



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Μελέτη της ενεργειακής σύζευξης του πλοίου με το ηπειρωτικό
δίκτυο - Διερεύνηση περιβαλλοντικών και οικονομικών οφελών**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Χάνδακας Ιωάννης

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Ιανουάριος 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

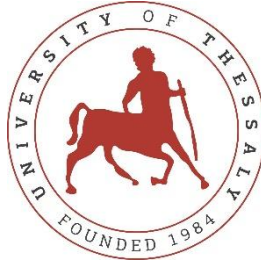
**Μελέτη της ενεργειακής σύζευξης του πλοίου με το ηπειρωτικό
δίκτυο - Διερεύνηση περιβαλλοντικών και οικονομικών οφελών**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Χάνδακας Ιωάννης

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Ιανουάριος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Study of the ship's energy shore connection - Investigation of
environmental and economic benefits**

MSc Thesis

Handakas Ioannis

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

January 2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Μπαργιώτας Δημήτριος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Πλέσσας Φώτιος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Ευμορφόπουλος Νέστωρ

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Χάνδακας Ιωάννης

21/01/2025

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this MSc thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Ioannis Handakas

21/01/2025

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα κύριο Δημήτριο Μπαργιώτα ο οποίος με την αμέριστη στήριξή του με βοήθησε καταλυτικά στην συγγραφή της. Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συνεχή στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Μελέτη της ενεργειακής σύζευξης του πλοίου με το ηπειρωτικό δίκτυο - Διερεύνηση περιβαλλοντικών και οικονομικών οφελών

Χάνδακας Ιωάννης

Περίληψη

Κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής ερευνήθηκε διεξοδικά η προοπτική της ενεργειακής αναβάθμισης του λιμένα του Βόλου. Ανάμεσα στις προτάσεις ήταν η απευθείας τροφοδότηση των σταθμευμένων πλοίων και σκαφών με ηλεκτρική ενέργεια ώστε να μην χρειάζεται να ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα χρησιμοποιώντας τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη τους. Επιπλέον εξετάστηκε, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά και τα εναλλακτικά καύσιμα χαμηλής ή μηδενικής περιεκτικότητας άνθρακα. Αφού δημιουργήθηκε το ενεργειακό προφίλ του λιμένα υπολογίστηκε πως η πιο συμφέρουσα λύση ήταν η εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων για την παραγωγή της απαραίτητης ηλεκτρικής ισχύος καθώς και η δημιουργία υποδομών ενεργειακής σύνδεσης των πλοίων και τον σκαφών με το μικροδίκτυο του λιμένα. Η υλοποίηση του συγκεκριμένου έργου αξιολογήθηκε τόσο οικονομικά, όσο και περιβαλλοντικά. Εμβαθύνοντας στα οικονομικά δεδομένα η υλοποίηση της συγκεκριμένης πρότασης θα παράγει ετήσια καθαρά έσοδα 825.080 ευρώ ενώ το συνολικό ισοζύγιο για όλη την διάρκεια ζωής του θα είναι 17.707.060 ευρώ. Η συγκεκριμένη πρόταση παραμένει ελκυστική ακόμη και με ένα Nominal Discount Rate ίσο με 7,88% αφού ακόμα και έτσι το Net Present Value είναι 5.978.606 ευρώ. Πέρα όμως από τα οικονομικά οφέλη που θα προκύψουν σημαντική κρίνεται και η περιβαλλοντική συνεισφορά του. Εκτιμάται ότι από την υλοποίηση του έργου και έπειτα τα πλοία που ελλιμενίζονται θα μειώσουν την κατανάλωσή τους κατά 117,26 τόνους πετρελαίου diesel ανά έτος. Αυτό σημαίνει ότι η ατμόσφαιρα της τοπικής κοινωνίας θα ελαφρυνθεί από εκπομπές 375,95 τόνων CO₂ ετησίως.

Λέξεις-κλειδιά:

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενεργειακή σύνδεση πλοίου-λιμένα, φωτοβολταϊκά, τεχνοοικονομική μελέτη, προστασία περιβάλλοντος

Study of the ship's energy shore connection - Investigation of environmental and economic benefits

Handakas Ioannis

Abstract

During the preparation of this thesis, the prospect of the energy upgrade of the port of Volos was thoroughly investigated. Among the proposals was the direct supply of parked ships and boats with electricity so that they do not have to pollute the atmosphere by using their power generating sets. In addition, the use of renewable energy sources was examined, as well as alternative fuels with low or zero carbon content. After the energy profile of the port was created, it was calculated that the most advantageous solution was the installation of PV systems to produce the necessary electrical power as well as the creation of infrastructure for the energy connection of ships and boats with the port's microgrid. The implementation of this specific project was deemed economically viable. A technical description of the project and the equipment that will be required was also carried out. Going deeper into the financial data, the implementation of this proposal was evaluated both in economic and environmental terms. Going deeper into the financial data, the implementation of this proposal will generate annual net income of 825,080 euros, while the total balance for its entire life will be 17,707,060 euros. This proposal remains attractive even with a Nominal Discount Rate equal to 7.88% since even so the Net Present Value is 5,978,606 euros. However, beyond the financial benefits that will arise, its environmental contribution is also considered significant. It is estimated that from the implementation of the project onwards, the ships that dock will reduce their consumption by 117.26 tons of diesel oil per year. This means that the atmosphere of the local community will be relieved of 375.95 tons of CO₂ emissions per year.

Keywords:

Environmental analysis, HOMER Pro, shore connection, techno-economic analysis, MATLAB, pvgis, photovoltaic

Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες</i>	<i>xiii</i>
<i>Περίληψη</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvii</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων</i>	<i>xix</i>
<i>Κατάλογος εικόνων</i>	<i>xxi</i>
<i>Κατάλογος σχημάτων</i>	<i>xxii</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	<i>xxiii</i>
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	1
1.2 Οργάνωση της διπλωματικής	2
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση προτεινόμενων τεχνολογιών και κριτηρίων αξιολόγησης	3
2.1 Ενεργειακή σύζευξη πλοίου λιμένα	3
2.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα	5
2.3 Ανεμογεννήτριες.....	6
2.4 Σταθμός επαναεριοποίησης υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG).....	8
2.5 Σταθμός παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής υδρογόνου	9
2.6 Αποθήκευση και διαχείριση ενέργειας.....	10
2.7 Κριτήρια οικονομικής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης	11
Κεφάλαιο 3 Case Study (Λιμάνι Βόλου)	12
3.1 Ενεργειακές ανάγκες για πλοία	12
3.2 Υπάρχουσα Ηλεκτρομηχανολογική Εγκατάσταση	12
3.3 Ανάλυση Ηλεκτρικού Φορτίου	14
3.4 . Ενεργειακές ανάγκες για σκάφη.....	17
3.5 . Σύνολο ενεργειακών αναγκών λιμένα	18
Κεφάλαιο 4 Εύρεση βέλτιστου συνδυασμού παραγωγικών πηγών	19
4.1 Δημιουργία Load Profile για τον λιμένα Βόλου	19
4.2 Δημιουργία μοντέλου στο HOMER Pro	21
4.3 Αποτελέσματα HOMER Pro	22
Κεφάλαιο 5 Μελέτη εγκατάστασης των τεχνολογιών	23
5.1 Ενεργειακή σύζευξη πλοίου - λιμένα	23

5.2 Net Metering	24
5.3 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος	26
5.4 Εκτίμηση παραγόμενης ισχύος.....	28
Κεφάλαιο 6 Υπολογισμός οφελών από την εφαρμογή των προτεινόμενων τεχνολογιών	30
6.1 Υπολογισμός οικονομικών οφελών	30
6.2 Υπολογισμός περιβαλλοντικών οφελών	32
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα.....	35
Βιβλιογραφία.....	37

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2. 1 : Παράδειγμα ηλεκτρικής σύνδεσης πλοίου-λιμένα.....	4
Εικόνα 2.2 : Παράδειγμα μηχανισμού ανεμογεννήτριας [14].....	7
Εικόνα 3. 1 : Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος Wartsila 6L20.....	13
Εικόνα 3.2 : Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος Caterpillar C4.4	13
Εικόνα 4. 1 : Μέγιστο ημερήσιο προφίλ ισχύος ανά μήνα (kW).....	20
Εικόνα 4. 2 : Load Profile κάθε μήνα συναρτήσει με την ώρα	20

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2.1 : Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου	5
Σχήμα 2. 2 : Αναλυτική αναπαράσταση συστήματος επαναεριοποίησης	9
Σχήμα 4. 1 : Εξεταζόμενοι παραγωγικοί συνδυασμοί.....	21
Σχήμα 5. 1: Μονογραμμικό σχέδιο σύνδεσης Φ/Β πάνελ.....	27
Σχήμα 5. 2: Μηνιαία παραγωγή Φ/Β πάρκου	29

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 3. 1 : Ανάλυση ηλεκτρικού φορτίου συμβατικού πλοίου σε κατάσταση φορτώσεως-εκφορτώσεως	15
Πίνακας 3. 2 : Ανάλυση ηλεκτρικού φορτίου συμβατικού πλοίου σε κατάσταση στάσης σε λιμάνι.....	16
Πίνακας 3. 3: Ανάλυση ηλεκτρικού φορτίου ταχύπλοου σε κατάσταση στάσης σε λιμάνι	17
Πίνακας 3. 4: Ενεργειακές ανάγκες των πλοίων ανά μήνα σε (kWh).....	17
Πίνακας 3. 5: Ενεργειακές ανάγκες των σκαφών ανά μήνα σε (kWh)	18
Πίνακας 3.6: Ενεργειακές ανάγκες λιμένα ανά μήνα σε (kWh)	18
Πίνακας 4. 1 : Στοιχεία μοντέλου HOMER Pro.....	22
Πίνακας 5. 1: Στοιχεία μετασχηματιστή.....	24
Πίνακας 5. 2: Στοιχεία Φ/Β πάνελ	26
Πίνακας 5. 3: Στοιχεία αντιστροφέα	28
Πίνακας 5. 4: Δεδομένα εισόδου pngis	28
Πίνακας 5. 5: Δεδομένα εξόδου pngis.....	29
Πίνακας 6. 1: Τιμές προσομοίωσης.....	31
Πίνακας 6. 2: Αποτελέσματα προσομοίωσης	32
Πίνακας 6. 3: Παραδοχές για υπολογισμό καυσαερίων.....	32

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η ισχύουσα κατάσταση στο χώρο της εμπορικής ναυτιλίας σχετικά με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς που ισχύουν και αυτούς που πρόκειται να επιβληθούν. Περαιτέρω, θα αναλυθεί το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.

Τα τελευταία χρόνια η προστασία του περιβάλλοντος θεωρείται παράγοντας ύψιστης σημασίας για την πλειοψηφία των χωρών. Πληθώρα κρατών και διεθνών οργανισμών όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση και ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχουν επιβάλει νέους κανονισμούς για την προστασία του περιβάλλοντος και ιδιαίτερα την μείωση των ρύπων. Πιο συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Ένωση στοχεύει σε μείωση κατά 55% (σε σχέση με τα επίπεδα του 1990) των αερίων του θερμοκηπίου έως το 2030 και σε μηδενισμό των εκπομπών έως το 2050 [1]. Επιπλέον, στόχοι έχουν τεθεί για τον κλάδο της ναυτιλίας από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό που στοχεύει σε μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) κατά 40% μέχρι το 2030 και κατά 70% έως το 2050 συγκριτικά με τις εκπομπές του 2008 [2]. Αυτή η ανάγκη για περικοπή των εκπομπών έχει οδηγήσει τόσο τις ναυτιλιακές εταιρείες όσο και τους οργανισμούς διαχείρισης λιμένων σε αναζήτηση τεχνολογιών που με την εγκατάστασή τους θα συμβάλλουν στην μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Οι ναυτιλιακές εταιρείες επικεντρώνονται σε εναλλακτικά καύσιμα όπως η αμμωνία (22,5 MJ/kg), η μεθανόλη (19,9 MJ/kg) και το υδρογόνο (120,2 MJ/kg) [3] ενώ οι οργανισμοί διαχείρισης λιμένων σχεδιάζουν την εγκατάσταση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνδυασμό με συστήματα αποθήκευσης που θα δώσουν τη δυνατότητα να καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες, να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ισχύ τα ελλιμενισμένα πλοία καθώς και την παραγωγή εναλλακτικών καυσίμων όπως το υδρογόνο με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο. Αυτές οι τεχνολογίες θα αναλυθούν στη συγκεκριμένη μελέτη καθώς και η δυνατότητά εγκατάστασής τους στο λιμένα του Βόλου.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Το εξεταζόμενο θέμα αυτής της μελέτης είναι η ενεργειακή διασύνδεση των ακτοπλοϊκών πλοίων καθώς και των σκαφών αναψυχής με το χερσαίο ηλεκτρικό δίκτυο και πιο

συγκεκριμένα το δίκτυο του λιμανιού. Πιο αναλυτικά, θα υπολογιστεί η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών των επιβατικών πλοίων καθώς και των σκαφών αναψυχής στον λιμένα του Βόλου. Περαιτέρω θα ερευνηθεί η ιδιοπαραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για λογαριασμό του λιμένα και θα προταθεί ο βέλτιστος συνδυασμός παραγωγικών πηγών και αποθηκευτικών μέσων. Επιπλέον, θα εξεταστεί η ενδεχόμενη εγκατάσταση σταθμού επαναεριοποίησης υδροποιημένου αερίου και σταθμός παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής υδρογόνου. Στη συνέχεια θα διερευνηθούν τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη για τον λιμένα καθώς και την ευρύτερη περιοχή.

1.2 Οργάνωση της διπλωματικής

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση των προτεινόμενων τεχνολογιών.

Κεφάλαιο 3: Υπολογισμός καταναλώσεων επιβατικών πλοίων και σκαφών στον λιμένα του βόλου.

Κεφάλαιο 4: Με τη χρήση του λογισμικού Homer Pro δημιουργήθηκε ένα Load Profile για τον λιμένα και εν συνεχεία διερευνήθηκε ο βέλτιστος συνδυασμός παραγωγικών πηγών για την κάλυψη αυτού του Load Profile.

Κεφάλαιο 5: Μελέτη εγκατάστασης των επιλεγόμενων τεχνολογιών.

Κεφάλαιο 6: Υπολογισμός των οικονομικών και περιβαλλοντικών οφελών της παρούσας μελέτης.

Κεφάλαιο 7: Τα εξαγόμενα συμπεράσματα παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο.

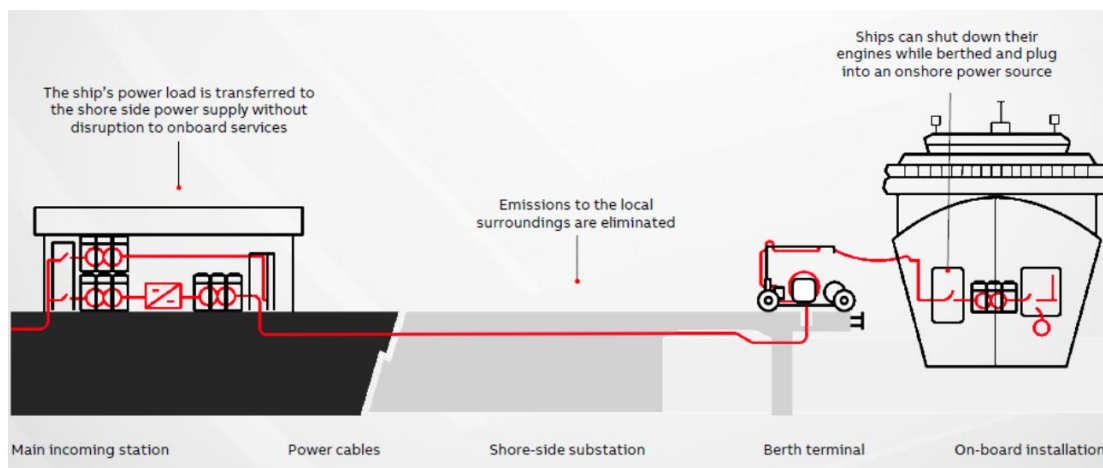
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση προτεινόμενων τεχνολογιών και κριτηρίων αξιολόγησης

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση για την μελέτη. Πιο συγκεκριμένα θα αναλυθούν θεωρητικά οι προτεινόμενες τεχνολογίες. Εν συνεχεία θα παρουσιαστούν τα οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης αυτής της ενεργειακής πρότασης.

2.1 Ενεργειακή σύζευξη πλοίου λιμένα

Μεγάλος αριθμός πλοίων και ειδικά ακτοπλοϊκών ελλιμενίζονται και διανυκτερεύουν καθημερινά σε λιμάνια. Παρά το γεγονός πως οι ενεργειακές τους ανάγκες μειώνονται σημαντικά κατά το διάστημα του ελλιμενισμού τους συνεχίζουν να καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη αναγκών σχετιζόμενων κυρίως με το ξενοδοχειακό τους. Για την κάλυψη αυτών των ενεργειακών αναγκών κατά την παραμονή τους στους λιμένες τα πλοία χρησιμοποιούν ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη που συνήθως λειτουργούν με την καύση diesel ή υδροποιημένου φυσικού αερίου. Η λειτουργία τους συνοδεύεται με οικονομικά και περιβαλλοντικά μειονεκτήματα, από οικονομικής πλευράς η κατανάλωσή τους σε καύσιμο είναι ιδιαίτερα ασύμφορη, ενώ η παρατεταμένη χρήση τους οδηγεί σε συχνότερη συντήρηση και περισσότερες επισκευές. Ταυτόχρονα η χρήση τους θεωρείται ιδιαίτερα επιβαρυντική και για το περιβάλλον αφού η ευρύτερη περιοχή του λιμένα έχει να αντιμετωπίσει επιπλέον ατμοσφαιρική ρύπανση αλλά και ηχορύπανση. Πολλοί ερευνητές θέλοντας να περιορίσουν το περιβαλλοντικό αντίκτυπο τις ναυτιλίας καθώς και να μειώσουν τα προαναφερθέντα κόστη εστιάζουν τις έρευνές στην ενεργειακή σύνδεση του πλοίου με το χερσαίο ηλεκτρικό δίκτυο, έτσι δίνεται στο πλοίο η πρόσβαση στην αγορά ενέργειας από το δίκτυο η οποία είναι αισθητά φθηνότερη αλλά και πιο φιλική προς το περιβάλλον σε σχέση με την λειτουργία των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών. Την ίδια στιγμή μειώνονται και οι ώρες χρήσης των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών περιορίζοντας έτσι την καταπόνησή τους που συνεπάγεται με λιγότερες βλάβες και συντήρηση. Στην Εικόνα 2.1 [4] παρατίθεται ένα παράδειγμα ηλεκτρικής σύνδεσης του πλοίου με το χερσαίο ηλεκτρικό

δίκτυο. Πιο αναλυτικά απεικονίζονται οι μετασχηματιστές που μετατρέπουν την τάση στο επιθυμητό επίπεδο, αρχικά από υψηλή σε μέση και εν συνεχεία σε χαμηλή τάση. Περαιτέρω διακρίνονται και οι διακόπτες τόσο στο πλοίο όσο και στη στεριά. Σε πολλές περιπτώσεις απαραίτητη κρίνεται και η εγκατάσταση ενός μετατροπέα συχνότητας καθώς η πλειοψηφία των εμπορικών πλοίων λειτουργεί με 60 Hz ενώ το ευρωπαϊκό δίκτυο είναι 50 Hz [5].

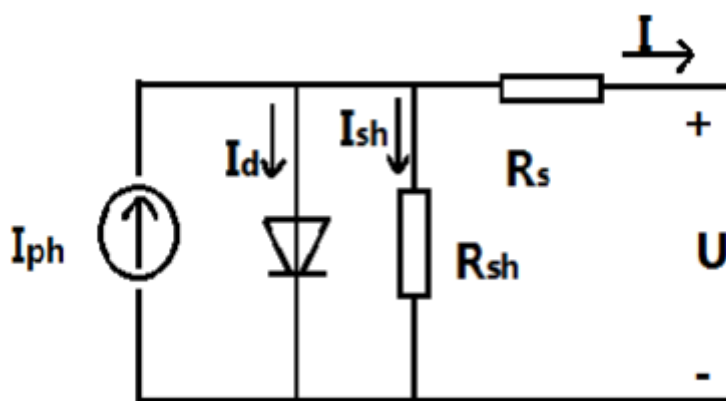


Εικόνα 2. 1 : Παράδειγμα ηλεκτρικής σύνδεσης πλοίου-λιμένα

Τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την αξιοποίηση της ηλεκτρικής σύνδεσης των πλοίων με το ηλεκτρικό δίκτυο της στεριάς έχουν μελετηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια από μεγάλο αριθμό ερευνητών. Μια από αυτές τις μελέτες σχετικά με το λιμάνι του Kaohsiung στην Ταϊβάν [6] έδειξε ότι η εφαρμογή του cold ironing δύναται να επιτύχει μείωση 57,16% στις εκπομπές CO₂ και 39,4% στα PM. Σε μια άλλη ερευνητική εργασία σχετικά με την ενεργειακή διασύνδεση σε λιμένες του Ηνωμένου Βασιλείου [7] υποστηρίζει πως είναι εφικτή η μείωση κατά 10% των εκπομπών άνθρακα και κατά 2% των εκπομπών διοξειδίου του θείου SO₂. Παρόμοια έρευνα σχετικά με την ηλεκτρική σύνδεση [8] έδειξε πως για τα πλοία ξηρού φορτίου υπάρχει οικονομικό όφελος όταν η τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερη από 0,19 \$/kWh και ότι δύναται να μειωθεί το κόστος ενέργειας του πλοίου έως και 75% κατά την παραμονή του στο λιμένα.

2.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Η χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων εστιάζει στη μετατροπή της προσφερόμενης από τον ήλιο ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η επίτευξη αυτής της μετατροπής οφείλεται στην αξιοποίηση του φωτοβολταϊκού (Φ/Β) φαινομένου. Υπάρχουν δύο κατηγορίες Φ/Β συστημάτων, τα ανεξάρτητα Φ/Β τα οποία δεν είναι συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο και αυτά που είναι συνδεδεμένα. Στην προκειμένη περίπτωση τα Φ/Β που θα εξετασθούν θα είναι συνδεδεμένα και στο δίκτυο για να υπάρχει η δυνατότητα πώλησης της πλεονάζουσας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα Φ/Β σύστημα αποτελείται από το Φ/Β πάνελ που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, τον αντιστροφέα που μετατρέπει αυτήν την τάση σε εναλλασσόμενη και το σύστημα διαχείρισης και παρακολούθησης. Επιπλέον σε πολλές εφαρμογές προστίθενται και συσσωρευτές ηλεκτρικής ισχύος για την αποθήκευση και καλύτερη αξιοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 2.1 [9] παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός Φ/Β στοιχείου, το οποίο αποτελείται από μια πηγή σταθερού ρεύματος I_{ph} , μια ιδανική δίοδο, μια αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος R_{sh} η οποία τοποθετείται παράλληλα στη δίοδο καθώς και μια αντίσταση απωλειών στον κλάδο που ακολουθεί το ρεύμα της διόδου R_s .



Σχήμα 2.1 : Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου

Το I_{ph} είναι συνεχές ρεύμα που παράγεται από το Φ/Β φαινόμενο, το I είναι η έξοδος ρεύματος από το Φ/Β στοιχείο και το U είναι η τάση εξόδου του Φ/Β στοιχείου.

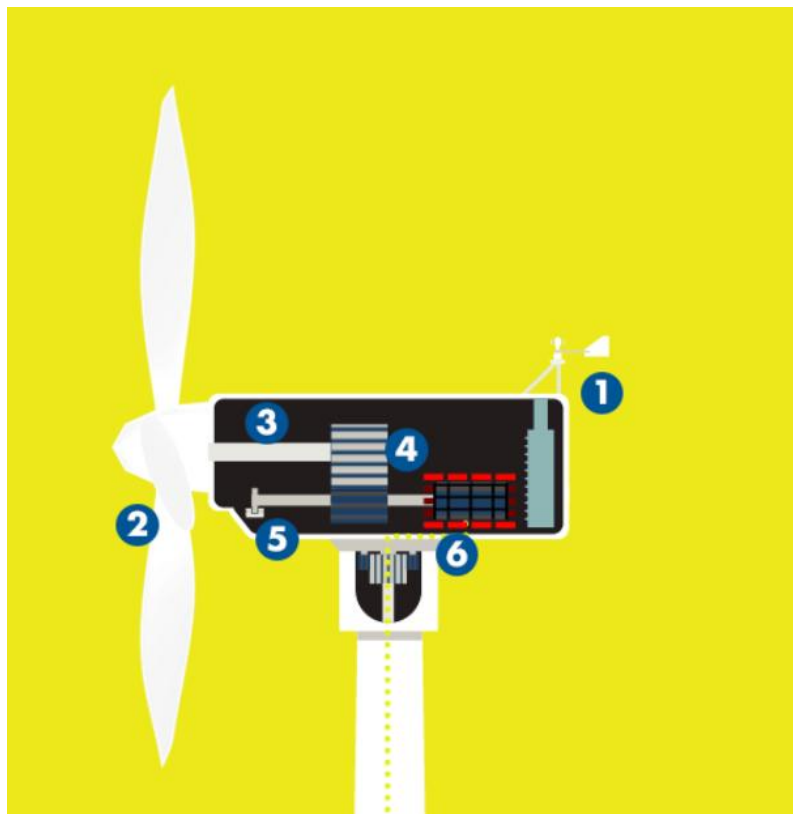
Η εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων είναι μια προοπτική που έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τον χώρο της ναυτιλίας τόσο σε επίπεδο πλοίου, όσο και για την χρήση σε λιμένα. Έρευνα για λιμένα με υποδομές ενεργειακής διασύνδεσης έδειξε πως η εκπομπές διοξειδίου του

άνθρακα από 0,591 kg CO₂/kWh, μειώθηκαν σε 0,444 kgCO₂/kWh [10]. Μια ακόμη μελέτη προτείνει την εισαγωγή Φ/Β συστημάτων στο μικροδίκτυο του λιμένα οι οποίες θα μπορούν να τροφοδοτούν τόσο τις εγκαταστάσεις του λιμένα όπως τους γερανούς, όσο και τα προσδεμένα σε αυτόν πλοία [11]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το κόστος ηλεκτροδότησης μειώνεται από 13,78% έως και 20,66%. Σε μελέτη βελτιστοποίησης εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε λιμένα, αποδεικνύεται πως με 550 kWp εξασφαλίζεται μείωση 20% στο κόστος ενέργειας. Με τη συγκεκριμένη εγκατεστημένη ισχύ καλύπτεται το 50% των ενεργειακών αναγκών και για μεγαλύτερη ισχύ δεν φαίνεται να αυξάνεται αρκετά το NPV ώστε να την δικαιολογήσει. Σε συνέχεια της έρευνας διερευνήθηκε η πιθανότητα στα 550 kWp να προστεθεί σύστημα αποθήκευσης ενέργειας χωρητικότητας 250 kWh και υπολογίστηκε πως δύναται να μειωθεί επιπλέον 8.93% το κόστος της ενέργειας [12]. Μια μελέτη για τον λιμένα Jabel Ali των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων έδειξε πως η εγκατάσταση Φ/Β πάνελ μπορεί να μειώσει κατά 10,5% το κόστος της ενέργειας [13].

2.3 Ανεμογεννήτριες

. Η χρήση της αιολικής ενέργειας εντοπίζεται από την αρχαιότητα καθώς οι άνθρωποι αξιοποιούσαν αυτήν την μορφή ενέργειας για να παράξουν ωφέλιμο έργο διευκολύνοντας έτσι πολλές εργασίες τους. Το μέσο αξιοποίησης αυτής της ενέργειας ήταν οι ανεμόμυλοι, οι οποίοι διέθεταν πτερύγια πακτωμένα σε έναν κάθετο άξονα. Η ενέργεια του ανέμου μεταφερόταν στα πτερύγια, τα οποία περιστρέφαν τον κάθετο άξονα παράγοντας έργο το οποίο με ένα σύστημα γραναζιών μεταφερόταν στο άνω μέρος του μύλου για να αλεσθούν τα σιτηρά. Με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν και οι ανεμογεννήτριες καθώς οι περισσότερες είναι πακτωμένες στο έδαφος, κάθετου άξονα και τριών πτερυγίων. Αναλυτικότερα υπάρχει ένας κάθετος άξονας χαμηλής ταχύτητας ο οποίος συνδέεται με τον άξονα υψηλής ταχύτητας με τη συμβολή ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Ο άξονας υψηλής ταχύτητας είναι συνδεδεμένος με την γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος. Η χρήση του κιβωτίου ταχυτήτων συμβάλει στην ορθή ρύθμιση των στροφών της γεννήτριας και δίνει την δυνατότητα στην ανεμογεννήτρια να λειτουργεί και να παράγει ηλεκτρική ισχύ σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου αφού δίνει την δυνατότητα στον άξονα υψηλής ταχύτητας ο οποίος είναι άμεσα συνδεδεμένος με την γεννήτρια να περιστραφεί στην ενδεδειγμένη

για τη γεννήτρια ταχύτητα. Η ρύθμιση της ταχύτητας δύναται να επιτευχθεί και με τη χρήση πτερυγίων μεταβλητού βήματος, βελτιώνοντας ταυτόχρονα και την απόδοση της ανεμογεννήτριας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ένας μηχανισμός με γρανάζια περιστρέφει τα πτερύγια και ρυθμίζει την γωνία με την οποία προσπίπτει ο άνεμος στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Μια ακόμη λύση για την αύξηση της απόδοσης είναι η τοποθέτηση ενός ανεμοδείκτη σε συνδυασμό με έναν μηχανισμό περιστροφής της ανεμογεννήτριας, ώστε τα πτερύγια να βρίσκονται πάντα στην κατάλληλη θέση εκμεταλλευόμενη πλήρως την αιολική ενέργεια ανεξαρτήτως της διεύθυνσεως του ανέμου. Για αύξηση της ασφάλειας του συστήματος εγκαθίσταται ένα φρένο ώστε να σταματάει την περιστροφή των πτερυγίων σε ταχύτητες ανέμου που μπορούν να αυξήσουν τις στροφές της γεννήτριας πάνω από τα επιτρεπτά όρια. Ένα σύστημα ανεμογεννήτριας παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2 όπου τα κυριότερα μέρη αριθμούνται ως εξής: Ανεμοδείκτης 1, πτερύγια 2, άξονας χαμηλής ταχύτητας 3, κιβώτιο ταχυτήτων 4, άξονας υψηλής ταχύτητας 5, γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος 6



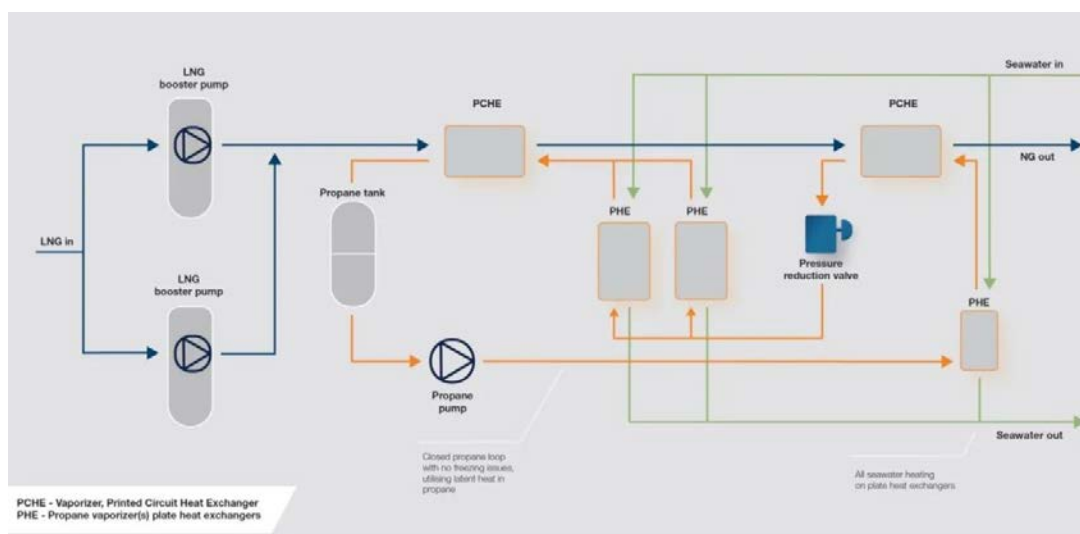
Εικόνα 2.2 : Παράδειγμα μηχανισμού ανεμογεννήτριας [14]

Ένα μεγάλο μέρος την ακαδημαϊκής ενεργειακής και περιβαλλοντικής κοινότητας έχει στρέψει την προσοχή του στις δυνατότητες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μεταξύ αυτών και στην αιολική ενέργεια. Έτσι, μεγάλο μέρος της επιστημονικής βιβλιογραφίας που αφορά την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των λιμένων περιλαμβάνει τις ανεμογεννήτριες ως προτεινόμενη λύση. Ερευνητική εργασία για τον λιμένα Jabel Ali των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων απέδειξε πως η εγκατάσταση ανεμογεννητριών δύναται να μειώσει κατά 21% το κόστος ενέργειας και σε συνδυασμό με Φ/Β συστήματα το κόστος ενέργειας μπορεί να μειωθεί αθροιστικά έως και 31.8% [13]. Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε για τον λιμένα της Damietta στην Αίγυπτο [15] με έναν συνδυασμό fuel cells (67,9%) και ανεμογεννητριών επιτευχθεί μείωση των εκπομπών CO₂, NO_x και CO κατά 32.176, 53.2 και 8,32 τόνους ετησίως καθώς και μείωση του κόστους ενέργειας σε 0,11 \$/kWh. Σε άλλη ερευνητική εργασία μελετήθηκαν δεδομένα τριών ετών για εκπομπές καυσαερίων στον λιμένα της Cartagena. Τα δεδομένα έδειξαν ότι κατά μέσο όρο κάθε έτος εκπέμπονται 242.133 τόνοι CO₂, 3.871 τόνοι NO_x, 759 τόνοι SO₂ και 562 τόνοι CO. Η έρευνα έδειξε πως αν το λιμάνι τροφοδοτούταν από ανεμογεννήτριες θα ήταν ισοδύναμο μέτρο ως προς τις εκπομπές CO₂ με την απομάκρυνση 178.000 αυτοκινήτων από τους δρόμους της πόλης [16].

2.4 Σταθμός επαναεριοποίησης υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG)

Ένα από τα καύσιμα που κερδίζει ολοένα και μεγαλύτερο μερίδιο της ενεργειακής αγοράς είναι το φυσικό αέριο, του οποίου η ζήτηση αναμένεται να αυξηθεί έως και 25% μέχρι το 2025 σε σχέση με τα επίπεδα του 2013 [17]. Για διευκόλυνση της μεταφοράς του το φυσικό αέριο υγροποιείται. Η υγροποίησή του επιτυγχάνεται με ψύξη στους -162 °C, έτσι καταλαμβάνει 600 φορές λιγότερο όγκο κάνοντας εφικτή την μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων. Αφού το υγροποιημένο φυσικό αέριο μεταφερθεί στις εγκαταστάσεις του λιμένα είτε αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές είτε επαναεριοποιείται και τροφοδοτείται στο δίκτυο φυσικού αερίου. Συνήθως οι σταθμοί επαναεριοποίησης είναι πλωτοί (Floating Storage Regasification Unit – FSRU) δηλαδή χρησιμοποιούνται πλοία που έχουν ναυπηγηθεί για να μεταφέρουν (LNG). Αυτό συμβαίνει γιατί το κόστος μιας μόνιμης παράκτιας μονάδας με υποδομές αποθήκευσης και μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου σε συνδυασμό με την κατασκευή αποβάθρας είναι ιδιαίτερα υψηλό. Συγκριτικά το κόστος αγοράς και

μετατροπής ενός LNGC είναι μικρότερο από 30% έως 50% [18]. Εμβαθύνοντας στη σύγκριση των δύο διαφορετικών ειδών σταθμών επαναεριοποίησης φυσικού αερίου βλέπουμε ότι οι πλωτοί σταθμοί έχουν δείκτη επιστροφής επένδυσης μεγαλύτερο του 12%, ενώ μια μόνιμη μονάδα έχει αρνητικό δείκτη εάν δεν επέμβει η κυβέρνηση με την επιβολή φόρου [19]. Για να μετατραπούν αυτά τα πλοία ενσωματώνεται ένα σύστημα επαναεριοποίησης το οποίο θερμαίνει το LNG με προπάνιο το οποίο θερμαίνεται με νερό θαλάσσης. Μια αναλυτική αναπαράσταση του συστήματος δίνεται στο Σχήμα 2.2 [20].



Σχήμα 2. 2 : Αναλυτική αναπαράσταση συστήματος επαναεριοποίησης

2.5 Σταθμός παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής υδρογόνου

Λόγω των νέων περιβαλλοντικών κανονισμών που επιβάλλουν δραστική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα η ναυτιλιακή βιομηχανία εξετάζει εναλλακτικά καύσιμα και εναλλακτικές μορφές πρόωσης στοχεύοντας στον περιορισμό του αποτυπώματος άνθρακα. Ως επικρατέστερη λύση φαντάζει η χρήση του υδρογόνου του οποίου η καύση παράγει μηδενικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα ενώ έχει σχεδόν τριπλάσια ενεργειακή πυκνότητα από τα υπάρχοντα καύσιμα (120,2 MJ/kg) [3]. Για να έχει νόημα όμως η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων πρέπει το υδρογόνο να παράγεται οικολογικά δηλαδή η ενέργεια που δαπανάται για την ηλεκτρόλυση του νερού πρέπει να προέρχεται μόνο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (πράσινο υδρογόνο). Μελέτη σχετικά με την απανθρακοποίηση του τομέα της ναυτιλίας για τις επόμενες δεκαετίες έδειξε ότι η καλύτερη οικονομική επιλογή είναι η κυψέλες υδρογόνου και ακολουθούν οι μηχανές εσωτερικής

καύσης που χρησιμοποιούν υδρογόνο. Πιο αναλυτικά, η σύγκριση περιλάμβανε τρία είδη ναυτιλίας, ακτοπλοΐα, ποντοπόρο και πλοία εμπορευματοκιβωτίων. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε δύο φορές μίας για τον προβλεπόμενο φόρο των 61 €/tCO₂ το 2030 και μια για 75 €/tCO₂ το 2040 [21]. Στην προσομοίωση του 2030 για την ακτοπλοΐα οι κυψέλες υδρογόνου ήταν 6% πιο φτηνές από το συμβατικό καύσιμο, ενώ οι μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου ήταν 2% πιο ακριβές. Για την ποντοπόρο το κόστος ήταν αντίστοιχο για τις κυψέλες και 6% πιο ακριβό για τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Ενώ για τα πλοία εμπορευματοκιβωτίων το κόστος ήταν μεγαλύτερο κατά 2% και 5% αντίστοιχα. Στην προσομοίωση του 2040 με τον αυξημένο φόρο άνθρακα το υδρογόνο υπερτερούσε σε κάθε κατηγορία καθώς ήταν φθηνότερο από 7% έως 19%, με τις κυψέλες υδρογόνου να είναι πάλι πιο οικονομικές από τις μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου [22]. Για αυτούς τους λόγους σε αρκετά λιμάνια εξετάζεται το ενδεχόμενο εγκατάστασης σταθμού παραγωγής και διανομής πράσινου υδρογόνου το οποίο θα ψύχεται στους -253°C ώστε να καταλαμβάνει λιγότερο όγκο και να αποθηκεύεται σε χαμηλή πίεση. Μελέτη που προσομοίωσε με την χρήση του λογισμικού HOMER PRO τον συνδυασμό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενεργειακής σύνδεσης πλοίου λιμένα και την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας με την παραγωγή υδρογόνου και την παραγωγή ενέργειας μέσω κυψελών υδρογόνου όταν αυτή χρειάζεται. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το αποτύπωμα άνθρακα του λιμένα μειώθηκε κατά 51,8% ενώ το κόστος ενέργειας μειώθηκε κατά 41,2%. Περαιτέρω αποδείχθηκε πως το λιμάνι μπορεί να είναι ενεργειακά αυτόνομο για μία μέρα και πως η πρόταση είναι υλοποιήσιμη ακόμη και για μικρούς λιμένες [23].

2.6 Αποθήκευση και διαχείριση ενέργειας

Για την πλήρη αξιοποίηση της παραγόμενης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενδείκνυται η χρήση μέσων αποθήκευσης. Έτσι δεν απαιτείται η άμεση κατανάλωση της παραγόμενης ισχύος αλλά μπορεί να αποθηκευτεί και να τροφοδοτηθεί όποτε απαιτηθεί. Η τροφοδοσία στις συστοιχίες μπαταριών είναι σε συνεχή τάση οπότε εάν τροφοδοτούνται από ανεμογεννήτριες θα χρειαστεί ένας ενδιάμεσος ανορθωτής AC – DC. Αντιθέτως για να τροφοδοτηθεί το δίκτυο από τις συστοιχίες μπαταριών θα χρειαστεί ένας μετατροπέας DC – AC. Για την διαχείριση της αποθηκευμένης ενέργειας με τον πιο αποδοτικό τρόπο χρησιμοποιούνται συστήματα διαχείρισης ισχύος (Power Management

System). Με τη χρήση ενός κατάλληλου συστήματος διαχείρισης ισχύος καθορίζονται αυτόματα τα κατάλληλα διαστήματα φόρτισης αλλά και τροφοδοσίας του δικτύου του λιμένα ώστε το σύστημα να δουλεύει με τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Έτσι όταν παράγεται περισσότερη ισχύ από αυτήν που καταναλώνεται από το λιμένα οι συστοιχίες μπαταριών θα φορτίζουν, στην αντίθετη περίπτωση οι συστοιχίες μπαταριών θα προσφέρουν ισχύ στο δίκτυο. Σύμφωνα με προσομοίωση σχετικά με την εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδοσία γερανών που χρησιμοποιούνται για τον χειρισμό του φορτίου αποδεικνύεται πως είναι εφικτή η μείωση έως και 57% στο ενεργειακό κόστος [24]. Άλλη μελέτη έδειξε πως η εισαγωγή συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε λιμένα που τροφοδοτείται από ηλιακή ενέργεια μειώνει περεταίρω το κόστος ενέργειας κατά 25,36% [12].

2.7 Κριτήρια οικονομικής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης

Το αντίκτυπο της προτεινόμενης ενεργειακής πρότασης θα αξιολογηθεί τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά. Το περιβαλλοντικό κριτήριο θα είναι η μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα ενώ για την οικονομική αξιολόγηση θα χρησιμοποιηθεί ο δείκτης Net Present Value (NPV - Εξίσωση 1) [25]. Ο συγκεκριμένος δείκτης χρησιμοποιείται για να προσαρμόσει τα οικονομικά αποτελέσματα μιας μακροχρόνιας επένδυσης στη σημερινή αξία των χρημάτων. Πιο αναλυτικά τα λειτουργικά και κεφαλαιουχικά έξοδα αφαιρούνται από τα έσοδα και στη συνέχεια το αποτέλεσμα αυτής της αφαίρεσης διαιρείται με τον συντελεστή discount rate. Όπου το i συμβολίζει το έτος και το dr το discount rate. Το discount rate ισούται με το nominal discount rate μείον τον συντελεστή πληθωρισμού.

$$NPV_i = \frac{\text{Έσοδα } i - \text{Λειτουργικά έξοδα } i - \text{Κεφαλαιουχικά έξοδα } i}{(1+dr)^i} \quad (1)$$

Κεφάλαιο 3 Case Study (Λιμάνι Βόλου)

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί το case study της μελέτης, ο λιμένας του Βόλου. Θα παρουσιαστούν τα ελλιμενιζόμενα πλοία και σκάφη και το ενεργειακό τους προφίλ. Εν συνεχεία θα πραγματοποιηθεί ανάλυση ηλεκτρικού φορτίου θα υπολογιστούν οι συνολικές ενεργειακές ανάγκες του λιμένα.

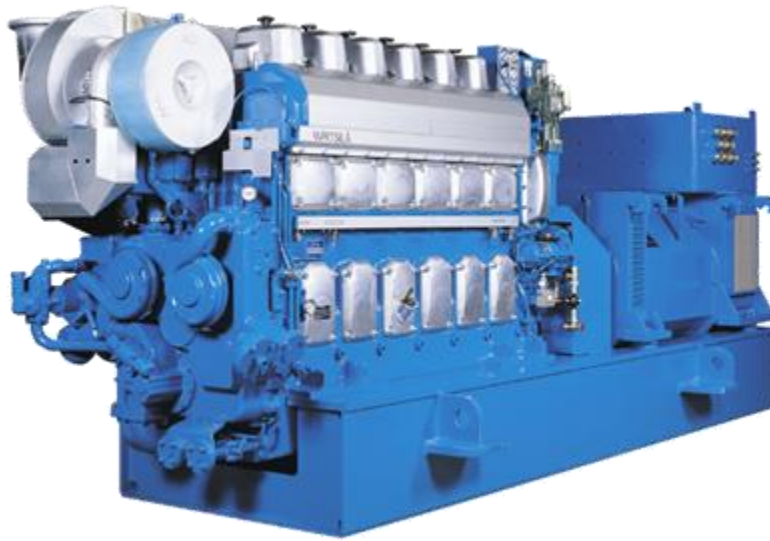
3.1 Ενεργειακές ανάγκες για πλοία

Για τις ανάγκες της μελέτης θα υποθεθεί πως κάθε μέρα στο λιμάνι διανυκτερεύουν για 7 ώρες δύο συμβατικά πλοία και τρία ταχύπλοα. Τα ίδια πλοία θα δαπανούν από μία ώρα για φόρτωση και εκφόρτωση. Τα συμβατικά πλοία της μελέτης θα είναι τα πλοία Blue Star Chios και Blue Star Myconos, ενώ τα ταχύπλοα θα είναι τα Hellenic Seaways Aero Catamaran 1, 2 και 3. Τόσο τα συμβατικά όσο και τα ταχύπλοα αποτελούν ομοιότυπες κατασκευές οπότε οι υπολογισμοί θα πραγματοποιηθούν μία φορά για κάθε κατηγορία.

3.2 Υπάρχουσα Ηλεκτρομηχανολογική Εγκατάσταση

Τα πλοία για να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες τόσο εν πλω όσο και κατά την διάρκεια της παραμονής χρησιμοποιούν ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη. Τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη αποτελούνται από μια μηχανή εσωτερικής καύσης και μια γεννήτρια.

Όσον αφορά τα δύο συμβατικά πλοία της μελέτης, είναι εξοπλισμένα με τρία τετράχρονα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη της Wartsila. Τα συγκεκριμένα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη τα οποία απεικονίζονται στην Εικόνα 3.1 διαθέτουν 6 κυλίνδρους τοποθετημένους σε σειρά (Line–L) και με διάμετρο εμβόλου ίση με 20 εκατοστά, από εκεί προκύπτει και η ονομασία 6L20 του μοντέλου. Κάθε ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος αποδίδει 1.080 kW, 3.240 kW συνολικά. Η γεννήτρια είναι εξαπολική οπότε σε συχνότητα 50 Hz η ταχύτητα λειτουργίας είναι 1.000 rpm (revolutions per minute). Υπάρχει η δυνατότητα κατανάλωσης τόσο MDO (Marine Diesel Oil) όσο και HFO (Heavy Fuel Oil).



Εικόνα 3. 1 : Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος Wartsila 6L20

Τα τρία ταχύπλοα της μελέτης χρησιμοποιούν δύο ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ναυτικής χρήσης C4.4 της Caterpillar τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.2. Οι γεννήτριες λειτουργούν σε μέγιστη ισχύ στα 86 kW ή στα 107.5 KVA συνυπολογίζοντας έναν συντελεστή ισχύος ίσο με 0.8. Η τάση λειτουργίας τους είναι τριφασική στα 400 V και η συχνότητα 50 Hz, όμοια με το ελληνικό δίκτυο. Επιπλέον, έχουν 4 πόλους και ταχύτητα περιστροφής 1.500 rpm.



Εικόνα 3.2 : Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος Caterpillar C4.4

3.3 Ανάλυση Ηλεκτρικού Φορτίου

Σε αυτήν την ενότητα θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση του ηλεκτρικού φορτίου, δηλαδή θα υπολογιστούν πόσα kW χρειάζεται το πλοίο ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας του. Για τα συμβατικά πλοία η ηλεκτρική ανάλυση θα χωριστεί σε δύο κατηγορίες, η πρώτη είναι η κατάσταση φορτώσεως – εκφορτώσεως (loading) και η δεύτερη η κατάσταση ελιγμών στάσης σε λιμάνι (on port). Στη συνέχεια δίνονται οι ανά κατηγορία πίνακες της ανάλυσης του ηλεκτρικού φορτίου, στους Πίνακες 3.1 και 3.2 δίνονται οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος του πλοίου τόσο αθροιστικά, όσο και σε επιμέρους σύνολα καταναλωτών. Οι αναλυτικοί πίνακες στους οποίους αναφέρεται η ηλεκτρική απαίτηση ισχύος κάθε συσκευής βρίσκονται στο παράρτημα της διπλωματικής εργασίας. Όσον αφορά τα τρία ταχύπλοα θα υπάρχει μόνο η κατηγορία στάσης σε λιμάνι καθώς λόγω της έλλειψης χώρου στάθμευσης αυτοκινήτων δεν υπάρχει διαφοροποίηση ανάμεσα στις δύο κατηγορίες. Αυτό συμβαίνει γιατί στα οχηματαγωγά πλοία κατά την φόρτωση και την εκφόρτωση το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας επιβαρύνεται με ηλεκτρικά φορτία εξαερισμού και φωτισμού των χώρων στάθμευσης αυτοκινήτων. Οι ηλεκτρικές καταναλώσεις για την κλάση ταχυπλόων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3. 1 : Ανάλυση ηλεκτρικού φορτίου συμβατικού πλοίου σε κατάσταση φορτώσεως-εκφορτώσεως

CONSUMPTION FOR GROUPS	%	No	ABS	USE	COE	
GROUP 1: AUX. MACH. FOR PROPULSION	0,3	57	855 kW	31	0,48	66,5 kW
GROUP 2: AUXILIARY MACHINERY FOR SHIP	0,03	21	111 kW	15	0,43	40,35 W
GROUP 3: HVAC	0,41	29	996 kW	24	0,57	648 kW
GROUP 4: GALLEY, LAUNDRY, WORKSHOPS	0,04	3	125 kW	3	0,45	55,75 W
GROUP 5: CARGO, DECK AND HULL	0,07	57	3023 kW	37	0,03	279,25 kW
GROUP 6: LIGHTING, ACCOMODATION	0,12	6	201 kW	6	0,86	174 kW
GROUP 7: NAVIGATION RADIO AND AUTOMATION	0,02	7	37 kW	7	0,6	14,9 kW
TOTAL (at consumer)						1278,75 kW

Πίνακας 3. 2 : Ανάλυση ηλεκτρικού φορτίου συμβατικού πλοίου σε κατάσταση στάσης σε λιμάνι

CONSUMPTION FOR GROUPS	%	No	ABS	US E	COE	
GROUP 1: AUX. MACH. FOR PROPULSION	0,3	57	855 kW	31	0,48	66,5 kW
GROUP 2: AUXILIARY MACHINERY FOR SHIP	0,03	21	111 kW	15	0,43	40,35 kW
GROUP 3: HVAC	0,41	29	996 kW	24	0,57	526 kW
GROUP 4: GALLEY, LAUNDRY, WORKSHOPS	0,04	3	125 kW	3	0,45	55,75 kW
GROUP 5: CARGO, DECK AND HULL	0,07	57	3023 kW	37	0,03	39,25 kW
GROUP 6: LIGHTING, ACCOMODATION	0,12	6	201 kW	6	0,86	174 kW
GROUP 7: NAVIGATION RADIO AND AUTOMATION	0,02	7	37 kW	7	0,6	14,9 kW
TOTAL (at consumer)						916,75 kW

Πίνακας 3. 3: Ανάλυση ηλεκτρικού φορτίου ταχύπλοου σε κατάσταση στάσης σε λιμάνι

CONSUMPTION FOR GROUPS	
GROUP 1: AUX. MACH. FOR PROPULSION	1218,8 W
GROUP 2: AUXILIARY MACHINERY FOR SHIP	1904,1 W
GROUP 3: HVAC	16532,7 W
GROUP 4: GALLEY, LAUNDRY, WORKSHOPS	1252,5 W
GROUP 5: CARGO, DECK AND HULL	400 W
GROUP 6: LIGHTING, ACCOMODATION	3419,83 W
GROUP 7: NAVIGATION RADIO AND AUTOMATION	1195,55 W
TOTAL (at consumer)	25923,48 W

Σε αυτήν την παράγραφο θα υπολογιστούν οι συνολικές ενεργειακές ανάγκες όλων των επιβατηγών πλοίων που είναι δρομολογημένα στον λιμένα του Βόλου. Τα ταχύπλοα θα δρομολογηθούν μόνο κατά την θερινή περίοδο, μεταξύ Ιουνίου και Σεπτεμβρίου. Ενώ τα συμβατικά πλοία θα αποδρομολογηθούν για ένα μήνα το καθένα, μεταξύ Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου όπου θα πραγματοποιήσουν τις ετήσιες επισκευές τους. Στον Πίνακα 3.4 περιέχονται οι ενεργειακές ανάγκες των πλοίων σε kWh.

Πίνακας 3. 4: Ενεργειακές ανάγκες των πλοίων ανά μήνα σε (kWh)

(kWh)	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουνι	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Blue Star Chios	0	215488	238576	230880	238576	230880	238576	238576	230880	238576	230880	238576
Blue Star Myconos	238576	0	238576	230880	238576	230880	238576	238576	230880	238576	230880	238576
Aero Catamaran 1	0	0	0	0	0	6221,6352	6429,02304	6429,02304	6221,6352	0	0	0
Aero Catamaran 2	0	0	0	0	0	6221,6352	6429,02304	6429,02304	6221,6352	0	0	0
Aero Catamaran 3	0	0	0	0	0	6221,6352	6429,02304	6429,02304	6221,6352	0	0	0
Συνολική Κατανάλωση Πλοίων	238576	215488	477152	461760	477152	480424,9056	496439,0691	496439,0691	480424,9056	477152	461760	477152
Ημερήσια Κατανάλωση Πλοίων	7696	7696	15392	15392	15392	16014,16352	16014,16352	16014,16352	16014,16352	15392	15392	15392

3.4. Ενεργειακές ανάγκες για σκάφη

Οι ηλεκτρικές καταναλώσεις των σκαφών που θα ελλιμενίζονται στη μαρίνα του βόλου θα κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το μήκος τους σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία θα αφορά σκάφη μικρότερα των 8 μέτρων με μέση κατανάλωση 5,29 kWh τη μέρα, η δεύτερη σκάφη από 8 έως 12 μέτρα με μέση κατανάλωση 13,95 kWh τη μέρα και η τρίτη κατηγορία σκάφη μεγαλύτερα από 12 μέτρα με μέση κατανάλωση 22,7 kWh τη μέρα [26].

Οι υπολογισμοί θα γίνουν με βάση την υπόθεση πως θα υπάρχουν 30 σκάφη της πρώτης κατηγορίας, 20 της δεύτερης και 10 της πρώτης σε ετήσια βάση, ενώ αυτοί οι αριθμοί θα διπλασιάζονται τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιος – Σεπτέμβριος). Οι ηλεκτρικές καταναλώσεις των σκαφών παρουσιάζονται αναλυτικά ανά μήνα στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3. 5: Ενεργειακές ανάγκες των σκαφών ανά μήνα σε (kWh)

(kWh)	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουνι	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
<8 m	4919,7	4443,6	4919,7	4761	4919,7	9522	9839,4	9839,4	9522	4919,7	4761	4919,7
8-12 m	8649	7812	8649	8370	8649	16740	17298	17298	16740	8649	8370	8649
>12 m	7037	6356	7037	6810	7037	13620	14074	14074	13620	7037	6810	7037
Συνολική Κατανάλωση Σκαφών	20606	18612	20606	19941	20606	39882	41211,4	41211,4	39882	20606	19941	20606
Ημερήσια Κατανάλωση Σκαφών	664,7	664,7	664,7	664,7	664,7	1329,4	1329,4	1329,4	1329,4	664,7	664,7	664,7

3.5. Σύνολο ενεργειακών αναγκών λιμένα

Στον Πίνακα 3.6 δίνονται οι συνολικές ενεργειακές ανάγκες του λιμένα για τα πλοία και τα σκάφη που ελλιμενίζονται σε αυτόν. Η μέγιστη κατανάλωση είναι 537.650 kWh για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο ενώ η ελάχιστη κατανάλωση είναι 234.100 kWh για τον μήνα Φεβρουάριο.

Πίνακας 3.6: Ενεργειακές ανάγκες λιμένα ανά μήνα σε (kWh)

(kWh)	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουνι	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Συνολική Κατανάλωση Πλοίων	238576	215488	477152	461760	477152	480424,9056	496439,0691	496439,0691	480424,9056	477152	461760	477152
Συνολική Κατανάλωση Σκαφών	20606	18612	20606	19941	20606	39882	41211,4	41211,4	39882	20606	19941	20606
Συνολική Κατανάλωση	259182	234100	497758	481701	497758	520306,9056	537650,4691	537650,4691	520306,9056	497758	481701	497758
Ημερήσια Κατανάλωση	8360,7	8360,7	16057	16057	16057	17343,56352	17343,56352	17343,56352	17343,56352	16057	16057	16057

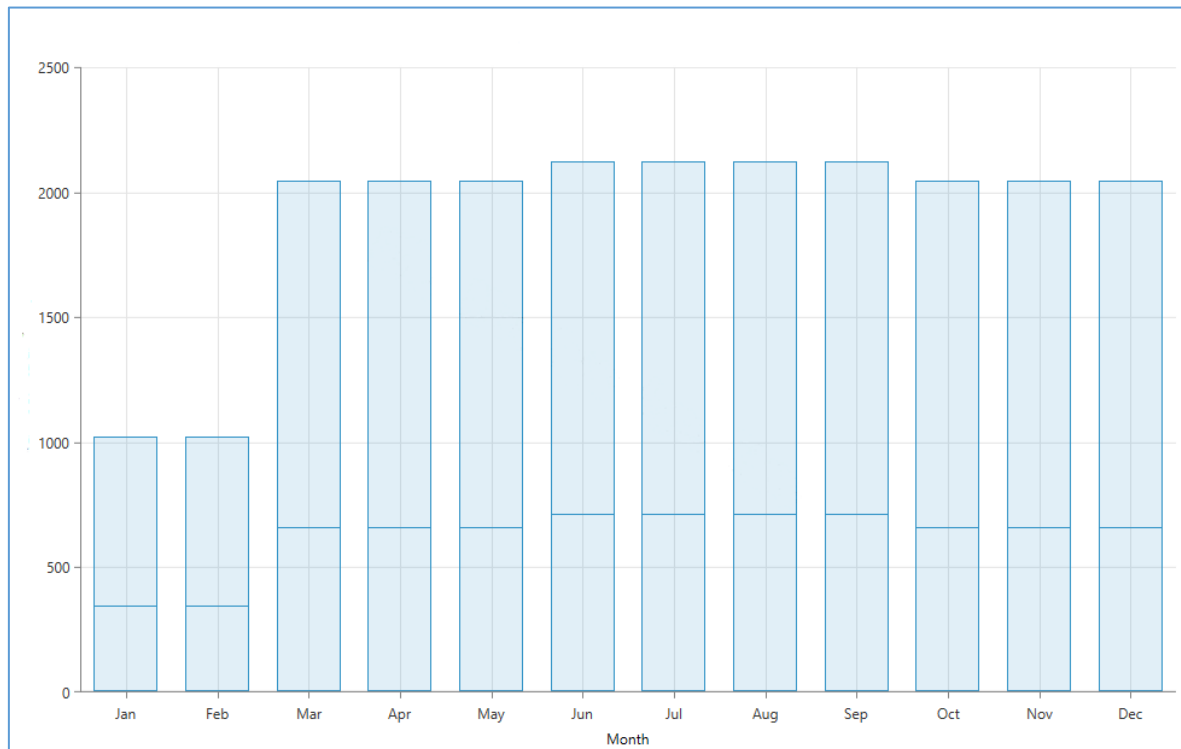
Κεφάλαιο 4 Εύρεση βέλτιστου συνδυασμού παραγωγικών πηγών

Στο κεφάλαιο 4 με τη χρήση του λογισμικού HOMER Pro αναπτύσσεται μοντέλο κατάλληλο για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού παραγωγικών. Αρχικά, θα δημιουργηθεί το Load Profile σύμφωνα με τις υπολογισθείσες καταναλώσεις. Εν συνεχεία θα προταθεί ο βέλτιστος συνδυασμός παραγωγικών πηγών για το συγκεκριμένο Load Profile στην περιοχή του λιμένα Βόλου. Η αξιολόγηση των συνδυασμών θα πραγματοποιηθεί σύμφωνα με το Net Present Cost (NPC). Η συγκεκριμένη μελέτη αφορά μόνο τον προσδιορισμό των παραγωγικών πηγών και την παραγωγή αυτών καθώς η συνολική αξιολόγηση του project θα πραγματοποιηθεί από μοντέλο που θα αναπτυχθεί στο λογισμικό MATLAB λαμβάνοντας υπόψιν επιπλέον παραμέτρους.

4.1 Δημιουργία Load Profile για τον λιμένα Βόλου

Η δημιουργία του Load Profile είναι απαραίτητο βήμα για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού παραγωγικών πηγών με τη χρήση του λογισμικού Homer Pro. Μετά τον ορισμό του Load Profile το λογισμικό θα έχει την δυνατότητα να καθορίσει τις ιδανικές παραγωγικές πηγές καθώς και την απαιτούμενη ισχύ αυτών. Για την ανάπτυξη του Load Profile θα γίνουν οι εξής υποθέσεις. Ότι τα συμβατικά πλοία θα αναχωρούν από το λιμάνι στις 08:00, στις 17:00 και θα ολοκληρώνουν το δρομολόγιό τους στις 12:20. Αυτό σημαίνει ότι κατά τα χρονικά διαστήματα 07:40 – 08:00, 16:40 – 17:00 και 00:20 – 00:40 η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ για τα συμβατικά πλοία θα εμπίπτει στην κατηγορία φορτώσεως – εκφορτώσεως, δηλαδή 1278,75 kW ανά πλοίο. Αυτό σημαίνει ότι μεταξύ 00:40 και 07:40 η ζητούμενη ηλεκτρική θα αντιπροσωπεύεται από την κατάσταση στάσης σε λιμάνι (916,75 kW ανά πλοίο) και τις υπόλοιπες ώρες τα πλοία θα ταξιδεύουν οπότε δεν θα χρειάζονται ηλεκτρική ισχύ από το λιμάνι. Για τα ταχύπλοα θεωρείται ότι θα βρίσκονται ελλιμενισμένα κατά τις ώρες 00:00 – 08:00 καταναλώνοντας 25,92348 kW ανά πλοίο. Επιπλέον, δεν υπάρχει διαφορετική κατάσταση κατανάλωσης μεταξύ στάσης στο λιμάνι και φόρτωσης – εκφόρτωσης, ενώ τα πλοία για την ολιγόλεπτη στάση τους δεν θα συνδέονται στην ηλεκτρική παροχή του λιμένα. Όσον αφορά τα σκάφη αναψυχής της μαρίνας θεωρείται πως η κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος από το δίκτυο του λιμένα θα

είναι μεταξύ 08:00 και 16:00. Το μέγιστο ημερήσιο προφίλ ηλεκτρικής ισχύος δίνεται στην Εικόνα 4.1 όπως διαμορφώθηκε στο λογισμικό Homer Pro, ενώ στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται το προφίλ ηλεκτρικής ισχύος κάθε μήνα συναρτήσει με την ώρα.



Εικόνα 4. 1 : Μέγιστο ημερήσιο προφίλ ισχύος ανά μήνα (kW)

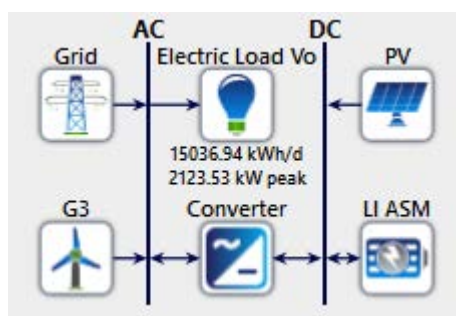


Εικόνα 4. 2 : Load Profile κάθε μήνα συναρτήσει με την ώρα

Από την Εικόνα 4.2 φαίνεται πως η κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος αφορά κυρίως τις νυχτερινές ώρες οπότε για την εκμετάλλευση της παραγόμενης από τα Φ/Β πάνελ ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει είτε να εγκατασταθούν συστοιχίες μπαταριών για την αποθήκευση αυτής της ενέργειας είτε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Net Metering.

4.2 Δημιουργία μοντέλου στο HOMER Pro

Η οικονομική ανάλυση της μελέτης θα διεξαχθεί με τη συμβολή του λογισμικού HOMER Pro. Ως σημείο υπολογισμού θα θεωρηθεί ο τερματικός σταθμός του λιμένα Βόλου, κτίριο Ιάσων με συντεταγμένες 39°21,5' N, 22°56,7' E. Στην ανάπτυξη του μοντέλου θα συμπεριληφθούν Φ/Β πάνελ, ανεμογεννήτριες, συστοιχίες μπαταριών και διασύνδεση με το δίκτυο όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Σε όλες τις περιπτώσεις θα χρησιμοποιηθούν τα Generic μοντέλα της εφαρμογής, το κόστος για τα Φ/Β είναι 935 €/kW [27] και για τις ανεμογεννήτριες 1.402 €/kW. Η ενεργειακή πρόταση για το λιμένα αφορά τα επόμενα 25 χρόνια [28] και λαμβάνει υπόψιν ένα nominal discount rate ίσο με 7,88% [29] και ένα συντελεστή πληθωρισμού 2% [30]. Οι τιμές πώλησης και αγοράς του ηλεκτρισμού θα είναι παρόμοιες αφού για εγκαταστάσεις ισχύος μεγαλύτερης των 500 kW δεν ισχύει η θεσμοθετημένη σταθερή τιμή των 0,06 €/kWh αλλά η τιμή που καθορίζεται από την αγορά. Η τιμή πώλησης ορίζεται ως 0,201 €/kWh και αναφέρεται στην τωρινή τιμή του Γ21 εμπορικού ημερήσιου τιμολόγιου της ΔΕΗ χωρίς την εφαρμογή της κυβερνητικής επιδότησης ενώ η αντίστοιχη τιμή για την αγορά είναι 0,181 €/kWh. Για τον υπολογισμό των οικονομικών αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Net Metering. Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση απεικονίζονται στον Πίνακα 4.1.



Σχήμα 4. 1 : Εξεταζόμενοι παραγωγικοί συνδυασμοί

Πίνακας 4. 1 : Στοιχεία μοντέλου HOMER Pro

Στοιχεία μοντέλου HOMER Pro	Τιμή
Συντεταγμένες	39°21.5' N, 22°56.7' E
Κόστος Φ/Β	935 €/kW
Κόστος ανεμογεννητριών	1.402 €/kW
Διάρκεια ζωής	25 χρόνια
Nominal discount rate	7,88%
Συντελεστής πληθωρισμού	2%
Τιμή πώλησης	0,201 €/kWh
Τιμή αγοράς (με επιδότηση)	0,181 €/kWh

4.3 Αποτελέσματα HOMER Pro

Από την προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό HOMER Pro κρίνεται συμφέρουσα η χρήση των Φ/Β πάνελ σε συνδυασμό με την άντληση ενέργειας από το δίκτυο και την κοστολόγηση που ορίζεται από τη μέθοδο Net Metering. Πιο αναλυτικά προτείνεται εγκατάσταση Φ/Β πάρκου συνολικής ισχύος 4.000 kWp και αντιστροφέας 3.749 kW. Το συνολικό Net Present Cost της επένδυσης σε αυτή την περίπτωση είναι - 1.506.760 € και η ετήσια παραγωγή εκτιμάται στις 8.178.148 kWh ανά έτος. Ο λόγος προτίμησης στα Φ/Β πάνελ είναι ότι απαιτούν μικρότερο αρχικό κεφάλαιο από την αγορά και εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Η παράλειψη των μπαταριών από την προσομοίωση του λογισμικού οφείλεται στο υψηλό κόστος κτήσης και αντικατάστασης κάθε δέκα χρόνια σε συνδυασμό με τη δυνατότητα χρήσης φτηνής ενέργειας από το δίκτυο λόγω του συμψηφισμού καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενέργειας.

Κεφάλαιο 5 Μελέτη εγκατάστασης των τεχνολογιών

Αυτό το κεφάλαιο θα αφιερωθεί στην τεχνική περιγραφή του έργου. Πιο συγκεκριμένα, θα δοθεί έμφαση στην επεξήγηση της ενεργειακής σύζευξης πλοίου - λιμένα.

5.1 Ενεργειακή σύζευξη πλοίου - λιμένα

Για την υλοποίηση της ενεργειακής σύζευξης των επιβατηγών πλοίων και των σκαφών αναψυχής με το ενεργειακό δίκτυο θα χρειαστούν κάποιες παρεμβάσεις στο λιμένα. Αρχικά, θα χρειαστεί ένας μετασχηματιστής τάσης ώστε να μετασχηματίζει την μέση τάση των 20 kV σε χαμηλή τάση ύψους 400 V. Ουσιαστικά θα τοποθετηθεί ένας υποσταθμός αφού το μέγιστο φορτίο των 2.123,53 kW που υπολογίστηκε δεν μπορεί να καλυφθεί από απλή τριφασική σύνδεση με το δίκτυο αν και τα πλοία είναι συμβατά τόσο σε τάση όσο και σε συχνότητα. Επιπλέον, θα απαιτηθεί η εγκατάσταση πέντε υποδοχών για τα επιβατηγά πλοία καθώς, για τα σκάφη αναψυχής υπάρχουν ήδη εγκατεστημένοι ρευματοδότες.

Για να καλυφθούν επαρκώς οι ανάγκες ισχύος που υπολογίστηκαν ως μέγιστο φορτίο θεωρώντας ότι ο συντελεστής ισχύος των περισσότερων φορτίων είναι περίπου 0,8 θα αρκούσε ένας μετασχηματιστής λίγο μεγαλύτερος από 2.500 kVA. Για να μπορεί όμως το σύστημα να ανταποκριθεί και σε περίπτωση που απαιτηθεί μεγαλύτερο φορτίο θα διαστασιολογηθεί ένας μεγαλύτερος μετασχηματιστής των 3.150 kVA, περισσότερες πληροφορίες για τον μετασχηματιστή παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 [31].

Πίνακας 5. 1: Στοιχεία μετασχηματιστή

Τάση στο πρωτεύον τύλιγμα	20 kV
Τάση στο δευτερεύον τύλιγμα	400 V
Ονομαστική ισχύς	3.150 kVA
Μέγιστη τάση ανοχής	24 kV BIL 1 (95 / 50 kV)
Απώλειες κενού	3.420 W
Απώλειες φορτίου στους 120°C	22.000 W
Τάση βραχυκύκλωσης	6%
Μήκος	2.440 mm
Πλάτος	1.280 mm
Ύψος	2.800 mm
Βάρος	6.805 kg

5.2 Net Metering

Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του λιμένα απαιτεί την παροχή ηλεκτρικής ισχύος ακόμη και σε ώρες που τα Φ/Β δεν θα μπορούν να προσφέρουν. Για να ανταπεξέλθει το μικροδίκτυο του λιμένα θα απαιτούνταν η εγκατάσταση μέσων αποθήκευσης ενέργειας τα οποία θα αύξαναν το κόστος υλοποίησης καθώς και θα περιόριζαν χωρικά τις υποδομές του λιμένα, για αυτόν τον λόγο προκρίνεται η λύση του ενεργειακού συμψηφισμού (Net Metering). Η πρακτική συμψηφισμού της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ενέργειας είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα μέσα προώθησης των ΑΠΕ ώστε να ενισχύσουν την αυτοπαραγωγή ενέργειας. Ο ενεργειακός συμψηφισμός δίνει την δυνατότητα στον καταναλωτή ενέργειας να γίνει ταυτόχρονα και παραγωγός καλύπτοντας μέρος της κατανάλωσής του και αποθηκεύοντας έμμεσα την πράσινη ενέργεια τροφοδοτώντας την στο δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα, ο όρος net προκύπτει από την πίστωση ή την χρέωση που υπολογίζεται για τον καταναλωτή από την διαφορά μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Ενεργειακός συμψηφισμός εννοείται ο συμψηφισμός της παρεχόμενης στο δίκτυο ενέργειας από το μέσο παραγωγής με την καταναλισκόμενη ενέργεια στην εγκατάσταση

του παραγωγού. Η παραγωγή ενέργειας πρέπει να βρίσκεται στον ίδιο χώρο με την κατανάλωση ή αν βρίσκεται σε απομακρυσμένο χώρο πρέπει να υπάρχει αποκλειστική γραμμή διασύνδεσης, η οποία θα αποτελεί τμήμα της ηλεκτρικής εγκατάστασης. Σύμφωνα με το παρόν νομικό πλαίσιο του ενεργειακού συμψηφισμού δεν είναι απαραίτητος ο ταυτοχρονισμός της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας [32].

Η περιορισμένη έκταση του λιμένα δεν επιτρέπει την εγκατάσταση Φ/Β επαρκούς δυναμικής ώστε να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες που έχουν υπολογιστεί. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να αποτελέσει λύση ο απλός ενεργειακός συμψηφισμός αλλά θα χρειαστεί να εφαρμοστεί ο εικονικός ενεργειακός συμψηφισμός (Virtual Net Metering). Η χρήση του εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού κάνει δυνατό τον συμψηφισμό της προσφερόμενης στο δίκτυο ενέργειας με έναν ή και περισσότερες καταναλωτές του αυτοπαραγωγού. Στον εικονικό ενεργειακό συμψηφισμό σε αντίθεση με τον απλό ενεργειακό συμψηφισμό δεν ισχύει κάποιος χωρικός περιορισμός για την εγκατάσταση και ούτε απαιτείται ηλεκτρική διασύνδεση του σταθμού παραγωγής και του καταναλωτή.

Οι όροι και προϋποθέσεις ανάπτυξης σταθμών παραγωγής με εικονικό ενεργειακό συμψηφισμό καθορίστηκαν αρχικά με την ΥΑ ΑΠΕΗΛ/Α/Φ1/οικ.175067 (ΦΕΚ Β' 1547/5.5.2017) η οποία καταργήθηκε και αντικαταστάθηκε από την ΥΑ Αριθμ. ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/15084/382 (ΦΕΚ Β' 759/5.3.2019).

Ο εικονικός ενεργειακός συμψηφισμός μπορεί να εφαρμοστεί με τρεις τρόπους. Ο πρώτος είναι ο συμψηφισμός της παρεχόμενης στο δίκτυο ενέργειας από έναν αυτοπαραγωγό με την καταναλισκόμενη ενέργεια από μια εγκατάσταση του παραγωγού σε απομακρυσμένη θέση. Στο συγκεκριμένο σενάριο ο σταθμός παραγωγής συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, ακόμη και εάν ο σταθμός και η εγκατάσταση βρίσκονται σε όμορο χώρο δεν απαιτείται ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους. Ο δεύτερος τρόπος εφαρμογής του εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού είναι μέσω του συμψηφισμού της προσφερόμενης στο δίκτυο ενέργειας από μία απομακρυσμένη εγκατάσταση παραγωγής σε μία ή περισσότερες εγκαταστάσεις κατανάλωσης του παραγωγού. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση και σε αυτή ο σταθμός παραγωγής θα συνδεθεί απευθείας στο δίκτυο χωρίς κάποια απαίτηση ηλεκτρικής διασύνδεσης με τις εγκαταστάσεις κατανάλωσης. Η τρίτη και τελευταία περίπτωση αφορά στον συμψηφισμό της εγχεόμενης στο δίκτυο ενέργειας από τον σταθμό παραγωγής με την απορροφώμενη ενέργεια από τις εγκαταστάσεις του

παραγωγού οι οποίες βρίσκονται στον ίδιο χώρο με τον σταθμό παραγωγής και συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους. Ο σταθμός παραγωγής μπορεί να συνδεθεί με το δίκτυο χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα σύνδεση του καταναλωτή με το δίκτυο είτε με την επαύξηση αυτής εάν δεν καλύπτει το μέγεθος του σταθμού. Για την περίπτωση που μελετάται σε αυτή τη διπλωματική θα χρησιμοποιηθεί η πρώτη περίπτωση καθώς όλες οι καταναλώσεις βρίσκονται σε όμορο χώρο αλλά δεν υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης των Φ/Β στον ίδιο χώρο [33].

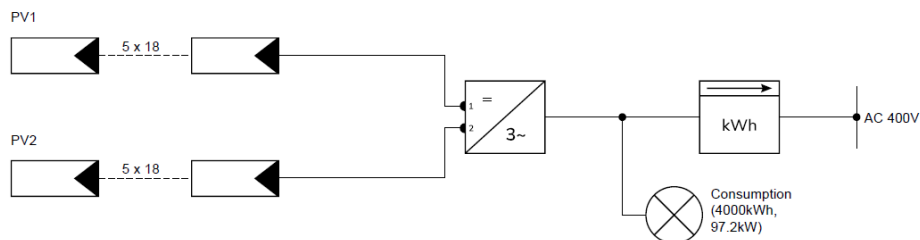
5.3 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του λογισμικού Homer PRO για να καλυφθούν οι υπολογισθείσες ανάγκες του λιμένα θα εγκατασταθούν φωτοβολταϊκά συνολικής ισχύος 4 MWp. Το πάρκο θα συνδεθεί στο δίκτυο μέσης τάσης με τη χρήση μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης 0.4/20 kV. Το πάρκο θα αποτελείται από πάνελ των 540 W τα στοιχεία των οποίων δίνονται στον Πίνακα 5.2 [34].

Πίνακας 5. 2: Στοιχεία Φ/Β πάνελ

Ισχύς	540 Wp
Ονομαστικό ρεύμα	13,15 A
Ονομαστική τάση	41,10 V
Ρεύμα βραχυκυκλώματος	13,89 A
Απόδοση σε συνθήκες εργαστηριακού ελέγχου	21,15%
Απόδοση στα 200 W/m ²	20,65%
Μέγιστη τάση συστήματος	1500 V
Μέγιστο ρεύμα επιστροφής	25 A
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40 - 85°C
Μήκος	2.279 mm
Πλάτος	1.134 mm
Ύψος	35 mm
Βάρος	29 kg

Τα πάνελ θα τοποθετηθούν κατά 90 σε σειρά στην μία είσοδο του αντιστροφέα και εν συνεχεία άλλα 90 σε σειρά στην άλλο είσοδο του αντιστροφέα όπως παρουσιάζεται και στο μονογραμμικό σχέδιο στο Σχήμα 5.1. Έτσι, κάθε αντιστροφέας θα επωμίζεται το φορτίο 180 πάνελ των 540 Wp δηλαδή σύνολο 97,2 kWp. Οπότε για να καλυφθούν πλήρως οι απαιτήσεις μας θα τοποθετηθούν 42 αντιστροφείς, 7.560 Φ/Β πάνελ και η συνολική ισχύς της εγκατάστασης θα είναι 4.082.400 Wp. Για την εγκατάσταση του πάρκου θα απαιτηθεί χώρος έκτασης 20 στρεμμάτων.



Σχήμα 5. 1: Μονογραμμικό σχέδιο σύνδεσης Φ/Β πάνελ

Κάθε αντιστροφέας που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι 100 kVA και οι 42 αντιστροφείς θα συνδεθούν πρώτα με έναν πίνακα και από εκεί μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης όλη η παραγωγή του πάρκου θα κατευθύνεται στο δίκτυο μέσης τάσης. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα καταγράφονται στον Πίνακα 5.3 [35], ενώ ο μετασχηματιστής ανύψωσης θα έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για τις εγκαταστάσεις του λιμένα αλλά θα είναι μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος.

Πίνακας 5. 3: Στοιχεία αντιστροφέα

Μέγιστο ρεύμα εισόδου	175 A
Μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης	250 A
Εύρος τάσης εισόδου	580 – 1000 VDC
Φαινόμενη ισχύς	100.000 VA
Ρεύμα εξόδου	144,9 A
Σύνδεση δικτύου	3~ (N)PE 400/230 V, 3~ (N)PE 380/220 V
Συχνότητα	50 – 60 Hz
Ύψος	755 mm
Πλάτος	1109 mm
Βάθος	346 mm
Βάρος	103 kg
Εύρος θερμοκρασίας περιβάλλοντος	-40 - 65°C
Μέγιστος βαθμός απόδοσης	98,5%

5.4 Εκτίμηση παραγόμενης ισχύος

Για την εκτίμηση της ετήσιας παραγόμενης ισχύος χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο υπολογισμού pnvgis, αξιοποιώντας ως δεδομένα εισόδου τα στοιχεία που αναγράφονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5. 4: Δεδομένα εισόδου pnvgis

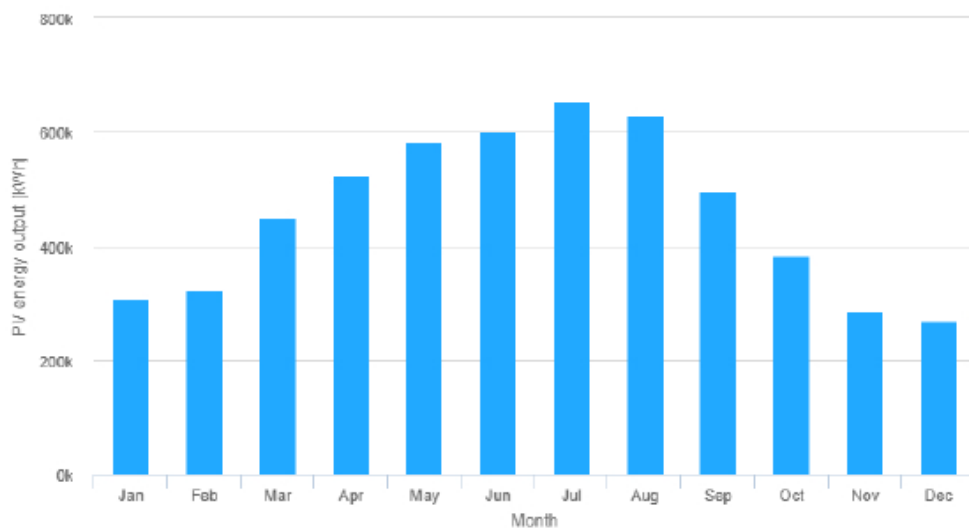
Δεδομένα εισόδου	
Γεωγραφικό πλάτος/Γεωγραφικό μήκος	39,363/22,940
Χρησιμοποιούμενη βάση δεδομένων	PVGIS-SARAH3
Τεχνολογία ΦΒ	Κρυσταλλική σιλικόνη
Εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β	4000 kWp
Απώλειες συστήματος	20%

Από τη χρήση του λογισμικού pnvgis προέκυψαν τα δεδομένα που παρατίθενται στον Πίνακα 5.5 καθώς και στο Σχήμα 5.2. Πιο αναλυτικά, στον Πίνακα 5.5 καταγράφονται η γωνία κλίσης, η αζιμουθιανή γωνία, η ετήσια παραγωγή ενέργειας, η ετήσια

μεταβλητότητα καθώς και οι απώλειες λόγω θερμοκρασίας. Ενώ στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η μηνιαία παραγωγή του Φ/Β συστήματος.

Πίνακας 5. 5: Δεδομένα εξόδου pvgis

Δεδομένα εξόδου	
Γωνία κλίσης	25°
Αζιμουθιανή γωνία	0°
Ετήσια παραγωγή ενέργειας	5.513.989,96 kWh
Ετήσια μεταβλητότητα	134.385,79 kWh
Απώλειες λόγω θερμοκρασίας	-7,5%



Σχήμα 5. 2: Μηνιαία παραγωγή Φ/Β πάρκου

Κεφάλαιο 6 Υπολογισμός οφελών από την εφαρμογή των προτεινόμενων τεχνολογιών

Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματευτούν τα οφέλη που θα προκύψουν από την εγκατάσταση και την χρήση των προτεινόμενων τεχνολογιών στον λιμένα του Βόλου. Πιο συγκεκριμένα, θα εξεταστούν πως θα ωφεληθεί οικονομικά ο Οργανισμός Λιμένος Βόλου καθώς και ποιες θετικές επιδράσεις θα υπάρξουν για το περιβάλλον της περιοχής.

6.1 Υπολογισμός οικονομικών οφελών

Για τον υπολογισμό των οικονομικών οφελών θα δημιουργηθεί μοντέλο στο MATLAB. Το μοντέλο θα περιλαμβάνει όλα τα κόστη που θα προκύψουν για τη δημιουργία αλλά και την εγκατάσταση των προτεινόμενων τεχνολογιών. Θα αφορά το κόστος της γης, της εγκατάστασης, της συντήρησης αλλά και τα κόστη πληθωρισμού και δανεισμού.

Η υλοποίηση του έργου, τόσο του Φ/Β πάρκου όσο και τα έργα για την αναβάθμιση του λιμένα θα έχουν ένα σημαντικό κόστος. Για την αγορά γης, Φ/Β πάνελ, αντιστροφών, μετασχηματιστών, καλωδίων και για τα εργατικά κόστη θα απαιτηθεί το ποσό των 2.920.000 ευρώ. Αυτό το κόστος υπολογίζεται σύμφωνα με την μέση τιμή που επικρατεί στην αγορά για την υλοποίηση παρόμοιων έργων, η οποία είναι 0,73 ευρώ ανά W_p [36]. Το έργο εκτιμάται ότι θα είναι σε λειτουργία για τουλάχιστον 25 έτη και για κάθε kWh που προσφέρεται από το μικροδίκτυο του λιμένα στα πλοία και στα σκάφη θα υπάρχει μια χρέωση ίση με 0,2 ευρώ.

Η οικονομική αξιολόγηση του έργου θα διεξαχθεί από το NPV και το Συνολικό Οικονομικό Ισοζύγιο αλλά για να υπολογιστούν αυτά θα πρέπει πρώτα να εκτιμηθεί το οικονομικό ισοζύγιο που περιλαμβάνει την αφαίρεση των εξόδων από το ετήσιο εισόδημα καθώς και τον υπολογισμό ενός εταιρικού φόρου ύψους 22%. Τα έσοδα υπολογίζονται με έναν απλό πολλαπλασιασμό της τιμής της kWh και του αριθμού των παραγόμενων kWh. Τα έξοδα αποτελούνται από έξοδα συντήρησης, απασχόλησης, ασφάλισης και κάποιων γενικών έκτακτων εξόδων. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση στο MATLAB παρατίθενται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6. 1: Τιμές προσομοίωσης

Τιμή kWh (Ευρώ)	0,2
Παραγόμενες kWh	5.513.989,96
Έξοδα συντήρησης (Ευρώ)	10.000
Έξοδα απασχόλησης (Ευρώ)	20.000
Έξοδα ασφάλισης (Ευρώ)	10.000
Έκτακτα έξοδα (Ευρώ)	5.000
Φόρος	22%
Nominal Discount Rate	7,88%

Για την δόμηση του κώδικα της προσομοίωσης στο MATLAB χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω εξισώσεις που υπολογίζουν το NPV, το Ετήσιο Οικονομικό Ισοζύγιο, το Συνολικό Οικονομικό Ισοζύγιο, το Χρόνος Αποπληρωμής καθώς και τον Συντελεστή Επιστροφής Επένδυσης.

$$NPV_i = \frac{\text{Έσοδα } i - \text{Λειτουργικά έξοδα } i - \text{Κεφαλαιουχικά έξοδα } i}{(1+dr)^i} \quad (1)$$

$$\text{Ετήσιο Οικονομικό Ισοζύγιο} = (\text{Ετήσια Έσοδα} - \text{Ετήσια Έξοδα}) * (1 - \text{Φόρος}) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Συνολικό Οικονομικό Ισοζύγιο} &= (\text{Διάρκεια} * \\ &\text{Ετήσιο Οικονομικό Ισοζύγιο}) - \text{Κόστος Υλοποίησης} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\text{Χρόνος Αποπληρωμής} = \text{Κόστος Υλοποίησης} / \text{Ετήσιο Οικονομικό Ισοζύγιο} \quad (4)$$

$$\text{Επιστροφή Επένδυσης} = \text{Συνολικό Οικονομικό Ισοζύγιο} / \text{Κόστος Υλοποίησης} \quad (5)$$

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που προέκυψαν από την χρήση των παραπάνω εξισώσεων δείχνουν Ετήσια Οικονομικό Ισοζύγιο 825.080 ευρώ, Συνολικό Οικονομικό Ισοζύγιο 17.707.060 ευρώ, Χρόνο Αποπληρωμής 3,54 χρόνια, Συντελεστή Επιστροφής Επένδυσης 6,06 και NPV 5.978.606 ευρώ. Τα αποτελέσματα παρατίθενται και στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6. 2: Αποτελέσματα προσομοίωσης

Ετήσιο Οικονομικό Ισοζύγιο (Ευρώ)	825.080
Συνολικό Οικονομικό Ισοζύγιο (Ευρώ)	17.707.060
Χρόνος Αποπληρωμής (Χρόνια)	3,54
Συντελεστής Επιστροφής Επένδυσης	6,06
NPV (Ευρώ)	5.978.606

6.2 Υπολογισμός περιβαλλοντικών οφελών

Σε αυτήν την υπό ενότητα θα εξεταστεί ο περιορισμός των εκπομπών καυσαερίων των πλοίων εντός του λιμένα. Πιο συγκεκριμένα θα υπολογιστεί πόσες εκπομπές CO₂. Για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών οφελών θα δημιουργηθεί μοντέλο στο MATLAB όπου θα συνυπολογιστούν οι συντελεστές παραγωγής των παραπάνω καυσαερίων ανά kWh. Για την προσομοίωση στο MATLAB θα ληφθεί υπόψιν ο συντελεστής εκπομπών CO₂ του diesel, ο οποίος είναι 3,206 (kg of exhaust gases/kg of fuel) [37], αφού βάση κανονισμών απαγορεύεται η καύση Heavy Fuel Oil (HFO) σε Emission Control Area (ECA).

Κατά την προσομοίωση έγιναν οι παραδοχές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6. 3: Παραδοχές για υπολογισμό καυσαερίων

Ενεργειακή πυκνότητα καυσίμου (MJ/kg)	42,7 [38]
Απόδοση ηλεκτρομηχανών	40 %
Συντελεστής CO ₂	3,206

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε την συγκεκριμένη κατανάλωση καυσίμου των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών, η οποία μετράτε σε g/kWh και σύμφωνα με την εξίσωση 6 είναι 210,77.

$$\text{Συγκεκριμένη Κατανάλωση Καυσίμου} = \frac{(3.6 \cdot 10^6)}{\text{Απόδοση Ηλεκτρομηχανών}} \cdot$$

$$\text{Ενεργειακή Πυκνότητα Καυσίμου} \cdot 10^3 \quad (6)$$

$$\text{Συνολική Κατανάλωση Καυσίμου} = \frac{\text{Συνολικό Φορτίο} \cdot \text{Συγκεκριμένη Κατανάλωση Καυσίμου}}{10^6} \quad (7)$$

$$\text{Συνολικές Εκπομπές CO}_2 = \text{Συνολική Κατανάλωση Καυσίμου} \cdot \text{Συντελεστής CO}_2 \quad (8)$$

Από την προσομοίωση και την χρήση των εξισώσεων 7 και 8 υπολογίστηκε πως ετησίως τα πλοία και τα σκάφη που σταθμεύουν στο λιμένα καταναλώνουν στον χρόνο παραμονής τους 117,26 τόνους πετρελαίου diesel το οποίο αντιστοιχεί σε εκπομπή 375,95 τόνων CO₂.

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκε η πιθανότητα ενεργειακής αναβάθμισης του λιμένα του Βόλου. Μεταξύ των λύσεων που ερευνήθηκαν ήταν η ηλεκτρική διασύνδεση των πλοίων με το μικροδίκτυο του λιμένα. Μετά την μελέτη των ενεργειακών απαιτήσεων και τη δημιουργία ενεργειακού προφίλ αποδείχτηκε πως η αποδοτικότερη επιλογή ήταν η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς και η δημιουργία υποδομών ενεργειακής σύνδεσης. Η υλοποίηση του συγκεκριμένου έργου κρίθηκε οικονομικά βιώσιμη και εκτιμάται ότι ο χρόνος αποπληρωμής θα είναι μόλις 3,54 χρόνια και ο συντελεστής επιστροφής επένδυσης υπολογίστηκε στο 6,06. Εμβαθύνοντας στα οικονομικά δεδομένα η προσομοίωση έδειξε ότι ο λιμένας θα παράγει ετήσια καθαρά έσοδα 825.080 ευρώ μετά από τους φόρους ενώ το συνολικό ισοζύγιο για όλη την διάρκεια ζωής του θα είναι 17.707.060 ευρώ. Η συγκεκριμένη πρόταση παραμένει ελκυστική ακόμη και με ένα Nominal Discount Rate ίσο με 7,88% αφού ακόμα και έτσι το Net Present Value είναι 5.978.606 ευρώ. Πέρα όμως από τα οικονομικά οφέλη που θα προκύψουν σημαντική κρίνεται και η περιβαλλοντική συνεισφορά του. Εκτιμάται ότι από την υλοποίηση του έργου και έπειτα τα πλοία που ελλιμενίζονται θα μειώσουν την κατανάλωσή τους κατά 117,26 τόνους πετρελαίου diesel ανά έτος. Αυτό σημαίνει ότι η ατμόσφαιρα της τοπικής κοινωνίας θα ελαφρυνθεί από εκπομπές 375,95 τόνων CO₂ ετησίως.

Βιβλιογραφία

- [1] " Stepping up Europe's 2030 climate ambition - Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people ". European Commission, 17 09 2020. [Online]
- [2] International Maritime Organization (2021) Fourth IMO Greenhouse Gas Study, IMO. International Maritime Organization.
- [3] American Bureau of Shipping (2021) Sustainability Whitepaper Hydrogen as Marine Fuel, absinfo. American Bureau of Shipping.
- [4] " Energy efficiency handbook, Toward zero emission ship operations ". ABB, 01 09 2020. [Online]
- [5] E. P. Lamprinidi, S. Orfanos-Pepainas, G. J. Tsekouras, F. D. Kanellos, J. M. Prousalidis and A. Vlachos, "Preliminary Technoeconomical Evaluation of Cold Ironing," 2022 7th International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and Industry (MCSI), Athens, Greece, 2022, pp. 89-95, doi: 10.1109/MCSI55933.2022.00021.
- [6] Chang, C.C. and Wang, C.M., 2012. Evaluating the effects of green port policy: Case study of Kaohsiung harbor in Taiwan. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(3), pp.185-189.
- [7] Iris, Ç. and Lam, J.S.L., 2019. A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, pp.170-182.
- [8] Yiğit, K., Kökkülünk, G., Parlak, A. and Karakaş, A., 2016. Energy cost assessment of shoreside power supply considering the smart grid concept: a case study for a bulk carrier ship. *Maritime Policy & Management*, 43(4), pp.469-482.
- [9] Peng, C., Shounan, S., Hai, L. and Qiang, Z., 2014, August. Modeling and simulation of ship power system integration of solar energy. In *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)* (pp. 1-5). IEEE.

- [10] Binot, F., Meunier, S., Reinbold, V., Petit, M., Correcher, S. and Mamadou, K., 2024. Optimization of the design of photovoltaic-based seaport microgrids considering techno-economic and environmental criteria. *Energy Reports*, 11, pp.5819-5830.
- [11] Iris, Ç. and Lam, J.S.L., 2021. Optimal energy management and operations planning in seaports with smart grid while harnessing renewable energy under uncertainty. *Omega*, 103, p.102445.
- [12] R. Trevisan, E. Ghiani, S. Ruggeri, S. Mocci, G. Pisano and F. Pilo, "Optimal sizing of PV and Storage for a Port Renewable Energy Community," 2022 2nd International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area (SyNERGY MED), Thessaloniki, Greece, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/SyNERGYMED55767.2022.9941383.
- [13] Elnajjar, H.M., Shehata, A.S., Elbatran, A.A. and Shehadeh, M.F., 2021. Experimental and techno-economic feasibility analysis of renewable energy technologies for Jabel Ali Port in UAE. *Energy Reports*, 7, pp.116-136.
- [14] "Wind Energy". HWEA, 02 12 2020. [Online]
- [15] Seddiek, I.S., 2020. Application of renewable energy technologies for eco-friendly sea ports. *Ships and Offshore Structures*, 15(9), pp.953-962.
- [16] Esteve Pérez, J. and Gutiérrez Romero, J.E., 2015. Renewable energy supply to ships at port. *Instrumentation Viewpoint*, (18), pp.66-66.
- [17] Hafezi, R., Akhavan, A., Pakseresht, S. and Wood, D.A., 2021. Global natural gas demand to 2025: A learning scenario development model. *Energy*, 224, p.120167.
- [18] Franklin, D., Reeve, H. and Hubbard, B., 2010, May. Converting Existing LNG Carriers for Floating LNG Applications (FLNG, FSRU, FSO). In *Offshore Technology Conference* (pp. OTC-20683). OTC.
- [19] Giranza, M.J. and Bergmann, A., 2018, May. An economic evaluation of onshore and floating liquefied natural gas receiving terminals: the case study of Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 150, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.

- [20] Ulstein, K.V., Madsen, P.H., «Bring in the Energy,» *LNG INDUSTRY*, 07 11 2022.
[Online]
- [21] Henbest S, Giannakopoulou E, Cumming V. New energy outlook 2015. New York: Bloomberg New Energy Finance; 2015.
- [22] Horvath, S., Fasihi, M. and Breyer, C., 2018. Techno-economic analysis of a decarbonized shipping sector: Technology suggestions for a fleet in 2030 and 2040. *Energy Conversion and Management*, 164, pp.230-241.
- [23] Vichos, E., Sifakis, N. and Tsoutsos, T., 2022. Challenges of integrating hydrogen energy storage systems into nearly zero-energy ports. *Energy*, 241, p.122878.
- [24] W. Niu, X. Huang, F. Yuan, N. Schofield, L. Xu, J. Chu, et al., "Sizing of energy system of a hybrid lithium battery RTG crane", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 10, pp. 7837-7844, Nov. 2017.
- [25] Karvounis, P., Dantas, J.L., Tsoumpris, C. and Theotokatos, G., 2022. Ship Power Plant Decarbonisation Using Hybrid Systems and Ammonia Fuel—A Techno-Economic–Environmental Analysis. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), p.1675.
- [26] Stefanou, P. and Outsas, P., 2013. Autonomous marina's operation with connectivity to the grid.
- [27] Ziegler, M.S., Mueller, J.M., Pereira, G.D., Song, J., Ferrara, M., Chiang, Y.M. and Trancik, J.E., 2019. Storage requirements and costs of shaping renewable energy toward grid decarbonization. *Joule*, 3(9), pp.2134-2153.
- [28] Pawel, I., 2014. The cost of storage—how to calculate the levelized cost of stored energy (LCOE) and applications to renewable energy generation. *Energy Procedia*, 46, pp.68-77.
- [29] Picek, O., 2020. Spillover effects from next generation EU. *Intereconomics*, 55(5), pp.325-331.
- [30] Saługa, P.W., Zamasz, K., Dacko-Pikiewicz, Z., Szczepańska-Woszczyna, K. and Malec, M., 2021. Risk-adjusted discount rate and its components for onshore wind farms at the feasibility stage. *Energies*, 14(20), p.6840.

- [31] "Trihal Transformer". [Online]
- [32] "Net Metering". Helapco, 27 04 2022. [Online]
- [33] "Net Metering". ΔΕΔΔΗΕ, 31 05 2019. [Online]
- [34] "Luxor Eco Line Half Cell M144/525-545W". Luxor Solar, 2014
- [35] "Inverter Tauro ECO Fronius". [Online]
- [36] Westerberg, Amelia & Lindahl, Johan. (2024). National Survey Report of PV Power Applications in Sweden 2023.
- [37] Herdzik, Jerzy. "Decarbonization of marine fuels—The future of shipping." *Energies* 14.14 (2021): 4311
- [38] Verbeek, R.P., Kadijk, G., Van Mensch, P., Wulffers, C., Van Den Beemt, B., Fraga, F. and Aalbers, A.D.A., 2011. *Environmental and Economic aspects of using LNG as a fuel for shipping in The Netherlands* (pp. 1-48). Delft: TNO.