area Network
MBES	Multibeam Echosounder
NMEA	National Marine Electronics Association
RMS	Root Mean Square
RTK	Real Time Kinematic
SHP	Shape file
SIM	Subscriber Identity Module
UHF	Ultra High Frequency



## **1 Εισαγωγή**

### **1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην κατασκευή και επιμέτρηση στρώσεων λιθορριπής κυματοθραύστη, χρησιμοποιώντας σύγχρονες τεχνολογίες. Πρόκειται για πραγματικό έργο επέκτασης λιμένα στην περιοχή Abu Qir της Αιγύπτου, έργο το οποίο ήταν σε εξέλιξη καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης της διπλωματικής εργασίας. Εκτελείται από την εταιρεία Ιγνάτιος Σπανόπουλος Ναυτιλιακή και Εμπορική Α.Ε. η οποία είναι υπεργολάβος στην κατασκευή των στρώσεων λιθορριπής.

### **1.2 Προκλήσεις του έργου**

Η αρχική μελέτη προέβλεπε την κατασκευή κυματοθραύστη συνολικού μήκους περίπου 9 χιλιομέτρων, σε απόσταση περίπου τριών χιλιομέτρων από την ακτογραμμή, και σε μέσο βάθος πυθμένα 18 μ.. Ο συνολικός όγκος των στρώσεων λιθορριπής που έπρεπε να κατασκευαστούν εκτιμήθηκε σε περισσότερα από 2.000.000 κ.μ., μετά από προμέτρηση που έγινε βάσει των υφιστάμενων σχεδίων της μελέτης. Η κατασκευή του κυματοθραύστη θα έπρεπε να γίνει χωρίς να υπάρχει πρόσβαση από την ξηρά ενώ παράλληλα θα ξεκινούσε και η επίχωση της ζώνης μεταξύ του κυματοθραύστη και της παραλίας για την επέκταση του λιμένα. Σημαντική παράμετρο στον τρόπο κατασκευής αποτέλεσε και το γεγονός ότι δεν μπορούσε να υπάρχει συνεχής τοπογραφική υποστήριξη κατά την διάρκεια της κατασκευής ενώ παράλληλα η απόκλιση των στρώσεων από την προβλεπόμενη θεωρητική επιφάνεια δεν θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από 0,80 μ. ώστε να μην γίνεται σπατάλη υλικού αλλά και για λόγους αρτιότητας της κατασκευής.

### **1.3 Σπουδαιότητα του προβλήματος**

Όπως έχει προαναφερθεί, η υλοποίηση του εν λόγω έργου αποτελεί πρόκληση για μια τεχνική εταιρεία λόγω του μεγέθους της κατασκευής, της απόστασης της από την ακτή, της απαιτούμενης ακρίβειας, του περιορισμένου χρόνου υλοποίησης και των ανθρώπινων πόρων που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Η δυσκολία του εγχειρήματος επιτείνεται και από το γεγονός ότι η όλη κατασκευή γίνεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας χωρίς να υπάρχει

οπτικός έλεγχος ενώ οι εργασίες θα έπρεπε να συνεχίζονται ακόμη και κατά τις βραδινές ώρες για την μείωση του κόστους του έργου, του συνολικού χρόνου κατασκευής και του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού. Από τα προαναφερθέντα γίνεται φανερό και η ανάγκη μιας αξιόπιστης μεθοδολογίας που θα μπορεί, σε σύντομο χρόνο, να δίνει την λεπτομερή εικόνα του θαλάσσιου πυθμένα, όποτε απαιτηθεί, με σκοπό τον έλεγχο της κατασκευής, την λήψη αποφάσεων για τα επόμενα βήματα και την επιμέτρηση των εργασιών. Η υιοθέτηση παραδοσιακών τοπογραφικών μεθόδων είναι φανερό ότι δεν θα μπορούσε να εξυπηρετήσει την υλοποίηση του συγκεκριμένου έργου.

#### **1.4 Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε**

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή των στρώσεων λιθορριπής είναι η εγκατάσταση και χρήση συστήματος καθοδήγησης σε αυτοκινούμενες φορτηγίδες-κλαπέ (self-propelled split hopper barges), το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνική δορυφορικού εντοπισμού Real Time Kinematic (RTK) ή κινηματική πραγματικού χρόνου. Λόγω της απαιτούμενης κατασκευαστικής ακρίβειας, της δυσκολίας πλοήγησης με ακρίβεια στην τελική θέση απόρριψης των υλικών, αλλά και της αβεβαιότητας στην τελική γεωμετρία των υλικών στον πυθμένα μετά την απόρριψή τους, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση ενός συστήματος που να μπορεί να παρέχει την θέση της φορτηγίδας με ακρίβεια αρκετά καλύτερη του μισού μέτρου. Το σύστημα αυτό περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο και αποτελείται από δέκτες GNSS (Global Navigation Satellite Systems), σύστημα επικοινωνιών UHF (Ultra High Frequency), ηλεκτρονικό υπολογιστή και λογισμικό καθοδήγησης. Η παραμετροποίηση των δεκτών και του λογισμικού έγινε από την εταιρεία JGC Συστήματα Γεωπληροφορικής ΑΕ. Για την αποτύπωση του θαλάσσιου πυθμένα χρησιμοποιήθηκε ηχοβολιστικό πολλαπλής δέσμης (multibeam echosounder) εγκατεστημένο στο πλάι κατάλληλα διαμορφωμένου σκάφους. Οι συσκευές αυτές έχουν την δυνατότητα σάρωσης μεγάλων εκτάσεων, σε μικρό χρονικό διάστημα και με μεγάλη ακρίβεια. Τέλος για τον έλεγχο της κατασκευής, τη σχεδίαση διατομών και την επιμέτρηση των εργασιών χρησιμοποιήθηκε λογισμικό επιμέτρησης με σχεδίαση διατομών, το οποίο υπήρχε διαθέσιμο στην εταιρεία.

## 1.5 Στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Στην διπλωματική εργασία αυτή δεν επιδιώκεται η παρουσίαση οργανωτικών ή οικονομικών ζητημάτων στην κατασκευή ενός λιμενικού έργου τα οποία άλλωστε δεν διαφέρουν από ένα οποιοδήποτε άλλο κατασκευαστικό έργο. Επίσης στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει μεγάλος όγκος πληροφοριών για τα θέματα αυτά αλλά και τη μελέτη λιμενικών έργων. Εδώ επιχειρείται κυρίως η κάλυψη του βιβλιογραφικού κενού που υπάρχει στην εφαρμογή και αξιολόγηση σύγχρονων τεχνολογιών για την κατασκευή και επιμέτρηση λιμενικών έργων. Συγκεκριμένα επιδιώκεται:

- Να παρουσιαστεί η διαδικασία εγκατάστασης συστήματος καθοδήγησης σε φορηγίδα και μεθοδολογίας εργασίας με αυτό σε έργο κυματοθραύστη.
- Να παρουσιαστούν η σπουδαιότητα, ο τρόπος λειτουργίας, οι δυνατότητες και οι περιορισμοί του παραπάνω συστήματος καθώς και τα προβλήματα που ενδέχεται να προκύψουν.
- Να παρουσιαστεί η χρήση ηχοβολιστικών πολλαπλής δέσμης στην κατασκευή λιμενικών έργων.
- Να παρουσιαστεί η μεθοδολογία επιμέτρησης των στρώσεων λιθορριπής ενός κυματοθραύστη με χρήση λογισμικού H/Y.
- Να γίνει αξιολόγηση της προαναφερθείσας μεθοδολογίας κατασκευής και επιμέτρησης.

## 1.6 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το αντικείμενο, οι στόχοι και η δομή της διπλωματικής εργασίας, το κατασκευαστικό έργο στο οποίο αναφέρεται, οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή ολοκλήρωση του έργου και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στη κατασκευή του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται γενικές πληροφορίες για τους κυματοθραύστες. Αναφέρονται οι χρησιμότητες και οι τύποι τους. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στους κυματοθραύστες με μορφή αναχώματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του έργου. Αναφέρονται οι μαθηματικές σχέσεις και οι αρχές της φυσικής στις οποίες στηρίζεται η μεθοδολογία και αναφέρεται η σχετική βιβλιογραφία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η εφαρμογή της επιλεγείσας μεθοδολογίας στην κατασκευή του έργου και καταγράφονται τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα, οι δυνατότητες, οι αδυναμίες της, οι προϋποθέσεις εφαρμογής και οι περιορισμοί της. Αναφέρονται προβλήματα που προέκυψαν καθώς και ο τρόπος αντιμετώπισης τους από τον συγγραφέα.

Τέλος τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται στο πέμπτο κεφάλαιο.



## 2 Γενικές πληροφορίες για τους κυματοθραύστες.

Οι κυματοθραύστες είναι κατασκευές με ευρεία χρήση παγκοσμίως. Κατασκευάζονται κοντά στις ακτές, συνήθως μπροστά από λιμάνια, με προφανέστερη λειτουργία την προστασία από την δράση των κυμάτων και των ρευμάτων. Υπάρχουν αρκετά είδη κυματοθραυστών με διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα το καθένα. Μεγάλη ποικιλία υπάρχει επίσης και στα υλικά κατασκευής τους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν λιθορριπές, άμμος, σκυρόδεμα, μέταλλο κ.α.

### 2.1 Χρησιμότητα των κυματοθραυστών.

Οι σημαντικότερες χρήσεις των κυματοθραυστών είναι:

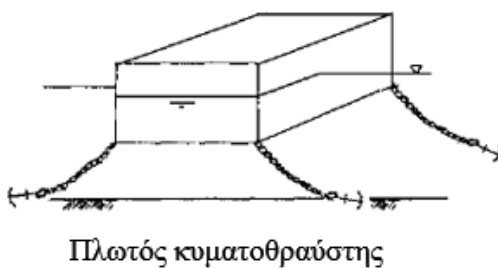
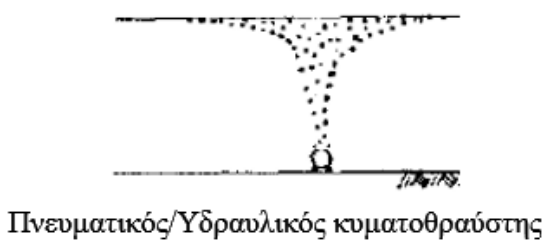
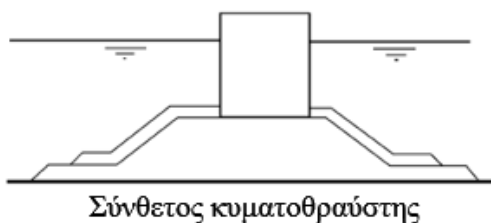
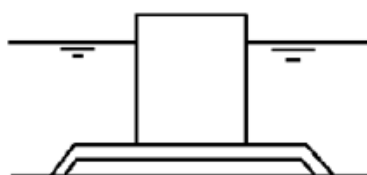
- Η προστασία των σκαφών και των λιμενικών εγκαταστάσεων από τα κύματα.
- Παροχή λιμενικών εγκαταστάσεων και προβλήτας.
- Η προστασία των ακτών από τη διάβρωση.
- Η καθοδήγηση των ρευμάτων για την υποβοήθηση της πλοήγησης των πλοίων.
- Η παρεμπόδιση της απόθεσης ιζημάτων και της μείωσης του βάθους στα λιμάνια.

### 2.2 Είδη κυματοθραυστών.

Οι κυματοθραύστες ανάλογα με τα σχεδιαστικά τους χαρακτηριστικά *ϑεψ* (Εικόνα 1) χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες (Angremond & Van Roode, 2004):

- **Κυματοθραύστες μορφής αναχώματος.** Κατασκευάζονται από λιθορριπές και άλλα χαλαρά και ασύνδετα μεταξύ τους στοιχεία όπως σκύρα, πέτρες λατομείου ή τεχνητούς ογκόλιθους από σκυρόδεμα. Περιγράφονται αναλυτικότερα στην επόμενη παράγραφο καθώς οι κατασκευή των λιθορριπών *ϑεψ* αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- **Μονολιθικοί τύποι.** Η διατομή τους σχεδιάζεται έτσι ώστε όλη η κατασκευή να αποτελεί ένα συμπαγές σώμα. Συνήθως περιλαμβάνει κτίσματα από λιθοδομές, τοιχοποιία ή caisson.
- **Σύνθετοι τύποι.** Είναι συνδυασμός των δυο παραπάνω τύπων. Περιλαμβάνουν μια μονολιθική κατασκευή (συνήθως caisson) και ένα ανάχωμα μικρού μεγέθους από χαλαρά υλικά.

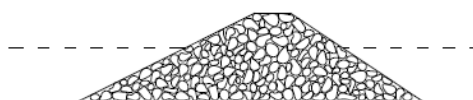
- **Ειδικοί ή μη συμβατικοί τύποι.** Είναι κυματοθραύστες για ειδικές περιπτώσεις στους οποίους χρησιμοποιούνται μη παραδοσιακές μέθοδοι ανάσχεσης των κυμάτων (επιπλέοντες, πνευματικοί, υδραυλικοί, συστοιχίες πασσάλων κ.α.).



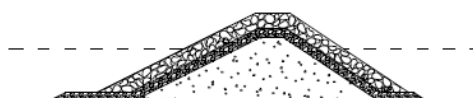
Εικόνα 1. Τύποι κυματοθραυστών (Angremond & Van Roode, 2004).

## 2.3 Οι κυματοθραύστες μορφής αναχώματος.

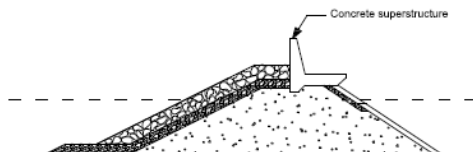
Είναι ο συνηθέστερος τύπος κυματοθραύστη. Στον τύπο αυτό γίνεται ανάσχεση της εισερχόμενης κυματικής ενέργειας κυρίως από τη θραύση των κυμάτων στο πρηνές του κυματοθραύστη και εν μέρει από την ροή στο πορώδες του αναχώματος (Andersen, 2006). Το αν θα επιτρέπεται η υπερπήδησή τους από τις θαλάσσιες μάζες ή όχι είναι μια σημαντική παράμετρος σχεδιασμού τους. Η συντριπτική πλειοψηφία τους δημιουργείται με επικαλυπτόμενες στρώσεις λιθορριπών διαφορετικής σε βάρος διαβάθμισης. Στην στέψη του μπορεί να υπάρχει υπερκατασκευή από σκυρόδεμα η οποία, εκτός από προστασία στην κατασκευή, μπορεί να έχει και άλλες χρησιμότητες όπως η κυκλοφορία πεζών και οχημάτων ή η πρόσδεση σκαφών.



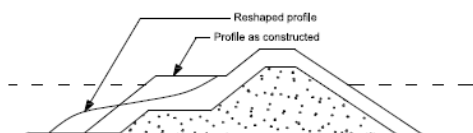
Απλή μορφή



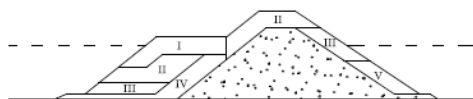
Με πολλαπλές στρώσεις  
λιθορριπών



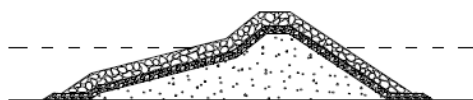
Με πολλαπλές στρώσεις  
λιθορριπών και υπερκατασκευή



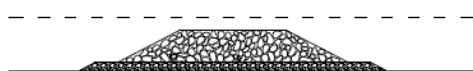
Αναδιαμορφούμενος με  
ανάχωμα



Μη αναδιαμορφούμενος με  
ανάχωμα



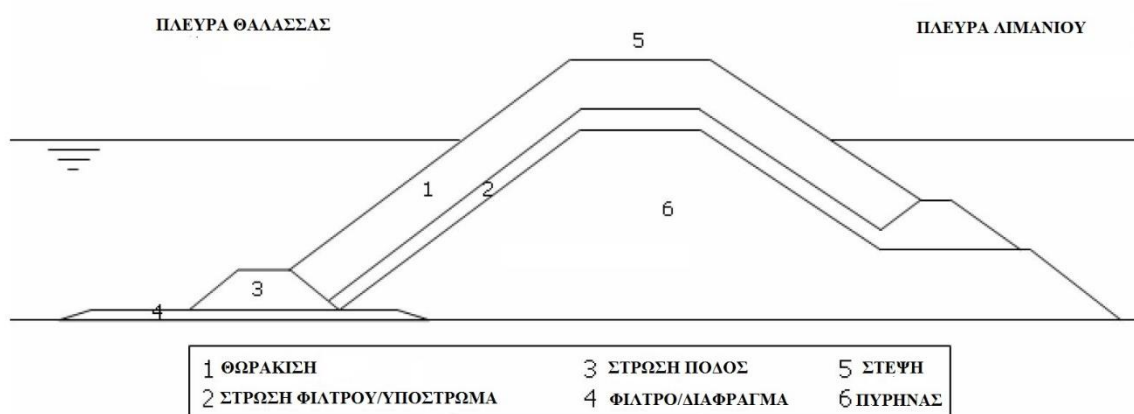
Με πολλαπλές κλίσεις πρηνών



Ύψαλος κυματοθραύστης

Εικόνα 2. Υποκατηγορίες κυματοθραύστη μορφής αναχώματος με λιθορριπές (Andersen, 2006).

Στην εικόνα 3 δίνεται μια ενδεικτική τυπική διατομή ενός τέτοιου κυματοθραύστη. Το εσωτερικό της, που ονομάζεται πυρήνας, κατασκευάζεται με ελαφρύτερα υλικά ενώ οι υπερκείμενες στρώσεις κατασκευάζονται με βαρύτερα κάθε φορά υλικά. Γενικός κανόνας είναι ότι κάθε στρώση θα πρέπει να εμποδίζει την διαφυγή των λεπτότερων υλικών της παρακείμενης στρώσης, μέσω των κενών της, λόγω ξεπλύματος (Massie, 1976). Πολλές φορές για την προστασία των πρανών από τα κύματα, στην εξωτερική στρώση που ονομάζεται θωράκιση, τοποθετούνται τεχνητοί ογκόλιθοι από σκυρόδεμα σε διάφορες μορφές (π.χ. Xbloc, Accropode, Tetrapod κ.α.). Ο χρήση των ογκόλιθων αυτών είναι ιδιαίτερα σημαντική στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη στην οποία γίνεται η θραύση των κυμάτων, αλλά μπορούν επίσης να προστατεύουν την στέψη και την υπήνεμη πλευρά του. Συνήθως η θωράκιση δεν ακουμπά απευθείας στον πυθμένα αλλά πάνω σε μια στρώση ποδός. Η στρώση αυτή, που κατασκευάζεται με ελαφρύτερα από την θωράκιση υλικά, έχει σκοπό την συγκράτηση της θωράκισης και την προστασία της κατασκευής από την διάβρωση

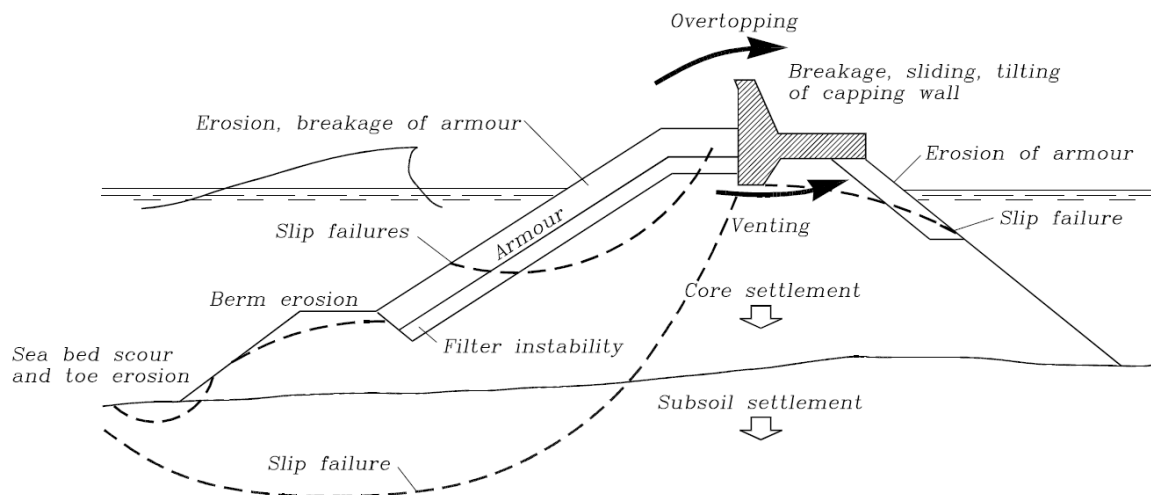


**Εικόνα 3. Ενδεικτική τυπική διατομή κυματοθραύστη με μορφή αναχώματος (Andersen, 2006).**

Για την προστασία αμμοδών παραλιών πολλές φορές η στέψη των κυματοθραυστών μορφής αναχώματος μπορεί βρίσκεται και κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Οι ύφαλοι αυτοί κυματοθραύστες δεν μεταβάλουν το τοπίο και έτσι επιτυγχάνεται καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα . Μπορεί όμως να εγκυμονούν κινδύνους για την ναυσιπλοΐα, όταν η στέψη τους βρίσκεται σε μικρό βάθος και δεν γίνουν εγκαίρως αντιληπτοί.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου κυματοθραύστη είναι η ανθεκτικότητα του, το φθινό κόστος και η διαθεσιμότητα των υλικών κατασκευής, η εύκολη προσαρμογή του σε μεταβαλλόμενη βαθυμετρία και σε καθιζήσεις του εδάφους, η λειτουργία του ακόμη και σε

περιπτώσεις μερικής καταστροφής. Βασικά μειονεκτήματα του είναι ο μεγάλος όγκος υλικών για την κατασκευή του και ότι δεν είναι κατάλληλος σε πολύ μαλακά εδάφη (Massie, 1976).



Εικόνα 4. Πιθανοί τρόποι αστοχίας ενός κυματοθραύστη μορφής αναχώματος (Andersen, 2006).



Εικόνα 5. Τεχνητοί ογκόλιθοι από σκυρόδεμα, τύπου Xbloc, στο πρηνές κυματοθραύστη (Λήψη από <https://www.xbloc.com/our-blocks/xbloc>).



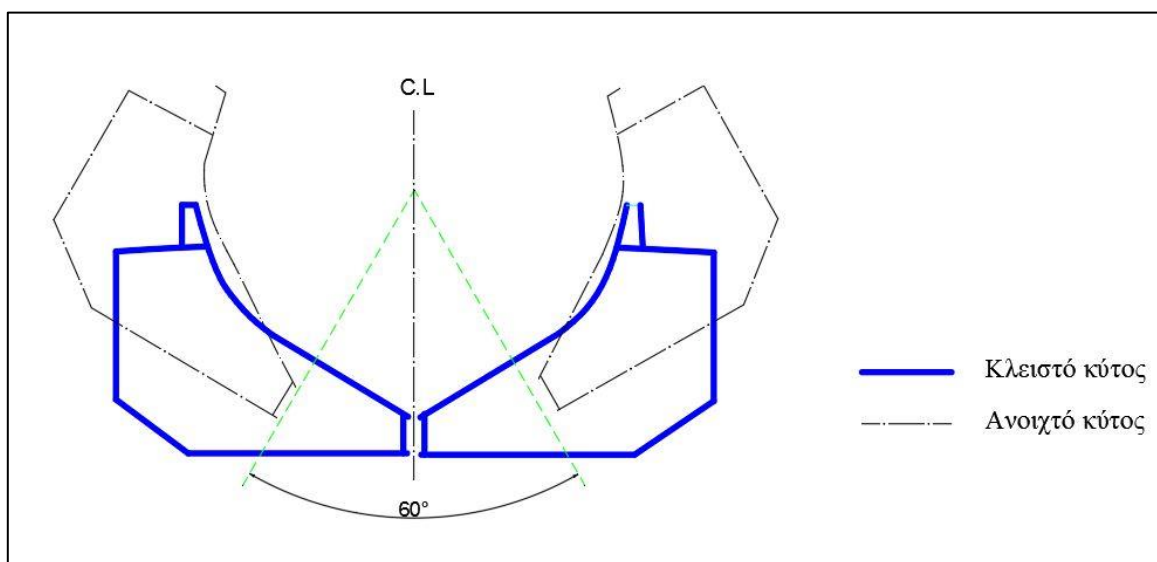


### 3 Μεθοδολογία - εξοπλισμός

#### 3.1 Πλωτός εξοπλισμός

##### 3.1.1 Γενικά

Ο πλωτός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στο έργο ήταν αυτοκινούμενες φορτηγίδες-κλαπέ οι οποίες χρησιμοποιούνται στην θαλάσσια μεταφορά υλικών (κυρίως προϊόντα θαλάσσιων εκσκαφών). Το κύτος των σκαφών αυτών είναι κατασκευασμένο με διπλά τοιχώματα και αποτελείται από δυο τμήματα που σχηματίζουν μια χοάνη μέσα στην οποία εναποτίθεται υλικό. Τα τμήματα αυτά εφάπτονται κατά μήκος του διαμήκους άξονα του σκάφους και συγκρατούνται ενωμένα με τη βοήθεια μεταλλικών αρθρώσεων στο πάνω μέρος τους και υδραυλικών εμβόλων στο κάτω. Με τα έμβολα αυτά το κύτος είναι δυνατό να χωρίζεται στα δυο, στο κάτω μέρος και σε όλο του το μήκος του και έτσι το υλικό που μεταφέρεται να απελευθερώνεται στην θάλασσα. Οι υδροστατικές δυνάμεις που ασκούνται στη φορτηγίδα κατά τα στάδια ανοίγματος κύτους, αδειάσματος του υλικού και κλεισίματος του κύτους δεν επιτρέπουν τη βύθισή της. Επίσης λόγω του μικρού βυθίσματος που έχει η φορτηγίδα χωρίς φορτίο, δεν εγκλωβίζεται θαλασσινό νερό εντός της χοάνης κατά το στάδιο του κλεισίματος.



Σχήμα 1. Τομή φορτηγίδας κλαπέ.



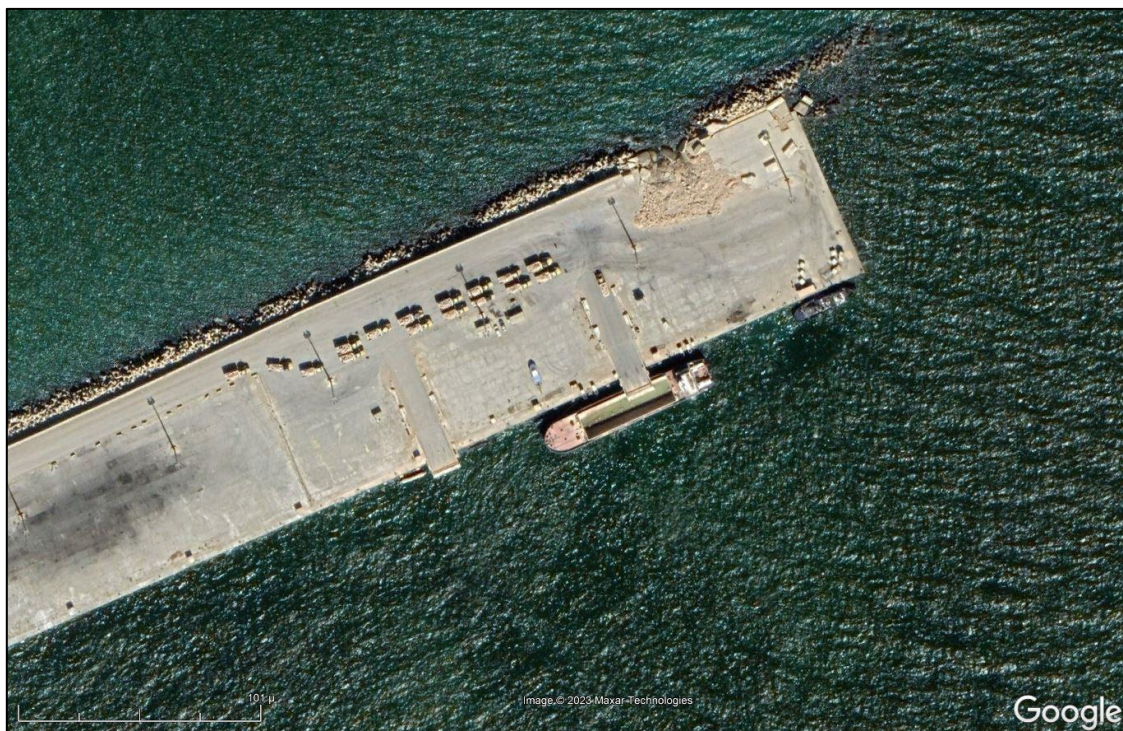
**Εικόνα 6. Φορτηγίδα- κλαπέ με ανοιχτό κύτος**  
(Λήψη από <https://www.nauticexpo.com/prod/mavi-deniz/product-32743-535397.html>).

### **3.1.2 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός.**

Στην κατασκευή του έργου χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 4 φορτηγίδες με διαφορετικές χωρητικότητες χοάνης (χρησιμοποιήθηκαν επίσης και ρυμουλκά για υποστηρικτικούς όμως λόγους). Αυτά ήταν η MARIANNA XX χωρητικότητας 1700 m<sup>3</sup>, η MARIANNA XXVI 1120 m<sup>3</sup> και οι MARIANNA XIII και XIV με 380 m<sup>3</sup>. Οι δυο πρώτες χρησιμοποιήθηκαν στα αρχικά στάδια κατασκευής, που απαιτείται «γέμισμα» του πυρήνα της διατομής με αρκετό υλικό ενώ οι δυο μικρότερες κυρίως στο τελικό στάδιο, που απαιτούνται συμπληρώματα ή στρώσεις υλικών μικρού πάχους.

Οι κατηγορίες υλικών λιθορριπής που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργολαβίας ήταν τρεις. Η πρώτη κατηγορία περιλάμβανε υλικά βάρους 0 - 300 Kg, η δεύτερη υλικά βάρους 300-1000 Kg και η τρίτη υλικά βάρους 1-3 tn. Για την φόρτωση υλικών της πρώτης κατηγορίας στις φορτηγίδες κατασκευάστηκαν δύο ειδικές ράμπες ώστε να μπορεί να γίνεται απευθείας με ανατροπές από φορτηγά και να επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου φόρτωσης. Για την δεύτερη και Τρίτη κατηγορία όμως χρησιμοποιήθηκαν εκσκαφείς με ανεστραμμένο κάδο ή κυκλική αρπάγη καθώς η πτώση υλικών με αυτό το βάρος, έστω και από μικρό ύψος, μπορεί να προκαλέσει ζημιά στην χοάνη της φορτηγίδας.





Εικόνα 7. Δορυφορική εικόνα του χώρου φόρτωσης από το google earth.



Εικόνα 8. Φόρτωση υλικών κατηγορίας 0 - 300 Kg.





Εικόνα 9. Φόρτωση υλικών κατηγορίας 300-1000 Kg.

## 3.2 Το σύστημα καθοδήγησης

### 3.2.1 Γενικά – αρχές λειτουργίας

Το σύστημα καθοδήγησης μιας φορτηγίδας αποτελεί ίσως την απλούστερη περίπτωση εγκατάστασης συστήματος καθοδήγησης και αυτό διότι είναι απαραίτητη μόνο η γνώση της θέσης της στο σύστημα προβολής σε δύο διαστάσεις καθώς και η διεύθυνση της σε σχέση με το Βορρά (η τρίτη διάσταση είναι πάντοτε η επιφάνεια της θάλασσας). Δεν απαιτούνται δηλαδή αισθητήρες ή όργανα όπως σε άλλου τύπου μηχανήματα (π.χ. γερανό, βυθοκόρο) με συνέπεια το κόστος και ο χρόνος τοποθέτησης να είναι μικρά. Επίσης το λογισμικό είναι αρκετά απλό στη χρήση του και μόνο η ρύθμιση του παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες για κάποιον μη εξειδικευμένο μηχανικό. Η λογική του συστήματος είναι ότι αν κάθε στιγμή

μπορούμε να υπολογίσουμε την απόλυτη θέση δύο σταθερών σημείων πάνω στη φορτηγίδα (στο προβολικό σύστημα) και ταυτόχρονα γνωρίζουμε τη γεωμετρία της, μπορούμε να προβάλλουμε την κάτοψή της σε μια ψηφιακή οριζοντιογραφία ή χάρτη στην οθόνη ενός υπολογιστή σε πραγματικό χρόνο (γίνεται η παραδοχή ότι η κατά μήκος και η εγκάρσια κλίση του σκάφους είναι μικρές και δεν υπάρχει αλλοίωση της κάτοψης). Στην περίπτωση δε που η φορτηγίδα κινείται, μπορούμε να βλέπουμε ταυτόχρονα να κινείται και η κάτοψή της πάνω στην οριζοντιογραφία. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται από την τεχνική δορυφορικού σχετικού κινηματικού προσδιορισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο (Real Time Kinematic).

Κανονικά η θέση ενός μόνο δέκτη στο χώρο θα μπορούσε να υπολογιστεί σαν τομή τριών σφαιρών, με κέντρα τις θέσεις των δορυφόρων οι οποίοι μπορούν να θεωρηθούν σαν τριγωνομετρικά σημεία, δεδομένου ότι γνωρίζουμε τις θέσεις των δορυφόρων τη στιγμή που εκπέμπουν ένα σήμα και τις ακτίνες τους που είναι οι αποστάσεις του δέκτη από κάθε δορυφόρο. Οι θέσεις των δορυφόρων παρέχονται από τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού στο εκπεμπόμενο σήμα ενώ η απόσταση μπορεί να υπολογιστούν μετρώντας το χρόνο που κάνει το σήμα να φτάσει από τον δορυφόρο στο δέκτη. Θα πρέπει απλά να επιλυθεί ένα σύστημα τριών εξισώσεων χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$(X-X_{\delta})^2+(Y-Y_{\delta})^2+(Z-Z_{\delta})^2=\rho^2 \text{ με } \rho=c*(t-t_{\delta}-\Delta T) \quad (1)$$

Όπου:

X, Y, Z: οι συντεταγμένες του δέκτη

$X_{\delta}$ ,  $Y_{\delta}$ ,  $Z_{\delta}$ : οι συντεταγμένες του δορυφόρου

$\rho$ : η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου - δέκτη

c: η ταχύτητα του φωτός

t: ο χρόνος λήψης του σήματος

$t_{\delta}$ : 0 χρόνος εκπομπής του σήματος

$\Delta T$ : η διαφορά των χρονομέτρων δορυφόρου και δέκτη

Επειδή ο όρος  $\Delta T$  δεν είναι γνωστός και έχουμε στο σύστημα εξισώσεων τέσσερις αγνώστους θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και ένας τέταρτος δορυφόρος και να προστεθεί άλλη μια εξίσωση. Ακόμη και έτσι όμως, αντί της πραγματικής γεωμετρικής απόστασης, λόγω χαμηλής ακρίβειας στη μέτρηση του χρόνου, μη συγχρονισμού των ρολογιών δορυφόρου δέκτη,

αλλαγών στην ταχύτητα διάδοσης του κύματος κ.α., υπολογίζεται μια απόσταση που διαφέρει αρκετά από την πραγματική και είναι γνωστή ως ψευδοαπόσταση. Η εξίσωση που συνδέει την ψευδοαπόσταση με την πραγματική γεωμετρική απόσταση είναι:

$$P = \rho + c * (dt-dT) + d_{ion} + d_{trop} + e \quad (2)$$

Όπου:

P: η μετρημένη ψευδοαπόσταση

$\rho$ : η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη

c: η ταχύτητα του φωτός

dt: η απόκλιση του χρονομέτρου του δορυφόρου από τον χρόνο GPS

dT: η απόκλιση του χρονομέτρου του δέκτη από τον χρόνο GPS

$d_{ion}$ : η καθυστέρηση (του σήματος) κατά την διαδρομή του στην ιονόσφαιρα

$d_{trop}$ : η καθυστέρηση (του σήματος) κατά την διαδρομή του στην τροπόσφαιρα

e: λοιπά σφάλματα που επηρεάζουν το δορυφόρο, το δέκτη ή/και το σήμα

Αντί της ψευδοαπόστασης για τοπογραφικούς σκοπούς χρησιμοποιείται μια άλλη προσέγγιση, η μέτρηση της φάσης του φέροντος σήματος που είναι πιο ακριβής. Η παραπάνω εξίσωση στην περίπτωση αυτή γίνεται:

$$\Phi = \rho * (f / c) + (dt-dT) * f + N - d_{ion} + d_{trop} + e \quad (3)$$

Όπου:

$\Phi$ : η παρατήρηση φάσης,

$\rho$ : η γεωμετρική απόσταση δορυφόρου-δέκτη

c: η ταχύτητα του φωτός

f: η συχνότητα του φέροντος κύματος

dt: η απόκλιση του χρονομέτρου του δορυφόρου από τον χρόνο GPS

dT: η απόκλιση του χρονομέτρου του δέκτη από τον χρόνο GPS

N: ο αρχικός άγνωστος αριθμός (ακέραιων) κύκλων

$d_{ion}$ : καθυστέρηση (του σήματος) κατά την διαδρομή του στην ιονόσφαιρα

$d_{\text{trop}}$ : καθυστέρηση (του σήματος) κατά την διαδρομή του στην τροπόσφαιρα

e: λοιπά σφάλματα που επηρεάζουν το δορυφόρο, το δέκτη ή/και το σήμα

Το πρόβλημα στην περίπτωση αυτή είναι ο άγνωστος αριθμός ακέραιων κύκλων του σήματος από τον δορυφόρο ως τον δέκτη.

Αυτό λύνεται με την τεχνική Real Time Kinematic (RTK), που αποτελεί τεχνική δορυφορικού εντοπισμού υψηλής ακρίβειας σε πραγματικό χρόνο, κατά την οποία πραγματοποιούνται μετρήσεις ψευδοαποστάσεων και φάσης στο φέρον σήμα δορυφόρων συστημάτων GNSS. Στην τεχνική RTK χρησιμοποιείται ένας σταθερός δέκτης (base) ο οποίος παραμένει ακίνητος πάνω σε σημείο γνωστών συντεταγμένων και ένας ή αρκετοί κινητοί δέκτες (rover) οι οποίοι παραμένουν ακίνητοι ή κινούνται στο χώρο. Ο σταθερός δέκτης πραγματοποιώντας μετρήσεις στο εκπεμπόμενο σήμα των δορυφόρων και γνωρίζοντας τις πραγματικές συντεταγμένες του σημείου που βρίσκεται, μπορεί να υπολογίζει διαφορικές διορθώσεις, τις οποίες στη συνέχεια μεταδίδει, μέσω μιας ασύρματης σύνδεσης, στους κινητούς δέκτες. Οι κινητοί δέκτες χρησιμοποιώντας τις διορθώσεις αυτές αλλά και τις δικές τους μετρήσεις μπορούν να υπολογίσουν το διάνυσμα  $[\Delta X, \Delta Y, \Delta Z]$  από τον σταθερό δέκτη και επομένως και τις συντεταγμένες του σημείου που βρίσκονται, σε πραγματικό χρόνο. Η ακρίβεια της τεχνικής αυτής είναι της τάξης των μερικών εκατοστών σε αποστάσεις μέχρι 20 χιλιόμετρα.

### 3.2.2 Χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός καθοδήγησης

Η επιλογή του συστήματος που τοποθετήθηκε έγινε με κριτήρια κόστους, χαρακτηριστικών και ελάχιστων δυνατοτήτων. Ο εξοπλισμός που περιλάμβανε είναι ο παρακάτω:

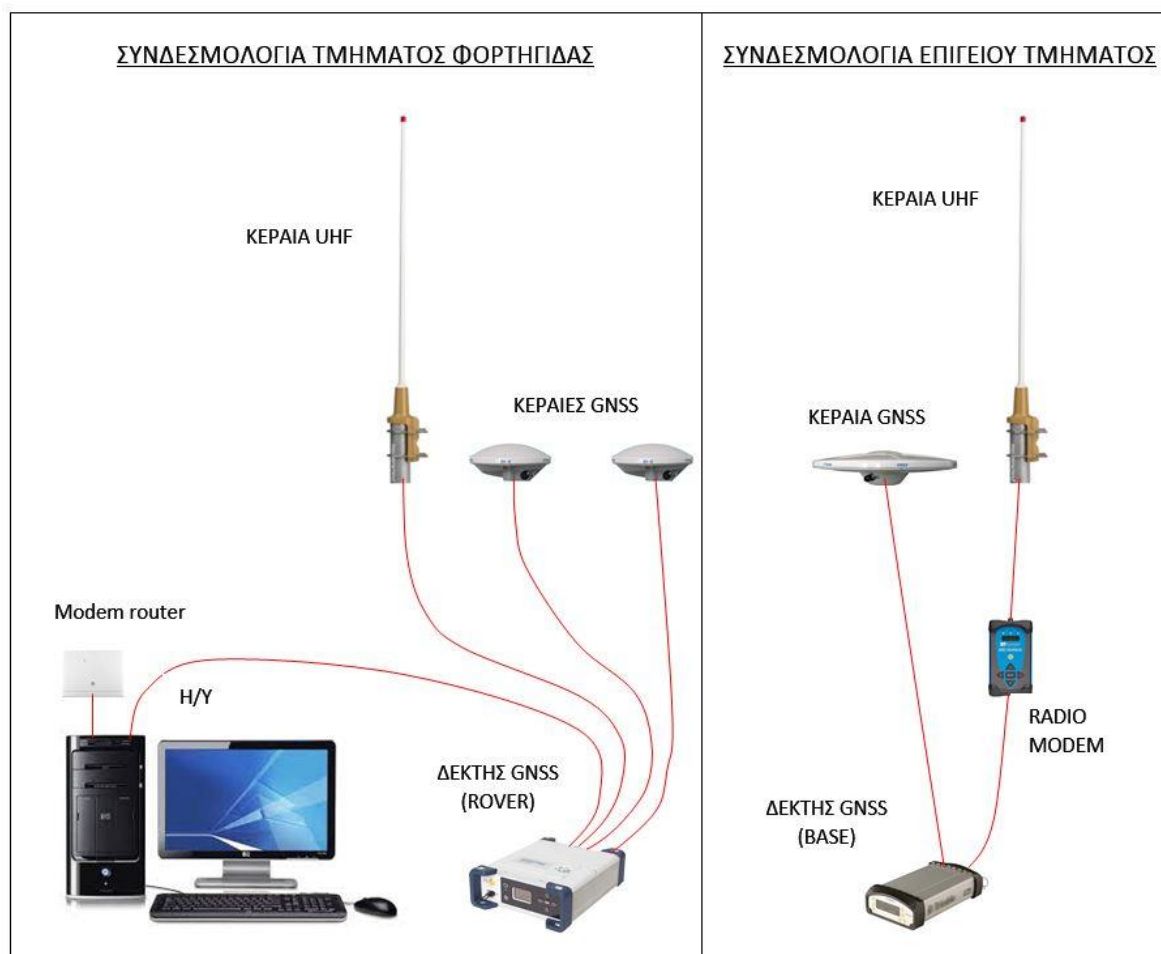
1. Ένα δέκτη Trimble R9s σαν base με κεραία Zephyr 3, εγκατεστημένο μόνιμα στην ξηρά.
2. Ένα δέκτη Spectra Precision SP90m με εσωτερικό radio και δυο κεραίες SPGA rover σε κάθε φορηγίδα. Η οριζοντιογραφική ακρίβεια (RMS) που δίνει ο κατασκευαστής για τον συγκεκριμένο δέκτη σε εφαρμογές RTK είναι 8 mm+1ppm και η υψομετρική 15mm+1ppm. Επίσης η γωνιακή ακρίβεια (RMS) μεταξύ των κεραίων είναι 0,09° για απόσταση μεταξύ τους 2 μέτρα και 0,02° για απόσταση 10 μέτρα
3. Ένα radio modem Pacific Crest ADL Vantage 430-470 MHz για την εκπομπή των διορθώσεων

4. Κεραίες UHF ναυτικού τύπου (marine) Procom CXL70-3LW/h σε κάθε φορτηγίδα και στον σταθμό ξηράς.
5. Έναν Η/Υ με επεξεργαστή intel i3 3,6 GHz, 16 GB RAM, κάρτα γραφικών Geforce GTX 1050 Ti , οθόνη 24", πληκτρολόγιο και ποντίκι σε κάθε φορτηγίδα
6. Το λογισμικό καθοδήγησης Teledyne PDS rock dumping and placement εγκατεστημένο στους Η/Υ των φορτηγίδων
7. Huawei B315s-22 LTE CPE Wireless 4G Modem Router
8. Κατάλληλα καλώδια για την σύνδεση των διαφόρων τμημάτων του συστήματος μεταξύ τους καθώς και τα καλώδια τροφοδοσίας των συσκευών

Μπορούμε να πούμε ότι αποτελείται από δύο τμήματα. Το επίγειο και αυτό που βρίσκεται πάνω στην φορτηγίδα. Στο επίγειο τμήμα η κεραία GNSS είναι τοποθετημένη σε εξωτερικό χώρο, σε σημείο με γνωστές συντεταγμένες (τριγωνομετρικό σημείο ή στάση). Το radio modem χρησιμοποιείται για να στέλνει τις διορθώσεις στον δέκτη rover. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το τμήμα αυτό δεν είναι απαραίτητο στην περίπτωση που στην περιοχή λειτουργεί δίκτυο παροχής διορθώσεων με συνδρομή ή υπάρχει άλλος σταθμός παροχής διορθώσεων (π.χ. εργοταξιακός) και ταυτόχρονα υπάρχει κάλυψη από δίκτυο GSM. Στην περίπτωση αυτή οι διορθώσεις μπορούν να λαμβάνονται μέσω διαδικτύου χρησιμοποιώντας μια κάρτα SIM που τοποθετείται στο εσωτερικό του δέκτη rover ή από το modem router αφού προηγουμένως συνδεθεί με το GPS.

Στο τμήμα που βρίσκεται πάνω στη φορτηγίδα οι κεραίες GNSS είναι τοποθετημένες σε δυο βάσεις, σε απόσταση μεταξύ τους. Οι κεραίες αυτές συνδέονται πάνω στον δέκτη SP90m που έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί δυο κεραίες. Για τις βάσεις αυτές απαιτείται ο προσδιορισμός της θέσης της μιας από αυτές καθώς και του αζιμούθιου της ευθείας που ορίζουν όπως περιγράφεται στις αρχές λειτουργίας του συστήματος στην προηγούμενη παράγραφο. Επίσης εκτός από τον υπολογιστή με εγκατεστημένο το λογισμικό καθοδήγησης χρησιμοποιείται και ένα modem το οποίο είναι απαραίτητο για τον απομακρυσμένο έλεγχο του υπολογιστή σε περίπτωση βλάβης, την μεταφορά αρχείων δεδομένων και την ρύθμιση του λογισμικού, χωρίς να απαιτείται η φυσική παρουσία μηχανικού. Η συνδεσμολογία των δυο τμημάτων είναι απλή και παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.





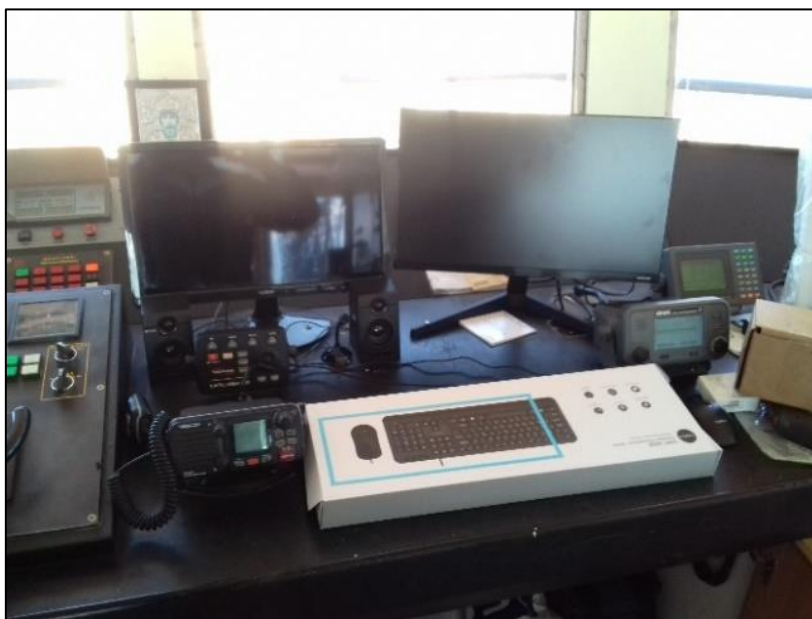
Εικόνα 10. Συνδεσμολογία συστήματος καθοδήγησης.

### 3.2.3 Εγκατάσταση του συστήματος καθοδήγησης

Πριν την εγκατάσταση του συστήματος καθοδήγησης το πρώτο που εξετάστηκε ήταν οι διαθέσιμες πηγές τροφοδοσίας του συστήματος με ηλεκτρικό ρεύμα. Παρόλο που οι δέκτες μπορούν να λειτουργούν με συνεχές ρεύμα ή μπαταρία και ακόμη στη θέση του H/Y να χρησιμοποιηθεί ένα τάμπλετ με windows και μπαταρία, τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τον σχεδιασμό του συστήματος με σταθερή πηγή τροφοδοσίας εναλλασσόμενου ρεύματος 220V είναι αντιληπτά. Είναι ξεκάθαρο επομένως ότι το θέμα της τροφοδοσίας θα πρέπει να έχει επιλυθεί πριν τον σχεδιασμό και την παραγγελία του συστήματος. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ρεύμα 220V που είτε υπήρχε διαθέσιμο στο χώρο εγκατάστασης του εξοπλισμού είτε εξασφαλίστηκε με την τοποθέτηση inverter.

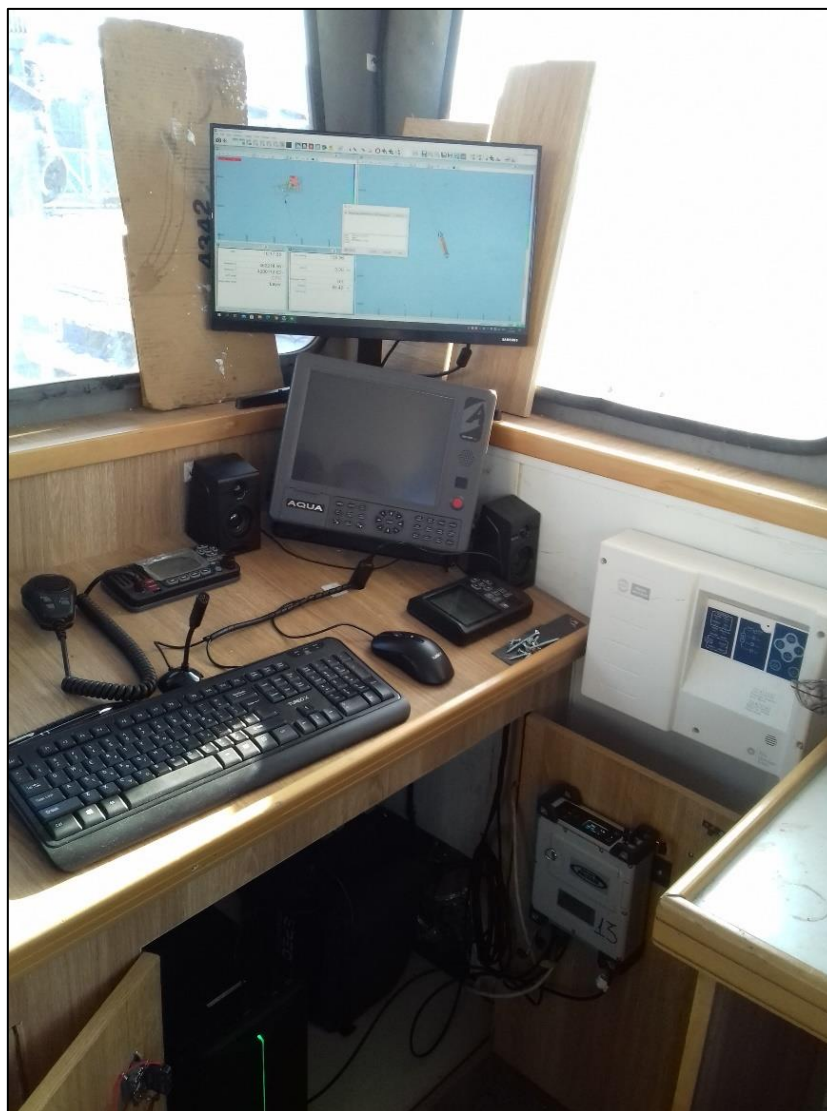
Μια άλλη σημαντική παράμετρος που αφορά το σχεδιασμό είναι ο διαθέσιμος χώρος και η θέση τοποθέτησης κυρίως της οθόνης αλλά και του υπόλοιπου εξοπλισμού καθώς και του

τρόπου διέλευσης των καλωδίων εντός και εκτός της γέφυρας. Σε κάποιες φορηγίδες πάνω στην κονσόλα ελέγχου του πλοίου, στην οποία θα έπρεπε να τοποθετηθούν τουλάχιστον η οθόνη, το ηλεκτρολόγιο και το ποντίκι (για την άμεση εποπτεία της θέσης και τον χειρισμό από τον κυβερνήτη), δεν υπήρχε αρκετός χώρος λόγω του ναυτιλιακού εξοπλισμού. Στην περίπτωση αυτή δημιουργήθηκε ο κατάλληλος χώρος και η υποδομή (μπρίζες, βάσεις στερέωσης, ανεμιστηράκια αερισμού κ.τ.λ.). Η συμμετοχή ενός ηλεκτρολόγου στα παραπάνω στάδια είναι εντελώς απαραίτητη λόγω και της επικινδυνότητας των εργασιών.



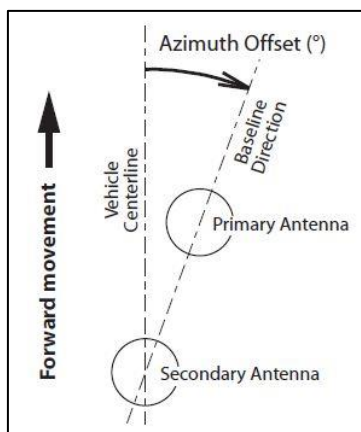
**Εικόνα 11. Το σύστημα κατά την στιγμή ολοκλήρωσης της συνδεσμολογίας στη MARIANNA XX.**



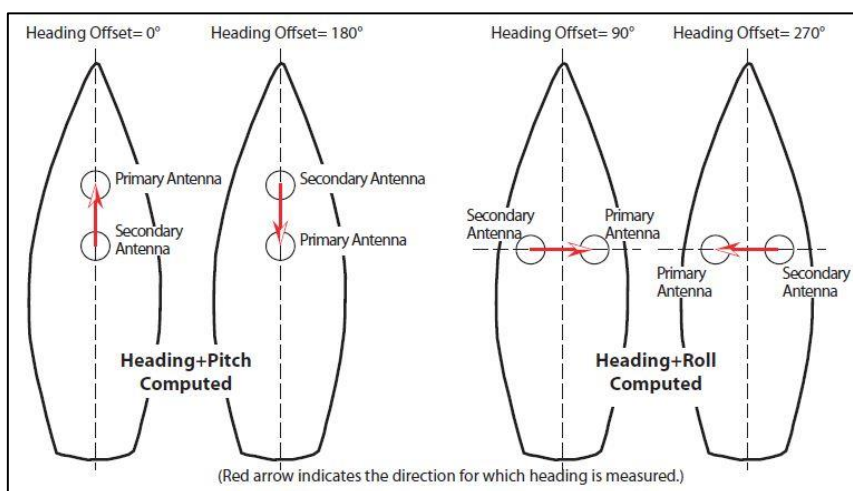


**Εικόνα 12. Το σύστημα με εγκατεστημένο το λογισμικό στη MARIANNA XIII.**

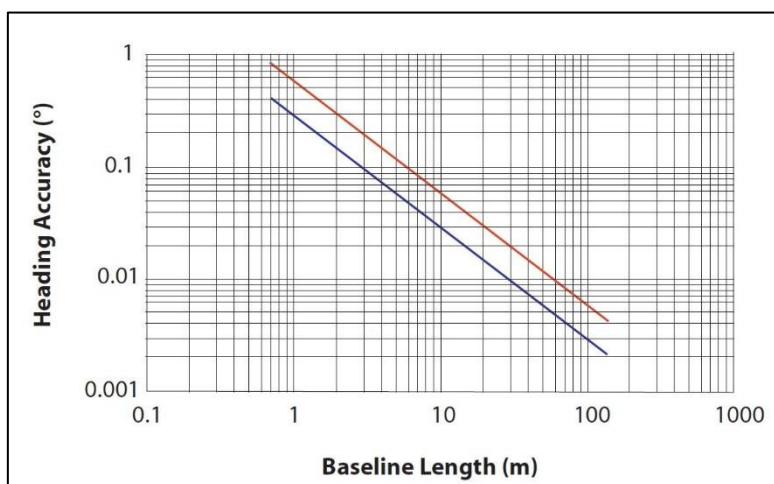
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι δυο κεραίες GNSS που βρίσκονται πάνω στις φορτηγίδες βιδώνονται πάνω σε βάσεις που πρέπει να βρίσκονται σε κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους. Οι βάσεις αυτές σε όλες τις περιπτώσεις τοποθετήθηκαν πάνω από τη γέφυρα και μακριά από εμπόδια ώστε να μειώνεται το μήκος των καλωδιώσεων και το φαινόμενο της πολυανάκλασης (multipath) του σήματος των δορυφόρων στις γύρω επιφάνειες, που έχει σαν αποτέλεσμα εσφαλμένους υπολογισμούς θέσης. Από τις κεραίες αυτές η μία θεωρείται πρωτεύουσα (primary) και η άλλη δευτερεύουσα (secondary). Ο τρόπος υπολογισμού της διεύθυνσης της φορτηγίδας από το GPS και το σφάλμα στον υπολογισμό της σε συνάρτηση με την απόσταση των βάσεων δίνονται στα επόμενα διάγραμμα (Trimble Inc, 2017, σελ.28-30).



Σχήμα 2. Υπολογισμός γωνιακής απόκλισης κεραιών GNSS και άξονα φορτηγίδας (Trimble Inc)



Σχήμα 3. Απόκλιση της διεύθυνσης και πραγματοποιούμενοι υπολογισμοί για διάφορες θέσεις των κεραιών GNSS (Trimble Inc).



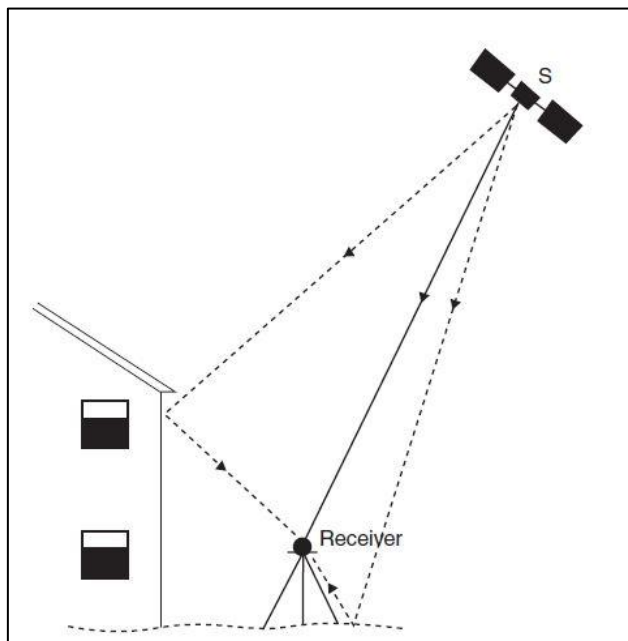
Σχήμα 4. Σφάλμα στον υπολογισμό της διεύθυνσης ανάλογα με την απόσταση των βάσεων (Μπλε γραμμή χωρίς σφάλματα πολυανάκλασης, κόκκινη γραμμή με σφάλματα πολυανάκλασης, Trimble Inc).

Όπως προκύπτει από τα σχήματα 2 και 3, αν η δευτερεύουσα και η πρωτεύουσα κεραία τοποθετηθούν παράλληλα στον άξονα της φορτηγίδας με την πρωτεύουσα κοντύτερα στην πλώρη, τότε η απόκλιση της διεύθυνσης που δίνει ο δέκτης με την πραγματική θα είναι μηδέν. Σε κάθε άλλη περίπτωση, υπάρχει γωνιακή απόκλιση μεταξύ των κεραιών και του άξονα, που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και να εισαχθεί είτε στις ρυθμίσεις του δέκτη είτε στις ρυθμίσεις του λογισμικού καθοδήγησης, για να γίνεται διόρθωση της διεύθυνσης. Από το σχήμα 3 προκύπτει επίσης ότι εκτός από την διεύθυνση, ανάλογα με την θέση των κεραιών, μπορεί να υπολογιστεί η διαμήκη ή η εγκάρσια κλίση της φορτηγίδας, που στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν μας ενδιαφέρουν. Η τοποθέτηση των κεραιών σε όλες της φορτηγίδες έγινε σε διεύθυνση περίπου κάθετη στον άξονά τους λόγω εμποδίων και περιορισμών στην εγκατάσταση. Το απόλυτο υψόμετρο που τοποθετήθηκαν σε κάθε φορτηγίδα ήταν περίπου το ίδιο ενώ η απόστασης μεταξύ τους (baseline) έγινε βάση του σχήματος 4.

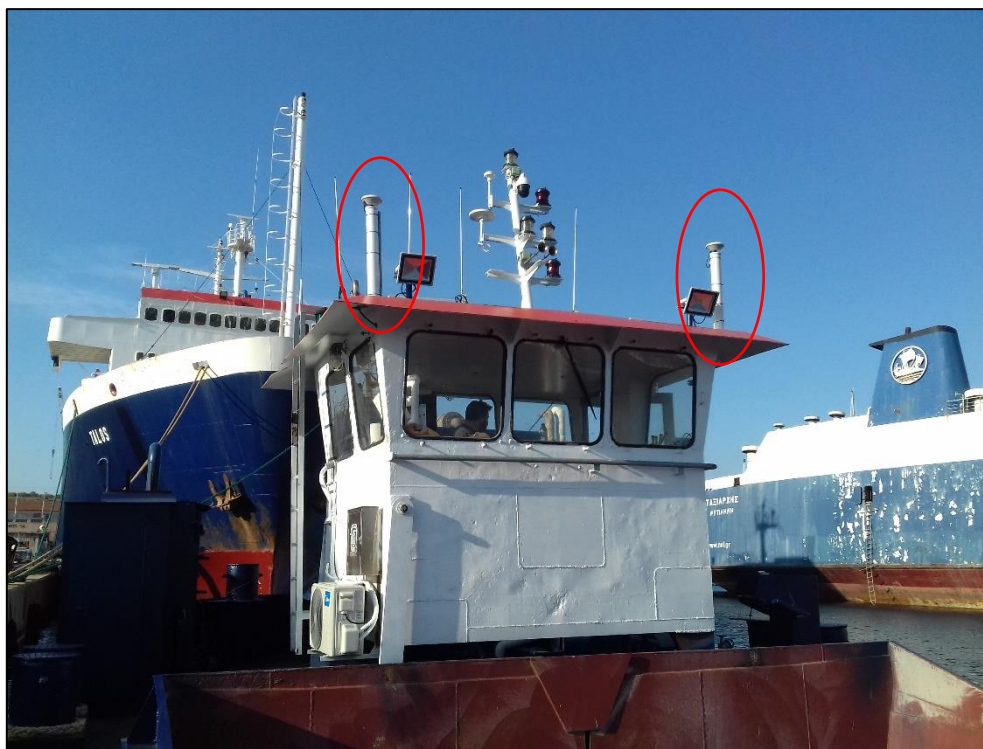
Όπως φαίνεται στο σχήμα 4 η ακρίβεια στον υπολογισμό της διεύθυνσης μεγαλώνει όσο μεγαλώνει και η απόσταση των κεραιών. Παρόλα αυτά οι μεγάλες αποστάσεις μπορεί να οδηγήσουν σε φαινόμενα διαφορικής πολυανάκλασης (differential multipath) μεταξύ των κεραιών και επομένως σφάλματα στον υπολογισμό της διεύθυνσης. Στην περίπτωση αυτή ο χειριστής του συστήματος βλέπει στην οθόνη του απότομες μεταβολές της διεύθυνσης της φορτηγίδας. Γι' αυτό στο εγχειρίδιο συστήνεται η απόσταση να μην ξεπερνά τα 5 μέτρα αν και αναφέρεται ότι σε ένα κινούμενο μέσο η επίδραση της πολυανάκλασης είναι περιορισμένη. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι τα σφάλματα του διαγράμματος είναι τυπικά σφάλματα RMS (είναι ίσα ή μικρότερα στο 67% περίπου των μετρήσεων). Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν με συντελεστή 1,96. Αυτό σημαίνει ότι για απόσταση κεραιών 3 μέτρα με επίδραση της πολυανάκλασης το μέγιστο σφάλμα θα είναι  $1,96 \cdot 0,2 = 0,392^\circ$  που σε απόσταση περίπου 40 μέτρα από τις κεραιές μεταφράζεται σε γραμμικό σφάλμα περίπου 27 εκατοστά. Το αντίστοιχο σφάλμα χωρίς την επίδραση της πολυανάκλασης είναι μόλις 13 εκατοστά.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω της ύπαρξης κραδασμών κατά τη διάρκεια της απόρριψης του υλικού, οι κεραιές δεν θα πρέπει να τοποθετούνται σε ψηλές ή εύκαμπτες βάσεις, εφόσον το επιτρέπουν οι συνθήκες, για την αποφυγή ταλαντώσεων και την καταστροφής τους. Επίσης λόγω του διαβρωτικού θαλάσσιου περιβάλλοντος θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα υλικά, να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας των συνδέσεων και επίσης να γίνεται

τακτικός έλεγχος και συντήρηση του εξοπλισμού. Εκτός από τις κεραίες GNSS πάνω στην γέφυρα τοποθετήθηκαν και οι κεραίες UHF (εικόνα 14).



Σχήμα 5. Το φαινόμενο της πολυανάκλασης σήματος (Schofield & Breach, 2007, σελ. 345).

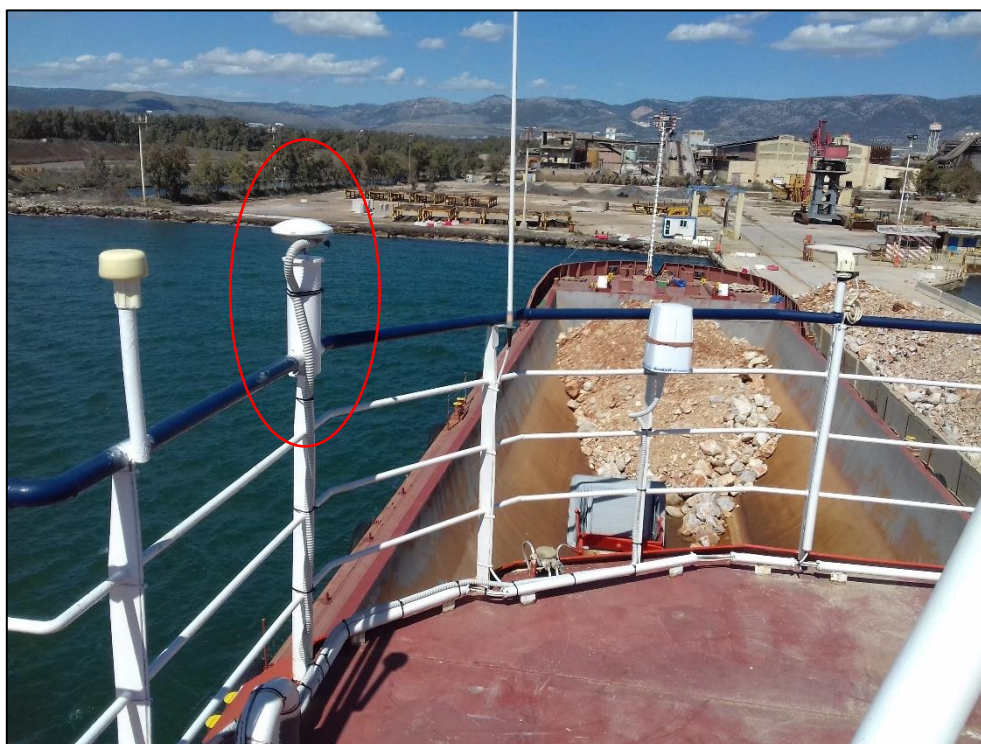


Εικόνα 13. Άποψη της γέφυρας φορτηγίδας με εγκατεστημένες τις κεραίες GNSS.



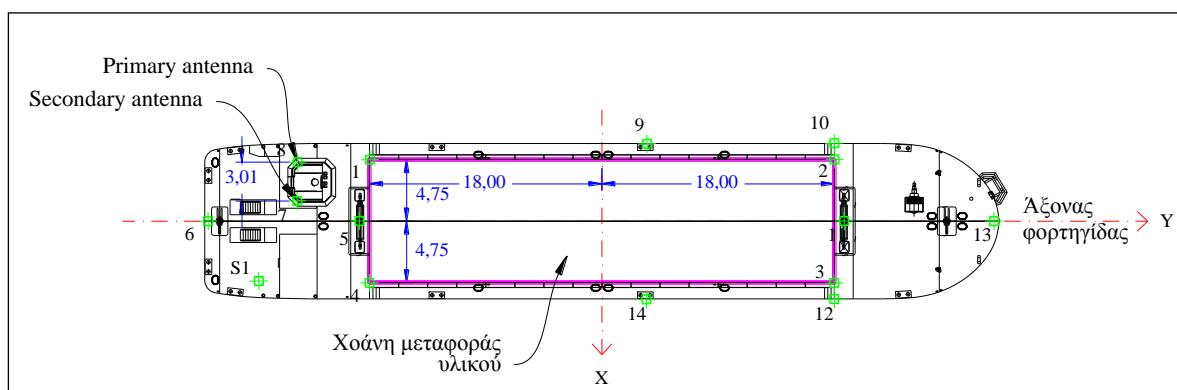


Εικόνα 14. Πλάγια όψη της γέφυρας με εγκατεστημένες τις κεραίες GNSS. Στα δεξιά διακρίνεται τοποθετημένη και η κεραία UHF.



Εικόνα 15. Εναλλακτικός τρόπος τοποθέτησης της κεραίας GNSS σε περιβάλλον με εμπόδια.

Μετά την τοποθέτηση των βάσεων απαιτείται αποτύπωση με γεωδαιτικό σταθμό (total station) για την δημιουργία της κάτοψης της φορτηγίδας και τον υπολογισμό της γωνιακής απόκλισης της ευθείας που ορίζουν οι κεραίες GNSS με τον άξονα της. Επειδή για όλες τις φορτηγίδες υπήρχε ήδη κάτοψη σε ψηφιακή μορφή, έγινε αποτύπωση μόνο των βάσεων, των ορίων της χοάνης και χαρακτηριστικών σημείων ώστε να είναι δυνατή η ταύτιση των σημείων της αποτύπωσης με την κάτοψη. Για να υπάρχει εσωτερική ακρίβεια στις μετρήσεις ο γεωδαιτικός σταθμός τοποθετήθηκε και οριζοντιώθηκε σε σημείο πάνω στην φορτηγίδα και οι μετρήσεις έγιναν σε ημέρα με χαμηλό κυματισμό. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται για μια από τις φορτηγίδες το σημείο που στήθηκε ο γεωδαιτικός σταθμός (S1), τα σημεία που μετρήθηκαν, η απόσταση μεταξύ των κεραιών και οι αποστάσεις των γωνιών της χοάνης ως προς την αρχή του σύστημα αξόνων. Η κάτοψη τοποθετείται έτσι ώστε να έχει σαν άξονα Y τον ένα από τους άξονες της χοάνης και ταυτόχρονα και άξονα της φορτηγίδας, ενώ σαν άξονα X των άλλο άξονα της χοάνης. Οι συντεταγμένες των κεραιών και των γωνιών της χοάνης που ζητείται να εισαχθούν, όπως θα δούμε στην συνέχεια, στο λογισμικό καθοδήγησης, αναφέρονται στο σύστημα αυτό. Επίσης το σύστημα αυτό είναι και το σύστημα του ψηφιακού αρχείου DXF με την κάτοψη που δημιουργείται.



Σχήμα 6. Κάτοψη μιας από τις φορτηγίδες με τα σημεία αποτύπωσης  
(Με κοκκινο-μωβ χρώμα απεικονίζονται τα όρια της χοάνης).

### 3.2.4 Ρύθμιση των δεκτών GNSS

Το επόμενο βήμα στην διαδικασία είναι η παραμετροποίηση των δεκτών GNSS και του λογισμικού καθοδήγησης (μετά την εγκατάσταση του στον H/Y). Οι δέκτες SP90m που χρησιμοποιήθηκαν διαθέτουν ενσωματωμένο στο firmware τους περιβάλλον ρυθμίσεων βασισμένο στην γλώσσα HTML το οποίο στο εγχειρίδιο των δεκτών αναφέρεται ως Web Server. Αυτό σημαίνει ότι συνδέοντας τον δέκτη με έναν H/Y χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο

LAN ή εναλλακτικά WiFi και έναν περιηγητή ιστού μπορούμε να κάνουμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις. Αυτές αφορούν τις κεραίες που χρησιμοποιούνται, τον τρόπο λειτουργίας του rover (στην περίπτωση μας dual RTK), τον υπολογισμό της διεύθυνσης (heading) των κεραιών, του εσωτερικού radio και την εξαγόμενη πληροφορία προς τον H/Y. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η γωνιακή απόκλιση της διεύθυνσης των κεραιών από τον άξονα της φορηγίδας που βρήκαμε από την αποτύπωση μπορεί να εισαχθεί είτε στον Web Server είτε στο λογισμικό καθοδήγησης.

Εικόνα 16. Η οθόνη ρυθμίσεων που αφορούν τις κεραίες GNSS στον Web Server των δεκτών rover.

Εικόνα 17. Η οθόνη ρυθμίσεων που αφορούν την εξαγόμενη πληροφορία στον H/Y.

Παρόμοιες ρυθμίσεις γίνονται και στον δέκτη base στον οποίο απαιτείται να εισαχθούν επίσης και οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του τριγωνομετρικού σημείου στο οποίο είναι τοποθετημένος, στο σύστημα WGS84. Η κεραία του δέκτη αυτού τοποθετήθηκε σε βάση στην ταράτσα κτιρίου, εντός του εργοταξιακού χώρου. Ο δέκτης με το radio modem τοποθετήθηκαν σε εσωτερικό χώρο για λόγους προστασίας και τροφοδοσίας με ηλεκτρικό ρεύμα.



**Εικόνα 18. Η βάση του base στην ξηρά.**

### **3.2.5 Περιγραφή - Ρύθμιση του λογισμικού.**

Το λογισμικό καθοδήγησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Teledyne PDS το οποίο διαθέτει αρκετές εκδόσεις ανάλογα με την εφαρμογή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε το Rock Dumping and Placement το οποίο κρίθηκε ότι διαθέτει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για τις ανάγκες του έργου. Μέσα από το λογισμικό αυτό ο κυβερνήτης μπορεί να έχει άποψη σε πραγματικό χρόνο για την θέση της φορτηγίδας στο έργο καθώς είναι δυνατή η προβολή της κάτοψης της πάνω σε χάρτες, οριζοντιογραφίες ή άλλες σχεδιαστικές πληροφορίες που έχουν εισαχθεί προηγουμένως. Μπορεί να δεχτεί αρκετά format αρχείων μεταξύ των οποίων Drawing exchange format (DXF), Esri Shapes (SHP), Micro station design

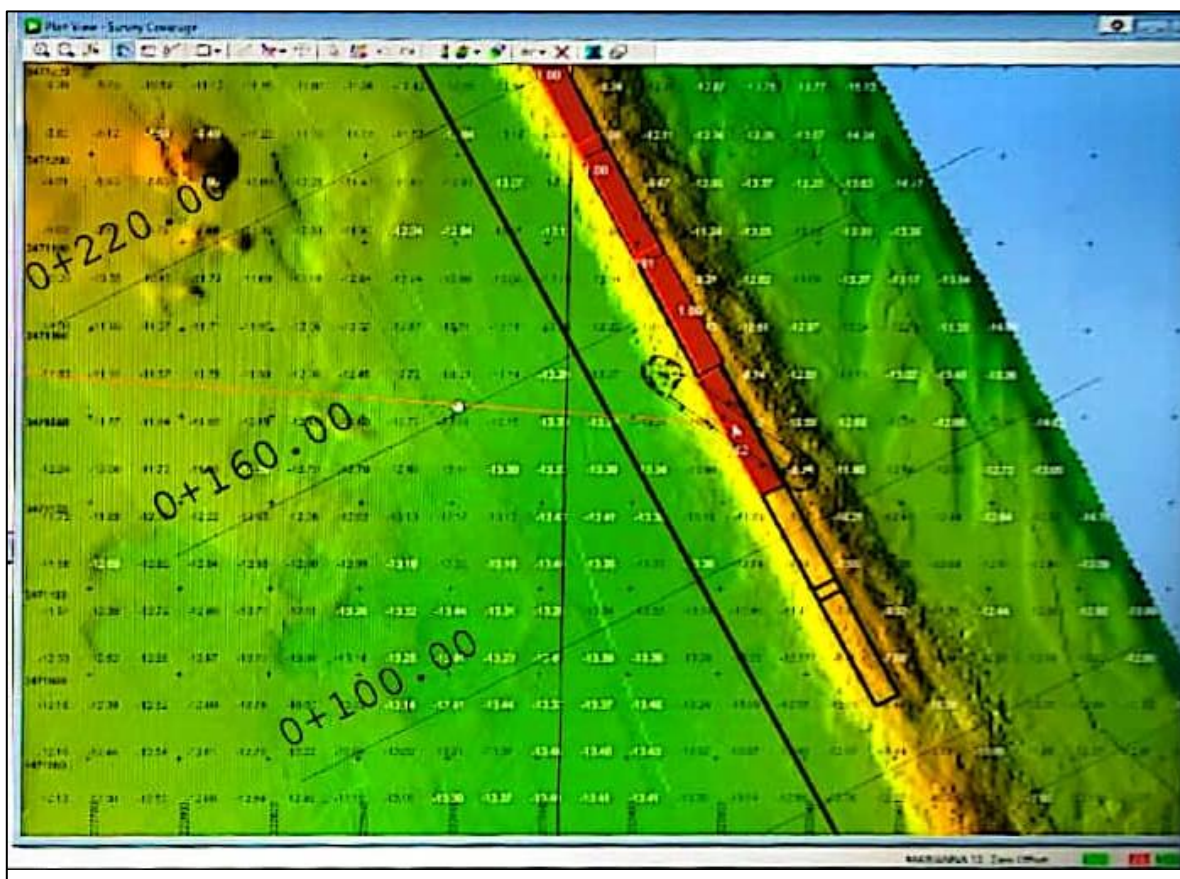


file (DGN), S-57 Charts κ.α.. Ταυτόχρονα στην οθόνη μπορούν να προβάλλονται πληροφορίες που αφορούν το ταξίδι όπως η διεύθυνση της πορείας, ο απαιτούμενος χρόνος και την απόσταση μέχρι τον προορισμό, η ποιότητα του σήματος του δέκτη, η ταχύτητα, τα βάθη, το ίχνος της ακολουθούμενης πορείας κ.α.. Τα επίπεδα πληροφορίας (Layers) που βλέπει ο χρήστης είναι πλήρως παραμετροποιήσιμα ανάλογα με τις ανάγκες του και είναι δυνατόν να δημιουργούνται, να αποθηκεύονται και να φορτώνονται διαφορετικές διατάξεις τους (Layouts) κάθε φορά. Η πληροφορία αυτή μπορεί να προέρχεται από πλήθος αισθητήρων και συσκευών που μπορεί να υποστηρίξει το λογισμικό όπως δέκτες GNSS, πυξίδες, κλισίμετρα, αποστασιόμετρα laser, κάμερες κ.α. Επίσης για μια φορηγίδα μπορούν να δημιουργηθούν διαφορετικά έργα (projects) με διαφορετικές κάθε φορά ρυθμίσεις. Εκτός από τις παραπάνω δυνατότητες διαθέτει και πολλές άλλες (σχεδιαστικές, υπολογισμού όγκων, καταγραφής δεδομένων, κ.τ.λ.) που όμως δεν ήταν όλες απαραίτητες στο συγκεκριμένο έργο.

Δυο δυνατότητες του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλο βαθμό είναι η δημιουργία ψηφιακού μοντέλου χρωματικών διαβαθμίσεων με τις πραγματοποιούμενες ρίψεις και η ταυτόχρονη καταγραφή των στοιχείων τους σε εξωτερικό αρχείο ASCII (ημερομηνία, ώρα, συντεταγμένες γωνιών χοάνης). Όπως φαίνεται και στην εικόνα 19, κατά την στιγμή της απόρριψης, με το πάτημα ενός κουμπιού στο πληκτρολόγιο δημιουργείται μια χρωματική «στάμπα» η οποία απεικονίζει την περιοχή της χοάνης τη στιγμή αυτή. Όταν στην ίδια περιοχή γίνονται περισσότερες από μια ρίψεις το χρώμα στην περιοχή αλλάζει ανάλογα με την κλίμακα που έχει οριστεί. Έτσι ο κυβερνήτης και η ομάδα παρακολούθησης του έργου μπορούν ανά πάσα στιγμή και για κάθε φορηγίδα, να έχουν επίγνωση για το που έχουν εκτελεστεί απορρίψεις, την ακρίβεια τους και τον αριθμό τους. Αυτό είναι δυνατό από την σύγκριση του ψηφιακού μοντέλου με τις προγραμματισμένες θέσεις απόρριψης που έχουν εισαχθεί στο λογισμικό σαν παραλληλόγραμμα με διαστάσεις αυτές της χοάνης της φορηγίδας (χρησιμοποιώντας αρχείο DXF). Από την σύγκριση αυτή φαίνονται επίσης η θέση και ο αριθμός των εναπομενουσών απορρίψεων. Η δεύτερη δυνατότητα, που δεν περιλαμβανόταν στην αρχική διαμόρφωση του λογισμικού, προστέθηκε μετά από συνεννόηση με την εταιρεία προμήθειας του για να υπάρχει καλύτερη γεωμετρική τεκμηρίωση και ευκολότερος έλεγχος των εργασιών κάθε φορηγίδας. Από τις συντεταγμένες των αρχείων αυτών ενημερωνόταν στο τέλος κάθε μήνα ένα αρχείο DWG, με τα συνολικά παραλληλόγραμμα από όλες τις φορηγίδες, για επιμετρητικούς σκοπούς. Το layer κάθε παραλληλογράμμου ήταν η

ημερομηνία απόρριψης. Έτσι ανοίγοντας τα κατάλληλα layer κάποιος μπορούσε εύκολα να έχει εικόνα για το πόσες ρίψεις έγιναν ανά μήνα και τις θέσεις που έγιναν.

Όλη η διαδικασία εισαγωγής – εξαγωγής δεδομένων στο λογισμικό, εποπτείας αλλά και παρεμβάσεων σε περίπτωση ύπαρξης τεχνικού προβλήματος γίνεται από ομάδα μηχανικών από την ξηρά. Αυτό ήταν εύκολο με χρήση λογισμικού απομακρυσμένης πρόσβασης (Teamviewer, Anydesk) αφού όπως έχει αναφερθεί ο υπολογιστής είναι συνδεδεμένος με modem – router.



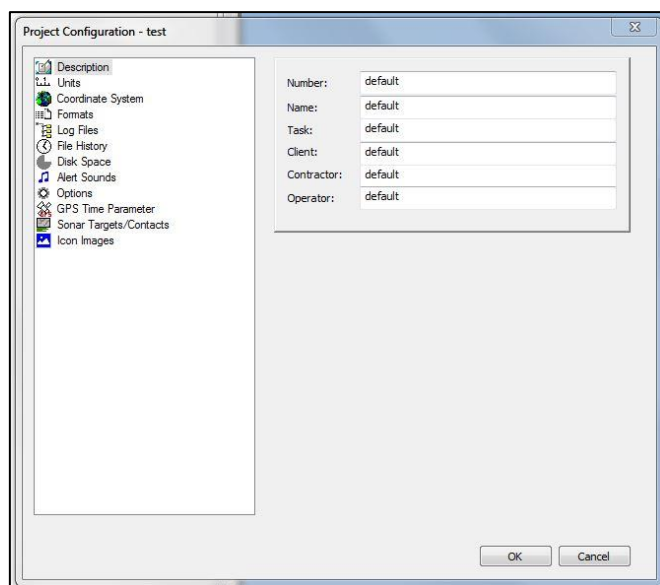
Εικόνα 19. Πραγματοποιημένες (κόκκινη διαγράμμιση) και προγραμματισμένες ρίψεις (μαύρα παραλληλόγραμμα).

```
[JOINTOBJECTS]
Dump-12/3/2021 8:46:54 πμ =
460807.386215,3486290.543754,0.000000,460812.496325,3486281.952445,0.000000,460803.905017,3486276.842335,0.000000,460798.794907,3486285.433643,0.000000
Dump-12/3/2021 8:46:58 πμ =
460807.386206,3486290.543756,0.000000,460812.496328,3486281.952455,0.000000,460803.905026,3486276.842332,0.000000,460798.794904,3486285.433634,0.000000
Dump-1/3/2021 2:42:45 μμ =
460843.256846,3486243.161944,0.000000,460853.252965,3486243.124347,0.000000,460853.215367,3486233.128228,0.000000,460843.219248,3486233.165826,0.000000
Dump-1/3/2021 2:43:32 μμ =
460843.803179,3486247.187688,0.000000,460853.772835,3486246.459848,0.000000,460853.044995,3486236.490191,0.000000,460843.075338,3486237.218031,0.000000
Dump-1/3/2021 2:43:50 μμ =
460843.936664,3486249.015993,0.000000,460853.906320,3486248.288153,0.000000,460853.178480,3486238.318497,0.000000,460843.208824,3486239.046337,0.000000
ObjectOrder = Dump-12/3/2021 8:46:54 πμ|Dump-12/3/2021 8:46:58 πμ|Dump-1/3/2021 2:42:45 μμ|Dump-1/3/2021 2:43:32 μμ|Dump-1/3/2021 2:43:50 μμ
```

Εικόνα 20. Τα περιεχόμενα του αρχείου ASCII με τα στοιχεία των ρίψεων.

Τα σημαντικότερα βήματα που απαιτούνται για την ρύθμιση του λογισμικού αφού γίνει η εγκατάσταση είναι τα παρακάτω:

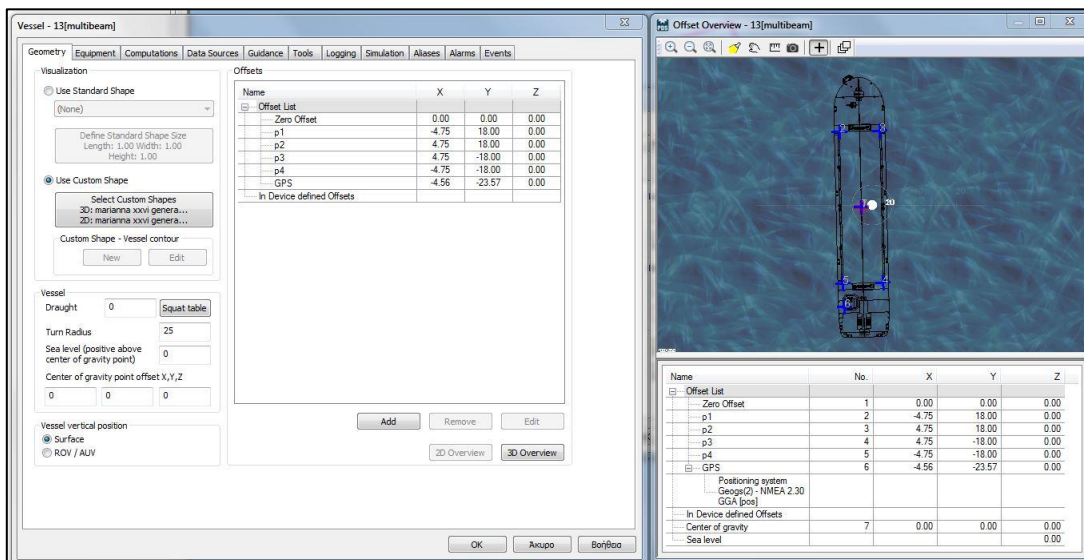
- Η Διαμόρφωση του έργου (project configuration). Καθορίζονται οι χρησιμοποιούμενες μονάδες για τα διάφορα μεγέθη, η ακρίβειά τους, το σύστημα και η μορφή (Γεωγραφικές, Καρτεσιανές) των συντεταγμένων και άλλες πληροφορίες που αφορούν το συγκεκριμένο έργο.



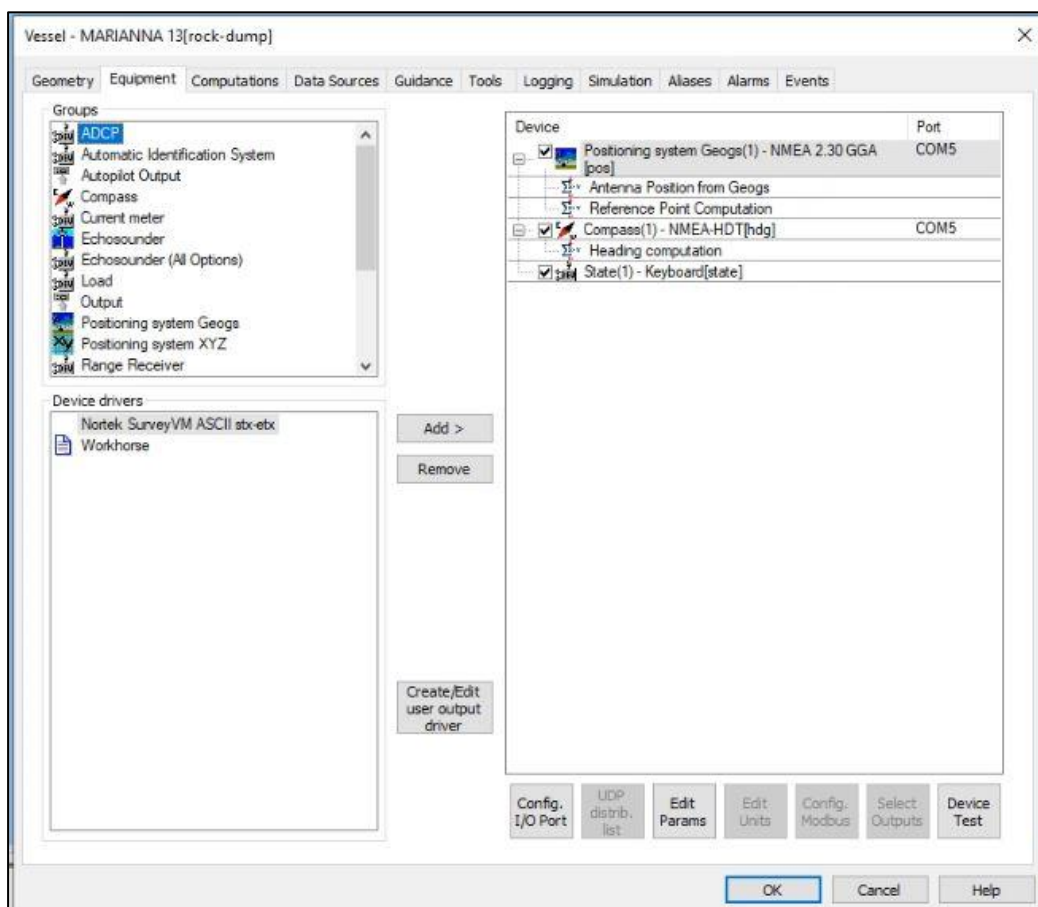
**Εικόνα 21. Το παράθυρο των ρυθμίσεων έργου.**

- Η διαμόρφωση του σκάφους. Στο στάδιο αυτό εισάγεται η κάτοψη της φορτηγίδας που έχουμε δημιουργήσει και ορίζονται οι τοπικές συντεταγμένες των γωνιών της χοάνης και της πρωτεύουσας κεραίας GNSS. Επίσης ορίζεται ο τύπος των συσκευών που στέλνουν δεδομένα στον H/Y, οι drivers για τα μηνύματα που αποστέλλονται, οι θύρες που χρησιμοποιούνται για τη λήψη των μηνυμάτων, καθώς και διάφοροι υπολογισμοί και λειτουργίες που επιθυμούμε να γίνονται από το λογισμικό (π.χ. υπολογισμός απόλυτων συντεταγμένες των γωνιών τις χοάνης, καταγραφή ρίψεων κ.τ.λ.). Οι συσκευές που επιλέχθηκαν στο συγκεκριμένο έργο ήταν τρεις. Μια συσκευή γεωγραφικού προσδιορισμού θέσης (Positioning System Geogs) με πληροφορία θέσης σε μορφή NMEA-GGA, μια πυξίδα (compass) με πληροφορία διεύθυνσης σε μορφή NMEA-HDT και ένα πληκτρολόγιο. Ουσιαστικά οι δυο πρώτες συσκευές αφορούν την διαχείριση του διπλού μηνύματος που εξάγεται από τους δέκτες rover. Τα μηνύματα

NMEA GGA & NMEA HDT ορίστηκαν όπως φαίνεται και στην εικόνα 8 ως εξαγόμενα από τους δέκτες αυτούς.



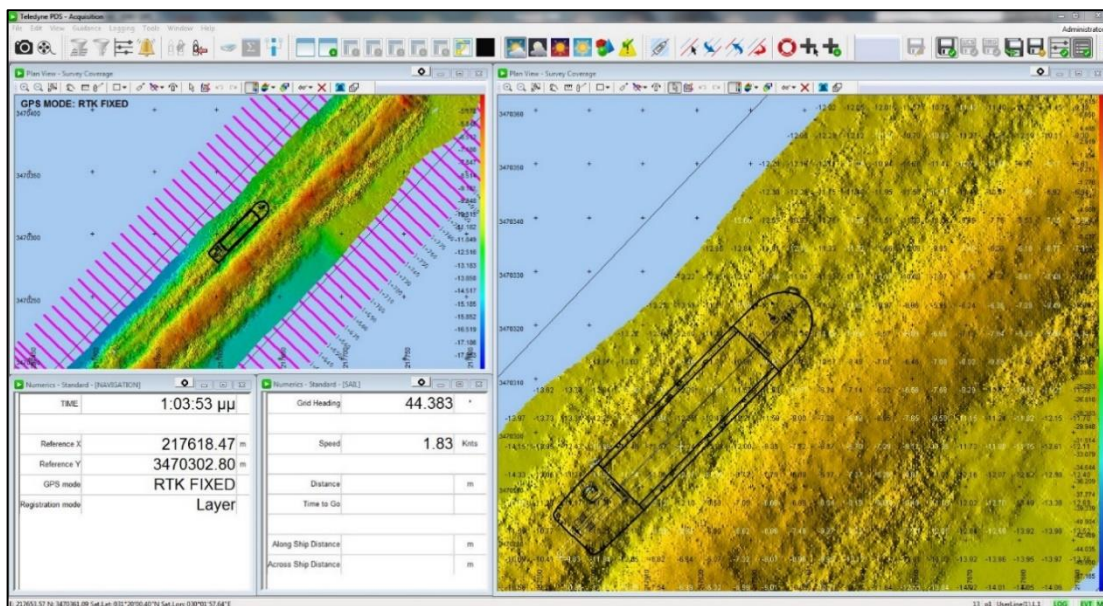
Εικόνα 22. Τα παράθυρα ορισμού τοπικών συντεταγμένων και προεπισκόπησης της κάτοψης και των σημείων.



Εικόνα 23. Το παράθυρο επιλογής του διαθέσιμου εξοπλισμού.



- Την διαμόρφωση της διάταξης των απεικονιζόμενων πληροφοριών στο παράθυρο πραγματικού χρόνου.

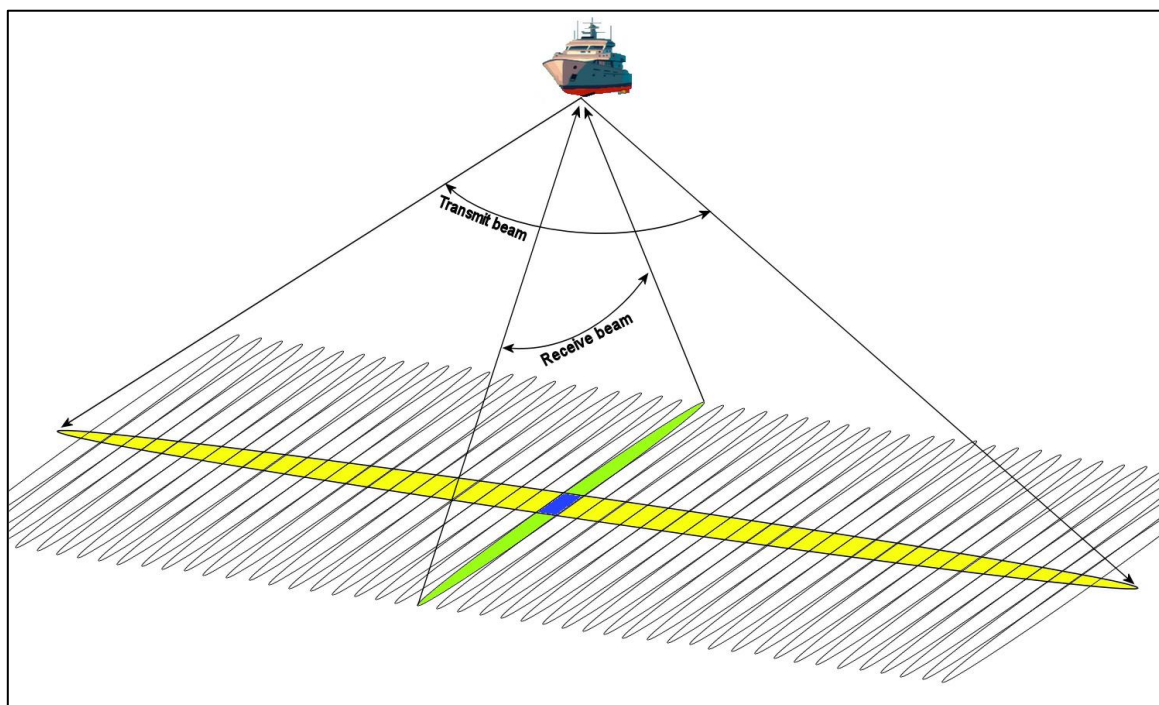


Εικόνα 24. Το παράθυρο πραγματικού χρόνου.

### 3.3 Υδρογραφικός εξοπλισμός

Για την αποτύπωση του θαλάσσιου πυθμένα χρησιμοποιήθηκε ηχοβολιστικό σύστημα πολλαπλής δέσμης (multibeam echosounder, MBES) εγκατεστημένο στο πλάι του σκάφους (Side-Mounted). Οι συσκευές αυτές με τη βοήθεια συστοιχιών πομπών και δεκτών, που ονομάζονται μορφοτροπείς (transducers), λόγω της δυνατότητας τους να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε ηχητική και το αντίστροφο, έχουν την δυνατότητα να εκπέμπουν ηχητικές δέσμες κατάλληλης συχνότητας (εξαρτάται από το βάθος ώστε να υπάρχει διεισδυτικότητα) στον πυθμένα και στην συνέχεια να λαμβάνουν το ανακλώμενο σήμα. Οι δέσμες αυτές έχουν τη μορφή βεντάλιας κάθετης στην διεύθυνσή κίνησης του σκάφους. Η βεντάλια αυτή είναι στενή στην παράλληλη με την κίνηση του σκάφους διεύθυνση και ευρεία στην κάθετη. Χρησιμοποιώντας την τεχνική της διαμόρφωσης δέσμης (beamforming) οι μορφοτροπείς λήψης (υδρόφωνα) μπορούν να παρουσιάζουν ευαισθησία σε ανακλώμενα σήματα που προέρχονται από συγκεκριμένες διευθύνσεις (Zwolak, 2015) δημιουργώντας ηλεκτρονικά εικονικές δέσμες οι οποίες έχουν αντίθετο προσανατολισμό (σχήμα 7). Χρησιμοποιώντας ειδικούς αλγορίθμους μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ εκπομπής και λήψης. Στην συνέχεια δεδομένου ότι η μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης

του ήχου κατά μήκος της διαδρομής είναι γνωστή ή μπορεί να εκτιμηθεί επαρκώς, είναι δυνατό να υπολογιστούν για τις περιοχές του πυθμένα, στις τομές των δεσμών εκπομπής και λήψης, η κάθετη (βάθος) και η οριζόντια απόσταση (εγκάρσια στην κίνηση) από τους μορφοτροπείς. Ο αριθμός των σημείων που υπολογίζονται εξαρτάται από τις δυνατότητες του ηχοβολιστικού και μπορεί να είναι δεκάδες ή εκατοντάδες (Zwolak, 2015). Με συνεχή επανάληψη των ηχητικών παλμών κατά την κίνηση του σκάφους γίνεται σάρωση μιας λωρίδας του πυθμένα το εύρος της οποίας εξαρτάται κυρίως από το βάθος του πυθμένα. Για την αποτύπωση μιας περιοχής ενδέχεται να απαιτούνται επαναλαμβανόμενα περάσματα σε κατάλληλες αποστάσεις μεταξύ τους ώστε να υπάρχει επικάλυψη πληροφορίας. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να δημιουργούνται τρισδιάστατα μοντέλα του πυθμένα με μεγάλη ανάλυση. Για να έχουν πρακτική αξία τα βάθη και οι αποστάσεις μετατρέπονται σε συντεταγμένες στο σύστημα αναφοράς. Σαν επιφάνεια αναφοράς των υψομέτρων χρησιμοποιείται συνήθως τη Μέση Στάθμη της Θάλασσας.



Σχήμα 7. Αρχή λειτουργίας ηχοβολιστικού συστήματος πολλαπλής δέσμης (Zwolak, 2015).

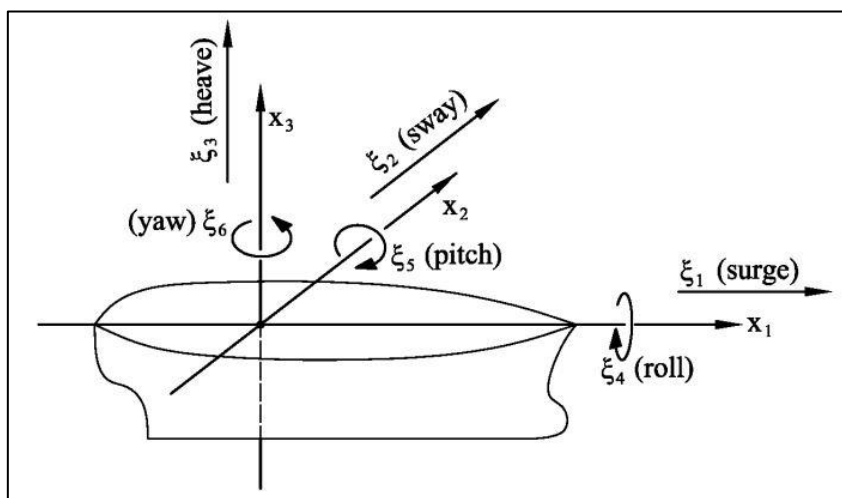
Για τον προσδιορισμό των τελικών συντεταγμένων των σημείων αποτύπωσης στο σύστημα αναφοράς, απαιτούνται τα δεδομένα και από άλλες συσκευές και αισθητήρες που είναι εγκατεστημένες ή χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της αποτύπωσης προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες αναγωγές και διορθώσεις των μετρήσεων του ηχοβολιστικού. Οι συσκευές αυτές που περιλαμβάνουν δέκτες GNSS, αδρανειακές μονάδες μέτρησης (Inertial

Measurement Units, IMU), γυροσκόπια, μετρητές ταχύτητας του ήχου κ.α., είναι απαραίτητες λόγω της δυναμικής κίνησης του σκάφους που πραγματοποιεί την αποτύπωση αλλά και της μεγάλης σημασίας που παίζει η ακριβής γνώση της ταχύτητας του ήχου σε συνάρτηση με το βάθος (sound velocity profile) στον υπολογισμό της θέσης και του βάθους των σημείων.

Η κίνηση ενός σκάφους στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που καθορίζεται από την αλληλεπίδραση των δυνάμεων του σκάφους, της θάλασσας και του ανέμου. Οι βαθμοί ελευθερίας της είναι 6 και περιλαμβάνουν 3 γραμμικές και 3 περιστροφικές κινήσεις (βλέπε σχετικό σχήμα). Η ονομασία τους στα Ελληνικά καθώς και η αγγλική ονομασία τους, που συνηθίζεται να χρησιμοποιείται περισσότερο ακόμη και στον ελληνικό χώρο, δίνεται στον πίνακα που ακολουθεί (Αθανασούλης & Μπελιμπασάκης, 2012).

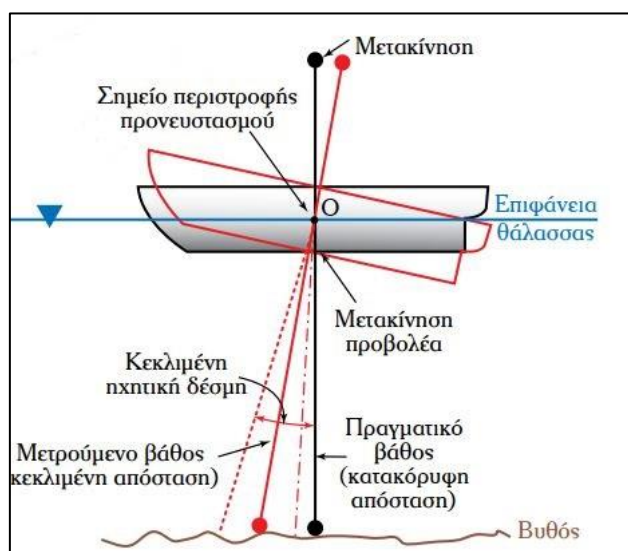
Πίνακας 1. Ονοματολογία κινήσεων πλοίου.

Ονοματολογία κινήσεων Πλοίου		
Κίνηση	Ελληνική ονομασία	Αγγλική ονομασία
$\xi_1$	Διαμήκης οριζόντια ταλάντωση	Surge
$\xi_2$	Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση	Sway
$\xi_3$	Κατακόρυφη ταλάντωση	Heave
$\xi_4$	Διατοιχισμός	Roll
$\xi_5$	Προνευτασμός	Pitch
$\xi_6$	Στροφική οριζόντια ταλάντωση	Yaw

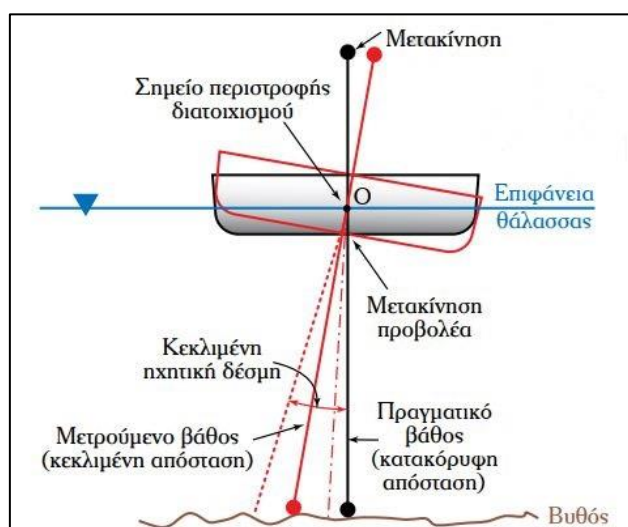


Σχήμα 8. Ονοματολογία κινήσεων πλοίου (Αθανασούλης & Μπελιμπασάκης, 2012).

Οι κινήσεις αυτές αν και μικρές σε μέγεθος, λόγω των ήπιων καιρικών και θαλάσσιων συνθηκών που διενεργούνται οι μετρήσεις, μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στην ακρίβεια της αποτύπωσης. Το μέγεθος των σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν εξαρτάται εκτός από την ακρίβεια μέτρησης των κινήσεων αυτών και από το βάθος του πυθμένα. Συνήθεις απαιτούμενες ακρίβειες μέτρησης για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% είναι  $0.05^\circ$  στο διατοιχισμό και προνευτασμό,  $0.2^\circ$  στην διεύθυνση του σκάφους και τα 10 εκατοστά ή το 10% του μεγέθους της για την κατακόρυφη ταλάντωση (ΙΗΟ, 2011, σελ.134). Στα επόμενα σχήματα φαίνεται η επίπτωση του προνευτασμού και του διατοιχισμού στο μετρούμενο βάθος.



Σχήμα 9. Επίδραση του προνευτασμού στην μέτρηση του βάθους (Παλληκάρης κ.α., 2016)

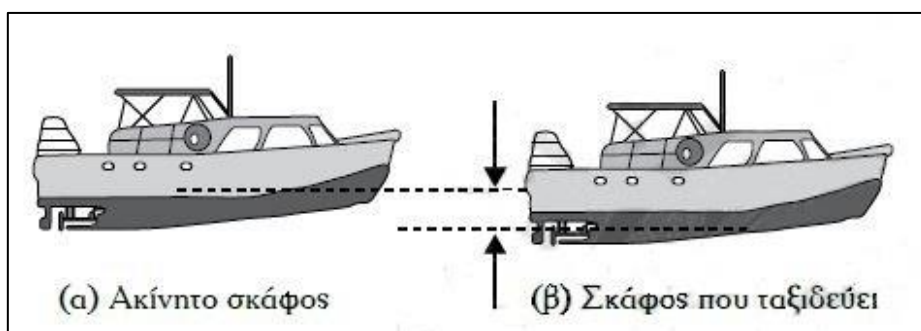


Σχήμα 10. Επίδραση του διατοιχισμού στην μέτρηση του βάθους (Παλληκάρης κ.α., 2016).

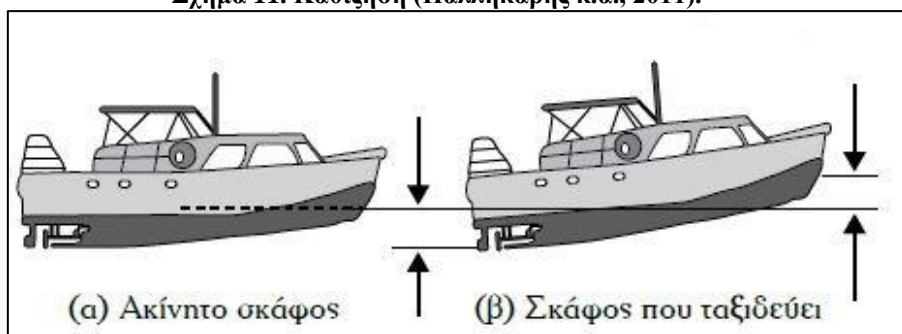


Άλλα σφάλματα που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό των βαθών και να γίνονται οι κατάλληλες διορθώσεις είναι τα παρακάτω (Παλληκάρης κ.α., 2016):

- 1) Σφάλμα βυθίσματος μορφοτροπέα. Τα μετρούμενα βάθη από την ηχοβολιστική συσκευή είναι από τον μορφοτροπέα και δεν περιλαμβάνουν το βύθισμά του που δεν είναι σταθερό και εξαρτάται από το βάρος του σκάφους.
- 2) Σφάλματα από κατακόρυφες μετακινήσεις λόγω επιδράσεως του κυματισμού. Τα σφάλματα αυτά είναι σημαντικά σε μικρά βάθη.
- 3) Σφάλματα καθίζσεως και δυναμικής διαγωγής λόγω της κινήσεως του σκάφους.
- 4) Σφάλματα οργάνων.
- 5) Σφάλματα στην ταχύτητα του ήχου τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια.



Σχήμα 11. Καθίζηση (Παλληκάρης κ.α., 2011).



Σχήμα 12. Δυναμική διαγωγή (Παλληκάρης κ.α., 2011).

Ιδιαίτερη σημασία στον υπολογισμό των βαθών έχει η ακριβής γνώση της ταχύτητας του ήχου κατά μήκος της διαδρομής του εκπεμπόμενου και στη συνέχεια ανακλώμενου ηχητικού παλμού η οποία δεν είναι σταθερή. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της μεγάλης ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό (περίπου 1500 m/sec) έστω και ένα μικρό σφάλμα στην θεώρηση της ταχύτητας μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο σφάλμα στον υπολογισμό της διανυόμενης

απόστασης και επομένως και του βάθους, ακόμη και αν ο χρόνος μεταξύ εκπομπής και λήψης προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια. Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό εξαρτάται από την θερμοκρασία, την αλατότητα και την πίεση. Λόγω της μη ύπαρξης ομοιογένειας στο θαλασσινό νερό, καθώς υδάτινες μάζες διαφορετικής πυκνότητας και θερμοκρασίας δεν αναμιγνύονται, είναι επόμενο να παρατηρούνται και ανάλογες μεταβολές της ταχύτητας σε σχέση με το βάθος. Γενικά η ταχύτητα του ήχου μεταβάλλεται περίπου κατά 4.5 m/sec, 1.3 m/sec και 1.6 m/sec με μεταβολή της θερμοκρασίας κατά 1 °C, της αλατότητας κατά 1‰ και της πίεσης κατά 10 ατμόσφαιρες αντίστοιχα (IHO, 2011, σελ. 126). Μια απλή εξίσωση για την εκτίμηση της ταχύτητας του ήχου συναρτήσει του βάθους, της θερμοκρασίας και της αλατότητας για γεωγραφικό πλάτος 45° που έχει προταθεί από τον Correns είναι η παρακάτω (IHO, 2011, σελ. 127):

$$C(Z, T, S) = 1449.05 + T \cdot [4.57 - T \cdot (0.0521 - 0.00023 \cdot T)] + (3.17) + [1.333 - T \cdot (0.0126 - 0.00009 \cdot T)] \cdot (S - 35) + \Delta(Z) \quad (4)$$

Όπου:

Z (m): Το βάθος

T (°C): Η θερμοκρασία

S (ppt): Η αλατότητα

$$\Delta(Z) \approx 16.3 \cdot Z + 0.18 \cdot Z^2$$

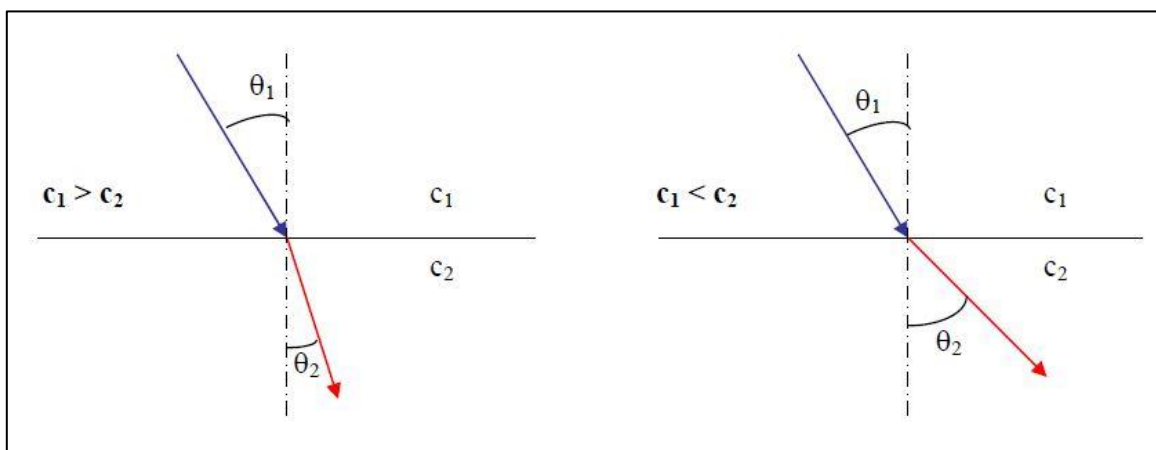
Για γεωγραφικά πλάτη διαφορετικά από 45° το Z θα πρέπει να αντικαθίσταται από την τιμή  $Z \cdot [1 - 0.0026 \cdot \cos(2\phi)]$ , όπου  $\phi$  το γεωγραφικό πλάτος.

Εκτός από την μεταβολή της ταχύτητας ένα άλλο πρόβλημα που προκύπτει από την διαστρωμάτωση του θαλασσινού νερού είναι και η διάθλαση των ηχητικών κυμάτων. Διάθλαση είναι η αλλαγή της πορείας ενός κύματος, στη διαχωριστική επιφάνεια δυο μέσων διάδοσης του, λόγω αλλαγής στην ταχύτητα του. Η πορεία του κύματος ακολουθεί το νόμο του Snell σύμφωνα με τον οποίο, στη διαχωριστική επιφάνεια δυο μέσων, ο λόγος των ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης προς τις ταχύτητες διάδοσης ενός κύματος είναι σταθερός (σχήμα 13), δηλαδή:

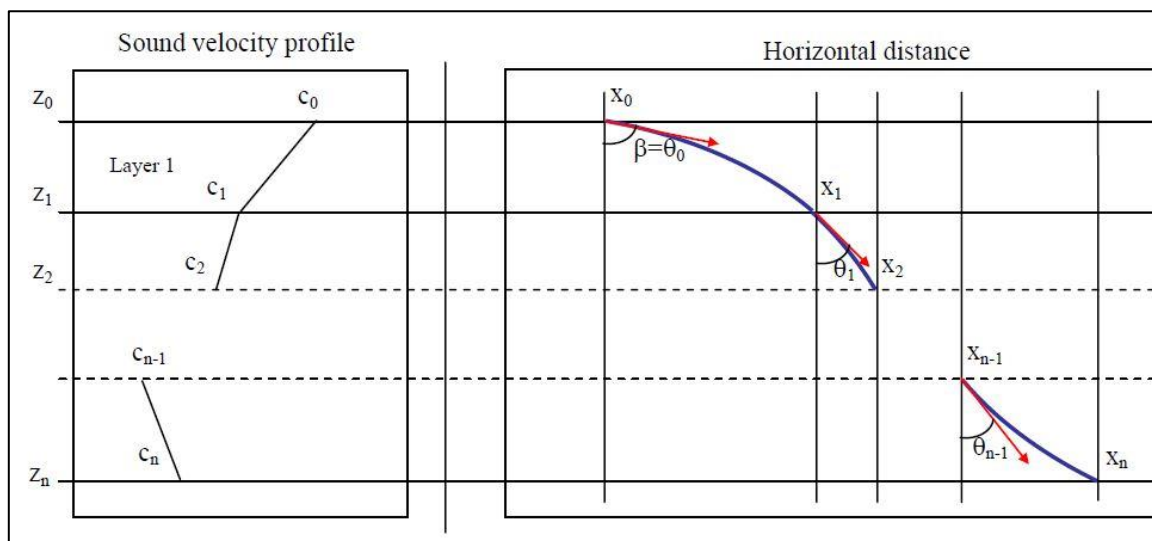
$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2} = k \quad (5)$$

Με την παραδοχή ότι η ταχύτητα μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ δυο μετρήσεων σε διαφορετικά βάθη προκύπτει ότι η τροχιά του κύματος μεταξύ των βαθών αυτών είναι

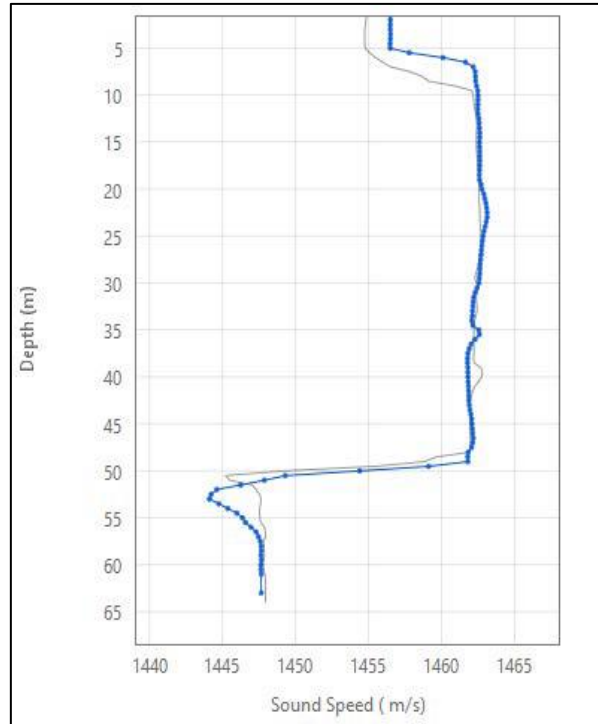
καμπύλη με σταθερή καμπυλότητα  $\rho$  (σχήμα 14). Από τα παραπάνω γίνεται φανερή η σημασία της ακριβούς γνώσης του κατακόρυφου προφίλ της ταχύτητας του ήχου καθώς σφάλματα στον προσδιορισμό του συνεπάγονται και σφάλματα στον προσδιορισμό της θέσης και του βάθους των σημείων του πυθμένα. Προκειμένου λοιπόν να εξασφαλίζεται η καλή ακρίβεια σε μια αποτύπωση θα πρέπει να διεξάγονται συχνές μετρήσεις της ταχύτητας του ήχου πριν την έναρξη όσο και κατά την διάρκεια της αποτύπωσης για τον προσδιορισμό του προφίλ ταχύτητας, που θα ανταποκρίνεται στις επικρατούσες συνθήκες της περιοχής.



Σχήμα 13. Διάθλαση του ήχου κατά την διάδοσή του σε μέσα με ταχύτητες  $C_1$  και  $C_2$  (ΙΗΟ, 2011, σελ.130).



Σχήμα 14. Τροχιά ηχητικού κύματος σε στρωματοποιημένο μέσο, με αρχική ταχύτητα  $C_0$  και γωνία  $\theta_0$  ως προς την κατακόρυφο, συναρτήσει του κατακόρυφου προφίλ ταχύτητας (ΙΗΟ, 2011, σελ.176).



Εικόνα 25. Μέτρηση της ταχύτητας του ήχου (αριστερά) και ενδεικτικό διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας του ήχου στο νερό συναρτήσει του βάθους (δεξιά), (Makar, 2019).

Σύμφωνα με τον IHO (2011, σελ. 180) η μεταβλητότητα των ανοιγμένων βαθών δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_Z^2 = \sigma_{Zc}^2 + \sigma_{H motion}^2 + \sigma_i^2 + \sigma_{tide}^2 + \sigma_{Z detection}^2 \quad (6)$$

Όπου:

$\sigma_{Zc}^2$  : Η μεταβλητότητα λόγω σφαλμάτων στην ταχύτητα του ήχου.

$\sigma_{H motion}^2$  : Η μεταβλητότητα λόγω σφαλμάτων των αισθητήρων κίνησης.

$\sigma_i^2$  : Η μεταβλητότητα λόγω σφαλμάτων βυθίσματος του μετατροπέα, καθίζησης και δυναμικής διαγωγής.

$\sigma_{tide}^2$  : Η μεταβλητότητα λόγω σφαλμάτων στον υπολογισμό της παλίρροιας.

$\sigma_{Z detection}^2$  : Η μεταβλητότητα του αλγόριθμου εντοπισμού του πυθμένα που εφαρμόζεται από το ηχοβολιστικό σύστημα.

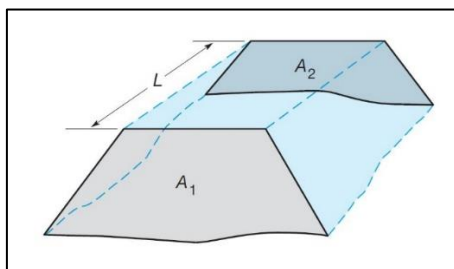
Οποσδήποτε μετά την εγκατάσταση του ηχοβολιστικού συστήματος πολλαπλής δέσμης στο σκάφος αλλά και μετά την πάροδο μεγάλων χρονικών διαστημάτων από την εγκατάστασή του, είναι απαραίτητο να γίνεται βαθμονόμηση του (calibration) στο πεδίο με μετρήσεις και την διεξαγωγή τεστ (patch test). Μέσω της διαδικασίας αυτή ελέγχεται και εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του συστήματος σαν σύνολο αφού εξαλείφονται υπολειπόμενα συστηματικά σφάλματα που δεν μπορούν να υπολογιστούν ή να προβλεφθούν θεωρητικά και οφείλονται σε ατέλειες στην κατασκευή και λειτουργία του. Από τα τεστ προκύπτουν διορθώσεις που πρέπει να εφαρμόζονται στους υπολογισμούς (εκτός από αυτές που έχουν ήδη αναφερθεί) και με τις οποίες τροφοδοτείται το λογισμικό επεξεργασίας των μετρήσεων. Επίσης αποτελούν ενδεδειγμένη μέθοδο ποιοτικού ελέγχου και ελέγχου ικανοποίησης των απαιτούμενων ακριβειών.

Το ηχοβολιστικό που χρησιμοποιήθηκε στο έργο ήταν τα Seabat T20-P της Teledyne Reson, σε συνδυασμό με το λογισμικό PDS Hydrography της ίδιας εταιρείας. Το ηχοβολιστικό αυτό προσφέρει υψηλή ανάλυση και διαθέτει ενσωματωμένο αδρανειακό σύστημα πλοήγησης (Inertial Navigation System, INS). Λειτουργεί σε συχνότητες από 190-420 kHz και μπορεί να συλλέγει σημεία σε ίσες αποστάσεις ή ίσες γωνίες (κάθετα στην κατεύθυνση κίνησης).

### 3.4 Μεθοδολογία επιμετρήσεων – εξοπλισμός.

Για την επιμέτρηση των εκτελεσμένων εργασιών του έργου, η πληρωμή των οποίων γινόταν βάσει του επιτόπου όγκου των απορριπτόμενων υλικών, χρησιμοποιήθηκαν λογισμικά που μπορούν να υπολογίσουν όγκους με τη μέθοδος των μέσων επιφανειών. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή ο όγκος μεταξύ δυο διατομών με επιφάνειες  $A_1$  και  $A_2$  που απέχουν απόσταση  $L$  υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V = \frac{A_1 + A_2}{2} * L \quad (7)$$



Σχήμα 15. Όγκος με τη μέθοδο των μέσων επιφανειών (Ghiliani & Wolf, 2012).

Ο συνολικός όγκος προκύπτει από το άθροισμα των όγκων μεταξύ όλων των διατομών του έργου. Αν θεωρήσουμε ότι οι αποστάσεις μεταξύ των  $n$  διατομών σε ένα έργο είναι σταθερές και ίσες με  $L$  τότε ο συνολικός όγκος θα είναι:

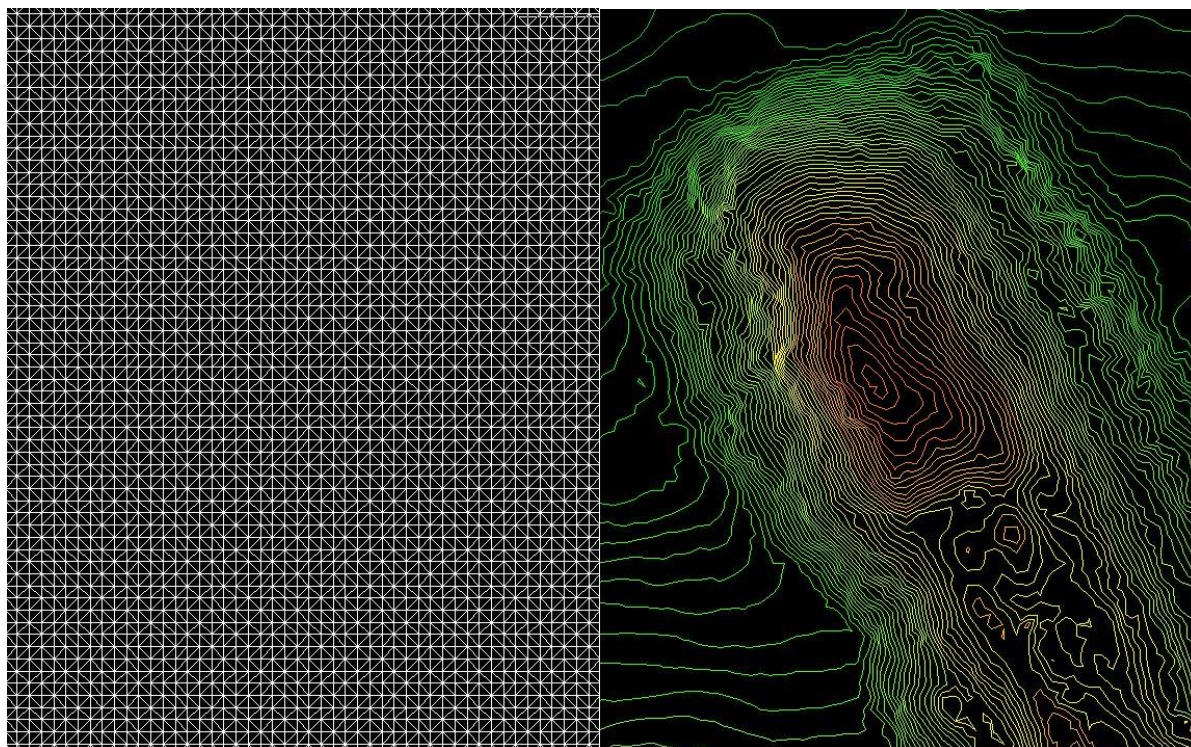
$$V_t = \sum V_i = \left( \frac{A_1 + A_n}{2} + A_2 + A_3 + \dots + A_{n-1} \right) * L \quad (8)$$

Η μέθοδος αυτή δίνει σωστά αποτελέσματα μόνο όταν η επιφάνεια στο μέσο της απόστασης μεταξύ των δυο διατομών είναι ίση με το μέσο όρο των επιφανειών των διατομών και συνήθως δίνει αποτελέσματα μεγαλύτερα των πραγματικών. Παρόλα αυτά προτιμάται στην πράξη κυρίως λόγω της απλότητας της. Επίσης η επίδραση της καμπυλότητας δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς γιατί συνήθως εξαλείφεται σε έργα με μεγάλο μήκος, αν και μπορεί να είναι σημαντική σε μικρά έργα ή εκσκαφές μονής καμπυλότητας (Schofield & Breach, 2007). Οι αποστάσεις που λαμβάνονται οι διατομές σε ένα έργο, εφόσον δεν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές μεταξύ τους, είναι συνήθως 10 ή 20 μέτρα. Στο συγκεκριμένο έργο για τον καλύτερο έλεγχο της κατασκευής λήφθηκαν διατομές ανά 5 μέτρα, πράγμα το οποίο υιοθετήθηκε αργότερα και στην επιμέτρηση των εργασιών για λόγους ευκολίας (δεν απαιτούνται διπλά αρχεία ή αρχεία μεγάλου μεγέθους που ανοίγουν δύσκολα και περιέχουν σε μεγάλο ποσοστό επαναλαμβανόμενη σχεδιαστική πληροφορία).

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε από την πλευρά της εταιρείας κατασκευής για την επιμέτρηση των εργασιών και τη σχεδίαση διατομών ήταν το Prost 2009 της Sierrasoft ενώ από την πλευρά του πελάτη το Civil 3D της Autodesk. Το πρώτο έχει σταματήσει να πωλείται πλέον από την εταιρεία κατασκευής του και έχει αντικατασταθεί από νεότερη έκδοση με παρόμοια χαρακτηριστικά υπό την ονομασία Roads. Παρόλα αυτά είναι πολύ εύχρηστο με μεγάλο προτέρημα την μικρή κατανάλωση πόρων του Η/Υ και την δημιουργία αρχείων DWG μικρού μεγέθους. Και τα δυο λογισμικά έχουν την δυνατότητα να δημιουργούν Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (ΨΜΕ), σε μορφή ακανόνιστου τριγωνικού δικτύου (Triangulated Irregular Network, TIN), από αρχεία αποτυπώσεων με συντεταγμένων σημείων. Από τα ΨΜΕ αυτά μπορούν να σχεδιάζονται αυτόματα ισοβαθείς καμπύλες και να εξάγονται γραμμές σε κάθε διατομή του άξονα, που αντιπροσωπεύουν την τομή του κατακόρυφου επιπέδου που διέρχεται από τη διατομή, με το ΨΜΕ. Επίσης δίνουν την δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργεί τυπικές διατομές και να τις εφαρμόζει στις διατομές ενός άξονα δημιουργώντας θεωρητικές γραμμές στρώσεων. Όλες οι γραμμές λαμβάνουν κωδικούς έτσι ώστε ο χρήστης ορίζοντας την αλληλουχία των υπολογισμών μεταξύ των γραμμών να προκύπτουν αυτόματα οι επιφάνειες



των υλικών σε κάθε διατομή και στη συνέχεια με χρήση της μεθόδου των μέσων επιφανειών οι όγκοι τους. Η τεκμηρίωση των υπολογισμών γίνεται με αναφορές σε μορφή πίνακα που μπορεί να εξάγονται από τα λογισμικά σε εξωτερικά αρχεία διαφόρων τύπων (pdf, xls, rtf κ.α.) ή να ενσωματώνονται στα σχέδια της επιμέτρησης σαν σχεδιαστική πληροφορία.



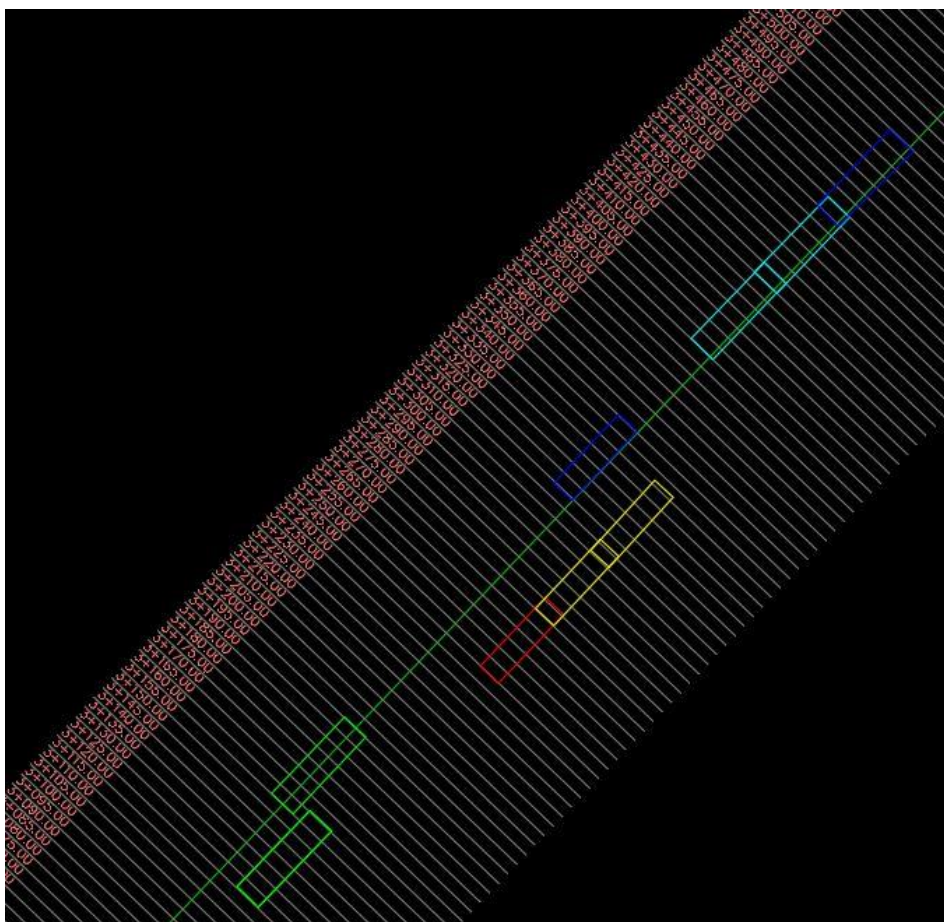
Εικόνα 26. Τρίγωνα ΨΜΕ περιοχής θαλάσσιου πυθμένα από κανάβο σημείων πλευράς 1μ. (αριστερά) και ισοβαθείς ανά 20 εκατοστά με χρωματική κλίμακα (ανάλογη με το απόλυτο υψόμετρό τους) δημιουργημένες από το ΨΜΕ (δεξιά).

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα δημιουργούμενα ψηφιακά μοντέλα και κατά συνέπεια και οι εξαγόμενες γραμμές στις επιμετρητικές διατομές μεταξύ δυο λογισμικών διαφέρουν έστω και ελάχιστα παρότι μπορεί να έχει χρησιμοποιηθεί το ίδιο αρχείο συντεταγμένων. Αυτό συμβαίνει διότι αφενός ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών που μπορεί να ενωθούν τα εκατοντάδες χιλιάδες σημεία ενός αρχείου συντεταγμένων μεταξύ τους, σχηματίζοντας τρίγωνα, είναι τεράστιος και αφετέρου διότι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί κάθε λογισμικό είναι διαφορετικός. Οι διαφορές που προκύπτουν γίνονται μικρότερες όσο μειώνεται η πλευρά του κανάβου του αρχείου συντεταγμένων, σε βάρος όμως της απόδοσης του Η/Υ. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής και εισαγωγής αρχείων μορφής xml και στα δυο λογισμικά έτσι ώστε να μπορεί να γίνεται η ανταλλαγή ΨΜΕ χωρίς να υπάρχουν διαφορές.

Volume calculation							Ref. Drawing:	Page No.	8
Core 0-300 Kg								Units:	m³
Section	Station	Area	Mean Area	Partial Distance	Volume				
					Partial	Cumulative			
127	1+160.00	122.92693	121.94171	5.00	609.70855	89142.51740			
128	1+165.00	120.95649							
128	1+165.00	120.95649	122.58203	5.00	612.91020	89755.42760			
129	1+170.00	124.20758							
129	1+170.00	124.20758	124.40582	5.00	622.02910	90377.45670			
130	1+175.00	124.60406							
130	1+175.00	124.60406	124.87356	5.00	624.36780	91001.82450			
131	1+180.00	125.14305							
131	1+180.00	125.14305	126.67429	5.00	633.37145	91635.19595			
132	1+185.00	128.20552							
132	1+185.00	128.20552	132.30997	5.00	661.54985	92296.74580			
133	1+190.00	136.41442							
133	1+190.00	136.41442	157.63432	5.00	788.17160	93084.91740			
134	1+195.00	178.85422							
134	1+195.00	178.85422	193.88424	5.00	969.42120	94054.33860			
135	1+200.00	208.91425							
135	1+200.00	208.91425	212.94669	5.00	1064.74345	95119.08205			
136	1+205.00	216.98313							
136	1+205.00	216.98313	213.15354	5.00	1065.76770	96184.84975			
137	1+210.00	209.32395							
137	1+210.00	209.32395	196.82829	5.00	984.14145	97168.99120			
138	1+215.00	184.33263							
138	1+215.00	184.33263	161.23183	5.00	806.15920	97975.15040			
139	1+220.00	138.13104							
139	1+220.00	138.13104	111.60595	3.55	395.67769	98370.82809			
140	1+223.55	85.08086							
140	1+223.55	85.08086	47.10083	4.45	209.81960	98580.64769			
141	1+228.00	9.12080							
Total						98580.64769			

Εικόνα 27. Σελίδα αναφοράς υπολογισμού όγκων από το λογισμικό Prost.

Επειδή οι αποτυπώσεις δεν γίνονταν σε όλο το μήκος του έργου αλλά μόνο στις περιοχές που είχαν γίνει απορρίψεις, στις επιμετρήσεις λαμβανόταν υπόψη το αρχείο DWG με τις απορρίψεις των φορτηγίδων, που αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.5, έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι όλες οι περιοχές στις οποίες πραγματοποιήθηκαν απορρίψεις, περιλαμβάνονται στις αποτυπώσεις. Οι απορρίψεις του αρχείου αυτού, εκτός από την ομάδα παρακολούθησης του έργου της εταιρείας κατασκευής, κοινοποιούνταν και στον πελάτη μέσω της εφαρμογής WhatsApp. Η κοινοποίηση γινόταν με φωτογραφία του λογισμικού PDS, κατά την στιγμή της απόρριψης, από τον κυβερνήτη.



**Εικόνα 28.** Τμήμα του αρχείου dwg με τις απορρίψεις. Τα παραλληλόγραμμα αντιπροσωπεύουν την θέση της χοάνη των φορτηγίδων κατά την στιγμή της απόρριψης και έχουν συντεταγμένες στο προβολικό σύστημα του έργου.

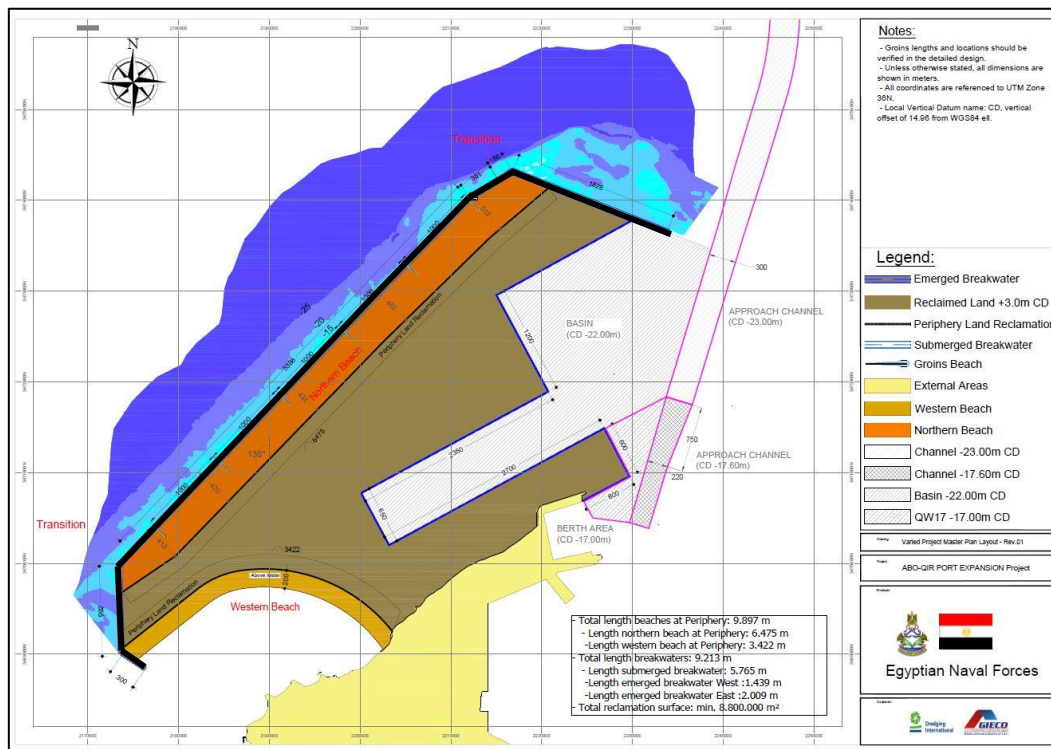
Σημαντικό ρόλο στον εντοπισμό τυχόν λαθών στις επιμετρήσεις, στην επίλυση διαφορών αλλά και στην παρακολούθηση του έργου έπαιξε η τήρηση μητρώου απορρίψεων σε αρχείο excel. Στο αρχείο αυτό καταγράφονταν για κάθε δρομολόγιο, το όνομα της φορτηγίδας, η χλιομέτρηση του σημείου απόρριψης, η ώρα αναχώρησης και επιστροφής, το μεταφερόμενο



υλικό και το βάρος του σε τόνους. Το βάρος υπολογιζόταν έμμεσα από το βύθισμα των φορτηγίδων με κατάλληλο φύλλο Excel. Αν και οι συνολικές ποσότητες επιμετρούνταν σε κ.μ. τα βάρη αυτά αποτελούσαν μια καλή εκτίμηση και για τους όγκους των υλικών, μετά την διαίρεση τους με το ειδικό βάρος τους. Σαν ειδικό βάρος χρησιμοποιήθηκε η τιμή που προέκυψε από τις απορρίψεις των πρώτων μηνών. Όλες οι ποσότητες υπολογίζονταν ανακεφαλαιωτικά από την αρχή του έργου για να μην δημιουργούνται κενά. Πριν την έναρξη των εργασιών έγινε αποτύπωση του πυθμένα που χρησιμοποιήθηκε σαν παραλαβή φυσικού εδάφους.

## 4 Εφαρμογή μεθόδου

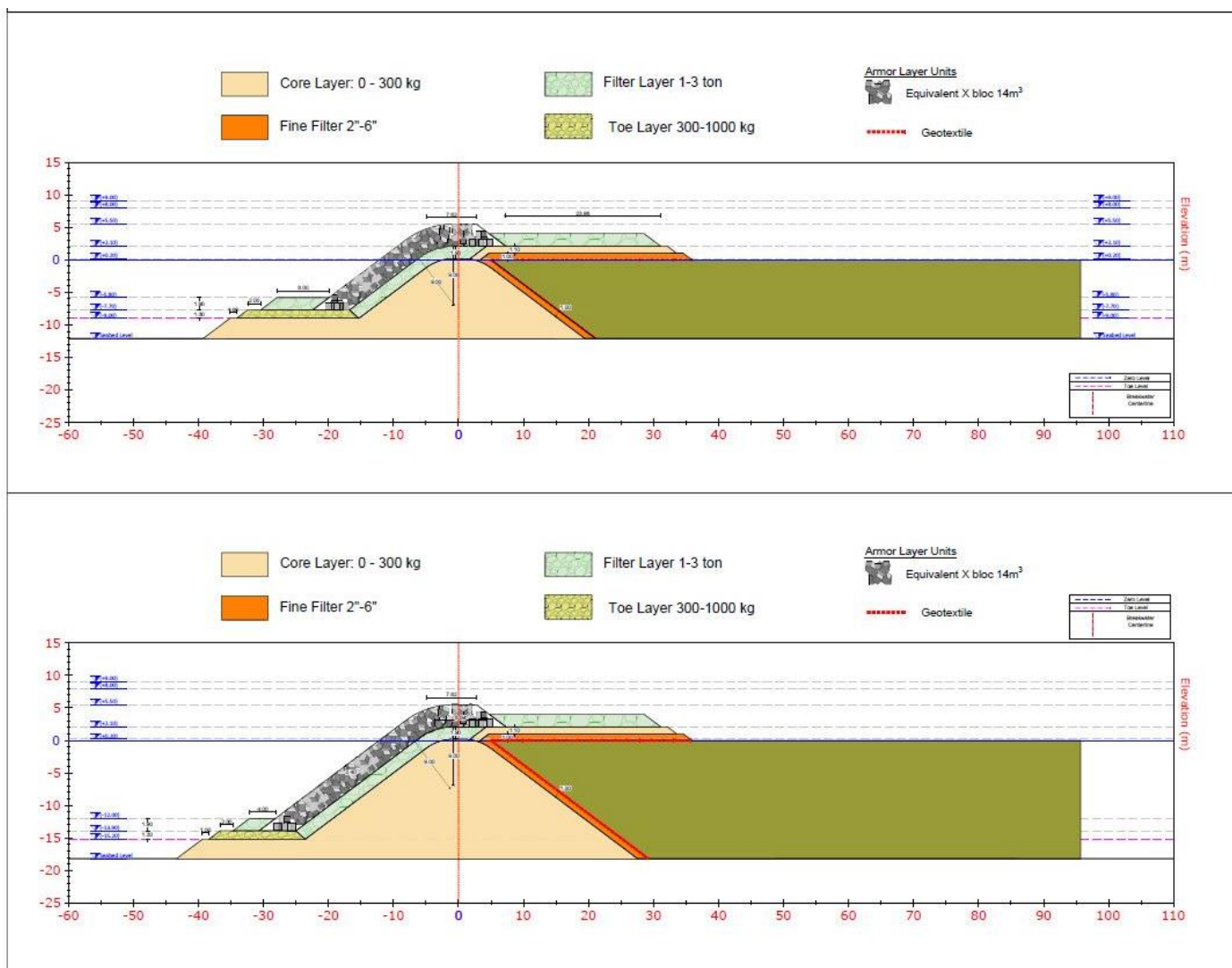
#### 4.1 Περιγραφή έργου – αντικείμενο εργασιών.



**Εικόνα 29. Το master plan της μελέτης του έργου.**

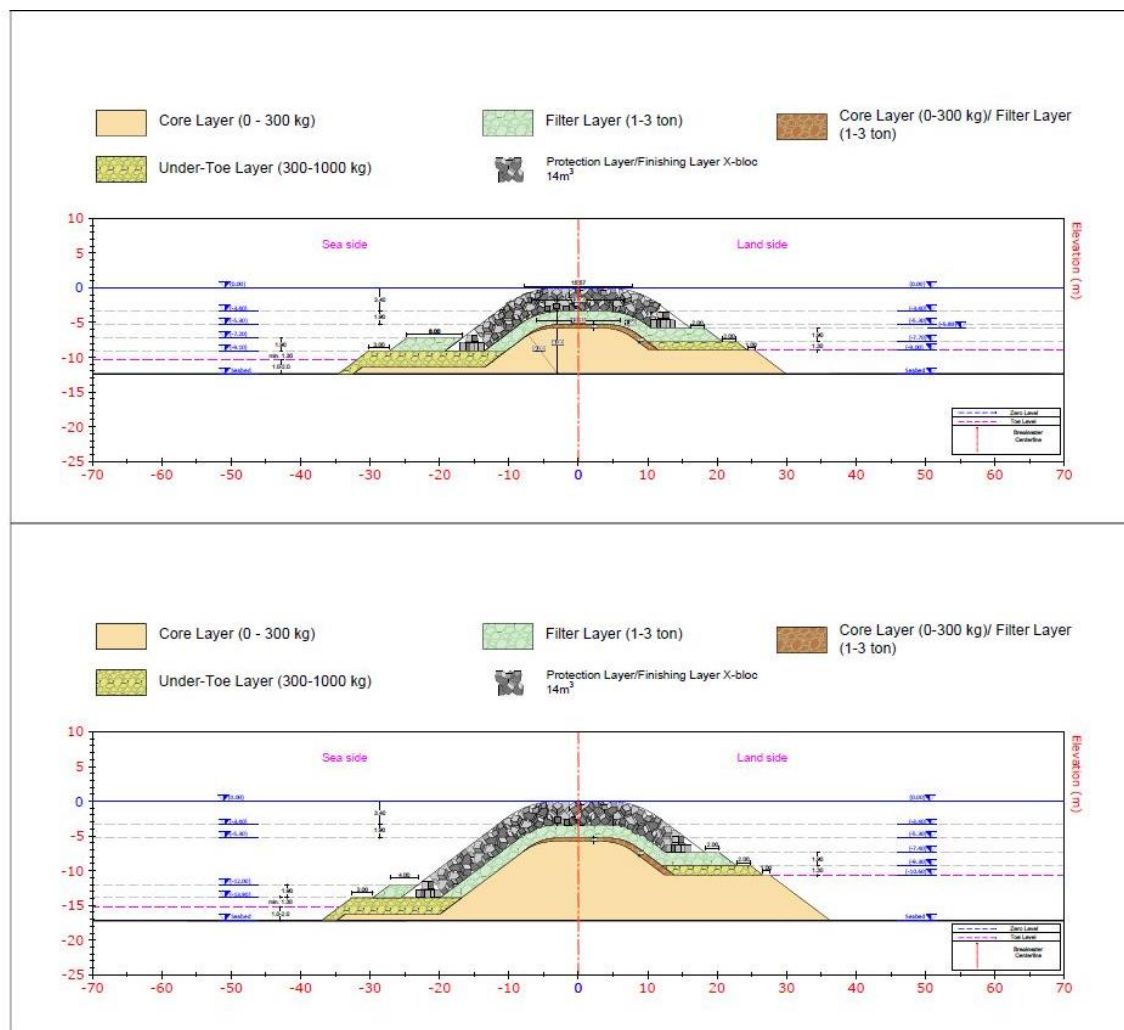
Το έργο εφαρμογής αφορά την κατασκευή στρώσεων λιθορριπής κυματοθραύστη μήκους 9.213 μ., στην πόλη Abu Qir η οποία βρίσκεται στις Μεσογειακές ακτές της Αιγύπτου. Αποτελεί τμήμα του έργου επέκτασης του υφιστάμενου λιμένα της πόλης. Ξεκίνησε στις αρχές του 2021 και εκτελείται υπεργολαβικά από την εταιρεία Ιγνάτιος Σπανόπουλος Ναυτιλιακή & Εμπορική Α.Ε. ως χρονική τη στιγμή που γράφεται η διπλωματική εργασία αυτή.

Όπως φαίνεται από το master plan του έργου (πλευρά κανάβου 1 χλμ.) η επέκταση έχει επιφάνεια 8.800.000 τ.μ. και περιλαμβάνει και την δημιουργία δυο παραλιών στα βόρεια και δυτικά. Η αρχική μελέτη προέβλεπε την κατασκευή έξαλης τυπικής διατομής στο μεγαλύτερο μήκος του κυματοθραύστη (emerged typical sections). Εν συνεχεία όμως αποφασίστηκε η τουριστική αξιοποίηση του λιμένα με αποτέλεσμα να μετατοπιστεί ο άξονας (έντονη μαύρη γραμμή) βορειότερα και να επιλεγούν ύφαλες τυπικές διατομές (submerged typical sections) στο μεγαλύτερο τμήμα του παραλιακού μετώπου. Έτσι κατά μήκος όλης της βόρειας παραλίας (κόκκινο χρώμα) και σε μήκος 5.765 μ. εφαρμόζονται ύφαλες τυπικές διατομές ενώ στα δυτικά και ανατολικά έξαλες.



Εικόνα 30. Ενδεικτικές έξαλες τυπικές διατομές της μελέτης.





Εικόνα 31. Ενδεικτικές ύφਾਲες τυπικές διατομές της μελέτης.

Όπως φαίνεται στις εικόνες 25 & 26 η κατασκευή γίνεται πάνω στον φυσικό πυθμένα χωρίς εξυγίανση. Ο πυρήνας των τυπικών διατομών αποτελείται από υλικά κατηγορίας 0-300 kg, με αμφίπλευρη διαμόρφωση στρώσεων έδρασης μεταβλητού πάχους (ελάχιστο πάχος 1 μ.) στις ύφαλες διατομές, ενώ στις έξαλες μόνο από την πλευρά της θάλασσας. Πάνω από την στρώση έδρασης δημιουργείται στρώση ποδός (toe layer) με βαρύτερα υλικά, κατηγορίας 300 – 1000 kg, επίσης μεταβλητού πάχους (ελάχιστο πάχος 1,30 μ.). Στις ύφαλες διατομές και περιμετρικά των πρानών και της στέψης του πυρήνα υπάρχει η στρώση φίλτρου (filter layer), πάχους 1,90 μ., με φυσικούς ογκόλιθους κατηγορίας 1-3 tn. Στις έξαλες διατομές η στρώση αυτή υπάρχει στην στέψη και το εξωτερικό πρानές (προς τη θάλασσα) ενώ εσωτερικά υπάρχει στρώση φίλτρου πάχους ενός μέτρου με υλικά διαμέτρου 2’’-6’’. Εξωτερικά της στρώσης φίλτρου 1- 3 tn κατασκευάζεται η στρώση θωράκισης από τεχνητούς ογκόλιθους. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η στέψη του πυρήνα των ύφαλων διατομών αποφασίστηκε κατά την διάρκεια εκτέλεσης του έργου να κατασκευαστεί με υλικά κατηγορίας 1-3 tn λόγω καταστροφής της από τον κυματισμό της θάλασσας, κατά την διάρκεια κακοκαιρίας. Τέτοιες αλλαγές υπήρξαν αρκετές κατά την διάρκεια κατασκευής του έργου με αποτέλεσμα οι τελικές διατομές να διαφέρουν σημαντικά από την αρχική μελέτη.

Οι στρώσεις που συμφωνήθηκε να κατασκευάστηκαν από τον υπεργολάβο είναι οι λιθορριπές (πυρήνας, toe layer και filter layer) μέχρι κάποια συγκεκριμένη μέγιστη στάθμη κάτω από την ΜΣΘ. Λόγω των δυνατοτήτων των πλωτών μέσων (βύθισμα, απαιτούμενο ελεύθερο βάθος για δυνατότητα απόρριψης υλικών), η μέγιστη στάθμη αυτή ορίστηκε στα -5 μ. ενώ η ακρίβεια κατασκευής των στρώσεων ορίστηκε στα 0,80 μέτρα.

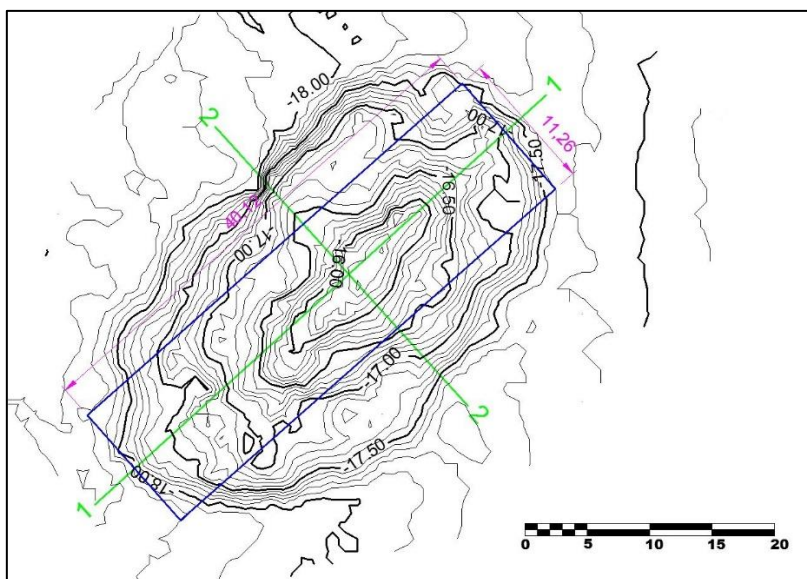
## 4.2 Εκμάθηση, εφαρμογή και αξιολόγηση του συστήματος καθοδήγησης.

Κατά την διάρκεια της εγκατάστασης του συστήματος πραγματοποιήθηκε και η εκπαίδευση του προσωπικού που θα το χρησιμοποιούσε. Αρχικά εκπαιδεύτηκαν δυο μηχανικοί της εταιρείας με τηλεεκπαίδευση, λόγω των προβλημάτων στις διακρατικές μετακινήσεις, εξαιτίας της επιδημίας Covid. Τα μαθήματα διήρκεσαν 4 ώρες αλλά χρειάστηκε άλλος τόσος χρόνος προσωπικής ενασχόλησης με το λογισμικό και διαβάσματος του εγχειριδίου χρήσης. Τα θέματα που καλύφθηκαν αφορούσαν την εγκατάσταση, την παραμετροποίηση, την λειτουργία, την εισαγωγή και εξαγωγή αρχείων και την παραγωγή σχεδίων. Στην συνέχεια ακολούθησε η εκπαίδευση των κυβερνητών των σκαφών από τους μηχανικούς. Απαιτήθηκε περίπου δυο

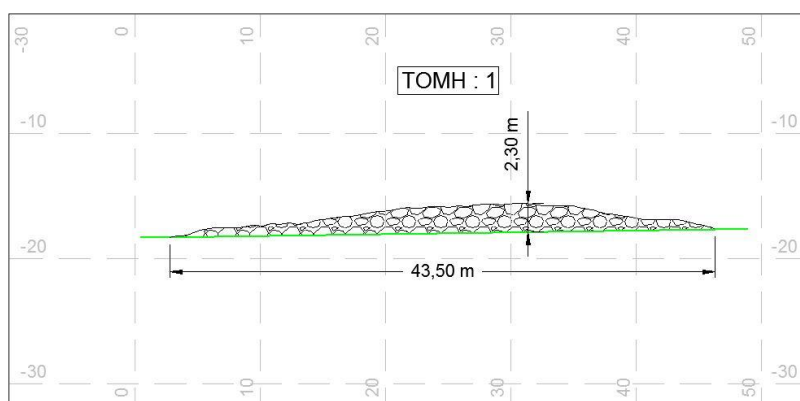
ώρες και έγινε εν πλω. Αυτή τη φορά το αντικείμενο ήταν περιορισμένο και αφορούσε το άνοιγμα και κλείσιμο του λογισμικού, τον έλεγχο καλής λειτουργίας του και των ενεργειών που πρέπει να γίνουν κατά την στιγμή της απόρριψης. Κατά τη διάρκεια της έγιναν και προσομοιώσεις απορρίψεων, για να διαπιστωθούν οι δυσκολίες στην εφαρμογή του.

Όσον αφορά τους κυβερνήτες των σκαφών η εκμάθηση είναι γρήγορη όμως η αποδοτική και αποτελεσματική εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του λογισμικού επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την πείρα που αποκτάται κατά τη διάρκεια της εργασίας και από τις ικανότητες τους στον χειρισμό του σκάφους. Αντίθετα η εκμάθηση από ένα μηχανικό απαιτεί χρόνο καθώς η πολυπλοκότητα και το πλήθος των δυνατοτήτων του επιβάλουν την ενασχόληση με αυτό για αρκετούς μήνες πριν υπάρξει σε βάθος γνώση του. Εντελώς απαραίτητο κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης είναι να δημιουργηθεί κάποιο αρχείο οδηγιών με τα βήματα εγκατάστασης και παραμετροποίησης του λογισμικού που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα σε ενδεχόμενη μεταφορά του εξοπλισμού σε άλλο σκάφος ή σε περιπτώσεις προβλημάτων. Τα προβλήματα αυτά ήταν αρκετά το πρώτο διάστημα κυρίως λόγω λανθασμένων ενεργειών ή πειραματισμών και η διαθεσιμότητα internet πάνω στο σκάφος βοήθησε στην απομακρυσμένη επίλυσή τους. Γι' αυτό ίσως αρχικά συμφέρει η ενεργοποίηση κάποιου πακέτου υποστήριξης από την εταιρεία προμήθειας (τουλάχιστον για τον πρώτο χρόνο χρήσης), μέχρι να υπάρξει εξοικείωση με το λογισμικό. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η σπουδαιότητα του έργου και τα πιθανά κόστη των καθυστερήσεων σε περίπτωση προβλημάτων.

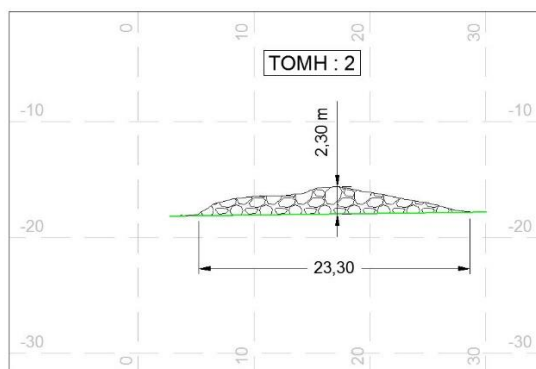
Εκτός όμως από τον χειρισμό του λογισμικού ο μηχανικός θα πρέπει να αποκτήσει πείρα στην συμπεριφορά των υλικών και την τελική γεωμετρία που αποκτούν μετά την απόρριψή τους σε διάφορα βάθη, είτε στον φυσικό πυθμένα είτε πάνω σε υφιστάμενες αποθέσεις υλικών. Αυτό είναι απαραίτητο για τον σωστό σχεδιασμό των ταξιδιών απόρριψης (χρησιμοποιούμενο σκάφος, ποσότητα υλικού, αριθμός απαιτούμενων δρομολογίων, επικάλυψη θέσεων απόρριψης κ.α.) και επομένως και την σωστή κατασκευή. Οι αποτυπώσεις που έγιναν μετά τις πρώτες απορρίψεις των φορτηγίδων στο φυσικό πυθμένα και με πλήρες φορτίο, αποτέλεσαν μια πάρα πολύ καλή ευκαιρία για την αρχική κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών μετά την απόρριψη τους. Η πείρα που αποκτήθηκε στην συνέχεια, κατά την διάρκεια του έργου, είχε σαν αποτέλεσμα την περεταίρω βελτίωση της κατασκευαστικής ακρίβειας και της ποιότητας του παραγόμενου αποτελέσματος.



Εικόνα 32. Αποτύπωση απόρριψης από τη φορτηγίδα Μαριάννα XX σε σχεδόν επίπεδο πυθμένα βάθους 18 μέτρων περίπου. Με μπλε χρώμα δίνεται το περίγραμμα της χοάνης κατά τη στιγμή της απόρριψης.



Εικόνα 33. Τομή κατά μήκος της απόρριψης.



Εικόνα 34. Τομή κατά πλάτος της απόρριψης.

Όσον αφορά την κατασκευή του πυρήνα ο οποίος είναι τραπεζοειδούς περίπου σχήματος (ή σύνθεση τραπεζοειδών σχημάτων) τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του συστήματος κρίνονται εντυπωσιακά. Αυτό συμβαίνει λόγω του παρόμοιου σχήματος και των απορρίψεων με την κατάλληλη επαλληλία των οποίων σχηματίζεται η λιθορριπή του πυρήνα (βλέπε παραπάνω σχήματα). Δυσκολία στην κατασκευή υπάρχει στην περίπτωση κεκλιμένων στρώσεων ή όταν εξαιτίας των υψομέτρων του πυθμένα προκύπτουν μικρού πάχους στρώσεις (μικρότερες από 1 μ.). Μια τέτοια περίπτωση είναι η στρώση με υλικά πυρήνα κάτω από την στρώση ποδός (toe layer). Στη στρώση αυτή ενώ το υψόμετρο της στέψης της, σύμφωνα με τη μελέτη, παραμένει σταθερό για μεγάλα τμήματα του έργου, ο πυθμένας μεταβάλλεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προκύπτουν μικρά πάχη σε κάποιες περιοχές. Η λύση που δόθηκε για τις περιοχές αυτές ήταν να παραλείπεται η στρώση αυτή και να κατασκευάζεται η υπερκείμενη στρώση ποδός με μεγαλύτερο πάχος. Η λύση αυτή εκτός από κατασκευαστικούς υιοθετήθηκε και για οικονομικούς λόγους καθώς θα οδηγούσε σε πολλά δρομολόγια με μικρή ποσότητα υλικών, πράγμα ασύμφορο. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να αποδοθεί στην χρησιμοποιούμενη μέθοδο κατασκευής με λιθορριπή και όχι στη χρήση συστήματος καθοδήγησης.

Στο hardware του συστήματος δεν σημειώθηκαν σημαντικά προβλήματα κατά τη λειτουργία του. Βλάβες υπήρξαν στην κεραία του base και στην κεραία ενός από τους δέκτες rover οι οποίες αντικαταστάθηκαν. Πιθανόν οφείλονταν σε ταλαντώσεις κατά την ώρα της απόρριψης των υλικών ή εξαιτίας του ανέμου καθώς αμφότερες ήταν τοποθετημένες σε μεταλλικές βάσεις. Οι βάσεις αυτές θα πρέπει να έχουν το μικρότερο δυνατό ύψος για να ελαχιστοποιούνται οι ταλαντώσεις. Συστήνεται επίσης η χρήση κεραιών βαρέος τύπου (rugged) οι οποίες, αν και ακριβότερες, είναι καταλληλότερες σε περιβάλλον με δονήσεις. Μαζί με την αγορά του συστήματος απαραίτητη είναι και η προμήθεια ανταλλακτικών (κεραίες, καλώδια κ.τ.λ.), τα οποία αν και δεν έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος, η αντικατάστασή τους σε περίπτωση βλάβης μπορεί να έχει πολλαπλάσιο οικονομικό κόστος ή κόστος σε χρόνο για τον εργολάβο ειδικά αν το έργο γίνεται σε χώρα του εξωτερικού.

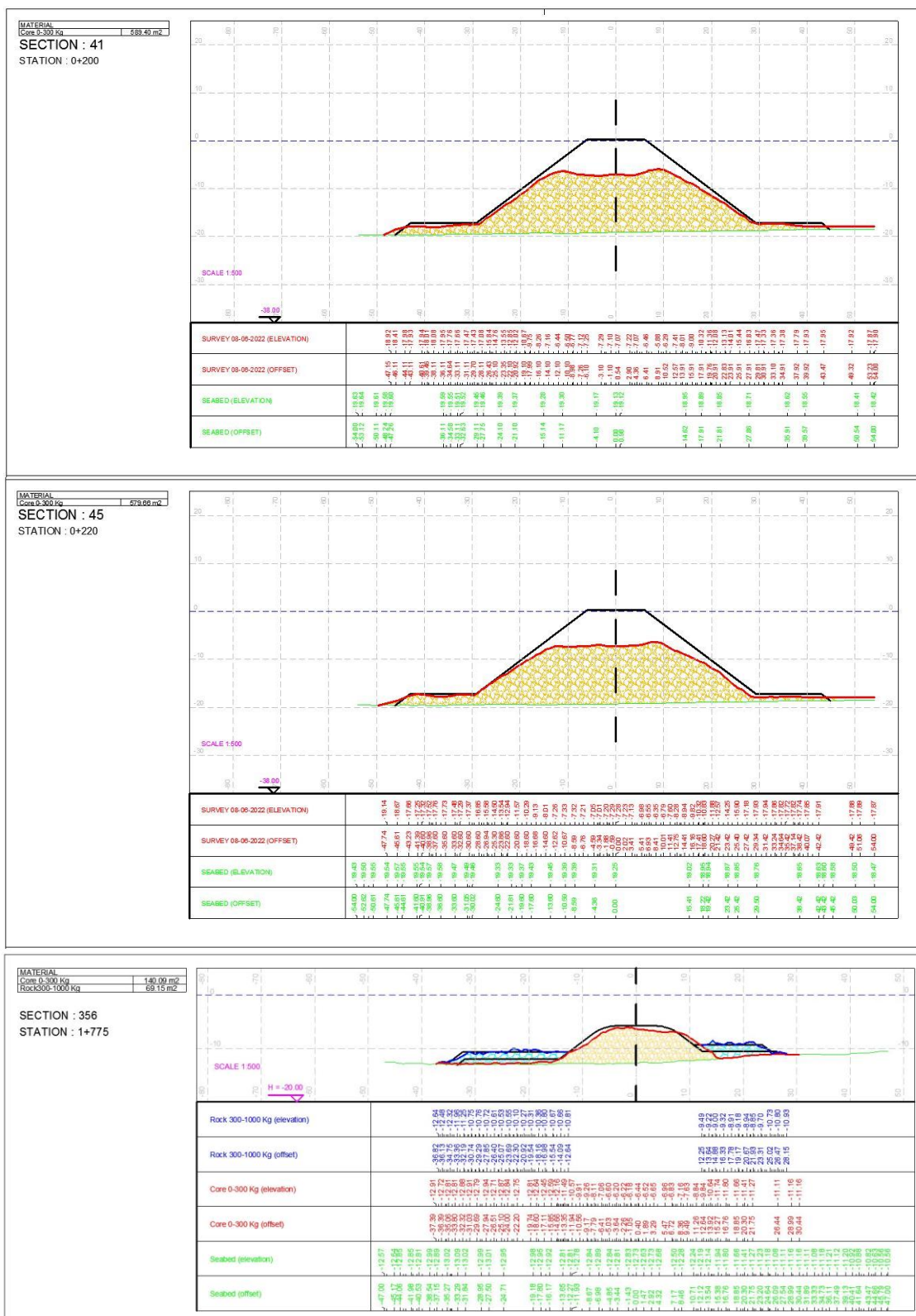
Σε κάθε περίπτωση το σύστημα καθοδήγησης που χρησιμοποιήθηκε αποδείχτηκε ένα πολύτιμο εργαλείο. Ο συνδυασμός του με λογισμικά απομακρυσμένης πρόσβασης (Teamviewer, Anydesk) και η χρήση του διαδικτύου ακόμη και εν πλω διέκρινε περαιτέρω τις δυνατότητες του. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που διαπιστώθηκαν από τη χρήση του είναι τα παρακάτω:

- Η γνώση σε πραγματικό χρόνο της θέσης και διεύθυνσης του σκάφους στην περιοχή των εργασιών.

- Η ακρίβεια στην πραγματοποίηση των απορρίψεων.
- Ο καλύτερος, ευκολότερος και σε πραγματικό χρόνο έλεγχος και τεκμηρίωση των εργασιών απόρριψης.
- Ο σχεδιασμός πολλών δρομολογίων για κάθε σκάφος, χωρίς να απαιτούνται νέες οδηγίες.
- Ο μηχανικός μπορεί να διευθύνει μεγάλο μέρος της κατασκευαστικής διαδικασίας και να δίνει οδηγίες στο προσωπικό χωρίς να απαιτείται η φυσική παρουσία του στο χώρο των εργασιών.
- Η μείωση του απαιτούμενου προσωπικού και χρόνου για την κατασκευή του έργου.
- Η δυνατότητα εργασίας με περιορισμένο φως ή τη νύχτα.
- Ο κυβερνήτης του σκάφους μπορεί να βλέπει σε πραγματικό χρόνο σημαντικές πληροφορίες για την εργασία του όπως βάθη, θέσεις απόρριψης που απομένουν, εμπόδια κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, περιοχές που πρέπει να αποφεύγει. Έτσι εντοπίζει την καλύτερη κάθε φορά διαδρομή αλλά και αποφεύγεται η πρόκληση ατυχημάτων.

Το συνολικό κόστος για του συστήματος για την αγορά, εκπαίδευση και την εγκατάσταση διαμορφώθηκε περίπου στις 30.000 € για κάθε σκάφος. Το ποσό αυτό κρίνεται πολύ λογικό διότι εκτός των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν, χωρίς τη χρήση του η εταιρεία δεν θα μπορούσε να αναλάβει καν την εκτέλεση του έργου. Σήμερα οι τεχνικές εταιρείες στην Ελλάδα επενδύουν σχεδόν αποκλειστικά στην αγορά μηχανημάτων για την εκτέλεση περισσότερων τεχνικών έργων και την αύξηση της παραγωγής. Πολλές φορές όμως είναι οι μικρές επενδύσεις σε τεχνολογία και η εκπαίδευση του προσωπικού που μπορούν να οδηγήσουν στην ανάπτυξη, την κερδοφορία και την επιτυχία.





Εικόνα 35. Ενδεικτικές διατομές επιμέτρησης υλικών πυρήνα στις οποίες φαίνονται οι γραμμές της μελέτης (μαύρο χρώμα), η γραμμή του πυθμένα (πράσινο χρώμα), η γραμμή του πυρήνα (κόκκινο χρώμα) και η γραμμή της στρώσης ποδός με μπλε χρώμα.

#### 4.3 Εφαρμογή και αξιολόγηση των αποτυπώσεων με ηχοβολιστικό πολλαπλής δέσμης.

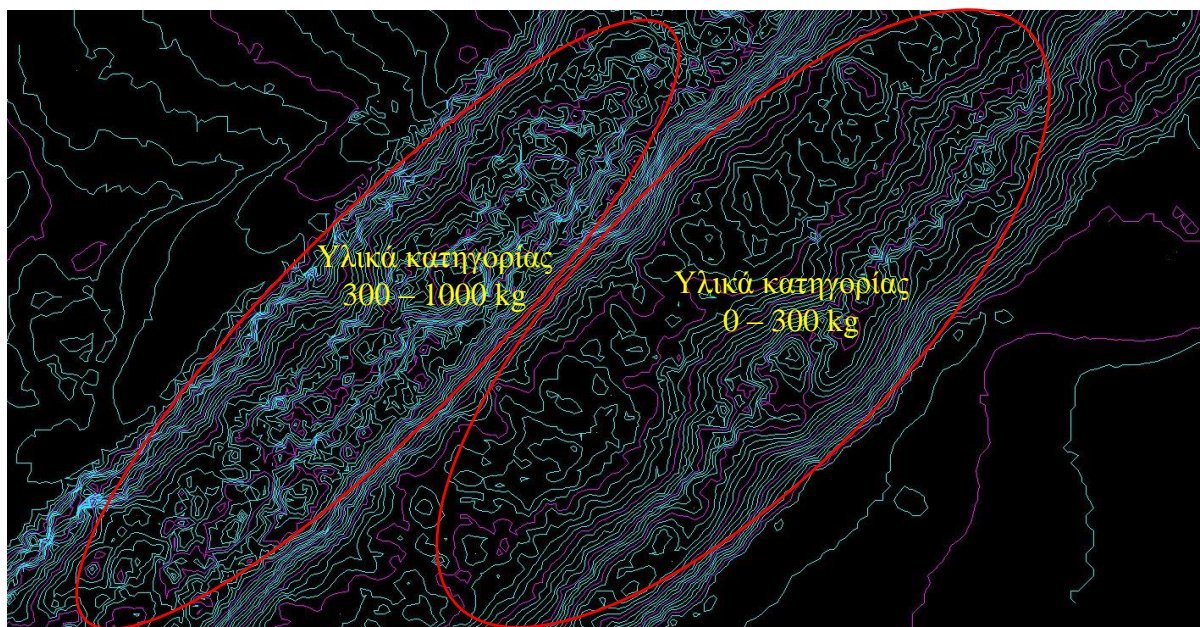
Η αποτύπωση με ηχοβολιστικό πολλαπλής δέσμης αποτελεί σήμερα την καλύτερη μέθοδο αποτύπωσης του θαλάσσιου πυθμένα. Σε τεχνικά έργα που καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις και στα οποία παρατηρούνται απότομες αλλαγές των βαθών σε μικρές αποστάσεις η εφαρμογή της είναι μονόδρομος. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της σε σχέση με παραδοσιακές μεθόδους αποτύπωσης είναι η συλλογή δεδομένων υψηλής ανάλυσης και ο μικρός χρόνος κάλυψης ακόμη και μεγάλων περιοχών καθώς απαιτούνται λιγότερα περάσματα.



Εικόνα 36. Το σκάφος που χρησιμοποιήθηκε για τις αποτυπώσεις.

Οι βυθομετρικές αποτυπώσεις για την εταιρεία γίνονταν από εξωτερικό συνεργείο. Πραγματοποιούνταν στο τέλος κάθε μήνα για την επιμέτρηση των ποσοτήτων, στις παραλαβές των κατασκευαστικών στρώσεων αλλά και μετά από απορρίψεις υλικών για να διαπιστωθεί η αναγκαιότητα επιπλέον απορρίψεων. Η αποτύπωση και ο υπολογισμός των βυθομέτρων της συνολικής έκτασης του έργου γινόταν σε 2 με 3 ημέρες. Σε κάθε μια από αυτές ένα τρίωρο περίπου αφιερωνόταν στις εργασίες πεδίου. Το εύρος της ζώνης αποτύπωσης εξαρτιόταν από την πρόοδο των εργασιών με μια μέση τιμή τα 120 μέτρα. Οι αποτυπώσεις πολλές φορές δεν κάλυπταν το σύνολο του έργου αλλά μόνο περιοχές που είχαν γίνει εργασίες. Για να μην δημιουργούνται μεγάλα και δύσχρηστα αρχεία σημείων καθώς σε κάθε αποτύπωση

λαμβάνονται εκατομμύρια σημεία, τα παραδοτέα ήταν αρχεία σημείων σε κανάβο πλευράς 0,5 ή 1,0 μέτρο. Οι αναλύσεις αυτές είναι ικανοποιητικές για επιμετρητικές ανάγκες και μάλιστα σε ανάλυση 0,5 μέτρα μπορεί να γίνει και διάκριση περιοχών με διαφορετικά υλικά κατασκευής από την ομαλότητα των ισοβαθών καμπυλών. Μεγαλύτερες αναλύσεις δεν χρησιμοποιήθηκαν καθώς δεν προσέφεραν σημαντικά στην ακρίβεια της κατασκευής και των επιμετρήσεων ενώ παράλληλα απαιτούσαν υπολογιστές με μεγάλη επεξεργαστική ισχύ για την διαχείριση των αρχείων. Άλλωστε θα ήταν παράλογο να ισχυριστεί κανείς ότι σχεδιάζοντας γραμμές με πολύ μεγάλη ακρίβεια στις θέσεις των διατομών βελτιώνει αντίστοιχα και την ακρίβεια στην κατασκευή ή τον υπολογισμό των ποσοτήτων, αφού στη λιθορριπή δεν υπάρχει ομαλή μεταβολή του υλικού ανάμεσα στις διατομές.

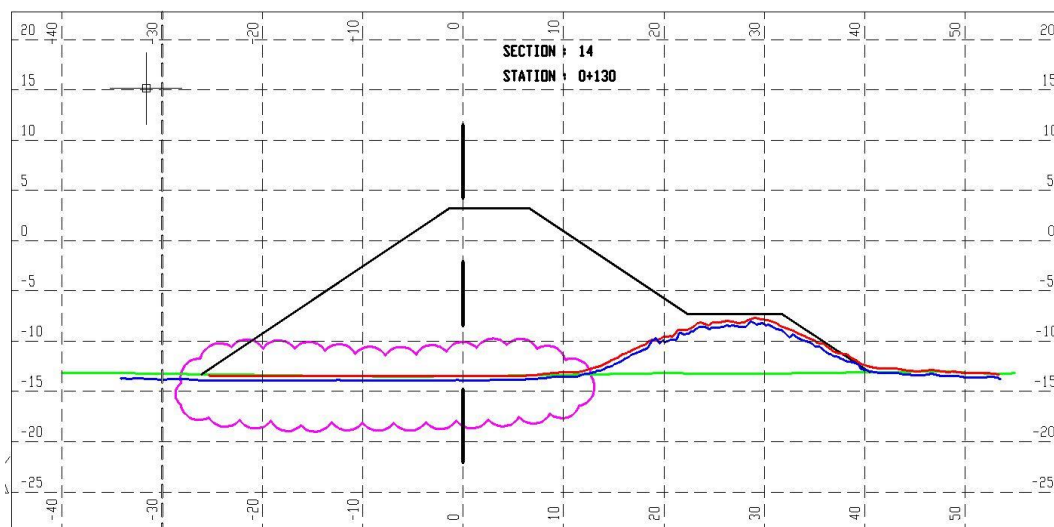


Εικόνα 37. Διάκριση περιοχών διαφορετικών υλικών κατασκευής από τις ισοϋψείς. Το βυθομετρικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τη μορφή κανάβου πλευράς 0,5 μέτρων και η ισοδιάσταση είναι 0,20 μέτρα.

Παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση των ηχοβολιστικών πολλαπλής δέσμης τα παραγόμενα αποτελέσματα δεν θα πρέπει να θεωρούνται de facto σωστά. Η βυθομετρήσεις θα πρέπει να γίνονται από έμπειρο συνεργείο που διαθέτει όλο τον απαιτούμενο εξοπλισμό. Λόγω της σπουδαιότητας της ταχύτητας του ήχου στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων θα πρέπει να γίνονται συνεχείς μετρήσεις της ταχύτητας του κατά την διάρκεια των μετρήσεων και να μην χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς το προφίλ που έχει μετρηθεί κάποια άλλη στιγμή ή σε διπλανή περιοχή. Σε αρκετές περιπτώσεις υπήρξαν διαφορές της τάξης των 40 εκατοστών σε



σχέση με προηγούμενες βυθομετρήσεις, χωρίς να έχουν εκτελεστεί όμως εργασίες. Αυτό οφείλεται είτε στη χρήση λανθασμένου προφίλ της ταχύτητας του ήχου από το συνεργείο αποτύπωσης είτε στην δημιουργία αιωρημάτων κατά τις εργασίες κατασκευής. Όταν τα σφάλματα είναι μεγάλα είναι εύκολο να εντοπιστούν κατά την επιμέτρηση των εργασιών καθώς στις σχεδιαζόμενες διατομές παρουσιάζεται ασυμφωνία της γραμμής του φυσικού πυθμένα και της γραμμής της βυθομέτρησης χωρίς να υπάρχει λόγος (π.χ. εργασίες από άλλα συνεργεία). Προσοχή θα πρέπει να δίνεται επίσης στις βυθομετρήσεις που χρησιμοποιούνται στον προγραμματισμό μελλοντικών ρίψεων καθώς λάθη στις βυθομετρήσεις μπορεί να οδηγήσουν σε κατασκευαστικά σφάλματα και σπατάλη χρόνου και πόρων. Λόγω της σπουδαιότητας της αρχικής βυθομέτρησης (παραλαβή φυσικού πυθμένα) στον υπολογισμό των ποσοτήτων, καλό είναι μια τεχνική εταιρία που αναλαμβάνει να εκτελέσει ένα τεχνικό έργο να προχωρά σε επιβεβαίωση των βαθών με αποτύπωση από διαφορετικό συνεργείο για την αποφυγή μελλοντικών διαφωνιών.



Εικόνα 38. Διατομή με γραμμές αποτυπώσεων δυο διαφορετικών ημερών (κόκκινη και μπλε). Οι δυο αποτυπώσεις είναι σχεδόν παράλληλες αλλά διαφέρουν περίπου 40 εκατοστά. Στην περιοχή που δεν έχουν γίνει απορρίψεις η μπλε γραμμή είναι χαμηλότερα από τον φυσικό πυθμένα (πράσινη γραμμή). Αντίθετα στην αποτύπωση που απεικονίζεται με κόκκινη γραμμή υπάρχει ταύτιση με το φυσικό πυθμένα.

#### 4.4 Εφαρμογή και αξιολόγηση της μεθόδου επιμέτρησης.

Η χρήση προγραμμάτων επιμέτρησης σε ένα σύγχρονο έργο είναι επιβεβλημένη λόγω της ταχύτητας και της ακρίβειας στους υπολογισμούς και στο σχεδιασμό, έναντι απλών σχεδιαστικών προγραμμάτων όπως το Autocad. Μια επιμέτρηση με διατομές που παλιότερα μπορεί να χρειαζόταν μέρες, σήμερα γίνεται σε ώρες και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ταυτόχρονα

με τη δυνατότητα γραμμοσκίασης των επιμετρούμενων εμβαδών που διαθέτουν τα λογισμικά καθιστούν εύκολο και τον έλεγχο των ποσοτήτων.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η επιμέτρηση στο έργο γινόταν και από την εταιρεία κατασκευής όσο και από τον πελάτη με διαφορετικά λογισμικά επιμέτρησης. Η επιμετρήσεις γινόταν συνήθως τέλος του μήνα (εκτός αν λόγω καιρού δεν μπορούσαν να γίνουν βυθομετρήσεις) και οι ποσότητες υπολογίζονταν ανακεφαλαιωτικά. Τα μόνα κοινά χρησιμοποιούμενα στοιχεία στις επιμετρήσεις ήταν εξ αρχής τα αρχεία συντεταγμένων των βυθομετρήσεων (ακόμη και για το φυσικό έδαφος). Από την πλευρά της εταιρείας κατασκευής εκτός από την επιμέτρηση του πελάτη γινόταν επιπλέον ο έλεγχος της συμφωνίας των μηνιαίων υπολογισμένων ποσοτήτων με τις ποσότητες που προκύπταν από τα βάρη του μητρώου απορρίψεων κάνοντας παραδοχές για το ειδικό βάρος. Οι προκύπτουσες διαφορές σε κάθε περίπτωση γίνονταν αποδεκτές εφόσον βρίσκονταν μέσα σε λογικά πλαίσια που καθορίζονταν λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά από παράγοντες από τους οποίους μπορεί να επηρεάζονται όπως:

- Η αβεβαιότητα στον αριθμό των αποτυπωμένων απορρίψεων της πρώτης και τελευταίας ημέρας της περιόδου επιμέτρησης
- Η έκταση των περιοχών απορρίψεων και το πιθανό σφάλμα των βυθομετρήσεων
- Η αβεβαιότητα στο ειδικό βάρος των απορριπτόμενων υλικών
- Η αβεβαιότητα στον υπολογισμό του βάρους των απορριπτόμενων υλικών από το βύθισμα των φορτηγίδων
- Η διαρκής συμπύκνωση των απορριπτόμενων υλικών υπό το βάρος τους
- Η καθίζηση του θαλάσσιου πυθμένα λόγω της επιφόρτισης
- Μετακινήσεις του υλικού από τον κυματισμό, τα υποθαλάσσια ρεύματα και την αποκατάσταση εσωτερικής ισορροπίας δυνάμεων που ίσως χρειαστεί αρκετό χρονικό διάστημα μετά την απόρριψη του.
- Μεταφορά λάσπης εντός των ορίων των διατομών από συνυπάρχουσες χωματοургικές εργασίες άλλων συνεργείων

Σε περίπτωση μεγάλης ογκομετρικής διαφοράς μεταξύ των δυο επιμετρήσεων γινόταν ανταλλαγή στοιχείων (διατομές, μοντέλα εδάφους) για να διαπιστωθεί που οφείλονταν αυτές



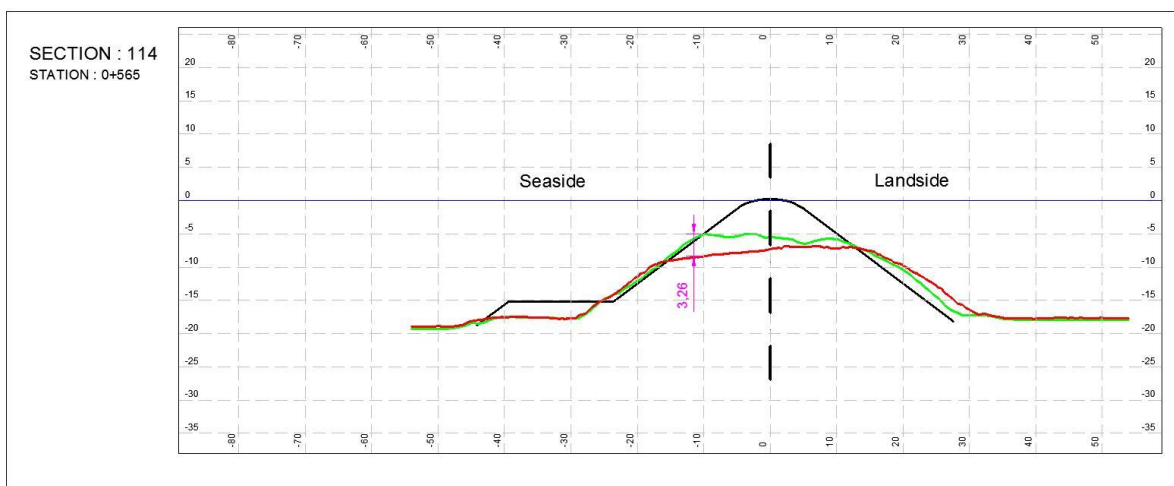
και να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις. Μια οριακή τιμή της διαφοράς αυτής, στην πλήρη ανάπτυξη του έργου, ήταν τα 5000 m<sup>3</sup>. Επίσης σημαντικό κριτήριο για την αποδοχή της επιμέτρησης του πελάτη, από την υπεργολάβο εταιρεία, ήταν το ποσοστό της διαφοράς ως προς τον συνολικό όγκο των εκτελεσμένων εργασιών, το οποίο μπορεί να μεταφραστεί και ως ποσοστό των μελλοντικών εσόδων του.

Κατά την διάρκεια κατασκευής παρουσιάστηκαν ορισμένα προβλήματα στις επιμετρήσεις. Τα προβλήματα αυτά και οι λύσεις που δόθηκαν για την επίλυση τους είναι τα παρακάτω:

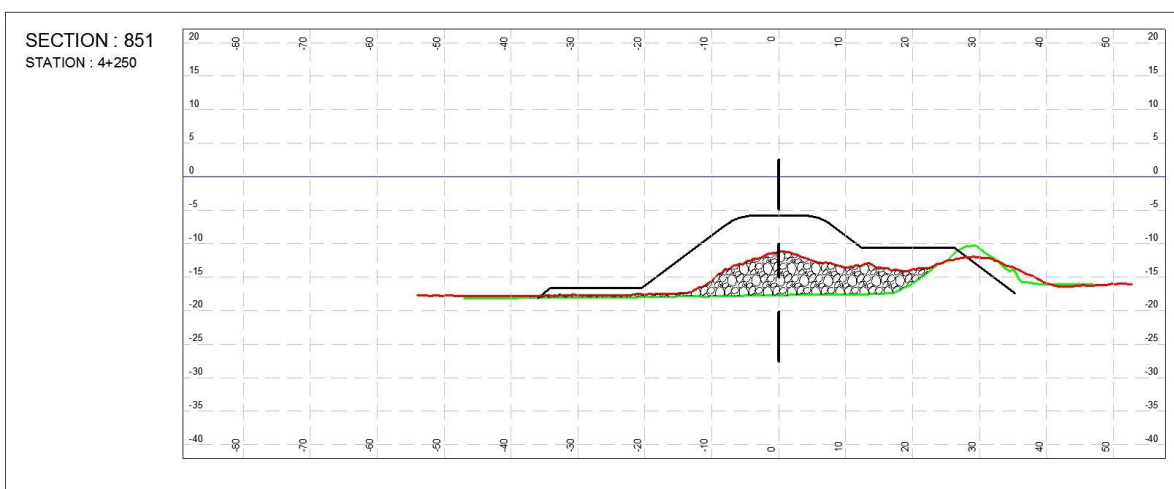
- Λόγω των μικροδιαφορών των μοντέλων αποτύπωσης και φυσικού πυθμένα προέκυπταν ποσότητες ακόμη και σε περιοχές που δεν είχαν εκτελεστεί εργασίες. Οι περιοχές αυτές αποκλείστηκαν από τους υπολογισμούς με κατάλληλη ρύθμιση του λογισμικού.
- Η εισαγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους στο αρχείο των διατομών επιμέτρησης δημιούργησαν μεγάλα σε μέγεθος αρχεία που ήταν δύσχρηστα. Η λύση ήταν τα ψηφιακά μοντέλα να χρησιμοποιούνταν σαν εξωτερικές αναφορές για να μην επηρεάζεται το μέγεθος των αρχείων.
- Υπήρξαν περιπτώσεις αλλαγών της μελέτης σε τμήματα του έργου στα οποία είχαν ήδη εκτελεστεί εργασίες. Στις αλλαγές αυτές υπήρχε τροποποίηση των τυπικών διατομών ή μικρή μετατόπιση του άξονα του κυματοθραύστη ή και τα δυο. Κάποια υλικά που είχαν ήδη αποτεθεί σωστά μπορεί να έμεναν τώρα εκτός διατομής. Επίσης κατά τη διάρκεια θαλασσοταραχών υλικό του πυρήνα που δεν είχε ακόμη προστατευθεί από την κατασκευή της στρώσης θωράκισης μπορεί να παρασυρόταν εκτός διατομής. Για να μην χάνονται οι ποσότητες αυτές, που προηγουμένως είχαν υπολογιστεί και μπορεί να ήταν αρκετές, κατασκευαζόταν νέα γραμμή του φυσικού πυθμένα από αποτύπωση πριν την αλλαγή της μελέτης ή μετά την θαλασσοταραχή και με βάση αυτή υπολογίζονταν όλες οι νέες ποσότητες. Σε αυτές προστίθεντο και οι υπολογισμένες ποσότητες της τελευταίας επιμέτρησης για τα τμήματα αυτά.

Αυτός που ασχολείται με την επιμέτρηση παρόμοιων έργων θα πρέπει πάντοτε να έχει στο πίσω μέρος του μυαλού του ότι το θαλάσσιο περιβάλλον είναι ένα δυναμικό περιβάλλον και ότι η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί στους υπολογισμούς υπόκειται σε περιορισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω. Μια λιθορριπή δεν έχει αυστηρώς γεωμετρικό σχήμα και επομένως η παραδοχή της μεθόδου των μέσων επιφανειών για την ύπαρξη μιας μέσης επιφάνειας στο

μέσο της απόστασης μεταξύ των διατομών μπορεί να μην ισχύει (ανάλογα και με την απόσταση των διατομών). Περιορισμοί υπάρχουν ακόμη και στις χρησιμοποιούμενες τοπογραφικές μεθόδους αποτύπωσης, που βασίζονται σε διαφορετικές αρχές από αυτές που χρησιμοποιεί η κλασική τοπογραφία. Έτσι μπορεί να προκύπτουν διαφορές στις υπολογισμένες ποσότητες, ακόμη και για τις ίδιες εργασίες, αν έχει μεσολαβήσει έστω και κάποιο μικρό χρονικό διάστημα μεταξύ των επιμετρήσεων. Κάθε δεδομένο που χρησιμοποιείται θα πρέπει να ελέγχεται για την ορθότητά του και να διασφαλίζεται ότι όλες οι εργασίες που έχουν γίνει συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς. Τέλος ορθότερο είναι οι βυθομετρικές αποτυπώσεις να παραδίδονται εκτός από τη μορφή αρχείου σημείων και με τη μορφή ψηφιακών μοντέλων εδάφους για να υπάρχει κοινή αναφορά από όλους τους εμπλεκόμενους στους υπολογισμούς.



Εικόνα 39. Στρώση πυρήνα πριν (πράσινη γραμμή) και μετά από κακοκαιρία (κόκκινη γραμμή).



Εικόνα 40. Επιμέτρηση πυρήνα μετά από την μετατόπιση άξονα κατά 28 μ. περίπου. Η τελευταία αποτύπωση πριν τη μετακίνηση (πράσινη γραμμή) χρησιμοποιείται σαν νέο έδαφος.

## 5 Συμπεράσματα

Η υιοθέτηση σύγχρονων τεχνολογιών στα τεχνικά έργα σήμερα είναι επιβεβλημένη για κάθε τεχνική εταιρία που θέλει να έχει πλεονέκτημα έναντι των ανταγωνιστών της, αλλά και για την είσοδο της σε νέες αγορές. Οι τεχνολογίες αυτές αφορούν σήμερα όλες τις λειτουργίες και δραστηριότητες που μπορεί να έχει μια τεχνική εταιρεία. Μικρές επενδύσεις σε καινοτόμα τεχνολογικά προϊόντα μπορούν να αυξήσουν κατακόρυφα τις δυνατότητες του υπάρχοντος εξοπλισμού μιας εταιρείας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η χρήση σύγχρονων τεχνολογιών, για την κατασκευή και επιμέτρηση στρώσεων λιθορριπής, σε έργο κυματοθραύστη στην περιοχή Abu Qir της Αιγύπτου. Συγκεκριμένα περιγράφηκε η διαδικασία εκτέλεσης και επιμέτρησης των εργασιών του έργου χρησιμοποιώντας σύστημα καθοδήγησης φορτηγίδων, ηχοβολιστικό σύστημα πολλαπλής δέσμης και λογισμικό επιμέτρησης με διατομές. Επίσης αναφέρθηκαν προβλήματα που προέκυψαν κατά την χρήση των παραπάνω μεθόδων.

Όσον αφορά το σύστημα καθοδήγησης διαπιστώθηκε ότι με ένα κόστος περίπου 30.000 € ανά φορτηγίδα προκύπτουν σημαντικά οφέλη. Σε αυτά περιλαμβάνονται η ακρίβεια στην κατασκευή, ο απομακρυσμένος και άμεσος έλεγχος των εργασιών, η εργασία χωρίς φωτισμό, η μείωση του απαιτούμενου προσωπικού και του χρόνου κατασκευής και η ασφάλεια μετακίνησης στο χώρο των εργασιών. Στην κατασκευή στρώσεων τραπεζοειδούς μορφής όπως ο πυρήνας διαπιστώθηκαν εντυπωσιακά αποτελέσματα από τη χρήση του συστήματος. Σε κεκλιμένες και μικρού πάχους στρώσεις που επηρεάζονται περισσότερο από την χρήση της λιθορριπής ως μεθόδου κατασκευής τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά. Η απόκτηση τέτοιων συστημάτων θα πρέπει να συνοδεύεται με την προμήθεια ανταλλακτικών ώστε να μην σταματούν οι εργασίες για μικροβλάβες. Καλό είναι επίσης να υπάρχει συνδρομή σε τεχνική υποστήριξη, μέχρι να υπάρξει εξοικείωση των χρηστών. Αν και η εκπαίδευση του προσωπικού στην χρήση του συστήματος διαρκεί ελάχιστες ώρες, η σε βάθος εκμάθηση του μπορεί να διαρκέσει και μήνες.

Τα ηχοβολιστικά συστήματα πολλαπλής δέσμης είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για την αποτύπωση του θαλάσσιου πυθμένα καθώς μπορούν να δώσουν δεδομένα υψηλής ανάλυσης. Επειδή όμως η λειτουργία τους βασίζεται στον ήχο, η ταχύτητα του οποίου δεν είναι σταθερή με το βάθος και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, θα πρέπει να γίνονται συνεχείς μετρήσεις της ταχύτητας ενώ σε τακτικά χρονικά διαστήματα θα πρέπει να γίνονται και τεστ

σωστής βαθμονόμησης του εξοπλισμού. Σε αρκετές βυθομετρήσεις διαπιστώθηκαν διαφορές με τα πραγματικά βάθη που έφταναν και τα 40 εκατοστά. Οι διαφορές αυτές οφείλονται είτε στην χρήση λανθασμένου κατακόρυφου προφίλ της ταχύτητας του ήχου είτε σε αιωρήματα στο θαλασσινό νερό από την κατασκευή του έργου.

Η χρήση σύγχρονων λογισμικών στην επιμέτρηση των εργασιών μειώνει σε μεγάλο βαθμό τον απαιτούμενο χρόνο σχεδίασης και υπολογισμών αυξάνοντας έτσι την παραγωγικότητα. Παράλληλα αυξάνουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αφού μειώνεται το ανθρώπινο λάθος. Επίσης καθιστά ευκολότερο των έλεγχο των αποτελεσμάτων οπτικοποιώντας τα επιμετρούμενα εμβαδά στις διατομές με γραμμοσκίαση. Επειδή οι γραμμές των εργασιών στις διατομές επιμέτρησης προκύπτουν από ψηφιακά μοντέλα εδάφους, αυτά θα πρέπει να έχουν την κατάλληλη ανάλυση ώστε να μην δημιουργούνται μεγάλα αρχεία αλλά ταυτόχρονα να επιτυγχάνεται και ακρίβεια στους υπολογισμούς. Αναλύσεις με κλίμακα δεδομένων 0,5 ή 1,0 μ. κρίνονται ικανοποιητικές για εργασίες λιθορριπής. Κατά τη σύνταξη των επιμετρήσεων και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ένας επιμετρητής λιμενικών έργων θα πρέπει να έχει στο μυαλό του ότι α) ο θαλάσσιος πυθμένας είναι ένα δυναμικό περιβάλλον με επίδραση και στις επιμετρήσεις β) ότι μπορεί να υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες στις αποτυπώσεις και για κανένα λόγο δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται δεδομένα άκριτα γ) ότι μια λιθορριπή δεν έχει αυστηρώς γεωμετρικό σχήμα σε αντίθεση με άλλες κατασκευές και έτσι μεταξύ των σχεδιαζόμενων διατομών να μην ισχύει η παραδοχή της μέσης επιφάνειας. Τέλος θα πρέπει να διασφαλίζει ότι όλες οι εργασίες έχουν μετρηθεί και έχουν συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς του.

Κλείνοντας θα πρέπει να αναφερθεί ότι η υιοθέτηση σύγχρονων τεχνολογιών από μια τεχνική εταιρία δεν αρκεί από μόνη της για να προκύψει όφελος γι' αυτή. Απαιτείται παράλληλα και η κατάλληλη εκπαίδευση του προσωπικού. Μόνο ο συνδυασμός και των δυο μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη, κερδοφορία και επιτυχία της.





## Βιβλιογραφία

Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές (πηγές) της Εργασίας.

Andersen, L. T. (2006). Hydraulic Response of Rubble Mound Breakwaters: scale effects-berm breakwaters. Aalborg University.

Angremond, K. D., & Van Roode, F. C. (2004). Breakwaters and closure dams. Spon Press

Fozein Kwanke, N. J. C. (2007). Concrete armour units for breakwaters: A study on the structural integrity.

Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2012). *Elementary surveying*. Prentice hall.

IHO (2011). Manual on hydrography. Publication C-13. Monaco: International Hydrographic Bureau

Makar, A. (2019, November). *Refraction Correction of the Acoustic Wave in Multibeam Systems*. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 362, No. 1, p. 012055). IOP Publishing.

Mann, R. (1998). *Field calibration procedures for multibeam sonar systems* (p. 0019). US Army Corps of Engineers Topographic Engineering Center.

Massie, W. W. (1976). Coastal engineering. Volume III: Breakwater design. Delft University Press.

Mohammadloo, T. H., Snellen, M., Renoud, W., Beaudoin, J., & Simons, D. G. (2019). *Correcting multibeam echosounder bathymetric measurements for errors induced by inaccurate water column sound speeds*. IEEE Access, 7, 122052-122068.

Schofield, W. & Breach, M. (2007). *Engineering surveying*. 6<sup>th</sup> Edition. London: CRC Press

Teledyne RESON A/S (2022). *Seabat T20-R product datasheet*. Ανακτήθηκε 30, Μαρτίου, 2024, από <https://www.teledynemarine.com/brands/reson/seabat-t20-r>

Teledyne RESON B.V. (2019). *Teledyne PDS user manual*.

Trimble Inc. (2017). *SP90m GNSS Receiver user guide (Rev. A)*.

Zwolak, K. (2015). *Underwater objects' detection system choice for harbor surveillance purposes*. Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, 56(1 (200)), 47-58.

Αναστασίου, Δ., Παπανικολάου, Ξ., Μαρίνου Α. & Παραδείσης Δ. (2014). *Εισαγωγικές σημειώσεις στο Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Global Positioning System (GPS)*.

Ανακτήθηκε 5, Φεβρουαρίου, 2024, από

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwji4aPZ6cSEAxUe8bsIHRFiAGEQFnoECBcQAQ&url=http%3A%2F%2Fusers.sch.gr%2Fmppapado%2Fdownloads%2FGPS.pdf&usg=AOvVaw2j1UXw8nmiKt7KkbgtzOFn&opi=89978449>

Αθανασούλης, Γ. & Μπελιμπασάκης Κ. (2012). *Δυναμική πλοίου*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Παλληκάρης, Α., Κατσούλης, Γ. & Δαλακλής Δ. (2016). *Ναυτικά ηλεκτρονικά όργανα και συστήματα ηλεκτρονικού χάρτη ECDIS*. 2<sup>η</sup> Έκδοση, Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.