



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ**

**ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**  
**ΠΟΛΥΔΕΣΜΙΚΟΥ ΗΧΟΒΟΛΙΣΤΗ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΛΙΜΕΝΑ**  
**ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΙΩΣΗΦ ΒΟΥΤΣΙΝΟΣ**

**ΙΟΥΛΙΟΣ 2024**

Επιβλέπων: Γκίκας Βασίλειος, Καθηγητής, Τομέας Τοπογραφίας, Ε.Μ.Π.



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ**

**HYDROGRAPHIC SURVEYS USING A MULTIBEAM  
ECHOSOUNDER SYSTEM: APPLICATION AT THE PORT OF  
ALEXANDROUPOLIS**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΙΩΣΗΦ ΒΟΥΤΣΙΝΟΣ**

**ΙΟΥΛΙΟΣ 2024**

Επιβλέπων: Γκίκας Βασίλειος, Καθηγητής, Τομέας Τοπογραφίας, Ε.Μ.Π.

**ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

<b>ΓΚΙΚΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ</b>	<b>ΠΑΝΤΑΖΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ</b>	<b>ΤΣΑΚΙΡΗ ΜΑΡΙΑ</b>
<b>ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΑΤΜ-ΕΜΠ</b>	<b>ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΑΤΜ-ΕΜΠ</b>	<b>ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΣΑΤΜ-ΕΜΠ</b>

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Γκίκα Βασίλειο για την υποστήριξη και την καθοδήγησή που παρείχε κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Πηνιώτη Γεώργιο, Ε.ΔΙ.Π. και μέλος του εργαστηρίου Γεωδαισίας, για την πολύτιμη και καθοριστική συνδρομή του στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, καθώς και όλους τους διδάσκοντες καθηγητές της ΣΑΤΜ που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στην εταιρία METRICA A.E., ανάδοχος μελέτης του έργου «ΒΥΘΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΛΙΜΕΝΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ», για την παραχώρηση τόσο των δεδομένων της μελέτης όσο και μετρητικών-υπολογιστικών μέσων με σκοπό την επεξεργασία και παρουσίασή τους. Ακόμα ευχαριστώ προσωπικά τον διευθυντή της εταιρίας και τοπογράφο μηχανικό κ. Σχάση Ερρίκο για την συνεργασία και την συνεισφορά του στην πραγματοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας, τον τοπογράφο μηχανικό κ. Ξενάκη Θεόδωρο για την επιστημονική του καθοδήγηση και την απaráμιλλη συνεισφορά του στην εκπόνηση της εργασίας και τον τοπογράφο μηχανικό κ. Μερτίκα Παναγιώτη για την τεχνική και επιστημονική υποστήριξή του στην διεκπεραίωση ολόκληρης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια, τους φίλους και την κοπέλα μου για την ανιδιοτελή και αστείρευτη στήριξή τους και κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Copyright © Ιωσήφ Βουτσίνος, 2024

Με την επιφύλαξη ορισμένων δικαιωμάτων (some rights reserved)

Ως κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων αυτού του έργου το παραχωρώ με άδεια Creative Commons:

Αναφορά Δημιουργού-Μη Εμπορική Χρήση-Όχι Παράγωγα Έργα 4.0, Διεθνής έκδοση





#### 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 δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας κάθε μορφής, 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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αφορά στην περιοχή της υδρογραφίας με την αξιοποίηση συστήματος πολυδεσμικού ηχοβολιστή. Πεδίο εφαρμογής αποτελεί μέρος του λιμένα Αλεξανδρούπολης. Στόχος της εργασίας αποτελεί η μελέτη και επεξεργασία πρωτογενών μετρητικών δεδομένων για την υδρογραφική αποτύπωση της περιοχής μελέτης (βυθομετρικοί χάρτες και κατάλληλα απεικονιστικά παράγωγα). Επιπρόσθετα, στο πλαίσιο της εργασίας αναλύονται τα βασικά στάδια των υδρογραφικών αποτυπώσεων που αφορούν στις τεχνικές και τεχνολογίες προσδιορισμού θέσης και βυθομετρήσεων στη θάλασσα με έμφαση στη τεχνολογία πολυδεσμικών ηχοβολιστών.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες ασφαλούς ναυσιπλοΐας και παρακολούθησης εισροής φερτών υλικών διαχρονικά στον λιμένα από γειτονικούς ποταμούς και την κίνηση υπόγειων υδάτων. Η περιοχή ενδιαφέροντος προσδιορίζεται στο ανατολικό τμήμα του λιμένα, χαρακτηρίζεται από μέσο βάθος -12 m και επιφάνεια περίπου 500.000 m<sup>2</sup>, ενώ για τις ανάγκες λειτουργίας του λιμένα προβλέπεται εκβάθυνση της περιοχής σε τελικό βάθος -15 m.

Η αποτύπωση του πυθμένα διενεργήθηκε με τη χρήση φορητού συστήματος πολυδεσμικού ηχοβολιστή *iWBMS*, που φέρει ενσωματωμένη αδρανειακή μονάδα *Applanix WaveMaster II* και δορυφορικού δέκτη *Trimble GNSS*. Μετά τη συλλογή των πρωτογενών δεδομένων μέσω του λογισμικού *NORBIT DCT*, εισήχθησαν προς επεξεργασία στο λογισμικό πακέτο *HYPACK*. Ακολούθως, με τη χρήση των επεξεργασμένων πλέον δεδομένων μέσω του λογισμικού *LEICA CYCLONE 3DR*, παράχθηκε η ορθοφωτογραφία του ψηφιακού μοντέλου επιφανείας (*TIN MODEL*) και η βυθομετρική εικόνα του τμήματος αποτύπωσης. Τέλος, αξιοποιήθηκε η ορθοφωτογραφία από το λογισμικό τρισδιάστατης αποτύπωσης για την σύνταξη των βυθομετρικών χαρτών στο λογισμικό *CIVIL 3D*.

## ABSTRACT

The subject of this thesis studies and practices multibeam echo sounder technology data in hydrographic mapping and their application in the bathymetric mapping of a section of the port of Alexandroupolis, Greece. The aim of this project is the production of hydrographic products including bathymetric maps and the appropriate imaging derivatives. In addition, the main aspects of hydrographic mapping referred to, the localization at sea and the dredging and the technology of multibeam echo sounders are being extensively discussed in this work.

The survey was conducted in the region of Alexandroupolis and addresses the needs for sustainable navigation and monitoring the inflow of sediments to the port throughout the years, from nearby rivers and groundwater. The survey area, located in the eastern part of the port, has an approximate depth of -12 m from the average sea level (ASL), surface area of approximately 500.000 m<sup>2</sup> and it is planned to be dredged with a final depth of -15 m (ASL).

Seafloor mapping was accomplished using the iWBMS portable multibeam *sonar*, the Applanix WaveMaster II integrated inertial unit and the Trimble GNSS satellite receivers. Once the primary data were acquired using NORBIT DCT software, they were imported for processing in HYPACK software. Subsequently, based on the newly processed data through the LEICA CYCLONE 3DR software, the orthophotograph of the digital surface model (TIN MODEL) and the seafloor image of the survey area were produced. Finally, the orthophotograph from the 3D modelling software was utilized to compile the bathymetric maps in the CIVIL 3D software.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	i
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	iii
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	vii
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	x
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ</b> .....	xi
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</b> .....	1
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	3
1.1 Βασικές Έννοιες – Ορισμοί.....	3
1.1.1 Ωκεανογραφία .....	3
1.1.2 Θαλάσσια Γεωδαισία.....	4
1.1.3 Υδρογραφία .....	5
1.2 Βασικά Στοιχεία Υδρογραφικών Αποτυπώσεων.....	6
1.2.1 Κύριες εργασίες υδρογραφικών αποτυπώσεων .....	6
1.2.2 Στάδια υδρογραφικών αποτυπώσεων .....	7
1.2.3 Προϊόντα υδρογραφικών αποτυπώσεων.....	9
1.2.4 Η υδρογραφία στην Ελλάδα .....	11
<b>2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ</b> .....	13
2.1 Βασικές Αρχές και Απαιτήσεις Ακρίβειας Προσδιορισμού Θέσης.....	13
2.2 Κλασικές και Ραδιομετρικές Μέθοδοι Προσδιορισμού Θέσης.....	14
2.2.1 Κλασικές μέθοδοι .....	15
2.2.1α Διαβαθμισμένο σχοινί .....	15
2.2.1β Εντοπισμός μέσω υλοποίησης παράλληλων διευθύνσεων .....	15
2.2.1γ Τριγωνισμός / Εμπροσθοτομία .....	16
2.2.1δ Εξάντας .....	17
2.2.2 Ραδιομετρικές μέθοδοι .....	18
2.2.2α Κυκλικά συστήματα εντοπισμού .....	18
2.2.2β Υπερβολικά συστήματα εντοπισμού .....	20
2.2.2γ Υπερβολικό σύστημα εντοπισμού Loran-C .....	20
2.3 Δορυφορικός / Αδρανειακός Προσδιορισμός Θέσης .....	22
2.3.1 Δορυφορικές μέθοδοι εντοπισμού .....	22
2.3.1α Βασικές αρχές λειτουργίας των συστημάτων GNSS.....	22

2.3.1β Απόλυτος/Σχετικός εντοπισμός θέσης.....	22
2.3.1γ Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης DGNSS με χρήση ψευδοαποστάσεων .....	23
2.3.1δ Το δορυφορικό σύστημα επαυξήσεως EGNOS της Ευρωπαϊκής Ένωσης .....	24
2.3.1ε Δέκτες GNSS για υδρογραφικές εφαρμογές.....	25
2.3.2 Αδρανειακές μέθοδοι εντοπισμού .....	27
2.3.2α Εισαγωγή στα αδρανειακά συστήματα εντοπισμού .....	27
2.3.2β Αισθητήρες – Πηγές σφαλμάτων .....	28
2.3.2γ Αδρανειακά συστήματα για θαλάσσιες εφαρμογές .....	28
2.3.3 Ολοκληρωμένες δορυφορικές και αδρανειακές μέθοδοι εντοπισμού .....	30
2.3.3α Εισαγωγή στο φίλτρο Kalman .....	30
2.3.3β Μαθηματικά μοντέλα φίλτρου Kalman.....	30
<b>3. ΒΥΘΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ .....</b>	<b>32</b>
3.1 Μέθοδοι και Τεχνικές Βυθομετρικής Αποτύπωσης .....	32
3.1.1 Ιστορική αναδρομή στις βυθομετρικές μεθόδους.....	32
3.1.2 Ακουστικό πεδίο.....	32
3.1.2α Ακουστικά κύματα και φυσικά χαρακτηριστικά στη θάλασσα.....	33
3.1.2β Ανίχνευση ακτινών sonar.....	35
3.1.3 Αισθητήρες κίνησης .....	35
3.1.3α Πορεία (Heading).....	36
3.1.3β Αδρανειακοί αισθητήρες.....	37
3.2 Τεχνολογίες και Συστήματα Βυθομετρήσεων.....	38
3.2.1 Τεχνολογία βυθομετρίας με τη χρήση πλωτού μέσου επιφανείας (shipborne) .....	38
3.2.1α Μονοδεσμικοί Ηχοβολιστές (SBES).....	38
3.2.1β Πολυδεσμικοί Ηχοβολιστές (MBES) .....	39
3.2.1γ Υποβρύχιο radar (sonar) πλευρικής σάρωσης.....	40
3.2.1δ Τρισδιάστατο υποβρύχιο radar (sonar) πανοραμικής σάρωσης.....	41
3.2.2 Διαστημικά και εναέρια συστήματα βαθυμετρίας (airborne and spaceborne).....	41
3.2.2α Σύστημα δορυφορικής αλτιμετρίας.....	42
3.2.2β Σύστημα LiDAR εναέριας βαθυμετρίας (ALB) .....	43
<b>4. ΒΥΘΟΜΕΤΡΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΠΟΛΥΔΕΣΜΙΚΩΝ ΗΧΟΒΟΛΙΣΤΩΝ .....</b>	<b>44</b>
4.1 Αρχές της Τεχνολογίας των Πολυδεσμικών Ηχοβολιστών.....	45
4.2 Βασικές Τεχνικές Προϋποθέσεις Μετρήσεων με Πολυδεσμικό Ηχοβολιστή.....	46
4.2.1 Εγκατάσταση του συστήματος πολυδεσμικού ηχοβολισμού .....	46
4.2.1α Μέθοδοι εγκατάστασης του συστήματος MBES.....	46
4.2.1β Αποκλίσεις (offsets) εγκατάστασης του συστήματος MBES .....	47

4.2.2 Βαθμονόμηση του συστήματος πολυδεσμικού ηχοβολισμού .....	48
4.2.2α Διόρθωση χρονική υστέρησης ( <i>Latency</i> ) .....	48
4.2.2β Διόρθωση απόκλισης διατοιχισμού ( <i>Roll</i> ) .....	49
4.2.2γ Διόρθωση απόκλισης Προνευστασμού ( <i>Pitch</i> ) .....	49
4.2.2δ Διόρθωση απόκλισης Εκτροπής ( <i>Yaw</i> ) .....	49
4.2.2ε Διάταξη των διορθώσεων του <i>patch test</i> .....	50
4.2.3 Το προφίλ ταχύτητας ήχου .....	51
<b>5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΛΙΜΕΝΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΜΕΛΕΤΗΣ</b> .....	<b>54</b>
5.1 Συνοπτική Περιγραφή της Μελέτης .....	54
5.1.1 Στόχος της μελέτης .....	54
5.1.2 Θέση και χαρακτηριστικά του λιμένα .....	54
5.2 Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς .....	57
5.2.1 Οριζοντιογραφικό σύστημα αναφοράς .....	57
5.2.2 Υψομετρικό σύστημα αναφοράς .....	58
5.3 Πλεονεκτήματα χρήσης πολυδεσμικού ηχοβολιστή .....	59
<b>6. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΜΕΛΕΤΗΣ</b> .....	<b>60</b>
6.1 Ενσωματωμένη Αδρανειακή Μονάδα και Κεραίες .....	60
6.2 Προφιλόμετρο μέτρησης της ταχύτητας του ήχου ( <i>SVP</i> ) .....	61
6.3 Πολυδεσμικός Ηχοβολιστής ( <i>MBES</i> ) .....	63
6.4 Λογισμικό Καταγραφής των Δεδομένων ( <i>DCT</i> ) .....	66
6.5 Λογισμικό Επεξεργασίας των Δεδομένων ( <i>HYPACK</i> ) .....	67
6.6 Προσαρμογή Εξοπλισμού στο Σκάφος .....	68
<b>7. ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ</b> .....	<b>73</b>
7.1 Συνθήκες Ολοκλήρωσης της Βυθομετρικής Μελέτης .....	73
7.2 Διαδικασία Μετρήσεων .....	74
<b>8. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</b> .....	<b>80</b>
8.1 Πρώτο Στάδιο Επεξεργασίας των Δεδομένων (γεωδαιτικές παράμετροι, <i>SVP</i> , <i>Patch Test</i> ) .....	81
8.2 Δεύτερο Στάδιο Επεξεργασίας των Δεδομένων (Εφαρμογή Φίλτρων και Αλγόριθμοι) .....	86
8.3 Τρίτο Στάδιο Επεξεργασίας των Δεδομένων (Εξαγωγή δεδομένων σε μορφότυπο <i>.xyz</i> ) .....	89
8.4 Τέταρτο στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων (Σύνθεση Τελικών Παραγώγων μέσω Λογισμικών <i>LEICA CYCLONE 3DR, CIVIL 3D</i> ) .....	90
8.5 Μέτρα Ποιότητας Υδρογραφικής Αποτύπωσης .....	93
<b>9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>96</b>

9.1 Αξιολόγηση Σχεδιασμού Υδρογραφικής Αποτύπωσης.....	96
9.2 Αξιολόγηση Βασικού Εξοπλισμού.....	96
9.2.1 Αξιολόγηση δέκτη <i>GNSS</i> .....	96
9.2.2 Αξιολόγηση πολυδεσμικού ηχοβολιστή.....	97
9.3 Αξιολόγηση Μεθοδολογίας Επεξεργασίας Μετρήσεων .....	97
9.4 Παρατηρήσεις / Συμπεράσματα .....	97
9.4.1 Γενικές παρατηρήσεις.....	97
9.4.2 Αξιολόγηση υδρογραφικής μελέτης.....	98
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>99</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>101</b>
<b>Π1. Διαγράμματα Παραγόντων που Μεταβάλουν το Υδάτινο Περιβάλλον .....</b>	<b>101</b>
<b>ΤΕΥΧΟΣ ΣΧΕΔΙΩΝ.....</b>	<b>107</b>

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ. 1.1	Χάρτης των παγκόσμιων ωκεάνιων λεκανών, [Miracosta.edu, 2021] .....	4
Σχ. 1.2	Συσχέτιση μεταξύ των τριών επιστημών.....	6
Σχ. 1.3	Γενικευμένο μοντέλο επεξεργασίας των δεδομένων, [Manual on Hydrography, 2011].....	8
Σχ. 1.4	Ιστορικός βυθομετρικός χάρτης Μοσχονήσων (αριστερά), ακτοπλοϊκός χάρτης δυτικού τμήματος Κρήτης (δεξιά), [hnhhs.gr, 2020] .....	10
Σχ. 1.5	Γενικός ναυτικός χάρτης της Ελλάδας (αριστερά), χάρτης του λιμένα Μαραθόκαμπου (δεξιά), [hnhhs.gr, 2020] .....	10
Σχ. 1.6	Οργανόγραμμα Υδρογραφικής Υπηρεσίας, [hnhhs.gr, 2020].....	12
Σχ. 2.1	Ηχοβολιστικές γραμμές με σύστημα πολυδεσμικού ηχοβολιστή (αριστερά), ηχοβολιστικές γραμμές με σύστημα μονοδεσμικού ηχοβολιστή (δεξιά), [Przeslawski, 2020] ....	14
Σχ. 2.2	Είδη γραμμών θέσης, [Τζιαβός, 2002] .....	14
Σχ. 2.3	Μέτρηση με διαβαθμισμένο σχοινί, [Manual on Hydrography, 2011] .....	15
Σχ. 2.4	Σχετικός εντοπισμός θέσης με στύλους απόστασης, σημαίες και laser, [Manual on Hydrography, 2011] .....	16
Σχ. 2.5	Προσδιορισμός θέσης με Τριγωνισμό / Εμπροσθοτομία, [Manual on Hydrography, 2011] .....	17
Σχ. 2.6	Προσδιορισμός θέσης με Εξάντα (οπισθοτομία), [Manual on Hydrography, 2011] .....	18
Σχ. 2.7	Κυκλικό εντοπισμός και περιοχές με ακριβή, ανακριβή και αδύνατο εντοπισμό.....	19
Σχ. 2.8	Παρελκόμενα του βασικού συστήματος Mini-Ranger, [Positioning Techniques for U.S. Army, 1977] .....	19
Σχ. 2.9	Αρχή λειτουργίας υπερβολικών συστημάτων εντοπισμού, [https://timeandnavigation.si.edu/] .....	20
Σχ. 2.10	Τυπική διάταξη των σταθμών μιας αλυσίδας Loran-C, [Παλληκάρη, 2016].....	21
Σχ. 2.11	Αρχή λειτουργίας διαφορικού GNSS (D-GNSS), [Παλληκάρη, 2016].....	24
Σχ. 2.12	Σύνθεση ευρωπαϊκού δορυφορικού συστήματος επαυξήσεως EGNOS, [Παλληκάρη, 2016].....	25
Σχ. 2.13	Δέκτης δορυφορικής ναυτιλίας δεκαετίας 1960 για εγκατάσταση σε υποβρύχια, [Παλληκάρη, 2016] .....	25
Σχ. 2.14	Παραδείγματα δεκτών GNSS για εφαρμογές στη θάλασσα, [Παλληκάρη, 2016].....	27
Σχ. 3.1	Ενδεικτικά διαγράμματα θερμοκρασίας, αλατότητας και ταχύτητας ήχου, [Dodd, 2013] .....	35
Σχ. 3.2	Διατοιχισμός, προνευστασμός, εκτροπή, ανύψωση, γραμμική ταλάντωση κατά μήκος του εγκάρσιου άξονα και του διαμήκους άξονα του σκάφους [Roy de Winter, 2018] .....	36
Σχ. 3.3	Κατάσταση του σκάφους, [Manual on Hydrography, 2011].....	37
Σχ. 3.4	Μονοδεσμικός ηχοβολιστής HY1601, [Wu, 2021].....	39
Σχ. 3.5	Πολυδεσμικός ηχοβολιστής διπλής συχνότητας, Bottom Chart 1180/1050D, [Wu, 2021] .....	40
Σχ. 3.6	Πλευρικό sonar Klein, [Dodd, 2013] .....	40
Σχ. 3.7	Sonar τρισδιάστατης σάρωσης BV5000, [Teledyne Marine, 2020] .....	41
Σχ. 3.8	Οπτικές μέθοδοι εξαγωγής της βυθομετρίας (τηλεπισκόπηση), [Ferreira, 2021] .....	42
Σχήμα 3-8	Διάγραμμα της λειτουργίας της δορυφορικής αλτιμετρίας και των παραμέτρων της, [Wu, 2021].....	43
Σχ. 3.9	Μη επανδρωμένο εναέριο σύστημα αποτύπωσης της εταιρίας RIEGL (Bathycopter), [RIEGLE, 2018] .....	43

Σχ. 4.1 Σύστημα προβολέων-υδροφώνων και κατευθυνόμενες δέσμες, [L-3 communications, 2000].....	45
Σχ. 4.2 Μέθοδος εγκατάστασης των MBES. (a) Εγκατάσταση τύπου γόνδολα, (b) χωνευτή εγκατάσταση, (c) εγκατάσταση στην κατασκευή προστασίας του σκάφους, (d) φορητή εγκατάσταση πλευρικά του σκάφους, [Wu, 2021].....	46
Σχ. 4.3 Διάγραμμα του συστήματος αναφοράς του σκάφους (VRF) για το MBES, [Wu, 2021] ..	47
Σχ. 4.4 Σύνολο βυθομετρικών δεδομένων για διόρθωση αποκλίσεων, (a) λόγω χρονικής υστέρησης, (b) λόγω διατοιχισμού, (c) λόγω προσνευστασμού, (d) λόγω εκτροπής, [Wu, 2021] .....	50
Σχ. 4.5 Τυπικά διαγράμματα ηχητικής ταχύτητας/βάθους (SVP) (αριστερά) και θερμοκρασίας/ηχητικής ταχύτητας (δεξιά), [Wu, 2021].....	52
Σχ. 4.6 Παράδειγμα παραμόρφωσης του πυθμένα με τη χρήση λανθασμένων μετρήσεων της ηχητικής ταχύτητας, [Malzone/AML, 2019].....	53
Σχ. 5.1 Οριοθέτηση περιοχής μελέτης (αριστερά) και κάτοψη λιμένα με ορθοφωτογραφία (δεξιά) .....	54
Σχ. 5.2 Διάγραμμα ταχύτητας του ήχου στο νερό σε σχέση με το βάθος .....	55
Σχ. 5.3 Διάγραμμα της θερμοκρασίας του νερού σε σχέση με το βάθος .....	55
Σχ. 5.4 Διάγραμμα της πίεσης στο νερό σε σχέση με το βάθος .....	56
Σχ. 5.5 Διάγραμμα της αλατότητας του νερού σε σχέση με το βάθος .....	56
Σχ. 5.6 Θέσεις <i>reper</i> (αριστερά) και στοιχεία χωροστάθμησης στο λιμένα (δεξιά), [Y.Y., 2015]	58
Σχ. 6.1 Applanix POS MV WaveMaster II, [Applanix, 2017].....	60
Σχ. 6.2 Βασικά μέρη του AML-3-LGR, [Norbit, 2021].....	62
Σχ. 6.3 Βασικά μέρη του πολυδεσμικού ηχοβολιστή NORBIT iWBMS, [NORBIT user manual, 2021].....	64
Σχ. 6.4 Μονάδα διεπαφής <i>sonar</i> , [NORBIT user manual, 2021].....	64
Σχ. 6.5 Λογισμικό NORBIT DCT, [DCT user guide].....	66
Σχ. 6.6 Λογισμικό HYPACK, [HYPACK user manual, 2023] .....	67
Σχ. 6.7 Γενική άποψη και διασύνδεση του εξοπλισμού υδρογραφικής αποτύπωσης, [NORBIT user manual, 2021] .....	69
Σχ. 6.7 Το σύστημα εντοπισμού της υδρογραφικής αποτύπωσης και τα παρελκόμενά του .....	69
Σχ. 6.8 Το σύστημα βυθομέτρησης της υδρογραφικής αποτύπωσης και τα παρελκόμενά του ....	71
Σχ. 6.9 Διασύνδεση όλων των συστημάτων εντοπισμού και βυθομέτρησης στη μονάδα διεπαφής του <i>sonar</i> για την πραγματοποίηση της υδρογραφικής αποτύπωσης (αριστερά). Ολοκληρωμένη πάκτωση της μεταλλικής ράβδου (που φέρει στο κάτω μέρος τον ηχοβολιστή) στη σταθερή βάση και πόντισή της στο νερό για την έναρξη της αποτύπωσης (δεξιά) .....	72
Σχ. 7.1 Τμήματα περιοχής μελέτης μελέτης ανά ημέρα βυθομετρήσεων .....	74
Σχ. 7.2 Τρισδιάστατη αποτύπωση του σκάφους μελέτης, [METRICA] .....	74
Σχ. 7.3 Εργαλείο NORBIT WBMS GUI, NORBIT user manual, 2021] .....	77
Σχ. 7.4 Λογισμικό NORBIT DCT, [METRICA] .....	78
Σχ. 7.5 Τοπογραφικά σημεία λεπτομερειών και όρια κρηπιδωμάτων, [METRICA] .....	79
Σχ. 7.6 Γεωδαιτικά σημεία αναφοράς της αποτύπωσης των τοπογραφικών λεπτομερειών, [METRICA] .....	79
Σχ. 8.1 Διάγραμμα ροής των εργασιών μια ολοκληρωμένης βυθομετρικής αποτύπωσης.....	80
Σχ. 8.2 Παράθυρο ρύθμισης γεωδαιτικών παραμέτρων στο λογισμικό HYPACK.....	81
Σχ. 8.3 Παράθυρο ρύθμισης αποκλίσεων των μετρητικών οργάνων στο λογισμικό HYPACK...82	82
Σχ. 8.4 Σημεία αναφοράς του πολυδεσμικού ηχοβολιστή NORBIT iWBMS, [NORBIT user manual].....	82

Σχ. 8.5 Παράθυρο ρύθμισης των αποκλίσεων του <i>patch test</i> στο λογισμικό <i>HYPACK</i> .....	83
Σχ. 8.6 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων παλίνρροιας και ηχητικής ταχύτητας για τη διόρθωση των βυθομετρικών δεδομένων στο λογισμικό <i>HYPACK</i> .....	84
Σχ. 8.7 Παράθυρο εισαγωγής των πρωτογενών βυθομετρικών δεδομένων στο λογισμικό <i>HYPACK</i> .....	84
Σχ. 8.7 Παράδειγμα εξάλειψης θορύβου εντός <i>HYPACK</i> .....	86
Fig. 8.7 Example of noise elimination within <i>HYPACK</i> .....	86
Σχ. 8.8 Απεικόνιση υποθαλάσσιου υψώματος εντός <i>HYPACK</i> .....	87
Σχ. 8.9 Εκτίμηση του καλύτερου βάθους (αριστερά) και της τελικής αβεβαιότητας (δεξιά) στο <i>CUBE</i> , [ <i>HYPACK</i> ].....	88
Σχ. 8.10 Παράδειγμα απεικόνισης ηχοβολιστικών γραμμών με το εργαλείο <i>CUBE Uncertainty</i> στο λογισμικό <i>Cyclone 3DR</i> .....	89
Σχ. 8.11 Δείγμα επεξεργασμένων βυθομετρικών δεδομένων σε μορφότυπο <i>.HS2X</i> εντός του <i>HYPACK</i> .....	90
Σχ. 8.12 Ορθοφωτογραφία με χρωματική κλίμακα των βαθών πυθμένα αποτύπωσης, [ <i>LEICA 3DR</i> ] .....	91
Σχ. 8.13 Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής μελέτης με τις ισοβαθείς καμπύλες, [ <i>LEICA 3DR</i> ] .....	92
Σχ. 8.14 Ενδεικτική Εικόνα με χρωματική κλίμακα της κλίσης του πυθμένα αποτύπωσης, [ <i>LEICA 3DR</i> ] .....	92

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πιν. 1.1 Προϋποθέσεις για την εκτέλεση μιας υδρογραφικής μελέτης, [Manual on Hydrography, 2011].....	7
Πιν. 2.1 Κλίμακες αποτύπωσης που χρησιμοποιούνται από την Ελληνική Υδρογραφική Υπηρεσία, [Τζιαβός, 2002].....	13
Πιν. 2.2 Παραδείγματα αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης, [Hydro International, 2016].....	29
Πιν. 3.1 Τιμές αλατότητας σε διαφορετικές κατηγορίες υδάτων .....	34
Πιν. 5.1 Συντεταγμένες μόνιμου σταθμού αναφοράς MET0050 Reference Station, [Metrica]....	57
Πιν. 6.1 Ακρίβεια συστήματος αδρανειακής μονάδας, [Applanix, 2017].....	60
Πιν. 6.2 Προδιαγραφές προφιλόμετρου NORBIT SV, [Norbit SV, 2021] .....	63
Πιν. 6.3 Τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος πολυδεσμικού ηχοβολιστή NORBIT iWBMS, [NORBIT datasheet, 2022].....	65
Πιν. 6.4 Τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος πολυδεσμικού ηχοβολιστή, [NORBIT user manual, 2021] .....	66
Πιν. 6.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά του ερευνητικού σκάφους, [Metrica] .....	68
Πιν. 7.1 Μετεωρολογικές συνθήκες ανά ημέρα βυθομετρήσεων, [Μετεωρολογικός Σταθμός Αερολιμένα Αλεξανδρούπολης].....	73
Πιν. 7.2 Μοχλοβραχίονες των επιμέρους τμημάτων του βυθομετρικού εξοπλισμού, [METRICA] .....	75
Πιν. 7.3 Παράμετροι GAMS, [METRICA].....	76
Πιν. 7.4 Τιμές παραμέτρων πολυδεσμικού ηχοβολιστή, [METRICA] .....	77
Πιν. 7.5 Συντεταγμένες γεωδαιτικών σημείων αναφοράς S 9001, S 9002, S 9003, [METRICA]	78
Πιν. 8.1 Τιμές παραμέτρων <i>patch test</i> [HYPACK].....	85
Πιν. 8.2 Τιμές παραμέτρων υπολογισμού <i>TPU</i> όπως καθορίστηκαν εντός του λογισμικού HYPACK.....	95



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ALB: Airborne LiDAR Bathymetry  
ASL: Average Sea Level  
ASV: Autonomous Surface Vehicle  
AUV: Autonomous Underwater Vehicle  
CAD: Computer-Aided Design  
CoG: Center of Gravity  
CRP: Center Reference Point  
CTD: Conductivity, Temperature and Pressure  
CUBE: Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator  
CW: Continuous Wave  
D-GNSS: Differential GNSS  
DCT: Data Collection Tool  
DGPS: Differential GPS  
DXF: Drawing Exchange Format  
EA: Equiangular  
ED: Equidistant  
EDM: Electronic Distance Measurement  
EGM: Earth Gravitational Model  
EGNOS: European Geostationary Navigation Overlay Service  
ENC: Electronic Navigation Chart  
EPS: Electronic Positioning System  
FFT: Fast Fourier Transform  
FM: Frequency Modulation  
FOG: Fibre Optic Gyro  
FS: Full Scale  
FWD: Forward  
GAMS: GNSS Azimuth Measurement Subsystem  
GB: Gigabyte  
GNSS: Global Navigation Satellite System  
GPS: Global Positioning System  
GUI: Graphical User Interface  
H.S.: Hydrographic Service  
HEPOS: Hellenic Positioning System  
HTRS07: Hellenic Terrestrial Reference System 2007  
HxGN: Hexagon  
IHO: International Hydrographic Organization  
IMU: Inertial Measurement Unit  
INS: Inertial Measurement Unit  
LF: Low Frequency  
LiDAR: Light Detection and Ranging  
LOP: Line of Position  
Loran: Long Range Navigation  
MBES: Multibeam Echosounder  
MEMS: Micro Electromechanical Sensor  
MHz: Megahertz  
MRS: Motorola Mini-Ranger System  
MRU: Motion Reference Unit

NAVTEX: Navigational Telex  
OPT: Optical  
POSMV: Position and Orientation Systems for Marine Vessels  
PPK: Post-processed Kinematic  
PPS: Pulse per Second  
PRN: Pseudo-random Noise  
RLG: Ring Laser Gyro  
RTK: Real-time Kinematic  
SB: Starboard  
SBAS: Satellite Based Augmentation System  
SBES: Single Beam Echosounder  
SIU: Sonar Interface Unit  
SPP: Single Point Positioning  
SRP: Sonar Reference Point  
SSS: Sise-scan Sonar  
STD: Standard Deviation  
SV: Sound Velocity  
SVP: Sound Velocity Profile  
THU: Total Horizontal Uncertainty  
TIN: Triangulated Irregular Network  
TPU: Total Propagated Uncertainty  
TVU: Total Vertical Uncertainty  
U.S.: United States  
USB: Universal Serial Bus  
VRF: Vessel Reference Frame  
WBMS: Wideband Multibeam Sonar  
WGS: World Geodetic System  
Wi-Fi: Wireless Fidelity  
XBT: Expendable Bathythermograph

ΑΕ: Ανώνυμη Εταιρία  
ΕΔ: Ένοπλες Δυνάμεις  
ΗΠΑ: Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής  
Κ.Α.: Κλίμακα Αποτύπωσης  
Κ.Χ.: Κλίμακα Χάρτη  
ΜΣΘ: Μέση Στάθμη της Θάλασσας  
ΟΛΑ: Οργανισμός Λιμένος Αλεξανδρούπολης  
ΠΝ: Πολεμικό Ναυτικό  
Υ/Γ: Υδρογραφικό  
ΥΥ: Υδρογραφική Υπηρεσία  
ΩΚ: Ωκεανογραφικό

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σήμερα, η τεχνική ηχητικής σάρωσης με την χρήση ηχοβολιστή πολλαπλών δεσμών (MBES) αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο για την εκτέλεση τοπογραφικής χαρτογράφησης του θαλάσσιου πυθμένα. Τα συστήματα αυτά έχουν πλέον αναπτυχθεί σε πλήρες βάθος (δηλαδή ανιχνεύουν το βυθό ακόμη και στα μεγαλύτερα βάθη του ωκεανού), υψηλής ακρίβειας, είναι ιδιαίτερα ολοκληρωμένα όργανα και αποτελούν το κύριο μέσο για την προώθηση της χρήσης τρισδιάστατης επεξεργασίας στερεοσκοπικής απεικόνισης, της χαρτογράφησης μέσω εικονικής πραγματικότητας, της ταξινόμησης των ιζημάτων του πυθμένα μέσω ήχου και άλλων εδραιωμένων ερευνητικών πεδίων για τη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου τεχνικού συστήματος.

Οι υδρογραφικές αποτυπώσεις κατέχουν σημαντικό ρόλο στην καταγραφή και ανάλυση των υποθαλάσσιων περιοχών, με εφαρμογές σε τομείς όπως η ναυτιλία, η αλιεία, η κατασκευή παράκτιων και υπεράκτιων έργων, η περιβαλλοντική διαχείριση και η διαχείριση των υδατικών πόρων. Παραδοσιακά, οι υδρογραφικές αποτυπώσεις διενεργούνταν με τη χρήση οργάνων που καθορίζουν τόσο την οριζοντιογραφική (γεωγραφική θέση) όσο και την υψομετρική (βάθος) διάσταση του βυθού. Σήμερα, η πιο αποδεκτή μέθοδος βυθομετρικής αποτύπωσης βασίζεται στον συνδυασμό κινηματικού δορυφορικού εντοπισμού με ηχοβολιστικά όργανα μέτρησης του βυθού. Αυτή η μέθοδος εφαρμόστηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας για την υδρογραφική αποτύπωση τμήματος του λιμένα Αλεξανδρούπολης. Η διάρθρωση της εργασίας έχει ως εξής:

Στο Πρώτο Κεφάλαιο αποδίδονται οι βασικές έννοιες που αφορούν τις επιστήμες της Ωκεανογραφίας, της Θαλάσσιας Γεωδαισίας και της Υδρογραφίας. Επίσης περιγράφονται τα βασικά στοιχεία των υδρογραφικών αποτυπώσεων και πώς εφαρμόζεται η επιστήμη της Υδρογραφίας στην Ελλάδα.

Το Δεύτερο Κεφάλαιο αναφέρεται στις μεθόδους προσδιορισμού της θέσης στη θάλασσα και ειδικότερα στις διαδικασίες οριζοντιογραφικού και βυθομετρικού εντοπισμού. Αναλύονται οι βασικές αρχές του προσδιορισμού θέσης, οι κλασικές και ραδιομετρικές τεχνικές προσδιορισμού θέσης και οι μέθοδοι και οι τεχνολογίες δορυφορικού/αδρανειακού εντοπισμού θέσης.

Το Τρίτο Κεφάλαιο εστιάζει στον τομέα των βυθομετρήσεων. Συγκεκριμένα, περιγράφονται οι μέθοδοι και τεχνικές των βυθομετρικών αποτυπώσεων, βασικές αρχές και παράμετροι των διαδικασιών, καθώς και οι τεχνολογίες και τα συστήματα βυθομετρήσεων με τη χρήση πλοίου και διαστημικών/εναέριων μέσων.

Το Τέταρτο Κεφάλαιο επεξηγεί την βυθομετρική τεχνολογία των πολυδεσμικών ηχοβολιστών, αποδίδοντας παράλληλα τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τις χρήσης αυτών των συστημάτων. Ειδικότερα, εισάγονται οι αρχές της τεχνολογίας των πολυδεσμικών ηχοβολιστών και οι βασικές προϋποθέσεις για την πραγματοποίηση αξιόπιστων μετρήσεων με πολυδεσμικό ηχοβολιστή.

Στο Πέμπτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται ο λιμένας της Αλεξανδρούπολης και οι στόχοι της μελέτης που βασίστηκε η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Συνοπτικά, περιγράφονται η θέση και τα χαρακτηριστικά του λιμένα, το οριζοντιογραφικό και το υψομετρικό σύστημα αναφοράς της μελέτης, καθώς και τα πλεονεκτήματα χρησιμοποίησης πολυδεσμικού ηχοβολιστή στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Στο Έκτο Κεφάλαιο παραθέτονται ο εξοπλισμός και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση της μελέτης τμήματος του λιμένα της Αλεξανδρούπολης, αλλά και πως αυτά προσαρμόζονται στο σκάφος.

Στο Έβδομο Κεφάλαιο περιγράφονται η οργάνωση της υδρογραφικής αποτύπωσης και η διαδικασία πραγματοποίησής της. Ειδικότερα, αναφέρονται τα τμήματα που χωρίστηκε η περιοχή μελέτης, το χρονικό διάστημα που διήρκεσαν οι μετρήσεις, οι συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή και η διαδικασία που εφαρμόστηκε για την λήψη των μετρήσεων.

Το Όγδοο Κεφάλαιο επικεντρώνεται στην παρουσίαση των σταδίων επεξεργασίας των δεδομένων και στην τελική ανάλυσή τους. Επίσης, παρουσιάζονται οι αβεβαιότητες της υδρογραφικής αποτύπωσης στον λιμένα της Αλεξανδρούπολης, όπως και το διάγραμμα ροής εργασιών που εφαρμόστηκαν για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης υδρογραφικής αποτύπωσης.

Τέλος, στο Ένατο Κεφάλαιο αξιολογούνται τα αποτελέσματα της λειτουργίας των οργάνων, της τελικής ποιότητας της ανάλυσης των δεδομένων και του συνόλου της εργασίας.

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΑ

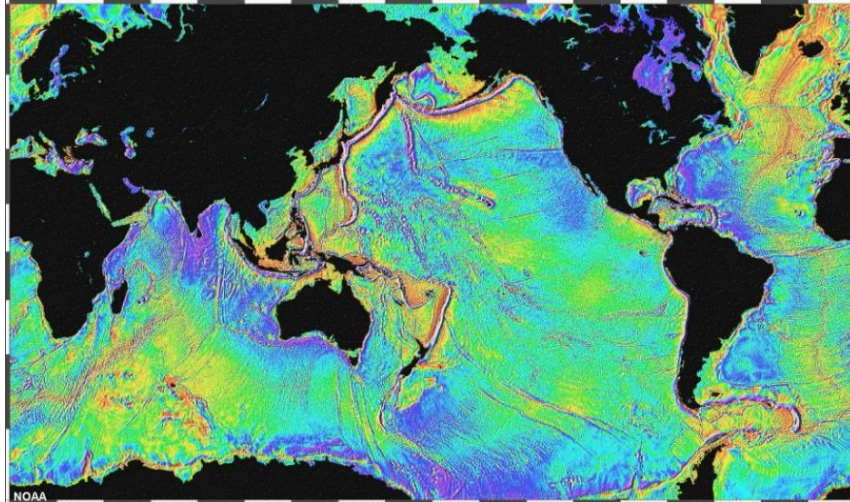
## 1.1 Βασικές Έννοιες – Ορισμοί

### 1.1.1 Ωκεανογραφία

Η ωκεανογραφία περιλαμβάνει τους επιστημονικούς κλάδους που ασχολούνται με τις φυσικές και βιολογικές ιδιότητες των παγκόσμιων ωκεανών και θαλάσσιων, καθώς και τα φυσικά φαινόμενα που παρατηρούνται σε αυτές τις υδάτινες μάζες. Συγκεκριμένα η επιστήμη της ωκεανογραφίας αφορά στη μελέτη όλων των πτυχών του θαλάσσιου φυσικού περιβάλλοντος (γεωλογία, χημεία, βιολογία κλπ.) και στη χαρτογράφηση του πυθμένα της θάλασσας. Εξ' αυτού και η ωκεανογραφία χωρίζεται σε τέσσερις κλάδους: φυσική ωκεανογραφία, χημική ωκεανογραφία, βιολογική ωκεανογραφία και γεωλογική ωκεανογραφία. Συγκεκριμένα, η φυσική ωκεανογραφία περιλαμβάνει τη μελέτη των ιδιοτήτων (θερμοκρασία, πυκνότητα κ.λπ.) και της κίνησης (κύματα, ρεύματα και παλίρροιες) του θαλασσινού νερού και την αλληλεπίδραση μεταξύ των ωκεανών και της ατμόσφαιρας. Η χημική ωκεανογραφία ασχολείται με τη διερεύνηση της σύνθεσης του θαλασσινού νερού και των βιογεωχημικών κύκλων που το επηρεάζουν. Ο κλάδος της βιολογικής ωκεανογραφίας σχετίζεται με τη μελέτη των βιολογικών οργανισμών στον ωκεανό (συμπεριλαμβανομένων των κύκλων ζωής και της παραγωγής τροφής), όπως τα βακτήρια, το φυτοπλαγκτόν, το ζωοπλαγκτόν και επεκτείνεται στην πιο παραδοσιακή θαλάσσια βιολογία που επικεντρώνεται στα ψάρια και τα θαλάσσια θηλαστικά. Όσον αφορά τη γεωλογική ωκεανογραφία, επικεντρώνεται στη δομή, τα χαρακτηριστικά και την εξέλιξη των ωκεάνιων λεκανών.

Οι ωκεανογράφοι χρησιμοποιούν μια πληθώρα εργαλείων για να μελετήσουν τον ωκεανό και πολλές από αυτές τις μελέτες περιλαμβάνουν περισσότερους από έναν κλάδους. Συλλέγουν διακριτά δείγματα νερού, ιζημάτων και βιολογικών δειγμάτων χρησιμοποιώντας ερευνητικά σκάφη. Η τηλεπισκόπηση από αεροσκάφη και δορυφόρους επιτρέπει στους ωκεανογράφους να έχουν μια σφαιρική εικόνα ορισμένων παραμέτρων. Η μοντελοποίηση καθιστά δυνατή την εξέταση του παρελθόντος και την πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης του ωκεανού (π.χ. κυκλοφορία υδάτων, αλληλεπιδράσεις αέρα-θάλασσας, βιωσιμότητα της αλιείας, ποιότητα του νερού κ.λπ.). Οι γνώσεις που αποκομίζονται από όλους αυτούς τους τύπους μετρήσεων επιτρέπουν στους επιστήμονες που ασχολούνται με την ωκεανογραφία να επιτυγχάνουν, μεταξύ άλλων :

- καλύτερη πρόβλεψη (με τη χρήση μοντέλων) των αλλαγών στο κλίμα, βελτίωση των προβλέψεων για κινδύνους, φυσικούς (π.χ. τυφώνες) ή ανθρωπογενείς (π.χ. πετρελαιοκηλίδες).
- αξιολόγηση των επιπτώσεων των ρύπων στην ποιότητα του νερού στον ωκεανό
- την προστασία της ποιότητας των υδάτων στον ωκεανό ενόψει των αυξημένων ανθρωπίνων απαιτήσεων (π.χ. αλιεία, τουρισμός, ναυτιλία, δύλιση πετρελαίου και φυσικού αερίου σε υπεράκτιες περιοχές, υπεράκτια αιολικά πάρκα κ.λπ.).



Σχ. 1.1 Χάρτης των παγκόσμιων ωκεάνιων λεκανών, [Miracosta.edu, 2021]

Fig 1.1 Map of the global ocean basins, [Miracosta.edu, 2021]

### 1.1.2 Θαλάσσια Γεωδαισία

Θαλάσσια Γεωδαισία είναι η επιστήμη που καθορίζει και καθιερώνει τα σημεία ελέγχου (*control points*) στον ωκεανό, καθώς και το σχήμα του ωκεανού συμπεριλαμβανομένου του πυθμένα του. Σκοπός της Θαλάσσιας Γεωδαισίας αποτελεί η προώθηση της ανάπτυξης στη μελέτη, χαρτογράφηση και τηλεπισκοπική παρακολούθηση των ωκεανών, με γνώμονα την επίλυση των προβλημάτων στο θαλάσσιο και παράκτιο περιβάλλον. Περιλαμβάνει τις θαλάσσιες δραστηριότητες που εξαρτώνται από τον προσδιορισμό της θέσης ή τις ακριβείς μετρήσεις στην επιφάνεια και το βυθό του ωκεανού. Οι περιοχές που καλύπτονται από αυτό το διεπιστημονικό πεδίο, μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν: βαθυμετρία, εντοπισμό θέσης (πυθμένας και επιφάνεια), βαρύτητα, τεκτονική των πλακών, εξάπλωση (επέκταση) του θαλάσσιου πυθμένα, γεωειδής κυματισμός, έρευνα για τσουνάμι, μέση στάθμη της θάλασσας και παλιρροϊκή μεταβολή. Μερικές από τις βασικές εφαρμογές της Θαλάσσιας Γεωδαισίας στις επιστημονικές περιοχές που αναφέρθηκαν είναι οι εξής:

- ο ακριβής προσδιορισμός του σχήματος της γήινης επιφάνειας (προσδιορισμός γεωειδούς) σε θαλάσσιες περιοχές, με σκοπό την ακριβέστερη εκπόνηση τοπογραφικών και χαρτογραφικών μελετών (βυθομετρία, δορυφορική υψομετρία κ.λπ.).
- η κατανόηση των μεταβολών της στάθμης της θάλασσας και των επιπτώσεών τους στις παράκτιες περιοχές.
- η μελέτη, ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων και τεχνολογιών για τον δυναμικό εντοπισμό και την ακριβή πλοήγηση σκαφών και διατάξεων επιφανείας, καθώς και υποβρυχίων συστημάτων και κατασκευών.
- Η υποστήριξη στο σχεδιασμό και στην κατασκευή υπεράκτιων κατασκευών και υποδομών, μέσω της ακριβούς χαρτογράφησης του θαλάσσιου πυθμένα, την αξιολόγηση της βαθυμετρίας και την κατανόηση της μεταφοράς ιζημάτων.

### 1.1.3 Υδρογραφία

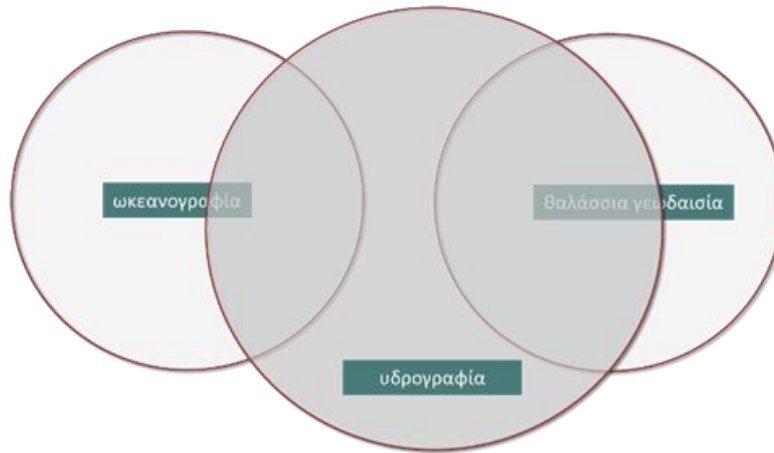
Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υδρογραφίας (*IHO: International Hydrographic Organization*), έχει αποδώσει πλήρως τον ορισμό της υδρογραφίας, ως τον κλάδο των εφαρμοσμένων επιστημών που ασχολείται με τη μέτρηση και την περιγραφή των χαρακτηριστικών των θαλασσών και των παράκτιων περιοχών. Πρωταρχικός στόχος της επιστήμης της υδρογραφίας αποτελεί η ναυσιπλοΐα και όλοι οι άλλοι θαλάσσιοι σκοποί και δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, των υπεράκτιων δραστηριοτήτων, της έρευνας, της προστασίας του περιβάλλοντος και των υπηρεσιών πρόβλεψης (*IHO Pub. S-32*). Εν ολίγης, η υδρογραφία, όπως ορίζεται, είναι το κλειδί για την πρόοδο όλων των θαλάσσιων δραστηριοτήτων, συνήθως μεγάλης εθνικής οικονομικής σημασίας. Δηλαδή εμπλέκεται στην κατάλληλη αντιμετώπιση τομέων όπως:

- ασφαλής και αποτελεσματική λειτουργία του ελέγχου της θαλάσσιας κυκλοφορίας.
- διαχείριση των παράκτιων ζωνών.
- εξερεύνηση και εκμετάλλευση των θαλάσσιων πόρων.
- προστασία του περιβάλλοντος.
- θαλάσσια άμυνα.

Η υδρογραφία, σε παγκόσμια κλίμακα, χαρακτηρίζεται από πολυάριθμα πεδία εφαρμογών. Εν συντομία η υδρογραφία, όπως ορίστηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, αποτελεί το ζητούμενο για την πρόοδο σε όλες τις θαλάσσιες δραστηριότητες, συνήθως μεγάλης εθνικής οικονομικής σημασίας. Οι κυριότεροι τομείς που σχετίζονται με τη υδρογραφία είναι οι εξής:

- Θαλάσσιες μεταφορές.
- Διαχείριση της παράκτιας ζώνης.
- Εξερεύνηση και εκμετάλλευση των θαλάσσιων πόρων .
- Προστασία και διαχείριση του περιβάλλοντος.
- Θαλάσσιες επιστήμες.
- Εθνικές υποδομές χωρικών δεδομένων.
- Οριοθέτηση των θαλάσσιων συνόρων.
- Ναυτική άμυνα.

Οι τρεις προαναφερθείσες επιστήμες (ωκεανογραφία, θαλάσσια γεωδαισία και υδρογραφία) συνδυάζουν το θεωρητικό υπόβαθρο και τις τεχνικές που τις χαρακτηρίζουν, με σκοπό να αποτυπώσουν το σύνολο των ωκεανών και θαλασσών (επιφάνεια και βυθός), να μελετήσουν και να καταγράψουν τα χαρακτηριστικά των υδάτινων αυτών μαζών (βιολογία, χημεία, φυσική, γεωλογία). Συνολικά, η συσχέτιση αυτών των επιστημών βοηθά στην κατανόηση και διαχείριση των παγκόσμιων ωκεανών και θαλασσών, ώστε μελλοντικά να προβλέπονται αλλαγές του κλίματος και να διασφαλίζονται η ασφάλεια και η αειφορία των θαλάσσιων περιοχών.



Σχ. 1.2 Συσχέτιση μεταξύ των τριών επιστημών  
 Fig. 1.2 Relation between the three domains

## 1.2 Βασικά Στοιχεία Υδρογραφικών Αποτυπώσεων

### 1.2.1 Κύριες εργασίες υδρογραφικών αποτυπώσεων

Μια υδρογραφική – βυθομετρική αποτύπωση αρχικά περιλαμβάνει, οριζοντιογραφικό προσδιορισμό της θέσης παρατήρησης σε καθορισμένο σύστημα αναφοράς (*Datum*), για τον εντοπισμό όλων των χαρακτηριστικών της θάλασσας σε πραγματικές σχετικές θέσεις. Αναγκαίος είναι και ο προσδιορισμός του βάρους σε αναγνωρισμένο (κρατικό) υψομετρικό σύστημα. Η υλοποίηση του υψομετρικού συστήματος αναφοράς, στηρίζεται στην αξιοποίηση δικτύου παλιρροιογράφων και άλλων μεθόδων βάσει των οποίων υπολογίζεται η υψομετρική αφετηρία και μέση στάθμη της θάλασσας (ΜΣΘ).

Μελέτες υδρογραφίας περιλαμβάνουν τη συλλογή στοιχείων στο θαλάσσιο χώρο και κατά μήκος της ακτής γεωαναφερόμενων δεδομένων σχετικά με:

- Διαμόρφωση της ακτογραμμής, συμπεριλαμβανομένων των ανθρωπογενών υποδομών για την θαλάσσια ναυσιπλοΐα, δηλαδή όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά της ακτής που ενδιαφέρουν τους υδρογράφους.
- Βάθη στην περιοχή ενδιαφέροντος (συμπεριλαμβανομένων όλων των πιθανών κινδύνων για τη ναυσιπλοΐα και άλλων θαλάσσιων δραστηριοτήτων).
- Χαρτογράφηση του πυθμένα της θάλασσας.
- Προσδιορισμός παλιρροιών και μετρήσεις ρευμάτων.
- Μέτρηση των φυσικών ιδιοτήτων της υδάτινης στήλης.



### 1.2.2 Στάδια υδρογραφικών αποτυπώσεων

Μια υδρογραφική αποτύπωση χωρίζεται στα εξής στάδια διαχείρισης: στο σχεδιασμό της μελέτης, στη συλλογή των δεδομένων πεδίου, στην επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων και την παραγωγή των τελικών αποτελεσμάτων αποτύπωσης. Η μελέτη προϋποθέτει προκαταρκτικές εργασίες πριν το στάδιο συλλογής δεδομένων πεδίου. Κύρια σημεία σε αυτό το στάδιο αφορούν :

- η ακριβής οριοθέτηση της περιοχής μελέτης.
- το είδος της μελέτης (αναγνωριστική ή οριστική) και η κλίμακα για την τήρηση των προτύπων του χαρτογραφικού υποβάθρου η που θα παραχθεί.
- Οι απαιτήσεις ακρίβειας ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής της μελέτης
- Οι διαθέσιμες πλατφόρμες (πλωτά σκάφη ή συνδυασμός με εναέρια μέσα) αναλόγως της θέσης και έκτασης της περιοχής μελέτης.
- Οι απαιτούμενες εργασίες / υλικά υποστήριξης (αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές φωτογραφίες, γεωδαιτικές, παλίρροιες).
- Τυχόν παράγοντες εξειδικευμένου χαρακτήρα (μορφολογία / μέσο βάθος πυθμένα, διαθέσιμος προϋπολογισμός, πολιτικοί ή επιχειρησιακοί περιορισμοί, κ.α.).

Reference	Order	Special	1a	1b	2
Chapter 1	Description of areas.	Areas where under-keel clearance is critical	Areas shallower than 100 metres where under-keel clearance is less critical but features of concern to surface shipping may exist.	Areas shallower than 100 metres where under-keel clearance is not considered to be an issue for the type of surface shipping expected to transit the area.	Areas generally deeper than 100 metres where a general description of the sea floor is considered adequate.
Chapter 2	Maximum allowable THU 95% Confidence level	2 metres	5 metres + 5% of depth	5 metres + 5% of depth	20 metres + 10% of depth
Para 3.2 and note 1	Maximum allowable TVU 95% Confidence level	a = 0.25 metre b = 0.0075	a = 0.5 metre b = 0.013	a = 0.5 metre b = 0.013	a = 1.0 metre b = 0.023
Glossary and note 2	Full Sea floor Search	Required	Required	Not required	Not required
Para 2.1 Para 3.4 Para 3.5 and note 3	Feature Detection	Cubic features > 1 metre	Cubic features > 2 metres, in depths up to 40 metres; 10% of depth beyond 40 metres	Not Applicable	Not Applicable
Para 3.6 and note 4	Recommended maximum Line Spacing	Not defined as full sea floor search is required	Not defined as full sea floor search is required	3 x average depth or 25 metres, whichever is greater For bathymetric lidar a spot spacing of 5 x 5 metres	4 x average depth
Chapter 2 and note 5	Positioning of fixed aids to navigation and topography significant to navigation. (95% Confidence level)	2 metres	2 metres	2 metres	5 metres
Chapter 2 and note 5	Positioning of the Coastline and topography less significant to navigation (95% Confidence level)	10 metres	20 metres	20 metres	20 metres
Chapter 2 and note 5	Mean position of floating aids to navigation (95% Confidence level)	10 metres	10 metres	10 metres	20 metres

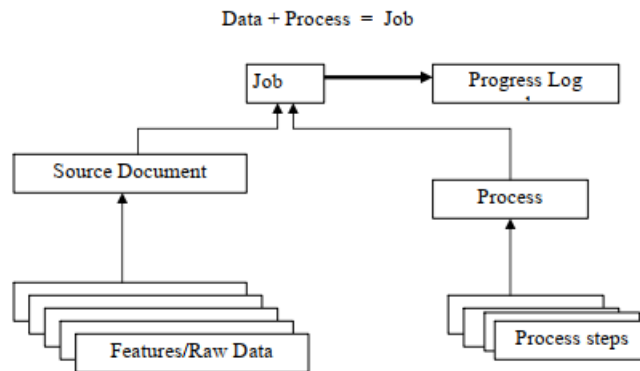
Πιν. 1.1 Προϋποθέσεις για την εκτέλεση μιας υδρογραφικής μελέτης, [Manual on Hydrography, 2011]

Table 1.1 Requirements for conducting a hydrographic survey, [Manual on Hydrography, 2011]

Η συλλογή δεδομένων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Οι απαιτήσεις της μελέτης, η πλατφόρμα / σκάφος μέτρησης, ο διαθέσιμος εξοπλισμός και ο χρόνος που τίθεται για μία συγκεκριμένη εργασία, θα καθορίσουν τον όγκο και τα χαρακτηριστικά των δεδομένων που πρέπει να συλλεχθούν.

Η επεξεργασία των δεδομένων πρέπει να γίνεται υπό συγκεκριμένα κριτήρια ποιοτικού ελέγχου. Τα υδρογραφικά δεδομένα συλλέγονται είτε από αυτοματοποιημένα συστήματα είτε μετατρέπονται σε αυτοματοποιημένη μορφή. Η τελική επεξεργασία των δεδομένων και η εξαγωγή

παραγώγων, πραγματοποιείται με τη χρήση υπολογιστικών συστημάτων επί του σκάφους ή και στο γραφείο.



Σχ. 1.3 Γενικευμένο μοντέλο επεξεργασίας των δεδομένων, [Manual on Hydrography, 2011]  
Fig. 1.3 The data processing model, [Manual on Hydrography, 2011]

Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της μελέτης αποτελεί βασικό στοιχείο της αξιοπιστίας των τελικών αποτελεσμάτων. Εφόσον κανένας εξοπλισμός δεν είναι εντελώς απαλλαγμένος από σφάλματα, σε όλες τις παρατηρήσεις εμφανίζονται αποκλίσεις. Επιπλέον, τα σφάλματα εισάγονται στους υπολογισμούς στη φάση μοντελοποίησης του πυθμένα από μετρήσεις βάρους σε διακριτές θέσεις. Οι τεχνικές παρατήρησης έχουν σχεδιαστεί για να εξαλείφουν πρωτίστως σφάλματα τυχαίου χαρακτήρα και συγκεκριμένα σφάλματα συστηματικού χαρακτήρα για τα οποία υπάρχει δυνατότητα «εξωτερικού ελέγχου», όπως συστήματα τεχνητού βυθού στον προσδιορισμό της ταχύτητας του ήχου στο νερό.

Η διαδικασία δημιουργίας βυθομετρικού χάρτη ονομάζεται απόδοση δεδομένων (θέσης οριζοντιογραφίας, βάρους) και οι πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των δεδομένων και του περιβάλλοντος ονομάζονται μεταδεδομένα. Τα μεταδεδομένα εν γένει περιλαμβάνουν:

- Ημερομηνία, περιοχή, εξοπλισμό, χαρακτηριστικά πλατφόρμας μελέτης, κ.ά.
- Γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή το πρωτίστως, προβολικό και υψομετρικό σύστημα αναφοράς, συμπεριλαμβανομένου του μετασχηματισμού του WGS 84 εάν χρησιμοποιείται ένα τοπικό σύστημα αναφοράς.
- Διαδικασίες και αποτελέσματα βαθμονόμησης εξοπλισμού
- Μοντέλο μεταβολής της ταχύτητας του ήχου.
- Παλιρροιακά δεδομένα και σχετικές αναγωγές.
- Αναμενόμενη ακρίβεια στο τελικό παράγωγο.

Τα ψηφιακά δεδομένα θα πρέπει να έχουν καθορισμένη μορφή, ώστε να εισάγονται κατά το δυνατόν αυτοματοποιημένα στη βάση δεδομένων του συστήματος παρατήρησης. Καθώς κάθε μελέτη περιλαμβάνει πολυάριθμα υποστηρικτικά έγγραφα και ψηφιακά αρχεία δεδομένων, τα αποτελέσματα θα πρέπει να επισημαίνονται με τρόπο που είναι περιγραφικός και κατανοητός για

στους τελικούς αποδέκτες σύμφωνα πάντα με τις υποδείξεις του *IHO*. Ο φάκελος των τελικών αποτελεσμάτων θα πρέπει γενικά να περιέχει:

- πρωτογενή και επεξεργασμένα (υπολογισμένα) δεδομένα οριζοντιογραφικού προσδιορισμού θέσης
- πρωτογενή και επεξεργασμένα (υπολογισμένα) βυθομετρικά δεδομένα
- αρχεία παλίρροιας, μοντέλο διάδοσης ταχύτητας του ήχου και γεωμετρικών παραμέτρων του σκάφους (μήκος, πλάτος, βύθισμα κ.λπ.)
- αρχεία δεδομένων πλευρικής σάρωσης (εφόσον πραγματοποιήθηκε)
- περιγραφική έκθεση και συμπληρωματικές εκθέσεις
- ημερολόγια πεδίου και τεκμηρίωση της επεξεργασίας

### 1.2.3 Προϊόντα υδρογραφικών αποτυπώσεων

Οι υδρογραφικές αποτυπώσεις παράγουν ως προϊόντα υδρογραφικά/βυθομετρικά διαγράμματα καθώς και ναυτικούς χάρτες για χρήση στη ναυτιλία ή χάρτες/διαγράμματα με εξειδικευμένο περιεχόμενο για άλλες εφαρμογές. Μερικά από τα βασικότερα είδη χαρτών που παράγονται από μια υδρογραφική αποτύπωση είναι τα εξής:

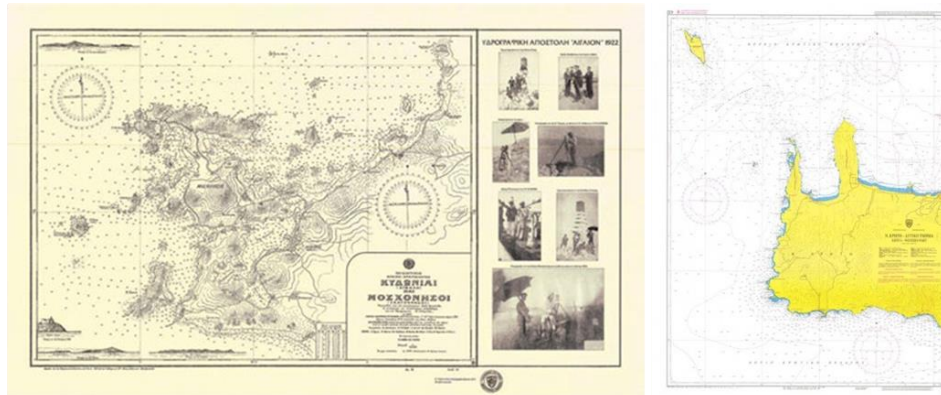
- Ναυτικοί χάρτες που παρέχουν πληροφορίες για τις παράκτιες περιοχές, τα λιμάνια, τις ακτές και τα νησιά και είναι απαραίτητοι για την ασφαλή ναυτιλία.
- Βαθυμετρικοί χάρτες για την υποστήριξη της ναυσιπλοΐας και την πραγματοποίηση τεχνικών έργων στη θάλασσα (πόντιση καλωδίων και αγωγών, εκβάθυνση λιμένων κλπ.).
- Χάρτες με ωκεανογραφικές πληροφορίες (παλίρροιας, ρεύματα, κύματα).

Οι ναυτικοί χάρτες συγκεκριμένα χωρίζονται σε διαφορετικά είδη και χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες προδιαγραφές για τις κλίμακες αποτύπωσης. Γενικοί ναυτικοί χάρτες, είναι χάρτες μικρής κλίμακας (1:100000 έως 1:600000 ή και μικρότερης) που απεικονίζουν εκτεταμένες θαλάσσιες επιφάνειες της γης. Ακτοπλοϊκοί χάρτες ή χάρτες ναυσιπλοΐας με βάρη έως 200 m, είναι χάρτες μεγαλύτερης κλίμακας (1:50000 έως 1:100000) που απεικονίζουν μικρότερες θαλάσσιες επιφάνειες της γης. Λιμενοδείκτες ή πορτολάνες ή χάρτες λιμανιών, είναι χάρτες που απεικονίζουν περιορισμένη επιφάνεια, όπως λιμένες ή διάυλοι, περιοχές πλοήγησης υπό περιορισμούς και περιοχές με υψηλή ναυτιλιακή κυκλοφορία. Είναι χάρτες μεγαλύτερης κλίμακας (1:10000 έως 1:500000).

Η Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού από την πλευρά της, είναι υπεύθυνη για την παραγωγή ναυτικών χαρτών και λοιπών ναυτιλιακών εκδόσεων. Τα κύρια είδη χαρτών που χρησιμοποιεί είναι:

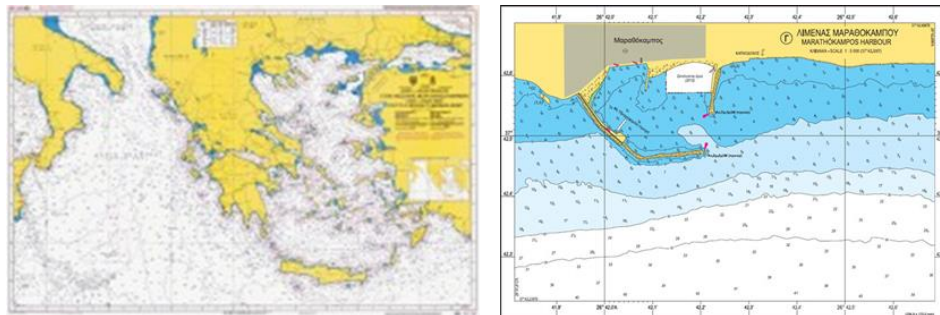
- Γενικοί Χάρτες, οι οποίοι καλύπτουν μεγάλες περιοχές και έχουν κλίμακα από 1:350000 έως 1:2000000
- Χάρτες Ναυτιλίας, που χρησιμοποιούνται για πλοήγηση και έχουν κλίμακα από 1:75000 έως 1:350000

- Χάρτες Προσέγγισης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κοντά σε λιμάνια και έχουν κλίμακα από 1:30000 έως 1:75000
- Χάρτες Λιμανιών – Όρμων, που χρησιμοποιούνται για λεπτομερή πλοήγηση σε λιμάνια και έχουν κλίμακα από 1:2000 έως 1:30000



Σχ. 1.4 Ιστορικός βυθομετρικός χάρτης Μοσχονήσων (αριστερά), ακτοπλοϊκός χάρτης δυτικού τμήματος Κρήτης (δεξιά), [hnhhs.gr, 2020]

Fig. 1.4 Historical bathymetric map of Moschon islands (left), navigational map of western Crete (right), [hnhhs.gr, 2020]



Σχ. 1.5 Γενικός ναυτικός χάρτης της Ελλάδας (αριστερά), χάρτης του λιμένα Μαραθόκαμπου (δεξιά), [hnhhs.gr, 2020]

Fig. 1.5 National naval map of Greece (left), map of the port of Marathokampos (right), [hnhhs.gr, 2020]

#### 1.2.4 Η υδρογραφία στην Ελλάδα

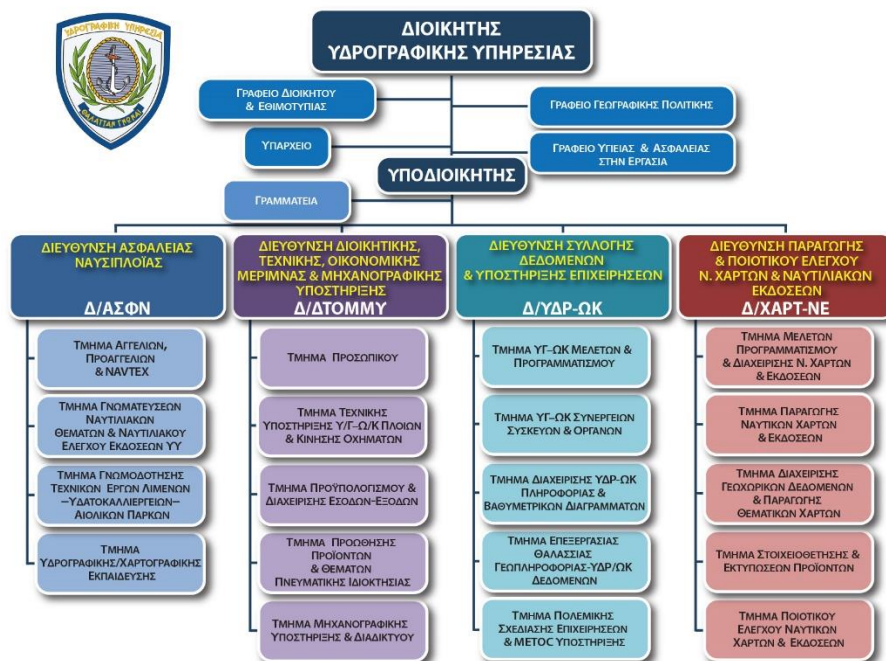
Όσον αφορά την επιστήμη της υδρογραφίας και τις εφαρμογές της στην Ελλάδα, η Υδρογραφική Υπηρεσία (ΥΥ) είναι ο επίσημος υδρογραφικός φορέας της χώρας. Αποτελεί Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού (ΠΝ) και εδρεύει στο νομό Αττικής. Σκοπός της ΥΥ είναι μελέτη των ελληνικών και διεθνών θαλασσών και ακτών, των συνθηκών ναυσιπλοΐας και η ανάπτυξη επιστημών που συνδέονται με τη ναυσιπλοΐα, τη ναυτιλία και τη ναυτική μετεωρολογία. Αποστολή της ΥΥ είναι η σχεδίαση και παραγωγή ναυτικών χαρτών και ναυτλιακών εκδόσεων, καθώς και η δημιουργία προϊόντων που προέρχονται από την μελέτη των παραμέτρων του θαλάσσιου περιβάλλοντος, την ανάπτυξη των γεωεπιστημών (Υδρογραφία, Τοπογραφία, Ωκεανογραφία, Γεωγραφία) και της επιστήμης της Ναυτιλίας.

Ειδικότερα η ΥΥ συλλέγει, επεξεργάζεται και αξιοποιεί πληροφορίες και δεδομένα για την παραγωγή προϊόντων και υπηρεσιών που σχετίζονται με τους τομείς της Υδρογραφίας, της Ναυτικής Χαρτογραφίας, της Ναυτιλίας και της Στρατιωτικής Ωκεανογραφίας, με σκοπό:

- Την υποστήριξη και κάλυψη των επιχειρησιακών απαιτήσεων του ΠΝ και γενικότερα της Εθνικής Άμυνας, σε θέματα αρμοδιότητάς της.
- Την συμβολή στην ασφάλεια των ναυτιλομένων στις Ελληνικές και γειτνιάζουσες θάλασσες.
- Την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος.
- Την συμβολή στην ανάπτυξη της οικονομίας της νησιωτικής χώρας.
- Την συνδρομή και υποστήριξη του έργου δημοσίων υπηρεσιών, νομικών ή φυσικών προσώπων και ιδιωτικών φορέων εφόσον απαιτηθεί.

Στις κύριες αρμοδιότητες της Υδρογραφικής Υπηρεσίας περιλαμβάνονται η μελέτη, προετοιμασία, έκδοση και διάθεση ναυτικών χαρτών και άλλων ναυτλιακών εκδόσεων και βοηθημάτων, τόσο σε έντυπη όσο και σε ηλεκτρονική μορφή, για την κάλυψη των αναγκών των ναυτιλομένων και των επιχειρησιακών απαιτήσεων του ΠΝ και των Ενόπλων Δυνάμεων γενικότερα. Επιπλέον, παρέχει στο ΠΝ και γενικά στις ΕΔ τις απαραίτητες περιβαλλοντικές πληροφορίες και στοιχεία για τη διεξαγωγή ναυτικών επιχειρήσεων. Ασχολείται με την εκτέλεση υδρογραφικών, ωκεανογραφικών, χαρτογραφικών και ναυτλιακών εργασιών και μελετών, καθώς και με την εφαρμογή ερευνητικών προγραμμάτων για τη συλλογή των απαραίτητων στοιχείων και πληροφοριών για την παραγωγή προϊόντων που υποστηρίζουν το ΠΝ και καλύπτουν τις ανάγκες στρατιωτικών και άλλων φορέων. Ακόμη, αναλαμβάνει τη μελέτη, προετοιμασία, έκδοση και διάθεση ειδικών θεματικών χαρτών για την υποστήριξη των αναγκών του Πολεμικού Ναυτικού, του Υπουργείου Εξωτερικών και άλλων κρατικών φορέων σε ζητήματα δικαίου θαλάσσης. Ως εθνικός συντονιστής του συστήματος, η ΥΥ συνεργάζεται με το Υπουργείο Ναυτιλίας, την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, τον Οργανισμό Τηλεπικοινωνιών Ελλάδος και άλλους αρμόδιους φορείς για την έκδοση μηνυμάτων *NAVTEX*, που αφορούν στην ασφάλεια της ναυσιπλοΐας.

Ο οργανισμός αποτελείται από το επιτελείο της ΥΥ, τα πλωτά μέσα (Υ/Γ – ΩΚ ΝΑΥΤΙΛΙΟΣ, Υ/Γ – ΩΚ ΠΥΘΕΑΣ, Υ/Γ ΣΤΡΑΒΩΝ, Άκατος 14), τα υδρογραφικά, τοπογραφικά και ωκεανογραφικά συνεργεία, το τυπογραφείο και το εθνικό δίκτυο Σταθμηγράφων. Στις κεντρικές εγκαταστάσεις του επιτελείου περιλαμβάνονται ο θάλαμος *NAVTEX*, η αρχειοθήκη και η βιβλιοθήκη της Υπηρεσίας.



Σχ. 1.6 Οργανόγραμμα Υδρογραφικής Υπηρεσίας, [hnhs.gr, 2020]

Fig. 1.6 Hydrographic Service organization chart, [hnhs.gr, 2020]

## 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΘΕΣΗΣ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ

### 2.1 Βασικές Αρχές και Απαιτήσεις Ακρίβειας Προσδιορισμού Θέσης

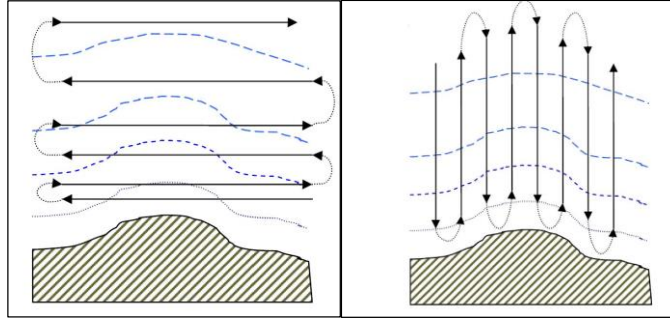
Η κλίμακα αποτύπωσης σε μια υδρογραφική αποτύπωση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με πιο σημαντικό την κλίμακα απόδοσης του χάρτη που καθορίζεται από το είδος της χρήσης. Συγκεκριμένα η κλίμακα αποτύπωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή και ίση από το διπλάσιο της κλίμακας απόδοσης  $[(K.A.) \geq 2*(K.X.)]$ , ώστε τα δεδομένα της υδρογραφικής αποτύπωσης να είναι ευκρινή στο χάρτη που αποδίδονται. Η αποτύπωση λιμενικών εγκαταστάσεων κατά κανόνα γίνεται σε κλίμακα 1:1000, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες κλίμακες 1:500 και 1:200 (Ελληνική Υδρογραφική Υπηρεσία).

ΚΛΙΜΑΚΑ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ Ή ΛΙΜΕΝΟΔΕΙΚΤΗ	ΚΛΙΜΑΚΑ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ
<b>K.X. 1:40000</b>	1:25000
<b>1:20000 K.X. 1:39999</b>	1:10000
<b>1:10000 1:19999</b>	1:5000
<b>1:5000 1:9999</b>	1:2000
<b>1:5000</b>	1:2000

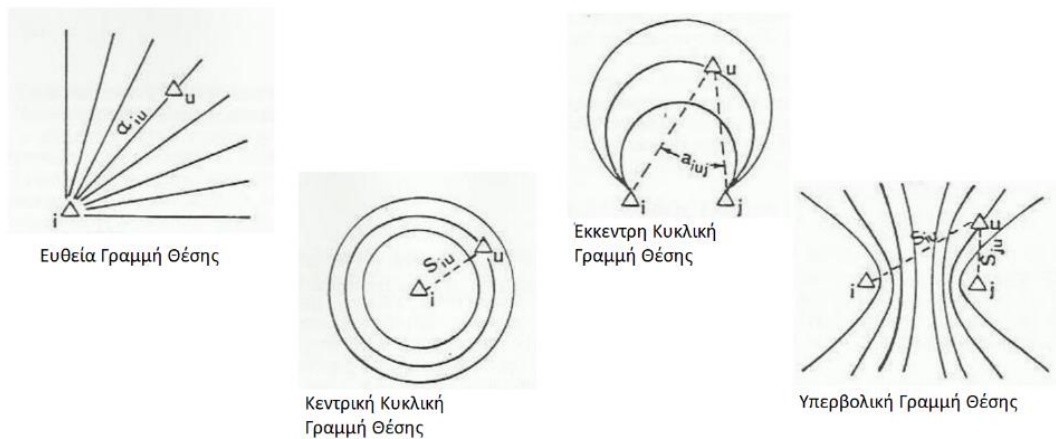
Πιν. 2.1. Κλίμακες αποτύπωσης που χρησιμοποιούνται από την Ελληνική Υδρογραφική Υπηρεσία, [Τζιαβός, 2002]  
Table 2.1, Mapping scales used by the Hellenic Hydrographic Service, [Tziavos, 2002]

Οι ηχοβολιστικές γραμμές ή βολιστικές γραμμές απεικονίζουν τις πλευσεις του πλωτού μέσου που εκτελεί την υδρογραφική αποτύπωση. Ο καθορισμός της βέλτιστης απόστασης μεταξύ διαδοχικών ηχοβολιστικών γραμμών καθορίζεται από το όριο της οριζόντιας εμβέλειας (κάλυψη *sonar* από έναν μορφοτροπέα) που αναμένεται σε συγκεκριμένο βάθος και την ακρίβεια εντοπισμού που απαιτείται από την μελέτη. Η τοπογραφία του βυθού και η κλίση αποτελούν σημαντικό παράγοντα για τον σχεδιασμό των γραμμών πλευσης. Για τη συλλογή δεδομένων με σύστημα πολυδευσμικού ηχοβολιστή, συνιστάται να διενεργούνται οι ηχοβολιστικές γραμμές παράλληλα στις βυθομετρικές γραμμές (ισοβαθείς). Αυτό ωφελεί στη διατήρηση συνεχούς επικάλυψης κατά μήκος των ηχοβολιστικών γραμμών (καθώς το πλάτος της σάρωσης ποικίλει ανάλογα με το βάθος).

Οι πρωτογενείς μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό στις υδρογραφικές αποτυπώσεις είναι οι ίδιες με αυτές της τοπογραφίας, δηλαδή διευθύνσεις, αζιμούθια και αποστάσεις. Οι μετρήσεις γίνονται με τη βοήθεια σημείων αναφοράς στη ξηρά. Κάθε μέτρηση προσδιορίζει μια γραμμή θέσης (*LOP: Line of Position*), δηλαδή το γεωμετρικό τόπο της θέσης του σκάφους.



Σχ. 2.1 Ηχοβολιστικές γραμμές με σύστημα πολυδεσμικού ηχοβολιστή (αριστερά), ηχοβολιστικές γραμμές με σύστημα μονοδεσμικού ηχοβολιστή (δεξιά), [Przeslawski, 2020]  
 Fig 2.1 Sounding lines with multibeam echo sounder (left), sounding lines with singlebeam echo sounder (right) , [Przeslawski, 2020]



Σχ. 2.2 Είδη γραμμών θέσης, [Τζιαβός, 2002]  
 Fig. 2.2 Various types of Lines of Position, [Tziavos, 2002]

## 2.2 Κλασικές και Ραδιομετρικές Μέθοδοι Προσδιορισμού Θέσης

Πριν από την εφαρμογή δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού (αρχές δεκαετίας 1990), χρησιμοποιούνταν επίγειες / συμβατικές τεχνολογίες και τεχνικές εντοπισμού πλωτών μέσω. Αυτές περιλαμβάνουν τη γραμμή σήμανσης, τον εξάντα, τον τριγωνισμό, τον τριπλευρισμό (ηλεκτρονικό) και τον γεωδαιτικό σταθμό.

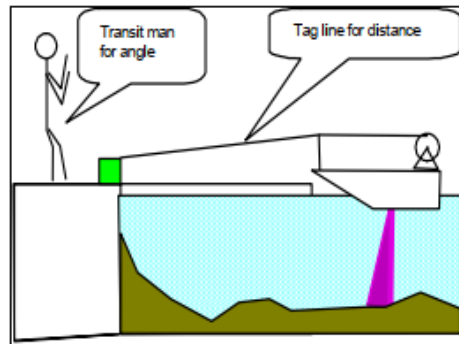


## 2.2.1 Κλασικές μέθοδοι

### 2.2.1α Διαβαθμισμένο σχοινί

Αποτελεί κλασική τεχνική εντοπισμού με αντικείμενο την εκτέλεση εγκάρσιων τομών από μια σταθερή γραμμή αναφοράς στην ακτή. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιούταν συχνά πριν τη δεκαετία του 1970 για την παρακολούθηση της προόδου των βυθοκορήσεων σε έργα ναυσιπλοΐας, παραδοσιακών μελετών διατομών καναλιού και ερευνών του υπεδάφους για εμπόδια στο κανάλι και του καθαρισμού αυτού. Οι τεχνικές με τη χρήση διαβαθμισμένου σχοινιού αντικαταστάθηκαν από τις τεχνικές μικροκυμάτων *EPS (Electronic Positioning Systems)* και τις τεχνικές απόστασης-αζιμούθιο, οι οποίες με τη σειρά τους αντικαταστάθηκαν από μεθόδους εντοπισμού θέσης με *GPS*.

Εντός περιορισμένης απόστασης από την γραμμή αναφοράς και με σωστή εκτέλεση, η μέτρηση με διαβαθμισμένο σχοινί αποτελεί μια ακριβή και σταθερή μέθοδο εκτέλεσης υδρογραφικών αποτυπώσεων και άλλων ερευνητικών εργασιών για θαλάσσιες μελέτες και κατασκευές. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένα βαθμονομημένο συρματόσχοινο, τεντωμένο κάθετα από κρηπιδώματα ή κομβικά σημεία προς τη γραμμή αναφοράς και διατηρείται κοντά στις περιοχές ελλειψισμού για κρίσιμες εργασίες διερεύνησης της περιοχής, όπου τα σήματα *GPS* μπλοκάρονται για τέτοιες έρευνες.



Σχ. 2.3 Μέτρηση με διαβαθμισμένο σχοινί, [Manual on Hydrography, 2011]

Fig. 2.3 Tag line survey, [Manual on Hydrography, 2011]

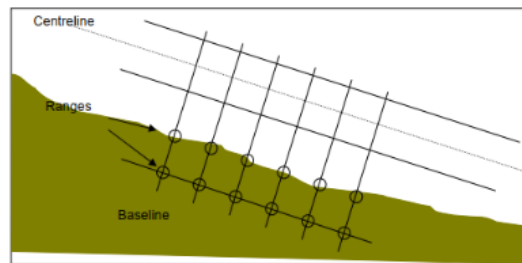
### 2.2.1β Εντοπισμός μέσω υλοποίησης παράλληλων διευθύνσεων

Αυτή η παραδοσιακή μέθοδος χρησιμοποιούνταν συχνά για τον εντοπισμό σκαφών βυθοκόρησης σε σχέση με γνωστά χαρακτηριστικά της ακτής ή σημαίες και εξακολουθεί να χρησιμοποιείται για λίγες εφαρμογές, όπως η οριζόντια και κατακόρυφη ευθυγράμμιση κατασκευαστικού εξοπλισμού, εξέδρας, φορτηγίδας κ.λπ.

Τα κύρια σημεία αυτής της μεθόδου είναι:

- Το σκάφος διατηρεί σταθερή ταχύτητα έρευνας μεταξύ όλων των σημείων αναφοράς.

- Οι διορθώσεις λαμβάνονται όταν το σκάφος διέρχεται πλάγια ή πλευρικά από ένα αναγνωρίσιμο αντικείμενο.
- Οι θέσεις θα παρεμβάλλονται μεταξύ των διορθώσεων.
- Η ταχύτητα του σκάφους θεωρείται σταθερή μεταξύ των διορθώσεων, οι οποίες θεωρούνται απαλλαγμένες από σφάλματα.
- Ο προσδιορισμός της θέσης μπορεί να προκύψει από την τομή των σημείων στην ακτή και των αποστάσεων, που προσδιορίζονται από την παρατήρηση τέτοιων χαρακτηριστικών.
- Τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή λόγω της προσεγγιστικής φύσης των δεδομένων και της οριακής ακρίβειας μιας τέτοιας έρευνας.

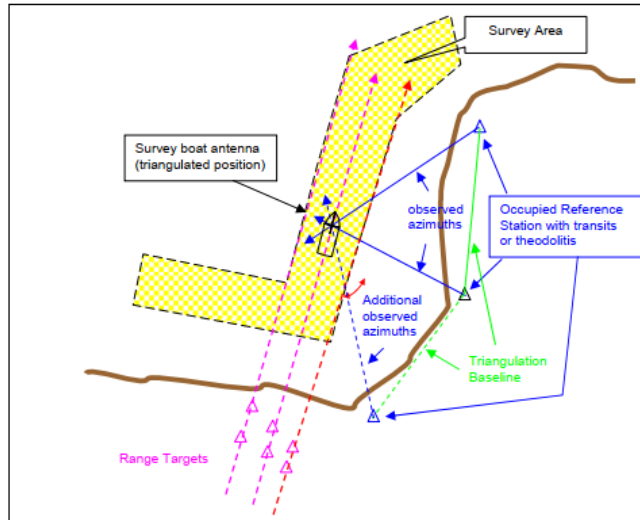


Σχ. 2.4 Σχετικός εντοπισμός θέσης με στύλους απόστασης, σημαίες και laser, [Manual on Hydrography, 2011]  
 Fig. 2.4 Range poles, flags and/or lasers set ashore for relative positioning, [Manual on Hydrography, 2011]

### 2.2.1γ Τριγωνισμός / Εμπροσθοτομία

Ένα σκάφος μπορεί να εντοπιστεί από τη διέλευσή του (εκτιμώμενη πορεία) ή τις παρατηρούμενες γωνίες του θεοδόλιχου από σημεία αναφοράς στην ακτή. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε μελέτες που απαιτείται αυξημένη ακρίβεια εντοπισμού. Οι γεωδαιτικοί σταθμοί θα πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις ακρίβειας για έρευνες ειδικής διάταξης. Η γωνία διατομής του σκάφους πρέπει να είναι τέτοια ώστε ένα σφάλμα κατεύθυνσης 1 λεπτού από ένα γεωδαιτικό σταθμό να μην προκαλέσει σφάλμα στη θέση του σκάφους μεγαλύτερο από 1 mm στην κλίμακα της έρευνας, γωνίες μεγαλύτερες από 30° και μικρότερες από 150° εξασφαλίζουν συνήθως την τήρηση αυτής της προϋπόθεσης. Τεχνικές τριγωνισμού χρησιμοποιούνται συχνά για να συμπληρώσουν την ηλεκτρονική μέτρηση απόστασης *EDM* ή τον εντοπισμό θέσης *DGPS* σταθερών υπεράκτιων κατασκευών (προβλήτες, γέφυρες, εξέδρες, κ.λπ.), τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής όσο και κατά τη μεταγενέστερη παρακολούθηση παραμορφώσεων.

Η ακρίβεια εντοπισμού θέσης τριγωνισμού / εμπροσθοτομίας εξαρτάται από την ακρίβεια εντοπισμού του χρησιμοποιούμενου συστήματος. Επιπλέον, σχετίζεται με τη γεωμετρική ισχύ της διατομής από δύο γωνίες ή διευθύνσεις αζιμούθιου και ποικίλλει σε όλη την περιοχή μελέτης, καθώς τα γωνιακά τυπικά σφάλματα κάθε οργάνου ποικίλουν ως συνάρτηση της απόστασης μεταξύ του οργάνου και του σκάφους. Ο μέσος όρος των τυπικών σφαλμάτων κάθε γωνιακής μέτρησης στο σκάφος, μαζί με την υπολογισμένη απόσταση από κάθε σημείο αναφοράς, αποτελεί μια εκτίμηση της ακρίβειας εντοπισμού θέσης τριγωνισμού / εμπροσθοτομίας.

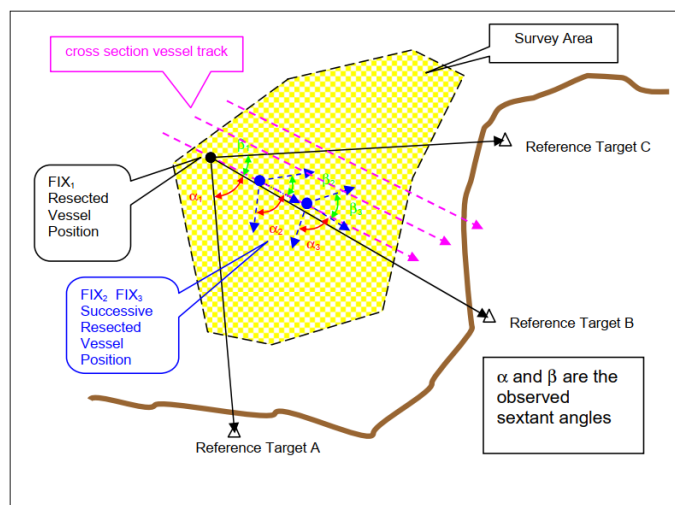


Σχ. 2.5 Προσδιορισμός θέσης με Τριγωνισμό / Εμπροσθοτομία, [Manual on Hydrography, 2011]  
 Fig. 2.5 Triangulation / Intersection positioning, [Manual on Hydrography, 2011]

### 2.2.1δ Εξάντας

Η αρχή λειτουργίας του εξάντα βασίζεται στο φαινόμενο της ανάκλασης, καθώς στην οπτική η γωνία πρόπτωσης μιας οπτικής ακτίνας επί ενός επιπέδου, είναι ίση με την γωνία ανάκλασής της. Ειδικότερα όμως για την μέτρηση των γωνιακών αποστάσεων με εξάντα εφαρμόζεται η αρχή της λεγόμενης διπλής ανάκλασης που επιτυγχάνεται με δύο κάτοπτρα, ένα μεγάλο κινητό και ένα μικρότερο σταθερό, τα οποία φέρει το όργανο και με τα οποία γίνονται οι παρατηρήσεις από το τηλεσκόπιο του οργάνου. Ο προσδιορισμός θέσης με εξάντα περιλαμβάνει την ταυτόχρονη παρατήρηση δύο γωνιών στο επίπεδο μεταξύ τριών γνωστών σημείων από τις οποίες προκύπτει η στιγμιαία θέση του σκάφους. Οι δύο παρατηρούμενες γωνίες με τη χρήση του εξάντα σχηματίζουν κυκλικούς τόπους, η τομή των οποίων αντιστοιχεί στη θέση του σκάφους. Ο προσδιορισμός θέσης με εξάντα εκτελείται αποκλειστικά επί του ερευνητικού σκάφους και δεν εξαρτάται από το ηλεκτρονικό σύστημα του σκάφους, τηλεπικοινωνίες ή χερσαία υποστήριξη.

Γενικά, ο προσδιορισμός θέσης με εξάντα υπό δυναμικές συνθήκες σκάφους δεν θεωρείται πλέον ακριβής για τις περισσότερες εφαρμογές. Σε ιδανικές συνθήκες, οι δυναμικές ακρίβειες δεν είναι καλύτερες από  $\pm 5\text{m}$  (95% επίπεδο εμπιστοσύνης), ενώ οι μέσες ακρίβειες κυμαίνονται μεταξύ των 10 έως 20 m.



Σχ. 2.6 Προσδιορισμός θέσης με Εξάντα (οπισθοτομία), [Manual on Hydrography, 2011]

Fig. 2.6 Sextant Resection positioning, [Manual on Hydrography, 2011]

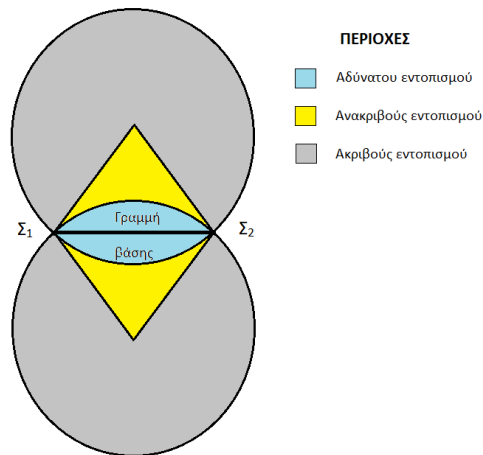
## 2.2.2 Ραδιομετρικές μέθοδοι

### 2.2.2α Κυκλικά συστήματα εντοπισμού

Η ονομασία των εν λόγω συστημάτων προδιαθέτει το γεγονός ότι ο προσδιορισμός της θέσης του σκάφους πραγματοποιείται στην τομή δύο ή περισσότερων κύκλων που προκύπτουν από την ταυτόχρονη μέτρηση των αποστάσεων του πλοίου από ισάριθμους σταθμούς αναφοράς (αρχή λειτουργίας).

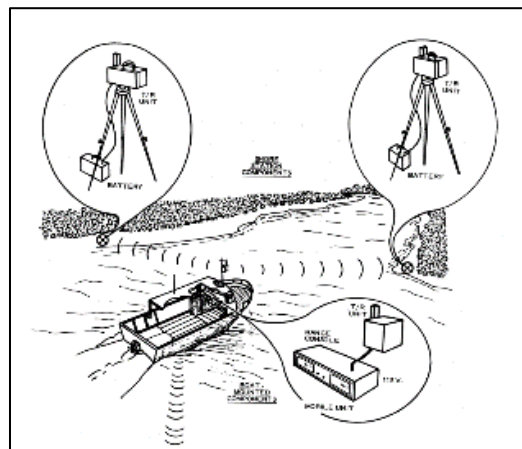
Στα κυκλικά συστήματα ο κύριος σταθμός βρίσκεται στο σκάφος και οι σταθμοί αναφοράς Σ1 και Σ2 στη στεριά (συνήθως βέβαια οι εργασίες πραγματοποιούνται με περισσότερους από δύο σταθμούς). Η γραμμή που συνδέει τα Σ1 και Σ2 ονομάζεται γραμμή βάσης και είναι αποφασιστικής σημασίας για να προσδιορισθούν οι περιοχές ακριβούς, ανακριβούς και αδύνατου εντοπισμού [βλ. Σχήμα 2.7].

Με τη κατασκευή δύο ισόπλευρων τριγώνων με μήκος Σ1Σ2 εκατέρωθεν της γραμμής βάσης και τον σχηματισμό δύο κύκλων από την κορυφή κάθε ισόπλευρου τριγώνου που περιέχουν τα άκρα της γραμμής βάσης, τότε δημιουργούνται πέντε περιοχές. Η περιοχή ανάμεσα στην τομή των δύο κύκλων και μεταξύ του Σ1 και Σ2 είναι περιοχή αδύνατου εντοπισμού γιατί σε όλα τα σημεία της περιοχής το σκάφος θα μετρά δύο αποστάσεις και οι αντίστοιχοι κύκλοι θα εφάπτονται. Άρα δεν θα υπάρχει εντοπισμός. Οι δύο περιοχές δεξιά του Σ2 και αριστερά του Σ1 είναι περιοχές αδύναμου ή ανακριβούς εντοπισμού γιατί οι κύκλοι τέμνονται με γωνίες κοντά στις 180°, άρα ο εντοπισμός έχει πολύ μεγάλη αβεβαιότητα, καθώς τα όρια των τομών κυμαίνονται μεταξύ 30° και 150°. Οι υπόλοιπες περιοχές, άνωθεν και κάτωθεν της γραμμής βάσης είναι περιοχές ισχυρού εντοπισμού.



Σχ. 2.7 Κυκλικό εντοπισμός και περιοχές με ακριβή, ανακριβή και αδύνατο εντοπισμό  
 Fig. 2.7 Circular positioning and areas with accurate, inaccurate and not-existent positioning

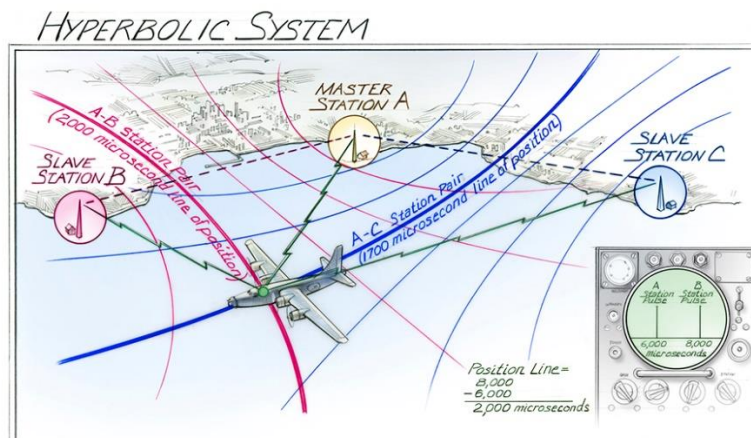
Το σύστημα *Mini-Ranger* της *Motorola* (*MRS: Motorola Mini-Ranger System*) είναι ένα ενεργητικό σύστημα μικρής εμβέλειας, οπτικής επαφής μέτρησης της απόστασης. Λειτουργεί με παλμικό ραντάρ χρησιμοποιώντας έναν πομπό φάσματος *C* (*C-band*) και μετρώντας τον χρόνο μεταξύ των μεταδιδόμενων και των λαμβανόμενων παλμών με ένα σήμα μετρητή 30 MHz. Αυτές οι πληροφορίες απόστασης που εμφανίζονται από τον *MRS* μαζί με τη γνωστή θέση κάθε πομποδέκτη, μπορούν να τριγωνιστούν για να αποδώσουν την θέση τους σκάφους. Λειτουργεί συχνότητες μεταξύ 5400 με 5600 MHz και έχει μέγιστη εμβέλεια 20 ναυτικά μίλια. Το πιθανό σφάλμα απόστασης ανέρχεται στα  $\pm 3$  m στα 20 ναυτικά μίλια. Τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν αποσυρθεί, λόγω των νέων τεχνολογιών που χρησιμοποιούν τη μέθοδο του δορυφορικού εντοπισμού θέσης.



Σχ. 2.8 Παρελκόμενα του βασικού συστήματος Mini-Ranger, [Positioning Techniques for U.S. Army, 1977]  
 Fig. 2.8 Components of basic Mini-Ranger system, [Positioning Techniques for U.S. Army, 1977]

### 2.2.2β Υπερβολικά συστήματα εντοπισμού

Η θέση του σκάφους με αξιοποίηση υπερβολικού συστήματος εντοπισμού προκύπτει από την τομή δύο υπερβολικών γραμμών θέσης, κάθε μία από τις οποίες προκύπτει από τη διαφορά των αποστάσεων του πλοίου από δύο σημεία αναφοράς της στεριάς. Τα συστήματα αυτά είναι παθητικά και, σε αντίθεση με τα κυκλικά συστήματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν από απεριόριστο αριθμό σκαφών. Συνήθως αποτελούνται από έναν κύριο σταθμό και δύο ή περισσότερους δευτερεύοντες. Οι υπερβολικές γραμμές κάθε δικτύου έχουν ως εστίες τους αντίστοιχους σταθμούς (τον κύριο και έναν δευτερεύοντα), ενώ οι γραμμές που καθορίζονται από τον κύριο σταθμό και έναν δευτερεύοντα ονομάζονται γραμμές βάσης. Κάθε υπερβολή αντιστοιχεί στην ίδια (σταθερή) διαφορά αποστάσεων του σκάφους από τους υπόψη σταθμούς. Ο συνδυασμός και των δύο δικτύων υπερβολών δημιουργεί ένα πλέγμα, το οποίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης του σκάφους. Οι αριθμοί που χαρακτηρίζουν κάθε υπερβολή του δικτύου προσδιορίζονται είτε μέσω της μέτρησης του χρόνου διάδοσης του εκπεμπόμενου παλμικού σήματος είτε μέσω της μέτρησης της διαφοράς φάσης των σημάτων που λαμβάνει το σκάφος από τον κύριο και τους δευτερεύοντες σταθμούς. Ποτέ δεν προσδιορίζονται οι αποστάσεις από το σκάφος προς τον κύριο και τους δευτερεύοντες σταθμούς, αλλά μόνο οι διαφορές των αποστάσεων. Έτσι, δεν απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ του πλοίου και των σταθμών.



Σχ. 2.9 Αρχή λειτουργίας υπερβολικών συστημάτων εντοπισμού, [<https://timeandnavigation.si.edu/>]  
Fig. 2.9 Operating principle of hyperbolic positioning systems, [<https://timeandnavigation.si.edu/>]

### 2.2.2γ Υπερβολικό σύστημα εντοπισμού Loran-C

Το σύστημα *Loran* είναι ένα επίγειο σύστημα προσδιορισμού θέσης, το οποίο δημιουργήθηκε από τις ΗΠΑ το 1940, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε εκτενέστατα με διάφορες εξελκτικές μορφές (*Loran-A*, *Loran-B*, *Loran-C*, κ.λπ.) τόσο στην ναυσιπλοΐα, όσο και στην αεροπλοΐα,

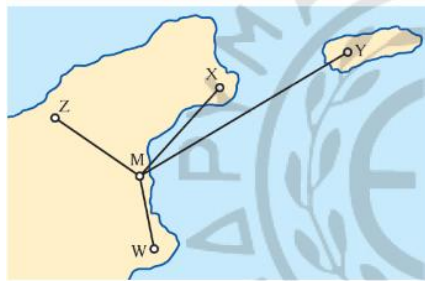
κυρίως μέχρι την εποχή της εξέλιξης του δορυφορικού συστήματος προσδιορισμού στίγματος GPS κατά τη δεκαετία του '90. Το ακρωνύμιο *Loran* προέρχεται από τις λέξεις *L*ong *R*ange *N*avigation.

Το σύστημα *Loran-C* λειτουργεί στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων *LF* (*Low Frequency*, 100 kHz) με τη μέθοδο μετρήσεως διαφοράς χρόνου και τη μέθοδο συγκρίσεως φάσεως. Το δίκτυο των σταθμών *Loran-C* αποτελείται από διάφορες αλυσίδες (ομάδες) σταθμών, κάθε μία από τις οποίες μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή και αποτελείται από έναν κύριο σταθμό *M* και δύο, τρεις ή και τέσσερις δευτερεύοντες, οι οποίοι συμβολίζονται με τα γράμματα *X, Y, Z* και *W*. Ο κύριος σταθμός της αλυσίδας βρίσκεται συνήθως σε κεντρικό σημείο της περιοχής εφαρμογής και οι δευτερεύοντες είναι εγκατεστημένοι περιφερειακά, γύρω από τον κύριο. Η ακρίβεια θέσης που παρέχει το σύστημα *Loran-C* εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως:

1. Τη γεωμετρία των σταθμών παρατήρησης.
2. Το μέσο διαδόσεως των εκπομπών (διάδοση ξηρά, θάλασσα κ.λπ.).
3. Την κατάσταση των σταθμών εκπομπής.
4. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη.
5. Την ικανότητα και την εμπειρία του χειριστή.

Η απόλυτη ακρίβεια (*absolute accuracy*) είναι ένα μέτρο της ικανότητας προσδιορισμού των γεωγραφικών συντεταγμένων (φ,λ) του στίγματος σκάφους από τον δέκτη *Loran-C*. Εν προκειμένω, η ακρίβεια προσδιορίζεται από τη διαφορά της πραγματικής θέσης του δέκτη από τη θέση που προκύπτει από τις διαφορές χρόνου ή τις αντίστοιχες συντεταγμένες που παρέχει ο δέκτης. Η σχετική ή επαναληπτική ακρίβεια (*repeatable accuracy*) ή και επαναληπτικότητα (*repeatability*) προσδιορίζει τη δυνατότητα που δίνει το σύστημα να επιστρέψουμε σε μια προηγούμενη θέση, χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες του συστήματος, ακόμα και αν τα στοιχεία του στίγματος που παρέχονται από τον δέκτη δεν είναι απόλυτα ακριβή (αλλά περιέχουν μόνο συστηματικά σφάλματα). Ενδεικτικές τιμές της επαναληπτικής ακρίβειας του συστήματος *Loran-C* για στίγμα που προκύπτει από λήψη κυμάτων εδάφους, ανάλογα με την απόσταση του σκάφους από τον κύριο σταθμό της αλυσίδας, είναι:

1. Απόσταση 200 nmi – ακρίβεια 15–90 m.
2. Απόσταση 500 nmi – ακρίβεια 60-210 m.
3. Απόσταση 750 nmi – ακρίβεια 90-340 m.
4. Απόσταση 1000 nmi – ακρίβεια 150-500 m.



Σχ. 2.10 Τυπική διάταξη των σταθμών μιας αλυσίδας *Loran-C*. [Παλληκάρη, 2016]  
Fig. 2.10 Usual configuration of the stations of a *Loran-C* system, [Pallikari, 2016]

## 2.3 Δορυφορικός / Αδρανειακός Προσδιορισμός Θέσης

### 2.3.1 Δορυφορικές μέθοδοι εντοπισμού

#### 2.3.1α Βασικές αρχές λειτουργίας των συστημάτων GNSS

Το δορυφορικό τμήμα των συστημάτων *GNSS* (*Global Navigation Satellite System*) αποτελείται από δορυφόρους, οι οποίοι είναι σε τροχιά γύρω από τη Γη και εκπέμπουν η/μ σήματα. Αυτά τα σήματα λαμβάνονται από δέκτες στο έδαφος, οι οποίοι χρησιμοποιούν τις πληροφορίες αυτές για να προσδιορίσουν τη θέση τους. Οι δέκτες μπορούν να υπολογίσουν την απόστασή τους από τους δορυφόρους με βάση τον χρόνο που χρειάστηκε το σήμα να φτάσει από τον δορυφόρο μέχρι τον δέκτη. Επιπλέον, οι δέκτες έχουν πρόσβαση στις γνωστές θέσεις των δορυφόρων κατά την αποστολή των σημάτων. Με αυτές τις πληροφορίες, ο δέκτης μπορεί να υπολογίσει γεωμετρικά τις συντεταγμένες του μέσω της διαδικασίας του τριγωνισμού, χρησιμοποιώντας τις αποστάσεις που μετρήθηκαν από τουλάχιστον τρεις δορυφόρους. Η ακρίβεια της απόστασης εξαρτάται από την ακρίβεια της γνώσης του χρόνου μετάβασης του σήματος και την συγχρονισμένη λειτουργία των χρονομέτρων των δορυφόρων και των δεκτών. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ακρίβειας του χρόνου, απαιτείται η λήψη μέτρησης από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους.

Για να προσδιοριστεί η θέση ενός δορυφορικού δέκτη στο σύστημα *GNSS*, χρησιμοποιείται η αρχή της τομής των σφαιρικών επιφανειών που προέρχονται από τους δορυφόρους. Αυτή η αρχή καθορισμού θέσης εφαρμόζεται με διάφορες μεθόδους, ανάλογα με τη χρήση του συστήματος *GNSS* (π.χ. ναυτιλία, γεωδαισία κ.λπ.). Οι κύριες μέθοδοι προσδιορισμού θέσεως των συστημάτων *GNSS* είναι:

1. Ναυτιλιακός (κινηματικός προσδιορισμός θέσης).
2. Στατικό προσδιορισμός θέσης.
3. Διαφορικός προσδιορισμός θέσης.
4. Απόλυτος προσδιορισμός θέσης (*single point positioning – SPP*)
5. Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο με της χρήση ψευδοαποστάσεων (*Differential GNSS – DGNSS*)

#### 2.3.1β Απόλυτος/Σχετικός εντοπισμός θέσης

Ο απόλυτος προσδιορισμός θέσης (*absolute positioning*) αναφέρεται στη διαδικασία υπολογισμού των συντεταγμένων ενός δέκτη ( $X, Y, Z$ ) μέσω των παρατηρήσεών του. Στην περίπτωση του *GPS*, οι συντεταγμένες υπολογίζονται αρχικά στο γεωδαιτικό σύστημα *WGS84* και μπορούν να μετατραπούν σε άλλα γεωδαιτικά ή προβολικά συστήματα αναφοράς με τη χρήση μετασχηματισμών παραμέτρων.

Η λύση πλοήγησης ή ναυσιπλοΐας (*navigation solution*) εν γένει αφορά σε επίλυση απόλυτου εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο που αποσκοπεί στον υπολογισμό θέσης και ταχύτητας του



σκάφους. Αυτό είναι απαραίτητο για πλοήγηση και ναυσιπλοΐα, όπου η θέση πρέπει να ενημερώνεται συνεχώς.

Για τον απόλυτο προσδιορισμό θέσης, συνήθως χρησιμοποιούνται παρατηρήσεις ψευδοαποστάσεων από τους κώδικες των δορυφόρων. Κυρίως στον κώδικα *C/A* (*Coarse Acquisition*), αλλά σύντομα θα είναι δυνατή η χρήση των κωδικών των νέων σημάτων. Με την εισαγωγή νέων πολιτικών σημάτων, όπως δέκτες δύο συχνοτήτων, θα είναι δυνατή η σχεδόν απαλοιφή των σφαλμάτων που προκαλούνται από την ιονοσφαιρική ανακλαστικότητα.

Επιπλέον, οι παρατηρήσεις από άλλα συστήματα *GNSS*, όπως το *GALILEO* (Ευρωπαϊκό διαστημικό πρόγραμμα), μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια του προσδιορισμού θέσης και χρόνου, καθώς επιτρέπουν τη χρήση επιπλέον δορυφόρων για τον υπολογισμό της θέσης.

Ο σχετικός προσδιορισμός θέσης αναφέρεται στη διαδικασία προσδιορισμού των συντεταγμένων ενός σημείου ως προς ένα άλλο σημείο που θεωρείται γνωστό. Αυτό σημαίνει ότι υπολογίζεται το διάνυσμα μεταξύ των δύο σημείων, το οποίο ονομάζεται διάνυσμα βάσης ή απλά βάση (*baseline*). Ο σχετικός προσδιορισμός απαιτεί την ταυτόχρονη μέτρηση προς δορυφόρους από τουλάχιστον δύο δέκτες. Για να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες ενός αγνώστου σημείου B, προϋποθέτουμε ότι γνωρίζουμε τις συντεταγμένες ενός γνωστού σημείου A ( $X_A, Y_A, Z_A$ ). Με βάση αυτές τις πληροφορίες, υπολογίζουμε τις συντεταγμένες ( $X_B, Y_B, Z_B$ ) του σημείου B, και έτσι προκύπτουν και οι συνιστώσες ( $\Delta X_{AB}, \Delta Y_{AB}, \Delta Z_{AB}$ ) του διανύσματος βάσης.

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο σχετικός προσδιορισμός συνήθως γίνεται εκ των υστέρων, δηλαδή μετά την καταγραφή των μετρήσεων από τους δέκτες. Αυτό σημαίνει ότι οι μετρήσεις προς τους δορυφόρους γίνονται ταυτόχρονα από δύο ή περισσότερους δέκτες, και στη συνέχεια αναλύονται τα δεδομένα για τον υπολογισμό των συντεταγμένων. Σε περίπτωση πραγματικού χρόνου προσδιορισμού θέσης, υπάρχουν ειδικές τεχνικές και πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί ο σχετικός προσδιορισμός θέσης με μεγαλύτερη ακρίβεια και συχνότητα ανανέωσης των συντεταγμένων.

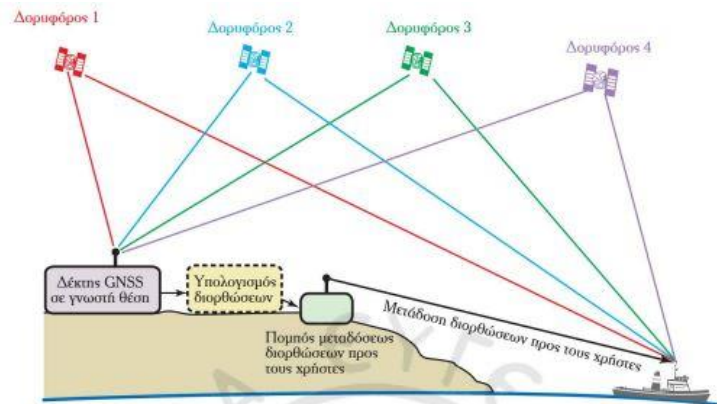
### 2.3.1γ Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης *DGNS* με χρήση ψευδοαποστάσεων

Γενικά, στον σχετικό προσδιορισμό θέσης, οι συντεταγμένες ενός σημείου καθορίζονται σε σχέση με ένα άλλο σημείο, του οποίου οι συντεταγμένες είναι ήδη γνωστές ως προς το σύστημα *WGS84* ή κάποιο άλλο σύστημα που αποκλίνει ελάχιστα από αυτό (λίγα μέτρα). Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ταυτόχρονη παρατήρηση από τους δύο δέκτες στα αντίστοιχα σημεία προς τους ίδιους δορυφόρους. Αυτό που καθορίζεται με μεγάλη ακρίβεια είναι η σχετική θέση, δηλαδή οι διαφορές των συντεταγμένων μεταξύ των δύο σημείων (διάνυσμα βάσης), και όχι οι απόλυτες τιμές του αγνώστου σημείου, η ακρίβεια των οποίων εξαρτάται από την ακρίβεια των συντεταγμένων του γνωστού σημείου. Με την ίδια λογική, ο σχετικός προσδιορισμός μπορεί να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει ταυτόχρονη μέτρηση σε περισσότερα από δύο σημεία με

αντίστοιχο αριθμό δεκτών, επιτρέποντας έτσι τον καθορισμό της σχετικής θέσης μεταξύ όλων των σημείων.

Στον σχετικό κινηματικό προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο, είναι απαραίτητο να αποστέλλονται δεδομένα (διορθώσεις ή παρατηρήσεις) από έναν σταθερό / ακίνητο δέκτη με γνωστές συντεταγμένες προς έναν ή περισσότερους κινητούς δέκτες. Αυτοί οι κινητοί δέκτες μπορούν είτε να παραμείνουν ακίνητοι για τουλάχιστον μία χρονική στιγμή σε συγκεκριμένα σημεία είτε να βρίσκονται συνεχώς σε κίνηση κατά μήκος μιας διαδρομής. Ο κινητός δέκτης επεξεργάζεται τις δικές του μετρήσεις μαζί με τα δεδομένα που λαμβάνει σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, με μικρή χρονική υστέρηση, και καθορίζει τη θέση του.

Η χρήση ψευδοαποστάσεων από κώδικες *PRN* (*Pseudo-random Noise*) για τον προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο είναι γνωστή ως *DGNSS* (*Differential GNSS*) και προσφέρει ακρίβεια μεταξύ 0,5 m και 3 m. Σε κάθε περίπτωση, η θέση του κινητού δέκτη προσδιορίζεται σε κάθε χρονική στιγμή, και για τις περισσότερες στιγμές στο ίδιο σημείο υπολογίζεται μια πιο ακριβής λύση, λαμβάνοντας υπόψη και ποιοτικούς δείκτες, την επιτυχημένη επίλυση των ασαφειών και το *rms* (*root mean square*) της εκτίμησης. Είναι δυνατόν οι μετρήσεις σε κάθε χρονική στιγμή να καταγράφονται στον δέκτη, έτσι ώστε ο χρήστης, αν το επιθυμεί, να επαναπροσδιορίσει όλα ή κάποια από τα σημεία αργότερα, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονες και όχι σχεδόν ταυτόχρονες παρατηρήσεις (μεταξύ σταθερού και κινητού δέκτη) για να επιτύχει καλύτερη ακρίβεια.



Σχ. 2.11 Αρχή λειτουργίας διαφορικού GNSS (D-GNSS), [Παλληκάρη, 2016]

Fig. 2.11 Differential GNSS operating principle (D-GNSS), [Pallikari, 2016]

### 2.3.1δ Το δορυφορικό σύστημα επαυξήσεως EGNOS της Ευρωπαϊκής Ένωσης

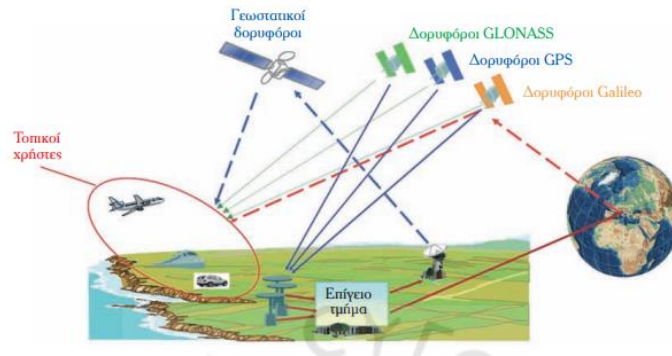
Το σύστημα *EGNOS* (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) είναι το πρώτο ευρωπαϊκό πρόγραμμα για δορυφορική ναυσιπλοΐα. Πρόκειται για ένα σύνθετο σύστημα δορυφορικής ενίσχυσης *SBAS* (*Satellite Based Augmentation System*), το οποίο αξιοποιεί δορυφόρους από δύο παγκόσμια συστήματα δορυφορικής πλοήγησης, το *GPS* και το *Galileo*. Σε αυτό προστίθενται τρεις επιπλέον γεωστατικοί δορυφόροι και ένα δίκτυο επίγειων σταθμών,

παρέχοντας βελτιωμένες υπηρεσίες προσδιορισμού θέσης με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με την ακρίβεια που προσφέρει το κάθε σύστημα ξεχωριστά.

Πιο αναλυτικά, τα τμήματα από τα οποία αποτελείται το σύστημα *EGNOS* είναι τα εξής:

1. Το δορυφορικό τμήμα.
2. Το επίγειο τμήμα.
3. Οι δορυφορικοί δέκτες *EGNOS*.

Η ακρίβεια του *EGNOS* στον προσδιορισμό θέσης κυμαίνεται μεταξύ 1 και 2 m για τον οριζόντιο προσδιορισμό θέσης, σε αντίθεση με τα 5 m του *GNSS*, ενώ για τον κατακόρυφο προσδιορισμό (υψόμετρο) κυμαίνεται μεταξύ 3 και 5 m.



Σχ. 2.12 Σύνθεση ευρωπαϊκού δορυφορικού συστήματος επαυξήσεως *EGNOS*, [Παλληκάρη, 2016]

Fig. 2.12 Composition of the European satellite augmentation system *EGNOS*, [Pallikari, 2016]

### 2.3.1ε Δέκτες *GNSS* για υδρογραφικές εφαρμογές

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες η εξέλιξη της τεχνολογίας των δεκτών *GNSS* είναι ραγδαία. Με την πρόοδο της ηλεκτρονικής, οι δέκτες *GNSS* έχουν γίνει όλο και πιο μικροί σε μέγεθος, κοστίζουν λιγότερο, καταναλώνουν λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία τους, είναι πιο αξιόπιστοι και μπορούν να εκτελούν περισσότερες λειτουργίες. Σήμερα, ένας δέκτης μπορεί να αποτελείται ουσιαστικά από λίγα ολοκληρωμένα κυκλώματα και να έχει εξαιρετικά μικρές διαστάσεις, σε σύγκριση με τους πολύ μεγάλους δορυφορικούς ναυτιλιακούς δέκτες των πρώτων συστημάτων δορυφορικής πλοήγησης της δεκαετίας του 1960.



Σχ. 2.13 Δέκτης δορυφορικής ναυτιλίας δεκαετίας 1960 για εγκατάσταση σε υποβρύχια, [Παλληκάρη, 2016]

Fig. 2.13 1960s satellite navigation receiver for installation in submarines, [Pallikari, 2016]

Ένας δέκτης *GNSS* περιλαμβάνει τις εξής κύριες μονάδες:

1. Κεραία με προενισχυτή, η οποία έχει ως σκοπό να μετατρέπει τα δορυφορικά σήματα που φτάνουν σε αυτήν σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα και, στη συνέχεια, σε ηλεκτρικά σήματα τα οποία μπορεί να επεξεργαστεί ο δέκτης. Οι κεραίες των συστημάτων *GNSS* διαθέτουν προενισχυτή για να επιτρέπουν τη λήψη ακόμη και των πιο ασθενών σημάτων.
2. Μονάδα μετατροπής της λαμβανόμενης ραδιοσυχνότητας σε ενδιάμεση συχνότητα: Αυτή η μονάδα μετατρέπει τη συχνότητα των λαμβανόμενων σημάτων σε μια ενδιάμεση συχνότητα που μπορεί να επεξεργαστεί ευκολότερα.
3. Μονάδα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος ή μονάδα ψηφιακής συσχέτισης: Αυτή η μονάδα ανιχνεύει, ανακτά και επεξεργάζεται τα δορυφορικά σήματα, ενώ επίσης ελέγχει τον δέκτη και εκτελεί τους απαραίτητους υπολογισμούς μέσω της μονάδας του μικροεπεξεργαστή.

Για την καλύτερη ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών και των επιχειρησιακών δυνατοτήτων τους, οι δέκτες *GNSS* μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει ορισμένων κριτηρίων. Ανάλογα με τις ικανότητες λήψης και επεξεργασίας των δορυφορικών σημάτων, οι δέκτες *GNSS* μπορούν να διαχωριστούν στις εξής κατηγορίες:

- Δέκτες μιας πολιτικής συχνότητας για μέτρηση ψευδοαποστάσεων με τον κώδικα *C/A*: Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τους τυπικούς ναυτιλιακούς δέκτες.
- Δέκτες μιας πολιτικής συχνότητας για μέτρηση ψευδοαποστάσεων με τον κώδικα *C/A* και χρήση μεθόδου σύγκρισης φάσης: Αυτοί είναι οι τυπικοί γεωδαιτικοί δέκτες.
- Δέκτες δύο συχνοτήτων: Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει δέκτες που μπορούν να λαμβάνουν και να επεξεργάζονται σήματα από δύο διαφορετικές συχνότητες.
- Δέκτες για μέτρηση ψευδοαποστάσεων με κρυπτογραφημένο κώδικα: Αυτοί είναι οι τυπικοί στρατιωτικοί δέκτες.
- Διαφορικοί δέκτες *GNSS*: Αυτοί οι δέκτες έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν σήματα από έναν διαφορικό σταθμό, βελτιώνοντας την ακρίβεια θέσης που παρέχουν οι κοινοί ναυτιλιακοί δέκτες.

Ανάλογα με τον αριθμό των καναλιών για τη λήψη και την επεξεργασία των δορυφορικών σημάτων, οι δέκτες *GNSS* μπορούν να διαφέρουν σημαντικά, συνήθως διαθέτοντας από 12 έως 40 κανάλια. Ένας καλός δέκτης *GNSS* θα πρέπει να είναι πολυκάναλος, διαθέτοντας ξεχωριστά κανάλια για κάθε δορυφορικό σήμα. Με βάση τη χρήση για την οποία προορίζονται, οι δέκτες *GNSS* μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Φορητοί δέκτες *GNSS* για ναυτιλιακή και γενική χρήση: Αυτοί οι δέκτες είναι μικρού μεγέθους και βάρους, ιδανικοί για μεταφορά [βλέπε σχ. 2-14 (α)].
- Ναυτιλιακοί δέκτες *GNSS* για μόνιμη εγκατάσταση σε σκάφη: Μερικοί από αυτούς τους δέκτες διαθέτουν μικρή οθόνη που μπορεί να εμφανίζει ηλεκτρονικό χάρτη με την τοποθεσία και την πορεία του σκάφους σε πραγματικό χρόνο [βλέπε σχ. 2-14 (β)].
- Ναυτιλιακοί δέκτες διαφορικού προσδιορισμού θέσης (*D-GNSS*): Αυτοί οι δέκτες μοιάζουν με τους κοινούς ναυτιλιακούς δέκτες *GNSS* αλλά προσφέρουν βελτιωμένη ακρίβεια μέσω της διαφορικής τεχνικής [βλέπε σχ. 2-14 (γ)].

- Υδρογραφικοί δέκτες για κινηματικό προσδιορισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο: Αυτοί οι δέκτες παρέχουν τη δυνατότητα για ακριβή προσδιορισμό θέσης με ακρίβεια της τάξης των εκατοστών (2-3 cm) σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να απαιτείται σταθερή θέση. Χρησιμοποιούνται σε ειδικές υδρογραφικές μετρήσεις υψηλών απαιτήσεων ακριβείας [βλέπε σχ. 2-14 (δ)].



Σχ. 2.14 Παραδείγματα δεκτών GNSS για εφαρμογές στη θάλασσα, [Παλληκάρη, 2016]

Fig. 2.14 Examples of GNSS receives for marine applications, [Pallikari, 2016]

### 2.3.2 Αδρανειακές μέθοδοι εντοπισμού

#### 2.3.2α Εισαγωγή στα αδρανειακά συστήματα εντοπισμού

Τα συστήματα αδρανειακού εντοπισμού είναι αυτόνομες συσκευές που υπολογίζουν τη θέση, την επιτάχυνση και την γωνιακή ταχύτητα ενός κινούμενου αντικειμένου. Βασίζονται στους νόμους της Νευτώνειας μηχανικής για να παρέχουν αυτές τις πληροφορίες. Τα συστήματα αυτά διαθέτουν αισθητήρες, όπως επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια, που ανιχνεύουν τις δυνάμεις και τις γωνιακές ταχύτητες που ασκούνται στο κινούμενο αντικείμενο.

Όσον αφορά την αρχή λειτουργίας των αδρανειακών συστημάτων, από την επιτάχυνση  $a(t)$  του σώματος σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή  $t$ , μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα  $v(t)$  και τη θέση  $x(t)$  του σώματος στην αντίστοιχη στιγμή, ολοκληρώνοντας την επιτάχυνση μία φορά

ως προς το χρόνο ώστε να υπολογιστεί η ταχύτητα και δεύτερη φορά για να υπολογιστεί η θέση του σώματος. Αντίστοιχα, μπορεί να υπολογιστεί ο προσανατολισμός του σώματος  $A(t)$ , εντοπίζοντας τη γωνιακή ταχύτητα  $\omega(t)$  που ανιχνεύεται από τα γυροσκόπια και εκτελώντας μια ολοκλήρωση της γωνιακής ταχύτητας μία φορά ως προς το χρόνο.




### 2.3.2β Αισθητήρες – Πηγές σφαλμάτων

Ένα αδρανειακό σύστημα εντοπισμού περιλαμβάνει δύο είδη αισθητήρων για την αποτύπωση των απαραίτητων μετρήσεων και αποτελείται από τρία κύρια μέρη. Το πρώτο μέρος είναι η αδρανειακή μονάδα *IMU (Inertial Measurement Unit)*, η οποία ανιχνεύει τις κινητικές παραμέτρους του αντικειμένου, όπως η επιτάχυνση και η γωνιακή ταχύτητα. Το δεύτερο μέρος είναι η μονάδα προεπεξεργασίας, η οποία επεξεργάζεται τις μετρήσεις που λαμβάνονται από την *IMU* και τις μετατρέπει σε χρήσιμες πληροφορίες, όπως η θέση, η ταχύτητα και ο προσανατολισμός του αντικειμένου. Το τρίτο μέρος είναι η κύρια υπολογιστική μονάδα, η οποία χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των δεδομένων και τον υπολογισμό της τελικής θέσης, της ταχύτητας και του προσανατολισμού του αντικειμένου.

Υπάρχουν πολλές πηγές σφαλμάτων που επηρεάζουν την απόδοση ενός αδρανειακού συστήματος. Αυτές οι πηγές περιλαμβάνουν τα σφάλματα των αισθητήρων, το σφάλμα της επιτάχυνσης της βαρύτητας, καθώς και τα σφάλματα αρχικοποίησης και ευθυγράμμισης. Αυτά τα σφάλματα εισέρχονται στις μετρήσεις και καθώς οι μετρήσεις ολοκληρώνονται ως προς τον χρόνο για τον υπολογισμό των παραμέτρων πλοήγησης, τα σφάλματα αυτά επίσης ολοκληρώνονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους τους γραμμικά σε πρώτο στάδιο ολοκλήρωσης, τετραγωνικά σε δεύτερο στάδιο και κυβικά σε τρίτο στάδιο ολοκλήρωσης, επηρεάζοντας ανάλογα τις παραμέτρους πλοήγησης.

### 2.3.2γ Αδρανειακά συστήματα για θαλάσσιες εφαρμογές

Όπως αναφέρθηκε, αδρανειακή μονάδα *IMU* διαθέτει 3 επιταχυνσιόμετρα και 3 γυροσκόπια για τη μέτρηση κατά μήκος των αξόνων  $X, Y$  και  $Z$  της *IMU*. Όλα τα επιταχυνσιόμετρα είναι ουσιαστικά τύπου μικρο-ηλεκτρομηχανικών αισθητήρων *MEMS (Micro Electro Mechanical Sensor)*. Υπάρχουν διαθέσιμοι διαφορετικοί τύποι κατασκευής, αλλά όλοι είναι κατασκευασμένοι σε ένα μικροσύστημα (*chip*) και δεν περιέχουν κινητά μέρη με την κλασική έννοια του όρου. Η ακρίβεια του επιταχυνσιόμετρου καθορίζεται από την ποιότητα του ίδιου του αισθητήρα αλλά και από τις τοπικές μεταβολές του πεδίου βαρύτητας της Γης. Η ποιότητα του αισθητήρα εξαρτάται από τις διαδικασίες βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται καθώς και από το αν χρησιμοποιείται προηγμένη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας εντός της συσκευής. Όσον αφορά το γυροσκόπιο, υπάρχουν τρεις κύριοι διαφορετικοί τύποι, αυτοί μπορούν να χωριστούν χονδρικά σε *MEMS*, γυροσκόπια οπτικών ινών (*FOG: Fibre Optic Gyro*) και γυροσκόπια τύπου laser με δακτύλιο (*RLG: Ring Laser Gyro*).

ΣΥΣΤΗΜΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
<p data-bbox="289 233 764 264">Μικρο-ηλεκτρομηχανικό σύστημα (<i>MEMS</i>)</p> 	<p data-bbox="824 233 1369 814">Τα <i>MEMS</i> πιο συχνά σήμερα, είναι μικρά και σχετικά φθηνά. Βρίσκονται επίσης στα κινητά τηλέφωνα για τον έλεγχο, για παράδειγμα, του προσανατολισμού της οθόνης. Όταν χρησιμοποιείται η τεχνολογία <i>MEMS</i>, μια σύγχρονη <i>IMU</i> μπορεί να έχει μέγεθος μόλις μερικών εκατοστών σε σχήμα κύβου. Η τυπική σταθερότητα ενός γυροσκοπίου <i>MEMS</i> κυμαίνεται μεταξύ 1° και 5° ανά ώρα, με μερικούς τύπους να είναι σημαντικά καλύτεροι και μερικούς σημαντικά χειρότεροι. Ένα σφάλμα κατεύθυνσης 1°/h σε ταχύτητα 10 <i>knot</i> μεταφράζεται σε σφάλμα θέσης άνω των 5 m μετά από ένα λεπτό χωρίς ενημέρωση θέσης. Επειδή υπάρχουν 3 γυροσκόπια (και 3 επιταχυνσιόμετρα), η αυτόνομη θέση <i>IMU</i> θα είναι συνήθως χειρότερη από τα αναφερόμενα 5 m.</p>
<p data-bbox="289 831 764 863">Σύστημα γυροσκοπίου οπτικών ινών (<i>FOG</i>)</p> 	<p data-bbox="824 831 1369 1136">Εάν απαιτείται καλύτερη απόδοση, μπορεί να επιλεγεί μια <i>IMU</i> με <i>FOG</i>. Αυτές έχουν συνήθως σταθερότητα καλύτερη από 0,1° ανά ώρα, με αποτέλεσμα μικρότερα σφάλματα θέσης από τα <i>MEMS</i>. Χρησιμοποιούν το μοτίβο παρεμβολής που δημιουργείται από δύο παλμούς φωτός που κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις μέσω μακρών πηνίων οπτικής ίνας για τη μέτρηση του ρυθμού στροφής.</p>
<p data-bbox="289 1188 764 1251">Σύστημα γυροσκοπίου τύπου laser με δακτύλιο (<i>RLG</i>)</p> 	<p data-bbox="824 1188 1369 1598">Όταν απαιτείται ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια, μπορεί να επιλεγεί μια <i>IMU</i> που περιέχει <i>RLGs</i>. Τα <i>RLGs</i> έχουν ρυθμό παρέκκλισης μικρότερο από 0,002° ανά ώρα, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν είτε πολύ υψηλή ακρίβεια είτε αυτόνομη απόδοση εντοπισμού θέσης για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Το <i>RLG</i> έχει αντικαταστήσει το παραδοσιακό (μηχανικό) γυροσκόπιο που χρησιμοποιείται στις περισσότερες στρατιωτικές εφαρμογές. Όπως είναι αναμενόμενο, η βελτιωμένη ακρίβεια συνοδεύεται από μεγαλύτερο κόστος.</p>

Πιν. 2.2 Παραδείγματα αδρανειακών συστημάτων πλοήγησης, [Hydro International, 2016]  
Table 2.2 Examples of inertial navigation systems, [Hydro International, 2016]

### 2.3.3 Ολοκληρωμένες δορυφορικές και αδρανειακές μέθοδοι εντοπισμού

#### 2.3.3α Εισαγωγή στο φίλτρο Kalman

Το φίλτρο *Kalman* αξιοποιείται σε πολλές εφαρμογές παρακολούθησης, πρόβλεψης και εξομάλυνσης των τιμών θέσης και κινηματικών χαρακτηριστικών (όπως η ταχύτητα και η επιτάχυνση) βασιζόμενο σε διακριτές μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο και μετεπεξεργασία. Γενικά, το φίλτρο *Kalman* χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των παραμέτρων θέσης και ταχύτητας ενός οχήματος, λαμβάνοντας υπόψη προηγούμενες παρατηρήσεις και γνώσεις για την κινηματική του κατάσταση σε κάθε χρονική στιγμή. Το φίλτρο *Kalman* εφαρμόζεται επίσης σε εφαρμογές που συνδυάζουν παρατηρήσεις από διάφορους αισθητήρες. Ένα παράδειγμα αυτού είναι οι εφαρμογές ολοκλήρωσης *GNSS/INS*. Σε αυτές τις εφαρμογές, το φίλτρο *Kalman* χρησιμοποιείται για να συνδυάσει τις μετρήσεις από ένα σύστημα πλοήγησης με δορυφορική τοπογραφία (*GNSS*) με ένα αδρανές σύστημα πλοήγησης (*INS*). Ο συνδυασμός αυτών των παρατηρήσεων μέσω του φίλτρου *Kalman* επιτυγχάνει βελτιωμένη εκτίμηση της θέσης και της κατάστασης κίνησης του οχήματος.

#### 2.3.3β Μαθηματικά μοντέλα φίλτρου Kalman

Το φίλτρο *Kalman* αποτελείται από τρία μοντέλα. Το πρωτεύον μοντέλο (συναρτησιακό) συνδέει τις παραμέτρους του διανύσματος κατάστασης με τις μετρήσεις. Το δευτερεύον μοντέλο, γνωστό και ως δυναμικό μοντέλο, συνδέει τις παραμέτρους μιας χρονικής στιγμής με αυτές μια μεταγενέστερης χρονικής στιγμής, καθώς περιγράφει την εξέλιξη των παραμέτρων με την πάροδο του χρόνου. Το στοχαστικό μοντέλο περιγράφει την ποιότητα των άλλων δύο μοντέλων και αποτελείται από πίνακες που περιγράφουν την μεταβλητότητα και τη συμμεταβλητότητα του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος μοντέλου.

Συγκεκριμένα το συναρτησιακό μοντέλο για την εφαρμογή του φίλτρου *Kalman*, απαιτεί τον προσδιορισμό του ελάχιστου αριθμού ανεξάρτητων παραμέτρων που απαρτίζουν το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος. Το συναρτησιακό μοντέλο περιγράφει τη φυσική και γεωμετρική σχέση μεταξύ των μετρήσεων και του διανύσματος κατάστασης. Άρα εφόσον  $I_i$  το διάνυσμα των παρατηρήσεων και  $x_i$  το διάνυσμα των αληθών τιμών των παραμέτρων σε χρονικές στιγμές  $t_i$ , το συναρτησιακό μοντέλο για ένα γραμμικό σύστημα γράφεται ως:

$$A_i * x_i = I_i + u_i \quad (2.2)$$

$A_i$ , ο πίνακας σχεδιασμού,

$u_i$ , τα υπόλοιπα των μετρήσεων.

Το δυναμικό μοντέλο περιγράφει τις μεταβολές του διανύσματος κατάστασης μεταξύ δύο χρονικών στιγμών. Εάν η σχέση που συνδέει τις δύο εποχές είναι γραμμική, τότε το δυναμικό μοντέλο παρουσιάζεται με την εξής μορφή:



$$\mathbf{x}_i = \mathbf{M}_{i-1} * \mathbf{x}_{i-1} + \mathbf{y}_{i-1} \quad (2.3)$$

$\mathbf{x}_i$ , το διάνυσμα κατάστασης στη χρονική στιγμή  $t_i$ ,

$\mathbf{x}_{i-1}$ , το διάνυσμα κατάστασης στη χρονική στιγμή  $t_{i-1}$ ,

$\mathbf{M}_{i-1}$ , ο πίνακας μετάβασης από την χρονική στιγμή  $t_{i-1}$  στην  $t_i$ ,

$\mathbf{y}_{i-1}$ , ο θόρυβος του δυναμικού μοντέλου από την χρονική στιγμή  $t_{i-1}$  στην  $t_i$ .

Το διάνυσμα  $\mathbf{y}_{i-1}$  προκύπτει από το γινόμενο  $\mathbf{T} * \mathbf{g}$ , όπου το διάνυσμα  $\mathbf{g}$  περιλαμβάνει τις ποσότητες που επηρεάζουν το δυναμικό μοντέλο, προκαλώντας μια λανθασμένη περιγραφή της πραγματικής δυναμικής κατάστασης του συστήματος. Το  $\mathbf{T}$  περιλαμβάνει τους συντελεστές που ρυθμίζουν την επίδραση της λανθασμένης περιγραφής του μοντέλου στο διάνυσμα κατάστασης.

### 3. ΒΥΘΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

#### 3.1 Μέθοδοι και Τεχνικές Βυθομετρικής Αποτύπωσης

##### 3.1.1 Ιστορική αναδρομή στις βυθομετρικές μεθόδους

Ο στύλος από μπαμπού ήταν το πρώτο εργαλείο βυθομετρίας και αργότερα εξελίχθηκε σε ένα σχοινί που ποντιζόταν στο νερό με ένα βαρύ αντικείμενο στο ένα άκρο. Στα μέσα του 15<sup>ου</sup> αιώνα, ο Νικόλα Κούσα εφηύρε έναν απλό υδραυλικό βυθόμετρο που εκτιμούσε το βάθος του νερού με βάση την ποσότητα της πίεσης του νερού. Το 1891, η *British Telecom* παρουσίασε τον βυθόμετρο τύπου Lucas, ο οποίος ήταν αναποτελεσματικός και μπορούσε να λειτουργήσει μόνο σε ένα σημείο ή γραμμή. Το 1913, ο Καναδός επιστήμονας Reginald Aubrey Fessenden εφηύρε τον ηχοβολιστή (*echo sounder*), το οποίο έχει εμβέλεια ανίχνευσης 3.7 km. Το 1918, ο Γάλλος φυσικός *Paul Langevin* δημιούργησε τη σύγχρονη υδροακουστική και εφηύρε το *sonar* που χρησιμοποιούσε έναν μορφοτροπέα για την ανίχνευση υποβρύχιων στόχων σε μεγάλες αποστάσεις, λαμβάνοντας για πρώτη φορά την ηχώ ενός υποβρυχίου. Τη δεκαετία του 1960, το *MBES* εμφανίστηκε με την εισαγωγή της υπολογιστικής τεχνολογίας και έτσι τα σύγχρονα *MBES* υψηλής ακρίβειας, υψηλής απόδοσης, αυτοματισμού και ψηφιοποίησης αναπτύχθηκαν.

Ο τρόπος συλλογής δεδομένων άλλαξε από ένα μόνο σημείο σε μία συνεχή γραμμή και τελικά σε τρισδιάστατη επιφάνεια. Οι σύγχρονες τεχνικές βυθομετρικής αποτύπωσης βασίζονται κυρίως στη χρήση ηχητικών κυμάτων (ηχοβολιστές μονής και πολλαπλής δέσμης), καθώς αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία στην σημερινή εποχή. Ακόμη χρησιμοποιούνται μετρητικά όργανα που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, δηλαδή ορατό φως (αεροφωτογραμμετρικές κάμερες, συστήματα *LiDAR (Light Detection And Ranging)* και ραδιοκύματα (αλτιμετρικά ραντάρ) για την πραγματοποίηση βυθομετρίας. Ως εκ τούτου, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε διαφορετικά μέσα ανάλογα με την τεχνική: στο υδάτινο περιβάλλον στην περίπτωση χρήσης ηχητικών κυμάτων, στον αέρα και στο υδάτινο περιβάλλον όταν χρησιμοποιείται ορατό φως και μόνο στον αέρα, όταν η βυθομετρία προκύπτει από πληροφορίες από υψομετρικά ραντάρ.

##### 3.1.2 Ακουστικό πεδίο

Παρά το γεγονός ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν εξαιρετική διάδοση στο κενό και στον αέρα, δύσκολα διεισδύουν και διαδίδονται στα υγρά. Ωστόσο, τα ακουστικά κύματα, είτε ηχητικά είτε υπερηχητικά, επιτυγχάνουν καλή διείσδυση και διάδοση σε όλα τα ελαστικά μέσα, εφόσον τα μέσα αυτά μπορούν να δονούνται όταν εκτίθενται σε μεταβολές της πίεσης. Η πλειονότητα των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για το προσδιορισμό του βάθους χρησιμοποιούν ακουστικά κύματα.

### 3.1.2α Ακουστικά κύματα και φυσικά χαρακτηριστικά στη θάλασσα

Ο ήχος διαδίδεται στο νερό μέσω μιας σειράς μεταβαλλόμενων μετώπων πίεσης. Σωματίδια νερού κινούνται κατά μήκος, εμπρός και πίσω, προς την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος, παράγοντας παρακείμενες περιοχές συμπίεσης και διαστολής, παρόμοιες με αυτές που παράγονται από διαμήκη κύματα σε μία ράβδο.

Το πλάτος του κύματος είναι ένα μέτρο της μεταβολής της πίεσης στο επίπεδο που διέρχεται το κύμα. Μια αύξηση του πλάτους αντιπροσωπεύει μια αύξηση της ενέργειας (δυνατότερο). Το πλάτος είναι ανάλογο της απόστασης του απομακρυνόμενου δονούμενου σωματιδίου από την ισορροπία.

Ένας κύκλος του κύματος αντιπροσωπεύει μια μεμονωμένη μετάβαση από την ισορροπία, μέσω συμπίεσης, στην ισορροπία και πάλι, διαστολή και επιστροφή στην ισορροπία.

Ο ρυθμός επανάληψης του κύματος είναι η συχνότητα, η οποία μετράται σε αριθμό κύκλων ανά δευτερόλεπτο ή *hertz* (Hz).

Το μήκος κύματος είναι η απόσταση που διανύει ένα κύμα σε έναν κύκλο. Η ταχύτητα ( $c$ ) ενός κύματος είναι η ταχύτητα διάδοσης και καθορίζεται από την συχνότητα ( $f$ ) και το μήκος κύματος ( $\lambda$ ):

$$c = f * \lambda \text{ (m/s)} \quad (3.1)$$

Η ένταση του ακουστικού κύματος,  $I$ , είναι η ποσότητα ενέργειας ανά δευτερόλεπτο που διασχίζει μια μονάδα επιφάνειας. Η ακουστική ένταση δίνεται από:

$$I = \frac{p_e^2}{\rho * c} \quad (3.2)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του νερού,  $c$  είναι η ταχύτητα του ήχου στο νερό και  $p_e$  είναι η πραγματική ακουστική πίεση, η οποία δίνεται από τη μέση τετραγωνική ρίζα του πλάτους της μέγιστης πίεσης,  $P$ , δηλ.:

$$p_e = \frac{P}{\sqrt{2}} \quad (3.3)$$

Η ταχύτητα του ήχου στο νερό μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (3.4)$$

Όπου:

$c$  είναι η ταχύτητα του ήχου

$E$  είναι ο συντελεστής όγκου (ελαστικότητα) του ρευστού

$\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού

Ωστόσο, η ταχύτητα του ήχου στο νερό δεν προσδιορίζεται ποτέ μέσω αυτών των βασικών αρχών. Η ταχύτητα προσδιορίζεται μέσω άμεσης παρατήρησης (ταχύμετρο ή προφιλόμετρο ταχύτητας του ήχου) είτε μέσω της μέτρησης της αλατότητας, της πίεσης και της θερμοκρασίας (*Conductivity*,

*Temperature and Pressure – CTD*). Η επίδραση αυτών των τριών παραμέτρων στην ηχητική ταχύτητα έχει διαπιστωθεί μέσω πειραμάτων.

### Αλατότητα

Η μέση αλατότητα στον ωκεανό κυμαίνεται από 32 έως 39 μονάδες πρακτικής αλατότητας (*psu*). Μια αλλαγή στην αλατότητα προκαλεί αλλαγή στην πυκνότητα, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει την ταχύτητα του ήχου. Μεταβολές στην αλατότητα παρατηρούνται στα ωκεάνια μέτωπα, κοντά σε περιοχές υψηλής εισροής γλυκού νερού, όπως οι είσοδοι ποταμών, οι υψηλές βροχοπτώσεις και το λιώσιμο των πάγων. Μια μεταβολή της αλατότητας κατά 1 *psu* θα έχει ως αποτέλεσμα μια μεταβολή της ταχύτητας κατά περίπου 1.3 m/s.

Γλυκό νερό	Υφάλμυρο νερό	Αλατούχο νερό
< 0.5 <i>psu</i>	0.5 έως 30 <i>psu</i>	30 έως 40 <i>psu</i>

Πιν. 3.1 Τιμές αλατότητας σε διαφορετικές κατηγορίες υδάτων  
Table 3.1 Salinity levels in different water categories

Η αλατότητα δεν μετριέται άμεσα. Προκύπτει από μετρήσεις αγωγιμότητας, συνήθως σε ένα σύστημα μέτρησης αγωγιμότητας, θερμοκρασίας και βάθους (*CTD*).

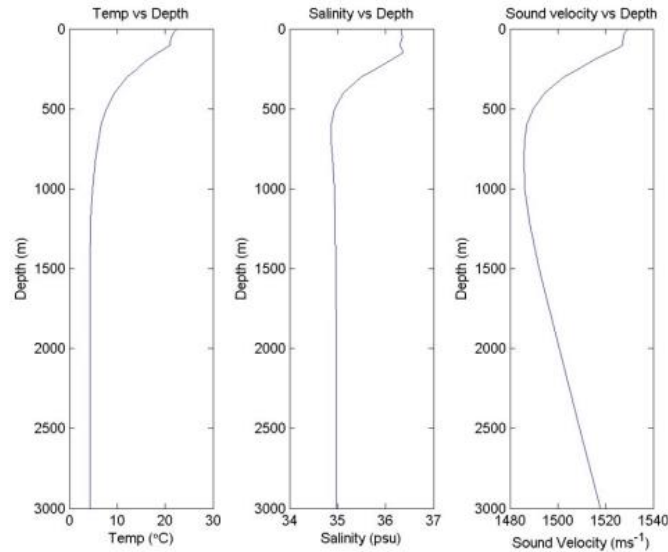
### Πίεση

Η υδροστατική πίεση επηρεάζει επίσης σημαντικά τη μεταβολή της ηχητικής ταχύτητας στο νερό. Η υδροστατική πίεση είναι συνάρτηση του βάθους και ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας του ήχου είναι περίπου 1.6 m/s για κάθε μεταβολή 10 atm, δηλαδή περίπου 100 m βάθος νερού.

### Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία έχει τη μεγαλύτερη συνολική επίδραση στην ταχύτητα του ήχου στα ανώτερα στρώματα της θάλασσας. Σε μεγαλύτερα βάθη (>1000m) όπου σταθεροποιείται η θερμοκρασία (ισόθερμη), η πίεση έχει την καθοριστική επιρροή. Η μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του συντελεστή όγκου και αύξηση της πυκνότητας του νερού. Η μείωση του συντελεστή όγκου και η αύξηση της πυκνότητας οδηγούν σε μείωση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό. Επομένως, η μείωση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση της ταχύτητας του ήχου. Μια μεταβολή 1 °C προκαλεί μεταβολή της ταχύτητας του ήχου της τάξης των 4.5 m/s. Γενικά, το ζεστό και αλμυρό νερό παρουσιάζει υψηλότερη ταχύτητα ήχου (*SV: Sound Velocity*) από το κρύο γλυκό νερό και η ταχύτητά του αυξάνεται πάντα με το βάθος. Συμπερασματικά, η θερμοκρασία έχει την μεγαλύτερη επίδραση στην *SV* στα ανώτερα στρώματα του ωκεανού και η πίεση έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στα βαθύτερα στρώματα του ωκεανού. Η αλατότητα προκαλεί τη

μεγαλύτερη μεταβλητότητα στην SV εκεί όπου υπάρχει μεγάλη εισροή γλυκού νερού (π.χ. ποτάμια και έντονες βροχοπτώσεις).



Σχ. 3.1 Ενδεικτικά διαγράμματα θερμοκρασίας, αλατότητας και ταχύτητας ήχου, [Dodd, 2013]  
Fig. 3.1 Temperature, salinity, and sound velocity plots, [Dodd, 2013]

### 3.1.2β Ανίχνευση ακτινών *sonar*

Τα ακουστικά κύματα καθώς ταξιδεύουν μέσα στο νερό ανακλώνται και διαθλώνται παρόμοια με την φωτεινή δέσμη, που ταξιδεύει μέσα από διαφορετικά μέσα. Τα διάφορα στρώματα του νερού χαρακτηρίζονται από στρώματα με διαφορετικές ταχύτητες ήχου. Το ακουστικό κύμα όχι μόνο επιταχύνει και επιβραδύνει λόγω των αλλαγών στην ταχύτητα του ήχου, αλλά διαθλάται και ανακλάται επίσης λόγω αλλαγών στην πυκνότητα του νερού, οι οποίες αντιπροσωπεύονται από αλλαγές στην ταχύτητα. Για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης στην οποία προσκρούει μια ηχητική ακτίνα στον πυθμένα, είναι απαραίτητο να ανιχνευθεί η διαδρομή της μέσω της υδάτινης στήλης. Υποτίθεται ότι η ακτίνα θα ακολουθήσει την ίδια διαδρομή και προς τις δύο κατευθύνσεις.

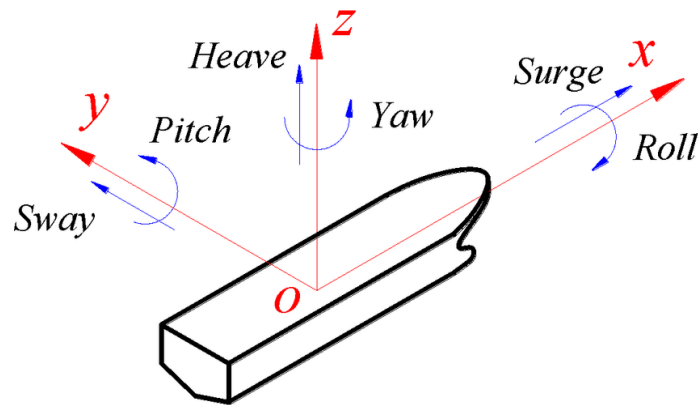
### 3.1.3 Αισθητήρες κίνησης

Η δυνατότητα διόρθωσης των παρατηρούμενων βαθών και της θέσης τους με βάση τη κίνηση του σκάφους, δηλαδή τη «κατάσταση» (αζιμούθιο, διατοιχισμός και προνευστασμός) και την ανύψωση του (*heave*), αποτέλεσε σημαντικό επίτευγμα και πρόοδος στην ποιότητα και στην ακρίβεια της υδρογραφικής έρευνας. Για το σκοπό αυτό, οι αδρανειακοί αισθητήρες με αισθητήρες αναγνώρισης προσανατολισμού (συνήθως γυροσκόπιο ή ηλεκτρομαγνητική πυξίδα) ή αδρανειακοί

αισθητήρες με την επιβολή διορθώσεων από δέκτη GNSS, χρησιμοποιούνται ώστε να μετρηθούν η «κατάσταση» και η ανύψωση του ερευνητικού σκάφους.

Η «κατάσταση» του σκάφους αποτελείται από τη θέση και τον προσανατολισμό, δηλαδή τρεις περιστροφές ως προς τους τρεις συμβατικούς άξονες που καθορίζονται για το σκάφος. Το σύστημα συντεταγμένων του σκάφους ορίζεται ως ένα δεξιόστροφο σύστημα με άξονα  $x$  προς της κατεύθυνση της πλώρης (μπροστά μέρος), άξονα  $y$  προς την κατεύθυνση της δεξιάς πλευράς του πλοίου και άξονα  $z$  προς την κατεύθυνση του κύτους (κάτω μέρος). Σε αυτό το σύστημα αναφοράς, ο διατοιχισμός (*roll*) αντιστοιχεί στην περιστροφή γύρω από τον άξονα  $x$  (ο διατοιχισμός είναι θετικός όταν η δεξιά πλευρά του πλοίου είναι προς τα κάτω), ο προνευστασμός (*pitch*) αντιστοιχεί στη περιστροφή γύρω από τον άξονα  $y$  (ο προνευστασμός είναι θετικός όταν η πλώρη είναι προς τα πάνω) και η εκτροπή (*yaw*) αντιστοιχεί στη περιστροφή γύρω από το άξονα  $z$  (η εκτροπή είναι θετική για δεξιόστροφη περιστροφή).

Για τον μετασχηματισμό των συλλεχθέντων δεδομένων, που αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς του σκάφους, στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν περιστροφές σύμφωνα με τον προσανατολισμό του σκάφους. Κατά σύμβαση, το τοπικό σύστημα συντεταγμένων ορίζεται ως ένα αριστερόστροφο σύστημα με τον άξονα  $x$  να έχει κατεύθυνση προς την Ανατολή, τον άξονα  $y$  να έχει κατεύθυνση προς τον Βορρά και τον άξονα  $z$  να έχει κατεύθυνση προς τα κάτω.



Σχ. 3.2 Διατοιχισμός, προνευστασμός, εκτροπή, ανύψωση, γραμμική ταλάντωση κατά μήκος του εγκάρσιου άξονα και του διαμήκους άξονα του σκάφους [Roy de Winter, 2018]

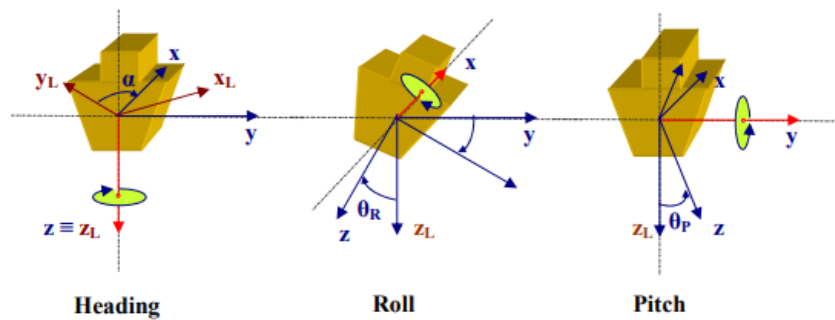
Fig. 3.2 Roll, pitch, yaw, heave, sway, surge of a ship., [Roy de Winter, 2018]

### 3.1.3α Πορεία (Heading)

Η καταγραφή και η εφαρμογή της πορείας του σκάφους κρίνονται απαραίτητες για τα συστήματα σάρωσης. Ωστόσο, για έρευνες με πολυδεσμικό ηχοβολιστή, η επίδραση της μεταβολής του προσανατολισμού (*heading*) κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής δεν είναι σημαντική, εάν η κεραία εντοπισμού και ο μετατροπέας του ηχοβολιστή βρίσκονται στον ίδιο κατακόρυφο άξονα.

Ο μετατροπέας είναι ένας αισθητήρας που εμπεριέχεται στο σύστημα του ηχοβολιστή, ο οποίος λαμβάνει ηλεκτρική ενέργεια από τον πομπό και στη συνέχεια τη μετατρέπει σε ηχητική ενέργεια. Όταν η κεραία εντοπισμού και ο μετατροπέας δεν βρίσκονται στον ίδιο κατακόρυφο άξονα, για ακρίβεια στον εντοπισμό της θέσης των βαθών, είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη η πορεία του σκάφους.

Για τη μέτρηση της πορείας σε πραγματικό χρόνο, διατίθενται διάφορες μέθοδοι και εξοπλισμοί, όπως: γυροσκοπικές πυξίδες, ηλεκτρομαγνητικές πυξίδες και *DGNSS* (*Differential GNSS*) με βάση τη φάση φορέα (*carrier-phase*). Η μέτρηση της πορείας με βάση τη φάση φορέα πραγματοποιείται στους αδρανειακούς αισθητήρες που ενσωματώνουν πληροφορίες *DGNSS*. Η λύση αυτή επιτρέπει υψηλές ακρίβειες.



Σχ. 3.3 Κατάσταση του σκάφους, [Manual on Hydrography, 2011]

Fig. 3.3 Vessel attitude, [Manual on Hydrography]

### 3.1.3β Αδρανειακοί αισθητήρες

Οι αδρανειακοί αισθητήρες ή οι αδρανειακές μονάδες μέτρησης (*IMU*) είναι οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στην υδρογραφία και σε συνεργασία με το σύστημα *GNSS* πραγματοποιούν μετρήσεις για τον υπολογισμό της «κατάστασης» του σκάφους (αζιμούθιο, διατοιχισμός, προνευστασμός). Αυτοί οι αισθητήρες εφαρμόζουν τους νόμους του Νεύτωνα για την κίνηση και αποτελούνται από τρία επιταχυνσιόμετρα, τοποθετημένα σε τρισσορθογώνιους άξονες και τρεις αισθητήρες γωνιακής ταχύτητας, τοποθετημένους στο ίδιο πλαίσιο, οι οποίοι έτσι υφίστανται τις ίδιες γωνιακές κινήσεις με το σκάφος. Η ένδειξη που παρέχεται από την τριάδα επιταχυνσιόμετρων παρέχει μια καλή εκτίμηση του διανύσματος βαρύτητας, της διεύθυνσης από την οποία μετρούνται οι μικρές γωνιακές μετατοπίσεις του σκάφους. Η τριάδα των αισθητήρων γωνιακής ταχύτητας μετρά τις γωνιακές μετατοπίσεις (δηλ. διατοιχισμός, προνευστασμός και εκτροπή).

## 3.2 Τεχνολογίες και Συστήματα Βυθομετρήσεων

Οι τεχνολογίες βυθομετρικών αποτυπώσεων μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με την πλατφόρμα που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις: μετρήσεις σε σκάφος (συμβατικά και μη επανδρωμένα σκάφη), εναέρια και διαστημικές μετρήσεις, υποβρύχιες μετρήσεις αυτόνομης πλοήγησης και επιτόπιες παρατηρήσεις του θαλάσσιου πυθμένα. Στις παρακάτω υποενότητες το ενδιαφέρον θα επικεντρωθεί κυρίως στις τεχνολογίες βαθυμετρίας με χρήση σκάφους, όπως στην τεχνολογία των μονοδεσμικών (*SBES: Single Beam Echosounder*) και πολυδεσμικών ηχοβολιστών (*MBES: Multi Beam Echosounder*) και λιγότερο στα διαστημικά και εναέρια συστήματα βαθυμετρίας, όπως συνιστούν τα συστήματα δορυφορικής αλτιμετρίας και τα συστήματα *LiDAR* εναέριας βαθυμετρίας.

### 3.2.1 Τεχνολογία βυθομετρίας με τη χρήση πλωτού μέσου επιφανείας (shipborne)

Η βυθομετρία αποτελεί βασική εργασία της χαρτογράφησης του πυθμένα υδάτινων περιοχών. Ο πιο άμεσος τρόπος εκπόνησης βυθομετρικών αποτυπώσεων είναι με σκάφος. Το φως και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα απορροφώνται στο νερό, ενώ τα ηχητικά κύματα μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις. Η μέτρηση του ήχου με σκάφος εξακολουθεί να είναι μια από τις κυριότερες μεθόδους βυθομετρικής αποτύπωσης. Τα Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (*GNSS*), αποτελούν μια ακριβής και αποτελεσματική τεχνολογία εντοπισμού που χρησιμοποιείται για ναυσιπλοΐα. Η ευρέως διαδεδομένη μέθοδος βυθομετρίας *GNSS plus detector*, βασίζεται στην αρχή της απόκτησης των συντεταγμένων του πλοίου μέσω δεδομένων πλοήγησης του *GNSS* και ταυτόχρονης λήψης των δεδομένων βάθους μέσω υπολογισμού της απόστασης του σημείου στο βυθό με το δέκτη *GNSS*, έντασης της ανάκλασης ή υποθαλάσσιων εικόνων με τη χρήση εξοπλισμού ανίχνευσης.

#### 3.2.1α Μονοδεσμικοί Ηχοβολιστές (*SBES*)

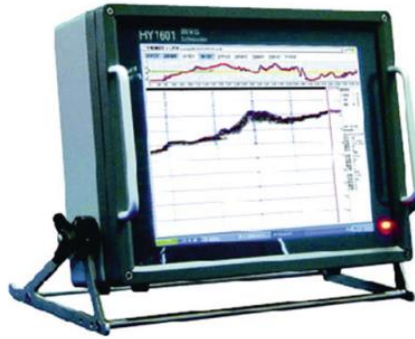
Σημαντική βελτίωση στις εργασίες θαλάσσιας μελέτης αποτέλεσε η εφεύρεση του μονοδεσμικού ηχοβολιστή τη δεκαετία του 1920. Η ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας επέφερε αλματώδη εξέλιξη στην τεχνολογία της υδρογραφίας, με την υψηλή ταχύτητα κάλυψης υδάτινων περιοχών και τη συνεχή καταγραφή του συστήματος.

Η βυθομετρία με ηχοβολισμούς μονής δέσμης, καταγράφει συνεχώς κατά μήκος μιας γραμμής, παράγοντας έτσι μια διατομή του πυθμένα. Το σύστημα μονοδεσμικού ηχοβολιστή μπορεί να λειτουργήσει είτε με μία συχνότητα είτε με δύο. Ο ηχοβολιστής μονής συχνότητας είναι ελαφρύς και εκπέμπει μόνο μία ζώνη συχνοτήτων (χαμηλή ή υψηλή), ενώ ο ηχοβολιστής δύο συχνοτήτων εκπέμπει τόσο υψηλής όσο και χαμηλής συχνότητας ηχητικά κύματα. Αξιοποιώντας αυτά τα χαρακτηριστικά, το πάχος του στρώματος ιλύος στον πυθμένα του ωκεανού μπορεί να



προσδιοριστεί, με τη μέτρηση της διαφοράς μεταξύ των αποστάσεων της επιφάνειας του νερού από την επιφάνεια του πυθμένα και από την επιφάνεια του σκληρού στρώματος.

Τα συμβατικά συστήματα μονοδεσμικού ηχοβολιστή παρουσιάζουν δύο βασικά μειονεκτήματα: πρώτον, λαμβάνονται δείγματα μόνο από τα σημεία που βρίσκονται κατά μήκος της γραμμής πλεύσης, που αντιπροσωπεύουν, μόνο ένα μικρό μέρος της περιοχής μελέτης και δεύτερον, η δέσμη είναι μεγάλου εύρους, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο σφάλμα βυθομέτρησης σε πυθμένα με υψηλή βυθομετρική διακύμανση. Τα συστήματα μονής δέσμης χρησιμοποιούνται ευρέως σε έρευνες ποταμών και ρηχών θαλασσών σε εργασίες περιορισμένων απαιτήσεων και χαμηλού κόστους.



Σχ. 3.4 Μονοδεσμικός ηχοβολιστής HY1601, [Wu, 2021]

Fig. 3.4 HY1601 single-beam echo sounder, [Wu, 2021]

### 3.2.1β Πολυδεσμικοί Ηχοβολιστές (MBES)

Το σύστημα *MBES* εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1970 οπότε ήταν μια νέα τεχνολογία που άλλαξε ριζικά τις μεθόδους παρακολούθησης των ωκεανών και την ποιότητα της καταγραφής. Ο πολυδεσμικός ηχοβολιστής παράγει έναν τρισδιάστατο χάρτη του θαλάσσιου πυθμένα. Μπορεί να μετρήσει το μέγεθος, το σχήμα και το ύψος υποβρύχιων στόχων με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα σε συγκεκριμένο πλάτος (3-12 φορές το μέσο βάθος της περιοχής μελέτης). Το σύστημα *MBES* καταγράφει χιλιάδες σημεία βάθους σε ένα επίπεδο κάθετο στην πορεία του σκάφους ταυτόχρονα. Σε αντίθεση με τον μονοδεσμικό ηχοβολιστή, ο πολυδεσμικός λειτουργεί με βοηθητικό εξοπλισμό, συμπεριλαμβανομένου ενός συστήματος δορυφορικού / αδρανειακού εντοπισμού, προφίλομετρου ηχητικής ταχύτητας. Αυτός ο συνδυασμός οργάνων παράσχει τη στιγμιαία θέση, το υψόμετρο, τη κατεύθυνση, την ταχύτητα του ήχου και άλλες πληροφορίες.



Σχ. 3.5 Πολυδραστικός ηχοβολιστής διπλής συχνότητας, Bottom Chart 1180/1050D, [Wu, 2021]  
Fig. 3.5 Dual-frequency MBES, Elac Bottom Chart 1180/1050D, [Wu, 2021]

### 3.2.1γ Υποβρύχιο radar (sonar) πλευρικής σάρωσης

Η τεχνολογία του SSS (*Side-Scan Sonar*) εμφανίστηκε κοντά στο τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, αλλά δεν χρησιμοποιήθηκε μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Βασίζεται στην αρχή της ηχητικής αντήχησης για την ανίχνευση υποβρύχιου στόχου, όπου μια συστοιχία αισθητήρων τοποθετημένοι στο κύτος του σκάφους εκπέμπουν τις δέσμες σάρωσης, οι οποίες είναι μεγάλου εύρους κάλυψης στην κατακόρυφη διεύθυνση και στενές στην οριζόντια διεύθυνση, σε ορισμένη γωνία κλίσης και συχνότητα εκπομπής. Αφού το ηχητικό κύμα διαδοθεί στο βυθό ή στο στόχο, ανακλάται και επιστρέφει πίσω στη συστοιχία λήψης του αισθητήρα, όπου στη συνέχεια επεξεργάζεται και αποθηκεύεται στη μονάδα επεξεργασίας. Η συχνότητα λειτουργίας του SSS καθορίζει το μέγιστο εύρος σάρωσης, ενώ το πλάτος παλμού την ανάλυση των δεδομένων. Γενικότερα, όσο μικρότερο είναι το πλάτος, τόσο υψηλότερη είναι η ανάλυση.



Σχ. 3.6 Πλευρικό sonar Klein, [Dodd, 2013]  
Fig. 3.6 Side scan Klein, [Dodd, 2013]

Η οριζόντια γωνία δέσμης επηρεάζει άμεσα την οριζόντια ανάλυση. Η γωνία της κατερχόμενης δέσμης επηρεάζει το πλάτος της περιοχής που καλύπτεται από το σύστημα πλευρικής σάρωσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η κατακόρυφη γωνία, τόσο μεγαλύτερη είναι η κάλυψη και μικρότερη η «τυφλή» περιοχή ακριβώς κάτω από το *sonar*.

### 3.2.1δ Τρισδιάστατο υποβρύχιο radar (*sonar*) πανοραμικής σάρωσης

Το *sonar* τρισδιάστατης απεικόνισης είναι παρόμοιο με έναν τρισδιάστατο σαρωτή *laser*. Το *sonar* εκπέμπει ένα ηχητικό κύμα σταθερής συχνότητας. Η δέσμη διαδίδεται μέσα στο νερό μέχρι την επιφάνεια του αντικειμένου και ανακλάται πίσω στην κεφαλή του *sonar*, η οποία μετατρέπει το λαμβανόμενο σήμα σε ηλεκτρικό σήμα. Στη συνέχεια, αυτό το ηλεκτρικό σήμα διαβιβάζεται στη μονάδα ελέγχου του αισθητήρα. Οι πληροφορίες της σαρωμένης επιφάνειας εμφανίζονται με τη μορφή εικόνας χρησιμοποιώντας το λογισμικό λειτουργίας του *sonar*. Κάθε φορά που ο αισθητήρας του *sonar* εκπέμπει έναν ακουστικό παλμό, σχηματίζεται μια περιοχή σάρωσης και οι συντεταγμένες των μετρούμενων σημείων μπορούν να ληφθούν. Ο μηχανισμός περιστροφής και κλίσης μπορεί να σαρώσει σε ένα μεγάλο εύρος: 360° στο οριζόντιο επίπεδο και 130° στο κατακόρυφο επίπεδο. Το βάθος σάρωσης μπορεί να φθάσει τα 300 m, με σφάλμα μικρότερο από 4 cm σε απόσταση 30 cm και σφάλμα γωνίας 1°.



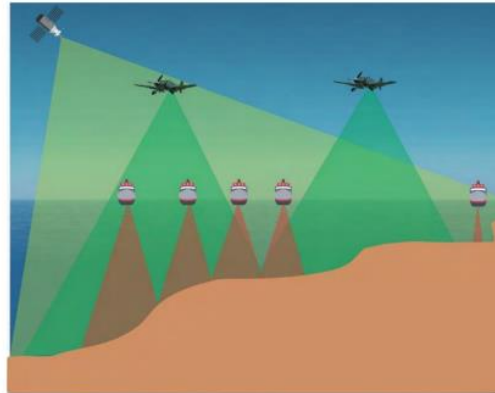
Σχ. 3.7 *Sonar* τρισδιάστατης σάρωσης BV5000, [Teledyne Marine, 2020]

Fig. 3.7 3D scanning sonar BV5000, [Teledyne Marine, 2020]

### 3.2.2 Διαστημικά και εναέρια συστήματα βαθυμετρίας (*airborne and spaceborne*)

Παρότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα απορροφώνται στο νερό, το ορατό τμήμα του φάσματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βαθυμετρική χαρτογράφηση, ιδίως όταν οι ακουστικές μέθοδοι έχουν περιορισμούς. Στο πλαίσιο αυτό, τα βάθη μπορούν να μετρηθούν με δύο βασικούς

τρόπους, χρησιμοποιώντας παθητικές μεθόδους, οι οποίες μετρούν μόνο το φυσικό φως που ανακλάται στον πυθμένα και οι ενεργές μέθοδοι, οι οποίες χρησιμοποιούν *laser* για την μέτρηση των αποστάσεων από το βυθό. Το μεγάλο πλεονέκτημα της εφαρμογής των μεθόδων αυτών έγκειται στην παραγωγικότητα που μπορεί να επιτευχθεί. Οι δορυφορικές μέθοδοι έχουν αποδειχθεί πολύ αποτελεσματικές σε πολύ ρηχές παράκτιες περιοχές, μέχρι βάθος περίπου 20 m και ακρίβεια περίπου 1 m, ενώ το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους είναι ότι τα δεδομένα βάθους που λαμβάνονται με αυτόν τον τρόπο είναι σχετικά πολύ φθηνά, ενώ οι σημαντικότεροι περιορισμοί σχετίζονται με τις παραμέτρους που καθορίζουν τις ιδιότητες της ατμόσφαιρας και της υδάτινης στήλης (καθαρή ατμόσφαιρα και υδάτινη στήλη) και του υλικού του πυθμένα. Τα αερομεταφερόμενα συστήματα υπερτερούν στη χαρτογράφηση του πυθμένα σε παράκτια ύδατα με χαμηλά ποσοστά συστατικών στοιχείων του νερού (συγκεντρώσεις αιωρούμενων ιζημάτων ή οργανικών χρωστικών). Τα εναέρια συστήματα βαθυμετρίας είναι ικανά να μετρούν βάθος νερού από 1.5 έως 60 m με ακρίβεια έως 0.15 m.



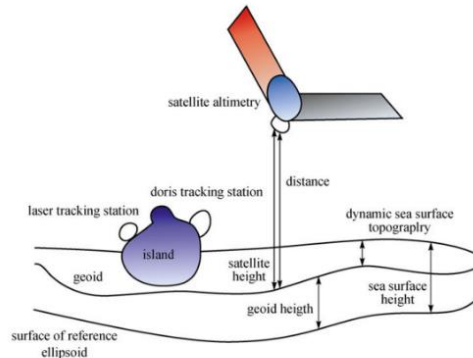
Σχ. 3.8 Οπτικές μέθοδοι εξαγωγής της βυθομετρίας (τηλεπισκόπηση), [Ferreira, 2021]  
Fig. 3.8 Optical methods for extraction of bathymetry (remote sensing), [Ferreira, 2021]

### 3.2.2α Σύστημα δορυφορικής αλτιμετρίας

Η τεχνολογία δορυφορικής αλτιμετρίας χρησιμοποιεί ένα μικροκυματικό ραντάρ υψομέτρου σε δορυφόρο για να προσδιορίσει το χρόνο των παλμών ραντάρ που ταξιδεύουν προς και από την επιφάνεια της θάλασσας και υπολογίζει την απόσταση από το δορυφόρο μέχρι το σημείο μέτρησης στην επιφάνεια της θάλασσας. Επιπλέον, μπορεί να προσδιορίσει τις μεταβολές της στάθμης της θάλασσας σε σχέση με ένα ελλειψοειδές αναφοράς, με βάση γνωστά δορυφορικά τροχιακά ύψη και διάφορες διορθώσεις σφαλμάτων.

Η δορυφορική αλτιμετρία παρέχει υψηλής ακρίβειας και υψηλής ανάλυσης γεωμετρικά δεδομένα (υψόμετρο επιφάνειας της θάλασσας, βάθος κ.λπ.) σε μεγάλες ωκεάνιες περιοχές, τα οποία μπορούν να αντιστραφούν για την παραγωγή της υποθαλάσσιας τοπογραφίας χρησιμοποιώντας αναλυτικές και στατιστικές μεθόδους. Η δορυφορική αλτιμετρία επηρεάζεται σε

μεγάλο βαθμό από έντονες μεταβολές στην τοπογραφία του βυθού. Τέτοιες μεταβολές μειώνουν σημαντικά την ακρίβεια των παρατηρήσεων, γι' αυτό η χρήση της δορυφορικής αλτιμετρίας για την αντιστροφή της βυθομετρικής αποτύπωσης στον ωκεανό, γενικά θα παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο σε βαθιά νερά. Επί του παρόντος, η μέθοδος αυτή δεν είναι γενικά κατάλληλη για χαρτογράφηση σε μεγάλη κλίμακα.



Σχήμα 3-8 Διάγραμμα της λειτουργίας της δορυφορικής αλτιμετρίας και των παραμέτρων της, [Wu, 2021]  
Figure 3-8 Schematic diagram of satellite altimetry operation and parameters, [Wu, 2021]

### 3.2.2β Σύστημα LiDAR εναέριας βαθυμετρίας (ALB)

Η ALB (*Airborne LiDAR Bathymetry*) είναι μια τεχνολογία που στηρίζεται στην αξιοποίηση επανδρωμένων και μη εναέριων μέσων, όπου δύο ακτίνες *laser* εκπέμπονται για τη μέτρηση του υψομέτρου του εναέριου μέσου σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας και τον πυθμένα, με αποτέλεσμα να προσδιορίζεται το βάθος του νερού. Γενικά, μπορούν να υπολογιστούν 30 – 50 m και η ακρίβεια είναι περίπου 0,1 – 0,2 m. Το ALB μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χαρτογράφηση μεγάλων περιοχών ρηχών υδάτων (ιδίως σε νερά με καλή ορατότητα).



Σχ. 3.9 Μη επανδρωμένο εναέριο σύστημα αποτύπωσης της εταιρίας RIEGL (*BathyCopter*), [RIEGLE, 2018]  
Fig. 3.9 RIEGL's unmanned aerial mapping system (*BathyCopter*), [RIEGLE, 2018]

#### 4. ΒΥΘΟΜΕΤΡΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΠΟΛΥΔΕΣΜΙΚΩΝ ΗΧΟΒΟΛΙΣΤΩΝ

Η τεχνολογία βυθομετρικής αποτύπωσης πολλαπλών δεσμών, θεωρείται ευρέως διαδεδομένη στις εν εξελίξει θαλάσσιες γεωλογικές εφαρμογές και είναι πλέον διαθέσιμη στην επιστημονική κοινότητα για σχεδόν τέσσερις δεκαετίες. Προήλθε από στρατιωτικά ερευνητικά προγράμματα που χρηματοδοτήθηκαν από το Ναυτικό Εργαστήριο Ερευνών των ΗΠΑ το 1964 και μέχρι το 1977 το πρώτο αποχαρακτηρισμένο σύστημα πολλαπλών δεσμών ήταν διαθέσιμο για επιστημονικές μελέτες στην υποβρύχια γεωμορφολογία. Επί του παρόντος, η τεχνική σάρωσης με πολλαπλές δέσμες αποτελεί την πιο κοινή μέθοδο για την εκτέλεση τοπογραφικής χαρτογράφησης του θαλάσσιου πυθμένα.

Το σύστημα πολυδεσμικού ηχοβολιστή (*MBES*) συνιστά ένα υψηλής τεχνολογίας προϊόν για χρήση στις σύγχρονες θαλάσσιες έρευνες και ένα πολύπλοκο σύστημα που αποτελείται από πολυάριθμους αισθητήρες. Η εφαρμογή της ακουστικής ανάκλασης, της σκέδασης και της ακουστικής για τον σχηματισμό των βαθυμετρικών δεδομένων σε μορφή λωρίδας, συνδυάζεται με τη χρήση εκατοντάδων ή και χιλιάδων ηχοβολισμών υψηλής πυκνότητας, στενών ακτινών μέτρησης, προηγμένων τεχνικών ανίχνευσης του πυθμένα και ακριβών μεθόδων διόρθωσης της ηχητικής ταχύτητας, ώστε να διασφαλιστεί η υψηλή ακρίβεια εντοπισμού του συστήματος. Τα *MBES* έχουν πλέον αναπτυχθεί σε πλήρη συστήματα εύρεσης ωκεάνιων βαθών υψηλής ακρίβειας και μπορούν να χαρτογραφήσουν σε μεγάλο βαθμό τον πυθμένα της θάλασσας. Αυτή η τεχνολογία συμβάλει στην προώθηση της εφαρμογής μεθόδων τρισδιάστατης επεξεργασίας στερεοσκοπικών απεικονίσεων, χαρτογράφησης με τη χρήση εικονικής πραγματικότητας, ακουστικής ταξινόμησης ιζημάτων του πυθμένα και άλλων βαθιά ερευνητικών μεθόδων για την διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου τεχνικού συστήματος.

Όσον αφορά τα συστήματα πολυδεσμικών ηχοβολιστών, χαρακτηρίζονται από τα εξής πλεονεκτήματα:

- Διαθέτουν υψηλή λεπτομέρεια στην ανάλυση των δεδομένων
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μεγάλα έως πολύ μικρά σκάφη
- Τα πιο πρόσφατα συστήματα επιχειρούν και σε πολύ ρηχά νερά
- Αποδίδουν πολύ ακριβή τρισδιάστατη βαθυμετρία (εύρος ακρίβειας cm/dm)
- Η λειτουργία της οπισθοσκέδασης παρέχει πρόσθετες πληροφορίες στην αποτύπωση του βυθού (ψευδό-πλευρική σάρωση)

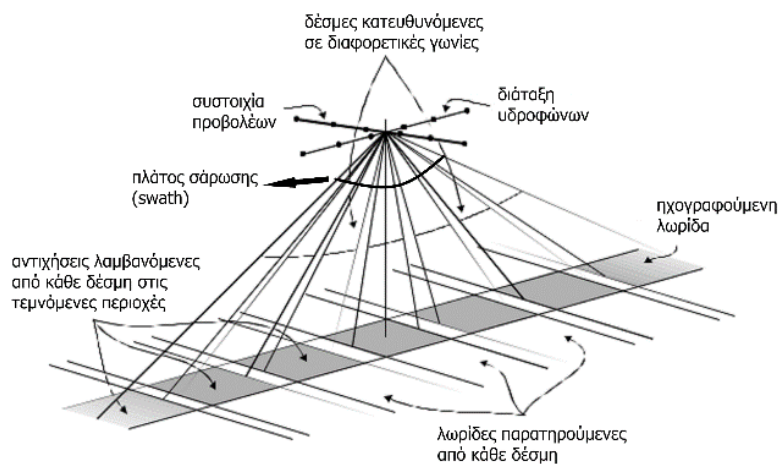
αλλά και τα εξής μειονεκτήματα:

- Οι δέσμες δεν διεισδύουν κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας
- Η τεχνική των συστημάτων πολυδεσμικού ηχοβολιστή είναι πιο πολύπλοκες από εκείνες των *sonar* πλευρικής σάρωσης.

#### 4.1 Αρχές της Τεχνολογίας των Πολυδεσμικών Ηχοβολιστών

Επί του παρόντος, τα συστήματα *MBES* ταξινομούνται κυρίως σε δύο κατηγορίες, μία που χρησιμοποιεί τεχνολογία ελέγχου του σχηματισμού δέσμης, η οποία ονομάζεται διαμόρφωση δέσμης *MBES* (και παραδοσιακό *MBES*) και άλλη μία που χρησιμοποιεί τεχνολογία συμβολομετρίας (*interferometry*), η οποία ονομάζεται συμβολομετρικό (*interferometric*) *MBES* (και *MBES* διαφοράς φάσης ή βαθυμετρική πλευρική σάρωση). Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο τύπων συστημάτων οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι οι διαμορφωτές δέσμης μετρούν την απόσταση για κάθε σεντ γωνιών, ενώ τα συμβολομετρικά συστήματα μέτρησης μετρούν γωνία για κάθε σεντ αποστάσεων. Ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας των *sonar*, τα συστήματα αυτά μπορούν επίσης να ταξινομούνται σε υψηλής συχνότητας, ενδιάμεσης συχνότητας και χαμηλής συχνότητας *MBES*, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ρηχά ύδατα, μεσαία ύδατα και βαθιά ύδατα αντίστοιχα.

Αυτά τα *MBES*, τα οποία είναι γνωστά και ως ηχοβολιστικά ζωνών ή συστήματα σάρωσης, χρησιμοποιούνται συνήθως για να προσδιορίσουν το βάθος του νερού και τη φύση του πυθμένα. Κατά τη λειτουργία τους, η συστοιχία προβολέων εκπέμπει ένα ευρύ ακουστικό παλμό σε σχήμα βεντάλιας σε καθορισμένη συχνότητα, που έχει στενή γωνία ανοίγματος παράλληλα της γραμμής πορείας ( $\approx 1^\circ$ ) και ευρεία γωνία ανοίγματος κάθετα της γραμμής πορείας ( $\approx 150^\circ$ ), γνωστή και ως πλάτος σάρωσης (*swath*). Η διάταξη υδροφώνων στη συνέχεια ανιχνεύει τις ανακλάσεις τους (ή ηχώ) και σχηματίζει πολυάριθμες λαμβανόμενες δέσμες (διαμόρφωση δέσμης) που είναι πολύ στενότερες στην εγκάρσια διεύθυνση ( $\approx 1^\circ$ ). Ο προβολέας και οι διατάξεις υδροφώνων είναι προσανατολισμένοι κάθετα μεταξύ τους, έτσι ώστε η λωρίδα του πυθμένα που ηχογραφείται από τους προβολείς θα τέμνει τη λωρίδα του πυθμένα που παρατηρείται από τα υδρόφωνα. Η μία μετά την άλλη, εκατοντάδες στενές δέσμες μπορούν τότε να προκύψουν από τις διασταυρωμένες καταγραφές. Χρησιμοποιώντας τη γωνία πρόσπτωσης και το χρόνο αμφίδρομης μετάδοσης κάθε στενής δέσμης, μπορούν να υπολογιστούν οι θέσεις και τα βάθη των μετρούμενων σημείων. Όταν το σκάφος κινείται, μια λωρίδα μετρήσεων βάθους του νερού με συγκεκριμένο πλάτος μπορεί να ληφθεί.



Σχ. 4.1 Σύστημα προβολέων-υδροφώνων και κατευθυνόμενες δέσμες, [L-3 communications, 2000]

Fig. 4.1 Projector-Hydrophone system and beam steering, [L-3 communications, 2000]

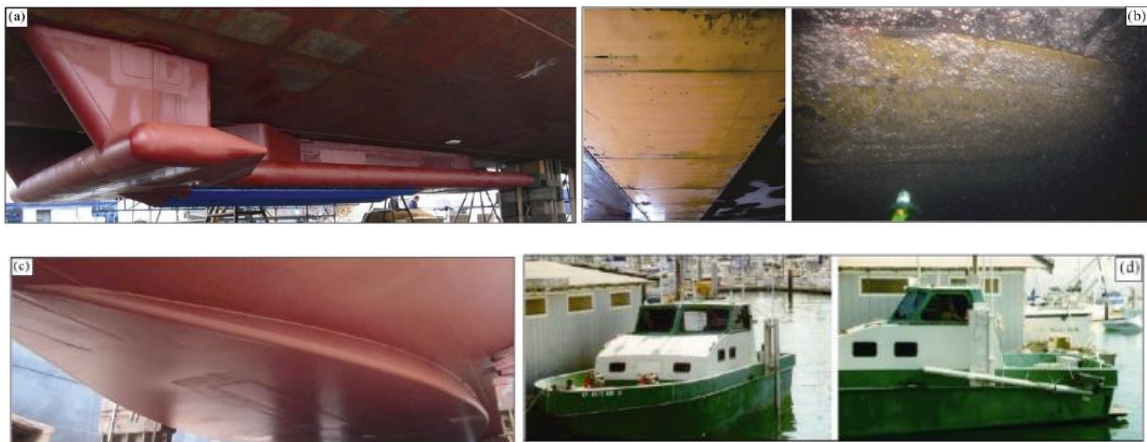
## 4.2 Βασικές Τεχνικές Προϋποθέσεις Μετρήσεων με Πολυδесμικό Ηχοβολιστή

### 4.2.1 Εγκατάσταση του συστήματος πολυδесμικού ηχοβολισμού

#### 4.2.1α Μέθοδοι εγκατάστασης του συστήματος MBES

Η μεταφορά με σκάφος αποτελεί αυτή τη στιγμή τη συνηθέστερη προσέγγιση εγκατάστασης πολυδесμικών ηχοβολιστών και αυτά τα συστήματα εγκαθίστανται με δύο πιθανούς τρόπους: με μόνιμη εγκατάσταση στο κύτος του σκάφους και με φορητή εγκατάσταση πλευρικά του σκάφους. Η μόνιμη εγκατάσταση στο κύτος του σκάφους του συστήματος MBES, προσφέρει τα πλεονεκτήματα της βελτίωσης της ασφάλειας του συστήματος, της μακροπρόθεσμης σταθερότητας της μόνιμης εγκατάστασης και μπορεί επίσης να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα των εργασιών μελέτης. Παρόλα αυτά, το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι η εγκατάσταση και η απεγκατάσταση του συστήματος MBES πρέπει να ολοκληρωθεί αυστηρά σε αποβάθρα πλοίων και συνεπώς το κόστος είναι υψηλό. Η μόνιμη εγκατάσταση του πολυδесμικού ηχοβολιστή χωρίζεται σε τρεις τύπους: γόνδολα, χωνευτή εγκατάσταση και εγκατάσταση στην κατασκευή προστασίας του κύτους του πλοίου (*blister*).

Η φορητή εγκατάσταση πλευρικά του σκάφους χρησιμοποιείται κυρίως για συστήματα MBES σε ρηγά νερά με μικρούς αισθητήρες. Το όργανο τοποθετείται στην αριστερή (*port*) και δεξιά πλευρά (*starboard*) ή στην πλώρη με τη χρήση ενός περιστρεφόμενου υποστυλώματος. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η διαδικασίες εγκατάστασης και η απεγκατάστασης είναι πρακτικές, αλλά μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η ασφάλεια του πολυδесμικού ηχοβολιστή, καθώς το σύστημα είναι ευάλωτο τόσο στο θόρυβο όσο και στο τράνταγμα του βραχίονα και η γωνία εγκατάστασης του συστήματος πρέπει να βαθμονομείται εκ νέου για κάθε εγκατάσταση και ανάκτησή του.



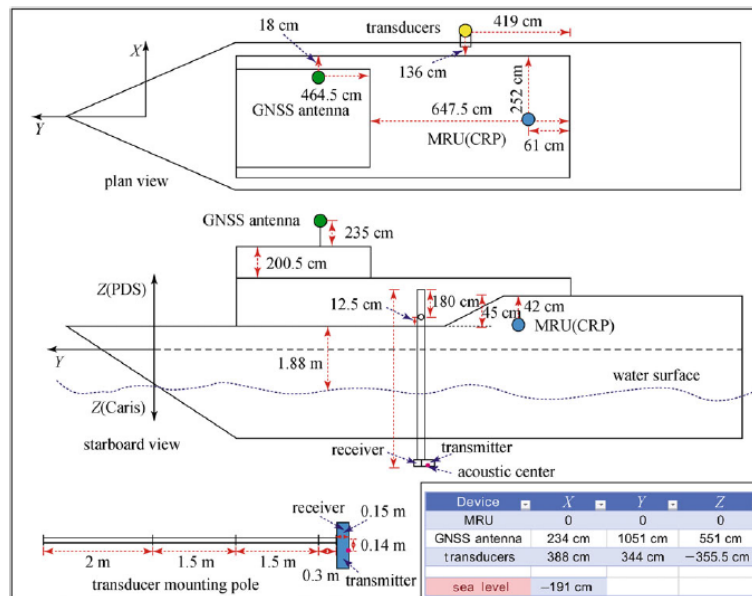
Σχ. 4.2 Μέθοδος εγκατάστασης των MBES. (a) Εγκατάσταση τύπου γόνδολα, (b) χωνευτή εγκατάσταση, (c) εγκατάσταση στην κατασκευή προστασίας του σκάφους, (d) φορητή εγκατάσταση πλευρικά του σκάφους, [Wu, 2021]  
Fig. 4.2 MBES installation method. (a) Gondola installation, (b) flush mounted, (c) blister installation, (d) shipside portable installation, [Wu, 2021]



#### 4.2.1β Αποκλίσεις (offsets) εγκατάστασης του συστήματος MBES

Η χωρική συσχέτιση μεταξύ όλων των αισθητήρων σε ένα σύστημα *MBES* (*GPS*, μετατροπέας, μονάδα αναφοράς κίνησης κ.λπ.) με το σύστημα αναφοράς του σκάφους, συνιστά αναγκαιότητα για την λήψη δεδομένων υψηλής ανάλυσης και ακρίβειας. Το βυθομετρικό σφάλμα δεν προέρχεται μόνο από το ίδιο το σύστημα *MBES*, αλλά περιλαμβάνει επίσης τα σφάλματα απόκλισης κάθε περιφερειακού αισθητήρα. Ως εκ τούτου, μετά της εγκατάσταση του *MBES*, είναι απαραίτητο να καθοριστεί ένα σύστημα αναφοράς του σκάφους (*VRF: Vessel Reference Frame*) που είναι σταθερό εντός του σκάφους και κεντρωμένο σε ένα σημείο αναφοράς. Όστε να συσχετιστούν οι βοηθητικές μετρήσεις θέσης και προσανατολισμού με το *sonar*, όλοι οι αισθητήρες θέσης, προσανατολισμού και *sonar* πρέπει στη συνέχεια να τοποθετούνται και να προσανατολίζονται εντός αυτού του *VRF*.

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη δημιουργία ενός *VRF*, περιλαμβάνει τον ορισμό των ρυθμίσεων απόκλισης μεταξύ των μετατροπέων ήχου (πομπός και δέκτης), των αισθητήρων κίνησης και των κεραιών του συστήματος εντοπισμού θέσης και των μετρήσεων του βυθίσματος του πλοίου. Το κεντρικό σημείο αναφοράς του σκάφους (*CRP: Center Reference Point*) καθορίζεται σε κάθε νέα εγκατάσταση ενός συστήματος *MBES*, για να προσαρμόζεται καλύτερα στην ισορροπία του σκάφους και στα κριτήρια εγκατάστασης (εάν το *MBES* είναι τοποθετημένο στο κύτος ή σε στύλο). Αφού καθοριστεί το *CRP*, το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των ρυθμίσεων απόκλισης για το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (*GNSS*), τον αισθητήρα κίνησης και τους μετατροπείς ήχου.



Σχ. 4.3 Διάγραμμα του συστήματος αναφοράς του σκάφους (*VRF*) για το *MBES*, [Wu, 2021]

Fig. 4.3 Diagram for the vessel reference frame (*VRF*) for *MBES*, [Wu, 2021]

Με σκοπό να διασφαλιστεί ότι το βάθος που χαρτογραφείται είναι το πραγματικό βάθος (στάθμη του νερού) και όχι το βάθος κάτω από την καρίνα του σκάφους, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν το βύθισμα του σκάφους κατά τη διάρκεια της συλλογής δεδομένων (πιθανότατα στην αρχή και στο τέλος των εργασιών). Αυτό συμβαίνει ώστε να καταγραφούν οι αλλαγές στο βύθισμα του σκάφους λόγω της χρήσης καυσίμων, αν και αυτό εξαρτάται από το μοντέλο του σκάφους που χρησιμοποιείται στη μελέτη. Όλες οι ρυθμίσεις των αποκλίσεων πρέπει να καταγράφονται και να αναλύονται στην έκθεση της μελέτης και στο αρχείο καταγραφής της επεξεργασίας των παρεχόμενων πρωτογενών δεδομένων.

#### 4.2.2 Βαθμονόμηση του συστήματος πολυδесμικού ηχοβολισμού

Εσφαλμένη ευθυγράμμιση ή λανθασμένος συγχρονισμός των αισθητήρων μεταξύ τους, μπορούν να δημιουργήσουν τόσο στατικές αποκλίσεις [π.χ. αποκλίσεις διατοιχισμού (*roll*)] όσο και δυναμικά σφάλματα, γνωστά ως ταλαντώσεις. Ως εκ τούτου, πριν από την έναρξη κάθε υδρογραφικής μελέτης, πρέπει να πραγματοποιείται βαθμονόμηση των παραμέτρων του συστήματος *MBES* μέσω των δοκιμών επιδιόρθωσης (*patch test*).

Το *patch test* απαιτεί τη συλλογή βυθομετρικών δεδομένων σε δύο διαφορετικούς τύπους τοπογραφίας του πυθμένα, ένα πεδινό τμήμα του θαλάσσιου βυθού που χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της απόκλισης λόγω διατοιχισμού και ένα τμήμα με απότομη κλίση ή που περιέχει ένα σαφώς καθορισμένο αντικείμενο (όπως ένα βράχο ή ένα μικρό ναυάγιο) χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση των αποκλίσεων λόγω χρονικής καθυστέρησης (*latency*), προνευστασμού (*pitch*) και εκτροπής (*yaw*). Η συλλογή δεδομένων για τη χρονική υστέρηση, τον προνευστασμό και την εκτροπή θα πρέπει να πραγματοποιείται σε ύδατα όσο το δυνατόν βαθύτερα. Αυτό ισχύει ιδίως για τη διόρθωση της απόκλισης λόγω προνευστασμού, εξαιτίας του γεγονότος ότι σε ρηγά νερά η γωνία του προνευστασμού μπορεί να μην είναι εύκολο να προσδιοριστεί λόγω της έλλειψης ευκρίνειας.

##### 4.2.2α Διόρθωση χρονική υστέρησης (*Latency*)

Η χρονική υστέρηση είναι μια χρονική απόκλιση μεταξύ των ρολογιών του *sonar* του πολυδесμικού ηχοβολιστή και του συστήματος εντοπισμού θέσης. Η τελευταία γενιά *MBES* θα ενσωματώνει το χρόνο του *GNSS* και τον παλμό ανά δευτερόλεπτο (*PPS: Pulse per Second*) για το συγχρονισμό του χρόνου, οπότε δεν θα αναμένεται να υπάρχει χρονική υστέρηση στη θέση *GNSS*. Παρόλα αυτά, είναι απαραίτητο να ολοκληρωθούν τουλάχιστον μία ή δύο δοκιμές χρονική υστέρησης για να αποδειχθεί ότι είναι μηδενική για όλους τους πρακτικούς σκοπούς.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.4 (α), το σύνολο των δεδομένων για τη διόρθωση της χρονικής καθυστέρησης συλλέγεται σε μια προκαθορισμένη γραμμή πάνω από μια απότομη πλαγιά ή ένα χαρακτηριστικό αντικείμενο. Το σκάφος σαρώνει το στόχο με μια κεντρική δέσμη κατά μήκος ενός ζεύγους επικαλυπτόμενων διαδρομών με διαφορετικές ταχύτητες (π.χ. η μία γραμμή θα πρέπει να έχει διπλάσια ταχύτητα από τη άλλη) και στην ίδια κατεύθυνση, η γωνία του

τμήματος εκπομπής του συστήματος θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη για να αυξηθεί η συχνότητα μετάδοσης. Εάν υπάρχει χρονική υστέρηση, ο στόχος που προκύπτει από τις δύο αυτές μετρήσεις φαίνεται διαχωρισμένος.

#### 4.2.2β Διόρθωση απόκλισης διατοιχισμού (Roll)

Η τιμή της απόκλισης του διατοιχισμού είναι ίσως η πιο κρίσιμη τιμή στο *patch test*, καθώς ένα σφάλμα λόγω διατοιχισμού θα οδηγήσει σε τεράστιο σφάλμα στα βάθη ηχοβολισμού. Όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.4 (b), το σύνολο δεδομένων για τη διόρθωση της απόκλισης λόγω διατοιχισμού πρέπει να συλλέγεται πάνω από πεδινό τμήμα του πυθμένα. Μία γραμμή μετράται δύο φορές, σε αμφίδρομες κατευθύνσεις και στην ίδια ταχύτητα μελέτης. Εάν υπάρχει απόκλιση λόγω διατοιχισμού, θα παρατηρούνται δύο στρώματα βυθού με κλίση σε αντίθετες κατευθύνσεις, η οποία κλίση θα αυξάνεται γραμμικά από την κεντρική δέσμη προς τις ακραίες δέσμες όταν οι σαρώσεις εξετάζονται σε προβολή προφίλ.

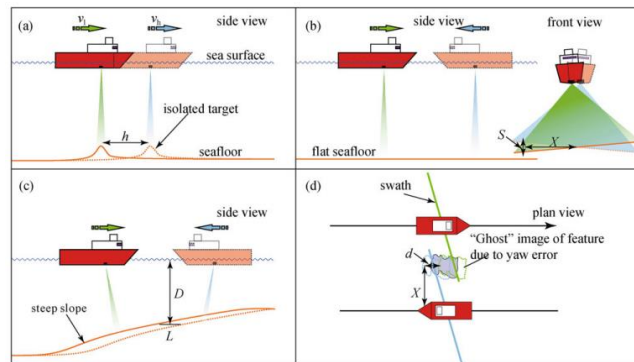
#### 4.2.2γ Διόρθωση απόκλισης Προνευστασμού (Pitch)

Ένα σφάλμα προνευστασμού θα έχει ως αποτέλεσμα ένα σφάλμα θέσης κατά μήκος της πορείας του σκάφους, το οποίο αυξάνεται σημαντικά με το βάθος. Το σύνολο δεδομένων για τη διόρθωση της απόκλισης λόγω προνευστασμού, συλλέγεται από τον ίδιο τύπο τοπογραφίας του πυθμένα με τη χρονική υστέρηση, δηλαδή πάνω από μια απότομη κλίση ή ένα χαρακτηριστικό αντικείμενο. Όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.4 (c), μετά την επιλογή μιας απότομης πλαγιάς στο πυθμένα και το καθορισμό μιας αρκετά μεγάλης γραμμικής διαδρομής μετ' επιστροφής, το σκάφος σαρώνει την πλαγιά με χαμηλή ταχύτητα με σταθερή κεντρική δέσμη. Οι γραμμές πορείας της έρευνας σε αντίστροφες κατευθύνσεις επικαλύπτονται και τα ίδια ακριβώς τμήματα της πλαγιάς που μετρούνται σηματοδοτούνται. Εάν υπάρχει απόκλιση λόγω προνευστασμού, τότε απεικονίζονται δύο διαφορετικές πλαγιές.

#### 4.2.2δ Διόρθωση απόκλισης Εκτροπής (Yaw)

Ένα σφάλμα εκτροπής θα οδηγήσει σε σφάλμα θέσης βάθους, το οποίο αυξάνεται με την απόσταση από το ναδίρ. Η διόρθωση της απόκλισης λόγω εκτροπής είναι συνήθως η πιο δύσκολη από τις 4 διορθώσεις που συνθέτουν ένα *patch test*. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα εάν χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εκτροπής μια πλαγιά, αν και ένα σαφώς καθορισμένο αντικείμενο λειτουργεί πολύ καλύτερα. Ο λόγος είναι ότι η περιοχή που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό δεν βρίσκεται ακριβώς κάτω από το σκάφος, αλλά στις εξωτερικές δέσμες και η πλαγιά μπορεί να μην είναι απόλυτα κάθετη σε σχέση με την πορεία του σκάφους.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.4 (d), το σύνολο δεδομένων για τη διόρθωση της απόκλισης λόγω εκτροπής συλλέγεται σε δύο προκαθορισμένες παράλληλες γραμμές πορείας της μελέτης. Οι γραμμές αυτές πρέπει να βρίσκονται εκατέρωθεν ενός χαρακτηριστικού αντικειμένου του πυθμένα και πρέπει να έχουν απόσταση ίση με 2-3 φορές το βάθος του νερού σε εκείνη τη θαλάσσια ζώνη. Το σκάφος σαρώνει το αντικείμενο χρησιμοποιώντας τις ακραίες δέσμες και έτσι ώστε να υπάρχει επαρκής επικάλυψη μεταξύ των δύο γραμμών πορείας της μελέτης. Το σύνολο των βυθομετρικών δεδομένων από το επικαλυπτόμενο τμήμα επεξεργάζεται και εάν υπάρχει απόκλιση λόγω εκτροπής, τα μετρούμενα αντικείμενα φαίνονται διαχωρισμένα.



Σχ. 4.4 Σύνολο βυθομετρικών δεδομένων για διόρθωση αποκλίσεων, (a) λόγω χρονικής υστέρησης, (b) λόγω διατοιχισμού, (c) λόγω προνευστασμού, (d) λόγω εκτροπής, [Wu, 2021]

Fig. 4.4 Bathymetric dataset for (a) latency, (b) roll offset, (c) pitch offset and (d) yaw offset correction, [Wu, 2021]

#### 4.2.2ε Διάταξη των διορθώσεων του patch test

Οι τέσσερις παραπάνω διορθώσεις πρέπει να εκτελούνται πολλαπλές φορές κατά τη διάρκεια του *patch test*. Γενικά, η χρονική υστέρηση θα επιλυθεί πριν από τον προνευστασμό, ενώ ο διατοιχισμός πριν από την εκτροπή. Οι πιο εφαρμόσιμες ακολουθίες διορθώσεων είναι: διατοιχισμός, χρονική υστέρηση, προνευστασμός και εκτροπή ή χρονική υστέρηση, προνευστασμός, διατοιχισμός και εκτροπή. Συνήθως όταν ένα σφάλμα είναι μεγαλύτερο από το αναμενόμενο σε μία από τις δοκιμές, είναι αναγκαία η επιστροφή και επίλυση για όλες τις προηγούμενες τιμές. Κάθε φορά που ένα σύνολο παραμέτρων διόρθωσης λαμβάνεται και εισάγεται στο σύστημα συλλογής δεδομένων του *MBES* ώστε να συμμετάσχει στους βυθομετρικούς υπολογισμούς, η διαδικασία βαθμονόμησης πρέπει να επαναλαμβάνεται έως ότου το τοπογραφικό προφίλ και οι ισοβαθείς γραμμές να ταιριάζουν ικανοποιητικά.

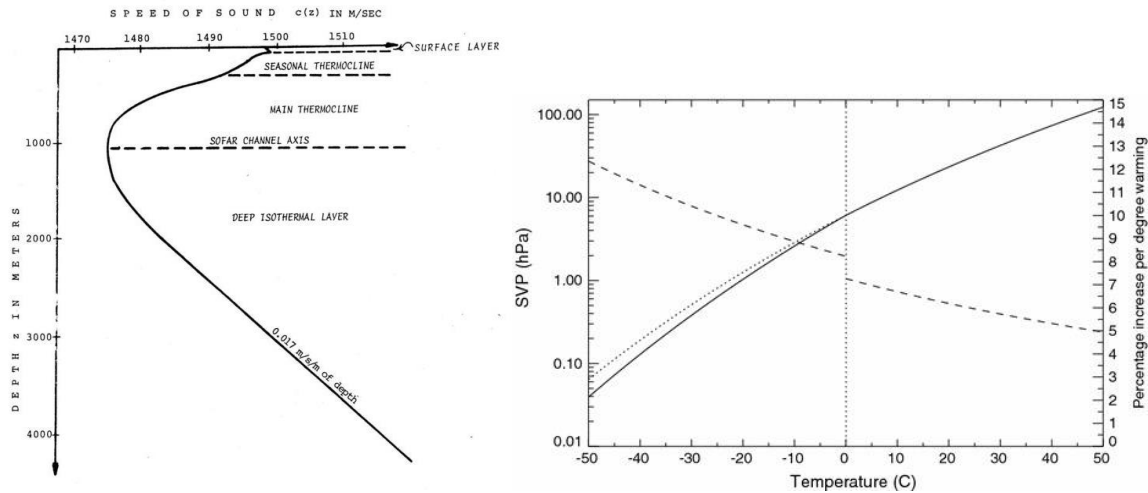
#### 4.2.3 Το προφίλ ταχύτητας ήχου

Ένας από τους κύριους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των πολυδεσμικών ηχοβολισμών είναι το προφίλ της ταχύτητας ήχου (*SVP: Sound Velocity Profile*) στο νερό. Το *SVP* ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα την εποχή, την περιοχή και το βάθος. Η διόρθωση με βάση το *SVP* είναι ο σημαντικότερος και δυσκολότερος παράγοντας που πρέπει να ελεγχθεί μεταξύ όλων των τύπων διορθώσεων. Σε γενικές γραμμές, το υδάτινο περιβάλλον τόσο στις υπεράκτιες όσο και στις περιοχές εκβολής των ποταμών είναι πολύπλοκο και τα *SVP* στις περιοχές αυτές μεταβάλλονται γρήγορα, επομένως είναι απαραίτητη η συχνή μέτρηση του *SVP*. Ωστόσο, το υδάτινο περιβάλλον στα βάθη της θάλασσας είναι πιο σταθερό, γεγονός που σημαίνει ότι οι χρονικές και χωρικές μεταβολές της ηχητικής ταχύτητας είναι μικρές. Επομένως, αντί το *SVP* να μετράται συχνά στην περίπτωση αυτή, αρκεί συνήθως η πραγματοποίηση μιας μόνο λήψης του *SVP* κάθε ημέρα. Το *CTD* (που σημαίνει Αγωγιμότητα, Θερμοκρασία και Βάθος), το προφιλόμετρο ηχητικής ταχύτητας και ο αναλώσιμος βαθυθερμογράφος *XBT* (*eXpendable BathyThermograph*) αποτελούν τα κύρια όργανα που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή *SVP*.

Κατά τη διάρκεια της βυθομετρικής μελέτης με πολυδεσμικό ηχοβολιστή, οι βασικές απαιτήσεις για τις μετρήσεις του *SVP* παραθέτονται ακολούθως:

1. Κάθε φορά που αρχίζει μια έρευνα, το *SVP* θα πρέπει να καταγράφεται τουλάχιστον μία φορά για να επιτευχθεί μια βασική κατανόηση των χαρακτηριστικών της ηχητικής ταχύτητας της περιοχής μελέτης.
2. Κατά τη διάρκεια της έρευνας, η τιμή της επιφανειακής ηχητικής ταχύτητας θα πρέπει να παρακολουθείται και να αξιολογείται σε πραγματικό χρόνο, ώστε να διασφαλίζεται ότι τα δεδομένα είναι ακριβή και αξιόπιστα.
3. Σε ρηγά ύδατα, πρέπει να λαμβάνονται κατακόρυφες συνεχείς μετρήσεις πλήρους βάθους του *SVP* καθ' όλη τη διάρκεια της διαδρομής και θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα *SVP* σε έκταση 50\*50 km.
4. Στα βαθιά ύδατα, οι κατακόρυφες συνεχείς μετρήσεις πλήρους βάθους του *SVP* είναι αναγκαίες. Η ηχητική ταχύτητα σε βάθη άνω των 2000 m μπορεί να συμπληρωθεί με τη χρήση των μετρούμενων *SVP* και παλαιότερων *SVP*. Θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα πλήρων μετρούμενο *SVP* σε έκταση 100\*100 km.
5. Το *SVP* θα πρέπει να αντικαθίσταται με την πάροδο του χρόνου όταν το βαθυμετρικό προφίλ του πυθμένα παραμορφώνεται.
6. Όταν οι υδρολογικές συνθήκες (δηλ. θερμοκρασία, αλατότητα και θολότητα) που επηρεάζουν το *SVP* αλλάζουν σημαντικά εντός της περιοχής μελέτης, ο αριθμός των μετρήσεων *SVP* θα πρέπει να αυξηθεί.
7. Η ακρίβεια μέτρησης της ηχητικής ταχύτητας για κάθε *SVP* θα πρέπει να είναι καλύτερη από 1m/s.
8. Όταν το *SVP* οργανώνεται ειδικά σε χρόνο και χώρο, η ακρίβεια του βάθους νερού στις δέσμες ακραίας θέσης της ζώνης πολλαπλών δεσμών πρέπει να συμφωνεί με τις σχετικές προδιαγραφές.

## Typical SVP

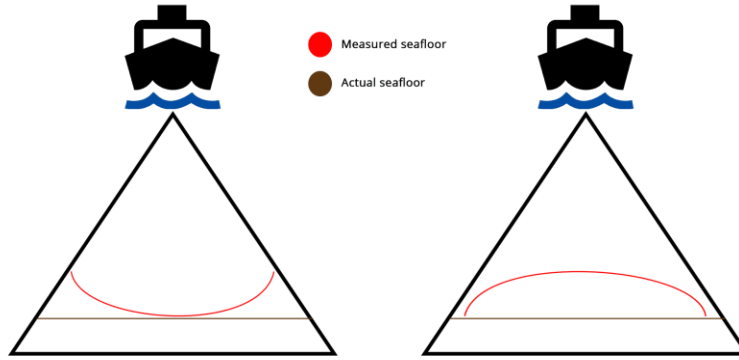


Σχ. 4.5 Τυπικά διαγράμματα ηχητικής ταχύτητας/βάθους (SVP) (αριστερά) και θερμοκρασίας/ηχητικής ταχύτητας (δεξιά), [Wu, 2021]

Fig. 4.5 Typical sound velocity/depth (SVP) (left) and temperature/sound velocity (right) diagrams, [Wu, 2021]

Δεδομένου ότι οι πολυδεσμικοί ηχοβολιστές βασίζονται στη μετάδοση και στη λήψη ακουστικών παλμών, η επίγνωση της ακριβούς διαδρομής που ακολουθεί κάθε μεμονωμένο κύμα στο ταξίδι του προς τον πυθμένα και πίσω είναι κρίσιμη. Υπάρχουν τρεις κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν αυτή τη διαδρομή: αγωγιμότητα, θερμοκρασία και πίεση (βάθος). Καθώς αυτοί οι τρεις παράγοντες μεταβάλλονται, μεταβάλλεται και η ηχητική ταχύτητα στο νερό. Αυτές οι αλλαγές εκτρέπουν την «δέσμη» προκαλώντας της αλλαγή κατεύθυνσης. Όταν η μέτρηση γίνεται εσφαλμένα, όχι αρκετά συχνά ή σε λάθος τοποθεσία, προκύπτει σφάλμα διάθλασης. Τα σφάλματα διάθλασης τείνουν να επιδεινώνονται όσο οριζόντια ή εκτός ναδίρ απομακρύνονται οι «δέσμες» από το κέντρο του *sonar*. Όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω Σχήμα 4.6, όταν η μετρούμενη ταχύτητα είναι υψηλότερη από ότι αναμενόταν, μια επίπεδη επιφάνεια θα κυρτώνεται προς τα πάνω (π.χ. «χαμόγελο») και όταν είναι πολύ χαμηλή, μια επίπεδη επιφάνεια θα κυρτώνεται προς τα κάτω (π.χ. «φρύδι»).

Σε 10 m νερού, το σφάλμα σε απόσταση 10 m από το ναδίρ στο βυθό της θάλασσας είναι 0.46 m. Αυτό μπορεί να μην φαίνεται υψηλό, αλλά γίνεται σημαντικό όταν επεκτείνεται στα 100 m και στην πλήρη κάλυψη του πολυδεσμικού ηχοβολιστή.



Σχ. 4.6 Παράδειγμα παραμόρφωσης του πυθμένα με τη χρήση λανθασμένων μετρήσεων της ηχητικής ταχύτητας, [Malzone/AML, 2019]

Fig. 4.6 Example of seafloor deformation using incorrect SVP, [Malzone/AML, 2019]

## 5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΛΙΜΕΝΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΜΕΛΕΤΗΣ

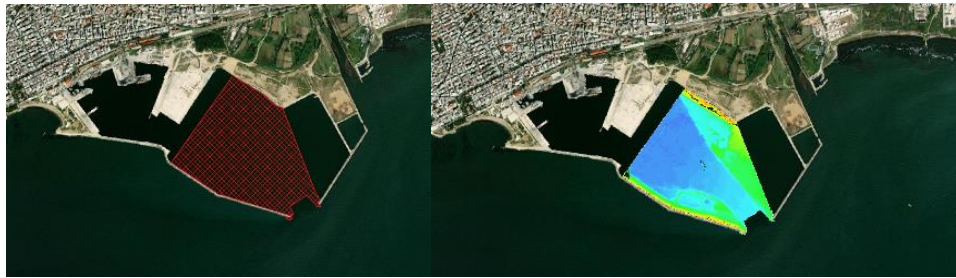
### 5.1 Συνοπτική Περιγραφή της Μελέτης

#### 5.1.1 Στόχος της μελέτης

Βασικό αντικείμενο της συγκεκριμένης μελέτης αποτελεί η βυθομετρική αποτύπωση τμήματος του θαλασσίου πυθμένα της ανατολικής λιμενολεκάνης ευθύνης του Οργανισμού Λιμένος Αλεξανδρούπολης, με τη χρήση πολυδευσμικού ηχοβολιστή (*Multibeam Echo Sounder*).

#### 5.1.2 Θέση και χαρακτηριστικά του λιμένα

Η περιοχή βυθομέτρησης χωροθετείται εντός του τομέα διαχείρισης του Οργανισμού Λιμένος Αλεξανδρούπολης (ΟΛΑ) της ανατολικής λιμενολεκάνης. Το βάθος του συγκεκριμένου τμήματος του λιμένα ανέρχεται στα -12.00 m (ΜΣΘ) σε επιφάνεια περίπου 500000 m<sup>2</sup> (συνολική επιφάνεια ανατολικής λιμενολεκάνης 1100000 m<sup>2</sup>), μετά την ολοκλήρωση του τελευταίου έργου εμπάθυνσης το 2015. Με βάση το εγκεκριμένο προγραμματικό σχέδιο του λιμένα προβλέπεται εκβάθυνση της ανατολικής λιμενολεκάνης σε συνολική επιφάνεια 667000 m<sup>2</sup> περίπου, με τελικό βάθος στα -15.00 m (ΜΣΘ).

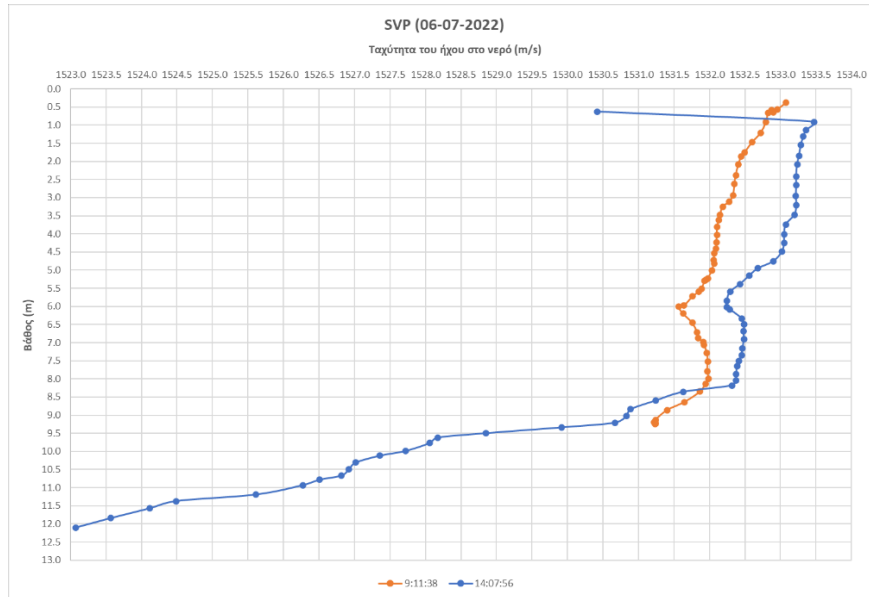


Σχ. 5.1 Οριοθέτηση περιοχής μελέτης (αριστερά) και κάτοψη λιμένα με ορθοφωτογραφία (δεξιά)  
Fig. 5.1 Delimitation of the survey area (left) and top view of the port with orthophotograph (right)

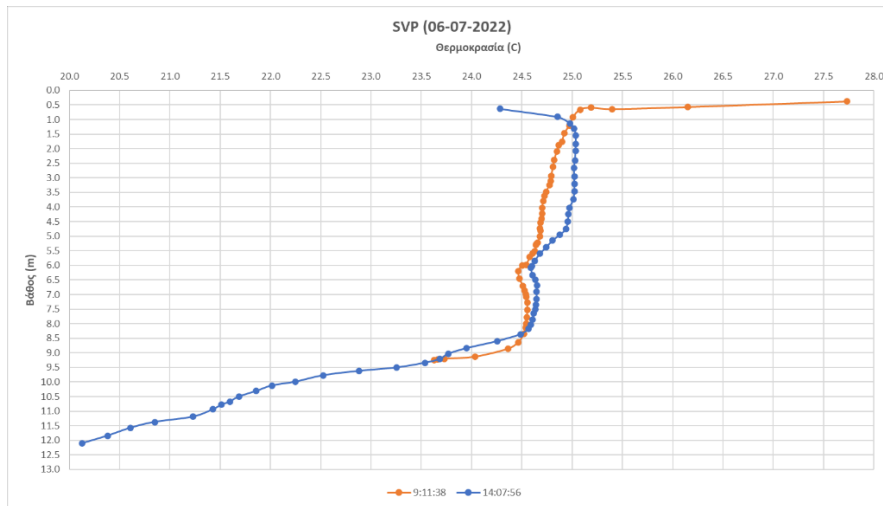
Όσον αφορά το υδάτινο περιβάλλον του λιμένα τις Αλεξανδρούπολης, αυτό εξαρτάται και μεταβάλλεται από πολλούς παράγοντες όπως: η θερμοκρασία, η αλατότητα, η πίεση κλπ. Με βάση τις μετρήσεις που διενεργήθηκαν μέσω του προφιλόμετρου ταχύτητας του ήχου σε ορισμένα σημεία του λιμένα, δημιουργήθηκαν κάποια διαγράμματα που φανερώνουν τις μεταβολές των τιμών των προαναφερθέντων παραγόντων σε σχέση με το βάθος του νερού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκεκριμένα διαγράμματα, ταχύτητας του ήχου στο νερό, θερμοκρασίας,



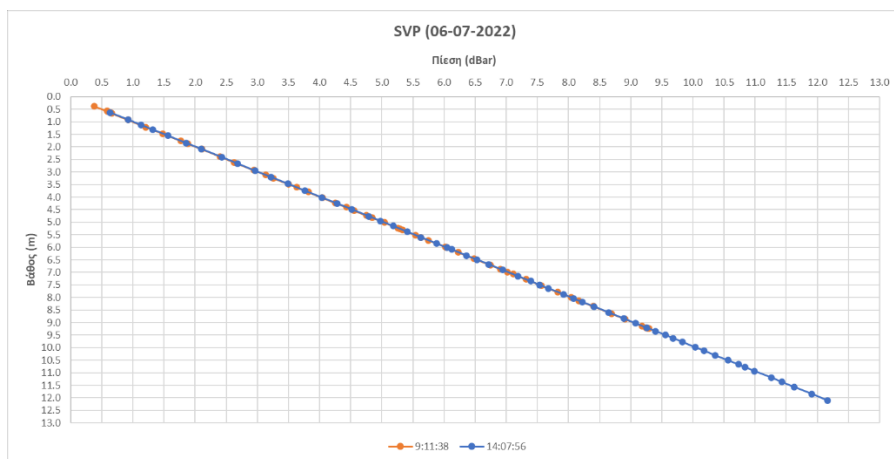
πίεσης και αλατότητας σε σχέση με το βάθος του νερού, συγκρινόμενα μεταξύ τους ανά ώρα μέτρησης.



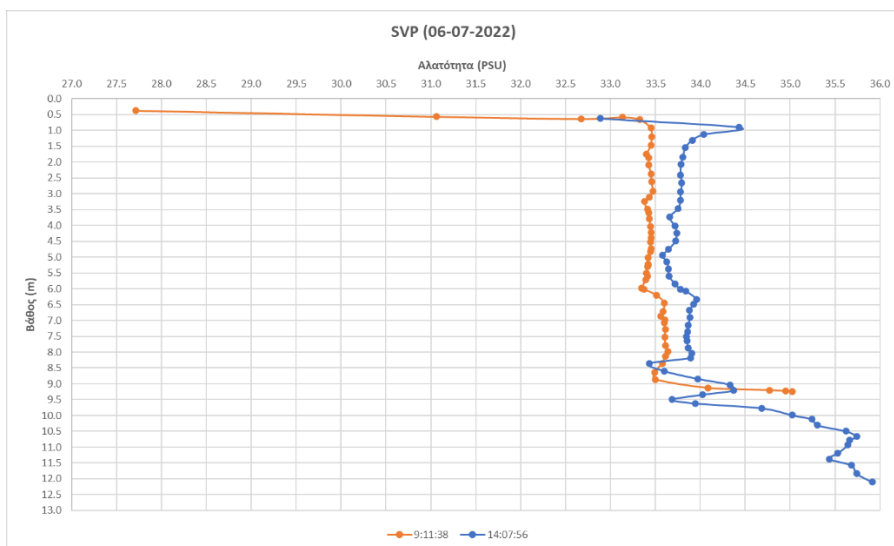
Σχ. 5.2 Διάγραμμα ταχύτητας του ήχου στο νερό σε σχέση με το βάθος  
 Fig. 5.2 Graph of the speed of sound in water versus depth



Σχ. 5.3 Διάγραμμα της θερμοκρασίας του νερού σε σχέση με το βάθος  
 Fig. 5.3 Graph of water temperature versus depth



Σχ. 5.4 Διάγραμμα της πίεσης στο νερό σε σχέση με το βάθος  
 Fig. 5.4 Graph of water pressure versus depth



Σχ. 5.5 Διάγραμμα της αλατότητας του νερού σε σχέση με το βάθος  
 Fig. 5.5 Graph of water salinity versus depth

Στο σχήμα 5.2 παρατηρείται για την ημερομηνία 06-07-2022, πως κυμαίνονται οι τιμές της ταχύτητας του ήχου ανάλογα με το βάθος. Δηλαδή, η ταχύτητα του ήχου μέχρι περίπου τα 8.5 – 9 m βάθος παραμένει σταθερή, ενώ σε βάθος > 9 m μειώνεται αισθητά. Ακόμη διαπιστώνεται η διαφορά στην ταχύτητα του ήχου στο νερό ανάλογα με την χρονική περίοδο των μετρήσεων, καθώς στις 14:07:56 η ταχύτητα του ήχου σε σύγκριση με τις 09:11:38 είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 0.5 m/s στα αντίστοιχα βάθη. Στο Σχήμα 5.3 για την ίδια ημερομηνία, παρατηρείται πως κυμαίνονται οι τιμές της θερμοκρασίας σε σχέση με το βάθος. Όσο το βάθος αυξάνεται τόσο η θερμοκρασία μειώνεται, καθώς στα βαθύτερα στρώματα της θάλασσας δεν έχουμε την αύξηση της θερμοκρασίας που παρατηρείται στα επιφανειακά στρώματα λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας.

Αυτός ο λόγος επεξηγεί και την διαφορά της θερμοκρασίας ανάμεσα στις δύο μετρήσεις. Δηλαδή τη χρονική περίοδο 14:07:56 οι ηλιακές ακτίνες έχουν θερμάνει την επιφάνεια της θάλασσας και γι' αυτό το λόγο παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις επιφανειακές τιμές της θερμοκρασίας των δύο μετρήσεων. Στο σχήμα 5.4 για την ίδια ημερομηνία, παρατηρείται πως κυμαίνονται οι τιμές της πίεσης σε σύγκριση με το βάθος. Όπως αναμενόταν, με την αύξηση του βάθους αυξάνεται και η υδροστατική πίεση. Στο σχήμα 5.5 παρατηρούνται οι τιμές της αλατότητας σε σχέση με το βάθος, για τις δύο μετρήσεις διαφορετικής χρονικής περιόδου. Δεν εμφανίζονται σημαντικές διαφορές στην τιμή της αλατότητας, καθώς στην περιοχή μελέτης δεν επικρατούν συνθήκες υψηλών βροχοπτώσεων ή φαινόμενα εισροής γλυκού νερού ώστε να μεταβληθεί η σύσταση του θαλασσινού νερού.

## 5.2 Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς

### 5.2.1 Οριζοντιογραφικό σύστημα αναφοράς

Για την λήψη των δορυφορικών διορθώσεων πραγματικού χρόνου (*Real Time Kinematic*), χρησιμοποιήθηκε υπηρεσία *HxGN (Hexagon) SmartNet* στην οποία εντάσσεται το *METRICANET GNSS*. Το συγκεκριμένο δίκτυο ανήκει στην *Metrica AE* και αποτελείται από ένα ευρύ δίκτυο μόνιμων σταθμών αναφοράς (περισσότεροι από 90 μόνιμοι σταθμοί), οι οποίοι καταγράφουν δεδομένα από δορυφορικούς σχηματισμούς όπως *GPS*, *GLONASS*, *GALLILEO* και *BEIDOU*. Οι συντεταγμένες των μόνιμων σταθμών έχουν προσδιοριστεί στο Ελληνικό Πλαίσιο *HTRS07* που χρησιμοποιεί το *HEPOS* και την Εγκάρσια Μερκατορική προβολή αλλά και το *ΕΓΣΑ87*. Στον επόμενο πίνακα παρατίθενται οι πληροφορίες του κύριου σταθμού αναφοράς (*MET050*) που χρησιμοποιήθηκε για την περιοχή της Αλεξανδρούπολης.

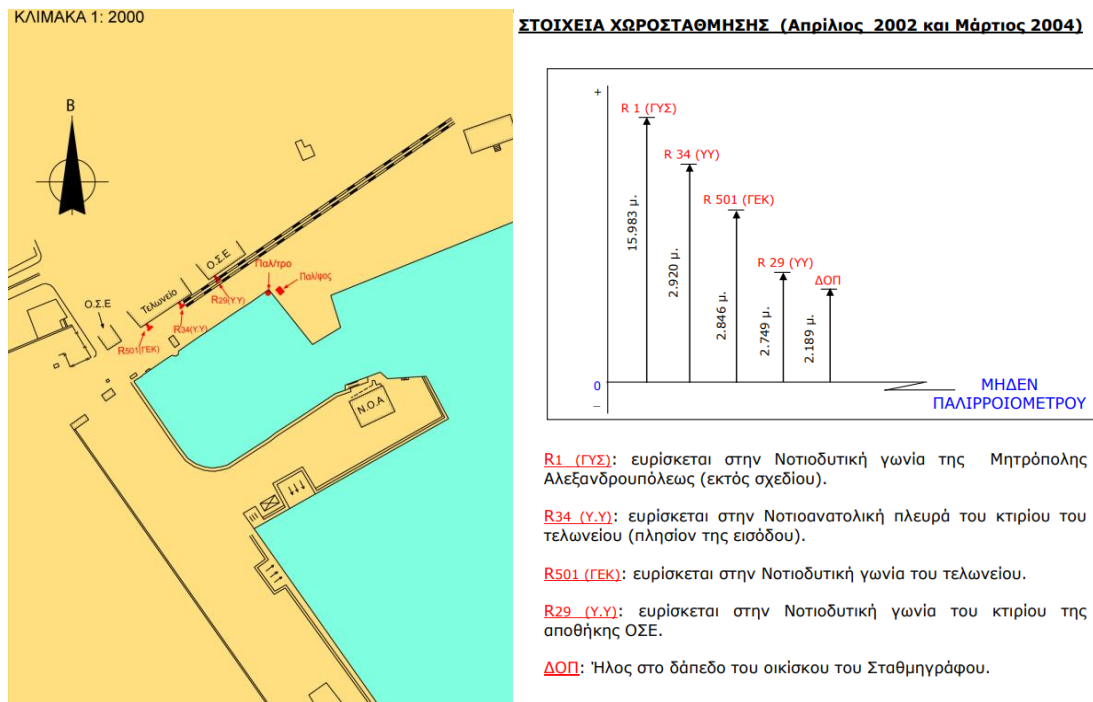
<b>Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 84 (WGS84)</b>	
Γεωγραφικό μήκος (μοίρες)	40° 50' 57'' .00 N
Γεωγραφικό πλάτος (μοίρες)	25° 51' 12'' .44 E
Υψόμετρο (m)	59.819
<b>Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 87 (ΕΓΣΑ87)</b>	
Ανατολικά (m)	656089.5827
Βόρεια (m)	4523380.7108
Υψόμετρο (m)	19.0568

Πιν. 5.1 Συντεταγμένες μόνιμου σταθμού αναφοράς MET0050 Reference Station, [Metrica]

Table 5.1 Coordinates of permanent station MET0050 Reference Station, [Metrica]

## 5.2.2 Υψομετρικό σύστημα αναφοράς

Ως υψομετρικό σύστημα αναφοράς επιλέχθηκε η μέση στάθμη της θάλασσας (ΜΣΘ), μέσω της χρήσης χωροσταθμικών αφετηριών του δικτύου και μετρήσεων παλιρροιογράφου του Εθνικού Συστήματος Μέτρησης Θαλασσών της Υδρογραφικής Υπηρεσίας του Πολεμικού Ναυτικού. Η μέση στάθμη της θάλασσας προσδιορίστηκε σε  $-0.417$  m από την στάθμη αναφοράς του παγκόσμιου γεωδαιτικού μοντέλου *EGM 08*, η οποία αποτέλεσε και την υψομετρική επιφάνεια αναφοράς των δεδομένων. Η σχετική διαφορά της μέσης στάθμης της θάλασσας και της κατώτατης ρηχίας ανέρχεται στα  $0.70$  m για τον σταθμό της Αλεξανδρούπολης. Η κατώτατη ρηχία ορίζει την επιφάνεια κατώτατης στάθμης της θάλασσας, καθ' όλη τη διάρκεια της μέτρησης-λειτουργίας του παλιρροιογράφου. Το παλιρροιακό εύρος και συνεπώς η θαλάσσια στάθμη που υπολογίζεται, μεταβάλλονται συνεχώς από την ατμοσφαιρική πίεση, τις ανεμολογικές συνθήκες, τις αλλαγές θαλάσσιας θερμοκρασίας που επηρεάζουν την πυκνότητα και τον όγκο του νερού, τις βροχοπτώσεις και τα νερά των ποταμών που εκβάλλουν στην θάλασσα.



Σχ. 5.6 Θέσεις reper (αριστερά) και στοιχεία χωροστάθμησης στο λιμένα (δεξιά), [Y.Y., 2015]

Fig. 5.6 Reper positions (left) and levelling details in the port (right), [H.S., 2015]

### 5.3 Πλεονεκτήματα χρήσης πολυδεσμικού ηχοβολιστή

Τα συστήματα πολυδεσμικών ηχοβολιστών, εκπέμπουν μια δέσμη ήχου και λαμβάνουν τις ανακλάσεις του ήχου που επιστρέφουν σε στενούς τομείς κάθετους σε αυτή τη δέσμη, με αποτέλεσμα τη χαρτογράφηση μιας έκτασης του βυθού αντί για μία γραμμή (σε αντίθεση με τους ηχοβολιστές μονής δέσμης). Διαθέτουν το πλεονέκτημα συλλογής βαθυμετρικών δεδομένων υψηλότερης ανάλυσης και καθιστούν τις προσπάθειες χαρτογράφησης αποτελεσματικότερες, καθώς χαρτογραφούν μια περιοχή σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με τους μονοδεσμικούς ηχοβολιστές. Τα σύγχρονα συστήματα διαθέτουν πολλές εκατοντάδες δέσμες και επιτυγχάνουν γωνίες σάρωσης μεταξύ  $120^\circ$  και  $150^\circ$ . Οι μικρότερες γωνίες και τα ρηχά νερά οδηγούν σε μικρότερο “ακουστικό ίχνος” και επομένως σε δεδομένα υψηλότερης ανάλυσης από τις μεγάλες γωνίες και τα μεγαλύτερα βάθη, λόγω της διαστολής της δέσμης καθώς ταξιδεύει μέσα στην υδάτινη στήλη. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να ληφθούν δεδομένα πολύ υψηλής ακρίβειας χρησιμοποιώντας πλοία σε μικρά βάθη, αλλά και ότι η ανάλυση μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος. Γι’ αυτό το λόγο σε βαθιά νερά, τα οχήματα που λειτουργούν κοντά βυθό της θάλασσας μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτή την πρόκληση.

## 6. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 6.1 Ενσωματωμένη Αδρανειακή Μονάδα και Κεραίες

Το σύστημα εντοπισμού του σκάφους περιλαμβάνει τη χρήση ολοκληρωμένου συστήματος δορυφορικού και αδρανειακού εντοπισμού (*GNSS/INS*). Το σύστημα δορυφορικού εντοπισμού περιλαμβάνει δύο κεραίες *GNSS*, μία κύρια και μία δευτερεύουσα. Αντίστοιχα, το σύστημα αδρανειακού εντοπισμού χρησιμοποιεί μια αδρανειακή μονάδα μετρήσεων (*IMU*), η οποία βρίσκεται ενσωματωμένη στον ηχοβολιστή πολλαπλών δεσμών. Συγκεκριμένα το αδρανειακό σύστημα πλοήγησης (*INS*) που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη υδρογραφική αποτύπωση, ενσωματωμένο στο σύστημα πολυδεσμικού ηχοβολιστή, είναι το *Applanix POS MV WaveMaster II*. Το αναφερόμενο σύστημα πλοήγησης αποτελείται από μία αδρανειακή μονάδα μετρήσεων (*IMU*) και δύο δορυφορικούς δέκτες *GNSS* τύπου *540AP* της εταιρίας *TRIMBLE*. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι ακρίβειες του *INS Applanix WaveMaster II*, οι οποίες συμμορφώνονται με τις σχετικές προδιαγραφές του *IHO (S-44 Special Order)*.



Σχ. 6.1 Applanix POS MV WaveMaster II, [Applanix, 2017]

Fig. 6.1 Applanix Pos MV WaveMaster II, [Applanix, 2017]

Περίληψη Επιδόσεων (Ακρίβεια του συστήματος <i>APPLANIX POS MV WAVEMASTER II</i> )	
<b>Θέση</b>	Οριζόντια: $\pm (8 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \cdot \text{απόσταση από το σταθμό RTK})$ Κατακόρυφα: $\pm (15 \text{ mm} + 1 \text{ ppm} \cdot \text{απόσταση από το σταθμό RTK})$
<b>Λιατοιχισμός (Roll) και Προνευστασμός (Pitch)</b>	$\pm 0.015^\circ$ (ανεξάρτητο από την απόσταση των κεραίων)
<b>Διεύθυνση (Heading)</b>	$\pm 0.03^\circ$ (RTK) με 2 m απόσταση μεταξύ των κεραίων

Πιν. 6.1 Ακρίβεια συστήματος αδρανειακής μονάδας, [Applanix, 2017]

Table 6.1 Inertial unit system accuracy, [Applanix, 2017]

Τα συστήματα *POS MV* συνδυάζουν δεδομένα θέσης *GNSS* με δεδομένα γωνιακής ταχύτητας και επιτάχυνσης από την μονάδα *IMU*, καθώς και υπολογισμού της διεύθυνσης (*heading*) του σκάφους από τον δέκτη *GNSS* (σύστημα υπολογισμού αζιμούθιου, *GAMS: GNSS Azimuth Measurement Subsystem*), για να παράξουν μια αξιόπιστη και ακριβή λύση θέσης και προσανατολισμού με έξι βαθμούς ελευθερίας.

Η συγκεκριμένη μονάδα διαθέτει τη δυνατότητα καταγραφής πρωτογενών παρατηρήσεων *GNSS* και αδρανειακών παρατηρήσεων για μεταγενέστερη επεξεργασία, για τη βέλτιστη λύση εντοπισμού θέσης και προσανατολισμού σε εκ των υστέρων επεξεργασία. Τα οφέλη της μετα-επεξεργασίας αυτών των παρατηρήσεων είναι τα εξής:

- Η διαδικασία κινηματικής μετα-επεξεργασίας (*Post - Process kinematic*) και ο προηγμένος αλγόριθμος εξομάλυνσης, βελτιώνουν δραστικά την ακρίβεια θέσης και προσανατολισμού.
- Τα σφάλματα ρύθμισης μπορούν να διορθωθούν στην μετα-επεξεργασία, εναλλακτικά διαφορετικές πηγές *GNSS* μπορούν να βρεθούν εάν η κύρια πηγή αποδειχθεί αναξιόπιστη.

Η εργοστασιακή ενσωμάτωση των κρίσιμων αισθητήρων παρέχει πολλά πλεονεκτήματα. Οι αποκλίσεις μεταξύ του *sonar* και του αδρανειακού συστήματος πλοήγησης είναι σταθερές και προκαθορισμένες στο πλαίσιο της ρύθμισης του συστήματος. Ο χρήστης χρειάζεται μόνο να μετρήσει την απόκλιση από το κάτω μέρος της κύριας κεραίας *GNSS*. Ενσωμάτωση καλωδίωσης και λογισμικού μεταξύ του *sonar*, του εντοπισμού θέσης, της κατεύθυνσης και των περιστροφών του πλοίου και της ταχύτητας του ήχου χειρίζονται εσωτερικά.

## 6.2 Προφιλόμετρο μέτρησης της ταχύτητας του ήχου (*SVP*)

Στη συγκεκριμένη υδρογραφική μελέτη, χρησιμοποιήθηκε το προφιλόμετρο της ταχύτητας του ήχου (*SVP*) *NORBIT SV Profiler (AML-3 LGR)*. Το προφιλόμετρο αυτό αποτελεί μια πολυμερής συσκευή που κατασκευάστηκε ειδικά για εφαρμογές δημιουργίας υδρογραφικών προφίλ σε συνδυασμό με *sonar*. Η συσκευή *Norbit SV Profiler* διαθέτει αυτόνομη τροφοδοσία μέσω μιας επαναφορτιζόμενης εσωτερικής μπαταρίας με μηχανικό διακόπτη ενεργοποίησης/απενεργοποίησης δίπλα στο άγκιστρό τους. Είναι σχεδιασμένο να καταγράφει τις μετρήσεις του αισθητήρα σε εσωτερική μνήμη και να μεταφέρουν τα δεδομένα μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων.



Σχ. 6.2 Βασικά μέρη του AML-3-LGR, [Norbit, 2021]  
 Fig. 6.2 Main parts of AML-3-LGR, [Norbit, 2021]

Το όργανο *NORBIT SV Profiler* παρέχει τρεις μετρήσεις: υδροστατική πίεση (εξαρτάται από το βάθος), ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό και θερμοκρασία του νερού. Ο μετρητής θερμοκρασίας βρίσκεται ενσωματωμένος στον αισθητήρα μέτρησης της ταχύτητας του ήχου. Ακόμη το προφιλόμετρο της ταχύτητας του ήχου που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη του λιμένα της Αλεξανδρούπολης, διαθέτει ακόμη έναν αποσπώμενο αισθητήρα, που παρέχει μετρήσεις αλατότητας και πυκνότητας του νερού. Η μέγιστη τιμή βάθους του οργάνου ανέρχεται στα 500 m. Εργοστασιακά, το όργανο *NORBIT SV Profiler* είναι εξοπλισμένο με ένα άγκιστρο, μια υποδοχή *USB-C*, έναν διακόπτη τροφοδοσίας και μια λυχνία τύπου *LED* ένδειξης της κατάστασης του προφιλόμετρου. Το άγκιστρο διαθέτει μια οπή που συμπίπτει με τον άξονα του οργάνου, ώστε να διευκολύνεται η πόντιση και η ανάδυσή του. Το άκρο του οργάνου που βρίσκεται στην αντίθετη πλευρά από το άγκιστρο, φιλοξενεί το φορτίο των αισθητήρων, οι οποίοι προστατεύονται μηχανικά από ένα συμπαγές πλέγμα ανθρακονήματος. Στον Πίνακα 6.2 περιγράφονται οι προδιαγραφές του προφιλόμετρου *NORBIT SV*.

<b>Εκτιμώμενο Βάθος</b>	500 m [1640 πόδια]
<b>Υλικό</b>	Ακετάλη, 316 ανοξείδωτο ατσάλι, πολυανθρακικό, ανθρακόνημα
<b>Δυνατότητα GNSS</b>	Ναι
<b>Χώρος Αποθήκευσης Δεδομένων</b>	30 GB
<b>Λογισμικό</b>	Sailfish
<b>Επικοινωνία/Διασύνδεση</b>	USB-C, Wi-Fi



<b>Τροφοδοσία</b>	Επαναφορτιζόμενη εσωτερική μπαταρία 2 κυψελών χωρητικότητας 24 Wh. Επιτοίχια φόρτιση ή με υπολογιστή μέσω USB (τουλάχιστον 10 W)
<b>Θερμοκρασία</b> Λειτουργίας Αποθήκευσης	-20 με +45°C -20 με +60°C
<b>Διαστάσεις</b> Διάμετρος Μήκος Βάρος Βάρος στο νερό	6.91 cm/ 2.72 in 25.84 cm/ 10.18 in 0.84 kg/ 1.86 lb. 0.53 kg/ 1.17 lb.
<b>Ηχητική Ταχύτητα</b> Εύρος Μετρήσεων Ακρίβεια	1375 – 1625 m/s ± 0.025 m/s
<b>Θερμοκρασία</b> Εύρος Μετρήσεων Ακρίβεια	-5 – 45°C ± 0.005°C
<b>Πίεση</b> Εύρος Μετρήσεων Ακρίβεια	0 – 500 dBar 0.05% FS

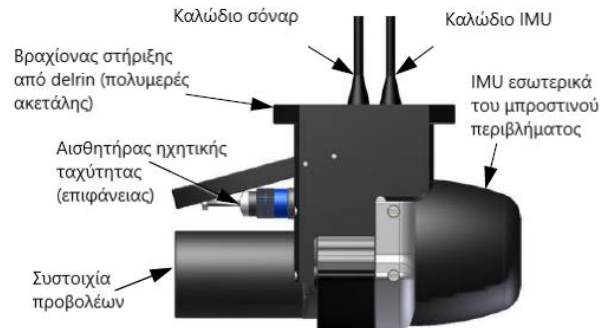
Πιν. 6.2 Προδιαγραφές προφιλόμετρου NORBIT SV, [Norbit SV, 2021]

Table 6.2 Specifications of NORBIT SV profiler, [Norbit SV, 2021]

### 6.3 Πολυδεσμικός Ηχοβολιστής (MBES)

Για τη συλλογή των πρωτογενών βυθομετρικών δεδομένων στον λιμένα της Αλεξανδρούπολης, χρησιμοποιήθηκε πολυδεσμικός ηχοβολιστής *iWBMS* της *NORBIT*. Το συγκεκριμένο *sonar* σχεδιάστηκε ως σύστημα κυλινδρικής συστοιχίας ευρείας ζώνης με μετάδοση διαμορφωμένης συχνότητας (*FM: Frequency Modulation*). Η κυλινδρική συστοιχία σε αντίθεση με μια επίπεδη, είναι λιγότερο επιρρεπείς σε σφάλματα ταχύτητας διάδοσης του ήχου στην επιφάνεια του νερού, όταν προσδιορίζεται ο πυθμένας. Λόγω των αποκλειστικών τεχνικών σταδιακής διαμόρφωσης της δέσμης που υποστηρίζονται μόνο από κυλινδρικές συστοιχίες, το *sonar* σχηματίζει στενότερες δέσμες από τις επίπεδες συστοιχίες, με αποτέλεσμα την ανώτερη ποιότητα βυθομετρίας. Η κυλινδρική συστοιχία του συγκεκριμένου πολυδεσμικού ηχοβολιστή μπορεί να καλύψει γωνία σάρωσης έως 210°. Στα συστήματα επίπεδης συστοιχίας θα μειωνόταν η αξιοπιστία των δεδομένων σε πολύ χαμηλότερες γωνίες σάρωσης ( $\pm 80^\circ$ ) και τότε θα ήταν απαραίτητη η τοποθέτηση δύο ή τριών ηχοβολιστικών υπό γωνία για την επίτευξη μεγαλύτερης κάλυψης σάρωσης. Ακόμη, η κυλινδρική συστοιχία παρουσιάζει ένα πιο υδροδυναμικό προφίλ που επιτρέπει ταχύτερη διέλευση, λιγότερες δονήσεις του συστήματος και χρήση ελαφρύτερου υλικού για τη στήριξη του *sonar*. Η πιο σταθερή εγκατάσταση του πολυδεσμικού ηχοβολιστή στο σκάφος, όπως στο κύτος, επιτρέπει μέγιστη ταχύτητα πλεύσης μεγαλύτερη των 20 κόμβων. Στο παρακάτω

σχήμα υποδεικνύονται τα βρεγμένα μέρη του πολυδεσμικού ηχοβολιστή *iWBMS* και τα ενσωματωμένα συστήματα που διαθέτει.



Σχ. 6.3 Βασικά μέρη του πολυδεσμικού ηχοβολιστή NORBIT *iWBMS*, [NORBIT user manual, 2021]

Fig. 6.3 Main parts of the NORBIT *iWBMS* MBES, [NORBIT user manual, 2021]

Από το σήμα που επιστρέφει, από τον ηχοβολισμό των κυλινδρικών συστοιχιών, σχηματίζονται 256, 512 ή 1024 δέσμες μέσα σε ένα επιλέξιμο από το χρήστη πλάτος σάρωσης από 5° έως 210° σε σχήμα βεντάλιας. Όλη η επεξεργασία και η εξαγωγή ανιχνεύσεων του πυθμένα με χρονική σήμανση, πραγματοποιείται εντός της κεφαλής του *sonar*. Το σύστημα απαιτεί πολύ μικρή παρέμβαση του χρήστη για την επίτευξη καθαρής και επαναλαμβανόμενης απλής βυθομετρίας. Η εγκατάσταση του υλισμικού είναι εξίσου εύκολη, συγκεκριμένα ένα καλώδιο τροφοδοτεί και συνδέει το *sonar* με μια μικρή μονάδα διεπαφής (*SIU: Sonar Interface Unit*). Η *SIU* συνδέεται με έναν υπολογιστή συλλογής δεδομένων μέσω ενός καλωδίου *Ethernet*.



Σχ. 6.4 Μονάδα διεπαφής *sonar*, [NORBIT user manual, 2021]

Fig. 6.4 Sonar Interface Unit (SIU), [NORBIT user manual, 2021]

Στον Πίνακα 6.3 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά, οι εφαρμογές και οι πρόσθετες επιλογές του *iWBMS sonar* της *NORBIT*, ενώ στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζονται οι τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος.

Χαρακτηριστικά	Εφαρμογές	Επιλογές
Sonar πολλαπλών δεσμών με ενσωματωμένο αδρανειακό σύστημα πλοήγησης	Βαθυμετρία ρηχών υδάτων	Προφιλόμετρο ηχητικής ταχύτητας (SVP)
Εύρος ζώνης 80 kHz	Έρευνες σε αγωγούς	Λογισμικό συλλογής δεδομένων (DCT)
Σταθεροποίηση διατοιχισμού (roll)	Έρευνες σε λίμνες, ποτάμια και εκβολές ποταμών	Άμεσα διαθέσιμες λύσεις έρευνας
Αποτελέσματα οπισθοσκέδασης (ένταση, πλευρική σάρωση, αποσπάσματα πλευρικής σάρωσης, υδάτινη στήλη)	Έρευνες σε λιμένες	Επιλογή μόνιμης εγκατάστασης στο κύτος
Πολυανίχνευση (multidetect)	Επιφανειακές εφαρμογές με μη επανδρωμένα οχήματα (AUV ή ASV)	Τοποθέτηση σε ράβδο και επιλογές μεταφοράς
Απλή διεπαφή Ethernet	Έρευνες σε παράκτιες περιοχές	Έκδοση 200 kHz
Ενσωματωμένος αισθητήρας ηχητικής ταχύτητας		Εξαγωγή ισχυρών αποτελεσμάτων οπισθοσκέδασης
Υδροδυναμικό κάλυμμα		Επιλογή στενής δέσμης
Περιλαμβάνεται βραχίονας στερέωσης		INS υψηλών προδιαγραφών
Επεξεργασία διαμορφωμένης συχνότητας (FM) & ρευματικού κύματος (CW)		Λογισμικό απόκτησης, επεξεργασίας δεδομένων και πλοήγησης
Υπερκαλύπτει την Special Order του Παγκόσμιου Οργανισμού Υδρογραφίας (IHO)		Επιλογή 1024 δεσμών
		Συμβατό με πακέτα λογισμικών όπως, DCT, HYPACK, Qinsy και άλλα

Πιν. 6.3 Τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος πολυδεσμικού ηχοβολιστή NORBIT iWBMS, [NORBIT datasheet, 2022]

Table 6.3 Technical specifications of the NORBIT iWBMS MBES, [NORBIT datasheet, 2022]

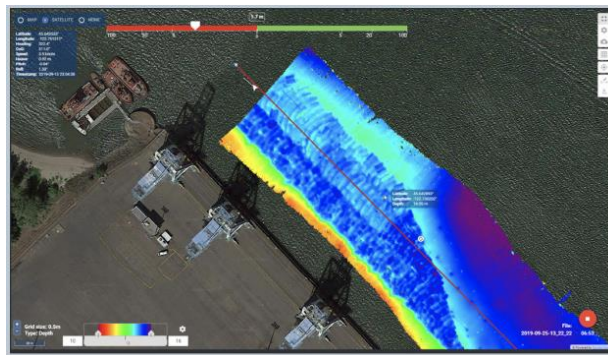
Τεχνικές Προδιαγραφές	
Κάλυψη σάρωσης	5-210° ευέλικτος τομέας (Για ρηγά νερά σύμφωνα με το Special Order του IHO >155°)
Ανάλυση του εύρους	<10 mm ακουστικό με 80 kHz εύρος ζώνης
Αριθμός δεσμών	256-512 (1024 HDS) EA & ED
Συχνότητα λειτουργίας	Καθοριστική συχνότητα 400 kHz (δυνατότητα συχνότητας 200-700 kHz)
Εύρος βάθους	0.2 – 275 m (>300m με 0.9° X 0.9°)
Ρυθμός ping	Έως 60 Hz, προσαρμόσιμο
Ακρίβεια ανύψωσης (heave)	2 cm ή 2% (διόρθωση πραγματικής ανύψωσης), 5 cm ή 5% (σε πραγματικό χρόνο)

<b>Βάρος</b>	8.5 kg (στην επιφάνεια), 3.5 kg (στο νερό)
<b>Διασύνδεση</b>	ETHERNET
<b>Μήκος καλωδίου</b>	STD 8 m, OPT: 2 m, 25 m και 50 m
<b>Θερμοκρασία λειτουργίας</b>	-4°C με +40°C (πάνω μέρος <i>sonar</i> -20°C με +55°C)
<b>Θερμοκρασία αποθήκευσης</b>	-20°C με +60°C

Πιν. 6.4 Τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος πολυδεσμικού ηχοβολιστή, [NORBIT user manual, 2021]  
Table 6.4 Technical specifications of the MBES, [NORBIT user manual, 2021]

#### 6.4 Λογισμικό Καταγραφής των Δεδομένων (*DCT*)

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των πρωτογενών βυθομετρικών δεδομένων, είναι σύστημα συλλογής δεδομένων (*DCT: Data Collection Tool*) της *NORBIT*. Πρόκειται για ένα βοηθητικό εργαλείο συλλογής δεδομένων που αποσκοπεί στην απλοποίηση των τυποποιημένων εργασιών βυθομετρικής μελέτης. Το γενικό πλάνο της βαθυμετρικής μελέτης εμφανίζεται σε ένα πρόγραμμα περιήγησης στο διαδίκτυο, επιτρέποντας γρήγορη εκτίμηση της κάλυψης και της ποιότητας των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο κατά την εκτέλεση της έρευνας. Το *DCT* μπορεί να λειτουργήσει σε συσκευή πλοήγησης με οθόνη αφής, σε *tablet*, σε *smartphone* ή σε υπολογιστή από ένα μόνο άτομο. Παρέχει μια σαφή, εύχρηστη διεπαφή με ελάχιστες ρυθμίσεις και το επίπεδο παρέμβασης του χρήστη σε αυτές είναι χαμηλό. Αυτό σημαίνει ότι ο χειριστής δεν απαιτείται να είναι κάποιος ειδικός στις έρευνες. Ο χρήστης μπορεί να καταγράφει δεδομένα χρησιμοποιώντας ένα απλό κουμπί *Start / Stop*. Χρησιμοποιώντας το γνωστό μορφότυπο *.s7k*, τα δεδομένα καταγράφονται με οριζόντιες συντεταγμένες στο σύστημα αναφοράς της ναυσιπλοΐας σε πραγματικό χρόνο και με βάθος μετρούμενο κάτω από το *sonar*, με όλες τις μονάδες σε μέτρα. Τα δεδομένα μπορούν να τροποποιηθούν στο λογισμικό μετα-επεξεργασίας σε οποιοδήποτε σύστημα συντεταγμένων/προβολή απαιτείται.

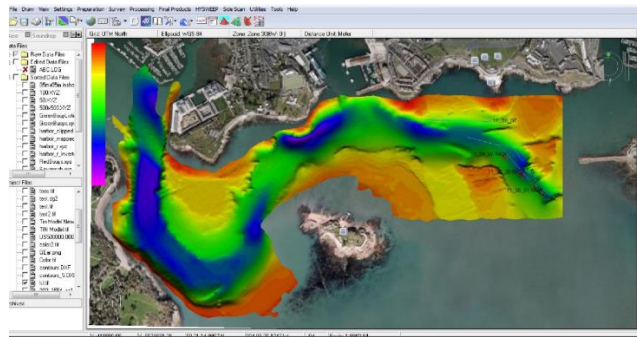


Σχ. 6.5 Λογισμικό NORBIT DCT, [DCT user guide]  
Fig. 6.5 NORBIT DCT software, [DCT user guide]

## 6.5 Λογισμικό Επεξεργασίας των Δεδομένων (HYPACK)

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των υδρογραφικών δεδομένων και την εξαγωγή των τελικών προϊόντων, είναι το *HYPACK*, της ομώνυμης εταιρίας. Αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση υδρογραφικών εργασιών. Σχεδιάστηκε για να διευκολύνει τις υδρογραφικές εργασίες, με περιβάλλον λογισμικού που είναι απλό και εύκολο στη χρήση. Το *HYPACK* παρέχει τα εργαλεία που απαιτούνται για τον σχεδιασμό, την απόκτηση και την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων της μελέτης και τη δημιουργία των τελικών προϊόντων που απαιτούνται. Συγκεκριμένα, διαθέτει τα εργαλεία για τη παραγωγή ισοβαθών, τον υπολογισμό όγκων, την δημιουργία μωσαϊκών πλευρικής σάρωσης και τη δημιουργία ηλεκτρονικών χαρτών (*ENC: Electronic Navigation Chart*). Συνεργάζεται με πάνω από 200 αισθητήρες, όπως: όλοι οι τύποι των δορυφορικών δεκτών (*GNSS*), αδρανειακά συστήματα, ηχοβολιστικά συστήματα (*echo sounders*), πλευρικά *sonar* και υποβρύχιους αισθητήρες απεικόνισης του θαλάσσιου πυθμένα, μαγνητόμετρα, αισθητήρες ταχύτητας κ.ά. Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα του λογισμικού *HYPACK* είναι τα εξής:

- Εύχρηστος σχεδιασμός έρευνας για τη δημιουργία γραμμών πλεύσης, με υποστήριξη παγκόσμιων συστημάτων αναφοράς.
- Εμφάνιση πλοήγησης σε πραγματικό χρόνο και υποστήριξη του απομακρυσμένου πηδαλιούχου με προβολή της έρευνας και σε άλλη οθόνη.
- Εργαλεία επεξεργασίας επιτρέπουν τον απλούστερο καθαρισμό των δεδομένων, με χειροκίνητα και αυτόματα φίλτρα.
- Τα αρχεία δεδομένων του *HYPACK* εξάγονται εύκολα σε *XYZ*, *CAD*, *DXF* και σε δεκάδες άλλες μορφές.
- Τέλος, το λογισμικό *HYPACK*, είναι εύκολο στη ρύθμιση, διαμορφώσιμο από τον χρήστη και επιτρέπει τη σύνδεση με σχεδόν οποιονδήποτε σύγχρονο αισθητήρα.



Σχ. 6.6 Λογισμικό HYPACK, [HYPACK user manual, 2023]

Fig. 6.6 HYPACK software, [HYPACK user manual, 2023]

## 6.6 Προσαρμογή Εξοπλισμού στο Σκάφος

Η βυθομετρική αποτύπωση τμήματος του λιμένα της Αλεξανδρούπολης, διεξήχθη με τη χρήση ειδικά διαμορφωμένου υδρογραφικού σκάφους. Το σκάφος αποτελεί τη θαλάσσια πλατφόρμα προσαρμογής του συνόλου του βυθομετρικού εξοπλισμού, ενώ διαθέτει τα μέσα για γρήγορη και ευέλικτη πλοήγηση σε παράκτιες περιοχές. Στον πίνακα 6.5 αναφέρονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του σκάφους.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Ολικό μήκος	7.80 m
Πλάτος	2.40 m
Βύθισμα	0.75 m
Τύπος εγκατάστασης Multibeam	Πλευρικός (Side Mount)
Τύπος εγκατάστασης IMU	Πλευρικός (Side Mount – Ενσωματωμένο με Multibeam)

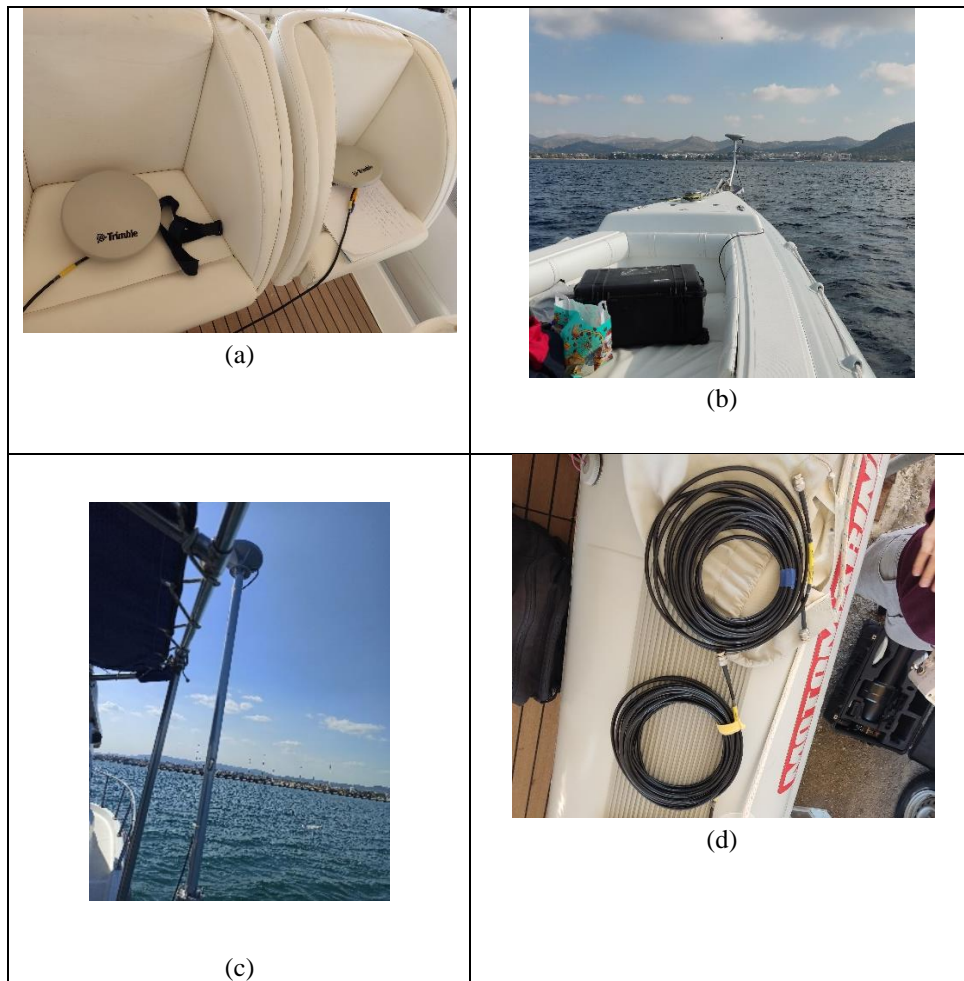
Πιν. 6.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά του ερευνητικού σκάφους, [Metrica]  
Table 6.5 Technical features of the survey vessel, [Metrica]

Προκειμένου ο εξοπλισμός της υδρογραφικής μελέτης να λειτουργήσει, στο σκάφος τοποθετήθηκαν δύο μπαταρίες 100 A σταθερής παροχής ρεύματος 12 V, παράλληλα συνδεδεμένες μεταξύ τους (δηλαδή παρείχαν στο σύστημα συνδυαστική ένταση 200 A για την κάλυψη των αναγκών της βυθομετρικής αποτύπωσης). Οι μπαταρίες αυτές αποτέλεσαν πηγή σταθερού ρεύματος για τη μικρή μονάδα διεπαφής *sonar* (*SIU*), στην οποία συνδέεται και τροφοδοτείται ο εξοπλισμός του συστήματος πολυδесμικού ηχοβολισμού. Αναλυτικά, οι δύο κεραίες *GNSS* (κύρια και δευτερεύουσα), αφού τοποθετήθηκαν η κύρια σε βάση στην πλώρη του σκάφους και η δευτερεύουσα στην κορυφή ράβδους [βλέπε σχ. 6.8 (f)] που πακτώθηκε σε σταθερή μεταλλική βάση στην δεξιά πλευρά (*starboard*) του σκάφους [βλέπε σχ. 6.8 (g)], στη συνέχεια συνδέθηκαν μέσω καλωδίωσης με την *SIU* στις ειδικές θύρες με τις αναγραφές *Ant 1* και *Ant 2* αντίστοιχα.

Στη συνέχεια ο πολυδесμικός ηχοβολιστής της *NORBIT (iWBMS)*, με τη χρήση έξι ανθεκτικών ειδικών κοχλιών που παρέχονται από το κατασκευαστή του ηχοβολιστή, σταθεροποιήθηκε στη βάση της ράβδου και τοποθετήθηκε στη δεξιά πλευρά του σκάφους. Ταυτόχρονα με την πρόσδεση του πολυδесμικού ηχοβολιστή στη ράβδο, μέσω δύο οπών συγκεκριμένων διαμέτρων, πραγματοποιήθηκε η τοποθέτηση του καλωδίου του *sonar* στο εσωτερικό της ράβδου, το οποίο συνδέει το *sonar* με την *SIU* και το τροφοδοτεί με ενέργεια. Τέλος, έλαβε χώρα η σύνδεση της υπολογιστικής μονάδας της υδρογραφικής μελέτης με την μονάδα διεπαφής του *sonar* (*SIU*) μέσω καλωδίου τύπου *Ethernet*, καθώς μέσω αυτής πραγματοποιήθηκε η εποπτεία και η διαχείριση της αποστολής.

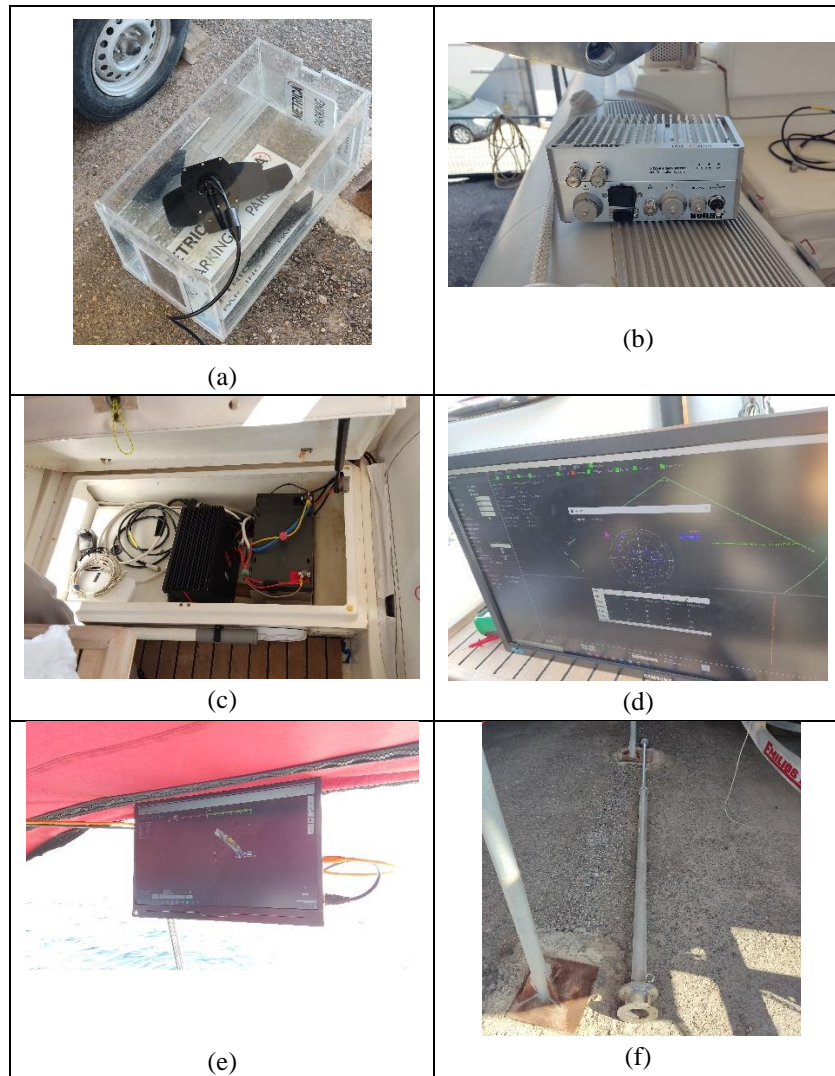


Σχ. 6.7 Γενική άποψη και διασύνδεση του εξοπλισμού υδρογραφικής αποτύπωσης, [NORBIT user manual, 2021]  
 Fig. 6.7 General view and Interconnection of hydrographic survey equipment, [NORBIT user manual, 2021]

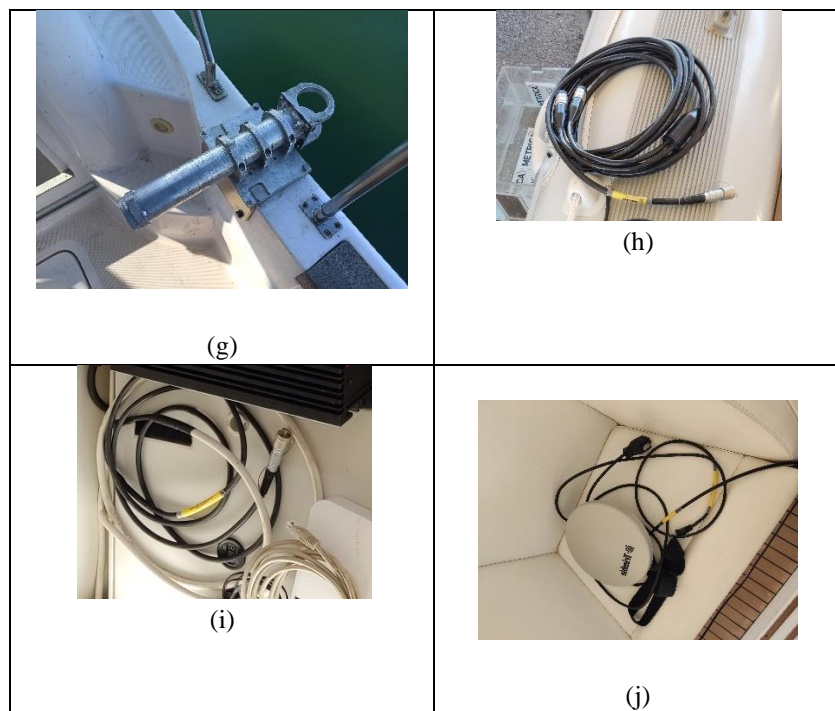


Σχ. 6.7 Το σύστημα εντοπισμού της υδρογραφικής αποτύπωσης και τα παρελκόμενά του  
 Fig. 6.7 The hydrographic survey's positioning system and its accessories

Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται το σύστημα εντοπισμού που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη υδρογραφική αποτύπωση, συμπεριλαμβανομένου και των απαραίτητων παρελκόμενων για την ομαλή λειτουργία του. Το βασικό τμήμα του συστήματος εντοπισμού, αποτελούν οι δύο κεραίες GNSS (μία κύρια και μία δευτερεύουσα), μαζί με την αδρανειακή μονάδα που βρίσκεται ενσωματωμένη στον ηχοβολιστή [βλέπε σχ. 6.7 (a)]. Η κύρια κεραία εγκαθίσταται σε μεταλλική βάση στην πλώρη του σκάφους [βλέπε σχ. 6.7 (b)], ενώ η δευτερεύουσα κεραία σε μεταλλική ράβδο πλευρικά του σκάφους [βλέπε σχ. 6.7 (c)]. Οι δύο αυτές κεραίες, συνδέονται με το σύστημα βυθομέτρησης μέσω δύο καλωδίων που ενώνονται στη μονάδα διεπαφής του *sonar* [βλέπε σχ. 6.7 (d)].

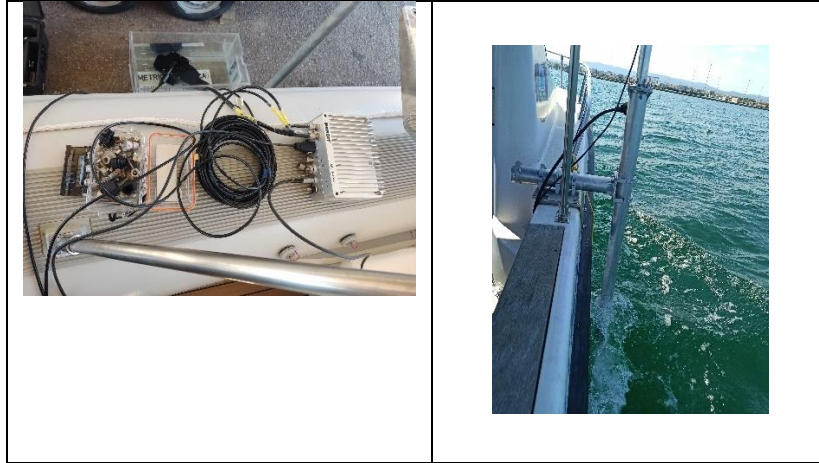






Σχ. 6.8 Το σύστημα βυθομέτρησης της υδρογραφικής αποτύπωσης και τα παρελκόμενά του  
 Fig. 6.8 The hydrographic survey's bathymetry system and its accessories

Στο Σχήμα 6.8 αναδεικνύεται το σύστημα βυθομέτρησης που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη υδρογραφική αποτύπωση, συμπεριλαμβανομένου και των απαραίτητων παρελκόμενων για την ομαλή λειτουργία του. Πρωτεύον στοιχείο του συστήματος βυθομετρίας, αποτελεί ο πολυδεσμικός ηχοβολιστής (*NORBIT iWBMS*) με τον οποίο συλλέγονται τα βυθομετρικά δεδομένα της περιοχής μελέτης [βλέπε σχ. 6.8 (a)]. Συνδέεται με τη μονάδα διεπαφής του *sonar* (*SIU*) [βλέπε σχ. 6.8 (b)] μέσω ειδικού καλωδίου [βλέπε σχ. 6.8 (h)], με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του και την διανομή πληροφοριών χρόνου και βυθομετρικών δεδομένων με το λογισμικό καταγραφής δεδομένων. Η μονάδα διεπαφής του *sonar* με τη σειρά της, μέσω ειδικού καλωδίου [βλέπε σχ. 6.8 (i)], συνδέεται με τις δύο μπαταρίες 100 A/ 12 V [βλέπε σχ. 6.8 (c) δεξιά], ώστε να διαμοιράσει την ενέργεια σε όλα τα μέρη του συστήματος (ηχοβολιστή, υπολογιστική μονάδα, κεραιές *GNSS*, οθόνες κ.λπ.). Η υπολογιστική μονάδα του συστήματος βυθομέτρησης [βλέπε σχ. 6.8 (c) αριστερά], διαχειρίζεται την εποπτεία της υδρογραφικής αποτύπωσης. Ο χειρισμός των λειτουργιών του *sonar* και του λογισμικού καταγραφής δεδομένων, πραγματοποιείται μέσω της διασύνδεσης καλωδίου *ethernet* [βλέπε σχ. 6.8 (j)] μεταξύ της υπολογιστικής μονάδας και της μονάδας διεπαφής του *sonar*. Η ρύθμιση των παραμέτρων του ηχοβολιστή και η παρακολούθηση της καταγραφής των δεδομένων γίνεται από μία οθόνη [βλέπε σχ. 6.8 (d)], ενώ η πορεία του σκάφους και η κάλυψη των τμημάτων της περιοχής μελέτης γίνεται από άλλη οθόνη [βλέπε σχ. 6.8 (e)].



Σχ. 6.9 Διασύνδεση όλων των συστημάτων εντοπισμού και βυθομέτρησης στη μονάδα διεπαφής του *sonar* για την πραγματοποίηση της υδρογραφικής αποτύπωσης (αριστερά). Ολοκληρωμένη πάκτωση της μεταλλικής ράβδου (που φέρει στο κάτω μέρος τον ηχοβολιστή) στη σταθερή βάση και πόντισή της στο νερό για την έναρξη της αποτύπωσης (δεξιά)

Fig. 6.9 Interconnection of the positioning and bathymetry systems to the sonar interface unit for the purposes hydrographic surveying (left). Installing the metal rod (carrying the sonar) on the fixed baseplate and placing it into the water to initiate the survey (right)

## 7. ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ

### 7.1 Συνθήκες Ολοκλήρωσης της Βυθομετρικής Μελέτης

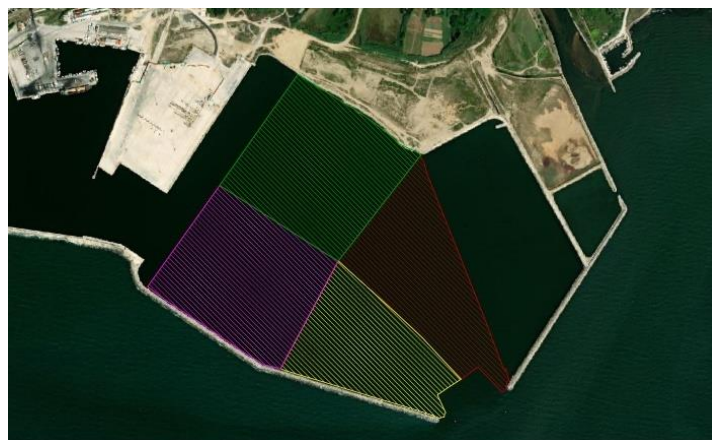
Το σύνολο των εργασιών βυθομέτρησης για τη περιοχή του λιμένα της Αλεξανδρούπολης ολοκληρώθηκε εντός τεσσάρων ημερών. Η επιλογή της ημέρας έναρξης των μετρήσεων καθορίστηκε σε ακολουθία της ολοκλήρωσης των απαραίτητων εταιρικών και λιμενικών διαδικασιών αναλογικά με την καταλληλότητα των μετεωρολογικών συνθηκών. Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι μέσες μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν ανά ημέρα κατά την διάρκεια των βυθομετρικών μετρήσεων.

Ημέρα	Μέση Τιμή Θερμοκρασίας (°C)	Μέση Τιμή Έντασης Ανέμου (Km/h)	Επικρατούν Άνεμος
Τετάρτη 06/07/2022	26.9	9.6	Μεταβλητοί
Πέμπτη 07/07/2022	26.8	10.7	SW-W
Παρασκευή 08/07/2022	26.1	11.2	N-NE
Σάββατο 09/07/2022	24.0	17.4	N-NE

Πιν. 7.1 Μετεωρολογικές συνθήκες ανά ημέρα βυθομετρήσεων, [Μετεωρολογικός Σταθμός Αερολιμένα Αλεξανδρούπολης]

Table 7.1 Meteorological conditions per sounding day, [Meteorological Station of Alexandroupolis Airport]

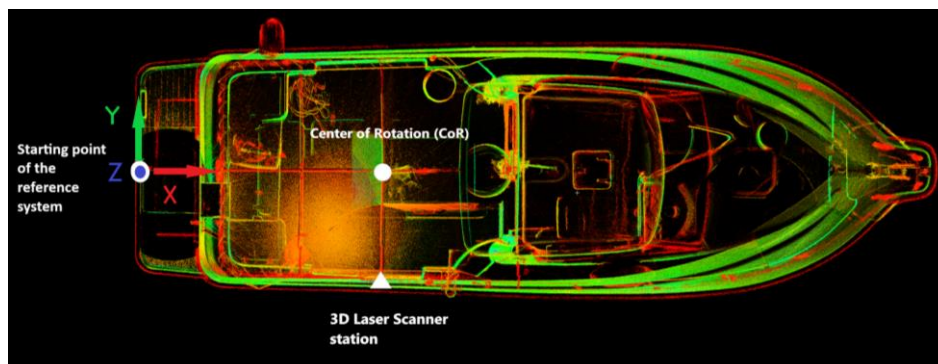
Η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε τέσσερα τμήματα τα οποία αποτυπώθηκαν σε τέσσερις διαφορετικές ημέρες (6,7,8,9 Ιουλίου 2022). Λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούσαν στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης και του χρονικού προγράμματος των υπεύθυνων της βυθομετρικής μελέτης, χωρίστηκε στα συγκεκριμένα τμήματα η βυθομετρική αποτύπωση ώστε να ολοκληρωθεί στο επιθυμητό χρονικό διάστημα. Στο Σχήμα 7.1, φαίνονται τα τμήματα στα οποία χωρίστηκε η περιοχή μελέτης και οι ημερομηνίες στις οποίες πραγματοποιήθηκε το καθένα από αυτά είναι οι εξής: το πράσινο τμήμα της περιοχής μελέτης μετρήθηκε στις 06/07/2022, το κόκκινο τμήμα μετρήθηκε στις 07/07/2022, το κίτρινο τμήμα μετρήθηκε στις 08/07/2022 και το μωβ τμήμα μετρήθηκε στις 09/07/2022.



Σχ. 7.1 Τμήματα περιοχής μελέτης μελέτης ανά ημέρα βυθομετρήσεων  
 Fig. 7.1 Segments of the survey area per sounding day

## 7.2 Διαδικασία Μετρήσεων

Πριν την έναρξη των μετρήσεων και την τοποθέτηση των συστημάτων της βυθομέτρησης στο υδρογραφικό σκάφος, διενεργήθηκε τρισδιάστατη σάρωση του σκάφους της υδρογραφικής μελέτης για την εύρεση του κέντρου βάρους του (*CoG: Center of Gravity*). Με την αξιοποίηση του τρισδιάστατου σαρωτή Laser *Leica RTC360* πραγματοποιήθηκε η σάρωση των όψεων του σκάφους (πίσω όψη, πλευρική όψη, άνω όψη), από την οποία προέκυψε νέφος σημείων για το σκάφος. Μέσω του νέφους σημείων και με τη χρήση διάφορων βαριών αντικειμένων που τοποθετήθηκαν στην πλώρη και στην πρύμνη του σκάφους, προσδιορίστηκε με ακρίβεια το σημείο στροφής του σκάφους. Το σημείο αυτό θεωρείται ως το κέντρο βάρους του σκάφους. Η διαδικασία αυτή συνέβαλε στην μέτρηση των αποκλίσεων του συστήματος του πολυδεδεσμικού ηχοβολιστή από το κέντρο βάρους του σκάφους για την διόρθωση των μετρούμενων βαθών, με αφετηρία του συστήματος ένα σημείο στην πρύμνη του σκάφους που βρίσκεται σε κοινό άξονα με το σημείο του κέντρου βάρους του σκάφους [βλέπε σχήμα 7.2].



Σχ. 7.2 Τρισδιάστατη αποτύπωση του σκάφους μελέτης, [METRICA]  
 Fig. 7.2 3D model of the survey vessel, [METRICA]

Το σύστημα αναφοράς του σκάφους, έχει ως θετικές τιμές στον άξονα X εκείνες με κατεύθυνση προς την πλώρη του σκάφους, έχει ως θετικές τιμές στον άξονα Y εκείνες με κατεύθυνση προς την αριστερή πλευρά του σκάφους και ως θετικές τιμές στον άξονα Z εκείνες με κατεύθυνση προς το ζενίθ.

Στη συνέχεια οι εργασίες επικεντρώθηκαν στην προετοιμασία του υδρογραφικού σκάφους για την πραγματοποίηση των βυθομετρικών μετρήσεων. Αφού ο πολυδεσμικός ηχοβολιστής εγκαταστάθηκε σταθερά με πλευρική τοποθέτηση (*side mount*) σε ειδικά διαμορφωμένη βάση, ακολούθησαν οι διαδικασίες ελέγχου (*calibration*) και προσδιορισμού των αποκλίσεων (*offsets*) των αισθητήρων της βυθομετρίας από το κέντρο βάρους του σκάφους. Αρχικά, αφού ακινητοποιήθηκε κατά το δυνατό το σκάφος, διεξήχθη ο έλεγχος των ενδείξεων του πολυδεσμικού ηχοβολιστή (*bar check*). Πιο συγκεκριμένα, επιβεβαιώθηκαν οι ενδείξεις του βυθομέτρου και επαληθεύτηκαν με τη χρήση βυθομετρικής βολίδας. Ακόμη, τα αποτελέσματα του συστήματος GNSS και οι μετρήσεις του αισθητήρα ταχύτητας του ήχου υποβλήθηκαν σε έλεγχο και επαλήθευση ταυτόχρονα. Στην περίπτωση του αισθητήρα ταχύτητας του ήχου, οι μετρήσεις που προέρχονται από τον αισθητήρα του *sonar* συγκρίνονται με αυτές άλλου αισθητήρα π.χ. προφιλόμετρου ταχύτητας του ήχου. Δηλαδή συγκρίνεται ο επιφανειακός αισθητήρας ταχύτητας του ήχου που είναι ενσωματωμένος στον ηχοβολιστή, με το προφιλόμετρο ταχύτητας του ήχου ως προς τις κοινές μετρήσεις τους. Εάν η διαφορά μεταξύ τους υπερβαίνει το 1 m/s και οι συνθήκες σύγκρισης είναι παρόμοιες, τότε προσδιορίζεται ποιος από τους δύο αισθητήρες είναι αναξιόπιστος και αποστέλλεται για βαθμονόμηση στην εταιρία κατασκευής του.

Παράλληλα, τεκμηριώθηκε με τη χρήση γεωδαιτικού σταθμού το σύνολο των αποκλίσεων των αισθητήρων (αποκλίσεις από το κέντρο βάρους του σκάφους) και εντάχθηκαν στο λογισμικό διαχείρισης του πολυδεσμικού ηχοβολιστή *NORBIT GUI*, αλλά και στο λογισμικό επεξεργασίας των πρωτογενών βυθομετρικών δεδομένων *HYPACK*. Στον πίνακα 7.2, παρουσιάζονται οι μοχλοβραχίονες (*lever arms*) των επιμέρους τμημάτων του βυθομετρικού εξοπλισμού.

	X (+SB) m	Y (+FWD) m	Z (+DOWN) m
Vessel CoG	0.000	0.000	0.000
WBMS Reference Point (MBES)	-0.172	1.200	0.820
WBMS IMU	0.083	1.200	0.899
POSMV GPS Primary Antenna	0.000	1.200	-2.260

Πιν. 7.2 Μοχλοβραχίονες των επιμέρους τμημάτων του βυθομετρικού εξοπλισμού, [METRICA]  
Table 7.2 Level arms of the individual parts of the hydrographic equipment, [METRICA]

Ακολούθησε ο έλεγχος και ο καθορισμός του αζιμούθιου μέσω του συστήματος *GAMS* (*GNSS: Azimuth Measurement Subsystem*). Ειδικότερα, για να υπολογιστούν οι αρχικές συνθήκες πλευσης, το σκάφος πραγματοποίησε συγκεκριμένη πορεία. Κατά τη διάρκεια αυτής της πορείας, καθορίστηκε η βάση (*baseline*) ανάμεσα στην κύρια (*primary*) και τη δευτερεύουσα (*secondary*) κεραία. Με την τιμή της βάσης να είναι υπολογισμένη, το σύστημα μπορεί να καθορίσει το

αξιμούθιο του σκάφους με τη βοήθεια των καταγραφών φάσης των κεραιών, αντί της παραδοσιακής μεθόδου που χρησιμοποιεί γυροπυξίδες. Το σύστημα *GAMS* αποτελεί ουσιαστικά μια πυξίδα *GNSS* που ενσωματώνεται σε ένα συσχετισμένο φίλτρο *Kalman*, στο οποίο οι εκτιμήσεις της πορείας του *GNSS* συνδυάζονται με τις εκτιμήσεις της πορείας που παράγονται από τη δυναμική ευθυγράμμιση του *INS*. Το σύστημα *GAMS* είναι απαραίτητο καθώς παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού ακριβών εκτιμήσεων της πορείας του σκάφους, ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος και τη δυναμική του σκάφους. Στον Πίνακα 7.3 αναφέρονται οι παράμετροι που προκύπτουν από το *GAMS*.

X (+SB) m	Y (+FWD) m	Z (+DOWN) m	Separation m
-1.21	4.70	0.61	4.89

Πιν. 7.3 Παράμετροι *GAMS*, [METRICA]  
 Table 7.3 *GAMS* parameters, [METRICA]

Μετά την ολοκλήρωση του υπολογισμού της βάσης των δύο κεραιών, πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος του *patch test*. Ο συγκεκριμένος έλεγχος αποσκοπεί στον καθορισμό των γωνιακών αποκλίσεων μεταξύ του πολυδεσμικού ηχοβολιστή (μορφοτροπέα) και του συστήματος της αδρανειακής μονάδας (*POS MV*) και για αυτό το λόγο θεωρείται από τους σημαντικότερους ελέγχους για την προετοιμασία του εξοπλισμού της βυθομετρίας. Γενικά, εκτελέστηκαν τέσσερις έλεγχοι: του διατοιχισμού (*roll*), του προνευστασμού (*pitch*), της εκτροπής (*yaw*) και της χρονικής υστέρησης (*latency*). Για την διενέργεια των ελέγχων, απαιτείται η πλεύση με συγκεκριμένο τρόπο, ταχύτητα και συνθήκες πυθμένα, τα οποία αναφέρθηκαν αναλυτικότερα στις υποενότητες των διορθώσεων των γωνιακών αποκλίσεων (4.2.2α, 4.2.2β, 4.2.2γ, 4.2.2δ). Οι παράμετροι απόκλισης υπολογίζονται στο στάδιο της επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων και αποδίδονται στο σύνολο των μετρήσεων μέσω του λογισμικού *HYPACK*.

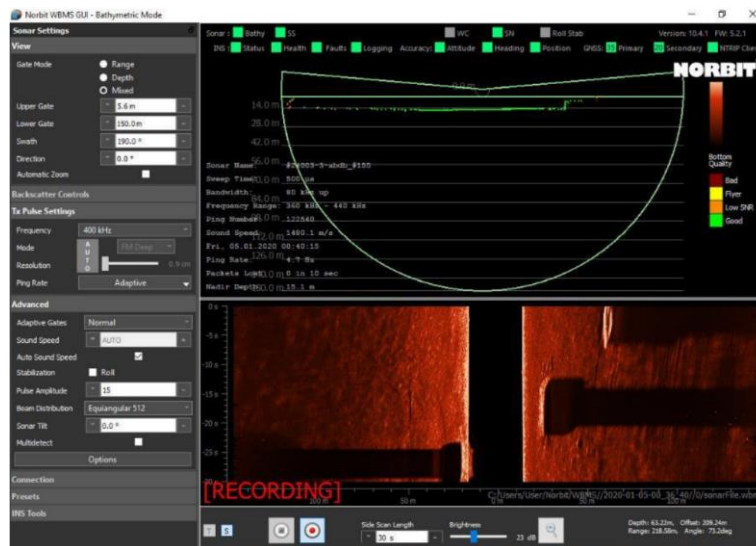
Αφότου πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητοι έλεγχοι και επαληθεύτηκε η σωστή λειτουργία του συστήματος, ξεκίνησε η βυθομετρική αποτύπωση της οριοθετημένης περιοχής του λιμένα της Αλεξανδρούπολης. Ο σχεδιασμός των γραμμών πλεύσης για την βυθομέτρηση της περιοχής ενδιαφέροντος του λιμένα βασίστηκε στο κριτήριο της καθολικής κάλυψης του θαλάσσιου πυθμένα και εξ αυτού πραγματοποιήθηκαν 150 γραμμές σάρωσης. Στο πίνακα 7.4, παραθέτονται οι βασικές ρυθμίσεις του πολυδεσμικού ηχοβολιστή που ακολουθήθηκαν κατά την βυθομετρία του θαλάσσιου πυθμένα.

Παράμετρος	Γενική Τιμή	Ειδικές Τιμές (Κρηπιδώματα – Ρηχές Ζώνες)
Συχνότητα	400 kHz	400 kHz / 700 kHz
Μέγιστη Γωνιακή Κάλυψης (Swath angle)	120°	100°
Στροφή Δεσμών (Beam Steering)	Όχι	Ναι
Σταθεροποίηση Δεσμών (Roll Stabilization)	Ναι	Ναι
Δειγματοληψία Πυθμένα	Equidistant (ίσες αποστάσεις μεταξύ των μετρούμενων σημείων)	Κυρίως Equiangular (ίσες γωνίες μεταξύ των μετρούμενων σημείων)
Πλήθος Δεσμών	512	512

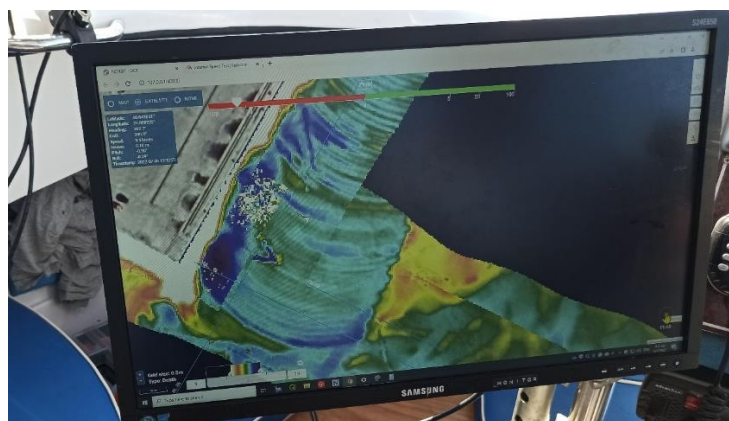
Πιν. 7.4 Τιμές παραμέτρων πολυδεσμικού ηχοβολιστή, [METRICA]  
 Table 7.4 Multibeam echo sounder parameter values, [METRICA]

Μέσα στα όρια της περιοχής όπου έλαβε χώρα η αποτύπωση, έγινε δειγματοληψία μετρήσεων χρησιμοποιώντας φορητό αισθητήρα μέτρησης της ταχύτητας του ήχου (SVP). Τα δεδομένα που προκύπτουν από τη μεταβολή της ταχύτητας του ήχου στο νερό αξιοποιούνται για την διόρθωση των βυθομετρικών δεδομένων, λόγω των διαφορετικών ταχυτήτων διάδοσης του ήχου καθ' ύψος της υδάτινης στήλης.

Η βασική λειτουργία του πολυδεσμικού ηχοβολιστή διαχειρίστηκε μέσω του λογισμικού *NORBIT WBMS GUI*, ενώ η συλλογή, ο έλεγχος, η προετοιμασία του πλάνου μετρήσεων της βυθομετρίας και η γενική άποψη των βυθομετρικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού *DCT* της *NORBIT*. Επιπλέον, μέσω του *DCT*, έγινε η επίβλεψη της πλοήγησης του σκάφους κατά μήκος των προσχεδιασμένων γραμμών σάρωσης.



Σχ. 7.3 Εργαλείο NORBIT WBMS GUI, [NORBIT user manual, 2021]  
 Fig. 7.3 NORBIT WBMS GUI tool, [NORBIT user manual, 2021]



Σχ. 7.4 Λογισμικό NORBIT DCT, [METRICA]

Fig. 7.4 NORBIT DCT software, [METRICA]

Τέλος, εκτός των βυθομετρικών εργασιών αποτύπωσης της περιοχής ενδιαφέροντος του λιμένα, πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω συμπληρωματικές εργασίες που πλαισίωσαν την μελέτη:

- Με τη χρήση κλασσικών τοπογραφικών μεθόδων και δορυφορικού δέκτη *GNSS*, αποτυπώθηκαν σημεία τοπογραφικών λεπτομερειών των κρηπιδωμάτων και της ακτογραμμής. Οι διαδικασίες αποτύπωσης των συγκεκριμένων τοπογραφικών στοιχείων, συντέλεσαν στην ορθή παρουσίαση των βυθομετρικών διαγραμμάτων και στον συσχετισμό και την συμπλήρωση της ήδη υπάρχουσας χαρτογραφικής πληροφορίας.
- Στο πλαίσιο αυτής της διαδικασίας ιδρύθηκαν τρία γεωδαιτικά σημεία αναφοράς (*CP1*, *CP2* και *CP3*) για την εκπλήρωση των αναγκών του ελέγχου και της αναγωγής των δεδομένων.

Στο Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες των γεωδαιτικών σημείων αναφοράς.

Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 87 (ΕΓΣΑ 87)	
Συντεταγμένες γεωδαιτικού σημείου <i>S 9001</i>	
Easting (m)	658158.2313
Northing (m)	4522855.1937
Height (m)	1.2851
Συντεταγμένες γεωδαιτικού σημείου <i>S 9002</i>	
Easting (m)	658108.1223
Northing (m)	4522815.0812
Height (m)	1.4682
Συντεταγμένες γεωδαιτικού σημείου <i>S 9003</i>	
Easting (m)	658192.8617
Northing (m)	4522872.8650
Height (m)	1.0578

Πιν. 7.5 Συντεταγμένες γεωδαιτικών σημείων αναφοράς *S 9001*, *S 9002*, *S 9003*, [METRICA]

Table 7.5 Coordinates of geodetic reference points *S 9001*, *S 9002*, *S 9003*, [METRICA]





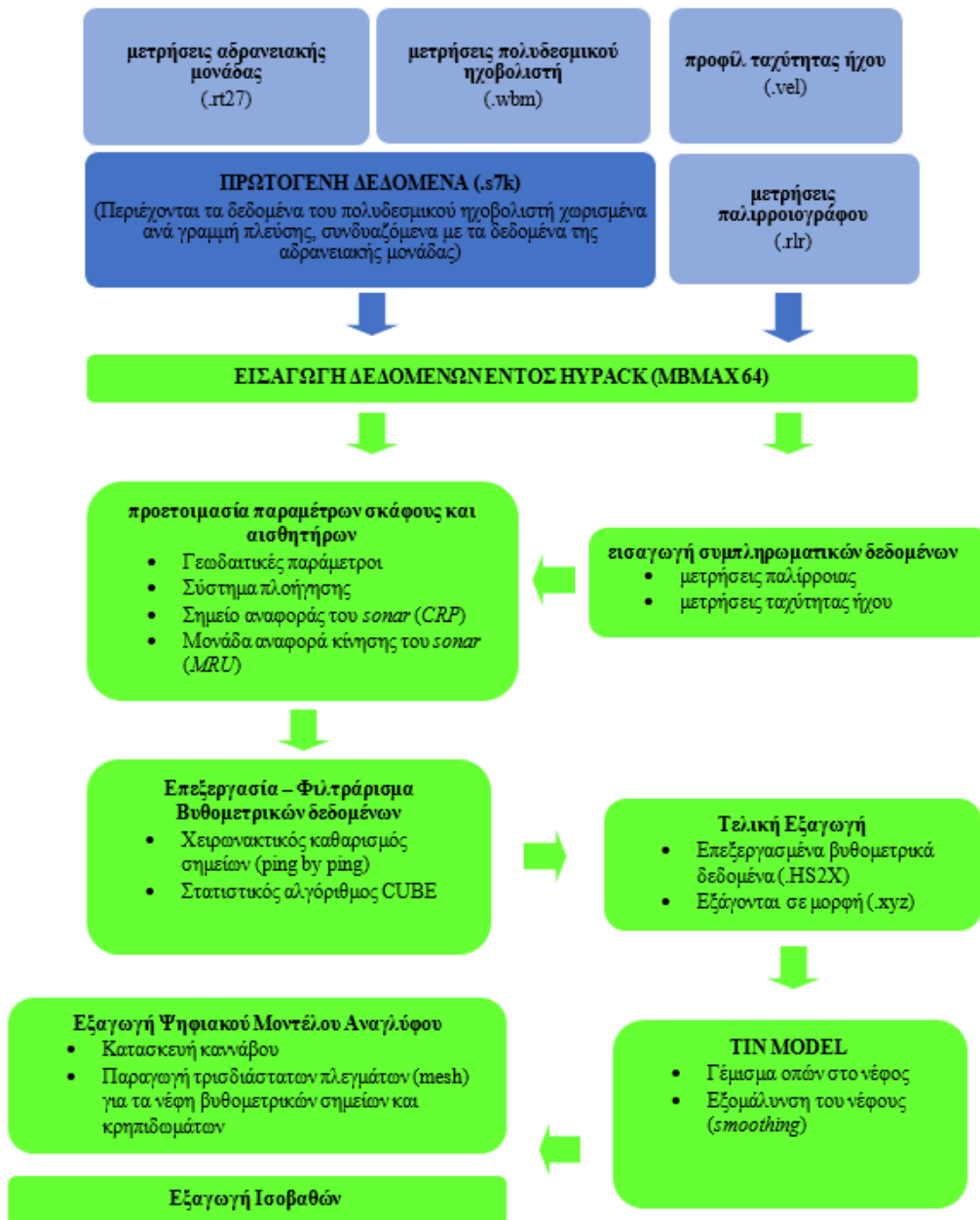
Σχ. 7.5 Τοπογραφικά σημεία λεπτομερειών και όρια κρηπιδωμάτων, [METRICA]  
 Fig. 7.5 Topographic waypoints and platform boundaries, [METRICA]



Σχ. 7.6 Γεωδαιτικά σημεία αναφοράς της αποτύπωσης των τοπογραφικών λεπτομερειών, [METRICA]  
 Fig. 7.6 Geodetic reference points of the survey of topographic details, [METRICA]

## 8. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

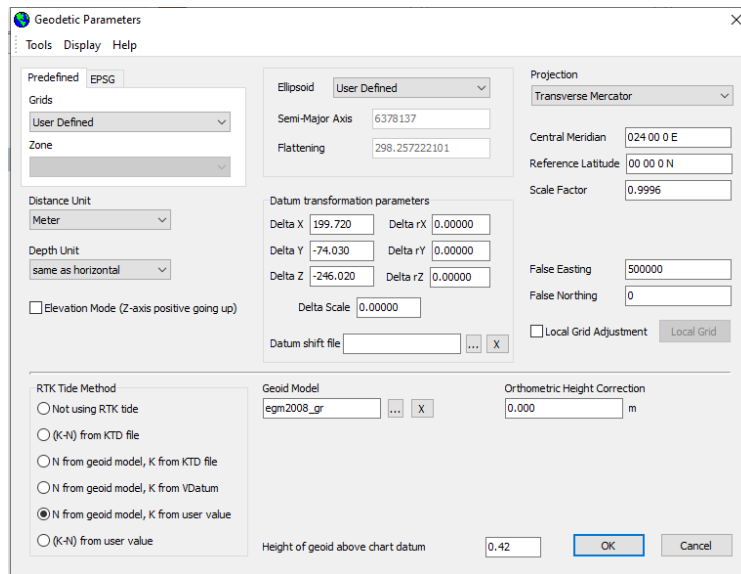
Μετά το πέρας της βυθομετρικής μελέτης, τα πρωτογενή δεδομένα που συλλέχθηκαν από τμήματα αποτύπωσης του λιμένα της Αλεξανδρούπολης, εισήχθησαν στο λογισμικό *HYPACK* προς επεξεργασία. Στο Σχήμα 8.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των κύριων εργασιών για την εκπόνηση της βυθομετρικής αποτύπωσης.



Σχ. 8.1 Διάγραμμα ροής των εργασιών μια ολοκληρωμένης βυθομετρικής αποτύπωσης  
Fig. 8.1 Flowchart of the workflow of an integrated bathymetric survey

## 8.1 Πρώτο Στάδιο Επεξεργασίας των Δεδομένων (γεωδαιτικές παράμετροι, SVP, Patch Test)

Πριν από την εισαγωγή των πρωτογενών δεδομένων στο λογισμικό επεξεργασίας της βυθομετρίας (*HYPACK*), ρυθμίστηκαν κατάλληλα οι γεωδαιτικές παράμετροι ώστε να αντανακλούν με εκείνες των δεδομένων της μελέτης.



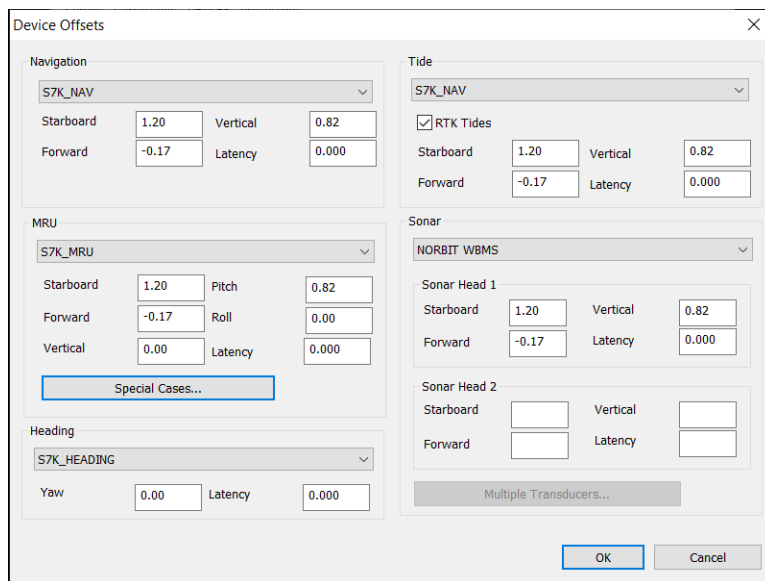
Σχ. 8.2 Παράθυρο ρύθμισης γεωδαιτικών παραμέτρων στο λογισμικό HYPACK

Fig. 8.2 Geodetic parameters setting window in HYPACK software

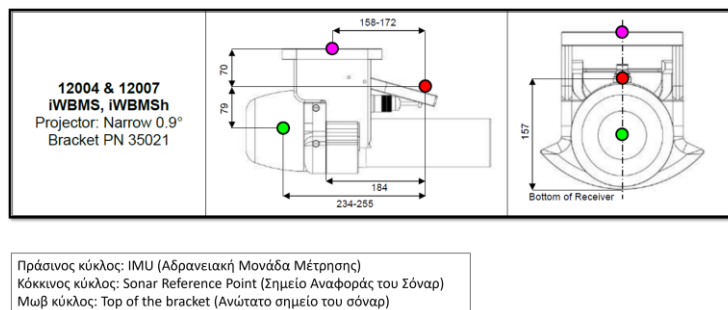
Συγκεκριμένα, όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 8.2, ρυθμίστηκαν σε μονάδες μέτρησης των αποστάσεων και βάθους, καθώς σε αυτές τις μονάδες μετρήθηκαν και στο λογισμικό συλλογής των δεδομένων (*DCT*). Μια από τις πιο βασικές διορθώσεις των δεδομένων αποτελούν εκείνες των δεδομένων παλίρροιας, που διενεργούνται με τη μέθοδο δορυφορικού εντοπισμού *RTK Tide*. Για αυτό το λόγο, το ύψος του γεωειδούς πάνω από το ελλειψοειδές αναφοράς (*N*) και το ύψος του γεωειδούς πάνω από το σύστημα αναφοράς (*K*) προσδιορίζονται από το γεωδαιτικό μοντέλο και το χρήστη αντίστοιχα. Για τη συγκεκριμένη μελέτη, το ύψος του γεωειδούς από το σύστημα αναφοράς ορίστηκε στα 0.42 m (μέση στάθμη). Ακόμη, επιλέχθηκε το γεωδαιτικό μοντέλο *EGM2008* και η Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή για τις ανάγκες της βυθομετρίας. Τέλος, καθορίζονται οι παράμετροι μετασχηματισμού του συστήματος αναφοράς, ώστε το παγκόσμιο σύστημα αναφοράς *WGS84* στο οποίο διενεργήθηκε η μελέτη να μεταφερθεί στο ΕΓΣΑ '87, όπου χρησιμοποιείται στον ελλαδικό χώρο.

Στη συνέχεια, ρυθμίζονται οι αποκλίσεις των συστημάτων της πλοήγησης, της μονάδας αναφοράς της κίνησης (*MRU: Motion Reference Unit*), της παλίρροιας και του πολυδευσμικού ηχοβολιστή, που είναι ενσωματωμένα στο *sonar* της *NORBIT* και γι' αυτό χαρακτηρίζονται από

τις ίδιες αποκλίσεις, από το κέντρο βάρους (*CoG*) του σκάφους για κάθε μέρα μετρήσεων. Αυτό συμβαίνει καθώς κάθε μέρα μετρήσεων το σύστημα του πολυδεσμικού ηχοβολιστή εγκαθίσταται και απεγκαθίσταται από το υδρογραφικό σκάφος και συνεπώς πρέπει να μετράται η απόσταση του σημείου αναφοράς του *sonar* (*SRP: Sonar Reference Point*) από το κέντρο βάρους του σκάφους πριν την έναρξη των μετρήσεων, εφόσον σε αυτό το σημείο αναφοράς θα ανάγονται τα μετρούμενα βάθη. Να σημειωθεί εδώ ότι η κατακόρυφη απόκλιση μετράται από την επιφάνεια του νερού. Άρα οι μετρήσεις των αποκλίσεων του οργάνου από το κέντρο βάρους του σκάφους στους τρεις άξονες (*X,Y,Z*), μεταφέρονται στο λογισμικό *HYPACK* το οποίο έχει ως σύμβαση προσήμων θετικά προς τα εμπρός (*Forward*), θετικά προς τα δεξιά (*Starboard*) και θετικά προς τα κάτω (*Down*) σε αντίθεση με το *NORBIT GUI* που έχει ως σύμβαση προσήμων θετικά προς τα πάνω (*Up*). Άρα πρέπει να γίνεται προσεκτική μεταφορά αυτών των τιμών, ώστε η κατακόρυφη απόκλιση που θεωρείται αρνητική στο *NORBIT GUI* να θεωρηθεί θετική στο *HYPACK*.

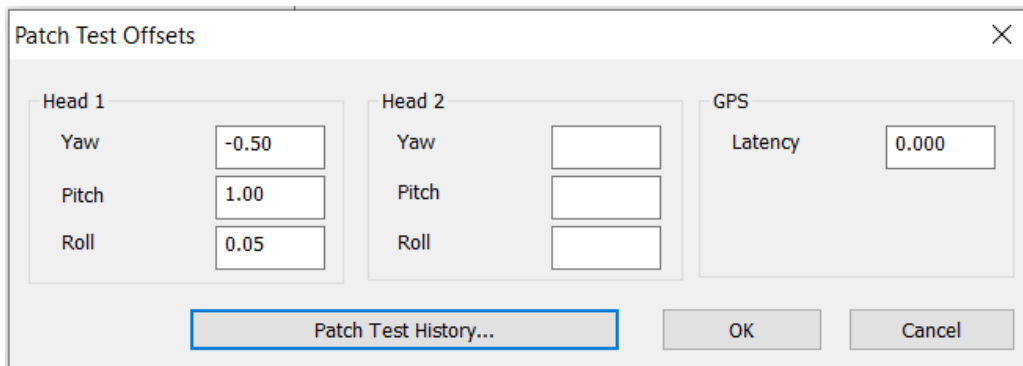


Σχ. 8.3 Παράθυρο ρύθμισης αποκλίσεων των μετρητικών οργάνων στο λογισμικό *HYPACK*  
 Fig. 8.3 Device offsets window of measuring equipment in *HYPACK* software



Σχ. 8.4 Σημεία αναφοράς του πολυδεσμικού ηχοβολιστή *NORBIT iWBMS*, [*NORBIT user manual*]  
 Fig. 8.4 Reference points of the *NORBIT iWBMS* multibeam echosounder, [*NORBIT user manual*]

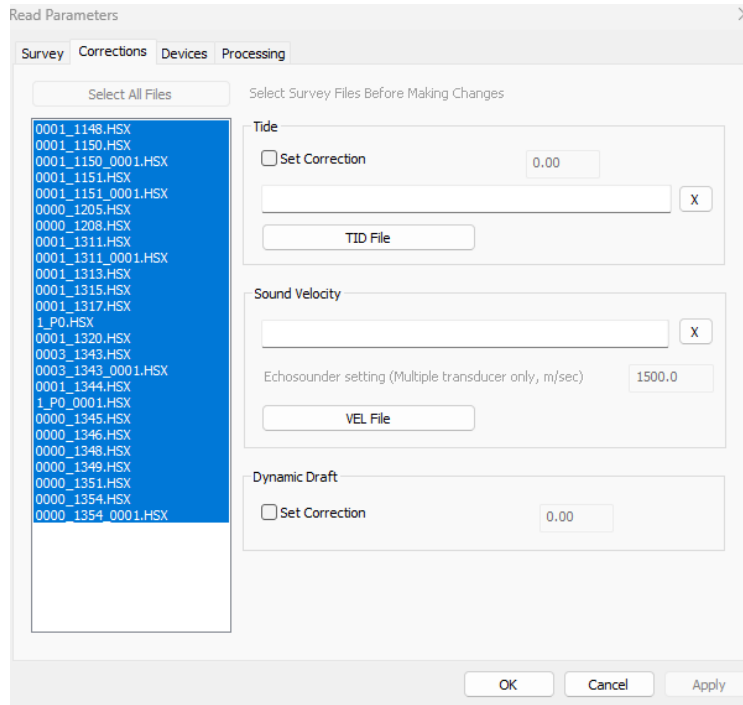
Ταυτόχρονα με τις γεωδαιτικές παραμέτρους και τις αποκλίσεις του οργάνου από το κέντρο βάρους του σκάφους πριν την εισαγωγή των πρωταρχικών βυθομετρικών δεδομένων στο *HYPACK*, εισάγονται και οι αποκλίσεις των στροφών του σκάφους, που προκύπτουν από συγκεκριμένες γραμμές πλεύσης για κάθε ημέρα μετρήσεων, οι οποίες διενεργήθηκαν για την διόρθωση του διατοιχισμού (*roll*), του προνευστασμού (*pitch*) και της εκτροπής (*yaw*). Αυτές οι αποκλίσεις φανερώνουν την πραγματική «κατάσταση» του σκάφους στους τρεις άξονες (*X,Y,Z*) ώστε τα βάθη των γραμμών πλεύσης να διορθώνονται προτού εισαχθούν για επεξεργασία.



Σχ. 8.5 Παράθυρο ρύθμισης των αποκλίσεων του *patch test* στο λογισμικό *HYPACK*

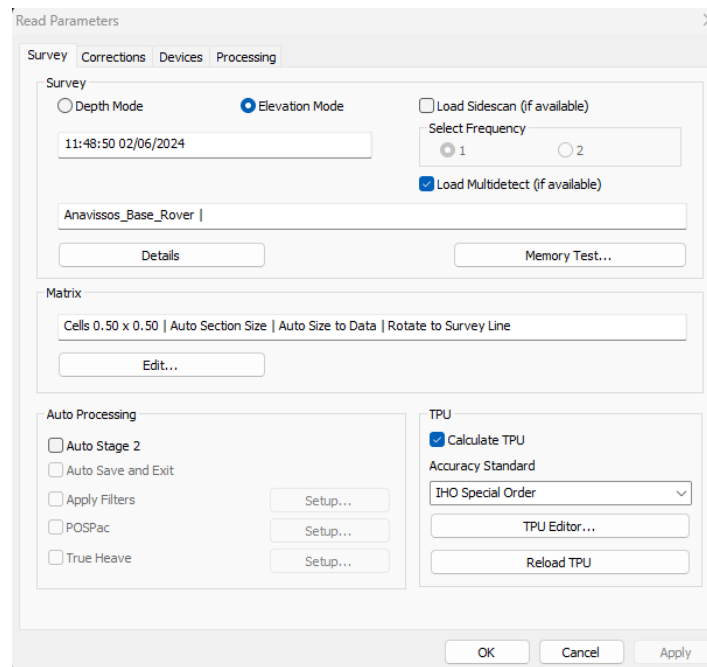
Fig. 8.5 Patch test offsets window in *HYPACK* software

Παράλληλα με τα πρωτογενή δεδομένα του πολυδεσμικού ηχοβολιστή και της αδρανειακής μονάδας εισήχθησαν και τα αρχεία διόρθωσης της ταχύτητας του ήχου στο νερό (*Sound Velocity Correction files*), τα οποία περιέχουν τις μετρήσεις της ταχύτητας του ήχου σε διαφορετικά βάθη, διαφορετικές χρονικές στιγμές και θέσεις στην περιοχή μελέτης. Κατά τη φόρτωση πολλαπλών αρχείων ηχητικής ταχύτητας, το λογισμικό επεξεργασίας υπολογίζει τις παρεμβαλλόμενες τιμές με βάση την χρονική στιγμή ή τη χρονική στιγμή και τη θέση κάθε μέτρησης της ταχύτητας του ήχου στο νερό με τα βυθομετρικά δεδομένα των σαρώσεων. Τα συγκεκριμένα αρχεία χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση των ηχοβολισμών του *sonar*, με τις διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης του ήχου στην υδάτινη στήλη και προέρχονται από το αντίστοιχο λογισμικό του *SVP*. Με αυτόν τον τρόπο, τα προφίλ της ηχητικής ταχύτητας διορθώνουν τα βάθη των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο και κατά τη διάρκεια της μετα-επεξεργασίας των δεδομένων μέσω του λογισμικού *HYPACK* (συγκεκριμένα με το εργαλείο *HYSWEEP*).



Σχ. 8.6 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων παλίρροιας και ηχητικής ταχύτητας για τη διόρθωση των βυθομετρικών δεδομένων στο λογισμικό *HYPACK*

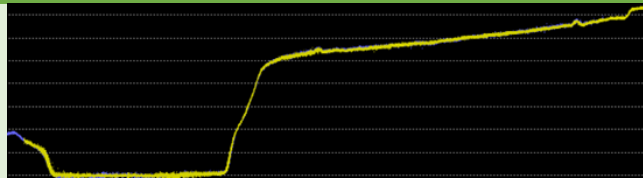
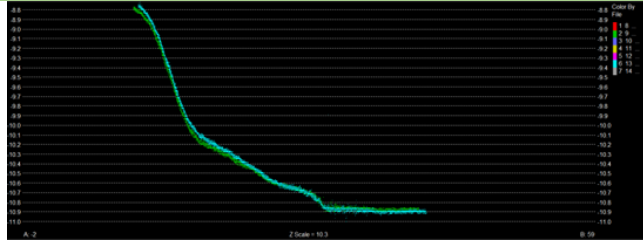
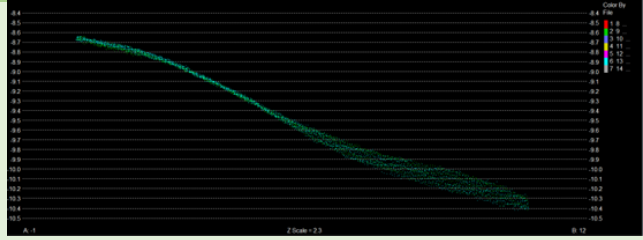
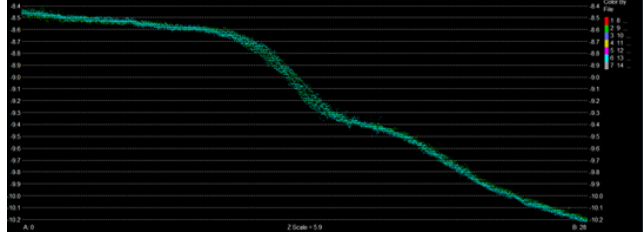
Fig. 8.6 Tide and sound velocity data input window for the correction of bathymetric data in *HYPACK* software



Σχ. 8.7 Παράθυρο εισαγωγής των πρωτογενών βυθομετρικών δεδομένων στο λογισμικό *HYPACK*

Fig. 8.7 Primary bathymetric data input window in *HYPACK* software

Τέλος, διεξήχθη ο έλεγχος των αποκλίσεων της «κατάστασης» του σκάφους (*latency, roll, pitch, yaw*), δηλαδή του *patch test*. Ο συγκεκριμένος έλεγχος είναι σημαντικός για τον καθορισμό των γωνιακών αποκλίσεων μεταξύ του πολυδευσμικού ηχοβολιστή (*MBES Transducer*) και του συστήματος της αδρανειακής μονάδας (*POS MV*). Οι παράμετροι απόκλισης υπολογίστηκαν και αποδόθηκαν στο σύνολο των δεδομένων εντός του λογισμικού *HYPACK (MBMAX 64)*. Πιο αναλυτικά, για κάθε έλεγχο *patch test* επιλέχθηκαν δύο γραμμές πλεύσης που πληρούν τις προϋποθέσεις της εκάστοτε γωνιακής απόκλισης και υπολογίστηκαν οι προσαρμογές των αποκλίσεων για την χρονική υστέρηση, τον διατοιχισμό, τον προνευστασμό και την εκτροπή. Αφού εκτελέστηκε κάθε δοκιμή μία φορά και εφαρμόστηκαν τα αποτελέσματα, εκτελείται κάθε δοκιμή ξανά έτσι ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια των υπολογισμών. Αυτό συμβαίνει καθώς οι πρώτες δοκιμές δεν είχαν το πλεονέκτημα των τιμών που παρήχθησαν πριν από αυτές. Οι σωστές τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από τον παραπάνω έλεγχο του *patch test*, εισάγονται στην καρτέλα των αποκλίσεων του λογισμικού επεξεργασίας (*HYPACK*). Η συγκεκριμένη διαδικασία διορθώνει μόνο τα επεξεργασμένα δεδομένα, ενώ τα ακατέργαστα πρωτογενή δεδομένα παραμένουν αναλλοίωτα.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ
Χρονική Υστέρηση (sec)	0.00	
Διατοιχισμός (degrees)	0.12	
Προνευστασμός (degrees)	1.50	
Εκτροπή (degrees)	-1.25	

Πιν. 8.1 Τιμές παραμέτρων *patch test* [HYPACK]  
 Table 8.1 Patch test parameters values [HYPACK]

## 8.2 Δεύτερο Στάδιο Επεξεργασίας των Δεδομένων (Εφαρμογή Φίλτρων και Αλγόριθμοι)

Σε επόμενο στάδιο ακολούθησε η επεξεργασία των βυθομετρικών δεδομένων και συγκεκριμένα το φιλτράρισμά τους από μετρήσεις με λανθασμένη βυθομετρική πληροφορία (βυθομετρικά σημεία). Ο καθαρισμός των δεδομένων και τα οποιαδήποτε φίλτρα, ρυθμίστηκαν απευθείας από το χρήστη (*manual*) και τα βυθομετρικά δεδομένα ελέγχθηκαν σχολαστικά με τη διαδικασία *ring by ring*, καθώς υπήρχαν αρκετά αντικείμενα και περιοχές ενδιαφέροντος στα οποία έπρεπε να δοθεί προσοχή ώστε να αποδοθούν με λεπτομέρεια στο πλαίσιο της μελέτης. Τέτοια αποτελούν τα ρηχά βυθομετρικά σημεία που συνιστούν τα κρηπιδώματα του λιμένα, τμήματα του πυθμένα με μικρό βάθος λόγω των φερτών υλικών που προέρχονται από τον ποταμό που εκβάλλει πλησίον του λιμένα της Αλεξανδρούπολης κ.ά. Η παραπάνω διαδικασία καθαρισμού των βυθομετρικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση διαφορετικών επιλογών οπτικοποίησης στο λογισμικό *HYPACK* (*sweep modules*, *cloud modules*), ώστε να φιλτραριστούν από τον θόρυβο (Σχήμα 8.7).

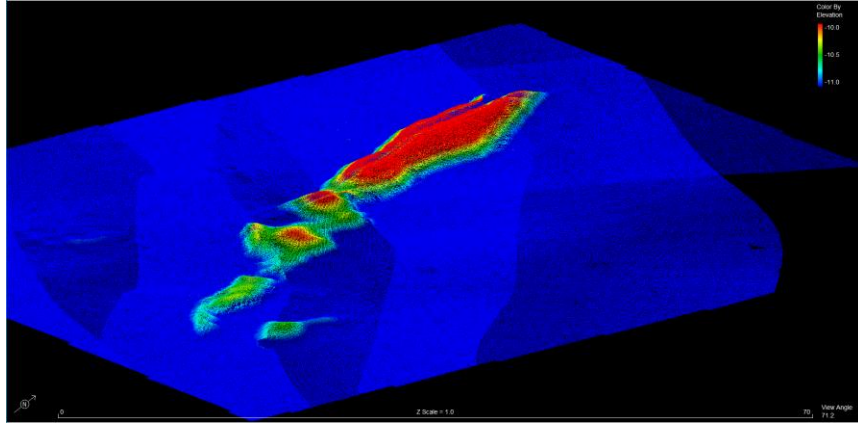


Σχ. 8.7 Παράδειγμα εξάλειψης θορύβου εντός *HYPACK*

Fig. 8.7 Example of noise elimination within *HYPACK*



Μια χαρακτηριστική περιοχή ενδιαφέροντος που εντοπίστηκε σε ένα τμήμα του λιμένα από την επικάλυψη των γραμμών πλεύσης και αιτιολογεί την επιλογή της χρονοβόρας διαδικασίας καθαρισμού των δεδομένων από τον χρήστη *ring by ring*, παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.8.



Σχ. 8.8 Απεικόνιση υποθαλάσσιου υψώματος εντός *HYPACK*  
Fig. 8.8 Illustration of an underwater mound within *HYPACK*

Πρόκειται για μια μία μικρή περιοχή με αρκετά ρηχότερο βάθος από το σύνολο του, η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη για λόγους ασφαλούς ναυσιπλοΐας. Πιθανότατα αυτός ο σχηματισμός εδάφους να προέκυψε είτε από ημιτελή εκχωμάτωση του λιμένα της Αλεξανδρουπόλης είτε από τη μεταφορά φερτών υλικών μέσω του ποταμού που εκβάλλει στην περιοχή.

Με την ολοκλήρωση του φιλτραρίσματος και του ελέγχου των βυθομετρικών δεδομένων από θορύβους, τα επεξεργασμένα πλέον δεδομένα με τη χρήση του αλγορίθμου *CUBE* (*Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator*) διορθώνονται ως προς το βάθος τους. Ο εκτιμητής συνδυασμένης αβεβαιότητας και βυθομετρίας (*CUBE*) εφαρμόζει αρχές στατιστικής ανάλυσης και μοντελοποίησης σε δεδομένα πολλαπλών δεσμών και παρέχει εκτιμήσεις αβεβαιότητας και βάθους σε μια διακριτοποιημένη επιφάνεια. Ο πρωταρχικός στόχος του αλγορίθμου είναι να χρησιμοποιήσει όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες από τα δεδομένα για να προσδιορίσει το πραγματικό βάθος σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής που ερευνάται, από τις θορυβώδεις εκτιμήσεις του βάθους αυτού (δηλ. τις σαρώσεις) και να ποσοτικοποιήσει την αβεβαιότητα της εκτίμησης του βάθους. Στο *HYPACK* τα μοντέλα *CUBE* υλοποιούνται στο πρόγραμμα *HYSWEEP EDITOR* και η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται σε τρία στάδια:

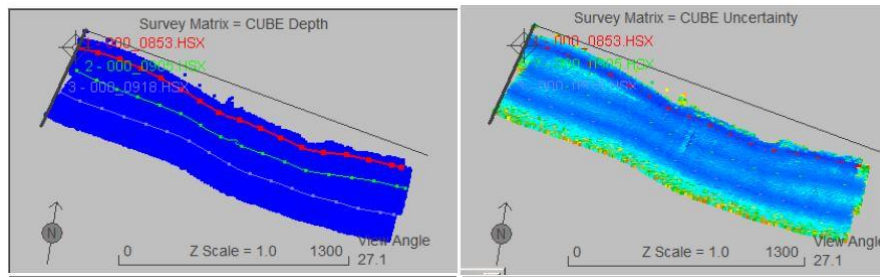
- Αβεβαιότητα: Το *CUBE* απαιτεί καλή εκτίμηση της αβεβαιότητας των ηχοβολισμών με βάση τις γνωστές δυνατότητες των αισθητήρων και το περιβάλλον.
- Φόρτωση δεδομένων στο μοντέλο *CUBE*: Κατά την εκκίνηση της λειτουργίας *CUBE* στο *HYSWEEP*, κάθε ηχοβολισμός που προστίθεται ελέγχεται σε σχέση με τους ηχοβολισμούς που έχουν ήδη συμπεριληφθεί, την υπάρχουσα εκτίμηση βάθους. Το αποτέλεσμα αυτής

της δοκιμής, ο παράγοντας *Bayes*, υποδεικνύει κατά πόσον η σάρωση συμφωνεί ή διαφωνεί με εκείνες που έχουν προηγηθεί. Εάν συμφωνεί, το *CUBE* ενημερώνει την εκτίμηση για να συμπεριλάβει τη σάρωση. Εάν δεν συμφωνεί, το *CUBE* δημιουργεί μια νέα, εναλλακτική εκτίμηση.

- Ανασκόπηση και επεξεργασία δεδομένων με τη χρήση του *CUBE depth* (υποθέσεις): Δίνεται η επιλογή για αποδοχή της αρχικής εκτίμησης βάθους του *CUBE* ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι υπολογισμοί ως οδηγός για περαιτέρω επεξεργασία.

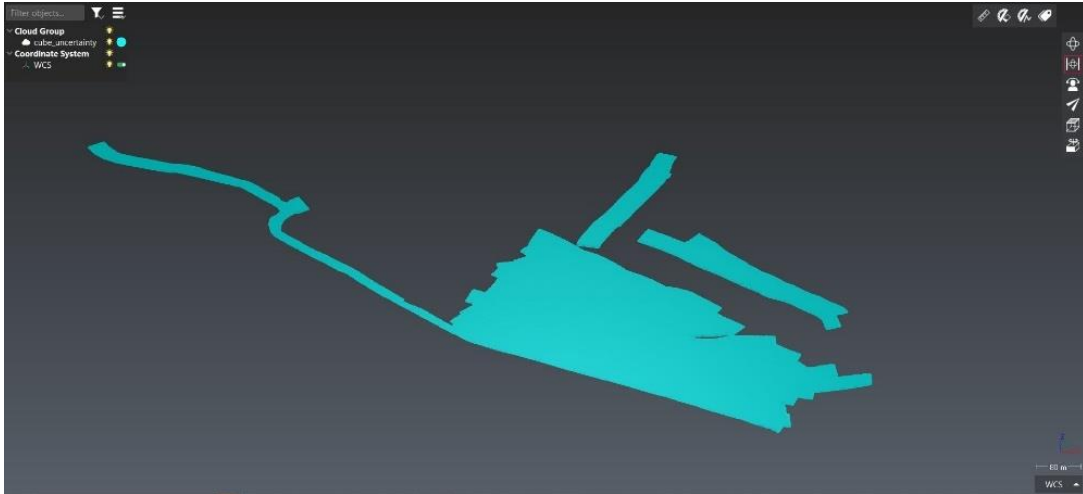
Για τις ανάγκες της βυθομετρικής μελέτης χρησιμοποιήθηκαν οι δύο παρακάτω υπολογισμοί *CUBE* οι οποίες κρίθηκαν αναγκαίες για την διόρθωση των βυθομετρικών δεδομένων της μελέτης εκπόνηση της μελέτης:

- *CUBE Depth* (Βάθος): Η καλύτερη εκτίμηση του βάθους σε κάθε σημείο σύμφωνα με τους υπολογισμούς *CUBE*, δεν αποτελεί πραγματική σάρωση (ηχοβολισμός). Μπορεί να μην είναι χρήσιμο εργαλείο όταν τα φίλτρα ανάγνωσης έχουν χρησιμοποιηθεί για να αφαιρέσουν βυθοσκοπήσεις εκτός των γνωστών ορίων.
- *CUBE Uncertainty* (Αβεβαιότητα): Η τελική αβεβαιότητα που σχετίζεται με κάθε βάθος. Ο αλγόριθμος *CUBE* αποδίδει υψηλή αβεβαιότητα στους κόμβους με χαμηλή πυκνότητα σάρωσης. Οι περισσότεροι από αυτούς τους κόμβους βρίσκονται στο άκρο της έρευνας.



Σχ. 8.9 Εκτίμηση του καλύτερου βάθους (αριστερά) και της τελικής αβεβαιότητας (δεξιά) στο *CUBE*, [HYPACK]  
Fig. 8.9 Estimation of best depth (left) and final uncertainty (right) in *CUBE*, [HYPACK]

Στο Σχήμα 8.10 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα τμήμα του λιμένα της Αλεξανδρούπολης, το οποίο επεξεργάστηκε με το εργαλείο *CUBE Uncertainty* και προσδιορίστηκε η τελική αβεβαιότητα κάθε σημείου με βάθος στην περιοχή (νέφος σημείων). Οι συγκεκριμένες σαρώσεις, εφόσον πέρασαν και τα δύο στάδια επεξεργασίας στο *HYPACK* (καθαρισμός από θορύβους και επεξεργασία με τον αλγόριθμο *CUBE*), εισήχθησαν ως νέφος σημείων σε μορφότυπο αρχείου *.xyz* στο λογισμικό *CYCLONE 3DR* και επιδέχθηκαν τις τελικές τροποποιήσεις ώστε να αποδίδουν το πραγματικό υποθαλάσσιο ανάγλυφο της περιοχής μελέτης με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

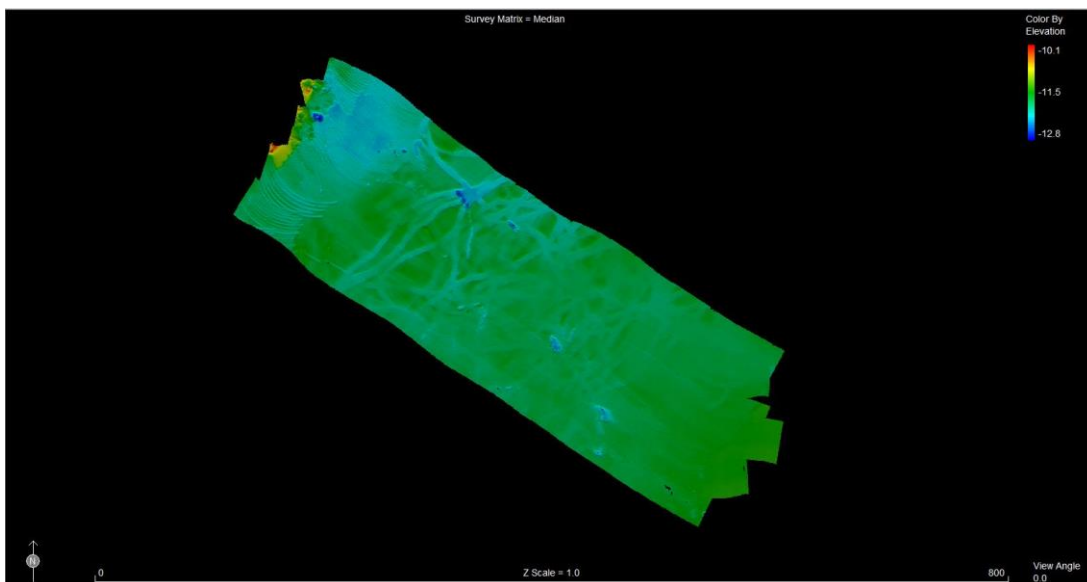


Σχ. 8.10 Παράδειγμα απεικόνισης ηχοβολιστικών γραμμών με το εργαλείο *CUBE Uncertainty* στο λογισμικό *Cyclone 3DR*

Fig. 8.10 Example of sounding lines visualization with the *CUBE Uncertainty* tool within *Cyclone 3DR* software

### 8.3 Τρίτο Στάδιο Επεξεργασίας των Δεδομένων (Εξαγωγή δεδομένων σε μορφότυπο .xyz)

Έπειτα από την ολοκλήρωση της επεξεργασίας και του καθαρισμού των πρωτογενών βυθομετρικών δεδομένων μέσω χειροκίνητου ελέγχων (*manual*) και αλγορίθμων (*CUBE*), οι τελικές πλέον μετρήσεις που αποτελούν τα επεξεργασμένα βυθομετρικά δεδομένα βρίσκονται σε τύπο αρχείου *.HS2X*, όπως προκύπτει από τα στάδια επεξεργασίας στο λογισμικό *HYPACK* και αντιγράφονται σε διάφορους σκληρούς δίσκους με αρκετά μεγάλη απαίτηση σε αποθηκευτικό χώρο. Εφόσον πλέον οι μετρήσεις δεν υπόκεινται σε περαιτέρω επεξεργασία στο λογισμικό *HYPACK* εξάγονται σε μορφότυπο αρχείου *.xyz* και είτε σε μορφή «*one per cell*» είτε σε «*all files*». Το αρχείο μορφής «*one per cell*» αποτελεί ουσιαστικά μια διακριτοποιημένη μορφή των δεδομένων όπου επιλέγονται αυτόματα μετρήσεις ανά συγκεκριμένη απόσταση που ορίζεται από τον χρήστη, με σκοπό την διατήρηση του απαραίτητου αριθμού μετρήσεων για την παραγωγή βυθομετρικών χαρτών και εικόνων. Στο αρχείο μορφής «*all files*», όπως προδιαθέτει και η ονομασία του χρησιμοποιούνται και εξάγονται όλα τα σημεία με βυθομετρική πληροφορία, με σκοπό να αποδίδονται με λεπτομέρεια αντικείμενα ενδιαφέροντος όπως είναι οι κατακόρυφες κατασκευές στη θάλασσα (κρηπιδώματα, λιμενολεκάνες κλπ). Τα αρχεία μορφής «*one per cell*» χρησιμοποιήθηκαν και για την απόδοση των ισοβαθών καμπυλών στον λιμένα της Αλεξανδρούπολης, ενώ τα αρχεία μορφής «*all files*» για την απόδοση του ψηφιακού μοντέλου επιφανείας του πυθμένα της περιοχής ενδιαφέροντος (*TIN MODEL*).



Σχ. 8.11 Δείγμα επεξεργασμένων βυθομετρικών δεδομένων σε μορφότυπο .HS2X εντός του HYPACK  
 Fig. 8.11 Sample of processed bathymetric data in .HS2X format within HYPACK

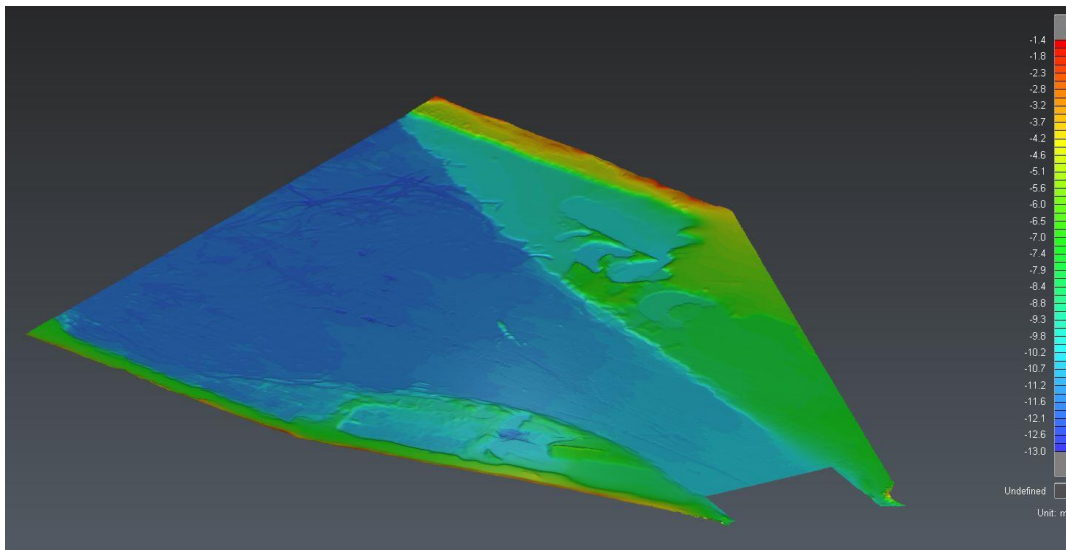
#### 8.4 Τέταρτο στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων (Σύνθεση Τελικών Παραγώγων μέσω Λογισμικών LEICA CYCLONE 3DR, CIVIL 3D)

Έπειτα από το πέρας της εισαγωγής, της επεξεργασίας και της εξαγωγής των βυθομετρικών δεδομένων με τη χρήση του λογισμικού HYPACK τα δεδομένα σε μορφή νέφους πλέον, εισάγονται στο λογισμικό LEICA CYCLONE 3DR με τελικό στόχο τον υπολογισμό του ψηφιακού μοντέλου επιφανείας του πυθμένα της περιοχής ενδιαφέροντος (TIN MODEL).

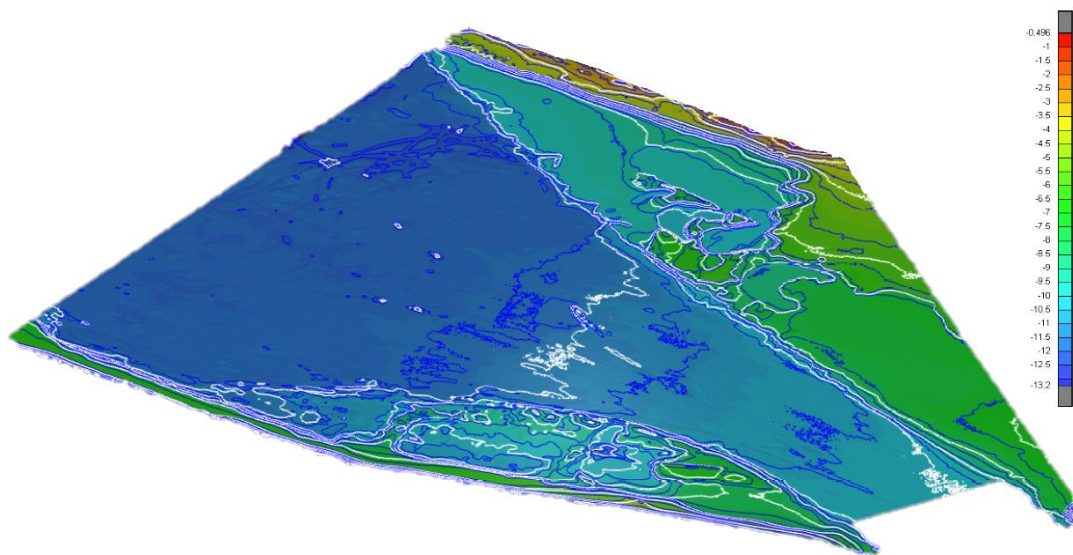
Αρχικά, εισάγονται στο λογισμικό LEICA CYCLONE 3DR όλα τα αρχεία μορφής «one per cell» που παρήχθησαν μέσω του λογισμικού HYPACK, ώστε να παρατηρηθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα τις επεξεργασίας των νεφών των βυθομετρικών σημείων και να διαπιστωθεί εάν λείπει κάποια κρίσιμη γραμμή πλεύσης. Το σύνολο των νεφών που εισήχθησαν υπέστησαν λεπτό καθαρισμό με βάση την κρίση του χρήστη, για να επιτευχθεί η απαλοιφή των δεδομένων εκείνων που επηρεάζουν την τελική παραγωγή του ψηφιακού μοντέλου. Συγκεκριμένα, απομακρύνονται οι σημειακές μετρήσεις βαθών που αποκλίνουν από τις πραγματικές τιμές του βάθους στη συγκεκριμένη περιοχή και αλλοιώνουν το μοντέλο του αναγλύφου του πυθμένα. Πιθανές ζώνες οπών (δηλαδή μικρών κενών λόγω έλλειψης σημειακής πληροφορίας) συμπληρώνονται μέσω του λογισμικού CYCLONE 3DR και εξομαλύνεται με κατάλληλα εργαλεία (smoothing) το μοντέλο αναγλύφου. Στη συνέχεια, εισάγονται σε μορφή αρχείου «all files» τα νέφη σημείων που σχετίζονται με τις χαρτογραφικές λεπτομέρειες της περιοχής μελέτης (κρηπιδώματα, κυματοθραύστες κλπ.). Τα νέφη των κατασκευών αυτών καθαρίζονται από σημεία που επηρεάζουν την σωστή απόδοσή τους, καθώς λόγω ανάκλασης των ηχητικών και ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων των μετρητικών μέσων στην πολύπλοκη επιφάνειά τους κατά την σάρωση προκύπτουν πλασματικές επιφάνειες που δεν συνάδουν με την πραγματική μορφή των χαρτογραφικών λεπτομερειών.

Εφόσον εισαχθούν όλα τα απαραίτητα νέφη για την παραγωγή του ψηφιακού μοντέλου επιφανείας του πυθμένα της περιοχής του λιμένα της Αλεξανδρούπολης και καθαριστούν με λεπτομέρεια από θορυβώδεις μετρήσεις, ξεκινάει η διαδικασία παραγωγής των τελικών οπτικοποιήσεων των δεδομένων (ορθοφωτογραφίες, έγχρωμες προοπτικές απόψεις, σημειακά βάθη και τελικές ισοβαθείς καμπύλες). Κατά τη δημιουργία των ισοβαθών καμπυλών η ισοδιάσταση της διακριτοποίησης των σημείων ορίστηκε ως το μισό της ισοδιάστασης των τελικών εξαγόμενων ισοβαθών καμπυλών (ισοβαθείς ανά 1 m άρα το πλέγμα (*grid*) στο νέφος μορφής «*one per cell*» είναι 0,5 m). Έτσι το πρώτο στάδιο μοντελοποίησης πραγματοποιήθηκε για την παρασκευή του πλέγματος (*grid*) και το δεύτερο στάδιο για τον σχηματισμό των ισοβαθών. Αυτό συνέβη ώστε να επιτευχθεί η ομαλότητα της γεωμετρίας των ισοβαθών καμπυλών. Η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τυπική απόκλιση (*std*) 1 cm.

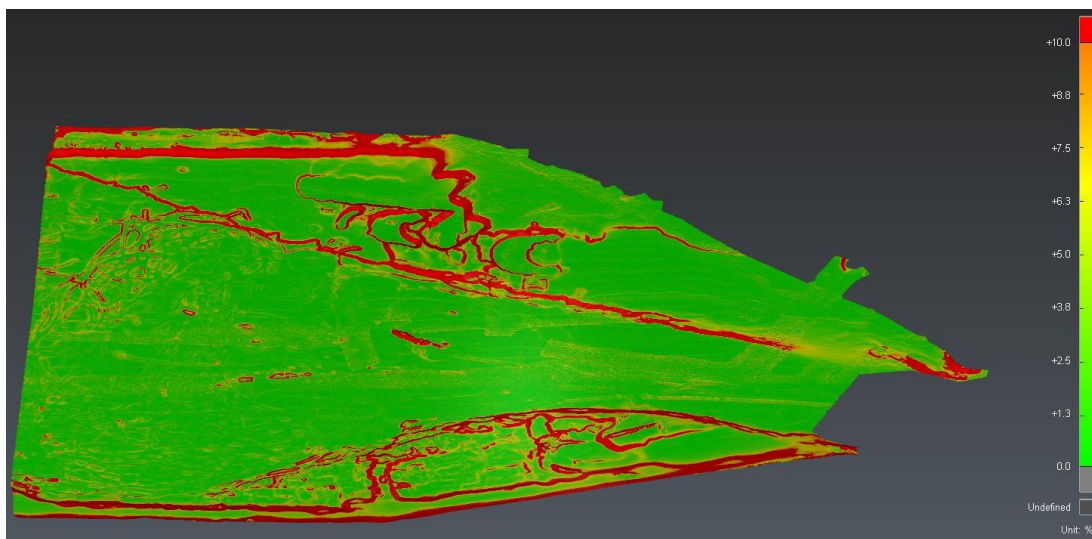
Σε τελικό στάδιο επεξεργασίας στο λογισμικό *LEICA CYCLONE 3DR*, σχηματίζονται τα *3D MESH* (τριδιάστατο πλέγμα) όλων των νεφών, δηλαδή με την μέθοδο της τριγωνοποίησης δημιουργούνται συνεχείς επιφάνειες τόσο για τα νέφη των βυθομετρικών δεδομένων όσο και για τα νέφη των κρηπιδωμάτων. Τα τρισδιάστατα πλέγματα των νεφών θα χρησιμοποιηθούν τόσο για την κατασκευή των ορθοφωτογραφιών και της βυθομετρικής εικόνας όσο και για την σύνταξη των βυθομετρικών χαρτών της περιοχής μελέτης του λιμένα της Αλεξανδρούπολης. Απαραίτητη κρίθηκε και η παρασκευή μιας χρωματικής κλίμακας που θα απεικονίζει τις διαφορές στα βάθη με βάση το χρώμα (κλίσεις).



Σχ. 8.12 Ορθοφωτογραφία με χρωματική κλίμακα των βαθών πυθμένα αποτύπωσης, [LEICA 3DR]  
Fig. 8.12 Orthophotograph with color scale of the bathymetry of the seafloor survey, [LEICA 3DR]



Σχ. 8.13 Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής μελέτης με τις ισοβαθείς καμπύλες, [LEICA 3DR]  
 Fig. 8.13 3D visualization of the survey area with depths contours, [LEICA 3DR]



Σχ. 8.14 Ενδεικτική Εικόνα με χρωματική κλίμακα της κλίσης του πυθμένα αποτύπωσης, [LEICA 3DR]  
 Fig. 8.14 Indicative image with colour scale of the slope of the seafloor survey, [LEICA 3DR]

Η ολοκληρωμένη βυθομετρική ορθοφωτογραφία μαζί με το πλέγμα των σημειακών βαθών και τις ισοβαθείς καμπύλες εξάγονται με σκοπό την παραγωγή των βυθομετρικών χαρτών μέσω του λογισμικού *CIVIL 3D*. Στο συγκεκριμένο λογισμικό, αφότου εισήχθησαν η βυθομετρική εικόνα, το πλέγμα σημειακών βαθών και οι βυθομετρικές καμπύλες, δημιουργήθηκε ο κάρναβος του χάρτη με τις συντεταγμένες της περιοχής μελέτης του λιμένα της Αλεξανδρούπολης. Εν

συνεχεία κατασκευάστηκε η χρωματική κλίμακα των βαθών της περιοχής και τα υπόλοιπα απαραίτητα χαρακτηριστικά για την απόδοση ενός ολοκληρωμένου βυθομετρικού χάρτη (υπόμνημα, κάτοψη λιμένα, γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, μέση στάθμη της θάλασσας κλπ.). Με την ολοκλήρωση της σύνθεσης των βυθομετρικών χαρτών, κατά την εξαγωγή τους χωρίστηκαν σε τμήματα, λόγω του μεγέθους της περιοχής μελέτης και της κλίμακας που επιλέχθηκε για την δημιουργία των χαρτών.

## 8.5 Μέτρα Ποιότητας Υδρογραφικής Αποτύπωσης

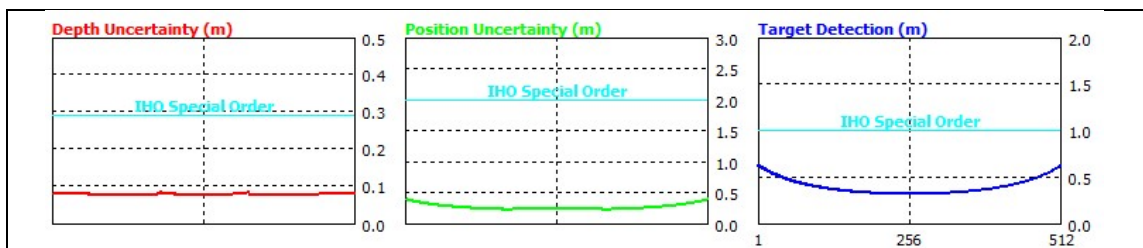
Οι τελικές συνιστώσες αβεβαιότητας της βυθομετρικής αποτύπωσης (*TPU: Total Propagated Uncertainty*), τόσο σε θέση (*THU: Total Horizontal Uncertainty*) όσο και σε βάθος (*TVU: Total Vertical Uncertainty*) επηρεάζονται από μια σειρά παραγόντων, όπως ενδεικτικά είναι:

- τυχαία σφάλματα, τα οποία σχετίζονται με τις εγγενείς τεχνικές δυνατότητες του εξοπλισμού μέτρησης και τυχαίες μεταβολές στις συνθήκες περιβάλλοντος,
- σφάλματα που σχετίζονται με την καταγραφή των σημειακών και γωνιακών θέσεων του αισθητήρα (*offsets*),
- σφάλματα λόγω του περιβάλλοντος διάδοσης και ανάκλασης των ακουστικών δεσμών (υδάτινη στήλη, πυθμένας),
- σφάλματα στην αναγωγή βυθομετρικών δεδομένων.

Η τελική αναμενόμενη αβεβαιότητα προέκυπτε μέσα από τον νόμο μετάδοσης μεταβλητοτήτων, με μερική παραγωγή των αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού της θέσης και του βάθους. Για τον καθορισμό των εξοπλισμών αξιοποιήθηκαν οι προκαθορισμένες λίστες εξοπλισμών εντός του *HYPACK*, καθώς και πληροφορίες των τεχνικών χαρακτηριστικών του εξοπλισμού.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται το σύνολο των σφαλμάτων της συγκεκριμένης βυθομετρικής αποτύπωσης. Από τα διαγράμματα διαπιστώνεται ότι οι αβεβαιότητες της δεδομένης βυθομετρικής αποτύπωσης βρίσκονται σε συμμόρφωση με την συμβατική προδιαγραφή του *IHO (S-44 Special Order)*.

Ολοκληρώνοντας θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν και σε επικαλυπτόμενες γραμμές, με έλεγχο των μέσων τιμών διαφορών βαθών (*mean*) και των τυπικών αποκλίσεων (*standard deviation*) για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Οι δειγματοληπτικοί έλεγχοι επιβεβαίωσαν τη συμμόρφωση με την κατηγορία *Special Order* του *IHO*, στην ζώνη αποτύπωσης με χρήση πολυδεσμικού ηχοβολιστή.



### ΓΕΝΙΚΑ

Γωνιακή Κάλυψη (deg)	120
Μέγιστη Συχνότητα Ping (Hz)	60
Πλάτος δέσμης παράλληλο της τροχιάς (deg)	0.9
Πλάτος δέσμης κάθετο της τροχιάς (deg)	0.9
Διάρκεια Παλμού (ms)	0.03
Γωνία διεύθυνσης κλάδου (deg)	361
Συχνότητα (kHz)	400
Εύρος ζώνης λήψης (kHz)	6
Εύρος ανάλυσης δειγματοληψίας (m)	0.009
Διασταύρωση μέτρησης πλάτους/φάσης (δείγματα)	12
Παρονομαστής ανίχνευσης πλάτους	6
Αριθμός Δεσμών	512
Βάθος Πυθμένα (m)	20

### ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Ταχύτητα του ήχου (m/s)	1530
Κύμα από κορυφή σε κορυφή (m)	1
F-A Κλίση του πυθμένα (deg)	0
P-S Κλίση του πυθμένα (deg)	0
Αβεβαιότητα στάθμης νερού (m)	0.01
Χωρική αβεβαιότητα πρόβλεψης παλίρροιας (m)	0.01
Αβεβαιότητα αισθητήρα ταχύτητας ήχου (m/s)	0.006
Αβεβαιότητα επιφανειακής ταχύτητας ήχου (m/s)	0.25
Χωροχρονική Διακύμανση (m/s)	1
Πάχος του στρώματος S-T (m)	10
Αβεβαιότητα ταχύτητας ήχου πέραν του SVP	0
Μέγιστο βάθος του προφίλ SV	28



ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΙΣΘΗΤΗΡΑ			
	Θέση	Μονάδα Αναφοράς Κίνησης (MRU)	Μορφοτροπέας
Starboard (δεξιά πλευρά σκάφους)	0.01	0.01	0.01
Forward (πλώρη)	0.01	0.01	0.01
Vertical (+ Down) (κύτος)	0.01	0.01	0.01
Ταχύτητα έρευνας (kts)	3		
Αβεβαιότητα ταχύτητας (m/s)	0.1		
Διατοιχισμός (roll) του μορφοτροπέα (deg)	0		
Προνευστασμός (pitch) του μορφοτροπέα (deg)	0		
Γωνία μετατόπισης διεύθυνσης (heading) του μορφοτροπέα (deg)	0		
Αβεβαιότητα σταθερής ανύψωσης (heave) (m)	0.02		
Ανύψωση (% του πλάτους ανύψωσης)	2		
Αβεβαιότητα αισθητήρα διατοιχισμού (deg)	0.02		
Αβεβαιότητα αισθητήρα προνευστασμού (deg)	0.02		
Αβεβαιότητα απόκλισης διατοιχισμού (deg)	0.01		
Αβεβαιότητα απόκλισης προνευστασμού (deg)	0.01		
Αβεβαιότητα απόκλισης εκτροπής (yaw) (deg)	0.01		
Αβεβαιότητα συστήματος εντοπισμού θέσης (m)	0.015		
Αβεβαιότητα διεύθυνσης (deg)	0.03		
Αβεβαιότητα βυθίσματος (m)	0.01		
Αβεβαιότητα κατάκλισης (m)	0.01		
Αλλαγές φόρτωσης (m)	0.01		
Χρονική απόκλιση εντοπισμού θέσης (ms)	0		
Χρονική απόκλιση MRU (s)	0.005		
Χρονική απόκλιση μορφοτροπέα (s)	0.005		
Χρονική υστέρηση (s)	0		

Πιν. 8.2 Τιμές παραμέτρων υπολογισμού TPU όπως καθορίστηκαν εντός του λογισμικού HYPACK  
Table 8.2 TPU calculation parameter values as defined within the HYPACK software

## 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 9.1 Αξιολόγηση Σχεδιασμού Υδρογραφικής Αποτύπωσης

Ο σχεδιασμός της υδρογραφικής μελέτης που προηγήθηκε των μετρήσεων, αξιολογείται βάσει της κάλυψης της περιοχής ενδιαφέροντος, της επάρκειας των δεδομένων που συλλέχθηκαν, της επιτευχθείσας ακρίβειας σε σχέση με τις προδιαγραφές του έργου και την ικανότητα αντιμετώπισης προβλημάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο πεδίο. Σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% παρατηρήθηκε ακρίβεια στη μέτρηση του βάθους  $\pm 0.1$  m, ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης των μετρήσεων  $\pm 0.5$  m.

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από την υδρογραφική μελέτη είναι υπερεπαρκή για την πλήρη αποτύπωση της περιοχής ενδιαφέροντος στο λιμένα της Αλεξανδρούπολης και την απόδοση λεπτομερής περιγραφής της βυθομετρίας της περιοχής. Καίριος παράγοντας για την επίτευξη αυτού του στόχου, είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός των ηχοβολιστικών γραμμών (γραμμές πλεύσης) με το προβλεπόμενο μήκος και πλάτος τους (γωνία κάλυψης  $120^\circ$ ).

Επιπλέον, η αυξημένη πυκνότητα καταγραφής των μετρήσεων, λόγω της χρήσης συστήματος πολυδεσμικού ηχοβολιστή, εξασφάλισε τη συλλογή όλων των απαραίτητων πληροφοριών και την αποφυγή καταγραφής περιοχών χωρίς πληροφορίες βάθους. Αυτό επέτρεψε τη δημιουργία ποιοτικού ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου του πυθμένα, ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας του πυθμένα, ορθοφωτογραφιών του πυθμένα αποτύπωσης και βυθομετρικών χαρτών με ακρίβεια που πληροί τις προδιαγραφές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υδρογραφίας (IHO).

### 9.2 Αξιολόγηση Βασικού Εξοπλισμού

#### 9.2.1 Αξιολόγηση δέκτη GNSS

Οι δέκτες GNSS που επιλέχθηκαν για την διεκπεραίωση της υδρογραφικής αποτύπωσης διαθέτουν ονομαστική οριζοντιογραφική ακρίβεια  $\pm 0.008$  m (σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο, επίπεδο εμπιστοσύνης 95%), η οποία υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις της μελέτης. Εκτιμάται ότι οι τελικές ακρίβειες που επιτεύχθηκαν πλησίαζαν κατά πολύ τις ονομαστικές, καθώς η δευτερεύουσα κεραία ήταν ενσωματωμένη με το ηχοβολιστικό όργανο σε μία ενιαία κατασκευή και οι καιρικές συνθήκες ήταν ικανοποιητικές. Η ταχύτητα του σκάφους ήταν κατάλληλη, ώστε το σύστημα μεταλλικής βάσης – ράβδου που ήταν προσδεμένος ο ηχοβολιστής πολλαπλών δεσμών να μην επιδέχεται μετακινήσεις που θα απειλήσουν την αποσταθεροποίησή του. Επιπλέον, η δυνατότητα δημιουργίας πολλών αρχείων στο λογισμικό καταγραφής των δεδομένων επέτρεψε τη συνεχή εποπτεία και έλεγχο των μετρήσεων, καθώς ήταν γνωστές οι θέσεις των περιοχών που αποτυπώθηκαν και δεν καλύπτονταν εξολοκλήρου δεύτερη φορά, εξοικονομώντας χρόνο. Με γνώση της θέσης και της «κατάστασης» του σκάφους, έγινε δυνατή η ακριβής πλοήγηση του σκάφους στις σχεδιασμένες ηχοβολιστικές γραμμές, καλύπτοντας έτσι ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος εντός των ορίων της.

## 9.2.2 Αξιολόγηση πολυδεσμικού ηχοβολιστή

Το ηχοβολιστικό σύστημα πολλαπλών δεσμών που χρησιμοποιήθηκε για τη διπλωματική εργασία καταγράφει μετρήσεις με ονομαστική ακρίβεια  $\pm 0.015$  m (σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης σε πραγματικό χρόνο, επίπεδο εμπιστοσύνης 95%). Αυτή η ακρίβεια πληροί τις προδιαγραφές της επιδιωκόμενης ακρίβειας υδρογραφικής αποτύπωσης και αυτής των προδιαγραφών του Παγκόσμιου Οργανισμού Υδρογραφίας (IHO). Ακόμη, η δυνατότητα σύνδεσης του ηχοβολιστικού συστήματος με υπολογιστική μονάδα διευκόλυνε τη διαδικασία βαθμονόμησης του οργάνου για τον εντοπισμό πιθανών συστηματικών σφαλμάτων στις μετρήσεις για τα συγκεκριμένα βάθη και τη ρύθμιση των κατάλληλων παραμέτρων του οργάνου (συχνότητα, κλίση του αισθητήρα του *sonar*, κατανομή δέσμης κ.λπ.) για την ακριβή και λεπτομερή μέτρηση του πυθμένα και των στοιχείων του. Η κυλινδρική συστοιχία που διαθέτει ο πολυδεσμικός ηχοβολιστής, μπορεί να καλύψει γωνία σάρωσης έως  $210^\circ$  και άρα μεγαλύτερη έκταση σε μία γραμμή πλεύσης. Σε αντίθεση σε τα ηχοβολιστικά συστήματα επίπεδης συστοιχίας, όπου θα μειωνόταν η αξιοπιστία των δεδομένων σε πολύ χαμηλότερες γωνίες σάρωσης ( $\pm 80^\circ$ ) και τότε θα ήταν απαραίτητη η τοποθέτηση δύο ή τριών ηχοβολιστικών υπό γωνία για την επίτευξη μεγαλύτερης κάλυψης σάρωσης.

## 9.3 Αξιολόγηση Μεθοδολογίας Επεξεργασίας Μετρήσεων

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των ψηφιακών μοντέλων επιφάνειας και ανάγλυφου του βυθού που προέκυψαν, διαπιστώθηκε ότι η πληροφορία για το βάθος αποδίδεται με ικανοποιητική ακρίβεια. Τα μοντέλα επιφάνειας και ανάγλυφου, είναι κατάλληλα για λεπτομερή έλεγχο της διαδικασίας επικάλυψης τόσο των ηχοβολιστικών γραμμών μεταξύ τους, όσο και με τις χαρτογραφικές λεπτομέρειες της περιοχής μελέτης (κρηπιδώματα, κυματοθραύστες κλπ.). Το πλέγμα στο νέφος σημείων μορφής «*one per cell*» ανά 0.5 m, εφόσον οι ισοβαθείς καμπύλες εμφανίζονται ανά 1 m βάθους, συντέλεσε στην ομαλότητα της γεωμετρίας των ισοβαθών καμπυλών. Με αυτό τον τρόπο επετεύχθη τυπική απόκλιση (*std*) 0.01 m στη δημιουργία των ψηφιακών μοντέλων. Η ακρίβεια αυτή μεταφέρθηκε και στην σύνταξη των βυθομετρικών χαρτών, καθώς εισήχθησαν στο λογισμικό CIVIL 3D με σκοπό την παραγωγή τους, το πλέγμα των σημειακών βαθών και οι ισοβαθείς καμπύλες.

## 9.4 Παρατηρήσεις / Συμπεράσματα

### 9.4.1 Γενικές παρατηρήσεις

- Στο πλαίσιο μιας υδρογραφικής μελέτης, ο σωστός προγραμματισμός από το γραφείο είναι εξαιρετικά σημαντικός και απαραίτητος για την υλοποίηση αυτής, καθώς και η ανάπτυξη του σχεδίου πλεύσης μετά από αναγνώριση και μελέτη της περιοχής ενδιαφέροντος.

- Είναι εξαιρετικά σημαντικό να πραγματοποιείται έλεγχος της καταλληλότητας, της ορθότητας, της αξιοπιστίας και της επάρκειας των μετρήσεων κατά τη διάρκεια της λήψης τους. Επίσης, η προσεκτική πλοήγηση του υδρογραφικού σκάφους κατά μήκος των ηχοβλιστικών γραμμών είναι κρίσιμη.
- Ο κατάλληλος συνδυασμός εξοπλισμού και μετρητικών οργάνων λειτούργησε αποτελεσματικά, παρέχοντας τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και αξιόπιστα αποτελέσματα, καλύπτοντας πλήρως τις προδιαγραφές της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

#### 9.4.2 Αξιολόγηση υδρογραφικής μελέτης

- Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια και ο αριθμός τους είναι επαρκής για την πλήρη κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος. Επιπλέον, η απόδοση των επιθυμητών ορθοφωτογραφιών και τρισδιάστατων απεικονίσεων των πρωτογενών δεδομένων που προέκυψαν από την αποτύπωση πραγματικών σημείων, τα οποία καθορίζουν τις γραμμές πλεύσης, προσφέρει μια λεπτομερή και ακριβή απεικόνιση του πυθμένα.
- Ο συνδυασμός των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν αποδείχθηκε ο ιδανικός, δεδομένης της επιτευχθείσας ακρίβειας και της ευελιξίας που προσέφερε για την αντιμετώπιση των προκύπτοντων προβλημάτων.
- Το ψηφιακό μοντέλο του βυθού προσφέρει την ευελιξία να δημιουργεί οποιαδήποτε τρισδιάστατη αναπαράσταση του πυθμένα, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη και σαφή εικόνα της τρέχουσας κατάστασης. Επίσης, επιτρέπει τη δημιουργία τομής ή μηκοτομής σε οποιαδήποτε επιθυμητή γραμμή.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Καραμάνου Α., *Συνδυασμός μεθόδων Δορυφορικού και Αδρανειακού Γεωδαιτικού εντοπισμού στην ψηφιακή καταγραφή οδικών δικτύων*, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2009, Διδακτορική διατριβή.
2. Κατσιγιάννη Γ., *Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων GNSS, GNSS/INS, RTS για την εξαγωγή τροχιάς πεζών σε δύσκολα περιβάλλοντα*, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2014, Μεταπτυχιακή εργασία.
3. Κολαΐτη Μ., *Αγγλοελληνικών λεξικόν των θεωρητικών και εφηρμοσμένων μαθηματικών*, Πρώτος τόμος, Αθήνα 1976.
4. Κολαΐτη Μ., *Αγγλοελληνικών λεξικόν των θεωρητικών και εφηρμοσμένων μαθηματικών*, Δεύτερος τόμος, Αθήνα 1976.
5. Παλληκάρη Α., *Ναυτικά Ηλεκτρονικά όργανα, Πρώτη Έκδοση*, Αθήνα 2008.
6. Παλληκάρη Α., *Ναυτικά Ηλεκτρονικά όργανα, Δεύτερη Έκδοση*, Αθήνα 2016.
7. Σωτηρίου Π., *Πειραματική αξιολόγηση δεκτών GNSS χαμηλού κόστους σε εφαρμογές ευφρών συστημάτων μεταφορών*, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2017, Διπλωματική εργασία.
8. Τζάρια Μ.Α., *Γεωδαιτικός έλεγχος πόντισης υποθαλάσσιων αγωγών διάθεσης λυμάτων ΚΕΛ Θριασίου πεδίου*, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2012, Διπλωματική εργασία.
9. Φωτίου Α., Λιβιεράτος Ε., *Ελλειπσοειδής Γεωδαισία και Γεωδαιτικά Δίκτυα*, Θεσσαλονίκη 2000.
10. Φωτίου Α., Πικρίδας Χ., *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές*, Δεύτερη έκδοση, Θεσσαλονίκη 2012.
11. *Θαλάσσια Γεωδαισία*, Σημειώσεις μαθήματος.
12. Υδρογραφική Υπηρεσία, *Στατιστικά στοιχεία της στάθμης της θάλασσας Ελληνικών λιμένων*, Δεύτερη έκδοση, Αθήνα 2015.

### Ξένη Βιβλιογραφία

1. Anderson N.M., *An evaluation of the Mini-Ranger positioning system*, Science report, 1973.
2. Awang A., Othman R., *Hydrographic survey using real time kinematic method for river deepening*, UTM (University Technology Malaysia), 2011.
3. Beaton R., *Marine Geodesy in the Department of Defense (USA)*, paper, 1986.
4. Calder B., Wells D., *Cube User's Manual*, version 1.13, 2007.
5. Delikaraoglou D., *The Hellenic Positioning System (HEPOS) and its foreseeable implications on the spatial data infrastructure in Greece*, article, 2008.
6. Dr. Dodd D., *Canadian Board of Examiners for Professional Surveyors*, version 1, 2013.
7. Ferreira I., Coelho L., *State of art of bathymetric surveys, original article*, 2021.
8. Hare R., *Depth and position error budgets for multibeam echosounding*, review, 1995.
9. Hart D., Downing G., *Positioning techniques and equipment for U.S. Army Corps of Engineers hydrographic surveys*, technical report, 1977.

10. IHO, *Manual on Hydrography*, 2011.
11. IHO, *The need for National Hydrographic Services*, version 3.0.4, 2015.
12. Krueger C., Vieira A., *The Geodesy in the Hydrography*, SBC (Sociedade Brasileira de Cartograph), 2014.
13. L-3 Communications Seabeam Instruments, Multibeam sonar, *Theory of operation*, 2000.
14. Mohammadloo T., Simmons D., *Comparing Modeled and measured Bathymetric Uncertainties: Effect of Doppler and Baseline Decorrelation*, conference paper, 2019.
15. Przeslawski R., Foster S., *Field Manuals for Marine Sampling in Australian Waters*, version 2, 2020.
16. Rinner K., *Marine Geodesy and its future*, 1993.
17. Snaith H., Devey C., *Seafloor Mapping – The Challenge of a Truly Global Ocean Bathymetry*, article, 2019.
18. U.S. Army Corps of Engineers, *Hydrographic Surveying*, engineer manual, 2013.
19. Wati G., *Basics of Hydrography and Inspection of subsea infrastructures*, Principles and practice, 1<sup>st</sup> edition, 2019.
20. Wu Z., Yang F., *High – Resolution Seafloor Survey and Applications*, 2021.
21. AML-3, Configurable Profiler and Real-Time Instrument, brochure, 2021.
22. Applanix, Applanix Products and Solutions for Hydrographic Survey and Marine Applications, brochure, 2018.
23. Applanix, POS MV WaveMaster II, datasheet, 2020.
24. HYPACK, Software for Hydrographic Data Collection, Processing and Final products, brochure, 2023.
25. HYPACK 2023 User Manual
26. IHO, International Hydrographic Organization Standards for Hydrographic Surveys, S-44 Edition 6.1.0, 2020.
27. NORBIT, Data Acquisition Software, brochure, 2021.
28. NORBIT, Data Collection Tool, user guide, 2022.
29. NORBIT, NORBIT SV Profiler: User Manual, 2021.
30. Teledyne Blueview, BV5000 3D Mechanical Scanning Sonar, brochure, 2020.

## Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

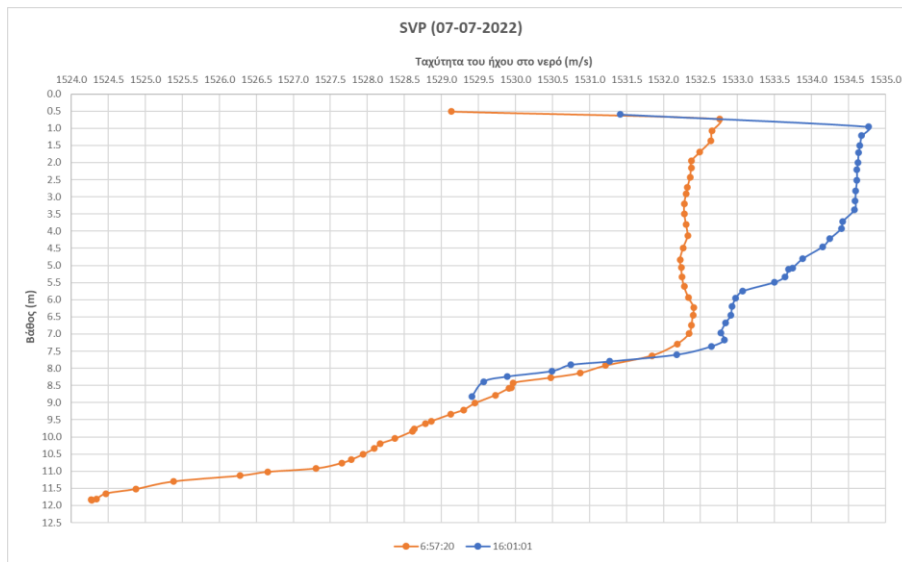
1. <https://gotbooks.miracosta.edu/oceans/chapter1.html>
2. <https://theconstructor.org/surveying/hydrographic-surveying-methods-uses/13838/>
3. <https://www.hnhs.gr/el/>
4. <https://ola-sa.gr/el/infrastructure/>
5. <https://poseidon.hcmr.gr/el/synistoses/katagrafikes-platformes/palirroiografoi>
6. <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>
7. <https://boats.gr/portfolio-item/king-fisher-720-esolembio/?lang=en>
8. <https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/inertial-labs/>
9. <https://amloceanographic.com/blog/post/sv-profile-frequency>
10. <https://ocean.tamu.edu/about/what-is-oceanography/index.html>
11. <https://timeandnavigation.si.edu/multimedia-asset/hyperbolic-system>

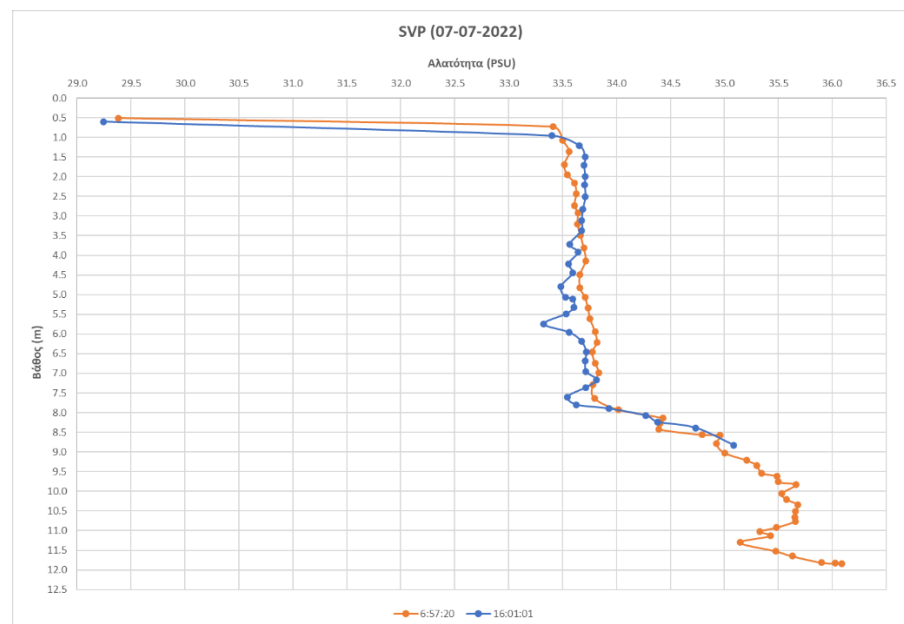
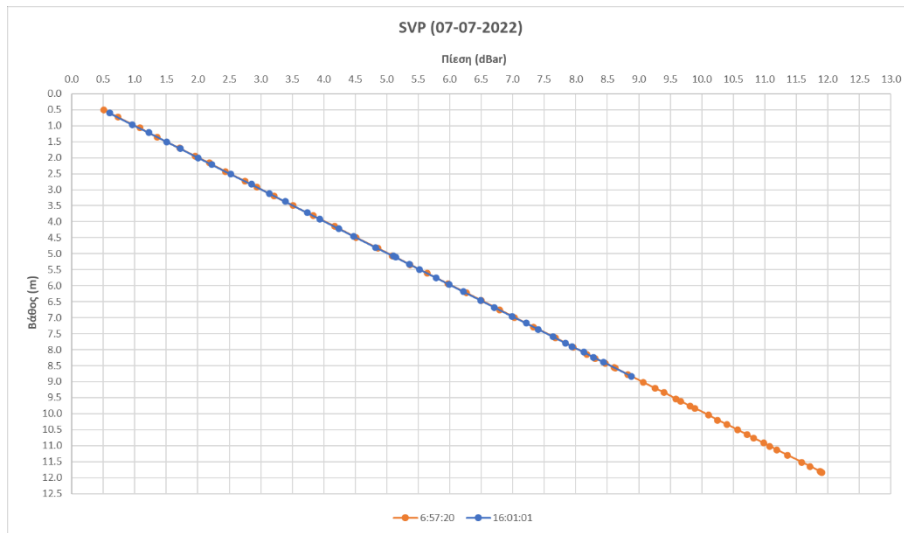
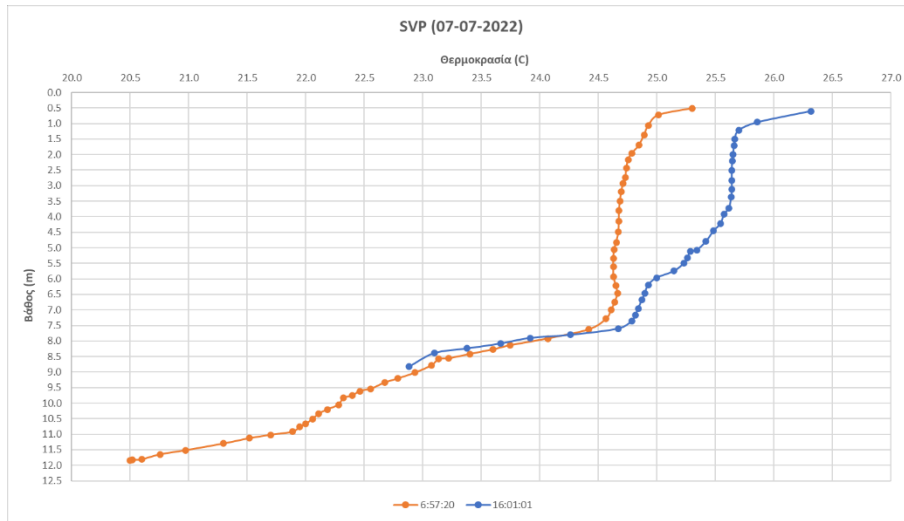
12. <https://www.hydro-international.com/content/article/inertial-navigation-systems>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

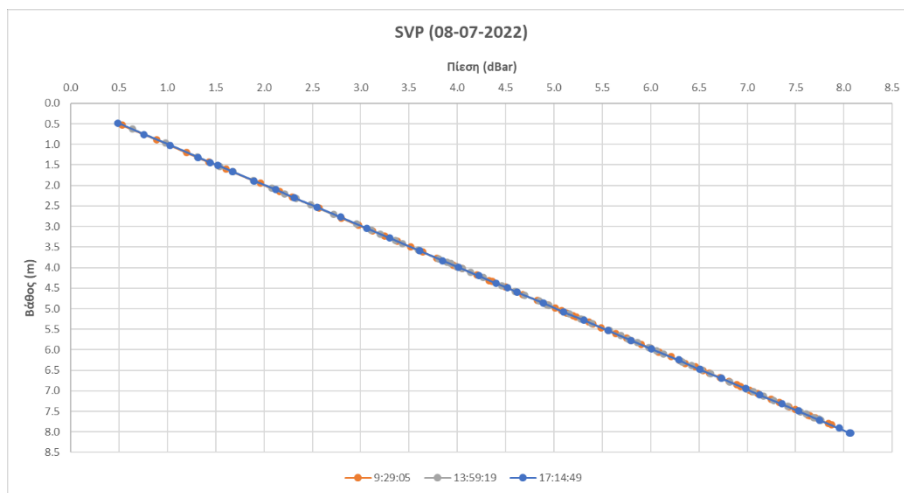
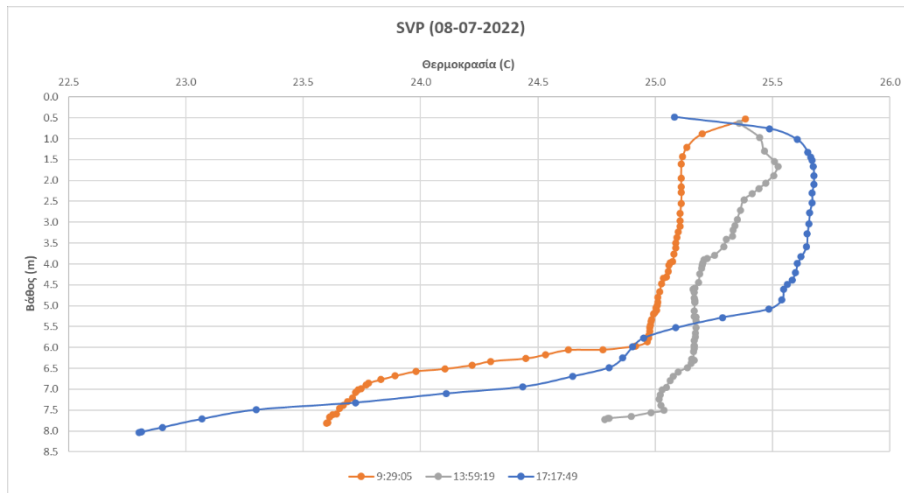
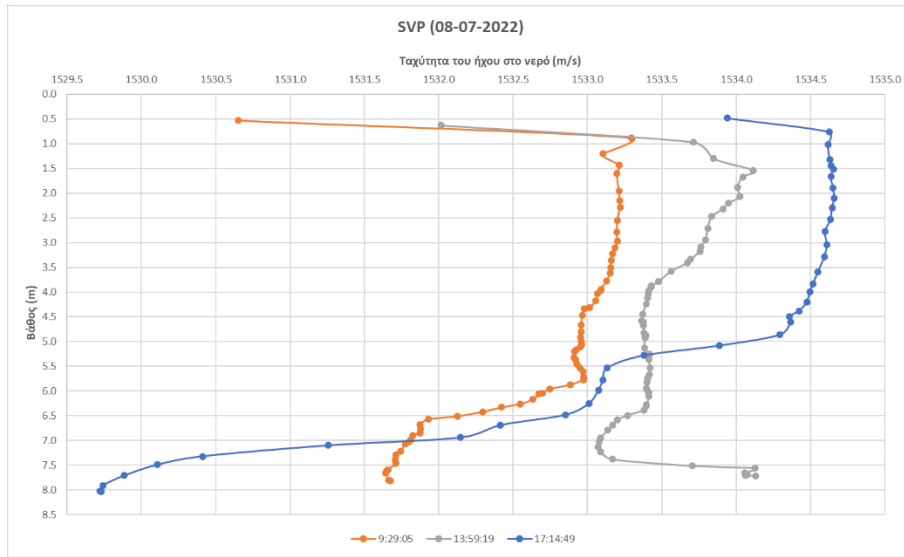
### Π1. Διαγράμματα Παραγόντων που Μεταβάλουν το Υδάτινο Περιβάλλον

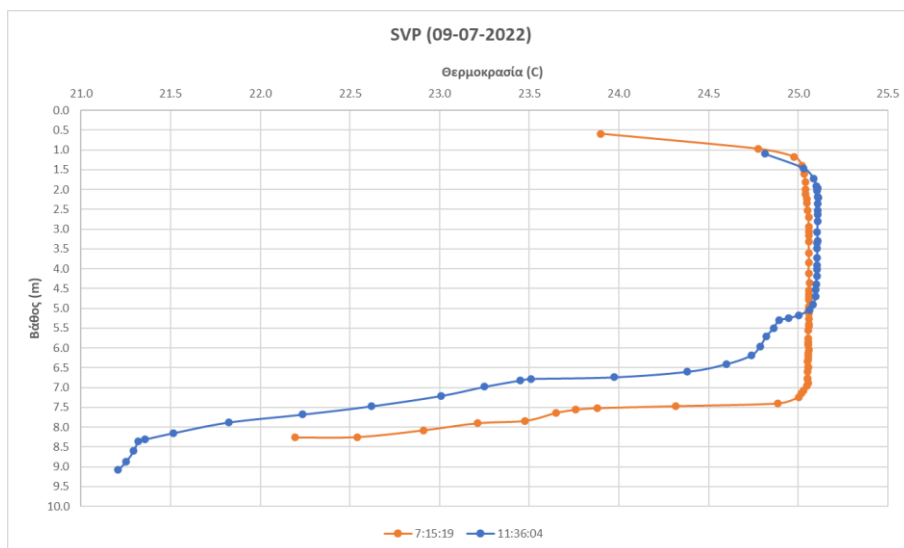
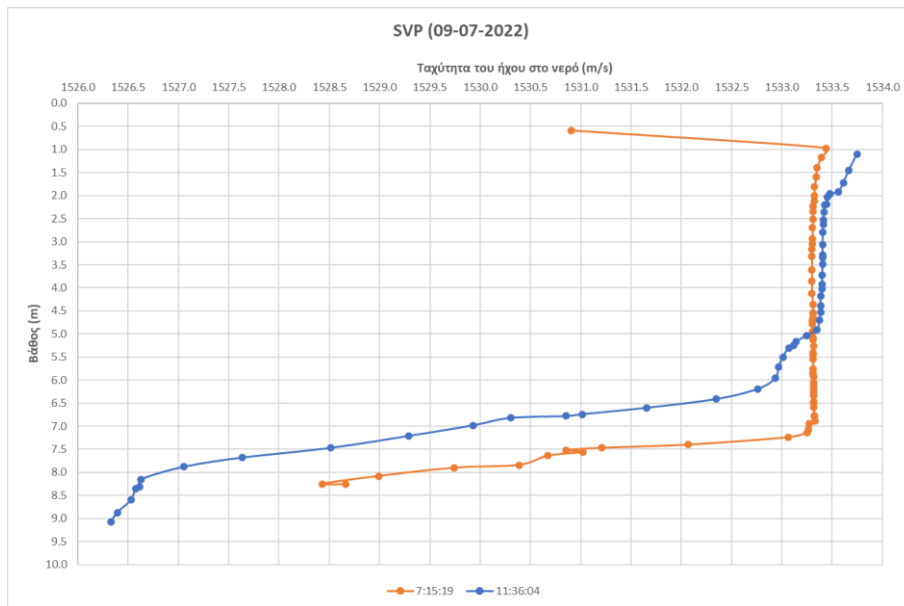
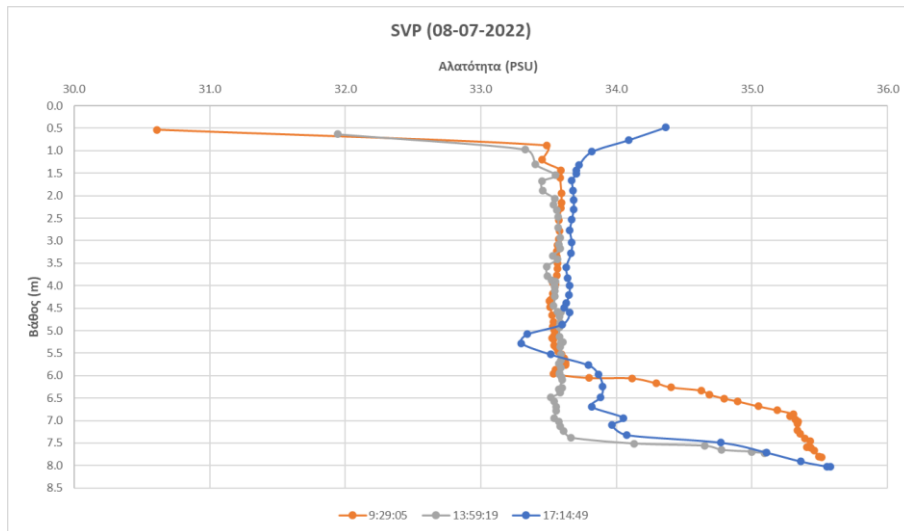
Με την αξιοποίηση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από το προφιλόμετρο *NORBIT SV* παράχθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα, ταχύτητας του ήχου στο νερό, θερμοκρασίας, πίεσης και αλατότητας σε σχέση με το βάθος του νερού, συγκρινόμενα μεταξύ τους ανά ώρα μέτρησης και ανά ημέρα μέτρησης.

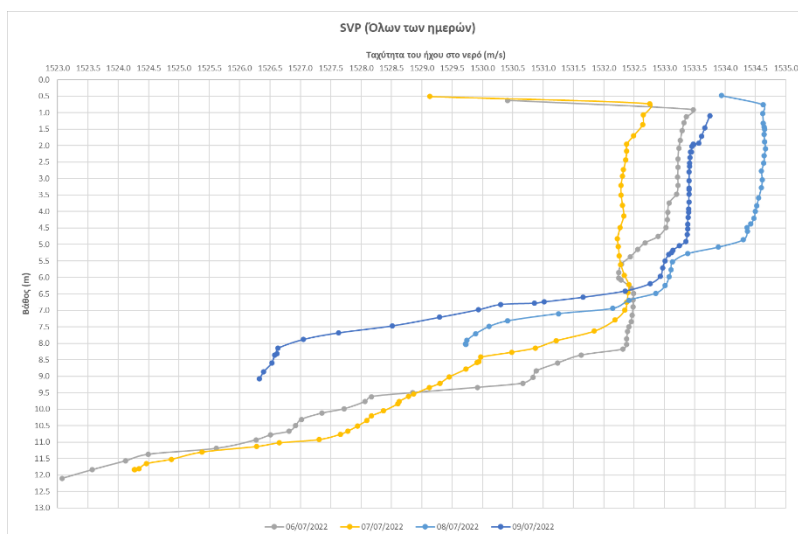
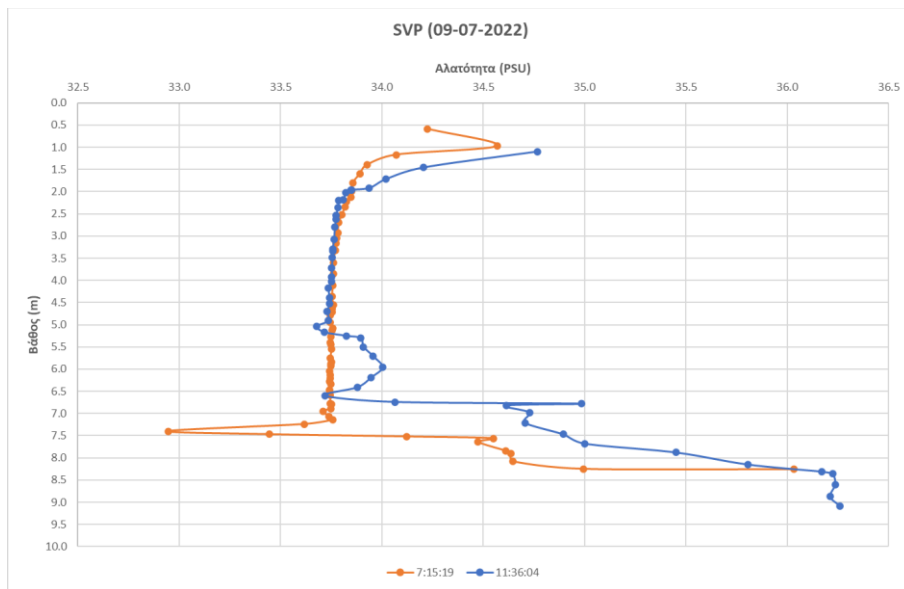
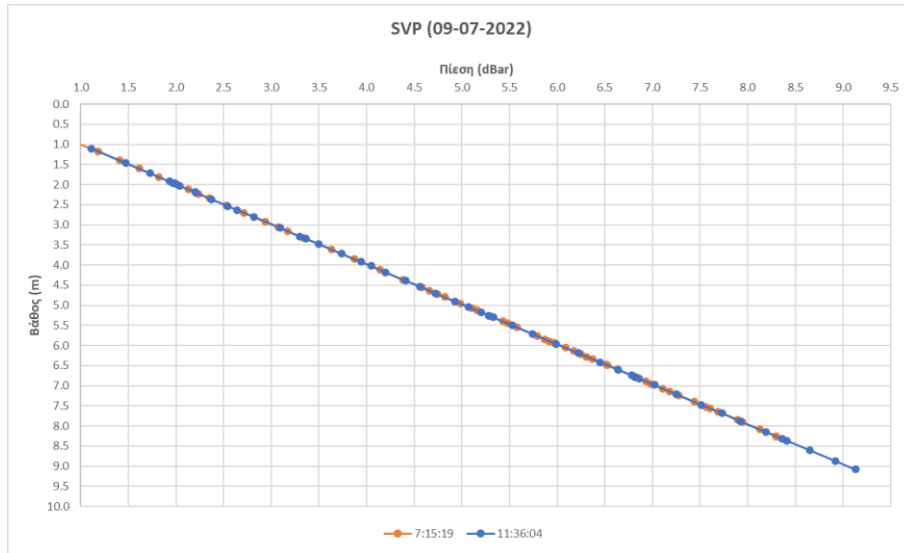


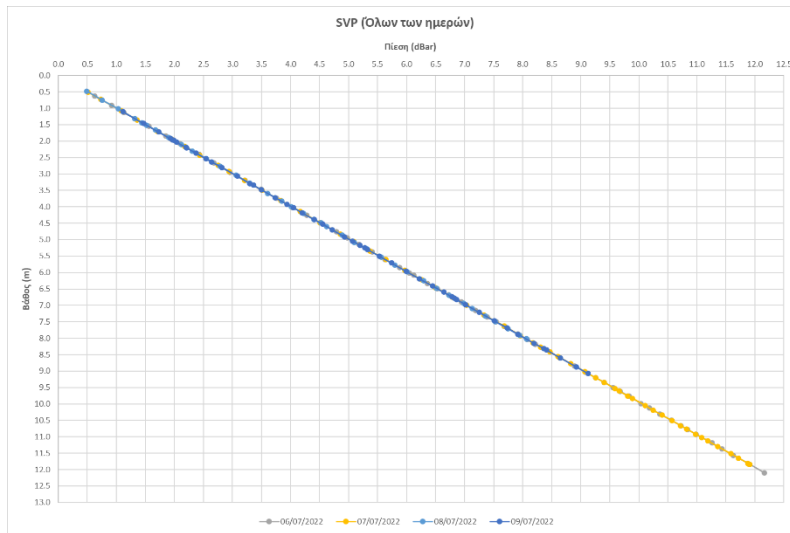
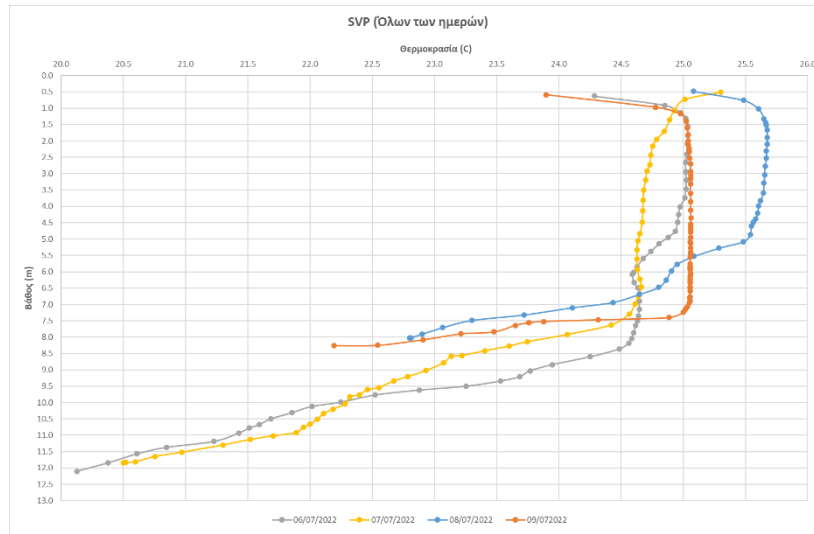












## ΤΕΥΧΟΣ ΣΧΕΔΙΩΝ

[Layout 2.pdf](#) (Βυθομετρική εικόνα)

[bathymetric map Alexandroupoli.pdf](#) (Βυθομετρικός χάρτης με βυθομετρική εικόνα, 1<sup>ο</sup> μέρος)

[bathymetric map Alexandroupoli part 2.pdf](#) (Βυθομετρικός χάρτης με βυθομετρική εικόνα, 2<sup>ο</sup> μέρος)

[bathymetric map Alexandroupoli 2.pdf](#) (Βυθομετρικός χάρτης χωρίς βυθομετρική εικόνα, 1<sup>ο</sup> μέρος)

[bathymetric map Alexandroupoli part 2.pdf](#) Βυθομετρικός χάρτης χωρίς βυθομετρική εικόνα, 2<sup>ο</sup> μέρος)