



Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Διαχείριση και Τεχνολογία Ποιότητας

Διπλωματική Εργασία

Αδρανειακό Σύστημα Ναυτιλίας Υποβρυχίου Οχήματος. Μελέτη
απόδοσης με χρήση της μεθοδολογίας Taguchi

Φωκίων Μαϊράγκας

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Νικόλαος Βαξεβανίδης

Πάτρα, Μάιος 2024

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

Αδρανειακό Σύστημα Ναυτιλίας Υποβρυχίου Οχήματος. Μελέτη
απόδοσης με χρήση της μεθοδολογίας Taguchi

Φωκίων Μαϊράγκας

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Νικόλαος Βαξεβανίδης

Καθηγητής, Ανώτατη Σχολή
Παιδαγωγικής & Τεχνολογικής
Εκπαίδευσης (ΑΣΠΑΙΤΕ)

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Γεώργιος Μπεσέρης

Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Πάτρα, Μάιος 2024

Στην Ειρήνη, την Άννα και τη Ζέτα

Περίληψη

Η ναυτιλία αποτέλεσε καίριο προβληματισμό του ανθρώπου, από την πρώτη στιγμή που αποφάσισε να απομακρυνθεί από τη στεριά και να κινηθεί στις ανοιχτές θάλασσες. Η χρήση αρχικά των ουράνιων αντικειμένων και εν συνεχεία της μαγνητικής πυξίδας, αποτέλεσαν για αιώνες το μόνο μέσο προσανατολισμού απουσία της ξηράς, ώσπου οι τεχνολογικές ανακαλύψεις του προηγούμενου αιώνα παρέδωσαν επιτέλους, τη σκυτάλη στη γυροσκοπική πυξίδα και στα συστήματα δορυφορικής ναυτιλίας. Αν και πλέον η χρήση των εν λόγω συστημάτων έχει εν πολλοίς καταστήσει το θέμα της ναυτιλίας στη θάλασσα ως κάτι ασήμαντο, εν τούτοις η πλεύση κάτω από την επιφάνεια της θαλάσσης παραμένει ένα δισεπίλυτο πρόβλημα. Τα υποβρύχια οχήματα, επανδρωμένα ή μη, βασίζονται ακόμη για τη ναυτιλία τους κάτω από το νερό στην τεχνική της αναμέτρησης και βασικό μέσο για την εκτέλεση αυτής είναι το αδρανειακό σύστημα ναυτιλίας. Τα συστήματα αυτά είναι εφοδιασμένα με γυροσκόπια laser και επιταχυνσιόμετρα και υπολογίζουν συνεχώς τη θέση και τα κινηματικά του στοιχεία του σκάφους, πλην όμως εμφανίζουν εγγενή σφάλματα, τα οποία αυξάνονται όσο παρατείνεται η παραμονή του σκάφους κάτω από την επιφάνεια και η συνέχιση της πλεύσης με αναμέτρηση. Το εν λόγω θέμα απασχολεί την επιστημονική κοινότητα και έχουν προταθεί λύσεις, οι οποίες όμως είτε δεν ικανοποιούν τις ad hoc ανάγκες του σκάφους επί του πεδίου, είτε βασίζονται σε ενεργητικά μέσα προδίδοντας όμως έτσι την παρουσία του. Στην παρούσα εργασία και στο πλαίσιο διερεύνησης της δυνατότητας μείωσης του ωριαίου σφάλματος ενός υποβρυχίου, αποκλειστικά με ιδία παθητικά μέσα, εφαρμόζεται η μεθοδολογία Taguchi σε πειραματικά δεδομένα πεδίου και εξετάζονται πέντε παράγοντες οι οποίοι είναι εφικτό να μεταβληθούν είτε άμεσα είτε έμμεσα με χρήση προληπτικών μέτρων. Τα αποτελέσματα του πειραματισμού καταδεικνύουν την ύπαρξη στατιστικά σημαντικών ενδείξεων σε τρεις από αυτούς, με την ταχύτητα πλεύσης, το χρόνο μεταξύ διαδοχικών στιγμάτων και την ορθή συντήρηση του δρομομέτρου του σκάφους να αποτελούν παράγοντες των οποίων η κατάλληλη επιλογή των επιπέδων τους ικανοποιεί αφενός μεν τις απαιτήσεις και αφετέρου δε επιτυγχάνει μείωση της ωριαίας έκπτωσης της θέσεως του αδρανειακού συστήματος, σε τιμές αντίστοιχες των ονομαστικών.

Λέξεις – Κλειδιά

Υποβρύχιο, Αδρανειακή Ναυτιλία, Γυροσκόπιο Laser, Taguchi

Underwater Vehicle Inertial Navigation System. Performance study using the Taguchi Method

Fokion Mairagkas

Abstract

Since man decided to move away from land and head out to the open sea, navigation has been one of his main concerns. For centuries the use of celestial objects and the magnetic compass remained the only means available to navigate in the absence of land, until the technological discoveries of the previous century made possible the handover of this task to the gyroscopic compass and the satellite navigation. Although navigation at sea, with the use of these systems, has become something trivial it still remains a problem for the ones that are navigating under the surface of the sea. Underwater vehicles either manned or unmanned in order to navigate underwater are using dead reckoning, based nowadays on inertial navigation systems. These systems, generally equipped with ring laser gyros and accelerometers, are capable of calculating the boat's position and movement but they are also subjected to inherit errors which tend to grow as the vehicle prolongs its underwater run. This matter has been addressed by the scientific community but nevertheless the solutions provided either do not satisfy the ad hoc requirements of the boat or are based on active sensors which are giving away the presence of the boat itself. In the scope of investigating the possibility to decrease the hourly rate of the boat's position error, by using only the boat's own passive means, the Taguchi method has been applied to experimental field data and five factors have been examined based on the ability of the boat to modify them at sea or to take precautionary actions prior to mission start. The experimental results demonstrate the presence of statistical significance indications on three of them, with speed, the time between position fixes and the proper maintenance of the log satisfying the requirements and a proper selection on their levels is able to reduce the hourly error rate of the system, even down to the nominal levels described by the manufacturer.

Keywords

Submarine, Inertial Navigation, Ring Laser Gyro, Taguchi

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract.....	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Σχημάτων	ix
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Συνοτομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Προσδιορισμός του προβλήματος	3
1.2 Σκοπός της Εργασίας.....	4
1.3 Αντικείμενο μελέτης – Πιθανοί περιορισμοί.....	4
1.4 Πεδίο Εφαρμογής – Σημασία Μελέτης	4
1.5 Δομή Εργασίας	5
2. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	7
2.1 Ο προσδιορισμός της θέσεως με την τεχνική της αναμέτρησης	7
2.2 Προσπάθειες για εύρεση λύσης.....	8
2.3 Αδρανειακή Ναυτιλία.....	8
2.3.1 Διαμορφώσεις Συστημάτων	10
2.4 Συστήματα Strapdown και τα Σφάλματά τους.....	12
2.4.1 Διαμορφώσεις Συστημάτων	13
2.4.2 Φαινόμενο Sagnac.....	13
2.4.3 Το γυροσκόπιο laser.....	14
2.4.4 Το επιταχυνσιόμετρο.....	19
2.4.5 Σύνοψη Σφαλμάτων Αισθητήρων IMU	22
2.5 Σφάλματα σε επίπεδο συστήματος.....	22
2.5.1 Προέλευση Σφαλμάτων Συστήματος.....	22
2.6 Η διάδοση των σφαλμάτων στο χρόνο	27
2.6.1 Ταλαντώσεις Schuler	27
2.6.2 Αστάθεια στο Κατακόρυφο.....	29
2.6.3 Επίδραση της δύναμης Coriolis	29
2.6.4 Τα σφάλματα των αισθητήρων	30
2.6.5 Σύνοψη επί των σφαλμάτων	31

2.7	Προτάσεις της επιστημονικής κοινότητας	32
3.	Μεθοδολογία Taguchi.....	35
3.1	Πειραματικός Σχεδιασμός	35
3.2	Η προσέγγιση του Taguchi.....	35
3.3	Η αντίληψη του Taguchi για την ποιότητα	36
3.4	Πειραματικός Σχεδιασμός κατά Taguchi	37
3.4.1	Εκτός Σειράς Έλεγχος Ποιότητας – Στάδια Σχεδίασης	38
3.4.2	Στάδια Έρευνας.....	38
3.4.3	Ορθογώνιες Διατάξεις.....	39
3.4.4	Μέτρα Επίδοσης.....	39
3.4.5	Μετασχηματισμός δεδομένων	40
3.4.6	Βέλτιστη Επιλογή.....	40
4.	Εφαρμογή της μεθοδολογίας Taguchi στο ναυτιλιακό σύστημα υποβρυχίου οχήματος.....	43
4.1	Γενική Περιγραφή του Συστήματος Ναυτιλίας.....	43
4.1.1	Ναυτιλιακοί Αισθητήρες.....	44
4.2	Ορισμός του Προβλήματος	48
4.3	Καθορισμός Παραγόντων Θορύβου και Ελέγχου	49
4.4	Σχεδιασμός – Επιλογή κατάλληλης ορθογώνιας διάταξης.....	50
4.5	Εκτέλεση Πειραμάτων – Συλλογή Δεδομένων	52
4.6	Στατιστική Ανάλυση των δεδομένων	53
4.6.1	Συναρτησιακή σχέση μεταξύ του μέσου και της τυπικής απόκλισης.....	54
4.6.2	Ανάλυση Διασποράς	55
4.6.3	Γραφική Ανάλυση.....	57
4.6.4	Τελική Επιλογή Παραγόντων Ελέγχου.....	58
5.	Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Παραγόντων – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων .60	
5.1	Πείραμα Επιβεβαίωσης	60
5.2	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	60
6.	Συμπεράσματα.....	63
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	65

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Ανωτέρας τάξης μπλοκ διάγραμμα INS τ. strapdown	9
Σχήμα 2-2 Δομή IMU με αντίζυγα	10
Σχήμα 2-3 Αρχή Λειτουργίας Αδρανειακού Συστήματος τ. Gimbaled	11
Σχήμα 2-4 Δομή IMU τύπου Strapdown.....	11
Σχήμα 2-5 Αρχή Λειτουργίας Αδρανειακού Συστήματος τ. Strapdown	12
Σχήμα 2-6 Κατανομή γυροσκοπίων	13
Σχήμα 2-7 Ταυτόχρονη άφιξη των δεσμών στο ίδιο σημείο.....	14
Σχήμα 2-8 Διαφορά στην χρονική άφιξη των δεσμών στο ίδιο σημείο.....	14
Σχήμα 2-9 Συμφασική εμφάνιση συμβολών.....	15
Σχήμα 2-10 Μη Συμφασική εμφάνιση συμβολών	15
Σχήμα 2-11 Αρχή Λειτουργίας Γυροσκοπίου Laser	16
Σχήμα 2-12 Γυροσκοπίου Laser.....	16
Σχήμα 2-13 Περιοχή Συχνοτήτων Lock In	18
Σχήμα 2-14 Ταξινόμηση Επιταχυνσιόμετρων	20
Σχήμα 2-15 Δομή Επιταχυνσιόμετρου.....	20
Σχήμα 2-16 Διασύνδεση INS/GNSS σε μορφή Tightly Coupled	24
Σχήμα 2-17 Διασύνδεση INS/GNSS σε μορφή Loosely Coupled.....	25
Σχήμα 2-18 Απεικόνιση βαρυτομετρικού μοντέλου του γεωειδούς για την Ανατολική Μεσόγειο.....	26
Σχήμα 2-19 Μοντέλο Ταλαντώσεων Schuler	27
Σχήμα 2-20 Τυπικό Σφάλμα Θέσεως (κατά πλάτος) ενός Αδρανειακού Συστήματος	28
Σχήμα 2-21 Τυπικό Σφάλμα Θέσεως (κατά μήκος) ενός Αδρανειακού Συστήματος	30
Σχήμα 2-22 Μέθοδοι προσδιορισμού θέσεως Y/B οχημάτων	33
Σχήμα 2-23 Παθητικές μέθοδοι προσδιορισμού θέσεως Y/B οχημάτων	34
Σχήμα 3-1 Συνάρτηση Απώλειας Taguchi	37
Σχήμα 4-1 Διασυνδέσεις Συστήματος διαχείρισης δεδομένων Y/B	43
Σχήμα 4-2 Τμήματα και Διασυνδέσεις Αδρανειακής Μονάδας	45
Σχήμα 4-3 Διασύνδεση Αισθητήρων GPS με το σύστημα διαχείρισης ναυτιλιακών δεδομένων	48
Σχήμα 4-4 Διάγραμμα Ishikawa για τον καθορισμό των παραγόντων Θορύβου και Ελέγχου	49

Γράφημα 4-1 Γραφική Ανάλυση ΜΣ.....	58
Γράφημα 4-2 Γραφική Ανάλυση ΜΘ.....	58

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1 Σφάλματα Αισθητήρων Αδρανειακής Μονάδας.....	22
Πίνακας 2-2 Διάδοση Σφαλμάτων Αδρανειακής Μονάδας στο χρόνο	29
Πίνακας 4-1 Δείγμα Παραγομένων Στοιχείων από το Εξεταζόμενο Ναυτιλιακό Σύστημα	46
Πίνακας 4-2 Επίπεδα Παραγόντων Ελέγχου	50
Πίνακας 4-3 Επίπεδα Παραγόντων Θορύβου	50
Πίνακας 4-4 Υπολογισμός Βαθμών Ελευθερίας.....	51
Πίνακας 4-5 Ορθογώνια Διάταξη L8	51
Πίνακας 4-6 Πλήρης Παραγοντικός Σχεδιασμός 2^2	51
Πίνακας 4-7 Εξωτερική Διάταξη	52
Πίνακας 4-8 Εσωτερική Διάταξη.....	52
Πίνακας 4-9 Δεδομένα Πειραματισμού	53
Πίνακας 4-10 Δεδομένα Πειραματισμού (μέση τιμή – τυπική απόκλιση)	54
Πίνακας 4-11 Δεδομένα Πειραματισμού ($\log(\text{mean}) - \log(s)$).....	54
Πίνακας 4-12 Ανάλυση Διασποράς Παλινδρόμησης.....	55
Πίνακας 4-13 Μέτρα Επίδοσης.....	55
Πίνακας 4-14 Ανάλυση Διασποράς ΜΣ	56
Πίνακας 4-15 Ανάλυση Διασποράς ΜΘ	57
Πίνακας 5-1 Δεδομένα Πειράματος Επιβεβαίωσης.....	60

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

Υ/Β	Υποβρύχιο
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
CDU	Control and Display Unit
CMS	Combat Management System
DRU	Dynamic Reference Unit
EM Log	Electromagnetic Log
GPS	Global Positioning System
ICU	Integrated Communication Unit
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
NDDC	Navigation Data Distribution Center

1. Εισαγωγή

Από την πρώτη στιγμή που ο άνθρωπος, αποφάσισε να ταξιδέψει στις ανοιχτές θάλασσες έπρεπε να απαντήσει σε δύο βασικά ερωτήματα, τα οποία στη σύγχρονη εποχή θεωρούνται δεδομένα: «που είμαστε» και «που πάμε».

Ήδη από τις αρχές του 20ου αιώνα και την εφαρμογή επί πλοίου, της γυροσκοπικής πυξίδας, η απάντηση επί του δευτέρου ερωτήματος είχε πλέον δοθεί και μάλιστα με πολύ μεγάλη ακρίβεια και σταθερότητα από ότι με τις μέχρι τότε χρησιμοποιούμενες μαγνητικές πυξίδες (Peshekhonov, 2022). Για την απάντηση όμως στο πρώτο ερώτημα και ιδιαίτερα κατά τον πλου στην ανοιχτή θάλασσα ο ναυτίλος έπρεπε ακόμα να βασιστεί σε αρχές και μεθοδολογία η οποία βασιζονταν στην παρατήρηση των ουρανίων σωμάτων. Τελικά, οι τεχνολογικές εξελίξεις του δεύτερου μισού του 20ου αιώνα και ο ανταγωνισμός των δύο υπερδυνάμεων έμελλαν να δώσουν και την οριστική απάντηση (MacKenzie, 1993). Πλέον ακόμα και με τη χρήση μίας φορητής συσκευής, ενός κινητού τηλεφώνου παραδείγματος χάριν είναι εφικτή η εύρεση της θέσεως, με πολύ μεγάλη ακρίβεια επί σχεδόν οποιοδήποτε σημείου του πλανήτη.

Βέβαια η τελευταία φράση αν και περιγράφει τη δυνατότητα που έχουν πλέον όλοι οι ναυτιλόμενοι, εν τούτοις δεν περιλαμβάνει μία μικρή μερίδα ανθρώπων και μηχανών οι οποίοι καλούνται να ταξιδέψουν κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, αρχής γενομένης από την πρώτη μαζική χρήση των υποβρυχίων, στον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο, μέχρι και σήμερα η ναυτιλία κάτω από το νερό βασίζεται στη θεμελιώδη αρχή του 1ου Νόμου του Νεύτωνα (Soloviev, 2021).

Για να γίνει το μέγεθος του προβλήματος πιο κατανοητό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι σε αντίθεση λοιπόν με ένα πλοίο, το υποβρύχιο όχημα (επανδρωμένο ή μη) αντιμετωπίζει περισσότερους ναυτιλιακούς κινδύνους και προβληματισμούς κατά την υποβρύχια πλεύση του, όπως π.χ τη μορφολογία του βυθού και την αποφυγή σύγκρουσης με αυτόν αλλά και την έγκαιρη λήψη της βέλτιστης θέσης για την εκτέλεση της αποστολής του, παρά τα υποθαλάσσια ρεύματα (Fu et al, 2022). Προφανώς δημιουργείται το εύλογο ερώτημα γιατί τότε το υποβρύχιο όχημα δεν φροντίζει να έχει συνεχώς ή αρκετά συχνά επαφή με την επιφάνεια της θάλασσας ώστε να μπορέσει να ανανεώσει τη θέση του, είτε μέσω της στεριάς (προϋποθέτει ότι η ξηρά είναι σε οπτική εμβέλεια ή εμβέλεια ραντάρ) είτε μέσω κάποιου από τα συστήματα δορυφορικής ναυτιλίας.

Η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα είναι ιδιαίτερα απλή. Διότι τα απαιτούμενα συστήματα, είτε δεν είναι πάντα διαθέσιμα (εμπόλεμες συγκρούσεις, πλεύση κάτω από πάγους), είτε επειδή η ακρίβειά τους έχει σκόπιμα μειωθεί σε σημείο που έχουν καταστεί αναξιόπιστα. Παράλληλα, η φύση της αποστολής υποβρυχίων οχημάτων που χρησιμοποιούνται για αμυντικούς σκοπούς, μπορεί πολλές φορές να επιτάσσει την αποφυγή του εντοπισμού τους από τις παρακείμενες εχθρικές δυνάμεις και την αναζήτηση του βέλτιστου βάθους αποκρύψεως από τις συσκευές εντοπισμού του αντιπάλου.

Στη σημερινή εποχή και με σκοπό την εκτέλεση της ναυτιλίας, κάθε υποβρύχιο όχημα είναι εφοδιασμένο με ένα σύστημα αδρανειακής ναυτιλίας (Inertial Navigation System - INS), το οποίο έχει σαν σκοπό το συνεχή υπολογισμό της κίνησης του σκάφους σε τρεις άξονες και εν συνεχεία τον υπολογισμό και την ανανέωση των στοιχείων της θέσεως, της πορείας, της ταχύτητας, της κλίσεως και του εκκρεμούς αυτού (Tal et al, 2017). Τα εν λόγω συστήματα δεν απαιτούν τη χρήση εξωτερικής παρατήρησης (ακτοπλοΐα, αστρονομική ή δορυφορική ναυτιλία) και επιτρέπουν την ασφαλή πλεύση κάτω από την επιφάνεια της θαλάσσης (Anbu & Jayaprasanth, 2019). Παράλληλα, κάνοντας χρήση των δεδομένων της υπολογιζόμενης πορείας και της ταχύτητας του σκάφους (όπως αυτή υπολογίζεται από το δρομόμετρο) επιτρέπουν την εκτίμηση της διεύθυνσης και έντασης των υποθαλάσσιων ρευμάτων (Zang et al, 2020).

Τα αδρανειακά συστήματα ναυτιλίας λόγω της φύσης τους παρουσιάζουν όμως σφάλματα, για τη μείωση των οποίων απαιτείται η χρήση επιπρόσθετων αισθητήρων του σκάφους και οι οποίοι δεν είναι πάντα εφικτό να αξιοποιηθούν (Seo et al, 2022)

Ειδικότερα και όσον αφορά τα υποθαλάσσια εμπόδια λόγω της μορφολογίας του βυθού (ύφαλοι, ανωφέρεια του πυθμένα) όλα τα υποβρύχια οχήματα διαθέτουν συσκευή που ονομάζεται ηχοβολιστικό για μέτρηση του βάθους υπό την τρόπιδα, με χρήση ηχητικών κυμάτων, ενώ τα μεγαλύτερα εξ αυτών συμπεριλαμβανομένων και των επανδρωμένων υποβρυχίων διαθέτουν ενεργητική συσκευή ηχοεντοπισμού (Sonar), με το οποίο μπορούν να εντοπίσουν αντικείμενα και να υπολογίσουν την απόσταση αυτά. Η χρήση όμως αυτών των ενεργητικών συστημάτων αντίκειται στο πλεονέκτημα που έχει η χρήση του υποβρυχίου, την αφάνεια, καθώς προδίδουν σχεδόν άμεσα την παρουσία του σκάφους στον αντίπαλο. Ο χειριστής του υποβρυχίου οχήματος ή ο ναυτίλος του υποβρυχίου θα πρέπει σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις να αρκестεί στην αναμέτρηση του αδρανειακού

συστήματος ναυτιλίας και στο παθητικό sonar το οποίο αποτελεί και την κύρια συσκευή εντοπισμού.

Ουσιαστικά σε περιβάλλον απειλής τόσο τα επανδρωμένα όσο και τα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα κινούνται σε βάθος εκτελώντας αναμέτρηση της θέσεως τους, ακρωόμενα ήχους δίχως να μπορούν να απαντήσουν με βεβαιότητα στα δύο βασικά ερωτήματα της ναυτιλίας.

1.1 Προσδιορισμός του προβλήματος

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της τεχνολογίας των μη επανδρωμένων υποβρυχίων σκαφών για εμπορικούς, επιστημονικούς και για στρατιωτικούς σκοπούς, ήρθε να συνδράμει τα όσα είχαν ήδη επιτευχθεί στον τομέα της υποβρυχίας ναυτιλίας, ειδικά λόγω των απαιτήσεων των πυρηνικών υποβρυχίων.

Η εξέλιξη των συστημάτων αδρανειακής ναυτιλίας προσέφερε ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του '70, συστήματα πολύ υψηλής ακρίβειας. Τα συστήματα αυτά αποτελούσαν τμήματα ενός μεγαλύτερου συνόλου συστημάτων, τα οποία κάνοντας σύνθεση πληροφοριών από το ηλεκτρομαγνητικό δρομόμετρο, το δρομόμετρο Doppler, τα βαθύμετρα και το μοντέλο κίνησης του σκάφους υποβοηθούσαν το σύστημα αδρανειακής ναυτιλίας, επιτυγχάνοντας ακρίβεια θέσεως τουλάχιστον της τάξης του 1 nm το εικοσιτετράωρο (King, 1998). Αξίζει να σημειωθεί ότι η προαναφερθείσες επιδόσεις είναι θεωρητικές και στην πράξη επιτυγχάνονται υπό ελεγχόμενες συνθήκες και προϋποθέσεις. Στην πραγματικότητα το σφάλμα θέσεως μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερο.

Σταδιακά η επιστημονική κοινότητα εργαζόμενη πάνω στον τομέα της βελτίωσης της ακρίβειας θέσεως κάτω από το νερό, έχει προβεί στην περαιτέρω βελτίωση των αισθητηρίων του αδρανειακών συστημάτων και έχει προτείνει επιπρόσθετους μηχανισμούς, οι οποίοι με τη σειρά τους έχουν την ικανότητα να μειώσουν τα συσσωρευόμενα σφάλματα θέσεως από την πολύωρη ή πολυήμερη παραμονή ενός υποβρυχίου οχήματος σε βάθος (Paturel et al, 2014).

Από την άλλη, είτε για καθαρά οικονομικούς λόγους είτε για λόγους πολυπλοκότητας των συστημάτων, η χρήση των προτεινόμενων τεχνικών ή η αντικατάσταση των συστημάτων τους με νεότερης γενεάς και υψηλότερης ακρίβειας, συνήθως αποτελεί για ένα υποβρύχιο αντικείμενο ενός προγράμματος εκσυγχρονισμού μέσης ζωής κάτι το οποίο εκτελείται εν

γένει κάθε 20 με 25 έτη. Έτσι ο χειριστής ή εν προκειμένω ο ναυτίλος του υποβρυχίου θέτει πάντα το ακόλουθο πολύ συγκεκριμένο ερώτημα.

Εφόσον το υποβρύχιο επιχειρεί μόνο του στην ανοιχτή θάλασσα δίχως τη δυνατότητα ανανέωσης της θέσεως του για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, τότε υπάρχουν άραγε παράγοντες τους οποίους είναι εφικτό να μεταβάλλουμε με ίδια μέσα ώστε να βελτιώσουμε την απόδοση του ναυτιλιακού συστήματος και να παρατείνουμε την αφανή πλεύση του σκάφους;

1.2 Σκοπός της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πρωτότυπη μελέτη και ο προσδιορισμός των παραγόντων, που θα μπορούσαν να τροποποιηθούν με παθητικά μέσα, είτε άμεσα στο πεδίο είτε έμμεσα με προληπτικές ενέργειες, μεταβάλλοντας έτσι την επίδοση ενός ναυτιλιακού συστήματος υποβρυχίου οχήματος και στη συνέχεια να προταθεί ο βέλτιστος συνδυασμός αυτών, ώστε να παραταθεί η ασφαλής παραμονή του σκάφους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

1.3 Αντικείμενο μελέτης – Πιθανοί περιορισμοί

Όσον αφορά το εξεταζόμενο αντικείμενο η παρούσα εργασία θα αξιοποιήσει δεδομένα πεδίου, τα οποία συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια μίας περιόδου διάρκειας τεσσάρων ετών στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου και τα οποία προέρχονται από το ναυτιλιακό σύστημα ενός σύγχρονου συμβατικού υποβρυχίου εφοδιασμένο με γυροσκόπια τύπου RLSG.

Επισημαίνεται ότι, η χρήση του εν λόγω συστήματος και τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν αν και δεν περιορίζονται αποκλειστικά στο συγκεκριμένο φορέα, εν τούτοις υπόκεινται στους περιορισμούς ακρίβειας που θέτει το ευρύτερο πλαίσιο χρήσης του βασικότερου αισθητήρα του συστήματος, το γυροσκόπιο laser.

1.4 Πεδίο Εφαρμογής – Σημασία Μελέτης

Η μέχρι τούδε διαθέσιμη βιβλιογραφία αν και πλέον είναι εφοδιασμένη με προτάσεις για νέες μεθόδους για τη βελτίωση της ακρίβειας θέσεως, όπως των Rogobete et al, (2018) ή

του Fu et al, (2022), εντούτοις εστιάζεται κυρίως σε μη επανδρωμένα οχήματα, προτείνοντας και περιγράφοντας νέες τεχνικές ή συστήματα με τα οποία δεν είναι απαραίτητο ότι είναι εφοδιασμένο ένα υποβρύχιο, όπως για παράδειγμα προτείνει ο Prieto, (2022). Αντίστοιχα η περίπτωση των Liu & Zhuang (2004), η οποία πραγματεύεται τη βελτίωση της επίδοσης του ναυτιλιακού συστήματος του υποβρυχίου δεν περιλαμβάνει δεδομένα πεδίου.

Υπογραμμίζεται επίσης το γεγονός ότι, η χρήση των δεδομένων στην παρούσα εργασία, από το ναυτιλιακό σύστημα ενός υποβρυχίου σε καμία περίπτωση δεν αποκλείει την εφαρμογή των αποτελεσμάτων της σε μη επανδρωμένα οχήματα, αφού το εξεταζόμενο σύστημα αποτελεί υπερσύνολο του αντίστοιχου συστήματος ενός AUV, μιας και διαθέτει όλα τα βοηθήματα που απαντώνται σε ένα μη επανδρωμένο υποβρύχιο όχημα. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι ο εξοπλισμός ενός υποβρυχίου αναμένεται να είναι τάξη μεγέθους, καλύτερος αλλά και ακριβότερος, έναντι του εξοπλισμού ενός AUV.

Έτσι η παρούσα φιλοδοξεί αφενός στην παροχή απαντήσεων στην πάγια απαίτηση του τελικού χρήστη αλλά και να εντοπίσει πιθανούς παράγοντες που δεν έχουν ληφθεί υπόψη σε επίπεδο σχεδίασης αποστολής πλην όμως επιβάλλουν περιορισμούς και μείωση των αναμενόμενων επιδόσεων στο πεδίο.

1.5 Δομή Εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια από τα οποία το πρώτο περιλαμβάνει τα εισαγωγικά στοιχεία με τον προσδιορισμό του προβλήματος, τον σκοπό και το πεδίο εφαρμογής της εργασίας, το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση με λεπτομερή ανάλυση της δομής και των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση ενός αδρανειακού συστήματος καθώς και τις προσεγγίσεις που έχουν προταθεί μέχρι τούδε από την επιστημονική κοινότητα για τη βελτίωση των επιδόσεων των συστημάτων ενώ στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία Taguchi. Στη συνέχεια στο τέταρτο κεφάλαιο ακολουθεί η εφαρμογή της μεθοδολογίας με μία σύντομη περιγραφή του υπό εξέταση συστήματος, την εκτέλεση του πειραματισμού και εξαγωγή των αποτελεσμάτων, τα οποία με τη σειρά τους σχολιάζονται στο πέμπτο κεφάλαιο σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα από το πείραμα επιβεβαίωσης. Τα συμπεράσματα

παρατίθενται στο έκτο κεφάλαιο της εργασίας, στο οποίο προτείνεται και αντικείμενο μελλοντικής έρευνας συναφώς των υφιστάμενων τεχνολογικών εξελίξεων. Η εργασία ολοκληρώνεται με το έβδομο κεφάλαιο το οποίο περιέχει τις βιβλιογραφικές αναφορές οι οποίες αξιοποιήθηκαν για τη συγγραφή της.

2. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

2.1 Ο προσδιορισμός της θέσεως με την τεχνική της αναμέτρησης

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, από τη στιγμή που ο άνθρωπος με τη χρήση των πλοίων απομακρύνθηκε από τη στεριά, έπρεπε να μπορέσει να προσανατολιστεί στο χώρο και να μπορέσει να απαντήσει στα ερωτήματα του που βρίσκεται και τι πορεία πρέπει να ακολουθήσει για να πάει εκεί που επιθυμεί.

Στην πράξη ο ναυτικός, όπως αναφέρει ο Smith (2021), ακολουθούσε την μέθοδο της αναμέτρησης (Dead Reckoning). Έτσι με σημείο αναφοράς το σημείο από όπου ξεκίνησε από τη στεριά, εκτιμούσε, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, την παρούσα θέση του με βάση την πορεία και την ταχύτητα που πίστευε ότι είχε. Βέβαια αμφότερα τα μεγέθη περιείχαν μεγάλες ανακρίβειες. Η πορεία αρχικά εξάγονταν με βάση τον ήλιο ή τους αστερισμούς τη νύχτα (π.χ τρίγωνο των ναυτιλομένων) και αργότερα με την πυξίδα μαγνητική ή γυροσκοπική ενώ αντίστοιχα η ταχύτητα μπορούσε να μετρηθεί με βάση διάφορες τεχνικές, με την πλέον πρόσφατη το δρομόμετρο ηλεκτρομαγνητικό ή Doppler (Zang, et al, 2020).

Παράλληλα, πάλι βασιζόμενος στην παρατήρηση της θέσης των ουρανίων σωμάτων, είχε τη δυνατότητα επιβεβαίωσης της θέσεως του, με μία σχετικά ικανοποιητική ακρίβεια (περί το 1 ναυτικό μίλι στην καλύτερη περίπτωση). Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι η εν λόγω επίδοση ήταν εφικτή μόνο υπό προϋποθέσεις (καθαρός ουρανός, ικανοποιητική αντίθεση ορίζοντα) ενώ απαιτούνταν ιδιαίτερα ακριβός και εξειδικευμένος εξοπλισμός όπως ο εξάντας και το χρονόμετρο ακριβείας (Smith, 2021).

Παρόλα αυτά ακόμη και μέχρι σήμερα που πλέον είναι γνωστή η πορεία του σκάφους ως προς τον αληθή Βορρά αλλά και η ταχύτητα μέσα στο νερό, υπάρχουν ακόμα σφάλματα που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς της αναμέτρησης όπως τα σφάλματα των αισθητήρων μέτρησης, οι παροιακίσεις του πηδαλιούχου αλλά και η επίδραση του ανέμου και των θαλασσίων ρευμάτων.

2.2 Προσπάθειες για εύρεση λύσης

Η αναζήτηση για βελτίωση της ναυτιλίας, με χρήση της αδρανειακής ναυτιλίας¹, είχε προταθεί το 1923 από τον Γερμανό Schuler (Grewal et al, 2007) ενώ το πρώτο σύστημα βασισμένο στην μέτρηση των εξωτερικών επιταχύνσεων προτάθηκε από τον Boykow, το 1938, με την πρώτη επιχειρησιακή χρήση κάποιου αδρανειακού συστήματος έστω και σε μία πρωτόγονη μορφή να εμφανίζεται στους πύραυλους V-2 προς τα τέλη του Β' ΠΠ (Webster & Halit, 2014). Το θέμα όπως ήταν αναμενόμενο συνέχισε να απασχολεί την επιστημονική κοινότητα και εστιάστηκε σε τεχνικές απευθείας μέτρησης των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται στο σκάφος. Έτσι, μετά την επιβολή διορθώσεων λόγω της επίδρασης της βαρύτητας και της περιστροφής της γης (δύναμη Coriolis), οι μετρήσεις ολοκληρώνονταν δις στον χρόνο για να υπολογιστεί τελικά η παρούσα θέση του σκάφους. Με τον τρόπο αυτό γεννήθηκε το πρώτο «σύγχρονο» αυτόνομο αδρανειακό σύστημα ναυτιλίας (το XN-1) το οποίο σχεδιάστηκε το 1955 για την πλοήγηση αεροσκαφών (Webster & Halit, 2014).

2.3 Αδρανειακή Ναυτιλία

Η αδρανειακή ναυτιλία, σύμφωνα με τον Solonvien (2021), είναι μία αυτοτελής μέθοδος ναυτιλίας η οποία βασίζεται στους δύο πρώτους νόμους του Νεύτωνα.

Πολύ πιο απλά για τον πρώτο νόμο μπορεί να ειπωθεί ότι ένα σώμα που κινείται με ευθύγραμμη ομαλή κίνηση θα συνεχίζει να κινείται με αυτήν εκτός εάν επιδράσει πάνω του μία εξωτερική δύναμη, ενώ για τον δεύτερο ότι η επιτάχυνση ενός σώματος είναι ανάλογη της συνισταμένης των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό και αντιστρόφως ανάλογη τη μάζας του.

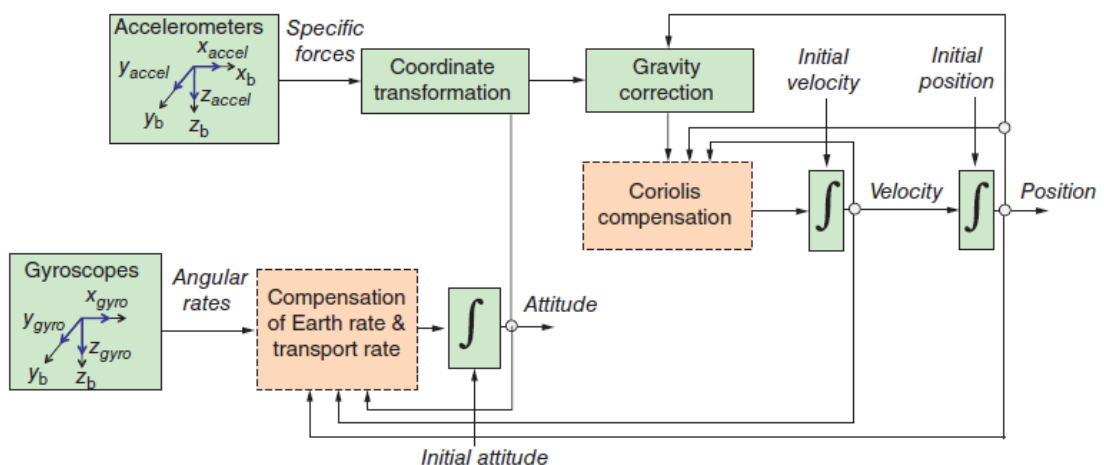
Αρκεί λοιπόν, να υπολογιστούν τα ανύσματα των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν σε ένα σώμα, οπότε θα υπολογιστεί η επιτάχυνση και ακολούθως ολοκληρώνοντας δις στο χρόνο, θα βρεθεί η ταχύτητα του σώματος και η μεταβολή της θέσης του από ένα αρχικό σημείο.

¹ Σήμερα η αδρανειακή ναυτιλία είναι το κύριο μέσο πλοήγησης αεροσκαφών, πυραύλων, πλοίων και υποβρυχίων

Για τον καθορισμό του αρχικού σημείου αλλά και της ταχύτητας και της διεύθυνσης του σώματος είναι απαραίτητη η εκ των προτέρων γνώση κάποιων αρχικών παραμέτρων, οι οποίες είναι εφικτό να ληφθούν από εξωτερικές πηγές και ως εκ τούτου, τα συστήματα αδρανειακής ναυτιλίας είναι διασυνδεδεμένα και με ένα σύστημα δορυφορικής ναυτιλίας.

Στην πράξη η λειτουργία των αδρανειακών συστημάτων βασίζεται σε μετρήσεις παραγόμενες από επιταχυνσιόμετρα και γυροσκόπια, με τα οποία υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο η θέση και η διεύθυνση ενός αντικειμένου στο χώρο σε σχέση με τα αρχικά στοιχεία κίνησης, διεύθυνσης και θέσεως κατά την έναρξη των παρατηρήσεων. Κύρια μονάδα ενός συστήματος αδρανειακής ναυτιλίας είναι η αδρανειακή μονάδα μέτρησης, εφεξής IMU (Inertial Measurement Unit), η οποία περιέχει τρία κάθετα μεταξύ τους γυροσκόπια και αντίστοιχο αριθμό επιταχυνσιομέτρων, με τα οποία υπολογίζει τις γωνιακές ταχύτητες και τις γραμμικές επιταχύνσεις, έχοντας συνολικά έξι βαθμούς ελευθερίας (Soloviev, 2021).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι νόμοι του Νεύτωνα αφορούν τη γραμμική κίνηση, ενώ αντίθετα τα αδρανειακά συστήματα ναυτιλίας υπολογίζουν κατά κύριο λόγο, την κίνηση επί της γης, η οποία περιστρέφεται. Άρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-1, η IMU θα πρέπει στους υπολογισμούς της να είναι ικανή να αντισταθμίσει τις επιδράσεις στα γυροσκόπια από την περιστροφή της γης (περίπου $15^\circ/\text{h}$), τη δύναμη Coriolis και την επίδραση που έχει η κίνηση του σώματος επί της επιφάνειας της γης σε σχέση με την περιστροφή της (transport rate) (Soloviev, 2021).



Σχήμα 2-1. Ανωτέρας τάξης μπλοκ διάγραμμα INS τ. strapdown (Soloviev, 2021)

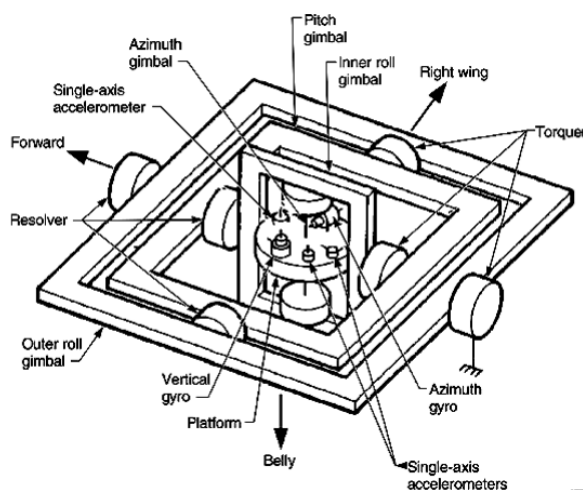
2.3.1 Διαμορφώσεις Συστημάτων

Γενικά τα συστήματα αδρανειακής ναυτιλίας διακρίνονται, σύμφωνα με τον Woodman, (2007), σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση το σύστημα αναφοράς επί του οποίου εδράζονται οι αισθητήρες τους:

- Τα συστήματα που διατηρούν σταθερή τη θέση τους στο χώρο (Stable Platform Systems)
- Τα συστήματα που οι αισθητήρες είναι πακτωμένοι στον φορέα και ακολουθούν την κίνηση αυτού (Strapdown Systems)

Stable Platform Systems

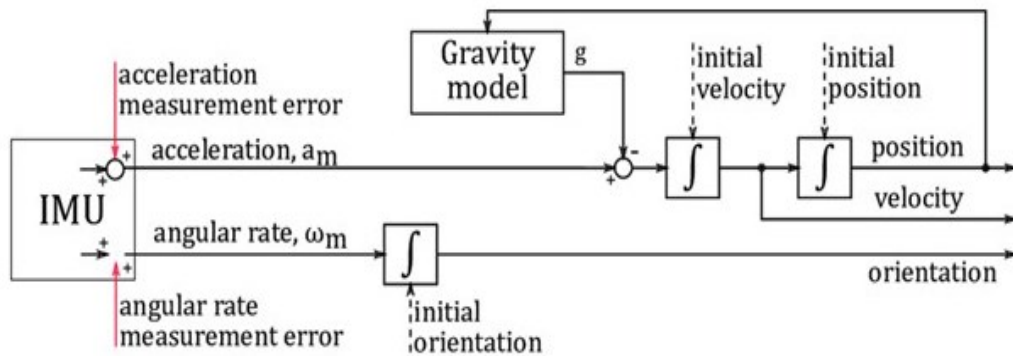
Τα συστήματα αυτά, αποτέλεσαν την πρώτη προσέγγιση στην κατασκευή αδρανειακών συστημάτων. Οι αισθητήρες της IMU, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-2, είναι αναρτημένοι επί της πλατφόρμας με τρία αντίζυγα (Gimbals) τα οποία επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση και στους τρεις άξονες, εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό ότι οι αισθητήρες παραμένουν απομονωμένοι από τις εξωτερικές περιστροφικές κινήσεις. Τα σήματα από τα τρία γυροσκόπια της IMU, που περιέχουν πληροφορίες επί των γωνιακών επιταχύνσεων της πλατφόρμας, παρέχονται σε αντίστοιχους κινητήρες οι οποίοι με τη σειρά τους επιβάλλουν τις απαιτούμενες διορθώσεις στα αντίζυγα, μηδενίζοντας ουσιαστικά τις εξωτερικές ροπές και διατηρώντας πάντα την IMU ευθυγραμμισμένη με το πεδίο αναφοράς επί του οποίου γίνεται η ναυτιλία (global frame).



Σχήμα 2-2. Δομή IMU με αντίζυγα (Πηγή: United Space Alliance, 2004)

Για τον υπολογισμό τη διεύθυνσης της IMU, υπάρχουν αισθητήρες που υπολογίζουν τις γωνιακές αποκλίσεις μεταξύ των γειτονικών αντιζύγων, ενώ οι μετρήσεις από τα τρία

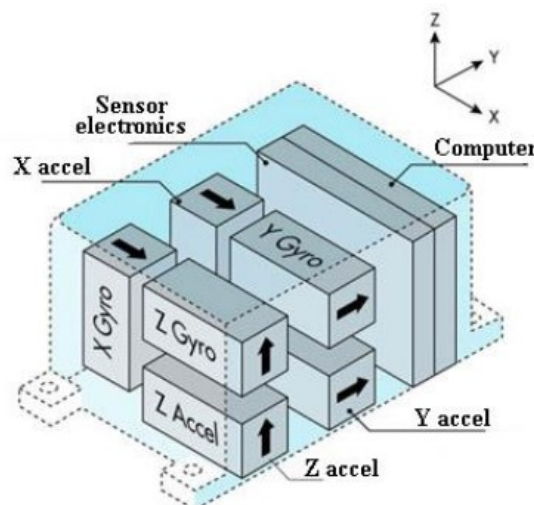
επιταχυνσιόμετρα αρχικά ολοκληρώνονται στο χρόνο για να υπολογιστεί η ταχύτητα και ακολούθως ολοκληρώνονται για δεύτερη φορά, για να υπολογιστεί η μετακίνηση της πλατφόρμας και να βρεθεί η νέα θέση της. Αξίζει να σημειωθεί ότι ειδικά για το κατακόρυφο επιταχυνσιόμετρο απαιτείται η αφαίρεση της επιτάχυνσης της βαρύτητας, που σημαίνει ότι θα πρέπει να υπάρχει μία ικανοποιητική πρόβλεψη για την εκτιμώμενη τιμή της (Woodman, 2007). Η αρχή λειτουργίας ενός αδρανειακού συστήματος με αντίζυγα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-3. Αρχή Λειτουργίας Αδρανειακού Συστήματος τ. Gimbaled
(Πηγή: Borodacz & Cezary Szczepanski, 2023)

Strapdown Systems

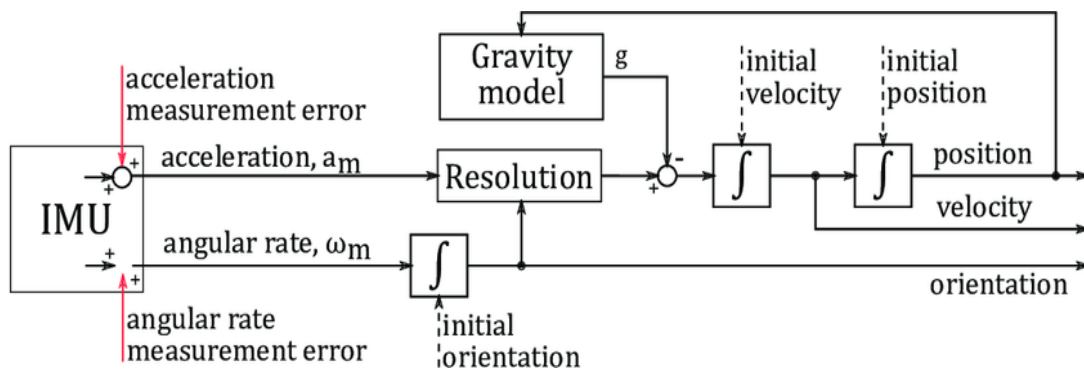
Σε αντίθεση με την προηγούμενη κατηγορία συστημάτων οι αδρανειακοί αισθητήρες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-4, είναι πακτωμένοι επί της συσκευής και αυτή με τη σειρά είναι πακτωμένη στο σκάφος.



Σχήμα 2-4. Δομή IMU τύπου Strapdown (Πηγή: Zakali, 2019)

Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι, σε αυτά τα συστήματα οι υπολογισμοί ανάγονται σε ένα νέο σύστημα αναφοράς που είναι το ίδιο το σκάφος και όχι το πεδίο που γίνεται η ναυτιλία και επομένως απαιτείται κάποιος μετασχηματισμός.

Ο μετασχηματισμός στην περίπτωση αυτή γίνεται συνδυάζοντας τα σήματα από τα τρία επιταχυνσιόμετρα, με τις τιμές των αντίστοιχων γυροσκοπίων οι οποίες έχουν ολοκληρωθεί στο χρόνο. Έχοντας μετασχηματίσει τις τιμές των επιταχυνσιομέτρων από το πεδίο αναφοράς του σκάφους στο πεδίο αναφοράς που γίνεται η ναυτιλία, πλέον οι υπολογισμοί μπορούν να συνεχιστούν όπως στα συστήματα σταθερής πλατφόρμας. Η αρχή λειτουργίας ενός αδρανειακού συστήματος τ . Strapdown φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 2-5.



Σχήμα 2-5. Αρχή Λειτουργίας Αδρανειακού Συστήματος τ . Strapdown
(Πηγή: Borodacz & Cezary Szczepanski, 2023)

Διαπιστώνεται ότι αν και αμφότεροι οι τύποι των συστημάτων αδρανειακής ναυτιλίας βασίζονται στις ίδιες αρχές λειτουργίας, εν τούτους τα συστήματα τύπου strapdown πλεονεκτούν όντας λιγότερο πολύπλοκα μηχανικά και εν γένει μικρότερα σε διαστάσεις από τα αντίστοιχα stable platform, ενώ το αρχικό τους μειονέκτημα που ήταν οι αυξημένες απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ, πλέον δεν είναι καν άξιο λόγου, καθώς το υπολογιστικό κόστος έχει ελαχιστοποιηθεί (Woodman, 2007). Για το λόγο αυτό, τα συστήματα strapdown επικράτησαν στην αγορά και τα δεδομένα από ένα σύστημα αυτού του τύπου θα αποτελέσουν τα στοιχεία, με τα οποία θα εκτελεστεί ο πειραματισμός σχεδιασμός της παρούσας εργασίας.

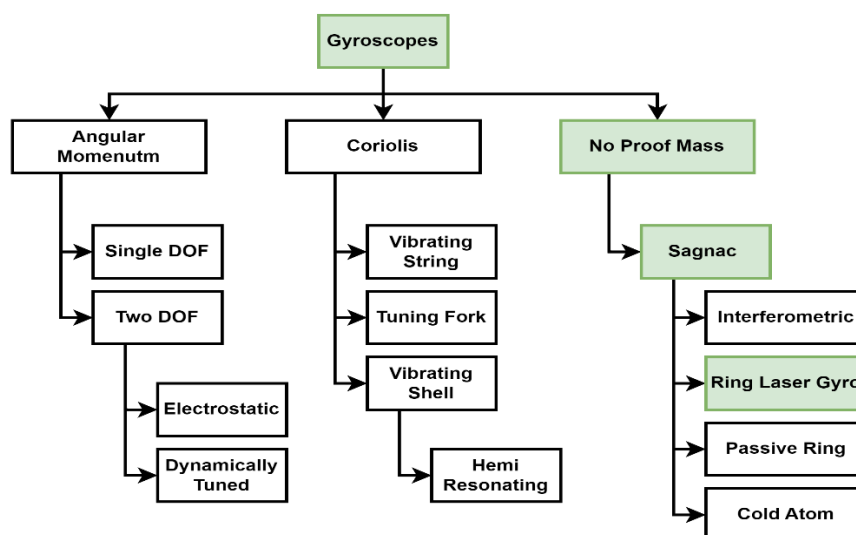
2.4 Συστήματα Strapdown και τα Σφάλματά τους

Με βάση τα όσα έχουν ήδη αναφερθεί, οι IMU ενός συστήματος αδρανειακής ναυτιλίας διαθέτουν δύο αισθητήρες. Τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα. Στις επόμενες

ενότητες θα εξεταστούν οι τύποι αυτών, με έμφαση σε αυτούς που χρησιμοποιούνται στο εξεταζόμενο σύστημα και τα πλεονεκτήματα / μειονεκτήματα που αυτοί παρουσιάζουν ώστε να γίνει κατανοητή η πηγή δημιουργίας των σφαλμάτων.

2.4.1 Διαμορφώσεις Συστημάτων

Το γυροσκόπιο είναι ο αισθητήρας μέτρησης της γωνιακής ταχύτητας της μονάδας και κάθε IMU διαθέτει τρία, σε ορθογώνια διάταξη. Τα γυροσκόπια μπορούν να καταταχθούν με βάση τον Smith, (2021) σε τρεις μεγάλες ομάδες όπως φαίνεται στο σχήμα 2-6 και για την παρούσα εργασία θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά στο γυροσκόπιο laser (Ring Laser Gyro - RLG) το οποίο ανήκει στους αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο Sagnac.



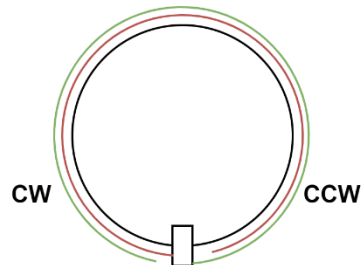
Σχήμα 2-6. Κατανομή γυροσκοπίων (Πηγή: Smith, 2021)

2.4.2 Φαινόμενο Sagnac

Όλα τα οπτικά γυροσκόπια βασίζονται, για τον υπολογισμό της γωνιακής ταχύτητας στο φαινόμενο Sagnac, το οποίο παρατηρήθηκε πρώτη φορά το 1913 με ένα συμβολόμετρο τοποθετημένο πάνω σε μία περιστρεφόμενη πλάκα, ως ένα μοτίβο κροσσών. Όπως αναφέρει οι Grewal et al, (2007) μία δέσμη φωτός που κινείται σε μία επίπεδη κλειστή διαδρομή θα εμφανίσει μία πολύ μικρή ολίσθηση φάσης, η οποία είναι ανάλογη του ρυθμού περιστροφής του επιπέδου επί του οποίου κινείται η δέσμη.

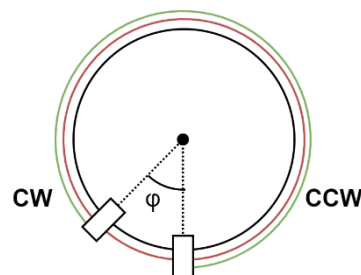
Για να εξηγηθεί το φαινόμενο, θα αξιοποιηθεί η εξήγηση του Smith, (2021) και θα υποθέσουμε ότι έχουμε δύο δέσμες φωτός της ίδιας συχνότητας οι οποίες εκκινούν από το ίδιο σημείο, την πηγή και κινούνται σε ίσες και αντίθετες κυκλικές διαδρομές όπως στο

παρακάτω σχήμα 2-7. Η κόκκινη δέσμη κινείται δεξιόστροφα ενώ η πράσινη δέσμη κινείται αριστερόστροφα. Εφόσον το επίπεδο αναφοράς πάνω στο οποίο κινούνται οι δέσμες δεν κινείται τότε οι δέσμες θα φθάσουν στο σημείο έναρξης, στον αισθητήρα, ταυτόχρονα.



Σχήμα 2-7. Ταυτόχρονη άφιξη των δεσμών στο ίδιο σημείο (Πηγή: Smith, 2021)

Εάν όμως το επίπεδο αναφοράς περιστρέφεται τότε η δέσμη που κινείται ομόρροπα με αυτό θα απαιτηθεί να εκτελέσει μεγαλύτερη διαδρομή ενώ αντίθετα η δέσμη που κινείται αντίρροπα θα εκτελέσει αντίστοιχα μικρότερη διαδρομή όπως στο παρακάτω σχήμα 2-8.



Σχήμα 2-8. Διαφορά στην χρονική άφιξη των δεσμών στο ίδιο σημείο (Πηγή: Smith, 2021)

Η διαφορά στην χρονική άφιξη των δύο δεσμών είναι δυνατόν να μετρηθεί και προκύπτει ότι μπορεί να βρεθεί από τη σχέση των Pavlath & Suman (1984)

$$\Delta t = \frac{4A}{c_0^2} * \omega \quad (2.1)$$

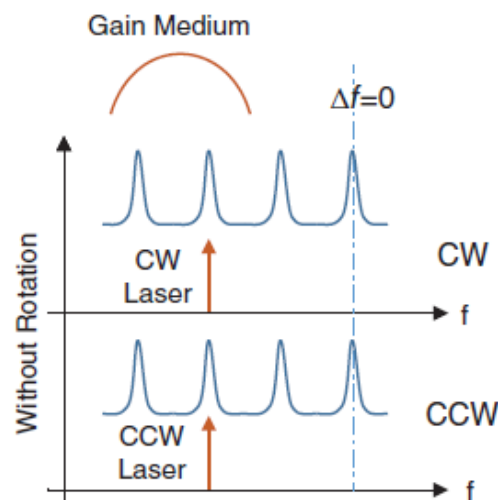
Όπου A είναι το μήκος της κυκλικής διαδρομής, c_0 είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό και ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της διαδρομής. Λύνοντας ως προς ω , προκύπτει η γωνιακή ταχύτητα του επιπέδου αναφοράς.

2.4.3 Το γυροσκόπιο laser

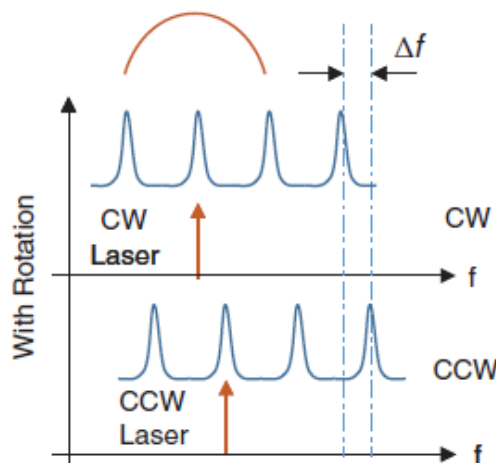
Αν και ήδη από το 1925 είχε γίνει εφαρμογή του φαινομένου Sagnac για τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής της γης, έπρεπε να ανακαλυφθεί το Laser το 1960 ώστε να αλλάξει

η πορεία της συμβολομετρίας και ακολούθως σε σύντομο χρονικό διάστημα, να υπάρξει η πρώτη επιστημονική απόδειξη επί της χρήσης του γυροσκοπίου Laser (Grewal et al, 2007).

Σε μία διάταξη όπως αυτή που περιεγράφηκε στην υποενότητα 2.4.2 εάν το μήκος της διαδρομής είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος του φωτός, παράγονται συμβολές οι οποίες εφόσον η διάταξη δεν περιστρέφεται θα συμβαίνουν με την ίδια συχνότητα και για τις δύο αντίθετα κινούμενες δέσμες. Εάν όμως η διάταξη περιστρέφεται τότε οι συμβολές θα συμβούν σε διαφορετική συχνότητα για την κάθε δέσμη σύμφωνα με το φαινόμενο Sagnac (λόγω διαφορετικού μήκους φαινόμενης διαδρομής της κάθε μίας). Το αποτέλεσμα φαίνεται πολύ χαρακτηριστικά στα παρακάτω σχήματα 2-9 και 2-10, ενώ προκύπτει ότι η διαφορά στη μετρούμενη συχνότητα είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής, η οποία είναι και το ζητούμενο.

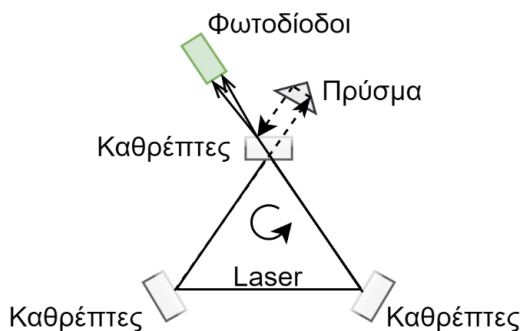


Σχήμα 2-9. Συμφασική εμφάνιση συμβολών (Πηγή: Smith, 2021)

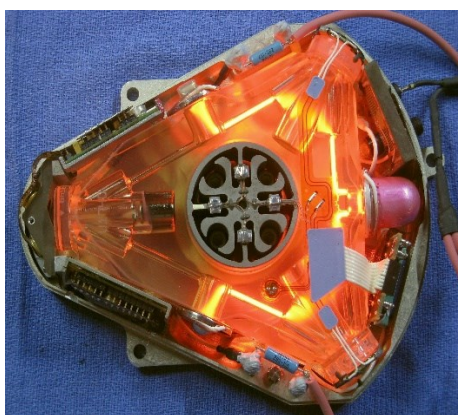


Σχήμα 2-10. Μη Συμφασική εμφάνιση συμβολών (Πηγή: Smith, 2021)

Στα σχήματα 2-11 και 2-12 φαίνονται τα βασικά στοιχεία ενός γυροσκοπίου laser. Διακρίνεται η κλειστή, τριγωνικού σχήματος, οπτική κοιλότητα εντός της οποίας διαδρομούν συνεχώς οι δύο ακτίνες laser (δημιουργούνται από laser αερίου τύπου He-Ne), οι ανακλαστικές επιφάνειες, οι οποίες είναι κατάλληλοι διηλεκτρικοί καθρέπτες που ανακλούν τη συγκεκριμένη συχνότητα του laser και το σύστημα των φωτοτρανσίστορ τα οποία εντοπίζουν τις δύο ακτίνες (Savage, 1978).



Σχήμα 2-11. Αρχή Λειτουργίας Γυροσκοπίου Laser



Σχήμα 2-12. Γυροσκόπιο Laser (Πηγή:<https://www.repairfaq.org/sam/laserpic/rlgpics.htm>)

Ο Savage (1978), αναφέρει ότι η ακρίβεια του γυροσκοπίου εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζονται οι ακτίνες του laser από την ίδια την κοιλότητα με βασικές παραμέτρους να είναι η σταθερότητα του μήκους των δύο ίσων και αντίθετων τριγωνικών διαδρομών ενώ η συχνότητα του laser να είναι περί την κορυφή της καμπύλης κέρδους του Doppler της εκπομπής του καθώς αρκετά από τα σφάλματα σταθεροποιούνται για τιμές περί την κορυφή της καμπύλης.

Για να επιτευχθεί ικανοποιητικός βαθμός σταθερότητας στο μήκος της διαδρομής η οπτική κοιλότητα είναι κατασκευασμένη από Cervit, ένα υλικό το οποίο έχει πολύ μικρό

συντελεστή θερμικής διαστολής. Μέσα στην κοιλότητα βρίσκεται το μείγμα αερίων Ηλίου – Νέον (He-Ne) με τους καθρέπτες και τα ηλεκτρόδια να αποτελούν τα στεγανοποιητικά παρεμβύσματα (δεν απεικονίζονται στο σχήμα 2-11). Στα ηλεκτρόδια εφαρμόζεται υψηλή τάση, της τάξης των 1500 Volt, μέσω της οποίας το αέριο ιονίζεται και δημιουργείται η εκπομπή του laser.

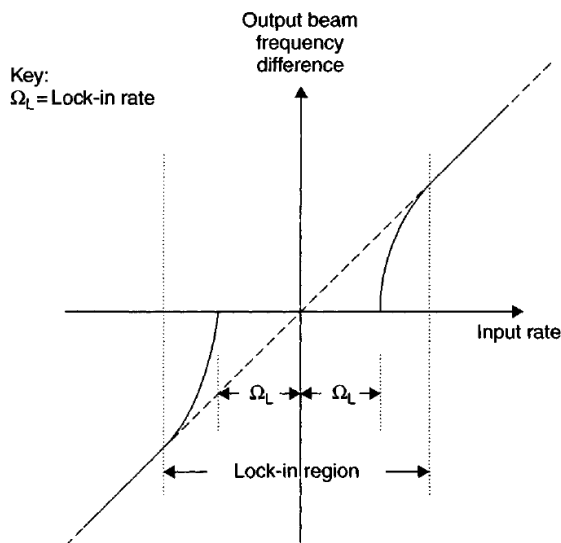
Τέλος όσον αφορά τους καθρέπτες είναι ειδικής κατασκευής ώστε αφενός να επιτρέπουν την ανάκλαση των δεσμών του laser αφετέρου δε να μην επιμολύνουν το αέριο με προσμίξεις οι οποίες μελλοντικά θα μειώσουν την απόδοση και θα επιταχύνουν τη γήρανση της γυροσκοπίου.

Φαινόμενο «Lock-in»

Το φαινόμενο του «Lock-in» έχει αποτελέσει την κυριότερη πηγή σφαλμάτων για τα γυροσκόπια laser και είναι και από τα πλέον δύσκολα στο χειρισμό, ενώ η διαχείρισή του αποτελεί πεδίο συναγωνισμού μεταξύ των κατασκευαστών αποτελώντας παράγοντα καθορισμού των χαρακτηριστικών και των επιδόσεων του γυροσκοπίου ανάλογα με την εφαρμογή (Savage, 1978).

Το φαινόμενο προκαλείται από την ύπαρξη ατελειών μέσα στο οπτικό μονοπάτι του laser κυρίως στους καθρέπτες, οι οποίοι προκαλούν σκέδαση από τη μία δέσμη στην άλλη, με αποτέλεσμα με μικρούς ρυθμούς περιστροφής οι συχνότητες των δύο δεσμών να πλησιάζουν μεταξύ τους και να ταυτίζονται. Ουσιαστικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-13, δημιουργείται μία μικρή ζώνη γωνιακών ταχυτήτων, στην οποία το γυροσκόπιο δεν μπορεί να αντιληφθεί την ύπαρξη περιστροφικής κίνησης.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου διατίθενται διάφορες τεχνικές με βασικότερη την επιβολή ενός είδους μηχανικής δόνησης (mechanical dithering) στο σώμα του γυροσκοπίου, ώστε η μετρούμενη γωνιακή ταχύτητα να μην βρεθεί μέσα στη «νεκρή ζώνη», ενώ στη συνέχεια η επίδραση της δόνησης, στις μετρήσεις, αφαιρείται κατά τα επόμενα στάδια επεξεργασία του σήματος (Grewal, 2007). Η εν λόγω τεχνική εφαρμόζεται και στη συσκευή που θα παρέχει τα δεδομένα της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 2-13. Περιοχή Συχνοτήτων Lock In (Πηγή: Savage, 1978)

Η συχνότητα του laser

Γενικά υπάρχει δυνατότητα επιλογής χρησιμοποίησης συχνότητας εκπομπής για τα laser είτε στα 0,63 μm (κόκκινο ορατό χρώμα), είτε στα 1,15 μm (υπέρυθρο). Η επιλογή έχει να κάνει με την επιθυμητή απόδοση, με τα ορατά laser να απαιτούν υψηλότερες προδιαγραφές σχεδίασης αλλά και να επιτυγχάνουν υψηλότερες ακρίβειες από τα αντίστοιχα απλούστερα αλλά και λιγότερο ακριβή υπέρυθρα. Ειδικά όσον αφορά το φαινόμενο «lock in», το συστηματικό σφάλμα του γυροσκοπίου αλλά τα σφάλματα του συντελεστή κλίμακας είναι μικρότερα στα ορατά laser.

Το μέγεθος

Για την περίπτωση των γυροσκοπίων laser ισχύει η αρχή «όσο μεγαλύτερο τόσο πιο ακριβές» αφού τα συστηματικά σφάλματα και τα σφάλματα λόγω «lock in» είναι αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου ή του κύβου της διαδρομής του laser αντίστοιχα, ενώ αντιστρόφως ανάλογα της διαδρομής είναι και τα σφάλματα κλίμακας.

Σφάλματα γυροσκοπίου laser

Τα σφάλματα του γυροσκοπίου Laser, στο οποίο έχει εκτελεστεί τεχνική αντιμετώπισης του φαινομένου «Lock In», περιγράφονται από την παρακάτω σχέσεις που αναφέρει ο Savage, (1978):

$$\text{Έξοδος} = (1 + \varepsilon)(\omega_x + y_z \omega_y - y_y \omega_z) + \omega_B \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + f(|\omega_\chi|) \quad (2.3)$$

$$\omega_B = B_0 + n_1 + n_2) \quad (2.4)$$

Όπου ω_χ = η γωνιακή ταχύτητα στον άξονα μέτρησης

ε = τα σφάλματα κλίμακας μέτρησης

ω_B = το συστηματικό σφάλμα του γυροσκοπίου

y_y, y_z = τα σφάλματα ευθυγραμμίσεως του επιπέδου του laser

με τον άξονα μέτρησης του γυροσκοπίου

ω_y, ω_z = οι γωνιακές ταχύτητες στους δύο κάθετους άξονες ως τη μέτρησης

ε_0 = το σταθερό σφάλμα της κλίμακας μέτρησης

$f(|\omega_\chi|)$ = τα σφάλματα γραμμικότητας (συμμετρικά ως προς τον άξονα)

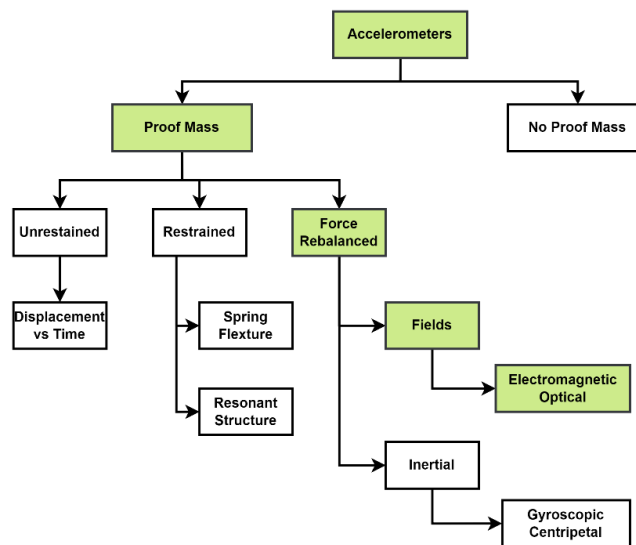
B_0 = το σταθερό συστηματικό σφάλμα

n_1, n_2 = συστηματικά σφάλματα ως αποτελέσματα ολοκλήρωσης

Ειδικότερα όσον αφορά τα αίτια και την πηγή προέλευσης των σφαλμάτων, μπορεί να ειπωθεί ότι τα σταθερά συστηματικά σφάλματα και τα σφάλματα ευθυγράμμισης της επιφάνειας του laser είναι εν γένει μετρήσιμα και σε μεγάλο βαθμό προβλέψιμα και έτσι αντισταθμίζονται. Η σταθερότητα των σφαλμάτων (έναντι του χρόνου ή της διαφοράς θερμοκρασίας) εξαρτώνται από την προσέγγιση του κατασκευαστή για την αντιμετώπιση του φαινομένου «Lock in» και τις απαιτήσεις ακρίβειας της εφαρμογής του γυροσκοπίου.

2.4.4 Το επιταχυνσιόμετρο

Το επιταχυνσιόμετρο είναι το δεύτερο βασικό αισθητήριο ενός συστήματος αδρανειακής ναυτιλίας και έχει ως σκοπό τη μέτρηση των αξονικών επιταχύνσεων που ασκούνται στο σύστημα (Savage, 1978). Τα επιταχυνσιόμετρα ταξινομούνται στις παρακάτω κατηγορίες του σχήματος 2-14, από τις οποίες για το σκοπό της παρούσας εργασίας, θα μας απασχολήσουν τα γυροσκοπία τύπου Electromagnetic Force Rebalanced, τα οποία διαθέτουν μία γνωστή μάζα στην οποία επενεργούν οι δυνάμεις που είναι επιθυμητό να υπολογιστούν και έναν μηχανισμό ο οποίος επενεργεί, κατά αντίθετο τρόπο στην επίδραση των δυνάμεων, ώστε η μάζα να μην έχει μετατόπιση, δίχως όμως την φυσική επαφή με αυτή (Smith, 2021).

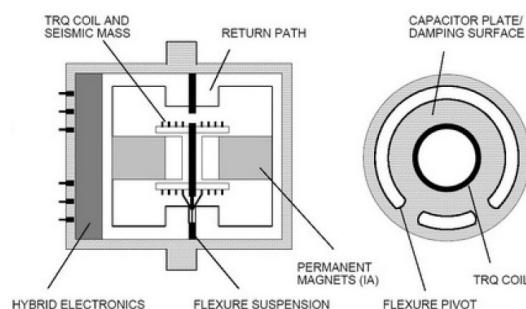


Σχήμα 2-14. Ταξινόμηση Επιταχυνσιόμετρων (Πηγή: Smith, 2021)

Επιταχυνσιόμετρο τύπου *Force Rebalanced*

Σε αυτό το είδος επιταχυνσιόμετρων όπως φαίνεται στο σχήμα 2-15, η μάζα βρίσκεται στερεωμένη, εν είδει εκκρεμούς, στο σώμα του οργάνου και περίξ αυτής υφίσταται κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική ή ηλεκτροστατική διάταξη η οποία έχει σαν σκοπό να την επαναφέρει στη θέση ηρεμίας. Κατά αντιστοιχία θα μπορούσε να παρομοιαστεί με μία μάζα η οποία συγκρατείται στη θέση ηρεμίας από ένα ελατήριο σε κάθε πλευρά της, δίχως όμως να έχει τους περιορισμούς που θα είχε μία τέτοια εφαρμογή (ιδιότητες ελατηρίων, σταθερότητα κλπ).

Παράλληλα, αφού στο συγκεκριμένο όργανο δεν υφίσταται μετατόπιση της μάζας, υπάρχει η δυνατότητα μείωσης των απαιτήσεων για την κατασκευή της ανάρτησης και του συστήματος υπολογισμού της τυχόν μετατόπισης. Το είδος επιταχυνσιόμετρου καθώς επιδεικνύει παράλληλα μικρότερα συστηματικά σφάλματα έναντι των υπολοίπων έχει κυριαρχήσει στην αγορά (Smith, 2021).



Σχήμα 2-15. Δομή Επιταχυνσιόμετρου (Πηγή: TKMS, 2011)

Σφάλματα επιταχυνσιομέτρων

Όπως και τα γυροσκόπια έτσι και τα επιταχυνσιόμετρα δεν είναι τέλειες συσκευές και συνεπώς παρουσιάζουν σφάλματα. Τα σφάλματα ενός επιταχυνσιομέτρου, με μηχανισμό εκκρεμούς, μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες, το συστηματικό σφάλμα και το σφάλμα της κλίμακας μέτρησης. Αμφότερα περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις που αναφέρει ο Savage, (1978):

$$a_B = C_0 + C_1 + C_2 a_I a_p + n \quad (2.5)$$

Όπου a_B = το συστηματικό σφάλμα

C_0 = το συστηματικό σφάλμα για τις μη μετρούμενες τιμές επιτάχυνσης

C_1 = το συστηματικό σφάλμα για τους κραδασμούς που δεν

περιλαμβάνονται στο μοντέλο

C_2 = η σταθερά του ανισοελαστικού σφάλματος στο εκκρεμές του οργάνου

n = το στοχαστικό τυχαίο σφάλμα που προκαλείται από αστάθειες

μεταβλητού τύπου στο όργανο

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 a_I + \varepsilon_3 a_I^2 \quad (2.6)$$

Όπου ε = Το σφάλμα κλίμακας

ε_0 = το σταθερό συστηματικό σφάλμα κλίμακας

ε_1 = το σφάλμα κλίμακας λόγω ασυμμετρίας

$\varepsilon_2, \varepsilon_3$ = σφάλματα γραμμικότητας σε μεγάλες επιταχυνσεις

Υπογραμμίζεται ότι το σύστημα της εσωτερικής λογικής του επιταχυνσιομέτρου είναι ικανό να αντισταθμίσει τα αναμενόμενα σφάλματα και να τα αφαιρέσει από τα εξαγόμενα δεδομένα του αισθητήρα. Το πρόβλημα δημιουργείται από τη μεταβολή των παραπάνω συνθηκών στην πάροδο του χρόνου και τη σταθερότητα που επιδεικνύει το επιταχυνσιόμετρο έναντι της θερμοκρασίας, των κραδασμών αλλά και των πιθανών διαφοροποιήσεων σε κάθε ενεργοποίηση του συστήματος.

2.4.5 Σύνοψη Σφαλμάτων Αισθητήρων IMU

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι οι αισθητήρες μίας αδρανειακής μονάδας είναι συσκευές οι οποίες έχουν πλήθος από εγγενή σφάλματα τα οποία επηρεάζουν την ακρίβεια της μονάδας και κατά συνέπεια την ακρίβεια της ναυτιλίας του υποβρυχίου οχήματος. Στον ακόλουθο πίνακα 2-1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα σφάλματα των αισθητήρων μιας αδρανειακής μονάδας σύμφωνα με τον Kumar (2004).

Είδος Σφάλματος	Επίδραση
Συστηματικό Σφάλμα των επιταχυνσιόμετρων	Οδηγεί σε μία σταθερή μετατόπιση της εξόδου του επιταχυνσιόμετρου, η οποία μεταβάλλεται σε κάθε εκκίνηση της συσκευής
Σφάλματα κλίμακας των επιταχυνσιόμετρων	Οδηγούν σε σφάλματα επιτάχυνσης ανάλογα της μετρούμενης τιμής αυτής
Συστηματικό σφάλμα του γυροσκοπίου ή έκπτωση του γυροσκοπίου	Οδηγεί σε μία σταθερή εμφάνιση γωνιακής ταχύτητας δίχως την πραγματική ύπαρξη αυτής.
Σφάλματα κλίμακας των γυροσκοπίων	Οδηγούν σε σφάλματα γωνιακής ταχύτητας ανάλογα τη μετρούμενης της τιμής αυτής
Έλλειψη καθετότητας μεταξύ των αξόνων των γυροσκοπίων και των επιταχυνσιόμετρων	Μη ορθή μηχανική ευθυγράμμιση και αβεβαιότητα στους άξονες των αισθητήρων με αποτέλεσμα την ύπαρξη σφαλμάτων κλίσεως, εκκρεμούς και πορείας
Θόρυβος στις μετρήσεις	Εισαγωγή τυχαίου θορύβου σε αμφοτέρους τις μετρήσεις των αισθητήρων

Πίνακας 2-1 Σφάλματα Αισθητήρων Αδρανειακής Μονάδας

2.5 Σφάλματα σε επίπεδο συστήματος

Στην προηγούμενη ενότητα εξετάστηκαν τα σφάλματα που αφορούσαν την αδρανειακή μονάδα και ήταν συνέπεια των ιδιοτήτων και της κατασκευής των δυο βασικών αισθητήρων της, του γυροσκοπίου και του επιταχυνσιόμετρου. Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στα σφάλματα που εμφανίζονται σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα το οποίο αποτελείται από τουλάχιστον μία αδρανειακή μονάδα και λοιπούς αισθητήρες (GPS, δρομόμετρο, βαθύμετρο) οι οποίοι υποστηρίζουν και βελτιώνουν την ακρίβειά της και στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στην επίδραση των σφαλμάτων της αδρανειακής μονάδας στο χρόνο και η επίδρασή τους στη ναυτιλία.

2.5.1 Προέλευση Σφαλμάτων Συστήματος

Σύμφωνα με τους Grewal et al, (2007), τα σφάλματα σε επίπεδο συστήματος μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες ανάλογα με την προέλευσή τους:

Σφάλματα Αρχικοποίησης

Όπως έχει γίνει ήδη αντιληπτό η αδρανειακή μονάδα μπορεί να μετρήσει τις επιβαλλόμενες επιταχύνσεις και γωνιακές ταχύτητες και να υπολογίσει τις επιδράσεις τους στην ταχύτητα και εν συνεχεία στη θέση του σώματος. Είναι λοιπόν είναι απαραίτητος ο καθορισμός των αρχικών στοιχείων της θέσεως και της ταχύτητας, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται είτε με τη συνδρομή συστημάτων δορυφορικής ναυτιλίας ή μέσω άλλων πηγών (π.χ χειροκίνητα). Τα σφάλματα αρχικοποίησης είναι τα σφάλματα στις εκτιμήσεις των δύο αυτών παραμέτρων.

Σφάλματα Ευθυγράμμισης

Τα περισσότερα τα αδρανειακά συστήματα κατά την εκκίνησή τους εισέρχονται σε μία αρχική φάση ευθυγράμμισης των γυροσκοπίων, για την εύρεση των διευθύνσεων ως προς τους ναυτιλιακούς άξονες. Η φάση αυτή διαρκεί, με υποβοήθηση από δορυφορικό σύστημα ναυτιλίας περί τα δέκα λεπτά, ενώ χωρίς αυτό διαρκεί τουλάχιστον μισή ώρα. Τα υπολειπόμενα σφάλματα μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας ονομάζονται σφάλματα ευθυγράμμισης και περιλαμβάνουν κλίσεις, εκκρεμή (είναι αμφότερα οι γωνιακές αποκλίσεις ως προς τους οριζόντιους άξονες) και σφάλματα πορείας (γωνιακές αποκλίσεις ως προς τον κατακόρυφο άξονα).

Το πρόβλημα με τα σφάλματα της κλίσεως και του εκκρεμούς είναι ότι προκαλούν με τη σειρά τους προβλήματα στον υπολογισμό των επιταχύνσεων λόγω του μη ικανοποιητικού υπολογισμού της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Τα σφάλματα λόγω ευθυγράμμισης διαδίδονται στο χρόνο με τη μορφή των ταλαντώσεων Schuler καθώς και με τη μορφή ενός σφάλματος θέσεως το οποίο είναι ίσο με τη γωνιακή απόκλιση σε ακτίνια επί την ακτίνα της γης. Όσον αφορά τα σφάλματα πορείας κυρίως επιβάλουν γωνιακές αποκλίσεις στην πορεία με βάση το σημείο εκκίνησης της αδρανειακής ναυτιλίας αλλά φέρουν και δευτερογενείς επιδράσεις λόγω της δύναμης Coriolis και των ταλαντώσεων Schuler.

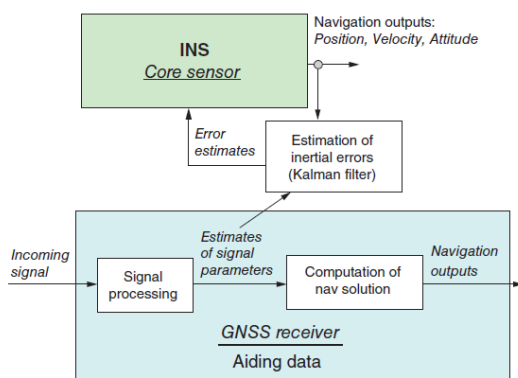
Σφάλματα Αντιστάθμισης των αισθητήρων

Ουσιαστικά εδώ έχουμε τα σφάλματα από το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη διαγωγή της αδρανειακής μονάδας. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση και την αντιστάθμιση των σταθερών σφαλμάτων των αισθητήρων (συστημικό σφάλμα ή το σφάλμα κλίμακας) και μπορεί να απαντηθεί σε δύο μορφές:

- Ως εξειδικευμένο μαθηματικό μοντέλο βασισμένο σε αρχές της φυσικής και τα κατασκευαστικά στοιχεία των αισθητήρων και ως εκ τούτου απαντά σε γνωστά αίτια.
- Ως γενικής χρήσης πολυωνυμικό μοντέλο, το οποίο προσαρμόζεται στα παρατηρούμενα σφάλματα, με σκοπό να προβλεφθούν και να διορθωθούν τα σφάλματα των αισθητήρων

Αξίζει να σημειωθεί ότι στα συστήματα που έχει ολοκληρωθεί το INS με ένα δορυφορικό σύστημα ναυτιλίας υπάρχουν και άλλα μοντέλα που αφορούν π.χ το κέρδος του φίλτρου Kalman ή μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη συνεχή βαθμονόμηση της αδρανειακής μονάδας υπό την παρουσία σήματος GPS.

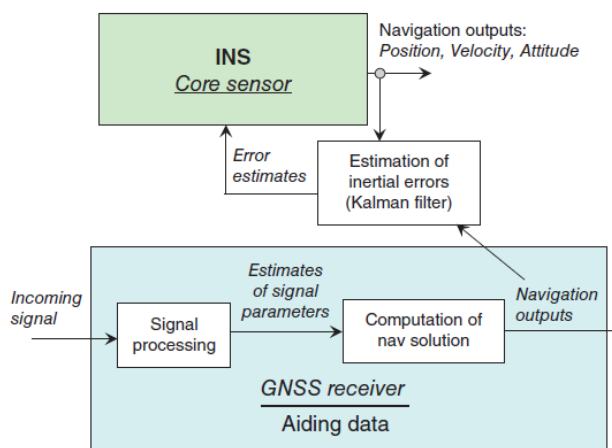
Υπογραμμίζεται ότι η παραπάνω μέθοδος, που αφορά σε συστήματα INS/GNSS τα οποία αναφέρονται ως «tightly coupled», είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια θέσεως του συστήματος σε περιόδους χωρίς σήμα GPS (πλεύση κάτω από το νερό) καθώς αντί να αρκείται στην αρχική βαθμονόμηση του συστήματος, χρησιμοποιεί τις μετρήσεις GPS για να μπορέσει συνεχώς, υπό την παρουσία του, να αντισταθμίσει τα τυχαία σφάλματα στη βαθμονόμηση των αισθητήρων ενώ μετά την απώλεια σήματος το σύστημα, με τη βοήθεια φίλτρων Kalman, συνεχίζει να παρακολουθεί και να υπολογίζει τα εκτιμώμενα σφάλματα όπως αυτά διευρύνονται στο χρόνο και τα αφαιρεί από τις αντίστοιχες ενδείξεις του αδρανειακού συστήματος όπως φαίνεται στο σχήμα 2-16.



Σχήμα 2-16. Διασύνδεση INS/GNSS σε μορφή Tightly Coupled (Πηγή:Soloviev, 2021)

Αντίθετα στα συστήματα του σχήματος 2-17, που χαρακτηρίζονται ως «loosely coupled», όπως αυτό από το οποίο χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για την παρούσα εργασία, αξιοποιείται ένα φίλτρο Kalman μέσω του οποίου γίνεται εκτίμηση της διάδοσης των σφαλμάτων στο χρόνο και εν συνεχεία ακολουθεί η αφαίρεσή τους από την παραγόμενη

θέση του INS, ενώ παράλληλα τα εν λόγω στοιχεία παρέχονται και προς τον δέκτη GPS για την υποβοήθηση κατά τη διαδικασία ανεύρεσης δορυφόρων όταν αυτό καταστεί εφικτό (Grewal et al, 2007)



Σχήμα 2-17. Διασύνδεση INS/GNSS σε μορφή Loosely Coupled (Πηγή: Soloviev, 2021)

Φίλτρο Kalman

Το φίλτρο Kalman αναπτύχθηκε από τον ομώνυμο συγγραφέα το 1960 και είναι μία πολύπλευρη και αποτελεσματική μέθοδος συνδυασμού «θορυβωδών» αισθητήρων ώστε να εκτιμηθεί η κατάσταση ενός συστήματος που η παρουσία του θορύβου το έχει καταστήσει αναξιόπιστο, αλλά και το οποίο έχει τα δικά του δυναμικά χαρακτηριστικά όπως για την περίπτωση του υποβρυχίου οι παροιακίσεις του πηδαλιούχου, η ύπαρξη θαλασσίου ρεύματος αλλά και απρόβλεπτες καταστάσεις των αισθητήρων. Το φίλτρο Kalman ελαχιστοποιεί τη διακύμανση του σφάλματος μεταξύ κατάστασης και εκτίμησης (Moysis, 2013).

Για τα συστήματα ναυτιλίας ενός υποβρυχίου οχήματος, ως αισθητήρας με εγγενή θόρυβο θα μπορούσε να χαρακτηριστεί το GPS, το δρομόμετρο Doppler και το αδρανειακό σύστημα ναυτιλίας ενώ σε επίπεδο της ίδιας της αδρανειακής μονάδας οι αισθητήρες είναι τα γυροσκόπια και τα επιταχυνσιόμετρα και αλλά και οι εξωτερικοί ως προς τη μονάδα αισθητήρες όπως το βαθύμετρο ή το δρομόμετρο.

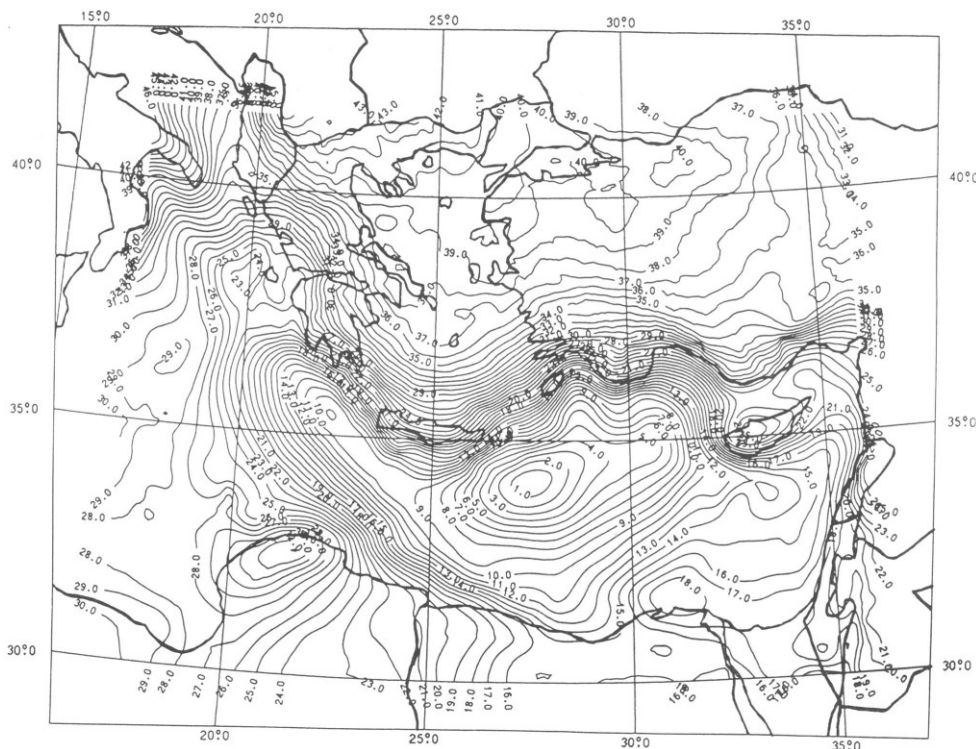
Αντίστοιχα ως παράμετροι για την περίπτωση του υποβρυχίου θα είναι η θέση, η ταχύτητα, η πορεία, η κλίση και το εκκρεμές καθώς και οι αντίστοιχοι ρυθμοί μεταβολής αυτών των παραμέτρων. Υπογραμμίζεται ότι το φίλτρο Kalman μπορεί να περιλαμβάνει και μεταβλητές θορύβου των οποίων αν και δεν επιθυμούμε τον υπολογισμό της ακριβούς τιμής

τους, εν τούτοις απαιτούνται για τη μείωση της διασποράς των σφαλμάτων π.χ τα σφάλματα (συστηματικά και κλίμακας) των γυροσκοπίων και των επιταχυνσιόμετρων.

Υπογραμμίζεται ότι, τα δεδομένα της παρούσας εργασίας θα είναι αποτέλεσμα ενός συστήματος ναυτιλίας που θα εφαρμόζει το φίλτρο Kalman τόσο σε επίπεδο αισθητήρων της αδρανειακής μονάδας, όσο και σε ένα ολοκληρωμένο ναυτιλιακό σύστημα.

Σφάλματα στον υπολογισμό της βαρύτητας

Η βαρύτητα στην πραγματικότητα δεν υπολογίζεται, καθώς συνυπάρχει στις μετρήσεις των επιταχυνσιόμετρων (Van Bronkhorst, 1978). Για την αφαίρεση της επίδρασης της βαρύτητας αρχικά θα πρέπει να ευθυγραμμιστούν ορθά οι διευθύνσεις των γυροσκοπίων και εν συνεχεία με βάση το βαρυτικό μοντέλο στη μνήμη του συστήματος, αφαιρείται η εκτιμώμενη τιμή της βαρυτικής επιτάχυνσης (Soloviev, 2021). Τυχόν ανωμαλίες του βυθού οι οποίες δεν περιγράφονται σωστά από το μοντέλο αναμένεται να οδηγήσουν σε αστάθεια στο κατακόρυφο επίπεδο. Στο σχήμα 2-18 απεικονίζεται το βαρυτομετρικό μοντέλο του γεωειδούς το οποίο αξιοποιήθηκε για την εκτίμηση διέλευσης από περιοχές με αυξημένη διαφοροποίηση και άρα πιθανή ύπαρξη ανακρίβειας στα αποθηκευμένα στοιχεία.

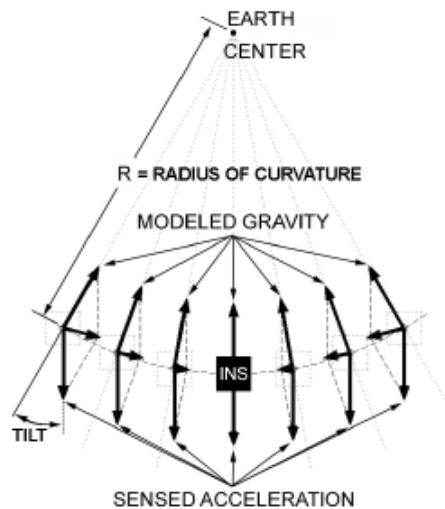


Σχήμα 2-18. Απεικόνιση βαρυτομετρικού μοντέλου του γεωειδούς (πέντε πρώτων) του GEOMED-1 για την Ανατολική Μεσόγειο (Arabelos et al. 1994)

2.6 Η διάδοση των σφαλμάτων στο χρόνο

2.6.1 Ταλαντώσεις Schuler

Τα σφάλματα ευθυγράμμισης των αισθητήρων του αδρανειακού συστήματος, όπως είναι αναμενόμενο, οδηγούν σε σφάλματα στην ακρίβεια της ναυτιλίας. Η διαδικασία μέσα από την οποία διαδίδεται στο χρόνο η εν λόγω επίδραση, είναι η ταλάντωση Schuler. Οι ταλαντώσεις αυτές έχουν την ίδια περίοδο, με την περίοδο των γυροσκοπικών σφαλμάτων που περιέγραψε ο Schuler, το 1923 και είναι της τάξης των 84 λεπτών περίπου (King, 1998). Για να γίνει πιο εύκολα κατανοητός ο μηχανισμός, θα χρησιμοποιήσουμε την έννοια του βαρυτικού εκκρεμούς στο οποίο μόλις εκτραπεί από τη θέση ηρεμίας ασκείται μία δύναμη ως συνισταμένη της βαρυτικής επιτάχυνσης και της τάσης του σημείου στήριξης, με τις ισοδύναμες επιταχύνσεις για το σύστημα αδρανειακής ναυτιλίας να είναι η πραγματική και η εκτιμώμενη από το μοντέλο επιτάχυνση της βαρύτητας όπως φαίνεται στο σχήμα 2-19.



Σχήμα 2-19. Μοντέλο Ταλαντώσεων Schuler (Πηγή:Grewal, 2017)

Προκύπτει ότι η επιπρόσθετη επιτάχυνση είναι:

$$\ddot{\delta} \approx -\omega^2 * \delta \quad (2.7)$$

$$\text{με } \omega = \sqrt{\frac{g}{R}} \text{ και } T \approx 5069 \text{ sec} \approx 84,4 \text{ min} \quad (2.8)$$

ενώ η απόκλιση λόγω της ταλάντωσης για μία χρονική στιγμή t ορίζεται ως

$$\delta(t) = |\delta|_{\max} \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.9)$$

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, R η απόσταση μέχρι το κέντρο της γης και δ η εκτροπή από τη θέση ηρεμίας.

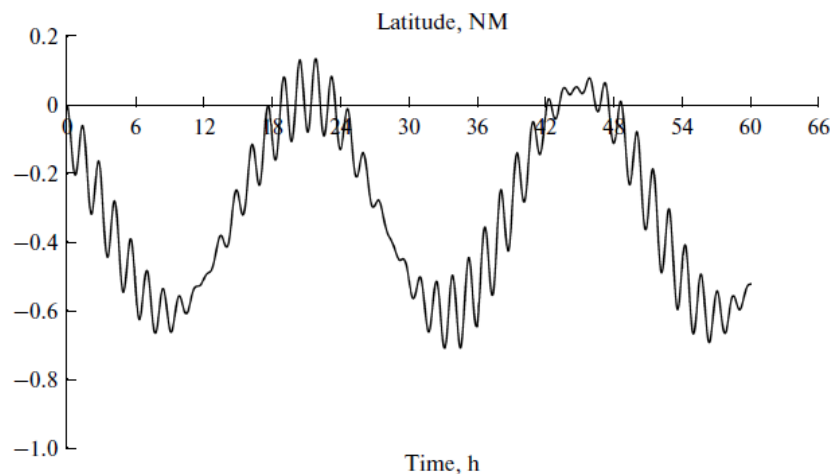
Στην παραπάνω εξήγηση του φαινομένου το μοντέλο της γης είναι σφαιρικό. Στην πραγματικότητα η περίοδος Schuler εξαρτάται από την ακτίνα της επιφάνειας που έχει το ισοβαρυντικό μοντέλο των υπολογισμών η οποία διαφέρει από τόπο σε τόπο (μήκος και πλάτος επί της επιφάνειας της γης) αλλά και από το βάθος σε περίπτωση ενός βαθυσκάφους. Βέβαια οι διαφοροποιήσεις στην περίοδο Schuler λόγω της θέσεως δεν είναι σημαντικές (τρίτο σημαντικό ψηφίο) και έτσι αγνοούνται.

Η επίδραση του φαινομένου Schuler είναι ότι αυξάνεται η μεταβλητότητα των σφαλμάτων θέσεως, ταχύτητας και επιτάχυνσης τα οποία συνδέονται και μεταξύ τους. Έτσι για μέγιστη απόκλιση $|\delta|_{max}$ τα σφάλματα για μία χρονική στιγμή t λόγω της ταλαντώσεως Schuler, σύμφωνα με τους Grewal et al, (2007) θα είναι:

$$\delta(t) = |\delta|_{max} \cos(\Omega_{Schuler}t + \varphi) \text{ για το σφάλμα θέσεως} \quad (2.10)$$

$$\dot{\delta}(t) = -|\delta|_{max}\Omega_{Schuler} \sin(\Omega_{Schuler}t + \varphi) \text{ για το σφάλμα ταχύτητας} \quad (2.11)$$

$$\ddot{\delta}(t) = -|\delta|_{max}\Omega_{Schuler}^2 \cos(\Omega_{Schuler}t + \varphi) \text{ για το σφάλμα επιτάχυνσης} \quad (2.12)$$



**Σχήμα 2-20. Τυπικό Σφάλμα Θέσεως (κατά πλάτος) ενός Αδρανειακού Συστήματος
(Πηγή:Paturel et al, 2014)**

Βέβαια όπως προκύπτει από τις παραπάνω εξισώσεις το φαινομένου Schuler κατά τρόπον τινά έχει ευεργετική επίδραση για τα αδρανειακά συστήματα υψηλής ακρίβειας καθώς επιβάλει αρνητική ανάδραση στα σφάλματα και περιορίζει τα οριζόντια σφάλματα των αισθητήρων της αδρανειακής μονάδας τα οποία σε διαφορετική περίπτωση θα μεγάλωναν

ανεξέλεγκτα. Στο ανωτέρω σχήμα 2-20 φαίνονται οι ταλαντώσεις Schuler και η επίδραση τους στο κατά πλάτος σφάλμα θέσεως του αδρανειακού συστήματος. Σύμφωνα με τον Soloviev, (2022) η προσεγγιστική επίδραση του φαινομένου Schuler φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 2-2.

Πηγή Σφάλματος	Οριζόντια Έκπτωση θέσεως σε χρόνο μεγαλύτερο της περιόδου Schuler	Οριζόντια Έκπτωση θέσεως σε χρόνο πολύ μικρότερο της περιόδου Schuler
Αρχικό σφάλμα θέσεως	$\sim \cos(\Omega_{Schuler} * t)$	σταθερό
Αρχικό σφάλμα ταχύτητας	$\sim \sin(\Omega_{Schuler} * t) / \Omega_{Schuler}$	$\sim t$
Αρχικό σφάλμα διεύθυνσης	$\sim 1 - \cos(\Omega_{Schuler} * t)$	$\sim t^2$
Συστηματικό σφάλμα επιταχυνσιόμετρου	$\sim (1 - \cos(\Omega_{Schuler} * t)) / \Omega_{Schuler}^2$	$\sim t^2$
Συστηματικό σφάλμα γυροσκοπίου	$\sim t - \sin(\Omega_{Schuler} * t) / \Omega_{Schuler}$	$\sim t^3$

Πίνακας 2-2 Διάδοση Σφαλμάτων Αδρανειακής Μονάδας στο χρόνο (Πηγή: Soloviev, 2022)

2.6.2 Αστάθεια στο Κατακόρυφο

Αξίζει να σημειωθεί ότι αντίστοιχες είναι και οι εξισώσεις που διέπουν τα θέματα μεταβλητότητας στο κατακόρυφο, πλην όμως το κατακόρυφο κανάλι λόγω της βαρύτητας είναι εγγενώς ασταθές και οι ταλαντώσεις εντός της περιόδου Schuler θα είχαν συνεχώς αυξημένο πλάτος. Για το λόγο αυτό απαιτείται και εφαρμόζεται μία αντιστάθμιση των σφαλμάτων και διασύνδεση με ένα αισθητήρα που θα υπολογίζει, για την περίπτωση του υποβρυχίου οχήματος το βάθος, όπως το βαθύμετρο.

2.6.3 Επίδραση της δύναμης Coriolis

Η δύναμη Coriolis η οποία έχει να κάνει με το ρυθμό περιστροφής της γης, επιδρά στο σφάλμα της θέσεως μέσω της επιτάχυνσης και έχει σαν συνέπεια τη συνεχή μεταβολή της τροχιάς του σώματος, προς τα δεξιά στο βόρειο ημισφαίριο και προς τα αριστερά στο νότιο. Η εν λόγω επίδραση στα κανάλια των τριών διευθύνσεων, σε συνδυασμό με την επίδραση της ταλάντωσης Schuler φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις των Grewal et al (2007):

$$\frac{d}{dt} \delta u_E = -\Omega_{Schuler}^2 \delta E + 2\Omega_{Earth} \sin \varphi \delta u_N - 2\Omega_{Earth} \cos \varphi \delta u_U \quad (2.13)$$

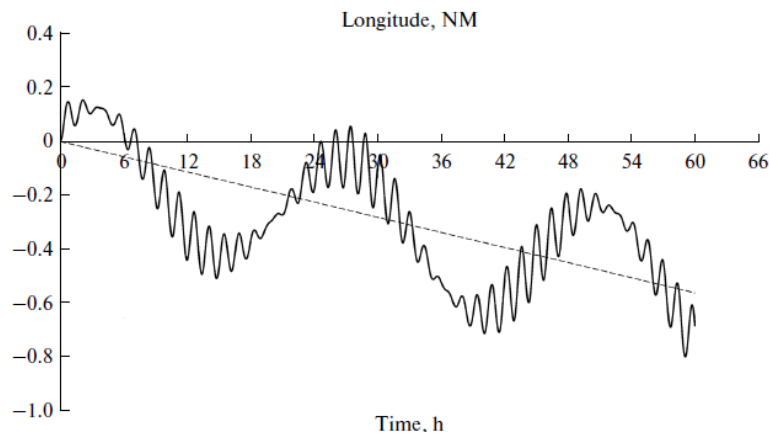
$$\frac{d}{dt} \delta u_N = -\Omega_{Schuler}^2 \delta N - 2\Omega_{Earth} \sin \varphi \delta u_E \quad (2.14)$$

$$\frac{d}{dt} \delta u_U = 2\Omega_{Earth} \cos \varphi \delta u_E \quad (2.15)$$

όπου $\Omega_{Earth} \approx 7,3 * 10^{-5} \text{ rad / sec}$ και δΕ, δΝ το σφάλμα θέσεως στο ανατολικό και βόρειο κανάλι αντίστοιχα.

Παράλληλα μέσω της επίδρασης της δύναμης Coriolis τα σφάλματα στο κατακόρυφο επίπεδο συνδέονται με τα σφάλματα στην ανατολική διεύθυνση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το σφάλμα που προκύπτει από τη δυνατότητα ακριβούς μέτρησης του ρυθμού περιστροφής της γης ($15,041^\circ/\text{h}$) δεν υπόκειται σε κάποιο περιορισμό και μπορεί να μεγαλώνει ανεξέλεγκτα αποτελώντας τον κυριότερο παράγοντα σφάλματος των σημερινών αδρανειακών συστημάτων. Στο σχήμα 2-21 φαίνεται η επίδραση του εν λόγω σφάλματος σε ένα σύγχρονο αδρανειακό σύστημα.



Σχήμα 2-21. Τυπικό Σφάλμα Θέσεως (κατά μήκος) ενός Αδρανειακού Συστήματος
(Πηγή:Paturel et al, 2013)

2.6.4 Τα σφάλματα των αισθητήρων

Τα σφάλματα των αισθητήρων αναλύθηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Είναι αντιληπτό ότι λόγω της μεθοδολογίας που ακολουθεί η συσκευή (ολοκλήρωση στο χρόνο) προκύπτει ότι η επίδραση των σφαλμάτων δεν είναι πάντα ανάλογη του χρόνου που έχει παρέλθει από την τελευταία φορά που αυτά μηδενίστηκαν. Έτσι η διάδοση των σφαλμάτων των επιταχυνσιομέτρων π.χ σε μία οριζόντια διεύθυνση χαρακτηρίζεται σύμφωνα με τους Grewal et al,(2007) από τις ακόλουθες δύο σχέσεις:

$$\delta u(t) = \delta u_0 + \int_0^t b_{accel} * dt = \delta u_0 + b_{accel} * t \quad \text{για την ταχύτητα (2.16)}$$

$$\delta x(t) = \delta x_0 + \int_0^t \delta u(t) * dt = \delta x_0 + \delta u_0 * t + b_{accel} * \frac{t^2}{2} \quad \text{για τη θέση (2.17)}$$

Αντίστοιχα όσον αφορά τα γυροσκόπια το σφάλμα τους θα επηρεάσει την διεύθυνση και τη θέση ως ακολούθως:

$$\delta_{attitude}(t) = \delta a_0 + \int_0^t b_{gyro} * dt = \delta a_0 + b_{gyro} * t \quad (2.18)$$

$$\delta x(t) = \iint -g * \delta_{attitude} = -g(\delta a_0 * \frac{t^2}{2} + b_{gyro} \frac{t^3}{6}) \quad (2.19)$$

Παρατηρώντας τις παραπάνω τέσσερις σχέσεις διαπιστώνεται ότι τα σφάλματα των αισθητήρων έχουν την τάση να αυξηθούν δραματικά με την πάροδο του χρόνου και απαιτείται τουλάχιστον κάποιος μορφής περιορισμός τους. Έτσι πέρα από την επιθυμητή επίδραση του φαινομένου Schuler, στα υποβρύχια οχήματα χρησιμοποιείται το δρομόμετρο ως επιπλέον αισθητήρας περιορισμού τουλάχιστον του σφάλματος της ταχύτητας και το οποίο και θα αποτελέσει παράγοντα προς διερεύνηση για την παρούσα εργασία.

2.6.5 Σύνοψη επί των σφαλμάτων

Συνοψίζοντας, τα συστήματα αδρανειακής ναυτιλίας υπόκεινται σε σφάλματα λόγω των αισθητήρων τους. Κυριότερο εξ αυτών θεωρείται το συστηματικό σφάλμα των γυροσκοπίων, ενώ στο συνολικό προϋπολογισμό των σφαλμάτων προστίθενται τα σφάλματα των επιταχυνσιόμετρων, ο θόρυβος των αισθητήρων, σφάλματα μη γραμμικότητας αλλά και τα σφάλματα που αρχικά μπορεί να είχαν προκύψει από την εγκατάσταση των αισθητήρων ή από το βαρυτικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς του συστήματος.

Τα περισσότερα από τα σφάλματα των αισθητήρων εμφανίζουν μία περιοδικότητα, η οποία έχει δύο περιόδους, την περίοδο της γης, καθώς περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της σε 24 ώρες και την περίοδο Schuler η οποία είναι της τάξης των 84 λεπτών. Τα σφάλματα των αισθητήρων επιδρούν συσσωρευτικά με την πάροδο του χρόνου και δημιουργούν με τη σειρά τους εννέα βασικά ναυτιλιακά σφάλματα (τρία θέσεως, τρία ταχύτητας, δύο προσανατολισμού και ένα σφάλμα πορείας). Εν γένει τα σφάλματα θέσεως λόγω του συστηματικού σφάλματος των γυροσκοπίων αυξάνονται κατά αναλογία με τον κύβο του χρόνου ενώ τα αντίστοιχα προερχόμενα από τα επιταχυνσιόμετρα είναι ανάλογα του τετραγώνου. Ως εκ τούτου αν και ο ρυθμός αύξησης στις οριζόντιες διευθύνσεις περιορίζεται και σταθεροποιείται από το φαινόμενο Schuler, εν τούτοις παραμένει ένα συνεχώς αυξανόμενο σφάλμα κατά το γεωγραφικό μήκος το οποίο προκύπτει από την αδυναμία ακριβούς μέτρησης του ρυθμού περιστροφής της γης από τα γυροσκόπια. Έτσι

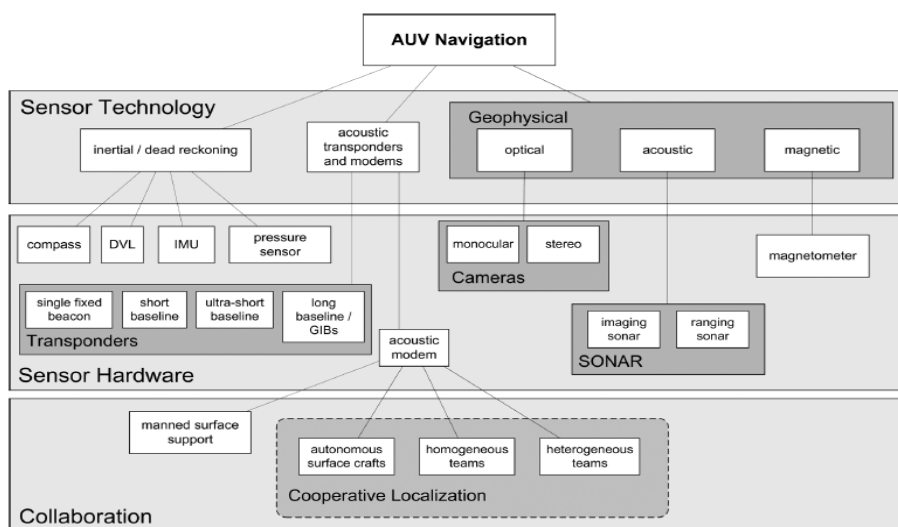
τόσο για την εγγενώς ασταθή κατακόρυφη διεύθυνση, όσο και για τον περιορισμό της ταχύτητας στην οριζόντια, στα υποβρύχια οχήματα συνηθίζεται η χρήση συμπληρωματικών αισθητήρων όπως τα βαθύμετρο και το δρομόμετρο (έναν αισθητήρα ο οποίος υπόκειται και αυτός σε ίδια σφάλματα) ώστε η μέγιστη τιμή των σφαλμάτων να περιοριστεί μέχρι να υπάρξει δυνατότητα μηδενισμού τους με τη χρήση έτερου μέσου, όπως του δορυφορικού συστήματος ναυτιλίας.

2.7 Προτάσεις της επιστημονικής κοινότητας

Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας, παρατηρείται ότι η ακρίβεια θέσεως ενός υποβρυχίου οχήματος είναι αντικείμενο που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα. Αν και στο παρελθόν το αντικείμενο απασχολούσε κυρίως τις εφαρμογές επί υποβρυχίων, τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη των μη επανδρωμένων οχημάτων έχει αποτελέσει γόνιμο έδαφος για την περαιτέρω ανάπτυξη τεχνικών υποβοήθησης των αδρανειακών συστημάτων.

Η ερευνητική προσπάθεια είναι πολυσχιδής και περιλαμβάνει τη διερεύνηση της δυνατότητας βελτίωσης του κύριου αισθητήρα του γυροσκοπίου (Paturel et al, 2014), αλλά και μεθόδους μείωσης των σφαλμάτων θέσεως στο πεδίο με χρήση ακουστικών αισθητήρων Ultra Short Base Line και Long Base Line όπως έχει προταθεί από τους (Lee et al, 2011) και Mikhalevsky, (2020) ή τη βελτίωση των αλγορίθμων για την βελτίωση της συμπεριφοράς του αδρανειακού συστήματος έναντι των θαλασσίων ρευμάτων (Zhu et al, 2016) και (Zang et al, 2020) ή των αλγορίθμων υπολογισμού τους (Xu & Hao, 2011). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ερευνητικές προτάσεις αφορούν επίσης τεχνικές διόρθωσης της θέσεως με χρήση αισθητήρων για τον υπολογισμό της βαρύτητας και την εν συνεχεία σύγκριση των τιμών με βάση το βαρυτικό μοντέλο της περιοχής (Xian & Ji, 2022) και (Rogobete et al, 2018) αλλά και ακόμη πιο πρωτοποριακές μεθόδους όπως η χρήση νετρίνο για τη διόρθωση της θέσεως του υποβρυχίου οχήματος (Prieto, 2022).

Οι παραπάνω μέθοδοι καθώς και οι ήδη χρησιμοποιούμενοι σε επανδρωμένα ή μη υποβρύχια οχήματα, θα μπορούσαν να συγκεντρωθούν στο παρακάτω σχήμα 2-22 των Paull et al, (2014). Επισημαίνεται ότι από τη μέχρι τώρα αναζήτηση δεν έχει προκύψει ότι έχει μελετηθεί η εφαρμογή της μεθοδολογίας Taguchi, για τη βελτίωση της υποβρυχίας ναυτιλίας, αξιοποιώντας τα υφιστάμενα μέσα στο πεδίο.



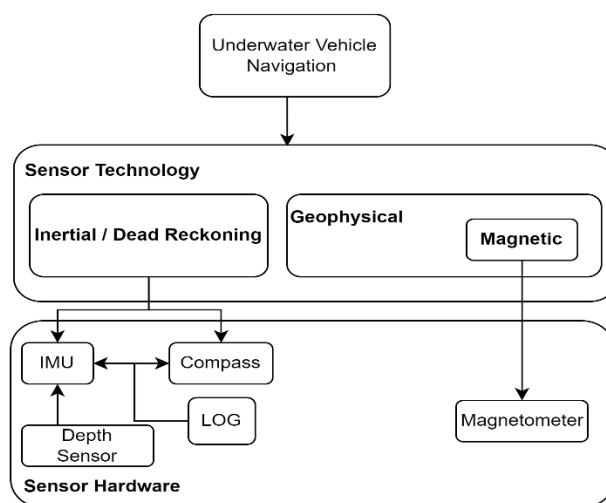
Σχήμα 2-22. Μέθοδοι προσδιορισμού θέσεως Υ/Β οχημάτων (Πηγή: Paull et al, 2014)

Συνοψίζοντας όσον αφορά τις ανωτέρω προτάσεις της επιστημονικής κοινότητας, κρίνεται σκόπιμο να επισημανθούν τα ακόλουθα:

- Όσον αφορά τη χρήση ακουστικών πομποδεκτών και modems, αφενός η χρήση τους υπόκειται σε περιορισμούς που αφορούν την εκπομπή ηχητικής ενέργειας και άρα την αποκάλυψη της θέσεως του υποβρυχίου οχήματος (περιπτώσεις Cooperative Localization) αφετέρου η χρήση Transponder προϋποθέτει την εκ προοιμίου γνώση της περιοχής επιχειρήσεων, ώστε η εγκατάσταση των συσκευών να προηγηθεί της ανάπτυξης του οχήματος. Η δε χρήση τους, αν και θα μπορούσε να συμπεριλάβει τεχνικές παραπλάνησης, εντούτοις πιθανότατα θα αποκαλύψει έμμεσα την παρουσία του υποβρυχίου. Στην ίδια κατηγορία εμπίπτουν και οι τεχνικές χρήσης ηχονετοπισμού (sonar) που ανήκουν στις γεωφυσικές μεθόδους αλλά και του δρομομέτρου Doppler (DVL) που ανήκει στους αισθητήρες ενός αδρανειακού συστήματος ναυτιλίας. Επιπρόσθετα η χρήση του δρομομέτρου Doppler πέρα των όποιων επιχειρησιακών περιορισμών, υπόκειται και σε υπό συνθήκη λειτουργία καθώς δεν είναι εφικτή η χρήση του σε βαθέα ύδατα, λόγω της υψηλής συχνότητας λειτουργίας και της σχετικά ταχείας απόσβεσής της στο νερό (Zang et al, 2020).
- Παρομοίως, όσον αφορά τη χρήση οπτικών ή ηλεκτρομαγνητικών αισθητήρων, για το σύνολό τους υφίστανται επιχειρησιακοί περιορισμοί που αφορούν στην προσέγγιση της επιφάνειας από το υποβρύχιο όχημα και την αποκάλυψή του σε εχθρικό περιβάλλον αλλά και τη σχετική εγγύτητα σε ξηρά ώστε να είναι εφικτή η λήψη μετρήσεων (οπτικών ή ραντάρ). Ιδιαίτερα επισημαίνεται ότι η αντίστοιχη

προσπάθεια για βελτίωση της θέσεως ενός υποβρυχίου οχήματος μέσω συστημάτων δορυφορικής ναυτιλίας όχι μόνο θέτει σε κίνδυνο αποκάλυψης την παρουσία του, αλλά ούτε είναι εξασφαλισμένη ότι θα διατίθεται (Jamming) ή ότι δεν θα περιλαμβάνει σφάλματα (spoofing).

Έχοντας αφαιρέσει όλους τους αισθητήρες που δύναται υπό προϋποθέσεις να αποκαλύψουν την παρουσία του υποβρυχίου οχήματος, καταλήγουμε στο ακόλουθο σχήμα 2-23 το οποίο διαθέτει μόνο παθητικούς αισθητήρες και οι οποίοι είναι εφικτό να λειτουργούν σε οποιοδήποτε βάθος πλεύσης του οχήματος.



Σχήμα 2-23. Παθητικές μέθοδοι προσδιορισμού θέσεως Υ/Β οχημάτων

Από τους αισθητήρες αυτούς διακρίνεται το δρομόμετρο (LOG) το οποίο αναμένεται να επηρεαστεί από την ύπαρξη των θαλασσίων ρευμάτων (Zang et al, 2020) και το μαγνητόμετρο το οποίο λόγω της επίδρασης του σκάφους αφενός δεν απαντάται συχνά ως αισθητήρας των ναυτιλιακών συστημάτων ενός υποβρυχίου (Gao et al, 2012) και αφετέρου οι επιδόσεις του δεν ικανοποιούν ακόμη τις απαιτήσεις (Xian & Ji, 2022).

Ως εκ τούτου και εκτιμάται ότι απαιτείται η περαιτέρω διερεύνηση του θέματος με χρήση της μεθοδολογίας Taguchi, ώστε να διερευνηθεί η επί του πεδίου δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης ενός ναυτιλιακού συστήματος υποβρυχίου οχήματος, με ιδία μέσα του φορέα και με χρήση αισθητηρίων τα οποία θα είναι πρακτικά και δυνητικά εφικτά να χρησιμοποιηθούν.

3. Μεθοδολογία Taguchi

3.1 Πειραματικός Σχεδιασμός

Ο πειραματικός σχεδιασμός μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία τεχνική που αποσκοπεί στην μείωση της ευαισθησίας του προϊόντος και των διαδικασιών έναντι της μεταβλητότητας που προκαλούν εσωτερικοί ή εξωτερικοί παράγοντες (Box et al, 1988 και Roy 2010). Σε γενικές γραμμές ως διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω του σχεδιασμού πειραμάτων βασιζομένων σε αρχές της στατιστικής ώστε να αναγνωρισθούν οι βέλτιστοι παράμετροι για τη ρύθμιση και την εκτέλεση μίας διεργασίας (Taguchi, 1986).

3.2 Η προσέγγιση του Taguchi

Ο Δρ. Genichi Taguchi, (1924 - 2012), ήταν ένας Ιάπωνας μηχανικός και στατιστολόγος ο οποίος ανέπτυξε από τη δεκαετία του 1950 την ομώνυμη μεθοδολογία για την βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων μέσω της εφαρμογής στατιστικών μεθόδων στην παραγωγή.

Ο Taguchi ισχυρίστηκε ότι η μεταβλητότητα στην ποιότητα ενός προϊόντος ή μίας διεργασίας, δημιουργείται από την παρουσία θορύβου ο οποίος προέρχεται από μη ελεγχόμενους παράγοντες, η μεταβλητότητα των οποίων αντικατοπτρίζεται στα μετρούμενα χαρακτηριστικά του προϊόντος (Taguchi, 1986). Επισημάνει δε ότι ως ένα αρχικό βήμα στην προσπάθεια για μείωση της μεταβλητότητας, είναι ο εντοπισμός των παραγόντων που παράγουν το θόρυβο και οι οποίοι δύναται να είναι είτε εξωτερικοί (συνθήκες περιβάλλοντος) είτε εσωτερικοί (μεταβλητότητα μεταξύ προϊόντων, φθορά μηχανών κλπ) (Roy, 2010) και των παραγόντων που μειώνουν το συστηματικό σφάλμα, οι ονομαζόμενοι και παράγοντες σήματος, μεταφέροντας τη μέση τιμή εγγύτερα στο στόχο. Επιπρόσθετα σύμφωνα με τον Taguchi, εφόσον καταστεί εφικτή η προσομοίωση του θορύβου κατά τη διάρκεια ενός πειράματος, είναι εφικτή η επίτευξη ανθεκτικότητας μέσα από την αναγνώριση ενός αριθμού βέλτιστων παραμέτρων του πειραματικού σχεδιασμού (Taguchi, 1986 και Roy, 2010). Ως ανθεκτικότητα κατά τον Taguchi ορίζεται η κατάσταση όπου η τεχνολογία, το προϊόν ή η διεργασία παρουσιάζει την ελάχιστη δυνατή ευαισθησία

στους παράγοντες που συνεισφέρουν στην μεταβλητότητα και τη γήρανση, με το χαμηλότερο κόστος για την παραγωγή (Taguchi, 1986).

Αν και όπως προαναφέρθηκε η προσέγγιση του Taguchi αφορά στην επίτευξη ανθεκτικότητας του προϊόντος ή της διεργασίας, στην πράξη η εφαρμογή της μεθόδου αφορά στη μείωση της μεταβλητότητας ώστε το χαρακτηριστικό ποιότητας που μας ενδιαφέρει να βρίσκεται όσο πιο κοντά στην τιμή στόχο (Singh, 2017). Το γεγονός αυτό όπως θα δούμε στη συνέχεια σχετίζεται με τον τρόπο που ο Taguchi αντιλαμβάνεται την ποιότητα. Όσον αφορά την τιμή του στόχου ή αλλιώς μέτρο επίδοσης διακρίνονται οι παρακάτω τρεις περιπτώσεις:

- Η μεγιστοποίηση της μέσης απόκρισης με παράλληλη μείωση της μεταβλητότητας, δηλαδή όσο μεγαλύτερο τόσο το καλύτερο.
- Η ελαχιστοποίηση της μέσης απόκρισης με παράλληλη μείωση της μεταβλητότητας, δηλαδή όσο μικρότερο τόσο το καλύτερο.
- Η ελαχιστοποίηση της διασποράς και η μέση τιμή της απόκρισης να βρίσκεται κατά το δυνατόν εγγύτερα σε μία ονομαστική τιμή. Δηλαδή η ονομαστική τιμή είναι η καλύτερη.

3.3 Η αντίληψη του Taguchi για την ποιότητα

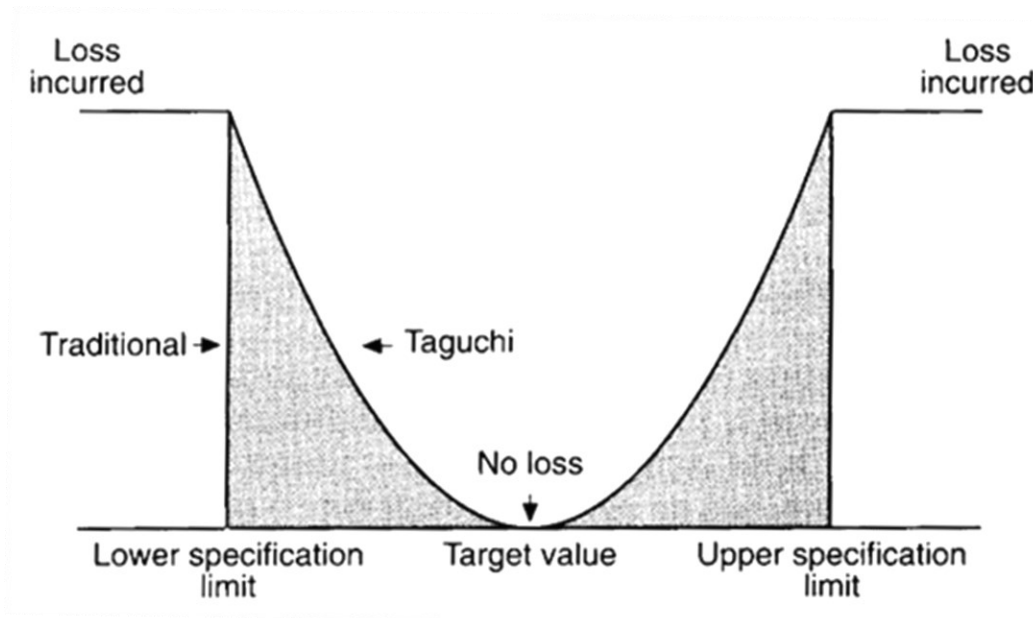
Ο Taguchi ορίζει την ποιότητα ενός προϊόντος «ως την απώλεια που μεταβιβάζεται στην κοινωνία από τη στιγμή της αποστολής του από το εργοστάσιο» (Singh, 2017). Με αυτή την αρνητική προσέγγιση δίδεται έμφαση στις απώλειες που προκαλούνται από τις εμφανιζόμενες αποκλίσεις, στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του προϊόντος, έναντι μίας τιμή στόχου. Η εν λόγω απώλεια μπορεί να προσεγγιστεί, κατά τον Taguchi, από την παρακάτω συνάρτηση απώλειας η οποία γραφικά απεικονίζεται στο σχήμα 3-1:

$$L (\text{χρηματική αξία}) = k (Y - m)^2 \quad (3.1)$$

$$k = \frac{M (\text{χρηματική αξία})}{D^2} \quad (3.2)$$

όπου Y είναι η τιμή του χαρακτηριστικού του προϊόντος, m η τιμή του στόχου και k ένας συντελεστής μετατροπής του κόστους ο οποίος ισούται με το κλάσμα της απώλειας της παραγωγού M , σε χρηματική αξία, όταν το προϊόν βρίσκεται εντός των προδιαγραφών $m \pm D$ του πελάτη έναντι του τετραγώνου του ορίου D . Ο σκοπός αυτής της προσέγγισης

είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών της κοινωνίας από τη χρήση του προϊόντος και η εύρεση της χρυσής τομής μεταξύ της απώλειας ποιότητας και της τιμής του.



Σχήμα 3-1. Συνάρτηση Απώλειας Taguchi (Πηγή: <https://pdcahome.com>)

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 3-1 η φιλοσοφία του Taguchi διαφοροποιείται από την παραδοσιακή άποψη ικανοποίησης των προδιαγραφών και επικροτείται η βελτιστοποίηση των πρακτικών που θα φέρουν τα χαρακτηριστικά του προϊόντος όσο πιο κοντά στην τιμή στόχο.

3.4 Πειραματικός Σχεδιασμός κατά Taguchi

Εν γένει στο πειραματικό σχεδιασμό που προτείνει ο Taguchi γίνεται αξιοποίηση και μελέτη δύο ειδών παραγόντων. Των παραγόντων θορύβου και των παραγόντων ελέγχου. Στα συγκεκριμένα είδη έχει γίνει αναφορά σε προγενέστερη ενότητα, ενώ συγκρατείται ότι οι μεν παράγοντες ελέγχου είναι αυτοί οι οποίοι δύναται να ελεγχθούν είτε κατά τη διάρκεια του πειράματος, είτε κατά την κανονική διεργασία ενώ οι παράγοντες θορύβου είτε πρακτικά δεν ελέγχονται κατά την παραγωγή, είτε δύναται να ελεγχθούν κατά την πειραματική διαδικασία μετά από επίπονη προσπάθεια (Roy, 2010).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω παράγοντες ελέγχου που αναφέρει ο Taguchi, έχουν μία επιπρόσθετη υποδιαίρεση και τους κατηγοριοποιεί σε παράγοντες ελέγχου θορύβου (σημαντική επίδραση στη μεταβλητότητα), σε παράγοντες ελέγχου στόχου (σημαντική

επίδραση στην μέση τιμή) ή αλλιώς «παράγοντες σήματος» και σε παράγοντες κόστους (δεν επιδρούν στη μεταβλητότητα ή τη μέση τιμή) των οποίων οι στάθμες επιλέγονται με βάση τη μείωση του κόστους παραγωγής (Singh, 2017).

3.4.1 Εκτός Σειράς Έλεγχος Ποιότητας – Στάδια Σχεδίασης

Ο Taguchi όσον αφορά τον εκτός σειράς έλεγχο ποιότητας, προτείνει μία διαδικασία αποτελούμενη από τρία βήματα:

- **Το σχεδιασμό του συστήματος**

Όπου γίνεται ο σχεδιασμός του προϊόντος με βάση τα χαρακτηριστικά που είναι επιθυμητό να έχει.

- **Τον σχεδιασμό των παραμέτρων**

Είναι το σημείο κλειδί της μεθόδου και αφορά στην εύρεση των κατάλληλων επιπέδων των παραγόντων ελέγχου, ώστε να μειωθεί η επίδραση στη μεταβλητότητα του προϊόντος ένεκα των παραγόντων θορύβου. Δηλαδή αντί να καταβληθεί προσπάθεια για έλεγχο των παραγόντων που δημιουργούν τη μεταβλητότητα επιλέγεται να μειωθεί η ευαισθησία της παραγωγικής διαδικασίας στην επιρροή τους.

- **Τον σχεδιασμό Ανοχών**

Εάν δεν έχει επιτευχθεί η επιθυμητή βελτίωση στο προηγούμενο βήμα (εξετάστηκαν οι πιο οικονομικοί ή οι πιο εύκολοι παράγοντες) τότε υπάρχει η δυνατότητα στον σχεδιασμό ανοχών να καθορισθούν πιο αυστηρές ανοχές, για κάποιους από τους παράγοντες.

3.4.2 Στάδια Έρευνας

Με βάση τους Karna & Sahai (2012), ο Taguchi προτείνει ένα βασικό πρόγραμμα έρευνας οκτώ σημείων για τον σχεδιασμό του πειράματος, το οποίο θα αξιοποιηθεί και στην παρούσα εργασία, τα στάδια του οποίου συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Βήμα – 1: Ορισμός του Προβλήματος, των παρενεργειών του και της μεθόδου παραγωγής σφαλμάτων.
- Βήμα – 2: Σύγκληση Εμπειρογνομόνων για τον εντοπισμό των παραγόντων θορύβου και των παραγόντων ελέγχου.

- Βήμα – 3: Ορισμός του Στόχου της έρευνας
- Βήμα – 4: Ορισμός των παραγόντων ελέγχου και των επιπέδων τους
- Βήμα – 5: Επιλογή κατάλληλης ορθογώνιας διάταξης
- Βήμα – 6: Εκτέλεση Πειραμάτων και Συλλογή Δεδομένων
- Βήμα – 7: Ανάλυση των δεδομένων και καθορισμός των βέλτιστων επιπέδων απόδοσης.
- Βήμα – 8: Εκτέλεση πειράματος επιβεβαίωσης και προγραμματισμός μελλοντικών ενεργειών

3.4.3 Ορθογώνιες Διατάξεις

Οι ορθογώνιες διατάξεις αποτελούν κεντρικό σημείο της μεθοδολογίας του Taguchi και για το λόγο αυτό θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά. Σύμφωνα με τον Taguchi, για την εκτέλεση του πειραματικού σχεδιασμού αξιοποιείται η τεχνική του κλασματικού / ορθογώνιου σχεδιασμού συνδυάζοντας τη διάταξη που περιλαμβάνει τους παράγοντες ελέγχου (εσωτερική διάταξη) με τη διάταξη που περιλαμβάνει τους παράγοντες θορύβου (εξωτερική διάταξη). Παράλληλα ο Taguchi περιέγραψε αριθμό από τυποποιημένες ορθογώνιες διατάξεις, οι οποίες δύναται να επιλεγθούν με βάση τις απαιτήσεις του σχεδιασμού, εξασφαλίζοντας ότι όλοι οι συνδυασμοί της εσωτερικής διάταξης, υπόκεινται στις ίδιους συνδυασμούς των παραγόντων θορύβου της εξωτερικής, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται και η μελέτη των ασυσχέτιστων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων (Roy, 2010).

3.4.4 Μέτρα Επίδοσης

Κριτήριο για την επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων και την επίτευξη της ανθεκτικότητας αποτελεί για τον Taguchi το λεγόμενο κριτήριο του «σήματος προς θόρυβο», το οποίο είναι μια λογαριθμική συνάρτηση, βασιζόμενη στα αποτελέσματα του ορθογώνιου σχεδιασμού μέσω της οποίας επιλέγονται τα κατάλληλα Μέτρα επίδοσης Θορύβου. Διακρίνονται τα ακόλουθα τρία μέτρα ανάλογα με το εάν είναι επιθυμητή η κατάσταση στην απόδοση «το μεγαλύτερο είναι το καλύτερο», «το μικρότερο είναι το καλύτερο» ή «η ονομαστική τιμή είναι η καλύτερη»:

$$SNR_{MEY} = -10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{n} \sum y^{-2} \right\} \quad (3.3)$$

$$SNR_{MIK} = -10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{n} \sum y^2 \right\} \quad (3.4)$$

$$SNR_{\Sigma\tau\omicron\chi} = 10 \log_{10} \left(\frac{\bar{y}}{s} \right)^2 \quad (3.5)$$

όπου n είναι το πλήθος των y παρατηρήσεων σε κάθε πειραματική δοκιμή ενώ \bar{y} και s είναι ο αριθμητικός μέσος και η τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων της κάθε δοκιμής.

3.4.5 Μετασχηματισμός δεδομένων

Για την εκτέλεση του πειραματισμού είναι απαραίτητο ότι πρέπει να ικανοποιούνται κάποιες στατιστικές προϋποθέσεις όπως η κανονικότητα και η σταθερότητα της διασποράς. Σε περίπτωση που υπάρχει συναρτησιακή εξάρτηση μεταξύ του αριθμητικού μέσου και της διασποράς των αποτελεσμάτων των δοκιμών, αφενός μεν παραβιάζεται η απαίτηση της σταθερότητας της διασποράς, αφετέρου δεν γίνεται εύκολα διακριτή η διαφορά (υπάρχει σύγχυση) μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν τη μεταβλητότητα και αυτών που επηρεάζουν τη μέση τιμή (Logothetis, 1990). Την ύπαρξη εξάρτησης μεταξύ του μέσου και της διασποράς σε αριθμό περιπτώσεων είχε εντοπίσει εμπειρικά και ο Taguchi και για αυτό το λόγο συνδύασε τις δύο παραμέτρους στη σχέση (3.5) (Gamage, 2015).

Από την άλλη ο Box (1988) έδειξε ότι και τα τρία προτεινόμενα από τον Taguchi μέτρα επίδοσης με χρήση του λόγου σήματος προς θόρυβο δεν είναι στατιστικά σημαντικά και εν γένει είναι ανεπαρκή σε σχέση με ένα μετασχηματισμό «λάμδα», στο διαχωρισμό του μέσου από την τυπική απόκλιση (Gamage, 2015) και για αυτό προτείνει ένα τέτοιο μετασχηματισμό ο οποίος είναι και επιθυμητός.

3.4.6 Βέλτιστη Επιλογή

Με βάση τα παραπάνω, τελικά είναι επιθυμητή η αναγνώριση ενός μέτρου θορύβου και ενός μέτρου στόχου τα οποία θα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους καθώς απαιτείται να προσεγγίσουμε π.χ την τιμή στόχο μειώνοντας παράλληλα τη μεταβλητότητα.

Σύμφωνα με τον Logothetis, (1990) υπάρχουν δύο επιλογές με βάση την εκ των προτέρων γνώση της ύπαρξης ή μη της τυχόν σχέσεως αλληλεξάρτησης μεταξύ του μέσου και της διασποράς. Εάν είναι γνωστή η μη ύπαρξη συναρτησιακής σχέσης μεταξύ της διασποράς της δοκιμής και του αριθμητικού της μέσου στην κλίμακα του μετασχηματισμού, τότε τα προτεινόμενα μέτρα θα είναι:

$$M\theta = -10 \log_{10}(s_T^2) \quad (3.6)$$

$$M\Sigma = \bar{y}_T \quad (3.7)$$

όπου s_T^2 και \bar{y}_T είναι η διασπορά και μέσος όρος των αποτελεσμάτων της πειραματικής δοκιμής στην κλίμακα μετασχηματισμού.

Αντίστοιχα η ύπαρξη μιας συναρτησιακής σχέσης μεταξύ του μέσου και της διασποράς, θα μπορούσε να αξιολογηθεί μέσω του μετασχηματισμού βήτα που προτείνει ο Logothetis, (1990) με την τιμή του βήτα να προσδιορίζεται από τον εκτιμητή των ελαχίστων τετραγώνων για το b στην παρακάτω σχέση:

$$\log s_i = \log a + b \log \bar{x}_i + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.8)$$

και τότε θα χρησιμοποιηθούν τα παρακάτω μέτρα με τα οποία είναι εφικτό να αποφευχθεί η απαίτηση μετασχηματισμού, αλλά και η σύγχυση μεταξύ των παραγόντων ελέγχου στόχου και θορύβου.

$$M\theta = 10 \log_{10}\left(\frac{f(\bar{y})}{s}\right)^2 \quad (3.9)$$

$$M\Sigma = \bar{y} \quad (3.10)$$

Έτσι εάν διαπιστωθεί ότι υπάρχει συναρτησιακή σχέση μεταξύ του μέσου και της διασποράς και ισχύει ότι:

$$\sigma = f(\mu) = \kappa \mu^\beta \quad (3.11)$$

τότε η (3.9) γίνεται

$$M\theta = 10 \log_{10}\left(\frac{\bar{y}^\beta}{s}\right)^2 \quad (3.12)$$

και θα αποτελέσει το μέτρο θορύβου για τον πειραματισμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο Logothetis, (1990) δεν απορρίπτει την ικανότητα ενός μετασχηματισμού δεδομένων πλην όμως επισημαίνει ότι εφαρμόζοντας την τεχνική βήτα καθώς είναι πανομοιότυπη με τον μετασχηματισμό «λάμδα» (της τεχνικής των Box-Cox) και άρα μέσω της ιδιαίτερα απλής διαδικασίας εύρεσης του b της σχέσης (3.8) επιτυγχάνονται τα ακόλουθα:

- Δημιουργείται ένας μέτρο για τον έλεγχο των παραγόντων θορύβου, το οποίο απεικονίζει τη μεταβλητότητα της διεργασίας ή του προϊόντος ανεξάρτητα από τη μέση τιμή.

- Ικανοποιούνται οι στατιστικές προϋποθέσεις της ανεξαρτησίας του μέσου από τη διασπορά, την ανεξαρτησία, την κανονικότητα και την ομοσκεδαστικότητα των σφαλμάτων.
- Εξασφαλίζεται η απλότητα (γραμμικότητα) του μοντέλου επιτρέποντας έτσι την εξαρχής θεώρηση αλληλεπιδράσεων υψηλότερης τάξης.

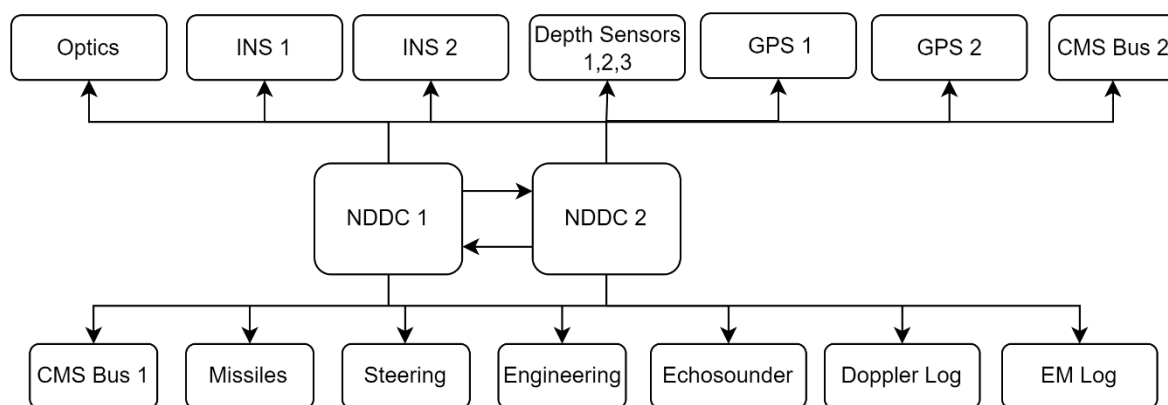
4. Εφαρμογή της μεθοδολογίας Taguchi στο ναυτιλιακό σύστημα υποβρυχίου οχήματος

4.1 Γενική Περιγραφή του Συστήματος Ναυτιλίας

Το σύστημα ενδιαφέροντος είναι ένα τυπικό ολοκληρωμένο σύστημα ναυτιλίας, το οποίο απαντάται σε συμβατικά υποβρύχια εκτοπίσματος περί τους 2000 τόνους.

Η καρδιά του συστήματος είναι το σύστημα διαχείρισης ναυτιλιακών αισθητήρων το οποίο έχει σαν σκοπό τη διασύνδεση των αισθητήρων μεταξύ τους, τη λήψη πρωταρχικών δεδομένων από αυτούς και εν συνεχεία τη διανομή επεξεργασμένων δεδομένων προς το σύνολο των συνδεδεμένων συστημάτων, είτε για την εκτέλεση υπολογισμών είτε για απεικόνιση προς τους χειριστές.

Οι γενική διασύνδεση των αισθητήρων με τη μονάδα διαχείρισης ναυτιλιακών δεδομένων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4-1. Διακρίνεται η ύπαρξη εν γένει τουλάχιστον δύο αισθητήρων ανά είδος, γεγονός το οποίο αντικατοπτρίζει την σημασία που έχει δοθεί στην αξιοπιστία του συστήματος από τον κατασκευαστή.



Σχήμα 4-1. Διασυνδέσεις Συστήματος διαχείρισης δεδομένων Y/B

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το σύστημα έχει τη δυνατότητα λήψης της ίδιας πληροφορίας από πολλαπλούς αισθητήρες, η επιλογή του πλέον κατάλληλου βασίζεται σε λίστες προτεραιοτήτων ανά είδος πληροφορίας, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί με βάση την απόδοση και την αξιοπιστία των παρεχόμενων δεδομένων από τον εκάστοτε αισθητήρα αλλά και την μέθοδο με βάση την οποία συλλέγονται τα δεδομένα (απ' ευθείας μέτρηση ή υπολογισμός).

Σε κρίσιμα συστήματα όπου συμμετέχουν τουλάχιστον τρεις αισθητήρες για την ίδια μέτρηση, εκτελείται και επιπρόσθετος έλεγχος εφικτότητας. Ήτοι διερευνάται μέσω συγκρίσεως των αναφερομένων τιμών η πιθανότητα ένας αισθητήρας να είναι βεβλαμένος.

Ειδικότερα όσον αφορά τους ναυτιλιακούς αισθητήρες, που απασχολούν την παρούσα μελέτη, διακρίνονται τα δύο αδρανειακά συστήματα ναυτιλίας, το δρομόμετρο, το δρομόμετρο Doppler, βαθύμετρα και οι δέκτες του δορυφορικού συστήματος ναυτιλίας.

Για τον υπολογισμό και την απεικόνιση των παραμέτρων θέσεως, πορείας και ταχύτητας του υποβρυχίου, το σύστημα διαχείρισης των ναυτιλιακών δεδομένων βασίζεται όπως προαναφέρθηκε σε λίστες προτεραιοτήτων, οι οποίες ρυθμίζουν αυτόματα την επιλογή του βέλτιστου αισθητήρα διατηρώντας πάντα τη δυνατότητα παρέμβασης από τον χειριστή. Ειδικά για τον υπολογισμό της θέσης του υποβρυχίου, διατίθενται δύο επιπρόσθετες ομάδες «αισθητήρων» τα Optimization και τα Navigation modules, τα οποία είναι ουσιαστικά υπολογιστικά συστήματα όπου τα μεν πρώτα βελτιστοποιούν την έξοδο των αδρανειακών συστημάτων προσπαθώντας να απαλείψουν τις ταλαντώσεις Schuler, ενώ τα δε δεύτερα είναι οι αισθητήρες με την μεγαλύτερη προτεραιότητα για τη εξαγωγή της θέσεως του υποβρυχίου και συνδυάζουν το σύνολο των ναυτιλιακών αισθητήρων με το μοντέλο κίνησης του υποβρυχίου για την παραγωγή του στίγματος. Τα δεδομένα της παρούσας εργασίας προέρχονται από αυτούς τους αισθητήρες.

Τέλος, οι κύριοι αποδέκτες των ναυτιλιακών πληροφοριών είναι το σύστημα μάχης και το σύστημα ηλεκτρονικών χαρτών του υποβρυχίου ενώ τμήματα των ανωτέρω πληροφοριών (συνήθως η πορεία, η ταχύτητα και το βάθος) αξιοποιούνται στα υπόλοιπα συστήματα.

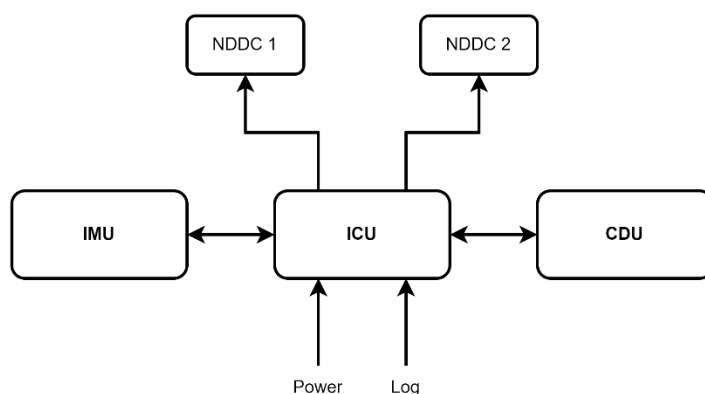
4.1.1 Ναυτιλιακοί Αισθητήρες

INS

Οι ναυτιλιακοί αισθητήρες του συστήματος περιλαμβάνουν δύο αυτόνομα αδρανειακά συστήματα ναυτιλίας τα οποία βασίζονται σε γυροσκόπια laser. Τα αδρανειακά συστήματα λειτουργούν παράλληλα και είναι συνδεδεμένα και με τις δύο μονάδες του συστήματος διαχείρισης ναυτιλιακών δεδομένων. Τα εξαγόμενα στοιχεία από τις δύο μονάδες περιλαμβάνουν στοιχεία πορείας, ταχύτητες και ρυθμούς μεταβολής των ταχυτήτων ως προς τους τρεις άξονες, την κλίση και το εκκρεμές του υποβρυχίου. Από τη μονάδα

διαχείρισης ναυτιλιακών δεδομένων λαμβάνουν την ταχύτητα του υποβρυχίου ως προς το νερό μέσω του ηλεκτρομαγνητικού δρομομέτρου καθώς και στοιχεία πορείας – ταχύτητας – θέσεως από τους δέκτες δορυφορικής ναυτιλίας.

Τα τμήματα που απαρτίζουν τα αδρανειακά συστήματα απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 4-2. Συγκρατείται η αδρανειακή μονάδα, η μονάδα διεπαφής (ICU) για τη σύνδεση της αδρανειακής μονάδας με την μονάδα χειρισμού και το σύστημα διαχείρισης ναυτιλιακών δεδομένων και η μονάδα χειρισμού και ελέγχου (CDU).



Σχήμα 4-2. Τμήματα και Διασυνδέσεις Αδρανειακής Μονάδας

Navigation Modules

Τα στοιχεία από τα δύο συστήματα εισέρχονται στις δύο μονάδες διαχείρισης ναυτιλιακών δεδομένων όπου εκεί επεξεργάζονται εκ νέου, σε υπολογιστικό επίπεδο, στην υπομονάδα ναυτιλίας. Συγκεκριμένα, τα λαμβανόμενα στοιχεία από τις μονάδες των δύο INS, συνδυάζονται επί του μοντέλου κίνησης του σκάφους με πληροφορίες από τους υπόλοιπους αισθητήρες (βαθύμετρα, ηλεκτρομαγνητικό δρομόμετρο και δρομόμετρο Doppler) και μέσω φίλτρων Kalman εξάγονται τα τελικά κινηματικά στοιχεία του σκάφους (θέση, ανύσματα ταχύτητας ως προς το βυθό).

Οι εν λόγω μονάδες είναι η κύρια πηγή για τη δημιουργία των κινηματικών στοιχείων του σκάφους και ως εκ τούτου αξιοποιήθηκαν για την παραγωγή των δεδομένων του πειράματος.

Η μορφή των δεδομένων είναι όπως απεικονίζεται στον παρακάτω πίνακα 4-1. Λόγω της φύσης τους τα εν λόγω δεδομένα χαρακτηρίζονται ως εμπιστευτικά και δεν είναι εφικτή η πλήρης παράθεσή τους στην παρούσα εργασία.

System_ Time.Date	System_ Time.Time	Compass. Value	Position. Latitude	Position. Longitude	Cog. Value	Sog_ Long	Speed_ Water. Value	Drift_ Angle. Value	Drift_ Speed. Value	Diving_ Depth. Value
20/8/2019	15:26:18.00	296.71	365.367	243.880	292.80	2.82	3.28	141.00	0.36	55.10
20/8/2019	15:26:19.00	296.68	365.367	243.880	292.80	2.82	3.28	140.80	0.36	55.40
20/8/2019	15:26:20.00	296.66	365.367	243.880	292.80	2.82	3.28	140.80	0.36	55.60
20/8/2019	15:26:21.00	296.62	365.367	243.879	292.80	2.82	3.28	140.70	0.36	55.80
20/8/2019	15:26:22.00	296.59	365.367	243.879	292.80	2.82	3.28	140.70	0.36	56.00
20/8/2019	15:26:23.00	296.55	365.367	243.879	292.80	2.82	3.28	140.70	0.36	56.20
20/8/2019	15:26:24.00	296.50	365.367	243.879	292.90	2.82	3.28	140.50	0.36	56.30
20/8/2019	15:26:25.00	296.46	365.367	243.878	292.80	2.82	3.28	140.40	0.36	56.50
20/8/2019	15:26:26.00	296.42	365.368	243.878	292.80	2.82	3.28	140.20	0.36	56.60
20/8/2019	15:26:27.00	296.38	365.368	243.878	292.80	2.82	3.28	140.10	0.36	56.60
20/8/2019	15:26:28.00	296.34	365.368	243.877	292.80	2.82	3.27	139.90	0.36	56.70
20/8/2019	15:26:29.00	296.29	365.368	243.877	292.70	2.82	3.27	139.90	0.36	56.70
20/8/2019	15:26:30.00	296.26	365.368	243.877	292.70	2.82	3.27	139.90	0.36	56.70
20/8/2019	15:26:31.00	296.22	365.368	243.876	292.70	2.82	3.26	139.80	0.36	56.60

Πίνακας 4-1. Δείγμα Παραγομένων Στοιχείων από το εξεταζόμενο ναυτιλιακό σύστημα

Αισθητήρες Βάθους

Οι αισθητήρες βάθους του υποβρυχίου είναι συνολικά πέντε (έχει δοθεί σημαίνουσα βαρύτητα από τον σχεδιαστή) και αποτελούνται από τρεις εσωτερικούς, οι οποίοι μετρούν την πίεση της θάλασσας που παρέχεται από συγκεκριμένο δίκτυο υψηλής πίεσης και από δύο εξωτερικούς οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο εξωτερικό σκάφος (αποτελούν τμήμα άλλων οργάνων, των βαθυθερμογράφων) και μετρούν την εξωτερική πίεση ανεξάρτητα από τη λειτουργία ή μη των δικτύων θαλάσσης του υποβρυχίου.

Τα δεδομένα από το σύνολο των αισθητήρων βάθους συλλέγονται από τη μονάδα διαχείρισης ναυτιλιακών δεδομένων και μετά από έλεγχο ορθότητας (απορρίπτονται οι ενδείξεις που δεν είναι συναφείς με των υπολοίπων) προκύπτει το βάθος του υποβρυχίου με αναγωγή στην τροπίδα αυτού.

Αισθητήρες Ταχύτητας

Οι αισθητήρες ταχύτητας του υποβρυχίου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σχετικής ταχύτητας ως προς το νερό και αληθούς ταχύτητας ως προς το βυθό. Στην μεν πρώτη κατηγορία ανήκει το ηλεκτρομαγνητικό δρομόμετρο το οποίο υπολογίζει, μέσω δύο εξωτερικών αισθητήρων, την ταχύτητα του υποβρυχίου στο νερό ενώ στη δεύτερη κατηγορία ανήκει το δρομόμετρο Doppler το οποίο αξιοποιεί μία ομάδα πέντε ακουστικών

δεσμών, για τον υπολογισμό της ταχύτητας του υποβρυχίου με βάση τις ανακλάσεις του ήχου από τον βυθό.

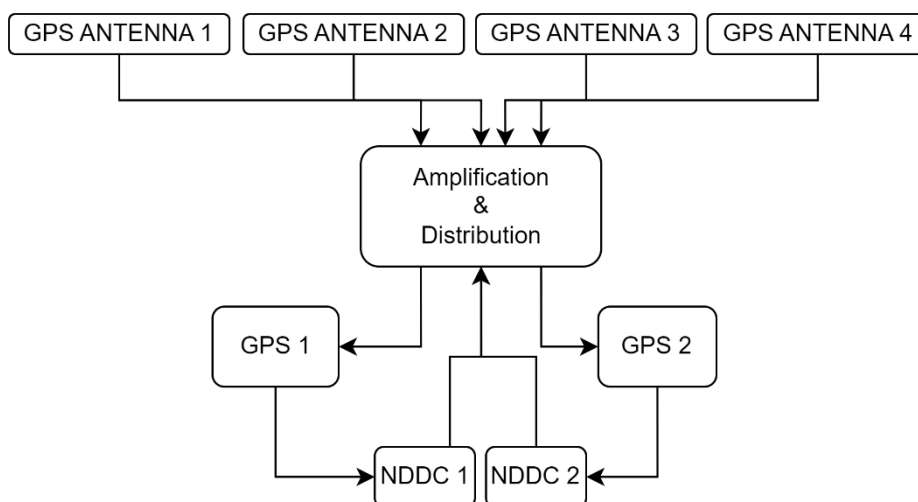
Οι εν λόγω αισθητήρες είναι κρίσιμης σημασίας καθώς αξιοποιούνται από τα αδρανειακά συστήματα για την άμβλυνση της έκπτωσης του γυροσκοπίου στον οριζόντιο άξονα αλλά η χρήση τους υπόκειται σε περιορισμούς.

Το δρομόμετρο υπόκειται σε σφάλματα αφενός από την ανάπτυξη θαλάσσιας βιορύπανσης, η οποία είναι μια βιολογική διαδικασία που λαμβάνει χώρα, ανεξάρτητα από τη γεωγραφική θέση και τις κλιματικές συνθήκες (Μπατσαούρας, 2022), αφετέρου δε από την ύπαρξη θαλασσίων ρευμάτων τα οποία κινούν ως προς το βυθό, το σύνολο της θαλάσσιας μάζας μέσα την οποία βρίσκεται το υποβρύχιο και όχι το σκάφος ως προς αυτήν.

Αντίθετα το δρομόμετρο doppler δεν επηρεάζεται από τα ανωτέρω φαινόμενα καθώς μετρά την αληθή ταχύτητα του υποβρυχίου στο χώρο πλην όμως δεν είναι εφικτή πάντοτε η χρήση του, καθώς προδίδει την παρουσία του υποβρυχίου (ένεκα της εκπομπής ήχου) ενώ λειτουργεί αποδοτικά μόνο σε ρηχά ύδατα (απόσταση από το βυθό < 200 μέτρων). Ως εκ τούτου οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας δεν περιλαμβάνουν τη χρήση αυτής της συσκευής.

Δέκτες συστήματος δορυφορικής ναυτιλίας

Οι δύο δέκτες βρίσκονται εγκατεστημένοι, ανά ένας, στις δύο μονάδες του συστήματος διαχείρισης ναυτιλιακών δεδομένων. Είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και διαθέτουν κοινή σύνδεση με τις κεραίες GPS του υποβρυχίου. Η διασύνδεση, φαίνεται στο σχήμα 4-3 και γίνεται μέσω μίας εξωτερικής μονάδας μικτονόμησης, η οποία εξασφαλίζει την ταυτόχρονη παροχή πρόσβασης σε μία από τις πέντε κεραίες (και πάλι βάσει προτεραιοτήτων), ενώ παράλληλα μέσω της επιβαλλόμενης ενίσχυσης σήματος εξασφαλίζεται η ικανοποιητική λήψη σήματος παρά τα μεγάλα μήκη των γραμμών μεταφοράς.



Σχήμα 4-3. Διασύνδεση Αισθητήρων GPS με το σύστημα διαχείρισης ναυτιλιακών δεδομένων

4.2 Ορισμός του Προβλήματος

Για τον ορισμό του προβλήματος, θα αξιοποιηθεί το τυπικό προφίλ κίνησης ενός συμβατικού υποβρυχίου. Αρχικά το σκάφος πλέει εν επιφανεία και κινείται προς το σημείο καταδύσεως. Η εν λόγω διαδικασία έχει συνήθως σχετικά μικρή διάρκεια (μερικές ώρες) και εκτελείται σε φίλια ύδατα καθώς καθόλη τη διάρκειά της το σκάφος είναι εκτεθειμένο. Σε αυτή τη φάση δεν τίθεται αμφιβολία για τη θέση του σκάφους καθώς όλες οι πηγές πληροφοριών είναι διαθέσιμες.

Εν συνεχεία το υποβρύχιο αφού ολοκληρώσει τη διαδικασία της κατάδυσης (ερματισμός του σκάφους) μπορεί να κινείται ελεύθερα κάτω από το νερό με βάση τον σκοπό της αποστολής του. Τα όρια της κίνησης του είναι από λίγα μέτρα κάτω από την επιφάνεια (περισκοπικό βάθος) όπου έχει τη δυνατότητα να ανανεώσει τα στοιχεία της θέσεως του (GPS, οπτικά, ραντάρ) έως το μέγιστο επιχειρησιακό του βάθος (μερικές εκατοντάδες μέτρα κάτω από τη θάλασσα).

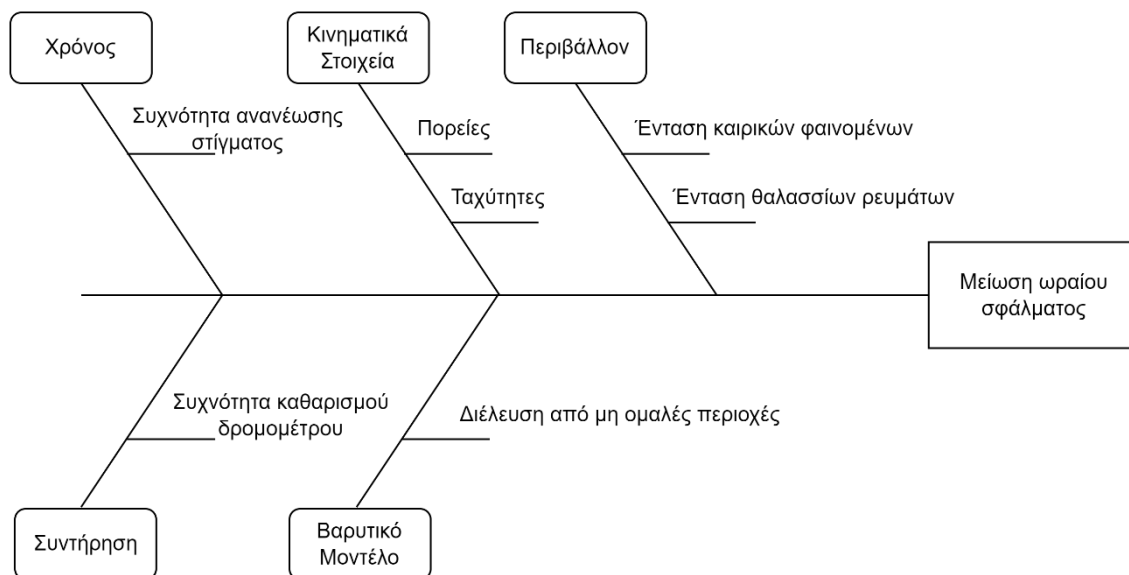
Η θέση του υποβρυχίου μέσα στο νερό, είναι μια περιοδική ή μη, εναλλαγή μεταξύ της πλεύσης σε περισκοπικό βάθος (περίπου 15% του χρόνου) όπου έχει στη διάθεσή του όλους τους αισθητήρες του αλλά είναι εκτεθειμένο και της πλεύσης σε μεγαλύτερα βάθη (85% του χρόνου), τα οποία καθορίζονται από τις απαιτήσεις της αποστολής (έρευνα, απόκρυψη, ασφάλεια) και όπου η αντίληψη της θέσεως του προκύπτει αποκλειστικά από την αναμέτρηση που παρέχουν τα αδρανειακά συστήματα ναυτιλίας.

Τα εν λόγω συστήματα όπως αναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο υπόκεινται σε σφάλματα, τα οποία αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου, αναγκάζοντας το υποβρύχιο να ανέλθει σε περισκοπικό βάθος και όντας εκτιθέμενο, να προσπαθήσει με χρήση των δορυφορικών συστημάτων ναυτιλίας να τα μηδενίσει.

Επομένως ως αντικείμενο του πειραματισμού χαρακτηρίστηκε η μείωση του ωριαίου σφάλματος, η οποία όμως θα πρέπει να επιτευχθεί με τα διαθέσιμα μέσα που έχει το σκάφος κατά την αποστολή και δύναται να μεταβάλει μεταξύ των δύο περιόδων ανόδου σε περισκοπικό βάθος ή με προληπτικά μέτρα προ ενάρξεως της αποστολής.

4.3 Καθορισμός Παραγόντων Θορύβου και Ελέγχου

Ο καθορισμός των παραγόντων θορύβου και ελέγχου για την παρούσα μελέτη βασίστηκε σε προσωπική πολυετή εμπειρία του φοιτητή επί του αντικειμένου, ενώ ελήφθησαν υπόψη υποδείξεις συναδέλφων που δραστηριοποιούνται στο χώρο. Οι παράγοντες που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα Ishikawa.



Σχήμα 4-4. Διάγραμμα Ishikawa για τον καθορισμό των παραγόντων Θορύβου και Ελέγχου

Ειδικότερα, όσον αφορά τη διάκριση των παραγόντων του παραπάνω σχήματος 4-4, η ένταση των καιρικών φαινομένων και η ένταση των θαλασσίων ρευμάτων αφενός μεν έχουν μία αλληλεξάρτηση, αφετέρου δε αποτελούν συνθήκες οι οποίες δεν είναι στη δυνατότητα του υποβρυχίου να μεταβληθούν. Για το λόγο αυτό χαρακτηρίστηκαν ως Παράγοντες

Θορύβου ενώ οι υπόλοιποι παράγοντες χαρακτηρίστηκαν ως Παράγοντες Ελέγχου. Συγκεκριμένα, η διέλευση ή μη από περιοχές που το βαρυτικό μοντέλο δεικνύει σημαντικές διαφοροποιήσεις, η συχνότητα βάσει της οποίας το υποβρύχιο ανέρχεται σε περισκοπικό βάθος για λήψη στίγματος, η προληπτική συντήρηση του δρομομέτρου, το οποίο υπόκειται σε βιορύπανση, καθώς επίσης και τα κινηματικά στοιχεία του σκάφους αποτελούν παράγοντες που εύκολα και σχετικά ανέξοδα θα μπορούσαν να μεταβληθούν ώστε να μειωθεί το ωριαίο σφάλμα του σκάφους. Για ευκολία σε μελλοντική αναφορά οι παράγοντες κωδικοποιήθηκαν με γράμματα της ελληνικής αλφαβήτου.

Στη συνέχεια και με βάση την πρότερη εμπειρία επιλέχθηκαν τα επίπεδα των παραγόντων τα οποία θα είναι δύο για κάθε παράγοντα. Συνοπτικά τα επιλεγθέντα επίπεδα ανά παράγοντα θορύβου και ελέγχου και οι κωδικές ονομασίες αυτών φαίνονται στους παρακάτω δύο πίνακες 4-2 και 4-3.

Κωδική Ονομασία	Παράγοντες Ελέγχου	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2
A	Συχνότητα ανανέωσης στίγματος	< 4 ώρες	> 4 ώρες
B	Συχνότητα καθαρισμού Δρομομέτρου	< 2 μήνες	> 2 μήνες
Γ	Διέλευση από περιοχές από περιοχές με μη ομαλό πεδίο	Ναι	Όχι
Δ	Πορείες	Ευθύγραμμες	Μεταβλητές
E	Ταχύτητες	< 4 kts	≥ 4 kts

Πίνακας 4-2. Επίπεδα Παραγόντων Ελέγχου

Κωδική Ονομασία	Παράγοντες Θορύβου	Επίπεδο 1	Επίπεδο 2
ΣΤ	Ένταση καιρικών φαινομένων	< SS 5	≥ SS 5
Z	Ένταση θαλασσίου ρεύματος	< 1 kts	≥ 1 kts

Πίνακας 4-3. Επίπεδα Παραγόντων Θορύβου

4.4 Σχεδιασμός – Επιλογή κατάλληλης ορθογώνιας διάταξης

Για την επιλογή κατάλληλης εσωτερικής ορθογώνιας διάταξης προηγήθηκε ο υπολογισμός των βαθμών ελευθερίας των παραγόντων ελέγχου. Οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας ήταν πέντε καθώς ο σχεδιασμός περιλάμβανε πέντε παράγοντες με δύο επίπεδα και ένα βαθμό ελευθερίας ο καθένας, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα 4-4.

Κωδική Ονομασία	Επίπεδα	Βαθμοί Ελευθερίας
A	2	2-1 = 1
B	2	2-1 = 1
Γ	2	2-1 = 1
Δ	2	2-1 = 1
E	2	2-1 = 1
Σύνολο		5 β.ε

Πίνακας 4-4. Υπολογισμός Βαθμών Ελευθερίας

Έτσι ως κατάλληλος σχεδιασμός για τους Παράγοντες Ελέγχου και την εσωτερική διάταξη επιλέχθηκε η ορθογώνια διάταξη $L8(2^5)$ του πίνακα 4-5, με 8 δοκιμές και 5 στήλες με τους αντίστοιχους πέντε δισταθμικούς παράγοντες.

Δοκιμή	Παράγοντες				
	A	B	Γ	Δ	E
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2
3	1	2	2	1	1
4	1	2	2	2	2
5	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1
7	2	2	1	1	2
8	2	2	1	2	1

Πίνακας 4-5. Ορθογώνια Διάταξη $L8$

Αντίστοιχα για την εξωτερική διάταξη και τους Παράγοντες Θορύβου επιλέχθηκε ο πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός 2^2 των παραγόντων ΣΤ και Ζ, όπως φαίνεται στον πίνακα 4-6.

Επανάληψη	Παράγοντες	
	ΣΤ	Z
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

Πίνακας 4-6. Πλήρης Παραγοντικός Σχεδιασμός 2^2

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν δύο πίνακες (4-7 και 4-8), ένας για την εξωτερική και ένας για την εσωτερική διάταξη οι οποίοι περιείχαν τα πραγματικά επίπεδα των παραγόντων. Επισημαίνεται ότι λόγω της εξωτερικής διάταξης η κάθε μία από τις οκτώ καταστάσεις επαναλήφθηκε τέσσερις φορές.

Επανάληψη	Παράγοντες	
	ΣΤ	Z
1	< SS 5	< 1 kts
2	< SS 5	≥ 1 kts
3	≥ SS 5	< 1 kts
4	≥ SS 5	≥ 1 kts

Πίνακας 4-7. Εξωτερική Διάταξη

Δοκιμή	Παράγοντες				
	A	B	Γ	Δ	E
1	< 4 h	< 2 μήνες	Ναι	Ευθύγραμμα	< 4 kts
2	< 4 h	< 2 μήνες	Ναι	Μεταβλητές	> 4 kts
3	< 4 h	'> 2 μήνες	Όχι	Ευθύγραμμα	< 4 kts
4	< 4 h	'> 2 μήνες	Όχι	Μεταβλητές	> 4 kts
5	> 4h	< 2 μήνες	Όχι	Ευθύγραμμα	> 4 kts
6	> 4h	< 2 μήνες	Όχι	Μεταβλητές	< 4 kts
7	> 4h	'> 2 μήνες	Ναι	Ευθύγραμμα	> 4 kts
8	> 4h	'> 2 μήνες	Ναι	Μεταβλητές	< 4 kts

Πίνακας 4-8. Εσωτερική Διάταξη

4.5 Εκτέλεση Πειραμάτων – Συλλογή Δεδομένων

Η λήψη των δεδομένων βασίσθηκε σε ήδη καταγεγραμμένα στοιχεία, που αφορούσαν σε μία συνολική περίοδο 4 ετών και από τα οποία επιλέχθηκαν όσα κάλυπταν, τόσο τις απαιτήσεις της εσωτερικής, όσο και τους συνδυασμούς της εξωτερικής διάταξης.

Καθώς είχε επιλεγεί η ορθογώνια διάταξη L8 για τους πέντε δισταθμικούς παράγοντες και με βάση των πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό για την εξωτερική διάταξη των δύο παραγόντων, ελήφθησαν συνολικά 32 μετρήσεις έκπτωσης στίγματος μετά από άνοδο του Y/B σε περισκοπικό βάθος, όπως φαίνονται στον πίνακα 4-9. Οι εν λόγω μετρήσεις αφορούσαν σε απ' ευθείας μέτρηση του σφάλματος θέσεως μετά από σταθεροποίηση των ενδείξεων GPS. Δεν υπήρχε ένδειξη για παρεμβολή ή βλάβη στη λειτουργία των συσκευών ελέγχου της θέσεως του Y/B και οι μετρήσεις θεωρήθηκαν αξιόπιστες.

Δοκιμή	Παράγοντες								
	ΣΤ					1	1	2	2
	Ζ					1	2	1	2
	Α	Β	Γ	Δ	Ε				
1	1	1	1	1	1	126	365	227	418
2	1	1	1	2	2	110	320	198	380
3	1	2	2	1	1	213	405	324	653
4	1	2	2	2	2	184	346	287	548
5	2	1	2	1	2	85	220	97	356
6	2	1	2	2	1	102	328	128	420
7	2	2	1	1	2	94	265	105	392
8	2	2	1	2	1	174	385	210	567

Πίνακας 4-9. Δεδομένα Πειραματισμού

4.6 Στατιστική Ανάλυση των δεδομένων

Για τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων τα αποτελέσματα από τον πειραματισμό εισήχθησαν στο λογισμικό Minitab.

Σκοπός της ανάλυσης ήταν η επιλογή των κατάλληλων μέτρων επίδοσης στόχου και θορύβου, ώστε να προσδιοριστούν οι αντίστοιχοι παράγοντες ελέγχου και μέσω της επιλογής των βέλτιστων επιπέδων τους να προσεγγιστεί η τιμή του στόχου από τη μέση τιμή (μηδενικό σφάλμα) και να ελαχιστοποιηθεί η μεταβλητότητα.

Ως μέτρο επίδοσης στόχου ΜΣ επιλέχθηκε ο αριθμητικός μέσος των παρατηρήσεων της κάθε δοκιμής ο οποίος αντικατοπτρίζει επαρκώς τη συνήθη απόδοση του ναυτιλιακού συστήματος.

Όσον αφορά το μέτρο επίδοσης θορύβου για την επιλογή του σύμφωνα με τον Taguchi το προτεινόμενο μέτρο για περιπτώσεις όπως αυτή του συγκεκριμένου πειραματισμού όπου «η χαμηλότερη τιμή είναι η καλύτερη» προτείνεται η σχέση 3.4.

Επειδή η εν λόγω πρόταση του Taguchi θα απέκρυπτε τυχόν σύγχυση μεταξύ του μέσου και της διασποράς και επειδή δεν ήταν επιθυμητός ο μετασχηματισμός δεδομένων επιλέχθηκε ως μέσο επίδοσης θορύβου η τεχνική βήτα που προτείνεται όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3 από τον Logothetis, (1990).

4.6.1 Συναρτησιακή σχέση μεταξύ του μέσου και της τυπικής απόκλισης

Τα δεδομένα εισήχθησαν στο Minitab όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 4-10.

Δοκ	A	B	Γ	Δ	E	Επαν 1	Επαν 2	Επαν 3	Επαν 4	Mean	Std. Dev
1	1	1	1	1	1	126	365	227	418	284,000	132,577
2	1	1	1	2	2	110	320	198	380	252,000	121,227
3	1	2	2	1	1	213	405	324	653	398,750	186,880
4	1	2	2	2	2	184	346	287	548	341,250	153,230
5	2	1	2	1	2	85	220	97	356	189,500	126,661
6	2	1	2	2	1	102	328	128	420	244,5	154,543
7	2	2	1	1	2	94	265	105	392	214	142,087
8	2	2	1	2	1	174	385	210	567	334	180,616

Πίνακας 4-10. Δεδομένα Πειραματισμού (μέση τιμή – τυπική απόκλιση)

Στη συνέχεια για πιστοποιηθεί η σχέση 3.11 εκτιμήθηκε η τιμή του β μέσω του εκτιμητή b στη σχέση 3.8 που προτείνεται από τον Logothetis, (1990) και δημιουργήθηκαν δύο επιπρόσθετες στήλες με το αποτέλεσμα του δεκαδικού λογαρίθμου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης όπως φαίνεται στον πίνακα 4-11.

Δοκ	A	B	Γ	Δ	E	Επαν 1	Επαν 2	Επαν 3	Επαν 4	Mean	Std. Dev	log(mean)	log(s)
1	1	1	1	1	1	126	365	227	418	284,000	132,577	2,45332	2,12247
2	1	1	1	2	2	110	320	198	380	252,000	121,227	2,40140	2,08360
3	1	2	2	1	1	213	405	324	653	398,750	186,880	2,60070	2,27156
4	1	2	2	2	2	184	346	287	548	341,250	153,230	2,53307	2,18535
5	2	1	2	1	2	85	220	97	356	189,500	126,661	2,27761	2,10264
6	2	1	2	2	1	102	328	128	420	244,5	154,543	2,38828	2,18905
7	2	2	1	1	2	94	265	105	392	214	142,087	2,33041	2,15255
8	2	2	1	2	1	174	385	210	567	334	180,616	2,52375	2,25676

Πίνακας 4-11. Δεδομένα Πειραματισμού (log(mean) – log(s))

Μετά την εκτέλεση παλινδρόμησης προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα του λογισμικού Minitab όπως φαίνεται στον πίνακα 4-12, όπου διαπιστώνεται ότι η β είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 5% και υπάρχει συναρτησιακή σχέση μεταξύ της τυπικής απόκλισης και της μέσης τιμής κάθε πειραματικής δοκιμής.

Η εν λόγω σχέση εκτιμάται ως:

$$\log(s) = 1,024 + 0,470 \log(\text{mean}) \quad (4.1)$$

Επομένως $b = 0,470$.

Με βάση τα ανωτέρω το ΜΘ που χρησιμοποιήθηκε με βάση τη σχέση 3.11 διαμορφώθηκε σε:

$$M\Theta = 10\log_{10}\left(\frac{\bar{y}^{0,470}}{s}\right)^2 \quad (4.2)$$

Regression Analysis: log(s) versus log(mean)

Regression Equation

$\log(s) = 1,024 + 0,470 \log(\text{mean})$

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	0,01861	56,39%	0,01861	0,018611	7,76	0,032
log(mean)	1	0,01861	56,39%	0,01861	0,018611	7,76	0,032
Error	6	0,01439	43,61%	0,01439	0,002399		
Total	7	0,03300	100,00%				

Πίνακας 4-12. Ανάλυση Διασποράς Παλινδρόμησης

Ο τελικός πίνακας 4-13 με τα δεδομένα του πειραματισμού και τα δύο μέτρα επίδοσης διαμορφώθηκε στον ακόλουθο:

Δοκ	A	B	Γ	Δ	Ε	Επαν 1	Επαν 2	Επαν 3	Επαν 4	ΜΣ	ΜΘ
1	1	1	1	1	1	126	365	227	418	284,00	-19,3882
2	1	1	1	2	2	110	320	198	380	252,00	-19,0988
3	1	2	2	1	1	213	405	324	653	398,75	-20,9847
4	1	2	2	2	2	184	346	287	548	341,25	-19,8960
5	2	1	2	1	2	85	220	97	356	189,50	-20,6433
6	2	1	2	2	1	102	328	128	420	244,50	-21,3312
7	2	2	1	1	2	94	265	105	392	214,00	-21,1452
8	2	2	1	2	1	174	385	210	567	334,00	-21,4119

Πίνακας 4-13. Μέτρα Επίδοσης

4.6.2 Ανάλυση Διασποράς

Στη συνέχεια εκτελέστηκε ανάλυση διασποράς για να διερευνηθεί η επίδραση των παραγόντων, μέσω των μέτρων στόχου και θορύβου, στην ωριαία έκπτωση.

Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και 90%.

Ανάλυση Διασποράς ΜΣ

Από τον ακόλουθο πίνακα ανάλυσης διασποράς για το μέτρο ελέγχου στόχου, διαπιστώθηκε ότι σε επίπεδο σημαντικότητας 5%, ο παράγοντας Β (η συχνότητα καθαρισμού του δρομομέτρου) είναι στατιστικά σημαντικός και ως εκ τούτου χαρακτηρίστηκε ως παράγοντας ελέγχου στόχου **ΠΕΣ**.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παράγοντες Α (Συχνότητα ανανέωσης στίγματος) και Ε (Ταχύτητα) θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν και αυτοί ως ΠΕΣ καθώς προκύπτει ότι είναι στατιστικά σημαντικοί σε επίπεδο σημαντικότητας 10% και απορρίπτονται οριακά σε επίπεδο σημαντικότητας 5% όπως φαίνεται στον πίνακα 4-14.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	1	10804,5	10804,5	17,73	0,052
B	1	12640,5	12640,5	20,74	0,045
Γ	1	1012,5	1012,5	1,66	0,326
Δ	1	913,8	913,8	1,50	0,345
E	1	8745,0	8745,0	14,35	0,063
Error	2	1218,8	609,4		
Total	7	35335,1			

Πίνακας 4-14. Ανάλυση Διασποράς ΜΣ

Ανάλυση Διασποράς ΜΘ

Αντίστοιχα όσον αφορά το μέτρο ελέγχου θορύβου από τον πίνακα ανάλυσης της διασποράς 4-15, διαπιστώθηκε ότι σε επίπεδο σημαντικότητας 5%, ο παράγοντας Α (Συχνότητα ανανέωσης στίγματος) είναι στατιστικά σημαντικός και ως εκ τούτου χαρακτηρίστηκε ως παράγοντας ελέγχου στόχου **ΠΕΘ**.

Αντίστοιχα ο παράγοντας Β θα μπορούσε με τη σειρά του να χαρακτηριστεί ως ΠΕΘ σε επίπεδο σημαντικότητας 10%, όπου σε αυτή την περίπτωση θα υπήρχε σύγκυση μεταξύ ΠΕΘ και ΠΕΣ.

Επισημαίνεται ότι σε επίπεδο σημαντικότητας 5% δεν διαπιστώνεται σύγκυση μεταξύ των ΠΕΘ και ΠΕΣ

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A	1	3,33322	3,33322	32,67	0,029
B	1	1,10727	1,10727	10,85	0,081
Γ	1	0,41003	0,41003	4,02	0,183
Δ	1	0,02241	0,02241	0,22	0,685
E	1	0,68011	0,68011	6,67	0,123
Error	2	0,20407	0,10204		
Total	7	5,75712			

Πίνακας 4-15. Ανάλυση Διασποράς ΜΘ

4.6.3 Γραφική Ανάλυση

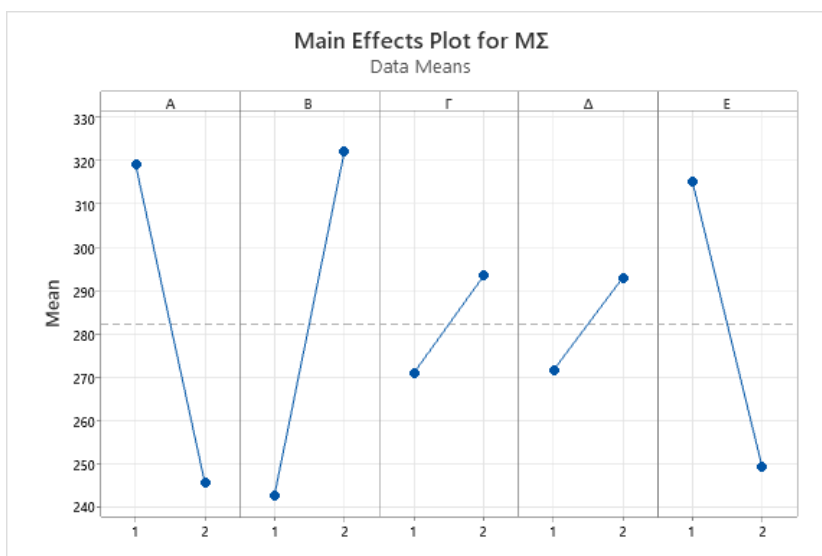
Από τα ακόλουθα δύο γραφήματα 4-1 και 4-2 που αφορούν στη γραφική ανάλυση του μέτρου στόχου και του μέτρου θορύβου, διαπιστώνεται ότι για το μέτρο στόχου ο παράγοντας B έχει την υψηλότερη επίδραση αλλά και οι παράγοντες A και E έχουν σημαντική συνεισφορά. Το εν λόγω γεγονός επιβεβαιώθηκε και από τον πίνακα ανάλυσης διασποράς σε επίπεδο σημαντικότητας 10%.

Αντίστοιχα για το μέτρο θορύβου ο παράγοντας A δείχνει να έχει σημαντική επίδραση, με τον παράγοντα B να έρχεται δεύτερος και τους παράγοντες E και Γ να είναι τρίτοι και τέταρτοι κατά σειρά.

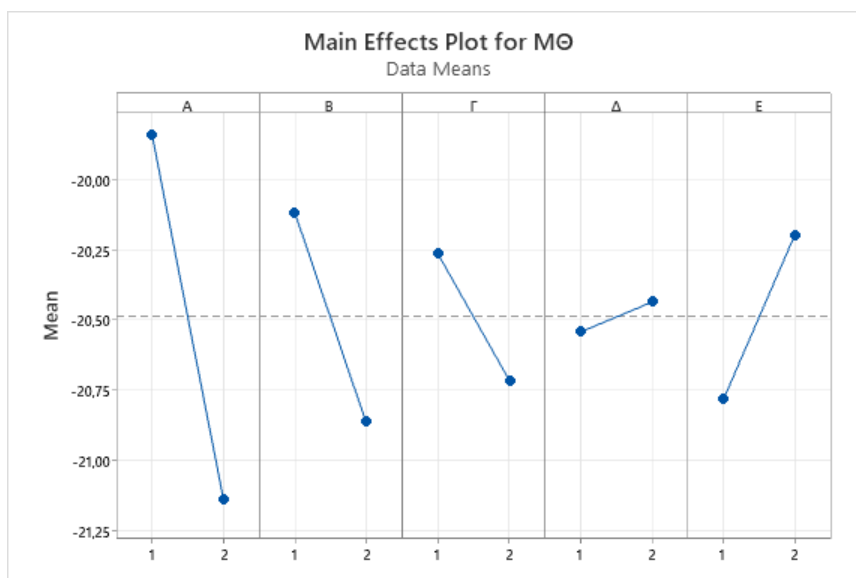
Και στις δύο περιπτώσεις ο παράγοντας Δ (το είδος της πορείας) δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση.

Ειδικότερα όσον αφορά τα επίπεδα των παραγόντων η βέλτιστη τιμή για τον παράγοντα B φαίνεται ότι η καλύτερη στάθμη του είναι η 1 (συχνότερος καθαρισμός), για τον παράγοντα E η στάθμη 2 (μεγαλύτερη ταχύτητα) ενώ για τον παράγοντα A η στάθμη 2 (μεγάλοι χρόνοι μεταξύ στιγμάτων) για το μέτρο στόχου και η στάθμη 1 (σύντομοι χρόνοι μεταξύ στιγμάτων) για το μέτρο θορύβου.

Το εν λόγω γεγονός φαίνεται και στα αποτελέσματα όπου στην κατάσταση 5 παρουσιάζεται το μικρότερο κατά μέσο όρο σφάλμα όπως και στη στην κατάσταση 2 όπου εμφανίζεται η μικρότερη τυπική απόκλιση.



Γράφημα 4-1. Γραφική Ανάλυση ΜΣ



Γράφημα 4-2. Γραφική Ανάλυση ΜΘ

4.6.4 Τελική Επιλογή Παραγόντων Ελέγχου

Η τελική επιλογή των παραγόντων ελέγχου βασίστηκε σε συνδυασμό των αποτελεσμάτων των στατιστικών ελέγχων και των γραφημάτων και εκτελέστηκε η παρακάτω κατανομή:

Παράγοντες Ελέγχου Στόχου

Επιλέχθηκαν οι παράγοντες Β (Συχνότητα καθαρισμού Δρομομέτρου) και Ε (Ταχύτητες) στις στάθμες 1 (συχνότερος καθαρισμός) και 2 (μεγαλύτερη ταχύτητα) αντίστοιχα.

Ειδικότερα όσον αφορά τον παράγοντα Α ο οποίος βρίσκεται σε σύγκυση μεταξύ ΠΕΣ και ΠΕΘ επιλέχθηκε η κατάταξη του στους ΠΕΣ με βέλτιστη τη στάθμη 2, καθώς στην πράξη

το ζητούμενο είναι η κυρίως η ορθότητα και η προσέγγιση του μηδενικού σφάλματος όχι η επίτευξη πιστότητας επί της διαδικασίας.

Παράγοντες Ελέγχου Θορύβου

Δεν επιλέχθηκε κάποιος παράγοντας αν και εφόσον δεν υπήρχε σύγκυση στον παράγοντα Α (Συχνότητα ανανέωσης στίγματος), θα εξετάζονταν η επιλογή του.

Παράγοντες Ελέγχου Κόστους

Ως παράγοντες ελέγχου κόστους επιλέχθηκαν οι παράγοντες Γ (Διέλευση από περιοχές με μη ομαλό πεδίο) και Δ (πορείες). Οι εν λόγω παράγοντες δε διαφαίνεται να έχουν στατιστικά σημαντική επίδραση και ως εκ τούτου παρέχεται ευχέρεια ρύθμισης της στάθμης τους, σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις της αποστολής.

5. Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Παραγόντων – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

5.1 Πείραμα Επιβεβαίωσης

Για την εκτέλεση του πειράματος επιβεβαίωσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα πεδίου, τα οποία προέρχονταν από έναν πλου και τα οποία ανταποκρίνονταν στις επιλεχθείσες στάθμες για τους ΠΕΣ.

Κατά τη διάρκεια του πλου δεν ήταν εφικτή η προσομοίωση όλων των παραγόντων θορύβου της εξωτερικής διάταξης (εκτελέστηκε υπό ιδανικές συνθήκες) και για τον λόγο χρησιμοποιήθηκε ο μέγιστος δυνατός αριθμός επαναλήψεων. Τα δεδομένα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα 5-1:

Επαν	A	B	Γ	Δ	E	A (διάρκεια σε λεπτά)	B	E (ταχύτητα σε κόμβους)	Ωριαία Έκπτωση (μέτρα)
1	2	1	-	-	2	795	< 2 μην	5,8	63
2	2	1	-	-	2	765	< 2 μην	5,8	62
3	2	1	-	-	2	630	< 2 μην	5,7	45
4	2	1	-	-	2	720	< 2 μην	5,1	85
5	2	1	-	-	2	440	< 2 μην	5,1	123
								Έκπτωση RMS	73

Πίνακας 5-1. Δεδομένα Πειράματος Επιβεβαίωσης

Από τα δεδομένα του πειράματος επιβεβαίωσης προκύπτει μία ωριαία έκπτωση (RMS) της τάξης των 73 μέτρων, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στη θεωρητική ακρίβεια των 77 μέτρων την ώρα που παρέχεται από τον κατασκευαστή του συστήματος.

Το εν λόγω γεγονός παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς επιβεβαιώνονται οι θεωρητικές επιδόσεις του συστήματος ναυτιλίας και εμμέσως αναγνωρίζονται οι συνθήκες και οι προϋποθέσεις κάτω από τις οποίες είναι εφικτή η επίτευξη αυτών.

5.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος επιβεβαίωσης και τη σημαντικότητα των παραγόντων κατά τη διάρκεια των στατιστικών και γραφικών ελέγχων διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- Από τους παράγοντες ελέγχου που επιλέχθηκαν αρχικά, δύο εξ αυτών, η κίνηση διαμέσου περιοχών με μεταβολές στο βαρυτικό πεδίο και το είδος της κίνησης (ευθύγραμμες ή μεταβαλλόμενες) δεν προκύπτει ότι είχαν στατιστικά σημαντική επίδραση. Το εν λόγω γεγονός υποδηλώνει ότι αφενός μεν το βαρυτικό μοντέλο που βρίσκεται αποθηκευμένο στα αδρανειακά συστήματα είναι ικανοποιητικό αφετέρου δε, δεν διαπιστώνεται προβληματισμός οφειλόμενος στο μοντέλο κίνησης και στον τρόπο παρακολούθησης των γωνιακών επιταχύνσεων από τα γυροσκόπια. Για το λόγο αυτό οι εν λόγω παράγοντες δικαίως χαρακτηρίστηκαν ως παράγοντες ελέγχου κόστους και όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα παραμείνουν στη διακριτική ευχέρεια της ομάδας πλοήγησης, για τη ρύθμισή τους με βάση τις απαιτήσεις της αποστολής.

- Όσον αφορά τους υπόλοιπους τρεις παράγοντες διαπιστώθηκε ότι είναι στατιστικά σημαντικοί σε επίπεδο εμπιστοσύνης της τάξης του 90% και επιδρούν στο μέσο ωριαίο σφάλμα θέσεως. Υπογραμμίζεται ότι για επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,1$ διαπιστώθηκε σύγκριση μεταξύ των ΠΕΣ και ΠΕΘ όσον αφορά τον χαρακτηρισμό του χρονικού διαστήματος μεταξύ της εκτέλεσης διαδοχικών στιγμάτων και ως εκ τούτου επιλέχθηκε ο χαρακτηρισμός του ως παράγοντα ελέγχου του στόχου καθώς η μείωση της μεταβλητότητα δεν είναι επί του πρακτέου τόσο σημαντική όσο η μείωση της μέσης τιμής.

- Από τις επιλεχθείσες στάθμες των ΠΕΣ προκύπτει επίσης μία λογική ερμηνεία καθώς η μεν συχνή συντήρηση του δρομομέτρου είναι αναμενόμενο να αποδώσει καρπούς και να μειώσει τα σφάλματα στη μέτρηση της ταχύτητας του Y/B (σημαντικός παράγοντας για τη μείωση της επίδρασης των σφαλμάτων των αδρανειακών μονάδων με την πάροδο του χρόνου) ενώ αντίστοιχα η αυξημένη ταχύτητα πλεύσης καταδεικνύει ότι το ναυτιλιακό σύστημα αποδίδει καλύτερα όταν τα μετρούμενα μεγέθη (γραμμικές επιταχύνσεις) αποκτούν σημαντικό μέγεθος. Αντίθετα οι επιδόσεις του συστήματος σε χαμηλές ταχύτητες (συνήθης τρόπος πλεύσης) φαίνεται να μειώνονται, κάτι το οποίο πιθανώς δύναται να αποδοθεί είτε στα όρια μέτρησης των γραμμικών επιταχύνσεων από τα επιταχυνσιόμετρα είτε σε μη γραμμικότητες που δύναται να υφίστανται στις καμπύλες βαθμονόμησης του δρομομέτρου. Τέλος η μείωση του ωριαίου σφάλματος με την αύξηση της παραμονής σε βάθος, θα μπορούσε να αποδοθεί στην επίδραση του φαινομένου Schuler και την ευεργετική της επίδραση στην ανεξέλεγκτη διάδοση των σφαλμάτων στο χρόνο.

- Οι ανωτέρω επιλογές διαφαίνεται ότι επιβεβαιώνονται ως οι βέλτιστες καθώς κατά το πείραμα επιβεβαίωσής, η χρήση τους είχε ως αποτέλεσμα την επίτευξη των ονομαστικών επιδόσεων του συστήματος, ενώ παράλληλα κατέδειξαν, σε συνδυασμό με τους συγκεκριμένους παράγοντες θορύβου (βέλτιστες καιρικές συνθήκες και απουσία θαλασσίου ρεύματος), ότι αν και πιθανώς υφίστανται περιθώρια βελτίωσης εν τούτους σε επάκμαση των καιρικών συνθηκών το σκάφος πρέπει να οδηγηθεί σε μεγαλύτερα βάθη για την αποφυγή της επίδρασής τους.

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αξιοποίησε, την ευρέως διαδεδομένη, στον εκτός σειράς έλεγχο ποιότητας, μεθοδολογία Taguchi με σκοπό τον εντοπισμό των παραγόντων οι οποίοι θα ήταν εφικτό να μεταβληθούν, με ιδία μέσα στο πεδίο, ώστε να βελτιωθεί η απόδοση του ναυτιλιακού συστήματος ενός υποβρυχίου οχήματος με απώτερο σκοπό την παράταση της αφανούς πλεύσης του σκάφους.

Για το σκοπό της εργασίας αξιοποιήθηκαν δεδομένα πεδίου από τους πλόες ενός συμβατικού υποβρυχίου στις περιοχές της Κεντρικής και Ανατολικής Μεσογείου, δίχως με αυτόν τον τρόπο να αποκλείεται η εφαρμογή των αποτελεσμάτων της σε με επανδρωμένα οχήματα, αφού το εξεταζόμενο σύστημα αποτελεί υπερσύνολο του αντίστοιχου συστήματος ενός AUV. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση εντοπίζεται στο γεγονός ότι ο εξοπλισμός ενός υποβρυχίου αναμένεται να είναι τάξη μεγέθους καλύτερος αλλά και ακριβότερος έναντι του εξοπλισμού ενός AUV.

Κατά την προετοιμασία του σχεδιασμού εντοπίστηκαν πέντε παράγοντες οι οποίοι αφορούσαν το σκάφος, την αποστολή και το περιβάλλον οι οποίοι θα μπορούσαν να τροποποιηθούν κατά κρίση της ομάδας ναυτιλίας του σκάφους, καθώς και δύο αστάθμητοι παράγοντες που αφορούσαν στις καιρικές συνθήκες και τα θαλάσσια ρεύματα και οι οποίοι χαρακτηρίστηκαν ως παράγοντες Θορύβου. Ο πειραματικός σχεδιασμός περιελάμβανε την εξέταση πέντε παραγόντων σε δύο διαφορετικές στάθμες έκαστος και εκτελέστηκε με τη χρήση της ορθογώνιας διάταξης $L8(2^5)$, με 8 δοκιμές ως εσωτερική διάταξη και πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό 2^2 για την εξωτερική.

Στη συνέχεια τα πειραματικά δεδομένα μελετήθηκαν με χρήση του λογισμικού Minitab όπου, μετά από στατιστικούς και γραφικούς ελέγχους, διαπιστώθηκε ότι δύο από τους παράγοντες (η συχνότητα ανανέωσης στίγματος και η συχνότητα καθαρισμού του δρομομέτρου) ήταν στατιστικά σημαντικοί ($p < 0,05$) και θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν ως παράγοντες ελέγχου στόχου και θορύβου αντίστοιχα, ενώ σε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0,1$ ήταν εφικτός ο χαρακτηρισμός και τρίτου παράγοντα (ταχύτητα πλεύσης) ως παράγοντα ελέγχου του στόχου. Βέβαια σε αυτό το επίπεδο σημαντικότητας διαπιστώθηκε σύγχυση μεταξύ ΠΕΣ και ΠΕΘ όσον αφορά συχνότητα ανανέωσης στίγματος και ως εκ τούτου η ταχύτητα πλεύσης χαρακτηρίστηκε ως ΠΕΣ, λόγω της πρακτικής σπουδαιότητας της ορθότητας έναντι της πιστότητας.

Ειδικότερα όσον αφορά τις στάθμες των ανωτέρων παραγόντων η επιλογή της συχνής συντήρησης του δρομομέτρου, της πλεύσης με υψηλή ταχύτητα και της αύξησης στο μέγιστο δυνατό του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών στιγμάτων επιβεβαιώθηκαν μέσω της εκτέλεσης πειράματος επιβεβαίωσης, ξεπερνώντας την ονομαστική επίδοση του ναυτιλιακού συστήματος του υποβρυχίου. Επομένως εκτιμάται ότι ο σκοπός της εργασίας επετεύχθη.

Τέλος, με γνώμονα την περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος και λαμβάνοντας υπόψη, τη συνεχώς αυξανόμενη χρήση νέων αδρανειακών συστημάτων βασισμένων σε γυροσκόπια οπτικής ίνας, προτείνεται μελλοντικά η εφαρμογή της εξελεγκτικής λειτουργίας στα συστήματα αυτά εκτελώντας κύκλους μεταβολών της ταχύτητας πλεύσης. Απώτερος σκοπός θα είναι πλέον η αξιοποίηση της ακρίβειας που παρέχουν τα αντίστοιχα συστήματα και επιλογή χαμηλότερης βαθμίδας ταχυτήτων, οι οποίες θα παρέχουν εφάμιλλα αποτελέσματα διασφαλίζοντας και το ανεντόπιστο του σκάφους.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές (πηγές) της Εργασίας.

Anbu, N. A., & Jayaprasanth, D. (2019). *Integration of inertial navigation system with global positioning system using extended kalman filter*. In 2019 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT) (pp. 789-794). IEEE.

Arabelos D, Barzaghi R, Sansò F, Sona G (1994) *The gravimetric geoid and the SST in the eastern Mediterranean*. In: Mare Nostrum, Geomed report 4, Thessaloniki, Greece

Borodacz, K., & Szczepański, C. (2023). *Impact of Motion-Dependent Errors on the Accuracy of an Unaided Strapdown Inertial Navigation System*. Sensors, 23(7), 3528.

Box, G. (1988). *Signal-to-noise ratios, performance criteria, and transformations*. Technometrics, 30(1), 1-17.

Box, G., Bisgaard, S., & Fung, C. (1988). *An explanation and critique of Taguchi's contributions to quality engineering*. Quality and reliability engineering international, 4(2), 123-131.

Fidalgo Prieto, J., Melis, S., Cezon, A., Azaola, M., Mata, F. J., Prajanu, C., ... & Mendes, L. (2022). *Submarine Navigation using Neutrinos*. arXiv e-prints, arXiv-2207.

Fu, J., Lv, T., Li, B., Ning, Z., & Chang, Y. (2022). *Three-dimensional underwater path planning of submarine considering the real marine environment*. IEEE Access, 10, 37016-37029.

Gamage, P. (2015). *Integration of Taguchi's robust parameter design approach in a mature lean manufacturing environment: the case of the apparel industry*: a thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Technology at Massey University, Manawatu, New Zealand (Doctoral dissertation, Massey University).

Gao, D., Wang, C., & Zhu, H. (2012). *Geomagnetic/dead reckoning integrated navigation method considering geomagnetic error*. In 2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC) (pp. 3613-3616). IEEE.

Grewal, M. S., Weill, L. R., & Andrews, A. P. (2007). *Global positioning systems, inertial navigation, and integration*. John Wiley & Sons.

TKMS (2011), *Inertial Navigation System MINS 100-022*

- Karna, S. K., & Sahai, R. (2012). *An overview on Taguchi method. International journal of engineering and mathematical sciences*, 1(1), 1-7.
- King, A. D. (1998). *Inertial navigation-forty years of evolution. GEC review*, 13(3), 140-149.
- Kumar, V. (2004). *Integration of inertial navigation system and global positioning system using kalman filtering*. Indian Institute of Technology, Bombay Mumbai.
- Lee, P. M., Jun, B. H., Park, J. Y., Shim, H. W., Kim, J. S., Jung, H. S., & Yoon, J. Y. (2011). *An in-situ correction method of position error for an autonomous underwater vehicle surveying the sea floor*. International Journal of Ocean System Engineering, 1(2), 60-67.
- Liu Wei-ren, ZHUANG Liang-jie. (2004). *A Study on the Error Estimation of INS Installed on Submarines*[J]. Journal of Applied Sciences, 2005, 23(3): 324-326.
- Logothetis, N. (1990). *Box-Cox transformations and the Taguchi method*. Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics, 39(1), 31-48.
- MacKenzie, D. (1993). *Inventing accuracy: A historical sociology of nuclear missile guidance*. MIT press.
- Mikhalevsky, P. N., Sperry, B. J., Woolfe, K. F., Dzieciuch, M. A., & Worcester, P. F. (2020). *Deep ocean long range underwater navigation*. The Journal of the Acoustical Society of America, 147(4), 2365-2382.
- Moysis, Lazaros. (2013). *To Φίλτρο Kalman (An introduction to the Kalman Filter)*. 10.13140/RG.2.1.2698.2802.
- Paturel, Y., Honthaas, J., Lefèvre, H., & Napolitano, F. (2014). *One nautical mile per month FOG-based strapdown inertial navigation system: a dream already within reach?* Gyroscopy and Navigation, 5, 1-8.
- Paull, L., Saeedi, S., Seto, M., & Li, H. (2013). *AUV navigation and localization: A review*. IEEE Journal of oceanic engineering, 39(1), 131-149.
- Pavlath, G. A., & Suman, M. C. (1984). *Fiber-Optic Gyroscopes: Advances and Future Developments*. Navigation, 31(2), 70-83.

- Peshekhonov, V. G. (2022). *Navigation Aids for Submarine Polar Missions*. Gyroscopy and Navigation, 13(2), 120-127.
- Rogobete, M., Tărbuță, O., Rogobete, A. D., & Eftimie, S. (2018). *Using gravity potential field and inertial navigation system in real time submarine positioning*. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 172, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.
- Roy, R. K. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
- Schmidt, G. T., Savage, P., Van Bronkhorst, A., Catford, J. R., & Levinson, E. (1978). Strap-Down Inertial Systems. NATO AGARD LS-95.
- Seo, Y. B., Yu, H., Ryu, K., Lee, I., Oh, J., Kim, C., ... & Park, C. (2022). *Analysis of Gyro Bias Depending on the Position of Inertial Measurement Unit in Rotational Inertial Navigation Systems*. Sensors, 22(21), 8355.
- United Space Alliance. (2008), LLC, *Shuttle Crew Operations Manual*, OI-33
- Singh, B., (2017). *Taguchi's Approach to Quality – An Overview*, Business Studies, Department of Commerce, University College of Business Studies, University of Calcutta, Volume XXXVIII, January-July 2017 (No. 1 & 2), ISSN: 0970-9657
- Smith, S. P. (2021). Morton, Y. J., van Diggelen, F., Spilker Jr, J. J., Parkinson, B. W., Lo, S., & Gao, G. (Eds.). (2021). *Position, navigation, and timing technologies in the 21st century: Integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications*, volume 1. John Wiley & Sons. pp. 1413-1434
- Soloviev, A (2021). Morton, Y. J., van Diggelen, F., Spilker Jr, J. J., Parkinson, B. W., Lo, S., & Gao, G. (Eds.). (2021). *Position, navigation, and timing technologies in the 21st century: Integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications*, volume 1. John Wiley & Sons. pp. 1447-1479
- Soloviev, A. (2022). June 4, 2022. *Inertial Error Propagation: Understanding Inertial Behavior*. Ανακτήθηκε την 12 Ιαν 2024, από <https://insidegnss.com/inertialerror-propagation-understanding-inertialbehavior/>
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*.

- Tal, A., Klein, I., & Katz, R. (2017). *Inertial navigation system/Doppler velocity log (INS/DVL) fusion with partial DVL measurements*. *Sensors*, 17(2), 415.
- Webster John, G., & Halit, E. (2014). *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement*.
- Woodman, O. J. (2007). *An introduction to inertial navigation* (No. UCAM-CL-TR-696). University of Cambridge, Computer Laboratory.
- Xian, P., & Ji, B. (2022, April). *Analysis on Several Influencing Factors of Underwater Gravity Gradient Navigation*. In 2022 3rd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing (ICGMRS) (pp. 822-827). IEEE.
- Xu, B., & Hao, Y. (2011, August). *Error analysis of the attitude updating algorithm for submarine in the dynamic environment*. In 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (pp. 2183-2188). IEEE.
- Zakali, M. A. (2019). *The model of inertial navigation system on base of MEMS sensors for unmanned aerial vehicles*. *Κροнос*, (10 (37)), 24-29.
- Zang, X., Ben, Y., & Li, Q. (2020). *INS/Log Integrated Navigation System with Ocean Current Velocity Model based on Multiple Model Adaptive Estimation*. In 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS) (pp. 817-821). IEEE.
- Zhu, Z., Hu, S. L. J., & Li, H. (2016). *Effect on Kalman based underwater tracking due to ocean current uncertainty*. In 2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV) (pp. 131-137). IEEE.
- Μπατσαούρας, Γ. (2022). *Συντήρηση υφάλων πλοίων. Αντιρρυπαντική τεχνολογία, υφαλοχρωματισμοί, υποβρύχιοι καθαρισμοί και η απόδοση πλοίου* (Doctoral dissertation, University of Piraeus (Greece)).

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

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