



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Μελέτη εγκατάστασης εναλλακτικής μορφής ενέργειας σε πλοίο με τη χρήση
φωτοβολταϊκών συστημάτων**

**Study on alternative energy form installation on a ship by using photovoltaic
systems**

Συγγραφέας:

ΔΟΥΡΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

A.M.: 13040

Επιβλέπων: Λέκτορας Μιχαήλ Σέρρης

Αιγάλεω, 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Τίτλος: Μελέτη εγκατάστασης εναλλακτικής μορφής ενέργειας σε πλοίο με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Συγγραφέας:

ΔΟΥΡΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (Α.Μ.: 13040)

Επιβλέπων:

Σέρρης Μιχαήλ,
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

13/7/2021

Εξεταστική Επιτροπή

Σέρρης Μιχαήλ,
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Ιακωβίδης Ισίδωρος,
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Παγώνης Δημήτριος -
Νικόλαος,
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Δούρος Νικόλαος του Χαραλάμπου, με αριθμό μητρώου 13040, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών 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



ΔΟΥΡΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω καταρχάς όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην επιτυχή εκπόνηση αυτής της διπλωματικής και κυρίως την αγαπημένη μου Ειρήνη.

Θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Μιχαήλ Σέρρη για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής και για το χρόνο που αφιέρωσε για την διόρθωση της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την οικονομική και ψυχολογική στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η ατμοσφαιρική ρύπανση συνιστά χαρακτηριστικό της σύγχρονης εποχής η οποία οφείλεται και στην καύση ορυκτού καυσίμου των μηχανών των πλοίων. Γι' αυτό, βασικός άξονας των σύγχρονων διεθνών συμβάσεων είναι η θέσπιση αυστηρών μέτρων για τον περιορισμό εκπομπών ρύπων. Η μείωση του ορυκτού καυσίμου των πλοίων, που συνιστά κύρια πηγή ενέργειας, επιτυγχάνεται ικανοποιητικώς με τη χρήση εναλλακτικών τρόπων κάλυψης της ενεργειακής κατανάλωσης του πλοίου. Ενδεικτικά, τα φωτοβολταϊκά ικανοποιούν τον ως άνω σκοπό μετατρέποντας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική χωρίς να ρυπαίνουν το περιβάλλον, αν εγκατασταθούν ως δευτερεύουσα πηγή ενέργειας στο ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου. Τις τελευταίες δεκαετίες γίνονται σχετικές μελέτες για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πλοία. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται ανάδειξη των διάφορων τεχνολογιών των φωτοβολταϊκών στοιχείων, των συσσωρευτών, των αντιστροφών DC-AC, και των πιθανών τρόπων σύνδεσης αυτών. Επίσης, αναλύεται ο διαφορετικός σε κάθε πλοίο τύπος σύνδεσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων με κριτήριο τα διαφορετικά ηλεκτρικά φορτία, το διαθέσιμο χώρο και την περιοχή πλεύσης τους. Στο πλαίσιο εφαρμογής φωτοβολταϊκού συστήματος σε ένα επιβατικό πλοίο που λειτουργεί αυτόνομα/συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου υπολογίζεται η μείωση κατανάλωσης καυσίμου και η μείωση εκπομπών ρύπων. Τέλος, αναδεικνύεται η αποτελεσματικότητα της χρήσης φωτοβολταϊκής ενέργειας σε σχέση με τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και τη συνακόλουθη εξοικονόμηση χρημάτων.

Λέξεις-κλειδιά : ατμοσφαιρική ρύπανση, κατανάλωση καυσίμου, ηλεκτρικό σύστημα πλοίου, ηλιακή ενέργεια, φωτοβολταϊκό σύστημα, εγκατάσταση σε πλοίο, αυτόνομο σύστημα /συνδεδεμένο στο δίκτυο.

Abstract

Air pollution is a feature of the modern era which is mainly due to the burning of fossil fuels in the engines of ships. Therefore, a key axis of modern international conventions is the introduction of strict measures to reduce emissions. The reduction of ships' fossil fuels, which is the main source of energy, is satisfactorily achieved by the use of alternative ways of covering the ship's energy consumption. Indicatively, photovoltaic systems the above purpose by converting solar energy to electricity without polluting the environment, when are installed as a secondary energy source in the ship's electrical system. In recent decades, relevant studies have been carried out concerning the installation of photovoltaic systems on ships. The aim of this work is to highlight the various technologies of photovoltaic panels, batteries, DC-AC inverters, and possible ways of connecting them. In addition, the different type of connection of the photovoltaic systems in each ship is analyzed with the criterion of the different electrical loads, the available space and their cruising area. In the context of the application of a photovoltaic system on a passenger ship that operates off-grid / connected to the ship's electrical system, the reduction of fuel consumption and the reduction of pollutant emissions are calculated. Finally, the efficiency of the use of photovoltaic energy in relation to the reduction of fuel consumption and the consequent cost reduction highlighted.

Key words: air pollution, fuel consumption, ship's electrical system, solar power, Photovoltaic systems, installation on a ship, standalone / grid-tied system.

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Ευχαριστίες..... | 1 |
| Περίληψη..... | 2 |
| Abstract | 3 |
| Κατάλογος Εικόνων..... | 8 |
| Κατάλογος Πινάκων | 12 |
| Κατάλογος ακρωνύμιων και συντομογραφιών | 14 |
| Πρόλογος..... | 16 |
| Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή..... | 18 |
| 1.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία | 18 |
| 1.2 Διεθνείς κανονισμοί για την εκπομπή καυσαερίων στην ναυτιλία..... | 26 |
| 1.2.1 Το Πρωτόκολλο του 1997 (Παράρτημα VI της MARPOL) | 28 |
| 1.2.2 Η επανεξέταση του παραρτήματος VI για τις εκπομπές NO _x και SO _x στις ειδικές περιοχές..... | 28 |
| 1.3 Ηλιακή ενέργεια και η εξέλιξη της ως πράσινη ενέργεια | 31 |
| 1.3.1 Στοιχεία Ηλιακής ακτινοβολίας | 33 |
| 1.4 Εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πλοία..... | 37 |
| 1.4.1 Auriga Leader | 37 |
| 1.4.2 Nichio Maru | 38 |
| 1.4.3 Blue Star Delos | 39 |
| 1.4.4 M/V Emerald Ace | 41 |
| 1.4.5 Motor Ship | 42 |
| 1.4.6 Ιδέες για το μέλλον..... | 43 |
| 1.5 Συμπεράσματα..... | 44 |
| 1.6 Βιβλιογραφικές πηγές | 45 |
| Κεφάλαιο 2. Η φυσική των φ/β στοιχείων | 48 |
| 2.1 Εισαγωγή | 48 |
| 2.2 Κατηγορίες Ημιαγωγών | 50 |
| 2.2.1 Ενδογενείς Ημιαγωγοί..... | 52 |
| 2.2.2 Εξωγενείς Ημιαγωγοί | 54 |
| 2.3 Μία πρώτη ματιά στη δίοδο – η περιοχή αραίωσης | 56 |
| 2.3.1 Στατική συμπεριφορά..... | 58 |
| 2.4 Φωτοαγωγιμότητα..... | 62 |
| 2.5 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο..... | 65 |

| | |
|---|-----|
| 2.5.1 Καμπύλη και εξίσωση ρεύματος-τάσης ΦΒ διόδου..... | 67 |
| 2.5.2 Το ηλεκτρικό κύκλωμα μίας διόδου P-N όταν δέχεται φως..... | 68 |
| 2.5.3 Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης (I-V) μίας ΦΒ κυψέλης | 69 |
| 2.5.3.1 Η απόδοση του φωτοβολταϊκής κυψέλης | 73 |
| 2.5.4 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας ΦΒ κυψέλης..... | 74 |
| 2.5.4.1 Το ηλεκτρικό κύκλωμα μίας ιδανικής ΦΒ κυψέλης..... | 74 |
| 2.5.4.2 Το ηλεκτρικό κύκλωμα μιας μη-ιδανικής ΦΒ κυψέλης | 75 |
| Επομένως, στην βραχυκυκλωμένη έξοδο της μη ιδανικής ΦΒ κυψέλης το επακόλουθο ρεύμα είναι το | 77 |
| 2.5.5 Οι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την ΦΒ κυψέλη..... | 77 |
| 2.5.5.1 Η επίδραση της θερμοκρασίας..... | 77 |
| 2.5.5.2 Η επίδραση της αντίστασης σε σειρά R_S και της παράλληλης αντίστασης R_{SH} | 78 |
| 2.6 Συνδεσμολογία Φ/Β κυψέλης..... | 79 |
| 2.6.1 Σύνδεση σε σειρά | 79 |
| 2.6.2 Παράλληλη σύνδεση | 81 |
| 2.7 Κατηγορίες ΦΒ στοιχείων και υλικά που τα αποτελούν..... | 83 |
| 2.7.1 ΜΟΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΠΥΡΙΤΙΟ | 84 |
| 2.7.2 ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΠΥΡΙΤΙΟ..... | 85 |
| 2.7.3 ΦΒ πλαίσιο άμορφου πυριτίου (amorphous-Si) | 86 |
| 2.7.4 ΦΒ πλαίσιο Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)..... | 86 |
| 2.7.5 ΦΒ κυψέλη Αρσενικούχου Γαλλίου (GaAs) | 87 |
| 2.7.6 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΠΥΡΙΤΙΟ ΛΕΠΤΟΥ ΦΙΛΜ (c-SiTFc) | 87 |
| 2.8 Βιβλιογραφικές πηγές | 88 |
| Κεφάλαιο 3. ΤΑ ΜΕΡΗ ΠΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΟΥΝ ΜΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΪΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ | 90 |
| 3.1 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module)..... | 91 |
| 3.1.1 Οι στοιχειοσειρές μέσα στο πλαίσιο | 94 |
| 3.2 Συστοιχίες ΦΒ πλαισίων και ΦΒ πεδίο (array) | 98 |
| 3.2.1 Οι κατηγορίες των ΦΒ πεδίων ανάλογα με τους αναστροφείς..... | 101 |
| 3.2.1.1 Κεντρική τεχνολογία (Centralized technology) | 102 |
| 3.2.1.2 Τεχνολογία συστοιχιών (string technology) | 104 |
| 3.2.1.3 Τεχνολογία AC-ΦΒ πλαισίου | 106 |
| 3.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα | 108 |

| | |
|---|-----|
| 3.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά που διέπουν τους ΦΒ αναστροφείς | 108 |
| 3.3.2 ΦΒ συστήματα εκτός δικτύου (off-grid systems) | 110 |
| 3.3.3 ΦΒ συστήματα συνδεδεμένα σε δίκτυο (grid-connected systems)..... | 112 |
| 3.3.4 Υβριδικό ΦΒ σύστημα (Hybrid grid)..... | 113 |
| 3.4 Συσσωρευτές..... | 116 |
| 3.4.1 Τα κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συστήματος συσσωρευτών | 116 |
| 3.4.2 Κατηγορίες συσσωρευτών για ΦΒ συστήματα..... | 117 |
| 3.4.3 Μέτρα ασφαλείας για τους ΦΒ συσσωρευτές στο πλοίο | 122 |
| 3.5 Καλωδιώσεις ΦΒ εγκατάστασης | 123 |
| 3.6 Συμπεράσματα..... | 126 |
| 3.7 Βιβλιογραφικές πηγές | 128 |
| Κεφάλαιο 4. Εγκατάσταση ΦΒ συστήματος σε day passenger boat για την κάλυψη δευτερευουσών αναγκών..... | 130 |
| 4.1 Επιλογή πλοίου για την εφαρμογή της εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος..... | 131 |
| 4.1.1 Το ηλεκτρικό φορτίο του πλοίου και οι καταναλωτές που το αποτελούν..... | 133 |
| 4.1.2 Περιγραφή ταξιδιού του πλοίου..... | 136 |
| 4.2 Το ηλιακό δυναμικό στην περιοχή των στενών του Βοσπόρου | 139 |
| 4.3 Υπολογισμός της παραγόμενης ΦΒ ενέργειας με βάση τα εγκατεστημένα ΦΒ πάνελ στο πλοίο. | 143 |
| 4.3.1 Επιλογή ΦΒ πλαισίου..... | 143 |
| 4.3.1.1 Υπολογισμός συνδεσμολογίας φωτοβολταϊκού πεδίου..... | 148 |
| 4.3.2 Υπολογισμός συστήματος συσσωρευτών για τις ανάγκες της εγκατάστασης | 151 |
| 4.3.2.1 Καθορισμός της ονομαστικής τάσης του συστήματος των συσσωρευτών | 152 |
| 4.3.2.2 Καθορισμός της χωρητικότητας του συστήματος των συσσωρευτών ... | 152 |
| 4.3.2.3 Οι επιλεγμένοι συσσωρευτές και η συνδεσμολογία του συστήματος.... | 154 |
| 4.3.3 Επιλογή αντιστροφών DC-AC εκτός δικτύου / συνδεδεμένο στο δίκτυο..... | 155 |
| 4.3.3.1 Τοπολογία σχεδιασμού συστήματος..... | 156 |
| 4.4 Εξοικονόμηση από την παράλληλη λειτουργία του υβριδικού συστήματος | 158 |
| 4.4.1 Η βοηθητική γεννήτρια ντίζελ και η ενέργεια που παράγει για να καλύψει τα φορτία του πλοίου | 159 |
| 4.4.2 Το ηλεκτρικό φορτίο του αρχικού κινητήρα ντίζελ μαζί με το υβριδικό..... | 161 |
| 4.5 Κατανάλωση καυσίμου της βοηθητικής γεννήτριας ντίζελ..... | 163 |

| | |
|--|-----|
| 4.6 Εκπομπές ρύπων από την βοηθητική γεννήτρια ντίζελ | 167 |
| 4.6.1 Όρια συντελεστών εκπομπών ρύπων για ναυτικούς κινητήρες..... | 167 |
| 4.6.2 Συντελεστές εκπομπών ρύπων | 168 |
| 4.6.3 Υπολογισμός εκπομπών ρύπων για την βοηθητική γεννήτρια ντίζελ του πλοίου | 168 |
| 4.7 Οικονομική ανάλυση..... | 172 |
| 4.8 Συμπεράσματα | 174 |
| Βιβλιογραφικές πηγές | 177 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|---|----|
| ΕΙΚΟΝΑ 1.1: ΠΑΓΚΟΣΜΙΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΥΣ ΚΛΑΔΟΥΣ..... | 19 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1. 2: Η ΜΠΛΕ ΓΡΑΜΜΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΙ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ ΤΙΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ (2007 ΕΩΣ 2012) ΚΑΙ Η ΠΡΑΣΙΝΗ ΜΟΝΟ ΤΟ ΕΤΟΣ 2007..... | 21 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1. 3: ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΕΣΑ. | 22 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1. 4: ΟΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΑ ΚΑΙ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΜΕΣΑ | 23 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.5: ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΕ ΠΛΟΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ ΚΑΙ ΔΕΞΑΜΕΝΟΠΛΟΙΑ ΑΡΓΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ..... | 24 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.6: ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΥΣΗΣ...25 | |
| ΕΙΚΟΝΑ 1. 7: ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΦΑΙΝΕΤΑΙ Η ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ ΤΟ ΜΕΣΗΜΕΡΙ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΓΗ, ΔΕΞΙΑ Η ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΓΗ ΤΟ ΒΡΑΔΥ | 32 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.8: ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ | 34 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1.9: ΕΤΗΣΙΟ ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΤΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ 1991-2015 | 34 |
| ΕΙΚΟΝΑ 1. 17: ΈΝΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟ ΗΛΙΑΚΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΠΛΟΙΟ | 43 |
| | |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 1: Η ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΕΝΟΣ ΑΠΛΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΚΑΙ ΤΟ ΖΕΥΓΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ – ΟΠΩΝ, Ε- ΚΑΙ Η +, ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ..... | 48 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2.2: ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ..... | 50 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 3: ΤΟ ΣΧΕΔΙΟ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΖΩΝΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ, ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΩΤΩΝ..... | 51 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 4: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΟΜΟΙΟΠΟΛΙΚΩΝ ΔΕΣΜΩΝ ΣΕ ΠΛΕΓΜΑ ΑΠΟ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΠΥΡΙΤΙΟ. ΚΑΘΕ ΓΡΑΜΜΗ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΕΙ ΤΑ ΑΤΟΜΑ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΕΙ ΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ ΠΟΥ ΜΟΙΡΑΖΕΤΑΙ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ. ΔΥΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΠΟΥ ΜΟΙΡΑΖΟΝΤΑΙ ΕΙΝΑΙ ΑΥΤΑ ΠΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΖΟΥΝ ΤΟΝ ΟΜΟΙΟΠΟΛΙΚΟ ΔΕΣΜΟ. | 53 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 5: ΟΙ ΔΥΟ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ Ο ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ Α) ΓΙΑ T=0, Β) ΓΙΑ ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ. | 54 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 6: ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ ΠΡΟΣΜΙΞΗ ΤΥΠΟΥ – N ΚΑΙ ΤΥΠΟΥ – P, ΔΕΞΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΙ ΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΖΩΝΕΣ. | 55 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 7: Η ΠΑΝΩ ΕΙΚΟΝΑ ΔΕΙΧΝΕΙ ΤΗ ΕΠΑΦΗ RN ΣΕ ΜΙΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ Η ΚΑΤΩ ΔΕΙΧΝΕΙ ΤΗΝ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ. | 56 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 8: Η ΕΠΑΦΗ RN ΑΠΟΤΟΜΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΝΟΘΕΥΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΙΣΟΡΡΟΠΗΜΕΝΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ..... | 58 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 9: ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΔΙΟΔΟΥ..... | 58 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 10: ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ..... | 59 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 11: ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΟΡΘΗΣ ΠΟΛΩΣΗΣ | 60 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 12: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΣΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΔΙΟΔΟΥ ΓΙΑ ΟΡΘΗ ΚΑΙ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΠΟΛΩΣΗ..... | 61 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 13: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΣΥΝΔΕΣΗΣ Α) ΑΠΟ ΖΩΝΗ ΣΕ ΖΩΝΗ, Β) ΜΕΣΟ ΕΠΑΝΑΣΥΝΔΕΣΗΣ. | 62 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 14: ΈΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ. | 63 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 15: ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΣΤΟ ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΜΕΡΙΚΟΥΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ..... | 64 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 16: Η ΕΠΑΦΗ RN ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΥΣΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΖΩΝΩΝ. | 65 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 17: Α) ΧΩΡΙΣ ΦΩΤΙΣΜΟ, ΕΝΑ ΗΛΙΑΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΕΧΕΙ ΤΑ ΙΔΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕ ΜΙΑ ΔΙΟΔΟ, Β) ΟΤΑΝ ΤΟ ΦΩΣ ΠΕΣΕΙ ΣΤΟ ΚΕΛΙ, Η ΚΑΜΠΥΛΗ IV ΑΛΛΑΖΕΙ ΚΑΘΩΣ ΤΟ ΚΕΛΙ ΑΡΧΙΖΕΙ ΝΑ ΠΑΡΑΓΕΙ ΙΣΧΥ, Γ) Όσο μεγαλώνει η ένταση της ημ ακτινοβολίας, τόσο μεγαλύτερη και η | |

| | |
|---|----|
| ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ, ΚΑΙ Δ) Η ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΙΔΩΝ ΑΝΑΣΤΡΕΦΕΤΑΙ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΕΧΕΙ ΜΟΝΟ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΦΩΤΙΖΟΜΕΝΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ..... | 68 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 18: ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΙ ΤΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΙΑΣ ΜΗ ΙΔΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΔΟΥ ΣΕ ΔΥΟ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ. ΟΤΑΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΩΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΚΑΙ ΟΤΑΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΩΣ ΦΒ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 69 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 19: Η ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ (I-V) ΤΗΣ ΦΒ ΚΥΨΕΛΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΟΥ ΑΥΤΗ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΔΕΔΟΜΕΝΟ ΦΩΤΙΣΜΟ. I_M, V_M ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΟΥ ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΟΠΟΙΩΝ ΔΙΝΟΥΝ ΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΙΣΧΥ. Η ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΠΡΑΣΙΝΟΥ ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΥ ΔΙΝΕΙ ΤΟ ΡΜ | 70 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 20: ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΧΑΡΑΞΗ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ I-V ΤΗΣ ΦΒ ΚΥΨΕΛΗΣ..... | 71 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 21: : ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ I-V ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΙΔΑΝΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΦΩΤΙΣΜΟΥ. | 71 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 22: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΜΕΝΕΣ ΑΠΟΔΟΣΕΙΣ ΠΑΝΩ ΣΤΙΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ IV. | 73 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 23: ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΗΣ ΙΔΑΝΙΚΗΣ ΦΒ ΚΥΨΕΛΗΣ | 75 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 24: ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΗΣ ΦΒ ΚΥΨΕΛΗΣ | 76 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2. 25: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΙΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ I - V ΕΝΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ..... | 78 |

| | |
|--|-----|
| ΕΙΚΟΝΑ 3. 1: ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΙ (Α) ΕΝΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ, (Β) ΕΝΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ, (C) ΜΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, (D) ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ..... | 90 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.2: Η ΤΟΜΗ ΕΝΟΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΚΑΙ ΤΑ ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΤΟ ΔΙΕΠΟΥΝ..... | 92 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.3: Η ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ (I-V) ΜΙΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΣΕΙΡΑΣ (N) ΦΒ ΚΥΨΕΛΩΝ ΣΥΜΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ | 95 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3. 4: Άνω απεικονίζεται η διατάξη της στοιχειοσειράς ενός πλαίσιου σε περίττο αριθμό στηλών και η θέση διοδών προστασίας. Κατω απεικονίζεται η ίδια στοιχειοσειρά σε ευθύγραμμη διατάξη ώστε να είναι αντιληπτή η περιοχή προστασίας που παρέχει η διοδος | 96 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3. 5: Η διατάξη της στοιχειοσειράς ενός πλαίσιου σε άρτιο αριθμό και η θέση των διοδών προστασίας. Κατω απεικονίζεται η ίδια στοιχειοσειρά σε ευθύγραμμη διατάξη, ώστε να κατανοηθεί καλύτερα από τον αναγνώστη η σύνδεση των διοδών..... | 97 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3. 6: Η ηλεκτρική σύνδεση δύο παράλληλων συστοιχιών όπου η κάθε μία αποτελείται από 3 σε σειρά Φβ πλαίσια ονομαστικής τάσης 24V..... | 99 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3. 7: Κεντρική τεχνολογία | 103 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3. 8: Τεχνολογία πολλαπλών συστοιχιών (MULTI-STRING TECHNOLOGY) | 105 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.9: Τα μέρη ενός αυτόνομου Φβ συστήματος | 111 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3. 10: Διαγράμμα συστήματος εκτός δικτύου | 111 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.11: Διαγράμμα Φβ συστήματος συνδεδεμένο με το δίκτυο..... | 113 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3. 12: Το διαγράμμα του υβριδικού συστήματος του πλοίου | 115 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3. 13: Βασικά στοιχεία μπαταρίας | 118 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3. 14: Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας..... | 119 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.15: Σύγκριση ενεργειακής πυκνότητας..... | 120 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3.16: Ενέργεια έναντι πυκνότητας ισχύος | 120 |
| | |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.1: Τα σχέδια του πλοίου με την πλαγιά οψη, κατοψη, το σαλόνι των επιβατών μαζί με την γεφυρά και η κατοψη του πλοίου με το εγκατεστημένο φωτοβολταϊκό πεδίο..... | 132 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4. 2 Το ηλεκτρικό σχέδιο του πλοίου. | 135 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.3: Το στενό του βόσπορου | 137 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.4: Αναγράφεται η παρία που καλύπτει το πλοίο | 137 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.5: Απεικόνιση του κληματος στην περιοχή του βόσπορου και γενικά στην Κωνσταντινούπολη | 139 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.6: Το διαγράμμα ραβδών που καταγράφει την μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία..... | 141 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.7: Το ωριαίο προφίλ της άμεσης κανονικής ηλιακής ακτινοβολίας | 142 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.8: Στον άξονα y έχουμε την ημερήσια κατανομή άμεση ηλιακή ακτινοβολία και στον άξονα x οι ανοιγμένες ώρες έκθεσης της ηλιακής ακτινοβολίας..... | 142 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.9: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου σε συνθήκες STC και NMOT..... | 144 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.10: 1) Διαστάσεις πλαισίου, 2) Θερμοκρασιακή εξάρτηση ορίων και 3) Οριακές τιμές ρεύματος, τάσης, δοκιμές σε μηχανική καταπόνηση και καταπόνηση όταν ασκείται φορτίο χιονιού..... | 145 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.11: Η Φβ ενέργεια που παράγεται από το Φβ πλαίσια ανάλογο με το ηλιακό δυναμικό κάθε μήνα. | 147 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.12: Σύνδεσμολογία των φωτοβολταϊκών κλαδών, των ρυθμιστών φορτίσης που καταλήγουν στους συσσωρευτές. Η κόκκινη γραμμή είναι το καλώδιο σύνδεσμολογίας τύπου RJ 45 που ενώνει τους ρυθμιστές, η κίτρινη γραμμή είναι το καλώδιο που φεύγει από κάθε φωτοβολταϊκό κλαδο και καταλήγει στους συσσωρευτές. | 151 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.13: Προτεινόμενος τρόπος σύνδεσης του υβριδικού Φβ συστήματος στο πίνακα φόρτισμού και στο διαγλω AC 220V διανομής του πλοίου..... | 157 |

| | |
|--|-----|
| ΕΙΚΟΝΑ 4.14: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΣΤΙΣ ΔΥΟ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΙ ΤΟ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑ..... | 159 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.15: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΝΤΙΖΕΛ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥ ΕΞΟΔΟΥ 37,7 ΚΑΙ Η ΙΣΧΥΣ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΙ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΟΡΤΙΟΥ. | 160 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.16: ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΙ Ο ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ Η ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΤΑΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΤΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ. | 162 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.17: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΙΔΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ | 165 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4.18: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΩΝ ΕΤΗΣΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO ₂ , CO, SO _x , NO _x , ΤΕΦΡΑΣ ΗC ΚΑΙ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΡΜ 2,5 ΑΠΟ ΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΤΗΣ ΝΤΙΖΕΛ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΠΟΥ ΤΡΟΦΟΔΟΤΕΙ ΤΑ ΦΟΡΤΙΑ. | 171 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|---|-----|
| ΠΙΝΑΚΑΣ 1. 1: Α) ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ (ΤΙΜΕΣ ΣΕ ΕΚΑΤΟΜΜΥΡΙΑ ΤΟΝΟΥΣ CO ₂) ΚΑΙ Β) ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ E ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ E (ΤΙΜΕΣ ΣΕ ΕΚΑΤΟΜΜΥΡΙΑ ΤΟΝΟΥΣ CO ₂ E) ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ | 20 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ BLUE STAR DELOS..... | 40 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ..... | 40 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 2. 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΙ ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΟΥΣ 25°C..... | 74 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3. 1: Ο ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΦΒ ΠΕΔΙΟΥ..... | 116 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 3. 2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΠΑΛΙΟΤΕΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ | 121 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ, ΟΙ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΕΣ ΚΥΡΙΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ Η ΗΛΕΚΤΡΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΝΤΙΖΕΛ. | 131 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΟΥ. | 134 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: ΤΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΑ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΕΙ ΤΟ ΠΛΟΙΟ | 138 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4: Ο ΚΑΙΡΟΣ ΣΤΗΝ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥΠΟΛΗ ΟΛΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ ΑΠΟ ΤΟ 1990-2015. | 140 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5: Η ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ..... | 141 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6: Η ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΤΑ 16 ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΚΑΘΕ ΜΕΡΑ | 147 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7: ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ, ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ. | 148 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8: ΤΙΜΕΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΣΕ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ. | 149 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.9: ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΡΡΤ 150/60..... | 149 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.10: Η ΙΣΧΥΣ ΑΙΧΜΗΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΟΙ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ. | 152 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.11: Η ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΣΕ ΑΗ..... | 153 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.12: ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ..... | 154 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.13: ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΕΚΤΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ | 156 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 14: Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΟΥ ΚΑΛΥΠΤΕΙ ΤΟ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΟΛΟΥ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΣΕ ΚW/H. | 158 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.15: Η ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΙ Ο ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΟΤΑΝ ΔΙΟΧΕΤΕΥΕΤΑΙ ΚΑΙ Η ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ. | 162 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.16: Η ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΥΟ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ..... | 164 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.17: ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΝΤΙΖΕΛ ΓΙΑ ΤΗΣ ΔΥΟ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ ΕΝΑ ΧΡΟΝΟ. | 165 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.18: ΤΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΑΠΟ ΤΟ ΑΡΝΗΤΙΚΟ ΜΕΛΟΣ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ 4.13 ΠΟΥ ΑΦΟΡΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ. | 166 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.19: Όριο εκπομπών Tier 1 για ναυτικούς κινητήρες προώσης και για βοηθητικούς ανάλογα με την ισχύ τους σε kW | 167 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.20: Όρια εκπομπών Tier 2 για ναυτικούς κινητήρες προώσης και για βοηθητικούς κινητήρες. Το νη,ζ εκφράζει τα λίτρα ανά κύλινδρο του κινητήρα..... | 167 |

| | |
|--|-----|
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.21: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΒΑΘΜΙΔΑΣ 3 ΓΙΑ ΝΟΧ, ΝΜΝΟC, ΡΜ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥC ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ / ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥC ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΦΑΣΕΙC ΤΑΞΙΔΙΟΥ ΠΛΟΙΟΥ (ΕΝ ΠΛΩ, ΕΝ ΟΡΜΩ, ΕΛΙΓΜΟΙ) ΣΕ G/ ΚΩΗ..... | 169 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.22: ΣΥΝΤΕΛΕCΤΕC ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΕ (G/ΚΩΗ), ΓΙΑ ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΥC ΝΑΥΤΙΚΟΥC ΚΙΝΗΤΗΡΕC ΜΕCΑΙΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΚΑΥCΙΜΟ ΠΟΥ ΧΡΗCΙΜΟΠΟΙΟΥΝ | 170 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.23: Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΕ ΚΩΗ ΣΕ ΕΝΑ ΕΤΟC ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙCΜΟ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ..... | 170 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.24: ΟΙ ΕΚΠΟΜΠΕC ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΓΙΑ ΤΙC ΔΥΟ ΚΑΤΑCΤΑCΕΙC ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑC ΚΑΙ Η ΜΕΙΩCΗ ΡΥΠΩΝ ΟΤΑΝ ΧΡΗCΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΚΑΙ ΤΟ ΦΒ CΥCΤΗΜΑ. | 170 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ 4.25: ΚΟCΤΟC ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ CΥCΤΗΜΑΤΟC | 172 |

Κατάλογος ακρωνύμιων και συντομογραφιών

AC: Alternating current
BMS: Battery Management System
CCS: China Classification Society
CdTe: Cadmium telluride
CIGS: Copper Indium Gallium Selenide
CH₄: Methane
CO: Carbon monoxide
CO₂: Carbon dioxide
DC: Direct Current
Eg: Energy gap
DIF: Diffuse horizontal irradiation
DNI: Direct normal irradiation
DOD: Depth of Discharge
DWT: Deadweight tonnage
ECA: Emission Control Areas
EMEP: European Monitoring and Evaluation Programme
GHG: Greenhouse Gas Emissions
GTI: Global horizontal irradiation
GTI_{opta}: Global tilted irradiation at optimum angle
HC: Ethyne
HIT: Hetero junction with Intrinsic Thin-layer
IMO: International Maritime Organization
MARPOL: The International Convention for Prevention of Marine Pollution For Ships
MDO: Marine Diesel Oil
MEPC: Marine Environment Protection Committee
MPPT: Maximum power point tracking
NiCd: Nickel–Cadmium
NiMH: Nickel Metal Hydride
NMOT: Nominal Module Operating Temperature
N₂O: Nitrous oxide
NOX: Nitrogen Oxides
PV: Photovoltaics
PM: Particulate matter
Si: Silicon
SO₂: Sulfur dioxide
SOX: Sulfur Oxides
STC: Standard Test Conditions
VOCs: Volatile organic compounds
LNG: Liquefied natural gas

ΕΕ: Ευρωπαϊκή Ένωση

ΕΠΘΠ: Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος

ΖΑ: Ζώνη Αγωγιμότητας

ΖΣ: Ζώνη Σθένους

ΟΗΕ: Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών

ΠΣΝ: Παγκόσμιο Συμβούλιο Ναυτιλίας

ΥΣΘΙ: Υβριδικό Σύστημα Θαλάσσιας Ισχύος

ΦΒ: Φωτοβολταϊκά

Πρόλογος

Το αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι η μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος σε πλοίο της κατηγορίας passengers boat. Σκοπός της εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η κάλυψη κάποιων φορτίων του πλοίου ως δευτερεύουσα, φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας. Ο στόχος είναι η μείωση καυσίμου και εκπομπών καυσαερίων της ηλεκτρογεννήτριας ντίζελ που επιτυγχάνεται μέσω της ενεργειακής κάλυψης των φορτίων που προέρχονται από την ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος. Επιπλέον, για να είναι οικονομικά ωφέλιμη η εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος συγκρίνεται το κόστος της με την μείωση καυσίμου της ηλεκτρογεννήτριας ντίζελ σε βάθος χρόνου λειτουργίας 20 ετών. Στο πλαίσιο της ανάπτυξης της μελέτης το ηλιακό δυναμικό της περιοχής πλεύσης του πλοίου έχει υπολογιστεί από το σημείο αναχώρησης, διότι δεν είναι γνωστή ανά πάσα στιγμή η ηλιακή ενέργεια που λαμβάνει το φωτοβολταϊκό πεδίο καθώς κινείται το πλοίο. Τα βήματα της μελέτης είναι ο υπολογισμός του ελεύθερου χώρου στο κατάστρωμα του πλοίου, το πλήθος των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) πλαισίων και η συνδεσμολογία τους, το πλήθος των αντιστροφέων DC-DC, το πλήθος των συσσωρευτών και η χωρητικότητα τους και η επιλογή του αναστροφέα DC-AC. Επιπλέον, υπολογίζεται η παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό πεδίο, τα φορτία του πλοίου σε κατάσταση εν πλω και εν όρμω, η αρχική κατανάλωση καυσίμου της γεννήτριας ντίζελ που καλύπτει της ανάγκες του πλοίου στις δύο καταστάσεις λειτουργίας και στην συνέχεια η κατανάλωση καυσίμου με την εφαρμογή του φωτοβολταϊκού συστήματος. Επίσης, υπολογίζονται οι εκπομπές καυσαερίων πριν και μετά την χρήση του ΦΒ συστήματος, καθώς και το κόστος εγκατάστασης αυτού σε σύγκριση με την εξοικονόμηση χρημάτων που προέρχεται από την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Τα κεφάλαια που συνθέτουν την διπλωματική εργασία είναι τα εξής:

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή και αναφορά στη ρύπανση της ατμόσφαιρας που προέρχεται από τις μηχανές των πλοίων λόγω της καύσης ορυκτού καυσίμου και στους κανονισμούς που έχουν θεσπιστεί για τη μείωση των εκπομπών καυσαερίων. Επιπλέον αναφορά στην ηλιακή ενέργεια και στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές που έχουν γίνει σε πλοία.

Κεφάλαιο 2: Αναφορά στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, καθώς και στους τρόπους συνδεσμολογίας τους.

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση του τρόπου σύνδεσης των ΦΒ πλαισίων, των κατηγοριών των φωτοβολταϊκών συστημάτων και των προβλημάτων που παρουσιάζουν οι κατηγορίες των ΦΒ συστημάτων στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επιπλέον, αναφορά στους αναστροφείς DC-AC που χρησιμοποιούνται στα ΦΒ συστήματα, αλλά και στις κατηγορίες των συσσωρευτών.

Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση της μελέτης εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος σε υπαρκτό πλοίο. Επίσης, αναφέρονται όλα τα χαρακτηριστικά του πλοίου όπως, ηλεκτρικός ισολογισμός, το ηλεκτρικό σχέδιο του πλοίου, τα χαρακτηριστικά της ντίζελ ηλεκτρογεννήτριας και τα δρομολόγια που πραγματοποιεί. Στην συνέχεια, επιλογή των φωτοβολταϊκών πλαισίων, του ελεγκτή φορτίου DC-DC, του αναστροφέα DC-AC και των συσσωρευτών. Επιπλέον, υπολογισμός της ενέργειας που παράγεται από το ΦΒ πεδίο, των φορτίων που μπορεί να καλύψει το ΦΒ σύστημα, της αρχικής κατανάλωσης καυσίμου της ντίζελ ηλεκτρογεννήτριας και της τελικής μετά την χρήση του ΦΒ συστήματος. Ακόμα, παρουσίαση των υπολογισμών των εκπομπών καυσαερίων της ντίζελ ηλεκτρογεννήτριας πριν την χρήση του ΦΒ συστήματος και μετά, καθώς και του κόστους εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος και κατανάλωσης καυσίμου πριν και μετά την χρήση του ΦΒ συστήματος. Τέλος, παράθεση των συμπερασμάτων από την εφαρμογή του ΦΒ συστήματος στο πλοίο.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία

Η ατμοσφαιρική ρύπανση από την ναυτιλία και κυρίως από τις διεθνείς θαλάσσιες μεταφορές έχουν μεγάλες επιπτώσεις στην μόλυνση της ατμόσφαιρας και συμβάλλουν σε ένα ποσοστό στην αλλαγή του κλίματος σε όλη τη Γη. Με βάση τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization, IMO), οι θαλάσσιες μεταφορές αλλά και ο στόλος των πλοίων έχουν αυξηθεί ραγδαία από το 1980 έως το 2009 (Μητρόπουλος, 2009). Η αύξηση του στόλου των πλοίων και των θαλάσσιων μεταφορών έχει ως συνέπεια την αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Emissions, GHG) και κατά κύριο λόγο του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

Από τις μελέτες του IMO παρατηρήθηκε ότι μεγαλύτερη ρύπανση ποέρχεται από τα πλοία τύπου tanker, balt carrier και container, ενώ ακόμα έχει παρατηρηθεί ότι όσο μικρότερη είναι η ολική χωρητικότητα του πλοίου (DWT), τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα καυσαερίων που εκλύονται στο περιβάλλον (Fenhann, 2017). Για το λόγο αυτό, ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών (Ο.Η.Ε.), ο IMO και η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) στο πλαίσιο της ευρύτερης συζήτησης σχετικά με την αλλαγή του κλίματος και τους επιβλαβείς ρύπους έχει αυξήσει τις εκκλήσεις προς τις ναυτιλιακές εταιρίες για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (ΕΕ 2009/16/ΕΚ). Συγκεκριμένα, η MARPOL, ως παράρτημα του IMO, ειδικεύεται στη μείωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος από τα πλοία και είναι αρμόδια για την επίβλεψη της εφαρμογής των κανόνων των σχετικών με τον περιορισμό της περιβαλλοντολογικής ρύπανσης (IMO, 2009). Μεταξύ διαφόρων, το παράρτημα IV θέτει τους κανονισμούς για τη συμμόρφωση των ναυτιλιακών εταιρειών προς την κατεύθυνση της μείωσης των επιβλαβών ατμοσφαιρικών ρύπων που προέρχονται από τα πλοία. Επιπλέον, το ως άνω παράρτημα του MARPOL έχει θεσπίσει νόμους για την αποφυγή των εκπομπών των οξειδίων του θείου (SO_x) και αζώτου (NO_x), ενώ παράλληλα έχει απαγορεύσει όσα αέρια συνεισφέρουν στη καταστροφή της στιβάδας του όζοντος.

Με βάση τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε το 2009 από τον IMO για την εκπομπή του CO₂ εκτιμάται ότι το 2007 τα πλοία απέβαλαν στην ατμόσφαιρα 1046 εκ. τόνους δηλαδή 3,3% από τις παγκόσμιες εκπομπές, ενώ τον ίδιο χρόνο οι εκπομπές CO₂ για την διεθνή ναυτιλία ήταν 870 εκατ. τόνους, δηλαδή 2,7 % από τις παγκόσμιες εκπομπές. Το υπόλοιπο ποσοστό καταχωρείται στην εγχώρια ναυτιλία (IMO, 2009).

Μια νεότερη μελέτη του IMO το 2014 έδειξε ότι η διεθνής ναυτιλία απέβαλε 796 εκατ. τόνους CO₂ το 2012, δηλαδή 2,2% από τις συνολικές εκπομπές από όλους τους παράγοντες αυτό το έτος. Επίσης μια σημαντική πρόβλεψη που έχει κάνει ο IMO για τις εκπομπές CO₂ από την ναυτιλία είναι ότι σε σχέση με το 2012 το ποσοστό μπορεί να αυξηθεί 50% έως 250% κατά το 2050 και αυτό θα οφείλεται στην μεγάλη αύξηση του στόλου (IMO, 2014).



ΕΙΚΟΝΑ 1.1: Παγκόσμιες εκπομπές CO₂ από διάφορους οικονομικούς κλάδους. Πηγή: *In the Second IMO GHG study 2009.*

Το CO₂ είναι από τα σημαντικότερα αέρια GHG, τόσο από πλευράς ποσότητας όσο και συνεισφοράς στην αύξηση της θερμοκρασίας της Γής. Επίσης το CO₂ όταν αναμιγνύεται με το οξείδιο του αζώτου έχει σαν αποτέλεσμα να συσσωρεύονται σωματίδια στην ατμόσφαιρα και να επηρεάζουν το pH της βροχής, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την όξινη βροχή η οποία προκαλεί μεγάλες καταστροφές σε αρχαία μνημεία, κτήρια αλλά και σε μεγάλες δασικές εκτάσεις (IMO, 2009).

Για τις εκπομπές των αερίων GHGs που περιέχουν CO₂, CH₄ και N₂O ή αλλιώς CO₂e, η μελέτη του IMO το 2014 έδειξε ότι το 2012 εκλύθηκαν στην ατμόσφαιρα 816 εκατομμύρια τόνοι CO₂e για GHGs που συνδυάζουν CO₂, CH₄ και N₂O. Ο Πίνακας 1.1 παρουσιάζει τις συνολικές εκπομπές CO₂ και CO₂e από όλους τους τομείς της ναυτιλίας σε σύγκριση με τις παγκόσμιες συνολικές εκπομπές CO₂ και CO₂e.

Πίνακας 1. 1: α) Εκπομπές CO₂ στην ναυτιλία σε σύγκριση με τις παγκόσμιες εκπομπές CO₂ (τιμές σε εκατομμύρια τόνους CO₂) και β) Εκπομπές CO₂e στην ναυτιλία σε σύγκριση με τις παγκόσμιες εκπομπές CO₂e (τιμές σε εκατομμύρια τόνους CO₂e) από την μέθοδο *Πηγή: (IMO 2014)*

Third IMO GHG Study 2014 CO₂

| Year | Global CO ₂ ¹ | Total shipping | % of global | International shipping | % of global |
|---------|-------------------------------------|----------------|-------------|------------------------|-------------|
| 2007 | 31,409 | 1,100 | 3.5% | 885 | 2.8% |
| 2008 | 32,204 | 1,135 | 3.5% | 921 | 2.9% |
| 2009 | 32,047 | 978 | 3.1% | 855 | 2.7% |
| 2010 | 33,612 | 915 | 2.7% | 771 | 2.3% |
| 2011 | 34,723 | 1,022 | 2.9% | 850 | 2.4% |
| 2012 | 35,640 | 938 | 2.6% | 796 | 2.2% |
| Average | 33,273 | 1,015 | 3.1% | 846 | 2.6% |

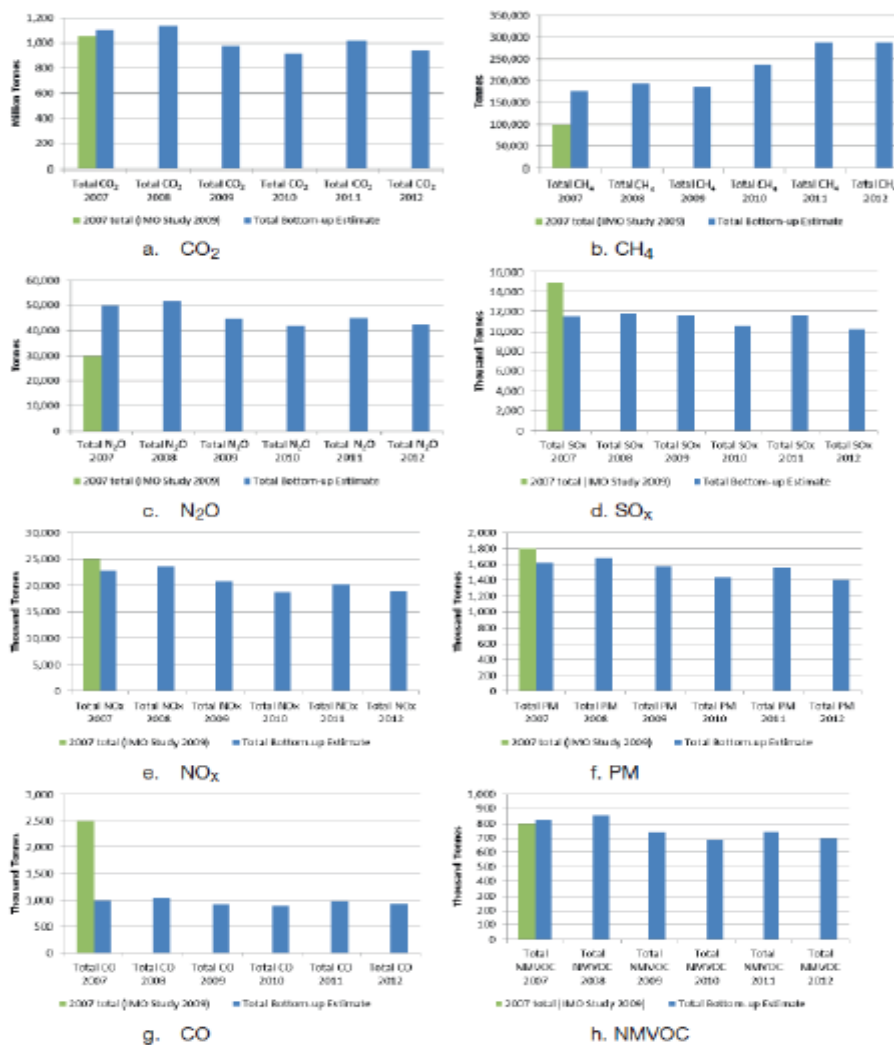
Third IMO GHG Study 2014 CO₂e

| Year | Global CO ₂ e ² | Total shipping | % of global | International shipping | % of global |
|---------|---------------------------------------|----------------|-------------|------------------------|-------------|
| 2007 | 34,881 | 1,121 | 3.2% | 903 | 2.6% |
| 2008 | 35,677 | 1,157 | 3.2% | 940 | 2.6% |
| 2009 | 35,519 | 998 | 2.8% | 873 | 2.5% |
| 2010 | 37,085 | 935 | 2.5% | 790 | 2.1% |
| 2011 | 38,196 | 1,045 | 2.7% | 871 | 2.3% |
| 2012 | 39,113 | 961 | 2.5% | 816 | 2.1% |
| Average | 36,745 | 1,036 | 2.8% | 866 | 2.4% |

Η μελέτη του IMO 2014 υπολογίζει κατά την περίοδο (2007-2012) ετήσιο μέσο όρο 20,9 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του αζώτου NO και NO₂ ή συνολικά NO_x που παράγονται από την οξείδωση του N του αέρα που παίρνει μέρος στην καύση. Η παραγωγή NO και NO₂ εξαρτάται από το είδος του κινητήρα, από το λόγο αέρα καυσίμου και σε συνδυασμό με τις μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις έχουμε ευνοϊκό σχηματισμό NO_x. Τα 20,9 εκατομμύρια τόνων NO_x αντιστοιχούν σε 6,3 εκατομμύρια τόνων στοιχειακού αζώτου N. Ενώ ο ετήσιος μέσος όρος από όλη την ναυτιλία για τα οξείδια του θείου SO_x (ως SO₂) που παράγεται από την οξείδωση του θείου που περιέχεται στο καύσιμο είναι 11,3 τόνοι. Αυτή η ποσότητα αντιστοιχεί σε 5,6 εκατομμύρια τόνους στοιχειακού θείου S.

Τα NO_x και SO_x παίζουν έμμεσο ρόλο στο σχηματισμό ατμοσφαιρικού όζοντος και στην δημιουργία φωτοχημικού νέφους σε περιοχές που υπάρχουν λιμάνια και μεγάλες αστικές περιοχές. Ετησίως, η διεθνής ναυτιλία εκτιμάται ότι παράγει περίπου 18,6

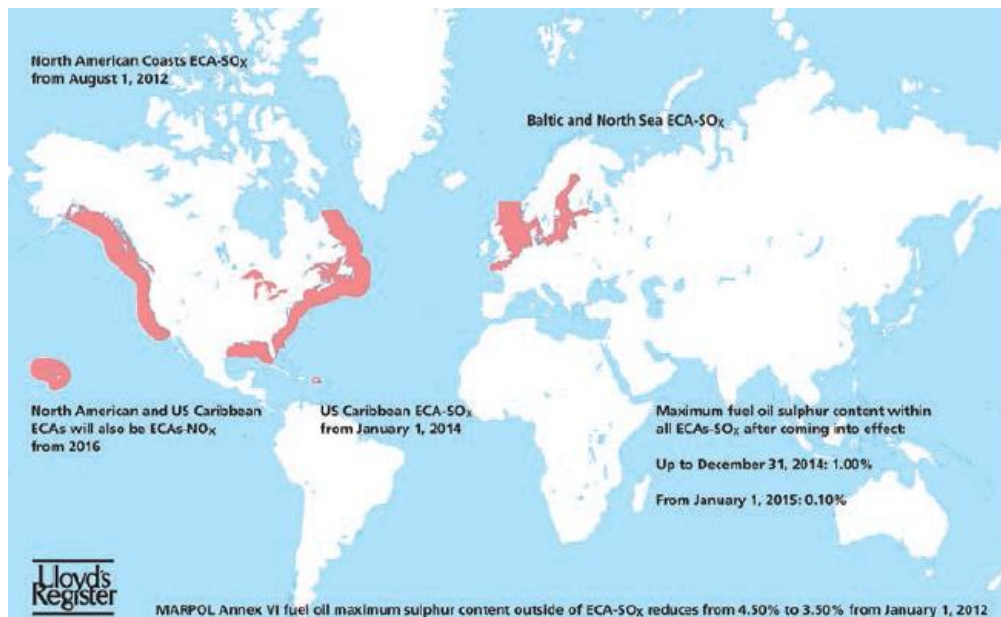
εκατομμύρια και 10,6 εκατομμύρια τόνους NO_x (ως NO₂) και SO_x (ως SO₂), αντίστοιχα. Αυτό μετατρέπεται σε σύνολο 5,6 εκατομμυρίων και 5,3 εκατομμυρίων τόνων NO_x και SO_x (ως στοιχειακό άζωτο και θείο, αντίστοιχα). Οι παγκόσμιες εκπομπές NO_x και SO_x από όλη την ναυτιλία αντιπροσωπεύουν περίπου το 15% και το 13% των παγκόσμιων NO_x και SO_x από ανθρωπογενείς πηγές που αναφέρονται στην Πέμπτη Έκθεση Αξιολόγησης IPCC (AR5), αντίστοιχα. Αξιοσημείωτο είναι ότι το SO₂ και NO_x και τα αιωρούμενα σωματίδια επιβαρύνουν την υγεία του ανθρώπου και το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, το SO₂, κατόπιν μετατροπής του σε θειικό οξύ επιφέρει τη μείωση του pH της βροχής και συνακόλουθα την πρόκληση του φαινομένου της όξινης βροχής (IMO, 2014).



ΕΙΚΟΝΑ 1. 2: Η μπλε γραμμή απεικονίζει όλες τις εκπομπές CO₂ τις ναυτιλίας από το (2007 έως 2012) και η πράσινη μόνο το έτος 2007.

Πηγή: (3rd GHG Study IMO, 2012).

Τα όρια εκπομπής NO_x ισχύουν παγκοσμίως, ενώ αυτή τη στιγμή οι απαιτήσεις εκπομπών SO_x του Παραρτήματος VI διαφέρουν ανάλογα με το πού ταξιδεύει ένα πλοίο. Ισχύουν αυστηρότερα επίπεδα SO_x σε ορισμένες περιοχές ελέγχου εκπομπών. Επί του παρόντος, υπάρχουν τέσσερις περιοχές ελέγχου εκπομπών (Emission control areas, ECA) που βρίσκονται στη Βαλτική Θάλασσα, τη Βόρεια Θάλασσα, γύρω από τη Βόρεια Αμερική και την Καραϊβική των ΗΠΑ, όπως φαίνεται στη εικόνα 1.3 (Parker, 2013).



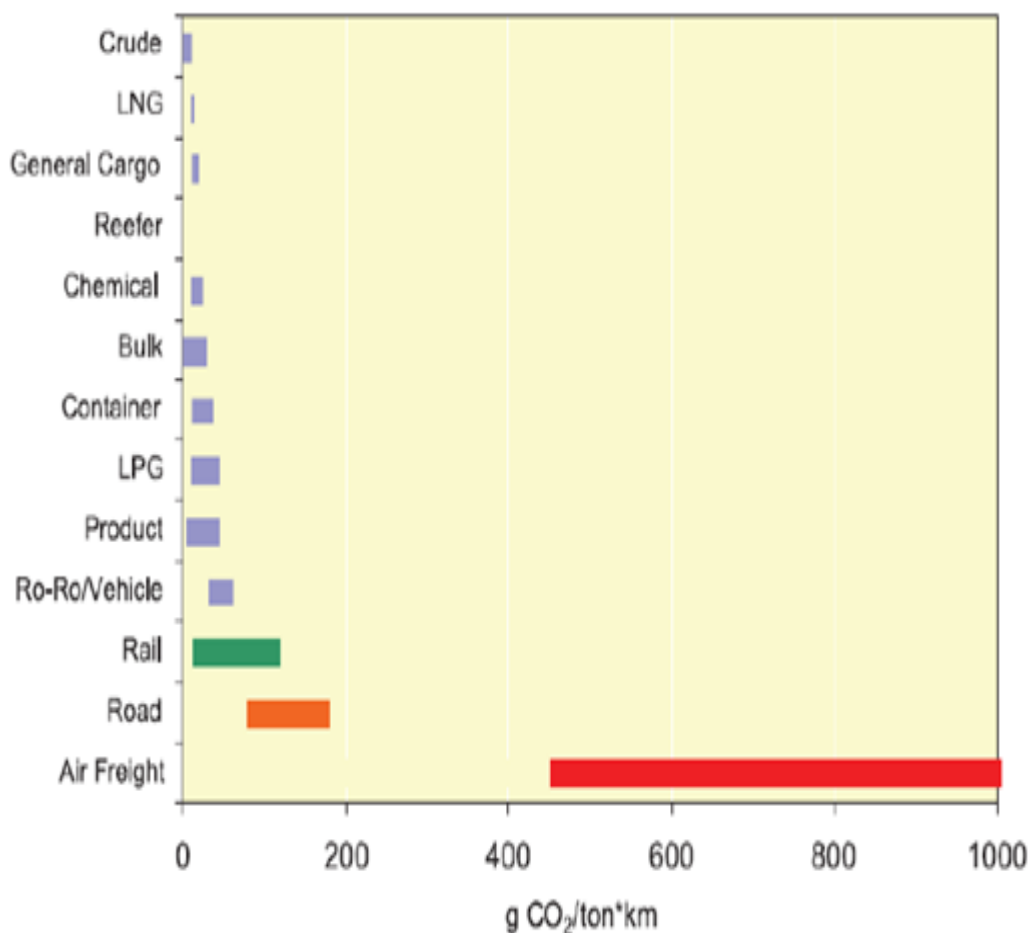
ΕΙΚΟΝΑ 1. 3: Περιοχές ελέγχου εκπομπών ECA. Πηγή: (Parker, 2013)

Ένα ακόμα στοιχείο που θα πρέπει να αναφέρουμε με βάση τις εκπομπές καυσαερίων από τα πλοία είναι οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs). Σε ορισμένες περιοχές και λιμάνια για τις εκπομπές VOCs τα δεξαμενόπλοια είναι υποχρεωμένα να φέρουν ειδικό σύστημα φιλτραρίσματος καυσαερίων. Οι έλεγχοι γίνονται σε συγκεκριμένους λιμένες με κριτήριο το φορτίο που φέρει κάθε πλοίο (Third IMO GHG Study, 2014).

Κατά το χρονικό διάστημα 2007-2012, ο μέσος όρος κατανάλωσης καυσίμου ετησίως κυμάνθηκε μεταξύ περίπου 247 εκατομμυρίων και 325 εκατομμυρίων τόνων καυσίμου που καταναλώθηκαν από όλα τα πλοία της παρούσας μελέτης, που βασίζεται στο α) και β) του πίνακα 1.1 (Third IMO GHG Study, 2014).

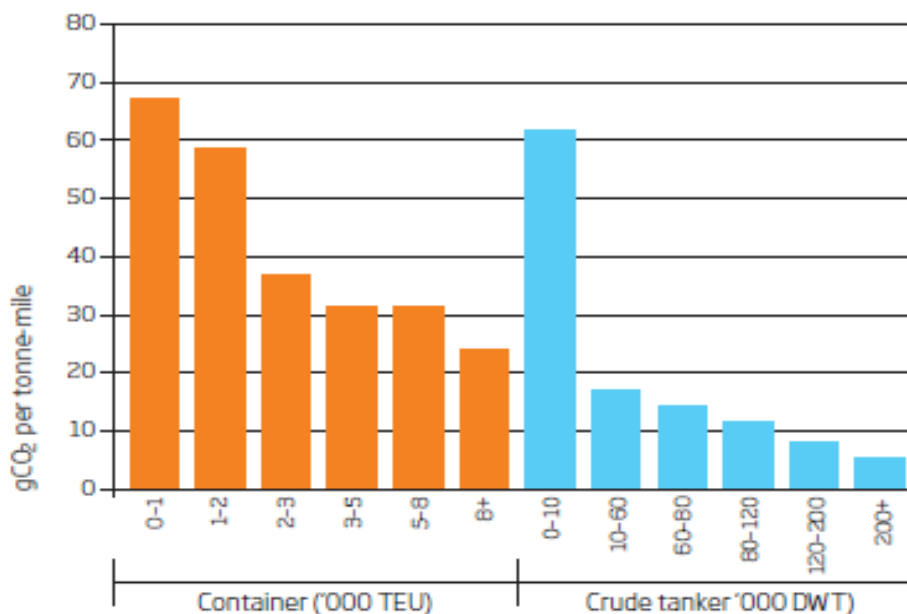
Παρόλο που η βιομηχανία έχει μειώσει την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας όλο και περισσότερο θερμικά αποδοτικούς κινητήρες ντίζελ τις τελευταίες δεκαετίες, η τρέχουσα συνολική κατανάλωση μαζούτ υπερβαίνει τους 350 εκατομμύρια τόνους ετησίως (Parker, 2013).

Προς το παρόν, περίπου το 95% των παγκόσμιων εμπορευμάτων μεταφέρονται δια θαλάσσης. Τα πλοία βάσει μελέτης είναι πιο φιλικά στο περιβάλλον σε όρους εκπομπών CO₂ από άλλους κλάδους μεταφοράς. Χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο δεξαμενόπλοιο ως αναφορά για τη μεταφορά ενός τόνου φορτίου πάνω από ένα μίλι, η εικόνα 1.4 δείχνει τη σχετική σχέση μεταξύ διαφορετικών τρόπων μεταφοράς. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε πριν περίπου 10 χρόνια και σήμερα λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας, τα ποσοστά από τους άλλους κλάδους έχουν μειωθεί (Parker, 2013).



ΕΙΚΟΝΑ 1. 4: Οι εκπομπές CO₂ σε διάφορα μεταφορικά και εμπορικά μέσα. Πηγή: (IMO, 2009).

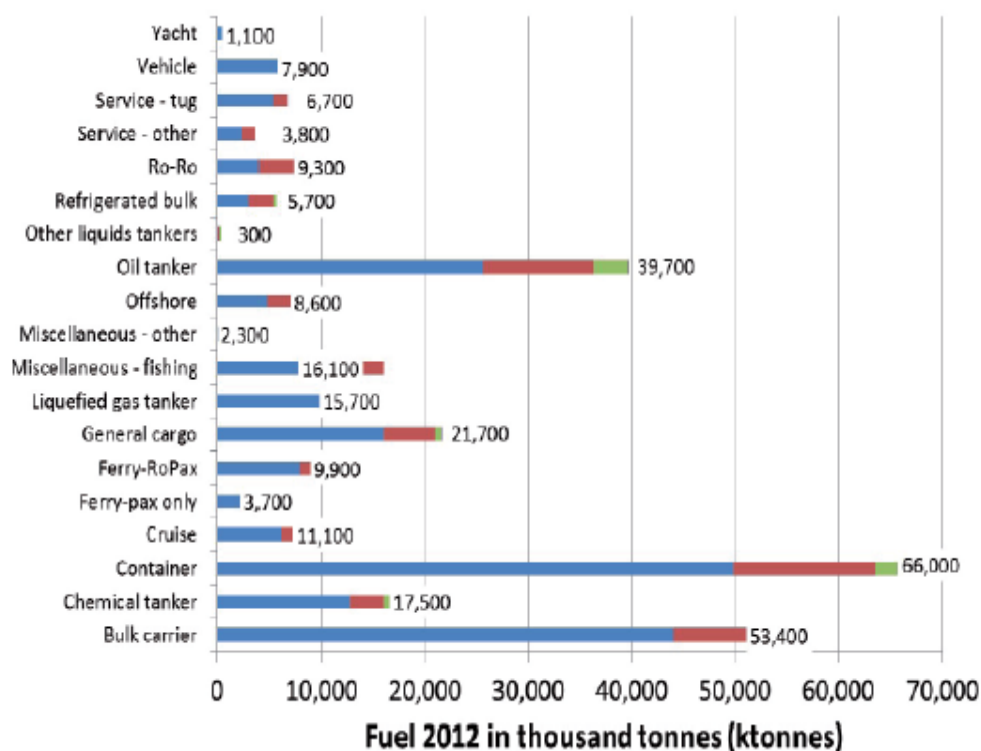
Η απόδοση του άνθρακα έχει ισχυρή σχέση με το μέγεθος του πλοίου. Η εικόνα 1.5 περιγράφει την μέση ενεργειακή απόδοση ανά μεταφορικό έργο που εκφράζεται σε g CO₂ / tonne × mile και του μεγέθους των πλοίων, στην περίπτωση αυτή σχεδιάζεται για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και δεξαμενόπλοια αργού πετρελαίου. Η μείωση των ειδικών εκπομπών είναι ανάλογη με το αυξανόμενο μέγεθος του πλοίου όπως φαίνεται (Parker, 2013).



ΕΙΚΟΝΑ 1.5: Απόδοση άνθρακα σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και δεξαμενόπλοια αργού πετρελαίου. Πηγή: *Royal Academy of Engineering, July 2013.*

Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι οι επιπτώσεις από τις εκπομπές καυσαερίων σήμερα δεν έχουν τόσο μεγάλο αντίκτυπο στο περιβάλλον όσο θα έχουν τα επόμενα χρόνια. Για το λόγο αυτό οι διεθνείς οργανισμοί και τα κράτη θα πρέπει να το λάβουν πιο σοβαρά υπόψη τους αυτό το ζήτημα σε συνεργασία με το IMO. Στο ευρύτερο πλαίσιο, μια πρόσφατη έκθεση της Royal Society ανέφερε ότι οι πιο ισχυρές οικονομικά χώρες θα πρέπει αφενός να εξασφαλίσουν την οικονομία τους και αφετέρου να προβούν σε αλλαγές που θα επιφέρουν μείωση στη μόλυνση του περιβάλλοντος. Επιπλέον, θα πρέπει να επενδύσουν σε νέες τεχνολογίες που θα επιφέρουν καλύτερη απόδοση του πλοίου, ενώ ταυτόχρονα θα είναι φιλικότερες προς το περιβάλλον (Parker, 2014).

Στην εικόνα 1.6 αναγράφεται η ετήσια κατανάλωση καυσίμου στη ναυτιλία για διαφορετικούς τύπους πλοίων. Η μπλε γραμμή δείχνει το άθροισμα κατανάλωσης της κύριας μηχανής, η πράσινη γραμμή δείχνει το άθροισμα της βοηθητικής μηχανής και η κόκκινη το άθροισμα από την κατανάλωση στο λέβητα.



ΕΙΚΟΝΑ 1.6: Ετήσια κατανάλωση καυσίμου στη ναυτιλία ανά τύπο πλοίου και σύστημα καύσης. Πηγή: (Third IMO GHG Study, 2014).

Στην επόμενη ενότητα θα αναφερθούμε στους κανονισμούς που τεθήκαν σε εφαρμογή για την ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία.

1.2 Διεθνείς κανονισμοί για την εκπομπή καυσαερίων στην ναυτιλία

Ο όρος ρύπανση χρησιμοποιείται ευρέως εδώ και πολλά χρόνια και χρησιμοποιείται με διάφορες έννοιες. Ως ρύπανση θεωρείται σήμερα οτιδήποτε είναι επιβλαβές για το περιβάλλον. Με άλλα λόγια, ο όρος ρύπανση χρησιμοποιείται όταν υπάρχει ένα μεγάλο ποσοστό συγκέντρωσης ουσιών, θορύβων, ακτινοβολίας ή άλλων μορφών ενέργειας για μεγάλη χρονική περίοδο που μπορούν να δημιουργήσουν σοβαρές επιπτώσεις στον άνθρωπο αλλά και στην χλωρίδα και πανίδα της Γης.

Η αναφορά στη μόλυνση του περιβάλλοντος χαρακτηρίζεται από τις υψηλές συγκεντρώσεις παθογόνων μικροοργανισμών ή ιζημάτων στο περιβάλλον. Η ρύπανση αυτού ως έννοια αφορά στις αρνητικές επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα και μπορεί να θεωρηθεί υποβάθμιση αυτού διότι προκαλεί αλλοίωση των φυσικών χαρακτηριστικών.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση ή γενικότερα η ρύπανση του αέρα θεωρείται διασυνοριακή και είναι η λιγότερο επιστημονικά μελετημένη.

Η διεθνής ναυτιλιακή κοινότητα δραστηριοποιείται σε χωρικά και διεθνή ύδατα σε όλο τον κόσμο και χρειάζεται ένα ρυθμιστικό καθεστώς που να μπορεί να εξυπηρετήσει σωστά αυτό το επίπεδο διεθνούς πολυπλοκότητας. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO), με έδρα το Λονδίνο, είναι μέλος του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ) και αποτελεί εξειδικευμένο οργανισμό για διεθνείς συνθήκες ναυτιλιακής κοινότητας με σκοπό να χρησιμοποιηθεί από τα κράτη-μέλη όταν υπάρξει ανάγκη. Ο IMO ιδρύθηκε το 1948 και τέθηκε σε ισχύ μετά από 10 χρόνια. Ως παγκόσμιος οργανισμός, επηρεάζει την ναυτιλιακή αγορά, την πολιτική των ναυτιλιακών εταιριών, τα συνδικάτα των ναυτικών αλλά έχει επιρροή και στις κυβερνήσεις (Αλεξόπουλος, 2018).

Οι κύριοι στόχοι του IMO είναι οι εξής:

1. Η αύξηση μέτρων ασφαλείας στην ξηρά και θάλασσα.
2. Το ανθρώπινο δυναμικό στην εμπορική ναυτιλία.
3. Η εξάλειψη και προστασία της θαλάσσιας ρύπανσης.

Οι στόχοι που προαναφέρθηκαν αποσκοπούν στην δημιουργία συμβάσεων, κωδίκων και προτάσεων, τα οποία στην συνέχεια θα ψηφιστούν από κράτη-μέλη για να εφαρμοστούν. Κάθε στοιχείο αντιστοιχεί σε μια διεθνή σύμβαση π.χ. η διεθνής σύμβαση

τις MARPOL έχει ως αντικείμενο τη ρύπανση του θαλάσσιου και ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος που προκαλείται από την ναυτιλία γενικά (Αλεξόπουλος, 2018).

Η σύμβαση της MARPOL για την προστασία της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος από τα πλοία από τυχόν ατυχήματα ή λειτουργίες του πλοίου, άρχισε να συζητείται το 1973 και 1978 και εφαρμόστηκε μετά από λίγα χρόνια. Η σύμβαση εστιάζει στην αντιμετώπιση της ρύπανσης που προκαλείται τόσο από τα λειτουργικά μέρη του πλοίου όσο και από ατυχήματα. Η σύμβαση της MARPOL χωρίζεται σε έξι παραρτήματα και εισάγει ελέγχους σε κάποιες ειδικές περιοχές για τα λειτουργικά συστήματα του πλοίου (Parker, 2013).

Τα έξι παραρτήματα είναι:

- Παράρτημα I - Κανονισμοί για την κατασκευή και λειτουργία του πλοίου ώστε να μην υπάρχει ρύπανση από το πετρέλαιο.
- Παράρτημα II: Κανονισμοί που αφορούν την θαλάσσια ρύπανση από Υγρές Τοξικές Ουσίες Χύδην.
- Παράρτημα III: Κανονισμοί για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος που αφορά την μετακίνηση επικίνδυνων ουσιών σε συσκευασμένη μορφή.
- Παράρτημα IV: Κανονισμοί για την ασφάλεια του θαλάσσιου περιβάλλοντος από την έγχυση λυμάτων από τα πλοία.
- Παράρτημα V: Κανονισμοί για την ασφάλεια του θαλάσσιου περιβάλλοντος από την έγχυση απορριμμάτων από τα πλοία.
- Παράρτημα VI: Κανονισμοί για την ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία.

Το 1997 έχουμε την δημιουργία και την έγκριση του παραρτήματος IV το οποίο τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005 (IMO, 2009).

1.2.1 Το Πρωτόκολλο του 1997 (Παράρτημα VI της MARPOL)

Στη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, η αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της υπερθέρμανσης του πλανήτη οδήγησε σε κανονισμούς για τον περιορισμό των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) και θείου (SO_x), καθώς και ρύπων που παράγονται από βαριά μέταλλα που με τη σειρά τους περιέχονται στο πετρέλαιο και παράγονται από την ατελή καύση στους κυλίνδρους του κινητήρα ντίζελ. Μεταγενέστερες τροποποιήσεις περιελάμβαναν περιορισμούς στις εκπομπές όζοντος, σωματιδίων και αερίων του θερμοκηπίου (*IMO, 2009*).

Τα πρότυπα εκπομπών παραρτήματος VI για τα NO_x χωρίζονται σε τρεις βαθμίδες: I, II και III. Η βαθμίδα I ήταν η πρώτη που εγκρίθηκε μαζί με το παράρτημα IV το 1997 (*Parker, 2013*).

Το όριο που τέθηκε στην βαθμίδα I είναι 4,5% κ.β. περιεκτικότητας του θείου στο μαζούτ. Επιπλέον, για την ασφάλεια των περιοχών και των λιμανιών με αυξημένη κινητικότητα έχει εφαρμοστεί ένα χαμηλότερο όριο περιεκτικότητας θείου στο μαζούτ το οποίο είναι 1,5% κ.β. . Επιπλέον, το παράρτημα δίνει ως εναλλακτική λύση, τα πλοία να φέρουν ειδικά φίλτρα και τεχνολογίες για την κατακράτηση του θείου ώστε να αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα σε μικρό ποσοστό. Μία από τις πρώτες περιοχές που ορίστηκε για τον έλεγχο εκπομπών SO_x από τα πλοία ήταν η Βαλτική θάλασσα, ενώ τον Ιούλιο το 2005 η Βόρεια θάλασσα συμπεριλήφθηκε στις ειδικές περιοχές (*IMO, 2009*).

1.2.2 Η επανεξέταση του παραρτήματος VI για τις εκπομπές NO_x και SO_x στις ειδικές περιοχές

Με την επανεξέταση του παραρτήματος VI έχουμε νέους κανονισμούς για ακόμα μικρότερη μείωση εκπομπών SO_x και NO_x αλλά και σωματιδίων που αποβάλλονται από τα καυσαέρια του πλοίου στις ειδικές περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECA) (*IMO 2009*).

Το 2008 ο IMO με την στήριξη του Παγκόσμιου Συμβουλίου Ναυτιλίας (ΠΣΝ) μέσα από μερικές τροπολογίες του παραρτήματος VI προχώρησε σε νέες μεταρρυθμίσεις για τις εκπομπές θείου σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι μεταρρυθμίσεις πραγματοποιούνται άμεσα αλλά σίγα σιγά με την πάροδο των χρόνων.

Η περιεκτικότητα του πετρελαίου σε S (θείο) που χρησιμοποιούν τα πλοία μέχρι το 2018 ήταν 3,5% κ.β. . Τον Οκτώβριο του 2016 η Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (ΕΠΘΠ) (Marine Environment Protection Committee - MEPC), παρότρυνε τη MARPOL να μειώσει την περιεκτικότητα του S στο πετρέλαιο από 3,5% σε 0,5% κ.β. . Αυτό το μέτρο εφαρμόστηκε από την 1^η Ιανουαρίου 2020 και αφορά πλοία που δεν εφαρμόζουν τεχνολογία για καθαρισμό καυσίμου ή δεν καταναλώνουν ελαφρύ καύσιμο (IMO, 2009). Για τις ECA τον Ιανουάριο του 2015 το όριο SO_x και PM έφτασε στο 0,10% κ.β.

Η MARPOL στο παράρτημα IV έχει χωρίσει σε ‘Βαθμίδες I, II και III’ ανάλογα με τη χρονολογία που έχουν εγκατασταθεί οι μηχανές στα πλοία, έτσι ώστε στα πιο καινούργια πλοία να ισχύουν αυστηρότερα όρια εκπομπών NO_x. Επίσης, με αυτό τον τρόπο μπορεί να ελέγξει πχ. πλοία που ανήκουν στη ‘Βαθμίδα I’ αλλά θέλουν να εισέρθουν σε περιοχές που το όριο εκπομπών είναι ‘Βαθμίδας III’. Για τους κινητήρες πετρελαίου που εγκαταστάθηκαν σε πλοία που κατασκευάστηκαν λίγο πριν ή μετά το 2011 το όριο εκπομπών θα είναι σύμφωνα με τη ‘Βαθμίδα II’, ενώ για κινητήρες που έχουν κατασκευαστεί μετά από της 1^η Ιανουαρίου του 2020 και πλέουν σε ECA (θάλασσα Καραϊβικής και Βόρεια Αμερική) τα όρια εκπομπών είναι πιο αυστηρά και ανήκουν στη ‘Βαθμίδα III’ (IMO 2009), (Parker 2013). Τα πλοία που έχουν κατασκευαστεί μετά το 1990 αλλά πριν από το 2000 συγκαταλέγονται στη ‘Βαθμίδα I’ και είναι υποχρεωμένα να φέρουν ειδικά συστήματα καθαρισμού καυσαερίων που θα έχουν εγκριθεί από τον IMO (IMO 2009), (Parker 2013).

Η αναθεώρηση του τεχνικού κώδικα NO_x 2008 στο παράρτημα VI της MARPOL θέτει νέους κανόνες για τους κινητήρες που έχουν κατασκευαστεί πριν από το 2000 και θέτει ως δέσμευση να φέρουν πιστοποιητικά με μετρήσεις και κύκλους δοκιμών για τους κινητήρες. Επίσης, κινητήρες που εντάσσονται στο επίπεδο II (Tier II) και επίπεδο III (Tier III) θα πρέπει πραγματοποιούν κύκλους δοκιμών πριν τεθούν σε λειτουργία στο πλοίο. Επιπλέον, για πλοία αναψυχής τα οποία είναι κάτω από 500 κόρους και μήκους άνω 24m και έχουν κατασκευαστεί πριν από 21 Ιανουαρίου 2020 η Βαθμίδα III δεν ισχύει.

Εκτός από τα NO_x και SO_x, αναθεώρηση στους κανονισμούς έχουμε και για ουσίες που προκαλούν καταστροφή του όζοντος της ατμόσφαιρας όπως οι εκπομπές σωματιδίων PM και τέφρα (ash).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι κανονισμοί και τα νέα νομικά πλαίσια που εφαρμόζονται για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μαζί με την άνοδο της τιμής του πετρελαίου, θα επιβαρύνουν οικονομικά τις ναυτιλιακές εταιρίες. Αυτός είναι και ένας λόγος που αναμένεται ένα ποσοστό της θαλάσσιας μεταφοράς να χαθεί και να προστεθεί στις χερσαίες μεταφορές. Τα τελευταία χρόνια παρατηρούμε αύξηση άλλων μορφών ενέργειας πρόωσης, που είναι πιο φιλικές στο περιβάλλον και μερικές από αυτές πολλά υποσχόμενες για το μέλλον, όπως το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), βιοντίζελ, κυψέλες καυσίμου και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική και ΦΒ ενέργεια). Η Φωτοβολταϊκή ενέργεια χρησιμοποιείται για να καλύψει βοηθητικά εξαρτήματα σε μεγάλα πλοία, και θα αναλυθεί εκτενώς στις επόμενες ενότητες.

1.3 Ηλιακή ενέργεια και η εξέλιξη της ως πράσινη ενέργεια

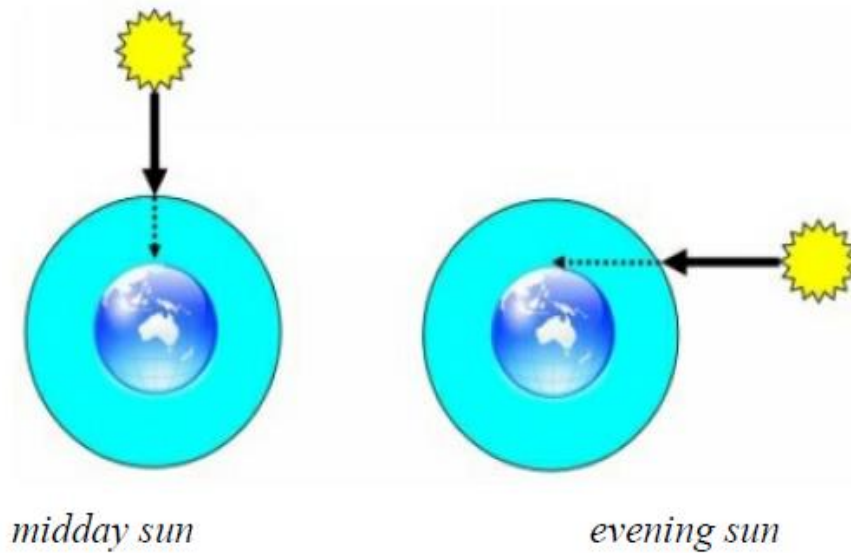
Η ηλιακή ενέργεια είναι ένας γενικός όρος για την παραγωγή ενέργειας, είτε ως θερμότητας είτε ως ηλεκτρικής ενέργειας, από την ηλιακή ακτινοβολία. Ο ήλιος είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την ύπαρξη ζωής πάνω στη Γη (Luque, 2003), εκπέμπει ενέργεια με ρυθμό $3,8 \times 10^{23}$ kW ανά δευτερόλεπτο. Από αυτό το ποσό η Γη λαμβάνει περίπου $1,8 \times 10^{14}$ kW ή 60%, και το υπόλοιπο ποσό αντανακλάται και χάνεται στο διάστημα. Ακόμα κι αν 0,1% αυτής της ενέργειας μπορούσε να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με απόδοση 10%, θα ήταν τέσσερις φορές η παγκόσμια παραγωγή ενέργειας περίπου 3000 GW. Η συνολική ετήσια ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει στη γη είναι πάνω από 7.500 φορές η συνολική ετήσια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στον κόσμο των 450 EJ. Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αξιοποίηση αυτού του σημαντικού ενεργειακού πόρου, είναι χρήσιμο να κατανοήσουμε κάποιες από τις ιδιότητες αυτής της "λάμψης" στον ουρανό (World Energy Council, 2013).

Ο ήλιος αποτελείται από ένα μείγμα αερίων κυρίως υδρογόνου. Ο ήλιος μετατρέπει το υδρογόνο σε ήλιο με μια αντίδραση θερμοπυρηνικής σύντηξης διατηρώντας στην εξωτερική επιφάνεια θερμοκρασία 5800 K. Η έντονη πυρηνική δραστηριότητα παράγει τεράστιες ποσότητες ενέργειας που εκπέμπεται με την μορφή φωτεινής ενέργειας (φωτόνια). Αυτά τα φωτόνια μεταφέρουν τεράστια ποσά ενέργειας και ορμής (Boxwell, 2017).

Τα διαφορετικά φωτόνια έχουν διαφορετικά μήκη κύματος φωτός. Ορισμένα φωτόνια μεταφέρουν μη ορατό φως (υπέρυθρο και υπεριώδες), ενώ άλλα θα μεταφέρουν ορατό φως (που αναφέρεται ως λευκό φως) (Boxwell, 2017).

Τα φωτόνια εκπέμπονται στο διάστημα με ταχύτητα ίση περίπου με 300.000.000 m/s και φτάνουν στη γη σε περίπου οκτώ λεπτά. Κατά τη διάρκεια του ταξιδιού τους από τον ήλιο στη γη, τα φωτόνια μπορούν να συγκρουστούν ή να προσεγγίσουν από άλλα σωματίδια ή να απορροφηθούν από την ύλη αποδίδοντας θερμότητα. Επίσης το μεσημέρι που ο ήλιος είναι κατακόρυφα από τη Γη τα φωτόνια διέρχονται από ένα στρώμα μικρότερου πάχους της ατμόσφαιρας, ενώ τις απογευματινές ώρες είναι παχύτερο αυτό το στρώμα (Boxwell, 2017).

Ο άλλος λόγος για τον οποίο ο ήλιος είναι θερμότερος κατά τη διάρκεια της μέρας παρά στο τέλος της είναι επειδή η ένταση των φωτονίων είναι πολύ υψηλότερη το μεσημέρι. Όταν ο ήλιος είναι χαμηλά στον ουρανό, τα φωτόνια αυτά απλώνονται σε μεγαλύτερη απόσταση από τη γωνία της θέσης της γης σε σχέση με τον ήλιο.



ΕΙΚΟΝΑ 1. 7: Αριστερά φαίνεται η θέση του ηλίου το μεσημέρι σε σχέση με την Γη, δεξιά η θέση του ηλίου σε σχέση με την Γη το βράδυ. Πηγή: Boxwell, 2017

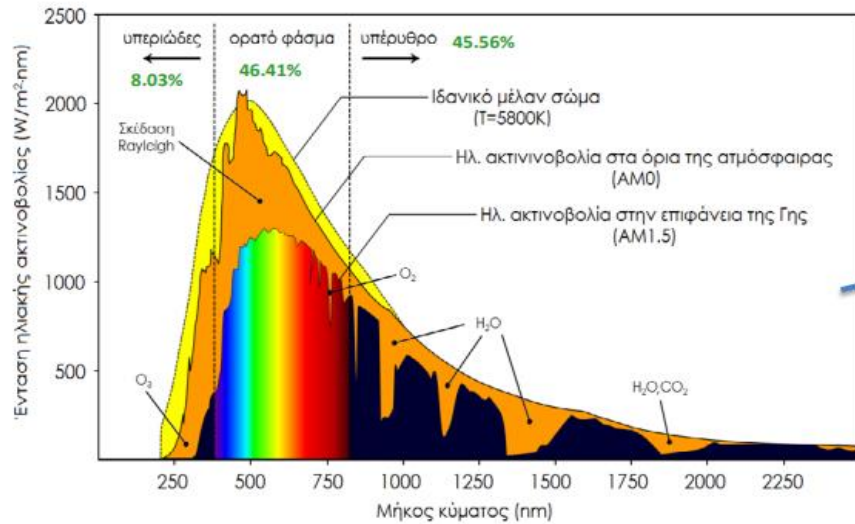
1.3.1 Στοιχεία Ηλιακής ακτινοβολίας

Η μετάδοση θερμότητας με θερμική ακτινοβολία είναι αποτελεί έναν από τους τρεις δυνατούς τρόπους μετάδοσης θερμότητας. Όλα τα σώματα όταν η θερμοκρασία τους είναι μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν ακτινοβολούν θερμότητα. Εάν ένα σώμα που έχει θερμοκρασία T_h τοποθετηθεί σε ένα κουτί με απόλυτα κενό χώρο και τα τοιχώματα έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία $T_c < T_h$, τότε μετά από κάποιο χρονικό διάστημα παρατηρείται ψύξη του θερμότερου σώματος. Ο μηχανισμός αυτός μετάδοσης ενέργειας (θερμότητα) από την πηγή προς ένα σε απόσταση ευρισκόμενο σώμα ονομάζεται **ακτινοβολία (radiation)** - ένας γενικός όρος ο οποίος καλύπτει τόσο τη θερμική όσο και άλλες μορφές ακτινοβολίας (Πολυζάκης, 2018).

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην εξωτερική επιφάνεια της Γης ονομάζεται συνολική ηλιακή ακτινοβολία (total solar irradiance, G_s) ή ηλιακή σταθερά (solar constant) όταν η Γη βρίσκεται στη μέση απόσταση από τον Ήλιο και η τιμή της είναι ίση με $G_s = 1,353 \text{ W/m}^2$ και εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο η ηλιακή ενέργεια προσπίπτει σε μία επιφάνεια κάθετα με τις ηλιακές ακτίνες στο ανώτερο άκρο της ατμόσφαιρας όταν η Γη βρίσκεται στη μέση απόσταση της από τον Ήλιο (Εικόνα 1.8).

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε μία επιφάνεια στη Γη, ορίζεται από ένα άμεσο μέρος και από ένα μέρος διάχυσης. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία (direct solar radiation) είναι η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης χωρίς να διασκορπίζεται ή να απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Ενώ ως διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία (diffuse solar radiation) ορίζεται η διασκορπισμένη ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης ομοιόμορφα από όλες τις κατευθύνσεις.

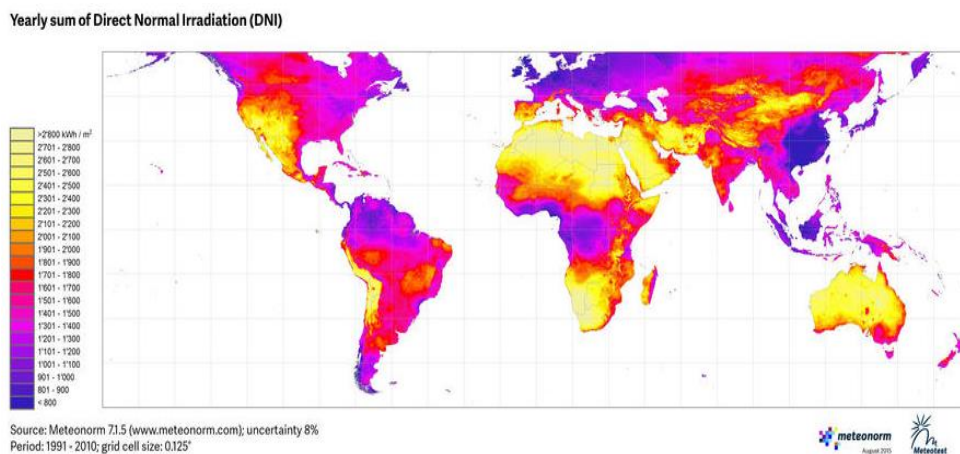
Στην εικόνα 1.8 απεικονίζεται το εύρος φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας 5.800 K, το φάσμα της ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας (AM0) και η συνολική ηλιακή ακτινοβολία (G_s) στην επιφάνεια της Γης.



EIKONA 1.8: Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας.
(Πηγή: Καββαδίας, 2013).

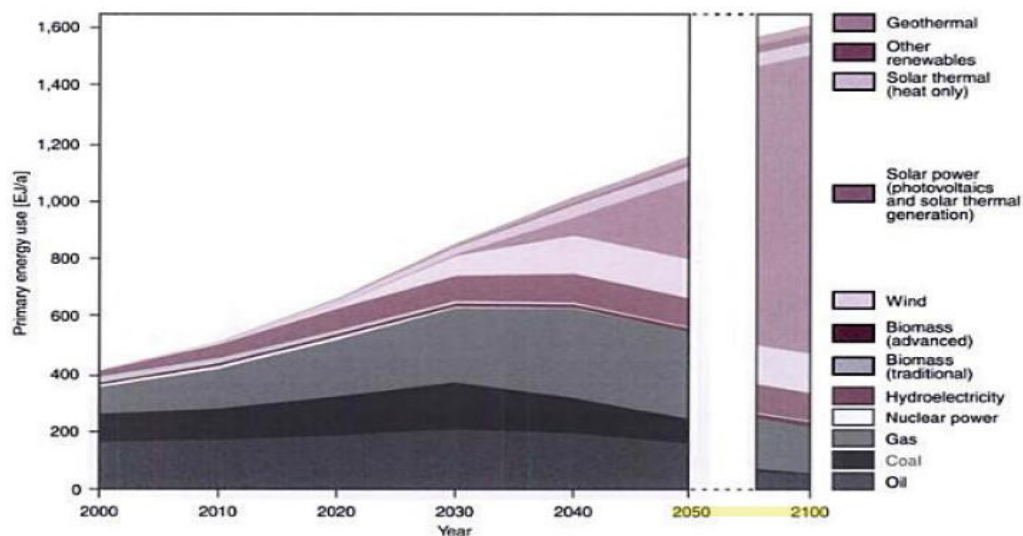
Η Γη δέχεται σταθερό ποσό ηλιακής ενέργειας. Οι πολλές και απότομες μειώσεις που εμφανίζονται στην φασματική κατανομή της ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης οφείλονται, στην απορρόφηση της ακτινοβολίας από μόρια αερίων όπως O_2 (οξυγόνο), O_3 (όζον), CO_2 (διοξείδιο του άνθρακα) και νερό. Επίσης, η εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται στο ότι διαπερνά την ατμόσφαιρα που αποτελείται από σκόνη και νέφος.

Έτσι, η μέση ετήσια ακτινοβολία επιφανείας είναι περίπου $170 W/m^2$ και αποδίδεται σε $5,4 GJ$ για $1 m^2$ στο επίπεδο του εδάφους. Η απόδοση αυτή είναι περίπου η ενέργεια που μπορεί να εξαχθεί από ένα βαρέλι πετρελαίου ή από 200 κιλά άνθρακα ή $140 m^3$ φυσικού αερίου (World Energy Council, 2013).



EIKONA 1.9: Ετήσιο άθροισμα της παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας από 1991-2015. Πηγή: World Energy Council, 2013

Η ηλεκτρική ακτινοβολία είναι η μεγαλύτερη πηγή ενέργεια που υπάρχει στο πλανήτη μας. Ωστόσο, το 80% της παγκόσμιας χρήσης ενέργειας βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα. Το ορυκτά καύσιμα όπως αναφέραμε και στην παράγραφο (1.1) είναι επιβλαβή για τον άνθρωπο και συνολικά για όλο το περιβάλλον. Εκτός από αυτό εγκυμονούν κινδύνους. Κατά τη μεγάλη ξηρασία που επήλθε από τις μεγάλες θερμοκρασίες το καλοκαίρι του 2003, πολλά εργοστάσια επεξεργασίας πετρελαίου, φυσικού αερίου και πυρηνικής ενέργειας κινδύνευσαν από την έλλειψη νερού. Σήμερα γίνονται προσπάθειες να αλλάξει η κατάσταση και η ενέργεια από τα ορυκτά καύσιμα να αντικατασταθεί με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μέχρι το 2100 όπως φαίνεται στη εικόνα 1.10 θα καταναλώνεται λιγότερο από 10% του παγκόσμιου ορυκτού καυσίμου ενώ η ηλιακή ενέργεια (θερμικά-Φ/Β) προτιμάται προς κατανάλωση κατά 70%.



ΕΙΚΟΝΑ 1.10: Η αλλαγή των παγκόσμιων πόρων την χρονική περίοδο 2050/2100. Πηγή: *World Energy Council, 2013*).

Η παγκόσμια κοινή γνώμη, οι διεθνείς και εθνικοί θεσμοί και άλλοι οργανισμοί αναγνωρίζουν όλο και περισσότερο τους κινδύνους αυτούς και επισημαίνουν την επείγουσα ανάγκη να μετατραπούν ριζικά τα σημερινά ενεργειακά συστήματα σε άλλα πιο βιώσιμα (*Vallvé, Lazoroulou & Anzizu, 2016*).

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μια πηγή ενέργειας που θεωρείται ότι μπορεί να είναι βιώσιμη. Μεγάλες πολυεθνικές και χώρες κατασκευάζουν μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα σε περιοχές που δεν είναι γόνιμες και η ενέργεια που παράγεται τροφοδοτεί αστικά κέντρα. Η άνθηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων οφείλεται στο γεγονός ότι έχει εξελιχθεί η τεχνολογία και πλέον τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν γίνει πιο ανθεκτικά και πιο αποδοτικά σε σχέση με τις προηγούμενες δεκαετίες.

Στην ενότητα που ακολουθεί περιγράφονται κάποιες από τις εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων εγκατεστημένων σε πλοία. Το φωτοβολταϊκό σύστημα μαζί με το σύστημα των συσσωρευτών και τα άλλα μέρη του λειτουργούν ως ξεχωριστό τμήμα από το τμήμα ηλεκτρικής εγκατάστασης του πλοίου και συμβάλουν ώστε να καλύψουν κάποια ηλεκτρικά φορτία του πλοίου. Η κάλυψη αυτών των φορτίων θα επιφέρει μείωση στην κατανάλωση καυσίμου και των εκπομπών ρύπων. Από την μείωση καυσίμου θα υπάρξει μείωση του λειτουργικού κόστους αφού τα φωτοβολταϊκά συστήματα πέρα από το κόστος εγκατάστασης, κατά την λειτουργία τους δεν καταναλώνουν κάποιο καύσιμο.

Σε σχέση με τις χερσαίες εγκαταστάσεις των φωτοβολταϊκών συστημάτων που είναι σταθερές και η ηλιακή ενέργεια που απορροφούν είναι γνωστή, οι εγκαταστάσεις σε πλοία έχουν το μειονέκτημα ότι η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι σταθερή διότι τα πλοία κινούνται συνεχώς και έτσι υπάρχουν διακυμάνσεις στην ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά.

1.4 Εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πλοία

Στη παράγραφο παρουσιάζονται φωτοβολταϊκά συστήματα που είτε έχουν εφαρμοστεί σε πλοία είτε είναι υπό υλοποίηση για το μέλλον. Στόχος αυτών των εφαρμογών είναι να αναδείξουν ότι υπάρχει τρόπος να χρησιμοποιηθούν φιλικές μορφές ενέργειας προς το περιβάλλον που θα αποφέρουν και οικονομικό όφελος.

1.4.1 Auriga Leader

Το Auriga Leader RoRo Ship είναι ένα υβριδικό πλοίο που τροφοδοτείται εν μέρει από φωτοβολταϊκά πάνελ εγκατεστημένα στο ανοιχτό κατάστρωμα του πλοίου. Οι κύριες διαστάσεις του είναι $L=200\text{m}$ (μήκος), $B=32,26\text{m}$ (πλάτος) και $D=34,52\text{m}$ (ύψος κατασκευής).

Το φωτοβολταϊκό πεδίο που έχει εγκατασταθεί στο πλοίο αποτελείται από 328 ηλιακούς συλλέκτες. Το φωτοβολταϊκό σύστημα παρέχει ισχύ 40 KW που είναι περίπου 10% της ισχύος του πλοίου όταν είναι αγκυροβολημένο στο λιμάνι. Το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι ενσωματωμένο στο κύριο ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου και είναι σε θέση να παρέχει 0,05% της ισχύος πρόωσης του πλοίου και 1% της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στο πλοίο για τις αντλίες και τα φώτα του πλοίου. Λόγω αυτού του τύπου ηλεκτρικής ενέργειας, σε ένα χρόνο το καύσιμο μειώνεται κατά 13 τόνους και οι εκπομπές CO₂ μειώνονται κατά 40 τόνους (Koumentakos, 2019). Ενώ το κόστος εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι 2.000.000 \$.

Τέλος, η εφαρμογή Φ/Β συστημάτων στο Auriga Leader RoRo Ship ήταν καθοριστικής σημασίας για να αναδειχθούν νέες τεχνολογίες και με την σειρά τους να ακολουθήσουν και άλλες εταιρείες στην υλοποίηση τέτοιων επενδύσεων (Ivan, 2016), (www.marineinsight.com).



ΕΙΚΟΝΑ 1.11: Το Auriga Leader RoRo Ship και τα Φ/Β πάνελ στην οροφή του. Πηγή: (Koumentakos, 2019).

1.4.2 Nichio Maru

Η Nissan κυκλοφόρησε ένα ενεργειακά αποδοτικό RoRo Ship αυτοκινήτων με το όνομα Nichio Maru, που χρησιμοποιεί ηλιακούς συλλέκτες, φωτισμού LED, γάστρα με χαμηλή τριβή και έναν ηλεκτρονικά ελεγχόμενο κινητήρα ντίζελ για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.

Το πρώτο ταξίδι του νεόκτιστου Nichio Maru ξεκίνησε το 2012 και είναι από τα πρώτα φορτηγά πλοία της Ιαπωνίας που έχουν εγκαταστήσει φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία. Υπάρχουν συνολικά 280 ηλιακοί συλλέκτες, τοποθετημένοι στο κατάστρωμα του πλοίου και χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία του φωτισμού LED που είναι εγκατεστημένος σε όλο το πλοίο και στο κατάστρωμα των αυτοκινήτων.

Οι κύριες διαστάσεις του πλοίου είναι μήκους 169,95 m (557 ft), πλάτους 26 m (85ft) και η συνήθης ταχύτητα που αναπτύσσει είναι 21,2 κόμβοι (24,5mph/ ή 39km/h).

Το Nichio Maru μπορεί να μεταφέρει έως 1.380 αυτοκίνητα και λειτουργεί στην κύρια θαλάσσια διαδρομή μεταξύ των περιοχών Kanto (Oppama), Kinki (Kobe) και Kyushu (Kanda), πραγματοποιώντας δύο δρομολόγια με επιστροφή κάθε εβδομάδα.

Η Nissan, συγκρίνοντας το Nichio Maru με ένα παρόμοιο πλοίο, αναφέρει ότι η ετήσια μείωση καυσίμου ήταν 1.400 tons και η μείωση του CO₂ ήταν 4.200 τόνοι (Darren, 2012).



ΕΙΚΟΝΑ 1.12: Το ενεργειακά αποδοτικό Nichio Maru RoRo Ship. Πηγή: (Darren, 2012)

1.4.3 Blue Star Delos

Το Blue Star Delos είναι ένα πλοίο της εταιρίας Blue Star Ferries που δραστηριοποιείται στα ελληνικά ύδατα και συγκεκριμένα στο Αιγαίο πέλαγος. Είναι αξιοσημείωτο να αναφέρουμε ότι είναι από τα πρώτα πλοία στην Ελλάδα που προχώρησε σε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων με στόχο τον έλεγχο της ανταπόκρισης των φωτοβολταϊκών συστημάτων στις αντίξοες συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος (Atkinson, 2016).

Για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων η Blue Star Ferries συνεργάστηκε με την Eco Marine και την κινεζική εταιρία Kei System (www.b2green.gr). Οι δύο εταιρίες που ήταν υπεύθυνες για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών, παρακολουθούσαν την πορεία του πλοίου για ένα χρόνο. Έτσι μπόρεσαν να έχουν ένα ολοκληρωμένο προφίλ σε όλη την διάρκεια του χρόνου, ώστε να δουν την συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών το καλοκαίρι που εμφανίζονται υψηλές θερμοκρασίες και το χειμώνα που εμφανίζονται χαμηλές θερμοκρασίες, λιγότερες μέρες ηλιοφάνειας και υψηλότεροι άνεμοι (Atkinson, 2016).

Τα κατασκευαστικά στοιχεία του Blue Star Delos αναγράφονται στο πίνακα 1.2 και τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης αναγράφονται στο πίνακα 1.3. Επίσης, στην εικόνα 1.13 βλέπουμε το διάγραμμα μπλοκ του φωτοβολταϊκού συστήματος με μέγιστη ισχύς εξόδου 2,35 kW (Atkinson, 2016) .

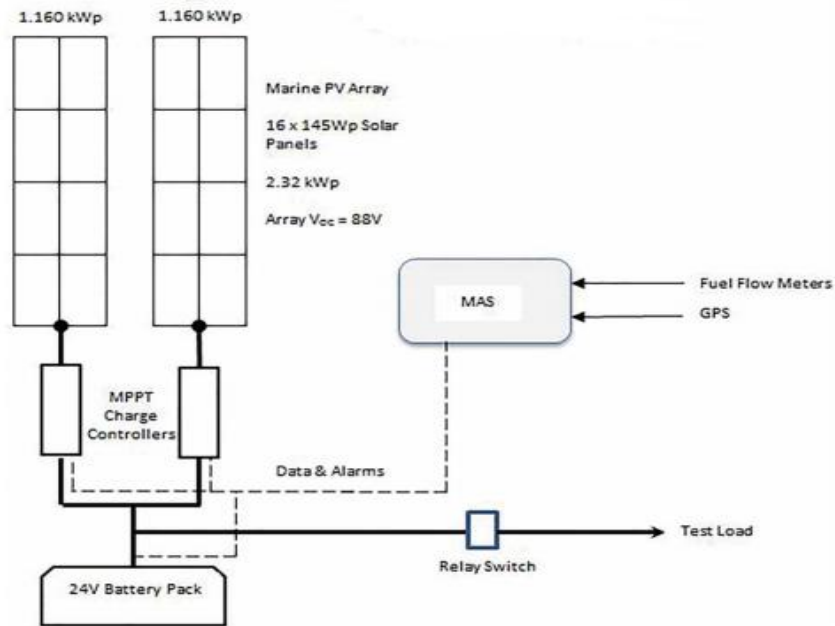
Στόχος της εταιρίας είναι να αναβαθμίσει σταδιακά το σύστημα των φωτοβολταϊκών έτσι ώστε να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του πλοίου όπως φωτισμό και ραντάρ.

Πίνακας 1.2: Στοιχεία του πλοίου Blue Star Delos. Πηγή: (Zisis, 2016)

| Blue Star Delos - vessel particulars (Flag: Greece) | | | |
|---|---------------|----------------------------|-----------------------|
| Built | 2011 | Main Engines | 4× MAN B&W 18 V 32/40 |
| Length | 145 m | Main Engines Total Power | 32,000 kW |
| Breadth | 22 m | 2 Shaft Alternators (Main) | 1254 kW (each) |
| Gross Tonnage (GRT) | 18,498 tonnes | 3 Diesel Alternators (Aux) | 1320 kW (each) |
| Deadweight (DWT) | 2775 tonnes | Passengers | 2400 |
| Draft | 5.70 m | Vehicles | 430 |
| Service Speed | 26 knots | Lanemeters | 600 |
| IMO Number | 9565039 | Classification | Bureau Veritas |

Πίνακας 1.3: Επισκόπηση της διαμόρφωσης του θαλάσσιου ηλιακού συστήματος ενέργειας κατά τη διάρκεια δοκιμών. Πηγή: (Zisis, 2016)

| Component | Details |
|--------------------------------------|---|
| Solar Panel Array Total: 2.32 kWp | 16× 145 Wp Marine Grade PV Panels |
| Energy storage | 12× VRLA 12 V Batteries. Configured as a 24 V Battery Pack. Total: 5.4 kWh |
| Computer system | MAS with combined CPU/AGU, ILS unit, data hubs & associated communication devices |
| Charge controllers | 2× 60 A MPPT Charge Controllers |
| Other equipment | 1× GPS antennae & receiver. Circuit breakers, relays, switches, etc. |



ΕΙΚΟΝΑ 1.13: Απλοποιημένο διάγραμμα του ΦΒ συστήματος Blue Star Delos κατά τη διάρκεια δοκιμών. Πηγή: (Zisis, 2016)

1.4.4 M/V Emerald Ace

Το M/V Emerald Ace είναι ένα υβριδικό πλοίο που μεταφέρει αυτοκίνητα, ανήκει στην Mitsui O.S.K. Lines, Ltd. Ξεκίνησε το 2012, το M/V Emerald Ace διαθέτει 768 ηλιακούς συλλέκτες Panasonic στο κύριο κατάστρωμα, για συνολική ονομαστική ισχύ εξόδου 160 kilowatt (kW). Τα πάνελ παράγουν ισχύ συνεχούς ρεύματος (DC) η οποία στη συνέχεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες ή μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) και παρέχεται σε όλο το πλοίο. Το πλοίο διαθέτει 52 μονάδες μπαταριών ιόντων-λιθίου με συνολική χωρητικότητα 2,2 MWh. Το M/V Emerald Ace μπορεί να λειτουργεί χωρίς εκπομπές καυσαερίων στο λιμάνι. Ενώ έχει την ικανότητα να λειτουργήσει μόνο με την ισχύ από την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Αυτό μειώνει τις συνολικές εκπομπές του σκάφους κατά 4,5% (American Bureau of Shipping, 2017).



ΕΙΚΟΝΑ 1.14: M/V Emerald Ace. Πηγή:
<https://www.21stcentech.com/transportation-update-marine-technologies-coming-tanker-cruise-fleets/>

1.4.5 Motor Ship

Το Motor Ship (MS) Tûranor PlanetSolar έχει κατασκευαστεί και τεθεί σε λειτουργία το 2010. Έχει ένα κατάστρωμα που καλύπτεται από 512 m² ηλιακών συλλεκτών. Τα πάνελ φορτίζουν έξι μπλοκ μπαταριών ιόντων λιθίου που ζυγίζουν 8,5 τόνους και τροφοδοτούν το πλοίο με ηλεκτρική ενέργεια για 72 ώρες χωρίς φόρτιση. Το συγκεκριμένο καταμαράν έχει μέγιστη ταχύτητα 14 κόμβων και δεν χρησιμοποιεί ορυκτό καύσιμο για τις ανάγκες του αλλά μόνο τα φωτοβολταϊκά και το σύστημα των συσσωρευτών (American Bureau of Shipping, 2017).



ΕΙΚΟΝΑ 1.15: Καταμαράν Motor Ship (MS). Πηγή: (Webster, 2012)

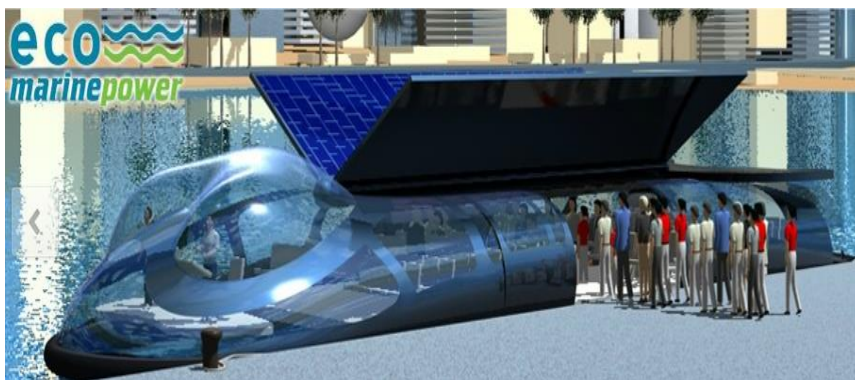
1.4.6 Ιδέες για το μέλλον

Τα παρακάτω είναι παραδείγματα ορισμένων μελλοντικών σχεδίων που αναπτύσσονται:

Το **Tonbo** που θα χρησιμοποιεί ένα υβριδικό σύστημα θαλάσσιας ισχύος (ΥΣΘΙ) σε συνδυασμό με ένα σύστημα ηλιακής-ηλεκτρικής ενέργειας για την παροχή της ενέργειας που απαιτείται τόσο για την πρόωση όσο και για τις απαιτήσεις του οχήματος όπως φωτισμός και ψύξη, με στόχο την μείωση του λειτουργικού κόστους για τους πλοιοκτήτες μειώνοντας το κόστος των καυσίμων.

Ο αρχικός σχεδιασμός του Tonbo επικεντρώνεται σε ηλιακό πλοίο 200-250 επιβατών. Όταν ταξιδεύει σε χαμηλές ταχύτητες (περίπου 8 κόμβοι ή λιγότερο), το Tonbo θα μπορεί να λειτουργεί σε ηλεκτρική λειτουργία χρησιμοποιώντας τις ενσωματωμένες μπαταρίες. Αυτό θα του επιτρέψει να κινείται σχεδόν αθόρυβα στο νερό (Eco Marine Power (n.d.)).

Το ηλιακό ηλεκτρικό πορθμείο Tonbo θα χρησιμοποιεί μπαταρίες λιθίου σύγχρονης τεχνολογίας και θα μπορεί να φορτίζει αυτές τις μπαταρίες χρησιμοποιώντας ένα καινοτόμο σύστημα ηλιακού συλλέκτη με συστοιχία που θα είναι τοποθετημένη στην οροφή ή χρησιμοποιώντας σταθμούς τροφοδότησης από την ακτή, κατά τον ελλιμενισμό του.



ΕΙΚΟΝΑ 1. 10: Ένα μελλοντικό ηλιακό ηλεκτρικό υβριδικό πλοίο.
Πηγή: (Eco Marine Power (n.d.)).

1.5 Συμπεράσματα

Τα συστήματα πρόωσης της ναυτιλίας τα τελευταία χρόνια έχουν υποστεί μεγάλες αλλαγές, κυρίως τα συστήματα πρόωσης των κινητήρων ντίζελ, με το κόστος καυσίμου να αντιπροσωπεύει μεγάλο μέρος του κόστους του πλοίου. Επίσης, οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί που θεσπίστηκαν για τον περιορισμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και η πιθανή εισαγωγή φόρων για την εκπομπή καυσαερίων, οδήγησε πολλές ναυτιλιακές εταιρίες να θέσουν υπό αμφισβήτηση τη βιωσιμότητα των συστημάτων πρόωσης που χρησιμοποιούν σήμερα τα πλοία. Έτσι, πολλές ναυτιλιακές εταιρείες στραφήκαν σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για κύριο μέσο πρόωσης ή για να καλύπτουν κάποιες ενεργειακές ανάγκες του πλοίου.

Η ηλιακή ενέργεια, μπορεί να αποτελέσει σημαντικό ρόλο μέσω της μετατροπής της σε ηλεκτρική.

Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων αλλά και η στροφή της αυτοκινητοβιομηχανίας στην ηλεκτρική ενέργεια και στην εξέλιξη των μέσων αποθήκευσης – μπαταριών έχουν κάνει τα φωτοβολταϊκά ακόμα πιο ελκυστικές επιλογές για εφαρμογή στα πλοία.

Τέλος, η εξέλιξη των συστημάτων συλλογής πληροφοριών για την πυκνότητα ακτινοβολίας και το ποσοστό διακύμανσης αυτής, καθιστά τα φωτοβολταϊκά συστήματα πιο ασφαλή για εφαρμογές στο θαλάσσιο περιβάλλον.

1.6 Βιβλιογραφικές πηγές

Αλεξόπουλος, Α.Β. και Φουρναράκης, Ν.Γ. (2018) *ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ – ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΙΚΑΙΟ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ*. Γ' Έκδοση. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδιο.

Ένωση Ελλήνων Εφοπλιστών. *ΠΡΟΛΗΨΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΠΛΟΙΑ ΚΑΘΕΣΤΩΤΑ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΖΗΜΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ*. Ανακτήθηκε 5 Δεκεμβρίου, 2020, από <https://www.isalos.net/wp-content/uploads/2016/04/201604211316308868.pdf>

Ευρωπαϊκή Ένωση. (2015, Απριλίου 16). ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ (ΕΕ) 2015/757 ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ανακτήθηκε 27 Φεβρουαρίου, 2021, από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=CELEX%3A32015R0757>

ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ. (2011, Μάρτιος 2). *Έντυπο πιστοποιητικού διεθνούς πρόληψης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (IAPP)*. Ανακτήθηκε 27 Φεβρουαρίου, 2021, από https://www.elinyae.gr/sites/default/files/2019-07/29a_11.1303368260437.pdf

Μητρόπουλος, Ε. (2009) *Second IMO GHG Study 2009*. London: CPI Books Limited, Reading RG1 8EX.

Πολυζάκης, Α., Ζώρας, Σ. και Παπαγεωργίου, Κ. (2018) *ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ*. Πτολεμαΐδα : HEAT COOL POWER.

American Bureau of Shipping. (2017). ABS Advisory on Hybrid Electric Power System. Ανάκτηση 5 Δεκεμβρίου, 2020, από www.eagle.org

Atkinson, G. (2016) *Analysis of marine solar power trials on Blue Star Delos*, Journal of Marine Engineering & Technology, VOL15 (NO. 3), 115–123. Retrieved May 14, 2020, from <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20464177.2016.1246907>

Boxwell, M. (2017) *solar electricity handbook*. Birmingham: Greenstream Publishing Limited.

Clerici, A. (2013) *World Energy Resources*. London: World Energy Council

Darren, Q. (2012, January 30). Nissan unveils energy-efficient Nichio Maru car carrier. NEW ATLAS. Ανακτήθηκε 10 Δεκεμβρίου, 2020, από <https://newatlas.com/nissan-nichio-maru-eco-car-carrier/21273/>

Eco Marine Power (χ.η.). Tonbo Solar Hybrid Ferry. Ανακτήθηκε 10 Νοεμβρίου, 2020, από <https://www.ecomarinepower.com/en/tonbo-hybrid-marine-power-vessel>

Fenhann, J. V. (2017) CO₂ Emissions from International Shipping: DTU Partnership Working Paper Series 2017, Vol. 4

Hitesh, K. (2017, July 4). Auriga Leader – The World’s First Partially Propelled Cargo Ship. Marine insight. Ανακτήθηκε 10 Δεκεμβρίου, 2020, από <https://www.marineinsight.com/types-of-ships/auriga-leader-the-worlds-first-partially-propelled-cargo-ship/>

International Maritime Organization. (2012). GHG emissions from international shipping. Ανακτήθηκε 3 Δεκεμβρίου, 2020, από <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/GHG-Emissions.aspx>

International Maritime Organization. (2009) M1, *Climate Change and the Shipping Response*. IMO 2009. Ανακτήθηκε 3 Δεκεμβρίου, 2020, από www.imo.org

Ivan, N., Chirică, I. (2016) *PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGY- THE FUTURE SOLUTION FOR SHIPS* : UNIVERSITY OF GALATI.

Koumentakos, A. (2019) *Developments in Electric and Green Marine Ships*. Piraeus: University of Piraeus

Luque, A. & Hegedus, S. (2003) *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. West Sussex: Wiley.

Parker, S. J. (2013) *Future Ship Powering Options - Exploring alternative methods of ship propulsion*: Royal Academy of Engineering.

Ralph, G., Spencer, D. (2007) *Draft Environmental Impact Statement/Environmental Impact Report Draft EIS/EIR for the Berth 136 – 147 (TraPac) Container Terminal Project*. Los Angeles: AQMD

Sekimizu, K. (2015) *Third IMO GHG Study 2014*. London: International Maritime Organization.

The International Maritime Organization’s Review of Vessel Air Emissions And The Proposal by the Government of the United States. (27/2/2021). Ανακτήθηκε από https://www.worldshipping.org/pdf/vessel_air_emissions_wsc_position_paper_on_usg_proposa.pdf

Vallvé, X., Lazopoulou, M., & Anzizu, M. (2016) *Solar Photovoltaic (PV) Hybrid Power Plants. A Guideline Report from the United Nations Development Programmed (UNDP) of the CEDRO project*. Lebanon: UNDP / CEDRO

Wang, H., Liang, Y., Jeong, B., Mesbahi, A., Zhou, P. (2019) *CONFIGURATIONS OPTIMIZATION OF A TUG SHIP PROPULSION SYSTEM: A LIFE CYCLE ASSESSMENT CASE STUDY*. Glasgow: University of Strathclyde.

Webster, A. (May 4, 2012). Planet Solar completes first solar-powered boat trip around the globe. *The Verge*, Ανακτήθηκε 8 Δεκεμβρίου, 2020, από <https://www.theverge.com/2012/5/4/2999750/planetsolar-solar-powered-boat-trip>

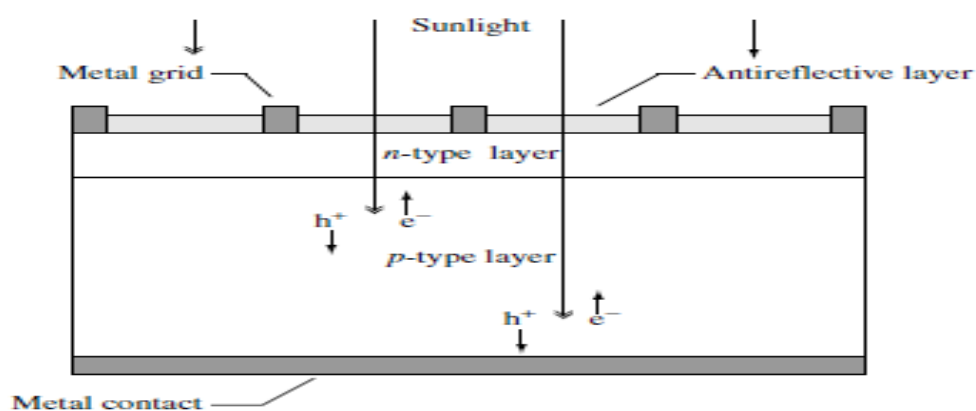
Zisis, T. (2016, January 1). Πιλοτική εφαρμογή φωτοβολταϊκής μονάδας σε ελληνικό πλοίο. B2Green. Ανακτήθηκε 10 Δεκεμβρίου, 2020, από <https://www.b2green.gr/el/post/31175/pilotiki-efarmogi-fotovoltaikis-monadas-se-elliniko-ploio>

Κεφάλαιο 2. Η φυσική των φ/β στοιχείων

2.1 Εισαγωγή

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι μία διαδικασία μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική πραγματοποιείται με την απορρόφηση φωτονίων από κατάλληλους σχηματισμούς, όπως είναι η δίοδος pn.

Τα φ/β στοιχεία ή αλλιώς ηλιακά κύτταρα, ηλιακές κυψέλες ημιαγωγών είναι ουσιαστικά απλές συσκευές που η λειτουργία τους βασίζεται σε δίοδους pn. Η δίοδος pn απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία (φωτόνια) και δημιουργεί φορείς ηλεκτρονίων-οπών που διαχωρίζονται από το φράγμα δυναμικού. Το φράγμα δυναμικού βρίσκεται ανάμεσα στην δίοδο pn. Τα ηλεκτρόνια και οι οπές μεταφέρονται στον ημιαγωγό τύπου n και p αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1. Τα μεταλλικά πλέγματα (metal grids) που βρίσκονται στην πάνω όψη, λειτουργούν ως ωμική επαφή και βοηθούν τους ηλεκτρικούς φορείς που έχουν δημιουργηθεί να οδηγηθούν προς εξωτερικά ηλεκτρόδια (αν θεωρήσουμε ότι το αρνητικό ηλεκτρόδιο συνδέεται με το μεταλλικό πλέγμα και το θετικό με την πίσω όψη στην εικόνα 2.1 που υπάρχει η μεταλλική επαφή). Τα μεταλλικά πλέγματα στην πάνω όψη έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια έτσι ώστε όταν πέφτει το φως να απορροφάται πιο γρήγορα από τον ημιαγωγό (Goetzberger & Hoffmann, 2005). Στη εικόνα 2.1 απεικονίζεται ένα απλό σύστημα ηλιακού κυττάρου.



Εικόνα 2. 1: Η απεικόνιση ενός απλού συμβατικού ηλιακού συλλέκτη και το ζεύγος ηλεκτρονίων – οπών, e^- και h^+ , αντίστοιχα. Πηγή:(Luque & Hegedus, 2003).

Στην πάνω όψη υπάρχει και μία αντανακλαστική στρώση μεταξύ των μεταλλικών πλεγμάτων. Η λειτουργία της αποσκοπεί στην αύξηση του ποσού ενέργειας που λαμβάνει από την ηλιακή ακτινοβολία και στην συνέχεια στη μεταφορά της στον ημιαγωγό.

Η δίοδος pn διαμορφώνεται όταν ένας ημιαγωγός τύπου-n και ένας ημιαγωγός τύπου-p ενώνονται για να σχηματίσουν μια μεταλλουργική σύνδεση. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως μέσω διάχυσης ή εμφύτευσης συγκεκριμένων προσμίξεων ή μέσω διαδικασίας εναπόθεσης (Jäger et al., 2014).

Όλη η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά και το ηλιακό φάσμα μαζί συγκροτούνται από σωματίδια τα λεγόμενα φωτόνια. Τα φωτόνια λειτουργούν ως μεταφορείς συγκεκριμένων ποσοτήτων ενέργειας, που τις καθορίζουν οι φασματικές ιδιότητες της πηγής. Ακόμα, τα φωτόνια διακρίνονται επίσης για τον κυματοειδή χαρακτήρα τους με μήκος κύματος λ . Η ενέργεια του φωτονίου, E δίνεται:

$$E = h \times f = \frac{h \times c}{\lambda} \text{ (joules)} \quad (2.1)$$

όπου h είναι σταθερά του Planck ($h = 6.63 \times 10^{-34}$ joule*sec), c είναι η ταχύτητα του φωτός ($c = 2.998 \times 10^8$ m/sec) και f είναι η συχνότητα του φωτονίου σε Hz. Δεδομένου ότι οι ενέργειες στο ατομικό επίπεδο τυπικά εκφράζονται σε ηλεκτρονιοβόλτ ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ joules) και τα μήκη κύματος τυπικά εκφράζονται σε μικρόμετρα, είναι δυνατόν να εκφραστεί $h \times c$ σε κατάλληλες μονάδες έτσι ώστε αν το λ εκφράζεται σε μm , τότε το E θα εκφράζεται σε eV (Πολυζάκης, Ζώρας & Παπαγεωργίου, 2018). Δηλαδή:

$$E = \frac{1,24}{\lambda} \text{ (eV)} \quad (2.2)$$

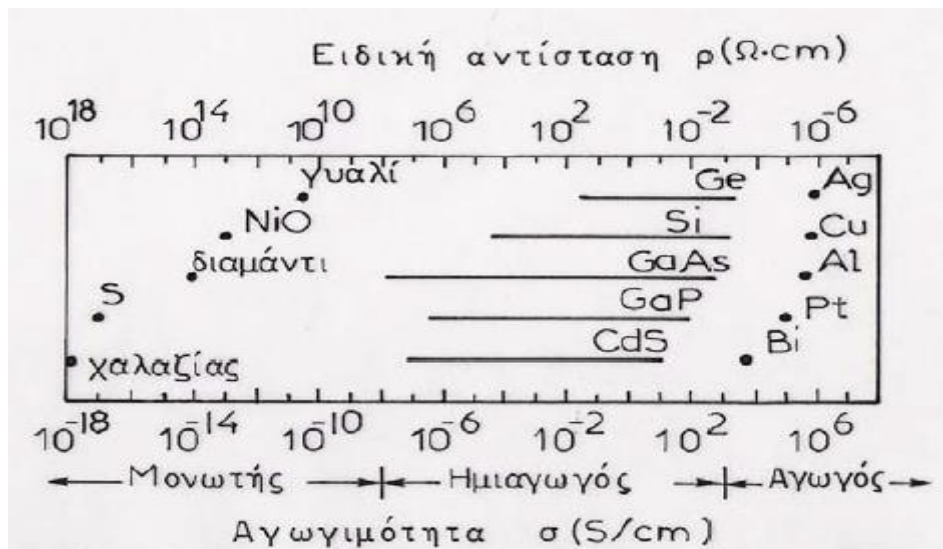
Μόνο τα φωτόνια με επαρκή ενέργεια μπορούν να δημιουργήσουν ένα ζεύγος ηλεκτρονικών οπών, δηλαδή εκείνα με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο ημιαγωγών (energy gap, E_g) και να συμβάλουν στη διαδικασία μετατροπής ενέργειας. Έτσι, η φασματική φύση του ηλιακού φωτός είναι ένα σημαντικό στοιχείο στο σχεδιασμό αποτελεσματικών ηλιακών κυττάρων (Rajput, 2017).

Οι αρχές της φύσης που διέπουν τον τρόπο λειτουργίας των ηλιακών κυττάρων αποτελούν το αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου. Πρώτον, δίνεται μια σύντομη ανασκόπηση των θεμελιωδών ιδιοτήτων των ημιαγωγών που περιλαμβάνει μια επισκόπηση της δομής των ημιαγωγών και της δημιουργίας φορέων ανασυνδέσεως και

μεταφοράς. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι ηλεκτροστατικές ιδιότητες της διόδου p-n, ακολουθούμενης από περιγραφή των βασικών λειτουργικών χαρακτηριστικών του ηλιακού κυττάρου, συμπεριλαμβανομένης της χαρακτηριστικής ρεύματος τάσης ενός ηλιακού κυττάρου. Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης χρησιμοποιείται για το καθορισμό βασικών μεγεθών του ηλιακού κυττάρου όπως της τάσης ανοιχτού κυκλώματος, (V_{oc}), του ρεύματος βραχυκυκλώματος (I_{sc}), του συντελεστή πλήρωσης (FF) και της αποδοτικότητας μετατροπής (η). Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένα επιπλέον θέματα όπως η επίδραση της θερμοκρασίας στο ηλιακό κύτταρο, η σύνδεση τους καθώς και τα υλικά που τα αποτελούν.

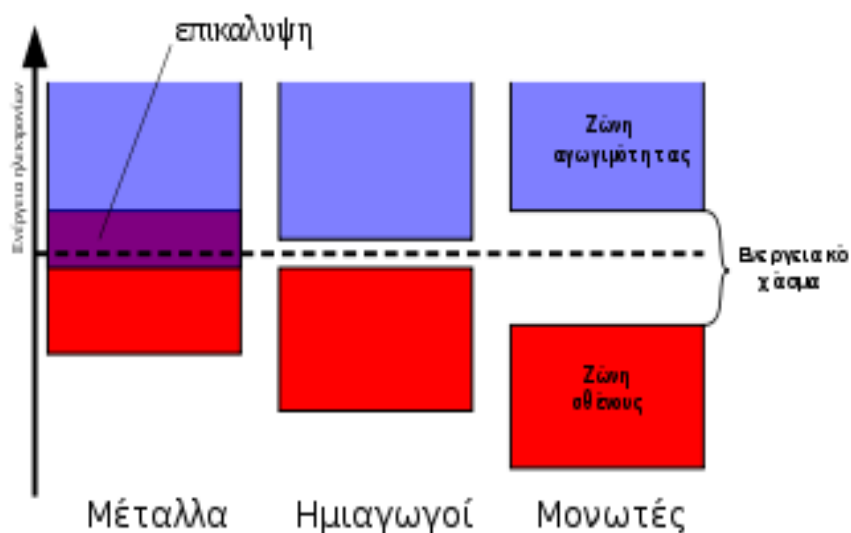
2.2 Κατηγορίες Ημιαγωγών

Οι ημιαγωγοί είναι μια κατηγορία στερεών σωμάτων με βασικό χαρακτηριστικό ότι διαθέτουν λιγότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια σε σύγκριση με τα μέταλλα τα οποία διαθέτουν μεγάλο αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων, ενώ σε σύγκριση με τους μονωτές, οι ημιαγωγοί, διαθέτουν πολύ περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η ειδική αντίσταση στους ημιαγωγούς κυμαίνεται από $10^8 - 10^2 \Omega\text{cm}$, ενώ στα μέταλλα $10^{-2} \Omega\text{cm}$ και στους μονωτές $10^{12} \Omega\text{cm}$ (Ventre & Messenger, 2005), (Σπανάκης, 2013).



Εικόνα 2.2: Κατάταξη υλικών ανάλογα με την ηλεκτρική αντίσταση. Πηγή: (Παλούρα, 2012)

Άλλο ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που κάνει αυτές τις τρεις κατηγορίες υλικών να διαφέρουν είναι το ενεργειακό χάσμα E_g (*energy gap*). Στη εικόνα 2.3 μπορούμε να δούμε τη σχετική θέση της ζώνης σθένους (ΖΣ) και ζώνης αγωγιμότητας (ΖΑ) για τα τρία είδη υλικών. Στα μέταλλα – αγωγούς με μηδενικό E_g διευκολύνεται η μετακίνηση των ηλεκτρονίων από την ΖΣ στη ΖΑ. Στην περίπτωση των ημιαγωγών όταν τα ηλεκτρόνια σθένους με οποιοδήποτε τρόπο αποκτήσουν την απαιτούμενη ενέργεια τότε μπορούν να υπερπηδήσουν το ενεργειακό χάσμα (E_g σχετικά μικρό) και να βρεθούν ελεύθερα στην ΖΑ. Η κενή θέση που αφήνουν πίσω λέγεται οπή (h^+). Στους μονωτές καθίσταται αδύνατη η μετατόπιση των ηλεκτρονίων σθένους από ΖΣ στη ΖΑ λόγω του ότι E_g είναι πολύ μεγάλο ($\approx 5\text{eV}$) (<http://physics.teiath.gr/>)(Σπανάκης, 2013).



Εικόνα 2. 3: Το σχέδιο των ενεργειακών ζωνών για τα υλικά των μετάλλων, ημιαγωγών και μονωτών. Πηγή: <https://el.wikipedia.org/wiki>.

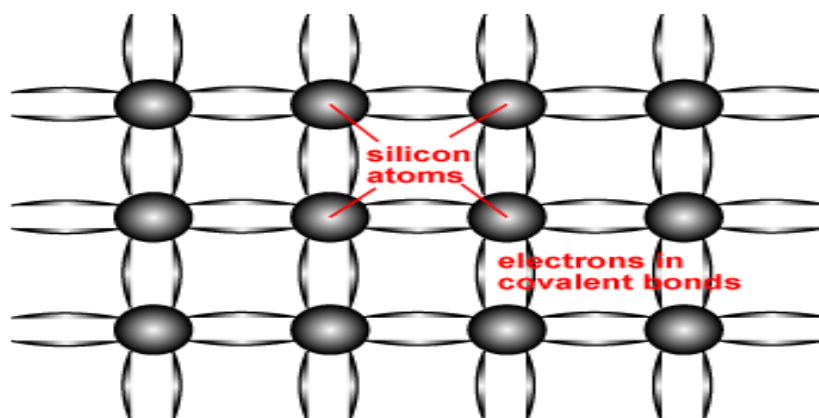
Οι ημιαγωγοί χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, στους ενδογενείς ημιαγωγούς που ο τρόπος ηλεκτρικής δράσης εξαρτάται από την υφιστάμενη ηλεκτρονιακή δομή των καθαρών υλικών και τους εξωγενείς ημιαγωγούς, που η ηλεκτρική δράση καθορίζεται από άτομα προσμίξεων, (Ενδογενής και εξωγενής ημιαγωγός τύπου N, P αντίστοιχα), (Σπανάκης, 2013).

2.2.1 Ενδογενείς Ημιαγωγοί

Ονομάζονται έτσι διότι δεν έχουν καμία πρόσμιξη, δηλαδή ο τρόπος εκδήλωσης της ηλεκτρικής δράσης εξαρτάται από την υφιστάμενη δομή ηλεκτρονίων του καθαρού υλικού. Ο σημαντικότερος ημιαγωγός αυτού του είδους είναι του πυριτίου (Si) με ($E_g=1,1\text{eV}$), άλλοι ημιαγωγοί του ίδιου είδους είναι:

- Γερμάνιο – Ge($E_g=0,67\text{eV}$),
- Αρσενικούχο Γάλλιο – GaAs($E_g=1,42\text{eV}$),
- Φωσφορούχο Γάλλιο – GaP($E_g=2,25\text{eV}$),
- Αντιμονούχο Ίνδιο – InSb($E_g=0,17\text{eV}$)
- Θειούχο Κάδμιο - CdS ($E_g=2,40\text{eV}$),
- Τελλουριούχος Ψευδάργυρος – ZnTe ($E_g=2.26\text{eV}$).

Οι ημιαγωγοί, όπως το πυρίτιο (Si) αποτελούνται από μεμονωμένα άτομα που συνδέονται μεταξύ τους σε μια κανονική, περιοδική δομή για να σχηματίσουν μια διάταξη στην οποία κάθε άτομο έχει 8 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα. Ένα μεμονωμένο άτομο αποτελείται από έναν πυρήνα πρωτονίων (θετικά φορτισμένα σωματίδια) και νετρόνια (σωματίδια χωρίς ηλεκτρικό φορτίο) που περιβάλλονται από ηλεκτρόνια. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων και των πρωτονίων είναι ίσος, έτσι ώστε το άτομο να είναι γενικά ηλεκτρικά ουδέτερο. Τα ηλεκτρόνια που περιβάλλουν κάθε άτομο σε έναν ημιαγωγό αποτελούν μέρος ομοιοπολικών δεσμών. Ένας ομοιοπολικός δεσμός αποτελείται από δύο άτομα που "μοιράζονται" ένα ζευγάρι ηλεκτρονίων. Κάθε άτομο σχηματίζει 4 ομοιοπολικούς δεσμούς με τα 4 περιβάλλοντα άτομα. Επομένως, μεταξύ κάθε ατόμου και των 4 ατόμων που το περιβάλλουν, μοιράζονται 8 ηλεκτρόνια. Η δομή ενός ημιαγωγού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 2.4 (Honsberg & Bowden, 2019).

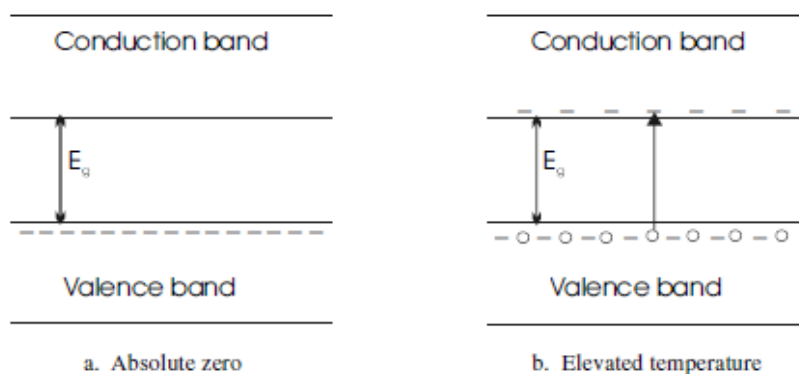


Εικόνα 2. 4: Σχηματική αναπαράσταση ομοιοπολικών δεσμών σε πλέγμα από κρυσταλλικό πυρίτιο. Κάθε γραμμή που συνδέει τα άτομα αντιπροσωπεύει ένα ηλεκτρόνιο που μοιράζεται μεταξύ τους. Δύο ηλεκτρόνια που μοιράζονται είναι αυτά που σχηματίζουν τον ομοιοπολικό δεσμό.

Πηγή: (Honsberg, 2019) .

Οι ημιαγωγοί ενεργούν ως μονωτές σε όχι υψηλά θερμοκρασιακά επίπεδα και ως αγωγοί σε υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας. Η αγωγιμότητα συμβαίνει σε υψηλότερη θερμοκρασία επειδή τα ηλεκτρόνια που περιβάλλουν τα άτομα του ημιαγωγού μπορούν να απομακρυνθούν από τον ομοιοπολικό δεσμό τους και να κινούνται ελεύθερα γύρω από το πλέγμα (Nathan, 2005).

Σε χαμηλές θερμοκρασίες τα ηλεκτρόνια σθένους συγκροτούνται σε αυτούς τους ομοιοπολικούς δεσμούς και έτσι λέμε ότι έχουν χαμηλότερη ενέργεια. Σε αυξημένες θερμοκρασίες, ειδικά στις θερμοκρασίες που λειτουργούν τα ηλιακά κύτταρα, τα ηλεκτρόνια μπορούν να αποκτήσουν εκείνη την ενέργεια που απαιτείται προκειμένου να ξεφύγουν από τον ομοιοπολικό δεσμό. Όταν ένα ηλεκτρόνιο κερδίζει αρκετή ενέργεια για να συμμετάσχει στην αγωγιμότητα (είναι "ελεύθερο"), βρίσκεται σε κατάσταση υψηλής ενέργειας. Η φύση των ηλεκτρονίων δεν τους επιτρέπει να υπάρχουν σε ενδιάμεση κατάσταση. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται να αποκτήσει ένα ηλεκτρόνιο για να μεταπηδήσει από τη ΖΣ στη ΖΑ είναι ίση με το διάκενο των ζωνών (Honsberg & Bowden, 2019), (Ventre & Messenger, 2005).



Εικόνα 2. 5: Οι δυο καταστάσεις που βρίσκεται ο ημιαγωγός α) για $T=0$, β) για αυξημένη θερμοκρασία.
 Πηγή: (Ventre, 2005)

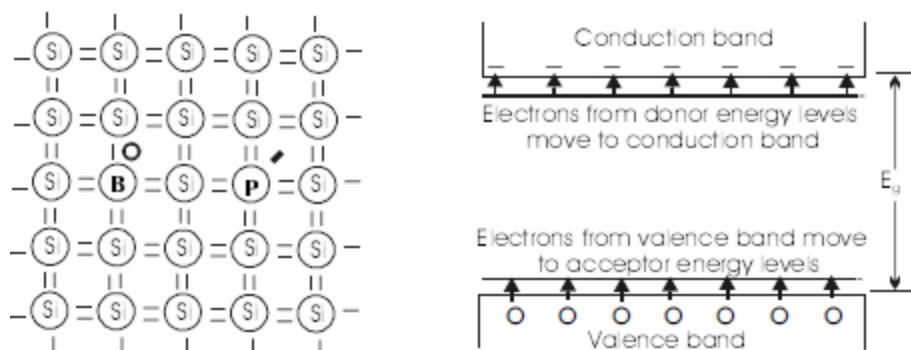
Η διέγερση ενός ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνει έναν κενό χώρο για ένα ηλεκτρόνιο. Ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό άτομο μπορεί να κινηθεί σε αυτόν τον κενό χώρο. Όταν αυτό το ηλεκτρόνιο κινείται, αφήνει ένα άλλο κενό. Η συνεχής αυτή κίνηση στο χώρο (για τα ηλεκτρόνια), μπορεί να απεικονιστεί ως η κίνηση ενός θετικά φορτισμένου σωματιδίου "οπή" μέσω της κρυσταλλικής δομής. Κατά συνέπεια, η διέγερση ενός ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας οδηγεί όχι μόνο ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας αλλά και μια οπή στη ζώνη σθένους (Δαμιανίδης, Κατσαρός, Τόλης & Στεργιόπουλος, 2011). Έτσι, παράλληλα το ηλεκτρόνιο αλλά και η οπή δύνανται να συμμετέχουν στην αγωγή και ονομάζονται «φορείς» ή ζεύγος ηλεκτρονίων – οπών.

2.2.2 Εξωγενείς Ημιαγωγοί

Όπως προαναφέρθηκε οι ημιαγωγοί που δεν περιέχουν ξένα άτομα στο εσωτερικό τους ονομάζονται ενδογενείς ημιαγωγοί. Εκτός από αυτούς υπάρχουν οι εξωγενείς ημιαγωγοί ή ημιαγωγοί με πρόσμιξη. Με την πρόσμιξη εισάγονται στο πλέγμα του πρωταρχικού ημιαγωγού άτομα με διαφορά σθένους 1 διότι βοηθούν στην αύξηση της αγωγιμότητας του υλικού.

Οι ημιαγωγοί τύπου n (δότες), χαρακτηρίζονται έτσι διότι στο βασικό στοιχείο του πλέγματος που είναι το τετρασθενές πυρίτιο εισάγονται ως πρόσμιξη πεντασθενή στοιχεία, όπως είναι το αρσενικό (As), ο φώσφορος (P) και το αντιμόνιο (Sb). Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουμε ο ημιαγωγός να έχει περισσότερα ηλεκτρόνια από οπές. Δηλαδή τα χημικά στοιχεία που αναφέραμε (πεντασθενή) έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν με το πυρίτιο (τετρασθενές) τέσσερις δεσμούς.

Το ηλεκτρόνιο που δε συμμετέχει σε δεσμό παραμένει ελεύθερο να κινείται και είναι ο παράγοντας που αυξάνει την αγωγιμότητα (Fthenakis & Letcher, 2018). Επίσης, η ατομική ακτίνα του ατόμου δότη ηλεκτρονίων, θα πρέπει να είναι σχεδόν ίδια με αυτή του βασικού στοιχείου. Έτσι τα άτομα των δοτών μπορούν να μεταπηδήσουν με χαμηλότερη ενέργεια από την ΖΣ προς την ΖΑ. Η ενέργεια που χρειάζεται για να γίνει η μεταπήδηση είναι περίπου 0,032 eV.



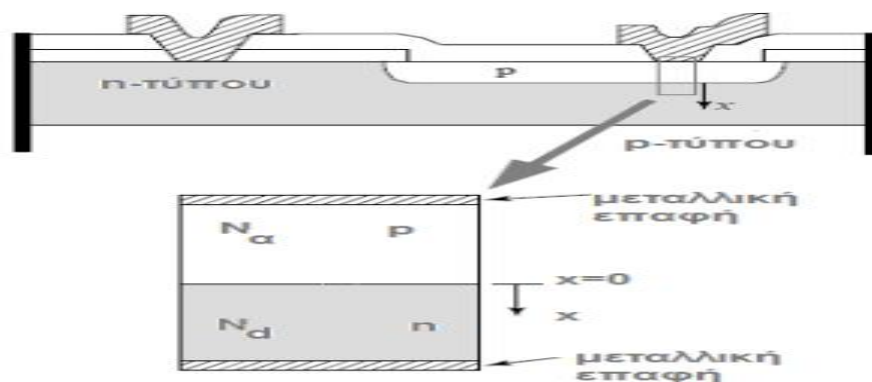
Εικόνα 2. 6: Αριστερά απεικονίζεται πρόσμιξη τύπου - n και τύπου - p, δεξιά απεικονίζονται οι ενεργειακές ζώνες.
Πηγή : (Ventre, 2005).

Οι ημιαγωγοί τύπου P (δέκτες), χαρακτηρίζονται έτσι γιατί το βασικό στοιχείο είναι το τετρασθενές πυρίτιο και γίνεται πρόσμιξη με τρισθενή χημικά στοιχεία όπως το βόριο (B) και το αλουμίνιο (Al). Αυτή η πρόσμιξη γίνεται περίπου στην κορυφή του κρυσταλλικού έτσι ώστε με ένα έναυσμα τα τρισθενή άτομα να συλλέγουν ηλεκτρόνια από την ζώνη σθένους.

Έτσι στο κρυσταλλικό πλέγμα που έχουν απομακρυνθεί τα ηλεκτρόνια σθένους παραμένουν κενές θέσεις οι οποίες μπορούν να καταληφθούν από ελεύθερα ηλεκτρόνια. Οι κενές θέσεις ή αλλιώς οπές μπορούν να κινηθούν κατά μήκος μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Με λίγα λόγια, καθώς το τετρασθενές πυρίτιο δημιουργεί δεσμούς με το τρισθενές (B), περισσεύει μία οπή που είναι ελεύθερη να κινηθεί με το έναυσμα ενός εξωτερικού παράγοντα και έτσι αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Το όνομα του τύπου P πηγάζει από το γεγονός ότι υπάρχει μεγαλύτερο πλήθος οπών σε σχέση με έναν ενδογενή ημιαγωγό και ότι υπάρχει ελλιπές ηλεκτρονιακό φορτίο (Σπανάκης, 2013).

2.3 Μία πρώτη ματιά στη δίοδο – η περιοχή αραίωσης

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκε πως προκύπτει ένας ενδογενής ημιαγωγός τύπου-n και ένα ημιαγωγό τύπου-p. Η δίοδος επαφής pn είναι το απλούστερο ημιαγωγικό στοιχείο. Η εικόνα 2.7 παρουσιάζεται μια τυπική δίοδος επαφής pn. Η δίοδος αυτή αποτελείται από δύο ομοιογενείς περιοχές από υλικό p και n, που διαχωρίζονται από μια λεπτή περιοχή μετάβασης από τον ένα τύπο νόθευσης στον άλλο. Το στοιχείο αυτό ονομάζεται βηματική επαφή (*step*) ή επαφή απότομης μεταβολής νόθευσης (*abrupt junction*).



Εικόνα 2. 7: Η πάνω εικόνα δείχνει τη επαφή pn σε μια διεργασία ολοκληρωμένου κυκλώματος και η κάτω δείχνει την μονοδιάστατη αναπαράσταση.

Πηγή: (Luque & Hegedus, 2003)

Το υλικό τύπου p νοθεύεται με τις προσμείξεις αποδέκτη (όπως το βόριο), με αποτέλεσμα οι οπές να αναχθούν σε κυρίαρχους φορείς ή φορείς πλειονότητας. Παρομοίως, η νόθευση του πυριτίου με προσμείξεις δότη (όπως ο φώσφορος ή το αρσενικό) δημιουργεί υλικό τύπου n κι έτσι τα ηλεκτρόνια γίνονται οι φορείς πλειονότητας. Οι επαφές αλουμινίου παρέχουν πρόσβαση στους ακροδέκτες p και n του στοιχείου.

Τοποθετώντας μαζί τα υλικά τύπου p και n προκαλείται στα όρια τους μεγάλη μεταβολή της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων. Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων αλλάζει από μια μεγάλη τιμή στο υλικό τύπου n σε μια πολύ μικρή τιμή στο υλικό τύπου p. Το αντίστροφο ισχύει για τη συγκέντρωση οπών. Η μεταβολή προκαλεί τη διάχυση των ηλεκτρονίων από το n στο p και τη διάχυση των οπών από το p στο υλικό τύπου n. Όταν οι οπές εγκαταλείπουν το υλικό τύπου p, δημιουργούν πίσω τους ακίνητα ιόντα, τα οποία είναι αρνητικά φορτισμένα. Κατά συνέπεια το υλικό τύπου p φορτίζεται αρνητικά στην περιοχή του συνόρου p-n.

Παρομοίως δημιουργείται θετικό φορτίο στην πλευρά n του συνόρου, αφού τα ηλεκτρόνια που διαχύθηκαν άφησαν πίσω τους τα θετικά φορτισμένα ιόντα δότες. Η περιοχή της επαφής, όπου οι φορείς πλειονότητας έχουν απομακρυνθεί αφήνοντας πίσω τους τα σταθερά ιόντα αποδέκτη και δότη, ονομάζεται περιοχή αραίωσης (*depletion region*) ή περιοχή φορτίου-χώρου (*space-charge region*). Τα φορτία δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της επαφής, με φορά από την περιοχή n προς την p (RABAEY, CHANDRAKASAN & NIKOLIC, 2003).

Το πεδίο αυτό εξουδετερώνει τη διάχυση των οπών και των ηλεκτρονίων, αφού προκαλεί τη μετατόπιση των ηλεκτρονίων από το p στο n και των οπών από το n στο p. Στην κατάσταση ισορροπίας το φορτίο αραίωσης δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο έτσι ώστε τα ρεύματα μετατόπισης να είναι ίσα και αντίθετα με τα ρεύματα διάχυσης, οδηγώντας σε μηδενική τελική ροή (RABAEY et al., 2003).

Η προηγούμενη ανάλυση συνοψίζεται στην εικόνα 2.8, που απεικονίζονται οι κατευθύνσεις των ρευμάτων, η πυκνότητα φορτίου, το ηλεκτρικό πεδίο, και το ηλεκτροστατικό πεδίο της επαφής pn απότομης μεταβολής νόθευσης σε συνθήκες μηδενικής πόλωσης. Στο στοιχείο που παρουσιάζεται το υλικό p είναι σε μεγαλύτερο βαθμό νοθευμένο από το υλικό n δηλαδή $N_A > N_D$, όπου N_A και N_D είναι η συγκέντρωση του αποδέκτη και του δότη, αντίστοιχα. Έτσι η συγκέντρωση φορτίου στην περιοχή αραίωσης είναι υψηλότερη στην πλευρά p της επαφής.

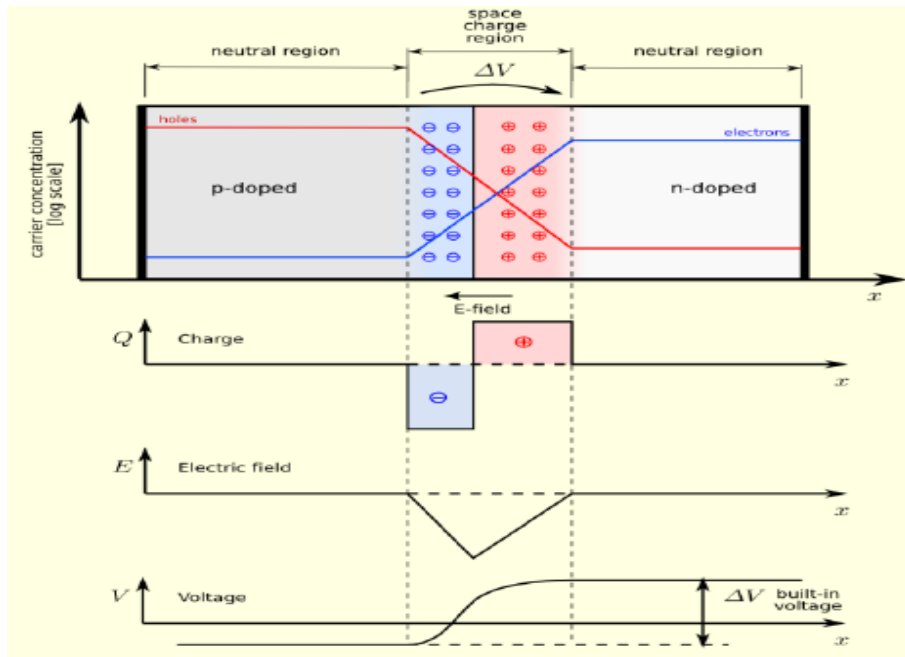
Η εικόνα 2.8 δείχνει επίσης ότι κάτω από μηδενική πόλωση υπάρχει μια τάση Φ_0 κατά μήκος της επαφής, η οποία ονομάζεται ενσωματωμένο δυναμικό (*built-in potential*) της επαφής. Το δυναμικό αυτό έχει την τιμή:

$$\Phi_0 = \varphi_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (2.3)$$

Όπου φ_T είναι η θερμική τάση (*thermal voltage*)

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} = 26 \text{ mV στους } 300 \text{ K} \quad (2.4)$$

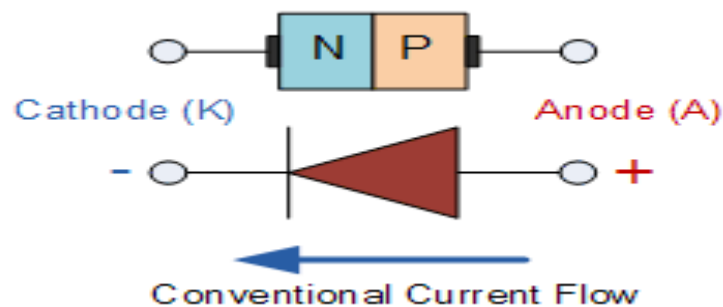
Το μέγεθος n_i είναι η ενδογενής συγκέντρωση φορέων σε ένα ανόθευτο δείγμα του ημιαγωγού, και είναι προσεγγιστικά ίσο με $1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ στους 300 K για το πυρίτιο.



Εικόνα 2. 8: Η επαφή pn απότομης μεταβολής νόθευσης σε συνθήκες ισορροπημένης πόλωσης.
 Πηγή: (RABAEY, 2003).

2.3.1 Στατική συμπεριφορά

Η προκύπτουσα ηλεκτρονική συσκευή που έχει δημιουργηθεί από τις δυο διαδοχικές στρώσης ημιαγωγών P και N είναι δίοδος επαφής P-N. Η δίοδος P-N εφαρμόζεται σαν ημιαγωγός στους ανορθωτές, σε τρανζίστορ κτλ. Η δίοδος PN αποτελείται από δυο ακροδέκτες την άνοδο (A) και την κάθοδο (K), όπου στα ηλεκτρικά κυκλώματα η μεριά P της ανόδου συμβολίζεται με ένα βέλος και στην μεριά n συμβολίζεται με μια καθετή γραμμή. Κύριο χαρακτηριστικό της δίοδου είναι να άγει το ρεύμα μόνο από την μια μεριά, δηλαδή από την άνοδο προς την κάθοδο (Ventre, 2005).



Εικόνα 2. 9: Συμβολισμός δίοδου.
 Πηγή: (https://www.electronicstutorials.ws/diode/diode_2.html)

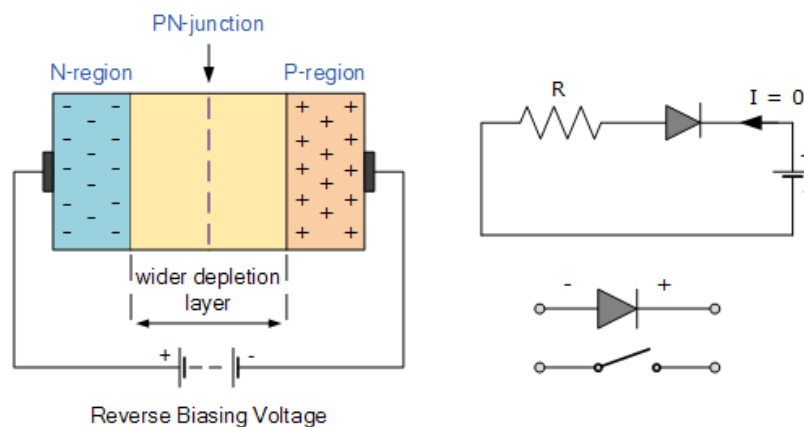
Πόλωση διόδου PN

Η εξωτερική πηγή που συνδέεται με την επαφή παίζει καθοριστικό ρόλο στο είδος πόλωσης. Ακολουθούν τα είδη πόλωσης της διόδου PN:

Ανάστροφη πόλωση (reverse polarisation):

Όταν μια διάδος είναι συνδεδεμένη σε κατάσταση ανάστροφης πόλωσης, εφαρμόζεται θετική τάση στον ημιαγωγό N και εφαρμόζεται αρνητική τάση στον ημιαγωγό P. Η θετική τάση που εφαρμόζεται στο υλικό τύπου N προσελκύει ηλεκτρόνια προς το θετικό ηλεκτρόδιο και μακριά από τη σύνδεση, ενώ οι οπές στο άκρο τύπου P απομακρύνονται επίσης μακριά από τη σύνδεση προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι ότι η περιοχή αγωγιμότητας μεγαλώνει λόγω της έλλειψης ηλεκτρονίων και οπών και παρουσιάζει μια μεγάλη αντίσταση, σχεδόν σαν μονωτή (Ventre, 2005).

Το αποτέλεσμα είναι ότι δημιουργείται ένα φράγμα υψηλού δυναμικού εμποδίζοντας έτσι το ρεύμα να ρέει μέσα από το υλικό ημιαγωγού.



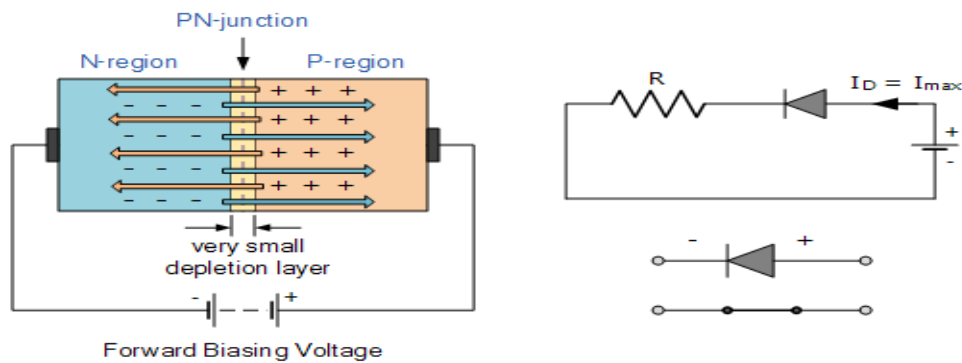
Εικόνα 2. 10: Συμβολισμός αντίστροφης πόλωσης.

Πηγή: (https://www.electronicstutorials.ws/diode/diode_2.html)

Έτσι με την εφαρμογή ανάστροφης πόλωσης (άνοδος αρνητική) η διάδος είναι μη αγωγή και συμπεριφέρεται ως ανοιχτό κύκλωμα. Όταν η εφαρμοζόμενη τάση υπερβαίνει μια συγκριμένη τιμή V_b - τάση κατάρρευσης, το διερχόμενο ρεύμα αυξάνεται δραστικά με πιθανή καταστροφή της διάταξης.

Ορθή πόλωση (forward polarisation):

Με την εφαρμογή ορθής πόλωσης (άνοδος θετική), η εφαρμοζόμενη τάση υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή V_k – τάση κατωφλίου, η διάδος είναι αγώγιμη και συμπεριφέρεται ως μία ωμική αντίσταση με πολύ χαμηλή τιμή.



Forward Biasing Voltage

Εικόνα 2. 11: Συμβολισμός ορθής πόλωσης

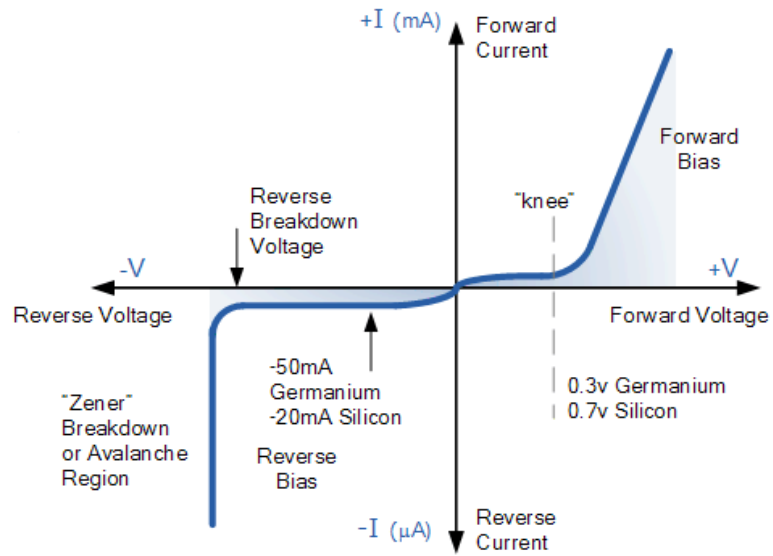
Πηγή: (https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_2.html)

Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος διόδου για την ορθή πόλωση και την ανάστροφη πόλωση.

Η συμπεριφορά της διόδου σε συνθήκες ορθής και ανάστροφης πόλωσης περιγράφεται πολύ καλά από τη γνωστή εξίσωση ιδανικής διόδου (ideal diode equation), η οποία συσχετίζει το ρεύμα που περνά μέσω της διόδου I_D με την τάση πόλωσης της διόδου V_D :

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) \quad \text{ή} \quad I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{\phi_T}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Η εκθετική συμπεριφορά της διόδου απεικονίζεται στην εικόνα 2.12, το I_s συμβολίζει μία σταθερή τιμή που ονομάζεται ρεύμα κορεσμού (*saturation current*) της διόδου. Αυτή η τιμή είναι ανάλογη της περιοχής της διόδου, και αποτελεί συνάρτηση των επιπέδων νόθευσης και του πλάτους των ουδέτερων περιοχών. Συνήθως η τιμή του I_s καθορίζεται με εμπειρικό τρόπο (Weidong, 2017).



Εικόνα 2. 12: Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης ρεύματος δίοδου για ορθή και ανάστροφη πόλωση.

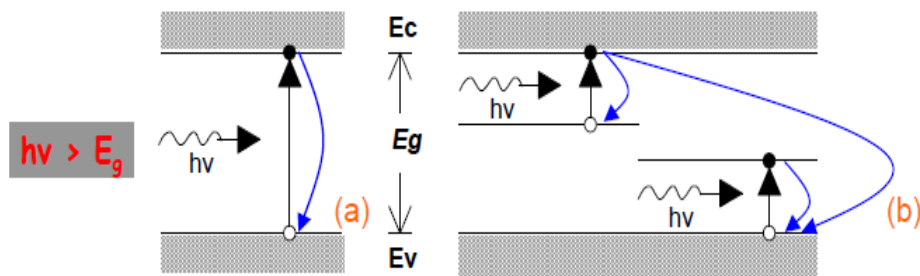
Πηγή: (https://www.electronicstutorials.ws/diode/diode_2.html)

2.4 Φωτοαγωγιμότητα

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ισχύς P_{inc} , έχει την ιδιότητα, όταν πέσει πάνω σε μια επίπεδη ημιαγωγική πλάκα να ανακλάται ένα μέρος αυτής, ισχύος P_{refl} σε διάφορες κατευθύνσεις ανάλογα με την τραχύτητα του υλικού και άλλο ένα μέρος περνάει μέσα στο ημιαγωγό (απορρόφηση) P_{abs} . Όταν το υλικό έχει αρκετά μικρό πάχος τότε ένα μέρος, P_{trans} θα μεταφερθεί προς το περιβάλλον (Σπανάκης 2013). Από την αρχή διατήρησης της ενέργειας έχει αποδειχτεί η ισότητα:

$$P_{inc} = P_{refl} + P_{abs} + P_{trans} \quad (2.6)$$

Η φωτοαγωγιμότητα είναι ένα φαινόμενο που δημιουργείται στα υλικά με την απορρόφηση φωτονίων από τα ηλεκτρόνια σθένους ή αγωγιμότητας. Αυτό οδηγεί στην αύξηση της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα τα τελευταία να καταλαμβάνουν θέσεις που ήταν κενές ή να προσκρούουν σε δομικές ατέλειες του υλικού και έτσι να επέρχεται αύξηση της θερμοκρασίας του. Με τον τρόπο αυτό, η ενέργεια των φωτονίων αποδίδεται στο υλικό ως θερμότητα.



Εικόνα 2. 13: Δημιουργία του φορέα αγωγιμότητας και επανασύνδεσης α) από ζώνη σε ζώνη, β) μέσω επανασύνδεσης.

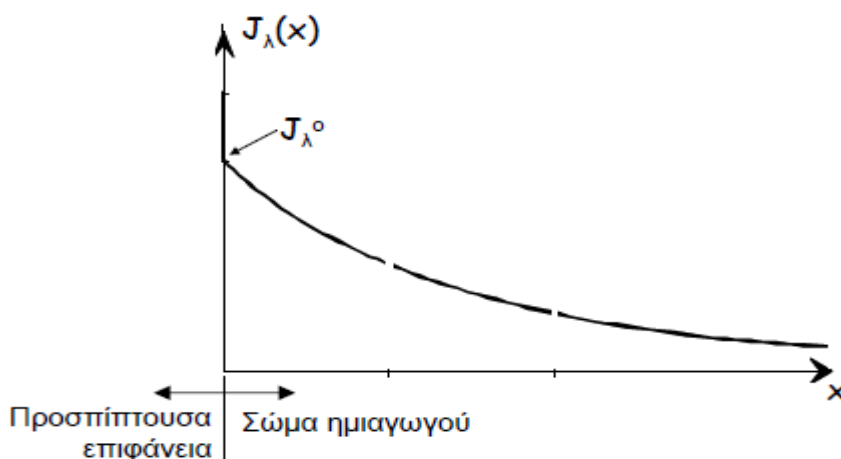
Πηγή: (Σπανάκης, 2013).

Στην πρώτη περίπτωση που η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από το διάκενο ($h\nu > E_g$) τότε δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίων-οπών. Αυτή η δημιουργία γίνεται με την απορρόφηση των φωτονίων από των ημιαγωγό. Όταν εισέλθει περισσότερη ενέργεια στον ημιαγωγό τότε μερικά από τα ηλεκτρόνια που βρίσκονταν στη ζώνη σθένους μετακινούνται στην ζώνη αγωγιμότητας σχηματίζοντας νέο ζεύγος ηλεκτρονίων-οπών.

Η δεύτερη περίπτωση είναι τα ηλεκτρόνια να μην υπερπηδήσουν στην ζώνη αγωγιμότητας και να συνδυαστούν ή να συγχωνευτούν με τις διπλανές οπές στην ήδη υπάρχουσα ζώνη, και η ενέργεια που έχουν λάβει να χαθεί με μορφή θερμότητας (Σπανάκης, 2013).

Είναι προφανές η ένταση του φωτός (πυκνότητα ισχύος) είναι μεγαλύτερη στην προσπίπτουσα επιφάνεια και μειώνεται καθώς εισχωρεί πιο βαθιά στο υλικό. Η ηλεκτρομαγνητική ένταση μειώνεται εκθετικά ως συνάρτηση της απόστασης X (από την επιφάνεια προς τα μέσα). Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την μείωση της έντασης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι ο συντελεστής απορρόφησης του υλικού (a), όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.14. Η σχέση 2.6 περιγράφει αυτή την συμπεριφορά και αποτελεί το νόμο του Beer. Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται αφενός από την ικανότητα του υλικού να απορροφά την ένταση του φωτός και αφετέρου από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Weidong, 2017). Επίσης, το πάχος του υλικού που απαιτείται για σημαντική απορρόφηση εξαρτάται από τη σταθερά απορρόφησης.

Αυτή είναι σημαντική πληροφορία για τον σχεδιαστή μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης, καθώς η κυψέλη πρέπει να έχει αρκετό πάχος για να απορροφά το προσπίπτον φως (Luque & Hegedus, 2003).



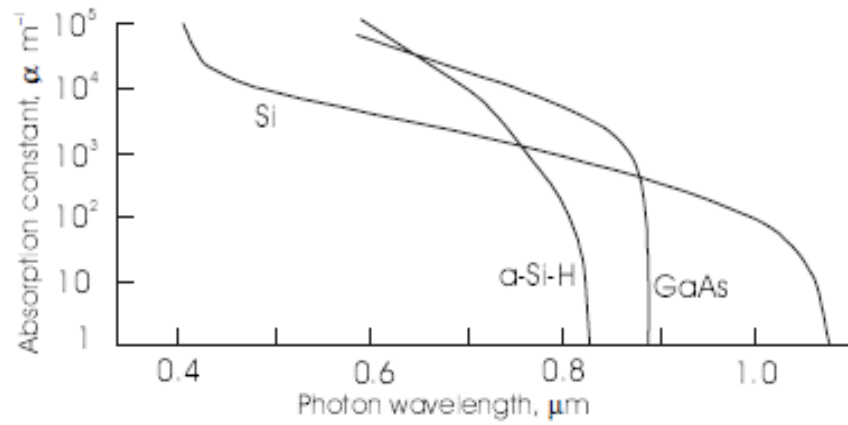
Εικόνα 2. 14: Ένταση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διερχόμενη από το υλικό ημιαγωγού.

Πηγή: (Σπανάκης, 2013)

Γνωρίζοντας ότι η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται καθώς εισχωρεί πιο βαθιά στο υλικό, το ηλεκτρικό φράγμα δυναμικού θα πρέπει να τοποθετείται κοντά στην περιοχή που δέχεται την ακτινοβολία.

Η εικόνα 2.15 δείχνει την εξάρτηση της σταθεράς απορρόφησης από το μήκος κύματος για διάφορα υλικά (Luque, 2003).

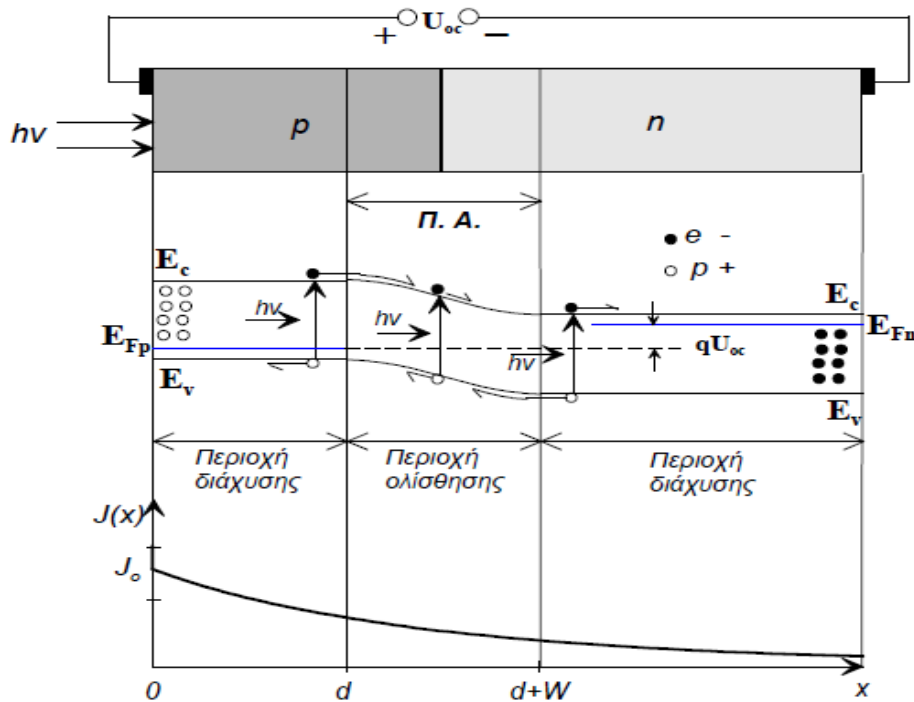
$$J_{\lambda}(x) = J_{\lambda_0} e^{(-ax)} \quad (2.6)$$



Εικόνα 2. 15: Εξάρτηση της σταθεράς απορρόφησης στο μήκος κύματος για μερικούς ημιαγωγούς.
Πηγή: (Luque & Hegedus 2003).

2.5 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Στην εικόνα 2.16 παρουσιάζεται η αλλαγή στην περιοχή αραίωσης μετά από τον φωτισμό τις διόδου P-N. Σε αυτή την περίπτωση τα φωτόνια προσπίπτουν από την μεριά του ημιαγωγού p. Η περιοχή αραίωσης είναι το μέρος όπου εμφανίζεται αρχικά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



Εικόνα 2. 16: Η επαφή pn στην περίπτωση προσπίπτουσας ακτινοβολίας και η κατανομή της έντασης πάνω στα διαγράμματα ζωνών.
Πηγή: (Σπανάκης, 2013)

Τα φωτόνια που θα φτάσουν στην περιοχή αραίωσης θα παράγουν και εκεί ζεύγη φωτοηλεκτρονίων-οπών (Electron-Hole Pair, EHP). Να προστεθεί κόμμα στο κυρίως σώμα ενός ημιαγωγού τα EHP μέσα στην περιοχή αραίωσης θα επηρεαστούν από τα φορτία της έγχυσης υλικού. Έτσι έχουμε μετακίνηση ηλεκτρονίων-οπών στον ημιαγωγό τύπου p και n, αντίστοιχα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πλεονάσματος φωτο-ηλεκτρονίων και φωτο-οπών αντίστοιχα στην πλευρά n και p. Επιπλέον το συνολικό φορτίο της επαφής θα μειώνεται όταν η διάδος λειτουργεί σαν ανοιχτό κύκλωμα διότι η πλεονάζουσα τιμή των φωτοφορέων εμφανίζεται με αρνητικό πρόσημο από αυτό της πρόσμιξης (Σπανάκης, 2013).

Έτσι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αναπτύσσει ένα νέο δυναμικό στη δίοδο pn που το ρεύμα διάχυσης και ολίσθησης είναι σε ισορροπία. Επιπροσθέτως, ο διαχωρισμός των φωτο-ηλεκτρονίων και φωτο-οπών δημιουργούν μια διαφορά δυναμικού (τάσης) ανάμεσα στην εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια τις επαφής. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος. Το ηλεκτρικό στοιχείο που αναπτύσσει διαφορά δυναμικού στα άκρα του λειτουργεί σαν μια πηγή τάσης. Το φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο η δίοδος γίνεται πηγή τάσης ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο (*Photovoltaic effect*), (Honsberg, 2019).

Το δυναμικό V_T (total) συσχετίζεται με την τάση εξόδου στους εξωτερικούς ακροδέκτες όταν η δίοδος P-N δέχεται φως. Η εξίσωση (2.7) που εκφράζει την τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) σε μία ιδανική δίοδο P-N στην περίπτωση που φωτίζεται και λειτουργεί σαν ανοιχτό κύκλωμα, δίνεται από:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \times \ln \left(\frac{L_n + L_p}{(L_n/t_n)^{\times n_p} + (L_p/t_p)^{\times p_n}} \times g_o + 1 \right) \quad (2.7)$$

Όπου

V_{OC} είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος, k η σταθερά Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία, q το φορτίο, L_n και L_p το μήκος διάχυσης για τα ηλεκτρόνια και οπές στον ημιαγωγό P και ημιαγωγό N αντίστοιχα. t_n , t_p ο χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων και οπών αντίστοιχα. n_p η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό P, p_n η συγκέντρωση των οπών στον ημιαγωγό N. g_o είναι ο ρυθμός δημιουργίας ζεύγος ηλεκτρονίων-οπών.

Το ρεύμα που παρέχεται ονομάζεται φωτόρρευμα και η ένταση του I_Φ είναι ανάλογη με την απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το φωτόρρευμα μεταφέρεται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα και θα έχει την ίδια διεύθυνση που έχει το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης τις διόδου (Σπανάκης 2013). Το φωτόρρευμα εκφράζεται από την εξίσωση 2.8:

$$I_\Phi = q \times A \times (L_n + L_p) \times g_o \quad (2.8)$$

Όπου A είναι η επιφάνεια που δέχεται το φως και $q = 1,6 \times 10^{-19}$ coul.

Από την εξίσωση 2.8 συμπεραίνεται ότι με την αύξηση του εμβαδού (A) της κυψέλης έχουμε και μεγαλύτερης έντασης φωτόρρευμα.

2.5.1 Καμπύλη και εξίσωση ρεύματος-τάσης ΦΒ διόδου

Οι εξισώσεις σε μία ιδανική δίοδο που πραγματοποιεί ηλεκτρική και οπτική διέγερση ταυτοχρόνως, εμφανίζεται σε δύο περιπτώσεις:

1. Κατά τη διάρκεια που υφίσταται ηλεκτρική διέγερση στο σκοτάδι.
2. Κατά τη διάρκεια ύπαρξης της έκθεσής της στο φως.

Στην περίπτωση διέγερσης της ιδανικής διόδου P-N το φωτόρευμα αφαιρείται από το ολικό ρεύμα ορθής πόλωσης και προστίθεται στο ολικό ρεύμα ανάστροφης πόλωσης (Δέρβος, 2013). Σύμφωνα με αυτό, προκύπτουν οι εξισώσεις 2.9 και 2.10 :

$$I_{OP\theta} = I_s \times \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - q \times A \times (L_n + L_p) \times g_o \quad (2.9)$$

$$I_{ANAST} = I_s + q \times A \times (L_n + L_p) \times g_o \quad (2.10)$$

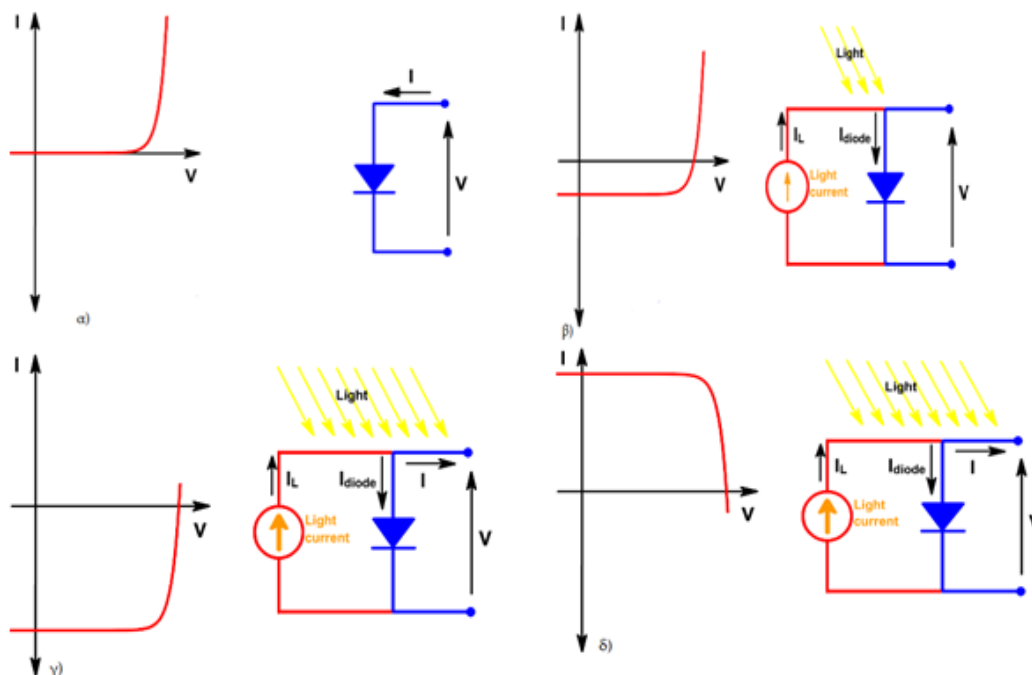
Όπου I_s είναι το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού, $q = 1,6 \times 10^{-19}$ coulomb, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ j/K και T είναι η θερμοκρασία του κυττάρου σε K. Όσο αφορά τους υπόλοιπους όρους έχουν προαναφερθεί στην εξίσωση 2.7.

Όπως απεικονίζεται και παρακάτω στην 2.17, η καμπύλη I-V (ρεύματος – τάσης) της ιδανικής διόδου, κάτω από ηλεκτροστατική-οπτική διέγερση, λειτουργεί διαφορετικά, σύμφωνα με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται. Από αυτό προκύπτει, ότι στο σχέδιο (α) της προαναφερθείσας εικόνας η καμπύλη της διόδου κατά τη διάρκεια του σκότους, εμφανίζεται στο πρώτο και στο τρίτο τεταρτημόριο. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο τεταρτημόριο έχουμε ορθή πόλωση και στο τρίτο ανάστροφη πόλωση. Το $I_{OP\theta}$ (ορθή πόλωση) αυξάνεται εκθετικά, όταν εφαρμόζεται η τάση V , πράγμα το οποίο, βλέπουμε και στην εξίσωση 2.9. Από την εξίσωση δεν λαμβάνουμε υπόψη τον όρο για το φωτόρευμα. Στην ανάστροφη πόλωση το ρεύμα θα πρέπει να μην επηρεάζεται από την τάση που εφαρμόζεται όταν ($I_{ANAST} = I_s$). Αυτό συμπεραίνεται λόγω της εξίσωσης 2.10, έχοντας αφαιρέσει τον όρο του φωτορεύματος.

Στα σχήματα (β) και (γ) της εικόνας 2.17 έχουμε την καμπύλη I-V όταν η δίοδος δέχεται φως. Η διαφορά του (β) από το (γ) είναι ότι στο (β) η δίοδος δέχεται μικρότερο ποσό φωτισμού.

Σε αυτή την περίπτωση (β), η καμπύλη είναι στο πρώτο και τέταρτο τεταρτημόριο στην ορθή πόλωση, ενώ στην ανάστροφη στο τρίτο. Στο (γ) λόγω της αυξημένης ποσότητας

φωτός μετατοπίζεται προς τα κάτω στο τέταρτο τεταρτημόριο. Υπό αυτές τις συνθήκες (αυξημένης ποσότητας φωτός), το φωτόρευμα αφαιρείται από το ρεύμα που αναλογούσε στο σκοτάδι και έτσι έχουμε την μείωση του ρεύματος $I_{OP\theta}$. Αξιοσημείωτο είναι ότι στο τέταρτο τεταρτημόριο η ισχύς λαμβάνει αρνητική τιμή με αποτέλεσμα το έργο να προσφέρεται στο εξωτερικό κύκλωμα.



Εικόνα 2. 17: α) Χωρίς φωτισμό, ένα ηλιακό στοιχείο έχει τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά με μια διόδο, β) όταν το φως πέσει στο κελί, η καμπύλη IV αλλάζει καθώς το κελί αρχίζει να παράγει ισχύ, γ) Όσο μεγαλώνει η ένταση της ΗΜ ακτινοβολίας, τόσο μεγαλύτερη και η μετατόπιση, και δ) η καμπύλη των ηλιακών κυψελίδων αναστρέφεται ως προς τον άξονα της τάσης και παρέχει μόνο τα δεδομένα της φωτιζόμενης καμπύλης.

Πηγή: (Honsberg, 2019)

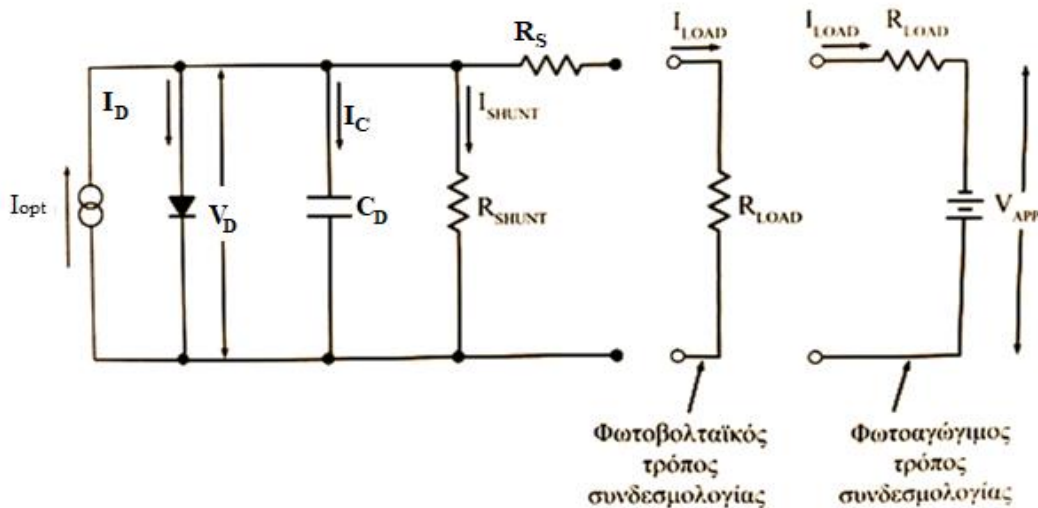
2.5.2 Το ηλεκτρικό κύκλωμα μίας διόδου P-N όταν δέχεται φως

Το ηλεκτρικό κύκλωμα που ισοδυναμεί με μία διόδο P-N υπό την επίδραση του φωτός, είτε ως αισθητήρα φωτός, είτε ως φωτοβολταϊκό στοιχείο απεικονίζεται στην εικόνα 2.18, κατά την οποία, παρέχεται το ισοδύναμο εξωτερικό κύκλωμα που χρειάζεται για τη λειτουργία των δύο διατάξεων.

Αναλυτικά, στην πρώτη περίπτωση που λειτουργεί ως αισθητήρας φωτός (τρίτο τεταρτημόριο), χρειάζεται να έχουμε αναστροφή πολικότητας και μια αντίσταση φορτίου,

ενώ στη δεύτερη περίπτωση για να γίνει ΦΒ μετατροπέας (τέταρτο τεταρτημόριο), χρησιμοποιείται μια ωμική αντίσταση για την κατανάλωση του φορτίου (Herbert, 2003).

Όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 2.18 το ηλεκτρικό κύκλωμα που είναι ισοδύναμο με την μη-ιδανική δίοδο P-N, αποτελείται από: μια πηγή που είναι υπεύθυνη για την παραγωγή του ρεύματος I_{Φ} , συνδεδεμένη παράλληλα με μια δίοδο. Το I_{Φ} ρέει εσωτερικά της διόδου, με αποτέλεσμα να διατηρείται η τάση V_D . Η μη-ιδανική δίοδος περιέχει τον παράλληλα συνδεδεμένο πυκνωτή και την παράλληλη αντίσταση R_{SH} . Επιπλέον, έχουμε τη σειριακή αντίσταση R_S που προστίθεται από το υπόστρωμα και την ωμική επαφή. Η R_S είναι σημαντική όταν έχουμε ορθή πόλωση (Goetzberger & Hoffmann, 2005).



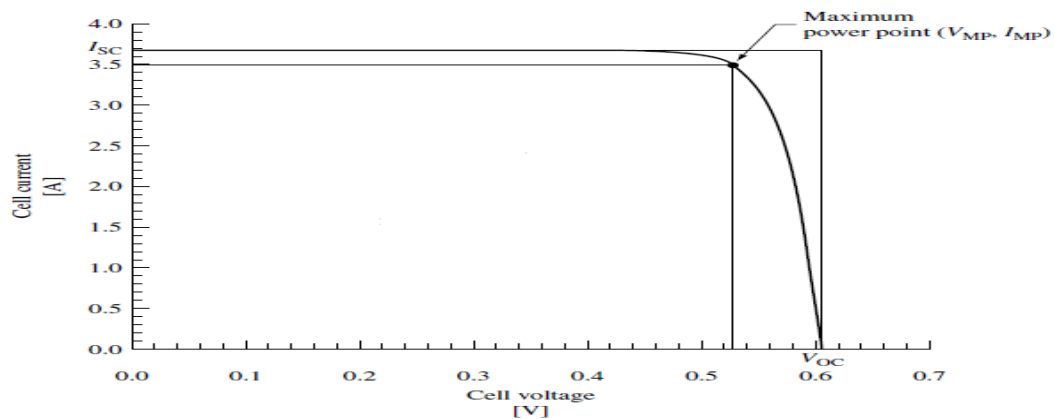
Εικόνα 2. 18: Απεικονίζει το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μίας μη ιδανικής διόδου σε δύο περιπτώσεις. Όταν λειτουργεί ως αισθητήρας και όταν λειτουργεί ως ΦΒ για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πηγή: Δέρβος, 2013.

Όπως αναφέρθηκε ανάλογα με τη λειτουργία του ηλεκτρικού κυκλώματος έχουμε και δύο περιπτώσεις σύνδεσης. Η πρώτη αφορά τη λειτουργία του ΦΒ μετατροπέα και συνδέεται με μία αντίσταση R_{LOAD} , ώστε να έχουμε μέγιστη ισχύ (Goetzberger & Hoffmann, 2005). Η δεύτερη, λειτουργεί ως ανιχνευτής φωτός ο οποίος έχει ανάστροφη πολικότητα της ιδανικής διόδου, καθώς στην έξοδο του συνδέεται με μία πηγή τάσεως.

Η αντίσταση φορτίου R_{LOAD} περιέχεται στην έξοδο, με αποτέλεσμα να δίνει το μέγιστο φωτόρευμα με τον φωτισμό.

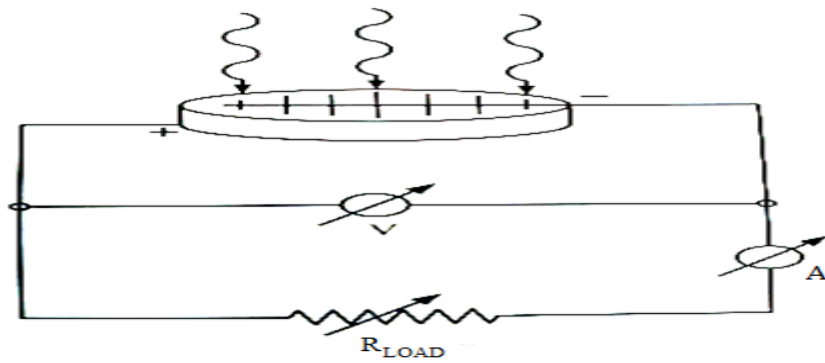
2.5.3 Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης (I-V) μίας ΦΒ κυψέλης

Η καμπύλη I-V μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης παρέχεται από τα σημεία λειτουργίας του τέταρτου τεταρτημόριου της καμπύλης ΦΒ διόδου στην εικόνα 2.17-σχήμα (γ). Η χαρακτηριστική καμπύλη της ΦΒ κυψέλης παρουσιάζεται μετατοπισμένη κατά τον άξονα xx', καθότι εμφανίζονται πάνω σε αυτήν μόνο τα δεδομένα του τέταρτου τεταρτημόριου, όπου και έχουμε την δίοδο υπό την επίδραση του φωτός. Η εικόνα 2.19 είναι χαρακτηριστική (I-V) της κυψέλης (Δέρβος, 2013).



Εικόνα 2. 19: Η χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) της ΦΒ κυψέλης στην περίπτωση που αυτή βρίσκεται κάτω από δεδομένο φωτισμό. I_m, V_m είναι το μέγιστο σημείο λειτουργίας που οι τιμές των οποίων δίνουν τη μέγιστη ισχύ. Η επιφάνεια του ορθογωνίου δίνει το P_m .
Πηγή: (Luque, 2003)

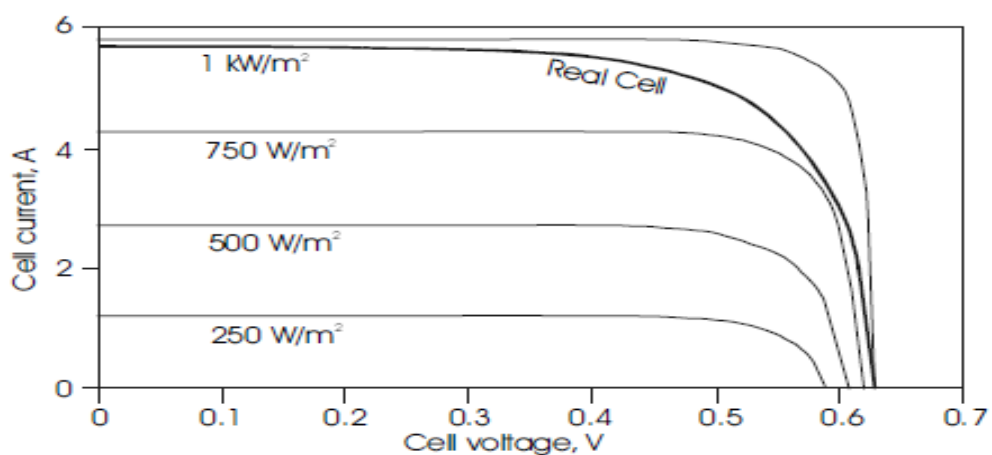
Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα που χρειάζεται για να χαράξουμε τη χαρακτηριστική I-V απεικονίζεται στην εικόνα 2.20. Σε αυτή την περίπτωση, για να μετρηθούν τα μεγέθη παίρνουμε μία μεμονωμένη ΦΒ κυψέλη. Το ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελείται από ένα αμπερόμετρο, ένα βολτόμετρο και μία αντίσταση φορτίου που η τιμή της μεταβάλλεται.



Εικόνα 2. 20: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για την χάραξη της χαρακτηριστικής I-V της ΦΒ κυψέλης.
Πηγή: Δέρβος, 2013.

Για να προσδιορίσουμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης, απλά ορίζουμε $V=0$ έτσι παίρνουμε το μέγιστο ρεύμα κυκλώματος. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης εμφανίζεται αν στο κύκλωμα της εικόνας 2.20 βραχυκυκλώσουμε την R_{LOAD} . Στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της ΦΒ κυψέλης προκύπτει $I_{SC}=I_{\Phi}$, ενώ παράλληλα, γνωρίζουμε ότι το φωτόρρευμα της κυψέλης είναι ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Επομένως, εάν το ρεύμα κυψέλης είναι γνωστό υπό τυπικές συνθήκες δοκιμής, $G_0 = 1 \text{ KW} / \text{m}^2$ στο AM 1.5 (ορίζεται ως το πάχος αέρας μάζας 1,5 φορές το πάχος της γήινης ατμόσφαιρας), τότε το ρεύμα κυψέλης σε οποιαδήποτε άλλη ακτινοβολία, G , προκύπτει από (Ventre, 2005):

$$I_{\Phi}(G) = (G / G_0) I_{\Phi}(G_0) \quad (2.11)$$



Εικόνα 2. 21: : Χαρακτηριστικά I-V πραγματικών και ιδανικών φωτοβολταϊκών κυττάρων σε διαφορετικά επίπεδα φωτισμού.
Πηγή: (Luque, 2003).

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) είναι μέγιστη όταν οι ακροδέκτες εξόδου της ΦΒ κυψέλης είναι σε λειτουργία ανοιχτού κυκλώματος (βλέπε το σχήμα της εικόνας 2.18, για $R_{LOAD}=\infty$, άρα $I_{LOAD}=0$). Η τάση ανοιχτού κυκλώματος μίας φωτιζόμενης κυψέλης έχει τη δυνατότητα να μετρηθεί με ένα βολτόμετρο.

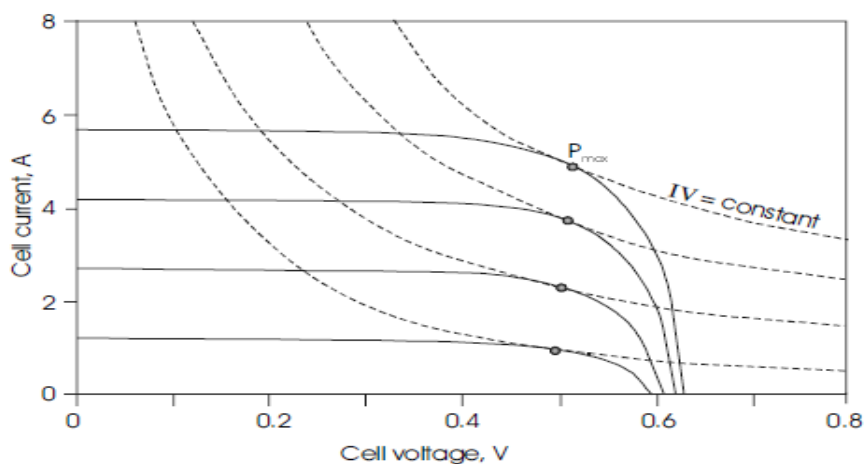
Πολλαπλασιάζοντας το ρεύμα της ΦΒ κυψέλης με την τάση της, παράγεται η ισχύς (P). Από τα πολλά σημεία λειτουργίας της κυψέλης, παρατηρούμε ότι η χαρακτηριστική καμπύλη I-V στην εικόνα 2.19 έχει ένα σημείο P_{max} που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ που παράγει. Επιπροσθέτως, το εμβαδόν του πράσινου ορθογώνιου, το οποίο προκύπτει από τη μέγιστη τιμή ρεύματος και τάσης, δίνει τη μέγιστη ισχύ. Κάτω από τις τυπικές συνθήκες εργαστηρίου και με σταθερή ΗΜ ακτινοβολία, η ΦΒ κυψέλη είναι κατασκευασμένη να λειτουργεί υπό την προαναφερθείσα μέγιστη ισχύ. Στην εικόνα 2.21 παρουσιάζονται πλήθος χαρακτηριστικών I-V σε διαφορετικά επίπεδα ΗΜ ακτινοβολίας (Ventre, 2005). Όπως παρατηρείται και στο σχήμα της εικόνας 2.19, υπάρχει ακόμα ένα ορθογώνιο που σχηματίζεται από τις τιμές (I_{sc}, V_{oc}).

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη την παρακάτω σχέση (2.12) για I_{max} και V_{max} , υπολογίζεται η τιμή της μέγιστης ισχύος:

$$P_{max} = I_m V_m = FF \times I_{sc} \times V_{oc} \quad (2.12)$$

Έχοντας τον FF ως συντελεστή πλήρωσης (FILL FACTOR) ο οποίος υπολογίζεται από το εμβαδόν του ορθογώνιου ($I_m \times V_m$) προς το εμβαδόν ($I_{sc} \times V_{oc}$) της εικόνας 2.19.

Ο συντελεστής πλήρωσης χαρακτηρίζει την ιδανικότητα της ΦΒ κυψέλης που λειτουργεί σαν πηγή ισχύος. Για μία ιδανική ΦΒ κυψέλη ($R \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$) ο συντελεστής πλήρωσης πλησιάζει την μονάδα. Η ΦΒ κυψέλες με μεγάλη εσωτερική αντίσταση έχουν μικρότερο συντελεστή πλήρωσης.



Εικόνα 2. 22: Προσδιορισμός του μέγιστου σημείου ισχύος σε συγκριμένες αποδόσεις πάνω στις χαρακτηριστικές IV.

Πηγή: (Luque, 2003).

Στις πραγματικές ΦΒ κυψέλες αναλογα με την τεχνολογία τους ο συντελεστής πλήρωσης έχει εύρος τιμών από 0,6 έως 0,8 και δίνεται από την εξίσωση 2.13 (Ventre, 2005).

$$FF = \frac{qV_{oc}/nk_B T - \ln(0,72 + qV_{oc}/nk_B T)}{1 + qV_{oc}/nk_B T} \quad (2.13)$$

Επίσης, όσο ο συντελεστής πλήρωσης πλησιάζει την μονάδα, τόσο μεγαλώνει η V_{oc} , αντίστοιχα και το E_g και το I_L .

2.5.3.1 Η απόδοση του φωτοβολταϊκής κυψέλης

Ο συντελεστής απόδοσης μίας ΦΒ κυψέλης είναι ένας βασικός παράγοντας που χρησιμοποιείται για την επιλογή και σύγκριση δύο ανόμοιων φωτοβολταϊκών κυψελών. Καθοριστικός παράγοντας για τον συντελεστή απόδοσης μιας ΦΒ κυψέλης είναι ο συντελεστής πλήρωσης, το ρεύμα βραχυκυκλώματος και η τάση ανοιχτού κυκλώματος (Fthenakis & Letcher, 2018). Ο συντελεστής απόδοσης (η), ορίζεται από τον λόγο της μέγιστης παρεχόμενης ισχύος P_{max} προς την προσπίπτουσα ηλιακή ισχύ P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{U_m I_m}{P_{in}} = \frac{FF U_{oc} I_{sc}}{P_{in}} \quad (2.14)$$

Το P_{in} είναι ίσο με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (J_{in}) επί την επιφάνεια A που προσπίπτει η ακτινοβολία.

Η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ορίζεται ως προς το ολοκλήρωμα του μήκους κύματος της κατανομής του ηλιακού φάσματος, που περνάει από αέρια μάζα ίση

με 1.5 φορές το πάχος της γήινης ατμόσφαιρας (AM1.5). Σε τυπικές συνθήκες δοκιμής οι ΦΒ κυψέλες μετριοούνται σε ακτινοβολία 1.000 W / m^2 , AM1.5 και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ \text{C}$.

$$J_{in} = \int_0^{\infty} J_{AM1,5}(\lambda) d\lambda \quad (2.15)$$

Επίσης, το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού έχει καθοριστικό ρόλο για τον συντελεστή απόδοσης. Στον πίνακα 2.1 βλέπουμε κάποια θεωρητικά ενεργειακά χάσματα διαφορετικών υλικών σε συνάρτηση με τον συντελεστή απόδοσης.

Πίνακας 2. 1: Θεωρητικοί βαθμοί απόδοσης για διάφορα φωτοβολταϊκά υλικά στους 25°C . Πηγή: (Ventre, 2005).

| Material | E_g | η_{max} |
|----------|-------|--------------|
| Ge | 0.6 | 13% |
| CIS | 1.0 | 24% |
| Si | 1.1 | 27% |
| InP | 1.2 | 24.5% |
| GaAs | 1.4 | 26.5% |
| CdTe | 1.48 | 27.5% |
| AlSb | 1.55 | 28% |
| a-Si:H | 1.65 | 27% |
| CdS | 2.42 | 18% |

Από τον πίνακα 2.1, προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το E_g τόσο μεγαλώνει και ο βαθμός απόδοσης.

2.5.4 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας ΦΒ κυψέλης

2.5.4.1 Το ηλεκτρικό κύκλωμα μίας ιδανικής ΦΒ κυψέλης

Ως, ιδανική ΦΒ κυψέλη εννοούμε ότι είναι υπό την επίδραση σταθερών συνθηκών φωτισμού. Το αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας ΦΒ κυψέλης δίνεται στην εικόνα 2.23 σε μορφή. Τα στοιχεία που το χαρακτηρίζουν είναι η πηγή του φωτορεύματος που παρέχει στο κύκλωμα φωτόρευμα έντασης I_{ph} , η δίοδος μέσα στην οποία ρέει ρεύμα I_D , και η αντίσταση φορτίου R_{LOAD} η οποία διαρρέεται από ρεύμα I_{LOAD} . Όπως έχει προαναφερθεί στην ιδανική ΦΒ κυψέλη ισχύει $R_S \rightarrow 0$ και $R_{SH} \rightarrow \infty$, και προκύπτει $V_{LOAD} = V_D$ (Weidong, 2017).

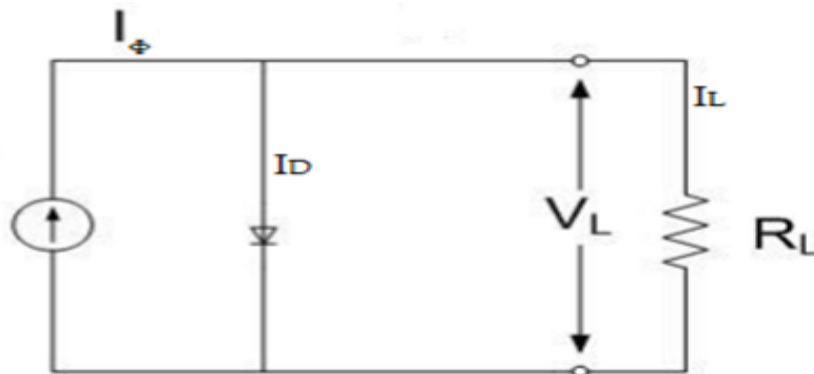
Όταν η ΦΒ κυψέλη βρίσκεται σε συνθήκες φωτισμού, τότε το ρεύμα φορτίου I_{LOAD} προκύπτει από το την σχέση 2.16 :

$$I_{LOAD} = I_{\Phi} - I_D \quad (2.16)$$

Αν αντικαταστήσουμε στη σχέση 2.16 το ρεύμα διόδου I_D από την σχέση 2.5 τότε προκύπτει η σχέση 2.17 :

$$I_{LOAD} = I_{\Phi} - I_s \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) \quad (2.17)$$

Όπου I_{LOAD} το καταναλισκόμενο ρεύμα της R_{LOAD} .



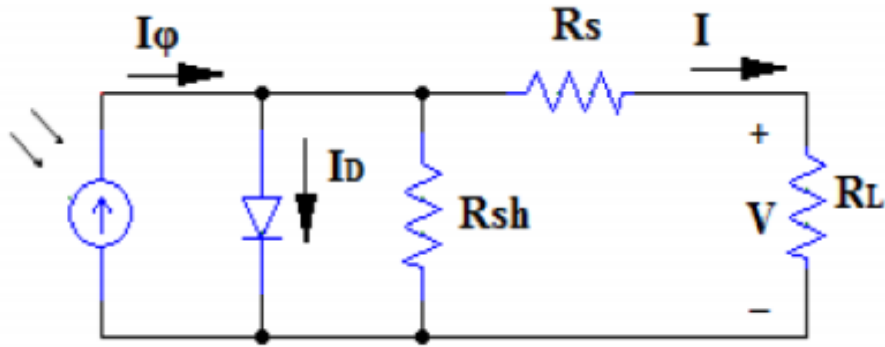
Εικόνα 2. 23: Το ηλεκτρικό κύκλωμα της ιδανικής ΦΒ κυψέλης.
Πηγή: (Luque & Hegedus, 2003)

Επιπλέον, σε περίπτωση που βραχυκυκλώσουμε τους ακροδέκτες της ΦΒ κυψέλης, τότε η V_{oc} μεγιστοποιείται, συνεπώς από $R_{LOAD}=\infty$ προκύπτει $I_{LOAD}=0$. Για να υπολογίσουμε την V_{oc} θέτουμε $I_{LOAD}=0$ και $V_{oc}=V_D$ στην σχέση 2.17

$$V_{OC} = \frac{k \times T}{q} \times \ln \left(\frac{I_{\Phi}}{I_s} + 1 \right) \quad (2.17)$$

2.5.4.2 Το ηλεκτρικό κύκλωμα μιας μη-ιδανικής ΦΒ κυψέλης

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της μη ιδανικής ΦΒ κυψέλης παρουσιάζεται στην εικόνα 2.24. Η διαφορά από την ιδανική ΦΒ κυψέλη είναι ότι τώρα στο κύκλωμα έχουν προστεθεί η αντίσταση σε σειρά (R_s) και η παράλληλη αντίσταση (R_{sh}). Η R_{sh} εμφανίζεται στο κύκλωμα λόγω αύξησης του ρεύματος που ρέει μέσα στην μη ιδανική δίοδο της ΦΒ κυψέλης και έχει καθοριστικό ρόλο κατά την ανάστροφη πόλωση. Η R_s εμφανίζεται λόγω των κατασκευαστικών ατελειών (Luque, 2003).



Εικόνα 2. 24: Αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα της ΦΒ κυψέλης.
Πηγή: (Luque, 2003).

Από το ηλεκτρικό κύκλωμα της εικόνας 2.24 προκύπτει ότι το ρεύμα που ρέει μέσα στον καταναλωτή είναι ίσο της εξίσωσης 2.18, ενώ

$$I_{LOAD} = I_{\Phi} - I_D - I_{SH} \quad (2.18)$$

Ενώ στο κλάδο της διόδου η τάση που αναπτύσσεται για την μη ιδανική ΦΒ κυψέλη δίνεται από την εξίσωση 2.19:

$$V_D = V_{LOAD} + I_{LOAD} \times R_S \quad (2.19)$$

Αν κάνουμε αντικατάσταση το I_{LOAD} από την εξίσωση 2.19 στην 2.18 της χαρακτηριστικής I-V της διόδου που βρίσκεται στην εικόνα 2.24 παίρνουμε την εξίσωση 2.20.

$$I_{LOAD} = I_{\Phi} - I_S \times \left(e^{\frac{q \times (V_{LOAD} + I_{LOAD} \times R_S)}{k \times T}} - 1 \right) - \frac{V_{LOAD} + I_{LOAD} \times R_S}{R_{SH}} \quad (2.20)$$

Στην μη ιδανική ΦΒ κυψέλη το φωτόρευμα δεν είναι ίσο με το ρεύμα βραχυκυκλώματος, όπως ισχύει για την ιδανική ΦΒ κυψέλη. Αν θέσουμε $V_{LOAD} = 0$ και το αντικαταστήσουμε με το I_{LOAD} , το ρεύμα βραχυκυκλώματος στην εξίσωση 2.20 προκύπτει:

$$I_{SC} = I_{\Phi} - I_S \times \left(e^{\frac{q \times (I_{SC} \times R_S)}{k \times T}} - 1 \right) - \frac{I_{SC} \times R_S}{R_{SH}} \quad (2.21)$$

Επομένως, στην βραχυκυκλωμένη έξοδο της μη ιδανικής ΦΒ κυψέλης το επακόλουθο ρεύμα είναι το I_{sc} .

Για να βρούμε την τάση V_{OC} αντικαθιστούμε στην εξίσωση 2.18 το ρεύμα που ρέει στη παράλληλη αντίσταση I_{SH} με (V_{OC}/R_{SH}) και το ρεύμα που ρέει στον κλάδο του καταναλωτή είναι μηδενικό, δηλαδή $I_{LOAD}=0$. Επίσης, με αυτό το δεδομένο έχουμε την τάση διόδου ίση με την τάση ανοιχτού κυκλώματος (Luque, 2003). Άρα η εξίσωση 2.18 αποδίδεται στην μορφή:

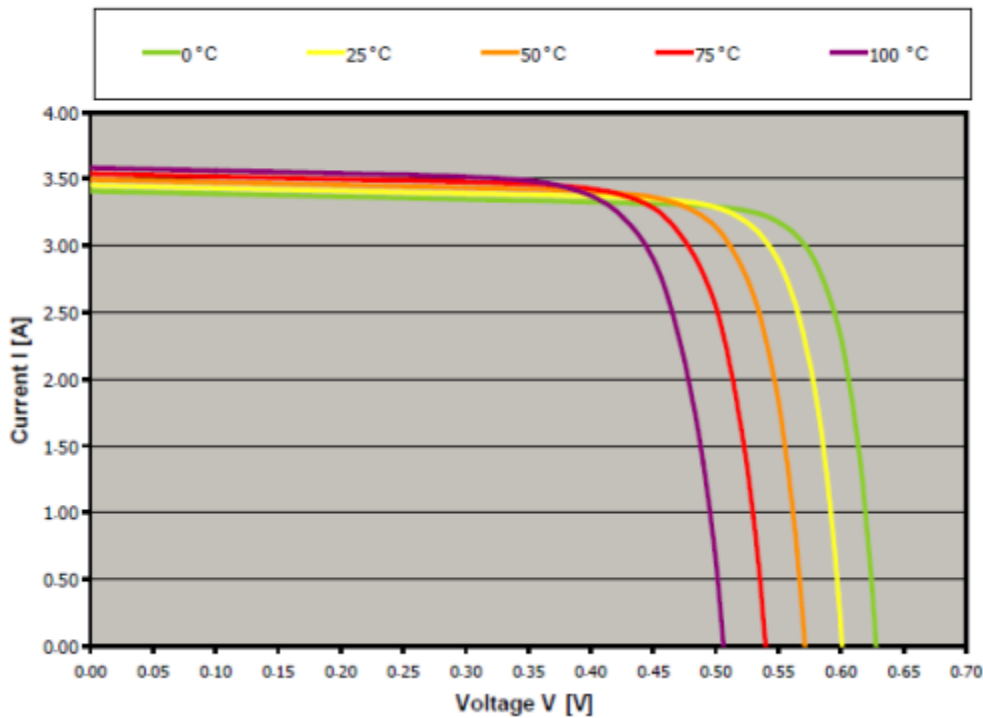
$$I_{\Phi} = I_s \left(e^{\frac{qV_{OC}}{kT}} - 1 \right) + \frac{V_{OC}}{R_{SH}} \quad (2.22)$$

Οι εξίσωση 2.21 και 2.22 λύνονται με υπολογιστικούς αλγόριθμους για την θεωρητική τιμή των I_{SC} και V_{OC} (Ventre, 2005).

2.5.5 Οι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την ΦΒ κυψέλη

2.5.5.1 Η επίδραση της θερμοκρασίας

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ΦΒ κυψέλη απεικονίζεται στην 2.25. Παρατηρείται ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας η χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) μετατοπίζεται και έχουμε μείωση της τάσης V_{OC} ενώ παράλληλα έχουμε μία μικρή αύξηση στο ρεύμα I_{SC} . Η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μείωση της ισχύος της ΦΒ κυψέλης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.25, όπου έχει μετατοπιστεί ως προς τον άξονα x το ορθογώνιο που σχηματιζόταν στην πρότυπες συνθήκες $25^{\circ}C$. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.25, στην θερμοκρασία $75^{\circ}C$ το εμβαδόν του ορθογωνίου μειώνεται (Nathan, 2005).

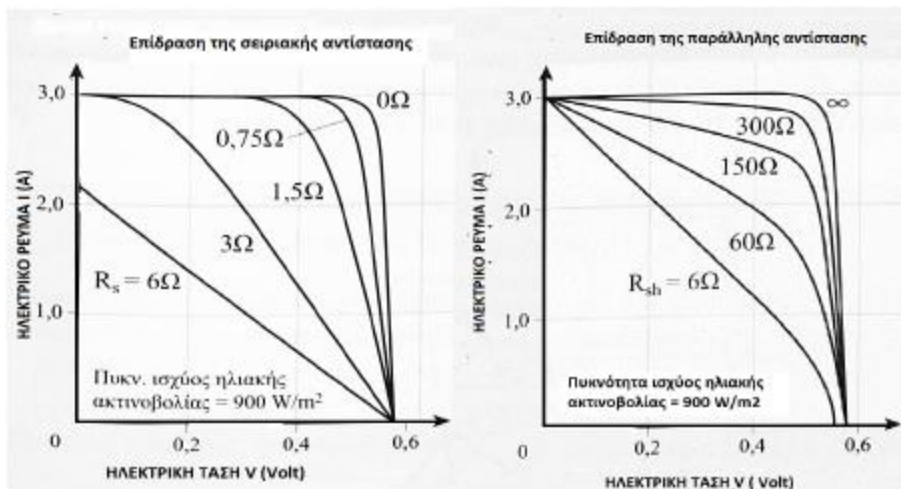


Εικόνα 2. 25: Η επίδραση της θερμοκρασίας στις καμπύλες I - V ενός ηλιακού στοιχείου.

Πηγή: (Honsberg, 2019)

2.5.5.2 Η επίδραση της αντίστασης σε σειρά R_s και της παράλληλης αντίστασης R_{SH}

Στην εικόνα 2.26, αναφέρεται η χαρακτηριστική (I-V) της ΦΒ κυψέλης. Από τα αριστερά έχουμε την καμπύλη (I-V) για την αύξηση της αντίστασης σε σειρά R_s , ενώ από τα δεξιά απεικονίζεται καμπύλη (I-V) με την μείωση παράλληλης αντίστασης R_{SH} . Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της αντίστασης σε σειρά ή την μείωση της παράλληλης αντίστασης το μέγεθος που μειώνεται είναι ο συντελεστής (FF). Είναι προφανές, ότι με την μείωση του FF έχουμε και μείωση του βαθμού απόδοσης, ενώ μειώνεται και η ισχύς που αποδίδει η ΦΒ κυψέλη. Ακόμη, το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοικτού κυκλώματος δεν επηρεάζονται αισθητά από μικρές αυξήσεις και μειώσεις της R_s και της R_{SH} αντίστοιχα. Για μεγάλη μεταβολή των R_s , R_{SH} θα έχουμε αρνητικές μεταβολές στην τάση ανοικτού κυκλώματος και στο ρεύμα βραχυκυκλώματος.



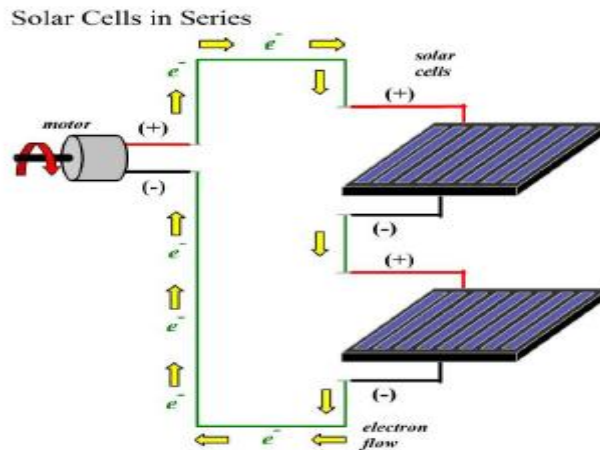
Εικόνα 2. 26: Η επίδραση της αντίστασης σε σειρά και παράλληλα, διάγραμμα I-V. Πηγή: (Σπανάκης, 2013)

2.6 Συνδεσμολογία ΦΒ κυψέλης

Οι συνήθεις συνδέσεις που υπάρχουν είναι σε σειρά, παράλληλα και η μικτή σύνδεση. Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των ΦΒ κυψελών επιτυγχάνεται και διαφορετικό αποτέλεσμα στην τάση και ισχύ του ΦΒ πλαισίου.

2.6.1 Σύνδεση σε σειρά

Για την δημιουργία ενός ΦΒ πλαισίου χρησιμοποιείται ένα πλήθος όμοιων ΦΒ κυψελών συνδεδεμένων σε σειρά. Με αυτό τον τρόπο, η τάση που αναπτύσσεται στην έξοδο μίας στοιχειοσειράς είναι ίση με το πλήθος των στοιχείων που βρίσκονται σε αυτή επί την τάση της μίας ΦΒ κυψέλης. Η σύνδεση των ΦΒ κυψελών γίνεται από τον θετικό πόλο της μίας στον αρνητικό πόλο της άλλης ΦΒ κυψέλης και το ρεύμα που αναπτύσσεται στην στοιχειοσειρά είναι ίσο με το ρεύμα της μίας ΦΒ κυψέλης (Fthenakis, 2012).

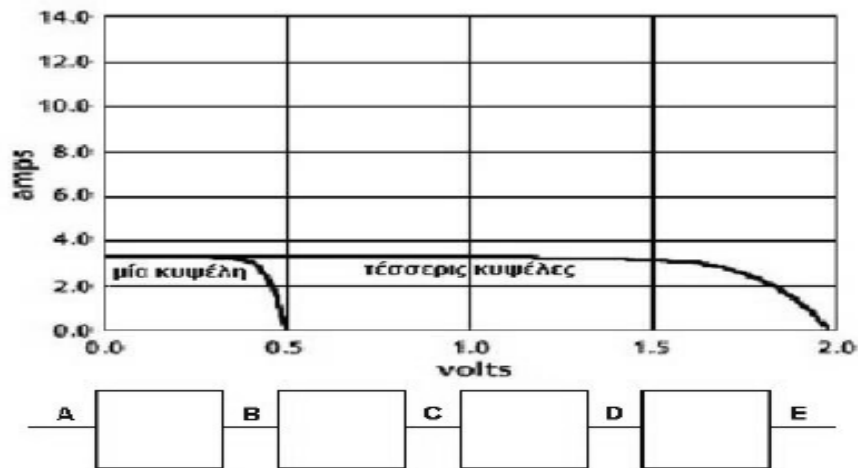


Εικόνα 2.27: Σύνδεση σε σειρά των ηλιακών κελιών.

Πηγή: (www.makeitsolar.com)

Συγκεκριμένα έχουμε, $I=I_1=I_2$ και $V=V_1+V_2$. Από την σχέση 2.23 υπολογίζεται η τάση όταν οι ΦΒ κυψέλες συνδέονται σε σειρά.

$$V_{\Sigma\epsilon\text{I}\rho\alpha\sigma} = n \times V_{\max} \quad (2.23)$$



Εικόνα 2.28: Σύνδεση σε σειρά με 4 ΦΒ κυψέλες και η καμπύλη I-V

Πηγή: http://gneng.blogspot.com/p/blog-page_19.html

Όπου, (n) είναι ο αριθμός των κυψελών και V_{\max} είναι η μέγιστη τάση μιας κυψέλης. Για να υπολογιστεί η ισχύς της συνδεσμολογίας κυψελών γίνεται πολλαπλασιασμός της συνολικής τάσης με το ρεύμα της συνδεσμολογίας. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως

μια κυψέλη μπορεί να έχει διαφορετική τάση από τις άλλες αλλά θα διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα.

Στην εικόνα 2.28 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη I-V μίας ΦΒ κυψέλης και από την μία ΦΒ κυψέλη περνάμε στην διαμόρφωση της συνολικής χαρακτηριστικής και των τεσσάρων ΦΒ κυψελών, οι οποίες βρίσκονται συνδεδεμένες σε σειρά (Science Fair Ideas, n.d.).

Με βάση την χαρακτηριστική καμπύλη I-V της ΦΒ κυψέλης παρατηρούμε ότι η τάση μίας ΦΒ κυψέλης από το Α στο Β είναι $V_{AB} = 0,5 \text{ V}$, ενώ στην συνέχεια προστίθενται και οι επόμενες $V_{AC} = 1\text{V}$, $V_{AD} = 1,5\text{V}$, $V_{AE} = 2\text{V}$ και το ρεύμα που διαρρέει την στοιχειοσειρά είναι από το Α μέχρι το Ε ίσο με $I_{AE} = 3 \text{ A}$.

2.6.2 Παράλληλη σύνδεση

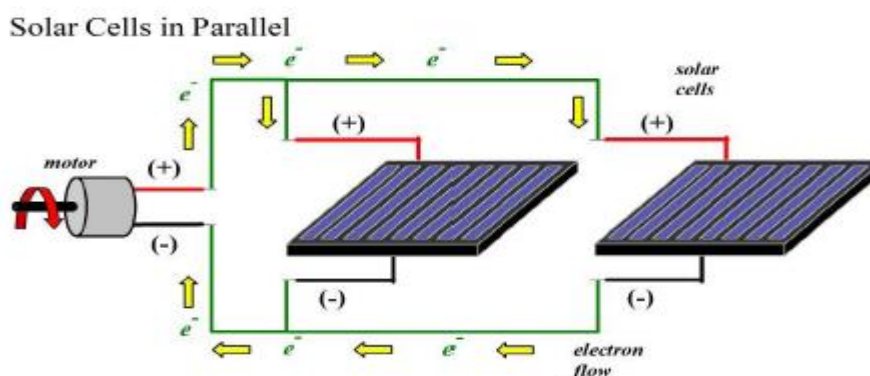
Αν έχουμε όμοιες κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα τότε το συνολικό ρεύμα θα ισούται με το ρεύμα της μίας κυψέλης (I_{max}) επί των αριθμό των κυψελών (n).

$$I_{\text{παράλληλα}} = n \times I_{\text{max}}(\text{μιας κυψέλης}) \quad (2.18)$$

Η τάση που αναπτύσσεται μεταξύ δυο κόμβων σε μια ομάδα κυψελών που είναι συνδεδεμένες παράλληλα είναι ίση με την τάση μίας κυψέλης.

$$V_{\text{παράλληλα}} = V_{\text{max}}(\text{μιας κυψέλης}) \quad (2.19)$$

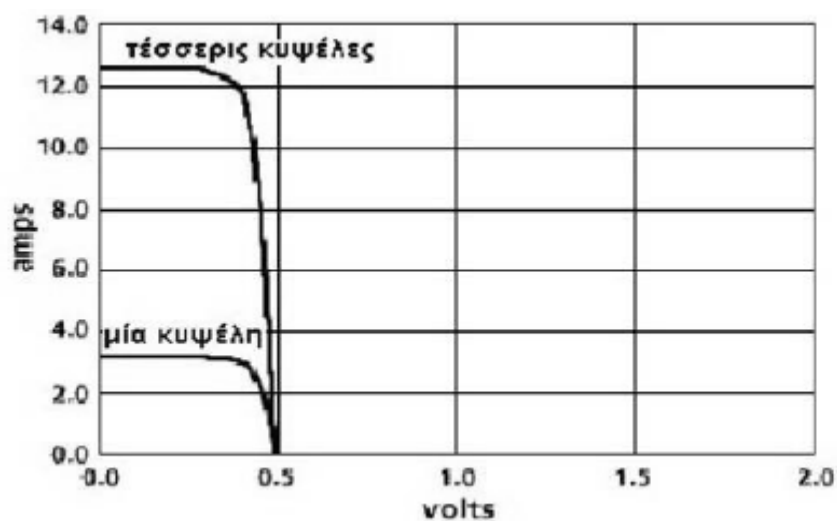
Η παράγουσα ισχύς που αποδίδεται από την παράλληλη σύνδεση των ΦΒ κυψελών είναι ίση με $I_{\text{παράλληλα}} \times V_{\text{παράλληλα}}$



Εικόνα 2.29: Σύνδεση παράλληλη ηλιακών κελιών.

Πηγή: (www.makeitsolar.com)

Στην εικόνα 2.30 φαίνεται η χαρακτηριστική I-V καμπύλη μιας κυψέλης και η χαρακτηριστική καμπύλη των κυψελών που είναι συνδεδεμένες παράλληλα.



Εικόνα 2.30: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V μιας κυψέλης και τεσσάρων κυψελών συνδεδεμένες παράλληλα.
Πηγή: http://gneng.blogspot.com/p/blog-page_19.html

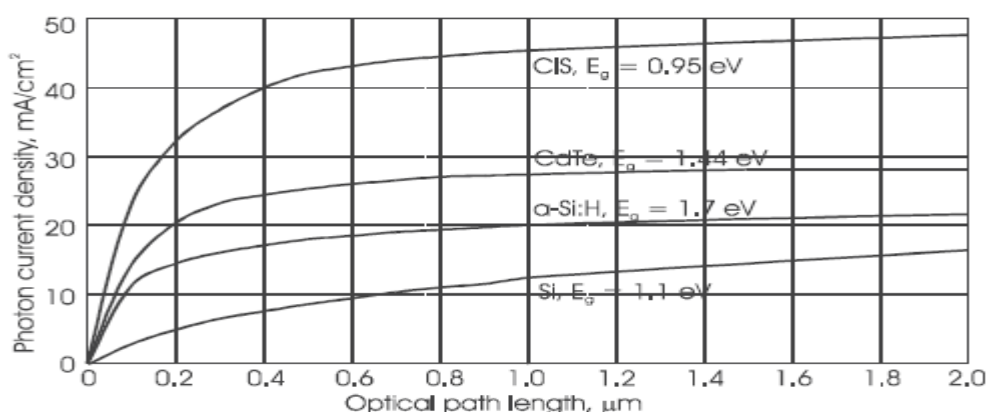
Στην εικόνα 2.30 παρουσιάζεται, ένα εύρος τιμών τάσης από 0,4 – 1,0 Volt, όταν βρίσκεται σε περιβάλλον με καλή ηλιακή πυκνότητα, ενώ το ρεύμα εξαρτάται από την επιφάνεια των κυψελών. Η συνήθης τιμή για το ρεύμα είναι 20 - 40 mA/cm² στην επιφάνεια της κυψέλης (Gevorkian, 2008).

2.7 Κατηγορίες ΦΒ στοιχείων και υλικά που τα αποτελούν

Στην παρούσα ενότητα αναφέρονται κάποιες κατηγορίες ΦΒ κυψελών που βρίσκονται στο εμπόριο.

Αρχικά, η κατασκευή ΦΒ κυψελών πραγματοποιείται με την βελτίωση και τον έλεγχο της καθαρότητας ή τον καθαρισμό. Εν συνεχεία, διαμορφώνοντας ένα εξαιρετικά καθαρό υλικό, η επόμενη διαδικασία είναι ο σχηματισμός της ένωσης p-n. Ωστόσο, περισσότερες από μία ενώσεις (p-n) μπορούν να σχεδιαστούν σε ορισμένα κελιά πολλαπλών επιπέδων. Η κρυσταλλική ΦΒ κυψέλη πυριτίου είναι ιστορικά από τις πρώτες κατηγορίες ΦΒ κυψελών που κατασκευάστηκαν. Η συνέχιση της παραγωγής τους στο μέλλον εξαρτάται από τη μείωση της ποσότητας ενέργειας που καταναλώνεται για την κατασκευή τους. Σήμερα, η τεχνολογία κρυσταλλικών ΦΒ κυψελών επικεντρώνεται γύρω από το λεπτό κύτταρο (thin) Si, το οποίο θα συζητηθεί παρακάτω (Luque & Hegedus, 2003).

Η εικόνα 3.31 δείχνει το ρεύμα φωτονίου έναντι του οπτικού μήκους διαδρομής για κοινά υλικά λεπτής μεμβράνης. Σε πολλά υλικά η ένταση του ρεύματος που αναπτύσσεται φτάνει στη τιμή του ρεύματος κορεσμού φωτονίων σε μια απόσταση 1 - 2 μm , ενώ το κρυσταλλικό Si απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερο πάχος για πλήρη απορρόφηση φωτονίων. Παραδείγματα φωτοβολταϊκών κυψελών λεπτής μεμβράνης που εξετάζονται στη παρούσα εργασία, είναι το άμορφο πυρίτιο (a-Si), κράμα χαλκού, ινδίου, γαλλίου και σεληνίου (CIGS) και το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το αρσενίδιο του γαλλίου έχει χρησιμοποιηθεί για ΦΒ κυψέλες υψηλής απόδοσης και έχει επίσης αποτελέσει αντικείμενο πειραμάτων λεπτής μεμβράνης (Ventre, 2005).



Εικόνα 2. 31: Ρεύμα φωτονίου έναντι οπτικού μήκους διαδρομής για υλικά λεπτής μεμβράνης, σε σύγκριση με το κρυσταλλικό πυρίτιο σε τυπικές συνθήκες δοκιμής.

Πηγή: (Luque, 2003).

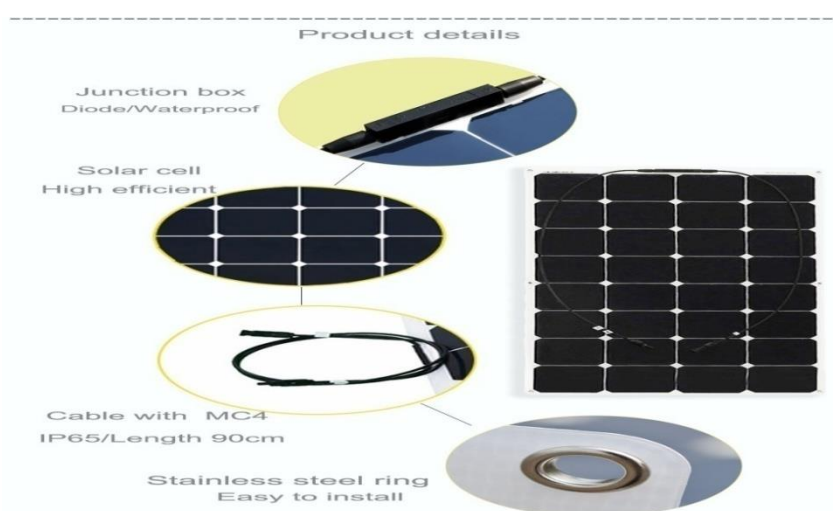
2.7.1 ΜΟΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΠΥΡΙΤΙΟ

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο κατασκευής Czochralski εκτιμάται ότι έχει απόδοση περίπου 15,5 % - 17,5%, ωστόσο σε εργαστηριακές δοκιμές η τιμή της ανέρχεται στο 24,5%.

Σύμφωνα με τα υπάρχοντα δεδομένα το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με την υψηλότερη απόδοση εκτιμάται ότι είναι της εταιρίας Sun Power με ποσοστό 18,5%. Κατά βάση χρησιμοποιείται για κατασκευές οι οποίες καταναλώνουν μεγαλύτερη ενέργεια. Ενδιαφέρον είναι, ότι χρησιμοποιεί μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πλαισίου έτσι ώστε να έχουν περισσότερη επιφάνεια για να αλληλεπιδράσουν τα φωτόνια στο εσωτερικό του (Ventre & Messenger 2005).

Η μορφή του μονοκρυσταλλικού ΦΒ στοιχείου είναι ανάλογη με τον τρόπο κοπής και με την χρήση του. Τα σχήματα που παίρνει είναι στρόγγυλα, ημί-στρογγυλά και τετράγωνα. Η χρήση του τελευταίου συνηθίζεται, καθώς το τετράγωνο είναι ευνοϊκότερο ως προς τη λιγότερη κατανάλωση του υλικού κατά την παραγωγή τους. Τα στρόγγυλα ή ημι-στρογγυλά δεν εξυπηρετούν σε μεγάλο βαθμό, καθότι δεν καλύπτουν μεγάλη επιφάνεια (Ventre & Messenger 2005).

Στην εικόνα 2.32 παρουσιάζεται ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο υψηλής απόδοσης. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με επιφάνεια αντανάκλασης στο πάνω μέρος κυκλοφορούν σε μαύρο ή μπλε χρώμα.



Εικόνα 2.32: Σχήμα μονοκρυσταλλικών κελιών πυριτίου.

Πηγή:

<https://www.aliexpress.com/i/1005001308250130.html?spm=2114.12057483.0.0.6195167ct4Y8G7>

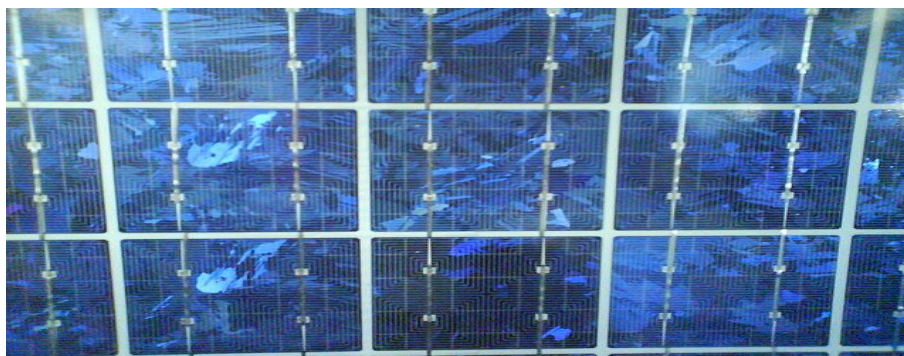
2.7.2 ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΠΥΡΙΤΙΟ

Αν και έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά, η μορφή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου διαφέρει από αυτή του μονοκρυσταλλικού. Επεξηγηματικά, κάποιες περιοχές του πολυκρυσταλλικού εμφανίζουν στοιχεία από μονό κρυσταλλικό υλικό. Το πολυκρυσταλλικό πλαίσιο εμφανίζει μικρότερη απόδοση σε σύγκριση με το μονοκρυσταλλικό, αλλά έχει χαμηλότερο κόστος.

Βασική διαφορά των δύο είναι ότι κατά την παραγωγική διαδικασία του πολυκρυσταλλικού πυριτίου δεν χρησιμοποιείται η μέθοδος Czochralski για την δημιουργία τέλει κρυσταλλικής δομής, αλλά το καθαρό πυρίτιο. Αφού τήκεται τοποθετείται σε δοχείο με τετραγωνική ή ορθογώνια βάση ώσπου γίνει μετατροπή της φυσικής του κατάστασης του σε στερεή. (Luque, 2003).

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή η παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι πιο οικονομική από το μονοκρυσταλλικό και δεν καταναλώνεται επιπλέον υλικό για την τοποθέτηση σε πλαίσιο όπως γίνεται στο μονοκρυσταλλικό, διότι το σχήμα του αποτελείται από τετραγωνικές και ορθογώνιες ράβδους.

Σύμφωνα με τις διαστάσεις εμπορίου (μήκος x πλάτος), $10\text{cm}^2 \times 10\text{cm}^2$ (4inch), $12.5\text{cm}^2 \times 12.5\text{cm}^2$ (5inch), $15\text{cm}^2 \times 15\text{cm}^2$ (6inch), $15.6\text{m}^2 \times 15.6\text{cm}^2$ (7inch) και $21\text{cm}^2 \times 21\text{cm}^2$ (8inch), η απόδοση του ανέρχεται στα 13% - 16%. Το πάχος του κυμαίνεται από 0,24mm – 0,3mm. Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με επιφάνεια αντανάκλασης στο πάνω μέρος, που παράγονται στο εμπόριο χαρακτηρίζονται από το μαύρο ή μπλε χρώμα τους (Ventre & Messenger, 2005).



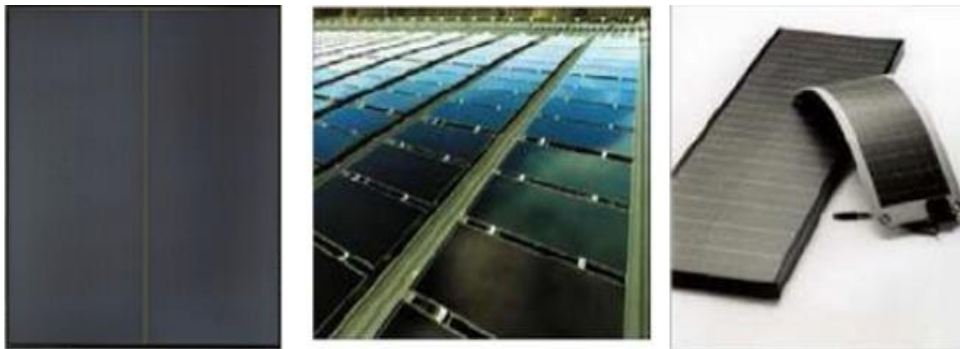
Εικόνα 2.33: πολυκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα.

Πηγή: <https://el.wikipedia.org>

2.7.3 ΦΒ πλαίσιο άμορφου πυριτίου (amorphous-Si)

Βασικό χαρακτηριστικό του ΦΒ πλαισίου άμορφου πυριτίου είναι ότι η χρήση του δεν είναι περίπλοκη (π.χ υπολογιστής, σε αυτόματα φαναράκια κήπου). Το άμορφο πυρίτιο είναι τεχνολογίας λεπτού υμενίου μη κρυσταλλικό και το πάχος του είναι πάρα πολύ μικρό συγκριτικά με το μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Επιπλέον, γνώρισμα των κυψελών άμορφου πυριτίου είναι η ευκαμψία των Φ/Β κελιών. Το άμορφο πυρίτιο είναι μικρότερης απόδοσης από τα μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά κυψέλες (LALOVIC, KISS & WEAKLIEM, 1987).

Το άμορφο πυρίτιο με τις νέες τεχνολογίες υλικών και σχεδίασης ΦΒ πλαισίων υπόσχεται πολλά για το μέλλον. Μπορεί να γίνει βιώσιμη λύση αφού θα κοστίζει λιγότερο από τα άλλα και θα αυξήσει την απόδοση του, η οποία στο ΦΒ πλαίσιο εκτιμάται μεταξύ 5-10%, και κοστολογείται 1-2 ευρώ σε μέγιστη ισχύ (Delahoy et al, 1985).



Εικόνα 2.34: Φωτοβολταϊκά πάνελ από άμορφο πυρίτιο
Πηγή: <http://www.energotechniki.gr/site/xpage.asp?sid=96&page=services2>

2.7.4 ΦΒ πλαίσιο Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Η κατασκευή ΦΒ κυψέλης από την κρυσταλλική ένωση τελλουριούχου καδμίου έχει μεγάλη θεωρητική απόδοση κοντά στο 25%. Αυτό συμβαίνει διότι το ενεργειακό διάκενο E_g του υλικού είναι μεγάλο. Επίσης, για να δημιουργηθεί η ΦΒ κυψέλη χρειάζεται ελάχιστη ποσότητα υλικού σε σύγκριση με μια μονοκρυσταλλική ΦΒ κυψέλη.

Η ΦΒ κυψέλη από τελλουριούχο κάδμιο έχει δείξει ότι η απόδοση του δεν επηρεάζεται από υψηλές θερμοκρασίες αλλά ούτε από την παρουσία νεφών. Τα μειονεκτήματα του είναι ότι το τελλούριο είναι ένα σπάνιο υλικό και το κάδμιο είναι ένα τοξικό υλικό κατά την επεξεργασία του (Cyrsa, et al., 2014).

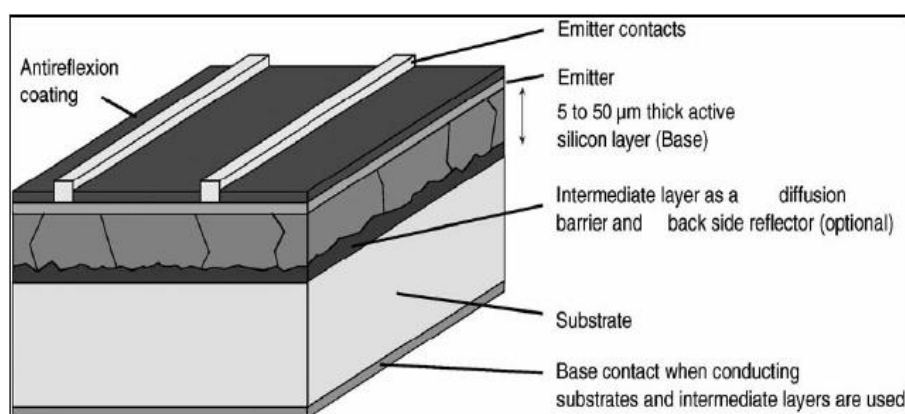
2.7.5 ΦΒ κυψέλη Αρσενικούχου Γαλλίου (GaAs)

Τα ΦΒ πλαίσια που είναι κατασκευασμένα από ΦΒ κυψέλες αρσενικούχου γαλλίου (GaAs) χρησιμοποιούνται κυρίως για διαστημικές εφαρμογές. Αυτό συμβαίνει διότι το ενεργειακό χάσμα φτάνει 1,43 eV, που σημαίνει ότι μπορεί να μετατρέπει μεγαλύτερο ποσό ενέργειας σε ηλεκτρική. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από μεγάλη ανθεκτικότητα στη θερμοκρασία. Η θεωρητική απόδοση εκτιμάται στο 30%.

Τα μειονεκτήματα του GaAs είναι ότι είναι τοξικό κατά την ανακύκλωση του και ακριβό (Ventre, 2005, Van Swaaij et al 2014).

2.7.6 ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΠΥΡΙΤΙΟ ΛΕΠΤΟΥ ΦΙΛΜ (c-SiTFc)

Ο σκοπός των λεπτών μεμβρανών (*films*) είναι η μείωση της ποσότητας του υλικού έτσι ώστε να έχει χαμηλότερο κόστος. Ένα από τα πλεονεκτήματα του είναι ότι μπορεί να τοποθετηθεί σε γυάλινες και κεραμικές επιφάνειες. Ακόμη, παρά το μικρό του πάχος (μικρόμετρα) η απόδοση του είναι αξιόλογη, εφόσον κυμαίνεται από 9 – 10%, το σχήμα του είναι τετράγωνο, το πάχος 0,03mm - 0,01mm και διαθέτει κεραμικό υπόστρωμα. Η εξωτερική του μορφή μοιάζει με τα πολυκρυσταλλικά και οι αποχρώσεις του διακρίνονται σε μπλε (με anti-reflective, AR) και γκρι (χωρίς AR) χρώμα (Van Swaaij et al 2014).



Εικόνα 2.35: Τα μέρη που αποτελείται ένα κρυσταλλικό πυρίτιο λεπτού φιλμ.

Πηγή: (Luque & Hegedus, 2003).

2.8 Βιβλιογραφικές πηγές

Δαμιανίδης, Μ., Κατσαρός, Γ., Τόλης, Μ. & Στεργιόπουλος, Φ. (2011). *Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων*. Θεσσαλονίκη: Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος. Ανακτήθηκε Μάρτιο 28, 2020 από <https://www.openbook.gr>

Ενεργό Τεχνική Εναλλακτικές Εφαρμογές. (χ.η.). Σχετικά ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ. Ανακτήθηκε Απρίλιος 3, 2020, από <http://www.energotechniki.gr>

Ντρίβας, Ν. (χ.η.). *Μελέτη ημιαγωγών*. Ανακτήθηκε Μάρτιο 28, 2020, από <http://physics.teiath.gr/>

Παπαγεωργίου, Δ. Γ., (χ.η.). Ημιαγωγοί. Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών: Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Ανακτήθηκε Μάρτιου 28, 2020, από <http://pc164.materials.uoi>

Πολυζάκης, Α., Ζώρας, Σ. & Παπαγεωργίου, Κ. (2018). *Μετάδοση θερμότητας και συσκευές διεργασίας*. Πτολεμαΐδα: Power Heat Cool.

Σπανάκης, Ε. (2007-2013) *Φωτοβολταϊκό φαινόμενο – Τύποι ΦΒ κυψελίδων*. Το πρόγραμμα συνδιοργανώνεται από: Το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Το Τμήμα Χημείας του Πανεπιστημίου Κρήτης.

Cyrsa, W., Heather, A., Capshaw, Z., Kingsbury, R., Sahmel, J. & Tvermoes, B. (2014). Landfill waste and recycling: Use of a screening-level risk assessment tool for end-of-life cadmium telluride (CdTe) thin-film photovoltaic (PV) panels. *Energy Policy*, vol 68, 524-533.

Delahoy, A.E., Gau S.C., Murphy, O.J., Kapur, M. & Bockris J.O. (1985). A one-unit photovoltaic electrolysis system based on a triple stack of amorphous silicon (pin) cells. A. Veziroglu (Ed),. *International Journal of Hydrogen Energy* (pp. 131-138): Elsevier B.V.

Electronics Tutorials. (n.d.) About diodes. Retrieved Απρίλιος 1, 2020, από https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_2.html

Fthenakis, V. (2012) *Third Generation Photovoltaic's*. Rijeka: Published by InTech. Ανακτήθηκε March, 2012, από www.intechopen.com

Fthenakis, V. & Letcher, T. (2018) *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems: With Special Focus on Photovoltaic Systems*. New York: Academic Press.

Gevorkian, P (2008) *Solar Power in Building Design*. California: McGraw-Hill. DOI: 10.1036/0071485635

Goetzberger, A. & Hoffmann, V.U., (2005) *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Berlin: Springer.

Herbert, W. (2003) *Solar Photovoltaic Systems Technical Training Manual*. Paris: UNESCO PUBLISHING.

Honsberg, C.B. & Bowden, S.G. (2019). *Photovoltaic's Education Website*. Ανακτήθηκε Απρίλιος 1, 2020, από www.pveducation.org.

Jäger, K., Isabella, O., Smets, A. H. M., Van Swaaij, R. A. C. M. M., Zemon, M. (2014) *Solar Energy Fundamentals, Technology, and Systems*. Delft: University of Technology.

Lalovic, B., Kiss, Z. & Weakliem, H. (1987). A Hybrid Amorphous Silicon Photovoltaic And Thermal Solar Collection. In B. Kidric Ed.), *Solar Cells* (pp. 131 – 138). Belgrade: Institute of Nuclear Sciences

Luque, A. & Hegedus, S. (2003) *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. West Sussex: Wiley.

Morley, D. (2014) *Planning for solar energy*. Chicago: American Planning Association. Ανακτήθηκε April, 2014, από www.planning.org

Nathan, S.L., (2005) *Basic research needs for solar energy utilization*. Argonne: Renée M. Nault, Argonne National Laboratory. Ανακτήθηκε September, 2005, Από http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/SEU_rpt.pdf.

Rabaey, J.M., Chandrakasan, A. & Nolic, B. (2003) Ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Αθήνα : Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

Rajput, S.K. (2017) *solar energy- Fundamentals, Economic and Energy Analysis*. Ghaziabad: NITRA. Ανακτήθηκε 28 September, 2017, Από <https://www.researchgate.net/publication/316146341>

Science Fair Ideas. (n.d.) About *Make It Solar Science Fair Projects*. Retrieved January 30, 2020, from www.makeitsolar.com

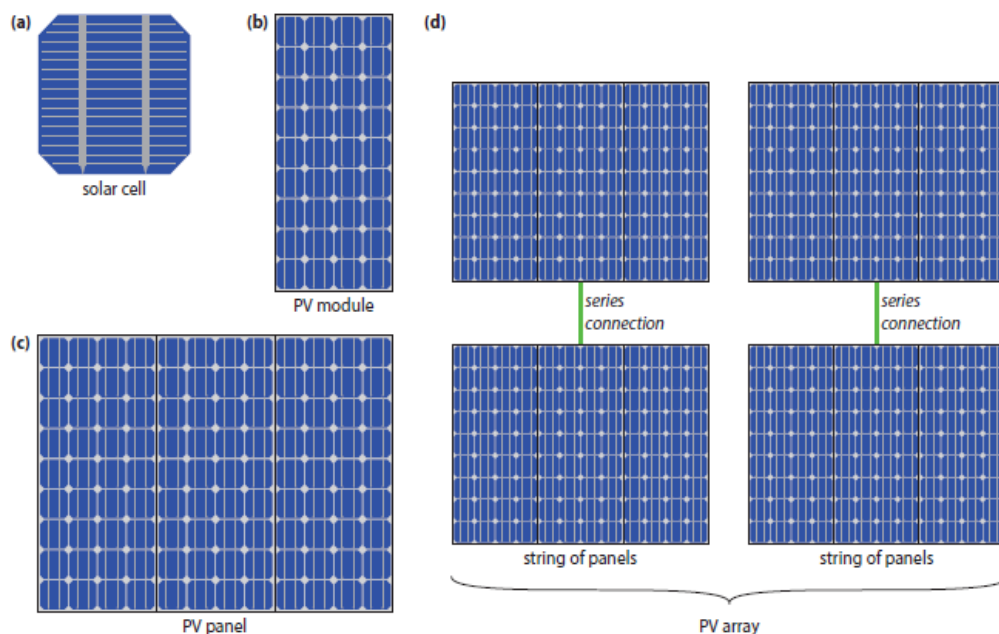
Theory of solar cells. (n.d). Retrieved Απρίλιος 1, 2020, από https://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_solar_cells

Ventre, J., Messenger, R. A., (2005) *Photovoltaic systems engineering*. London: CRC PRESS.

Weidong, X. (2017) *Photovoltaic Power System: Modelling, Design and Control*. Sydney: John Wiley. DOI:10.1002/9781119280408

Κεφάλαιο 3. ΤΑ ΜΕΡΗ ΠΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΟΥΝ ΜΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Το κεφάλαιο αυτό αφορά τα μέρη που αποτελούν τα φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς και το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module) που είναι και ο κύριος πυρήνας της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Για να παράγει μία εγκατάσταση μεγαλύτερη τάση στην έξοδο της, τα πλαίσια συνδέονται όμοια σε σειρά σχηματίζοντας την λεγόμενη στοιχειοσειρά (string), η οποία έχει την ικανότητα να συνδέεται απευθείας με έναν καταναλωτή για μικρές εφαρμογές. Είναι προφανές, ότι ο καταναλωτής σε αυτή την περίπτωση θα λαμβάνει συνεχές ρεύμα από την έξοδο του ΦΒ συστήματος. Εκτός από την αύξηση της τάσης χρειάζεται και αύξηση του ρεύματος στην έξοδο του ΦΒ συστήματος. Για να επιτευχθεί αυτό, οι συστοιχίες συνδέονται παράλληλα σχηματίζοντας ένα υποπεδίο ή πεδίο (array). Στην συνέχεια, θα γίνει αναφορά στα είδη των φωτοβολταϊκών συστημάτων και ποια από αυτά βρίσκουν εφαρμογή στα πλοία. Τέλος θα αναλύσουμε τα είδη των συσσωρευτών ενέργειας (μπαταρίες), τους μετατροπείς (DC-DC), τους αναστροφείς (DC-AC) και τους ρυθμιστές φορτίου.



ΕΙΚΟΝΑ 3. 1: Απεικονίζονται (a) ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, (b) ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, (c) μια φωτοβολταϊκή στοιχειοσειρά, (d) το πεδίο των φωτοβολταϊκών στοιχείων . Πηγή: Van Swaaij et al 2014

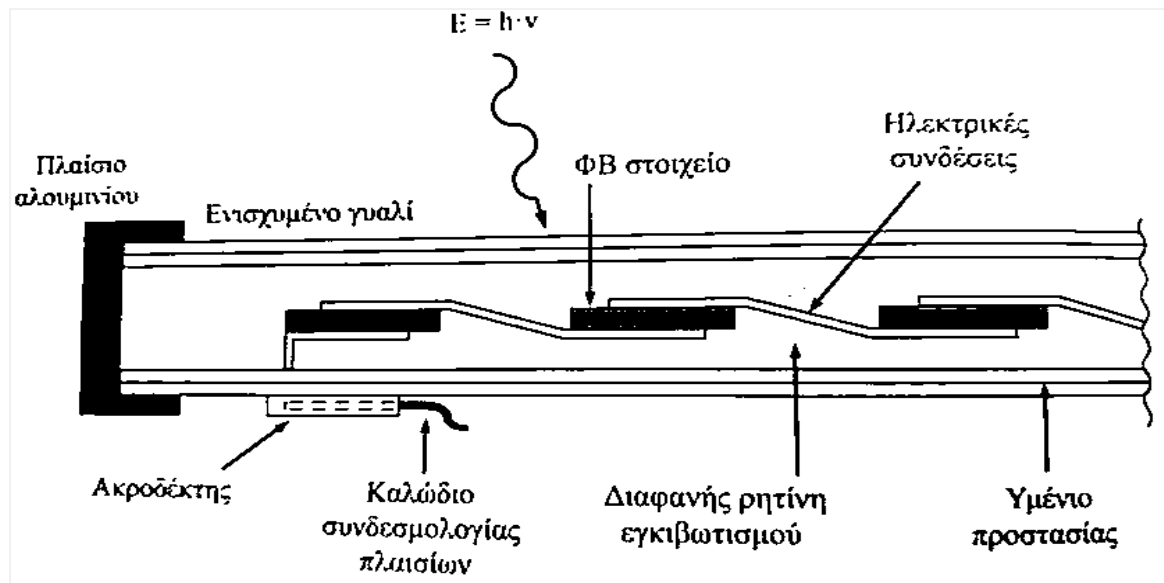
3.1 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module)

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο, όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, δίνει στην έξοδο του συνεχή τάση περίπου 0,5 V, ενώ το ρεύμα παραγωγής από το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ανάλογο της ακτινοβολίας που λαμβάνει. Η τιμή του ρεύματος για την παραγωγή P_{max} έχει εύρος τιμών από 4 έως 7 A συνήθως, άρα η παρεχόμενη μέγιστη ισχύς ανέρχεται περίπου στα 3 W (Van Swaaij *et al* 2014).

Η ηλεκτρολογική σύνδεση σε σειρά των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιφέρει στην έξοδο του ΦΒ πλαισίου μεγαλύτερη τάση, προκειμένου να υπάρχει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούν το κύριο πυλώνα της κατασκευαστικής μονάδας που χρησιμοποιείται για την δημιουργία μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Η συνδεσμολογία των ΦΒ στοιχείων είναι σε σειρά, δηλαδή η πάνω όψη του ενός στοιχείου (υλικό τύπου n) συνδέεται ηλεκτρικά με την κάτω όψη (υλικό τύπου p) του στοιχείου που ακολουθεί. Αυτές οι ηλεκτρικές συνδέσεις είναι το πιο ευαίσθητο σημείο σε ένα πλαίσιο και χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την συγκόλληση τους για τυχόν ηλεκτρομαγνητικές διεγέρσεις, για διάβρωση και για καταπονήσεις που θα επέλθουν κατά το διάστημα εφαρμογής τους. Για την αποφυγή διαβρώσεων από διείσδυση υγρασίας, όλο το σύστημα των στοιχειοσειρών εγκιβωτίζεται μέσα σε ρητίνη. Επιπλέον, οι ακροδέκτες (θετικός και αρνητικός) από την στοιχειοσειρά συνδέονται στο κιβώτιο του ΦΒ πλαισίου που είναι αρμόδιο για τις ηλεκτρικές συνδέσεις. Το κιβώτιο σύνδεσης περιέχει επίσης εξωτερικούς ακροδέκτες για να συνδεθεί η δίοδος προστασίας του ΦΒ πλαισίου αλλά και η σύνδεση με άλλα πλαίσια. Η διαφανής ρητίνη των ΦΒ στοιχείων εγκλείεται σε ενισχυμένο γυαλί το οποίο περιέχει υμένιο προστασίας και έτσι αυξάνει την αντοχή σε εγκάρσιες μηχανικές καταπονήσεις. Επίσης, διαφοροποιεί το δείκτη διάθλασης στις διαχωριστικές επιφάνειες με αποτέλεσμα να εγκλωβίζει την ακτινοβολία ανάμεσα στις δύο επιφάνειες (Δέρβος, 2013).

Περιμετρικά το πλαίσιο περιβάλλεται από ανοδιωμένο αλουμίνιο, το οποίο είναι ανθεκτικό στην διάβρωση. Το μεταλλικό πλαίσιο πάντα γειώνεται εξωτερικά με χάλκινο, αγωγό ικανής διατομής.



ΕΙΚΟΝΑ 3.2: Η τομή ενός ΦΒ πλαισίου και τα κυριότερα τμήματα που το διέπουν.
Πηγή: (Δέρβος, 2013)

Σύμφωνα με τη κλάση II κατά πρότυπο IEC61730 το πλαίσιο θα πρέπει να διασφαλίζει στεγανότητα ώστε να μην εισέρχεται υγρασία στο εσωτερικό που βρίσκονται τα ΦΒ στοιχεία, ενώ θα πρέπει να υπάρχει και πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση. Επίσης, τα ΦΒ πλαίσια θα πρέπει να είναι ανθεκτικά στις καταπονήσεις και στους κραδασμούς. Βάση του προτύπου IEC61215 ed.2, τα πλαίσια θα πρέπει να είναι ανθεκτικά σε φορτία μηχανικής καταπόνησης, όπως το χιόνι, ο πάγος και ο άνεμος. Επίσης, θα πρέπει να αντέχουν σε φορτία περίπου 5500 N/m^2 (Δέρβος, 2013).

Άλλο ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η συμβατότητα του ΦΒ πλαισίου με τους αντιστροφείς ή τους φορτιστές συσσωρευτών. Η συμβατότητα ορίζεται από: (1) τον αναστροφέα ή τον φορτιστή συσσωρευτών και την ικανότητα που έχουν ώστε το πλαίσιο να παρέχει την μέγιστη ηλεκτρική ισχύ, (2) το ρεύμα και την τάση μέγιστης ισχύος της συνδεσμολογίας όλων των πλαισίων να αντιστοιχούν με την τιμή εισόδου του αναστροφέα (Δέρβος, 2013).

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά μεγέθη που πρέπει να εκτιμηθούν για την καταλληλότητα και την έγκριση ενός ΦΒ πλαισίου είναι τα εξής:

Κατασκευαστής και τύπος: Κάθε πλαίσιο θα πρέπει να αναγράφει τον κατασκευαστή, τον εμπορικό τύπο του μοντέλου και τον αριθμό σειράς παραγωγής.

Υλικό ΦΒ πλαισίου: Το υλικό κατασκευής των πλαισίων και η ποιότητα, δηλαδή Μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό, λεπτού υμενίου και άμορφου πυριτίου, η χρήση του οποίου συμβάλλει στην αξιολόγηση της καταλληλότητας του περιβάλλοντος στο οποίο θα εγκατασταθούν.

Ισχύς κορυφής STC (Standard Test Conditions): Η παραγόμενη ονομαστική ισχύς της κορυφής του πλαισίου (σε W_p) αντιστοιχεί στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ του πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες φωτισμού STC. Οι συνθήκες φωτισμού αποδίδονται από την πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας 1000 W/m^2 , το φάσμα της προσπίπτουσας δέσμης (AM 1,5), τη θερμοκρασία του υλικού των ΦΒ στοιχείων (25°C) και την επεξεργασία ακτινοβολίας που γίνεται στο πλαίσιο.

Οριακή τιμή για I_{sc} και V_{oc} : Οι τιμές αυτές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην σύνδεση του ΦΒ πλαισίου ή του ΦΒ πεδίου με τους αντιστροφείς, ρυθμιστές μπαταριών και τους συσσωρευτές, με στόχο την επίτευξη της συμβατότητας.

Ονομαστική θερμοκρασία πλαισίου: Αφορά στην θερμοκρασία που αποκτούν οι ΦΒ κυψέλες του πλαισίου όταν βρίσκονται σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος και συγχρόνως στις συνθήκες λειτουργίας που ακολουθούν: 80 mW/cm^2 , Θερμοκρασία περιβάλλοντος: 20°C , Ταχύτητα: 1m/s , τοποθεσία πλαισίου: η πίσω όψη ελεύθερη.

Η προσεγγιστική σχέση για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας των ΦΒ στοιχείων ενός πλαισίου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία δίνεται από τη σχέση:

$$T_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ}} = T_{\text{ΑΕΡΑ}} + \frac{T_{\text{NOCT}} - 20}{80} \times J_0 \quad (3.1)$$

Όπου

$T_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ}}$: η θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί στα ΦΒ στοιχεία του πλαισίου ($^\circ\text{C}$).

T_{NOCT} : η ονομαστική θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου ($^\circ\text{C}$).

$T_{\text{ΑΕΡΟΣ}}$: η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^\circ\text{C}$).

J_0 : η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου (mW/cm^2).

Ασφάλεια ρεύματος σειράς: Η τιμή της δίνεται πάντα από τον κατασκευαστή και τοποθετείται στην σειριακή συστοιχία των πλαισίων πριν συνδεθούν με την είσοδο του αντιστροφέα DC. Επιπλέον για την ασφάλεια του συστήματος η τιμή της είναι διπλάσια σε σχέση με το μέγιστο ρεύμα.

Συνδεσμολογία: Η καλωδίωση για την σύνδεση των ΦΒ πλαισίων τις περισσότερες φορές είναι μικρής διατομής 6 mm² και μερικές φορές 4 mm². Οι σύνδεσμοι θα πρέπει να έχουν στεγανότητα, ευκολία σύνδεσης των γειτονικών πλαισίων και ασφάλεια εγκατάστασης.

Επιπλέον χαρακτηριστικά: Η πλήρης γνώση του εκάστοτε αγοραστή για τα χαρακτηριστικά του ΦΒ πλαισίου ολοκληρώνεται με την πληροφόρηση του για τα υλικά που δημιουργούν την πίσω επιφάνεια, το μέταλλο που αποτελεί το ΦΒ και το χρώμα αυτών. Επίσης θα πρέπει να αναγράφονται οι διαστάσεις του πλαισίου: βάρος, ύψος, πλάτος και μήκος. Επιπλέον, στο ΦΒ πλαίσιο θα πρέπει να αναγράφεται η πιστοποίηση υλικού καθώς και η πιστοποίηση για την ελάχιστη ισχύ κορυφής. Ακόμη, θα πρέπει να δίνεται το ποσοστό της μείωσης απόδοσης ως αποτέλεσμα της επερχόμενης γήρανσης του πλαισίου, η οποία φτάνει κατά μέσο όρο το ποσοστό του 10-20%

3.1.1 Οι στοιχειοσειρές μέσα στο πλαίσιο

Για την ομαλή λειτουργία του πλαισίου οι ΦΒ συστοιχίες δημιουργούνται από όμοιες σε σειρά ΦΒ κυψέλες, ενώ όπως έχουμε προαναφέρει η τάση θα είναι ίδια σε όλα τα ΦΒ πλαίσια. Η συνολική τάση του ΦΒ πλαισίου προκύπτει από το άθροισμα όλων των στοιχείων όταν φωτίζονται, ενώ το ρεύμα παραμένει ίδιο σε όλη την στοιχειοσειρά.

Τα πλέον διαδεδομένα ΦΒ πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν στα κυκλώματα ονομαστικής τάσεως των 12 V_{DC} αποτελούνται από ένα πλήθος 36 ΦΒ στοιχείων, στα οποία η τάση εξόδου κατά την λειτουργία τους κυμαινόταν από 18 – 22 V_{DC}. Τα σύγχρονα ΦΒ πλαίσια έχουν ονομαστική τάση 24 V_{DC} και αποτελούνται από 72 ΦΒ στοιχεία. Επιπλέον, στην αγορά υπάρχουν και ΦΒ πλαίσια με 96 ΦΒ στοιχεία.

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος στα άκρα της στοιχειοσειράς είναι κατά N φορές μεγαλύτερη από την τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός ΦΒ στοιχείου. Για συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος $R_{LOAD} = \infty$ και $I_{LOAD} = 0$ έχουμε:

$$V_{OC(N)} = N \times V_{OC(1)} \quad (3.2)$$

- $V_{OC(N)}$: η λαμβάνουσα τάση στα άκρα της στοιχειοσειράς N πλαισίων
- $V_{OC(1)}$: η λαμβάνουσα τάση από το πλαίσιο
- N: είναι το πλήθος των πλαισίων που υπάρχουν στην στοιχειοσειρά

Αν η τάση των ακροδεκτών του ΦΒ πλαισίου βραχυκυκλωθεί, η τάση στους ακροδέκτες της στοιχειοσειράς θα μηδενιστεί και έτσι το ρεύμα φορτίου θα προκύψει από το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός από τα ΦΒ στοιχεία. Οπότε $R_{LOAD} = 0$ και:

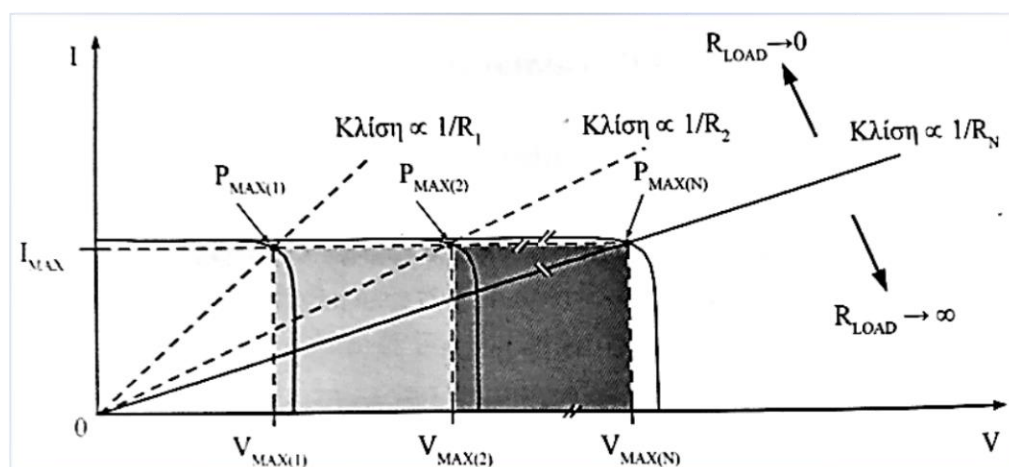
$$V_1 = V_2 = \dots = V_N \text{ άρα και το } V_{LOAD} = 0 \quad (3.3)$$

Το V_{LOAD} είναι η τάση στους ακροδέκτες του πλαισίου που συνδέεται με το φορτίο.

Για το ρεύμα που διαρρέει τη βραχυκυκλωμένη στοιχειοσειρά ισχύει:

$$I_{SC(1)} = I_{SC(2)} = \dots = I_{SC(N)} = 0, \text{ άρα και το } I_{LOAD} = I_{SC(i)} \quad (3.4)$$

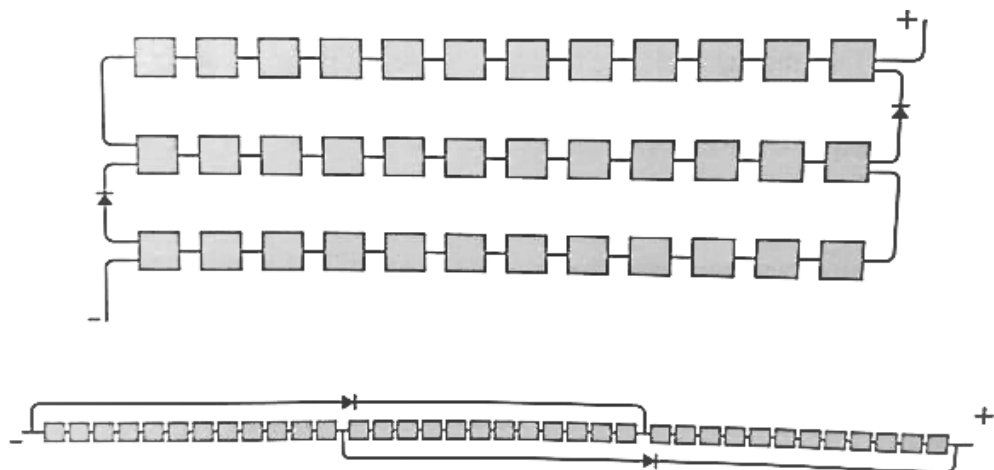
Η καμπύλη I-V όλου του πλαισίου προκύπτει από τη χαρακτηριστική καμπύλη ενός ΦΒ στοιχείου συν το πλήθος όλων των στοιχείων που αποτελούν το πλαίσιο για το ίδιο ρεύμα. Επιπλέον, το σημείο μέγιστης ισχύος που προκύπτει από το άθροισμα των καμπυλών αποτυπώνεται στην εικόνα 3.3. Από τη χαρακτηριστική καμπύλη παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η προσθήκη των στοιχειοσειρών αυξάνεται και η αντίσταση προσαρμογής φορτίου (R_N) που χρησιμοποιείται για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στο πλαίσιο.



ΕΙΚΟΝΑ 3.3: Η χαρακτηριστική καμπύλη (I-V) μιας στοιχειοσειράς (N) ΦΒ κυψελών συμπεριλαμβανομένης και της αντίστασης προσαρμογής. Πηγή: Δέρβος, 2013

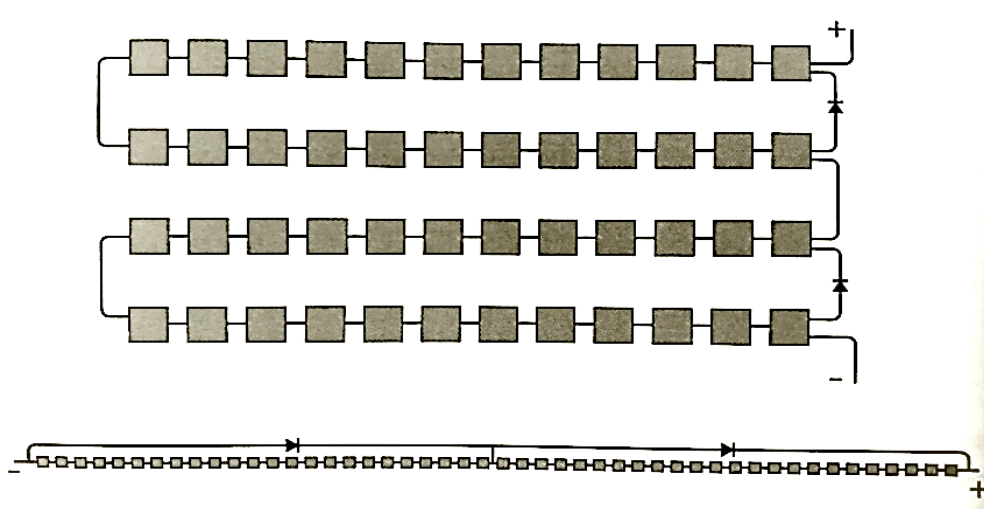
Δυστυχώς, τα φωτοβολταϊκά συστήματα πάνω στα πλοία παρουσιάζουν ορισμένα προβλήματα τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν. Χαρακτηριστικό πρόβλημα αποτελούν τα θερμά σημεία, των οποίων η προβληματική αναπτύσσεται παρακάτω. Αρχικά, τα θερμά σημεία δημιουργούνται από την γήρανση των στοιχείων και από μερική σκίαση αυτών. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, στις ΦΒ εγκαταστάσεις απαιτείται η σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά, για τη δημιουργία συστοιχιών. Η ηλεκτρική ισχύς των συστοιχιών αυτών οδηγεί στην είσοδο των διαχειριστών. Όμως, στην περίπτωση καταστροφής ενός μόνου ΦΒ στοιχείου, είναι πιθανό να καταστραφεί όλο το πλαίσιο. Για το λόγο αυτό, τοποθετούνται παράλληλα προς τη στοιχειοσειρά του πλαισίου ανά συγκεκριμένο μήκος δίοδοι προστασίας (*shunt diodes*) «δίοδοι παράκαμψης». Οι δίοδοι προστασίας δημιουργούν εναλλακτικές διαδρομές για το ρεύμα όταν έχει πρόβλημα ένα ή και περισσότερα στοιχεία (Δέρβος, 2013, Van Swaaij et al 2014).

Σχετικά με τη λειτουργία των δίοδων παράκαμψης αναφέρουμε τα εξής: Το πλήθος των δίοδων παράκαμψης εξαρτάται από το αριθμό των στηλών στη στοιχειοσειρά. Όταν είναι περιττός ο αριθμός των στηλών που αποτελεί το πλαίσιο και δύο ανεξάρτητα κιβώτια σύνδεσης, ένα θετικό και ένα αρνητικό, τότε οι δίοδοι προστασίας συνδέονται εναλλάξ στις δύο αντίθετες πλευρές, όπως ακριβώς απεικονίζεται παρακάτω (εικόνα 3.4) (Δέρβος, 2013).



ΕΙΚΟΝΑ 3. 4: Άνω απεικονίζεται η διάταξη της στοιχειοσειράς ενός πλαισίου σε περιττό αριθμό στηλών και η θέση δίοδων προστασίας. Κάτω απεικονίζεται η ίδια στοιχειοσειρά σε ευθύγραμμη διάταξη ώστε να είναι αντιληπτή η περιοχή προστασίας που παρέχει η δίοδος. Πηγή: Δέρβος, 2013

Ενώ, όταν η σειρά των ΦΒ στοιχείων έχει κατανεμηθεί με άρτιο αριθμό και με την προϋπόθεση ότι υπάρχει ένα εξωτερικό κιβώτιο σύνδεσης στο οποίο συνδέονται και ο θετικός και ο αρνητικός ακροδέκτης, τότε η θέση των διόδων προστασίας είναι από τη μία μόνο πλευρά του ΦΒ πλαισίου, όπως φαίνεται στη εικόνα 3.5 (Δέρβος, 2013).



ΕΙΚΟΝΑ 3. 5: Η διάταξη της στοιχειοσειράς ενός πλαισίου σε άρτιο αριθμό και η θέση των διόδων προστασίας. Κάτω απεικονίζεται η ίδια στοιχειοσειρά σε ευθύγραμμη διάταξη, ώστε να κατανοηθεί καλύτερα από τον αναγνώστη η σύνδεση των διόδων. Πηγή: (Δέρβος, 2013).

3.2 Συστοιχίες ΦΒ πλαισίων και ΦΒ πεδίο (array)

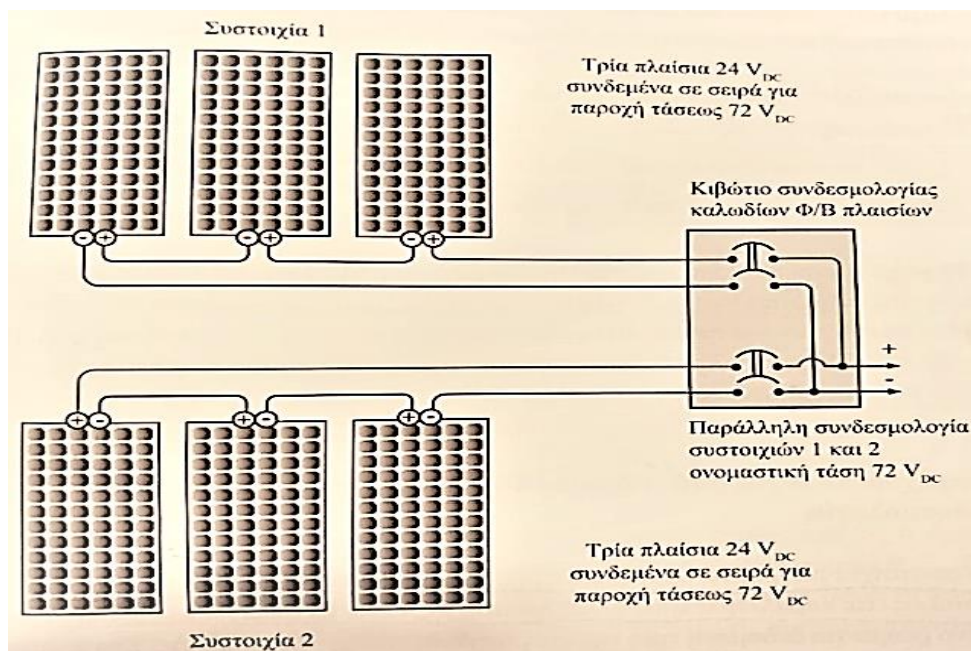
Η ονομαστική τάση του πλαισίου είναι πολλαπλάσιο των 12V και ουσιαστικά εξαρτάται από το πλήθος των ΦΒ στοιχείων που αποτελούν την στοιχειοσειρά (Ventre & Messenger 2005).

Η δημιουργία μεγαλύτερης τάσης εξόδου επιτυγχάνεται με τη σύνδεση σε σειρά ΦΒ πλαισίων. Η ομάδα όμοιων πλαισίων που συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά ονομάζεται φωτοβολταϊκή συστοιχία (string). Σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα που διαρρέει μια συστοιχία είναι κοινό για όλα τα πλαίσια.

Για την επίτευξη υψηλότερης έντασης ρεύματος προς τον διαχειριστή, οι συστοιχίες συνδέονται παράλληλα. Η ομάδα των συστοιχιών αυτών δημιουργούν ένα υποπεδίο (sub-array) ή/και πεδίο (array). Ο ακριβής προσδιορισμός εξαρτάται από το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος της ΦΒ εγκατάστασης και συνακόλουθα από το πλήθος των ομάδων των παράλληλων ΦΒ συστοιχιών που επαναλαμβάνονται. Οι παράλληλες συστοιχίες που ορίζουν ένα υποπεδίο ελέγχονται από τον ίδιο αλγόριθμο παροχής μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος (Maximum Power Point Tracking System, MPPT). Ο αλγόριθμος είναι κατασκευασμένος για να βρίσκει το μέγιστο σημείο ισχύος από το πλήθος διαφορετικών τιμών που παρέχουν τα πλαίσια και εφαρμόζεται στους αναστροφείς είτε στους ρυθμιστές φόρτισης των συσσωρευτών. Σε μεγάλες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών σε πλοία οι αλγόριθμοι MPPT είναι ασταθείς διότι στο θαλάσσιο περιβάλλον η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις (Paulson, 2019).

Για την κατανόηση των παραπάνω διαπιστώσεων, παρατίθεται η εικόνα 3.6. Σ' αυτήν, απεικονίζεται η συνδεσμολογία 6 ΦΒ πλαισίων που σχηματίζουν ένα υπό-πεδίο. Για τον σχηματισμό του υπό-πεδίου τα ΦΒ πλαίσια συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους ανά τρία σε σειρά σχηματίζοντας δύο συστοιχίες παράλληλα συνδεδεμένες. Το συνολικό ρεύμα που θα προκύπτει στην έξοδο του συστήματος αναμένεται να είναι διπλάσιο από αυτό που θα έδινε η κάθε συστοιχία ξεχωριστά. Η τάση εξόδου του συστήματος παραμένει ίδια με την τάση που θα έδινε η μία συστοιχία αυτόνομα. Για την σύνδεση των συστοιχιών έχουμε ένα κιβώτιο συνδεσμολογίας καλωδίων ΦΒ πλαισίων (combiner box) όπου καταλήγουν τα καλώδια των συστοιχιών. Το κιβώτιο συνδεσμολογίας είναι ένας

τοπικός πίνακας DC όπου περιέχει όλα τα απαιτούμενα συστήματα ασφαλείας (Δέρβος, 2013).



ΕΙΚΟΝΑ 3. 6: Η ηλεκτρική σύνδεση δύο παράλληλων συστοιχιών όπου η κάθε μία αποτελείται από 3 σε σειρά ΦΒ πλαίσια ονομαστικής τάσης 24V. Πηγή: (Δέρβος, 2013).

Από την παρακάτω εξίσωση υπολογίζεται η μέγιστη ονομαστική τάση V_{ON} που λαμβάνεται στα άκρα της στοιχειοσειράς.

$$V_{ON} = 1,15 M \times V_{OC} \quad (3.5)$$

Όπου:

M: είναι το πλήθος των ΦΒ πλαισίων που αποτελούν μία συστοιχία

V_{OC} : η τάση ανοικτού κυκλώματος σε πρότυπες συνθήκες φωτισμού σε ένα ΦΒ πλαίσιο

1,15: χρησιμοποιείται ως ανοικτού κυκλώματος ασφαλείας

Από την εξίσωση 3.6 υπολογίζεται το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας που λαμβάνεται στους ακροδέκτες της στοιχειοσειράς.

$$I_{ON} = 1,25 \times I_{SC} \quad (3.6)$$

I_{SC} : το ρεύμα βραχυκυκλώματος σε πρότυπες συνθήκες φωτισμού σε ένα ΦΒ πλαίσιο.

1,25: χρησιμοποιείται ως προσαύξηση του ρεύματος.

Η ονομαστική τάση και το ρεύμα λειτουργίας που υπολογίζονται από τις σχέσεις 3.5, 3.6 χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των διατάξεων του συστήματος. Η τάση ανοικτού κυκλώματος σε ένα πεδίο με πλήθος N ίδιων συστοιχιών είναι ίση με την τάση ανοικτού κυκλώματος της μίας συστοιχίας που βρίσκεται στους ακροδέκτες της. Για το ρεύμα ανοικτού κυκλώματος I_{OC} , ισχύει $R_{LOAD} \rightarrow \infty$ άρα μηδενίζεται. Επομένως, προκύπτει η σχέση 3.7:

$$V_{OC} = V_{OC(1)} = V_{OC(2)} = \dots = V_{OC(N)} \text{ και } I_{OC} = 0 \quad (3.7)$$

V_{OC} : η συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος που εμφανίζεται στους ακροδέκτες του πεδίου από N ίδιες συστοιχίες οι οποίες είναι παράλληλα συνδεδεμένα.

$V_{OC(i)}$: η τάση ανοικτού κυκλώματος στην (i) συστοιχία.

I_{OC} : το άθροισμα του ρεύματος που εμφανίζεται στο άκρα του πεδίου από N ίδιες παράλληλες συστοιχίες.

Στην περίπτωση που η έξοδος από τις συστοιχίες βραχυκυκλωθεί ($R_{LOAD} \rightarrow 0$), σε κάθε συστοιχία θα έχουμε μηδενική τάση στα άκρα της και μηδενική τάση στα άκρα όλου του συστήματος. Ταυτόχρονα, το ρεύμα του συστήματος που θα εμφανίζεται στην έξοδο υπό βραχυκύκλωση θα είναι N φορές μεγαλύτερο από αυτό της μίας συστοιχίας (Δέρβος, 2013).

$$V_{SC} = V_{SC(1)} = V_{SC(2)} = \dots = V_{SC(N)} = 0 \text{ και } I_{SC} = N \times I_{SC(i)} \quad (3.8)$$

V_{sc} : η συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος που εμφανίζεται στους ακροδέκτες του πεδίου από N ίδιες συστοιχίες η οποίες είναι παράλληλα συνδεδεμένες.

$V_{sc(i)}$: η τάση ανοικτού κυκλώματος (i) συστοιχία.

I_{SC} : η ολική ένταση του ρεύματος που εμφανίζεται στο άκρα του πεδίου από N ίδιες παράλληλες συστοιχίες.

N : το πλήθος των συστοιχιών που είναι παράλληλα ηλεκτρικά συνδεδεμένες.

Παράλληλα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η συνολική μέγιστη ισχύς (P_{MAX}) γίνεται N φορές μεγαλύτερη από την μέγιστη ισχύ που παράγει κάθε συστοιχία.

3.2.1 Οι κατηγορίες των ΦΒ πεδίων ανάλογα με τους αναστροφείς

Η ισχύς μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης σχετίζεται με τον αριθμό των πλαισίων που την αποτελούν, ενώ η τάση και το ρεύμα εξόδου σχετίζεται με τον τρόπο που είναι συνδεδεμένες οι στοιχειοσειρές (σε σειρά ή παράλληλα). Υπάρχουν τέσσερις κύριες τεχνολογίες για τη διασύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων και αναστροφέων, οι οποίες παρουσιάζονται στις ακόλουθες παραγράφους, προσαρμοσμένες για θαλάσσιες εφαρμογές (Kobougiaris, Tatakis & Prousalidis, 2013).

Οι αναστροφείς των φωτοβολταϊκών συστημάτων μετατρέπουν την τάση DC που παράγεται από την έξοδο των ΦΒ πλαισίων σε τάση AC σταθερού πλάτους και συχνότητας. Οι αναστροφείς που χρησιμοποιούνται στα ΦΒ συστήματα μπορεί να είναι λίγο διαφορετικοί από τους υπόλοιπους. Συγκεκριμένα, ένας αναστροφές ΦΒ συστήματος νέας τεχνολογίας περιέχει αλγόριθμο (MPPT) και παράλληλα μπορεί να περιέχει και σύστημα φόρτισης συσσωρευτών (Δέρβος, 2013).

Τα σημαντικότερα μεγέθη του αναστροφέα είναι:

| | |
|-------------------------|----------------------|
| Ονομαστική ισχύς | (P_{NOM}) |
| Ονομαστική τάση εισόδου | (V_{DC}) |
| Ονομαστική τάση εξόδου | (V_{RMS}) |
| Συχνότητα εξόδου | (Hz) |
| Φάσεις | μονοφασικό-τριφασικό |

Επίσης, σε μία ηλεκτρική διάταξη φωτοβολταϊκού συστήματος πολλές φορές χρησιμοποιούνται και οι μετατροπείς τάσης. Η λειτουργία του μετατροπέα τάσης (converter DC-DC), έγκειται στη μετατροπή π.χ. της τάσης DC από χαμηλή σε υψηλότερη τιμή. Με αυτόν τον τρόπο, ο μετατροπέας επικουρεί τον αναστροφέα να λάβει μεγαλύτερη τιμή τάσεως και καλύτερη τιμή τάσης εξόδου, (Δέρβος, 2013).

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η τάση εισόδου V_{DC} του αναστροφέα εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ του. Για μικρή ισχύ (W) η τάση εισόδου του που συναντάμε συνήθως είναι 12 V, 24 V και 48 V. Αν έχουμε αναστροφείς με υψηλότερη τιμή ισχύος (KW), τότε η τάση εισόδου θα κυμαίνεται από $150 V_{DC} - 400 V_{DC}$. Επίσης υπάρχουν και «κεντρικοί / τριφασικοί αναστροφείς» που έχουν τάση εισόδου $600 V_{DC}$ ή $1000 V_{DC}$ (Δέρβος, 2013).

Η διάκριση των αναστροφέων ανάλογα με την θέση που είναι τοποθετημένοι στη ΦΒ γεννήτρια, αποκαλύπτει τρία είδη τεχνολογιών κατασκευής τους: την κεντρική τεχνολογία (Centralized technology), την τεχνολογία συστοιχιών/πολυσυστοιχίας (string / mult-string technology) και την μικροτεχνολογία πλαισίου (micro-technology).

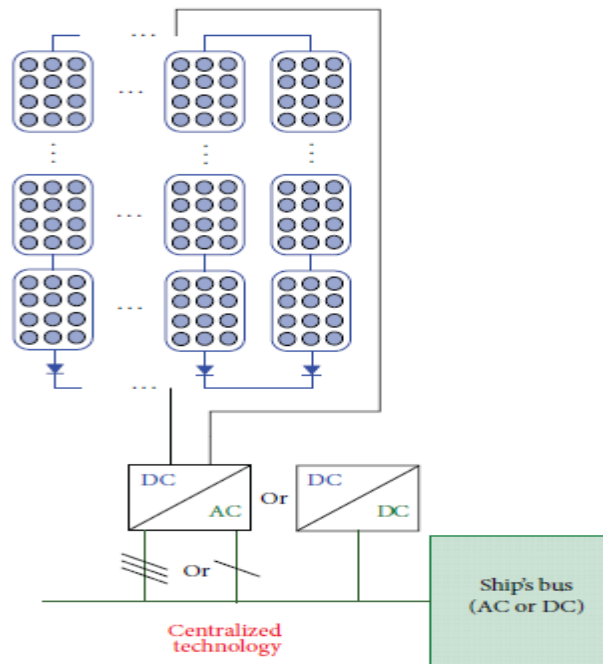
3.2.1.1 Κεντρική τεχνολογία (Centralized technology)

Η κεντρική τεχνολογία, ως τρόπος κατασκευής των αναστροφέων, είναι από τις παλαιότερες τεχνολογίες που έχουν εφαρμοστεί σε ΦΒ εγκαταστάσεις και αναπτύσσουν μεγάλα ποσά ισχύος στην έξοδο τους. Το κύριο χαρακτηριστικό της κεντρικής τεχνολογίας είναι ότι όλη η ισχύς από τα ΦΒ πεδία αποδίδεται σε ένα κύριο αναστροφέα, τον λεγόμενο κεντρικό αναστροφέα (central inverter). Έτσι αναπτύσσεται και η διάταξη του κεντρικού αναστροφέα (Δέρβος Κ. 2013).

Οι κεντρικοί αναστροφείς πολλές φορές συνδέονται σε διάταξη, στην οποία μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι από ένας κεντρικοί αναστροφείς. Ο ένας χαρακτηρίζεται ως κύριος και οι υπόλοιποι ως δευτερεύοντες. Οι δευτερεύοντες αναστροφείς ενεργοποιούνται όταν υπάρχει δυσλειτουργία στο κύριο αναστροφέα (Δέρβος, 2013).

Στη εικόνα 3.7 απεικονίζεται η διάταξη της κεντρικής τεχνολογίας που είναι προσαρμοσμένη με το δίαυλο του πλοίου. Η συνδεσμολογία των πλαισίων γίνεται ηλεκτρολογικά σε σειρά, με τη σειρά τους οι συστοιχίες συνδέονται παράλληλα και τα υποπεδία/πεδία συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους ως προς το κεντρικό αναστροφέα. Στην έξοδο κάθε συστοιχίας υπάρχει και μια δίοδος ασφαλείας για το αντίστροφο ρεύμα ή την διαφορά θερμοκρασίας του δικτύου. Η κάθε έξοδος των υποπεδίων ελέγχεται από τους αλγόριθμους για το μέγιστο σημείο ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT) που είναι ενσωματωμένο στον αναστροφέα DC-AC και στον αντιστροφέα DC-DC.

Η μετατροπή της τάσεως (DC-DC) πραγματοποιείται πριν την είσοδο του αντιστροφέα για την εξισορρόπηση των τάσεων των υποπεδίων και για τη λήψη μεγαλύτερης τάσης προς στην είσοδο του το κεντρικού αναστροφέα. Στην είσοδο του αναστροφέα υπάρχει προστασία για τυχόν υπερτάσεις. Στην έξοδο του κεντρικού αναστροφέα υπάρχει διάταξη ασφαλείας για την σύνδεση με το δίαυλο του πλοίου καθώς και για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του συστήματος (Δέρβος, 2013).



ΕΙΚΟΝΑ 3. 7: Κεντρική τεχνολογία. Πηγή: Kobougias, 2013.

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κεντρικής τεχνολογίας στις θαλάσσιες εφαρμογές μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

Πλεονεκτήματα.

1. Μπορούν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω του περιορισμένου χώρου στα πλοία, η παραγωγή ισχύος δεν μπορεί να είναι ίση με τις αντίστοιχες ηπειρωτικές εφαρμογές (10 KW έως 400 KW), αλλά σίγουρα μεγαλύτερο από τα 10 KW (Kobougias, Tatakis & Prousalidis 2013).
2. Ο αναστροφέας μπορεί να είναι μακριά από το φωτοβολταϊκό δίκτυο, και να προστατεύεται από την υγρασία και τη σκόνη.
3. Μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε μονοφασικό όσο και σε τριφασικό δίαυλο AC.

Μειονεκτήματα.

1. Απαιτούνται μεγάλοι χώροι εγκατάστασης.
2. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι πιο πιθανό να σκιάζονται και να κτυπηθούν από φαινόμενα hotspot.
3. Μόνο ο ίδιος τύπος φωτοβολταϊκών στοιχείων μπορεί να εγκατασταθεί.

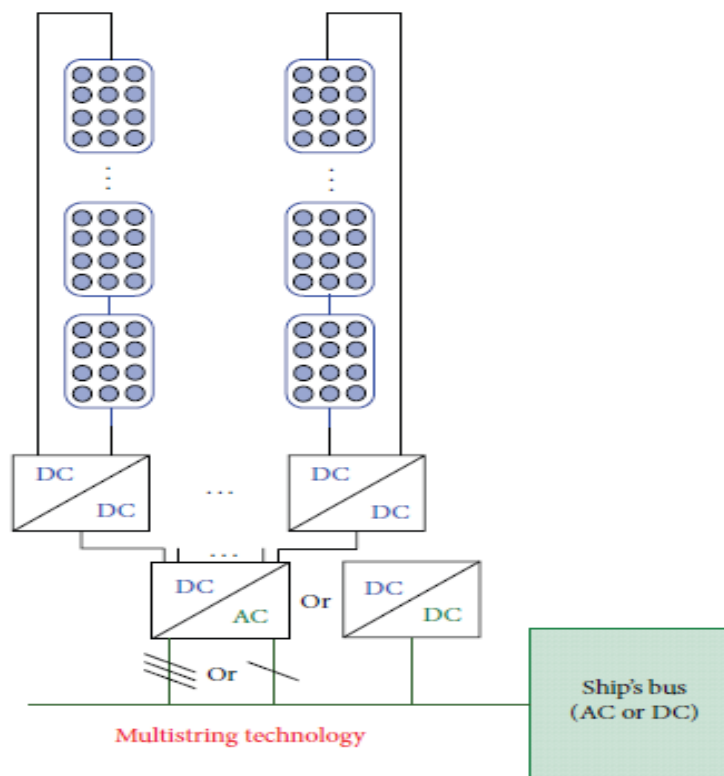
4. Υπάρχει υψηλή τάση στο σημείο σύνδεσης μεταξύ φωτοβολταϊκού δικτύου και μετατροπέα που έχει ως αποτέλεσμα:
 - υψηλότερο κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.
 - υψηλότερο κόστος καλωδίωσης (ειδικές προδιαγραφές για μόνωση και μεταφορά υψηλής ισχύος).
5. Το ενιαίο σύστημα ελέγχου MPPT δεν μπορεί να βοηθήσει κάθε πίνακα να λειτουργεί στη μέγιστη ισχύ του, οδηγώντας σε μειωμένη συνολική απόδοση.
6. Χαμηλότερη απόδοση σε σχέση με άλλες τεχνολογίες.

3.2.1.2 Τεχνολογία συστοιχιών (string technology)

Η τεχνολογία πολλαπλών συστοιχιών είναι μια εξέλιξη της κεντρικής τεχνολογίας που στις μέρες μας κερδίζει έδαφος ολοένα και περισσότερο στην παγκόσμια αγορά. Η διαχείριση ισχύος που προσφέρεται είναι παρόμοια με την κεντρική τεχνολογία. Στην εικόνα 3.8 απεικονίζεται η τεχνολογία πολλαπλών συστοιχιών (multi-string technology). Τα μέρη που διέπουν αυτή τη τεχνολογία είναι τα ΦΒ πλαίσια συνδεδεμένα ηλεκτρολογικά σε σειρά δημιουργώντας μία ή και περισσότερες συστοιχίες παράλληλα συνδεδεμένες μεταξύ τους και οι αναστροφείς πολλαπλών συστοιχιών. Ως επακόλουθο, επιτυγχάνεται η λήψη της ηλεκτρικής ισχύος των παράλληλων συστοιχιών (Δέρβος, 2013, Kobougias, 2013).

Ο αναστροφέας μπορεί να έχει υπό τον έλεγχο του ακόμα και ένα ολόκληρο υποπεδίο (sub-array). Ο μετατροπέας, με τη σειρά του μπορεί να ελέγχει με τον αλγόριθμο MPPT μία συστοιχία ξεχωριστά ή ενιαία για όλες τις παράλληλες συστοιχίες που συνδέονται με αυτόν. Επίσης, στο ηλεκτρολογικό σχέδιο της εικόνας 3.8 παρουσιάζεται ο τρόπος σύνδεσης των συστοιχιών στο πλαίσιο της πολλαπλής τεχνολογίας.

Αναλυτικότερα, η τάση εισόδου πριν καταλήξει στον αναστροφέα μπορεί να έχει ανυψωθεί μέσω του μετατροπέα DC-DC με αποτέλεσμα την μεγιστοποίηση της απόδοσης αλλά και την καλύτερη ποιότητα ελέγχου σε παρεμβολές από την τάση εισόδου των συστοιχιών (Δέρβος, 2013).



ΕΙΚΟΝΑ 3. 8: Τεχνολογία πολλαπλών συστοιχιών (multi-string technology). Πηγή: Kobougias, 2013.

Πλεονεκτήματα.

1. Παρόμοια παραγωγή ενέργειας με την κεντρική τεχνολογία.
2. Πιο αποτελεσματικό σύστημα ελέγχου MPPT.
3. Είναι εφικτή η εγκατάσταση διαφορετικών τύπων και αριθμών πλαισίων σε κάθε συστοιχία.
4. Οι δίοδοι αποκλεισμού δεν είναι απαραίτητες.
5. Ο αναστροφέας μπορεί να είναι μακριά από το φωτοβολταϊκό δίκτυο, και να προστατεύεται από την υγρασία και τη σκόνη.
6. Μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε μονοφασικό όσο και σε τριφασικό δίαυλο AC.

Μειονεκτήματα.

1. Ο πρόσθετος αναστροφέας σε κάθε συστοιχία αυξάνει το συνολικό κόστος.
2. Τα προβλήματα της υψηλής τάσης DC στο σημείο σύνδεσης μεταξύ του ΦΒ δικτύου και των αναστροφέων δημιουργεί πάλι το φαινόμενο hotspot.

3. Ακόμα κι αν το σύστημα είναι λειτουργικό κατά τη διάρκεια της βλάβης του αναστροφέα μιας συστοιχίας, δεν μπορεί να παραμείνει λειτουργικό εάν ο κύριος αναστροφέας έχει κάποιο πρόβλημα.
4. Απαιτούνται μεγάλοι χώροι εγκατάστασης.

3.2.1.3 Τεχνολογία AC-ΦΒ πλαισίου

Η τεχνολογία AC-ΦΒ πλαισίου ή MICROINVERTER, αποτελεί τον πιο σύγχρονο τρόπο κατασκευής ενός αναστροφέα. Πρόκειται για φωτοβολταϊκές συσκευές χαμηλής ισχύος που αποτελούνται από ένα μόνο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και έναν αναστροφέα που συνδέεται απευθείας με το δίαυλο (Kobougias, Tatakis & Prousalidis 2013). Στην παρούσα μέθοδο, η έλλειψη φωτοβολταϊκών συστοιχιών και ο αποτελεσματικότερος έλεγχος κάθε συσκευής (πλαίσιο και αναστροφέα) οδηγούν σε υψηλότερη συνολική απόδοση. Ο αναστροφέας μπορεί να συνδεθεί είτε στον μηχανισμό στήριξης δίπλα στο πλαίσιο είτε απευθείας στην πίσω πλευρά του (Δέρβος, 2013).

Σε σύγκριση με τις προαναφερθείσες τεχνολογίες, το MICROINVERTER έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Πλεονεκτήματα.

1. Η αντιστοίχιση μεταξύ ενός πίνακα και μετατροπέα προσφέρει τον βέλτιστο έλεγχο MPPT.
2. Η τάση στο σημείο σύνδεσης μεταξύ του πλαισίου και του αναστροφέα είναι μικρή.
3. Μικρό κόστος εφαρμογής.
4. Για την εγκατάσταση του συστήματος δεν χρειάζεται εξειδικευμένο συνεργείο.
5. Χρειάζεται μικρό χώρο για την εγκατάσταση του, καθιστώντας το ιδανικό για θαλάσσιες εφαρμογές, ειδικά σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις ενσωματωμένες σε παράθυρα και γυάλινες προσόψεις.
6. Τοποθετείται εύκολα κοντά σε κρίσιμα φορτία.
7. Η αναβάθμιση της εγκατεστημένης χωρητικότητας ισχύος επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση περισσότερων μονάδων στο δίαυλο χωρίς περαιτέρω περιορισμούς από τον προηγούμενο σχεδιασμό του συστήματος.

8. Μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση που βασίζεται σε αυτή την τεχνολογία παράγει ισχύ ακόμα κι αν δεν λειτουργεί ένας από τους αναστροφείς.
9. Τα πλαίσια δεν έχουν κίνδυνο hotspot.

Μειονεκτήματα.

1. Το σύστημα μικρο-αναστροφήα πλαισίου στις ηπειρωτικές εφαρμογές υλοποιείται σε μονοφασικές εφαρμογές που η τάση εξόδου ξεπερνά σχεδόν τα 300V (χωρίς τη χρήση μετασχηματιστή). Ωστόσο, σε θαλάσσιες εφαρμογές, απαιτείται η ικανότητα για τροφοδότηση τριφασικών φορτίων και για αύξηση της τάσης εξόδου τους σε τιμή ίση με 400 V (DC ή AC).
2. Η μέγιστη ισχύς καθορίζεται από την ονομαστική ισχύ των φωτοβολταϊκών πάνελ. Σύμφωνα με την παρούσα εμπορική τεχνολογία, δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 350 W.
3. Λόγω της τοποθέτησης κοντά στο πλαίσιο, ο μετατροπέας εκτίθεται σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας (υγρασία, θερμοκρασία) που μειώνουν τη διάρκεια ζωής του και καθιστούν δυσκολότερη την εκπλήρωση των προδιαγραφών σχεδίασης.
4. Έχει χαμηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τις άλλες τοπολογίες. Ωστόσο, γίνονται διάφορες έρευνες για την εξέλιξη τους.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι κατηγορίες των παραπάνω τεχνολογιών κατασκευής και σύνδεσης αναστροφών, που αποτελούν ένα ΦΒ πεδίο, είχαν προγενέστερη εφαρμογή στον ηπειρωτικό χώρο. Σε θαλάσσιες εφαρμογές, στο κατάστρωμα του πλοίου, λόγω των δύσκολων συνθηκών έχουν γίνει κάποιες τροποποιήσεις σε αυτές τις κατηγορίες για να μπορούν να είναι περισσότερο αποδοτικές. Ενδεικτικά, ο περιορισμένος χώρος, το υγρό περιβάλλον, η ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες κινδύνου για τα ΦΒ πεδία και τους αναστροφείς/μετατροπείς (Kobougias, Tatakis & Prousalidis 2013).

3.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη χρήση τους. Είναι γνωστό ότι αυτές οι κατηγορίες αναπτύχθηκαν πρώτα σε χερσαίες εφαρμογές οι οποίες έχουν εξελιχθεί σε μεγαλύτερο βαθμό από τις θαλάσσιες. Στις τελευταίες έχει εφαρμοστεί αυτή η κατηγοριοποίηση, προσαρμοσμένη στις ιδιαιτερότητες των καταστάσεων. Ο περιορισμένος ελεύθερος χώρος του πλοίου, τα μεγάλα ποσοστά υγρασίας, η διακύμανση της ηλιακής πυκνότητας είναι μερικοί σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε τα ΦΒ συστήματα να προσαρμοστούν πάνω στο πλοίο.

Οι κατηγορίες των ΦΒ συστημάτων έχουν πάρει το όνομα τους από τον αναστροφέα και είναι οι εξής: α) αυτόνομα συστήματα (stand-alone) ή εκτός δικτύου (off-grid), β) συνδεδεμένα στο δίκτυο (grid-connected) και γ) υβριδικά συστήματα (hybrid grid) που συνδέονται στο δίκτυο αλλά υποστηρίζονται και από συσσωρευτές (battery back-up).

3.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά που διέπουν τους ΦΒ αναστροφείς

Η κύρια λειτουργία που χαρακτηρίζει τους αναστροφείς είναι η παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης. Αν η ισχύς του ΦΒ πεδίου ξεπερνάει $1500 W_p$, είναι απαραίτητη η χρήση μονοφασικού μετατροπέα διότι χρησιμοποιείται AC καταναλωτής. Αν έχουμε ισχύ εγκατάστασης μεγαλύτερη των $15 KW_p$ τότε εφαρμόζονται οι τριφασικοί αναστροφείς. Για ενδιάμεσες τιμές το κύκλωμα εξόδου του αναστροφέα μπορεί να είναι είτε μονοφασικό είτε τριφασικό (Δέρβος Κ. 2013).

Είναι εύλογο, ότι στην περίπτωση που η ΦΒ εγκατάσταση είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο, η χρήση αναστροφέα είναι απαραίτητη και η τάση εξόδου του πρέπει να είναι ίδια με του δικτύου, δηλαδή ημιτονική, συχνότητας 50 Hz, και να είναι συγχρονισμένη με τη συχνότητα του δικτύου στο οποίο είναι συνδεδεμένο (Δέρβος Κ. 2013).

Οι αναστροφείς έχουν συνήθως διάρκεια ζωής από 5 έως 10 έτη και απαιτείται η τοποθέτηση τους σε ξηρό και κλιματιζόμενο χώρο. Η μείωση διάρκειας ζωής των αναστροφέων και της απόδοσης τους, εξαρτάται από τις συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας και την ελλιπή συντήρησή τους. Πολλές φορές, μάλιστα η τοποθέτηση τους γίνεται κοντά στους συσσωρευτές (Δέρβος Κ. 2013).

Ο αναστροφέας κατά την δύση του ηλίου, που το επίπεδο ενέργειας μειώνεται δραματικά, σταματάει να λειτουργεί, όταν πέσει κάτω από μια καθορισμένη, ειδική για κάθε αναστροφέα, κρίσιμη τιμή ισχύος. Η λειτουργία αυτή του αναστροφέα ονομάζεται κατάσταση αδρανοποίησης (sleep). Στην κατάσταση αυτή, ο αναστροφέας επικοινωνεί με το σύστημα για να τροφοδοτείται είτε με DC είτε με AC ισχύ και αυτό γίνεται για να καλυφτούν οι ενεργειακές του ανάγκες. Το ποσοστό για να καλυφτούν οι ανάγκες αυτές είναι 2% της ονομαστικής ισχύος του αναστροφέα. Με την ανατολή του ηλίου και όταν το ΦΒ πεδίο δέχεται την απαιτούμενη ένταση τότε ο αναστροφέας ξανά μπαίνει σε λειτουργία (Δέρβος Κ. 2013).

Η απόδοση κατά την λειτουργία του ορίζεται από την ηλεκτρική ισχύ AC προς την ισχύ DC και δίνεται από τη σχέση 3.9.

$$\eta = P_{AC}/P_{DC} \quad (3.9)$$

Ο συντελεστής απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση της ισχύος λειτουργίας, ενώ όσο μικρότερη είναι η ισχύς λειτουργίας σε σύγκριση με την ονομαστική ισχύ, ο συντελεστής απόδοσης μειώνεται. Για αναστροφείς καλής ποιότητας ο βαθμός απόδοσης ανέρχεται στο 92% για ονομαστική ισχύ (P_{ONOM}) της τάξεως του 20% έως 100%. Στην περίπτωση που η ισχύς λειτουργίας φτάσει κάτω από 20% της ονομαστικής, τότε ο βαθμός απόδοσης θα μειωθεί δραματικά (Pearsall, 2017).

Οι Ευρωπαίοι κατασκευαστές συνιστούν ένα άλλο βαθμό απόδοσης Euro (η), για να συγκρίνουν αναστροφείς που έχουν στην έξοδο τους τάση με ημιτονική κυματομορφή. Με αυτό τον τρόπο ο μετατροπέας θα μπορεί να έχει καλύτερη απόδοση για χαμηλότερες ονομαστικές τιμές (Martins, 2016), τότε η απόδοση δίνεται από την εξίσωση 3.10.

$$\text{Euro } \eta = 0,03 \times \eta_{5\%} + 0,06 \times \eta_{10\%} + 0,13 \times \eta_{20\%} + 0,1 \times \eta_{30\%} + 0,48 \times \eta_{50\%} + 0,2 \times \eta_{100\%} \quad (3.10)$$

Επιπλέον, η απόδοση του αναστροφέα εξαρτάται και από το φορτίο που είναι συνδεδεμένο.

Όλοι οι αναστροφείς θα πρέπει να αντέχουν σε υπερφορτώσεις σε ποσοστό 10% για μεγάλο χρονικό διάστημα (π.χ. 8 min), με σκοπό να ικανοποιούν τις απαιτήσεις για υπερβολική παραγωγή ισχύ στην είσοδο DC.

Ακόμα, η σταθερότητα πλάτους, η σταθερότητα συχνότητας της κυματομορφής AC και η αρμονική παραμόρφωση υψηλών συχνοτήτων δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν

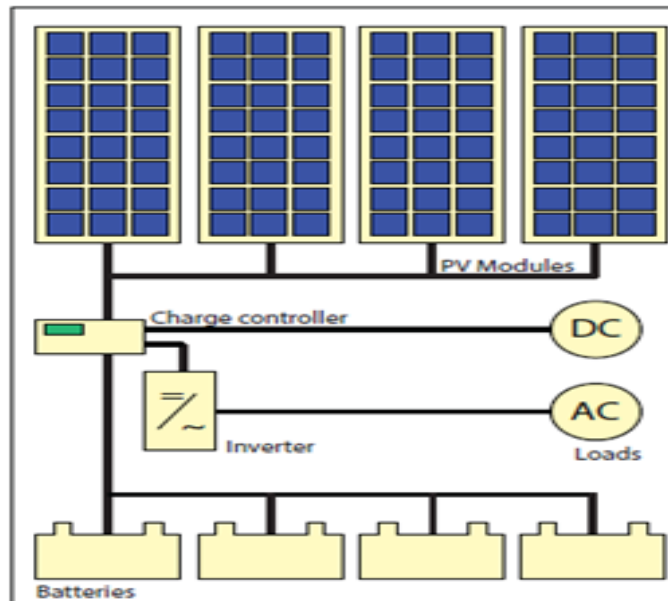
κάποιες καθορισμένες τιμές. Για αναστροφείς με ημιτονικές κυματομορφές εξόδου, το πλάτος της ονομαστικής ισχύς AC θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 5%. Η συχνότητα εξόδου (50 Hz) θα πρέπει να είναι τουλάχιστον $\pm 2\%$ της ονομαστικής συχνότητας, ενώ στην περίπτωση ημιτονικής εξόδου η συχνότητα αυστηρά δεν θα πρέπει να ξεπερνάει $\pm 1\%$. Όλοι οι αναστροφείς στην κυματομορφή της τάσης εξόδου τους παράγουν αρμονικές παραμορφώσεις υψηλής συχνότητας (Δέρβος, 2013).

3.3.2 ΦΒ συστήματα εκτός δικτύου (off-grid systems)

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα εκτός δικτύου δεν είναι συνδεδεμένα με το κύριο σύστημα ισχύος του πλοίου και προσφέρουν απευθείας την ενέργεια τους στο φορτίο (Paulson, 2019). Τα χειραία εκτός δικτύου συστήματα απλά δεν συνδέονται με το τοπικό δίκτυο. Ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συνήθως ενσωματώνεται στο σύστημα ισχύος του πλοίου. Η έξοδος DC των φωτοβολταϊκών συστοιχιών μετά από τους ελεγκτές DC-DC αποθηκεύουν την ενέργεια τους σε συσσωρευτές. Οι συσσωρευτές μπορούν να παρέχουν άμεση τροφοδοσία σε φορτία συνεχούς ρεύματος αλλά και σε φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος στο πλοίο μέσω αναστροφέα DC σε AC. Όμως, όσον αφορά στην ασφάλεια του πλοίου, συνήθως υπάρχει μια γεννήτρια ντίζελ ως εφεδρική για την κατάσταση έκτακτης ανάγκης (Paulson, 2019).

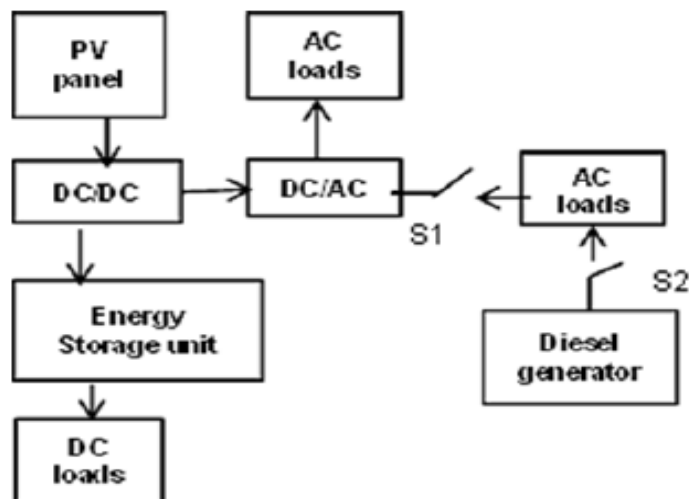
Μειονέκτημα των αυτόνομων συστημάτων αποτελεί η μικρή ισχύς τους γιατί χρειάζεται μεγάλος αποθηκευτικός χώρος για την αποθήκευση ενέργειας. Ακόμα ένα μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι, αν το φορτίο λειτουργεί σε χαμηλή τάση για μεγάλο χρονικό διάστημα θα προκαλέσει απώλεια ισχύος στον αναστροφέα (Sun, et al 2019).

Τα σημαντικότερα μέρη που αποτελούν ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, είναι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, ο ρυθμιστής φόρτισης των συσσωρευτών, ο αναστροφέας τάσης DC σε AC, οι συσσωρευτές και ο καταναλωτής που είναι συνδεδεμένος στο σύστημα. Ο ρυθμιστής φόρτισης πραγματοποιεί δυο βασικές λειτουργίες: α) ρυθμίζει το σημείο λειτουργίας του ΦΒ πεδίου, για να παρέχει την μέγιστη ηλεκτρική ισχύ και β) φορτίζει τους συσσωρευτές (Van Swaaij et al 2014).



ΕΙΚΟΝΑ 3.9: Τα μέρη ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος. Πηγή: Van Swaij *et al* 2014.

Στο διάγραμμα της εικόνας 3.10 δίνεται ως παράδειγμα ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, το οποίο χρησιμοποιείται στο πλοίο "Auriga Leader". Από την εικόνα προκύπτει ότι τα ηλεκτρικά φορτία τροφοδοτούνται από μπαταρίες όταν αυτές έχουν αρκετή ισχύ (κλειστή S1 και ανοικτή S2). Όμως, όταν δεν έχει αρκετή ισχύ η μπαταρία, για να καλύψει τις απαιτήσεις, τα ηλεκτρικά φορτία τροφοδοτούνται από τη γεννήτρια ντίζελ (S1 ανοικτή και S2 κλειστή). Αυτός ο τύπος διαμόρφωσης μπορεί να μειώσει τη χωρητικότητα των συστοιχιών των μπαταριών και έτσι να μειώσει το επενδυτικό κόστος.



ΕΙΚΟΝΑ 3. 10: Διάγραμμα συστήματος εκτός δικτύου. Πηγή: Paulson, 2019.

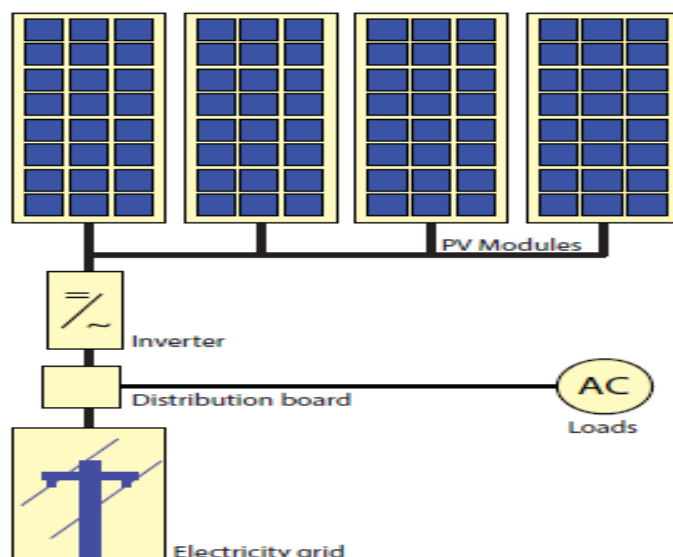
3.3.3 ΦΒ συστήματα συνδεδεμένα σε δίκτυο (grid-connected systems)

Για τα φωτοβολταϊκά συστήματα που συνδέονται με το δίκτυο (grid-connected) οι αναστροφείς (DC-AC inverter) τους έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά από τους αναστροφείς των αυτόνομων συστημάτων. Τα χαρακτηριστικά του αναστροφέα που συνδέεται με το δίκτυο στις χερσαίες εφαρμογές είναι ότι κατά την έξοδο τους παρέχουν ημιτονοειδή τάση, που έχει συχνότητα και πλάτος με την τάση του δικτύου. Επίσης, όταν υπάρχει λειτουργική αστάθεια στο δίκτυο (συχνότητα ή τάση δικτύου εκτός προβλεπόμενων τιμών) τότε ο αναστροφέας την εντοπίζει και διακόπτει το ΦΒ πεδίο από το δίκτυο. Επιπλέον, ο έλεγχος της παύσης και της έναρξης για την λειτουργία του αναστροφέα γίνεται χειροκίνητα.

Οι αναστροφείς DC-AC της συγκριμένης κατηγορίας στις επίγειες εφαρμογές δεν προβλέπουν την εγκατάσταση συσσωρευτών για αποθήκευση ενέργειας.

Για το φωτοβολταϊκό σύστημα που συνδέεται με το δίκτυο (grid-connected) και είναι ενσωματωμένο στο χερσαίο ηλεκτρικό δίκτυο, δεν υπάρχει υποχρεωτική απαίτηση για τη ρύθμιση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, αλλά αυτή η σχεδιαστική ιδέα θα πρέπει να αλλάξει για την εφαρμογή σε πλοίο (Paulson, 2019). Η στιγμιαία διακύμανση ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι πιθανόν να επιβαρύνει το σύστημα της γεννήτριας. Εάν αυτή η διακύμανση είναι πολύ μεγάλη, θα είναι δύσκολο ακόμη και για την σύγχρονη γεννήτρια να ανταποκριθεί γρήγορα και να επιλύσουν το πρόβλημα υπερβολικής διέγερσης της γεννήτριας ή το πρόβλημα της ρύθμισης ταχύτητας. Σε ακραίες καταστάσεις, η σταθερότητα ολόκληρου του συστήματος ισχύος του πλοίου θα μειωθεί σε χαμηλό επίπεδο και μπορεί να έχουμε την καταστροφή του ΦΒ συστήματος που με την σειρά του θα δημιουργήσει ταλάντωση σε όλο το σύστημα του πλοίου.

Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να ενσωματωθεί το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας στο ΦΒ σύστημα. Μόνο βάσει αυτού του είδους δομής του συστήματος ή του σχεδιασμού τοπολογίας, μπορεί το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (energy management system, EMS) του σταθμού παραγωγής ενέργειας του πλοίου να προγραμματίσει την ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος που συνδέεται με το δίκτυο και να επιφέρει την αποτελεσματική χρήση της φωτοβολταϊκής ισχύος (Sun, et al 2019).



ΕΙΚΟΝΑ 3.11: Διάγραμμα ΦΒ συστήματος συνδεδεμένο με το δίκτυο. Πηγή: *Van Swaij et al 2014*.

3.3.4 Υβριδικό ΦΒ σύστημα (Hybrid grid)

Τα υβριδικά ΦΒ συστήματα δεν έχουν ένα συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας, χαρακτηρίζονται έτσι, διότι, έχουν περισσότερες από μια πηγή ενέργειας (π.χ. ηλιακή, αιολική, ενέργεια από γεννήτρια). Τα νέα φιλικά προς το περιβάλλον πλοία που διαθέτουν ΦΒ γεννήτριες ή αιολική ενέργεια χρησιμοποιούν τα υβριδικά συστήματα. Επίσης, τα υβριδικά έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν είτε αυτόνομα είτε να είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο και να αλλάζουν με διακόπτη μετάβασης (transfer switch) (Sun, et al 2019).

Στην εικόνα 3.12 απεικονίζεται το σχεδιάγραμμα ενός σε λειτουργία υβριδικού συστήματος που είναι αυτόνομο/συνδεδεμένο στο δίκτυο. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας, τις εξής: 1) Σύστημα εκτός δικτύου (off-grid system), 2) Συνδεδεμένο με το δίκτυο του πλοίου (The grid-connected systems), 3) Λειτουργία ηλεκτρικής τροφοδοσίας από το πλοίο όταν η φωτοβολταϊκή ισχύς είναι ανεπαρκής, 4) Λειτουργία τροφοδοσίας ενέργειας από το σύστημα του πλοίου όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι υπό συντήρηση. Επιπλέον, το υβριδικό περιλαμβάνει κυρίως ηλιακή φωτοβολταϊκή συστοιχία, ελεγκτή, μπαταρία ιόντων λιθίου και Σύστημα Διαχείρισης Μπαταρίας (Battery Management System, BMS), μετατροπέα, κιβώτιο

διανομής AC (Alternative Current Distribution Box) και σύστημα διαχείρισης ηλιακής ενέργειας (solar power management system) κ.λπ. (Sun, et al 2019).

(1) Σύστημα εκτός δικτύου (off-grid system)

Στο σύστημα αυτό, η ισχύς εξόδου του μετατροπέα που λειτουργεί εκτός δικτύου αλλάζει με την αύξηση ή τη μείωση του φορτίου και η απαιτούμενη ισχύς μοιράζεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τους συσσωρευτές. Η διαφορά διακύμανσης ισχύος εξόδου μεταξύ του φωτοβολταϊκού ελεγκτή και του αντιστροφέα εξισορροπείται από το BMS αλλάζοντας την κατάσταση φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Η τριφασική έξοδος εναλλασσόμενου ρεύματος από το μετατροπέα τροφοδοτεί απευθείας το φορτίο φωτισμού, αφού πρώτα υποβιβαστεί από τον μετασχηματιστή στον πίνακα διανομής ισχύος AC (το τριφασικό φορτίο πρέπει να είναι ισορροπημένο). Η ροή ισχύος είναι η εξής: Ηλιακή φωτοβολταϊκή κυψέλη → ΦΒ ελεγκτής (↔ BMS και μπαταρία) → Ενσωματωμένος αναστροφέας εκτός δικτύου / συνδεδεμένος στο δίκτυο (450Vac / 60Hz) → Κιβώτιο διανομής ισχύος AC (450 / 230Vac, 60Hz, μετασχηματιστής φωτισμού 50 KW) → Υποκιβώτιο 4 -9L → φορτίο LED (Sun, et al 2019).

2) Σύστημα συνδεδεμένο με το δίκτυο (The grid-connected systems)

Στο παρόν σύστημα, η ισχύς εξόδου του αναστροφέα που είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο είναι σταθερή. Ωστόσο, η διακύμανση ισχύος εξόδου των φωτοβολταϊκών στοιχείων εναλλάσσεται και γι' αυτό εξισορροπείται από τους συσσωρευτές. Η τριφασική έξοδος AC από τον αναστροφέα ενσωματώνεται στο κύριο πίνακα διανομής του πλοίου και γι' αυτό έχει εγκατασταθεί μια συσκευή πρόληψης της αντίστροφης ροής για την αποφυγή της ροής ενέργειας. Η ροή ισχύος είναι η εξής: ηλιακό φωτοβολταϊκό στοιχείο → φωτοβολταϊκός ελεγκτής (↔ BMS και μπαταρία) → ενσωματωμένος αναστροφέας εκτός δικτύου / συνδεδεμένος στο δίκτυο → κεντρικός δίαυλος (Sun, et al 2019).

3) Λειτουργία ηλεκτρικής τροφοδοσίας από το πλοίο όταν η φωτοβολταϊκή ισχύς είναι ανεπαρκής:

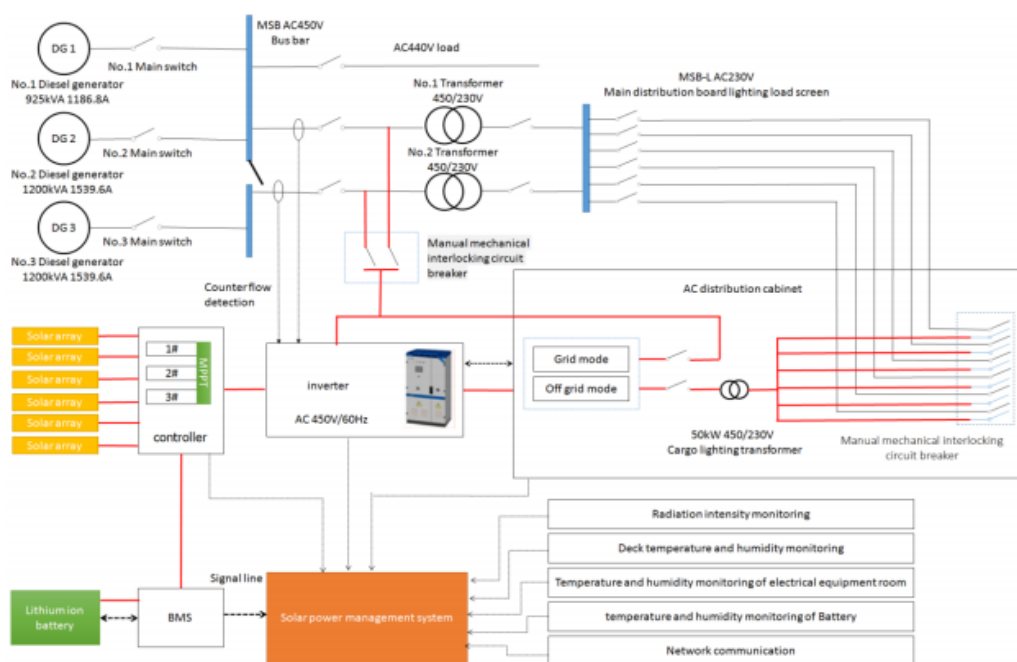
Στην παρούσα λειτουργία, παρατηρείται ότι όταν η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος δεν επαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα και η χωρητικότητα του συσσωρευτή δεν είναι αρκετή για να υποστηρίξει την κατανάλωση ισχύος του φορτίου, η

ισχύς μεταβαίνει στην παράκαμψη του ΦΒ συστήματος τροφοδοσίας με αποτέλεσμα την παροχή ισχύος από το πλοίο στο φορτίο φωτισμού μέσω του πίνακα διανομής ισχύος AC του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Στην περίπτωση που η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξηθεί, τότε ο αναστροφέας θα ενεργοποιηθεί και η τροφοδοσία του φορτίου θα επιτευχθεί από το ΦΒ σύστημα (Sun, et al 2019).

4) Λειτουργία τροφοδοσίας ενέργειας από το σύστημα του πλοίου όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι υπό συντήρηση:

Στην περίπτωση που το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι απενεργοποιημένο για συντήρηση, ο διακόπτης μεταξύ του φωτοβολταϊκού αναστροφέα και του κύριου πίνακα διανομής πρέπει να αποσυνδεθεί για να διακόψει εντελώς το φωτοβολταϊκό σύστημα. Μετά την ενεργοποίηση του φωτοβολταϊκού διακόπτη στο κουτί διανομής AC, το φορτίο φωτισμού παρέχεται από τον κύριο μετασχηματιστή του πλοίου (Sun, et al 2019).



ΕΙΚΟΝΑ 3. 12: Το διάγραμμα του υβριδικού συστήματος του πλοίου. Πηγή: Sun, et al 2019.

3.4 Συσσωρευτές

Η απρόβλεπτη και μεταβλητή φύση της ΦΒ ισχύος, επιτάσσει την ανάπτυξη ενός συστήματος αποθήκευσης για την διοχέτευση της φωτοβολταϊκής ενέργειας στο ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου. Σε μερικές περιπτώσεις συνιστάται η ύπαρξη συστοιχιών συσσωρευτών για την αποθήκευση μεγαλύτερου μέρους ενέργειας για τη χρήση της τελευταίας κατά τις χρονικές περιόδους που δεν προσπίπτει επαρκής ηλιακή ακτινοβολία ή κατά την διάρκεια της νύχτας (Paulson, 2019).

Για τον υπολογισμό του συστήματος των συσσωρευτών λαμβάνονται υπόψη οι μέρες ή οι ώρες αυτονομίας του συστήματος, η τάση του συστήματος των συσσωρευτών και ο μέγιστος επιτρεπτός βαθμός εκφόρτωσης (Depth Of Discharge, DOD). Η επιλεγμένη τιμή για το βαθμό εκφόρτωσης καθορίζει και την διάρκεια ζωής (Sun, et al 2019).

3.4.1 Τα κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συστήματος συσσωρευτών

Τα κύρια χαρακτηριστικά για τη δημιουργία ενός συστήματος συσσωρευτών είναι η ονομαστική τάση (V_B) που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της συνδεσμολογίας με άλλα μέρη του συστήματος και η χωρητικότητα τους (C). Επιπλέον, η καθημερινή λειτουργία τους επιφέρει την μείωση χωρητικότητας λόγω γήρανσης, κι αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό που λειτουργεί υπονομευτικά για την μακροβιότητα των συσσωρευτών. (Sun, et al 2019).

Ένας τρόπος προσδιορισμού της ονομαστικής τάσης του συστήματος συσσωρευτών είναι ο υπολογισμός της ονομαστικής ισχύος εξόδου του ΦΒ πεδίου. Επιπλέον, η τάση εξόδου του ρυθμιστή φορτίου των συσσωρευτών θα πρέπει να συμπίπτει με εκείνη του συστήματος των συσσωρευτών (Δέρβος Κ. 2013).

Πίνακας 3. 1: Ο προσδιορισμός της ονομαστικής τάσης των συσσωρευτών με βάση την ονομαστική τάση εξόδου του ΦΒ πεδίου. Πηγή: Δέρβος Κ. 2013.

| Ισχύς αιχμής P_a | Ονομαστική τάση συστήματος συσσωρευτών V_B |
|--------------------|--|
| 0-3 kWp | 12V |
| 3-10 kWp | 24-48V |
| 10-15 kWp | 48-60V |
| >15 kWp | >48V |

Το βάθος εκφόρτισης (DOD) σε μία μπαταρία καθορίζεται από τις ηλεκτροδιακές αντιδράσεις και την ενέργεια που απαιτεί το σύστημα. Η τιμή του βαθμού εκφόρτισης επιλέγεται με βάση τον τύπο του συσσωρευτή ή σε δεδομένη χρονική περίοδο με βάση την αυτονομία του (Δέρβος Κ. 2013).

Περαιτέρω, η ονομαστική χωρητικότητα, σε αμπερώρες, (ampere-hours, Ah) της μπαταρίας υπολογίζεται πειραματικά από τον χρόνο t που είναι ανάλογος με την πλήρη εκφόρτιση της μπαταρίας υπό σταθερό ρεύμα σε θερμοκρασία 20 °C (Δέρβος Κ. 2013).

Για την σύνδεση των συστοιχιών συσσωρευτών ισχύει ότι για την αύξηση της ονομαστικής τάσης οι συστοιχίες συσσωρευτών συνδέονται σε σειρά στην έξοδο τους, με σταθερό ρεύμα. Ενώ, το πλήθος των παράλληλων συστοιχιών των συσσωρευτών αυξάνει την χωρητικότητα και το ρεύμα του συστήματος (Δέρβος Κ. 2013).

3.4.2 Κατηγορίες συσσωρευτών για ΦΒ συστήματα

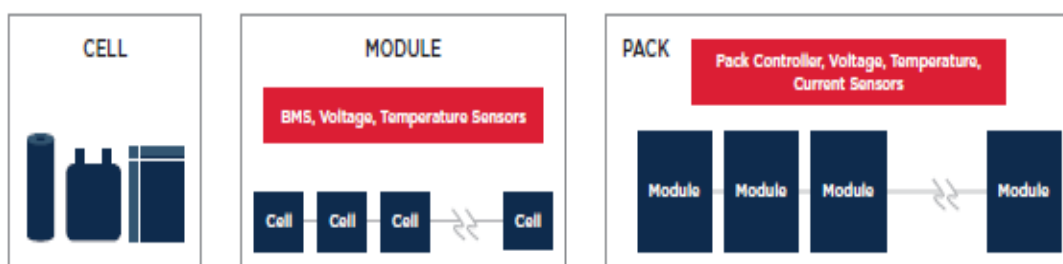
Οι πρώτες κατηγορίες μπαταριών για την συσσώρευση ενέργειας ήταν οι παραδοσιακές χημικές μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (NiMH), νικελίου καδμίου (NiCd) και μολύβδου οξέος (Lead Acid). Αυτές οι κατηγορίες συσσωρευτών, εκτός ότι είναι μη ανακυκλώσιμες και τοξικές για το περιβάλλον, δεν έχουν και τα χαρακτηριστικά των νέων συσσωρευτών (Kobougias, Tatakis & Prousalidis 2013).

Σήμερα, οι νέες και εναλλακτικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε θαλάσσιες εφαρμογές είναι οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου (lithium-ion batteries), οι υπερπυκνωτές (supercapacitors) και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (flywheel energy storage systems). Παρακάτω, μάλιστα, θα γίνει εκτενής αναφορά σε συσσωρευτές ιόντων λιθίου που είναι και η πιο αξιόπιστοι και διαδεδομένοι, αυτή τη στιγμή, σε σχέση με άλλες παλιότερες τεχνολογίες συσσωρευτών (Kobougias, 2013).

Ιστορικά, οι πρώτες μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιήθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1990. Αυτές οι μπαταρίες παρουσίαζαν χαμηλή εσωτερική αντίσταση, χαμηλές απώλειες και χρησιμοποιήθηκαν για εφαρμογές χαμηλής ενέργειας, χαμηλής ισχύος και μεγάλης διάρκειας ζωής. Ωστόσο, οι εξελίξεις στην παραγωγή νέων κατάλληλων χημικών ενώσεων του λιθίου έχουν οδηγήσει σε αυξημένη ενέργεια και πυκνότητα ισχύος (American Bureau of Shipping, 2017).

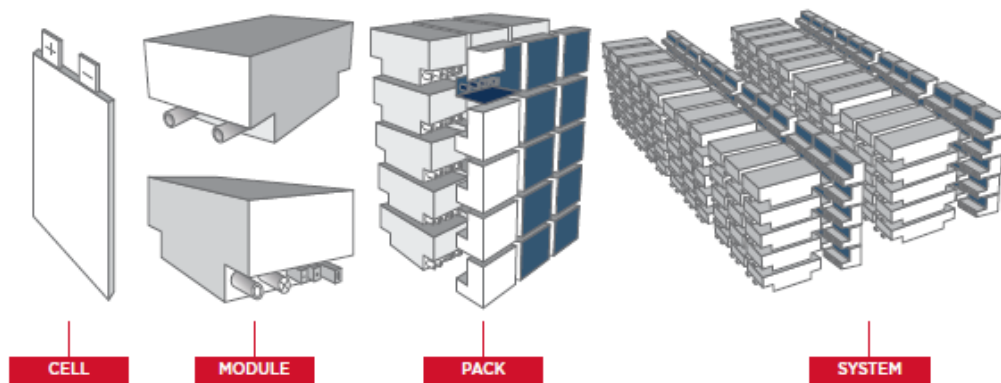
Η τεχνολογική εξέλιξη έχει διευκολύνει τη χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου σε εφαρμογές που προηγουμένως δεν ήταν εφικτές με τις παραδοσιακές χημικές μπαταρίες. Μεγάλες μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν βρει εφαρμογές σε αμυντικά συστήματα, ηλεκτρικά οχήματα, δορυφόρους, θαλάσσιες και υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Επιπλέον χαρακτηριστικό της λειτουργίας τους είναι ότι η τεχνολογία μπαταριών ιόντων λιθίου απαιτεί λειτουργία εντός καθορισμένων παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένων ειδικών ρυθμών φόρτισης / εκφόρτισης, τάσεων, ρευμάτων και θερμοκρασιών (American Bureau of Shipping, 2017).

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να φορτιστούν και να αποφορτιστούν πολλές φορές κατά τη διάρκεια ζωής τους. Σε ορισμένες εφαρμογές, ένα μόνο κελί μπορεί να είναι κατάλληλο για την κάλυψη της ενέργειας των αναγκών ενός φορτίου, ενώ για άλλους τύπους συσσωρευτών μπορεί να απαιτούνται πολλαπλά κελιά για την παροχή της απαραίτητης τάσης, ρεύματος και ισχύος. Τα μεμονωμένα κελιά ιόντων λιθίου ομαδοποιούνται σε σειρές ή σε παράλληλους συνδυασμούς δημιουργώντας ένα συσσωρευτή (μονάδα), που περιέχει βοηθητικές συσκευές, οι οποίες με τη σειρά τους παρέχουν ρυθμίσεις ακροδεκτών, θερμικές (ψύξη ή θέρμανση) ρυθμίσεις, λειτουργίες παρακολούθησης του ποσού φόρτισης-εκφόρτισης, ασφάλειας και ελέγχου και καθιστούν τη μονάδα κατάλληλη για την προβλεπόμενη χρήση (American Bureau of Shipping, 2017).



ΕΙΚΟΝΑ 3. 13: Βασικά στοιχεία μπαταρίας. Πηγή: (American Bureau of Shipping, 2017).

Οι μονάδες μπορούν να ομαδοποιηθούν περαιτέρω σε σειρές ή / και παράλληλους συνδυασμούς για να σχηματίσουν ένα πακέτο. Το πακέτο συσσωρευτών (pack) διαθέτει επαρκή θήκη για τις μονάδες συσσωρευτών, ρυθμιστή ισχύος και τάσης φόρτισης/εκφόρτισης. Οι συσσωρευτές (Battery packs) μπορούν επίσης, να ομαδοποιηθούν σε σειρά ή και παράλληλα για να σχηματίσουν ένα σύστημα μπαταρίας ανάλογα με τα αναμενόμενα φορτία.



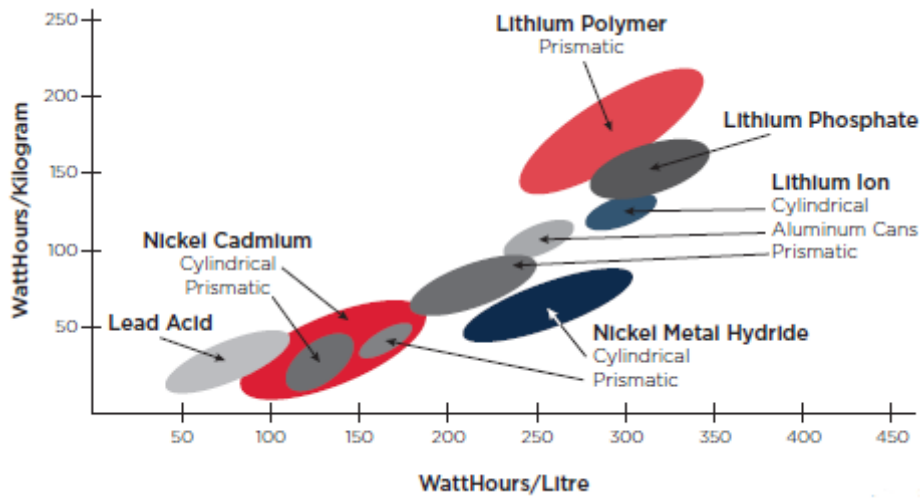
ΕΙΚΟΝΑ 3. 14: Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Πηγή: (American Bureau of Shipping, 2017).

Η λειτουργική απόδοση και η ασφάλεια μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου στο σύνολό της επιτυγχάνεται από μια συσκευή ελέγχου που συνήθως ονομάζεται Battery Management System (BMS). Ένα τυπικό BMS χωρίζεται μεταξύ εξαρτημάτων που είναι εγκατεστημένα σε μεμονωμένες μονάδες μπαταρίας (battery modules) και άλλων εξαρτημάτων που είναι εγκατεστημένα σε πακέτα μπαταριών (battery packs) (American Bureau of Shipping, 2017).

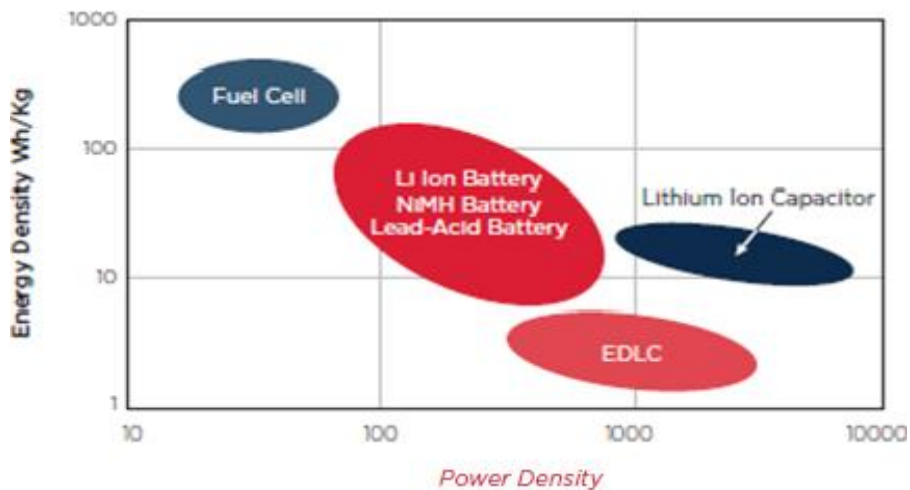
Οι διάφορες εσωτερικές χημικές διεργασίες των μπαταριών ιόντων λιθίου παρέχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας και ασφάλειας. Η επιλογή ενός συγκεκριμένου τύπου εξαρτάται από την εφαρμογή. Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι:

- Η ενεργειακή ανάγκη της εφαρμογής.
- Ρυθμός παροχής ενέργειας (ισχύς).
- Κύκλος λειτουργίας.
- Εύρος τάσης λειτουργίας.
- Μέγιστο ρεύμα, χρόνος φόρτισης, χρόνος εκφόρτισης.
- Ροή θερμότητας, έλεγχος θερμοκρασίας.
- Ψυκτικές ανάγκες.
- Δυνατότητες ελέγχου.

Οι εικόνες 3.15 και 3.16 απεικονίζουν συγκρίσεις σχετικά με την πυκνότητα ενέργειας και ισχύος διαφορετικών τύπων χημικών συσσωρευτών. Είναι προφανές ότι οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, όσο αφορά τη σύγκριση του διαθέσιμου όγκου, από άλλους συσσωρευτές (American Bureau of Shipping, 2017).



EIKONA 3.15: Σύγκριση ενεργειακής πυκνότητας. Πηγή: <https://ww2.eagle.org>.



EIKONA 3.16: Ενέργεια έναντι πυκνότητας ισχύος. Πηγή: <https://ww2.eagle.org>.

Πλεονεκτήματα των συσσωρευτών ιόντων λιθίου σε σχέση με άλλους συσσωρευτές:

- **Πυκνότητα ενέργειας (Watt-hour/kg):** Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου προσφέρουν πολύ υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και χωρητικότητα σε σύγκριση με άλλες παραδοσιακές μπαταρίες. Η χαμηλή εσωτερική τους αντίσταση καθιστά μια μπαταρία ιόντων λιθίου πιο κατάλληλη για εφαρμογές υψηλής ισχύος (βλέπε πίνακα 3.2).

Πίνακας 3. 2: χαρακτηριστικά των συσσωρευτών λιθίου σε σύγκριση με τις παλιότερες τεχνολογίες. Πηγή: <https://ww2.eagle.org>.

| Specifications | Lithium-Ion | | | Lead Acid | NiCd | NiMH |
|-------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-------|---------|
| | Cobalt | Manganese | Phosphate | | | |
| Specific Energy (wh/kg) | 150-250 | 100-150 | 90-120 | 30-50 | 45-80 | 60-120 |
| Cycle Life (80% DoD) | 500-1000 | 500-1000 | 1000-2000 | 200-300 | 1000 | 300-500 |
| Cell Voltage (nominal) | 3.6V | 3.7V | 3.2-3.3V | 2V | 1.2V | 1.2V |

- Βάρος:** Οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου ζυγίζουν το 1/3 του βάρους των συσσωρευτών μολύβδου οξέος και είναι μικρότερες σε μέγεθος από άλλες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες παρόμοιας χωρητικότητας. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι πρακτικές σε εφαρμογές στις οποίες θεωρούνται σημαντικές οι φυσικές προδιαγραφές όπως ο χώρος, το βάρος και η συνολική αποθήκευση ενέργειας.
- Ταχύτερη φόρτιση:** Η χαμηλή εσωτερική αντίσταση των χημικών ιόντων λιθίου σε σύγκριση με εκείνη των παραδοσιακών μπαταριών επιτρέπει τη φόρτιση με χαμηλότερες απώλειες και αύξηση θερμότητας. Αυτό το πλεονέκτημα μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτερους συνολικούς χρόνους φόρτισης, ωστόσο ποικίλοι παράγοντες επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.
- Ρυθμός εκφόρτωσης:** Όλες οι μπαταρίες υπόκεινται σε απώλειες με τη μορφή εκφόρτισης. Ο ρυθμός εκφόρτισης για μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι συνήθως χαμηλότερος από αυτόν για άλλους τύπους μπαταριών και για άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.
- Κύκλος ζωής:** Η διάρκεια ζωής του κύκλου είναι πολύ υψηλότερη για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου σε σύγκριση με άλλες παραδοσιακές μπαταρίες. Για μπαταρίες ιόντων λιθίου, ο κύκλος ζωής επηρεάζεται από το βάθος της εκφόρτισης (depth of discharge, DoD). Μικρό βάθος εκφόρτισης αυξάνει τη διάρκεια ζωής του κύκλου. Ο παραπάνω πίνακας δείχνει τη διάρκεια ζωής του κύκλου στο 80% DoD.

Μειονεκτήματα των συσσωρευτών ιόντων-λιθίου:

- **Κόστος:** Η τιμή κόστους των συσσωρευτών ιόντων λιθίου είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση αυτής των συμβατικών συσσωρευτών.

3.4.3 Μέτρα ασφαλείας για τους ΦΒ συσσωρευτές στο πλοίο

Η ανάλυση και ο έλεγχος ασφαλείας είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή των συστοιχιών συσσωρευτών, ανεξάρτητα από το είδος της τεχνολογίας του συσσωρευτή που επιλέγεται ή το είδος του δικτύου που εφαρμόζεται πάνω στο πλοίο. Αρχικά το σύστημα BMS που είναι τοποθετημένο στο σύστημα συσσωρευτών μπορεί να προσφέρει ασφάλεια για πρόληψη υπερθέρμανσης, υπερφόρτισης και βραχυκυκλώματος στο σύστημα των συσσωρευτών. Για ένα μηχανολογικό έργο φωτοβολταϊκού συστήματος σε πλοίο, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σοβαρά μέτρα υψηλών προδιαγραφών για την αντιμετώπιση κινδύνων, ανταποκρινόμενα σε ακραίες καταστάσεις, όπως αστοχία συστήματος, περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας και πυρκαγιά καμπίνας. Για αυτό το λόγο έχει καταστεί υποχρεωτικό να γίνεται έλεγχος των ΦΒ συστημάτων και επιθεώρηση των συσσωρευτών. Έτσι το μηχανικό σύστημα πυρόσβεσης και αερισμού θα πρέπει να συμπεριληφθεί στο σχεδιασμό του χώρου των συστημάτων συσσωρευτών (Sun, et al., 2019).

Δύο από τις πιο σημαντικές απαιτήσεις για την ασφάλεια των συσσωρευτών είναι:

- Το μηχανικό σύστημα εξαερισμού θαλάμου θα πρέπει να ενσωματώνεται στο χώρο συστοιχιών μπαταριών για την αποφυγή υπερβολικής θερμοκρασίας γύρω από τις συστοιχίες μπαταριών και η θύρα εξαερισμού πρέπει να είναι αδιάβροχη. Για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας φωσφορικού σιδήρου λιθίου, η θερμοκρασία περιβάλλοντος καμπίνας πρέπει να ρυθμίζεται μεταξύ 0-45 °C.
- Για τους συσσωρευτές ιόντων λιθίου συνιστάται να χρησιμοποιείται το πυροσβεστικό επταφθοροπροπάνιο (HFC-227) στο σύστημα πυρόσβεσης που βρίσκεται στο δωμάτιο των συσσωρευτών (Sun et al., 2019).

3.5 Καλωδιώσεις ΦΒ εγκατάστασης

Οι σημαντικότεροι παράγοντες για των υπολογισμό της ελάχιστης διατομής των καλωδιώσεων που θα πρέπει να εκτιμηθούν είναι το ρεύμα (AC ή DC), η τάση λειτουργίας της εγκατάστασης σε κάθε κλάδο και η μέγιστη αποδεκτή τιμή πτώσης τάσης στα άκρα του αγωγού.

Για την σωστή διατομή του αγωγού που θα επιλεγθεί, ο υπολογισμός γίνεται από τις σχέσεις 3.11, 3.12, 3.13:

$$\text{DC ρεύμα:} \quad S = \frac{2 \times L \times I}{\sigma \times \Delta V} \times 10^6 \quad (3.11)$$

$$\text{AC μονοφασικό ρεύμα:} \quad S = \frac{2 \times L \times I \times \cos \varphi}{\sigma \times \Delta V} \times 10^6 \quad (3.12)$$

$$\text{AC τριφασικό ρεύμα:} \quad S = \frac{\sqrt{3} \times L \times I \times \cos \varphi}{\sigma \times \Delta V} \times 10^6 \quad (3.13)$$

όπου:

| | |
|-----------------|--|
| S | Η ελάχιστη δυνατή διατομή του αγωγού [mm ²] |
| L | Το μήκος του εξεταζόμενου κλάδου [m] |
| I | Το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό [A] |
| σ | Η ειδική αγωγιμότητα για το υλικό του αγωγού [Ω ⁻¹ * m ⁻¹] |
| ΔV | Η μέγιστη αποδεκτή τιμή πτώσης τάσεως V καθ' ολο το μήκος του αγωγού |
| cosφ | Συντελεστής ισχύος για τον αναστροφέα. Μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο του φορτίου και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ των ορίων 0,8 < cosφ < 1 |
| 10 ⁶ | Συντελεστής ο οποίος εισάγεται προκειμένου να παρέχεται η τιμή του εμβαδού της διατομής, S, απευθείας σε [mm ²] |

Το μέγεθος που ίσως να διαφοροποιείται και θα πρέπει να υπολογίζεται σε κάθε θέση του κλάδου της ΦΒ εγκατάστασης είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της πτώσης τάσεως (ΔV). Η μέγιστη αποδεκτή τιμή πτώσης τάσεως καθορίζεται από την τάση λειτουργίας στο σημείο που μας ενδιαφέρει προς το συνιστάμενο ποσοστό των απωλειών. Οι περιοχές που καθορίζονται με διαφορετικά ποσοστά απωλειών είναι οι παρακάτω:

1. Η περιοχή μεταξύ των ΦΒ συστοιχιών και του ρυθμιστή φόρτισης των συσσωρευτών και συγκεκριμένα από τους ακροδέκτες εξόδου του πίνακα των ΦΒ πεδίων μέχρι τους ακροδέκτες εισόδου του ρυθμιστή φόρτισης.

Η ονομαστική τάση λειτουργίας διαφέρει ανάλογα με τον αριθμό των πλαισίων που υπάρχει στις συστοιχίες. Όσον αφορά στον υπολογισμό του ρεύματος, η τιμή του προκύπτει από το ρεύμα του ενός ΦΒ πλαισίου, που είναι ήδη γνωστό από τις προδιαγραφές του, επί το πλήθος των παράλληλων συστοιχιών. Επιπλέον, το καλώδιο που χρησιμοποιείται σε αυτή την περιοχή είναι διπολικό και μπαίνει μέσα σε σωλήνα. Αυτό γίνεται για την προστασία του καλωδίου από την ακτινοβολία, την υψηλή θερμοκρασία και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Η ΔV σε αυτό το σημείο εμφανίζεται ως $\Delta V=3\%*y$ (y : η τάση που εμφανίζεται σε αυτή την περιοχή).

2. Η περιοχή μεταξύ του ρυθμιστή φόρτισης και του συστήματος των συσσωρευτών και συγκεκριμένα από τους ακροδέκτες του ρυθμιστή φόρτισης μέχρι τους δύο κεντρικούς πόλους των μπαταριών. Σε αυτή την περιοχή υπάρχει συνεχές ρεύμα και η τάση στο κύκλωμα ορίζεται από την σύνδεση των συσσωρευτών. Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται είναι δυο ξεχωριστά μονοπολικά που τοποθετούνται σε εξωτερικό αεριζόμενο σωλήνα. Η ΔV εξαρτάται από τους τύπους του ρυθμιστή και είναι ίση με $(2\%-3\%)*y$.

3. Η περιοχή του κυκλώματος μεταξύ των συσσωρευτών και του αναστροφέα τάσης (inverter) και ειδικότερα, από τους πόλους των συσσωρευτών μέχρι τους ακροδέκτες εισόδου της διάταξης του αντιστροφέα. Το συγκεκριμένο μέρος της εγκατάστασης έχει τις μεγαλύτερες απώλειες ηλεκτρικής ισχύος. Η ΔV στην περιοχή αυτή είναι $\Delta V=1\%*y$. Το ρεύμα σε αυτό το κλάδο είναι συνεχές και το υλικό μόνωσης των καλωδίων είναι υψηλών προδιαγραφών για τυχόν προσβολή από χημικές ουσίες.

4. Η περιοχή του κυκλώματος των καταναλωτών DC. Προσδιορίζεται από τα άκρα εναλλασσόμενου ρεύματος εξόδου του ρυθμιστή φορτίου έως τους καταναλωτές ή το κιβώτιο σύνδεσης καταναλωτών DC και κάθε καλώδιο του κυκλώματος είναι διπολικό και αντιστοιχεί ένα σε κάθε γραμμή. Η ονομαστική τάση του κυκλώματος υπολογίζεται από τους συσσωρευτές και θα πρέπει να ταιριάζει με αυτή των καταναλωτών.

5. Η περιοχή του κυκλώματος που τροφοδοτεί τους καταναλωτές AC. Προσδιορίζεται από την έξοδο του αντιστροφέα έως το πίνακα των καταναλωτών AC ή αν είναι μεγάλη εγκατάσταση των ΦΒ έως το μετασχηματιστή μέσης τάσης. Τα καλώδια που τοποθετούνται από την διασύνδεση των ΦΒ πλαισίων μέχρι και το κύκλωμα κατανάλωσης συνεχούς ρεύματος θα πρέπει να τηρούν ειδικές προδιαγραφές μόνωσης. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του αγωγού πρέπει να κυμαίνεται από -40 έως +120, ενώ

στο εσωτερικό του το ανώτερο όριο θερμοκρασίας δεν πρέπει να ξεπερνά τους +140°C. Επίσης, το μονωτικό υλικό του καλωδίου θα πρέπει να είναι ανθεκτικό σε όζον, αμμωνία, λάδι, μικρόβια και μικροοργανισμούς, να μην καίγεται και να είναι ανθεκτικό όταν εκτίθεται στην ακτινοβολία (Δέρβος, 2013).

3.6 Συμπεράσματα

1. Η ανθεκτικότητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων που εγκαθίστανται στις θαλάσσιες εφαρμογές είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ανταπόκριση της λειτουργίας τους ακόμα και στις αντίξοες συνθήκες της θάλασσας, όπως υψηλή υγρασία, αλμύρα, ισχυρούς ανέμους και διάβρωση. Επιπλέον, τα βραχυκυκλώματα και η φθορά στα μηχανικά μέρη των μετατροπέων προκαλούνται από υγρασία και αλάτι. Για την αποφυγή αυτών απαιτείται ο γαλβανισμός και η κάλυψη εξωτερικά των μεταλλικών επιφανειών με αντιδιαβρωτικές επιστρώσεις. Ακόμα, για την παρεμπόδιση της υποβάθμισης των ηλιακών στοιχείων λόγω οποιασδήποτε διεύθυνσης υγρασίας αποτελεί προϋπόθεση η κάλυψη των ΦΒ με φύλλα γυαλιού αυξημένης αντοχής.

2. Η μεταβαλλόμενη ηλιακή ακτινοβολία λόγω συνεχούς πλεύσης του πλοίου σε συνδυασμό με τα προβλήματα που αναφέραμε στο πρώτο (1.) συμπέρασμα, μειώνει την ισχύ εξόδου από τις ΦΒ συστοιχίες.

3. Τα ΦΒ συστήματα που χρησιμοποιούνται σε χερσαίες εφαρμογές διαφέρουν από τα συστήματα που έχουν εφαρμογή στα πλοία. Λόγω του περιορισμένου χώρου, της διακύμανσης της ακτινοβολίας, τα αυτόνομα ΦΒ συστήματα δεν έχουν σταθερή ισχύ για να τροφοδοτήσουν τα DC φορτία. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, απαιτείται η εγκατάσταση ενός πλήθους συσσωρευτών με σκοπό την αποθήκευση ενέργειας, λύση ανεπιτυχής διότι το βάρος της εγκατάστασης δημιουργεί πρόβλημα στην ευστάθεια του πλοίου. Από την άλλη μεριά, τα ΦΒ συστήματα που είναι διασυνδεδεμένα στο δίκτυο του πλοίου, λόγω της διακύμανσης της ακτινοβολίας μπορεί να έχουν διαφορά τάσης, συχνότητας και φάσης. Επίσης ο διασυνδεδεμένος αναστροφέας στο δίκτυο δεν έχει την ικανότητα να υποστηρίζει την τάση δικτύου και, άρα, δεν μπορεί να αντέξει την υψηλού επιπέδου διαταραχή του φορτίου ισχύος στο δίκτυο του πλοίου. Επομένως, από όλα τα παραπάνω μειονεκτήματα λειτουργίας των υπόλοιπων ΦΒ συστημάτων προκύπτει ότι τα κατάλληλα συστήματα για το πλοίο είναι τα υβριδικά λόγω της εξάλειψης των παραπάνω εμποδίων που επιτυγχάνουν.

4. Ανεξάρτητα από το είδος των φωτοβολταϊκών συστημάτων του πλοίου, όπως τύπος εκτός δικτύου, συνδεδεμένου δικτύου ή υβριδικού, τόσο ο σχεδιασμός του συστήματος όσο και η τεχνική προδιαγραφή θα πρέπει να αξιολογηθούν λεπτομερώς και να ανταποκρίνονται στην απαίτηση σχεδιασμού του πλοίου. Επίσης, η διάταξη των

συσσωρευτών εντός του πλοίου επιβάλλεται να υπακούει σε κανόνες ασφαλείας, δηλαδή να υπάρχει σύστημα πυροπροστασίας και εξαερισμού.

3.7 Βιβλιογραφικές πηγές

Δέρβος, Κ. Θ. (2013) *ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ*. Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε. Μ. Π.

American Bureau of Shipping. (2017). ABS Advisory on Hybrid Electric Power System. Ανάκτηση 5 Δεκεμβρίου, 2020, από www.eagle.org

Anwari, M., Hiendro, A. & Bouchekara, H. (2014, 13 May). Performance Analysis of Hybrid PV/Diesel Energy System in Western Region of Saudi Arabia. *International Journal of Photoenergy*, p 10. DOI:10.1155/2014/626251

Dimas, A., Firmanda, A. & Ihtstam S. (2014). Standalone Photovoltaic System Sizing using Peak Sun Hour Method and Evaluation by TRNSYS Simulation. *International Journal of Renewable Energy Research*. 4(1): 109-114.

Fthenakis, V. & Letcher, T. (2018) *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems: With Special Focus on Photovoltaic Systems*. New York: Academic Press.

Gevorkian, P (2008) *Solar Power in Building Design*. California: McGraw-Hill. DOI: 10.1036/0071485635

Ivan, N., Chirică, I. (2016) *PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGY. THE FUTURE SOLUTION FOR SHIPS*. UNIVERSITY OF GALATI, Galati.

Jäger, K., Isabella, O., Smets, A. H. M., Van Swaaij, R. A. C. M. M., Zemon, M. (2014) *Solar Energy Fundamentals, Technology, and Systems*. Delft: University of Technology.

Kobougias, I., Tatakis, E., and Prousalidis, J. (2013) *PV Systems Installed in Marine Vessels, Technologies and Specifications*: Hindawi Publishing Corporation.

Kurniawan, A. (2016, 1 April). A Review of Solar-Powered Boat Development. *The Journal for Technology and Science*, Vol. 27, No. 1, p 8. DOI:10.12962/j20882033.v27i1.761

Martins, A.P. (2016). Efficiency analysis of low-power grid-connected photovoltaic system. In Donsion, P.M., Vargara, S. & Vitale, G. (Eds.), *Renewable Energy*, 2nd Edition, pp (230-255). Newcastle: Cambridge Scholars Publishing.

Paulson, M., Dr. Mariamma, P. (2019) Marine Photovoltaic's: A review of research and developments, challenges and future Trends. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, VOL 8(9), pp 1-10. Retrieved from www.ijstr.org.

Pearsall, N.M. (2017). Introduction to photovoltaic system performance. In N.M. Pearsall (Eds.), *the Performance of Photovoltaic (PV) Systems Modeling, Measurement and Assessment*, pp (1-19). Newcastle: Woodhead.

Qiu, Y., Yuan, C., Sun, Y. & Tang, X. (2019). Power Quality Analysis for Ship-Photovoltaic Power System: A Case Study. *Electric Power Components and Systems*, vol 0, 1-12. DOI: 10.1080/15325008.2018.1485185

Qiu, Y., Yuan, C. & Sun, Y. (2015). Review on the Application and Research Progress of Photovoltaics-ship Power System. In P.R. Wuhan, the 3rd International Conference on Transportation Information and Safety, 25-28 June 2015 (pp 1-5). Wuhan: P. R. China.

Tang, R. (2017, 15 November). Large-scale photovoltaic system on green ship and its MPPT controlling. *Solar Energy*, 158, pp 614-628. Retrieved January 30, 2020, from www.sciencedirect.com

Sun, Y., Yan, X., Yuan, C., Tang, X., Malekian, R., Guo, C. & Li, Z. (2019). The application of hybrid photovoltaic system on the ocean-going ship: engineering practice and experimental research. *Journal of Marine Engineering and Technology*, 18 (1), 56-66

Ventre, J., Messenger, R. A., (2005) *Photovoltaic systems engineering*. 2nd ed. Boca Raton London New York Washington, D.C. : CRC PRESS.

Weidong, X. (2017) *Photovoltaic Power System: Modelling, Design and Control*. Sydney: John Wiley. DOI: 10.1002/9781119280408

Yang, R., Yuan, Y., Ying, R., Shen, B. & Long, T. (2020, March 16). A Novel Energy Management Strategy for a Ship's Hybrid Solar Energy Generation System Using a Particle Swarm Optimization Algorithm. *Electrical Power and Energy System*, Vol. 13, No. 4, pp 1-13. DOI: 10.3390/en13061380

Κεφάλαιο 4. Εγκατάσταση ΦΒ συστήματος σε day passenger boat για την κάλυψη δευτερευουσών αναγκών

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αποτελεί είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων ενός ΦΒ συστήματος εγκατεστημένου σε πλοίο συμπεριλαμβανομένων των ρυθμιστών φόρτισης, των συσσωρευτών μαζί με το σύστημα διανομής ενέργειας και τους αντιστροφείς. Ειδικότερα, αναλύεται η ικανότητα των συστημάτων να λειτουργούν ως υβριδικό σύστημα με στόχο την κάλυψη κάποιων φορτίων του πλοίου. Περαιτέρω, η λειτουργία του ΦΒ συστήματος και των συσσωρευτών γίνεται παράλληλα με το κύριο σύστημα τροφοδοσίας του πλοίου που είναι η ηλεκτρογεννήτρια ντίζελ και ένα σύστημα συσσωρευτών. Επίσης, το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί ως αυτόνομο σύστημα που θα συνδέεται μόνο με τον πίνακα του φωτισμού ή ως συνδεδεμένο στο κεντρικό δίκτυο διανομής ενέργειας του πλοίου. Τέλος, στόχος της εγκατάστασης των ΦΒ συστημάτων και των συσσωρευτών στο πλοίο είναι αφενός η μείωση καυσίμου που χρησιμοποιεί η ηλεκτρογεννήτρια και αφετέρου η μείωση εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, των οξειδίων του αζώτου, των οξειδίων του θείου και του μονοξειδίου του άνθρακα που δημιουργούνται κατά την καύση στην ηλεκτρογεννήτρια.

Μια σημαντική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το ΦΒ σύστημα είναι η μείωση των απωλειών ενέργειας που προκαλείται από το θαλάσσιο περιβάλλον. Ακόμη μία παράμετρος που έχει ληφθεί υπόψη είναι το ηλιακό δυναμικό της περιοχής πλεύσης του πλοίου που μεταβάλλεται ανάλογα με το μήνα και την εποχή. Με βάση αυτή την παράμετρο θα δούμε και την διακύμανση της παραγόμενης ΦΒ ενέργειας ανάμεσα στο καλοκαίρι και τον χειμώνα που έχουμε και την μεγαλύτερη διαφορά στην ένταση της ακτινοβολίας.

Στην συνέχεια θα αναλυθούν και τα επιπλέον μέρη που διέπουν την ΦΒ εγκατάσταση για την σωστή λειτουργία της, παράλληλα με το σύστημα διανομής του πλοίου. Όμως, αξίζει να επισημανθεί ότι απαιτείται προσοχή στον έλεγχο της συμβατότητας των δύο συστημάτων.

Τέλος, για να καταστεί αποδεκτό ότι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, όπως το ΦΒ σύστημα εγκατεστημένο στο θαλάσσιο περιβάλλον, είναι οικονομικά βιώσιμη, θα ακολουθήσει η οικονομική ανάλυση. Η ανάλυση αυτή είναι μια σημαντική παράμετρος

που αφορά κάθε εταιρία για να πειστεί ότι μία εγκατάσταση ΦΒ συστημάτων θα έχει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη στα χρόνια λειτουργίας της.

4.1 Επιλογή πλοίου για την εφαρμογή της εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος

Το υπό μελέτη πλοίο που επιλέχθηκε για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων απεικονίζεται στην εικόνα 4.1. Το πλοίο δραστηριοποιείται στα στενά του Βοσπόρου για την μεταφορά επιβατών γι' αυτό και χαρακτηρίζεται ως "passenger boat". Η μεταφορική του ικανότητα είναι 30 επιβάτες και 3 άτομα πλήρωμα.

Ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή του συγκεκριμένου πλοίου ήταν ο ελεύθερος χώρος στο κατάστρωμα για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πάνελ.

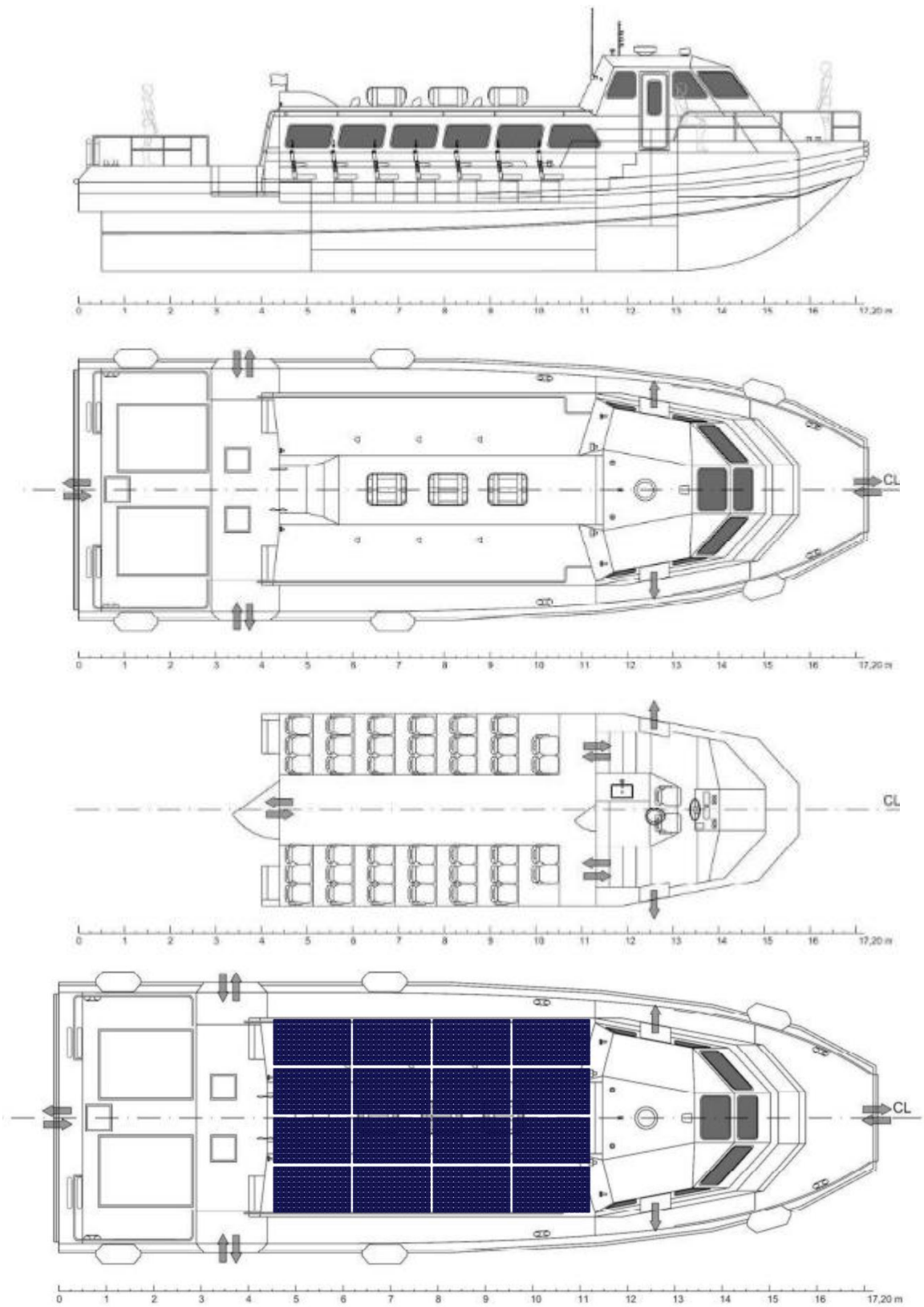
Άλλο ένα κριτήριο αποτέλεσε η ανυπαρξία μεγάλων ηλεκτρικών φορτίων όπως για παράδειγμα σε ένα κρουαζιερόπλοιο ή σε ένα ferry boat, όπου η ανάγκες σε αυτά τα πλοία είναι μεγαλύτερες.

Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται το ναυπηγικό σχέδιο του πλοίου που αποτελείται από την πλάγια όψη, την κάτοψη, την κάτοψη του σαλονιού και την σχεδίαση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στην κάτοψη του πλοίου. Επιπλέον, η σχεδίαση της κάτοψης με τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά έχει πραγματοποιηθεί στο 3D πρόγραμμα Rhino.

Στο πίνακα 4.1 απεικονίζονται οι κύριες διαστάσεις του πλοίου μαζί με τις μηχανές πρόωσης και την ηλεκτρογεννήτρια που καλύπτει της ανάγκες του πλοίου.

Πίνακας 4.1: Διαστάσεις του πλοίου, οι εγκατεστημένες κύριες μηχανές και η ηλεκτρογεννήτρια ντίζελ. *Izmir Shipyard*, 2019.

| TECHNICAL SPECIFICATIONS | |
|--------------------------|-----------------------------|
| Length Overall: | 17,30 m |
| Beam: | 5,80m |
| Draught: | 1,10m |
| Pax and Crew: | 30+3 |
| Engine: | FPT C90 368KW, 2530 PPM x 2 |
| Speed : | 23 knots |
| Generator | 2 SET |
| OUTPUT | 41,3 KVA |
| Revolutions per min | 1500 |
| Frequency | 50 Hz |
| Voltage | 380 V |
| Current (prime power) | 50,7 A |
| Diesel engine | 2 SET |
| Type | 4- stroke |
| Continuous rating output | 37,7 KW |
| Rated output | 41,4 KW |



Εικόνα 4.1: Τα σχέδια του πλοίου με την πλάγια όψη, κάτοψη, το σαλόνι των επιβατών μαζί με την γέφυρα και η κάτοψη του πλοίου με το εγκατεστημένο φωτοβολταϊκό πεδίο.
 Πηγή: *Izmir Shipyard*, 2019.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα πρέπει να εγκατασταθούν σε ένα μεταλλικό πλαίσιο (βάση) που θα είναι υψωμένο στο κατάστρωμα του πλοίου. Επίσης, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι στο σημείο που έχουμε εγκαταστήσει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια υπάρχουν σωσίβιες λέμβοι που θα πρέπει να μεταφερθούν σε άλλο σημείο για λόγους ασφαλείας.

4.1.1 Το ηλεκτρικό φορτίο του πλοίου και οι καταναλωτές που το αποτελούν

Κάθε πλοίο έχει διάφορους καταναλωτές για παράδειγμα, φώτα καταστρώματος, φώτα ναυσιπλοΐας, κλιματισμός, συστήματα πλοήγησης και πολλά άλλα. Με βάση αυτούς τους καταναλωτές κάθε πλοίο έχει μία εγκατεστημένη ισχύ που διαφέρει από πλοίο σε πλοίο και από μία κατηγορία πλοίου σε μία άλλη. Είναι γεγονός ότι τα πλοία με τους περισσότερους καταναλωτές είναι τα κρουαζιερόπλοια και τα ferry boat. Επιπλέον, το πλοίο λειτουργεί σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας (εν πλω, ελιγμών, εν όρμω και στην κατάσταση έκτακτης ανάγκης). Σε κάθε μία από αυτές τις καταστάσεις έχουμε και διαφορετικό φορτίο λειτουργίας. Συνήθως η δυσμενέστερη κατάσταση του πλοίου είναι όταν βρίσκεται εν πλω.

Στο πλαίσιο των αναγκών της διπλωματικής, προϋπόθεση για τη γνώση περί της κάλυψης των φορτίων από την εγκατάσταση του ΦΒ συστήματος, είναι η γνώση των ηλεκτρικών φορτίων που καταναλώνονται σε κάθε κατάσταση. Βάσει των δεδομένων που έχουμε για το συγκεκριμένο πλοίο, προέκυψαν δύο καταστάσεις λειτουργίας, εν πλω και εν όρμω. Η κατάσταση χειρισμού στους υπολογισμούς δεν λαμβάνεται υπόψη αλλά έχει συμπεριληφθεί στο χρόνο που βρίσκεται εν πλω. Σε άλλη περίπτωση π.χ για τον υπολογισμό του πλήθους των ηλεκτρογεννητριών που χρειάζονται για την επαρκή κάλυψη των ηλεκτρικών είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί και η κατάσταση ελιγμών και η κατάσταση έκτακτης ανάγκης.

Ο προσδιορισμός του ηλεκτρικού φορτίου του πλοίου αναγράφεται στο πίνακα 4.2 για τις καταστάσεις λειτουργίας εν πλω και εν όρμω με όλα τα στοιχεία των καταναλωτών που απαρτίζουν το πλοίο. Επίσης, αναγράφεται και η κατάσταση έκτακτης ανάγκης του πλοίου.

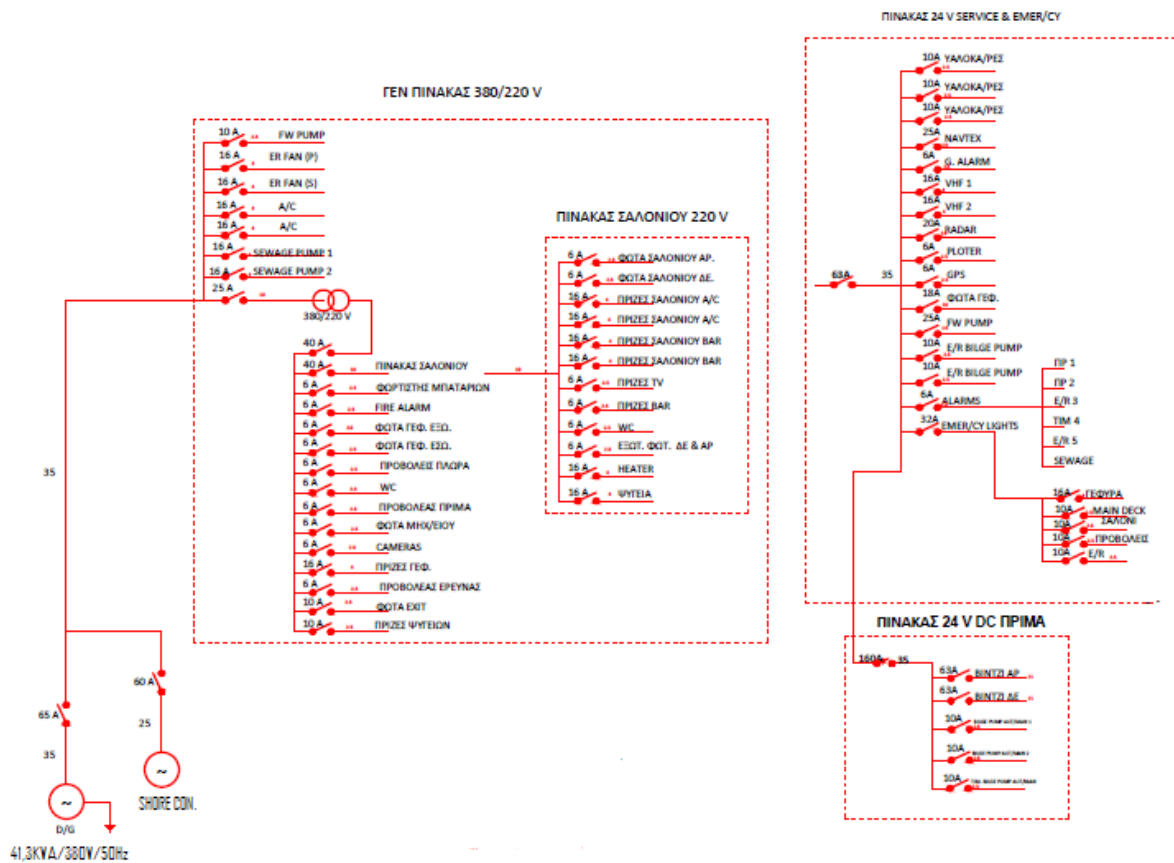
Το ηλεκτρικό φορτίο του πλοίου όταν βρίσκεται σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης κανονικά υπολογίζεται λεπτομερώς σε ξεχωριστό πίνακα αλλά για την παρούσα μελέτη δεν λαμβάνεται υπόψη.

Πίνακας 4.2: Ηλεκτρικός ισολογισμός του υπό μελέτη πλοίου.

| 380/220 V, 50HZ | | | |
|---|--------------|--------------|-------------|
| CONSUMPTION | SAIL | PORT | EMERGENCY |
| | KW | KW | KW |
| Βοηθητικά μηχανήματα χώρων ενδιαιτήσης | | | |
| HEATER / AC | 4 | | |
| SEWAGE PUMP | 1,2 | 1,2 | |
| fresh water pump | 0,3 | 0,3 | |
| A/C | 2,5 | 2,5 | |
| Σαλόνι | | | |
| ψυγείο | 0,75 | 0,75 | |
| πρίζα ψυγείου | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| πρίζες bar | 0,01 | 0,01 | |
| πρίζες σαλονίου bar | 0,1 | 0,1 | |
| πρίζες TV | 0,01 | 0,01 | |
| πρίζες Γεφ | 0,01 | 0,01 | |
| ΠΙΝΑΚΕΣ ΦΩΤΙΣΜΟΥ | | | |
| Φώτα γέφυρας εξω/μεσα | 0,1 | 0,1 | |
| προβολείς πλώρα/πρήμα | | 0,6 | 0,6 |
| Φώτα ναυ/οιας | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Φώτα σαλονίου AP. | 0,1 | 0,1 | |
| Φώτα σαλονίου ΔΞ. | 0,1 | 0,1 | |
| Φώτα μηχανωστασίου | 0,1 | 0,1 | |
| Φώτα γεφ. | 0,01 | 0,01 | |
| Προβολείς έρευνας | | | 0,3 |
| Φώτα μηχ. | 0,2 | 0,2 | |
| Βοηθητικά σκάφους | | | |
| bow thraster | | 1,5 | |
| εργάτης άγκηρας | | 1,2 | |
| Υαλοκα/εξ | | 0,24 | |
| fire alarm | | | 0,05 |
| Υαλοκα/εξ | 0,24 | | |
| NAYTEX | 0,17 | | |
| G.ALARM | | | 0,01 |
| VHF | 0,015 | 0,015 | |
| RADAR | 0,3 | 0,3 | |
| GPS | 0,015 | 0,015 | |
| FM PUMP | 0,3 | 0,3 | |
| E/R BILGE PUMP | | | 0,04 |
| TIM. PULG PUMP AUT/MAN | | | 0,07 |
| CAMERES | 0,01 | 0,01 | |
| Βοηθητικά πρόωσης | | | |
| Κινητήρας μηχ. Πηδ. | 3 | | |
| oily water separator | 0,1 | | |
| Ανεμιστήρας Μηχ. | 0,8 | 0,8 | |
| Bilge pump | 0,6 | | |
| TOTAL | 15,44 | 10,87 | 1,47 |

Όπως παρατηρούμε και από τον πίνακα 4.2 η συνολική ισχύς λειτουργίας στην κατάσταση κατά τη οποία το πλοίο βρίσκεται εν πλω είναι 15,44 KW, ενώ στην κατάσταση που το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι είναι 10,87 KW.

Στην εικόνα 4.2 φαίνεται το ηλεκτρικό σχέδιο του πλοίου με την τροφοδοσία της ηλεκτρογεννήτριας και την τροφοδοσία από το λιμάνι προς τους καταναλωτές.



Εικόνα 4. 2 Το ηλεκτρικό σχέδιο του πλοίου.

Η διάταξη αποτελείται από ένα ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος (κινητήρα ντίζελ-γεννήτριας AC 380 V, 33 KW) που παρέχει την ηλεκτρική ισχύ στους καταναλωτές AC 380V, στην αντλία νερού (FW PUMP), στο κλιματισμός A/C και στην αντλία λυμάτων (SEWAGE PUMP).

Επιπλέον, μέσω της ηλεκτρογεννήτριας ντίζελ επιτυγχάνεται η τροφοδοσία σε καταναλωτές με τάση AC 220V. Για να είναι συμβατή η τάση και το ρεύμα ως προς αυτούς τους καταναλωτές και για να μην προκύψει η καταστροφή των καταναλωτών AC 220V, είναι τοποθετημένος ένας μετασχηματιστής που υποβαθμίζει την τάση από 380V/220V.

Ο ρόλος του μετασχηματιστή σε αυτό το δίκτυο είναι η μετατροπή της τάσης λειτουργίας από 380V σε 220V και συνακόλουθα του ρεύματος λειτουργίας. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί η τροφοδοσία διάφορων καταναλωτών που λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης.

Μερικοί από τους καταναλωτές που τροφοδοτούνται από το σύστημα 220V είναι το σύστημα φωτισμού της γέφυρας, ο φωτισμός του μηχανοστασίου, κάμερες, ψυγείο κτλ. Το τρίτο σύστημα καταναλωτών λειτουργεί σε τάση 24V και τροφοδοτείται από το σύστημα των συσσωρευτών. Επιπλέον, όταν έχουμε εκφόρτιση των συσσωρευτών για την σωστή λειτουργία παροχής ενέργειας για την φόρτιση τους από την ηλεκτρογεννήτρια θα πρέπει πρώτα να γίνουν κάποιες διαδικασίες. Για να τροφοδοτηθεί το σύστημα συσσωρευτών το ρεύμα θα μετατραπεί από εναλλασσόμενο σε συνεχές σε χαμηλά επίπεδα τάσης (π.χ. 12 V, 24 V). Η χαμηλή τάση επιτυγχάνεται με μετασχηματιστή υποβιβασμού, ενώ στην συνέχεια η προκύπτουσα εναλλασσόμενη τάση μετατρέπεται σε συνεχή μέσω ανορθωτικής διάταξης.

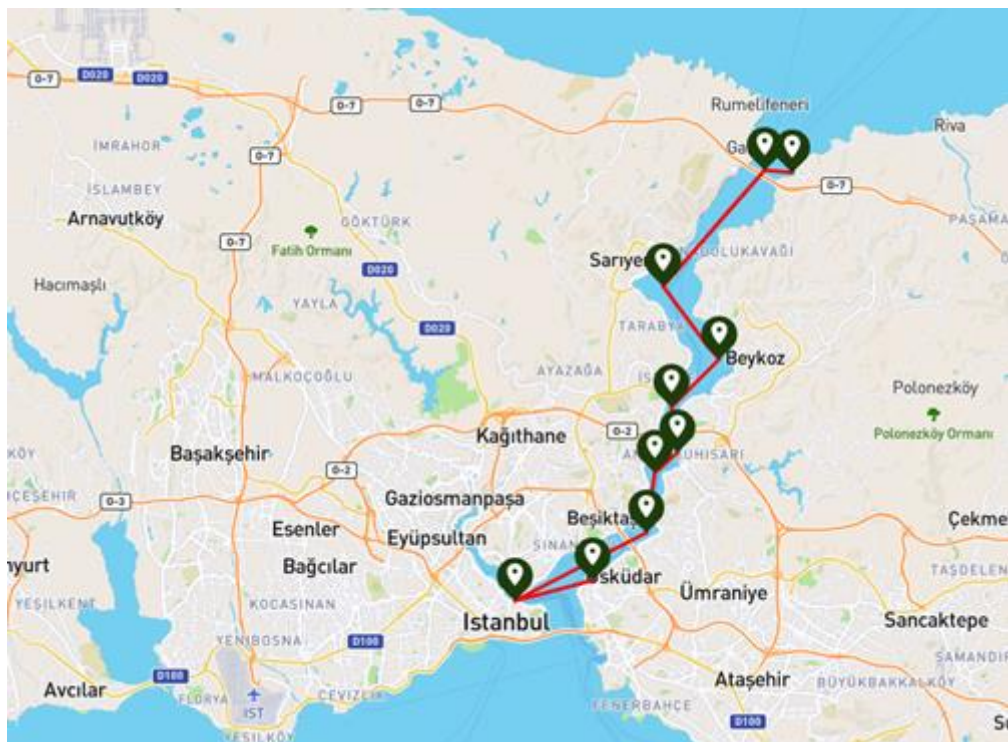
Στην περίπτωση που το πλοίο βρίσκεται σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης η τροφοδοσία ενέργειας γίνεται μέσω των εφεδρικών συσσωρευτών έκτακτης ανάγκης.

4.1.2 Περιγραφή ταξιδιού του πλοίου

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου 4, το πλοίο πραγματοποιεί πλόες στα στενά του Βοσπόρου. Η θάλασσα του Μαρμαρά που βρίσκεται στα στενά του Βοσπόρου ενώνει βορειανατολικά τον Εύξεινο Πόντο (μαύρη θάλασσα) με το Αιγαίο. Το μήκος είναι σχεδόν 30 km και τα πλάτη κυμαίνονται από 0,7 έως 3,5 km. Έτσι, το Στενό του Βοσπόρου είναι μια ιδιαίτερα κρίσιμη περιοχή με αυξημένη κυκλοφορία που προκαλεί σημαντική ατμοσφαιρική ρύπανση αλλά και πολλά ατυχήματα λόγω του θαλάσσιου ρεύματος του Μαρμαρά. Στην εικόνα 4.3 απεικονίζεται η περιοχή στα στενά του Βοσπόρου.



Εικόνα 4.3: Το στενό του Βοσπόρου. Πηγή: <https://earth.google.com>



Εικόνα 4.4: Αναγράφεται η παρία που καλύπτει το πλοίο. Πηγή: <https://earth.google.com>

Στον πίνακα 4.3 αναγράφονται αναλυτικά οι ώρες των δρομολογίων που πραγματοποιεί το πλοίο. Το σενάριο των δρομολογίων δεν είναι πραγματικό. Ο υπολογισμός της ώρας άφιξης από ένα λιμάνι στο άλλο έχει γίνει από την απόσταση που απέχουν τα λιμάνια σε ναυτικά μίλια ανάλογα με την ταχύτητα πλεύσης του πλοίου. Από τα δεδομένα του πλοίου προκύπτει ότι η ταχύτητα πλεύσης είναι 16 kts. Η απόσταση ανάμεσα στο λιμάνι ΟΥΣΚΟΥΝΤΑΡ και στο λιμάνι ΕΝΙΝΟΝΟΥ είναι 3,2 ναυτικά μίλια και για να καλύψει το πλοίο αυτή την απόσταση κάνει 20 λεπτά. Αντίστοιχα για να καλύψει την απόσταση 27 ναυτικά μίλια, χρειάζεται 90 λεπτά από το λιμάνι ΕΝΙΝΟΝΟΥ προς το λιμάνι ΟΥΣΚΟΥΝΤΑΡ.

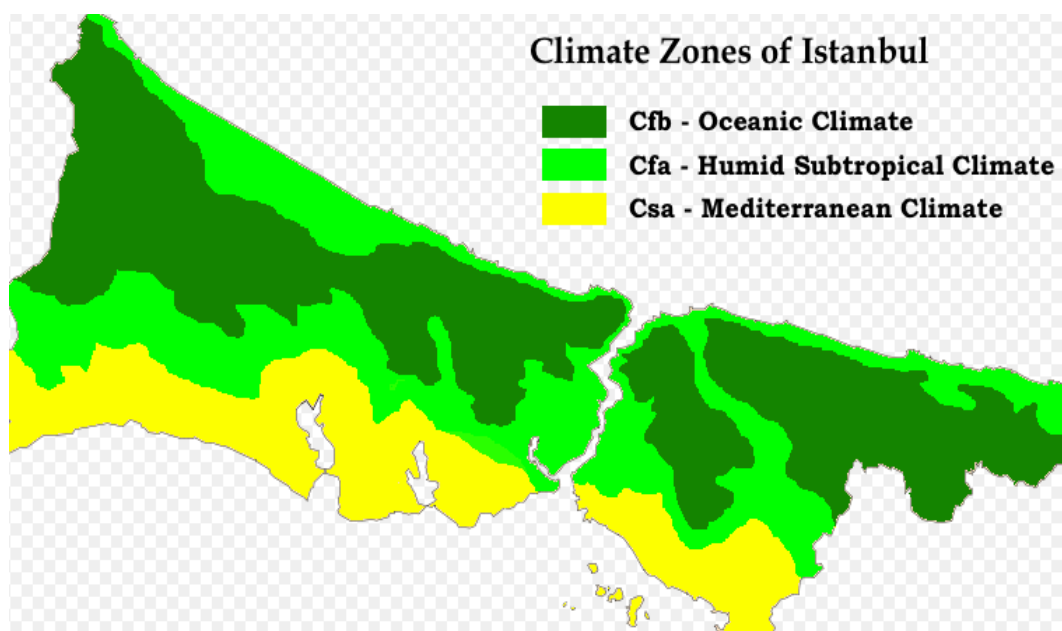
Πίνακας 4.3: Τα δρομολόγια που πραγματοποιεί το πλοίο

| Πρόγραμμα | ΩΡΑ | |
|------------|-------|-------|
| | ΑΦ. | ΑΝΑΧ. |
| ΛΙΜΑΝΙ | | |
| ΟΥΣΚΟΥΝΤΑΡ | | 10:00 |
| ΕΝΙΝΟΝΟΥ | 10:20 | 10:30 |
| ΡΟΥΡΑΖ | 12:00 | 12:20 |
| ΟΥΣΚΟΥΝΤΑΝ | 13:30 | 13:40 |
| ΕΝΙΝΟΝΟΥ | 14:00 | 14:10 |
| ΡΟΥΡΑΖ | 15:40 | 16:00 |
| ΟΥΣΚΟΥΝΤΑΡ | 17:10 | - |

Συνολικά οι ώρες του πλοίου σε κατάσταση πλεύσης είναι 6 ώρες, ενώ στην κατάσταση που βρίσκεται στο λιμάνι είναι 1 ώρα και 10 λεπτά.

4.2 Το ηλιακό δυναμικό στην περιοχή των στενών του Βοσπόρου

Γενικά το κλίμα στην περιοχή της Κωνσταντινούπολης χαρακτηρίζεται ήπιο με υψηλή υγρασία. Συγκεκριμένα, στην περιοχή των στενών του Βοσπόρου χαρακτηρίζεται ως Εύκρατο ωκεάνιο κλίμα όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.5 σύμφωνα με το Παγκόσμιο οργανισμό μετεωρολογίας (World Meteorological Organization, n.d.). Επιπλέον, σύμφωνα με την ταξινόμηση κλίματος κατά Κέππεν, το κλίμα χαρακτηρίζεται ως Υποτροπικό Ωκεάνιο Κλίμα και ως κατεξοχήν Μεσογειακό κλίμα (World Meteorological Organization, n.d.).



Εικόνα 4.5: Απεικόνιση του κλίματος στην περιοχή του Βοσπόρου και γενικά στην Κωνσταντινούπολη. Πηγή: <https://el.wikipedia.org>

Ένας σημαντικός παράγοντας για την απόδοση των ΦΒ πλαισίων είναι η θερμοκρασία. Η μέση θερμοκρασία τον μήνα Ιανουάριο είναι 5,8 °C που είναι και η χαμηλότερη κατά την διάρκεια του έτους, ενώ η υψηλότερη έχει καταγραφεί το μήνα Ιούλιο 28,4 °C. Στο πίνακα 4.4 παρουσιάζεται η κατάταξη της θερμοκρασίας στην περιοχή της Κωνσταντινούπολης. Επιπλέον, στο πίνακα καταγράφεται ο όγκος βροχής που πέφτει στην περιοχή και οι μέρες βροχόπτωσης και χιονόπτωσης. Οι μέρες βροχής είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τα ΦΒ συστήματα για τον υπολογισμό των ημερών ή ωρών που μπορούν οι συσσωρευτές να αντέξουν για να καλύψουν το

απαιτούμενο φορτίο καταναλωτών που έχουν δρομολογηθεί (TR MINISTRY OF AGRICULTURE AND FORESTRY, n.d.)

Πίνακας 4.4: Ο καιρός στην Κωνσταντινούπολη όλο το χρόνο από το 1990-2015.
Πηγή: (TR MINISTRY OF AGRICULTURE AND FORESTRY, n.d.)

| Μήνας | Ιαν | Φεβ | Μαρ | Απρ | Μάι | Ιουν | Ιουλ | Αυγ | Σεπ | Οκτ | Νοε | Δεκ | Έτος |
|--|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Μέγιστη καταγεγραμμένη θερμοκρασία (°C) | 18,3 | 24,0 | 26,2 | 32,9 | 33,0 | 40,2 | 40,5 | 38,8 | 33,6 | 34,2 | 27,2 | 21,2 | 40,5 |
| Μέγιστη θερμοκρασία (°C) | 8,7 | 9,1 | 11,2 | 16,5 | 21,4 | 26,0 | 28,4 | 28,5 | 25,0 | 20,1 | 15,2 | 9,7 | 18,3 |
| Μέση θερμοκρασία (°C) | 5,8 | 5,9 | 7,6 | 12,1 | 16,7 | 21,0 | 23,4 | 23,6 | 20,2 | 16,0 | 11,9 | 8,2 | 14,3 |
| Ελάχιστη θερμοκρασίας (°C) | 2,9 | 2,8 | 3,9 | 7,7 | 12,0 | 16,0 | 18,5 | 18,7 | 15,2 | 12,0 | 8,5 | 5,3 | 10,3 |
| Ελάχιστη καταγεγραμμένη θερμοκρασία (°C) | -10,4 | -16,1 | -7,0 | -0,6 | 3,6 | 8,0 | 10,5 | 8,2 | 5,2 | 1,0 | -4,0 | -9,4 | -16,1 |
| Βροχόπτωση (mm) | 102,4 | 80,2 | 69,9 | 45,8 | 36,1 | 34,0 | 38,8 | 47,8 | 61,4 | 100,9 | 110,7 | 123,9 | 843,9 |
| Μέση Μηνιαία Υγρασία (%) | 77 | 75 | 74 | 71 | 72 | 70 | 67 | 68 | 68 | 72 | 74 | 76 | 72 |
| Μέση ημέρες με το χιόνι | 6 | 6 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 19 |
| Μέση ημέρες με την βροχοπτώσεις | 20 | 17 | 16 | 14 | 12 | 8 | 5 | 6 | 7 | 12 | 16 | 19 | 152 |

Το ηλιακό δυναμικό της περιοχής που κινείται το πλοίο έχει υπολογιστεί από το σημείο εκκίνησης του που είναι το λιμάνι στο YOŞKOYNTAP. Τα δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία της περιοχής έχουν υπολογιστεί από την ηλεκτρονική πλατφόρμα GLOBAL SOLAR ATLAS για την χρονολογία του 2019.

Το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της περιοχής είναι 41.062301°, 29.047294° αντίστοιχα.

Στο πίνακα 4.5 φαίνονται οι τιμές (μέση ετήσια τιμή) που αφορούν την ετήσια διάχυτη οριζόντια ακτινοβολία (DIF), άμεση κανονική ακτινοβολία (DNI), παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία (GHI), παγκόσμια κεκλιμένη ακτινοβολία (GTI), παγκόσμια κεκλιμένη ακτινοβολία σε βέλτιστη γωνία (GTI_opta).

Πίνακας 4.5: Η μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία στο τέλος του πίνακα.
 Πηγή: GLOBAL SOLAR ATLAS

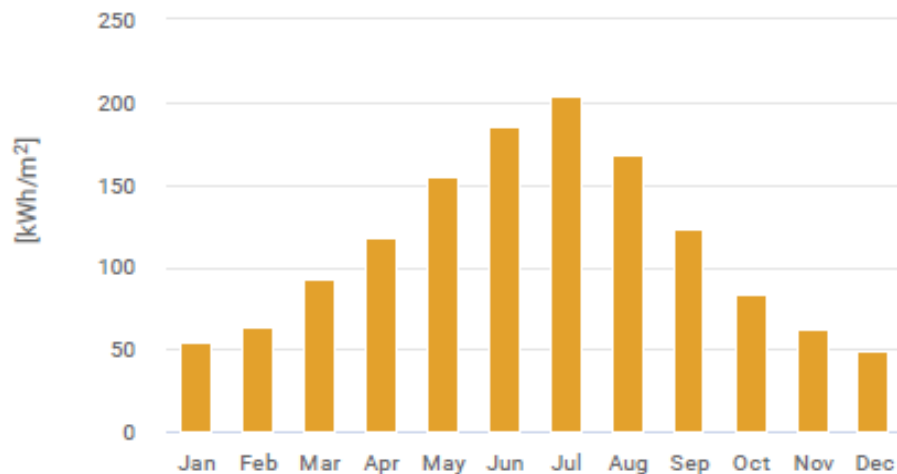
| Map data | | | |
|--|----------|------|--------------------|
| Direct normal irradiation | DNI | 1345 | kWh/m ² |
| Global horizontal irradiation | GHI | 1482 | kWh/m ² |
| Diffuse horizontal irradiation | DIF | 648 | kWh/m ² |
| Global tilted irradiation at optimum angle | GTI_opta | 1653 | kWh/m ² |
| Air temperature | TEMP | 15,4 | °C |

Η ηλιακή ακτινοβολία που μας ενδιαφέρει για τους υπολογισμούς είναι η άμεση κανονική ακτινοβολία (DNI). Η υπό γωνία ακτινοβολία θα χρησιμοποιούνταν αν τα ΦΒ πάνελ ήταν τοποθετημένα με κλίση. Στην υπό μελέτη περίπτωση, με βάση και τις εφαρμογές που αναφέρθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο, προκύπτει ότι ο βέλτιστος τρόπος τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι παράλληλα με το κατάστρωμα, δηλαδή χωρίς κλίση.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.6 φαίνεται το ποσό της άμεσης κανονικής ακτινοβολίας συνολικά για κάθε μήνα.

Monthly averages

Direct normal irradiation



Εικόνα 4.6: Το διάγραμμα ράβδων που καταγράφει την μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία. Πηγή: GLOBAL SOLAR ATLAS

Στην εικόνα 4.7 φαίνεται το μέσο ωριαίο προφίλ της κατανομής της κανονικής ηλιακής ακτινοβολίας.

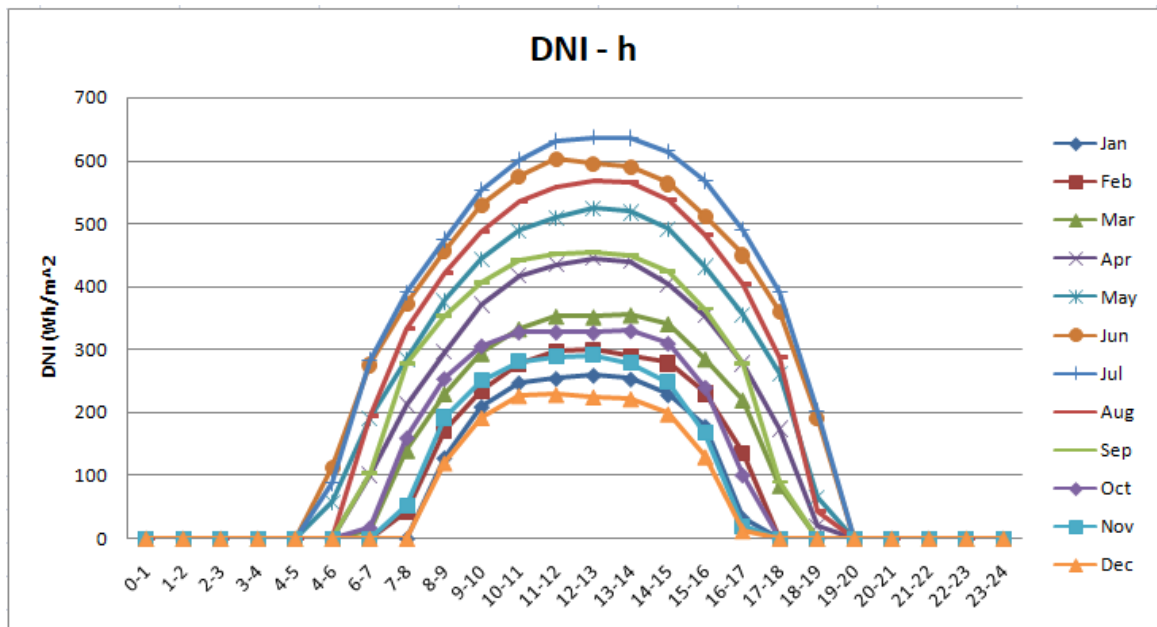
Average hourly profiles

Direct normal irradiation [Wh/m²]

| | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 - 1 | | | | | | | | | | | | |
| 1 - 2 | | | | | | | | | | | | |
| 2 - 3 | | | | | | | | | | | | |
| 3 - 4 | | | | | | | | | | | | |
| 4 - 5 | | | | | | | | | | | | |
| 5 - 6 | | | | | 57 | 113 | 89 | | | | | |
| 6 - 7 | | | 13 | 102 | 192 | 276 | 283 | 195 | 104 | 17 | | |
| 7 - 8 | | 42 | 140 | 212 | 285 | 373 | 390 | 334 | 278 | 160 | 52 | |
| 8 - 9 | 128 | 172 | 230 | 297 | 377 | 457 | 474 | 421 | 354 | 254 | 192 | 120 |
| 9 - 10 | 209 | 234 | 294 | 371 | 443 | 530 | 553 | 488 | 407 | 306 | 251 | 192 |
| 10 - 11 | 247 | 276 | 333 | 417 | 489 | 575 | 600 | 536 | 443 | 328 | 282 | 227 |
| 11 - 12 | 254 | 296 | 353 | 435 | 510 | 602 | 630 | 559 | 452 | 328 | 289 | 229 |
| 12 - 13 | 259 | 299 | 352 | 445 | 524 | 595 | 636 | 568 | 455 | 327 | 291 | 225 |
| 13 - 14 | 253 | 290 | 355 | 440 | 518 | 589 | 635 | 566 | 450 | 330 | 279 | 222 |
| 14 - 15 | 228 | 278 | 341 | 404 | 492 | 563 | 614 | 538 | 424 | 310 | 249 | 198 |
| 15 - 16 | 178 | 230 | 285 | 354 | 432 | 511 | 567 | 483 | 365 | 240 | 168 | 130 |
| 16 - 17 | 32 | 136 | 220 | 278 | 356 | 450 | 490 | 404 | 278 | 101 | 20 | 12 |
| 17 - 18 | | | 84 | 175 | 262 | 361 | 390 | 288 | 90 | | | |
| 18 - 19 | | | | 19 | 66 | 192 | 203 | 43 | | | | |
| 19 - 20 | | | | | | | | | | | | |
| 20 - 21 | | | | | | | | | | | | |
| 21 - 22 | | | | | | | | | | | | |
| 22 - 23 | | | | | | | | | | | | |
| 23 - 24 | | | | | | | | | | | | |
| Sum | 1788 | 2252 | 3000 | 3946 | 5003 | 6188 | 6555 | 5422 | 4099 | 2701 | 2074 | 1555 |

Εικόνα 4.7: Το ωριαίο προφίλ της άμεσης κανονικής ηλιακής ακτινοβολίας. Πηγή: *GLOBAL SOLAR ATLAS*

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.8 απεικονίζεται το ίδιο, αλλά δίνεται έμφαση στην ημερήσια κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας και στον προσδιορισμό της ανοιγμένης ώρας της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια της ημέρας κάθε μήνα ξεχωριστά.



Εικόνα 4.8: Στον άξονα Y έχουμε την ημερήσια κατανομή άμεση ηλιακή ακτινοβολία και στον άξονα X οι ανοιγμένες ώρες έκθεσής της ηλιακής ακτινοβολίας.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι διαδικασίες για το προσδιορισμό των ανοιγμένων ωρών της ηλιακής ακτινοβολίας στο συγκεκριμένο τόπο επαναλαμβάνονται καθημερινά. Στην συγκεκριμένη μελέτη αυτό έχει γίνει με το λογισμικό *GLOBAL SOLAR ATLAS* για να προσδιοριστούν στην συνέχεια οι μέσες μηνιαίες τιμές, οι εποχικές τιμές και, τέλος, οι μέσες ετήσιες τιμές των ανοιγμένων ωρών ηλιακής ακτινοβολίας. Τα δεδομένα αυτά στην συνέχεια χρησιμοποιούνται για να υπολογισθούν οι αναμενόμενες τιμές φωτοβολταϊκής ενέργειας της εγκατάστασης κατά την διάρκεια του έτους.

4.3 Υπολογισμός της παραγόμενης ΦΒ ενέργειας με βάση τα εγκατεστημένα ΦΒ πάνελ στο πλοίο.

Ο γενικός τρόπος υπολογισμού του πλήθους των ΦΒ πάνελ γίνεται ανάλογα με την ζήτηση των καταναλωτών σε μία αυτόνομη χερσαία εγκατάσταση όπου ο χώρος εγκατάστασης των ΦΒ πάνελ δεν συνιστά πρόβλημα. Όπως έχει αναφερθεί και στο τρίτο κεφάλαιο ο ελεύθερος χώρος για την εγκατάσταση ΦΒ πάνελ σε ένα πλοίο είναι από τους κύριους παράγοντες εξέτασης πριν προβεί κανείς σε ενέργειες υπολογισμού και εγκατάστασης ΦΒ πλαισίων.

Έτσι ο ελεύθερος χώρος στον οποίο μπορούν να εγκατασταθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι στο πάνω μέρος του υπό μελέτη πλοίου και υπολογίζεται από τα ναυπηγικά σχέδια του, γεγονός που προκύπτει από την εικόνα 4.1. Η ελεύθερη επιφάνεια που μπορούμε να αντικαταστήσουμε τα ΦΒ πλαίσια είναι 28 m².

4.3.1 Επιλογή ΦΒ πλαισίου

Ο τρόπος επιλογής του ΦΒ πλαισίου δεν είναι συγκεκριμένος. Ανάλογα με τις ανάγκες κάθε εφαρμογής μπορεί να υπάρξει και διαφορετικός λόγος επιλογής. Κάποιες από τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη είναι επιλογή του ΦΒ πλαισίου, η απόδοση του, το ρεύμα βραχυκυκλώματος, η τάση ανοιχτού κυκλώματος και οι διαστάσεις του. Επιπλέον, άλλοι παράμετροι συνιστούν η λειτουργική αξιοπιστία, η γήρανση, το κόστος του πλαισίου και η συμβατότητα με τα υπόλοιπα εξαρτήματα της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (ρυθμιστής φόρτισης των συσσωρευτών, αντιστροφείας).

Το κριτήριο επιλογής του ΦΒ πλαισίου σε πρώτο στάδιο έγινε με βάση την ονομαστική ισχύ του σε συνθήκες STC, ενώ στην συνέχεια ελέγχθηκε η συμβατότητα με

τα υπόλοιπα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα. Επίσης, η αντοχή του σε ένα δύσκολο περιβάλλον όπως το θαλάσσιο ήταν ακόμη ένα χαρακτηριστικό που λήφθηκε υπόψη.

Το ΦΒ πλαίσιο που επιλέχθηκε είναι μονοκρυσταλλικού πυριτίου, της Ιαπωνικής εταιρίας SHARP που ειδικεύεται για μεγάλο χρονικό διάστημα στην κατασκευή και την εξέλιξη της τεχνολογίας των ΦΒ πλαισίων. Το μοντέλο του ΦΒ πλαισίου είναι το Sharp NU-AC 300B (300W Black) και σύμφωνα με την εταιρία το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιοδήποτε περιβάλλον. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πλαισίου αναγράφονται στην εικόνα 4.9.

| Electrical data (STC) | | |
|---------------------------------------|----------|--------|
| Maximum power (Wp) | Pmax | 300 |
| Open-circuit voltage (V) | Voc | 40,03 |
| Short-circuit current (A) | Isc | 9,71 |
| Voltage at point of maximum power (V) | Vmpp | 32,68 |
| Current at point of maximum power (A) | Impp | 9,18 |
| Module efficiently (%) | η_m | 18,3 |
| Electrical data (NMOT) | | |
| Maximum power (Wp) | Pmax | 224,13 |
| Open-circuit voltage (V) | Voc | 37,94 |
| Short-circuit current (A) | Isc | 7,87 |
| Voltage at point of maximum power (V) | Vmpp | 30,5 |
| Current at point of maximum power (A) | Impp | 7,35 |

Εικόνα 4.9: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου σε συνθήκες STC και NMOT. Πηγή: (Σιδηροκαστρίτης, 2008)

Για τις συνθήκες STC και NMOT έχει ξαναγίνει αναφορά στην ενότητα 3.1 του κεφαλαίου 3. Η πρότυπη συνθήκη φωτισμού (STC) αναφέρεται σε πυκνότητα ακτινοβολίας 1.000 W/m², θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου 25°C και φάσμα της προσπίπτουσας (AM 1,5). Για την ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας μονάδας (NMOT) λαμβάνονται ως δεδομένα τα εξής: θερμοκρασία 45 °C, ακτινοβολία 800 W/m², θερμοκρασία αέρα 20 °C, ταχύτητα αέρα of 1 m/s. Επιπλέον, στην εικόνα 4.10 έχουμε τις διαστάσεις του πλαισίου, θερμοκρασιακή εξάρτηση ορίων και οριακές τιμές.

1. Mechanical data

| | |
|--------|----------|
| Length | 1,650 mm |
| Width | 992 mm |
| Depth | 35 mm |
| Weight | 18.5 kg |

2. Temperature coefficient

| | |
|-----------|------------|
| P_{max} | -0.375%/°C |
| V_{oc} | -0.273%/°C |
| I_{sc} | 0.037%/°C |

3. Limit values

| | |
|--|--------------|
| Maximum system voltage | 1,000 VDC |
| Over-current protection | 15 A |
| Temperature range | -40 to 85 °C |
| Max. mechanical load (snow/wind) | 2,400 Pa |
| Tested snow load (IEC61215 test pass*) | 5,400 Pa |

Εικόνα 4.10: 1) διαστάσεις πλαισίου, 2) θερμοκρασιακή εξάρτηση ορίων και 3) οριακές τιμές ρεύματος, τάσης, δόκιμες σε μηχανική καταπόνηση και καταπόνηση όταν ασκείται φορτίο χιονιού. Πηγή: (Σιδηροκαστρίτης, 2008)

Ο αριθμός των πλαισίων που μπορούν να εγκατασταθούν στο κατάστρωμα του πλοίου είναι 16 σύμφωνα με το διαθέσιμο χώρο 28 m². Ο χώρος που καταλαμβάνουν τα 16 ΦΒ πλαίσια είναι 16×1,65m² ×0,992m² = 26.2 m².

Η ονομαστική ισχύς της εγκατάστασης σε συνθήκες STC είναι $Q_m = 300 \times 16 = 4,8$ KW_p. Από την εξίσωση 4.1 λαμβάνουμε την ενέργεια που αποδίδουν τα ΦΒ πλαίσια στο σύστημα (Katagi et al., 1995).

$$P_{DC} = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times DNI \times Q_m \quad (4.1)$$

P_{DC} : ΦΒ ενέργεια (kwh/day)

DNI: η άμεση ροή της ηλιακή ακτινοβολία (kwh/m²/day)

K_1 : συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης

$$K_1 = 1 - \alpha(T - 25) \quad (4.2)$$

T : η θερμοκρασία των ΦΒ σε °C και 25 °C η θερμοκρασία σε συνθήκη STC

$$T = T_a + 0.3 \times E \quad (4.3)$$

T_a : η θερμοκρασία του αέρα σε °C . Είναι ένας παράγοντας που αλλάζει ανάλογα με τον μήνα και την εποχή. Τα δεδομένα για την μέση ημερήσια θερμοκρασία κάθε μήνα δίνονται στον πίνακα 4.4.

E : η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας για έναν ήλιο σε πρότυπες συνθήκες φωτισμού σε (mW/cm^2)

α : 0,005 συντελεστής για μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.

K_2 : συντελεστής ρύπων για το θαλάσσιο περιβάλλον συχνά λαμβάνεται ίσος με 0,95.

K_3 : συντελεστής γήρανσης ΦΒ μονάδας, για όλη την διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών λαμβάνεται ίσος με 0,95.

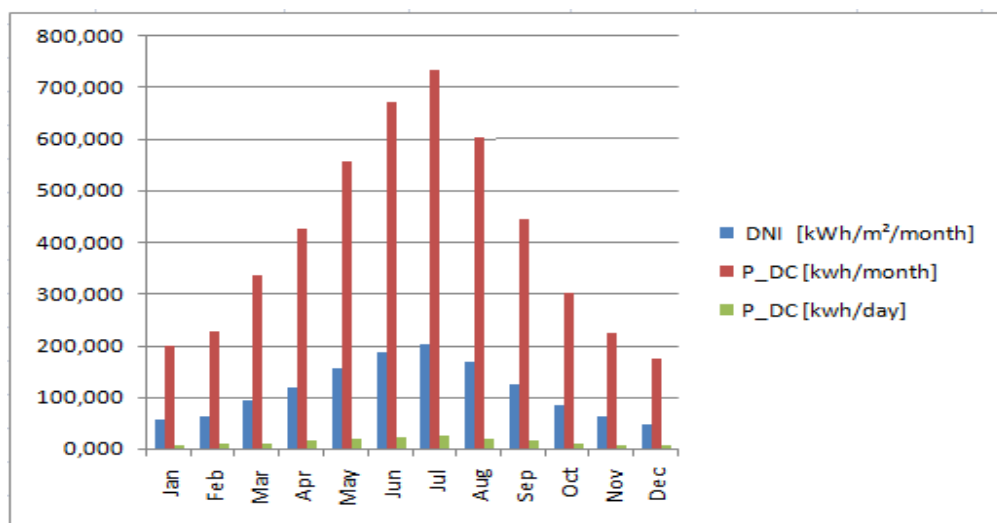
K_4 : συντελεστής απωλειών ανομοιογένειας, λαμβάνεται υπόψη για διάφορες κατασκευαστικές ατέλειες, για τυχούσα σκίαση γειτονικού πλαισίου και συνήθως η απώλεια είναι της τάξης του 2% και η τιμή που λαμβάνει είναι 0,98.

Από τις εξισώσεις 4.1, 4.2 και 4.3 προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 4.6 για την παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια κάθε μήνα. Επίσης λαμβάνεται ως δεδομένο ότι η μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία ανάγεται στην ημερήσια τιμή DNI της στήλης 3, αν διαιρεθεί η μηνιαία τιμή με τον αριθμό των ημερών κάθε μήνα από την στήλη 1.

Πίνακας 4.6: Η παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια από τα 16 εγκατεστημένα πλαίσια ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνουν κάθε μέρα

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------|--------|-------------------------------|---------------------------------|------------------|----------------|---------|---------|-------|
| ΗΜΕΡΕΣ | ΜΗΝΕΣ | DNI [kWh/m ² /day] | DNI [kWh/m ² /month] | P_DC [kwh/month] | P_DC [kwh/day] | Ta [°C] | T [°C] | K1 |
| 30 | Jan | 1,833 | 55,000 | 198,643 | 6,621 | 8,700 | 38,700 | 0,932 |
| 28 | Feb | 2,250 | 63,000 | 227,536 | 8,126 | 9,100 | 39,100 | 0,930 |
| 31 | Mar | 3,000 | 93,000 | 335,887 | 10,835 | 11,200 | 41,200 | 0,919 |
| 30 | Apr | 3,933 | 118,000 | 426,179 | 14,206 | 16,500 | 46,500 | 0,893 |
| 31 | May | 5,000 | 155,000 | 559,811 | 18,058 | 16,700 | 46,700 | 0,892 |
| 30 | Jun | 6,200 | 186,000 | 671,773 | 22,392 | 21,000 | 51,000 | 0,870 |
| 31 | Jul | 6,548 | 203,000 | 733,172 | 23,651 | 23,400 | 53,400 | 0,858 |
| 31 | Aug | 5,419 | 168,000 | 606,763 | 19,573 | 23,600 | 53,600 | 0,857 |
| 30 | Sep | 4,100 | 123,000 | 444,237 | 14,808 | 20,200 | 50,200 | 0,874 |
| 31 | Oct | 2,710 | 84,000 | 303,381 | 9,786 | 16,000 | 46,000 | 0,895 |
| 30 | Nov | 2,067 | 62,000 | 223,924 | 7,464 | 11,900 | 41,900 | 0,916 |
| 31 | Dec | 1,548 | 48,000 | 173,361 | 5,592 | 8,200 | 38,200 | 0,934 |
| 365 | Yearly | 45,300 | 1359,000 | 4908,279 | 163,609 | 186,500 | 216,500 | 0,043 |
| - | M_O | 3,775 | 113,250 | 409,023 | 13,634 | 15,542 | 45,542 | 0,897 |

Στην εικόνα 4.11 απεικονίζεται το διάγραμμα των τιμών του πίνακα 4.6 για την ηλιακή ενέργεια, την ενέργεια που αποδίδεται από τα ΦΒ πλαίσια για κάθε μήνα και για κάθε μία μέρα του μήνα, θεωρώντας ότι όλες οι μέρες του μήνα έχουν την ίδια ηλιοφάνεια.



Εικόνα 4.11: Η ΦΒ ενέργεια που παράγεται από το ΦΒ πλαίσια ανάλογο με το ηλιακό δυναμικό κάθε μήνα.

4.3.1.1 Υπολογισμός συνδεσμολογίας φωτοβολταϊκού πεδίου

Για την ορθή λειτουργία του φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και για τη συμβατότητα ανάμεσα στην έξοδο του ΦΒ πεδίου και την είσοδο της επόμενης διάταξης, δηλαδή τους ρυθμιστές φορτίου και τους συσσωρευτές, το μετατροπέα τάσης DC-DC και των αναστροφέα θα πρέπει πρώτα να είναι γνωστή η τάση του ΦΒ πεδίου. Η τάση του ΦΒ πεδίου καθορίζεται από τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά ώστε να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση μίας ΦΒ σειράς. Επίσης, στον πίνακα 4.7 έχουμε διακριτές περιπτώσεις ελέγχου της ονομαστικής τάσης λειτουργίας του ΦΒ πεδίου ανάλογα με τις διατάξεις.

Πίνακας 4.7: Διακριτές περιπτώσεις καθορισμού της ονομαστικής τάσης λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πεδίου, ανάλογα με τις διατάξεις.

| ΦΒ σύστημα με μεικτή συνδεσμολογία συσσωρευτών (σειρά – παράλληλα). Ονομαστική τάση του συστήματος συσσωρευτών = V_B | |
|--|---------------------------|
| Χρήση: ρυθμιστών φορτίου – συσσωρευτών | $V_{NOM(DC)} \geq 1,2V_B$ |
| Χρήση: ρυθμιστών φορτίου – συσσωρευτών, και αναστροφέα τάσεως DC-AC (inverter) | $V_{NOM(DC)} \geq 1,2V_B$ |
| Χρήση: ρυθμιστών φορτίου – συσσωρευτών, και μετατροπέα τάσεως DC-DC (converter) με τάση εισόδου του converter (V_{CONV}) | $V_{NOM(DC)} = V_{CONV}$ |
| Διασυνδεδεμένα ΦΒ συστήματα, ή αυτόνομα χωρίς αποθήκευση σε συσσωρευτές | |
| Χρήση: αναστροφέα τάσης DC-AC (inverter) με τάση εισόδου του inverter V_{INV} | $V_{NOM(DC)} = V_{INV}$ |
| Χρήση: μετατροπέα τάσης DC-DC (converter) με τάση εισόδου του V_{CONV} | $V_{NOM(DC)} = V_{CONV}$ |

Είναι σαφές ότι η ονομαστική τάση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πεδίου δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το επιτρεπόμενο όριο λειτουργίας της εισόδου της επόμενης ηλεκτρικής διάταξης. Για ένα σύστημα που συμπεριλαμβάνει συσσωρευτές, η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πεδίου καθορίζεται από την επιτρεπόμενη τάση του ρυθμιστή φόρτισης.

Για συστήματα τα οποία δεν συμπεριλαμβάνουν συσσωρευτές, δηλαδή είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, η ονομαστική τάση του φωτοβολταϊκού πεδίου θα είναι μεγαλύτερη και δίνεται στον πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8: Τιμές ονομαστικές τάσης εξόδου σε συνδεδεμένο σύστημα ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος.

| Εγκατεστημένη ισχύς ΦΒ πεδίου | Ονομαστική τάση εξόδου DC |
|----------------------------------|--|
| ΦΒ σύστημα έως 3 kWp | $V_{NOM(DC)}$: 100 - 200V |
| ΦΒ σύστημα έως 15 kWp | $V_{NOM(DC)}$: 200 - 400V |
| ΦΒ σύστημα μεγαλύτερο των 15 kWp | $V_{NOM(DC)}$: 400 - 700V (ή / και 1000V) |

Σύμφωνα με τις ανάλογες περιπτώσεις (Lee et al. 2012 και Sun et al. 2019) ένα φωτοβολταϊκό υβριδικό σύστημα σε πλοίο αντιμετωπίζεται όπως ένα σύστημα με συσσωρευτές μη διασυνδεδεμένο στο σύστημα. Έτσι, το πρώτο βήμα είναι η επιλογή ενός ρυθμιστή φόρτισης που να διαθέτει και αλγόριθμο MPPT έτσι ώστε να επιτευχθεί το μέγιστο σημείο ισχύος από την έξοδο του φωτοβολταϊκού πεδίου.

Ο τρόπος σύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων που επιλέχτηκε είναι ο εξής:

Δύο πλαίσια σε σειρά σχηματίζουν μία συστοιχία δηλαδή ($N_S=2$) και οκτώ παράλληλες συστοιχίες, δηλαδή ($N_P=8$). Ο τρόπος σύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων δεν έγινε αυθαίρετα αλλά με βάση την συμβατότητα της σύνδεσης με το ρυθμιστή φορτίου. Έτσι, στον πίνακα 4.9 εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά του ρυθμιστή που επιλέχτηκαν και πρέπει να επαληθευθούν σχετικά με την ορθότητα σύνδεσης του ΦΒ πεδίου.

Πίνακας 4.9: Τα χαρακτηριστικά του επιλεγμένου ρυθμιστή φόρτισης MPPT 150/60.

| Είσοδος ρυθμιστή : (προς τα ΦΒ πλαίσια) | |
|---|-------------------------------------|
| Μέγιστη ΦΒ ισχύς | 1720 W |
| Μέγιστη τάση DC | 150 V_{DC} |
| Βέλτιστο εύρος τάσης αλγορίθμου MPPT | 16,2V / 32,4V / 48,6V / 64,8V / 81V |
| Μέγιστο ρεύμα εισόδου από το ΦΒ πεδίο | 50A |
| Έξοδος ρυθμιστή : (προς τους συσσωρευτές) | |
| Ονομαστική ισχύς DC έως 40°C | 1700W |
| Εύρος ονομαστικής τάσεως | 24V |
| Μέγιστο φόρτισης | 60A |
| Θερμοκρασία εύρους λειτουργίας | -30 °C....+60°C |

Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων που συνδέονται σε σειρά υπολογίζεται από την κατ' επιλογή ονομαστική τιμή του ΦΒ συστήματος $V_{ONOM(DC)}$ προς τη μέγιστη τάση V_{mpp} του ΦΒ πλαισίου από το πίνακα της εικόνας 4.9. Έτσι προκύπτει από την εξίσωση 4.4 :

$$N_s = \frac{V_{ONOM(DC)}}{V_{MP}} = \frac{70 \text{ V}}{32.68 \text{ V}} = 2,14. \text{ Άρα, } N_s = 2 \text{ πλαίσια εν σειρά} \quad (4.4)$$

Η τιμή την ονομαστικής τάσης επιλέχθηκε ανάμεσα από το εύρος τάσεων του ρυθμιστή φόρτισης. Επιπλέον, η ονομαστική τάση είναι μικρότερη από τη μέγιστη τάση του ρυθμιστή φόρτισης. Άλλο ένα χαρακτηριστικό που θα πρέπει να εξεταστεί για την συμβατότητα είναι το μέγιστο ρεύμα από το πλαίσιο (9,71 A) που ταυτίζεται με το ρεύμα μίας βραχυκυκλωμένης συστοιχίας. Το πρώτο θα πρέπει να είναι μικρότερο του ρεύματος στην είσοδο του ρυθμιστή.

Ο αριθμός των παράλληλων συστοιχιών καθορίζεται από τον συνολικό αριθμό των πλαισίων προς τον αριθμό των πλαισίων σε σειρά. Δίνεται από την εξίσωση 4.5:

$$N_p = \frac{N_{\text{πλαίσια}}}{N_s} = \frac{16}{2} = 8 \quad (4.5)$$

Μετά από τον καθορισμό και των παράλληλων συστοιχιών θα πρέπει να εξεταστούν και άλλα χαρακτηριστικά για την συμβατότητα του φωτοβολταϊκού πεδίου με το ρυθμιστή φόρτισης. Οπότε, θα πρέπει να ελεγχθεί αν η τάση του ανοιχτού κυκλώματος της συστοιχίας είναι κάτω από το όριο μέγιστης τάσης εισόδου του ρυθμιστή. Έτσι προκύπτει $V_{OC} = 40,03 \text{ V} \times 2 \text{ πλαίσια σε σειρά} \leq 150 \text{ V}_{DC}$, το οποίο είναι αποδεκτό.

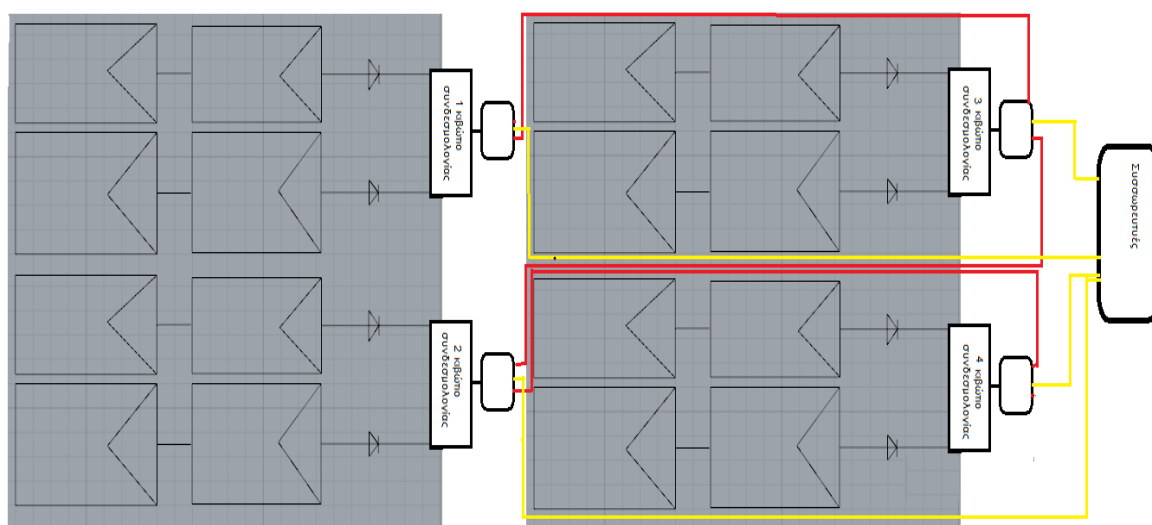
Το ρεύμα που αποδίδεται από κάθε συστοιχία είναι το μέγιστο ρεύμα ενός πλαισίου I_{mpp} και θα πρέπει να είναι μικρότερο από το ρεύμα εισόδου του ρυθμιστή. Έτσι ο συντελεστής ασφάλειας είναι καθορισμένος στο 50%, οπότε $I = 1,5 \times 9,18 \text{ A} = 13,77 \text{ A}$. Είναι προφανές ότι το ρεύμα από την συστοιχία είναι μικρότερο.

Ο έλεγχος της ισχύος που παράγεται από τις δύο ΦΒ συστοιχίες και λαμβάνει ο ρυθμιστής φορτίου υπολογίζεται από $P_{IN} = 2 \times 2 \times 300 = 1200 \text{ W}_p$. Η τιμή είναι αποδεκτή μέσα στο εύρος τιμών του ρυθμιστή.

Μετά από τον έλεγχο της σωστής συνδεσμολογίας μπορούμε να καθορίσουμε τον απαιτούμενο αριθμό ρυθμιστών φορτίου από τη σχέση:

$$N_{PY\theta.} = \frac{8 \text{ ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ}}{2 \text{ ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ/PYΘΜΙΣΤΗ}} = 4 \text{ ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ} \quad (4.6)$$

Ο ρυθμιστής φορτίου SmartSolar MPPT 150/60 έχει λειτουργία σύνδεσης παράλληλα μέχρι και 10 ρυθμιστές. Έτσι οι τέσσερις ρυθμιστές συνδέονται παράλληλα πριν καταλήξουν στους συσσωρευτές.



Εικόνα 4.12: Συνδεσμολογία των φωτοβολταϊκών κλάδων, των ρυθμιστών φόρτισης που καταλήγουν στους συσσωρευτές. Η κόκκινη γραμμή είναι το καλώδιο συνδεσμολογίας τύπου RJ 45 που ενώνει τους ρυθμιστές, η κίτρινη γραμμή είναι το καλώδιο που φεύγει από κάθε φωτοβολταϊκό κλάδο και καταλήγει στους συσσωρευτές.

Οι ρυθμιστές φορτίου συνδέονται με το σύστημα διανομής ενέργειας των μπαταριών για την φόρτιση τους. Επιπλέον, εκτός από την παραπάνω σύνδεση, ο ρυθμιστής φορτίου μπορεί να συνδέεται και με την είσοδο DC του αντιστροφέα εκτός δικτύου για την έγχυση ενέργειας απευθείας στους καταναλωτές. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμιστής φορτίου, το σύστημα διανομής συσσωρευτών και ο μετατροπέας θα έχουν κοινό δίαυλο DC.

4.3.2 Υπολογισμός συστήματος συσσωρευτών για τις ανάγκες της εγκατάστασης

Το σύστημα των συσσωρευτών όπως έχει αναφερθεί στο τρίτο κεφάλαιο είναι από τα σημαντικότερα μέρη που αποτελούν το φωτοβολταϊκό σύστημα για τρεις λόγους. Ο ένας από αυτούς έγκειται στη χρησιμότητα τους για αποθήκευση ενέργειας από το φωτοβολταϊκό πεδίο.

Ο δεύτερος λόγος συνίσταται στη σταθερή διανομή ενέργειας που προσφέρουν οι συσσωρευτές στα φορτία του πλοίου και ο τρίτος λόγος αφορά στην ασφάλεια διανομής τάσης και ρεύματος που προσφέρει το σύστημα συσσωρευτών, όταν το ΦΒ σύστημα είναι συνδεδεμένο στο κύριο δίκτυο του πλοίου.

Επιπλέον, γίνεται επιλογή του τύπου συσσωρευτών με βάση τα βασικά χαρακτηριστικά τους (χωρητικότητα, ονομαστική τάση, ρεύμα και βαθμός εκφόρτισης) τα οποία χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της συνολικής χωρητικότητας. Επίσης, γίνεται καθορισμός της ηλεκτρικής συνδεσμολογίας των συσσωρευτών και τη περιόδου αυτονομίας, με σκοπό την δημιουργία ενός συστήματος το οποίο τροφοδοτεί τα φορτία.

4.3.2.1 Καθορισμός της ονομαστικής τάσης του συστήματος των συσσωρευτών

Ένας τρόπος εύρεσης ενδεικτικής ονομαστικής τάσης των συσσωρευτών προκύπτει σύμφωνα με την ισχύ αιχμής του φωτοβολταϊκού πεδίου, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.10. Για την επιλογή του ρυθμιστή φόρτισης, η τάση εξόδου θα πρέπει να είναι συμβατή με την τάση εισόδου των συσσωρευτών. Έτσι, από τον πίνακα 4.9 έχουμε τάση εξόδου ρυθμιστή 24V. Αυτή η τιμή καθορίζει και την τάση στο σύστημα των συσσωρευτών. Αν αυτή η τιμή δεν ήταν συμβατή, τότε θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί μετατροπέας τάσης DC-DC, χρήση που δε θεωρείται συμφέρουσα, γιατί αυξάνει την ηλεκτρική απώλεια και το κόστος.

Πίνακας 4.10: Η ισχύς αιχμής του φωτοβολταϊκού πεδίου και αντίστοιχα οι ενδεικτικές τιμές τάσης του συστήματος των συσσωρευτών.

| Ισχύς αιχμής Pa | Ονομαστική τάση συστήματος συσσωρευτών V _B |
|-----------------|---|
| 0-3 kWp | 12 V |
| 3-10 kWp | 24-48 V |
| 10-15 kWp | 48-60 V |
| >15 kWp | >48 V |

4.3.2.2 Καθορισμός της χωρητικότητας του συστήματος των συσσωρευτών

Για τον καθορισμό της χωρητικότητας του συστήματος των συσσωρευτών θα πρέπει να οριστούν οι ημέρες αυτοδυναμίας του συστήματος, η ονομαστική τάση που λειτουργεί το σύστημα συσσωρευτών και ο βαθμός εκφόρτισης. Η ονομαστική τάση και ο βαθμός εκφόρτισης αναγράφονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του επιλεγόμενου συσσωρευτή.

Τα δεδομένα αυτά παρέχουν την δυνατότητα υπολογισμού της χωρητικότητας C (Ah) του συστήματος (Δέρβος, 2013). Η ονομαστική χωρητικότητα αποδίδεται από την εξίσωση 4.7.

$$C [Ah] = \sigma_{YM} \frac{E_T \left[\frac{Wh}{d} \right] \times (n \times l_D)}{\sigma_{\Gamma\Sigma} \times DOD \times V_B [V] \times \sigma_{MHE}} \quad (4.7)$$

Από την εξίσωση 4.7 προκύπτει η τιμή της χωρητικότητας του συστήματος των συσσωρευτών που αναγράφεται στον πίνακα 4.11:

Πίνακας 4.11: Η ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών σε Ah.

| Προσδιορισμός χωρητικότητας των συσσωρευτών | | |
|---|----------|--------|
| Ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες, E_T | 14448 | Wh/day |
| Ονομαστική τάση συστήματος συσσωρευτών V_B | 24 | V |
| Ημέρες αυτοδυναμίας n | 1 | |
| Αποδεκτό μέγιστος βαθμός εκφόρτισης συσσωρευτών DOD | 0,6 | |
| Ημερήσιο ποσοστό τροφοδοσίας φορτίων από τους συσσωρευτές I_D | 1 | |
| Συντελεστής υπερεκτίμησης μελέτης σ_YM | 0,9 | |
| Συντελεστής μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σ_MHE | 0,91 | |
| Συντελεστής γύρασης των συσσωρευτών σ_ΓΣ | 0,8 | |
| Χωρητικότητα των συσσωρευτών C | 2480,769 | Ah |

όπου,

E_T: η ημερήσια ενέργεια των καταναλωτών που τροφοδοτεί το φωτοβολταϊκό πεδίο. Οι καταναλωτές που λαμβάνονται υπόψη είναι τα φώτα του πλοίου και το σύστημα GPS συνολικής ισχύς 2,035 KW.

n: είναι οι ημέρες αυτοδυναμίας του συστήματος των συσσωρευτών που μπορούν να ανταπεξέλθουν.

DOD: ο μέγιστος βαθμός εκφόρτισης που έχει ληφθεί από τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή που έχει επιλεγεί για τις ανάγκες της μελέτης.

σ_{YM}: ο συντελεστής υπερεκτίμησης μελέτης λαμβάνεται υπόψη για πιθανόν λανθασμένες τιμές των αρχικών δεδομένων και συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς για την αύξηση των ημερών αυτονομίας. Το ποσοστό ασφαλείας που έχει ληφθεί είναι 20%.

L_D : ο συντελεστής παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1.0. Λαμβάνεται ως 0, όταν το φωτοβολταϊκό πεδίο τροφοδοτεί κατευθείαν τα φορτία, ενώ 1 όταν το σύστημα των συσσωρευτών τροφοδοτεί όλους τους καταναλωτές.

σ_{TS} : είναι ο συντελεστής γήρανσης του συσσωρευτή κατά την διάρκεια λειτουργίας στη διάρκεια ζωής του.

σ_{MHE} : είναι ο συντελεστής απωλειών της ενέργειας που κυκλοφορεί στα καλώδια. Για εγκαταστάσεις με αναστροφέα οι τιμές που λαμβάνονται είναι 0,9 - 0,92.

4.3.2.3 Οι επιλεγμένοι συσσωρευτές και η συνδεσμολογία του συστήματος

Όπως προκύπτει από τους παραπάνω υπολογισμούς, η χωρητικότητα του συστήματος των συσσωρευτών είναι $C = 2480.769$ Ah. Οι συσσωρευτές είναι της εταιρίας KILOVAULT, ειδική στην χρήση φωτοβολταϊκών εφαρμογών. Τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή που επιλέχθηκε αναγράφονται στο πίνακα 4.12.

Πίνακας 4.12: Τα δεδομένα του συγκεκριμένου συσσωρευτή για την μελέτη.
Πηγή: <https://www.altestore.com/store/>

| Τύπος συσσωρευτή | φωσφορικού σιδήρου λιθίου LiFePO ₄ |
|---|---|
| Ονομαστική τάση συσσωρευτή | 12 V DC |
| Ονομαστική χωρητικότητα (Ah) στους 25°C | 300 Ah |
| Ονομαστική ενέργεια απόδοσης σε (wh) | 3600 wh |
| κύκλος λειτουργίας | 5000 (80% DoD); 2000 (100% DoD) |
| Τάση λειτουργίας κελίου | 4,2 έως 2,5 V |
| Μήκος | 508 mm |
| Πλάτος | 221 mm |
| Υψος | 270 mm |
| Βάρος | 38 kg |

Για την επίτευξη της τάσης λειτουργίας των συσσωρευτών στα 24V θα πρέπει να συνδέονται ανά δύο σε σειρά. Άρα $N_S=2$ και τάση κάθε συστοιχίας $V_B = 2 \times 12V = 24V$. Κατά μήκος μίας συστοιχίας συσσωρευτών το ρεύμα και η χωρητικότητα παραμένουν σταθερά.

Η παράλληλη συνδεσμολογία των συσσωρευτών καθορίζει τη χωρητικότητα του συστήματος έτσι ώστε αυτή να φτάσει στο επιθυμητό αριθμό που έχει υπολογιστεί από

την εξίσωση 4.7. Επιπλέον, το ρεύμα και η χωρητικότητα θα πρέπει να είναι ίσα με το άθροισμα των παράλληλων συστοιχιών.

Δηλαδή, $C_{ολικό} = N_p \times C_{συστοιχίας}$, και $I_{ολικό} = N_p \times I_{συστοιχίας}$

Άρα,

$$N_p = 2480.769 \text{ [Ah]} / 300 \text{ [Ah]} = 8,27 = 9 \text{ συσσωρευτές παράλληλα.}$$

Ο συνολικός αριθμός για το σύστημα θα είναι $N_{συνολικό} = N_s \times N_p = 2 \times 9 = 18$ συσσωρευτές.

Η συνολική ενέργεια που δίνει το σύστημα των συσσωρευτών είναι 64,8 KWh.

4.3.3 Επιλογή αντιστροφών DC-AC εκτός δικτύου / συνδεδεμένο στο δίκτυο

Ο υβριδικός αντιστροφέας μετατρέπει το συνεχές ρεύμα DC σε εναλλασσόμενο AC και μπορεί να λειτουργεί παράλληλα για πολλές εφαρμογές. Μία σημαντική λειτουργία του υβριδικού αντιστροφέα DC-AC είναι ότι μπορεί να παρέχει ενέργεια και από μία εφεδρική πηγή όπως οι συσσωρευτές που φορτίζονται από το ΦΒ πεδίο. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να παρέχει παράλληλα ενέργεια και στα φορτία αλλά και στο δίκτυο. Η επιλογή γίνεται με διακόπτη εναλλαγής κατάστασης λειτουργίας, όταν για παράδειγμα τους καλοκαιρινούς μήνες που η ενέργεια που παράγεται από το ΦΒ πεδίο είναι μεγάλη και οι συσσωρευτές αποθηκεύουν περισσότερη ενέργεια, τότε ο αντιστροφέας DC-AC μπορεί να διανέμει ενέργεια και στον πίνακα φωτισμού αλλά και στο σύστημα διανομής του πλοίου για την κάλυψη μεγαλύτερων φορτίων. Με άλλα λόγια, ο αναστροφέας DC-AC έχει την λειτουργία του αυτόνομου συστήματος και του διασυνδεδεμένου στο δίκτυο. Επιπλέον ο υβριδικός αντιστροφέας έχει την ικανότητα να λειτουργεί και ως φορτιστής συσσωρευτών αντλώντας εναλλασσόμενο ρεύμα από το ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος. Τα χαρακτηριστικά του υβριδικού αντιστροφέα αναγράφονται στο πίνακα 4.13.

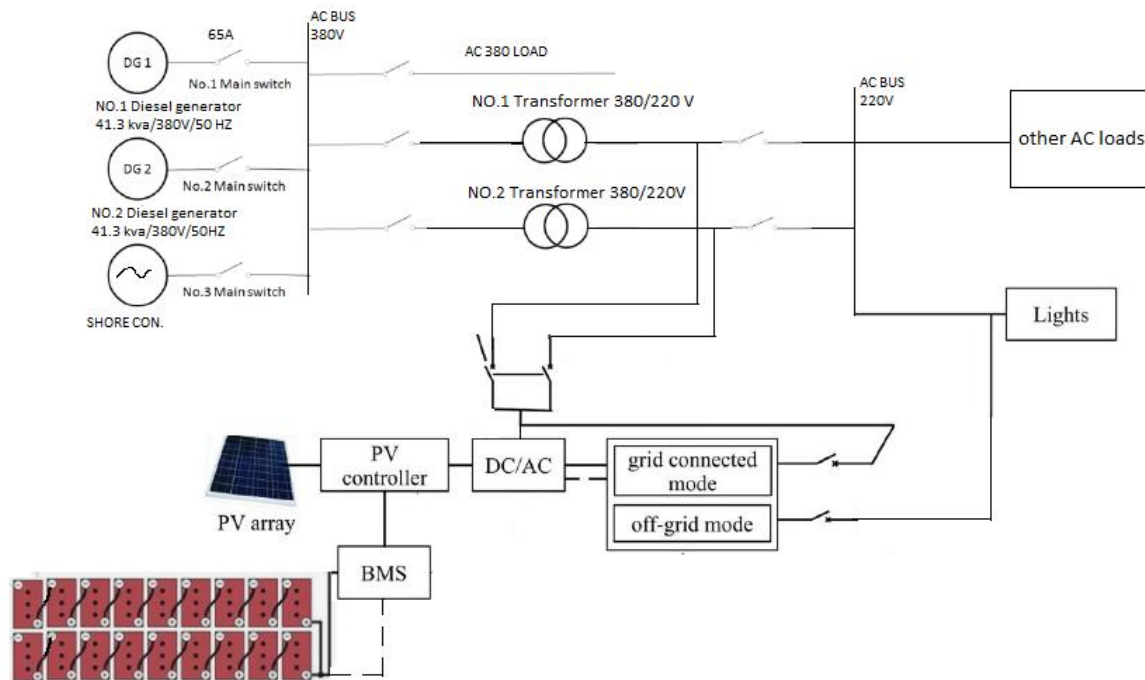
Πίνακας 4.13: Τα χαρακτηριστικά του αντιστροφέα εκτός δικτύου

| On/Off Grid Hybrid Solar Inverter | |
|--|--------------------------|
| Έξοδος AC (φορτίο -κατανάλωσης AC) | |
| Όνομαστική τάση (ρυθμιζόμενη) | 220VAC-240VAC(setting) |
| Συχνότητα δικτύου AC (ριθμιζόμενη) | 50Hz/60Hz (Auto Sensing) |
| Συνεχής ισχύς AC στους 25°C | 2-5,5 KW |
| Όνομαστικό ρεύμα AC | 25,9 A |
| Συντελεστής παραμόρφωσης τάσης εξόδου | 95% |
| Είσοδος AC (από γεννήτρια ή δίκτυο) | |
| Τάση εισόδου AC (εύρος) | 230V (187-265 VAC) |
| Συχνότητα εισόδου AC (εύρος) | 50Hz (40Hz - 70 Hz) |
| Μέγ. Ρεύμα εισόδου | 50A |
| Είσοδος DC (από συσσωρευτές) | |
| Τάση συσσωρευτή (εύρος) | 24V (16,8V - 31,5V) |
| Μέγιστο ρεύμα φόρτισης συσσωρευτών / ρεύμα διαρκούς φόρτισης | 60/60 |
| Τύπος συσσωρευτή / χωρητικότητα συσσωρευτή (εύρος) | LiFePO4/300Ah |
| Συντελεστής απόδοσης | 95% |

4.3.3.1 Τοπολογία σχεδιασμού συστήματος

Το διάγραμμα του υβριδικού τύπου φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο συνδέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου και στους καταναλωτές (φωτισμός), φαίνεται στην εικόνα 4.13. Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από 16 φωτοβολταϊκά πλαίσια, 4 ελεγκτές φορτίου, 18 συσσωρευτές φωσφορικού σιδήρου λιθίου, BMS, on/off δικτύου αντιστροφέα, πίνακα AC διανομής και σύστημα διαχείρισης ηλιακής ενέργειας. Οι κύριες λειτουργίες αυτών των συσκευών ορίζονται ως εξής: Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε συνεχές ρεύμα και την εξάγουν στον ελεγκτή- (controller). Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ισχύος του ΦΒ πεδίου, ο φωτοβολταϊκός ελεγκτής (PV controller) έχει τη λειτουργία πολλαπλασιασμού που παρέχει το μέγιστο έλεγχο παρακολούθησης ισχύος (maximum power point tracking -MPPT) και τον έλεγχο τάσης και ρεύματος εξόδου. Επιπλέον, οι ακροδέκτες εξόδου του ελεγκτή συνδέονται με τον ακροδέκτη εισόδου του BMS και του αντιστροφέα DC-AC, που σημαίνει ότι αυτά τα τρία στοιχεία έχουν κοινό δίαυλο DC. Το BMS έχει τις δυνατότητες προστασίας έναντι υπερφόρτισης και εκφόρτισης, οι οποίες είναι απαραίτητες για την κανονική λειτουργία των συσσωρευτών φωσφορικού σιδήρου λιθίου. Το BMS μπορεί να αλλάξει δυναμικά την κατάσταση φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας και να επιτύχει τη δυναμική ισορροπία της φωτοβολταϊκής ενέργειας μεταξύ του ακροδέκτη DC και AC. Η διαδικασία μετασχηματισμού συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα πραγματοποιείται από μετατροπέα, ο οποίος έχει επίσης

λειτουργίες προστασίας κυκλώματος από αντίστροφη σύνδεση, βραχυκύκλωμα, αντίστροφη ισχύ, υπερθέρμανση και υπερφόρτωση. Η ονομαστική τάση και η συχνότητα του αντιστροφέα (AC-DC) ορίζονται στα 220Vac / 50 Hz. Κατά τη λειτουργία αυτόνομου συστήματος η ενέργεια από τον αντιστροφέα καταλήγει στο πίνακα φωτισμού, ενώ όταν έχουμε περίσσεια ενέργειας ενέργεια καταλήγει στο σύστημα διανομής ισχύος του πλοίου AC 220V.



Εικόνα 4.13: Προτεινόμενος τρόπος σύνδεσης του υβριδικού ΦΒ συστήματος στο πίνακα φωτισμού και στο δίαυλό AC 220V διανομής του πλοίου.

Λειτουργία τροφοδοσίας δικτύου του πλοίου με ανεπαρκή απόδοση ηλιακής ενέργειας:

Όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα αντιμετωπίζει μια απότομη πτώση της ισχύος εξόδου και η ενέργεια της μπαταρίας δεν επαρκεί για την υποστήριξη του φορτίου, ενεργοποιείται η εφεδρική ισχύς παράκαμψης και έτσι, η αρχική ηλεκτρική ισχύς του πλοίου χρησιμοποιείται για την παροχή ενέργειας στο φορτίο φωτισμού.

Λειτουργία τροφοδοσίας δικτύου του πλοίου σε κατάσταση βλάβης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος:

Σε αυτήν την κατάσταση, ένας μονοπολικός διακόπτης διπλής ρίψης μεταβαίνει στο αρχικό ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου, το οποίο παρέχει ενέργεια στο φορτίο φωτισμού.

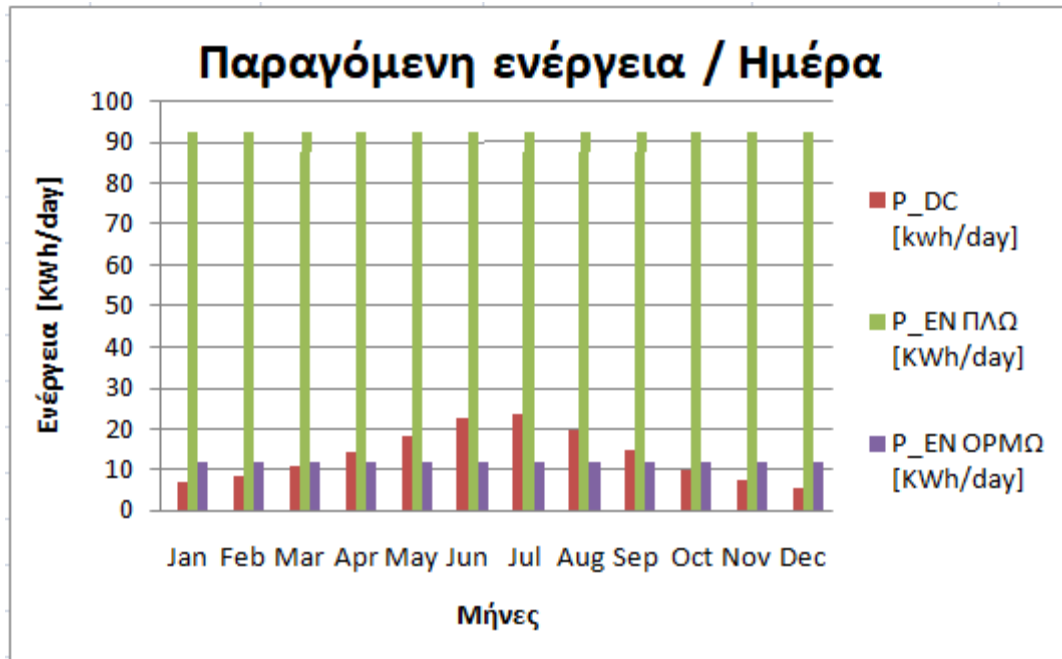
4.4 Εξοικονόμηση από την παράλληλη λειτουργία του υβριδικού συστήματος

Από την περιγραφή των ωρών ταξιδιού του παρόντος πλοίου που υπολογίστηκαν στην ενότητα 4.1.2 αυτού του κεφαλαίου, προέκυψε ότι το πλοίο αυτό σε μία ημέρα λειτουργεί συνολικά 7 ώρες και 10 λεπτά. Αυτό το στοιχείο είναι χρήσιμο για να υπολογιστεί, στη συνέχεια, η αρχική κατανάλωση καυσίμου που γίνεται από το ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος έτσι ώστε να καλύψει τις απαιτούμενες ανάγκες του πλοίου. Επιπλέον, θα πρέπει να οριστούν και οι ώρες ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται το ΦΒ πεδίο. Μια τυπική τιμή που ορίζεται είναι οι 6 ώρες ανοιγμένης ηλιακής ακτινοβολίας, αν θεωρήσουμε ότι το καλοκαίρι ο μέσος όρος των ανοιγμένων ωρών είναι 7,5 h και το χειμώνα 4,5 h. Στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη, οι ώρες ανοιγμένης ηλιακής ακτινοβολίας έχουν υπολογιστεί για κάθε μήνα από το πρόγραμμα που υπολογίζεται το ηλιακό δυναμικό.

Στο πίνακα 4.14 παρουσιάζονται τα δεδομένα της ΦΒ ενέργειας που παράγεται σε όλη την διάρκεια του έτους για κάθε μήνα και την ενέργεια που χρειάζεται το πλοίο στην κατάσταση εν πλω και εν όρμω, $P_{ολ}$. Επιπλέον, στην τελευταία στήλη φαίνεται η ενέργεια που μπορεί να καλύψει το φωτοβολταϊκό σύστημα.

Πίνακας 4. 14: Η ενέργεια που καλύπτει το ΦΒ σύστημα κατά την διάρκεια όλου του χρόνου σε KW/h.

| Μήνες | P_DC [kwh/month] | P_ολ [KWh/month] | E= P_ολ- P_DC [KWh/month] |
|--------|------------------|------------------|---------------------------|
| Jan | 198,643 | 3137,91 | 2939,267 |
| Feb | 227,536 | 3137,91 | 2910,374 |
| Mar | 335,887 | 3137,91 | 2802,023 |
| Apr | 426,179 | 3137,91 | 2711,731 |
| May | 559,811 | 3137,91 | 2578,099 |
| Jun | 671,773 | 3137,91 | 2466,137 |
| Jul | 733,172 | 3137,91 | 2404,738 |
| Aug | 606,763 | 3137,91 | 2531,147 |
| Sep | 444,237 | 3137,91 | 2693,673 |
| Oct | 303,381 | 3137,91 | 2834,529 |
| Nov | 223,924 | 3137,91 | 2913,986 |
| Dec | 173,361 | 3137,91 | 2964,549 |
| Yearly | 4908,279 | 37654,92 | 32746,641 |
| M_O | 409,023 | 3137,91 | 2728,887 |



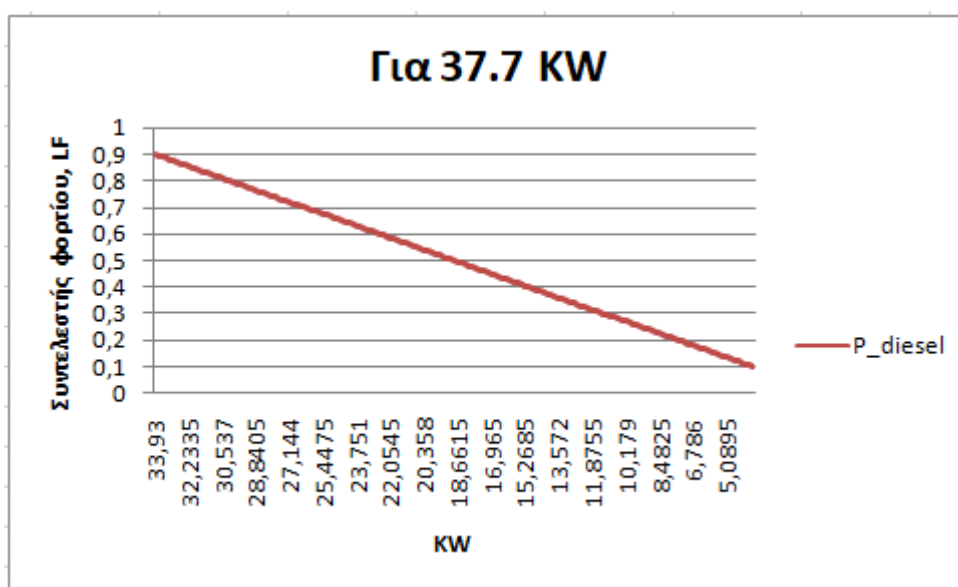
Εικόνα 4.14: Διάγραμμα απεικόνισης του ηλεκτρικού φορτίου του πλοίο στις δύο καταστάσεις λειτουργίας και η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει το ΦΒ σύστημα.

4.4.1 Η βοηθητική γεννήτρια ντίζελ και η ενέργεια που παράγει για να καλύψει τα φορτία του πλοίου

Στο πλοίο ο όρος βοηθητικά μηχανήματα αναφέρεται γενικά σε όλα τα άλλα μηχανήματα εκτός από τα μηχανήματα πρόωσης (Woodyard, 2009). Αυτά περιλαμβάνουν βοηθητικές γεννήτριες ντίζελ, αεροσυμπιεστές, καθαριστές, γεννήτριες γλυκού νερού, λέβητες κ.λπ. Ωστόσο, οι βοηθητικοί κινητήρες ντίζελ που είναι εγκατεστημένοι στο μηχανοστάσιο του πλοίου με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος αναφέρονται αποκλειστικά σε ηλεκτρικά σετ ηλεκτροπαραγωγής που έχουν κινητήρες ντίζελ ως πρωταρχική πηγή ενέργειας. Παρόλο που υπάρχουν πολλές διαμορφώσεις μηχανημάτων που είναι ικανές να παράγουν ηλεκτρική ισχύ στο πλοίο, όπως γεννήτριες στροβιλοκινητήρα και γεννήτριες άξονα, αυτά τα συστήματα συμπληρώνουν μόνο τα σετ ηλεκτροπαραγωγής ντίζελ ως την κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κινητήρες ντίζελ χρησιμοποιούνται πάντοτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία λόγω της απλότητας, της αξιοπιστίας και της υψηλότερης θερμικής απόδοσης. Υπάρχουν μόνο δύο τύποι κινητήρων ανάφλεξης με συμπίεση που χρησιμοποιούνται σε πλοία είτε για πρόωση είτε για παραγωγή ισχύος. Αυτοί είναι οι

δύχρονου και τετράχρονου κινητήρες με τη διαφορά μεταξύ τους να είναι στο πώς αναπτύσσεται η ισχύς κατά τη διάρκεια του κύκλου.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, για την κάλυψη του φορτίου του πλοίου χρησιμοποιείται μία ηλεκτρογεννήτρια ντίζελ 37,7 KW και μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική AC 33 KW. Από την μετατροπή της μηχανικής σε ηλεκτρική προκύπτει απώλεια 0,2% .



Εικόνα 4.15: Διάγραμμα της ντίζελ γεννήτριας με ονομαστική ισχύ εξόδου 37,7 και η ισχύς που παράγει ανάλογα με το συντελεστή φορτίου.

Σε αυτό το σημείο θα υπολογιστεί η ενέργεια που παράγεται από την ηλεκτρογεννήτρια για να μπορεί να καλύψει της ανάγκες του υπό εξέταση πλοίου ανά πάσα στιγμή. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες από μηχανική σε ηλεκτρική ενέργεια.

Από την τρίτη μελέτη IMO (2014,) για βοηθητικές μηχανές, η εξίσωση 4.8 δίνεται για τον υπολογισμό την ισχύος της ντίζελ γεννήτριας που απαιτείται να παράγεται στις περιπτώσεις που το πλοίο είναι εν πλω και εν όρμω.

$$P_{DG} = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^{t=k} P_{rated} \times LF_t \quad (4.8)$$

Όπου, P_{DG} είναι η ισχύς ενός βοηθητικού κινητήρα σε λειτουργία που αντιστοιχεί στην ονομαστική ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου του πλοίου, P_{rated} είναι η ονομαστική ισχύς των βοηθητικών κινητήρων, LF_t είναι ο συντελεστής λειτουργίας στο χρόνο (t) και n είναι ο αριθμός των βοηθητικών κινητήρων που λειτουργούν. Το διάστημα $t = 0$ έως $t = k$ είναι η περίοδος κατά την οποία υπάρχει αυτή η κατάσταση φόρτισης.

Ο συντελεστής φορτίου LF_t της ντίζελ γεννήτριας όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλω είναι 0,50 , ενώ όταν είναι εν όρμω είναι 0,4.

Για τις 6 ώρες λειτουργίας του πλοίου εν πλω η ντίζελ γεννήτρια παράγει ενέργεια 117,624 KWh, ενώ όταν βρίσκεται στο λιμάνι για 1 ώρα και 10 λεπτά για να καλύψει τις ανάγκες του πλοίου παράγει 16,588 KWh.

4.4.2 Το ηλεκτρικό φορτίο του αρχικού κινητήρα ντίζελ μαζί με το υβριδικό

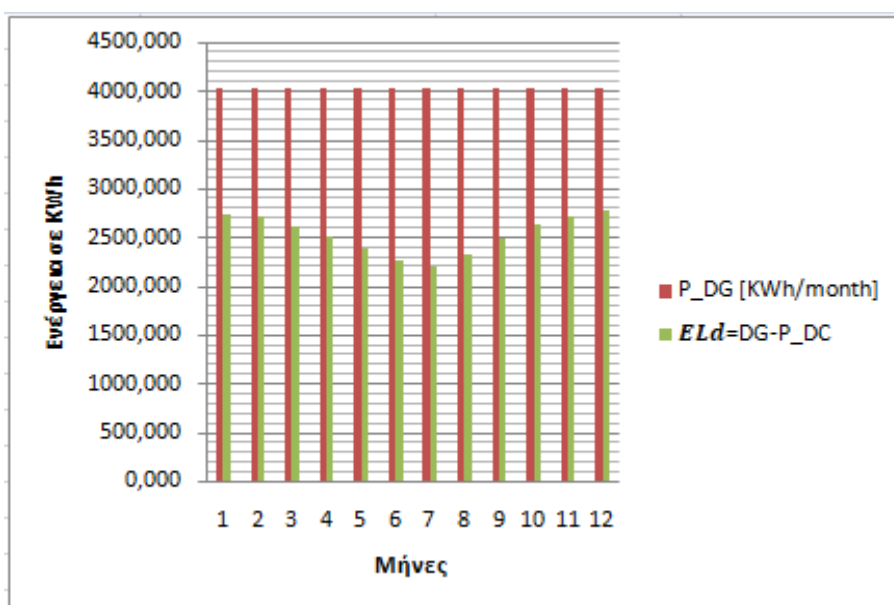
Αυτή η έρευνα δεν θεωρεί το ηλιακό φωτοβολταϊκό σύστημα στο πλοίο ως την κύρια πηγή ισχύος για την τροφοδοσία ηλεκτρικού φορτίου σε αυτό. Βάσει της έρευνας, η εφαρμογή του φωτοβολταϊκού συστήματος αποτελεί επιπλέον παροχή ενέργειας με τον βοηθητικό κινητήρα ντίζελ ως η κύρια πηγή ισχύος. Το ηλεκτρικό φορτίο του βοηθητικού πετρελαιοκινητήρα μαζί με το φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να προσδιοριστεί από την παρακάτω εξίσωση 4.9:

$$ELd_h = P_{DG} - P_{DC} \quad (4.9)$$

Όπου, ELd_h είναι το ηλεκτρικό φορτίο της ηλεκτρογεννήτριας όταν το ηλιακό φωτοβολταϊκό σύστημα τροφοδοτεί το σύστημα με ηλεκτρικό φορτίο P_{DC} . Πρέπει να σημειωθεί ότι το P_{DC} είναι διαθέσιμο τις ώρες αιχμής της ηλιακής ακτινοβολίας.

Πίνακας 4.15: Η μείωση του ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει ο κινητήρας του πλοίου όταν διοχετεύεται και η φωτοβολταϊκή ενέργεια.

| MONTH | PV array | | Generator Diesel | | DAY | MONTH |
|--------|----------------|------------------|------------------|------------------|---------------|-------------|
| | P_DC [kwh/day] | P_DC [kwh/month] | P_DG [Kwh/day] | P_DG [KWh/month] | ELd=P_DG-P_DC | ELd=DG-P_DC |
| Jan | 6,621 | 198,643 | 134,212 | 4026,360 | 91,281 | 2738,417 |
| Feb | 8,126 | 227,536 | 134,212 | 4026,360 | 89,776 | 2709,524 |
| Mar | 10,835 | 335,887 | 134,212 | 4026,360 | 87,067 | 2601,173 |
| Apr | 14,206 | 426,179 | 134,212 | 4026,360 | 83,696 | 2510,881 |
| May | 18,058 | 559,811 | 134,212 | 4026,360 | 79,844 | 2377,249 |
| Jun | 22,392 | 671,773 | 134,212 | 4026,360 | 75,510 | 2265,287 |
| Jul | 23,651 | 733,172 | 134,212 | 4026,360 | 74,251 | 2203,888 |
| Aug | 19,573 | 606,763 | 134,212 | 4026,360 | 78,329 | 2330,297 |
| Sep | 14,808 | 444,237 | 134,212 | 4026,360 | 83,094 | 2492,823 |
| Oct | 9,786 | 303,381 | 134,212 | 4026,360 | 88,116 | 2633,679 |
| Nov | 7,464 | 223,924 | 134,212 | 4026,360 | 90,438 | 2713,136 |
| Dec | 5,592 | 173,361 | 134,212 | 4026,360 | 92,310 | 2763,699 |
| Yearly | 163,609 | 4908,279 | 1610,544 | 48316,320 | 1011,215 | 30336,441 |
| M_0 | 13,634 | 409,023 | 134,212 | 4026,360 | 84,268 | 2528,037 |



Εικόνα 4.16: Το διάγραμμα με την ενέργεια που παράγει ο κινητήρας του πλοίου και η μείωση του όταν λειτουργεί το υβριδικό σύστημα.

4.5 Κατανάλωση καυσίμου της βοηθητικής γεννήτριας ντίζελ

Το βασικό ζητούμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνηθεί εάν η εγκατάσταση του συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού συστήματος επιφέρει μείωση της κατανάλωσης καυσίμου της βοηθητικής γεννήτριας ντίζελ.

Αρχικά θα πρέπει να υπολογιστεί η κατανάλωση καυσίμου που παράγεται από την ηλεκτρογεννήτρια ντίζελ στις ώρες λειτουργίας του πλοίου έτσι ώστε να καλύπτει τα φορτία του.

Από την εξίσωση 4.10 υπολογίζουμε την κατανάλωση καυσίμου Q_t (σε τόνους ανά έτος).

$$Q_t = bsfc \times P_{rated} \times LF \times h \text{ (τόνοι)} \quad (4.10)$$

Στη σχέση 4.10, το $bsfc$ είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου σε (g/KWh), P_{rated} είναι η ονομαστική ισχύς της ηλεκτρογεννήτριας ντίζελ σε (KW), LF είναι ο συντελεστής λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας ντίζελ και h οι ώρες λειτουργίας.

Η κατανάλωση καυσίμου θα υπολογιστεί αρχικά για χρονικό διάστημα ενός έτους και στην συνέχεια για 20 χρόνια λειτουργίας, που είναι η εκτιμώμενη χρονική περίοδος λειτουργίας του ΦΒ συστήματος πάνω στο πλοίο.

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου, αρχικά, θα πρέπει να βρεθεί η ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα. Η έλλειψη ικανών στοιχείων για την ηλεκτρογεννήτρια ντίζελ του πλοίου, για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας επιλέχθηκε μια ηλεκτρογεννήτρια ντίζελ με τα ίδια χαρακτηριστικά έτσι ώστε να γίνουν οι απαιτούμενοι υπολογισμοί. Η ηλεκτρογεννήτριας ντίζελ είναι της εταιρίας YANMAR σειράς YH μοντέλο, 4TNV98T-GGEH.

Η ογκομετρική παροχή καυσίμου του κινητήρα σε φορτίο 75% είναι $V_{FUEL}=7,58$ L/h. Άρα για φορτίο 50% και για 40% αντίστοιχα είναι 5,260 L/h και 4,042 L/h.

Από την σχέση 4.11 υπολογίζεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου:

$$bsfc = \frac{\dot{m}_{fuel} \times 1000}{P_{mech}} \text{ (g/kwh)} \quad (4.11)$$

\dot{m}_{fuel} : η παροχή μάζας του καυσίμου σε kg/h

P_{mech} : η μηχανική ισχύς του κινητήρα σε KW

Η παροχή μάζας καυσίμου είναι άγνωστη, ωστόσο αν γνωρίζουμε την πυκνότητα του καυσίμου μπορούμε να την υπολογίσουμε. Η πυκνότητα καυσίμου για το ελαφρύ ναυτικό πετρέλαιο (marine diesel oil) ισούται με $\rho_{\text{diesel}} = 840 \text{ kg/m}^3$. Έτσι από την σχέση 4.12 η παροχή μάζας καυσίμου είναι :

$$m_{\text{fuel}} = \rho_{\text{diesel}} \times V_{\text{fuel}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \quad (4.12)$$

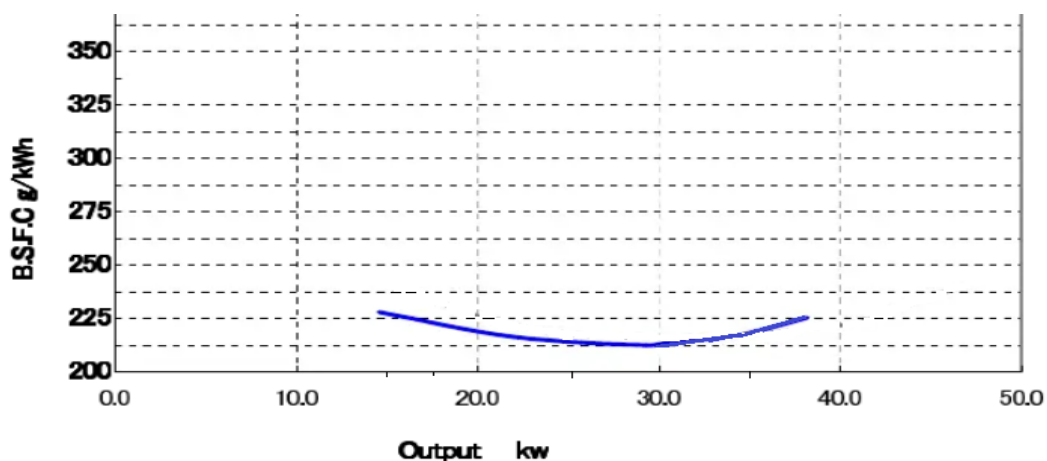
Το V_{fuel} από L/h το μετατρέπουμε σε m^3/h διαιρώντας δια 1000.

Η μηχανική ισχύς υπολογίζεται από το φορτίο της μηχανής επί την ονομαστική ισχύ του κινητήρα.

Άρα από την σχέση 4.12 και 4.11 προκύπτει η ειδική κατανάλωση καυσίμου που απεικονίζεται στον πίνακα 4.16.

Πίνακας 4.16: Η ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου.

| Συντελεστής φορτίου | 0,5 | 0,4 | |
|----------------------|---------|---------|-----------------------|
| ρ_{fuel} | 840 | | kg/m^3 |
| V_{fuel} | 5,26 | 4,042 | L/h |
| | 0,00526 | 0,00402 | m^3/h |
| m_{fuel} | 4,42 | 3,38 | kg/h |
| P_{Mech} | 19,604 | 15,04 | kw |
| bsfc | 217,5 | 225 | g/kwh |



Εικόνα 4.17: Διάγραμμα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου ανάλογα με την παρεχόμενη ισχύ του κινητήρα. Πηγή: YANMAR, 2005.

Από την σχέση 4.10 η κατανάλωση καυσίμου που προκύπτει φαίνεται στο πίνακα 4.17

Πίνακας 4.17: Κατανάλωση καυσίμου της γεννήτριας ντίζελ για της δύο καταστάσεις λειτουργίας σε ένα χρόνο.

| Στοιχεία | Αρχική κατανάλωση | |
|-----------------|-------------------|---------|
| | EN ΠΛΩ | EN ΟΡΜΩ |
| bsfc [g/KWh] | 217,05 | 225 |
| P_dc [KW] | 37,7 | 37,7 |
| LF | 0,5 | 0,4 |
| h | 2160 | 396 |
| Q_t [tons/year] | 9,19 | 1,34 |
| Συνολικό | 10,535 | |

Η κατανάλωση καυσίμου με την χρήση του φωτοβολταϊκού συστήματος υπολογίζεται από την σχέση 4.13

$$Q_h = Q_t - P_{dc} \times bsfc \times h \quad (4.13)$$

P_{dc} : η ισχύς από το φωτοβολταϊκό σύστημα σε KW,

bsfc: η ειδική κατανάλωση καυσίμου σε g/KWh,

h : οι ώρες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος,

Με τη χρήση των φωτοβολταϊκών όταν, λειτουργούν στην κατάσταση εν πλώ του πλοίου για να καλύψουν τους καταναλωτές 2,035 KW, η συνολική ισχύς του πλοίου μειώνεται στο 13,405 KW, αντίστοιχα για την κατάσταση που το πλοίο βρίσκεται εν όρμω μειώνεται στο 8,835 KW. Επίσης, η ντίζελ γεννήτρια τώρα θα λειτουργεί σε φορτίο 0,45 εν πλώ και 0,35 εν όρμω. Η αντίστοιχη ειδική κατανάλωση καυσίμου θα είναι 223,5 g/KWh και 228,0 g/KWh, σύμφωνα με το διάγραμμα στην εικόνα 4.17.

Από την εξίσωση 4.13, τα αποτελέσματα του αρνητικού μέλους της, $Q = P_{dc} \times bsfc \times h$ φαίνονται στο πίνακα 4.18

Πίνακας 4.18: Το αποτέλεσμα από το αρνητικό μέλος της εξίσωσης 4.13 που αφορά τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος.

| Στοιχεία | Με το ΦΒ σύστημα | |
|-----------------|------------------|---------|
| | ΕΝ ΠΛΩ | ΕΝ ΟΡΜΩ |
| bsfc [kg/KWh] | 223,5 | 228 |
| P_dc [KW] | 4,8 | 4,8 |
| h | 2160 | 396 |
| Q [tons/year] | 2,317248 | 0,722 |
| Συνολικό | 3,039 | |

Άρα, από την σχέση 4.13 έχουμε $Q_h = Q_t - Q = 10,535 - 3,039 = 7.496$ tons/year

Για τα 20 χρόνια λειτουργίας των φωτοβολταϊκών από την αρχική κατανάλωση που είναι 210,7 τόνους θα μειωθεί στους 149,9 τόνους που σημαίνει ότι έχουμε 60,7 τόνους εξοικονόμηση καυσίμου.

4.6 Εκπομπές ρύπων από την βοηθητική γεννήτρια ντίζελ

4.6.1 Όρια συντελεστών εκπομπών ρύπων για ναυτικούς κινητήρες

Στις 6 Μαΐου 2008, η αμερικάνικη επιτροπή (US EPA) δημοσίευσε τον τελικό κανόνα «40 CFR Parts 9, 85», για κινητήρες πλοίων μικρότερους από 30 λίτρα ανά κύλινδρο. Αυτός ο κανονισμός ρυθμίζει, μεταξύ άλλων, τις οριακές τιμές εκπομπών για κινητήρες πλοίων που λειτουργούν σε εμπορικά και σκάφη αναψυχής (Nitsche & Slama, 2011). Ο κανονισμός καλύπτει κινητήρες πρόωσης και βοηθητικούς κινητήρες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι κανονισμοί για εκπομπές ρύπων από τα πλοία είναι από τους πιο αυστηρούς και με βάση αυτούς συντάσσονται ανάλογοι κανονισμοί από άλλες χώρες.

Πίνακας 4.19: Όριο εκπομπών Tier 1 για ναυτικούς κινητήρες πρόωσης και για βοηθητικούς ανάλογα με την ισχύ τους σε KW.

Πηγή: (Nitsche, 2011)

| Cat. | Power and displacement | speed min ⁻¹ | Model year | NO _x g/kWh | HC-NO _x g/kWh | PM g/kWh | CO g/kWh |
|------------------|--|-------------------------|------------|-----------------------|--------------------------|----------|----------|
| Small | $P_n < 8 \text{ kW}$ | – | 2000 | – | 10.5 | 1.0 | 8.0 |
| | $8 \text{ kW} \leq P_n < 19 \text{ kW}$ | – | 2000 | – | 9.5 | 0.8 | 6.6 |
| | $19 \text{ kW} \leq P_n < 37 \text{ kW}$ | – | 1999 | – | 9.5 | 0.8 | 5.5 |
| C1, C2, C3, Rec. | $P_n \geq 37 \text{ kW}$ und $V_{h,z} \geq 2.5 \text{ l}$ | $n_n \geq 2000$ | 2004 | 9.8 | – | – | – |
| | | $130 \leq n_n < 2000$ | 2004 | $45 \cdot n_n^{-0.2}$ | – | – | – |
| | | $n_n < 130$ | 2004 | 17.0 | – | – | – |

Πίνακας 4.20: Όρια εκπομπών Tier 2 για ναυτικούς κινητήρες πρόωσης και για βοηθητικούς κινητήρες. Το $V_{h,z}$ εκφράζει τα λίτρα ανά κύλινδρο του κινητήρα. Πηγή: (Nitsche, 2011)

| Cat.* | Cylinder displacement | Power kW | Model year | HC+NO _x g/kWh | PM g/kWh | CO g/kWh |
|-------|--|--------------------|------------|--------------------------|----------|----------|
| Small | – | $P_n < 8$ | 2005 | 7.5 | 0.8 | 8.0 |
| | – | $8 \leq P_n < 19$ | 2005 | 7.5 | 0.8 | 6.6 |
| | – | $19 \leq P_n < 37$ | 2004 | 7.5 | 0.6 | 5.5 |
| C1 | $V_{h,z} < 0.9$ | $P_n \geq 37$ | 2005 | 7.5 | 0.4 | 5.0 |
| | $0.9 \text{ l} \leq V_{h,z} < 1.2 \text{ l}$ | – | 2004 | 7.2 | 0.3 | 5.0 |
| | $1.2 \text{ l} \leq V_{h,z} < 2.5 \text{ l}$ | – | 2004 | 7.2 | 0.2 | 5.0 |
| | $2.5 \text{ l} \leq V_{h,z} < 5 \text{ l}$ | – | 2007 | 7.2 | 0.2 | 5.0 |
| C2 | $5 \text{ l} \leq V_{h,z} < 15 \text{ l}$ | – | 2007 | 7.8 | 0.27 | 5.0 |
| | $15 \text{ l} \leq V_{h,z} < 20 \text{ l}$ | $P_n < 3300$ | 2007 | 8.7 | 0.5 | 5.0 |
| | $15 \text{ l} \leq V_{h,z} < 20 \text{ l}$ | $P_n \geq 3300$ | 2007 | 9.8 | 0.5 | 5.0 |
| | $20 \text{ l} \leq V_{h,z} < 25 \text{ l}$ | – | 2007 | 9.8 | 0.5 | 5.0 |
| Rec. | $25 \text{ l} \leq V_{h,z} < 30 \text{ l}$ | – | 2007 | 11.0 | 0.5 | 5.0 |
| | $V_{h,z} < 0.9 \text{ l}$ | $P_n \geq 37$ | 2007 | 7.5 | 0.4 | 5.0 |
| | $0.9 \text{ l} \leq V_{h,z} < 1.2 \text{ l}$ | $P_n \geq 37$ | 2006 | 7.2 | 0.3 | 5.0 |
| | $1.2 \text{ l} \leq V_{h,z} < 2.5 \text{ l}$ | $P_n \geq 37$ | 2006 | 7.2 | 0.2 | 5.0 |
| | $2.5 \text{ l} \leq V_{h,z} < 5.0 \text{ l}$ | $P_n \geq 37$ | 2009 | 7.2 | 0.2 | 5.0 |

4.6.2 Συντελεστές εκπομπών ρύπων

Ο υπολογισμός των συντελεστών ρύπων είναι μια διαδικασία για την οποία απαιτούνται πολλές πληροφορίες (π.χ. ονομαστική ισχύς της μηχανής, χρονολογία μηχανής και πλοίου, ταχύτητα πλεύσης του σκάφους, στροφές λειτουργίας του κινητήρα, καύσιμο που χρησιμοποιεί ο κινητήρας, κτλ).

Σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουμε για την μηχανή της παρούσης μελέτης οι συντελεστές εκπομπών μπορούν να επιλεγθούν και από τις μεθοδολογίες υπολογισμού των εκπομπών ρύπων που δίνονται από πίνακες. Οι μεθοδολογίες είναι τρεις, Tier 1, Tier 2 και Tier 3 (Trozzi, 2019). Επίσης, ο υπολογισμός για τους συντελεστές εκπομπών μπορεί να γίνει και από εμπειρικές σχέσεις ανάλογα με την ονομαστική ισχύ του κινητήρα και το είδος του, όπως έχει προκύψει από στατιστικά δεδομένα.

Οι συντελεστές εκπομπών ρύπων που θα υπολογίσουμε για την βοηθητική μηχανή ντίζελ είναι: ο συντελεστής για τα αέρια NO_x που εξαρτάται από το είδος του κινητήρα, τα αέρια SO_x που εξαρτώνται από την περιεκτικότητα θείου στο καύσιμο, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τους υδρογονάνθρακες (HC) που εξαρτώνται από την ατελή καύση του καυσίμου στον κινητήρα και τα σωματίδια (PM). Οι μονάδες μέτρησης που συνήθως χρησιμοποιούνται στις περισσότερες μελέτες είναι g/KWh και kg/τόνο καυσίμου.

4.6.3 Υπολογισμός εκπομπών ρύπων για την βοηθητική γεννήτρια ντίζελ του πλοίου

Για τον υπολογισμό των εκπεμπόμενων ρύπων από την καύση του βοηθητικού κινητήρα ντίζελ χρησιμοποιούμε τη μέθοδο World Ports Climate Initiative (WPCI, 2010). Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και για μηχανές πρόωσης και για βοηθητικές μηχανές. Επίσης, η μέθοδος βασίζεται στις μεθοδολογίες Tier 1, Tier 2 από το εγχειρίδιο EMEP/EEA, που έχουν εγκριθεί από τα μέλη του συμβουλίου LRTAP (Trozzi, 2019).

Τα απαιτούμενα στοιχεία για τον υπολογισμό των εκπεμπόμενων ρύπων σε τόνους είναι η ενέργεια που παράγει η γεννήτρια ντίζελ (E_{ENERGY}) για να καλύψει το απαιτούμενο φορτίο του πλοίου στην κατάσταση λειτουργίας που βρίσκεται (εν πλω, εν όρμω) εκφρασμένη σε KWh επί τον συντελεστή εκπομπών ρύπων (EF) σε g/KWh. Η σχέση μπορεί να αλλάξει και αντί για την ενέργεια που παράγει ο κινητήρας να χρησιμοποιηθεί η κατανάλωση καυσίμου σύμφωνα με την μεθοδολογία Tier 1. Έτσι οι εκπομπές ρύπων αποδίδονται από την εξίσωση 4.14.

$$Emission [tonnes] = E_{ENERGY} [KWh] \times EF \quad (4.14)$$

Από την εξίσωση 4.15 υπολογίζουμε την ενέργεια που παράγει η ντίζελ γεννήτρια

$$E_{ENERGY} [KWh] = MCR [KW] \times LF \times ACT [h] \quad (4.15)$$

MCR: είναι η ονομαστική ισχύς της μηχανής,

LF: ο συντελεστής φορτίου λειτουργίας,

ACT: ο χρόνος λειτουργίας ανάλογα την κατάσταση που βρίσκεται το πλοίο,

Για τον υπολογισμό του EF, από τα στοιχεία που έχουν συλλεχθεί από EMEP/EEA για Tier 3 θα πρέπει να γνωρίζουμε το καύσιμο που καταναλώνει ο κινητήρας, τη χρονολογία κατασκευής και τον τύπο του. Η ντίζελ γεννήτρια είναι μεσαίας ταχύτητας, το έτος κατασκευής είναι το 2015 και καταναλώνει καύσιμο ναυτικό πετρέλαιο (MDO). Επομένως, από τον πίνακα 4.21 επιλέγουμε EF_{NOx} 2010 και EF για PM_{2,5} για τα χαρακτηριστικά που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Πίνακας 4.21: Συντελεστές εκπομπών βαθμίδας 3 για NOx, NMVOC, PM και ειδική κατανάλωση καυσίμου για διαφορετικούς τύπους κινητήρων / συνδυασμούς καυσίμων και φάσεις ταξιδιού πλοίου (εν πλω, εν όρμω, ελιγμοί) σε g/ kWh. Πηγή: (Trozzi, 2019)

| Engine | Phase | Engine type | Fuel type | NO _x EF 2000 (g/kWh) | NO _x EF 2005 (g/kWh) | NO _x EF 2010 (g/kWh) | NMVOC EF (g/kWh) | TSP PM ₁₀ PM _{2,5} EF (g/kWh) | Specific fuel consumption (g fuel/kWh) | |
|---------------|-----------------------|-----------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------|---|--|-------|
| Main | Cruise | Gas turbine | BFO | 6.1 | 5.9 | 5.7 | 0.1 | 0.1 | 305.0 | |
| | | | MDO/MGO | 5.7 | 5.5 | 5.3 | 0.1 | 0.0 | 290.0 | |
| | | High-speed diesel | BFO | 12.7 | 12.3 | 11.8 | 0.2 | 0.8 | 213.0 | |
| | | | MDO/MGO | 12.0 | 11.6 | 11.2 | 0.2 | 0.3 | 203.0 | |
| | | Medium-speed diesel | BFO | 14.0 | 13.5 | 13.0 | 0.5 | 0.8 | 213.0 | |
| | | | MDO/MGO | 13.2 | 12.8 | 12.3 | 0.5 | 0.3 | 203.0 | |
| | | Slow-speed diesel | BFO | 18.1 | 17.5 | 16.9 | 0.6 | 1.7 | 195.0 | |
| | | | MDO/MGO | 17.0 | 16.4 | 15.8 | 0.6 | 0.3 | 185.0 | |
| | | Steam turbine | BFO | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 0.1 | 0.8 | 305.0 | |
| | | | MDO/MGO | 2.0 | 1.9 | 1.9 | 0.1 | 0.3 | 290.0 | |
| | | Manoeuvring Hotelling | Gas turbine | BFO | 3.1 | 3.0 | 2.9 | 0.5 | 1.5 | 336.0 |
| | | | | MDO/MGO | 2.9 | 2.8 | 2.7 | 0.5 | 0.5 | 319.0 |
| | High-speed diesel | | BFO | 10.2 | 9.9 | 9.5 | 0.6 | 2.4 | 234.0 | |
| | | | MDO/MGO | 9.6 | 9.3 | 8.9 | 0.6 | 0.9 | 223.0 | |
| | Medium-speed diesel | | BFO | 11.2 | 10.8 | 10.4 | 1.5 | 2.4 | 234.0 | |
| | | | MDO/MGO | 10.6 | 10.2 | 9.9 | 1.5 | 0.9 | 223.0 | |
| | Slow-speed diesel | | BFO | 14.5 | 14.0 | 13.5 | 1.8 | 2.4 | 215.0 | |
| | | | MDO/MGO | 13.6 | 13.1 | 12.7 | 1.8 | 0.9 | 204.0 | |
| Steam turbine | BFO | | 1.7 | 1.6 | 1.6 | 0.3 | 2.4 | 336.0 | | |
| | MDO/MGO | | 1.6 | 1.6 | 1.5 | 0.3 | 0.9 | 319.0 | | |
| Auxiliary | Cruise | High-speed diesel | BFO | 11.6 | 11.2 | 10.8 | 0.4 | 0.8 | 227.0 | |
| | | | MDO/MGO | 10.9 | 10.5 | 10.2 | 0.4 | 0.3 | 217.0 | |
| | Manoeuvring Hotelling | Medium-speed diesel | BFO | 14.7 | 14.2 | 13.7 | 0.4 | 0.8 | 227.0 | |
| | | | MDO/MGO | 13.9 | 13.5 | 13.0 | 0.4 | 0.3 | 217.0 | |

Πίνακας 4.22: Συντελεστές εκπομπών ρύπων σε (g/KWh), για βοηθητικούς ναυτικούς κινητήρες μεσαίων στροφών ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιούν. Πηγή: (Nitsche, 2011)

| Fuel Type | Sulfur | Emission Factors (g/kWh) | | | | | | |
|-----------|--------|--------------------------|------------------|-------------------|------|------|-------|-----------------|
| | | NOx | PM ₁₀ | PM _{2.5} | HC | CO | SOx | CO ₂ |
| RO | 2.70% | 14.7 | 1.44 | 1.32 | 0.40 | 1.10 | 11.98 | 722.54 |
| MDO | 1.00% | 13.9 | 0.49 | 0.45 | 0.40 | 1.10 | 4.24 | 690.71 |
| MGO | 0.50% | 13.9 | 0.32 | 0.29 | 0.40 | 1.10 | 2.12 | 690.71 |
| MGO | 0.10% | 13.9 | 0.18 | 0.17 | 0.40 | 1.10 | 0.42 | 690.71 |

Από την εξίσωση 4.15 προκύπτει ο πίνακας 4.23 για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου χωρίς / μαζί με το ΦΒ σύστημα.

Πίνακας 4.23: Η ενέργεια που παράγεται από τον κινητήρα σε KWh σε ένα έτος για τον υπολογισμό των εκπομπών ρύπων.

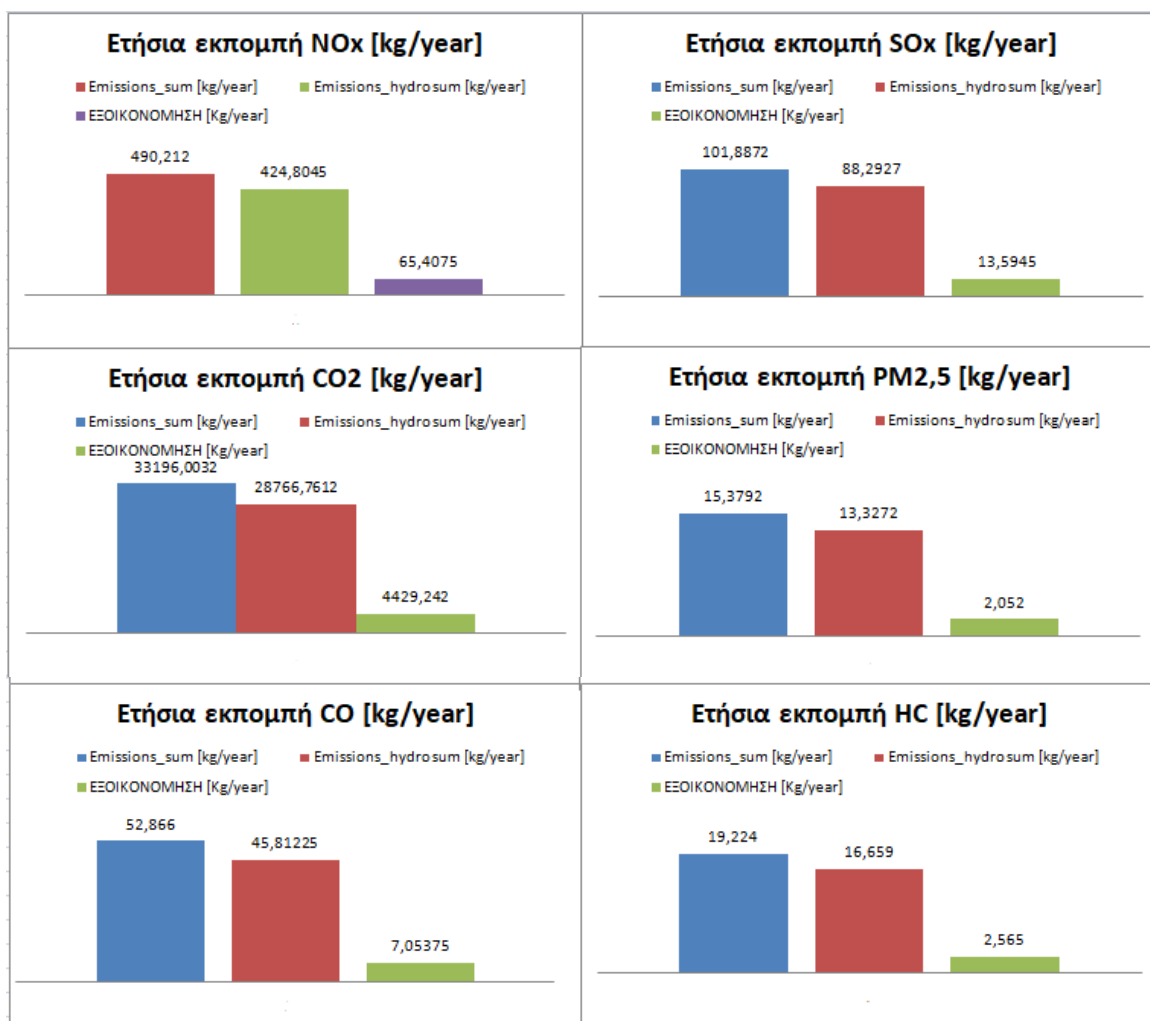
| Στοιχεία | Αρχική | | Με το ΦΒ σύστημα | |
|----------------|--------|---------|------------------|---------|
| | ΕΝ ΠΛΩ | ΕΝ ΟΡΜΩ | ΕΝ ΠΛΩ | ΕΝ ΟΡΜΩ |
| MCR [KW] | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 |
| LF | 0,52 | 0,4 | 0,45 | 0,35 |
| ACT [h] | 2160 | 396 | 2160 | 396 |
| E_ENERGY [KWh] | 42120 | 5940 | 36450 | 5197,5 |

Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία αυτά, υπολογίζονται οι εκπομπές των ρύπων από την εξίσωση 4.15 και τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναγράφονται στο πίνακα 4.24. Επίσης, οι συντελεστές για CO₂, CO, HC και SO_x που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ληφθεί από τον πίνακα 4.22 για ναυτικό πετρέλαιο περιεκτικότητας σε θείο 1%.

Πίνακας 4.24: Οι εκπομπές ρύπων από τον κινητήρα για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας και η μείωση ρύπων όταν χρησιμοποιείται και το ΦΒ σύστημα.

| Στοιχεία | Κατάσταση | Nox | CO ₂ | CO | PM _{2,5} | SO _x | HC |
|-------------------------------|-----------|----------|-----------------|----------|-------------------|-----------------|--------|
| EF [g/KWh] | | 10,2 | 690,72 | 1,1 | 0,32 | 2,12 | 0,4 |
| Emissions [kg/year] | ΕΝ ΠΛΩ | 429,624 | 29093,1 | 46,332 | 13,4784 | 89,2944 | 16,848 |
| | ΕΝ ΟΡΜΩ | 60,588 | 4102,88 | 6,534 | 1,9008 | 12,5928 | 2,376 |
| Emissions_sum [kg/year] | | 490,212 | 33196 | 52,866 | 15,3792 | 101,8872 | 19,224 |
| Emissions_hydro [Kg/year] | ΕΝ ΠΛΩ | 371,79 | 25176,7 | 40,095 | 11,664 | 77,274 | 14,58 |
| | ΕΝ ΟΡΜΩ | 53,0145 | 3590,02 | 5,71725 | 1,6632 | 11,0187 | 2,079 |
| Emissions_hydro sum [kg/year] | | 424,8045 | 28766,8 | 45,81225 | 13,3272 | 88,2927 | 16,659 |
| ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ [Kg/year] | | 65,4075 | 4429,24 | 7,05375 | 2,052 | 13,5945 | 2,565 |

Με την χρήση του φωτοβολταϊκού συστήματος παρατηρούμε ότι η μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανέρχεται στους 4,429 τόνους ανά έτος. Αν υπολογίσουμε τις εκπομπές CO₂ για τα 20 χρόνια ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος που θα λειτουργεί στο πλοίο, τότε η μείωση των εκπομπών ανέρχεται στους 88,58 τόνους.



Εικόνα 4.18: Διαγράμματα των ετήσιων εκπομπών CO₂, CO, SO_x, NO_x, τέφρας HC και σωματιδίων PM 2,5 από τον κινητήρα της ντίζελ γεννήτριας του πλοίου που τροφοδοτεί τα φορτία.

4.7 Οικονομική ανάλυση

Η οικονομική ανάλυση είναι από τους κύριους παράγοντες που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για να διερευνηθεί αν η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στο πλοίο είναι οικονομικά βιώσιμη και συμφέρουσα.

Για να είναι συμβούν αυτά, θα πρέπει το κόστος αγοράς και εγκατάστασης της να είναι μικρότερο από το κόστος της κατανάλωσης καυσίμου με στόχο την εξοικονόμηση χρημάτων.

Το κόστος αγοράς του φωτοβολταϊκού συστήματος έχει υπολογιστεί με βάση της τιμές από τους τιμοκαταλόγους των φωτοβολταϊκών πλαισίων, των συσσωρευτών, των ελεγκτών φορτίου DC-DC και των αναστροφών DC-AC. Μέσα στα αρχικά κόστη θα πρέπει να συμπεριληφθεί και το κόστος εγκατάστασης, το κόστος αλλαγής των συσσωρευτών, των αντιστροφών και των ρυθμιστών φορτίου στα 20 χρόνια λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Οι συσσωρευτές φωσφορικού σιδήρου λιθίου που έχουν επιλεγεί έχουν αντοχή πάνω από 10 χρόνια ενώ ο κατασκευαστής παρέχει εγγύηση ως και 7,5 χρόνια. Έτσι θεωρείται ότι οι συσσωρευτές θα πρέπει να αντικατασταθούν μία φορά στα 20 χρόνια. Το ίδιο ισχύει και για τους ρυθμιστές φορτίου και για τους αντιστροφείς. Στον πίνακα 4.25 αναγράφονται αναλυτικά τα κόστη του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Πίνακας 4.25: Κόστος φωτοβολταϊκού συστήματος

| Κόστος Φωτοβολταϊκού συστήματος | | |
|---------------------------------|-----------------|--------------------|
| Στοιχεία | [Πλήθος]*[ΤΙΜΗ] | ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΤΙΜΗ [\$] |
| ΦΒ πλαίσιο | 16*196 [\$] | 3136 |
| Inverter DC-AC | 2*1*490 [\$] | 980 |
| Charge-Controller DC-DC | 2*4*500 [\$] | 4000 |
| Συσσωρευτές | 2*18*1200 [\$] | 43200 |
| Άλλα εξαρτήματα | | 800 |
| Κόστος εγκατάστασης | | 2000 |
| ΣΥΝΟΛΟ | | 54116 |

το συνολικό κόστος του συστήματος μαζί με τις προβλεπόμενες αλλαγές είναι 54.116\$.

Το κόστος του ναυτικού καυσίμου MDO για το 2021 σύμφωνα με το Istanbul Bunker Prices ανέρχεται στα 491 \$/ton. Το αρχικό κόστος καυσίμου της γεννήτριας ντίζελ για την κάλυψη των αναγκών του πλοίου είναι :

$$10,535 \text{ (tons)} \times 491 \left(\frac{\$}{\text{tons}} \right) = 5.172,7 \text{ \$/year}$$

Με την εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού συστήματος υπολογίστηκε ότι το σύστημα καταναλώνει 7.496 tons/year, άρα σε ένα έτος θα υπάρξει μείωση κατά 3,039 tons. Έτσι, η εξοικονόμηση από την μείωση του καυσίμου για ένα χρόνο θα είναι:

$$3,039 \text{ (tons)} \times 491 \left(\frac{\$}{\text{tons}} \right) = 1492,149 \frac{\$}{\text{year}}$$

Στα 20 χρόνια λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος η εξοικονόμηση από την μείωση καυσίμου εκτιμάται ότι θα είναι 29.842,98 \$.

Συνεπώς, ο πλοιοκτήτης δεν θα μπορεί να αποπληρώσει το χρέος από την μείωση καυσίμου με την χρήση των φωτοβολταϊκών στα 20 χρόνια λειτουργίας του και αυτό αποτελεί ένα από τα μειονεκτήματα εγκατάστασης ΦΒ συστήματος. Το υπολειπόμενο ποσό που θα πρέπει να πληρώσει είναι $54.116\$ - 29.842,98 = 24.273\$$.

Με βάση τα παραπάνω κόστη, προκύπτει ότι η χρηματοδότηση από κάποιον φορέα της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών θα αποτελούσε κίνητρο για τους πλοιοκτήτες να προβούν στην εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων πάνω στο πλοίο τους.

4.8 Συμπεράσματα

Ο στόχος της παρούσης διπλωματικής είναι η περιγραφή της τεχνολογίας, του τρόπου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων και της εφαρμογής τους σε ένα επιβατικό πλοίο ως βοηθητική πηγή ενέργειας για την κάλυψη του φωτισμού του πλοίου και του συστήματος GPS. Είναι προφανές ότι η εφαρμογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο πλοίο σκοπεί στη μείωση των εκπομπών ρύπων, κατανάλωσης ορυκτού καυσίμου και στην αποφυγή κόστους καυσίμου.

Η χρήση των ΦΒ συστημάτων καθιστά εφικτή την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, με αποτέλεσμα η πρώτη να καθίσταται πιο ελκυστική ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ανάπτυξη της τεχνολογίας όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Με άλλα λόγια, έχουν γίνει πιο αποδοτικά σε επίπεδο ενέργειας, ανθεκτικότητας σε καιρικές συνθήκες και η απόδοσή τους δεν μειώνεται σε μεγάλο βαθμό τις ανήλιαγες μέρες. Επιπλέον, οι εγκαταστάσεις των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε χερσαίες εφαρμογές αποτελούν πεδίο επένδυσης για τις κυβερνήσεις μέσω χρηματοδότησης υψηλών ποσών για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πάρκων.

Όσο αφορά στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στο θαλάσσιο περιβάλλον και ειδικότερα στα πλοία οι παράμετροι που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι περισσότεροι. Οι δύσκολες καιρικές συνθήκες, οι υψηλής έντασης άνεμοι, το μεγάλο ποσοστό υγρασίας καθιστούν το φωτοβολταϊκό σύστημα πιο ευάλωτο και ο χρόνος ζωής του μειώνεται πιο γρήγορα σε σχέση με τα χερσαία συστήματα. Επιπλέον, για να προχωρήσουμε σε μία εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε πλοίο το πρώτο που θα πρέπει να εξεταστεί είναι ο ελεύθερος χώρος στο κατάστρωμα του πλοίου. Σε πλοία όπως bulk carriers, oil tanker, container ship ο χώρος και το περιβάλλον του πλοίου καθιστά δύσκολη την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών. Επίσης, και τα κρουαζιερόπλοια ανήκουν σε αυτή την κατηγορία διότι το up deck χρησιμοποιείται για διάφορες δραστηριότητες.

Οι περισσότερες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών έχουν γίνει σε επιβατικά πλοία, ro-ro, ro-rax, που κινούνται σε μικρότερη εμβέλεια. Σε αυτού του τύπου τα πλοία ο διαθέσιμος χώρος στο κατάστρωμα είναι περισσότερος, αλλά και τα φορτία του πλοίου είναι μικρότερα. Με αυτό τον τρόπο τα φωτοβολταϊκά λειτουργούν ως βοηθητική πηγή ενέργειας για την κάλυψη κάποιων φορτίων του πλοίου. Επιπλέον, το σύστημα των συσσωρευτών, το πλήθος τους και η ισχύς που μπορεί να καλύψουν αποκτούν σημαντικό

ρόλο στην εγκατάσταση. Οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται για να συλλέξουν την ενέργεια που παράγει το φωτοβολταϊκό πεδίο προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις που η ηλιακή ενέργεια είναι ανεπαρκής. Επίσης, οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται για να διοχετεύεται η ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά στο σύστημα διανομής φορτίων του πλοίου έτσι ώστε να υπάρχει σταθερή τάση και συχνότητα ανάμεσα στα δύο συστήματα.

Συμπερασματικά, την καλύτερη εφαρμογή φωτοβολταϊκού συστήματος σε πλοίο την έχει αυτό που λειτουργεί και εκτός δικτύου/ συνδεδεμένο με το δίκτυο, ανάλογα με την κατάσταση των συσσωρευτών και το φορτίο που έχουμε από την ηλιακή ενέργεια.

Από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο passenger boat με εγκατάσταση 16 φωτοβολταϊκών πλαισίων, 18 συσσωρευτών, 4 ρυθμιστών φορτίου και δύο αντιστροφών AC-DC για την κάλυψη 2,035 KW που αντιστοιχούν στο φωτισμό και στο σύστημα GPS, αποδείχθηκε ότι το κόστος εγκατάστασης του ΦΒ συστήματος υπερκάλυψε το ποσό που εξοικονομήθηκε από τη μείωση καύσιμου της γεννήτριας ντίζελ. Αυτό σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη μελέτη από οικονομικής άποψης δεν συμφέρει η εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος και γι' αυτό η χρηματοδότηση από κρατικούς ή οικονομικούς φορείς αποτελεί προς το παρόν τη μόνη λύση προς μεγαλύτερη παρότρυνση των πλοιοκτητών για εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων στα πλοία τους, με απώτερο στόχο την προστασία του περιβάλλοντος από ρυπογόνα αέρια.

Από την άλλη πλευρά, η εξοικονόμηση των εκπομπών ρύπων για 20 χρόνια λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος για το CO₂ είναι 88,58 τόνοι, για το NO_x είναι 1,3 τόνοι, για το SO_x είναι 272 kg, για το PM είναι 41 kg και για το CO είναι 141,06 kg. Αυτό σημαίνει ότι με την χρήση του φωτοβολταϊκού συστήματος επιτυγχάνεται μία σημαντική μείωση των εκπομπών ρύπων κυρίως του CO₂, που είναι υπεύθυνο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Από ναυπηγικής πλευράς, για μία εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πλοίο, θα πρέπει να γίνεται υπολογισμός βαρών και ευστάθειας έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η γραμμή πλευσης και το κέντρο βάρους του πλοίου.

Για μία ολοκληρωμένη αναλυτική μελέτη θα πρέπει να γνωρίζουμε ακριβώς την θέση του πλοίου και τα δρομολόγια που πραγματοποιεί. Έτσι μπορεί να εκτιμηθεί η ηλιοφάνεια που έχει στην τοποθεσία που βρίσκεται το πλοίο κάθε στιγμή.

Το μειονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχει καταγραφή της ηλιακής ενέργειας ημερησίως σε όλες τις χώρες. Επίσης, είναι δύσκολο να γνωρίζουμε την ηλιακή ενέργεια ανά πάσα στιγμή στις πλόες που πραγματοποιεί το πλοίο.

Τέλος, τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μία ελπιδοφόρα λύση που μπορεί να λειτουργεί παράλληλα και με άλλες πηγές ενέργειας έτσι ώστε να έχουμε μεγαλύτερη κάλυψη αναγκών στα πλοία. Είναι προφανές ότι στο μέλλον θα έχουμε μεγαλύτερη εξέλιξη με κατεύθυνση τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα τους και την ανθεκτικότητα τους. Επιπλέον, οι συσσωρευτές που είναι ένα κύριο κομμάτι των φωτοβολταϊκών τα τελευταία χρόνια έχουν εξελιχθεί ως προς την αντοχή και την χωρητικότητα τους με αποτέλεσμα την ευρύτερη εφαρμογή τους στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η πρόοδος αυτή μπορεί να φέρει την επανάσταση και στον κλάδο της ναυτιλίας και έτσι στο προσεχές μέλλον ίσως να κατασκευάζονται πλοία υψηλών προδιαγραφών, με στόχο την αξιοποίηση της ηλεκτροπρώωσης, και τότε η κατανάλωση ορυκτού καυσίμου αναμένεται να περιοριστεί δραστικά ή να εξαλειφθεί.

Βιβλιογραφικές πηγές

- Σιδηροκαστρίτης, Ζ. (2008). *OLYMPIC ENGINEERING & CONSULTING*. Ανακτήθηκε 2 Μαρτίου 2020, από www.oleng.eu
- AMPS Technical Committee. (2016). *Determination of thermal input power of an engine driven generator*. Retrieved April 5, 2021, from techsec@amps.org.uk
- Durmusoglu, Y. (2013). Damage Costs of Air Pollution from Ships in the Region of the Sea of Marmara. *Naval Engineers Journal*, 125(3), 71-85. Retrieved April 1, 2021, from https://www.researchgate.net/publication/285274590_Damage_Costs_of_Air_Pollution_from_Ships_in_the_Region_of_the_Sea_of_Marmara
- GLOBAL SOLAR ATLAS. (n.d.) *Energy data info*. Retrieved March 3, 2021, from globalsolaratlas.info
- Izmir Shipyard (2019). *HDPE PASSENGER BOAT IZ 1730*. Retrieved 8, 2021, from www.izmirshipyard.com
- Katagi, T., Fujii, Y., Nishikawa, E., Hashimoto, I. & Ishida H. (1995). Photovoltaic Generating System on ships to reduce fossil fuel dependence. *MESJ*, Vol 30, (No.12), pp. 1-11. Retrieved February 25, 2021, from www.koreascience.or.kr
- Lee, K.J., Shin, S.D., Lee, P.J., Yoo, W.D., Choi, K.Y. & Kim. J.H. (2012). Hybrid photovoltaic / diesel green ship operating in standalone and grid-connected mode in South Korea. *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 9-12 October 2012 (pp. 1-4). Seoul. IEEE.
- Lee, K.J. (2005) *4TNV98-GGE for Generator, specifications and drawings*: YANMAR.
- Nitsche, M., Slama, j. (2011). Exhaust emission legislation Diesel and gas engines, Marine, Stationary power plants, Nonroad mobile machinery and Rail. *VDM Engines and Systems*. Retrieved 2018, from mus@vdma.org
- Sun, Y., Yan, X., Yuan, C., Tang, X., Malekian, R., Guo, C. & Li, Z. (2019). The application of hybrid photovoltaic system on the ocean-going ship: engineering practice and experimental research. *Journal of Marine Engineering and Technology*, 18 (1), pp. 56-66. DOD: 10.1080/20464177.2018.1493025
- TR MINISTRY OF AGRICULTURE AND FORESTRY. (n.d.) *General Directorate of Meteorology*. Retrieved April 2, 2021, from www.mgm.gov.tr
- Trozzi, C. & Lauretis, D.R. (2019). Air pollutant emission inventory guidebook EMEP/EEA. Danmark: European Environment Agency.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2009). *Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories*. Virginia: ICF International.

Woodyard, D. (2009). *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines* (9th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann. Retrieved March 10, 2021, from www.dieselduck.info

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. (n.d.) *World Weather Information Service*. Retrieved April 2, 2021, from www.worldweather.wmo

WPCI. (2010). *Carbon Footprinting Working Group - Guidance Document*. Retrieved April 3, 2021, from [https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/Carbon Footprinting Guidance Document.pdf](https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/Carbon_Footprinting_Guidance_Document.pdf)