



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη ναυτιλία - Εφαρμογή φωτοβολταϊκού συστήματος  
σε φορτηγό οχηματαγωγό πλοίο τύπου Roll-on/Roll-off**

**Renewable energy sources in shipping – Photovoltaic system installation in a  
Roll-on/Roll-off cargo ship**

Συγγραφέας:

ΠΕΤΡΟΥ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

A.M. 16078

Επιβλέπων: Λέκτορας Μιχαήλ Σέρρης

Αιγάλεω, 2022





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

### **Διπλωματική Εργασία**

**Τίτλος: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη ναυτιλία - Εφαρμογή φωτοβολταϊκών συστημάτων σε φορτηγό οχηματαγωγό πλοίο τύπου Roll-on/Roll-off**

### **Συγγραφέας:**

ΠΕΤΡΟΥ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ (Α.Μ. 16078)

### **Επιβλέπων**

Σέρρης Μιχαήλ,

Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

### **Ημερομηνία εξέτασης**

15/11/2022

### **Εξεταστική Επιτροπή**

Σέρρης Μιχαήλ,  
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Ιακωβίδης Ισίδωρος,  
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Δημητρέλλου Σωτηρία,  
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια  
ΠΑ.Δ.Α.



## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Πέτρου Παρασκευή του Αθανασίου, με αριθμό μητρώου 16078, φοιτήτρια 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».

Η Δηλούσα



ΠΕΤΡΟΥ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ



## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον Καθηγητή κ. Σέρρη Μιχαήλ, του οποίου η καθοδήγηση και η στήριξη ήταν σημαντικές για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τις ευχαριστίες μου εκφράζω στον Καθηγητή κ. Παγώνη Δημήτριο για τον χρόνο και τις επιστημονικές του γνώσεις που μου παρείχε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον αγαπημένο μου Σπύρο, ο οποίος συνέβαλε σημαντικά στην παροχή ηλεκτρολογικών γνώσεων για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην ναυτιλιακή εταιρεία Neptune Lines για τον χρόνο που αφιέρωσε, αλλά και για τα σχέδια και τα δεδομένα του πλοίου που μου παρείχε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την συνεχή στήριξη που μου προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια της ζωής μου.

## Περίληψη

Η αυξημένη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων για λόγους μεταφοράς αποτελεί κύρια αιτία μόλυνσης της ατμόσφαιρας του πλανήτη. Ως λύση στην μείωση διοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου παρουσιάστηκε η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στη ναυτιλία, για να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών καυσαερίων θεσπίστηκαν κανονισμοί και αυστηρά μέτρα, που είχαν στόχο την προστασία του περιβάλλοντος. Λόγω της συνεχούς αύξησης του κόστους καυσίμου, σε συνδυασμό με την οικολογική καταστροφή, οι πλοιοκτήτες επιλέγουν εναλλακτικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η εφαρμογή φωτοβολταϊκού συστήματος για την κάλυψη μερικών ηλεκτρικών φορτίων του πλοίου σε συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας. Το ιδιαίτερο στοιχείο της συγκεκριμένης εργασίας είναι το είδος του πλοίου που μελετάται και τα ηλεκτρικά του φορτία, καθώς το κατάστρωμα του θεωρείται κατάλληλο για την τοποθέτηση μεγάλου ΦΒ συστήματος, αλλά οι ενεργειακές απαιτήσεις ξεπερνούν τις δυνατότητες του. Σκοπός της εγκατάστασης ΦΒ συστήματος είναι η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και φυσικά, η μείωση κατανάλωσης καυσίμου. Τέλος, αναδεικνύεται η αποτελεσματικότητα της ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και το οικονομικό όφελος που επιφέρει στον πλοιοκτήτη.

Λέξεις κλειδιά: ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ατμοσφαιρική ρύπανση, ορυκτά καύσιμα, ηλιακή ενέργεια, φωτοβολταϊκό φαινόμενο, φωτοβολταϊκό σύστημα, Ro-Ro Ship, φωτοβολταϊκή εγκατάσταση σε πλοίο.



## **Abstract**

Increased consumption of fossil fuels is the main reason for global air pollution. Renewable energy sources are used to reduce the production of carbon dioxide, nitrogen oxides and thus to reduce air pollution. In shipping, in order to achieve a reduction in exhaust emissions, regulations and strict measures were introduced. Due to the constant increase in fuel costs, combined with ecological destruction, shipowners are opting for alternative methods of energy production, such as photovoltaic systems, which convert solar energy into electricity. In this thesis, an attempt is made to implement a photovoltaic system to provide part of the ship's energy. The special feature of this thesis is the type of ship being studied and its electrical loads, as its deck is considered suitable for the installation of a large PV system, but the energy requirements are beyond its capabilities. The purpose of installing a PV system is to reduce air pollution and of course, to reduce fuel consumption. Finally, the energy efficiency of PV panels and the economic benefit to the shipowner is highlighted.

Keywords: renewable energy, air pollution, fossil fuel, solar energy, photovoltaic effect, photovoltaic system, Ro-Ro Ship, photovoltaic installation on a ship.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	6
Περίληψη .....	7
Abstract .....	8
Κατάλογος Εικόνων .....	13
Κατάλογος Πινάκων .....	17
Πρόλογος .....	19
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή.....	21
1.1 Γενικά.....	21
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....	23
1.2.1 Ηλιακή ενέργεια - Ήλιος.....	23
1.2.2 Αιολική ενέργεια – Άνεμος.....	24
1.2.3 Υδραυλική ενέργεια – Υδατοπτώσεις.....	25
1.2.4 Γεωθερμική ενέργεια .....	26
1.2.5 Βιομάζα.....	29
1.3 Ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία .....	31
1.4 Κανονισμοί ελέγχου καυσαερίων στη ναυτιλία .....	36
1.5 Συμπεράσματα.....	39
1.6 Βιβλιογραφικές πηγές .....	40
Κεφάλαιο 2. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στα πλοία .....	42
2.1 Γενικά.....	42
2.2 Ιστορική Αναδρομή.....	46
2.3 Ηλιακή Ενέργεια .....	48
2.3.1 Φωτοβολταϊκά Συστήματα .....	48
2.3.2 Παραδείγματα Φωτοβολταϊκών εφαρμογών σε πλοία .....	49
2.4 Αιολική Ενέργεια .....	55
2.4.1 Μαλακά Ιστία – Soft Sails .....	55
2.4.2 Σταθερά Ιστία – Fixed Sails.....	56
2.4.3 Ρότορες - Rotors .....	57
2.4.4 Ιστία τύπου Kite – Kite Sails .....	59
2.4.5 Ανεμογεννήτριες – Wind Turbines.....	61
2.5 Βιοενέργεια .....	66

2.5.1	Βιοκαύσιμα .....	66
2.5.2	Υγρά βιοκαύσιμα .....	68
2.5.3	Βιοαέριο .....	69
2.6	Κυματική ενέργεια .....	70
2.7	Κυψέλες καυσίμου Υδρογόνου .....	71
2.8	Πρόωση με τη χρήση μπαταριών .....	73
2.9	Συμπεράσματα.....	74
2.10	Βιβλιογραφικές πηγές .....	75
Κεφάλαιο 3. Φωτοβολταϊκή μετατροπή και Φ/Β στοιχεία .....		78
3.1	Γενικά.....	78
3.2	Ηλιακή ακτινοβολία και Γεωμετρία.....	79
3.2.1	Ηλιακή Γεωμετρία .....	81
3.2.3	Ατμόσφαιρα .....	83
3.2.4	Διέλευση και Συνιστώσες Ηλιακής Ακτινοβολίας .....	85
3.2.5	Φαινόμενο του Θερμοκηπίου .....	87
3.3	Ημιαγωγοί .....	88
3.3.1	Γενικά.....	88
3.3.2	Κατηγορίες Ημιαγωγών .....	89
3.4	Δίοδος Επαφής .....	93
3.4.1	Στατική Συμπεριφορά .....	94
3.5	Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο .....	97
3.5.1	Ιστορική Αναδρομή .....	97
3.5.2	Ανάλυση Φωτοβολταϊκού Φαινομένου .....	98
3.6	Το Φωτοβολταϊκό Στοιχείο .....	103
3.6.1	Δομή Φ/Β Στοιχείου.....	103
3.6.2	Χαρακτηριστική καμπύλη Φ/Β Στοιχείου .....	104
3.6.3	Σημείο Λειτουργίας Φ/Β Στοιχείου .....	107
3.6.4	Βαθμός απόδοσης Φ/Β Στοιχείου .....	109
3.6.5	Αντιστάσεις κυκλώματος Φ/Β Στοιχείου.....	111
3.6.6	Απώλειες ισχύος στα Φ/Β Στοιχεία .....	112
3.6.7	Επίδραση θερμοκρασίας στη λειτουργία του Φ/Β Στοιχείου .....	114
3.7	Συνδεσμολογία .....	116
3.7.1	Σύνδεση σε σειρά.....	116
3.7.2	Παράλληλη σύνδεση.....	117
3.7.3	Μικτή σύνδεση .....	119

3.8	Κατηγορίες Φ/Β Στοιχείων .....	120
3.8.1	Φ/Β Στοιχεία Πυριτίου.....	120
3.8.2	Φ/Β Στοιχεία άλλων υλικών .....	125
3.9	Βιβλιογραφικές πηγές .....	128
Κεφάλαιο 4. Φωτοβολταϊκά συστήματα.....		130
4.1	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.....	130
4.1.1	Κατασκευαστικές λεπτομέρειες Φ/Β πλαισίου.....	132
4.1.2	Ισχύς αιχμής Φ/Β πλαισίου .....	135
4.1.3	Βαθμός απόδοσης Φ/Β πλαισίου .....	136
4.2	Φ/Β συστοιχίες και Φ/Β πεδίο (array).....	138
4.3	Ανάλυση φωτοβολταϊκών συστημάτων .....	139
4.3.1	Αυτόνομα Φ/Β συστήματα - εκτός δικτύου (off-grid systems).....	141
4.3.2	Φ/Β συστήματα συνδεδεμένα σε δίκτυο (grid-connected systems) .....	142
4.3.3	Υβριδικά Φ/Β συστήματα (hybrid-grid systems) .....	143
4.3.4	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Φ/Β συστημάτων .....	146
4.4	Αντιστροφείς DC - AC (inverters) .....	148
4.5	Ηλεκτρικός συσσωρευτής .....	150
4.5.1	Κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά .....	150
4.5.2	Βαθμός απόδοσης ηλεκτρικού συσσωρευτή .....	152
4.5.3	Κατηγορίες ηλεκτρικών συσσωρευτών ΦΒ συστήματος .....	152
4.5.4	Μέτρα ασφαλείας για την ομαλή λειτουργία ηλεκτρικών συσσωρευτών .	155
4.6	Καλωδίωση ΦΒ συστήματος .....	156
4.7	Συμπεράσματα.....	158
4.8	Βιβλιογραφικές πηγές .....	159
Κεφάλαιο 5. Εφαρμογή Φ/Β συστήματος σε Ro-Ro πλοίο .....		161
5.1	Επιλογή πλοίου για τοποθέτηση του Φ/Β συστήματος.....	161
5.1.1	Ηλεκτρικές καταναλώσεις πλοίου .....	161
5.1.2	Ταξίδια που εκτελεί το πλοίο - Ηλιακό δυναμικό περιοχής πλεύσης.....	164
5.2	Τοποθέτηση ΦΒ πλαισίων στο πλοίο / υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας	171
5.2.1	Μελέτη διαθέσιμου χώρου του πλοίου .....	171
5.2.2	Επιλογή Φ/Β πλαισίου .....	174
5.2.3	Συνδεσμολογία Φ/Β πλαισίων και Ρυθμιστών φόρτισης.....	181
5.2.4	Υπολογισμός ηλεκτρικών συσσωρευτών Φ/Β συστήματος .....	186
5.2.5	Επιλογή αντιστροφέων DC-AC .....	191

5.3	Μονογραμμικό σχέδιο συστήματος .....	193
5.4	Εξοικονόμηση καυσίμου από το ΦΒ σύστημα .....	194
5.5	Εκπομπές ρύπων.....	199
5.6	Οικονομική ανάλυση εγκατάστασης.....	202
5.7	Συμπεράσματα.....	204
5.8	Βιβλιογραφία.....	206
	Συμπεράσματα .....	207
	Βιβλιογραφία .....	209

## Κατάλογος Εικόνων

EIKONA 1-1: Φωτοβολταϊκά Πλαίσια. ....	23
EIKONA 1-2: Εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας στην Κίνα (Σιντσιάνγκ) .....	24
EIKONA 1-3: Υδροηλεκτρικό φράγμα στη Λίμνη Πλαστήρα. ....	26
EIKONA 1-4: Διεθνής κατανάλωση καυσίμου ανά τύπο πλοίου, σύμφωνα με την κατανομή των διεθνών εκπομπών με βάση το ταξίδι. ....	33
EIKONA 1-5: Εκτιμήσεις διεθνών ναυτιλιακών εκπομπών για το διάστημα από 2012 έως 2018. ....	33
EIKONA 1-6: Ποσοστό διεθνών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για το 2018 με βάση το ταξίδι. ....	34
EIKONA 1-7: Διεθνής κατανάλωση καυσίμου, για το έτος 2018. ....	34
EIKONA 1-8: Εκπομπές CO <sub>2</sub> σε εμπορικά και μεταφορικά μέσα. ....	35
EIKONA 2-1: Απεικόνιση των a) Greenheart Ship, b) B9 Ship. ....	43
EIKONA 2-2: Απεικόνιση του πλοίου Meri Ship. ....	43
EIKONA 2-3: Απεικόνιση του Solar Sailor ship. ....	44
EIKONA 2-4: Απεικόνιση του Viking Lady, το οποίο χρησιμοποιεί κυψέλες υδρογόνου για την πρόωση του. ....	44
EIKONA 2-5: The Buckau Ship, το πρώτο πλοίο με σύστημα πρόωσης Flettner Rotor. Φωτογραφία του 1924. ....	46
EIKONA 2-6: Αυτόνομα Φ/Β συστήματα σε πλοίο εξόρυξης πετρελαίου. ....	49
EIKONA 2-7: Φωτοβολταϊκό σύστημα του Auriga Leader Ship. ....	50
EIKONA 2-8: Φ/Β σύστημα του Nichioh Maru ship. ....	51
EIKONA 2-9: Motor Ship - Tunaror PlanetSolar. ....	51
EIKONA 2-10: Φ/Β σύστημα Blue Star Delos. ....	52
EIKONA 2-11: Διάγραμμα Φ/Β συστήματος Blue Star Delos σε πειραματικό στάδιο. ....	52
EIKONA 2-12: Σχεδιασμός υβριδικού πλοίου Tonbo. ....	53
EIKONA 2-13: Σχεδιασμός Super Eco Ship 2030. ....	55
EIKONA 2-14: Maltese Falcon κατά τη διάρκεια πλεύσης. Πηγή: (Wikipedia, Σεπτέμβριος 2018.) ....	56
EIKONA 2-15: Σύστημα Walker Wingsail στο Ashington Ship. ....	57
EIKONA 2-16: Vindskip - Το πρώτο cargo ship που κινείται με αιολική ενέργεια. ....	57
EIKONA 2-17: Κίνηση ρότορσιπ κατά φαινόμενο μάγκνους. ....	58
EIKONA 2-18: Rotor Ship – Σύστημα Flettner. ....	59
EIKONA 2-19: Η ιδέα του SeaWing. ....	61
EIKONA 2-20: Πρόωση πλοίου με ιστίο τύπου Kite. ....	61
EIKONA 2-21: Παρουσίαση οριζόντιου και κάθετου. ....	62
EIKONA 2-22: Καταμαράν Revelation II. ....	63
EIKONA 2-23: FastRig Sails - Ιστία με στόχο την μείωση κατανάλωσης καυσίμου κατά 20%. ....	63
EIKONA 2-24: Είδη ανεμογεννητριών στο υδάτινο περιβάλλον για διάφορα βάθη. ....	64
EIKONA 2-25: Σύνοψη της διαδικασίας παραγωγής συμβατικών και προηγμένων βιοκαυσίμων. ....	66
EIKONA 2-26: Το πλοίο E/S Orcelle της εταιρείας Wallenius Wilhelmsen Logistics, ...	70
EIKONA 2-27: Hydrogen Hybrid Harbour Tug Ship. ....	72

EΙΚΟΝΑ 3-1: Κίνηση ηλεκτρονίων του n προς τις οπές του p.....	78
EΙΚΟΝΑ 3-2: Πορεία προσπίπτουσας ακτίνας σε διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων...	80
EΙΚΟΝΑ 3-3: Φαινόμενες διαδρομές του ήλιου κατά τη διάρκεια α) μίας ημέρας, β) τεσσάρων χαρακτηριστικών ημερών του έτους.....	82
EΙΚΟΝΑ 3-4: Φάσματα ηλιακής ακτινοβολίας. ....	86
EΙΚΟΝΑ 3-5: Ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια εισόδου στην ατμόσφαιρα.....	87
EΙΚΟΝΑ 3-6: Απεικόνιση ενεργειακών ζωνών διάφορων υλικών.....	89
EΙΚΟΝΑ 3-7: Φωτοαγωγιμότητα υλικού.....	90
EΙΚΟΝΑ 3-8: Απεικόνιση επαφής pn με απότομη μεταβολή νόθευσης σε ισορροπημένη πόλωση.....	94
EΙΚΟΝΑ 3-9: Περιγραφή ΦΒ φαινομένου. ....	99
EΙΚΟΝΑ 3-10: Δημιουργία φορέα αγωγιμότητας και επανασύνδεσης α) από ζώνη σε ζώνη, β) μέσο επανασύνδεσης. ....	99
EΙΚΟΝΑ 3-11: Ένταση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διέλευση του σε υλικό ημιαγωγού. ....	100
EΙΚΟΝΑ 3-12: Εξάρτηση της σταθεράς απορρόφησης ως συνάρτηση του μήκους κύματος λ για διάφορους ημιαγωγούς. ....	100
EΙΚΟΝΑ 3-13: Απεικόνιση προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επαφή pn και η κατανομή της στις διάφορες ζώνες.....	101
EΙΚΟΝΑ 3-14: Φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου.....	103
EΙΚΟΝΑ 3-15: Τα βασικά μέρη ενός ΦΒ πλαισίου, α) Φωτοβολταϊκή κυψέλη, β) Φωτοβολταϊκό πάνελ, .....	104
EΙΚΟΝΑ 3-16: Ανοιχτό κύκλωμα ΦΒ στοιχείου.....	104
EΙΚΟΝΑ 3-17: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος I – τάσεως V ενός ΦΒ στοιχείου. ....	105
EΙΚΟΝΑ 3-18: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για την χάραξη της καμπύλης I – V του ΦΒ στοιχείου.....	106
EΙΚΟΝΑ 3-19: Καμπύλες I – V για διάφορα πραγματικά ΦΒ κύτταρα σε διάφορα επίπεδα φωτισμού. Πηγή (Luque & Hegenus, 2003) .....	107
EΙΚΟΝΑ 3-20: Χαρακτηριστική καμπύλη I – V ενός ΦΒ στοιχείου, μεταβολή της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος του P σε συνάρτηση με την τάση V και την καμπύλη φορτίου ΚΦ. Πηγή: (Πέρδιος, 2011) .....	107
EΙΚΟΝΑ 3-21: Μεταβολή τάσεως ανοιχτού κυκλώματος και ρεύματος βραχυκύκλωσης συναρτήσει ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.....	108
EΙΚΟΝΑ 3-22: Μετατόπιση των χαρακτηριστικών καμπυλών I – V με την ταυτόχρονη μεταβολή της ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας.....	109
EΙΚΟΝΑ 3-23: Θεωρητική απόδοση των ΦΒ στοιχείων σε συνάρτηση με το ενεργειακό διάκενο. ....	110
EΙΚΟΝΑ 3-24: Ισοδύναμο φωτοβολταϊκό κύκλωμα, α) απλό, β) πλήρες. ....	111
EΙΚΟΝΑ 3-25: Επίδραση αντίστασης σε σειρά και παράλληλη. ....	112
EΙΚΟΝΑ 3-26: Απώλειες ισχύος μέσα σε φωτοστοιχεία.....	114
EΙΚΟΝΑ 3-27: Επίδραση θερμοκρασίας στις Χαρακτηριστικές Καμπύλες I – V ενός ηλιακού στοιχείου. ....	115
EΙΚΟΝΑ 3-28: Μεταβολή ισχύος συναρτήσει θερμοκρασίας για 1.000 W/m <sup>2</sup> ακτινοβολία. ....	115
EΙΚΟΝΑ 3-29: Σύνδεση σε σειρά. ....	116

EIKONA 3-30: Κυψέλες με σύνδεση σε σειρά.....	117
EIKONA 3-31: Παράλληλη σύνδεση.....	118
EIKONA 3-32: Μορφή καμπυλών I – V κυψελών σε παράλληλη σύνδεση.....	118
EIKONA 3-33: Σύνδεση τριών κυψελών παράλληλα.....	119
EIKONA 3-34: ΦΒ στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου.....	121
EIKONA 3-35: ΦΒ στοιχείο σε κυλίνδρους.....	122
EIKONA 3-36: ΦΒ στοιχείο πολυκρυσταλλικού Πυριτίου.....	123
EIKONA 3-37: Δομή ΦΒ στοιχείου μορφής φιλμ.....	124
EIKONA 3-38: Σχηματική αναπαράσταση της δομής πυριτίου, α) Κρυσταλλικό πυρίτιο, .....	124
EIKONA 3-39: ΦΒ στοιχείο τύπου φιλμ.....	125
EIKONA 4-1: Σύνδεση ΦΒ στοιχείων σε σειρά για τη δημιουργία ΦΒ πλαισίου.....	130
EIKONA 4-2: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V μίας στοιχειοσειράς ΦΒ κυψελών. Πηγή: (Δέρβος, 2013).....	131
EIKONA 4-3: Απεικόνιση κυρίων τμημάτων ΦΒ πλαισίου.....	132
EIKONA 4-4: Απεικόνιση διάταξης στοιχειοσειράς ΦΒ πλαισίου με περιττό αριθμό στηλών, και θέση διόδων προστασίας– Απεικόνιση ευθύγραμμης διάταξης στοιχειοσειράς. Πηγή: (Δέρβος, 2013).....	135
EIKONA 4-5: Απεικόνιση διάταξης στοιχειοσειράς ΦΒ πλαισίου με άρτιο αριθμό στηλών, και θέση διόδων προστασίας. Απεικόνιση ευθύγραμμης διάταξης στοιχειοσειράς. Πηγή: (Δέρβος, 2013).....	135
EIKONA 4-6: Παρουσίαση λειτουργίας θερμοκηπίου.....	139
EIKONA 4-7: Διάγραμμα αυτόνομου συστήματος πλοίου Auriga Leader. Πηγή: (Paulson, 2019).....	142
EIKONA 4-8: Διάγραμμα ΦΒ συστήματος συνδεδεμένο με το δίκτυο. Πηγή: (Van Swaaij, 2014).....	143
EIKONA 4-9: Απεικόνιση Υβριδικού Συστήματος. Πηγή: (Προβατάς, 2017).....	144
EIKONA 4-10: Συνδεσμολογία ΦΒ συστήματος που περιέχει συσσωρευτές για την αποθήκευση ενέργειας, αντιστροφείς για την μετατροπή DC ρεύματος σε AC και ελεγκτές φόρτισης.....	144
EIKONA 4-11: Διάγραμμα Υβριδικού ΦΒ συστήματος σε πλοίο.....	145
EIKONA 4-12: Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Πηγή: (Δούρος, 2021).....	154
EIKONA 4-13: Χαρακτηριστικά μπαταριών λιθίου συγκριτικά με διαφορετικές τεχνολογίες. Πηγή: (Δούρος, 2021).....	155
EIKONA 5-1: Χάρτης ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή της Μεσογείου.....	166
EIKONA 5-2: Ωριαίο προφίλ κατανομής ηλιακής ενέργειας (Wh/m <sup>2</sup> ).....	169
EIKONA 5-3: Στον άξονα X παρουσιάζονται οι ώρες έκθεσης ηλιακής ακτινοβολίας και στον άξονα Y είναι η ημερήσια κατανομή της άμεσης ηλιακής ενέργειας.....	169
EIKONA 5-4: Ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα για μηδενικές μοίρες.....	170
EIKONA 5-5: Πεδίο προσγείωσης ελικοπτέρου / μεταφοράς προϊόντων όσο το ελικόπτερο βρίσκεται στον αέρα– Winching area.....	172
EIKONA 5-6: Ύψος εμποδίων για την προσγείωση ελικοπτέρου σε πλοίο. Πηγή: (IMO, 1999).....	172



EIKONA 5-7: Διαστάσεις χώρου προσγείωσης ελικοπτέρου με εμπόδια στην πλευρά του πλοίου - Ro-Ro πλοίο. Πηγή: (IMO, 1999) .....	173
EIKONA 5-8: Αεροφωτογραφία του πλοίου που μελετάται. Πηγή: ( <a href="https://www.maltashipphotos.com/productfile.asp?ProductID1=16662&amp;PRODUCTCAT1=Yachts">https://www.maltashipphotos.com/productfile.asp?ProductID1=16662&amp;PRODUCTCAT1=Yachts</a> , 2012). .....	174
EIKONA 5-9: Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	175
EIKONA 5-10: Διαστάσεις και πίσω όψη φωτοβολταϊκού πλαισίου. ....	175
EIKONA 5-11: General arrangement plan of ship. ....	178
EIKONA 5-12: Τοποθέτηση ΦΒ πλαισίων επί του πλοίου μέσω του προγράμματος Rhinoceros. ....	179
EIKONA 5-13: Παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια ανά ημέρα και ανά μήνα.....	181
EIKONA 5-14: Παράλληλη σύνδεση δύο φωτοβολταϊκών κλάδων αποτελούμενοι από πέντε φωτοβολταϊκά πλαίσια ο καθένας και σύνδεση τους με τον ρυθμιστή φόρτισης. Στο σύστημα μας θα είναι 45 όμοιες διατάξεις. ....	185
EIKONA 5-15: Σύνδεση 12 συσσωρευτών σε σειρά με τάση 2 V η κάθε μία δημιουργώντας συνολική τάση 24 V. ....	190
EIKONA 5-16: Χαρακτηριστικά inverter DC – AC που επιλέχθηκε για το σύστημα για 48 V.....	191
EIKONA 5-17: Παράλληλη σύνδεση δύο συστοιχιών συσσωρευτών με έναν inverter. Το σύστημα διαθέτει 22 όμοιες διατάξεις. ....	192
EIKONA 5-18: Σύνδεση σε σειρά υπολειπόμενης συστοιχίας με έναν inverter.....	192
EIKONA 5-19: Προτεινόμενος τρόπος σύνδεσης ΦΒ συστήματος για την τροφοδοσία AC φορτίων.....	193
EIKONA 5-20: Απεικόνιση μηνιαίας αποδιδόμενης ενέργειας συστήματος και απαιτούμενης ενέργειας για τον φωτισμό για τάση 167 [Kw] .....	195

## Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τη ναυτιλία για το διάστημα 2012-2018. Διαχωρισμός ανάλογα το ταξίδι και το είδος του πλοίου. Πηγή: (IMO, 2021)	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: Θεωρητικοί βαθμοί απόδοσης για διάφορα ΦΒ υλικά στους 25 ° C. Πηγή: (Ventre, 2005)	110
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά διάφορων ΦΒ στοιχείων. Πηγή: (Πέρδιος, 2011)	125
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1: Συνολικά φορτία και γεννήτριες που αξιοποιούνται (Τα στοιχεία έχουν δοθεί από την εταιρεία Neptune Lines και αφορούν στο συγκεκριμένο πλοίο που μελετάται).	162
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2: Απαιτούμενη ισχύς για τον φωτισμό σε διάφορες	164
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3: Ενδεικτικά δρομολόγια πλοίου.	164
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-4: Κλίμα στην Ισπανία (Βαρκελώνη) ανά μήνα –	166
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-5: Κλίμα στην Ιταλία ανά μήνα	167
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-6: Κλίμα στην Πορτογαλία ανά μήνα	167
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-7: Δεδομένα ακτινοβολίας για την περιοχή που μελετάται.	168
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-8: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου.	176
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-9: Θερμοκρασιακές κατηγορίες ΦΒ πλαισίου - Μέγιστη τάση λειτουργίας.	176
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-10: Παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια ανά ημέρα και ανά μήνα για ένα έτος	180
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-11: Ονομαστική τάση λειτουργίας φωτοβολταϊκού συστήματος ανάλογα τις διατάξεις	182
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-12: Ονομαστική τάση εξόδου ανάλογα την εγκατεστημένη	182
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-13: Χαρακτηριστικά Ρυθμιστή φόρτισης συστήματος	183
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-14: Ονομαστική τάση συσσωρευτών ανάλογα με την τάση αιχμής του Φωτοβολταϊκού πεδίου	186
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-15: Χωρητικότητα συστήματος συσσωρευτών ανάλογα τις απαιτήσεις του φωτοβολταϊκού πεδίου	188
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-16: Χαρακτηριστικά συσσωρευτή που επιλέχθηκε για το σύστημα	189
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-17: Μέγιστη αποδιδόμενη ΦΒ ενέργεια ανά μήνα –	194
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-18: Δεδομένα κατανάλωσης καυσίμου έως τον Νοέμβριο του 2021 για το πλοίο που μελετάται	195
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-19: Ειδική κατανάλωση SFOC για τη Diesel Engine και η ημερήσια μέση τιμή της ενέργειας σε GWh	197
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-20: Υπολογισμός μηνιαίων τόνων καυσίμου που απαιτούνται για τις 5 ώρες	197
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-21: Υπολογισμός καυσίμου που εξοικονομείται για την κατάσταση	198
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-22: Υπολογισμός μηνιαίων συντελεστών εκπομπών για τους	200
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-23: Υπολογισμός εκπομπών ρύπων σε κιλά για MGO και HFO καύσιμο	201
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-24: Υπολογισμός Εκπομπών ρύπων σε τόνους για ένα έτος και για 20 έτη, για MGO και HFO καύσιμο	201

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-25: Συνολικό κόστος εγκατάστασης.....	202
---	-----

## Πρόλογος

Το αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η αναλυτική περιγραφή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα πλοία και η μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος σε Roll-on/Roll-off πλοίο. Ο ρόλος της εγκατάστασης είναι η μερική κάλυψη φορτίων κατά τη διάρκεια φορτοεκφόρτωσης του αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια. Πρωταρχικός στόχος είναι η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών καυσαερίων στην ατμόσφαιρα. Για να εξακριβωθεί εάν η εγκατάσταση είναι κερδοφόρα θα πρέπει να γίνει σύγκριση της συνολικής αξίας της με την αξία του καυσίμου που εξοικονομείται σε διάστημα 20 ετών. Επιπλέον, η ηλιοφάνεια της περιοχής υπολογίζεται ποιοτικά χρησιμοποιώντας ένα πλήθος λιμένων που προσαράζει το πλοίο. Αρχικά, μελετάται ο χώρος που διαθέτει το πλοίο και επιλέγονται τα φορτία που θα καλυφθούν από το σύστημα. Στη συνέχεια, από το πλήθος των ΦΒ πλαισίων υπολογίζονται οι φορτιστές ρύθμισης, οι συσσωρευτές, οι αντιστροφείς DC-AC και η συνδεσμολογία τους. Έπειτα, από τα δεδομένα του πλοίου και τις καταναλώσεις του έτους 2021 γίνεται υπολογισμός του καυσίμου, που μπορεί να εξοικονομηθεί από τη χρήση ΦΒ συστήματος και υπολογισμός των εκπομπών που αντιστοιχούν στην συγκεκριμένη ποσότητα καυσίμου. Τέλος, γίνεται οικονομική ανάλυση και σύγκριση της αξίας της εγκατάστασης με το κόστος καυσίμου την τρέχουσα περίοδο. Τα κεφάλαια που απαρτίζουν τη διπλωματική είναι τα εξής:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ανάλυση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η οποία οφείλεται στη χρήση ορυκτών καυσίμων για την πρόωση των πλοίων. Επιπλέον, αναφορά στους κανονισμούς που έχουν θεσπιστεί στον κλάδο της ναυτιλίας για την προστασία της ατμόσφαιρας.

Κεφάλαιο 2: Εκτενής ανάλυση των Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα πλοία και αναφορά σε εφαρμογές που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια.

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή του φωτοβολταϊκού φαινομένου και των ημιαγωγών. Αναφορά στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων και στα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους.

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση των ΦΒ πλαισίων και του τρόπου σύνδεσής τους. Επιπλέον, αναφορά στα ΦΒ συστήματα και στις κατηγορίες τους, στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους, αλλά και στους συσσωρευτές.

Κεφάλαιο 5: Εκτενής μελέτη εγκατάστασης ΦΒ συστήματος σε υπαρκτό πλοίο. Παρουσίαση χαρακτηριστικών του πλοίου, σχέδια, καταναλώσεις και περιοχή πλεύσης. Υπολογισμός του ηλιακού δυναμικού της περιοχής και έπειτα, επιλογή ΦΒ πλαισίων, ρυθμιστών φόρτισης, inverters και μπαταριών. Στη συνέχεια, υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας και κόστους εγκατάστασης, αλλά και σύγκριση κόστους εξοικονόμησης καυσίμου με κόστος εγκατάστασης. Ακόμα, υπολογισμός των εκπομπών καυσαερίων που αντιστοιχούν στο καύσιμο που εξοικονομείται. Τέλος, παράθεση των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων της μελέτης.

# Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Η συσχέτιση των ενεργειακών και περιβαλλοντικών προβλημάτων είναι έντονη, καθώς θεωρείται σχεδόν αδύνατο να παραχθεί ή να καταναλωθεί ενέργεια χωρίς επιπτώσεις στη φύση. Τα οικολογικά προβλήματα που σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την ενέργεια είναι η ατμοσφαιρική και η θερμική ρύπανση αλλά και η ρύπανση των υδάτων. Η κύρια αιτία ραγδαίας αύξησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης συνδέεται με την καύση ορυκτών καυσίμων για την κάλυψη ανθρωπίνων αναγκών. Κύριο επιβαρυντικό παράγοντα αποτελεί η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα. Επιπλέον, το 60% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως ευθύνεται για την κλιματική αλλαγή και συνδέεται με την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας, που όμως είναι απαραίτητες για την οικονομική και κοινωνική ευημερία. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό πως η ανάγκη κάλυψης ενεργειακών αναγκών σε συνδυασμό με τους περιορισμένους ενεργειακούς πόρους και την μόλυνση του περιβάλλοντος ανεπιφύλακτα αποτελούν τον πυρήνα της ενεργειακής κρίσης. (Σιδερίδου, Αχιλιάς & Μπικιάρης, 2011)

Οι δραστηριότητες στο θαλάσσιο περιβάλλον συμβάλλουν σημαντικά στην επιβάρυνση της ατμόσφαιρας, καθώς το 95% του εμπορίου διακινείται μέσω των υδάτων. Τα καύσιμα των πλοίων χαρακτηρίζονται από την μεγάλη περιεκτικότητά τους σε αεροζόλη και σε ουσίες που επηρεάζουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Έτσι, με την αύξηση της κίνησης των πλοίων, αυξάνεται και η ρύπανση της ατμόσφαιρας (Parker, 2013).

Η ανάγκη ελαχιστοποίησης χρήσης ορυκτών πόρων, αλλά και η προστασία του περιβάλλοντος από τους ρύπους που εκπέμπουν οδήγησαν στην αναζήτηση νέων μεθόδων με πιο οικολογικό χαρακτήρα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), δηλαδή οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες προέρχονται από ενεργειακά φαινόμενα, όπως ο ήλιος, ο άνεμος, οι κυματισμοί κλπ. Οι ΑΠΕ έχουν την ιδιότητα να βρίσκονται εν αφθονία στο φυσικό περιβάλλον, να είναι πιο φιλικές προς αυτό, χωρίς να εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του αζώτου και άλλα τοξικά απόβλητα. Επίσης, δεν απαιτείται ενεργητική παρέμβαση για την εκμετάλλευση της καθώς αυτή επιδιώκεται με την ροή ενέργειας που υπάρχει στο περιβάλλον. Οι παραπάνω λόγοι δίνουν την ιδιότητα στις ανανεώσιμες πηγές να χαρακτηρίζονται ως 'ήπιες' μορφές ενέργειας.

Έτσι, οι ΑΠΕ θεωρούνται παγκοσμίως η αφετηρία επίλυσης των οικολογικών προβλημάτων τόσο στη στεριά όσο και στην θάλασσα.

Οι πηγές που εξαρτώνται από την ηλιακή ακτινοβολία, όπως η ηλιακή, η βιομάζα και η αιολική δεν πρόκειται να εξαντληθούν όσο υπάρχει ήλιος. Σε αντίθετη περίπτωση η γεωθερμική ενέργεια και τα γεωθερμικά πεδία που ανήκουν στις ΑΠΕ μπορεί να ανανεωθούν σε πάροδο μίας χιλιετίας ή να εξαντληθούν για πάντα. Έτσι, γίνεται σαφές πως ο όρος ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν καλύπτει όλο το εύρος αυτών των πηγών. Ο καλύτερος όρος που μπορεί να δοθεί για να επιτευχθεί ο παραπάνω σκοπός είναι οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας. (Σιδερίδου, Αχιλιάς & Μπικιάρης, 2011)

Στην ενότητα που ακολουθεί αναφέρονται αναλυτικά τα είδη των εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

## 1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

### 1.2.1 Ηλιακή ενέργεια - Ήλιος

Η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο είναι η σωματιδιακή ακτινοβολία (ηλιακός άνεμος) και η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Καθώς η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατευθύνεται προς την επιφάνεια της γης, τη στιγμή που διασχίζει την ατμόσφαιρα δέχεται κάποιες ουσιαστικές αλλαγές. Αυτές οι αλλαγές δημιουργήθηκαν λόγω της ατμοσφαιρικής σύνθεσης. Ένα μόνο μικρό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει στη γη απευθείας από τον ήλιο. Το υπόλοιπο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας είτε επιστρέφει στο διάστημα λόγω ανάκλασης είτε απορροφάται από τα στοιχεία της ατμόσφαιρας (Σιδερίδου, Αχιλιάς & Μπικιάρης, 2011). Επιπλέον, κάθε τετραγωνικό μέτρο της γης δέχεται περίπου 4-6 kWh ενέργειας από τον ήλιο σε διάστημα μίας ημέρας.

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας θεωρείται σκόπιμη, αφού η ποσότητα της ακτινοβολίας που αναφέρεται παραπάνω υπολογίζεται ως σχεδόν η διπλάσια που θα μπορούσε να ληφθεί από τις μη ανανεώσιμες πηγές και περισσότερη από την ενέργεια που καταναλώνει ο άνθρωπος ετησίως (Κορωναίος, 2012).

Η ακτινοβολία που προέρχεται από τον ήλιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με θερμικές και φωτοβολταϊκές μεθόδους, αλλά και για την παραγωγή θερμότητας με τη χρήση ενεργητικών και παθητικών συστημάτων.



ΕΙΚΟΝΑ 1-1: Φωτοβολταϊκά Πλαίσια.  
Πηγή: (<https://www.renovablesverdes.com> , 18.07.2022)



### 1.2.2 Αιολική ενέργεια – Άνεμος

Η ηλιακή ενέργεια έχει την ικανότητα θέρμανσης της επιφάνειας της γης. Η θέρμανση αυτή δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο το εύρος του πλανήτη. Οι αέριες μάζες των περιοχών με υψηλή θερμοκρασία κινούνται προς τις περιοχές χαμηλών θερμοκρασιών με σκοπό την δημιουργία μίας μέσης τιμής. Η διαφορά πίεσης που δημιουργείται μεταξύ ψυχρότερης και θερμότερης περιοχής σε συνδυασμό με την περιστροφή της γης και την κίνηση της θερμοκρασίας οδηγεί στη δημιουργία ανέμων, δηλαδή οριζόντιες κινήσεις μαζών αέρα που ταξιδεύουν από μία περιοχή σε μια άλλη.

Η έννοια της αιολικής ενέργειας παρουσιάζεται από τη μυθολογία με την ύπαρξη του Αιόλου που θεωρούταν ο Ταμίας των Ανέμων. Στο χώρο της ναυσιπλοΐας από το 3000 π.Χ. εμφανίζεται η εκμετάλλευση αυτού του φυσικού φαινομένου με τη χρήση ιστιοφόρων. Για αρκετούς αιώνες χρησιμοποιήθηκαν ανεμόμυλοι από τους Πέρσες τους Έλληνες και τους Αιγύπτιους για άλεσμα δημητριακών και σιτηρών. Στην Ολλανδία χρησιμοποιήθηκαν ανεμόμυλοι για άντληση νερού από πλημμυρισμένες περιοχές. Σταδιακά, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, τον 17ο αιώνα, δημιουργήθηκαν οι αμοστρόβιλοι που αντικατέστησαν τους ανεμόμυλους. Τέλη του 18ου αιώνα η Δανία αρχίζει να εκμεταλλεύεται την αιολική ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω ανεμογεννητριών και στην πορεία μέσω αιολικών πάρκων (Σιδερίδου, Αχιλιάς & Μπικιάρης, 2011).



ΕΙΚΟΝΑ 1-2: Εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας στην Κίνα (Σιντσιάνγκ)  
Πηγή: (Wikipedia - 2005)

Η κινητική ενέργεια που παράγει ο άνεμος με τη βοήθεια της τεχνολογίας της σημερινής εποχής μπορεί να γίνει σε μεγάλο βαθμό αξιοποιήσιμη. Τα κύρια πλεονεκτήματα που επιφέρει η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας είναι:

- Η αύξηση νέων θέσεων εργασίας και εργατικού δυναμικού. Σε παγκόσμιο επίπεδο υπολογίζεται πως για κάθε Μεγαβάτ δημιουργούνται περίπου 14 νέες θέσεις, ενώ για την Ελλάδα, ειδικότερα, απαιτούνται περίπου 3 Μεγαβάτ για τη δημιουργία μίας τοπικής μόνιμης θέσης.
- Η μείωση εκπομπών τοξικών ουσιών και αερίων που συνδέονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου και συνεπώς, η μείωση προβλημάτων υγείας και όξινης βροχής.
- Η οικονομική απόδοση, καθώς το κόστος που σχετίζεται με την εγκατάσταση σταδιακά μειώνεται. Αφού γίνει η εγκατάσταση και έχει δαπανηθεί το μεγαλύτερο μέρος, αυτό που εκκρεμεί είναι μια συνήθης συντήρηση η οποία έχει αρκετά χαμηλό κόστος. Επίσης, τα υλικά κατασκευής τους ανακυκλώνονται κατά 85-90 % και δίνουν τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης.
- Η ασφάλεια στην επένδυση, αφού η τιμή της ενέργειας που παράγεται μέσω ΑΠΕ διατηρείται για αρκετά χρόνια σταθερή (Γκαράκης, 2021).

### **1.2.3 Υδραυλική ενέργεια – Υδατοπτώσεις**

Όταν μία μεγάλη ποσότητα νερού ρέει από περιοχή με μεγάλο υψόμετρο σε περιοχή με χαμηλό, η ενέργεια του από δυναμική μετατρέπεται σε κινητική. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται υδατόπτωση. Για την αξιοποίηση της ενέργειας που παρέχεται από τη ροή νερού χρησιμοποιούνται υδροηλεκτρικά έργα, όπως φράγματα, κλειστοί αγωγοί πτώσεως και υδροστρόβιλοι. Οι υδραυλικές τουρμπίνες έχουν την ιδιότητα μετατροπής της ενέργειας υδατοπτώσεων σε υδροηλεκτρική ενέργεια και χωρίζονται σε μικρής και μεγάλης κλίμακας. Οι μονάδες μικρής κλίμακας τοποθετούνται κοντά σε ποτάμια και κανάλια, σε αντίθεση με της μεγάλης κλίμακας που απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και δεξαμενών μεγάλων διαστάσεων. Είναι εμφανές, λοιπόν, πως οι μονάδες μεγάλης κλίμακας σε αντίθεση με της μικρής, λόγω των εγκαταστάσεων που απαιτούν, επιφέρουν επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον και στο οικοσύστημα.

Οι μονάδες μικρής ενέργειας είναι < 30 MW και χαρακτηρίζονται ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με τον εξής τρόπο: Η κίνηση του νερού μέσα σε τούνελ ενεργοποιεί τις τουρμπίνες που μετατρέπουν αυτή την κινητική ενέργεια σε μηχανική. Έπειτα με τη χρήση γεννητριών η μηχανική

ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η συγκεκριμένη ενέργεια παράγεται αποκλειστικά σε περιοχές με έντονες υδατοπτώσεις (Allaboutenergy, 2022).



ΕΙΚΟΝΑ 1-3: Υδροηλεκτρικό φράγμα στη Λίμνη Πλαστήρα.

Πηγή: (<https://el.wikipedia.org> 2010)

#### 1.2.4 Γεωθερμική ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια πηγάζει από το εσωτερικό της γης προς την επιφάνεια της. Είναι ένα είδος ανανεώσιμης πηγής ενέργειας και δημιουργείται εξαιτίας του γεωθερμικού δυναμικού. Η μετάδοση της θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω ρηγμάτων του υπεδάφους και ηφαιστειακών φαινομένων κοντά στις λιθοσφαιρικές πλάκες.

Η θερμοκρασία του ρευστού που πηγάζει από αυτό το φαινόμενο διαφέρει και χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες.

Χαμηλής Ενθαλπίας: Οι θερμοκρασίες του ρευστού κυμαίνονται μεταξύ 25 και 80 βαθμούς Κελσίου και συνήθως το ρευστό εφαρμόζεται για θέρμανση θερμοκηπίων, χωρών και παραγωγή γλυκού νερού.

Μέσης Ενθαλπίας: Συνήθως χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού με τη χρήση κυκλώματος φρέον με χαμηλό σημείο ζέσεως καθώς και στην ξυλεία για θέρμανση και ξήρανση. Οι θερμοκρασίες αυτής της κατηγορίας κυμαίνονται από 80 έως 150 βαθμούς Κελσίου.

Υψηλής Ενθαλπίας: Η συγκεκριμένη κατηγορία χρησιμοποιείται αποκλειστικά για παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι θερμοκρασίες υπερβαίνουν τους 150 βαθμούς Κελσίου.

Η πρώτη βιομηχανική χρήση της γεωθερμικής ενέργειας εφαρμόστηκε στην Ιταλία. Σκοπός ήταν η εξάτμιση νερού που περιείχε βορικό οξύ μέσω των φυσικών ατμών αλλά και η θέρμανση κατοικιών. Η Ισλανδία λόγω της γεωλογικής της θέσης έχει τη δυνατότητα να καλύπτει μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και θέρμανσης με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας. Οι χώρες που διαθέτουν πηγές γεωθερμικής ενέργειας έχουν ένα κοινό γεωλογικό χαρακτηριστικό. Είναι όλες αρκετά σειсмоγενείς και έχουν ένα μεγάλο αριθμό ηφαιστείων στην έκτασή τους (Ζγούρης, 2015).

Η Ελλάδα, λόγω γεωγραφικής και γεωλογικής θέσης, έχει αρκετές πηγές άντλησης γεωθερμικής ενέργειας και των τριών ειδών Ενθαλπίας. Αρκετές ηπειρωτικές και νησιωτικές περιοχές της Ελλάδας διαθέτουν γεωθερμικές πηγές μικρού βάθους και αξιοποιούνται για τουριστικούς σκοπούς συμβάλλοντας στην αύξηση της οικονομίας της χώρας. Η Μήλος διαθέτει γεωθερμικές πηγές και έχουν ήδη γίνει πέντε επιπλέον γεωτρήσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη της γεωθερμίας. Οι θερμοκρασίες είναι περίπου ίσες με 350 βαθμούς Κελσίου σε βάθος 1.000 μέτρων. Το 1971 άρχισε η αναζήτηση πηγών γεωθερμικής ενέργειας με τη ΔΕΗ να χρηματοδοτεί αρκετές έρευνες με σκοπό την εύρεση πηγών Υψηλής Ενθαλπίας και την παραγωγή ηλεκτρισμού (Τζεφέρης, 2014).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας διαφέρουν ανάλογα τη θερμοκρασία. Έτσι έχουμε:

- Γεωθερμική ενέργεια θερμοκρασίας από 25 έως 40 °C χρησιμοποιείται σε θερμά λουτρά.
- Για ενέργεια θερμοκρασίας άνω των 15 °C βρίσκουμε εφαρμογές στην ιχθυοκαλλιέργεια και για άνω των 25 °C στα θερμοκήπια (για την άνθηση των φυτών). Επίσης μπορούν να βρεθούν και εφαρμογές για εξασφάλιση αντιπαγετικής προστασίας στους ίδιους βαθμούς Κελσίου.
- Για εφαρμογές σε αντλίες θερμότητας απορρόφησης η θερμοκρασία είναι συνήθως κάτω των 60 °C, ενώ για υδρόψυκτες είναι κάτω των 30 °C. Για θέρμανση με καλοριφέρ άνω των 60 °C για αερόθερμα άνω των 40 °C και για ενδοδαπέδια συστήματα άνω των 25 °C.
- Για γεωργικές και αγροτικές εφαρμογές η θερμοκρασία είναι άνω των 60 °C.
- Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η θερμοκρασία πρέπει να είναι άνω των 90 °C.

Η γεωθερμική ενέργεια ενώ έχει αρκετά οφέλη και χρησιμοποιείται σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών, επιφέρει αρκετά προβλήματα.

- Έχει την τάση να διαβρώνει μεταλλικές επιφάνειες και να δημιουργεί επικαθίσεις πάνω σε αυτές.
- Εκπέμπει αρκετά τοξικά αέρια, κυρίως υδρόθειο, και επιφέρει οικολογικό πρόβλημα λόγω της διάχυσης των ρευστών στο φυσικό περιβάλλον μετά τη χρήση τους.

Τα παραπάνω προβλήματα προκύπτουν από την ίδια τη σύσταση του ρευστού, αφού μένει για αρκετό καιρό εγκλωβισμένο στα πετρώματα του υπεδάφους και επηρεάζεται από διάφορα διαλυμένα αέρια και άλατα.

Η βελτιστοποίηση του ρευστού μπορεί να επιτευχθεί με την επεξεργασία των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσής του. Για τη μείωση των ποσοστών των επικαθίσεων στις μονάδες γεωθερμίας υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η ρύθμιση του pH του ρευστού αλλά και η χρήση χημικών ουσιών είναι κάποιες από τις προτεινόμενες μεθόδους. Επίσης, κατά τη διακοπή της μονάδας μπορεί να γίνει απομάκρυνση των στερεών και καθάρισμα των επιφανειών. Για την προστασία των επιφανειών και αποφυγή των διαβρώσεων πρέπει να γίνεται σωστή επιλογή υλικού με πολυμερικά στοιχεία, να χρησιμοποιούνται στρώματα προστασίας διάβρωσης στις επιφάνειες και τέλος, να γίνεται σωστός σχεδιασμός της μονάδας.

Για την προστασία των υδάτινων αποδεκτών κατά τη χρήση γεωθερμίας υψηλής ενθαλπίας πρέπει να ακολουθηθούν κάποιες οδηγίες. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και την έντονης περιεκτικότητας του ρευστού σε χημικές ουσίες κρίνεται αναγκαία η επεξεργασία αυτού ώστε να επιτευχθεί η μείωση της θερμοκρασίας. Έτσι, το ρευστό θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια σε υδάτινους αποδέκτες (Σιδερίδου, Αχιλιάς & Μπικιάρης, 2011).

### 1.2.5 Βιομάζα

Η βιομάζα είναι η ύλη που προέρχεται από το οργανικό περιβάλλον, δηλαδή τα ξύλα, γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα αλλά και ζωικά και φυτικά υπολείμματα. Η βιομάζα έχει την ιδιότητα να χρησιμεύει ως καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας.

Τα φυτά, λοιπόν, με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης μετατρέπουν την ενέργεια του ήλιου σε βιομάζα και με τη σειρά τους οι ζωικοί οργανισμοί μέσω της τροφής τους λαμβάνουν ένα μέρος αυτής. Με αυτόν τον τρόπο συμπεραίνεται πως η βιομάζα αποτελεί μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που παράγεται από τον ήλιο.

Ένα παράδειγμα που δείχνει το πόσο συχνή είναι η χρήση της βιομάζας, από τα παλαιά χρόνια, είναι το ξύλο. Η καύση του ξύλου παράγει θερμότητα και βοηθάει σε διάφορες οικιακές χρήσεις. Αρκετές περιοχές της Ευρώπης, της Λατινικής Αμερικής και της Αφρικής χρησιμοποιούν φυτικά υπολείμματα, όπως άχυρα και καρπούς, αλλά και ζωικά απόβλητα, όπως κοπριά για τη θέρμανση τους.

Στην Ευρώπη τη σημερινή εποχή και κυρίως στην Ελλάδα μία διαδεδομένη καύσιμη ύλη είναι το πέλλετ (Pellet). Αποτελείται από συμπυκνωμένο πριονίδι και η καύση τους γίνεται από ειδικές θερμάστρες – σόμπες. Σκοπός είναι η παραγωγή θερμότητας και η αντικατάσταση του ξύλου και του τζακιού με οικονομικά και εξυπηρετικά οφέλη. Η κατανάλωση κυμαίνεται στα 0,6 με 2,5 kg/ώρα και το κόστος ανέρχεται περίπου στα 0,55€/κιλό.

Η παραγωγή ενέργειας πραγματοποιείται με δύο μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος είναι ο διαχωρισμός. Χωρίζουν τα απόβλητα σε δύο κατηγορίες, τα ελαφριά και τα βαριά. Η κατηγορία των ελαφριών αποβλήτων έχει την ιδιότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ατμολεβήτων και μετατροπής αυτών σε ατμό. Η ενέργεια που παράγεται από τα συγκεκριμένα απόβλητα είναι μικρή συγκριτικά με άλλα είδη πηγών ενέργειας, δηλαδή της τάξης των 1.300-2.000 kcal/kg. Το κύριο όφελος της μεθόδου αυτής είναι η ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων αφού εξαφανίζονται με την καύση. Η δεύτερη μέθοδος είναι η μετατροπή των απορριμμάτων σε αέρια καύσιμα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διατήρηση αυτών σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και υγρασία. Σκοπός είναι η δημιουργία μεθανίου και βιοαερίου. Έπειτα η καύση γίνεται με τη χρήση μηχανών εσωτερικής καύσης αλλά και αεροστροβίλων.

Η περιεκτικότητα σε θείο της βιομάζας είναι σχεδόν μηδενική με αποτέλεσμα την μη παραγωγή διοξειδίου του θείου που ευθύνεται για την όξινη βροχή. Αυτό τη καθιστά αρκετά φιλική προς το περιβάλλον. Το ίδιο φυσικά συμβαίνει και με το διοξείδιο του άνθρακα το οποίο αφού απελευθερωθεί από την καύση, δεσμεύεται πάλι από τα φυτά που δημιουργούν βιομάζα. Επίσης, η βιομάζα ενισχύει το εμπορικό ισοζύγιο, αφού παράγεται εντός της χώρας και μειώνει την ανάγκη εισαγωγής καυσίμων. Έτσι, γίνεται εξοικονόμηση του συναλλάγματος και εξασφαλίζεται ο εφοδιασμός ενέργειας της χώρας.

Κάθε ενεργειακή πηγή χαρακτηρίζεται και από τα πλεονεκτήματα αλλά και από τα μειονεκτήματα της. Ένα κύριο μειονέκτημα της βιομάζας είναι το υψηλό κόστος που απαιτεί ο εξοπλισμός της συγκριτικά με αυτόν των συμβατικών καυσίμων. Επίσης, η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας καθίσταται αρκετές φορές δύσκολη λόγω της υγρασίας αλλά και του αυξημένου όγκου της. Τέλος, η δυσκολία στην αποθήκευση και στη μεταφορά σε συνδυασμό με την μεγάλη κατανάλωση βιομάζας που δυσχεραίνει την τροφοδοσία των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης της, αυξάνουν το κόστος της (Σιδερίδου, Αχιλιάς & Μπικιάρης, 2011).

Η αντικατάσταση συμβατικών καυσίμων με εναλλακτικά για την μετακίνηση των αυτοκινήτων και την οικιακή θέρμανση, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ σε κτίρια και η δημιουργία ηλιακών και αιολικών πάρκων στην ακτή, αλλά και η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας αποτελούν κινήσεις που αφορούν στην παραγωγή ενέργειας φιλική προς το περιβάλλον για τις καθημερινές ανάγκες του ανθρώπου. Ωστόσο, εκτός από την επιθυμία κάλυψης των καθημερινών αναγκών και την χερσαία εφαρμογή ΑΠΕ, κρίνεται αναγκαία και η αξιοποίηση του υδάτινου περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, οι μετακινήσεις με τη χρήση πλοίων, όπως ήδη έχει αναφερθεί, έχουν αυξηθεί τόσο για την διακίνηση του εμπορίου και την εξαγωγή ορυκτών πόρων όσο και για αναψυχή και αλιεία. Η μεγαλύτερη επίπτωση που έχουν τα πλοία στο περιβάλλον είναι η επιβάρυνση της ατμόσφαιρας, λόγω των καυσίμων που χρησιμοποιούν για την μετακίνηση τους. Έτσι, σταδιακά, στόχος είναι η ανάδειξη των ΑΠΕ επί των πλοίων για την ελαχιστοποίηση της μόλυνσης που προκαλούν και παράλληλα τον μη αρνητικό επηρεασμό της ναυτιλίας και της οικονομίας.

### 1.3 Ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία

Η ατμοσφαιρική ρύπανση, αν και η επίδραση της δεν είναι αισθητά ορατή εξ' αρχής, όπως η ρύπανση από πετρελαιοκηλίδες, επιδρά αρνητικά στο ευρύ περιβάλλον δημιουργώντας αρκετές διαφοροποιήσεις στην ποιότητα της ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα ο κλάδος της ναυτιλίας έχει έντονη επίδραση στην αλλαγή του κλίματος της Γης. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization, IMO) στο διάστημα από το 1970 έως το 2013 υπολόγισε, πως η ναυτιλιακή χωρητικότητα σε όλη σχετίζεται με τη μεταφορά προϊόντων και αγαθών ετησίως, σε παγκόσμιο επίπεδο, αυξήθηκε από 2,6 σε 9,5 δισεκατομμύρια τόνους αποδεικνύοντας την σημαντική αξία του κλάδου. Το αποκορύφωμα της ανάπτυξης ήρθε το 2004 με την αξία των εξαγωγών να αγγίζει τα 8,9 τρισεκατομμύρια δολάρια.

Η ναυτιλία χρησιμοποιείται ως μέσο ανάπτυξης της παγκόσμιας οικονομίας και σύμφωνα με το Διεθνές Ναυτιλιακό Επιμελητήριο (International Chamber of Shipping) παρέχει τη δυνατότητα μεταφοράς εμπορευμάτων και αγαθών ποσότητας περίπου ίσης με το 90% παγκοσμίως. Εκτός της μεταφοράς εμπορευμάτων και αγαθών, η θαλάσσια δραστηριότητα βοηθά και στην μεταφορά ανθρώπων, στην αύξηση του τουρισμού και στην αλιεία. Για την πρόωση των πλοίων έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές μέθοδοι που σταδιακά εξελίσσονταν. Ωστόσο το αποτέλεσμα αυτής της εξέλιξης ήταν η συνεχής επιβάρυνση του πλανήτη. Στα πρώτα στάδια της ναυτιλίας χρησιμοποιήθηκαν ιστία για την κίνηση των πλοίων καταλήγοντας στο ναυτιλιακό ντίζελ (MDO) και στο βαρύ μαζούτ (HFO).

Σύμφωνα με τις μελέτες του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) για την προστασία του περιβάλλοντος από τη ναυτιλία παρατηρήθηκε αύξηση χρήσης τέτοιων καυσίμων καθώς ο κλάδος άνθιζε όλο και περισσότερο. Αν και οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) από τη ναυτιλία θεωρούνται σχετικά λιγότερες σε σύγκριση με άλλα μέσα μεταφοράς και διακίνησης εμπορίου, κατά τη διάρκεια μίας πενταετίας (από το 2007 έως το 2012) η ναυτιλία ευθυνόταν για το 2,8% έως 3% των ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Το 2013 η Διεθνής Σύμβαση Πρόληψης της Ρύπανσης από τα Πλοία (MARPOL) εφάρμοσε κανονισμούς προστασίας του περιβάλλοντος με σκοπό την μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έως 50% μέχρι το 2050. Επίσης, στα νέα πλοία καθιστά υποχρεωτικό τον δείκτη ενεργειακής απόδοσης (Efficiency Design Index – EEDI) και σε



όλα τα πλοία το Σχέδιο Ενεργειακής Απόδοσης (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP). Επιπλέον, το Παράρτημα IV της MARPOL θέτει κανόνες για την συμμόρφωση των ναυτιλιακών εταιρειών απέναντι στην προστασία της ατμόσφαιρας από τα πλοία, δηλαδή την μείωση εκπομπών αζώτου (NO<sub>x</sub>) και θείου (SO<sub>x</sub>), που συμβάλλουν στην τρύπα του όζοντος και στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

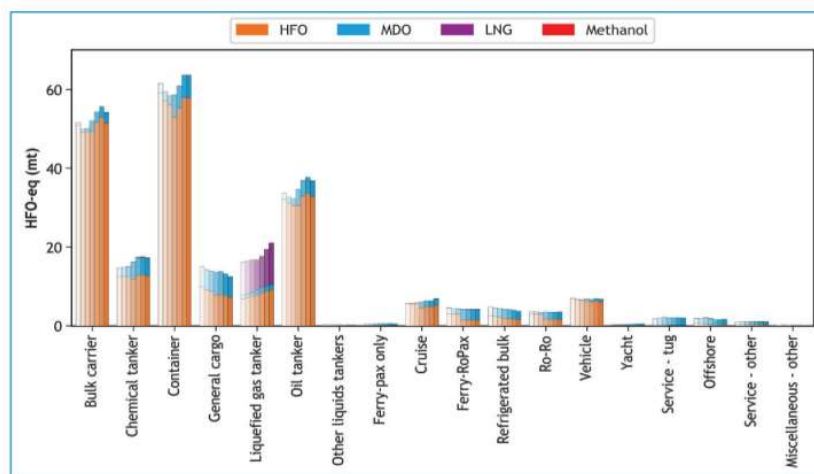
Μέσω της τέταρτης μελέτης GHG (Greenhouse Gas Emissions) του IMO του έτους 2020 υπολογίστηκε πως οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), μεθανίου (CH<sub>4</sub>) και οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) στη ναυτιλία αυξήθηκαν από 977 εκατομμύρια σε 1.076 εκατομμύρια τόνους στο διάστημα από το 2012 έως το 2018. Η αύξηση αυτή αντιστοιχεί στο 9,6%. Συγκεκριμένα, για το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) η αύξηση αυτή είναι ίση με 9,3% καθώς μέσα στο ίδιο διάστημα από 962 εκατομμύρια τόνους, έφτασε τους 1.056. Για τα ταξίδια αναψυχής εκτιμάται μία αύξηση της τάξεως των 5,6%, δηλαδή από 701 εκατομμύρια τόνους εκπομπών CO<sub>2</sub> σε 740 εκατομμύρια τόνους, αλλά ο ρυθμός αύξησης είναι μικρότερος συγκριτικά με τις συνολικές εκπομπές της ναυτιλίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τη ναυτιλία για το διάστημα 2012-2018 σε τόνους. Διαχωρισμός ανάλογα το ταξίδι και το είδος του πλοίου. Πηγή: (IMO, 2021)

Year	Global anthropogenic CO <sub>2</sub> emissions	Total shipping CO <sub>2</sub>	Total shipping as a percentage of global	Voyage-based International shipping CO <sub>2</sub>	Voyage-based International shipping as a percentage of global	Vessel-based International shipping CO <sub>2</sub>	Vessel-based International shipping as a percentage of global
2012	34,793	962	2.76%	701	2.01%	848	2.44%
2013	34,959	957	2.74%	684	1.96%	837	2.39%
2014	35,225	964	2.74%	681	1.93%	846	2.37%
2015	35,239	991	2.81%	700	1.99%	859	2.44%
2016	35,380	1,026	2.90%	727	2.05%	894	2.53%
2017	35,810	1,064	2.97%	746	2.08%	929	2.59%
2018	36,573	1,056	2.89%	740	2.02%	919	2.51%

Τα πλοία που φέρουν την μεγαλύτερη ευθύνη για την εκπομπή ρύπων είναι τα containerships, τα bulk carriers και τα oil tankers. Συγκεκριμένα αυτά που διαθέτουν την χαμηλότερη ολική χωρητικότητα παράγουν τα μεγαλύτερα ποσοστά καυσαερίου (Fenhann, 2017).

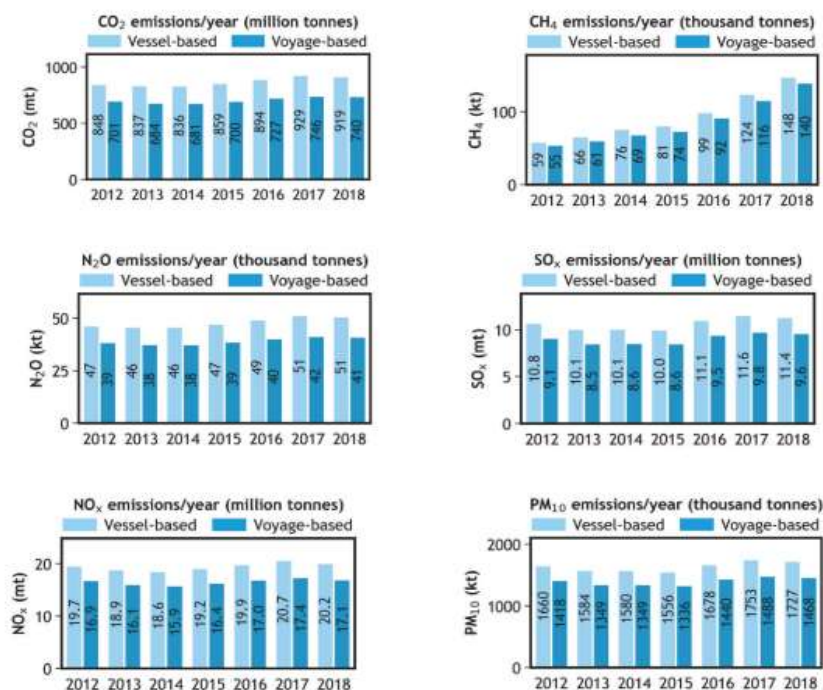
Το βαρύ μαζούτ (HFO) παραμένει το κυρίαρχο καύσιμο στην ναυτιλία σε ποσοστό 79% της συνολικής κατανάλωσης καυσίμων για το έτος 2018. Ωστόσο, αυτό που παρατηρείται στο διάστημα από το 2012 έως το 2018 είναι η μείωση κατά 7% του HFO και η αύξηση του ναυτικού ντίζελ (MDO) και του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) κατά 6% και 0,9% αντίστοιχα. Η μεθανόλη το ίδιο διάστημα αρχίζει να αξιοποιείται ως καύσιμο λαμβάνοντας την τέταρτη θέση στην κατάταξη των πιο σημαντικών καυσίμων της ναυτιλίας και σημειώνοντας αύξηση της τάξεως του 87%.



ΕΙΚΟΝΑ 1-4: Διεθνής κατανάλωση καυσίμου ανά τύπο πλοίου, σύμφωνα με την κατανομή των διεθνών εκπομπών με βάση το ταξίδι.

Πηγή: <https://www.imo.org> IMO, 2020

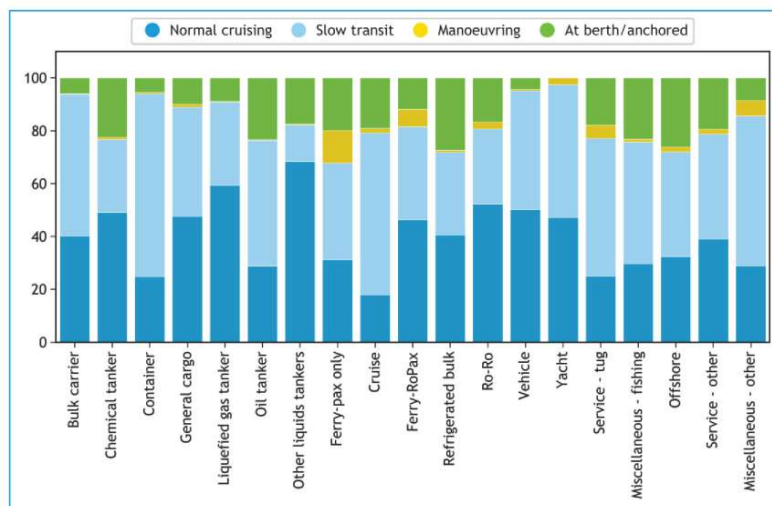
Οι εκπομπές  $SO_x$  και  $NO_x$  παίζουν σημαντικό ρόλο στην δημιουργία φωτοχημικού νέφους και στην επιβάρυνση της τρύπας του όζοντος. Σύμφωνα με την Πέμπτη Έκθεση Αξιολόγησης IPCC η ναυτιλία είναι υπεύθυνη για το 13% των παγκόσμιων εκπομπών  $SO_x$  και για το 15% των  $NO_x$ . Αξίζει να σημειωθεί πως τα οξείδια του θείου και του αζώτου ευθύνονται σε μεγάλο βαθμό για την καταστροφή του περιβάλλοντος, καθώς έχουν την ιδιότητα μείωσης του pH της βροχής και κατά συνέπεια την δημιουργία όξινης βροχής, αλλά και την επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου.



ΕΙΚΟΝΑ 1-5: Εκτιμήσεις διεθνών ναυτιλιακών εκπομπών για το διάστημα από 2012 έως 2018.

Πηγή: <https://www.imo.org>, IMO 2020

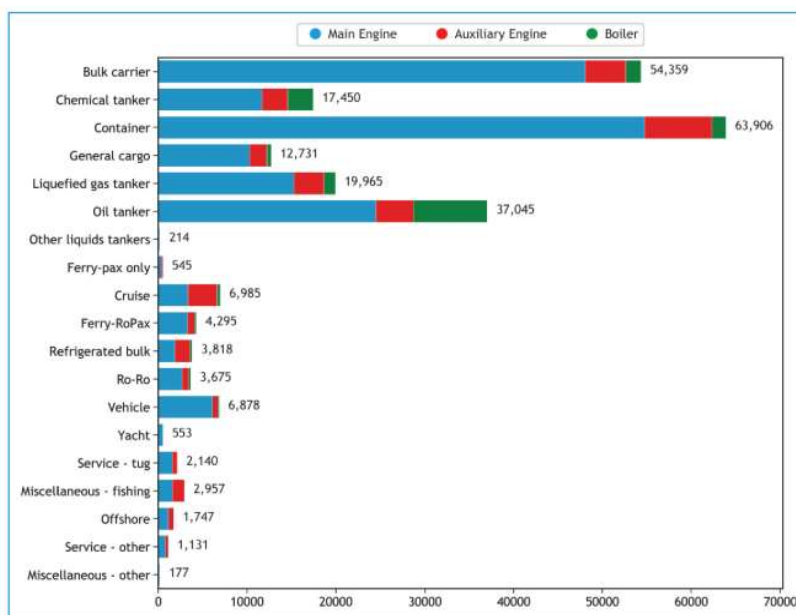
Η εικόνα 1-6 απεικονίζει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για διάφορα πλοία στις καταστάσεις λειτουργίας τους. Οι καταστάσεις λειτουργίας διαχωρίζονται με βάση την ταχύτητα, τις καταναλώσεις και την απόσταση του πλοίου από την ακτή.



ΕΙΚΟΝΑ 1-6: Ποσοστό διεθνών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για το 2018 με βάση το ταξίδι.

Πηγή: <https://www.imo.org>, IMO 2020

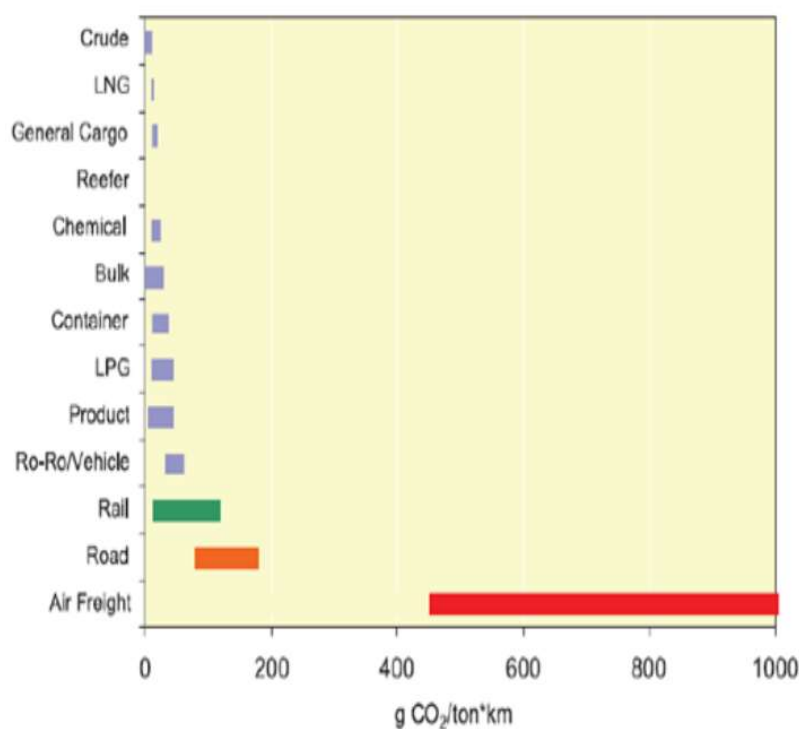
Στην εικόνα 1-7 απεικονίζεται η ετήσια κατανάλωση καυσίμου στην ναυτιλία για διάφορους τύπους πλοίων. Το μπλε μέρος συμβολίζει την κατανάλωση της κύριας μηχανής, το κόκκινο την κατανάλωση της βοηθητικής μηχανής και η πράσινη του λέβητα (IMO, 2021).



ΕΙΚΟΝΑ 1-7: Διεθνής κατανάλωση καυσίμου, για το έτος 2018 με κατανομή ανάλογα την κύρια μηχανή, τη βοηθητική μηχανή και τον λέβητα.

Πηγή: (<https://www.imo.org>, IMO 2020)

Σε σύγκριση άλλων μεθόδων μεταφοράς με τα πλοία παρατηρήθηκε πως τα πλοία δεν αποτελούν την κύρια αιτία αύξησης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Στην εικόνα 1-8 χρησιμοποιήθηκε ως αφετηρία και μέτρο σύγκρισης ένα δεξαμενόπλοιο, για μεταφορά ενός τόνου φορτίου για ένα ναυτικό μίλι, με σκοπό την παρουσίαση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για διάφορους τρόπους μεταφοράς. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί πως η μελέτη που σχετίζεται με την εικόνα ολοκληρώθηκε πριν μία δεκαετία και τα ποσά αυτά ενδέχεται να έχουν ελαττωθεί (Parker, 2013).



ΕΙΚΟΝΑ 1-8: Εκπομπές CO<sub>2</sub> σε εμπορικά και μεταφορικά μέσα.  
Πηγή: IMO, 2009

Την σημερινή εποχή, λόγω των επιρροών του COVID-19 οι προβλέψεις παρουσιάζουν μείωση εκπομπών ρύπων το 2021 και το 2022 κατά μεγάλο βαθμό. Αυτό οφείλεται στην παύση λειτουργίας πολλών βιομηχανιών και στην διακοπή των θαλάσσιων δραστηριοτήτων για εκείνο το χρονικό διάστημα. Ωστόσο, εκτιμάται πως οι εκπομπές καυσαερίων αν και σήμερα δεν φέρουν μεγάλο μερίδιο ευθύνης για την καταστροφή του πλανήτη, μελλοντικά θα αποτελούν την κύρια αιτία μόλυνσης. Για αυτόν τον λόγο κρίνεται αναγκαία η θέσπιση και η εφαρμογή ισχυρότερων κανονισμών προστασίας των υδάτων και αποφυγής εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από θαλάσσιες δραστηριότητες (IMO, 2020).

## 1.4 Κανονισμοί ελέγχου καυσαερίων στη ναυτιλία

Η ρύπανση είναι μία διαδικασία μόλυνσης του οικοσυστήματος, δηλαδή αύξησης της συγκέντρωσης μίας χημικής ένωσης πάνω από τις επιτρεπτές τιμές που είναι αποδεκτές. Η συγκεκριμένη διαδικασία επιβαρύνει αρνητικά τους ρυθμούς ανάπτυξης των ειδών του οικοσυστήματος και φυσικά τις ανάγκες και τη ζωή του ανθρώπινου είδους. Για τον λόγο αυτόν, διάφοροι οργανισμοί θέσπισαν κανόνες προστασίας του περιβάλλοντος και έλεγχου των εκπομπών καυσαερίων.

Στον κλάδο της ναυτιλίας, το 1948 στην Ναυτιλιακή Συνδιάσκεψη των Ενωμένων Εθνών εγκρίθηκε η σύμβαση για την ίδρυση του IMCO (Intergovernmental Maritime Consultative Organization) με έδρα το Λονδίνο, ο οποίος το 1982 τροποποίησε το όνομα του και μετατράπηκε σε IMO (International Maritime Organization – Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός). Για την εφαρμογή της σύμβασης της ίδρυσης του IMO χρειάστηκαν 7 κράτη με στόλο μεγαλύτερο του ενός εκατομμυρίου κόρων. Ο IMO σταδιακά απέκτησε ισχυρή θέση στην οργάνωση και διαχείριση ζητημάτων που αφορούν την ναυτιλία με αποτέλεσμα την άσκηση επιρροής στην ναυτιλιακή αγορά, στις κυβερνήσεις και στις ναυτιλιακές εταιρείες (Αλεξόπουλος, 2018).

Την δεκαετία του 1960 έγιναν μερικές τροποποιήσεις στο καταστατικό του και μέσα σε αυτές εντάχθηκε και η προστασία του περιβάλλοντος από τις εκπομπές καυσαερίων στη ναυτιλία, η δημιουργία μέτρων ασφαλείας και η ενίσχυση του ανθρώπινου δυναμικού.

Για την επίτευξη των στόχων θα πρέπει να ψηφιστούν και να εφαρμοστούν συμβάσεις από τα κράτη – μέλη που συμμετέχουν. Έτσι, το 1974 δημιουργήθηκε η σύμβαση SOLAS (Convention of Safety of Life at Sea), η οποία σε συνδυασμό με τη σύμβαση MARPOL αναλύουν θέματα ναυσιπλοΐας και μεθόδους μείωσης της θαλάσσιας ρύπανσης από ατυχήματα ή λειτουργικά προβλήματα των πλοίων. Τα κράτη, στα όρια της δικαιοδοσίας τους έχουν το δικαίωμα απαγόρευσης πλεύσης πλοίων που δεν υπακούν στους κανόνες της σύμβασης. Η σύμβαση της MARPOL εγκρίθηκε τον Νοέμβριο του 1973 από τον IMO και τέθηκε σε ισχύ στις 2 Οκτωβρίου το 1983.

Η σύμβαση της MARPOL αποτελούταν από πέντε Παραρτήματα που αφορούσαν σε κανονισμούς πλοίων για την ρύπανση από πετρέλαιο και από υγρές τοξικές ουσίες χύδην, για την έγχυση λυμάτων και απορριμμάτων στο θαλάσσιο περιβάλλον και για την μεταφορά επικίνδυνων ουσιών.

Το 1997 εγκρίθηκε ένα Πρωτόκολλο για την τροποποίηση της σύμβασης και στις 19 Μαΐου του 2005 τέθηκε σε ισχύ το Παράρτημα VI «Πρόληψη Ρύπανσης του Αέρα από τα Πλοία». Στόχος του Παραρτήματος VI είναι η θέσπιση κανονισμών και ορίων για την μείωση οξειδίων του αζώτου  $NO_x$  και του θείου  $SO_x$ . Επιπλέον, το 2011 προστέθηκαν στο Παράρτημα μέτρα ενεργειακής απόδοσης για την μείωση των εκπομπών καυσαερίων, τα οποία τέθηκαν σε ισχύ το 2013 (Εξαρχος, 2013).

Τα πρότυπα εκπομπών του Παραρτήματος VI χωρίζονται σε τρεις βαθμίδες ανάλογα το έτος κατασκευής και εγκατάστασης των κινητήρων ντίζελ κάτω των 130 KW. Η πρώτη βαθμίδα αφορά στις εκπομπές καυσαερίων και εγκρίθηκε μαζί με το παράρτημα το 1997. Ο κανονισμός που περιλάμβανε η πρώτη βαθμίδα αφορά στην περιεκτικότητα του μαζούτ σε θείο, η οποία θα έπρεπε να είναι ίση με 4,5% κ.β. Για τις περιοχές με αυξημένη κινητικότητα, όπως τα λιμάνια το ποσό αυτό είναι ίσο με 1,5% κ.β. Σε περίπτωση που δεν είναι εφικτή η χρήση τέτοιου είδους μαζούτ, τα πλοία θα πρέπει να διαθέτουν φίλτρα και κατάλληλες τεχνολογίες, όπως τα scrubbers, για τον καθαρισμό του καυσίμου και την διαχείριση των εκπομπών των οξειδίων του θείου (IMO, 2009).

Το 2008 εντάχθηκαν στο Πρωτόκολλο άλλες δύο βαθμίδες. Η δεύτερη από τις πλέον τρεις βαθμίδες αφορά στους κινητήρες με ημερομηνία κατασκευής από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2011 και μετά, και θέτει επιπλέον όρια στις εκπομπές οξειδίων αζώτου και θείου. Τα ποσά αυτά υπολογίζονται με βάση μία συνάρτηση που εξαρτάται από την ταχύτητα. Επιπλέον, το ίδιο έτος τέθηκαν κανονισμοί για τους κινητήρες που κατασκευάστηκαν πριν το 2000, οι οποίοι θα πρέπει να φέρουν ειδικά πιστοποιητικά με μετρήσεις και κύκλους δοκιμών. Η Τρίτη βαθμίδες περιλαμβάνει κινητήρες με ημερομηνία κατασκευής από 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου του 2016 και μετά. Εξάιρεση αποτελούν τα πλοία αναψυχής κάτω των 500 κόνων και μήκους άνω των 24 m για την ίδια χρονολογία κατασκευής. Τέλος, οι κινητήρες που ανήκουν στις βαθμίδες II και III θα πρέπει να πραγματοποιούν κύκλους δοκιμών πριν τεθούν σε λειτουργία (Parker, 2013).

Στα πλαίσια της ενίσχυσης της πράσινης ναυτιλίας, από το 2019, σύμφωνα με τον IMO, έχει θεσπιστεί η καταγραφή δεδομένων κατανάλωσης καυσίμου, απόστασης και χρονικής διάρκειας πλεύσης. Τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιηθούν στις αρχές του 2023 για την εφαρμογή του δείκτη έντασης άνθρακα (CII). Τα πλοία, λοιπόν, θα ομαδοποιούνται σε διάφορες κατηγορίες CII, που θα κυμαίνονται από Α έως Ε ανάλογα με το πόσο φιλικά είναι προς το περιβάλλον. Κάθε χρόνο τα κριτήρια θα γίνονται πιο αυστηρά και κάθε

περίπου δύο χρόνια τα πλοία θα πρέπει να παρουσιάζουν ενέργειες βελτίωσης. Σε περίπτωση που δεν ληφθούν νέα μέτρα, τα πλοία θα λαμβάνουν χαμηλότερη βαθμολογία CII. Ο κύριος υπεύθυνος της παραπάνω διαδικασίας είναι ο πλοιοκτήτης καθώς οφείλει να επικαιροποιεί το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης (SEEMP) μέσω της βελτιωμένης βαθμολογίας (Mettälä, 2021).

## 1.5 Συμπεράσματα

Στη σύγχρονη εποχή παρατηρείται αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων, όπως οξείδια του αζώτου και θείου, τα οποία συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή του πλανήτη. Έτσι, άρχισε η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες βασίζονται καθαρά σε φυσικά φαινόμενα.

Στον κλάδο της ναυτιλίας λόγω αυξημένων εκπομπών ρύπων θεσπίστηκαν κανονισμοί με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος από την ατμοσφαιρική ρύπανση. Οι ναυτιλιακές εταιρείες ωστόσο, λόγω της αύξησης της τιμής του καυσίμου και των νέων μέτρων πρόληψης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όπως είναι αναμενόμενο, αντιμετωπίζουν σημαντική οικονομική επιβάρυνση. Η παραπάνω αιτία προκαλεί αύξηση των χερσαίων μεταφορών και μείωση των θαλάσσιων δραστηριοτήτων δημιουργώντας πιο έντονο οικονομικό πρόβλημα στον κλάδο της ναυτιλίας.

Στα πλαίσια της μείωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη ναυτιλία, εκτός από κανονισμούς που καθιερώθηκαν για την εξασφάλιση της, θεσπίστηκε και ο βαθμός CII, ο οποίος θα υποχρεώνει τους πλοιοκτήτες να κάνουν τεχνικές βελτιώσεις στα πλοία ανά χρόνο. Οι βελτιώσεις αυτές θα συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος και μπορούν να είναι χαμηλού κόστους, όπως η δρομολόγηση με βάση τον καιρό, η συντήρηση του πλοίου και ο καθαρισμός της γάστρας. Εκτός από εκείνες τις δράσεις χαμηλού κόστους, προωθούνται και οι εναλλακτικές μέθοδοι πρόωσης και η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επί των πλοίων, οι οποίες αναλύονται εκτενέστερα στο κεφάλαιο που ακολουθεί.



## 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.

Γκαράκης, Κ. (2021). Ο Χάρτης της Αιολικής Ενέργειας, Ανακτήθηκε 15 Μαΐου 2022, από [www.michanikos-online.gr](http://www.michanikos-online.gr)

Έξαρχος, Σ. (2013). Ατμοσφαιρική Ρύπανση από Πλοία. Διεθνείς και Ευρωπαϊκές Εξελίξεις (Αδημοσίευτη Διπλωματική Εργασία). Πανεπιστήμιο Πειραιώς.

Ζγούρης, Χ. (2015). Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Βιώσιμη Τουριστική Ανάπτυξη (Αδημοσίευτη Διπλωματική Εργασία). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη

Κορωναίος, Χ. (2012). Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Διδακτικές σημειώσεις). Ανάκτηση από <http://environ.survey.ntua.gr/files/mathimata/6420/APE-kef1-6.pdf>

Περιβάλλον & Διαχείριση Ενέργειας. Ανακτήθηκε 13 Μαΐου 2022 από <http://www.allaboutenergy.gr/>

Σιδερίδου Ειρ. , Αχιλιάς Δ. & Μπικιάρης Δ. (2011). Καύσιμα – Λιπαντικά. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Τζεφέρης, Π (2014). Το ιστορικό της γεωθερμίας στη Μήλο-Κίμωλο. Ανακτήθηκε 20 Αυγούστου 2022 από [https://www.oryktosploutos.net/2014/12/blog-post\\_25-19/](https://www.oryktosploutos.net/2014/12/blog-post_25-19/)

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

International Maritime Organization. (2009) M1, Climate Change and the Shipping Response. IMO 2009. Ανακτήθηκε 4 Οκτωβρίου 2021, από [www.imo.org](http://www.imo.org)

Kitack, L. (2021) Fourth IMO GHG Study 2020. London: International Maritime Organization.

Mettälä Ossi, (2021). How to navigate CII: what it is and how you can stay compliant. Retrieved 16 August 2022, from <https://www.napa.fi>

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

Renovables Verdes, (2022). Photovoltaic Panels. Retrieved July 26, 2022 from <https://www.renovablesverdes.com>

The International Maritime Organization's Review of Vessel Air Emissions And The Proposal by the Government of the United States. (2021). Retrieved from [https://www.worldshipping.org/pdf/vessel\\_air\\_emissions\\_wsc\\_position\\_paper\\_on\\_us\\_g\\_pproposa.pdf](https://www.worldshipping.org/pdf/vessel_air_emissions_wsc_position_paper_on_us_g_pproposa.pdf).

Wikipedia, (2005). Εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας στην Κίνα. Ανακτήθηκε 26 Ιουλίου 2022 από <https://el.wikipedia.org>.

Wikipedia, (2010). Υδροηλεκτρικό φράγμα στη Λίμνη Πλαστήρα. Ανακτήθηκε 26 Ιουλίου 2022 από <https://el.wikipedia.org>.

## **Κεφάλαιο 2. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στα πλοία**

### **2.1 Γενικά**

Στη ναυτιλία, με την πάροδο των ετών, παρουσιάζονται νέες ιδέες και μέθοδοι πρόωσης πλοίων. Μέσα σε διάστημα 150 ετών υπήρξαν αρκετές εναλλαγές που οδήγησαν στην κατανάλωση καυσίμων υψηλών εκπομπών ρύπων. Αρχικά, για την πρόωση των πλοίων χρησιμοποιούνταν πανιά (ιστία) τα οποία σταδιακά αντικαταστάθηκαν από τον άνθρακα με σκοπό τη παραγωγή ατμού. Έπειτα, η χρήση του άνθρακα άρχισε να ελαχιστοποιείται καθώς ήρθε στην επιφάνεια το ναυτιλιακό πετρέλαιο και το μαζούτ. Μέσα από αυτή την εξέλιξη στον τρόπο μετακίνησης πλοίων παρατηρήθηκε βελτίωση της θερμικής απόδοσης η οποία λάμβανε τιμές άνω του 50% στην κατηγορία των αργών πλοίων. Αυτή η εξέλιξη όμως, δεν είχε ευνοϊκά αποτελέσματα για το περιβάλλον αυξάνοντας την ανάγκη προστασίας του πλανήτη.

Στόχος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα πλοία είναι η δημιουργία υβριδικών και βοηθητικών συστημάτων πρόωσης, με σκοπό την εξοικονόμηση καυσίμου για διάφορες ενεργειακές λειτουργίες του πλοίου. Οι εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών στα πλοία βασίζονται στην αιολική ενέργεια, στην ενέργεια από τον ήλιο, στα βιοκαύσιμα αλλά και στην ενέργεια που συλλέγεται από τα κύματα. Γενικά, η τοποθέτηση ανανεώσιμων πηγών γίνεται είτε από την αρχή της σχεδίασης του πλοίου είτε το ήδη υπάρχον πλοίο υφίσταται κάποιο είδος τροποποίησης. Η καλύτερη επιλογή τοποθέτησης συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι σε πλοία κάτω των 10.000 τόνων που έχουν μικρότερες ενεργειακές ανάγκες και μεταφέρουν λιγότερο φορτίο συγκριτικά με μεγαλύτερα πλοία. Γενικά, τα συγκεκριμένα πλοία χρησιμοποιούνται ευρέως σε μεγαλύτερη συχνότητα από τα υπόλοιπα και έχουν την ιδιότητα εκπομπής υψηλών τιμών διοξειδίου του άνθρακα.

Όπως είναι ήδη γνωστό, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στα πλοία μπορούν να εφαρμοστούν οποιαδήποτε χρονική στιγμή είτε με μετασκευές εκ των υστέρων είτε κατά τη διάρκεια ναυπήγησης τους. Ενώ η ιδέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη ναυτιλία θεωρείται αρκετά φιλόδοξη και αποτελεσματική, η ένταξη τους συναντά πολλές δυσκολίες τόσο από την συνεχή ασυμφωνία πλοιοκτητών και ναυπηγών, όσο και από την μη ύπαρξη ανάλογων συστημάτων στο εμπόριο. Για την ομαλή ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα πρέπει να γίνει σωστή και προσεκτική μελέτη. Επίσης, κρίνεται αναγκαία η δημιουργία μέτρων στήριξης και κίνητρων προώθησης των ΑΠΕ που θα επιφέρουν το βέλτιστο αποτέλεσμα και την εμπορική βιωσιμότητα.

Οι κύριες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη ναυτιλία και κάποια παραδείγματα εφαρμογής αυτών παρουσιάζονται παρακάτω:

- Αιολική ενέργεια, με τη χρήση σταθερών πανιών όπως στο UT Wind Challenger project για τη δημιουργία υβριδικού συστήματος πρόωσης, μαλακών πανιών, όπως το πλοίο της Greenheart's και το φορτηγό πλοίο της B9 Shipping με 3000dwt και με τη χρήση ανεμογεννητριών. Δυστυχώς, στη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν υπάρχουν πρωτότυπα που έχουν υλοποιηθεί με επιτυχία.



ΕΙΚΟΝΑ 2-1: Απεικόνιση των α) Greenheart Ship, β) B9 Ship.

Πηγές: (<https://inhabitat.com/greenheart-project-the-worlds-first-open-source-solar-powered-ship/>, <https://gcaptain.com/sail-powered-container-ship/>.)

Ανακτήθηκαν: (27.09.2022)

- Βιοκαύσιμα, με τη χρήση bio-oil, όπως το πλοίο Meri, το οποίο αγγίζει το 100% στη χρήση βιοκαυσίμου.



ΕΙΚΟΝΑ 2-2: Απεικόνιση του πλοίου Meri Ship.

Πηγή: (<https://www.shipspotting.com/photos/2833550>)

Ανακτήθηκε: (27.09.2022)

- Ηλιακή ενέργεια, με τη χρήση συστημάτων φωτοβολταϊκών, όπως το SolarSailor της OCIUS Technology.



ΕΙΚΟΝΑ 2-3: Απεικόνιση του Solar Sailor ship.

Πηγή: ([http://www.change-climate.com/Transport\\_Land\\_Sea\\_Sustainable/](http://www.change-climate.com/Transport_Land_Sea_Sustainable/))

Ανακτήθηκε: (27.09.2022)

- Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου (Hydrogen fuel cells). Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετά ποταμόπλοια και πορθμεία. Η πρώτη επιτυχημένη εφαρμογή κυψελών καυσίμου υδρογόνου που επιτεύχθηκε ηλεκτρική απόδοση ίση με 44,5% ήταν το 2012 στο σκάφος Viking Lady που κατάφερε λειτουργία άνω των 7.000 ωρών. Την ίδια χρονιά παρουσιάστηκαν κάποιες ιδέες για ελαχιστοποίηση των εκπομπών στο πλοίο Scandlines από τον Germanischer Lloyd.



ΕΙΚΟΝΑ 2-4: Απεικόνιση του Viking Lady, το οποίο χρησιμοποιεί κυψέλες υδρογόνου για την πρόωση του.

Πηγή:

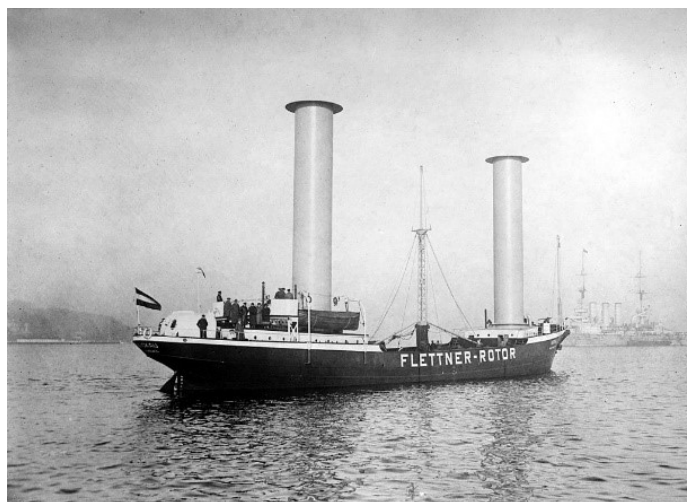
(<https://www.marinetraffic.com/en/photos/of/ships/shipid:315058/ships>)

Ανακτήθηκε: (27.09.2022)

Γενικά, η εναλλακτική πηγή ενέργειας που εκτιμάται ότι προσφέρει τις περισσότερες δυνατότητες είναι τα βιοκαύσιμα. Η χρήση των βιοκαυσίμων όμως, εξαρτάται κυρίως από τα παγκόσμια αποθέματα πρώτων υλών δημιουργίας τέτοιας μορφής ενέργειας καθώς η διαθεσιμότητα είναι περιορισμένη. Ένας προσιτός τρόπος ένταξης των ΑΠΕ στη ναυτιλία είναι η χρήση μεικτών και υβριδικών συστημάτων. Έτσι, θα επιτευχθεί σταδιακή μελέτη και θα δοθεί χρόνος αντιμετώπισης τυχόν προβλημάτων και δημιουργίας νέων τεχνολογιών οδηγώντας στην ομαλή και ολοκληρωτική ένταξη των ΑΠΕ στο θαλάσσιο περιβάλλον. (IRENA, 2015)

## 2.2 Ιστορική Αναδρομή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα πανιά ήταν το πρώτο μέσο πρόωσης που κινούταν με ενέργεια που πηγάζει από την ίδια τη φύση, τη αιολική. Η μετάβαση από τα πανιά στη χρήση ορυκτών καυσίμων πραγματοποιήθηκε στα τέλη του 19<sup>ου</sup> μέχρι τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα, ένα διάστημα που χαρακτηρίζεται από έντονες ενεργειακές κρίσεις. Σε περιπτώσεις ενεργειακής κρίσης η ανάγκη αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξανόταν αισθητά με αποτέλεσμα την δημιουργία καινοτομιών φιλικές προς το περιβάλλον. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας καινοτομίας είναι ο ρότορας Flettner (Flettner Rotor) που άρχισε να χρησιμοποιείται μετά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο. Σταδιακά, στα τέλη του 1920 η χρήση του άρχισε να περιορίζεται καθώς αναπτύχθηκε η παραγωγή φθηνών καυσίμων και μηχανών. Σε γενικές γραμμές, σε κάθε απόπειρα αύξησης της χρήσης των ΑΠΕ ακολουθούσε και ένα συμβάν το οποίο εμπόδιζε αυτή την κίνηση. Αυτό παρατηρήθηκε επιπλέον και στην πετρελαϊκή κρίση του 1979, όπου ακολούθησε μία σειρά πολλών υποσχόμενων δοκιμών στις ανανεώσιμες πηγές, αλλά διακόπηκαν καθώς το 1986 υπήρξε πτώση της τιμής του πετρελαίου. Σκοπός των δοκιμών ήταν η εξοικονόμηση καυσίμου από 10 έως 30%, αλλά η μείωση της τιμής του πετρελαίου εμπόδισε αυτές τις οικολογικές κινήσεις (IRENA, 2015).



ΕΙΚΟΝΑ 2-5: The Buckau Ship, το πρώτο πλοίο με σύστημα πρόωσης Flettner Rotor. Φωτογραφία του 1924.

*Πηγή: (Wikipedia, 2022)*

Φτάνοντας, λοιπόν, στον 20<sup>ο</sup> αιώνα, η παγκοσμιοποίηση της οικονομίας και η άνοδος που παρουσιάζει η Κίνα στον κλάδο της κατασκευής επέφεραν σημαντική αύξηση της διεθνούς και παγκόσμιας εμπορικής ναυτιλίας. Το 2015 στη συμφωνία των Παρισίων για την κλιματική αλλαγή παρουσιάστηκαν οι πρώτες απόπειρες ένταξης πράσινης ενέργειας

στην παγκόσμια οικονομία. Παρ' όλα αυτά, για άλλη μία φορά οι προσπάθειες δεν είχαν ιδιαίτερη επιτυχία και πολλές από τις πιο ισχυρές χώρες δεν υπέγραψαν τα συμφωνημένα πρωτόκολλα. Αυτό αποτέλεσε αρνητικό παράγοντα στην προσπάθεια αναχαίτησης της κλιματικής αλλαγής.

Την σημερινή εποχή ωστόσο, ο πόλεμος μεταξύ Ουκρανίας και Ρωσίας, αλλά και οι σχέσεις Ελλάδας με Τουρκία είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση των τιμών των καυσίμων και την έλλειψη προσβασιμότητας σε φυσικό αέριο. Αυτό το γεγονός, λοιπόν, συναρτίζει της οικολογικής καταστροφής ωθεί σε νέες πράσινες επενδύσεις και στην παροχή επιδοτήσεων για την εφαρμογή τους στη ναυτιλία. (Μελάς, 2022)



## 2.3 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί ένα καλό παράδειγμα ανανεώσιμης πηγής ενέργειας και μετά το πέρας της εποχής των ορυκτών πόρων και καυσίμων, θα αποκτήσει αξία και θα θεωρείται από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται ευρέως στην ξηρά, ωστόσο η ανάπτυξη της και οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί για την εκμετάλλευση της στις μεταφορές, και κυρίως στις θαλάσσιες, δεν σημειώνουν σπουδαία άνοδο. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξασφάλιση ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία, ή ως σύστημα πρόωσης. Έτσι, αντικαθίσταται ένα μέρος του καυσίμου ντίζελ από μία φιλική προς το περιβάλλον ενέργεια και αυτό προσφέρει μείωση ρύπων, αλλά και μείωση κατανάλωσης καυσίμου. Ο ρόλος της, όμως, για την ώρα είναι καθαρά βοηθητικός αφού δεν μπορεί να εξασφαλίσει τη συνολική απαιτούμενη ενέργεια που ζητά ένα πλοίο και η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη συλλογή της είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα (IRENA, 2015).

### 2.3.1 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα συστήματα φωτοβολταϊκών και η εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλιακών κυψελών έχει έντονη απήχηση στο χερσαίο περιβάλλον και πλέον αποτελεί την συχνότερη επιλογή παραγωγής "πράσινης" ενέργειας. Έτσι, σταδιακά, η χρήση φωτοβολταϊκών έκανε την εμφάνιση της και στη ναυτιλία, τα οποία αρχικά εφαρμοζόντουσαν σε μικρά σκάφη, κυρίως αναψυχής. Δυστυχώς, σε μεγάλα πλοία η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά είναι σχετικά μικρή συγκριτικά με την απαιτούμενη και γι' αυτό η λύση των φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν προτιμάται. Η παραγόμενη ενέργεια βέβαια, δεν αποτελεί το μόνο αποτρεπτικό λόγο επιλογής της συγκεκριμένης ΑΠΕ. Ο διαθέσιμος χώρος στο κατάστρωμα είναι από τα βασικά προβλήματα, καθώς είναι περιορισμένος σε αρκετά είδη πλοίων. Παρ' όλα αυτά, μια ενδεικτική λύση για την χρήση των φωτοβολταϊκών και σε μεγάλα πλοία είναι η αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου και η δημιουργία συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με τη χρήση μπαταριών με σκοπό είτε την παροχή βοηθητικής πρόωσης είτε την μείωση κατανάλωσης καυσίμου που χρησιμοποιούταν για λοιπές λειτουργίες (IRENA, 2015).

Παρ' όλες τις δυσκολίες που αναφέρθηκαν έχουν γίνει αρκετές δοκιμές ένταξης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πλοία και τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ικανοποιητικά. Τον Δεκέμβριο του 2008 με τη λήξη κατασκευής του πλοίου Auriga Leader άρχισαν οι δοκιμές λειτουργίας του με φωτοβολταϊκά πάνελ. Εκεί ήταν που διαπιστώθηκε η δυσκολία

σταθεροποίησης της παραγόμενης ενέργειας καθώς οι καιρικές συνθήκες δημιουργούσαν αυξομειώσεις. Το 2009 το Τεχνολογικό Ινστιτούτο Μασαχουσέτης μαζί με τη Nippon Yusen Kaisha Line (NYK) παρουσίασαν την ιδέα υβριδικών συστημάτων τα οποία παρέχουν ελαχιστοποιήσεις στις διακυμάνσεις της παραγόμενης ενέργειας μέσω των μπαταριών νικελίου – υδρογόνου, γνωστές ως Gigacell. Τέλος, η εταιρεία Kawasaki Heavy Industries θα ασχοληθεί με την εμπορική διάθεση των υλικών και του υβριδικού συστήματος σε πλοία (NYK, 2015).



ΕΙΚΟΝΑ 2-6: Αυτόνομα Φ/Β συστήματα σε πλοίο εξόρυξης πετρελαίου  
Πηγή: (photovoltaic.gr, 2022)

### 2.3.2 Παραδείγματα Φωτοβολταϊκών εφαρμογών σε πλοία

#### **Auriga Leader**

Το Auriga Leader είναι ένα Roll-on/Roll-off πλοίο, το οποίο μεταφέρει οχήματα σε παγκόσμιο επίπεδο, όπως εκείνα της εταιρείας Mitsubishi από την Ιαπωνία και άλλων μεγάλων εταιρειών. Η καινοτομία του συγκεκριμένου πλοίου είναι η παραγωγή ενός ποσοστού της ενέργειας του μέσω φωτοβολταϊκού συστήματος. Το Auriga Leader έχει τη δυνατότητα μεταφοράς 6.200 αυτοκίνητα και το μήκος του φτάνει τα 200 μέτρα.

Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων που διαθέτει το πλοίο είναι ίσος με 328 και η ισχύς που παρέχει αγγίζει τα 40 kW. Η ισχύς αυτή είναι ίση με το 10% της συνολικής ισχύος που διαθέτει το πλοίο όταν βρίσκεται στο λιμάνι. Επιπλέον, το 0,05% της ισχύος αξιοποιείται για την πρόωση του πλοίου και το 1% για ηλεκτρική χρήση, όπως σε διάφορες

αντλίες και φωτισμό. Η συνολική αξία της εγκατάστασης ανέρχεται στα 2.000.000 \$ και τα οφέλη που παρουσίασε σε διάστημα ενός έτους είναι η εξοικονόμηση καυσίμου κατά 13 τόνους και η μείωση των εκπομπών  $CO_2$  κατά 40 τόνους.

Η συγκεκριμένη εγκατάσταση ακόμη και μετά την ολοκλήρωση και την χρήση της εξακολουθεί να παρακολουθείται μέχρι την εύρεση κατάλληλης λειτουργίας που θα επιφέρει σταθερή παροχή ενέργειας ακόμη και σε δύσκολες καιρικές συνθήκες. Τέλος, το Auriga Leader αποτελεί το πλοίο που οδηγεί στην όλο και πιο συχνή ανάδειξη νέων τεχνολογιών και στην προώθηση τέτοιων επενδύσεων στον χώρο της εμπορικής ναυτιλίας.



ΕΙΚΟΝΑ 2-7: Φωτοβολταϊκό σύστημα του Auriga Leader Ship.  
Πηγή: (<https://www.marineinsight.com/types-of-ships>, 2022)

### **Nichioh Maru**

Το Nichioh Maru είναι οχηματαγωγό Ro-Ro πλοίο, το οποίο κατασκευάστηκε από την Nissan και διαθέτει φωτοβολταϊκά πάνελ στο κατάστρωμα του και ειδικά διαμορφωμένα γάστρα για τη μείωση της τριβής. Επιπλέον, διαθέτει LED φωτισμό και για την εξοικονόμηση καυσίμου υπάρχει ηλεκτρονικά ελεγχόμενος κινητήρας. Το μήκος του Nichioh Maru είναι ίσο με 169,95 m και διαθέτει χωρητικότητα για 1.380 αυτοκίνητα. Τα δρομολόγια που εκτελεί είναι μεταξύ των περιοχών Kanto (Orrama), Kinki (Kobe) και Kyushu (Kanda).

Το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι ίσο με 281 και η ενέργεια που παράγεται τροφοδοτεί τον φωτισμό του πλοίου. Το πρώτο του ταξίδι έγινε το 2012 και θεωρείται από τα πρώτα φορτηγά πλοία στην Ιαπωνία που διαθέτουν φωτοβολταϊκό σύστημα.

Η Nissan υπολογίζει ετήσια μείωση καυσίμου ίση με 1.400 τόνους, η οποία ισοδυναμεί με μείωση εκπομπών  $CO_2$  της τάξεως των 4.200 τόνων. Το Nichio Maru μαζί με το The City of St. Peterburg αποτελούν μέρος του πράσινου στόλου της Nissan.



ΕΙΚΟΝΑ 2-8: Φ/Β σύστημα του Nichio Maru ship.  
Πηγή: (Marine Traffic, 2022)

### **Motor Ship**

Το Motor Ship Tunaror PlanetSolar ανήκει στην κατηγορία των καταμαράν και διαθέτει κατάστρωμα με συνολικό εμβαδόν  $512m^2$ . Όλο το κατάστρωμα του πλοίου αξιοποιείται για την παραγωγή ενέργειας μέσω ηλιακών συλλεκτών, οι οποίοι γεμίζουν 6 μπλοκ μπαταριών ιόντων λιθίου. Το βάρος των συσσωρευτών είναι ίσο με 8,5 τόνους και έχουν τη δυνατότητα τροφοδοσίας για 72 ώρες χωρίς να χρειαστεί φόρτιση. Όλες οι ανάγκες του πλοίου καλύπτονται καθαρά από το φωτοβολταϊκό σύστημα και το πλοίο τέθηκε σε λειτουργία το 2010.



ΕΙΚΟΝΑ 2-9: Motor Ship - Tunaror PlanetSolar.  
Πηγή: (<http://elizabethqueenseaswinn.com>)  
Ανακτήθηκε: (05.08.2022)

## Blue Star Delos

Το Blue Star Delos ανήκει στον στόλο της Blue Star Ferries και είναι από τα πρώτα πλοία που πλέον σε Ελληνικά ύδατα και διαθέτουν φωτοβολταϊκά πλαίσια. Στόχος της κατασκευής ήταν η μελέτη και ο έλεγχος της συμπεριφοράς του συστήματος σε αντίξοες καιρικές συνθήκες.

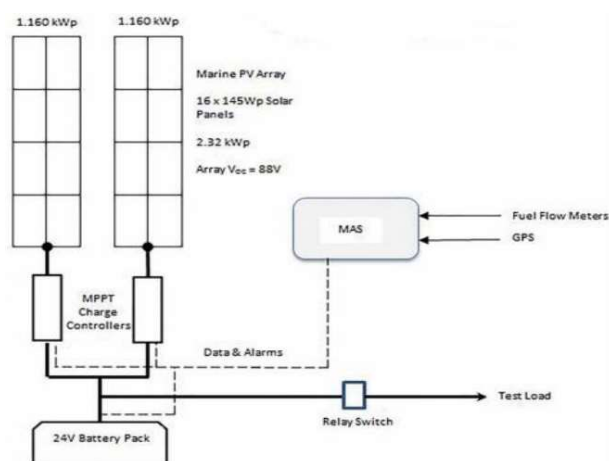
Η Blue Star Ferries για την εφαρμογή του φωτοβολταϊκού συστήματος συνεργάστηκε με δύο ακόμη εταιρείες, την Kei System και την Eco Marine. Η πορεία του πλοίου μελετήθηκε έναν ολόκληρο χρόνο, καθώς στόχος ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού συστήματος κάθε εποχή του χρόνου και της απόδοσης τους μήνες με την περισσότερη ηλιοφάνεια.



ΕΙΚΟΝΑ 2-10: Φ/Β σύστημα Blue Star Delos.

Πηγή: (<https://e-nautilia.gr>, 2014)

Σκοπός πλέον της εταιρείας είναι η μελλοντική εξέλιξη του συστήματος και η κάλυψη ενεργειακών αναγκών, όπως ο φωτισμός και διάφορα συστήματα ναυσιπλοΐας. Στην εικόνα 2-11 παρουσιάζεται ένα αρχικό διάγραμμα του συστήματος.



ΕΙΚΟΝΑ 2-11: Διάγραμμα Φ/Β συστήματος Blue Star Delos σε πειραματικό στάδιο.

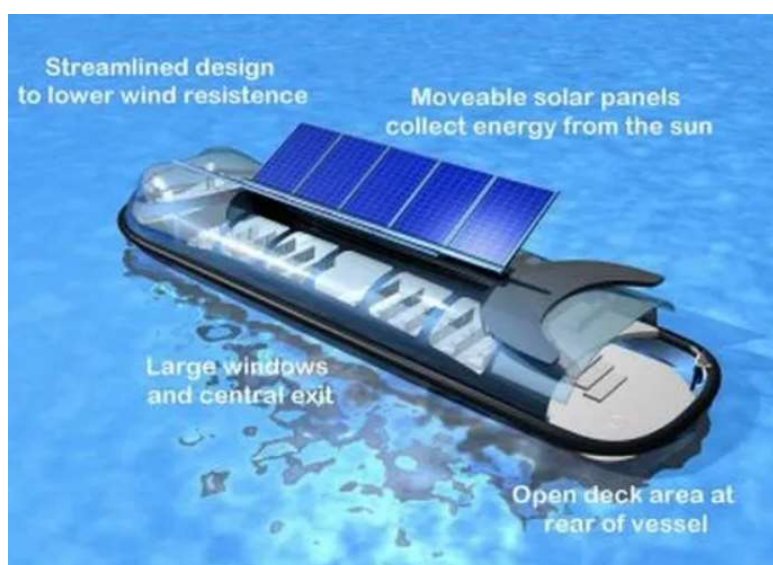
Πηγή: (Zisis, 2016)

## Υβριδικό σκάφος Tonbo

Η εταιρεία Eco Marine Power έχει δημιουργήσει ένα μοντέλο υβριδικού σκάφους, το Tonbo, το οποίο διαθέτει τη νεότερη πράσινη τεχνολογία της εποχής. Συγκεκριμένα στην οροφή του διαθέτει ηλιακό πάνελ, όπου η ενέργεια θα συλλέγεται σε μπαταρίες λιθίου με σκοπό την κάλυψη μέρους του φωτισμού και της θέρμανσης, αλλά και ενός ποσοστού της πρόωσης του σκάφους.

Εκτός από το πάνελ που θα υπάρχει στην οροφή, το σκάφος θα έχει δυνατότητα παραγωγής ενέργειας μέσω λήψης ισχύος από την ακτή χρησιμοποιώντας παράλληλα δίκτυο γεννητριών επί του πλοίου. Επιπλέον, ένα σύστημα ταχείας φόρτισης επί του πλοίου θα επιτρέπει την φόρτιση των μπαταριών σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Οι εναλλακτικές δυνατότητες παραγωγής ενέργειας, αλλά και η βελτίωση του υβριδικού συστήματος θαλάσσιας ισχύος (ΥΣΘΙ) του σκάφους καθιστούν το Tonbo ως μία ελκυστική πρόταση που θα επιφέρει οικονομικό κέρδος ως προς το καύσιμο και οικολογικά οφέλη.

Το σκάφος είναι σχεδιασμένο από ειδικό αλουμίνιο που χρησιμοποιείται στην ναυτιλία με διαστάσεις 30 μέτρα μήκος και 8 μέτρα πλάτος. Σε συνδυασμό με την μορφή της γάστρας, το σκάφος έχει τη δυνατότητα ελιγμών και πλεύσης σε ποταμούς και σε περιοχές με περιορισμένο χώρο. Επιπλέον, το Tonbo μπορεί να μεταφέρει 200 έως 250 επιβάτες και διαθέτει ειδικά διαμορφωμένο κατάστρωμα και περιοχή παρατήρησης μπροστά. Ο επαναστατικός σχεδιασμός του σκάφους αποτελεί μέρος της μελλοντικής εξέλιξης για τις μεταφορές σε ποταμούς παγκοσμίως.



ΕΙΚΟΝΑ 2-12: Σχεδιασμός υβριδικού πλοίου Tonbo.  
Πηγή: (Eco Marine Power)

## **Super Eco Ship 2030 - NYK**

Ο σχεδιασμός των σύγχρονων πλοίων και οι καινοτόμες ιδέες που επικρατούν στη σύγχρονη κοινωνία θα επιφέρουν ραγδαίες εξελίξεις στον χώρο της ναυτιλίας. Η ναυτιλία, η οποία εξακολουθεί να αποτελεί την οικονομικότερη λύση μεταφοράς εμπορεύματος φέρει και μεγάλο μερίδιο ευθύνης για την σταδιακή καταστροφή του πλανήτη. Έτσι, η ανάπτυξη πλοίων πιο φιλικά προς το περιβάλλον αποτελούν την μοναδική λύση.

Το Super Eco Ship 2030 αποτελεί την μελλοντική εξέλιξη που απαιτούν οι ανάγκες της εποχής. Η καινοτομία που θα διαθέτει το συγκεκριμένο πλοίο είναι η μέθοδος φόρτωσης, η οποία θα γίνεται με ολοκληρωμένο σύστημα κάτω από το κλειστό κύριο κατάστρωμα του. Έτσι, η ανάγκη μεταφοράς εξοπλισμού από την ακτή καταργείται και επιτυγχάνεται σταθερότητα του σκάφους και ενδεχόμενη ολοκληρωτική αφαίρεση έρματος.

Η πλήρη του πλοίου θα διαθέτει όλα τα μηχανήματα και τους χώρους ενδιαίτησης του πληρώματος και το σχήμα της θα επιτρέπει την καλύτερη πλευση. Τα νέα υλικά κατασκευής, όπως υψηλής αντοχής χάλυβας και διάφορα κράματα θα μειώσουν το βάρος του σκάφους κατά 20%. Η μείωση του βάρους θα επιφέρει και μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 9% (Hiteshk, 2011), (Προβατάς, 2017).

Για την πρόωση και την κάλυψη διάφορων ενεργειακών αναγκών του Super Eco Ship 2030 θα χρησιμοποιούνται κυψέλες καυσίμου, οι οποίες εξασφαλίζουν προστασία του περιβάλλοντος. Οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται η κύρια μέθοδος παραγωγής ενέργειας με τη χρήση μεθανόλης ή υδρογόνου και σε συνεργασία με τα ηλιακά πάνελ που θα καλύπτουν την περιοχή του εμπορεύματος θα καλύπτονται όλες οι απαιτήσεις του. Επιπλέον, συγχρόνως με τον βέλτιστο σχεδιασμό του πλοίου υπολογίζεται συνολική μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 69%. Αυτά τα αποτελέσματα καθιστούν το Super Eco Ship 2030 το πλοίο του μέλλοντος.



EIKONA 2-13: Σχεδιασμός Super Eco Ship 2030.

Πηγή: (Elomatic, 2022)

## 2.4 Αιολική Ενέργεια

Ο άνεμος αποτελεί άμεσα διαθέσιμη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που υπάρχει εν αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Αν και κυμαίνεται ανάλογα με διάφορες περιοχές έχει επιτευχθεί η αξιοποίηση του πολύ πριν ανακαλυφθεί η ατμομηχανή. Χρησιμοποιούταν ως μέθοδος πρόωσης μικρών πλοίων, με την χρήση πανιών, τα οποία μετέφεραν αρκετά μέλη πληρώματος. Τα κύρια μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας είναι η διακύμανση της δύναμης του ανέμου κατά περιοχές και χρονικές περιόδους και η δυσκολία στην αξιοποίηση όλου του δυναμικού πρόωσης όταν πλέουν προς τον άνεμο. Στόχος είναι η δημιουργία είτε μικρών πλοίων είτε μεγάλων φορτηγών που θα χρησιμοποιούν την αιολική ενέργεια για κύρια ή βοηθητική πρόωση.

### 2.4.1 Μαλακά Ιστία – Soft Sails

Η συγκεκριμένη κατηγορία των μαλακών ιστίων χρησιμοποιείται σε μικρά σκάφη αναψυχής και σε ιστιοπλοϊκά αγώνων. Τα πανιά μπορούν να αξιοποιήσουν αρκετό από το δυναμικό που παράγεται από τον άνεμο και η τοποθέτησή τους γίνεται είτε με μετασκευή σε υπάρχοντα σκάφη είτε εξ αρχής κατά την σχεδίαση νέων κατασκευών. Φυσικά, με το πέρασ των ετών δημιουργήθηκαν και νέες καινοτομίες όπως τα συστήματα Dyna-Rig το 1960. Τα συστήματα αυτά καθυστέρησαν να εφαρμοστούν σε ιστιοφόρα σκάφη καθώς υπήρχε έλλειψη κατασκευαστικών υλικών. Η πρώτη εφαρμογή έγινε σε ένα από τα μεγαλύτερα σκάφη αναψυχής, το Maltese Falcon που αργότερα μετονομάστηκε σε Falcon Rig. Ακολούθησε η εταιρεία Dykstra Naval Architects με το φορτηγό πλοίο Ecoliner χωρητικότητας 7.000 DWT και η εταιρεία Greenheart με ένα φορτηγό χωρητικότητας 75 DWT. Το σύστημα Dyna-Rig αποτελείται από έναν ενιαίο πίνακα, ο οποίος χειρίζεται αποκλειστικά από ένα άτομο στη γέφυρα του πλοίου και για τη σωστή ρύθμιση της γωνίας



των ιστίων ανάλογα με τη ροή του ανέμου, το κατάρτι περιστρέφεται γύρω από τον κεντρικό του άξονα. Σκοπός είναι η απορρόφηση του δυναμικού του ανέμου ανεξάρτητα από τη δύναμη και την κατεύθυνση του. Διευκολύνει την πρόσβαση για την φόρτωση και εκφόρτωση των φορτίων και αυξάνει τη δυνατότητα μεταφοράς πληρώματος παρόμοιο ή ίσο με εκείνων των πλοίων που κινούνται με ορυκτά καύσιμα. Η εταιρεία Seagate κατάφερε να κατοχυρώσει την καινοτομία των πτυσσόμενων τριγωνικών ιστίων (Delta Wing) με σκοπό την εφαρμογή τους σε υπάρχοντα Ro-Ro πλοία, Container Ships και οχηματαγωγά.

Για την ευκολότερη τοποθέτηση και σε μικρότερα σκάφη, όπως καταμαράν και φορτηγά πλοία έχουν δημιουργηθεί ειδικές βάσεις / εξέδρες ώστε να ενισχυθεί η βοηθητική ισχύς των σκαφών (IRENA, 2015).



ΕΙΚΟΝΑ 2-14: Maltese Falcon κατά τη διάρκεια πλεύσης. Πηγή: (Wikipedia, Σεπτέμβριος 2018.) Ανακτήθηκε: (15 Ιουνίου, 2022)

#### 2.4.2 Σταθερά Ιστία – Fixed Sails

Τα σταθερά ιστία τοποθετούνται σε πλοία ως αντικατάσταση των συμβατικών πανιών. Έχουν την ιδιότητα άνωσης και στις δύο πλευρές τους και βοηθούν την πρόωση και ως προς τις δύο κατευθύνσεις. Χαρακτηρίζονται ως σταθερά πανιά καθώς αποτελούν άκαμπτα ιστία τοποθετημένα σε περιστρεφόμενο κατάρτι. Σε περίπτωση έντονων καιρικών συνθηκών ή σε διάφορες καταστάσεις σε λιμένες δίνεται η δυνατότητα αναδίπλωσης τους για αποφυγή ατυχημάτων και βλαβών. Το 1980 προσπάθησαν να ενταχθούν τέτοια ιστία

σε πειράματα στην Ιαπωνία με αποτέλεσμα την εφαρμογή του συστήματος Walker Wingsail στο Ashington Ship το 1986.



ΕΙΚΟΝΑ 2-15: Σύστημα Walker Wingsail στο Ashington Ship.

Πηγή: (Tyne Built Ships). Ανακτήθηκε: (17.06.22)

Η Lade AS δημιούργησε ένα υβριδικό μοντέλο πλοίου, το Vindskip, το οποίο χρησιμοποιεί υγροποιημένο φυσικό αέριο και αιολική ενέργεια για την μετακίνησή του. Η κύρια ιδέα είναι η δημιουργία κύτους που θυμίζει μεταλλικό "φύλλο" κάθετο στην επιφάνεια της θάλασσας, το οποίο κινείται όμοια με την ροή του ανέμου και παράγει άνωση που βοηθά στην πρόωση του ίδιου του πλοίου και στη δημιουργία ενός δυναμικού συστήματος που κρατά σταθερή την ταχύτητα του πλοίου. Έτσι, επιδιώκεται εξοικονόμηση καυσίμου (LadeAS, 2013).



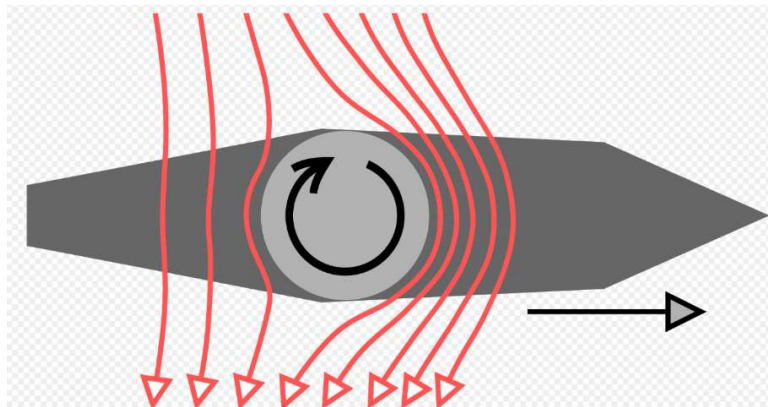
ΕΙΚΟΝΑ 2-16: Vindskip - Το πρώτο cargo ship που κινείται με αιολική ενέργεια.

Πηγή: (Energeypress, 2015)

### 2.4.3 Ρότορες - Rotors

Ο ρότορας αποτελεί μία περιστρεφόμενη κυλινδρική δοκό που βοηθά στην πρόωση των πλοίων. Η κίνηση μέσω αυτής της μεθόδου παράγεται εξαιτίας του φαινομένου Μάγκνους (Magnus). Ουσιαστικά κατά τη διάρκεια περιστροφής του κυλίνδρου, μόρια αέρα κατά τη φορά κίνησης του κυλίνδρου, κινούνται με μεγάλη ταχύτητα και κατά την

αντίθετη φορά, με χαμηλή. Αυτή η κίνηση των μορίων δημιουργεί πίεση αντίρροπη με αποτέλεσμα δημιουργίας κάθετων δυνάμεων στο σύστημα. (Chanson, 2014)



ΕΙΚΟΝΑ 2-17: Κίνηση ρότορσιπ κατά φαινόμενο μάγκνους.  
Πηγή: (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flettnerrotor.png>, 2013)

Η μέθοδος του ρότορα εφαρμόστηκε σε κάποια πειράματα το 1923 και έπειτα, χωρίς όμως αισθητή επιτυχία. Ενώ η ιδέα του ρότορα είχε μείνει αρκετά πίσω, το 1980 στο πλοίο Alcyone εφαρμόστηκε από τον ωκεανογράφο Jacques Cousteau σύστημα πρόωσης Turbo Sail επιφέροντας ραγδαία εξέλιξη στην πρόωση μέσω ρότορα. Το Turbo Sail αποτελείται από ένα κατακόρυφο κύλινδρο που θύμιζε φτερό αεροπλάνου και ένα σύστημα ελέγχου με ανεμιστήρα στο πίσω μέρος το οποίο κινεί το πανί ανάλογα με την ροή του ανέμου επιδιώκοντας βέλτιστη πρόωση μέσω της αιολικής ενέργειας. Εκτός από τη σωστή αξιοποίηση του ανέμου, το σύστημα παρέχει άμεσο αποτέλεσμα καθώς δεν χρειάζεται να προσαρμοστεί ανάλογα τις αλλαγές του αέρα, όπως τα συμβατικά πανιά (Wikipedia, 2022).



ΕΙΚΟΝΑ 2-18: Rotor Ship – Σύστημα Flettner.

*Πηγή: (Wikipedia, 2010)*

Το 1985 παρουσιάστηκαν αποτελέσματα πειραμάτων από 75 πλοία που κινούνταν με τη βοήθεια της αιολικής ενέργειας. Τα ευρήματα αυτά ήταν αρκετά ενθαρρυντικά και κατέστησαν τον ρότορα ως μία σπουδαία καινοτομία με σημαντικές δυνατότητες. Πιο πρόσφατα, το 2010 έγιναν δοκιμές επιδιώκοντας την τοποθέτηση 4 συστημάτων Flettner στο πλοίο E-Ship χωρητικότητας 12.800 DWT της εταιρείας Enercon. Η προσπάθεια ένταξης ρότορα ως μετασκευή σε πλοία ακόμη εξετάζεται, καθώς η έλλειψη χώρου στο κατάστρωμα τους είναι αισθητή. Από τότε έχουν γίνει προσπάθειες τοποθέτησης Flettner σε πλοία χύδην φορτίου και δεξαμενόπλοια (LadeAS, 2013).

#### **2.4.4 Ιστιά τύπου Kite – Kite Sails**

Τα πανιά Kite, που η μορφή τους θυμίζει αρκετά χαρταετό, τοποθετούνται στην πλώρη των πλοίων και αποκτούν μεγάλο υψόμετρο για να φτάσουν τις μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Από τις αρχές του 2000 η εταιρεία SkySails με έδρα στο Αμβούργο άρχισε να εκτελεί πειράματα με σκοπό την ρυμούλκηση πλοίων και κυρίως cargo Ships με τη βοήθεια χαρταετών. Οκτώ χρόνια αργότερα πραγματοποιήθηκε ταξίδι 12 χιλιάδων ναυτικών μιλίων στο οποίο έγιναν αρκετές προσπάθειες χρήσης των Kite Sails. Όπως έχει ήδη παρατηρηθεί, σε αρκετές προσπάθειες ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εμπόδιο έμπαινε η μείωση της τιμής των καυσίμων με αποτέλεσμα την αδιαφορία για τις ΑΠΕ. Έτσι, και σε αυτήν την περίπτωση, η ιδέα της εφαρμογής των ιστιών Kite δεν αναπτύχθηκε. Η Airbus προσπαθεί να παρέχει σε cargo ships τη δυνατότητα πρόωσης με τη βοήθεια μεγάλων

πανιών. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη εταιρεία, οι χαρταετοί έχουν μέγεθος έως 1.000 τετραγωνικά μέτρα και στόχο έχουν την κάλυψη έως και 20% της ενέργειας που χρειάζεται για την πρόωση. Μετά το καλοκαίρι του 2018 δημιουργήθηκε ο πρώτος χαρταετός με το όνομα SeaWing το οποίο έχει την ικανότητα να φτάνει σε ύψη από 200 έως 300 μέτρα και να ανοίγει μόνο με ένα κουμπί κατά τις περιόδους υψηλών ταχυτήτων ανέμου. Όταν η ταχύτητα ανέμου πέσει κάτω από το επιθυμητό που προσφέρει ασφαλή πτήση του ιστίου, αυτόματα το πανί κατεβαίνει και μαζεύεται στην αρχική του θέση. Σύμφωνα με την AirSeas, τη θυγατρική της ευρωπαϊκής εταιρείας αεροσκαφών, και μία οικονομοτεχνική μελέτη που πραγματοποιήθηκε, όσα πλοία χρησιμοποιήσουν συστήματα SeaWing υπολογίζεται πως θα παρουσιάσουν μείωση καυσίμων συνολικής αξίας έως 2 εκατομμυρίων δολαρίων. Υπολογίζεται επίσης, πως η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα θα φτάσει τους 8.000 τόνους σε ετήσια βάση. Εκτός, φυσικά, από τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα θα παρουσιαστεί και μείωση σε οξείδια του αζώτου και του θείου καθιστώντας τα SeaWings ως μία πολλά υποσχόμενη λύση για την προστασία του περιβάλλοντος (IRENA, 2015).

Η εταιρεία αυτοκινήτων Renault είχε σκοπό μέσα σε 12 χρόνια την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά ένα τέταρτο συγκριτικά με τα προηγούμενα χρόνια. Για τον σκοπό αυτό συνεργάστηκε με τη Neoline και δημιούργησαν ένα οχηματαγωγό που κινείται με τέσσερα πανιά και μέχρι το 2021 υπολογιζόταν η χρήση ενός νέου πλοίου με δύο Kite Sails συνολικού μήκους 136 μέτρα που θα έπλεε στα θαλάσσια ύδατα κοντά στον Καναδά. Σύμφωνα με την Neoline επιδιώκεται μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έως 90% συγκριτικά με τα συμβατικά πλοία σε ταχύτητα πλεύσης 11 κόμβους αυξάνοντας ελαφρώς τις ημέρες εκτέλεσης ταξιδιού. Η συγκεκριμένη ιδέα δείχνει να είναι αρκετά φιλόδοξη και θα εξασφαλίσει σίγουρη προστασία του περιβάλλοντος αφού η κατανάλωση καυσίμου για πρόωση των πλοίων θα μειωθεί αισθητά. Βασική προϋπόθεση της συγκεκριμένης καινοτομίας είναι η ύπαρξη ανέμου υψηλής ταχύτητας (Αγγελίδης, 2019).



EIKONA 2-19: Η ιδέα του SeaWing.  
Πηγή: (Airbus, 2018)

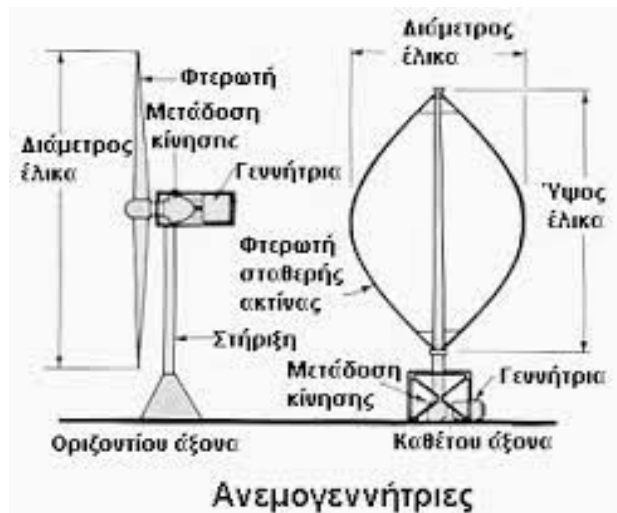


EIKONA 2-20: Πρόωση πλοίου με ιστίο τύπου Kite.  
Πηγή: (SkySails, 2020)

#### 2.4.5 Ανεμογεννήτριες – Wind Turbines

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, όπως ήδη έχει αναφερθεί, έκανε αισθητή την εμφάνιση της πριν εκατοντάδες χρόνια στον χώρο της ναυτιλίας. Η εξέλιξη της τεχνολογίας συνδυαστικά με την επιθυμία βέλτιστης εκμετάλλευσης των μαζών ανέμου οδήγησε στη δημιουργία μηχανών μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Οι μηχανές αυτές ονομάζονται ανεμογεννήτριες και η εμφάνιση τους στο χερσαίο περιβάλλον είναι έντονη. Υπολογίζεται πως η κινητική ενέργεια από τον άνεμο έχει τη δυνατότητα διπλάσιας κάλυψης των ανθρωπίνων αναγκών. Τα είδη των ανεμογεννητριών είναι δύο:

- Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, οι οποίες διαθέτουν συνήθως τρία πτερύγια και θυμίζουν αρκετά έλικες αεροπλάνων. Ο άξονας τους συνήθως είναι παράλληλος στην επιφάνεια της Γης και στη διεύθυνση του αέρα. Το μέγεθος τους ποικίλλει καθώς εξαρτάται από την περιοχή τοποθέτησης τους και φυσικά, από τις ενεργειακές ανάγκες που υπολογίζονται να καλύπτει. Το συγκεκριμένο είδος ανεμογεννήτριας είναι το πιο διαδεδομένο και λόγω του ύψους της, μπορεί να εκμεταλλευτεί μάζες ανέμου μεγαλύτερης ταχύτητας.
- Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, οι οποίες διαθέτουν δύο φτερά που ενώνονται στην κορυφή και στη βάση του άξονα, προσφέροντας ένα ελλειπτικό σχήμα. Η ιδιότητα τους είναι η εκμετάλλευση ανέμου από κάθε δυνατή κατεύθυνση. Έχουν μικρότερο μέγεθος από εκείνες οριζόντιου άξονα και αυτό τους δίνει τη δυνατότητα εύκολης τοποθέτησης. Δυστυχώς, όμως, το χαμηλό τους ύψος και η δυσκολία στην εκκίνηση τις καθιστά μη αποδοτικές και έτσι, η χρήση τους είναι πιο σπάνια (ΚΑΠΕ, 2022).



ΕΙΚΟΝΑ 2-21: Παρουσίαση οριζόντιου και κάθετου άξονα ανεμογεννήτριες.

Πηγή: (Αληφραγκής. Ανακτήθηκε 06.07.22)

Η σκέψη εφαρμογής ανεμογεννητριών σε πλοία φαίνεται πραγματοποιήσιμη αφού οι ανεμογεννήτριες έχουν την ιδιότητα να παράγουν ενέργεια σε όλες τις κατευθύνσεις κίνησης του ανέμου, αρκεί να βρεθεί ο κατάλληλος χώρος στο κατάστρωμα του πλοίου. Λόγω της έντονης απήχησης των ανεμογεννητριών σε χερσαίο αλλά και στο υδάτινο περιβάλλον προβλέπεται ραγδαία εξέλιξη και εκμετάλλευση και στη ναυτιλία (IRENA, 2015).

Σε επίπεδο πειραμάτων έχει δημιουργηθεί ένα καταμαράν Revelation II, το οποίο έχει συνολικό μήκος 10,97 μέτρα και διαθέτει μία ανεμογεννήτρια ως μέσο πρόωσης. Το συγκεκριμένο καταμαράν μπορεί να ταξιδεύει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, καθώς διαθέτει πυλώνα 9,14 μέτρων που έχει τη δυνατότητα περιστροφής και τρία περύγια μεγέθους 6,1 μέτρων. Επίσης, η ισχύς που παράγει είναι ίση με 150 ίππους και διαθέτει μία μεγάλη έλικα κάτω από το νερό. Τέλος, τα περύγια έχουν τη δυνατότητα αλλαγής της ταχύτητας του καταμαράν.



ΕΙΚΟΝΑ 2-22: Καταμαράν Revelation II.

Πηγή: (VelaBlog, 2014)

Η δύναμη που παράγει η ανεμογεννήτρια, συνήθως, δεν καλύπτει τις απαιτήσεις ενός σκάφους. Έτσι, η αιολική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα υβριδικό σύστημα ως συμπληρωματική. Επίσης, τα πλοία θα πρέπει να διαθέτουν ειδικές γάστρες μείωσης της τριβής, όπως τα υδροπτερύγια (hydrofoils).

Από δοκιμές που διεξάχθηκαν σε μοντέλα από τη Lloyd's Register, εκτιμήθηκε σημαντική μείωση κατανάλωσης του καυσίμου. Ένα παράδειγμα είναι το δεξαμενόπλοιο Panamax με δύο ανεμογεννήτριες ενός Μεγαβάτ, όπου υπολογίστηκε ετήσια μείωση του καυσίμου κατά 16%. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προστασία του περιβάλλοντος και φυσικά το χρηματικό όφελος. Ωστόσο, απαιτούνται μελέτες και έντονες προσπάθειες δημιουργίας ενός ολοκληρωμένου project, το οποίο θα μπορεί να υλοποιηθεί και να επιφέρει οφέλη (Αγγελίδης, 2019).



ΕΙΚΟΝΑ 2-23: FastRig Sails - Ιστία με στόχο την μείωση κατανάλωσης καυσίμου κατά 20%.

Πηγή: (Smart Green Shipping, 2022)



Προϋπόθεση τοποθέτησης ανεμογεννητριών είναι η ύπαρξη κατάλληλου εδάφους και περιοχής τοποθέτησης. Για τον λόγο αυτό προτάθηκε η χρήση του υδάτινου περιβάλλοντος και η δημιουργία υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Έτσι, επιτυγχάνεται η αύξηση της παραγωγής ενέργειας φιλικής προς το περιβάλλον και αξιοποιούνται περιοχές που ενδεχομένως δεν διέθεταν καλό έδαφος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί γι' αυτόν τον λόγο. Η ιδέα για πλωτές ανεμογεννήτριες διατυπώθηκε από τον Hermann Honnef το 1932 στη Γερμανία και οι πρώτες δοκιμές πλωτής ανεμογεννήτριας έγιναν στη Σουηδία το 1990. Η πλωτή ανεμογεννήτρια απείχε από τη στεριά 250 μέτρα και στηριζόταν μέσω τρίποδης κατασκευής στα 7 μέτρα βάθος.

Το πρώτο αιολικό πάρκο έγινε το 1991 στη Δανία και αποτελούταν από 11 ανεμογεννήτριες σε βάθος που δεν ξεπερνούσε τα 5 μέτρα με συνολικό κόστος κατασκευής 10.000.000 €. Το 2001 έξω από το λιμάνι της Κοπεγχάγης στη Δανία δημιουργήθηκε το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο με ονομαστική ισχύ τα 40 MW που αποτελούταν από 20 ανεμογεννήτριες. Μέχρι το 2005 δεν υπήρξε έντονη εξέλιξη στον τομέα τοποθέτησης ανεμογεννητριών καθώς το κόστος ήταν υψηλό και εντοπίζονταν συχνά προβλήματα και βλάβες. Το 2008, όμως, νοτιοανατολικά της Ιταλίας η Ολλανδική εταιρεία Blue δημιούργησε την πρώτη ανεμογεννήτρια που δεν διέθετε σταθερή στήριξη στον πυθμένα της θάλασσας και τοποθετήθηκε 21 χιλιόμετρα μακριά από την ακτή σε βάθος 113 μέτρων. Στην Ευρώπη έως και το 2012 μετρήθηκαν 1.664 ανεμογεννήτριες σε 10 χώρες και μέσα στο 2013 υπήρξε αύξηση έως και 34% από την προηγούμενη χρονιά φτάνοντας τις 2.080 ανεμογεννήτριες.



ΕΙΚΟΝΑ 2-24: Είδη ανεμογεννητριών στο υδάτινο περιβάλλον για διάφορα βάθη.  
Πηγή: (Ρώσσης). Ανακτήθηκε: (<http://www.cres.gr>, 06.07.22)

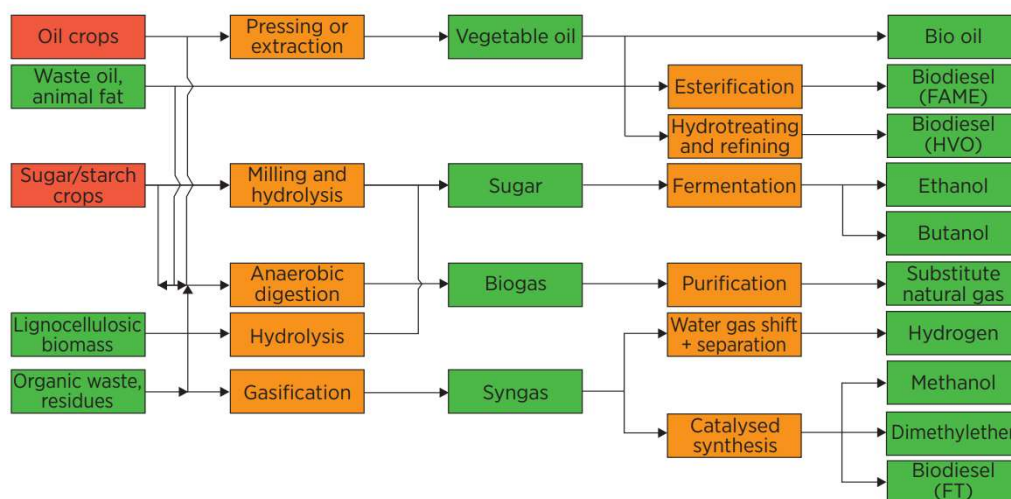
Μέχρι και σήμερα υπολογίζεται πως η ισχύς που παράγεται από τις πλωτές ανεμογεννήτριες ξεπερνά τα 7 GW και η Κίνα μαζί με άλλες χώρες της Ασίας έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους στην εν λόγω βιομηχανία. Έτσι, τα επόμενα χρόνια υπολογίζεται ραγδαία εξέλιξη της συγκεκριμένης καινοτομίας (HELMERA, 2022).

## 2.5 Βιοενέργεια

Η αυξημένη ζήτηση εμπορικής ναυτιλίας σε συνδυασμό με την μείωση της διαθεσιμότητας αργού πετρελαίου και τη θέσπιση αυστηρών κανονισμών για την κατανάλωση καυσίμων στη ναυτιλία οδήγησε στην αναζήτηση εναλλακτικών καυσίμων για την πρόωση των πλοίων. Η ιδιαιτερότητα τους είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο και το μικρό αποτύπωμα άνθρακα. Οι εκπομπές θείου και αζώτου των ορυκτών καυσίμων, όπως το υγραέριο είναι πού χαμηλές, όμως παρουσιάζουν αρνητική συνεισφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αντιθέτως, τα βιοκαύσιμα έχουν τη ιδιότητα παραγωγής ελάχιστων ρύπων συνεισφέροντας έτσι, στην προστασία του περιβάλλοντος (Bennett & Spaeth, 2017).

### 2.5.1 Βιοκαύσιμα

Η αναφορά Annex 41 της συμφωνίας Advanced Marine Fuels Implementing Agreement της Διεθνούς Επιτροπής Ενέργειας (International Energy Agency) παρουσιάζει μία πλήρη αξιολόγηση των εναλλακτικών καυσίμων σε ναυτιλιακό επίπεδο. Μερικά από τα βιοκαύσιμα που χρησιμοποιούνται είναι το βιομεθάνιο, το βιοντίζελ, η βιοιθανόλη ο Διμεθυλαιθέρας (DME), το έλαιο πυρόλησης και διάφορα υδρογονωμένα φυτικά έλαια (HVO - Hydrogenated Vegetable Oil). Μία μικρή ποσότητα των βιοκαυσίμων προέρχεται από απόβλητα ζωικού λίπους.



EIKONA 2-25: Σύνοψη της διαδικασίας παραγωγής συμβατικών και προηγμένων βιοκαυσίμων.

Πηγή: (Ecofys, 2012)

Το βασικό πλεονέκτημα των βιοκαυσίμων στη ναυτιλία είναι ο μικρός βαθμός εξευγενισμού που διαθέτει συγκριτικά με τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα. Έτσι, το κόστος παραγωγής και επεξεργασίας είναι χαμηλότερο, χωρίς να χρειάζεται παραπάνω από μία διύλιση. Ένα βασικό εμπόδιο στην ανάπτυξη των βιοκαυσίμων στη ναυτιλία είναι η προσαρμογή των κινητήρων για να λειτουργούν με τα νέα εναλλακτικά καύσιμα. Αυτή η διαδικασία είναι κοστοβόρα και έτσι, η λύση έρχεται από την δημιουργία ενός παρόμοιου συμβατού καυσίμου με αυτό που ήδη χρησιμοποιούνταν. Τα καύσιμα drop-in είναι η καλύτερη λύση, καθώς δεν χρειάζονται σημαντικές αλλαγές στους κινητήρες και συνήθως ταιριάζουν στην πλειοψηφία αυτών.

Αν και την τρέχουσα περίοδο τα βιοκαύσιμα δεν έχουν κερδίσει σημαντικό έδαφος στον κλάδο της ναυτιλίας, ο ρόλος τους στο μέλλον εκτιμάται ότι θα είναι αξιοσημείωτος. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την αύξηση παραγωγής προηγμένων βιοκαυσίμων (δεύτερης και τρίτης γενιάς) τα βιοκαύσιμα υπολογίζεται ότι θα αποτελέσουν την κύρια βιώσιμη πηγή ενέργειας στον τομέα της ναυτιλίας και τον μεταφορών. Αυτή η εκτίμηση, βέβαια, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την διαθεσιμότητα ανανεώσιμων καλλιεργειών, οι οποίες θα εξασφαλίσουν την παραγωγή του καυσίμου, αλλά και από την βιωσιμότητα του εμπορίου και την μελλοντική του αξία, η οποία, ίσως, είναι αρκετά ανταγωνιστική.

Τα βιοκαύσιμα σύμφωνα με την EBTP (European Biofuels Technology Platform) χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες εξαρτώνται από την πηγή άνθρακα που χρησιμοποιείται. Έτσι, έχουμε:

- 1<sup>ης</sup> Γενιάς, όπου ο άνθρακας προέρχεται από τα φυτά, όπως διάφορα σάκχαρα και λιπίδια.
- 2<sup>ης</sup> Γενιάς, όπου η κυτταρίνη και η λιγνίνη ή η πηκτίνη θεωρούνται οι πηγές άνθρακα. Αυτό σημαίνει πως τα δασικά και διάφορα αγροτικά απόβλητα παρέχουν την απαιτούμενη ποσότητα άνθρακα.
- 3<sup>ης</sup> Γενιάς, όπου αυτότροφοι και υδρόβιοι οργανισμοί, όπως τα φύκια προσφέρουν άνθρακα για την δημιουργία βιοκαυσίμου (IRENA, 2015).

### 2.5.2 Υγρά βιοκαύσιμα

Τα υγρά βιοκαύσιμα είναι ευρέως διαδεδομένα και με κάποιες αλλαγές στον κινητήρα, μπορούν να εφαρμοστούν σε αρκετά πλοία. Έτσι, το 2006 έγινε η εμφάνιση τους στο χώρο της ναυτιλίας σε κάποια επιλεγμένα κρουαζιερόπλοια της εταιρείας Caribbean Cruises συμπεριλαμβανομένου και του Jewel of the Seas (293m). Αρχικά ξεκίνησε από καύσιμα αποτελούμενα από 5% βιοντίζελ και στην πορεία επιτεύχθηκε η χρήση του βιοντίζελ στο 100%. Από τον Μάιο έως τον Οκτώβριο του ίδιου έτους το πλοίο Ana Desgagnes με 17.850 DWT χρησιμοποιούσε καύσιμο αποτελούμενο από 20% βιοντίζελ και προερχόταν από μαγειρικά και ζωικά έλαια. Το 2011 το Maersk Kalmar με 88.669 DWT άρχισε να λειτουργεί με μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων (FAME). Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε από την Maersk και Lloyd's και διήρκησε για 160 ώρες καταλήγοντας σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μετά από έναν χρόνο, το 2012, η εταιρεία Meriaura Ltd's με το πλοίο Meri συνολικού μήκους 105 m και 4.359 DWT ολοκλήρωσε εμπορική αποστολή με 100% υγρό βιοκαύσιμο. Η αποστολή εκτελέστηκε στην Φινλανδία με βιοκαύσιμο πολτού ξύλου και το πλοίο διέθετε MDO ως εφεδρικό καύσιμο.

Τα βιοκαύσιμα 3<sup>ης</sup> γενιάς που παράγονται από φύκια είχαν ήδη κάνει την εμφάνιση τους στη ναυτιλία ακόμη και στην Ελλάδα (DealNews, 2022). Στα τέλη του 2011 το πολεμικό ναυτικό των Η.Π.Α. σε συνεργασία με την Maersk ξεκίνησαν τις δοκιμές αξιοποίησης 3<sup>ης</sup> γενιάς βιοκαυσίμου στο πλοίο Maersk Kalmar. Σκοπός της συνεργασίας αυτής ήταν η μείωση χρήσης ορυκτών καυσίμων κατά 50% στα επόμενα 10 χρόνια. Το 2013, η εταιρεία Maersk μαζί με την Progression Industry επιδίωξαν την ανάπτυξη του CyclOx, ενός βιώσιμου και οικονομικά ανταγωνιστικού καυσίμου για χρήση στην ναυτιλία που προέρχεται από λιγνίτη. Η EBTP αναφέρει ένα μεγάλο πλήθος δοκιμών βιοκαυσίμων στον κλάδο της ναυτιλίας, συμπεριλαμβανομένου του προγράμματος TEN-T της Ευρωπαϊκής Επιτροπής που μελετά τα καύσιμα για τη χρήση τους σε θαλάσσιες μεταφορές και του METHAPU που στοχεύει στην πιστοποίηση βοηθητικών συστημάτων με βασικό καύσιμο τη μεθανόλη (IRENA, 2015).

### 2.5.3 Βιοαέριο

Το βιοαέριο παράγεται με αναγωγή οργανικών ενώσεων που περιέχονται σε λύματα ή άλλου είδους απόβλητα. Ουσιαστικά, η παραγωγή του γίνεται με την αποικοδόμηση (ή διάσπαση) οργανικών ενώσεων σε αναερόβιες συνθήκες από κατάλληλους μικροοργανισμούς (αναερόβια βακτήρια) οργανικών υλικών. Με την υγροποίηση του παραγόμενου αερίου βιομεθανίου προκύπτει το υγρό βιομεθάνιο (LBM), το οποίο αξιοποιείται στις μεταφορές. Έως τώρα, ένα καύσιμο το οποίο είναι ευρέως διαδεδομένο στη ναυτιλία είναι το υγραέριο (LNG).

Σε γενικές γραμμές, θεωρείται ως μία λύση χαμηλών εκπομπών ρύπων και εύκολη στον ανεφοδιασμό. Η χρήση του LBM στη ναυτιλία εκτιμάται πως θα είναι αυξημένη, καθώς ο συνδυασμός του με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, θα επιφέρει μείωση εκπομπών ρύπων (IRENA, 2015).

## 2.6 Κυματική ενέργεια

Η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας των υδάτων αποτελεί ιδέα που θα αναπτυχθεί στο μέλλον. Αυτό συμβαίνει, διότι απαιτεί ένα νέο σχεδιασμό διαφορετικό από τους συνηθισμένους για να εφαρμοστεί στον κλάδο της ναυτιλίας. Ωστόσο, η αδιάκοπη κίνηση των υδάτων μπορεί να είναι αποδοτικότερη από τις υπόλοιπες ανανεώσιμες ενέργειες, οι οποίες ενδέχεται να παρουσιάζουν παύσεις στην λειτουργία τους. Με τη βοήθεια μελετών των κινήσεων και του μεγέθους διάφορων θαλάσσιων ζώων, όπως τα δελφίνια, προτάθηκαν για υλοποίηση ιδέες που περιείχαν κάποιου είδους μίμηση. Το πλοίο E/S Orcelle της εταιρείας Wallenius Wilhelmsen Logistics (WWL) διαθέτει 12 πτερύγια. Αυτά τα πτερύγια λειτουργούν όπως και οι ουρές των δελφινιών και έτσι, εκμεταλλεύονται την κυματική ενέργεια για πρόωση. Εκτός από την κινηματική ενέργεια, έχουν τη δυνατότητα τροφοδοσίας συστημάτων με ηλεκτρική και υδραυλική ενέργεια (IRENA, 2015).



ΕΙΚΟΝΑ 2-26: Το πλοίο E/S Orcelle της εταιρείας Wallenius Wilhelmsen Logistics,  
*Πηγή: (Solar Navigator, 2022)*

Εκτός από τη δημιουργία συστημάτων πρόωσης και παροχής διάφορων ειδών ενέργειας στα πλοία μέσω κυμάτων έχει μελετηθεί η δημιουργία πλοίων τα οποία θα μεταφέρουν μπαταρίες καθαρά για μία συγκεκριμένη χρήση. Οι μπαταρίες θα συλλέγουν την ενέργεια από τα κύματα που θα δημιουργείται μέσω πλωτών συστημάτων και όταν θα γεμίζουν, θα επιστρέφουν στη στεριά. Έτσι, επιδιώκεται μείωση καλωδίων που μεταφέρουν τη συγκεκριμένη ενέργεια και κατά συνέπεια, ελαχιστοποίηση του κόστους κατά σχεδόν 50% (Μάναλης, 2012).

## 2.7 Κυψέλες καυσίμου Υδρογόνου

Η χρήση του υδρογόνου στις θαλάσσιες μεταφορές μελετάται από το 2000 και χαρακτηρίζεται ως το καύσιμο του μέλλοντος. Γενικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως drop – in καύσιμο, αλλά σε πολύ χαμηλά επίπεδα προσμίξεων έτσι ώστε να μην δημιουργηθούν προβλήματα στους κινητήρες. Η χρήση του υδρογόνου, κυρίως μελετάται με τη χρήση κυψελών καυσίμου και παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον σε νέα κρουαζιερόπλοια, επιβατηγά και σκάφη υπεράκτιου εφοδιασμού.

Μέσα στις κυψέλες καυσίμου γίνονται ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, οι οποίες έχουν στόχο την απευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε ηλεκτρική. Γενικά, οι κυψέλες καυσίμου είναι συσκευές παραγωγής συμπληρωματικής ενέργειας και στα πλοία μπορούν να τοποθετηθούν ως δεύτερη εναλλακτική μηχανή σε συνδυασμό με τον κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Το 2008, στο Αμβούργο, μέσω του project Zemships δημιουργήθηκε το πρώτο επιβατηγό, το οποίο ονομάστηκε FCS Alsterwasser και χρησιμοποιούσε ως μέσο πρόωσης αποκλειστικά κυψέλες υδρογόνου. Ο αριθμός των επιβατών που μπορούσε να μεταφέρει ήταν 100 και η χωρητικότητα της κάθε κυψέλης, από τις δύο που διέθετε, ήταν 48 KW (Luleva, 2012).

Μετά από τέσσερα χρόνια, το 2012, τοποθετήθηκε μία κυψέλη υδρογόνου χωρητικότητας 330 KW στο πλοίο Viking Lady μέσω του project FellowSHIP. Η αποδοτικότητα άγγιξε το 44,5% και αφού ενεργοποιήθηκε η θερμική επαναφορά, η απόδοση έφτασε το 55%. Οι ώρες λειτουργίας του συστήματος έφταναν περίπου τις 7.000 (Timoleon, 2019).

Άλλο ένα καινοτόμο project ήταν το Hydrogen Hybrid Harbour Tug, το οποίο αναπτύχθηκε από την WorldWise Marine σε συνεργασία με Ολλανδούς διαχειριστές ρυμουλκών. Το συγκεκριμένο project αφορά σε ένα ρυμουλκό 50 τόνων με κυψέλες υδρογόνου υπό πίεση 430 bar. Οι κυψέλες σε συνδυασμό με τις μπαταρίες προσφέρουν ισχύ κατάλληλη ώστε να καλύψουν το 85% του χρόνου λειτουργίας του, δηλαδή την κατάσταση αναμονής του ρυμουλκού. Ο κ. Michiel Wijsmuller, CEO της Offshore Ship Designers, αναφέρει πως μπορεί να επιτευχθεί μείωση εκπομπών διοξειδίων θείου και αζώτου κατά 98% (The Maritime Executive, 2011).





EIKONA 2-27: Hydrogen Hybrid Harbour Tug Ship.  
Πηγή: (Howard, 2019)

Την ίδια χρονιά, η Germanischer Lloyd υλοποίησε διάφορες μελέτες στο πλοίο Scandlines ferry 1.500 επιβατών και σε ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, για επίτευξη μηδενικών ρύπων. Οι μελέτες αφορούσαν σε σύστημα μπαταριών και κυψελών (IRENA, 2015).

Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου βασίζεται στη μετατροπή οξυγόνου και υδρογόνου σε νερό. Παράλληλα με τη διαδικασία αυτή παράγει ηλεκτρισμό σε μορφή συνεχούς ρεύματος και θερμότητα.

Από τη μία μεριά το υδρογόνο ( $H_2$ ) έρχεται σε επαφή με την άνοδο και μέσω ενός καταλύτη γίνεται η οξείδωση του. Κατά την οξείδωση, παράγονται 2 ηλεκτρόνια ανά μόριο υδρογόνου τα οποία οδεύουν προς την κάθοδο όπου προκαλούν καταλυτική αναγωγή του οξυγόνου σε υδροξυλιόντα. Τα παραγόμενα υδροξυλιόντα αντιδρούν με τα κατιόντα υδρογόνου που παράγονται στην άνοδο από την οξείδωση του αερίου υδρογόνου, για να σχηματίσουν νερό. Σε αυτό το σημείο δημιουργείται το νερό, το οποίο απομακρύνεται σταδιακά.

Λόγω της βιωσιμότητας παραγωγής υδρογόνου, η οποία σχετίζεται με τα ορυκτά καύσιμα, μελετάται η ηλεκτρόλυση του θαλασσινού νερού μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο υδάτινο περιβάλλον (Αγγελίδης, 2019).

## 2.8 Πρόωση με τη χρήση μπαταριών

Η πρόωση πλοίων μέσω του ηλεκτρισμού που αποθηκεύεται σε μπαταρίες είναι γεγονός. Δύο διαδεδομένα παραδείγματα πλοίων είναι το Zerocat και το Ar Vag Tredan. Το Zerocat είναι ferry boat που ανήκει στην εταιρεία Siemens. Έχει δυνατότητα μεταφοράς 120 αυτοκινήτων και 360 επιβατών και εκτελεί διαδρομές διάρκειας 20 λεπτών. Οι μπαταρίες είναι ιόντων λιθίου και η επαναφόρτιση τους επιτυγχάνεται σε μόλις 10 λεπτά. Η περιοχή πλεύσης του συγκεκριμένου πλοίου είναι τα νερά της Νορβηγίας και η ενέργεια που αποθηκεύεται στις μπαταρίες συλλέγεται από υδροηλεκτρικό σταθμό. Το πλοίο Ar Vag Tredan είναι και αυτό της ίδιας κατηγορίας και διαθέτει χώρο για 147 επιβάτες. Το project αυτό, παρουσιάστηκε από την Lorient Agglomeration και διαθέτει δύο προωθητήρες συνολικά 140 kW. Οι προωθητήρες τροφοδοτούνται από υπερ – πυκνωτές στους οποίους αποθηκεύεται η απαιτούμενη ενέργεια πρόωσης.

Σε γενικές γραμμές, αυτά τα πλοία δεν αποτελούν καθαρά μέρος των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Για να θεωρηθούν απόλυτα κινούμενα από ανανεώσιμες πηγές θα πρέπει και η ενέργεια που αποθηκεύεται στους υπερ-πυκνωτές να προέρχεται από τέτοιες ενεργειακές πηγές.

## 2.9 Συμπεράσματα

Στη ναυτιλία παρουσιάζεται από την αρχαιότητα η χρήση ΑΠΕ και συγκεκριμένα της αιολικής ενέργειας για την πρόωση των πλοίων. Με την πάροδο των ετών εμφανίστηκαν νέες καινοτόμες ιδέες πιο φιλικές προς το περιβάλλον, οι οποίες έχουν συνεισφέρει αισθητά στη μείωση χρήσης ορυκτών καυσίμων.

Η ηλιακή ενέργεια μέσω της μετατροπής της σε ηλεκτρική θεωρείται από τις πιο σημαντικές ΑΠΕ. Επιπλέον, η ανάπτυξη ηλεκτρικών συστημάτων και η επιλογή της ηλιακής ενέργειας ως μέθοδο πρόωσης από μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες καθιστά την ιδέα χρήσης φωτοβολταϊκών συστημάτων και στην ναυτιλία ελκυστική. Επίσης στο άμεσο μέλλον προβλέπεται ανάπτυξη καινοτόμων ιδεών και εφαρμογών για εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας στη ναυτιλία.

## 2.10 Βιβλιογραφικές πηγές

Αγγελίδης Ε. (2019). Μελέτη και διερεύνηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών συμβατικών πλοίων και η εφαρμογή τους στην πρόωση μέσω υβριδικών συστημάτων. (Αδημοσίευτη Διπλωματική Εργασία), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Αληφραγκής. Οι ανεμογεννήτριες. Ανακτήθηκε Ιούλιο 6, 2022 από <https://ilektroaytomatismoi.blogspot.com>

ΚΑΠΕ, (2022). Ενέργεια & Πολίτης. Ανεμογεννήτριες. Ανακτήθηκε 17 Ιουλίου 2022 από [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_windmill.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm)

Μάναλης Α., 2012. Κυματική και ωκεάνια ενέργεια, σημερινή πραγματικότητα και μελλοντικές προοπτικές. (Αδημοσίευτη Πτυχιακή Εργασία). Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας.

Μελάς, Κ. (2022). Οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας ως μέτρο αντιστάθμισης στη μεταβλητότητα του κλάδου της ναυτιλίας. Ανακτήθηκε από <https://www.economia.gr/apenaytiliafeb22/>

Airbus, 2018. High-flying Airbus technology comes down to Earth for use on ships. Retrieved from <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2018-09-high-flying-airbus-technology-comes-down-to-earth-for-use-on-ships>

Bennett P, Spaeth J. (2017), Annual Report 2017. IEA Bioenergy. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/04/IEA-Bioenergy-Annual-Report-2017-R1.pdf>

Chanson, H. (2013) Applied Hydrodynamics: An Introduction. CRC Press. Retrieved May 15, 2022.

DealNews, 2022. Τις πρώτες δοκιμές βιοκαυσίμων κάνουν στα πλοία τους οι Greeks. Ανακτήθηκε 30 Αυγούστου 2022.

Eco Marine Power. Tonbo Solar Hybrid Ferry. Retrieved May 15, 2022 from <https://www.ecomarinepower.com/en/research/25>.

Elomatic, 2022. NYU Super Eco Ship 2030. Retrieved from <https://www.elomatic.com>

E-Nautilia, 2014. Εγκαταστάθηκαν ηλιακά πάνελ στο Blue Star Delos. Ανακτήθηκε από <https://e-nautilia.gr/egatastathikan-iliaka-panel-sto-blue-star-delos/>.

HELMERA. Υπεράκτια αιολικά πάρκα. Ανακτήθηκε από <https://www.helmepacadets.gr/files/YperaktiaAiolikaParka.pdf>.

Howard M., 2019. ‘eTug’ Powered by Battery, Hydrogen Fuel Cell. Retrieved from <https://www.maritimepropulsion.com/news/etug-powered-battery-hydrogen-572284>.

LadeAs (2013). Project Vindskip. Retrieved April 12, 2022 from <https://ladeas.no/about-the-vindskip/>.

Linus Mofor, (January 2015). Renewable Energy Options For Shipping. Technology Brief. International Renewable Energy Agency.

Luleva M., 2012. FCS Alsterwasser: The First Ship Powered by Hydrogen Fuel Cells. The Green Optimistic. Retrieved from <https://www.greenoptimistic.com/fcs-alsterwasser-the-first-ship-powered-by-hydrogen-fuel-cells-20121024/>

Marine insight, 2012. Auriga Leader – The World’s First Partially Propelled Cargo Ship. Retrieved from <https://www.marineinsight.com/types-of-ships/auriga-leader-the-worlds-first-partially-propelled-cargo-ship/>.

Nidaa Bakhsh, 2022. New wind propulsion technology launches. Retrieved from <https://lloydlist.maritimeintelligence.informa.com/LL1141738/New-wind-propulsion-technology-launches>.

Nippon Yusen Kabushiki Kaisha. (2015). NYK's Ship Information Management System Recognized at 2015 Eco-Products Awards. NYK. Retrieved March 10, 2022 from <https://www.nyk.com/english/news/2015/004201.html>

Photovoltaic. Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα. Ανακτήθηκε 25 Ιουλίου 2022 από <https://www.photovoltaic.gr/el/portfolio-1139/stand-alone-pv-systems/drillship-offgrid-photovoltaic-systems.html>

Safety4sea (2018). NYK Super Eco Ship 2030. Retrieved July 17, 2022 from <https://safety4sea.com/tag/nyk-super-eco-ship-2030/>

SkySails Marine, 2020. The pioneer of Kite-Based propulsion systems. Retrieved from <https://skysails-marine.com/>.

Solarnavigator. Orcelle- Solar and wave powered cargo ship. Retrieved from [http://www.solarnavigator.net/solar\\_transporter\\_orcelle](http://www.solarnavigator.net/solar_transporter_orcelle).

The Maritime Executive, 2011. Offshore Ship Designers launches near-zero emission tug. Retrieved from <https://maritime-executive.com/article/2008-05-272008-05-21-offshore-ship-designers-launches-near-zero-emission-tug>

Timoleon E., 2019. Exploring Fuel Cells for Marine Power Plants Economic Feasibility Study for a Ro/Pax Vessel. (Diploma Thesis). National Technical University of Athens.

Tyne Built Ships, 2012. Ashington Ship. Retrieved from <http://www.tynebuiltships.co.uk/A-Ships/ashington1979.html>.

Velablog, 2014. Revelation II – II Catamarano eolico. Retrieved from <http://www.velablog.it/barche-bizzarre/revelation-ii-il-catamarano-eolico>

Wikipedia (2007). Maltese Falcon under sail. Retrieved from <https://en.wikipedia.org>.

Wikipedia (2022). Turbosail. Retrieved April 12, 2022 from <https://en.wikipedia.org>.

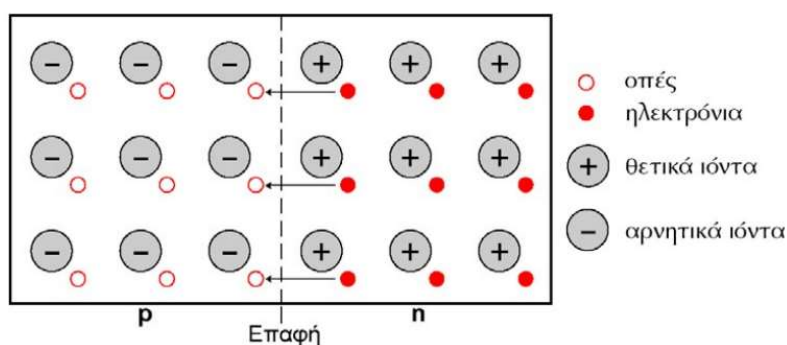
4green.gr (2011). Φτηνή ενέργεια από τα κύματα. Ανακτήθηκε 15 Ιουνίου 2022 από <https://www.4green.gr/news/data/diafora/86631.asp>

## Κεφάλαιο 3. Φωτοβολταϊκή μετατροπή και Φ/Β στοιχεία

### 3.1 Γενικά

Με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο επιτυγχάνεται η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η μετατροπή πραγματοποιείται με τη μέθοδο της απορρόφησης φωτονίων από κατάλληλες διατάξεις. Μία από αυτές, που θα μελετηθεί παρακάτω, είναι η διάταξη του ημιαγωγού τύπου p-n.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή αλλιώς ηλιακά κύτταρα αποτελούν απλές συσκευές διόδων ημιαγωγού. Η μορφή τους θυμίζει δίσκο, όπου η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου. Ουσιαστικά, η δίοδος p-n απορροφά την ακτινοβολία από τον ήλιο και έπειτα δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Τα ζεύγη αυτά, στη συνέχεια, διαχωρίζονται από το φράγμα δυναμικού, που υπάρχει ανάμεσα στη δίοδο p-n. Στην εικόνα παρακάτω παρουσιάζεται η κίνηση των ηλεκτρονίων του ημιαγωγού n προς τις οπές του ημιαγωγού p.



ΕΙΚΟΝΑ 3-1: Κίνηση ηλεκτρονίων του n προς τις οπές του p.  
Πηγή: (Αντωνίου & Τσέρνιχ).

Τα πλέγματα μετάλλου (metal grids) στο επάνω μέρος της κατασκευής παρουσιάζουν ομοιότητες με την ωμική επαφή και ωθούν τους ηλεκτρικούς φορείς σε εξωτερικά ηλεκτρόδια. Η επιφάνεια των μεταλλικών πλεγμάτων είναι αρκετά μεγάλη καθώς επιδιώκεται η ταχύτερη απορρόφηση του φωτός (Goetzberger & Hoffmann, 2005).

Μεταξύ των μεταλλικών πλεγμάτων, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διαθέτουν μία στρώση η οποία έχει αντανακλαστικές ιδιότητες. Στόχος της συγκεκριμένης στρώσης είναι η αύξηση της ενέργειας που απορροφάται από την ηλιακή ακτινοβολία και η εύκολη μεταφορά της στον ημιαγωγό (Jäger et al., 2014).

## 3.2 Ηλιακή ακτινοβολία και Γεωμετρία

Ηλιακή γεωμετρία ονομάζεται η διαδικασία μελέτης και περιγραφής της σχετικής κίνησης του ήλιου. Σε συνδυασμό με τη γεωμετρία των κτηρίων, τη θέση τους και τα υλικά κατασκευής τους επιδιώκεται ο υπολογισμός των φορτίων ψύξης και θέρμανσης κατά τη διάρκεια διαφόρων εποχών. Μέσω της ηλιακής γεωμετρίας είναι δυνατός ο υπολογισμός σκιάσεων διαφόρων αντικειμένων από τεχνητά και φυσικά εμπόδια. Μέσα σε αυτά τα αντικείμενα είναι και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με τους ηλιακούς συλλέκτες και υπολογίζεται, ανά ώρα οποιαδήποτε στιγμή του χρόνου, η επιφάνεια που καλύπτεται από κάποιο εμπόδιο.

Ο ήλιος έχει μάζα ίση με  $2 \cdot 10^{30}$  kg και ακτίνα 700.000 km. Η θερμοκρασία του στην επιφάνεια αγγίζει τα 5.800 K ενώ ο πυρήνας του έχει θερμοκρασία ίση με 14.000.000 K. Η Γη απέχει από τον ήλιο απόσταση ίση με 150.000.000 km και η ταχύτητα του φωτός είναι  $300.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ . Ο χρόνος που απαιτείται για να διανύσει το φως αυτή την απόσταση εκτιμάται σε 8,5 min. Οι αυτοσυντηρούμενες θερμοπυρηνικές αντιδράσεις διατηρούν τη θερμοκρασία του ήλιου σε υψηλά επίπεδα και έχουν την δυνατότητα μετατροπής κάθε δευτερόλεπτο 654 εκατομμύρια τόνους υδρογόνου. Όποια μάζα χάνεται κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης διαδικασίας γίνεται ενέργεια. Υπολογίζεται πως κατά τη μετατροπή 1g υδρογόνου παράγεται ενέργεια ίση με  $1,67 \cdot 10^5$  kWh η οποία διαδίδεται είτε μέσω μαγνητικής ακτινοβολίας είτε μέσω σωματιδιακής μορφής. Αξίζει να σημειωθεί πως η ενέργεια που καταναλώνει ο παγκόσμιος πληθυσμός σε ένα έτος είναι ίση με την ενέργεια που παράγει ο ήλιος για 20 λεπτά.

Το φάσμα του φωτός διαμορφώνεται με βάση την προσομοίωση ενός μέλανος σώματος με θερμοκρασία όση η επιφανειακή θερμοκρασία του ήλιου, δηλαδή 5.800 K. Καθώς το φως του Ήλιου πλησιάζει τη Γη, λόγω διάφορων απορροφήσεων και στρωμάτων που διασχίζει, αποκτά ανώμαλη κατανομή φάσματος.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία της μέσης απόστασης ενός πλανήτη με τον ήλιο ονομάζεται ηλιακή σταθερά. Για τη Γη η ηλιακή σταθερά είναι ίση με  $1.367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Τα φωτόνια ή κβάντα φωτός αποτελούν την ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ενέργεια τους συμβολίζεται με E και η ταχύτητα τους είναι ίση με του φωτός (c).



Γενικά για την ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ισχύει ο τύπος:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} [J] \quad (3-1)$$

Όπου:

$h = 6.67 \cdot 10^{-34} [Js]$ : η σταθερά του Plank,

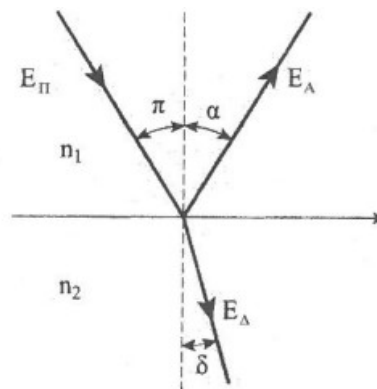
$\nu [s^{-1}]$ : η συχνότητα της ακτινοβολίας και

$\lambda [m]$ : το μήκος κύματος.

Αντίστοιχα η συγκεκριμένη σχέση μπορεί να γραφτεί και με την παρακάτω μορφή καθώς το μήκος κύματος  $\lambda$  συνήθως μετριέται σε [nm], όπου  $1 [nm] = 10^{-9}[m]$ , δηλαδή:

$$E = \frac{1.240}{\lambda} [eV] \quad (3-2)$$

Η διέγερση των ηλεκτρικών φορτίων που εκτελούν ταλάντωση οδηγούν στην απορρόφηση της ακτινοβολίας σε ένα υλικό. Στο σχήμα της εικόνας 3-2 φαίνεται η διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων και η πορεία που εκτελεί η ακτίνα ακτινοβολίας.



ΕΙΚΟΝΑ 3-2: Πορεία προσπίπτουσας ακτίνας σε διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων.

Πηγή: (Πέρδιος, 2011)

Όπου:

$E_{\Pi}$ : η ενέργεια της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια

$E_{\Lambda}$ : η ανακλώμενη ενέργεια ακτινοβολίας

$E_{\Delta}$ : η ενέργεια που διαπερνά την επιφάνεια πρόσπτωσης

$E_{\Lambda\Pi}$ : το ποσό της  $E_{\Delta}$  που απορροφάται από το υλικό

$n = \frac{c_0}{c}$  : ο δείκτης διάθλασης υλικού

$c_0, c$ : η ταχύτητα του φωτός στο υλικό και στο μέσο ( $c < c_0$ )

$\alpha = \frac{E_{\Delta\Pi}}{E_{\Pi}}$  : η απορροφητικότητα του σώματος

$\rho = \frac{E_A}{E_{\Pi}}$  : η ανακλαστικότητα του σώματος

$\tau = \frac{E_{\Delta}}{E_{\Pi}}$  : η διαπερατότητα του σώματος

Από τη διατήρηση της ενέργειας καταλήγουμε:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (3-3)$$

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως η συχνότητα της ακτινοβολίας δεν τροποποιείται καθώς διαδίδεται σε άλλα υλικά ή ανακλάται από κάποιες επιφάνειες και η ταχύτητα εξαρτάται από το υλικό του μέσου διάδοσης (Πέρδιος, 2011).

### 3.2.1 Ηλιακή Γεωμετρία

Η Γη αποτελεί έναν από τους 9 μεγαλύτερους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος και οι κινήσεις της επηρεάζουν την ηλιακή γεωμετρία. Τα δύο είδη κίνησης της είναι τα εξής:

- Η κίνηση γύρω από τον Ήλιο με περίοδο ίση με 365,25 ημέρες. Η κίνηση αυτή γίνεται σε ελλειπτική τροχιά και η διάρκεια της περιόδου ορίζεται ως το έτος.
- Η περιστροφική κίνηση γύρω από τον άξονα της (βορρά – νότο) με φορά από την δύση προς την ανατολή. Η διάρκεια της περιστροφής είναι 24 ώρες και αποτελεί την ημέρα.

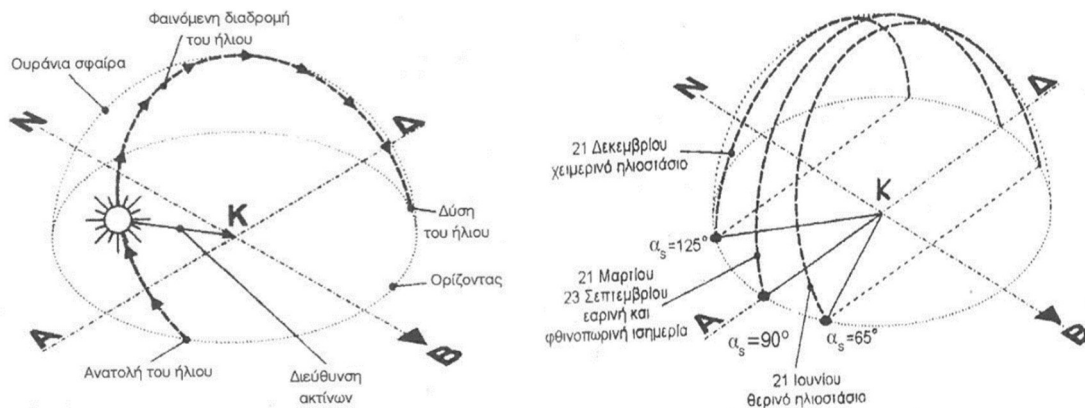
Το επίπεδο που εφάπτεται της σφαιρικής γης στο σημείο ενός τόπου ονομάζεται ορίζοντας. Η κατακόρυφη διεύθυνση του τόπου, η οποία είναι κάθετη προς τον ορίζοντα, τέμνει την σφαίρα σε δύο σημεία, το άνω το οποίο ονομάζεται Ζενίθ ενώ το κάτω με την ονομασία Ναδίρ.

Για το σωστό εντοπισμό σημείων στην επιφάνεια της Γης χρησιμοποιούνται γεωγραφικές συντεταγμένες. Για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων η Γη χωρίζεται σε δύο βασικούς κύκλους, τον μεσημβρινό και τον ισημερινό. Ο μεσημβρινός της Γης διέρχεται από το Γκρήνουιτς. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες αποτελούνται από το γεωγραφικό πλάτος και μήκος. Γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$  (latitude) ορίζεται ως η γωνία που

δημιουργείται μεταξύ της κατακόρυφου του τόπου και του ισημερινού και υπολογίζεται πάνω στον μεσημβρινό. Οι τιμές που μπορεί να πάρει η γωνία είναι από  $90^\circ$  βόρεια (North N) έως  $90^\circ$  νότια (South S) του ισημερινού. Το γεωγραφικό μήκος  $\lambda$  (longitude) είναι η διέδρη γωνία που δημιουργείται μεταξύ του μεσημβρινού του Γκρήνουιτς και του μεσημβρινού του τόπου. Οι τιμές της είναι από  $-180^\circ$  ανατολικά έως  $+180^\circ$  δυτικά του μεσημβρινού του Γκρήνουιτς και μετρείται πάνω στον ισημερινό.

Για την εύρεση της θέσης ουράνιων σωμάτων χρησιμοποιούνται οι σφαιρικές συντεταγμένες, δηλαδή η γωνία ύψους και το αζιμούθιο. Η γωνία ύψους  $\gamma$  είναι η γωνία που δημιουργείται μεταξύ της θέσης του σώματος και του ορίζοντα. Οι τιμές που λαμβάνει είναι από  $0$  έως  $90^\circ$  από τον ορίζοντα έως το Ζενίθ και  $0$  έως  $-90^\circ$  από τον ορίζοντα προς το Ναδίρ. Το αζιμούθιο είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή του ουράνιου σώματος πάνω στον ορίζοντα και τον Νότο. Οι τιμές είναι από  $0-180^\circ$  δυτικά και  $0-180^\circ$  ανατολικά.

Στην εικόνα 3-3 παρουσιάζεται η κίνηση του ήλιου ως προς ένα σημείο K κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το σημείο K θεωρείται ως σημείο αναφοράς και με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η διεύθυνση των ηλιακών ακτίνων.



ΕΙΚΟΝΑ 3-3: Φαινόμενες διαδρομές του ήλιου κατά τη διάρκεια α) μίας ημέρας, β) τεσσάρων χαρακτηριστικών ημερών του έτους.

Πηγή: (Πέρδιος, 2011)

Γενικά, η καμπύλη και η διαδρομή που κάνει ο ήλιος ως προς το σημείο K αλλάζει καθημερινά με αποτέλεσμα τη μεταβολή των διευθύνσεων των ακτίνων του ήλιου. Η μεγαλύτερη διαδρομή γίνεται 21 Ιουνίου με αποτέλεσμα την ύπαρξη της μεγαλύτερης ημέρας του έτους. Αντίθετα, 21 Δεκεμβρίου έχουμε την μικρότερη ημέρα καθώς η διαδρομή είναι η ελάχιστη που μπορεί να συμβεί. Δύο ημέρες τον χρόνο διαθέτουμε ισημερία και αυτές είναι η 21 Μαρτίου και η 23 Σεπτεμβρίου. Τότε, ο ήλιος αρχίζει

ακριβώς από την Ανατολή και καταλήγει στη Δύση. Ουσιαστικά οι ημέρες που ο ήλιος εκτελεί ακριβώς τη διαδρομή Ανατολή – Δύση είναι μόνο δύο σε όλο το έτος.

Η ορθή προβολή της τροχιάς του Ήλιου κατά τη διάρκεια ενός έτους και η απεικόνιση της ακριβούς θέσης στο γεωγραφικό πλάτος του τόπου για κάθε ώρα της ημέρας γίνεται μέσω του ηλιακού χάρτη (Πέρδιος, 2011).

### 3.2.2 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή τη γωνία με την οποία προσπίπτει σε μία επιφάνεια. Έτσι, η γεωμετρία του ήλιου δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας με δεδομένα τη θέση και την κλίση της επιφάνειας. Για να υπολογιστεί η ηλιακή ακτινοβολία πρόσπτωσης βασική πληροφορία είναι η ηλιακή ακτινοβολία εξωτερικά της ατμόσφαιρας και η διαθέσιμη στην θέση όπου βρίσκεται η επιφάνεια. Η δεύτερη πληροφορία παρέχεται είτε με εμπειρικούς κανόνες και αριθμητικές μεθόδους είτε με εφαρμογή μετρήσεων στην περιοχή που μας ενδιαφέρει. Με γνωστές τις δύο αυτές πληροφορίες οδηγούμαστε στον υπολογισμό της ολικής. Η ολική ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από τρεις τύπους ακτινοβολίας, την διάχυτη, την ανακλώμενη και την άμεση.

Στόχος της παραπάνω διαδικασίας είναι ο υπολογισμός των ηλιακών κερδών (solar gains) από κάθε επιφάνεια που προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία. Για αδιαφανείς επιφάνειες χρειάζεται ο επιπρόσθετος υπολογισμός της θερμοκρασίας αέρα – ηλίου (Πολυζάκης, 2018).

### 3.2.3 Ατμόσφαιρα

Το υψόμετρο παίζει σημαντικό ρόλο στην πυκνότητα του αέρα. Όσο αυξάνεται το ύψος τόσο μειώνεται η πυκνότητα και το βάρος του τμήματος της ατμόσφαιρας που μελετάται.

Επίσης, μεταβολή παρουσιάζεται και στην πίεση  $p$  της ατμόσφαιρας. Υπολογίζεται πως ανά 10 μέτρα μεταβάλλεται κατά 133 Pa. Η μεταβολή αυτή υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$p = p_0 \cdot e^{\left(\frac{-\rho_0 \cdot g_0 \cdot h}{p_0}\right)} \left[\frac{N}{m^2}\right] \quad (3-4)$$

Όπου:

$p_0$ : η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της Γης,  $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$

$\rho_0$ : η πυκνότητα του αέρα σε ύψος στην επιφάνεια της θάλασσας,  $h=0$ ,  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$g_0$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$

$h$ : το ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, [m]

Εκτός από την μεταβολή της πίεσης με το ύψος παρουσιάζεται μεταβολή και στη θερμοκρασία. Γενικά, υπολογίζεται πως ανά 1.000 μέτρα η θερμοκρασία μειώνεται κατά 6,5 °C.

Η ατμόσφαιρα ανάλογα το ύψος χωρίζεται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Τροπόσφαιρα**

Είναι το πρώτο στρώμα της ατμόσφαιρας με πάχος 7 έως 17 Km. Σε αυτό το στρώμα παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά φαινόμενα και η θερμοκρασία του από τη θάλασσα έως τα όρια του παίρνει τιμές από 20 °C έως -60 °C.

- **Στρατόσφαιρα**

Το πάχος του συγκεκριμένου στρώματος φτάνει τα 30 Km και η θερμοκρασία φτάνει από τους -60 °C έως 0 °C.

- **Μεσόσφαιρα**

Βρίσκεται ακριβώς πάνω από την στρατόσφαιρα και έχει ακριβώς το ίδιο πάχος. Οι θερμοκρασίες που λαμβάνει είναι από 0 °C έως -90 °C.

- **Θερμόσφαιρα**

Η απόσταση της Θερμόσφαιρας φτάνει τα 300 Km από την επιφάνεια της θάλασσας. Το πάχος της είναι περίπου 210 Km και οι θερμοκρασίες που λαμβάνει είναι από -90 °C έως 1200 °C.

- **Εξώσφαιρα**

Η εξώσφαιρα αποτελεί το τελευταίο στρώμα και η θερμοκρασία είναι ίδια με αυτή της Θερμόσφαιρας.

- **Ιονόσφαιρα**

Η ιονόσφαιρα παρέχει ευελιξία στις τηλεπικοινωνίες καθώς διαθέτει ιονισμένα άτομα. Κάποιο μέρος της βρίσκεται στην Θερμόσφαιρα και το άλλο στην Εξώσφαιρα.

Τα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας περιέχουν 78% άζωτο κατ' όγκο και 21% οξυγόνο. Εκτός των δύο αυτών στοιχείων υπάρχει και διοξείδιο του άνθρακα, όζον, υδρατμοί και μεθάνιο.

Στην τροπόσφαιρα υπάρχουν αέρια οξείδια στα οποία επιδρούν οι υπεριώδεις ακτίνες. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται όζον. Το όζον αυξάνεται σε περιοχές του πλανήτη που έχουν μεγάλες θερμοκρασίες, όπως οι πόλεις, και σε συνδυασμό με τους λοιπούς ρύπους αυξάνεται το φωτοχημικό νέφος.

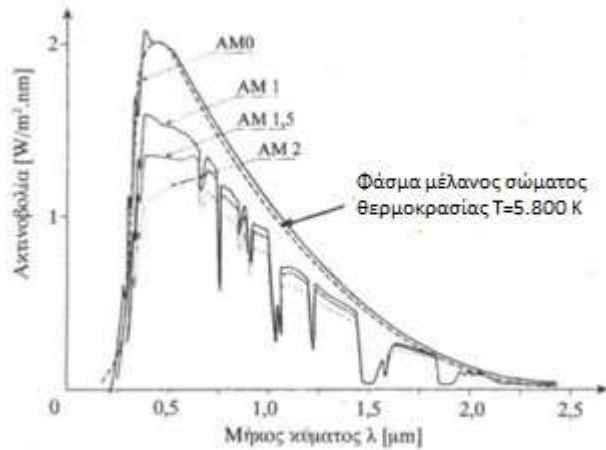
Το όζον έχει την ικανότητα απορρόφησης υπεριώδους ακτινοβολίας. Η έντονη συσσώρευση των ρύπων στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του όζοντος. Με τη μείωση αυτή μειώνεται και η απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας οδηγώντας στην μείωση προστασίας του πλανήτη.

### **3.2.4 Διέλευση και Συνιστώσες Ηλιακής Ακτινοβολίας**

Το υψόμετρο, η υγρασία της ατμόσφαιρας και διάφορες καιρικές συνθήκες επηρεάζουν την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στην Γη. Η μάζα αέρα AM είναι ο αριθμός που καθορίζει το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας. Καθορίζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η διαδρομή στην ατμόσφαιρα σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της και δίνεται από τον τύπο:

$$AM = \frac{1}{\cos z}$$
, όπου  $z$  η γωνία που σχηματίζουν οι ακτίνες με τη διεύθυνση του Ζενίθ, σε μοίρες.

Οι περιοχές της ατμόσφαιρας που διέρχεται ηλιακή ακτινοβολία με μικρή σχετικά απορρόφηση ονομάζονται φασματικά παράθυρα. Τα φασματικά παράθυρα είναι τρία και διαχωρίζονται με βάση την απορροφητική δράση αερίων στην περιοχή.



ΕΙΚΟΝΑ 3-4: Φάσματα ηλιακής ακτινοβολίας.  
 Πηγή: (Πέρδιος, 2011)

Τα φωτόνια κατά την εισχώρηση των ακτίνων στη Γη, σκεδάζονται από τη σκόνη και τον καπνό του περιβάλλοντος. Ένα ποσοστό εκείνης της ακτινοβολίας διαχέεται στο διάστημα και το υπόλοιπο φτάνει στη Γη, ένα άλλο απορροφάται από μόρια του όζοντος και το υπόλοιπο ανακλάται από τα σύννεφα και διαχέεται προς την επιφάνεια της Γης.

Όπως ήδη αναφέρθηκε και ανωτέρω, τα είδη της προσπίπτουσας συνιστώσας είναι τρία.

- Η απ' ευθείας, η οποία εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης, την υγρασία της ατμόσφαιρας και την ημέρα του έτους,
- Η διάχυτη, η οποία έχει τους ίδιους παράγοντες εξάρτησης όπως η απ' ευθείας και
- Η ανακλώμενη από το έδαφος, η οποία εξαρτάται από τη μορφολογία και την πυκνότητα των νεφών.

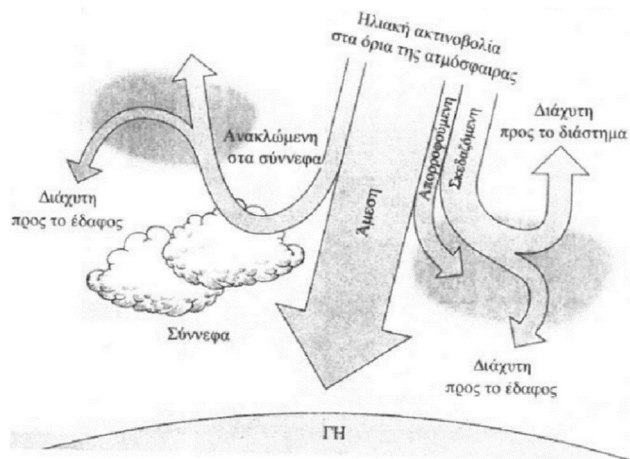
Η ολική ακτινοβολία υπολογίζεται από την εξίσωση 3-5:

$$G = B_n \cdot \sigma \nu \nu z + D \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (3-5)$$

Όπου:

$B_n$ : η απ' ευθείας κάθετη ακτινοβολία στην επιφάνεια,  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

$D$ : η διάχυτη ακτινοβολία στην επιφάνεια,  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$



ΕΙΚΟΝΑ 3-5: Ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια εισόδου στην ατμόσφαιρα.  
 Πηγή: (Πέρδιος, 2011)

### 3.2.5 Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Η ηλιακή ακτινοβολία που καταλήγει στη Γη είναι περίπου το 70% της συνολικής ενώ η υπόλοιπη σκεδιάζεται στο διάστημα. Από αυτό το ποσοστό ένα μέρος θερμαίνει τη Γη. Ο πλανήτης μας καθ' όλη τη διαδικασία εκπέμπει ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα θερμοκρασίας περίπου ίσης με 15 °C. Ένα ποσό από αυτή την ακτινοβολία απορροφάται από τα αέρια της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα τη σταθερή διατήρηση της θερμοκρασίας. Η διαδικασία αυτή αποτελεί το κανονικό φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Λόγω χρήσης καυσίμων και δημιουργίας ρύπων συσσωρεύεται μεγάλη ποσότητα αερίων στην ατμόσφαιρα η οποία μας οδηγεί σε αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας της Γης. Ουσιαστικά τα αέρια αυτά εγκλωβίζουν την ακτινοβολία της Γης εντός της ατμόσφαιρας. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται κακό φαινόμενο του θερμοκηπίου καθώς δημιουργείται έντονη κλιματική αλλαγή (Πέρδιος, 2011).



## 3.3 Ημιαγωγοί

### 3.3.1 Γενικά

Τα στερεά σώματα δημιουργούνται όταν περισσότερα από 2 άτομα έρχονται αρκετά κοντά. Το φορτίο των ηλεκτρονίων κάθε ατόμου είναι αρνητικό ενώ του πυρήνα θετικό και τα ηλεκτρόνια είναι τοποθετημένα σε διάφορες στιβάδες. Τα δύο αυτά ηλεκτρικά φορτία μεταξύ τους είναι ίσα και αντίθετα έτσι ώστε το άτομο να είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην εξωτερική στιβάδα αποτελούν τα ηλεκτρόνια σθένους και βρίσκονται σε διαφορετική στάθμη ενέργειας.

Τα άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος των στερεών σωμάτων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εκτελούν ταλαντώσεις γύρω από τη θέση ισορροπίας τους. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερο πλάτος αποκτά η ταλάντωση και έτσι, οι ατομικοί δεσμοί σπάνε και το ηλεκτρόνιο αποκτά ενέργεια, η οποία το καθιστά ελεύθερο. Η κίνηση αυτή ονομάζεται ηλεκτρική αγωγιμότητα. Το κενό που δημιουργείται κατά την απομάκρυνση του ηλεκτρονίου ονομάζεται οπή. Η οπή, λοιπόν, έχει τη δυνατότητα έλξης ηλεκτρονίων σθένους άλλου ατόμου και σε περίπτωση σύλληψης νέου ηλεκτρονίου, κατά την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου στον ημιαγωγό, η κίνηση των οπών είναι αντίθετη από εκείνη των ηλεκτρονίων και έτσι παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Σύμφωνα με την θεωρία ζωνών – band theory τα ηλεκτρόνια μπορούν να μεταπηδούν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας σε συνηθισμένη θερμοκρασία. Σε περίπτωση που συμβεί αυτό, το στερεό άγει τον ηλεκτρισμό.

Ανάλογα με την κίνηση τους τα ηλεκτρόνια χωρίζονται και αυτά σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες:

- Τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στιβάδων,
- Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια τα οποία διαθέτουν ενέργεια η οποία τα βοηθάει για την απομάκρυνση τους από το σώμα και τέλος,
- Τα ηλεκτρόνια σθένους τα οποία μπορούν εύκολα να μετακινηθούν σε άλλους δεσμούς, είτε επειδή τα ηλεκτρόνια σθένους των άλλων δεσμών κινήθηκαν προς άλλες κατευθύνσεις, είτε επειδή ανταλλάσσουν θέσεις μεταξύ τους.

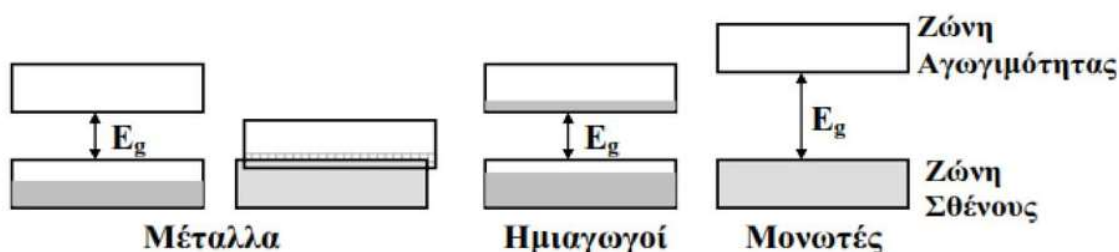
### 3.3.2 Κατηγορίες Ημιαγωγών

Η παραγωγή ρεύματος, δηλαδή η κίνηση των ηλεκτρονίων εκτός ημιαγωγού μπορεί να επιτευχθεί μέσω των ημιαγωγών πρόσμειξης. Οι ημιαγωγοί πρόσμειξης περιέχουν στο κρυσταλλικό τους πλέγμα άτομα διαφορετικού υλικού. Οι τύποι των ημιαγωγών είναι δύο, οι ενδογενείς ημιαγωγοί, οι οποίοι καθορίζονται από την ηλεκτρονιακή δομή των καθαρών υλικών και οι εξωγενείς ημιαγωγοί, οι οποίοι εξαρτώνται από τα άτομα προσμίξεων (Σπανάκης, 2013).

#### Ενδογενείς Ημιαγωγοί

Οι ημιαγωγοί είναι στερεά σώματα τα οποία διαφέρουν στον αριθμό ηλεκτρονίων της εξωτερικής στιβάδας από τα υπόλοιπα στερεά σώματα. Συγκριτικά, λοιπόν, με τα μέταλλα διαθέτουν μικρότερο αριθμό ηλεκτρονίων σθένους ενώ αντίθετα, ο αριθμός ηλεκτρονίων σθένους συγκριτικά με τους μονωτές είναι μεγαλύτερος. Η ειδική αντίσταση τους παίρνει τιμές από  $10^{-8} - 10^{-2} \Omega\text{cm}$ , ενώ η ειδική αντίσταση των μετάλλων και των μονωτών είναι ίση με  $10^{-2} \Omega\text{cm}$  και  $10^{12} \Omega\text{cm}$  αντίστοιχα (Πλευριτάκης, 2019).

Οι ενεργειακές ζώνες μετάλλου, ημιαγωγού και μονωτή περιγράφονται στο παρακάτω σχήμα της εικόνας 3-6. Η εσωτερική ενεργειακή ζώνη είναι η ζώνη που περιλαμβάνει τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στιβάδων. Στη συνέχεια ακολουθεί η ζώνη σθένους (ΖΣ), όπου διαθέτει τα ηλεκτρόνια σθένους και έπειτα έχουμε την ζώνη των ελεύθερων ηλεκτρονίων η οποία ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας (ΖΑ). Η απόσταση των δύο άνω ζωνών ονομάζεται ενεργειακό διάκενο  $E_g$  ή ενεργειακό χάσμα. Το ενεργειακό χάσμα δηλώνει την ενέργεια που απαιτείται για τη μετατροπή ενός ηλεκτρονίου σθένους σε ελεύθερο.



ΕΙΚΟΝΑ 3-6: Απεικόνιση ενεργειακών ζωνών διάφορων υλικών.

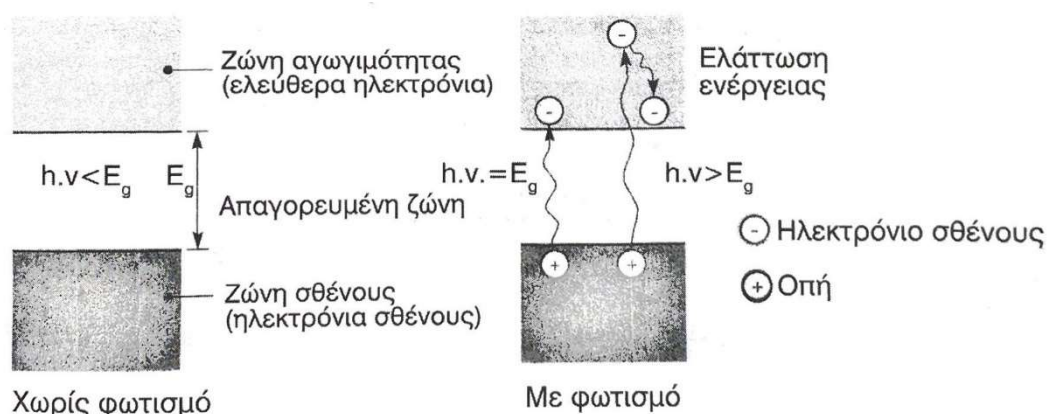
Πηγή: (Πέρδιος, 2011)

Το  $E_g$  είναι η διαφορά μεταξύ της ενέργειας κορυφής της ζώνης σθένους η οποία συμβολίζεται με  $E_v$  και της ενέργειας του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας, δηλαδή το  $E_c$ .

$$E_g = E_c - E_v \quad (3-6)$$

Σε ένα καθαρό χωρίς προσμίξεις σώμα η απόσταση αυτή ονομάζεται απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη για τα ηλεκτρόνια. Ανάλογα την ενέργεια των φωτονίων και του ενεργειακού χάσματος καθορίζεται η ποσότητα απορρόφησης του φωτός.

Γενικά, κατά τον φωτισμό ενός ημιαγωγού τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας αυξάνονται με αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας. Όταν σταματήσει ο φωτισμός, η αγωγιμότητα επιστρέφει στις αρχικές τιμές της.



ΕΙΚΟΝΑ 3-7: Φωτοαγωγιμότητα υλικού  
Πηγή: (Πέρδιος, 2011)

Οι ημιαγωγοί σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργούν ως μονωτές ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες ως αγωγοί. Σε χαμηλές θερμοκρασίες δημιουργείται σύγκρουση των ηλεκτρονίων σθένους με τους ομοιοπολικούς δεσμούς και έτσι δεν αποκτούν μεγάλη ενέργεια για την κίνηση τους. Η φύση των ηλεκτρονίων των ημιαγωγών τους επιτρέπει να βρίσκονται είτε σε κατάσταση υψηλής ενέργειας είτε χαμηλής.

Άλλη μία διαφορά που το κάνει να ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα είναι το ενεργειακό χάσμα  $E_g$ . Τα μέταλλα δεν διαθέτουν ενεργειακό χάσμα με αποτέλεσμα την άμεση μετακίνηση των ηλεκτρονίων από την ΖΣ στη ΖΑ. Οι ημιαγωγοί διαθέτουν ενεργειακό χάσμα και η απόκτηση απαιτούμενης ενέργειας των ηλεκτρονίων μπορεί να εξασφαλίσει την μεταπήδηση τους στη ΖΑ. Σε αντίθετη περίπτωση, οι μονωτές διαθέτουν μεγάλο ενεργειακό χάσμα και η μετακίνηση των ηλεκτρονίων καθίσταται αδύνατη.

Η ιδιαιτερότητα των ενδογενών ημιαγωγών είναι η ίση ποσότητα οπών και ηλεκτρονίων που διαθέτουν. Με την αλλαγή της θερμοκρασίας η κατάσταση τους μεταβάλλεται πολύ γρήγορα (Πέρδιος, 2011).

## Εξωγενείς Ημιαγωγοί

Εάν στους ενδογενείς ημιαγωγούς προστεθεί κάποια ποσότητα από τα στοιχεία της τρίτης και πέμπτης ομάδας του περιοδικού πίνακα τότε ο ημιαγωγός αποκτά προσμίξεις. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται εμπλουτισμός και γίνεται με σκοπό την αύξηση της αγωγιμότητας του υλικού. Το είδος των προσμίξεων που θα χρησιμοποιηθούν καθορίζει αν η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη των οπών και το αντίθετο. Εάν η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη από την συγκέντρωση των οπών, ο ημιαγωγός καλείται τύπου n. Εάν ισχύει το αντίθετο, ο ημιαγωγός χαρακτηρίζεται ως τύπου p (Εξωγενείς Ημιαγωγοί, 2022).

Μερικοί από τους σημαντικότερους ημιαγωγούς που χρησιμοποιούνται στις προσμίξεις είναι οι εξής:

- Το Πυρίτιο, Si ( $E_g=1,1\text{eV}$ ),
- Το Γερμάνιο, Ge( $E_g=0,67\text{eV}$ ),
- Το Αρσενικούχο Γάλλιο, GaAs( $E_g=2,25\text{eV}$ ),
- Το Φωσφορούχο Γάλλιο – GaP( $E_g=2,25\text{eV}$ ),
- Ο Τελλουριούχος Ψευδάργυρος – ZnTe ( $E_g=2.26\text{eV}$ ).

## Ημιαγωγοί τύπου N

Όταν μία μικρή ποσότητα ενός στοιχείου της πέμπτης ( $V_A$ ) ομάδας του περιοδικού πίνακα προστεθεί σε έναν ημιαγωγό, δηλαδή μέσω της αντικατάστασης ατόμων του καθαρού ημιαγωγού με άτομα από υλικά μεγαλύτερου σθένους δημιουργείται ο ημιαγωγός τύπου n. Ως ημιαγωγοί τύπου n (δότες) χρησιμοποιούνται συχνά το πυρίτιο και το γερμάνιο ενώ ως στοιχεία για την πρόσμιξη το αρσενικό, ο φώσφορος και το αντιμόνιο. Στο βασικό στοιχείο, λοιπόν, το οποίο είναι τετρασθενές, εισάγεται πεντασθενές στοιχείο και με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται τέσσερις δεσμοί. Το πέμπτο ηλεκτρόνιο που δεν συμμετέχει παραμένει ελεύθερο αυξάνοντας την αγωγιμότητα. Το φορτίο του ατόμου που ιονίζεται κατά την πρόσμιξη είναι θετικό και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραμένουν ελεύθερα ηλεκτρόνια από τον δότη. Η απόκτηση γειτονικών ηλεκτρονίων είναι πιο δύσκολη και έτσι, μειώνεται ο αριθμός των οπών. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως ο ημιαγωγός θα αποτελείται από αρκετά ελεύθερα ηλεκτρόνια τα οποία θα μεταφέρουν το ρεύμα και λίγες οπές. Τα ηλεκτρόνια λόγω της αυξημένης ποσότητας τους ονομάζονται φορείς πλειονότητας, ενώ οι οπές φορείς μειονότητας. Όσο αυξάνεται η ποσότητα των

ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό, τόσο θα αυξάνεται και η αγωγιμότητα του. Ένα παράδειγμα είναι η αντικατάσταση ατόμων κρυσταλλικού πυριτίου (Si) σθένους 4 με άτομα φωσφόρου (P) που διαθέτουν σθένος 5 (Πλευριτάκης, 2019).

### **Ημιαγωγός τύπου P**

Η δημιουργία των ημιαγωγών τύπου P γίνεται κατά την πρόσμιξη ημιαγωγών με στοιχεία της τρίτης ομάδας του περιοδικού πίνακα, όπως το βόριο (B) και το αλουμίνιο (Al). Έτσι, όταν ένα τρισθενές στοιχείο δημιουργήσει δεσμούς με ένα τετρασθενές, θα χρησιμοποιήσει όλα τα ηλεκτρόνια που διαθέτει στην εξωτερική στοιβάδα. Ένα άτομο του ημιαγωγού, όμως, θα αναζητήσει ένα ηλεκτρόνιο από κάποιο γειτονικό άτομο και έτσι θα γίνει δανεισμός.

Το ηλεκτρόνιο που θα καταλάβει τη θέση που ήταν κενή θα ιονίσει με αρνητικό φορτίο το άτομο και έτσι, αντιθέτως με τους ημιαγωγούς τύπου n, οι οπές απελευθερώνονται και ο αριθμός τους αυξάνεται ενώ τα ηλεκτρόνια μειώνονται. Τα άτομα που λαμβάνουν ένα νέο ηλεκτρόνιο ονομάζονται αποδέκτες και η διαδικασία αυτή οδηγεί στην αγωγιμότητα τους. Σε αυτή την περίπτωση οι φορείς πλειονότητας είναι οι οπές, ενώ οι φορείς μειονότητας τα ηλεκτρόνια (Πέρδιος, 2011).

### 3.4 Δίοδος Επαφής

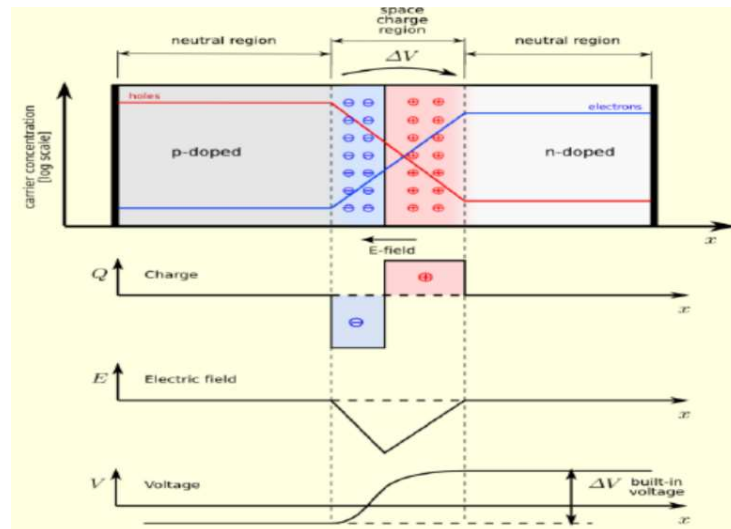
Στην προηγούμενη παράγραφο δόθηκαν μερικές πληροφορίες για τη δημιουργία των ημιαγωγών τύπου n και τύπου p. Όταν έρθει σε επαφή ένας ημιαγωγός τύπου n με έναν ημιαγωγό τύπου p δημιουργείται μία συνθήκη ανταλλαγής ηλεκτρονίων και οπών, η οποία ονομάζεται δίοδος επαφής p-n. Οι δύο αυτές επιφάνειες χωρίζονται μεταξύ τους από μία μεταβατική περιοχή. Το πυρίτιο νοθεύεται με τις προσμίξεις του αποδέκτη και έτσι, οι οπές μετατρέπονται σε φορείς πλειονότητας. Από την άλλη μεριά, το πυρίτιο κατά την νόθευση του με προσμίξεις δότη μετατρέπεται σε υλικό τύπου n και τα ηλεκτρόνια του αποτελούν τους φορείς πλειονότητας.

Κατά την επαφή των δύο αυτών υλικών παρουσιάζεται μεγάλη μεταβολή στη συγκέντρωση ηλεκτρονίων. Η μεταβολή της συγκέντρωσης από μία μεγάλη τιμή στο υλικό n σε μία μικρή στο υλικό p προκαλεί διάχυση ηλεκτρονίων από το n στο p και διάχυση οπών από το p στο n. Με την απομάκρυνση των οπών από το υλικό τύπου p, δημιουργείται αύξηση των αρνητικά φορτισμένων ιόντων. Έτσι, το υλικό τύπου p αποκτά αρνητικό φορτίο.

Αντιθέτως, στο υλικό n τα ηλεκτρόνια που απομακρύνονται δημιουργούν θετικά φορτισμένα ιόντα και έτσι, το υλικό n αποκτά θετικό φορτίο. Το σημείο επαφής της απομάκρυνσης των φορέων πλειονότητας και της δημιουργίας θετικών ιόντων αποδέκτη και δότη ονομάζεται περιοχή αραίωσης.

Σκοπός του φορτίου αραίωσης είναι η δημιουργία μηδενικής ροής. Αυτό επιτυγχάνεται με την παραγωγή ενός ηλεκτρικού πεδίου με ίσα και αντίθετα ρεύματα διάχυσης. Έτσι, δημιουργείται ισορροπία μεταξύ των οπών και των ηλεκτρονίων καθώς η διάχυση αυτή ελαχιστοποιείται.

Στην εικόνα 3-8 απεικονίζονται οι κατευθύνσεις των ρευμάτων και το ηλεκτρικό πεδίο, η πυκνότητα του φορτίου και το πεδίο επαφής p-n απότομης μεταβολής νόθευσης σε συνθήκες μηδενικής πόλωσης. Το υλικό p στην παρακάτω περίπτωση είναι σε μεγαλύτερο βαθμό νοθευμένο συγκριτικά με το υλικό n. Γι' αυτό η συγκέντρωση του αποδέκτη είναι μεγαλύτερη από του δότη, δηλαδή  $N_A > N_D$ .



ΕΙΚΟΝΑ 3-8: Απεικόνιση επαφής pn με απότομη μεταβολή νόθευσης σε ισορροπημένη πόλωση.  
 Πηγή: (RABAEY, 2003)

Επιπλέον, σύμφωνα με την εικόνα, κατά μήκος της επαφής κάτω από τη μηδενική πόλωση υπάρχει τάση  $\Phi_0$ , η οποία ονομάζεται ενσωματωμένο δυναμικό της επαφής (built-in potential). Η τάση δίνεται από τον τύπο 3-7:

$$\Phi_0 = \varphi_T \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (3-7)$$

Όπου:

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} = 26\text{mV στα } 300 \text{ K}$$

$n_i$ : η ενδογενής συγκέντρωση φορέων σε ανόθευτο δείγμα ημιαγωγού.

$n_i \approx 1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , για το πυρίτιο σε θερμοκρασία 300 K (Rabaey et al., 2003).

### 3.4.1 Στατική Συμπεριφορά

Η ηλεκτρονική συσκευή που μελετάται αποτελείται από δύο διαφορετικά υλικά, τον ημιαγωγό τύπου p και τον ημιαγωγό τύπου n και ονομάζεται δίοδος επαφής p-n ή κρυσταλλοδίοδος ή ημιαγωγική επαφή p-n. Η δίοδος διαθέτει δύο ακροδέκτες, την άνοδο (A) από τη μεριά του υλικού p, η οποία συμβολίζεται με βέλος και την κάθοδο (K) από τη μεριά του υλικού n, η οποία συμβολίζεται με μία γραμμή. Η δίοδος έχει την ιδιαιτερότητα να άγει το ρεύμα μόνο με κατεύθυνση από την άνοδο στην κάθοδο. Μερικές εφαρμογές της δίοδου p-n παρουσιάζονται σε τρανζίστορ, ανορθωτές κλπ.

### **3.4.1.1 Πόλωση Διόδου p-n**

Μία σημαντική ιδιαιτερότητα της διόδου p-n είναι η διαφοροποίηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη φορά που εφαρμόζεται η ηλεκτρική τάση στα άκρα της (Πέρδιος, 2011).

Το είδος της πόλωσης, λοιπόν εξαρτάται από την εξωτερική πηγή που συνδέεται με την δίοδο επαφής, καθώς εκείνη καθορίζει την ηλεκτρική τάση στα άκρα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα είδη της πόλωσης της διόδου p-n:

#### **Ορθή Πόλωση (Forward polarisation)**

Στην ορθή πόλωση ο θετικός πόλος συνδέεται με τον ημιαγωγό p ενώ ο αρνητικός συνδέεται με τον αγωγό n.

Η εφαρμοζόμενη τάση υπερβαίνει την τάση κατωφλίου –  $V_k$  και έτσι, η δίοδος γίνεται αγωγίμη. Η συμπεριφορά της θυμίζει ωμική αντίσταση με χαρακτηριστικά χαμηλή τιμή.

Η κίνηση των ηλεκτρονίων γίνεται ανεμπόδιστα από την πηγή μέσω του ημιαγωγού n προς την περιοχή της επαφής. Στο σημείο εκείνο γίνεται επανασύνδεση με τις οπές, οι οποίες δημιουργούνται εξαιτίας της απομάκρυνσης των ηλεκτρονίων προς τον θετικό πόλο μέσω του ημιαγωγού p (Πέρδιος, 2011).

#### **Ανάστροφη Πόλωση (Reserve polarisation)**

Στην ανάστροφη πόλωση ο αρνητικός πόλος της πηγής συνεχούς τάσεως συνδέεται με τον ημιαγωγό p ενώ ο θετικός με τον αγωγό n. Οι οπές στο άκρο τύπου p απομακρύνονται και κινούνται προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο και τα ηλεκτρόνια έλκονται από τη θετική τάση του υλικού n με κατεύθυνση προς το θετικό ηλεκτρόδιο. Η συμπεριφορά της θυμίζει μονωτή καθώς τα ηλεκτρόνια, οι οπές και κατά συνέπεια η αγωγιμότητα μειώνονται οδηγώντας στη δημιουργία μίας μεγάλης αντίστασης. Η ανάστροφη πόλωση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ισχυρού δυναμικού το οποίο μπαίνει εμπόδιο στη ροή του ρεύματος εντός του ημιαγωγού. Ουσιαστικά, λειτουργεί ως ένα ανοιχτό κύκλωμα με μηδενική αγωγιμότητα. Η τάση που εφαρμόζεται δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την τάση κατάρρευσης –  $V_b$  καθώς υπάρχει ενδεχόμενο πλήρους καταστροφής της διάταξης.

Έτσι, κατά την ορθή πόλωση της διόδου επιτρέπεται η διέλευση ρεύματος από την επαφή των ημιαγωγών ενώ, στην ανάστροφη πόλωση αυξάνεται σημαντικά η ζώνη φραγής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό στη διέλευση ρεύματος από την επαφή των ημιαγωγών. Σε αυτή τη συνθήκη άγεται μόνο ρεύμα πολύ μικρής και σταθερής τιμής



$I_s$ , το οποίο ονομάζεται ρεύμα κόρου. Η ιδιαιτερότητα της επαφής να άγει ρεύμα προς μία μόνο κατεύθυνση εξηγεί τον λόγο που χρησιμοποιείται ως διάταξη ανόρθωσης μετατροπής εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές (Ventre, 2005).

Η εξίσωση ιδανικής διόδου (ideal diode equation) προσφέρει τη δυνατότητα σύνδεσης της τάσης πόλωσης της διόδου  $V_D$  με το ρεύμα που περνά από τη δίοδο  $I_D$  και μελετά τη συμπεριφορά της διόδου στα διάφορα είδη πόλωσης:

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) \text{ ή } I_D = I_s \left( e^{\frac{V_D}{\phi_t}} - 1 \right) \quad (3-8)$$

Παρακάτω απεικονίζεται η εκθετική συμπεριφορά της διόδου. Το ρεύμα κόρου ή κορεσμένο ρεύμα είναι ανάλογο της περιοχής της διόδου, και είναι μέρος συνάρτησης επιπέδων νόθευσης και πλάτους ουδέτερων περιοχών. Η τιμή που λαμβάνει, τις περισσότερες φορές, δίνεται με εμπειρικές μεθόδους (Πέρδιος, 2011).

## 3.5 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

### 3.5.1 Ιστορική Αναδρομή

Η αύξηση των ενεργειακών αναγκών της σύγχρονης εποχής, σε συνδυασμό με την μείωση της ποσότητας των ορυκτών καυσίμων παγκοσμίως είχαν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεθόδων παραγωγής ενέργειας πιο φιλικών προς το περιβάλλον και συγκεκριμένα την ανάδειξη της ηλιακής ενέργειας με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Η πρώτη επαφή με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έγινε από τον Γάλλο φυσικό Edmond Becquerel το 1839 όταν διεξήγε πειράματα με ηλεκτρολυτική επαφή η οποία αποτελούταν από δύο καλώδια μετάλλου. Στη συνέχεια, το 1876 οι Adams και ο φοιτητής του Day διέκριναν την ικανότητα του σεληνίου (Se) να παράγει ρεύμα όταν βρίσκεται στον ήλιο. Η μέθοδος παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) παρουσιάστηκε από τον Πολωνό Czochralski το 1918 και η έρευνα της χρησιμοποιείται ακόμα στις μέρες μας. Το 1949 οι Mott και Schottky ανέπτυξαν τη θεωρία διόδου σταθερής κατάστασης. Εκείνο το χρονικό διάστημα η κβαντική θεωρία ήδη είχε μελετηθεί και μπορούσαν να γίνουν διάφορες δοκιμές για τη δημιουργία φωτοβολταϊκών. Έξι χρόνια αργότερα, το 1954, οι Chapin, Fuller και Pearson στο εργαστήριο της Bell δημιούργησαν το πρώτο ηλιακό κελί και είχε δυνατότητα εκμετάλλευσης προσπίπτουσας ακτινοβολίας κατά 6%. Η συνεχή μελέτη και εξέλιξη των φωτοβολταϊκών οδήγησε στην τοποθέτηση αυτών σε διαστημικές εφαρμογές. Έτσι, το 1958 χρησιμοποιήθηκε αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στον δορυφόρο Vanguard I. Η διάρκεια λειτουργίας του συστήματος ήταν περίπου 8 έτη.

Μετά την επιτυχημένη τοποθέτηση συστήματος σε δορυφόρο για σχεδόν μία δεκαετία, ακολούθησαν ραγδαίες εξελίξεις στην τεχνολογία και αύξηση των φωτοβολταϊκών εφαρμογών. Άλλη μία σημαντική εξέλιξη έλαβε χώρα στην Ιαπωνία του 1962 όπου η Sharp τοποθέτησε σε φάρο τη μεγαλύτερη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση για την εποχή. Η εγκατεστημένη ισχύς άγγιζε τα 242 Wp, δηλαδή η μέγιστη ισχύς σε πρότυπες συνθήκες STC. Το βασικό πρόβλημα των φωτοβολταϊκών ήταν το υψηλό κόστος συγκριτικά με τη χαμηλή απόδοσή τους. Αυτό τα καθιστούσε δύσκολα στην εγκατάσταση και η μόνη επιλογή ήταν η χρήση τους ως μικρά αυτόνομα συστήματα. Σταδιακά η τεχνολογία βοήθησε στη βελτίωση της απόδοσής τους. Βασικός πελάτης εκείνη την εποχή αλλά και τις επόμενες δεκαετίες ήταν η NASA. Αποτρεπτικός παράγοντας για τη χρήση των φωτοβολταϊκών, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι το μεγάλο κόστος τους. Βέβαια, αυτό

σταδιακά βελτιώθηκε με την τιμή ενός φωτοβολταϊκού το 1956 να αγγίζει τα 500 δολάρια, το 1970 τα 100 δολάρια και το 1973 τα 50 δολάρια ανά Watt (\$/Watt). Το 1980 η ACRO Solar στην Καλιφόρνια έκανε την πρώτη εγκατάσταση ΦΒ με ισχύ 1MW. Η συγκεκριμένη εγκατάσταση διέθετε σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων της τροχιάς του ηλίου. Μέσα σε τρία χρόνια, το 1983, η τεχνολογία βοήθησε να δημιουργηθεί σύστημα 22 MW και ο τζίρος έφτασε τα 250.000.000 δολάρια. Το 1999 επιτεύχθηκε η δημιουργία φωτοβολταϊκού στοιχείου το οποίο διέθετε 32,3 % απόδοση. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο αναπτύχθηκε από την εταιρεία Spectrolab σε συνεργασία με το NREL και αποτελείται από τρία διαφορετικά υλικά. Το ρεκόρ απόδοσης εκείνη την περίοδο είναι των Thins Films και άγγιζε τα 18,8%.

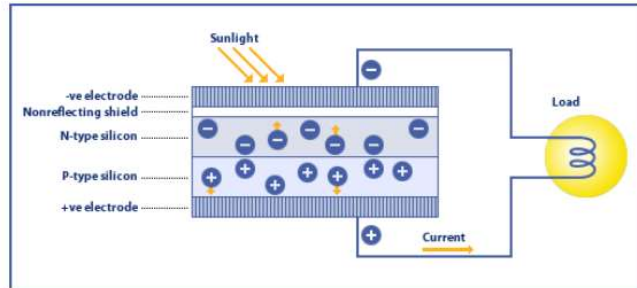
Το 2004 η παραγωγή και η ένταξη νέων εταιρειών στον χώρο των φωτοβολταϊκών συστημάτων είχε ανοδική πορεία, η οποία ακόμα εξακολουθεί να υπάρχει ακόμα και σήμερα. Η τιμή των διασυνδεδεμένων συστημάτων έχει φτάσει στα 6,5 ευρώ/Wp, όπου Wp η ισχύς αιχμής. Η κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ κυριαρχεί στη Γερμανία και την Ιαπωνία και στη συνέχεια πολλές χώρες επιλέγουν είτε την κατασκευή εγκαταστάσεων είτε την παραγωγή φωτοβολταϊκών και εξοπλισμού. Την ίδια χρονιά η παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων αγγίζει τα 1.200 MW και ο τζίρος φτάνει τα 6.500.000.000 δολάρια. Η Ιαπωνία και η Γερμανία αρχίζουν να επενδύουν σημαντικά ποσά για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων. Φυσικά, μέσα σε όλα αυτά τα χρόνια έχουν καταφέρει την αύξηση των κερδών από την τεχνογνωσία τους (Ιστορικό των φωτοβολταϊκών, 2022).

### **3.5.2 Ανάλυση Φωτοβολταϊκού Φαινομένου**

Η διαδικασία μετατροπής ηλιακής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε ηλεκτρική ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το φως του ήλιου αποτελείται από πακέτα ηλιακής ενέργειας, τα οποία αποτελούν τα φωτόνια. Κάθε φωτόνιο διαθέτει διαφορετική ποσότητα ενέργειας και αυτό καθορίζει σε ποιο φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας αντιστοιχεί.

Όταν προσπίπτει ακτινοβολία στην επιφάνεια μίας διόδου, τα φωτόνια με ενέργεια  $h\nu$  είτε μεγαλύτερη είτε ίση με το ενεργειακό χάσμα  $E_g$ , δηλαδή  $h\nu > E_g$ , μπορούν να απορροφηθούν σε έναν χημικό δεσμό και να απελευθερώσουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Σε περίπτωση που το ηλεκτρόνιο δεν έχει απομακρυνθεί από την περιοχή, μπορεί να συνδεθεί με την οπή που άφησε πίσω του και να αποδώσει την ενέργεια ως θερμότητα. Εάν, όμως, καταφέρει να απομακρυνθεί, το φως δημιουργεί νέο

ζεύγος φορέα αγωγιμότητας, το φωτοηλεκτρόνιο και την φωτοοπή. Έτσι, καθ' όλη τη διάρκεια της εκπομπής της ακτινοβολίας παράγονται δέσμες οπών και ηλεκτρονίων. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί μία διαφορά δυναμικού, η οποία εξακολουθεί να υπάρχει καθ' όλη τη διάρκεια πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια (Σπανάκης, 2013).



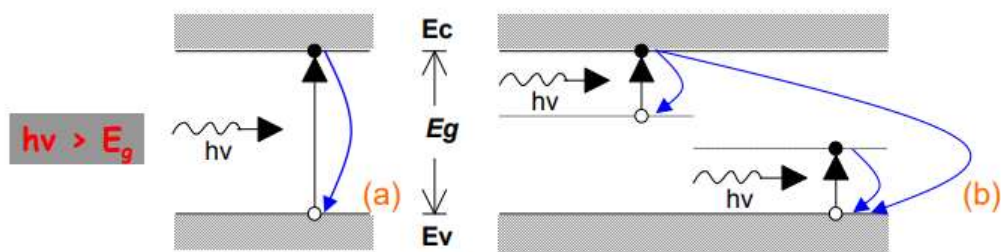
ΕΙΚΟΝΑ 3-9: Περιγραφή ΦΒ φαινομένου.

Πηγή: (Roscoff, Τα φωτοβολταικά από το Α ως το Ω, 2010)

Αναλυτικότερα, μία ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ισχύος  $P_{inc}$ , η οποία προσπίπτει σε μία επιφάνεια ημιαγωγού διασπάται σε δύο κατηγορίες, την  $P_{refl}$ , δηλαδή εκείνη που ανακλάται προς τα πίσω ή σκεδάζεται σε διάφορες κατευθύνσεις και την  $P_{abs}$ , η οποία απορροφάται από το υλικό. Από την  $P_{abs}$  ένα μέρος,  $P_{trans}$  καταφέρνει να διαπεράσει την επιφάνεια και να βγει έξω. Λόγω αρχής διατήρησης της ενέργειας προκύπτει:

$$P_{inc} = P_{refl} + P_{abs} \quad (3-9)$$

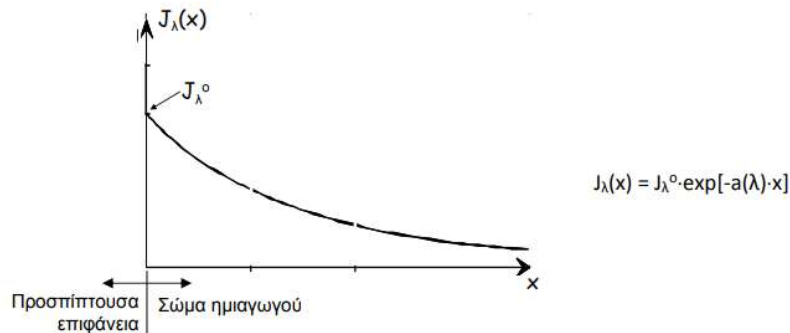
Με την απορρόφηση της ενέργειας των φωτονίων από τα ηλεκτρόνια σθένους δημιουργείται αύξηση της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων. Στη συνέχεια, λόγω ταλάντωσης δημιουργούνται σκεδάσεις μεταξύ των ατόμων του πλέγματος και έτσι αυξάνεται η θερμοκρασία του υλικού. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η απορροφημένη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα και αυξάνει τη θερμοκρασία του υλικού (Πέρδιος, 2011).



ΕΙΚΟΝΑ 3-10: Δημιουργία φορέα αγωγιμότητας και επανασύνδεσης α) από ζώνη σε ζώνη, β) μέσω επανασύνδεσης.

Πηγή: (Σπανάκης, 2013)

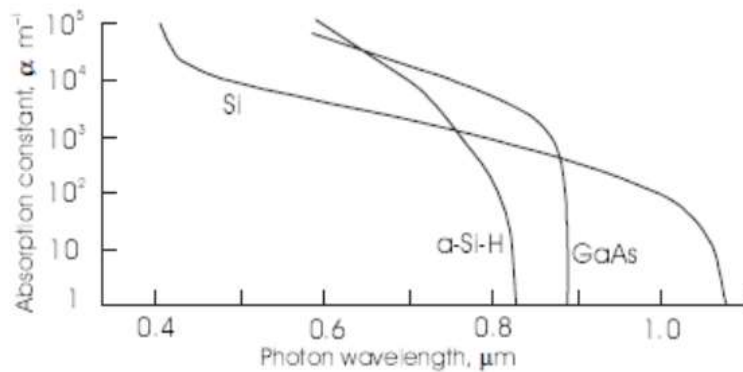
Η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολία, η οποία εισέρχεται σε έναν ημιαγωγό είναι ισχυρότερη στην επιφάνεια από το εσωτερικό του. Η μείωση αυτή είναι εκθετική και εξαρτάται από τον συντελεστή απορρόφησης του υλικού ( $\alpha$ ). Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος  $\lambda$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, αλλά και από την ικανότητα του υλικού απορρόφησης της έντασης του φωτός. Τέλος, η σταθερά απορρόφησης προσδιορίζει το πάχος του υλικού που χρειάζεται για την απορρόφηση (Luque & Hegedus, 2003) .



ΕΙΚΟΝΑ 3-11: Ένταση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διέλευση του σε υλικό ημιαγωγού.  
Πηγή: (Σπανάκης, 2013)

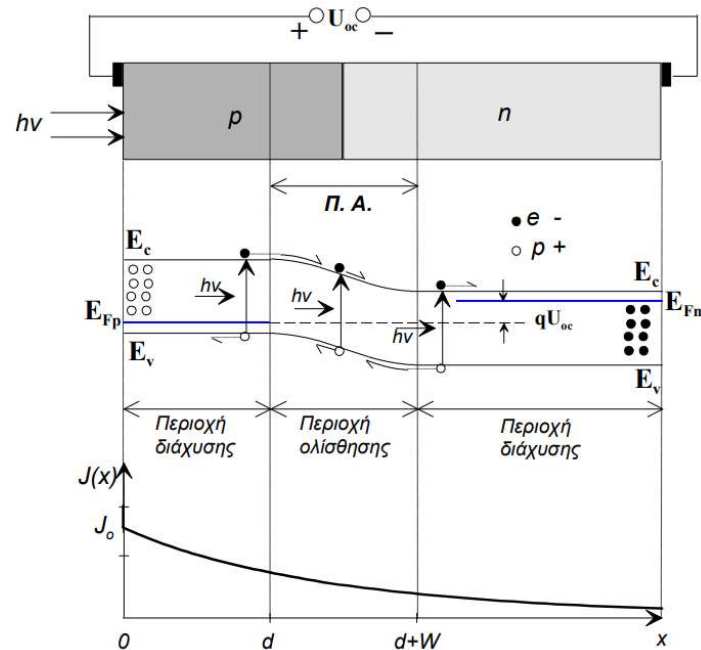
Μία σημαντική παρατήρηση είναι πως, λόγω της εκθετικής μείωσης της έντασης της ακτινοβολίας, το ηλεκτρικό φράγμα δυναμικού οφείλει να τοποθετείται πολύ κοντά στην περιοχή πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Στην εικόνα 3-12 απεικονίζεται η εξάρτηση του συντελεστή απορρόφησης από το μήκος κύματος για διάφορα υλικά.

$$J_{\lambda}(x) = J_{\lambda_0} e^{(-\alpha x)} \quad (3-10)$$



ΕΙΚΟΝΑ 3-12: Εξάρτηση της σταθεράς απορρόφησης ως συνάρτηση του μήκους κύματος  $\lambda$  για διάφορους ημιαγωγούς.  
Πηγή: (Luque & Hegenus, 2003)

Σε μία δίοδο επαφής p-n στην οποία προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παρουσιάζεται διαφοροποίηση στην περιοχή αραίωσης. Σε αυτό το σημείο, όπως ήδη έχει αναφερθεί, δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών (Electron-Hole Pair, EHP), τα οποία επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το ηλεκτρικό πεδίο της περιοχής (Σπανάκης, 2013).



ΕΙΚΟΝΑ 3-13: Απεικόνιση προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επαφή p-n και η κατανομή της στις διάφορες ζώνες.

Πηγή: (Σπανάκης, 2013)

Ουσιαστικά, τα ηλεκτρόνια κινούνται προς τον ημιαγωγό τύπου p δημιουργώντας ένα πλεόνασμα ηλεκτρονίων στην περιοχή p και αντίστοιχα οι οπές προς τον ημιαγωγό τύπου n δημιουργώντας πλεόνασμα οπών. Σε περίπτωση ύπαρξης ανοιχτού κυκλώματος στη δίοδο, δηλαδή χωρίς εξωτερική σύνδεση, το πλεόνασμα της περιοχής αποκτά αντίθετο φορτίο από αυτό των προσμίξεων και το συνολικό φορτίο παρουσιάζει μείωση. Έτσι, δημιουργείται μία νέα δυναμική η οποία παρουσιάζει ισορροπία μεταξύ των ρευμάτων, που είναι ενισχυμένα από το φως και εκείνων της διάχυσης. Η διαφορά δυναμικού λόγω της αύξησης των φωτοφορέων εκατέρωθεν της επαφής ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{OC}$ . Το ηλεκτρικό στοιχείο που δημιουργεί τη διαφορά δυναμικού ονομάζεται πηγή ισχύος και όλη η παραπάνω διαδικασία μετατροπής της δίοδου σε πηγή τάσης αποτελεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (Honsberg, 2019).

Με την βραχυκύκλωση των εξωτερικών άκρων της διόδου, οι φωτοφορείς σταματάνε να μαζεύονται στα όρια και κατευθύνονται προς το εξωτερικό κύκλωμα. Η κίνηση αυτή αποτελεί διαχυτική διαδικασία και γίνεται από τα σώματα των ημιαγωγών n και p. Οι οπές του ημιαγωγού p συνδέονται με ηλεκτρόνια του εξωτερικού κυκλώματος, τα οποία προέρχονται από τον ημιαγωγό n (Σπανάκης, 2013).

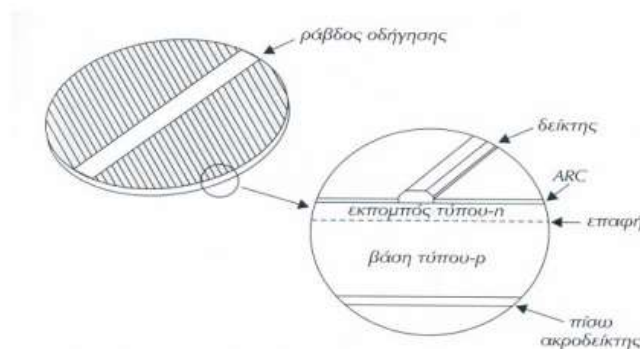
Το ρεύμα της διόδου ονομάζεται φωτόρευμα και συμβολίζεται με  $I_L$ . Σε περίπτωση που τα άκρα της επαφής συνδεθούν με ένα χάλκινο σύρμα μεγάλης διατομής (σχεδόν μηδενική αντίσταση), τότε το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο και το ρεύμα ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ . Η εξίσωση που εκφράζει το φωτόρευμα είναι η (3-12) και παρατηρείται πως, το φωτόρευμα είναι ανάλογο του εμβαδού της επιφάνειας και όσο μεγαλώνει εκείνη, τόσο αυξάνεται και το φωτόρευμα (Δούρος, 2021).

$$I_L = q \cdot A \cdot (L_n + L_p) \cdot g_0 \quad (3-11)$$

Όπου, A η επιφάνεια που δέχεται φως και q το φορτίο που είναι ίσο με  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

### 3.6 Το Φωτοβολταϊκό Στοιχείο

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (PV cell) είναι το μέσο στο οποίο όταν προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Το ΦΒ στοιχείο μπορεί να ονομαστεί και ΦΒ κύτταρο και ΦΒ κυψέλη. Στην εικόνα 3-14 παρουσιάζεται το σχέδιο ενός ΦΒ στοιχείου πυριτίου, το οποίο χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα. Οι επαφές στο μπροστινό και στο πίσω μέρος του ΦΒ στοιχείου λειτουργούν ως έξοδοι ρεύματος, το οποίο παράγεται εντός του ημιαγωγού. Στο πάνω μέρος της επαφής απαιτείται να υπάρχει δυνατότητα διάθλασης του φωτός. Γι' αυτόν τον λόγο η επιφάνεια είναι φτιαγμένη από λεπτές μεταλλικές λωρίδες (fingers). Σκοπός τους είναι η μεταφορά του ρεύματος σε μία μεγαλύτερη ράβδο οδήγησης. Επάνω από την επιφάνεια του κυττάρου υπάρχει ένα επιπλέον στρώμα το οποίο χρησιμοποιείται για την αποφυγή της ανάκλαση και το υλικό κατασκευής του είναι διηλεκτρικό (Αντωνίου & Τσέρνιχ).



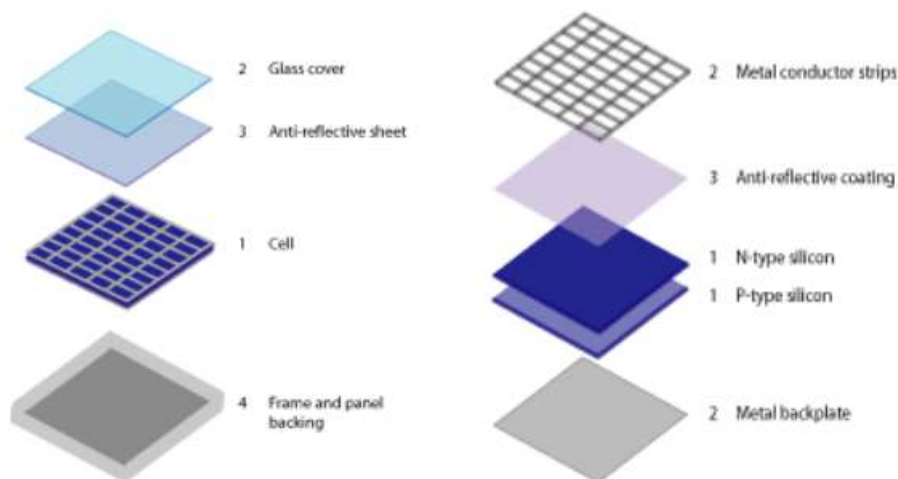
ΕΙΚΟΝΑ 3-14: Φωτοβολταϊκού στοιχείο πυριτίου.  
Πηγή: (Αντωνίου & Τσέρνιχ). Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

#### 3.6.1 Δομή Φ/Β Στοιχείου

Στην εικόνα 3-15 φαίνεται η δομή του Φ/Β στοιχείου. Η επάνω μεριά του κυττάρου αποτελείται από ένα λεπτό μεταλλικό πλέγμα. Το πλέγμα προστατεύει το Φ/Β κύτταρο, αλλά προσφέρει και την ελευθερία έκθεσης της επιφάνειας στην ηλιακή ακτινοβολία ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απορρόφηση. Στη συνέχεια, είναι το προστατευτικό στρώμα που εμποδίζει την ανάκλαση και έπειτα, ακολουθεί ο ημιαγωγός p-n. Στο πίσω μέρος της διάταξης υπάρχει μία επιφάνεια αλουμινίου, η οποία δεν χρειάζεται κάποιο είδος κάλυψης καθώς δεν προσπίπτει ακτινοβολία εκεί.



Για να αποφευχθεί η υγρασία τα ΦΒ στοιχεία καλύπτονται με μία επιφάνεια γυαλιού. Για την πλήρη στεγανοποίηση τους περιμετρικά καλύπτονται από ταινία αλουμινίου, η οποία συγκρατεί τη συστοιχία και την προστατεύει από διάφορα καιρικά φαινόμενα (Αντωνίου & Τσέρνιχ).

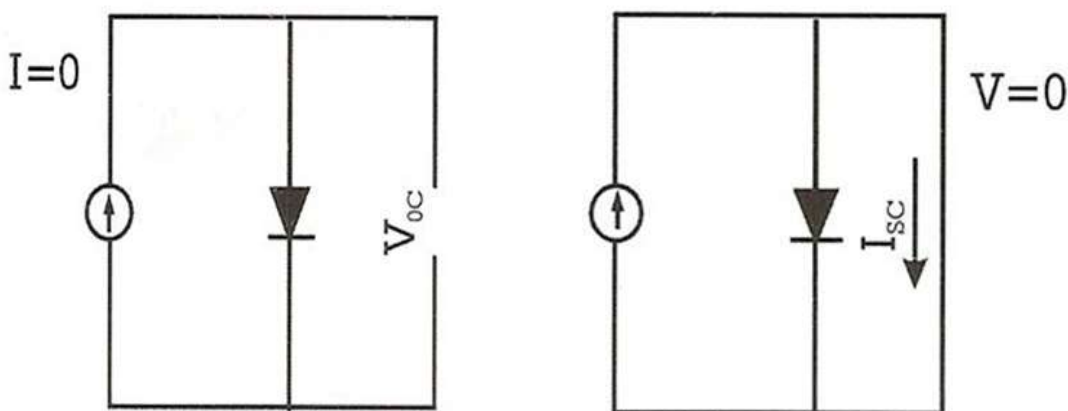


ΕΙΚΟΝΑ 3-15: Τα βασικά μέρη ενός ΦΒ πλαισίου, α) Φωτοβολταϊκή κυψέλη, β) Φωτοβολταϊκό πάνελ,

Πηγή: ([https://selasenergy.gr/fv\\_panels.php](https://selasenergy.gr/fv_panels.php))  
Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

### 3.6.2 Χαρακτηριστική καμπύλη Φ/Β Στοιχείου

Με βάση εκείνα που αναπτύχθηκαν στο παραπάνω κεφάλαιο, γνωρίζουμε πως ακόμα και με σταθερή την ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο η τάση μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνεται στο κύκλωμα.

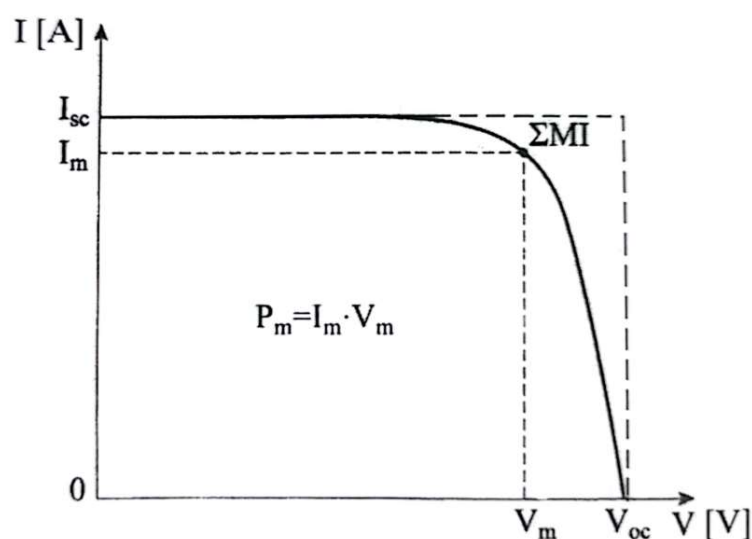


ΕΙΚΟΝΑ 3-16: Ανοιχτό κύκλωμα ΦΒ στοιχείου

Πηγή: ([https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2017/02/blog-post\\_5.html](https://oaedhlectrologoi.blogspot.com/2017/02/blog-post_5.html)) Ανακτήθηκε: (22.06.2022)

Καθώς το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο, η τάση του μηδενίζεται και το ρεύμα  $I_{sc}$  αγγίζει το μέγιστο. Από την άλλη μεριά, όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό, η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται και η τάση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή  $V_{oc}$ .

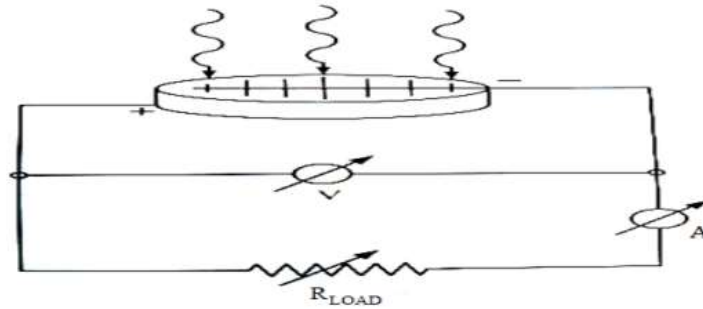
Στο σχήμα της εικόνας 3-17 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη του Φ/Β στοιχείου, δηλαδή η ένταση ως συνάρτηση της τάσης. Οι απαιτήσεις για την ισχύ της συγκεκριμένης καμπύλης για μεταβαλλόμενη αντίσταση από μηδενική (βραχυκύκλωμα) έως άπειρη (ανοιχτό κύκλωμα) είναι δύο. Θα πρέπει να υπάρχει σταθερή εκπομπή ηλιακής ακτινοβολίας και σταθερή θερμοκρασία. Για τα διαστήματα μεταξύ των δύο αυτών καταστάσεων η τάση και το ρεύμα λαμβάνουν ενδιάμεσες τιμές (Πέρδιος, 2011).



ΕΙΚΟΝΑ 3-17: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος  $I$  – τάσεως  $V$  ενός ΦΒ στοιχείου.

Πηγή: (Πέρδιος, 2011)

Το ισοδύναμο κύκλωμα που απαιτείται για τη δημιουργία της χαρακτηριστικής καμπύλης  $I$ - $V$  παρουσιάζεται στην εικόνα 3-18 με τη χρήση δύο μεμονωμένων ΦΒ κυψελών. Το κύκλωμα διαθέτει βολτόμετρο, αμπερόμετρο και μία μεταβαλλόμενη αντίσταση φορτίου (Δέρβος 2013).



ΕΙΚΟΝΑ 3-18: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για την χάραξη της καμπύλης I – V του ΦΒ στοιχείου.

Πηγή: (Δέρβος, 2013)

Για να ληφθεί το μέγιστο ρεύμα στο παραπάνω κύκλωμα αρκεί να βραχυκυκλωθεί το  $R_{LOAD}$ . Στη μόνιμη κατάσταση γνωρίζουμε πως το φωτόρευμα είναι ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, εάν έχουμε γνωστό το ρεύμα σε τυπικές συνθήκες δοκιμής και την ακτινοβολία ίση με  $G_0 = 1 \frac{kW}{m^2}$  στο AM 1.5, δηλαδή το πάχος της αέριας μάζας 1,5 φορές το πάχος της γήινης ατμόσφαιρας, τότε η τιμή του ρεύματος για άλλες ακτινοβολίες  $G$  υπολογίζεται από την εξίσωση 3-13 (Δούρος, 2021).

$$I_L(G) = \left(\frac{G}{G_0}\right) \cdot I_L(G_0) \quad (3-12)$$

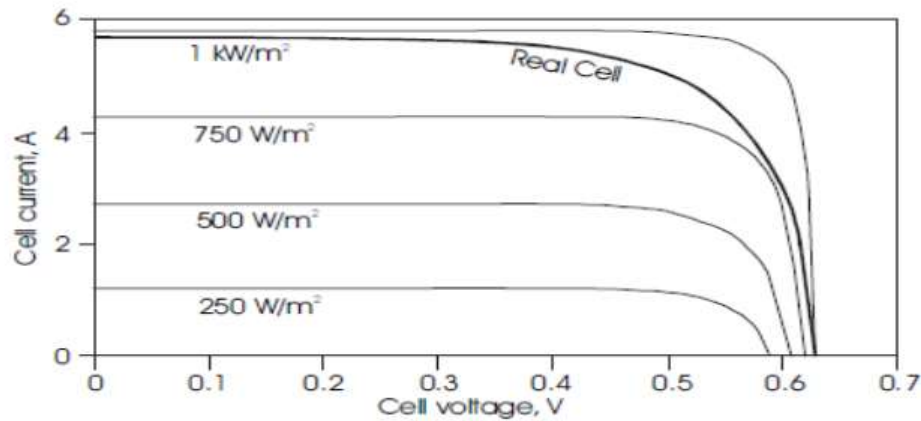
Όπως είναι γνωστό, η ηλεκτρική ισχύς  $P$  δίνεται από τη σχέση  $P=I \cdot V$ . Η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς είναι ίση με το εμβαδόν που σχηματίζεται από το ορθογώνιο της καμπύλης I-V με πλευρές  $I_m$  και  $V_m$  και συμβολίζεται με  $P_m$ . Από το σχήμα 3-14 προκύπτει η ομαλή μεταβολή της τάσης και του ρεύματος, αλλά και η ομαλή μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος  $P$  του ΦΒ στοιχείου, με μέγιστη την  $P_m$ .

Για το ορθογώνιο που δημιουργείται από την τιμή ρεύματος  $I_{sc}$  (ρεύμα βραχυκυκλώματος) και την τάση  $V_{oc}$  (τάση ανοιχτού κυκλώματος) γνωρίζουμε πως περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του ΦΒ στοιχείου ως πηγή σταθερού ρεύματος. Το πηλίκο των δύο εμβαδών ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF του ΦΒ στοιχείου (fill factor). Αυτό που προκύπτει από τον συντελεστή πλήρωσης είναι το μέρος της προσέγγισης της λειτουργίας του στοιχείου.

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}}, \text{ αδιάστατο μέγεθος} \quad (3-13)$$

Οι τιμές που μπορεί να βάλει ο FF κυμαίνονται από 0 έως 1. ένα ΦΒ στοιχείο το οποίο έχει FF από 0,7 έως 0,9 θεωρείται πως διαθέτει καλή ενεργειακή απόδοση (Πέρδιος, 2011).

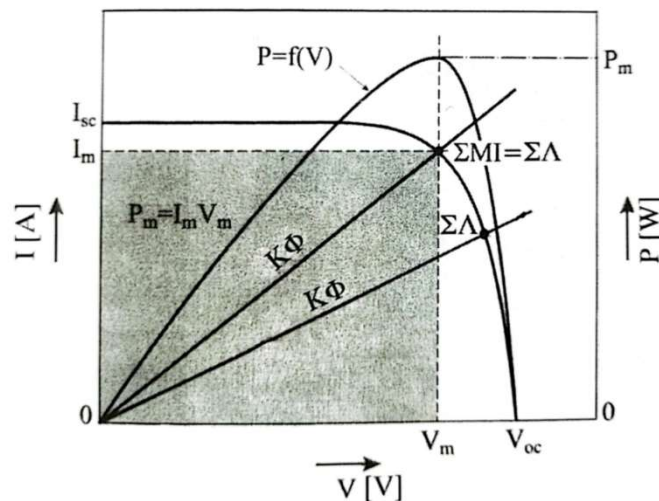
Στην εικόνα 3-19 παρουσιάζονται διάφορες χαρακτηριστικές I-V για διάφορα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας (Ventre, 2005).



ΕΙΚΟΝΑ 3-19: Καμπύλες I – V για διάφορα πραγματικά ΦΒ κύτταρα σε διάφορα επίπεδα φωτισμού. Πηγή (Luque & Hegemus, 2003)

### 3.6.3 Σημείο Λειτουργίας Φ/Β Στοιχείου

Για τις καταστάσεις βραχυκυκλωμένου και ανοιχτού κυκλώματος όπου έχουμε  $V=0$  και  $I=0$  αντίστοιχα η ηλεκτρική ισχύς του ΦΒ στοιχείου είναι ίση με μηδέν ( $P=0$ ). Η εικόνα 3-20 απεικονίζει τη μεταβολή της ισχύος με την τάση και παρατηρείται πως το σημείο της μέγιστης τάσης είναι ακριβώς εκεί όπου η ένταση του ρεύματος παρουσιάζει την μεγαλύτερη πτώση.



ΕΙΚΟΝΑ 3-20: Χαρακτηριστική καμπύλη I – V ενός ΦΒ στοιχείου, μεταβολή της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος του  $P$  σε συνάρτηση με την τάση  $V$  και την καμπύλη φορτίου  $K\Phi$ . Πηγή: (Πέρδιος, 2011)

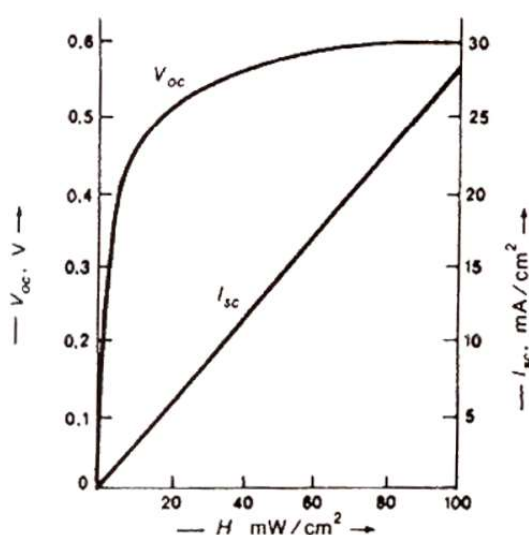
Ως ΣΜΙ ορίζεται το σημείο μέγιστης ισχύος, ΣΛ το σημείο λειτουργίας του συστήματος, ΣΜΙ=ΣΛ η σύμπτωση σημείου λειτουργίας με το σημείο μέγιστης ισχύος και ΚΦ η καμπύλη φορτίου ωμικής αντίστασης.

Αυτό που απαιτείται, λοιπόν, είναι η αντιστοίχιση της τάσης και του ρεύματος στο σημείο της μέγιστης ισχύος ΣΜΙ. Έτσι, επιδιώκεται κατάλληλη τιμή της αντίστασης του κυκλώματος με σκοπό την παραγωγή της μεγαλύτερης εφικτής ηλεκτρικής ισχύος του φωτοβολταϊκού.

Η καμπύλη ΚΦ, καθώς έχουμε θεωρήσει ότι το ΦΒ στοιχείο τροφοδοτεί μία ωμική αντίσταση, απεικονίζει την μεταβολή του ρεύματος  $I$  σε συνάρτηση με την τάση  $V$  στα άκρα της. Το σημείο τομής της χαρακτηριστικής καμπύλης και της καμπύλης φορτίου ονομάζεται σημείο λειτουργίας ΣΛ.

Για να επιτευχθεί η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς του ΦΒ στοιχείου σε κάθε τροποποίηση απαιτείται η σύμπτωση του ΣΛ με το κάθε ΣΜΙ της συγκεκριμένης περίπτωσης. Αυτό επιδιώκεται με τη χρήση ηλεκτρονικών διατάξεων παρακολούθησης του σημείου ΣΜΙ.

Στην εικόνα 3-21 παρουσιάζεται η μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$  και της τάσης  $V_{OC}$  συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό που παρατηρείται είναι η ανάλογη μεταβολή του ρεύματος  $I_{SC}$  με την ακτινοβολία και η απότομη αύξηση της  $V_{OC}$  στην αρχή. Στη συνέχεια η  $V_{OC}$  παραμένει σταθερή έως τη δύση του ηλίου.

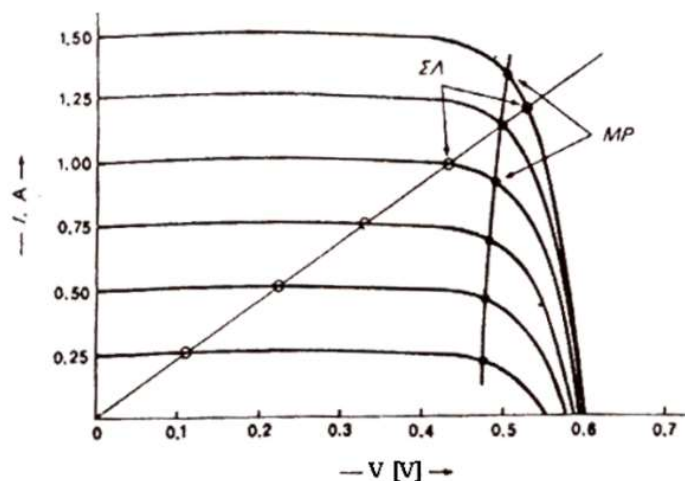


ΕΙΚΟΝΑ 3-21: Μεταβολή τάσεως ανοιχτού κυκλώματος και ρεύματος βραχυκύκλωσης συναρτήσει ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.

Πηγή: (<https://www.arcmeletitiki.gr>)

Ανακτήθηκε: (22.06.2022)

Καθώς μεταβάλλεται η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας, παρουσιάζεται κάποιο είδος μετατόπισης και αλλαγής θέσεως των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V. Έτσι, γίνεται αισθητή η απομάκρυνση των σημείων ΣΛ από τα σημεία ΣΜΙ (μέγιστης ισχύος) (Πέρδιος, 2011).



ΕΙΚΟΝΑ 3-22: Μετατόπιση των χαρακτηριστικών καμπυλών I – V με την ταυτόχρονη μεταβολή της ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας.  
 Πηγή: (<https://www.arcmeletitiki.gr>), Ανακτήθηκε: 22.06.2022)

### 3.6.4 Βαθμός απόδοσης Φ/Β Στοιχείου

Ένα ΦΒ στοιχείο δέχεται ηλιακή ακτινοβολία ίση με  $P_{HA}$  και αποδίδει ισχύ η οποία συμβολίζεται με  $P_m$ . Το πηλίκο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας ορίζεται ως ο βαθμός απόδοσης  $\eta$  του ΦΒ στοιχείου. Ο βαθμός απόδοσης  $\eta$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σύγκριση δύο φωτοβολταϊκών τα οποία παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους (Πέρδιος, 2011). Με  $V_m$  συμβολίζεται η τάση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος, με  $FF$  ο συντελεστής πλήρωσης και με  $V_{OC}$  η τάση ανοιχτού κυκλώματος.

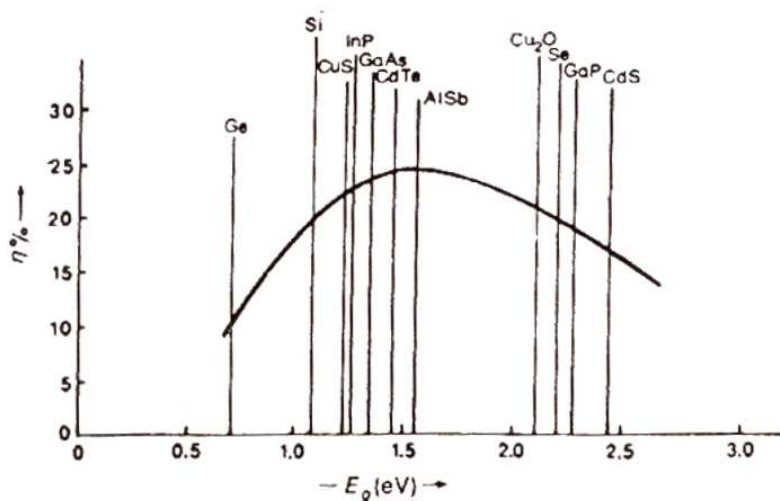
$$\eta = \frac{P_m}{P_{HA}} = I_m \cdot \frac{V_m}{P_{HA}} = \frac{FF \cdot I_{SC} \cdot V_{OC}}{P_{HA}} [-] \quad (3-14)$$

Τέλος, ο συντελεστής απόδοσης εξαρτάται αρκετά από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Στον πίνακα 3-1 παρουσιάζονται διάφορα ενεργειακά χάσματα για έναν αριθμό υλικών συναρτήσει του συντελεστή απόδοσης (Δούρος, 2021).

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: Θεωρητικοί βαθμοί απόδοσης για διάφορα ΦΒ υλικά στους 25 °C. Πηγή: (Ventre, 2005)

Material	$E_g$	$\eta_{max}$
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%

Στην εικόνα 3-23 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα της θεωρητικής απόδοσης των ΦΒ στοιχείων συναρτήσει του ενεργειακού διάκενου ( $E_g$ ). Από την εικόνα 3-23 γίνεται αντιληπτό πως το 25% των αποδόσεων μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας πραγματοποιούνται σε ΦΒ στοιχεία με ενεργειακό διάκενο ημιαγωγού περίπου ίσο με 1,5eV.

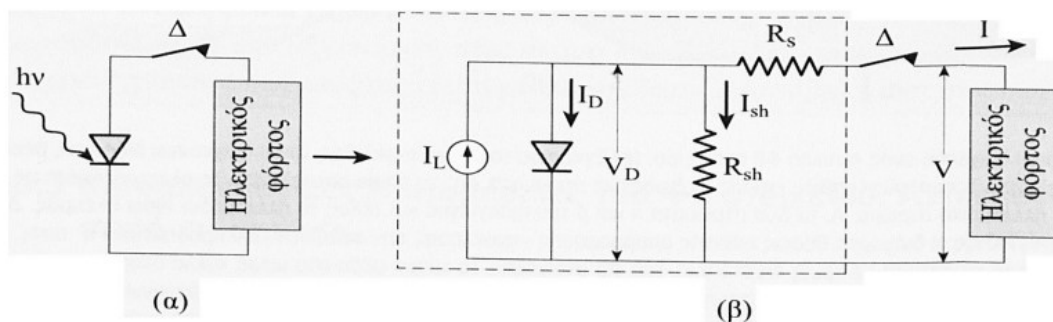


ΕΙΚΟΝΑ 3-23: Θεωρητική απόδοση των ΦΒ στοιχείων σε συνάρτηση με το ενεργειακό διάκενο.

Πηγή: (<https://www.arcmeletitiki.gr>) Ανακτήθηκε: (20.06.2022)

### 3.6.5 Αντιστάσεις κυκλώματος Φ/Β Στοιχείου

Η εικόνα 3-24 απεικονίζει αναλυτικά ένα ισοδύναμο κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου. Το σύστημα αποτελείται από μία πηγή που παράγει ρεύμα  $I_L$ , μία διόδο από την οποία περνάει ρεύμα  $I_D$  και το μη ιδανικό τμήμα, δηλαδή μία αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος  $R_{sh}$  μεταξύ των άκρων η οποία βρίσκεται σε παράλληλη σύνδεση με τα άκρα της διόδου και μία αντίσταση απωλειών ρεύματος  $R_s$  (Αντωνίου & Τσέρνιχ).



ΕΙΚΟΝΑ 3-24: Ισοδύναμο φωτοβολταϊκό κύκλωμα, α) απλό, β) πλήρες.

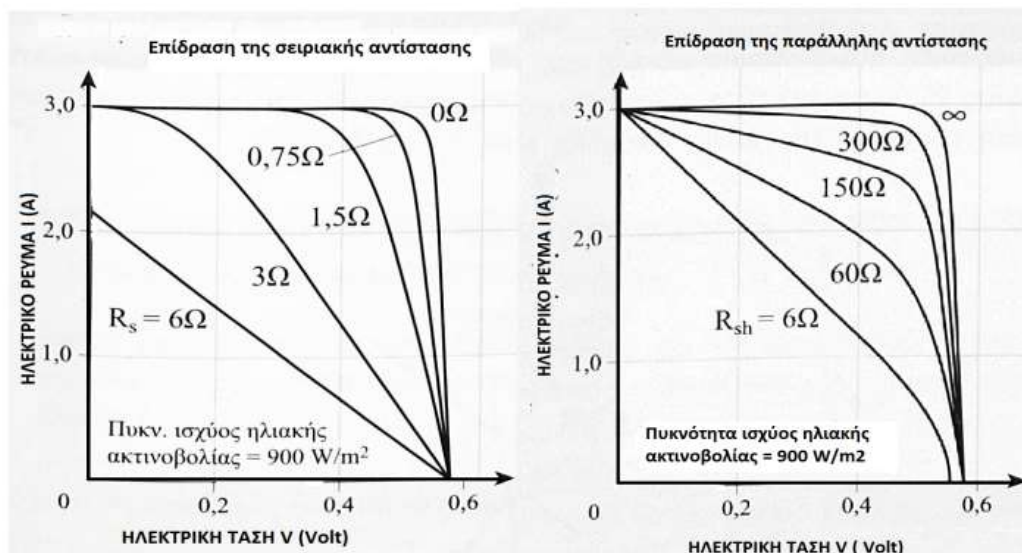
Πηγή: (Αντωνίου & Τσερνιχ), Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

Η κάθε αντίσταση αφορά σε διαφορετικές διαδρομές που εκτελεί το ηλεκτρικό κύκλωμα. Αναλυτικότερα:

- Η αντίσταση  $R_{sh}$  αφορά σε διαδρομές μεταξύ των σημείων που διαθέτουν διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου. Ουσιαστικά, το ρεύμα εκτελεί διαδρομές διαμέσου του σώματος της διάταξης επαφής, στις εξωτερικές επιφάνειες με παράλληλη πορεία προς το ηλεκτρικό πεδίο και διαμέσου της ηλεκτρικής διάβασης των προσμίξεων.
- Η αντίσταση  $R_s$  σχετίζεται με την αντίσταση της επαφής στη διόδο του ηλεκτρικού ρεύματος στο σώμα της διόδου και στις ωμικές αντιστάσεις των σημείων πρόσφυσης των ηλεκτροδίων και των μεταλλικών κλάδων τους.

Στην εικόνα 3-25 φαίνεται η επίδραση των δύο αυτών αντιστάσεων  $R_{sh}$  και  $R_s$ . Αυτό που γίνεται αντιληπτό είναι πως όταν κινούμαστε προς την τάση  $V_{OC}$  παρουσιάζεται έντονη μείωση του ρεύματος για μικρή αντίσταση  $R_{sh}$ , ενώ η μεγάλη  $R_s$  έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύος. Αυτό συμβαίνει, διότι ακόμα και μία μικρή αύξηση της αντίστασης  $R_s$  μειώνει την περιοχή των τάσεων με σταθερό ρεύμα  $I_{sc}$  (Αντωνίου & Τσέρνιχ).





ΕΙΚΟΝΑ 3-25: Επίδραση αντίστασης σε σειρά και παράλληλη.  
 Πηγή: (Αντωνίου & Τσέρνιχ). Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

### 3.6.6 Απώλειες ισχύος στα Φ/Β Στοιχεία

#### Θεμελιώδεις απώλειες

Όπως έχει προαναφερθεί, κατά την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από το ΦΒ στοιχείο κάποια ποσότητα μετατρέπεται σε θερμότητα. Εκτός από αυτή τη συνθήκη, είναι γνωστό πως ένα ποσοστό του ηλιακού φάσματος δεν χρησιμοποιείται καθώς ο ημιαγωγός δεν μπορεί να απορροφήσει το φως όταν η ενέργεια είναι μικρότερη από το ενεργειακό φάσμα.

Σε γενικές γραμμές αυτές οι απώλειες μπορούν να μειωθούν, αλλά απαιτείται μελέτη δημιουργίας νέας δομής. Γι' αυτόν τον λόγο μελετάται ένα νέο σύστημα που ονομάζεται ηλιακό κύτταρο πολλαπλών επικαλύψεων (tandem cell). Η κορυφή του ηλιακού κυττάρου πρέπει να είναι κατασκευασμένη από κατάλληλο ημιαγωγό ώστε να αξιοποιείται ακόμα και η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος. Έπειτα, το φως του ηλίου αξιοποιείται από τη βάση του ηλιακού κυττάρου και με αυτόν τον τρόπο επιδιώκονται μεγάλες τιμές απόδοσης. Μέχρι τώρα δεν έχει υλοποιηθεί η συγκεκριμένη ιδέα, ωστόσο υπάρχουν αρκετές πιθανότητες να δημιουργηθεί ένα είδος λεπτής μεμβράνης που θα επιδιώκει την αύξηση της απόδοσης.

### **Επανασύνδεση οπών – ηλεκτρονίων**

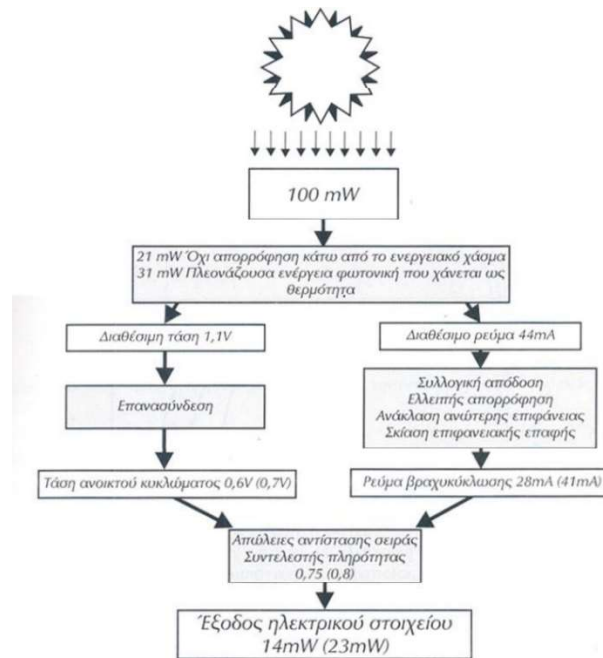
Σε ημιαγωγούς προσμίξεων, αλλά και σε ατέλειες της κρυσταλλικής δομής παρουσιάζονται επανασυνδέσεις. Στη συγκεκριμένη διαδικασία τα ηλεκτρόνια επιστρέφουν στη ζώνη σθένους και έρχονται σε σύνδεση με τις οπές. Άλλο ένα σημείο που εμφανίζονται επανασυνδέσεις είναι εντός των ωμικών μεταλλικών επαφών. Αποτέλεσμα της ανωτέρω διαδικασίας είναι η ελάττωση της τάσης και του ρεύματος εξόδου του φωτοκυττάρου.

### **Λοιπές απώλειες ρεύματος**

Οι απώλειες του ρεύματος μπορεί να οφείλονται στην ανάκλαση του φωτός, στις σκιάσεις του φωτοκυττάρου και φυσικά σε μειωμένη απορρόφηση του φωτός, η οποία παρουσιάζεται κυρίως σε ΦΒ στοιχεία πυριτίου. Το πυρίτιο δεν διαθέτει υψηλά χαρακτηριστικά απορρόφησης του φωτός και έτσι η απώλεια είναι αναπόφευκτη. Επίσης, κρίνεται αναγκαία η εξάλειψη της σκίασης σε ΦΒ στοιχεία και κυρίως σε εκείνα που απαιτούν μεγάλη ένταση ηλιακού φωτός για να λειτουργήσουν.

Η αντίσταση σειράς, η οποία περιέχει όλες τις ωμικές απώλειες κατά τη ροή του ρεύματος σε ένα ΦΒ στοιχείο, παρουσιάζει κάποιο είδος απωλειών. Αυτή η απώλεια εμφανίζεται στον συντελεστή πληρότητας, ο οποίος σταδιακά ελαττώνεται με αποτέλεσμα την αρνητική επίδραση στο ηλιακό στοιχείο.

Συνολικά, λοιπόν, στην εικόνα 3-26 φαίνονται όλες οι απώλειες που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Αυτό που παρατηρείται είναι πως η θεωρητική απόδοση ενός ΦΒ στοιχείου πυριτίου φτάνει έως το 48%. Οι υπόλοιπες απώλειες, όπως της τάσης και του συντελεστή πληρότητας, βοηθούν στην κατανόηση του λόγου που υπάρχει μόνο 23% απόδοση στο καλύτερο ΒΦ πυριτίου, ενώ η απόδοση εκείνων του εμπορίου φτάνει το 14% απόδοση. Σταδιακά θα επιτευχθεί μία αύξηση της απόδοσης κατά 4% (Αντωνίου & Τσέρνιχ).



ΕΙΚΟΝΑ 3-26: Απώλειες ισχύος μέσα σε φωτοστοιχεία.  
 Πηγή: (Αντωνίου & Τσέρνιχ). Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

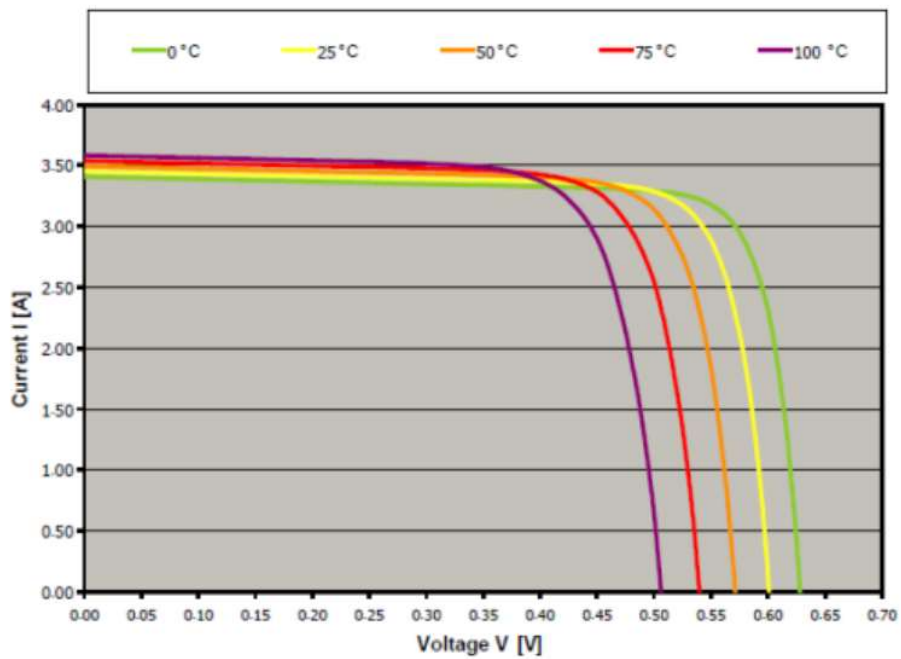
### 3.6.7 Επίδραση θερμοκρασίας στη λειτουργία του Φ/Β Στοιχείου

Κατά τον φωτισμό του ΦΒ στοιχείου παρουσιάζεται αύξηση της θερμοκρασίας του. Αυτό συμβαίνει, διότι ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται μετατρέπεται σε θερμότητα. Τα αποτελέσματα αυτής της συνθήκης είναι η μείωση της τάσης του ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$  και η αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$ . Η αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης, βέβαια, εξαρτάται αρκετά από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, οδηγούμαστε στη σταδιακή ελάττωση της μέγιστης ισχύος  $P_m$  κατά 0,04% περίπου για κάθε βαθμό άνω των 25 °C και φυσικά, στην διαφοροποίηση της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης. Συγκεκριμένα, στο σημείο της μέγιστης ισχύος παρουσιάζεται πιο ομαλή και στρογγυλή καμπύλη. Τα ΦΒ στοιχεία, όμως, δεν δουλεύουν στη θερμοκρασία αέρα  $t_a$ , αλλά σε θερμοκρασία κατά 30 °C μεγαλύτερη. Έτσι, δημιουργείται ένας συντελεστής θερμοκρασίας  $\sigma_\theta$  με σκοπό τον ακριβή υπολογισμό της απόδοσης των ΦΒ (Πέρδιος, 2011).

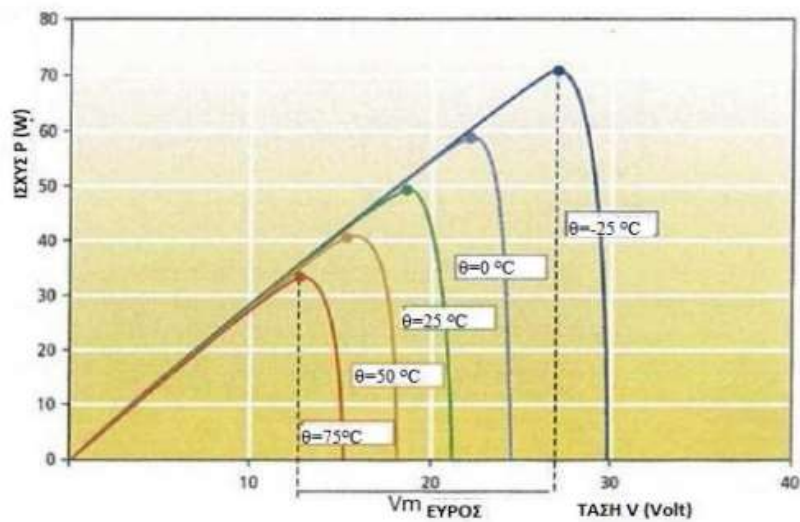
Η εξίσωση που εκφράζει τον συντελεστή  $\sigma_\theta$  είναι η εξής:

$$\sigma_\theta = 1 - [(t_a + 30) - 25] \cdot 0,004 \quad (3-15)$$

Η εικόνα 3-27 παρουσιάζει τη μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης με την αύξηση της θερμοκρασίας και η εικόνα 3-28 την μεταβολή της ισχύος ανάλογα τη θερμοκρασία.



ΕΙΚΟΝΑ 3-27: Επίδραση θερμοκρασίας στις Χαρακτηριστικές Καμπύλες I – V ενός ηλιακού στοιχείου.  
 Πηγή: (Honsberg, 2019)



ΕΙΚΟΝΑ 3-28: Μεταβολή ισχύος συναρτήσει θερμοκρασίας για 1.000 W/m<sup>2</sup> ακτινοβολία.  
 Πηγή: (Αντωνίου & Τσέρνιχ). Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

### 3.7 Συνδεσμολογία

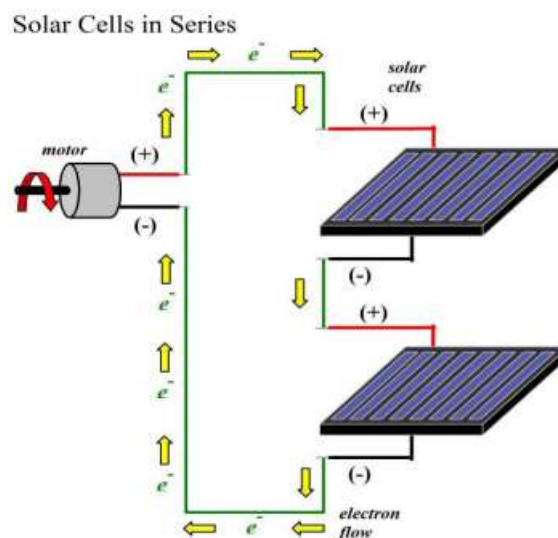
Τα είδη σύνδεσης των ΦΒ κυψελών είναι τρία, η σύνδεση σε σειρά, η παράλληλη σύνδεση και η μικτή σύνδεση.

#### 3.7.1 Σύνδεση σε σειρά

Όπως είναι ήδη γνωστό, το ρεύμα που περνά κατά τη συνδεσμολογία σε σειρά είναι ίδιο παντού. Έτσι, θα είναι και ίδιο με εκείνο που παράγεται από μία κυψέλη. Σε περίπτωση που κάποια συνδεσμολογία έχει παραπάνω ρεύμα από ένα Φ/Β στοιχείο που συνδέεται μαζί της, το ρεύμα θα ελαττωθεί και θα φτάσει τα επίπεδα του Φ/Β στοιχείου (Αντωνίου & Τσέρνιχ). Η σύνδεση επιτυγχάνεται με την ροή του ρεύματος από τον θετικό πόλο στον αρνητικό. Αναλυτικότερα οι σχέσεις που ισχύουν είναι οι παρακάτω:

$$I = I_1 = I_2 \text{ \& } V = V_1 + V_2 \quad (3-16)$$

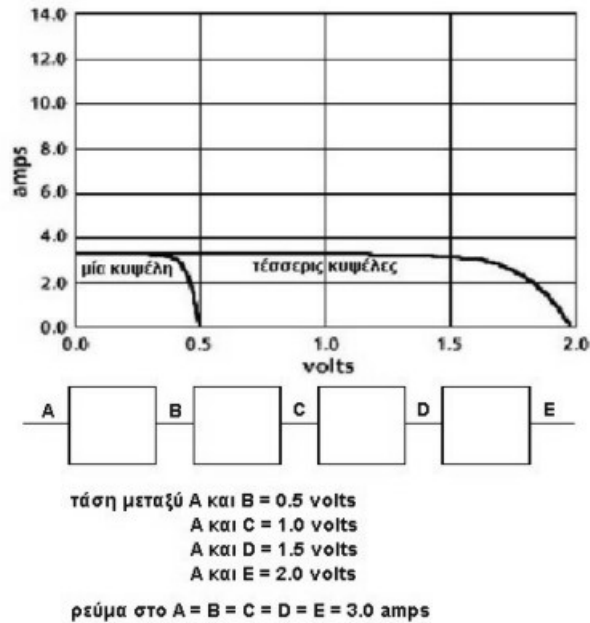
$$V_{\text{Σειράς}} = n \cdot V_{\text{max}} \quad (3-17)$$



ΕΙΚΟΝΑ 3-29: Σύνδεση σε σειρά.

Πηγή: (Αντωνίου & Τσέρνιχ). Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

Έτσι, γίνεται αντιληπτό πως κάθε μεμονωμένη κυψέλη θα διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα ανεξάρτητα από την τάση λειτουργίας της. Στο σχήμα της εικόνας 3-30 φαίνονται τέσσερεις κυψέλες οι οποίες βρίσκονται σε σύνδεση σε σειρά και στο διάγραμμα της ίδιας εικόνας απεικονίζεται ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών καμπυλών  $I - V$  των μεμονωμένων κυψελών και πως συμβάλουν στη δημιουργία της καμπύλης  $I - V$  για την συγκεκριμένη συνδεσμολογία.



EIKONA 3-30: Κυψέλες με σύνδεση σε σειρά.  
 Πηγή: (Αντωνίου & Τσέρνιχ). Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

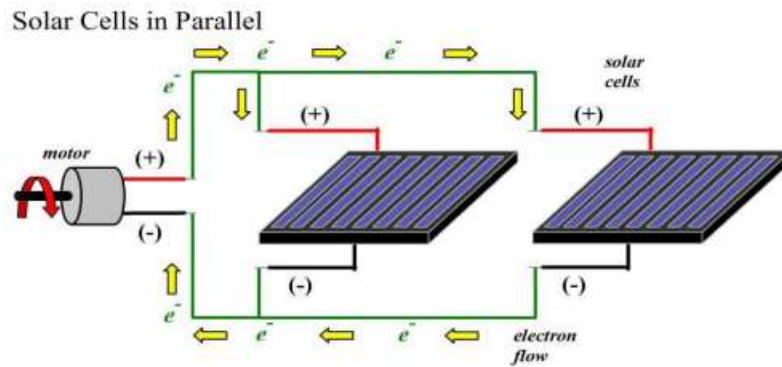
Με βάση την παραπάνω εικόνα, φαίνεται πως η τάση του ΦΒ στοιχείου από το Α στο Β είναι ίση με  $V_{AB} = 0,5$  Volts ενώ από το Α στο C είναι ίση με  $V_{AC} = 1,0$  Volt, από το Α στο D είναι ίση με  $V_{AD} = 1,5$  Volts και από το Α στο Ε είναι ίση με  $V_{AE} = 2.0$  Volts. Το ρεύμα από την αντίθετη μεριά παραμένει σταθερό καθ' όλη τη συνδεσμολογία και η τιμή του είναι ίση με  $I_{AE} = 3$  A (Δούρος, 2021).

### 3.7.2 Παράλληλη σύνδεση

Στην παράλληλη σύνδεση γνωρίζουμε πως η τάση σε όλη τη συνδεσμολογία παραμένει σταθερή. Αυτό που μεταβάλλεται είναι το ρεύμα, καθώς μοιράζεται σε κάθε παράλληλη σύνδεση. Έτσι, προκύπτει:

$$I_{\text{παράλληλα}} = n \cdot I_{\text{max}} \text{ (μίας κυψέλης)} \ \& \ V_{\text{παράλληλα}} = V_{\text{max}} \text{ (μίας κυψέλης)} \quad (3-11)$$

Άρα, συμπεραίνεται πως το παραγόμενο ρεύμα όλης της συνδεσμολογίας είναι ίσο με το άθροισμα των μεμονωμένων ρευμάτων κάθε κυψέλης και η τάση μίας παράλληλης σύνδεσης είναι ίση με την τάση κάθε κυψέλης.

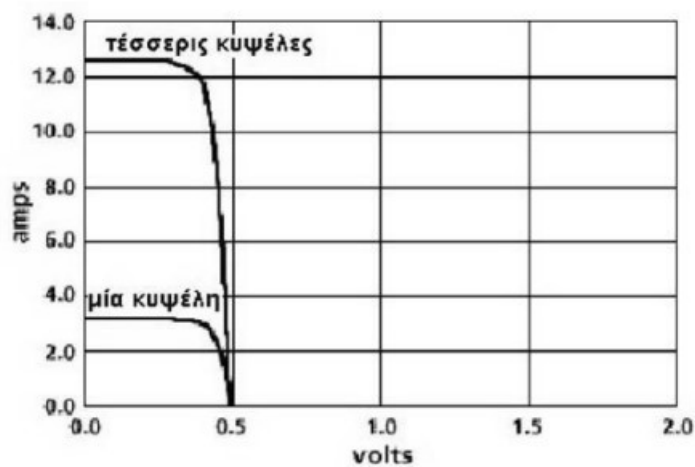


ΕΙΚΟΝΑ 3-31: Παράλληλη σύνδεση.

Πηγή: (Αντωνίου & Τσέρνιχ). Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

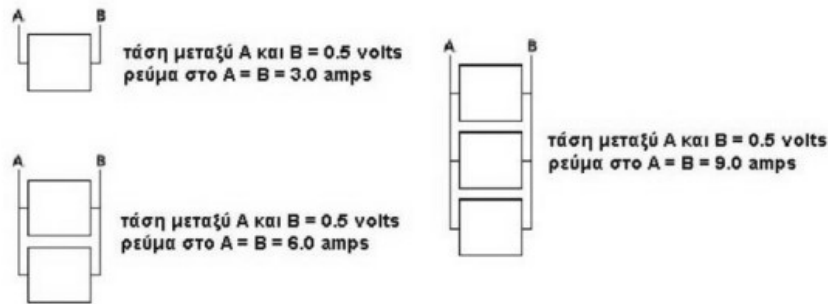
Η ισχύς που αποδίδεται στη συνδεσμολογία είναι ίση με το συνολικό ρεύμα πολλαπλασιασμένο με την τάση κάθε κυψέλης.

Στην εικόνα 3-32 παρουσιάζεται μία παράλληλη συνδεσμολογία τεσσάρων κυψελών και η επίδραση της χαρακτηριστικής καμπύλης  $I - V$  κάθε μεμονωμένης κυψέλης στην καμπύλη της συνδεσμολογίας.



ΕΙΚΟΝΑ 3-32: Μορφή καμπυλών  $I - V$  κυψελών σε παράλληλη σύνδεση.

Πηγή: (Αντωνίου & Τσέρνιχ). Ανακτήθηκε: (23.06.2022)



ΕΙΚΟΝΑ 3-33: Σύνδεση τριών κυψελών παράλληλα.  
 Πηγή: (Αντωνίου & Τσέρνιχ). Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

Αυτό που παρατηρείται είναι πως η τάση παραμένει ίση με  $V=0,5$  A, ενώ το ρεύμα αυξάνεται καθώς προστίθεται και μία παράλληλη κυψέλη.

Η προτεινόμενη τιμή της τάσης  $V_1$  και  $V_2$  είναι από 0,4 έως 1,0 Volts. Το ρεύμα εξαρτάται από το εμβαδόν των ΦΒ στοιχείων και γι' αυτόν τον λόγο οι τιμές του πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ  $20 \text{ mA/cm}^2$  και  $40 \text{ mA/cm}^2$  της επιφάνειας του στοιχείου (Gevirkian, 2008).

### 3.7.3 Μικτή σύνδεση

Κατά την σύνδεση πολλών διατάξεων παράλληλα δημιουργείται ένας φωτοβολταϊκός συλλέκτης. Η παράλληλη σύνδεση τους δημιουργούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία μεταξύ τους διαθέτουν σύνδεση σε σειρά. Αυτή η σύνδεση σε σειρά δημιουργεί τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες.

Στα σημεία της παράλληλης σύνδεσης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών τοποθετούνται δίοδοι ελέγχου της ροής του ρεύματος. Η καλύτερη θέση είναι στην έξοδο κάθε παράλληλου κλάδου και ο σκοπός τους είναι η αποφυγή ροής ρεύματος μεταξύ των παράλληλων κλάδων. Η συγκεκριμένη δίοδος κατά την αγορά του ΦΒ πλαισίου είναι ήδη ενσωματωμένη και όταν υπάρχει κανονική ροή δεν παρουσιάζει κάποια ενέργεια. Σε εκείνη τη συνθήκη καταναλώνει μία μικρή ποσότητα ισχύος. Ωστόσο, όταν παρουσιαστεί κάποια βλάβη, η δίοδος εκτρέπει το ρεύμα μέσω αυτής και γύρω από το ΦΒ πλαίσιο. Εάν δεν υπάρχει δίοδος διέλευσης υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του πλαισίου, καθώς το ρεύμα διοχετεύεται υπό τη μορφή θερμότητας.



## 3.8 Κατηγορίες Φ/Β Στοιχείων

Η ενότητα έχει στόχο την παρουσίαση μερικών από τις πιο διαδεδομένες κατηγορίες ΦΒ στοιχείων που υπάρχουν στο εμπόριο.

Για τη δημιουργία ενός ΦΒ κυττάρου η πρώτη κίνηση είναι η δημιουργία ενός εξαιρετικά καθαρού υλικού που στόχο θα έχει την όσο δυνατόν περισσότερη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, ακολουθεί ο σχεδιασμός της ένωσης p-n, η οποία μπορεί να εμφανίζεται σε διάφορες μορφές στα κελιά πολλαπλών επιπέδων. Η πρώτη κρυσταλλική κυψέλη που χρησιμοποιήθηκε ήταν εκείνη του πυριτίου, η οποία χρησιμοποιείται με διάφορες παραλλαγές και βελτιώσεις ακόμα και σήμερα. Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή της θα καθορίσει το πόσο διαδεδομένη θα είναι και στο μέλλον (Luque & Hegedus, 2003).

### 3.8.1 Φ/Β Στοιχεία Πυριτίου

Το πυρίτιο αποτελεί περίπου το 25% του γήινου φλοιού και θεωρείται το πιο διαδεδομένο στοιχείο στη φύση. Η παραγωγή πυριτίου επιτυγχάνεται μέσω της άμμου, καθώς το βασικό της στοιχείο είναι το οξείδιο του πυριτίου ( $SiO_2$ ). Οι φάσεις επεξεργασίας και καθαρισμού του πυριτίου παρουσιάζονται παρακάτω:

1<sup>η</sup> Φάση: Δημιουργία πυριτίου μεταλλουργικής ποιότητας μέσω της μεθόδου ανάτηξης.



2<sup>η</sup> Φάση: Μετατροπή του μεταλλουργικού πυριτίου σε τριχλωροσιλάνιο με τη βοήθεια υδροχλωρικού οξέος.



3<sup>η</sup> Φάση: Καθαρισμός του τριχλωροσιλανίου μέσω κλασματικής απόσταξης και έπειτα, η αναγωγή του με υδρογόνο. Έτσι, επιτυγχάνεται η δημιουργία πυριτίου ηλεκτρονικής ποιότητας.

4<sup>η</sup> Φάση: Τήξη και ανακρυστάλλωση με σκοπό την επίτευξη μέγιστης καθαρότητας. Το παραγόμενο πυρίτιο, μετά την ανακρυστάλλωση, έχει κυλινδρική μορφή και η διάμετρος της φτάνει τα 10cm.

Αφού, λοιπόν, πραγματοποιηθεί η κατεργασία που περιγράφεται από τις παραπάνω φάσεις ακολουθεί κόψιμο του κυλίνδρου σε δίσκία πάχους 0,5mm. Οι δίσκοι, στη

συνέχεια, επεξεργάζονται για να έχουν λεία επιφάνεια και με τη μέθοδο της διάχυσης ή της εμφύτευσης προσμείξεων μετατρέπονται σε διόδους επαφής p-n. Τέλος, ακολουθεί η συγκόλληση των ηλεκτροδίων στις δύο μεριές των δίσκων, η κάλυψη της μίας επιφάνειας με το στρώμα αποφυγής της ανάκλασης και η στεγανοποίηση (Πέρδιος, 2011).

Το πυρίτιο διακρίνεται σε τέσσερεις διαφορετικούς τύπους ανάλογα τη δομή τους, οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω.

### 3.8.1.1 Φ/Β Στοιχεία Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (c-Si)

Η απόδοση του ΦΒ στοιχείου από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο σε εργαστηριακό επίπεδο υπολογίζεται περίπου 21-24%. Αν και ακούγεται αρκετά αισιόδοξο ποσοστό, στην πράξη η απόδοση ενός ΦΒ πλαισίου από το συγκεκριμένο υλικό ανέρχεται στα 12-19%.

Σε επίπεδο εμπορίου υπολογίζεται πως το ΦΒ πλαίσιο της εταιρείας Sun Power διαθέτει μία από τις μεγαλύτερες αποδόσεις, περίπου ίση με 18,5%. Η καινοτομία του συγκεκριμένου ΦΒ πλαισίου είναι οι μεγάλες μεταλλικές επαφές που διαθέτει και ενισχύει την αλληλεπίδραση των φωτονίων. Συνήθως, το συγκεκριμένο πλαίσιο χρησιμοποιείται για να καλύψει μεγάλη ποσότητα απαιτούμενης ενέργειας (Ventre 2005).

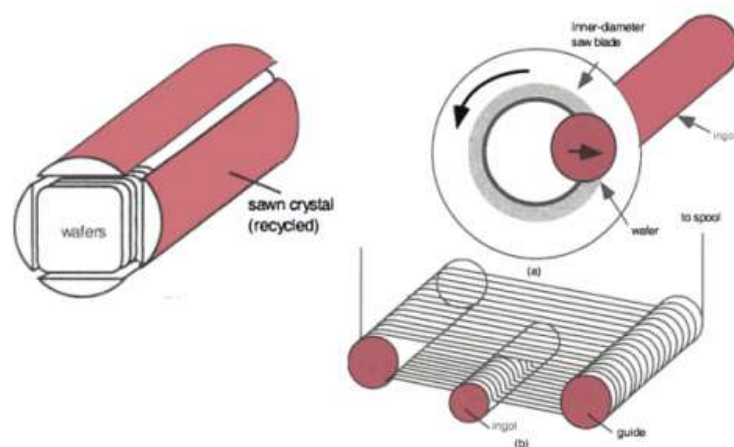


ΕΙΚΟΝΑ 3-34: ΦΒ στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου.  
Πηγή: (<https://www.eco2day.gr>) Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

Όπως προαναφέρθηκε το σχήμα της μονοκρυσταλλικής ΦΒ κυψέλης είναι κυκλικού δίσκου καθώς προέρχεται από την κοπή κυλίνδρου. Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις που το μονοκρυσταλλικό ΦΒ στοιχείο διαθέτει ημικυκλικό ή τετραγωνικό σχήμα, με την τελευταία περίπτωση να γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη.

Αυτό συμβαίνει, διότι κατά τη διαδικασία παραγωγής του ΦΒ στοιχείου επιτυγχάνεται μείωση κατανάλωσης του υλικού και μετέπειτα, έχει τη δυνατότητα κάλυψης μεγαλύτερης

επιφάνειας από εκείνα με στρογγυλό σχήμα (Δούρος, 2021). Το πάχος του υλικού θεωρείται μεγάλο, καθώς αγγίζει τα 300 $\mu\text{m}$  (Πέρδιος, 2011).



ΕΙΚΟΝΑ 3-35: ΦΒ στοιχείο σε κυλίνδρους.

Πηγή: (Μαυροκέφαλος, 2010)

### 3.8.1.2 Φ/Β Στοιχεία Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (m-Si)

Τα ΦΒ στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου μοιάζουν αρκετά με εκείνα του μονοκρυσταλλικού. Ωστόσο, μία διαφορά είναι πως στο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο διακρίνονται διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές. Σε εργαστηριακό επίπεδο η απόδοση φτάνει 17-20% και ως ΦΒ πλαίσιο η απόδοση του είναι 12-19%. Αν και η ελάττωση της απόδοσης σε σχέση με το μονοκρυσταλλικό ΦΒ στοιχείο πυριτίου είναι αισθητή, το κόστος κατασκευής είναι εξίσου χαμηλό και αυτό οδηγεί στην ευκολότερη επιλογή του. (Πέρδιος, 2011).

Η παραγωγή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου ξεκινά με τη χρήση καθαρού πυριτίου. Όταν, λοιπόν, ολοκληρωθεί η τήξη του, τοποθετείται σε ειδικά καλούπια ορθογωνικής και τετραγωνικής μορφής μέχρι την στερεοποίηση τους (Luque & Hegedus, 2003).

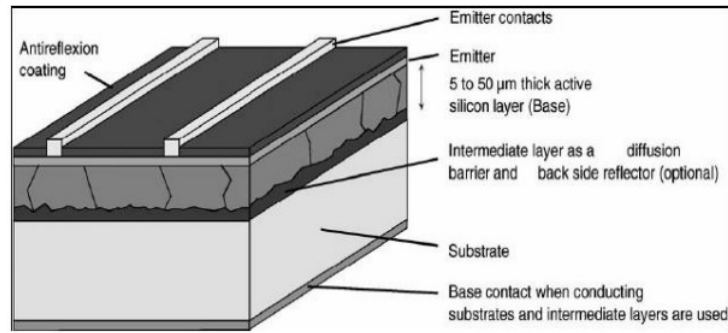
Το πάχος του συγκεκριμένου ΦΒ στοιχείου κυμαίνεται από 0,24 - 0,3mm και διαθέτουν λεπτά επιστρώματα πάχους 10-50 $\mu\text{m}$ . Εάν προστεθεί η επιφάνεια για την μείωση της ανάκλασης το ΦΒ στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου από γαλάζιο χρώμα αποκτά μπλε έως μαύρο (Ventre, 2005).



ΕΙΚΟΝΑ 3-36: ΦΒ στοιχείο πολυκρυσταλλικού Πυριτίου.  
Πηγή: (<https://www.researchgate.net>), Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

### 3.8.1.3 Φ/Β Στοιχεία λεπτού φιλμ (c-SiTFEC)

Η παραγωγή της λεπτής αυτής ταινίας επιτυγχάνεται με τη χρήση τηγμένου υλικού. Διαθέτει τετραγωνικό σχήμα και το πάχος του κυμαίνεται μεταξύ 0,01 και 0,03mm. Επίσης, στο κάτω μέρος φέρει κεραμική κάλυψη και μπορεί να εφαρμοστεί σε κεραμικές επιφάνειες και γυαλί. Η απόδοση του είναι από 9 έως 10% και διαθέτει γκρι και μπλε χρωματισμούς. Το μπλε χρώμα το λαμβάνει σε περιπτώσεις που τοποθετείται επιφάνεια αποφυγής ανάκλασης (anti-reflective). Σκοπός της συγκεκριμένης καινοτομίας είναι η επίτευξη χαμηλού κόστους κατασκευής (Δούρος,2021).



ΕΙΚΟΝΑ 3-37: Δομή ΦΒ στοιχείου μορφής φιλμ.

Πηγή: (Luque & Hegedus, 2003)

### 3.8.1.4 Φ/Β στοιχεία άμορφου Πυριτίου (α-Si)

Το άμορφο πυρίτιο έχει αρκετές διαφορές από το κρυσταλλικό πυρίτιο. Αρχικά, το ενεργειακό του χάσμα παίρνει τιμές από 1,2eV έως 1,6eV, το οποίο καθορίζεται από τον τρόπο κατασκευής του. Από την άλλη μεριά, το κρυσταλλικό πυρίτιο διαθέτει σταθερή τιμή ενεργειακού χάσματος ίση με 1,1eV. Ως βασικό πλεονέκτημα του άμορφου ΦΒ στοιχείου πυριτίου είναι ο μεγάλος συντελεστής απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας που διαθέτει. Έτσι, απαιτείται μικρό πάχος κατασκευής και αυτό ελαττώνει αρκετά το κόστος. Μέσα στις διαφορές από το κρυσταλλικό πυρίτιο είναι και η ευκαμψία των ΦΒ κελιών.

Οι χημικοί δεσμοί του άμορφου πυριτίου παρουσιάζουν στρεβλώσεις και για την αύξηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων προστίθεται υδρογόνο. Η απόδοση της συγκεκριμένης κυψέλης είναι περίπου 6-8% και οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται διαθέτουν συνήθως, τρεις κυψέλες διαφορετικού κράματος. Συνδέονται διαδοχικά και πρώτη μπαίνει εκείνη με την μεγαλύτερη τιμή ενεργειακού χάσματος. Έτσι, τα φωτόνια μικρής ενέργειας απορροφούνται από τις πίσω κυψέλες και επιτυγχάνεται η μείωση της παραγόμενης θερμότητας. Η απόδοση μπορεί να φτάσει έως 12% (Πέρδιος, 2011).



ΕΙΚΟΝΑ 3-38: Σχηματική αναπαράσταση της δομής πυριτίου, α) Κρυσταλλικό πυρίτιο,

β) Άμορφο πυρίτιο,

γ) Υδρογονούχο άμορφο πυρίτιο. Πηγή: (Πέρδιος, 2011)



ΕΙΚΟΝΑ 3-39: ΦΒ στοιχείο τύπου φιλμ.

Πηγή: (<https://www.smart-cover.gr>) Ανακτήθηκε: (23.06.2022)

Στον πίνακα 3-2 αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και των τριών ΦΒ κυττάρων πυριτίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά διάφορων ΦΒ στοιχείων. Πηγή: (Πέρδιος, 2011)

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΜΟΝΟ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ	ΠΟΛΥ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ	ΑΜΟΡΦΟ
Απαιτούμενη επιφάνεια για κάθε kWp	7-8 [m <sup>2</sup> ]	8-10[m <sup>2</sup> ]	10-20[m <sup>2</sup> ]
Απόδοση	12-19%	12-19%	4-7%
Ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα $\left[ \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWp}} \right]$	1300	1300	1300-1400

### 3.8.2 Φ/Β Στοιχεία άλλων υλικών

Ενώ τα ΦΒ στοιχεία πυριτίου είναι ευρέως διαδεδομένα και η χρήση τους είναι συνεχής, έχουν κατασκευαστεί και ΦΒ στοιχεία από άλλα υλικά. Η χρήση τους, βέβαια, περιορίζεται, διότι τα μειονεκτήματα και τα προβλήματα είναι πολλά παραπάνω συγκριτικά με εκείνα του πυριτίου. Παρακάτω αναφέρονται τα κύρια ΦΒ στοιχεία παραγόμενα από διαφορετικά υλικά.

#### 3.8.2.1 Φ/Β Στοιχεία αρσενικούχου γαλλίου (GaAs)

Η κατασκευή του επιτυγχάνεται με τη χρήση αρσενικούχου γαλλίου και το ενεργειακό του χάσμα είναι ίσο με 1,43eV. Έτσι, το συγκεκριμένο ΦΒ στοιχείο έχει τη δυνατότητα μετατροπής μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας και σε συνδυασμό με την αντοχή του στη θερμοκρασία χαρακτηρίζεται ως αρκετά ανθεκτικό και ισχυρό. Αυτός είναι και ο λόγος

που χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε διαστημικές εφαρμογές. (Δούρος, 2021). Η θεωρητική του απόδοση φτάνει το 30% ενώ ως ΦΒ πλαίσιο αγγίζει το 25%. Σε γενικές γραμμές θεωρείται αρκετά ακριβό και κατά την ανακύκλωση του εκπέμπει τοξικά αέρια (Ventre, 2005, Van Swaaij, 2014).

### **3.8.2.2 Φ/Β Στοιχεία Τελλουριούχου Καδμίου (CdTe)**

Το πάχος της συγκεκριμένης κυψέλης είναι μικρό συγκριτικά με εκείνο της μονοκρυσταλλικής. Το υλικό που χρειάζεται είναι λιγότερο και η απόδοση του σε θεωρητικό επίπεδο φτάνει το 25%. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο ενεργειακό χάσμα  $E_g$  που διαθέτει το ΦΒ στοιχείο.

Ένα βασικό μειονέκτημα του ΦΒ στοιχείου από Τελλουριούχο κάδμιο είναι πως το υλικό κατασκευής του είναι δυσεύρετο και φυσικά κατά την ανακύκλωση του και την επεξεργασία του παρουσιάζει τοξικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, το συγκεκριμένο στοιχείο δεν επηρεάζεται από την εξωτερική θερμοκρασία και η απόδοση του είναι ανεξάρτητη από την παρουσία νεφών (Δούρος, 2021).

### **3.8.2.3 Φ/Β στοιχεία δισεληνοϊνδιούχου χαλκού (CuInSe<sub>2</sub>)**

Τα ΦΒ στοιχεία CIS περιέχουν χαλκό (Cu), σελήνιο (Se) και ίνδιο (In) και διαθέτουν ενεργειακό χάσμα ίσο με 1,04eV, το οποίο πλησιάζει αρκετά εκείνο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Γι' αυτόν τον λόγο θεωρείται ένα από τα πιο απορροφητικά υλικά.

Η διάταξη αποτελείται από μία επιφάνεια μολυβδαινίου πάχους 1μm το οποίο καλύπτεται από ένα στρώμα γυαλιού. Η επιλογή του μολυβδαινίου και του γυαλιού είναι σημαντική καθώς καθορίζει την τελική ποιότητα του ΦΒ κυττάρου. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας του γυαλιού σε νάτριο, το οποίο βελτιώνει τη μορφολογία και αυξάνει την αγωγιμότητα. Στην επάνω μεριά του μολυβδαινίου τοποθετείται το CIS, το οποίο διαθέτει πάχος περίπου ίσο με 2μm. Στη συνέχεια προστίθενται δύο μεμβράνες από CdS και ZnO αντίστοιχα. Η τελευταία διαθέτει ενεργειακό διάκενο ίσο με 3,2eV, το οποίο για το ηλιακό κύτταρο λειτουργεί ως παράθυρο.

Η απόδοση του μπορεί να διαφέρει καθώς το φάσμα των αναλογιών των στοιχείων του ΦΒ κυττάρου είναι μεγάλο και προσφέρει μία δυνατότητα πολλών πειραματισμών. Η απόδοση που έχει επιτευχθεί σε θεωρητικό επίπεδο είναι το 18,8% (Πέρδιος, 2011).



### 3.9 Βιβλιογραφικές πηγές

Αντωνίου Ε, Τσέρνιχ Ε. Φωτοβολταϊκά Συστήματα. (Πτυχιακή Εργασία). Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας. 2022, Απρίλιος 25. Ανακτήθηκε από <http://digilib.teiemt.gr/jspui/bitstream/123456789/1374/1/012011012.pdf>

Δούρος Ν., (2021). Μελέτη εγκατάστασης εναλλακτικής μορφής ενέργειας σε πλοίο με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων. (Αδημοσίευτη Πτυχιακή Εργασία). Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

Εξωγενείς ημιαγωγοί. (2022, 16 Ιουλίου). Ανακτήθηκε από <https://riverglennapts.com/el/semiconductor/781-extrinsic-semiconductors.html>

Ιστορικό των φωτοβολταϊκών. (2022, 16 Ιουλίου). Ανακτήθηκε από <https://new.selasenergy.gr/fotovoltaika>

Μαυροκέφαλος, 2010. Σύγκριση απόδοσης και κόστους μίας τυπικής φωτοβολταϊκή εγκατάστασης. (Αδημοσίευτη Διπλωματική Εργασία). Πανεπιστήμιο Πατρών.

Πέρδιος, Σ. (2011). Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις. Αθήνα: Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ – 4Μ.

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

Πλευριτάκης, Ι. (2019). Ενδογενείς ημιαγωγοί. Ανακτήθηκε 17.07.2022 από <https://learnelectronics.gr>

Σπανάκης, Ε. (2013). Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο – Τύποι ΦΒ κυψελίδων. Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Τα φωτοβολταϊκά από το Α ως το Ω, 2010. Ανακτήθηκε 23 Ιουνίου 2022 από <http://roscovnicoff.blogspot.com/2010/10/blog-post.html>

Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο. 2022, Μάρτιος 23. Ανακτήθηκε από [https://www.arcmeletitiki.gr/images/uploads/pdf/arc\\_ape11.pdf](https://www.arcmeletitiki.gr/images/uploads/pdf/arc_ape11.pdf)

Φωτοβολταϊκά πλαίσια. 2022, Μάιος 6, Ανακτήθηκε από <https://new.selasenergy.gr/fotovoltaika>

Geotzberger, A. & Hoffman, V.U, (2005). Photovoltaic Solar Energy Generation. Berlin: Springer.

Gevorkian, P. (2008). Solar Power in Building Design. California: McGraw-Hill.

Honsberg, C.B. & Bowden, S.G. (2019). Photovoltaic's Education Website.

Ανακτήθηκε Απρίλιος 16, 2022, από [www.pveducation.org](http://www.pveducation.org).

Jager, 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.

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 13 Απριλίου 2022, από [www.planning.org](http://www.planning.org)

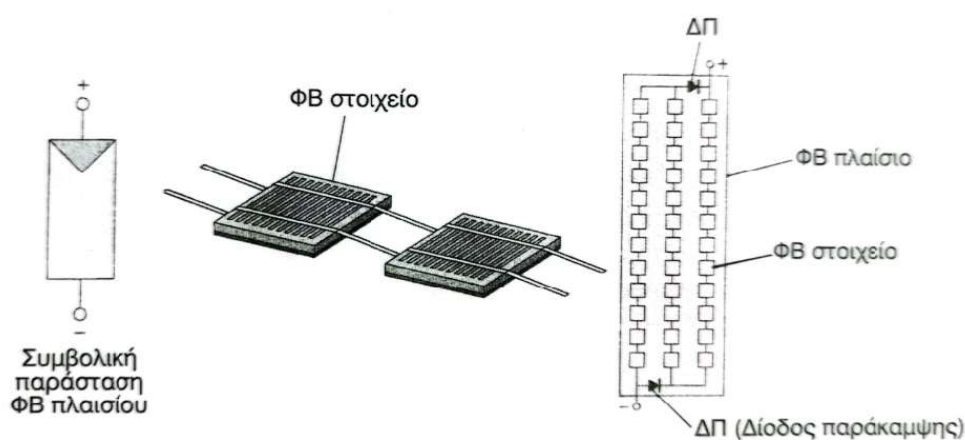
Rabaey, J.M., (2017) Chandrakasan, A. & Nolic, B. (2003). Ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

Ventre, J. (2005). Photovoltaic systems engineering. London: CRC PRESS

## Κεφάλαιο 4. Φωτοβολταικά συστήματα

### 4.1 Φωτοβολταικό πλαίσιο

Υπό συνθήκες κανονικής ηλιακής ακτινοβολίας τα ΦΒ στοιχεία πυριτίου φέρουν τάση ίση με 0,5 V και η ισχύς που παράγεται είναι κάτω των 0,4 W. Οι τιμές αυτές, όπως είναι λογικό, δεν μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες μίας εγκατάστασης και κυρίως ενός πλοίου. Γι' αυτόν τον λόγο δημιουργείται μία σχετικά εύχρηστη διάταξη, η οποία περιλαμβάνει σύνδεση των ΦΒ στοιχείων σε σειρά, και ονομάζεται φωτοβολταικό πλαίσιο (PV module).



ΕΙΚΟΝΑ 4-1: Σύνδεση ΦΒ στοιχείων σε σειρά για τη δημιουργία ΦΒ πλαισίου.

Πηγή: (Πέρδιος, 2011)

Η σύνδεση ΦΒ στοιχείων σε σειρά προκαλεί αύξηση της τάσης και επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα. Όπως είναι προφανές, τα ΦΒ πλαίσια αποτελούν το βασικό μέρος μίας φωτοβολταικής εγκατάστασης.

Η συνδεσμολογία των ΦΒ στοιχείων επιδιώκεται με τη σύνδεση του θετικού ηλεκτροδίου του ενός στοιχείου με το αρνητικό ηλεκτρόδιο του άλλου, δηλαδή το υλικό τύπου n του πρώτου κυττάρου με το υλικό τύπου p του επόμενου. Η σύνδεση θα πρέπει να διεξαχθεί με την απαραίτητη προσοχή που απαιτείται, καθώς υπάρχει πιθανότητα ηλεκτρομαγνητικών διεγέρσεων και διάφορων διαβρώσεων που θα αλλοιώσουν την ποιότητα της συγκόλλησης. Οι ακροδέκτες, λοιπόν, της σειράς που δημιουργείται καταλήγουν στο κιβώτιο του πλαισίου. Με κατάλληλους εξωτερικούς ακροδέκτες το κιβώτιο επιτυγχάνει τη σύνδεση του με τη δίοδο προστασίας και φυσικά με τα υπόλοιπα ΦΒ πλαίσια.

Κατά τη σύνδεση σε σειρά όμοιων ΦΒ στοιχείων  $N$  αριθμού ισχύουν οι παρακάτω κανόνες:

- Η τάση ανοιχτού κυκλώματος του ΦΒ πλαισίου  $V_{OCΠ}$  είναι ανάλογη της τάσης του ενός ΦΒ στοιχείου  $V_{OC}$ , δηλαδή για συνθήκες  $R_{LOAD} = \infty$  και  $I_{LOAD} = 0$  έχουμε:

$$V_{OCΠ} = N \cdot V_{OC} \text{ [V]} \quad (4-1)$$

- Σε περίπτωση βραχυκύκλωσης των ακροδεκτών η τάση του ΦΒ πλαισίου μηδενίζεται και το ρεύμα  $I_{SCΠ}$  είναι ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ενός ΦΒ στοιχείου  $I_{SC}$ , δηλαδή

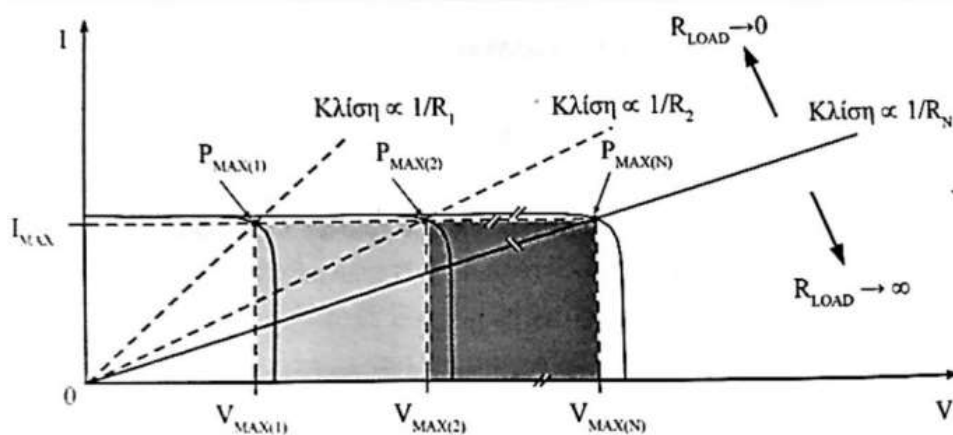
$$I_{SCΠ} = I_{SC} \text{ [A]} \quad (4-2)$$

Και εφόσον η αντίσταση  $R_{LOAD} = 0$ , τότε  $V_1 = V_2 = \dots = V_N \rightarrow V_{LOAD} = 0$

Αξίζει να σημειωθεί πως σε περίπτωση σύνδεσης σε σειρά ΦΒ στοιχείων τα οποία διαθέτουν διαφορετικό ρεύμα βραχυκύκλωσης, το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ΦΒ πλαισίου είναι ίσο με το ρεύμα εκείνου το ΦΒ στοιχείου που διαθέτει την μικρότερη τιμή. Άρα ισχύει η σχέση:

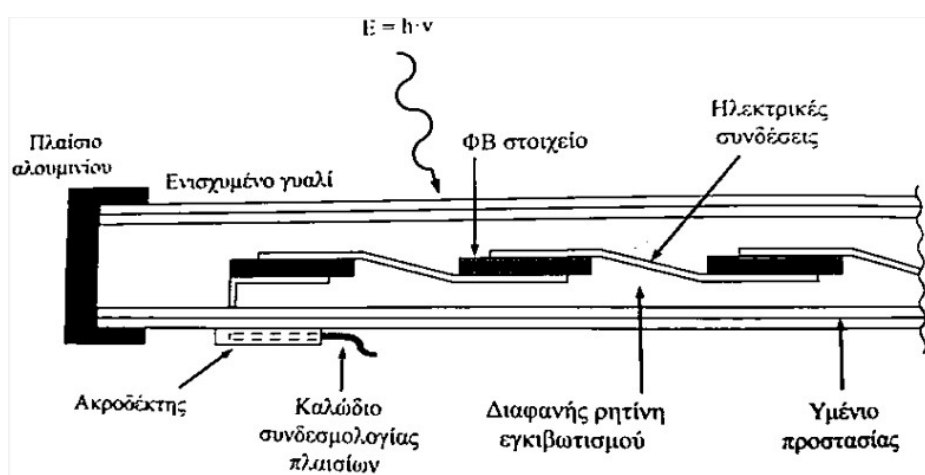
$$I_{SCΠ} = I_{SCmin} \quad (4-3)$$

Για την χαρακτηριστική καμπύλη  $I - V$  του ΦΒ πλαισίου, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα των ΦΒ στοιχείων, προκύπτει από την πρόσθεση όλων των καμπυλών  $I - V$  των στοιχείων που διαθέτουν ίδιο ρεύμα. Έτσι, παρατηρείται η αύξηση της τάσης του πλαισίου και της αντίστασης προσαρμογής φορτίου ( $R_N$ ).



ΕΙΚΟΝΑ 4-2: Χαρακτηριστική καμπύλη  $I - V$  μίας στοιχειοσειράς ΦΒ κυψελών. Πηγή: (Δέρβος, 2013)

Για τη σύνδεση του ΦΒ πλαισίου με ηλεκτρικούς συσσωρευτές η ονομαστική τάση θα πρέπει να είναι ίση με 12 V, ίση δηλαδή με εκείνη στους πόλους μίας συνηθισμένης μπαταρίας. Στο εμπόριο το πλήθος των στοιχείων που απαρτίζουν ένα ΦΒ πλαίσιο είναι 36. Η τάση εξόδου κυμαίνεται μεταξύ 18 και 22 V. Σε περίπτωση, όμως, που γίνει σύνδεση με μπαταρία που απαιτεί τάση 14,4 V, όπως εκείνες που βρίσκονται στην αγορά, πρέπει να τεθεί ένα όριο για τη φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας, αλλά και να δημιουργηθεί μία δίοδος αντεπιστροφής. Αυτή η δίοδος θα συμβάλλει στην απαγόρευση της εκφόρτισης του συσσωρευτή μέσω του πλαισίου, εάν δεν διατίθεται ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, πλέον η παραπάνω σύνδεση δεν προτιμάται και συστήνεται η χρήση ρυθμιστή φόρτισης. Στην αγορά υπάρχουν πλέον σύγχρονα ΦΒ πλαίσια με ονομαστική τάση ανώτερη των 40 V και με περισσότερες από 120 ΦΒ κυψέλες.



ΕΙΚΟΝΑ 4-3: Απεικόνιση κυρίων τμημάτων ΦΒ πλαισίου.

Πηγή: (Δέρβος, 2013)

#### 4.1.1 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες Φ/Β πλαισίου

Η πίσω μεριά του ΦΒ πλαισίου αποτελείται από μία επιφάνεια μετάλλου στο κάτω μέρος, συνήθως αλουμίνιο, ή από ένα φύλλο ισχυρού πλαστικού. Επάνω σε αυτό το φύλλο τοποθετείται το ΦΒ στοιχείο, το οποίο ενώνεται με ειδική κολλητική ουσία. Η επάνω όψη των ΦΒ στοιχείων καλύπτεται από γυάλινη (ρητίνη) ή διάφανη πλαστική μεμβράνη, η οποία τα προστατεύει από υγρασία. Η ρητίνη, για την αποφυγή των εγκάρσιων καταπονήσεων, διαθέτει υμένιο προστασίας (πλέγμα). Περιμετρικά του πλαισίου για την συγκράτηση όλης της διάταξης, υπάρχει ειδική ταινία από ανοδιωμένο αλουμίνιο ή από συνθετικό ελαστικό. Η γείωση του πλαισίου επιτυγχάνεται με αγωγό ιδανικής διατομής από χαλκό. Έτσι, εκτός από τη μηχανική αντοχή εξασφαλίζονται οι υποδοχές στήριξης, αλλά και η πλήρης στεγανότητα.

Για την δημιουργία μίας σωστής διάταξης και φυσικά την έγκριση της απαιτείται να ληφθούν υπόψιν κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά:

- **Υλικό κατασκευής πλαισίου:** Το υλικό κατασκευής καθορίζει την ποιότητα του ΦΒ πλαισίου και φυσικά ανάλογα και τις περιβαλλοντικές συνθήκες θα χρησιμοποιηθεί το κατάλληλο είδος (μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό, άμορφου πυριτίου κλπ). Εκτός από τις περιβαλλοντικές συνθήκες για την επιλογή του υλικού του ΦΒ πλαισίου, θα πρέπει να έχουν μελετηθεί και οι ενεργειακές ανάγκες για τις οποίες θα λειτουργεί το ΦΒ πλαίσιο (Δούρος, 2021).
- **Δυνατότητα σύνδεσης με συσσωρευτή:** Θα πρέπει να υπάρχει η ευχέρεια συνδυασμού του ΦΒ πλαισίου με συσσωρευτές ονομαστικής τάσεως ίση με 12 V ώστε να επιτευχθεί η αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας (Πέρδιος, 2011).
- **Ευκολία στη συνδεσμολογία:** σε περίπτωση επέκτασης της κατασκευής, αλλά και σε ύπαρξη βλάβης, το ΦΒ πλαίσιο θα πρέπει να μπορεί να αντικατασταθεί εύκολα χωρίς να χρειάζεται αποσυναρμολόγηση του δικτύου. Επίσης η διατομή των καλωδίων είναι συνήθως μεταξύ 4 και 6mm<sup>2</sup>.

Δύο βασικά προβλήματα, τα οποία αυξάνουν την πιθανότητα καταστροφής των ΦΒ πλαισίων είναι η υγρασία και η υπερθέρμανση (hot spot).

- Υγρασία

Οι κατασκευαστές ΦΒ πλαισίων θεωρούν πως η προτιμότερη λύση αποφυγής της υγρασίας είναι η δυνατότητα παροχής αέρα. Έτσι, θα μειωθούν οι συσσωρευμένοι υδρατμοί και κατά συνέπεια η δημιουργία νερού μεταξύ των επιπέδων που αποτελούν το ΦΒ πλαίσιο. Για την απομάκρυνση της υγρασίας προτιμάται η δημιουργία μίας οπής στον πίνακα συνδέσεων, από την οποία απελευθερώνονται οι υδρατμοί και φυσικά, για την σωστή προστασία της και την απομάκρυνση των ακαθαρσιών τοποθετείται στο πάνω μέρος πλέγμα.

- Υπερθέρμανση

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, κατά την κάλυψη ενός ΦΒ στοιχείου από κάποιο εμπόδιο ή σκίαση η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μηδενίζεται. Αυτό συμβαίνει, καθώς δεν διατίθεται ηλιακή ακτινοβολία πρόσπτωσης. Το ΦΒ πλαίσιο, όμως, λαμβάνει το ρεύμα βραχυκύκλωσης εκείνου του ΦΒ στοιχείου με το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Το συνολικό παραγόμενο ρεύμα του πλαισίου πλησιάζει αρκετά στο μηδέν. Ωστόσο,

λόγω της συνδεσμολογίας, το στοιχείο, στο οποίο δεν προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία, δέχεται τις τάσεις όλων των υπόλοιπων στοιχείων και αυτό οδηγεί στην υπερθέρμανση του. Σε περίπτωση που η μπαταρία που συνδέεται στο ΦΒ στοιχείο είναι 24 V υπάρχει αυξημένη πιθανότητα καταστροφής του κυττάρου, αλλά και δημιουργία πυρκαγιάς.

Η σχέση της που προσδιορίζει την ιδανική θερμοκρασία των ΦΒ στοιχείων ενός ΦΒ πλαισίου είναι η παρακάτω:

$$t_{\sigma} = t_{\alpha} + \frac{t_{noct}-20}{80} \cdot J_0 \quad (4-4)$$

Όπου:

$t_{\sigma}$ : η θερμοκρασία των στοιχείων που απαρτίζουν το ΦΒ πλαίσιο [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$t_{\alpha}$ : η θερμοκρασία του αέρα,

$t_{noct}$ : η ονομαστική θερμοκρασία του πλαισίου [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$J_0$ : η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας [ $\text{mW}/\text{cm}^2$ ]

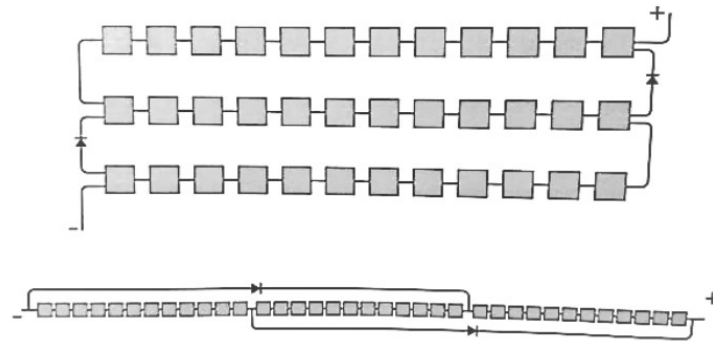
Η ονομαστική θερμοκρασία του πλαισίου είναι η θερμοκρασία που αποκτά όταν βρίσκεται σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, με θερμοκρασία περιβάλλοντος  $20^{\circ}\text{C}$  και πυκνότητα ισχύος  $80 \text{ mW}/\text{cm}^2$  (Δέρβος, 2013, Van Swaaij et al 2014).

Για την αποφυγή της υπερθέρμανσης και των προβλημάτων που θα επιφέρει, προτείνεται η παράλληλη σύνδεση μίας διόδου παράκαμψης (by-pass diode), ανά ομάδα στοιχείων. Έτσι, για παράδειγμα, εάν συνδέσουμε μία δίοδο παράκαμψης στο κιβώτιο συνδέσεων με 18 κυψέλες από τα συνολικά 36 στοιχεία του πλαισίου, η ανάστροφη τάση πέφτει κάτω από 10 V. Αυτή η συνθήκη προστατεύει το πλαίσιο από τυχόν υπερθέρμανση και η χρήση του μπορεί να συνεχιστεί και με την παρουσία καμένου ΦΒ στοιχείου.

Στο υδάτινο περιβάλλον και συγκεκριμένα στο πλοίο που αποτελεί τον χώρο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, γίνεται προφανές πως η υπερθέρμανση λόγω σκιάσεων και γήρανσης των ΦΒ στοιχείων είναι αναπόφευκτη. Έτσι, κρίνεται αναγκαία η σύνδεση διόδου προστασίας παράλληλα της στοιχειοσειράς και η εξασφάλιση εναλλακτικής διαδρομής ρεύματος.

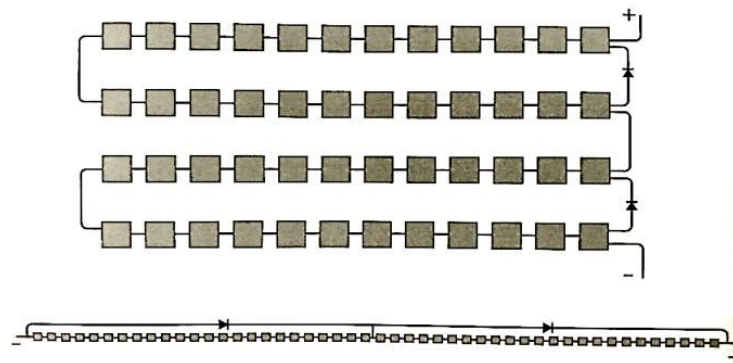
Ο αριθμός των διόδων παράκαμψης εξαρτάται από τις στήλες στοιχειοσειρών της διάταξης. Στην εικόνα 4-4 απεικονίζεται η μέθοδος που συνδέονται οι δίοδοι παράκαμψης στις στοιχειοσειρές. Συγκεκριμένα, όταν διατίθεται περιττός αριθμός στηλών και δύο

ανεξάρτητα κιβώτια σύνδεσης, ένα θετικό και ένα αρνητικό, τότε οι διόδοι συνδέονται εναλλάξ και στις δύο αντίθετες πλευρές.



ΕΙΚΟΝΑ 4-4: Απεικόνιση διάταξης στοιχειοσειράς ΦΒ πλαισίου με περιττό αριθμό στηλών, και θέση διόδων προστασίας– Απεικόνιση ευθύγραμμης διάταξης στοιχειοσειράς. Πηγή: (Δέρβος, 2013)

Στην περίπτωση που οι στήλες είναι άρτιου αριθμού και υπάρχει μόνο ένα κιβώτιο σύνδεσης εξωτερικά που συνδέονται και οι δύο ακροδέκτες, τότε οι διόδοι παράκαμψης τοποθετούνται μόνο στη μία μεριά του ΦΒ πλαισίου (εικόνα 4-5).



ΕΙΚΟΝΑ 4-5: Απεικόνιση διάταξης στοιχειοσειράς ΦΒ πλαισίου με άρτιο αριθμό στηλών, και θέση διόδων προστασίας. Απεικόνιση ευθύγραμμης διάταξης στοιχειοσειράς. Πηγή: (Δέρβος, 2013)

#### 4.1.2 Ισχύς αιχμής Φ/Β πλαισίου

Η ισχύς αιχμής του πλαισίου (pick power) αποτελεί την μέγιστη ηλεκτρική ισχύ που παράγεται κάτω από πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC και συμβολίζεται με  $P_{p\pi}$ . Η ισχύς αποτελεί το πιο σημαντικό στοιχείο ενός ΦΒ πλαισίου και μέσω αυτής επιλέγεται το πλαίσιο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Για την καλύτερη κατανόηση της έννοιας της ισχύος αιχμής παρουσιάζεται το εξής παράδειγμα:



Εάν ένα πλαίσιο έχει ισχύ αιχμής ίση με  $P_{P\pi} = 100 W_p$  και μάζα αέρα  $AM=1,5$  σε θερμοκρασία  $25^\circ C$ , τότε η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ισχύος του είναι ίση με  $P_{STC} = 1 \frac{Kw}{m^2}$ . Η μάζα αέρα υπολογίζεται από τον τύπο  $AM = \frac{1}{\sigma \nu \nu z}$ , όπου  $z$  η γωνία μεταξύ ηλιακών ακτινών και της διεύθυνσης του Ζενίθ του τόπου. Ο αριθμός  $AM$  δείχνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα συγκριτικά με την κατακόρυφη διαδρομή της.

#### 4.1.3 Βαθμός απόδοσης Φ/Β πλαισίου

Η απόδοση των ΦΒ πλαισίων υπολογίζεται με τη χρήση του τύπου 4-5:

$$n_{\pi} = \frac{P_{m\pi}}{P_{HA}} \ \& \ n_{\pi} = \frac{P_{m\pi}}{P_{HA} \cdot S_{\pi}} \quad (4-5)$$

Όπου:

$P_{m\pi}$  [W]: μέγιστη ηλεκτρική ισχύς ΦΒ πλαισίου,

$P_{HA}$  [W]: ισχύς προσπίπτουσας ακτινοβολίας,

$$\text{ή } n_{\pi} = \frac{P_{m\pi}}{P_{HA} \cdot S_{\pi}}, \text{ αδιάστατο μέγεθος} \quad (4-6)$$

Όπου:

$P_{HA}$ : πυκνότητα ισχύος προσπίπτουσας ακτινοβολίας,  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

$S_{\pi}$ : επιφάνεια πρόσπτωσης ακτινοβολίας,  $[m^2]$

Ο βαθμός απόδοσης των ΦΒ πλαισίων επηρεάζεται αρκετά από τα εξής:

- Γήρανση

Τα ΦΒ πλαίσια με το πέρασ των ετών δέχονται κάποια διάβρωση καθώς χαλάνε τα υλικά κατασκευής των στοιχείων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της απόδοσης κατά 1% περίπου ετησίως. Για τον καλύτερο υπολογισμό της γήρανσης υπάρχει ο συντελεστής γήρανσης  $\sigma_{\gamma}$ , ο οποίος έχει αρχική τιμή ίση με 0,99 και μειώνεται κάθε χρόνο κατά 0,01.

- Υπερθέρμανση

Τα ΦΒ στοιχεία από τα οποία αποτελείται το ΦΒ πλαίσιο ενδέχεται να φέρουν υψηλές θερμοκρασίες (μέση θερμοκρασία  $30^\circ C$ ) και αυτό οδηγεί στη μείωση της

απόδοσης του πλαισίου. Εξαιτίας αυτής της συνθήκης υπάρχει ο συντελεστής θερμοκρασίας  $\sigma_{\theta}$  και υπολογίζεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης και τα χρήσης της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας  $t_{\alpha}$ :

$$\sigma_{\theta} = 1 - [(t_{\alpha} + 30) - 25] \cdot 0,004 \quad (4-7)$$

- Ακαθαρσίες επιφανειών

Η ρύπανση των επιφάνειας των ΦΒ πλαισίων είναι ένας συνηθισμένος παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά την απόδοση τους. Αυξημένη σκόνη, αλάτι και διάφορες άλλες ακαθαρσίες παρουσιάζουν τα πλαίσια που διαθέτουν χαμηλή κλίση. Γι' αυτό συστήνεται η τοποθέτηση των πλαισίων με κλίση περίπου  $45^{\circ}$  και να μην υπάρχει δυνατότητα συγκράτησης ρύπων. Φυσικά, και στην συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχει ένας συντελεστής ρύπανσης επιφανειών  $\sigma_{\rho}$ , ο οποίος παίρνει τιμές από 0,80 για την χειρότερη περίπτωση που τα πλαίσια έχουν μηδενική κλίση και είναι ακαθάριστα, έως 0,95 για πλαίσια που καθαρίζονται συχνά.

- Δίοδος αντεπιστροφής

Σε περίπτωση που το ΦΒ πλαίσιο δεν λαμβάνει ηλιακή ακτινοβολία, τότε η δίοδος που εμποδίζει την εκφόρτιση της μπαταρίας δημιουργεί κάποιες μικρές απώλειες. Για τις απώλειες αυτές υπάρχει ο συντελεστής απωλειών διόδου  $\sigma_{\delta}$  ο οποίος συνήθως λαμβάνεται ίσος με 0,99.

## 4.2 Φ/B συστοιχίες και Φ/B πεδίο (array)

Ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις τα ΦΒ πλαίσια μπορούν να τοποθετηθούν είτε σε σειρά είτε παράλληλα. Η ονομαστική τάση των ΦΒ πλαισίων είναι πολλαπλάσιο των 12 V και εξαρτάται από την σύνδεση τους (Ventre, 2005).

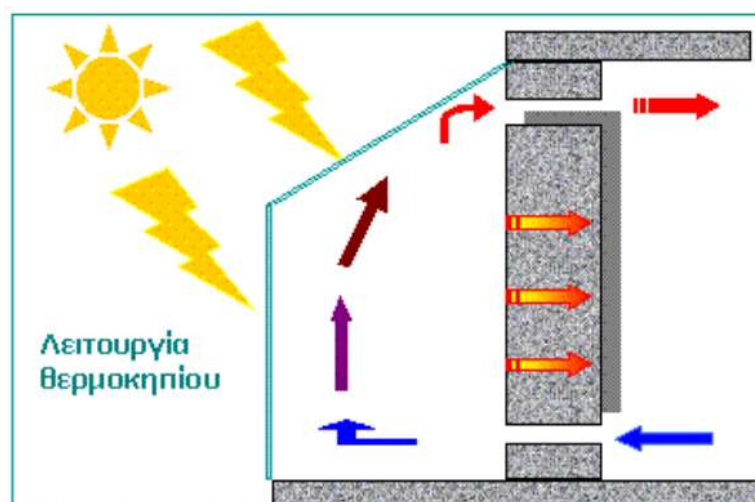
Η σύνδεση σε σειρά πολλών ΦΒ πλαισίων αποτελεί την ΦΒ συστοιχία (strings) και η επιφάνεια της συστοιχίας μπορεί να είναι είτε σταθερή είτε περιστρεφόμενη. Με την σύνδεση σε σειρά επιτυγχάνεται αύξηση εξόδου ενώ το ρεύμα είναι κοινό για όλα τα στοιχεία, δηλαδή σταθερό.

Σε περίπτωση που απαιτείται αύξηση της έντασης του ρεύματος οι συστοιχίες μεταξύ τους συνδέονται παράλληλα. Το πλήθος των συστοιχιών αυτών αποτελεί το υποπεδίο (sub-array) και καθορίζεται από την εγκατεστημένη ισχύ της ΦΒ εγκατάστασης. Με σκοπό την παροχή μέγιστης ισχύος του συστήματος (Maximum Power Point Tracking System, MPPT), οι παράλληλες συστοιχίες ελέγχονται από έναν αλγόριθμο, ο οποίος βρίσκει το μέγιστο σημείο ισχύος των ΦΒ πλαισίων. Σε περιβάλλον, όπως το υδάτινο, λόγω της μη σταθερής ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζεται αστάθεια του αλγορίθμου MPPT.

### 4.3 Ανάλυση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται με τρία διαφορετικά συστήματα, τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά.

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούν την ενέργεια του ήλιου για να διανέμουν θερμότητα στον χώρο. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιείται διαφανές υλικό, όπως το γυαλί, το οποίο συλλέγει τη θερμότητα που δημιουργείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Μερικά είδη παθητικών συστημάτων είναι οι τοίχοι θερμικής αποθήκευσης και το θερμοσιφωνικό πάνελ εσωτερικού χώρου, όπου ο συνδυασμός των δύο αποτελεί τον τοίχο Trombe – Michel, τα ηλιακά θερμοκήπια και τέλος, τα ηλιακά αίθρια, τα οποία βρίσκονται σε εσωτερικό χώρο και η οροφή τους καλύπτεται από τζάμι (Κυνηγόπουλος, 2016).



ΕΙΚΟΝΑ 4-6: Παρουσίαση λειτουργίας θερμοκηπίου.

Πηγή: (<http://www.cres.gr>). Ανακτήθηκε: (24.06.2022)

Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα και στη συνέχεια τη διοχετεύουν στο νερό και στον αέρα. Η χρήση τους γίνεται σε οικιακό και βιομηχανικό επίπεδο. Η πιο συχνή χρήση τέτοιων συστημάτων είναι για την θέρμανση νερού οικιακής χρήσης μέσω ηλιακών θερμοσίφωνων. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από συλλέκτες ηλιακής ενέργειας με κατεύθυνση προς το νότο και κλίση από 30° έως 60° για καλύτερη απορρόφηση, μία δεξαμενή αποθήκευσης και τις σωληνώσεις. Εκτός από την παραγωγή ζεστού νερού, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη θέρμανση χώρων.

Με τον όρο φωτοβολταϊκό χαρακτηρίζεται κάθε διάταξη που περιέχει ΦΒ στοιχεία σε σειρά. Τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ) συστήματα αποθηκεύουν ηλιακή ακτινοβολία και έπειτα, τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή ηλεκτρισμό. Στις μέρες μας υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εφαρμογών των ΦΒ συστημάτων και έχουν τη δυνατότητα κάλυψης μεγάλου εύρους ισχύος. Αυτό σημαίνει πως έχουν κάλυψη ισχύος από φωτιστικά και άλλα είδη χαμηλής ισχύος έως ολόκληρων συγκροτημάτων και νησιών.

Όπως έχει προαναφερθεί, το 1954 οι Fuller, Pearson και Charin δημιούργησαν την πρώτη κατασκευή ΦΒ κυττάρου από πυρίτιο. Το 1956, η εταιρεία Hoffman ξεκίνησε την παραγωγή ΦΒ κυττάρου από κρυσταλλικό πυρίτιο με απόδοση από 5 έως 10%. Το κόστος που απαιτούνταν για την κατασκευή άγγιζε τα 1.000 δολάρια/Wp. Το 1958 άρχισε η χρήση ΦΒ στοιχείων σε διαστημικές εφαρμογές. Οι μελέτες των ΦΒ στοιχείων γινόντουσαν όλο και πιο συχνές και η εξέλιξη οδήγησε στη χρήση των ΦΒ συστημάτων και σε επίγειες εφαρμογές, όπως τροφοδότηση εγκαταστάσεων και συσκευών, αλλά και κατοικιών που δεν ήταν μέρος κάποιου ηλεκτρικού δικτύου.

Τη σημερινή εποχή, τα ΦΒ συστήματα από κρυσταλλικό πυρίτιο, τα οποία χρησιμοποιούνται σε διαστημικές εφαρμογές παρουσιάζουν βαθμό απόδοσης περίπου ίσο με 22%, ενώ εκείνα για βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές περίπου 14%. Αξίζει να σημειωθεί πως η θεωρητική τιμή των παραπάνω ΦΒ συστημάτων είναι περίπου ίση με 25%.

Το κόστος για συστήματα μικρής ισχύος, δηλαδή για οικιακή και βιομηχανική χρήση είναι περίπου ίσο με 4.500,00 €/kWp. Εάν τα συστήματα είναι μεγαλύτερης ισχύος το κόστος ελαττώνεται, καθώς αποτελεί συνάρτηση του μεγέθους του συστήματος. Αξιοσημείωτη μείωση κόστους, περίπου στο 70% ενός συστήματος μικρής ισχύος, παρουσιάζουν τα συστήματα άνω του ενός MWp. Εκτός από τα κόστη εγκατάστασης, τα ΦΒ συστήματα απαιτούν και κάποια ετήσια λειτουργικά κόστη, τα οποία φτάνουν έως το 1,5% της αρχικής επένδυσης.

Τα ΦΒ συστήματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες έχουν λάβει το όνομα τους από τον αντιστροφέα τάσης, και είναι οι εξής:

- Αυτόνομα συστήματα (stand-alone) ή εκτός δικτύου (off-grid),
- Συνδεδεμένα σε δίκτυο (grid-connected),

- Υβριδικά συστήματα (hybrid grid) με άμεση σύνδεση στο δίκτυο και υποστήριξη από συσσωρευτές (battery back-up).

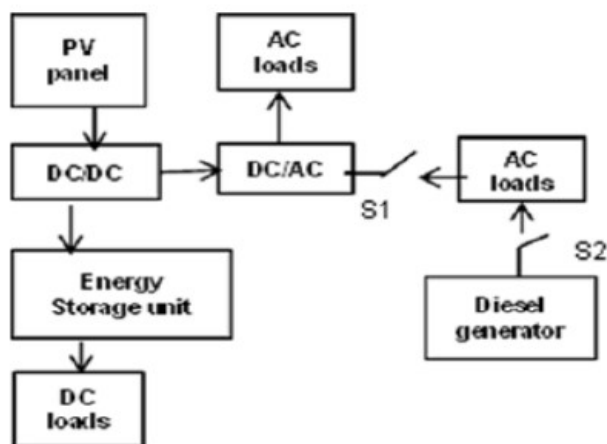
Οι τρεις αυτές κατηγορίες δημιουργήθηκαν πρώτα σε χερσαίο επίπεδο και ύστερα μελετήθηκαν στο υδάτινο περιβάλλον και κυρίως, πάνω σε πλοίο. Για την εφαρμογή σε πλοία είναι φανερό πως πρέπει να γίνουν κάποιες αλλαγές στα συστήματα καθώς δεν υπάρχει πάντα ο απαιτούμενος χώρος τοποθέτησης τους, τα ποσοστά υγρασίας είναι υψηλά και φυσικά, υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας.

#### **4.3.1 Αυτόνομα Φ/Β συστήματα - εκτός δικτύου (off-grid systems)**

Η βασική λειτουργία των ΦΒ συστημάτων εκτός δικτύου είναι η προσφορά της ενέργειας απευθείας στο φορτίο χωρίς να απαιτείται σύνδεση με το κύριο σύστημα ισχύος. Αυτό συμβαίνει σε εφαρμογές σε πλοία ενώ σε χερσαίες εγκαταστάσεις δεν γίνεται σύνδεση του συστήματος με το τοπικό δίκτυο. Κατά την έξοδο DC που διαθέτουν οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες γίνεται αποθήκευση της ενέργειας σε συσσωρευτές, δηλαδή μπαταρίες. Από εκεί, λοιπόν, οι μπαταρίες μπορούν να τροφοδοτήσουν με ενέργεια φορτία του πλοίου είτε συνεχούς είτε εναλλασσόμενου ρεύματος με τη χρήση αντιστροφών DC σε AC (Paulson, 2019).

Ενώ η ιδέα δημιουργίας ενός αυτόνομου συστήματος είναι καλή, η αποθήκευση της ενέργειας αποτελεί βασικό μειονέκτημα, καθώς αυξάνεται αρκετά το κόστος της επένδυσης. Εκτός από τους συσσωρευτές, μειονέκτημα αποτελεί και το ενδεχόμενο λειτουργίας του φορτίου σε χαμηλή τάση. Αυτό, για μεγάλο χρονικό διάστημα ενδέχεται να προκαλέσει απώλεια ισχύος του inverter (Sun, et al 2019).

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας της γεννήτριας, στην εικόνα 4-7 απεικονίζεται ένα σύστημα εκτός δικτύου του πλοίου Auriga Leader. Στο συγκεκριμένο σύστημα σε περίπτωση που η ισχύς των μπαταριών είναι χαμηλή, η γεννήτρια μπαίνει σε λειτουργία για την κάλυψη των απαιτούμενων αναγκών. Η χρήση της γεννήτριας μειώνει κατά πολύ την χωρητικότητα των συστοιχιών και σαφώς, επιδρά στη μείωση του κόστους κατασκευής του συστήματος.

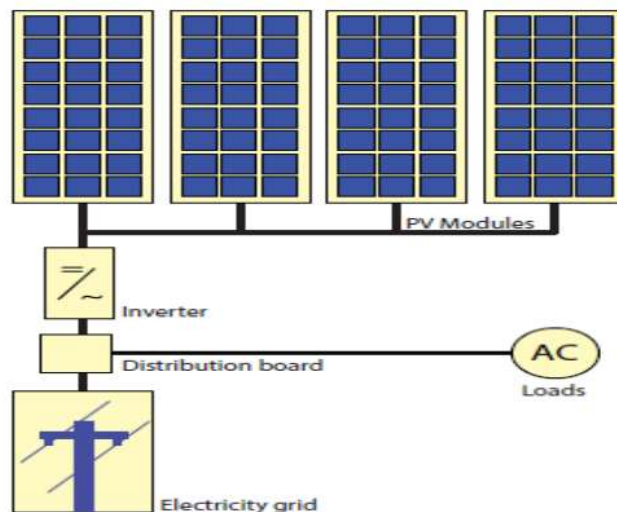


ΕΙΚΟΝΑ 4-7: Διάγραμμα αυτόνομου συστήματος πλοίου Auriga Leader. Πηγή: (Paulson, 2019)

#### 4.3.2 Φ/Β συστήματα συνδεδεμένα σε δίκτυο (grid-connected systems)

Στα συστήματα που συνδέονται με το δίκτυο χρησιμοποιούνται διαφορετικοί αντιστροφείς (inverters) από εκείνους που είναι στα εκτός δικτύου (off-grid) συστήματα. Όπως αναφέρθηκε, η ημιτονοειδής τάση του αντιστροφέα και κατά συνέπεια το πλάτος και η συχνότητα του, θα πρέπει να συμπίπτουν με εκείνα του δικτύου. Επίσης, κάθε αλλαγή και αστάθεια στο δίκτυο θα πρέπει να αντιμετωπίζεται με διακοπή της λειτουργίας του συστήματος.

Τα συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο (grid-connected) και χρησιμοποιούνται σε χερσαίες εφαρμογές δεν απαιτούν την χρήση μπαταριών για την αποθήκευση της ενέργειας. Αντιθέτως, σε εφαρμογές επί των πλοίων είναι απαραίτητη η χρήση συσσωρευτών (Paulson, 2019). Οι διακυμάνσεις της ισχύος ενδέχεται να επηρεάσουν το σύστημα και τη λειτουργία του, αλλά και τη γεννήτρια. Εάν οι διακυμάνσεις είναι συχνές και η διάρκεια τους είναι μεγάλη, τότε ακόμα και οι σύγχρονες γεννήτριες θα δυσκολευτούν στην διατήρηση σταθερής ισχύος και υπάρχει πιθανότητα υπερ-διέγερσης τους. Σε αυτές τις συνθήκες, η ισχύς θα παρουσιάσει σημαντική μείωση και αυξάνεται το ενδεχόμενο καταστροφής του ΦΒ συστήματος, και γι' αυτόν τον λόγο κρίνεται αναγκαία η χρήση μπαταριών. Έτσι, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (energy management system, EMS) του πλοίου θα μπορεί να ελέγχει την ισχύ εξόδου του συστήματος και να προσφέρει ασφαλή λειτουργία (Sun, et al 2020).



ΕΙΚΟΝΑ 4-8: Διάγραμμα ΦΒ συστήματος συνδεδεμένο με το δίκτυο. Πηγή: (Van Swaij, 2014)

#### 4.3.3 Υβριδικά Φ/Β συστήματα (hybrid-grid systems)

Τα υβριδικά ΦΒ συστήματα έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ενέργεια με την εκμετάλλευση δύο πηγών ενέργειας και άνω, όπως ηλιακή, αιολική και ενέργεια που προέρχεται από γεννήτρια. Συνήθως η διάταξη αξιοποιεί μία ανανεώσιμη πηγή και μία συμβατική. Σκοπός των υβριδικών συστημάτων είναι ο συνδυασμός διάφορων πηγών για την επίτευξη σταθερής και συνεχούς τροφοδοσίας ενέργειας. Ο συνδυασμός αυτός, συνήθως, είναι πιο φιλικός προς το περιβάλλον (4green, 2022).

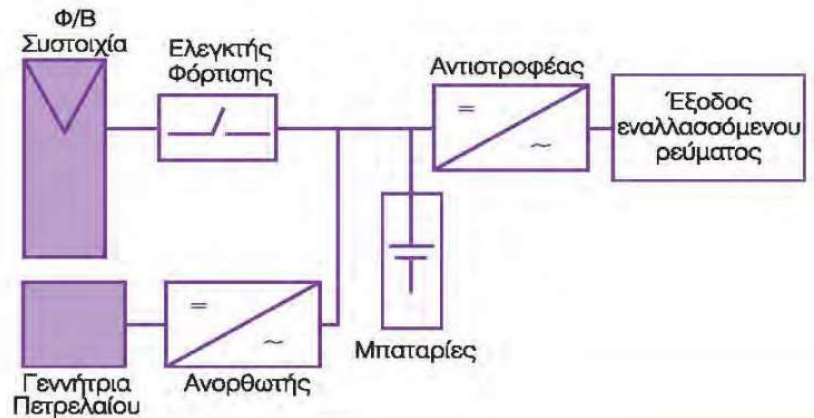
Επίσης, ένα χαρακτηριστικό των υβριδικών συστημάτων είναι πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως αυτόνομα συστήματα, είτε με σύνδεση τους στο δίκτυο και τη χρήση διακόπτη μετάβασης. Ο διακόπτης αυτός θα δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να λειτουργεί είτε με την κύρια πηγή είτε με τη συμβατική (Δούρος, 2021).

##### 4.3.3.1 Υβριδικά Φ/Β συστήματα με ή χωρίς σύνδεση στο δίκτυο

Τα υβριδικά συστήματα εκτός δικτύου παρουσιάζουν διαφορά στην ισχύ εξόδου καθώς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αύξηση και τη μείωση του φορτίου. Η ισχύς, λοιπόν, παρέχεται στο σύστημα από τους συσσωρευτές και τα ΦΒ στοιχεία. Το Battery Management System (BMS) έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της διαφοράς ισχύος που δημιουργείται μεταξύ ελεγκτή του φωτοβολταϊκού και αντιστροφέα. Η τριφασική έξοδος του εναλλασσόμενου ρεύματος υποβιβάζεται στον πίνακα διανομής ισχύος μέσω του μετασχηματιστή και στη συνέχεια τροφοδοτεί απευθείας το φορτίο.



Αντιθέτως, στο σύστημα που ο αντιστροφείας είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο η ισχύς είναι σταθερή. Οι συσσωρευτές πρέπει να εξισορροπούν τη διακύμανση της ισχύος εξόδου καθώς αυτή εναλλάσσεται. για την προστασία του συστήματος. Έτσι, στο σημείο όπου η τριφασική έξοδος συνδέεται με τον κύριο πίνακα του πλοίου, τοποθετείται μία συσκευή για να ελέγχει τη ροή.



ΕΙΚΟΝΑ 4-9: Απεικόνιση Υβριδικού Συστήματος.  
 Πηγή: (Προβατάς, 2017)

Το ΦΒ σύστημα της εικόνας διαθέτει φωτοβολταϊκά πλαίσια, inverter για τη μετατροπή του ρεύματος από DC σε AC και μπαταρίες με τον καταναλωτή. Εκτός από αυτά, το σύστημα θα πρέπει να διαθέτει και ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών, οι οποίοι έχουν στόχο την παροχή μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος και φυσικά, τη φόρτιση των συσσωρευτών. Η γεννήτρια που φαίνεται στην εικόνα 4-10 τοποθετείται για την ενίσχυση του συστήματος σε έκτακτες περιπτώσεις (Δούρος, 2021).

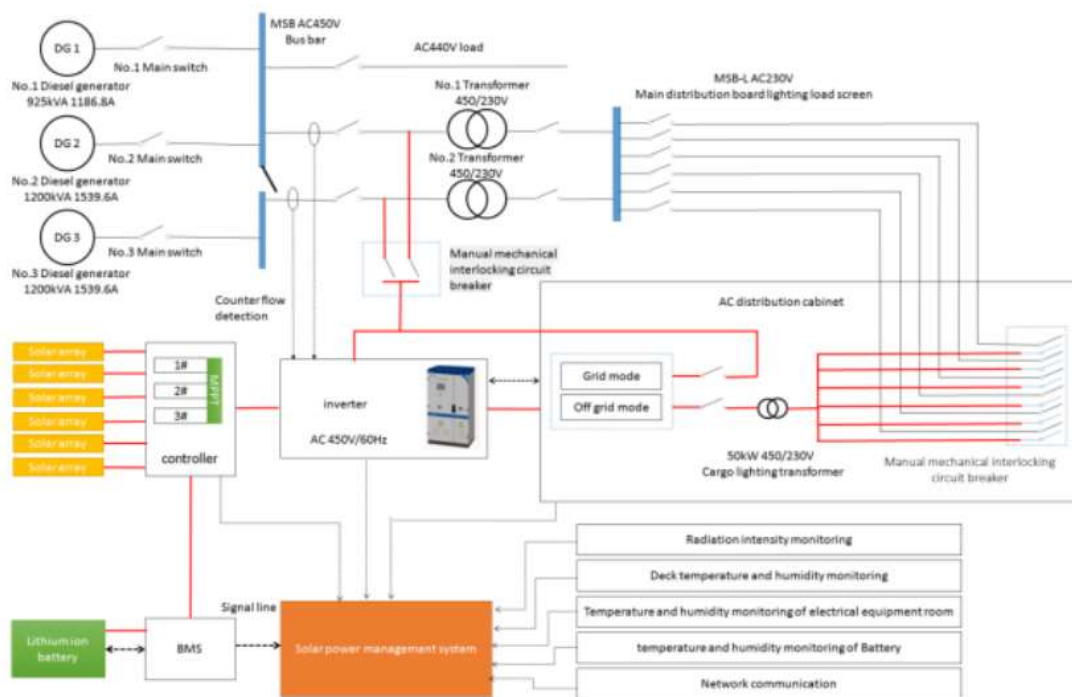


ΕΙΚΟΝΑ 4-10: Συνδεσμολογία ΦΒ συστήματος που περιέχει συσσωρευτές για την αποθήκευση ενέργειας, αντιστροφείας για την μετατροπή DC ρεύματος σε AC και ελεγκτές φόρτισης.

#### 4.3.3.2 Ηλεκτρική τροφοδοσία με ελλιπή Φ/Β ισχύ

Για ανεπαρκή ποσότητα ισχύος από τα Φ/Β συστήματα, αλλά και έλλειψη χωρητικότητας των μπαταριών για αρκετό χρονικό διάστημα, η απαιτούμενη ισχύς καλύπτεται μέσω του πλοίου, η οποία περνά από τον πίνακα διανομής ισχύος AC του συστήματος. Αφού ανακτηθεί η απαιτούμενη ακτινοβολία, ο αντιστροφέας ενεργοποιείται και η ενέργεια για τα φορτία λαμβάνεται μέσω του συστήματος των Φ/Β.

Εάν το σύστημα είναι απενεργοποιημένο για οποιονδήποτε λόγο, μεταξύ του αντιστροφέα και του πίνακα διανομής κλείνει ο διακόπτης και το σύστημα αποσυνδέεται πλήρως. Η ενέργεια που απαιτείται εκείνη τη χρονική περίοδο καλύπτεται από το πλοίο και τη γεννήτρια του (Sun, et al 2020).



ΕΙΚΟΝΑ 4-11: Διάγραμμα Υβριδικού ΦΒ συστήματος σε πλοίο.  
Πηγή: (Sun, et al 2020)

#### 4.3.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των ΦΒ συστημάτων

Ως βασικό μειονέκτημα των ΦΒ συστημάτων μπορεί να θεωρηθεί το υψηλό κόστος κατασκευής της εγκατάστασης, το οποίο ακόμα και με την συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας παραμένει στα ίδια επίπεδα. Ωστόσο, το κόστος αυτό χρειάζεται λιγότερο από 8 χρόνια για να αποσβεστεί πλήρως. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η ΦΒ εγκατάσταση και η ισχύς της, τόσο πιο σύντομα επιτυγχάνεται η απόσβεση της. Άλλο ένα μειονέκτημα είναι η υποχρέωση καθαρισμού των ΦΒ πλαισίων για την απομάκρυνση της σκόνης και άλλων ακαθαρσιών, τα οποία οδηγούν στη μείωση του βαθμού απόδοσης του συστήματος. Τέλος, η ανάγκη αποθήκευσης της ενέργειας που παράγεται από τα ΦΒ συστήματα απαιτεί χώρο και φυσικά, ενδέχεται να αυξήσει κατά πολύ το κόστος κατασκευής της διάταξης.

Τα πλεονεκτήματα των ΦΒ συστημάτων είναι τα εξής:

- Οι εκπομπές ρύπων κατά τη λειτουργία τους είναι μηδενικοί. Ένα ΦΒ σύστημα ισχύος 1 kW αποτρέπει την έκλυση άνω των 1.300 kg CO<sub>2</sub> ανά έτος, καθώς με τα σημερινά δεδομένα στην Ελλάδα, κάθε ηλιακή κιλοβατώρα ισοδυναμεί με 1 kg CO<sub>2</sub>. Αυτό ισοδυναμεί με την ποσότητα που απορροφούν 200 δέντρα. Εκτός από την προστασία και την ελάττωση των ρύπων διοξειδίου του άνθρακα, τα ΦΒ συστήματα μειώνουν και τους ρύπους από το διοξείδιο του θείου και διάφορα οξείδια του αζώτου.
- Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή και το κόστος της είναι μηδενικό.
- Η απόδοση τους σε μεγάλο υψόμετρο αυξάνεται, διότι η έκθεση στον ήλιο είναι αυξημένη και η θερμοκρασία πλησιάζει εκείνη των ιδανικών συνθηκών.
- Η διάρκεια ζωής τους είναι τουλάχιστον 25 χρόνια.
- Η λειτουργία τους είναι αθόρυβη.
- Οποιαδήποτε στιγμή διατίθεται δυνατότητα επέκτασης της κατασκευής.
- Η εγκατάσταση τους σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις, όπως στέγες, πλοία, πρόσοψη κτιρίων, είναι εφικτή.
- Το κόστος συντήρησης τους είναι ελάχιστο.
- Σε περίπτωση βλάβης ή προβλήματος, η επισκευή γίνεται σχετικά εύκολα, καθώς το σύστημα διαθέτει σπονδυλωτή σύνδεση.
- Οι πρώτες ύλες κατασκευής των ΦΒ στοιχείων είναι εν αφθονία και αυτό διευκολύνει την συνεχή παραγωγή τους.

- Προσφέρουν άριστη λειτουργία ως αυτόνομα συστήματα. Επίσης, μπορούν να συνδεθούν και με άλλες πηγές ενέργειας, είτε ανανεώσιμες, είτε συμβατικές και να λειτουργούν ως υβριδικά συστήματα και ως συσσωρευτές ενέργειας. Επιπλέον, η δυνατότητα σύνδεσης του απευθείας με το δίκτυο ηλεκτροδότησης προσφέρει ευελιξία στην πώληση της παραπάνω ενέργειας που παράγεται από τα ΦΒ συστήματα.
- Στις ημέρες που απαιτείται μεγάλη παραγωγή ενέργειας, δηλαδή κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες, τα ΦΒ συστήματα παράγουν τη μέγιστη ενέργεια. Αυτό βοηθά στην ενίσχυση του δικτύου και δίνει τη δυνατότητα αποφυγής μπλακ άουτ και στη μείωση των αιχμών φορτίου. Έτσι, η επίλυση αυτών των προβλημάτων στηρίζουν αρκετά την εθνική οικονομία καθώς ένα μπλακ άουτ στοιχίζει αρκετά εκατομμύρια ευρώ (Αιολική Γη, 2022).
- Τα ΦΒ συστήματα λόγω της ποικιλίας χρωμάτων, της αντοχής τους και της καλαισθησίας τους, μπορούν να αντικαταστήσουν διάφορα δομικά υλικά, όπως τις κεραμοσκεπές. Εκτός από τα συνηθισμένα ΦΒ πλαίσια, διατίθενται και διαφανή ΦΒ, τα οποία προσφέρουν θερμομονωτικές ιδιότητες και μειώνουν τις θερμικές απώλειες κατά 15-30%.
- Η ισχύς τους είναι αρκετά μεγαλύτερη συγκριτικά με το βάρος της κατασκευής και αυτό διευκολύνει τις διαστημικές εφαρμογές.

Από αυτά που αναφέρθηκαν, γίνεται αντιληπτό πως τα πλεονεκτήματα των ΦΒ συστημάτων υπερτερούν σε σχέση με τα μειονεκτήματα τους. Το ευρύ κοινό, λοιπόν, δικαιολογημένα έχει στρέψει το ενδιαφέρον του, στη χρήση των ανανεώσιμων πηγών και κυρίως στην εκμετάλλευση του ήλιου για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών και στη χρήση ΦΒ συστημάτων.

#### 4.4 Αντιστροφείς DC - AC (inverters)

Ο αντιστροφέας τάσης (Inverter) αποτελεί έναν μηχανισμό ισχύος μετατροπής του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Για ισχύ άνω των 1,5 kW<sub>P</sub> χρησιμοποιείται μονοφασικός μετατροπέας, καθώς ο καταναλωτής της διάταξης είναι AC. Σε ισχύ άνω των 15 kW<sub>P</sub> χρησιμοποιείται τριφασικός μετατροπέας. Μεταξύ των παραπάνω τιμών, ο μετατροπέας μπορεί να είναι είτε μονοφασικός είτε τριφασικός.

Για εγκαταστάσεις ΦΒ συστημάτων που συνδέονται κατευθείαν με το δίκτυο, η τάση εξόδου, αλλά και η συχνότητα ημιτονοειδούς μορφής θα πρέπει να συμπίπτουν με εκείνες του δικτύου. Η συχνότητα είναι ίση με 50 Hz (Δέρβος, 2013).

Ο αντιστροφέας διαθέτει μία κρίσιμη τιμή ισχύος, στην οποία όταν το ποσό της ενέργειας μειωθεί σε μεγάλο βαθμό, μπαίνει σε κατάσταση αδρανοποίησης (sleep). Αυτό συμβαίνει συνήθως, την χρονική στιγμή που ο ήλιος δύει και έπειτα. Για να μην διακοπεί πλήρως η λειτουργία του συστήματος και για την μερική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του, ο αναστροφέας έχει την ιδιότητα επικοινωνίας με το σύστημα. Οι ενεργειακές ανάγκες απαιτούν περίπου το 2% της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα και όταν ανατείλει ο ήλιος, η λειτουργία του συστήματος ανακτάται.

Αξίζει να αναφερθεί πως η διάρκεια ζωής ενός τέτοιου μηχανισμού κυμαίνεται μεταξύ 5 και 10 έτη. Η συγκεκριμένη διάρκεια ζωής ενδέχεται να επηρεαστεί αρνητικά λόγω υψηλής θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, αλλά και ύπαρξη υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Έτσι, απαιτείται τακτικός έλεγχος και διατήρηση των κατάλληλων ατμοσφαιρικών συνθηκών.

Ένα χαρακτηριστικό των αντιστροφέων που δεν πρέπει να αμεληθεί είναι η ανθεκτικότητά τους σε υπερφορτώσεις. Ενδέχεται κατά τη χρήση τους να υπάρξει απαίτηση για μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος στο σημείο εισόδου DC και αυτό να οδηγήσει σε υπερφόρτωση του συστήματος κατά 10% για διάρκεια έως και 10 λεπτά.

Η απόδοση του αντιστροφέα σε κατάσταση λειτουργίας δίνεται από τον τύπο 4-8:

$$n = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (4-8)$$

Όπου, P<sub>AC</sub> και P<sub>DC</sub> η ηλεκτρική ισχύς AC και η ηλεκτρική ισχύς DC αντίστοιχα.

Γίνεται αντιληπτό πως η ισχύς λειτουργίας επηρεάζει την απόδοση, καθώς η αύξηση της οδηγεί σε αύξηση της απόδοσης, ενώ η μείωση της συγκριτικά με την ονομαστική ισχύ μειώνει την απόδοση. Εάν η ισχύς λειτουργίας αγγίζει τιμές κάτω του 20% της ονομαστικής, ο βαθμός απόδοσης παρουσιάζει έντονη μείωση. Ωστόσο, στην Ευρώπη οι κατασκευαστές προτείνουν έναν διαφορετικό τύπο υπολογισμού της απόδοσης.

$$n = 0.03 \cdot n_{5\%} + 0.06 \cdot n_{10\%} + 0.13 \cdot n_{20\%} + 0.1 \cdot n_{30\%} + 0.48 \cdot n_{50\%} + 0.2 \cdot n_{100\%}$$

(4-9)

Αυτός ο τύπος βοηθά την σύγκριση των αντιστροφών με ημιτονοειδή μορφή στην έξοδο της τάσης. Έτσι, η απόδοση του αντιστροφέα θα είναι καλύτερη για χαμηλότερες ονομαστικές τιμές τάσης (Δούρος,2021).

Επιπλέον, ο αντιστροφέας τάσης θα πρέπει να αποτελείται από εύκολες συνδέσεις, καθώς ενδέχεται να χρειαστεί κάποια τροποποίηση ή αναβάθμιση του συστήματος κατά τη χρήση του. Ακόμα, απαιτείται γαλβανική απομόνωση του κυκλώματος από τα κυκλώματα ελέγχου και προστασίας. Αυτό θα παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης του αντιστροφέα με διάφορα ψηφιακά συστήματα.

Παραπάνω αναφέρθηκε η μετατροπή του αντιστροφέα από μονοφασικό σε τριφασικό. Για να επιτευχθεί αυτή η μετατροπή, ο inverter θα πρέπει να επαναπρογραμματίζεται χωρίς να χρειαστεί κάποια αποσυναρμολόγηση του συστήματος. Τέλος, η ανάγκη για διακοπή της λειτουργίας σε περίπτωση βραχυκυκλώματος ή άλλου προβλήματος είναι αναγκαία, καθώς και η ένδειξη του σφάλματος για την ταχύτερη επίλυση του προβλήματος (GreenSystem et al 2022).

## 4.5 Ηλεκτρικός συσσωρευτής

Η παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την χρονική περίοδο που διανύεται και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Έτσι, κατά τη διάρκεια της νύχτας και σε συνεφιασμένες ημέρες δεν υπάρχει αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια εξακολουθεί να υπάρχει.

Οι συσσωρευτές έχουν την ιδιότητα σύνδεσης μεταξύ τους με σκοπό τη δημιουργία πακέτων. Μπορούν να συνδεθούν και με τους δύο τρόπους σύνδεσης και η περαιτέρω σύνδεση των πακέτων οδηγεί στη δημιουργία συστήματος συσσωρευτών. Τα συστήματα αυτά εξαρτώνται από τις ενεργειακές ανάγκες των φορτίων. Τα ΦΒ συστήματα, τα οποία είναι συνδεδεμένα σε δίκτυο ηλεκτρικής παροχής λαμβάνουν από εκεί την απαιτούμενη συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια και σε περίπτωση παραγωγής περισσότερης ενέργειας από την επιθυμητή, την διοχετεύουν πίσω σε αυτό. Στα αυτόνομα ΦΒ συστήματα δεν υπάρχει δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας και έτσι, συνίσταται η χρήση ηλεκτρικών συσσωρευτών. Σκοπός τους είναι η αποθήκευση ενός μεγάλου μέρους ενέργειας και η τροφοδοσία των φορτίων όταν δεν υπάρχει παραγωγή από τα ΦΒ πλαίσια (Πέρδιος, 2011).

Μία βασική παράμετρος επιλογής συσσωρευτών είναι οι ημέρες αυτοδυναμίας που θα διαθέτει το σύστημα. Μία ιδανική αυτοδυναμία είναι 3 – 10 ημέρες. Επιπλέον, θα πρέπει να μελετηθεί η τάση του συστήματος και ο βαθμός εκφόρτισης των μπαταριών (Depth Of Discharge, DOD), τα οποία καθορίζουν τη διάρκεια ζωής τους. (Δούρος, 2021)

### 4.5.1 Κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Τα κύρια χαρακτηριστικά των συσσωρευτών είναι η ονομαστική τάση ( $V_B$ ), η οποία καθορίζει τη συνδεσμολογία του συστήματος και η χωρητικότητα (C).

Η ονομαστική τάση των πόλων εκφράζεται με την έννοια της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ). Ο προσδιορισμός της ονομαστικής τάσης μπορεί να γίνει μέσω του πίνακα 4-1. Οι ρυθμιστές φορτίου, που συνδέονται με τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές θα πρέπει να διαθέτουν ίδια τάση εξόδου με την τάση εισόδου των συσσωρευτών (Πέρδιος, 2011).

Πίνακας 4-1 Ονομαστική τάση συσσωρευτών ανάλογα με την ισχύ αιχμής ΦΒ συστοιχίας.  
 Πηγή: (Πέρδιος, 2011)

Ισχύς αιχμής ΦΒ συστοιχίας $P_{p\sigma}$	Ονομαστική τάση συσσωρευτών $V_B$
0 – 0,5 kWp	12 V
0,5 – 3 kWp	24
3 – 10 kWp	48
>10 kWp	>48 V

Η ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών σε Ah αποτελεί το ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει. Η ονομαστική χωρητικότητα δίνεται από το γινόμενο της έντασης του ρεύματος του συσσωρευτή επί τις ώρες που απαιτείται για την εκφόρτιση του, δηλαδή:  $C = I \cdot n_h$

Η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει ο συσσωρευτής δίνεται από το γινόμενο της χωρητικότητας του συσσωρευτή επί την ονομαστική του τάση, δηλαδή  $E_B = C \cdot V_B$  [Kw].

Όπως και στα φωτοβολταϊκά, έτσι και στους συσσωρευτές ανάλογα με την συνδεσμολογία τους η τάση διαφοροποιείται. Έτσι, στην σε σειρά σύνδεση δύο όμοιων συσσωρευτών, γνωρίζουμε πως η τάση διπλασιάζεται, ενώ στην παράλληλη σύνδεση η τάση παραμένει ίδια.

Επιπλέον, η ονομαστική χωρητικότητα εξαρτάται από τις διαδοχικές φορτίσεις και εκφορτίσεις των συσσωρευτών, δηλαδή από τον κύκλο λειτουργίας  $N_K$ . Το ποσό της ενέργειας που δίνει η μπαταρία σε κάθε εκφόρτιση ονομάζεται βάθος εκφόρτισης και συμβολίζεται με  $\beta_{εκ}$ . Επίσης, το γινόμενο κύκλου και βαθμού εκφόρτισης αποτελεί σταθερό αριθμό. Για εκείνους τους συσσωρευτές που το βάθος εκφόρτισης φτάνει το 0,3 υπολογίζεται πως η διάρκεια ζωής τους ξεπερνά τη δεκαετία.

Πίνακας 4-2: Βάθος εκφόρτισης ανάλογα με τις ημέρες αυτονομίας του συστήματος.  
 Πηγή: (Πέρδιος, 2011)

Βάθος εκφόρτισης $\beta_{εκ}$	Ημέρες αυτονομίας συστήματος
0,4	1 – 3
0,6	4 – 6
0,8	7 - 10



Με την πάροδο των ετών και κατά συνέπεια την αύξηση των κύκλων λειτουργίας για σταθερό βαθμό εκφόρτισης παρατηρείται μείωση της ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας. Αυτή η μείωση αποτελεί μέρος της γήρανσης του συσσωρευτή και εκφράζεται μέσω του συντελεστή γήρανσης  $\sigma_{\gamma B} = 0,8$ . Το 0,8 σημαίνει πως, στο τέλος της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή η χωρητικότητα είναι στο 80% της αρχικής. Ένας παράγοντας που ενισχύει τη γήρανση των συσσωρευτών είναι η έκθεση τους σε υψηλές θερμοκρασίες, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην αυτοεκφόρτιση της μπαταρίας. Επιπλέον, οι χαμηλές θερμοκρασίες οδηγούν στην μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στις πολύ χαμηλές τιμές της θερμοκρασίας καθώς ενδέχεται να οδηγήσουν σε πάγωμα του ηλεκτρολύτη. Η συνθήκη, που μπορεί να διατηρήσει την κατάσταση της μπαταρίας σε φυσιολογικά επίπεδα και να αυξήσει την χωρητικότητα της είναι η ήπια φόρτιση, δηλαδή η αύξηση της περιόδου φόρτισης έως το μέγιστο όριο (Πέρδιος, 2011).

#### 4.5.2 Βαθμός απόδοσης ηλεκτρικού συσσωρευτή

Κατά τη φόρτιση ενός συσσωρευτή το 10 έως 20% της ενέργειας, που προσφέρεται σε αυτόν χάνεται για να μπορεί να θερμανθεί ο ηλεκτρολύτης.

Ο βαθμός απόδοσης  $n_B$  του συσσωρευτή δίνεται μέσω της σχέσης 4-10:

$$n_B = \frac{E_{εκ}}{E_{\varphi}} = 0,8 - 0,85 \quad (4-10)$$

$E_{εκ}$  [ J ]: ενέργεια που δίνεται κατά την εκφόρτιση

$E_{\varphi}$  [ J ]: ενέργεια που προσφέρεται κατά την φόρτιση (Πέρδιος, 2011).

#### 4.5.3 Κατηγορίες ηλεκτρικών συσσωρευτών ΦΒ συστήματος

Ο ηλεκτρικός συσσωρευτής διαθέτει ζεύγη μεταλλικών ηλεκτροδίων (στοιχεία), τα οποία μεταξύ τους διαθέτουν σύνδεση σε σειρά. Η μορφή τους θυμίζει πλακίδια και είναι τοποθετημένα μέσα σε διάλυμα ηλεκτρολύτη (Πέρδιος, 2011). Οι πρώτες μπαταρίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν νικελίου μετάλλου (NiMH), νικελίου καδμίου (NiCd) και μολύβδου οξέος (Lead Acid). Η μη ανακύκλωση τους και η τοξικότητα τους προς το περιβάλλον οδήγησαν στον περιορισμό της χρήσης τους (Kobougias, 2013).

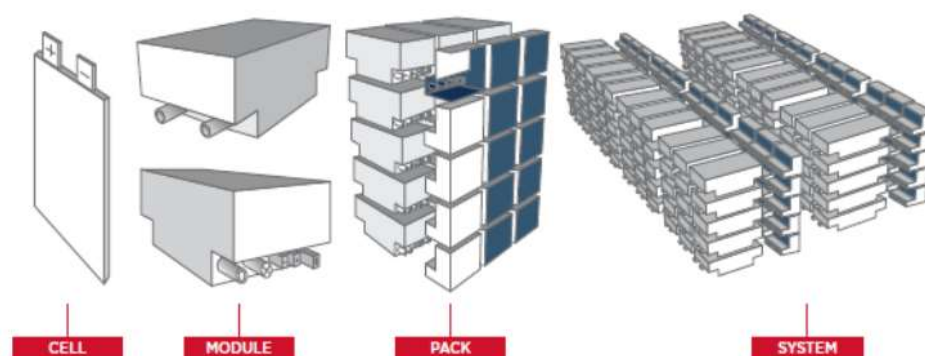
Τη σημερινή εποχή υπάρχουν εναλλακτικές μπαταρίες, οι οποίες παρουσιάζουν χαρακτηριστικά προστασίας του περιβάλλοντος. Στις θαλάσσιες εφαρμογές τοποθετούνται μπαταρίες ιόντων λιθίου (lithium – ion batteries), υπερπυκνωτές (supercapacitors) και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Οι συσσωρευτές που θα μελετηθούν εκτενέστερα είναι εκείνοι των ιόντων λιθίου, καθώς χρησιμοποιούνται ευρέως και παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας (Kobougias, 2013).

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ένα είδος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Κατά την φόρτιση, τα ιόντα λιθίου κινούνται από το θετικό στο αρνητικό ηλεκτρόδιο και κατά την εκφόρτιση εκτελούν την αντίθετη πορεία. Τα βασικά στοιχεία που διαθέτει η μπαταρία ιόντων λιθίου είναι το ζεύγος ηλεκτροδίων και ο ηλεκτρολύτης, που δίνει τη δυνατότητα της ιονικής μετακίνησης (Wikipedia, 2022).

Οι πρώτες μπαταρίες λιθίου άρχισαν να χρησιμοποιούνται στα μέσα της δεκαετίας του 90 και συγκεκριμένα, η πρώτη μπαταρία λιθίου κυκλοφόρησε το 1991 από τους Sony και Asahi Kasei. Αρχικά, οι μπαταρίες λιθίου λόγω της χαμηλής τους ισχύος χρησιμοποιήθηκαν σε συστήματα που απαιτούσαν μικρά ποσά ενέργειας. Το θετικό χαρακτηριστικό τους ήταν η μεγάλη διάρκεια ζωής που διέθεταν. Στην πορεία, με την εξέλιξη της τεχνολογίας δημιουργήθηκαν συσσωρευτές ιόντων λιθίου με μεγαλύτερη χωρητικότητα και μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος. Σταδιακά, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιήθηκαν σε εφαρμογές, όπου οι χημικές μπαταρίες ήταν αδύνατον να χρησιμοποιηθούν. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές λάμβαναν χώρα σε ηλεκτρικά οχήματα, σε δορυφόρους και σε διάφορες εγκαταστάσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επιπλέον, η λειτουργία των συγκεκριμένων μπαταριών εξαρτάται από κάποιες παραμέτρους, όπως τα χαρακτηριστικά των ρυθμιστών φόρτισης, την ένταση του ρεύματος και την τάση.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου απαρτίζονται από κελιά, τα οποία είναι είτε σε σειρά είτε παράλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η χρήση των κελιών εξαρτάται από τις ενεργειακές ανάγκες που πρέπει να καλυφθούν. Αυτό σημαίνει πως, για μικρή κάλυψη ενέργειας ενδέχεται να αποφορτιστεί μόνο ένα κελί του συσσωρευτή και για μεγάλη κάλυψη να χρειάζονται πολλά ή και όλα τα κελιά της μπαταρίας. Οι μπαταρίες, εκτός από τα στοιχεία που ήδη έχουν αναφερθεί, διαθέτουν επιπλέον συστήματα για την θέρμανση και ψύξη του συσσωρευτή, για τον έλεγχο φόρτισης και εκφόρτισης του, αλλά και για την ασφάλεια του

και την αποφυγή βλαβών. Η συσκευή που βοηθά στην ασφάλεια και την ομαλή λειτουργία των συσσωρευτών ιόντων λιθίου ονομάζεται BMS (Battery Management System).



ΕΙΚΟΝΑ 4-12: Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Πηγή: (Δούρος, 2021)

Το κόστος των συσσωρευτών ιόντων λιθίου είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σύγκριση με εκείνο των συμβατικών συσσωρευτών. Παρ' όλα αυτά, αποτελεί το μοναδικό κύριο μειονέκτημα τους, καθώς παρουσιάζουν αξιοσημείωτα και ποικίλα πλεονεκτήματα, τα οποία δικαιολογούν και το αυξημένο κόστος τους. Μερικά από αυτά είναι τα κάτωθι:

- Ενεργειακή πυκνότητα: Το βασικό πλεονέκτημα των συσσωρευτών ιόντων λιθίου είναι η υψηλή τους ενεργειακή πυκνότητα και η μεγαλύτερη χωρητικότητα που διαθέτουν συγκριτικά με τις συνηθισμένες μπαταρίες. Σε εφαρμογές υψηλής ισχύος οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου θεωρούνται ιδανικές επιλογές, καθώς διαθέτουν χαμηλή αντίσταση.
- Ρυθμός φόρτισης και ταχύτητα εκφόρτισης: Ο ρυθμός εκφόρτισης των συσσωρευτών ιόντων λιθίου θεωρείται μικρότερος σε σχέση με εκείνον των κλασσικών συσσωρευτών. Επιπλέον, η φόρτιση καθορίζεται από την εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή η οποία είναι χαμηλή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των απωλειών και την επίτευξη καλύτερου χρόνου φόρτισης.
- Κύκλος ζωής: Ο κύκλος ζωής των συσσωρευτών εξαρτάται από το βάθος εκφόρτισης. Οι συσσωρευτές λιθίου διαθέτουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τους υπόλοιπους συσσωρευτές, αφού το χαμηλό τους βάθος εκφόρτισης οδηγεί σε αύξηση της διάρκειας ζωής (Πέρδιος, 2011).

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

ΕΙΚΟΝΑ 4-13: Χαρακτηριστικά μπαταριών λιθίου συγκριτικά με διαφορετικές τεχνολογίες. Πηγή: (Δούρος, 2021)

#### 4.5.4 Μέτρα ασφαλείας για την ομαλή λειτουργία ηλεκτρικών συσσωρευτών

Για την ομαλή λειτουργία των συσσωρευτών κρίνεται αναγκαία η λήψη μερικών μέτρων ασφαλείας. Για συσσωρευτές που εφαρμόζονται σε πλοία, τα μέτρα ασφαλείας θα πρέπει να τηρούνται στο 100% καθώς οι θερμοκρασίες στα διάφορα καταστρώματα υπερβαίνουν τις ιδανικές τιμές λειτουργίας των συσσωρευτών και για τους χώρους ενδιαίτησης θα πρέπει να αποκλειστεί το ενδεχόμενο πυρκαγιάς. Οι παραπάνω συνθήκες καθιστούν αναγκαία την υποχρεωτική και συχνή επιθεώρηση του συστήματος.

Δύο από τα κύρια μέτρα ασφαλείας ΦΒ συστημάτων που διαθέτουν ηλεκτρικούς συσσωρευτές και βρίσκουν εφαρμογή σε πλοία είναι τα παρακάτω:

- Στον χώρο των συσσωρευτών θα πρέπει να τοποθετηθεί σύστημα πυρόσβεσης και συγκεκριμένα επταφθοροπροπάνιο (Sun, et al., 2019).
- Για την διατήρηση της ιδανικής θερμοκρασίας λειτουργίας συσσωρευτών απαιτείται σύστημα εξαερισμού. Η συνηθισμένη θερμοκρασία λειτουργίας είναι από 0 °C έως 45 °C (Sun, et al., 2019).

## 4.6 Καλωδίωση ΦΒ συστήματος

Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την καλωδίωση που θα χρησιμοποιηθεί στο ΦΒ σύστημα είναι τρεις. Αρχικά θα πρέπει να είναι γνωστό το είδος του ρεύματος που ρέει στους κλάδους, δηλαδή AC ή DC, η τάση του κάθε κλάδου και τέλος η πτώση τάσης στα άκρα των αγωγών. Οι τύποι που βοηθούν στον υπολογισμό της διατομής των καλωδίων για διάφορες μορφές ρεύματος φαίνονται παρακάτω.

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\sigma \cdot \Delta V} \cdot 10^6, \text{ για ρεύμα DC} \quad (4-11)$$

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I \cdot \cos\varphi}{\sigma \cdot \Delta V} \cdot 10^6, \text{ για μονοφασικό AC} \quad (4-12)$$

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot L \cdot I \cdot \cos\varphi}{\sigma \cdot \Delta V} \cdot 10^6, \text{ για τριφασικό AC} \quad (4-13)$$

Όπου,

S: Η ελάχιστη διατομή αγωγού [mm<sup>2</sup>].

L: Το μήκος του κλάδου [m].

I: Το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό [A].

σ: Η ειδική αγωγιμότητα του υλικού που μελετάται [ $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ ].

$\Delta V$ : Η μέγιστη πτώση τάσης για όλο το μήκος του αγωγού.

cosφ: Ο συντελεστής ισχύος του αντιστροφέα, ο οποίος παίρνει τιμές από 0,8 έως 1.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή πτώσης τάσης ( $\Delta V$ ) είναι από τα πιο βασικά στοιχεία που θα πρέπει να υπολογίζονται σε κάθε σημείο του κλάδου, καθώς υπολογίζεται από την τάση λειτουργίας του σημείου προς το συνιστάμενο ποσό απωλειών. Οι κύριες περιοχές που παρουσιάζουν διαφορετικά ποσοστά απωλειών είναι οι εξής:

- Ο κλάδος μεταξύ ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών και ΦΒ συστοιχία. Το καλώδιο της περιοχής εκείνης είναι διπολικό και για προστασία από υψηλή θερμοκρασία και βλάβες προστατεύεται με ειδικό σωλήνα. Η πτώση τάσης είναι ίση με 3% επί την τάση που εμφανίζεται στην περιοχή.
- Ο κλάδος μεταξύ ρυθμιστή φόρτισης και σύστημα συσσωρευτών. Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται είναι δύο μονοπολικά και η τιμή της πτώσης τάσης είναι ίση με 2 έως 3% επί την τάση που εμφανίζεται στην περιοχή.

- Ο κλάδος μεταξύ περιοχής κυκλώματος και αντιστροφή DC-AC. Εξαιτίας των υψηλών κινδύνων της περιοχής προβλέπεται η χρήση καλωδίων με μονωτικό υλικό. Η τιμή της πτώσης τάσης είναι περίπου ίση με το 1% επί την τάση που εμφανίζεται στην περιοχή. (Δέρβος, 2013).

## 4.7 Συμπεράσματα

Οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι αρκετά δυσμενείς συγκριτικά με εκείνες στο χερσαίο. Έτσι, οι εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων στα πλοία θα πρέπει να ανταποκρίνονται πλήρως και η λειτουργία τους να μην επηρεάζεται από τα υψηλά ποσοστά υγρασίας, το αλάτι και τους δυνατούς ανέμους. Για να αποφευχθεί η διάβρωση τους απαιτείται η εξωτερική τους κάλυψη με προστατευτικές επιστρώσεις και γυαλί υψηλής αντοχής. Επιπλέον, λόγω ισχυρών ανέμων, προτείνεται η τοποθέτηση τους με κλίση μηδέν μοιρών και σε βάσεις που να μην απέχουν πολύ από την επιφάνεια του καταστρώματος.

Ενώ η ιδέα τοποθέτησης φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς την ύπαρξη συσσωρευτών, το οποίο θα τροφοδοτεί με ενέργεια όσο μπορεί να παράγει, φαίνεται αρκετά ενδιαφέρουσα και οικονομική, στα πλοία δεν προτείνεται. Λόγω της κίνησης του πλοίου παρουσιάζεται διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ΦΒ σύστημα και έτσι, σε συνδυασμό με τον μειωμένο χώρο, δημιουργείται αστάθεια στην ισχύ που τροφοδοτεί τα φορτία. Αυτή η αστάθεια μπορεί να προκαλέσει βλάβες στο δίκτυο του πλοίου, αλλά και στους αντιστροφείς, οι οποίοι λειτουργούν σε συγκεκριμένη τάση. Έτσι, για την αποφυγή τέτοιου είδους προβλημάτων γίνεται χρήση συσσωρευτών, οι οποίοι παρέχουν στο σύστημα σταθερή τιμή τάσης.

Η επιλογή αυτόνομου ή υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος γίνεται με βάση τις ανάγκες λειτουργίας του πλοίου. Συνήθως για μεγάλα πλοία, λόγω απαίτησης μεγάλων ποσών ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν ως βοηθητική ενέργεια, η οποία επιδιώκει στην εξοικονόμηση μερικής ποσότητας καυσίμου. Επιπλέον, τα ΦΒ συστήματα θα πρέπει να υπακούν πλήρως στους κανόνες ασφαλείας και να μελετηθούν λεπτομερώς ώστε να αποφευχθεί τυχόν πρόβλημα στη λειτουργία του πλοίου. Τέλος, οι συσσωρευτές πρέπει να τοποθετούνται σε χώρο με εξαερισμό και με φυσιολογικά ποσοστά υγρασίας.

## 4.8 Βιβλιογραφικές πηγές

Δέρβος, Κ. Θ., (2013). Φωτοβολταϊκά συστήματα από τη θεωρία στην πράξη. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Δούρος Ν., (2021). Μελέτη εγκατάστασης εναλλακτικής μορφής ενέργειας σε πλοίο με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων. (Αδημοσίευτη Πτυχιακή Εργασία). Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

Κυνηγόπουλος, 2016. Μελέτη της επίδρασης του φορτίου και των περιβαλλοντικών συνθηκών στο θερμοκρασιακό πεδίο διαφόρων τύπων και διατομών εναέριων αγωγών. (Διπλωματική Εργασία). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Πέρδιος, Σ. (2011). Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις. Αθήνα: Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ – 4Μ.

Προβατάς, 2017. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ. (Διπλωματική Εργασία). Πανεπιστήμιο Πειραιώς.

4green, 2022. Υβριδικά συστήματα για μέγιστη αυτονομία. Ανακτήθηκε Ιούνιο 26, 2022 από <https://www.4green.gr/news/data/diafora/90062.asp>

Cres, 2022. Ηλιακός Χώρος (Θερμοκήπιο). Ανακτήθηκε Ιούνιο 24, 2022 από [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/pathitika\\_iliaka\\_systimata\\_emmeso\\_kerdos\\_ilia\\_kos\\_xoros.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/pathitika_iliaka_systimata_emmeso_kerdos_ilia_kos_xoros.htm).

GreenSystem, 2022. Αντιστροφείς τάσης (Inverters). Ανακτήθηκε Ιούνιο 29, 2022 από <https://www.fotovoltaika-systems.gr/fotovoltaika-inverters.html>.

Jager, K., Isabella, O., Smets, A. H. M., Van Swaij, 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.

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](http://www.ijstr.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), 55-56

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

Wikipedia, 2022. Μπαταρία ιόντων λιθίου. Ανακτήθηκε Ιούνιο 29, 2022 από <https://el.wikipedia.org>.

## **Κεφάλαιο 5. Εφαρμογή Φ/Β συστήματος σε Ro-Ro πλοίο**

### **5.1 Επιλογή πλοίου για τοποθέτηση του Φ/Β συστήματος**

Στη συγκεκριμένη εργασία το πλοίο που θα μελετηθεί για την εφαρμογή του ΦΒ συστήματος είναι τύπου roll-on/roll-off. Το συγκεκριμένο πλοίο μεταφέρει αποκλειστικά οχήματα και συνήθως τα ταξίδια που εκτελεί λαμβάνουν χώρα νοτιοδυτικά της Ισπανίας σε νερά του Ατλαντικού ωκεανού και σε νερά της Μεσογείου Θάλασσας έως τα στενά του Βοσπόρου.

Ο κύριος λόγος επιλογής αυτού του πλοίου είναι ο αυξημένος ελεύθερος χώρος που διαθέτει στο κατάστρωμα του. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης αξιόλογου αριθμού ΦΒ πλαισίων, τα οποία στόχο θα έχουν την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλοίου. Εκτός από την διαθεσιμότητα χώρου που διαθέτει το πλοίο Ro-Ro, άλλος ένας παράγοντας επιλογής του ήταν η πρόκληση της μελέτης ενός τόσο μεγάλου πλοίου, το οποίο όπως θα δούμε και παρακάτω έχει πολλές ενεργειακές απαιτήσεις. Έτσι, ενδεχομένως η μελέτη να βοηθήσει στην αξιοποίηση ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών και σε τέτοιου είδους πλοία, τα οποία εκπέμπουν μία σημαντική ποσότητα ρύπων στο περιβάλλον.

#### **5.1.1 Ηλεκτρικές καταναλώσεις πλοίου**

Στον ηλεκτρικό ισολογισμό κάθε πλοίου αναλύονται τα φορτία με βάση την κατάσταση πλεύσης που βρίσκεται το εκάστοτε πλοίο (εν όρμω, εν πλω, σε κατάσταση ελιγμών κλπ). Κάθε κατάσταση λειτουργίας έχει και διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις, αφού δεν αξιοποιούνται πάντα όλα τα φορτία του.

Το πλοίο που μελετάται στην διπλωματική εργασία διαθέτει πέντε καταστάσεις λειτουργίας, εν πλω, εν όρμω, σε κατάσταση ελιγμών - φορτοεκφορτώσεων και έκτακτης ανάγκης. Τα φορτία, επίσης, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα συνεχή (continuous load) και τα διακοπτόμενα (intermittent load). Η διαφορά των δύο αυτών φορτίων είναι η λειτουργία του κινητήρα. Στη συνεχή λειτουργία ο κινητήρας λειτουργεί συνεχώς για μεγάλο χρονικό διάστημα υπό τις ίδιες συνθήκες, ενώ στη διακοπτόμενη ο κινητήρας φορτίζεται για μικρό χρονικό διάστημα και στη συνέχεια αδρανοποιείται για μεγάλο ή μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό που γίνεται αισθητό από τα δεδομένα που δίνονται για το συγκεκριμένο πλοίο και βλέποντας το συνολικό φορτίο, είναι πως οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι πάρα πολλές για να επιτευχθεί κάλυψη τους μόνο από ΦΒ συστήματα.

Γι' αυτόν τον λόγο θα πρέπει να επιλεγθεί μία ή περισσότερες καταστάσεις λειτουργίας που θα καλυφθούν μέσω ηλιακής ενέργειας.

Το πλοίο διαθέτει τέσσερις γεννήτριες, μία shaft generator η οποία φτάνει τα 1.800kW, δύο main generators έως 1.100 kW η κάθε μία και μία emergency generator μόλις 150 kW. Από τα δεδομένα του ισολογισμού γνωρίζουμε, για τις διάφορες καταστάσεις, το Continuous Load, τις γεννήτριες που λειτουργούν, αλλά και το συνολικό φορτίο. Οι καταστάσεις λειτουργίας διαθέτουν διαφορετικά φορτία ανάλογα με το αν λειτουργεί το bow thruster και το Car deck Fan.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1: Συνολικά φορτία και γεννήτριες που αξιοποιούνται (Τα στοιχεία έχουν δοθεί από την εταιρεία Neptune Lines και αφορούν στο συγκεκριμένο πλοίο που μελετάται).

Classification	At Sea		At Port (in/out)			
	W/O Car DK Fan	W Car DK Fan	W/O Thruster		W Thruster	
			W/O Car DK Fan	W Car DK Fan	W/O Car DK Fan	W Car DK Fan
Total of Continuous Load	1183,3	1183,3	1124,9	1124,9	980	-
Total Load	1244,2	1744,2	1350,1	1850,3	2110,9	-
Capacity of Generator (kW)	1800	1800	1100	1100	1100	-
No. Of Running Generator (SET)	1	1	2	2	2	-
Classification	At Load/Unloading		At Harbor			
	W/O Car DK Fan	W Car DK Fan	W/O Car DK Fan	W Car DK Fan		
Total of Continuous Load	1004,1	1004,1	786,3	786,3		
Total Load	1184,9	1685,1	839	1339,6		
Capacity of Generator (kW)	1100	1100	1100	1100		
No. Of Running Generator (SET)	2	2	1	2		

Η shaft generator όταν βρίσκεται σε λειτουργία έχει την ιδιότητα μέσω της περιστροφικής κίνησης του άξονα της έλικας να διοχετεύει ενέργεια στα φορτία και έτσι, οι main generators δεν βρίσκονται σε λειτουργία. Η αξιοποίηση της περιστροφικής κίνησης της προπέλας αποτελεί κατά κάποιον τρόπο πράσινη ενέργεια, καθώς αναπόφευκτα για την κίνηση του πλοίου θα περιστραφεί ο άξονας. Έτσι, η χρήση των ΦΒ συστημάτων στην κατάσταση εν πλω ενδέχεται να μην επιφέρει κάποια σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου. Στις καταστάσεις at port - at harbor, επειδή ο χρόνος που διαρκούν οι συγκεκριμένες καταστάσεις λειτουργίας είναι μεταβαλλόμενος και συνήθως μικρός, δεν είναι εύκολος ο υπολογισμός της εξοικονόμησης καυσίμου που θα επιφέρει το ΦΒ σύστημα.

Στην δυσμενέστερη κατάσταση, ωστόσο, δηλαδή at Load / Unloading λειτουργούν οι 2 main generators (450V, 3Ph, 50Hz, 900 RPM). Συγκεκριμένα για τον φωτισμό χρειάζονται 167 kW. Η διάρκεια της φορτοεκφόρτωσης είναι κατά μέσον όρο 5 ώρες. Η μελέτη που θα ακολουθήσει βασίζεται στην συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας, αφού εκ πρώτης όψεως ενδέχεται να καλυφθεί όλο το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για τον φωτισμό και να επιφέρει αισθητή εξοικονόμηση καυσίμου. Η συνολική ενέργεια που χρειάζεται στην κατάσταση της φορτοεκφόρτωσης είναι ίση με:

$$E_K = 167 \left[ \frac{kWh}{\etaμερα} \right] \cdot 5 [h] \cdot 90\% = 751,5 \left[ \frac{kWh}{\etaμερα} \right]$$

Για τον υπολογισμό της ενέργειας λαμβάνεται ένα 90% ταυτοχρονισμού, δηλαδή δεν θα δουλεύει όλος ο φωτισμός για 5 ώρες. Το ποσοστό αυτό λαμβάνεται με μεγάλη ασφάλεια, διότι το σύστημα μπορεί να λειτουργεί και σε ποσοστό 80% και κάτω ανάλογα με το φορτίο που φορτώνει και εκφορτώνει.

Στον πίνακα 5-2 παρουσιάζονται τα φορτία του φωτισμού του πλοίου για τις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2: Απαιτούμενη ισχύς για τον φωτισμό σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας.

Consumers (Kw) (Καταναλωτές)	At Sea	At Port (in/out)	At Cargo Operating	At Harbor
Machinery Space Lighting	20	20	20	20
Accommodation Lighting	20	20	12	12
Deck Lighting	9	9	15	9
Cargo Hold Lighting	22.5	22.5	120	22.5
<b>Total</b>	71.5	71.5	167	63.5

### 5.1.2 Ταξίδια που εκτελεί το πλοίο - Ηλιακό δυναμικό περιοχής πλεύσης

Τα ταξίδια που εκτελεί το πλοίο γίνονται, κυρίως, εντός της Μεσογείου Θάλασσας, δυτικά της Ισπανίας, δηλαδή σε νερά του Ατλαντικού Ωκεανού και εντός της Μαύρης Θάλασσας κοντά στην Κωνσταντινούπολη και τη Ρουμανία. Στον πίνακα 5-3 φαίνονται κάποια ενδεικτικά δρομολόγια που εκτελεί το πλοίο, η μέση ταχύτητα πλεύσης και η διάρκεια του ταξιδιού (MarineTraffic,2022).

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3: Ενδεικτικά δρομολόγια πλοίου.

Πηγή: (<https://www.marinetraffic.com>, 2022)

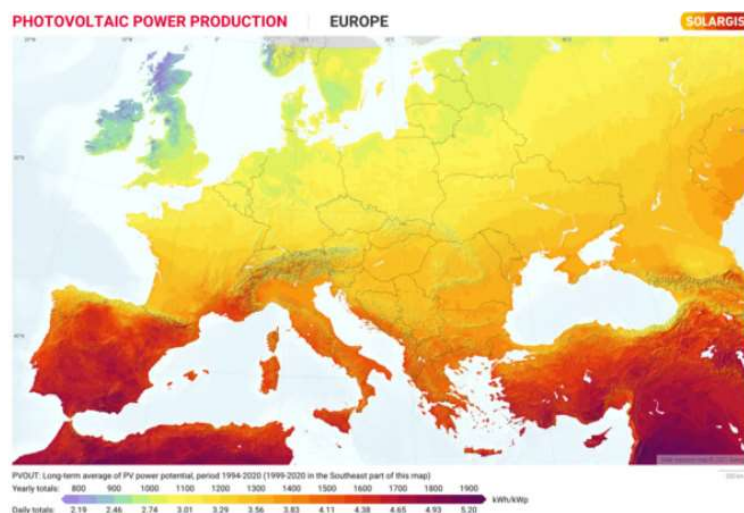
Λιμένας Αναχώρησης	Λιμένας Άφιξης	Ταχύτητα (Knots)	Διάρκεια Ταξιδιού
Malaga (Ισπανία)	Vigo (Ισπανία)	16.1	1 ημέρα και 14 ώρες
Vigo (Ισπανία)	Setubal (Πορτογαλία)	13.7	8 ώρες και 30 λεπτά
Tanger Med (Στενό του Γιβραλτάρ)	Fos Sur Mer (Γαλλία)	14.4	2 ημέρες και 2 ώρες και 30 λεπτά
Constana (Ρουμανία)	Gemlik (Τουρκία)	15.1	18,5 ώρες
Gemlik (Τουρκία)	Sete (Γαλλία)	13.3	4 ημέρες, 11 ώρες και 13 λεπτά
Sete (Γαλλία)	Fos Sur Mer (Γαλλία)	13,5	5 ώρες και 30 λεπτά
Fos Sur Mer (Γαλλία)	Barcelona (Ισπανία)	12,5	9 ώρες και 30 λεπτά
Gioia Tauro (Ιταλία)	Civitavecchia (Ιταλία)	13.6	22 ώρες

Το κλίμα στην περιοχή πλεύσης και κυρίως στη Μεσόγειο είναι εύκρατο και αυτά που τα χαρακτηρίζουν είναι οι ήπιοι βροχεροί χειμώνες και τα θερμά ξηρά καλοκαίρια. Το κύριο πρόβλημα του μεσογειακού κλίματος είναι η ξηρασία που υπάρχει, καθώς οι βροχές είναι σπάνιο φαινόμενο και η ξηρασία δεν πέφτει κάτω από 100-150 mm (Σαντσεζ, 2015). Το τελευταίο δεκαήμερο του Ιουλίου και το πρώτο του Αυγούστου θεωρείται η θερμότερη περίοδος. Η θερμοκρασία κυμαίνεται από 29°C έως 38°C.

Στην Ιταλία και την Τουρκία το κλίμα ανήκει στην κατηγορία του ηπειρωτικού και χαρακτηρίζεται από κρύους χειμώνες με παγετούς και ήπια ή ζεστά καλοκαίρια. Στην Ισπανία, κοντά στην Καταλονία παρατηρείται το τυπικό μεσογειακό κλίμα με μέση θερμοκρασία άνω των 18°C και υγρούς χειμώνες. Τα καλοκαίρια είναι πολύ θερμά και η θερμοκρασία ενδέχεται να φτάνει τους 38°C.

Σε διαφορετικές περιοχές της Ισπανίας κοντά στο στενό του Γιβραλτάρ η μέση θερμοκρασία είναι υψηλότερη από 20°C και όταν υπάρχουν κύματα θερμότητας ενδέχεται να ξεπεράσει τους 45°C. Οι βροχές δεν είναι συχνό φαινόμενο και οι τιμές τους είναι μεταξύ 200 και 400 mm. Εκτός από την Ισπανία, το κλίμα αυτό παρουσιάζεται και στην Πορτογαλία, αλλά και στην Ελλάδα. Επιπλέον, οι άνεμοι στην περιοχή του Στενού του Γιβραλτάρ φτάνουν τους 40 με 50 κόμβους και στην επιφάνεια του νερού η ροή γίνεται από τον Ατλαντικό στη Μεσόγειο και σε βαθύτερα επίπεδα γίνεται η αντίθετη κίνηση.

Στην εικόνα 5-1 παρουσιάζεται ο χάρτης της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται η περιοχή που μελετάται. Μέσω αυτού αποδεικνύεται πως στο σημείο που υπάρχει αυξημένη συχνότητα ταξιδιών του πλοίου, κοντά, δηλαδή, στο στενό του Γιβραλτάρ, στην Πορτογαλία και στην Ισπανία η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή και αυτό θα ενισχύσει την απόδοση του ΦΒ συστήματος. Ωστόσο, στα στενά του Βοσπόρου και στη Ρουμανία η ηλιακή ακτινοβολία είναι πιο χαμηλή. Στα στενά του Βοσπόρου το κλίμα δεν παρουσιάζει σημαντικές αλλαγές, καθώς διαθέτει και εκείνη η περιοχή χαρακτηριστικά μεσογειακού κλίματος. Συγκεκριμένα, το κλίμα της περιοχής είναι εύκρατο και ανήκει στο Υποτροπικό Ωκεάνιο Κλίμα. Η θερμοκρασία της περιοχής την χειμερινή περίοδο φτάνει έως και τους 5,8°C και τον Ιούλιο φτάνει τους 28,4°C. Παρ' όλα αυτά, τα ταξίδια σε εκείνα τα ύδατα είναι πιο σπάνια συγκριτικά με εκείνα κοντά στην Ιταλία και την Ισπανία (Σαντσεζ, 2015).



ΕΙΚΟΝΑ 5-1: Χάρτης ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή της Μεσογείου.

Πηγή: (<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/europe>), Ανακτήθηκε: (17.05.2022)

Η απόδοση των ΦΒ συστημάτων εξαρτάται αρκετά από τη θερμοκρασία της περιοχής. Ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποιοι πίνακες (πίνακας 5-4, 5-5, 5-6) των περιοχών πλευσης με τις θερμοκρασίες που επικρατούν ανά μήνα κατά τη διάρκεια ενός έτους. Επιπλέον, οι πίνακες περιέχουν και τον όγκο βροχής, την υγρασία και το πλήθος των βροχερών ημερών. Οι βροχερές ημέρες συμβάλλουν στον υπολογισμό του χρόνου αντοχής των συσσωρευτών μέσα στη μέρα, ώστε να επιτευχθεί η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλοίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-4: Κλίμα στην Ισπανία (Βαρκελώνη) ανά μήνα – Αριθμός βροχερών ημερών και ποσοστό υγρασίας κατά τη διάρκεια του έτους. Πηγή: (<https://en.climate-data.org/europe/spain-5/>). Ανακτήθηκε: (17.05.2022)

	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Avg. Temperature °C	7.9 °C	8.5 °C	10.9 °C	13.5 °C	17 °C	21.3 °C	23.8 °C	23.9 °C	20.9 °C	17.4 °C	12.1 °C	8.6 °C
(°F)	(46.2)	(47.3)	(51.7)	(56.2)	(62.6)	(70.4)	(74.9)	(75)	(69.5)	(63.4)	(53.8)	(47.6)
Min. Temperature °C	4 °C	4.3 °C	6.5 °C	9.1 °C	12.7 °C	17 °C	19.8 °C	20.2 °C	17.5 °C	14.2 °C	8.5 °C	5 °C
(°F)	(39.2)	(39.8)	(43.7)	(48.4)	(54.9)	(62.6)	(67.7)	(68.3)	(63.6)	(57.6)	(47.2)	(41)
Max. Temperature °C	12.3 °C	12.9 °C	15.5 °C	17.6 °C	20.9 °C	25.3 °C	27.6 °C	27.6 °C	24.2 °C	20.7 °C	15.9 °C	12.9 °C
(°F)	(54.1)	(55.2)	(60)	(63.6)	(69.7)	(77.5)	(81.7)	(81.7)	(75.6)	(69.3)	(60.6)	(55.2)
Precipitation / Rainfall	39	39	43	54	48	37	27	43	82	94	64	44
mm (in)	(1.5)	(1.5)	(1.7)	(2.1)	(1.9)	(1.5)	(1.1)	(1.7)	(3.2)	(3.7)	(2.5)	(1.7)
Humidity	79%	76%	74%	75%	74%	72%	70%	73%	77%	80%	79%	79%
Rainy days	6	6	6	9	8	6	5	7	11	11	8	6

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-5: Κλίμα στην Ιταλία ανά μήνα

Πηγή: (<https://www.sunpope.com/italy/>). Ανακτήθηκε: (17.05.2022)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Day Temperature	11°	13°	15°	19°	23°	28°	30°	30°	26°	22°	16°	13°
Night Temperature	5°	5°	7°	10°	13°	17°	20°	19°	17°	13°	9°	6°
Water Temperature	14°	13°	13°	14°	17°	21°	23°	24°	23°	20°	18°	15°
Precipitation (inch)	2.99	3.46	3.03	2.83	2.48	1.89	0.55	0.87	2.76	5.04	5.04	4.17
Rainy days	6	6	8	8	6	4	2	2	5	6	8	8
Hours of Sunshine	4	5	7	7	9	9	11	10	8	6	4	3

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-6: Κλίμα στην Πορτογαλία ανά μήνα.

Πηγή: (<https://www.sunpope.com/portugal/>). Ανακτήθηκε: (17.05.2022)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Day Temperature	14°	14°	16°	18°	20°	23°	25°	25°	24°	21°	17°	14°
Night Temperature	5°	6°	7°	8°	11°	14°	15°	15°	14°	11°	8°	6°
Water Temperature	14°	13°	13°	14°	15°	16°	17°	18°	18°	17°	15°	14°
Precipitation (inch)	6.73	6.65	4.41	4.41	3.5	2.09	0.63	0.87	2.52	5.16	5.98	6.93
Rainy days	14	13	11	10	9	6	2	3	6	10	12	12
Hours of Sunshine	4	5	6	7	8	9	10	10	8	6	5	4

Το ηλιακό δυναμικό θα υπολογιστεί προσεγγιστικά καθώς δεν υπάρχει συγκεκριμένη διαδρομή που εκτελεί το πλοίο. Με βάση, λοιπόν, τον χάρτη ηλιακής ακτινοβολίας θα επιλεγεί μία περιοχή, η οποία περιέχει αντιπροσωπευτική ηλιακή ακτινοβολία των περιοχών της Μεσογείου Θάλασσας. Οι πλατφόρμες που θα χρησιμοποιηθούν για την ηλιακή ακτινοβολία και το ηλιακό δυναμικό είναι η GLOBAL SOLAR ATLAS και η PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. Η περιοχή στην οποία βασίζονται οι μετρήσεις είναι το λιμάνι της Βαρκελώνης το οποίο θεωρείται πως διαθέτει τον μέσο όρο των ηλιακών δυναμικών μεταξύ της Ρουμανίας (μικρότερο ηλιακό δυναμικό) και του στενού του Γιβραλτάρ (μεγαλύτερο ηλιακό δυναμικό). Επίσης, περίπου, σε μία νοητή ευθεία από την Βαρκελώνη παράλληλη στον Ισημερινό της Γης και με μικρές αποκλίσεις από αυτή εκτελούνται τα δρομολόγια του πλοίου και βρίσκονται τα λιμάνια εκκίνησης και άφιξης.



Από την πλατφόρμα GLOBAL SOLAR ATLAS προκύπτουν οι παρακάτω μετρήσεις του 5-7 για την περιοχή με γεωγραφικό πλάτος και μήκος 41.38093°,002.187471° αντίστοιχα:

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-7: Δεδομένα ακτινοβολίας για την περιοχή που μελετάται.  
 Πηγή: (<https://globalsolaratlas.info/map>). Ανακτήθηκε: (17.05.2022)

<b>ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ GLOBAL SOLAR ATLAS</b>			
Direct normal irradiation	DNI	1731,0	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Global horizontal irradiation	GHI	1619,5	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Global tilted irradiation at optimum angle	GTI <sub>OPTA</sub>	1915,0	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Air temperature	TEMP	16,4	° C

Τα παραπάνω δεδομένα που προκύπτουν μέσω της πλατφόρμας αφορούν μέσες ετήσιες τιμές για το ηλιακό δυναμικό της περιοχής. Έτσι, το DNI αφορά στην άμεση κανονική ακτινοβολία, το GHI στην παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία και το GTI<sub>OPTA</sub> στην παγκόσμια κεκλιμένη σε βέλτιστη γωνία.

Στην περίπτωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας τα ΦΒ πλαίσια θα τοποθετηθούν με μηδενική κλίση, καθώς ανάλογα την πορεία του πλοίου, ενδέχεται να δημιουργηθούν σκιάσεις, οι οποίες θα συμβάλλουν αρνητικά στην απόδοση του ΦΒ συστήματος.

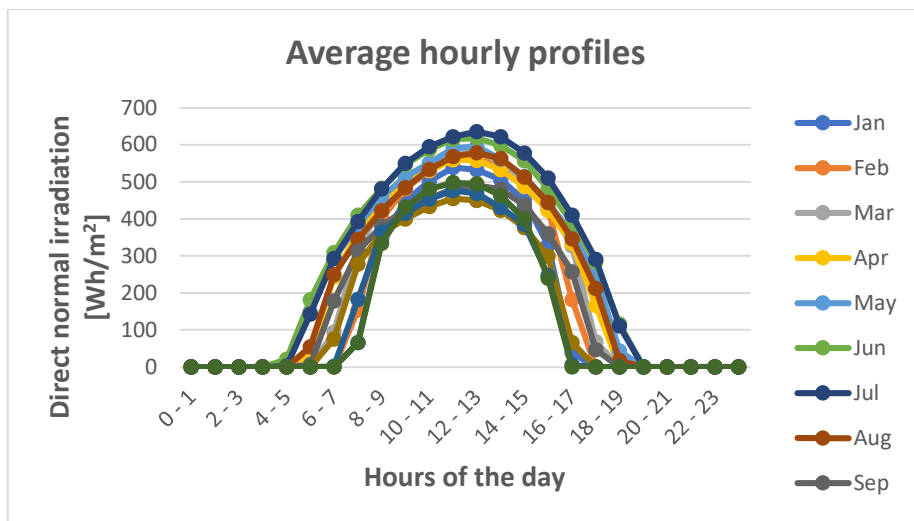
Στην εικόνα 5-2 παρουσιάζεται το ωριαίο προφίλ της κατανομής της κανονικής ηλιακής ακτινοβολίας στην συγκεκριμένη περιοχή.

**Average hourly profiles**  
Direct normal irradiation [Wh/m<sup>2</sup>]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5					3	21	3					
5 - 6				26	148	182	143	55	6			
6 - 7			95	229	292	309	293	249	179	55	2	
7 - 8	67	154	321	365	384	410	393	345	313	280	183	66
8 - 9	348	401	434	439	459	484	481	422	381	363	366	335
9 - 10	449	482	494	496	514	546	549	483	427	402	416	433
10 - 11	503	532	543	531	551	587	594	533	455	434	454	483
11 - 12	540	564	579	560	590	615	621	566	481	456	478	499
12 - 13	534	577	591	558	596	619	636	578	490	452	470	495
13 - 14	507	547	550	534	560	599	621	561	479	425	432	463
14 - 15	452	499	499	489	515	557	578	512	436	377	385	400
15 - 16	330	426	435	424	444	482	510	444	361	300	248	240
16 - 17	39	182	328	336	360	388	410	346	257	67	5	
17 - 18			54	167	250	284	291	212	47			
18 - 19				2	43	117	111	17				
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	3767	4365	4923	5157	5708	6200	6235	5324	4311	3609	3439	3416

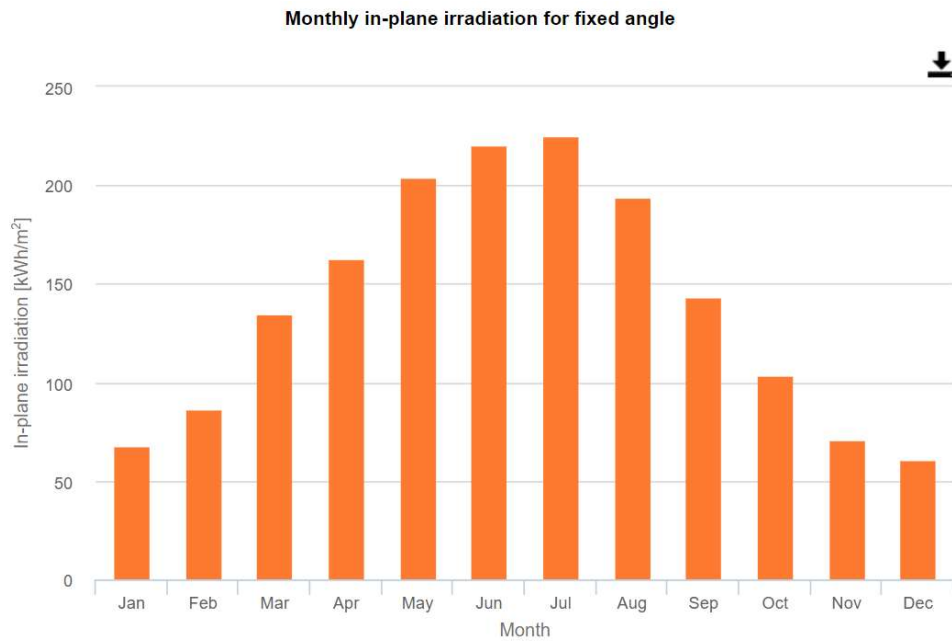
ΕΙΚΟΝΑ 5-2: Ωριαίο προφίλ κατανομής ηλιακής ενέργειας (Wh/m<sup>2</sup>).  
Πηγή: (GLOBAL SOLAR ATLAS)

Στο διάγραμμα της εικόνας 5-3 παρουσιάζεται η ωριαία ποσότητα της άμεσης κανονικής ακτινοβολίας για τους μήνες του έτους.



ΕΙΚΟΝΑ 5-3: Στον άξονα X παρουσιάζονται οι ώρες έκθεσης ηλιακής ακτινοβολίας και στον άξονα Y είναι η ημερήσια κατανομή της άμεσης ηλιακής ενέργειας.

Μέσω της πλατφόρμας PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM απεικονίζεται η ηλιακή ακτινοβολία για τις 0 μοίρες (in-plane) για ένα έτος.



ΕΙΚΟΝΑ 5-4: Ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα για μηδενικές μοίρες.  
Πηγή: (PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM),  
Ανακτήθηκε: (19.05.2022)

## **5.2 Τοποθέτηση ΦΒ πλαισίων στο πλοίο - Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας**

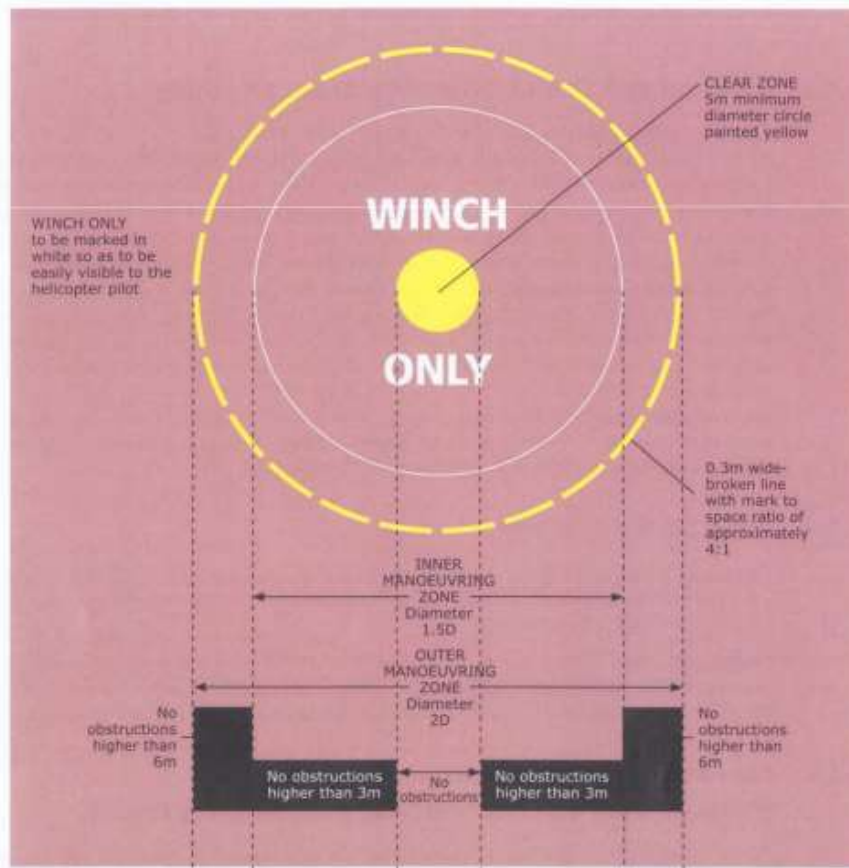
Το πλήθος των ΦΒ πλαισίων, τα οποία θα τοποθετηθούν στο πλοίο υπολογίζεται με βάση τις ενεργειακές ανάγκες του πλοίου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι ενεργειακές ανάγκες του Ro-Ro πλοίου είναι μεγάλες. Γίνεται σαφές, λοιπόν, πως δεν είναι δυνατή η κάλυψη όλων των αναγκών με τη χρήση ΦΒ συστήματος.

Σκοπός είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ενεργειακή κάλυψη με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η συμβολή των γεννητριών που διαθέτει για την κάλυψη των εναπομεινάντων ενεργειών (Υβριδικό σύστημα). Γι' αυτόν τον λόγο θα γίνει η μέγιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου χώρου, που διαθέτει το πλοίο.

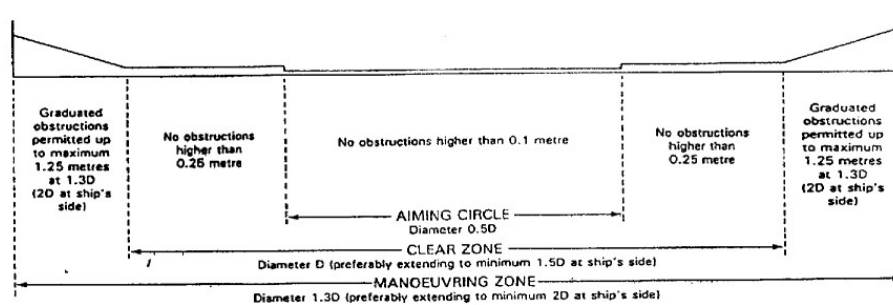
### **5.2.1 Μελέτη διαθέσιμου χώρου του πλοίου**

Ένα στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψιν και δεν απεικονίζεται ξεκάθαρα στα σχέδια του πλοίου, είναι η ύπαρξη ελικοδρομίου στο κατάστρωμα (helicopter deck). Σύμφωνα, λοιπόν, με την τέταρτη έκδοση του Guide to Helicopter/Ship Operations, λόγω της ανάγκης ανέλκυσης προσωπικού, αλλά και εφοδίων στο πλοίο, συνίσταται η ύπαρξη χώρου προσγειώσης. Όταν δεν είναι εφικτή η δημιουργία ενός χώρου προσγειώσης ελικοπτέρων, προβλέπεται ένας χώρος, ο οποίος θα χρησιμοποιείται για μεταφορά προϊόντων χωρίς να προσγειωθεί το ελικόπτερο. Ο χώρος αυτός αποτελείται από την ελεύθερη ζώνη (clear zone) και την ζώνη ελιγμών. Η ζώνη ελιγμών που χωρίζεται στο εσωτερικό και εξωτερικό τμήμα, πρέπει να εκτείνεται πέρα από την ελεύθερη ζώνη και η ελάχιστη διάμετρος να είναι ίση με  $2D$ , όπου  $D$  η μέγιστη διάσταση έλικας ελικοπτέρου που προσγειώνεται στο πλοίο. Στο εσωτερικό τμήμα της ζώνης ελιγμών με διάμετρο ίση με  $1,5 D$  επιτρέπονται εμπόδια με συνολικό ύψος έως  $3m$ . Εντός του εξωτερικού τμήματος της ζώνης ελιγμών ακτίνας ίσης με  $2D$  δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση αντικειμένων με ύψος άνω των  $6m$ .

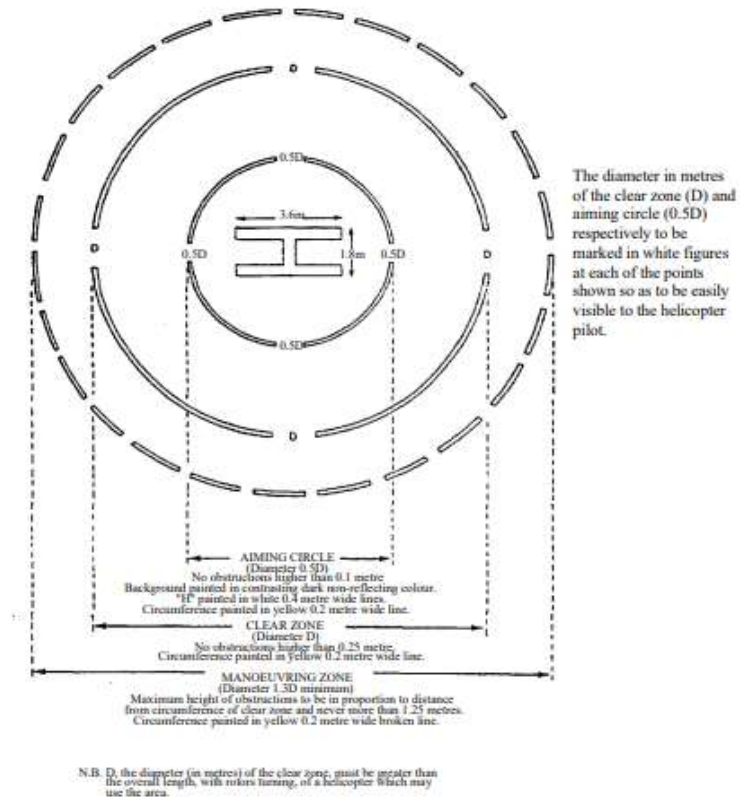
Ωστόσο, σύμφωνα με τον IMO, σε πλοίο roll-on/roll-off η ελεύθερη ζώνη θα πρέπει να έχει διάμετρο τουλάχιστον  $D \geq 5 m$  και η ζώνη ελιγμών πρέπει να εκτείνεται πέρα από την ελεύθερη ζώνη με ελάχιστη διάμετρο  $1.3D$ . Το μέγιστο ύψος πρέπει να είναι ανάλογο της απόστασης της περιφέρειας της ελεύθερης ζώνης με κατώτατο όριο τα  $0,25m$ .



ΕΙΚΟΝΑ 5-5: Πεδίο προσγείωσης ελικοπτερου / μεταφοράς προϊόντων όσο το ελικόπτερο βρίσκεται στον αέρα– Winching area.  
 Πηγή: (Guide to helicopter / Ship operations – Fourth Edition)



ΕΙΚΟΝΑ 5-6: Ύψος εμποδίων για την προσγείωση ελικοπτερου σε πλοίο.  
 Πηγή: (IMO, 1999)



EIKONA 5-7: Διαστάσεις χώρου προσγείωσης ελικοπτερου με εμπόδια στην πλευρά του πλοίου - Ro-Ro πλοίο. Πηγή: (IMO, 1999)

Η τοποθέτηση του helicopter deck θα πρέπει να μελετηθεί σωστά, ώστε να μην επηρεάζει άλλες λειτουργίες του πλοίου. Έτσι, σύμφωνα με εκτίμηση κινδύνου δεν προτείνεται η τοποθέτηση του κοντά στην πλώρη, αλλά και στην πτέρυγα της γέφυρας. Επίσης, η περιοχή προσγείωσης θα πρέπει να είναι σχετικά μακριά από τις καμπίνες και να διατίθεται αρκετός χώρος για την συγκέντρωση του προσωπικού και την πρόσβαση τους από πολλές κατευθύνσεις.

Η ελεύθερη επιφάνεια (clear zone) θα πρέπει να διαθέτει έντονο χρώμα, συνήθως κίτρινο, για να μπορεί να γίνει αντιληπτή από απόσταση και να έρχεται σε αντίθεση με το υπόλοιπο περιβάλλον του πλοίου. Το εξωτερικό τμήμα του χώρου ελιγμών επισημαίνεται με κίτρινη διακεκομμένη γραμμή πλάτους 0,3m και το εσωτερικό τμήμα με την ίδια γραμμή πλάτους 0,1m.

Στο σχέδιο, για την τήρηση και των δύο κανονισμών και με τον προσεγγιστικό υπολογισμό μέσω υπαρκτών φωτογραφιών του πλοίου, έχει δημιουργηθεί ένας κύκλος διαμέτρου 5m που θα είναι η καθαρή περιοχή (clear zone). Περιμετρικά του κύκλου υπάρχει αρκετός χώρος για την ασφαλή αποβίβαση και επιβίβαση των επιβατών του

ελικοπτέρου, αλλά και για την τήρηση της κλιμακωτής αύξησης του επιτρεπτού ύψους εμποδίων. Επίσης, στα σημεία που υπάρχουν σκάλες δεν έχουν τοποθετηθεί πάνελ.



ΕΙΚΟΝΑ 5-8: Αεροφωτογραφία του πλοίου που μελετάται. Πηγή:

<https://www.maltashippphotos.com/productfile.asp?ProductID1=16662&PRODUCTCAT1=Yachts>, 2012).

Ανακτήθηκε: (20.05.2022)

### 5.2.2 Επιλογή Φ/Β πλαισίου

Το ΦΒ πλαίσιο, όπως ήδη αναφέρθηκε, επιλέγεται με βάση τις ενεργειακές ανάγκες του πλοίου, αλλά και τον διαθέσιμο χώρο του. Εκτός από αυτά τα δύο κριτήρια επιλογής των ΦΒ πλαισίων υπάρχουν και κάποια χαρακτηριστικά, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψιν και αφορούν το ΦΒ πλαίσιο. Αυτά είναι η απόδοση του, η ονομαστική ισχύς και το μέγεθος του. Επιπλέον, θα πρέπει να μελετηθούν τα μέρη που θα συνδέονται με τα ΦΒ πλαίσια και η αξιοπιστία τους, καθώς η κατασκευή θα πρέπει να διαθέτει ανοχή στις δύσκολες καιρικές συνθήκες. Έτσι, θα μειωθεί το κόστος συντήρησης και η πιθανότητα βλάβης.

Βασικός παράγοντας επιλογής ΦΒ πλαισίου ήταν η ονομαστική ισχύς του, καθώς υπάρχει απαίτηση μεγάλης κάλυψης φορτίων. Έτσι, το ΦΒ πλαίσιο που επιλέχθηκε αποτελείται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο και ανήκει στην εταιρεία Trina Solar Co, Ltd. Το μοντέλο το ΦΒ πλαισίου είναι το Vertex Backsheet Monocrystalline Module (Product

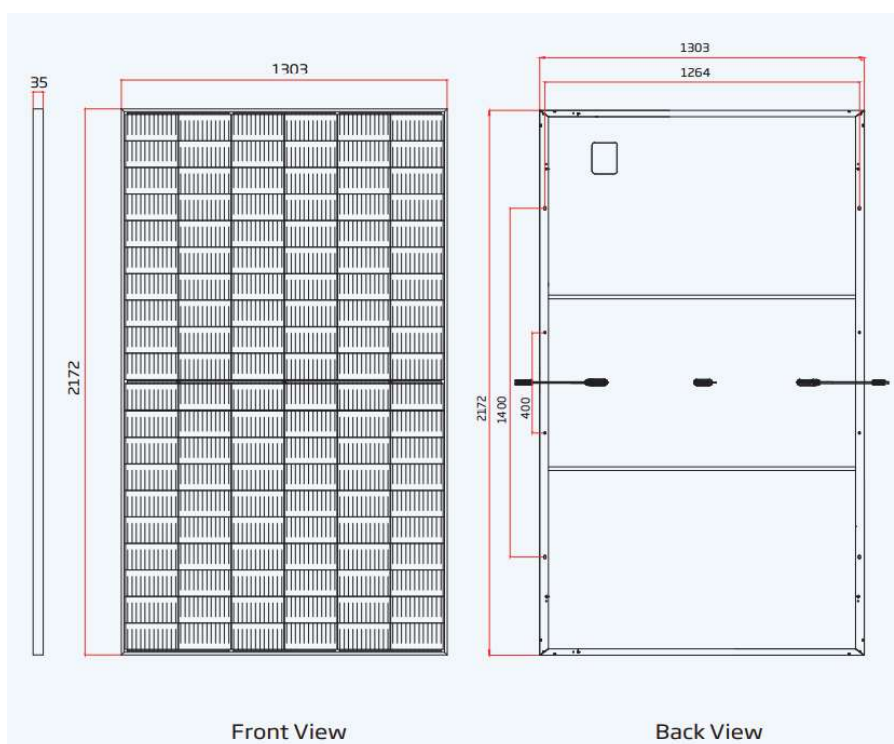
TSM-DE20) με μέγιστη ισχύ 605W+. Ο πίνακας της εικόνας 5-9 διαθέτει τις διαστάσεις, το είδος του πλαισίου, τον αριθμό των Φ/Β κυττάρων, το βάρος και το είδος του γυαλιού που χρησιμοποιείται στην κατασκευή. Επιπλέον, στην εικόνα 5-10 παρουσιάζεται το σχέδιο των πλαισίων με την μπροστινή όψη και την πίσω.

#### MECHANICAL DATA

Solar Cells	Monocrystalline
No. of cells	120 cells
Module Dimensions	2172×1303×35 mm (85.51×51.30×1.38 inches)
Weight	30.9 kg (68.1 lb)
Glass	3.2 mm (0.13 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant material	EVA
Backsheet	White
Frame	35mm(1.38 inches) Anodized Aluminium Alloy

ΕΙΚΟΝΑ 5-9: Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Πηγή: (Trina Solar),  
Ανακτήθηκε: (20.05.2022)



ΕΙΚΟΝΑ 5-10: Διαστάσεις και πίσω όψη φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Πηγή: (Trina Solar),  
Ανακτήθηκε: (20.05.2022)



Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ πλαισίου αναφέρονται στον πίνακα 5-8. Η συνθήκη STC αφορά σε ακτινοβολία έντασης ίση με  $1.000 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$  και θερμοκρασία πλαισίων ίση με  $25^{\circ}C$ . Επίσης το φάσμα της προσπίπτουσας ίσο με AM 1,5. Η συνθήκη NOCT αφορά σε ακτινοβολία έντασης ίση με  $800 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$ , θερμοκρασία πλαισίων  $43^{\circ}C (\pm 2)$ , θερμοκρασία αέρα  $20^{\circ}C$  και ταχύτητα του αέρα ίση με 1 m/s.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-8: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου.  
Πηγή: (Trina Solar), Ανακτήθηκε: (20.05.2022)

<b>ELECTRICAL DATA (STC)</b>	
Peak Power Watts-Pmax (Wp)	605
Power Tolerance-Pmax (W)	0~+5
Maximum Power Voltage-Vmpp (V)	34,6
Maximum Power Current-Impp (A)	17,49
Open Circuit Voltage-Voc (V)	41,7
Short Circuit Current-Isc (A)	18,57
Module Efficiency m (%)	21,4
<b>ELECTRICAL DATA (NOCT)</b>	
Peak Power Watts-Pmax (Wp)	458
Maximum Power Voltage-Vmpp (V)	32,2
Maximum Power Current-Impp (A)	14,22
Open Circuit Voltage-Voc (V)	39,3
Short Circuit Current-Isc (A)	14,96

Στη συνέχεια, στον πίνακα 5-9 αναφέρονται κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά των ΦΒ πλαισίων, που θα χρησιμοποιηθούν, όπως οι μέγιστες τιμές της τάσης (Volt) και της θερμοκρασίας και οι θερμοκρασιακές εξαρτήσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-9: Θερμοκρασιακές κατηγορίες ΦΒ πλαισίου - Μέγιστη τάση λειτουργίας.  
Πηγή: (Trina Solar), Ανακτήθηκε: (20.05.2022)

<b>TEMPERATURE RATINGS</b>		<b>MAXIMUM RATINGS</b>	
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	$43^{\circ}C (\pm 2^{\circ}C)$	Operational Temperature	-40~+85°C
Temperature Coefficient of P <sub>MAX</sub>	-0.34%/°C	Maximum System Voltage	1500V DC (IEC)
Temperature Coefficient of Voc	-0.25%/°C		1500V DC (UL)
Temperature Coefficient of Isc	0.04%/°C	Max Series Fuse Rating	30A

Το πλήθος των ΦΒ πλαισίων, που θα τοποθετηθούν στο πλοίο εξαρτάται από την ισχύ που επιθυμούμε να καλυφθεί και τον διαθέσιμο χώρο. Ο τύπος, ο οποίος δίνει την ισχύ αιχμής για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων με συγκεκριμένες ημέρες αυτονομίας φαίνεται στην εξίσωση 5-1.

$$P_{p\Sigma} = \frac{E_K \cdot P_{STC} \cdot m}{E_{HA} \cdot \sigma_{\Delta\Sigma} \cdot \sigma_{\mu}} \cdot \frac{N}{N-n} \quad (5-1)$$

Όπου:

$E_K \left[ \frac{\text{kW}}{\text{ημερα}} \right]$ : Η ημερήσια ενέργεια κατανάλωσης, η οποία στην παρούσα διπλωματική μελέτη είναι ίση με  $E_K = 167 \text{ [kW/ημέρα]} \cdot 5 \text{ [h]} \cdot 90\% = 751,5 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{ημέρα}} \right]$ . Το 90%, αφορά στο ποσοστό ταυτοχρονισμού.

$P_{STC} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]$ : Η ισχύς προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC, ίση με  $1 \left[ \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]$ .

$m$ : Ο συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων, ο οποίος λαμβάνεται στη δική μας περίπτωση ίσος με 1.

$E_{HA} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]$ : Η ημερήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία είναι ίση με την μηνιαία ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας τον χειρότερο μήνα προς τις ημέρες του μήνα, δηλαδή για τον μήνα Δεκέμβριο ισχύει:

$$E_{HA} = \frac{60,78}{31} = 1,96 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{ημέρα}} \right]$$

$\sigma_{\theta}$ : Ο συντελεστής θερμοκρασίας, ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση με  $t_{\alpha} = 8,6 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$ .

$$\sigma_{\theta} = 1 - [(t_{\alpha} + 30) - 25] \cdot 0,004 \quad (5-2)$$

Στην παρούσα μελέτη η τιμή του συντελεστή θερμοκρασίας είναι ίση με  $\sigma_{\theta} = 0,95$ .

$\sigma_{\Delta\Sigma}$ : Ο συντελεστής απωλειών συστοιχίας για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα, ο οποίος είναι ίσος με  $\sigma_{\Delta\Sigma} = 0,77 \cdot \sigma_{\theta} = 0,73$ .

$\sigma_{\mu}$ : ο συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας μαζί με τις απώλειες του φορτιστή ρύθμισης, του ελεγκτή φόρτισης και του inverter, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 0,97.

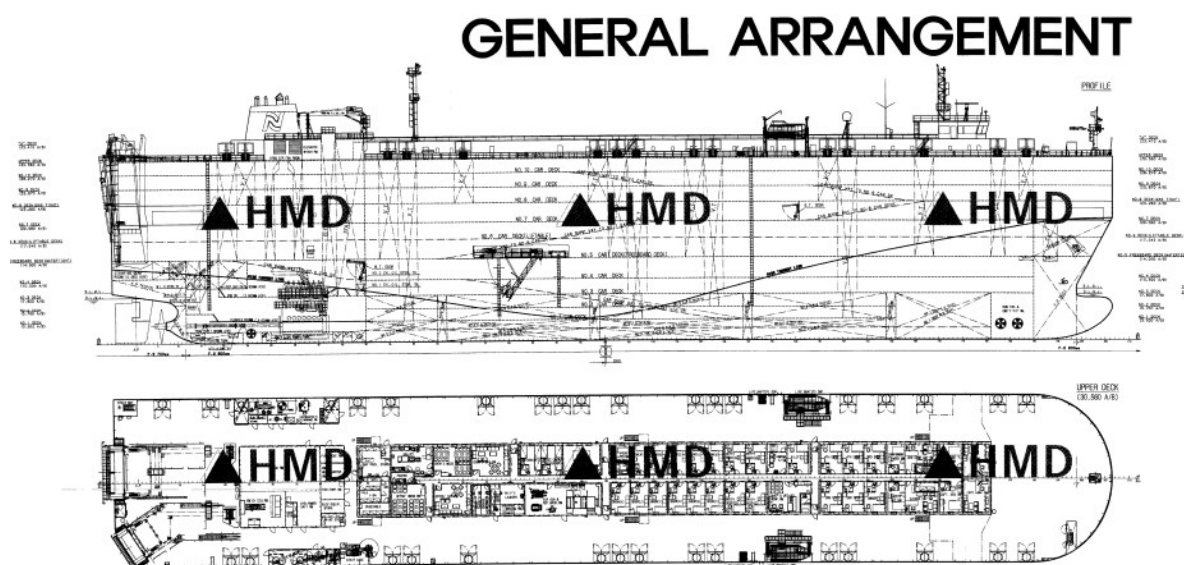
$N$ : Το πλήθος των ημερών του δυσμενέστερου μήνα, δηλαδή 31.

$n$ : Το πλήθος των ημερών αυτονομίας, ίσο με 1.

Από τον τύπο 5-1 και για την δυσμενέστερη περίοδο, η οποία είναι κατά τη διάρκεια του Δεκεμβρίου με μέσον όρο θερμοκρασίας ίση με 8,6 °C προκύπτει πως η θεωρητική απαιτούμενη ισχύς του συστήματος για 751,5 [kWh/ημ] είναι ίση με 560,79 [kWp]:

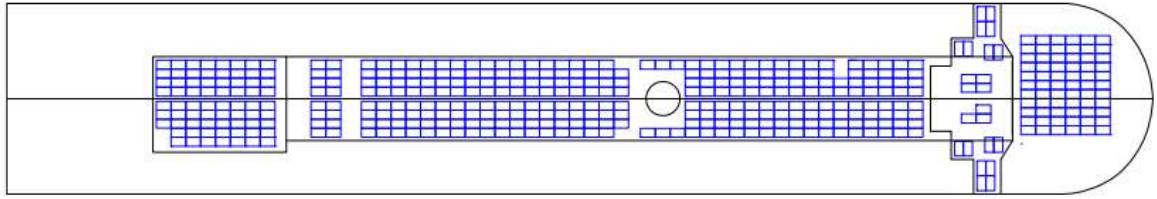
$$P_{p\Sigma} = \frac{751,5 \cdot 1}{1,96 \cdot 0,73 \cdot 0,97} \cdot \frac{31}{31} \rightarrow P_{p\Sigma} = 560,79 \text{ [kWp]}$$

Ωστόσο, πρωταρχικός παράγοντας είναι ο διαθέσιμος χώρος που διαθέτει το πλοίο. Στην εικόνα 5-11 παρουσιάζεται το ναυπηγικό σχέδιο του πλοίου το οποίο αποτελείται από την πλάγια όψη και την κάτοψη του πλοίου.



ΕΙΚΟΝΑ 5-11: General arrangement plan of ship.

Στη συνέχεια, το σχέδιο της εικόνας 5-12, το οποίο δημιουργήθηκε μέσω του 3D προγράμματος Rhino απεικονίζει το πλήθος των ΦΒ πλαισίων που θα τοποθετηθούν επί του πλοίου και τις θέσεις τοποθέτησής τους. Τα ΦΒ πλαίσια τοποθετούνται με μισό μέτρο απόσταση (0.5m) από την άκρη του καταστρώματος και διαθέτουν κεντρικό διάδρομο κατά μήκος του πλοίου με πλάτος 0,8m. Επίσης, η απόσταση μεταξύ των πλαισίων είναι 2cm και η κλίση τους μηδενική. Τα ΦΒ πλαίσια θα τοποθετηθούν σε ειδικά διαμορφωμένες βάσεις, οι οποίες θα είναι κατασκευασμένες από μέταλλο. Το ύψος τους ανάλογα τα εμπόδια που υπάρχουν θα είναι από 0,4m έως 0,8m.



ΕΙΚΟΝΑ 5-12: Τοποθέτηση ΦΒ πλαισίων επί του πλοίου μέσω του προγράμματος Rhinoceros.

Για τον υπολογισμό του πλήθους των πλαισίων θα ληφθούν υπόψιν οι διαστάσεις των πλαισίων και έτσι, για διαστάσεις ίσες με  $2,172 \cdot 1,303$  [mm], με τα περιθώρια και τους διαδρόμους που δημιουργήθηκαν μεταξύ των πλαισίων και αναφέρθηκαν στον διαθέσιμο χώρο θα τοποθετηθούν 450 πλαίσια.

Από τον συνολικό αριθμό των πλαισίων η ονομαστική ισχύς όλης της εγκατάστασης είναι ίση με  $P_E = 450 \cdot 605$  [ $W_p$ ], δηλαδή:

$$P_E = 272.250 [W_p] = 272,25 [kW_p]$$

Είναι προφανές πως η ονομαστική ισχύς του εφικτού συστήματος απέχει πολύ από την θεωρητική ισχύ που απαιτούν τα συγκεκριμένα φορτία. Ωστόσο, η θεωρητική ισχύς αναφέρεται στην δυσμενέστερη περίοδο και σε εκείνες τις περιπτώσεις θα ληφθεί ενέργεια πρώτα από τις μπαταρίες του συστήματος και έπειτα από τις γεννήτριες του πλοίου.

Η μέγιστη αποδιδόμενη ενέργεια του ΦΒ συστήματος που μελετάται υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E_{m\Pi} = E_{HA} \cdot S_{\Pi} \cdot n_{STC} \cdot \sigma_{\gamma} \cdot \sigma_{\rho} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\delta} \cdot N = E_{HA} \cdot S_{\Pi} \cdot n_{\Pi} [kWh] \quad (5-3)$$

Όπου:

$E_{HA}$  [ $\frac{kWh}{m^2}$ ]: η ενέργεια της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

$S_{\Pi}$  [ $m^2$ ]: η επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου, δηλαδή  $1,303 \cdot 2,172$  [m] = 2,83 [m]

$n_{STC}$ : ο βαθμός ΦΒ πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες STC, δηλαδή 21,4%

$\sigma_{\gamma}$ : ο συντελεστής γήρανσης ο οποίος είναι ίσος με 0,98. Για το πρώτο έτος παρουσιάζεται μείωση ίση με 2% και για κάθε επιπλέον έτος μείωση κατά 0,55%

$\sigma_\rho$ : ο συντελεστής ρύπανσης του ΦΒ πλαισίου, ο οποίος στην παρούσα διπλωματική θα έχει τιμή ίση με 0,90, για ελαφρώς σκονισμένα πλαίσια. Αυτό συμβαίνει, διότι η κλίση των πλαισίων είναι μηδενική και ενδέχεται να εναποθέτονται διάφορες ακαθαρσίες του περιβάλλοντος.

$\sigma_\theta$ : ο συντελεστής θερμοκρασίας, ο οποίος υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_\theta = 1 - [(t_\alpha + 30) - 25] \cdot 0,004 \quad (5-2)$$

Το  $t_\alpha$  είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία της ατμόσφαιρας στην περιοχή που μελετάται.

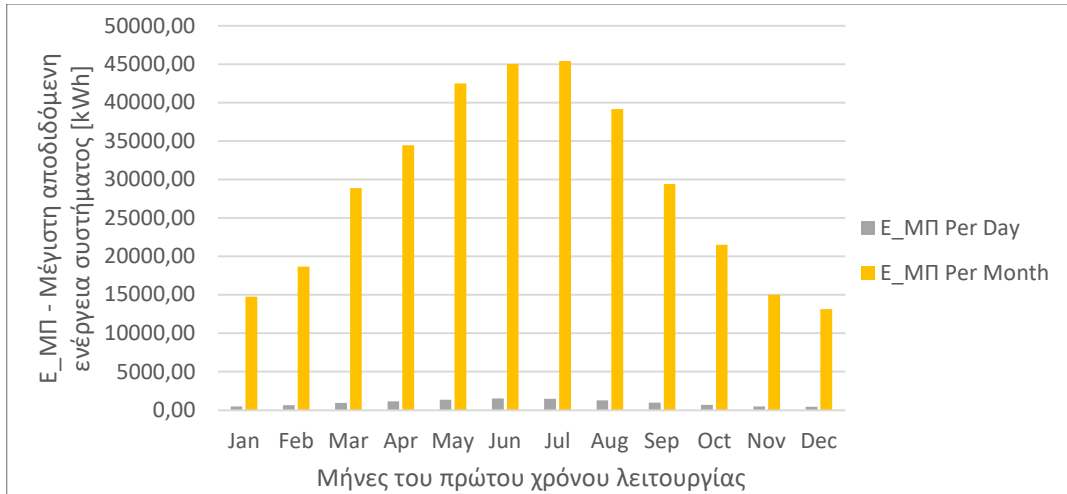
$\sigma_\delta$ : ο συντελεστής απωλειών διόδου, ο οποίος είναι ίσος με 0,99. Οι απώλειες αυτές οφείλονται στην δίοδο αντεπιστροφής, που εμποδίζει την εκφόρτιση του συσσωρευτή, όταν το πλαίσιο δεν φωτίζεται.

N: το πλήθος των ΦΒ πλαισίων του συστήματος, το οποίο είναι ίσο με 450 ΦΒ πλαίσια.

Από τον τύπο 5-3 και από τα δεδομένα του προγράμματος προκύπτει ο πίνακας 5-10 με την μέγιστη παραγόμενη ενέργεια των ΦΒ πλαισίων για κάθε μέρα και κάθε μήνα. Το συγκεκριμένο διάγραμμα αφορά στο πρώτο έτος λειτουργίας του συστήματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-10: Παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια ανά ημέρα και ανά μήνα για ένα έτος.

Days	Months	Ta Avg. Temper.	E_HA Per Day	E_HA Per Month	$\sigma_\theta$	E_MΠ Per Day	E_MΠ per Month
[-]	[-]	°C	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[-]	[kWh]	[kWh]
31	Jan	7,9	2,20	68,12	0,948	495,95	15374,48
28	Feb	8,5	3,09	86,41	0,946	694,75	19453,13
31	Mar	10,9	4,36	135,01	0,936	970,51	30085,81
30	Apr	13,5	5,43	163	0,926	1197,32	35919,72
31	May	17	6,58	204,02	0,912	1428,37	44279,42
30	Jun	21,3	7,35	220,45	0,895	1564,77	46942,95
31	Jul	23,8	7,25	224,76	0,885	1526,64	47325,85
31	Aug	23,9	6,26	193,95	0,884	1316,77	40819,98
30	Sep	20,9	4,79	143,68	0,896	1021,67	30650,14
31	Oct	17,4	3,33	103,36	0,910	722,37	22393,35
30	Nov	12,1	2,35	70,6	0,932	521,73	15651,95
31	Dec	8,6	1,96	60,78	0,946	441,21	13677,37
-	Avg	-	-	-	-	991,84	30214,51



ΕΙΚΟΝΑ 5-13: Παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια ανά ημέρα και ανά μήνα

### 5.2.3 Συνδεσμολογία Φ/Β πλαισίων και Ρυθμιστών φόρτισης

Οι ΦΒ συστοιχίες, όπως ήδη έχει αναφερθεί, αποτελούνται από ΦΒ πλαίσια  $N$  αριθμού, τα οποία χωρίζονται σε κλάδους  $N_{\Pi}$  παράλληλους μεταξύ τους. Επιπλέον, η κάθε συστοιχία αποτελείται από πλήθος πλαισίων  $N_{\sigma}$  συνδεδεμένα σε σειρά. Η σχέση που συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη είναι:

$$N = N_{\Pi} \cdot N_{\sigma} \quad (5-4)$$

Όλα τα ΦΒ πλαίσια θα πρέπει να διαθέτουν τα ίδια χαρακτηριστικά, όπως και στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την αποφυγή ανομοιογένειας και αύξηση απωλειών. Επίσης, για τη συνδεσμολογία θα πρέπει να τηρούνται οι τέσσερις παρακάτω κανόνες:

- Η τάση ενός κλάδου συμπίπτει με την τάση της ΦΒ συστοιχίας
- Η τάση ρεύματος της συστοιχίας συμπίπτει με την τάση ρεύματος ενός ΦΒ πλαισίου πολλαπλασιασμένο με το πλήθος των  $N_{\sigma}$  πλαισίων του κλάδου
- Η ένταση ρεύματος μίας συστοιχίας είναι ίση με εκείνη του ενός πλαισίου
- Η ένταση ρεύματος της συστοιχίας είναι ίση με το γινόμενο της έντασης ενός πλαισίου επί το πλήθος των κλάδων  $N_{\Pi}$ .

Επιπλέον, η συνδεσμολογία θα πρέπει να είναι κατάλληλη έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση εξόδου της συστοιχίας και συγκεκριμένα του πεδίου. Έτσι, για τη σύνδεση και τη συμβατότητα της εξόδου του ΦΒ πεδίου και της εισόδου του ρυθμιστή φόρτισης, των συσσωρευτών και του αντιστροφέα DC-AC απαιτείται η εύρεση της τάσης του ΦΒ πεδίου. Η τάση του πεδίου εξαρτάται από το πλήθος των πλαισίων που συνδέονται

σε σειρά, διότι το άθροισμα των τάσεων εκείνων των ΦΒ πλαισίων ισούται με την τάση του ΦΒ πεδίου. Ανάλογα με τις διατάξεις που έχουν δημιουργηθεί και θεωρώντας  $V_{m\sigma}$  τη μέγιστη τάση της ΦΒ συστοιχίας, η οποία είναι ίση με την τάση εισόδου της διάταξης, διακρίνονται οι περιπτώσεις του πίνακα 5-11.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-11: Ονομαστική τάση λειτουργίας φωτοβολταϊκού συστήματος ανάλογα τις διατάξεις

<b>ΦΒ σύστημα μεικτής συνδεσμολογίας συσσωρευτών ή αυτόνομων χωρίς συσσωρευτές</b>	
Χρήση ηλεκτρικού συσσωρευτή	$V_{m\sigma} > 1,2 V_B$ , $V_B$ : Ονομαστική τάση συσσωρευτή
Χρήση ηλεκτρικού συσσωρευτή και μετατροπέα τάσεως DC-DC (Converter)	$V_{m\sigma} = V_{CON} < 600 V$ , $V_{CON}$ : Τάση στην είσοδο του Converter
Χρήση ηλεκτρικού συσσωρευτή και μετατροπέα τάσεως DC-AC (Inverter)	$V_{m\sigma} > 1,2 V_B$ , $V_B$ : Ονομαστική τάση συσσωρευτή
Χρήση μετατροπέα τάσεως DC-AC (Inverter)	$V_{m\sigma} = V_{INV}$ , $V_{INV}$ : Τάση στην είσοδο του Inverter
Χρήση μετατροπέα τάσεως DC-DC (Converter)	$V_{m\sigma} = V_{CON}$ , $V_{CON}$ : Τάση στην είσοδο του Converter

Γίνεται αντιληπτό, λοιπόν, πως η τάση του ΦΒ πεδίου δεν θα πρέπει να ξεπερνά το επιτρεπόμενο όριο της εισόδου της ηλεκτρικής διάταξης που ακολουθεί. Επιπλέον, η τάση εξόδου ενός ΦΒ πεδίου, που συνδέεται με ηλεκτρικούς συσσωρευτές, εξαρτάται από την επιτρεπόμενη τάση του ρυθμιστή φόρτισης. Για τα συστήματα, που είναι συνδεδεμένα κατευθείαν με το δίκτυο η τάση του πεδίου είναι μεγαλύτερη και παρουσιάζονται τα όρια με βάση την εγκατεστημένη ισχύ στον πίνακα 5-12.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-12: Ονομαστική τάση εξόδου ανάλογα την εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος

<b>Εγκατεστημένη Ισχύς ΦΒ πεδίου</b>	<b>Ονομαστική τάση εξόδου DC</b>
Έως 3 kWp	$V_{DC}$ : 100 - 200 V
Έως 15 kWp	$V_{DC}$ : 200 – 400 V
Άνω των 15 kWp	$V_{DC}$ : 400 – 700 V

Η επιλογή της συνδεσμολογίας των ΦΒ πλαισίων θα γίνει, αφού βρεθεί ο κατάλληλος τύπος ρυθμιστή φόρτισης. Το ΦΒ υβριδικό σύστημα σε ένα πλοίο ουσιαστικά λειτουργεί ως σύστημα, το οποίο δεν τροφοδοτείται από το δίκτυο και διαθέτει ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Για την επίτευξη της μέγιστης ισχύος, που μπορεί να διαθέσει το σύστημα, οι ρυθμιστές φόρτισης χρειάζεται να διαθέτουν και αλγόριθμο MPPT. Ο αλγόριθμος αυτός με βάση τη χαρακτηριστική καμπύλη  $V - I$  προσαρμόζει τις τιμές τάσεως και ρεύματος ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη ισχύς εισόδου. Υπενθυμίζεται, πως η ισχύς αποτελεί το γινόμενο τάσης ρεύματος.

Ο ρυθμιστής φόρτισης, ο οποίος χρησιμοποιείται στην εργασία ανήκει στην εταιρεία Victron Energy και στον πίνακα 5-13 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-13: Χαρακτηριστικά Ρυθμιστή φόρτισης συστήματος.

Πηγή: (<https://www.victronenergy.gr/solar-charge-controllers>), Ανακτήθηκε: (20.05.2022)

<b>BlueSolar Charge Controller (250/100-Tr VE.Can)</b>	
Rated charge current (Ρεύμα εξόδου)	100 A
Nominal PV power, 48V (Ονομαστική τάση)	5.800 W
Maximum efficiency (Μέγιστη απόδοση)	99%
Charge voltage 'absorption' (Τάση φόρτισης)	57,6 V
Maximum PV open circuit voltage ( $V_{DC}$ )	250V absolute maximum coldest conditions
Operating temperature	-30 to +60°C (full rated output up to 40°C)

Λαμβάνοντας υπόψιν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή φόρτισης και σύμφωνα με το πλήθος των ΦΒ πλαισίων που διατίθεται (450 ΦΒ πλαίσια) η συνδεσμολογία που επιλέχθηκε είναι η εξής:

Σε σειρά θα συνδεθούν πέντε ΦΒ πλαίσια, δηλαδή μια συστοιχία θα αποτελείται από  $N_{\sigma} = 5$ . Επίσης, ο αριθμός των παράλληλων συνδέσεων θα είναι ίσος με  $N_{\pi} = 90$  κλάδους.



Η επιλογή της συνδεσμολογίας αυτής έγινε με τον εξής τρόπο:

Τα ΦΒ πλαίσια που μπορούν να συνδεθούν σε σειρά θα πρέπει να διαθέτουν τάση  $V_{m\Sigma} \leq V_{DC}$ . Αυτό συμβαίνει, διότι η ονομαστική τάση του ρυθμιστή φόρτισης, δηλαδή η τάση εισόδου είναι ίση με 250 V. Έτσι ο αριθμός των πλαισίων σε σειρά υπολογίζεται:

$$250 \geq V_{m\Sigma},$$

$$250 \geq N_{\sigma} \cdot 41,7 \rightarrow N_{\sigma} \leq 5,99 \approx 5 \text{ ΦΒ πλαίσια σε σειρά} \quad (5-5)$$

Επιπλέον, ο τύπος που δίνει τον αριθμό των σε σειρά ΦΒ πλαισίων χωρίς την ύπαρξη ρυθμιστή φόρτισης είναι ο εξής:

$$N_{\sigma} = \frac{V_{m\Sigma}}{V_{m\Pi}} \quad (5-6)$$

Όπου,

$V_{m\Sigma}$ : η τάση όλου του ΦΒ συστήματος, δηλαδή η τάση μίας συστοιχίας,

$V_{m\Pi}$ : η μέγιστη τάση ενός ΦΒ πλαισίου,  $V_{m\Pi} = V_{OC} = 41,7 \text{ V}$ .

Ο αριθμός των παράλληλων συνδέσεων του συστήματος υπολογίζεται μέσω του παρακάτω τύπου:

$$N = N_{\pi} \cdot N_{\sigma}, \text{ δηλαδή } N_{\pi} = \frac{N}{N_{\sigma}} \rightarrow N_{\pi} = \frac{450}{5} \quad (5-7)$$

Έτσι, ο αριθμός των παράλληλων συστοιχιών είναι  $N_{\pi} = 90$ .

Ο παράγοντας ο οποίος ενδέχεται να καθορίσει το σύνολο των ΦΒ πλαισίων που θα συνδέονται με έναν ρυθμιστή φόρτισης είναι το όριο της ισχύος του ρυθμιστή φόρτισης, δηλαδή η ονομαστική ισχύς των ΦΒ πλαισίων που μπορεί να δεχτεί. Η τιμή αυτή είναι ίση με 5.800 W. Έτσι σε κάθε ρυθμιστή φόρτισης ισχύει:

$$5.800 \text{ W} \geq N_{PY\Theta M_{\Phi}} \cdot 605 \rightarrow N_{PY\Theta M_{\Phi}} \leq 9,587 \approx 9 \text{ ΦΒ πλαίσια} \quad (5-8)$$

Όπου,  $N_{PY\Theta M_{\Phi}}$  ο αριθμός των ΦΒ πλαισίων που θα εξυπηρετούνται από έναν ρυθμιστή φόρτισης.

Ο ρυθμιστής φόρτισης, ωστόσο, έχει τη δυνατότητα να μειώνει την ισχύ, όταν αυτή υπερβαίνει το όριο. Αυτό, πρακτικά, θα συμβεί σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις, διότι οι ρυθμιστές φόρτισης έχουν ανοχή της τάξεως των 10%, ενώ στη σύνδεση 10 ΦΒ πλαισίων (6.050 W) η παραπάνω εγκατεστημένη ισχύς (στην περίπτωση μέγιστης ισχύος)

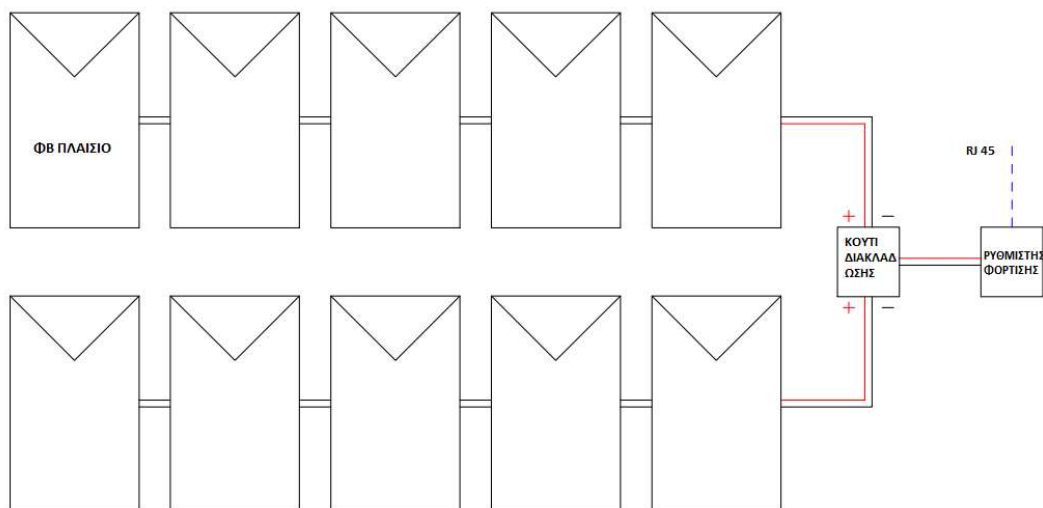
υπερβαίνει την ισχύ του ρυθμιστή φόρτισης κατά 4,3%. Έτσι, ο αριθμός των ΦΒ πλαισίων, που θα συνδεθούν με έναν ρυθμιστή φόρτισης είναι:

$$N_{PY\Theta M_{\Phi}} = 10$$

Εφόσον κάθε ρυθμιστής θα εξυπηρετεί 10 ΦΒ πλαίσια, δηλαδή δύο συστοιχίες των πέντε ΦΒ πλαισίων παράλληλα συνδεδεμένες μεταξύ τους, θα χρειαστούν 45 ρυθμιστές φόρτισης για την κάλυψη όλου του συστήματος.

$$N_{PY\Theta} = \frac{90 \text{ Συστοιχίες}}{2 \frac{\text{Συστοιχίες}}{\text{ΡΥΘΜΙΣΤΗ}}} = 45 \text{ ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ} \quad (5-9)$$

Οι ρυθμιστές φόρτισης έχουν τη δυνατότητα παράλληλης μεταξύ τους σύνδεσης με όριο τους 25 ρυθμιστές φόρτισης. Έτσι, 25 θα συνδεθούν παράλληλα και θα δημιουργηθεί μία δεύτερη παράλληλη σύνδεση με τους υπόλοιπους 20.



ΕΙΚΟΝΑ 5-14: Παράλληλη σύνδεση δύο φωτοβολταϊκών κλάδων αποτελούμενοι από πέντε φωτοβολταϊκά πλαίσια ο καθένας και σύνδεση τους με τον ρυθμιστή φόρτισης. Στο σύστημα μας θα είναι 45 όμοιες διατάξεις.

Στην εικόνα 5-14 παρουσιάζονται δύο συστοιχίες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες παράλληλα μεταξύ τους. Στη συνέχεια, μετά την παράλληλη σύνδεση ακολουθεί το κουτί διακλάδωσης και έπειτα, ο ρυθμιστής φόρτισης. Από τον ρυθμιστή φόρτισης φεύγει καλώδιο επικοινωνίας RJ 45. Το σύστημα που μελετάται διαθέτει 45 τέτοιες συνδέσεις.

## 5.2.4 Υπολογισμός ηλεκτρικών συσσωρευτών Φ/Β συστήματος

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές στη λειτουργία ενός ΦΒ συστήματος επί του πλοίου παίζουν καθοριστικό ρόλο. Αρχικά, οι συσσωρευτές έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, σε περίπτωση που οι ηλεκτρικές ανάγκες του πλοίου είναι μικρότερες συγκριτικά με την παραγόμενη ενέργεια. Έτσι, αξιοποιείται όλη η ενέργεια, που μπορεί να συλλέξει το ΦΒ σύστημα. Επιπλέον, έχουν την δυνατότητα σταθερής διανομής ενέργειας και την αποφυγή αυξομειώσεων, που ενδέχεται να επηρεάσουν και να καταστρέψουν το ΦΒ σύστημα και τέλος, όταν το ΦΒ σύστημα είναι απευθείας συνδεδεμένο με το κύριο δίκτυο, οι μπαταρίες προσφέρουν ασφαλή διανομή ρεύματος τάσης.

Για την επιλογή του κατάλληλου συσσωρευτή θα πρέπει να μελετηθούν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του και να διευκρινιστεί εάν καλύπτουν τις ανάγκες του συστήματος που μελετάται. Κάποια από τα χαρακτηριστικά του είναι η ονομαστική τάση, η χωρητικότητα και ο βαθμός εκφόρτισης.

### 5.2.4.1 Ονομαστική τάση ηλεκτρικού συσσωρευτή

Η ονομαστική τάση των συσσωρευτών μπορεί να καθοριστεί από την ισχύ αιχμής του ΦΒ πεδίου. Παρακάτω, στον πίνακα 5-14, φαίνονται οι ονομαστικές τάσεις των ηλεκτρικών συσσωρευτών για τις διάφορες τιμές ισχύος αιχμών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-14: Ονομαστική τάση συσσωρευτών ανάλογα με την τάση αιχμής του Φωτοβολταϊκού πεδίου

Ισχύς αιχμής ΦΒ πεδίου $V_{MPP}$	Ονομαστική τάση συσσωρευτών $V_B$
0 – 3 kWp	12 V
3 – 10 kWp	24 – 48 V
10 – 15 kWp	48 -60 V
> 15 kWp	> 48 V

Αυτό που θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι η συμβατότητα της τάσεως εισόδου των συσσωρευτών και εκείνης της εξόδου των ρυθμιστών φόρτισης. Από τον προηγούμενο πίνακα συμπεραίνεται πως, για το ΦΒ σύστημα της διπλωματικής, η ιδανική ονομαστική τάση των συσσωρευτών είναι ίση με 48 V. Σε περίπτωση που η τάση αυτή δεν είναι συμβατή, τότε απαιτείται η χρήση μετατροπέα τάσης DC – DC, ο οποίος αναπόφευκτα, αυξάνει το κόστος της κατασκευής.

#### 5.2.4.2 Συνολική χωρητικότητα συσσωρευτών

Για να υπολογιστεί η χωρητικότητα που θα πρέπει να διαθέτουν οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος, ο οποίος περιέχει τις ημέρες αυτοδυναμίας του συστήματος, τον βαθμό εκφόρτισης και άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά. Έτσι, έχουμε:

$$C = \frac{[(n+b) \cdot m \cdot E_K]}{[\sigma_{\gamma B} \cdot \sigma_{EK} \cdot \beta_{EK} \cdot V_B]} \quad (5-10)$$

Όπου:

$n$  : αριθμός ημερών αυτονομίας του συστήματος, δηλαδή ημέρες χωρίς ηλιοφάνεια.

$b$  : ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας, ο οποίος θα ληφθεί ίσος με 0,90. Υπολογίζεται πως τουλάχιστον το 10% της ενέργειας θα τροφοδοτείται απευθείας από τα ΦΒ πλαίσια, διότι η συνεχής ενεργειακή ζήτηση των φορτίων απαιτεί ένα ποσοστό ταυτοχρονισμού. Το υπόλοιπο 90% θα τροφοδοτείται από τους συσσωρευτές.

$$b = \frac{E_{KE}}{E_K} \quad (5-11)$$

$E_{KE}$  [Wh/ημέρα]: ηλεκτρική ενέργεια που καλύπτει ο συσσωρευτής.

$E_K$  [Wh/ημέρα]: ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης ίση με 835 [kWh/day].

$m$  : συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων για την κάλυψη υποτίμησης αναγκών της κατανάλωσης. Λαμβάνεται ίσος με 1 καθώς τα φορτία θα είναι σταθερής τιμής.

$\sigma_{\gamma B}$  : συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή. Λαμβάνεται ίσος με 0,90 λόγω της καλύτερης ποιότητας του συσσωρευτή (gel συσσωρευτές).

$\sigma_{EK}$  : συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας, ίσος με 0,95.

$\beta_{EK}$  : βάθος εκφόρτισης ηλεκτρικού συσσωρευτή, ο οποίος θα ληφθεί ίσος με 0,85 για να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η ενέργεια των συσσωρευτών και να επιτευχθεί εξοικονόμηση χρημάτων και χώρου.

$V_B$  [ V ]: ονομαστική τάση συσσωρευτή, ίση με 48 V.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-15: Χωρητικότητα συστήματος συσσωρευτών ανάλογα τις απαιτήσεις του φωτοβολταϊκού πεδίου.

<b>Υπολογισμός χωρητικότητας συστήματος συσσωρευτών</b>	
Ονομαστική τάση συσσωρευτών, $V_B$	48 [V]
Ημέρες αυτοδυναμίας, n	0,5
Ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης, $E_K$	751.500 [Wh/day]
Συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων, m	1
Συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή, $\sigma_{ΓΒ}$	0,90
Συντελεστής απωλειών μεταφοράς, $\sigma_{EK}$	0,95
Βάθος εκφόρτισης ηλεκτρικών συσσωρευτών, $\beta_{EK}$	0,85
Ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας, b	0,90
Χωρητικότητα συσσωρευτών, C	40.931 [Ah]

#### 5.2.4.3 Επιλογή Ηλεκτρικών συσσωρευτών συστήματος

Η συνολική χωρητικότητα που θα πρέπει να διαθέτουν οι μπαταρίες με βάση τους υπολογισμούς της παραπάνω ενότητας είναι  $C=40.931$  [Ah]. Οι συσσωρευτές που επιλέχθηκαν στην παρούσα μελέτη είναι το μοντέλο RES SOPzV της εταιρείας SUNLIGHT Reliable Battery Solutions. Οι συγκεκριμένοι συσσωρευτές είναι μορφής GEL, οι οποίοι διαθέτουν μοναδικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τους απλούς συσσωρευτές. Μερικά από αυτά είναι η αύξηση κατά 60% των κύκλων ζωής φτάνοντας περίπου τους 2.400 κύκλους σε θερμοκρασία 20° C, η αξιοπιστία και η υψηλή χωρητικότητα τους με τη βοήθεια των κραμάτων μολύβδου – ασβεστίου και το μεγάλο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας που διαθέτουν. Τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή που θα χρησιμοποιηθεί αναγράφονται στον πίνακα 5-16.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-16: Χαρακτηριστικά συσσωρευτή που επιλέχθηκε για το σύστημα  
 Πηγή: (<https://www.the-sunlight-group.com/en/global>)

Χαρακτηριστικά συσσωρευτή RES SOPzV model	
Ονομαστική τάση συσσωρευτή	2 [V]
Ονομαστική χωρητικότητα συσσωρευτή	994 [Ah]
Ονομαστική ενέργεια συσσωρευτή	2720 [Wh]
Ένταση ρεύματος βραχυκύκλωσης	7500 [A]
Μήκος	198 [mm]
Πλάτος	137 [mm]
Ύψος	568 [mm]
Βάρος	48,8 [kg]

Εφόσον η επιθυμητή τάση λειτουργίας είναι ίση με 48 V, θα πρέπει να συνδεθούν 24 συσσωρευτές σε σειρά. Έτσι, για  $N_{\sigma} = 24$  η τάση θα προκύψει  $V_B = 2 \cdot 24 = 48$  V. Στην σύνδεση σε σειρά, δηλαδή σε έναν κλάδο συσσωρευτών αυτά που μεταβάλλονται είναι η τάση και η ενέργεια, ενώ η χωρητικότητα παραμένει σταθερή. Για την αύξηση της θα πρέπει να υπάρξει παράλληλη σύνδεση των κλάδων. Εφόσον η ολική χωρητικότητα που απαιτεί το σύστημα είναι ίση με  $C=40.931$  [Ah] το πλήθος των παράλληλων συστοιχιών υπολογίζεται παρακάτω:

$$N_{\pi} = \frac{C}{C_{\text{Συστοιχιών}}} = \frac{40.931}{994} \rightarrow N_{\pi} = 41,18 \approx 42 \quad (5-12)$$

Ωστόσο, το πλήθος των συστοιχιών στην διπλωματική εργασία επιλέγεται ίσο με 45 και η συνολική χωρητικότητα του συστήματος συσσωρευτών είναι ίση με:

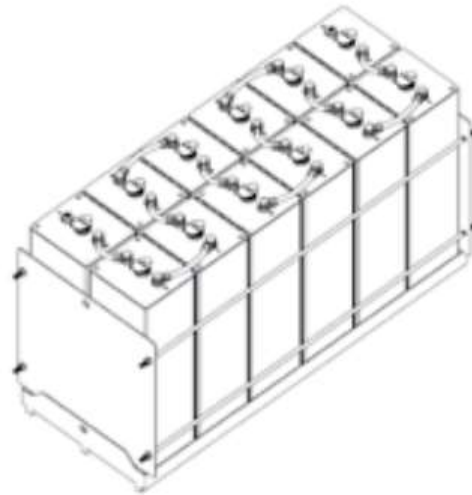
$$C_{\text{Πραγματικό}} = 45 \cdot 994 = 44.730 \text{ [Ah]}$$

Ο συνολικός αριθμός του συστήματος των συσσωρευτών θα είναι ίσος με:

$$N = N_{\sigma} \cdot N_{\pi_{\text{πραγματικό}}} = 24 \cdot 45 = 1.080 \text{ συσσωρευτές} \quad (5-13)$$

Επιπλέον, είναι σημαντικό να σημειωθεί πως ο ρυθμιστής φόρτισης θα πρέπει να έχει τάση εξόδου μεγαλύτερη του  $1,2 \cdot 48$ , δηλαδή μεγαλύτερη των 57,6 V ( $V_{MS} > 1,2 V_B$ ). Τέλος, ο κάθε ρυθμιστής φόρτισης θα αντιστοιχεί και σε μία συστοιχία από 24 μπαταρίες.

Ένα ενδεικτικό σχήμα συνδεσμολογίας 12 μπαταριών με τάση 2 V η κάθε μία, άρα συνολική 24 V φαίνεται στην εικόνα 5-15. Στην παρούσα διπλωματική εργασία απαιτείται σύνδεση σε σειρά ενός επιπλέον αντίστοιχου πακέτου 12 μπαταριών, δηλαδή η σύνδεση σε σειρά θα περιέχει 24 μπαταρίες συνολικά, ώστε να επιτευχθεί η τάση των 48 V.



ΕΙΚΟΝΑ 5-15: Σύνδεση 12 συσσωρευτών σε σειρά με τάση 2 V η κάθε μία δημιουργώντας συνολική τάση 24 V.  
*Πηγή: (Sunlight), Ανακτήθηκε: (22.05.2022)*

## 5.2.5 Επιλογή αντιστροφέων DC-AC

Η επιλογή των inverters καθορίζεται από τα φορτία του πλοίου που επιθυμούμε να καλύψει το ΦΒ σύστημα που μελετάται. Ο αντιστροφές DC-AC που θα επιλεγεί είναι της εταιρείας Victron Energy το μοντέλο Quattro 10.000 [W], ο οποίος έχει την ιδιότητα του φορτιστή και μπορεί να λειτουργήσει ως αντιστροφές πραγματικά ημιτονοειδούς κύματος. Τα χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στην εικόνα 5-16.

Quattro	12/3000/120-50/50 24/3000/70-50/50	12/5000/220-100/100 24/5000/120-100/100 48/5000/70-100/100	24/8000/200-100/100 48/8000/110-100/100	48/10000/140-100/100
PowerControl / PowerAssist	Yes			
Integrated Transfer switch	Yes			
AC inputs (2x)	Input voltage range: 187-265 VAC Input frequency: 45 – 65 Hz Power factor:			
Maximum feed through current (A)	2x 50	2x100	2x100	2x100
<b>INVERTER</b>				
Input voltage range (V DC)	9,5 – 17V 19 – 33V 38 – 66V			
Output (1)	Output voltage: 230 VAC ± 2% Frequency: 50 Hz ± 0,1%			
Cont. output power at 25°C (VA) (3)	3000	5000	8000	10000
Cont. output power at 25°C (W)	2400	4000	6400	8000
Cont. output power at 40°C (W)	2200	3700	5500	6500
Cont. output power at 65°C (W)	1700	3000	3600	4500
Peak power (W)	6000	10000	16000	20000
Maximum efficiency (%)	93 / 94	94 / 94 / 95	94 / 96	96
Zero load power (W)	20 / 20	30 / 30 / 35	60 / 60	60
Zero load power in AES mode (W)	15 / 15	20 / 25 / 30	40 / 40	40
Zero load power in Search mode (W)	8 / 10	10 / 10 / 15	15 / 15	15
<b>CHARGER</b>				
Charge voltage 'absorption' (V DC)	14,4 / 28,8	14,4 / 28,8 / 57,6	28,8 / 57,6	57,6
Charge voltage 'float' (V DC)	13,8 / 27,6	13,8 / 27,6 / 55,2	27,6 / 55,2	55,2
Storage mode (V DC)	13,2 / 26,4	13,2 / 26,4 / 52,8	26,4 / 52,8	52,8
Charge current house battery (A) (4)	120 / 70	220 / 120 / 70	200 / 110	140

ΕΙΚΟΝΑ 5-16: Χαρακτηριστικά inverter DC – AC που επιλέχθηκε για το σύστημα για 48 V.  
Πηγή: (VictronEnergy), Ανακτήθηκε: (21.05.2022)

Εφόσον η απαιτούμενη ισχύς του συστήματος είναι ίση με 167.000 [W], το πλήθος των inverters είναι ίσο με:

$$N_{Inv} = \frac{167.000}{10.000} = 16,7 \approx 17$$

Η συνολική ισχύς των inverters θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη ισχύ του συστήματος, καθώς ορισμένα συστήματα, κυρίως κινητήρες, έχουν μεγαλύτερη ισχύ εκκίνησης από την ονομαστική τους. Γι' αυτόν τον λόγο το Peak Power είναι ίσο με 20.000 [W].

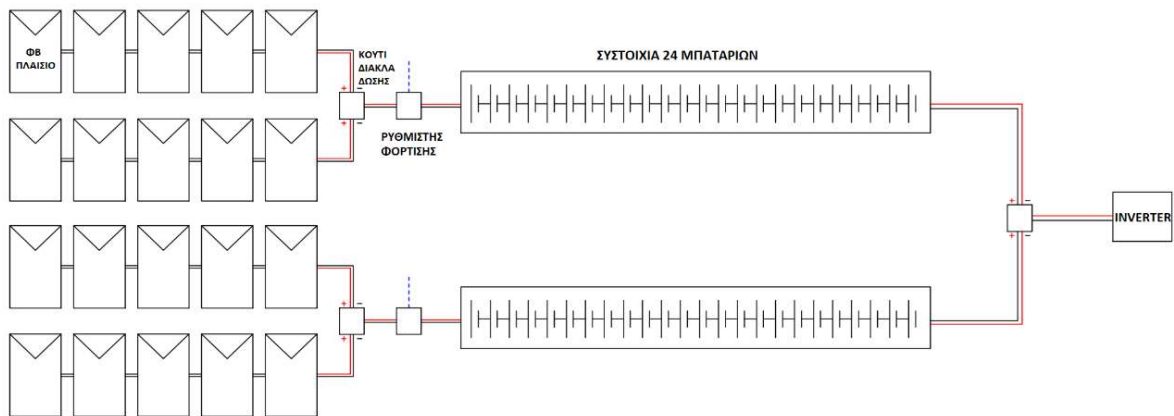
Από τα χαρακτηριστικά του inverter φαίνεται πως για διαφορετικές θερμοκρασίες αλλάζει και η ισχύς που μπορούν να καλύψουν. Έτσι, απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός inverters για την πλήρη κάλυψη της ισχύος του συστήματος. Επιπλέον, για την ύπαρξη συμμετρίας στη συνδεσμολογία συσσωρευτών και inverters θα τοποθετηθούν 23 inverters, άρα  $N_{Inv_{πραγμ}} = 23$ .



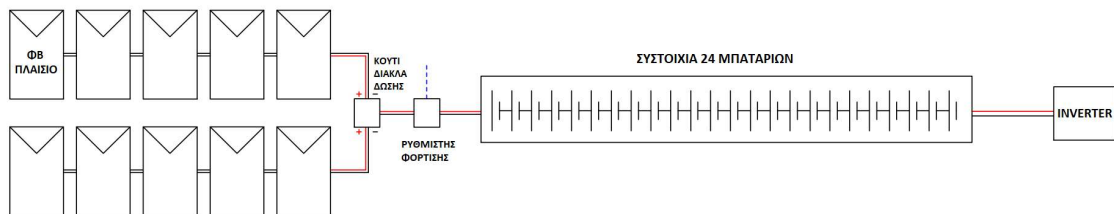
Για 23 inverters προκύπτει συνολική ισχύς ίση με:

$$P_{Inv} = 23 \cdot 10.000 [W] = 230.000 [W]$$

Από τα χαρακτηριστικά του inverter είναι γνωστό πως οι εισόδοι που διαθέτει είναι δύο. Έτσι, από τις 45 συστοιχίες μπαταριών οι 44 θα συνδεθούν με 22 inverters και η 45<sup>η</sup> θα συνδεθεί με εκείνον που απομένει.



ΕΙΚΟΝΑ 5-17: Παράλληλη σύνδεση δύο συστοιχιών συσσωρευτών με έναν inverter. Το σύστημα διαθέτει 22 όμοιες διατάξεις.



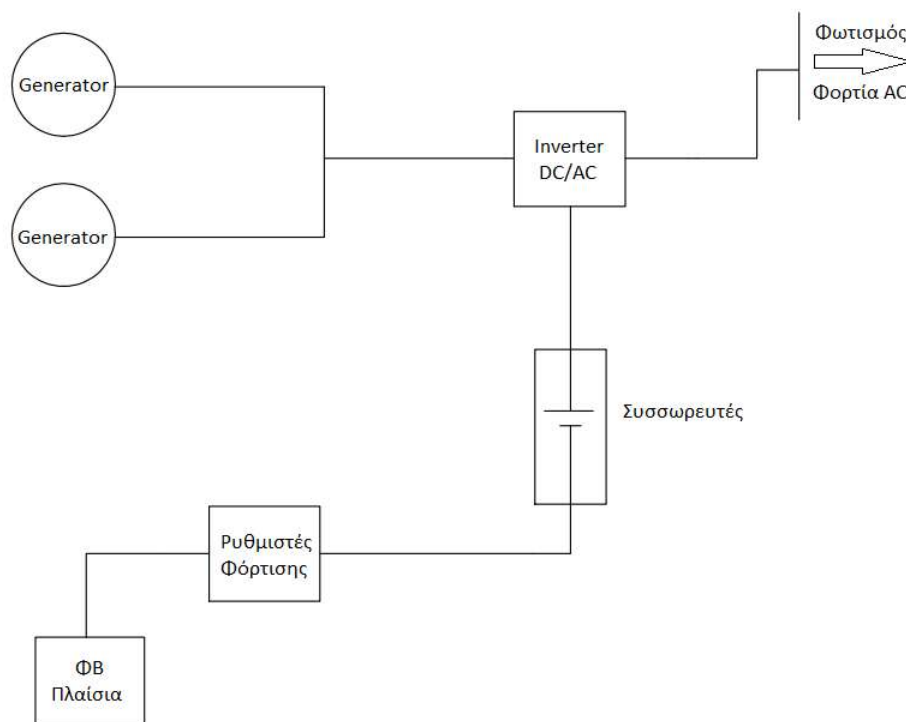
ΕΙΚΟΝΑ 5-18: Σύνδεση σε σειρά υπολειπόμενης συστοιχίας με έναν inverter. Το σύστημα διαθέτει μία διάταξη.

Τέλος, όταν οι μπαταρίες φτάσουν στο χαμηλότερο επίπεδο (cut off), το οποίο έχει οριστεί ίσο με το 15%, προκειμένου να συνεχιστεί η αδιάλειπτη τροφοδοσία των φορτίων, θα συνδεθούν στις εισόδους του inverter οι δύο γεννήτριες. Ο συγκεκριμένος Inverter έχει επιλεγθεί καταλλήλως για να μπορεί να λειτουργεί και σαν 'διακόπτης' για την επιλογή μεταξύ γεννήτριας και φωτοβολταϊκών πλαισίων.

### 5.3 Μονογραμμικό σχέδιο συστήματος

Το διάγραμμα του συστήματος που μελετάται φαίνεται στην εικόνα 5-19. Το σύστημα συγκεντρωτικά αποτελείται από 450 ΦΒ πλαίσια, 45 ρυθμιστές φόρτισης, 1.080 συσσωρευτές και 25 αντιστροφείς. Η ενέργεια που παράγεται από τα ΦΒ πλαίσια διανέμεται στον φωτισμό κατά τη διάρκεια της φόρτωσης και εκφόρτωσης. Σε περίπτωση παραγωγής περισσότερης ενέργειας από την απαιτούμενη, θα διανέμεται και σε υπόλοιπα AC φορτία. Επιπλέον, το σύστημα στις υπόλοιπες καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου θα διακόπτει τη λειτουργία του και θα φορτίζει τους συσσωρευτές.

Εάν παρουσιάζεται απότομη πτώση της ισχύος εξόδου και οι συσσωρευτές δεν μπορούν να καλύψουν την απαιτούμενη ενέργεια, τότε μέσω του inverter χρησιμοποιείται η αρχική ισχύς του συστήματος και η παράκαμψη παύει να λειτουργεί. Τέλος, εάν παρουσιαστεί βλάβη στο ΦΒ σύστημα χρησιμοποιείται μονοπολικός διακόπτης που διακόπτει τη λειτουργία του.



ΕΙΚΟΝΑ 5-19: Προτεινόμενος τρόπος σύνδεσης ΦΒ συστήματος για την τροφοδοσία AC φορτίων.

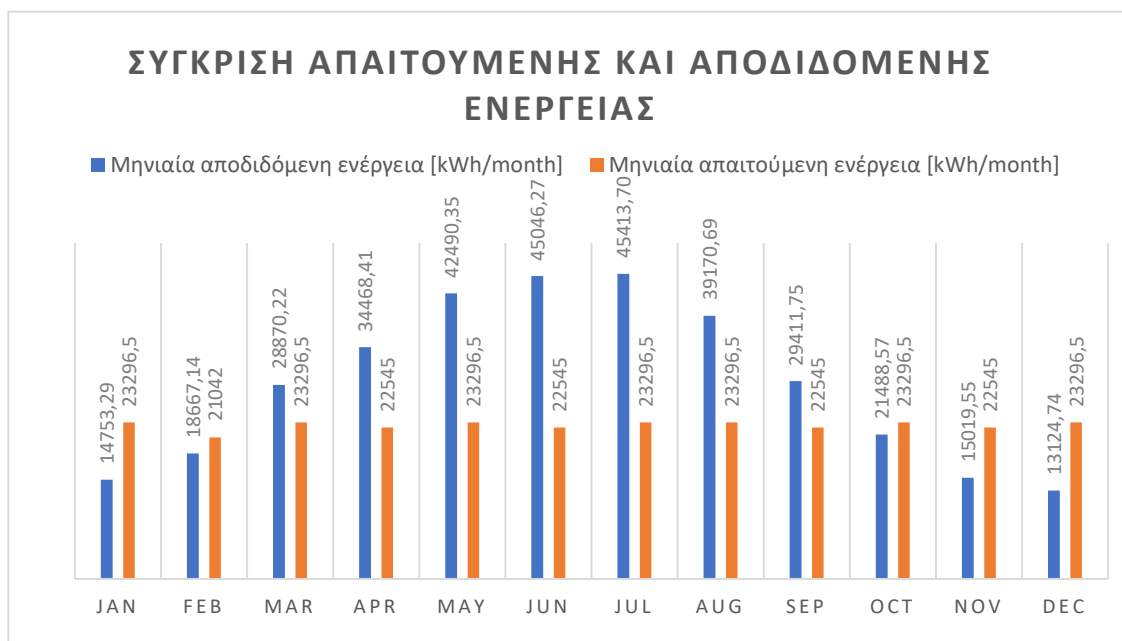
## 5.4 Εξοικονόμηση καυσίμου από το ΦΒ σύστημα

Το φωτοβολταϊκό σύστημα της εργασίας, όπως ήδη έχει αναφερθεί, χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της φορτοεκφόρτωσης για την κάλυψη του φωτισμού και για συνολικά 5 ώρες. Για εκείνες τις ώρες παρουσιάζονται από τις μετρήσεις του προγράμματος PVGIS η συνολική μηνιαία αποδιδόμενη ενέργεια του συστήματος. Συγκριτικά, λοιπόν, με τις 751,5 [kWh] ημερησίως πολλαπλασιασμένες με το πλήθος των ημερών κάθε μήνα, προκύπτει το διάγραμμα 5-20, στο οποίο φαίνεται η αποδιδόμενη και η απαιτούμενη ενέργεια για τον φωτισμό.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-17: Μέγιστη αποδιδόμενη ΦΒ ενέργεια ανά μήνα –  
Μέγιστη απαιτούμενη ενέργεια για τον φωτισμό κατά τη διάρκεια φορτω-εκφόρτωσης

Months	E_MPI Per Month [kWh] Μέγιστη αποδιδόμενη ενέργεια	E_lighting Per Month [kWh] Απαιτούμενη ενέργεια συστήματος
Jan	14753,29	23296,5
Feb	18667,14	21042
Mar	28870,22	23296,5
Apr	34468,41	22545
May	42490,35	23296,5
Jun	45046,27	22545
Jul	45413,70	23296,5
Aug	39170,69	23296,5
Sep	29411,75	22545
Oct	21488,57	23296,5
Nov	15019,55	22545
Dec	13124,74	23296,5

ΕΙΚΟΝΑ 5-20: Απεικόνιση μηνιαίας αποδιδόμενης ενέργειας συστήματος και απαιτούμενης ενέργειας για τον φωτισμό για τάση 167 [Kw]



Παρατηρείται πως, για τους χειμερινούς μήνες το σύστημα δεν καλύπτει πλήρως τις ενεργειακές ανάγκες του πλοίου. Έτσι, η γεννήτρια θα συνδέεται και θα τροφοδοτεί τα φορτία για την πλήρη κάλυψη. Επιπλέον, τους καλοκαιρινούς μήνες η αποδιδόμενη ενέργεια είναι σχεδόν διπλάσια από την απαιτούμενη. Η ενέργεια αυτή μπορεί να αποθηκευτεί στις μπαταρίες με σκοπό την τροφοδοσία των φορτίων τα διαστήματα που δεν υπάρχει υψηλή ηλιοφάνεια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-18: Δεδομένα κατανάλωσης καυσίμου έως τον Νοέμβριο του 2021 για το πλοίο που μελετάται.

Row Labels	Sum of Total Fuel [MT]	Sum of ME Cons [MT]	Sum of DG Cons [MT]	Sum of Boiler Cons [MT]
	<b>6.259</b>	<b>5449,1</b>	<b>669,4</b>	<b>140,4</b>
Jan	578	504,4	62,9	10,7
Feb	634	574	50,4	10
Mar	636	560,9	62,6	12,9
Apr	687	631,9	46,9	8,2
May	518	446,5	60,8	11
Jun	359	267,6	74	17,2
Jul	454	377,4	64,3	12,3
Aug	493	419,4	58,8	15,1
Sep	584	502,1	68,8	12,9
Oct	702	628,7	58,2	14,6
Nov	613	536,2	61,7	15,5
<b>Grand Total</b>	<b>6.259</b>	<b>5449,1</b>	<b>669,4</b>	<b>140,4</b>

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας που μελετάται το πλοίο χρησιμοποιεί τις δύο main generators που διαθέτει (1.100 kW). Στον πίνακα 5-18 δίνονται τα δεδομένα από την κατανάλωση καυσίμου που διαθέτει το πλοίο για το έτος 2021 και έως τον Νοέμβριο. Η στήλη που αφορά στην κατανάλωση που γίνεται κατά τη διάρκεια της φορτοεκφόρτωσης είναι εκείνη με το Sum of DG Cons. (Diesel Generator). Για τον Δεκέμβριο υπολογίστηκε μία μέση τιμή του καυσίμου ίση με 62,3 tons.

Ο τύπος που δίνει την κατανάλωση καυσίμου του πλοίου σε τόνους ανά έτος είναι ο εξής:

$$Q_t = P_{rated} \cdot SFOC \cdot LF \cdot h [tons] \quad (5-14)$$

Όπου:

$P_{rated}$ : η ονομαστική ισχύς της ηλεκτρογεννήτριας ντίζελ [LW].

LF: ο συντελεστής λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας ντίζελ και

SFOC: η ειδική κατανάλωση καυσίμου με μονάδες μέτρησης g/KWh. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου εκφράζει την ποσότητα καυσίμου που χρειάζεται για να παραχθεί μία κιλοβατώρα. Ο τύπος της ειδικής κατανάλωσης SFOC παρουσιάζεται παρακάτω:

$$SFOC = \dot{m}_{fuel} \cdot \frac{1000}{P_{mech}} \left[ \frac{g}{KWh} \right] \quad (5-15)$$

Όπου:

$\dot{m}_{fuel}$ : Η παροχή μάζας καυσίμου [kg/h].

$P_{mech}$ : Η μηχανική ισχύς του κινητήρα [kW].

Στην περίπτωση του πλοίου που μελετάται η ειδική κατανάλωση καυσίμου είναι ήδη γνωστή και παρουσιάζεται στον πίνακα 5-19. Αξίζει να σημειωθεί πως η ειδική κατανάλωση απαιτεί μικτή μέτρηση καθώς το πλοίο διαθέτει συστήματα Scrubber και επιτρέπεται η χρήση HFO. Τα ποσοστά καυσίμου που χρησιμοποιεί είναι 60% HFO και 40% MGO. Για τον Νοέμβριο και τον Δεκέμβριο βρέθηκε μία μέση τιμή εκείνων των μηνών με τιμές 272 και 286  $\left[ \frac{g}{KWh} \right]$  αντίστοιχα. Επιπλέον, παρουσιάζεται η ημερήσια ενέργεια που χρειάζεται το πλοίο σε GWh.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-19: Ειδική κατανάλωση SFOC για τη Diesel Engine και η ημερήσια μέση τιμή της ενέργειας σε GWh.

Πηγή: (Neptune Lines)

Row Labels	Average of DG SFOC	Average of Daily Energy (GWh)
	<b>260</b>	<b>11,6</b>
2021-1	300	11,0
2021-2	317	9,4
2021-3	268	10,5
2021-4	289	10,4
2021-5	254	11,5
2021-6	259	11,1
2021-7	241	12,5
2021-8	214	13,7
2021-9	217	13,3
2021-10	244	12,6
<b>Grand Total</b>	<b>260</b>	<b>11,6</b>

Για τον υπολογισμό του καυσίμου, που χρειάζεται για τις 5 ώρες λειτουργίας του πλοίου και για τις 751,5 [kWh] υπολογίζεται παρακάτω:

$$Q = days \cdot E_{lighting} [kWh] \cdot SFOC \left[ \frac{g}{kWh} \right] \quad (5-16)$$

Ο παραπάνω τύπος υπολογίζει το καύσιμο σε γραμμάρια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-20: Υπολογισμός μηνιαίων τόνων καυσίμου που απαιτούνται για τις 5 ώρες στην κατάσταση λειτουργίας που μελετάται.

Months	Days	Sum of DG Cons [MT]	Average of DG SFOC [g/kWh]	E_lighting Απαιτούμενη ημερήσια ενέργεια για 5 ώρες[kWh]	Μηνιαία ποσότητα καυσίμου για 5 ώρες και 167kW [kg]	Μηνιαία ποσότητα καυσίμου για 5 ώρες και 167kW [tons]
<b>Jan</b>	31	62,9	300	751,5	6988,95	6,99
<b>Feb</b>	28	50,4	317	751,5	6670,31	6,67
<b>Mar</b>	31	62,6	268	751,5	6243,46	6,24
<b>Apr</b>	30	46,9	289	751,5	6515,51	6,52
<b>May</b>	31	60,8	254	751,5	5917,31	5,92
<b>Jun</b>	30	74	259	751,5	5839,16	5,84
<b>Jul</b>	31	64,3	241	751,5	5614,46	5,61
<b>Aug</b>	31	58,8	214	751,5	4985,45	4,99
<b>Sep</b>	30	68,8	217	751,5	4892,27	4,89
<b>Oct</b>	31	58,2	244	751,5	5684,35	5,68
<b>Nov</b>	30	61,7	272	751,5	6132,24	6,13
<b>Dec</b>	31	62,3	286	751,5	6662,80	6,66
<b>Sum</b>	-	669,4	-	7515	72146,25	72,15

Για την εξοικονόμηση καυσίμου που επιφέρεται από το Φ/Β σύστημα θα πρέπει να υπολογιστούν, τουλάχιστον κατά προσέγγιση, οι ημέρες ανά μήνα, που θα καλύπτονται πλήρως οι ανάγκες από την νέα εγκατάσταση.

Έτσι, από το διάγραμμα της εικόνας 5-20 υπολογίζονται οι μέρες και στη συνέχεια, στον πίνακα 5-21 το καύσιμο ανά μήνα, που εξοικονομείται. Με τα δεδομένα του έτους 2021 η ποσότητα καυσίμου αγγίζει τους 63,24 τόνους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-21: Υπολογισμός καυσίμου που εξοικονομείται για την κατάσταση λειτουργίας που μελετάται.

Months	Μηνιαία ποσότητα καυσίμου για 5 ώρες και 167kW [tons]	Ημερήσια ποσότητα καυσίμου για 5 ώρες και 167kW [tons]	Ημέρες κάλυψης από το σύστημα	Εξοικονόμηση καυσίμου για τις ημέρες κάλυψης [tons]
Jan	6,99	0,23	20	4,51
Feb	6,67	0,24	24	5,72
Mar	6,24	0,20	31	6,24
Apr	6,52	0,22	30	6,52
May	5,92	0,19	31	5,92
Jun	5,84	0,19	30	5,84
Jul	5,61	0,18	31	5,61
Aug	4,99	0,16	31	4,99
Sep	4,89	0,16	30	4,89
Oct	5,68	0,18	28	5,13
Nov	6,13	0,20	20	4,09
Dec	6,66	0,21	18	3,79
Sum	72,15	2,40	324	63,24

## 5.5 Εκπομπές ρύπων

Βασικό στοιχείο για τον υπολογισμό των εκπομπών ρύπων χρησιμοποιούνται οι συντελεστές εκπομπών, οι οποίοι εξαρτώνται από τον τύπο του κινητήρα, το είδος του ρύπου, αλλά και το καύσιμο. Οι μονάδες μέτρησης των συντελεστών εκπομπών είναι τα γραμμάρια ανά Κιλοβατώρα (g/kWh) με βάση την ενέργεια και γραμμάρια ρύπων ανά γραμμάρια καυσίμου που καταναλώνεται (g ρύπων/g καυσίμου) με βάση το καύσιμο. Η μετατροπή των συντελεστών ρύπων με βάση την ενέργεια σε συντελεστές ρύπων με βάση το καύσιμο γίνεται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$EF_{baseline} (gpollut/gfuel) = \frac{EF_{baseline} \left( \frac{gpollut}{kWh} \right)}{SFOC_{baseline} \left( \frac{gfuel}{kWh} \right)} \quad (5-17)$$

Όπου:

$EF_{baseline}$  : Συντελεστής εκπομπών.

$SFOC_{baseline}$  : Ειδική κατανάλωση καυσίμου.

### Διοξείδιο του άνθρακα - (CO<sub>2</sub>)

MGO:

$$CO_2 \left( \frac{g}{kWh} \right) = EF_{baseline} \cdot CO_2 = 3,206 (g_{pollutant}/g_{fuel}) \cdot SFOC (g_{fuel}/kWh) \quad (5-18)$$

HFO:

$$CO_2 \left( \frac{g}{kWh} \right) = EF_{baseline} \cdot CO_2 = 3,188 (g_{pollutant}/g_{fuel}) \cdot SFOC (g_{fuel}/kWh) \quad (5-19)$$

### Οξειδία του αζώτου - (NO<sub>x</sub>)

$$NO_x \left( \frac{g}{kWh} \right) = 45 \cdot n^{-0,2} (\text{IMO Tier I, για κατασκευές από το 2000 και έπειτα}) \quad (5-20)$$

$$NO_x \left( \frac{g}{kWh} \right) = 44 \cdot n^{-0,23} (\text{IMO Tier II, για κατασκευές από το 2011 και έπειτα}) \quad (5-21)$$

$$NO_x \left( \frac{g}{kWh} \right) = 9 \cdot n^{-0,2} (\text{IMO Tier III, για κατασκευές από το 2016 και έπειτα}) \quad (5-22)$$

Όπου:

n: οι στροφές του κινητήρα, οι οποίες είναι 900 rpm. Επιπλέον, το πλοίο κατασκευάστηκε το 2010 και έτσι, ο τύπος που επιλέγεται για την εύρεση των οξειδίων του αζώτου είναι από το IMO Tier I.



### Οξείδια του θείου - (SO<sub>x</sub>)

$$SO_x \left( \frac{g}{kWh} \right) = SFOC \left( \frac{g}{kWh} \right) \cdot 2 \cdot 0,97753 \cdot \% Fuel Sulphur \quad (5-23)$$

Όπου:

0,97753: Ο συντελεστής μετατροπής S σε SO<sub>x</sub>

2: Η αναλογία μοριακού βάρους SO<sub>x</sub> και S.

% Fuel Sulphur: Το ποσοστό θείου S στο καύσιμο. Για HFO είναι περίπου ίσο με 2,5% ενώ για MGO είναι μικρότερο του 0,1%.

### Αιωρούμενα σωματίδια

HFO:

$$PM \left( \frac{g}{kWh} \right) = 1,35 + SFOC \left( \frac{g}{kWh} \right) \cdot 7 \cdot 0,02247 \cdot (\% Fuel Sulphur - 0,0246) \quad (5-24)$$

MGO:

$$PM \left( \frac{g}{kWh} \right) = 0,23 + SFOC \left( \frac{g}{kWh} \right) \cdot 7 \cdot 0,02247 \cdot (\% Fuel Sulphur - 0,0024) \quad (5-25)$$

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι συντελεστές εκπομπών για καύσιμο HSFO και MGO. Ο συντελεστής εκπομπών NO<sub>x</sub> εξαρτάται από τις στροφές του κινητήρα και είναι σταθερός και ίσο με EF<sub>NO<sub>x</sub></sub> = 11,54.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-22: Υπολογισμός μηνιαίων συντελεστών εκπομπών για τους διάφορους ρύπους

Μήνες	EF <sub>CO<sub>2</sub></sub> (g/kWh)		EF <sub>SO<sub>x</sub></sub> (g/kWh)		PM (g/KWh)	
	EF <sub>MGO</sub>	EF <sub>HFO</sub>	EF <sub>MGO</sub>	EF <sub>HFO</sub>	EF <sub>MGO</sub>	EF <sub>HFO</sub>
-						
Jan	961,80	934,20	2,93	20,53	0,35	1,84
Feb	1016,30	987,14	3,10	21,69	0,36	1,87
Mar	859,21	834,55	2,62	18,34	0,34	1,79
Apr	926,53	899,95	2,83	19,78	0,35	1,82
May	814,32	790,96	2,48	17,38	0,33	1,77
Jun	830,35	806,53	2,53	17,72	0,34	1,77
Jul	772,65	750,47	2,36	16,49	0,33	1,74
Aug	686,08	666,40	2,09	14,64	0,32	1,70
Sep	695,70	675,74	2,12	14,85	0,32	1,70
Oct	782,26	759,82	2,39	16,70	0,33	1,75
Nov	872,03	847,01	2,66	18,61	0,34	1,79
Dec	916,92	890,60	2,80	19,57	0,35	1,82

Σύμφωνα, λοιπόν, με τους συντελεστές εκπομπών, για ημερήσια απαιτούμενη ενέργεια 751,5 kWh και συγκεκριμένες ημέρες αυτονομίας που έχουν υπολογιστεί, προκύπτουν οι ρύποι σε kg ανά έτος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-23: Υπολογισμός εκπομπών ρύπων σε κιλά για MGO και HFO καύσιμο

Μήνες	CO <sub>2</sub> (Kg)		SO <sub>x</sub> (Kg)		NO <sub>x</sub> (Kg)	PM (kg)	
	CO <sub>2</sub> MGO	CO <sub>2</sub> HFO	SO <sub>x</sub> MGO	SO <sub>x</sub> HFO		PM <sub>MGO</sub>	PM <sub>HFO</sub>
-					-		
Jan	5782,34	8425,70	17,63	185,12	173,51	2,12	16,60
Feb	7332,01	10683,78	22,36	234,74	208,21	2,59	20,22
Mar	8006,62	11666,78	24,41	256,33	268,94	3,16	25,00
Apr	8355,48	12175,13	25,48	267,50	260,26	3,14	24,66
May	7588,36	11057,32	23,14	242,94	268,94	3,11	24,68
Jun	7488,13	10911,28	22,83	239,73	260,26	3,03	23,99
Jul	7199,98	10491,40	21,95	230,51	268,94	3,06	24,38
Aug	6393,34	9316,01	19,49	204,68	268,94	2,96	23,76
Sep	6273,84	9141,88	19,13	200,86	260,26	2,87	23,06
Oct	6584,16	9594,06	20,08	210,79	242,91	2,78	22,08
Nov	5242,66	7639,30	15,99	167,84	173,51	2,05	16,19
Dec	4961,25	7229,25	15,13	158,84	156,16	1,88	14,75
Sum	81208,17	118331,90	247,61	2599,89	2810,85	32,76	259,38

Οι τόνοι ανά έτος και για 20 χρόνια διάρκειας ζωής φαίνονται στον πίνακα 5-24.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-24: Υπολογισμός Εκπομπών ρύπων σε τόνους για ένα έτος και για 20 έτη, για MGO και HFO καύσιμο

A/A	CO <sub>2</sub> (tons)		SO <sub>x</sub> (tons)		NO <sub>x</sub> (tons)	PM (tons)	
	CO <sub>2</sub> MGO	CO <sub>2</sub> HFO	SO <sub>x</sub> MGO	SO <sub>x</sub> HFO		PM <sub>MGO</sub>	PM <sub>HFO</sub>
-					-		
Τόννοι ανά έτος	81,21	118,33	0,25	2,60	2,81	0,03	0,26
Τόννοι ανά 20 έτη	1624,16	2366,64	4,95	52,00	56,22	0,66	5,19

Έτσι, επειδή το πλοίο καταναλώνει 60% HFO και 40% MGO για την κατάσταση λειτουργίας που μελετάται, οι τόνοι ρύπων που εξοικονομούνται είναι ίσοι με 208,30 tons για έναν χρόνο και 4.166,03 tons για 20 έτη.

## 5.6 Οικονομική ανάλυση εγκατάστασης

Η οικονομική ανάλυση είναι ο βασικότερος παράγοντας για να προκύψει εάν η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι συμφέρουσα. Για τα χρόνια λειτουργίας της εγκατάστασης θα πρέπει να προκύπτει το κόστος της κατανάλωσης καυσίμου μεγαλύτερο από το συνολικό κόστος της εγκατάστασης, συμπεριλαμβανομένου και του κόστους συντήρησης.

Με βάση τους σημερινούς τιμοκαταλόγους των συστημάτων που προστέθηκαν στην εγκατάσταση γίνεται υπολογισμός της συνολικής αξίας που χρειάζεται το σύστημα. Για τον υπολογισμό των ΦΒ πλαισίων υπάρχει κάθε χρόνο μία στάνταρ τιμή του Watt και για τώρα είναι ίση με 0,32 €/Watt. Για το κόστος εγκατάστασης και για τις βάσεις το κόστος είναι περίπου ίσο με 100 €/kW. Επιπλέον, γνωστός προμηθευτής της Victron για την αγορά άνω των τριών τεμαχίων πραγματοποιεί έκπτωση 33%.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-25: Συνολικό κόστος εγκατάστασης

Items	Quantity	Price (€)	Discount (%)	Total Price (€)
ΦΒ πλαίσια-Ισχύς ΦΒ συστήματος	272.250 [W]	0,32	-	87.120,00
Ρυθμιστής φόρτισης	45	1.003,00	33,00 %	30.240,45
Συσσωρευτές	1080	260,00	-	280.800,00
Αντιστροφείς AC-DC	23	4.290,00	33,00 %	66.108,90
Κόστος εγκατάστασης	272.250 [W]	0,10	-	27.225,00
Βάσεις Συστήματος	272.250 [W]	0,10	-	27.225,00
<b>TOTAL COST</b>				<b>518.719,35 €</b>

Η συνολική αξία της εγκατάστασης ανέρχεται στα 518.719,35 €.

Το καύσιμο που χρησιμοποιούσε το πλοίο ήταν κυρίως MGO. Ωστόσο, για την εξοικονόμηση χρημάτων και την μείωση ρύπων επιλέχθηκε η τοποθέτηση συστήματος Scrubber δίνοντας τη δυνατότητα χρήσης καυσίμου HFO. Οι τιμές των καυσίμων την συγκεκριμένη χρονική περίοδο ανέρχονται στα 1.234,5 \$/tons και 530,5 \$/tons αντίστοιχα.

Έτσι, το κόστος καυσίμου για το καύσιμο που θα εξοικονομηθεί από το φωτοβολταϊκό σύστημα υπολογίζεται παρακάτω:

$$63,24 \text{ (tons)} \cdot 1.234,5 \left( \frac{\$}{\text{tons}} \right) \cdot 40\% + 63,24 \text{ (tons)} \cdot 530,5 \left( \frac{\$}{\text{tons}} \right) \cdot 60\%$$

Άρα το συνολικό κόστος καυσίμου για ένα έτος είναι ίσο με 50.843,63 €

Από τους παραπάνω υπολογισμούς συμπεραίνεται πως η απόσβεση του συστήματος θα επιτευχθεί σε περίπου 10 χρόνια.

Στα 20 χρόνια λειτουργίας θα χρειαστεί να αλλαχθούν σίγουρα οι συσσωρευτές και οι inverters. Για αυτή τη χρονική περίοδο το οικονομικό όφελος του πλοιοκτήτη για τα δύο είδη καυσίμου είναι:

$$50.843,63 \text{ €} \cdot 20 \text{ (years)} - 518.719,35 \text{ €} = 498.153,29 \text{ €}$$

Με βάση τα παραπάνω κόστη προκύπτει πως για πλοία που διαθέτουν συστήματα Scrubber το όφελος είναι πολύ χαμηλό. Έτσι, η τοποθέτηση ΦΒ πλαισίων πρέπει να γίνει σε πλοία, που δεν χρησιμοποιούν σε μεγάλο βαθμό HFO.

## 5.7 Συμπεράσματα

Στη μελέτη που παρουσιάζεται χρησιμοποιείται Ro-Ro οχηματαγωγό και τοποθετούνται 450 φωτοβολταϊκά πλαίσια με συνολική ισχύ αιχμής 272,25 kWp, 45 ρυθμιστές φόρτισης, 1.080 συσσωρευτές και 23 inverters AC-DC. Στόχος είναι η κάλυψη του φωτισμού του πλοίου σε κατάσταση φορτοεκφόρτωσης, η οποία αντιστοιχεί σε ισχύ 167kW. Η κατάσταση φορτοεκφόρτωσης διαρκεί 5 ώρες και έτσι, για ταυτοχρονισμό έως 90% η απαιτούμενη ενέργεια είναι ίση με 751,5 KWh. Ωστόσο, για τις συγκεκριμένες ενεργειακές απαιτήσεις από τον τύπο της θεωρίας υπολογίζεται, πως η απαιτούμενη ισχύς είναι ίση με 560,79 KWp. Αξίζει να σημειωθεί πως ο συγκεκριμένος τύπος υπολογίζεται με βάση τις μετρήσεις για τον μήνα με τις δυσμενέστερες καιρικές συνθήκες, δηλαδή τον Δεκέμβριο. Το σύστημα, που τοποθετείται έχει τη δυνατότητα πλήρους κάλυψης ενεργειακών αναγκών για τον φωτισμό κατά την φορτοεκφόρτωση για 7 μήνες ετησίως. Επιπλέον, η περίσσεια ενέργεια, για να μην χαθεί, μπορεί να τροφοδοτήσει διάφορα άλλα φορτία AC. Τους 5 μήνες που το σύστημα δεν παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια, τότε τροφοδοτεί τα φορτία με ενέργεια από τις γεννήτριες που διαθέτει.

Για μία ολοκληρωμένη μελέτη είναι αναγκαίο να μελετηθεί η ημερήσια ηλιοφάνεια των λιμένων που γίνεται η διαδικασία της φορτοεκφόρτωσης. Τα δεδομένα που προκύπτουν από το πρόγραμμα PVGIS παρουσιάζουν τον μέσο όρο της ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε μήνα και όχι τις πραγματικές μετρήσεις.

Οι συσσωρευτές στόχο έχουν τη συλλογή της ενέργειας του συστήματος για την κάλυψη αναγκών σε ημέρες χωρίς ηλιοφάνεια. Επιπλέον, ένας δεύτερος λόγος που τοποθετούνται συσσωρευτές είναι για τη διατήρηση της τάσης σε σταθερά επίπεδα για την επίτευξη ομαλής λειτουργίας του υβριδικού συστήματος. Σε περίπτωση απουσίας συσσωρευτών υπάρχει πιθανότητα δημιουργίας βλάβης ή και καταστροφής των συστημάτων του πλοίου.

Από οικονομικής άποψης, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στο συγκεκριμένο πλοίο ενώ καταναλώνει μία μίξη καυσίμων (60% HFO και 40% MGO) δεν αποτελεί την πιο κερδοφόρα λύση, καθώς διαθέτει Scrubber και έχει τη δυνατότητα κατανάλωσης οικονομικότερου καυσίμου. Οι μελέτες που αφορούν σε συστήματα ΑΠΕ θεωρούνται κερδοφόρες όταν η απόσβεση επιτυγχάνεται σε περίπου 7 με 8 χρόνια. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η απόσβεση θα επιτευχθεί σε 10. Έτσι, μία λύση στην ανάδειξη των ΑΠΕ στη ναυτιλία είναι η ολική ή μερική οικονομική ενίσχυση από το κράτος.

Η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ενδεχομένως να επηρεάσει την ευστάθεια του πλοίου και το κέντρο βάρους του πλοίου. Έτσι, θα πρέπει να μελετηθεί η θέση των συσσωρευτών που θα τοποθετηθούν, η οποία θα είναι στο Car Deck και να γίνει σωστός υπολογισμός του βάρους όλης της κατασκευής.

## 5.8 Βιβλιογραφία

Σαντσέζ Μόνικα, 2015. Πώς είναι το μεσογειακό κλίμα. Ανακτήθηκε 17.05.2022 από <https://www.meteorologiaenred.com>.

Climate-Data.org, 2022. Spain Climate / Spain Weather By Month. Ανακτήθηκε 17.05.2022 από <https://en.climate-data.org/europe/spain-5/>

GLOBAL SOLAR ATLAS. Energy data info. Retrieved June 20, 2022 from [globalsolaratlas.info](http://globalsolaratlas.info)

IMO, 1999. RECOMMENDATION ON HELICOPTER LANDING AREAS ON RO-RO PASSENGER SHIPS. London. Retrieved May 15, 2022 from <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/MSC.1-Circ.>

International Chamber of Shipping, 2008. Guide to Helicopter / Ship Operations. London: Marisec Publications.

MarineTraffic, 2022. Neptune Ithaki. Retrieved May, 30, 2022 from <https://www.marinetraffic.com>

SunPope, 2022. Best Time to Visit Italy. Retrieved May, 17, 2022 from <https://www.sunpope.com/italy/>

SunPope, 2022. Best Time to Visit Portugal. Retrieved May, 17, 2022 from <https://www.sunpope.com/portugal/>

TrinaSolar, 2021. Vertex Backsheet Monocrystalline Module. Retrieved November 5, 2022 from [https://static.trinasolar.com/sites/default/files/Aus\\_Vertex\\_DE20\\_2020A.pdf](https://static.trinasolar.com/sites/default/files/Aus_Vertex_DE20_2020A.pdf)

Victron energy, 2022. Ηλιακοί ρυθμιστές φόρτισης. Ανακτήθηκε 6 Ιουνίου 2022 από <https://www.victronenergy.gr/solar-charge-controllers>

Victron energy, 2022. Αντιστροφείς. Ανακτήθηκε 10 Ιουνίου, 2022 από <https://www.victronenergy.gr/inverters>

Victron Energy, 2022. Pricelist 2022. Retrieved August 8, 2022 from <https://www.victronenergy.gr/information/pricelist>

## Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο την ανάλυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τόσο στο επίπεδο ξηράς όσο και στις θάλασσας με έμφαση στην ηλιακή ενέργεια και στην λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων μέσα από την εφαρμογή τους σε Ro-Ro οχηματαγωγό πλοίο. Σκοπός της εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η μείωση των εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα, η μείωση κατανάλωσης ορυκτού καυσίμου και το οικονομικό κέρδος των πλοιοκτητών.

Η αύξηση του κόστους ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με την μόλυνση της ατμόσφαιρας από τα πλοία καθιστούν πιο ελκυστική την ιδέα χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα πλοία. Αν και παρουσιάζεται από την αρχαιότητα η χρήση ΑΠΕ στην ναυτιλία, συγκεκριμένα της αιολικής μέσω ιστίων, η βασική πηγή ενέργειας είναι ο ήλιος καθώς δημιουργεί διαφορές θερμοκρασίας και πίεσεως στην επιφάνεια της γης και κατ' επέκταση την κίνηση των μορίων αέρα. Η ηλιακή ενέργεια εκτός από την "δημιουργία" ανέμου μπορεί να αξιοποιηθεί μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων βασίζεται στην μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Τη σημερινή εποχή παρατηρείται ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών με αποτέλεσμα την αύξηση της αποδοτικότητας τους, αλλά και της αντοχής τους σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Σε χερσαίο περιβάλλον τα ηλιακά πάρκα αποτελούν είδος επένδυσης προσφέροντας οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Στο θαλάσσιο περιβάλλον οι καιρικές συνθήκες, δηλαδή τα ποσοστά υγρασίας και οι άνεμοι, καθιστούν πολύπλοκη την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων και επηρεάζουν αρνητικά τη διάρκεια ζωής τους. Επιπλέον, τα πλοία διαθέτουν συγκεκριμένο διαθέσιμο χώρο θέτοντας όρια στην ισχύ που μπορεί το σύστημα να παράγει και στα φορτία που μπορεί να τροφοδοτήσει. Επιπλέον, ένα θέμα που προβληματίζει τους πλοιοκτήτες είναι ο χώρος που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τους συσσωρευτές, καθώς χωρίς συσσωρευτές το σύστημα ενδέχεται να παρουσιάσει καταστροφικά προβλήματα στη λειτουργία του. Μερικά από τα πλοία που παρουσιάζουν τέτοια προβλήματα είναι τα bulk carriers, τα container ships και τα κρουαζιερόπλοια καθώς τα καταστρώματα του αποτελούν μέρη για διάφορες δραστηριότητες των επιβατών. Για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων επιλέγονται πλοία Ro-Ro και επιβατικά, τα οποία έχουν μεγαλύτερο ελεύθερο κατάστρωμα και επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός υβριδικού



συστήματος. Επίσης, ένα μέρος των Car decks μπορεί να αξιοποιηθεί για την τοποθέτηση των μπαταριών, των inverters και των ρυθμιστών φόρτισης του συστήματος.

Εν κατακλείδι, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ιδίως η ηλιακή αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη λύση στη ναυτιλία. Προσεχώς αναμένεται ταχύτερη ανάπτυξη της τεχνολογίας των ΑΠΕ και συγκεκριμένα των φωτοβολταϊκών συστημάτων τόσο σε ποσοστά αποδοτικότητας όσο και σε αντοχή. Έτσι, η εξέλιξη αυτή θα επιφέρει δραστικές αλλαγές στην κατανάλωση καυσίμου και ενδεχομένως να δημιουργηθούν πλοία με χαμηλές έως μηδενικές εκπομπές ρύπων.

## Βιβλιογραφία

Αγγελίδης Ε. (2019). Μελέτη και διερεύνηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών συμβατικών πλοίων και η εφαρμογή τους στην πρόωση μέσω υβριδικών συστημάτων. (Αδημοσίευτη Διπλωματική Εργασία), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

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

Αληφραγκής. Οι ανεμογεννήτριες. Ανακτήθηκε Ιούλιο 6, 2022 από <https://ilektroutomatismoi.blogspot.com>

Αντωνίου Ε, Τσέρνιχ Ε. Φωτοβολταϊκά Συστήματα. (Πτυχιακή Εργασία). Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας. 2022, Απρίλιος 25. Ανακτήθηκε από <http://digilib.teiemt.gr/jspui/bitstream/123456789/1374/1/012011012.pdf>

Γκαράκης, Κ. (2021). Ο Χάρτης της Αιολικής Ενέργειας, Ανακτήθηκε 15 Μαΐου 2022, από [www.michanikos-online.gr](http://www.michanikos-online.gr)

Δέρβος, Κ. Θ., (2013). Φωτοβολταϊκά συστήματα από τη θεωρία στην πράξη. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Δούρος Ν., (2021). Μελέτη εγκατάστασης εναλλακτικής μορφής ενέργειας σε πλοίο με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων. (Αδημοσίευτη Πτυχιακή Εργασία). Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

Έξαρχος, Σ. (2013). Ατμοσφαιρική Ρύπανση από Πλοία. Διεθνείς και Ευρωπαϊκές Εξελίξεις (Αδημοσίευτη Διπλωματική Εργασία). Πανεπιστήμιο Πειραιώς.

Εξωγενείς ημιαγωγοί. (2022, 16 Ιουλίου). Ανακτήθηκε από <https://riverglennapts.com/el/semiconductor/781-extrinsic-semiconductors.html>

Ζγούρης, Χ. (2015). Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Βιώσιμη Τουριστική Ανάπτυξη (Αδημοσίευτη Διπλωματική Εργασία). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη.

Ιστορικό των φωτοβολταϊκών. (2022, 16 Ιουλίου). Ανακτήθηκε από <https://new.selasenergy.gr/fotovoltaika>

ΚΑΠΕ, (2022). Ενέργεια & Πολίτης. Ανεμογεννήτριες. Ανακτήθηκε 17 Ιουλίου 2022 από [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_windmill.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm)

Κορωναίος, Χ. (2012). Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Διδακτικές σημειώσεις). Ανάκτηση από <http://environ.survey.ntua.gr/files/mathimata/6420/APE-kefl-6.pdf>

Κυνηγόπουλος, 2016. Μελέτη της επίδρασης του φορτίου και των περιβαλλοντικών συνθηκών στο θερμοκρασιακό πεδίο διαφόρων τύπων και διατομών εναέριων αγωγών. (Διπλωματική Εργασία). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Μάναλης Α., 2012. Κυματική και ωκεάνια ενέργεια, σημερινή πραγματικότητα και μελλοντικές προοπτικές. (Αδημοσίευτη Πτυχιακή Εργασία). Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας.

Μαυροκέφαλος, 2010. Σύγκριση απόδοσης και κόστους μίας τυπικής φωτοβολταϊκή εγκατάστασης. (Αδημοσίευτη Διπλωματική Εργασία). Πανεπιστήμιο Πατρών.

Μελάς, Κ. (2022). Οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας ως μέτρο αντιστάθμισης στη μεταβλητότητα του κλάδου της ναυτιλίας. Ανακτήθηκε από <https://www.economia.gr/apenaytiliafeb22/>

Πέρδιος, Σ. (2011). Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις. Αθήνα: Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ – 4Μ.

Περιβάλλον & Διαχείριση Ενέργειας. Ανακτήθηκε 13 Μαΐου 2022 από <http://www.allaboutenergy.gr/>

Πλευριτάκης, Ι. (2019). Ενδογενείς ημιαγωγοί. Ανακτήθηκε 17.07.2022 από <https://learnelectronics.gr>

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

Προβατάς, 2017. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ. (Διπλωματική Εργασία). Πανεπιστήμιο Πειραιώς.

Σαντσεζ Μόνικα, 2015. Πώς είναι το μεσογειακό κλίμα. Ανακτήθηκε 17.05.2022 από <https://www.meteorologiaenred.com>.

Σιδερίδου Ερ. , Αχιλιάς Δ. & Μπικιάρης Δ. (2011). Καύσιμα – Λιπαντικά. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

Σπανάκης, Ε. (2013). Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο – Τύποι ΦΒ κυψελίδων. Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Πανεπιστήμιο Κρήτης.

Τα φωτοβολταϊκά από το Α ως το Ω, 2010. Ανακτήθηκε 23 Ιουνίου 2022 από <http://roscovnicoff.blogspot.com/2010/10/blog-post.html>

Τζεφέρης, Π (2014). Το ιστορικό της γεωθερμίας στη Μήλο-Κίμωλο. Ανακτήθηκε 20 Αυγούστου 2022 από [https://www.oryktosploutos.net/2014/12/blog-post\\_25-19/](https://www.oryktosploutos.net/2014/12/blog-post_25-19/)

Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο. 2022, Μάρτιος 23. Ανακτήθηκε από [https://www.arcmeletitiki.gr/images/uploads/pdf/arc\\_apel11.pdf](https://www.arcmeletitiki.gr/images/uploads/pdf/arc_apel11.pdf)

Φωτοβολταϊκά πλαίσια. 2022, Μάιος 6, Ανακτήθηκε από <https://new.selasenergy.gr/fotovoltaika>

Airbus, 2018. High-flying Airbus technology comes down to Earth for use on ships. Retrieved from <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2018-09-high-flying-airbus-technology-comes-down-to-earth-for-use-on-ships>

Bennett P, Spaeth J. (2017), Annual Report 2017. IEA Bioenergy. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/04/IEA-Bioenergy-Annual-Report-2017-R1.pdf>

Chanson, H. (2013) Applied Hydrodynamics: An Introduction. CRC Press. Retrieved May 15, 2022.

Climate-Data.org, 2022. Spain Climate / Spain Weather By Month. Ανακτήθηκε 17.05.2022 από <https://en.climate-data.org/europe/spain-5/>

Cres, 2022. Ηλιακός Χώρος (Θερμοκήπιο). Ανακτήθηκε Ιούνιο 24, 2022 από [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/pathitika\\_iliaka\\_systimata\\_emmeso\\_kerdos\\_ilia\\_kos\\_xoros.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/pathitika_iliaka_systimata_emmeso_kerdos_ilia_kos_xoros.htm)

DealNews, 2022. Τις πρώτες δοκιμές βιοκαυσίμων κάνουν στα πλοία τους οι Greeks. Ανακτήθηκε 30 Αυγούστου 2022.

Eco Marine Power. Tonbo Solar Hybrid Ferry. Retrieved May 15, 2022 from <https://www.ecomarinepower.com/en/research/25>

Elomatic, 2022. NYU Super Eco Ship 2030. Retrieved from <https://www.elomatic.com>

E-Nautilia, 2014. Εγκαταστάθηκαν ηλιακά πάνελ στο Blue Star Delos. Ανακτήθηκε από <https://e-nautilia.gr/egatastathikan-iliaka-panel-sto-blue-star-delos/>

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

Geotzberger, A. & Hoffman, V.U, (2005). Photovoltaic Solar Energy Generation. Berlin: Springer.

Gevorkian, P. (2008). Solar Power in Building Design. California: McGraw-Hill.

GLOBAL SOLAR ATLAS. Energy data info. Retrieved June 20, 2022 from [globalsolaratlas.info](https://globalsolaratlas.info).

GreenSystem, 2022. Αντιστροφείς τάσης (Inverters). Ανακτήθηκε Ιούνιο 29, 2022 από <https://www.fotovoltaiika-systems.gr/fotovoltaiika-inverters.html>

HELMEPA. Υπεράκτια αιολικά πάρκα. Ανακτήθηκε από <https://www.helmepacadets.gr/files/YperaktiaAiolikaParka.pdf>

Honsberg, C.B. & Bowden, S.G. (2019). Photovoltaic's Education Website. Ανακτήθηκε Απρίλιος 16, 2022, από [www.pveducation.org](http://www.pveducation.org)

Howard M., 2019. 'eTug' Powered by Battery, Hydrogen Fuel Cell. Retrieved from <https://www.maritimepropulsion.com/news/etug-powered-battery-hydrogen-572284>

International Chamber of Shipping, (2008). Guide to Helicopter / Ship Operations. London: Marisec Publications.

International Maritime Organization, (1999). Recommendation of helicopter landing areas on Ro-Ro passenger ships. London. Retrieved May 15, 2022 from <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/MSC.1-Circ.>

International Maritime Organization. (2009) M1, Climate Change and the Shipping Response. IMO 2009. Ανακτήθηκε 4 Οκτωβρίου 2021, από [www.imo.org](http://www.imo.org)

Jager, 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.

Kitack, L. (2021) Fourth IMO GHG Study 2020. London: International Maritime Organization.

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

LadeAs (2013). Project Vindskip. Retrieved April 12, 2022 from <https://ladeas.no/about-the-vindskip/>

Linus Mofor, (January 2015). Renewable Energy Options For Shipping. Technology Brief. International Renewable Energy Agency.

Luleva M., 2012. FCS Alsterwasser: The First Ship Powered by Hydrogen Fuel Cells. The Green Optimistic. Retrieved from <https://www.greenoptimistic.com/fcs-alsterwasser-the-first-ship-powered-by-hydrogen-fuel-cells-20121024/>

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

Marine Insight, 2012. Auriga Leader – The World’s First Partially Propelled Cargo Ship. Retrieved from <https://www.marineinsight.com/types-of-ships/auriga-leader-the-worlds-first-partially-propelled-cargo-ship/>

MarineTraffic, 2022. Neptune Ithaki. Retrieved May, 30, 2022 from <https://www.marinetraffic.com>

Mettälä Ossi, (2021). How to navigate CII: what it is and how you can stay compliant. Retrieved 16 August 2022, from <https://www.napa.fi>

Morley, D. (2014) Planning For Solar Energy. Chicago: American Planning Association. Ανακτήθηκε 13 Απριλίου 2022, από [www.planning.org](http://www.planning.org)

Nidaa Bakhsh, 2022. New wind propulsion technology launches. Retrieved from <https://lloydlist.maritimeintelligence.informa.com/LL1141738/New-wind-propulsion-technology-launches>.

Nippon Yusen Kabushiki Kaisha. (2015). NYK's Ship Information Management System Recognized at 2015 Eco-Products Awards. NYK. Retrieved March 10, 2022 from <https://www.nyk.com/english/news/2015/004201.html>

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

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](http://www.ijstr.org).

Photovoltaic. Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα. Ανακτήθηκε 25 Ιουλίου 2022 από <https://www.photovoltaic.gr/el/portfolio-1139/stand-alone-pv-systems/drillship-offgrid-photovoltaic-systems.html>

Rabaey, J.M., (2017) Chandrakasan, A. & Nolic, B. (2003). Ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

Renovables Verdes, 2022. Photovoltaic Panels. Retrieved July 26, 2022 from <https://www.renovablesverdes.com>

Safety4sea (2018). NYK Super Eco Ship 2030. Retrieved July 17, 2022 from <https://safety4sea.com/tag/nyk-super-eco-ship-2030/>

SkySails Marine, (2020). The pioneer of Kite-Based propulsion systems. Retrieved from <https://skysails-marine.com/>

Solarnavigator. Orcelle- Solar and wave powered cargo ship. Retrieved from [http://www.solarnavigator.net/solar\\_transporter\\_orcelle](http://www.solarnavigator.net/solar_transporter_orcelle)

SunPope, 2022. Best Time to Visit Italy. Retrieved May, 17, 2022 from <https://www.sunpope.com/italy/>

SunPope, 2022. Best Time to Visit Portugal. Retrieved May, 17, 2022 from <https://www.sunpope.com/portugal/>

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), 55-56.

The International Maritime Organization's Review of Vessel Air Emissions And The Proposal by the Government of the United States. (2021). Retrieved from [https://www.worldshipping.org/pdf/vessel\\_air\\_emissions\\_wsc\\_position\\_paper\\_on\\_us\\_g\\_proposa.pdf](https://www.worldshipping.org/pdf/vessel_air_emissions_wsc_position_paper_on_us_g_proposa.pdf)

The Maritime Executive, 2011. Offshore Ship Designers launches near-zero emission tug. Retrieved from <https://maritime-executive.com/article/2008-05-272008-05-21-offshore-ship-designers-launches-near-zero-emission-tug>

Timoleon E., 2019. Exploring Fuel Cells for Marine Power Plants Economic Feasibility Study for a Ro/Pax Vessel. (Diploma Thesis). National Technical University of Athens.

TrinaSolar, (2021). Vertex Backsheet Monocrystalline Module. Retrieved November 5, 2022 from [https://static.trinasolar.com/sites/default/files/Aus\\_Vertex\\_DE20\\_2020A.pdf](https://static.trinasolar.com/sites/default/files/Aus_Vertex_DE20_2020A.pdf)

Tyne Built Ships, 2012. Ashington Ship. Retrieved from <http://www.tynebuiltships.co.uk/A-Ships/ashington1979.html>

Velablog, 2014. Revelation II – II Catamarano eolico. Retrieved from <http://www.velablog.it/barche-bizzarre/revelation-ii-il-catamarano-eolico>

Ventre, J. (2005). Photovoltaic systems engineering. London: CRC PRESS.

Victron energy, 2022. Αντιστροφείς. Ανακτήθηκε 10 Ιουνίου, 2022 από <https://www.victronenergy.gr/inverters>

Victron energy, 2022. Ηλιακοί ρυθμιστές φόρτισης. Ανακτήθηκε 6 Ιουνίου 2022 από <https://www.victronenergy.gr/solar-charge-controllers>

Victron Energy, 2022. Pricelist 2022. Retrieved August 8, 2022 from <https://www.victronenergy.gr/information/pricelist>

Wikipedia, (2005). Εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας στην Κίνα. Ανακτήθηκε 26 Ιουλίου 2022 από <https://el.wikipedia.org>

Wikipedia, (2022). Μπαταρία ιόντων λιθίου. Ανακτήθηκε Ιούνιο 29, 2022 από <https://el.wikipedia.org>

Wikipedia (2007). Maltese Falcon under sail. Retrieved from <https://en.wikipedia.org>

Wikipedia, (2010). Υδροηλεκτρικό φράγμα στη Λίμνη Πλαστήρα. Ανακτήθηκε 26 Ιουλίου 2022 από <https://el.wikipedia.org>

Wikipedia, (2022). Turbosail. Retrieved April 12, 2022 from <https://en.wikipedia.org>

4green.gr, (2011). Φτηνή ενέργεια από τα κύματα. Ανακτήθηκε 15 Ιουνίου 2022 από <https://www.4green.gr/news/data/diafora/86631.asp>

4green.gr, 2022. Υβριδικά συστήματα για μέγιστη αυτονομία. Ανακτήθηκε Ιούνιο 26, 2022 από <https://www.4green.gr/news/data/diafora/90062.asp>