



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Παραγωγή και αποθήκευση πράσινου υδρογόνου σε φορτηγά
πλοία**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΜΑΣΤΡΑΚΑ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

Επιβλέπων:

ΔΡ. ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ ΚΟΣΜΑΣ

Αθήνα, Ιούλιος 2024



University of West Attica

School of Engineering

Department of Mechanical Engineering

Green hydrogen production in cargo ships

THESIS

OF

MASTRAKAS NIKOLAOS

SUPERVISOR:

DR. KAVVADIAS KOSMAS

Athens, July 2024

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Α/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ ΚΟΣΜΑΣ	Αναπληρωτής Καθηγητής, Αντιπρόεδρος Τμήματος	
2	ΚΟΝΔΥΛΗ ΑΙΜΙΛΙΑ	Καθηγήτρια, Τμήματος	Πρόεδρος
3	ΖΑΦΕΙΡΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	Επίκουρος Καθηγητής	

Copyright © - 10/8/2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολόκληρου 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.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μάστρακας Νικόλαος του Κυριάκου με αριθμό μητρώου 18392012 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

Μάστρακας Νικόλαος



Περίληψη

Το πράσινο υδρογόνο αποτελεί ένα εξελιγμένο και αρκετά βιώσιμο τρόπο αποθήκευσης ενέργειας, ο οποίος μπορεί να συμβάλει στην καταπολέμηση του ενεργειακού προβλήματος και της κλιματικής αλλαγής. Για τον λόγο αυτό υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον όσον αφορά την έρευνα ενός καινοτόμου βιώσιμου τρόπου παραγωγής και οικονομικής αξιοποίησης του πράσινου υδρογόνου. Η μελέτη εξετάζει την εφαρμογή συστημάτων παραγωγής υδρογόνου σε πλοία, αναλύοντας τις τεχνικές παραμέτρους και τα οικονομικά κόστη της διαδικασίας. Η παροχή ενέργειας γίνεται με μία συστοιχία φωτοβολταϊκών που προσφέρει ενέργεια σε μονάδες ηλεκτρόλυσης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) και μία μονάδα αφαλάτωσης για παροχή της απαιτούμενη ποσότητας νερού. Παράλληλα, διερευνάται η αποθήκευση υδρογόνου σε συμπιεσμένη μορφή, λαμβάνοντας υπόψη την ασφάλεια, την αποδοτικότητα και τον διαθέσιμο χώρο στα πλοία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις τεχνολογικές προκλήσεις και στις πιθανές λύσεις που αφορούν την ενσωμάτωση αυτών των συστημάτων στις υπάρχουσες ναυτιλιακές υποδομές. Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν ότι αν και μία τέτοια επένδυση δεν είναι οικονομικά βιώσιμη, θα μπορούσε με μερικούς ανασχηματισμούς να παράξει αρκετό κέρδος, πωλώντας το παραγόμενο υδρογόνο στην τοπική αγορά. Ωστόσο, απαιτούνται περαιτέρω επενδύσεις στην έρευνα και την ανάπτυξη, καθώς και στη βελτίωση των σχετικών κανονισμών, προκειμένου να καταστεί αυτή η τεχνολογία οικονομικά βιώσιμη και ευρέως αποδεκτή στη ναυτιλία.

Λέξεις Κλειδιά

Πράσινο υδρογόνο, Αποθήκευση ενέργειας, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Φωτοβολταϊκά σε πλοίο, Ναυτιλία, Ηλεκτρόλυση

Abstract

Green hydrogen represents an advanced and sustainable method of energy storage that can contribute significantly to addressing the energy crisis and combating climate change. As a result, there is significant interest in researching innovative and sustainable ways of producing and economically utilizing green hydrogen. This study examines the application of hydrogen production systems on ships, analyzing the technical parameters and economic costs of the process. The energy supply is provided by an array of photovoltaic panels that power proton exchange membrane (PEM) electrolysis units and a desalination unit to supply the necessary amount of water. Additionally, the study explores the storage of hydrogen in compressed form, taking into account safety, efficiency, and the available space on ships. Special emphasis is placed on the technological challenges and potential solutions related to the integration of these systems into existing maritime infrastructure. The research results indicate that although such an investment is not currently economically viable, with certain adjustments, it could generate sufficient profit by selling the produced hydrogen in the local market. However, further investment in research and development, as well as improvements in relevant regulations, are required to make this technology economically sustainable and widely accepted in the maritime industry.

Keywords

Green hydrogen, Energy storage, Renewable energy sources, Photovoltaics on ships, Shipping, Electrolysis

Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	2
Περίληψη	4
Abstract	6
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Σχημάτων	11
Κατάλογος Πινάκων	12
Κατάλογος Εικόνων	13
1 Εισαγωγή	16
2 Θεωρητικό υπόβαθρο/Βιβλιογραφική ανασκόπηση	20
2.1 Υδρογόνο	20
2.1.1 Τύποι υδρογόνου.....	21
2.1.2 Εφαρμογές	22
2.1.3 Υδρογόνο ως μέσο αποθήκευσης	22
2.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια	23
2.2.1 Συμπληρωματικές διατάξεις	25
2.2.2 Ηλιακή ακτινοβολία.....	25
2.2.3 Τεχνοοικονομικά φωτοβολταϊκών	26
2.3 Ηλεκτρόλυση.....	26
2.4 Αφαλάτωση	28
2.5 Αποθήκευση υδρογόνου.....	29
2.5.1 Δεξαμενές υψηλής πίεσης.....	29

2.6	Τεκμηρίωση της έρευνας	30
3	Μεθοδολογία.....	34
3.1	Περιγραφή διάταξης.....	34
3.2	Επιλογή τύπου πλοίου και εκτίμηση γεωγραφικών συντεταγμένων αυτού για τη διάρκεια της μελέτης	35
3.3	Εκτίμηση ηλιακού δυναμικού πλοίου	36
3.4	Επιλογή χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκού πλαισίου και χωροταξική μελέτη των πλαισίων στην επιφάνεια του πλοίου	37
3.5	Τελική διαθέσιμη παραγόμενη ενέργεια	38
3.6	Εκλογή κατάλληλων διατάξεων.....	39
3.7	Ηλεκτρόλυση.....	40
3.8	Αφαλάτωση	40
3.9	Διαστασιολόγηση μονάδων ηλεκτρόλυσης και αφαλάτωσης.....	41
3.10	Αναγωγή ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος σε ενέργεια ανά kg υδρογόνου	42
3.11	Υπολογισμός τελικής παραγόμενης ποσότητας υδρογόνου και διαστασιολόγηση δεξαμενής αποθήκευσης.....	42
3.12	Τεχνοοικονομική ανάλυση.....	43
4	Μελέτη περίπτωσης	46
4.1	Επιλογή πλοίου και γεωγραφικές συντεταγμένες	46
4.2	Ηλιακό δυναμικό πλοίου και θερμοκρασία περιβάλλοντος.....	48
4.3	Επιλεγμένες διατάξεις και χαρακτηριστικά τους/ Σχέδια πλοίου	50
4.4	Αρχικό κόστος και κόστος συντήρησης μονάδων εγκατάστασης	51
4.5	Επιλογή γωνίας των πλαισίων της διάταξης	52
5	Αποτελέσματα.....	56

5.1 Τελική ενεργειακή παραγωγή φωτοβολταϊκών/Μηνιαία παραγωγή /κατανομές θερμοκρασίας module /Συντελεστής φορτίου	56
5.2 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης ηλεκτρόλυσης/αφαλάτωσης και ενεργειακή κατανάλωση διάταξης	58
5.3 Ανηγγμένη ενεργειακή κατανάλωση ανά κιλό υδρογόνου.....	59
5.4 Τελική παραγόμενη ποσότητα υδρογόνου	60
5.5 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης δεξαμενής υδρογόνου	65
5.6 Αποτελέσματα τεχνοοικονομικής ανάλυσης	66
6 Συζήτηση.....	72
6.1 Τελικά ευρύματα	72
6.2 Τρόποι βελτιστοποίησης	72
6.2.1 Κόστος δεξαμενής.....	72
6.2.2 Κόστος συντήρησης.....	74
6.2.3 Ενεργειακή κατανάλωση βοηθητικών διατάξεων	75
6.2.4 Ψύξη πλαισίων.....	75
6.2.5 Εκμετάλλευση επιδοτήσεων και υπολειμματικής αξίας και αύξηση του χρόνου ζωής της επένδυσης	76
Βιβλιογραφία.....	77
Παράρτημα.....	83

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του πλοίου	49
Σχήμα 2: Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της μελέτης.....	49
Σχήμα 3:Καμπύλες λειτουργίας φωτοβολταϊκού.....	50
Σχήμα 4: Ωριαία ισχύς φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	56
Σχήμα 5: Μηνιαία παραγωγή ενέργειας φωτοβολταϊκών πλαισίων	57
Σχήμα 6: Θεωρητική θερμοκρασία κυψελών φωτοβολταϊκών	58
Σχήμα 7: Ποσοστά κατανομής παραγόμενης ενέργειας σε πλήρη ισχύ	59
Σχήμα 8: Ανηγμένη κατανάλωση ενέργειας ανά κιλό παραγόμενου υδρογόνου.....	60
Σχήμα 9: Ενεργειακή κατανάλωση πρώτης μονάδας ηλεκτρόλυσης	61
Σχήμα 10: Ενεργειακή κατανάλωση δεύτερης μονάδας ηλεκτρόλυσης.....	62
Σχήμα 11: Ενεργειακή κατανάλωση τρίτης μονάδας ηλεκτρόλυσης	62
Σχήμα 12: Ενεργειακή κατανάλωση τέταρτης μονάδας ηλεκτρόλυσης.....	63
Σχήμα 13: Ενεργειακή κατανάλωση πέμπτης μονάδας ηλεκτρόλυσης	63
Σχήμα 14: Ενεργειακή κατανάλωση έκτης μονάδας ηλεκτρόλυσης	64
Σχήμα 15: Παραγωγή υδρογόνου ανά μήνα	65
Σχήμα 16: Πληρότητα δεξαμενής κατά τη διάρκεια της μελέτης	66
Σχήμα 17: Βαθμός απόδοσης επένδυσης κατα τη διάρκεια της επένδυσης	69

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	24
Πίνακας 2: Ταξινόμηση και εφαρμογές διάφορων τύπων δεξαμενών υδρογόνου υψηλής πίεσης	30
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά επιλεγμένου πλοίου “Advantage Anthem”	46
Πίνακας 4: Προορισμοί που έχουν ενταχθεί στη διαδρομή του πλοίου μαζί με τις συντεταγμένες τους	47
Πίνακας 5: Επιλεγμένες διατάξεις με τα χαρακτηριστικά τους.....	50
Πίνακας 6: Τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά επιλεγμένων διατάξεων	52
Πίνακας 7: Συνολική παραγωγή και συντελεστές ισχύος για κάθε μονάδα ηλεκτρόλυσης.....	64
Πίνακας 8: Τεχνοοικονομικά μεγέθη και μεταβλητές.....	67
Πίνακας 9: Σύνοψη χαρακτηριστικών διατάξεων	67
Πίνακας 10: Σύνοψη αρχικού κόστους, κόστους συντήρισης και εσόδων της εγκατάστασης	68
Πίνακας 11: Αναγωγή οικονομικών μεγεθών στο τέλος της διάρκειας ζωής της επένδυσης	68

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Κύριες ναυτικές εμπρορικές οδοί με επισήμανση στα σημεία υψηλής κυκλοφοριακής συμφόρησης (chokepoints)	17
Εικόνα 2: Ποσοστό ένταξης ανανεώσιμων πηγών από το 1975 μέχρι σήμερα και πρόβλεψη μέχρι το 2050.....	21
Εικόνα 3: Διατάξεις ηλεκτρόλυσης υδρογόνου από νερό. a) Αλκαλική b) Μεμβράνης στερεου πολυμερούς	27
Εικόνα 4: Αεροφωτογραφία του πλοίου “Advantage Anthem”	47
Εικόνα 5: Χάρτης επιλεγμένης διαδρομής	48
Εικόνα 6: Αριθμός και διάταξη τοποθετημένων πλαισίων στην επιφάνεια του πλοίου.....	51
Εικόνα 7: Ύψος τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων	51
Εικόνα 8: Νέα προτινόμενη διαδρομή πλοίου κατά τη διάρκεια του έτους.....	74

Κεφάλαιο 1

1 Εισαγωγή

Από τη βιομηχανική επανάσταση και έπειτα, τα ορυκτά καύσιμα επικρατούσαν στην αγορά για αιώνες και πρόσφεραν αρκετά στην ανάπτυξη και την ευημερία του ανθρώπου, μέσω της καύσης και απόδοσης ενέργειας από αυτά. Με τα χρόνια, η καύση αυτών των οργανικών πηγών ενέργειας, αρχικά εξάντλησαν τους πόρους τους ανά τον κόσμο και απελευθέρωσαν στην ατμόσφαιρα τοξικά και μη αέρια ως προϊόντα της καύσης αυτής, τα οποία αλλάξαν αρκετά τη σύσταση της και έβλαψαν την υγεία του ανθρώπου και τις συνθήκες ζωής σε όλο τον πλανήτη. Οι λύσεις που προτάθηκαν, αν και πολύ καινοτόμες και επαναστατικές, δεν απευθύνθηκαν στην πηγή του προβλήματος δηλαδή την καύση ορυκτών καυσίμων, αλλά στην επεξεργασία και μείωση των ρύπων που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα ως προϊόντα της καύσης τους. Σήμερα εξετάζεται και εξελίσσεται η λύση του προβλήματος μέσω της αντικατάστασης των καυσίμων αυτών, με τρόπο ο οποίος δεν θα διακόψει την ‘ενεργειακή ευημερία’ μας και θα είναι μακροχρόνια οικονομικά βιώσιμος. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν διάφορες πηγές ενέργειας, ανανεώσιμες ως προς την ποσότητα της ενέργειας που παράγουν, οι οποίες με τις σωστές υποδομές και τις σωστές πηγές αποθήκευσης θα μπορούν να εξασφαλίσουν την ανθρώπινη ενεργειακή ανεξαρτησία. Μία από αυτές της πηγές αποθήκευσης που εξετάζεται είναι η παραγωγή και αποθήκευση πράσινου υδρογόνου.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αν και αρκετά συμφέρουσες ως προς την υγεία του ανθρώπου και την οικονομία, πάσχουν από ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα, που δεν είναι άλλο από την απόρριψη παραγόμενης ενέργειας. Η ενέργεια που παράγεται είναι διαθέσιμη στο δίκτυο, αλλά δεν χρησιμοποιείται από κανέναν με αποτέλεσμα την απόρριψη της, έτσι ώστε να μην υπάρξει βλάβη στο δίκτυο. Έτσι καταλήγουμε σε σπατάλη τουλάχιστον των δύο τρίτων της παραγόμενης ενέργειας, ενέργεια η οποία θα μπορούσε να συμβάλει σημαντικά στη λύση του ενεργειακού προβλήματος. Η αποθήκευση της ενέργειας και χρήση της σε άλλο χρόνο, παρουσιάζει ένα μεν δύσκολο και ακριβό επίτευγμα, αλλά ταυτόχρονα και μία λύση, η οποία μπορεί να φέρει την παραγωγή πράσινης ενέργειας σε ίσους όρους με την παραγωγή μέσω καύσης συμβατικών καυσίμων.

Η ναυσιπλοΐα είναι ένα κύριο μέσο εμπορίου με αρκετά μεγάλο πλήθος λειτουργικών πλοίων, με τις περισσότερες κύριες εμπορικές οδούς να διαπερνούν για μεγάλο χρονικό διάστημα περιοχές με μεγάλα ποσά και ποσοστά ηλιοφάνειας και αρκετά κοντά στον ισημερινό, όπου η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει αρκετά μεγάλα επίπεδα. Επιπροσθέτως, τα σημεία στα οποία οι εμπορικοί αυτοί διάδρομοι έχουν τη μεγαλύτερη κίνηση (chokepoints),

δηλαδή εκεί που τα πλοία είναι ουσιαστικά στάσιμα και δεν αποδίδουν με τους ίδιους ρυθμούς, είναι επίσης σε παρόμοιες συνθήκες. Γνωρίζοντας αυτό μπορούμε να έρθουμε στο συμπέρασμα ότι τεράστια ποσά ενέργειας δεν αξιοποιούνται στα εν λόγω ταξίδια. Με τις κατάλληλες διατάξεις και χρηματικές επενδύσεις μπορούν να μετατραπούν τα πλοία αυτά σε κινούμενες μηχανές παραγωγής και αποθήκευσης πράσινης ενέργεια.



Εικόνα 1: Κύριες ναυτικές εμπροχικές οδοί με επισήμανση στα σημεία υψηλής κυκλοφοριακής συμφόρησης (chokepoints) [1]

Η ένταξη φωτοβολταϊκών πάνω σε πλοίο δεν είναι κάποια καινοτόμα ιδέα καθώς έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν, ως μία προσπάθεια απαλλαγής των πλοίων από ορυκτά καύσιμα για να μειωθεί και το κόστος, αλλά και το αποτύπωμα άνθρακα τους. Καινοτόμα θα μπορούσε να χαρακτηριστεί η ιδέα που παρουσιάζει ο συγγραφέας στην μελέτη αυτή, η οποία δεν έχει ως κύριο σκοπό την κατασκευή και σχεδίαση πλοίων που λειτουργούν με πράσινη ενέργεια, αλλά την ένταξη αυτής της τεχνολογίας σε ήδη υπάρχοντα πλοία, με σκοπό την παραγωγή κέρδους και την αποφόρτωση της παγκόσμιας αγοράς ενέργειας από την καύση ορυκτών καυσίμων.

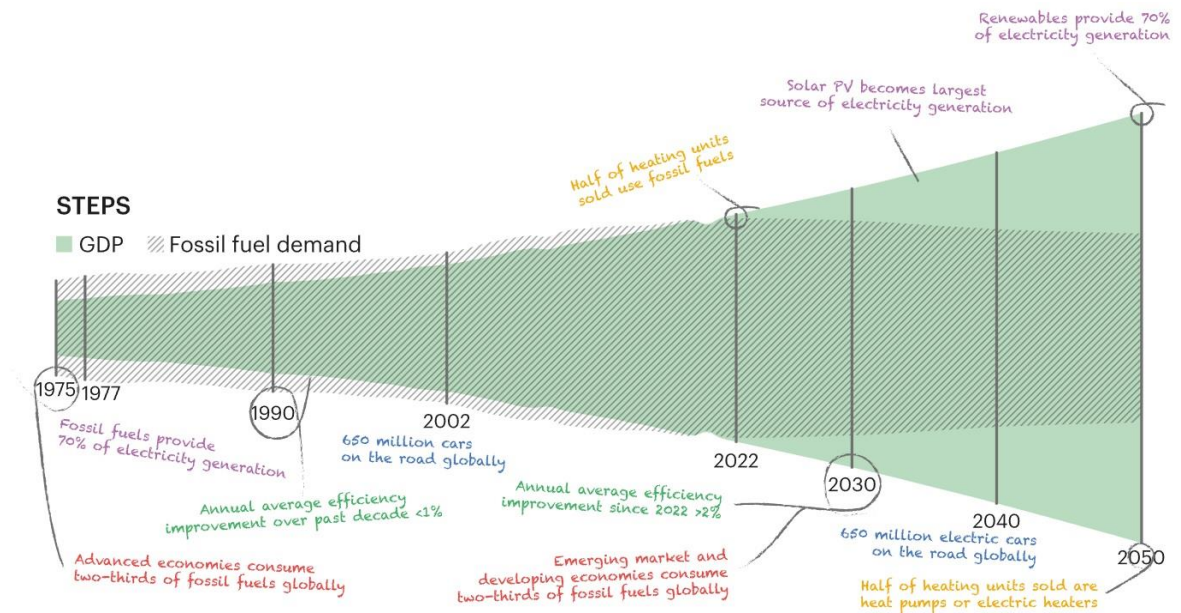
Κεφάλαιο 2

2 Θεωρητικό υπόβαθρο/Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν εκτενώς οι απαραίτητες θεωρητικές γνώσεις που συντελούν στην ορθή κατανόηση της μελέτης, πληροφορίες οι οποίες είναι προϊόντα βιβλιογραφικής ανασκόπησης και επαρκώς τεκμηριωμένες από αυτήν. Θα αναλυθούν επίσης παραδοχές που έγιναν με σκοπό την διεξαγωγή δεδομένων και αποτελεσμάτων και προβλέψεις όσον αφορά την αγορά του υδρογόνου και των σχετικών διατάξεων. Επιπλέον θα γίνει τεκμηρίωση της μελέτης και παράθεση των ερευνητικών ερωτημάτων που οδήγησαν στη διεξαγωγή της παρούσας έρευνας.

2.1 Υδρογόνο

Το υδρογόνο είναι το πρώτο στοιχείο του περιοδικού πίνακα και υπάρχει σε τεράστιες ποσότητες σε ολόκληρο το γνωστό σύμπαν, αποτελώντας το 75% της μάζας ολόκληρου του σύμπαντος. Η ανακάλυψη του έγινε τον 15ο αιώνα και μετά από αρκετή έρευνα και προσπάθεια της επιστημονικής κοινότητας, έγινε αντιληπτό ότι αποτελούσε μία καινοτόμα και πολύ καθαρή πηγή ενέργειας. Το ενδιαφέρον κορυφώθηκε κατά τη διάρκεια του Πρώτου Παγκοσμίου πολέμου, όπου χρησιμοποιήθηκε ως πηγή ενέργειας για τα καινούργια τεχνολογία αεροπλοία. Το ενδιαφέρον στη συνέχεια έπαψε να υπάρχει τις επόμενες δεκαετίες, όπου το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο έγιναν οι κύριες πηγές ενέργειας, κερδίζοντας έτσι την αγορά για τις επόμενες δεκαετίες και βάζοντας τέλος στην ανάπτυξη τεχνολογιών παραγωγής και αξιοποίησης υδρογόνου. Το υδρογόνο επανήλθε στο προσκήνιο τη δεκαετία του 1990, όταν έγινε αντιληπτό το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής και του μεγάλου επιπέδου ρύπανσης που είχαν δημιουργήσει τα ορυκτά καύσιμα και ερευνήθηκε η ένταξη νέων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα, ουδέτερες ως προς το περιβάλλον, όπως αιολική και ηλιακή ενέργεια και φυσικά το υδρογόνο [2][3]. Πλέον το υδρογόνο σε συνεργασία με τις ανανεώσιμες καλύπτουν το 16% της ενεργειακής ζήτησης με σκοπό να καλύπτουν το 70% μέχρι το 2050 [4].



Εικόνα 2: Ποσοστό ένταξης ανανεώσιμων πηγών από το 1975 μέχρι σήμερα και πρόβλεψη μέχρι το 2050 [4]

Όσον αφορά τις ιδιότητες του το υδρογόνο είναι άχρωμο, άοσμο και έχει τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ενέργεια (120-140 MJ/kg) [5] από όλα τα καύσιμα. Το υδρογόνο είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο, καθώς είναι πολύ αντιδραστικό με πολλά άτομα, όπως το οξυγόνο, κάτι που καθιστά αρκετά δύσκολη την διαχείριση και αποθήκευσή του κατά τη διάρκεια της αξιοποίησης του, είτε αυτή είναι μέσω καύσης, είτε μέσω κυψέλης καυσίμου. Οι διαδικασίες αυτές έχουν ως προϊόντα κυρίως νερό, κάτι που καθιστά το υδρογόνο μη ρυπογόνο πηγή ενέργειας. Χρησιμοποιείται για σκοπούς αποθήκευσης ενέργειας, καθώς δεν υπάρχει πουθενά ελεύθερο στην ατμόσφαιρα λόγω της υψηλής αντιδραστικότητας του και η ενέργεια για παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου φτάνει τις 50-55KWh [6].

2.1.1 Τύποι υδρογόνου

Το υδρογόνο ανάλογα με την προέλευση του κατηγοριοποιείται στις εξής κατηγορίες [7]:

- Πράσινο, το οποίο προέρχεται από πράσινη ενέργεια
- Μπλε, το οποίο προέρχεται από καύση μεθανίου με χρήση τεχνολογίας συλλογής άνθρακα
- Καφέ, το οποίο προέρχεται από καύση συμβατικών καυσίμων
- Γκρι, το οποίο προέρχεται από τη χρήση φυσικού αερίου- ατμού

Η σημασία της προέλευσης του υδρογόνου είναι συντριπτική, καθώς αυτό το ξεχωρίζει μεταξύ πράσινης και συμβατικής πηγής ενέργειας.

2.1.2 Εφαρμογές

Οι εφαρμογές του υδρογόνου ως πηγή ενέργειας αριθμούν όσες και των συμβατικών καυσίμων, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθούν για ποικίλες εφαρμογές με τις κατάλληλες υποδομές. Μερικές από αυτές αποτελούν τον τομέα των μεταφορών, της βιομηχανίας, της αεροπορίας και κυριότερα της αποθήκευσης ενέργειας και εξισορρόπησης και σταθεροποίησης της ενεργειακής ζήτησης.

Ο πιο συνήθης τρόπος αξιοποίησης του υδρογόνου είναι μέσω κυψελών καυσίμου, οι οποίες εκμεταλλεύονται την χημική αντίδραση υδρογόνου και οξυγόνου και παράγουν ηλεκτρισμό.

2.1.3 Υδρογόνο ως μέσο αποθήκευσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο κύριος ρόλος του υδρογόνου στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μας, είναι ως ένα μέσο αποθήκευσης ενέργειας. Ειδικότερα, το πράσινο υδρογόνο εκμεταλλεύεται το πλεόνασμα ενέργειας που μπορεί να λαμβάνεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας, το οποίο πλεόνασμα, αντί να απορριφθεί από το δίκτυο χρησιμοποιείται για την παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου. Στη συνέχεια, το υδρογόνο αυτό αξιοποιείται για την παραγωγή ενέργειας σε μεταγενέστερο χρόνο, όπως και οι υπόλοιπες πηγές αποθήκευσης.

Για να αξιολογηθεί ορθά λοιπόν το υδρογόνο ως πηγή ενέργειας, δεν αρκεί να συγκριθεί με τα συμβατικά καύσιμα, αλλά και με τις υπόλοιπες πηγές αποθήκευσης. Πέραν του υδρογόνου οι πλέον διαδεδομένες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας για παρόμοιες εφαρμογές με αυτές του υδρογόνου είναι τα αντίστροφα υδροηλεκτρικά και οι μπαταρίες. Όσον αφορά τα αντίστροφα υδροηλεκτρικά, ένα σαφές πλεονέκτημα του υδρογόνου όταν συγκριθούν οι δύο τεχνολογίες είναι ότι το τελευταίο προσφέρει πολύ μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, έχοντας τη δυνατότητα να αποθηκεύσει τεράστιες ποσότητες ενέργειας σε σχετικά μικρό όγκο. Από την άλλη μεριά το κόστος, η πολυπλοκότητα και η έλλειψη τεχνολογικής ωρίμανσης της αξιοποίησης του υδρογόνου, έφεραν τους επενδυτές να επενδύσουν στα αντίστροφα υδροηλεκτρικά. Η αναγέννηση του ενδιαφέροντος όμως και η συνεχής επένδυση σε έρευνες και μελέτες σε τεχνολογίες αξιοποίησης υδρογόνου αλλάζουν την εικόνα, μετατρέποντας το υδρογόνο στην κυριότερη πηγή αποθήκευσης ενέργειας μέχρι το 2030 [8].

Η μεγαλύτερη όμως μάχη στον τομέα της αποθήκευσης γίνεται μεταξύ του υδρογόνου και μπαταριών. Συγκρίνοντας τις δύο τεχνολογίες, γίνεται αντιληπτό ότι ενώ οι μπαταρίες

είναι πιο ώριμη τεχνολογία και πιο αποδοτική σε έναν πλήρη κύκλο φόρτισης- εκφόρτισης από ότι έναν αντίστοιχο κύκλο παραγωγής- αποθήκευσης- αξιοποίησης υδρογόνου, η μεγάλη ενεργειακή περιεκτικότητα και ο σχεδόν μηδενικός ρυθμός αυτοεκφόρτισης, το τοποθετούν σε πλεονεκτική θέση. Οφείλει να αναφερθεί και το γεγονός ότι ακόμα και αν το κόστος των μπαταριών συγκριτικά με το υδρογόνο είναι αρκετά μικρότερο, η μικρή διαθεσιμότητα των απαιτούμενων υλικών και η ποσότητα ρύπανσης που προκαλούν οι μπαταρίες κατά το στάδιο της απόρριψής τους, θα αποτελέσει πρόβλημα στο μέλλον, αν φυσικά δεν κατασκευαστούν καινούργιοι τύποι μπαταριών που μετριάζουν αυτά τα προβλήματα [9].

Αφού έγινε εκτενής αναφορά στο υδρογόνο, ακολουθεί η αναφορά στα σχέδια της παγκόσμιας κοινότητας όσον αφορά την αξιοποίηση του. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την ενεργειακή πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης [10] έχουν τεθεί οι εξής στόχοι:

- Παραγωγή 10 εκατομμύρια τόνων πράσινου υδρογόνου μέχρι το 2030 μέσω ηλεκτρόλυσης
- Εγκατάσταση 40 GW ισχύος μονάδων ηλεκτρόλυσης σε όλη την επικράτεια της Ευρωπαϊκής Ένωσης
- Επένδυση σε έργα πράσινης ενέργειας, όπως έργα παραγωγής και αποθήκευσης πράσινου υδρογόνου
- Χρήση πράσινου υδρογόνου στη βιομηχανία και στην μαζική μεταφορά (πλοία, αεροπλάνα, λεωφορεία)
- Συνεργασία με γειτονικές περιοχές όσον αφορά την παραγωγή, αγορά και πώληση πράσινου υδρογόνου

Τέλος, ιδιαίτερα σημαντική είναι η εκτίμηση της τιμής του υδρογόνου στην αγορά και για την επόμενη εικοσαετία. Σύμφωνα με πηγές, η τιμή του υδρογόνου την στιγμή της συγγραφής είναι 6-8 €/kg ενώ αναμένεται πτώση της τιμής του όσο η τεχνολογία διαδίδεται και εξελίσσεται και όσο το υδρογόνο γίνεται πιο διαθέσιμο στην αγορά [11].

2.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούν την πιο διαδεδομένη τεχνολογία αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας και συντελούν στο ενεργειακό ισοζύγιο κατά 6,7% επί της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας [12]. Η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από την εταιρία Bell Labs το 1954 [13] και βίωσε εκτενή τεχνολογική εξέλιξη από το 2008 και έπειτα [14]. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο για να παράξει ηλεκτρική ενέργεια. Εν' ολίγης, το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από δύο σώματα σιλικόνης,

το άνω στρώμα που έχει περίσσεια ηλεκτρονίων και το κάτω στρώμα που έχει έλλειψη ηλεκτρονίων (περίσσεια οπών). Μόλις η ηλιακή ακτινοβολία χτυπήσει το άνω στρώμα, τα επιπλέον ηλεκτρόνια διεγείρονται και κινούνται προς τις οπές του κάτω στρώματος, δημιουργώντας κύκλωμα και παράγοντας ηλεκτρισμό [15].

Ενώ η αρχή λειτουργίας παραμένει ίδια, πολλές είναι οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των τύπων των φωτοβολταϊκών πλαισίων, όσον αφορά τα υλικά και τις ιδιότητές τους. Οι πιο σχετικοί τύποι αναφέρονται παρακάτω:

- Μονοκρυσταλλικά πλαίσια
- Πολυκρυσταλλικά πλαίσια

Οι διαφορές στα υλικά όσον αφορά τις δύο αυτές κατηγορίες ισοδυναμούν και σε μία διαφορά στην πολυπλοκότητά, στους ρύπους κατασκευής και απόρριψής τους, στο κόστος και στην απόδοσή τους. Συγκρίνοντας μία προς μία τις παραμέτρους μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση των δύο κατηγοριών [16][17].

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πλαισίων [16]

	Monocrystalline	Polycrystalline
Color	Black	Blue
Cost	\$1 – \$1.50 per watt	\$0.75 – \$1 per watt
Efficiency Rating	More efficient	Less efficient
Life Span	25 – 30 years	25 – 30 years
Temperature Coefficient	Lower temperature coefficient	Higher temperature coefficient
Durability	More durable	Less durable

Γενικότερα η μέγιστη θεωρητική απόδοση που είναι δυνατό να αγγίξει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι 25% σε συνθήκες εργαστηρίου, ενώ ο μέσος όρος ενός καινούργιου πλαισίου σε πραγματικές συνθήκες είναι κάτω από 20% [18]. Τέλος πρέπει να γίνει αναφορά στη μείωση της απόδοσης των πλαισίων ανάλογα με τη θερμοκρασία των κυψελών, η οποία συνήθως αναφέρεται από τον κατασκευαστή και σε εργαστηριακές συνθήκες είναι $-0,109 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ και $-0,124 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ για μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά πλαίσια αντίστοιχα [19].

2.2.1 Συμπληρωματικές διατάξεις

Με σκοπό την αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας των πλαισίων, χρησιμοποιούνται κατάλληλα ηλεκτρονικά ισχύος για διαχείριση και σταθεροποίηση του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτά αποτελούνται από τα παρακάτω:

- Μετατροπέας από συνεχές σε εναλλασσόμενο και από εναλλασσόμενο σε συνεχές, ανάλογα με τις ανάγκες της κατανάλωσης
- Σταθεροποιητής τάσης
- Βελτιστοποιητές ισχύος/ Μετατροπέας DC/DC
- Σύστημα παρακολούθησης
- Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις γίνεται χρήση μπαταριών για την αποθήκευση ενέργειας, διαδικασία για την οποία χρειάζονται ρυθμιστές φόρτισης

2.2.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Ένα μεγάλο μέρος που επηρεάζει σημαντικά την ενεργειακή παραγωγή των πλαισίων είναι η ηλιακή ακτινοβολία που αυτά απορροφούν. Η ηλιακή ακτινοβολία μετριέται σε W/m^2 και διαφοροποιείται ανάλογα με καιρικές και γεωγραφικές συνθήκες. Χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, την διάχυτη και την άμεση ηλιακή ακτινοβολία με την τελευταία να είναι κατά πολύ ισχυρότερη από την πρώτη. Όσον αφορά τα καιρικά φαινόμενα, συννεφιά και υγρασία μειώνουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών [20][21]. Επίσης καιρικές συνθήκες όπως αμμοθύελλες, δυνατός αέρας, μικροσωματίδια και ούτω καθ' εξής, είναι δυνατόν να δημιουργήσουν επικάλυψη σκόνης στην επιφάνεια των πλαισίων, η οποία μειώνει την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτά. Όσον αφορά τις γεωγραφικές συνθήκες, κανόνας είναι ότι η ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται σε συνάρτηση με την απόσταση από τον Ισημερινό [22]. Τέλος, υπάρχουν άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια των πλαισίων που έχουν σχέση με την ίδια την κατασκευή και τοποθέτηση τους. Αυτοί οι παράγοντες είναι η σκίαση που υπάρχει κατά τη διάρκεια της ημέρας από όμορες κατασκευές και η ανάκλαση των υλικών των πλαισίων.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την ηλιακή ακτινοβολία είναι οι ηλιακές γωνίες και οι γωνίες κλίσης των πλαισίων. Ως κανόνας λαμβάνεται ότι μέσα στην ημέρα, όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ του, δηλαδή όταν έχουμε ηλιακό μεσημέρι, τότε η ακτινοβολία είναι μέγιστη. Εποχικές μεταβολές έχουν ως αποτέλεσμα την μετατόπιση της ζενιθιακής γωνίας ανά ημέρα και την αλλαγή της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στην εξεταζόμενη περιοχή. Σε γενικές γραμμές η ηλιακή ακτινοβολία είναι αντιστρόφως ανάλογη

με την ηλιακή ζενιθιακή γωνία, με τη μέγιστη τιμή ηλιακής ακτινοβολίας να είναι στις 0° [23]. Αναφορικά με τα ίδια τα πλαίσια, κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης, ανάλογα με την τοποθεσία και την χρήση των πλαισίων, εντάσσεται γωνία κλίσης σε αυτά, με σκοπό η ακτινοβολία να προσπίπτει όσο το δυνατόν πιο κάθετα. [24]. Τέλος, όσον αφορά το αξιμουθίο και την αξιμουθιακή γωνία του πλαισίου, αυτή πρέπει να είναι τέτοια ώστε πάντα το πλαίσιο να είναι στραμμένο προς την κατεύθυνση του ηλίου. Αν και δύσκολο εγχείρημα, για το σκοπό αυτό υπάρχουν τεχνολογίες “solar tracking” οι οποίες με μία αύξηση του κόστους προσφέρουν σημαντική αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών.

2.2.3 Τεχνοοικονομικά φωτοβολταϊκών

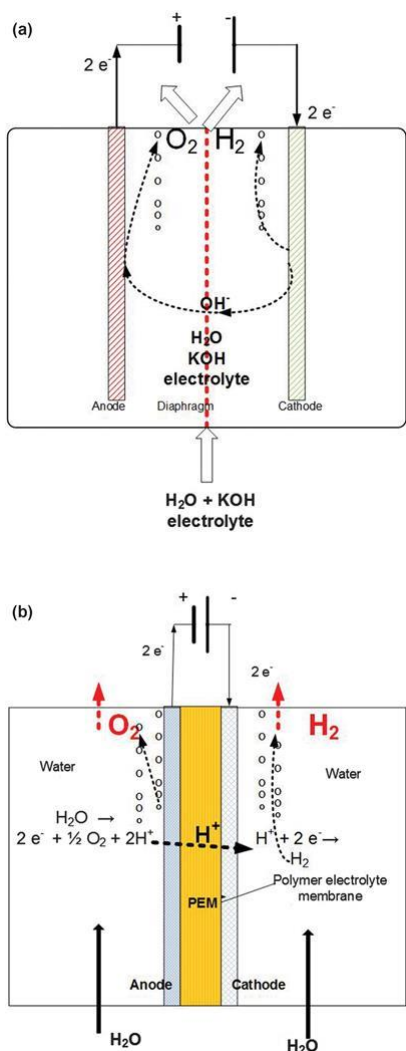
Έχοντας αναλύσει τις κύριες συνιστώσες των φωτοβολταϊκών πλαισίων, σκόπιμη είναι και η αναφορά στο κόστος αρχικής επένδυσης και συντήρησης τους. Την χρονική στιγμή της συγγραφής το κόστος ανά μονάδα ισχύος ανερχόταν στα 900€/KW κατά μέσο όρο [25] και το κόστος συντήρησης σύμφωνα με κατασκευαστές ανερχόταν στο 1-2% του αρχικού κόστους ανά έτος. Σύμφωνα με προβλέψεις το αρχικό κόστος των φωτοβολταϊκών θα συνεχίσει την καθοδική πορεία του φτάνοντας το 2040 60% μείωση του κόστους του [26].

2.3 Ηλεκτρόλυση

Μια πολύ σημαντική τεχνολογική εξέλιξη όσον αφορά το υδρογόνο ήταν οι διατάξεις ηλεκτρόλυσης. Η βασική αρχή λειτουργίας των παραπάνω εκμεταλλεύεται ηλεκτρική ενέργεια για να διασπάσει το δεσμό του υδρογόνου και του οξυγόνου στο νερό. Στη συνέχεια ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται γίνεται συλλογή του υδρογόνου και ο διαχωρισμός του από το παραγόμενο οξυγόνο [27].

Η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τη διάσπαση του νερού στα επιμέρους στοιχεία του έγινε για πρώτη φορά το 1800. Η πρώτη εμπορική εφαρμογή έγινε το 1890, όπου υπήρχε ανάγκη παραγωγής υδρογόνου για τα γαλλικά στρατιωτικά αερόπλοια. Στη συνέχεια η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιούνταν περιορισμένα σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας για παραγωγή υδρογόνου που χρησιμοποιούνταν σε στρατιωτικές -διαστημικές εγκαταστάσεις. Από το 1990 και έπειτα επανεκκινήθηκε το ενδιαφέρον για την παραγωγή υδρογόνου καθώς πλέον θεωρούνταν ως πηγή πράσινης ενέργειας, αφού η αξιοποίηση του δεν απελευθερώνει ρύπους επιβλαβείς για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Την τελευταία δεκαετία, η τεχνολογία μελετάται και αναπτύσσεται εκθετικά, ανάπτυξη η οποία αναμένεται να συνεχίσει και τις επόμενες δεκαετίες [2].

Ανά τα χρόνια, αρκετοί τύποι διατάξεων ηλεκτρόλυσης έχουν κυκλοφορήσει στην αγορά ή βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, ο καθένας διαφορετικός ως προς το κόστος, τα υλικά και την απόδοσή του [28]. Παρακάτω αναφέρονται μερικοί από αυτούς:



Εικόνα 3: Διατάξεις ηλεκτρόλυσης υδρογόνου από νερό. a) Αλκαλική b) Μembrάνης στερεού πολυμερούς [27]

- Αλκαλικές μονάδες ηλεκτρόλυσης, οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν στην ιστορία, οι οποίες χρησιμοποιούν KOH και NaOH σαν ηλεκτρολύτες. Είναι αρκετά ώριμη τεχνολογία και η απόδοσή τους κυμαίνεται από 60-80%
- Μονάδες ανταλλαγής πρωτονίων, οι οποίες είναι σχετικά καινούργιες στην αγορά και χρησιμοποιούν ευγενή μέταλλα ως ηλεκτρόδια, κάτι που ανεβάζει σημαντικά το κόστος τους, την καθαρότητα του παραγόμενου υδρογόνου και την απόδοσή τους η οποία είναι περίπου 80%. Αφού πρόκειται για καινούργια τεχνολογία, περαιτέρω μελέτη μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις μονάδες ανταλλαγής πρωτονίων τα επόμενα χρόνια.
- Μονάδες στερεού οξειδίου, οι οποίες είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Χρησιμοποιούν στερεό ηλεκτρολύτη και λειτουργούν σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες 700-1000°C κάτι που επιτρέπει απόδοση κοντά στο 100% σε ιδανικές συνθήκες.

Σε γενικές γραμμές, η ποιότητα του παραγόμενου υδρογόνου είναι άνω του 99,9% για όλες τις μεθόδους, με τις διατάξεις ανταλλαγής πρωτονίων να αγγίζουν το 99.99 % [29]. Η κατανάλωση νερού είναι ίδια για όλους τους τύπους ηλεκτρόλυσης και είναι 9L ανά kg παραγόμενου υδρογόνου, ενώ το παρεχόμενο νερό πρέπει να είναι υψηλής καθαρότητας [30].

Η ηλεκτρόλυση σήμερα εφαρμόζεται ιδιαίτερα για την παραγωγή υδρογόνου, όμως η πλειοψηφία της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των διατάξεων αυτών, προέρχεται από ηλεκτρική ενέργεια δικτύου και το παραγόμενο υδρογόνο δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως πράσινο. Με την αύξηση της ανάγκης για αποθήκευση ενέργειας και της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα, αναμένεται σημαντική

άνοδος της παραγωγής πράσινου υδρογόνου από ηλεκτρόλυση μέχρι το τέλος της δεκαετίας [31].

Όσον αφορά το κόστος και συγκεκριμένα το κόστος των μονάδων ηλεκτρόλυσης ανταλλαγής πρωτονίων, αυτό ανέρχεται στα 700-1000 €/KW ανάλογα με την χώρα κατασκευής τους, τιμή η οποία αναμένεται να μειωθεί σημαντικά τα επόμενα χρόνια [32]. Όσον αφορά το κόστος συντήρησης, αυτό μπορεί να ληφθεί σύμφωνα με έρευνες από 1% έως 3%[33].

2.4 Αφαλάτωση

Η αφαλάτωση του νερού υπάρχει ως έννοια από τα αρχαία χρόνια. Διάφοροι αρχαίοι πολιτισμοί είχαν αναπτύξει μεθόδους απομάκρυνσης αλάτων από το νερό παρέχοντας καθαρό πόσιμο νερό στην τότε κοινωνία. Από το 1850 και έπειτα, σύγχρονες τεχνολογίες αφαλάτωσης ξεκίνησαν να εφαρμόζονται, τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούσαν ατμό και θερμότητα. Στις αρχές του 20ου αιώνα και μέχρι το Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο, ξεκίνησε η κατασκευή μεγάλων εγκαταστάσεων αφαλάτωσης που χρησιμοποιούσαν τη μέθοδο αυτή. Τη δεκαετία του 1950, μαζί με την αύξηση ανάγκης της καθαρού νερού στις πόλεις λόγω της αστικοποίησης, αναπτύχθηκε η τεχνολογία αντίστροφης ώσμωσης (RO), η οποία είδε σημαντική άνοδο στην απόδοση από το 1970 και έπειτα. Πλέον η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης έχει εγκατασταθεί ως η πλέον εφαρμοσμένη μέθοδος, παρέχοντας καθαρό νερό σε απομακρυσμένες περιοχές και συνεπώς μειώνοντας το κόστος πόσιμου νερού [34].

Η βασική λειτουργία της αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης βασίζεται στο φυσικό φαινόμενο της ώσμωσης, όπου δύο όμοια διαλύματα με διαφορετική συγκέντρωση που χωρίζονται από μία μεμβράνη, τείνουν να γίνονται ομοιόμορφα. Μέσο της εγκατάστασης ημιπερατής μεμβράνης, η οποία δεν επιτρέπει στα άλατα να διέλθουν και εφαρμόζοντας πίεση, είναι δυνατή η αφαλάτωση του νερού με μία αντίστροφη διαδικασία από αυτή της ώσμωσης. Η πίεση που επιτρέπει τη διαδικασία να λάβει χώρα ονομάζεται ωσμωτική και το νερό πρέπει να περάσει διάφορα στάδια προεπεξεργασίας με σκοπό την προστασία της μεμβράνης [35]. Η ενεργειακή κατανάλωση της μεθόδου ανέρχεται σε 3,5 KWh/m³ για εφαρμογές με θαλασσινό νερό. Όσον αφορά το αρχικό κόστος της διάταξης, αυτό είναι ανάλογο με την ημερήσια παραγωγή της μονάδας και ανέρχεται σε 800 €/ m³/ημέρα [36]. Όσον αφορά το κόστος συντήρησης και αλλαγής μεμβρανών, αυτό μπορεί να ληφθεί ως 5% του αρχικού κόστους ετησίως [37].

2.5 Αποθήκευση υδρογόνου

Σημαντική πτυχή στην αξιοποίηση του υδρογόνου ως πηγή ενέργειας είναι φυσικά η αποθήκευση του. Από την στιγμή που ξεκίνησε η παραγωγή του υδρογόνου έχουν αναπτυχθεί διάφορες διατάξεις αποθήκευσης, η κάθε μία με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

Η φύση του υδρογόνου, η πυκνότητα καθώς και η αντιδραστικότητά του, καθιστά την αποθήκευσή του διαδικασία αρκετά πολύπλοκη και ακριβή. Οι πλέον διαδεδομένες διατάξεις αποθήκευσης είναι:





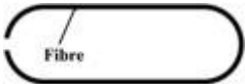
- Αποθήκευση σε κρυογονικές συνθήκες (υδρογόνο σε υγρή μορφή)
- Αποθήκευση σε δεξαμενές μεταλλικών υβριδίων
- Αποθήκευση σε δεξαμενές υψηλής πίεσης

Οι παραπάνω είναι όλες αρκετά αξιόπιστες τεχνολογίες και διαφέρουν αρκετά ως προς τη μέγιστη ποσότητα αποθήκευσης και το κόστος. Για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου, η πιο συμφέρουσα τεχνολογία θεωρείται η αποθήκευση σε δεξαμενές υψηλής πίεσης.

2.5.1 Δεξαμενές υψηλής πίεσης

Ως δεξαμενές υψηλής πίεσης θεωρούμε δεξαμενές με παχύ τοίχωμα οι οποίες φτάνουν μέχρι τα 70 MPa. Η κύρια ενεργειακή κατανάλωση είναι η απαραίτητα για την αύξηση του υδρογόνου στην απαιτούμενη πίεση, ανάλογα με την πληρότητα της δεξαμενής. Οι εν' λόγω δεξαμενές χωρίζονται σε υποκατηγορίες ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, οι οποίες είναι από Type I έως IV. Υπάρχουν και δεξαμενές Type V αλλά επειδή βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, το κόστος τους δεν επιτρέπει την εφαρμογή σε εμπορικό επίπεδο [38]. Μια γενική όψη των διάφορων τύπων παρουσιάζονται στον “Πίνακας 2”.

Πίνακας 2: Ταξινόμηση και εφαρμογές διάφορων τύπων δεξαμενών υδρογόνου υψηλής πίεσης [39]

Type	Schematic	Materials			Maximum pressure (bar)	Applications
		Metal	Composite	Polymer		
I		Steel/Al	/	/	Al: 175 Steel: 200	Submarine applications
II		Steel/Al liner	Filament windings around the cylinder part	/	Al/glass: 263 Steel/carbon fibre: 299	Stationary fuel cells and hydrogen (FCH) technologies
III		Al/Steel liner	Composite over-wrap (fibre glass/aramid or carbon fibre)	/	Al/glass: 305 Al/aramid: 438 Al/carbon: 700	Vehicles
IV		/	Composite over-wrap (carbon fibre)	Polymer liner	350 (buses) 700	Vehicles
V		/	Composite	/	1000	Aerospace applications

Αναφορικά με το κόστος των δεξαμενών, αυτό ανέρχεται σε 569 €/kg για τις δεξαμενές Type IV [40]. Τέλος, ως ποσοστό του αρχικού κόστους, το κόστος συντήρησης μίας τέτοιας δεξαμενής ανέρχεται στο 1%, το οποίο καθορίζεται από τους αντίστοιχους κατασκευαστές.

2.6 Τεκμηρίωση της έρευνας

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η τεχνοοικονομική μελέτη μίας διάταξης φωτοβολταϊκών πάνω σε μεγάλης επιφάνειας πλοίο, το οποίο θα εκμεταλλεύεται την ενέργεια του ηλίου για παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου, το οποίο στη συνέχεια θα μεταπωλείται στην τοπική αγορά στην οποία βρίσκεται το πλοίο αυτό. Το παραπάνω όχι μόνο θα αποφέρει κέρδος στην αντίστοιχη εταιρία, αλλά και θα βοηθήσει την τοπική κοινωνία να περιορίσει την εκπομπή ρύπων για την παραγωγή ενέργειας, παραγωγή που θα ερχόταν από ορυκτά καύσιμα. Επίσης, είναι ένας τρόπος για ταυτόχρονη παραγωγή και μεταφορά του υδρογόνου, που αντιμετωπίζει ουσιαστικά ένα από τα μειονεκτήματα του υδρογόνου που είναι η δυσκολία στη μεταφορά του. Ευρύτερα, με μία σχετική επένδυση θα είναι δυνατόν να γίνει εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας που δέχεται ένα πλοίο κατά τη διάρκεια του ταξιδιού του, η οποία σε κάθε άλλη περίπτωση θα χανόταν. Στην μελέτη αυτή λοιπόν θα αναλυθεί κατά πόσο μία τέτοια διάταξη είναι εφικτή και κατά πόσο θα αποφέρει κέρδος αν συνυπολογιστεί η μεγάλη αρχική επένδυση και το σχετικό κόστος συντήρησης που χρειάζεται.

Με γνώμονα λοιπόν τα παραπάνω δημιουργούνται μερικά σχετικά ερευνητικά ερωτήματα που καλούνται να απαντηθούν και έχουν να κάνουν με την τεχνοοικονομική και χωροταξική άποψη της ιδέας. Συγκεκριμένα:

- Είναι η συγκεκριμένη διάταξη τεχνοοικονομικά εφικτή και μπορεί να γίνει απόσβεση του αρχικού της κόστους και του κόστους συντήρησης;
- Μπορούν να τοποθετηθούν όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα, χωρίς να διαταράσσεται η ορθή λειτουργία του πλοίου;
- Κατά πόσο μία διάταξη παραγωγής πράσινου υδρογόνου μπορεί να βγάλει κέρδος και κατά πόσο επηρεάζει το πρόβλημα μας το κυλιόμενο ηλιακό δυναμικό, λόγω της συνεχούς αλλαγής της τοποθεσίας του πλοίου.

Περαιτέρω πληροφορίες και λεπτομερής παράθεση της ιδέας γίνεται στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας στο υποκεφάλαιο “περιγραφή διάταξης” καθώς και στο κεφάλαιο μελέτης περίπτωσης.

Κεφάλαιο 3

3 Μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας θα γίνει εκτενής αναφορά στον τρόπο με τον οποίο έγινε η μελέτη και στον τρόπο με τον οποίο συλλέχθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα και λήφθηκαν τα αποτελέσματα της μελέτης.

3.1 Περιγραφή διάταξης

Αρχικά πριν γίνει αναφορά στα βήματα ανάλυσης και συλλογής δεδομένων, αποτελεσμάτων και επιλογής των κατάλληλων συνιστωσών, πρέπει να γίνει κατανοητή η προτεινόμενη διάταξη. Η αρχή λειτουργίας είναι η εξής: Ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που έχουν τοποθετηθεί πάνω στο κατάστρωμα του πλοίου, τα οποία με τη σειρά τους παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή στη συνέχεια παρέχεται στα επιμέρους κομμάτια της διάταξης, ανάλογα με τις ενεργειακές τους ανάγκες, για να ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής υδρογόνου. Τέλος, το παραγόμενο υδρογόνο αποθηκεύεται στη δεξαμενή, έτοιμο να χρησιμοποιηθεί ή να πωληθεί σε κατάλληλους αγοραστές.

Για την επίτευξη της παραπάνω λειτουργίας θα χρησιμοποιηθούν στην εγκατάσταση:

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία
- Μονάδες ηλεκτρόλυσης PEM
- Μονάδα αφαλάτωσης RO
- Δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου (υψηλής πίεσης type IV)
- Ηλεκτρονικά ισχύος για μετατροπή και διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

Είναι επίσης απαραίτητη η εισαγωγή δεδομένων τα οποία χρησιμοποιεί η μελέτη. Αυτά αποτελούν:

- Γεωγραφικές συντεταγμένες πλοίου ανά ώρα για όλη τη διάρκεια της μελέτης
- Ηλιακή ακτινοβολία στις εξεταζόμενες συντεταγμένες
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος στις εξεταζόμενες συντεταγμένες
- Καμπύλες λειτουργίας επιλεγμένων φωτοβολταϊκών και γενικότερα χαρακτηριστικά τους

- Χαρακτηριστικά επιλεγμένης μονάδας ηλεκτρόλυσης (ισχύς, παραγωγή, απαίτηση σε νερό κλπ)
- Χαρακτηριστικά επιλεγμένης μονάδας αφαλάτωσης

3.2 Επιλογή τύπου πλοίου και εκτίμηση γεωγραφικών συντεταγμένων αυτού για τη διάρκεια της μελέτης

Το πρώτο βήμα για την διεξαγωγή της συγκεκριμένης μελέτης είναι η αρχική επιλογή του τύπου του πλοίου στο οποίο θα γίνει η εν λόγω εγκατάσταση. Για το σκοπό, αυτό θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά που οφείλει να διαθέτει το επιλεγμένο πλοίο. Αυτά είναι:

- Μεγάλη επιφάνεια.
- Μεγάλος χώρος αποθήκευσης.
- Να χρησιμοποιεί αντλίες και δεξαμενές για τη λειτουργία του και όχι γερανούς και κοντέινερ.
- Να διαθέτει αρκετό ελεύθερο χώρο.

Στη συνέχεια θα αναλυθούν μια προς μία οι παραπάνω συνιστώσες. Η μεγάλη επιφάνεια είναι απαραίτητη για την εγκατάσταση μεγάλης ισχύος διάταξη φωτοβολταϊκών. Η επιφάνεια πρέπει να βρίσκεται σε σημείο το οποίο δέχεται μεγάλα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, με το μικρότερο δυνατό ποσοστό σκίασης, όπως είναι το κατάστρωμα. Η τοποθέτηση της εγκατάστασης πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην διαταράσσονται οι απαραίτητες εργασίες που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του πλοίου με σκοπό την ορθή λειτουργία αυτού.

Ο μεγάλος χώρος αποθήκευσης πρέπει να υπάρχει με σκοπό την αποθήκευση μεγάλης ποσότητας υδρογόνου μαζί με το υπόλοιπο φορτίο που μεταφέρει το πλοίο, την ώρα που αυτό παράγεται από την εγκατάσταση του πλοίου. Η ιδέα λοιπόν, αν συζητάμε για παράδειγμα για ένα πλοίο “tanker”, αφού στις περισσότερες περιπτώσεις τέτοιου τύπου πλοία δε χρησιμοποιούν ολόκληρο το χώρο αποθήκευσης και είναι μερικώς γεμάτα με καύσιμο, είναι να γίνει μετατροπή μίας εκ' των διαθέσιμων δεξαμενών αυτού του πλοίου σε δεξαμενή υψηλής πίεσης αποθήκευσης υδρογόνου.

Όπως είναι προφανές σε ένα πλοίο με μία τεράστια επιφάνεια φωτοβολταϊκών δεν είναι πρακτική η συνεχής φόρτωση - εκφόρτωση κοντέινερ, καθώς αυτό θα πρέπει να συνοδεύεται από μία διάταξη που θα απομακρύνει την συστοιχία των φωτοβολταϊκών κατά τη διάρκεια της

διαδικασίας. Για τον λόγο αυτό επιλέγονται πλοία τα οποία χρησιμοποιούν αντλίες και δεξαμενές, δηλαδή όχι στερεά φορτία.

Μια τέτοια εγκατάσταση, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, συνοδεύεται και με μονάδες ηλεκτρόλυσης και αφαλάτωσης, πέρα από την δεξαμενή και τα φωτοβολταϊκά. Οι μονάδες αυτές πέραν του ότι από μόνες τους καταλαμβάνουν μία σημαντική ποσότητα χώρου, έχουν και συμπληρωματικές διατάξεις, οι οποίες πρέπει να τοποθετούνται σε ασφαλές σημείο στο χώρο του πλοίου, για να αποφεύγεται η έκθεση τους σε στοιχεία όπως ακτινοβολία, υψηλή/χαμηλή θερμοκρασία, υγρασία κλπ. Έτσι για την επιλογή μας πρέπει να ληφθεί υπ' όψη και ο παράγοντας τοποθέτησης αυτών, αφού ο χώρος σε ένα πλοίο είναι αρκετά περιορισμένος. Διαθεσιμότητα κενού ελεύθερου χώρου θα βοηθούσε σημαντικά στη λύση του χωροταξικού προβλήματος που αναδύεται στις συγκεκριμένες συνθήκες.

Αφού γίνει η επιλογή του πλοίου, ακολουθεί η εκτίμηση των γεωγραφικών του συντεταγμένων για τη διάρκεια της μελέτης, η οποία είναι ένα έτος. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ειδική υπηρεσία “AIS tracking” [41], η οποία παρέχεται από διάφορους φορείς που ασχολούνται με χαρτογραφήσεις ναυτικών οδών, εντοπισμό τοποθεσίας πλοίου, υπολογισμό χρόνου αφίξεων κ.ο.κ. Εναλλακτικά τα δεδομένα αυτά μπορούν να ζητηθούν από την ίδια την εταιρία του πλοίου καθώς όλες οι εταιρίες διαθέτουν ένα ιστορικό στιγμάτων τοποθεσίας ανά ώρα τουλάχιστον πέντε ετών για τα πλοία τους. Στη μελέτη αυτή τα δεδομένα δεν ήταν εξ' ολοκλήρου διαθέσιμα λόγω έλλειψης πρόσβασης και υποστήριξης από τους προαναφερόμενους φορείς. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό σε αρκετά σημεία έγινε εκτίμηση της τοποθεσίας και πορείας του πλοίου και υπολογισμός της αναμενόμενης θέσης του πλοίου, δεδομένου της αρχικής και τελικής του θέσης και ταχύτητας, ή με την χρήση κάποιου αντίστοιχου εργαλείου, όπως το “voyage planner” της υπηρεσίας “Marine traffic” το οποίο υπολογίζει τα παραπάνω, με δεδομένους χρόνους και τόπους εκκίνησης, ταχύτητα και προορισμούς. [42]

3.3 Εκτίμηση ηλιακού δυναμικού πλοίου

Η εκτίμηση του ηλιακού δυναμικού σε μη σταθερές γεωγραφικές συντεταγμένες είναι ένα αρκετά δύσκολο εγχείρημα, καθώς δεν υπάρχουν προγράμματα προσομοίωσης που να ασχολούνται με κινούμενες συντεταγμένες. Συνεπώς για την λύση του προβλήματος αυτού αναπτύχθηκε κατάλληλη μεθοδολογία.

Η ιδέα είναι, να χωριστεί το ταξίδι του πλοίου σε “ζώνες”, όπου σε κάθε μία από αυτές η ηλιακή ακτινοβολία και οι μετεωρολογικές συνθήκες θεωρούνται σταθερές. Έτσι λοιπόν, μία παραδοχή που έγινε είναι ότι οι τιμές ηλιακής ακτινοβολίας παραμένουν σταθερές σε μία επιφάνεια του χάρτη ένα επί ένα (μία μοίρα επί μία μοίρα) και ίση με την ηλιακή ακτινοβολία στο κέντρο της ζώνης αυτής. Για παράδειγμα, οι συντεταγμένες (28.1,-15.4) ανήκουν στη ζώνη (28-29) γεωγραφικό πλάτος και (-15, -16) γεωγραφικό μήκος και λαμβάνεται τιμή ηλιακής ακτινοβολίας ίση με αυτή του σημείου (28.5,-15.5). Σημαντική επίσης παραδοχή είναι η στρογγυλοποίηση των συντεταγμένων στο ένα δεκαδικό ψηφίο, για να είναι ευκολότερη η ταξινόμηση τους στην αντίστοιχη ζώνη.

Έχοντας λοιπόν την ζώνη στην οποία ανήκουν οι συντεταγμένες, ακολουθεί η προσομοίωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην εκάστοτε ζώνη με κατάλληλο πρόγραμμα για όλες τις ζώνες και για όλη τη χρονική περίοδο της μελέτης [43][44]. Αφού γίνει λοιπόν η συλλογή και συγκέντρωση των δεδομένων για όλες τις ώρες της μελέτης, σειρά έχει η αντιστοίχιση των συντεταγμένων του πλοίου, μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, με τις συνθήκες ακτινοβολίας που επικρατούσαν στην αντίστοιχη ζώνη τη δεδομένη χρονική στιγμή. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι όλες οι ώρες αναγράφονται σε UTC για να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα μετατροπών της τοπικής ώρας. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται το ηλιακό δυναμικό του πλοίου για ολόκληρο το έτος.

Παρόμοια διαδικασία λαμβάνει μέρος για την εκτίμηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε κινούμενες συντεταγμένες, η οποία θα χρησιμοποιηθεί μαζί με την ακτινοβολία για την εκτίμηση θερμοκρασίας κυψέλης και κατά συνέπεια εκτίμηση παραγόμενης ενέργειας της εγκατάστασης.

3.4 Επιλογή χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκού πλαισίου και χωροταξική μελέτη των πλαισίων στην επιφάνεια του πλοίου

Όσον αφορά την επιλογή των πλαισίων πρέπει να ληφθούν υπ’ όψη τα ακόλουθα χαρακτηριστικά.

- Διάρκεια ζωής
- Κόστος
- Απόδοση και παραγωγή

- Ανθεκτικότητα
- Δυνατότητα χρήσης σε θαλάσσιες και παραθαλάσσιες εφαρμογές
- Μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας και μικρός συντελεστής θερμοκρασίας
- Εύκολη συντήρηση

Πιο συγκεκριμένα, πέρα από τα συνήθη χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη, όπως το κόστος, η απόδοση και η διάρκεια ζωής, πρέπει να αναζητηθούν πλαίσια κατάλληλα να λειτουργήσουν σε συνθήκες με άλατα, μεγάλο ποσοστό υγρασίας και μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας, λόγω της διέλευσης του πλοίου από πολλά διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη. Επίσης αυτά πρέπει να είναι ανθεκτικά σε διάβρωση και προσκρούσεις αλάτων και σωματιδίων γενικότερα, δεδομένου των μεγάλων ταχυτήτων ανέμου σε ανοικτές θάλασσες. Τέλος, οφείλει να είναι σχετικά φθηνή και εύκολη η συντήρηση του πλαισίου, για να μπορεί να πραγματοποιείται με ταχύτητα και κατά τη διάρκεια του δρομολογίου.

Για το σκοπό της χωροταξικής μελέτης και τον καθορισμό της τελικής ισχύος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, εφόσον έχει προηγηθεί η επιλογή του πλοίου και του πλαισίου, αρκεί χρησιμοποιώντας τα σχέδια του πλοίου και τις διαστάσεις των πλαισίων, να εκτιμηθεί πόσα πλαίσια είναι δυνατόν να τοποθετηθούν στην ελεύθερη επιφάνεια του πλοίου. Σημαντικό είναι ότι πρέπει τα πλαίσια να είναι σε κάποιο ύψος (μορφή σκέπαστρου) τέτοιο ώστε να μη διαταράσσονται οι εργασίες που λαμβάνουν χώρα στο κατάστρωμα του πλοίου, χωρίς όμως αυτά να εμποδίζουν το οπτικό πεδίο του πληρώματος από την γέφυρα του πλοίου. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπ' όψη και η επιβάρυνση στην αεροδυναμική του πλοίου που θα έχει η εγκατάσταση αυτή. Στο στάδιο αυτό γίνεται και υπολογισμός της γωνίας που πρέπει να τοποθετηθούν τα πλαίσια, αν και για διάφορους λόγους στην παρούσα μελέτη τα πλαίσια θα τοποθετηθούν οριζοντίως στην επιφάνεια του πλοίου.

3.5 Τελική διαθέσιμη παραγόμενη ενέργεια

Επόμενο βήμα της μεθοδολογίας που προτείνεται είναι ο υπολογισμός της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των πλαισίων. Αρχικά, έχοντας δεδομένες τις καμπύλες του κατασκευαστή από το επιλεγθέν πλαίσιο και έχοντας στη διάθεση μας τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και γωνίας του πλαισίου, μπορούμε να υπολογίσουμε την παραγωγή ενός πλαισίου κατά τη διάρκεια της ημέρας αντιστοιχίζοντας την τιμή ακτινοβολίας με την αναμενόμενη παραγωγή του πλαισίου στην τιμή αυτή, σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Ωστόσο, διορθώσεις στις τιμές αυτές πρέπει να γίνουν, για να ανταποκρίνονται και στις συνθήκες θερμοκρασίας που επικρατούν στην περιοχή. Γνωρίζοντας λοιπόν τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ακτινοβολία, λαμβάνουμε τον τύπο θερμοκρασίας της κυψέλης [45]:

$$T_{cell} = T_a + (NOCT - 20) \frac{I_T}{800}$$

Όπου T_{cell} η θερμοκρασία της κυψέλης, T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος, NOCT η θερμοκρασία της κυψέλης σε συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος 20oC και ηλιακής ακτινοβολίας 800W/m² και I_T η επικρατούσα ηλιακή ακτινοβολία.

Για τον τελικό υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας ολόκληρης της συστοιχίας λαμβάνουμε τον αριθμό των πλαισίων που υπολογίστηκαν ότι θα τοποθετηθούν στο προηγούμενο βήμα και το συντελεστή θερμοκρασιών των πλαισίων. Έτσι λαμβάνουμε τον τύπο:

$$P_{array} = \frac{P_{mod} \cdot n_{mod}}{1000} - P_{mod} \cdot n_{mod} |T_{cell} - 25| * a (kW)$$

Όπου P_{array} η ισχύς της συστοιχίας, P_{mod} η ισχύς του κάθε πίνακα, n_{mod} ο αριθμός των πινάκων και a ο συντελεστής θερμοκρασίας.

Άλλοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την ενεργειακή παραγωγή της εγκατάστασης μπορεί να είναι η γήρανση των πλαισίων και η σκίαση από τον πύργο ελέγχου. Στο σημείο αυτό θα γίνει η παραδοχή ότι στο ύψος που τοποθετείται η εγκατάσταση, η σκίαση που δέχεται είναι ελάχιστη και αμελητέα. Όσον αφορά την γήρανση, όλοι υπολογισμοί και οι εκτιμήσεις γίνονται στον πρώτο χρόνο λειτουργίας και για λόγους απλοποίησης, θα θεωρηθεί ότι κάθε χρόνο παράγεται το ίδιο ποσό ενέργειας, με την ένταξη ενός βαθμού απόδοσης ο οποίος θα συμπεριλαμβάνει τις απώλειες λόγω γήρανσης κατά μέσο όρο καθ' όλη τη διάρκεια της επένδυσης.

Τέλος, σημαντικό μέτρο αξιολόγησης της εγκατάστασης, το οποίο πρέπει να ληφθεί υπ' όψη είναι ο συντελεστής φορτίου (Capacity Factor), ο οποίος δείχνει πόσο αξιόλογο είναι το ηλιακό δυναμικό της περιοχής, ή στην συγκεκριμένη περίπτωση της διαδρομής του πλοίου.

3.6 Εκλογή κατάλληλων διατάξεων

Έχοντας υπολογίσει την παραγωγή ενέργειας της εγκατάστασης, ακολουθεί η επιλογή και η διαστασιολόγηση των μονάδων ηλεκτρόλυσης και αφαλάτωσης. Πρέπει να γίνει αντιληπτό

ότι ενώ η ηλεκτρόλυση διαστασιολογείται ανάλογα με την διαθέσιμη ενέργεια, το ίδιο δεν ισχύει για την μονάδα αφαλάτωσης, καθώς η δεύτερη διαστασιολογείται ανάλογα με τις ανάγκες σε νερό της ηλεκτρόλυσης.

3.7 Ηλεκτρόλυση

Χάρη στη φύση του προβλήματος που καλούμαστε να λύσουμε η επιλογή θα γίνει ανάλογα με το εύρος παραγωγής της ηλεκτρόλυσης. Δηλαδή, στη συγκεκριμένη μελέτη θα επιλεγθούν μονάδες ηλεκτρόλυσης ανταλλαγής πρωτονίων οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν και να παράξουν υδρογόνο με την ελάχιστη δυνατή ενέργεια τροφοδοσίας. Επίσης, θα ληφθούν υπ' όψη και οι διαστάσεις των εν λόγω μονάδων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η κατανομή τους στο χώρο του πλοίου.

Σύμφωνα λοιπόν με την διαθέσιμη ισχύ θα χωριστεί η κατανάλωση σε τρεις τομείς

- Ισχύς αφαλάτωσης
- Ισχύς ηλεκτρόλυσης
- Ισχύς αποθήκευσης

Το άθροισμα των τριών μας κάνουν τη μέγιστη κατανάλωση ισχύος μια “μονάδας” αφαλάτωσης- ηλεκτρόλυσης- αποθήκευσης (συμπύεσης). Σκοπός είναι να υπολογιστεί πόσες τέτοιες “μονάδες” μπορεί να λειτουργήσουν στην εγκατάσταση με σκοπό την παραγωγή κέρδους.

3.8 Αφαλάτωση

Όσον αφορά την αφαλάτωση, η διαστασιολόγηση γίνεται με σημείο αναφοράς την μέγιστη ανάγκη των μονάδων ηλεκτρόλυσης σε νερό, που αναγράφεται στα χαρακτηριστικά την μονάδας που δίνονται από τον κατασκευαστή. Αν για παράδειγμα υπάρχουν τέσσερις μονάδες με μέγιστη ανάγκη σε νερό 25 λίτρα ανά ώρα κάθε μία, τότε πρέπει να ενταχθεί μία μονάδα αφαλάτωσης που να παρέχει στην εγκατάσταση 100 λίτρα ασφατωμένου νερού ανά ώρα. Επειδή η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης έχει αρκετά μεγάλο εύρος λειτουργίας σε βέλτιστη απόδοση και το κόστος της είναι μηδαμινό σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις της εγκατάστασης, δε θα επανεξετάζεται η διαστασιολόγηση της από αυτή της αρχικής υπόθεσης αριθμού μονάδων ηλεκτρόλυσης, παρά μόνο αν η αρχική αυτή υπόθεση είναι πολύ εκτός της πραγματικότητας. Αυτό γίνεται για να μειωθεί η πολυπλοκότητα του προβλήματος της διαστασιολόγησης της εγκατάστασης.

3.9 Διαστασιολόγηση μονάδων ηλεκτρόλυσης και αφαλάτωσης

Όσον αφορά τη διαστασιολόγηση της ηλεκτρόλυσης, γνωρίζοντας τη διαθέσιμη ενέργεια, επιλέγουμε πόσες περίπου μονάδες ηλεκτρόλυσης θα λειτουργούν στο πλοίο. Στη συνέχεια “μοιράζουμε” τη διαθέσιμη ενέργεια στις μονάδες αυτές. Για να γίνει πιο κατανοητό, θα θεωρηθεί ένα παράδειγμα του υπολογισμού αυτού. Έστω ότι η διαθέσιμη ισχύς από τη συστοιχία των φωτοβολταϊκών για μία ώρα της ημέρας είναι 300KW σύμφωνα με τα δεδομένα και η κατανάλωση ισχύος είναι 100KW από την ηλεκτρόλυση, 5KW από την αφαλάτωση και 5 KW από την συμπίεση και αποθήκευση του υδρογόνου. Αθροίζοντας τις τρεις ισχύς λαμβάνεται κατανάλωση 110KW , μικρότερη από τη διαθέσιμη ενέργεια. Άρα με την ισχύ που υπολείπεται των 190KW εντάσσεται στο σύστημα δεύτερη μονάδα ηλεκτρόλυσης που θα καταναλώσει άλλα 110KW. Αν υπάρχει και άλλη περίσσεια ισχύος εντάσσεται και άλλη μονάδα και ούτω καθ' εξής. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η κατανάλωση και η διανομή ενέργειας ολόκληρης της εγκατάστασης για κάθε ώρα της μελέτης.

Γνωρίζοντας την κατανάλωση και ορίζοντας έναν τυπικό βαθμό απόδοσης για όλη τη διεργασία, ο οποίος θα περιλαμβάνει απώλειες μεταφοράς, μετατροπής, άντλησης, λειτουργίας, τριβές και λοιπά, υπολογίζεται το καθαρό έργο των διατάξεων που μπορεί να μεταφραστεί σε παραγωγή υδρογόνου. Σε αυτόν το βαθμό απόδοσης περιλαμβάνεται και ένας μέσος όρος μείωσης απόδοσης λόγω γήρανσης των πλαισίων. Τέλος, με τρόπο που αναφέρεται σε παρακάτω μέρος της μεθοδολογίας, υπολογίζουμε την ποσότητα υδρογόνου που παράγεται από την κάθε μονάδα. Η ποσότητα που μας ενδιαφέρει για το παρόν σημείο της διαστασιολόγησης είναι η παραγωγή της τελευταίας μονάδας, την οποία και θα αθροίσουμε για όλο το έτος. Έχοντας μία δεδομένη τιμή πώλησης του υδρογόνου, γίνεται ο υπολογισμός των εσόδων αυτής. Τα αποτελέσματα που μπορεί να προκύψουν είναι τα εξής:

- Τα έσοδα είναι αρκετά μεγαλύτερα από το αρχικό κόστος της μονάδας, που σημαίνει ότι πρέπει να εξετασθεί η προσθήκη επιπλέον μονάδας και να επαναληφθεί η διαδικασία.
- Τα έσοδα είναι μικρότερα από το αρχικό κόστος, οπότε πρέπει να αφαιρεθεί η τελευταία μονάδα και να γίνει εκ' νέου εξέταση με μία μονάδα λιγότερη.
- Τα έσοδα είναι ελαφρώς παραπάνω από το αρχικό κόστος, το οποίο σημαίνει ότι για την ώρα κρίνεται ο αριθμός των μονάδων ως ορθός. Στην περίπτωση αυτή όμως πρέπει να εξεταστεί εκ' νέου ο αριθμός των μονάδων κατά τη διάρκεια της τεχνοοικονομικής

ανάλυσης, στην οποία εκτός από το αρχικό κόστος θα συμπεριλαμβάνεται και το κόστος συντήρησης.

3.10 Αναγωγή ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος σε ενέργεια ανά kg υδρογόνου

Για τον σκοπό της διαστασιολόγησης, αναφέρθηκε ότι απαραίτητος είναι και ο υπολογισμός της παραγόμενης ποσότητας υδρογόνου της εγκατάστασης, ενώ το μόνα δεδομένα που έχουμε στη διάθεση μας είναι το καθαρό έργο των διατάξεων. Το παραπάνω πρόβλημα λύνεται αν γίνει ο υπολογισμός απαραίτητης ενέργειας παραγωγής ενός κιλού υδρογόνου και στη συνέχεια αν διαιρεθεί με αυτή την ποσότητα το καθαρό έργο των διατάξεων. Για το σκοπό του πρώτου υπολογισμού, η ενέργεια παραγωγής ανά μονάδα μάζας πρέπει να χωριστεί σε τρία μέρη:

- Ενέργεια αφαλάτωσης ποσότητας νερού που χρειάζεται για την παραγωγή ενός κιλού υδρογόνου από επιλεγμένη μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης. [36]
- Ενέργεια παραγωγής ενός κιλού υδρογόνου από τις επιλεγμένες μονάδες ηλεκτρόλυσης ανταλλαγής πρωτονίων.
- Ενέργεια συμπίεσης ενός κιλού υδρογόνου στα 70 MPa πίεση στην οποία λειτουργεί η δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου. [46]

Αθροίζοντας τις παραπάνω ενέργειες λαμβάνεται η συνολική ενέργεια παραγωγής υδρογόνου ανά μονάδα μάζας σε KWh/kg. Διαιρώντας το καθαρό έργο με την η συνολική ενέργεια παραγωγής υδρογόνου ανά μονάδα μάζας λαμβάνεται η ποσότητα παραγωγής υδρογόνου σε kg.

3.11 Υπολογισμός τελικής παραγόμενης ποσότητας υδρογόνου και διαστασιολόγηση δεξαμενής αποθήκευσης

Ο τελικός υπολογισμός της παραγόμενης ποσότητας υδρογόνου γίνεται αθροίζοντας τις επιμέρους ποσότητες από την κάθε μονάδα και στη συνέχεια κάνοντας ένα τελικό άθροισμα των ποσοτήτων αυτών για όλη τη διάρκεια του έτους. Είναι σημαντικό όμως να υπολογιστεί με σκοπό τη διαστασιολόγηση της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου υψηλής πίεσης, η μέγιστη ποσότητα υδρογόνου που δύναται να αποθηκεύσει το πλοίο. Αυτή δεν είναι άλλη από την ποσότητα που θα παραχθεί κατά τη διάρκεια της μεγαλύτερης διαδρομής του τους θερινούς μήνες. Έτσι, διαπιστώνοντας ποια είναι η διαδρομή αυτή και αθροίζοντας τις

επιμέρους ωριαίες τιμές παραγόμενου υδρογόνου, είναι δυνατή η διαστασιολόγηση της δεξαμενής αποθήκευσης.

3.12 Τεχνοοικονομική ανάλυση

Συγκεντρώνοντας όλα τα στοιχεία των προηγούμενων βημάτων της μεθοδολογίας, λαμβάνει χώρα η τελική οικονομική αξιολόγηση του έργου. Οι συνιστώσες που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη για το συγκεκριμένο εγχείρημα είναι:

- Το αρχικό κόστος της επένδυσης και εγκατάστασης IC
- Το κόστος συντήρησης της εγκατάστασης FC
- Τα έσοδα της εγκατάστασης R
- Το τελικό κέρδος ανά έτος Gn
- Το βαθμό απόδοσης της επένδυσης η*

Για να ληφθούν τα παραπάνω πρέπει υπολογιστούν τα εξής. Αρχικά υπολογίζοντας την ποσότητα του παραγόμενου υδρογόνου και βάσει πηγών ερευνώντας την τιμή του θα λάβουμε τα ετήσια έσοδα της εγκατάστασης [47]:

$$R_0 = \frac{mH_2}{year} * price_{H_2}$$

Συνεχίζουμε υπολογίζοντας τα διαχρονικά έσοδα της επένδυσης, λαμβάνοντας υπ' όψη την απόδοση της επένδυσης και τον ετήσιο ρυθμό αναπροσαρμογής της ενέργειας:

$$R_n = R_0(1 + e)(1 + i)^n \left(1 - \frac{\left(\frac{1 + e}{1 + i}\right)^n}{i - e}\right)$$

Συνεχίζουμε λαμβάνοντας από την βιβλιογραφία τους συντελεστές ετήσιου κόστους συντήρησης, λαμβάνοντας υπ' όψη και τον πληθωρισμό:

$$FC_n = m * IC_0(1 + g)(1 + i)^n \left(1 - \frac{\left(\frac{1 + g}{1 + i}\right)^n}{i - g}\right)$$

Λαμβάνοντας τα παραπάνω μεγέθη, συνεχίζουμε με τον υπολογισμό των διαχρονικών κερδών ή ζημίας της επένδυσης αφαιρώντας τα έσοδα από τα έξοδα, όπου στην περίπτωση μας τα

έξοδα είναι μόνο το ετήσιο κόστος συντήρησης και το αρχικό κόστος, λαμβάνοντας υπ' όψη την απόδοση της επένδυσης και ανάγοντας το στο νιοστό έτος:

$$G_n = R_n - FC_n - C_n$$

$$C_n = a * IC_0 * (1 + i)^n + \beta * IC_0 * (1 + i')^n + \gamma * IC_0$$

Όπου α,β,γ οι συντελεστές για ίδια κεφάλαια, δανειακά κεφάλαια και επιδοτήσεις αντίστοιχα. Τέλος γνωρίζοντας όλα τα παραπάνω υπολογίζουμε τον τελικό βαθμό απόδοσης της επένδυσης και βλέποντας την περίοδο αποπληρωμής του αρχικού κεφαλαίου αξιολογούμε αν τελικά αξίζει να επενδύσουμε στο σύστημα. Τα έσοδα και το αρχικό κόστος πρέπει να είναι υπολογισμένα για το πρώτο έτος, δηλαδή πρέπει να λάβουμε υπ' όψη τον πληθωρισμό:

$$\eta^* = \frac{\bar{G}_n}{IC_0}$$

Για τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών πρέπει να ληφθούν υπ' όψη τα i, g, e τα οποία θα θεωρηθούν σταθερά για όλη τη διάρκεια της επένδυσης. Επίσης, πρέπει να εκτιμηθεί και ο χρόνος ζωής της επένδυσης, ο οποίος τυπικά για τέτοιες εγκαταστάσεις είναι περίπου 20 έτη. Σύμφωνα λοιπόν και με τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζονται τα εν λόγω μεγέθη για κάθε έτος της επένδυσης. Έτσι, μέσω του υπολογισμού του βαθμού απόδοσης της επένδυσης στο τελευταίο έτος της, γίνεται και η τελική αξιολόγηση της επένδυσης.

Κεφάλαιο 4

4 Μελέτη περίπτωσης

Στο κεφάλαιο της μελέτης περίπτωσης θα δοθούν αναλυτικά τα δεδομένα της συγκεκριμένης έρευνας τα οποία περιλαμβάνουν παράγοντες γεωγραφικούς, γεωμετρικούς, περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και ούτω καθ' εξής.

4.1 Επιλογή πλοίου και γεωγραφικές συντεταγμένες

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας, η επιλογή του πλοίου στο οποίο θα γίνει η εγκατάσταση είναι εξαιρετικά σημαντική. Σύμφωνα με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά επιλέχθηκε πλοίο μεταφοράς αργού πετρελαίου, το οποίο εκτελεί υπερατλαντικά ταξίδια, εν ονόματι “Advantage Anthem”. Παρακάτω αναγράφονται τα χαρακτηριστικά του πλοίου “Πίνακας 3”

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά επιλεγμένου πλοίου “Advantage Anthem”[48]

Dimensions	
Length overall	248.97m
Length between perpendiculars	239m
Breadth moulded	43.8m
Depth	21m
Draught	15.02m

Design	
Keel Laid	-
Hull type	DOUBLE HULL
Hull material	Steel
Number of decks	1
Pump	3 AT 2,800 M3/HR
Speed	14.5kn

Tonnage	
Gross tonnage	61336
Net tonnage	35873
Deadweight tonnage	116087
Displacement tonnage	134340

Capacity	
Ballast capacity	62012m ³
Oil	123650m ³
Crude capacity	817661bbl

Engine	
Number of engines	1
Bore	600mm
Cylinders	6
Power	13560kw
RPM	105rpm
Stroke	600mm
Propeller	1 FIXED PITCH
Fuel Type	MARINE DIESEL

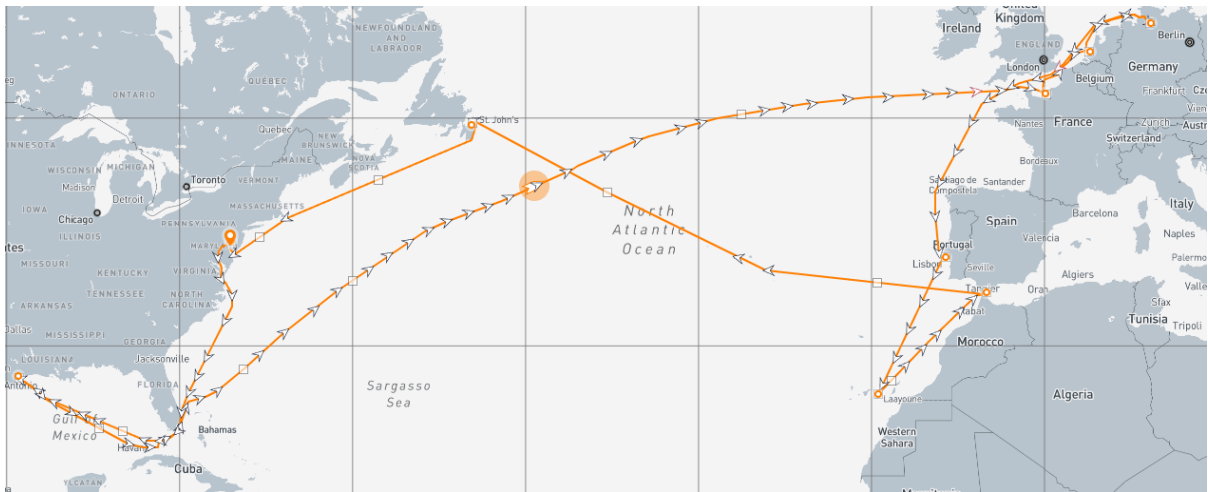


Εικόνα 4: Αεροφωτογραφία του πλοίου “Advantage Anthem”

Για το σκοπό της έρευνας έγινε παραδοχή ότι το πλοίο εκτελεί σταθερό δρομολόγιο κάθε τρεις μήνες, όπως αυτό φαίνεται στον “Πίνακας 4”

Πίνακας 4: Προορισμοί που έχουν ενταχθεί στη διαδρομή του πλοίου μαζί με τις συντεταγμένες τους

Λιμάνι	Συντεταγμένες(Lat,Lon)
Las Palmas (ES)	(28.1,-15.4)
Gibraltar (GI)	(36.3,-5.4)
Arnold’s Cove (CA)	(47.8,-54.0)
Philadelphia (US)	(38.2,-75.9)
Houston (US)	(29.7,-95.3)
Le Havre (FR)	(49.5,0.1)
Rotterdam (NL)	(51.9,4.5)
Hamburg (DE)	(53.5,10.0)
Lisboa (PT)	(38.7,-9.2)

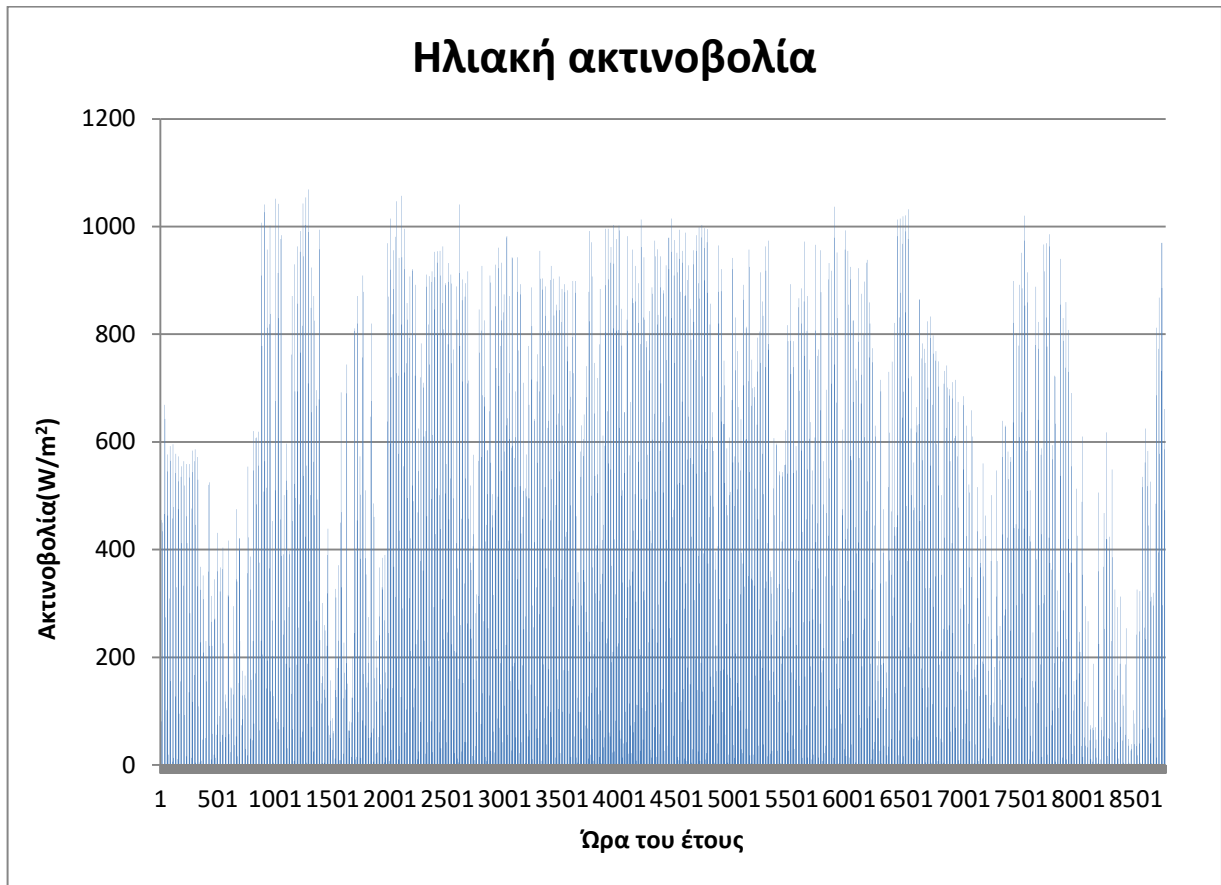


Εικόνα 5: Χάρτης επιλεγμένης διαδρομής

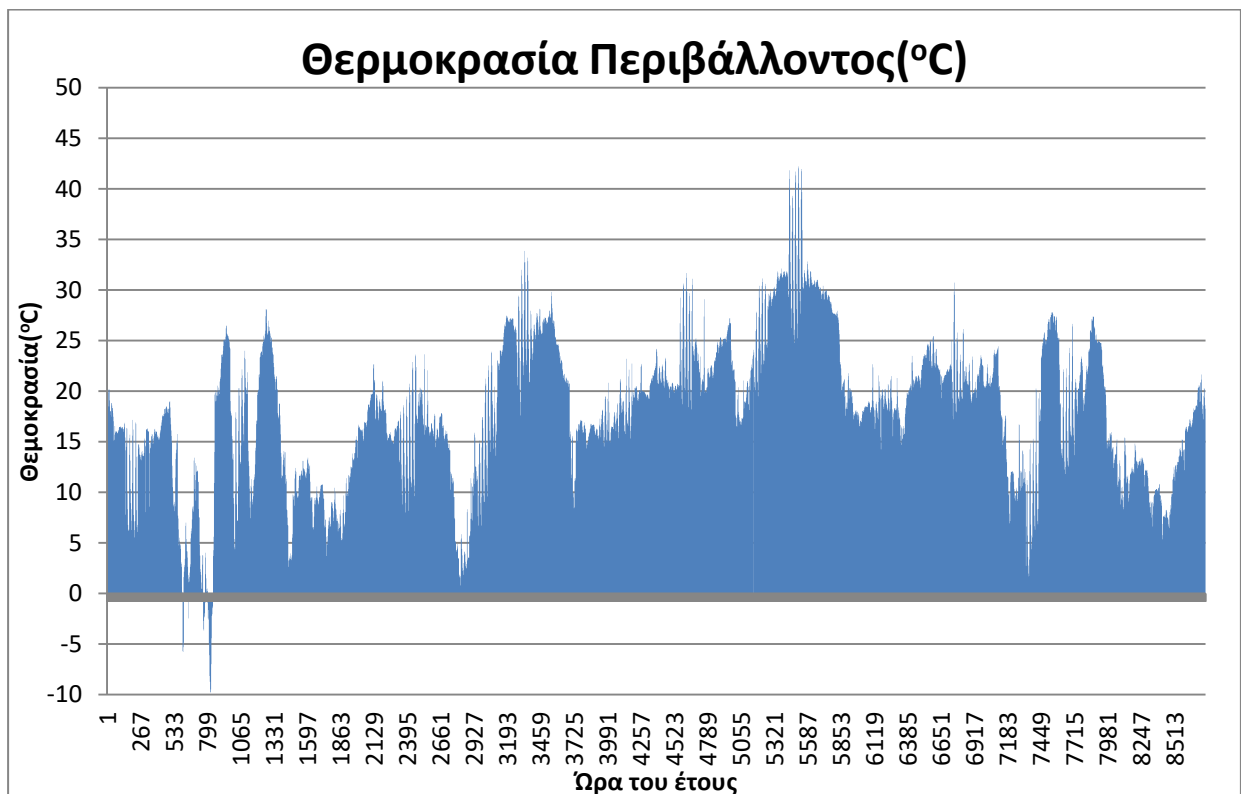
Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι για τις ώρες που δεν υπήρχαν διαθέσιμες συντεταγμένες, έγινε γραμμική παρεμβολή γνωρίζοντας αρχικές συντεταγμένες, τελικές συντεταγμένες και θεωρώντας σταθερή ταχύτητα του πλοίου για το διάστημα που υπολογίστηκε. Επίσης, λόγω έλλειψης ή δύσκολης πρόσβασης στα μακροχρόνια δεδομένα του πλοίου, η πορεία βασίζεται σε κατά το ήμισυ πιθανούς προορισμούς, με σκοπό την συμπλήρωση των δεδομένων και την πιο εύκολη ανάλυση τους, αφού το δρομολόγιο είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να διαρκεί ακριβώς τρεις μήνες και να επαναλαμβάνεται τέσσερις φορές το χρόνο.

4.2 Ηλιακό δυναμικό πλοίου και θερμοκρασία περιβάλλοντος

Κύριο κομμάτι της μελέτης και των απαραίτητων δεδομένων για την διεξαγωγή της είναι η εισαγωγή δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία και την κατασκευασμένη διαδρομή του πλοίου, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης “Renewables Ninja” [44], το οποίο με δεδομένες γεωγραφικές συντεταγμένες μήκους και πλάτους, μέσω χρονοσειρών βασισμένες σε πραγματικά δεδομένα, προσομοιώνει το ηλιακό δυναμικό και τη θερμοκρασία της περιοχής. Οι προσομοιώσεις αυτές έγιναν για ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 309 προσομοιώσεις για 309 “ζώνες” ηλιακής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια έγινε αντιστοίχιση των δεδομένων θέσης πλοίου και ώρας στίγματος με τις αντίστοιχες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που επικρατούσαν εκείνη τη στιγμή σε αυτές τις γεωγραφικές συντεταγμένες. Με τον τρόπο αυτό λήφθηκαν τα δεδομένα του “Σχήμα 1” και του “Σχήμα 2”.



Σχήμα 1: Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του πλοίου



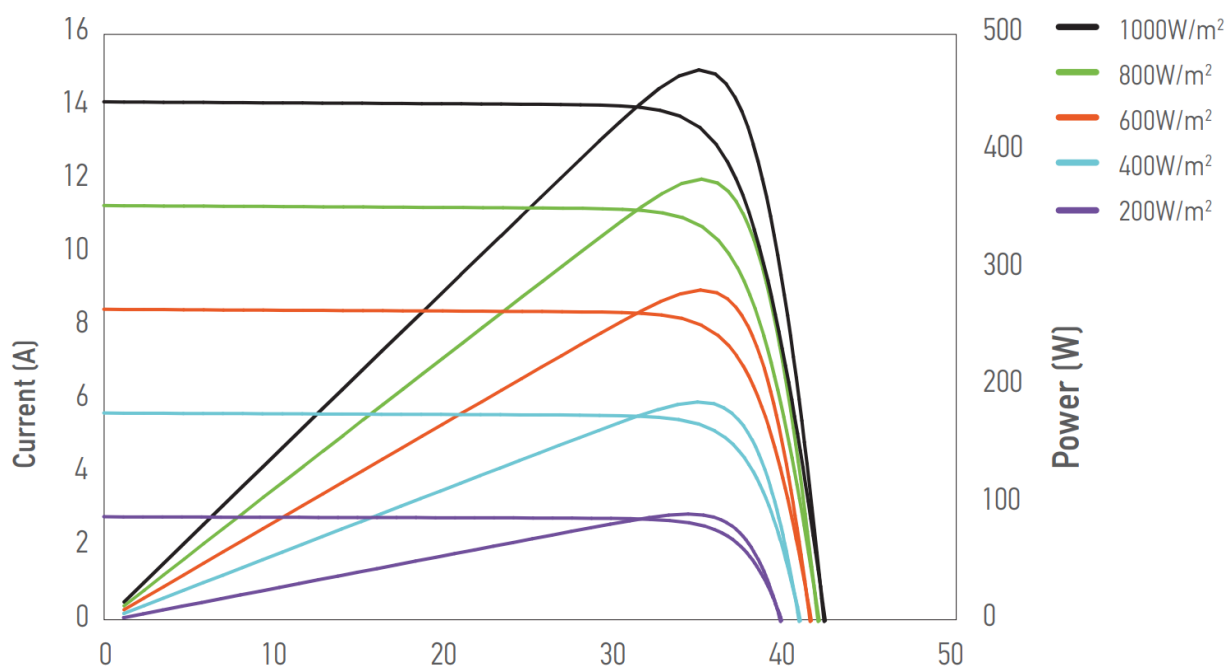
Σχήμα 2: Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της μελέτης

4.3 Επιλεγμένες διατάξεις και χαρακτηριστικά τους/ Σχέδια πλοίου

Αναπαράγοντας τα επόμενα βήματα της μεθοδολογίας έγινε επιλογή των διατάξεων, βάσει των χαρακτηριστικών που προαναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα βασικά χαρακτηριστικά τους αναφέρονται στον “Πίνακας 5”, καθώς πιο πολλές λεπτομερείς μπορούν να βρεθούν στο “Παράρτημα”. Στο “Σχήμα 3” διακρίνονται οι καμπύλες των φωτοβλταϊκών πλαισίων, σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

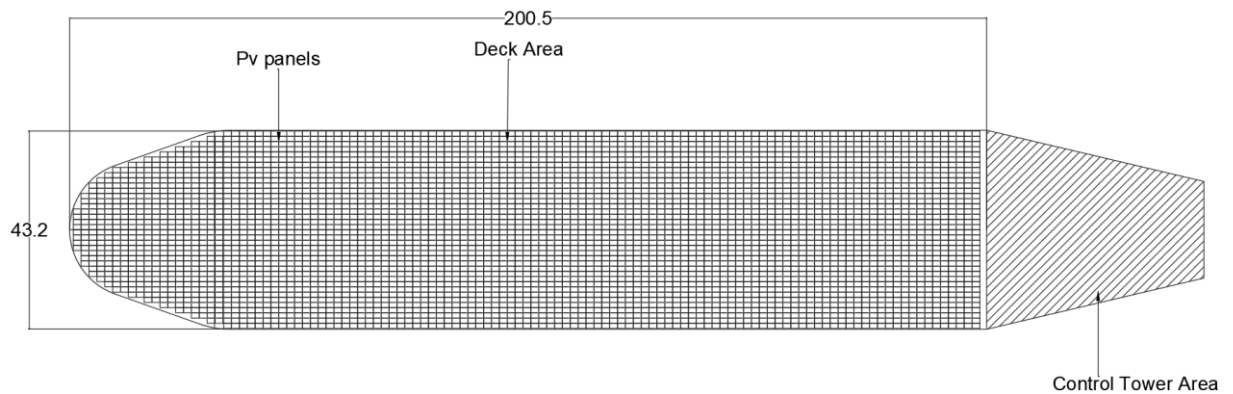
Πίνακας 5: Επιλεγμένες διατάξεις με τα χαρακτηριστικά τους

Σύστημα	Ονομασία	Μέγιστη Ισχύς(KW)	Διαστάσεις
Φωτοβολταϊκό	Black Tiger RCM-460-7RCG	0.460	1.722m x 1.134m x 0.035m
Ηλεκτρόλυση Ανταλλαγής πρωτονίων	Nel C30 series	236	2.52m x 1.16m x 2.01m
Αφαλάτωση Αντίστροφης ώσμωσης	Aquamiser + A1216S	2.24	1.19m x 0.53m x 0.57m



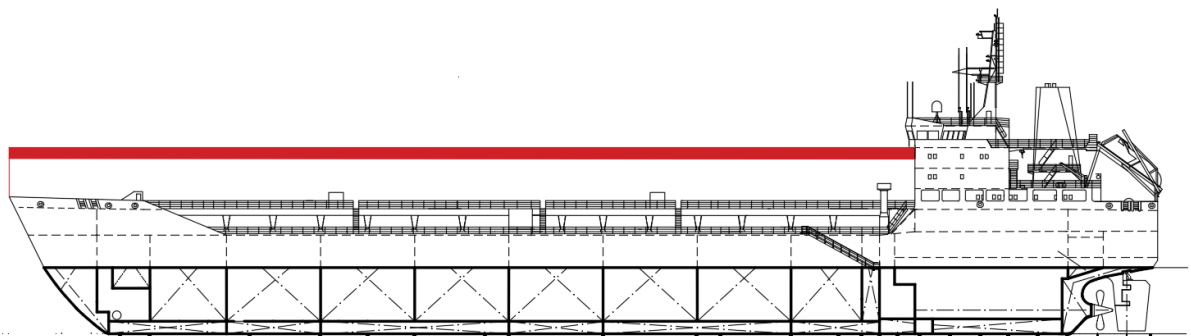
Σχήμα 3: Καμπύλες λειτουργίας φωτοβλταϊκού

Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας τα σχέδια του επιλεγμένου πλοίου και δεδομένου των διαστάσεων του κάθε πλαισίου, υπολογίζεται πόσα πλαίσια είναι δυνατόν να τοποθετηθούν πάνω στο κατάστρωμα "Εικόνα 6". Ο συνολικός αριθμός πλαισίων που προκύπτει είναι 4140 για μία εγκατάσταση συνολικής ισχύος περίπου 1,9 MW.



Εικόνα 6: Αριθμός και διάταξη τοποθετημένων πλαισίων στην επιφάνεια του πλοίου

Τέλος όπως αναφέρεται και στη μεθοδολογία, τα πλαίσια είναι τοποθετημένα σε ύψος, ώστε να μην διαταράσσονται οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο κατάστρωμα και να μην εμποδίζεται το οπτικό πεδίο του πληρώματος από τη γέφυρα "Εικόνα 7".



Εικόνα 7: Ύψος τοποθέτησης φωτοβολταϊκών πλαισίων

4.4 Αρχικό κόστος και κόστος συντήρησης μονάδων εγκατάστασης

Εκτενής βιβλιογραφική έρευνα έγινε για τον υπολογισμό του αναμενόμενου κόστους των συστημάτων της εγκατάστασης. Κατόπιν της έρευνας αυτής, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Το ανηγμένο κόστος ανά μονάδα ισχύος μίας συστοιχίας φωτοβολταϊκών είναι 900€/KW [26]
- Το ανηγμένο κόστος ανά μονάδα ηλεκτρόλυσης "Nel C30 series" είναι 700€/ KW [32]

- Το ανηγμένο κόστος ανά λίτρα ασφατωμένου νερού την ημέρα της μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης είναι 0.8€/LPD [36]. Το νούμερο αυτό ανεβαίνει στα 1,9€/LPD αν συμπεριληφθεί και το κόστος αλλαγής μεμβράνης.

Σημαντική συνεισφορά στο συνολικό αρχικό κόστος της εγκατάστασης κατέχει η μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου υψηλής πίεσης Type IV, η οποία λόγω υλικών κατασκευής και πολυπλοκότητας φτάνει τα 569€/kgH₂[40].

Όσον αφορά τα κόστη συντήρησης, λήφθηκαν ως συντελεστές επί του αρχικού κόστους ανά έτος, για φωτοβολταϊκά 1%/έτος [26], για την ηλεκτρόλυση 3%/έτος[33], για την αφαλάτωση 5%/έτος [37] και για την αποθήκευση 1%/έτος. Το κόστος λειτουργίας δεν λήφθηκε υπ' όψη, καθώς θεωρείται μηδενικό αφού ολόκληρη η εγκατάσταση τροφοδοτείται από την πράσινη ενέργεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Πίνακας 6: Τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά επιλεγμένων διατάξεων

Σύστημα	Ανηγμένο κόστος μονάδας	Κόστος συντήρησης
Ηλεκτρόλυση PEM (nel C30 series)	700 €/KW	3% (IC ₀ /έτος)
Αφαλάτωση (Aquamiser + A1216S)	1.9 €/LPD	5% (IC ₀ /έτος)
Αποθήκευση (Type IV High pressure tank)	569 €/kg of H ₂ storage capacity	1% (IC ₀ /έτος)
Φωτοβολταϊκά (Black Tiger RCM-460-7RCG)	900 €/KW	1% (IC ₀ /έτος)

4.5 Επιλογή γωνίας των πλαισίων της διάταξης

Αναφορικά με την επιλογή της γωνίας των πλαισίων, μία τιμή πέραν της οριζόντιας θα φέρει επιπλέον οικονομική δαπάνη, χωρίς αυτή η οικονομική δαπάνη να μεταφράζεται σε ίδιο ποσοστό κέρδους. Για να εξετάσουμε τον λόγο που συμβαίνει αυτό πρέπει να γίνει αναφορά στις δυνατές εναλλακτικές της οριζόντιας τοποθέτησης.

- Τοποθέτηση σε βέλτιστη γωνία η οποία παραμένει σταθερή

- Ένταξη μηχανισμού “Solar tracking” για την βελτιστοποίηση της παραγωγής των φωτοβολταϊκών

Όσον αφορά την πρώτη περίπτωση, προκύπτουν τα εξής προβλήματα. Αρχικά θα πρέπει να μειωθεί ο αριθμός των συνολικών πλαισίων, αν θεωρηθεί ότι κάθε πλαίσιο θα έχει ξεχωριστά την βέλτιστη γωνία, με σκοπό την αύξηση της απόστασης μεταξύ τους για να μην επισκιάζει το ένα πλαίσιο το άλλο κατά τη διάρκεια των ωρών που ο ήλιος είναι χαμηλά. Αυτό μειώνει σημαντικά τον συνολικό αριθμό πλαισίων που μπορούν να τοποθετηθούν και συνεπώς την συνολική παραγόμενη ενέργεια. Σε περίπτωση που θεωρείται η διάταξη ως μία ενιαία και αδιάκοπη συστοιχία, δηλαδή όλα τα πλαίσια είναι το ένα η συνέχεια του άλλου και εφαρμοστεί έτσι μια κλίση σε ολόκληρη τη συστοιχία, αυτό θα έχει αρνητική επίπτωση στην αεροδυναμική του πλοίου και θα το επιβραδύνει δημιουργώντας ροπές κατά μήκος της διεύθυνσης του. Τρίτο και σημαντικότερο πρόβλημα για την συγκεκριμένη εναλλακτική αποτελεί το γεγονός ότι αν για παράδειγμα τα πλαίσια είναι τοποθετημένα σε μία βέλτιστη γωνία για πορεία του πλοίου από ανατολή προς δύση, τότε όταν το πλοίο αλλάξει πορεία και κατευθύνεται από δύση προς ανατολή, αυτά δεν θα παράγουν σχεδόν καθόλου ενέργεια αφού θα είναι στραμμένα προς το βορρά. Συνεπώς, όλες οι πτυχές αυτής της εναλλακτικής απορρίπτονται.

Όσον αφορά τη δεύτερη εναλλακτική, ένα σύστημα “solar tracking” μιλώντας πάντα για μία ενιαία συστοιχία, θα δημιουργήσει επιπλέον κόστος στην εγκατάσταση, επιπλέον συντήρηση και θα δημιουργηθούν καταπονήσεις στα σημεία στήριξης, που μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές φθορές στο ευαίσθητο αυτό σύστημα. Επιπλέον ένας τέτοιος μηχανισμός δε θα μπορέσει να ανταποκριθεί επαρκώς στις γρήγορες αλλαγές πορείας του πλοίου, ιδιαίτερα όταν βρίσκεται στο λιμάνι, καθώς και οι συνεχείς αλλαγές κλίσης και η συνεχής κίνηση μίας τέτοιας πολύ μεγάλων διαστάσεων εγκατάστασης μπορεί να προκαλέσει ατυχήματα. Τέλος, τίθεται πάλι θέμα με την αεροδυναμική του πλοίου και των ροπών που δημιουργούνται από την κλίση μίας τόσο μεγάλης επιφάνειας πάνω στο πλοίο και την συνεχή κίνηση της.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι για την συγκεκριμένη εφαρμογή, η ιδανική γωνία τοποθέτησης είναι η οριζόντια. Αυτό βέβαια δεν έρχεται χωρίς τα μειονεκτήματά του. Πέρα του προφανούς ότι δε θα είναι βέλτιστη η γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, μία οριζόντια θέση των πλαισίων συντελεί στην επικάθηση μικροσωματιδίων και αλάτων στην επιφάνειά τους και δεν είναι ιδανική για τυχόν απομάκρυνση νερού από αυτή που θα έχει βρεθεί εκεί λόγω είτε βροχής, είτε λόγω μεγάλης κυμάτωσης της θάλασσας. Τα

μειονεκτήματα που αναφέρονται παραπάνω είναι δυστυχώς μία πραγματικότητα η οποία δε μπορεί να αποφευχθεί και πρέπει να ληφθεί υπ' όψη στην έρευνα.

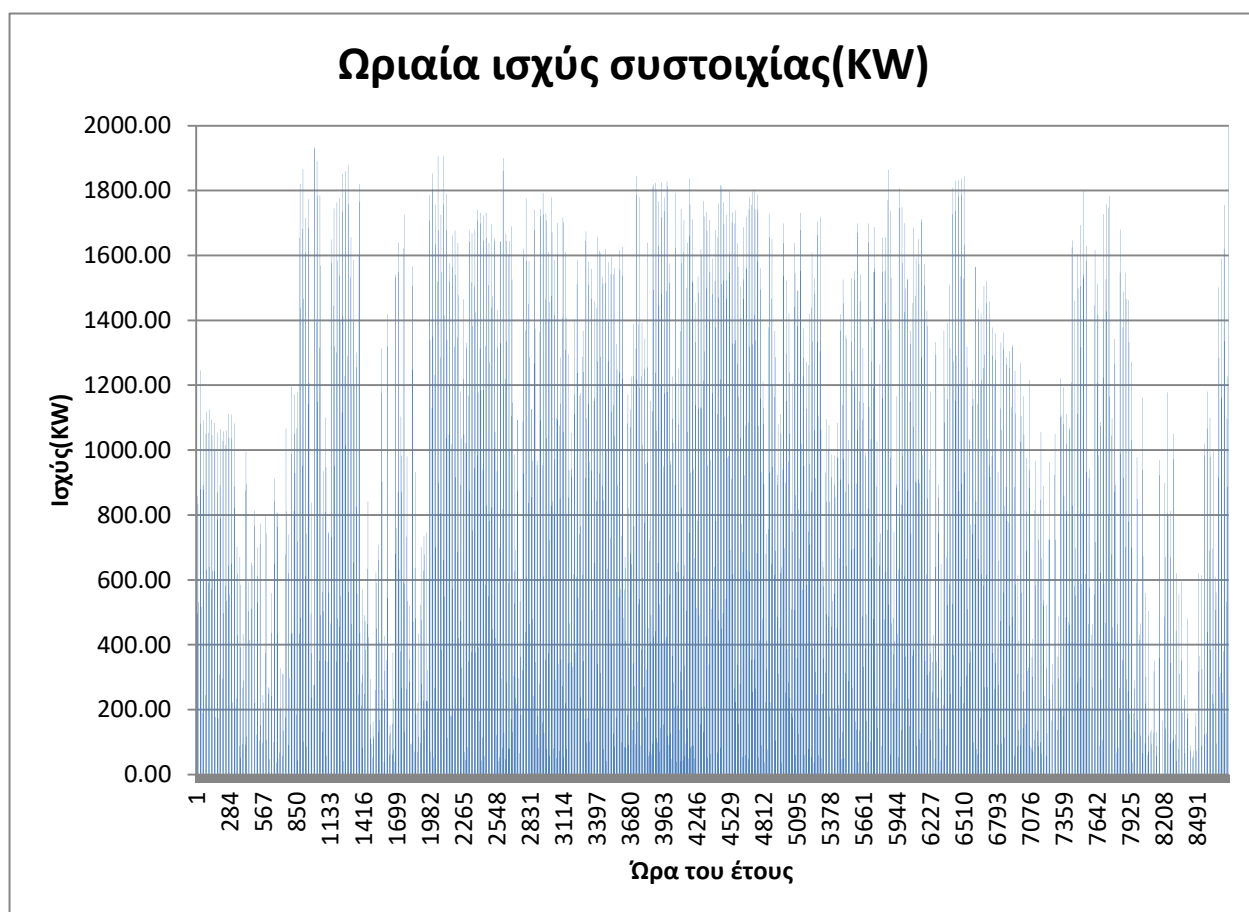
Κεφάλαιο 5

5 Αποτελέσματα

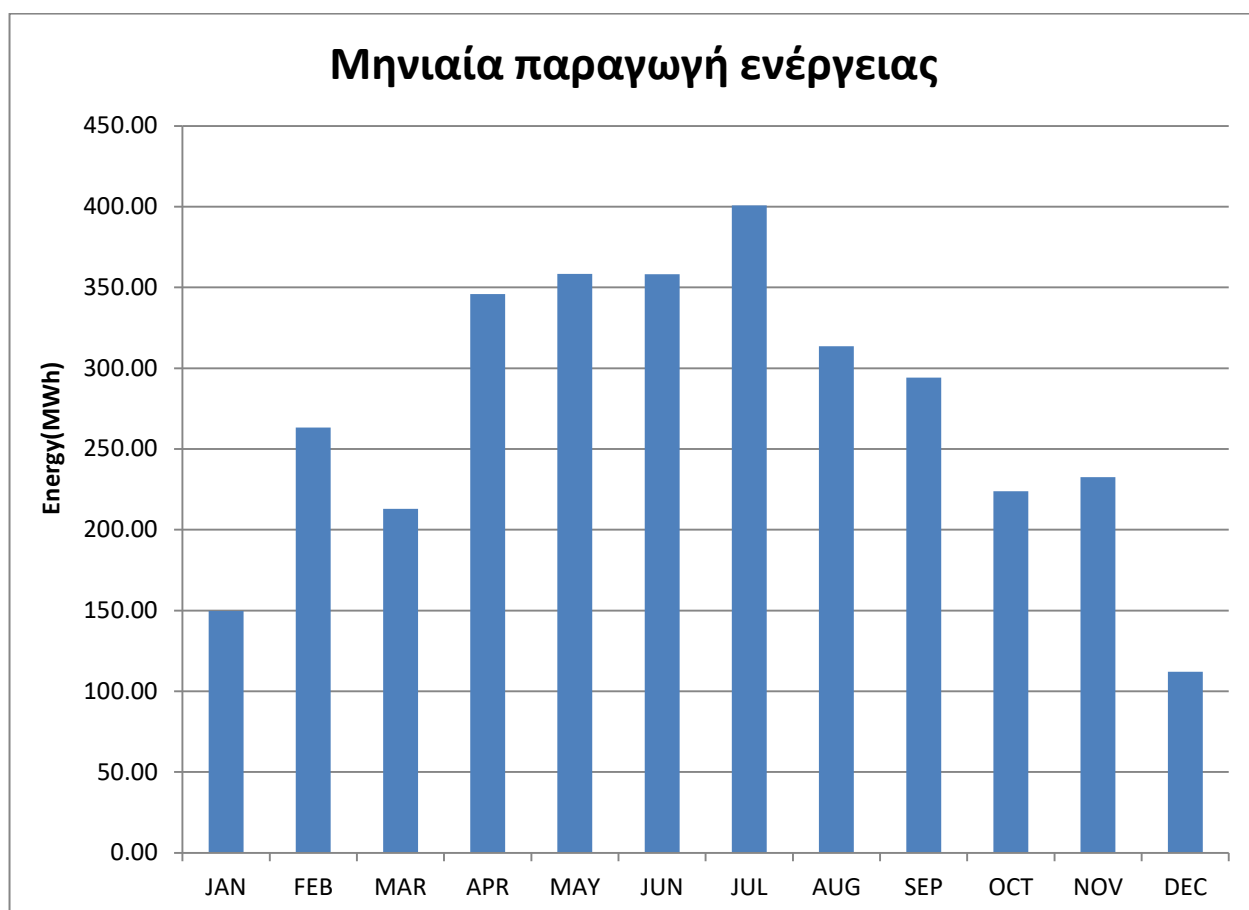
Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν διεξοδικά τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της έρευνας, με αναφορές σε διαγράμματα και υπολογισμούς και βάσει των παραμέτρων που τέθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

5.1 Τελική ενεργειακή παραγωγή φωτοβολταϊκών/Μηνιαία παραγωγή /κατανομές θερμοκρασίας module /Συντελεστής φορτίου

Με τη χρήση των εξισώσεων που αναλύθηκαν στην μεθοδολογία και των αντίστοιχων δεδομένων, ήταν δυνατός ο υπολογισμός της τελικής ενέργειας που παράγεται από τα πλαίσια. Στο “Σχήμα 4” και το “Σχήμα 5” απεικονίζονται η ημερήσια αναμενόμενη και η μηνιαία αναμενόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχα για όλη τη διάρκεια της έρευνας.



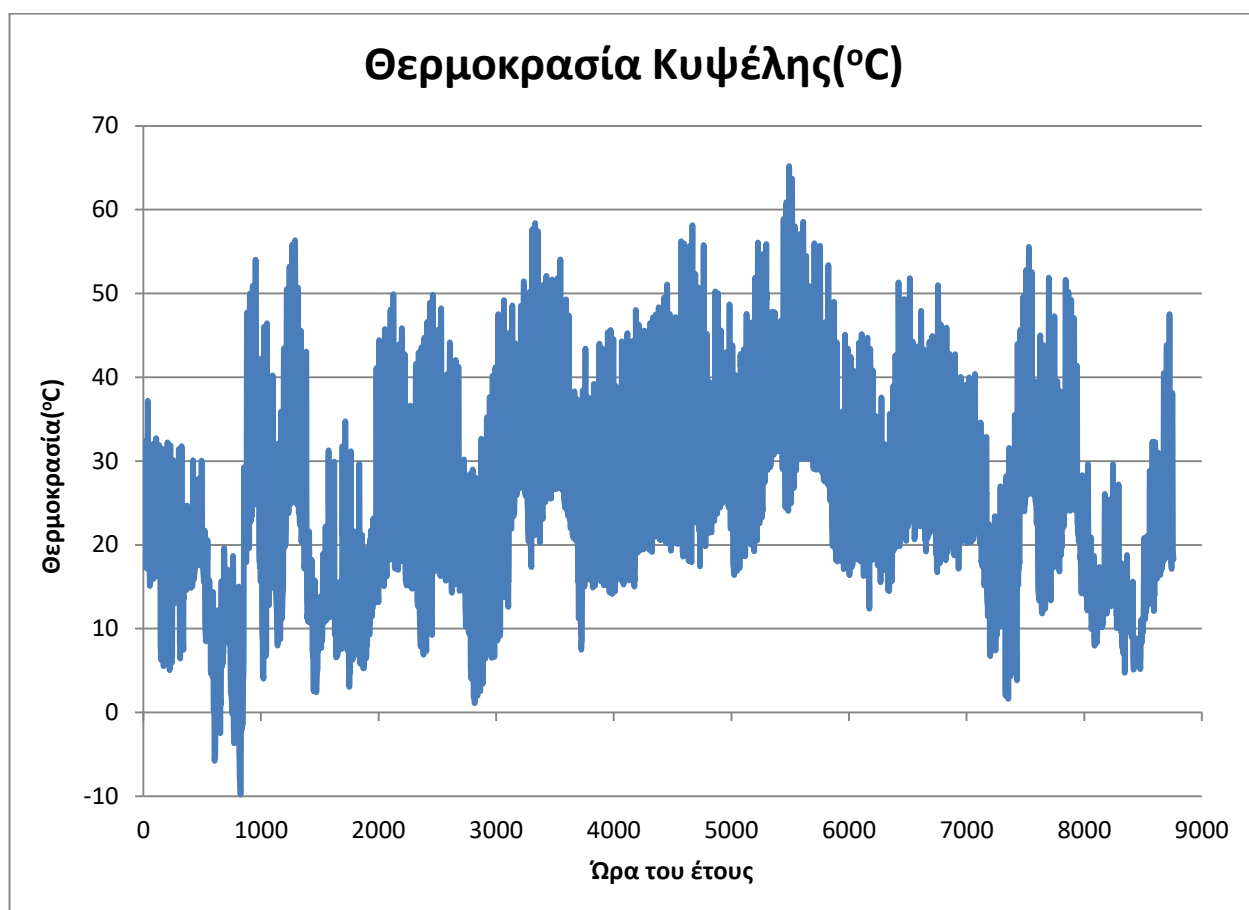
Σχήμα 4: Ωριαία ισχύς φωτοβολταϊκών πλαισίων



Σχήμα 5: Μηνιαία παραγωγή ενέργειας φωτοβλταϊκών πλαισίων

Όπως είναι αναμενόμενο η ημερήσια παραγωγή ενέργειας παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση κατά τη διάρκεια του έτους, διότι σε αντίθεση με άλλες έρευνες όπου η διακύμανση οφείλεται σε μετεωρολογικές συνθήκες και εποχικούς παράγοντες, εντάσσεται και ο παράγοντας της μεγάλης αλλαγής γεωγραφικού πλάτους και μήκους με διαδρομές και κοντά και μακριά από τον Ισημερινό. Όσον αφορά τα μηνιαία διαγράμματα, παρατηρείται πύκνωση της παραγόμενης ενέργειας τους θερινούς μήνες και ιδιαίτερα το μήνα Ιούλιο, που σε συνδυασμό με εποχικούς παράγοντες, το πλοίο τυχαίνει να διαπερνάει ζώνες πολύ κοντά στον Ισημερινό [22].

Γνωστή είναι επίσης η επιβάρυνση στην παραγόμενη ενέργεια που προκαλεί η θερμοκρασία των κυψελών, όπως αναλύθηκε εκτενώς σε προηγούμενα κεφάλαια. Με σκοπό λοιπόν την μελλοντική μελέτη και ένταξη συστήματος ψύξης κυψελών της εγκατάστασης και επιπλέον τον πιο ακριβή υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας, οι αντίστοιχες εξισώσεις της μεθοδολογίας παρήγαγαν αποτελέσματα για τις αναμενόμενες θερμοκρασίες των κυψελών. Η μέγιστη θερμοκρασία των κυψελών φτάνει τους 65°C, θερμοκρασία αρκετά υψηλή η οποία όμως είναι μέσα στα όρια που έχει θέσει ο κατασκευαστής ως όρια λειτουργίας.

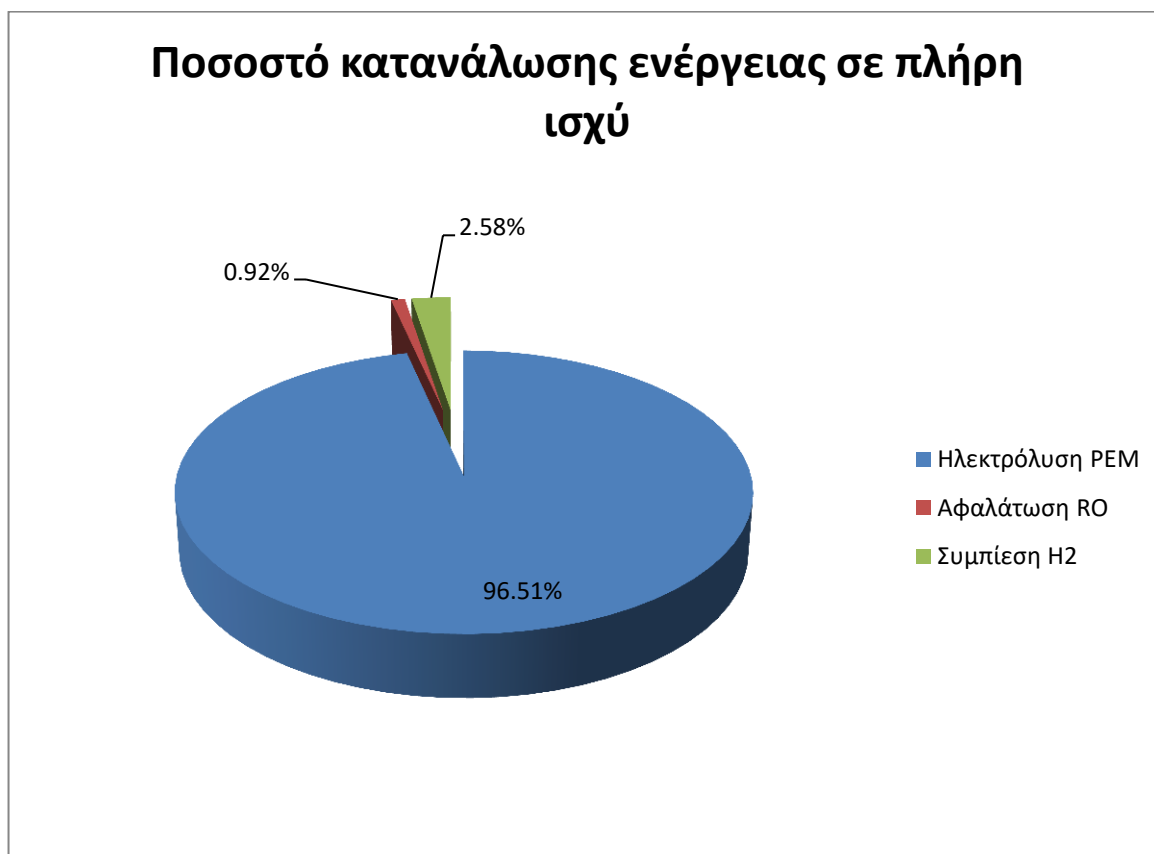


Σχήμα 6: Θεωρητική θερμοκρασία κυψελών φωτοβολταϊκών

Κάνοντας λοιπόν την παραδοχή ότι δεν υπάρχει σκίαση και ότι όλες οι κυψέλες λειτουργούν στην ίδια θερμοκρασία καταλήγουμε σε ένα εύρος λειτουργίας από -10°C μέχρι 65°C . Τέλος για την ορθή αξιολόγηση του ηλιακού δυναμικού απαραίτητος είναι και ο υπολογισμός του συντελεστή ισχύος των φωτοβολταϊκών. Σύμφωνα με τα δεδομένα, η εγκατάσταση έχει συντελεστή $20,71\%$, που αξιολογείται ως αρκετά υψηλή τιμή.

5.2 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης ηλεκτρόλυσης/αφαλάτωσης και ενεργειακή κατανάλωση διάταξης

Αναφορικά με την κατανάλωση της ενέργειας που παράγεται από τα πλαίσια, έγινε διαστασιολόγηση των μονάδων ηλεκτρόλυσης και έπειτα της αφαλάτωσης βάσει των απαιτήσεων της ηλεκτρόλυσης σε αφαλατωμένο νερό. Με βάση τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στη μελέτη περίπτωσης, η συνολική καταναλισκόμενη ισχύς που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο της επιλεγμένης μονάδας ηλεκτρόλυσης ανταλλαγής πρωτονίων, σε συνδυασμό με την απαιτούμενη ισχύ για αφαλάτωση νερού και συμπίεση παραγόμενου υδρογόνου στα 70MPa είναι $244,54\text{KW}$.



Σχήμα 7: Ποσοστά κατανομής παραγόμενης ενέργειας σε πλήρη ισχύ

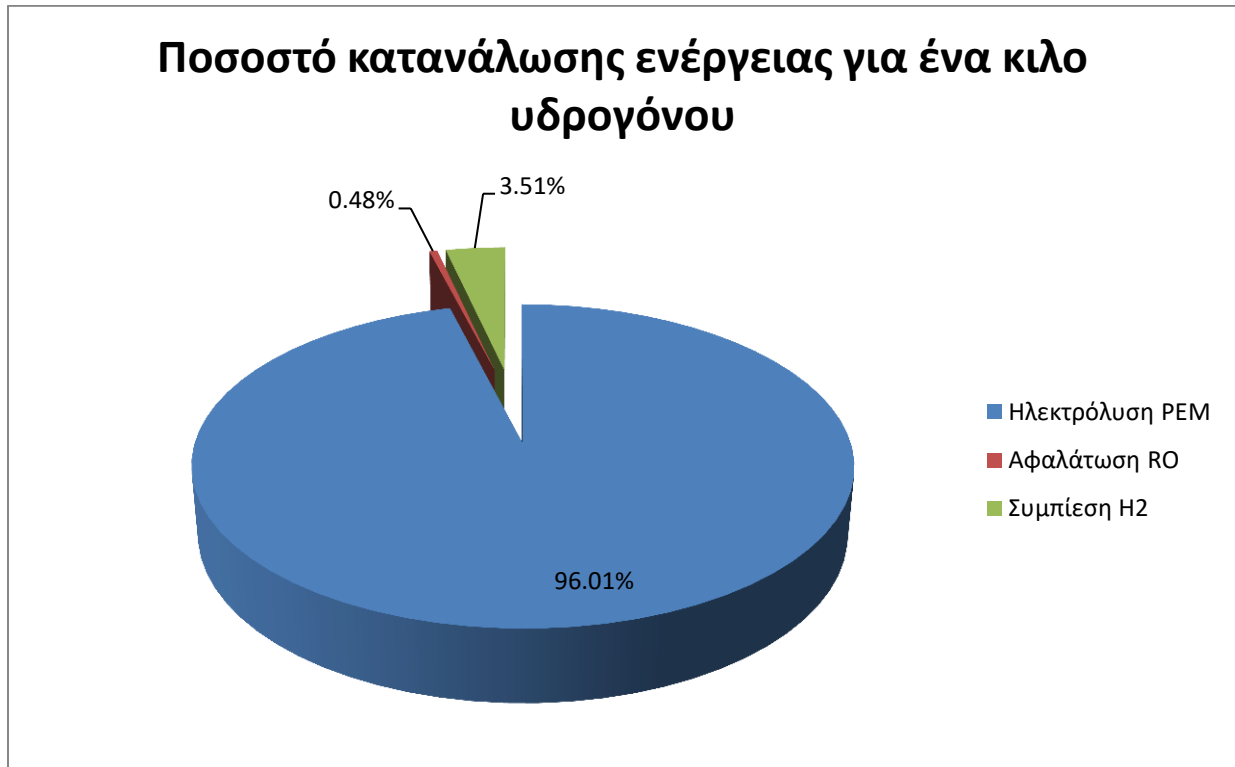
Τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης αναδεικνύουν ότι το βέλτιστο κέρδος θα παραχθεί με την εγκατάσταση έξι μονάδων ηλεκτρόλυσης. Αντίστοιχα η μονάδα αφαλάτωσης βάσει της μέγιστης δυνατής παραγωγής υδρογόνου διαστασιολογήθηκε στα 2,24 KW. Επιλέχθηκε η μονάδα αφαλάτωσης Aquamiser + A1216S, η οποία στη μέγιστη ισχύ της μπορεί να παράξει 189.27 λίτρα νερού ανά ώρα και 4542 λίτρα ανά ημέρα , επεξεργάζοντας νερό θαλάσσης. Τα δευτερεύοντα χαρακτηριστικά αναφέρονται διεξοδικά στο “Παράρτημα”.

5.3 Ανηγμένη ενεργειακή κατανάλωση ανά κιλό υδρογόνου

Για το σκοπό του υπολογισμού της παραγόμενης ποσότητας υδρογόνου, με δεδομένα εισαγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, πρέπει να γίνει ο υπολογισμός της καταναλισκόμενης ενέργειας της εγκατάστασης ανα κιλό υδρογόνου , σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της. Η ενέργεια αυτή χωρίζεται ως εξής:

- Ηλεκτρόλυση PEM Nel C30 series:64,5 KWh/kg
- Αφαλάτωση RO Aquamiser + A1216S:0.32 KWh/kg για την αφαλάτωση 9L νερού [30] που είναι απαραίτητα για την παραγωγή ενός κιλού υδρογόνου
- Συμπίεση ενός κιλού υδρογόνου στα 70MPa:2,36 KWh/kg [46]

Η ενεργειακή κατανάλωση για την συμπίεση υπολογίστηκε από βιβλιογραφικές πηγές, ενώ για τις άλλες δύο διατάξεις υπολογίστηκε σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κατασκευαστή. Ιδιαίτερα για την αφαλάτωση υπολογίστηκε πόσο χρόνο πρέπει η μονάδα να λειτουργεί στην μέγιστη ισχύ της για να γίνει η παραγωγή της απαραίτητης ποσότητας νερού ανά κιλό υδρογόνου της βιβλιογραφίας. Πολλαπλασιάζοντας την τιμή ισχύος και ενέργειας λήφθηκε το παραπάνω νούμερο.



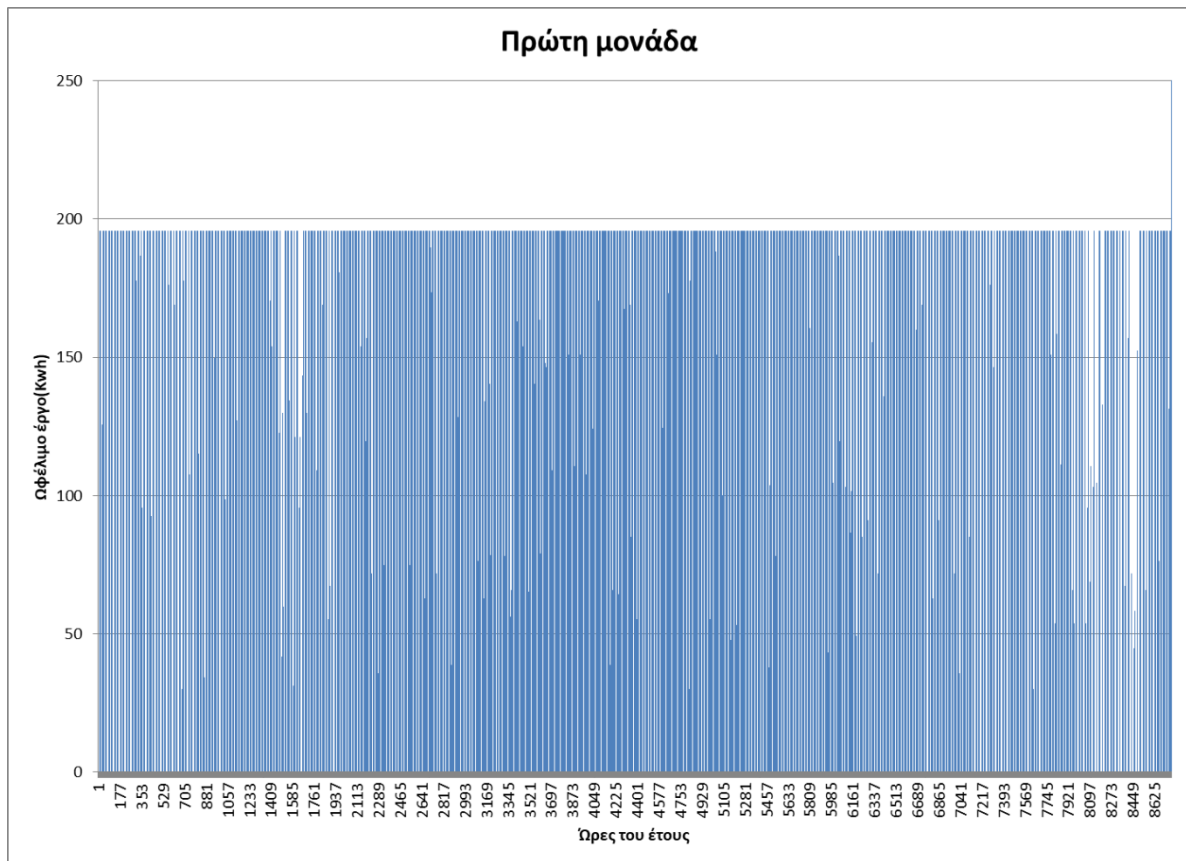
Σχήμα 8: Ανηγγμένη κατανάλωση ενέργειας ανά κιλό παραγόμενου υδρογόνου

Αν αθροίσουμε τις επιμέρους ενέργειες καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι απαιτούνται 67,8 KWh για την παραγωγή ενός κιλού υδρογόνου από τη εγκατάσταση που μελετάται.

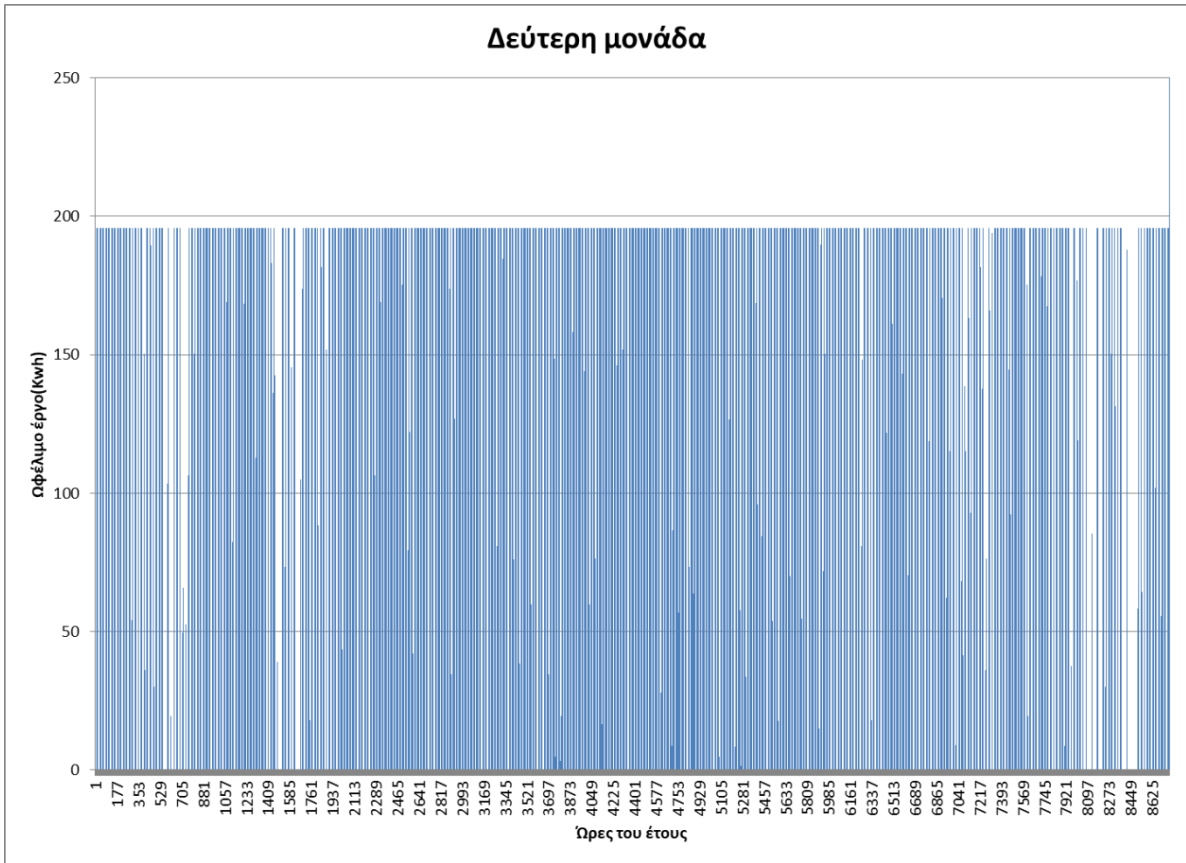
5.4 Τελική παραγόμενη ποσότητα υδρογόνου

Έχοντας λάβει όλα τα απαραίτητα δεδομένα από τα προηγούμενα βήματα της μεθοδολογίας, ακολουθεί ο υπολογισμός του τελικού αποδιδόμενου έργου της εγκατάστασης και συνεπώς της τελικής παραγόμενης ποσότητας υδρογόνου. Θεωρείται βαθμός απόδοσης ολόκληρης της διαδικασίας 0.8 λόγω απωλειών καλωδίων, μετατροπής ενέργειας, θερμότητας, άντλησης νερού και ούτω καθ' εξής. Στο παραπάνω νούμερο δεν συνυπολογίζονται οι απώλειες της ηλεκτρόλυσης διότι έχουν υπολογιστεί από τον κατασκευαστή και έχουν μεταφραστεί σε κατανάλωση ενέργειας ανά κιλό υδρογόνου. Το τελικό προσφερόμενο έργο, δηλαδή η ενέργεια που θα καταλήξει στην παραγωγή/ αποθήκευση υδρογόνου υπολογίστηκε ξεχωριστά για την κάθε μονάδα ηλεκτρόλυσης και

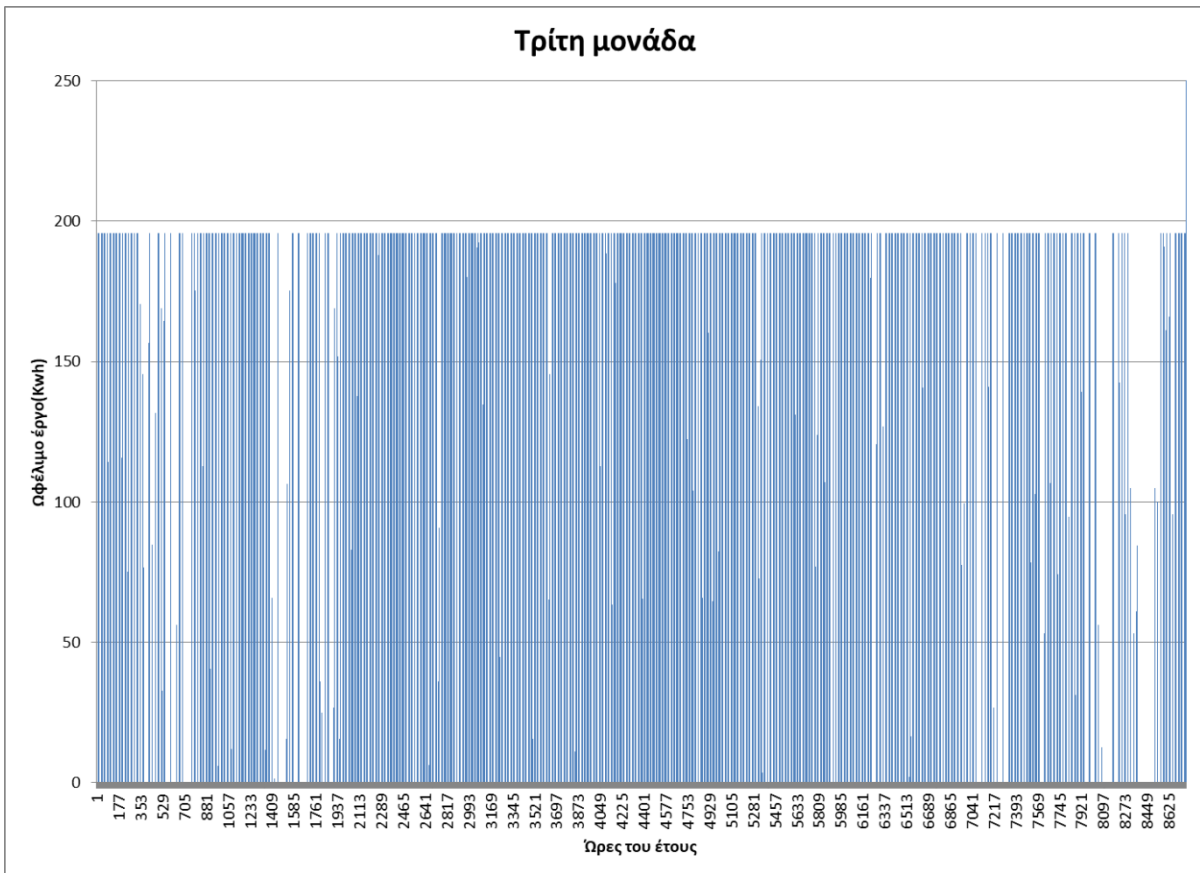
απεικονίζονται στα “Σχήμα 9 έως 14“. Επίσης έγινε η διαίρεση της ενέργειας αυτής με την ανηγμένη κατανάλωση ενέργειας ανά κιλό υδρογόνου, με σκοπό τον υπολογισμό της τελικής ποσότητας παραγωγής της κάθε μονάδας καθ’ όλη τη διάρκεια της μελέτης. Η ποσότητα αυτή μαζί με τον συντελεστή φορτίου της κάθε μονάδας αναγράφεται στον “Πίνακας 7”.



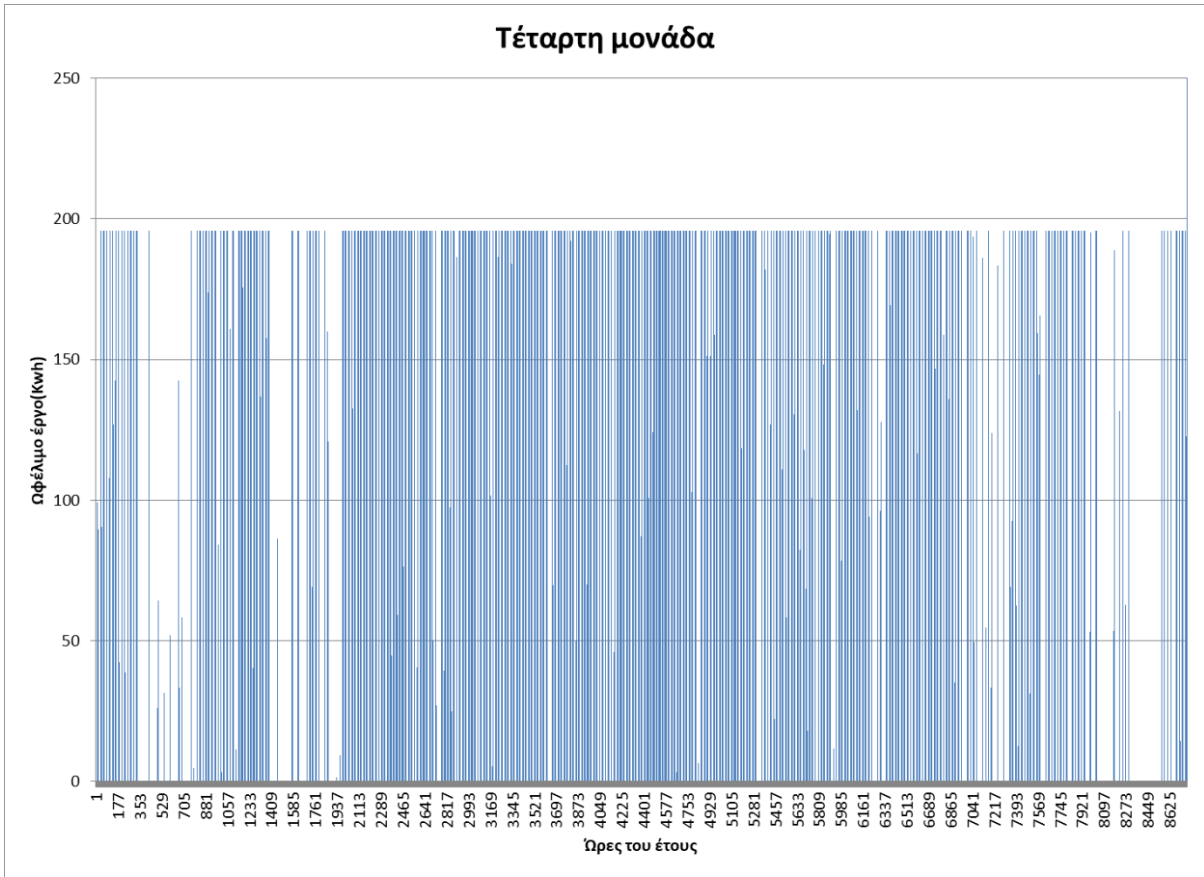
Σχήμα 9: Ενεργειακή κατανάλωση πρώτης μονάδας ηλεκτρόλυσης



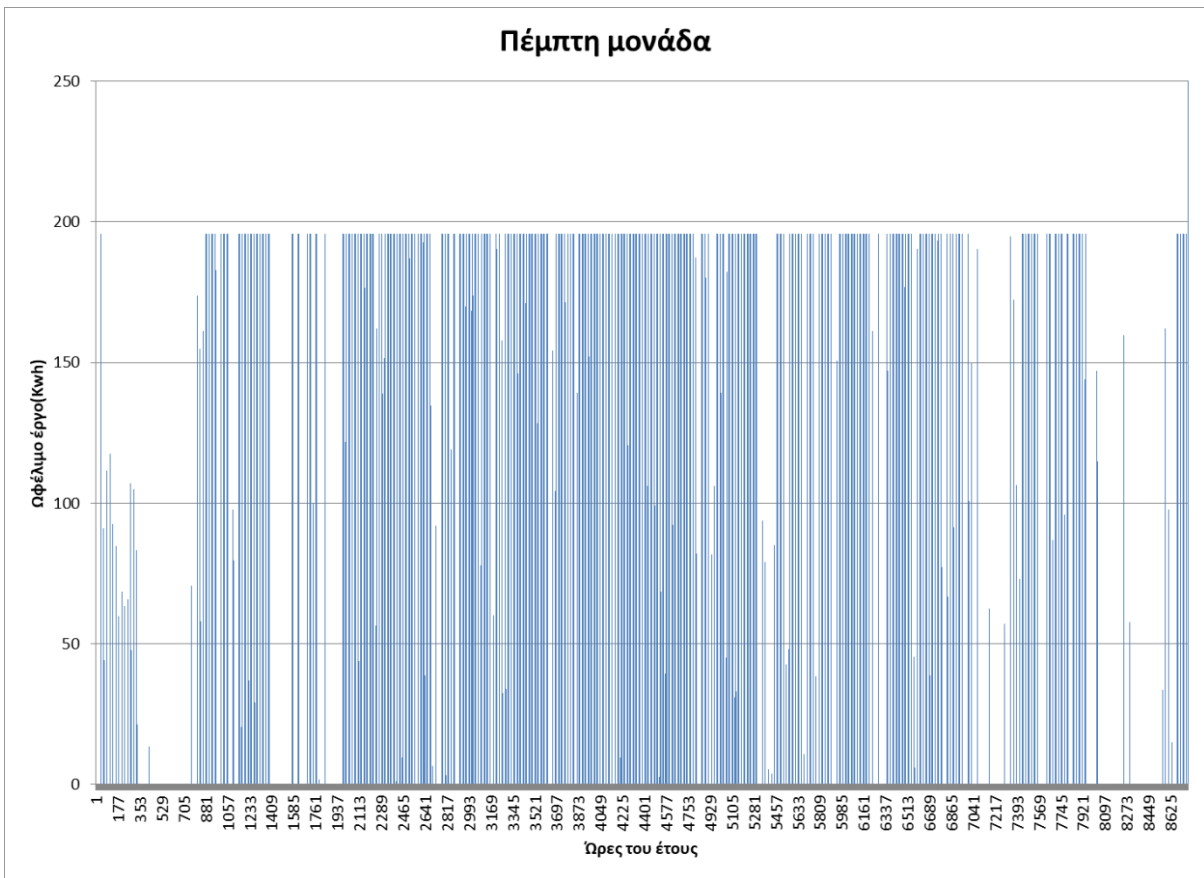
Σχήμα 10: Ενεργειακή κατανάλωση δεύτερης μονάδας ηλεκτρόλυσης



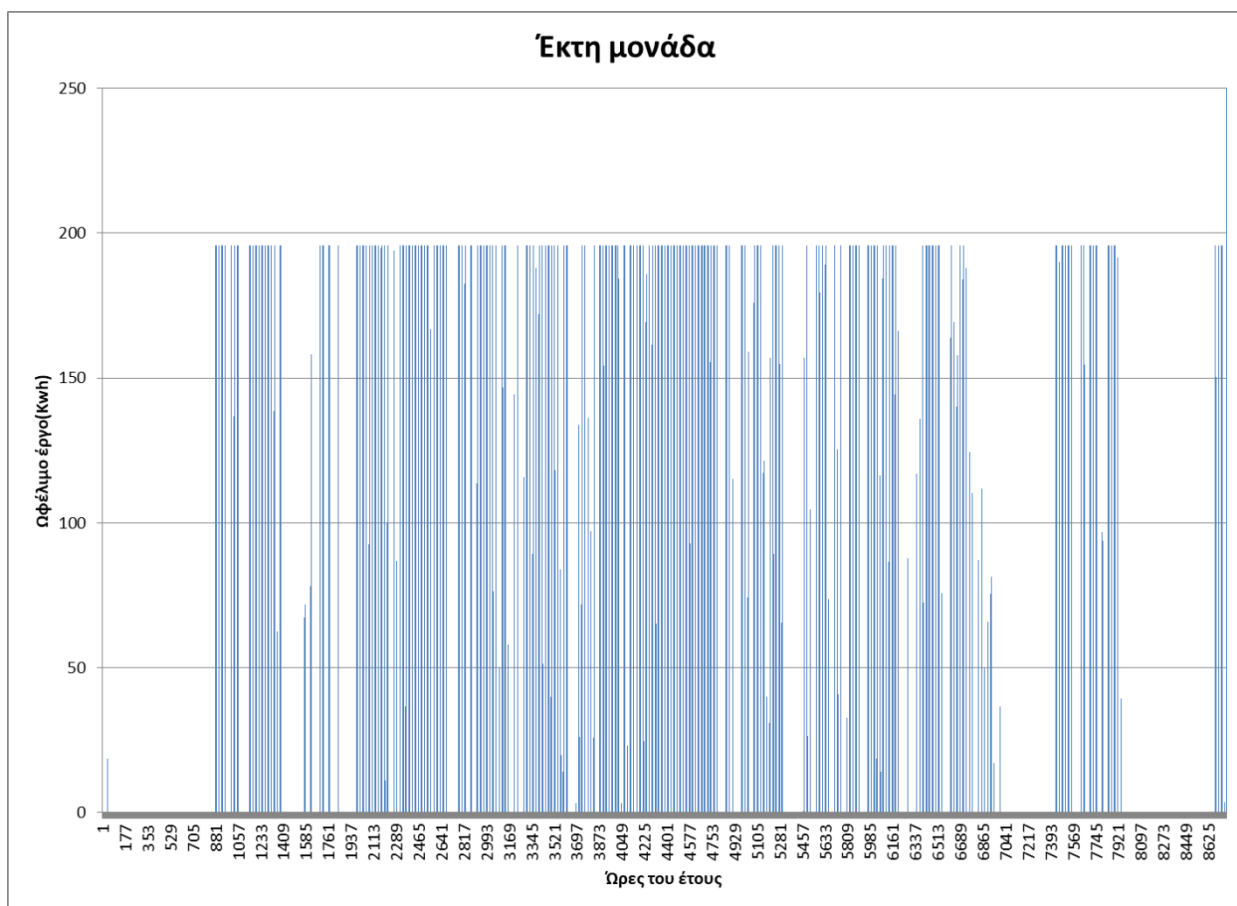
Σχήμα 11: Ενεργειακή κατανάλωση τρίτης μονάδας ηλεκτρόλυσης



Σχήμα 12: Ενεργειακή κατανάλωση τέταρτης μονάδας ηλεκτρόλυσης



Σχήμα 13: Ενεργειακή κατανάλωση πέμπτης μονάδας ηλεκτρόλυσης

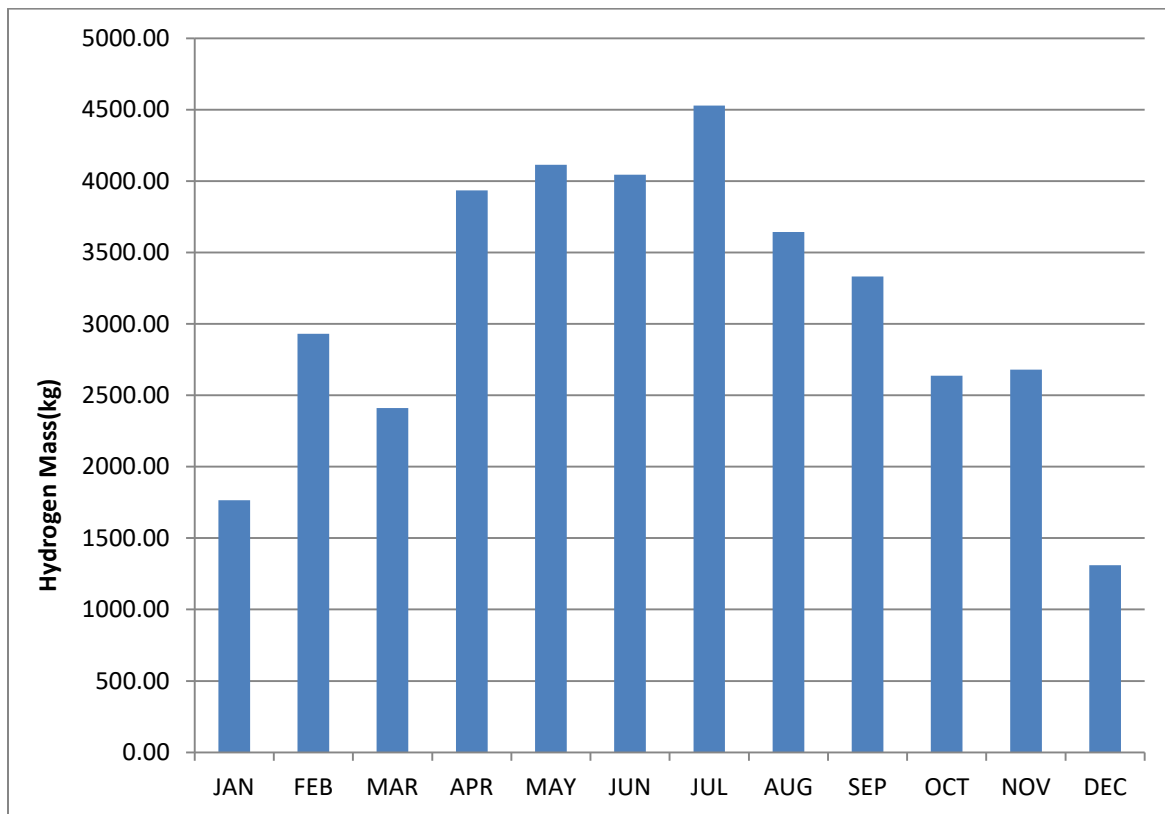


Σχήμα 14: Ενεργειακή κατανάλωση έκτης μονάδας ηλεκτρόλυσης

Πίνακας 7: Συνολική παραγωγή και συντελεστής ισχύος για κάθε μονάδα ηλεκτρόλυσης

Αριθμός μονάδας	Συντελεστής φορτίου(Cf)	Συνολικό έργο ανά έτος(KWh)	Ποσότητα υδρογόνου(Kg)
1	0.34	737466.26	10877.08
2	0.27	575652.57	8490.45
3	0.21	458286.88	6759.39
4	0.16	352618.81	5200.87
5	0.12	248087.33	3659.11
6	0.07	158821.73	2343.50

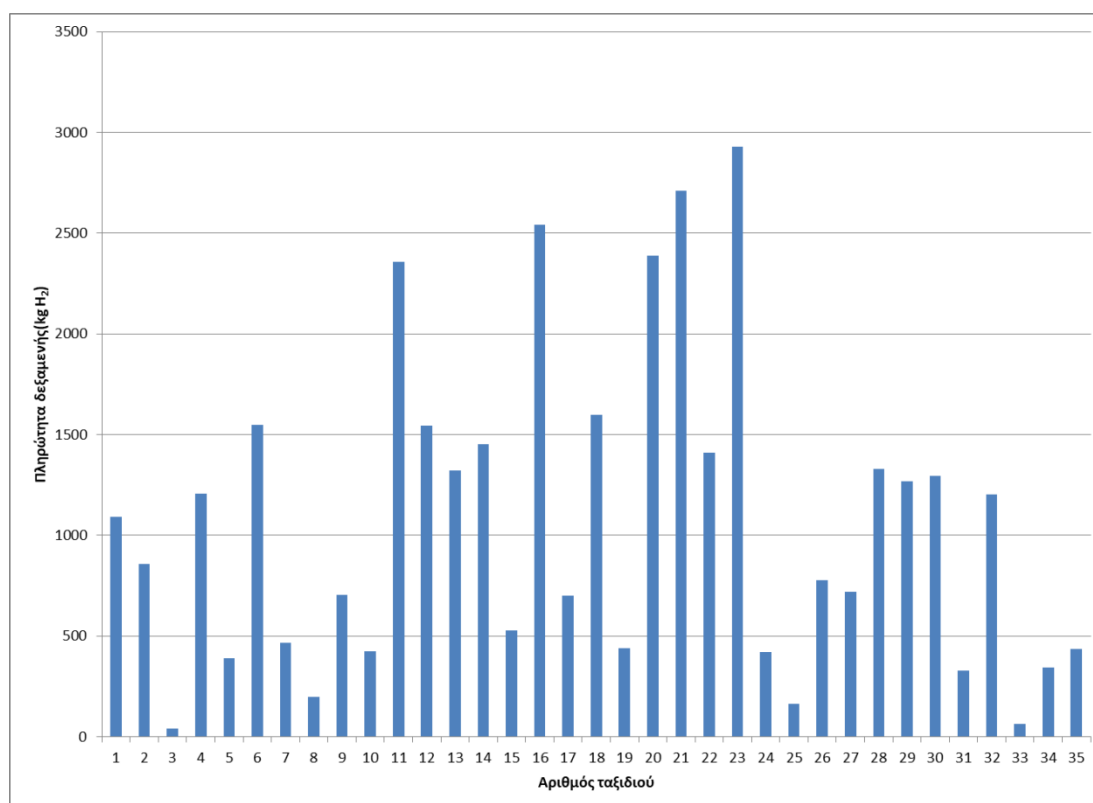
Αθροίζοντας τις επιμέρους ποσότητες που παρήγαγε η κάθε μονάδα ηλεκτρόλυσης, καταλήγουμε στην συνολική ποσότητα υδρογόνου, η οποία εκτιμάται στα 37329,40 kg/έτος. Αναλύοντας περαιτέρω τα δεδομένα, μπορεί να κατασκευαστεί η μηνιαία συνολική παραγωγή υδρογόνου “Σχήμα 15” το οποίο είναι παρόμοιο με το “Σχήμα 5” της μηνιαίας παραγόμενης ενέργειας.



Σχήμα 15: Παραγωγή υδρογόνου ανά μήνα

5.5 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης δεξαμενής υδρογόνου

Όσον αφορά τη διαστασιολόγηση της δεξαμενής αποθήκευσης, έγινε η σχετική ανάλυση δεδομένων για να υπολογιστεί η μέγιστη ποσότητα υδρογόνου που καλείται το πλοίο να αποθηκεύσει. Στο “Σχήμα 16” απεικονίζεται η μέγιστη στάθμη της δεξαμενής καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους. Ο υπολογισμός έγινε αθροίζοντας της ποσότητες υδρογόνου που παράχθηκαν εν’ πλω και μηδενίζοντας τη στάθμη κάθε φορά που το πλοίο εισέρχεται σε λιμάνι.



Σχήμα 16: Πληρότητα δεξαμενής κατά τη διάρκεια της μελέτης

Με γνώμονα τα παραπάνω σχήμα και τις υπολογισμένες ωριαίες τιμές παραγωγής υδρογόνου, η μέγιστη αναγκαία χωρητικότητα δεξαμενής του υδρογόνου εκτιμάται στα 2927kg H₂. Συνεπώς μία δεξαμενή χωρητικότητας 3000 kg H₂ είναι υπέρ αρκετή για να καλύψει τις ανάγκες της εγκατάστασης. Το παραπάνω νούμερο, έχοντας υπ' όψη ότι στα 70MPa η απαιτούμενη χωρητικότητα ανά κιλό υδρογόνου είναι 39,3 kg/m³ [49] τότε ο απαραίτητος όγκος της δεξαμενής, προσαυξάνοντας το νούμερο κατά 5% για να λάβουμε υπ' όψη και άλλες βοηθητικές διατάξεις της δεξαμενής, είναι 80m³.

5.6 Αποτελέσματα τεχνοοικονομικής ανάλυσης

Κατόπιν της διαδικασίας των διαστασιολογήσεων και τον υπολογισμών, καλούμαστε να απαντήσουμε το κύριο ερευνητικό ερώτημα της μελέτης, που είναι αν τελικά η εγκατάσταση αυτή μπορεί να αποφέρει κέρδος στο τέλος της επένδυσης. Για το σκοπό αυτό πρέπει να αναφερθούν οι κύριοι οικονομικοί παράγοντες οι οποίοι είναι απαραίτητοι με βάση τη μεθοδολογία. Κατόπιν βιβλιογραφικής ανασκόπησης τα μεγέθη αυτά συγκεντρώθηκαν στον “Πίνακας 8 ”[11][50].

Πίνακας 8: Τεχνοοικονομικά μεγέθη και μεταβλητές

Συμβολισμός	n	i	g	e	CH ₂ (€/kg)
Επεξήγηση	Χρόνος ζωής	Απόδοση ιδίων κεφαλαίων	Πληθωρισμός αγοράς	Ετήσιος ρυθμός αναπροσαρμογής της τιμής της ενέργειας	Τιμή Υδρογόνου
Τιμή	20	0.08	0.03	0.05	7

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές πηγές όπως αυτές αναφέρονται και στο κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας, έγινε μία σύνοψη του αρχικού κόστους και του κόστους συντήρησης των διατάξεων ξεχωριστά στον “Πίνακας 9”, έχοντας υπ’ όψη τα ανηγμένα κόστη και τις τιμές που προέκυψαν από το κομμάτι της διαστασιολόγησης.

Πίνακας 9: Σύνοψη χαρακτηριστικών διατάξεων

Σύστημα	Ανηγμένο κόστος μονάδας	Ισχύς/Χωρητικότητα	Συνολικό κόστος
Ηλεκτρόλυση PEM (nel C30 series)	700 €/KW	236KW x 6 μονάδες	990000€
Αφαλάτωση (Aquamiser + A1216S)	1.9 €/LPD	4542LPD	8600€
Αποθήκευση (Type IV High pressure tank)	569 €/kg of H ₂ storage capacity	3000kg	1707000€
Φωτοβολταϊκά (Black Tiger RCM-460-7RCG)	900 €/KW	1930KW	1728000€

Λαμβάνοντας λοιπόν υπ' όψη την τιμή των 7€/kg [11] του υδρογόνου, δεδομένου ότι θα πωληθεί ολόκληρη η ποσότητα υδρογόνου που παράχθηκε από την εγκατάσταση και αθροίζοντας τα επιμέρους κόστη, εξάγονται ο “Πίνακας 9” και ο “Πίνακας 10”:

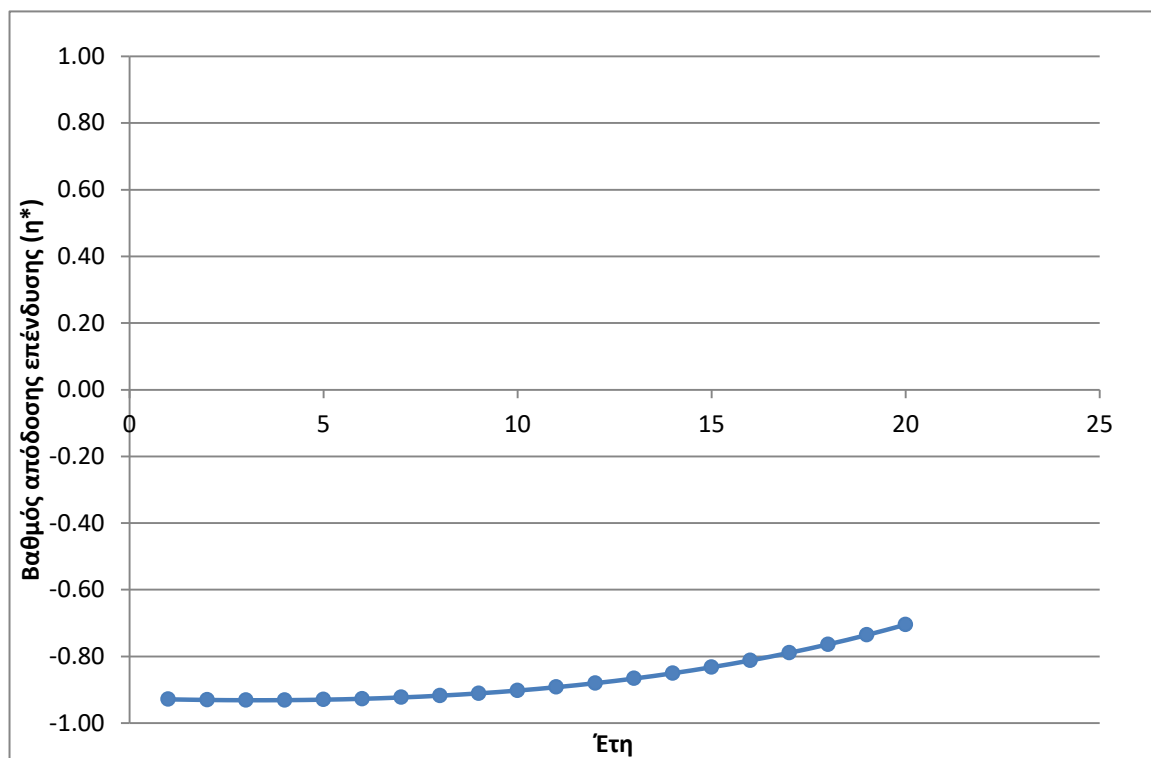
Πίνακας 10: Σύνοψη αρχικού κόστους, κόστους συντήρισης και εσόδων της εγκατάστασης

R ₀	IC _{0el}	IC _{0des}	IC _{0sto}	IC _{0sol}	C _{0H₂} (€/kg)	kgH ₂ (kg/year)
261305	990000	8600	1707000	1728000	7	37329
m	0.03	0.05	0.01	0.01		
FC ₀	29700	430	12240	17280		

Πίνακας 11: Αναγωγή οικονομικών μεγεθών στο τέλος της διάρκειας ζωής της επένδυσης

n	R _n (€)	FC _{n_{el}} (€)	FC _{n_{des}} (€)	FC _{n_{sto}} (€)	FC _{n_{sol}} (€)	FC _n (€)	C _n (€)	G _n (€)	η*
1	274371	30591	443	17582	17798	66414	4788288	-4580331	-0,93
2	584410	64547	935	37098	37555	140134	5171351	-4727075	-0,93
3	933657	102165	1479	58719	59441	221804	5585059	-4873206	-0,93
4	1325969	143766	2081	82629	83645	312121	6031864	-5018016	-0,93
5	1765546	189697	2746	109028	110369	411841	6514413	-5160708	-0,93
6	2256965	240336	3480	138133	139832	521781	7035566	-5300382	-0,93
7	2805205	296091	4287	170177	172271	642826	7598411	-5436031	-0,92
8	3415690	357401	5174	205415	207942	775933	8206284	-5566527	-0,92
9	4094316	424745	6150	244121	247124	922139	8862787	-5690610	-0,91
10	4847501	498639	7219	286591	290117	1082566	9571810	-5806875	-0,90
11	5682223	579641	8392	333147	337246	1258427	10337555	-5913759	-0,89
12	6606068	668358	9677	384137	388863	1451034	11164559	-6009525	-0,88
13	7627285	765442	11082	439936	445348	1661808	12057724	-6092247	-0,87
14	8754835	871601	12619	500951	507113	1892284	13022342	-6159791	-0,85
15	9998458	987601	14299	567621	574604	2144125	14064129	-6209796	-0,83
16	11368732	1114269	16133	640423	648302	2419126	15189259	-6239653	-0,81
17	12877149	1252500	18134	719871	728727	2719232	16404400	-6246483	-0,79
18	14536184	1403262	20317	806521	816443	3046543	17716752	-6227111	-0,76
19	16359386	1567602	22696	900975	912059	3403333	19134092	-6178039	-0,74
20	18361459	1746652	25288	1003884	1016234	3792058	20664820	-6095418	-0,70

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της βιβλιογραφίας για τελική απόδοση της επένδυσης σε βάθος 20 ετών παράγεται το “Σχήμα 17”.



Σχήμα 17: Βαθμός απόδοσης επένδυσης κατα τη διάρκεια της επένδυσης

Με τα δεδομένα της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης εξάγεται το συμπέρασμα ότι μία τέτοια επένδυση δεν είναι κερδοφόρα σε βάθος 20 ετών για τον εκάστοτε επενδυτή.

Κεφάλαιο 6

6 Συζήτηση

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται εκτενής ανάλυση των ευρημάτων της μελέτης, καθώς και θα προταθούν τρόποι με τους οποίους μπορεί να βελτιστοποιηθεί το αποτέλεσμα. Αναφορές θα γίνουν σε προτάσεις για μελλοντικές έρευνες για θέματα πάνω στο αντικείμενο της μελέτης και με τα οποία η παρούσα δεν έχει ασχοληθεί.

6.1 Τελικά ευρήματα

Σαν συμπέρασμα που εξάχθηκε από την μελέτη λαμβάνεται ότι ενώ η συγκεκριμένη ιδέα είναι ένας πολύ καλός τρόπος εκμετάλλευσης της ελεύθερης επιφάνειας στα πλοία για παραγωγή, αποθήκευση και ταυτόχρονη μεταφορά ενέργειας σε μορφή υδρογόνου, με βάση τις τωρινές τιμές της αγοράς η επένδυση σε ένα τέτοιο έργο δεν είναι οικονομικά ωφέλιμη. Για να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση του έργου, οφείλουν να αναγνωριστούν και να αναλυθούν τα σημεία τα οποία η πρόταση αυτή υστερεί και να προταθούν σχετικές λύσεις. Παρακάτω αναγράφονται τα σημεία αυτά:

- Μεγάλο κόστος δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου υψηλής πίεσης
- Κόστος συντήρησης
- Μικρή ζωή επένδυσης σε σχέση με μέγιστη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης
- Μη εκμετάλλευση κρατικών διευκολύνσεων, όπως κρατικές επιδοτήσεις για την υλοποίηση του έργου
- Θεώρηση μηδενικής υπολιπούσας αξίας στο τέλος της επένδυσης
- Ενεργειακή κατανάλωση βοηθητικών διατάξεων
- Μη ένταξη ψυκτικού μηχανισμού στα πλαίσια

6.2 Τρόποι βελτιστοποίησης

Αφού έχουν αναγνωριστεί τα αδύναμα σημεία της εγκατάστασης, όσον αφορά τους οικονομικούς και ενεργειακούς παράγοντες, ακολουθούν προτάσεις μείωσης του τελικού κόστους και προτάσεις μεγιστοποίησης της παραγωγής, σε μία προσπάθεια τροποποίησης του έργου έτσι ώστε να είναι οικονομικά ωφέλιμο.

6.2.1 Κόστος δεξαμενής

Ένα σημαντικό έξοδο του αρχικού κόστους της εγκατάστασης είναι αυτό της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου υψηλής πίεσης. Ένας λόγος που το παραπάνω είναι ιδιαίτερα υψηλό είναι ότι διαστασιολογήθηκε για να αποθηκεύει ένα πολύ μεγάλο ποσό υδρογόνου.

Σύμφωνα με το “Σχήμα 16” πληρότητας δεξαμενής, οι διαδρομές στις οποίες υπάρχει μέγιστη παραγωγή είναι οι διαδρομές 11 (Las Palmas- Gibraltar), 16 (Houston- Le Havre), 20 (Las Palmas- Gibraltar), 21 (Gibraltar- Arnold's Cove) και 23 (Houston- Le Havre).

Στη συνέχεια θα αναλυθούν προτεινόμενοι τρόποι που θα συντελέσουν στη λύση για κάθε διαδρομή ξεχωριστά. Όσον αφορά τη διαδρομή από Las Palmas μέχρι Gibraltar, ενώ το ταξίδι είναι αρκετά μικρό σχετικά με τα υπόλοιπα, η μεγάλη κίνηση στα στενά και τα μεγάλα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή, καθιστούν τη διαδρομή αυτή αρκετά παραγωγική σε άποψη υδρογόνου. Ενώ δε μπορεί να ληφθεί μέτρο για την κίνηση του συγκεκριμένου λιμανιού ή των στενών, μία ενδιάμεση λύση είναι η ένταξη ενός ενδιάμεσου προορισμού με σκοπό την εκφόρτωση του υδρογόνου, κατά τη διάρκεια της αναμονής. Η αλλαγή αυτή όχι μόνο αποφορτώνει το πλοίο από την περίσσεια υδρογόνου, αλλά το καθιστά και πιο παραγωγικό, αφού αντί να παραμένει αδρανές θα παράγει κέρδος.

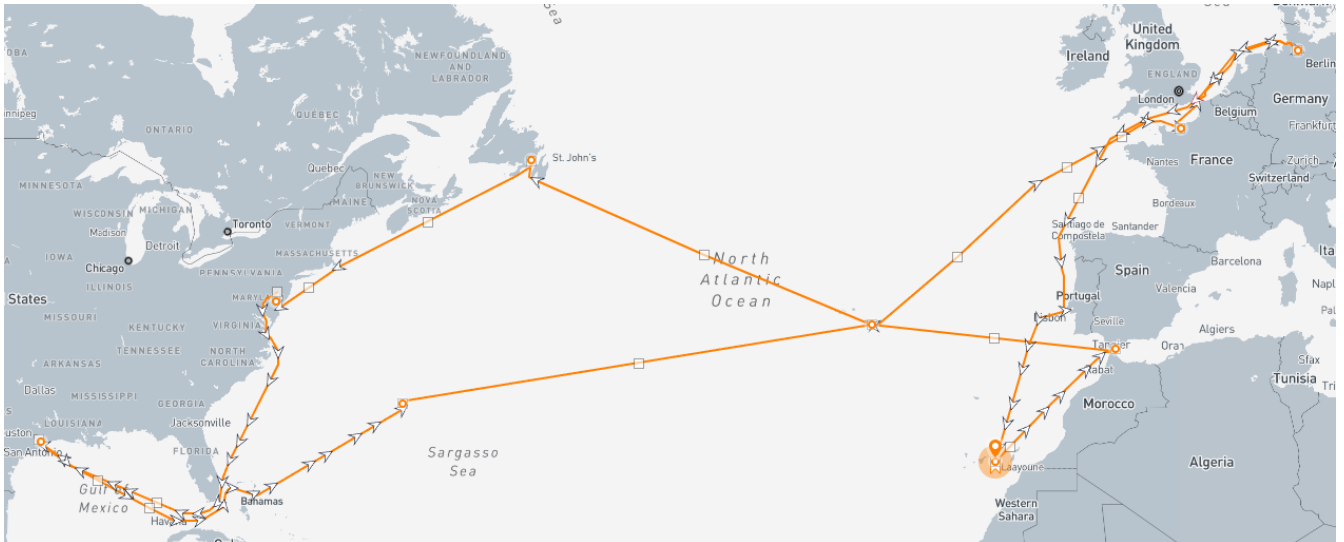
Αναφορικά με τις υπερατλαντικές διαδρομές (Gibraltar- Arnold's Cove, Houston- Le Havre), μία αρκετά πρακτική λύση είναι η ενδιάμεση στάση τους θερινούς μήνες σε λιμάνια που βρίσκονται στη μέση του Ατλαντικού, τα οποία αποτελούν και πολύ χρήσιμα σημεία εκφόρτωσης λόγω της τοποθεσίας τους. Τέτοια λιμάνια μπορεί να βρίσκονται στα εξής νησιά:

- Αγγλικά νησιά Βερμούδες
- Πορτογαλικά νησιά Αζόρες

Τα λιμάνια στα νησιά αυτά τα οποία είναι υποψήφια για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι:

- Hamilton harbour (Βερμούδες)
- St. George's harbour (Βερμούδες)
- Ponta Delgada (Αζόρες)
- Praia da Vitoria (Αζόρες)

Η επιλογή αυτών έγινε διότι αποτελούν τα μεγαλύτερα λιμάνια των παραπάνω νήσων και έχουν εμπορικές εγκαταστάσεις, απαραίτητες για την φόρτωση εκφόρτωση υδρογόνου. Ο τρόπος αυτός θα μειώσει την μέγιστη απαιτούμενη χωρητικότητα της δεξαμενής, αφού πλέον το πλοίο θα έχει σημεία εκφόρτωσης στις μεγάλες διαδρομές. Μια πρόταση τροποποίησης της διαδρομής για το σκοπό της μείωσης του κόστους της δεξαμενής φαίνεται στην “Εικόνα 8”.



Εικόνα 8: Νέα προτεινόμενη διαδρομή πλοίου κατά τη διάρκεια του έτους

6.2.2 Κόστος συντήρησης

Σε μία προσπάθεια μείωσης του κόστους συντήρησης, πρέπει να ληφθεί υπ' όψη ότι η μόνη διαθέσιμη ώρα συντήρησης είναι την ώρα που το πλοίο βρίσκεται σε λιμάνι και γίνεται από τους κατάλληλους μηχανικούς αν αυτοί είναι διαθέσιμοι, σε περίπτωση απρόοπτης βλάβης. Αυτό συντελεί στα εξής:

- Μεγαλύτερη παραμονή του πλοίου στο εκάστοτε λιμάνι
- Μεγαλύτερα κόστη συντήρησης
- Πιθανή καταστρεπτική για την εγκατάσταση βλάβη, αν η συντήρηση δεν γίνει σύντομα
- Επιδείνωση της κίνησης του λιμανιού άρα και μεγαλύτεροι χρόνοι αναμονής για να δέσουν τα επόμενα πλοία

Έχοντας παραθέσει τα προβλήματα με τη συντήρηση, ακολουθεί η πρόταση και περιγραφή μίας λύσης. Είναι γνωστό ότι ένα μεγάλο μέρος του πληρώματος του πλοίου είναι μηχανικοί, έμπειροι και αρκετά ικανοί να εργάζονται κατά τη διάρκεια που το πλοίο ταξιδεύει. Αφού λοιπόν η προτεινόμενη εγκατάσταση είναι εντελώς ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες λειτουργίες του πλοίου και αφού οι περισσότερες διατάξεις δεν διαθέτουν κινούμενα μέρη, είναι δυνατή η συντήρηση των εγκαταστάσεων εν' πλω από τους ίδιους τους μηχανικούς του πλοίου. Είναι σημαντικό βέβαια να αναφερθεί ότι η εταιρία του πλοίου πρέπει να παρέχει στους μηχανικούς επαρκή κατάρτιση πάνω στη συγκεκριμένη διεργασία και επαρκή εξοπλισμό ασφαλείας, καθώς ένα εργατικό ατύχημα στη μέση του ατλαντικού ακόμα και αν αυτό δεν είναι σοβαρό, μπορεί να αποβεί μοιραίο λόγω έλλειψης απαραίτητων ιατρικών υποδομών. Το συγκεκριμένο εγχείρημα θα μειώσει τα κόστη συντήρησης

σημαντικά, αφού το μόνο που θα έχει πλέον κόστος είναι η μικρή αύξηση των μισθών των μηχανικών αν αυτή κριθεί απαραίτητη και τα ανταλλακτικά των διατάξεων τα οποία οφείλουν να υπάρχουν διαθέσιμα. Τέλος, σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι οι διεργασίες αυτές θα πρέπει να λαμβάνουν χώρα τη νύχτα, όπου εγκαταστάσεις δεν λειτουργούν με σκοπό να μην μειώνεται η παραγωγικότητα της εγκατάστασης.

6.2.3 Ενεργειακή κατανάλωση βοηθητικών διατάξεων

Μια σημαντική παρατήρηση που πρέπει να γίνει στο σημείο αυτό και φαίνεται στα “Σχήμα 7 και Σχήμα 8” είναι ότι η ηλεκτρόλυση καταναλώνει ένα εξαιρετικά μεγάλο ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας (96,5%), ενώ η αφαλάτωση και αποθήκευση καταναλώνουν μόλις το υπόλοιπο 3,5 %. Η ενέργεια αυτή είναι αρκετά μικρή ώστε να είναι δυνατή η κάλυψη της από την μηχανή του πλοίου, η οποία είναι κατασκευασμένη να αντέχει φορτία πέραν της κίνησης του πλοίου, όπως φωτισμός, αερισμός, κλιματισμός, κατανάλωση του πληρώματος και λοιπά. Οι καταναλώσεις αυτές λαμβάνουν χώρα κυρίως τη νύχτα που δεν υπάρχει φως και που το πλήρωμα βρίσκεται στις καμπίνες. Συνεπώς η μπαταρία του πλοίου μπορεί κατά τη διάρκεια της ημέρας να τροφοδοτεί τις διατάξεις αφαλάτωσης νερού και συμπίεσης υδρογόνου, επιτρέποντας την ενέργεια των πλαισίων που θα διοχετεύονταν για το σκοπό αυτό να ανακατευθυνθεί στην παραγωγή υδρογόνου.

6.2.4 Ψύξη πλαισίων

Ένας σημαντικός παράγοντας που μειώνει την απόδοση των πλαισίων και αυξάνει το βαθμό επικινδυνότητας της εγκατάστασης είναι η θερμοκρασία τους, η οποία σύμφωνα με το “Σχήμα 6” αγγίζει κατά τη διάρκεια του έτους μέχρι και τους 65 οC. Σκόπιμη θεωρείται λοιπόν η ένταξη μονάδας ψύξης των φωτοβολταϊκών. Σαφώς όμως, για την ένταξη ενός τέτοιου συστήματος, απαιτείται παραπάνω έρευνα πάνω στο έργο. Μερικοί τρόποι λοιπόν επίτευξης αυτού που θα προταθούν είναι οι παρακάτω:

- Παραδοσιακοί τρόποι ψύξης φωτοβολταϊκών με εναλλάκτες και αντλίες θερμότητας [51]
- Ένταξη μονάδας τριπαραγωγής που χρησιμοποιεί την απορριπτόμενη θερμότητα της μηχανής για άλλες διεργασίες στο πλοίο, συμπεριλαμβανομένου και της παραγωγής ψυκτικής ισχύος [52].

Ενώ και οι δύο τρόποι επιβαρύνουν οικονομικά το έργο, πρέπει να γίνει εκ’ νέου τεχνοοικονομική αξιολόγηση για να διαπιστωθεί αν είναι εφικτό η επένδυση να μπορεί να

υποστηρίζει τέτοιες διατάξεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι η δεύτερη πρόταση υπερτερεί της πρώτης αφού χρησιμοποιεί θερμική ενέργεια που αποβάλλεται από τη μηχανή και δεν επιβαρύνει ενεργειακά την εγκατάσταση. Επίσης μια μονάδα τριπαραγωγής μπορεί να ελαφρύνει ενεργειακά το πλοίο και να έχει οικονομικό όφελος σε αυτό.

6.2.5 Εκμετάλλευση επιδοτήσεων και υπολειμματικής αξίας και αύξηση του χρόνου ζωής της επένδυσης

Με σκοπό να υπάρξει υποβοήθηση της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου, πρέπει να εξετασθεί αν μπορεί να γίνει αύξηση του χρόνου ζωής της επένδυσης από τα 20 στα 25 ή και τα 30 χρόνια, αφού οι επιλεγμένες διατάξεις υποθέτοντας καλή συντήρηση, μπορούν να φτάσουν χρόνους ζωής μεγαλύτερους των 20 ετών σύμφωνα με τους κατασκευαστές. Επιπλέον, πρέπει να εξετασθεί αν στο τέλος της επένδυσης οι επιμέρους διατάξεις μπορεί να πωληθούν, τακτική που εφαρμόζεται συχνά σε τέτοιες επενδύσεις και μπορεί να επιστρέψει 10-20% του αρχικού κόστους. Τέλος, οφείλει να εξετασθεί από νομικής προσέγγισης αν μία τέτοια εγκατάσταση δικαιούται κρατική επιδότηση, αφού είναι αρκετά σύνηθες σε έργα πράσινης ενέργειας να παρέχονται τέτοιες επιδοτήσεις από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Μια επιδότηση ακόμα και 10% του αρχικού κόστους, μπορεί να βοηθήσει σημαντικά την οικονομική βιωσιμότητα του έργου.

Βιβλιογραφία

- [1] "Main Maritime Shipping Routes," PortEconomics Management, 2023. <https://porteconomicsmanagement.org/pemp/contents/part1/interoceanic-passages/main-maritime-shipping-routes/>.
- [2] T. Smolinka, H. Bergmann, J. Garche and M. Kusnezoff, "Chapter 4 - The history of water electrolysis from its beginnings to the present," in *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications*, Elsevier, 2022, pp. 83-164. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819424-9.00010-0>
- [3] N. A. Al-Mufachi and N. Shah, "The role of hydrogen and fuel cell technology in providing security for the UK energy system," *Energy Policy*, vol. 171, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113286>
- [4] "World Energy Outlook 2023 - Pathways for the Energy Mix," International Energy Agency (IEA), 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023/pathways-for-the-energy-mix>.
- [5] "Heat Values of Various Fuels," World Nuclear Association, 2020. <https://worldnuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels>.
- [6] B. Seger, "Electrolysis Value: Thinking in Terms of MWh Instead of kg," LinkedIn Pulse, 2023. <https://www.linkedin.com/pulse/electrolysis-value-thinking-terms-mwh-instead-kg-brian-seger>.
- [7] "Types of Hydrogen," Stargate Hydrogen, 2023. <https://stargatehydrogen.com/blog/types-of-hydrogen/>.
- [8] F. Klumpp, "Comparison of pumped hydro, hydrogen storage and compressed air energy storage for integrating high shares of renewable energies—Potential, cost-comparison and ranking,," *Journal of Energy Storage*, vol. 8, pp. 119-128, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.09.012>
- [9] "The Future of Energy Storage: Hydrogen VS Lithium," Senza Hydrogen, <https://senzahydrogen.com/hydrogen-vs-lithium>.

- [10] "EU energy policy," Energy Union, 2019.
- [11] "Hydrogen Cost and Sales Prices," Hydrogen Valley platform, 2023. <https://h2v.eu/analysis/statistics/financing/hydrogen-cost-and-sales-prices>.
- [12] "Renewables," International Energy Agency (IEA), <https://www.iea.org/energy-system/renewables>.
- [13] "Bell Labs Silicon Solar Cell," American Physical Society (APS), 2009. <https://www.aps.org/apsnews/2009/04/bell-labs-silicon-solar-cell>.
- [14] "Solar Industry Research Data," Solar Energy Industries Association (SEIA), <https://www.seia.org/solar-industry-research-data>.
- [15] "Office of Energy Efficiency & Renewable Energy," U.S. Department of Energy, <https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work>.
- [16] "Forbes," Forbes Media LLC, 2023. <https://www.forbes.com/home-improvement/solar/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>.
- [17] M. Mirzaei and M. Z. Mohiabadi, "A comparative analysis of long-term field test of monocrystalline and polycrystalline PV power generation in semi-arid climate conditions,," *Energy for Sustainable Development*, vol. 38, pp. 93-101, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.01.002>
- [18] A. G. Gaglia, S. Lykoudis, A. A. Argiriou, C. A. Balaras and E. Dialynas, "Energy efficiency of PV panels under real outdoor conditions—An experimental assessment in Athens, Greece,," *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 236-243, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.051>
- [19] J. Adeeb, A. Farhan and A. Al-Salaymeh, "Temperature Effect on Performance of Different Solar Cell Technologies," *Adeeb, J., Farhan, A., Al-Salaymeh, A. (2019). Temperature Effect on Performance of Different Solar Cell Technologies. Journal of Ecological Engineering*, 20(5), 249-254, vol. 20, no. 5, pp. 249-254, 2019. <https://doi.org/10.12911/22998993/105543>
- [20] A. K. Tripathi, R. Shashwati, A. Mangalpady and S. Prasad, "Evaluation of solar PV panel performance under humid atmosphere," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 5916-5920, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.775>

- [21] M. Yaseen, A. Faris and Y. Ali, "Studying the weather condition affecting on solar panel efficiency," *Tikrit Journal of Pure Science*, vol. 25, pp. 98-102, 2020. [10.25130/tjps.v25i3.255](https://doi.org/10.25130/tjps.v25i3.255)
- [22] G. Kopp, "Daily solar flux as a function of latitude and time," *Solar Energy*, vol. 249, pp. 250-254, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.022>
- [23] A. Y. Dvorkin and E. H. Steinberger, "MODELING THE ALTITUDE EFFECT ON SOLAR UV RADIATION," *Solar Energy*, vol. 65, no. 3, pp. 181-187, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00126-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00126-1)
- [24] K. A. Sado, H. H. Lokman and S. Sado, "Photovoltaic panels tilt angle," *International Conference on Renewable Energy*, vol. 239, 2021.
- [25] "National Renewable Energy Laboratory (NREL)," U.S. Department of Energy, <https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/solar-installed-system-cost.html>.
- [26] I. E. N. (IENE), The Institute of Energy for South East Europe, 27 August 2024. <https://www.iene.eu/1/about-iene-c5.html>.
- [27] K. Scott, "Chapter 1: Introduction to Electrolysis, Electrolysers and Hydrogen Production," in *Electrochemical Methods for Hydrogen Production*, The Royal Society of Chemistry, 2019, pp. 1-27. <https://doi.org/10.1039/9781788016049-00001>
- [28] S. A. Grigoriev, V. N. Fateev, D. G. Bessarabov and P. Millet, "Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 49, pp. 26036-26058, 2020.
- [29] N. Sezer, S. Bayhan, U. Fesli and A. Sanfilippo, "A comprehensive review of the state-of-the-art of proton exchange membrane water electrolysis," *Materials Science for Energy Technologies*, vol. 8, pp. 44-65, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.109>
- [30] C. Hwang, "Rocky Mountain Institute," <https://rmi.org/hydrogen-reality-check-distilling-green-hydrogens-water-consumption/>.
- [31] I. E. A. (IEA), "Global hydrogen review 2023," August 2023. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>.
- [32] S. Mellor, "PV Magazine," Electrolyzer prices: What to expect, 21 March 2024.

<https://www.pv-magazine.com/2024/03/21/electrolyzer-prices-what-to-expect/>.

- [33] A. Christensen, "Assessment of Hydrogen Production Costs from," International Council on Clean Transportation, 2020.
- [34] A. N. Angelakis, M. Valipour, K.-H. Choo, A. Baba, R. Kumar, G. S. Toor and Z. Wang, "Desalination: From Ancient to Present and Future," *Water*, vol. 13, no. 16, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13162222>
- [35] U. Spohn, "MEMBRANE SEPARATIONS | Reverse Osmosis," *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.04614-X>
- [36] A. Kaya, E. Tok and M. Koc, "A Levelized Cost Analysis for Solar-Energy-Powered Sea Water Desalination in The Emirate of Abu Dhabi," *Sustainability*, vol. 11, no. 6, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11061691>
- [37] A. Shokri and M. S. Fard, "Techno-economic assessment of water desalination: Future outlooks and challenges," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 169, pp. 564-578, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.007>
- [38] E. M. Ahmed , T. Jagruti , S.-A. Annukka and . L. Martti, "Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 29, pp. 15671-15690, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.080>
- [39] Q. Cheng, Z. Ruiqiang, S. Zhusheng and L. Jianguo, "Review of common hydrogen storage tanks and current manufacturing methods for aluminium alloy tank liners," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 7, no. 2, pp. 269-284, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.08.002>
- [40] S. K. Hyun and S. K. Ha, "A Review on the Cost Analysis of Hydrogen Gas Storage Tanks for Fuel Cell Vehicles," *Energies*, vol. 16, no. 13, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16135233>
- [41] "MarineTraffic," MarineTraffic: Global ship tracking intelligence, <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home>.

- [42] MarineTraffic, "Voyage planner," MarineTraffic, <https://www.marinetraffic.com/en/online-services/plans/voyage-planner>.
- [43] S. Pfenninger and I. Staffell, "Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data," *Energy*, vol. 114, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.060>.
- [44] S. Pfenninger and I. Staffell, "Renewables.ninja," <https://www.renewables.ninja/>.
- [45] V. Sun, A. Asanakham, T. Deethayat and T. Kiatsiriroat, "A new method for evaluating nominal operating cell temperature (NOCT) of unglazed photovoltaic thermal module," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1029-1042, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.04.026>
- [46] V. Knop, "Hydrogen compression," AWOE, 16 January 2022. <https://www.awoe.net/Hydrogen-Compression-General.html>.
- [47] Ι. Κ. Καλδέλλης, Γ. Χ. Σπυρόπουλος and Κ. Α. Καββαδίας, Υπολογιστικές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας, Ηλιακή ακτινοβολία- Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις- Ηλιακά θερμικά συστήματα, Αθήνα: Εκδόσεις ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ, 2007.
- [48] MarineTraffic, "AMAX Anthem vessel details," MarineTraffic, https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:149975/mmsi:538006199/imo:9472634/vessel:AMAX_ANTHEM#vesselCharacteristics.
- [49] C. Raucci, J. Calleya, S. S. De La Fuente and . R. Pawling, "Hydrogen on board ship: a first analysis of key parameters and implications," *International Conference on Shipping in Changing Climates 2015*, vol. 2015, 2015.
- [50] A. O'Neill, "Greece: Inflation rate from 1989 to 2029," Statista, 2024.
- [51] P. Dwivedi, K. Sudhakar, A. Soni, E. Solomin and I. Kirpichnikova, "Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 21, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674>
- [52] M. Jradi and S. Riffat, "Tri-generation systems: Energy policies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 396-415, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.039>

Παράρτημα



N-TYPE MONO CRYSTALLINE HALF CUT MODULE - BACK CONTACT TECHNOLOGY

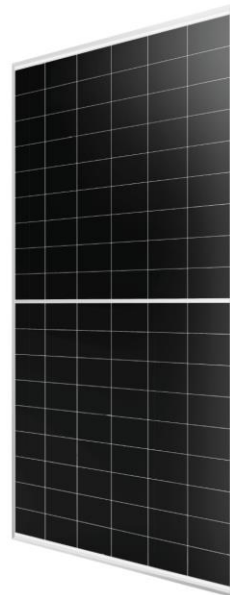
440 / 445 / 450 / 455 / 460 Watts

BLACK TIGER SERIES



Overview

Black Tiger modules provide numerous benefits to customers seeking a high-quality product with exceptional performance and aesthetic, captivating design. The "Black Tiger" module utilizes N-Type cell technology in conjunction with a rear connection method known as BackContact. As a result, there is 0% front grid shadow loss, which increases the PV module's yield. Due to reduced shading on the front of the cell, the module maximizes total cell area realizing higher efficiency and resulting in a fast return on investment.



Guaranteed mechanical resistance to severe weather conditions



Positive Tolerance



100 % electro-luminescence tested

Key Benefits



Zero Light Induced Degradation



25 Years Limited Product Warranty



0% Front Grid Shading Loss



Low Pmax Temperature Coefficient



Low LCOE

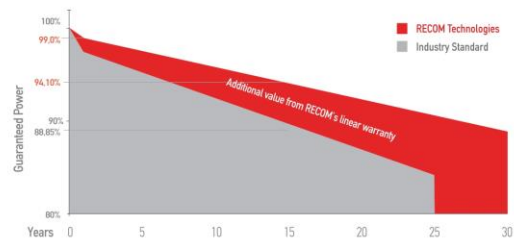


Higher Light Conversion

Tests, Certifications and Warranties

Standard Tests	IEC 61215, IEC 61730
Factory Quality Tests	ISO 9001: 2015, ISO 14001: 2015
Certifications	Conformity to CE, PV CYCLE Fire safety Class C according to UL790
Insurance	Third party liability insurance provided by Liberty Mutual
Wind and Snow Loads Testing	Module certified to withstand extreme wind (2400 Pascal) and snow loads (5400 Pascal)
Withstanding Hail	Maximum Diameter of 25 mm with impact speed of 23 m/s
Power Tolerance	Guaranteed +0/+5W (STC condition)
Warranties	<ul style="list-style-type: none"> 25-year limited product warranty 15-year manufacturer warranty on 94,10% of the nominal performance 30-year transferable linear power output warranty

Linear Performance Warranty



First Year Output $\geq 99.0\%$ | 2-30 Year Decline $\leq 0.35\%$ | 30 Year Output $\geq 88,85\%$

Black Tiger

N-TYPE MONO CRYSTALLINE HALF CUT MODULE - BACK CONTACT TECHNOLOGY

RCM-xxx-7RCG (xxx=440-460)

Electrical Characteristics

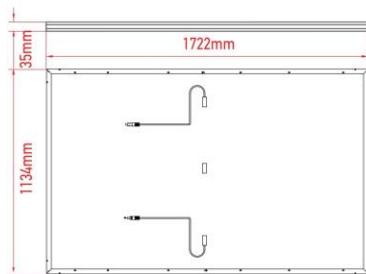
POWER CLASS ⁽¹⁾			440		445		450		455		460	
Testing Condition			STC ⁽²⁾	NMOT ⁽³⁾	STC	NMOT	STC	NMOT	STC	NMOT	STC	NMOT
Maximum Power	P _{max}	[Wp]	440	332	445	335	450	339	455	343	460	347
Maximum Power Voltage	V _{mp}	[V]	33.71	31.85	33.81	31.95	33.91	32.04	34.01	32.14	34.11	32.23
Maximum Power Current	I _{mp}	[A]	13.05	10.41	13.16	10.50	13.27	10.58	13.38	10.67	13.49	10.76
Open Circuit Voltage	V _{oc}	[V]	39.95	37.75	40.05	37.85	40.15	37.94	40.25	38.03	40.35	38.13
Short Circuit Current	I _{sc}	[A]	13.79	11.15	13.85	11.20	13.91	11.25	13.97	11.30	14.03	11.35
Module Efficiency	Eff	[%]	22.5		22.8		23.0		23.3		23.6	
Maximum Series Fuse	I _R	[A]	25									
Maximum System Voltage	V _{sys}	[V]	1500V DC (IEC)									

(1) Measurement Tolerances: P_{max} (± 3%), I_{sc} & V_{oc} (± 3%) - Power Classification 0/+5W
 (2) STC (Standard Testing Condition): Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, AM 1.5
 (3) NMOT (Nominal Operating Module Temperature): Irradiance 800W/m², NMOT, Ambient Temperature 20°C, AM 1.5, Wind Speed 1m/s

Mechanical Data

Dimensions	1722 mm x 1134 mm x 35 mm
Weight	22.2 Kg
Cell Type	RC-N-Type - 182mm x 91mm (2 x 54 Pcs) - G10
Front Glass	3.2 mm Tempered and low iron glass + Anti Reflective Coating
Rear Side	Anti-aging film
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68, 3 Bypass diodes
Connector	EVO2 compatible
Output cable	4mm ² - Length: 350 mm or can be customized

Dimensions



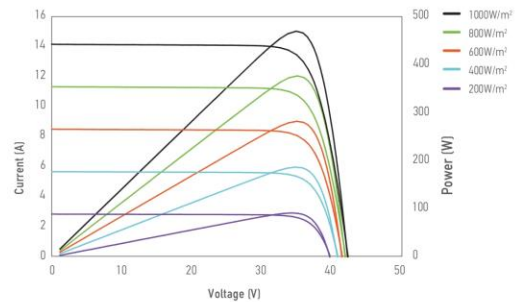
RECOM assumes no liability or responsibility for any typographical error, layout error, misinformation, any other error, omission, contained herein.

www.recom-tech.com

The specification and key features described in this datasheet may deviate slightly and are not guaranteed. Due to on-going innovation, research and product enhancement, RECOM Technologies reserves the right to make any adjustment to the information described herein at any time without notice. Please always obtain the most recent version of the datasheet which shall be duly incorporated into the binding contract made by the parties governing all transactions related to the purchase and sale of the products described herein. Please read the safety and installation instructions before using the modules.

I-V Curve

The module relative power loss at low light irradiance of 200W/m² is less than 3%.



Temperature Characteristics

P _{max} Temperature Coefficient	-0.29% / °C
V _{oc} Temperature Coefficient	-0.24% / °C
I _{sc} Temperature Coefficient	+0.05% / °C
Operating Temperature	-40 ~ +85 °C
Nominal Operating Module Temperature (NMOT)	42 ± 2 °C

Packing Configuration

Container	40' HC
Pieces per Pallet	31
Pallets per Container	26
Pieces per Container	(31+31)x13=806 pcs

Release: RCM-xxx-7RCGxxx-440-460-14-010-35-SW-15V-datasheet-2023-05-v1.0

© Copyright 2023, RECOM



C Series

Proton Exchange Membrane (PEM) Hydrogen Generation Systems



MODEL	C10	C20	C30
Description	On-site hydrogen generator in two integrated, automated, site-ready enclosures Load following operation automatically adjusts output 0 to 100% to match demand Full differential pressure, H ₂ over O ₂		
Electrolyte	Proton Exchange Membrane (PEM) – caustic-free		
HYDROGEN PRODUCTION			
Nominal Production Rate Nm ³ /h @ 0°C, 1 bar SCF/h @ 70°F, 1 atm kg/24 h	10 Nm ³ /h 380 SCF/h 21.6 kg/24 h	20 Nm ³ /h 760 SCF/h 43.3 kg/24 h	30 Nm ³ /h 1,140 SCF/h 65.0 kg/24 h
Delivery Pressure – Nominal	30 barg (435 psig)		
Power Consumption by System per Volume of H ₂ Gas Produced ¹	6.2 kWh/Nm ³ (16.3 kWh/100 ft ³)	6.0 kWh/Nm ³ (15.8 kWh/100 ft ³)	5.8 kWh/Nm ³ (15.2 kWh/100 ft ³)
Power Consumed per Mass of H ₂ Gas Produced ¹	68.9 kWh/kg	66.7 kWh/kg	64.5 kWh/kg
Purity (Concentration of Impurities)	ISO 14687-1 Type 1 grade C ISO 14687-2 Type 1 grade D 99.9998% [H ₂ O < 2 ppm, -72°C (-98°F) Dew Point, N ₂ < 2 ppm, O ₂ < 1 ppm, all others undetectable]		
Turndown Range	0 to 100% net product delivery (automatic)		
Upgradeability	Field upgradeable to a maximum of 30 Nm ³ /h (1,140 SCF/h)		N/A
DI WATER REQUIREMENTS			
Consumption Rate at Maximum Production	9 l/h (2.4 gal/h)	17.9 l/h (4.7 gal/h)	26.9 l/h (7.1 gal/h)
Temperature	5 to 40°C (41 to 104°F)		
Pressure	1.0 to 4.1 barg (10 to 60 psig)		
Input Water Quality	Required: ASTM Type II Deionized Water, < 1 μS/cm (> 1 MΩ-cm) Preferred: ASTM Type I Deionized Water, < 0.1 μS/cm (> 10 MΩ-cm)		
HEAT LOAD AND COOLANT REQUIREMENTS			
Coolant ²	Liquid cooled; non-freezing, non-fouling; 5 to 35°C (41 to 95°F)		
Maximum Heat Load (Cooling Requirement)	32 kW (109,189 BTU/h) (9.1 tons refrigeration)	64 kW (218,377 BTU/h) (18.2 tons refrigeration)	96 kW (327,566 BTU/h) (27.3 tons refrigeration)
Coolant Flow Rate	Up to 92 l/min (24.3 gal/min)	Up to 144 l/min (38 gal/min)	Up to 200 l/min (52.8 gal/min)
Pressure Drop (at Full Flow)	Up to ~1.1 barg (~14.5 psig)		
Maximum Pressure	4.1 barg (60 psig) continuous		
ELECTRICAL SPECIFICATIONS			
Maximum Power Required within Expected System Life	85 kVA	160 kVA	236 kVA
Electrical Requirements	380,400,415 VAC, three phase, 50 Hz (+/- 10% from nominal voltage) 480 VAC, three phase, 60 Hz (+/- 10% from nominal voltage)		

MODEL	C10	C20	C30	
INTERFACE CONNECTIONS – CONSULT MECHANICAL INTERFACE DIAGRAM DRAWING PD-9900-0039 FOR DETAILS				
H ₂ Product Port	3/8" compression tube fitting, SS			
H ₂ Vent Port	1" compression tube fitting, SS			
O ₂ Vent Port	1" compression tube fitting, SS			
DI Water Port	1/2" FNPT, SS			
Coolant Supply and Return Ports	Electrolyzer Enclosure: 1/2" MNPT, brass (Cell Stack); 1/2" FNPT, brass (Hydrogen Dryer) Power Supply Enclosure: 1/2" MNPT, brass (Power Supply Cooling)			
Drain Port	1/2" FNPT, brass			
Electrical	Electrical terminals at fused disconnect inside power supply enclosure			
Communications	Modbus TCP/IP, 24 VDC dry contacts			
CONTROL SYSTEMS				
Standard Features	<ul style="list-style-type: none"> Fully automated, push button start/stop Automatic fault detection and system depressurization E-stop 		<ul style="list-style-type: none"> Remote start/stop On-board H₂ leak detection Remote communications 	
Remote Alarm	Form C relay, 5 A, 250 V, 150 W Maximum rated switching			
Remote Shutdown	Safety circuit trip			
PHYSICAL CHARACTERISTICS				
Dimensions W x D x H	Product	Electrolyzer Enclosure: 252 cm x 116 cm x 201 cm (99" x 46" x 79") Power Supply Enclosure: 169 cm x 103 cm x 201 cm (67" x 41" x 79")		
	Est. Shipping	Electrolyzer Enclosure: 269 cm x 122 cm x 225 cm (106" x 48" x 89") Power Supply Enclosure: 269 cm x 122 cm x 225 cm (106" x 48" x 89")		
Weight	Product	2,734 kg (6,026 lbs)	2,924 kg (6,446 lbs)	3,076 kg (6,781 lbs)
	Est. Shipping	2,876 kg (6,340 lbs)	3,089 kg (6,810 lbs)	3,241 kg (7,145 lbs)
IP Rating	Overall unit rating of IP44			
ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS – DO NOT FREEZE				
Standard Siting Location	Indoor/sheltered; level ±1°, 0 to 100% RH non-condensing, non-hazardous/non-classified environment			
Storage/Transport Temperature	5 to 60°C (41 to 140°F)			
Ambient Temperature Range	5 to 40°C (41 to 104°F)			
Altitude Range – Sea Level	2,000 m (6,562 ft)			
Room Ventilation	Proper ventilation must be provided from a non-hazardous area, at a rate consistent with the cabinet ventilation rate listed below			
SAFETY AND REGULATORY CONFORMITY				
Maximum On-board H ₂ Inventory at Full Production	0.13 Nm ³ 4.9 SCF 0.011 kg	0.17 Nm ³ 6.4 SCF 0.015 kg	0.18 Nm ³ 7 SCF 0.016 kg	
Cabinet Ventilation with Environment	Vent fan draws fresh air up to 8.5 Nm ³ /min (300 ft ³ /min)			
Noise dB(A) at 1 Meter	< 75			
Conformity	cTUVus (UL and CSA equivalent), CE (PED, Mach. Dir., EMC), ISO22734-1			
OPTIONS				
<ul style="list-style-type: none"> Factory matched RO/DI water system Factory matched cooler/chiller Dew point monitoring 	<ul style="list-style-type: none"> Low ambient temperature package (-10°C to 40°C) 	<ul style="list-style-type: none"> High ambient temperature package (5°C to 50°C) 	<ul style="list-style-type: none"> Equipment orientation Current command 	



Specifications are subject to change. Please contact Nel Hydrogen for solutions to best fit your needs.

¹ Dependent on configuration and operating conditions.

² Consult Nel Hydrogen Applications Engineering Department for specific requirements and cooling water temperatures other than 35°C.

www.nelhydrogen.com | +1.203.949.8697 | info@nelhydrogen.com

MADE IN USA

© 2024 Nel ASA. All Rights Reserved. Nel and the Nel logo are trademarks of Nel ASA.



PD-0600-0068 Rev J



KEY FEATURES:

- Staged starting of motors
- Timed start-up (Prime, Init, Run)
- TDS monitoring of product water
- Automatically diverts water to the product tank below 500 PPM
- Programmable automatic Fresh Water Flush; or, convenient one-touch button for manual operation
- Overpressure protection (HP fault)
- Loss of Prime/Fouled Filter detection (LP fault)
- Available in Framed and Modular configurations

A FULL-FEATURED AND AFFORDABLE SOLUTION TO FIT YOUR NEEDS.

The Aquamiser+ Series offers programmable settings and remote display capability through an advanced control system. This full-featured affordable solution is ideal for meeting your water production needs. With outputs of 250–1,800 GPD this series will provide the safety and controls needed to operate both dependably and efficiently. The Aquamiser+ is available in framed, and modular configurations to be utilized in tight spaces and bulkheads. However, despite its small size, the expansive controls include a fully automatic Fresh Water Flush System for unattended maintenance. Scheduled flushes, once a week or more frequently, will help maintain and keep your watermaker fresh and ready for your next voyage.

For nearly three decades, FCI Watermakers has been pioneering technologies and manufacturing the most reliable, trouble-free watermaking systems for the offshore and boating industries. Each unit is manufactured and live-tested in our facility. Your system comes with peace of mind, and a readily available customer service and technical support team. Our worldwide service network ensures proper maintenance, and unrivaled satisfaction.

FEATURES WITH REMOTE DISPLAY

- Remote system control up to 150' away
- Readout of product TDS
- Automatic tank level controls
- Programmable times/set points and display settings



REMOTE DISPLAY

Allows you to monitor critical conditions of operation and execute fresh water flushes.

OPTIONAL EQUIPMENT / ACCESSORIES

- Dockside Treatment System (DTS)
- Filter Replacement Kit
- Pocket PPM Meter
- Ultra-Violet Sterilizer

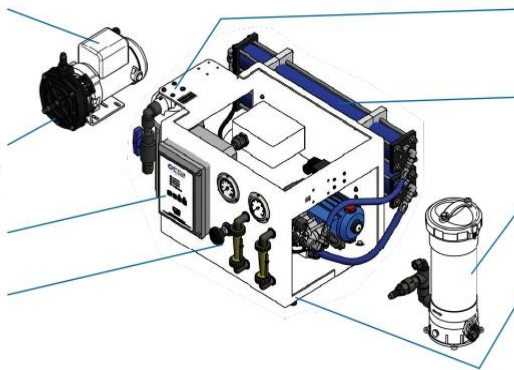


COMMERCIAL PRE-FILTER

Standard feature on 1,200 and 1,800 GPD units, and a no-cost upgrade for lower output systems when chosen at the time of order.

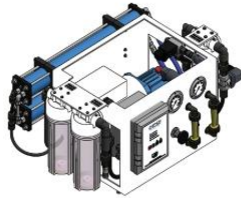
FEATURES

- **MOTORS:** TEFC Continuous-duty washdown rated motors with 316SS shaft, and sealed maintenance-free bearings for long life applications.
- **LP FEED PUMP:** Closed impeller design offers 50% more pressure efficiency over standard pumps.
- **ELECTRICAL:** NEMA 4X rated enclosure.
- **PRESSURE GAUGES & FLOW METERS:** Visual indicators aid troubleshooting.



- **FRESH WATER FLUSH:** Standard on all units with the ability to do weekly flushes.
- **MEMBRANES:** High Rejection non-proprietary membranes used to obtain the highest water quality of product water.
- **PRE-FILTER:** 40 sq. ft. of pleated filter with PVC core in addition to pressure alarming.
- **SHOCKMOUNTS:** Installed on frame and motor to reduce noise and vibration.

DIMENSIONS



UNIT WIDTH

Frame Only	24.75 in / 628.65 mm
with FWF Filter	31.50 in / 800.10 mm
with Membranes	47.00 in / 1193.80 mm

UNIT DEPTH

Frame Only	17.05 in / 433.07 mm
with Membranes	20.90 in / 530.86 mm

UNIT HEIGHT

Frame	14.75 in / 374.65 mm
-------	----------------------



LP PUMP

Width	7.30 in / 185.42 mm
Depth	15.95 in / 405.13 mm
Height	10.75 in / 273.05 mm



COMMERCIAL PRE-FILTER 1200-1800

Width	11.10 in / 281.94 mm
Depth	9.60 in / 243.83 mm
Height	20.50 in / 520.70 mm

AVAILABLE PRODUCT OPTIONS



COMMERCIAL PRE-FILTER 250-800

Width	11.10 in / 281.94 mm
Depth	9.60 in / 243.83 mm
Height	20.50 in / 520.70 mm



#93-6683

AQ3 REMOTE

Width	5.42 in / 137.67 mm
Depth	2.12 in / 53.85 mm
Height	4.11 in / 104.39 mm

REQUIREMENTS

UTILITIES

Inlet	Brine	Product	FWF
3/4" FNPT	1/2" Tube	3/8" Tube	1/2" Tube

ELECTRICAL

HP	KW	VAC	HZ	PH
1.5 (250-800) 2.5 (1200-1800)	1.49 (250-800) 2.24 (1200-1800)	120 / 208-240 / 380 / 480	50 / 60	1 / 3

MODEL	Weight (LBS / KG)	Seawater (GPD / LPD)	Seawater (GPH / LPH)	Commercial Filter Upgrade Available	Commercial Filter Standard	1.5 HP Drive	2.5 HP Drive	316SS High Pressure Pump	AQ3 Control System
A216S	190 / 86.18	250 / 946.35	10.41 / 39.41	☑		☑		☑	☑
A516S	200 / 91.72	500 / 1892.71	20.83 / 78.85	☑		☑		☑	☑
A616S	200 / 91.72	600 / 2271.25	25.00 / 94.64	☑		☑		☑	☑
A816S	220 / 99.79	800 / 3028.33	33.33 / 126.17	☑		☑		☑	☑
A1216S	225 / 102.06	1200 / 4542.49	50.00 / 189.27		☑		☑	☑	☑
A1816S	235 / 106.59	1800 / 6813.74	75.00 / 283.91		☑		☑	☑	☑

System Rated Based on Typical: Sea Water Conditions: Temperature 77° F / 25° C | TDS 32,000 | Pressure 825 PSI

The Filtration Concepts Incorporated, dba FCI Watermakers, General Terms and Conditions of Sale and applicable Warranty are incorporated herein and applicable to this Product. FCI's Customer Service Department can provide Purchaser with a copy of the General Terms and Conditions of Sale upon request.

©2023 FCI Watermakers