

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ-ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Δ.Π.Μ.Σ: ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ



# Υποθαλάσσιος Εντοπισμός Υποβρύχιου Ρομποτικού συστήματος για Χαρτογράφηση Θαλάσσιου Περιβάλλοντος

ΜΕΡΤΙΚΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: Θαλάσσιο Περιβάλλον και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας



Επιβλέπων Καθηγητής: Καράντζαλος Κωνσταντίνος  
ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2024

**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF NAVAL ARCHITECTURE AND MARINE  
ENGINEERING  
Master's Degree Program: SHIP AND MARINE TECHNOLOGY**



# **Underwater Positioning of Subsurface Robotic System for Monitoring the Marine Environment**

**PANAGIOTIS MERTIKAS  
MASTER THESIS**

**STREAM: Marine Environment and Renewable Energy Resources**



**Supervisor: Konstantinos Karantzas  
ATHENS, OCTOBER 2024**



# Μέθοδοι Εντοπισμού Θέσης με βάση Υποβρύχια Ρομποτικά Συστήματα για Χαρτογράφηση του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος

Μεταπτυχιακή Εργασία  
Μερτίκα Παναγιώτη

Επιβλέπων Καθηγητής:  
Καράντζαλος Κ., Καθηγητής ΕΜΠ

*Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 22 Οκτωβρίου 2024*

Υπογραφή

.....  
Κ. Καράντζαλος

Υπογραφή

.....  
Κ. Κυριακόπουλος

Υπογραφή

.....  
Γ. Παπαλάμπρου

Copyright © All rights reserved Παναγιώτης Σ. Μερτίκας, 2024. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικό ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναγράφεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Αρχικά, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Καράντζαλο, για τη συνεχή στήριξη, βοήθεια και την αφοσίωση του στη καθοδήγηση. Η σκληρή του δουλειά και το κίνητρό του μου έδωσαν την ώθηση να βελτιώνομαι συνεχώς και να εξελίσσομαι κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, για τη σταθερή υποστήριξη, τη βοήθεια και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν, δίνοντάς μου τη δύναμη και το θάρρος να συνεχίζω με στόχο τη διαρκή βελτίωση και εξέλιξη.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν στο Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης, για το εξαιρετικό ομαδικό κλίμα, την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου.

Ευχαριστώ την εταιρεία METRICA A.E. για τη διάθεση του εξοπλισμού, του σκάφους αποστολής και του μετρητικού εξοπλισμού, ο οποίος ήταν απαραίτητος για την επιτυχή διεξαγωγή της έρευνάς μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το ερευνητικό πρόγραμμα RAMONES για την πολύτιμη διάθεση του εξοπλισμού, τόσο του υποβρύχιου ρομποτικού συστήματος Glider, όσο και του συστήματος υποθαλάσσιου εντοπισμού (USBL) της εταιρείας Evologics, που συνέβαλαν καθοριστικά στην εκπόνηση της εργασίας μου.

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην αξιολόγηση των δυνατοτήτων υποθαλάσσιου εντοπισμού μέσω της τεχνολογίας Ultra-Short Baseline (USBL) και της συνδυαστικής της χρήσης με άλλες τεχνολογίες, όπως ο δορυφορικός εντοπισμός. Στο πρώτο σκέλος της μελέτης, πραγματοποιήθηκε παραγωγή τρισδιάστατων αποτυπώσεων υποβρύχιου ρομποτικού συστήματος τύπου Glider αλλά και του σκάφους που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας, αξιοποιώντας μεθοδολογίες όπως ο επίγειος σαρωτής (Laser Scanner) και ο Βιομηχανικός Γεωδαιτικός Σταθμός (Robotic Total Station), με στόχο τον προσδιορισμό των σχετικών θέσεων μεταξύ των συστημάτων USBL και Global Navigation Satellite System (GNSS). Η εργασία συνδυάζει τις μετρήσεις USBL με έναν σύγχρονο δορυφορικό δέκτη (GNSS), παρέχοντας διορθωμένες συντεταγμένες σε πραγματικό χρόνο. Ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις καταγραφές του Glider, αναλύοντας ποιοτικά τις διαφορές στα βάθη και τις περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα και η αγωγιμότητα, κατά τη διάρκεια πέντε αποστολών στον Κορινθιακό. Οι παρατηρήσεις έδειξαν σταθερές τιμές στην αλατότητα και την αγωγιμότητα, ενώ η θερμοκρασία παρουσίασε σημαντικές διακυμάνσεις. Αυτή η εργασία συμβάλλει στην κατανόηση και εφαρμογή των μεθόδων USBL στον υποβρύχιο εντοπισμό και στην ανάλυση των χαρακτηριστικών του θαλάσσιου περιβάλλοντος.



## **Abstract**

This study focuses on the evaluation of underwater object positioning capabilities using Ultra-Short Baseline (USBL) technology and its combined use with other technologies, such as Satellite Positioning. In the first part of the study, three-dimensional positioning was conducted for an underwater robotic system (Glider Type) as well as of the vessel used in the experimental process. Methodologies such as Laser Scanner and Robotic Total Station were used to determine the relative positions between USBL and GNSS systems.

The study combines USBL measurements with a modern satellite receiver (GNSS), providing corrected coordinates in real time. A comparison of the results with the Glider's recordings followed, qualitatively analyzing the differences in depths and environmental parameters such as temperature, salinity, and conductivity during five missions in the Corinthian Gulf.

Observations indicated stable values for salinity and conductivity, while temperature exhibited significant variations. This work contributes to the understanding and application of USBL methods in underwater positioning and analysis of the characteristics of the marine environment.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>7</b>
1.1	Αντικείμενο και Στόχοι Εργασίας . . . . .	7
1.2	Κίνητρο και Συνεισφορά Εργασίας . . . . .	7
1.3	Δομή Εργασίας . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Θεωρητικό Υπόβαθρο</b>	<b>9</b>
2.1	Ακουστικά Κύματα στο Θαλάσσιο Περιβάλλον . . . . .	9
2.2	Η φύση των ακουστικών διαταραχών . . . . .	9
2.3	Ακουστικά Κύματα . . . . .	10
2.4	Ακουστική Εξίσωση . . . . .	10
2.4.1	Εξίσωση Συνέχειας . . . . .	11
2.4.2	Εξίσωση Euler . . . . .	12
2.4.3	Καταστατική Εξίσωση . . . . .	12
2.4.4	Γραμμικοποιημένη Κυματική Εξίσωση . . . . .	12
2.5	Ακουστικές Παράμετροι . . . . .	14
2.5.1	Κατανομή της Θερμοκρασίας στο Θαλάσσιο Περιβάλλον . . . . .	14
2.5.2	Κατανομή της Αλατότητας στο Θαλάσσιο Περιβάλλον . . . . .	14
2.5.3	Κατανομή της Αγωγιμότητας στο Θαλάσσιο Περιβάλλον . . . . .	15
2.5.4	Ταχύτητα του ήχου στη Θάλασσα . . . . .	16
2.5.5	Υδροακουστικές εφαρμογές . . . . .	18
2.6	Διεγείροντα αίτια του ήχου και θορύβου στη θάλασσα . . . . .	19
2.7	Μέθοδοι και Συστήματα Υποθαλάσσιου Εντοπισμού . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Μεθοδολογία</b>	<b>26</b>
3.1	Τρισδιάστατες Αποτυπώσεις . . . . .	26
3.1.1	Μεθοδολογία Τρισδιάστατης Σάρωσης . . . . .	27
3.1.2	Λογισμικά και Επεξεργασία . . . . .	30
3.1.3	Μετρητικός Εξοπλισμός και Παρελκόμενα . . . . .	36
3.1.4	Τρισδιάστατη Αποτύπωση Σκάφους Αποστολής . . . . .	41
3.1.5	Τρισδιάστατη Αποτύπωση Ρομποτικού Υποθαλάσσιου Συστήματος . . . . .	46
3.2	Υποθαλάσσιος Εντοπισμός . . . . .	53
3.2.1	Μεθοδολογία Υποθαλάσσιου Εντοπισμού . . . . .	54
3.2.2	Εξοπλισμός & Τεχνικά Χαρακτηριστικά . . . . .	58
3.2.3	Επεξεργασία και Λογισμικά . . . . .	65
3.3	Προετοιμασία Διεξαγωγής Πειράματος στη περιοχή των Αντικύρων . . . . .	68
3.3.1	Επιλογή Περιοχής . . . . .	69
3.3.2	Προετοιμασία Glider . . . . .	69
3.3.3	Επιβεβαίωση στη Θάλασσα & Σχεδίαση Αποστολών . . . . .	70

<b>4</b>	<b>Πειραματικά Αποτελέσματα και Αξιολόγηση</b>	<b>72</b>
4.1	Αποτελέσματα Τρισδιάστατων Αποτυπώσεων και Διαστασιολογικών Ελέγχων	72
4.1.1	Σκάφος Αποστολής . . . . .	72
4.1.2	Υποβρύχιο Ρομποτικό Σύστημα Αποστολής . . . . .	73
4.2	Πειραματικά Αποτελέσματα στη περιοχή της Αντίκυρας . . . . .	74
4.2.1	Μια Γραμμική Βύθιση στα 100 μέτρα βάθος . . . . .	75
4.2.2	Τρεις Γραμμικές Βυθίσεις στα 60 μέτρα βάθος . . . . .	76
4.2.3	Μια Σπειροειδής Βύθιση-Ανάδυση σε βάθος 200 μέτρων . . . . .	77
4.2.4	Μια Σπειροειδής Βύθιση-Ανάδυση σε βάθος 400 μέτρων . . . . .	80
4.2.5	Συνδυαστική Σπειροειδής Βύθιση-Ανάδυση στα 300 και 150 μέτρα . .	82
4.2.6	Γενική Ανασκόπηση και Σχολιασμός . . . . .	84
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα &amp; Προτάσεις</b>	<b>87</b>
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>89</b>

# Κατάλογος σχημάτων

2.1	Εφαρμογή της αρχής του Huygens σε επίπεδο και σφαιρικό κύμα σε ομογενές μέσο . . . . .	10
2.2	Στοιχειώδης Όγκος Ρευστού για την Εφαρμογή των Εξισώσεων Συνέχειας - Euler	11
2.3	Κατακόρυφη Κατανομή Θερμοκρασίας Θαλασσινού Νερού . . . . .	14
2.4	Μέση Ετήσια Κατανομή της Αλατότητας επί τοις % . . . . .	15
2.5	Μέση Ετήσια Κατανομή της Αγωγιμότητας (Conductivity) στο Θαλάσσιο Περιβάλλον . . . . .	16
2.6	Κατακόρυφη Κατανομή της Ταχύτητας του Ήχου στο Θαλασσινό Νερό . . . . .	17
2.7	Υποβρύχιο Ακουστικό Κανάλι . . . . .	17
2.8	Διάδοση Ακουστικών Παλμών από Σημειακή Πηγή . . . . .	18
2.9	Γενική μορφή του φάσματος του θορύβου περιβάλλοντος . . . . .	20
2.10	Παράδειγμα από ένα σύστημα Long Baseline . . . . .	21
2.11	Παράδειγμα από ένα σύστημα Short Baseline . . . . .	21
2.12	Παράδειγμα από ένα σύστημα Ultra Short Baseline . . . . .	22
2.13	Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της θέσης του συστήματος USBL . . . . .	22
2.14	Διαφορά Φάσης Μεταξύ Δυο στοιχείων του USBL . . . . .	24
3.1	Λογισμικό Leica Cyclone Field 360 . . . . .	31
3.2	Λογισμικό Leica Cyclone Register 360+ . . . . .	32
3.3	Στιγμιότυπα από τον Έλεγχο Συνένωσης Επιμέρους Νεφών . . . . .	32
3.4	Στιγμιότυπα από τον καθαρισμό νέφους σημείων . . . . .	33
3.5	Τοποθέτηση Ονομάτων Ειδικών Στόχων HDS στο Λογισμικό Leica Cyclone Register 360+. . . . .	33
3.6	Προσδιορισμό Σημείων Ενδιαφέροντος στο Λογισμικό Cyclone Core . . . . .	34
3.7	Λογισμικό Spatial Analyzer . . . . .	35
3.8	Διάγραμμα Ροής Γενικής Μεθοδολογίας . . . . .	35
3.9	Διάγραμμα Ροής Μεθόδου Επεξεργασίας & Λογισμικών . . . . .	36
3.10	Leica Laser Scanner RTC 360 . . . . .	37
3.11	Τρίποδας Στήριξης Leica RTC 360 . . . . .	38
3.12	Leica MS256 . . . . .	38
3.13	Leica HDS Ανακλαστικοί Στόχοι. . . . .	39
3.14	Leica Total Station TDRA6000. . . . .	40
3.15	Βιομηχανικός Τρίποδας τοποθέτησης Leica TDRA6000 . . . . .	40
3.16	Στόχοι Bohnenstingl - Παρελκόμενα Leica TDRA6000. . . . .	41
3.17	Σκάφος Αποστολής τύπου Nireus Ω53 Escape . . . . .	41
3.18	Βάση στήριξης μετρήτικού εξοπλισμού . . . . .	42
3.19	Θέσεις Τοποθέτησης στόχων HDS κατά την αποτύπωση του σκάφους Αποστολής	43
3.20	Τοποθέτηση Βάσεων Στήριξης Trailer . . . . .	44
3.21	Κάτοψη οπτικοποίησης των στάσεων . . . . .	44



3.22	Στιγμιότυπα από τη διαδικασία αποτύπωσης του σκάφους μέσα από τη χρήση τεχνολογίας Laser Scanner (Leica RTC 360) και Γεωδαιτικού Σταθμού (Leica TDRA 6000).	45
3.23	Εξαγόμενα Σημεία από το Τρισδιάστατο Νέφος του Σκάφους	45
3.24	Καθορισμός Συστήματος Συντεταγμένων	47
3.25	Teledyne Slocum Glider G3	48
3.26	Teledyne Slocum Glider G3 - Εξοπλισμός	48
3.27	Προσδιορισμός Σημείων Ενδιαφέροντος προς Μέτρηση στο Glider Slocum G3	49
3.28	Θέσεις Στόχων HDS κατά την Τρισδιάστατη Αποτύπωση του Glider	50
3.29	Κάτοψη των θέσεων που πραγματοποιήθηκαν στάσεις με τη χρήση Επίγειου Σαρωτή.	50
3.30	Στιγμιότυπα από τη διαδικασία αποτύπωσης του ρομποτικού συστήματος τύπου Glider μέσα από τη χρήση τεχνολογίας Laser Scanner (Leica RTC 360) και Γεωδαιτικού Σταθμού (Leica TDRA 6000).	51
3.31	Εικόνα από την διαδικασία συνένωσης μεταξύ των διαφορετικών στάσεων	52
3.32	Εικόνα απόδοσης σημείων μέτρησης για την εξαγωγή του Συστήματος Συντεταγμένων.	54
3.33	Διάγραμμα Οπτικοποίησης τρόπου Προσδιορισμού Κελμμένης Απόστασης και Χρόνου Μετάδοσης	55
3.34	Κάτοψη από τους διάφορους μόνιμα εγκατεστημένους σταθμούς αναφοράς	57
3.35	Evologics S2CR 18/34.	59
3.36	Αντιστάθμιση Κινήσεων Σκάφους Αποστολής	59
3.37	Σημείο Αναφοράς Μέτρησης Συστήματος Mission Control	60
3.38	Αναπαράσταση τρόπου μετάδοσης των ακουστικών παλμών από τον transceiver	60
3.39	Συνδεσιμότητα αισθητήρα Evologics USBL S2CR 18/34.	61
3.40	Evologics USBL S2C OEM	61
3.41	Σχέδιο Συνδεσμολογίας πλακέτας-USBL	63
3.42	Συνδεσμολογία USBL-πλακέτας	63
3.43	Δορυφορικός Δέκτης Leica GS18	63
3.44	Συνδεσμολογία για Επίτευξη Χρονικής Τροφοδοσίας μεταξύ GNSS-USBL	65
3.45	Λογισμικό Επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήρων USBL - Evologics AMA	66
3.46	Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμων Διαχείρισης Δεδομένων GNSS-USBL	68
3.47	Περιοχή Διεξαγωγής Πειράματος (Αντίκυρα)	69
3.48	Κατανομή βαρών στο Glider	70
3.49	Πειράματα Ευστάθειας	70
3.50	Πειράματα Ευστάθειας στη Θάλασσα	71
4.1	Τρισδιάστατο Νέφος Σημείων Ρομποτικού Συστήματος Σκάφους	72
4.2	Τρισδιάστατη Αναπαράσταση των διαφορών που μετρήθηκαν	73
4.3	Τρισδιάστατο Νέφος Σημείων Ρομποτικού Συστήματος Glider	73
4.4	Δορυφορική Εικόνα περιοχής Διεξαγωγής του Πειράματος	74
4.5	Μια βύθιση στα 100 μέτρα	75
4.6	Υποθαλάσσιος Εντοπισμός Glider σε αποστολή Γραμμικής Βύθισης 100 μέτρων βάθους	75
4.7	Διάγραμμα Ταχυτήτων Βύθισης-Ανάδυσης σε μέγιστο βάθος των 100 μέτρων	75
4.8	Διάγραμμα θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, αλατότητας αλλά και βάθους στη περίπτωση Γραμμικής Βύθισης-Ανάδυσης σε μέγιστο βάθος των 100 μέτρων	76
4.9	Τρεις Γραμμικές Βυθίσεις σε μέγιστο βάθος των 60 μέτρων	77

4.10	Υποθαλάσσιος Εντοπισμός Glider σε αποστολή Τριών Γραμμικών Βυθίσεων σε 60 μέτρα βάθος . . . . .	77
4.11	Διάγραμμα θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, αλατότητας αλλά και βάθους στη περίπτωση Γραμμικής Βύθισης-Ανάδυσης σε μέγιστο βάθος των 60 μέτρων . . .	78
4.12	Βύθιση στα 200 μέτρα μέσω ελικοειδούς μορφής . . . . .	79
4.13	Εικόνα Τρισδιάστατης Αναπαράστασης πορείας υποβρύχιου ρομποτικού συστήματος μέσω ελικοειδούς βύθισης σε βάθος 200 μέτρων . . . . .	79
4.14	Διάγραμμα Ταχυτήτων Βύθισης-Ανάδυσης σε πείραμα ελικοειδούς μορφής με μέγιστο βάθος 200 μέτρα . . . . .	80
4.15	Διάγραμμα θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, αλατότητας αλλά και βάθους στη περίπτωση χρήσης ελικοειδούς βύθισης σε βάθος των 200 μέτρων . . . . .	80
4.16	Βύθιση σπειροειδούς μορφής στα 400 μέτρα . . . . .	81
4.17	Εικόνα Τρισδιάστατης Αναπαράστασης πορείας υποβρύχιου ρομποτικού συστήματος μέσω σπειροειδούς βύθισης σε βάθος 400 μέτρων . . . . .	81
4.18	Διάγραμμα Ταχυτήτων Βύθισης-Ανάδυσης σε πείραμα σπειροειδούς μορφής με μέγιστο βάθος 400 μέτρα . . . . .	82
4.19	Διάγραμμα θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, αλατότητας αλλά και βάθους στη περίπτωση χρήσης σπειροειδούς βύθισης σε βάθος των 400 μέτρων . . . . .	82
4.20	Βύθιση στα 300 μέτρα ανάδυση στα 150 μέτρα, βύθιση στα 300 και ανάδυση έως την ελεύθερη επιφάνεια μέσω σπειροειδούς μορφής . . . . .	83
4.21	Εικόνα Τρισδιάστατης Αναπαράστασης πορείας υποβρύχιου ρομποτικού συστήματος σε βάθος 300 μέτρων . . . . .	83
4.22	Διάγραμμα Ταχυτήτων Βύθισης-Ανάδυσης σε πείραμα σπειροειδούς μορφής με μέγιστο βάθος 300 μέτρα . . . . .	84
4.23	Διάγραμμα θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, αλατότητας αλλά και βάθους στη περίπτωση χρήσης ελικοειδούς βύθισης σε βάθος των 300 μέτρων . . . . .	85
4.24	Συνολικό Διάγραμμα Απόδοσης Ταχυτήτων Γραμμικής Ανάδυσης και Βύθισης	85
4.25	Συνολικό Διάγραμμα Απόδοσης Ταχυτήτων Σπειροειδούς Ανάδυσης και Βύθισης	85
4.26	Γενικό Διάγραμμα απόδοσης θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, αλατότητας αλλά και βάθους για όλες τις αποστολές που εκτελέστηκαν . . . . .	86
4.27	Στιγμιότυπα από τη διαδικασία διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας. . . .	86

## Κατάλογος πινάκων

3.1	Τεχνικά Χαρακτηριστικά Επίγειου Σαρωτή (Leica RTC 360) . . . . .	37
3.2	Τεχνικά Χαρακτηριστικά Γεωδαιτικού Σταθμού Leica TDRA6000 . . . . .	40
3.3	Τεχνικά Χαρακτηριστικά Σκάφους . . . . .	42
3.4	Πίνακας Μετασχηματισμού Ελαχίστων Τετραγώνων μεταξύ Μετρήσεων Laser Scanner & Γεωδαιτικού Σταθμού . . . . .	46
3.5	Στατιστικά Στοιχεία Βέλτιστου Επιπέδου Αναφοράς . . . . .	47
3.6	Στατιστικά Στοιχεία Βέλτιστης Ευθείας Αναφοράς . . . . .	47
3.7	Πίνακας Μετασχηματισμού Ελαχίστων Τετραγώνων μεταξύ Μετρήσεων Laser Scanner & Γεωδαιτικού Σταθμού . . . . .	52
3.8	Στατιστικά Στοιχεία από την Εφαρμογή των Βέλτιστων Κύκλων με τη Μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων . . . . .	53
3.9	Στατιστικά Στοιχεία Δημιουργίας Βέλτιστης Ευθείας Αναφοράς. . . . .	54
3.10	Χαρακτηριστικά της συσκευής EnoLogics S2CR 18/34 . . . . .	59
3.11	Τεχνικά χαρακτηριστικά του S2CR 18/34 USBL . . . . .	62
3.12	Τεχνικά χαρακτηριστικά του <i>Leica GS18</i> . . . . .	64
3.13	Παράμετροι του Ελληνικού Γεωδαιτικού Συστήματος Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87) . . . . .	64
3.14	Στοιχεία Μηνύματος USBLLONG . . . . .	67
4.1	Αποτελέσματα Διαφορών κέντρου πρόσδεσης USBL και Φασματικού κέντρου δορυφορικού Δέκτη . . . . .	73
4.2	Αποτελέσματα Διαφορών κέντρου USBL και Φασματικού κέντρου Κεραίας Glider . . . . .	74
4.3	Διαγράμματα Ταχυτήτων σε Αποστολή τριών βυθίσεων Βάθους 60 μέτρων . . . . .	78

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Στο παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο, παρατίθενται γενικές πληροφορίες σχετικά με τους υποθαλάσσιους εντοπισμούς και τις μεθόδους χρήσης τους, εστιάζοντας κυρίως σε αυτόνομα συστήματα (Glider) που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Ακολουθεί μια παρουσίαση των στόχων, των κινήτρων και της συνεισφοράς της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Τέλος, γίνεται συνοπτική περιγραφή της δομής και της διάρθρωσης των κεφαλαίων της εργασίας.

### 1.1 Αντικείμενο και Στόχοι Εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εστιάζει στον ακριβή υποθαλάσσιο εντοπισμό ενός ρομποτικού συστήματος τύπου Glider (Slocum Glider G3). Για το σκοπό αυτό, αξιοποιείται ένας συνδυασμός προηγμένων τεχνολογιών, όπως Ultra Short Baseline (USBL), σύγχρονοι δορυφορικοί δέκτες Global Navigation Satellite System (GNSS), τρισδιάστατος επίγειος σαρωτής (3D Laser Scanner) και βιομηχανικός γεωδαιτικός σταθμός (Total Station).

#### Στόχοι της Εργασίας

Οι κύριοι στόχοι της εργασίας είναι οι εξής:

##### 1. Ανάλυση και Αξιολόγηση της Τεχνολογίας USBL:

Παρουσίαση των τεχνολογικών χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων του συστήματος USBL για τον υποθαλάσσιο εντοπισμό, καθώς και αξιολόγηση της ακρίβειας και αξιοπιστίας του σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες, όπως οι δορυφορικοί δέκτες GNSS.

2. Χρήση Μετρολογικού Εξοπλισμού: Μέτρηση σχετικών θέσεων μεταξύ του εξοπλισμού (USBL-GNSS) που χρησιμοποιήθηκε για τον υποθαλάσσιο εντοπισμό με σκοπό την βελτίωση της ακρίβειας του τελικού αποτελέσματος.

3. Πρακτική Εφαρμογή και Μελλοντικές Βελτιώσεις: Εφαρμογή της μεθοδολογίας για τον εντοπισμό υποβρύχιων αντικειμένων και πρόταση μελλοντικών βελτιώσεων στις τεχνικές και στα εργαλεία που χρησιμοποιούνται.

Οι παραπάνω στόχοι αποσκοπούν στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης για τον υποθαλάσσιο εντοπισμό, αξιοποιώντας σύγχρονες τεχνολογίες και μεθόδους προκειμένου να βελτιωθούν η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα των υποβρύχιων αποστολών.

### 1.2 Κίνητρο και Συνεισφορά Εργασίας

Το κίνητρο για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας προέρχεται από την ανάγκη για ακριβή και αξιόπιστη υποθαλάσσια χαρτογράφηση και εντοπισμό, στοιχεία που εί-



ναι κρίσιμα για πολλές εφαρμογές, όπως η επιστημονική έρευνα, η θαλάσσια βιολογία και η διαχείριση θαλάσσιων πόρων. Η αυξανόμενη χρήση ρομποτικών συστημάτων, όπως το Glider, για την εξερεύνηση και μελέτη του θαλάσσιου περιβάλλοντος τεκμηριώνει τη σημασία της ανάπτυξης και βελτίωσης των τεχνολογιών εντοπισμού.

Η συνεισφορά της εργασίας έγκειται στην:

1. **Ανάπτυξη Μεθοδολογίας:** Δημιουργία μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας υποθαλάσσιου εντοπισμού που συνδυάζει προηγμένες τεχνολογίες όπως USBL και GNSS, παρέχοντας ένα μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικές αποστολές.
2. **Βελτίωση Ακρίβειας:** Με την εκτίμηση και τη βελτίωση των σχετικών θέσεων μεταξύ του εξοπλισμού (USBL-GNSS), η εργασία συμβάλλει στη μείωση των σφαλμάτων στον εντοπισμό, ενισχύοντας έτσι την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
3. **Προτάσεις Βελτίωσης:** Παροχή συστάσεων για μελλοντικές τεχνικές και εργαλεία, ανοίγοντας το δρόμο για περαιτέρω έρευνες και εξελίξεις στο πεδίο των υποθαλάσσιων εφαρμογών.

Μέσω αυτής της εργασίας, επιδιώκεται η βέλτιστη κατανόηση των δυνατοτήτων και περιορισμών των διαθέσιμων τεχνολογιών, καθώς και η προώθηση καινοτόμων προσεγγίσεων που θα υποστηρίξουν την ανάπτυξη αποτελεσματικών υποβρύχιων αποστολών.

## 1.3 Δομή Εργασίας

Μετά το Κεφάλαιο 1, που αποτελεί εισαγωγή στο αντικείμενο, κίνητρο και συνεισφορά της μεταπτυχιακής εργασίας, το τεύχος αναπτύσσεται σε τέσσερα ακόμη κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 περιλαμβάνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας. Αρχικά, περιγράφεται ο τρόπος διάδοσης ενός ακουστικού παλμού, σε δεύτερο στάδιο γίνεται αναφορά στον τρόπο με τον οποίο οι περιβαλλοντικές παράμετροι όπως η θερμοκρασία η αλατότητα και η ταχύτητα διάδοσης επηρεάζουν την παραπάνω διάδοση και τέλος γίνεται ανασκόπηση των διαθέσιμων τεχνολογιών, με έμφαση στη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται όλο το μεθοδολογικό πλαίσιο με σκοπό τον υποθαλάσσιο εντοπισμό ενός υποβρύχιου αυτόνομου οχήματος το οποίο αποτελείται από την τρισδιάστατη αποτύπωση τόσο του σκάφους επιφανείας όσο και του υποθαλάσσιου με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό των σχετικών τους θέσεων με σκοπό τη μελέτη των περιβαλλοντικών παραμέτρων του θαλάσσιου ύδατος. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω διαδικασίες ενώ υλοποιείται εκτενής αξιολόγησή τους. Τέλος, το Κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει τα τελικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας και των επιμέρους τεχνικών καθώς και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, ενώ δίνονται προτάσεις για μελλοντική βελτίωση και επέκταση του αντικειμένου. Το τεύχος ολοκληρώνεται με την παράθεση της βιβλιογραφίας που αξιοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας.

# Κεφάλαιο 2

## Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Ακουστικά Κύματα στο Θαλάσσιο Περιβάλλον

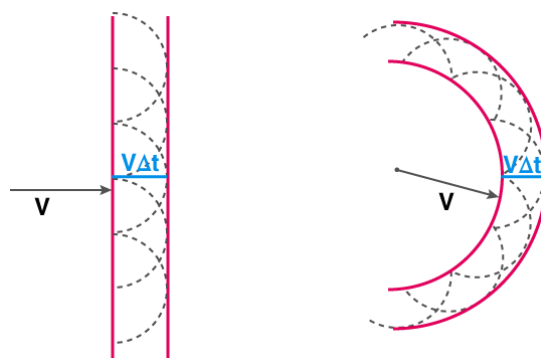
Τα ακουστικά κύματα (acoustic waves), τα οποία παράγουν την αίσθηση του ήχου στο ανθρώπινο αυτί, είναι κύματα συμπίεσης (διαταραχές πίεσης), που διαδίδονται μέσα σε ένα ακουστικό μέσο. Το ακουστικό μέσο (ή μέσο διάδοσης του ήχου) μπορεί να είναι ρευστό (υγρό ή αέριο), στερεό ή και συνδυασμός των ανωτέρω. Αντίστοιχα με τα ακουστικά είναι τα υπερηχητικά κύματα (ultrasonic waves) και υποηχητικά κύματα (infrasonic waves), των οποίων οι συχνότητες είναι εκτός των ορίων της ανθρώπινης ακοής (υψηλότερες ή χαμηλότερες, αντίστοιχα). Η διάδοση των ακουστικών κυμάτων βρίσκει πολλές και σημαντικές εφαρμογές στη θάλασσα. Το θαλάσσιο περιβάλλον αποτελεί ένα φυσικό κυματοδηγό, ο οποίος περιορίζεται άνωθεν από την ελεύθερη επιφάνεια και κάτωθεν από το θαλάσσιο πυθμένα. Λόγω του γεγονότος αυτού, και επειδή η απορρόφηση της ακουστικής ενέργειας (ισχύος) από το θαλασσινό νερό είναι πολύ μικρή, τα ακουστικά κύματα μπορούν να διαδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις μέσα στη θάλασσα (ως πολλές εκατοντάδες χιλιόμετρα). Γι' αυτό το λόγο, ακουστικά κύματα χρησιμοποιούνται στη θάλασσα για βαθυμετρήσεις, ανίχνευση και παρακολούθηση αντικειμένων, υποθαλάσσια τηλεπικοινωνία και μετάδοση πληροφοριών, τομογραφική διερεύνηση των θαλασσιών μαζών και του πυθμένα της θάλασσας και πολλές άλλες εφαρμογές [3], [4].

### 2.2 Η φύση των ακουστικών διαταραχών

Ένα ακουστικό κύμα είναι μία διαταραχή της πίεσης ενός μέσου που διαδίδεται μέσα στο μέσον αυτό. Για να γίνει δυνατή η μετάδοση της διαταραχής, το μέσον πρέπει να είναι συμπιεστό (να επιτρέπει αυξομειώσεις της πυκνότητας) και τα ακουστικά κύματα χαρακτηρίζονται ως κύματα συμπίεστικότητας (compressional waves). Η διαταραχή προέρχεται από την ακουστική πηγή που με κάποιο φυσικό τρόπο (π.χ. ταλάντωση ή έκρηξη) διαταράσσει την κατάσταση ισορροπίας του μέσου με έμφαση στα κινητικά χαρακτηριστικά των στοιχειωδών σωματιδίων που το αποτελούν και προκαλεί αυξομειώσεις των μεγεθών που υπεισέρχονται στην μηχανική συμπεριφορά του υλικού, όπως είναι η πυκνότητα, η πίεση, και η ταχύτητα των στοιχειωδών σωματιδίων. Ανάλογα με το μέγεθος της διαταραχής η πηγή χαρακτηρίζεται ως μεγάλης ή μικρής έντασης. Είναι αυτονόητο ότι η ακουστική διαταραχή προσδίδει ενέργεια στο σύστημα που χαρακτηρίζεται ως “ακουστική ενέργεια”.

## 2.3 Ακουστικά Κύματα

Η ακουστική διαταραχή διαδίδεται στο ακουστικό μέσο με μία διαδικασία μπορεί να περιγραφεί ως μία διαδοχική διέγερση των στοιχειωδών σωματιδίων του ακουστικού μέσου. Εάν θεωρήσουμε μία σημειακή πηγή, η αρχή του Huygens μας δίνει παραστατικά τη διαδικασία αυτή για ομογενή και ισότροπα μέσα. Σύμφωνα με αυτή, μία διαταραχή που έχει φτάσει σε συγκεκριμένο σημείο του ακουστικού χώρου δρα ως νέα πηγή που λόγω συμμετρίας στέλνει ακουστική ενέργεια σε μέτωπα που έχουν τη μορφή σφαιρικών επιφανειών. Συνθέτοντας τις νέες αυτές επιφάνειες παίρνει κανείς το νέο «μέτωπο κύματος» κ.ο.κ.. Η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής παίρνει συγκεκριμένη τιμή που μπορεί να μεταβάλλεται με το χώρο και το χρόνο. Εάν η ταχύτητα θεωρηθεί σταθερή και ίση με  $c$ , η διανυθείσα από το μέτωπο κύματος απόσταση σε χρόνο  $\Delta t$  είναι  $\Delta R = c\Delta t$  [14].



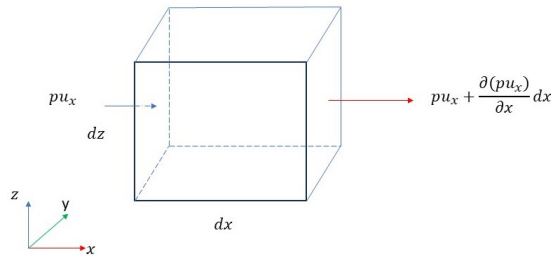
Εικόνα 2.1: Εφαρμογή της αρχής του Huygens σε επίπεδο και σφαιρικό κύμα σε ομογενές μέσο

## 2.4 Ακουστική Εξίσωση

Η μελέτη των χαρακτηριστικών διάδοσης των κυμάτων προϋποθέτει τη διατύπωση των εξισώσεων που διέπουν τη μεταβολή των χαρακτηριστικών μεγεθών του μέσου. Τα μεγέθη αυτά είναι η πίεση  $p$ , η ταχύτητα των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου  $\vec{u}$  (διανυσματικό μέγεθος) και η πυκνότητα  $\rho$ , που είναι συναρτήσεις των χωρικών μεταβλητών και του χρόνου,  $p = p(\vec{x}, t)$ ,  $\vec{u} = \vec{u}(\vec{x}, t)$ ,  $\rho = \rho(\vec{x}, t)$ , όπου  $\vec{x}$  αντιπροσωπεύει τις χωρικές μεταβλητές. Έτσι ξεκινώντας με την ανάπτυξη της ακουστικής εξίσωσης για ρευστό ακουστικό μέσο στις τρεις διαστάσεις και τονίζοντας πως τα ακουστικά κύματα είναι "διαμήκη" (η διεύθυνση διάδοσής τους είναι παράλληλη στη διεύθυνση ταλάντωσης των σωματιδίων που αποτελούν το μέσο διάδοσης), η ακουστική εξίσωση προκύπτει από την εφαρμογή των βασικών εξισώσεων των συμπίεστων ρευστών που διέπουν τις μεταβολές των χαρακτηριστικών μεγεθών του μέσου. Αναλυτικά για τον προσδιορισμό των τριών ανεξάρτητων ποσοτήτων κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη τριών ανεξάρτητων εξισώσεων για τον υπολογισμό των παραπάνω. Αυτές ορίζονται ως:

1. Εξίσωση Συνέχειας
2. Εξίσωση Euler
3. Καταστατική Εξίσωση

Με βάση τις προϋποθέσεις πως το ρευστό είναι ομογενές, ισότροπο και δεν υπάρχουν μηχανισμοί που να δημιουργούν συνεκτικότητα (viscosity) ή μεταφορά θερμότητας και αμελώντας την επίδραση της βαρύτητας και τέλος οι τιμές πίεσης και πυκνότητας παραμένουν σταθερές σε όλο τον όγκο του ρευστού οι παραπάνω εξισώσεις αναπτύσσονται ως εξής:



Εικόνα 2.2: Στοιχειώδης Όγκος Ρευστού για την Εφαρμογή των Εξισώσεων Συνέχειας - Euler

## 2.4.1 Εξίσωση Συνέχειας

Θεωρώντας έναν όγκο ρευστού

$$dV = dx dy dz$$

(Εικόνα 2.2), σταθερός σε χώρο και μέσω όπου διέρχεται το ρευστό, ο ρυθμός ροής του υγρού διαμέσου του όγκου αυτού, πρέπει να είναι ίσος με το ρυθμό αύξησης ή μείωσης της μάζας του ρευστού στον όγκο.

Η καθαρή ροή του ρευστού κατά τον άξονα των  $X$  είναι:

$$[\rho u_x - [\rho u_x + \frac{\partial \rho u_x}{\partial x}]] dy dz = [\frac{\partial \rho u_x}{\partial x}] dV$$

Όπου

$$u_x$$

είναι η συνιστώσα της ταχύτητας κατά τον  $X$  άξονα.

Αντιστοίχως για τους υπόλοιπους άξονες,

$$-[\frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z}] dV = -[\nabla \cdot (\rho \vec{u})] dV$$

Η καθαρή ροή διαμέσου του όγκου ισοδυναμεί με την μεταβολή της μάζας του όγκου στη μονάδα του χρόνου που είναι:

$$[\frac{\partial \rho}{\partial t}] dV$$

Εξισώνοντας τα παραπάνω προκύπτει:

$$-[\nabla \cdot (\rho \vec{u})] = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Η εξίσωση 2.4.1 ονομάζεται εξίσωση **Συνέχειας**, μη γραμμική (λόγο του δεύτερου όρου της )



## 2.4.2 Εξίσωση Euler

Θεωρώντας πάλι ένα στοιχειώδη όγκο ρευστού  $dV = dx dy dz$  που κινείται, η επιτάχυνση της στοιχειώδους μάζας του ρευστού που περιέχεται στον όγκο είναι  $\vec{a}(\vec{x}, t) = \vec{a}(x, y, z, t)$  και σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Newton συνδέεται με τη δύναμη  $\partial f$  που ενεργεί στη μάζα, μέσω της σχέσης:

$$d\vec{f} = \vec{a} dm$$

Αμελώντας τη συνεκτικότητα η καθαρή δύναμη που επενεργεί στον στοιχειώδη όγκο κατά τη  $x$  διεύθυνση, οφείλεται στην καθαρή πίεση που επενεργεί στη πλευρά  $dy dz$  και είναι:

$$df_x = [p - (p + \frac{\partial p}{\partial x} dx)] dy dz = -\frac{\partial p}{\partial x} dV$$

ενώ στις τρεις διαστάσεις διαμορφώνεται ως εξής:

$$d\vec{f} = -\nabla p dV$$

Η επιτάχυνση σύμφωνα και με τον ορισμό της είναι :

$$\vec{a}(x, y, z, t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \left( \frac{\vec{u}(x + u_x dt, y + u_y dt, z + u_z dt, t + dt) - \vec{u}(x, y, z, t)}{dt} \right)$$

Αναπτύσσοντας την παραπάνω εξίσωση σε σειρά *Taylor* ως προς την ταχύτητα, κρατώντας όρους πρώτης τάξης και αξιοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η εξίσωση:

$$-\nabla p = \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}$$

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως **Εξίσωση Euler** και είναι και πάλι μη γραμμική ([16]).

## 2.4.3 Καταστατική Εξίσωση

Η καταστατική εξίσωση είναι χαρακτηριστική του μέσου στο οποίο διαδίδεται η κυματική διαταραχή και συσχετίζει τις μεταβολές της πίεσης και της πυκνότητας. Θεωρώντας αδιαβατικές μεταβολές στο ρευστό, η καταστατική εξίσωση δεν περιλαμβάνει όρο που να σχετίζεται με την εντροπία και εκφράζεται μέσω της γενικής σχέσης:

$$p = g(\rho)$$

όπου η μορφή της συνάρτησης  $g$  εξαρτάται από το υλικό μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η διάδοση και, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, διαφοροποιείται αυτή ανάλογα με το είδος του ρευστού.

## 2.4.4 Γραμμικοποιημένη Κυματική Εξίσωση

Στη φύση, η μεταβολή της πίεσης ενός ακουστικού μέσου που προέρχεται από μια ηχητική πηγή δημιουργεί μικρές μεταβολές των παραμέτρων του ακουστικού μέσου. Έτσι με αφετηρία τις τιμές των παραμέτρων στο μέσο όταν δεν υπάρχει ακουστική διαταραχή, οι αντίστοιχες ποσότητες μπορούν να αναπαρασταθούν ως αθροίσματα τιμών ισορροπίας και μικρών μεταβολών ([15]):

$$p = p_o(\vec{x}, t) + E p_1(\vec{x}, t)$$

$$p = p_o(\vec{x}, t) + Ep_1(\vec{x}, t)$$

$$\vec{u} = \vec{u}_o(\vec{x}, t) + E\vec{u}_1(\vec{x}, t)$$

Όπου,

Η παράμετρος  $E$ , χαρακτηρίζει τις μικρές μεταβολές. Αντίστοιχα, ο δείκτης  $O$  χαρακτηρίζει τις τιμές στο ακουστικό αδιατάρακτο μέσον, ενώ ο δείκτης  $1$  χαρακτηρίζει τις μεταβολές λόγω της ακουστικής διέγερσης. Αντικαθιστώντας στις παραπάνω τις παραπάνω εκφράσεις στην εξίσωση συνέχειας και εξισώνοντας τους ίδιους όρους δύναμης του  $E$  προκύπτει:

$$\frac{\partial p_o}{\partial t} + \nabla(p_o \vec{u}_o) = 0$$

Υποθέτοντας αδιατάρακτο ρευστό σε ισορροπία ( $\vec{u}_o = 0$ ) και κατά συνέπεια  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ , η πυκνότητα ισορροπίας δεν εξαρτάται από το χρόνο ( $p_o = p(\vec{x})$ ). Έτσι, εξισώνονται τους όρους πρώτης τάξης ως προς  $E$  προκύπτει:

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} + \nabla(p_o \frac{\vec{u}_1}{\partial t}) \quad (2.1)$$

Και κατά συνέχεια ως προς την εξίσωση Euler:

$$-\nabla p_1 = p_o \frac{\partial u_1}{\partial t} \quad (2.2)$$

Αμελώντας πάλι τους όρους δεύτερης τάξης ως προς  $E$  και υποθέτοντας μηδενική ταχύτητα ισορροπίας ( $\vec{u}_o = 0$ ).

Όσον αφορά στην καταστατική εξίσωση, αναπτύσσοντας πάλι κατά Taylor γύρω από την τιμή ισορροπίας (δείκτης  $0$ ) και αμελώντας όρους δεύτερης τάξης και άνω, προκύπτει η σχέση:

$$p_1 = \left( \frac{\partial p}{\partial P} \right)_0 p_1 \quad (2.3)$$

Από τις εξισώσεις 2.1, 2.2, 2.3 αποκλίνοντας τους δυο όρους Euler, παραγωγίζοντας ως προς τον χρόνο την εξίσωση συνέχειας, η καταστατική εξίσωση διαμορφώνεται:

$$p_1 = p_1 \frac{1}{\left( \frac{\partial P}{\partial p} \right)_0} \quad (2.4)$$

Ορίζουμε τον όρο  $\frac{\partial P}{\partial p}_0 \equiv c^2$  και αντικαθιστώντας την πυκνότητα διαταραχής  $p_1$  στην 2.4 καταλήγουμε:

$$\nabla^2 p_1 = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

Η 2.5 ονομάζεται γραμμικοποιημένη ακουστική εξίσωση, όπου ο όρος  $c$  αντιπροσωπεύει τη ταχύτητα διάδοσης του κύματος και εκφράζει τη φύση των ακουστικών διαταραχών. Η λύση της παραπάνω εξίσωσης δίδεται προσεγγιστικά μέσω της μεθόδου του χωρισμού μεταβλητών (χρόνου και χώρου) όπου η παραπάνω μέθοδος οδηγεί σε μια μερική διαφορική εξίσωση για μια συνάρτηση πολλών μεταβλητών η οποία μπορεί να χωριστεί σε μια ομάδα συνήθων διαφορικών εξισώσεων κάθε μια από τις οποίες ορίζεται για μια συνάρτηση που εξαρτάται από μία μόνο μεταβλητή. Η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου δεν είναι πάντα εφικτή ιδιαίτερα για την κυματική εξίσωση όπου ο χωρισμός είναι δυνατός σε έντεκα συστήματα συντεταγμένων ([17]). Επιπλέον, ο όρος  $\frac{1}{c^2}$  της κυματικής εξίσωσης θα πρέπει να είναι είτε άθροισμα όρων καθέναν από τους οποίους να εξαρτάται από μια μόνο μεταβλητή ή να είναι ο ίδιος συνάρτηση μιας μεταβλητής. Θεωρώντας πως ισχύουν οι παραπάνω υποθέσεις, η λύση του προβλήματος οδηγεί

σε απλές εξισώσεις οι οποίες αναφέρονται στη διάδοση του ήχου στη θάλασσα (Ray Theory-Ray Tracing).

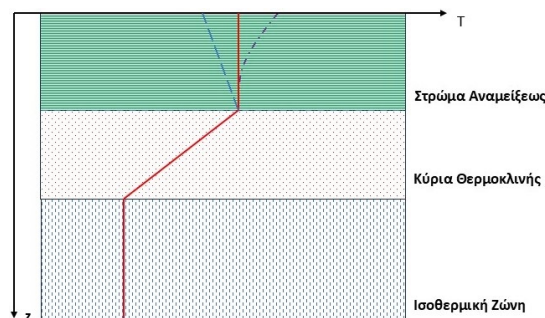
Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, ένας ακουστικός παλμός κατά τη διάδοσή του επηρεάζεται κυρίως από τις ακουστικές παραμέτρους οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

## 2.5 Ακουστικές Παράμετροι

Οι σημαντικότερες φυσικές παράμετροι, τις οποίες μελετά η παρούσα εργασία και που επηρεάζουν σημαντικά τη διάδοση των ακουστικών κυμάτων στη θάλασσα είναι η **θερμοκρασία**, η **αλατότητα** του θαλασσινού νερού, η **ταχύτητα του ήχου στο νερό**, η **πυκνότητα**, η **ύπαρξη διαστρωματώσεων** της στήλης του νερού, η **γεωμορφολογία**, η **σύσταση του θαλάσσιου πυθμένα** καθώς και η **κατάσταση της θάλασσας** από άποψη κυματισμών. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, μελετάται ιδιαίτερα η μεταβολή των τριων πρώτων παραμέτρων. Συγκεκριμένα,

### 2.5.1 Κατανομή της Θερμοκρασίας στο Θαλάσσιο Περιβάλλον

Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται μια τυπική μορφή της κατακόρυφης κατανομής της θερμοκρασίας στη στήλη του θαλασσινού νερού η οποία παρουσιάζει μέγιστο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Το πρώτο στρώμα κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια, πάχους ένας περίπου εκατό μέτρων, ονομάζεται στρώμα αναμείξεως. Στην περιοχή αυτή η δράση των θαλασσιών κυματισμών συντελεί σε μια εξισορρόπηση της θερμοκρασίας του νερού σε σταθερά επίπεδα. Τα επίπεδα αυτά διαφοροποιούνται ανάλογα με την εποχή αλλά και την ώρα της ημέρας. Ειδικότερα κατά τους θερινούς μήνες αλλά και τις θερμότερες ώρες της ημέρας, το κατακόρυφο προφίλ της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού παρουσιάζει μια τοπική αύξηση κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια (Εικόνα 2.3). Αντίθετα κατά τους χειμερινούς μήνες, η μέση θερμοκρασία στο στρώμα αναμείξεως παραμένει σταθερή με μικρή τάση μείωσης κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια. Κάτω από το στρώμα αναμείξεως υπάρχει η κύρια θερμοκλιής ζώνη, η οποία συνήθως έχει πάχος αρκετές εκατοντάδες μέτρα, όπου η θερμοκρασία ελαττώνεται με σταθερό ρυθμό, λόγω αύξησης του βάθους και ελάττωσης της ροής της θερμότητας από την ελεύθερη επιφάνεια. Σε πολύ μεγαλύτερα βάθη, η θερμοκρασία σταθεροποιείται στους περίπου 3 °C ως αποτέλεσμα της θερμοδυναμικής ισορροπίας του θαλασσινού νερού σε μεγάλη πίεση.

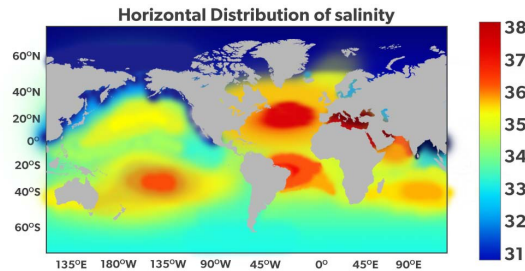


Εικόνα 2.3: Κατακόρυφη Κατανομή Θερμοκρασίας Θαλασσινού Νερού

### 2.5.2 Κατανομή της Αλατότητας στο Θαλάσσιο Περιβάλλον

Η αλατότητα ως μέγεθος υποδεικνύει την μέση περιεκτικότητα διαλυμένων αλάτων σε αυτό. Τα ποσοστά που κυμαίνεται είναι 30 έως 45 %. Η διακύμανση της συγκεκριμένης παραμέ-

τρον δεν παρουσιάζει τόσο έντονη διαστρωμάτωση σαν αυτή της θερμοκρασίας. Οι τιμή της εξαρτάται κυρίως από τη γεωγραφική περιοχή. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα είναι αυτά του Ατλαντικού με ποσοστό 34-36 ‰ μικρότερα σε σύγκριση με αυτά της Μεσογείου με ποσοστά 36 ‰ ([18]). Εκτός από τα παραπάνω, η αλατότητα παρουσιάζει εντονότερη διακύμανση στην παράκτια ζώνη, όπου για παράδειγμα στις εκβολές των ποταμών το θαλασσινό νερό τροφοδοτείται από γλυκό με αποτέλεσμα την έντονη πτώση της. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα από την κατανομή της παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 2.4: Μέση Ετήσια Κατανομή της Αλατότητας επί τοις ‰

### 2.5.3 Κατανομή της Αγωγιμότητας στο Θαλάσσιο Περιβάλλον

Η αγωγιμότητα στη θάλασσα είναι το μέτρο της ικανότητας του θαλασσινού νερού να αγωγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η ικανότητα εξαρτάται άμεσα από την αλατότητα, καθώς η αγωγιμότητα αυξάνεται με την περιεκτικότητα του νερού σε διαλυμένα άλατα. Τα ιόντα που βρίσκονται στα διαλυμένα άλατα (όπως το νάτριο και το χλώριο) επιτρέπουν στο νερό να αγωγει το ηλεκτρικό ρεύμα πιο εύκολα.

Η θερμοκρασία αποτελεί επίσης σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την αγωγιμότητα. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τόσο αυξάνεται και η αγωγιμότητα του νερού, καθώς τα ιόντα κινούνται πιο ελεύθερα. Στη θάλασσα, όπου η αλατότητα κυμαίνεται μεταξύ 30 και 45 ‰, η αγωγιμότητα είναι υψηλότερη σε σχέση με το γλυκό νερό, όπου η αλατότητα είναι πολύ χαμηλότερη ([19]).

Συνεπώς, οι περιοχές με υψηλότερη αλατότητα, όπως η Μεσόγειος, έχουν μεγαλύτερη αγωγιμότητα σε σύγκριση με τον Ατλαντικό ή τις παράκτιες ζώνες κοντά στις εκβολές ποταμών, όπου η αλατότητα είναι χαμηλότερη λόγω της ανάμειξης με γλυκό νερό. Η αγωγιμότητα της θάλασσας χρησιμοποιείται συχνά ως μέτρο για την εκτίμηση της αλατότητας, μέσω ειδικών αισθητήρων που μετρούν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού και υπολογίζουν την αλατότητα βάσει αυτής της μέτρησης.

Η αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 3 και 7 S/m (Siemens ανά μέτρο), ανάλογα με την αλατότητα και τη θερμοκρασία:

$$3 \text{ S/m} \leq \sigma \leq 7 \text{ S/m}$$

όπου  $\sigma$  είναι η αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού.

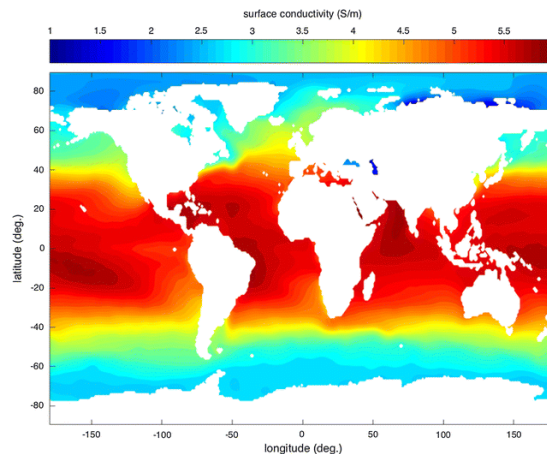
- Για περιοχές με χαμηλή αλατότητα, όπως κοντά στις εκβολές ποταμών:

$$\sigma \approx 3 - 4 \text{ S/m}$$

- Σε περιοχές με υψηλότερη αλατότητα, όπως στη Μεσόγειο:

$$\sigma \approx 5 - 6 \text{ S/m}$$

Η αγωγιμότητα αυξάνεται περίπου κατά 2-3% για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C.



Εικόνα 2.5: Μέση Ετήσια Κατανομή της Αγωγιμότητας (Conductivity) στο Θαλάσσιο Περιβάλλον

#### 2.5.4 Ταχύτητα του ήχου στη Θάλασσα

Η κατανομή της ταχύτητας του ήχου στη θάλασσα, επηρεάζει σε μέγιστο βαθμό τα φαινόμενα διάδοσης του ήχου στη θάλασσα, όπως αυτό αναλύθηκε και από τη κυματική εξίσωση. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητα και τη συμπιεστότητα του ακουστικού μέσου. Στη θάλασσα η πυκνότητα του νερού επηρεάζεται κυρίως από τη (στατική) πίεση, την αλατότητα και τη θερμοκρασία του νερού. Συνεπώς, η ταχύτητα του ήχου παρουσιάζει αυξητική συμπεριφορά καθώς παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση τόσο της θερμοκρασίας της αλατότητας αλλά και της υδροστατικής πίεσης της θάλασσας. Μέσω της παρακάτω εξίσωσης (2.6) γίνεται εφικτός ο υπολογισμός της ταχύτητας του ήχου στη θάλασσα ([20]):

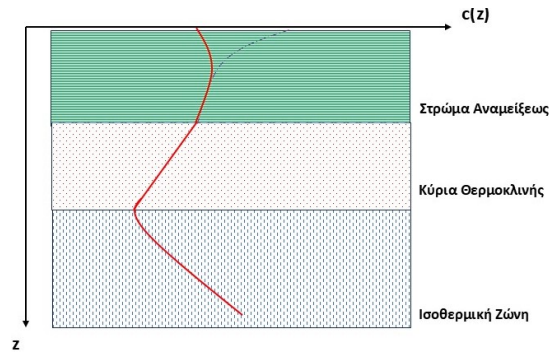
$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016z \quad (2.6)$$

όπου

1.  $c$  ταχύτητα του ήχου στο θαλασινό νερό  $\frac{m}{s}$
2.  $T$  θερμοκρασία σε °C
3.  $S$  αλατότητα σε ‰ ή ppt
4.  $z$  το βάθος σε m

Ο παραπάνω υπολογισμός οδηγεί σε τιμές από  $c=1450m/s$  έως  $c=1570m/s$ . Οι διακυμάνσεις αυτές και ιδιαίτερα η δημιουργία τοπικών ελαχίστων έχουν σημαντικό αποτέλεσμα στη μορφή διάδοσης του ήχου στη θάλασσα. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της διάθλασης. Εκτός όμως από τις παραπάνω παραμέτρους, σημαντικός παράγοντας επηρεασμού της ταχύτητας είναι και η εποχική και ημερήσια μεταβλητότητα αλλά και η γεωγραφική. Μια καμπύλη κατανομής της ταχύτητας του ήχου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.6:

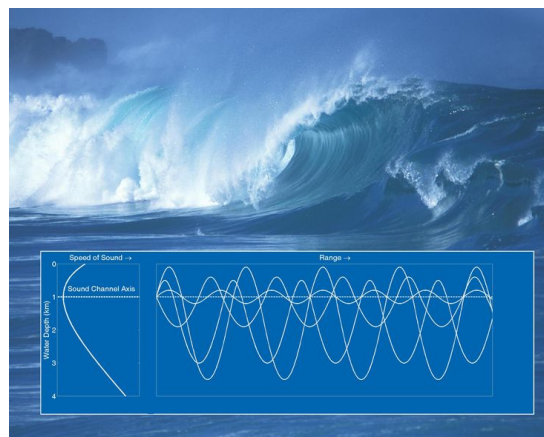
Στο παραπάνω σχήμα η ταχύτητα παρουσιάζει εντονότερη μεταβολή στο ανώτερο στρώμα του νερού και επηρεάζεται άμεσα από τη διάρκεια της ημέρας αλλά και από την εποχή. Για



Εικόνα 2.6: Κατακόρυφη Κατανομή της Ταχύτητας του Ήχου στο Θαλασινό Νερό

παράδειγμα τις θερμότερες ώρες της ημέρας με ήρεμη κατά μέσο όρο κατάσταση θάλασσας αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του ήχου. Στο πρώτο στρώμα (Στρώμα Αναμείξεως), όπου η θερμοκρασία παραμένει κατά μέσο όρο σταθερή με μικρές τροποποιήσεις αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ταχύτητα του ήχου να παραμένει κατά μέσο όρο σταθερή και να παρουσιάζει μια μικρή αύξηση στο κατώτερο τμήμα λόγω αύξησης του βάθους. Ακριβώς κάτω από αυτό (Κύρια Θερμοκλιής), η θερμοκρασία του νερού μειώνεται σημαντικά με αποτέλεσμα να παρουσιάζει την ανάλογη μείωση και η ταχύτητα. Τέλος, στο τμήμα της Ισοθερμικής Ζώνης, η ταχύτητα παρουσιάζει έντονη αύξηση καθώς το ποσοστό της υδροστατικής πίεσης αυξάνεται.

Ένα σημαντικό στοιχείο που πρέπει να αναφερθεί είναι πως απεικονίζοντας την εξάρτηση της ταχύτητας του ήχου από τη τυπική κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας και του βάθους, για σταθερή αλατότητα, παρατηρείται η ύπαρξη δυο τοπικών ελαχίστων. Το πρώτο εντοπίζεται στη θέση της ελεύθερης επιφάνειας και το επόμενο στο βαθύτερο όριο της κύριας θερμοκλιής ζώνης. Αυτό συμβαίνει διότι μεταξύ της κύριας θερμοκλιούς ζώνης, όπου η ταχύτητα του ήχου ελαττώνεται με το βάθος, και της ισοθερμικής ζώνης, υπάρχει κάποια θέση στην οποία η κατανομή της ταχύτητας του ήχου παρουσιάζει ελάχιστο. Το βάθος που αντιστοιχεί στην θέση αυτή ορίζει τον άξονα του βαθύως-υποβρυχίου ακουστικού καναλιού (Deep Underwater Sound Channel).

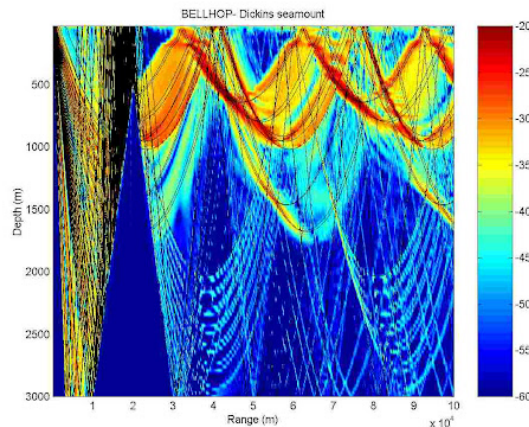


Εικόνα 2.7: Υποβρύχιο Ακουστικό Κανάλι

Αξιοποιώντας όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά αλλά και τις μεταβολές αυτών παρακάτω παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα διάδοσης των ακουστικών παλμών από μια σημειακή πηγή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8, είναι δυνατή η παρατήρηση ενός επιπλέον φαινομένου που ονομάζεται **ζώνη σκιάς** που παρατηρείται λόγω της καμπύλωσης των ηχητικών ακτίνων



λόγω διάθλασης. Οι ηχητικές ακτίνες δεν διαδίδονται στην περιοχή που εκτείνεται από 5km έως 15km και σε βάθος περίπου από 100m έως 300m.



Εικόνα 2.8: Διάδοση Ακουστικών Παλμών από Σημειακή Πηγή

Αξιοποιώντας τα παραπάνω στοιχεία αλλά και γενικότερα την ακουστική διάδοση παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές αυτών ανάλογα και με την περιοχή συχνοτήτων τους. Κάποιες από αυτές παρουσιάζονται στη παρακάτω ενότητα.

## 2.5.5 Υδροακουστικές εφαρμογές

Σε ότι αφορά στις υδροακουστικές εφαρμογές, οι περιοχές συχνοτήτων των ακουστικών κυμάτων που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές καλύπτουν ένα ευρύτατο φάσμα που αρχίζει από υποπολλαπλάσια του Hz και φτάνει ως πολλά KHz. Ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων, οι εφαρμογές των ακουστικών κυμάτων στη θάλασσα ταξινομούνται ως εξής:

1. **Πολύ χαμηλές συχνότητες (0.1-10Hz):** Χρησιμοποιούνται σε σεισμικές εφαρμογές στις οποίες το ενδιαφέρον στρέφεται στη διερεύνηση του πυθμένα της θάλασσας. Η έρευνα του πυθμένα έχει ως στόχο τη μελέτη των υποστρωμάτων που τον αποτελούν και την ανίχνευση τυχόν ασυνεχειών. Ετσι, γίνεται γνωστή η σύστασή του, διαπιστώνεται η δυνατότητα θεμελίωσης υποθαλασσιών κατασκευών, ανιχνεύονται υποθαλάσσια κοιτάσματα πετρελαίου κ.λ.π.
2. **Μεσαίες συχνότητες (10Hz-1KHz):** Δύο μεγάλες περιοχές εφαρμογών όπου χρησιμοποιούνται αυτές οι συχνότητες είναι η Θαλάσσια Ακουστική Τομογραφία (Ocean Acoustic Tomography) και η παθητική ακρόαση. Η αρχή της ακουστικής τομογραφίας βασίζεται στο γεγονός ότι, καθώς κάποιο ηχητικό σήμα διαδίδεται στο θαλάσσιο περιβάλλον επηρεάζεται και διαμορφώνεται από τις ακουστικές παραμέτρους του περιβάλλοντος, αποθηκεύοντας έτσι πληροφορίες για τη δομή και τη σύσταση της θαλάσσιας μάζας από όπου διέρχεται. Καταγράφοντας το διαμορφωμένο ηχητικό σήμα που φθάνει σε μια ορισμένη θέση, με κατάλληλη επεξεργασία μπορεί να ανακτηθεί ένα μέρος από τις πληροφορίες που περιέχει. Τα παθητικά συστήματα ακρόασης αξιοποιούν τους ήχους που φτάνουν σε κάποιο δέκτη που παρακολουθεί το θόρυβο της θάλασσας. Τα ακουστικά κύματα που συλλαμβάνονται έχοντας διανύσει πολλές εκατοντάδες (ή και χιλιάδες) χιλιόμετρα στη θάλασσα μεταφέρουν πληροφορίες για σεισμούς, εκρήξεις ηφαιστείων και μακρινές καταιγίδες. Επίσης, στις συχνότητες αυτές (κυρίως στην περιοχή 50-300Hz) είναι αισθητός

ο θόρυβος από την κίνηση των πλοίων (ship traffic noise), ο επιφανειακός άνεμος και τα κύματα ελεύθερης επιφάνειας, οι βροχοπτώσεις και άλλα μετεωρολογικά φαινόμενα.

3. **Υψηλές συχνότητες (1 KHz-μερικές δεκάδες KHz):** Χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση αντικειμένων (echo location) από “ενεργά” (active) συστήματα (τα οποία είναι γνωστά και ως SONAR), για βαθυμετρήσεις (echo sounding), ανίχνευση κοπαδιών από ψάρια, στην υποβρύχια αρχαιολογία, στον εντοπισμό υποβρυχίων, τορπιλών και άλλων υποθαλάσσιων στόχων από πλοία του Πολεμικού Ναυτικού.
4. **Πολύ υψηλές συχνότητες (ως 300KHz περίπου):** Σ’ αυτή την περιοχή συχνοτήτων γίνεται η υποθαλάσσια επικοινωνία και η μετάδοση πληροφοριών. Είναι γνωστό ότι στον αέρα, ως μέσο τηλεπικοινωνίας και μεταφοράς πληροφοριών, χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Όμως στο νερό παρουσιάζουν μεγάλη απόσβεση και δεν διαδίδονται παρά μόνο σε πολύ μικρές αποστάσεις. Έτσι το ρόλο που παίζουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στον αέρα παίζουν στο νερό τα ακουστικά κύματα, τα οποία, όπως προαναφέρθηκε, διαδίδονται σε πολύ μεγάλες αποστάσεις.

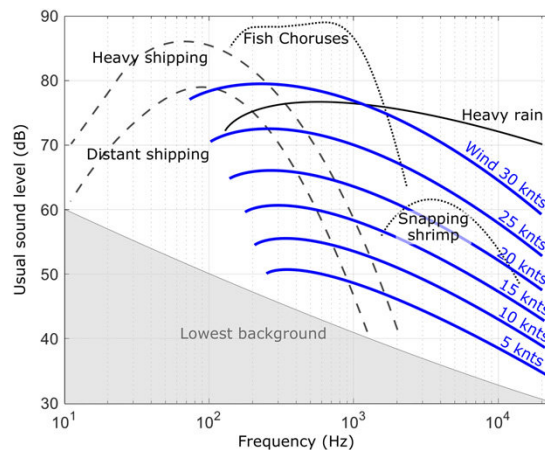
Με βάση τις παραπάνω εφαρμογές αλλά και το βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας σχετικά με τον υποθαλάσσιο εντοπισμό και τη μελέτη των περιβαλλοντικών παραμέτρων της θάλασσας παρακάτω παρουσιάζονται αρχικά οι κύριες παράμετροι-αίτια θορύβου στο θαλάσσιο περιβάλλον.

## 2.6 Διεγείροντα αίτια του ήχου και θορύβου στη θάλασσα

Η διεγερση των ακουστικών κυμάτων στο θαλάσσιο περιβάλλον προέρχεται είτε από το θόρυβο περιβάλλοντος (ambient noise) είτε από κάποια συγκεκριμένη υδροακουστική εφαρμογή. Οι όροι ήχος και θόρυβος χρησιμοποιούνται εδώ για να δηλώσουν τη διάκριση ανάμεσα σε ένα διαμορφωμένο ηχητικό σήμα (ήχος) το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει μια ή περισσότερες κύριες αρμονικές και τα πολλαπλάσια αυτών και ένα ηχητικό σήμα με περισσότερα ακανόνιστα χαρακτηριστικά (θόρυβος) στο οποίο δεν διακρίνεται κάποια διαμόρφωση ή άλλη κανονικότητα. Σε ότι αφορά στο θόρυβο περιβάλλοντος στη θάλασσα, αυτός κυρίως οφείλεται είτε σε φυσικά αίτια είτε σε άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες που δεν σχετίζονται με κάποια συγκεκριμένη υδροακουστική εφαρμογή. Ο θόρυβος περιβάλλοντος αποτελεί ουσιαστικό χαρακτηριστικό γνώρισμα μιας θαλάσσιας περιοχής, περιέχοντας πληθώρα πληροφοριών για την κατάσταση της θάλασσας στη συγκεκριμένη περιοχή, την κατάσταση της ατμόσφαιρας άνωθεν αυτής, τις τεκτονικές διεργασίες στον θαλάσσιο πυθμένα κλπ. Η γενική μορφή του φάσματος του θορύβου περιβάλλοντος παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9 [17]. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή των πολύ χαμηλών συχνοτήτων (0.1 Hz έως 10 Hz) η κύρια πηγή του θορύβου περιβάλλοντος είναι οι σεισμοί, οι εκρήξεις υποθαλασσιών ηφαιστίων και οι μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις θαλασσιών κυματισμών βαρύτητας. Στην περιοχή των μεσαίων χαμηλών συχνοτήτων (50 Hz έως 300 Hz) η κύρια πηγή του θορύβου περιβάλλοντος είναι οι θαλάσσιοι πλόες. Ανάλογα με την ύπαρξη κανονικής ή αυξημένης κυκλοφορίας πλοίων στην ευρύτερη εξεταζόμενη περιοχή, το φάσμα θορύβου περιβάλλοντος διαμορφώνεται αντίστοιχα. Στην ευρύτερη περιοχή των συχνοτήτων από 1 Hz έως 50 kHz μεγάλο τμήμα του φάσματος θορύβου περιβάλλοντος προέρχεται από την κατάσταση της θάλασσας και της ατμόσφαιρας (τον καιρό) στην εξεταζόμενη περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή από 1 Hz έως 100 Hz μεγάλο τμήμα του θορύβου περιβάλλοντος προέρχεται από τους θαλάσσιους ανεμογενείς κυματισμούς και από τις δευτεροτάξιες μεταβολές της πίεσης στο πεδίο κυματισμών. Στην περιοχή συχνοτήτων από 100 Hz έως 10 kHz ο θόρυβος περιβάλλοντος προέρχεται από την αλληλεπίδραση της αέριας μάζας με τη θάλασσα,



τη γένεση και τη θραύση των κυματισμών και από τη θραύση των φυσαλλίδων αέρα οι οποίες παγιδεύονται στο επιφανειακό στρώμα νερού.



Εικόνα 2.9: Γενική μορφή του φάσματος του θορύβου περιβάλλοντος

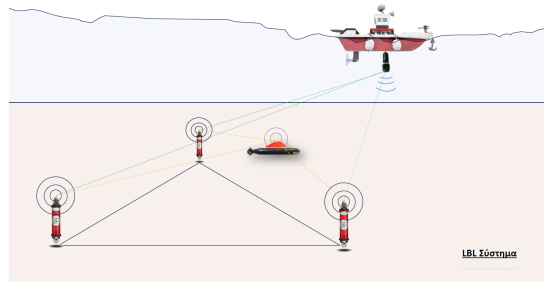
Αξιοποιώντας τη διαμόρφωση του θεωρητικού υποβάθρου τόσο στη διάδοση των ακουστικών παλμών στο υδάτινο περιβάλλον, στις διαθέσιμες μεθόδους για τον υποθαλάσσιο εντοπισμό αλλά και στους κινδύνους αυτών (φάσμα θορύβου), στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του USBL για τον υποθαλάσσιο εντοπισμό ενός αυτόνομου υποθαλάσσιου οχήματος με απώτερο σκοπό τη μελέτη του θαλασσιού περιβάλλοντος ως προς τις παραμέτρους θερμοκρασίας, αλατότητας, αγωγιμότητας και κατά συνέπεια της διαφοροποίησης της ταχύτητας του ήχου.

## 2.7 Μέθοδοι και Συστήματα Υποθαλάσσιου Εντοπισμού

Ο επιφανειακός εντοπισμός θέσης γίνεται με τη χρήση ενός παγκόσμιου συστήματος δορυφορικής πλοήγησης (GNSS). Οι δορυφόροι εκπέμπουν ραδιοκύματα στην επιφάνεια της γης και αυτά ανιχνεύονται από ένα σύνολο αισθητήρων χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό θέσης και χρόνου. Στη περίπτωση του υδάτινου περιβάλλοντος όμως, η χρήση ραδιοκυμάτων δεν είναι εφικτή καθώς υπάρχει εκθετική εξασθένιση αυτών. Έτσι, ο εντοπισμός θέσης γίνεται μέσα από τη χρήση ακουστικών κυμάτων [1]. Οι μέθοδοι εντοπισμού στο θαλάσσιο περιβάλλον διακρίνονται σε τρεις βασικούς άξονες:

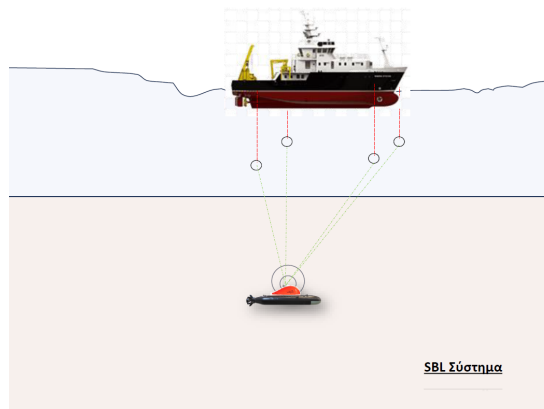
**1. Συστήματα Long Baseline (LBL):** Τα συγκεκριμένα συστήματα βασίζονται (Εικόνα 2.10), σε ένα δίκτυο από μόνιμα εγκατεστημένους υποβρύχιους σταθμούς (Transponder Network) των οποίων η θέση είναι γνωστή [2]. Το σύστημα των σταθμών αυτών τοποθετείται συνήθως στις κορυφές της περιοχής μελέτης με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται αφενός η ιδανική γεωμετρία με στόχο την επίτευξη της υψηλότερης δυνατής ακρίβειας, καλύτερης του ενός μέτρου και μερικές φορές έως και 0.01 μέτρων, και αφετέρου να αποφεύγονται τυχόν παρεμβολές μεταξύ των ακουστικών παλμών.

**2. Συστήματα Short Baseline (SBL):** Τα συστήματα Short Baseline χρησιμοποιούν τρεις ή περισσότερους ανεξάρτητους αισθητήρες μετάδοσης ακουστικών παλμών (Transducers) οι οποίοι είναι σειριακά συνδεδεμένοι μεταξύ τους σε μια κεντρική μονάδα ελέγχου (Εικόνα 2.11). Η επιτευχθείσα ακρίβεια των παραπάνω συστημάτων εξαρτάται άμεσα από την απόσταση μεταξύ των αισθητήρων καθώς και τον τρόπο τοποθέτησής τους. Για παράδειγμα σε συστήματα



Εικόνα 2.10: Παράδειγμα από ένα σύστημα Long Baseline

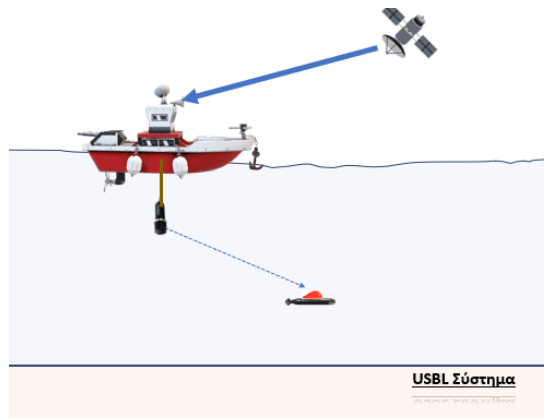
όπου η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων είναι αρκετά μεγάλη, όπως στη περίπτωση τοποθέτησης των αισθητήρων σε ένα μεγάλο πλοίο ή σε μια μεγάλη πλατφόρμα, η ακρίβεια μπορεί να προσεγγίσει ακόμη και τη μεθοδολογία των Long Baseline Συστημάτων. Αντιθέτως, στη περίπτωση χρήσης ενός μικρού σκάφους (συνήθης περίπτωση), η ακρίβεια του αποτελέσματος μειώνεται αισθητά .



Εικόνα 2.11: Παράδειγμα από ένα σύστημα Short Baseline

**3. Συστήματα Ultra Short Baseline (USBL):** Τα συστήματα Ultra Short Baseline, με τα οποία και γίνεται η κύρια εστίαση στη παρούσα εργασία, είναι συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν ως κύρια μέθοδο εντοπισμού δυο βασικούς αισθητήρες ονόματι μετατροπείς ακουστικών παλμών (Transducer) και αναμεταδότες (Transponder) αυτών. Συγκεκριμένα, ο μετατροπέας των ακουστικών παλμών χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της απόστασης του στόχου μέσα από την εκμετάλευση του χρόνου μετάδοσης του σήματος, από τον έναν αισθητήρα στον άλλο, καθώς και τη διεύθυνση η οποία υπολογίζεται από τη διαφορά φάσης του επιστρεφόμενου σήματος όπως αυτά επιστρέφουν στον κάθε μετατροπέα επιφανείας. Συνεπώς μέσα από τον συνδυασμό της απόστασης και της διεύθυνσης του σήματος είναι δυνατός ο υπολογισμός της ακριβούς θέσης του στόχου συναρτήσει της θέσης του σκάφους.

Στην ουσία, ο πομπός τοποθετείται κάτω από τη τρύπια του σκάφους, σε βάθος όπου να μην επηρεάζεται από ακουστικό θόρυβο, και εκπέμπει ακουστικά κύματα τα οποία ανακλώνται από τον αναμεταδότη (Receiver) και επιστρέφουν στον πομπό. Οι αναμεταδότες τοποθετούνται σε αντικείμενα ή όργανα έρευνας, όπως τα Glider με τα οποία ασχολείται η παρούσα εργασία, και του οποίου η θέση θέλουμε να προσδιοριστεί. Ο αναμεταδότης έχει την λειτουργία να λαμβάνει και να ανακλά τα κύματα που εκπέμπονται από τον πομπό. Εάν είναι γνωστή η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό (βασισμένη στις μετρήσεις από το Sound Velocity Profiler) και ο χρόνος ταξιδιού του κύματος μέχρι να επιστρέψει στον πομπό, τότε μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ του πομπού και του αναμεταδότη (πλάγια απόσταση-Slant Range) [21] . Εκτός από την

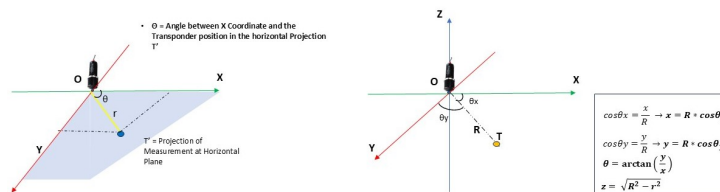


Εικόνα 2.12: Παράδειγμα από ένα σύστημα Ultra Short Baseline

απόσταση, η γωνία ανάκλασης (Bearing Angle) του κύματος είναι επίσης σημαντικός παράγοντας στη μέθοδο USBL. Ένα σφάλμα μερικών μοιρών στην ανάγνωση της γωνίας μπορεί να μειώσει την ακρίβεια του συστήματος. Αυτός είναι ο λόγος που το USBL δεν χρησιμοποιείται συχνά σε έρευνες βαθέων υδάτων, όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια.

Η γωνία πρόπτωσης του κύματος στο USBL προκύπτει από τη διαφορά φάσης μεταξύ ορισμένων στοιχείων λήψης στον πομπό. Με βάση την απόσταση ( $R$ ) και τη γωνία ( $\theta$ ), η θέση στις συντεταγμένες  $X$  και  $Y$  υπολογίζεται μέσω μετατροπής από πολικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, οι κινήσεις του πλοίου όπως ο διατοιχισμός, προνευτασμός και κάθετη μετατόπιση, επηρεάζουν την ακρίβεια του USBL. Αυτό συμβαίνει επειδή ο πομπός είναι εγκατεστημένος σε ένα αρκετά μεγάλο μηχανικό σωλήνα που τοποθετείται στο ερευνητικό πλοίο. Ιδανικά, οι τιμές των παραπάνω κινήσεων θα πρέπει να είναι  $0^\circ$  κατά την εγκατάσταση του πομπού. Αυτή η αρχική τιμή χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τον προσδιορισμό της θέσης. Ωστόσο, είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν αυτές οι συνθήκες λόγω των κυμάτων της θάλασσας. Για να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα τοποθέτησης, χρησιμοποιείται το όργανο Motion Reference Unit (MRU) για την ανίχνευση των κινήσεων του πλοίου. Ακόμη και μετά την εγκατάσταση του MRU, παραμένει ένα σημαντικό σφάλμα θέσης. Διάφορες μελέτες έχουν ασχοληθεί με το συγκεκριμένο ζήτημα [22], [23].

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της θέσης του συστήματος USBL είναι τα σφάλματα του ίδιου του εξοπλισμού, τα σφάλματα μέτρησης των παραμέτρων του θαλάσσιου περιβάλλοντος Sound Velocity Profiler (SVP), τα σφάλματα των μετρήσεων καθυστέρησης χρόνου και τα σφάλματα στην εγκατάσταση της διάταξης του πομπού (transducer array-C-Os Calibration) [22]. Τα σφάλματα κατά την εγκατάσταση της διάταξης των πομπών αποτελούν την κύρια πηγή σφαλμάτων για τα συστήματα USBL και πρέπει να διορθώνονται με ακρίβεια πριν από τη χρήση τους σε δραστηριότητες έρευνας [23]. Η βαθμονόμηση των σφαλμάτων εγκατάστασης της ακουστικής διάταξης USBL μπορεί να γίνει με τον καθορισμό της επίδρασης των κινήσεων των πλοίων στη θάλασσα.



Εικόνα 2.13: Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της θέσης του συστήματος USBL

Στην Εικόνα 2.13, το σημείο Ο αντιπροσωπεύει τη θέση του πομπού (transducer), ενώ το σημείο Τ είναι η θέση του αναμεταδότη (transponder). Το σημείο Τ' είναι η προβολή της θέσης του αναμεταδότη στο οριζόντιο επίπεδο. Οι γωνίες  $\theta_x$  και  $\theta_y$  αντιπροσωπεύουν τις γωνίες μεταξύ των συντεταγμένων X και Y αντίστοιχα και της απόστασης (R) του αναμεταδότη. Η γωνία  $\theta$  είναι η συνολική γωνία της απόστασης R. Μέσω των παρακάτω σχέσεων μπορούν να προσδιοριστούν οι ποσότητες των μερικών γωνιών  $\theta_x, \theta_y$ :

$$\cos(\theta_x) = \frac{x}{R} \quad (2.7)$$

$$\cos(\theta_y) = \frac{y}{R} \quad (2.8)$$

$$\theta = \arctan \frac{y}{x} \quad (2.9)$$

Η γωνία  $\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της συντεταγμένης X και της θέσης του αναμεταδότη (transponder) στην οριζόντια προβολή (σημείο Τ').

Εάν  $x$  είναι η θέση στη συντεταγμένη X και Y είναι η θέση στη συντεταγμένη y, τότε από τις Εξισώσεις 2.10 και 2.11 μπορεί να καθοριστεί η θέση του αναμεταδότη χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες X και Y μέσω των παρακάτω εξισώσεων:

$$x = R \cos \theta_x \quad (2.10)$$

$$y = R \cos \theta_y \quad (2.11)$$

όπου R είναι η απόσταση μεταξύ του πομπού και του αναμεταδότη. Στο σύστημα των τριών διαστάσεων αυτή η απόσταση ορίζεται ως:

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (2.12)$$

Εκτός από την απόσταση του πομπού (transducer) από την πραγματική θέση του αναμεταδότη (transponder), υπάρχει και η απόσταση r, η οποία είναι η απόσταση μεταξύ του πομπού και της προβολής της θέσης του αναμεταδότη στο οριζόντιο επίπεδο.

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2.13)$$

$$z = \sqrt{R^2 - r^2} \quad (2.14)$$

Η τιμή της απόστασης R προσδιορίζεται με βάση τον χρόνο διάδοσης του ακουστικού κύματος που λαμβάνεται από τον πομπό (transducer) και την ταχύτητα διάδοσης του ακουστικού κύματος στο θαλασσινό νερό. Σε αυτή την περίπτωση, έχει πραγματοποιηθεί η υπόθεση πως η ταχύτητα του ακουστικού κύματος στο θαλασσινό νερό είναι ομοιόμορφη και σταθερή. Έτσι ο προσδιορισμός της κεκλιμένης απόστασης γίνεται μέσω της σχέσης 2.15:

$$R = \frac{C \delta t}{2} \quad (2.15)$$

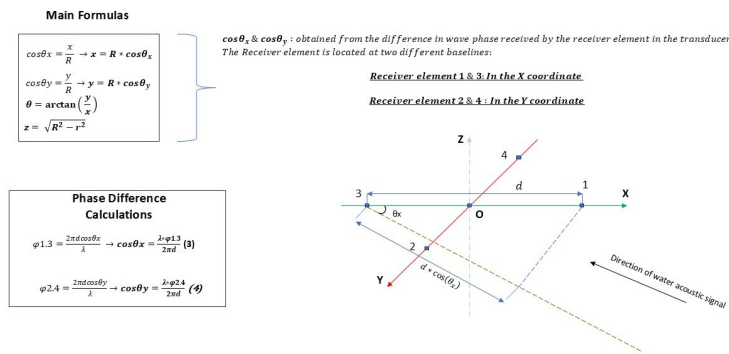
Όπου C είναι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό, μετρημένη σε m/s. Το  $\delta t$  προσδιορίζει το χρόνο που χρειάζεται ο ακουστικός παλμός να ταξιδεύει μέχρι τον εντοπισμό του αναμεταδότη. Στα συστήματα USBL, οι τιμές των γωνιών  $\cos \theta_x$  και  $\cos \theta_y$  προκύπτουν από τη διαφορά φάσης των κυμάτων που λαμβάνονται από τα στοιχεία λήψης (receivers) του πομπού

(transducer). Τα στοιχεία λήψης βρίσκονται σε δύο διαφορετικές βάσεις (baselines). Τα στοιχεία λήψης (elements) 1 και 3 βρίσκονται στη συντεταγμένη X του συστήματος συντεταγμένων στην ακουστική διάταξη του αισθητήρα USBL, ενώ τα στοιχεία λήψης 2 και 4 βρίσκονται στη συντεταγμένη Y και προσδιορίζονται μέσω των σχέσεων 2.16, 2.17.

$$\phi_{1.3} = \frac{2\pi d \cos \theta_x}{\lambda} \quad (2.16)$$

$$\phi_{2.4} = \frac{2\pi d \cos \theta_y}{\lambda} \quad (2.17)$$

όπου  $\phi_{1.3}$  αντιπροσωπεύει τη διαφορά φάσης μεταξύ των δυο διαφορετικών στοιχείων (receiver elements) κατά την X διεύθυνση και αντίστοιχα το  $\phi_{2.4}$  αντιπροσωπεύει τα στοιχεία κατά τη Y διεύθυνση και τέλος το d ορίζει την απόσταση μεταξύ των δυο στοιχείων.



Εικόνα 2.14: Διαφορά Φάσης Μεταξύ Δυο στοιχείων του USBL

Με βάση τη διαφορά φάσεων όπως προέκυψαν από τις εξισώσεις 2.16, 2.17, οι γωνίες  $\theta_x, \theta_y$  υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\cos \theta_x = \frac{\lambda \phi_{1.3}}{2\pi d} \quad (2.18)$$

$$\cos \theta_y = \frac{\lambda \phi_{2.4}}{2\pi d} \quad (2.19)$$

Τοποθετώντας τις παραπάνω σχέσεις στις 2.10, 2.11 προκύπτει:

$$x = \frac{R \lambda \phi_{1.3}}{2\pi d} \quad (2.20)$$

$$y = \frac{R \lambda \phi_{2.4}}{2\pi d} \quad (2.21)$$

$$z = R \sqrt{1 - \cos^2 \theta_x - \cos^2 \theta_y} \quad (2.22)$$

Από τις 2.20, 2.21, 2.22 προκύπτει σε διανυσματική μορφή οι τρισδιάστατες συντεταγμένες της θέσης του αναμεταδότη (transponder)

$$P_t = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cdot \lambda \cdot \frac{\phi_{1.3}}{2\pi d} \\ R \cdot \lambda \cdot \frac{\phi_{2.4}}{2\pi d} \\ R \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \theta_x - \cos^2 \theta_y} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο που έχει παρουσιαστεί, ακολουθεί το μεθοδολογικό πλαίσιο που σχετίζεται με τη διαδικασία υλοποίησης τρισδιάστατου εντοπισμού ενός υποθαλάσσιου αυτόνομου οχήματος, με στόχο την εξαγωγή περιβαλλοντικών παραμέτρων. Το παραπάνω θεωρητικό υπόβαθρο και τα συνοδευτικά μαθηματικά μοντέλα έχουν ενσωματωθεί στον εξοπλισμό του συστήματος USBL που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία.

# Κεφάλαιο 3

## Μεθοδολογία

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μεθοδολογία, ο εξοπλισμός και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση του υποθαλάσσιου εντοπισμού ενός ρομποτικού συστήματος, με απώτερο στόχο την ανάλυση και μελέτη του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε βασίστηκε στο Κεφάλαιο 2 και οργανώθηκε στα εξής στάδια:

1. **Τρισδιάστατη αποτύπωση του Ρομποτικού Συστήματος και του Σκάφους Αποστολής:** Περιλαμβάνει τόσο τις εργασίες πεδίου που πραγματοποιήθηκαν όσο και τα λογισμικά επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των τρισδιάστατων αντικειμένων για τον προσδιορισμό σημείων ενδιαφέροντος, απαραίτητων για την επίτευξη του σκοπού της παρούσας εργασίας.
2. **Μετρητικός εξοπλισμός για τον υποθαλάσσιο εντοπισμό:** Παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού και τα λογισμικά που αναπτύχθηκαν για την επιτυχή πραγματοποίηση του εντοπισμού.
3. **Ρομποτικό υποθαλάσσιο σύστημα:** Περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος του μετρητικού εξοπλισμού και της διαδικασίας προετοιμασίας του.
4. **Προπαρασκευαστικά πειράματα και σχεδιασμός του βασικού πειράματος:** Αναλύονται τα προκαταρκτικά πειράματα και η στρατηγική σχεδίασης του κύριου πειράματος για τον υποθαλάσσιο εντοπισμό με σκοπό τη μέτρηση περιβαλλοντικών παραμέτρων του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

### 3.1 Τρισδιάστατες Αποτυπώσεις

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται λεπτομερώς η μεθοδολογία, ο εξοπλισμός και τα λογισμικά που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την τρισδιάστατη αποτύπωση του ρομποτικού συστήματος (Glider). Σκοπός αυτής της αποτύπωσης ήταν ο προσδιορισμός κρίσιμων σημείων ενδιαφέροντος τα οποία θεωρήθηκαν απαραίτητα για τη μετέπειτα εφαρμογή του πειράματος. Συγκεκριμένα, ο πειραματικός εξοπλισμός περιλάμβανε τη χρήση ενός σκάφους εξοπλισμένου με μετρητικό σύστημα (Ενότητα 3.2) για τον υποθαλάσσιο εντοπισμό του ρομποτικού συστήματος. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικοί δέκτες οι οποίοι συνεργάζονταν με το μετρητικό σύστημα για τη γεωαναφορά των προσδιοριζόμενων σημείων ενδιαφέροντος και τον συγχρονισμό μεταξύ των δύο τεχνολογιών, εξασφαλίζοντας την ακρίβεια των μετρήσεων.

### 3.1.1 Μεθοδολογία Τρισδιάστατης Σάρωσης

Στη παρούσα ενότητα περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση της τρισδιάστατης σάρωσης τόσο του σκάφους που φέρει τον μετρητικό εξοπλισμό (USBL και δορυφορικούς δέκτες) τόσο και του ρομποτικού συστήματος το οποίο φέρει και αυτό εξοπλισμό (USBL) με σκοπό τον εντοπισμό του. Αυτή χωρίζεται στα εξής στάδια:

1. Σχεδιασμός και Προετοιμασία στο Γραφείο
2. Προετοιμασία Πεδίου
3. Εργασίες Πεδίου με τη Χρήση Επίγειου Σαρωτή
4. Εργασίες Πεδίου με τη Χρήση Γεωδαιτικού Σταθμού
5. Επεξεργασία και Προσδιορισμός Σημείων Ενδιαφέροντος

Στο πρώτο στάδιο της υλοποίησης περιλαμβάνεται η επιλογή της βέλτιστης μεθοδολογίας που θα ακολουθηθεί καθώς και η επιλογή του κατάλληλου μετρητικού εξοπλισμού, ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια της μεθοδολογίας και η επίτευξη των στόχων των μετρήσεων. Ο σχεδιασμός και η προετοιμασία στο γραφείο περιλαμβάνουν την εκπόνηση ενός προκαταρκτικού σχεδίου για τις θέσεις του επίγειου σαρωτή προκειμένου να αποτυπωθεί το σύνολο του αντικειμένου που πρόκειται να μετρηθεί (σκάφος και ρομποτικό σύστημα), με ιδιαίτερη έμφαση στα σημεία ενδιαφέροντος. Η πλήρης αποτύπωση του αντικειμένου είναι απαραίτητη και όχι μόνο των σημείων ενδιαφέροντος, καθώς αυτή θα χρησιμοποιηθεί ως βάση για τη δημιουργία ενός συστήματος συντεταγμένων για κάθε αντικείμενο (βλ. Ενότητα 3.1.2). Επιπλέον, γίνεται λεπτομερής μελέτη των κατασκευαστικών σχεδίων κάθε υποσυστήματος ξεχωριστά ώστε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο πεδίο να υπάρχει η απαραίτητη προετοιμασία για την ακριβή αποτύπωση των κρίσιμων σημείων ενδιαφέροντος. Τέλος, με την ολοκλήρωση της επιλογής του κατάλληλου μετρολογικού εξοπλισμού (Ενότητα 3.1.3, ακολουθεί η προετοιμασία του. Αυτή περιλαμβάνει την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του εξοπλισμού, την επαλήθευση της ακρίβειας αποτύπωσης μέσω δοκιμαστικών μετρήσεων καθώς και την επιλογή των κατάλληλων παρελκόμενων που θα υποστηρίξουν την ομαλή διεξαγωγή των μετρήσεων.

Το δεύτερο στάδιο αφορά στο σχεδιασμό και στην προετοιμασία στο πεδίο για την αποτύπωση, τόσο με τη χρήση επίγειου σαρωτή όσο και με γεωδαιτικό σταθμό. Σε αυτό το στάδιο, διασφαλίζεται η σταθερή τοποθέτηση του αντικειμένου ώστε να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία των μετρήσεων. Επιπλέον, περιλαμβάνει την τοποθέτηση ειδικών στόχων High Definition System Targets (HDS Targets) σε συγκεκριμένα σημεία γύρω από το αντικείμενο ενδιαφέροντος. Η τοποθέτηση των στόχων γίνεται με τρόπο που να εξασφαλίζει την ακρίβεια και την ολοκληρωμένη επεξεργασία των δεδομένων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και της ανάλυσης. Συγκεκριμένα, τα βασικά κριτήρια καθορισμού των θέσεων τους γίνεται σύμφωνα με τα παρακάτω:

1. Εξασφάλιση της ασφάλειας και της σταθερότητας στην τοποθέτηση των στόχων. Αποφυγή μη σταθερών θέσεων. Για παράδειγμα, αποφυγή της τοποθέτησης των στόχων πάνω ή πολύ κοντά σε κινούμενα αντικείμενα, όπως οχήματα ή κιβώτια, καλυμμένες επιφάνειες, σκαλωσιές, μηχανήματα κ.α., αποφυγή τοποθέτησης των στόχων σε ελαφρά αντικείμενα των οποίων η θέση μπορεί να μεταβληθεί με τον αέρα, αποφυγή τοποθέτησης των στόχων πάνω ή πολύ κοντά σε ιδιαίτερα αντανακλαστικές ή ολισθηρές επιφάνειες καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε θορυβώδη και ανακριβή αποτελέσματα.



2. Εξασφάλιση της δυνατότητας πλήρους περιστροφής των HDS στόχων (αρχή και σκοπός λειτουργίας τους), μέσω της τοποθέτησής τους σε χώρους που επιτρέπουν την ανεμπόδιση κίνησή τους περιμετρικά της βάσης τους και συγχρόνως χώρους ελεύθερης πρόσβασης του παρατηρητή για την πραγματοποίηση της περιστροφής τους.
3. Εξασφάλιση της ορατότητας του εκάστοτε στόχου, από όσο το δυνατόν περισσότερες πιθανές στάσεις του σαρωτή όσο και του Γεωδαιτικού Σταθμού.
4. Αποφυγή συγγραμμικότητας στην τοποθέτηση των στόχων. Η τοποθέτηση των στόχων είναι βέλτιστη όταν υλοποιούνται ισόπλευρα τρίγωνα μεταξύ τους, τα οποία καλύπτουν πλήρως το αντικείμενο ενδιαφέροντος.
5. Πλήρης κάλυψη του συνόλου του αντικειμένου προκειμένου οι στόχοι να είναι ορατοί από κατά το δυνατόν περισσότερες πιθανές στάσεις του σαρωτή. Ιδιαίτερα συνιστάται η τοποθέτηση HDS στόχων οι οποίοι με την περιστροφή τους δύναται να γίνουν ορατοί από πολλές περισσότερες στάσεις έναντι των στόχων A4.
6. Οικονομία εργασιών, με επιλογή όσο το δυνατόν λιγότερων αναγκαίων στάσεων που πληρούν όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις.

Με βάση τα παραπάνω, οι ακριβείς θέσεις τοποθέτησης των στόχων για κάθε ένα από τα δύο αντικείμενα παρουσιάζονται στις Ενότητες 3.1.4, 3.1.5.

Έπειτα από τη προετοιμασία στο πεδίο και την τοποθέτηση των στόχων επόμενο στάδιο είναι η έναρξη των μετρήσεων με τη χρήση του Επίγειου Σαρωτή (Leica RTC360). Αυτές περιλαμβάνουν την τοποθέτηση του οργάνου σε συγκεκριμένες θέσεις περιμετρικά του αντικειμένου ενδιαφέροντος προκειμένου να σαρωθεί λεπτομερώς όλη η επιφάνειά του.

Η σάρωση αναφέρεται στη διαδικασία καθορισμού των τρισδιάστατων συντεταγμένων των σημείων που βρίσκονται στην επιφάνεια του αντικειμένου προς μέτρηση. Παράλληλα με τη γεωμετρική αποτύπωση μπορούν να συλλεχθούν ραδιομετρικές πληροφορίες, όπως το χρώμα του αντικειμένου. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν την ένταση του ανακλώμενου σήματος ή/και τα χρώματα (υφές) του αντικειμένου τα οποία προκύπτουν από τις εικόνες High Dynamic Range (HDR φωτογραφίες) που λαμβάνονται από τις ενσωματωμένες ψηφιακές κάμερες του σαρωτή (Ενότητα 3.1.3). Το σήμα μέτρησης (laser beam) ανακλάται από το αντικείμενο με διάφορες εντάσεις, ανάλογα με τα φυσικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας, όπως το υλικό, το χρώμα και η τραχύτητα. Οι ραδιομετρικές πληροφορίες που συλλέγονται χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την απόδοση του χρώματος στα μετρούμενα σημεία. Οι παράμετροι της σάρωσης καθορίζουν την περιοχή και την πυκνότητα των σημείων που μετριοούνται στην επιφάνεια του αντικειμένου. Η πιο σημαντική παράμετρος είναι η ανάλυση της σάρωσης καθώς αυτή επηρεάζει τη λεπτομέρεια των μετρήσεων και όγκο των δεδομένων που συλλέγονται. Η ανάλυση αναφέρεται στην απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρούμενων σημείων και καθορίζει την πυκνότητα των σημείων μιας σάρωσης (3,6 και 9 mm αντίστοιχα). Συνήθως, η ανάλυση επιλέγεται ανάλογα με τον βαθμό λεπτομέρειας που απαιτείται. Σε ομαλές επιφάνειες, όπως ένα επίπεδο, απαιτούνται λιγότερα σημεία για την ακριβή απόδοση της γεωμετρίας σε σύγκριση με επιφάνειες με μεγάλη καμπυλότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση τόσο αυξάνεται ο αριθμός των σημείων που αποτυπώνονται, επηρεάζοντας τον χρόνο των μετρήσεων και το μέγεθος των αρχείων δεδομένων. Το αποτέλεσμα κάθε σάρωσης είναι ένα ακανόνιστο raster αρχείο, γνωστό ως "νέφος σημείων" (point cloud), το οποίο τεκμηριώνει γεωμετρικά το αντικείμενο. Το νέφος σημείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία χωρικών μοντέλων ή για την επαλήθευση και ανάλυση γεωμετρικών παραμέτρων. Για την υλοποίηση των παραπάνω κρίθηκε απαραίτητη η συνένωση όλων των δεδομένων αποτύπωσης που συλλέχθηκαν

κατά την παρούσα μελέτη, δηλαδή των δεδομένων από όλα τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν (Ενότητα 3.1.2). Για να επιτευχθεί αυτό, ήταν απαραίτητο τα δεδομένα της σάρωσης με το RTC360 να μετασχηματιστούν και να ευθυγραμμιστούν με το επιλεγμένο σύστημα αναφοράς των μετρήσεων. Οι μετρήσεις με το 3D Laser Scanner Leica RTC360 βασίζονται στη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων. Στα συστήματα Laser Scanner που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο, η μέτρηση του μήκους πραγματοποιείται βάσει της αρχής της μέτρησης του χρόνου πτήσης του παλμού (time-of-flight) μεταξύ της εκπομπής και της ανάκλασης του σήματος. Ο προσδιορισμός των συντεταγμένων γίνεται στο πλαίσιο ενός καρτεσιανού τρισσορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων  $(x, y, z)$ , που ονομάζεται Σύστημα Συντεταγμένων Αισθητήρα (Sensor Coordinate System - SCS). Κάθε θέση (στάση) του σαρωτή RTC360 δημιουργεί το δικό της σύστημα συντεταγμένων αισθητήρα, καθώς ο σαρωτής αλλάζει θέση στο χώρο, μεταβάλλοντας το σημείο αναφοράς των μετρήσεων. Συνεπώς, για την ορθή συσχέτιση των δεδομένων αποτύπωσης, οι συντεταγμένες που λαμβάνονται από τα διαφορετικά συστήματα συντεταγμένων αισθητήρα (SCS) πρέπει πρώτα να συσχετιστούν μεταξύ τους. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά πρέπει να μεταφερθούν και να προσαρμοστούν στο επιλεγμένο σύστημα αναφοράς των μετρήσεων ώστε να εξασφαλιστεί η συνοχή και η ακρίβεια των μετρήσεων από όλες τις στάσεις και όργανα μέτρησης.

Έπειτα από την ολοκλήρωση της μεθοδολογίας που αφορούσε στη χρήση του επίγειου σαρωτή, το επόμενο στάδιο, το οποίο είναι συμπληρωματικό, αφορά στις μετρήσεις με τη χρήση γεωδαιτικού σταθμού. Εκμεταλλευόμενοι τους διάφορους στόχους HDS που είχαν τοποθετηθεί κατά την προετοιμασία στο πεδίο, αυτοί χρησίμευσαν ως κύριο εργαλείο για τη συνένωση των δύο συνόλων μετρήσεων. Παρακάτω παρατίθεται μια αναφορά στη μέθοδο πραγματοποίησης των μετρήσεων με τη χρήση γεωδαιτικού σταθμού.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται με το γεωδαιτικό σταθμό TDRA6000 βασίζονται επίσης στη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων η οποία ακολουθεί την αρχή της τρισδιάστατης μέτρησης σημείων στο σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα. Συγκεκριμένα, όπως ορίζει η μέθοδος αυτή, οι συντεταγμένες των σημείων που αποτυπώνονται υπολογίζονται με βάση τρία μετρούμενα μεγέθη (οριζόντιες γωνίες, κατακόρυφες γωνίες και κεκλιμένα μήκη). Τα αποτελέσματα υπολογίζονται και εμφανίζονται σε ένα καρτεσιανό τρισσορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων  $(x, y, z)$ , το οποίο ονομάζεται σύστημα συντεταγμένων αισθητήρα (Sensor Coordinate System - SCS). Το SCS ορίζεται από τα εξής στοιχεία:

1. **Καθορισμός ενός επιπέδου αναφοράς:** Το επίπεδο αναφοράς μπορεί να επιλεγεί ως το  $(x, y)$ ,  $(x, z)$  ή  $(y, z)$ . Το επιλεγμένο επίπεδο καθορίζεται τουλάχιστον από τρία σημεία στο χώρο, τα οποία μετρώνται στο σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα. Αυτά, καθορίζουν τη θετική κατεύθυνση του επιπέδου (normal) ή την παράλληλη προς το οριζόντιο επίπεδο
2. **Καθορισμός μιας γραμμής αναφοράς.** Αφού καθοριστεί η κατεύθυνση του επιπέδου, έπειτα επιλέγεται και καθορίζεται και η κατεύθυνση ενός εκ των δύο αξόνων του. Έστω ότι επιλέγεται ως επίπεδο αναφοράς το  $(x, y)$ . Σε αυτό το βήμα θα πρέπει να οριστεί η κατεύθυνση του άξονα  $x$  ή του άξονα  $y$ . Αυτό υλοποιείται με τη μέτρηση τουλάχιστον δύο σημείων αναφοράς που ανήκουν στον εν λόγω άξονα, τα οποία μετρώνται στο σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα. Η θετική κατεύθυνση προσδιορίζεται από το πρώτο προς το δεύτερο σημείο.
3. **Καθορισμός ενός συγκεκριμένου σημείου του αντικειμένου:** Αφού καθοριστεί η κατεύθυνση του άξονα του OCS, έπειτα επιλέγεται και καθορίζεται ένα συγκεκριμένο σημείο του αντικειμένου (με μετατόπιση ή όχι). Οι τιμές αυτού του σημείου  $(x,y,z)$ , μετρημένες στο σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα, ορίζονται τελικά ως η αφετηρία  $(0,0,0)$

του συστήματος συντεταγμένων του αντικειμένου ή ως οποιοδήποτε άλλο απαραίτητο σημείο του

Αυτή η μέθοδος εξασφαλίζει επιτρέπει την ομαλή και ορθή ενοποίηση των δεδομένων από τον γεωδαιτικό σταθμό με εκείνα του επίγειου σαρωτή, ολοκληρώνοντας έτσι τη συνολική αποτύπωση του αντικειμένου.

### 3.1.2 Λογισμικά και Επεξεργασία

Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων από τον επίγειο σαρωτή και το γεωδαιτικό σταθμό καθώς και την ενοποίησή τους. Μέσω εξειδικευμένων λογισμικών και τεχνικών, επιδιώχθηκε η δημιουργία ενός ενιαίου συστήματος συντεταγμένων για κάθε αντικείμενο. Αυτό το ενιαίο σύστημα αποτέλεσε τη βάση για τον προσδιορισμό των σημείων ενδιαφέροντος τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στον ακριβή εντοπισμό του υποθαλάσσιου ρομποτικού συστήματος.

Ξεκινώντας με την επεξεργασία των δεδομένων του επίγειου σαρωτή αυτή χωρίζεται στα εξής στάδια:

1. Ενοποίηση των στάσεων στο πεδίο (Pre-Alignment)
2. Ασφαλή Μεταφορά Δεδομένων (Backup)
3. Ενοποίηση Στάσεων και Εισαγωγή Ονομάτων Στόχων
4. Δημιουργία Επιπρόσθετων Συνδέσεων (Cross Lines)
5. Ενοποίηση Νεφών Σημείων (Unify Clouds)

Το πρώτο από τα προαναφερόμενα στάδια συνδέεται με τη διαδικασία προετοιμασίας στο πεδίο, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Κατά τη διάρκεια αυτής, ο σαρωτής τοποθετείται σε διάφορες θέσεις περιμετρικά του αντικειμένου που μελετάται. Μετά από κάθε ολοκλήρωση στάσης υπάρχει η δυνατότητα μίας πρώτης ένωσης των διαφόρων στάσεων απευθείας στο πεδίο, διευκολύνοντας έτσι την επόμενη φάση της επεξεργασίας στο γραφείο. Η εν λόγω διαδικασία υλοποιείται με τη χρήση του λογισμικού Cyclone Field 360 το οποίο προσφέρει εργαλεία για την άμεση διασύνδεση των μετρήσεων και τη διαχείριση των δεδομένων στο πεδίο. Μια σύντομη περιγραφή των δυνατοτήτων του παρουσιάζεται παρακάτω.

Το λογισμικό Leica Cyclone Field 360 το οποίο είναι διαθέσιμο και για κινητές συσκευές, αποτελεί εργαλείο πεδίου για τη διαχείριση σαρωτών όπως οι BLK360, BLK2GO, BLK2GO PULSE, BLK ARC, RTC360 και ScanStation P-Series. Μέσω του φιλικού περιβάλλοντος εργασίας του, επιτρέπει στο χρήστη τον απομακρυσμένο έλεγχο του σαρωτή και την άμεση προβολή του νέφους σημείων επί τόπου. Οι χρήστες μπορούν να πλοηγούνται εύκολα στο νέο σύννεφο σημείων και να έχουν πλήρη εικόνα και δεδομένα τα οποία μεταφέρονται απευθείας σε tablet ή κινητό τηλέφωνο, αξιοποιώντας την τεχνολογία edge computing.

Η άμεση πρόσβαση και οπτικοποίηση των δεδομένων είναι θεμελιώδεις για τον ποιοτικό έλεγχο στο πεδίο. Με το Cyclone FIELD 360, τα προκαταρκτικά ευθυγραμμισμένα δεδομένα νέφους σημείων επιτρέπουν στους χρήστες να πραγματοποιούν ταχείς ελέγχους ποιότητας, να αυξάνουν την παραγωγικότητα και να λαμβάνουν πιο ενημερωμένες και αποτελεσματικές αποφάσεις κατά τη διάρκεια της εργασίας στο πεδίο. Μια αντιπροσωπευτική εικόνα του περιγραφόμενου λογισμικού παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Λογισμικό Leica Cyclone Field 360

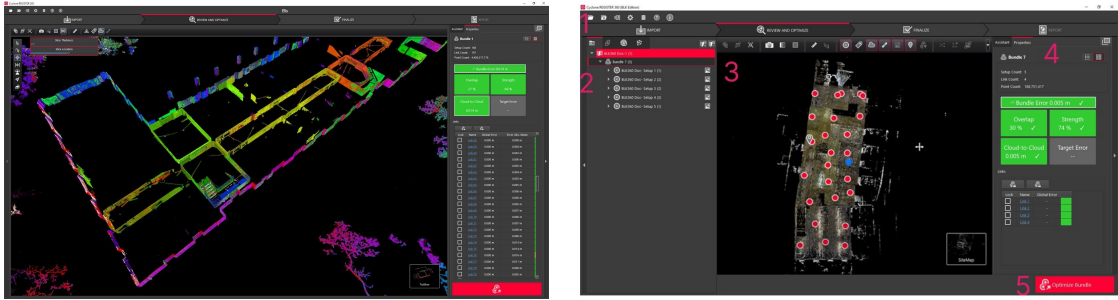
Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης ενοποίησης των στάσεων, το επόμενο στάδιο αφορά στις εργασίες στο γραφείο. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από τον επίγειο σαρωτή και έχουν ενοποιηθεί μέσω του λογισμικού Cyclone Field 360 πρέπει να μεταφερθούν με ασφάλεια από τον εξοπλισμό σε τοπικό αποθηκευτικό χώρο του υπολογιστή επεξεργασίας, χρησιμοποιώντας USB.

Τα δεδομένα αυτά αποτελούνται από μεμονωμένους φακέλους ο καθένας με το όνομα της αντίστοιχης στάσης, οι οποίοι περιλαμβάνουν την πληροφορία του νέφους σημείων, τις έγχρωμες σφαιρικές εικόνες που έχουν ληφθεί, καθώς και ένα αρχείο με κατάληξη .prj. Το αρχείο .prj περιέχει πληροφορίες για τον τρόπο ενοποίησης των στάσεων, όπως έχει καταγραφεί από το λογισμικό Leica Cyclone Field 360. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων και της προέλευσής τους από διαφορετικά όργανα, καθιστώντας απαραίτητη την οργάνωση και συστηματική διαχείριση των μετρήσεων για τη περαιτέρω επεξεργασία.

Το τρίτο και σημαντικότερο στάδιο αφορά στη βασική επεξεργασία των δεδομένων από τον Επίγειο Σαρωτή και την ενοποίησή τους. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός ενιαίου, έγχρωμου νέφους σημείων στο οποίο θα περιλαμβάνονται τα ονόματα των ειδικών στόχων (HDS Targets). Αυτοί οι στόχοι θα χρησιμοποιηθούν σε επόμενο στάδιο για την ενοποίηση με τα δεδομένα του Γεωδαιτικού Σταθμού. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Leica Cyclone Register 360+, το οποίο περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω. Το Leica Cyclone Register 360+ είναι ένα λογισμικό υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία και την ενοποίηση δεδομένων από επίγειους σαρωτές, όπως αυτοί χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία (Ενότητα 3.1.3). Παρέχει εύκολα κατανοητά εργαλεία για την καταχώρηση, την ευθυγράμμιση και την ενσωμάτωση νεφών σημείων που προέρχονται από πολλαπλές σαρώσεις, δημιουργώντας ένα ενιαίο και ακριβές σύνολο δεδομένων. Το λογισμικό υποστηρίζει την αυτόματη ταυτοποίηση ειδικών στόχων (HDS Targets) και τη σύνδεσή τους με άλλα γεωδαιτικά δεδομένα, ενώ παράλληλα παρέχει εργαλεία για τη διόρθωση σφαλμάτων, την ακριβή τοποθέτηση και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων σε διάφορες μορφές αρχείων. Η φιλική προς το χρήστη διεπαφή του επιτρέπει την ταχεία επεξεργασία μεγάλων όγκων δεδομένων, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές στον τομέα της τοπογραφίας, της αρχιτεκτονικής, και των υποδομών. Μια αντιπροσωπευτική εικόνα του περιγραφόμενου λογισμικού, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.

Έπειτα από τη γενική περιγραφή του λογισμικού, η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των αντικειμένων που αποτυπώθηκαν είχε ως εξής:

1. Εισαγωγή των αρχικών δεδομένων (Raw Data) στο λογισμικό Leica Cyclone Register 360+.
2. Έλεγχος των ενοποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν στις εργασίες πεδίου μέσω του Leica

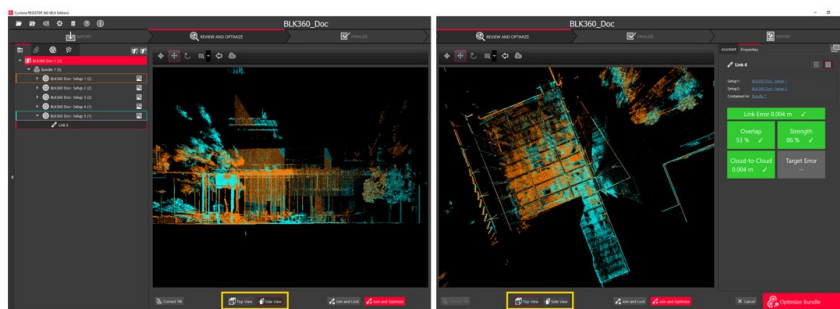


Εικόνα 3.2: Λογισμικό Leica Cyclone Register 360+

Cyclone Field 360, για να διασφαλιστεί η σωστή ευθυγράμμιση και ακρίβεια των δεδομένων.

3. Διόρθωση τυχόν σφαλμάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της ενοποίησης των σαρώσεων και εκκαθάριση των νεφών από κινούμενα αντικείμενα ή θόρυβο, για την εξασφάλιση της ορθής ενοποίησης.
4. Δημιουργία επιπλέον ενοποιήσεων για την εξασφάλιση της ακριβούς ευθυγράμμισης των σαρωμένων δεδομένων, για την επαλήθευση της ποιότητας των ενώσεων (Cross Check Validation).
5. Για κάθε στόχο που είχε τοποθετηθεί στο πεδίο και για κάθε στάση του σαρωτή, έγινε καταχώρηση του αντίστοιχου ονόματος. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για κάθε στάση του σαρωτή, εξασφαλίζοντας ότι όλα τα δεδομένα ήταν σωστά καταχωρημένα και αντιστοιχισμένα με τους ειδικούς στόχους. Αυτή η πρακτική επιτρέπει την εύκολη ταυτοποίηση και αναγνώριση των δεδομένων σε μεταγενέστερα στάδια επεξεργασίας και ενοποίησης.

Αντιπροσωπτικά παραδείγματα των παραπάνω αναφερόμενων διαδικασιών παρουσιάζονται στην Εικόνες 3.3, 3.4, 3.5.

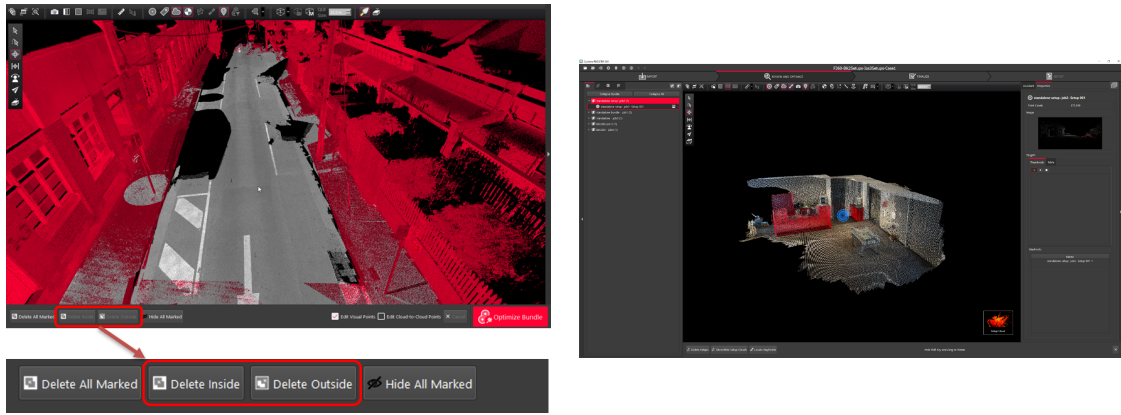


Εικόνα 3.3: Στιγμιότυπα από τον Έλεγχο Συνένωσης Επιμέρους Νεφών

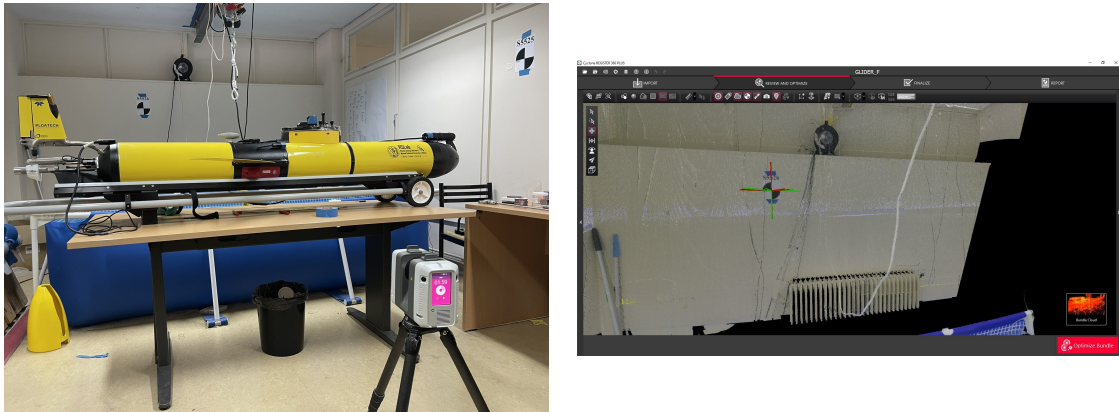
Έπειτα από την εφαρμογή των παραπάνω σταδίων ακολουθεί η εισαγωγή των ενοποιημένων δεδομένων στο Λογισμικό Leica Cyclone Register Core το οποίο είναι μια εξειδικευμένη λύση για την επεξεργασία και ενοποίηση δεδομένων από Επίγειους Σαρωτές. Εστιάζει στην επίτευξη υψηλής ακρίβειας κατά τη συγχώνευση νεφών σημείων μέσω ενός συνόλου προηγμένων εργαλείων και τεχνικών.

Το Leica Cyclone Register Core επιτρέπει την αυτόματη και ημιαυτόματη ευθυγράμμιση νεφών σημείων, διασφαλίζοντας ότι όλα τα δεδομένα ενοποιούνται με ακρίβεια και αποτελε-





Εικόνα 3.4: Στιγμιότυπα από τον καθαρισμό νέφους σημείων



Εικόνα 3.5: Τοποθέτηση Ονομάτων Ειδικών Στόχων HDS στο Λογισμικό Leica Cyclone Register 360+.

σματικότητα. Το λογισμικό παρέχει επίσης δυνατότητες για την ανάλυση και διόρθωση τυχόν σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν κατά τη διαδικασία των μετρήσεων.

Αναγνωρίζεται για την ικανότητά του να υποστηρίζει έργα που απαιτούν υψηλό επίπεδο ακρίβειας και λεπτομέρειας, όπως σε τοπογραφικές και αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Επιπλέον, το Leica Cyclone Register Core προσφέρει ένα ευέλικτο και ισχυρό σύνολο εργαλείων που βελτιώνουν την αποδοτικότητα και την ποιότητα των τελικών δεδομένων, εξασφαλίζοντας την ακριβή αποτύπωση και ανάλυση των σαρωμένων περιοχών.

Στο εξειδικευμένο λογισμικό Leica Cyclone Register Core έγινε η εισαγωγή του ενοποιημένου νέφους σημείων, το οποίο είχε προηγουμένως εξαχθεί από το λογισμικό Leica Cyclone Register 360+ μαζί με τα ονόματα των στόχων. Ο σκοπός της χρήσης του συγκεκριμένου λογισμικού ήταν:

1. **Ενοποίηση Νεφών:** Ομαδοποίηση των νεφών σημείων σε ένα ενιαίο σύνολο (Unify Clouds).
2. **Μείωση Πυκνότητας:** Ρύθμιση της πυκνότητας του νέφους στα επιθυμητά επίπεδα, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.
3. **Εξαγωγή Βασικών Σημείων:** Εξαγωγή κρίσιμων σημείων από το νέφος, τα οποία θα ενοποιηθούν με τα δεδομένα που θα προκύψουν από τη χρήση του γεωδαιτικού Σταθμού (Total Station), όπως έχει περιγραφεί παραπάνω (Coordinate System Definition).

Συγκεκριμένα, το πρώτο στάδιο της ενοποίησης αφορά στην ομαδοποίηση των διαφόρων επιμέρους στάσεων που πραγματοποιήθηκαν στην προηγούμενη φάση, με σκοπό τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου νέφους. Αυτή η διαδικασία μειώνει σημαντικά τον όγκο των δεδομένων, ενοποιώντας τις μεμονωμένες στάσεις σε ένα ενιαίο σύνολο.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την επιπλέον μείωση του όγκου των δεδομένων μέσω της μείωσης της πυκνότητας των σημείων. Όπως αναφέρθηκε στη μεθοδολογία, οι πολλαπλές στάσεις κατά τις εργασίες πεδίου οδηγούν σε σημαντική επικάλυψη των νεφών σε διάφορα σημεία, γεγονός που αυξάνει τον όγκο του τελικού αρχείου. Επομένως, εφαρμόζεται η μείωση της πυκνότητας για να περιοριστεί η περιττή πληροφορία.

Τέλος, αναφορικά με τον προσδιορισμό των σημείων ενδιαφέροντος, αυτά σχετίζονται με τη δημιουργία σημείων (Vertices) σε προκαθορισμένα σημεία, με σκοπό τη διαμόρφωση του συστήματος συντεταγμένων για κάθε αντικείμενο ενδιαφέροντος. Για παράδειγμα, όπως αναφέρεται στην Ενότητα 3.1.4, τέτοια σημεία εξάγονται από το κατάστρωμα (deck) του σκάφους για να δημιουργηθεί ένα επίπεδο αναφοράς.

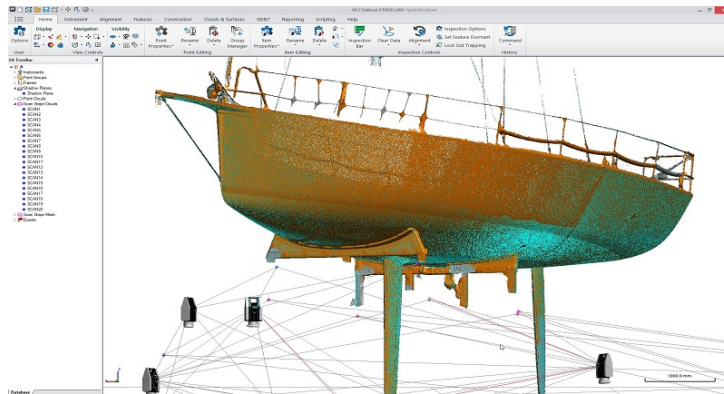


Εικόνα 3.6: Προσδιορισμό Σημείων Ενδιαφέροντος στο Λογισμικό Cyclone Core

Το τελευταίο και σημαντικότερο στάδιο, μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας ενοποίησης των διαφόρων στάσεων, της εισαγωγής στόχων και της εξαγωγής σημείων ενδιαφέροντος, είναι η συσχέτιση και η μετεπεξεργασία αυτών σε συνδυασμό με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν μέσω του γεωδαιτικού σταθμού (Total Station). Όπως αναφέρθηκε στην αρχή αυτής της ενότητας, ο γεωδαιτικός σταθμός, μετρώντας οριζόντιες και κατακόρυφες γωνίες καθώς και κεκλιμένες αποστάσεις, είναι σε θέση, μέσω κατάλληλης επεξεργασίας, να παράγει ως τελικό προϊόν τις τρισδιάστατες συντεταγμένες των μετρημένων σημείων.

Τα σημεία που εξήχθησαν από το λογισμικό σάρωσης, καθώς και τα αντίστοιχα δεδομένα από τον γεωδαιτικό σταθμό, συνδυάστηκαν και επεξεργάστηκαν μέσω της πλατφόρμας Spatial Analyzer που αποτελεί ένα προηγμένο λογισμικό που αναπτύχθηκε από την εταιρεία New River Kinematics και το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση, ανάλυση και επεξεργασία τρισδιάστατων γεωμετρικών δεδομένων. Το λογισμικό παρέχει ισχυρά εργαλεία για τη σύγκριση και την ευθυγράμμιση δεδομένων από διαφορετικές πηγές με εξαιρετική ακρίβεια, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία, όπως η βιομηχανική μέτρηση, η ευθυγράμμιση μεγάλων κατασκευών και ο έλεγχος ποιότητας. Το Spatial Analyzer επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση δεδομένων από διάφορους αισθητήρες και όργανα μέτρησης, όπως γεωδαιτικοί σταθμοί, σαρωτές λέιζερ, και άλλα όργανα ακριβείας. Μέσα από μια φιλική διεπαφή, οι χρήστες μπορούν να εκτελούν λεπτομερείς αναλύσεις, να δημιουργούν τρισδιάστατα μοντέλα και να εξάγουν ακριβή αποτελέσματα. Το λογισμικό υποστηρίζει λειτουργίες όπως η επαλήθευση και διόρθωση των μετρήσεων, η δημιουργία αναφορών, και η παρακολούθηση της ακρίβειας των διαδικασιών. Το Spatial Analyzer χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες όπως η αεροναυπηγική, η ναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία και άλλες εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλής ακρίβειας μετρήσεις και ανάλυση τρισδιάστατων δεδομένων.

Μια αντιπροσωπευτική Εικόνα από τη πλατφόρμα αυτή παρουσιάζεται παρακάτω:



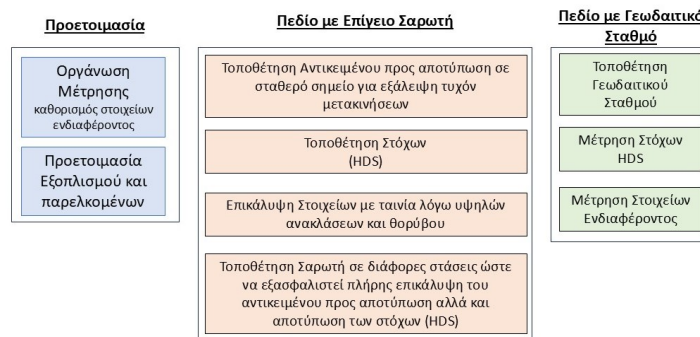
Εικόνα 3.7: Λογισμικό Spatial Analyzer

Αναλυτικά, όπως αναφέρθηκε στην αρχή της ενότητας, για να συνδυαστούν δύο σειρές μετρήσεων από διαφορετικές τεχνολογίες, απαιτείται η ύπαρξη τουλάχιστον τριών κοινών σημείων για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του αφινικού μετασχηματισμού (3 στροφές  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  και 3 μετατοπίσεις  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ). Για την επίτευξη αυτού του συνδυασμού, μετρώνται τουλάχιστον τρεις κοινός στόχοι, τόσο από το σύστημα του Σαρωτή όσο και μέσω του γεωδαιτικού σταθμού, ώστε να υπολογιστούν οι παράμετροι μετασχηματισμού.

Η διαδικασία αυτή εφαρμόζει τη Μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων (Best Fit Transformation), η οποία έχει ως αποτέλεσμα την ενοποίηση των μετρήσεων από τα δύο μετρητικά όργανα σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων. Μέσα από αυτό το συνδυασμό, είναι δυνατή η παραγωγή βέλτιστων γεωμετρικών στοιχείων, όπως ευθείες και επίπεδα, τα οποία συμβάλλουν στη διαμόρφωση του συστήματος συντεταγμένων για το αντικείμενο προς αποτύπωση. Αναλυτικά, η διαδικασία για κάθε αντικείμενο παρουσιάζεται στις Ενότητες 3.1.4 και 3.1.5.

Συμπερασματικά έως τώρα, αναλύθηκε διεξοδικά η μεθοδολογία προσέγγισης και ο συνδυασμός διαφόρων τεχνολογιών και εξοπλισμού, με σκοπό την ακριβή εξαγωγή σημείων ενδιαφέροντος. Οι τεχνικές που εφαρμόστηκαν αξιοποιούν τόσο δεδομένα από σαρωτές όσο και από γεωδαιτικούς σταθμούς, εξασφαλίζοντας την ακρίβεια και τη συνοχή των τελικών μετρήσεων.

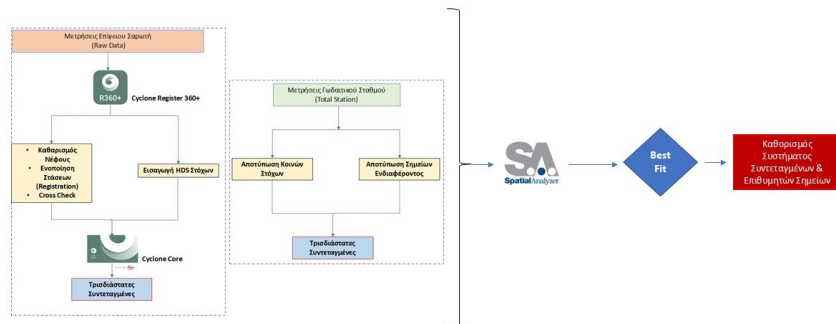
Παρακάτω παρατίθενται σε διαγραμματική μορφή η συνολική μεθοδολογία, με έμφαση στα προκαταρκτικά στάδια, καθώς και η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων, προσφέροντας μια σαφή και δομημένη εικόνα των βημάτων που ακολουθήθηκαν.



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα Ροής Γενικής Μεθοδολογίας

Η επόμενη Ενότητα 3.1.3 αναλύει λεπτομερώς τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε τόσο για την αποτύπωση του σκάφους αποστολής όσο και για το υποθαλάσσιο ρομποτικό σύστημα.





Εικόνα 3.9: Διάγραμμα Ροής Μεθόδου Επεξεργασίας & Λογισμικών

Η παρουσίαση του εξοπλισμού θα δώσει μια σαφή εικόνα των εργαλείων και τεχνολογιών που συνέβαλαν στην ακρίβεια και την επιτυχία των μετρήσεων, προσφέροντας μια πληρέστερη κατανόηση της διαδικασίας αποτύπωσης.

### 3.1.3 Μετρητικός Εξοπλισμός και Παρελκόμενα

Κάθε εφαρμογή απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού, προκειμένου να συλλεχθεί η απαιτούμενη πληροφορία ενός έργου στον συντομότερο δυνατό χρόνο και με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Μετά από ενδελεχή μελέτη, επιλέχθηκε ο κατάλληλος εξοπλισμός, ο οποίος παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω μαζί με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του. Για τις ανάγκες των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκαν τόσο ο Γεωδαιτικός Σταθμός όσο και ο Επίγειος Σαρωτής (Laser Scanner), αμφότερα προϊόντα της εταιρείας Leica Geosystems, γνωστής για την ακρίβεια και την αξιοπιστία των οργάνων της σε τοπογραφικές και γεωμετρικές εφαρμογές.

#### Επίγειος Σαρωτής Leica RTC 360

Το 3D Laser Scanner Leica RTC360 είναι ένα προηγμένο εργαλείο αποτύπωσης τρισδιάστατων σημείων, σχεδιασμένο να καταγράφει λεπτομερή δεδομένα με εξαιρετική ακρίβεια και ταχύτητα. Κατασκευασμένο από την Leica Geosystems, προσφέρει στους χρήστες τη δυνατότητα δημιουργίας ολοκληρωμένων τρισδιάστατων μοντέλων τόσο της σαρωμένης επιφάνειας όσο και του ευρύτερου περιβάλλοντος.

Ο Leica RTC360 είναι εξαιρετικά φορητός και ελαφρύς, καθιστώντας τον ιδανικό για εργασία σε ποικίλα περιβάλλοντα, ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες πεδίου. Η εργονομική του σχεδίαση, σε συνδυασμό με το πτυσσόμενο τρίποδο, επιτρέπει την εύκολη μεταφορά του.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του RTC360 είναι η ταχύτητά του, με ρυθμό σάρωσης 2.000.000 σημεία ανά δευτερόλεπτο, που επιτρέπει γρήγορη ολοκλήρωση έργων χωρίς διακοπές. Η διαδικασία σάρωσης γίνεται με το πάτημα ενός κουμπιού, διευκολύνοντας τον χρήστη στην απόκτηση ακριβών δεδομένων.


Ο σαρωτής λειτουργεί σε εμβέλεια 0.5 έως 130 μέτρα, ανεξάρτητα από τις συνθήκες φωτισμού, με ακρίβεια 1.9 mm στα 10 μέτρα. Τα δεδομένα που συλλέγονται είναι χαμηλού θορύβου, παράγοντας καθαρές και λεπτομερείς εικόνες, ενώ η τεχνολογία Dual Axis Compensator διασφαλίζει την ακρίβεια των μετρήσεων.

Επιπλέον, ο Leica Laser Scanner RTC360 διαθέτει σύστημα απεικόνισης HDR με τρεις βαθμονομημένες κάμερες για τη δημιουργία έγχρωμου νέφους σημείων και σύστημα πέντε καμερών για τη λειτουργία του οπτικού αδρανειακού συστήματος Visual Inertial System (VIS). Η αυτοματοποιημένη καταγραφή χωρίς στόχους και η εύκολη μεταφορά δεδομένων μεγιστοποιούν

την παραγωγικότητα και μειώνουν τον χρόνο εργασίας στο πεδίο. Η Εικόνα 3.10 παραθέτει μια αντιπροσωπευτική εικόνα του εξοπλισμού αυτού καθώς και ο Πίνακας 3.1 τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.



Εικόνα 3.10: Leica Laser Scanner RTC 360

<b>Laser Scanner Leica RTC360</b>	
<b>Τύπος Laser Scanner</b>	3D laser scanner υψηλής ταχύτητας με ενσωματωμένο σύστημα σφαιρικής εικόνας HDR και VIS (Virtual Inertial System) για σύνδεση των νεφών σημείων σε πραγματικό χρόνο.
<b>Λήψη σημείων</b>	2.000.000 points/sec
<b>Εμβέλεια</b>	0.5 up to 130 m
<b>Ακρίβεια απόστασης</b>	5.3 mm / 40 m
<b>Γωνιομετρική Ακρίβεια</b>	18"
<b>Αδρανειακή μονάδα μέτρησης</b>	(IMU)
<b>Camera</b>	36 MP 3-camera system captures, 432 MPx raw data for calibrated 360° x 300° spherical image
	

Πίνακας 3.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Επίγειου Σαρωτή (Leica RTC 360)

Εκτός από το βασικό εξοπλισμό, σημαντικό ρόλο στη σωστή λειτουργία και χρήση του σαρωτή παίζουν και τα συνοδευτικά παρελκόμενα. Αυτά περιλαμβάνουν τον τρίποδα, πάνω στον οποίο τοποθετείται το όργανο για σταθερή και ακριβή σάρωση, μπαταρίες για τη συνεχή τροφοδοσία κατά τη διάρκεια των εργασιών στο πεδίο καθώς και αποθηκευτική μονάδα για την ασφαλή και γρήγορη αποθήκευση των μεγάλων όγκων δεδομένων που συλλέγονται. Επιπλέον, ειδικοί ασπρόμαυροι στόχοι χρησιμοποιούνται για τον ακριβή προσδιορισμό θέσεων, διευκολύνοντας τη διαδικασία ευθυγράμμισης και ενοποίησης των σαρώσεων.

Αρχικά, ο τρίποδας στήριξης που χρησιμοποιείται είναι ο GST80 Lightweight Tripod, κατασκευασμένος από ανθρακόνημα. Πρόκειται για έναν πτυσσόμενο τρίποδα, ειδικά σχεδιασμένο για τη σταθερή και ασφαλή έδραση του σαρωτή Leica RTC360. Η κατασκευή του από ανθρακόνημα, σε συνδυασμό με τα πόδια από καουτσούκ, τον καθιστούν εξαιρετικά ελαφρύ και αν-

θεκτικό. Αυτά τα χαρακτηριστικά του προσφέρουν σημαντική ευελιξία και διευκολύνουν τόσο τη μεταφορά όσο και τη χρήση του σε διάφορα περιβάλλοντα, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται η σταθερότητα κατά τις μετρήσεις (Εικόνα 3.11).



Εικόνα 3.11: Τρίποδας Στήριξης Leica RTC 360

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στον παρελκόμενο εξοπλισμό του RTC360 περιλαμβάνονται δύο αποθηκευτικές μονάδες USB «Leica MS256», οι οποίες προσαρμίζονται στη θυρίδα USB του οργάνου. Αυτές οι μονάδες αποθήκευσης είναι σχεδιασμένες για τη γρήγορη και αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων. Στην παρούσα εφαρμογή, χρησιμοποιήθηκε μία από τις δύο μονάδες για τη μεταφορά των συλλεχθέντων δεδομένων από το σαρωτή σε εξωτερικό υπολογιστή, όπου θα πραγματοποιηθεί η μετέπειτα επεξεργασία τους, διευκολύνοντας την οργάνωση και αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της σάρωσης.



Εικόνα 3.12: Leica MS256

Τέλος, το σημαντικότερο παρελκόμενο του εξοπλισμού αποτελούν οι ανακλαστικοί στόχοι (HDS Targets). Αυτοί οι ειδικοί στόχοι έχουν τη δυνατότητα περιστροφής, επιτρέποντας την ακριβή αποτύπωσή τους κατά τη μετακίνηση του Laser Scanner. Η ιδιότητά τους να διατηρούν το κέντρο τους σταθερό, ανεξάρτητα από τη γωνία θέασης ή την αλλαγή της θέσης του σαρωτή, διασφαλίζει την ακρίβεια των μετρήσεων. Οι HDS Targets είναι κρίσιμοι για τη διατήρηση της συνέπειας και της ακρίβειας κατά τη σάρωση σε πολυσύνθετες αποτυπώσεις. Αντιπροσωπευτικές εικόνες παρουσιάζονται παρακάτω:

Εκτός από τη χρήση του Επίγειου Σαρωτή, πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις με Γεωδαιτικό Σταθμό. Τα χαρακτηριστικά και τα παρελκόμενα αυτού παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.



Εικόνα 3.13: Leica HDS Ανακλαστικοί Στόχοι.

### Γεωδαιτικός Σταθμός Leica TDRA6000

Ο ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός Leica TDRA6000 αποτελεί ένα κορυφαίο όργανο για αποτύπωση και χάραξη σημείων στον τρισδιάστατο χώρο, με έμφαση στην ακρίβεια και την ευκολία χρήσης σε βιομηχανικές εφαρμογές. Κατασκευασμένο από τη Leica Geosystems, διαθέτει τεχνολογία αιχμής, συμπεριλαμβανομένου ενός λέιζερ που εξασφαλίζει αβεβαιότητα σημείου 0.25mm στα 30m, καθιστώντας το ένα από τα πιο ακριβή γεωδαιτικά όργανα της κατηγορίας του.

Η μονάδα Automatic Target Recognition (ATR) επιτρέπει τον αυτόματο εντοπισμό στόχου με ακρίβεια  $\pm 0.5\text{mm}$  και γωνιακή ακρίβεια  $1''$ , διευκολύνοντας τις μετρήσεις από ένα άτομο. Η τεχνολογία Powersearch (PS) επιτρέπει το γρήγορο επανακλείδωμα στόχου σε αποστάσεις έως 300m. Με την εφαρμογή του απόλυτου ιντερφερόμετρου (Absolute Interferometer), διασφαλίζεται ακριβής παρακολούθηση γωνιών χωρίς την ανάγκη για περίπλοκες διαδικασίες βαθμονόμησης, προσφέροντας ένα φιλικό περιβάλλον εργασίας.


Επιπλέον, η τεχνολογία Απόλυτης Μέτρησης Μήκους (ADM) συνδυάζει μεθόδους μέτρησης που εκμεταλλεύονται τη φάση και τον χρόνο πτήσης (time-of-flight), παρέχοντας ακρίβεια  $\pm(0.6\text{mm}+1\text{ppm})$  με ανάλυση 0.1mm. Η μέτρηση μπορεί να γίνει σε ανακλαστικές ή ακόμα και σε ανακλαστικές ταινίες και επιφάνειες χωρίς ανακλαστήρα (Reflectorless) με ακρίβεια  $\pm(2\text{mm}+2\text{ppm})$ .

Η ακρίβεια στις γωνιακές μετρήσεις φτάνει τα  $0.5''$ , με ανάλυση  $0.01''$ , διασφαλίζοντας εξαιρετική απόδοση σε λεπτομερείς εφαρμογές. Η λειτουργία του γεωδαιτικού σταθμού υποστηρίζεται από ατέρμονους κοχλίες και ενσωματωμένους σερβομηχανισμούς που επιτρέπουν την πλήρη ρομποτική λειτουργία, συμπεριλαμβανομένης της αυτόματης αλλαγής θέσης τηλεσκοπίου χωρίς την παρέμβαση του χειριστή, διευκολύνοντας ακόμα περισσότερο τη χρήση του σε απαιτητικές εργασίες πεδίου ([6]).

Όπως και στην περίπτωση του επίγειου σαρωτή, έτσι και στη χρήση του γεωδαιτικού σταθμού απαιτούνται τα αντίστοιχα παρελκόμενα. Αυτά περιλαμβάνουν τον ειδικό βιομηχανικό τρίποδα, πάνω στον οποίο τοποθετείται ο εξοπλισμός καθώς και τους ειδικά διαμορφωμένους στόχους οι οποίοι είναι απαραίτητοι για τις αλλαγές στάσεων. Οι στόχοι αυτοί διασφαλίζουν την ένταξη του οργάνου στο αρχικό σύστημα αναφοράς που έχει καθοριστεί. Αρχικά, ο τρίποδας είναι βιομηχανικού τύπου, ονόματι Aluminum Tripod AT28 που είναι ένας εξειδικευμένος τρίποδας σχεδιασμένος ειδικά για εφαρμογές βιομηχανικής γεωδαισίας. Κατασκευασμένος από αλουμίνιο, προσφέρει συνδυασμό ελαφρότητας και ανθεκτικότητας, καθιστώντας τη μεταφορά του εύκολη και βολική. Η κύρια διαφορά του από έναν συμβατικό τρίποδα έγκειται στον ειδικό σχεδιασμό του για βιομηχανική χρήση. Η κατασκευή του είναι ιδιαίτερα σταθερή, κάτι που



Εικόνα 3.14: Leica Total Station TDRA6000.

<b>Leica Total Station TDRA6000</b>	
<b>Γωνιομετρική Ακρίβεια</b>	±0.2 mm (BRR) / 120 m
<b>Ακρίβεια χωρίς στόχους</b>	±2 mm + 2 ppm
<b>Εμβέλεια</b>	up to 300 m
Διπλός Αντισταθμιστής Μετρήσεων	
Αυτόματη Αναγνώριση Στόχου (ATR)	
<b>DCP05 S/W</b>	(Εξειδικευμένο firmware of AMS - LEICA για βιομηχανικές μετρήσεις)
	

Πίνακας 3.2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Γεωδαιτικού Σταθμού Leica TDRA6000

είναι κρίσιμο για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας. Ενσωματώνει χαρακτηριστικά όπως σύστημα εύκολης ρύθμισης του ύψους, σύνδεση μεταξύ των σκελών για αυξημένη σταθερότητα κατά την τοποθέτηση, καθώς και κινούμενους δίσκους που βελτιώνουν την επαφή με το έδαφος.



Εικόνα 3.15: Βιομηχανικός Τρίποδας τοποθέτησης Leica TDRA6000

Εκτός από τη χρήση του τρίποδα, απαραίτητο στοιχείο για τη μέτρηση με τη χρήση γεωδαιτικού σταθμού αποτελούν ειδικά διαμορφωμένοι στόχοι (Bohnesteingl) σφαιρικού σχήματος,



τοποθετημένοι σε ειδική μαγνητική βάση που επιτρέπει την περιστροφή τους διατηρώντας σταθερό το κέντρο τους. Έτσι δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να μετακινεί τον εξοπλισμό σε διάφορες θέσεις, αποτυπώνοντας τους ίδιους στόχους και εντάσσοντάς στο ίδιο σύστημα αναφοράς με το αρχικό.



Εικόνα 3.16: Στόχοι Bohnenstingl - Παρελκόμενα Leica TDRA6000.

Μετά την αναλυτική παρουσίαση της μεθοδολογίας για τη μέτρηση με τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού και για την επεξεργασία με χρήση λογισμικών, ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για την τρισδιάστατη αποτύπωση των αντικειμένων ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας. Αυτή η μεθοδολογία σχετίζεται με το Σκάφος Αποστολής και το Υποθαλάσσιο Ρομποτικό Σύστημα τύπου Glider και αναλύεται στις Ενότητες 3.1.4 και 3.1.5.

### 3.1.4 Τρισδιάστατη Αποτύπωση Σκάφους Αποστολής

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την τρισδιάστατη αποτύπωση και τη μέτρηση σημείων ενδιαφέροντος του πρώτου εξοπλισμού ο οποίος αφορά στο σκάφος αποστολής. Το σκάφος είναι εξοπλισμένο με μετρητικά συστήματα που είναι απαραίτητα για την επίτευξη του στόχου της εργασίας. Η διαδικασία αποτύπωσης περιλαμβάνει τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών και τεχνολογιών για τη δημιουργία ενός ακριβούς τρισδιάστατου νέφους σημείων του σκάφους. Το αποτέλεσμα αυτό επιτρέπει την εξαγωγή των σημείων ενδιαφέροντος τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα στάδια της μελέτης.

Το σκάφος που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας Nireus Boats, μοντέλο NIREUS Ω53 ESCAPE του οποίου τα τεχνικά χαρακτηριστικά παρατίθενται στον επόμενο πίνακα και στην Εικόνα 3.17.



Εικόνα 3.17: Σκάφος Αποστολής τύπου Nireus Ω53 Escape

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Σκάφους	
Ολικό Μήκος	5,30m
Άτομα	8
Βάρος Σκάφους	600kg
Ολικό Πλάτος	2,30m
Τύπος Κινητήρα:	Εξωλέμβιο
Βύθισμα (με Κινητήρα)	0.39m
Μεγ. Ιπποδύναμη	115hp
Μεγ. Επιτρεπόμενο Φορτίο	995 kg
Κατηγορία Σχεδίασης	C
Γωνία Dead Rise	ΠΜ 38

Πίνακας 3.3: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Σκάφους

Πάνω στο σκάφος έχει σχεδιαστεί και τοποθετηθεί ειδική βάση για τη στήριξη του μετρητικού εξοπλισμού. Η βάση αυτή είναι τοποθετημένη στη δεξιά πλευρά της πρύμνης του σκάφους (Starboard Side) και αποτελείται από τέσσερα βασικά τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι μια ανοξείδωτη βάση, η οποία είναι βιδωμένη στην κουπαστή του σκάφους, εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα του εξοπλισμού και την ποιότητα των μετρήσεων. Το δεύτερο τμήμα είναι μια κυλινδρική διάταξη με ενσωματωμένα "δαχτυλίδια", τα οποία επιτρέπουν την επαναληψιμότητα της τοποθέτησης της βάσης στο ίδιο σημείο. Στο τέλος του κυλίνδρου υπάρχουν δύο επιπλέον "δαχτυλίδια" πάνω στα οποία τοποθετείται το βασικό ανοξείδωτο τμήμα της βάσης. Στο άκρο του, υπάρχει μια φλάντζα όπου βιδώθηκε ο μετρητικός εξοπλισμός. Τέλος, στο ανώτερο τμήμα της βάσης προσδένεται ένα τελευταίο κομμάτι σε σχήμα "T", στο οποίο έχουν τοποθετηθεί δύο δορυφορικοί δέκτες σε προκαθορισμένες θέσεις.

Ο σχεδιασμός αυτών των τμημάτων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, έχει γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε κατά τη διαμέλιση της βάσης και επανατοποθέτηση αυτής, οι αποστάσεις και οι θέσεις τοποθέτησης του εξοπλισμού να μην αλλάζουν.



Εικόνα 3.18: Βάση στήριξης μετρητικού εξοπλισμού

### Προετοιμασία Διεξαγωγής Μετρήσεων

Έχοντας τοποθετημένα όλα τα κομμάτια της βάσης πάνω στο σκάφος, επόμενο στάδιο ήταν η τρισδιάστατη αποτύπωση του σκάφους καθώς και των σημείων στη βάση όπου επρόκειτο να τοποθετηθούν οι δορυφορικοί δέκτες αλλά και ο μετρητικός εξοπλισμός USBL (Ενότητα 3.2).

Σύμφωνα με το μεθοδολογικό πλαίσιο που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το προπαρασκευαστικό στάδιο περιλάμβανε την προετοιμασία των μετρήσεων στο γραφείο.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ορθής λειτουργίας του εξοπλισμού, τόσο του επίγειου σαρωτή όσο και του γεωδαιτικό σταθμού καθώς και των αντίστοιχων παρελκόμενων. Στη συνέχεια, μελετήθηκαν και προσδιορίστηκαν τα στοιχεία που επρόκειτο να μετρηθούν καθώς και οι μέθοδοι μέτρησής τους. Αυτά τα στοιχεία διαχωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες:

1. Στοιχεία για εξαγωγή Συστήματος συντεταγμένων Σκάφους
2. Στοιχεία Μετρητικού Εξοπλισμού

Με βάση τα παραπάνω, τα στοιχεία που ορίστηκαν προς μέτρηση ήταν:

1. Σημεία στο Κατάστρωμα
2. Σημεία στην Κεντρική Γραμμή του σκάφους (Center Line)
3. Σημεία στο κάτω μέρος της φλάντζας όπου θα προσδεθεί ο μετρητικός εξοπλισμός
4. Σημεία όπου θα προσδεθούν οι Δορυφορικοί δέκτες, απαραίτητοι για την εκπλήρωση του στόχου της εργασίας.

Μετά την προετοιμασία στο γραφείο, το επόμενο στάδιο ήταν η προετοιμασία στο πεδίο, η οποία χωρίστηκε σε τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορούσε στη σταθερή τοποθέτηση του σκάφους σε ακλόνητα σημεία για να αποφευχθεί τυχόν μετακίνηση του αντικειμένου και να διασφαλιστεί η ακρίβεια των μετρήσεων. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση ειδικών βάσεων στο trailer, που απέτρεψαν την κίνηση του σκάφους κατά τη διάρκεια της διαδικασίας (Εικόνα 3.19).

Το δεύτερο στάδιο ήταν η τοποθέτηση της ειδικά σχεδιασμένης βάσης πάνω στο σκάφος αλλά και του εξοπλισμού που επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί ήτοι των δυο δορυφορικών δεκτών, όπως αυτοί φαίνονται στην Εικόνα 3.20.

Το τρίτο στάδιο περιλάμβανε την τοποθέτηση των ειδικών στόχων HDS οι οποίοι περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τρεις στόχοι οι οποίοι παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.20.



Εικόνα 3.19: Θέσεις Τοποθέτησης στόχων HDS κατά την αποτύπωση του σκάφους Αποστολής

## Εργασίες Πεδίου

Με την ολοκλήρωση της προετοιμασίας στο πεδίο (ασφαλής στήριξη και τοποθέτηση στόχων), το επόμενο στάδιο ήταν η διεξαγωγή των μετρήσεων. Η διαδικασία ξεκίνησε με τη χρήση του Επίγειου Σαρωτή Leica Laser Scanner RTC 360. Ο σαρωτής τοποθετήθηκε σε διάφορες θέσεις (14 στο σύνολό τους) περιμετρικά του σκάφους, προκειμένου να επιτευχθεί η πλήρης



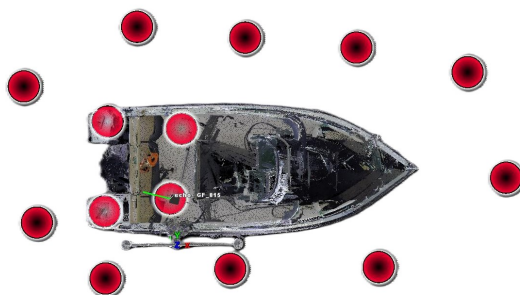


Βάσεις Στήριξης

Εικόνα 3.20: Τοποθέτηση Βάσεων Στήριξης Trailer

αποτύπωση του αντικειμένου. Ακολούθησε η μέτρηση των στοιχείων ενδιαφέροντος, όπως το κάτω μέρος της φλάντζας όπου θα εγκατασταθεί ο ειδικός μετρητικός εξοπλισμός και οι δορυφορικοί δέκτες. Η όλη διαδικασία πραγματοποιήθηκε μέσω της χρήσης του λογισμικού Leica Cyclone Field 360.

Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίστηκε η συλλογή λεπτομερών δεδομένων για τα κρίσιμα σημεία του σκάφους, απαραίτητα για τα επόμενα στάδια της μελέτης. Παρακάτω παρουσιάζεται μια κάτοψη των διαφορετικών στάσεων για τη πραγματοποίηση των μετρήσεων (Εικόνα 3.21).



Εικόνα 3.21: Κάτοψη οπτικοποίησης των στάσεων

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων με τη χρήση του Laser Scanner, επόμενο στάδιο αποτέλεσε η μέτρηση χαρακτηριστικών σημείων από το Γεωδαιτικό Σταθμό (Leica Robotic Total Station TDRA6000) και συγκεκριμένα,

1. Δειγματοληπτικά Σημεία στο Κάτω Μέρος των Κεραιών
2. Δειγματοληπτικά Σημεία στη Κυκλική Διατομή της Βάσης
3. Στόχοι Σαρωτή
4. Δειγματοληπτικά Σημεία στις οπές της φλάντζας

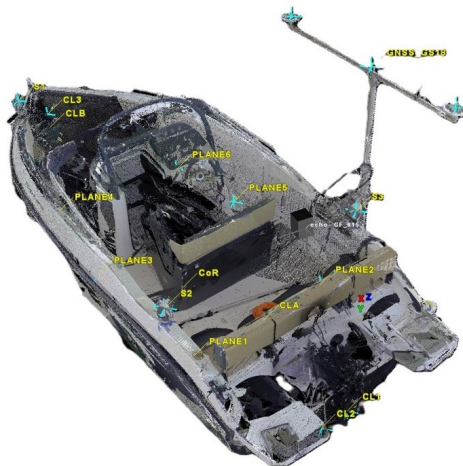
Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 3, οι στόχοι που μετρήθηκαν και αποτυπώθηκαν με τη χρήση του Laser Scanner είχαν ως απώτερο σκοπό την ενοποίηση στο επόμενο στάδιο της επεξεργασίας. Επιπλέον, μετρήθηκαν και πρόσθετα στοιχεία, καθώς το ανοξείδωτο υλικό προκάλεσε υψηλές ανακλάσεις κατά τη σάρωση. Μέσω αυτής της διαδικασίας εξασφαλίστηκε τόσο η βέλτιστη ακρίβεια των μετρήσεων όσο και η σωστή αποτύπωση των κρίσιμων στοιχείων ενδιαφέροντος.



Εικόνα 3.22: Στιγμιότυπα από τη διαδικασία αποτύπωσης του σκάφους μέσα από τη χρήση τεχνολογίας Laser Scanner (Leica RTC 360) και Γεωδαιτικού Σταθμού (Leica TDRA 6000).

### Επεξεργασία Δεδομένων

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών πεδίου, ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων. Αρχικά, οι επιμέρους στάσεις από την αποτύπωση με τον Επίγειο Σαρωτή εισήχθησαν στο λογισμικό Leica Cyclone Register 360+. Στο λογισμικό αυτό, πραγματοποιήθηκε η ενοποίηση των δεδομένων από τις διάφορες στάσεις, ο καθαρισμός των νεφών από κινούμενα αντικείμενα και θόρυβο καθώς και η εισαγωγή των ονομάτων των στόχων. Στη συνέχεια, έγιναν επιπρόσθετες ενώσεις (Additional Links) για τη βελτιστοποίηση της λύσης. Το τελικό ενοποιημένο νέφος εισήχθη στο λογισμικό Leica Cyclone Core όπου πραγματοποιήθηκε επιπλέον έλεγχος για τυχόν σφάλματα μεταξύ των επιμέρους ενώσεων, ομαδοποίηση σε ένα ενιαίο νέφος και μείωση της πυκνότητάς του για ευκολότερη διαχείριση. Το αποτέλεσμα του έγχρωμου τρισδιάστατου νέφους παρατίθεται στην Ενότητα των αποτελεσμάτων (Ενότητα 4.1). Στη συνέχεια, ακολούθησε ο προσδιορισμός των σημείων ενδιαφέροντος με σκοπό τη δημιουργία του συστήματος συντεταγμένων του σκάφους και των σημείων αναφοράς του μετρητικού εξοπλισμού. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν σημεία στο κατάστρωμα του σκάφους, στη Center Line, στην αξονική της βάσης πρόσδεσης του εξοπλισμού, στο κατώτερο σημείο των δορυφορικών δεκτών (GNSS). Όλα τα παραπάνω μαζί με τους στόχους τους σαρωτή εξήχθησαν σε μορφότυπο τρισδιάστατων συντεταγμένων και παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.23.



Εικόνα 3.23: Εξαγόμενα Σημεία από το Τρισδιάστατο Νέφος του Σκάφους

Αντίστοιχα, οι τρισδιάστατες συντεταγμένες που προέκυψαν από τον γεωδαιτικό σταθμό, σε συνδυασμό με αυτές του σαρωτή, εισήχθησαν στη μετρολογική πλατφόρμα Spatial Analyzer. Εκεί πραγματοποιήθηκε η διαδικασία ενοποίησης των δυο μετρήσεων μέσω της χρήσης των

ελαχίστων τετραγώνων (best fit transformation), τα αποτελέσματα της οποίας παρατίθενται στον Πίνακα 3.4.

<b>Best-Fit Transformation</b>	X (mm)	Y (mm)	Z(mm)	Mag.
<b>Results</b>				
Count	3	3	3	3
Max Error	0	0	0	0
RMS Error	0	0	0	0
StdDev Error	0	0	0	0
Max Error (all)	0	0	0	0
RMS Error (all)	0	0	0	0
Unknowns	6		Equations	9
<b>Transformation</b>				
Translation (mm)	-4.28	-36.55	16.77	40.44
Fixed XYZ Rotation (deg)	-3.4783	-0.509	1.488	
Euler XYZ Rotation (deg)	-3.4641	-0.5982	1.4544	
Axis-Angle Rotation (deg)	-0.91087	-0.14537	0.38625	3.8112
Scale Factor	1			
<b>Matrix</b>				
	0.999623	-0.02538	-0.01044	-4.278015
	0.025966	0.997835	0.06042	-36.548716
	0.008884	-0.060669	0.998118	16.766714
	0	0	0	1

Πίνακας 3.4: Πίνακας Μετασχηματισμού Ελαχίστων Τετραγώνων μεταξύ Μετρήσεων Laser Scanner & Γεωδαιτικού Σταθμού

Επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία του συστήματος συντεταγμένων του σκάφους. Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, για να υλοποιηθεί αυτό, απαιτήθηκε η κατασκευή ενός επιπέδου αναφοράς (best fit plane), ορισμός μιας ευθείας (best fit line) που καθορίζει την κατεύθυνση και καθορισμός ενός σημείου (Origin) που αποτελεί την αρχή του συστήματος συντεταγμένων.

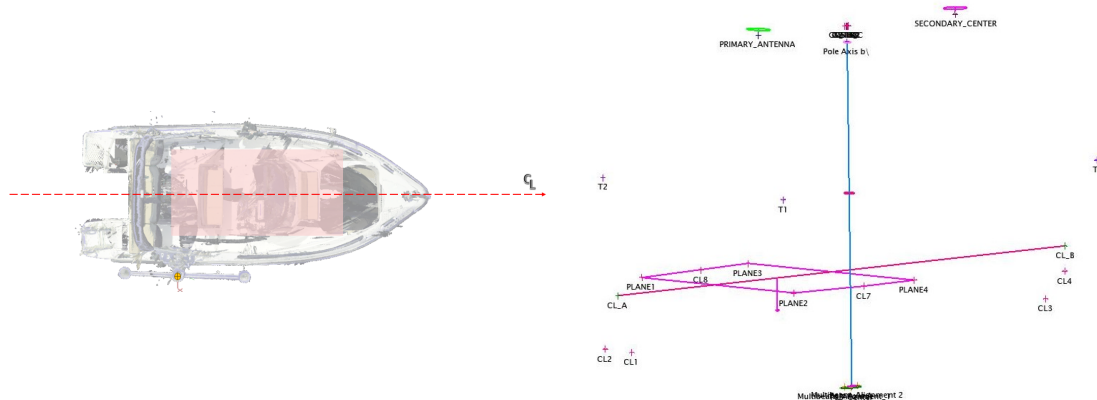
Αναλυτικά, το σύστημα αναφοράς του σκάφους ορίστηκε ως εξής:

1. Το βέλτιστο επίπεδο ορίστηκε από τα σημεία του καταστρώματος.
2. Η βέλτιστη ευθεία, η οποία καθόρισε την κατεύθυνση του συστήματος, προέκυψε από σημεία εκατέρωθεν του καταστρώματος και της τρόπιδας του σκάφους.
3. Η αρχή του συστήματος συντεταγμένων ορίστηκε στο κέντρο της φλάντζας, στο χαμηλότερο σημείο του σκάφους.

Τελευταίο στάδιο ήταν η εξαγωγή της σχετικής θέσης και στις τρεις διαστάσεις μεταξύ του κατώτερου σημείου της φλάντζας (Top of the Bracket), σε σχέση με το σημείο αναφοράς του Δορυφορικού Δέκτη το οποίο βρίσκεται ομοαξονικά στο πάνω μέρος της βάσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.1 αλλά και στην Εικόνα 4.2.

### 3.1.5 Τρισδιάστατη Αποτύπωση Ρομποτικού Υποθαλάσσιου Συστήματος

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται αναλυτικά το μεθοδολογικό πλαίσιο που αφορά στην τρισδιάστατη αποτύπωση και στα σημεία ενδιαφέροντος του ρομποτικού συστήματος το οποίο



Εικόνα 3.24: Καθορισμός Συστήματος Συντεταγμένων

Deviation Stats	
Mean	-0.0 mm
RMS	2.3 mm
Magnitude	
Max	3.4 mm
Min	0.3 mm
Signed	
Max	2.6 mm
Min	-3.4 mm
Measured from positive side	
All offsets set to 0.00 mm	
<b>Total Number</b>	6 points

Πίνακας 3.5: Στατιστικά Στοιχεία Βέλτιστου Επιπέδου Αναφοράς

Deviation Stats	
Mean	0.8 mm
RMS	0.9 mm
Magnitude	
Max	1.1 mm
Min	0.1 mm
Signed	
Max	1.1 mm
Min	0.1 mm
<b>Total Number</b>	3 points

Πίνακας 3.6: Στατιστικά Στοιχεία Βέλτιστης Ευθείας Αναφοράς

αποτελέσει το βασικό εργαλείο για την επίτευξη του υποθαλάσσιου εντοπισμού.

Το ρομποτικό αυτόνομο υποθαλάσσιο όχημα που χρησιμοποιήθηκε και μελετήθηκε ανήκει στην εταιρεία Teledyne Technologies. Μια συνοπτική περιγραφή του οχήματος παρατίθεται παρακάτω.

Το Slocum Glider G3 είναι ένα καινοτόμο αυτόνομο υποβρύχιο όχημα, μέρος της κλάσης Slocum gliders, που αρχικά σχεδιάστηκε από τον Douglas C. Webb με την υποστήριξη του Henry Stommel και άλλων επιστημόνων. Η σειρά αυτή των gliders πήρε το όνομά της από τον Joshua Slocum, τον πρώτο άνθρωπο που περιέπλευσε τον κόσμο μόνος του. Τα gliders αυτά διαθέτουν βελτιστοποιημένους κινητήρες για εφαρμογές σε ρηγά παράκτια ύδατα ή σε μεγαλύτερα βάθη, με δυνατότητες να επιχειρούν σε βάθη από 4 έως και 1000 μέτρα ([9], [10]).

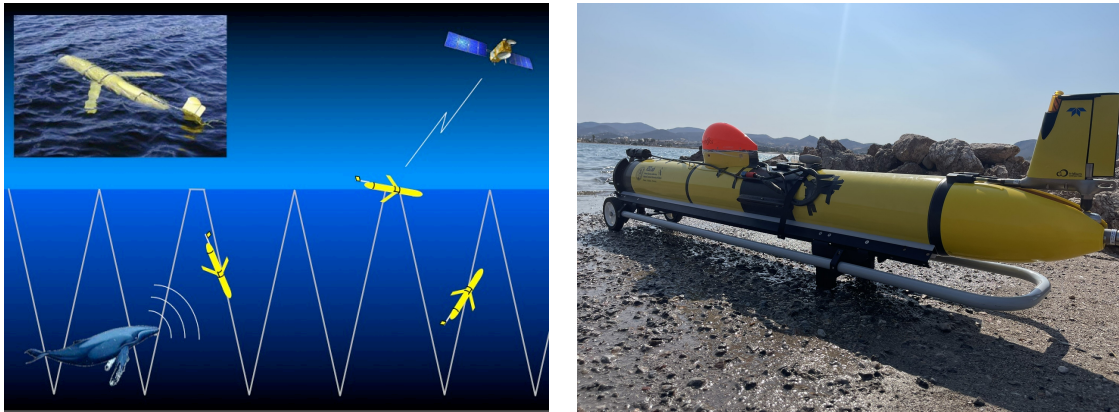
Τα Slocum gliders είναι εξαιρετικά ευκίνητα και μπορούν να μετακινούνται τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα, χάρη στην ικανότητα μεταβολής της πλευστότητάς τους, ακολουθώντας ένα κατακόρυφο προφίλ «σπειροειδούς» μορφής. Εξοπλισμένα με μακροπρόθεσμες δυνατότητες παρακολούθησης, τα gliders αυτά είναι ιδανικά για υποβρύχια δειγματοληψία σε περιφερειακό επίπεδο, προσφέροντας σημαντική εξοικονόμηση κόστους σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους έρευνας με πλοία.

Μπορούν να προγραμματιστούν για να περιπολούν για εβδομάδες, μήνες, ή ακόμα και χρόνια ενώ αναδύονται στην επιφάνεια για να μεταδώσουν τα δεδομένα τους και να λάβουν νέες εντολές μέσω δορυφόρου. Το χαμηλό κόστος λειτουργίας, η δυνατότητα να χειρίζονται πολλα-



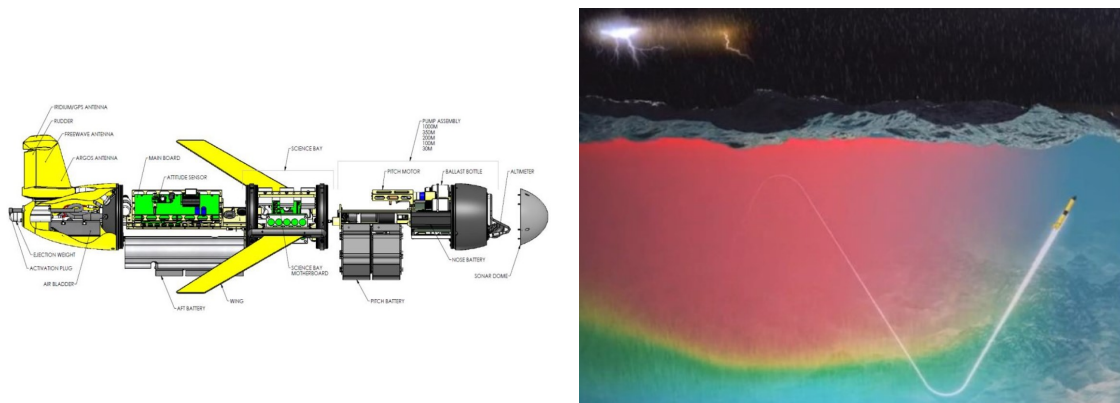
πλά οχήματα με ελάχιστο προσωπικό και υποδομές καθώς και η ικανότητά τους να επιχειρούν συνεχώς 24 ώρες το 24ωρο, 365 μέρες τον χρόνο, τα καθιστούν εξαιρετικά εργαλεία για τη χαρτογράφηση και μελέτη των δυναμικών χαρακτηριστικών των υποθαλάσσιων παράκτιων ή βαθιών υδάτων ([7], [8]).

Το σύστημα G3 είναι η πιο σύγχρονη εκδοχή των Slocum gliders, προσφέροντας νέες δυνατότητες και βελτιώσεις σε σχέση με τα προηγούμενα συστήματα G1 και G2, καθιστώντας το απαραίτητο για τους χρήστες να εξοικειωθούν με τα νέα χαρακτηριστικά του G3 πριν το πρώτο του χειρισμό.



Εικόνα 3.25: Teledyne Slocum Glider G3

Το συγκεκριμένο όχημα φέρει εξειδικευμένο εξοπλισμό που καλύπτει διάφορες ανάγκες. Περιλαμβάνει αισθητήρες για τη μέτρηση περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα, η αγωγιμότητα και το βάθος. Επιπλέον, διαθέτει συστήματα πλοήγησης (Garmin GPS 15xH/15xL) βασισμένα σε τεχνολογίες SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) καθώς και συσκευές εντοπισμού μέσω τεχνολογίας USBL (Ultra-Short Baseline), προσφέροντας έτσι ολοκληρωμένη υποστήριξη για την παρακολούθηση και τον εντοπισμό του οχήματος σε θαλάσσιο περιβάλλον.



Εικόνα 3.26: Teledyne Slocum Glider G3 - Εξοπλισμός

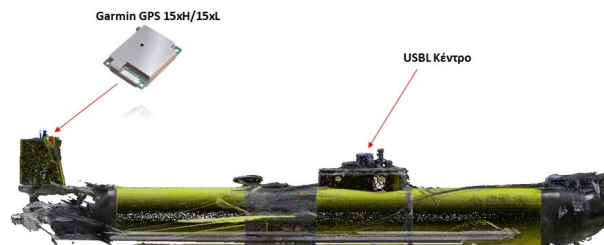
Το συγκεκριμένο όχημα ήταν διαθέσιμο στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος Ramones ([11], [12]). Το πρόγραμμα **RAMONES** (Robotic Aerial Maritime Observation Network for Environmental Studies) είναι μια ευρωπαϊκή πρωτοβουλία που στοχεύει στη δημιουργία ενός δικτύου αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων αέρος και θαλάσσης για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Η κύρια στόχευση του προγράμματος είναι η ανάπτυξη και η ολοκλήρωση νέων τεχνολογιών για την ενίσχυση της ικανότητας παρακολούθησης του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Οι βασικοί στόχοι του RAMONES περιλαμβάνουν:

- **Ανάπτυξη Αυτόνομων Συστημάτων:** Εξερεύνηση και ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών για αυτόνομα ρομποτικά συστήματα, όπως τα εναέρια και θαλάσσια ρομπότ, για την παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων.
- **Δημιουργία Δικτύου:** Σύνδεση και συντονισμός αυτών των ρομποτικών συστημάτων για τη δημιουργία ενός ενιαίου δικτύου παρακολούθησης που μπορεί να καλύψει μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και να παρέχει αναλυτικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.
- **Ενίσχυση της Περιβαλλοντικής Έρευνας:** Υποστήριξη ερευνητικών προσπαθειών και πολιτικών σχετικών με τη διαχείριση των θαλάσσιων πόρων, με στόχο την καλύτερη κατανόηση και προστασία του περιβάλλοντος.

Το πρόγραμμα επιδιώκει να συμβάλει στην καινοτομία στον τομέα της ρομποτικής και της περιβαλλοντικής παρακολούθησης, προσφέροντας σημαντικές πληροφορίες για την επιστήμη και τη διαχείριση των φυσικών πόρων.

Στο πλαίσιο του παραπάνω προγράμματος, έχει τοποθετηθεί και προγραμματιστεί ένα επιπρόσθετο τμήμα που σχετίζεται με τον υποθαλάσσιο εντοπισμό του οχήματος (Science Component), βασισμένο στη τεχνολογία Ultra Short Baseline (USBL). Αναλυτικές πληροφορίες για αυτόν τον εξοπλισμό παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες. Ωστόσο, μέσω της παρούσας αναφοράς είναι σημαντικό να καθοριστούν με ακρίβεια οι σχετικές θέσεις μεταξύ της κεραίας GPS που είναι εγκατεστημένη στο όχημα (Garmin GPS 15xH/15xL) από την αρχική του κατασκευή και του κέντρου αναφοράς του συστήματος USBL, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.27. Για την υλοποίηση αυτής της διαδικασίας πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη αποτύπωση του οχήματος, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη Ενότητα και αναλύεται λεπτομερώς παρακάτω.



Εικόνα 3.27: Προσδιορισμός Σημείων Ενδιαφέροντος προς Μέτρηση στο Glider Slocum G3

### Προετοιμασία Διεξαγωγής Μετρήσεων

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα για την Τρισδιάστατη Αποτύπωση του Σκάφους Αποστολής, η διαδικασία κάθε αποτύπωσης ξεκινά με την προετοιμασία της, τόσο στο γραφείο όσο και στο πεδίο. Αρχικά, στο γραφείο πραγματοποιήθηκε λεπτομερής μελέτη των σχεδίων του Glider, με στόχο την αναγνώριση των σημείων ενδιαφέροντος και αναφοράς που πρέπει να προσδιοριστούν με ακρίβεια κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

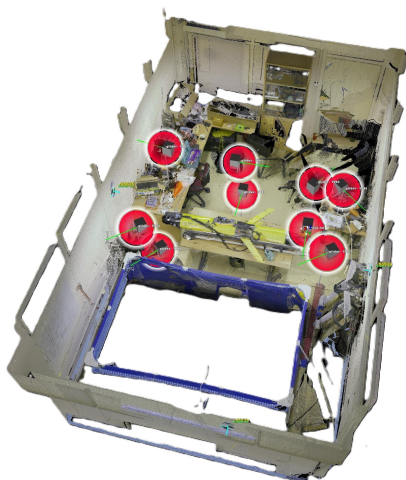
Η προετοιμασία στο πεδίο, η οποία πραγματοποιήθηκε εξολοκλήρου στο εργαστήριο Τηλεπισκόπησης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αφορούσε τη σταθερή τοποθέτηση του οχήματος σε ένα προκαθορισμένο σημείο και την αποκάλυψη των οργάνων προς αποτύπωση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αυτή περιλάμβανε την αποκάλυψη του αισθητήρα USBL, καθώς και την τοποθέτηση ειδικών στόχων HDS περιμετρικά του χώρου. Για τη διαδικασία αυτή επιλέχθηκαν τρεις στόχοι, οι οποίοι τοποθετήθηκαν στους τοίχους περιμετρικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.28.



Εικόνα 3.28: Θέσεις Στόχων HDS κατά την Τρισδιάστατη Αποτύπωση του Glider

### Εργασίες Πεδίου

Με την ολοκλήρωση της προετοιμασίας για τη μέτρηση, ξεκίνησε η τρισδιάστατη αποτύπωση του Glider με τη χρήση του επίγειου σαρωτή Leica Laser Scanner RTC360. Πραγματοποιήθηκαν περιμετρικές στάσεις, εννέα σε αριθμό, με στόχο την πλήρη αποτύπωση του οχήματος, προκειμένου να εξαχθεί το σύστημα συντεταγμένων του και να καταγραφούν με ακρίβεια οι αισθητήρες. Επίσης έμφαση δόθηκε και στην αποτύπωση των στόχων για τη μετέπειτα χρήση τους σε συνδυασμό με αυτές του γεωδαιτικού σταθμού. Παρακάτω παρουσιάζεται μια αντιπροσωπευτική εικόνα των στάσεων που πραγματοποιήθηκαν.



Εικόνα 3.29: Κάτοψη των θέσεων που πραγματοποιήθηκαν στάσεις με τη χρήση Επίγειου Σαρωτή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, επειδή ο αισθητήρας USBL περιλάμβανε υλικά με ανακλαστικές και μαύρες επιφάνειες, οι οποίες δεν αποδίδονται σωστά κατά την τρισδιάστατη σάρωση, τοποθετήθηκε ταινία περιμετρικά του αισθητήρα για να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα από ανακλάσεις.

Αφού ολοκληρώθηκε η αποτύπωση με τη χρήση του επίγειου Σαρωτή, στη συνέχεια ακολούθησε η λεπτομερής αποτύπωση με τη χρήση του Γεωδαιτικού Σταθμού Leica TDR6000. Τα στοιχεία τα οποία μετρήθηκαν με τον αναφερθέντα εξοπλισμό ήσαν τα εξής:

1. Στόχοι HDS



2. Δειγματοληπτικά σημεία στην εγγεγραμμένη επιφάνεια του αισθητήρα USBL
3. Δειγματοληπτικά σημεία στην εγγεγραμμένη επιφάνεια της κεραίας GPS του Glider (Aft Side)
4. Περιμετρικοί Κύκλοι καθόλο το μήκος του οχήματος για την εξαγωγή του συστήματος συντεταγμένων του.
5. Δειγματοληπτικά σημεία εκατέρωθεν των φτερών πλεύσης για τη χρήση τους στο σύστημα συντεταγμένων.

Η υλοποίηση των παραπάνω μετρήσεων πραγματοποιήθηκε από μια μόνο στάση. Γενικές Εικόνες από τις παραπάνω εργασίες πεδίου, παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 3.30: Στιγμιότυπα από τη διαδικασία αποτύπωσης του ρομποτικού συστήματος τύπου Glider μέσα από τη χρήση τεχνολογίας Laser Scanner (Leica RTC 360) και Γεωδαιτικού Σταθμού (Leica TDRA 6000).

### Επεξεργασία Δεδομένων

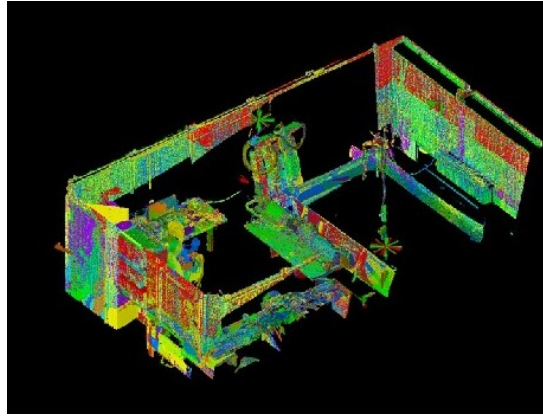
Η παρούσα υποενότητα περιγράφει τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων από τον Laser Scanner και από το Γεωδαιτικό Σταθμό καθώς και τον συνδυασμό αυτών. Αρχικά, τα πρωτογενή δεδομένα (Raw Data) από τις στάσεις που πραγματοποιήθηκαν επεξεργάστηκαν μέσω του λογισμικού Leica Cyclone 360+, όπου έγινε εκτενής καθαρισμός του νέφους σημείων ξεχωριστά για κάθε στάση, απομακρύνοντας τυχόν ανακλάσεις, κινούμενα αντικείμενα κ.λπ.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε έλεγχος και διόρθωση των συνδέσεων που είχαν γίνει στο πεδίο μέσω του Cyclone Field 360. Εισήχθησαν τα ονόματα των στόχων για κάθε μεμονωμένη στάση, ενώ για την περαιτέρω βελτίωση της αρχικής λύσης δημιουργήθηκαν επιπρόσθετοι σύνδεσμοι (Additional Links).

Το επόμενο στάδιο περιλάμβανε τη μεταφορά του συνενωμένου νέφους σημείων (Registered Cloud) στο λογισμικό Leica Cyclone για περαιτέρω επεξεργασία. Σε αυτή τη φάση πραγματοποιήθηκε η ομαδοποίηση όλων των στάσεων σε ένα ενιαίο σύνολο, η μείωση της πυκνότητας του νέφους και η εξαγωγή σημείων ενδιαφέροντος. Τα σημεία αυτά αφορούσαν τη δειγματοληψία στο κέλυφος του οχήματος και επιλεγμένα σημεία στα φτερά του.

Τα σημεία που συλλέχθηκαν αποθηκεύτηκαν ως τρισδιάστατες συντεταγμένες με στόχο τον συνδυασμό τους με τα αντίστοιχα δεδομένα από τον γεωδαιτικό σταθμό. Στο λογισμικό Spatial





Εικόνα 3.31: Εικόνα από την διαδικασία συνένωσης μεταξύ των διαφορετικών στάσεων

Analyzer, πραγματοποιήθηκε η συνένωση των σημείων από το Laser Scanner και τον γεωδαιτικό σταθμό μέσω της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (Best Fit Transformation). Τα αποτελέσματα του μετασχηματισμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7.

<b>Best-Fit Transformation</b>	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Mag.
<b>Results</b>				
Count	40	40	40	40
Max Error	0	0	0	0
RMS Error	0	0	0	0
StdDev Error	0	0	0	0
Max Error (all)	0	0	0	0
RMS Error (all)	0	0	0	0
Unknowns	6		Equations	120
<b>Transformation</b>				
Translation (mm)	-35.2	-0.25	0.98	35.22
Fixed XYZ Rotation (deg)	4.8937	-0.1498	-0.1579	
Euler XYZ Rotation (deg)	4.8933	-0.1628	-0.1445	
Axis-Angle Rotation (deg)	0.999012	-0.031945	-0.030908	4.8984
Scale Factor	1			
<b>Matrix</b>				
	0.999993	0.002523	-0.002841	-35.203501
	-0.002756	0.996351	-0.0853	-0.245915
	0.002615	0.085308	0.996351	0.982612
	0	0	0	1

Πίνακας 3.7: Πίνακας Μετασχηματισμού Ελαχίστων Τετραγώνων μεταξύ Μετρήσεων Laser Scanner & Γεωδαιτικού Σταθμού

Επόμενο στάδιο ήταν η δημιουργία του συστήματος συντεταγμένων του Glider. Αυτό ορίστηκε ως εξής:

1. Από τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το Γεωδαιτικό Σταθμό περιμετρικά του κελύφους του οχήματος όπου δημιουργήθηκαν οι βέλτιστοι κύκλοι (Πίνακας 3.8). Τα κέντρα αυτών των κύκλων καθόρισαν τη διεύθυνση (Best Fit Line) και την αντιστάθμιση στην κατά μήκος διεύθυνση (Pitch Compensation).

2. Από τα σημεία που μετρήθηκαν στα φτερά πραγματοποιήθηκε η αντιστάθμιση κατά το οριζόντιο επίπεδο (XY).
3. Δημιουργήθηκαν τα κέντρα από το USBL-OEM καθώς και της κεραίας GPS του Glider.
4. Στο κέντρο της κεραίας ορίστηκε η αρχή των αξόνων, επιτρέποντας τον υπολογισμό της σχετικής θέσης της κεραίας GPS-USBL.

Deviation Stats	Value	Units
Mean	0.1	mm
RMS	0.1	mm
<b>Magnitude (ABS Combined)</b>		
Max	0.1	mm
Min	0.0	mm
<b>Signed Planar</b>		
Max	0.0	mm
Min	-0.0	mm
<b>Signed Radial</b>		
Max	0.2	mm
Min	-0.1	mm

Deviation Stats	Value	Units
Mean	0.1	mm
RMS	0.1	mm
<b>Magnitude (ABS Combined)</b>		
Max	0.1	mm
Min	0.0	mm
<b>Signed Planar</b>		
Max	0.0	mm
Min	-0.0	mm
<b>Signed Radial</b>		
Max	0.2	mm
Min	-0.1	mm

Deviation Stats	Value	Units
Mean	0.1	mm
RMS	0.1	mm
<b>Magnitude (ABS Combined)</b>		
Max	0.1	mm
Min	0.0	mm
<b>Signed Planar</b>		
Max	0.0	mm
Min	-0.0	mm
<b>Signed Radial</b>		
Max	0.2	mm
Min	-0.1	mm

Deviation Stats	Value	Units
Mean	0.1	mm
RMS	0.1	mm
<b>Magnitude (ABS Combined)</b>		
Max	0.1	mm
Min	0.0	mm
<b>Signed Planar</b>		
Max	0.0	mm
Min	-0.0	mm
<b>Signed Radial</b>		
Max	0.2	mm
Min	-0.1	mm

Πίνακας 3.8: Στατιστικά Στοιχεία από την Εφαρμογή των Βέλτιστων Κύκλων με τη Μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων

Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.32, όπως και στιγμιότυπα από την επεξεργασία στο λογισμικό Spatial Analyzer.

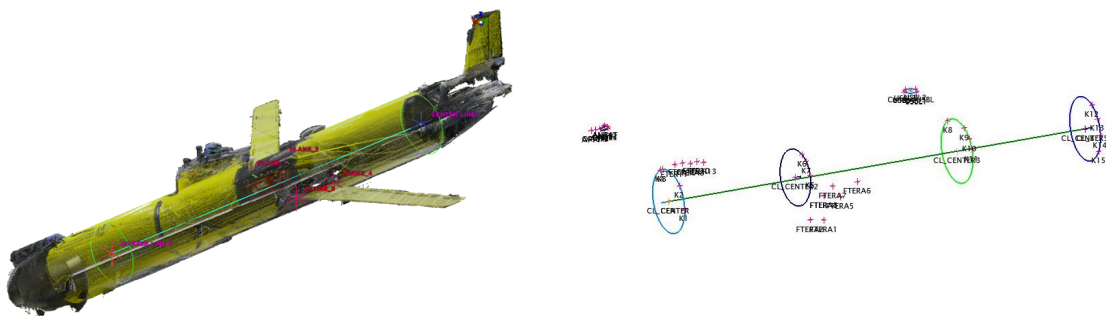
Μέσα από την ολοκλήρωση της περιγραφής της παραπάνω μεθοδολογίας και επεξεργασίας έγινε παραγωγή του έγχρωμου τρισδιάστατου νέφους σημείων καθώς και των σχετικών θέσεων μεταξύ κεραίας GPS-GLider και USBL. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

## 3.2 Υποθαλάσσιος Εντοπισμός

Η δεύτερη ενότητα της παρούσας εργασίας, στο Κεφάλαιο της Μεθοδολογίας, παρουσιάζει και αναλύει λεπτομερώς τη μεθοδολογία, τον εξοπλισμό και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν, με στόχο τον υποθαλάσσιο εντοπισμό του υποβρύχιου ρομποτικού συστήματος τύπου Glider Slocum G3.

Deviation Stats	
Mean	-0.0 mm
RMS	2.3 mm
Magnitude	
Max	3.4 mm
Min	0.3 mm
Signed	
Max	2.6 mm
Min	-3.4 mm
Measured from positive side	
All offsets set to 0.00 mm	
<b>Total Number</b>	6 points

Πίνακας 3.9: Στατιστικά Στοιχεία Δημιουργίας Βέλτιστης Ευθείας Αναφοράς.



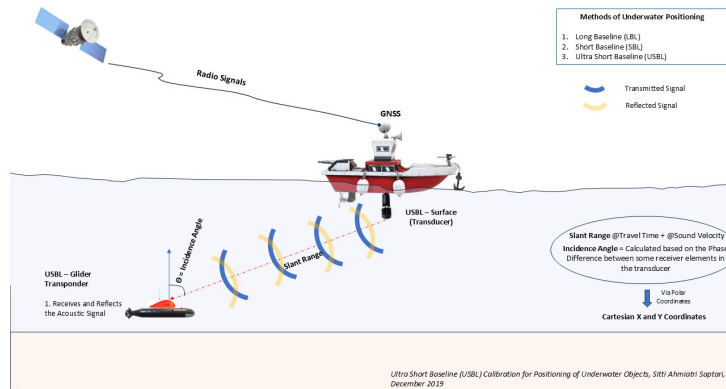
Εικόνα 3.32: Εικόνα απόδοσης σημείων μέτρησης για την εξαγωγή του Συστήματος Συντεταγμένων.

### 3.2.1 Μεθοδολογία Υποθαλάσσιου Εντοπισμού

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στόχος της παρούσας ενότητας είναι η παρουσίαση του μεθοδολογικού πλαισίου που αναπτύχθηκε για τον υποθαλάσσιο εντοπισμό του Glider. Συγκεκριμένα, αυτό σχετίζεται με τον προσδιορισμό και την αποτύπωση της θέσης του οχήματος στον τρισδιάστατο χώρο σε επίπεδο προβολικών συντεταγμένων, καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής. Ο στόχος είναι η σύγκριση της πραγματικής θέσης του οχήματος με την θεωρητική/προγραμματισμένη θέση. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού υπάρχουν - έχουν αναπτυχθεί, όπως έχει αναφερθεί και στο Θεωρητικό Υπόβαθρο, διαφορετικές τεχνολογίες με τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί αυτό και συγκεκριμένα:

1. Ultra Short BaseLine
2. Short BaseLine
3. Long BaseLine

Και οι τρεις παραπάνω μέθοδοι, ανεξάρτητα από τον αριθμό των αισθητήρων που χρησιμοποιούν, βασίζονται σε δύο κύρια στοιχεία για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων στις τρεις διαστάσεις (X, Y, Z): την κεκλιμένη απόσταση (Slant Range) που δημιουργείται μεταξύ δύο αισθητήρων και τη γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της απόστασης με τον ορίζοντα (Bearing Angle). Αναλυτικά, η κεκλιμένη απόσταση συνδέεται άμεσα με τον χρόνο μετάδοσης ενός παλμού από τον μεταδότη (Tranceiver) στον αποδέκτη του ακουστικού παλμού (Transponder). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Ultra Short Baseline.



Εικόνα 3.33: Διάγραμμα Οπτικοποίησης τρόπου Προσδιορισμού Κελιμένης Απόστασης και Χρόνου Μετάδοσης

Αναλύοντας περαιτέρω την παραπάνω μέθοδο και την Εικόνα 3.33, σημειώνεται ότι η υπολογιζόμενη κεκλιμένη απόσταση και κατ' επέκταση ο υπολογισμός των συντεταγμένων του στόχου, εξαρτάται άμεσα τόσο από το χρόνο διάδοσης του ακουστικού παλμού από τη στιγμή της δημιουργίας του μέχρι τη στιγμή της λήψης από το στόχο, όσο και από την ταχύτητα μετάδοσής του.

Η ταχύτητα μετάδοσης του ακουστικού παλμού μπορεί να προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως τα Sound Velocity Profiles. Αυτά τα συστήματα μπορούν να μετρήσουν την ταχύτητα του ήχου με ακρίβεια μικρότερη από 0.1 m/sec και να ανιχνεύσουν τις διαφοροποιήσεις της σε όλη τη στήλη του νερού (Water Column).

Επομένως, η ακρίβεια της μεθόδου Ultra Short Baseline (USBL) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακριβή μέτρηση του χρόνου διάδοσης του παλμού (Tranceiver -Transponder) και από το συγχρονισμό των αισθητήρων μεταξύ τους.

Για το λόγο αυτό, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη μέτρηση του χρόνου με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η πιο ακριβής πηγή χρόνου με ακρίβεια της τάξης του  $10^{-6}$  δευτερολέπτου είναι οι δορυφορικοί δέκτες GPS (GPS Time). Ο συγχρονισμός των αισθητήρων πραγματοποιείται με τη χρήση μιας κοινής χρονικής αναφοράς η οποία, στην παρούσα περίπτωση, έχει οριστεί ως το Unix Epoch Time (UTC).

Το Unix Epoch Time αναφέρεται στον αριθμό των δευτερολέπτων που έχουν παρέλθει από την αρχή της εποχής Unix, δηλαδή από την 1η Ιανουαρίου 1970, 00:00:00 Coordinated Universal Time (UTC). Αυτή η χρονική αναφορά χρησιμοποιείται ευρέως σε υπολογιστικά συστήματα και εφαρμογές για την παροχή ενός κοινώς αποδεκτού χρονικού σημείου αναφοράς, επιτρέποντας συνεπή συγχρονισμό και σύγκριση χρόνων μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και αισθητήρων. Συνεπώς, καθορίζοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια το πλαίσιο του στόχου της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήρες: ο μεταδότης των ακουστικών παλμών (Mission Control) και ένας επιπρόσθετος αισθητήρας, ο οποίος θα λειτουργεί ως αποδέκτης του σήματος (USBL Modem). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών των συστημάτων παρουσιάζονται στην Ενότητα 3.2.3. Για την ακριβή "χρονική τροφοδότηση" και τον συγχρονισμό των δύο συστημάτων, έγινε σύνδεση του Mission Control με GPS για δύο βασικούς λόγους. Πρώτον την εξασφάλιση της ακριβούς παροχή χρόνου (GPS Time) και, δεύτερον του ακριβούς προσδιορισμό των συντεταγμένων της θέσης στο προβολικό επίπεδο από την οποία εκπέμφθηκε ο παλμός. Αντίστοιχα, όσον αφορά στον συγχρονισμό του αισθητήρα του Ρομποτικού Συστήματος έγινε αυτός μέσω δικτυακού διακομιστή (ntp Server- Discipline Procedure).

Ο NTP (Network Time Protocol) clock server είναι ένας διακομιστής που χρησιμοποιείται

για στο συγχρονισμό της ώρας σε υπολογιστικά συστήματα και δίκτυα. Η τεχνολογία NTP επιτρέπει στα διάφορα μετρητικά συστήματα να συντονίζουν την ώρα τους με έναν ακριβή και αξιόπιστο τρόπο, χρησιμοποιώντας ως πηγή χρόνου έναν κεντρικό διακομιστή, όπως ένα ρολόι ατομικής ακρίβειας ή GPS.

Χάρη σε αυτή τη διαδικασία, εξασφαλίστηκε η βέλτιστη ακρίβεια στον συγχρονισμό των δύο συστημάτων. Το επόμενο στάδιο αφορά τον συγχρονισμό των συντεταγμένων του δορυφορικού δέκτη με τους αισθητήρες USBL. Παρόλο που και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν την ίδια χρονική αναφορά, δεν είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε πραγματικό χρόνο, γεγονός που σημαίνει ότι κατά τη στιγμή παραγωγής του ακουστικού παλμού δεν γνωρίζουμε επακριβώς τη θέση του οχήματος τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος οδήγησε στην ανάγκη για αυτόματο προσδιορισμό των συντεταγμένων μέσω του δορυφορικού δέκτη (GNSS), με τη βέλτιστη δυνατή ακρίβεια ως προς το χρόνο. Αυτή ορίστηκε στα 20Hz, δηλαδή ενημέρωση της θέσης ανά 0.05 δευτερόλεπτα, προσφέροντας έτσι χρονική ακρίβεια της τάξης του 1/20 του δευτερολέπτου.

Με βάση τα παραπάνω και αφού εξασφαλίστηκε η ακρίβεια του χρόνου, το επόμενο βήμα είναι ο βέλτιστος δυνατός προσδιορισμός της θέσης μέσω του δορυφορικού δέκτη. Για την επίτευξη αυτού του στόχου απαιτείται η σταθερή τοποθέτηση του δέκτη σε μια ακλόνητη βάση στήριξης, διασφαλίζοντας παράλληλα τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια στη γνώση της σχετικής θέσης μεταξύ του σημείου αναφοράς του δέκτη και του αντίστοιχου σημείου του αισθητήρα που μεταδίδει τους ακουστικούς παλμούς.

Βάσει της ανάλυσης που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, η δημιουργία μιας σταθερής βάσης για την τοποθέτηση του εξοπλισμού καθώς και η τρισδιάστατη αποτύπωση του σκάφους επέτρεψαν τον ακριβή προσδιορισμό της σχετικής θέσης των δύο συστημάτων με ακρίβεια καλύτερη του 1 εκατοστού. Έχοντας πλέον γνωστή τη σχετική θέση μεταξύ των δύο συστημάτων, το επόμενο στάδιο αφορά στη διασφάλιση της μέγιστης δυνατής ακρίβειας στον υπολογισμό των συντεταγμένων σε κάθε χρονική στιγμή, καθώς και στην επιλογή της βέλτιστης μεθόδου για την επίτευξη αυτής της ακρίβειας.

Στον κόσμο της υδρογραφίας και γενικότερα του Δορυφορικού Εντοπισμού, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού συντεταγμένων. Συγκεκριμένα:

1. **DGPS (Differential GPS):** Πρόκειται για μια τεχνική εντοπισμού που βελτιώνει την ακρίβεια του παραδοσιακού GPS, χρησιμοποιώντας διορθωτικά σήματα από σταθμούς αναφοράς (ground stations) κοντά στο χρήστη. Αυτές οι διορθώσεις μειώνουν τα σφάλματα από παράγοντες όπως η ατμοσφαιρική καθυστέρηση, προσφέροντας ακρίβεια της τάξης των λίγων μέτρων.
2. **Marinestar:** Είναι μια δορυφορική υπηρεσία εντοπισμού υψηλής ακρίβειας που χρησιμοποιείται κυρίως στη ναυτιλία και στη γεωργία. Παρέχει διορθωτικά δεδομένα μέσω δορυφόρων για την ενίσχυση του GNSS, επιτυγχάνοντας ακρίβεια μέχρι και 10 εκατοστών, χωρίς την ανάγκη σταθμών βάσης ή σύνδεσης στο διαδίκτυο .
3. **Base Rover:** Είναι μια μέθοδος εντοπισμού που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές RTK (Real-Time Kinematic). Αποτελείται από έναν "σταθμό βάσης" που παραμένει σε μια γνωστή θέση και έναν "κινητό σταθμό" (rover) που κινείται. Ο σταθμός βάσης στέλνει διορθώσεις στον rover σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας ακρίβεια της τάξης του εκατοστού .
4. **Ntrip Client:** Το Ntrip (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) είναι ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά διορθωτικών δεδομένων από σταθμούς αναφοράς μέσω του διαδικτύου σε GNSS δέκτες. Ο Ntrip Client λαμβάνει αυτά

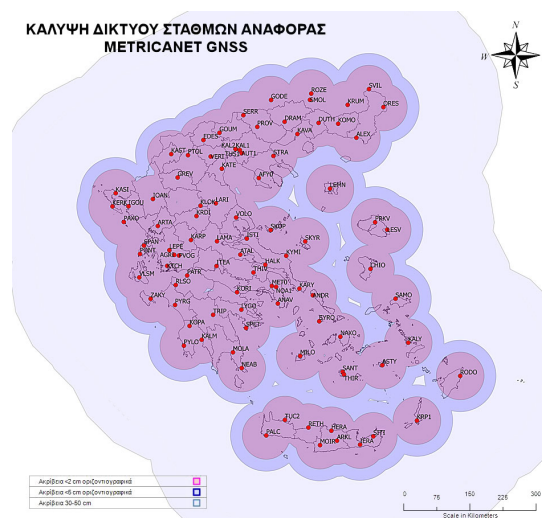
τα δεδομένα για βελτιωμένο εντοπισμό, συχνά για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, όπως γεωδαιτικές μετρήσεις και γεωργία ακριβείας .

Οι πρώτες δυο μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως στην υδρογραφία και σε εφαρμογές όπου δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός θέσης, όπως για παράδειγμα:

Το DGPS χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της ακρίβειας του GPS σε θαλάσσια πλοία, βοηθώντας τους ναυτικούς να διατηρούν την πορεία τους με υψηλή ακρίβεια και ασφάλεια. Τα σκάφη χρησιμοποιούν DGPS για να διορθώσουν τις ατασθαλίες και τα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν από την ατμόσφαιρα ή άλλες παρεμβολές. Επίσης, στα μεγάλα εμπορικά πλοία, το DGPS χρησιμοποιείται για την ακριβή πλοήγηση σε λιμάνια ή στενές θαλάσσιες οδούς, όπου η ακρίβεια είναι κρίσιμη για την αποφυγή ατυχημάτων και την αποδοτική χρήση του χώρου. Αντίστοιχα σχετικά με τη τεχνολογία τύπου Marinestar χρησιμοποιείται κυρίως για τη στήριξη των συστημάτων πλοήγησης σε υποβρύχιες έρευνες. Συνεπώς οι παραπάνω μέθοδοι δεν ενδείκνυται για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Αντιθέτως, η μέθοδος Base Rover με βάση και τη βιβλιογραφία, ενδείκνυται ως η αποτελεσματικότερη από άποψη ακρίβειας και χρησιμοποιείται ευρέως σε θέματα υδρογραφίας, όπως για την ακριβή χαρτογράφηση των θαλάσσιων βυθών. Ο σταθμός βάσης παρέχει διορθώσεις στον κινητό σταθμό (Rover) που είναι τοποθετημένος πάνω σε σκάφος ή ROV (Remote Operated Vehicle), εξασφαλίζοντας ακριβείς μετρήσεις βάθους και τοπογραφίας του βυθού. Το αρνητικό της μεθόδου, είναι πως υπάρχει περίπτωση για δημιουργία μεγάλων διανυσμάτων >30 km μεταξύ base και rover, να χαθεί το σήμα και άρα τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να μην είναι αξιόπιστα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η μέθοδος που επιλέχθηκε ως καταλληλότερη για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας είναι η δικτυακή σύνδεση (NTRIP), ειδικά η υπηρεσία της εταιρείας METRICA-METΡΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ Α.Ε.Ε., γνωστή ως METRICA NET. Το HxGN SmartNet είναι μια υπηρεσία διόρθωσης GNSS που βασίζεται στο μεγαλύτερο δίκτυο σταθμών αναφοράς παγκοσμίως. Επιτρέπει σε συσκευές με δυνατότητα GNSS να προσδιορίζουν με ακρίβεια 1-2 εκατοστών τις θέσεις τους, σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η υπηρεσία είναι διαθέσιμη 24 ώρες το 24ωρο μέσω μιας υποδομής υψηλής διαθεσιμότητας και υποστηρίζεται από μια εξειδικευμένη ομάδα με πάνω από 10 χρόνια εμπειρίας στην αξιόπιστη παροχή υπηρεσιών.



Εικόνα 3.34: Κάτοψη από τους διάφορους μόνιμα εγκατεστημένους σταθμούς αναφοράς

Αφού περιγράφηκε η μεθοδολογία για την υποθαλάσσια ανίχνευση και εντοπισμό, το επό-

μενο στάδιο αφορά στη φάση του εργαστηριακού πειραματισμού. Καταρχήν, είναι απαραίτητο να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία της ακουστικής επικοινωνίας μεταξύ του αναμεταδότη του ακουστικού παλμού και του αντίστοιχου δέκτη. Επιπλέον, πρέπει να διασφαλιστεί ότι ο αναμεταδότης (Tranceiver -Mission Control) λαμβάνει σωστά το σήμα χρόνου από τον δορυφορικό δέκτη, ενώ το σύστημα που είναι εγκατεστημένο στο Glider πρέπει να συγχρονίζεται με την ίδια χρονική αναφορά.

Επιπροσθέτως, ο δορυφορικός δέκτης GNSS πρέπει να ελεγχθεί για τη σωστή καταγραφή των συντεταγμένων και του χρόνου που καταγράφονται αυτές, προκειμένου να είναι δυνατή η ακριβής μετεπεξεργασία των δεδομένων. Με την ολοκλήρωση αυτών των βημάτων, πριν από την εκτέλεση της βασικής μέτρησης, κρίθηκε αναγκαία η διενέργεια ενός προκαταρκτικού πειράματος για την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του συστήματος και την εξαγωγή αντίστοιχων αποτελεσμάτων.

### **3.2.2 Εξοπλισμός & Τεχνικά Χαρακτηριστικά**

Η μέθοδος του υποθαλάσσιου εντοπισμού Ultra Short Baseline βασίζεται, όπως αναφέρεται και στη προηγούμενη Ενότητα, σε ένα σύστημα μεταδότη ακουστικού παλμού αλλά και σε ένα δέκτη. Τέλος, απαραίτητο εξοπλισμό αποτελεί και η ύπαρξη ενός πλήρους συστήματος δορυφορικού δέκτη με τη δυνατότητα σύνδεσής του σε δικτυακό πάροχο για να μπορεί να λάβει διορθώσεις στον προσδιορισμό της θέσης του σε πραγματικό χρόνο. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας και, ξεκινώντας με το σύστημα υποθαλάσσιου εντοπισμού, παρουσιάζεται το ακριβές είδος του ως άνω εξοπλισμού αλλά και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

#### **Σύστημα Αναμεταδότητη Ακουστικού Παλμού Enologics USBL S18/34R**

Αρχικά, ο βασικός εξοπλισμός (Mission Control) που χρησιμοποιήθηκε για τη μετάδοση των ακουστικών παλμών και το προσδιορισμό των συντεταγμένων του υποθαλάσσιου στόχου είναι κατασκευασμένος από την εταιρεία Enologics και το μοντέλο αυτού ονομάζεται Enologics S2C R 18/34.

Η συσκευή EnoLogics S2CR 18/34 είναι ένα προηγμένο υποθαλάσσιο σύστημα εντοπισμού θέσης και επικοινωνίας, που συνδυάζει ισχυρή λειτουργικότητα εντοπισμού USBL (Ultra Short BaseLine) με πλήρη ψηφιακή επικοινωνία. Αυτή η συσκευή αξιοποιεί την τεχνολογία S2C (Smart Communication Channel) για να παρέχει ακριβή παρακολούθηση θέσης και επικοινωνία πλήρους αμφίδρομης ροής, καθιστώντας την κατάλληλη για ποικιλία υποθαλάσσιων εφαρμογών.

Η συσκευή EnoLogics S2CR 18/34 επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία εντοπισμού θέσης και επικοινωνίας, χωρίς την ανάγκη εναλλαγής μεταξύ των λειτουργιών. Αυτό επιτρέπει την ακριβή καταγραφή της θέσης μέσω του συστήματος USBL, ενώ παρέχει πλήρη αμφίδρομη επικοινωνία για την αποστολή και λήψη δεδομένων. Ενσωματωμένα χαρακτηριστικά της, όπως η εξαιρετική ακρίβεια και η πλήρης ενσωμάτωσή της, καθιστούν το S2CR 18/34 ιδανικό για υποθαλάσσιες εφαρμογές που απαιτούν τόσο ακριβή εντοπισμό όσο και αξιόπιστη επικοινωνία. Επιπλέον, η συσκευή διαθέτει ενσωματωμένη αδρανειακή μονάδα (IMU) για την αντιστάθμιση των κινήσεων του σκάφους, καθώς και γυροσκόπιο (AHRS (Attitude and Heading Reference System)).

Αυτό επιτρέπει την ακριβή εξαγωγή των αρχικών συντεταγμένων του υποθαλάσσιου στόχου, ενώ παράλληλα διορθώνονται οι μετρήσεις λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω κινήσεις

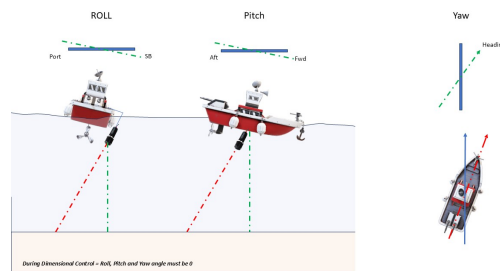


Χαρακτηριστικό	Τιμή
Συχνότητα Λειτουργίας	18 - 34 kHz
Σκοτεινότητα Ακτίνας Εκπομπής	Ημισφαιρική (18/34H)
Βάθος Λειτουργίας	- Κατασκευή από Delrin: 200 μέτρα - Κατασκευή από Αλουμίνιο: 2000 μέτρα - Κατασκευή από Ανοξείδωτο Ατσάλι: 2000 μέτρα - Κατασκευή από Τιτάνιο: 2000/6000 μέτρα (18/34D)
Εύρος Λειτουργίας	3500 μέτρα
Σύνδεση Ακουστικών	Έως 13.9 kbit/s
Ρυθμός Σφαλμάτων Μπιτ	Λιγότερο από $10^{-10}$
Εσωτερική Μνήμη Δεδομένων	1 MB, ρυθμιζόμενη

Πίνακας 3.10: Χαρακτηριστικά της συσκευής EvoLogics S2CR 18/34



Εικόνα 3.35: Evologics S2CR 18/34.

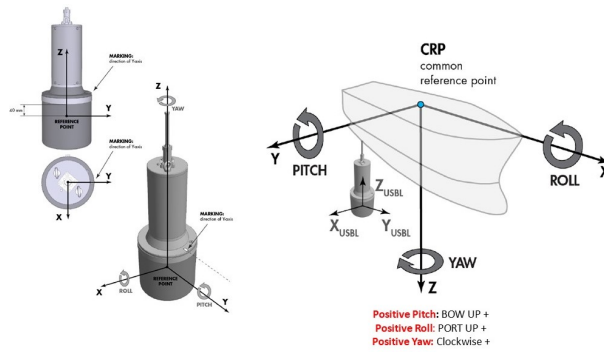


Εικόνα 3.36: Αντιστάθμιση Κινήσεων Σκάφους Αποστολής

και αντισταθμίσεις. Ως αποτέλεσμα, παρέχονται διορθωμένες και ακριβείς συντεταγμένες που λαμβάνουν υπόψη τις δυναμικές κινήσεις του σκάφους (USBLLONG). Σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία ([13]), για τον υπολογισμό των πραγματικών διορθώσεων του συστήματος (True Heave), είναι απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός των σχετικών θέσεων (τρεις Διαστάσεις) μεταξύ της θέσης πρόσδεσης του εξοπλισμού και της θέσης του δορυφορικού δέκτη. Αυτό καλύφθηκε από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο (3.1.4). Στη Εικόνα 3.37 αποτυπώνεται το σημείο αναφοράς του transceiver καθώς και ο προσδιορισμός πρόσδεσης αυτού.

Η χρήση του συγκεκριμένου εξοπλισμού αποτέλεσε τη πηγή για τη μετάδοση των ηχητικών παλμών. Το σύστημα EvoLogics S2CR 18/34 χρησιμοποιεί έναν ειδικά σχεδιασμένο ακουστικό πομπό για την εκπομπή παλμών που επιτρέπουν τόσο τον εντοπισμό υποθαλάσσιων στόχων

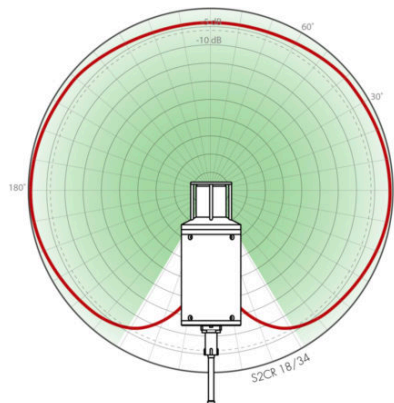




Εικόνα 3.37: Σημείο Αναφοράς Μέτρησης Συστήματος Mission Control

όσο και τη μετάδοση δεδομένων. Ο παλμός δημιουργείται μέσω ενός ακουστικού αισθητήρα με οριζόντια πανκατευθυντική δέσμη (horizontally omnidirectional), που σημαίνει ότι η εκπομπή του σήματος καλύπτει 360 μοίρες στον οριζόντιο άξονα. Αυτή η δυνατότητα εξασφαλίζει ότι το σήμα διαδίδεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω από τον πομπό, βελτιώνοντας έτσι την ικανότητα εντοπισμού στόχων σε διάφορες γωνίες και αποστάσεις.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η έκδοση 18/34H, το σύστημα μπορεί να δημιουργήσει παλμούς με ημισφαιρική δέσμη (hemispherical), επιτρέποντας στο σήμα να διαδίδεται πάνω από τον πομπό σε ένα ευρύ ημισφαιρικό πεδίο. Αυτή η διάταξη είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε καταστάσεις όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια εντοπισμού σε συγκεκριμένη κατεύθυνση, συνδυάζοντας την πανκατευθυντική διάδοση με πιο στοχευμένες γωνίες κάλυψης.



Εικόνα 3.38: Αναπαράσταση τρόπου μετάδοσης των ακουστικών παλμών από τον transceiver

Το επόμενο στάδιο αφορά στη συνδεσιμότητα και στον τρόπο επικοινωνίας με τους υπόλοιπους αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, όπως το USBL-Modem. Ο πομπός (USBL S2CR 18/34) είναι εξοπλισμένος με αδιάβροχο καλώδιο 8 ακίδων (Εικόνα 3.39). Στο άλλο άκρο του καλωδίου υπάρχουν 6 υποδοχές (adaptors).

Οι πρώτες τρεις υποδοχές, χρώματος κόκκινου, μαύρου και μπλε (θετικό, αρνητικό και γείωση), αντίστοιχα χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία του εξοπλισμού με ρεύμα. Η επόμενη υποδοχή, με κόκκινο χρώμα, είναι μια σύνδεση ethernet, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση του πομπού με τον υπολογιστή, επιτρέποντας τον περαιτέρω προγραμματισμό και τη διαχείρισή του. Τέλος, υπάρχει και ένας σύνδεσμος τύπου SMB (SMB Connector) ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την παροχή ακριβούς χρονικής αναφοράς στον πομπό από έναν δορυφορικό δέκτη. Ο τρόπος σύνδεσης και επικοινωνίας με τον δορυφορικό δέκτη που χρησιμοποιήθηκε αναλύεται παρακάτω.

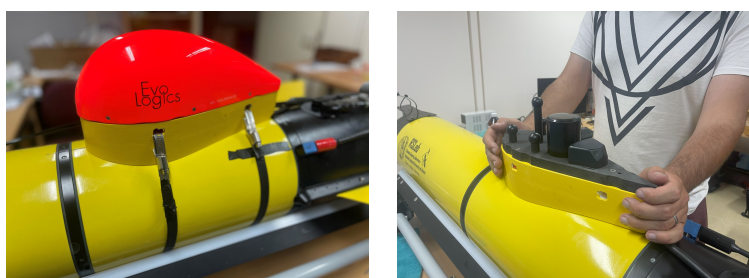


Εικόνα 3.39: Συνδεσιμότητα αισθητήρα Evologics USBL S2CR 18/34.

## Σύστημα USBL Glider

Ο δεύτερος κατά σειρά εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε σχετίζεται με αυτόν που είναι συνδεδεμένος στο Υποθαλάσσιο Ρομποτικό Σύστημα τύπου Glider. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα σύστημα Ultra Short Baseline από την εταιρεία Evologics με ακριβές όνομα μοντέλου S2C USBL OEM. Το EvoLogics S2C USBL OEM είναι ένα σύστημα υποβρύχιας ακουστικής επικοινωνίας και εντοπισμού που προσφέρεται χωρίς περίβλημα, ιδανικό για ενσωμάτωση σε άλλα προϊόντα και εξοπλισμό. Διαθέτει τα τυπικά ηλεκτρονικά S2C (αναλογική μονάδα εμπρόσθιου άκρου και ψηφιακή μονάδα επεξεργασίας), σε συνδυασμό με έναν αισθητήρα που συνδέεται μέσω καλωδίου, επιτυγχάνοντας βέλτιστη απόδοση.

Το S2C USBL OEM είναι κατάλληλο για ενσωμάτωση σε αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (Glider/AUVs), τηλεκατευθυνόμενα οχήματα (ROVs), ενσωματωμένους αισθητήρες και πλωτήρες επιφανείας, όπου η μικρότερη διάσταση και το χαμηλότερο βάρος αποτελούν κρίσιμα κριτήρια. Παρά την έλλειψη περιβλήματος, προσφέρει τις ίδιες δυνατότητες και λειτουργίες με τα τυπικά συστήματα S2C και είναι διαθέσιμο σε δύο εκδόσεις: τα S2C R OEM για USBL, LBL και υποβρύχιους αισθητήρες και τα S2C M OEM για τη σειρά mini modems S2C M. Για τη παρούσα εργασία τοποθετήθηκε επίσης ένα ειδικό πορτοκαλί περίβλημα, μελετημένο και σχεδιασμένο (Εικόνα 3.40) ώστε να μειώνει την τριβή κατά την κίνηση του οχήματος το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν το Glider.



Εικόνα 3.40: Evologics USBL S2C OEM

Η συνδεσμολογία του συγκεκριμένου εξοπλισμού περιλάμβανε τον βασικό αισθητήρα USBL, καθώς και μια πλακέτα που διαχειρίζεται όλη τη λειτουργία του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης ρεύματος και του προγραμματισμού. Αφού ολοκληρώθηκε η σύνδεση του αισθητήρα με την πλακέτα το επόμενο στάδιο ήταν η σύνδεση του συστήματος με ένα υπολογιστικό σύστημα για τον προγραμματισμό του και την ενσωμάτωσή του στο Glider. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω της εγκατάστασης και προγραμματισμού ενός υπολογιστή Raspberry Pi 4, ο οποίος τροφοδοτείται απευθείας από το Glider. Το **Raspberry Pi 4** είναι ένας μικρός και οικονομικός υπολογιστής που βασίζεται στην αρχιτεκτονική ARM. Σχεδιάστηκε κυρίως για εκπαιδευ-

Γενικά	Τιμές
Βάθος Λειτουργίας	
Περίβλημα Delrin	200 m
Περίβλημα Αλουμινίου	2000 m
Περίβλημα Ανοξειδωτου Χάλυβα	2000 m
Περίβλημα Τιτανίου	2000/6000 m (18/34D)
Εύρος Λειτουργίας	3500 m
Ζώνη Συχνοτήτων	18 - 34 kHz
Μοτίβο Ακτινοβολίας Μετατροπέα	οριζόντια πανκατευθυντικό ημισφαιρικό (18/34H)
<b>Συνδεσιμότητα</b>	
Ακουστική Σύνδεση	έως 13,9 kbit/s
Ρυθμός Σφάλματος Δεδομένων	μικρότερος από $10^{-10}$
Εσωτερική Μνήμη Δεδομένων	1 MB, παραμετροποιήσιμη

Πίνακας 3.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά του S2CR 18/34 USBL

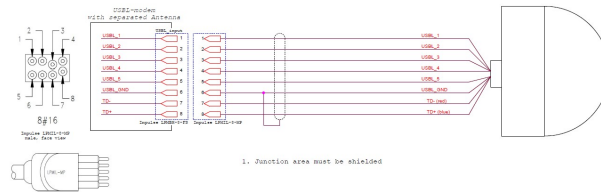
τικούς σκοπούς αλλά βρίσκει χρήση και σε πολλές εφαρμογές, όπως Internet of Things (IoT), αυτοματισμούς και ανάπτυξη πρωτοτύπων. Παρά το μικρό του μέγεθος, προσφέρει σημαντική υπολογιστική ισχύ και πολλές δυνατότητες.

#### Βασικά χαρακτηριστικά:

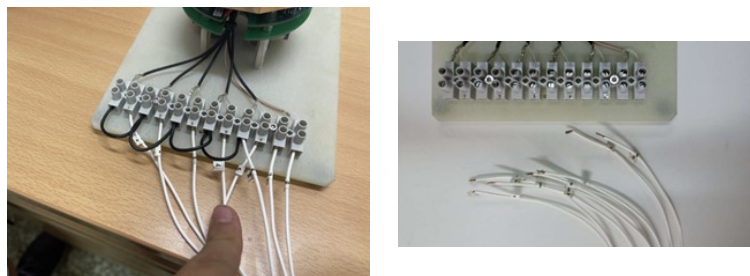
- **Επεξεργαστής:** Quad-core ARM Cortex-A72 (64-bit) στα 1.5 GHz
- **Μνήμη RAM:** Διατίθεται σε εκδόσεις με 2GB, 4GB και 8GB LPDDR4-3200 SDRAM
- **Αποθηκευτικός χώρος:** Υποστήριξη για microSD κάρτες για την εγκατάσταση λειτουργικού συστήματος και αποθήκευση δεδομένων.
- **Συνδεσιμότητα:**
  - 2 θύρες USB 3.0 και 2 θύρες USB 2.0
  - Gigabit Ethernet θύρα για ενσύρματη δικτύωση
  - Wi-Fi 802.11ac και Bluetooth 5.0 για ασύρματη επικοινωνία
- **Γραφικά:** Δύο θύρες micro-HDMI με υποστήριξη έως ανάλυση 4K, VideoCore VI GPU
- **Επέκταση I/O:** 40-pin GPIO για σύνδεση με εξωτερικούς αισθητήρες και περιφερειακά
- **Τροφοδοσία:** Μέσω USB-C με κατανάλωση ισχύος έως 15W

Το Raspberry Pi 4 είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπως έλεγχος αισθητήρων, αυτοματισμούς, μικροεπεξεργαστικά συστήματα και διασύνδεση με άλλα συστήματα, όπως το *Glider*, καθώς προσφέρει εύκολη παραμετροποίηση και δυνατότητα προγραμματισμού σε περιβάλλον Linux.

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω συνδεσμολογίας και την ένταξη του υπολογιστικού συστήματος *Raspberry Pi 4* στο *Glider*, μαζί με τον αισθητήρα *USBL OEM*, παρέχοντάς του ρεύμα από το όχημα και χρονική αναφορά από το σύστημα κεραίας, το τελευταίο κομμάτι του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε αφορά στο δορυφορικό δέκτη. Ο συγκεκριμένος δέκτης τοποθετήθηκε πάνω στο σκάφος για την ακριβή εξαγωγή των συντεταγμένων τόσο του σκάφους όσο και για τον μεταγενέστερο υπολογισμό της θέσης του *Glider*.



Εικόνα 3.41: Σχέδιο Συνδεσμολογίας πλακέτας-USBL



Εικόνα 3.42: Συνδεσμολογία USBL-πλακέτας

Η χρήση του δορυφορικού δέκτη εξασφάλισε την απαραίτητη ακρίβεια στο προσδιορισμό των συντεταγμένων, κάτι που είναι κρίσιμο για τον εντοπισμό και παρακολούθηση του *Glider* σε πραγματικό χρόνο.

### Δορυφορικός Δέκτης Leica GNSS GS18

Στο σύστημα επιφανείας που περιλαμβάνει τον *tranceiver Evologics USBL S2CR 18/34*, όπως αυτός περιγράφηκε παραπάνω, απαραίτητος επιπρόσθετος εξοπλισμός για την παροχή των προβολικών συντεταγμένων καθώς και την τροφοδότηση του συστήματος με χρονική αναφορά (*Unix Epoch Time*) ήταν ο δορυφορικός δέκτης *Leica GS18*. Τα χαρακτηριστικά και η περιγραφή του δορυφορικού δέκτη παρατίθενται παρακάτω:

Ο *Leica GS18* αποτελεί έναν υψηλής ακρίβειας δέκτη GNSS με δυνατότητα προσδιορισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο, εξασφαλίζοντας προβολικές συντεταγμένες και συγχρονισμό χρόνου με εξαιρετική ακρίβεια. Ο δέκτης είναι σχεδιασμένος για εφαρμογές ακριβείας, όπως η χαρτογράφηση, η γεωδαισία και οι αποστολές που απαιτούν μέγιστη ακρίβεια θέσης. Παρέχει επίσης τη δυνατότητα λήψης διορθώσεων σε πραγματικό χρόνο από υπηρεσίες όπως το RTK, εξασφαλίζοντας ακρίβεια μερικών εκατοστών.



Εικόνα 3.43: Δορυφορικός Δέκτης Leica GS18

Με βάση τον παραπάνω εξοπλισμό, τα στάδια που ακολούθησαν ήσαν:

Χαρακτηριστικό	Περιγραφή
Ακρίβεια Θέσης (RTK)	Οριζόντια: 8 mm + 1 ppm, Κατακόρυφα: 15 mm + 1 ppm
Συστήματα GNSS	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, NavIC
Υποστήριξη Διορθώσεων	RTK, Network RTK, SmartLink
Χρονική Ακρίβεια (Time Sync)	Ακριβής συγχρονισμός με <i>Unix Epoch Time</i>
Δεδομένα Εξόδου	NMEA, RINEX
Αντοχή σε Νερό/Σκόνη	IP68
Διάρκεια Μπαταρίας	Έως 7 ώρες (με μία μπαταρία)
Θερμοκρασία Λειτουργίας	-40°C έως +65°C
Βάρος	1.25 kg (με μπαταρία)
Μέθοδοι Επικοινωνίας	Bluetooth, Wi-Fi, USB, Ethernet

Πίνακας 3.12: Τεχνικά χαρακτηριστικά του *Leica GS18*

1. Καθορισμός Συστήματος Συντεταγμένων
2. Καθορισμός Δειγματοληψίας Αυτόματων Συντεταγμένων
3. Χρονική Τροφοδότηση στο USBL Σύστημα Επιφανείας (S2CR 18/34)

Το σύστημα συντεταγμένων που επιλέχθηκε για την παρούσα εργασία είναι το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ '87) - Πίνακας 3.13, το οποίο συσχετίστηκε άμεσα με τη γεωγραφική τοποθεσία διεξαγωγής του πειράματος, εντός του ελληνικού χώρου. Η χρήση του ΕΓΣΑ '87 εξασφαλίζει την ακρίβεια των μετρήσεων και τη συμβατότητά τους με τις γεωδαιτικές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα.

Ως υψομετρική αφετηρία, χρησιμοποιήθηκε το Ελληνικό Γεωειδές Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Το γεωειδές αποτελεί μια ισοδυναμική επιφάνεια που περιγράφει τη μέση στάθμη της θάλασσας στην περιοχή του ελλαδικού χώρου, υπολογισμένη από δεδομένα βαρύτητας.

Παράμετρος	Τιμή
Όνομα Προβολικού Συστήματος	GGRS87 / (ΕΓΣΑ '87)
Σφαιροειδές	GRS 1980
Επικεντρική Ακτίνα (a)	6378137 μέτρα
Επιπέδωση (f)	1 / 298.257222101
Μετασχηματισμός στο WGS84	TOWGS84[-199.87, 74.79, 246.62, 0, 0, 0, 0]
Κεντρικός Μεσημβρινός	24 μοίρες
Παράλληλος Αφετηρίας	0 μοίρες
Παράγοντας Κλίμακας	0.9996
Ψευδομετατόπιση Ανατολής	500000 μέτρα
Ψευδομετατόπιση Βορρά	0 μέτρα
Μονάδα	Μέτρο
Αναφορά	EPSG:2100

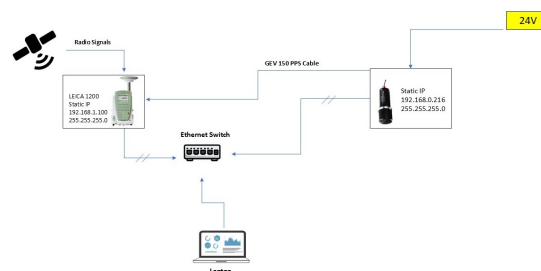
Πίνακας 3.13: Παράμετροι του Ελληνικού Γεωδαιτικού Συστήματος Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87)

Η παραμετροποίηση του συγκεκριμένου δέκτη ξεκινά με τον ορισμό του Ελληνικού Γεωδαιτικού Συστήματος Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ '87) για τις οριζοντιογραφικές συντεταγμένες

και του Earth Gravitational Model 2008 (EGM '08) για τις υψομετρικές συντεταγμένες. Στη συνέχεια, ο δέκτης συνδέεται με την πλατφόρμα NTRIP, μέσω της οποίας λαμβάνει διορθώσεις σε πραγματικό χρόνο για κάθε μέτρηση. Το δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε για αυτή τη σύνδεση ήταν το METRICA NET, δίνοντας ως αποτέλεσμα μια τάξη ακρίβειας τόσο σε υψομετρικό όσο και σε οριζοντιογραφικό επίπεδο της τάξης μικρότερη των 2 εκατοστών.

Για τη διασφάλιση της μέγιστης δυνατής ακρίβειας τόσο ως προς τον χρόνο όσο και ως προς τη συγχρονισμένη καταγραφή των μετρήσεων με το σύστημα USBL, ορίστηκε η αυτόματη μέτρηση συντεταγμένων (Auto Points Measurement) από τον δέκτη με ρυθμό 20 Hz (μία μέτρηση κάθε 0.05 δευτερόλεπτα). Αυτό διασφαλίζει χρονική ακρίβεια της τάξης του 1/10 του δευτερολέπτου, καθιστώντας τα δεδομένα ακριβή και πλήρως συγχρονισμένα με τις μετρήσεις του USBL.

Το τελικό στάδιο της διαδικασίας αφορούσε τη χρονική τροφοδότηση του αισθητήρα αναφοράς USBL S2CR 18/34. Επειδή δεν υπήρχαν τα απαραίτητα καλώδια για το συγκεκριμένο σύστημα, η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός εναλλακτικού Δορυφορικού Δέκτη, συγκεκριμένα του Leica 1200. Για τη σύνδεση και την παροχή χρονικών πληροφοριών, χρησιμοποιήθηκε το καλώδιο GEV150 PPS, το οποίο συνδέθηκε στον SMB Connector. Αυτός με τη σειρά του ήταν απευθείας συνδεδεμένος με το USBL S2CR 18/34, όπως είχε περιγραφεί νωρίτερα.



Εικόνα 3.44: Συνδεσμολογία για Επίτευξη Χρονικής Τροφοδοσίας μεταξύ GNSS-USBL

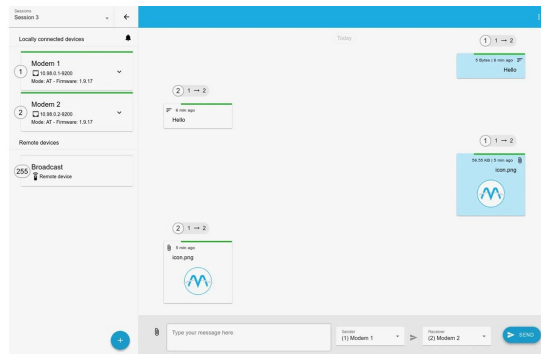
Αξιοποιώντας όλον τον παραπάνω εξοπλισμό και την ολοκλήρωση της ορθής συνδεσμολογίας μεταξύ τους, στην Ενότητα 3.2.3 παρουσιάζεται αναλυτικά η παραμετροποίηση αυτού καθώς και η ανάπτυξη λογισμικών για τη διαχείριση των δεδομένων και εξαγωγή των αντίστοιχων αποτελεσμάτων.

### 3.2.3 Επεξεργασία και Λογισμικά

Βασικό στοιχείο της παρούσας ενότητας αποτελεί αυτό της επικοινωνίας μεταξύ των δυο αισθητήρων υποθαλάσσιου εντοπισμού (USBL επιφανείας και OEM) καθώς και η διαχείριση των δεδομένων που εξάγουν. Συγκεκριμένα, η εταιρεία Enologics έχει αναπτύξει το λογισμικό AMA το οποίο χρησιμοποιείται για πειραματικούς κυρίως σκοπούς και για διευκόλυνση των χρηστών ως προς την επιβεβαίωση επικοινωνίας μεταξύ των δυο αισθητήρων ή και περισσότερων. Αυτό επιτυγχάνεται αφού συνδεθούν οι δυο αισθητήρες σε έναν υπολογιστή μέσω των δυο διαθέσιμων ethernet καλωδίων και οριστούν static ip για κάθε ένα σύστημα. Έτσι, μέσω αποστολής και λήψης αντίστοιχα ακουστικών παλμών-μηνυμάτων μεταξύ των δυο οργάνων σε υδάτινο περιβάλλον, όπως για παράδειγμα μια πισίνα, όπως αυτή χρησιμοποιήθηκε στη προκειμένη περίπτωση.

Για την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων αυτών (ακουστικών παλμών), αλλά και τη περαιτέρω διαχείρισή τους χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία των AT Commands.





Εικόνα 3.45: Λογισμικό Επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήρων USBL - Evologics AMA

Τα AT Commands είναι μια συγκεκριμένη γλώσσα εντολών που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των συσκευών S2C. Αποτελούνται από σύντομες συμβολοσειρές κειμένου που δίνουν οδηγίες στη συσκευή να εκτελέσει κάποια ενέργεια. Το σύνολο των εντολών AT περιλαμβάνει εντολές για όλες τις λειτουργίες επικοινωνίας, προβολής, τροποποίησης και αποθήκευσης ρυθμίσεων της συσκευής καθώς και για την παρακολούθηση παραμέτρων επικοινωνίας και εντοπισμού θέσης.

Για την εισαγωγή και εκτέλεση των AT commands χρειάζεται να ενεργοποιηθεί ένας ενσωματωμένος διαχειριστής εντολών στη διεπαφή εισόδου-εξόδου που χρησιμοποιείται για την πρόσβαση στη συσκευή. Αυτός ο διαχειριστής είναι ενεργοποιημένος εξ ορισμού για μία από τις διεπαφές εισόδου-εξόδου της συσκευής.

Όταν ο διαχειριστής εντολών AT είναι ενεργοποιημένος, η συσκευή υποστηρίζει δύο λειτουργικές καταστάσεις: τη **Λειτουργία Δεδομένων** (Data Mode) και τη **Λειτουργία Εντολών** (Command Mode). Στη προκειμένη περίπτωση ο αισθητήρας επιφανείας (Mission Control-S2CR 18/34) ορίστηκε σε Λειτουργία Εντολών (Command Mode) και ο αντίστοιχος ο οποίος ήταν προσδεδεμένος στο υποθαλάσσιο όχημα σε Λειτουργία Δεδομένων (Data Mode). Η εντολή που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό από τον ένα αισθητήρα στον άλλο ήταν η USBLLONG που περιλαμβάνει δεδομένα όπως ο τρέχων χρόνος, ο χρόνος μέτρησης, οι συντεταγμένες του στόχου (X, Y, Z), οι μετρήσεις κλίσης καθώς και πρόσθετες πληροφορίες όπως ο χρόνος διάδοσης του σήματος, η ένταση του σήματος (rssi), η ακεραιότητα και η ακρίβεια της μέτρησης.

Η δημιουργία της παραπάνω συμβολοσειράς που αποσκοπεί στην εξαγωγή των τρισδιάστατων συντεταγμένων του στόχου προς εντοπισμό συνδέεται με την αποστολή ακουστικών μηνυμάτων μεταξύ των δυο οργάνων. Τα είδη ακουστικών μηνυμάτων είναι τα εξής:

- **Άμεσα Μηνύματα.** Άμεσα μηνύματα - Instant Messages(IM) είναι μηνύματα που μεταδίδονται το συντομότερο δυνατόν μετά τη λήψη της αντίστοιχης εντολής. Μπορούν να μεταδοθούν με επιβεβαίωση παράδοσης.
- **Συγχρονισμένα Άμεσα Μηνύματα.** Συγχρονισμένα άμεσα μηνύματα Synchronous Instant Messages (IMS) είναι μηνύματα που μεταδίδονται με χρονικά προγραμματισμένη αποστολή. Σε αντίθεση με τα άμεσα μηνύματα, η μετάδοση ενός IMS μπορεί να προγραμματιστεί να ξεκινήσει σε μια προκαθορισμένη χρονική στιγμή. Η μετάδοση του IMS ελέγχεται από ανώτερα πρωτόκολλα που ενεργοποιούν στη φυσική στρώση για να ξεκινήσει η μετάδοση.
- **Μηνύματα Piggyback.** Μηνύματα Piggyback Messages (PBM) είναι μηνύματα που μπορούν να μεταδοθούν μόνο ως επισυναπτόμενα σε άλλα δεδομένα. Ένα PBM δεν μεταδίδεται άμεσα ή σε προγραμματισμένο χρόνο, αντίθετα, αποθηκεύεται μέχρι να υπάρχουν

Στοιχείο	Περιγραφή
<current time>	Χρονική σήμανση της εξόδου της συμβολοσειράς, στο τοπικό Σύστημα Χρόνου της συσκευής, σε s (s.ssssss).
<measurement time>	Χρονική σήμανση της μέτρησης της θέσης του στόχου, στο τοπικό Σύστημα Χρόνου της συσκευής, σε s (s.ssssss).
<remote address>	Η διεύθυνση του στόχου.
<X>,<Y>,<Z>	Συντεταγμένες του στόχου στο σύστημα αναφοράς της τοπικής συσκευής, σε m, με κινητή υποδιαστολή.
<E>,<N>,<U>	Συντεταγμένες του στόχου με αντιστάθμιση κινήσεων, σε m, με κινητή υποδιαστολή.
<roll>,<pitch>,<yaw>	Γωνίες περιστροφής της τοπικής συσκευής, σε ακτίνια, με κινητή υποδιαστολή.
<propagation time>	Χρόνος διάδοσης του ακουστικού σήματος, σε ms.
<rsst>	Δείκτης Ικανότητας Λήψης Σήματος, υπογεγραμμένος αριθμός. Δείτε την ενότητα 5.13.3 για περισσότερες πληροφορίες.
<integrity>	Επίπεδο ακεραιότητας σήματος. Δείτε την ενότητα 5.13.4 για περισσότερες πληροφορίες.
<accuracy>	Ακρίβεια της προσδιορισμένης θέσης, σε m.

Πίνακας 3.14: Στοιχεία Μηνύματος USBLLONG

άλλα δεδομένα προς μετάδοση. Ένα PBM μπορεί να μεταδοθεί μόνο μαζί με την επιβεβαίωση λήψης ενός άμεσου μηνύματος ή μαζί με ένα μήνυμα υπηρεσίας του αλγορίθμου δεδομένων burst.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά το πρώτο είδος μηνύματος (IM). Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος σε Python και σε μορφή bash script, ο οποίος, σε τακτά χρονικά διαστήματα, στέλνει ένα μήνυμα από τον αισθητήρα επιφάνειας. Αυτό το μήνυμα λαμβάνεται από το σύστημα USBL του Glider το οποίο στη συνέχεια στέλνει πίσω στον αισθητήρα επιφάνειας τη χρονική στιγμή λήψης του μηνύματος. Με αυτό το τρόπο, υπολογίζεται η κεκλιμένη απόσταση και η κατακόρυφη γωνία μέσω της ταχύτητας μετάδοσης (Sound Velocity).

Λαμβάνοντας υπόψη την περιοχή διεξαγωγής του πειράματος, τα βάθη της καθώς και τον χρόνο μετάδοσης, λήψης και επαναμετάδοσης των μηνυμάτων, υπολογίστηκε ότι το βέλτιστο χρονικό βήμα για την αποστολή άμεσου μηνύματος ήταν τα πέντε δευτερόλεπτα.

Το τελευταίο και πιο σημαντικό βήμα στην επεξεργασία των δεδομένων, ήταν ο συνδυασμός τους με εκείνα του Δορυφορικού Δέκτη **Leica GS18**, με σκοπό την εξαγωγή τρισδιάστατων γεωαναφερμένων συντεταγμένων του υποθαλάσσιου οχήματος σε πραγματικό χρόνο, για τη μελέτη του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

### 1. Πρώτος Αλγόριθμος (Διαχείριση Δεδομένων GPS):

- Διαβάζει τη σφαιρική συντεταγμένη λύση (φ,λ) από το GPS (NMEA), μαζί με τη χρονική σήμανση, με ακρίβεια δύο δεκάτων του δευτερολέπτου.
- Οι σφαιρικές συντεταγμένες μετατρέπονται σε προβολικές χρησιμοποιώντας το **Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς ΕΓΣΑ '87** και την υψομετρική αφετηρία **EGM '08**.
- Το αποτέλεσμα αποθηκεύεται σε αρχείο.

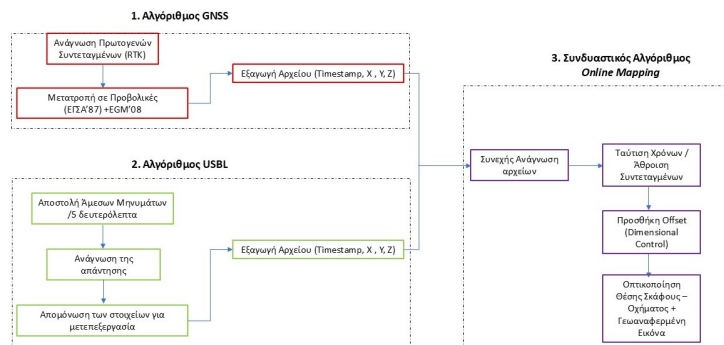


## 2. Δεύτερος Αλγόριθμος (Διαχείριση Δεδομένων USBLLONG):

- Διαχειρίζεται τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον αισθητήρα επιφανείας (*Mission Control*), ορίζοντας το χρονικό βήμα αποστολής των ηχητικών παλμών.
- Αποκωδικοποιεί τη συμβολοσειρά **USBLLONG** από τον υποθαλάσσιο στόχο, διαχωρίζοντας τις παραμέτρους που θα συσχετιστούν με τα δεδομένα GPS (διορθωμένες συντεταγμένες XYZ και χρόνο λήψης του μηνύματος).
- Καταγράφει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σε αρχείο.

## 3. Τρίτος Αλγόριθμος (Συνδυασμός Δεδομένων GPS και USBL):

- Διαβάζει συνεχώς τα δύο αρχεία (GPS και USBLLONG).
- Τη χρονική στιγμή που καταγράφεται τιμή από το USBLLONG, αναζητά την αντίστοιχη χρονική τιμή από το αρχείο GPS και τις αθροίζει.
- Προστίθενται οι αντίστοιχες τιμές από τις τρισδιάστατες αποτυπώσεις, και οι συντεταγμένες (του σκάφους και του στόχου) προβάλλονται σε πραγματικό χρόνο πάνω σε γεωαναφερμένη εικόνα της περιοχής.
- Ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί τον στόχο, εξασφαλίζοντας ότι δεν διακόπτεται η επικοινωνία.



Εικόνα 3.46: Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμων Διαχείρισης Δεδομένων GNSS-USBL

Τα αποτελέσματα του υποθαλάσσιου εντοπισμού από την εφαρμογή που έλαβαν χώρα στη περιοχή των Αντικύρων παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 στο τμήμα των διαφορετικών πειραμάτων-αποστολών που πραγματοποιήθηκαν.

## 3.3 Προετοιμασία Διεξαγωγής Πειράματος στη περιοχή των Αντικύρων

Μετά τον προσδιορισμό, και την επιλογή των τεχνικών προδιαγραφών και τη παραμετροποίηση του κατάλληλου εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί για τον υποθαλάσσιο και δορυφορικό εντοπισμό, το επόμενο και απαραίτητο βήμα είναι η παρουσίαση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση του πειράματος. Στόχος ήταν ο συνδυασμός όλων των τεχνολογιών με σκοπό τη μελέτη περιβαλλοντικών παραμέτρων στο θαλάσσιο περιβάλλον, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα και η αγωγιμότητα και πώς αυτές μεταβάλλονται σε συνάρτηση με το βάθος.

### 3.3.1 Επιλογή Περιοχής

Το πρώτο στάδιο για την υλοποίηση του πειράματος ήταν η επιλογή της περιοχής. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο που περιγράφει το Glider, το αυτόνομο όχημα μπορεί να καταδυθεί με δύο τρόπους, είτε με γραμμική είτε με σπειροειδή βύθιση, ανάλογα με την αποστολή του, βθάνοντας ακόμη και σε 2000 μέτρα. Για να επιτευχθεί αυτή η κίνηση και ειδικά σε αποστολές που απαιτείται πλεύση σε αυτά, ενώ παράλληλα πρέπει να αποφευχθεί τυχόν πρόσκρουση σε αβαθή σημεία. Επομένως, το πρώτο απαραίτητο κριτήριο ήταν η ύπαρξη μεγάλης υψομετρικής διαφοράς (μεγάλο εύρος βάθους) ώστε να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος ατυχήματος. Επιπλέον, λόγω της ανάγκης για σκάφος που θα φέρει τον βασικό εξοπλισμό, ήταν αναγκαία η ύπαρξη λιμανιού το οποίο θα επέτρεπε την εύκολη κατέλκυση του σκάφους. Αυτό εξασφαλίζει αφενός την άμεση πρόσβαση στο χώρο διεξαγωγής του πειράματος και αφετέρου την προστασία του σκάφους κατά τις βραδινές ώρες από πιθανή θαλασσοταραχή. Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, η περιοχή που επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν η Αντίκυρα, καθώς πληροί τις παραπάνω προϋποθέσεις.

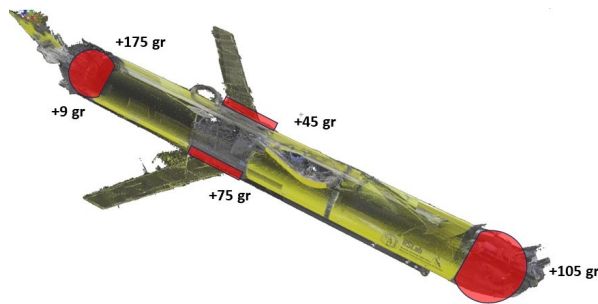


Εικόνα 3.47: Περιοχή Διεξαγωγής Πειράματος (Αντίκυρα)

### 3.3.2 Προετοιμασία Glider

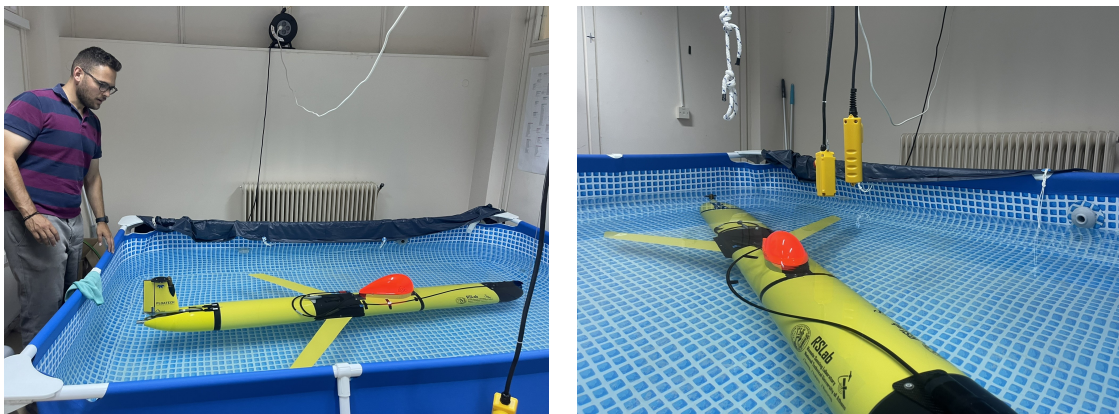
Η προετοιμασία του Glider επικεντρώθηκε στην εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας τόσο του συστήματος πλοήγησής του όσο και του μετρητικού εξοπλισμού που φέρει. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον λεπτομερή έλεγχο και τη σωστή ρύθμιση των συστημάτων εντοπισμού, τηλεμετρίας και των αισθητήρων που καταγράφουν κρίσιμες περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα και η αγωγιμότητα. Η ορθή προετοιμασία διασφαλίζει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των δεδομένων που θα συλλεχθούν κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει την ασφαλή πλεύση του Glider στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ειδικά για την πλοήγηση, έγινε έλεγχος της ισορροπημένης πλεύσης του οχήματος καθώς και της δημιουργίας κενού αέρος στο εσωτερικό του κελύφους, προκειμένου να αποφευχθεί η πιθανότητα εισόδου νερού.

Για την επίτευξη της ισορροπίας, πραγματοποιήθηκε προσαρμογή των βαρών σε τέσσερις θέσεις γύρω από το όχημα μέσω προσθήκης ειδικών βαρών (bullets) με στόχο η καταγραφή των γωνιών κλίσης τόσο κατά τον διαμήκη όσο και τον εγκάρσιο άξονα να παραμένει κάτω από 1 μοίρα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Επιπλέον, όσον αφορά στη διαδικασία βύθισης του Glider, αυτή έπρεπε να πραγματοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε το όχημα, σε όλο το μήκος του, να είναι πλήρως βυθισμένο στο νερό, με εξαίρεση το πάνω μέρος του πηδαλίου. Το πηδάλιο έπρεπε να έρχεται σε επαφή, σχεδόν εφαιπτομενικά, με την ελεύθερη επιφάνεια του νερού, διασφαλίζοντας την ορθή κίνηση και πλεύση του οχήματος.



Εικόνα 3.48: Κατανομή βαρών στο Glider

Η παραπάνω διαδικασία υλοποιήθηκε σε υδάτινο περιβάλλον και συγκεκριμένα στη πισίνα του εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης (Εικόνες 3.49) το οποίο διαφέρει από το μετέπειτα πραγματικό περιβάλλον διεξαγωγής του πειράματος. Για αυτό το λόγο κρίθηκε απαραίτητο να υπολογιστεί το επιπρόσθετο βάρος που θα χρειαζόταν ώστε το Glider να προσαρμοστεί στις συνθήκες της θάλασσας.



Εικόνα 3.49: Πειράματα Ευστάθειας

### 3.3.3 Επιβεβαίωση στη Θάλασσα & Σχεδίαση Αποστολών

Για τον υπολογισμό του επιπρόσθετου βάρους, αξιοποιήθηκε το τρισδιάστατο νέφος σημείων που δημιουργήθηκε με τη χρήση του Επίγειου Σαρωτή (αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.1.5). Από το τρισδιάστατο μοντέλο, υπολογίστηκε ο όγκος του οχήματος και, στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό του επιπλέον βάρους που απαιτείται. Αναλυτικά:

**Άνοση στο γλυκό νερό:**

$$F_{\text{άνωσης, γλυκό νερό}} = \rho_{\text{γλυκό νερό}} \cdot V \cdot g$$

Όπου:

- $\rho_{\text{γλυκό νερό}} \approx 1000 \text{ kg/m}^3$  είναι η πυκνότητα του γλυκού νερού,
- $V$  είναι ο όγκος του οχήματος που εκτοπίζει νερό, και
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

### Άνωση στο θαλασσινό νερό:

$$F_{\text{άνωσης, θαλασσινό νερό}} = \rho_{\text{θαλασσινό νερό}} \cdot V \cdot g$$

Όπου:

- $\rho_{\text{θαλασσινό νερό}} \approx 1025 \text{ kg/m}^3$  είναι η πυκνότητα του θαλασσινού νερού.

Χρησιμοποιώντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, υπολογίστηκε ότι στη θάλασσα θα πρέπει να προσθέσουμε 2 κιλά βάρος στο όχημα. Για την επιβεβαίωση των παραπάνω, πραγματοποιήθηκε δοκιμή στην περιοχή της Αναβύσσου, προσθέτοντας τα επιπλέον βάρη μέχρι να ικανοποιηθούν οι συνθήκες πλεύσης που προαναφέρθηκαν.



Εικόνα 3.50: Πειράματα Ευστάθειας στη Θάλασσα

Με την ολοκλήρωση όλων των παραπάνω προετοιμασιών και πριν από την έναρξη του πειράματος, πραγματοποιήθηκε λεπτομερής σχεδιασμός των αποστολών που επρόκειτο να υλοποιηθούν. Ο σχεδιασμός αυτός περιελάμβανε τις ακόλουθες αποστολές:

1. Μια Γραμμική Βύθιση στα 100 μέτρα Βάθος
2. Τρεις Γραμμικές Βυθίσεις στα 60 μέτρα βάθος
3. Μια σπειροειδής Βύθιση στα 200 μέτρα βάθος
4. Μια σπειροειδής Βύθιση στα 400 μέτρα βάθος
5. Μια σπειροειδής Βύθιση στα 300 μέτρα ανάδυση στα 150 και ξανά βύθιση στα 300 μέτρα

Σε όλες τις αποστολές πραγματοποιήθηκε συνεχής εντοπισμός του αυτόνομου υποθαλάσσιου οχήματος (Glider) καθ' όλη τη διάρκειά τους. Παράλληλα, συλλέχθηκαν οι περιβαλλοντικές μετρήσεις που καταγράφηκαν από το όχημα, οι οποίες αφορούσαν τις φυσικές παραμέτρους του θαλάσσιου περιβάλλοντος.



## Κεφάλαιο 4

# Πειραματικά Αποτελέσματα και Αξιολόγηση

Στο παρών Κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα τα οποία διεξήχθησαν από την εφαρμογή των διαδικασιών που περιγράφησαν στο Κεφάλαιο 3. Ειδικότερα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη διαδικασία των τρισδιάστατων μετρήσεων στο σκάφος και στο ρομποτικό σύστημα τύπου Glider που χρησιμοποιήθηκε. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε αποστολή, τα οποία αφορούν στον υποθαλάσσιο εντοπισμό του ρομποτικού συστήματος, με στόχο την εξαγωγή και ερμηνεία διαγραμμάτων τόσο για τα τεχνικά χαρακτηριστικά πλοήγησης του ρομποτικού συστήματος, όσο και για τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά του θαλάσσιου περιβάλλοντος σε κάθε αποστολή, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα, η αγωγιμότητα κ.ά.

### 4.1 Αποτελέσματα Τρισδιάστατων Αποτυπώσεων και Διαστασιολογικών Ελέγχων

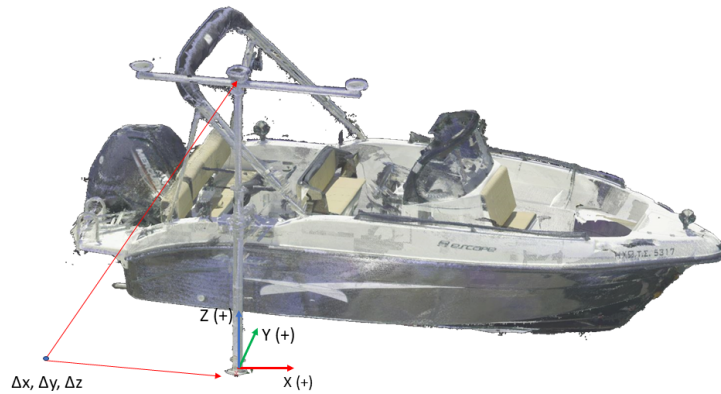
#### 4.1.1 Σκάφος Αποστολής

Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 στην Ενότητα που αφορά στον εξοπλισμό, ακολουθεί η παρουσίαση του τρισδιάστατου νέφους σημείων, το οποίο δημιουργήθηκε με σκοπό τον προσδιορισμό των ακριβών αποστάσεων και σημείων που κρίθηκαν απαραίτητα για την εκτέλεση του πειράματος. Αυτά τα σημεία αφορούν την υψομετρική και οριζοντιογραφική απόκλιση μεταξύ του κέντρου πρόσδεσης του εξοπλισμού USBL και του κέντρου φάσματος του δορυφορικού δέκτη GNSS.



Εικόνα 4.1: Τρισδιάστατο Νέφος Σημείων Ρομποτικού Συστήματος Σκάφους

Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται το τρισδιάστατο νέφος σημείων του σκάφους που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος. Το νέφος αποτελείται από τρία εκατομμύρια σημεία, όλα χρωματισμένα με βάση τις σφαιρικές εικόνες που λήφθηκαν από τον επίγειο σαρωτή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Βάσει αυτών των δεδομένων, στον Πίνακα 4.1 και στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζονται τόσο οι οριζοντιογραφικές όσο και οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος καθώς και ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίστηκε η κατεύθυνση του συστήματος συντεταγμένων.



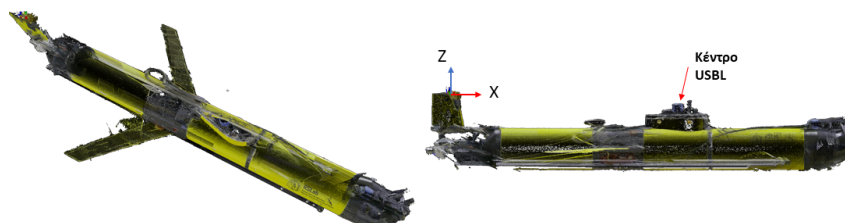
Εικόνα 4.2: Τρισδιάστατη Αναπαράσταση των διαφορών που μετρήθηκαν

Αποτελέσματα Διαφορών κέντρου πρόσδεσης USBL και Φασματικού κέντρου δορυφορικού Δέκτη	
Διεύθυνση Port/Starboard (-)	- 0.028 μμ
Διεύθυνση Aft/Forward (+)	+ 0.005 μμ
Εγκάρσια Διεύθυνση	+ 2.707 μμ

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα Διαφορών κέντρου πρόσδεσης USBL και Φασματικού κέντρου δορυφορικού Δέκτη

#### 4.1.2 Υποβρύχιο Ρομποτικό Σύστημα Αποστολής

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται το τρισδιάστατο νέφος δεδομένων (Εικόνα 4.3), καθώς και η διαφορά μεταξύ του κέντρου του συστήματος USBL και του φασματικού κέντρου της κεραίας του Glider. Η διαφορά εξετάζεται τόσο ως προς την οριζοντιογραφική όσο και την υψομετρική διάσταση. Η μελέτη αυτή αποσκοπεί στην ανάλυση των διαφορών στη θέση καταγραφής που προκύπτουν από το ίδιο το ρομποτικό σύστημα σε σύγκριση με τη μεθοδολογία της παρούσας εφαρμογής μέσω του συστήματος USBL.



Εικόνα 4.3: Τρισδιάστατο Νέφος Σημείων Ρομποτικού Συστήματος Glider

Η Εικόνα 4.3 απεικονίζει ένα τρισδιάστατο έγχρωμο νέφος σημείων, αποτελούμενο από ένα εκατομμύριο σημεία το οποίο επέτρεψε την ακριβή μέτρηση των οριζοντιογραφικών και υψομετρικών διαφορών μεταξύ του φασματικού κέντρου της κεραίας του Glider και του κέντρου μέτρησης του συστήματος USBL. Τα αποτελέσματα των αποστάσεων αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Αποτελέσματα Διαφορών κέντρου USBL και Φασματικού κέντρου Κεραίας Glider	
Διεύθυνση Port/Starboard (-)	- 0.001 μμ
Διεύθυνση Aft/Forward (+)	+ 1.240 μμ
Εγκάρσια Διεύθυνση	- 0.057 μμ

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα Διαφορών κέντρου USBL και Φασματικού κέντρου Κεραίας Glider

## 4.2 Πειραματικά Αποτελέσματα στη περιοχή της Αντίκυρας

Μετά την εφαρμογή όλων των παραπάνω διαδικασιών και δοκιμών, καθώς και τον συνδυασμό των τεχνολογιών που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3, και αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τις τρισδιάστατες αποτυπώσεις, η παρούσα Ενότητα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε στον Κορινθιακό Κόλπο και συγκεκριμένα στην περιοχή της Αντίκυρας. Αυτή χωρίστηκε στις παρακάτω αποστολές:

1. Μια Γραμμική Βύθιση στα 100 μέτρα βάθος (Εικόνα 4.5).
2. Τρεις Γραμμικές Βυθίσεις στα 60 μέτρα βάθος (Εικόνα 4.9).
3. Μια Βύθιση με μορφή σπείρας στα 200 μέτρα βάθος (Εικόνα 4.15).
4. Μια Βύθιση με μορφή σπείρας στα 400 μέτρα βάθος (Εικόνα 4.18).
5. Μια Βύθιση με μορφή σπείρας στα 300 μέτρα βάθος, ανάδυση στα 150 και κατάδυση πάλι στα 300 μέτρα (Εικόνα 4.20).

Στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζεται μια γενική δορυφορική εικόνα της περιοχής όπου με κίτρινο χρώμα αποδίδονται τα σημεία βύθισης του εξοπλισμού. Η συγκεκριμένη περιοχή επιλέχθηκε, καθώς παρουσιάζει μεγάλα βάθη, της τάξης των 1000 μέτρων, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται η ασφάλεια του βυθιζόμενου ρομποτικού συστήματος.



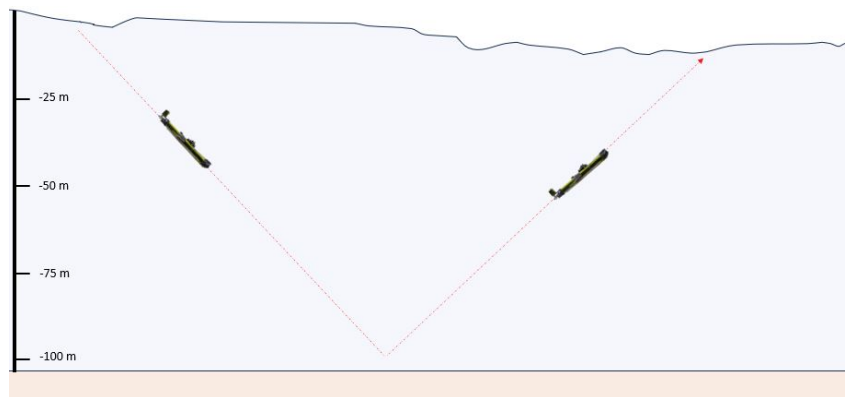
Εικόνα 4.4: Δορυφορική Εικόνα περιοχής Διεξαγωγής του Πειράματος



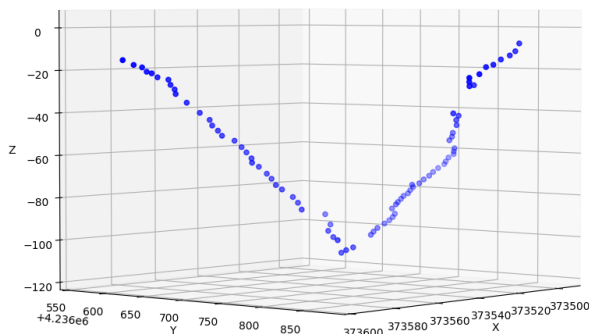
Στις παρακάτω υποενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε αποστολή ξεχωριστά, αναφορικά με τον τρισδιάστατο υποθαλάσσιο εντοπισμό του βυθιζόμενου συστήματος, καθώς και τις μετρήσεις των περιβαλλοντικών παραμέτρων του νερού οι οποίες συλλέχθηκαν από το ίδιο το βυθιζόμενο ρομποτικό σύστημα. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τη θέση και την κίνηση του συστήματος στον βυθό καθώς και τις παραμέτρους όπως, θερμοκρασία, αλατότητα και βάθος, οι οποίες καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια κάθε αποστολής.

#### 4.2.1 Μια Γραμμική Βύθιση στα 100 μέτρα βάθος

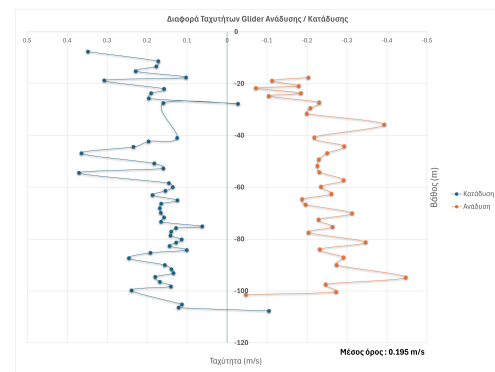
Η πρώτη αποστολή ήταν μια γραμμική βύθιση στα εκατό μέτρα βάθος.



Εικόνα 4.5: Μια βύθιση στα 100 μέτρα



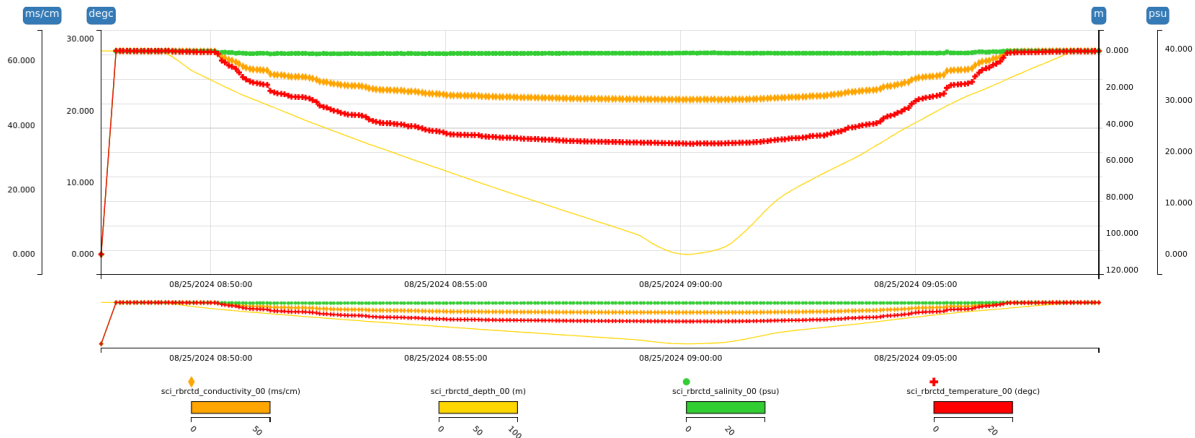
Εικόνα 4.6: Υποθαλάσσιος Εντοπισμός Glider σε αποστολή Γραμμικής Βύθισης 100 μέτρων βάθους



Εικόνα 4.7: Διάγραμμα Ταχυτήτων Βύθισης-Ανάδυσης σε μέγιστο βάθος των 100 μέτρων

Σύμφωνα με την Εικόνα 4.6, όπου απεικονίζεται τρισδιάστατα η θέση του Glider για κάθε πραγματοποιημένη μέτρηση, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το ρομποτικό σύστημα βυθίστηκε γραμμικά σε βάθος 107,68 μέτρων, δηλαδή 7,68 μέτρα βαθύτερα από το επιθυμητό. Η μέση ταχύτητα κατάδυσης καταγράφηκε στα 0,157 m/sec (μπλε χρώμα). Κατά την ανάδυση, παρατηρήθηκε μέση ταχύτητα 0,228 m/sec. Ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης της αποστολής ήταν 17 λεπτά. Σημειώνεται επίσης ότι, περίπου στα 40 μέτρα βάθος, υπήρξε εκτροπή από την κανονική τροχιά του συστήματος, πιθανότατα λόγω της επίδρασης υποθαλάσσιων ρευμάτων. Κατά την εκτέλεση της αποστολής, το Glider πραγματοποίησε διάφορες περιβαλλοντικές μετρήσεις κατά τη βύθιση και την ανάδυσή του. Οι πιο σημαντικές από αυτές τις μετρήσεις παρουσιάζονται

στην Εικόνα 4.8. Τα δεδομένα αφορούν παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα και η πυκνότητα του νερού, και παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την υδρογραφική κατάσταση της περιοχής, καθώς και για τις συνθήκες που επηρέασαν την κίνηση του ρομποτικού συστήματος κατά την αποστολή.



Εικόνα 4.8: Διάγραμμα θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, αλατότητας αλλά και βάθους στη περίπτωση Γραμμικής Βύθισης-Ανάδυσης σε μέγιστο βάθος των 100 μέτρων

Η Εικόνα 4.8 παρουσιάζει τις περιβαλλοντικές παραμέτρους που μετρήθηκαν κατά την αποστολή του Glider, χρησιμοποιώντας διαφορετικά χρώματα για κάθε παράμετρο: η θερμοκρασία αποδίδεται με κόκκινο χρώμα (σε βαθμούς Κελσίου), η αγωγιμότητα με πορτοκαλί, η αλατότητα με πράσινο και το βάθος με κίτρινο. Από τις μετρήσεις βάθους που καταγράφηκαν, φαίνεται ότι το Glider έφτασε σε μέγιστο βάθος περίπου 110 μέτρων, επιβεβαιώνοντας τα δεδομένα που συλλέχθηκαν μέσω της τεχνολογίας USBL.

Αναλύοντας τις περιβαλλοντικές παραμέτρους, η μέση θερμοκρασία του νερού μετρήθηκε στους 21°C, η αλατότητα στα 40 PSU, ενώ η μέση τιμή της αγωγιμότητας υπολογίστηκε στα 52 mS/cm. Οι παραπάνω παραμέτρους οδηγούν σε μια μέση ταχύτητα του ήχου στο νερό περί των 1530.64 m/sec.

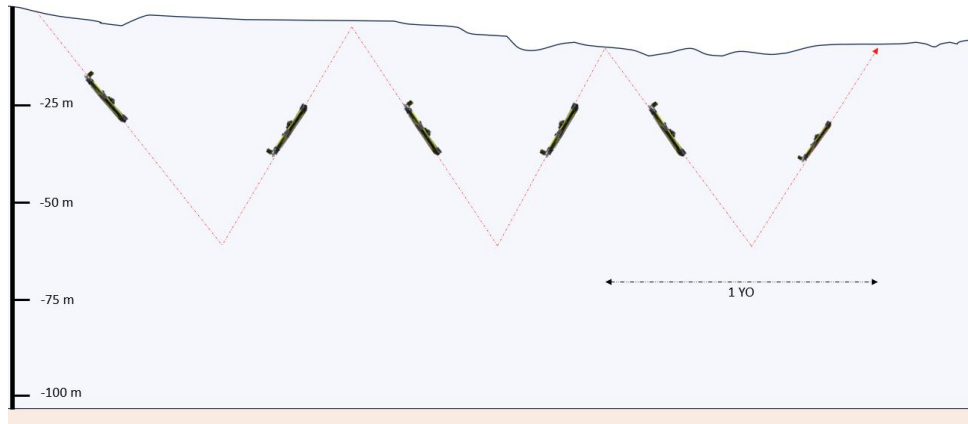
#### 4.2.2 Τρεις Γραμμικές Βυθίσεις στα 60 μέτρα βάθος

Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δεύτερης κατά σειράς αποστολής που εκτελέστηκε η οποία αφορά σε τρεις κατά σειρά γραμμικές βυθίσεις και τρεις αναδύσεις του Glider σε βάθος 60 μέτρων. Σκοπός και σε αυτή τη περίπτωση ήταν ο ακριβής εντοπισμός του οχήματος, ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών πλεύσης του αλλά και περιβαλλοντικές μετρήσεις εκτέλεσε κατά τη διαδρομή του.

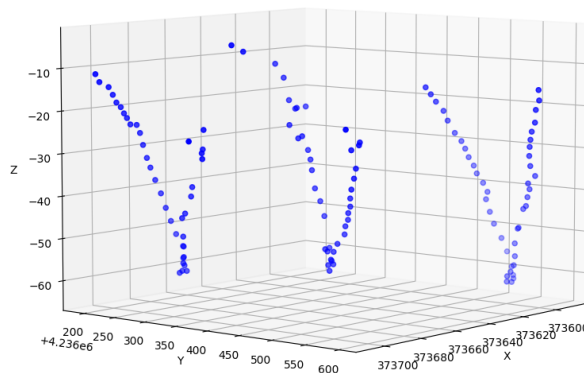
Με βάση την Εικόνα 4.9 η οποία αποτελεί την οπτικοποίηση της αποστολής με γραφική μορφή, στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζεται η πραγματική μορφή της πλοήγησης του οχήματος. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πως στο πρώτο τμήμα της αποστολής το όχημα εκτέλεσε γραμμική βύθιση με τελικό βάθος τα 62.8 μέτρα (2.81 μ βαθύτερα από το επιθυμητό), στη δεύτερη 58.45 μέτρα (1.55 ρηχότερα από το πραγματικό) και τέλος 59.07 τελικό βάθος (0.93 μέτρα ρηχότερα).

Για την καλύτερη και περαιτέρω μελέτη και σύγκριση των αποτελεσμάτων στο Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται και οι ταχύτητες κατάδυσης-ανάδυσης του οχήματος για κάθε ένα σύστημα βύθισης-ανάδυσης (Εικόνα 4.9) ξεχωριστά.

Αναλυτικά, στο πρώτο τμήμα το όχημα καταδύθηκε με μια μέση ταχύτητα 0.167m/sec και αναδύθηκε με 0.228 m/sec. Αντίστοιχα για τα υπόλοιπα δυο υπομήματα οι μέσες ταχύτητες



Εικόνα 4.9: Τρεις Γραμμικές Βυθίσεις σε μέγιστο βάθος των 60 μέτρων



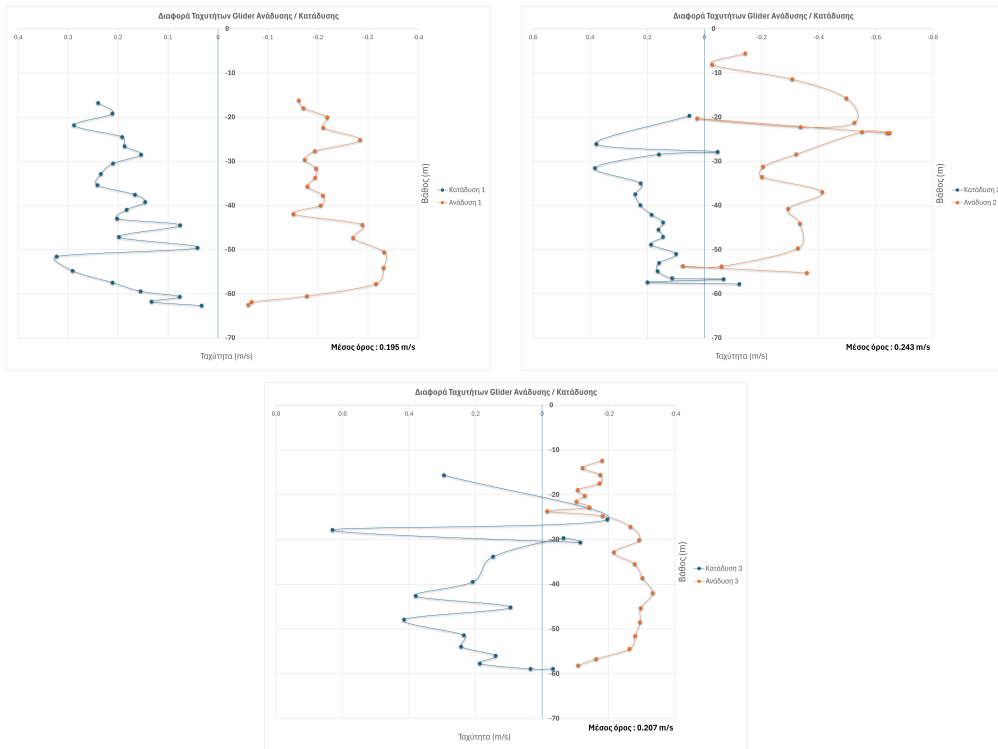
Εικόνα 4.10: Υποθαλάσσιος Εντοπισμός Glider σε αποστολή Τριών Γραμμικών Βυθίσεων σε 60 μέτρα βάθος

κατάδυσης προσδιορίστηκαν ως 0.156 m/sec και 0.167 m/sec. Αντίστοιχα, οι μέσες ταχύτητες ανάδυσης μετρήθηκαν ως 0.206 m/sec και 0.201 m/sec. Ως προς τις περιβαλλοντικές παραμέτρους που προσδιορίστηκαν στη παρούσα αποστολή, αυτές οπτικοποιούνται στην Εικόνα 4.11. Όπως και στην προηγούμενη Ενότητα, με **κόκκινο** χρώμα αποτυπώνονται οι τιμές της θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου, με **πορτοκαλί** χρώμα οι τιμές της αγωγιμότητας σε mS/cm, με **πράσινο** χρώμα η αλατότητα σε PSU και τέλος με **κίτρινο** οι τιμές βάρους σε μέτρα.

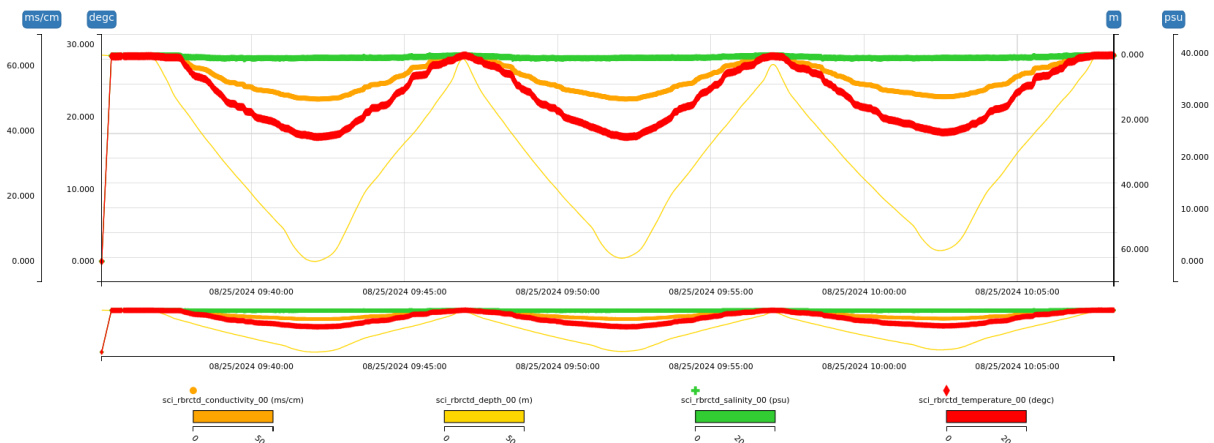
Αναλύοντας περαιτέρω την Εικόνα 4.11, και λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των βαθμών που κατέγραψε το Glider, παρατηρείται ότι κατά το πρώτο στάδιο της καθόδου, το όχημα βυθίστηκε σε βάθη μεγαλύτερα των εξήντα (60) μέτρων, ενώ στα επόμενα δύο στάδια κινήθηκε σε ρηχότερα βάθη. Αυτές οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν τις αντίστοιχες που πραγματοποιήθηκαν από το σκάφος. Η θερμοκρασία του νερού στην επιφάνεια ξεκινά από 30°C και μειώνεται σημαντικά, φτάνοντας περίπου στους 15°C σε βάθος 60 μέτρων. Όσον αφορά την αλατότητα, παρατηρείται σταθερή τιμή περίπου στα 40 PSU, όπως και στην προηγούμενη αποστολή. Τέλος, η αγωγιμότητα του νερού καταγράφηκε με μια μέση τιμή περίπου 53 mS/cm. Λαμβάνοντας υπόψη της παραπάνω τιμές, εξάγεται μια μέση ταχύτητα του ήχου στο νερό 1530 m/sec.

### 4.2.3 Μια Σπειροειδής Βύθιση-Ανάδυση σε βάθος 200 μέτρων

Η τρίτη αποστολή διαφέρει σημαντικά από τις προηγούμενες δύο και ειδικότερα ως προς τον τρόπο κατάδυσης του οχήματος. Συγκεκριμένα, αντί για γραμμική βύθιση στη προκειμένη



Πίνακας 4.3: Διαγράμματα Ταχυτήτων σε Αποστολή τριών βυθίσεων Βάθους 60 μέτρων

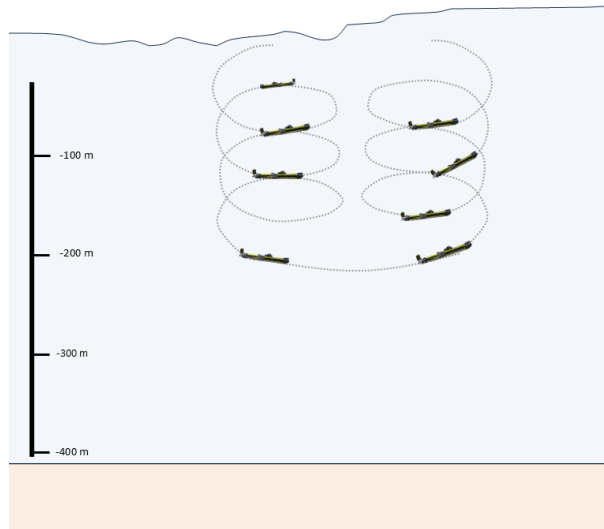


Εικόνα 4.11: Διάγραμμα θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, αλατότητας αλλά και βάθους στη περίπτωση Γραμμικής Βύθισης-Ανάδυσης σε μέγιστο βάθος των 60 μέτρων

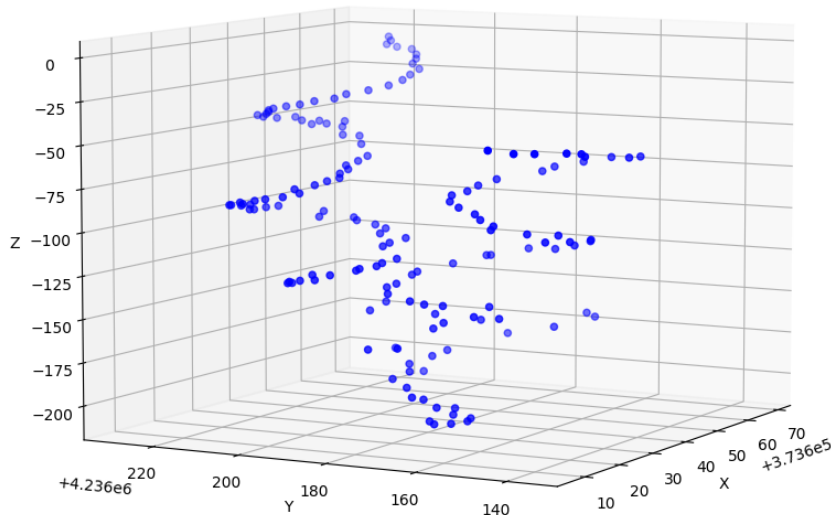
περίπτωση το Glider καταδύθηκε με μια σπειροειδή κίνηση μέχρι τα 200 μέτρα βάθος και αναδύθηκε με τον ίδιο τρόπο. Μια γραφική αναπαράσταση της κίνησης αποτυπώνεται στην Εικόνα 4.15

Παρατηρώντας τα ακριβή αποτελέσματα από τον εντοπισμό του οχήματος από το σκάφος με χρήση τεχνολογίας USBL αυτά αποτυπώνονται στην Εικόνα 4.13 επιβεβαιώνοντας την επιθυμητή πορεία.

Από τις παραπάνω μετρήσεις προκύπτει ότι το όχημα έφτασε σε βάθος 205,035 μέτρων, δηλαδή 5,035 μέτρα βαθύτερα από το επιθυμητό. Παρατηρώντας τη μορφή της σπειροειδούς κίνησης, διαπιστώνεται ότι καθώς το όχημα κατεβαίνει σε μεγαλύτερα βάθη, η ακτίνα της σπείρας αυξάνεται. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις δείχνουν ότι η ακτίνα ξεκινά από τα 5,59 μέτρα και,



Εικόνα 4.12: Βύθιση στα 200 μέτρα μέσω ελικοειδούς μορφής

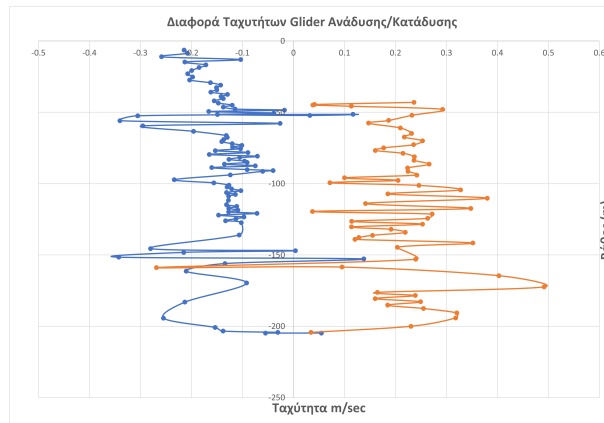


Εικόνα 4.13: Εικόνα Τρισδιάστατης Αναπαράστασης πορείας υποβρύχιου ρομποτικού συστήματος μέσω ελικοειδούς βύθισης σε βάθος 200 μέτρων

στο δεύτερο τμήμα της σπείρας, αυξάνεται στα 8,64 μέτρα. Αντιθέτως, κατά την ανάδυση, η ακτίνα συνεχίζει να αυξάνεται. Στο βαθύτερο σημείο εκκίνησης της ανάδυσης, η ακτίνα της σπείρας είναι 9,68 μέτρα και καταλήγει στην επιφάνεια, φτάνοντας τα 10,09 μέτρα. Μελετώντας τις ταχύτητες κατάδυσης με αυτή τη μορφή, υπολογίστηκε μια μέση τιμή 0,13 m/sec, ενώ η μέση ταχύτητα ανάδυσης ήταν 0,20 m/sec. Η γραφική απεικόνιση των ταχυτήτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.14. Ο συνολικός χρόνος της αποστολής πραγματοποιήθηκε στα 38 λεπτά.

Σημαντικό ενδιαφέρον αποτελούν και οι περιβαλλοντικές μετρήσεις οι οποίες πάρθηκαν κατά τη παρούσα αποστολή οι οποίες οπτικοποιούνται μέσω της Εικόνας 4.15 και αποτυπώνουν και σε αυτή τη περίπτωση τιμές θερμοκρασίας, αλατότητας, αγωγιμότητας αλλά και βάθους.

Η καμπύλη βαθών, στην προκειμένη περίπτωση, αποτυπώνεται σε γραμμική μορφή αντί σπειροειδούς, διότι το glider καταγράφει τιμές πίεσης και όχι θέσης. Ως προς τις τιμές βαθών αυτές φαίνεται να καταλήγουν σε ένα μέγιστο βάθος μεγαλύτερο των 200 μέτρων, όπως επιβε-



Εικόνα 4.14: Διάγραμμα Ταχυτήτων Βύθισης-Ανάδυσης σε πείραμα ελικοειδούς μορφής με μέγιστο βάθος 200 μέτρα



Εικόνα 4.15: Διάγραμμα θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, αλατότητας αλλά και βάθους στη περίπτωση χρήσης ελικοειδούς βύθισης σε βάθος των 200 μέτρων

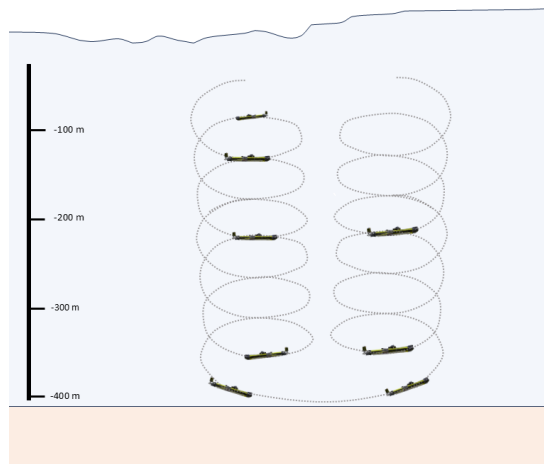
βαιώνεται από το σύστημα του USBL. Οι τιμές της θερμοκρασίας ξεκινούν από περίπου 30°C στην επιφάνεια και μειώνονται σταδιακά, φτάνοντας την ελάχιστη τιμή περίπου στους 15°C σε βάθος 100 μέτρων. Αυτή η θερμοκρασία παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής έως ότου ξεκινήσει η αύξησή της όταν το όχημα ανεβαίνει ξανά από τα 100 μέτρα και πάνω. Η αγωγιμότητα αρχίζει από 60 mS/cm στην επιφάνεια και, σε βάθος περίπου 50 μέτρων, μειώνεται στην ελάχιστη τιμή της, γύρω από 53 mS/cm, τιμή που παραμένει σταθερή μέχρι το glider να φτάσει ξανά τα 50 μέτρα κατά την ανάδυση. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω τιμές, εξάγεται η μέση ταχύτητα του ήχου στο νερό 1531 m/sec.

#### 4.2.4 Μια Σπειροειδής Βύθιση-Ανάδυση σε βάθος 400 μέτρων

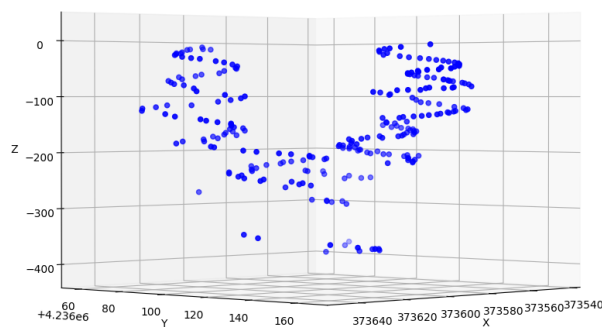
Η τέταρτη κατά σειρά αποστολή, αποτελεί και τη βαθύτερη αποστολή που εκτελέστηκε και σχετίζεται με μια σπειροειδή βύθιση και ανάδυση στα 400 μέτρα βάθος. Η αναπαράσταση αυτής παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.16.

Η πραγματική πορεία του ρομποτικού συστήματος που μετρήθηκε από το σύστημα USBL-GNSS με τη χρήση σκάφους παρουσιάζεται παρακάτω (Εικόνα 4.17 )

Όπως προκύπτει από τις μετρήσεις, το Glider εκτέλεσε με επιτυχία μια σπειροειδή κατάδυση και ανάδυση στα 400 μέτρα, όπως είχε προγραμματιστεί. Μέχρι περίπου τα 300 μέτρα βάθους,



Εικόνα 4.16: Βύθιση σπειροειδούς μορφής στα 400 μέτρα



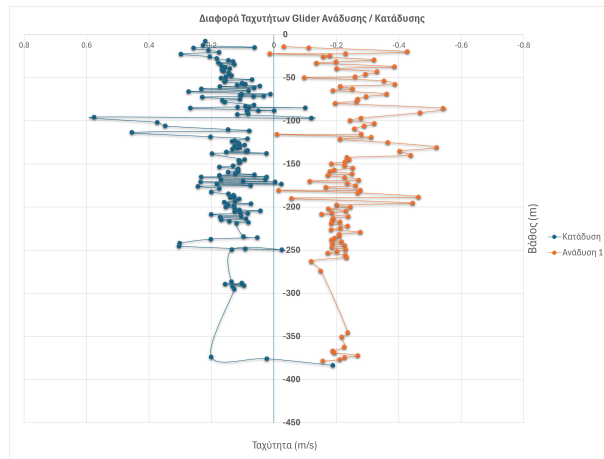
Εικόνα 4.17: Εικόνα Τρισδιάστατης Αναπαράστασης πορείας υποβρύχιου ρομποτικού συστήματος μέσω σπειροειδούς βύθισης σε βάθος 400 μέτρων

το όχημα ακολουθούσε μια σπειροειδή κίνηση. Ωστόσο, σε μεγαλύτερο βάθος, το Glider παρασύρθηκε και έφτασε μέχρι τα 383,37 μέτρα, που είναι 16,63 μέτρα πιο ρηχό από το επιθυμητό βάθος. Από εκεί, το όχημα ξεκίνησε την ανάδυσή του με σωστή σπειροειδή κίνηση, φτάνοντας τελικά στην ελεύθερη επιφάνεια. Κατά την κατάδυση, το Glider άρχισε με μια ακτίνα 8,71 μέτρων κοντά στην επιφάνεια και έφτασε κοντά στα 400 μέτρα με ακτίνα 12,48 μέτρων. Κατά την ανάδυση, κατέληξε κοντά στην επιφάνεια με μια ακτίνα 11,21 μέτρων, μεγαλύτερη κατά 2,5 μέτρα.

Μελετώντας τις αντίστοιχες ταχύτητες ανάδυσης και κατάδυσης, αυτές παρουσιάζονται με γραφική μορφή στο Διάγραμμα 4.18. Συγκεκριμένα, το όχημα καταδύθηκε με μια μέση ταχύτητα 0.13 m/sec και αναδύθηκε με μέση ταχύτητα περί τα 0.23 m/sec. Ο συνολικός χρόνος της αποστολής καταγράφηκε στα 79 λεπτά.

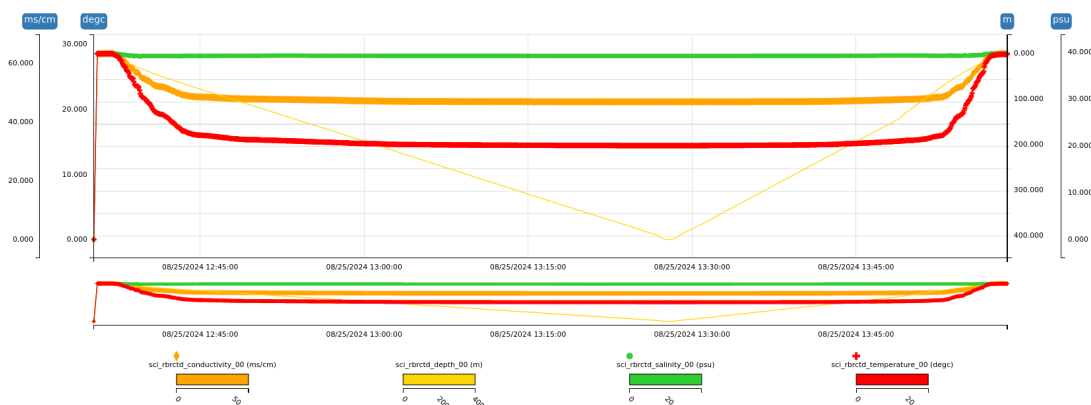
Τα αποτελέσματα που προήλθαν από τις περιβαλλοντικές μετρήσεις του glider παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.19. Με κίτρινο χρώμα αποδίδεται η εκτελεσμένη αποστολή όπως αυτή καταγράφηκε από τους αισθητήρες πίεσης του οχήματος, ενώ σε αυτή την περίπτωση αποδίδεται με γραμμική μορφή. Ωστόσο, δεν αποδίδονται προβλήματα κατά την πλοήγηση όπως αυτά εντοπίστηκαν στην Εικόνα 4.17. Στην επιφάνεια του νερού η αρχική τιμή της θερμοκρασίας είναι περίπου 30°C. Καθώς το Glider κατέρχεται, η θερμοκρασία μειώνεται στα 15°C περίπου στα 200 μέτρα βάθος και παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της κατάδυσης. Στην ανάδυση, η θερμοκρασία αυξάνεται και επανέρχεται στην επιφάνεια, όπου αποτυπώνεται η αύξηση της





Εικόνα 4.18: Διάγραμμα Ταχυτήτων Βύθισης-Ανάδυσης σε πείραμα σπειροειδούς μορφής με μέγιστο βάθος 400 μέτρα

θερμοκρασίας. Η αγωγιμότητα, που αποτυπώνεται με πορτοκαλί χρώμα, ξεκινά από μια αρχική τιμή 60 mS/cm στην επιφάνεια και μειώνεται στα 42 mS/cm περίπου στα 100 μέτρα βάθος, παραμένοντας σταθερή σε μεγαλύτερα βάθη. Η αλατότητα παραμένει σταθερή γύρω στα 40 psu. Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις, η μέση ταχύτητα του ήχου στο νερό υπολογίζεται σε 1533 m/sec.



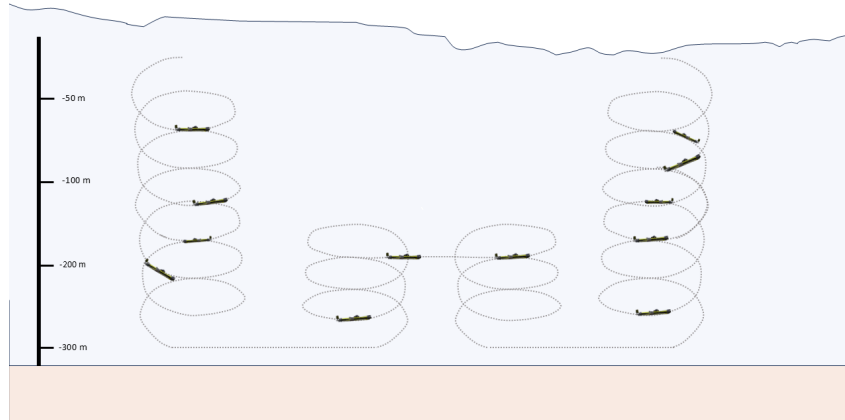
Εικόνα 4.19: Διάγραμμα θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, αλατότητας αλλά και βάθους στη περίπτωση χρήσης σπειροειδούς βύθισης σε βάθος των 400 μέτρων

#### 4.2.5 Συνδυαστική Σπειροειδής Βύθιση-Ανάδυση στα 300 και 150 μέτρα

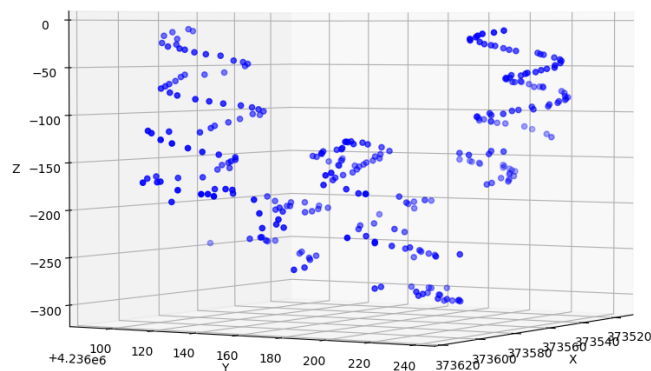
Η τελευταία πειραματική αποστολή, όπως υποδεικνύει και ο τίτλος της, σχετίζεται με μια συνδυαστική σπειροειδή πλοήγηση. Η αποστολή περιλαμβάνει τις εξής φάσεις:

1. **Κατάδυση:** Το όχημα καταδύεται με σπειροειδή μορφή στα 300 μέτρα βάθος
2. **Ανάδυση:** Από τα 300 μέτρα βάθος, αναδύεται μέχρι τα 150 μέτρα ακολουθώντας πάλι σπειροειδή κίνηση
3. **Επανακατάδυση:** Καταδύεται ξανά στα 300 μέτρα με σπειροειδή κίνηση

4. **Τελική Ανάδυση:** Αναδύεται με σπειροειδή κίνηση μέχρι να φτάσει στην ελεύθερη επιφάνεια



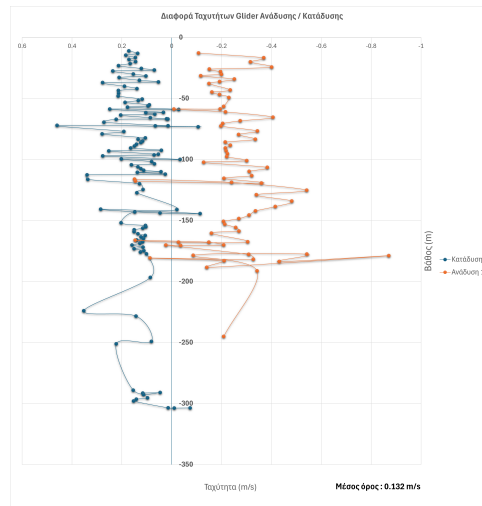
Εικόνα 4.20: Βύθιση στα 300 μέτρα ανάδυση στα 150 μέτρα, βύθιση στα 300 και ανάδυση έως την ελεύθερη επιφάνεια μέσω σπειροειδούς μορφής



Εικόνα 4.21: Εικόνα Τρισδιάστατης Αναπαράστασης πορείας υποβρύχιου ρομποτικού συστήματος σε βάθος 300 μέτρων

Συγκεκριμένα, στο πρώτο τμήμα της αποστολής αποτυπώνεται η κάθοδος του οχήματος μέσω ελικοειδούς μορφής ακτίνας 11.49 μέτρα, φτάνει μέχρι τα 303,765 (3,765 μέτρα βαθύτερα από το ονομαστικό βάθος) με μια ακτίνα κατάδυσης 15.17 μέτρα, αναδύεται μέχρι τα 129,28 μέτρα (21 μέτρα ρηχότερα από το επιθυμητό) με μια ακτίνα πορείας 9,88 μέτρα, όπου επανακαταδύεται μέχρι τα 263,85 μέτρα (36,15 μέτρα ρηχότερα από το επιθυμητό) και τελικά επανέρχεται στην επιφάνεια με μια ελικοειδή μορφή ακτίνας 16,96 μέτρα. Οι αντίστοιχες ταχύτητες για κάθε ένα υπομήμα της αποστολής ήσαν:

1. **Κατάδυση:** 0.13 m/sec
2. **Ανάδυση:** 0.21 m/sec
3. **Επανακατάδυση:** 0.12 m/sec
4. **Τελική Ανάδυση:** 0.20 m/sec



Εικόνα 4.22: Διάγραμμα Ταχυτήτων Βύθισης-Ανάδυσης σε πείραμα σπειροειδούς μορφής με μέγιστο βάθος 300 μέτρα

Η διάρκεια της αποστολής στο σύνολό της ήταν 95 λεπτά. Εξετάζοντας τα περιβαλλοντικά δεδομένα της αποστολής (Εικόνα 4.23), παρατηρείται ότι οι καταγραφές του βάθους από το glider, απεικονισμένες με κίτρινη γραμμή, αποκαλύπτουν μια γραμμική πορεία του ρομποτικού συστήματος. Στην πρώτη κατάδυση, το glider φτάνει σε βάθος μεγαλύτερο των 300 μέτρων, αποτέλεσμα που συμφωνεί με τις μετρήσεις του USBL. Στη συνέχεια, ανεβαίνει σε βάθος περίπου 130 μέτρων, και τα δεδομένα αυτά συμβαδίζουν επίσης με τις μετρήσεις του σκάφους. Ακολουθεί μια δεύτερη κατάδυση λίγο πιο βαθιά από τα 300 μέτρα, η οποία φαίνεται να διαφέρει από τα δεδομένα του σκάφους, πιθανότατα λόγω δυσκολιών στην επικοινωνία μεταξύ glider και σκάφους. Τέλος, το glider αναδύεται στην επιφάνεια. Μελετώντας το διάγραμμα της θερμοκρασίας, το οποίο απεικονίζεται με κόκκινη γραμμή, οι τιμές κυμαίνονται από 30°C έως 15°C, με την ελάχιστη τιμή των 15°C να διατηρείται σταθερή για το μεγαλύτερο μέρος της αποστολής από βάθος 150 μέτρων και κάτω. Η αγωγιμότητα κυμαίνεται μεταξύ 60 και 42 mS/cm, με την κατώτερη τιμή της να διατηρείται σταθερή από βάθος 75 μέτρων. Τέλος, η αλατότητα παρέμεινε σταθερή περίπου στα 40 psu καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και τα αντίστοιχα διαγράμματα, υπολογίστηκε η μέση ταχύτητα του ήχου στο νερό, η οποία ήταν 1532 m/s.

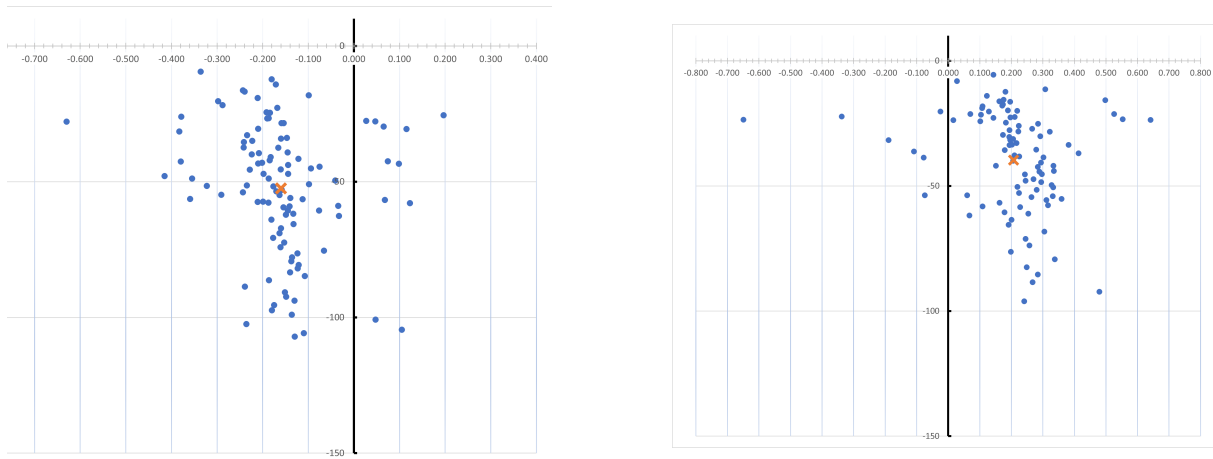
#### 4.2.6 Γενική Ανασκόπηση και Σχολιασμός

Στην παρούσα υποενότητα, παρουσιάζονται ποιοτικά στοιχεία τόσο περιβαλλοντικά όσο και τεχνικά τα οποία προέκυψαν από την αναλυτική μελέτη της κάθε μιας αποστολής ξεχωριστά. Επίσης, παρουσιάζονται και κάποιες αντιπροσωπευτικές εικόνες από τις εργασίες πεδίου. Αρχικά, γίνεται μελέτη της μέσης ταχύτητας βύθισης και κατάδυσης του ρομποτικού συστήματος στη περίπτωση της γραμμικής πορείας (Εικόνα 4.24). Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατίθενται και για τη περίπτωση της σπειροειδούς κίνησης (Εικόνα 4.25). Σε κάθε μια από τις παρακάτω Εικόνες απεικονίζονται όλες οι τιμές ταχυτήτων για κάθε μια περίπτωση πορείας (αρνητικές τιμές υποδεικνύουν κατάδυση, θετικές ανάδυση) με μπλε χρώμα οι μετρήσεις και με πορτοκαλί ο αντίστοιχος μέσος όρος. Από το σύνολο των αποστολών, η μέση τιμή ταχύτητας κατάδυσης στη περίπτωση της γραμμικής μορφής διαμορφώθηκε 0,16 m/sec και αντίστοιχα για την σπειροειδή 0,13 m/sec. Αντίστοιχα, για τη περίπτωση της ανάδυσης στη γραμμική και σπειροειδής μορφή υπολογίστηκε ενιαία τιμή 0,21 m/sec. Συμπερασματικά, η ταχύτητα του οχήματος κατά

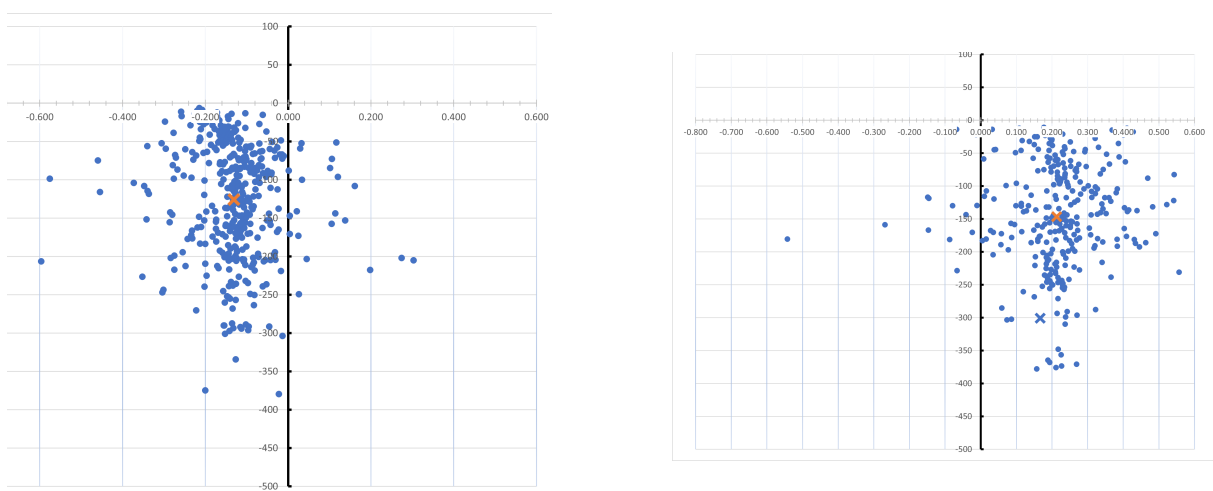


Εικόνα 4.23: Διάγραμμα θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, αλατότητας αλλά και βάθους στη περίπτωση χρήσης ελικοειδούς βύθισης σε βάθος των 300 μέτρων

την ανάδυσή του παρουσιάζει μια αύξηση της τάξης του 30% σε σχέση με τη κατάδυσή του.



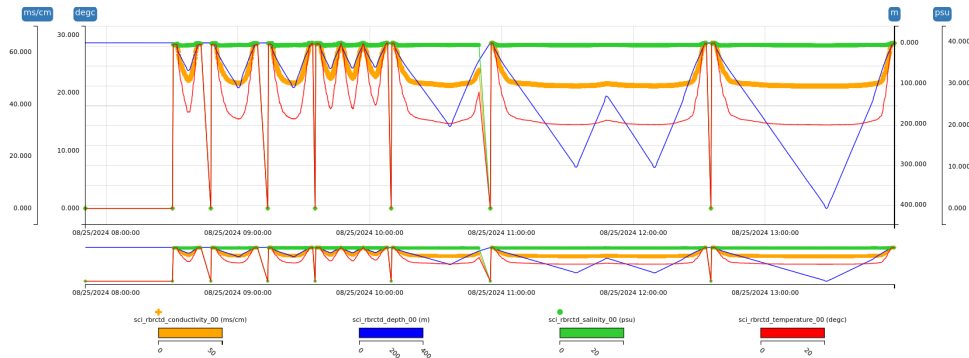
Εικόνα 4.24: Συνολικό Διάγραμμα Απόδοσης Ταχυτήτων Γραμμικής Ανάδυσης και Βύθισης



Εικόνα 4.25: Συνολικό Διάγραμμα Απόδοσης Ταχυτήτων Σπειροειδούς Ανάδυσης και Βύθισης

Το δεύτερο στάδιο της ενότητας σχετίζεται με την ανασκόπηση των περιβαλλοντικών στοι-

χείων όπως αυτά αναλύθηκαν ξεχωριστά παραπάνω. Συγκεκριμένα η Εικόνα 4.26 παρουσιάζει όλες τις περιβαλλοντικές μετρήσεις. Αναλυτικά, με μπλε χρώμα αποτυπώνονται οι τιμές βάθους, διακριτοποιώντας τη κάθε μια αποστολή ξεχωριστά, με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι τιμές της θερμοκρασίας όπου παρατηρήθηκε μια ελάχιστη τιμή κοντά στους 15°C σε βάθος 200 μέτρων, με πορτοκαλί χρώμα η αγωγιμότητα η οποία παρουσιάζει και αυτή μια σταθερή ελάχιστη τιμή περίπου στα 42 mS/cm. Τέλος, η αλατότητα, απεικονιζόμενη με πράσινο χρώμα κρατά μια σταθερή τιμή στα 40 psu σε όλες τις αποστολές. Απο τα παραπάνω αποτελέσματα είναι δυνατός ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας του ήχου στο νερό περί τα 1531 m/sec.



Εικόνα 4.26: Γενικό Διάγραμμα απόδοσης θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, αλατότητας αλλά και βάθους για όλες τις αποστολές που εκτελέστηκαν



Εικόνα 4.27: Στιγμιότυπα από τη διαδικασία διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας.

## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα & Προτάσεις

Από την ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτουν σαφή συμπεράσματα σχετικά με τις δυνατότητες υποθαλάσσιου εντοπισμού μέσω της τεχνολογίας USBL και τη συνδυαστική χρήση της με άλλες τεχνολογίες, όπως ο Δορυφορικός Εντοπισμός. Συγκεκριμένα, όσον αφορά το πρώτο σκέλος της εργασίας, πραγματοποιήθηκε παραγωγή τρισδιάστατων αποτυπώσεων τόσο στο σκάφος αποστολής όσο και στο υποβρύχιο ρομποτικό σύστημα τύπου Glider. Για το σκοπό αυτό, εφαρμόστηκαν διάφορες μεθοδολογίες και τεχνολογίες, όπως ο Επίγειος Σαρωτής (Laser Scanner) και ο Βιομηχανικός Γεωδαιτικός Σταθμός (Total Station), με στόχο τον προσδιορισμό της σχετικής θέσης μεταξύ των συστημάτων USBL και GNSS που χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό του στόχου. Αξιοποιώντας τις μετρήσεις αυτές, παρουσιάστηκε ο εξοπλισμός USBL και η συνδυασμένη χρήση του με έναν σύγχρονο δορυφορικό δέκτη. Συγκεκριμένα, ο δορυφορικός δέκτης παρείχε μετρήσεις και προσδιορισμό διορθωμένων συντεταγμένων μέσω RTK σε πραγματικό χρόνο (ΕΓΣΑ87), ενώ το σύστημα USBL προσδιόρισε τις σχετικές συντεταγμένες μεταξύ του πομπού των ακουστικών παλμών και του υποβρύχιου ρομποτικού συστήματος (USBL-OEM). Συνδυάζοντας αυτές τις δύο τεχνολογίες με αναφορά στη χρονική αφετηρία Unix Epoch Time (UTC), επιτεύχθηκε η πραγματική και σε πραγματικό χρόνο οπτικοποίηση των τρισδιάστατων συντεταγμένων του υποβρύχιου ρομποτικού συστήματος για κάθε αποστολή. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις καταγραφές που διενήργησε το Glider μέσω μετρητικού εξοπλισμού CDT. Έτσι, συγκρίθηκαν ποιοτικά οι διαφορές στα βάθη μεταξύ του πιεζομετρικού αισθητήρα και της τεχνολογίας USBL, ενώ αξιολογήθηκαν και οι περιβαλλοντικές παράμετροι, όπως η θερμοκρασία, η αλατότητα και η αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού, εξετάζοντας πώς αυτές οι τιμές διαφοροποιούνται ανά αποστολή και βάθος. Πραγματοποιήθηκαν πέντε αποστολές στην περιοχή του Κορινθιακού (Αντίκυρα), οι οποίες διαφοροποιούνταν σε τρόπο βύθισης-ανάδυσης του οχήματος, στον αριθμό των αποστολών και στο μέγιστο βάθος, το οποίο ορίστηκε στα 400 μέτρα.

Μέσω των παραπάνω παρατηρήθηκαν τόσο διαφοροποιήσεις - συγκρίσεις μεταξύ της πλοήγησης του σκαφους αλλά και αυτές που μετρήθηκαν από το σύστημα USBL. Ως προς τις περιβαλλοντικές μετρήσεις παρατηρήθηκαν γενικά σταθερές τιμές στην αλατότητα περί τα 40 psu, αντιστοίχα και με την αγωγιμότητα περί τα 42 mS/cm. Κυρίως διαφοροποίηση παρατηρήθηκε στον παράγοντα της θερμοκρασίας ως προς το βάθος και συγκεκριμένα υπήρχε διακύμανση αυτής από 30 °C έως τη χαμηλότερη 15 °C.

Βάσει της μελέτης και αξιολόγησης των παραπάνω αποτελεσμάτων, προτείνονται τα εξής για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων: Αρχικά, θα ήταν χρήσιμο να πραγματοποιηθούν ακριβείς μετρήσεις της ταχύτητας του ήχου στο νερό με τη χρήση τεχνολογίας Sound Velocity Profiler, σε τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να συγκριθούν οι τιμές που εξάγονται από το Glider. Ο τελικός

στόχος θα είναι ο υπολογισμός της τροχιάς αξιοποιώντας αυτές τις μετρήσεις. Επιπλέον, προτείνεται η ανάπτυξη μιας διαδικασίας επαναυπολογισμού των συντεταγμένων, χρησιμοποιώντας τις γωνίες (roll, pitch & yaw) με αφετηρία το κέντρο βάρους του σκάφους, ώστε οι υπολογισμοί να προσεγγίζουν την πραγματικότητα. Τέλος, το υποβρύχιο ρομποτικό σύστημα θα μπορούσε, κατά τη διάρκεια των αποστολών του, να τροποποιήσει την πορεία του. Μέσω της ίδιας τεχνολογίας, μπορεί να προσδιοριστεί αυτή η τροποποίηση σε πραγματικό χρόνο και να μελετηθεί η σύγκρισή της με τη θεωρητική πορεία ([24]).



# Βιβλιογραφία

- [1] Bagus Septyanto, Dian Nurdiana, Sitti Ahmiatri Saptari, *Ultra Short Baseline (USBL) Calibration for Positioning of Underwater Objects*, *Al-Fiziya: Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation and Theoretical Physics*, vol. 2, pp. 73--85, Dec. 2019. doi: 10.15408/fiziya.v2i2.12524.
- [2] *Underwater Acoustic Positioning Systems*, author=Milne, P.H., isbn=9780872010123, lccn=83080348, url=https://books.google.gr/books?id=nf9TAAAAMAAJ, year=1983, publisher=Gulf Publishing Company
- [3] L. M. Brekhovskikh and Yu. P. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, 8th ed., Berlin, Heidelberg: Springer, 1982.
- [4] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., New York: McGraw-Hill, 1983.
- [5] William M. Carey and Richard B. Evans, *Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources*, New York: Springer, 2011.
- [6] D. Erdenebat, D. Waldmann, and F. Teferle, "Numerical investigation of bridges with the aim of condition assessment in applying the Deformation Area Difference method (DAD-method) and selecting appropriate measurement techniques," in *Proceedings of the 6th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Oct. 2016, p. 222, doi: 10.1201/9781315375175-171.
- [7] Slocum G2 Glider. *Operators Training Guide*. Teledyne Webb Research, 2023.
- [8] Slocum G3 Glider. *Operators Manual*. Teledyne Webb Research, 2023.
- [9] Jones, Clayton, Allsup, Ben, and DeCollibus, Christopher. "Slocum glider: Expanding our understanding of the oceans." In *2014 Oceans - St. John's*, pp. 1-10, 2014. doi:10.1109/OCEANS.2014.7003260.
- [10] Jones, Clayton, Webb, Doug, Kohut, Josh, Glenn, Scott, Kerfoot, John, Schofield, Oscar, Roarty, Hugh, Aragon, David, Haldeman, Chip, Graver, Josh, and Yan, Arthur. "Slocum Gliders, Advancing Oceanography." 2007.
- [11] Batista, P., Cabecinhas, D., Sebastião, L., Pascoal, A., Mertzimekis, T., Kebkal, K., Mallios, A., Karantzalos, K., Nikolopoulos, K., Escartín, J., & Maigne, L. "The EU project RAMONES – continuous, long-term autonomous monitoring of underwater radioactivity." In *Proceedings of the 7th Jornadas de Estudos Hidrográficos*, 2022.
- [12] Maurya, P., Morishita, H., Pascoal, A., & Aguiar, A. P. "A path following controller for marine vehicles using a two scale inner-outer loop approach." *Sensors*, vol. 22, no. 11, pp. 4293, 2022.

- [13] EvoLogics, *Underwater Acoustic Positioning System User Guide*, EvoLogics GmbH, Berlin, Germany.
- [14] Forrest L. Anderson, *Huygens' Principle geometric derivation and elimination of the wake and backward wave*, Scientific Reports, vol. 11, no. 1, pp. 20257, Oct. 2021. doi: 10.1038/s41598-021-99049-7.
- [15] Jensen, Finn B. and Kuperman, William A. and Porter, Michael B. and Schmidt, Henrik, *Computational Ocean Acoustics*, 2nd ed., Springer Publishing Company, Incorporated, 2011.
- [16] John L. Butler , Charles H. Sherman, *Transducers and Arrays for Underwater Sound*, Latest ed., Springer Publishing Company, Incorporated, 2016.
- [17] Philip M. Morse; Herman Feshbach; E. L. Hill, *Am. J. Phys.* 22, 410–413 (1954)
- [18] Nasreen & Ijmtst, E. Ocean Salinity. *International Journal For Modern Trends In Science And Technology*. 8 pp. 296-302 (2022,1)
- [19] Tyler, R., Boyer, T., Minami, T., Zweng, M. & Reagan, J. Electrical conductivity of the global ocean. *Earth, Planets And Space*. 69 (2017,12)
- [20] C. S. Clay and H. Medwin, *Acoustical Oceanography: Principles and Applications*, New York: John Wiley & Sons, 1977, xviii, 544 pp. (Ocean Engineering: A Wiley Series.) *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, vol. 58, no. 2, pp. 543, 1978. doi:10.1017/S0025315400028228.
- [21] Bao, J., Li, D., Qiao, X. & Rauschenbach, T. Integrated navigation for autonomous underwater vehicles in aquaculture: A review. *Information Processing In Agriculture*. 7, 139-151 (2020), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221431731930071X>
- [22] Kebkal, K. & Mashoshin, A. AUV acoustic positioning methods. *Gyroscopy And Navigation*. 8, 80-89 (2017,1,1), <https://doi.org/10.1134/S2075108717010059>
- [23] Jinwu, T., Xiaosu, X., Zhang, T., Zhang, L. & Yao, L. Study on Installation Error Analysis and Calibration of Acoustic Transceiver Array Based on SINS/USBL Integrated System. *IEEE Access*. PP pp. 1-1 (2018,10)
- [24] Kussat, N., Chadwell, C. & Zimmerman, R. Absolute Positioning of an Autonomous Underwater Vehicle Using GPS and Acoustic Measurements. *Oceanic Engineering, IEEE Journal Of*. 30 pp. 153 - 164 (2005,2)