



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Εξηλεκτρισμός Πλωτών Μέσων:
Η Περίπτωση των Θαλάσσιων Σκούτερ.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Θεμιστοκλή Γ. Διδασκάλου

Επιβλέπων:

Δρ Δημήτριος Ζαφειράκης
Επίκουρος Καθηγητής Πα.Δ.Α.

Αθήνα, Μάρτιος 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Εξηλεκτρισμός Πλωτών Μέσων:
Η Περίπτωση των Θαλάσσιων Σκούτερ.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Θεμιστοκλή Γ. Διδασκάλου

Επιβλέπων: Δρ Δημήτριος Ζαφειράκης
Επίκουρος Καθηγητής Πα.Δ.Α.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική Επιτροπή την 14^η Μαρτίου 2023

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Δρ Δημήτριος Ζαφειράκης
Επικ. Καθηγητής Πα.Δ.Α.

.....
Δρ Κωνσταντίνος Μουστρής
Αναπλ. Καθηγητής Πα.Δ.Α.

.....
Δρ Γεώργιος Σπυρόπουλος
ΕΔΙΠ Α΄ Πα.Δ.Α.

Αθήνα, Μάρτιος 2023

Copyright © - Θεμιστοκλής Γ. Διδασκάλου, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Θεμιστοκλή Διδασκάλου του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 46145907 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής 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 πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Θεμιστοκλής Γ. Διδασκάλου

Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αναφέρεται στην ηλεκτρική πρόωση σκαφών και συγκεκριμένα στον εξηλεκτισμό των προσωπικών ταχύπλων σκαφών (PWC) γνωστά και ως τζετ σκι. Θα γίνει αναφορά στην δομή και τα μέρη που απαρτίζουν αυτού του είδους τα σκάφη καθώς επίσης και στη διαδικασία μετατροπής ενός βενζινοκίνητου τζετ σκι σε αμιγώς ηλεκτρικό. Ακόμη, θα παρουσιαστούν οι μέχρι τώρα προσπάθειες τόσο από Πανεπιστήμια του εξωτερικού όσο και από νεοσύστατες εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικών τζετ σκι. Τέλος, αναπτύσσοντας ολοκληρωμένο υπολογιστικό πλαίσιο και μελετώντας το πρόβλημα παραμετρικά, θα καθορίσουμε τις συνθήκες υπό τις οποίες το εγχείρημα εξηλεκτισμού ενός τέτοιου σκάφους είναι βιώσιμο.

Λέξεις Κλειδιά

Τζετ σκι, πρόωση, βενζινοκίνητο, εξηλεκτισμός.

Abstract

This thesis refers to the electric propulsion of boats and specifically to the electrification of personal watercraft (PWC) also known as jet skis. Reference will be made to the structure and parts that make up this type of boat as well as to the process of converting a gasoline powered jet ski to a pure electric one. Also, the efforts made so far both by Universities abroad and by newly established companies producing electric jet skis will be presented. Finally, by developing an integrated computational framework and by investigating the problem parametrically, we will determine the conditions under which the electrification of such a vessel becomes viable.

Key Words

Jet ski, propulsion, gasoline powered, electrification.

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ζαφειράκη Δημήτριο, ο οποίος στάθηκε αρωγός σε οποιαδήποτε δυσκολία αντιμετώπισα καθώς και που μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα που ο ίδιος επέλεξα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το σύνολο των καθηγητών που απαρτίζουν το Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής για τον χρόνο που μας αφιέρωσαν καθώς και τις γνώσεις που μας μεταλαμπάδευσαν. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, η οποία ήταν δίπλα μου και με στήριξε σε όλη την διάρκεια της φοίτησής μου και ιδιαίτερα τον αδερφό μου Σπύρο Διδασκάλου.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	11
1. Ηλεκτροκίνηση.	11
2. Πράσινη ηλεκτροκίνηση – πράσινα λιμάνια.	12
3. Ιστορία του τζετ σκι.	13
4. Εξέλιξη του τζετ σκι.	14
5. Η γάστρα του τζετ σκι.	15
6. Λειτουργία του τζετ σκι.	16
7. Χρήση τζετ σκι.	17
8. Προσπάθειες εξηλεκτισμού του τζετ σκι.	19
9. Μετατροπή μηχανοκίνητου τζετ σκι σε αμιγώς ηλεκτρικό.	20
9.1 Ηλεκτρικό μοτέρ πρόωσης.	21
9.2 Σύστημα ελέγχου του ηλεκτρικού μοτέρ.	23
9.3 Είδη μπαταριών.	23
9.4 Σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS).	26
9.5 Χειριστήριο επιτάχυνσης αναβάτη (throttle control).	26
10. Επιπρόσθετος εξοπλισμός του τζετ σκι.	27
11. Μετατροπή βενζινοκίνητου τζετ σκι σε αμιγώς ηλεκτρικό.	29
12. Βιωσιμότητα αμιγώς ηλεκτρικού τζετ σκι.	33
13. Συμπεράσματα.	48
Βιβλιογραφία.	49
Πίνακας 1 Βάρη (Kawasaki Ultra 250x)	34
Πίνακας 2 Απαιτούμενη υποδύναμη βάση τυπικών καταναλώσεων Kawasaki Ultra 250x	35
Πίνακας 3 Τυπικός ηλεκτροκινητήρας - βάρη	36
Πίνακας 4 Τυπική μπαταρία - βάρη για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 150kWh/kg	36
Πίνακας 5 Τυπική μπαταρία - βάρη για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 200Wh/kg	36
Πίνακας 6 Τυπική μπαταρία - βάρη για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 250Wh/kg.	37
Πίνακας 7 Συνολικά βάρη Η/Κ – συσσωρευτών για ενεργειακή πυκνότητα ίση 150kWh/kg.	37
Πίνακας 8 Συνολικά βάρη Η/Κ – συσσωρευτών για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 200Wh/kg	37

Πίνακας 9 Συνολικά βάρη H/K – συσσωρευτών για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 250Wh/kg	37
Πίνακας 10 Πίνακας εκτιμώμενων αυτονομιών	39
Πίνακας 11 Τυπικές καταναλώσεις βενζινοκίνητου jet ski για Kawasaki Ultra 250x (lt/h).	40
Πίνακας 12 Κόστη λειτουργίας βενζινοκίνητου jet ski για κύκλους ισοδύναμης λειτουργίας (€).....	41
Πίνακας 13 Κόστη λειτουργίας αμιγώς ηλεκτρικού jet ski για κύκλους ισοδύναμης λειτουργίας (€).....	41
Πίνακας 14 Διαφορά λειτουργικού κόστους ανά κύκλο eJet-ski (€)	42
Πίνακας 15 Πίνακας κόστους εξηλεκτρισμού (€).....	43
Πίνακας 16 Πίνακας ισχύος φόρτισης (kW)	43
Πίνακας 17 Πίνακας κόστους φορτιστή (€).....	44
Πίνακας 18 Πίνακας κύκλων ανά ημέρα για μεταβλητή ισχύ φόρτισης (κύκλοι/ημέρα)	44
Πίνακας 19 Πίνακας κύκλων ανά ημέρα για σταθερή ισχύ φόρτισης (κύκλοι/ημέρα)....	44
Πίνακας 20 Πίνακας κύκλων ανά χρόνο για μεταβλητή ισχύ φόρτισης (κύκλοι/χρόνο)..	45
Πίνακας 21 Πίνακας κύκλων ανά χρόνο για σταθερή ισχύ φόρτισης (κύκλοι/χρόνο)	45
Πίνακας 22 Πίνακας κύκλων απόσβεσης για μεταβλητή ισχύ φόρτισης (κύκλοι)	46
Πίνακας 23 Πίνακας κύκλων απόσβεσης για σταθερή ισχύ φόρτισης (κύκλοι).....	46
Πίνακας 24 Πίνακας ετών απόσβεσης για μεταβλητή ισχύ φόρτισης (έτη).....	47
Πίνακας 25 Πίνακας ετών απόσβεσης για σταθερή ισχύ φόρτισης (έτη)	47
Διάγραμμα 1 Εκτίμηση βάρους συστήματος συσσωρευτή-H/K για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 150kWh/kg	38
Διάγραμμα 2 Εκτίμηση βάρους συστήματος συσσωρευτή-H/K για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 200kWh/kg	38
Διάγραμμα 3 Εκτίμηση βάρους συστήματος συσσωρευτή-H/K για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 250kWh/kg	39
Διάγραμμα 4 Μέγιστη αυτονομία υπό τον περιορισμό του μέγιστου βάρους.....	40
Διάγραμμα 5 Κατανάλωση συμβατικού Jet-Ski για κύκλους ισοδύναμης διάρκειας	41
Διάγραμμα 6 Διαφορά λειτουργικού κόστους ανά κύκλο (eJet-ski)	42
Διάγραμμα 7 Διάγραμμα κύκλων ανά χρόνο συναρτήσει της ταχύτητας για μεταβλητή ισχύ φόρτισης.....	45
Διάγραμμα 8 Διάγραμμα κύκλων ανά χρόνο συναρτήσει της ταχύτητας για σταθερή ισχύ φόρτισης.....	46
Διάγραμμα 9 Έτη Απόσβεσης - Μεταβλητή & σταθερή ισχύς φορτιστή.....	47

Εικόνα 1 Πράσινα λιμάνια	13
Εικόνα 2 Kawasaki JS400 (1973)	14
Εικόνα 3 Yamaha FX CRUISER HO (2023)	15
Εικόνα 4 Sea-doo T3 hull deep V (2023).....	16
Εικόνα 5 Τυπική διάταξη ενός τζετ σκι.....	17
Εικόνα 6 Sea-doo FISHPRO TROPHY (2023).....	18
Εικόνα 7 Τζετ σκι διάσωσης και περισυλλογής.....	18
Εικόνα 8 Taiga Orca electric jet ski (2020).....	19
Εικόνα 9 Edolphin electric jet ski (2022).....	20
Εικόνα 10 Εσωτερική όψη ενός βενζινοκίνητου τζετ σκι	21
Εικόνα 11 Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη.....	23
Εικόνα 12 Χειριστήριο επιτάχυνσης τύπου μανέτα	27
Εικόνα 13 Χειριστήριο επιτάχυνσης περιστροφικό	27
Εικόνα 14 Βάση στήριξης βενζινοκίνητου μοτέρ σε τζετ σκι	28
Εικόνα 15 Άξονας μετάδοσης κίνησης	29
Εικόνα 16 Kawasaki Ultra 250x (2008)	29
Εικόνα 17 Εσωτερική όψη του βενζινοκινητήρα.....	30
Εικόνα 18 Εναπομείναν χώρος μετά την αφαίρεση του κινητήρα	30
Εικόνα 19 Άξονας μετάδοσης κίνησης	31
Εικόνα 20 Κόμπλερ κύριου άξονα	31
Εικόνα 21 Αντλία πρόωσης (jet pump).....	31
Εικόνα 22 Τελικό τμήμα αντλίας πρόωσης	32
Εικόνα 23 Σύστημα πρόωσης τζετ σκι	32
Εικόνα 24 Μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας	33
Εικόνα 25 Διάγραμμα αναλογιών kW/lb για τυπικούς ηλεκτροκινητήρες.....	35

Εισαγωγή

Ο όρος τζετ σκι εισήχθη από την Kawasaki το 1972 και αναφέρεται στο πρώτο εμπορικά επιτυχημένο προσωπικό θαλάσσιο σκάφος (PWC). Το τζετ σκι είναι ένα σκάφος σχεδιασμένο κυρίως για απόλαυση, αλλά χρησιμοποιείται επίσης για πρακτικές εφαρμογές όπως επίβλεψη και περισυλλογή αθλητών του σερφ. Όλες οι εφαρμογές των τζετ σκι απαιτούν υψηλή απόδοση, κάτι που οδήγησε στην ανάπτυξη βενζινοκινητήρων μεγάλης ισχύος για την κάλυψη των αναγκών. Λόγω της εκτεταμένης χρήσης ορυκτών καυσίμων και συγκεκριμένα βενζίνης, παρατηρείται αυξημένη απελευθέρωση ρύπων τόσο στον αέρα όσο και στο νερό καθώς και υψηλά επίπεδα ηχορύπανσης. Η μετατροπή των τζετ σκι σε ηλεκτρικά θα μείωνε σημαντικά όλες τις πηγές περιβαλλοντικής ρύπανσης, ωστόσο προκειμένου ένα ηλεκτρικό τζετ σκι να είναι εμπορικά βιώσιμο, θα πρέπει να ανταγωνιστεί τα συμβατικά συστήματα σε τιμή, απόδοση και ασφάλεια.

1. Ηλεκτροκίνηση.

Στο πλαίσιο των τεχνολογιών που πλαισιώνουν τις μεταφορές παρατηρείται αυξημένη ζήτηση για αποδοτικότερα μέσα με όσο το δυνατόν μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Όσον αφορά τις μεταφορές σε οδικό επίπεδο, συνεχώς νέες τεχνολογίες δοκιμάζονται και τελικά υιοθετούνται από τις εταιρίες κατασκευής οχημάτων. Για παράδειγμα, παρατηρείται μετάβαση από τις μηχανές εσωτερικής καύσης σε αμιγώς ηλεκτροκίνητα οχήματα. Αυτό σημαίνει πως τα οχήματα κινούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες οι οποίοι τροφοδοτούνται από μια μπαταρία.

Η ηλεκτροκίνηση παρουσιάζει διάφορα οφέλη μεταξύ των οποίων αυξημένη ροπή των οχημάτων, μείωση του θορύβου λειτουργίας καθώς επίσης και μειωμένες εκπομπές CO₂. Αυτή η μείωση προκύπτει όταν το ρεύμα που χρησιμοποιείται για την φόρτιση των οχημάτων προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ηλιακά – αιολικά συστήματα.

Στον κλάδο της ναυτιλίας, η ηλεκτροκίνηση υφίσταται για πάνω από 120 χρόνια. Οι κατασκευαστές θέλησαν να συμπεριλάβουν τα οφέλη της ηλεκτροκίνησης σε πλοία τα οποία προηγούμενα χρησιμοποιούσαν ντιζελομηχανές για την πρόωσή τους. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν πλοία τα οποία κινούνταν με την χρήση ηλεκτροκινητήρων των οποίων οι απαιτούμενες ενεργειακές ανάγκες προέρχονταν από γεννήτριες ντίζελ.

Στην ναυτιλία δεν εντάσσονται μόνο τα πλοία μεταφοράς εμπορευμάτων-επιβατών αλλά και σκάφη ιδιωτικής-επαγγελματικής χρήσης. Αν και είναι σαφές πως η πρώτη κατηγορία ευθύνεται για το μεγαλύτερο μερίδιο εκπομπών του συγκεκριμένου τομέα, λόγω του αυξημένου αριθμού μικρότερων σκαφών δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο και το αποτύπωμα της δεύτερης κατηγορίας.

Γι' αυτό τον λόγο, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονο ενδιαφέρον για τον εξηλεκτρισμό των μικρών θαλάσσιων μέσων. Νεοσύστατες εταιρίες παράγουν ηλεκτρικά μοτέρ ειδικά διαμορφωμένα έτσι ώστε να μπορούν να καλύπτουν τις ανάγκες πρόωσης μικρών και μεσαίων σκαφών, καθώς και να λειτουργούν σε συνθήκες που ορίζει το υδάτινο περιβάλλον. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η βελτίωση των μπαταριών προκειμένου να καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο, παρέχοντας όμως όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αυτονομία. Για τον λόγο αυτό η παρούσα διπλωματική εργασία θα εστιάσει στον εξηλεκτρισμό των θαλάσσιων σκούτερ ή αλλιώς τζετ σκι, προσωπικά σκάφη αναψυχής περιορισμένων διαστάσεων, με μέγιστο αριθμό επιβαινόντων τα τρία άτομα και συνάμα πολύ υψηλές επιδόσεις.

2. Πράσινη ηλεκτροκίνηση – πράσινα λιμάνια.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα ηλεκτροκίνητα σκάφη τροφοδοτούνται από μπαταρίες ώστε να καλύψουν τις λειτουργικές τους ανάγκες. Για την επαναφόρτιση τους, χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών φορτιστές ανάλογα με το μέγεθος του συστήματος του σκάφους. Προκειμένου τα ηλεκτροκίνητα σκάφη να γίνουν περισσότερο διαδεδομένα, θα πρέπει κάθε λιμένας να δίνει την δυνατότητα επαναφόρτισης, έχοντας τοποθετημένους φορτιστές στις προβλήτες του.

Ένα ακόμη στοιχείο που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην μετάβαση σε ηλεκτροκίνητα σκάφη είναι η προέλευση της ενέργειας επαναφόρτισης. Με άλλα λόγια, προκειμένου η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται στο σκάφος να χαρακτηριστεί πράσινη, το ρεύμα πρέπει να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Συνεπώς, μιλάμε για ένα ολοκληρωμένο σύστημα παροχής ενέργειας, το οποίο χρησιμοποιεί την ηλιακή κατά βάση ενέργεια και υπό προϋποθέσεις την αιολική. Πέρα από ένα αιολικό ή φωτοβολταϊκό πάρκο που βρίσκεται μακριά από τον λιμένα, μπορούν να κατασκευαστούν κτήρια, υπόστεγα και άλλα τμήματα στα οποία να ενσωματώνονται π.χ. ηλιακά πάνελ, προκειμένου να συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια και να την αποθηκεύουν για χρήση εντός του λιμένα.

Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να μειωθεί το κόστος επαναφόρτισης των σκαφών καθώς επίσης και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατά την χρήση τους.



Εικόνα 1 Πράσινα λιμάνια

3. Ιστορία του τζετ σκι.

Ο εφευρέτης ονόματι Clayton Jacobson II δημιούργησε το πρώτο προσωπικό σκάφος (PWC) το 1968, το οποίο ήταν ένα stand-up σκάφος εφοδιασμένο με τζετ πρόωση. Με αυτή του την δημιουργία εξασφάλισε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το επόμενο έτος για το "μηχανοκίνητο υδρόβιο όχημα" του. Ο Jacobson συνεργάστηκε με την Bombardier, μια εταιρεία που κατασκευάζει οχήματα χιονιού, με την ιδέα να μετατραπεί το Ski-Doo της εταιρείας προκειμένου να μπορεί να λειτουργεί στο νερό. Με την Bombardier ξεκίνησαν να συνεργάζονται για τη δημιουργία αυτού που σήμερα είναι γνωστό ως Sea-Doo. Το 1971, μετά από κάποιες διαφωνίες όσον αφορά την συνεργασία, τα δικαιώματα ευρεσιτεχνίας και αδειοδότησης παραδόθηκαν στην Kawasaki πριν η Sea-Doo εισέλθει στην αγορά. Στη συνέχεια, η Kawasaki λάνσαρε την εφεύρεση στην αγορά το 1972, με την εμπορική ονομασία Jet Ski (Club, 2011).



Εικόνα 2 Kawasaki JS400 (1973)

4. Εξέλιξη του τζετ σκι.

Στον κλάδο κατασκευής τζετ σκι δεν συναντάμε μεγάλο αριθμό κατασκευαστών. Κυρίαρχες εταιρίες θεωρούνται η KAWASAKI-YAMAHA-SEA-DOO οι οποίες κατέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό των πωλήσεων παγκοσμίως. Ξεκινώντας το 1965, η SEA-DOO κατασκευάζει το πρώτο προσωπικό σκάφος αναψυχής (PWC) το οποίο όμως δεν ελκύει το αγοραστικό κοινό με αποτέλεσμα η BOMBARDIER, канаδέζικη εταιρία που προμήθευε με κινητήρες την SEA-DOO να εγκαταλείψει το όλο εγχείρημα. Το 1972, η ιαπωνική εταιρία KAWASAKI κατασκευάζει το πρώτο της όρθιο τζετ σκι το οποίο κερδίζει την αμερικάνικη αγορά το 1973. Το συγκεκριμένο μοντέλο λανσαρίστηκε με ένα δίχρονο θερμικό μοτέρ 400cc. Καθώς τα τζετ σκι γίνονταν όλο και πιο διαδεδομένα, οι εταιρίες δημιουργούσαν διαρκώς νέες τεχνολογίες τις οποίες ενσωμάτωναν στα σκάφη τους. Το 1986, η KAWASAKI κατασκευάζει το πρώτο "καθιστό" τζετ σκι καθώς τα όρθια τζετ χρειάζονταν τόσο φυσική κατάσταση όσο και οδηγικές ικανότητες για να χρησιμοποιηθούν. Το 1986 η YAMAHA εισέρχεται στην αγορά κατασκευάζοντας το πρώτο της "καθιστό" τζετ σκι. Έπειτα από 2 έτη, η SEA-DOO σε συνεργασία με την BOMBARDIER επανέρχονται στον χώρο του τζετ σκι δημιουργώντας το δικό τους διθέσιο "καθιστό" σκάφος. Τα πρώτα τζετ σκι εφοδιάζονται με δίχρονους κινητήρες της τάξης των 500cc. Καθώς ο ανταγωνισμός και η ζήτηση στον χώρο όλο και αυξάνονται, οι εταιρίες δημιουργούν μεγαλύτερα και πιο αποδοτικά σκάφη. Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα παρουσιάζονται τα πρώτα τριθέσια σκάφη τα οποία εφοδιάζονται πλέον με τετράχρονους κινητήρες αυξημένης ισχύος. Φτάνοντας στο σήμερα, τα τζετ σκι εφοδιάζονται με υπερτροφοδοτούμενους κινητήρες της τάξης των 300+ ίππων, καθώς επίσης φέρουν τεχνολογίες όπως όπισθεν, cruise control, πλοήγηση κ.α. Τέλος, πρώτη η SEA-DOO το 2023 κάνει χρήση

υλικών νέας τεχνολογίας όπως carbon προκειμένου να μειώσει το βάρος αλλά και να αυξήσει την αντοχή στα σκάφη της (Club, 2011), (Yamaha Motor Co., 2023).



Εικόνα 3 Yamaha FX CRUISER HO (2023)

5. Η γάστρα του τζετ σκι.

Η κατασκευή του τζετ σκι βασίζεται πάνω σε ένα κέλυφος το οποίο ονομάζεται γάστρα του σκάφους.

Η γάστρα είναι το τμήμα του τζετ σκι το οποίο έρχεται σε επαφή με το νερό. Επάνω από την γάστρα βρίσκεται τοποθετημένο το κατάστρωμα. Τα δύο αυτά τμήματα του σκάφους είναι συνδεδεμένα έτσι μεταξύ τους ώστε το σκάφος εσωτερικά να είναι στεγανό. Συνήθη υλικά κατασκευής είναι ο υαλοβάμβακας καθώς επίσης και το carbon όπου με την χρήση ειδικών ρητινών κατασκευάζονται οι διάφοροι τύποι των γαστρών.

Οι γάστρες των σκαφών ποικίλουν ανάλογα με την χρήση και το μέγεθος αυτών. Για παράδειγμα, τα σκάφη που πλέουν με μικρές ταχύτητες και ενδείκνυνται για υδάτινα περιβάλλοντα χωρίς κυματισμό φέρουν επίπεδη γάστρα, ενώ αντιθέτως σκάφη που πλέουν σε πελάγη με υψηλές ταχύτητες χρησιμοποιούν γάστρες τύπου V. Έτσι και τα τζετ σκι εφοδιάζονται με γάστρα τύπου V, δηλαδή μια γάστρα που η πλώρη είναι μυτερή και ισιώνει όσο πλησιάζουμε στην πρύμνη. Η δομή αυτή βοηθά το σκάφος να σκίζει τα κύματα και να ταξιδεύει ουσιαστικά με το πίσω τμήμα του. Το μειονέκτημα αυτού του τύπου γάστρας είναι ότι προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές ταχύτητες χρειάζεται αυξημένη υποδύναμη (Hiseadock, 2023).



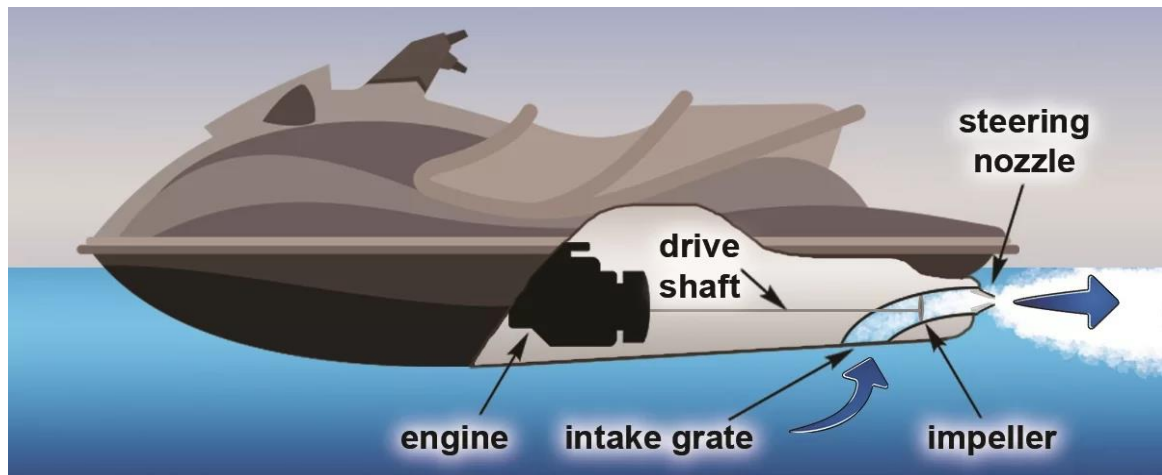
Εικόνα 4 Sea-doo T3 hull deep V (2023)

6. Λειτουργία του τζετ σκι.

Σε όλα τα τζετ σκι μέχρι και σήμερα το μέσο για την δημιουργία ώθησης είναι jet drive ή αλλιώς αντλία νερού. Η αρχή λειτουργίας της αντλίας αυτής βασίζεται στον τρίτο νόμο του Νεύτωνα (νόμος δράσης -αντίδρασης).

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον Νεύτωνα κάθε δύναμη που ασκεί ένα αντικείμενο σε ένα δεύτερο αντικείμενο, είναι μια ίση και αντίθετη δύναμη που ασκείται από το δεύτερο αντικείμενο στο πρώτο. Η πτερωτή της αντλίας προωθήσεως ασκεί δύναμη στο νερό, το οποίο έχει μικρή μάζα αλλά πολύ μεγάλη επιτάχυνση, ενώ το νερό, που εξέρχεται από την σωλήνωση ασκεί μια δύναμη στο τζετ σκι προς την αντίθετη κατεύθυνση προωθώντας το τζετ σκι προς τα εμπρός, έχοντας μεγαλύτερη μάζα και μικρότερη επιτάχυνση. Το νερό που χρησιμοποιείται για την διαδικασία αυτή εισέρχεται μέσω μιας σχάρας εισαγωγής η οποία είναι τοποθετημένη στο κάτω τμήμα της γάστρας του τζετ σκι. Προκειμένου να ολοκληρωθεί η κίνηση αυτή του νερού, εντός της σωλήνωσης είναι τοποθετημένη μια πτερωτή η οποία απαρτίζεται από τρία πτερύγια και έχει διάμετρο περίπου 15cm, όντας συνδεδεμένη μέσω άξονα με μία μηχανή εσωτερικής καύσης. Έχοντας την προπέλα τοποθετημένη εντός της κατασκευής αυτής αποφεύγονται τραυματισμοί που είναι πιο συνηθισμένοι σε σκάφη που διαθέτουν εξωλέμβιο ή έσω-έξω κινητήρα καθώς η προπέλα είναι εκτεθειμένη.

Τέλος, το στρίψιμο του τζετ σκι επιτυγχάνεται με την ζεύξη του τιμονιού και ενός κινούμενου τμήματος που ακουμπά στην έξοδο της σωλήνωσης με την χρήση μιας ντίζας. Βέβαια, για να επιτευχθεί η στροφή του τζετ σκι χρειάζεται αυξημένη ισχύ (Jetdrift, 2022).



Εικόνα 5 Τυπική διάταξη ενός τζετ σκι

7. Χρήση τζετ σκι.

Αρχικά τα τζετ σκι δημιουργήθηκαν με κύριο σκοπό την ψυχαγωγία του αναβάτη σε κοντινή εμβέλεια από την ακτή. Με την πάροδο των χρόνων και με την εξέλιξη στον κλάδο, τα τζετ σκι χρησιμοποιούνται και για άλλους σκοπούς πέραν του ψυχαγωγικού τους χαρακτήρα.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στην ψυχαγωγία, τα τζετ σκι πρωταγωνιστούν στο θαλάσσιο παιχνίδι λόγω της ευκολίας χειρισμού. Ακόμη, εκμεταλλευόμενοι τις μικρές τους διαστάσεις, οι αναβάτες χρησιμοποιούν τα τζετ σκι για θαλάσσιο κάμπινγκ καθώς και για εξερεύνηση ακτών. Η ταχύτητά τους και η άμεση απόκριση τα κάνει επίσης δημοφιλή τόσο σε θαλάσσιους αγώνες όσο και στην υποστήριξη διάφορων θαλάσσιων παιχνιδιών συμπεριλαμβανομένου και του fly board, μια κατασκευή που χρησιμοποιεί την δύναμη του τζετ σκι προκειμένου ο αναβάτης να αιωρείται πάνω από την επιφάνεια του νερού.

Ακόμη δεν είναι λίγοι εκείνοι που χρησιμοποιούν τα τζετ σκι για ψάρεμα διαμορφώνοντάς τα κατάλληλα για να εξυπηρετούν αυτό τον σκοπό. Μάλιστα, πρώτη η SEA-DOO θέλοντας να καλύψει τις επιθυμίες του αγοραστικού κοινού, παρουσίασε ένα ειδικά διαμορφωμένο τζετ σκι που προορίζεται για ψάρεμα.



Εικόνα 6 Sea-doo FISHPRO TROPHY (2023)

Επιπλέον, τζετ σκι που φέρουν βοηθητική σανίδα πλεύσης στο πίσω τμήμα τους, χρησιμοποιούνται τόσο σε αγώνες του σερφ όσον αφορά την περισυλλογή αθλητών μετά από πτώση, όσο και σε ναυαγσσωστικό επίπεδο, σε παραλίες λουόμενων. Τέλος, τζετ σκι συναντάμε σε διάφορα σώματα όπως το πολεμικό ναυτικό και το λιμενικό (Jetdrift, 2022).



Εικόνα 7 Τζετ σκι διάσωσης και περισυλλογής

8. Προσπάθειες εξηλεκτρισμού του τζετ σκι.

Αν και στις μέρες μας παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά οχήματα, στον τομέα των τζετ σκι τα στοιχεία δεν είναι τόσο ενθαρρυντικά. Οι κορυφαίες εταιρίες στον χώρο συνεχίζουν να εξελίσσουν και να τοποθετούν στα σκάφη τους βενζινοκινητήρες υψηλών επιδόσεων θέτοντας την ηλεκτροκίνηση σε δεύτερη μοίρα. Αυτό συμβαίνει καθώς οι εταιρίες έρχονται αντιμέτωπες με ζητήματα που αφορούν τόσο στο κόστος παραγωγής, άρα και πώλησης, όσο και σε θέματα αποδοτικότητας και αξιοπιστίας.

Καθώς οι κορυφαίοι παραγωγοί τζετ σκι υιοθετούν αυτή τη στάση, δημιουργούνται νέες εταιρίες οι οποίες προσπαθούν να εισέλθουν στο χώρο παρέχοντας στο αγοραστικό κοινό ηλεκτροκίνητα σκάφη. Το πρώτο αμιγώς ηλεκτρικό τζετ σκι παρουσιάστηκε το 2020 από την εταιρία Taiga Motors με εμπορική ονομασία Taiga Orca.

Επρόκειτο για ένα σύγχρονο τζετ σκι εξοπλισμένο με ηλεκτρικό κινητήρα μεγέθους 134kW (180 ίππων) και μπαταρία χωρητικότητας 23kWh, η οποία σε συνθήκες πλεύσης με ταχύτητες της τάξης των 70km/h (38 knot) προσφέρει αυτονομία περίπου δύο ωρών. Το σύστημα έχει την δυνατότητα φόρτισης τριών διαφορετικών ταχυτήτων με γρηγορότερη αυτή της ταχείας φόρτισης όπου σε είκοσι λεπτά έχει επιτευχθεί το 80% αυτής (ΚΟΥΚΟΥΒΙΝΟΣ, 2020).



Εικόνα 8 Taiga Orca electric jet ski (2020)

Μια ακόμη προσπάθεια ολοκληρώθηκε το 2022 από μία νεοσύστατη εταιρία παραγωγής ηλεκτρικών τζετ σκι που ονομάζεται EDOLPHIN και εδρεύει στην Γαλλία. Η συγκεκριμένη εταιρία δημιούργησε ένα αμιγώς ηλεκτρικό σκάφος ισχύος 100kW που λόγω της ελαφριάς κατασκευής του αγγίζει την τελική ταχύτητα των 90km/h. Η αυτονομία του αγγίζει επίσης τις δύο ώρες (E-dolphin, 2023).



Εικόνα 9 Edolphin electric jet ski (2022)

Πέρα από τις νεοσύστατες αυτές εταιρίες, προσπάθειες εξηλεκτισμού των τζετ σκι έχουν πραγματοποιηθεί εντός πανεπιστημίων σε ερευνητικό επίπεδο. Κορυφαία θεωρείται η κατασκευή ηλεκτρικού τζετ σκι που πραγματοποίησαν σπουδαστές του UWA (University of Western Australia). Οι εν λόγω σπουδαστές χρησιμοποίησαν την γάστρα ενός τζετ σκι της εταιρίας SEA-DOO εντός της οποίας τοποθέτησαν όλα τα εξαρτήματα προκειμένου η πρόωση του τζετ σκι να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία ενός αμιγώς ηλεκτρικού σκάφους το οποίο ανέπτυξε ταχύτητα της τάξης των 25m/h και εμφάνιζε αυτονομία περίπου 30 λεπτών (Beckley, 2013).

9. Μετατροπή μηχανοκίνητου τζετ σκι σε αμιγώς ηλεκτρικό.

Μέχρι πρότινος, όπου εμφανίστηκαν εταιρίες κατασκευής αμιγώς ηλεκτρικών τζετ σκι, όλες οι μετατροπές βασίζονταν πάνω σε σκάφη κατασκευασμένα από τις κυρίαρχες εταιρίες του χώρου. Προκειμένου η πρόωση ενός τζετ σκι να μετατραπεί σε ηλεκτρική, αρχικά αφαιρούνται όλα τα κύρια και βοηθητικά μέρη που διαθέτει το σκάφος για την μηχανοκίνητη πρόωση. Αυτά είναι η βενζινοκίνητη μονάδα πρόωσης,

που αποτελείται από τον βασικό κινητήρα καθώς και από περιφερειακά τμήματά του όπως η μονάδα ψύξης και υπερτροφοδότησης. Ακόμη, αφαιρούνται τμήματα όπως το ρεζερβουάρ καυσίμου καθώς και η μονάδα ελέγχου του κινητήρα.

Με αυτή τη διαδικασία αφαίρεσης των παραπάνω τμημάτων, διαμορφώνεται ένα σκάφος το οποίο πέρα από το εξωτερικό τμήμα, το οποίο παραμένει ίδιο, εσωτερικά φέρει μόνο τον κύριο άξονα μετάδοσης κίνησης καθώς επίσης και βοηθητικά τμήματα που αφορούν στην πλεύση.



Εικόνα 10 Εσωτερική όψη ενός βενζινοκίνητου τζετ σκι

Είτε στην πρώτη περίπτωση, όπου κατασκευάζεται ένα αμιγώς ηλεκτρικό τζετ σκι από την αρχή, είτε στη δεύτερη, όπου χρησιμοποιείται το κύριο σώμα ενώ αφαιρούνται όλα τα υφιστάμενα μηχανικά μέρη, δεν παρατηρούνται διαφορές στα νέα εξαρτήματα που θα χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε το σκάφος να γίνει αμιγώς ηλεκτρικό. Τα κυριότερα μέρη ενός ηλεκτροκίνητου τζετ σκι είναι το ηλεκτρικό μοτέρ παραγωγής κίνησης, μία συστοιχία μπαταριών καθώς και μια μονάδα ελέγχου αυτών των δύο (Beckley, 2013).

9.1 Ηλεκτρικό μοτέρ πρόωσης.

Το ηλεκτρικό μοτέρ που τοποθετείται σε ένα τζετ σκι είναι το μέσο το οποίο μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική, έτσι ώστε να περιστρέφεται ο άξονας

μετάδοσης κίνησης της προπέλας του σκάφους με αποτέλεσμα την λειτουργία του jet drive και τελικά την κίνηση αυτού. Προκειμένου να γίνει επιλογή του ηλεκτρικού μοτέρ, πρέπει να ληφθούν υπόψιν παράμετροι όπως το μέγεθος και το βάρος του, καθώς επίσης και παράμετροι που σχετίζονται με την απόδοση και τις ανάγκες ισχύος αυτού. Ένα τζετ σκι που θα μετατραπεί σε αμιγώς ηλεκτρικό θα πρέπει να παρουσιάζει ισχύ και αυτονομία αντίστοιχη με όταν χρησιμοποιούνταν θερμική μηχανή ισχύος.

Στο εμπόριο συναντάμε διάφορους τύπους ηλεκτρικών κινητήρων. Συνήθης είναι οι ηλεκτροκινητήρες εναλλασσόμενου (AC) και συνεχούς ρεύματος (DC). Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι απλούστεροι όσον αφορά την κατασκευή τους συγκριτικά με αυτούς του συνεχούς ρεύματος.

Καθώς οι ανάγκες για μεγαλύτερη ισχύ και απόδοση όλο και αυξάνονται, στην αγορά πλέον συναντάμε διάφορους νέους τύπους ηλεκτρικών μοτέρ που εφοδιάζονται μάλιστα και τα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα που κυκλοφορούν. Αυτοί είναι κυρίως οι επαγωγικοί ασύγχρονοι χωρίς ψήκτρες, οι ασύγχρονοι που διαθέτουν εξωτερικές ψήκτρες καθώς και οι σύγχρονοι ηλεκτροκινητήρες μόνιμου μαγνήτη.

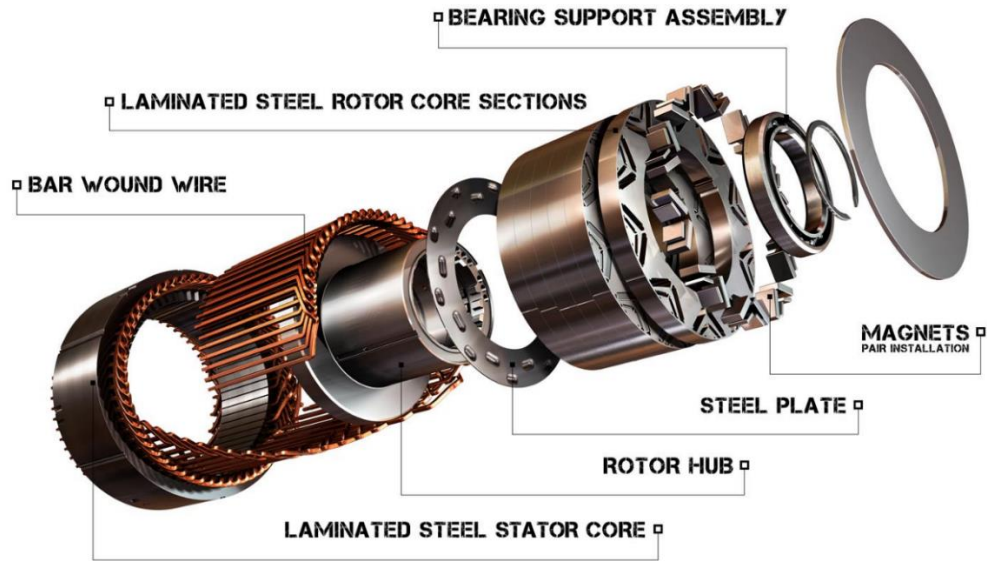
Οι επαγωγικοί κινητήρες αφενός προσφέρουν αυξημένη ισχύ, αφετέρου παρουσιάζουν μειωμένο κόστος παραγωγής. Συγκριτικά, ένας σύγχρονος κινητήρας παρουσιάζει το πλεονέκτημα του εύκολου χειρισμού καθώς επίσης και των περιορισμένων διαστάσεων σε σχέση με έναν ασύγχρονο. Επίσης συναντάμε διαφορές ως προς την ψύξη, όπου ένας σύγχρονος κινητήρας ψύχεται ευκολότερα από έναν ασύγχρονο. Ωστόσο, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και τα ηλεκτρονικά ισχύος που συνοδεύουν το σύστημά μας τα οποία είναι υπεύθυνα για τον μετασχηματισμό του συνεχούς ρεύματος (DC) των μπαταριών σε εναλλασσόμενο (AC).

Μεταξύ των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη και των επαγωγικών, συναντάμε πολλά κοινά χαρακτηριστικά. Και οι δύο διαθέτουν έναν στάτορα ο οποίος διαθέτει περιελίξεις γύρω από το κυλινδρικό κέλυφος με έναν ρότορα ο οποίος περιστρέφεται στη μέση. Στους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, ο ρότορας αποτελείται από μαγνήτες νεοδυμίου ενώ απουσιάζει η περιέλιξη χαλκού.

Κατά την τοποθέτηση ενός κινητήρα οποιουδήποτε είδους σε ένα σκάφος, τοποθετείται περιμετρικά αυτού ένα σύστημα ψύξης, το οποίο χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό προκειμένου να διατηρεί την θερμοκρασία του κινητήρα σταθερή και να αποφεύγεται η υπερθέρμανση καθώς και τυχόν βλάβες (Electric motor, 2022).



General Motors Permanent Magnet Electric Motor



Εικόνα 11 Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη

9.2 Σύστημα ελέγχου του ηλεκτρικού μοτέρ.

Στα σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα συνήθως είναι η τοποθέτηση ηλεκτρικού μοτέρ μόνιμου μαγνήτη. Προκειμένου να λάβουν χώρα όλες οι απαραίτητες λειτουργίες, το μοτέρ συνοδεύεται από ένα σύστημα ελέγχου (motor controller). Το σύστημα αυτό ελέγχει την ροπή και την ταχύτητα στρέψης του κινητήρα μόνιμου μαγνήτη. Το σύστημα λαμβάνει σήμα από τον χειριστή μέσω ειδικά διαμορφωμένων χειριστηρίων και καθορίζει την τάση που θα δεχτεί το ηλεκτρικό μοτέρ. Έτσι αυξάνοντας την τάση που δέχεται το μοτέρ, αυξάνεται αναλογικά η ροπή και η ταχύτητα στρέψης. Το σύστημα είναι υπεύθυνο για τις παρακάτω λειτουργίες:

- Ενεργοποίηση – απενεργοποίηση ηλεκτρικού μοτέρ.
- Μεταβολή ροπής- ταχύτητας .
- Προστασία ηλεκτρικού κινητήρα κατά την χρήση.
- Αποστολή δεδομένων του κινητήρα στον χρήστη (Beckley, 2013).

9.3 Είδη μπαταριών.

Τα ηλεκτρικά οχήματα (EV) βασίζονται σε μπαταρίες για την αποθήκευση και την παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτεί το σύστημα πρόωσης του

οχήματος. Υπάρχουν αρκετοί τύποι μπαταριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρικά οχήματα, συμπεριλαμβανομένων των μπαταριών μολύβδου-οξέος, υδριδίου νικελίου-μετάλλου (NiMH) και μπαταριών ιόντων λιθίου.

- Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι ο παλαιότερος τύπος επαναφορτιζόμενων μπαταριών και χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα εδώ και δεκαετίες. Είναι σχετικά οικονομικές και έχουν μακρά ιστορία χρήσης στα αυτοκίνητα, αλλά είναι επίσης σχετικά βαριές και έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με άλλους τύπους μπαταριών. Ως αποτέλεσμα, δεν χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα EV.
- Οι μπαταρίες NiMH διαθέτουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος όσον αφορά το βάρος και την ενεργειακή πυκνότητα. Έχουν χρησιμοποιηθεί σε ορισμένα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEV) και plug-in υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (PHEV), αλλά είναι επίσης σχετικά ακριβές και έχουν χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου.
- Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ο πιο κοινός τύπος μπαταριών που χρησιμοποιούνται σήμερα στα ηλεκτρικά οχήματα. Έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, που σημαίνει ότι μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε μικρό όγκο. Είναι επίσης σχετικά ελαφριές και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Επιπλέον, η απόδοσή τους δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις αλλαγές θερμοκρασίας. Ωστόσο, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι σχετικά ακριβές και η απόδοσή τους μπορεί να υποβαθμιστεί με την πάροδο του χρόνου.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου που χρησιμοποιούνται στα EV διατίθενται σε διάφορες μορφές, όπως οξείδιο του κοβαλτίου λιθίου (LiCoO_2), οξείδιο λιθίου νικελίου κοβαλτίου μαγγανίου (LiNiCoMnO_2 ή NMC), φωσφορικού σιδήρου λιθίου (LiFePO_4 ή LFP) και οξείδιο του νικελίου λιθίου κοβαλτίου (ONCAI αλουμίνιο). με το καθένα να έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

- Οι μπαταρίες LiCoO_2 έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, αλλά είναι επίσης σχετικά ακριβές και μπορεί να είναι λιγότερο σταθερές από άλλους τύπους μπαταριών ιόντων λιθίου.
- Οι μπαταρίες LiNiCoMnO_2 είναι μια καλή ισορροπία μεταξύ πυκνότητας ενέργειας, κόστους και σταθερότητας, αλλά μπορεί να μην είναι σε θέση να υποστηρίξουν τόσους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης όσοι οι μπαταρίες LFP.
- Οι μπαταρίες LiFePO_4 έχουν μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα από άλλους τύπους μπαταριών ιόντων λιθίου, αλλά είναι φθηνότερες, πιο σταθερές και μπορούν να υποστηρίξουν περισσότερους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Έχουν επίσης καλύτερη θερμική σταθερότητα και ιστορικό ασφάλειας.
- Οι μπαταρίες LiNiCoAlO_2 είναι παρόμοιες με τις μπαταρίες LiCoO_2 όσον αφορά την ενεργειακή πυκνότητα, αλλά έχουν καλύτερη θερμική σταθερότητα, καθιστώντας τις πιο ασφαλείς στη χρήση.

Επί του παρόντος, οι περισσότεροι κατασκευαστές EV έχουν υιοθετήσει τη χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου (κυρίως NMC) λόγω της ισορροπίας μεταξύ πυκνότητας ενέργειας, κόστους και σταθερότητας.

Μια μπαταρία EV αποτελείται συνήθως από μεγάλο αριθμό μεμονωμένων στοιχείων μπαταρίας ιόντων λιθίου που συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά και παράλληλα. Η χωρητικότητα της μπαταρίας μετριέται σε κιλοβατώρες (kWh) και όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα, τόσο περισσότερη ενέργεια μπορεί να αποθηκεύσει η μπαταρία. Η εμβέλεια ενός EV σχετίζεται άμεσα με τη χωρητικότητα της μπαταρίας του. Μια μπαταρία με μεγαλύτερη χωρητικότητα θα επιτρέψει στο EV να ταξιδέψει μακρύτερα με μία μόνο φόρτιση από μια μπαταρία με μικρότερη χωρητικότητα.

Εκτός από τον τύπο της μπαταρίας και τη χωρητικότητά της, άλλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση μιας μπαταρίας EV περιλαμβάνουν τους ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης, τη θερμοκρασία και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης. Οι μπαταρίες EV θα πρέπει να φορτίζονται και να εκφορτίζονται με σχετικά αργό ρυθμό για να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής τους. Επίσης, αποδίδουν καλύτερα σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας, επομένως ορισμένοι κατασκευαστές EV περιλαμβάνουν συστήματα θέρμανσης και ψύξης μπαταρίας για να διατηρούν τη μπαταρία στη βέλτιστη θερμοκρασία.

Συνοπτικά, οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της απόδοσης και της αυτονομίας του οχήματος. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος και NiMH χρησιμοποιήθηκαν στις πρώτες εφαρμογές των ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από μπαταρίες ιόντων λιθίου λόγω της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας, του χαμηλότερου βάρους και της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής τους. Μεταξύ των μπαταριών ιόντων λιθίου, διατίθεται διαφορετική χημεία καθόδου όπως LiCoO_2 , LiNiCoMnO_2 , LiFePO_4 , LiNiCoAlO_2 η καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Μια άλλη πτυχή των μπαταριών EV είναι η διαδικασία ανακύκλωσης και απόρριψης των χρησιμοποιημένων μπαταριών. Η ανακύκλωση των μπαταριών EV είναι σημαντική όχι μόνο για τη διατήρηση των πόρων αλλά και για την ασφαλή απόρριψη των επικίνδυνων υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτές. Επί του παρόντος, η διαδικασία ανακύκλωσης για τις μπαταρίες EV δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί πλήρως, αλλά υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη μεθόδων ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των υλικών από αυτές τις μπαταρίες.

Συμπερασματικά, οι μπαταρίες αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των ηλεκτρικών οχημάτων και η απόδοση και η εμβέλειά τους εξαρτώνται άμεσα από τον τύπο των μπαταριών που χρησιμοποιούνται και τον τρόπο σχεδιασμού και διαχείρισής τους. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι αυτή τη στιγμή η πιο δημοφιλής επιλογή μεταξύ των κατασκευαστών EV λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, του χαμηλού

βάρους και της μεγάλης διάρκειας ζωής τους. Επίσης, η ανακύκλωση και η απόρριψη των χρησιμοποιημένων μπαταριών είναι σημαντικός παράγοντας για το βιώσιμο μέλλον (Michael Hartwick, 2020).

9.4 Σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS).

Το σύστημα διαχείρισης μπαταριών είναι μια μονάδα ελέγχου που τοποθετείται σε κάθε ηλεκτρικό όχημα. Κύρια λειτουργία του συστήματος είναι η προστασία των μπαταριών από κάθε είδους ζημιά, η παράταση ζωής των μπαταριών του συστήματος καθώς και η διατήρηση των μπαταριών σε επίπεδο τέτοιο όπου να μπορούν να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες του συστήματος.

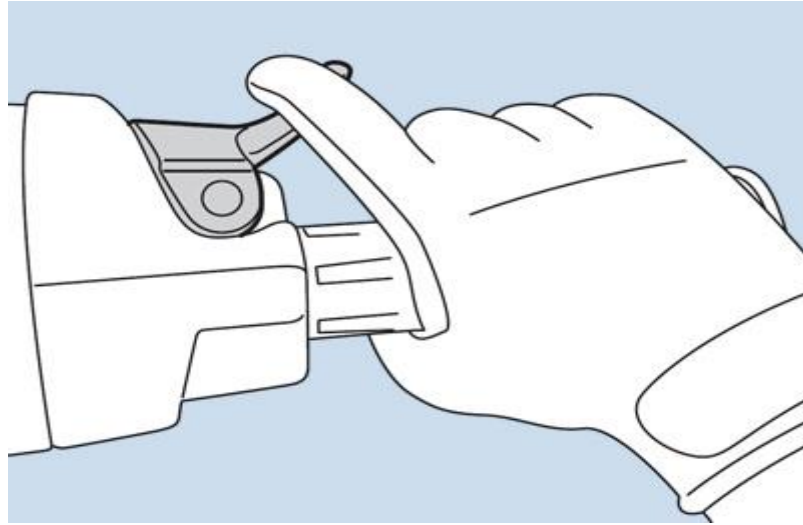
Προκειμένου το BMS να επιτύχει τα παραπάνω γίνονται διάφορες διεργασίες όπως,

- Προστασία των στοιχείων της μπαταρίας: Η μπαταρία που χρησιμοποιείται σε ένα ηλεκτρικό όχημα, απαρτίζεται από ένα πλήθος στοιχείων. Το σύστημα BMS διασφαλίζει τις σωστές συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργεί η μπαταρία του οχήματος. Όταν κατά την χρήση ξεπεραστούν οι ανοχές του συστήματος τότε το BMS παρεμβαίνει και διακόπτεται η λειτουργία αυτού.
- Έλεγχος κατά την φόρτιση: Το μεγαλύτερο ποσοστό βλαβών παρουσιάζεται κατά την διαδικασία της φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό, το BMS αναγνωρίζει τον τύπο φορτιστή που αντιστοιχεί στις μπαταρίες καθώς επίσης και τις συνθήκες φόρτισης. Σε αντίθετη περίπτωση, το σύστημα παρεμβαίνει και διακόπτεται η φόρτιση.
- Ισορροπία μεταξύ των στοιχείων: Κατά την κατασκευή και με την χρήση των μπαταριών και την συνεχή φόρτιση – εκφόρτιση, παρατηρείται πως η απόδοση των στοιχείων της μπαταρίας δεν είναι ομοιόμορφη. Το σύστημα BMS είναι υπεύθυνο προκειμένου ανεξάρτητα από την απόδοση του κάθε στοιχείου, η συνολική απόδοση της μπαταρίας να είναι η προβλεπόμενη.
- Καταγραφή ιστορικού: Το σύστημα BMS καταγράφει διαρκώς δεδομένα που αφορούν στην χρήση των μπαταριών. Με αυτόν τον τρόπο συγκεντρώνονται δεδομένα που βοηθούν στην εκτίμηση υγείας και απόδοσης των μπαταριών (Beckley, 2013).

9.5 Χειριστήριο επιτάχυνσης αναβάτη (throttle control).

Το χειριστήριο επιτάχυνσης είναι το μέσο σύνδεσης του αναβάτη με το ηλεκτρικό όχημα. Στα ηλεκτρικά τζετ σκι, τοποθετείται στο δεξί τμήμα του τιμονιού και μπορεί να είναι δύο ειδών:

- Τύπου μανέτας, όπου ο χειριστής προκειμένου να επιταχύνει ασκεί περισσότερη δύναμη στο χειριστήριο.



Εικόνα 12 Χειριστήριο επιτάχυνσης τύπου μανέτα

- Περιστροφικός διακόπτης επιτάχυνσης, όπου ο χειριστής προκειμένου να επιταχύνει περιστρέφει τον διακόπτη προς τα κάτω. Όσες περισσότερες μοίρες περιστροφής, τόσο μεγαλύτερη και η επιτάχυνση του οχήματος (Jetdrift, 2022).



Εικόνα 13 Χειριστήριο επιτάχυνσης περιστροφικό

10. Επιπρόσθετος εξοπλισμός του τζετ σκι.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά σε όλα τα βασικά μέρη που απαρτίζουν ένα αμιγώς ηλεκτρικό τζετ σκι. Προκειμένου τα εξαρτήματα αυτά να τοποθετηθούν εντός του σκάφους χρειάζεται επιπρόσθετος εξοπλισμός.

- I. Βάση στήριξης ηλεκτρικού κινητήρα: Όπως ακριβώς και σε ένα βενζινοκίνητο τζετ σκι, ο κινητήρας συνδέεται στη γάστρα του σκάφους με ειδικές βάσης στήριξης, έτσι και σε ένα αμιγώς ηλεκτρικό τζετ σκι χρειάζεται η αντίστοιχη κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα, στα βενζινοκίνητα σκάφη συνήθως

παρατηρούμε τέσσερις βάσεις στήριξης του βενζινοκινητήρα οι οποίες είναι κατασκευασμένες από ανοξείδωτο ατσάλι σε συνδυασμό με ελαστικά τμήματα. Έτσι προσφέρουν στήριξη στον κινητήρα καθώς και αντικραδασμικές ιδιότητες τόσο κατά την λειτουργία όσο και στην πλεύση.



Εικόνα 14 Βάση στήριξης βενζινοκίνητου μοτέρ σε τζετ σκι

Αντίστοιχα, σε ένα αμιγώς ηλεκτρικό τζετ σκι, το ηλεκτρικό μοτέρ τοποθετείται σε μία βάση η οποία διαθέτει όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά .

- II. Κυτίο τοποθέτησης μπαταριών: ένα μεγάλο τμήμα του εσωτερικού ενός τζετ σκι καλύπτεται από το δοχείο καυσίμου. Στα νέα βενζινοκίνητα τζετ σκι προκειμένου να αυξηθεί η αυτονομία τοποθετούνται ρεζερβουάρ καυσίμου που αγγίζουν την χωρητικότητα των 75+ λίτρων. Σε ένα αμιγώς ηλεκτρικό τζετ σκι αντί για καύσιμο χρησιμοποιούνται μπαταρίες προκειμένου να τροφοδοτηθεί ο κινητήρας. Το σύνολο των στοιχείων που απαρτίζουν την μπαταρία συνδέονται μεταξύ τους μέσω καλωδίων κατασκευασμένα από κασίτερο. Η τοποθέτηση των στοιχείων χρήζει στεγάνωσης τόσο για αποφυγή ηλεκτροπληξίας όσο και διάβρωσης. Ως αποτέλεσμα, κατασκευάζονται ειδικά κυτία από ελαφριά υλικά όπως πλαστικά τα οποία φέρουν ειδική μόνωση για την αποφυγή διείσδυσης υδάτων εντός αυτών. Ωστόσο το μέγεθος και το σχήμα τους χρειάζονται προσεκτική μελέτη κατά την κατασκευή για το σωστό καταμερισμό του βάρους εντός του σκάφους και τελικά το σωστό ζύγισμα αυτού.
- III. Άξονας μετάδοσης κίνησης: Τόσο σε ένα βενζινοκίνητο όσο και σε ένα ηλεκτρικό τζετ σκι η κίνηση του μοτέρ περνά από τον άξονα μετάδοσης κίνησης και καταλήγει στην πτερωτή ή προπέλα. Προκειμένου να κατασκευαστεί ένας τέτοιος άξονας πρέπει να ληφθούν πληθώρα παραγόντων υπόψιν όπως για παράδειγμα το μέγεθος, το βάρος καθώς και η αντοχή σε κόπωση και στρέψη. Στα ηλεκτρικά τζετ σκι συνυπολογίζεται και η αυξημένη ροπή των κινητήρων (Beckley, 2013).



Εικόνα 15 Άξονας μετάδοσης κίνησης

11. Μετατροπή βενζινοκίνητου τζετ σκι σε αμιγώς ηλεκτρικό.

Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε προσπάθεια προκαταρκτικού σχεδιασμού μετατροπής ενός βενζινοκίνητου τζετ σκι σε αμιγώς ηλεκτρικό. Το σκάφος που μελετήθηκε είναι κατασκευασμένο από την εταιρία Kawasaki. Το τζετ σκι κατασκευάστηκε το 2008 με εμπορική ονομασία Kawasaki Ultra 250x. Είναι ένα τριθέσιο τζετ σκι με ολικό μήκος 3.37m και πλάτος 1.19m ενώ το βάρος του χωρίς υγρά ανέρχεται στα 410kg.



Εικόνα 16 Kawasaki Ultra 250x (2008)

Εφοδιάζεται με έναν τετράχρονο, τετρακύλινδρο υπερτροφοδοτούμενο κινητήρα 1498cc ο οποίος αποδίδει 250hp στις 7750rpm και μέγιστη ροπή 237Nm στις 6.500 rpm. Το σκάφος διαθέτει ρεζερβουάρ καυσίμου 78 λίτρων και παρουσιάζει αυτονομία 65.3mi (105 km) ή αλλιώς περίπου μίας ώρας στη μέγιστη ταχύτητα των 70mph (Kawasaki, 2008).



Εικόνα 17 Εσωτερική όψη του βενζινοκινητήρα

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μετατροπή, από το σκάφος αφαιρέθηκαν όλα τα βασικά τμήματα του κινητήρα καθώς και μέρη που πλαισίωναν αυτόν όπως π.χ υπερσυμπιεστής και μονάδα ψύξης.



Εικόνα 18 Εναπομείναν χώρος μετά την αφαίρεση του κινητήρα

Ο κινητήρας συνδέεται με το κινητήριο σύστημα του σκάφους (jet pump), μέσω ενός άξονα μετάδοσης κίνησης . Το τμήμα αυτό δεν χρειάζεται να αφαιρεθεί αφού και με τη χρήση ηλεκτροκινητήρα η δομή θα παραμείνει η ίδια.



Εικόνα 19 Άξονας μετάδοσης κίνησης



Εικόνα 20 Κόμπλερ κύριου άξονα

Ένα ακόμη τμήμα του σκάφους που παραμένει ίδιο είναι η αντλία πρόωσης (jet pump) η οποία βρίσκεται στην πρύμνη του τζετ σκι τοποθετημένη στο κάτω τμήμα του σκάφους. Η αντλία αυτή απαρτίζεται από δύο μέρη, τον λοβό όπου εσωκλείεται η προπέλα του σκάφους και το τελικό τμήμα μέσω του οποίου εξέρχεται το νερό που περνά από την αντλία και είναι υπεύθυνο για την πρόωση καθώς και για το στρίψιμο του σκάφους.

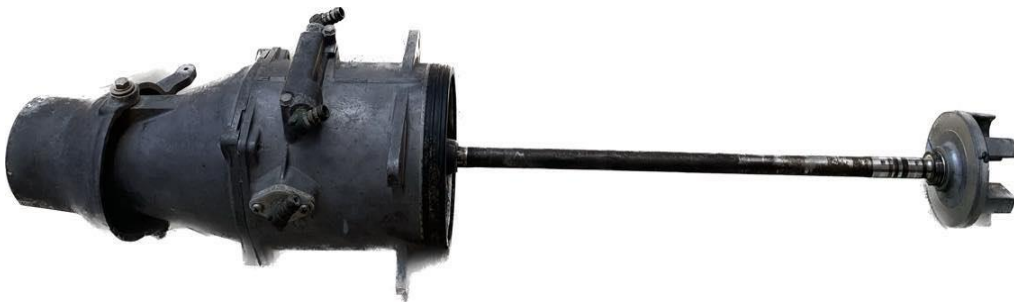


Εικόνα 21 Αντλία πρόωσης (jet pump)



Εικόνα 22 Τελικό τμήμα αντλίας πρόωσης

Τα παραπάνω τμήματα ενώνονται και απαρτίζουν το σύστημα πρόωσης του τζετ σκι.



Εικόνα 23 Σύστημα πρόωσης τζετ σκι

Για την κατασκευή ενός αμιγώς ηλεκτρικού τζετ σκι και αφού αφαιρέθηκαν τα παραπάνω, χρειάζεται μελέτη προκειμένου να βρεθεί σύστημα ηλεκτροκινητήρα – μπαταρίας το οποίο να παρέχει ενέργεια πρόωσης αντίστοιχη με αυτή του βενζινοκίνητου συνόλου. Συνεπώς, το παρόν τζετ σκι θα πρέπει να εφοδιαστεί με έναν ηλεκτροκινητήρα που να πλησιάζει ή να ξεπερνά τους 250hp καθώς και μπαταρίες που να τον υποστηρίζουν.

12. Βιωσιμότητα αμιγώς ηλεκτρικού τζετ σκι.

Προκειμένου να λάβει χώρα η μετατροπή ενός βενζινοκίνητου τζετ σκι σε αμιγώς ηλεκτρικό, πρέπει πρώτα να αποφανθούμε πως το όλο εγχείρημα είναι βιώσιμο. Συνεπώς, βασισμένοι στο μοντέλο της Kawasaki που διαθέτουμε καθώς και σε εμπειρικά δεδομένα λειτουργίας και βιβλιογραφικές πληροφορίες, αναπτύχθηκε υπολογιστικό πλαίσιο για την προκαταρκτική οικονομοτεχνική αξιολόγηση παρόμοιων σχημάτων. Για το σκοπό αυτό, το σύστημά μας ορίζεται από τις συνιστώσες του τζετ-σκι και της υποδομής φόρτισης επί της ακτής, θεωρώντας εν προκειμένω ηλεκτρική διασύνδεση με το τοπικό δίκτυο, χωρίς φυσικά να αποκλείεται η δημιουργία αυτόνομης εγκατάστασης για τη φόρτιση του τζετ-σκι στην ακτή, που μπορεί, υπο προϋποθέσεις να αποδειχθεί και οικονομικότερη ως λύση.

Με βάση τα ανωτέρω, παρουσιάζονται ακολούθως οι βασικές παράμετροι του προβλήματος καθώς και οι σχετικές παραδοχές οι οποίες ελήφθησαν υπόψη, με το μεθοδολογικό πλαίσιο του προβλήματος να αποτυπώνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 24 Μεθοδολογικό πλαίσιο εργασίας

Ειδικότερα, λαμβάνοντας υπόψη τις απαραίτητες πληροφορίες για το συμβατικό jet-ski και πραγματοποιώντας την άσκηση αφαίρεσης του συμβατικού εξοπλισμού, καθορίζεται το μέγιστο διαθέσιμο βάρος προς αξιοποίηση – κάλυψη από το ολοκληρωμένο σύστημα ηλεκτροκινητήρα και συσσωρευτών. Την ίδια στιγμή, καθορίζονται οι ανάγκες σε αποδιδόμενη ισχύ και πρωτογενή ενέργεια για την ικανοποίηση εύρους επιθυμητών τελικών ταχυτήτων και αυτονομίας, οι οποίες και επαληθεύονται με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υφιστάμενου jet-ski.

Ακολουθως, υπολογίζεται το βάρος του ηλεκτροκινητήρα συναρτήσει των απαιτήσεων σε ισχύ για διαφορετικό εύρος τελικών ταχυτήτων, το οποίο περιορίζει το αντίστοιχο διαθέσιμο κατόπιν τη αφαίρεσης του συμβατικού εξοπλισμού. Το μειωμένο πλέον διαθέσιμο βάρος διατίθεται για την ενσωμάτωση συσσωρευτών, που υπό τον συγκεκριμένο περιορισμό προσφέρουν τα ανάλογα επίπεδα αυτονομίας, εξετάζοντας την ίδια στιγμή τη συνδυασμένη επίδραση των παραμέτρων της ενεργειακής πυκνότητας των συσσωρευτών και της επιθυμητής τελικής ταχύτητας του jet-ski.

Με βάση τα ανωτέρω, διαμορφώνονται σενάρια για την οικονομική αξιολόγηση του εγχειρήματος της μετατροπής, συνυπολογίζοντας και το κόστος της απαιτούμενης υποδομής φόρτισης επί της ακτής. Τα δεδομένα εισόδου σε αυτή την περίπτωση περιλαμβάνουν τις θεωρούμενες ώρες λειτουργίας του jet-ski ανά ημέρα (σενάριο εμπορικής χρήσης – μίσθωσης), τις ημέρες λειτουργίας ανά σεζόν, καθώς και τις επιμέρους συνιστώσες αρχικού και λειτουργικού κόστους. Στη βάση αυτών, πραγματοποιείται προκαταρκτική οικονομική ανάλυση για την εκτίμηση του κέρδους που σημειώνεται ανά κύκλο λειτουργίας ("βόλτα") του ηλεκτρικού jet-ski σε σχέση με το συμβατικό (λόγω εξοικονόμησης καυσίμου), που στη συνέχεια οδηγεί στον υπολογισμό των απαιτούμενων κύκλων λειτουργίας για την απόσβεση του εξοπλισμού μετατροπής, καθώς και στο χρονικό ορίζοντα της τελευταίας.

I. Βάρη

Το μοντέλο 250x της Kawasaki με τον βενζινοκινητήρα που διέθετε έφθανε συνολικά να ζυγίζει 500kg με πλήρες το δοχείο καυσίμου, ενώ η γάστρα του έπειτα από την αφαίρεση του κινητήρα και των διαφόρων εξαρτημάτων ζύγιζε 100kg. Συνεπώς κατά την μετατροπή, το αξιοποιήσιμο βάρος που περιλαμβάνει ηλεκτροκινητήρα, μπαταρίες και λοιπό εξοπλισμό ανέρχεται στα 400kg.

Συνολικό βάρος (kg)	500 (με γεμάτο ντεπόζιτο)
Καθαρό βάρος γάστρας (kg)	100
Αξιοποιήσιμο βάρος (kg)	400

Πίνακας 1 Βάρη (Kawasaki Ultra 250x)

II. Καταναλώσεις και ιπποδύναμη σκάφους.

Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρία, το συγκεκριμένο τζετ σκι παρουσιάζει καταναλώσεις που κυμαίνονται από 20 lt/h και αγγίζουν τα 74lt/h ανάλογα την ταχύτητα πλεύσης. Προκειμένου να βρεθεί η μέση ωριαία αποδιδόμενη ισχύς σε kW/h ανάλογα με την ταχύτητα που κινείται το τζετ σκι ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Θεωρώντας την θερμογόνο δύναμη της βενζίνης ίση με 10kWh/lt, πολλαπλασιάζοντας την με τα λίτρα που καταναλώνει το σκάφος και θεωρώντας τον βαθμό απόδοσης του συστήματος ίσο με 25%, προκύπτει η αντίστοιχη αποδιδόμενη

ισχύς του συστήματος σε kW/h, η οποία φαίνεται να συμπίπτει και με τις θεωρητικές τιμές (τιμές κατασκευαστή). Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται από τους ακόλουθους τύπους.

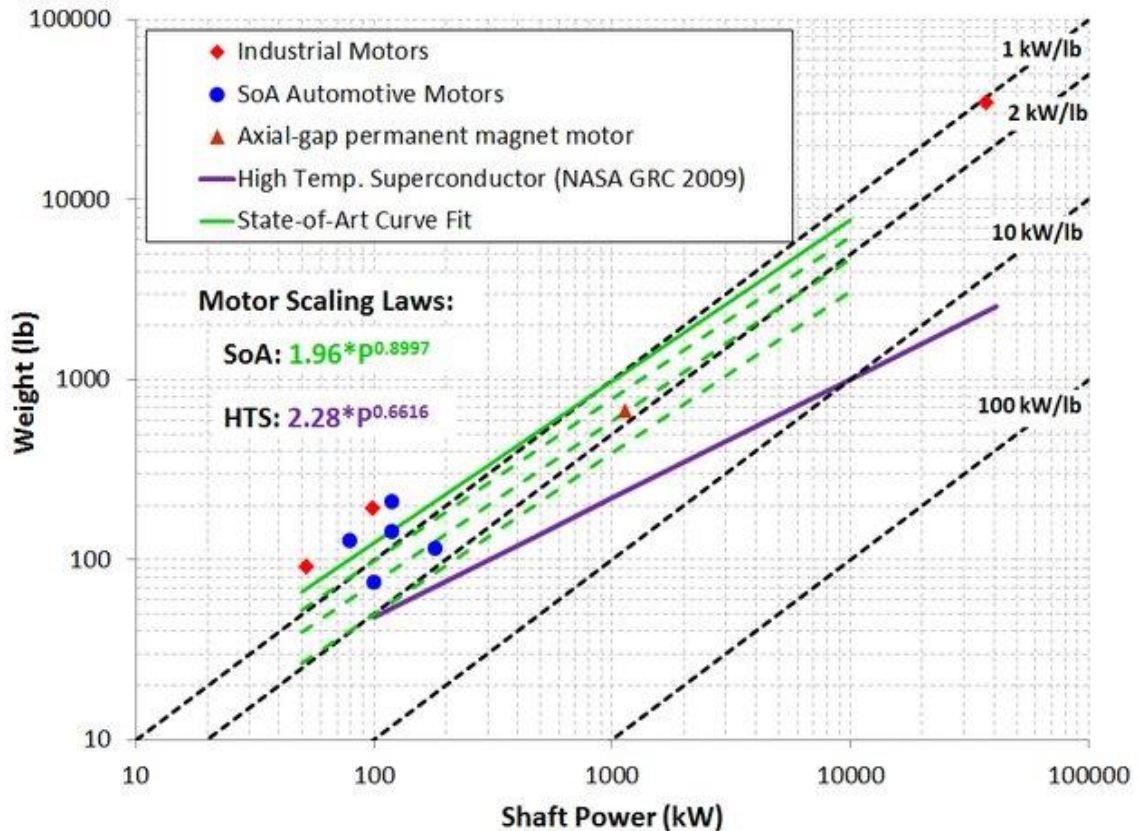
- Μετατροπή από mil/h σε km/h: $U \left(\frac{\text{mil}}{\text{h}}\right) = 1.609 \cdot U \left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)$
- Υπολογισμός ονομαστικής ισχύς: $P_{gross} = \dot{v} \cdot H u_{fuel}$
- Υπολογισμός πραγματικής ισχύς: $P_{net} = \eta_t \cdot P_{gross}$
- Μετατροπή από kW σε HP: $P_{net}(HP) = P_{net}(kW) / 0.7$

U (m/h)	U (km/h)	\dot{v} (lt/h)	$H u_{fuel}$ (kWh/lt)	P_{gross} (kW)	η_t (%)	P_{net} (kW)	P_{net} (HP)
70	112.6	74.5	10	745	25	186.2	266
45	72.4	37		370		92.5	132.1
25	40.2	20		200		50	71.4

Πίνακας 2 Απαιτούμενη υποδύναμη βάση τυπικών καταναλώσεων Kawasaki Ultra 250x

III. Τυπικός ηλεκτροκινητήρας – βάρη.

Στη συνέχεια, και από το παρακάτω διάγραμμα προκύπτει, μια αναλογία kW/lb, ίση με 1 για ηλεκτροκινητήρα που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στην μετατροπή του τζετ σκι σε αμιγώς ηλεκτρικό.



Εικόνα 25 Διάγραμμα αναλογιών kW/lb για τυπικούς ηλεκτροκινητήρες

Έχοντας σαν δεδομένο την τιμή 1kW/lb, προκύπτουν τα ανάλογα βάρη ηλεκτροκινητήρα για την αντίστοιχη υποδύναμη βάσει των παρακάτω σχέσεων.

- Μετατροπή από kW/lb σε kW/kg: $\left(\frac{kW}{kg}\right) = \frac{\frac{kW}{lb}}{0.45}$
- Υπολογισμός βάρους ηλ/ρα βάσει ισχύος: $M = P_{net} \cdot (kW/kg)$

Αναλογία ισχύος – βάρους (kW/lb)	1
Αναλογία ισχύος – βάρους (kW/kg)	2.2
Βάρος για χαμηλή ισχύ (kg)	22.5
Βάρος για μέση ισχύ (kg)	41.6
Βάρος για μέγιστη ισχύ (kg)	83.8

Πίνακας 3 Τυπικός ηλεκτροκινητήρας - βάρη

IV. Τυπική μπαταρία - βάρη.

Αντίστοιχα, και όσον αφορά σύγχρονους συσσωρευτές λιθίου, προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες οι οποίοι δείχνουν τα ανάλογα βάρη των συσσωρευτών για συγκεκριμένη υποδύναμη και αυτονομία. Πιο συγκεκριμένα, μελετήσαμε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις όσον αφορά τις τάξεις ενεργειακής πυκνότητας των συσσωρευτών, για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 0.15, 0.20 και 0.25 kWh/kg. Ο τύπος για τον υπολογισμό του βάρους των συσσωρευτών είναι:

$$\text{Βάρος συσσωρευτών} = P_{net} \cdot h / \text{Ενεργειακή πυκνότητα}$$

Ενεργειακή πυκνότητα (Wh/kg)	150					
Κόστος (€/kWh)	100					
Αυτονομία (h)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Βάρος για μέγιστη ισχύ (kg)	620.8	1241.7	1862.5	2483.3	3104.2	3725.0
Βάρος για μέση ισχύ (kg)	308.3	616.7	925.0	1233.3	1541.7	1850.0
Βάρος για χαμηλή ισχύ (kg)	166.7	333.3	500	666.7	833.3	1000

Πίνακας 4 Τυπική μπαταρία - βάρη για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 150kWh/kg

Ενεργειακή πυκνότητα (Wh/kg)	200					
Κόστος (€/kWh)	150					
Αυτονομία (h)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Βάρος για μέγιστη ισχύ (kg)	465.6	931.3	1396.9	1862.5	2328.1	2793.8
Βάρος για μέση ισχύ (kg)	231.3	462.5	693.8	925.0	1156.3	1387.5
Βάρος για χαμηλή ισχύ (kg)	125	250	375	500	625	750

Πίνακας 5 Τυπική μπαταρία - βάρη για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 200Wh/kg

Ενεργειακή πυκνότητα (Wh/kg)	250					
Κόστος (€/kWh)	200					
Αυτονομία (h)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Βάρος για μέγιστη ισχύ (kg)	372.5	745	1117.5	1490	1862.5	2235
Βάρος για μέση ισχύ (kg)	185	370	555	740	925	1110
Βάρος για χαμηλή ισχύ (kg)	100	200	300	400	500	600

Πίνακας 6 Τυπική μπαταρία - βάρη για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 250Wh/kg.

V. Συνολικά βάρη Η/Κ – συσσωρευτών.

Συνδυάζοντας τόσο τα βάρη των ηλεκτροκινητήρων όσο και των συσσωρευτών, προκύπτουν τα συνολικά βάρη του συστήματος βάσει της επιθυμητής ιπποδύναμης – αυτονομίας για τις τρεις τιμές ενεργειακής πυκνότητας που εξετάζονται:

Αυτονομία (h)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Βάρος για μέγιστη ισχύ (kg)	704.6	1325.5	1946.3	2567.1	3187.9	3808.8
Βάρος για μέση ισχύ (kg)	349.9	658.3	966.6	1274.9	1583.3	1891.6
Βάρος για χαμηλή ισχύ (kg)	189.2	355.8	522.5	689.2	855.8	1022.5

Πίνακας 7 Συνολικά βάρη Η/Κ – συσσωρευτών για ενεργειακή πυκνότητα ίση 150kWh/kg.

Αυτονομία (h)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Βάρος για μέγιστη ισχύ (kg)	549.4	1015	1480.7	1946.3	2411.9	2877.5
Βάρος για μέση ισχύ (kg)	272.8	504.1	735.4	966.6	1197.8	1429.1
Βάρος για χαμηλή ισχύ (kg)	147.5	272.5	397.5	522.5	647.5	772.5

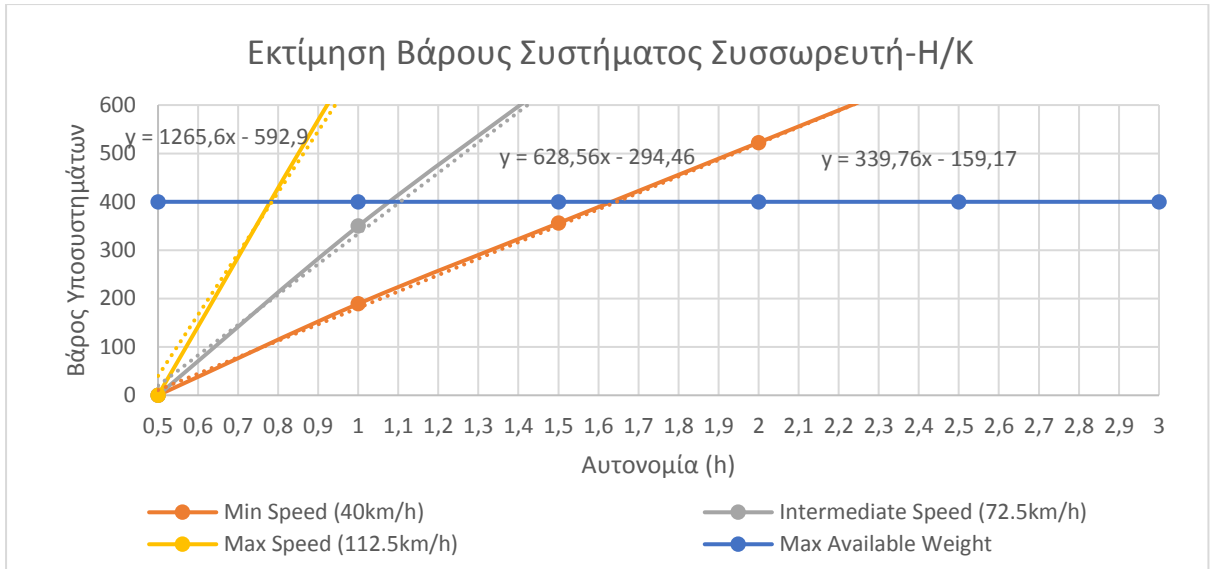
Πίνακας 8 Συνολικά βάρη Η/Κ – συσσωρευτών για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 200Wh/kg

Αυτονομία (h)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Βάρος για μέγιστη ισχύ (kg)	456.3	828.8	1201.3	1573.8	1946.3	2318.8
Βάρος για μέση ισχύ (kg)	226.6	411.6	596.6	781.6	966.6	1151.6
Βάρος για χαμηλή ισχύ (kg)	122.5	222.5	322.5	422.5	522.5	622.5

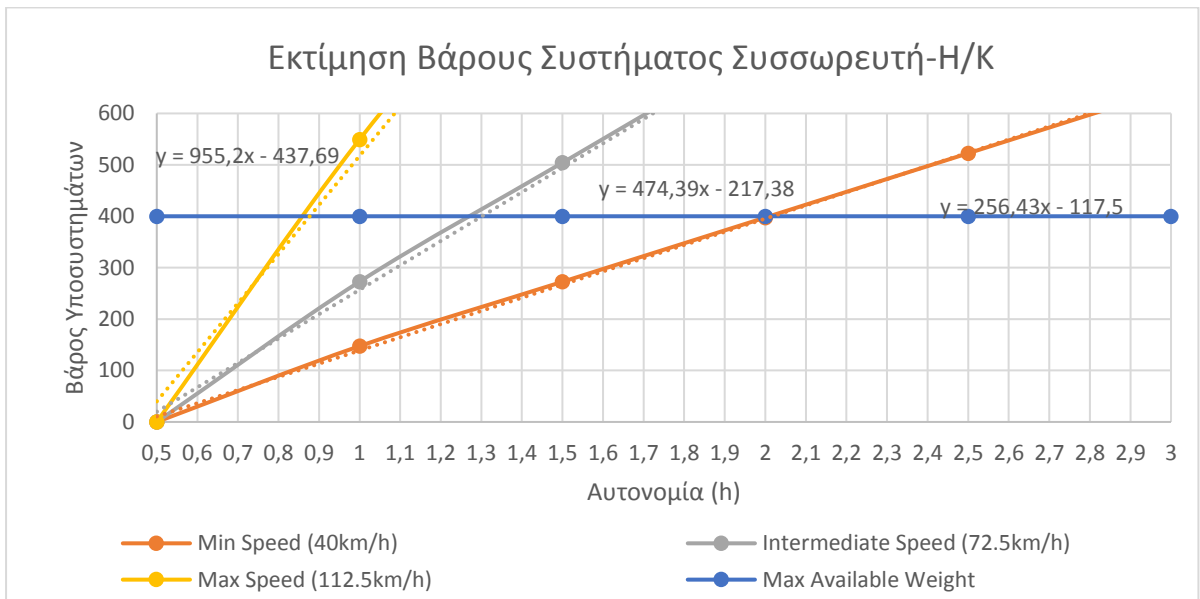
Πίνακας 9 Συνολικά βάρη Η/Κ – συσσωρευτών για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 250Wh/kg

VI. Εκτίμηση αυτονομίας του συστήματος.

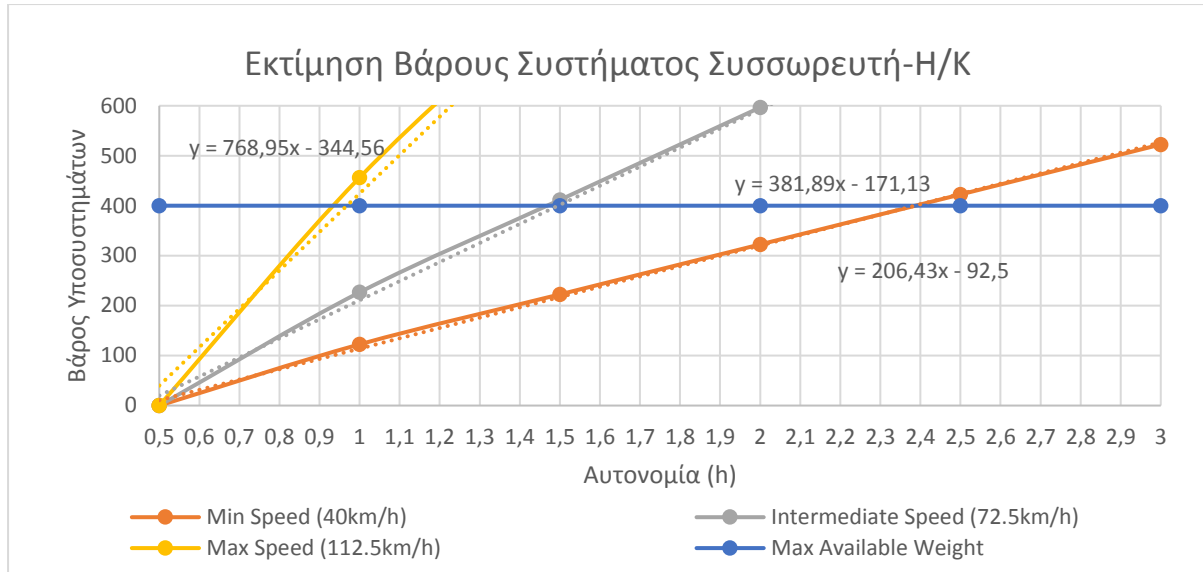
Αναπαριστώντας γραφικά τα δεδομένα που προέκυψαν από την ανάλυση των συνολικών βαρών σε σχέση με την αυτονομία προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα για ενεργειακή πυκνότητα 0.15, 0.2 και 0.25kWh/kg. Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτουν οι εκτιμώμενες μέγιστες αυτονομίες βάσει του περιορισμού των 400kg.



Διάγραμμα 1 Εκτίμηση βάρους συστήματος συσσωρευτή-Η/Κ για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 150kWh/kg



Διάγραμμα 2 Εκτίμηση βάρους συστήματος συσσωρευτή-Η/Κ για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 200kWh/kg



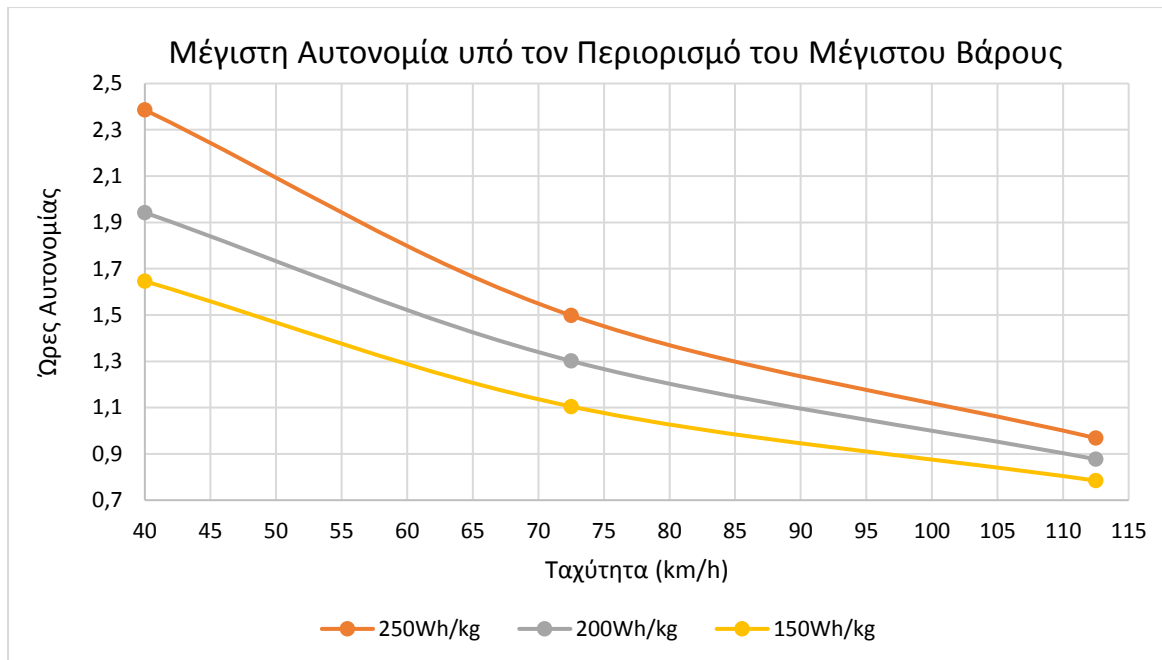
Διάγραμμα 3 Εκτίμηση βάρους συστήματος συσσωρευτή-Η/Κ για ενεργειακή πυκνότητα ίση με 250kWh/kg

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας.

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)		Αυτονομία για όριο στα 400kg (h)
0.25	Μέγιστη ταχύτητα	0.968
	Μέση ταχύτητα	1.498
	Χαμηλή ταχύτητα	2.386
0.2	Μέγιστη ταχύτητα	0.877
	Μέση ταχύτητα	1.301
	Χαμηλή ταχύτητα	1.942
0.15	Μέγιστη ταχύτητα	0.785
	Μέση ταχύτητα	1.105
	Χαμηλή ταχύτητα	1.646

Πίνακας 10 Πίνακας εκτιμώμενων αυτονομιών

Αντίστοιχα, το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του προηγούμενου πίνακα.



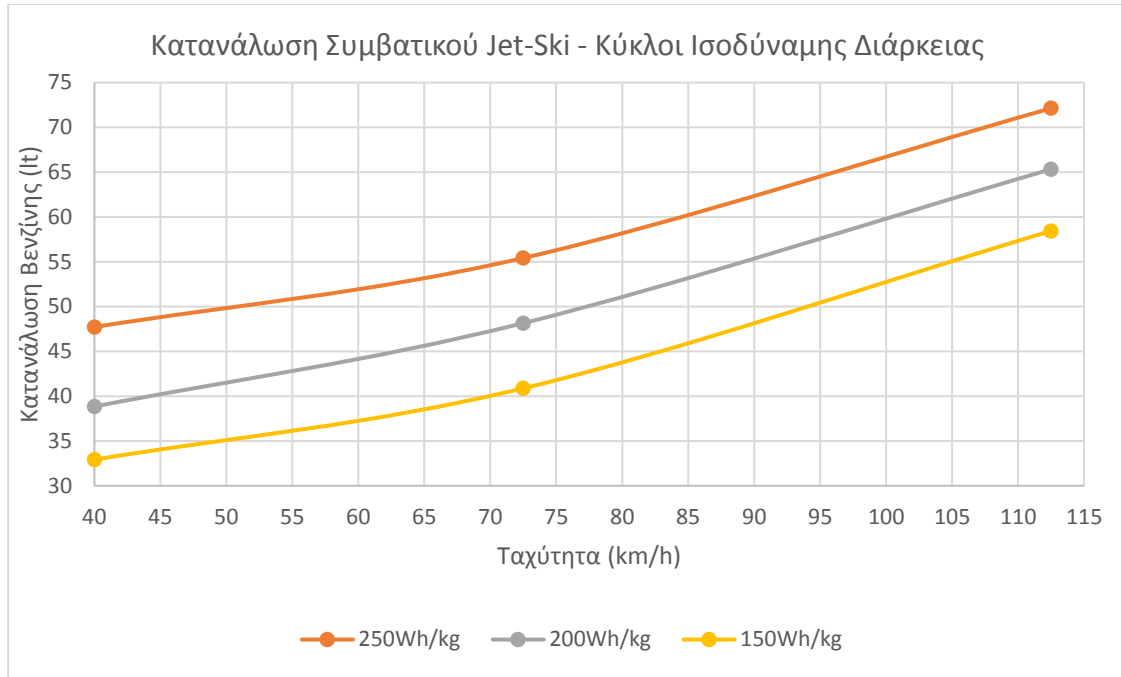
Διάγραμμα 4 Μέγιστη αυτονομία υπό τον περιορισμό του μέγιστου βάρους

VII. Σύγκριση κόστους χρήσης βενζινοκίνητου - αμιγώς ηλεκτρικού τζετ σκι.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις τυπικές καταναλώσεις του υπό ανάλυση τζετ σκι οι οποίες προκύπτουν σύμφωνα με τον κατασκευαστή έχουμε τον παρακάτω πίνακα τα δεδομένα του οποίου δίνονται γραφικά και στο παρακάτω διάγραμμα.

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	72.1	65.3	58.4
72.5	55.4	48.1	40.8
40	47.7	38.8	32.9

Πίνακας 11 Τυπικές καταναλώσεις βενζινοκίνητου jet ski για Kawasaki Ultra 250x (lt/h).



Διάγραμμα 5 Κατανάλωση συμβατικού Jet-Ski για κύκλους ισοδύναμης διάρκειας

Λαμβάνοντας υπόψιν τις τρέχουσες τιμές καυσίμου - kWh προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες κόστους λειτουργίας :

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	129.8	117.6	105.2
72.5	99.8	86.7	73.6
40	85.9	69.9	59.2

Πίνακας 12 Κόστη λειτουργίας βενζινοκίνητου jet ski για κύκλους ισοδύναμης λειτουργίας (€)

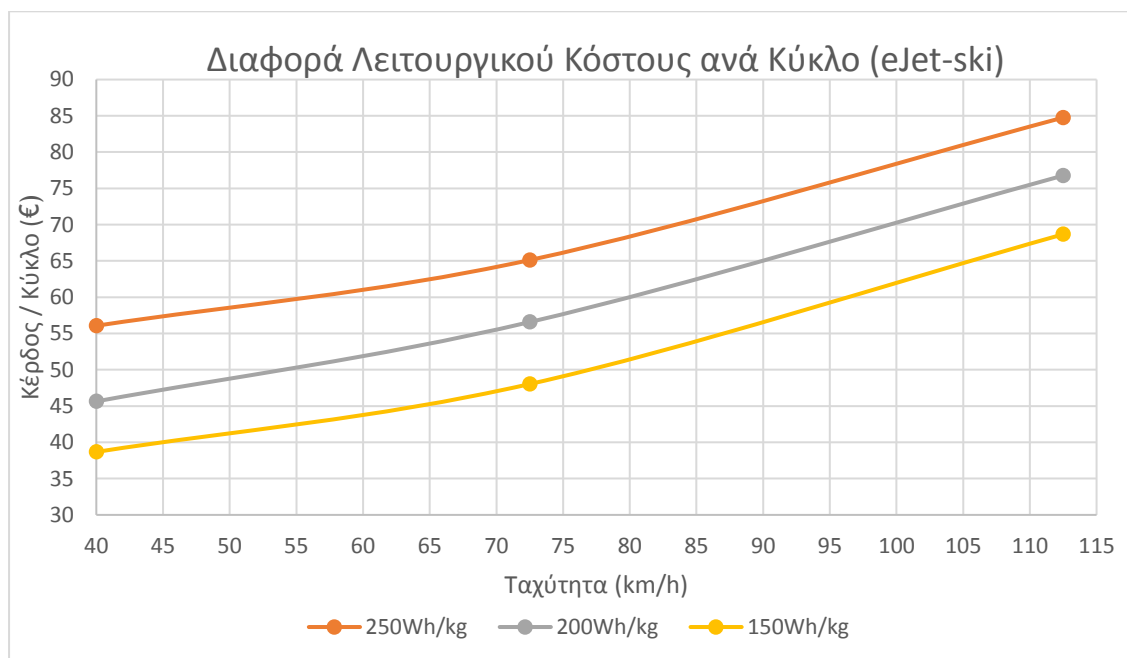
Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	45.1	40.8	36.5
72.5	34.6	30.1	25.5
40	29.8	24.3	20.6

Πίνακας 13 Κόστη λειτουργίας αμιγώς ηλεκτρικού jet ski για κύκλους ισοδύναμης λειτουργίας (€)

Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα διαφοράς λειτουργικού κόστους:

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	84.8	76.8	68.7
72.5	65.1	56.6	48.0
40	56.1	45.6	38.7

Πίνακας 14 Διαφορά λειτουργικού κόστους ανά κύκλο eJet-ski (€)



Διάγραμμα 6 Διαφορά λειτουργικού κόστους ανά κύκλο (eJet-ski)

VIII. Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης του κόστους εξηλεκτρισμού

Ολοκληρώνοντας την ανάλυση και έχοντας υπολογίσει την διαφορά λειτουργικού κόστους για το βενζινοκίνητο σε σχέση με το αμιγώς ηλεκτρικό jet ski υπολογίζεται ο χρόνος απόσβεσης της μετατροπής αυτής. Για αυτό το σκοπό υπολογίζεται το κόστος της μετατροπής και στη συνέχεια υπολογίζεται με δυο διαφορετικές μεθόδους φόρτισης, με μεταβλητή ισχύ φόρτισης (υπό σταθερό χρόνο φόρτισης δηλαδή) και με σταθερή ισχύ φόρτισης, ο χρόνος απόσβεσης.

Για το κόστος μετατροπής ισχύει:

- Κόστος συσσωρευτών: 100€/kWh για ενεργειακή πυκνότητα 0.15kWh/kg, 150€/kWh για ενεργειακή πυκνότητα 0.2kWh/kg και 200€/kWh για ενεργειακή πυκνότητα 0.25kWh/kg.
- Κόστος ηλεκτροκινητήρα: 20€/HP

Με αυτό τον τρόπο προκύπτει ο παρακάτω πίνακας κόστους εξηλεκτρισμού.

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	42402.6	32604.3	22799.8
72.5	22458.7	17314.4	12169.9
40	13408.3	10274.8	7351.1

Πίνακας 15 Πίνακας κόστους εξηλεκτρισμού (€)

Ακόμη θεωρώντας την αναλογία φόρτισης ανά χρήση ίση με 2 (διπλάσιος χρόνος φόρτισης ως προς χρόνο πλεύσης) και βάσει των δεδομένων των πινάκων Πίνακας 2 και Πίνακας 10 προκύπτει ο παρακάτω πίνακας ισχύος φόρτισης του εξηλεκτρισμένου jet ski.

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	96.176	106.188	118.702
72.5	47.765	52.738	58.953
40	25.819	28.507	31.866

Πίνακας 16 Πίνακας ισχύος φόρτισης (kW)

Θεωρώντας τώρα ένα κόστος 300 €/kW για τον φορτιστή που απαιτείται προκύπτουν τα παρακάτω κόστη φορτιστών.

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	28852.7	31856.5	35610.5
72.5	14329.5	15821.4	17685.8
40	7745.7	8552.1	9559.9

Πίνακας 17 Πίνακας κόστους φορτιστή (€)

Στην συνέχεια θεωρώντας μια ημερησία χρήση 10 ώρες την ημέρα προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες κύκλων ανά ημέρα τόσο για μεταβλητή όσο και για σταθερή ισχύ φόρτισης. Για την προσέγγιση με σταθερή ισχύ φόρτισης η ισχύς θεωρείται ίση με 25kW.

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	3.4	3.8	4.2
72.5	2.2	2.6	3.0
40	1.4	1.7	2.0

Πίνακας 18 Πίνακας κύκλων ανά ημέρα για μεταβλητή ισχύ φόρτισης (κύκλοι/ημέρα)

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	1.2	1.2	1.2
72.5	1.9	2.0	2.1
40	2.3	2.5	2.7

Πίνακας 19 Πίνακας κύκλων ανά ημέρα για σταθερή ισχύ φόρτισης (κύκλοι/ημέρα)

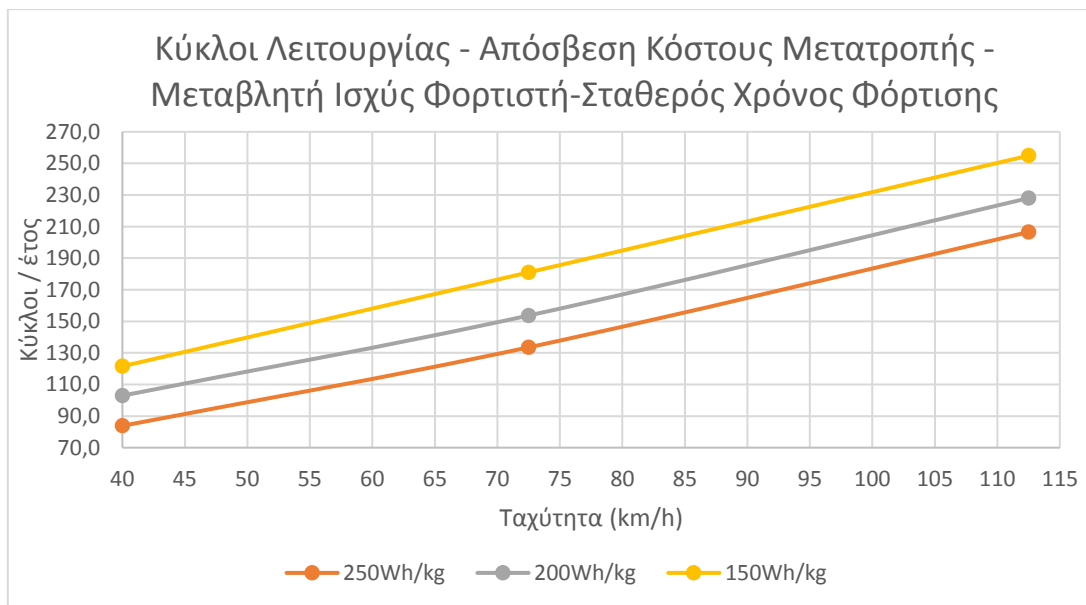
Και θεωρώντας μια χρήση ίση με 60 μέρες τον χρόνο προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες κύκλων ανά χρόνο τόσο για μεταβλητή (σταθερός χρόνος φόρτισης) όσο και για σταθερή ισχύ φόρτισης. Τα δεδομένα των πινάκων αναπαρίστανται στα παρακάτω διαγράμματα.

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	206.6	228.1	254.9
72.5	133.5	153.7	181.0
40	83.8	103.0	121.5

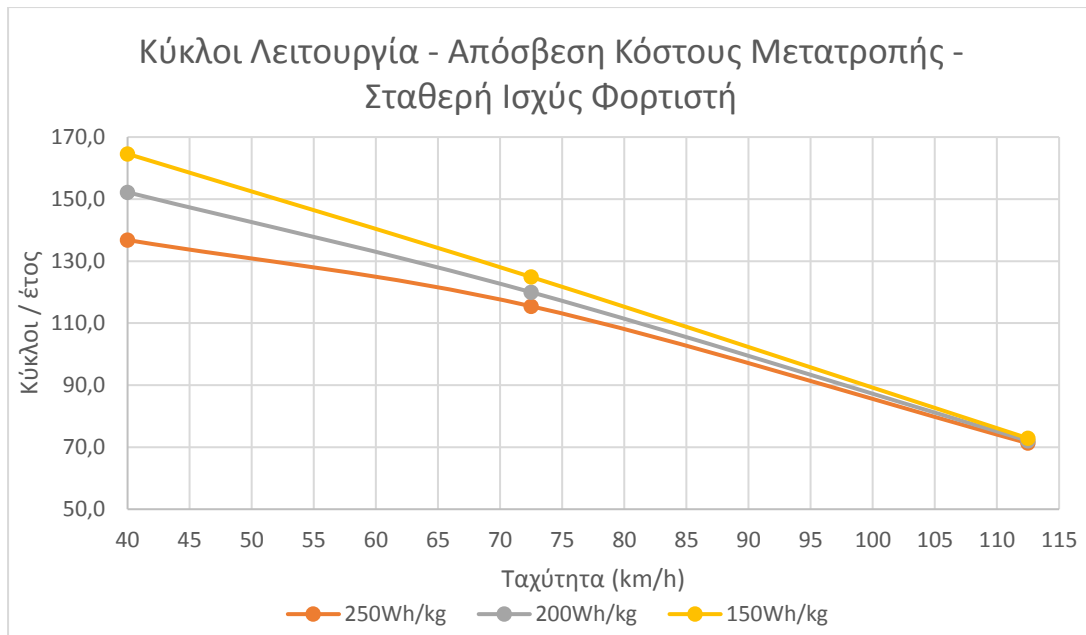
Πίνακας 20 Πίνακας κύκλων ανά χρόνο για μεταβλητή ισχύ φόρτισης (κύκλοι/χρόνο)

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	71.3	72.1	72.9
72.5	115.4	120.0	124.9
40	136.8	152.2	164.6

Πίνακας 21 Πίνακας κύκλων ανά χρόνο για σταθερή ισχύ φόρτισης (κύκλοι/χρόνο)



Διάγραμμα 7 Διάγραμμα κύκλων ανά χρόνο συναρτήσει της ταχύτητας για μεταβλητή ισχύ φόρτισης



Διάγραμμα 8 Διάγραμμα κύκλων ανά χρόνο συναρτήσει της ταχύτητας για σταθερή ισχύ φόρτισης

Προσθέτοντας το κόστος εξηλεκτρισμού με το κόστος φορτιστή και διαιρώντας τα με το κέρδος από την διαφορά λειτουργικού κόστους προκύπτουν οι κύκλοι που απαιτούνται για την απόσβεση του κόστους εξηλεκτρισμού. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	840.6	839.6	850.5
72.5	564.9	585.6	621.5
40	377.3	412.4	437.2

Πίνακας 22 Πίνακας κύκλων απόσβεσης για μεταβλητή ισχύ φόρτισης (κύκλοι)

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	588.7	522.4	441.2
72.5	460	438.6	409.5
40	372.9	389.4	383.9

Πίνακας 23 Πίνακας κύκλων απόσβεσης για σταθερή ισχύ φόρτισης (κύκλοι)

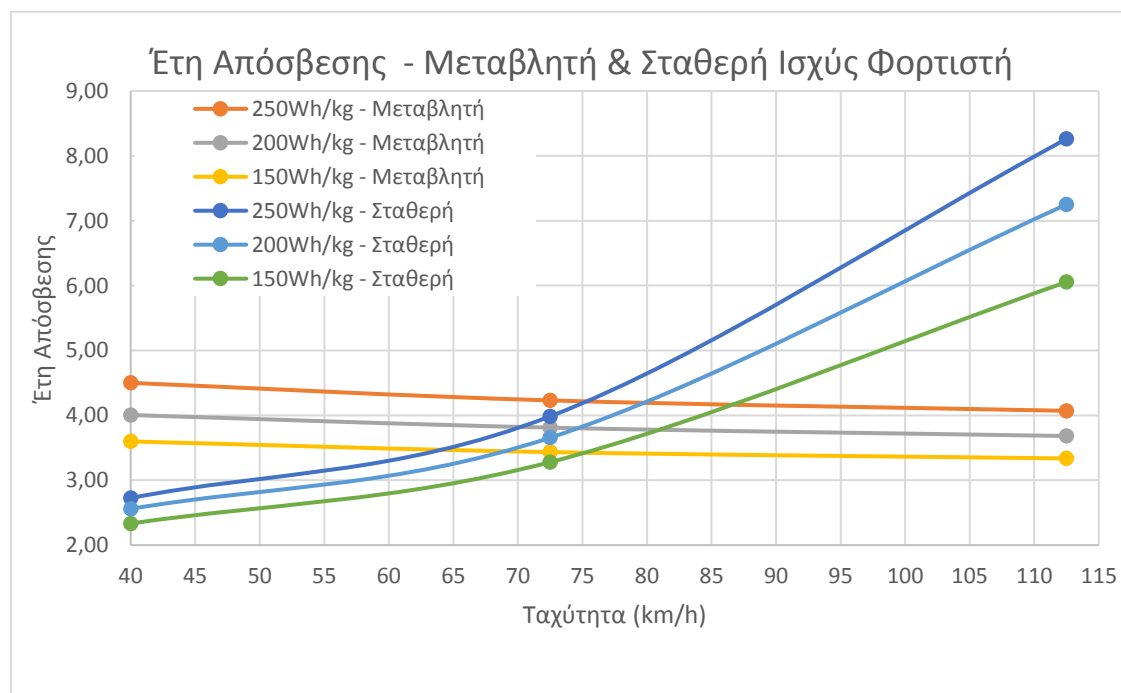
Τέλος, διαιρώντας τους κύκλους για απόσβεση με τους κύκλους ανά χρόνο προκύπτουν τα χρόνια που χρειάζονται για απόσβεση. Τα δεδομένα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες και στο συγκεντρωτικό διάγραμμα που ακολουθεί.

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	4.1	3.7	3.3
72.5	4.2	3.8	3.4
40	4.5	4	3.6

Πίνακας 24 Πίνακας ετών απόσβεσης για μεταβλητή ισχύ φόρτισης (έτη)

Ενεργειακή πυκνότητα (kWh/kg)	0.25	0.2	0.15
Ταχύτητα (km/h)			
112.5	8.3	7.2	6.1
72.5	3.9	3.7	3.3
40	2.7	2.6	2.3

Πίνακας 25 Πίνακας ετών απόσβεσης για σταθερή ισχύ φόρτισης (έτη)



Διάγραμμα 9 Έτη Απόσβεσης - Μεταβλητή & σταθερή ισχύς φορτιστή

13. Συμπεράσματα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα εφαρμογής για την ανωτέρω μελέτη περίπτωσης, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Βάσει του περιορισμού βάρους καθώς και με την κατάλληλη επιλογή ενεργειακής πυκνότητας των μπαταριών, το εξηλεκτρισμένο τζετ σκι παρουσιάζει αντίστοιχη αυτονομία με αυτή του βενζινοκίνητου, της τάξης της μίας ώρας για μέγιστες ταχύτητες πλεύσης.
- Μετά την σύγκριση του λειτουργικού κόστους του βενζινοκίνητου και του εξηλεκτρισμένου τζετ σκι προκύπτει ότι το κέρδος χρήσης του ηλεκτρικού τζετ σκι ανά κύκλο χρήσης κυμαίνεται από 38-85 ευρώ ανάλογα με την ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών που διαθέτουμε καθώς επίσης και με την ταχύτητα πλεύσης.
- Ανάμεσα στα δύο σκάφη παρουσιάζεται αυξημένος ο χρόνος επαναφόρτισης του ηλεκτρικού συγκριτικά με τον ανεφοδιασμό του βενζινοκίνητου και συγκεκριμένα για χρήση φορτιστή μεταβλητής ισχύος φόρτισης, ο βέλτιστος χρόνος επαναφόρτισης είναι οι δύο ώρες ενώ στην περίπτωση του βενζινοκίνητου ο ανεφοδιασμός διαρκεί μόλις λίγα λεπτά.

Όσον αφορά την απόσβεση μετατροπής, για μεσαίες και μικρές ταχύτητες λειτουργίας, συμφέρει η προσέγγιση χρήσης φορτιστή σταθερής (και περιορισμένης) ισχύος φόρτισης αφού ο χρόνος απόσβεσης είναι μικρότερος των τεσσάρων ετών σε κάθε περίπτωση, ενώ για χρήση σε υψηλές ταχύτητες προτιμάται η προσέγγιση που επιτρέπει την αξιοποίηση μεγαλύτερης ισχύος φόρτισης (υπό σταθερό χρόνο), που μειώνει κατά το ήμισυ τα έτη απόσβεσης της μετατροπής.

Σε κάθε περίπτωση, και λαμβάνοντας επίσης υπόψη τα απαιτούμενα αρχικά κόστη επένδυσης, η μαζική μετατροπή συμβατικών jet ski σε ηλεκτρικά ενδεχομένως προσελκύει περισσότερο το ενδιαφέρον στο πλαίσιο δημιουργίας ενός αντίστοιχου πλωτού μέσου, με μικρότερες όμως απαιτήσεις μέγιστης ταχύτητας πλεύσης, ηπιότερων δηλαδή επιδόσεων, που στην πράξη συμβαδίζει επίσης με τους πραγματικούς περιορισμούς σε συνθήκες πλεύσης, ειδικά στην περίπτωση μισθωμένων jet ski. Ταυτόχρονα, και αναλογιζόμενοι την επίδραση του κόστους των συσσωρευτών στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους μετατροπής, είναι σκόπιμη επίσης η διερεύνηση μοντέλου μίσθωσης συσσωρευτών αποκλειστικά για την περίοδο χρήσης του jet ski, προσέγγιση η οποία θα βελτιώσει ακόμη περισσότερο τους οικονομικούς δείκτες αξιολόγησης, εξασφαλίζοντας τη βιωσιμότητα παρόμοιων εγχειρημάτων και αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα της έντασης κεφαλαίου.

Βιβλιογραφία

- Beckley, A. (2013). *Drive Train for an Electric Jet Ski Conversion*. University of Western Australia.
- Club, L. J. (2011). Ανάκτηση από https://www.s50static.com/cms/uploads/files/20945030cc142424b021f798aedeb0f81e60f9_.pdf
- E-dolphin. (2023). Ανάκτηση από <https://www.edolphin.fr/>
- Electric motor*. (2022). Ανάκτηση από https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor
- Hiseadock. (2023). *A Complete Guide to Jet Ski Hull*. Ανάκτηση από <https://www.hiseadock.com/complete-guide-to-jet-ski-hull/>
- Jetdrift. (2022). *Home*. Ανάκτηση από jetdrift: <https://www.jetdrift.com/how-does-a-jet-ski-work/>
- Kawasaki. (2008). *Kawasaki ULTRA 250X 2008*. Ανάκτηση από Kawasaki: https://www.kawasaki.co.uk/en/products/archive/Jet_Ski_/2008/Ultra_250X/overview?Uid=0602WlhZXFhZWV5ZW1pdWl1aXl1aX11QRg0GRT0j
- Michael Hartwick, M. K.-P. (2020). *Electric/Solar Powered Jet Ski*. WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE.
- Morgan, A. D. (2018). *Shock & Vibration Isolation for an Electric Jet Ski*. University of Western Australia.
- Yamaha Motor Co., L. (2023). *Yamaha Motor Co., Ltd. Products WaveRunner(PWC)*. Ανάκτηση από Yamaha Motor Co., Ltd.: <https://global.yamaha-motor.com/business/waverunner/history/>
- ΚΟΥΚΟΥΒΙΝΟΣ, Δ. Ι. (2020). *ΣΚΑΦΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΑ Τεχνολογία - Τεχνογνωσία - Ασφάλεια*. ΠΕΙΡΑΙΑΣ: ΝΑΥΤΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ .