



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΤΙΤΛΟΣ

Συσσωρευτές Υποβρυχίων και Τορπιλών

ΤΙΤΛΟΣ ΑΓΓΛΙΚΑ

Submarine and Torpedo Batteries

Όνοματεπώνυμο Φοιτητή:

ΚΑΡΚΟΥΛΙΑΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

Όνοματεπώνυμο Υπεύθυνου Καθηγητή:

Δρ. ΣΤΑΥΡΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

ΓΚΑΝΕΤΣΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΣΤΑΥΡΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Stavrou', written in a cursive style.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Καρκούλιας Αναστάσιος του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 8096635 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Μη Επανδρωμένα Αυτόνομα και Τηλεκατευθυνόμενα Συστήματα» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής της Σχολής Μηχανικών Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο δηλών

Ημερομηνία



10/03/2024

ΚΑΡΚΟΥΛΙΑΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

Συσσωρευτές Υποβρυχίων και Τορπιλών

ΚΑΡΚΟΥΛΙΑΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Μη Επανδρωμένα Αυτόνομα και Τηλεκατευθυνόμενα Συστήματα» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανασκόπηση της τεχνολογικής εξέλιξης των υποβρυχίων, συμπεριλαμβανομένων των μη επανδρωμένων υποβρυχίων οχημάτων (UUVs) καθώς και των τορπιλών, αναλύοντας εις βάθος τους τύπους των χρησιμοποιούμενων συσσωρευτών. Οι συσσωρευτές διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο, καθώς παρέχουν ενέργεια σε πολλά κρίσιμα συστήματα, όπως το σύστημα πρόωσης, τα ηλεκτρονικά συστήματα επικοινωνιών όπως το sonar. Δεδομένου του κρίσιμου ρόλου των συσσωρευτών στην τροφοδότηση αυτών των συστημάτων, η έρευνα αυτή προσφέρει μια ανάλυση των διάφορων τύπων συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές αυτές, συμπεριλαμβανομένων των ιόντων λιθίου, των μολύβδου-οξέος καθώς και άλλων εναλλακτικών λύσεων, αξιολογώντας την ενεργειακή τους πυκνότητα, τον κύκλο ζωής και την ασφάλεια που προσφέρουν σε απαιτητικές επιχειρησιακές συνθήκες.

Μέσω μιας μεθοδικής προσέγγισης, η οποία συνδυάζει τη θεωρητική ανάλυση με την τεχνική βιβλιογραφία, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο οι συσσωρευτές επηρεάζουν τη λειτουργία και την απόδοση των υποθαλάσσιων οχημάτων. Επιπρόσθετα, η ανάλυση αυτή προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο τόσο στην κατανόηση όσο και στην ανάπτυξη της τεχνολογίας συσσωρευτών για μελλοντικές εφαρμογές σε υποθαλάσσια οχήματα ενισχύοντας την απόδοση και την αξιοπιστία τους.

Λέξεις Κλειδιά: Υποβρύχια, Μη Επανδρωμένα Οχήματα, UUV, Τορπίλες, Συσσωρευτές, Ιόντων Λιθίου, Μολύβδου Οξέος.

Abstract

This thesis aims to review the technological progression of submarines, including Unmanned Underwater Vehicles (UUVs) and torpedoes, analyzing in depth the types of batteries used. Batteries fulfill a critical function, delivering energy to essential systems such as propulsion system, and electronic communication systems like sonar. Considering the crucial role of batteries in energizing these integral systems, this research conducts an exhaustive examination of the types of batteries deployed in these applications, encompassing lithium-ion, lead-acid, and other alternative solutions, and evaluates their energy density, lifecycle, and safety under demanding operational conditions.

Through a meticulous approach that combines theoretical analysis with a review of technical literature, this dissertation elucidates the impact of battery technology on the functionality and performance of underwater vehicles. Furthermore, this analysis offers invaluable insights, thereby contributing to the comprehension and advancement of battery technology for future applications in underwater vehicles, thereby enhancing their operational efficiency and dependability.

Keywords: Submarines, Unmanned Underwater Vehicles, UUV, Torpedoes, Batteries, Lithium-Ion, Lead-Acid.

Ευχαριστίες

Εκφράζω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου προς τον επιβλέποντα καθηγητή, Δρ. Βασίλειο Σταύρου, για την καθοδήγηση που μου πρόσφερε κατά την εκπόνηση αυτής της διατριβής. Επιπρόσθετα, θέλω να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου και στους φίλους μου για την αδιάκοπη υπομονή και στήριξη που μου πρόσφεραν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

| | |
|---|-----------|
| Κατάλογος Εικόνων | 11 |
| Κατάλογος Πινάκων | 13 |
| Κεφάλαιο 1ο – Ιστορική εξέλιξη υποβρυχίων | 15 |
| 1.1 Εισαγωγή | 15 |
| 1.2 Βασικά τμήματα υποβρυχίου | 16 |
| 1.2.1 Pressure hull..... | 17 |
| 1.2.2 Θαλασσέρματα-Αρχή λειτουργίας..... | 17 |
| 1.2.3 Θάλαμος πρόωσης..... | 19 |
| 1.2.4 Προπέλεις..... | 20 |
| 1.2.5 Συσσωρευτές..... | 20 |
| 1.2.6 Εσωτερικοί χώροι διαμονής και συστήματα υποστήριξης ζωής..... | 21 |
| 1.2.7 Θάλαμος τορπιλών..... | 21 |
| 1.2.8 Πτερύγιο γέφυρας..... | 21 |
| 1.2.9 Περισκόπιο..... | 22 |
| 1.2.10 Κέντρο ελέγχου..... | 22 |
| 1.2.11 Επιφάνειες ελέγχου..... | 22 |
| 1.3 Ιστορική ανασκόπηση 18ου αιώνα-20^{ου} αιώνα | 22 |
| 1.3.1 Turtle 1776..... | 23 |
| 1.3.2 Nautilus 1800..... | 24 |
| 1.3.3 CSS H.L. Hunley 1863..... | 25 |
| 1.3.4 Le plongeur 1864..... | 25 |
| 1.3.5 Nordenfelt I 1886 (Ελληνικό πολεμικό Ναυτικό)..... | 26 |
| 1.3.6 USS Holland 1898..... | 27 |
| 1.4 Η εξέλιξη των υποβρυχίων- Α' Παγκόσμιος Πόλεμος | 28 |
| 1.4.1 Ανάπτυξη τορπιλών..... | 28 |
| 1.4.2 Βελτίωση συστημάτων πρόωσης..... | 29 |
| 1.4.3 Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό -Α' Παγκόσμιος Πόλεμος..... | 29 |
| 1.5 Η εξέλιξη των Υποβρυχίων- Β' Παγκόσμιος Πόλεμος | 30 |
| 1.5.1 Snorkel (αναπνευστήρας)..... | 31 |
| 1.5.2 Βελτίωση υδροδυναμικής..... | 31 |
| 1.5.3 Sonar..... | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 1.5.4 Ανάπτυξη ειδικών τύπων υποβρυχίων | 32 |
| 1.5.5 Βελτίωση Τεχνολογίας τορπιλών..... | 32 |
| 1.6 Σύγχρονα υποβρύχια | 35 |
| 1.6.1 Πυρηνική πρόωση..... | 35 |
| 1.6.2 Σύστημα αναερόβιας πρόωσης | 36 |
| 1.6.3 Βαλιστικοί πύραυλοι..... | 36 |
| 1.6.4 Πλοήγηση σύγχρονων υποβρυχίων..... | 36 |
| 1.6.5 Photonics mast | 37 |
| 1.6.6 Συστήματα ηλεκτρονικού πολέμου (EW)..... | 37 |
| 1.6.7 Stealth..... | 37 |
| 1.6.8 Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό στη σύγχρονη εποχή | 38 |
| 1.7 Μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα..... | 39 |
| 1.7.1 Συστήματα επικοινωνίας..... | 40 |
| 1.7.2 Συστήματα πρόωσης UUV..... | 40 |
| 1.7.3 Συστήματα πλοήγησης και αισθητήρες UUV | 40 |
| 1.7.4 Αυτονομία των μη επανδρωμένων υποβρυχίων οχημάτων | 41 |
| Κεφάλαιο 2^ο – Συσσωρευτές υποβρυχίων και UUV | 42 |
| 2.1 Εισαγωγή..... | 42 |
| 2.2 Βασικές αρχές τεχνολογίας συσσωρευτών..... | 43 |
| 2.2.1 Κατηγορίες συσσωρευτών | 43 |
| 2.2.2 Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών | 43 |
| 2.2.3 Ειδική ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου | 45 |
| 2.2.4 Ειδική ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας | 45 |
| 2.2.5 Βασικά χαρακτηριστικά συσσωρευτών | 46 |
| 2.2.6 Πρότυπα δυναμικά ηλεκτροδίων | 48 |
| 2.3 Ανάλυση συσσωρευτών υποβρυχίων..... | 50 |
| 2.3.1 Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος..... | 50 |
| 2.3.2 Συσσωρευτές ιόντων λιθίου | 52 |
| 2.3.3 Σύγκριση χαρακτηριστικών των συσσωρευτών Μολύβδου-Οξέος και Ιόντων-Λιθίου | 56 |
| 2.3.4 Στάδια φόρτισης συσσωρευτών μολύβδου-οξέος..... | 57 |
| 2.3.5 Στάδια φόρτισης συσσωρευτών ιόντων λιθίου | 57 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3.6 Εκφόρτιση συσσωρευτών | 58 |
| 2.3.7 C-rate..... | 60 |
| 2.3.8 Αυτοεκφόρτιση | 61 |
| 2.4 Διαμέρισμα συσσωρευτή..... | 61 |
| 2.4.1 Διασύνδεση και έλεγχος στοιχείων..... | 62 |
| 2.4.2 Η επίδραση των συστημάτων πρόωσης στη φόρτιση συσσωρευτών | 62 |
| 2.5 Συντήρηση συσσωρευτών υποβρυχίων..... | 63 |
| 2.5.1 Συντήρηση συσσωρευτών Μολύβδου-Οξέος | 63 |
| 2.5.2 Συντήρηση συσσωρευτών Ιόντων-Λιθίου | 64 |
| 2.5.3 Μέτρα ασφάλειας κατά την συντήρηση των συσσωρευτών..... | 64 |
| 2.6 Απαιτήσεις ασφαλείας..... | 65 |
| 2.6.1 Συστήματα ασφαλείας για συσσωρευτές μολύβδου οξέος..... | 65 |
| 2.6.2 Κίνδυνοι κατά τη χρήση συσσωρευτών ιόντων λιθίου..... | 66 |
| 2.6.3 Αντιμετώπιση Πυρκαγιάς σε Συσσωρευτές Υποβρυχίων..... | 68 |
| 2.7 Επιχειρησιακά οφέλη..... | 68 |
| 2.8 Συσσωρευτές μη επανδρωμένων υποβρυχίων οχημάτων..... | 69 |
| 2.8.1 Πρωτεύοντες συσσωρευτές UUV | 69 |
| 2.8.2 Δευτερεύοντες συσσωρευτές UUV..... | 70 |
| 2.8.3 Επιχειρησιακά οφέλη συσσωρευτών Li-ion και LiPo | 72 |
| Κεφάλαιο 3^ο – Ιστορική εξέλιξη τορπιλών | 74 |
| 3.1 Εισαγωγή..... | 74 |
| 3.2 Κατηγοριοποίηση τορπιλών | 75 |
| 3.3 Βασικά Τμήματα και Υποσυστήματα Τορπιλών | 75 |
| 3.3.1 Εξωτερικό περίβλημα | 76 |
| 3.3.2 Κεφαλή μάχης..... | 76 |
| 3.3.3 Κεφαλή Ασκήσεων | 76 |
| 3.3.4 Πρόωση Τορπιλών..... | 77 |
| 3.3.5 Ουραίο τμήμα..... | 77 |
| 3.4 Ιστορική ανασκόπηση τορπιλών 19ου αιώνα..... | 78 |
| 3.4.1 Στατικές τορπίλες (1801) | 78 |
| 3.4.2 Τορπίλες Whitehead (1866)..... | 79 |
| 3.4.3 Τορπίλη Schwartzkopff..... | 80 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4.4 Μη Καθοδηγούμενες Τορπίλες (Unguided) | 80 |
| 3.5 Η εξέλιξη των τορπιλών– Α΄ Παγκόσμιος Πόλεμος | 81 |
| 3.5.1 Ανάπτυξη νέων συστημάτων πρόωσης..... | 81 |
| 3.5.2 Σύστημα καθοδήγησης με γυροσκόπια..... | 82 |
| 3.5.3 Βελτίωση κεφαλών μάχης..... | 82 |
| 3.5.4 Ανάπτυξη μηχανισμού ελέγχου βάθους..... | 83 |
| 3.6 Η εξέλιξη των τορπιλών Β΄ Παγκόσμιος πόλεμος..... | 84 |
| 3.6.1 Ηλεκτρική Πρόωση και Συσσωρευτές..... | 84 |
| 3.6.2 Κινητήρες ‘Burner cycle’ | 85 |
| 3.6.3 Σύστημα Προηγμένης Καθοδήγησης | 85 |
| 3.6.4 Η Εξέλιξη των Κεφαλών Μάχης..... | 86 |
| 3.6.5 Η Χρήση Αεροπορικών Τορπιλών στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο | 86 |
| 3.7 Σύγχρονες τορπίλες | 88 |
| 3.7.1 Βελτίωση θερμικών συστημάτων πρόωσης..... | 88 |
| 3.7.2 Ανάπτυξη νέων τύπων τορπιλών | 89 |
| 3.7.3 Σύστημα καθοδήγησης τορπιλών μέσω καλωδίου | 90 |
| 3.7.4 Σύστημα καθοδήγησης Wake homing | 90 |
| 3.7.5 Ανάπτυξη νέων συσσωρευτών..... | 90 |
| 3.7.6 Πυρηνικές Κεφαλές Τορπιλών..... | 91 |
| 3.7.7 Εκτόξευση τορπιλών από σύγχρονα υποβρύχια | 91 |
| 3.7.8 Εκπαιδευτικές βολές | 91 |
| 3.7.9 Ανάκτηση τορπιλών | 92 |
| 3.7.10 Τεχνικά χαρακτηριστικά σύγχρονων τορπιλών | 92 |
| Κεφάλαιο 4^ο Συσσωρευτές τορπιλών | 95 |
| 4.1 Εισαγωγή | 95 |
| 4.2 Ο ρόλος των συσσωρευτών στις τορπίλες | 96 |
| 4.2.1 Κριτήρια επιλογής κατάλληλου τύπου συσσωρευτή | 96 |
| 4.2.2 Είδη Συσσωρευτών Τορπιλών | 96 |
| 4.3 Ανάλυση Συσσωρευτών τορπιλών..... | 99 |
| 4.3.1 Συσσωρευτές Μολύβδου-Οξέος | 99 |
| 4.3.2 Συσσωρευτές Αργύρου-Ψευδαργύρου -Silver-Zinc (Ag-Zn)..... | 101 |
| 4.3.3 Ανάλυση συσσωρευτών Αργύρου-Ψευδαργύρου..... | 101 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 4.3.4 | Συσσωρευτές μαγνησίου-χλωριούχου αργύρου Mg-AgCl..... | 107 |
| 4.3.5 | Συσσωρευτές αργύρου οξειδίου-αλουμινίου (AgO-Al) | 109 |
| 4.3.6 | Συσσωρευτές ιόντων λιθίου | 111 |
| 4.3.7 | Η σημασία της χρήσης συσσωρευτών ιόντων λιθίου στις εκπαιδευτικές τορπίλες..... | 113 |
| 4.3.8 | Διαχείριση συσσωρευτών τορπιλών | 114 |
| | Συμπεράσματα | 115 |
| | Βιβλιογραφία | 116 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|--|----|
| ΕΙΚΟΝΑ 1.1 : ΒΑΣΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ. | 16 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.2 : ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΟΜΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ [2]..... | 17 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.3 : ΘΑΛΑΣΣΕΡΜΑΤΑ,ΔΙΑΤΑΞΗ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΠΛΕΥΣΤΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ [3]. | 18 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.3 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΠΛΕΥΣΤΟΤΗΤΑΣ ΥΠΟΒΡΥΧΙΩΝ. | 19 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.4 : ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ TURTLE [8]. | 23 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.5 : ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ NAUTILUS [9]. | 24 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.6 : ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ H.L. HUNLEY [10]..... | 25 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.7 : ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ LE PLONGEUR [12]. | 26 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.8 : ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΤΟΜΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΟΨΗΣ NORDENFELT I [14]. | 27 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.9 : USS HOLLAND [5]..... | 28 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ. | 44 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.1: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ ΜΟΛΥΒΔΟΥ- ΟΞΕΟΣ..... | 50 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ ΤΥΠΟΥ D 7420 [50]..... | 51 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.3: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ.... | 52 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.4 :ΣΤΟΙΧΕΙΟ LiFeYPO4 WB-LYP10000ΑΗΑ [54]. | 54 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.5 : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ ΚΑΙ ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ [55]..... | 58 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.6: ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΙ ΤΗ ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ ΚΑΙ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ [55]. | 59 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.7: ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΙ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ ΚΑΙ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ C-RATES [55]. | 60 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.8 : ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ [50]. | 61 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.9 : ΑΝΕΞΕΛΕΓΚΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ [65].. | 67 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.10 : ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΗΜΕΙΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΑΝΕΞΕΛΕΓΚΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ [65].. | 67 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.11 : ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ BLUEFIN® 1.5 kWh SUBSEA BATTERY [68]. | 72 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.1 : ΒΑΣΙΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΤΟΡΠΙΛΗΣ [70]. | 75 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.2 : ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΤΟΡΠΙΛΕΣ [74]..... | 78 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.3 : ΤΟΡΠΙΛΕΣ WHITEHEAD [75]..... | 79 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.4 : ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΩΣΗΣ WET HEATER [75]. | 81 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.5 : ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ SUPERCAVITATION ΣΕ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΟΧΗΜΑΤΑ [82]. | 89 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΑΣΗΣ "ΑΠΟΘΕΜΑΤΙΚΩΝ" ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΤΟΡΠΙΛΩΝ [87]. | 97 |

| | |
|--|-----|
| ΕΙΚΟΝΑ 4.2 : ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ ΜΟΛΥΒΔΟΥ ΟΞΕΟΣ ΤΟΡΠΙΛΗΣ MARK 18 [88]. | 100 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.3 : ΠΡΩΤΕΥΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ ΑΡΓΥΡΟΥ-ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ SLST-C1 [90]. | 102 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.4 : ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ SLST-C1 [90]. | 104 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.5 : ΔΕΥΤΕΡΕΥΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ ΑΡΓΥΡΟΥ-ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ SLST-E1 [90]. | 105 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.6 : ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ SLST-E1 [90]. | 106 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.7 : ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ V616 [92]. | 108 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.8 : ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ AGO-AL [93]. | 110 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.9 : ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ AGO-AL [87]. | 110 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.10 : ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ AGO-AL, ΤΟΡΠΙΛΗΣ Κ745 [96]. | 111 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.11 : ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ [91]. | 112 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.12 : ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΤΟΡΠΙΛΗΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ SLPB98188216P [97]. | 112 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|----|
| ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΩΝ Α' ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΠΟΛΕΜΟΥ [13-14],[18-19]. | 30 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2 : ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΠΟΛΕΜΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΤΟΥ Β' ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΠΟΛΕΜΟΥ [13-15]. | 33 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3: ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΟΥ ΠΟΛΕΜΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΤΟΥ Β' ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΠΟΛΕΜΟΥ [13-15]. | 34 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 1.4 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΥΠΟΒΡΥΧΙΩΝ [14-15]. | 39 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 1.5 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΥΠΟΒΡΥΧΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ [40-43]. | 41 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ [46]. | 46 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΕΥΤΕΡΕΥΝΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ [46]. | 47 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3 : ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΩΝ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ [46]. | 48 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4 : ΠΡΟΤΥΠΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ [46]. | 49 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΤΥΠΟΥ D 7420 [50]. | 51 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6: ΥΛΙΚΑ ΑΝΟΔΟΥ ΓΙΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ [51-53]. | 53 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.7 : ΥΛΙΚΑ ΚΑΘΟΔΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ [51-53]. | 53 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.8: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ WB-LYP10000ΑΗΑ [54]. | 54 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.9 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ SLPB140460330 [49]. | 55 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.10 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ ΚΑΙ ΙΟΝΤΩΝ-ΛΙΘΙΟΥ [56-60]. | 56 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.11 : ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΩΣΗΣ ΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ [64]. | 63 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2.13 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ BLUEFIN® 1.5 kWh SUBSEA BATTERY [68]. | 72 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΡΠΙΛΗΣ WHITEHEAD [73,75-76]. | 79 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΡΠΙΛΗΣ SCHWARTZKOPFF [73,76]. | 80 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΡΠΙΛΩΝ Α' ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΠΟΛΕΜΟΥ [76,78]. | 83 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΡΠΙΛΩΝ Α' ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΠΟΛΕΜΟΥ [76,78]. | 84 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΡΠΙΛΩΝ Β' ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΠΟΛΕΜΟΥ [76,78]. | 87 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΡΠΙΛΩΝ Β' ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΥ ΠΟΛΕΜΟΥ [76,78]. | 87 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7 : ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ OTTO FUEL II [73,78]. | 88 |

| | |
|---|-----|
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3.8 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΡΠΙΛΩΝ [85,86]..... | 93 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3.10 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΡΠΙΛΩΝ [84-85]. | 93 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3.9 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΡΠΙΛΩΝ [84-85]. | 94 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 : ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΟΔΟΥ ΓΙΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΤΟΡΠΙΛΩΝ [46,87]. | 98 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ SLST-C1 [90]. | 103 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 : ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ,ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ SLST-C1 [90]. | 104 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ SLST-E1 [90]. | 106 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5 : ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ SLST-E1 [90]. | 106 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6 : ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ,ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ SLST-E1 [90]. | 107 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ V616 [92]. | 109 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΡΠΙΛΗΣ Α-244 [84]..... | 109 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.9 : ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ ΑGΟ-ΑL,ΤΟΡΠΙΛΗ Κ745 [96]..... | 111 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.10 : ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ SLPB98188216P [98]. | 113 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.11 : ΜΕΣΟ ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ ΚΥΚΛΟ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΑGΟ- ΖΝ ΚΑΙ Li-ΙΟΝ ΓΙΑ LWT ΚΑΙ ΗWT [100]. | 114 |

Κεφάλαιο 1ο – Ιστορική εξέλιξη υποβρυχίων

1.1 Εισαγωγή

Τα υποβρύχια ως τεχνολογικά επιτεύγματα έχουν τις ρίζες τους στο 18 αιώνα και αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά ναυτικά τεχνολογικά επιτεύγματα διαδραματίζοντας έναν κρίσιμο ρόλο στη στρατηγική των σύγχρονων ναυτικών δυνάμεων. Από την ανάπτυξή τους τον 18ο αιώνα, τα υποβρύχια έχουν υποστεί σημαντικές εξελίξεις, καθιστώντας τα ικανά να εκτελέσουν μια πληθώρα στρατιωτικών αποστολών. Οι αποστολές περιλαμβάνουν την επίθεση εναντίον εχθρικών πολεμικών πλοίων, τη διακοπή των επικοινωνιών και της εφοδιαστικής αλυσίδας καθώς και αποστολές κατασκοπείας συμβάλλοντας στη συλλογή κρίσιμων πληροφοριών.

Κατά τη διάρκεια του 18ου αιώνα, παρατηρήθηκε μια αξιοσημείωτη πρόοδος όσον αφορά την τεχνολογική εξέλιξη των υποβρυχίων. Υποβρύχια όπως το Turtle και το Hunley ήταν μεταξύ των πρώτων υποβρυχίων που κατασκευάστηκαν. Οι τεχνολογικές πρόοδοι κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου έθεσαν τα θεμέλια για μελλοντική ανάπτυξη, καθώς οι εφευρέτες αντιμετώπισαν προκλήσεις σχετικά με τον έλεγχο της πλευστότητας, της πρόωσης και την ασφάλεια.

Η περίοδος των παγκόσμιων πολέμων του 20ού αιώνα χαρακτηρίστηκε από σημαντική επιτάχυνση στην ανάπτυξη των υποβρυχίων. Αρκετά κράτη ανά τον κόσμο αναγνώρισαν τη στρατηγική σημασία των υποβρυχίων για τις ναυτικές επιχειρήσεις, επιδιώκοντας την ανάπτυξη προηγμένων μοντέλων όπως τα Γερμανικά U-boats και το Ιαπωνικό I-400. Κατά την ίδια περίοδο, η πρόοδος σε τεχνολογίες όπως το sonar και τα πιο αποδοτικά συστήματα πρόωσης ενίσχυσαν την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των υποβρυχίων. Οι καινοτομίες αυτές έθεσαν τις βάσεις για την ανάπτυξη των σύγχρονων υποβρυχίων.

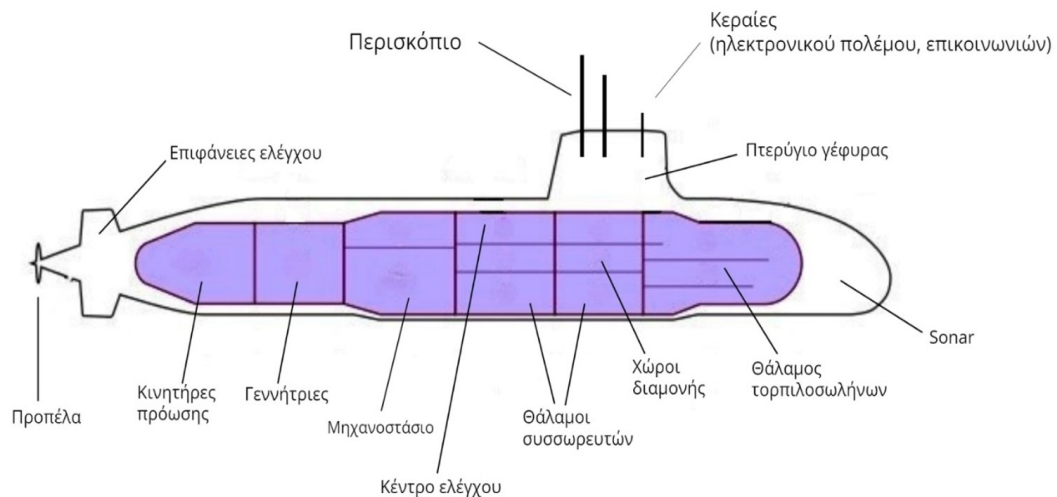
Κατά τη διάρκεια του ψυχρού πολέμου, η τεχνολογική ανάπτυξη στον τομέα των υποβρυχίων κατέγραψε σημαντική πρόοδο, με πλέον σημαντικό επίτευγμα την εισαγωγή της πυρηνικής πρόωσης. Τα προηγμένα αυτά υποβρύχια, εξοπλισμένα με πυρηνικούς αντιδραστήρες, απέκτησαν τη δυνατότητα να παραμένουν υποβρύχια για εκτεταμένες χρονικές περιόδους καθιστώντας τα κρίσιμα για την επιτυχία στρατηγικών ναυτικών επιχειρήσεων.

Στη σύγχρονη εποχή, τα υποβρύχια έχουν εξελιχθεί σε πολύπλοκες μηχανές. Μια νέα κατηγορία υποβρυχίων τα UUVs, (μη επανδρωμένα υποβρύχια) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διεξαγωγή πολεμικών επιχειρήσεων. Η επίδρασή τους είναι ιδιαίτερα αισθητή σε περιοχές όπου η ανθρώπινη πρόσβαση θεωρείται επικίνδυνη ή δύσκολη, καθιστώντας τα απαραίτητα εργαλεία στη σύγχρονη εποχή.

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί μια επισκόπηση των βασικών τμημάτων των υποβρυχίων και της ιστορικής τους εξέλιξης. Η ανάλυση θα καλύψει τόσο τις σταδιακές βελτιώσεις στη σχεδίαση και τη λειτουργία των υποβρυχίων, όσο και τις τεχνολογικές καινοτομίες που έχουν επιτρέψει τόσο στα υποβρύχια όσο και στα UUVs (μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα) να εξελιχθούν σε κρίσιμα εργαλεία στη διεξαγωγή σύγχρονων ναυτικών επιχειρήσεων.

1.2 Βασικά τμήματα υποβρυχίου

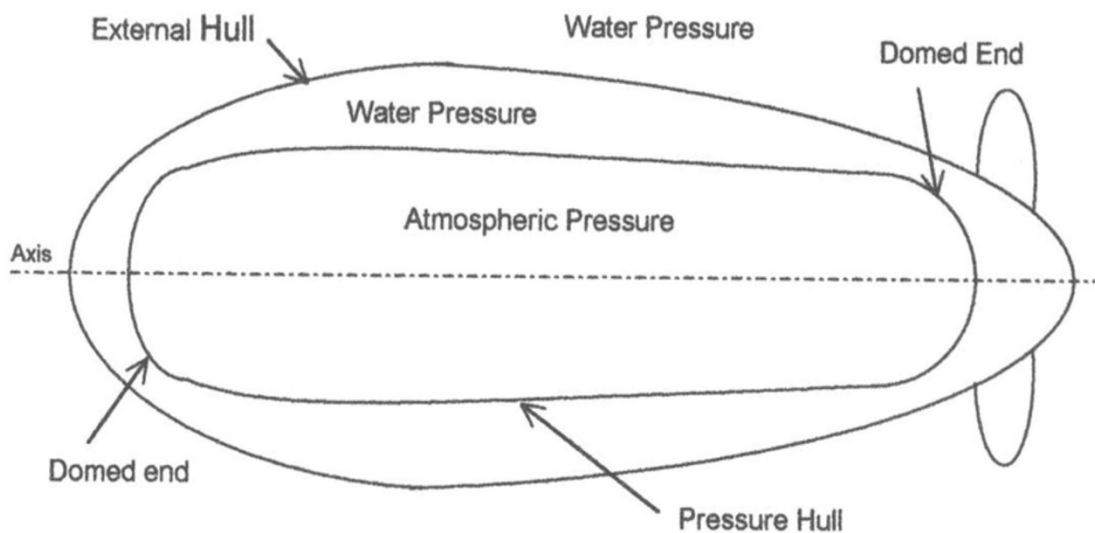
Ένα υποβρύχιο αποτελείται από μια σειρά σημαντικών τμημάτων, τα οποία συνεργάζονται ώστε να εξασφαλίσουν την αποτελεσματική του λειτουργία. Ξεκινώντας από την κύρια δομή, η οποία παρέχει τη δομική ακεραιότητα που απαιτείται για να αντέξει τεράστιες πιέσεις σε μεγάλα βάθη, μέχρι το μηχανοστάσιο που στεγάζει το σύστημα πρόωσης για την κίνηση, κάθε μέρος εξυπηρετεί μια συγκεκριμένη και αναντικατάστατη λειτουργία. Βασικά συστήματα, όπως το αδρανειακό σύστημα πλοήγησης και το Sonar, διευκολύνουν την πλοήγηση και τον εντοπισμό απειλών, ενώ ο έλεγχος του υποβρυχίου επιτυγχάνεται από τα πτερύγια ανόδου-καθόδου και το πηδάλιο διεύθυνσης. Εσωτερικά του υποβρυχίου, οι χώροι για τα πληρώματα, το κέντρο διοίκησης και τμήματα όπως ο χώρος για τους συσσωρευτές συμβάλλουν τόσο στη λειτουργικότητα του υποβρυχίου όσο και στην ικανοποιητική διαμονή του πληρώματος [1].



Εικόνα 1.1 : Βασικά τμήματα υποβρυχίου.

1.2.1 Pressure hull

Τα υποβρύχια διαθέτουν ένα εξωτερικό κύτος (external hull) και ένα εσωτερικό κύτος (pressure hull), με τα θαλασσέρματα να βρίσκονται μεταξύ τους. Το εσωτερικό κύτος ενός υποβρυχίου το οποίο είναι κατασκευασμένο για να αντέχει σε υψηλή υποθαλάσσια πίεση, στεγάζει τους κρίσιμους χώρους και τα συστήματα του υποβρυχίου. Περιλαμβάνει τους χώρους διαμονής του πληρώματος, τον οπλισμό, τα συστήματα ελέγχου, τις επικοινωνίες, το κέντρο διοίκησης, τα διαμερίσματα των συσσωρευτών, καθώς και τα βασικά και βοηθητικά μηχανήματα. Η δομή του εσωτερικού κύτους είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια και τη λειτουργία του υποβρυχίου, ειδικά κατά τη βυθίση σε μεγάλα βάθη [1-3].

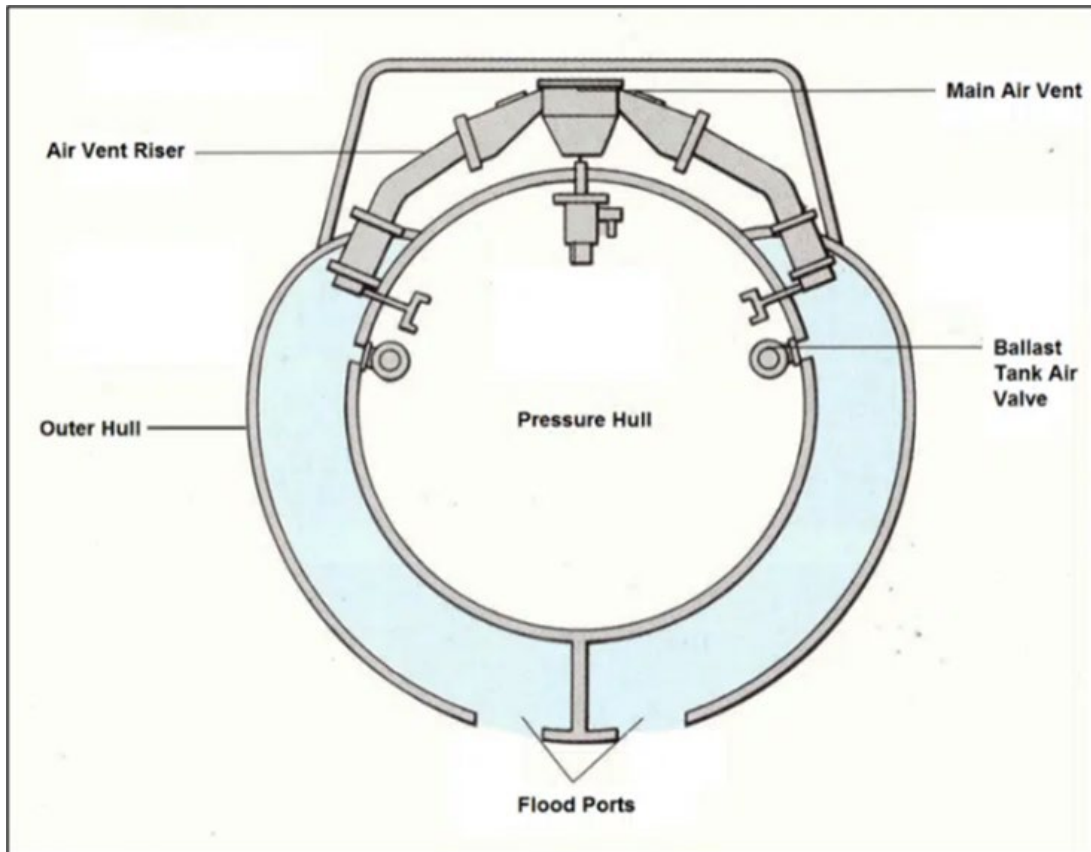


Εικόνα 1.2 : Διάταξη δομής συμβατικού υποβρυχίου [2].

1.2.2 Θαλασσέρματα-Αρχή λειτουργίας

Τα υποβρύχια, διαθέτουν ειδικές δεξαμενές γνωστές ως θαλασσέρματα, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση της πλευστότητας, μεταβάλλοντας την ποσότητα νερού που περιέχουν εσωτερικά τους. Η διαδικασία αυτή στηρίζεται στην αρχή του Αρχιμήδη, η οποία αναφέρει ότι οποιοδήποτε αντικείμενο βρίσκεται μέσα σε ένα ρευστό υφίσταται μια ανοδική δύναμη η οποία είναι ίση με το βάρος του ρευστού που έχει εκτοπιστεί από το αντικείμενο. Στο πλαίσιο των υποβρυχίων, η αρχή του Αρχιμήδη εφαρμόζεται για τον έλεγχο της πλευστότητας των υποβρυχίων. Ρυθμίζοντας την ποσότητα του νερού που υπάρχει στα θαλασσέρματα, το υποβρύχιο μπορεί να

ελέγξει τον όγκο του νερού που εκτοπίζει, μεταβάλλοντας με αυτό τον τρόπο την πλευστότητα του [2-3].

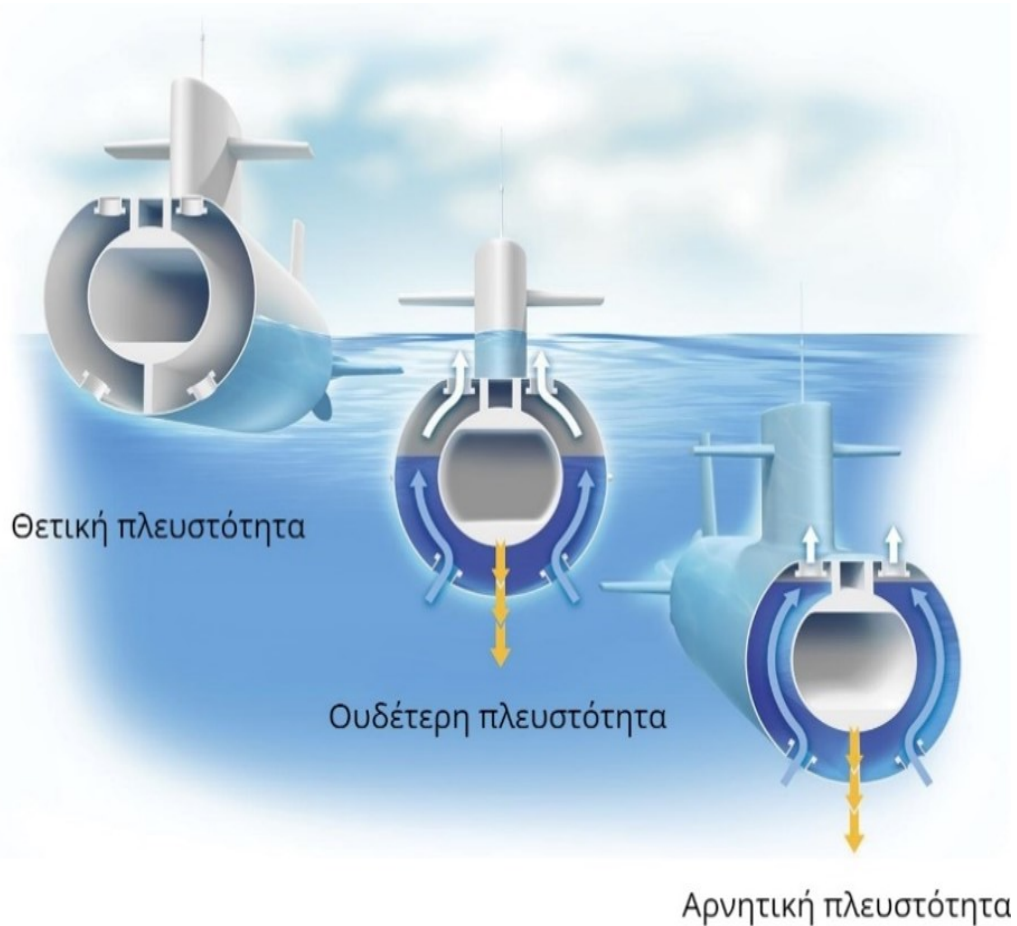


Εικόνα 1.3 : Θαλασσέρματα,διάταξη ρύθμισης πλευστότητας υποβρυχίου [3].

Θετική πλευστότητα: Το νερό στα θαλασσέρματα απομακρύνεται από το υποβρύχιο. Αυτό σημαίνει ότι η πυκνότητά του είναι μικρότερη από το περιβάλλον νερό, επιτρέποντάς του να αναδυθεί στην επιφάνεια.

Ουδέτερη πλευστότητα: Στην περίπτωση αυτή το βάρος του υποβρυχίου είναι ίσο με την ποσότητα του νερού που εκτοπίζει. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ρύθμισης της ποσότητας νερού και αέρα που βρίσκεται στα θαλασσέρματα.

Αρνητική πλευστότητα: Κατά την κατάδυση, ο αέρας από τα θαλασσέρματα αποβάλλεται και αντικαθίσταται από θαλασσινό νερό. Η ποσότητα του νερού μέσα στα θαλασσέρματα είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα του νερού που εκτοπίζεται, προκαλώντας τη βύθιση του υποβρυχίου [1,4].



Εικόνα 1.3 : Σύγκριση Καταστάσεων Πλευστότητας Υποβρυχίων.

1.2.3 Θάλαμος πρόωσης

Στα περισσότερα υποβρύχια, ο θάλαμος πρόωσης βρίσκεται συνήθως στην πρύμνη του υποβρυχίου. Η ακριβής θέση του θαλάμου πρόωσης ενδέχεται να διαφέρει ανάλογα με τον σχεδιασμό και τον τύπο του υποβρυχίου. Ο κύριος σκοπός του θαλάμου πρόωσης είναι να φιλοξενεί τα συστήματα πρόωσης που επιτρέπουν την κίνηση του υποβρυχίου. Στα συμβατικά υποβρύχια, αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν συνήθως πετρελαιοκινητήρες ή συστήματα αναερόβιας πρόωσης ενώ στα πυρηνοκίνητα υποβρύχια, η ενέργεια της πρόωσης προέρχεται από πυρηνικούς αντιδραστήρες. Επιπλέον, στον θάλαμο πρόωσης βρίσκονται και άλλα σημαντικά μηχανήματα όπως αεριοστρόβιλοι, κιβώτια ταχυτήτων, ηλεκτροκινητήρες και γεννήτριες, τα οποία συμβάλλουν στην κίνηση και τη λειτουργία του υποβρυχίου [1,5].

1.2.4 Προπέλες

Οι προπέλες στα υποβρύχια αποτελούν ένα κρίσιμο στοιχείο του συστήματος πρόωσης και είναι υπεύθυνες για την μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ώθηση, επιτρέποντας έτσι στο υποβρύχιο να κινείται στο νερό. Οι προπέλες στα σύγχρονα υποβρύχια είναι σχεδιασμένες με στόχο τη μείωση του παραγόμενου θορύβου και συχνά διαθέτουν από πέντε έως επτά πτερύγια. Κατασκευάζονται από υλικά υψηλής αντοχής όπως το τιτάνιο, προσφέροντας βελτιωμένη απόδοση και μεγάλη ανθεκτικότητα [1].

1.2.5 Συσσωρευτές

Τα υποβρύχια διαθέτουν συνήθως δύο διαμερίσματα συσσωρευτών, τα οποία είναι τοποθετημένα στο κατώτερο τμήμα του υποβρυχίου ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη ευστάθεια. Οι συσσωρευτές αποτελούν περίπου το ένα τέταρτο της συνολικής μάζας του υποβρυχίου και εξυπηρετούν ορισμένες κρίσιμες λειτουργίες οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια.

1. Πηγή Ενέργειας: Κατά την υποβρύχια λειτουργία ενός υποβρυχίου, η χρήση των κινητήρων που λειτουργούν με πετρέλαιο δεν είναι δυνατή, καθώς αυτοί οι κινητήρες απαιτούν οξυγόνο για να λειτουργήσουν. Σε αυτή τη φάση, οι συσσωρευτές γίνονται η κύρια πηγή ενέργειας για το υποβρύχιο. Αυτό σημαίνει ότι οι συσσωρευτές παρέχουν την απαραίτητη ενέργεια για την κίνηση του υποβρυχίου και επίσης τροφοδοτούν τα ηλεκτρικά συστήματα που είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία του.
2. Εφεδρεία: Σε περίπτωση διακοπής ρεύματος ή άλλης έκτακτης ανάγκης, οι συσσωρευτές μπορούν να λειτουργήσουν ως εφεδρική πηγή ενέργειας για κρίσιμες λειτουργίες όπως τα συστήματα υποστήριξης της ζωής και της πλοήγησης.
3. Αθόρυβη Λειτουργία: Η αθόρυβη λειτουργία αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα στην επιχειρησιακή απόδοση των υποβρυχίων. Όταν τα υποβρύχια λειτουργούν με την ενέργεια των συσσωρευτών, το επίπεδο θορύβου που παράγουν είναι σημαντικά μειωμένο σε σύγκριση με την περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται πετρελαιοκινητήρες. Αυτή η μείωση του θορύβου είναι ουσιώδης για την αποφυγή ανίχνευσης από εχθρικές ή ανταγωνιστικές δυνάμεις, καθώς ο θόρυβος μπορεί να αποκαλύψει τη θέση και την παρουσία ενός υποβρυχίου [1].

1.2.6 Εσωτερικοί χώροι διαμονής και συστήματα υποστήριξης ζωής

Ο χώρος ανάπαυσης για το πλήρωμα ενός υποβρυχίου συνήθως βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του υποβρυχίου. Αυτή η περιοχή παρέχει στους ναύτες έναν απαραίτητο χώρο για ξεκούραση και ανάκτηση ενέργειας μετά την εκτέλεση των καθηκόντων τους. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια του πληρώματος, το υποβρύχιο εξοπλίζεται με ειδικά φίλτρα που παγιδεύουν και απομακρύνουν το εκπνεόμενο διοξείδιο του άνθρακα. Επιπρόσθετα, το υποβρύχιο εφοδιάζεται με συστήματα ηλεκτρόλυσης του νερού, τα οποία παράγουν οξυγόνο για την αναπνοή του πληρώματος. Για την αντιμετώπιση των χαμηλών θερμοκρασιών που επικρατούν εσωτερικά του υποβρυχίου, χρησιμοποιείται κατάλληλο σύστημα θέρμανσης, το οποίο διασφαλίζει ότι οι εσωτερικές θερμοκρασίες παραμένουν σε αποδεκτά επίπεδα. Τέλος, το υποβρύχιο διαθέτει σύγχρονα συστήματα απόσταξης, τα οποία επεξεργάζονται το θαλασσινό νερό για την αφαίρεση των αλάτων, μετατρέποντάς το σε πόσιμο νερό. Αυτό το νερό χρησιμοποιείται για να καλυφθούν οι καθημερινές ανάγκες του πληρώματος, όπως είναι το μαγείρεμα και η προσωπική υγιεινή [1,5].

1.2.7 Θάλαμος торπιλών

Τα διαμερίσματα όπου φιλοξενούνται οι торπίλες αποτελούν αναπόσπαστα μέρη ενός υποβρυχίου, τα οποία είναι σχεδιασμένα για την αποθήκευση, συντήρηση, και εκτόξευση торπιλών. Σε αυτά τα διαμερίσματα βρίσκονται και οι торπιλοσωλήνες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι τόσο στην πλώρη όσο και στην πρύμνη του υποβρυχίου. Εκτός από την αποθήκευση των торπιλών και των торπιλοσωλήνων, το διαμέρισμα αυτό συχνά περιέχει περίπλοκα συστήματα για τη στόχευση και την εκτόξευση των торπιλών. Είναι επίσης μία από τις πιο ασφαλείς περιοχές ενός υποβρυχίου, λαμβάνοντας υπόψη την εύφλεκτη φύση των όπλων που περιέχει [1,5].

1.2.8 Πτερύγιο γέφυρας

Το πτερύγιο γέφυρας αποτελεί ένα σημαντικό δομικό τμήμα σε ένα υποβρύχιο, τοποθετημένο στην κορυφή του κύτους. Αυτός το τμήμα φιλοξενεί συστήματα όπως τα συστήματα πλοήγησης και επικοινωνίας, τα περισκόπια και τα συστήματα ηλεκτρονικού πολέμου [1,5].

1.2.9 Περισκόπιο

Το περισκόπιο είναι τοποθετημένο στο πτερύγιο γέφυρας. Ο στόχος του περισκόπιου είναι να επιτρέψει σε έναν παρατηρητή να εποπτεύει την περιοχή και τις συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια ενώ το υποβρύχιο παραμένει βυθισμένο [1,5].

1.2.10 Κέντρο ελέγχου

Το κέντρο ελέγχου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο καθώς είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση και την εποπτεία πολλαπλών λειτουργιών του υποβρυχίου. Συνήθως είναι τοποθετημένο στο άνω τμήμα του, ώστε να παρέχεται άμεση πρόσβαση στα κρίσιμα σημεία του υποβρυχίου [5-6].

1.2.11 Επιφάνειες ελέγχου

Τα υποβρύχια εξοπλίζονται με ειδικές επιφάνειες ελέγχου οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για την πλοήγησή τους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτές οι επιφάνειες ελέγχου διακρίνονται σε δύο βασικούς τύπους:

Τα πτερύγια ανόδου-καθόδου: Αυτά είναι κινητά οριζόντια πτερύγια, τοποθετημένα κατά κανόνα στην πλώρη ή στην πρύμνη του υποβρυχίου. Η λειτουργία τους είναι η ρύθμιση της γωνίας ανόδου ή καθόδου του υποβρυχίου, επιτρέποντας έτσι την αλλαγή του βάθους στο οποίο κινείται.

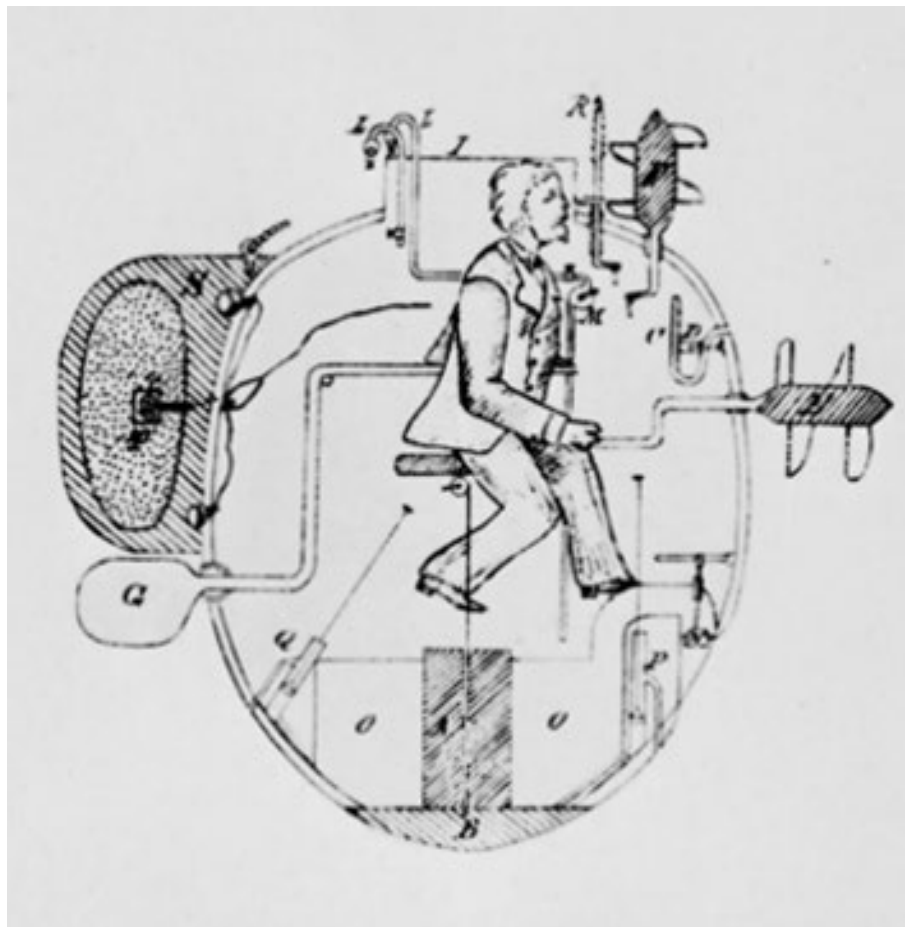
Το πηδάλιο διεύθυνσης: Βρίσκεται συνήθως στην πρύμνη και είναι υπεύθυνο για την κατεύθυνση του υποβρυχίου. Μέσω της ρύθμισης αυτού του πηδαλίου, το υποβρύχιο μπορεί να στρίψει και να πλεύσει προς την επιθυμητή κατεύθυνση [1,5].

1.3 Ιστορική ανασκόπηση 18^{ου} αιώνα-20^{ου} αιώνα

Στις ενότητες που ακολουθούν θα πραγματοποιηθεί μια ιστορική ανασκόπηση των υποβρυχίων από τα πρώτα στάδια της ανάπτυξής τους, μέχρι τα σημερινά σύγχρονα και τεχνολογικά προηγμένα υποβρύχια. Οι ενότητες αυτές έχουν ως στόχο να προσφέρουν ένα συγκροτημένο πλαίσιο για την κατανόηση της τεχνολογικής εξέλιξης των υποβρυχίων με την πάροδο των αιώνων.

1.3.1 Turtle 1776

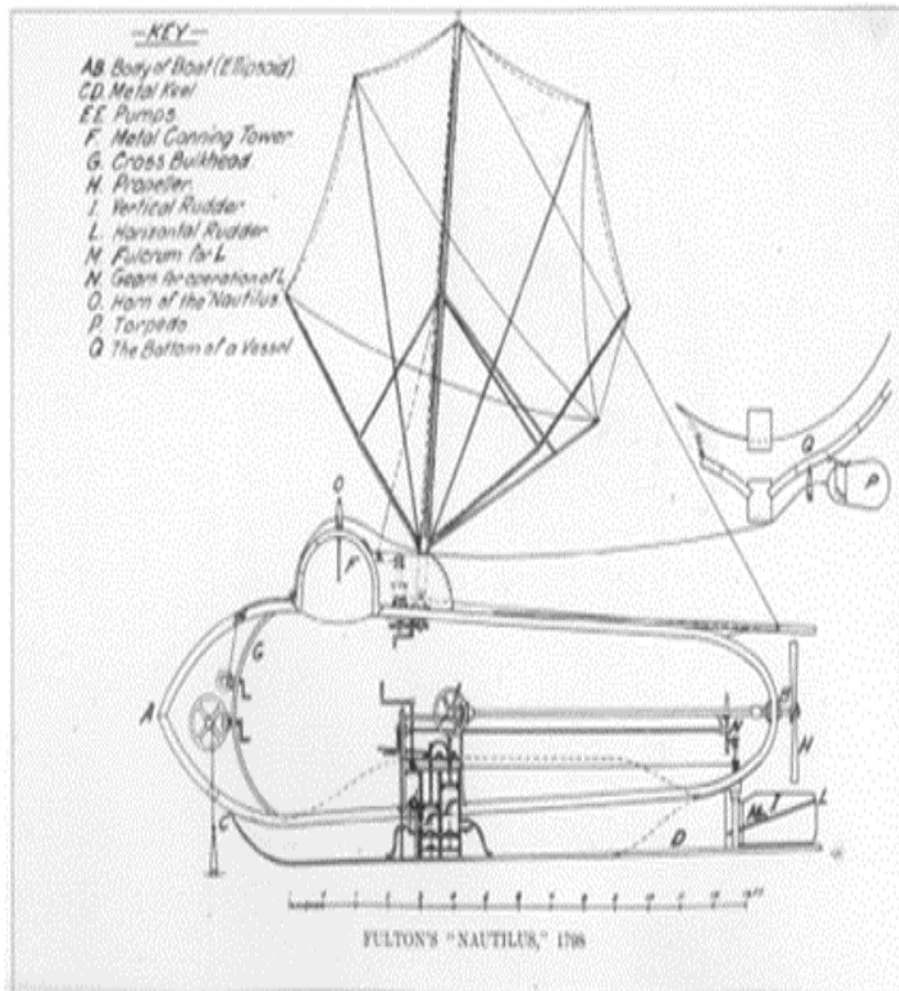
Το Turtle, το οποίο σχεδιάστηκε το 1775 από τον Αμερικανό David Bushnell, θεωρείται το πρώτο υποβρύχιο που χρησιμοποιήθηκε για πολεμικές επιχειρήσεις. Αυτό το καινοτόμο υποβρύχιο, κατασκευασμένο από ξύλο βελανιδιάς και στεγανοποιημένο με πίσσα, είχε ύψος περίπου 6 πόδια και διάμετρο 3 πόδια. Η κίνηση του Turtle επιτυγχανόταν μέσω δύο προπελών, μια για την οριζόντια και μια για την κάθετη κίνηση, αναπτύσσοντας μέγιστη ταχύτητα 4.8 km/h. Το πλήρωμά του αποτελούνταν από μόλις ένα άτομο, το οποίο έλεγχε την πλευστότητα με τη χρήση ενός θαλασσέριματος και μιας αντλίας χειρός. Το υποβρύχιο μπορούσε να παραμείνει κάτω από την επιφάνεια για περίπου μισή ώρα και διέθετε μικρά παράθυρα για την πλοήγηση. Η πρώτη και κύρια αποστολή του Turtle ήταν η προσπάθεια βύθισης του βρετανικού πολεμικού πλοίου HMS Eagle το 1776, μια αποστολή που αντιμετώπισε δυσκολίες και τελικά απέτυχε. Παρόλα αυτά, το Turtle σημείωσε σημαντική πρόοδο στην ανάπτυξη του υποβρυχίου πολέμου, θέτοντας έτσι τις βάσεις για μελλοντικές ναυπηγήσεις [7-8].



Εικόνα 1.4 : Απεικόνιση υποβρυχίου Turtle [8].

1.3.2 Nautilus 1800

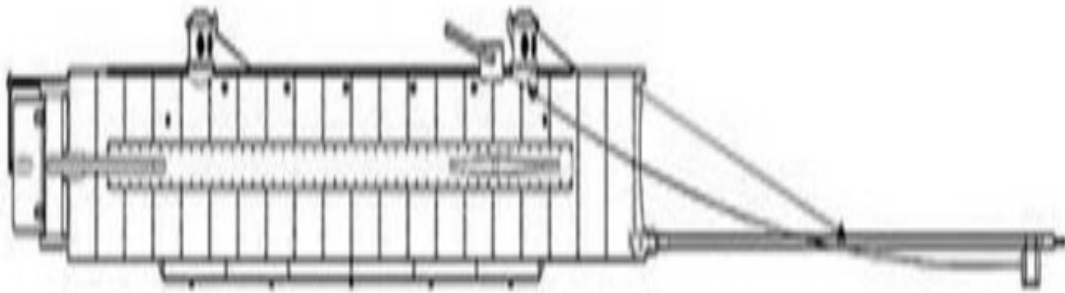
Το 1800, ο Robert Fulton σχεδίασε το “Nautilus”, ένα επαναστατικό υποβρύχιο από χαλκό και σίδηρο. Με μήκος 21 πόδια και πλάτος 6 πόδια, το Nautilus είχε σχήμα ψαριού με αιχμηρή πλώρη και κωνική πρύμνη για μειωμένη υδροδυναμική αντίσταση. Κινούνταν με τετράφυλλη χειροκίνητη προπέλα και είχε αναδιπλούμενο κατάρτι για την πλεύση στην επιφάνεια. Είχε ειδικές επιφάνειες ελέγχου για την κατάδυση και προηγμένο σύστημα θαλασσέρματος με δύο χάλκινες δεξαμενές για τη ρύθμιση της πλευστότητας και του βάθους. Το Nautilus σχεδιάστηκε να προσαρτίζει εκρηκτικά σε εχθρικά πλοία, χρησιμοποιώντας μια πρώιμη μορφή νάρκης που ονομάστηκε “carcass”. Η χρήση του Nautilus όμως περιορίστηκε λόγω πολιτικών και οικονομικών δυσκολιών [8-9].



Εικόνα 1.5 : Σχηματική αναπαράσταση του υποβρυχίου Nautilus [9].

1.3.3 CSS H.L. Hunley 1863

Κατά τον Αμερικανικό Εμφύλιο Πόλεμο, το υποβρύχιο H.L. Hunley σχεδιάστηκε για να βοηθήσει τη Συνομοσπονδία να παρακάμψει τον ναυτικό αποκλεισμό της Ένωσης. Με μήκος 40 πόδια και πλάτος 4 πόδια, το Hunley κινούνταν μηχανικά από οκτώ μέλη πληρώματος, με μέγιστη ταχύτητα 4 κόμβους στην επιφάνεια και 2 κόμβους εν καταδύσει. Διέθετε δύο θαλασσερματα για τον έλεγχο της πλευστότητας και ήταν εξοπλισμένο με μια τορπίλη περίπου 90 λιβρών. Κατά τις δοκιμές, το Hunley βυθίστηκε δύο φορές, χάνοντας 22 μέλη πληρώματος, αλλά ανασυρθηκε και τελικά, στις 17 Φεβρουαρίου 1864, βύθισε το Housatonic του στόλου των ΗΠΑ, σημειώνοντας την πρώτη επιτυχημένη βύθιση εχθρικού πλοίου στην ιστορία [8],[10].

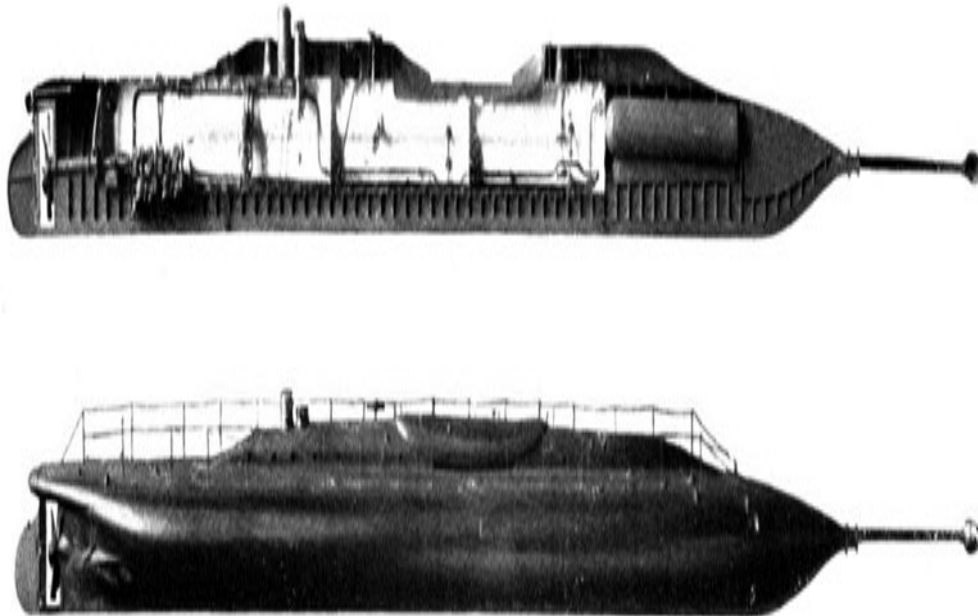


Εικόνα 1.6 : Σχηματική απεικόνιση του υποβρυχίου H.L. Hunley [10].

1.3.4 Le plongeur 1864

Το "Le Plongeur" (Ο Δύτης), ένα γαλλικό υποβρύχιο, σχεδιασμένο από τους Simeon Bourgeois και Charles Brun, ήταν πρωτοπόρο στη χρήση μηχανικής πρόωσης. Με μήκος 146 πόδια, πλάτος 3.7 μέτρα και 420 τόνους εκτόπισμα, διέθετε εμβολοφόρο κινητήρα 60 kW που τροφοδοτούνταν από συμπιεσμένο αέρα και ανέπτυξε ταχύτητα 4 κόμβων, με εμβέλεια 5 ναυτικών μιλίων. Το υποβρύχιο μπορούσε να αναδυθεί ή να καταδυθεί μέσω ενός θαλασσερματος το οποίο είχε όγκο 53 m³. Επίσης, διέθετε κριό για την προσάρτηση εκρηκτικών σε εχθρικά πλοία. Παρόλες τις τεχνολογικές του προόδους, το "Le Plongeur" αντιμετώπισε τεχνικές προκλήσεις, όπως ο ανεπαρκής

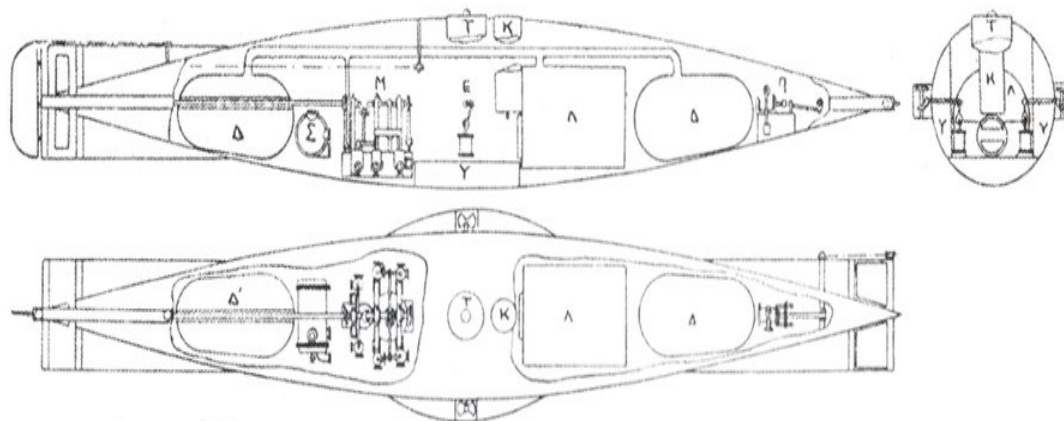
κινητήρας και το απρόβλεπτο σύστημα ελέγχου πλευστότητας, οδηγώντας στην απόσυρσή του το 1872 [11-12].



Εικόνα 1.7 : Απεικόνιση του υποβρυχίου Le Plongeur [12].

1.3.5 Nordenfelt I 1886 (Ελληνικό πολεμικό Ναυτικό)

Το Nordenfelt I, αποτέλεσε πρώτο υποβρύχιο της Ελλάδας, σχεδιασμένο από τον Σουηδό Thorsten Nordenfelt και κατασκευασμένο στην Αγγλία το 1885, ήταν ένα σημαντικό ορόσημο στη ναυτική ιστορία. Με μήκος 19,5 μέτρα και πλάτος 3,7 μέτρα, το υποβρύχιο είχε εκτόπισμα 60 τόνων στην επιφάνεια και 80 τόνων κατά τη βύθιση. Επιπλέον, ήταν εφοδιασμένο με μια ατμομηχανή 100 ίππων, παρέχοντας μέγιστη ταχύτητα 9 κόμβων στην επιφάνεια και 3 κόμβους εν καταδύσει. Ο οπλισμός του περιελάμβανε έναν τορπιλοσωλήνα 14 ιντσών και ένα πυροβόλο 1 ίντσας. Παρ' όλα αυτά, το Nordenfelt I αντιμετώπισε προκλήσεις όπως η αστάθεια, η ανεπαρκής στεγανοποίηση του πυργίσκου και η μειωμένη ταχύτητα κατά την υποβρύχια πλεύση, περιορίζοντας την αποτελεσματικότητά του. Μετά από αρχικές δοκιμαστικές αποστολές, το υποβρύχιο επεστράφη στην Αγγλία λόγω της απογοητευτικής του απόδοσης [13-14].

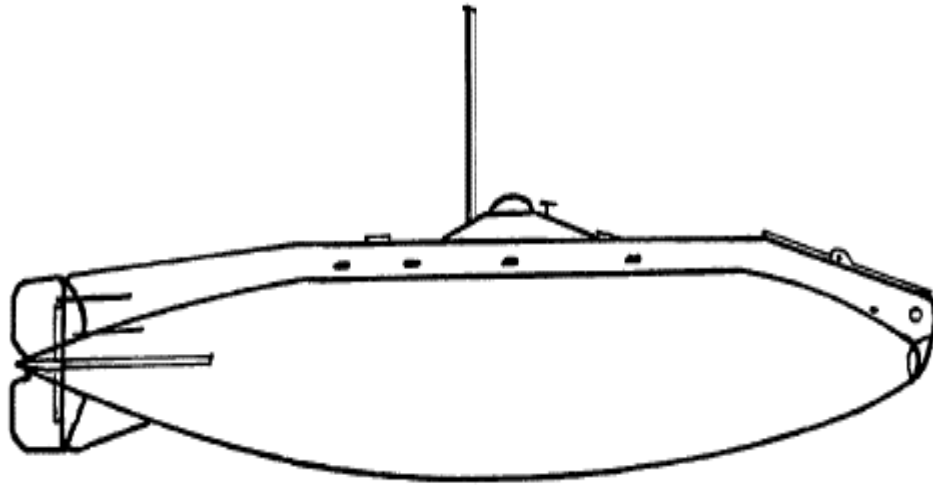


- Λ Λέβης.
- Κ Καπνοδόχος.
- Μ Κύρια ατμομηχανή.
- Σ Συμπιεστής.
- Δ, Δ' Δεξαμεναι αποθηκευσεως υπερθερμανθέντος ύδατος.
- Τ Κάθοδος
- Υ Υδροδόκη
- Ε Βοηθητικόν μηχανημα κινήσεως κατακορύφων ελικων.
- Π Υψηρετικόν μηχανημα αυτομάτου κινήσεως προωραίων οριζοντίων πηδαλιων.

Εικόνα 1.8 : Σχέδιο διαμήκους τομής και κάτοψης Nordenfelt I [14].

1.3.6 USS Holland 1898

Το USS Holland (SS-1), θεωρείται ως το πρώτο υποβρύχιο του πολεμικού ναυτικού των ΗΠΑ και καθελκύστηκε στις 17 Μαΐου 1897. Το υποβρύχιο αυτό διέθετε μήκος 16.4 m, πλάτος 3.1 m, βύθισμα 2.5 m και διέθετε εκτόπισμα 64 τόνους στην επιφάνεια και 74 τόνους κατά τη βύθιση. Το σύστημα πρόωσης αποτελούνταν από έναν κινητήρα βενζίνης 45-hp για την πλεύση στην επιφάνεια και έναν ηλεκτρικό κινητήρα 50-hp για την υποβρύχια πλεύση. Το υποβρύχιο Holland διέθετε επιχειρησιακή ακτίνα δράσης που έφθανε τα 200 ναυτικά μίλια κατά την επιφανειακή πλεύση και τα 30 ναυτικά μίλια κατά την κατάδυση. Το μέγιστο βάθος κατάδυσης ήταν 75 πόδια και διέθετε οπλισμό ενός τορπιλοσωλήνα 18 ιντσών. Το υποβρύχιο φιλοξενούσε πλήρωμα έξι ατόμων και εκτελούσε κυρίως πειραματικές αποστολές. Ο έλεγχος της πλευστότητας επιτυγχάνονταν μέσω ενός συστήματος θαλασσέρματος και συμπιεσμένου αέρα ενώ η πορεία του υποβρυχίου ελέγχονταν μέσω χειροκίνητων επιφανειών ελέγχου. Παρά το γεγονός ότι αρχικά δεν προοριζόνταν για πολεμική χρήση, η σχεδίαση του Holland επηρέασε αρκετές από τις μελλοντικές στρατιωτικές εφαρμογές [5].



Εικόνα 1.9 : USS Holland [5].

1.4 Η εξέλιξη των υποβρυχίων- Α' Παγκόσμιος Πόλεμος

Κατά τις αρχές του 20ού αιώνα και οδεύοντας προς τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο, τα υποβρύχια αναδείχθηκαν σε κρίσιμο στοιχείο του ναυτικού πολέμου, χρησιμοποιούμενα κυρίως από τη Γερμανία για την επίθεση εναντίον επιφανειακών εμπορικών πλοίων. Αυτή η περίοδος σήμανε μια σημαντική μετάβαση στην τεχνολογία των υποβρυχίων, από πειραματικές κατασκευές σε πλήρως λειτουργικές και στρατηγικά ζωτικής σημασίας μονάδες [16].

1.4.1 Ανάπτυξη τορπιλών

Η ανάπτυξη των τορπιλών ήταν καθοριστική, ενισχύοντας τις επιθετικές δυνατότητες των υποβρυχίων και καθιστώντας τα ισχυρά στρατηγικά όπλα. Οι τορπίλες πλέον δεν ήταν μόνο ταχύτερες και πιο αξιόπιστες, αλλά και σημαντικά πιο ισχυρές, μεταβάλλοντας τον ρόλο των υποβρυχίων από απλά εργαλεία αναγνώρισης σε σοβαρές απειλές κατά των επιφανειακών πλοίων [17].

1.4.2 Βελτίωση συστημάτων πρόωσης

Παράλληλα με τις προόδους στον οπλισμό, παρατηρήθηκε ένα σημαντικό άλμα και στην τεχνολογία της πρόωσης. Η μετάβαση από τους βενζινοκινητήρες στους πετρελαιοκινητήρες συνέβαλε σημαντικά στην ασφάλεια και την αποδοτικότητα των υποβρυχίων, λόγω της μειωμένης πτητικότητας του πετρελαίου σε σύγκριση με τη αυτή της βενζίνης.

Η χρήση του διπλού συστήματος πρόωσης (πετρελαιοκινητήρες-ηλεκτροκινητήρες) σε συνδυασμό με την βελτίωση της τεχνολογίας των συσσωρευτών, οι οποίοι τροφοδοτούσαν τους ηλεκτροκινητήρες για την υποβρύχια πλεύση, συνέβαλαν στην αύξηση της εμβέλειας και της απόδοσης των υποβρυχίων, επιτρέποντάς τους να παραμένουν εν καταδύσει για εκτεταμένες περιόδους. Αυτή η τεχνολογική πρόοδος αποδείχθηκε καθοριστική στην εξέλιξη του υποβρυχίου ως ενά ικανού μέσου για τη διεξαγωγή ναυτικών επιχειρήσεων, με ιδιαίτερη έμφαση στην εκτέλεση αναγνωριστικών αποστολών και αιφνιδιαστικών επιθέσεων [8].

1.4.3 Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό -Α' Παγκόσμιος Πόλεμος

Κατά την περίοδο αυτή, η Ελλάδα, επιδιώκοντας την εκσυγχρονισμό των ναυτικών της δυνάμεων, άρχισε να ενσωματώνει υποβρύχια σκάφη στο στόλο της. Αν και δεν ήταν τεχνολογικά προηγμένα όσο εκείνα μεγάλων δυνάμεων όπως η Γερμανία ή οι Ηνωμένες Πολιτείες, τα ελληνικά υποβρύχια αποτέλεσαν ένα σημαντικό βήμα στη ναυτική ανάπτυξη της Ελλάδας. Τα υποβρύχια αυτά, συχνά αποκτηθέντα μέσω διεθνών συνεργασιών και συνεργατικών προσπαθειών, χρησιμοποιούνταν κυρίως για αποστολές ακτοφυλακής και αναγνώρισης, ενισχύοντας τις αμυντικές δυνατότητες της Ελλάδας και αντανακλώντας τη δέσμευσή της στην υιοθέτηση σύγχρονων τακτικών ναυτικού πολέμου [13-14].

Ο πίνακας που ακολουθεί θα αναδείξει τις τεχνικές προδιαγραφές σημαντικών υποβρυχίων της εποχής, συμπεριλαμβανομένων και των ελληνικών υποβρυχίων της κλάσης Laubeuf. Αυτή η λεπτομερής επισκόπηση στοχεύει να παρέχει μια σαφή και αντικειμενική σύγκριση των διαφορετικών αυτών υποβρυχίων, επικεντρωμένη στις κατασκευαστικές λεπτομέρειες, τις δυνατότητες και τον οπλισμό τους, με στόχο να αναδείξει την τεχνολογική πρόοδο και τη στρατηγική σημασία που είχαν κατά την κρίσιμη αυτή περίοδο στην ιστορία του Α' Παγκόσμιου Πολέμου.

| ΤΥΠΟΣ Υ/Β | Type U 31 | L-class | LAUBEUF (Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό) |
|-----------------------------------|--|--|---|
| ΚΑΘΕΛΚΥΣΗ | 1914 | 1914 | 1911 |
| ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ(τόνοι) | 685 | 450 | 310 |
| ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ (τόνοι) | 878 | 548 | 460 |
| ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (m) | 64,7/6,32/3,56 | 51,03/5,31/4,14 | 50/4,7/2,7 m |
| ΠΡΩΣΗ | 2 Μηχανές Diesel 2 Ηλεκτροκινητήρες | 2 Μηχανές Diesel 2 Ηλεκτροκινητήρες | 2 Μηχανές Diesel 2 Ηλεκτροκινητήρες |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (knots) | 16,4 | 14 | 13 |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ | 9,7 | 10,5 | 8,5 |
| ΑΤΚΙΝΑ ΔΡΑΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ | 8.790 νμ (8 κόμβους) | 4500 νμ (7 κόμβους) | 1800 νμ |
| ΑΚΤΙΝΑ ΔΡΑΣΗΣ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ | 80 νμ (5 κόμβους) | 150 νμ (5 κόμβους) | 8 νμ (8 κόμβους) |
| ΒΑΘΟΣ ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ (m) | 50 | 61 | 36 |
| ΤΟΡΠΙΛΟΣΩΛΗΝΕΣ | 4 Τορπιλωσολήνες 20 ιντσών | 4 Τορπιλωσολήνες 450 χιλ. | 5 Τορπιλωσολήνες 450 χιλ. |
| ΠΛΗΡΩΜΑ | 35 | 28 | 18 |

Πίνακας 1.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά υποβρυχίων Α' Παγκόσμιου Πόλεμου [13-14],[18-19].

1.5 Η εξέλιξη των Υποβρυχίων- Β' Παγκόσμιος Πόλεμος

Μετά το πέρας του Α' Παγκόσμιου Πολέμου, υπήρξε μια έντονη εξέλιξη στην τεχνολογία των υποβρυχίων. Οι ναυτικές δυνάμεις επένδυσαν σημαντικά στην ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων πρόωσης, καινοτόμων σχεδιασμών κύτους και τεχνολογιών ανίχνευσης όπως το sonar. Αυτές οι πρόοδοι εξέλιξαν τον ρόλο των υποβρυχίων στις ναυτικές συγκρούσεις, καθιστώντας τα ακόμη πιο αποτελεσματικά και κρίσιμα στρατηγικά εργαλεία.

1.5.1 Snorkel (αναπνευστήρας)

Μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στην τεχνολογία υποβρυχίων ήταν η εφεύρεση του συστήματος snorkel, ένας σωλήνας που επιτρέπει τη λειτουργία των κινητήρων ντίζελ σε βάθος περισκοπίου επιτρέποντας παράλληλα την φόρτιση των συσσωρευτών και την εξαερισμό του εσωτερικού χώρου χωρίς την ανάγκη ανάδυσης, μειώνοντας έτσι δραστικά τον κίνδυνο επιθέσεων από εχθρικές δυνάμεις. Το υποβρύχιο O 19 του Βασιλικού Ναυτικού της Ολλανδίας υπήρξε το πρώτο υποβρύχιο που χρησιμοποίησε το σύστημα αυτό [1],[20].

1.5.2 Βελτίωση υδροδυναμικής

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η εξέλιξη της υδροδυναμικής σχεδίασης αποτέλεσε μια από τις πιο σημαντικές βελτιώσεις στην κατασκευή υποβρυχίων. Με τη βελτιωμένη υδροδυναμική σχεδίαση, τα υποβρύχια έγιναν πιο γρήγορα και ευέλικτα, βελτιώνοντας έτσι την ικανότητά τους να εκτελούν αποτελεσματικά επιθετικές και αμυντικές ενέργειες. Η αύξηση της ευκινησίας ήταν ιδιαίτερα κρίσιμη σε μια περίοδο που οι τακτικές του ανθυποβρυχιακού πολέμου εξελίσσονταν ταχύτατα. Παράλληλα, η βελτιωμένη υδροδυναμική σχεδίαση συνέβαλε σημαντικά στην αύξηση της οικονομίας καυσίμων και στην επέκταση της επιχειρησιακής εμβέλειας των υποβρυχίων αυξάνοντας έτσι τη στρατηγική τους αξία. Ένα ξεχωριστό παράδειγμα αυτής της βελτιωμένης υδροδυναμικής σχεδίασης αποτελεί το υποβρύχιο Type XXI [5],[21].

1.5.3 Sonar

Το sonar αναπτύχθηκε αρχικά κατά τη διάρκεια του Α' Παγκοσμίου Πολέμου, αλλά η ευρεία χρήση του σε υποβρύχια άρχισε κυρίως κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι σόναρ: το παθητικό και το ενεργητικό. Το παθητικό σόναρ, μέσω των υδροφώνων που χρησιμοποιεί, επέτρεψε στα υποβρύχια να παρακολουθούν διακριτικά τους ήχους κάτω από το νερό. Αυτά τα υδρόφωνα μετατρέπουν τα ηχητικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα, επιτρέποντας στους χειριστές να ανιχνεύουν και να αναλύουν την παρουσία άλλων αντικειμένων χωρίς να αποκαλύπτουν τη θέση τους. Εν αντιθέση με το ενεργητικό σόναρ το οποίο λειτουργεί με την εκπομπή ηχητικών κυμάτων, τα οποία, όταν αντανακλώνται πίσω από ένα αντικείμενο, επιστρέφουν στο υποβρύχιο. Το σύστημα στη συνέχεια μετρά το χρονικό διάστημα μεταξύ της εκπομπής και της επιστροφής των ηχητικών κυμάτων για να

καθορίσει την απόσταση και πιθανώς την κατεύθυνση του αντικειμένου. Ωστόσο, η χρήση του ενεργητικού σόναρ στα υποβρύχια ήταν περιορισμένη, ιδίως κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, καθώς η εκπομπή των ηχητικών κυμάτων θα μπορούσε επίσης να αποκαλύψει τη θέση του υποβρυχίου [1],[22].

1.5.4 Ανάπτυξη ειδικών τύπων υποβρυχίων

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, αναπτύχθηκαν νέοι τύποι υποβρυχίων με ιδιαίτερες λειτουργίες. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα ήταν τα υποβρύχια τύπου "milk cow" που χρησιμοποιήθηκαν από τη Γερμανία για την εφοδιαστική υποστήριξη των U-boat με καύσιμα και άλλα απαραίτητα εφόδια, επεκτείνοντας σημαντικά την επιχειρησιακή τους εμβέλεια. Επιπλέον, τα Ιαπωνικά υποβρύχια τύπου I-400, αποτελούσαν μια μοναδική συνδυασμένη τεχνολογία υποβρυχίων και αεροπλανοφόρων. Αυτά τα υποβρύχια είχαν την ικανότητα να μεταφέρουν και να εκτοξεύουν έως τρία αεροσκάφη, πραγματοποιώντας βομβαρδισμούς σε στρατηγικούς στόχους. Τέλος, κατά τη διάρκεια του Δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου, αναπτύχθηκε ακόμη μια ειδική κατηγορία υποβρυχίων, γνωστή ως "midget" (μικροσκοπικά). Αυτά τα υποβρύχια διέθεταν περιορισμένη επιχειρησιακή εμβέλεια και βάθος κατάδυσης, γι' αυτό χρησιμοποιούνταν κυρίως για αποστολές αναγνώρισης και επιθέσεις σε εχθρικά λιμάνια (Pearl Harbor). Το πλήρωμα αποτελούνταν συνήθως από δύο άτομα και ήταν εξοπλισμένα με τορπίλες ή εκρηκτικά [23-25].

1.5.5 Βελτίωση Τεχνολογίας τορπιλών

Επιπλέον κατά την περίοδο αυτή, η τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα των τορπιλών ήταν ιδιαίτερα κρίσιμη και επιδραστική. Ένα από τα πιο σημαντικά επιτεύγματα ήταν η χρήση ηλεκτρικής πρόωσης, η οποία έκανε τις τορπίλες πιο αθόρυβες και δυσκολότερα ανιχνεύσιμες ενώ παράλληλα, η εμβέλεια και η ταχύτητα των τορπιλών αυξήθηκαν σημαντικά. Επιπλέον, η ανάπτυξη βελτιωμένων συστημάτων καθοδήγησης αύξησε την ακρίβεια των τορπιλών, καθιστώντας τις πιο ικανές στο να πλήττουν με ακρίβεια στόχους. Αυτή η βελτίωση έδωσε τη δυνατότητα στα υποβρύχια να βυθίζονται ακόμη και τα μεγαλύτερα πολεμικά και εμπορικά πλοία, αλλάζοντας έτσι δραστικά τις τακτικές και τις στρατηγικές των ναυτικών μαχών [26-27].

Στους πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται σημαντικά υποβρύχια κατά την περίοδο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού. Κατά την έναρξη του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, το Ελληνικό Ναυτικό διέθετε έναν σημαντικό στόλο υποβρυχίων, αποτελούμενο κυρίως από έξι υποβρύχια:

τα ΚΑΤΣΩΝΗΣ Υ1 και ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΗΣ Υ2, που ανήκαν στην κλάση Schneider-Laubeuf, και τα ΠΡΩΤΕΥΣ Υ3, ΝΗΡΕΥΣ Υ4, ΤΡΙΤΩΝ Υ5, και ΓΛΑΥΚΟΣ Υ6 της κλάσης Simonot. Το 1942 το Ελληνικό Ναυτικό παραλαμβάνει ένα αιχμαλωτισμένο Ιταλικό υποβρύχιο τύπου PERLA (ΜΑΤΡΩΖΟΣ Υ7) και το 1943 ένα υποβρύχιο τύπου ‘V’ (ΠΙΠΙΝΟΣ Υ8).

Τα ελληνικά υποβρύχια, ειδικότερα αυτά της κλάσης SCHNEIDER-LAUBEUF (ΚΑΤΣΩΝΗΣ Υ1-ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΗΣ Υ2), διαδραμάτισαν κρίσιμο ρόλο στη διακοπή των εφοδιαστικών ροών των δυνάμεων του Άξονα, ενώ παράλληλα εκτελούσαν και σημαντικές αποστολές αναγνώρισης. Παρά τις σημαντικές προκλήσεις, όπως οι περιορισμένοι πόροι και η αντιμετώπιση ενός ισχυρού αντιπάλου, τα υποβρύχια αυτά κατάφεραν να επιτύχουν σημαντικές επιχειρησιακές νίκες, αποδεικνύοντας την υψηλή επιδεξιότητα και την αποτελεσματικότητα των πληρωμάτων τους [13-14].

| ΤΥΠΟΣ Υ/Β | ‘V’ | PERLA | SCHNEIDER-LAUBEUF | SIMONOT |
|--------------------------------|--|--|--|--|
| ΚΑΘΕΛΚΥΣΗ | 1942 | 1936 | 1926 | 1927-1928 |
| ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ(τόνοι) | 640 | 677 | 576 | 780 |
| ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ (τόνοι) | 740 | 857 | 775 | 960 |
| ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (m) | 60,6/4,9/4,4 | 60,2/6,4/4,3 | 62,5/5,3/3,6 | 68,6/5,7/4,1 |
| ΠΡΩΩΣΗ | 2 Μηχανές Diesel 2 Ηλεκτροκινητήρες | 2 Μηχανές Diesel 2 Ηλεκτροκινητήρες | 2 Μηχανές Diesel 2 Ηλεκτροκινητήρες | 2 Μηχανές Diesel 2 Ηλεκτροκινητήρες |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (κόμβοι) | 12,5 | 14 | 14 | 14 |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ (κόμβοι) | 9 | 7,5 | 9 | 9 |
| ΑΚΤΙΝΑ ΔΡΑΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ | 3.850 νμ (12 κόμβους) | 5.200 νμ (8 κόμβους) | 3500 νμ (10 κόμβους) | 3600 νμ (12,5 κόμβους) |
| ΑΚΤΙΝΑ ΔΡΑΣΗΣ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ | 178 νμ (2,2 κόμβους) | 74 νμ (4 κόμβους) | 100 νμ (3,5 κόμβους) | 100 νμ (3,5 κόμβους) |
| ΒΑΘΟΣ ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ (m) | 105 | 120 | 80 | 90 |
| ΤΟΡΠΙΛΟ-ΣΩΛΗΝΕΣ | 4 Τορπιλοσωλήνες 21 ιντσών | 6 Τορπιλοσωλήνες 21 ιντσών | 6 Τορπιλοσωλήνες 21 ιντσών | 8 Τορπιλοσωλήνες 21 ιντσών |
| ΠΛΗΡΩΜΑ | 39 | 43 | 41 | 41 |

Πίνακας 1.2 : Υποβρύχια Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού κατά την περίοδο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου [13-15].

| ΤΥΠΟΣ Υ/Β | GATO | BALAO | GUPPY IIA | GUPPY III |
|---|--|--|--|--|
| ΚΑΘΕΛΚΥΣΗ | 1942 | 1944 | 1943 | 1945 |
| ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ(τ όνοι) | 2.021 | 2.040 | 1.840 | 1.975 |
| ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ (τόνοι) | 2.424 | 2.410 | 2.445 | 2.540 |
| ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (m) | 95,1/8,3/4,7 | 95,2/8,3/4,7 | 93,3/8,3/4,7 | 98,2/8,3/4,7 |
| ΠΡΩΩΣΗ | 4 Μηχανές Diesel 2 Ηλεκτροκινητήρες | 4 Μηχανές Diesel 2 Ηλεκτροκινητήρες | 3 Μηχανές Diesel 2 Ηλεκτροκινητήρες | 4 Μηχανές Diesel 2 Ηλεκτροκινητήρες |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (κόμβοι) | 19,5 | 18 | 17 | 17 |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ (κόμβοι) | 8,7 | 9 | 14 | 14 |
| ΑΚΤΙΝΑ ΔΡΑΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ | 6100 νμ (17,7 κόμβους) | 12.000 νμ (10 κόμβους) | 12.000 νμ (10 κόμβους) | 12.000 νμ (10 κόμβους) |
| ΑΚΤΙΝΑ ΔΡΑΣΗΣ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ | 70 νμ (3,2 κόμβους) | 70 νμ (3,2 κόμβους) | 70 νμ (3,2 κόμβους) | 70 νμ (3,2 κόμβους) |
| ΒΑΘΟΣ ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ (m) | 93 | 122 | 122 | 122 |
| ΤΟΡΠΙΛΟ- ΣΩΛΗΝΕΣ | 10 Τορπιλοσωλήνες 21 ιντσών | 10 Τορπιλοσωλήνες 21 ιντσών | 10 Τορπιλοσωλήνες 21 ιντσών | 10 Τορπιλοσωλήνες 21 ιντσών |
| ΠΛΗΡΩΜΑ | 75 | 75 | 75 | 75 |

Πίνακας 1.3: Υποβρύχια Αμερικανικού πολεμικού Ναυτικού κατά την περίοδο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου [13-15].

Αξίζει να σημειωθεί ότι το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό απέκτησε μεταξύ 1957 και 1973 πέντε αναβαθμισμένα υποβρύχια από τις αμερικανικές κλάσεις GATO (ΠΟΣΕΙΔΩΝ Υ16, ΑΜΦΙΤΡΙΤΗ Υ17), BALAO (ΤΡΑΙΝΑ S86), GUPPY IIA (ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΗΣ S114) και GUPPY III (ΚΑΤΣΩΝΗΣ S115).

1.6 Σύγχρονα υποβρύχια

Στα χρόνια που ακολούθησαν μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, παρατηρήθηκε μια σειρά σημαντικών τεχνολογικών προόδων στον τομέα των υποβρυχίων. Μεταξύ των πιο σημαντικών καινοτομιών συγκαταλέγονται οι επαναστατικές μέθοδοι πρόωσης, όπως η πυρηνοκίνητη πρόωση, η οποία προσφέρει αξιοσημείωτη ενεργειακή αυτονομία, και η αναερόβια πρόωση, η οποία αποτελεί μια αξιόλογη εναλλακτική για τα συμβατικά ντίζελ υποβρύχια, προσφέροντας αυξημένη επιχειρησιακή εμβέλεια. Ένας ακόμη τομέας στον οποίο έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος είναι η ικανότητα εκτόξευσης βαλλιστικών πυραύλων από ορισμένα υποβρύχια, τα οποία εκτελούν αποστολές με στρατηγικό αντίκτυπο σε παγκόσμια κλίμακα. Όσον αφορά τον τομέα των ηλεκτρονικών συστημάτων, τα σύγχρονα υποβρύχια είναι εφοδιασμένα με προηγμένα συστήματα επικοινωνίας, ανίχνευσης και παρακολούθησης, προσφέροντας ακριβείς και αποτελεσματικές δυνατότητες για τη διεξαγωγή κρίσιμων ναυτικών αποστολών. Επίσης, η υιοθέτηση νέων τύπων συσσωρευτών, όπως είναι οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου, οι οποίοι διακρίνονται για την υψηλή ενεργειακή τους πυκνότητα, την ταχεία φόρτιση και την επιμηκυμένη διάρκεια ζωής, συμβάλλουν στην ενίσχυση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των υποβρυχίων.

1.6.1 Πυρηνική πρόωση

Η πυρηνική πρόωση στα υποβρύχια αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις στην ιστορία του ναυτικού πολέμου. Η πρώτη επιτυχημένη εφαρμογή της πυρηνικής πρόωσης σε υποβρύχιο ήταν στο USS Nautilus (SSN-571), το οποίο κατελκύστηκε το 1954. Το κύριο πλεονέκτημα της πυρηνικής πρόωσης είναι η ικανότητά της να παρέχει στα υποβρύχια απεριόριστη επιχειρησιακή εμβέλεια και τη δυνατότητα να παραμένουν εν καταδύσει για πολύ μεγάλες χρονικές περιόδους καθιστώντας τα υποβρυχια αυτά δυσκόλα στον εντοπισμό.

Τα πυρηνικά υποβρύχια είναι εξοπλισμένα με πυρηνικούς αντιδραστήρες, στους οποίους διενεργείται διάσπαση ατόμων, απελευθερώνοντας ενέργεια σε μορφή θερμότητας. Αυτή η θερμότητα, με τη σειρά της, θερμαίνει το ψυκτικό νερό που κυκλοφορεί γύρω από τον πυρήνα του αντιδραστήρα, παράγοντας ατμό υψηλής πίεσης. Στη συνέχεια, ο παραγόμενος ατμός χρησιμοποιείται για να περιστρέψει τις τουρμπίνες πρόωσης, οι οποίες κινούν την προπέλα του υποβρυχίου, επιτρέποντας έτσι την κίνησή του [1],[28-29].

1.6.2 Σύστημα αναερόβιας πρόωσης

Τα συστήματα Αναερόβιας Πρόωσης Αέρα (AIP) αποτελούν μία σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία των υποβρυχίων. Το AIP επιτρέπει στα υποβρύχια να λειτουργούν εν καταδύσει για περισσότερο χρόνο χωρίς την ανάγκη συχνής ανάδυσης, όπως συμβαίνει με τα συμβατικά υποβρύχια. Αυτή η δυνατότητα ενισχύει σημαντικά τα χαρακτηριστικά stealth και την επιχειρησιακή ευελιξία ενός υποβρυχίου. Για παράδειγμα, τα υποβρύχια τύπου 214 του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού χρησιμοποιούν τεχνολογία AIP, παρουσιάζοντας σημαντική βελτίωση στις επιχειρησιακές τους δυνατότητες. Υπάρχουν αρκετοί τύποι συστημάτων αναερόβιας πρόωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα. Οι πιο συνηθισμένοι είναι ο κινητήρας Stirling και τα fuel cells.

Ο κινητήρας Stirling λειτουργεί θερμαίνοντας και ψύχοντας ένα αέριο σε ένα κλειστό κύκλωμα, το οποίο με τη σειρά του κινεί έναν εμβόλιο.

Τα fuel cells παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας χημικής αντίδρασης, συνήθως περιλαμβάνοντας υδρογόνο και οξυγόνο, και είναι γνωστά για την υψηλή τους απόδοση και την αθόρυβη λειτουργία τους [1].

1.6.3 Βαλιστικοί πύραυλοι

Το USS George Washington (SSBN-598) σηματοδότησε μία εποχή επαναστατικών αλλαγών στο σχεδιασμό των υποβρυχίων. Αυτό το πρωτοποριακό υποβρύχιο τέθηκε σε υπηρεσία τον Δεκέμβριο του 1959 και αποτέλεσε το πρώτο επιχειρησιακό υποβρύχιο, ικανό να εκτοξεύσει βαλλιστικούς πυραύλους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η δυνατότητα αυτή, έθεσε νέα πρότυπα στον σχεδιασμό σύγχρονων υποβρυχίων [30].

1.6.4 Πλοήγηση σύγχρονων υποβρυχίων

Στα υποβρύχια, τα Συστήματα Αδρανειακής Πλοήγησης (INS) και τα Παγκόσμια Συστήματα Τοποθέτησης (GPS) είναι κρίσιμα για την ακριβή πλοήγηση. Το INS λειτουργεί ανεξάρτητα, χρησιμοποιώντας γυροσκόπια και επιταχυνσιόμετρα για να υπολογίζει τη θέση, την κατεύθυνση και την ταχύτητα του υποβρυχίου, κατά την διάρκεια υποβρυχίας πλεύσης όπου τα σήματα του GPS δεν είναι διαθέσιμα. Το GPS, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιείται όταν το υποβρύχιο αναδύεται, παρέχοντας ακριβή δεδομένα θέσης μέσω δορυφορικών σημάτων. Η ένταξη του INS και του GPS

επιτρέπει στα υποβρύχια να πλοηγούνται αξιόπιστα, συνδυάζοντας την αυτονομία του INS στην ανοιχτή θάλασσα με την ακρίβεια του GPS όταν είναι προσβάσιμο [1],[31].

1.6.5 Photonics mast

Το "photonics mast" στα σύγχρονα υποβρύχια αντιπροσωπεύει μία σημαντική τεχνολογική εξέλιξη, αντικαθιστώντας το κλασικό περισκόπιο με ένα ψηφιακό σύστημα. Αυτό επιτρέπει τη βελτίωση του σχεδιασμού του εσωτερικού χώρου του υποβρυχίου και μειώνει τον κίνδυνο εισχώρησης θαλασσινού νερού. Το σύστημα, εφοδιασμένο με αισθητήρες όπως κάμερες υψηλής ευκρίνειας και θερμογραφικές κάμερες, αναδύεται πάνω από το νερό για συλλογή δεδομένων, ενισχύοντας τις λειτουργίες πλοήγησης, ηλεκτρονικού πολέμου και επικοινωνιών του υποβρυχίου [1],[32].

1.6.6 Συστήματα ηλεκτρονικού πολέμου (EW)

Τα συστήματα ηλεκτρονικού πολέμου (EW) εντός των υποβρυχίων αποτελούν έναν καθοριστικό παράγοντα στο πλαίσιο των σύγχρονων ναυτικών επιχειρήσεων, εξασφαλίζοντας ενισχυμένες δυνατότητες ανίχνευσης, επιτήρησης και επικοινωνίας. Ενδεικτικό σύστημα της συγκεκριμένης κατηγορίας αποτελεί το AN/BLQ-10 το οποίο αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο στα σύγχρονα υποβρύχια, όπως στα υποβρύχια τύπου Virginia, Los Angeles και Seawolf του Ναυτικού των ΗΠΑ. Το εν λόγω σύστημα αναλύει τα σήματα που εκπέμπονται από το photonics mast του υποβρυχίου, προσφέροντας κρίσιμες λειτουργίες όπως η πρόληψη ανίχνευσης και συγκρούσεων, η στοχοποίηση εχθρικών ραντάρ και επικοινωνιακών συστημάτων, καθώς και λειτουργίες παρακολούθησης. Το σύστημα αυτομάτως ανιχνεύει, ταξινομεί, εντοπίζει και προσδιορίζει τυχόν εχθρικά σήματα ραντάρ και επικοινωνίας στη θαλάσσια περιοχή [33].

1.6.7 Stealth

Τα χαρακτηριστικά stealth αποτελούν κύριο στοιχείο στη σχεδίαση σύγχρονων υποβρυχίων, τα οποία είναι απαραίτητα για την επιβίωση και την απόδοση των σύγχρονων υποβρυχίων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι μέθοδοι με τις οποίες επιτυγχάνονται τα χαρακτηριστικά stealth στα σύγχρονα υποβρύχια.

Ακουστική Απόκρυψη: Είναι το σημαντικότερο στοιχείο στην τεχνολογία απόκρυψης των υποβρυχίων. Τα υποβρύχια σχεδιάζονται για να ελαχιστοποιούν τον θόρυβο από τις μηχανές τους, τις προπέλες και τη γενική τους λειτουργία. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους, όπως τη χρήση υλικών που απορροφούν τον ήχο, την μείωση του θορύβου που παράγεται από τα μηχανήματα και τον σχεδιασμό των προπελών που ελαχιστοποιούν το cavitation (τη δημιουργία φυσαλίδων, οι οποίες παράγουν θόρυβο).

Radar Cross-Section Reduction: Αν και λιγότερο κρίσιμο για τα υποβρύχια απ' ό,τι για τα επιφανειακά σκάφη ή τα αεροσκάφη, η ελαχιστοποίηση του Radar Cross-Section βοηθά στη μείωση της ανίχνευσιμότητας όταν ένα υποβρύχιο βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω του σχεδιασμού του κύτους και της χρήσης υλικών που απορροφούν τα ραντάρ.

Μείωση της Θερμικής Υπογραφής: Η μείωση της θερμικής υπογραφής είναι σημαντική για να αποφευχθεί η ανίχνευση από υπέρυθρους αισθητήρες. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με την ψύξη των καυσαερίων και την ελαχιστοποίηση της θερμότητας που εκπέμπεται από το κύτος.

Αποφυγή Ανίχνευσης Μαγνητικής Ανωμαλίας (MAD): Τα υποβρύχια κατασκευάζονται με υλικά και σχεδιασμούς που ελαχιστοποιούν τη μαγνητική τους υπογραφή, καθιστώντας δυσκολότερη την ανίχνευσή τους από συστήματα ανίχνευσης μαγνητικής ανωμαλίας.

Τεχνολογίες Χαμηλής Ορατότητας: Περιλαμβάνουν τη χρήση ειδικών επικαλύψεων και υλικών στο κύτος για να απορροφήσουν ή να ανακλάσουν τα κύματα του σόναρ, καθιστώντας το υποβρύχιο δυσκολότερο στην ανίχνευση με ενεργά συστήματα σόναρ [1],[34-36].

1.6.8 Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό στη σύγχρονη εποχή

Το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό, ανταποκρινόμενο στις σύγχρονες προκλήσεις και απαιτήσεις, έχει προβεί σε μια σημαντική προσπάθεια εκσυγχρονισμού του υποβρυχίου στόλου του κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Ο υποβρυχιακός στόλος περιλαμβάνει πλέον υποβρύχια τα οποία εφοδιάζονται με υψηλού επιπέδου τεχνολογία, ενισχύοντας τις δυνατότητες και την αποτελεσματικότητά τους. Ο ρόλος αυτών των υποβρυχίων είναι καθοριστικός για την προστασία των θαλάσσιων συνόρων και συμφερόντων της Ελλάδας, ιδίως σε μια περιοχή με περίπλοκες γεωπολιτικές προκλήσεις. Η ενσωμάτωση σύγχρονων υποβρυχίων στον στόλο του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού αντικατοπτρίζει την αποφασιστικότητα της χώρας να ενισχύσει τον υποβρυχιακό της στόλο και να προσαρμόζεται αποτελεσματικά στις διεθνείς

προκλήσεις. Στον πίνακα 1.4 που παρατίθεται στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των σύγχρονων ελληνικών υποβρυχίων [14-15].

| ΤΥΠΟΣ Υ/Β | 209/1100 | 209/1200 | 214 |
|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| ΚΑΘΕΛΚΥΣΗ | 1972 | 1979 | 2004 |
| ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ(τόνοι) | 1.101 | 1.180 | 1.780 |
| ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ (τόνοι) | 1.278 | 1.285 | 1.940 |
| ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (m) | 54,4/6,25/5,5 | 56/6,25/5,5 | 65,3/6,3/6,6 |
| ΠΡΟΩΣΗ | 4 Μηχανές Diesel 1 Ηλεκτροκινητήρα | 4 Μηχανές Diesel 1 Ηλεκτροκινητήρα | Σύστημα AIP SIEMENS 2 FC MODULES 2 Γεννήτριες 2 Μηχανές Diesel 1 Ηλεκτροκινητήρας |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (κόμβοι) | 11 | 11 | 12 |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ (κόμβοι) | 21,5 | 21,5 | 21 (με συσσωρευτές) 6,5 (με χρήση AIP) |
| ΑΚΤΙΝΑ ΔΡΑΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ | 1.700 νμ (10 κόμβους) | 2.500 νμ (10 κόμβους) | > 10.000 νμ |
| ΑΚΤΙΝΑ ΔΡΑΣΗΣ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ | 600 νμ (3 κόμβους) | 600 νμ (3 κόμβους) | > 1.0000 νμ |
| ΒΑΘΟΣ ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ (m) | 250 | 250 | > 300 |
| ΤΟΡΠΙΛΟΣΩΛΗΝΕΣ | 8 Τορπιλοσωλήνες 21 ιντσών | 8 Τορπιλοσωλήνες 21 ιντσών | 8 Τορπιλοσωλήνες 21 ιντσών |
| ΠΛΗΡΩΜΑ | 34 | 34 | 32 |

Πίνακας 1.4 : Τεχνικά χαρακτηριστικά σύγχρονων Ελληνικών υποβρυχίων [14-15].

1.7 Μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, η τεχνολογική πρόοδος έχει καταστήσει δυνατή την ανάπτυξη προηγμένων μη επανδρωμένων υποβρυχίων οχημάτων (UUVs), τα οποία ξεχωρίζουν λόγω της αυτονομίας τους, των προηγμένων τεχνολογιών πλοήγησης και ανίχνευσης, καθώς και των βελτιωμένων δυνατοτήτων επικοινωνίας. Ειδικότερα, τα UUVs όπως το Orca συμβάλλουν καθοριστικά στην αναβάθμιση των επιχειρησιακών δυνατοτήτων σε σενάρια αναγνώρισης, παρακολούθησης και αντιμετώπισης υποθαλάσσιων απειλών. Η αυτονομία των UUVs επιτρέπει την ασφαλή διεξαγωγή αποστολών υψηλού κινδύνου, όπως η επιτήρηση και η ανίχνευση ναρκών, μειώνοντας σημαντικά τους κινδύνους για το ανθρώπινο προσωπικό. Η ενσωμάτωση των UUVs στις σύγχρονες ναυτικές επιχειρήσεις έχει οδηγήσει σε μια θεαματική αλλαγή του τρόπου εκτέλεσης των αποστολών, ενισχύοντας την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα [37].

1.7.1 Συστήματα επικοινωνίας

Τα συστήματα επικοινωνίας των μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων (UUVs) αποτελούν κρίσιμο στοιχείο για την αποδοτική τους λειτουργία, καθώς επιτρέπουν τη μετάδοση δεδομένων, την λήψη εντολών και την άμεση συνεργασία με άλλα συστήματα ή χειριστές. Στο υποβρύχιο περιβάλλον, όπου η αποτελεσματικότητα των παραδοσιακών ραδιοκυμάτων μειώνεται σημαντικά, τα UUVs στρέφονται προς την ακουστική τεχνολογία, χρησιμοποιώντας ηχητικά κύματα για την αξιόπιστη μεταφορά πληροφοριών, ξεπερνώντας έτσι τις προκλήσεις που επιφέρει η απώλεια σήματος στο νερό. Πέραν αυτού, προηγμένα UUVs διαθέτουν δυνατότητες δορυφορικής επικοινωνίας, παρέχοντας τη δυνατότητα πραγματικού χρόνου μετάδοσης και λήψης δεδομένων όταν βρίσκονται στην επιφάνεια. Επιπρόσθετα, ορισμένα UUVs διαθέτουν οπτικά συστήματα επικοινωνίας που προσφέρουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέσω της χρήσης λέιζερ. Αυτό το ευρύ φάσμα τεχνολογιών εξασφαλίζει συνεχή συνδεσιμότητα κατά τη διάρκεια απαιτητικών αποστολών, βελτιώνοντας συνολικά την αυτονομία και την επιχειρησιακή απόδοση των UUVs [38-39].

1.7.2 Συστήματα πρόωσης UUV

Τα συστήματα πρόωσης των Μη Επανδρωμένων Υποβρύχιων Οχημάτων (UUVs) διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο τόσο για την επιχειρησιακή τους απόδοση όσο και για την εμβέλειά τους. Η πλειονότητα των UUVs χρησιμοποιεί συσσωρευτές ιόντων λιθίου για την τροφοδότηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος (DC), λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και απόδοσής τους, ενισχύοντας έτσι την ικανότητά τους να εκτελούν αποστολές μακράς διάρκειας. Επιπλέον, ορισμένα προηγμένα μοντέλα, όπως το Orca UUV, διαθέτουν υβριδικά συστήματα πρόωσης diesel-electric, παρόμοια με τα συστήματα πρόωσης που χρησιμοποιούνται στα συμβατικά υποβρύχια [40-43].

1.7.3 Συστήματα πλοήγησης και αισθητήρες UUV

Τα συστήματα πλοήγησης και οι αισθητήρες αποτελούν κρίσιμα στοιχεία για τη λειτουργία των μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων (UUV), καθιστώντας δυνατή την ακριβή πλοήγηση και την εκτέλεση σύνθετων αποστολών. Τα UUV ενσωματώνουν συστήματα αδρανειακής πλοήγησης και GPS για τον εντοπισμό θέσης, ακουστική τοποθέτηση και Doppler velocity logs για τη διατήρηση πορείας. Επιπλέον, αισθητήρες όπως το σόναρ, το λίνταρ και οι οπτικές κάμερες δίνουν τη δυνατότητα

στα UUV να ανιχνεύουν και να αναλύουν κρίσιμα δεδομένα. Αυτές οι τεχνολογικές καινοτομίες είναι απαραίτητες για εφαρμογές όπως η χαρτογράφηση του θαλάσσιου βυθού, η επιστημονική έρευνα, η παρακολούθηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος και η εκτέλεση στρατιωτικών αποστολών [44].

1.7.4 Αυτονομία των μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων

Η αυτονομία των μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων, επιτρέπει την ανεξάρτητη λειτουργία τους, χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Η αυτονομία στηρίζεται στην εφαρμογή εξελιγμένων αλγορίθμων και τεχνικών εκμάθησης για την ενίσχυση των επιχειρησιακών τους ικανοτήτων. Μέσω των αισθητήρων τους, τα UUVs συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον, τα οποία στη συνέχεια αναλύονται από ενσωματωμένους υπολογιστές κάνοντας χρήση σύνθετων αλγορίθμων. Αυτή η διαδικασία τους επιτρέπει να ερμηνεύουν αυτόνομα το περιβάλλον και να λαμβάνουν αποφάσεις, όπως η αποφυγή εμποδίων ή η εστίαση σε συγκεκριμένους επιχειρησιακούς στόχους. Η ικανότητα για συνεχή εκμάθηση και προσαρμογή σε νέα δεδομένα βελτιώνει σημαντικά την απόδοση των UUVs, επιτρέποντάς τους να ανταπεξέρχονται σε πολύπλοκες αποστολές με ελάχιστη ή καθόλου ανθρώπινη εποπτεία [45].

| UUV | Orca | REMUS 6000 | HUGIN Superior | Bluefin-21 |
|---------------------------------------|--|---------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| ΕΤΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΥΠΗΡΕΣΙΑ | 2022 | 2007 | 2018 | - |
| ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ | 50 τόνοι | 862KG | 2200kg | 750kg |
| ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (m) | 15.5 m x 2.6 m | 3.84 m x 0.71 m | 6.6m x 0.875m | 4.93 m x 533 mm |
| ΠΡΟΩΣΗ | Hybrid diesel/lithium-ion battery system | Li-ion battery pack | Lithium Polymer battery | lithium polymer batteries |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (κόμβοι) | 8 | 5 | 5 | 4.5 |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ (κόμβοι) | 3 | 3 | 3 | 3 |
| ΑΚΤΙΝΑ ΔΡΑΣΗΣ ΕΝ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙ | 150 nm | 74 νμ (4 κόμβους) | 72 hours endurance at 3-4 knots | 25 hours endurance at 3 knots |
| ΒΑΘΟΣ ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ (m) | 3,000 m | 6000 | 6000 | 4,500 m |

Πίνακας 1.5 : Τεχνικά χαρακτηριστικά αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων [40-43].

Κεφάλαιο 2^ο – Συσσωρευτές υποβρυχίων και UUV

2.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των συσσωρευτών αποτέλεσε έναν κρίσιμο παράγοντα στη βελτίωση των επιχειρησιακών δυνατοτήτων των υποβρυχίων. Κατά τα μέσα του 19ου αιώνα υποβρύχια όπως το USS Hunley στον Αμερικανικό Εμφύλιο Πόλεμο διέθεταν περιορισμένη ικανότητα να παραμείνουν υποβρύχια λόγω ανεπαρκών πηγών ενέργειας. Μια σημαντική εξέλιξη στη τεχνολογία των υποβρυχίων συνέβη στα τέλη του 19ου και στις αρχές του 20ού αιώνα με την εμφάνιση των συσσωρευτών μολύβδου οξέος. Παρά το υψηλό βάρος τους και την ανάγκη για συχνή συντήρηση, η χρήση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος αποτέλεσε μια σημαντική πρόοδο, καθώς επέτρεψαν στα υποβρύχια να παραμένουν εν καταδύσει για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Ο ρόλος των συσσωρευτών στα υποβρύχια είναι καθοριστικός. Οι συσσωρευτές είναι υπεύθυνοι για την παροχή ενέργειας για την κίνηση του υποβρυχίου, καθώς και για την τροφοδοσία άλλων κρίσιμων συστημάτων. Επιπλέον, σε περίπτωση απώλειας της κύριας πηγής ενέργειας, οι συσσωρευτές λειτουργούν ως εναλλακτική πηγή, εξασφαλίζοντας τη συνεχή λειτουργία των ζωτικών συστημάτων, όπως είναι τα συστήματα υποστήριξης ζωής και πλοήγησης. Η ικανότητά τους να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας επιτρέπει στα υποβρύχια να επιχειρούν εν καταδύσει για εκτεταμένες χρονικές περιόδους.

Κατά τα τελευταία έτη, η τεχνολογία των υποβρυχίων έχει γνωρίσει μια σημαντική εξέλιξη με τη μετάβαση από τους παραδοσιακούς συσσωρευτές μολύβδου-οξέος προς τους προηγμένους συσσωρευτές ιόντων λιθίου. Η επιλογή των συσσωρευτών ιόντων λιθίου οφείλεται σε μια σειρά από πλεονεκτήματα που προσφέρουν, όπως η υψηλή πυκνότητα ενέργειας, το μειωμένο βάρος και η μειωμένη ανάγκη συντήρησης. Αυτά τα χαρακτηριστικά συντελούν στη βελτίωση της επιχειρησιακής εμβέλειας και αποτελεσματικότητας των υποβρυχίων, ενισχύοντας τη δυνατότητά τους να εκτελούν απαιτητικές αποστολές.

Στις επόμενες ενότητες θα πραγματοποιηθεί μια λεπτομερής ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών των συσσωρευτών υποβρυχίων, με επίκεντρο τις διακριτές διαφορές τους ως προς την απόδοση, τη συντήρηση και την ασφάλεια. Η κατανόηση των αδυναμιών και των δυνατοτήτων του κάθε τύπου συσσωρευτή θεωρείται απαραίτητη για τον σχεδιασμό αποδοτικών και ασφαλών υποβρυχίων.

Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου αυτού, θα πραγματοποιηθεί αναφορά στους τύπους συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα (UUVs), εστιάζοντας στις τεχνικές προδιαγραφές και τις επιχειρησιακές

δυνατότητες που προσφέρουν στα UUVs, όπως η αύξηση της εμβέλειας και η αύξηση της ικανότητας να επιχειρούν σε μεγαλύτερα βάθη.

2.2 Βασικές αρχές τεχνολογίας συσσωρευτών

Στην παρούσα ενότητα, θα διερευνηθούν οι βασικές αρχές που διέπουν την τεχνολογία των συσσωρευτών. Αυτή η ανάλυση θα περιλαμβάνει την εξέταση των κύριων τύπων συσσωρευτών, των λειτουργικών τους ιδιοτήτων, και των βασικών αρχών που καθορίζουν την αποθήκευση και την παραγωγή ενέργειας. Επίσης, θα εξεταστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής και την απόδοση των συσσωρευτών, με ιδιαίτερη έμφαση στους συσσωρευτές υποβρυχίων.

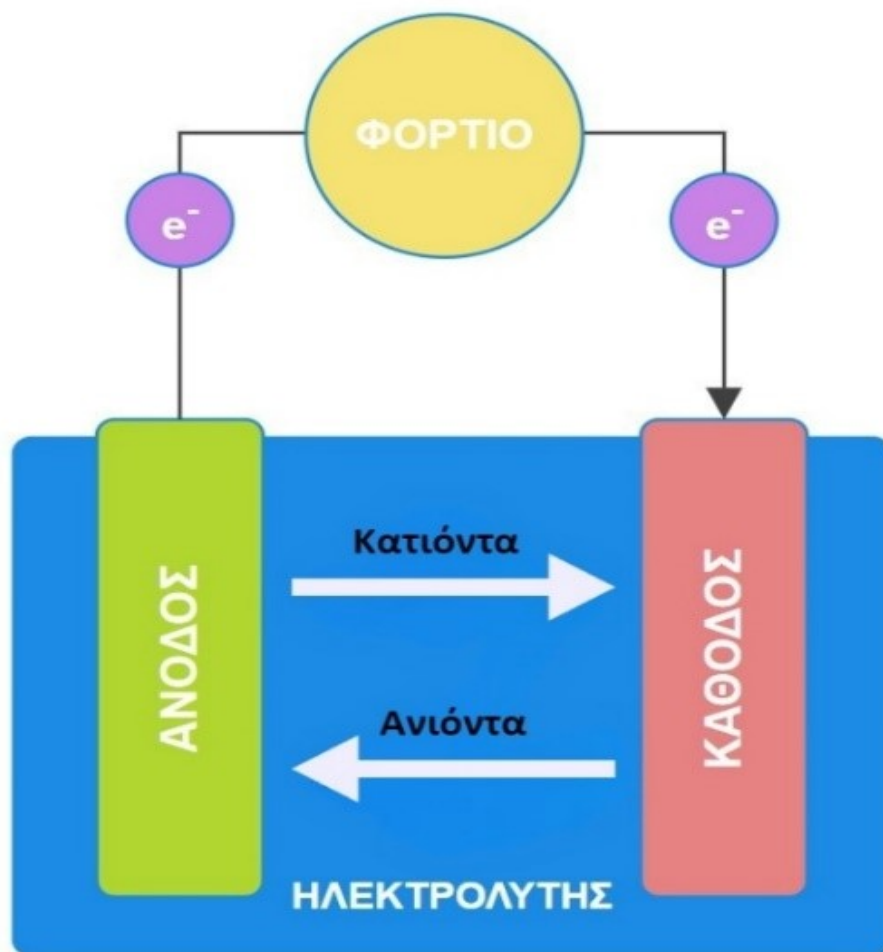
2.2.1 Κατηγορίες συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τους πρωτεύοντες και τους δευτερεύοντες. Οι πρωτεύοντες συσσωρευτές, γνωστοί και ως μη επαναφορτιζόμενοι, είναι σχεδιασμένοι για μια μοναδική χρήση. Μετά την εξάντληση της ενέργειάς τους, δεν μπορούν να επαναφορτιστούν και απαιτείται η αντικατάστασή τους. Αντιθέτως, οι δευτερεύοντες συσσωρευτές προσφέρουν τη δυνατότητα επαναφόρτισης και επαναχρησιμοποίησης. Η επιλογή ανάμεσα στις δύο κατηγορίες εξαρτάται από τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής, λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμους παράγοντες όπως η διάρκεια ζωής και η συχνότητα χρήσης [46].

2.2.2 Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές λειτουργούν μετατρέποντας τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αυτή η μετατροπή συμβαίνει εσωτερικά ενός στοιχείου το οποίο αποτελεί μια αυτόνομη μονάδα. Ένας συσσωρευτής μπορεί να περιλαμβάνει πολλά τέτοια στοιχεία, διατεταγμένα εν σειρά ή παράλληλα [46]. Εσωτερικά τους, τα στοιχεία περιέχουν δύο διαφορετικά υλικά, την άνοδο και την κάθοδο, τα οποία ενεργούν ως αρνητικοί και θετικοί πόλοι αντιστοίχως. Οι πόλοι αυτοί, βυθίζονται σε έναν ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι μια ουσία που περιέχει ελεύθερα ιόντα που επιτρέπουν τη ροή ηλεκτρικού φορτίου [46].

Κατά τη σύνδεση του συσσωρευτή σε εξωτερικό κύκλωμα, η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της ροής ηλεκτρονίων από την άνοδο (αρνητικός πόλος) προς την κάθοδο (θετικός πόλος). Ταυτόχρονα, κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός συσσωρευτή, τα κατιόντα (θετικά φορτισμένα ιόντα) και τα ανιόντα (αρνητικά φορτισμένα ιόντα) ρέουν προς την άνοδο και την κάθοδο διαμέσου του ηλεκτρολύτη. Οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές μπορούν να αντιστρέψουν αυτές τις χημικές αντιδράσεις εφαρμόζοντας εξωτερική ηλεκτρική ενέργεια, επιτρέποντας τους να χρησιμοποιηθούν παραπάνω από μια φορά [46]. Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών.

Οξειδοαναγωγική αντίδραση συσσωρευτή

- Ημιαντίδραση οξείδωσης: $A \rightarrow B + e^-$ Το A είναι το στοιχείο ή η ένωση που υφίσταται οξείδωση στην άνοδο του συσσωρευτή. Κατά την οξείδωση, το A αποβάλλει ηλεκτρόνια και μετατρέπεται στη μορφή B.
- Ημιαντίδραση αναγωγής: $C + e^- \rightarrow D$ Το C είναι το στοιχείο ή η ένωση που υφίσταται αναγωγή στην κάθοδο του συσσωρευτή. Κατά την αναγωγή, το C αποκτά ηλεκτρόνια και μετατρέπεται στη μορφή D.
- Συνολική οξειδοαναγωγική αντίδραση: $A + C \rightarrow B + D$ Η συνολική οξειδοαναγωγική αντίδραση στον συσσωρευτή, όπου τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται από το A στο C. Αυτή η μεταφορά ηλεκτρονίων παράγει ηλεκτρική ενέργεια και επιτρέπει στον συσσωρευτή να αποθηκεύει ή να παρέχει ενέργεια.

2.2.3 Ειδική ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου

Η ειδική ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου (Specific volume energy), η οποία μετράται σε $(W \cdot h/l)$, είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της ποσότητας ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει ένας συσσωρευτής σε δεδομένο όγκο. Μια υψηλή τιμή σε αυτό το χαρακτηριστικό υποδεικνύει την ικανότητα του συσσωρευτή να αποθηκεύει μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε σχετικά περιορισμένο χώρο, πράγμα που αποτελεί ένα πλεονέκτημα σε εφαρμογές όπου ο χώρος είναι περιορισμένος, όπως στα υποβρύχια [46].

2.2.4 Ειδική ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα μάζας

Η ειδική ενεργειακή πυκνότητα ανά μάζα (Specific Mass Energy), η οποία εκφράζεται σε $(W \cdot h/kg)$, αποτελεί έναν σημαντικό δείκτη για την εκτίμηση της ικανότητας ενός συσσωρευτή να αποθηκεύει ενέργεια αναλογικά με το βάρος του. Συσσωρευτές που παρουσιάζουν υψηλή τιμή σε αυτόν τον δείκτη έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας ενώ παράλληλα διατηρούν το συνολικό βάρος σε χαμηλά επίπεδα [46].

2.2.5 Βασικά χαρακτηριστικά συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές διαφοροποιούνται ανάλογα με τα υλικά της ανόδου, της καθόδου, και του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Κάθε τύπος παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που καθορίζονται από τα εν λόγω υλικά και τις χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν εσωτερικά του συσσωρευτή. Οι πίνακες 2.1 και 2.2 που παρατίθενται στη συνέχεια, παρουσιάζουν τα Βασικά χαρακτηριστικά πρωτευνόντων και δευτερευόντων συσσωρευτών [46].

| Προτεινόμενες συσσωρευτές | Άνοδος | Κάθodos | Μηχανισμός Αντίδρασης | Τάση (V) | Ενέργεια Wh / kg | Πυκνότητα Wh / L |
|----------------------------------|--------|-----------------------|---|----------|------------------|------------------|
| Leclanche | Zn | MnO ₂ | $Zn + 2MnO_2 \rightarrow ZnO + Mn_2O_3$ | 1.6 | 85 | 165 |
| Magnesium | Mg | MnO ₂ | $Mg + 2MnO_2 + H_2O \rightarrow Mn_2O_3 + Mg(OH)_2$ | 2.8 | 100 | 195 |
| Alkaline MnO ₂ | Zn | MnO ₂ | $Zn + 2MnO_2 \rightarrow ZnO + Mn_2O_3$ | 1.5 | 145 | 400 |
| Mercury | Zn | HgO | $Zn + HgO \rightarrow ZnO + Hg$ | 1.34 | 100 | 470 |
| Mercad | Cd | HgO | $Cd + HgO + H_2O \rightarrow Cd(OH)_2 + Hg$ | 0.91 | 55 | 230 |
| Silver Oxide | Zn | Ag ₂ O | $Zn + Ag_2O + H_2O \rightarrow Zn(OH)_2 + 2Ag$ | 1.6 | 135 | 525 |
| Zinc/O ₂ | Zn | O ₂ | $Zn + 0.5O_2 \rightarrow ZnO$ | 1.65 | - | 1300 |
| Zinc/Air | Zn | Air | $Zn + 0.5O_2 \rightarrow ZnO$ | 1.65 | 370 | 1300 |
| Li/SOCl ₂ | Li | SOCl ₂ | $4Li + 2SOCl_2 \rightarrow 4LiCl + S + SO_2$ | 3.65 | 590 | 1100 |
| Li/SO ₂ | Li | SO ₂ | $2Li + 2SO_2 \rightarrow Li_2S_2O_4$ | 3.1 | 260 | 415 |
| LiMnO ₂ | Li | MnO ₂ | $Li + MnIVO_2 \rightarrow Mn^{IV}O_2(Li^+)$ | 3.5 | 230 | 535 |
| Li/FeS ₂ | Li | FeS ₂ | $4Li + FeS_2 \rightarrow Li_2S + Fe$ | 1.8 | 260 | 500 |
| Li/(CF) _n | Li | (CF) _n | $nLi + (CF)_n \rightarrow nLiF + nC$ | 3.1 | 250 | 635 |
| Li/I ₂ ⁽³⁾ | Li | I ₂ (P2VP) | $Li + 0.5I_2 \rightarrow LiI$ | 2.8 | 245 | 900 |

Πίνακας 2.1: Βασικά χαρακτηριστικά πρωτευνόντων συσσωρευτών [46].

| Δευτερεύοντες συσσωρευτές | Άνοδος | Κάθοδος | Μηχανισμός Αντίδρασης | Τάση (V) | Ενέργεια Wh / kg | Πυκνότητα Wh / L |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|-------------|---------------------|---------------------|
| Lead-Acid | Pb | PbO ₂ | $Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$ | 2.1 | 35 | 70 |
| Edison | Fe | NiO ₂ | $Fe + 2NiOOH + 2H_2O \rightarrow 2Ni(OH)_2 + Fe(OH)_2$ | 1.4 | 30 | 55 |
| Nickel-Cadmium | Cd | NiO ₂ | $Cd + 2NiOOH + 2H_2O \rightarrow 2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2$ | 1.35 | 35 | 100 |
| Nickel-Zinc | Zn | NiO ₂ | $Zn + 2NiOOH + 2H_2O \rightarrow 2Ni(OH)_2 + Zn(OH)_2$ | 1.73 | 60 | 120 |
| Nickel-Hydrogen | H ₂ | NiO ₂ | $H_2 + 2NiOOH \rightarrow 2Ni(OH)_2$ | 1.5 | 55 | 60 |
| Nickel Metal Hydride | MH | NiO ₂ | $MH + NiOOH \rightarrow M + Ni(OH)_2$ | 1.35 | 75 | 240 |
| Silver-Zinc | Zn | AgO | $Zn + AgO + H_2O \rightarrow Zn(OH)_2 + Ag$ | 1.85 | 105 | 180 |
| Silver-Cadmium | Cd | AgO | $Cd + AgO + H_2O \rightarrow Cd(OH)_2 + Ag$ | 1.4 | 70 | 120 |
| Zinc/Chlorine | Zn | Cl ₂ | $Zn + Cl_2 \rightarrow ZnCl_2$ | 2.12 | - | - |
| Zinc/Bromine | Zn | Br ₂ | $Zn + Br_2 \rightarrow Zn Br_2$ | 1.85 | 70 | 60 |
| Lithium Ion | Li _x C ₆ | Li _(1-x) CoO ₂ | $Li_xC_6 + Li_{(1-x)}CoO_2 \rightarrow LiCoO_2 + C_6$ | 4.1 | 150 | 400 |
| Lithium/MnO₂ | Li | MnO ₂ | $Li + Mn^{IV}O_2 \rightarrow Mn^{IV}O_2(Li^+)$ | 3.5 | 120 | 265 |
| Lithium/FeS₂ | Li(Al) | FeS ₂ | $2Li(Al) + FeS_2 \rightarrow Li_2FeS_2 + 2Al$ | 1.73 | 180 | 350 |
| Lithium/FeSv | Li(Al) | FeS | $2Li(Al) + FeS \rightarrow Li_2S + Fe + 2Al$ | 1.33 | 130 | 220 |
| Sodium/Sulfur | Na | S | $2Na + 3S \rightarrow Na_2S_3$ | 2.1 | 170 | 345 |
| Sodium/NiCl₂ | Na | NiCl ₂ | $2Na + NiCl_2 \rightarrow 2NaCl + Ni$ | 2058 | 115 | 190 |

Πίνακας 2.2: Βασικά χαρακτηριστικά δευτερέωντων συσσωρευτών [46].

| Είδος ηλεκτρολύτη | Ειδική αγωγιμότητα, $\Omega^{-1} \text{CM}^{-1}$ |
|--------------------------------|---|
| Aqueous electrolytes | $1-5 \times 10^{-1}$ |
| Molten salt | $\sim 10^{-1}$ |
| Ανόργανοι ηλεκτρολύτες | $2 \times 10^{-2} - 10^{-1}$ |
| Οργανικοί ηλεκτρολύτες | $10^{-3} - 10^{-2}$ |
| Πολυμερείς ηλεκτρολύτες | $10^{-7} - 10^{-3}$ |
| Ανόργανοι στερεοί ηλεκτρολύτες | $10^{-8} - 10^{-5}$ |

Πίνακας 2.3 : *Είδη και Αγωγιμότητα Ηλεκτρολυτών σε Θερμοκρασία Περιβάλλοντος [46].*

2.2.6 Πρότυπα δυναμικά ηλεκτροδίων

Τα Πρότυπα Δυναμικά Ηλεκτροδίων (SEPs) αποτελούν βασικό στοιχείο στην επιστήμη της ηλεκτροχημείας καθώς ποσοτικοποιούν το ηλεκτρικό δυναμικό ενός ηλεκτροδίου υπό συγκεκριμένες, πρότυπες συνθήκες οι οποίες περιλαμβάνουν συγκέντρωση διαλύματος 1 M, θερμοκρασία 25°C και ατμοσφαιρική πίεση. Τα δυναμικά αυτά εκφράζονται σε Volt (V) και συγκρίνονται σε σχέση με το Πρότυπο Ηλεκτρόδιο Υδρογόνου (SHE), το οποίο έχει ένα καθορισμένο δυναμικό 0 V. Κάθε ημιαντίδραση χαρακτηρίζεται από ένα SEP, το οποίο συμβολίζεται ως E^0 , το οποίο δείχνει την τάση ενός ηλεκτροδίου να αποβάλλει ή να προσλαμβάνει ένα ηλεκτρόνιο, λειτουργώντας ως ο κρίσιμος παράγοντας ο οποίος καθορίζει την κατεύθυνση της ροής των ηλεκτρονίων σε ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο.

Οι τιμές SEP αντικατοπτρίζουν τις ηλεκτροχημικές σειρές των στοιχείων, με τα πιο αρνητικά δυναμικά να υποδηλώνουν μια ισχυρότερη τάση να αποβάλλουν ηλεκτρόνια, έχοντας έτσι αναγωγική δράση. Αντίθετα, τα πιο θετικά δυναμικά υποδηλώνουν μεγαλύτερη τάση για πρόσληψη ηλεκτρονίων, το οποίο είναι χαρακτηριστικό των οξειδωτικών παραγόντων. Με μαθηματικούς όρους το πρότυπο δυναμικό στοιχείου E^0_{CELL} για μια πλήρη αντίδραση οξειδοαναγωγής προκύπτει συνδυάζοντας δύο ημιαντιδράσεις, και υπολογίζεται ως η διαφορά των SEPs της κάθοδου και της άνοδου: $E^0_{\text{CELL}} = E^0_{\text{CATHODE}} - E^0_{\text{ANODE}}$

Στο πλαίσιο πρακτικών εφαρμογών, ιδίως στον σχεδιασμό πηγών ενέργειας όπως οι συσσωρευτές υποβρυχίων, τα Πρότυπα Δυναμικά Ηλεκτροδίων (SEPs) επηρεάζουν

την επιλογή υλικών που εγγυώνται την βέλτιστη απόδοση και ενεργειακή απόδοση. Η ικανότητα ενός συσσωρευτή να παράγει τάση και να προσφέρει ισχύ για παρατεταμένες περιόδους επηρεάζεται άμεσα από αυτά τα δυναμικά. Σε συνθήκες που αποκλίνουν από τις προκαθορισμένες πρότυπες, χρησιμοποιείται η εξίσωση του Nernst. Αυτή η εξίσωση επιτρέπει την εκτίμηση του δυναμικού ενός ηλεκτροδίου με βάση τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του, και δίνεται από την σχέση $E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln(Q)$ όπου R αποτελεί την παγκόσμια σταθερά των αερίων, T τη θερμοκρασία σε Kelvin, n τον αριθμό των μορίων των ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση, F τη σταθερά του Faraday και Q, τον λόγο της αντίδρασης. Ο παρακάτω πίνακας αποτυπώνει τα Πρότυπα Δυναμικά Ηλεκτροδίων (SEPs) για διάφορα ηλεκτρόδια [46-48].

| Αντίδραση Ηλεκτροδίου | E^0, V | Αντίδραση Ηλεκτροδίου | E^0, V |
|--------------------------------------|----------|---|----------|
| $Li^+ + e \rightleftharpoons Li$ | -3.01 | $Tl^+ + e \rightleftharpoons Tl$ | -0.34 |
| $Rb^+ + e \rightleftharpoons Rb$ | -2.98 | $Co^{2+} + 2e \rightleftharpoons Co$ | -0.27 |
| $Cs^+ + e \rightleftharpoons Cs$ | -2.92 | $Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni$ | -0.23 |
| $K^+ + e \rightleftharpoons K$ | -2.92 | $Sn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sn$ | -0.14 |
| $Ba^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ba$ | -2.92 | $Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb$ | -0.13 |
| $Sr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sr$ | -2.89 | $D^+ + e \rightleftharpoons 1/2D_2$ | -0.003 |
| $Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca$ | -2.84 | $H^+ + e \rightleftharpoons 1/2H_2$ | 0.000 |
| $Na^+ + e \rightleftharpoons Na$ | -2.71 | $Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu$ | 0.34 |
| $Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg$ | -2.38 | $1/2O_2 + H_2O + 2e \rightleftharpoons 2OH^-$ | 0.40 |
| $Ti^+ + 2e \rightleftharpoons Ti$ | -1.75 | $Cu^+ + e \rightleftharpoons Cu$ | 0.52 |
| $Be^{2+} + 2e \rightleftharpoons Be$ | -1.70 | $Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2Hg$ | 0.80 |
| $Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al$ | -1.66 | $Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag$ | 0.80 |
| $Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn$ | -1.05 | $Pd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pd$ | 0.83 |
| $Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn$ | -0.76 | $Ir^{3+} + 3e \rightleftharpoons Ir$ | 1.00 |
| $Ga^{3+} + 3e \rightleftharpoons Ga$ | -0.52 | $Br_2 + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$ | 1.07 |
| $Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe$ | -0.44 | $O_2 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$ | 1.23 |
| $Cd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cd$ | -0.40 | $Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$ | 1.36 |
| $In^{3+} + 3e \rightleftharpoons In$ | -0.34 | $F_2 + 2e \rightleftharpoons 2F^-$ | 2.87 |

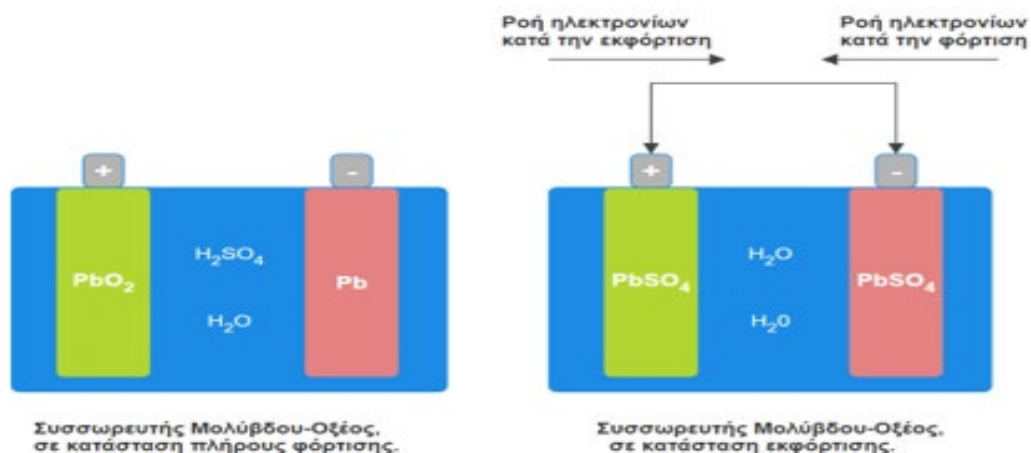
Πίνακας 2.4 : Πρότυπα Δυναμικά Ηλεκτροδίων [46].

2.3 Ανάλυση συσσωρευτών υποβρυχίων

Στο πλαίσιο των υποβρυχίων, η επιλογή του κατάλληλου τύπου συσσωρευτή αποτελεί μία κρίσιμη απόφαση, με τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος και ιόντων-λιθίου να αποτελούν τις δύο κύριες επιλογές. Καθένας από αυτούς τους τύπους παρουσιάζει μοναδικά τεχνικά χαρακτηριστικά, τα οποία επηρεάζουν τόσο την απόδοση όσο και την διάρκεια ζωής τους. Μέσα από την ανάλυση των επόμενων ενοτήτων θα εξεταστούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών των συσσωρευτών, εστιάζοντας στις διαφορές τους όσον αφορά την απόδοση, την συντήρηση και την ασφάλεια. Η κατανόηση των πλεονεκτημάτων και περιορισμών κάθε τύπου συσσωρευτή είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη αποδοτικών και ασφαλών υποβρυχίων.

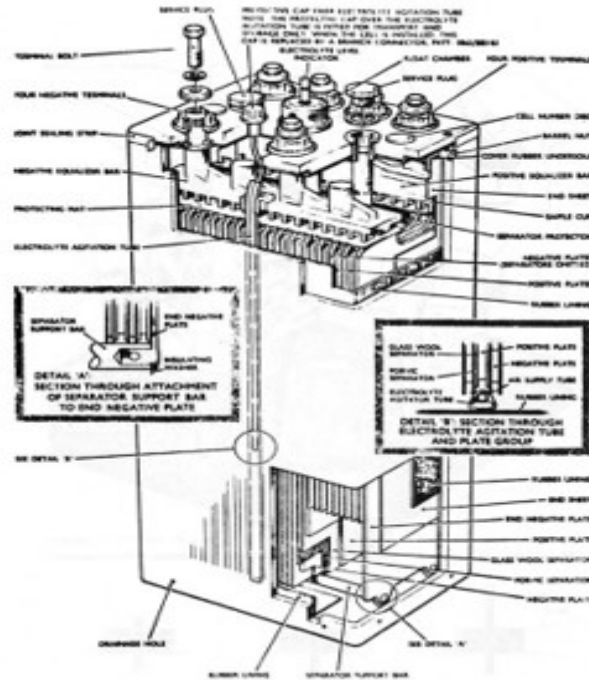
2.3.1 Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος αποτελούν την πλέον διαδεδομένη επιλογή συσσωρευτών και χρησιμοποιούνται στις περισσότερες κλάσεις υποβρυχίων. Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος αποτελούνται από μία ανοδο (από μολύβδο) και μία Kathodo (από διοξείδιο του μολύβδου), τα οποία είναι βυθισμένα σε έναν ηλεκτρολύτη θεικού οξέος. Κατά την εκφόρτιση, οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μετατρέπουν και τα δύο ηλεκτρόδια σε θειικό μολύβδο, ενώ το θειικό οξύ μετατρέπεται σε νερό. Κατά τη φόρτιση, συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία, με το νερό να υποβάλλεται σε ηλεκτρόλυση, παράγοντας υδρογόνο και οξυγόνο που απελευθερώνονται μέσω ανοιγμάτων εξαερισμού. Η ανθεκτικότητα και την απλότητά τους, καθιστά τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος ιδανικούς για τις απαιτητικές συνθήκες των υποβρυχίων. Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ενός συσσωρευτή Μολύβδου-Οξέος [49].



Εικόνα 2.1: Διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης σε συσσωρευτή Μολύβδου-Οξέος.

Στη συνέχεια παρατίθεται η Εικόνα 2.2, η οποία απεικονίζει ένα πραγματικό στοιχείο συσσωρευτή μολύβδου-οξέος της κλάσης υποβρυχίων Oberon. Επίσης, παρουσιάζεται ο Πίνακας 2.5, ο οποίος περιλαμβάνει τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτού του στοιχείου[50].



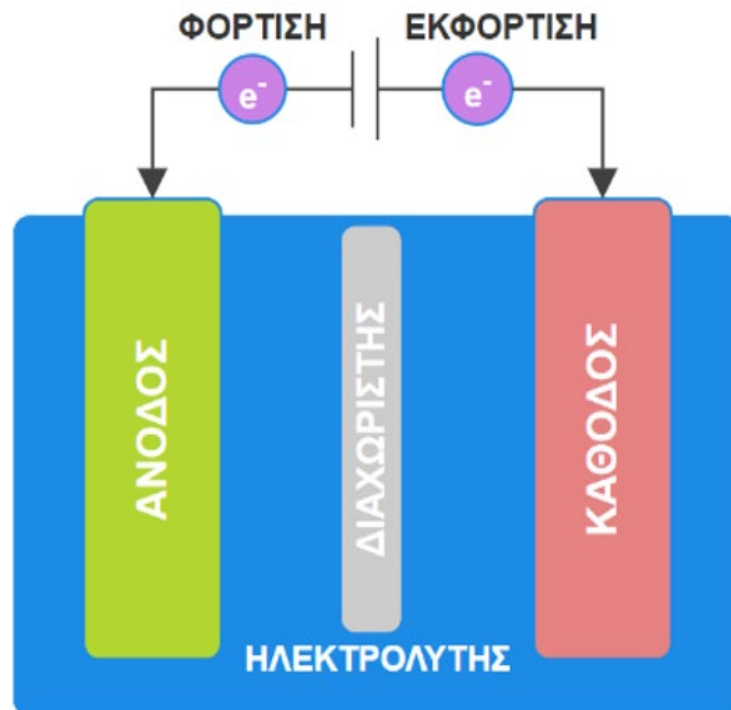
Εικόνα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση στοιχείου μολύβδου-οξέος Τύπου D 7420 [50].

| Τύπος συσσωρευτή | Μολύβδου-οξέος |
|---------------------------|---|
| Rating | 74.20 Ampere-Hours @ 5 Hour Rate |
| Ονομαστική τάση στοιχείου | 2.2 Volts |
| Βάρος στοιχείου | > 500 kg |
| Όγκος ηλεκτρολύτη | ~70 Liters (18 1/2 Gallons) |
| Πύκνότητα ηλεκτρολύτη | 1080 to 1280 |
| Δοχείο στοιχείου | Fibre Glass with an internal Rubber Bag (Υλικό κατασκευής από ίνες γυαλιού επενδυμένο εσωτερικά από λάστιχο.) |
| Διαχωρισμός πλακών | Double Layer (Glass Wool and Porvic/PVC Separator) |
| Επιπλέον χαρακτηριστικά | Δείκτης στάθμης ηλεκτρολύτη, συλλέκτης ηλεκτρολύτη |

Πίνακας 2.5 : Τεχνικά χαρακτηριστικά στοιχείου τύπου D 7420 [50].

2.3.2 Συσσωρευτές ιόντων λιθίου

Η τεχνολογία των συσσωρευτών εξελίσσεται διαρκώς, και στο πλαίσιο αυτής της εξέλιξης, αναμένεται ότι οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου θα αντικαταστήσουν σταδιακά τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος στις εφαρμογές υποβρυχίων. Οι συσσωρευτές λιθίου-ιόντων λειτουργούν με βάση την κίνηση των ιόντων λιθίου μεταξύ της ανόδου και της καθόδου κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης. Η δομή τους περιλαμβάνει μια κάθοδο από οξείδιο μετάλλου λιθίου (όπως το οξείδιο λιθίου-κοβαλτίου ή το οξείδιο λιθίου-μαγγανίου), μια άνοδο που συνήθως κατασκευάζεται από γραφίτη, έναν ηλεκτρολύτη βασισμένο σε άλας λιθίου, και έναν πορώδη διαχωριστή. Κατά την εκφόρτιση, τα ιόντα λιθίου μετακινούνται από την άνοδο προς την κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη, ενώ τα ηλεκτρόνια κινούνται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος προς την κάθοδο, τροφοδοτώντας με ηλεκτρικό ρεύμα τους καταναλωτές. Κατά τη φόρτιση, μια εξωτερική τάση επιβάλλει την κίνηση των ιόντων λιθίου προς την αντίθετη κατεύθυνση, προς την άνοδο, αποθηκεύοντας έτσι ενέργεια. Η υψηλή απόδοση και η συμπαγής δομή των συσσωρευτών λιθίου-ιόντων τους καθιστούν ιδανικούς για χρήση σε εφαρμογές όπως τα υποβρύχια [49].



Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας συσσωρευτή ιόντων λιθίου.

Στους πίνακες 2.6 και 2.7 παρουσιάζονται τα υλικά που ενδείκνυνται για χρήση στις ανόδους και καθόδους των συσσωρευτών ιόντων λιθίου.

| Υλικό ανόδου | Χαρακτηριστικά |
|------------------------|---|
| Γραφίτης | Το πιο κοινό, απορροφά αποτελεσματικά τα ιόντα λιθίου |
| Πυρίτιο | Θεωρητικά υψηλότερη χωρητικότητα |
| Lithium Titanate (LTO) | Υψηλή σταθερότητα κύκλου και ασφάλεια, χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας |

Πίνακας 2.6: Υλικά Ανόδου για Σύσσωρευτές Ιόντων Λιθίου και οι Χαρακτηριστικές Ιδιότητές τους [51-53].

| Υλικό καθόδου | Χαρακτηριστικά |
|---|--|
| Lithium Cobalt Oxide (LCO) | Υψηλή πυκνότητα ενέργειας, κίνδυνοι ασφάλειας, περιορισμένος κύκλος ζωής |
| Lithium Iron Phosphate (LiFePO ₄) | Θερμική σταθερότητα, ασφάλεια, μακρά διάρκεια ζωής |
| Lithium Manganese Oxide (LMO) & Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC) | Καλή ισορροπία πυκνότητας ενέργειας, ασφάλειας και διάρκειας ζωής |
| Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA) | χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλών επιδόσεων. |

Πίνακας 2.7 : Υλικά καθόδου συσσωρευτών Ιόντων Λιθίου και οι Χαρακτηριστικές Ιδιότητές τους [51-53].

Στοιχείο LiFeYPO₄

Οι συσσωρευτές LiFeYPO₄ αποτελούν μια κατηγορία συσσωρευτών ιόντων λιθίου, οι οποίοι χρησιμοποιούν ως υλικό καθόδου το "lithium iron phosphate", με την επιπλέον προσθήκη υτρίου για την ενίσχυση της απόδοσης τους. Η προσθήκη του υτρίου βελτιώνει σημαντικά την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη θερμική σταθερότητα του υλικού της καθόδου. Αυτή η τεχνολογική πρόοδος επιτρέπει τη δημιουργία ενός συσσωρευτή με υψηλότερη απόδοση και αυξημένα επίπεδα ασφαλείας. Οι συσσωρευτές LiFeYPO₄, σε αντίθεση με άλλους συσσωρευτές ιόντων λιθίου, διακρίνονται για την εξαιρετική τους αντοχή στο "thermal runaway". Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, τα ιόντα λιθίου μετακινούνται από την άνοδο προς την κάθοδο, μία διεργασία η οποία διευκολύνεται από τη σταθεροποιητική επίδραση του υτρίου στη δομή της καθόδου. Η εν λόγω σταθερότητα είναι κρίσιμης σημασίας για τη διάρκεια ζωής και την απόδοση του συσσωρευτή, ιδιαίτερα κατά την

επαναλαμβανόμενη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης. Η παρουσία του υτρίου εξασφαλίζει ότι η κάθοδος διατηρείται χωρίς φθορές καθ' όλη τη διάρκεια αυτών των κύκλων, βελτιώνοντας έτσι στην ενίσχυση της συνολικής διάρκειας ζωής του συσσωρευτή. Αυτό καθιστά τους συσσωρευτές LiFeYPO_4 μια αξιόπιστη επιλογή για εφαρμογές όπως τα υποβρύχια. Η ακόλουθη εικόνα 2.4 απεικονίζει ένα στοιχείο ενός συσσωρευτή LiFeYPO_4 που αναμένεται να χρησιμοποιηθεί στα υποβρύχια της κλάσης Yuan. Επιπλέον, ο Πίνακας 2.8 παρέχει τεχνικές προδιαγραφές του συγκεκριμένου στοιχείου [54].



Εικόνα 2.4 :Στοιχείο LiFeYPO_4 WB-LYP10000AHA [54].

| Μοντέλο: | WB-LYP10000AHA |
|--------------------------------------|-----------------|
| Τάση Λειτουργίας: | 2.8-4.0V |
| Ονομαστική Τάση: | 3.2V |
| Ονομαστική Χωρητικότητα | 10000Ah |
| Μέγιστο Ρεύμα Εκφόρτισης (Συνεχές): | << 1CA |
| Μέγιστο Ρεύμα Εκφόρτισης (παλμικό): | << 10CA |
| Κανονικό Ρεύμα Φόρτισης/Εκφόρτισης: | 0.5CA |
| Κύκλοι Ζωής: (80% DOD) | 5000 |
| Κύκλοι Ζωής: (70% DOD) | 7000 |
| Θερμοκρασία Λειτουργίας (Φόρτιση): | -45-85 deg. C |
| Θερμοκρασία Λειτουργίας (Εκφόρτιση): | -45-85 deg. C |
| Διαστάσεις (mm): | 367×756×687 |
| Βάρος (Kg): | 335kg +/- 3000g |
| Ρυθμός Αυτοεκφόρτισης: | << 1% το μήνα |

Πίνακας 2.8: Τεχνικά χαρακτηριστικά στοιχείου WB-LYP10000AHA [54].

Στοιχεία Λιθίου Πολυμερούς (LiPo)

Οι συσσωρευτές Λιθίου Πολυμερούς (LiPo) αντιπροσωπεύουν μια προηγμένη κατηγορία επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών, διακρίνονται για την υψηλή τους ενεργειακή πυκνότητα και είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για εφαρμογές όπου ο χώρος και το βάρος είναι περιορισμένοι. Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς συσσωρευτές ιόντων λιθίου οι οποίοι χρησιμοποιούν υγρό ηλεκτρολύτη, οι LiPo συσσωρευτές ενσωματώνουν έναν ηλεκτρολύτη πολυμερούς. Αυτή η καινοτομία επιτρέπει τη δημιουργία πιο λεπτών και ευέλικτων συσσωρευτών, συμβάλλοντας στη μείωση του βάρους. Ωστόσο, οι συσσωρευτές LiPo μπορεί να είναι επιρρεπείς σε (thermal runaway) εάν υποστούν υπερβολική φόρτιση ή αποφόρτιση ή υποστούν φυσική βλάβη. Ως εκ τούτου, είναι κρίσιμο η χρήση τους να γίνεται με κατάλληλα κυκλώματα προστασίας και ασφαλείς μεθόδους φόρτισης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα στοιχείο LiPo δεν είναι άμεσα συγκρίσιμο με στοιχεία άλλων τύπων συσσωρευτών ως προς το βάρος. Συγκεκριμένα, ένα στοιχείο LiPo ζυγίζει περίπου 4 κιλά, ενώ ένα αντίστοιχο στοιχείο LiFeYPO₄ ενδέχεται να ξεπερνά τα 300 κιλά. Γι' αυτό το λόγο, ένα Module LiPo θεωρείται ισοδύναμο με ένα μεμονωμένο στοιχείο άλλης τεχνολογίας συσσωρευτή, όπως το LiFeYPO₄.

Το module του LiPo αποτελείται από πολλαπλά στοιχεία συνδεδεμένα εν σειρά και παράλληλα, προσφέροντας έτσι αντίστοιχη ισχύ και χωρητικότητα με τα στοιχεία άλλων τεχνολογιών. Αυτό το καθιστά ευέλικτο σε εφαρμογές όπου ο χώρος και το βάρος αποτελούν περιοριστικούς παράγοντες όπως στα υποβρύχια. Στον ακόλουθο Πίνακα 2.9 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός στοιχείου LiPo της εταιρίας KOKAM, το οποίο αυτή τη στιγμή βρίσκεται σε προχωρημένη φάση δοκιμών, με στόχο την ενσωμάτωσή του σε συστήματα υποβρυχίων [49,55].

| Μοντέλο: | SLPB140460330 |
|--------------------------------------|---------------|
| Τάση Λειτουργίας: | 3.0-4.2V |
| Ονομαστική Τάση: | 3.7V |
| Ονομαστική Χωρητικότητα: | 200Ah |
| Μέγιστο Ρεύμα Φόρτισης (Συνεχές): | 200 A (1C) |
| Μέγιστο Ρεύμα Εκφόρτισης (Συνεχές): | 400 A (2C) |
| Κύκλος Ζωής: (80% DOD): | >4000 |
| Θερμοκρασία Λειτουργίας (Φόρτιση): | 0-45 deg. C |
| Θερμοκρασία Λειτουργίας (Εκφόρτιση): | -10-55 deg. C |
| Διαστάσεις (mm): | 13.7×464×327 |
| Βάρος (Kg): | 4.2 ±0.1 |
| Ρυθμός Αυτοεκφόρτισης: | < 2% ανά έτος |

Πίνακας 2.9 : Τεχνικά χαρακτηριστικά στοιχείου SLPB140460330 [49].

2.3.3 Σύγκριση χαρακτηριστικών των συσσωρευτών Μολύβδου-Οξέος και Ιόντων-Λιθίου

Οι κύριοι τύποι συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στα υποβρύχια παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές σε μια σειρά από κρίσιμα τεχνικά χαρακτηριστικά. Ενδεικτικά, οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου προσφέρουν αυξημένη ειδική ενεργειακή πυκνότητα, τόσο ως προς τον όγκο ($W \cdot h/l$) όσο και ως προς τη μάζα ($W \cdot h/kg$), διπλάσια μέση τάση κατά την εκφόρτιση και μικρότερο χρόνο φόρτισης. Στον Πίνακα 2.10, που παρατίθεται στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών με τρόπο που διευκολύνει τη σύγκρισή τους, προσδίδοντας μια σαφή κατανόηση των διαφορών τους. Αυτό θα διευκολύνει στην επιλογή του πιο κατάλληλου τύπου συσσωρευτή ανάλογα με τις ανάγκες κάθε υποβρυχίου [56-60].

| Χαρακτηριστικά επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών | Μολύβδου-Οξέος | Ιόντων Λιθίου |
|---|---|---|
| ΑΡΧΗ | $Pb+PbO_2+2H_2SO_4 \rightarrow 2PbSO_4+2H_2O$ | $Li_xC_6 + Li_{(1-x)}CoO_2 \rightarrow LiCoO_2 + C_6$ |
| Ειδική ενεργειακή πυκνότητα όγκου, $W \cdot h/l$ | 64-90 | 150-350 |
| Ειδική ενεργειακή πυκνότητα μάζας, $W \cdot h/kg$ | 23-55 | 100-250 |
| Μέση τάση κατά την εκφόρτιση, V | 1.7-2.0 | 3.6-3.7 |
| Χρόνος φόρτισης, ώρες | 5-15 | 2-3 |
| Ανάγκη για επαναφορτίσεις και κύκλους συντήρησης | ΝΑΙ | ΟΧΙ |
| Ανάγκη για συντήρηση | ΝΑΙ | ΟΧΙ |
| Αποθήκευση σε κατάσταση εκφόρτισης | ΜΗ ΕΠΙΘΥΜΗΤΟ | ΕΠΙΤΡΕΠΤΟ |
| Αυτοεκφόρτιση, %/ημέρα | ≤ 0.7 | ≤ 0.1 |
| Στεγανότητα | ΟΧΙ | ΝΑΙ |
| Εκπομπή αερίων κατά την λειτουργία | ΝΑΙ (υδρογόνο και οξυγόνο) | ΟΧΙ |
| Κύκλοι | 600-1500 | > 7000 |
| Διάρκεια ζωής, χρόνια | 5-12 | 5-20 |

Πίνακας 2.10 : Σύγκριση χαρακτηριστικών των συσσωρευτών Μολύβδου-Οξέος και Ιόντων-Λιθίου [56-60].

2.3.4 Στάδια φόρτισης συσσωρευτών μολύβδου-οξέος

Η διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος στα υποβρύχια χαρακτηρίζεται από τρία στάδια τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια.

- Πρώτο στάδιο φόρτισης: Φόρτιση με σταθερό ρεύμα ή ισχύ μέχρι η μέση τάση να φτάσει την τάση ανάπτυξης αερίων (οξυγόνου και υδρογόνου).
- Δεύτερο στάδιο φόρτισης: Στο δεύτερο στάδιο φόρτισης, το ρεύμα μειώνεται ενώ η μέση τάση διατηρείται κάτω από την τάση ανάπτυξης αερίων. Το στάδιο ολοκληρώνεται όταν η μέση τάση φτάσει την τάση ανάπτυξης αερίων, ενώ το ρεύμα φόρτισης φτάνει σε μια χαμηλή τιμή που αναφέρεται ως το ρεύμα ανάπτυξης αερίων (gassing current).
- Τρίτο στάδιο φόρτισης (πραγματοποιείται μια φορά το μήνα): Η φόρτιση πραγματοποιείται με σταθερό ρεύμα ενώ η τάση του συσσωρευτή υπερβαίνει την τάση παραγωγής αερίων. Αυτό το στάδιο χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της απόδοσης του συσσωρευτή μέσω της πλήρους φόρτισης.

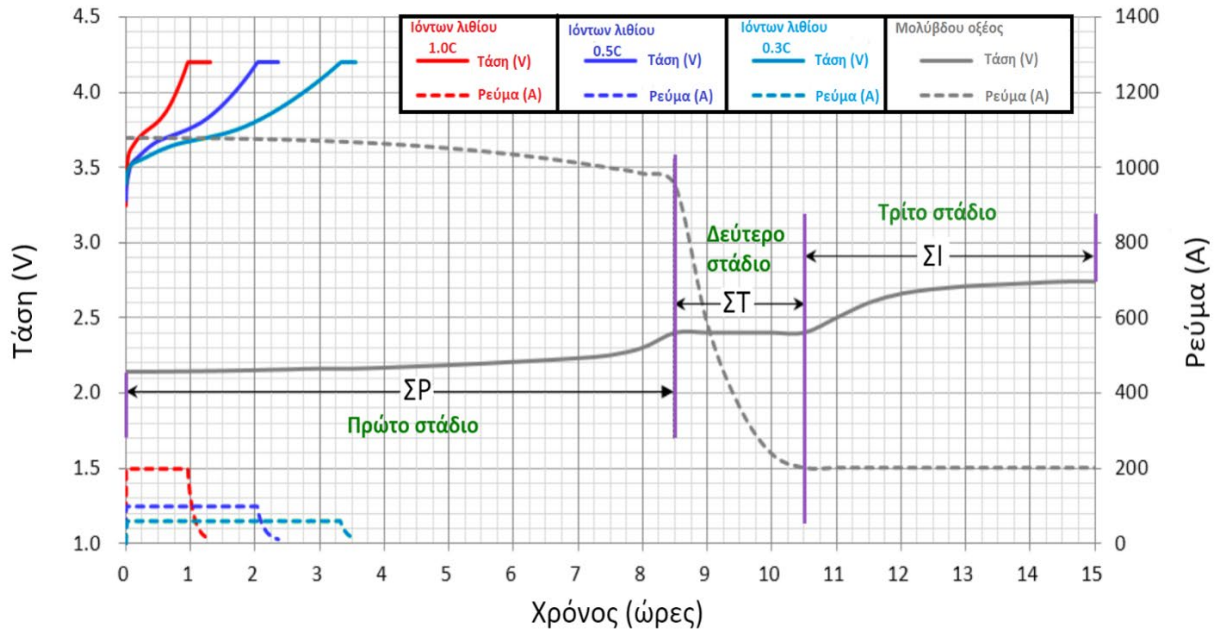
Επίσης, περίπου κάθε έξι μήνες πραγματοποιείται εξισορροπιστική φόρτιση (Equalizing charge) για ομοιόμορφη φόρτιση των στοιχείων [61].

Στην Εικόνα 2.5 απεικονίζονται τα στάδια φόρτισης των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος, όπου οι τιμές τάσης και ρεύματος απεικονίζονται από καμπύλες μαύρης απόχρωσης [55].

2.3.5 Στάδια φόρτισης συσσωρευτών ιόντων λιθίου

Η διαδικασία φόρτισης ενός συσσωρευτή ιόντων-λιθίου διακρίνεται σε δύο βασικά στάδια. Στο αρχικό στάδιο, εφαρμόζεται φόρτιση με σταθερό ρεύμα, μέχρι η τάση να φτάσει περίπου στο 95% της προκαθορισμένης Κατάστασης Φόρτισης (SOC). Στην συνέχεια ακολουθεί το τελικό στάδιο, όπου η φόρτιση εκτελείται με σταθερή τάση και ταυτόχρονη μείωση του ρεύματος. Το σημείο ολοκλήρωσης της φόρτισης επιτυγχάνεται όταν η τιμή του ρεύματος μειωθεί σε χαμηλά επίπεδα, υποδεικνύοντας την πλήρη φόρτιση του συσσωρευτή. Στην περίπτωση των συσσωρευτών ιόντων-λιθίου, δεν παρουσιάζεται η ανάγκη για (equalizing charge) φόρτιση εξισορρόπησης. Η διαδικασία εξισορρόπησης των στοιχείων εκτελείται αυτόματα μέσω του Συστήματος Διαχείρισης Συσσωρευτών (BMS - Battery Management System). Στην Εικόνα 2.5 απεικονίζονται οι καμπύλες φόρτισης των συσσωρευτών ιόντων λιθίου, οι οποίες εκφράζουν τα διάφορα στάδια φόρτισης για κάθε ένα από τα επιλεγμένα c-rates. Χρησιμοποιούνται διακριτά χρώματα—κόκκινο, μπλε και γαλάζιο—για

διαφορετικά c-rates, επιτρέποντας μια άμεση οπτική διάκριση και σύγκριση μεταξύ τους [59,61].



Εικόνα 2.5 : Συγκριτικό διάγραμμα φόρτισης συσσωρευτών Ιόντων Λιθίου και Μολύβδου-Οξέος [55].

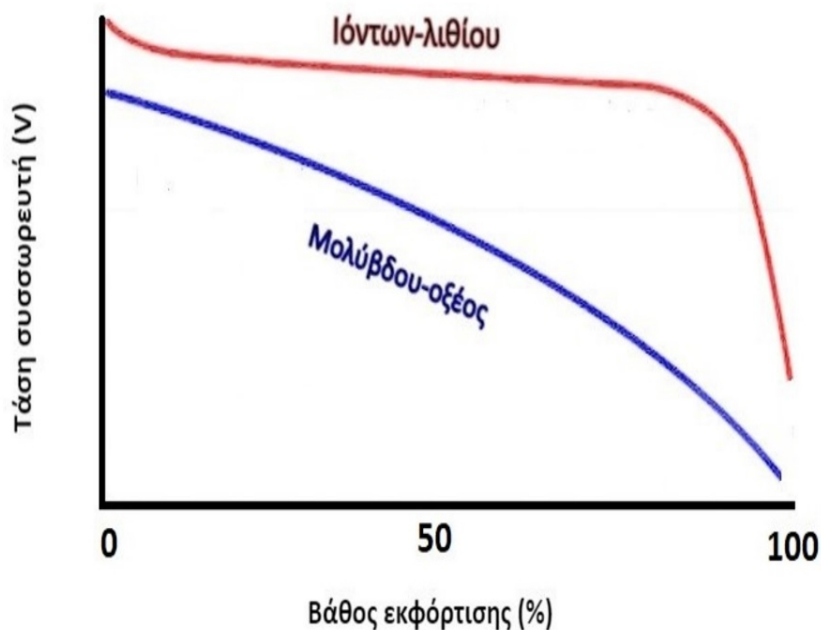
2.3.6 Εκφόρτιση συσσωρευτών

Το Βάθος Εκφόρτισης (Depth of Discharge, DoD) αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα όσον αφορά την απόδοση και τη διατήρηση της διάρκειας ζωής ενός συσσωρευτή. Το Βάθος Εκφόρτισης αντιπροσωπεύει το ποσοστό της χωρητικότητας του συσσωρευτή που έχει χρησιμοποιηθεί κατά την εκφόρτιση και υπολογίζεται εφαρμόζοντας τον ακόλουθο μαθηματικό τύπο:

$$DoD = \frac{\text{removed amount of charge}}{\text{maximum available amount of charge}} \times 100\%$$

Στις εφαρμογές υποβρυχίων, το βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών είναι κρίσιμο για την εξασφάλιση τόσο της επιχειρησιακής απόδοσης όσο και της διάρκειας ζωής τους. Στα υποβρύχια, οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος δεν αποφορτίζονται

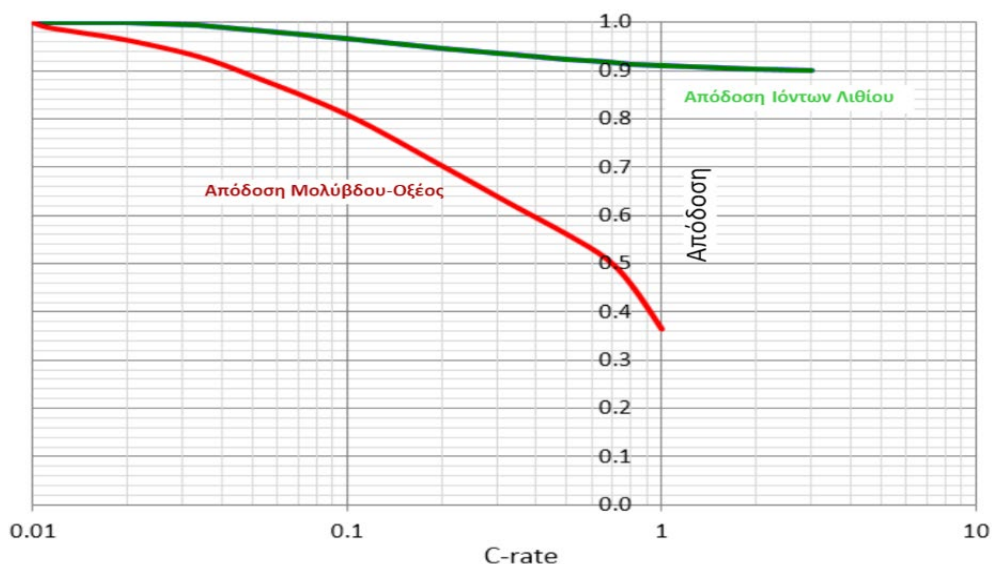
περισσότερο από το 80% του Βάθους Εκφόρτισης (DoD) κατά την επιχειρησιακή λειτουργία, προκειμένου να προληφθεί η ταχεία μείωση της διάρκειας ζωής τους. Αντίθετα, οι συσσωρευτές ιόντων-λιθίου επιδεικνύουν εξαιρετική αντοχή, καθώς μπορούν να αποφορτιστούν έως και στο 93% του DoD ή και λιγότερο, χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά η διάρκεια ζωής τους. Αυτή η αντοχή σε βαθύτερους κύκλους εκφόρτισης επιτρέπει στους συσσωρευτές λιθίου-ιόντων να χρησιμοποιούν μεγαλύτερο μέρος της χωρητικότητάς τους σε κάθε κύκλο, ενισχύοντας έτσι την ενεργειακή τους απόδοση. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την εκφόρτιση των συσσωρευτών, οι συσσωρευτές ιόντων-λιθίου διατηρούν υψηλότερη τάση εξόδου για το μεγαλύτερο μέρος του κύκλου εκφόρτισης σε σύγκριση με τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, όπως αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Ως εκ τούτου, ένας από τους παράγοντες για την επιλογή συσσωρευτών ιόντων λιθίου στα σύγχρονα υποβρύχια αποτελεί και αυτό το χαρακτηριστικό, το οποίο ευνοεί τη διεξαγωγή αποστολών μεγάλης διάρκειας [55,59,61].



Εικόνα 1.6: Το διάγραμμα απεικονίζει τη σχέση μεταξύ του βάθους εκφόρτισης και της τάσης για συσσωρευτές μολύβδου-οξέος και ιόντων λιθίου [55].

2.3.7 C-rate

Στο πλαίσιο των υποβρυχίων, η επιλογή κατάλληλων συσσωρευτών εστιάζει στην απόδοση και τη διάρκεια ζωής τους, με το C-rate να αποτελεί μια καθοριστική παράμετρο. Το C-rate είναι ο ρυθμός με τον οποίο ένας συσσωρευτής φορτίζεται ή εκφορτίζεται σε σχέση με την χωρητικότητά του, με μονάδα μέτρησης τα Αμπερώρια (Ah, Ampere×hours). Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος δεν είναι ανθεκτικοί σε υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης. Σε περίπτωση υψηλού ρυθμού φόρτισης, (πάνω από 1C), ο συσσωρευτής ενδέχεται να επιβαρυνθεί, οδηγώντας τον σε πρόωρη φθορά λόγω διάβρωσης των πλακών και μείωσης του ηλεκτρολύτη. Αντιθέτως, οι συσσωρευτές ιόντων-λιθίου διαχειρίζονται πιο αποτελεσματικά υψηλούς ρυθμούς C-rate, επιτρέποντας γρηγορότερη φόρτιση και εκφόρτιση. Ωστόσο, η συνεχής χρήση των συσσωρευτών αυτών σε πολύ υψηλούς ρυθμούς C-rate, όπως 2C ή περισσότερο, μπορεί επίσης να μειώσει τη διάρκεια ζωής τους, κυρίως λόγω αυξημένης φθοράς των ηλεκτροδίων και πιθανών προβλημάτων διαχείρισης θερμοκρασίας, που μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια χωρητικότητας και να επηρεάσουν την ασφάλεια του συσσωρευτή. Στη συνέχεια, παρατίθεται ένα διάγραμμα το οποίο παρουσιάζει την απόδοση εκφόρτισης των δύο τύπων συσσωρευτών υποβρυχίων. Οι συσσωρευτές ιόντων-λιθίου διατηρούν υψηλή απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα C-rate. Αντιθέτως, η απόδοση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος μειώνεται καθώς αυξάνεται το C-rate, υποδεικνύοντας περιορισμένη απόδοση σε υψηλότερες απαιτήσεις εκφόρτισης. Αυτό υποδηλώνει ότι οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος είναι λιγότερο κατάλληλοι για εφαρμογές που απαιτούν υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης, κάτι που αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για εφαρμογές όπως τα υποβρύχια [55,59].



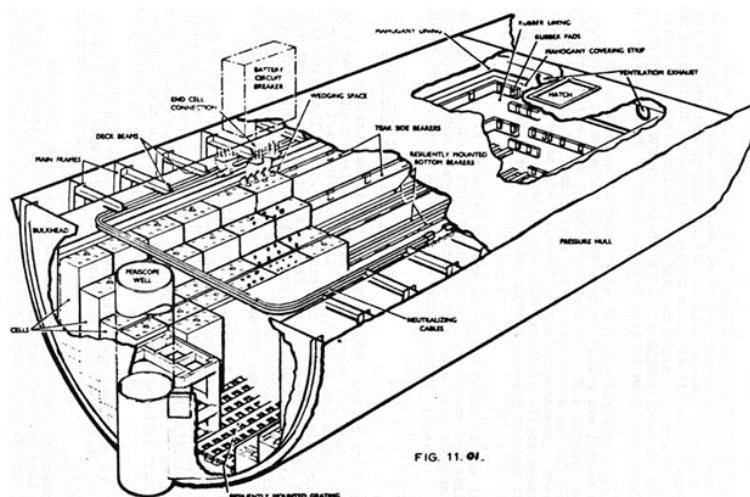
Εικόνα 2.7: Το διάγραμμα απεικονίζει την απόδοση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος και ιόντων λιθίου σε διαφορετικά C-rates [55].

2.3.8 Αυτοεκφόρτιση

Η αυτοεκφόρτιση αποτελεί ένα χαρακτηριστικό των συσσωρευτών όπου το φορτίο τους μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και διαφέρει σημαντικά μεταξύ των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος και των ιόντων-λιθίου. Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος έχουν υψηλότερο ρυθμό αυτοεκφόρτισης, περίπου 5% το μήνα, επηρεαζόμενοι από παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η ηλικία τους. Αντίθετα, οι συσσωρευτές ιόντων-λιθίου έχουν πολύ χαμηλότερο ρυθμό, συνήθως γύρω στο 1-2% το μήνα. Η διαφορά στους ρυθμούς αυτοεκφόρτισης αποτελεί σημαντικό παράγοντα κατά την επιλογή ανάμεσα σε αυτούς τους δύο τύπους συσσωρευτών για εφαρμογές όπως τα υποβρύχια [57,62].

2.4 Διαμέρισμα συσσωρευτή

Το διαμέρισμα του συσσωρευτή στα υποβρύχια αποτελεί έναν ζωτικής σημασίας χώρο καθώς περιλαμβάνει τόσο τα στοιχεία του συσσωρευτή όσο και τα συστήματα που εγγυώνται την ασφάλεια και την αποδοτική του λειτουργία. Στο διαμέρισμα αυτό, ενσωματώνονται συστήματα για την διαχείριση της θερμοκρασίας, τον εξαερισμό και την παρακολούθηση της κατάστασης των συσσωρευτών. Οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες αυτών των διαμερισμάτων είναι καθοριστικές για την ασφάλεια του πληρώματος και την αποδοτική λειτουργία του υποβρυχίου, αντιμετωπίζοντας προκλήσεις όπως το thermal runaway και η πρόληψη πυρκαγιάς.



Εικόνα 2.8 : Διαμέρισμα συσσωρευτή [50].

2.4.1 Διασύνδεση και έλεγχος στοιχείων

Η διασύνδεση των στοιχείων σε υποβρύχια είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία τους. Τα στοιχεία μολύβδου-οξέος καθώς και τα στοιχεία ιόντων-λιθίου συνδέονται κατά ομάδες εν σειρά και παράλληλα [63]. Όταν συνδέονται εν σειρά, τα επιμέρους στοιχεία του συσσωρευτή ενισχύουν τη συνολική τάση εξόδου του συστήματος, ενώ κατά την παράλληλη σύνδεση αυξάνεται η συνολική χωρητικότητα του συστήματος, επιτρέποντας μεγαλύτερη αποθήκευση ενέργειας. Αυτή η διάταξη είναι κρίσιμη για τη διαχείριση των ενεργειακών αναγκών των υποβρυχίων υπό απαιτητικές συνθήκες.

Ο έλεγχος των στοιχείων μολύβδου-οξέος, πραγματοποιείται συνήθως μέσω πινάκων διακοπών (switchboards). Αυτοί οι πίνακες επιτρέπουν την απομόνωση και διαχείριση των στοιχείων του συσσωρευτή για σκοπούς συντήρησης ή σε περίπτωση βλαβών, διασφαλίζοντας την ομαλή και ασφαλή λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων του υποβρυχίου.

Στην περίπτωση των συσσωρευτών ιόντων λιθίου, χρησιμοποιείται ένα πιο προηγμένο σύστημα ελέγχου, το οποίο είναι γνωστό ως Σύστημα Διαχείρισης Συσσωρευτή (Battery Management System - BMS). Το BMS διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στον έλεγχο της υγείας του συσσωρευτή, ελέγχοντας παραμέτρους όπως οι θερμοκρασίες των στοιχείων, τις τάσεις και την κατάσταση φόρτισης τους. Αυτό το σύστημα είναι απαραίτητο για την αποφυγή υπερφόρτισης ή υπερβολικής εκφόρτισης που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε βλάβη ή αστοχία των στοιχείων. Επιπρόσθετα, το BMS συμβάλλει στη διατήρηση ισορροπίας φόρτισης μεταξύ των στοιχείων, παρατείνοντας έτσι τη συνολική διάρκεια ζωής του συσσωρευτή και διατηρώντας την απόδοσή του [55,63].

2.4.2 Η επίδραση των συστημάτων πρόωσης στη φόρτιση συσσωρευτών

Η διαδικασία της φόρτισης των συσσωρευτών στα υποβρύχια είναι κρίσιμη, καθώς επηρεάζει άμεσα την αυτονομία, την ασφάλεια και τις επιχειρησιακές δυνατότητες τους. Η φόρτιση των συσσωρευτών στα συμβατικά υποβρύχια έχει ως αποτέλεσμα την έκθεση των υποβρυχίων σε κίνδυνο, καθώς αυτή η διαδικασία απαιτεί την ανάδυσή τους, αποκαλύπτοντας τη θέση τους. Ωστόσο, με τη χρήση νέων και πιο σύγχρονων συστημάτων πρόωσης, όπως οι κυψέλες καυσίμου (fuel cells), η επαναφόρτιση των συσσωρευτών μπορεί πλέον να πραγματοποιηθεί εν καταδύσει, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο έκθεσης των υποβρυχίων [64].

Ανεξάρτητα από το σύστημα πρόωσης που ενδέχεται να χρησιμοποιεί ένα υποβρύχιο, η ενέργεια που αποθηκεύεται στους συσσωρευτές διανέμεται στη συνέχεια κυρίως στους ηλεκτρικούς κινητήρες για την πρόωση και στα εν πλω συστήματα. Αυτό εξασφαλίζει τη συνεχή και αποδοτική λειτουργία των συστημάτων του υποβρυχίου, ανεξαρτήτως της μεθόδου παραγωγής ή αποθήκευσης της ενέργειας.

| Σύστημα πρόωσης | Πηγή Φόρτισης Συσσωρευτή (Επιφάνεια) | Πηγή Φόρτισης Συσσωρευτή (Εν καταδύσει) |
|------------------------|---|---|
| Diesel-Electric | Γεννήτριες Diesel | - |
| Stirling AIP | Γεννήτριες Diesel | Stirling κινητήρας |
| Fuel Cell AIP | Γεννήτριες Diesel | Fuel Cells |

Πίνακας 2.11 : Επίδραση Συστημάτων Πρόωσης στη Φόρτιση Συσσωρευτών [64].

2.5 Συντήρηση συσσωρευτών υποβρυχίων

Η συντήρηση, οι ελέγχοι και τα μέτρα ασφαλείας που σχετίζονται με τους συσσωρευτές των υποβρυχίων είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης και της επιχειρησιακής τους ετοιμότητας. Δεδομένου ότι οι συσσωρευτές είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων ενός υποβρυχίου - τροφοδοτώντας κρίσιμα συστήματα όπως αυτό της πρόωσης έως τα συστήματα υποστήριξης της ζωής - οποιαδήποτε αστοχία μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες. Η συντήρηση των συσσωρευτών περιλαμβάνει αυστηρούς ελέγχους και δοκιμές για τον εντοπισμό και την πρόληψη οποιωνδήποτε ζητημάτων που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο τη απόδοση του υποβρυχίου ή την ασφάλεια του πληρώματος.

2.5.1 Συντήρηση συσσωρευτών Μολύβδου-Οξέος

Στα υποβρύχια, η συντήρηση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος απαιτεί τακτικούς ελέγχους πυκνότητας και θερμοκρασίας. Η πυκνότητα δείχνει το επίπεδο φόρτισης και την υγεία του στοιχείου, ενώ η θερμοκρασία βοηθά στην ανίχνευση πιθανών προβλημάτων όπως η υπερθέρμανση. Επίσης, απαιτείται συμπλήρωση του

ηλεκτρολύτη διότι, κατά τη διαδικασία της φόρτισης και εκφόρτισης, τα αέρια που εκλύονται από τις χημικές αντιδράσεις εσωτερικά του συσσωρευτή προκαλούν τη μείωση του επιπέδου του ηλεκτρολύτη. Επιπρόσθετα, διενεργούνται έλεγχοι για διαρροές ρεύματος (earth leakage test), έλεγχος πτώσης τάσης σε millivolt (milli volt drop test) καθώς και τακτικός καθαρισμός για την αποφυγή προβλημάτων από ακαθαρσίες ή διάβρωση. Αυτές οι διαδικασίες συντήρησης και ελέγχου εξασφαλίζουν την αποδοτική και ασφαλή λειτουργία των συσσωρευτών [50].

2.5.2 Συντήρηση συσσωρευτών Ιόντων-Λιθίου

Οι συσσωρευτές ιόντων-λιθίου σε σύγκριση με τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, δεν απαιτούν συντήρηση. Παρόλα αυτά, απαιτείται περιοδικός έλεγχος για να διασφαλιστεί η υγεία και η αποδοτικότητά τους, που περιλαμβάνει ελέγχους για φυσικές βλάβες, τη σωστή λειτουργία του συστήματος διαχείρισης συσσωρευτών και την παρακολούθηση της κατάστασης φόρτισης και της γενικής απόδοσης τους [56].

2.5.3 Μέτρα ασφάλειας κατά την συντήρηση των συσσωρευτών

Η διαδικασία συντήρησης συσσωρευτών σε υποβρύχια απαιτεί την εφαρμογή αυστηρών μέτρων ασφαλείας, προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία τους και η προστασία του πληρώματος. Αυτά τα μέτρα περιλαμβάνουν [50]:

- Απαγόρευση καπνίσματος στο χώρο του συσσωρευτή.
- Η προστατευτική ενδυμασία πρέπει να καλύπτει το σώμα και τα άκρα παρέχοντας προστασία από πιθανά εγκαύματα.
- Απαγορεύεται η μεταφορά μεταλλικών αντικειμένων στις τσέπες για να αποφευχθούν βραχυκυκλώματα.
- Χρήση μονωμένων εργαλείων.
- Αποσύνδεση του συσσωρευτή κατά τη συντήρηση.
- Το σύστημα εξαερισμού του συσσωρευτή πρέπει να λειτουργεί για να αποφευχθεί η συσσώρευση επικίνδυνων αερίων.
- Πρέπει να Χρησιμοποιούνται λαστιχένια πατάκια για εργασίες πάνω από τα στοιχεία.

2.6 Απαιτήσεις ασφαλείας

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος όσο και οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου πρέπει να λειτουργούν υπό αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας. Αυτό συμβαίνει λόγω της ανάγκης για υψηλή απόδοση, αξιοπιστία και αντοχή σε απαιτητικές συνθήκες, όπως είναι οι υποθαλάσσιες συνθήκες λειτουργίας. Οι συσσωρευτές αυτοί πρέπει να διαθέτουν ειδικές διατάξεις για την πρόληψη της διαρροής ή της υπερθέρμανσης, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να είναι σχεδιασμένοι ώστε να αντέχουν στην πίεση και τις δυσμενείς συνθήκες του υποθαλάσσιου περιβάλλοντος. Η σημασία αυτών των απαιτήσεων ασφαλείας είναι ζωτικής σημασίας για την αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία των υποβρυχίων.

2.6.1 Συστήματα ασφαλείας για συσσωρευτές μολύβδου οξέος

Στα υποβρύχια με συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, η ασφαλής λειτουργία τους στηρίζεται σε μια σειρά από κρίσιμα συστήματα που εξασφαλίζουν την αποδοτική και ασφαλή τους λειτουργία. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Το σύστημα ψύξης των συσσωρευτών αποτελεί έναν θεμελιώδη μηχανισμό για την απομάκρυνση της υψηλής θερμότητας, η οποία παράγεται κατά τις φάσεις φόρτισης και εκφόρτισης. Το σύστημα ψύξης, διαθέτει μια σειρά από σωλήνες και πλάκες ψύξης οι οποίες είναι συνδεδεμένες με τα στοιχεία του συσσωρευτή. Καθώς το νερό διαρρέει μέσα από αυτούς τους σωλήνες, μεταφέρει τη θερμότητα που έχει απορροφηθεί από τις πλάκες. Στη συνέχεια, αυτή η θερμότητα αποβάλλεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος με τη σειρά του ψύχεται από το θαλασσινό νερό, ολοκληρώνοντας τον κύκλο της ψύξης [50].
- Το σύστημα ανακίνησης ηλεκτρολύτη χρησιμοποιεί αέρα χαμηλής πίεσης για να διεγείρει την κυκλοφορία του ηλεκτρολύτη στο εσωτερικό των στοιχείων. Ο αέρας που εισάγεται στο κάτω μέρος των στοιχείων παράγει μικρές φυσαλίδες, οι οποίες προκαλούν ανακίνηση του ηλεκτρολύτη, αποτρέποντας το φαινόμενο stratification, δηλαδή τον σχηματισμό στρωμάτων διαφορετικής πυκνότητας, καθώς επίσης συμβάλλουν στην πρόληψη της τοπικής υπερθέρμανσης και στη μείωση του χρόνου φόρτισης των συσσωρευτών [50].
- Το σύστημα απομάκρυνσης υδρογόνου (Hydrogen Eliminators) απομακρύνει το υδρογόνο που παράγεται κατά τη φόρτιση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος. Το υδρογόνο, είναι εύφλεκτο και δύναται να προκαλέσει έκρηξη υπό ορισμένες συνθήκες, αποτελώντας κίνδυνο για το υποβρύχιο και το πλήρωμά του [50].

2.6.2 Κίνδυνοι κατά τη χρήση συσσωρευτών ιόντων λιθίου

Η εφαρμογή των συσσωρευτών ιόντων λιθίου σε συμβατικά υποβρύχια παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε ό,τι αφορά την ενεργειακή χωρητικότητα σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς συσσωρευτές μολύβδου-οξέος.

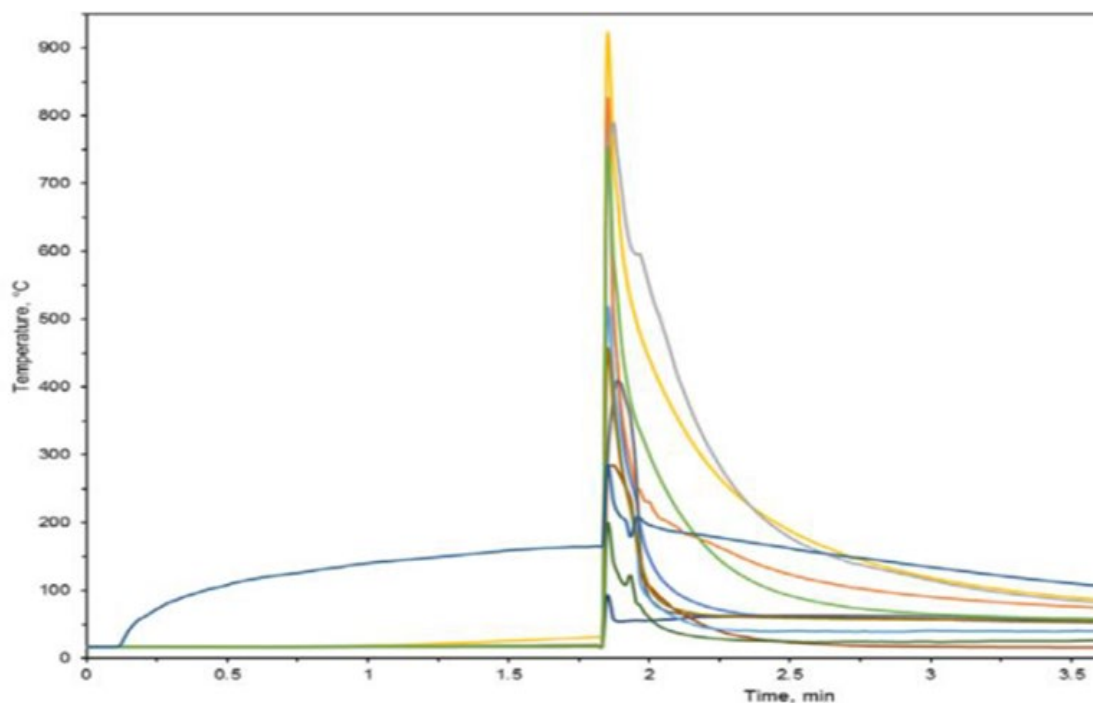
Παρόλα αυτά, η χρήση τους συνεπάγεται αυξημένους κινδύνους, όπως το thermal runaway, το οποίο μπορεί να προκληθεί από υπερφόρτιση, βραχυκύκλωμα ή υπερθέρμανση προκαλώντας φωτιές ή εκρήξεις. Για το λόγο αυτό, η εφαρμογή των συσσωρευτών ιόντων λιθίου στα υποβρύχια παραμένει περιορισμένη.

Φαινόμενο ανεξέλεγκτης θερμικής αντίδρασης (Thermal runaway)

Ο κίνδυνος του thermal runaway σε συσσωρευτές ιόντων λιθίου αποτελεί ένα σημαντικό κίνδυνο ασφαλείας. Πρόκειται για μια ανεξέλεγκτη αύξηση στη θερμοκρασία εντός του συσσωρευτή, που μπορεί να προκληθεί από βραχυκύκλωμα, υπερφόρτιση, ή από έκθεση σε υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες. Η υπερθέρμανση αυτή μπορεί να προκαλέσει βλάβες στα εσωτερικά μέρη του συσσωρευτή και να οδηγήσει στην ανάφλεξη εύφλεκτων υλικών. Επιπλέον, εάν η θερμοκρασία ενός στοιχείου αυξηθεί δραματικά, αυτό μπορεί να προκαλέσει αύξηση θερμοκρασίας και στα γειτονικά στοιχεία, δημιουργώντας ένα φαινόμενο αλυσιδωτής αντίδρασης. Αυτή η αλυσιδωτή αντίδραση μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένη παραγωγή θερμότητας, απελευθέρωση τοξικών αερίων και, στα πιο σοβαρά σενάρια, σε φωτιές ή εκρήξεις. Στην εικόνα 2.9 παρουσιάζεται το φαινόμενο του thermal runaway ενός στοιχείου, ενώ στην εικόνα 2.10 απεικονίζονται οι θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν και μετρήθηκαν σε διάφορα μέρη του ίδιου στοιχείου [65].



Εικόνα 2.9 : Ανεξέλεγκτη θερμική αντίδραση στοιχείου ιόντων λιθίου [65].



Εικόνα 2.10 : Θερμοκρασίες που μετρήθηκαν σε διάφορα σημεία γύρω από το στοιχείο κατά τη διάρκεια της ανεξέλεγκτης θερμικής αντίδρασης [65].

Η διαχείριση του thermal runaway στα στοιχεία επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης θερμικής μόνωσης ώστε να μην διαδοθεί στα γειτονικά στοιχεία. Επιπλέον, το Σύστημα Διαχείρισης συσσωρευτών (Battery Management System, BMS) προσφέρει πρόσθετα μέτρα ασφάλειας για να βοηθήσει στον έλεγχο των κινδύνων που συνδέονται με το thermal runaway.

2.6.3 Αντιμετώπιση Πυρκαγιάς σε Συσσωρευτές Υποβρυχίων

Η παρουσία φωτιάς σε υποβρύχιο αποτελεί μία εξαιρετικά επικίνδυνη κατάσταση. Η αντιμετώπιση πυρκαγιών σε συσσωρευτές υποβρυχίων, ιδίως στους ιόντων-λιθίου, είναι κρίσιμης σημασίας λόγω του κινδύνου της ανεξέλεγκτης θερμικής αντίδρασης (thermal runaway). Σε περίπτωση πυρκαγιάς σε συσσωρευτή υποβρυχίου, το πλήρωμα πρέπει να ενεργήσει άμεσα με τα ακόλουθα μέτρα:

- Διακοπή φόρτισης (εάν ο συσσωρευτής φορτίζεται).
- Κλείσιμο του συστήματος εξαερισμού του συσσωρευτή.
- Αποσύνδεση του συσσωρευτή από το φορτίο.
- Κλείσιμο των διαχωριστικών τοιχωμάτων του διαμερίσματος του συσσωρευτή.
- Συνέχιση λειτουργίας των συστημάτων ψύξης του συσσωρευτή.
- Χρήση απεσταγμένου νερού για ψύξη του διαμερίσματος.
- Έλεγχος της περιοχής για να επιβεβαιωθεί ότι η πυρκαγιά έχει σβήσει πριν ανοίξει το διαμέρισμα.

Τα παραπάνω μέτρα είναι ενδεικτικά και οι διαδικασίες ενδέχεται να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του υποβρυχίου και τους ειδικούς κανονισμούς ασφάλειάς του [50].

2.7 Επιχειρησιακά οφέλη

Η εφαρμογή συσσωρευτών ιόντων λιθίου στα υποβρύχια αποτελεί μια σημαντική καινοτομία, ενισχύοντας σημαντικά τις επιχειρησιακές τους δυνατότητες. Οι συσσωρευτές αυτοί προσφέρουν αυξημένη εμβέλεια, καθώς διαθέτουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Επίσης, το "indiscretion ratio", που είναι ο χρόνος που απαιτείται να λειτουργήσουν οι γεννήτριες diesel στην επιφάνεια για τη φόρτιση των συσσωρευτών σε σχέση με τον χρόνο που παραμένει το υποβρύχιο εν καταδύσει, είναι σημαντικά μικρότερος, μειώνοντας την πιθανότητα εντοπισμού του υποβρυχίου.

Επιπλέον, μέσω της χρήσης των συσσωρευτών ιόντων λιθίου, το επιχειρησιακό κόστος παραμένει χαμηλό, καθώς οι συσσωρευτές αυτοί δεν απαιτούν συχνή συντήρηση και αντικατάσταση.

Το σημαντικό πλεονέκτημα από τη χρήση συσσωρευτών ιόντων λιθίου στα υποβρύχια είναι η μείωση του βάρους, η οποία συμβάλλει στην αύξηση της εμβέλειας και της ευκινησίας τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα υποβρύχια της κλάσης Yuan, τα οποία αναμένεται να χρησιμοποιήσουν συσσωρευτή αποτελούμενο από 960 στοιχεία WB-LYP10000ΑΗΑ. Η μετάβαση των υποβρυχίων της κλάσης Yuan σε συσσωρευτές ιόντων λιθίου υπολογίζεται ότι θα επιφέρει εξοικονόμηση βάρους περίπου 260 τόνων σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, βελτιώνοντας έτσι τόσο την απόδοση όσο και την ευκινησία των υποβρυχίων. Κατά την ολοκλήρωση της μετάβασης σε συσσωρευτές ιόντων λιθίου, τα υποβρύχια της κλάσης Yuan αναμένεται να διαθέτουν αυξημένη εμβέλεια, φτάνοντας έως και τα 3300 ναυτικά μίλια και τη δυνατότητα να παραμένουν εν καταδύσει έως και 800 ώρες χωρίς ανάγκη ανάδυσης [66].

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση συσσωρευτών ιόντων λιθίου στα υποβρύχια επιφέρει μια σημαντική αναβάθμιση σε σχέση με τους προγενέστερους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση των επιχειρησιακών δυνατοτήτων των υποβρυχίων, καθιστώντας δυνατή την εκτέλεση πιο περίπλοκων και απαιτητικών αποστολών.

2.8 Συσσωρευτές μη επανδρωμένων υποβρυχίων οχημάτων

Η τεχνολογία των συσσωρευτών διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα (UUVs), επηρεάζοντας τις επιχειρησιακές τους δυνατότητες όπως η εμβέλεια. Η επιλογή μεταξύ πρωτεύοντων (μη επαναφορτιζόμενων) και δευτερεύοντων (επαναφορτιζόμενων) συσσωρευτών εξαρτάται από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της αποστολής, όπως η διάρκεια, το βάθος και οι απαιτήσεις φορτίου. Η κατάλληλη επιλογή είναι κρίσιμη, καθώς επηρεάζει άμεσα την απόδοση του UUV.

2.8.1 Πρωτεύοντες συσσωρευτές UUV

Στα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα (UUVs), η χρήση των πρωτεύοντων συσσωρευτών είναι λιγότερο συχνή από τους δευτερεύοντες λόγω του περιορισμού της μίας χρήσης. Ωστόσο, οι πρωτεύοντες συσσωρευτές, συμπεριλαμβανομένων των

αλκαλικών στοιχείων μαγγανίου (MnO_2) και των συσσωρευτών με βάση το λίθιο όπως ο lithium sulfur dioxide και ο lithium thionyl chloride, χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένες αποστολές που απαιτούν υψηλή πυκνότητα ενέργειας [67].

Ειδικότερα, οι πρωτεύοντες συσσωρευτές βάσης λιθίου, όπως ο lithium sulfur dioxide και ο lithium thionyl chloride, διαθέτουν ενεργειακή πυκνότητα που φτάνει έως και 661 Wh kg^{-1} . Οι συσσωρευτές με βάση το λίθιο επιτρέπουν σε UUVs, όπως το REMUS AUV βάρους 30 κιλών, να καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις, ενισχύοντας έτσι σημαντικά την απόδοσή τους κατά την εκτέλεση απαιτητικών αποστολών [67].

Οι αλκαλικοί συσσωρευτές μαγγανίου (MnO_2) αποτελούν μια εξαιρετική επιλογή για την τροφοδοσία μικρού μεγέθους μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων (UUVs) λόγω της ευρείας διαθεσιμότητας, αποτέλεσμα της μαζικής παραγωγής για καταναλωτικές εφαρμογές. Αυτοί οι συσσωρευτές κατασκευάζονται με καθόδο από διοξείδιο του μαγγανίου και άνοδο από ψευδάργυρο και ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται υδροξείδιο του καλίου. Η απόδοσή αυτών των συσσωρευτών ενδέχεται να επηρεαστεί σημαντικά από αλλαγές θερμοκρασίας, οδηγώντας σε μειωμένη απόδοση. Επιπλέον, παρατηρείται σταδιακή μείωση της τάσης κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, πράγμα που μπορεί να περιορίσει τη χρησιμότητά τους σε αποστολές μεγάλης διάρκειας όπου απαιτείται σταθερή ισχύς εξόδου [67].

2.8.2 Δευτερεύοντες συσσωρευτές UUV

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των συσσωρευτών διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση των δυνατοτήτων των μη επανδρωμένων υποβρυχίων οχημάτων (UUVs). Οι δευτερεύοντες συσσωρευτές, που προσφέρουν τη δυνατότητα επαναφόρτισης, αποτελούν την πλέον ενδεδειγμένη επιλογή για τις λειτουργικές ανάγκες των UUVs, παρέχοντας μια πιο οικονομικά αποδοτική και ευέλικτη λύση, παρά το πιθανώς υψηλότερο αρχικό κόστος ή τις χαμηλότερες ενεργειακές πυκνότητες σε σύγκριση με τους πρωτεύοντες συσσωρευτές. Υπάρχουν διάφοροι τύποι δευτερεύοντων συσσωρευτών που ενδείκνυνται για χρήση σε μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα (UUVs) όπως οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (lead-acid), αργύρου-ψευδαργύρου (silver-zinc), νικελίου-καδμίου (nickel-cadmium), ιόντων-λιθίου (lithium-ion) και lithium-solid polymer.

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, αποτελούν μια αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική επιλογή, παρέχοντας ικανοποιητική ενεργειακή απόδοση σε UUVs όπως το Autosub. Παρόλο που παραμένουν μια αξιολόγη επιλογή, σταδιακά υποκαθίστανται από πιο σύγχρονες τεχνολογίες που επιδεικνύουν υψηλότερες ενεργειακές πυκνότητες [67].

Οι συσσωρευτές αργύρου-ψευδαργύρου, οι οποίοι διαθέτουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, χρησιμοποιούνται σε UUVs όπως το Odyssey IIb. Αυτοί οι συσσωρευτές έχουν άνοδο από ψευδάργυρο, κάθοδο από οξείδιο του αργύρου και ως ηλεκτρολύτη χρησιμοποιούν υδροξείδιο του καλίου. Ωστόσο, λόγω των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν όπως το αυξημένο κόστος και ο περιορισμένος αριθμός κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης, οι συσσωρευτές αυτοί δεν χρησιμοποιούνται πλέον στα UUV [67].

Οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου, προσφέρουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής αλλά έρχονται με υψηλότερο κόστος, ενώ παράλληλα η χρήση τους προκαλεί δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της τοξικότητας του καδμίου. Η εφαρμογή τους σε μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα (UUVs) απαιτεί προσεκτική διαχείριση θερμοκρασίας καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να επιταχύνουν τη φθορά του συσσωρευτή και να μειώσουν τη χωρητικότητα του. Επίσης, η χωρητικότητα αυτού του τύπου συσσωρευτή μπορεί να μειωθεί λόγω του 'φαινομένου μνήμης' (memory effect) το οποίο προκαλείται όταν οι συσσωρευτές δεν αδειάζουν πλήρως πριν από κάθε φόρτιση. Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου δεν χρησιμοποιούνται πλέον σε εφαρμογές UUVs [67].

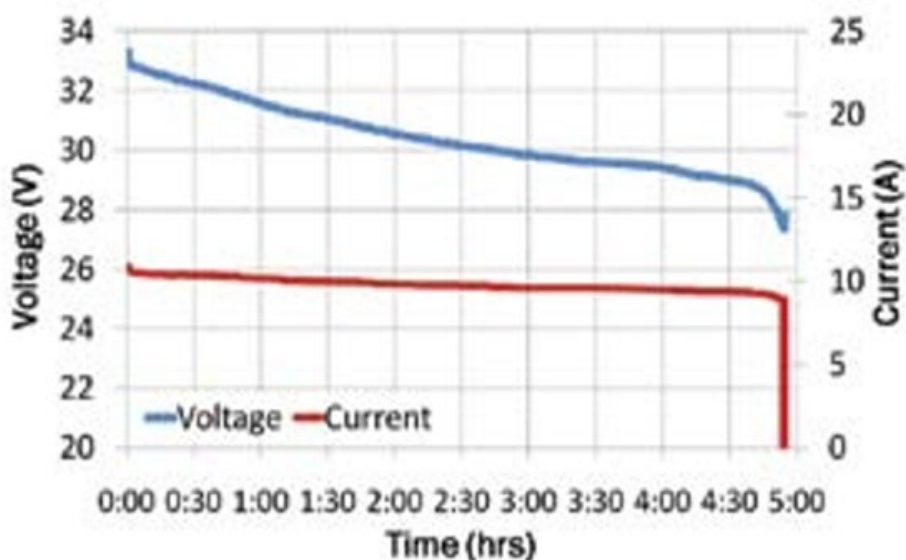
Οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται σε μη επανδρωμένα υποβρύχια, όπως το ABE και το Urashima, καθώς προσφέρουν εξαιρετική ενεργειακή πυκνότητα, (~150 Wh/kg). Ειδικότερα, το Urashima, με συνολικό βάρος 7 τόνους, διαθέτει τρεις συσσωρευτές 130 V 100 Ah συνδεδεμένους παράλληλα, επιτρέποντας την κάλυψη αποστάσεων έως και 100 χιλιομέτρων [67].

Οι συσσωρευτές Lithium-Polymer (LiPo) χρησιμοποιούνται σε σύγχρονα μη επανδρωμένα υποβρύχια όπως το Orca. Οι συσσωρευτές αυτοί προσφέρουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, ευνοώντας τις αποστολές μακράς διάρκειας. Επίσης, η ικανότητά τους να αντέχουν σε συνθήκες υψηλής πίεσης σε μεγάλα βάθη, καθώς και η αντοχή τους σε κραδασμούς και δονήσεις, τους καθιστά ιδανικούς για τις απαιτητικές υποθαλάσσιες αποστολές [67].

Στον πίνακα 2.13 που παρατίθεται στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συσσωρευτή Bluefin® 1.5 kWh (LiPo) ο οποίος χρησιμοποιείται σε μικρού μεγέθους UUV (Bluefin-9). Πέρα από τα αξιοσημείωτα τεχνικά χαρακτηριστικά του, ο συσσωρευτής διαθέτει ηλεκτρονικά συστήματα ασφαλείας για την παρακολούθηση και πρόληψη συνθηκών υπερβολικής τάσης, χαμηλής τάσης, υπερβολικού ρεύματος και υπερθέρμανσης [68].

| Μοντέλο: | Bluefin® 1.5 kWh Subsea Battery |
|-------------------------|---------------------------------|
| Διαστάσεις (L x W x H) | (38.4 x 13.3 x 21 cm) |
| Βάρος | 31.5 lb (14.3 kg) |
| Όγκος | 8.12 liters |
| Depth Rating | 6,000 m |
| Ενέργεια | 1.5 kWh |
| Ονομαστική τάση | 30 V |
| Χωρητικότητα | 48 Ah |
| Κύκλος Ζωής: (80% DOD): | >300-500 |
| Ρεύμα εκφόρτισης | 10 A ονομαστικό, 30 A μέγιστο |
| Θερμοκρασία εκφόρτισης | -20 to 48° C |
| Ρεύμα φόρτισης | 12 A ονομαστικό, 15 A μέγιστο |
| Θερμοκρασία φόρτισης | 0 έως 48° C |

Πίνακας 2.13 : Τεχνικά χαρακτηριστικά συσσωρευτή Bluefin® 1.5 kWh Subsea Battery [68].



Εικόνα 2.11 : Εκφόρτιση συσσωρευτή Bluefin® 1.5 kWh Subsea Battery [68].

2.8.3 Επιχειρησιακά οφέλη συσσωρευτών Li-ion και LiPo

Η επιλογή κατάλληλου συσσωρευτή για τα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα είναι κρίσιμη για τη συνολική τους απόδοση. Οι δύο κυριότεροι τύποι συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα μη επανδρωμένα υποβρύχια είναι ιόντων λιθίου (Li-ion) και Lithium-Polymer (LiPo), καθώς αυτοί οι δύο τύποι ενισχύουν σημαντικά τις επιχειρησιακές δυνατότητες των UUV. Τα σημαντικότερα οφέλη από τη χρήση αυτών των συσσωρευτών είναι η αύξηση της εμβέλειας λόγω της υψηλής ενεργειακής τους

πυκνότητας καθώς και η αύξηση του μέγιστου επιτρεπόμενου επιχειρησιακού βάθους (έως 6000 μέτρα), καθώς αυτοί οι συσσωρευτές μπορούν να λειτουργούν κάτω από υψηλές πιέσεις και χαμηλές θερμοκρασίες [68]. Επιπλέον, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των συσσωρευτών αυτών συμβάλλει στη μείωση του συνολικού βάρους του UUV, επιτρέποντας τη φόρτωση επιπλέον αισθητήρων και οργάνων, ενισχύοντας με τον τρόπο αυτό την ικανότητα των UUV να συλλέγουν και να αναλύουν δεδομένα. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των δύο αυτών τύπων συσσωρευτών αποτελεί η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, μειώνοντας έτσι την ανάγκη συχνής αντικατάστασης με άμεσο επακόλουθο τη μείωση του επιχειρησιακού κόστους. Αυτή η τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα των συσσωρευτών καθιστά τα UUV πιο αποδοτικά σε ένα ευρύ φάσμα απαιτητικών αποστολών [67].

Κεφάλαιο 3^ο – Ιστορική εξέλιξη τορπιλών

3.1 Εισαγωγή

Η τορπίλη αποτελεί ένα προηγμένο υποβρύχιο όπλο, το οποίο έχει σχεδιαστεί να εκτοξεύεται από αρκετές πλατφόρμες, συμπεριλαμβανομένων υποβρυχίων, πλοίων επιφανείας, αεροσκαφών και παράκτιων αμυντικών συστημάτων. Η κύρια λειτουργία της επικεντρώνεται στην αποτελεσματική προσβολή τόσο υποβρυχίων όσο και πλοίων επιφανείας.

Η πρώτη εμφάνιση της τορπίλης καταγράφεται στις αρχές του 19ου αιώνα ως στατική εκρηκτική συσκευή, λειτουργώντας σαν υποβρύχια νάρκη για αμυντικούς σκοπούς. Η εξέλιξη της τορπίλης σε ένα δυναμικό και αυτοκινούμενο όπλο αποδίδεται στις καινοτομίες του Ρόμπερτ Γουάιτχεντ κατά τη δεκαετία του 1860. Ο σχεδιασμός του Γουάιτχεντ, βασισμένος στη χρήση συμπιεσμένου αέρα για την πρόωση και τη δυνατότητα διατήρησης σταθερού βάθους, αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη των σύγχρονων τορπιλών.

Προς το τέλος του 19ου αιώνα, παρατηρήθηκαν σημαντικές τεχνολογικές καινοτομίες που επέφεραν καθοριστικές αλλαγές στη σχεδίαση των τορπιλών. Ειδικότερα, η εισαγωγή συστημάτων καθοδήγησης με γυροσκόπια, η ανάπτυξη εξελιγμένων συστημάτων πρόωσης και η αναβάθμιση των μηχανισμών πυροδότησης εκρηκτικών, συνέβαλαν στην αύξηση της απόδοσης των τορπιλών. Η στρατηγική αξία των τορπιλών κατέστη ιδιαίτερα εμφανής κατά τη διάρκεια των Παγκοσμίων Πολέμων, μέσω της χρήσης τους από υποβρύχια και αεροσκάφη, όπου διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στην έκβαση των ναυτικών επιχειρήσεων.

Στη σύγχρονη εποχή, οι τορπίλες έχουν εξελιχθεί σε κρίσιμα στρατηγικά όπλα, ενσωματώνοντας προηγμένες καινοτομίες που τις καθιστούν ιδιαίτερα αποτελεσματικές. Εξοπλίζονται με συστήματα σόναρ και ηλεκτρονικής καθοδήγησης, παρέχοντας εξαιρετική ακρίβεια και αξιοπιστία. Παράλληλα, χρησιμοποιούν εξελιγμένα συστήματα πρόωσης, όπως πυραυλικούς κινητήρες και ηλεκτρικούς κινητήρες, οι οποίοι τροφοδοτούνται από συσσωρευτές, επιτυγχάνοντας έτσι υψηλές ταχύτητες και μεγάλη εμβέλεια. Η διαρκής ανάπτυξη και εξέλιξη των τορπιλών αποτελεί βασικό στοιχείο για την ενίσχυση των δυνατοτήτων των σύγχρονων ναυτικών δυνάμεων.

Στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου θα πραγματοποιηθεί μια επισκόπηση των βασικών τμημάτων των τορπιλών και της ιστορικής τους εξέλιξης. Η ανάλυση θα καλύψει τόσο τις σταδιακές βελτιώσεις στη σχεδίαση και τη λειτουργία τους, καθώς και τις

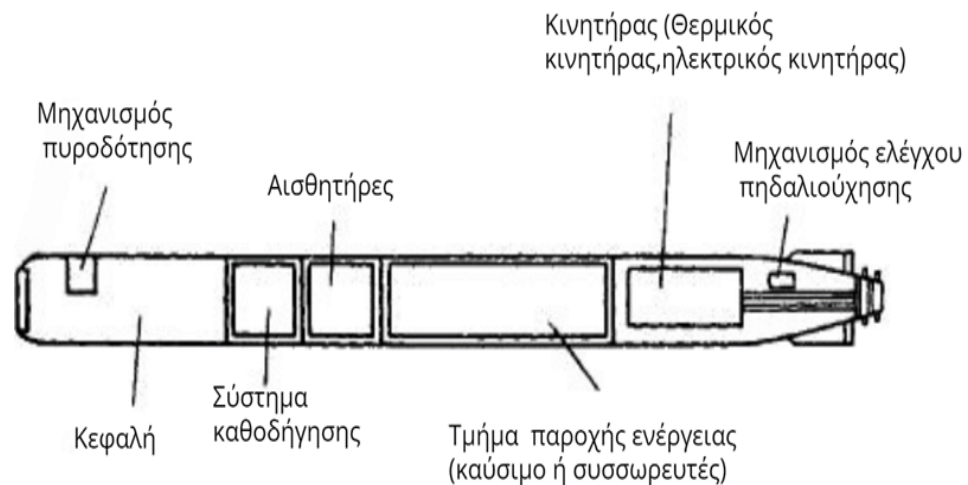
τεχνολογικές καινοτομίες που τις έχουν καταστήσει απαραίτητες για κάθε σύγχρονη ναυτική δύναμη.

3.2 Κατηγοριοποίηση τορπιλών

Οι τορπίλες κατατάσσονται ανάλογα με το βάρος τους σε δύο βασικές κατηγορίες: τις τορπίλες χαμηλού βάρους (Lightweight Torpedoes - LWT) και τις τορπίλες υψηλού βάρους (Heavyweight Torpedoes - HWT). Οι τορπίλες υψηλού βάρους χρησιμοποιούνται πρωτίστως από υποβρύχια για επιθέσεις εναντίον υποβρυχίων και πλοίων επιφανείας. Αντιθέτως, οι τορπίλες χαμηλού βάρους χρησιμοποιούνται κυρίως για ανθυποβρυχιακό πόλεμο και έχουν τη δυνατότητα εκτόξευσης τόσο από πλοία επιφανείας όσο και από αεροσκάφη [69].

3.3 Βασικά Τμήματα και Υποσυστήματα Τορπιλών

Οι τορπίλες είναι προηγμένα όπλα τα οποία διαθέτουν μεγάλη ακρίβεια και καταστρεπτική ικανότητα. Η δομή τους περιλαμβάνει διάφορα κρίσιμα τμήματα τα οποία συμβάλλουν στην αποτελεσματική εκτέλεση των αποστολών τους. Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστούν τα κυριότερα μέρη μιας τορπίλης, περιλαμβάνοντας το σύστημα πρόωσης, τα συστήματα καθοδήγησης και τους συσσωρευτές [69-71].



Εικόνα 3.1 : Βασικά τμήματα τορπίλης [70].

3.3.1 Εξωτερικό περίβλημα

Το εξωτερικό περίβλημα μιας торπίλης αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο το οποίο φιλοξενεί τα εσωτερικά της συστήματα και συμβάλλει στην υδροδυναμική της απόδοση. Είναι σχεδιασμένο για να αντέχει στις αυξημένες υποθαλάσσιες πιέσεις και τη διάβρωση. Η επιλογή ανθεκτικών υλικών, όπως το ατσάλι υψηλής ποιότητας, εξασφαλίζει τη μακροχρόνια αντοχή της торπίλης στο απαιτητικό αυτό περιβάλλον [69,71].

3.3.2 Κεφαλή μάχης

Η κεφαλή μάχης της торπίλης, η οποία φιλοξενεί τα εκρηκτικά, αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο, καθώς διαθέτει την ικανότητα να προκαλεί σημαντικές φθορές κατά την προσβολή του στόχου. Το μέγεθος της κεφαλής μάχης καθορίζεται από την κατηγορία της торπίλης και τον επιδιωκόμενο σκοπό χρήσης της. Παραδείγματος χάριν, торπίλες με χαμηλό βάρος, που χρησιμοποιούνται για ανθυποβρυχιακές αποστολές, συχνά φέρουν μικρότερες κεφαλές περίπου 40 κιλών, εν αντιθέσει με τις торπίλες υψηλού βάρους, που στοχεύουν μεγαλύτερα πλοία επιφανείας, οι οποίες ενδέχεται να φέρουν κεφαλές έως και 200 κιλά. Η σχεδίαση της κεφαλής μάχης είναι πολύπλοκη, καθώς η κεφαλή πρέπει να παραμένει σε σταθερή κατάσταση σε μια σειρά από συνθήκες, συμπεριλαμβανομένης της υψηλής πίεσης και των διαφορετικών θερμοκρασιών, μέχρι τη προσβολή του στόχου της [69,71-72].

3.3.3 Κεφαλή Ασκήσεων

Οι торπίλες είναι σχεδιασμένες με τη δυνατότητα να εξοπλίζονται είτε με κεφαλή μάχης για επιχειρησιακή χρήση είτε με ειδικές κεφαλές για την πραγματοποίηση ασκήσεων. Η κεφαλή ασκήσεων, η οποία δεν περιέχει εκρηκτικά, ενσωματώνει συστήματα τηλεμετρίας και συσκευές εντοπισμού για τη διευκόλυνση της ανάκτησης της торπίλης μετά την εκτόξευση. Αυτό επιτρέπει τη λεπτομερή αξιολόγηση της ακρίβειας και της συνολικής απόδοσης της βολής. Κατόπιν της αξιολόγησης της βολής, η торπίλη μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ασκήσεις, προσφέροντας μια οικονομική λύση για την εκπαίδευση των στελεχών [69,71-72].

3.3.4 Πρόωση Τορπιλών

Το σύστημα πρόωσης μιας τορπίλης αποτελείται από τρία βασικά τμήματα: την πηγή ενέργειας, τον κινητήρα και τον προωθητή [69]. Ως πηγή ενέργειας χρησιμοποιείται είτε κάποιο είδος καυσίμου (Κηροζίνη,Μεθανόλη,Αιθανόλη,Υπεροξειδίο του Υδρογόνου) είτε ένας ηλεκτρικός συσσωρευτής [69]. Ο κινητήρας, ανάλογα με την επιλεγμένη πηγή ενέργειας,ενδέχεται να είναι θερμικός ή ηλεκτρικός. Όσον αφορά τον προωθητή, αυτός μπορεί να λάβει τη μορφή μιας συμβατικής προπέλας ή ενός κινητήρα τύπου pumpjet, προσδίδοντας πρόωση στην τορπίλη [69].

Η ηλεκτρική πρόωση κατατάσσεται ως μία από τις κορυφαίες επιλογές για τις σύγχρονες τορπίλες, διαθέτοντας σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η αυξημένη επιχειρησιακή εμβέλεια και η μειωμένη ηχητική υπογραφή, συμβάλλοντας στην αύξηση της αποτελεσματικότητάς της στο πεδίο των επιχειρήσεων.

Αντιθέτως, τα θερμικά συστήματα πρόωσης αποτελούν την κύρια επιλογή για τορπίλες όπου απαιτούνται υψηλότερες ταχύτητες. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνολογίες, όπως κινητήρες εσωτερικής καύσης και αεροστροβίλους [69], εκμεταλλευόμενα καύσιμα όπως το Otto II για τη δημιουργία αερίων υψηλής πίεσης. Αυτά τα αέρια δρουν ως κινητήρια δύναμη, για την περιστροφή τουρμπινών ή εμβόλων, εξασφαλίζοντας την απαραίτητη ισχύ για την πρόωση της τορπίλης. Επίσης, υπάρχουν τορπίλες με πυραυλική πρόωση για εκτοξεύσεις από την επιφάνεια, χρησιμοποιώντας στερεά ή υγρά καύσιμα για την παραγωγή αερίων υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, αναπτύσσοντας υψηλές ταχύτητες.

Η επιλογή μεταξύ ηλεκτρικής και θερμικής πρόωσης, καθώς και ο τύπος του καυσίμου, εξαρτάται συχνά από παράμετρος όπως η επιθυμητή εμβέλεια, η ταχύτητα και οι ειδικές απαιτήσεις κάθε αποστολής [69,72].

3.3.5 Ουραίο τμήμα

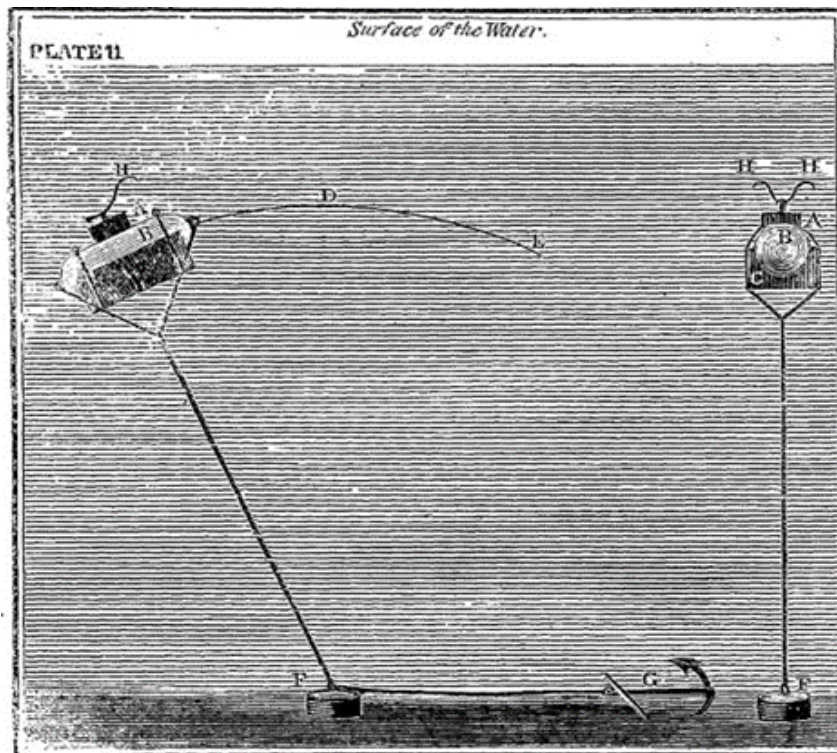
Το ουραίο τμήμα μιας τορπίλης,αποτελεί ένα κρίσιμο τμήμα το οποίο περιλαμβάνει επιφάνειες ελέγχου οι οποίες συμβάλουν στον έλεγχο της πορείας και της ευστάθειας της. Επίσης,στο τμήμα αυτό τοποθετείται και η προπέλα,η οποία έχει ως κύρια λειτουργία την παροχή της απαραίτητης πρόωσης για την κίνηση της τορπίλης [69-71].

3.4 Ιστορική ανασκόπηση τορπιλών 19ου αιώνα

Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί μια ιστορική ανασκόπηση της εξέλιξης των τορπιλών κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα. Θα αναλυθούν οι πρώτες κατασκευές και οι τεχνολογικές καινοτομίες που συνέβαλαν στη βελτίωση και στην εξέλιξη των τορπιλών.

3.4.1 Στατικές τορπίλες (1801)

Οι στατικές τορπίλες, αναπτύχθηκαν από τον εφευρέτη Robert Fulton το 1801, ήταν απλά εκρηκτικά μέσα (περίπου 20 λιβρών), τα οποία χρησιμοποιούνταν κυρίως για αμυντικούς σκοπούς. Συχνά στερεώνονταν στον βυθό της θάλασσας ή επέπλεαν στην επιφάνειά της, και ενεργοποιούνταν όταν ένα εχθρικό πλοίο έρχονταν σε φυσική επαφή. Η κύρια χρήση τους ήταν η προστασία των λιμανιών και η δημιουργία ζωνών αποκλεισμού. Οι στατικές τορπίλες χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά σε μεγάλη κλίμακα από τη ρωσική κυβέρνηση κατά τη διάρκεια του Κριμαϊκού Πολέμου (1854-1856) [73,74].



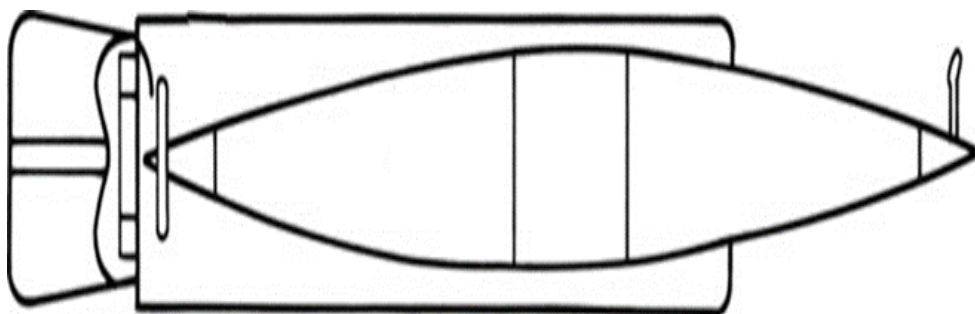
Εικόνα 3.2 : Στατικές τορπίλες [74].

3.4.2 Τορπίλες Whitehead (1866)

Η τορπίλη Whitehead, εφευρέθηκε από τον Robert Whitehead τη δεκαετία του 1860, και αποτέλεσε έναν κομβικό ορόσημο στην εξέλιξη των τορπιλών. Ο Whitehead ανέπτυξε την πρώτη αυτοκινούμενη τορπίλη, μια επαναστατική αλλαγή σε σχέση με τις προηγούμενες στατικές τορπίλες. Η καινοτομία της έγκειται στη χρήση συμπιεσμένου αέρα για την πρόωση, ενώ παράλληλα διέθετε την ικανότητα να διατηρεί ένα προκαθορισμένο βάθος ενώ κινούνταν προς το στόχο της. Αυτή η τορπίλη ήταν η πρώτη που επέτρεπε επιθέσεις από μεγάλη απόσταση, επηρεάζοντας τις τακτικές στη διεξαγωγή ναυτικών επιχειρήσεων. Οι καινοτομίες του Whitehead συνέβαλαν στην ανάπτυξη των σύγχρονων αυτοκινούμενων τορπιλών και έθεσαν τις βάσεις για τις προηγμένες τορπίλες που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη εποχή. Υπήρχαν δύο παραλλαγές της τορπίλης Whitehead με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους να παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα [73,75-76].

| Παραλλαγή | Μήκος | Διάμετρος | Βάρος | Εκρηκτικό Φορτίο | Επίδοση (Ταχύτητα/Εμβέλεια) |
|-------------|------------------|-----------|------------|---------------------|-----------------------------|
| Παραλλαγή 1 | 11 feet 7 inches | 14 inches | 346 pounds | 40 pounds guncotton | 8-10 knots / 200 yards |
| Παραλλαγή 2 | 14 feet | 16 inches | 650 pounds | 60 pounds guncotton | 8-10 knots / 200 yards |

Πίνακας 3.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά τορπίλης Whitehead [73,75-76].



Εικόνα 3.3 : Τορπίλες Whitehead [75]

3.4.3 Τορπίλη Schwartzkopff

Η τορπίλη Schwartzkopff, η οποία αναπτύχθηκε στα τέλη του 19ου αιώνα, εισήγαγε σημαντικές βελτιώσεις στην τεχνολογία των τορπιλών. Με τη χρήση ενός βελτιωμένου συστήματος πρόωσης συμπιεσμένου αέρα, η τορπίλη Schwartzkopff κατάφερε να ξεπεράσει τις επιδόσεις των προηγούμενων τορπιλών, όπως η Whitehead, σε ταχύτητα και εμβέλεια. Επιπλέον, η επιλογή του μπρούντζου ως υλικού κατασκευής, αντί του παραδοσιακού χάλυβα, προσέφερε βελτιωμένη αντοχή στη διάβρωση, ενώ η υδροδυναμική σχεδίαση της τορπίλης βελτίωσε την ευστάθεια και τον έλεγχο κατά την πλεύση. Αυτές οι βελτιώσεις αύξησαν σημαντικά την αποτελεσματικότητα της τορπίλης [73,76].

| Χαρακτηριστικά | Τιμή |
|------------------|-------------------|
| Βάρος | 616 pounds |
| Μήκος | 14 feet, 9 inches |
| Διάμετρος | 14 inches |
| Εμβέλεια | 220-440 yards |
| Τύπος εκρηκτικών | Guncotton |
| Βάρος Κεφαλής | 44 pounds |
| Μέγιστη Ταχύτητα | 22–25 knots |

Πίνακας 3.2 : Τεχνικά χαρακτηριστικά τορπίλης Schwartzkopff [73,76].

3.4.4 Μη Καθοδηγούμενες Τορπίλες (Unguided)

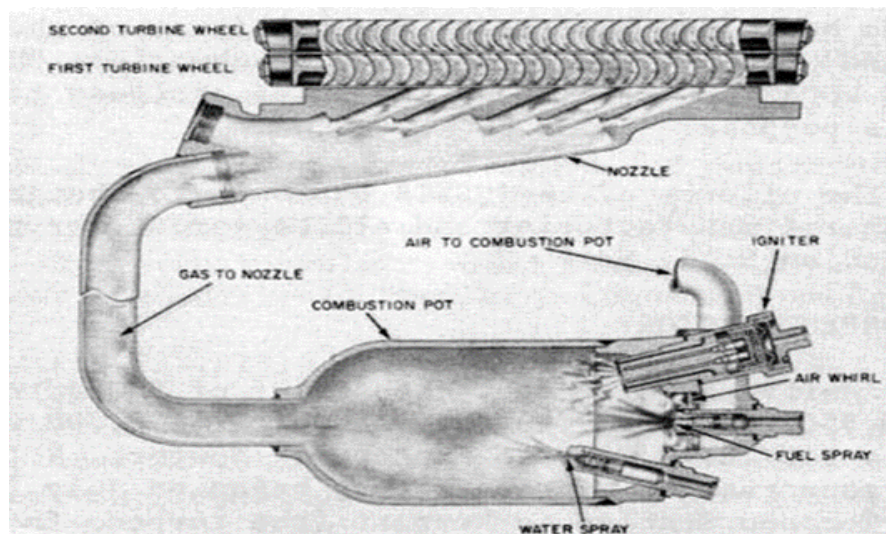
Οι τορπίλες Whitehead και Schwartzkopff, όπως και οι υπόλοιπες τορπίλες αυτής της περιόδου, ήταν μη καθοδηγούμενες και συχνά χαρακτηρίζονται ως "straight-running". Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακριβή στόχευση πριν από την εκτόξευση, καθώς δεν διαθέτουν τη δυνατότητα να διορθώσουν την πορεία τους ή να ανταποκριθούν σε αλλαγή της θέσης του στόχου. Η αδυναμία διόρθωσης της πορείας τους τις καθιστά λιγότερο αποτελεσματικές σε σύγκριση με τις τορπίλες οι οποίες χρησιμοποιούν σύστημα καθοδήγησης [73,76].

3.5 Η εξέλιξη των τορπιλών– Α' Παγκοσμιος Πόλεμος

Στις αρχές του 20ού αιώνα και έως την έναρξη του Α' Παγκοσμίου Πολέμου, η τεχνολογία των τορπιλών αναπτύχθηκε σημαντικά. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι τορπίλες εξελίχθηκαν σε σύνθετα όπλα μέσω μιας σειράς τεχνολογικών καινοτομιών. Σημαντικά επιτεύγματα περιλαμβάνουν την ανάπτυξη νέων συστημάτων πρόωσης, την εισαγωγή προηγμένων συστημάτων καθοδήγησης και τη χρήση πιο ισχυρών εκρηκτικών, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα των τορπιλών. Επίσης, κατά την περίοδο αυτή, η εφαρμογή των τορπιλών δεν περιορίστηκε αποκλειστικά στα πλοία επιφανείας και τα υποβρύχια αλλά επεκτάθηκε και στην αεροπορία, προσδίδοντας μια νέα διάσταση στη διεξαγωγή πολεμικών επιχειρήσεων.

3.5.1 Ανάπτυξη νέων συστημάτων πρόωσης

Στις αρχές του 20ού αιώνα, η τεχνολογία των τορπιλών εξελίχθηκε σημαντικά, ιδιαίτερα στον τομέα της πρόωσης. Η αντικατάσταση των συστημάτων πρόωσης που χρησιμοποιούσαν συμπιεσμένο αέρα από κινητήρες wet heater, οδήγησε στην αύξηση της εμβέλειας και τις ταχύτητας των τορπιλών. Σε ένα σύστημα πρόωσης τορπίλης wet heater, το καύσιμο, συνήθως κηροζίνη, αναμιγνύεται με νερό. Το μείγμα στη συνέχεια αναφλέγεται σε έναν θάλαμο καύσης, όπου η θερμότητα από το καύσιμο που έχει αναφλεγεί, βράζει το νερό δημιουργώντας ατμό υψηλής πίεσης. Ο ατμός που παράγεται στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να κινήσει την τουρμπίνα της τορπίλης, η οποία, με τη σειρά της, κινεί την προπέλα, προσφέροντας την απαιτούμενη ισχύ για την πρόωση της. Αυτή η εξέλιξη στα συστήματα πρόωσης ήταν καθοριστική για την ενίσχυση της επιχειρησιακής απόδοσης των τορπιλών [75].



Εικόνα 3.4 : Σύστημα πρόωσης wet heater [75].

3.5.2 Σύστημα καθοδήγησης με γυροσκόπια

Τα γυροσκόπια στα συστήματα καθοδήγησης των τορπιλών κατά τη διάρκεια του Α' Παγκόσμιου Πολέμου ήταν καθοριστικά για τη διατήρηση της σταθερής και ακριβείς πορείας των τορπιλών μετά την εκτόξευσή τους. Η λειτουργία τους βασίζεται στην Αρχή Διατήρησης της Στροφορμής και της μετάπτωσης. Τα γυροσκόπια στις τορπίλες αποτελούνταν από έναν ρότορα που περιστρεφόταν με υψηλή ταχύτητα, τοποθετημένο σε έναν άξονα που του επέτρεπε να κινείται σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Όταν μια εξωτερική δύναμη ασκείται στο περιστρεφόμενο σύστημα, προκαλείται το φαινόμενο της μετάπτωσης, επιφέροντας την αλλαγή στην κατεύθυνση του άξονα περιστροφής του γυροσκοπίου. Σε μια τορπίλη, το γυροσκόπιο συνδεόταν με το σύστημα πηδαλιούχησης. Καθώς η τορπίλη κινούνταν, οποιαδήποτε απόκλιση από την προβλεπόμενη πορεία της θα προκαλούσε την κλίση του γυροσκοπίου, ενεργοποιώντας έναν μηχανισμό ο οποίος διόρθωνε την κλίση των πηδαλίων. Αυτή η διορθωτική ενέργεια επανέφερε την τορπίλη στην προβλεπόμενη πορεία της, αντιμετωπίζοντας τις αποκλίσεις λόγω των ρευμάτων του νερού ή την αρχική γωνία εκτόξευσης. Έτσι, ο ρόλος του γυροσκοπίου ήταν κρίσιμος για τη διατήρηση μιας ευθείας και προβλέψιμης τροχιάς, αυξάνοντας σημαντικά την ακρίβεια και την αξιοπιστία των τορπιλών [73,77].

3.5.3 Βελτίωση κεφαλών μάχης

Ένα ακόμη τεχνολογικό επίτευγμα στις αρχές του 20ού αιώνα αποτέλεσε η ανάπτυξη πιο αξιόπιστων και ισχυρότερων εκρηκτικών υλών, τα οποία, σε συνδυασμό με τις τεχνολογικές προόδους στους μηχανισμούς πυροδότησης, αύξησαν την καταστρεπτική ισχύ των τορπιλών. Τα εκρηκτικά που χρησιμοποιούνταν στις κεφαλές των τορπιλών περιελάμβαναν διάφορες ουσίες, μερικές από τις πιο συνηθισμένες είναι οι ακόλουθες:

- Τρινιτροτολουόλιο (TNT): Αποτελέσε μία από τις πιο διαδεδομένες εκρηκτικές ουσίες και χρησιμοποιούνταν ευρέως λόγω της σταθερότητάς του και της ισχυρής εκρηκτικής του δύναμης.
- Πικρικό Οξύ (Lyddite): Αυτό το εκρηκτικό χρησιμοποιήθηκε σε τορπίλες, ιδίως στις αρχές του 20ού αιώνα.
- Guncotton: Μια ακόμη εκρηκτική ουσία που χρησιμοποιήθηκε σε ορισμένες τορπίλες, ήταν το Guncotton, γνωστό για την ικανότητά του να προκαλεί σοβαρές καταστροφές [73,76].

3.5.4 Ανάπτυξη μηχανισμού ελέγχου βάθους

Στις αρχές του 20ού αιώνα, η δυνατότητα ελέγχου του βάθους στο οποίο κινείται μια torpille βελτιώθηκε σημαντικά με την εισαγωγή εξελιγμένων μηχανισμών ελέγχου βάθους. Αυτοί οι μηχανισμοί βασίζονταν κατά κύριο λόγο σε συστήματα υδροστατικής πίεσης, τα οποία διέθεταν αισθητήρες για την ανίχνευση της πίεσης του νερού σε διαφορετικά βάθη. Αυτή η τεχνολογία επέτρεπε την προσαρμογή του συστήματος πρόωσης και των επιφανειών ελέγχου της torpilles, ώστε να μπορεί να διατηρηθεί σε ένα σταθερό και επιθυμητό βάθος, ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητά της [73,76].

Στους Πίνακες 3.3 και 3.4 που παρατίθενται στη συνέχεια, παρουσιάζονται torpilles της περιόδου του Α' Παγκοσμίου Πολέμου. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται torpilles που εκτοξεύονταν από ναυτικά μέσα όπως πλοία επιφανείας και υποβρύχια, ενώ ο Πίνακας 3.4 εστιάζει σε torpilles που εκτοξεύονταν από αεροσκάφη.

| Τorpille | C/03 D | Type 44 (No. 2) | Bliss-Leavitt 18" Mark 7 | M19V |
|-----------------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|
| Χώρα προέλευσης | ΓΕΡΜΑΝΙΑ | ΙΑΠΩΝΙΑ | ΗΠΑ | ΓΑΛΛΙΑ |
| Πλατφόρμα εκτόξευσης | Πλοία επιφανείας | Πλοία επιφανείας | Υποβρύχια | Πλοία επιφανείας |
| Έτος Σχεδίασης | 1903 | 1910 | 1910 | 1919 |
| Έτος Παραλαβής | 1905 | 1911 | 1912 | 1921 |
| Βάρος | 1,422 lbs. (675 kg) | 1,653 lbs. (750 kg) | 1,588 lbs. (720 kg) | 3,053 lbs. (1,385 kg) |
| Συνολικό Μήκος | 203 in (5.150 m) | 212 in (5.39 m) | 204 in (5.182 m) | 21 ft. 8 in (6.600 m) |
| Εκρηκτικό Φορτίο | 388 lbs. (176 kg) TNT | 243 lbs. (110 kg) Picric Acid or Shimose | 205 lbs. (93 kg) TNT | 525 lbs. (238 kg) picric acid |
| Εμβέλεια / Ταχύτητα | 2,020 yards (1,850 m) / 31 knots | 4,400 yards (4,000 m) / 35 knots | 4,000 yards (3,650 m) / 32 knots | 2,200 yards (2,000 m) / 43 knots |
| Πηγή Ενέργειας | Wet Heater | Kerosene-air fresh-water | Wet-Heater | Kerosene Wet-heater |

Πίνακας 3.3 : Τεχνικά χαρακτηριστικά torpillon Α' Παγκοσμίου Πολέμου [76,78].

| Τορπίλη | Bliss-Leavitt 18" Mark 7 Type D | Mark VII |
|----------------------|------------------------------------|--|
| Χώρα προέλευσης | ΗΠΑ | ΑΓΓΛΙΑ |
| Πλατφόρμα εκτόξευσης | Αεροσκάφη | Υδροπλάνα |
| Έτος Σχεδίασης | 1916 | 1907 |
| Έτος Παραλαβής | 1917 | 1910 |
| Βάρος | 1,036 lbs. (470 kg) | - |
| Συνολικό Μήκος | 120 in (3.048 m) | - |
| Εκρηκτικό Φορτίο | 200 lbs. (90 kg) TNT | 320 lbs. (145 kg) TNT |
| Εμβέλεια / Ταχύτητα | 2,000 yards (1,800 m) / 35 knots | 6,000 - 7,000 yards (4,570 - 7,650 m) / 30 knots |
| Πηγή Ενέργειας | Wet-heater | Wet-heater |

Πίνακας 3.4 : Τεχνικά χαρακτηριστικά τορπιλών Α' Παγκοσμίου Πολέμου [76,78].

3.6 Η εξέλιξη των τορπιλών Β' Παγκόσμιος πόλεμος

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, ο τομέας των τορπιλών εξελίχθηκε σημαντικά με την ανάπτυξη νέων προηγμένων συστημάτων. Την περίοδο αυτή παρουσιάστηκαν καινοτομίες όπως το σύστημα καθοδήγησης acoustic homing [73], η ηλεκτρική πρόωση [69] και η μαγνητική πυροδότηση [76], ενισχύοντας σημαντικά την εμβέλεια, την ταχύτητα, και την αποτελεσματικότητα των τορπιλών. Αυτές οι καινοτομίες ήταν καθοριστικές στην εξέλιξη των τορπιλών και επηρέασαν σημαντικά την έκβαση των ναυτικών επιχειρήσεων.

3.6.1 Ηλεκτρική Πρόωση και Συσσωρευτές

Η εισαγωγή της ηλεκτρικής πρόωσης σε συνδυασμό με την ανάπτυξη πιο αποδοτικών συσσωρευτών μολύβδου-οξέος αποτέλεσε μια σημαντική τεχνολογική εξέλιξη. Οι τορπίλες που ενσωμάτωσαν ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης διέθεταν αυξημένη εμβέλεια ενώ παράλληλα παρήγαγαν χαμηλότερα επίπεδα θορύβου κατά τη

λειτουργία τους. Επιπρόσθετα, αυτές οι τορπίλες, σε σύγκριση με τις παλαιότερες που χρησιμοποιούσαν συμπιεσμένο αέρα, δεν παρήγαγαν ορατά ίχνη (όπως φυσαλίδες αέρα στην επιφάνεια του νερού), αυξάνοντας έτσι τη δυσκολία εντοπισμού τους [69,73].

3.6.2 Κινητήρες ‘Burner cycle’

Η πρόωση με κινητήρα "burner cycle" [78] αποτέλεσε μια καινοτόμο τεχνολογία όσον αφορά την πρόωση των τορπιλών. Το σύστημα αυτό, το οποίο είναι κλειστού τύπου, περιλαμβάνει το καύσιμο (κηροζίνη ή αιθανόλη) και τον οξειδωτή (υπεροξείδιο του υδρογόνου) σε δεξαμενές, καθιστώντας την καύση εφικτή χωρίς την ανάγκη για πρόσβαση σε εξωτερικό οξυγόνο. Τα παραγόμενα αέρια από την καύση εκτονώνονται παρέχοντας την απαραίτητη ισχύ για την κίνησή της τορπίλης. Το σύστημα αυτό διαθέτει υψηλή ενεργειακή απόδοση, οδηγώντας σε αξιοσημείωτη βελτίωση της επιχειρησιακής απόδοσης των τορπιλών, αυξάνοντας σημαντικά την ταχύτητα και την εμβέλεια τους [73,78].

3.6.3 Σύστημα Προηγμένης Καθοδήγησης

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η ανάπτυξη των acoustic homing τορπιλών από τις Ηνωμένες Πολιτείες και τη Γερμανία αποτέλεσε μια σημαντική καινοτομία. Το νέο σύστημα καθοδήγησης χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς σε τορπίλες όπως η γερμανική τορπίλη G7e/T4 και η αμερικανική τορπίλη Mark 24. Οι τορπίλες αυτές εξοπλίζονταν με acoustic transducers και χρησιμοποιούσαν έναν συνδυασμό παθητικού και ενεργητικού σόναρ για τον εντοπισμό των στόχων. Αρχικά χρησιμοποιούσαν παθητικό σόναρ για να ανιχνεύσουν χαρακτηριστικούς θορύβους που εκπέμπονταν από τους στόχους, όπως οι ήχοι του κινητήρα ή των προπελών. Κατά την προσέγγιση του στόχου, πραγματοποιούσαν μετάβαση στη χρήση ενεργητικού σόναρ. Μέσω της εκπομπής παλμών σόναρ και της ανάλυσης των αντανακλάσεων των παλμών αυτών, κατάφερναν να προσδιορίσουν με ακρίβεια τη θέση του στόχου [73].

Ένα ακόμη προηγμένο σύστημα καθοδήγησης που αναπτύχθηκε αυτή την περίοδο ήταν το σύστημα Pattern-Running. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η Γερμανία ανέπτυξε προηγμένες τορπίλες με την ικανότητα να ακολουθούν προκαθορισμένες διαδρομές, σηματοδοτώντας μια σημαντική καινοτομία στην τεχνολογία των τορπιλών. Αυτές οι τορπίλες εκτελούσαν ένα προγραμματισμένο μοτίβο κινήσεων, όπως ένας κύκλος ή εκτελώντας μια εναλλασσόμενη πορεία (ζιγκ-

ζαγκ) . Αυτό το χαρακτηριστικό είχε ως κύριο στόχο την αύξηση της πιθανότητας πλήγματος ενός στόχου σε ένα κομβίο. Η αρχική έκδοση, γνωστή ως FaT [73], κινούνταν ευθεία μετά την εκτόξευση και στη συνέχεια ακολουθούσε ένα μοτίβο σάρωσης κατά μήκος της αρχικής τροχιάς. Η πιο περίπλοκη έκδοση, γνωστή ως LuT [73], είχε τη δυνατότητα να αλλάξει κατεύθυνση μετά την εκτόξευση και στη συνέχεια να εκτελέσει ένα πιο περίτεχνο μοτίβο κινήσεων [73].

3.6.4 Η Εξέλιξη των Κεφαλών Μάχης

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η τεχνολογία των κεφαλών μάχης βελτιώθηκε σημαντικά. Η ανάπτυξη νέων, πιο ισχυρών εκρηκτικών υλών, όπως το Torpex (το οποίο αποτελείται από Trinitrotoluene (TNT), Cyclotrimethylenetrinitramine (RDX) και σκόνη αλουμινίου) και η χρήση πιο αποτελεσματικών μηχανισμών πυροδότησης, αύξησε σημαντικά την καταστρεπτική ισχύ και την αποτελεσματικότητα των τορπιλών. Πιο συγκεκριμένα, η μαγνητική πυροδότηση αποτέλεσε μια σημαντική καινοτομία καθώς επέτρεπε την πυροδότηση της τορπίλης ενώ αυτή βρισκόταν κοντά στον στόχο χωρίς άμεση επαφή [76,78].

3.6.5 Η Χρήση Αεροπορικών Τορπιλών στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, σημειώθηκαν σημαντικές βελτιώσεις στην τεχνολογία των τορπιλών οι οποίες εκτοξεύονταν από αεροσκάφη. Αυτές οι βελτιώσεις περιλάμβαναν καλύτερη αεροδυναμική για πιο αποτελεσματική εκτόξευση και βελτιωμένους μηχανισμούς για τον έλεγχο του βάθους και του μηχανισμού πυροδότησης. Οι τορπίλες αυτές μπορούσαν να ρυθμιστούν σε συγκεκριμένο βάθος πλεύσης πριν εισέλθουν στο νερό, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητά τους εναντίον εχθρικών πλοίων. Ο ρόλος αυτών των τορπιλών στις ναυτικές επιχειρήσεις ήταν καθοριστικός, καθώς χρησιμοποιούνταν μαζικά από αεροσκάφη που επιχειρούσαν από αεροπλανοφόρα [78-80].

Στους Πίνακες 3.5 και 3.6 που ακολουθούν στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά σημαντικών τορπιλών της περιόδου του Β' Παγκοσμίου Πολέμου.

| Τορτίλη | Type 95 Model 2 | G7e T4 | W 270 'F' | Mark 18 |
|----------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Χώρα προέλευσης | ΙΑΠΩΝΙΑ | ΓΕΡΜΑΝΙΑ | ΙΤΑΛΙΑ | ΗΠΑ |
| Πλατφόρμα Εκτόξευσης | Υποβρύχια | Υποβρύχια | Υποβρύχια | Υποβρύχια |
| Έτος Σχεδίασης | 1943 | 1940 | 1935 | 1943 |
| Έτος Παραλαβής | 1944 | 1943 | 1939 | 1944 |
| Βάρος | 3,814 lbs. (1,730 kg) | 3,080 lbs. (1,937 kg) | 3,417 lbs. (1,550 kg) | 3,041 lbs. (1,379 kg) |
| Συνολικό Μήκος | 281 in (7.150 m) | 23 ft. 7 in. (7.186 m) | 21 ft. 4 in. (6.500 m) | 20 ft 6 in (6.225 m) |
| Εκρηκτικό Φορτίο | 1,213 lbs. (550 kg) Type 97 | 440 lbs. (200 kg) Hexanite | 551 lbs. (250 kg) | 600 lbs. (272 kg) TPX |
| Εμβέλεια / Ταχύτητα | 8,200 yards (7,500 m) / 45-47 knots | 8,200 yards (7,500 m) / 20 knots | 3,300 yards (3,000 m) / 43 knots | 4,000 yards (3,650 m) / 29 knots |
| Πηγή Ενέργειας | Kerosene-oxygen wet-heater | Lead-acid batteries | Wet-heater | Lead acid Electric Battery |

Πίνακας 3.5 : Τεχνικά χαρακτηριστικά τορπιλών Β' Παγκοσμίου Πολέμου [76,78].

| Τορτίλη | Mark XV | Mark 13 | Type 91 Mod 2 | F5W |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Χώρα προέλευσης | ΑΓΓΛΙΑ | ΗΠΑ | ΙΑΠΩΝΙΑ | ΙΤΑΛΙΑ-ΓΕΡΜΑΝΙΑ |
| Πλατφόρμα Εκτόξευσης | Αεροσκάφη | Αεροσκάφη | Αεροσκάφη | Αεροσκάφη |
| Έτος Σχεδίασης | 1942 | 1930 | 1940 | - |
| Έτος Παραλαβής | 1943 | 1938 | 1941 | - |
| Βάρος | 1,801 lbs. (817 kg) | 1,949 lbs. (884 kg) | 1,841 lbs. (935 kg) | 1,995 lbs. (905 kg) |
| Συνολικό Μήκος | 17 ft 2.75 in (5.251 m) | 13 ft. 5 in (4.089 m) | 216 in (5.486 m) | 17 ft. 11 in. (5.460 m) |
| Εκρηκτικό Φορτίο | 545 lbs. (247 kg) Torpex | 392 lbs. (178 kg) TNT | 452 lbs. (205 kg) | 441 lbs. (200 kg) |
| Εμβέλεια / Ταχύτητα | 2,500 yards (2,290 m) / 40 knots | 5,700 yards (5,210 m) / 30 knots | 2,200 yards (2,000 m) / 41-43 knots | 3,300 yards (3,000 m) / 40 knots |
| Πηγή Ενέργειας | Burner-cycle | Wet-heater steam turbine | Kerosene-air wet-heater | Wet-heater |

Πίνακας 3.6 : Τεχνικά χαρακτηριστικά τορπιλών Β' Παγκοσμίου Πολέμου [76,78].

3.7 Σύγχρονες τορπίλες

Στη σύγχρονη εποχή, οι τορπίλες αποτελούν ένα από τα κυριότερα και πιο εξελιγμένα οπτικά μέσα. Η τεχνολογική τους πρόοδος επικεντρώνεται σε σημαντικές βελτιώσεις όπως η εξέλιξη νέων θερμικών συστημάτων πρόωσης, η χρήση πιο αποδοτικών συστημάτων καθοδήγησης και η ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης μέσω της χρήσης προηγμένων συσσωρευτών. Αυτές οι καινοτομίες ενισχύουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία των σύγχρονων τορπιλών.

3.7.1 Βελτίωση θερμικών συστημάτων πρόωσης

Τα σύγχρονα συστήματα πρόωσης στις τορπίλες έχουν εξελιχθεί σημαντικά, ενσωματώνοντας προηγμένες τεχνολογίες για την αύξηση της ταχύτητας, της εμβέλειας και τη μείωση του παραγόμενου θορύβου. Πιο συγκεκριμένα, συστήματα όπως η πυραυλική πρόωση, που χρησιμοποιούνται στις τορπίλες, δίνουν έμφαση στην παροχή ενός υψηλού λόγου ώσης προς βάρος, επιτρέποντας στην τορπίλη να επιτύχει πολύ υψηλή ταχύτητα [72]. Επίσης, ένα ακόμη εξελιγμένο σύστημα πρόωσης που χρησιμοποιείται στις σύγχρονες τορπίλες είναι το σύστημα πρόωσης τύπου rump jet [73,81], το οποίο δεν διαθέτει προπέλα. Λόγω της έλλειψης προπέλας, ο παραγόμενος θόρυβος είναι ελάχιστος σε σύγκριση με τα συστήματα πρόωσης που χρησιμοποιούν τις παραδοσιακές προπέλες, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα ανίχνευσης από εχθρικά σόναρ [73,81].

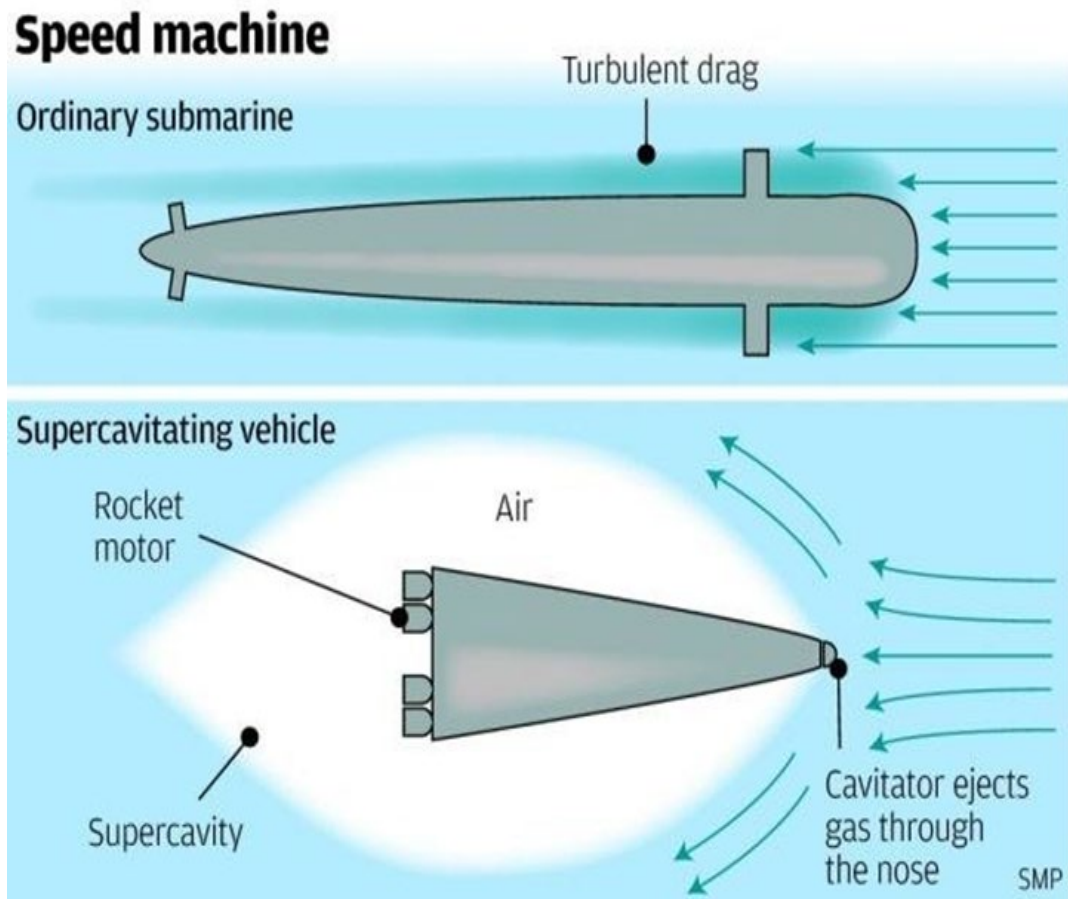
Παράλληλα, η ανάπτυξη και χρήση νέων τύπων καυσίμων, όπως το Otto fuel II, έχει ενισχύσει αισθητά την εμβέλεια και την ταχύτητα των τορπιλών. Η σύνθεση του Otto fuel II προσδίδει ξεχωριστά χαρακτηριστικά, όπως είναι η σταθερότητα, η απουσία πτητικότητας και η δυνατότητα ανάφλεξης χωρίς την ανάγκη εξωτερικής πηγής οξυγόνου. Αυτές οι ιδιότητες το καθιστούν εξαιρετικά αποδοτικό για εφαρμογές όπως οι τορπίλες [73,78].

| Χημική σύνθεση Otto Fuel II | |
|-----------------------------------|---------|
| Συστατικό | Ποσοστό |
| Propylene Glycol Dinitrate (PGDN) | 76% |
| 2-Nitrodiphenylamine | 1.5% |
| Dibutyl Sebacate | 22.5% |

Πίνακας 3.7 : Χημική σύνθεση Otto Fuel II [73,78].

3.7.2 Ανάπτυξη νέων τύπων τορπιλών

Μετά τη λήξη του Β' Παγκόσμιου Πολέμου, αναπτύχθηκαν νέες τορπίλες με ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά και επιχειρησιακές δυνατότητες. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα αποτελεί η τορπίλη VA-111 Shkval, η οποία χάρη στην πυραυλική πρόωση και στο φαινόμενο του supercavitation [82], κατέστη δυνατόν να επιτευχθούν ταχύτητες άνω των 200 κόμβων (περίπου 370 χιλιόμετρα/ώρα). Το supercavitation επιτρέπει στις τορπίλες να κινούνται με εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες, δημιουργώντας φουσαλίδες αέρα γύρω από το περίβλημά τους. Αυτό το στρώμα αέρα που σχηματίζεται μειώνει την τριβή ανάμεσα στην τορπίλη και το νερό, επιτρέποντας στις τορπίλες να κινηθούν με ταχύτητες που διαφορετικά θα ήταν αδύνατο να επιτευχθούν λόγω της αυξημένης αντίστασης [73,82].



Εικόνα 3.5 : Το φαινόμενο του Supercavitation σε υποβρύχια οχήματα [82].

3.7.3 Σύστημα καθοδήγησης τορπιλών μέσω καλωδίου

Η καθοδήγηση μέσω καλωδίου (wire guided) στις τορπίλες αποτελεί μια κρίσιμη τεχνολογία που επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο και την επικοινωνία μεταξύ της τορπίλης και της πλατφόρμας εκτόξευσης, είτε πρόκειται για πλοίο είτε για υποβρύχιο. Σε αυτό το σύστημα, η τορπίλη συνδέεται φυσικά με το σκάφος μέσω ενός καλωδίου για τη μετάδοση δεδομένων. Αυτή η μέθοδος καθοδήγησης προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα όσον αφορά την ακρίβεια. Επιτρέπει στον χειριστή να προσαρμόζει σε πραγματικό χρόνο την τροχιά της τορπίλης με βάση τις δυναμικές συνθήκες του υποθαλάσσιου περιβάλλοντος και τις κινήσεις του στόχου, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα μιας επιτυχούς προσβολής [73,83].

3.7.4 Σύστημα καθοδήγησης Wake homing

Μια τορπίλη εφοδιασμένη με αυτό το σύστημα, κατά την εκτόξευση, ανιχνεύει και ακολουθεί το ίχνος του στόχου. Με τη βοήθεια του σονάρ, εντοπίζει αλλαγές στη σύσταση του νερού προκαλούμενες από την κίνηση του στόχου, όπως είναι οι μικροσκοπικές φυσαλίδες αέρα. Εκμεταλλευόμενη αυτές τις διακυμάνσεις, η τορπίλη προσαρμόζει την πορεία της ακολουθώντας μια τροχιά σε σχήμα ζιγκ-ζαγκ εντός του ίχνους, προσεγγίζοντας εν τέλει τον στόχο από την πλώρη ώστε να προκαλέσει μέγιστη ζημιά στα συστήματα πρόωσης και πλοήγησης του σκάφους [73].

3.7.5 Ανάπτυξη νέων συσσωρευτών

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος αποτελούσαν την κύρια πηγή ενέργειας για το σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης των τορπιλών. Παρόλο που ήταν αποτελεσματικοί για την εποχή, διέθεταν σχετικά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, περιορίζοντας την εμβέλειά τους. Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, σημειώθηκαν σημαντικές πρόοδοι στην τεχνολογία των συσσωρευτών, με την εισαγωγή πιο προηγμένων πηγών ενέργειας. Συσσωρευτές όπως οι silver-zinc, συσσωρευτές ενεργοποιούμενοι με θαλασσινό νερό και συσσωρευτές ιόντων λιθίου ξεχωρίζουν για την αυξημένη ενεργειακή τους πυκνότητα και απόδοση. Η χρήση αυτών των νέων συσσωρευτών έχει συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση των επιδόσεων των σύγχρονων τορπιλών, προσφέροντας σημαντική αύξηση στην εμβέλεια και τη διάρκεια για την οποία μπορούν να αποθηκευτούν αυτές οι τορπίλες χωρίς συντήρηση [69].

3.7.6 Πυρηνικές Κεφαλές Τορπιλών

Κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, σημειώθηκαν σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία των τορπιλών, ιδιαίτερα με την ανάπτυξη πυρηνικών κεφαλών από το Πολεμικό Ναυτικό των Ηνωμένων Πολιτειών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη της τορπίλης Mark 45, η οποία φέρει πυρηνική κεφαλή, προσφέροντας μεγαλύτερη καταστρεπτική ισχύ σε σύγκριση με τις συμβατικές κεφαλές [73].

3.7.7 Εκτόξευση τορπιλών από σύγχρονα υποβρύχια

Η διαδικασία εκτόξευσης μιας τορπίλης από ένα υποβρύχιο αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, η οποία ξεκινά με την εισαγωγή της τορπίλης στον τορπιλοσωλήνα. Στην περίπτωση που η τορπίλη είναι καθοδηγούμενη μέσω καλωδίου (wire-guided), πραγματοποιούνται οι αναγκαίες ηλεκτρικές συνδέσεις για τη μετάδοση δεδομένων και την επικοινωνία μεταξύ της τορπίλης και του υποβρυχίου. Στη συνέχεια, ο τορπιλοσωλήνας πλημμυρίζει με θαλασσινό νερό για να εξισορροπηθεί η πίεση εσωτερικά και εξωτερικά του, αποτρέποντας φθορές στην τορπίλη λόγω της διαφοράς πίεσης. Όταν ολοκληρωθεί η προετοιμασία, η εξωτερική πόρτα του τορπιλοσωλήνα, γνωστή ως muzzle door, ανοίγει, και η τορπίλη είναι πλέον έτοιμη για εκτόξευση. Το αρχικό στάδιο της εκτόξευσης επιτυγχάνεται είτε μέσω ενός υδραυλικού συστήματος που χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό υπό πίεση (για τορπίλες με θερμικούς κινητήρες), είτε μέσω του δικού τους συστήματος πρόωσης, για τις τορπίλες με ηλεκτρική πρόωση. Για τις καθοδηγούμενες τορπίλες μέσω καλωδίου (wire guided), ένα λεπτό καλώδιο "ξετυλίγεται" από την τορπίλη, διατηρώντας τη σύνδεση με το υποβρύχιο, επιτρέποντας την καθοδήγηση και τον έλεγχο της πορείας της τορπίλης προς τον στόχο της [1].

3.7.8 Εκπαιδευτικές βολές

Οι σύγχρονες ναυτικές δυνάμεις, με στόχο την ενίσχυση των δεξιοτήτων των πληρωμάτων και τη διατήρησή τους σε υψηλό επιχειρησιακό επίπεδο, προβαίνουν σε εκπαιδευτικές βολές χρησιμοποιώντας τορπίλες με εκπαιδευτικές κεφαλές (δεν περιέχουν εκρηκτικά). Μέσω της διεξαγωγής ασκήσεων που προσομοιώνουν πραγματικές συνθήκες, εξασφαλίζεται η αποτελεσματική εκπαίδευση και ετοιμότητα των πληρωμάτων, ενισχύοντας τις επιχειρησιακές τους ικανότητες [69]. Οι τορπίλες που χρησιμοποιούνται για εκπαιδευτικές βολές πρέπει να πληρούν τις εξής προϋποθέσεις:

- 1 Πρέπει να εξοπλίζονται με σύστημα τηλεμετρίας και κατάλληλο σύστημα καταγραφής διαφόρων παραμέτρων.
- 2 Οφείλουν να διαθέτουν την ίδια εμβέλεια και ταχύτητα με τις τορπίλες που χρησιμοποιούνται σε πραγματικές συνθήκες, προσομοιώνοντας έτσι ακριβώς τις επιχειρησιακές συνθήκες.
- 3 Κατά την ολοκλήρωση της βολής, οι τορπίλες θα πρέπει να έχουν την ικανότητα ανάδυσης για την επιτυχή ανάκτηση τους. Για την επίτευξη της ανάδυσης των τορπιλών μετά τις εκπαιδευτικές βολές, μια συνηθισμένη πρακτική είναι η χρήση κατάλληλης κεφαλής η οποία περιέχει νερό, το οποίο ισούται με το βάρος των εκρηκτικών, για τη διατήρηση του κέντρου βάρους της τορπίλης. Κατά την ολοκλήρωση της βολής, το νερό αυτό αποβάλλεται μέσω της χρήσης συμπιεσμένου αέρα, μειώνοντας έτσι το βάρος της τορπίλης και προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο την ανάδυση της στην επιφάνεια [69,84].

3.7.9 Ανάκτηση τορπιλών

Οι εκπαιδευτικές τορπίλες έχουν σχεδιαστεί ώστε να αναδύονται στην επιφάνεια μετά την ολοκλήρωση της βολής. Για τη διευκόλυνση εντοπισμού τους από την ομάδα περισυλλογής, οι τορπίλες είναι εφοδιασμένες με οπτικά και ηλεκτρονικά συστήματα εντοπισμού, όπως συστήματα παραγωγής χρωματιστού καπνού και σύστημα πομπού, το οποίο εκπέμπει θόρυβο διευκολύνοντας τον εντοπισμό της τορπίλης. Η ανάκτηση των τορπιλών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε από πλοία επιφανείας είτε από ελικόπτερα, χρησιμοποιώντας σχοινιά, δίχτυα ή γεραμούς. Μετά την ανάκτησή τους, οι τορπίλες υπόκεινται σε εκτεταμένη επιθεώρηση και συντήρηση για να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία τους [69,84].

3.7.10 Τεχνικά χαρακτηριστικά σύγχρονων τορπιλών

Η τεχνολογία των τορπιλών έχει σημειώσει εντυπωσιακή πρόοδο, καθιστώντας τις τορπίλες αναγκαίες για κάθε σύγχρονη ναυτική δύναμη. Στους Πίνακες 3.8, 3.9, και 3.10, που παρατίθενται στη συνέχεια, πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών σύγχρονων τορπιλών. Οι πίνακες αυτοί είναι καθοριστικοί για την κατανόηση της εξέλιξης των τορπιλών, επισημαίνοντας τη σημασία των τεχνολογικών προόδων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η σημαντική αύξηση της εμβέλειας και της ταχύτητας, η οποία οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των συσσωρευτών.

| Τορπίλη | DM2A1 | DM2A3 | DM2A4 | SUT |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Χώρα προέλευσης | ΓΕΡΜΑΝΙΑ | ΓΕΡΜΑΝΙΑ | ΓΕΡΜΑΝΙΑ | ΓΕΡΜΑΝΙΑ |
| Πλατφόρμα Εκτόξευσης | Πλοία επιφανείας και υποβρύχια | Πλοία επιφανείας και υποβρύχια | Πλοία επιφανείας και υποβρύχια | Πλοία επιφανείας και υποβρύχια |
| Έτος Σχεδίασης | 1967 | 1985 | 1985 | 1967 |
| Έτος Παραλαβής | 1969 | 1987 | 1999 | 1980 |
| Βάρος | 3,020 lbs. (1,370 kg) | 3,020 lbs. (1,370 kg) | 3,020 lbs. (1,370 kg) | 3,116 lbs. (1,414 kg) |
| Συνολικό Μήκος | 257.9 in. (6.550 m) | 259.8 in. (6.600 m) | 259.8 in. (6.600 m) | 239 in. (6.080 m) |
| Εκρηκτικό Φορτίο | 551 lbs. (250 kg) | 573 lbs. (260 kg) | 573 lbs. (260 kg) | 573 lbs. (260 kg) |
| Εμβέλεια / Ταχύτητα | 22,000 yards (20,000 m) / 33 knots | 22,000 yards (20,000 m) / 35 knots | 55,000 yards (~50,000 m) / 50 knots | 30,600 yards (28,000 m) / 23 knots |
| Πηγή Ενέργειας | Silver-zinc battery | Silver-zinc battery | Silver-zinc battery | Silver-zinc battery |

Πίνακας 3.8 : Τεχνικά χαρακτηριστικά τορπιλών [85,86].

| Τορπίλη | Mark 46 | L4 | A-244 |
|----------------------|---|----------------------------------|----------------------------------|
| Χώρα προέλευσης | ΗΠΑ | ΓΑΛΛΙΑ | ΙΤΑΛΙΑ |
| Πλατφόρμα Εκτόξευσης | Πλοία επιφανείας και αεροσκάφη | Αεροσκάφη | Πλοία επιφανείας και ελικόπτερα |
| Έτος Σχεδίασης | 1964 | - | 1968 |
| Έτος Παραλαβής | 1966 | 1964 | 1971 |
| Βάρος | 568 lbs. (258 kg) | 1,157 lbs. (525 kg) | 485 lbs. (220 kg) |
| Συνολικό Μήκος | 102.36 in. (2.600 m) | 123 in. (3.130 m) | 108.s in. (2.75 m) |
| Εκρηκτικό Φορτίο | Mod 5: 98 lbs. (44.5 kg) PBXN-103 | 331 lbs. (150 kg) HBX-3 | 75 lbs. (34 kg) |
| Εμβέλεια / Ταχύτητα | Mod 5: 8,000 yards (7,300 m) / 45 knots | 5,500 yards (5,000 m) / 30 knots | 6,600 yards (6,000 m) / 30 knots |
| Πηγή Ενέργειας | Otto fuel II | Nickel-cadmium Battery | Lead-acid Battery |

Πίνακας 3.10 : Τεχνικά χαρακτηριστικά τορπιλών [84-85].

| Τορτίλη | Mark 24 Tigerfish | A-184 | L5 | Mark 45 |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--|
| Χώρα προέλευσης | ΑΓΓΛΙΑ | ΙΤΑΛΙΑ | ΓΑΛΛΙΑ | ΗΠΑ |
| Πλατφόρμα Εκτόξευσης | Υποβρύχια | Πλοία επιφανείας και υποβρύχια | Πλοία επιφανείας και υποβρύχια | Υποβρύχια |
| Έτος Σχεδίασης | 1967 | 1971 | - | 1957 |
| Έτος Παραλαβής | 1980 | 1974 | 1971 | 1963 |
| Βάρος | 3,420 lbs. (1,551 kg) | 2,788 lbs. (1,265 kg) | 2061 lbs. (935 kg) | 2,330 lbs. (1,057 kg) |
| Συνολικό Μήκος | 254.5 in (6.464 m) | 236 in. (6.000 m) | 170.1 in (4.320 m) | 225 in (5.715 m) |
| Εκρηκτικό Φορτίο | 750 lbs. (340 kg) Torpex | 551 lbs. (250 kg) | 440 lbs. (200 kg) HBX-3 or TNT | Mark 34 Nuclear warhead |
| Εμβέλεια / Ταχύτητα | 23,000 yards (21,000 m) / 35 knots | 27,300 yards (25,000 m) / 24 knots | 7,700 yards (7,000 m) / 35 knots | 11,000 to 15,000 yards (10,000 to 13,650 m) / 40 knots |
| Πηγή Ενέργειας | silver-zinc batteries | Silver-zinc battery | Silver-zinc Battery | Electric-Battery, seawater |

Πίνακας 3.9 : Τεχνικά χαρακτηριστικά τορπιλών [84-85].

Κεφάλαιο 4^ο Συσσωρευτές τορπιλών

4.1 Εισαγωγή

Οι τορπίλες έχουν διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη διεξαγωγή πολεμικών επιχειρήσεων, καθώς έχουν εξελιχθεί σημαντικά, από τις πρώιμες εκδοχές του 19ου αιώνα σε πολύπλοκα και υψηλής ακρίβειας όπλα της σύγχρονης εποχής. Η αποτελεσματικότητά τους έχει αυξηθεί κυρίως λόγω της τεχνολογικής προόδου, ιδιαίτερα στον τομέα των συσσωρευτών, οι οποίοι τροφοδοτούν κρίσιμα συστήματα της τορπίλης, όπως το σύστημα πρόωσης. Αυτό το κεφάλαιο διερευνά τις τεχνολογικές προόδους και τις προκλήσεις στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη πιο αποδοτικών συσσωρευτών για τα συστήματα πρόωσης των τορπιλών. Αρχικά, οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος έθεσαν τη βάση για την πρόωση των τορπιλών, προσφέροντας αξιόπιστη αλλά ουσιαστικά περιορισμένη απόδοση λόγω της χαμηλής ενεργειακής τους πυκνότητας και της απαίτησης για συχνή συντήρηση.

Η αναζήτηση πιο αποδοτικών πηγών ενέργειας οδήγησε στην ανάπτυξη νέων τύπων συσσωρευτών, όπως των αργύρου-ψευδαργύρου, αργύρου-οξειδίου-αλουμινίου και μαγνησίου-χλωριούχου αργύρου. Οι συσσωρευτές αυτοί αποτελούν την κύρια επιλογή για τα συστήματα πρόωσης των σύγχρονων τορπιλών λόγω της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας και της δυνατότητάς που προσφέρουν να παραμείνουν σε κατάσταση αποθήκευσης για μεγάλες χρονικές περιόδους. Επιπλέον, υπερτερούν σημαντικά των μολύβδου-οξέος συσσωρευτών, προσφέροντας αυξημένη εμβέλεια και ταχύτητα στις τορπίλες, εξασφαλίζοντας έτσι τακτικό πλεονέκτημα στις ναυτικές συγκρούσεις.

Η εμφάνιση των συσσωρευτών ιόντων λιθίου σηματοδοτεί την πιο πρόσφατη εξέλιξη στα συστήματα πρόωσης τορπιλών, προσφέροντας σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με προηγούμενες γενιές συσσωρευτών. Με χαρακτηριστικά όπως η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και το μειωμένο βάρος, οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου αυξάνουν σημαντικά την επιχειρησιακή εμβέλεια και την απόδοση των τορπιλών. Επιπλέον, το κεφάλαιο αυτό αναλύει τα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών ιόντων λιθίου, επισημαίνοντας τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από τη δυνατότητα επαναφόρτισης και τη μείωση του κόστους για την πραγματοποίηση εκπαιδευτικών βολών.

Μέσω της ανάλυσης της τεχνολογικής εξέλιξης των συσσωρευτών, αναδεικνύεται ο κρίσιμος ρόλος που διαδραματίζουν στην βελτίωση της επιχειρησιακής απόδοσης των τορπιλών.

4.2 Ο ρόλος των συσσωρευτών στις τορπίλες

Οι συσσωρευτές διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην λειτουργία και την απόδοση των τορπιλών, καθώς τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια κρίσιμα συστήματα όπως το σύστημα πρόωσης και το σύστημα καθοδήγησης. Η ενεργειακή απόδοση των συσσωρευτών σε συνδυασμό με την ικανότητά τους να λειτουργούν αξιόπιστα υπό ακραίες συνθήκες, όπως είναι οι χαμηλές θερμοκρασίες και οι υψηλές πιέσεις, επηρεάζουν άμεσα την επιχειρησιακή απόδοση των τορπιλών [69].

4.2.1 Κριτήρια επιλογής κατάλληλου τύπου συσσωρευτή

Η επιλογή του ιδανικού τύπου συσσωρευτή για τορπίλες βασίζεται σε ένα σύνολο κριτηρίων όπως είναι η ενεργειακή πυκνότητα, η αξιοπιστία, η αντοχή στις συνθήκες λειτουργίας, η διάρκεια ζωής και η ασφάλεια. Επίσης, κατά την επιλογή ενός κατάλληλου συσσωρευτή για τορπίλες, ένας κρίσιμος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ο σκοπός της χρήσης της τορπίλης. Πλέον γίνεται όλο και πιο συχνή η πρακτική χρήσης δύο τύπων συσσωρευτών στις τορπίλες: (i) ενός δευτερεύοντος τύπου, ο οποίος είναι επαναφορτιζόμενος, και (ii) ενός πρωτεύοντος τύπου, ο οποίος δεν είναι επαναχρησιμοποιήσιμος μετά την εκφόρτιση. Ο πρωτεύων συσσωρευτής είναι κατάλληλος για τορπίλες που προορίζονται για μάχη, ενώ οι δευτερεύοντες συσσωρευτές αξιοποιούνται για τη διεξαγωγή εκπαιδευτικών βολών. Η χρήση των δευτερεύοντων συσσωρευτών επιτρέπει την διεξαγωγή εκπαιδευτικών βολών με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι οι απαιτήσεις για την εκπλήρωση του εκπαιδευτικού στόχου θα ικανοποιηθούν επαρκώς. Οι δευτερεύοντες συσσωρευτές, για να είναι οικονομικά αποδοτικοί, πρέπει να είναι ικανοί να προσφέρουν τουλάχιστον 6 έως 10 κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης [69].

4.2.2 Είδη Συσσωρευτών Τορπιλών

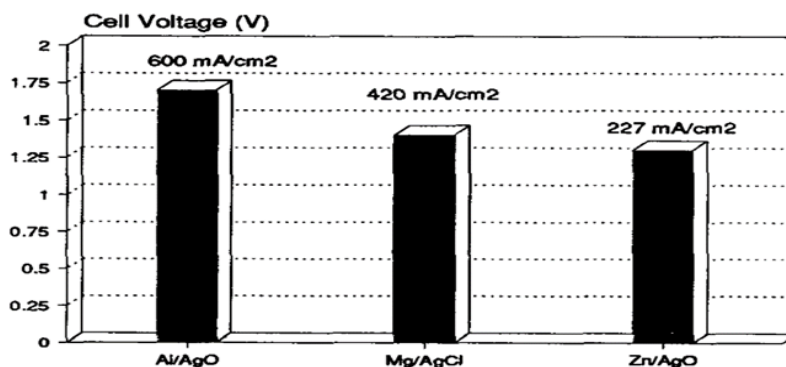
Στις εφαρμογές τορπιλών, η επιλογή του κατάλληλου τύπου συσσωρευτή είναι κρίσιμη και βασίζεται στις ειδικές σχεδιαστικές απαιτήσεις και στους επιχειρησιακούς στόχους, εξασφαλίζοντας βέλτιστη απόδοση και αξιοπιστία υπό απαιτητικές συνθήκες. Οι κύριοι τύποι συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές τορπιλών είναι οι ακόλουθοι:

- Συσσωρευτές Μολύβδου-Οξέος (Lead-acid): Αναγνωρίζονται ως ένας από τους παλαιότερους τύπους, αυτοί οι συσσωρευτές διακρίνονται για την

αξιοπιστία και το χαμηλό τους κόστος. Ωστόσο, εμφανίζουν μειονεκτήματα όπως αυξημένο βάρος και η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με πιο σύγχρονους συσσωρευτές.

- Συσσωρευτές Αργύρου-Ψευδαργύρου (Silver-Zinc): Οι συσσωρευτές αυτοί διακρίνονται για την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, κάτι που τους επιτρέπει να αποθηκεύουν αυξημένες ποσότητες ενέργειας αναλογικά με τον όγκο και το βάρος τους. Η ιδιότητα αυτή τους καθιστά ιδανικούς για τη χρήση σε τορπίλες που απαιτούν υψηλή ταχύτητα και μεγάλη εμβέλεια.
- Συσσωρευτές Αργύρου-Οξειδίου του Αλουμινίου (Silver Oxide-Aluminum): Οι συσσωρευτές αυτοί επιδεικνύουν χαρακτηριστικά παρόμοια με τους συσσωρευτές αργύρου-ψευδαργύρου προσφέροντας υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Αυτό τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές όπου η μείωση του όγκου και του βάρους τους είναι ζωτικής σημασίας.
- Συσσωρευτές Μαγνησίου-Αργύρου Χλωριδίου (Magnesium-Silver Chloride): Αυτοί οι συσσωρευτές διακρίνονται για την υψηλή ενεργειακή τους απόδοση και αξιοπιστία στο απαιτητικό υποβρύχιο περιβάλλον.
- Συσσωρευτές Λιθίου (Lithium): Η χρήση τους στις σύγχρονες τορπίλες αυξάνεται χάρη στην υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, το μειωμένο βάρος και του μεγάλου κύκλου ζωής που προσφέρουν. Αυτά τα χαρακτηριστικά συμβάλλουν καθοριστικά στη βελτίωση της εμβέλειας και της απόδοσης των τορπιλών [69].

Οι συσσωρευτές οι οποίοι αναφέρθηκαν προηγουμένως, όπως οι Al-AgO (Αργύρου-Οξειδίου του Αλουμινίου), Mg-AgCl (Μαγνησίου-Αργύρου Χλωριδίου) και Zn-AgO (Ψευδάργυρος-Αργυροξείδιο) οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές τορπιλών, ανήκουν στην κατηγορία των "αποθεματικών" συσσωρευτών (reserve batteries). Αυτοί οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται ως "αποθεματικοί" επειδή παραμένουν αδρανείς (δηλαδή, δεν υπόκεινται σε σημαντικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις) καθώς αποθηκεύονται σε ξηρή κατάσταση, χωρίς ηλεκτρολύτη. Η ενεργοποίηση αυτών των συσσωρευτών απαιτεί την εισαγωγή του ηλεκτρολύτη, ο οποίος σε περιπτώσεις όπως στους συσσωρευτές Mg-AgCl (Μαγνησίου-Αργύρου Χλωριδίου) μπορεί να είναι το θαλασσινό νερό. Το μεγάλο πλεονέκτημα των συσσωρευτών αυτών είναι η ικανότητα αποθήκευσης τους για μεγάλες χρονικές περιόδους [46,69].



Εικόνα 4.1: Χαρακτηριστικές τιμές τάσης "αποθεματικών" συσσωρευτών τορπιλών [87].

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι χωρητικότητες των υλικών ανόδου που χρησιμοποιούνται στους συσσωρευτές τορπιλών, με τις μετρήσεις να εκφράζονται σε αμπερώρια ανά γραμμάριο (Ah/g) και αμπερώρια ανά κυβικό εκατοστό (Ah/cm³).

Ah/g (αμπερώρια ανά γραμμάριο): χρησιμοποιείται για να εκφράσει την ποσότητα της ηλεκτρικής φόρτισης (σε αμπερώρια) που μπορεί να αποθηκευτεί ανά γραμμάριο υλικού του συσσωρευτή. Παρέχει χρήσιμες πληροφορίες ως προς την ικανότητα του συσσωρευτή να αποθηκεύσει ενέργεια σε σχέση με το βάρος του κάτι που είναι κρίσιμο σε περιπτώσεις όπου το βάρος αποτελεί κρίσιμο παράγοντα σε εφαρμογές όπως οι τορπίλες [87].

Ah/cm³ (αμπερώρια ανά κυβικό εκατοστό): χρησιμοποιείται για να εκφράσει την ποσότητα της ηλεκτρικής φόρτισης η οποία μπορεί να αποθηκευτεί (σε αμπερώρια) σε ένα κυβικό εκατοστό του συσσωρευτή. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για να αξιολογηθεί πόσο αποδοτικά χρησιμοποιείται ο όγκος που καταλαμβάνει ο συσσωρευτής σε εφαρμογές όπως οι τορπίλες, όπου ο χώρος είναι περιορισμένος [87].

| Υλικό | Ah/g | Ah/cm ³ |
|-----------|------|--------------------|
| Lithium | 3.86 | 2.06 |
| Aluminum | 2.98 | 8.10 |
| Zinc | 0.82 | 5.80 |
| Magnesium | 2.20 | 3.80 |
| Lead | 0.26 | 2.9 |

Πίνακας 4.1 : Χωρητικότητα υλικών ανόδου για συσσωρευτές τορπιλών [46,87].

4.2.3 Βασικές Απαιτήσεις των Συσσωρευτών στις Τορπίλες

Η απόδοση και ασφάλεια των τορπιλών εξαρτάται από τον τύπο των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται. Οι συσσωρευτές αυτοί πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένες απαιτήσεις όσον αφορά την ασφάλεια, την ενεργειακή τους απόδοση και την επιχειρησιακή τους ετοιμότητα για την επιτυχή εκτέλεση των αποστολών τους. Στη συνέχεια παρατίθενται βασικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν οι συσσωρευτές στις σύγχρονες τορπίλες.

- Οι συσσωρευτές πρέπει να είναι έτοιμοι προς χρήση με ελάχιστη ή καθόλου συντήρηση, ακόμα και μετά από παρατεταμένη αποθήκευση σε πλοία επιφανείας ή υποβρύχια. Επιπλέον, πρέπει να παρουσιάζουν αντοχή σε δύσκολες συνθήκες, όπως είναι οι συνεχείς δονήσεις και οι μεταβολές της θερμοκρασίας, διατηρώντας την επιχειρησιακή τους ετοιμότητα.

- Κατά την εκτόξευση της τορπίλης, ο συσσωρευτής πρέπει να ανταποκρίνεται στην απαίτηση για υψηλή παροχή ενέργειας καθώς και στα δυναμικά φορτία που δέχεται λόγω της επιτάχυνσης.
- Ο συσσωρευτής οφείλει να εξασφαλίζει την παροχή συνεχούς και σταθερής τάσης για την περίοδο πλεύσης της τορπίλης, προκειμένου να διατηρηθεί η ταχύτητα της τορπίλης, κάτι το οποίο είναι κρίσιμος παράγοντας για την ακρίβεια της στόχευσης.
- Ο συσσωρευτής πρέπει να είναι ικανός να τροφοδοτεί όχι μόνο το σύστημα πρόωσης, αλλά και άλλα συστήματα της τορπίλης όπως το σύστημα καθοδήγησης.
- Ο συσσωρευτής πρέπει να λειτουργεί χωρίς να απελευθερώνει επικίνδυνα εκρηκτικά αέρια εσωτερικά της τορπίλης (υδρογόνο), τυχόν εκπομπή αερίων πρέπει να είναι ελεγχόμενη.
- Ο συσσωρευτής, κατά τη διάρκεια λειτουργίας, παράγει σημαντική θερμότητα, ιδιαίτερα σε τορπίλες υψηλού βάρους που κινούνται με υψηλές ταχύτητες, και θα πρέπει να μπορεί να διαχειρίζεται ή να αποβάλλει αυτή τη θερμότητα διατηρώντας παράλληλα το επίπεδο της ισχύος του [69].

4.3 Ανάλυση Συσσωρευτών τορπιλών

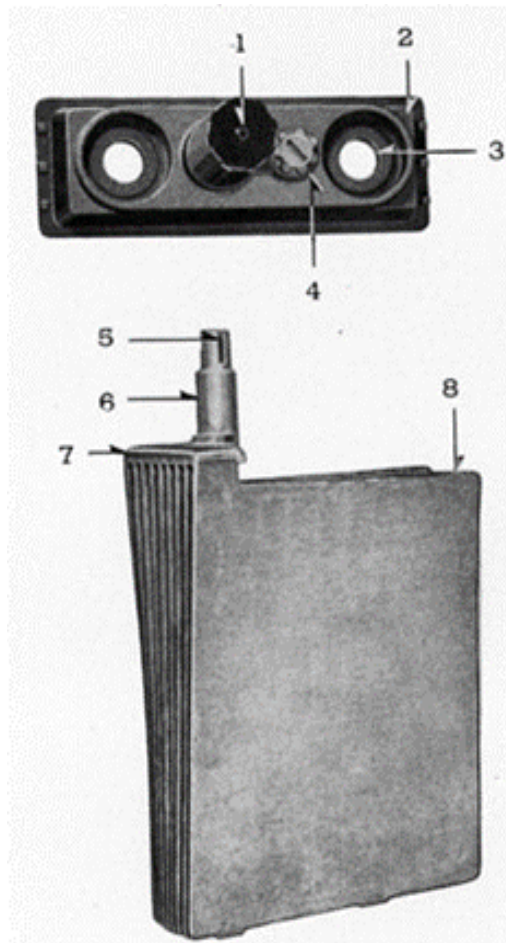
Στην παρούσα ενότητα, θα διεξαχθεί λεπτομερής ανάλυση των συσσωρευτών οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε τορπίλες. Ειδικότερα, θα αναλυθούν οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, αργύρου-ψευδαργύρου, αργύρου οξειδίου-αλουμινίου, μαγνησίου-χλωριούχου αργύρου και ιότων λιθίου. Στόχος είναι να διερευνηθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες κάθε τύπου, με στόχο την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο επηρεάζουν τις επιχειρησιακές δυνατότητες των τορπιλών.

4.3.1 Συσσωρευτές Μολύβδου-Οξέος

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος πραγματοποίησαν την πρώτη τους εμφάνιση στον τομέα της πρόωσης τορπιλών κατά τα τελευταία στάδια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, διατηρώντας μια σημαντική παρουσία για περίπου δύο δεκαετίες. Τα κύρια μειονεκτηματά τους εντοπίζονται στο αυξημένο βάρος και όγκο σε σχέση με την ενεργειακή τους χωρητικότητα (50 Wh/Kg και 80 Wh/Lt). Επιπλέον, Οι συσσωρευτές αυτοί διαθέτουν περιορισμένη διάρκεια οφέλιμης ζωής μετά την εγκατάστασή τους στις τορπίλες, απαιτώντας αντικατάσταση έπειτα σύντομο χρονικό διάστημα. Επιπρόσθετα, η παραγωγή υδρογόνου κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή αποτελεί

ένα επιπλέον μειονέκτημα, απαιτώντας αποτελεσματικό περιορισμό του υδρογόνου για να αποφευχθεί ο κίνδυνος έκρηξης. Παρά το γεγονός ότι οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος προσφέρουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους, οι τεχνικοί τους περιορισμοί δεν τους επέτρεψαν να συμβάλλουν στην αύξηση της ταχύτητας και της εμβέλειας των τορπιλών με αποτέλεσμα να μην χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες τορπίλες [69].

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τορπίλης που χρησιμοποίησε συσσωρευτές μολύβδου-οξέος είναι η τορπίλη Mark 18, του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Αυτή η τορπίλη εξοπλίστηκε με ένα σύστημα τροφοδοσίας αποτελούμενο από 80 στοιχεία μολύβδου-οξέος. Κατά τη φόρτιση και πριν την ενεργοποίηση, τα στοιχεία αυτά παρήγαγαν τάση περίπου 170 βολτ, η οποία μειωνόταν σε περίπου 140 βολτ κατά τη διάρκεια λειτουργίας, λόγω της εσωτερικής αντίστασης του συσσωρευτή. Αυτή η μείωση της τάσης έχει σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση της τορπίλης, καθώς επηρέαζε την ικανότητα του συστήματος να παρέχει επαρκή ενέργεια για την τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα, οδηγώντας σε μειωμένη ταχύτητα (29 knots) και εμβέλεια (3,650m) [69,78,88].



Εικόνα 4.2 : Στοιχείο συσσωρευτή μολύβδου οξέος τορπίλης Mark 18 [88].

4.3.2 Συσσωρευτές Αργύρου-Ψευδαργύρου -Silver-Zinc (Ag-Zn)

Οι συσσωρευτές Αργύρου-Ψευδαργύρου (Ag-Zn) αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τύπο συσσωρευτή τορπιλών και χρησιμοποιούνται τόσο σε πρωτεύοντες όσο και σε δευτερεύοντες συσσωρευτές, λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας που διαθέτουν. Στους πρωτεύοντες συσσωρευτές, ως ανόδος χρησιμοποιείται ο ψευδάργυρος, ενώ ως κάθοδος, το οξείδιο του αργύρου. Αντίστροφα, στους δευτερεύοντες συσσωρευτές, το οξείδιο του ψευδαργύρου χρησιμοποιείται ως ανόδος και ο άργυρος ως κάθοδος. Και στις δύο περιπτώσεις, ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται το υδροξείδιο του καλίου [69,89-91].

Οι συσσωρευτές Αργύρου-Ψευδαργύρου (Ag-Zn) σε αντίθεση με τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος παρέχουν υψηλότερη αναλογία ισχύος ανά μονάδα βάρους και όγκου (105 Wh/kg και 180 Wh/lt) και η τάση εξόδου διατηρείται σταθερή μέχρι τη πλήρη εκφόρτιση του συσσωρευτή [69,89-91]. Στο πλαίσιο των τορπιλών, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας και της επιχειρησιακής εμβέλειας, στοιχεία απαραίτητα για την αποτελεσματικότητα των τορπιλών. Επιπλέον, οι συσσωρευτές αργύρου-ψευδαργύρου διακρίνονται για το χαμηλό τους ποσοστό αυτοεκφόρτισης, διασφαλίζοντας τη διατήρηση της φόρτισής τους για παρατεταμένες περιόδους αδράνειας. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς οι τορπίλες μπορούν να παραμείνουν αποθηκευμένες για μεγάλα χρονικά διαστήματα και να είναι έτοιμες προς χρήση όταν αυτό απαιτηθεί [69,89-91].

Για λόγους ασφαλείας και βελτιστοποίησης της επιχειρησιακής απόδοσης, η ενεργοποίηση αυτών των συσσωρευτών πραγματοποιείται λίγο πριν τη χρήση τους, μέσω ενός μηχανισμού έγχυσης ηλεκτρολύτη. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός πυροτεχνικού μηχανισμού, ο οποίος ενεργοποιείται από έναν ηλεκτρικό παλμό. Κατά την ενεργοποίηση του πυροτεχνικού μηχανισμού απελευθερώνεται ένα μη αδρανές αέριο υπό πίεση (αζώτο) ωθώντας τον ηλεκτρολύτη (ο οποίος βρίσκεται αποθηκευμένος σε ξεχωριστή δεξαμενή) στα στοιχεία του συσσωρευτή μέσω ενός ειδικού δικτύου διανομής. Μόλις ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, ο συσσωρευτής είναι έτοιμος προς χρήση. Αυτή η διαδικασία συμβάλλει στην επέκταση της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή, η οποία μπορεί να υπερβαίνει τα οκτώ έτη [69,89-91].

4.3.3 Ανάλυση συσσωρευτών Αργύρου-Ψευδαργύρου

Στη συνέχεια, θα διεξαχθεί λεπτομερής ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών των πρωτεύοντων και δευτερεύοντων συσσωρευτών Αργύρου-Ψευδαργύρου (Ag-Zn), οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες τορπίλες, με έμφαση στα μοντέλα SLST-C1 και SLST-E1. Ο πρωτεύων συσσωρευτής SLST-C1 έχει σχεδιαστεί για χρήση υπό

συνθήκες πραγματικής μάχης, ενώ ο δευτερεύον συσσωρευτής SLST-E1 χρησιμοποιείται στα πλαίσια εκπαιδευτικών βολών [90].

Συσσωρευτής μάχης SLST-C1 Αργύρου-Ψευδαργύρου (Silver-Zinc)

Ο πρωτεύων συσσωρευτής SLST-C1 της εταιρείας Sunlight, είναι σχεδιασμένος για χρήση σε βαρέως τύπου τορπίλες (όπως οι DM2A1, SST4, και SUT) και αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα αποτελείται από 152 στοιχεία αργύρου-ψευδαργύρου για την τροφοδοσία του συστήματος πρόωσης και των μηχανισμών ελέγχου, ενώ το δεύτερο από 20 στοιχεία για την τροφοδοσία των ηλεκτρικών συστημάτων της τορπίλης. Και τα δύο τμήματα διαθέτουν στοιχεία τα οποία βρίσκονται σε ξηρή κατάσταση, με τον ηλεκτρολύτη αποθηκευμένο ξεχωριστά. Η διαδικασία εκλύσεως του ηλεκτρολύτη στα στοιχεία του συσσωρευτή πραγματοποιείται μέσω ενός ηλεκτρικού σήματος, το οποίο προκαλεί την απελευθέρωση ενός μείγματος αδρανών αερίων υπό πίεση, οδηγώντας τον ηλεκτρολύτη προς τα στοιχεία. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την άμεση εκκύση και ενεργοποίηση του συσσωρευτή όταν χρειαστεί, ενισχύοντας την απόδοση και την ασφάλεια της τορπίλης [90].



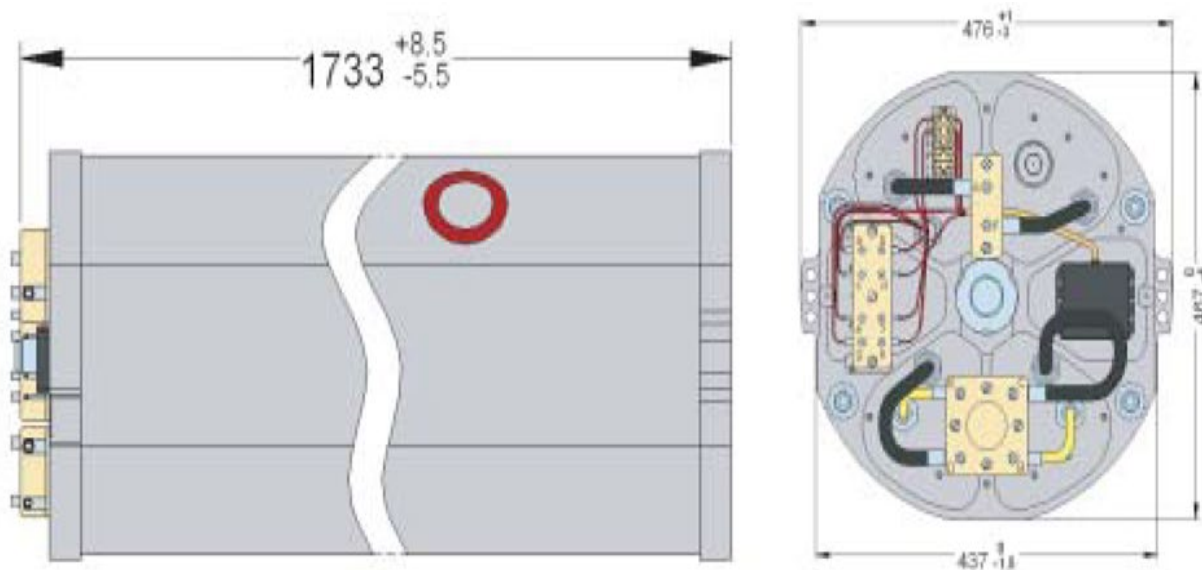
Εικόνα 4.3 : Πρωτεύων συσσωρευτής αργύρου-ψευδαργύρου SLST-C1 [90].

Χαρακτηριστικά συσσωρευτή

Ο συσσωρευτής Sunlight SLST-C1, διαθέτει πληθώρα εξαρτημάτων τα οποία προστατεύονται από ένα ελαστικό υλικό που αντέχει σε διακυμάνσεις θερμοκρασίας και κραδασμούς, εξασφαλίζοντας υψηλή ηλεκτρική απόδοση. Επιπλέον, διαθέτει ηλεκτρονικά συστήματα ασφαλείας που παρακολουθούν τις κρίσιμες λειτουργίες και παραμέτρους, διασφαλίζοντας την αξιόπιστη λειτουργία του συσσωρευτή. Επίσης, διακρίνεται για τα χαρακτηριστικά του, όπως το διπλό σύστημα απορρόφησης ηλεκτρολύτη, το σύστημα θέρμανσης ηλεκτρολύτη, το αλουμινένιο περίβλημα, καθώς και για το πλεονέκτημα μακροχρόνιας αποθήκευσης από 8 έως 16 έτη [90].

| Χαρακτηριστικά | Πρόωση | | | Βοηθητικά |
|--|--|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| | Σύνδεση εν σειρά AC-DF | Παράλληλη Σύνδεση AC-DF AB-EF | | * |
| Ακροδέκτες συσσωρευτή | | | | a-b |
| Λειτουργία Τορπίλης | Υψηλή Ταχύτητα | Μεσαία Ταχύτητα | Χαμηλή Ταχύτητα | |
| Τάση (V) | 210+8 -6 | 114 ±6 | 85 ±5 | 28.5 +3 -1.5 |
| Ρεύμα Εκφόρτισης (A) | 400±5 | 300±5 | 250±5 | 40±1 |
| Τελική Τάση Εκφόρτισης (V) | 189 | 102 | 80 | 26.5 |
| Διάρκεια Εκφόρτισης (λεπτά) | ≥13 | ≥45 | ≥53 | ≥45 |
| Χωρητικότητα (Ah) | ≥104 | ≥225 | ≥221 | ≥30 |
| Αριθμός στοιχείων (τεμ.) | 152 | 2×76 | 2×56 | 20 |
| Activation Time (sec) up to Threshold Voltage (V) under Load of (Ω) | ≤9 180 0.4 | ≤9 100 0.34 | ≤9 74 0.3 | ≤3 25 1.0 |
| Ισχύς (μέση) (kW) | ≥100,8 | ≥34,2 | ≥21,2 | ≥1.14 |
| Ηλεκτρικός παλμός για ενεργοποίηση Θερμική ισχύς Αισθητήρας διαρροής Αισθητήρας πίεσης | Τάση: 115V ±5V (AC) Συχνότητα: 50, 60 or 400Hz Ρεύμα: 1A±0.3A Διάρκεια: ≥50 ms 500W (μέγιστο) Τάση: 115V ±5V (AC) Συχνότητα: 50, 60 or 400Hz Περιλαμβάνεται Περιλαμβάνεται | | | |
| | *Ανεξάρτητα από το στάδιο λειτουργίας, υπάρχει διαθέσιμο ρεύμα εκφόρτισης 10A±3A στους ακροδέκτες D-h. Η τάση είναι ≥30V. | | | |

Πίνακας 4.2 : Τεχνικά χαρακτηριστικά συσσωρευτή SLST-C1 [90].



Εικόνα 4.4 : Διαστάσεις συσσωρευτή SLST-C1 [90].

| Χαρακτηριστικά | Τιμές |
|---|----------------|
| Συνολικό Ύψος (mm) | 467 +0/-4 |
| Συνολικό Πλάτος (1) (mm) | 437 +0/-1.5 |
| Συνολικό Πλάτος (2) (mm) | 476 +1/-3 |
| Συνολικό Μήκος (mm) | 1733 +8.5/-5.5 |
| Βάρος (kg) | 402 ± 6 |
| Θερμοκρασία Αποθήκευσης °C | -15 έως +25* |
| Θερμοκρασία Μεταφοράς °C | -15 έως +25* |
| Λειτουργική Θερμοκρασία °C (Σύστημα Θέρμανσης "απενεργοποιημένο") | +15 έως +45 |
| Λειτουργική Θερμοκρασία °C (Σύστημα Θέρμανσης "ενεργοποιημένο") | -2 έως +15 |
| Σχετική Υγρασία (%) | έως 95 |

*Μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση: ±10°C για ένα μήνα ανά έτος.

Πίνακας 4.3 : Συνθήκες αποθήκευσης, μεταφοράς και λειτουργίας SLST-C1 [90].

Συσσωρευτής εκπαιδευτικών βολών SLST-E1 (Silver-Zinc)

Ο δευτερεύων συσσωρευτής αργύρου-ψευδαργύρου Sunlight SLST-E1 αποτελεί έναν ειδικά σχεδιασμένο συσσωρευτή για την πραγματοποίηση εκπαιδευτικών βολών. Χρησιμοποιείται σε τορπίλες υψηλού βάρους, συμπεριλαμβανομένων των μοντέλων DM 2 A3, DM 2 A1, SUT και SST4. Η δομή του SLST-E1 περιλαμβάνει ένα περίβλημα που φιλοξενεί στοιχεία AgO/Zn, τα οποία διαθέτουν υψηλή αντοχή και μπορούν να αντικατασταθούν με ευκολία όταν αυτό απαιτηθεί. Αυτό διασφαλίζει ότι ο συσσωρευτής μπορεί να συντηρηθεί απευθείας στο πεδίο, βελτιώνοντας την επιχειρησιακή απόδοση και μειώνοντας τον χρόνο τον οποίο σύστημα παραμένει μη επιχειρησιακό [90].

Ο συσσωρευτής αυτός αποτελείται από δύο τμήματα: το πρώτο τμήμα του συσσωρευτή είναι υπεύθυνο για την τροφοδοσία του συστήματος πρόωσης και τα στοιχεία ελέγχου της τορπίλης, χρησιμοποιώντας 158 στοιχεία AgO/Zn, τύπου SL120HS. Το δεύτερο τμήμα του συσσωρευτή διαθέτει 20 στοιχεία AgO/Zn, τύπου SL40HS, τα οποία τροφοδοτούν τα ηλεκτρονικά συστήματα της τορπίλης. Τα στοιχεία παραδίδονται χωρίς ηλεκτρολύτη στο εσωτερικό τους, επομένως απαιτείται η πλήρωση τους με ηλεκτρολύτη πριν τεθούν σε λειτουργία [90].

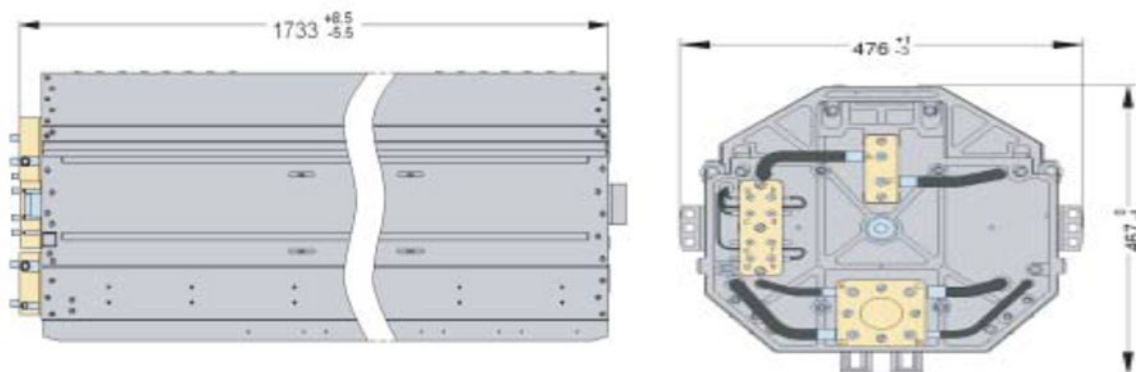
Σε ό,τι αφορά την απόδοση, ο συσσωρευτής SLST-E1 έχει σχεδιαστεί ειδικά για να ανταποκρίνεται στις απαιτητικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως είναι οι ακραίες θερμοκρασίες και οι κραδασμοί. Ο συσσωρευτής προσφέρει διάρκεια αποθήκευσης 5 έτη σε ξηρή κατάσταση (χωρίς ηλεκτρολύτη) και 12 μήνες σε υγρή κατάσταση. Επιπλέον, έχει σχεδιαστεί να αντέχει μεταξύ 10 έως 25 κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης, καθιστώντας τον οικονομικά βιώσιμη επιλογή για την πραγματοποίηση εκπαιδευτικών βολών [90].



Εικόνα 4.5 : Δευτερεύων συσσωρευτής αργύρου-ψευδαργύρου SLST-E1 [90].

| Χαρακτηριστικά | Σύνδεση εν σειρά AC-DF | Πρόωση | | Βοηθητικά* |
|----------------------------|---|---------------|--------------------------|-----------------|
| | | AC-DF | Παράλληλη Σύνδεση EF AB- | a-b |
| Λειτουργία Τορπίλης | Υψηλή Ταχύτητα | Μέση Ταχύτητα | Χαμηλή Ταχύτητα | |
| Τάση (V) | 210+8 -6 | 114±6 | 85±5 | 28.5 +3 -1.5 |
| Ρεύμα Εκφόρτισης (A) | 400±5 | 300±5 | 250±5 | 40±0.5 |
| Τελική Τάση Εκφόρτισης (V) | 189 | 102 | 80 | 26.5 |
| Χρόνος Εκφόρτισης (λεπτά) | ≥13 | ≥45 | ≥53 | ≥60 |
| Χωρητικότητα (Ah) | ≥104 | ≥225 | ≥221 | ≥40 |
| Αριθμός στοιχείων | 158 | 2×79 | 2×58 | 20 |
| Τύπος στοιχείων** | SL120HS | | | SL40HS |
| Ηλεκτρολύτης | Υδροξείδιο του Καλίου | | | |
| Ισχύς (μέση) (kw) | ≥100,8 | ≥34,2 | ≥21,2 | ≥1.14 |
| Ισχύς συστήματος θέρμανσης | 500w(μέγιστο) Τάση :115V ± 5V (AC) Συχνότητα : 50,60 or 400Hz | | | |

Πίνακας 4.4 : Τεχνικά χαρακτηριστικά συσσωρευτή SLST-E1 [90].



Εικόνα 4.6 : Διαστάσεις συσσωρευτή SLST-E1 [90].

| Χαρακτηριστικά | Τιμή |
|--------------------------|----------------|
| Συνολικό Ύψος (mm) | 467 +0/-4 |
| Συνολικό Πλάτος (1) (mm) | 437 +0/-1.5 |
| Συνολικό Πλάτος (2) (mm) | 476 +1/-3 |
| Συνολικό Μήκος (mm) | 1733 +8.5/-5.5 |
| Βάρος (kg) | 395 +3/-0 |

Πίνακας 4.5 : Διαστάσεις συσσωρευτή SLST-E1 [90].

| Αποθήκευση, Μεταφορά και Επιχειρησιακές συνθήκες | |
|---|--|
| Χαρακτηριστικά | Τιμές |
| Θερμοκρασία Μεταφοράς (°C) | -15 έως +35* |
| Θερμοκρασία Αποθήκευσης (°C) (Ξηρή κατάσταση) | 0 έως +35** |
| Θερμοκρασία Αποθήκευσης (°C) (υγρή κατάσταση) | 15 έως +25*** |
| Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C) | +18 έως +45 (Σύστημα Θέρμανσης "απενεργοποιημένο") |
| Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C) | 2 έως +18 (Σύστημα Θέρμανσης "ενεργοποιημένο") Χρόνος θέρμανσης από -2°C έως +18°C περίπου 18 ώρες |
| Θερμοκρασία Λειτουργίας στοιχείου (°C) | μέγ. +95°C στο τέλος της εκφόρτισης |
| Σχετική Υγρασία (%) | 45 έως 75 |
| * Επιτρέπεται μια βραχυπρόθεσμη (≤ 8 ώρες) απόκλιση θερμοκρασίας σε εύρος από -20°C έως 65°C. | |
| ** Η θερμοκρασία αποθήκευσης επιτρέπεται να είναι μεταξύ -20°C και 45°C για ένα μήνα ανά έτος αποθήκευσης. | |
| *** Η θερμοκρασία αποθήκευσης επιτρέπεται να αποκλίνει από το δοσμένο εύρος θερμοκρασίας κατά ± 10°C για ένα μήνα ανά έτος. | |

Πίνακας 4.6 : Συνθήκες αποθήκευσης, μεταφοράς και λειτουργίας SLST-E1 [90].

4.3.4 Συσσωρευτές μαγνησίου-χλωριούχου αργύρου *Mg-AgCl*

Ένα σημαντικό είδος πρωτεύοντος συσσωρευτή που χρησιμοποιείται σε τορπίλες είναι αυτός που ενεργοποιείται με θαλασσινό νερό (ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται το θαλασσινό νερό). Ανάμεσα στους διάφορους καθόδους που χρησιμοποιούνται σε αυτού του είδους συσσωρευτές, το silver chloride προσφέρει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και ισχύ ανά μονάδα βάρους και όγκου (70Wh/kg και 120Wh/lit). Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν μακρά διάρκεια ζωής σε ανενεργό κατάσταση λόγω του φυσικού διαχωρισμού των ηλεκτροδίων από τον ηλεκτρολύτη κατά τη διάρκεια αποθήκευσης. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του τύπου συσσωρευτή είναι η εξάλειψη της ανάγκης μεταφοράς του βάρους του ηλεκτρολύτη από την τορπίλη, καθιστώντας τον ιδιαίτερα πρακτικό και αποδοτικό. Κατά τη φάση εκτόξευσης της τορπίλης, το θαλασσινό νερό εισέρχεται στον χώρο του συσσωρευτή μέσω αγωγών στο περίβλημα της τορπίλης, ενεργοποιώντας τον συσσωρευτή σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο για να παρέχει την επιθυμητή ισχύ. Παρόλα αυτά, η χρήση αυτού του είδους των συσσωρευτών έχει σημαντικά μειονεκτήματα, όπως το υψηλό κόστος και η παραγωγή υδρογόνου κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, το οποίο αποτελεί σημαντικό κίνδυνο ασφαλείας. Το υδρογόνο είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο και η συσσώρευσή του μπορεί να οδηγήσει σε έκρηξη εάν δεν απομακρυνθεί σωστά. Η παρουσία μικρών ανοιγμάτων για τη διαφυγή του υδρογόνου βοηθά στη μείωση αυτού του κινδύνου, αλλά δεν τον εξαλείφει πλήρως [69].

Συσσωρευτής μαγνησίου-γλωριούχου αργύρου V616

Μετά την αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών που ενεργοποιούνται με θαλασσινό νερό, ακολουθεί ανάλυση του συσσωρευτή V616, ο οποίος τροφοδοτεί τις τορπίλες A244. Ο συσσωρευτής αποτελείται από 146 στοιχεία. Κάθε στοιχείο αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο silver chloride και ένα ηλεκτρόδιο μαγνησίου τα οποία διαχωρίζονται μέσω διαχωριστών κατασκευασμένων από πλαστικό. Ο συσσωρευτής αποθηκεύεται χωρίς ηλεκτρολύτη και ενεργοποιείται από το θαλασσινό νερό μετά την εκτόξευση της τορπίλης μέσω μιας αντλίας που βρίσκεται στο περίβλημα της τορπίλης. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της τορπίλης, η συνεχής ροή του θαλασσινού νερού απομακρύνει τη θερμότητα που παράγεται, μειώνει τη συσσώρευση του υδρογόνου και αποβάλλει τα ορυκτά κατάλοιπα τα οποία αποτελούν υποπροϊόντα της διαδικασίας της εκφόρτισης και των διαβρωτικών αντιδράσεων [89,91-92]. Οι επιδόσεις του συσσωρευτή V616 εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση άλατος στο θαλασσινό νερό. Σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές, τα προβλεπόμενα όρια χρήσης του εν λόγω συσσωρευτή καθορίζουν ότι η επιτρεπτή θερμοκρασία του θαλασσινού νερού κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών από 0°C έως 30°C. Παράλληλα, η επιτρεπτή συγκέντρωση άλατος στο θαλασσινό νερό για την βέλτιστη λειτουργία του συσσωρευτή ορίζεται σε ένα εύρος τιμών από 15g/l έως 38g/l [92].



Εικόνα 4.7 : Συσσωρευτής V616 [92].

| Χαρακτηριστικό | Τιμή |
|------------------------------|--------|
| Διάμετρος (mm) | 311 |
| Μήκος (mm) | 226 |
| Βάρος (ξηρό) (kg) | 34 ± 1 |
| Ονομαστική Ισχύς (kW) | 32 |
| Ονομαστική Τάση (V) | 160 |
| Διάρκεια τροφοδοσίας (λεπτά) | 6 |
| Μέγιστη Τάση (V) | 190 |
| Ελάχιστη Τάση (V) | 140 |

Πίνακας 4.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά συσσωρευτή V616 [92].

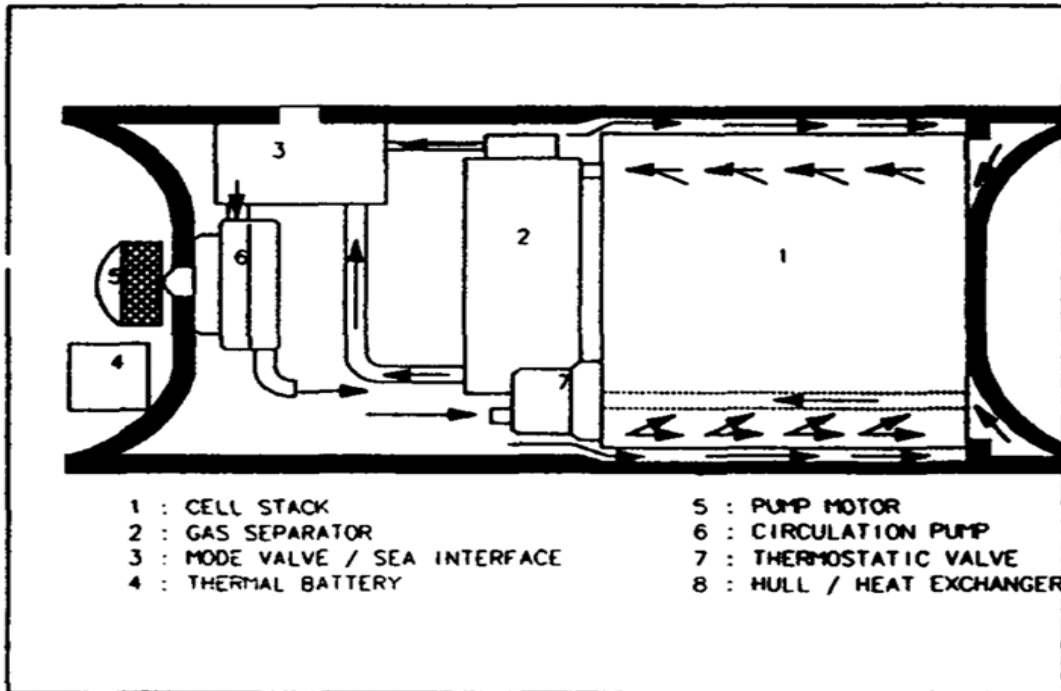
| Τορπίλη A-244 (MOD 3) (12.8 in) | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Πλατφόρμα εκτόξευσης | Πλοία επιφανείας και ελικόπτερα |
| Έτος Σχεδίασης | 1968 |
| Έτος Παραλαβής | 1982 |
| Βάρος | 254 kg |
| Συνολικό Μήκος | 2.75 m |
| Εκρηκτικό Φορτίο | 45 kg |
| Εμβέλεια / Ταχύτητα | 6,000 m (30 knots) |
| Πηγή ενέργειας | AgCl-Mg battery |

Πίνακας 4.8: Τεχνικά χαρακτηριστικά τορπίλης A-244 [84].

4.3.5 Συσσωρευτές αργύρου οξειδίου-αλουμινίου (AgO-Al)

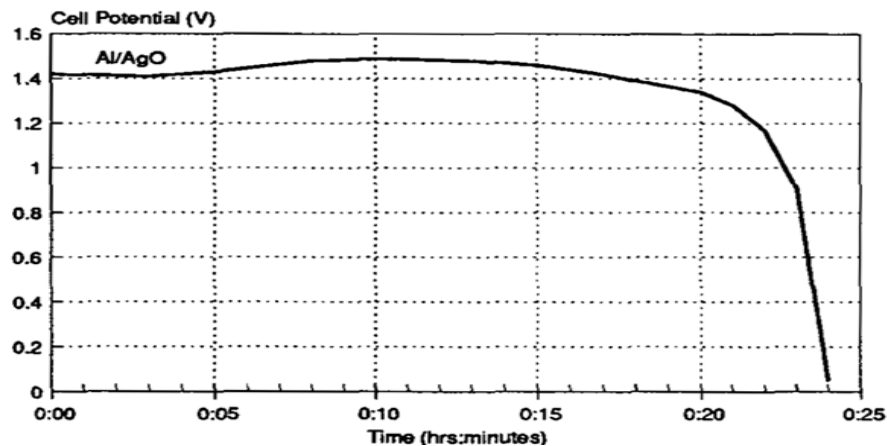
Ένας επιπλέον τύπος πρωτεύοντος συσσωρευτή που βρίσκει εφαρμογή στις τορπίλες όπως οι F21 και K745 είναι ο συσσωρευτής αργύρου οξειδίου-αλουμινίου (AgO-Al). Αυτοί οι συσσωρευτές διαθέτουν ανόδο από αλουμίνιο και κάθοδο από οξείδιο του αργύρου, ενώ ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται το υδροξείδιο του νατρίου (καυστική σόδα). Ο ηλεκτρολύτης παραμένει σε στερεή μορφή μέχρι να έρθει σε επαφή με θαλασσινό νερό, διατηρώντας με αυτόν τον τρόπο τον συσσωρευτή σε αδρανή κατάσταση έως την εκτόξευση της τορπίλης. Αυτή η δυνατότητα ενισχύει σημαντικά την ασφάλεια και την διάρκεια αποθήκευσης των συσσωρευτών AgO-Al, χωρίς να επηρεάζεται η απόδοσή τους [69,89-92].

Ο συσσωρευτής αυτός είναι πιο πολύπλοκος σε σχέση με τον απλό συσσωρευτή που ενεργοποιείται με θαλασσινό νερό ο οποίος εξετάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, καθώς απαιτεί την ενσωμάτωση εξαρτημάτων όπως διαχωριστές αερίων, αντλίας, θερμοστατικές βαλβίδες και εναλλάκτες θερμότητας για την βελτιστοποίηση της ισχύος εξόδου [69,93].

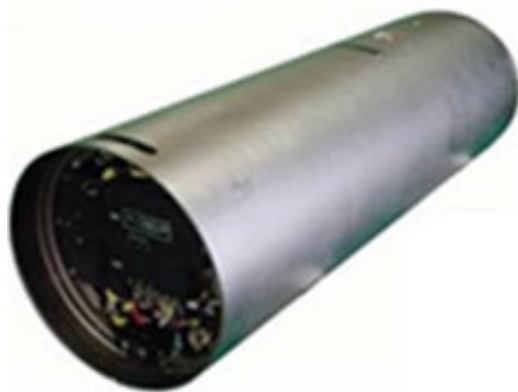


Εικόνα 4.8 : Διάταξη συστήματος παροχής θαλασσινού νερού στο συσσωρευτή AgO-Al [93].

Σε επίπεδο απόδοσης, τα στοιχεία αργύρου οξειδίου-αλουμινίου (AgO-Al) παρουσιάζουν σημαντικό πλεονέκτημα σε σύγκριση με τα στοιχεία συσσωρευτών αργύρου-ψευδαργύρου (Ag-Zn) καθώς διαθέτουν μεγαλύτερη τάση εξόδου (1.7 V έναντι 1.5 V) καθώς και μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και ισχύ ανά μονάδα βάρους (130 Wh/kg έναντι 105 Wh/kg) [94]. Αυτά τα χαρακτηριστικά αποδεικνύονται ιδιαίτερα σημαντικά για τις τορπίλες, διασφαλίζοντας αυξημένη εμβέλεια και ταχύτητα, στοιχεία τα οποία είναι απαραίτητα για την αποτελεσματικότητα των τορπιλών. Πιο συγκεκριμένα, λόγω του συσσωρευτή AgO-Al, η τορπίλη F21 διαθέτει εμβέλεια 50 km και μέγιστη ταχύτητα 50 κόμβους [95].



Εικόνα 4.9 : Καμπύλη εκφόρτισης συσσωρευτή AgO-Al [87].



Εικόνα 4.10 : Συσσωρευτής AgO-Al, τορπίλης K745 [96].

| Παράμετρος | Τιμή |
|------------------|--|
| Τύπος συσσωρευτή | Συσσωρευτής Silver oxide-aluminum AgO-Al |
| Μήκος (L) [mm] | 1,002 |
| Πλάτος (W) [mm] | 324 |
| Ύψος (H) [mm] | 403 |
| Έξοδος [kW] | 100 |
| Βάρος [kg] | 100 |

Πίνακας 4.9 : Χαρακτηριστικά συσσωρευτή AgO-Al,τορπίλη K745 [96].

4.3.6 Συσσωρευτές ιόντων λιθίου

Η χρήση των συσσωρευτών ιόντων λιθίου (Li-ion) αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη στον τομέα των τορπιλών, προσφέροντας πλεονεκτήματα όπως η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και η δυνατότητα να λειτουργούν αποδοτικά σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Η άνοδος των συσσωρευτών ιόντων λιθίου αποτελείται από γραφίτη, ενώ η κάθοδος από υλικά όπως το οξειδίο του κοβαλτίου (LiCoO₂), το οξειδίο του μαγγανίου (LiMn₂O₄), ή το φωσφορικό οξύ λιθίου και σιδήρου (LiFePO₄). Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται ένας οργανικός διαλύτης εμπλουτισμένος με άλατα λιθίου [89,91].

Τα στοιχεία ιόντων-λιθίου (Li-ion) στις τορπίλες συνδέονται παράλληλα (κατά ομάδες) για να πληρούν τις απαιτήσεις χωρητικότητας, και οι ομάδες αυτές στη συνέχεια συνδέονται εν σειρά για να πληρούν τις προδιαγραφές τάσης του συσσωρευτή. Οι συσσωρευτές ιόντων-λιθίου ελέγχονται από ένα ειδικό ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου (BMS, battery management system) [89].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των συσσωρευτών ιόντων λιθίου έγκειται στην ευελιξία κατασκευής τους σε διάφορες γεωμετρικές διατάξεις, όπως κυλινδρικές και σχεδόν

πρισματικές μορφές [89],καταλαμβάνοντας πιο αποδοτικά τον διαθέσιμο χώρο στο εσωτερικό της τορπίλης.Πρόσθετα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών ιόντων λιθίου περιλαμβάνουν [89]:

- Διάρκεια ζωής που εκτείνεται πέραν των δέκα ετών.
- Υποστήριξη περισσότερους από 500 κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης.
- Χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης.
- Αποδοτική λειτουργία σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.
- Δεν απαιτούν συντήρηση.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα άμεσης αξιολόγησης του επιπέδου φόρτισης μέσω της μέτρησης της τάσης.



Εικόνα 4.11 : Κυλινδρικά στοιχεία ιόντων λιθίου [91].



Εικόνα 4.12 : Πρισματικό στοιχείο τορπίλης ιόντων λιθίου SLPB98188216P [97].

| Χαρακτηριστικά | Τιμές |
|------------------------------------|-----------------|
| Μοντέλο | SLPB98818216P |
| Ονομαστική Χωρητικότητα (Ah) | 30 |
| Πυκνότητα Ενέργειας (Wh/kg) | 146 |
| Ρεύμα Εκφόρτισης (Συνεχές/Μέγιστο) | 20/30 |
| Εσωτερική Αντίσταση (mΩ) | 0.7 |
| Διαστάσεις (ΠxΜxΥ, mm) | 199 x 223 x 9.4 |
| Βάρος (g) | 780 |

Πίνακας 4.10 : Τεχνικά χαρακτηριστικά στοιχείου SLPB98188216P [98].

4.3.7 Η σημασία της χρήσης συσσωρευτών ιόντων λιθίου στις εκπαιδευτικές τορπίλες.

Στην περίπτωση τόσο των Τορπιλών Χαμηλού Βάρους (LWTs) όσο και των Τορπιλών Υψηλού Βάρους (HWTs), η έλλειψη επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών, οι οποίοι να είναι σε θέση να παρέχουν έναν ικανοποιητικό αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης, οδηγεί σε σημαντική αύξηση του κόστους κατά την πραγματοποίηση εκπαιδευτικών βολών (λόγω της απαίτησης για συχνή αντικατάσταση των χρησιμοποιούμενων συσσωρευτών). Για τον λόγο αυτό, αναδεικνύεται η ανάγκη για πιο αποδοτικές λύσεις στον τομέα των συσσωρευτών, προκειμένου να μειωθεί το επιχειρησιακό κόστος κατά την πραγματοποίηση εκπαιδευτικών βολών [89,99].

Παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία των συσσωρευτών ιόντων λιθίου για τις τορπίλες βρίσκεται ακόμα στα αρχικά στάδια ανάπτυξης και δεν έχει πλήρως καθιερωθεί, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς συσσωρευτές αργύρου-ψευδαργύρου, οι οποίοι επί δεκαετίες αποτέλεσαν την κύρια επιλογή για την παροχή ενέργειας στον τομέα των εκπαιδευτικών τορπιλών. Η χρήση συσσωρευτών ιόντων λιθίου προσφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη, κυρίως λόγω της δυνατότητας πολλαπλών επαναφορτίσεων, ξεπερνώντας τους 500 κύκλους [89].

Στη μελέτη που ακολουθεί εξετάζονται τα οικονομικά οφέλη από τη χρήση συσσωρευτών ιόντων λιθίου έναντι των συσσωρευτών Αργύρου-Ψευδαργύρου (AgO-Zn), σε εφαρμογές εκπαιδευτικών τορπιλών. Η μελέτη αναδεικνύει ότι οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου γίνονται σημαντικά φθηνότεροι έπειτα από 100 κύκλους χρήσης παρά το υψηλό κόστος απόκτησης τους. Στη συνέχεια παρατίθεται ο πίνακας 4.11 όπου παρουσιάζεται το οικονομικό όφελος από τη χρήση συσσωρευτών ιόντων λιθίου. Τα κόστη που αναγράφονται έχουν προσαρμοστεί από lakhs (1 Lakh = 100,000 Ρουπίες) σε Ευρώ, χρησιμοποιώντας μια προσεγγιστική ισοτιμία μετατροπής 0.012 (από Ρουπία σε Ευρώ) [100].

| Παράμετροι | AgO-Zn (LWT) | Li-ion (LWT) | AgO-Zn (HWT) | Li-ion (HWT) |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Κόστος | €60,000 | €240,000 | €240,000 | €960,000 |
| Οφελος ανακύκλωσης | €30,000 | €0 | €120,000 | €0 |
| Κύκλος ζωής | 10 | 500 | 10 | 500 |
| Μέσο κόστος ανά κύκλο | €3,000 | €480 | €12,000 | €1,920 |

Πίνακας 4.11 : Μέσο κόστος ανά κύκλο χρησιμοποιώντας συσσωρευτές AgO-Zn και Li-ion για LWT και HWT [100].

Συμπερασματικά, μέσα από αυτή τη μελέτη, γίνεται κατανοητό ότι οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου αποτελούν την πλέον οικονομική λύση για την πραγματοποίηση εκπαιδευτικών βολών τόσο για τις Τορπίλες Χαμηλού Βάρους (LWT) όσο και για τις Τορπίλες Υψηλού Βάρους (HWT), ειδικά όταν λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι της απόδοσης, οι κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης και το συνολικό κόστος κτήσης (TCO). Η χρήση των συσσωρευτών ιόντων λιθίου στις εκπαιδευτικές τορπίλες προσφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη, ιδιαίτερα για τις χώρες οι οποίες διαθέτουν περιορισμένους προϋπολογισμούς. Μέσω της χρήσης των συσσωρευτών αυτών επιτυγχάνεται η αποτελεσματική εκπαίδευση των πληρωμάτων, ενισχύοντας τις επιχειρησιακές τους ικανότητες, ενώ παράλληλα το κόστος διατηρείται σε διαχειρίσιμα επίπεδα [89,100].

4.3.8 Διαχείριση συσσωρευτών τορπιλών

Οι συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται σε τορπίλες απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά την τήρηση πρωτοκόλλων ασφαλείας, λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύουν. Οι τεχνικοί πρέπει να έχουν λάβει κατάλληλη εκπαίδευση σχετικά με τις ειδικές απαιτήσεις κάθε τύπου συσσωρευτή, συμπεριλαμβανομένων των κατάλληλων συνθηκών αποθήκευσης, των διαδικασιών φόρτισης και εκφόρτισης, καθώς και των διαδικασιών που πρέπει να ακολουθηθούν σε περίπτωση διαρροής ηλεκτρολύτη. Η τακτική συντήρηση και οι έλεγχοι είναι απαραίτητοι για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της απόδοσης των συσσωρευτών στο απαιτητικό περιβάλλον των ναυτικών επιχειρήσεων. Επίσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εφαρμόζοντας κατάλληλες μεθόδους απόρριψης και ανακύκλωσης για τη μείωση του οικολογικού αντίκτυπου από τη χρήση των συσσωρευτών [69,100].

Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η έρευνα που παρουσιάζεται σε αυτή τη διπλωματική εργασία αναδεικνύει την κρίσιμη επίδραση της τεχνολογίας των συσσωρευτών στην απόδοση των υποβρυχίων, των Μη Επανδρωμένων Υποβρυχίων Οχημάτων (UUVs) και των τορπιλών.

Όσον αφορά τα υποβρύχια, η μετάβαση προς τους συσσωρευτές ιόντων-λιθίου από τους παραδοσιακούς συσσωρευτές μολύβδου-οξέος έχει σηματοδοτήσει ένα σημαντικό τεχνολογικό άλμα, προσφέροντας βελτιωμένη εμβέλεια, ταχύτητα, αυξημένο κύκλο ζωής και μια εξαιρετική μείωση στο βάρος, όπως αποδεικνύεται από τα υποβρύχια της κλάσης Yuan στην Κίνα. Αυτή η μετάβαση δεν σηματοδοτεί μόνο μια κίνηση προς πιο αποδοτικούς και βιώσιμους συσσωρευτές αλλά αντανακλά επίσης τις αυξημένες απαιτήσεις του σύγχρονου ναυτικού πολέμου.

Στον τομέα των UUVs, η επιλογή δευτερευόντων συσσωρευτών ιόντων λιθίου στα σύγχρονα UUVs αναδεικνύει την ανάγκη για χρήση συσσωρευτών οι οποίοι είναι ικανοί να υποστηρίξουν απαιτητικές επιχειρήσεις. Η επιλογή των συσσωρευτών αυτών συνδέεται με την αυξανόμενη απαίτηση για UUVs που έχουν τη δυνατότητα να επιχειρούν αυτόνομα σε μεγαλύτερες αποστάσεις και για μεγάλες χρονικές περιόδους, διευρύνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη χρησιμότητά τους, τόσο στον στρατιωτικό όσο και στον επιστημονικό τομέα.

Οι τορπίλες αποτελούν μια ξεχωριστή περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται τόσο πρωτεύοντες όσο και δευτερεύοντες συσσωρευτές, αντικατοπτρίζοντας την ανάγκη για ισορροπία μεταξύ κόστους και επιχειρησιακής απόδοσης. Οι τορπίλες που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση εκπαιδευτικών βολών χρησιμοποιούν δευτερεύοντες συσσωρευτές, όπως αυτοί του αργύρου-ψευδαργύρου ή ιόντων λιθίου, για τη μείωση των εξόδων καθώς δεν απαιτείται η αντικατάστασή τους. Αντίθετα, σε πραγματικές συνθήκες μάχης απαιτείται η χρήση πρωτεύοντων συσσωρευτών, όπως οι συσσωρευτές αργύρου οξειδίου-αλουμινίου, για να διασφαλιστεί η μέγιστη αξιοπιστία και απόδοση σε κρίσιμες καταστάσεις.

Η παρούσα διπλωματική εργασία τονίζει την σημασία της συνεχούς έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα των συσσωρευτών. Με την αύξηση των δυνατοτήτων των υποβρυχίων οχημάτων, παρατηρείται ανάλογη αύξηση στη ζήτηση για πιο αποδοτικούς συσσωρευτές που θα καλύψουν τις ενεργειακές τους απαιτήσεις. Η ανάπτυξη πιο αποδοτικών υποβρυχίων οχημάτων συνδέεται άμεσα με την πρόοδο στην τεχνολογία των συσσωρευτών, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για διαρκή καινοτομία, ώστε να εξασφαλιστούν βελτιωμένες ενεργειακές λύσεις που θα συμβάλουν στην αύξηση της ασφάλειας και της απόδοσης αυτών των υποβρυχίων οχημάτων.

Βιβλιογραφία

1. Gabler, U. (2000). Submarine design. Casemate UK Limited.
2. Ross C T F 2001 Pressure Vessels: External Pressure Technology Chichester, UK: Horwood Publishing Ltd.
3. Chakraborty, S. (2022, April 28). Understanding stability of submarine. Marine Insight. <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-stability-submarine/>
4. United States. Bureau of Naval Personnel. Training Division. (1955). The Submarine. Retrieved from <https://books.google.gr/books?id=HvipnllXV6AC>
5. Burcher, R., & Rydill, L. (1994). Concepts in Submarine Design (Cambridge Ocean Technology Series). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107050211
6. The control room: The most important space on the submarine.(n.d.). <https://www.usspkennedyjr.org/the-control-room-the-most-important-space-on-the-submarine/>
7. Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2018, March 6). Turtle. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/topic/Turtle-submarine>
8. Friedman, N. and Polmar, . Norman C. (2023, October 25). submarine. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/submarine-naval-vessel>
9. Parsons, W. B. (1922). Robert Fulton and the submarine. In Columbia University Press eBooks.
10. Galvani, William and Campbell, Thomas R. (2002) "The CSS H. L. Hunley: Confederate Submarine," Naval War College Review: Vol. 55: No. 2, Article 15.
11. Andrews, E. (2023, June 1). 9 Groundbreaking early submarines. HISTORY. <https://www.history.com/news/9-groundbreaking-early-submarines>
12. Reader, G. T., & Potter, I. J. (1997). Early Submarine Engine Development. SAE Transactions, 106, 1923. <http://www.jstor.org/stable/44730807>
13. Massouras, T. G., & Katopodis, T. P. (2010). HELLENIC SUBMARINES (Vol. 1). Hellenic Maritime Museum.
14. Μαστρογεωργίου, Γ., & Μαδωνής, Α. (2009). ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ 1885-2010. ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ.
15. Massouras, T. G., & Katopodis, T. P. (2010). HELLENIC SUBMARINES (Vol. 2). Hellenic Maritime Museum.
16. Unrestricted U-boat warfare. (n.d.). National WWI Museum and Memorial. [https://www.theworldwar.org/learn/about-wwi/unrestricted-u-boat-warfare#:~:text=The%20formidable%20U%2Dboats%20\(unterseeboots,the%20British%20blockade%20defeated%20Germany](https://www.theworldwar.org/learn/about-wwi/unrestricted-u-boat-warfare#:~:text=The%20formidable%20U%2Dboats%20(unterseeboots,the%20British%20blockade%20defeated%20Germany)
17. Torpedoes. (n.d.). APRIL SMITH'S S.T.E.M. CLASS. <https://www.aprilsmith.org/torpedoes.html#:~:text=The%20average%20torpedo%20during%20World,a%20distance%20of%20600%20feet.>

18. Gröner, E.; Jung, D.; Maass, M. (1991). German Warships 1815–1945, U-boats and Mine Warfare Vessels. Vol. 2. Translated by Thomas, K.; Magowan, R. London: Conway Maritime Press. ISBN 0-85177-593-4.
19. Submarine Photo Index. (n.d.).
<https://www.navsource.org/archives/08/08040.htm>
20. Wikipedia contributors. (2023, July 7). HNLMS o 19. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/HNLMS_O_19
21. Wikipedia contributors. (2023b, November 14). Type XXI submarine. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Type_XXI_submarine
22. NAVAL SONAR - Chapter 14. (n.d.).
<https://maritime.org/doc/sonar/chap14.php#:~:text=During%20World%20War%20II%2C%20combination,end%20of%20World%20War%20II>
23. Wikipedia contributors. (2023b, October 14). Midget submarine. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Midget_submarine
24. Muir, M., Boyd, C., & Yoshida, A. (1997b). The Japanese Submarine Force and World War II. *The Journal of Military History*, 61(4), 821.
25. A. Neistlé, German U-Boat Losses during World War II: Details of Destruction, 2nd ed. Havertown: Frontline Books, 2014.
26. Wikipedia contributors. (2023c, November 7). Torpedo. Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Torpedo>
27. A Brief History of U.S. Navy Torpedo Development-Part 1, n.d., pp. 35–40.
<https://maritime.org/doc/jolie/part1.php>
28. Nuclear submarines and aircraft carriers | US EPA. (2023, May 3). US EPA.
<https://www.epa.gov/radtown/nuclear-submarines-and-aircraft-carriers#:~:text=Nuclear%20submarines%20and%20aircraft%20carriers%20are%20powered%20by%20onboard%20nuclear,power%20to%20turn%20the%20propeller>
29. Reid, Tyler. "The USS Nautilus (SSN-571)." (March 11, 2014).
<http://large.stanford.edu/courses/2014/ph241/reid1/>
30. Wikipedia contributors. (2023c, October 31). USS George Washington (SSBN-598). Wikipedia.
[https://en.wikipedia.org/wiki/USS_George_Washington_\(SSBN-598\)](https://en.wikipedia.org/wiki/USS_George_Washington_(SSBN-598))
31. Archus, D. (2021, May 13). How do the submarines navigate underwater? - Naval Post- Naval News and Information. Naval Post- Naval News and Information. <https://navalpost.com/how-submarine-navigate-underwater/>
32. Wikipedia contributors. (2023b, October 4). Photonics mast. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Photonics_mast
33. AN/BLQ-10 Submarine Electronic Warfare Support System. (2019, August 19). The Office of the Director, Operational Test and Evaluation.
<https://www.dote.osd.mil/portals/97/pub/reports/fy2017/navy/2017anblq10.pdf?ver=2019-08-19-113710-523>
34. State-of-the-art Stealth Capabilities. (n.d.). Thyssenkrupp.
<https://www.thyssenkrupp-marinesystems.nl/en/state-of-the-art-stealth-capabilities.html>

35. Padavic-Callaghan, K. (2022, September 30). Stealth rubber coating could make submarines nearly invisible to sonar. *New Scientist*.
<https://www.newscientist.com/article/2340542-stealth-rubber-coating-could-make-submarines-nearly-invisible-to-sonar/>
36. Unseen & Unheard: The role of Stealth. (n.d.).
<https://www.spsnavalforces.com/story/?id=842&h=Unseen-and-Unheard-The-Role-of-Stealth#:~:text=The%20latest%20development%20in%20stealth,operator%20on%20a%20surface%20ship>
37. Allard, Y., Shahbazian, E., & Isenor, A. (2014). Unmanned underwater vehicle (UUV) information study (p. 0078). Defence Research and Development Canada.
38. Vio, R. P., Cristi, R., & Smith, K. B. (2017, June). UUV localization using acoustic communications, networking, and a priori knowledge of the ocean current. In *OCEANS 2017-Aberdeen* (pp. 1-7). IEEE.
39. Ali, M. F., Jayakody, D. N. K., & Li, Y. (2022). Recent trends in underwater visible light communication (UVLC) systems. *IEEE Access*, 10, 22169-22225.
40. Hydroid Inc. (2012). REMUS 6000: Littoral to deep operations, custom design, ease of operation, launch and recovery system, proven REMUS technology, and applications specifications (MKT 12-010 REVA). Hydroid Inc.
41. General Dynamics & Bluefin Robotics. (2015). Bluefin-21 Autonomous Underwater Vehicle (AUV): Technical specifications, applications, and system package. Quincy, MA: Bluefin Robotics.
42. Kongsberg. (n.d.). HUGIN Superior: The New Flagship AUV from KONGSBERG. Retrieved from
<https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/hugin-superior.pdf>
43. GlobalSecurity.org. (n.d.). XLUUV Specifications. Retrieved from
<https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/xluuv-specs-2.htm>
44. Watson, S., Duecker, D. A., & Groves, K. (2020). Localisation of unmanned underwater vehicles (UUVs) in complex and confined environments: A review. *Sensors*, 20(21), 6203.
45. Yao, H., Wang, H., & Wang, Y. (2020). UUV autonomous decision-making method based on dynamic influence diagram. *Complexity*, 2020, 1-14.
46. Linden, David & Thomas B. Reddy. *Handbook of Batteries: Third Edition*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2002
47. Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C. J., & Woodward, P. M. (2012). *Chemistry: The Central Science*. (12 ed.) Pearson Prentice Hall.
48. Zumdahl S. S. & Zumdahl S. A. (2014). *Chemistry (Ninth)*. Brooks/Cole Cengage Learning.
49. Gartner, N. (2021). Thermal behaviour of lithium-ion batteries and the implications on submarine system design. TU Delft Repositories.

- <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:f102aa75-fa6a-48d2-83c9-92c9e632ff6a?collection=education>
50. C.F. "O" Class Submarines, Training Notebook, Electrical . Vol. 11, 1956, Retrieved from <https://maritime.org/doc/oberon/electrical/index.php>
 51. Nzereogu, P., Omah, A. D., Ezema, F. I., Iwuoha, E. I., & Nwanya, A. C. (2022). Anode materials for lithium-ion batteries: A review. *Applied Surface Science Advances*, 9, 100233. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100233>
 52. Mishra, A., Mehta, A., Basu, S., Malode, S. J., Shetti, N. P., Shukla, S. S., Nadagouda, M. N., & Aminabhavi, T. M. (2018). Electrode materials for lithium-ion batteries. *Materials Science for Energy Technologies*, 1(2), 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.08.001>
 53. Sharma, S., Singh, B. P., & Tripathi, S. K. (2021). Recent advancements in development of different cathode materials for rechargeable lithium ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 43, 103112. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103112>
 54. Thunder Sky Winston. (2021). WB-LYP10000AHA Battery Specifications. Retrieved from <https://www.thundersky-winston.com/static/upload/file/20210521/1621587013791065.pdf>
 55. Chong, C. Y. (2018, June 26-28). Lithium-ion technology for a submarine main battery - UDT presentation. Kokam. Retrieved from https://cdn.asp.events/CLIENT_Clarion__96F66098_5056_B733_492B7F3A0E159DC7/sites/UDT-2020/media/libraries/2018-presentation/Day-2---Theatre-1---12-00-Choong-Yeong-Chong-180627-kkc-----udt-2018-kokam-presentation-CHONG.pdf
 56. V Romanovsky et al 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2131 042100 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2131/4/042100>
 57. Holze R. Self-discharge of Batteries: Causes, Mechanisms and Remedies. *Advanced Materials Science and Technology*, 2022;4(2):049388. <https://doi.org/10.37155/2717-526X-0402-3>
 58. Pennino, V. (2019, May). LITHIUM-ION BATTERY SYSTEM FOR U212NFS. UDT. https://cdn.asp.events/CLIENT_Clarion__96F66098_5056_B733_492B7F3A0E159DC7/sites/udt-2024/media/libraries/sensors-and-processing/116---Vincenzo-Pennino-Slides.pdf
 59. Kim, B., Sohn, S. hyun, & Kang, S. (2021, August 20). An Experimental Study on the Charging/Discharging Characteristics and Safety of Lithium-Ion Battery System for Submarine Propulsion. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*. The Society of Naval Architects of Korea. <https://doi.org/10.3744/snak.2021.58.4.225>
 60. F. Wang and J. Gao, "Feasibility Analysis of New Energy Batteries Equipped on Conventional Submarines," 2022 7th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM), Xi'an, China, 2022, pp. 106-109, doi: 10.1109/ICICM56102.2022.10011306.
 61. Piłat, T., Grzeczka, G., & Polak, A. (2017). Online assessment of the lead-ACID battery electrical capacity on submarines. *Diagnostyka*, 18(3), 69-75.

62. Townsend, A.; Gouws, R. A Comparative Review of Lead-Acid, Lithium-Ion and Ultra-Capacitor Technologies and Their Degradation Mechanisms. *Energies* 2022, 15, 4930. <https://doi.org/10.3390/en15134930>
63. Uboat.net - articles. (n.d.).
<https://uboat.net/articles/id/54#:~:text=There%20are%20%20to%204,in%20serial%20or%20parallel%20connection>
64. Başhan, V. (2022). Comparative evaluation and selection of submarines with air-independent propulsion system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(86), 36659-36671. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.191>
65. Wikström, A. (2019, May). Lithium Ion Battery - Opportunities and Challenges for Submarines. UDT.
https://cdn.asp.events/CLIENT_Clarion__96F66098_5056_B733_492B7F3A0E159DC7/sites/UDT-2020/media/libraries/sensors-and-processing/76---Anders-Wikstrom-Paper.pdf
66. Pike, J. (n.d.). Type 039A Yuan-Class Design.
<https://www.globalsecurity.org/military/world/china/yuan-design.htm>
67. Griffiths, G. (2002). *Technology and applications of autonomous underwater vehicles*. CRC Press.
68. Bluefin Robotics Corporation. (2010, December 3). 1.5 kWh Subsea Battery. Bluefin Robotics. Retrieved from
<https://www.electronicsdatasheets.com/manufacturers/bluefin-robotics/parts/15-kwh-subsea-battery>
69. Ramanarasaiah, N. K. (1993). *Introduction to Torpedo Technology*. Defence Science Documentation Centre (DESIDOC).
<https://www.drdo.gov.in/monograph/introduction-torpedo-technology>
70. Torpedo (naval warfare). (n.d.-b). In *TheFreeDictionary.com*.
[https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Torpedo+\(naval+warfare\)](https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Torpedo+(naval+warfare))
71. Navy Department, Bureau of Ordnance. (1945). *Torpedoes mark 14 and 23 types*. Retrieved from <https://maritime.org/doc/torpedo/index.php>
72. Goodman, J. L. (1995). *Industrial assessment for torpedoes*. Defence Technical Information Center. Retrieved from
<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA303815.pdf>
73. Branfill-Cook, R. (2014). *Torpedo: The Complete History of the World's Most Revolutionary Naval Weapon*. Seaforth Publishing.
74. Fulton, R. (1914). *Torpedo war, and submarine explosions*. William Abbatt. (Original work published 1810). Retrieved from
<https://www.gutenberg.org/files/51748/51748-h/51748-h.htm>
75. *A brief history of U.S. navy torpedo development - Part 1*. (n.d.).
<https://maritime.org/doc/jolie/part1.php>
76. Friedman, N. (2011). *Naval weapons of World War One*. Seaforth Publishing.
77. Santos, M. D. (2023, November 14). Πώς λειτουργεί ένα γυροσκόπιο: Βασικές αρχές και εφαρμογές - Polaridad.es. Polaridad.es.
<https://polaridad.es/el/como-funciona-un-giroscopio/>
78. Campbell, J., & Campbell, N. J. M. (1985). *Naval weapons of World War Two*. Naval Inst Press.

79. Smith, P. (2007). *Torpedo bombers: Rare Photographs from Wartime Archives*. Casemate Publishers.
80. Lepage, J. (2020). *Torpedo Bombers 1900-1950: An Illustrated History*. US Naval Institute Press.
81. Zhou, Y., Pavesi, G., Yuan, J., & Fu, Y. (2022). A review on hydrodynamic performance and design of pump-jet: Advances, challenges and prospects. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1514. <https://doi.org/10.3390/jmse10101514>
82. T. Gopala Krishnan, D. Lokesharun, R. Saravanan, N. Poornachandiran; CFD based shape optimization of axisymmetric cavitators in supercavitating flows. *AIP Conf. Proc.* 29 October 2020; 2283 (1): 020115. <https://doi.org/10.1063/5.0025254>
83. *Guidance Wire For Torpedoes | Defence Research and Development Organisation - DRDO, Ministry of Defence, Government of India.* (n.d.). <https://www.drdo.gov.in/guidance-wire-torpedoes>
84. Group, J. I. (1997). *Jane's underwater warfare systems: 1997-98*. Janes Information Group.
85. Friedman, N. (1991). *The Naval Institute Guide to World Naval Weapons Systems, 1991/92*. Naval Inst Press.
86. DiGiulian, T. (2022, December 24). *World War II Torpedoes of Germany - NAVWEAPS*. http://www.navweaps.com/Weapons/WTGER_PostWWII.php
87. K. J. Gregg and M. J. Niksa, "Aluminum silver oxide reserve primary battery for small submersibles," *Proceedings of the 1992 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, Washington, DC, USA, 1992, pp. 181-183, doi: 10.1109/AUV.1992.225175.
88. Department of the Navy, Bureau of Ordnance. (1943). *U.S. Navy Torpedo Mark 18 (Electric), OP 946*. United States Government Printing Office. Retrieved from <https://maritime.org/doc/torpedomk18/index.php>
89. Poiner, F., & D'issel, L. (2009, March). *Lithium-ion battery technology - the most promising approach for exercise torpedoes: A Saft white paper*. Saft Space & Defence Division. Retrieved from https://www.saft.com/download_file/6X7JMGAyv3Fm6HdmtEv%252B2gtlbZ1bRRVHkjS11M6md92GD2EF7vU%252F3Oybbz3WOIG%252BxR8srpA5iCdJ%252FV3IQzTVHQyiTucngZKEg9KkYCLkowAvgaG1hurgXbUzJfYKBcvyf0rRUVDXe24BY1s224sPytI5GGZqhamCFj%252B18KyjUKa2IOr23A%253D%253D/To
90. Sunlight Factory. (2006, February). *Introduction. Primary torpedo batteries. Secondary torpedo batteries. Silver - Zinc torpedo batteries. Range of torpedo batteries*. Doc No 39/0145310/FEB 2006. Retrieved from <https://silo.tips/download/sunlight-factory-introduction-primary-torpedo-batteries-secondary-torpedo-batteries-silver-zinc-torpedo-batteries-range-of-torpedo-batteries>
91. Saft. (2006, October). *Multi-technology battery systems: Integrated solutions for torpedo propulsion (Doc N° 32004 - 2 -1006)*. Retrieved from

- <https://unece.org/DAM/trans/doc/2009/wp15ac1/ECE-TRANS-WP15-AC1-09-GE-inf21a1e.pdf>
92. Saft. (2013, March). Magnesium-silver chloride seawater-activated battery: Type V616 for A244 torpedoes (Doc No.: 35002-2-0313). Retrieved from https://www.saft.com/download_file/6X7JMGA3Fm6HdmtEv%252B2gtlbZ1bRRVHkjS11M6md92GD2EF7vU%252F3Oybbz3WOIG%252BxR8srpA5iCdJ%252FV3IQzTVHQyiTucngZKEg9KkYCLkowAvgAG1hurjK%252Ftrtimg9J0YwpCrnw0UmHQVU6BpAtoGiqOfVoenGPq8sAN8rYm7ZXKCs2Lxxw%253D%253D/V616_35002_2_0313.pdf
 93. M. P. Lannot, L. d'Ussel and J. Hastings, "Comparison of aluminum silver oxide and lithium oxyhalide batteries performances for underwater weapons propulsion," Proceedings of the 34th International Power Sources Symposium, Cherry Hill, NJ, USA, 1990, pp. 112-114, doi: 10.1109/IPSS.1990.145805.
 94. Chen, J., Xu, W., Wang, X., Yang, S., & Xiong, C. (2023). Progress and applications of seawater-activated batteries. *Sustainability*, 15(2), 1635. <https://doi.org/10.3390/su15021635>
 95. Fougeyrollas, R. (Naval Group), Courrillaud, D. (Naval Group), Chaffois, L. (EURENCO), & Chabin, P. (EURENCO). (2018, April). Heavy torpedo warhead: IM tests assessment. Presented at IMEMTS 2018, Portland. Retrieved from https://ndiastorage.blob.core.usgovcloudapi.net/ndia/2018/imem/20150_Chaffois_Presentation.pdf
 96. Korea Special Battery. (n.d.). Battery for torpedo. Retrieved from http://www.ksbatteries.com/en/?page_id=33
 97. Online forum post. (2020, December 16). Image from "Sold: Kokam Lithium-Ion NMC SLPB Battery Cells 30 AH 30C Discharge \$400 OBO." DIY Electric Car. Retrieved from https://www.diyelectriccar.com/attachments/20200118_163735-jpg.121087/
 98. Kokam. (2021). Superior lithium ion battery (KKBR-20210521-BM-CEL-07). Retrieved from https://www.masterinstruments.com.au/files/battery_information/kokam_cell_brochure2021.pdf
 99. C. M. Orndorff and C. J. Egan, "Electric propulsion: fleet readiness at affordable costs," in *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 11, no. 5, pp. 27-31, May 1996, doi: 10.1109/62.494185.
 100. Ragit, S.S., Singh, K., & Srinivas, M. (2023). Feasibility Study of Lithium Ion Batteries for Torpedo Applications. *Defence Science Journal*.