



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βέλτιστος Ενεργειακός Σχεδιασμός για Ασφαλή Κάλυψη των
Ενεργειακών Αναγκών Πλωτής Πλατφόρμας - Επιστημονικού
Εργαστηρίου**

Όνομα: Φιορέντζη Εμμ. Γεωργία

ΑΜ: 2013030078

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Σταυρακάκης Γεώργιος, Καθηγητής ΗΜΜΥ (επιβλέπων)

Κουτρούλης Ευτύχιος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΗΜΜΥ

Κατσίγιαννης Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

Χανιά, Οκτώβριος 2019

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Επ. Καθηγητή Κατσίγιαννη Ιωάννη, για την καθοδήγηση, τις συμβουλές και την βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της ενασχόλησής μου με τη διπλωματική εργασία. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σταυρακάκη Γεώργιο για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγησή του.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή και τη διαρκή στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας κατά κύριο λόγο εφαρμόζονται για την αδιάλειπτη λειτουργία σημαντικών συστημάτων, σε περιοχές όπου η σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο αποτελεί μία μη συμφέρουσα λύση από οικονομική άποψη ή παρουσιάζει προβλήματα (διακοπές ή μεταβολές τάσης). Ως Υβριδικό Σύστημα Ενέργειας (ΥΣΕ) ορίζεται οποιοδήποτε σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, στο οποίο ενσωματώνονται περισσότερες από μία πηγές ενέργειας που λειτουργούν μαζί με τον απαραίτητο υποστηρικτικό εξοπλισμό, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης της ενέργειας, με στόχο την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο ή στο σημείο εγκατάστασής του. Καθώς ο ήλιος και ο άνεμος δεν παράγουν κάθε ώρα της ημέρας επαρκή ενέργεια για την κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου, η χρήση μίας μονάδας ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής, κρίνεται συνήθως απαραίτητη.

Η εργασία αυτή μελετάει το σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος ενέργειας και συγκεκριμένα μίας αυτόνομης πλωτής πλατφόρμας, η οποία πρόκειται να κατασκευαστεί βόρεια του Ηρακλείου. Το υπό μελέτη πλωτό επιστημονικό εργαστήριο συνδυάζει μονάδες ΑΠΕ, μία μονάδα ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής, καθώς και μπαταρίες για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσομοίωση και η οικονομοτεχνική ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό HOMER (Hybrid Optimization Model for Energy Resources), με σκοπό να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση του συστήματος και η μέγιστη παραγωγή ενέργειας με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Στην παρούσα εργασία μελετάται, ως αρχικό σενάριο, η αυτόνομη λειτουργία της πλωτής πλατφόρμας, έχοντας ως κύριες ενεργειακές πηγές, μία ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά στοιχεία και μία γεννήτρια Diesel. Σε επόμενο σενάριο, πραγματοποιήθηκε η μελέτη και η ανάλυση της λειτουργίας του υβριδικού συστήματος με τη χρήση κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs), ως μονάδα ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής. Για την εκπόνηση των παραπάνω προσομοιώσεων, έγινε η επιλογή δύο διαφορετικών μοντέλων ανεμογεννητριών, ενώ παράλληλα επιλέχθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι μπαταριών με σκοπό την μελέτη όλων των συνδυασμών στοιχείων. Ως τελευταίο σενάριο, μελετήθηκε η σύνδεση της πλωτής πλατφόρμας με το δίκτυο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το σύστημα αποτελείται μόνο από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Οι προσομοιώσεις όλων των παραπάνω συνδυασμών επαναλήφθηκαν για τέσσερα σενάρια πρόβλεψης φορτίου.

Τέλος, παρουσιάζονται, αναλύονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων λειτουργίας του υβριδικού συστήματος. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της μοντελοποίησης της αυτόνομης λειτουργίας της πλατφόρμας αναλύονται οι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή του ιδανικού συνδυασμού στοιχείων. Η αξιολόγηση των επιμέρους στοιχείων που αποτελούν το αυτόνομο υβριδικό σύστημα, ως προς την καταλληλότητα, το κόστος, την απόδοση και τη διάρκεια ζωής τους, αποτελεί σημαντικό κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού στοιχείων, με στόχο την ασφαλή κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του υπό μελέτη πλωτού επιστημονικού εργαστηρίου.

Abstract

Hybrid power systems are mainly implemented for the uninterrupted operation of significant systems, in areas where the connection to the network is an economically unviable solution or presents problems (interruptions or voltage fluctuations). A Hybrid Energy System is any autonomous power system, incorporating more than one energy sources that operate together with the necessary supporting equipment, including energy storage, in order to provide electricity to the network or at the point of installation. The use of a dispatchable power output unit is usually considered necessary, as the energy generated by the sun and wind is not enough for every hour of the day, in order to meet the load requirements.

This thesis studies the design and the operation of a hybrid energy system, in particular a floating platform, which will be constructed north of Heraklion. The floating science laboratory combines renewable energy power plants, a dispatchable power output unit and a battery storage energy system. The simulation has been implemented in HOMER software (Hybrid Optimization Model for Energy Resources), as the aim of this study is to achieve the optimization of the energy system and the maximum energy production with the minimum cost.

The initial case that was studied, is the autonomous operation of the floating platform, including as main energy sources, a wind turbine, photovoltaic modules and a Diesel generator. Subsequently, the autonomous hybrid system was simulated by using Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs). All the above simulations were conducted with two different models of wind turbines and two different types of batteries, in order to select the most efficient and suitable combination of elements. In the last case, the floating platform was connected to the central grid, in which case only photovoltaic modules were used. The simulations of all the above combinations were conducted for four load prediction scenarios.

Finally, all the simulations' results for the autonomous and grid-connected platform are presented, analyzed and compared. In particular, in the case of modeling the platform's autonomous operation, there are many constraints that have to be taken into consideration. The evaluation of the individual components, in terms of their suitability, cost, efficiency and operational lifetime, is an important criterion for selecting the ideal combination of elements, in order to safely meet the energy needs of the floating scientific laboratory.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη	2
Abstract.....	3
1 Εισαγωγή.....	7
1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	7
1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας	7
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	9
2.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).....	9
2.1.1 Τύποι Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	9
2.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας ..	10
2.1.3 Η ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα	13
2.1.4 Υβριδικά συστήματα ενέργειας	15
2.2 Ηλιακή Ενέργεια	17
2.2.1 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών	20
2.2.2 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	22
2.2.3 Πλωτά Φωτοβολταϊκά Συστήματα	27
2.3 Αιολική ενέργεια και αιολικές μηχανές	29
2.3.1 Αιολική ενέργεια.....	29
2.3.2 Συστήματα και τύποι ανεμογεννητριών	29
2.3.3 Ανεμογεννήτριες σταθερής – μεταβλητής ταχύτητας.....	32
2.3.4 Ασύγχρονες Γεννήτριες	35
2.3.5 Σύγχρονες Γεννήτριες.....	37
2.4 Κυψέλες καυσίμου	40
2.4.1 Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs)	43
2.5 Αντιστροφείς	51
2.6 Αποθήκευση ενέργειας	53
2.6.1 Οι μπαταρίες ως διατάξεις αποθήκευσης.....	56
2.6.2 Τύποι Μπαταριών	59
3 Μικροδίκτυα	66
3.1 Τρόπος Λειτουργίας	66
3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά	68
3.3 Έλεγχος Μικροδικτύου	71
3.3.1 Διαχείριση τάσης και συχνότητας	72

3.3.2	Ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης.....	72
3.3.3	Ποιότητα ισχύος	72
3.3.4	Θέματα μικροπηγών ενέργειας.....	73
3.3.5	Επικοινωνία μεταξύ των εξαρτημάτων του μικροδικτύου	73
4	Αυτόνομες ενεργειακές πλατφόρμες.....	74
4.1	Βέλτιστος σχεδιασμός και διαχείριση του απομονωμένου υβριδικού ενεργειακού συστήματος στο νησί Kish (νότιο Ιράν)	75
4.2	Μελέτη για τη βιωσιμότητα πλωτής πλατφόρμας στην Αφρική βασισμένη στην ηλιακή ενέργεια	76
4.3	Μελέτη για την αξιοποίηση της αιολικής και ηλιακής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών πλατφόρμας πετρελαίου και φυσικού αερίου στη Μαλαισία	77
5	Περιγραφή λογισμικού HOMER	79
5.1	Μοντελοποίηση του αυτόνομου πλωτού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη Σούδα.....	80
5.1.1	Δημιουργία νέου αρχείου HOMER και επεξεργασία του Schematic.....	81
5.1.2	Ανάλυση Φορτίου.....	83
5.1.3	Φωτοβολταϊκά.....	87
5.1.4	Ανεμογεννήτρια	89
5.1.5	Μπαταρίες	92
5.1.6	Αντιστροφή.....	96
5.1.7	Τελική μορφή του συστήματος	97
5.2	Πόροι του συστήματος (Resources).....	98
5.2.1	Ηλιακό δυναμικό.....	98
5.2.2	Αιολικό Δυναμικό.....	100
5.3	Άλλοι παράμετροι και περιορισμοί του συστήματος	103
5.3.1	Οικονομικές παράμετροι (Economics)	103
5.3.2	Στρατηγική ελέγχου (System control)	104
5.3.3	Θερμοκρασία (Temperature).....	105
5.3.4	Εκπομπές αέριων ρύπων (Emissions)	106
5.3.5	Περιορισμοί (Constraints).....	106
5.4	Αποτελέσματα προσομοίωσης	107
6	Μοντελοποίηση πλωτής πλατφόρμας - επιστημονικού εργαστηρίου (βόρεια του Ηρακλείου) με τη χρήση του λογισμικού HOMER - Παρουσίαση των αποτελεσμάτων.....	115
6.1	Σενάρια Φορτίου	116

6.2	Περιγραφή στοιχείων που αποτελούν το πλωτό ενεργειακό σύστημα	119
6.2.1	Επιλογή κατάλληλου τύπου ανεμογεννήτριας	119
6.2.2	Επιλογή κατάλληλου τύπου συσσωρευτών.....	122
6.2.3	Φωτοβολταϊκά στοιχεία	124
6.2.4	Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)	125
6.3	Υπολογισμός εμβαδού του χώρου εγκατάστασης των μπαταριών	126
6.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	128
6.4.1	Αυτονομία Πλατφόρμας	129
6.4.2	Σύνδεση πλωτής πλατφόρμας με το δίκτυο	161
7	Συμπεράσματα.....	164
8	Βιβλιογραφία.....	166

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο ενεργειακός σχεδιασμός, η προσομοίωση και η ανάλυση της λειτουργίας ενός επιστημονικού εργαστηρίου. Πρόκειται για μια πλωτή πλατφόρμα, η οποία πρόκειται να κατασκευαστεί βόρεια του Ηρακλείου. Το αυτόνομο υβριδικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που μοντελοποιείται, συνδυάζει μονάδες ΑΠΕ, μία μονάδα ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής, καθώς και μπαταρίες για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Μία ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά στοιχεία και μία γεννήτρια Diesel ή κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) αποτελούν τα βασικά στοιχεία του ενεργειακού συστήματος. Η προσομοίωση και η οικονομοτεχνική ανάλυση έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού HOMER (Hybrid Optimization Model for Energy Resources) με σκοπό να επιτευχθεί η μέγιστη παραγωγή ενέργειας με το μικρότερο δυνατό κόστος, καθώς και η βελτιστοποίηση του συστήματος. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την πιθανή μελλοντική εξέλιξη και αναβάθμιση της πλωτής πλατφόρμας, προσομοιώνονται τέσσερα σενάρια πρόβλεψης φορτίου, για καθένα από τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματά τους, συνδυάζοντας σε κάθε σενάριο διαφορετικά μοντέλα ανεμογεννητριών και διαφορετικούς τύπους συσσωρευτών. Τέλος, μελετάται το σενάριο σύνδεσης της πλωτής πλατφόρμας με το δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα αποτελείται μόνο από φωτοβολταϊκά στοιχεία.

1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας

Στο υπόλοιπο του *πρώτου κεφαλαίου* περιγράφεται η δομή της διπλωματικής εργασίας.

Στο *δεύτερο κεφάλαιο*, παρατίθενται πληροφορίες για τους διάφορους τύπους Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, καθώς επίσης, γίνεται και μία σύντομη ανάλυση της συμβολής των ΑΠΕ και των υβριδικών συστημάτων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, γίνεται μία λεπτομερής παρουσίαση της εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας και των συστημάτων που έχουν προκύψει από αυτήν, συμπεριλαμβανομένων των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών. Ξεχωριστή αναφορά γίνεται στην αιολική ενέργεια, τις αιολικές μηχανές και τις σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες. Ακόμη, παρατίθενται αναλυτικές πληροφορίες για τις κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου, για τους αντιστροφείς, καθώς επίσης και για τις μπαταρίες ως διατάξεις αποθήκευσης, αναλύοντας τέσσερις διαφορετικούς τύπους συσσωρευτών.

Το *τρίτο κεφάλαιο* πραγματεύεται τα μικροδίκτυα, παρουσιάζοντας τον τρόπο λειτουργίας τους, τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, το πώς επιτυγχάνεται ο έλεγχος ενός μικροδικτύου, όπως και ορισμένα θέματα με τα οποία έρχεται αντιμέτωπο.

Το *τέταρτο κεφάλαιο* περιλαμβάνει την αναλυτική παρουσίαση συγκεκριμένων μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί και έχουν ως αντικείμενο τις πλωτές πλατφόρμες.

Στο *πέμπτο κεφάλαιο* πραγματοποιείται μία λεπτομερής περιγραφή του λογισμικού HOMER, το οποίο αποτελεί το βασικό εργαλείο για την ανάλυση της πλωτής ενεργειακής πλατφόρμας που εξετάζει η παρούσα διπλωματική. Το αυτόνομο σύστημα που προσομοιώνεται στο HOMER και περιγράφεται σε αυτό το κεφάλαιο, είναι μία ήδη υπάρχουσα αυτόνομη πλατφόρμα, η οποία βρίσκεται στον κόλπο της Σούδας Χανίων. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα που χρειάζεται το πρόγραμμα για να εκτελέσει την προσομοίωση του υβριδικού αυτού συστήματος, αναλύοντας όλες τις παραμέτρους και περιορισμούς του συστήματος, καθώς και τα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο υπολογίστηκαν τα ανεμολογικά δεδομένα που εισήχθησαν στο λογισμικό HOMER για την περιοχή εγκατάστασης της πλατφόρμας στον κόλπο της Σούδας, χρησιμοποιώντας το λογισμικό WAsP.

Στο *έκτο κεφάλαιο* παρουσιάζεται αναλυτικά η μοντελοποίηση της πλωτής πλατφόρμας - επιστημονικού εργαστηρίου που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική. Συγκεκριμένα, αναλύονται τα τέσσερα σενάρια φορτίου, γίνεται η επιλογή των κατάλληλων τύπων ανεμογεννητριών και συσσωρευτών και υπολογίζεται ο χώρος που καταλαμβάνουν οι συσσωρευτές στην πλωτή πλατφόρμα. Τέλος, πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για την αυτόνομη λειτουργία της πλωτής πλατφόρμας, καθώς και για τη σύνδεσή της με το δίκτυο.

Στο *έβδομο κεφάλαιο* παρατίθενται τα συμπεράσματα, τα οποία εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις όλων των σεναρίων που μελετήθηκαν.

2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

2.1.1 Τύποι Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας [24]

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) (ή ήπιες μορφές ενέργειας, ή νέες πηγές ενέργειας, ή πράσινη ενέργεια) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Η ανάγκη για αξιοποίηση αυτών των πηγών ενέργειας, καθώς επίσης ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη τεχνολογιών, που όχι μόνο θα δεσμεύουν το δυναμικό τους, αλλά θα λειτουργούν και αποδοτικά, εμφανίστηκε μετά την πετρελαϊκή κρίση του '73 και εδραιώθηκε τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Οι δύο πιο κρίσιμοι παράγοντες που ώθησαν τις ανεπτυγμένες βιομηχανικά χώρες στις ΑΠΕ, ήταν πρωταρχικά η ανάγκη να αντιμετωπιστεί η ενεργειακή ανασφάλεια, που σημαίνει απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, όπως είναι το πετρέλαιο, καθώς η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια συνεχώς αυξάνεται και οι πόροι αυτοί εξαντλούνται με την πάροδο του χρόνου. Ο δεύτερος παράγοντας ήταν η αντιμετώπιση των σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων που προκαλούνται σε παγκόσμια κλίμακα από την απελευθέρωση τόσο στον αέρα όσο και στα ύδατα, βλαβερών αερίων και αποβλήτων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα. Γι' αυτούς τους λόγους οι σύγχρονοι τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να προσανατολίζονται σε τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον, ενώ ταυτόχρονα θα εξασφαλίζουν χαμηλό κόστος παραγωγής.

Ο όρος «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας» αναφέρεται κυρίως στις ακόλουθες:

1. Αιολική Ενέργεια
2. Ηλιακή Ενέργεια (Θερμικά Ηλιακά, Φωτοβολταϊκά)
3. Μικρά Υδροηλεκτρικά (εγκατεστημένη ισχύς <10 MW)
4. Κυψέλες Καυσίμου
5. Ενέργεια από τη θάλασσα
6. Γεωθερμική Ενέργεια
7. Βιομάζα
8. Ωσμωτική ενέργεια

Με βάση τις υφιστάμενες τεχνολογίες, ο καλύτερος τρόπος αξιοποίησης των ΑΠΕ είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας άμεσα από τις πηγές 1-8. Ειδικότερα για κάθε μία από αυτές σημειώνονται τα εξής:

1. Η *αιολική ενέργεια* αξιοποιείται μέσω των ανεμογεννητριών (Α/Γ), οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.
2. Η *ηλιακή ενέργεια* αξιοποιείται είτε μέσω των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) γεννητριών, οι οποίες μετατρέπουν απ' ευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, είτε με τη συγκέντρωση των ηλιακών ακτινών μέσω ηλιακών συλλεκτών, ώστε να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες και τελικά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, εκτεταμένη χρήση της ηλιακής ενέργειας γίνεται

για τη θέρμανση νερού ή χώρων.

3. Με τα «*μικρά υδροηλεκτρικά*» (ΜΥΗΕ) γίνεται εκμετάλλευση υδάτινων ρευμάτων, για τα οποία δεν απαιτούνται μεγάλα έργα αποθήκευσης (π.χ. φράγματα).
4. Οι «*κυψέλες καυσίμου*» μετατρέπουν απ' ευθείας την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική με τη χρήση κατάλληλων διατάξεων και ηλεκτρολυτών.
5. Η *ενέργεια* που προκύπτει από τη *θάλασσα* έχει τις εξής κατηγορίες:
 - *Ενέργεια από παλίρροιες*: Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού.
 - *Ενέργεια από κύματα*: Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.
 - *Ενέργεια από τους ωκεανούς*: Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας.
6. Η «*γεωθερμική ενέργεια*», δηλαδή η θερμότητα των εσωτερικών στρωμάτων της γης, γίνεται εκμεταλλεύσιμη όταν υπάρχουν κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες.
7. Η *βιομάζα* συνίσταται από τα πάσης φύσεως γεωργικά και δασικά υπολείμματα , από τα οποία με κατάλληλες θερμοχημικές διεργασίες μπορούν να ληφθούν καύσιμα.
8. *Ωσμωτική ενέργεια*: Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως συμβαίνει όταν ένα ποτάμι εκβάλλει στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ωσμωτική ενέργεια (ή γαλάζια ενέργεια) και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής.

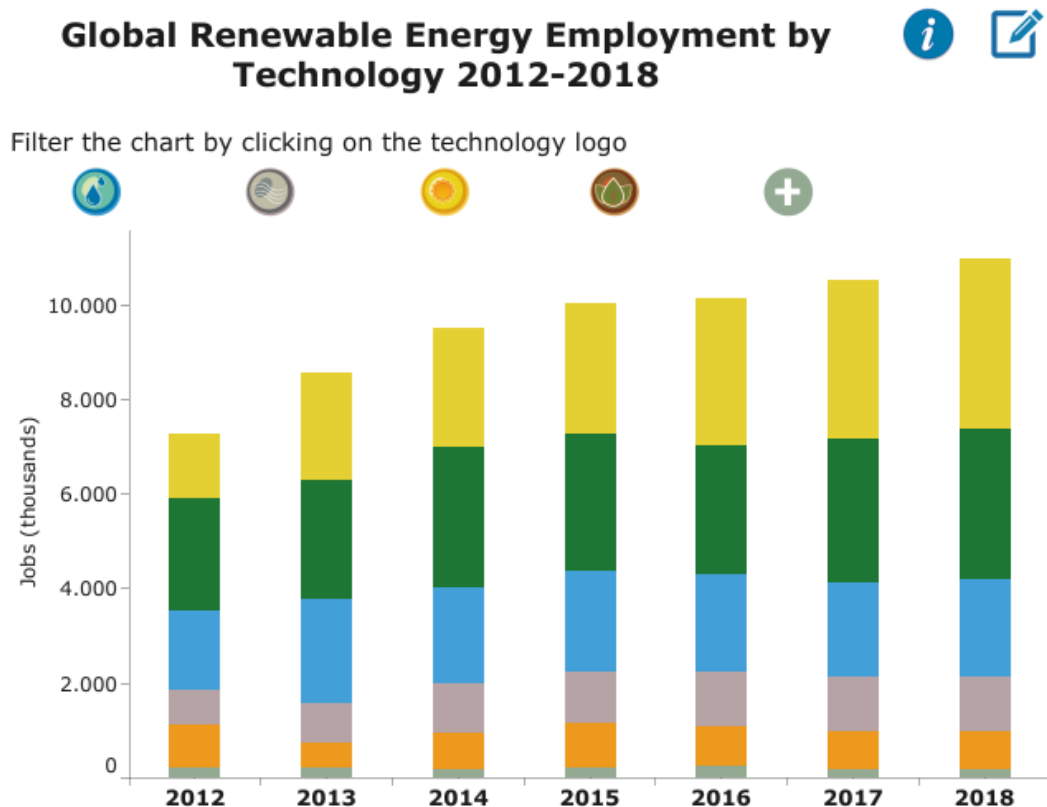
2.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας [24]

Η σπουδαιότητα των ΑΠΕ συνίσταται στους ακόλουθους λόγους:

- Είναι «καθαρές» πηγές ενέργειας με ελάχιστη επίδραση στο περιβάλλον.
- Κατά κανόνα είναι ανεξάντλητες σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα που προβλέπεται να αρχίσουν να εξαντλούνται από το 2020-2060.
- Ενισχύουν την εθνική οικονομία αφού συχνά μπορούν να βασιστούν σε επενδύσεις μέσα στην ίδια την χώρα, σε αντίθεση με τις αυξημένου κόστους

εισαγωγές ενέργειας, δίνοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα δημιουργίας πολλών νέων θέσεων εργασίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.

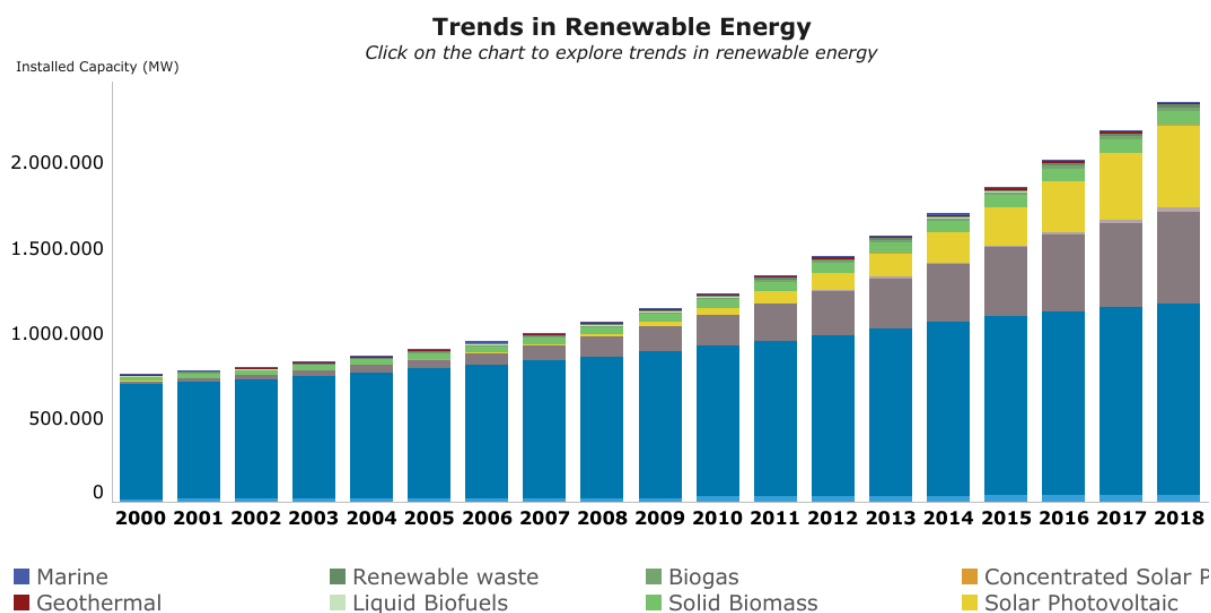
- Ενισχύουν την ενεργειακή ασφάλεια αφού ανεξαρτητοποιούν ενεργειακά την χώρα.
- Βοηθούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, καθώς δίνεται η δυνατότητα ύπαρξης τους γεωγραφικά διάσπαρτα. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό-περιφερειακό επίπεδο με επιπλέον πλεονέκτημα την μείωση των απωλειών κατά τη μεταφορά ενέργειας καθώς επίσης και την “ελάφρυνση” των συστημάτων υποδομής.
- Καθώς δεν επηρεάζονται από τις τιμές των συμβατικών καυσίμων, οι οποίες καθορίζονται από τη διεθνή οικονομία, μπορούν να έχουν χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.
- Τέλος, με ορθολογική χρήση τους, αλλά και ανάπτυξή τους χωρίς επιβάρυνση του γεωγραφικού τοπίου και των τοπικών οικονομιών (όπως π.χ. κτηνοτροφία, γεωργία κτλ) μπορούν να αποτελέσουν εναλλακτική λύση σε διάφορα ενεργειακά ζητήματα.



© IRENA Source: IRENA jobs database. Totals may not add up due to rounding. Bioenergy includes liquid biofuels, solid biomass and biogas. Other technologies include geothermal energy, concentrated solar power, heat pumps (ground-based), municipal and industrial waste, and ocean energy.

Εικόνα 2.1 Θέσεις εργασίας στις ΑΠΕ παγκοσμίως και Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. [10]

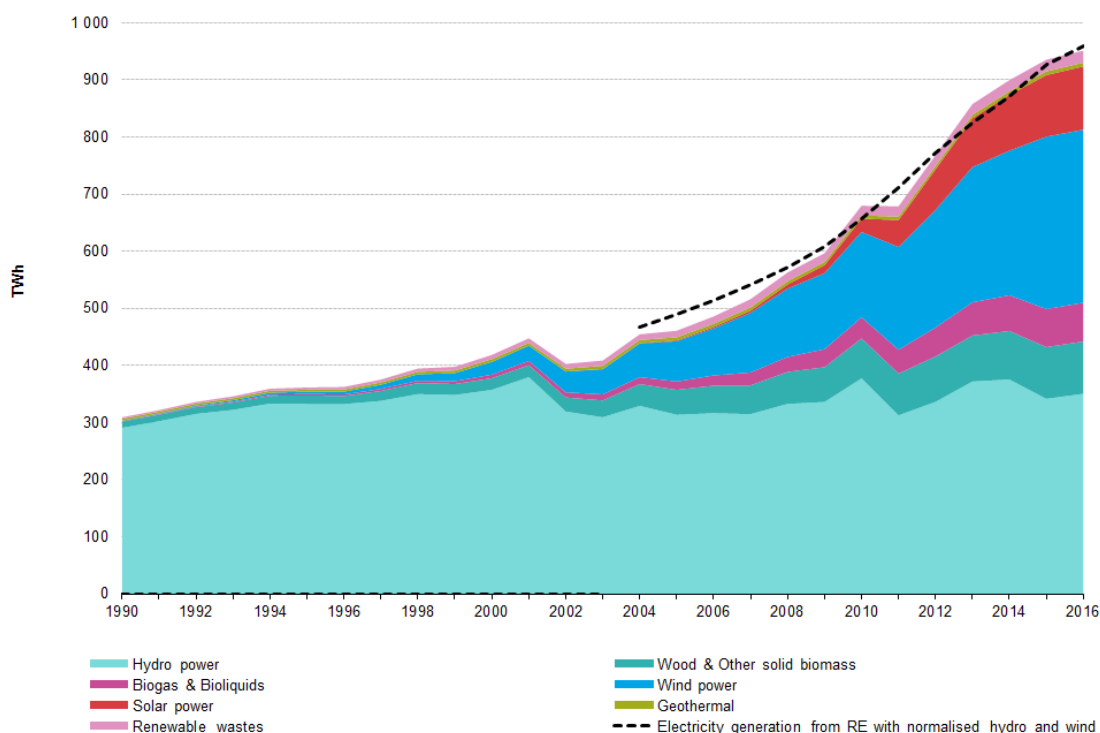
Στην Εικόνα 2.2 απεικονίζεται ένα διάγραμμα για την παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ και την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας κατά τη χρονική περίοδο 2000 - 2018.



© IRENA

Εικόνα 2.2 Παγκόσμια Εγκατεστημένη Ισχύς και Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια από Α.Π.Ε., 2000-2018. [10]

Στην Εικόνα 2.3 απεικονίζεται η Συνολική Ακαθάριστη εγχώρια κατανάλωση ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας κατά τη χρονική περίοδο 1990-2016.



Εικόνα 2.3 Συνολική Ακαθάριστη εγχώρια κατανάλωση ενέργειας από Α.Π.Ε., 1990-2016. [6]

Μια μικρή αναφορά αξίζει να γίνει και στα μειονεκτήματα τα οποία έχουν οι διάφοροι τύποι των ΑΠΕ, καθώς αποτελούν και τις παραμέτρους οι οποίες πρέπει να εξεταστούν και να βελτιωθούν, προκειμένου να εδραιωθούν ως ενεργειακές πηγές. Αναφορικά λοιπόν:

- Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.
- Για τον παραπάνω λόγο προς το παρόν, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.
- Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη και ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Επιπλέον, τα αιολικά πάρκα πολλές φορές διαταράσσουν την ισορροπία του οικοσυστήματος όταν απαιτούν την αποψίλωση μεγάλων εκτάσεων ή την εκχώρηση βοσκοτόπων, προκειμένου να γίνει η εγκατάστασή τους, με αποτέλεσμα να προκαλούνται και κοινωνικές αντιδράσεις. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας, των ανεμογεννητριών και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν.
- Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

2.1.3 Η ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα [4]

Το ενεργειακό μίγμα στη χώρα μας παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με την υπόλοιπη Ευρώπη των 28. Κατ' αρχάς, η συμμετοχή του πετρελαίου και των ορυκτών καυσίμων είναι 52,8% και 23,7% αντίστοιχα, υπερβαίνει δηλαδή τους ευρωπαϊκούς μέσους όρους (34,4% και 16,2%). Επίσης, το μερίδιο του φυσικού αερίου είναι μικρότερο, 11,3% έναντι 22% κατά μέσο όρο στην Ε.Ε. Την ίδια στιγμή, η εξάρτηση της χώρας μας από τις εισαγωγές όλων των ορυκτών καυσίμων είναι μεγαλύτερη από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο. Μάλιστα, την περίοδο 2005-2015 αυξήθηκε κατά 3,3%, δηλαδή περισσότερο από τη μέση αύξηση της τάξης του 1,9% που σημειώθηκε κατά μέσο όρο σε πανευρωπαϊκό επίπεδο. Την ίδια περίοδο, η αύξηση της εξάρτησης ήταν μεγαλύτερη για το φυσικό αέριο και τα πετρελαϊκά προϊόντα.

Όσον αφορά όλες τις ενεργειακές πηγές, η ανάλυση διαπιστώνει πως ο μεγαλύτερος λόγος ανησυχίας για την ασφάλεια εφοδιασμού προέρχεται από το φυσικό αέριο, επειδή το συγκεκριμένο καύσιμο παίζει σημαντικό ρόλο και στη θέρμανση του οικιακού τομέα. Η ολοκλήρωση του Διαδριατικού Αγωγού (TAP) θα συμβάλει σημαντικά στη διαφοροποίηση των πηγών. Όσον αφορά τους τομείς της ενεργειακής κατανάλωσης, στην Ελλάδα η “μερίδι του λέντος” αφορά τις μεταφορές, το μερίδιο των οποίων το 2015 άγγιξε το 39,9% στη συνολική τελική κατανάλωση, πάνω από το 33,1% που είναι ο πανευρωπαϊκός μέσος όρος. Την ίδια χρονιά, η κατανάλωση του οικιστικού τομέα αντιστοιχούσε στο 26,7%, ελαφρώς πάνω από τον

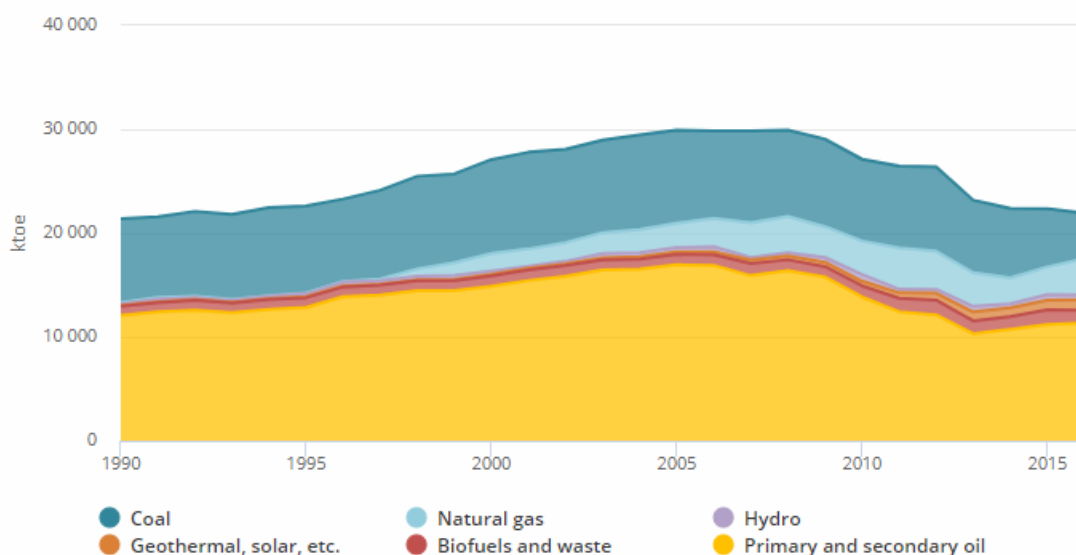
πανευρωπαϊκό μέσο όρο (25,4%). Αντίθετα, η κατανάλωση των βιομηχανιών άγγιξε το 19%, 6 και πλέον ποσοστιαίες μονάδες κάτω από τον μέσο όρο των 28 κρατών-μελών.

Την περίοδο 2005-2015, η Ελλάδα μείωσε την πρωτογενή ενεργειακή κατανάλωση κατά 22,5%, στα 23,75 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (Mtoe) (Εικόνα 2.4). Μειωμένη ήταν την ίδια περίοδο και η τελική ενεργειακή κατανάλωση, κατά 21,3% και στα 16,5 Mtoe το 2015 (Εικόνα 2.5). Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι τα νούμερα αυτά σημαίνουν πως η χώρα μας έχει ήδη πετύχει τους εθνικούς στόχους μείωσης της κατανάλωσης, που έχουν τεθεί για το 2020, θα χρειαστεί προσπάθεια για να διατηρηθούν αυτές οι επιδόσεις, ή για να “φρενάρει” η άνοδός τους την επόμενη πενταετία, με την εκτιμώμενη οικονομική ανάκαμψη και επομένως την αύξηση του ΑΕΠ (Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος).

Όσον αφορά την εξέλιξη της ενεργειακής έντασης, δηλαδή της ποσότητας ενέργειας που χρησιμοποιείται ανά παραγόμενη μονάδα, η Ελλάδα ανήκει στον μικρό αριθμό κρατών που την περίοδο 2005-2015 “είδε” τον βιομηχανικό της τομέα να βελτιώνει την επίδοσή του. Έτσι, το 2015 ο σχετικός δείκτης διαμορφώθηκε στο 131,75, παραμένοντας αρκετά πάνω από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο 92,14. Αντίθετα, η ενεργειακή ένταση στις υπηρεσίες και τον οικιστικό τομέα βρίσκονται κάτω από τους αντίστοιχους ευρωπαϊκούς όρους. Μάλιστα, ο κλάδος των υπηρεσιών ακολούθησε αυξητική τάση την περίοδο 2005-2015, αντίθετη από την τάση μείωσης που παρατηρήθηκε στην υπόλοιπη Ευρώπη.

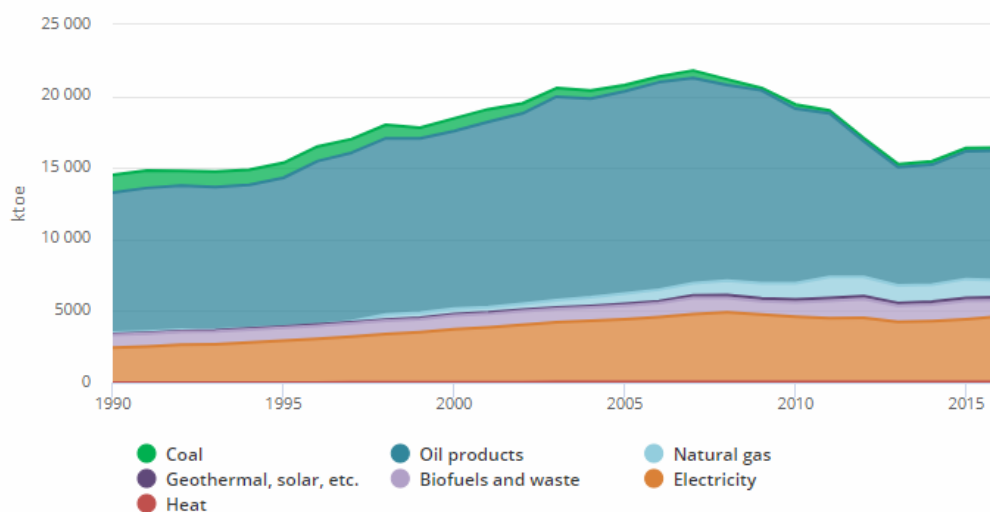
Την περίοδο 2005-2015, καταγράφηκε επίσης μέση ετήσια μείωση της τάξης του 1,9% στη συνολική τελική κατανάλωση στις μεταφορές, συγκρίσιμη με τη μέση ετήσια μείωση κατά 2,1% του ΑΕΠ (Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος). Αυτό οφειλόταν κατά κύριο λόγο στην ελάττωση διακίνησης εμπορευμάτων, καθώς την ίδια χρονική περίοδο αυξήθηκε η μετακίνηση επιβατών.

Greece 1990 - 2016



Εικόνα 2.4 Συνολική παροχή πρωτογενούς ενέργειας, 1990-2016. [9]

Greece 1990 - 2016



Εικόνα 2.5 Παραγωγή ενέργειας ανά πηγή, 1990-2016. [9]

2.1.4 Υβριδικά συστήματα ενέργειας [24]

Ως Υβριδικό Σύστημα Ενέργειας (ΥΣΕ) ορίζεται οποιοδήποτε αυτόνομο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, στο οποίο ενσωματώνονται περισσότερες από μία πηγές ενέργειας που λειτουργούν μαζί με τον απαραίτητο υποστηρικτικό εξοπλισμό, περιλαμβανομένης της αποθήκευσης της ενέργειας, με στόχο την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο ή στο σημείο εγκατάστασής του. Τα βασικά μέρη που συνιστούν ένα ΥΣΕ είναι:

1. οι μονάδες παραγωγής της ενέργειας
2. η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας
3. η μονάδα ελέγχου της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και συντονισμού των διάφορων διαθέσιμων επιλογών για βέλτιστη κάλυψη των αναγκών.

Πιο συγκεκριμένα, ένα ΥΣΕ μπορεί να περιλαμβάνει μία συμβατική μονάδα παραγωγής σε συνδυασμό με μία τουλάχιστον μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα εποπτείας και ελέγχου, καθώς και σύστημα διαχείρισης φορτίου. Σύμφωνα με το νόμο 3468/2006, ως υβριδικό σύστημα ή αλλιώς υβριδικός σταθμός ορίζεται κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί μία, τουλάχιστον μορφή ΑΠΕ, η συνολική ενέργεια που απορροφά από το δίκτυο, σε ετήσια βάση, δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού αυτού, καθώς επίσης η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ του σταθμού δε μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού, προσαυξημένη κατά ποσοστό μέχρι 20%.

Ως κυριότερα οφέλη από την αξιοποίηση των ΥΣΕ θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν τα εξής:

- Διασφαλίζουν την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς οι ΑΠΕ εξαρτώνται από καιρικές συνθήκες, οι οποίες εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις, όπως η ταχύτητα ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία.
- Συμβάλλουν στην διαφοροποίηση των ενεργειακών πηγών (energy diversification), αποφεύγοντας έτσι την εξάρτηση από συγκεκριμένες ενεργειακές πηγές.
- Επιτυγχάνουν την οικονομικότερη λειτουργία των συμβατικών μονάδων, καθώς αυτές φορτίζονται με σταθερότερο φορτίο και πλησίον της χαμηλότερης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες υβριδικών συστημάτων, τα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο και τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα.

2.1.4.1 Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Αν ένας υβριδικός σταθμός συνδεθεί σε δίκτυο απείρου ζυγού, τότε γίνεται λόγος για διεσπαρμένη παραγωγή. Δεδομένου ότι το κεντρικό δίκτυο έχει την ευθύνη για τον έλεγχο της τάσης και της συχνότητας, αλλά και για την παραγωγή άεργου ισχύος, ο σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος απλοποιείται, καθώς δεν απαιτούνται συστήματα ελέγχου. Όταν ζητείται περισσότερη ενέργεια από αυτήν που μπορεί να παράγει ο σταθμός, το έλλειμμα ενέργειας παρέχεται από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Παρομοίως, τυχούσα περίσσεια ενέργειας που παράγεται από το υβριδικό σύστημα μπορεί να απορροφηθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο με κάποιους περιορισμούς για την στιγμιαία παραγωγή ισχύος του ΥΣΕ. Στην περίπτωση ασθενούς δικτύου, όπου η ρύθμιση τάσης και συχνότητας μπορεί να επηρεαστεί από την ύπαρξη του ΥΣΕ, απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός και διατάξεις ελέγχου.

2.1.4.2 Αυτόνομα υβριδικά συστήματα

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα (ΑΥΣ) χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων φορτίων/φορτίων ειδικού σκοπού ή απομονωμένων/νησιωτικών περιοχών, που δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε δεν υπάρχει σύστημα μεταφοράς παρά μόνο σύστημα διανομής. Η σημαντικότερη διαφορά του αυτόνομου σε σχέση με ένα διασυνδεδεμένο υβριδικό σύστημα είναι ότι πρέπει να μπορεί να παρέχει όλη την ενέργεια που ζητείται οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή να κάνει αποκοπή φορτίου, όταν αυτό δεν είναι εφικτό. Επιπλέον, οφείλει να έχει την ικανότητα ρύθμισης συχνότητας και παραγωγής άεργου ισχύος, ώστε να ρυθμίζει την τάση του δικτύου. Όταν η ηλεκτρική παραγωγή από ΑΠΕ ξεπερνά το φορτίο, η περίσσεια ενέργειας πρέπει να αποθηκευτεί ή και να απορριφθεί με κάποιο τρόπο, ώστε να μην προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Για τους παραπάνω λόγους, τα περισσότερα ΑΥΣ περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης και συστήματα ελέγχου και διαχείρισης φορτίου.

2.2 Ηλιακή Ενέργεια [28]

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας που είναι φιλική προς το περιβάλλον και είναι πρακτικά ανεξάντλητη αφού προέρχεται από τον ήλιο. Η ενέργεια που δέχεται η γη από τον ήλιο κατά τη διάρκεια ενός έτους, υπολογίζεται σε διπλάσια από την ενέργεια που θα προσέφερε το σύνολο του ορυκτού πλούτου του πλανήτη. Από την συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης, συνήθως λιγότερο από το 60% είναι άμεση, ενώ η υπόλοιπη είναι διάχυτη, διότι έχει προηγουμένως σκεδαστεί και ανακλαστεί στα διάφορα σωματίδια και σταγονίδια που αιωρούνται στον αέρα, ανάλογα βέβαια με τη σύσταση της ατμόσφαιρας και το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας. Το 30% περίπου της απορροφημένης από το σύστημα ατμόσφαιρα – γη ηλιακής ενέργειας καταναλώνεται για την εξάτμιση των επιφανειακών υδάτων του πλανήτη στην ατμόσφαιρα. Το 20% περίπου μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του αέρα (άνεμος) και ένα πολύ μικρό ποσοστό της τάξης του 1% συμμετέχει στη φωτοσύνθεση. Η υπόλοιπη ενέργεια θερμαίνει τον πλανήτη και επανεκπέμπεται στο διάστημα.

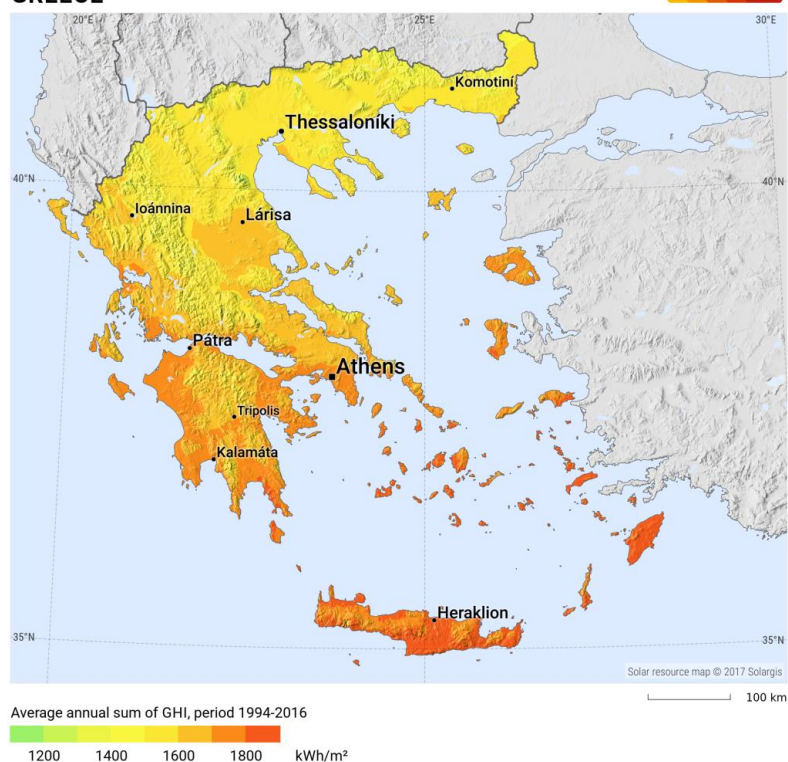
Η ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση και το υψόμετρο της τοποθεσίας. Η τελική ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες, την περιεκτικότητα της υγρασία στην ατμόσφαιρα και κυρίως της θέσης του ήλιου στον ουρανό.

Η ατμόσφαιρα της γης, μειώνει σημαντικά την ακτινοβολία με τους μηχανισμούς της ανάκλασης, απορρόφησης (από το όζον, τους υδρατμούς, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα) και σκέδασης (από τα μόρια αέρα, σκόνης ή ρύπους). Όταν η ηλιακή ακτινοβολία αθροίζεται σε μία περιοχή στη διάρκεια ενός έτους, προκύπτει η ετήσια ηλιακή ενέργεια, συνήθως σε kWh/m² (Εικόνα 2.6). Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μία αξιόπιστη φθηνή λύση για τις αναπτυσσόμενες χώρες που προσπαθούν να προσθέσουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια στα εθνικά τους δίκτυα σύμφωνα με στοιχεία του Bloomberg. Η έκθεση έδειξε ότι το κόστος της ηλιακής ενέργειας σε 58 χώρες χαμηλότερου εισοδήματος, συμπεριλαμβανομένης της Κίνας, της Βραζιλίας και της Ινδίας, έχει πέσει περίπου στο ένα τρίτο των επιπέδων του 2010 και είναι τώρα λίγο φθηνότερο από την αιολική ενέργεια. Εξάλλου, η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας έχει αποδειχθεί μία απροσδόκητα καλή εξέλιξη για απομακρυσμένα νησιά στο νότιο Ειρηνικό Ωκεανό και άλλα απομονωμένα μέρη που μέχρι πρότινος βασίζονταν στην εισαγωγή τεράστιων ποσοτήτων ορυκτών καυσίμων.

Ωστόσο, στις πλούσιες χώρες όπου η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές πρέπει να ανταγωνίζεται τους υφιστάμενους σταθμούς παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, το κόστος μπορεί να είναι υψηλότερο. Στις περισσότερες από αυτές τις χώρες εξακολουθούν να υπάρχουν κρατικές επιδοτήσεις για τη βιομηχανία ορυκτών καυσίμων.

GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION GREECE

SOLARGIS



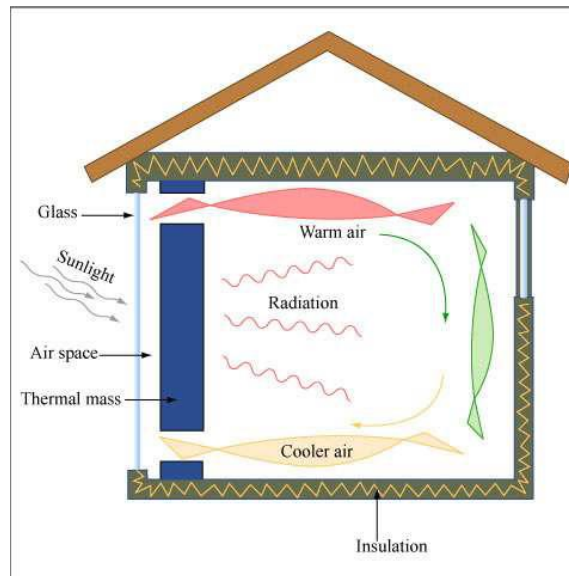
Εικόνα 2.6 Χάρτης του μέσου όρου της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας της Ελλάδας, 1994-2016. [17]

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, αυτή μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα *παθητικά ηλιακά συστήματα*, τα *ενεργητικά ηλιακά συστήματα* ή *ηλιοθερμικά συστήματα*, και τα *φωτοβολταϊκά συστήματα*. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

- **Παθητικά ηλιακά συστήματα**

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από δομικά στοιχεία, κατάλληλα σχεδιασμένα και συνδυασμένα μεταξύ τους, ώστε να υποβοηθούν την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τον φυσικό φωτισμό των κτιρίων ή για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας μέσα σε αυτά (Εικόνα 2.7). Προϋπόθεση για την εφαρμογή παθητικών ηλιακών συστημάτων σε ένα κτίριο είναι η θερμομόνωση του, έτσι ώστε να περιοριστούν οι θερμικές απώλειες. Η αρχή λειτουργίας των παθητικών συστημάτων θέρμανσης βασίζεται στο "φαινόμενο του θερμοκηπίου", ενώ τα παθητικά συστήματα δροσισμού βασίζονται στην προστασία του κτιρίου από τον ήλιο, δηλαδή στην παρεμπόδιση της εισόδου των ανεπιθύμητων, κατά τη θερινή περίοδο, ακτίνων του ήλιου στο κτίριο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μόνιμων ή κινητών σκιάστρων καθώς και με τη διευκόλυνση της φυσικής κυκλοφορίας του αέρα στο εσωτερικό των κτιρίων. Ένα κτίριο που περιλαμβάνει παθητικά συστήματα θέρμανσης, δροσισμού ή ακόμη και φυσικού φωτισμού,

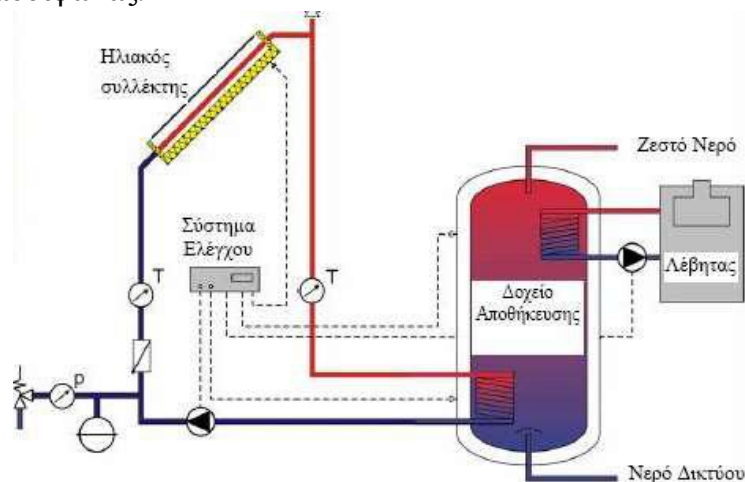
κατασκευασμένο εξαρχής ή τροποποιημένο, ονομάζεται "βιοκλιματικό κτήριο" και είναι δυνατό να καλύψει μεγάλο μέρος των ενεργειακών του αναγκών από την άμεση ή έμμεση αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.



Εικόνα 2.7 Παράδειγμα παθητικού συστήματος.

- **Ενεργητικά ηλιακά συστήματα**

Η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται μέσω ηλιακών συλλεκτών. Οι συλλέκτες περιλαμβάνουν μια μαύρη, συνήθως επίπεδη μεταλλική επιφάνεια, η οποία απορροφά την ακτινοβολία και θερμαίνεται. Πάνω από την απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα (συνήθως από γυαλί ή πλαστικό) που παγιδεύει τη θερμότητα (φαινόμενο θερμοκηπίου). Σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια τοποθετούνται λεπτοί σωλήνες, μέσα στους οποίους διοχετεύεται κάποιο υγρό, που απάγει την θερμότητα και τη μεταφέρει, με τη βοήθεια μικρών αντλιών (κυκλοφορητές) σε μια μεμονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης (Εικόνα 2.8). Το πιο απλό και διαδεδομένο σήμερα ενεργητικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνας.



Εικόνα 2.8 Παράδειγμα ενεργητικού συστήματος.

- **Φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα**

Η λειτουργία την φωτοβολταϊκών ηλιακών συστημάτων στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Μερικά υλικά, όπως το πυρίτιο με πρόσμιξη άλλων στοιχείων, γίνονται ημιαγωγοί (άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα προς μια μόνο διεύθυνση), έχουν δηλαδή τη δυνατότητα να δημιουργούν διαφορά δυναμικού όταν φωτίζονται και κατά συνέπεια να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Συνδέοντας μεταξύ τους πολλά μικρά κομμάτια τέτοιων υλικών (φωτοβολταϊκές κυψέλες ή στοιχεία), τοποθετώντας τα σε μία επίπεδη επιφάνεια (φωτοβολταϊκό σύστημα) και στρέφοντάς τα προς τον ήλιο, γίνεται δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο μπορεί να καλύψει ανάγκες όπως: λειτουργία επιστημονικών συσκευών (δορυφόρων), κίνηση ελαφρών αυτοκινήτων (ηλιακά αυτοκίνητα), λειτουργία φάρων, ή την κάλυψη έστω και μέρους των ενεργειακών αναγκών μικρών κατοικιών όπως φωτισμός, τηλεπικοινωνίες, ψύξη κτλ. Η μέγιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων (Φ/B), ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους κυμαίνεται από 7% (ηλιακά στοιχεία άμορφου πυριτίου) έως 12-15% (ηλιακά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου). Το σημαντικό είναι ότι η ενέργεια που παράγεται με αυτό τον τρόπο, μπορεί να αποθηκευτεί σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές (μπαταρίες) με αποτέλεσμα να υπάρχει ανεξάντλητη, ανανεώσιμη, φθηνή και κυρίως "καθαρή" ενέργεια.

2.2.1 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών

Όταν το φως προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υλικού, τότε ένα μέρος αυτού ανακλάται, ένα άλλο τη διαπερνά και το υπόλοιπο απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η απορρόφηση του φωτός, ουσιαστικά σημαίνει τη μετατροπή του σε άλλη μορφή ενέργειας η οποία συνήθως είναι θερμότητα. Παρ' όλα αυτά όμως, υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνειά τους, σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, αποτελεί τη βασική φυσική διαδικασία μέσω της οποίας ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα. Υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο, το αρσενιούχο γάλλιο, το τελουριούχο κάδμιο, ο δισελινιοϊνδιουχος χαλκός κλπ. Το στοιχείο του κρυσταλλικού πυριτίου ωστόσο παραμένει το ευρύτερα διαδεδομένο φωτοβολταϊκό στοιχείο.

2.2.1.1 Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών

Ο περισσότερος γνωστός ημιαγωγός είναι το πυρίτιο (Si). Το πυρίτιο τις αποκτά τις ημιαγωγικές ιδιότητες του με τεχνικό τρόπο. Αυτό πρακτικά γίνεται με την πρόσμιξη άλλων στοιχείων, τα οποία είτε έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο είτε ένα λιγότερο στη στοιβάδα σθένους τους. Η πρόσμιξη κάνει τον κρύσταλλο δεκτικό είτε σε θετικά φορτία (υλικό τύπου p) είτε σε αρνητικά φορτία (υλικό τύπου n).

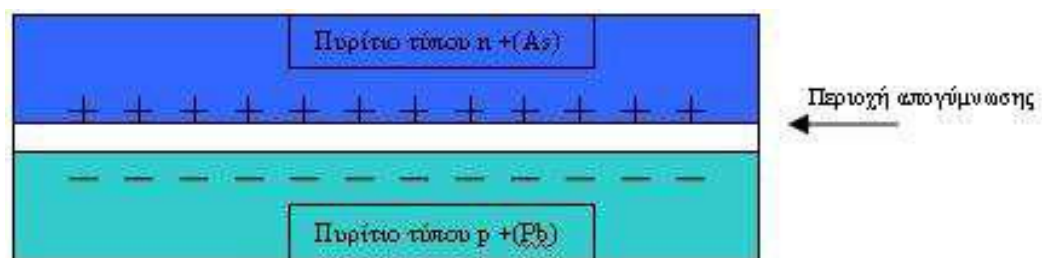
Για την κατασκευή ημιαγωγού τύπου n, ή αλλιώς ενός αρνητικά φορτισμένου κρυσταλλού πυριτίου, θα πρέπει να γίνει πρόσμιξη ενός υλικού με 5e στην εξωτερική του στοιβάδα, όπως για παράδειγμα το αρσενικό (As). Αντίστοιχα, για τη δημιουργία ημιαγωγού τύπου p, ή αλλιώς ενός θετικά φορτισμένου κρυσταλλού πυριτίου,

χρειάζεται να γίνει πρόσμειξη στον κρύσταλλο κάποιου υλικού, όπως το βόριο (B) που έχει 3ε στην εξωτερική του στοιβάδα.

2.2.1.2 Δημιουργία του ηλεκτρικού πεδίου

Εάν έρθουν σε επαφή δύο τμήματα πυριτίου τύπου n και τύπου p, το ένα απέναντι από το άλλο, δημιουργείται στη θέση επαφής μια ζώνη όπου εναλλάσσονται οπές και ηλεκτρόνια. Ελεύθερα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού n εισέρχονται στον ημιαγωγό p και συμπληρώνουν αντίστοιχες οπές, ενώ ελεύθερες οπές από τον ημιαγωγό p εισέρχονται στον n ημιαγωγό και ενώνονται με ίσο αριθμό ηλεκτρονίων. Έτσι, η πλευρά n αποκτά θετικό δυναμικό και η πλευρά p αρνητικό, απαγορεύοντας πια την ανταλλαγή ηλεκτρονίων-οπών στην περιοχή απογύμνωσης. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται μια δίοδος ή αλλιώς ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή των δύο υλικών που ονομάζεται δίοδος επαφής ή ημιαγωγική επαφή p-n (Εικόνα 2.9).

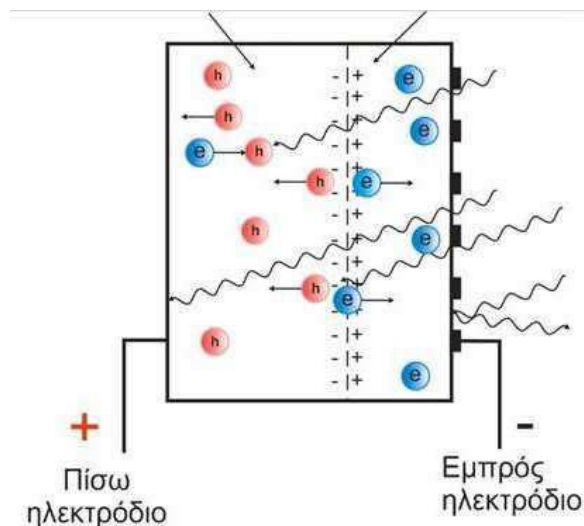
Κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία έρχεται με τη μορφή πακέτων ενέργειας ή φωτονίων, τα φωτόνια που προσπίπτουν στη διάταξη του φωτοβολταϊκού κελιού περνούν αδιατάραχτα την επαφή τύπου n και χτυπούν άτομα τη περιοχή τύπου p. Τα ηλεκτρόνια της περιοχής τύπου p αρχίζουν και κινούνται μεταξύ των οπών ώσπου τελικά φτάνουν στην περιοχή της διόδου, όπου και έλκονται πλέον από το θετικό πεδίο της εκεί περιοχής.



Εικόνα 2.9 Επαφή ημιαγωγού τύπου p και ημιαγωγού τύπου n.

Αφού ξεπεράσουν το ενεργειακό χάσμα αυτής της περιοχής μετά είναι αδύνατον να επιστρέψουν. Στο κομμάτι της επαφής n πλέον, υπάρχει μια περίσσεια ηλεκτρονίων που μπορεί να γίνει να εκμεταλλεύσιμη. Αυτή η περίσσεια των ηλεκτρονίων μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα εάν τοποθετήσουμε μια διάταξη, όπως ένα μεταλλικό αγωγό στο πάνω μέρος της επαφής n και στο κάτω της επαφής p και ένα φορτίο ενδιάμεσα, με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείσει ένας αγωγίμος δρόμος για το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται. Αυτή είναι απλοποιημένα η γενική αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου (Εικόνα 2.10).

Συμπερασματικά η όλη διάταξη, αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού κυττάρου.



Εικόνα 2.10 Μηχανισμός εκδήλωσης φωτοβολταϊκού φαινομένου σε φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες της παραπάνω διάταξης, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Από την πίσω πλευρά του φωτοβολταϊκού πάνελ εξέρχονται δύο καλώδια (θετικό και αρνητικό) από όπου περνάει το ηλεκτρικό ρεύμα.

2.2.2 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μετατρέπουν ένα ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό, το οποίο εξαρτάται από τον τύπο των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τα λεγόμενα μονοκρυσταλλικά στοιχεία έχουν τη μεγαλύτερη απόδοση, η οποία κυμαίνεται στη βιομηχανία από 15 - 18% (δηλαδή μετατρέπουν αυτό το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρικό ρεύμα). Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. Τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία έχουν ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση (τα συνηθισμένα πολυκρυσταλλικά πάνελ μετατρέπουν το 14%-16% της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό), είναι όμως φθηνότερα από τα μονοκρυσταλλικά.

2.2.2.1 Φωτοβολταϊκές Τεχνολογίες

Οι φωτοβολταϊκές τεχνολογίες διακρίνονται σε *πρώτης*, *δεύτερης* και *τρίτης* γενιάς. Στην πρώτη γενιά ανήκουν τα φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si), στη δεύτερη γενιά περιλαμβάνει την τεχνολογία λεπτού υμένα (thin film) και στην τρίτη γενιά γενικά ανήκουν τα συγκεντρωτικά συστήματα, τα οργανικά συστήματα, καθώς και άλλες τεχνολογίες που δεν είναι ακόμα εμπορικά διαθέσιμες. Οι τεχνολογίες διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά το βαθμό απορρόφησης του φωτός, την ενεργειακή απόδοση, τον τρόπο και το κόστος κατασκευής. Μία σύνοψη τους φαίνεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Σύνοψη απόδοσης φωτοβολταϊκών τεχνολογιών.

Commercial Module Efficiency								
Technology	First generation : Crystalline silicon		Second generation : Thin Film				Third generation PV	
	Mono	Multi	a-Si	CdTe	CIGS	a-Si/μc-Si	CPV	DSSC/OPV
Cell efficiency	16-22%	14-18%	5.4-7.7%	9-12.5%	7.3-12.7%	7.5-9.8%	30-38%	2-4%
Module efficiency	13-19.7%	11-15%					~25%	
Area needed per KW (for modules)	~7m ²	~8m ²	~15m ²	~10m ²	~10m ²	~12m ²		

Source: Strategic Research Agenda (2011), Photon International (February 2011), EPIA analysis
Efficiency based on Standard Test Conditions (STC).

- **Πρώτης γενιάς φωτοβολταϊκά συστήματα**

Η τεχνολογία του κρυσταλλικού πυριτίου είναι η πιο γνωστή και ώριμη από τις άλλες σχετικές τεχνολογίες. Αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 80% της καθημερινής αγοράς και η απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 12% και 22%. Οι κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από λεπτά πλακίδια (wafer) πυριτίου, τα οποία είναι είτε μονοκρυσταλλικά είτε πολυκρυσταλλικά.

Οι κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχουν κοπεί από ένα κυλινδρικό κρύσταλλο πυριτίου. Το πυρίτιο πρέπει να είναι πολύ υψηλής καθαρότητας και να έχει τέλεια δομή κρυστάλλου. Αυτού του είδους οι ηλιακές κυψέλες έχουν και τη μεγαλύτερη απόδοση. Η κατασκευή τους όμως, είναι πιο πολύπλοκη γιατί απαιτεί την κατασκευή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου με αποτέλεσμα να έχει υψηλότερο κόστος κατασκευής.

Οι κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από ράβδους λιωμένου και επανακρυσταλλομένου πυριτίου. Για την παραγωγή τους, οι ράβδοι του πυριτίου κόβονται σε λεπτά τμήματα από τα οποία κατασκευάζεται η κυψέλη του φωτοβολταϊκού πλαισίου με τη διαδικασία χύτευσης. Η διαδικασία κατασκευής τους είναι απλούστερη από εκείνη των μονοκρυσταλλικών ηλιακών κυψελών με αποτέλεσμα να έχουν χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Όμως, παρουσιάζουν μικρότερη απόδοση από τις ηλιακές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου που οφείλεται στις ατέλειες στη δομή του κρυστάλλου ως αποτέλεσμα της διαδικασίας χύτευσης.

- **Δεύτερης γενιάς φωτοβολταϊκά συστήματα**

Οι φωτοβολταϊκές ηλιακές κυψέλες λεπτού υμένα, προκύπτουν από την εναπόθεση λεπτών στρωμάτων φωτοευαίσθητου ημιαγωγίμου υλικού επάνω σε γυαλί ή ανοξείδωτο χάλυβα ή πλαστικό ή ακόμα και σε άλλου είδους χαμηλού κόστους υποστρώματα. Μόλις το υλικό αποτεθεί στο γυαλί, με τη βοήθεια λέιζερ κόβεται σε πολλαπλές λεπτές κυψέλες.

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες λεπτού υμένα συνήθως περικλείονται σε δύο γυάλινες επιφάνειες χωρίς πλαίσιο. Εάν το φωτοευαίσθητο υλικό έχει εναποτεθεί επάνω σε λεπτή πλαστική μεμβράνη, τότε η ηλιακή κυψέλη που προκύπτει μπορεί να είναι εύκαμπτη. Αυτού του είδους οι φωτοβολταϊκές κυψέλες, μπορούν να ενσωματωθούν επάνω σε κτίρια ή να χρησιμοποιηθούν σε ειδικές εφαρμογές.

Τα πρότυπα φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτού υμένα έχουν χαμηλότερη ονομαστική ισχύ (40 έως 150 Wp) και το μέγεθός τους είναι σχετικά μικρότερο. Ωστόσο, δεν υπάρχει κοινός βιομηχανικός κανόνας που να ορίζει το βέλτιστο μέγεθος

του πλαισίου για την τεχνολογία λεπτού υμένα. Έτσι, αυτά ποικίλουν από 0,6 μέχρι 5,7 m², ανάλογα με την εφαρμογή τους. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα μεγάλα φωτοβολταϊκά πλαίσια στον κτιριακό τομέα ή σε εγκαταστάσεις στο έδαφος, όπου το κόστος της γης είναι μικρό. *Τέσσερις διαφορετικοί τύποι* φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτού υμένα είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο:

1. Άμορφο πυρίτιο (a-Si)

Το στρώμα του ημιαγωγού έχει πάχος περίπου 1-2 μm. Το άμορφο πυρίτιο μπορεί να απορροφήσει περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία σε σύγκριση με αυτό του κρυσταλλικού πυριτίου. Ωστόσο, προκαλείται χαμηλότερη ροή ηλεκτρονίων, η οποία οδηγεί σε αποδόσεις που κυμαίνονται από 4% έως 8%. Ολοένα και περισσότερες εταιρείες, παράγουν ελαφρά, εύκαμπτα φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου, τα οποία είναι κατάλληλα για επίπεδες και κυρτές οροφές.

2. Πολλαπλών Επιστρώσεων λεπτού υμένα πυρίτιο (a-Si/μc-Si)

Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο λεπτού υμένα, αποτελείται από κυψέλη άμορφου πυριτίου, με πρόσθετα στρώματα άμορφου και μονοκρυσταλλικού πυριτίου, τα οποία εφαρμόζονται στο υπόστρωμα. Το μικροκρυσταλλικό απορροφά περισσότερο φως στο κοντινό υπέρυθρο και ερυθρό φάσμα με αποτέλεσμα να αυξάνει την απόδοση του συστήματος προσεγγίζοντας μέχρι και το 12%. Το πάχος του στρώματος του μικροκρυσταλλικού πυριτίου είναι της τάξης των 3 μm.

3. Ηλιακές φωτοβολταϊκές κυψέλες τελλουρίου-καδμίου (CdTe)

Η κατασκευή των λεπτών υποστρωμάτων τελλουρίου-καδμίου κοστίζει λιγότερο και η απόδοσή τους φθάνει έως και 13%. Αυτό το καθιστά ως την οικονομικότερη τεχνολογία λεπτού υμένα, η οποία είναι σήμερα διαθέσιμη.

4. Φωτοβολταϊκές κυψέλες πολυκρυσταλλικών υμενίων τετραμερούς σεληνίου (CIGS) και δισεληνοειδούς χαλκού (CIS)

Οι ηλιακές κυψέλες CIGS και CIS προσφέρουν τις υψηλότερες αποδόσεις από όλες τις τεχνολογίες λεπτού υμένα. Αποδόσεις της τάξεως του 20% έχουν επιτευχθεί εργαστηριακά, πλησιάζοντας τα επίπεδα που παρουσιάζει το κρυσταλλικό πυρίτιο. Η διαδικασία παραγωγής είναι πολύ πιο περίπλοκη και λιγότερο τυποποιημένη σε σύγκριση με άλλους τύπους ηλιακών κυψελών οδηγώντας σε αύξηση του κόστους κατασκευής τους. Η τρέχουσα απόδοσή τους κυμαίνεται από 10-14%.

• Τρίτης γενιάς φωτοβολταϊκά συστήματα

1. Συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα (CPV)

Τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούν φακούς ή κάτοπτρα, ώστε να εστιάζεται η ηλιακή ακτινοβολία στις κυψέλες. Οι κυψέλες αυτές είναι φτιαγμένες από πολύ μικρές ποσότητες ημιαγωγικού φωτοβολταϊκού υλικού, υψηλής απόδοσης, αλλά και κόστους. Οι συγκεντρωτικές φωτοβολταϊκές κυψέλες έχουν ως βάση συνήθως το πυρίτιο ή άλλα ημιαγώγιμα στοιχεία (αρσενιούχο γάλλιο, GaAs). Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν μόνο την άμεση ακτινοβολία και είναι πολύ πιο αποδοτικά σε περιοχές με υψηλές τιμές άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Η ένταση στο σημείο συγκεντρώσεως κυμαίνεται από 2 έως 100 ήλιους (χαμηλή συγκέντρωση) μέχρι και 1000 ήλιους (υψηλή συγκέντρωση). Αποδόσεις του 20-25%

έχουν παρατηρηθεί σε κυψέλες με βάση το πυρίτιο. Αντιθέτως, αποδόσεις της τάξεως του 25-30% έχουν επιτευχθεί χρησιμοποιώντας αρσενιούχο γάλλιο (GaAs), καθώς και άνω του 40% σε εργαστηριακές συνθήκες. Οι ηλιακές κυψέλες των φωτοβολταϊκών πλαισίων αποτελούνται από σύνολα φακών ή κατόπτρων τα οποία είναι ακριβή, αξιόπιστα και θα πρέπει να είναι μονίμως προσανατολισμένα προς τον ήλιο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση συστήματος παρακολούθησης δύο αξόνων.

2. Άλλης μορφής τρίτης γενιάς φωτοβολταϊκά συστήματα

Οι τεχνολογίες τρίτης γενιάς που έχουν σήμερα ξεκινήσει να εμφανίζονται στην αγορά κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Προηγμένης Τεχνολογίας Ανόργανου Λεπτού Υμένα Σφαιρικά (CIS).
- Οργανικές φωτοευαίσθητες ηλιακές κυψέλες με χρωστική ουσία (DSC).
- Θερμοφωτοβολταϊκές κυψέλες (TPV) που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμένα συστήματα θερμότητας και ενέργειας.

Τα φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς, έχουν σημαντικά ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης, εξαιτίας της ευκαμψίας που παρουσιάζει το υπόστρωμα και της ικανότητας τους να λειτουργούν κάτω από χαμηλές ή μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού. Διάφορες εφαρμογές συναντώνται στα χαμηλής ισχύος ηλεκτρονικά είδη που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο (φορτιστές κινητών τηλεφώνων, εφαρμογές φωτισμού και αυτοτροφοδοτούμενες οθόνες), καθώς και σε εφαρμογές σε κτίρια.

- Εκτός από τις φωτοβολταϊκές τεχνολογίες τρίτης γενιάς, ακόμα νεότερες τεχνολογίες βρίσκονται σε ερευνητικό επίπεδο.
 - Ενεργά υποστρώματα με την εισαγωγή κβαντικών σωματιδίων ή σωματιδίων νανοτεχνολογίας. Αυτή η τεχνολογία είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί σε φωτοβολταϊκά συγκεντρωτικά συστήματα λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής, αλλά και της υψηλής απόδοσης που επιτυγχάνεται.
 - Προσαρμογή του ηλιακού φάσματος σε μήκη κύματος με μέγιστη απόδοση συλλογής ή αύξηση της απορροφητικότητας των ηλιακών κυψελών. Οι προσαρμογές αυτές μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις υφιστάμενες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυψελών.

2.2.2.2 Επιλογή φωτοβολταϊκών πάνελ

Ο ήλιος παρέχει πάνω από 1.000 Watt ανά τετραγωνικό μέτρο. Έτσι, ένα φωτοβολταϊκό με διαστάσεις ένα μέτρο πλάτος και ένα μέτρο ύψος (δηλαδή ένα τετραγωνικό μέτρο) θα παράγει περίπου 160W την ώρα αν αποτελείται από μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, περίπου 140W την ώρα αν αποτελείται από πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία και περίπου 80 W την ώρα αν είναι, για παράδειγμα, άμορφου πυριτίου.

Ένα φωτοβολταϊκό με ονομαστική μέγιστη ισχύ 100 W βγάζει έξοδο περίπου 20 V και 5 A ($20\text{ V} \times 5\text{ A} = 100\text{ W}$). Γίνεται να συνδεθούν όσα φωτοβολταϊκά πάνελ

θέλει ο επενδυτής σε σειρά ή και παράλληλα, για να πετύχει το συνδυασμό τάσης ρεύματος (V), έντασης ρεύματος (A) και φυσικά την συνολική ισχύ (W) που επιθυμεί να έχει το σύστημα. Φωτοβολταϊκά συνδεδεμένα σε σειρά είναι όταν έχουν συνδεθεί μεταξύ τους, ενώνοντας το θετικό καλώδιο εξόδου του ενός πάνελ με το αρνητικό του άλλου, δηλαδή εναλλάξ το + με το - κ.ο.κ. Συνδεδεμένα παράλληλα είναι όταν έχει συνδεθεί το θετικό καλώδιο εξόδου του ενός πάνελ με το θετικό του επόμενου και το αρνητικό καλώδιο εξόδου με το αρνητικό του επόμενου. Σε σειρά αθροίζεται μόνο η τάση (τα V), ενώ παράλληλα αθροίζεται μόνο το ρεύμα (τα A). Τα φωτοβολταϊκά πάνελ συνδέονται συνήθως σε σειρά για μεγαλύτερη τάση (V) όταν πρόκειται να συνδεθούν με το δίκτυο της ΔΕΗ, ενώ προορίζονται για αυτόνομο σύστημα με συσσωρευτές (μπαταρίες), τότε η απαιτούμενη τάση εξαρτάται από αυτή των συσσωρευτών.

Μια αρκετά συνηθισμένη παρανόηση είναι αυτή που θέλει τα μονοκρυσταλλικά να είναι καλύτερα από πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, αφού έχουν μεγαλύτερη απόδοση. Η σύγχυση προκαλείται από την έννοια “απόδοση φωτοβολταϊκών”. Η έννοια είναι τεχνική και δεν πρέπει να απασχολεί ιδιαίτερα τον τελικό χρήστη ενός μικρού συστήματος. Αφορά μόνο μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα ή στέγες περιορισμένων τετραγωνικών όπου κάθε εκατοστό μπορεί να έχει σημασία για την τοποθέτηση μερικών ακόμη πάνελ (αφού τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν κατά λίγα εκατοστά μικρότερες διαστάσεις).

Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά την φυσιολογική απώλεια ισχύος στη διάρκεια των ετών που παρουσιάζουν όλα τα πάνελ. Επίσης, τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά είναι καλύτερα από τα μονοκρυσταλλικά για το κλίμα της Ελλάδας (λόγω καλύτερου συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης). Εξ’ άλλου, όταν κάποιος αγοράζει φωτοβολταϊκό πάνελ π.χ. 200 Watt/p, τόσα Watt/p θα παράγει το πάνελ του είτε είναι μονοκρυσταλλικό είτε είναι πολυκρυσταλλικό, απλά το μονοκρυσταλλικό μπορεί να είναι ακριβότερο και μικρότερο σε διαστάσεις.

Υπάρχουν και τα λεγόμενα “άμορφου πυρίτιου” που αποτελούνται από μια ενιαία επιφάνεια κι όχι από διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία όπως τα προηγούμενα. Αυτά έχουν χαμηλότερη απόδοση (10%-15% σήμερα), αλλά είναι τα οικονομικότερα. Χρειάζονται απλώς μεγαλύτερη επιφάνεια για να δώσουν την ίδια ισχύ με τα μονοκρυσταλλικά ή τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά.

Για την επιλογή των φωτοβολταϊκών πλαισίων απαιτείται έλεγχος των εγγυήσεων που προσφέρει ο κάθε κατασκευαστής. Τα πλαίσια με πάνω από 25 χρόνια εγγύηση απόδοσης είναι συνήθως και τα πιο αξιόπιστα. Βασικό κριτήριο είναι επίσης να δίνεται από τον κατασκευαστή γραμμική εγγύηση απόδοσης. Η κατασκευάστρια εταιρία και η παγκόσμια κατάταξη του επιλεγμένου πλαισίου σε εξειδικευμένα tests αποτελούν επίσης στοιχεία για την επιλογή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Όσον αφορά την ισχύ και την τάση, η επιλογή θα γίνει ανάλογα με τις ανάγκες του επενδυτή από ειδικό και έμπειρο μηχανικό σε αυτόνομο φωτοβολταϊκά συστήματα.

2.2.3 Πλωτά Φωτοβολταϊκά Συστήματα [22] [25]

Με τον όρο πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα αναφερόμαστε σε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, η οποία εγκαθίσταται στην επιφάνεια της θάλασσας, ή λίμνης ή ακόμα και ποταμού και επιπλέει, αντί συμβατικών εγκαταστάσεων, όπου τα πλαίσια είναι στερεωμένα σε χερσαίο έδαφος. Ένα εγκατεστημένο πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα απεικονίζεται στην Εικόνα 2.11.

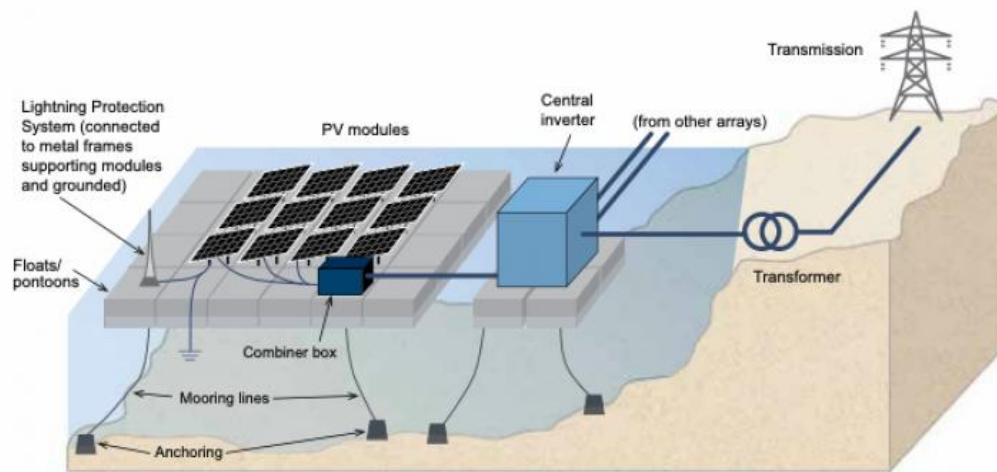


Εικόνα 2.11 Εγκατεστημένο πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η εκμετάλλευση επιφανειών όγκων νερού όπως θάλασσες, λίμνες και ποταμοί με μεγάλο πλάτος και μικρή ροή. Δεν καταλαμβάνουν έδαφος, το οποίο μπορεί να έχει διάφορες άλλες χρήσεις. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα εγκατάστασης τους σε περιοχές που ούτως ή άλλως οι χερσαίες εκτάσεις είναι περιορισμένες όπως σε μικρά νησιά, όπου μάλιστα συμφέρει και περισσότερο, καθώς η ανά μονάδα αξία της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας σε μη διασυνδεδεμένα νησιά είναι ακόμα μεγαλύτερη. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων εξαρτάται από τη θερμοκρασία, οπότε ένα ακόμη πλεονέκτημα των πλωτών εγκαταστάσεων είναι ότι είναι αποδοτικότερες εφ' όσον λειτουργούν σε ευνοϊκότερο περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει διότι είναι χαμηλότερες οι θερμοκρασίες στη θάλασσα σε σχέση με το χερσαίο έδαφος, και υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα φυσικής ψύξης των πλαισίων χρησιμοποιώντας τις ακόμη χαμηλότερες θερμοκρασίες του νερού. Ενώ η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μπορεί να ξεπερνάει τους 35 βαθμούς, την ίδια χρονική περίοδο η θερμοκρασία του νερού μπορεί να είναι κάτω των 20 βαθμών. Λειτουργία πλαισίων σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σημαίνει και μεγαλύτερη απόδοση λειτουργίας. Τέλος, η παρουσία σκόνης που συγκεντρώνεται στην επιφάνεια των πλωτών φωτοβολταϊκών είναι μειωμένη σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα.

Όσον αφορά το κόστος των πλωτών φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ελαφρώς υψηλότερο ή συγκρίσιμο με εκείνο των συμβατικών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων και αυτό οφείλεται στην ανάγκη για πλωτήρες, αγκυροβόλια και άλλα ανθεκτικά ηλεκτρικά εξαρτήματα. Συγκεκριμένα, το κόστος κυμαίνεται από 0,8 – 1,2 ευρώ ανά Wp, αναλόγως βέβαια με την θέση του έργου και το μέγεθος του συστήματος.

Ένα τυπικό πλωτό φωτοβολταϊκό σύστημα μεγάλης κλίμακας με τα βασικά συστατικά του παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12 Σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού πλωτού φωτοβολταϊκού συστήματος μεγάλης κλίμακας με τα βασικά συστατικά του.

2.3 Αιολική ενέργεια και αιολικές μηχανές [24]

2.3.1 Αιολική ενέργεια

Ένα από τα είδη των ΑΠΕ που γνωρίζουν τη μεγαλύτερη άνθιση, είναι η αιολική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του ανέμου που προέρχεται από τη μετακίνηση αερίων μαζών της ατμόσφαιρας. Οι μετακινήσεις του αέρα, οι άνεμοι, προέρχονται από τις μεταβολές και τις διαφορετικές από τόπο σε τόπο τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι διαφορετικές αυτές τιμές της πίεσης οφείλονται στη διαφορετική θέρμανση (απορρόφηση ενέργειας) της ατμόσφαιρας κάθε τόπου από τον Ήλιο.

Ο άνθρωπος από πολύ παλιά κατάλαβε πόσο σημαντική μπορεί να αποδειχθεί η ενέργεια που δίνει ο άνεμος όταν φυσάει και αξιοποίησε τη δύναμη των ανέμων σε διάφορες χρήσεις. Τα ιστιοφόρα πλοία μετέφεραν ανθρώπους και εμπορεύματα διασχίζοντας τις θάλασσες και πάνω τους στήριξαν την ακμή και την οικονομική τους ευρωστία μεγάλες πόλεις που κυριάρχησαν στην ιστορία. Οι ανεμόμυλοι πάλι, που άφθονους βλέπει κανείς κυρίως στα νησιά μας, ήταν πολύτιμοι βοηθοί στην παραγωγή του αλευριού, βασικού παράγοντα διατροφής σε όλες τις ανθρώπινες κοινωνίες.

Αυτή η ενέργεια, η αιολική, αξιοποιείται στις μέρες μας ολοένα και περισσότερο, σε περιοχές όπου συχνά φυσούν ισχυροί άνεμοι. Για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται σήμερα οι ανεμογεννήτριες, με τις οποίες μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του ανέμου σε άλλες πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας, όπως θερμική, ηλεκτρική και φυσικά μηχανική. Ο άνεμος, όμως, είναι μια ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη σε όλες της τις παραμέτρους πηγή ενέργειας. Η δέσμευση και χρησιμοποίηση της ενέργειας αυτής, είναι ως εκ τούτου μια πολύ δαπανηρή διαδικασία. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες, χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα επιτεύγματα στην τεχνολογία των υλικών, στη μηχανολογία, στην ηλεκτρονική και στην αεροδυναμική, έχουν ανεβάσει σε υψηλά επίπεδα την απόδοσή τους, μειώνοντας συνεχώς το κόστος της παραγόμενης ενέργειας.

Η μελέτη ενός συστήματος ανεμογεννήτριας (Α/Γ), περιλαμβάνει την αεροδυναμική σχεδίαση και τη μελέτη εφαρμογής, στην οποία περιλαμβάνονται η μηχανολογική μελέτη και σχεδίαση, η μελέτη του ηλεκτρολογικού συστήματος και τα ηλεκτρολογικά συστήματα ελέγχου και ασφαλείας. Η αεροδυναμική σχεδίαση αποτελεί προϋπόθεση για τον σχεδιασμό ενός συστήματος δέσμευσης και μετατροπής της ενέργειας του ανέμου, ενώ η ηλεκτρομηχανολογική μελέτη είναι το αμέσως επόμενο και αναγκαίο στάδιο για την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, κατά τον αποδοτικότερο και πλέον συμφέροντα τεχνοοικονομικό τρόπο.

2.3.2 Συστήματα και τύποι ανεμογεννητριών

Παρόλο που η αρχή λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας είναι απλή, το σύστημά της παραμένει να είναι σύνθετο και να απαιτεί συνδυασμό γνώσεων από πολλούς τομείς. Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των πτερυγίων απαιτεί σύνθετες γνώσεις αεροδυναμικής, η δομή του άξονα οδήγησης, καθώς και του πύργου της ανεμογεννήτριας απαιτεί γνώσεις μηχανολογικές και δομικές, ενώ το τμήμα των ελεγκτών και το σύστημα προστασίας απαιτεί γνώσεις τόσο ηλεκτρολογικές, όσο και των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με

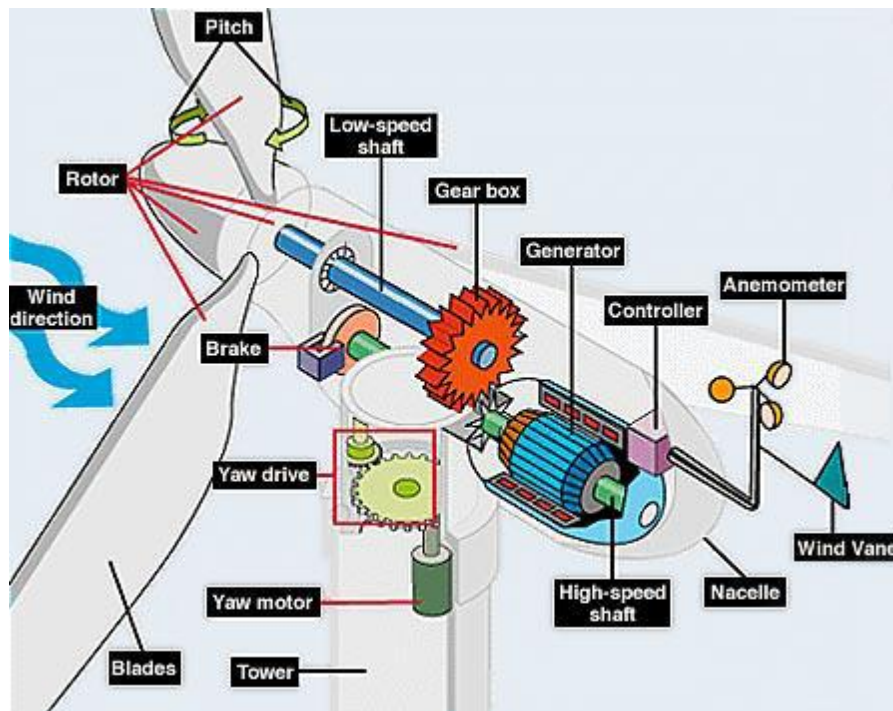
τη ροή του ανέμου.

Οι πλέον διαδεδομένοι τύποι είναι οι *ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα*, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους και οι ανεμογεννήτριες *κατακόρυφου άξονα*, ο δρομέας των οποίων παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους (Εικόνα 2.14). Παρ' όλα αυτά έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα γιατί παρουσιάζει καλύτερο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με τη μηχανή κατακόρυφου άξονα.

Υπάρχει επιπλέον διαχωρισμός των ανεμογεννητριών ανά κατηγορία. Έτσι, οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα διαχωρίζονται με βάση τον αριθμό των πτερυγίων (μονόπτερυγες, δίπτερυγες, τρίπτερυγες, πολύπτερυγες), το είδος των πτερυγίων (stall-controlled, pitch-controlled), τη φορά των πτερυγίων σε σχέση με τη φορά του ανέμου (down-stream, up-stream) κτλ.

Μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα αποτελείται από τα εξής μέρη (Εικόνα 2.13):

- Το *δρομέα (Rotor)*, που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια (*Blades*) από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα.
- Το σύστημα *μετάδοσης της κίνησης*, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών (*Gear box*), το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας για το οποίο υπάρχει η δυνατότητα να μην συμπεριληφθεί. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.
- Την *ηλεκτρική γεννήτρια*, σύγχρονη ή επαγωγική με κάποιο αριθμό πόλων, η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Υπάρχει και το σύστημα πέδης (*Brakes*), το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.
- Το *σύστημα προσανατολισμού (Yaw mechanism)*, που αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
- Τον *πύργο (Tower)*, ο οποίος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο πύργος είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Τον *ηλεκτρονικό πίνακα* και τον *πίνακα ελέγχου*, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.



Εικόνα 2.13 Τα μέρη της ανεμογεννήτριας.

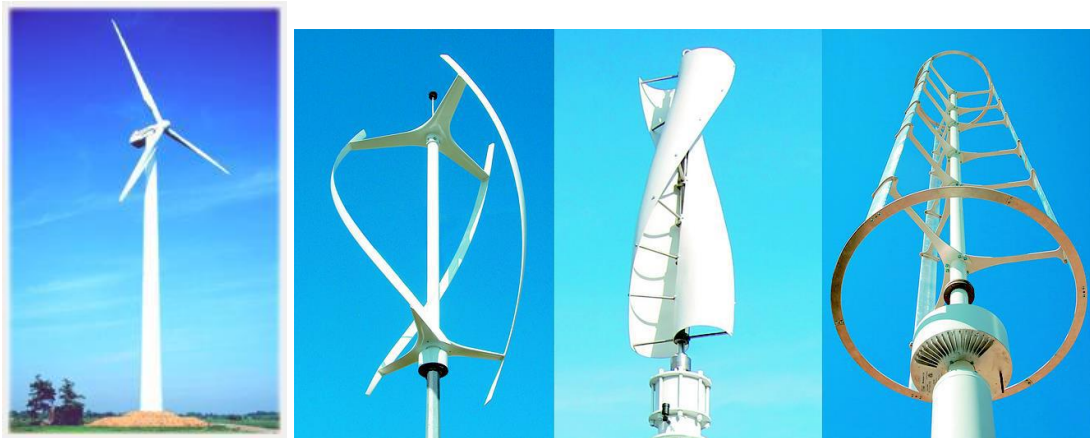
Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα κατέχουν το συντριπτικό μερίδιο της αγοράς και έχει επικρατήσει η χρήση τους σε μεγάλες αιολικές εγκαταστάσεις. Πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα που τις κάνουν τόσο δημοφιλείς, είναι ότι:

1. Δεν χρειάζονται πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου για να ξεκινήσουν να περιστρέφονται και έτσι αρχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και με πολύ μικρές ταχύτητες ανέμου.
2. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα εμφανίζουν υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή.

Ωστόσο σημαντικό μειονέκτημα των γεννητριών αυτών είναι ότι η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να είναι τοποθετημένα πάνω στο πύργο, γεγονός που δυσκολεύει την πρόσβαση και συντήρησή τους και καθιστά την κατασκευή τους πιο ακριβή και δύσκολη.

Σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, στις οριζόντιου άξονα χρειάζεται ένας ενεργός μηχανισμός περιστροφής ο οποίος προσανατολίζει την ανεμογεννήτρια προς την κατεύθυνση του ανέμου, ώστε κάθε φορά ο άνεμος να προσπίπτει κάθετα στα πτερύγια της έλικας και έτσι να μεγιστοποιείται η ενεργειακή απολαβή.

Παρόλο που οι μονοπτέρυγες και διπτέρυγες ανεμογεννήτριες είναι πιο φθηνές, δεν μπόρεσαν να επικρατήσουν στην αγορά λόγω κυρίως των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν στην εξισορρόπηση δυνάμεων της όλης κατασκευής κατά την περιστροφή τους. Οι τριπτέρυγες είναι αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο, καθώς είναι πιο σταθερές μιας και το αεροδυναμικό τους φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα και το μηχανικό φορτίο τους εξισορροπείται. Επιπλέον έχει αποδειχθεί ότι έχουν μεγαλύτερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος από τις πολυπτέρυγες. Η χρήση των πολυπτέρυγων ανεμογεννητριών περιορίζεται σε ελάχιστες εφαρμογές, μια από αυτές είναι η άντληση υδάτων στις οποίες προτιμώνται εξαιτίας της μεγάλης ροπής εκκίνησης που διαθέτουν.



Εικόνα 2.14 Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα και ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα.

Ένας παράγοντας που κατηγοριοποιεί τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, είναι ο τύπος των πτερυγίων που διαθέτουν για τον έλεγχο και περιορισμό της αεροδυναμικής ισχύος και ροπής. Οι δύο βασικοί τύποι πτερυγίων είναι:

- Τα πτερύγια με έλεγχο του βήματος (*pitch controlled*) που μπορούν να περιστραφούν κατά τον διαμήκη άξονά τους, ελέγχοντας με αυτό τον τρόπο τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατά συνέπεια την προσπίπτουσα σε αυτά αεροδυναμική ισχύ. Η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος ελέγχου της γωνίας των πτερυγίων, καθώς επίσης η χρήση υδραυλικών και ηλεκτρομηχανολογικών μέσων για την περιστροφή των πτερυγίων, αποτελούν τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της διάταξης.
- Τα πτερύγια με ενεργό έλεγχο του βήματός τους (*active stall*) στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Στη διάταξη αυτή, όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα, μεγαλώνει δηλαδή η γωνία με τον άνεμο, αποκόπτοντας με αυτό τον τρόπο την περίσσεια της αεροδυναμικής ισχύος. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι ελέγχεται γρηγορότερα η ισχύς εξόδου με αποτέλεσμα να μην καταπονούνται τα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας σε ριπές ανέμου. Αυτός ο έλεγχος χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες μεγαλύτερες του 1 MW.

2.3.3 Ανεμογεννήτριες σταθερής – μεταβλητής ταχύτητας

Με βάση την περιστροφική ταχύτητα, οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας και σε ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας. Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας συνδέονται απευθείας στο δίκτυο μέσω μετασχηματιστή προσαρμογής της τάσης εξόδου της ανεμογεννήτριας στην τάση εξόδου του δικτύου. Εφόσον η συχνότητα του δικτύου f (Hz) είναι σταθερή και η μηχανή έχει συγκεκριμένο αριθμό ζευγών πόλων p , η ταχύτητα n (rpm) της ανεμογεννήτριας είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την ταχύτητα του ανέμου και σταθερή όταν πρόκειται για σύγχρονη μηχανή και δίνεται από τη σχέση:

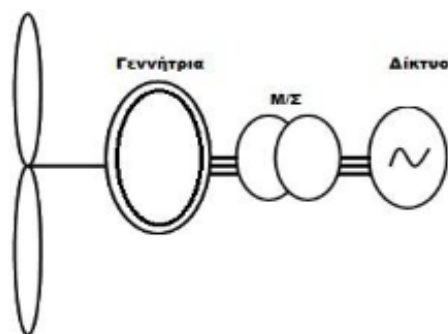
$$n = 60f \cdot p \quad (1)$$

ή σχεδόν σταθερή όταν πρόκειται για επαγωγική μηχανή και δίνεται από τη σχέση:

$$n=(1-s)60f \cdot p, \text{ όπου } s \text{ η ολίσθηση.} \quad (2)$$

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα συστήματα αυτά είναι η στιβαρή και απλή κατασκευή τους, η απλότητα του συστήματος ελέγχου και κυρίως το χαμηλό κόστος συντήρησης. Παρόλα αυτά, σημαντικά είναι και τα μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών στα οποία συγκαταλέγονται η υποβέλπιστα εκμετάλλευση της ανεμογεννήτριας για τις περισσότερες ταχύτητες ανέμου και οι μεγάλες μηχανικές ταλαντώσεις στις οποίες υπόκεινται οι μηχανές λόγω των έντονων μεταβολών της ροής, οι οποίες προκαλούνται από τις απότομες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου.

Συνήθως, οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.15, αποτελούνται από μια επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Ένας από τους λόγους που επιλέγεται η επαγωγική μηχανή είναι ότι είναι αξιόπιστη και συγκριτικά με άλλες πιο φθηνή, όμως σημαντικό της μειονέκτημα είναι ότι καταναλώνει άεργο ισχύ η οποία γίνεται τόσο μεγαλύτερη, όσο αυξάνεται η παραγωγή της ενεργού ισχύος. Για να ισοσταθμίζεται η κατανάλωση άεργου ισχύος της επαγωγικής γεννήτριας έτσι ώστε να παίρνουμε συντελεστή ισχύος κοντά στη μονάδα, στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο χρησιμοποιείται συστοιχία παράλληλων πυκνωτών. Στη περίπτωση που χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια, το σημαντικότερο πρόβλημα που εμφανίζεται είναι οι διακυμάνσεις στην τάση του δικτύου εξαιτίας των απότομων διαταραχών ισχύος προς το δίκτυο που προκαλούνται από τις απότομες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου. Συμπερασματικά λοιπόν, προκύπτει ότι τα συστήματα σταθερής ταχύτητας είναι άπια και πιο οικονομικά, αλλά λόγω των σημαντικών προβλημάτων που παρουσιάζουν, η χρήση τους τείνει να εγκαταλειφθεί.



Εικόνα 2.15 Σύστημα σταθερής ταχύτητας.

Οι ανεμογεννήτριες *μεταβλητής ταχύτητας* έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την προσαρμογή της ταχύτητας περιστροφής τους στην ταχύτητα του ανέμου, με σκοπό τη μεγιστοποίηση του ποσοστού της αιολικής ενέργειας που μετατρέπεται σε μηχανική, το οποίο μεταφράζεται στη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο γίνεται μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, ο οποίος απεμπλέκει την ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας από την συχνότητα του δικτύου και επιτρέπει έτσι, τη λειτουργία της σε διάφορες ταχύτητες. Κύριος σκοπός των συστημάτων αυτών είναι η μέγιστη απομάστευση ισχύος από την ανεμογεννήτρια, το οποίο επιτυγχάνεται με την κατάλληλη μεταβολή της γωνιακής της ταχύτητας μέσω του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος.

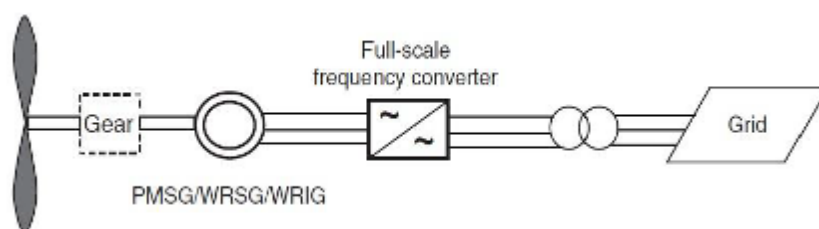
Συμπερασματικά λοιπόν, ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας είναι η βέλτιστη ενεργειακή της απόδοση. Επιπλέον, στα συστήματα μεταβλητής ταχύτητας η ύπαρξη των ηλεκτρονικών μετατροπέων επιτρέπει τον έλεγχο της άεργου ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας της συνολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης, λόγω της μεταβλητότητας των στροφών της ανεμογεννήτριας, εξαιτίας διακυμάνσεων της ταχύτητας του ανέμου, δεν εμφανίζονται απότομες μεταβολές στη μηχανική ροπή με αποτέλεσμα την μειωμένη μηχανική καταπόνηση του άξονα της μηχανής και παράλληλα την αύξηση της αναμενόμενης διάρκειας ζωής της μηχανής.

Ωστόσο τα συστήματα αυτά συνοδεύονται και από κάποια μειονεκτήματα, όπως η υψηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης που τα χαρακτηρίζει και το υψηλό κόστος της αρχικής εγκατάστασης. Επιπρόσθετα, η χρήση μετατροπέων συνοδεύεται από έγχυση ανώτερων αρμονικών στο δίκτυο, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη χρήση φίλτρων τα οποία περιορίζουν το ποσοστό του συνολικού αρμονικού περιεχομένου που εγχέεται στο δίκτυο. Επιπλέον, λόγω της υψηλής διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας του μετατροπέα ισχύος αυξάνονται και οι διακοπτικές απώλειες πάνω στα ημιαγωγικά στοιχεία, και έτσι αυξάνεται συνολικά το ποσοστό των απωλειών του συστήματος.

Η χρήση ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας αυξάνει το βαθμό ελευθερίας επιλογής τύπου γεννήτριας και μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Επιγραμματικά, οι τύποι αυτοί είναι:

- **Γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος:**

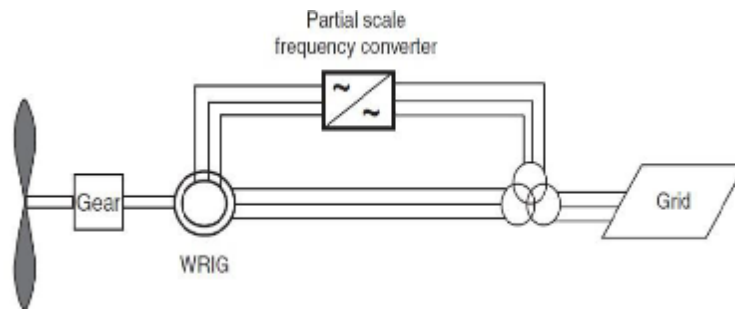
Στον τύπο αυτό χρησιμοποιούνται οι εξής τύποι γεννητριών: σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (PMSG), σύγχρονες γεννήτριες με τύλιγμα διέγερσης (WRSG) και επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG) ή βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG). Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.16, επιτυγχάνεται μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, διαστασιολογημένο στην ονομαστική ισχύ της γεννήτριας, ο οποίος τοποθετείται μεταξύ του στάτη και του δικτύου. Μέσω του ελέγχου που εφαρμόζεται στο μετατροπέα στη μεριά της γεννήτριας ρυθμίζεται κατάλληλα η ταχύτητα της γεννήτριας, ώστε να αντιστοιχεί σε αυτήν όπου η ενεργειακή απολαβή από τον άνεμο είναι μέγιστη. Το μέρος του μετατροπέα στη μεριά του δικτύου προσφέρει την δυνατότητα του πλήρους ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο και της ρύθμισης της τάσης εξόδου επιδρώντας έτσι θετικά στην ευστάθεια του δικτύου. Μειονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι το υψηλό κόστος του μετατροπέα και η έγχυση υψίσυχων αρμονικών στο δίκτυο.



Εικόνα 2.16 Σύστημα με πλήρη μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος.

- **Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG):**

Σε αυτόν το τύπο ως γεννήτρια χρησιμοποιούνται επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG). Το τύλιγμα του στάτη της μηχανής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.17, συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, ενώ το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτείται μέσω δύο τριφασικών μετατροπών πηγής τάσης με ονομαστική ισχύ 30-40% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας. Μέσω των μετατροπών, η γεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει σε υποσύγχρονη και υπερσύγχρονη ταχύτητα (από -40% έως +30% της σύγχρονης ταχύτητας), ενώ παράλληλα επιτρέπεται ο ακριβής έλεγχος της άεργου ισχύος. Ο τύπος αυτός πλεονεκτεί κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, ενώ στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος συντήρησης των γεννητριών αυτών και η ανάγκη υψηλής προστασίας τους σε περίπτωση σφάλματος του δικτύου.



Εικόνα 2.17 Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας.

2.3.4 Ασύγχρονες Γεννήτριες

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες στον κόσμο χρησιμοποιούν τριφασικές ασύγχρονες γεννήτριες με κλωβό. Αυτός ο τύπος γεννήτριας παρόλο που δεν χρησιμοποιείται ευρέως, είναι πολύ διαδεδομένος εκτός από την βιομηχανία των ανεμογεννητριών, και στα μικρά υδροηλεκτρικά. Το περίεργο με αυτού του είδους τη γεννήτρια είναι ότι αρχικά είχε σχεδιαστεί ως ηλεκτρικός κινητήρας. Για την ακρίβεια το ένα τρίτο της παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης χρησιμοποιείται για τη λειτουργία ασύγχρονων κινητήρων μέσα σε εργοστάσια, αντλίες, ανελκυστήρες, και άλλες εφαρμογές, όπου είναι απαραίτητη η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική.

Ένας λόγος επιλογής του κινητήρα αυτού είναι η αξιοπιστία του και ότι είναι σχετικά φθηνός. Η γεννήτρια έχει ακόμα κάποια χαρακτηριστικά που είναι χρήσιμα για τις ανεμογεννήτριες. Έχει αυξημένη δυνατότητα ολίσθησης, και μια ικανότητα υπερφόρτωσης. Η ασύγχρονη γεννήτρια με κλωβό έχει ένα δρομέα, ο οποίος τη διαφοροποιεί από τη σύγχρονη γεννήτρια. Ο δρομέας αποτελείται από μεταλλικές ράβδους (συνήθως αλουμινίου) που ενώνονται ηλεκτρικά με αλουμινένιους δακτυλίους. Ένα ισχυρό πλεονέκτημα αυτού του τύπου δρομέα είναι ότι προσαρμόζεται αυτόματα στα ζεύγη πόλων του στάτη. Αν ο δρομέας περιστρέφεται ακριβώς στην σύγχρονη ταχύτητα, τότε το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με ακριβώς την ίδια ταχύτητα, δεν υπάρχουν φαινόμενα επαγωγής, και δεν αλληλοεπιδρά με το στάτη. Αν η ταχύτητα υπερβεί την σύγχρονη ταχύτητα, τότε ο δρομέας περιστρέφεται γρηγορότερα από το μαγνητικό πεδίο με συνέπεια να παρέχεται στο δίκτυο ηλεκτρικό ρεύμα.

Η ταχύτητα της ασύγχρονης γεννήτριας μεταβάλλεται με την εφαρμοζόμενη περιστροφική δύναμη. Στην πράξη, η διαφορά μεταξύ της περιστροφικής ταχύτητας

στη μέγιστη ισχύ και στη χαμηλή είναι πολύ μικρή, της τάξης του 1%. Η διαφορά αυτή σε ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας καλείται ολίσθηση της γεννήτριας. Γι' αυτό μια γεννήτρια με δυο ζεύγη πόλων θα περιστρέφεται αργά στις 1500 *rpm*, όταν είναι συνδεδεμένη με δίκτυο συχνότητας 50 Hz. Αν η γεννήτρια παράγει τη μέγιστη ισχύ της θα λειτουργεί στις 1515 *rpm*.

Η παρακάτω σχέση είναι ο ορισμός της ολίσθησης μιας ασύγχρονης μηχανής. Το μέγεθος s εκφράζει την ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από την σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

$$s = (n_s - n)/n_s \quad (3)$$

Στην κατάσταση ηρεμίας $n = 0$ και επομένως $s = 1$, ενώ για $n = n_s$ η ολίσθηση ισούται με $s = 0$. Αν ο δρομέας στραφεί γρηγορότερα από το στρεφόμενο πεδίο ($n > n_s$), τότε η ολίσθηση γίνεται αρνητική και είναι η περίπτωση της λειτουργίας της μηχανής ως γεννήτρια.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι η γεννήτρια θα αυξάνει ή θα μειώνει ελαφρώς τις στροφές, όταν η περιστροφική δύναμη μεταβάλλεται. Αυτό έχει ως συνέπεια μικρότερη καταπόνηση στο κιβώτιο ταχυτήτων, και αυτός είναι ένας από τους σοβαρότερους λόγους για τη χρήση ασύγχρονης γεννήτριας παρά σύγχρονης σε ανεμογεννήτριες που είναι άμεσα συνδεδεμένες με το δίκτυο.

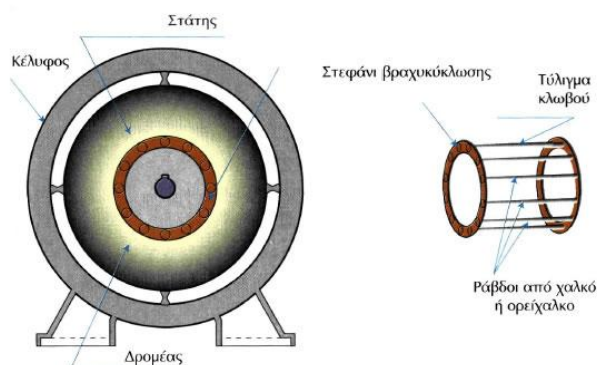
Στην ασύγχρονη γεννήτρια, ο στάτης πρέπει πριν λειτουργήσει να μαγνητιστεί από το δίκτυο. Υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργήσει η ασύγχρονη γεννήτρια σε αυτόνομο δίκτυο, όμως, πρέπει να παρέχονται πυκνωτές που να δίνουν το απαραίτητο ρεύμα μαγνήτισης. Επίσης, είναι απαραίτητο ο δρομέας να έχει έναν εναπομείναν μαγνητισμό όταν εκκινήσει η γεννήτρια. Σε άλλη περίπτωση, θα χρειαστεί μπαταρία και ηλεκτρονικά ισχύος, ή μια μικρή νηζελογεννήτρια για να εκκινήσει το σύστημα.

Μια ασύγχρονη μηχανή με δακτυλιοφόρο δρομέα (*wound rotor*) (Εικόνα 2.18) έχει ένα στάτη παρόμοιο με την ασύγχρονη μηχανή με κλωβό, αλλά ένα δρομέα, ο οποίος φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τύλιγμα όμοιο με το τύλιγμα του στάτη. Το τύλιγμα του δρομέα συνδέεται ηλεκτρικά με το περιβάλλον (π.χ. αντιστάσεις) διαμέσου “slip rings” (δακτυλίου) και “brushes” (ψήκτρες). Έτσι γίνεται δυνατός ο εξωτερικός έλεγχος των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του ρότορα και με τον τρόπο αυτό επηρεάζεται η τάση του. Στο δρομέα σχεδόν πάντα οι τρεις φάσεις συνδέονται σε αστέρα και τα τρία άκρα τους συνδέονται με τους τρεις δακτυλίους. Οι δακτύλιοι μέσω των ψηκτρών συνδέονται με ένα εξωτερικό κύκλωμα, π.χ. με τρεις ωμικές αντιστάσεις συνδεδεμένες σε αστέρα, ή είναι βραχυκυκλωμένοι.

Εντούτοις, δε δίνεται ισχύς στους δακτυλίους. Ο μοναδικός τους στόχος είναι να επιτρέψουν στην αντίσταση να τοποθετηθεί σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα κατά την εκκίνηση. Τέτοια διάταξη ομαλής εκκίνησης υπάρχει στις γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (*optislip*). Τοποθετώντας την αντίσταση σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα, όχι μόνο μειώνεται το ρεύμα εκκίνησης, αλλά αυξάνεται και η ροπή εκκίνησης. Η ολίσθηση του δρομέα αλλάζει τροποποιώντας τη συνολική αντίσταση του ρότορα μέσω ενός μετατροπέα που συνδέεται στον άξονα του ρότορα. Ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο. Αυτή η αντίσταση αποκόβεται όταν η μηχανή έχει ξεκινήσει, ώστε να μοιάζει ο δρομέας ηλεκτρικά με το δρομέα σε μηχανή κλωβού (Εικόνα 2.19).

Το βασικό πλεονέκτημα είναι η ελαχιστοποίηση του φορτίου στις ανεμογεννήτριες κατά τη διάρκεια των ριπών του ανέμου. Μέσω αυτού του

συστήματος, η γεννήτρια έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει την ολίσθησή της (σε ένα μικρό εύρος τιμών) και να οδηγηθεί στη βέλτιστη ολίσθηση, εξασφαλίζοντας μικρότερες ταλαντώσεις στη ροπή εισόδου και στην ισχύ εξόδου. Τα κύρια μειονεκτήματα της γεννήτριας με δακτυλιοφόρο δρομέα είναι ότι είναι πιο ακριβή και όχι τόσο στιβαρή, όσο η γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού, το εύρος στο οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα περιορίζεται στο 0 – 10%, καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του στάτη, ο έλεγχος της πραγματικής και αέργου ισχύος που επιτυγχάνεται δεν είναι αρκετά ικανοποιητικός και τέλος, ένα ποσοστό ισχύος καταναλώνεται στη μεταβλητή αντίσταση του δρομέα.



Εικόνα 2.18 Ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα.



Εικόνα 2.19 Ασύγχρονη γεννήτρια με κλωβό.

2.3.5 Σύγχρονες Γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι γνωστό ότι πήραν το όνομά τους από το γεγονός ότι ο δρομέας τους περιστρέφεται σύγχρονα με την ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι μηχανολογικά πολύ πιο πολύπλοκες και πολύ πιο ακριβές από αντίστοιχες επαγωγικές γεννήτριες ανάλογου μεγέθους. Παρόλα αυτά έχουν ένα βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις επαγωγικές γεννήτριες, το οποίο είναι ότι το ρεύμα μαγνήτισης δεν δημιουργείται από το κύκλωμα του στάτη. Το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο για τη λειτουργία της μηχανής μπορεί να δημιουργηθεί μέσω συμβατικού τυλίγματος διέγερσης στο δρομέα (περίπτωση WRSG) ή με τη χρήση μόνιμων μαγνητών (περίπτωση PMSG). Αξίζει να αναφερθεί ότι αν η σύγχρονη γεννήτρια έχει ένα κατάλληλο, μεγάλο αριθμό πόλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων.

Η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη λοιπόν, είναι αυτοδιεγερόμενη λόγω της ύπαρξης μόνιμων μαγνητών στο δρομέα, οι οποίοι δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην απαιτείται επιπλέον παροχή ηλεκτρικού ρεύματος για την διέγερση της μηχανής, οπότε δεν υπάρχουν και οι απώλειες στο τύλιγμα διέγερσης, με συνέπεια ο βαθμός απόδοσής της να είναι υψηλότερος από τον

αντίστοιχο της επαγωγικής γεννήτριας. Επιπρόσθετα, η ύπαρξη μόνιμου μαγνήτη και συνεπώς η απουσία του τυλίγματος διέγερσης, σημαίνει και την απουσία ψηκτρών και συλλέκτη με άμεση συνέπεια την αυξημένη αξιοπιστία και την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων για συντήρηση. Επίσης, με την χρήση μαγνητών επιτυγχάνεται υψηλή πυκνότητα ροής με αποτέλεσμα να προκύπτει μικρότερο βάρος και όγκος για μια μηχανή δεδομένης ισχύος.

Ωστόσο, πρέπει να αναφερθούν και τα μειονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου μηχανής, τα οποία έχουν λειτουργήσει ως ανασταλτικός παράγοντας στη διείσδυσή της σε μεγαλύτερο βαθμό στην αγορά. Κυριότερος παράγοντας είναι ότι τα υλικά με τα οποία κατασκευάζονται οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος, καθώς προέρχονται από σπάνιες γαίες και επιπρόσθετα δεν είναι καθόλου εύκολα στην επεξεργασία. Επιπλέον, τα μαγνητικά υλικά είναι αρκετά ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες πράγμα, το οποίο καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη κάποιου συστήματος ψύξης.

Πρόσθετο κόστος για ένα σύστημα με χρήση διέγερσης με μόνιμο μαγνήτη αποτελεί η απαραίτητη χρήση ενός μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας, προκειμένου να προσαρμόσει την τάση και τη συχνότητα της γεννήτριας στην τάση και στη συχνότητα του δικτύου αντίστοιχα. Το πλεονέκτημα όμως στη περίπτωση αυτή είναι ότι μπορεί να παραχθεί ενέργεια σε κάθε ταχύτητα ανέμου. Αρνητικό είναι το γεγονός ότι η σύγχρονη φύση των σύγχρονων γεννητριών με μόνιμο μαγνήτη μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα κατά την εκκίνηση, τον συγχρονισμό και τη ρύθμιση της τάσης, ενώ προκαλεί και δύσκαμπτη συμπεριφορά σε περίπτωση που η ταχύτητα του αέρα δεν είναι σταθερή.

Οι σύγχρονες γεννήτριες ή αλλιώς εναλλακτικές κατηγοριοποιούνται με βάση τον τρόπο κατασκευής τους και κυρίως με βάση τη διάταξη των μαγνητικών πόλων. Συγκεκριμένα, προκύπτουν οι εξής κατηγορίες:

- Εναλλακτικές με εξωτερικούς πόλους.
- Εναλλακτικές με εσωτερικούς ή περιστρεφόμενους πόλους. Οι εναλλακτικές με περιστρεφόμενους πόλους αποτελούν μια ιδιαίτερη ομάδα εναλλακτικών και ονομάζονται στροβιλοεναλλακτικές.

Οι σύγχρονες γεννήτριες διακρίνονται και σε δύο ακόμα σημαντικές κατηγορίες που είναι οι εξής:

- Σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Synchronous Generator WSRG)
- Σύγχρονες γεννήτριες μονίμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Generator PMSG)

2.3.5.1 Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (Wound Rotor Synchronous Generator-WSRG)

Η σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WSRG) παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά ως προς την κατασκευή της. Ο στάτης περιλαμβάνει ένα τριφασικό τύλιγμα που δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με μια επαγωγική μηχανή. Η κατασκευή του δρομέα μπορεί να επιτευχθεί, είτε με έκτυπους πόλους, είτε με πόλους κυλινδρικής μορφής με κατανεμημένο τύλιγμα. Στον δρομέα προσαρτάται ειδικό σύστημα για να τροφοδοτεί το τύλιγμα με συνεχές ρεύμα, ώστε να

παραχθεί το απαιτούμενο πεδίο διέγερσης που στρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την δυνατότητα ελέγχου της διέγερσης και συνεπώς, της ροής προκειμένου να περιορίζονται οι απώλειες για διαφορετικά επίπεδα ισχύος.

2.3.5.2 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Generator-PMSG)

Χαρακτηρίζεται σύγχρονη, διότι ο δρομέας περιστρέφεται με σύγχρονο αριθμό στροφών, δηλαδή με τη ίδια ταχύτητα που περιστρέφεται το μαγνητικό πεδίο. Είναι αυτό-διεγειρόμενη λόγω της ύπαρξης μονίμων μαγνητών στον δρομέα, οι οποίοι παράγουν το μαγνητικό πεδίο. Αυτό συνεπάγεται το ότι δεν χρειάζεται επιπλέον παροχή ηλεκτρικού ρεύματος για την διέγερση της μηχανής, οπότε εξαλείφονται και οι απώλειες στο τύλιγμα διέγερσης. Συνεπώς εμφανίζει υψηλό βαθμό απόδοσης. Επιπλέον, η ύπαρξη μαγνητών συνοδεύεται από υψηλή πυκνότητα ροής με αποτέλεσμα να προκύπτει μικρότερο βάρος και όγκος για μια μηχανή δεδομένης ισχύος. Ο στάτης αυτής της κατηγορίας γεννητριών αποτελείται από συμβατικό τριφασικό τύλιγμα. Ο δρομέας εν συνεχεία αποτελείται από ένα σύστημα πόλων μαγνήτη, οι οποίοι μπορεί να είναι είτε κυλινδρικοί, είτε έκτυποι. Πολύ σημαντικό είναι το ότι μπορούν να παράγουν ισχύ σε οποιαδήποτε ταχύτητα, δηλαδή να δουλέψουν σε μεταβλητές ταχύτητες.

Κατηγορίες σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη [23]

Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη διακρίνονται σε ορισμένες κατηγορίες, οι οποίες προκύπτουν με βάση:

- Τη μορφή της επαγόμενης τάσης στο στάτη.
- Την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής.
- Την τοποθέτηση των μαγνητών στον δρομέα.

Με βάση το πρώτο κριτήριο διάκρισης, *την μορφή της επαγόμενης τάσης στον στάτη*, προκύπτουν οι εξής δύο κατηγορίες:

- Τραπεζοειδείς σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (trapezoidal PMSG)
- Ημιτονοειδείς σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (sinusoidal PMSG)

Με βάση το δεύτερο κριτήριο κατηγοριοποίησης των σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη, *δηλαδή την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής*, εμφανίζονται τρία ακόμα είδη:

- Μηχανές ακτινικής ροής (radical flux permanent magnet – RFPM)
- Μηχανές αξονικής ροής (axial flux permanent magnet – AFPM)
- Μηχανές εγκάρσιας ροής (transversal flux permanent magnet – TFPM)

Με βάση το τρίτο και τελευταίο κριτήριο κατηγοριοποίησης των σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη, *δηλαδή την τοποθέτηση των μαγνητών στον δρομέα της μηχανής*, διακρίνονται οι παρακάτω τύποι:

- Μηχανή εσωτερικού μαγνήτη (Interior magnet type - IPMSG)
- Μηχανή επιφανειακού μαγνήτη (Surface mounted magnet type - SPMSG)

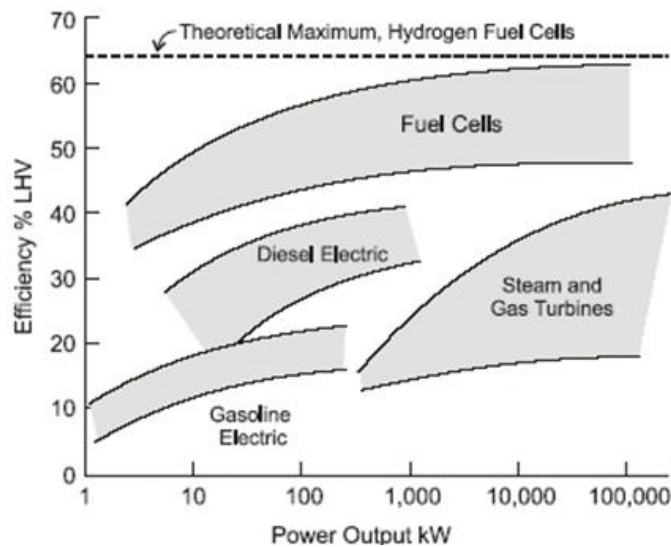
2.4 Κυψέλες καυσίμου [3] [31]

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου, ενώ περιγράφονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των σύγχρονων κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs), τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, καθώς και οι τύποι συστοιχιών της SOFC. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ένα από τα σενάρια που μελετήθηκε είναι η αυτόνομη λειτουργία της πλατφόρμας με ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά στοιχεία, κυψέλες στερεού οξειδίου και συσσωρευτές. Παρά το υψηλό κόστος τους συγκριτικά με τις γεννήτριες Diesel, η απόδοσή τους είναι πολύ υψηλή. Έτσι, μπορούν να χαρακτηριστούν ιδανικές για αυτόνομα συστήματα, όπως αυτό που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι συσκευές ηλεκτροχημικής μετατροπής. Ενώνουν ηλεκτροχημικά ένα καύσιμο, που κατά κανόνα είναι υδρογόνο, με ένα οξειδωτικό χωρίς καύση. Η χημική αντίδραση που πραγματοποιείται μέσα στην κυψέλη οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας και νερού, καθώς προστίθενται το καύσιμο και το οξυγόνο. Η συνεχόμενη εισροή του καυσίμου είναι αναγκαία για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Τα κύρια πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης είναι τα εξής :

- Αποτελούν πιο καθαρή πηγή ενέργειας.
- Έχουν μεγαλύτερη απόδοση. Οι κυψέλες καυσίμου δε λειτουργούν σε θερμοδυναμικό κύκλο, επομένως δεν έχουν το αντίστοιχο αυστηρό όριο για την απόδοση, αλλά ισχύει για αυτές το όριο απόδοσης της χημικής αντίδρασης, το οποίο όμως είναι υψηλότερο. Ακόμα, τα μηχανικά μέρη που χρειάζονται, για παράδειγμα οι αντλίες, έχουν πολύ λιγότερες απώλειες από τα κινούμενα μέρη μιας μηχανής. Με συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, η απόδοση μπορεί να ξεπεράσει το 90%.
- Είναι πολύ πιο αθόρυβα, καθώς τα κινούμενα μηχανικά μέρη είναι ελάχιστα.
- Είναι πιο αξιόπιστα, για τον ίδιο λόγο.
- Η συντήρησή τους είναι ευκολότερη.
- Λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Ανταποκρίνονται πιο γρήγορα στις μεταβολές του φορτίου.
- Ευνοούν την κατανεμημένη παραγωγή της ενέργειας.

Στην Εικόνα 2.20 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα με τους βαθμούς απόδοσης των ατμοστροβίλων και των αεριοστροβίλων, των γεννητριών βενζίνης, των νηξελογεννητριών και των κυψελών καυσίμου.



Εικόνα 2.20 Βαθμός απόδοσης διαφόρων πηγών ενέργειας.

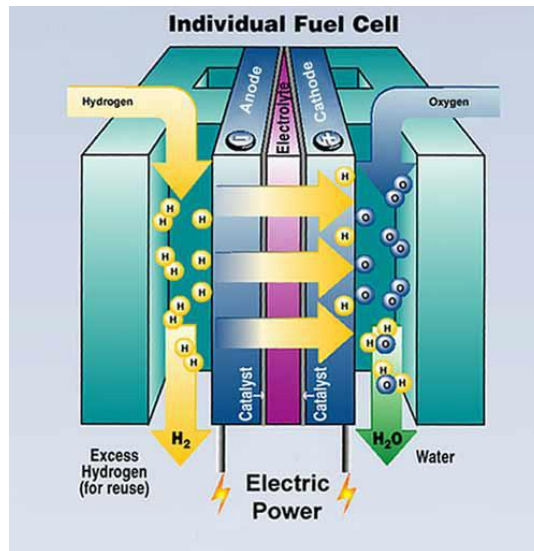
Τα κύρια πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου έναντι των μπαταριών είναι:

- Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ενέργεια όσο τροφοδοτούνται με υδρογόνο και οξυγόνο. Αντίθετα οι μπαταρίες χρειάζονται φόρτιση.
- Τα συστήματα κυψελών υδρογόνου είναι ελαφρύτερα σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα με μπαταρίες.
- Οι κυψέλες υδρογόνου είναι πιο αξιόπιστες, χρειάζονται λιγότερο τακτικά συντήρηση και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Από την άλλη, τα κύρια μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι:

- Το κόστος των κυψελών καυσίμου είναι ακόμα πολύ μεγάλο.
- Συνυπολογίζοντας όλο τον εξοπλισμό που χρειάζονται για τη λειτουργία τους, τα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι βαρύτερα και πιο ογκώδη από μηχανές εσωτερικής καύσης, που είναι ικανές να παράγουν αντίστοιχη ποσότητα ενέργειας.

Ως προς τη δομή (Εικόνα 2.21), η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια - άνοδο και κάθοδο - τα οποία χωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Το στρώμα της ανόδου και της καθόδου αποτελείται από το στρώμα διάχυσης αερίων, που είναι υπεύθυνο για την ομοιόμορφη κατανομή των αερίων στην επιφάνεια του καταλύτη. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην κυψέλη συμβαίνουν στην επιφάνεια πριν τον ηλεκτρολύτη, η οποία είναι εμπλουτισμένη με έναν καταλύτη – συνήθως λευκόχρυσος ή παλλάδιο.



Εικόνα 2.21 Λειτουργία κυψέλης.

Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την αντίδραση του οξυγόνου με το καύσιμο (υδρογόνο, μεθάνιο, μεθανόλη) μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Για την ακρίβεια, η απόσπαση των ηλεκτρονίων από τα μόρια του καυσίμου οδηγούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο ηλεκτρική ενέργεια. Η θεωρητική τιμή της τάσεως για κυψέλες καυσίμου υδρογόνου κυμαίνεται στα 1.23V για θερμοκρασία 25°C. Στην πράξη όμως το φάσμα των τιμών της τάσεως βρίσκεται περίπου στο 0.5-1V. Για την επίτευξη μεγαλύτερης τάσεως συνδέονται πολλές κυψέλες μαζί, δημιουργώντας μια συστοιχία κυψελών (stack).

Οι κυριότεροι τύποι κυψελών καυσίμου είναι:

- Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (Alkaline Fuel Cell-AFC).
- Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane-PEMFC).
- Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell-PAFC).
- Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cell-MCFC).
- Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell-SOFC).

Τα χαρακτηριστικά των κυριότερων τύπων κυψελών καυσίμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 Γενικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.

Είδος κυψέλης καυσίμου	<i>Proton Exchange Membrane (PEMFC)</i>	<i>Alkaline (AFC)</i>	<i>Phosphoric Acid (PAFC)</i>	<i>Molten Carbonate (MCFC)</i>	<i>Solid Oxide (SOFC)</i>
Ηλεκτρολύτης	πολυμερής μεμβράνη	30-50% KOH	φωσφορικό οξύ	τήγματα ανθρακικών αλάτων (Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃)	αργόμοιο κεραμικό υλικό
Θερμοκρασία	50-80°C	60-90°C	160-220°C	620-660°C	800-1000°C
Καύσιμο	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH	H ₂	H ₂ , CH ₄	CH ₄	H ₂ , CH ₄
Αντίδραση Ανόδου	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$
Αντίδραση Καθόδου	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
Βαθμός απόδοσης	50-60%	50-60%	55%	60-65%	55-65%
Δυναμική απόκριση	γρήγορη	γρήγορη	αργή	αργή	γρήγορη (όταν είναι ζεστή)
Χρόνος εκκίνησης	άμεσα	άμεσα	περίπου 30 min	αρκετές ώρες	αρκετές ώρες
Εφαρμογές	διαστημική τεχνολογία, οχήματα, υποβρύχια, κινητές εφαρμογές	διαστημική τεχνολογία, οχήματα, υποβρύχια	παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμπαραγωγή θερμότητας, οχήματα	παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
Πλεονεκτήματα	απλή δομή, χαμηλή θερμοκρασία, μικρός χρόνος εκκίνησης	γρήγορη αντίδραση καθόδου λόγω υψηλής θερμοκρασίας	μεγάλος βαθμός απόδοσης (συμπ. θερμοηλεκτρικής)	υψηλή θερμοκρασία, επιζείει στην επιλογή του καυσίμου	υψηλή θερμοκρασία
Μειονεκτήματα	ακριβός καταλύτης (Pt)	πολύπλοκη υπομείκνωση του CO ₂	Pt καταλύτης, μικρή ισχύς, ογκώδης και βαρύ	μικρή βιωσιμότητα	μικρή βιωσιμότητα

2.4.1 Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs)

2.4.1.1 Εισαγωγή

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells, SOFCs) είναι οι αποδοτικότερες συσκευές που έχουν ανακαλυφθεί μέχρι σήμερα για την απ' ευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια. Η βασική ιδέα για την χρήση των SOFCs περιγράφηκε πρώτη φορά από τον Nernst το 1899, στο πανεπιστήμιο του Gottingen και έκτοτε έχουν γίνει πολύ σημαντικές αλλαγές και προσθήκες, τόσο στη βασική θεωρία όσο και στην εφαρμογή αυτής της ιδέας. Η βασική διάταξη ενός SOFC είναι σχετικά απλή, καθώς η θεμελιώδης δομή του αποτελείται από δύο πορώδη ηλεκτρόδια σε επαφή με έναν ηλεκτρολύτη και το εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα που συνδέει τα ηλεκτρόδια και καταναλώνει την παραγόμενη ισχύ. Τα SOFCs φέρουν σαν ηλεκτρολύτη κάποιο κεραμικό οξείδιο, το οποίο παρουσιάζει ιοντική αγωγιμότητα. Το ένα πορώδες ηλεκτρόδιο, η κάθοδος, χρησιμοποιείται για την αναγωγή του οξειδωτικού μέσου και δέσμευση ιόντων οξυγόνου. Στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, το οξειδωτικό μέσο είναι οξυγόνο που, συνηθέστερα, λαμβάνεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα που τροφοδοτείται στην κάθοδο, είτε σπανιότερα, οξυγόνο σε διάφορες περιεκτικότητες. Σε θεωρητικό επίπεδο, σαν οξειδωτικό μέσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε αέριο μπορεί να αναχθεί, παρέχοντας ιόντα οξυγόνου προς ρόφηση στην κάθοδο. Τα ιόντα που ροφώνται στην κάθοδο άγονται μέσω του κεραμικού στερεού ηλεκτρολύτη, σε θερμοκρασίες ανώτερες των 400 °C, συνηθέστερα στο εύρος 600 – 1000 °C, οδηγούμενα στην πορώδη άνοδο του ηλεκτροχημικού κελιού. Στο ανοδικό ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται το καύσιμο, το οποίο, δυνητικά, μπορεί να είναι οποιοδήποτε αέριο μπορεί να οξειδωθεί στον καταλύτη του ανοδικού ηλεκτροδίου, αντιδρώντας με τα ιόντα που τροφοδοτήθηκαν από την κάθοδο. Τα πιο διαδεδομένα καύσιμα είναι το υδρογόνο και το μεθάνιο, αν και ένα από τα μεγαλύτερα προτερήματα των SOFCs

είναι ότι μπορούν να οξειδώσουν πληθώρα καυσίμων χωρίς να αντιμετωπίζουν τα προβλήματα δηλητηριασμού που αντιμετωπίζουν άλλα είδη κυψελών καυσίμου. Οι αντιδράσεις αναγωγής στην κάθοδο και οξείδωσης στην άνοδο καταναλώνουν και προσφέρουν, αντίστοιχα, ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα, παράγοντας έτσι ηλεκτρικό έργο σε αυτό. Η δομή μίας σύγχρονης συστοιχίας SOFCs χρησιμοποιεί ηλεκτρολύτη ζirkονίας σταθεροποιημένης με ύττρια (YSZ), κεραμομεταλλικές ανόδους Ni/YSZ, και καθόδους μεικτών κεραμικών οξειδίων βασισμένων σε σπάνιες γαίες. Αυτά τα υλικά μπορεί να μην είναι τα πιο αποδοτικά που έχουν βρεθεί, αλλά αποτελούν τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες επιλογές.

2.4.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)

Ένα κελί καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη μπορεί να οριστεί γενικά ως ένα κεραμικό πολυστρωματικό υλικό, το οποίο λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιώντας αέριο καύσιμο και οξειδωτικό, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα χαρακτηριστικά προσδίδουν στο κελί έναν αριθμό πλεονεκτημάτων, συγκρινόμενο με τις παραδοσιακές γεννήτριες και τους άλλους τύπους κελιών καυσίμου.

Αρχικά, σημαντικά πλεονεκτήματα αποτελούν η σημαντικά μειωμένη εκπομπή αερίων ρύπων, τα χαμηλά επίπεδα θορύβου, η υψηλή ποιότητα θερμότητας που είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις συμπαραγωγής ενέργειας θερμότητας, καθώς και η υψηλή απόδοση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (έως 50%) που μπορεί να επιτευχθεί σε συνδυασμένους κύκλους. Ακόμη υψηλότερες αποδόσεις που φτάνουν και το 70%, δίνει ο συνδυασμός κελιού καυσίμου και αεροστροβίλου. Η ζωή του κελιού καυσίμου είναι μεγαλύτερη, λόγω υψηλότερης αντοχής σε διάβρωση από προσμίξεις με καύσιμο, όπως είναι το θείο, ενώ παράλληλα τα κελιά καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν στις ανάγκες απόδοσης ισχύος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, δεν υπάρχουν προβλήματα διαχείρισης του ηλεκτρολύτη ή διάβρωσης των ηλεκτροδίων που εμφανίζονται σε άλλους τύπους κελιών καυσίμου και υπάρχει δυνατότητα χρήσης των κελιών καυσίμου στην ηλεκτρολύση. Επιπλέον, δεν είναι απαραίτητη η χρήση ακριβών καταλυτών, όπως η πλατίνα.

Τα κελιά καυσίμου παρουσιάζουν, όμως, και σημαντικά μειονεκτήματα, τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι ο πιθανός σχηματισμός ανεπιθύμητων φάσεων με χαμηλή αγωγιμότητα, λόγω αντιδράσεων στη διεπιφάνεια καθόδου ηλεκτρολύτη, η υποβάθμιση της απόδοσης της ανόδου, λόγω φαινομένων συσσωμάτωσης που εμφανίζει ο καταλύτης, καθώς και ο υψηλός λόγος κόστους επένδυσης προς την απόδοση που ισχύει σήμερα για τα κελιά καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη. Η αντίσταση του ηλεκτρολύτη και τα φαινόμενα πόλωσης στα ηλεκτρόδια αποτελούν ακόμη ανασταλτικούς παράγοντες, ιδιαίτερα σε κελιά που λειτουργούν σε μέση θερμοκρασία. Τέλος, η ψαθυρότητα των κεραμικών υλικών των συστατικών του κελιού δυσκολεύει την κατασκευή κελιών με διαστάσεις μεγαλύτερες από 0.2 m². Αυτό αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα που δεν επιτρέπει την κατασκευή μονάδων της τάξεως MW.

2.4.1.3 Χαρακτηριστικά σύγχρονης κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)

Μια σύγχρονη κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) αποτελείται από την σύνθεση του πυκνού ηλεκτρολύτη, τα πορώδη ηλεκτρόδια της ανόδου και καθόδου μαζί με το εξωτερικό στερεό διασύνδεσης (διπολική πλάκα). Η τελευταία σχηματίζει τα κανάλια της ανόδου και της καθόδου. Στα κανάλια αυτά οδηγούνται το καύσιμο και το οξειδωτικό. Ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιήσει το καθαρό υδρογόνο, το μονοξείδιο του άνθρακα και γενικότερα υδρογονάνθρακες, ενώ για οξειδωτικό σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο αέρας. Η κυψέλη στερεού οξειδίου λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες και σε πιέσεις ατμοσφαιρικές ή πιο υψηλές.

Η χρήση στερεού ηλεκτρολύτη (κεραμικό υλικό) εξαλείφει τη περίπτωση της διάβρωσης του υλικού και τα προβλήματα διαχείρισης. Επιτρέπει ευέλικτους σχεδιασμούς του κελιού και βελτίωση της απόδοσης λειτουργίας. Για την ιδανική αγωγιμότητα των ιόντων, ο ηλεκτρολύτης πρέπει να λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες μεταξύ 600 έως 1000 °C. Οι υψηλές αυτές θερμοκρασίες προκαλούν γρήγορες αντιδράσεις και επιτρέπουν την αναμόρφωση του υδρογονάνθρακα. Η αυξημένη θερμότητα που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμένο κύκλο αξιοποίησης θερμότητας. Αυτό καθιστά αναγκαίο την χρήση απαιτητικών υλικών και την επίτευξη συγκεκριμένων συνθηκών κατά τη διαδικασία της αντίδρασης.

Οι κυψέλες καυσίμων που λειτουργούν στους 800 με 1000°C ονομάζονται ενδιάμεσων θερμοκρασιών (Intermediate Temperature SOFCs - IT-SOFCs) και επιτρέπουν τη χρήση μεγαλύτερου εύρους υλικών. Οι κυψέλες υψηλών θερμοκρασιών γενικά χρησιμοποιούν όλες κεραμικά υλικά, ενώ οι ενδιάμεσων θερμοκρασιών χρησιμοποιούν ένωση κεραμικού και μετάλλων. Οι τελευταίες για την διπολική πλάκα μπορεί να χρησιμοποιήσουν ανοξειδωτο χάλυβα αντί για ακριβά υλικά και έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε χρώμιο κράματα ή οξειδία.

Ένας τυπικός ηλεκτρολύτης κατασκευάζεται από οξείδιο του ζirkονίου (ZrO_2), εμποτισμένο με μικρή ποσότητα οξειδίου του υτρίου (Y_2O_3), ένα οξείδιο (YSZ) ιοντικά αγωγίμο σε υψηλές θερμοκρασίες. Η άνοδος κατασκευάζεται συνήθως από το κεραμομέταλλο νικελίου και ζirkονίου το οποίο παρέχει υψηλή ηλεκτροχημική απόδοση, καλή χημική σταθερότητα και έχει χαμηλό κόστος. Από την άλλη, η κάθοδος κατασκευάζεται από $LaMnO_3$, το οποίο πληροί τις προϋποθέσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, έχει επαρκή συμβατότητα με τον ηλεκτρολύτη και αποδεκτή θερμική επέκταση, έτσι ώστε να συμβαδίζει με τα άλλα στοιχεία του κελιού.

Δύο σημαντικοί σχεδιασμοί κελιών είναι τα electrolyte supported και τα electrode supported. Στη πρώτη κατηγορία ο ηλεκτρολύτης είναι πιο παχύς από τα ηλεκτρόδια και προορίζεται μόνο για υψηλές θερμοκρασίες. Στη δεύτερη κατηγορία, ένα από τα δύο ηλεκτρόδια είναι το πιο παχύ στοιχείο από τα τρία, με τον ηλεκτρολύτη να έχει μικρό πάχος. Αυτό συμβαίνει για να επιτευχθεί η μείωση των ωμικών απωλειών σε μικρότερες θερμοκρασίες. Παρ' όλα αυτά, συνήθως, παρατηρείται μεγαλύτερη συνολική αντίσταση στις μεσαίες θερμοκρασίες από ότι στις υψηλές. Τέλος, πρόσφατες προσπάθειες στη τεχνολογία κυψελών καυσίμων επιδιώκουν να μειώσουν αισθητά το πάχος των κελιών με την προοπτική να διατηρήσουν σταθερή την ηλεκτροχημική συμπεριφορά. Έτσι θα υφίσταται η ίδια ισχύς με μικρότερο κόστος.

Οι περισσότερες κυψέλες καυσίμου πρακτικά χρειάζεται να μετατρέψουν το αρχικό καύσιμο υδρογονανθράκων σε αέριο πλούσιο σε υδρογόνο. Μία επιλογή για τη μετατροπή αυτή, είναι να γίνει έμμεσα σε ένα σύστημα επεξεργασίας καυσίμου, όπως ένα εξωτερικό καταλύτη αναμόρφωσης με ατμό. Μία άλλη επιλογή είναι να γίνει σε έναν αντιδραστήρα μερικής οξειδωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρειάζεται θερμότητα να οδηγήσει στην αντίδραση αναμόρφωσης. Μία μέθοδος να επιτευχθεί η διαδικασία αυτή είναι να τροφοδοτηθούν τα αέρια των καναλιών της ανόδου και καθόδου στην έξοδο του κελιού σε ένα καυστήρα όπου στον χώρο αυτό καίγεται επιπλέον καύσιμο. Η θερμότητα που παράγεται στο καυστήρα χρησιμοποιείται στη προθέρμανση του καυσίμου και του αέρα, αλλά και στην θερμότητα που χρειάζεται ο αναμορφωτής. Παρ' όλα αυτά ένας πιο κομψός και πιο αποδοτικός τρόπος να βρεθεί θερμότητα για τη παραπάνω διαδικασία είναι να μεταφερθεί στο εσωτερικό του κελιού. Η καταλυτική αναμόρφωση με ατμό πραγματοποιείται συνήθως στους 1023 με 1173 °K και αυτό είναι εφικτό στις κυψέλες στερεού οξειδίου υψηλών θερμοκρασιών (SOFCs). Επειδή λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και πραγματοποιείται στο εσωτερικό η διαδικασία της αναμόρφωσης ονομάζονται εσωτερικής αναμόρφωσης SOFCs (IR-SOFC, internal reforming SOFC). Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας η θερμοκρασία για την αντίδραση αναμόρφωσης ποικίλει από 40 έως 70% της συνολικής θερμοκρασίας που παράγεται μέσα στη κυψέλη. Έτσι, στις IRSOFCs δεν υπάρχει επιπλέον αναμορφωτής καυσίμου και προκύπτει ένας πιο ελκυστικός και αποδοτικός σχεδιασμός της κυψέλης. Τέλος, οι απαιτήσεις για επιπλέον αέρα στο κανάλι της καθόδου μειώνονται.

Γενικά υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για την διαδικασία της εσωτερικής αναμόρφωσης σε μία κυψέλη καυσίμου: η ενσωματωμένη (IIR-integrated internal reforming) και η απευθείας (DIR-direct internal reforming). Στη πρώτη προσέγγιση, ο χώρος της αντίδρασης είναι ξεχωριστός, αλλά παρακείμενος στην άνοδο και θερμικά αγωγίμος κοντά σε αυτή. Στη τελευταία προσέγγιση το καύσιμο (μεθάνιο) παρέχεται κατευθείαν στη κυψέλη και η αντίδραση γίνεται απευθείας στην άνοδο. Ένα πλεονέκτημα της ενσωματωμένης εσωτερικής αναμόρφωσης είναι ότι ο χώρος που λαμβάνει χώρα η αντίδραση και το περιβάλλον του κελιού δεν έχουν καμία φυσική επίδραση μεταξύ τους. Παρ' όλα αυτά, η μετατροπή του μεθανίου σε υδρογόνο δεν πραγματοποιείται σε μεγάλη έκταση όσο στην άμεση περίπτωση. Στην άμεση εσωτερική αναμόρφωση μέρος του ατμού που απαιτείται για την αντίδραση μπορεί να ανακτηθεί από την ηλεκτροχημική αντίδραση του υδρογόνου που πραγματοποιείται στην άνοδο. Λόγω της συνεχόμενης κατανάλωσης του υδρογόνου, η ισορροπία της αντίδρασης της αναμόρφωσης μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω αυξάνοντας τη μετατροπή του μεθανίου και οδηγώντας έτσι σε αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του υδρογόνου. Από την άλλη, απαιτείται υλικό ανόδου το οποίο θα έχει καλή καταλυτική δράση για τη περίπτωση της αναμόρφωσης, ώστε να επιτευχθεί αποδοτική παραγωγή ισχύος.

Σε μία κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου, η αναμόρφωση μπορεί να γίνει εσωτερικά, όπου η κατασκευή του κεραμικού ηλεκτροδίου της ανόδου από νικέλιο/ζιρκόνιο παρέχει επαρκή δράση στην αναμόρφωση με ατμό (steam reforming) και στις αντιδράσεις μετατόπισης χωρίς τη χρήση επιπλέον καταλύτη. Ένα πρόβλημα που είναι συνυφασμένο με την απευθείας αναμόρφωση είναι η εναποθέτηση του άνθρακα στην άνοδο και μεταγενέστερη ηλεκτροκαταλυτική απενεργοποίηση. Αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση της απόδοσης του κελιού αλλά και της αντοχής του. Ο μεγάλος λόγος ατμού προς άνθρακα στους τυπικούς συμβατικούς αναμορφωτές ατμού

για να καταστείλουν τον σχηματισμό άνθρακα είναι μη ελκυστικός όταν μειώνεται η ηλεκτρική απόδοση του κελιού από την διάλυση του ατμού του καυσίμου. Παρ' όλα αυτά, εξελιγμένα υλικά ανόδου επιτρέπουν την εσωτερική άμεση διαδικασία της αναμόρφωσης σε χαμηλούς λόγους ατμού προς άνθρακα δίνοντας σημαντικά πλεονεκτήματα.

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (και γενικότερα κυψέλες άλλου τύπου) προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως : υψηλούς βαθμούς απόδοσης, ευελιξία στη μορφοποίηση της κατασκευής, μηδαμικοί περιορισμοί στη τοποθέτηση και παραγωγή ισχύος με ελάχιστες εκπομπές ρύπων.

Συγκρίνοντας με τις κυψέλες των άλλων κατηγοριών, οι SOFC παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

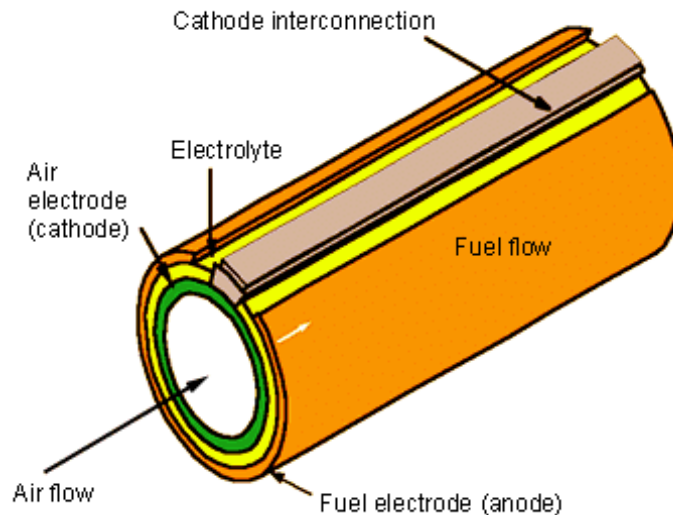
- Στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια είναι γρήγορες, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται καταλύτης σε αυτά. Σε υψηλές θερμοκρασίες όμως η επιλογή των υλικών είναι περιορισμένη για λόγους αντοχής υλικών.
- Οι κυψέλες στερεού οξειδίου δεν παρουσιάζουν πρόβλημα στην έκθεση σε μονοξείδιο του άνθρακα. Στη πραγματικότητα υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο. Οι κυψέλες μπορούν να λειτουργήσουν σε σχετικά μεγάλα ποσοστά ακαθαρσιών στο καύσιμο.
- Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου έχουν τη δυνατότητα χρήσης μεγάλης ποικιλίας καυσίμων. Εκτός από το υδρογόνο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί βενζίνη, αλκοόλες, φυσικό αέριο και πολλά ακόμη. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, καύσιμα προέλευσης υδρογονανθράκων μπορούν να αναμορφωθούν εσωτερικά της κυψέλης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μη χρήση εξωτερικού και ίσως ακριβού αναμορφωτή καυσίμου.
- Εκλύουν μεγάλες ποσότητες θερμότητας, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συμπαραγωγή σε συμβατικούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις πρώτες βαθμίδες. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης μπορεί να αυξηθεί σημαντικά εκμεταλλεύοντας την αχρησιμοποίητη θερμότητα του κελιού.
- Λόγω του στερεού ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν οι κυψέλες στερεού οξειδίου, ο χειρισμός του ηλεκτρολύτη δεν παρουσιάζει πρόβλημα διαχείρισης (απώλεια υλικού και αλλαγή σύστασης). Σε αντίθεση με κυψέλες υγρών ηλεκτρολυτών, οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου δεν χρειάζεται να αποθηκεύουν επιπλέον ποσότητα ηλεκτρολύτη.
- Λόγω της στερεάς κατάστασης όλων των στοιχείων του κελιού, οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου μπορούν να πάρουν γεωμετρίες αδύνατες σε άλλες περιπτώσεις κελιών. Παρόλο αυτά η κατασκευή των δύσκολων αυτών γεωμετριών αποτελεί τεχνική πρόκληση.
- Τα στοιχεία τους παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα επιμέρους στοιχεία πρέπει να είναι πολύ μικρά για να μειώνονται οι εσωτερικές ηλεκτρικές απώλειες.

2.4.1.4 Τύποι συστοιχιών της SOFC

Οι συστοιχίες κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου χωρίζονται σε δύο κυρίως τύπους, που σχετίζονται με τη γεωμετρία των επί μέρους τμημάτων και το τμήμα των μεμονωμένων κελιών που υποστηρίζει τη συστοιχία. Οι γεωμετρίες αυτές είναι η επίπεδη και η σωληνωτή. Οι συστοιχίες σωληνωτής γεωμετρίας είναι οι πιο ανεπτυγμένες σε επίπεδο εφαρμογής, καθώς όλα τα εγκατεστημένα λειτουργικά συστήματα κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου είναι σωληνωτής γεωμετρίας, αλλά οι συστοιχίες επίπεδης γεωμετρίας είναι σαφώς πιο υποσχόμενες, καθώς αποδίδουν ισχύ ανά επιφάνεια σημαντικά μεγαλύτερη, έως και μία τάξη μεγέθους, συγκριτικά με τις συστοιχίες επίπεδης γεωμετρίας.

- **Συστοιχίες σωληνωτής συστοιχίας**

Οι συστοιχίες σωληνωτής γεωμετρίας έχουν αναπτυχθεί από την εταιρεία Siemens Westinghouse. Η προσέγγιση αφορά σωληνωτά κελιά, καθοδικά υποστηριγμένα, συνδεδεμένα ηλεκτρικά με κεραμικό διασυνδετικό. Τα κελιά είναι σωλήνες μήκους 1,5m, κατασκευασμένοι από το υλικό της καθόδου (LSM) με τη μέθοδο της διέλασης και πυροσυσσώματωσης. Στη συνέχεια, στο εξωτερικό μέρος του σωλήνα εναποτίθεται ο ηλεκτρολύτης YSZ, πάχους περίπου 40μm, με τη μέθοδο της ηλεκτροχημικής εναπόθεσης με ατμό (Electrochemical Vapor Deposition, EVD). Η άνοδος Ni/YSZ εναποτίθεται στο εξωτερικό του σωλήνα με τη μέθοδο EVD ή με πυροσυσσώματωση υλός NiO-YSZ. Το διασυνδετικό που χρησιμοποιείται στις σωληνωτές συστοιχίες είναι LaCrO_3 ντοπαρισμένο με Ca ή Sr και εναποτίθεται, σε μία λωρίδα που διατρέχει όλο το μήκος του σωλήνα, με τη μέθοδο Plasma Spraying. Το οξειδωτικό μέσο παρέχεται στο εσωτερικό του σωλήνα ενώ η τροφοδοσία του καυσίμου γίνεται από την εξωτερική πλευρά των κυλίνδρων. Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα των σωληνωτών συστοιχιών είναι η απουσία επισφραγιστικών, που απλοποιεί σημαντικά το σύστημα, μειώνει το κόστος του και αυξάνει τη μακροβιότητά του. Οι σωληνωτές συστοιχίες αποδίδουν πυκνότητες ισχύος της τάξης των 200mW/cm^2 σε θερμοκρασίες $900\text{--}1000^\circ\text{C}$. Στην Εικόνα 2.22 φαίνεται η δομή του μεμονωμένου κελιού (σωλήνας). Οι χαμηλές σχετικά πυκνότητες ρεύματος που αποδίδουν οι σωλήνες, οδήγησαν στον σχεδιασμό πεπλατυσμένου σωλήνα, ο οποίος οδηγεί σε χαμηλότερη ωμική αντίσταση και κατά συνέπεια σε αυξημένη παραγωγή ισχύος. Η δομή πεπλατυσμένου σωλήνα περιλαμβάνει εσωτερικά πολλαπλά κανάλια τροφοδοσίας. Και σε αυτή την περίπτωση, η συστοιχία δεν απαιτεί επισφραγιστικό. Εκτός από την εταιρία Siemens Westinghouse και άλλοι κατασκευαστές ακολουθούν το πρότυπο της σωληνωτής γεωμετρίας. Η εταιρία TOTO της Ιαπωνίας χρησιμοποιεί τη σωληνωτή γεωμετρία, χρησιμοποιώντας σωλήνες μικρότερου μήκους, της τάξης των 0,5m, και επιχειρώντας να ενσωματώσει τεχνολογίες χαμηλότερου κόστους στην κατασκευή των κελιών. Μία παραλλαγή της σωληνωτής διάταξης χρησιμοποιείται από την Mitsubishi Heavy Industries. Τα μεμονωμένα κελιά τοποθετούνται σε ένα πορώδη κεντρικό υποστηρικτικό σωλήνα και συνδέονται σε σειρά με κεραμικούς διασυνδετικούς δακτυλίους, δομή που οδηγεί σε μεγαλύτερες τάσεις στο σύστημα.

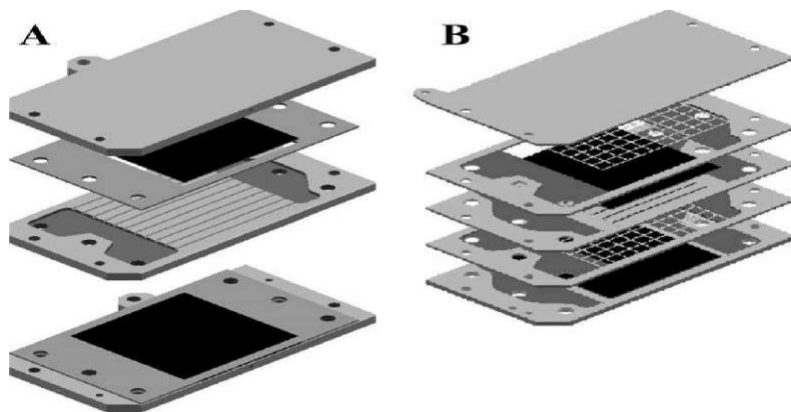


Εικόνα 2.22 Δομή Σχηματική αναπαράσταση σωληνωτού μονού κελιού.

- **Συστοιχίες επίπεδης γεωμετρίας**

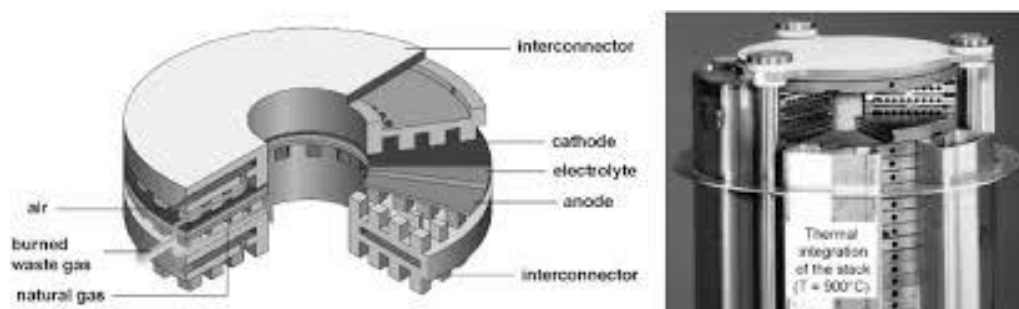
Οι συστοιχίες επίπεδης γεωμετρίας είναι οι πιο υποσχόμενες διατάξεις για παραγωγή ενέργειας από κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου με μεγάλη πυκνότητα ισχύος, γεγονός που τις κάνει κατάλληλες για χρήση ακόμα και σε κινητές πηγές παραγωγής ενέργειας. Οι πρώτες συστοιχίες επίπεδης αναπτύχθηκαν και μοντελοποιήθηκαν από τους Michaels, Vayenas και Hegedus τη δεκαετία του 1980. Σήμερα κάθε μεμονωμένο κελί στις συστοιχίες επίπεδης γεωμετρίας είναι μία επίπεδη πλάκα ανόδου/ ηλεκτρολύτη/ καθόδου, εγκλεισμένη σε διασυνδετικές πλάκες, οι οποίες στηρίζουν μηχανικά τη διάταξη και φέρουν τα κανάλια τροφοδοσίας των αερίων. Αυτή η διάταξη συνδέει ηλεκτρικά τα διαδοχικά κελιά σε σειρά. Τα επί μέρους τμήματα των μερών της επίπεδης συστοιχίας (ηλεκτροχημικό κελί και διασυνδετικά) κατασκευάζονται με απλούστερες και φθηνότερες τεχνικές συγκριτικά με τα τμήματα των σωληνωτών συστοιχιών, ενώ και το σχήμα τους είναι απλούστερο, οδηγώντας σε σημαντική μείωση του κόστους. Παρ' ότι η βασική διάταξη επίπεδων κελιών και διασυνδετικών είναι κοινός τύπος, οι συστοιχίες διαφορετικών κατασκευαστών διαφέρουν σημαντικά ως προς τη δομή τους. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ανοδικά υποστηριγμένα συστήματα επίπεδων συστοιχιών τα οποία έχουν και την μεγαλύτερη απόδοση ισχύος.

Ένα τέτοιο σύστημα συστοιχίας επίπεδης γεωμετρίας έχει αναπτυχθεί στο ερευνητικό κέντρο Jülich της Γερμανίας. Βασίζεται σε ανοδικά υποστηριγμένα κελιά, με πάχος κεραμομεταλλικής ανόδου 1,5 mm, με ηλεκτρολύτη πάχους 15-40 μm και καθοδικά ηλεκτρόδια LSCF. Η δομή ενός μονού κελιού αυτής της συστοιχίας φαίνεται στην Εικόνα 2.23. Η θερμοκρασία λειτουργίας της συστοιχίας ήταν 700 – 800°C και επέτρεπε τη χρήση μεταλλικών διασυνδετικών (CroFer22APU) τα οποία ήταν σχεδιασμένα έτσι ώστε να συγκαλούνται μεταξύ τους ανά μεμονωμένο κελί και να συνδέονται στη συστοιχία μεταξύ τους με επισφραγιστικό κεραμικού-υάλου (Ba-Ca-Al-Si). Η συστοιχία με 60 κελιά διαστάσεων 20x20 cm λειτούργησε αποδίδοντας 13,3 kW με καύσιμο υδρογόνο σε πυκνότητα ρεύματος 0,74 A/cm².



Εικόνα 2.23 Μονό κελί και μεταλλικά διασυνδετικά της συστοιχίας επίπεδης γεωμετρίας του ερευνητικού κέντρου Jülich της Γερμανίας.

Ένας άλλος κατασκευαστής που ακολουθεί την επίπεδη γεωμετρία είναι η εταιρία Hexis Sulzer της Ελβετίας. Η ιδιαιτερότητα των συστημάτων αυτού του κατασκευαστή είναι ότι η συστοιχία δεν χρησιμοποιεί επισφραγιστικά. Τα κελιά έχουν σχήμα δίσκου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.24, και το καύσιμο τροφοδοτείται από το κέντρο του κυλίνδρου που σχηματίζουν οι δίσκοι. Η διάταξη είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε το καύσιμο που δεν έχει αντιδράσει στα κελιά της συστοιχίας να καίγεται κατά την έξοδο από τη συστοιχία.



Εικόνα 2.24 Σχεδιασμός και συστοιχία της εταιρίας Hexis Sulzer.

Μερικοί ακόμα από τους κατασκευαστές που ασχολούνται με την ανάπτυξη συστοιχιών επίπεδης γεωμετρίας είναι οι : Global Thermoelectric (Καναδάς), Delphi σε συνεργασία με το Pacific Northwest National Laboratory των ΗΠΑ και Haldor Topsøe της Δανίας σε συνεργασία με το ερευνητικό κέντρο Riso.

2.5 Αντιστροφείς [27]

Στα μικροδίκτυα χρησιμοποιούνται μετατροπείς DC/AC, οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν απομονωμένα φορτία μετατρέποντας την ισχύ που παράγεται από μια πηγή DC σε ισχύ με AC χαρακτηριστικά, τα οποία προσομοιάζουν την ενέργεια που θα λάμβανε το φορτίο αυτό αν ήταν συνδεδεμένο στο δίκτυο. Μετατροπείς χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως σε περιπτώσεις όπου η ενέργεια από DC πηγές, όπως μπαταρίες, φωτοβολταϊκά και κυψέλες καυσίμου πρέπει να μετατραπεί έτσι ώστε να μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες φορτίων AC. Παράδειγμα τέτοιων εφαρμογών είναι τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπου η φωτοβολταϊκή συστοιχία παράγει ρεύμα DC υπό μία χαμηλή τάση DC (24 ή 48 V) και μέσω του μετατροπέα αυτά μετατρέπονται σε AC για την κάλυψη των φορτίων ενός συστήματος που δε συνδέεται με το δίκτυο.

Οι τρεις βασικές λειτουργίες που εκτελεί ένας αντιστροφέας είναι οι εξής:

- Μετατροπή του ρεύματος σε εναλλασσόμενο.
- Μετασχηματισμός του ρεύματος σε ημιτονοειδή κυματομορφή με συγκεκριμένη συχνότητα.
- Ενίσχυση της τάσης της DC πηγής με μετατροπέα DC/DC.

Με βάση τις ανωτέρω λειτουργίες, καθορίζονται τα επιμέρους στοιχεία του αντιστροφέα και ως εκ τούτου προσδιορίζεται η απόδοση και οι απώλειες. Αντί του DC/DC μετατροπέα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετασχηματιστής αλλά έτσι, αυξάνονται οι απώλειες. Άλλο στοιχείο που πρέπει να ενσωματωθεί στην έξοδο του αντιστροφέα είναι το φίλτρο που θα αποκόψει τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες που προκύπτουν από τη λειτουργία των διακοπτικών στοιχείων, ώστε να λάβουμε στην έξοδο όσο το δυνατόν πιο καθαρό ημίτονο. Οι υψηλότερες μέγιστες αποδόσεις επιτυγχάνονται στους αντιστροφείς που δεν περιλαμβάνουν στην διάταξή τους μετασχηματιστή, με μέση μέγιστη απόδοση εμπορικών αντιστροφέων της τάξεως του 96.5%. Η ευρωπαϊκή απόδοση είναι μία μέτρηση που έχει καθιερωθεί από τα ευρωπαϊκά πρότυπα ώστε να δώσει μία εκτίμηση της απόδοσης του αντιστροφέα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η ανάγκη καθιέρωσης ενός τέτοιου δείκτη, δημιουργήθηκε καθώς η απόδοση του αντιστροφέα μεταβάλλεται με την μεταβολή των συνθηκών ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η ευρωπαϊκή απόδοση ορίζεται ως:

$$n_{euro}=0.03n_5+0.06n_{10}+0.13n_{20}+0.1n_{30}+0.48n_{50}+0.2n_{100} \quad (4)$$

Τις υψηλότερες ευρωπαϊκές αποδόσεις έχουν πάλι οι αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή (~90%).

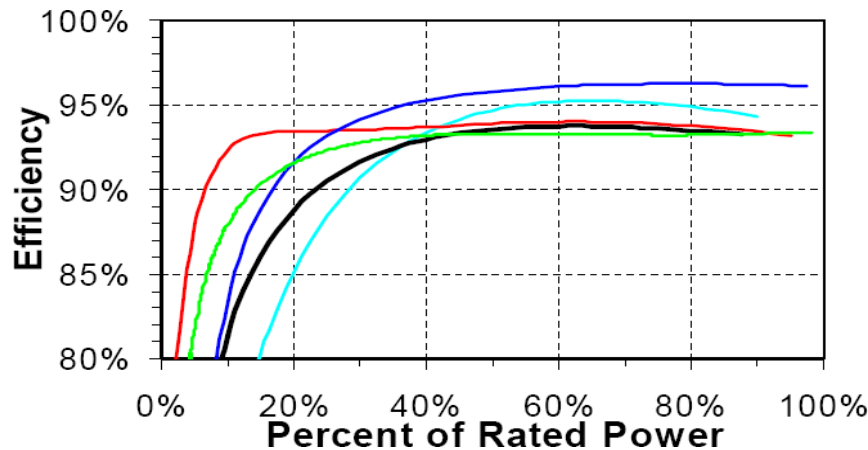
Διάφορες εφαρμογές των διατάξεων αντιστροφέων DC/AC υπάρχουν σήμερα, όπως:

- Έλεγχος ταχύτητας ηλεκτρικών μηχανών AC.
- Αντιστάθμιση αέργου ισχύος σε δίκτυα (SVC-Static Var Compansator) ή ως ενεργά φίλτρα σε συστήματα μεταφοράς ισχύος (FACTS-Flexible AC Transmission Systems).
- Έλεγχος τάσης εξόδου σε αιολικά συστήματα.
- Έλεγχος θερμοκρασίας με επαγωγή.

- Γενικά σε συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.
- Διατάξεις Αδιάκοπης Παροχής Ισχύος (UPS-Uninterruptible Power Supplies).

Οι κύριες κατηγορίες αντιστροφών σε σχέση με την πηγή που θεωρείται στην είσοδό τους είναι οι εξής:

- Αντιστροφείς πηγής τάσεως (στην DC πλευρά του αντιστροφέα υπάρχει πηγή DC τάσης).
- Αντιστροφείς πηγής ρεύματος (στην DC πλευρά του αντιστροφέα υπάρχει πηγή DC ρεύματος).



Εικόνα 2.25 Τυπικές αποδόσεις αντιστροφών ανάλογα με το επίπεδο ισχύος.

Οι αντιστροφείς VSI είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος αντιστροφέα και βρίσκεται εφαρμογή στις περισσότερες βιομηχανικές διατάξεις. Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε μηχανές πολύ υψηλής ισχύος.

Σχετικά με την τοπολογία των αντιστροφών πηγής τάσεως, υπάρχουν διάφοροι τύποι ανάλογα με τον αριθμό και τη συνδεσμολογία των διακοπτικών στοιχείων που περιλαμβάνει η διάταξη του αντιστροφέα, μονοφασικοί αντιστροφείς ημιγέφυρας, μονοφασικοί αντιστροφείς γέφυρας και τριφασικοί αντιστροφείς.

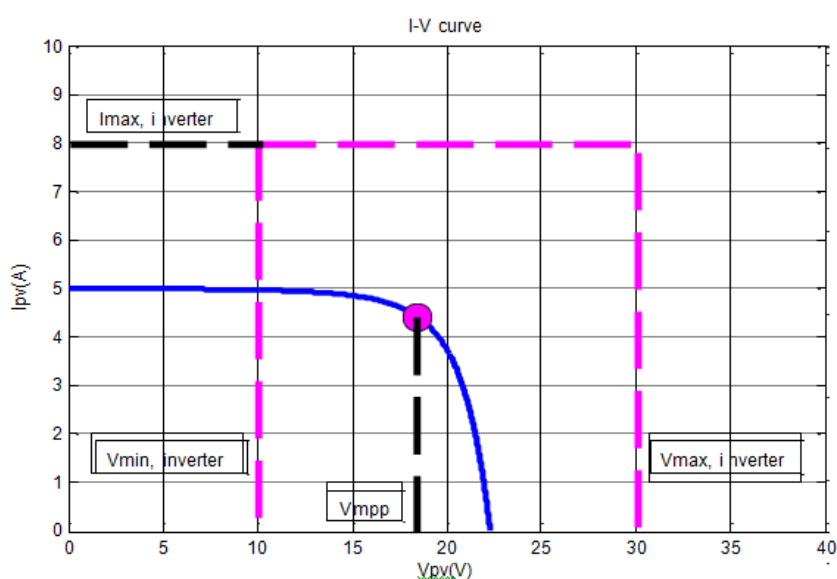
Στην Εικόνα 2.25 απεικονίζεται η απόδοση του αντιστροφέα, η οποία δε διατηρείται σταθερή σε όλα τα επίπεδα ισχύος. Προκειμένου να επιτυγχάνονται υψηλές αποδόσεις, ο αντιστροφέας πρέπει να είναι κοντά στο πλήρες φορτίο. Όμως, αυτό δεν είναι πάντα δυνατό. Μερικά συστήματα δεν φτάνουν ποτέ την ονομαστική τους ισχύ λόγω της ανεπαρκούς κλίσης, του προσανατολισμού ή της ακτινοβολίας στην περιοχή. Οι μέσες ετήσιες αποδόσεις των αντιστροφών είναι συνήθως 6-8% χαμηλότερες από τις ονομαστικές. Η υποδιαστασιολόγηση μεταθέτει την μέγιστη απόδοση σε πιο χαμηλά επίπεδα ισχύος, στα οποία λειτουργεί ο αντιστροφέας τις περισσότερες ώρες του έτους.

Οι μετατροπείς χρησιμοποιούν την διαδικασία εντοπισμού του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος (MPPT) για να πάρουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ από τη DC γεννήτρια. Για παράδειγμα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παρουσιάζουν μία σύνθετη σχέση μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της συνολικής αντίστασης, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα μία μη γραμμική καμπύλη απόδοσης εξόδου. Ο σκοπός του συστήματος MPPT είναι να δοκιμάζει την έξοδο των στοιχείων και να καθορίζει το ζεύγος τάσης και ρεύματος που επιτυγχάνει τη μέγιστη ισχύ για κάθε δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Το εύρος των τάσεων όπου εκτελείται το

MPPT (Maximum Power Point Tracking – Εύρεση Σημείου Μέγιστης Ισχύος) δίνεται ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η συμβατότητα με την τάση MPPT της DC γεννήτριας.

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι αλγορίθμων MPPT: perturb and observe, incremental conductance και constant voltage. Οι δύο πρώτες μέθοδοι που συχνά αναφέρονται ως μέθοδοι αναρρίχησης λόφου, βασίζονται στην καμπύλη της ισχύος συναρτήσει της τάσης η οποία έχει θετική κλίση αριστερά του σημείου μέγιστης ισχύος και αρνητική στη δεξιά πλευρά αυτού.

Στην Εικόνα 2.26 απεικονίζεται η καμπύλη I-V μιας φωτοβολταϊκής πηγής και τα όρια τάσεως και ρεύματος του αντιστροφέα. Θα πρέπει η I-V στις κανονικές συνθήκες να παρουσιάζει το σημείο MPP κάπου στα μέσα του παραθύρου τάσης του αντιστροφέα, ώστε να υπάρχουν περιθώρια για τις μεταβολές της τάσης της πηγής λόγω θερμοκρασίας.



Εικόνα 2.26 Καμπύλη I-V φωτοβολταϊκής πηγής και όρια τάσεως και ρεύματος αντιστροφέα.

2.6 Αποθήκευση ενέργειας [27]

Σε κάθε ηλεκτρικό δίκτυο, είτε διασυνδεδεμένο είτε αυτόνομο δίκτυο (μεγάλης ή μικρής εγκατεστημένης ισχύος, όπως τα νησιά, ανάλογα με το μέγεθός τους), πρέπει να πληρείται το ισοζύγιο ισχύος, που σημαίνει ότι η απορροφούμενη ενέργεια από τους καταναλωτές ρεύματος πρέπει να είναι ίδια, με μικρές παραλλαγές, με εκείνη που παράγεται από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (θερμικά, υδροηλεκτρικά, κλπ.).

Η χρονική μεταβολή του φορτίου είναι σχετικά προβλέψιμη με τρόπο ώστε να είναι προσαρμοσμένη σε αυτήν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για τεχνικούς λόγους, σε περιπτώσεις με χαμηλό φορτίο, μεγάλες θερμικές μονάδες δεν μπορούν να μειώσουν την παραγωγή κάτω από ένα κατώφλι και έτσι τότε υπάρχει πλεονάζουσα ενέργεια στο δίκτυο.

Η αύξηση της συμμετοχής της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από αιολική ενέργεια προκαλεί νέα τεχνικά προβλήματα στη διαχείριση του δικτύου,

προκαλώντας σοβαρές διακυμάνσεις στην παραγωγή των αιολικών πάρκων. Επίσης, κύριο πρόβλημα είναι η αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης της παραγωγής από τα αιολικά πάρκα, λόγω της μεταβλητότητας του ανέμου. Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, επίσης, δεν ρυθμίζουν τη ροή και την ενέργεια που παράγεται, καθώς η τελευταία εξαρτάται από την φυσική ροή του ποταμού (μεγάλη κατά τη διάρκεια των πλημμύρων και χαμηλή κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων). Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια είναι μηδενική κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενώ την ημέρα εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες (ήλιος ή σύννεφα). Κατά συνέπεια, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν το μειονέκτημα της χρονικής υστέρησης της παραγωγής που δεν μπορεί να είναι στον ανθρώπινο έλεγχο, σε σχέση με τη ζήτηση. Δημιουργείται, ως εκ τούτου, η ανάγκη για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας για μικρά και μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η ανάγκη για αποθήκευση προϋπήρχε, επειδή οι θερμικές μονάδες δεν είναι ευπροσάρμοστες και μερικές φορές (τη νύχτα) η ισχύς που παράγεται είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση. Ωστόσο, η ανάγκη για αποθήκευση θα αυξηθεί σημαντικά στο μέλλον, λόγω της αυξημένης συμμετοχής των ΑΠΕ.

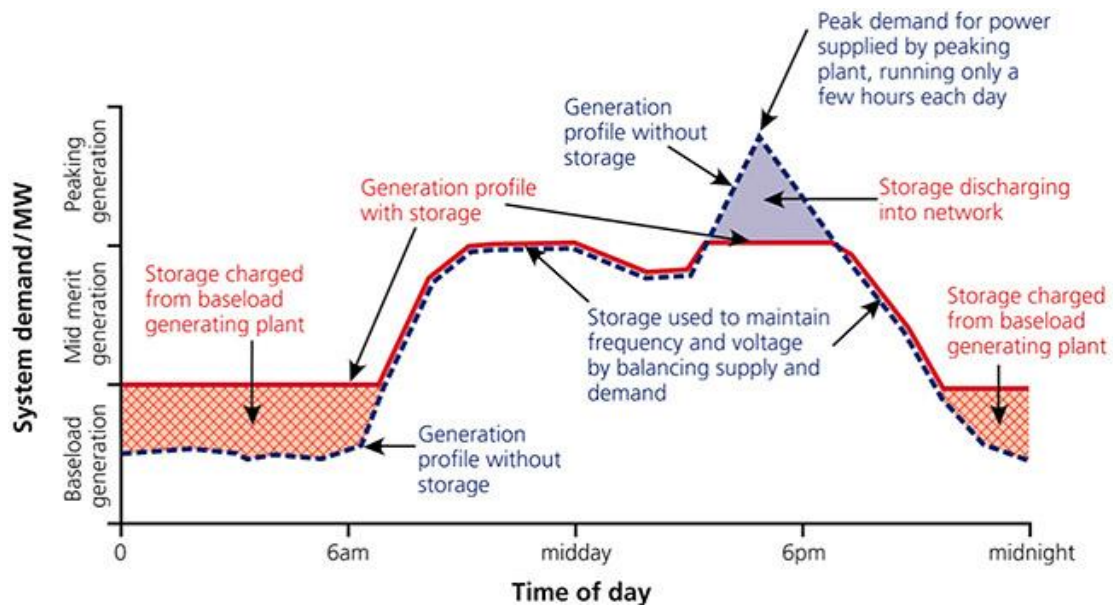
Η ανάγκη για την αποθήκευση ενέργειας υπήρχε κατά παράδοση, καθώς υπάρχουν τα τεχνικά ελάχιστα των μεγάλων θερμοηλεκτρικών σταθμών και η ανάγκη για την κάλυψη των λεγόμενων «αιχμών» φορτίου, δηλαδή των μικρών χρονικών διαστημάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας που το φορτίο αυξάνεται απότομα. Πλέον η ανάγκη για αποθήκευση προέρχεται και από την αύξηση της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδίως των αιολικών πάρκων στο σύστημα παραγωγής.

Ο διαχειριστής του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζει δύο ακραία προβλήματα:

- Βέλτιστη ενσωμάτωση στο δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές στις περιόδους χαμηλού φορτίου, κυρίως από αιολικά πάρκα (προβλήματα σταθερότητας σε υψηλή διείσδυση)
- Διαθεσιμότητα ισχύος και της ενέργειας σε σύντομο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια των περιόδων υψηλού φορτίου και ιδίως σε φορτία αιχμής.

Η ανάγκη για την αποθήκευση μέρους της ενέργειας που προέρχεται από την παραγωγή ανεμογεννητριών γίνεται όλο και πιο επιτακτική, καθώς η αναλογία αιολικής ενέργειας αρχίζει να πλησιάζει κάποια όρια πέρα από τα οποία προκαλεί προβλήματα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ορισμένες περιοχές έχουν ήδη φτάσει στο όριο, έτσι ώστε η περαιτέρω ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας μπορεί να γίνει μόνο αν συνδυαστεί με την αποθήκευση. Προφανώς το πρόβλημα της διαχείρισης ενέργειας από ΑΠΕ είναι πολύ πιο έντονο και λιγότερο άκαμπτο σε μικρά συστήματα (νησιά), ακόμη και στο μέγεθος της Κρήτης.

Εν κατακλείδι, όταν μία από τις μονάδες που συμμετέχουν στην παραγωγή ενέργειας παράγει ηλεκτρική ενέργεια με υψηλή μεταβλητότητα, όπως στην περίπτωση μιας ανεμογεννήτριας, υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με τη διαθεσιμότητα της ενέργειας ανά πάσα στιγμή ώστε να ανταποκριθεί στη ζήτηση. Ένας τρόπος για να μειωθεί η αβεβαιότητα και να εξασφαλιστεί η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές είναι μέσω της εγκατάστασης ενός ηλεκτρικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, που επιτρέπει την προσαρμογή με τον παράτυπο χαρακτήρα της προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για να αποθηκεύονται μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας είναι η χρήση συστημάτων άντλησης.



Εικόνα 2.27 Η αποθήκευση ενέργειας. [30]

Η Εικόνα 2.27 δείχνει πώς οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας εξομαλύνουν την ισχύ των συμβατικών μονάδων, μια τυπική ημέρα του χρόνου. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην ισχύ του φορτίου κατά τη διάρκεια της ημέρας, η οποία συμπίπτει με την απελευθέρωση ενέργειας στο κύτταρο των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής χωρίς διατάξεις για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην παραγωγή των συμβατικών μονάδων, όταν η λειτουργία του συστήματος περιλαμβάνει διατάξεις για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Παρατηρούμε ότι χρησιμοποιώντας τις μεθόδους αποθήκευσης, το εύρος λειτουργίας των συμβατικών μονάδων είναι αυστηρά περιορισμένο με αποτέλεσμα την οικονομική λειτουργία του συστήματος παραγωγής. Έτσι, εάν το φορτίο του συστήματος μειώνεται σημαντικά, κάτι που συμβαίνει συνήθως τη νύχτα, όπου οι συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας παράγουν ενέργεια που υπερβαίνει το φορτίο, η περίσσεια αποθηκεύεται για μεταγενέστερη χρήση. Ως εκ τούτου, το επίπεδο απόδοσης διατηρείται σε υψηλά επίπεδα. Σε βραδινές ώρες στις οποίες το φορτίο παρουσιάζει αιχμές, αντί να ενεργοποιούνται οι εγκαταστάσεις παραγωγής, που συνεπάγεται σημαντικές πρόσθετες δαπάνες ισχύος, το φορτίο τροφοδοτείται από τη διάταξη αποθήκευσης όπου προηγουμένως είχε αποθηκευτεί η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας. Τα οφέλη της αποθήκευσης ενέργειας είναι τα ακόλουθα:

- Μείωση του λειτουργικού κόστους και του αρχικού κεφαλαίου για την εγκατάσταση συμβατικών μονάδων.
- Αύξηση της παραγωγής από ΑΠΕ.
- Βελτιστοποίηση της χρήσης του υπάρχοντος δικτύου μεταφοράς και διανομής και ελαχιστοποίηση του κόστους για την ενίσχυσή της.
- Λειτουργία σε stand – alone εφαρμογές .

- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω οικολογικών μέσων.
- Βελτίωση της ευελιξίας και της αξιοπιστίας του συστήματος, παρέχοντας εφεδρική δύναμη.

Σε συνδυασμό με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αυξήσει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες, καθιστώντας δυνατή την κάλυψη της αιχμής της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Την ίδια στιγμή, η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να διευκολύνει την ένταξη σε ένα ευρύ φάσμα μεταβλητών ΑΠΕ (μη ρυθμιζόμενες), όπως η αιολική και η ηλιακή, στο δίκτυο. Οι διατάξεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, παρέχουν ευελιξία στην εγκατάσταση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η αποθήκευση ενέργειας παρέχει, επίσης, ευελιξία στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, όσον αφορά την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων. Ως πηγή της παραγωγής, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους και επενδύσεων κεφαλαίου. Παραδείγματα αποτελούν η στρεφόμενη εφεδρεία για την προσωρινή υποστήριξη της παραγωγής, η ρύθμιση συχνότητας για stand-alone μονάδες, αναβάλλοντας την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, η στρατηγική που βασίζεται σε συστήματα αποθήκευσης που είναι εγκατεστημένα μπορεί να κάνει καλύτερη χρήση του εξοπλισμού μεταφοράς και της υφιστάμενης κατανομής.

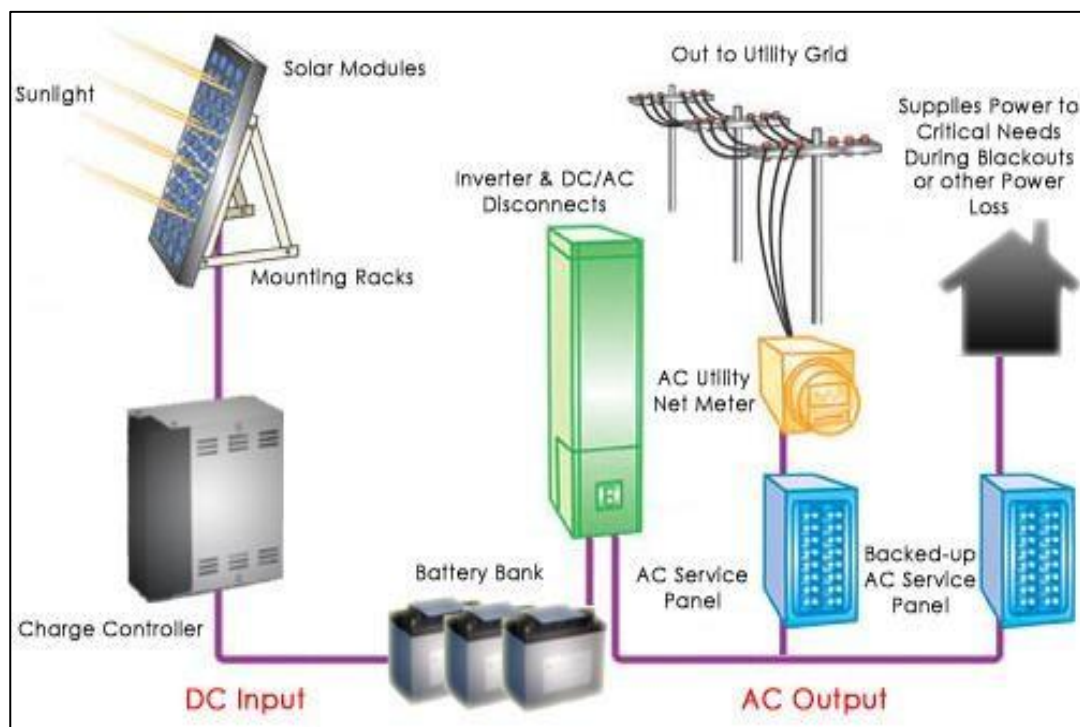
Επιπλέον, η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της έντασης στις μεμονωμένες γραμμές που είναι κοντά στο ανώτατο όριο, μειώνοντας το φορτίο αιχμής του υποσταθμού.

2.6.1 Οι μπαταρίες ως διατάξεις αποθήκευσης

Καθώς ο ήλιος και ο άνεμος δε δίνουν κάθε ώρα της ημέρας επαρκή ενέργεια για να την κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται απαραίτητη. Αυτό γίνεται συνήθως (και ειδικά στα συστήματα ΑΠΕ) με τις μπαταρίες, από τις οποίες μπορεί να αντληθεί ενέργεια οποιαδήποτε ώρα της ημέρας. Μπαταρίες μολύβδου οξέως χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα ως μπαταρίες εκκίνησης και ως εκ τούτου είναι διαθέσιμες σε όλο τον κόσμο.

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέως – ειδικά σχεδιασμένες για τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των συστημάτων ΑΠΕ – είναι συνήθως η πρώτη επιλογή για την αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές καθώς έχουν ως κύρια πλεονεκτήματα το χαμηλό κόστος, την αντοχή σε κύκλους λειτουργίας και την ικανότητα φόρτισης / εκφόρτισης. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν ακόμα προκλήσεις για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους, ειδικότερα ως προς τον χρόνο ζωής σε θερμά κλίματα. Η συστοιχία μπαταριών περιλαμβάνει πολλά στοιχεία μολύβδου οξέως συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους. Οι μπαταρίες μολύβδου οξέως είναι σχετικά φθηνές και άμεσα διαθέσιμες από τους κατασκευαστές, σε σύγκριση με άλλα συστήματα μπαταριών όπως οι ιόντων λιθίου και οι νικελίου-υδριδίου μετάλλου. Υπάρχουν πολλοί τύποι, διαστάσεις και χωρητικότητα μπαταριών μολύβδου οξέως για να επιλέξει κανείς ανάλογα με την εφαρμογή.

Παρακάτω (Εικόνα 2.28) απεικονίζεται ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, το οποίο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο και χρησιμοποιεί μπαταρίες για την αποθήκευση της ενέργειας.



Εικόνα 2.28 Φωτοβολταϊκό σύστημα με μπαταρίες για αποθήκευση ενέργειας.

Παρά την πληθώρα τύπων και εφαρμογών, όσον αφορά τις μπαταρίες μολύβδου οξέως, τα χαρακτηριστικά που είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων, είναι οι απαιτήσεις συντήρησης της μπαταρίας και η δυνατότητα βαθιάς εκφόρτισης, διατηρώντας παράλληλα μεγάλη διάρκεια ζωής.

Οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης μπορούν να είναι ανοικτού ή κλειστού τύπου. Οι μπαταρίες ανοικτού τύπου αποτελούνται από στιβαρές πλάκες και ηλεκτρολυτικό διάλυμα και απαιτούν συντήρηση κάθε 6-12 μήνες με συμπλήρωση απιονισμένου νερού. Οι μπαταρίες κλειστού τύπου, όπως οι AGM και GEL, δεν απαιτούν συντήρηση. Βασικά θετικά χαρακτηριστικά των μπαταριών βαθιάς εκφόρτισης είναι η μεγάλη αντοχή σε κύκλους και ο μεγάλος χρόνος ζωής. Οι μπαταρίες με μικρό βάθος εκφόρτισης – μικρότερο του 25% - έχουν συνήθως λεπτότερες πλάκες από κράματα ασβεστίου μολύβδου.

Χαρακτηριστικό των μπαταριών ανοικτού τύπου είναι ότι μικρά ποσά υδρογόνου και οξυγόνου που παράγονται στα ηλεκτρόδια κατά τη λειτουργία της μπαταρίας ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μέσω μικρών οπών στο επάνω μέρος της μπαταρίας. Σε μία μπαταρία κλειστού τύπου μία ειδική διάταξη καταλύτη μέσα στη μπαταρία χρησιμοποιείται για να επανενώσει το υδρογόνο με το οξυγόνο δημιουργώντας νερό. Επομένως, δεν υπάρχει απώλεια υγρού, όπως στις ανοικτού τύπου.

Οι αυστηρές απαιτήσεις για τις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν προτρέψει διάφορους κατασκευαστές να αναπτύξουν μπαταρίες ειδικά σχεδιασμένες για φωτοβολταϊκά ή άλλα συστήματα παραγωγής ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται

συνηθέστερα στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι είτε μολύβδου οξέως βαθιάς εκφόρτισης, είτε λιγότερων κύκλων χωρίς απαιτήσεις συντήρησης. Οι ειδικές μπαταρίες με μικρό βάθος εκφόρτισης που δεν απαιτούν συντήρηση μπορούν επίσης να εγκατασταθούν, αν η συστοιχία μπαταριών σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να μην απαιτηθεί ποτέ εκφόρτιση κάτω του 25%.

Μια μπαταρία μεγάλου χρόνου ζωής σε ένα κατάλληλα σχεδιασμένο φωτοβολταϊκό σύστημα με τη σωστή συντήρηση μπορεί να διαρκέσει μέχρι 15 έτη, αλλά η χρήση μπαταριών που δεν σχεδιάστηκαν για πολλούς κύκλους φόρτισης, ή είναι ακατάλληλες για το συγκεκριμένο σύστημα, μπορεί να οδηγήσει σε μια συστοιχία μπαταριών ανίκανη να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της εφαρμογής σε μόλις μερικά χρόνια.

Η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι το μέτρο για την ποσότητα ρεύματος που μπορεί να αποθηκευτεί και να αντληθεί από μία μπαταρία. Η μονάδα μέτρησης είναι τα αμπερώρια (Ah). Η τιμή αυτή είναι θεωρητική και εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων. Στις μπαταρίες μολύβδου οξέως υπάρχουν τρία ενεργά συστατικά μέρη, το ενεργό υλικό του θεωρητικού ηλεκτροδίου, το ενεργό υλικό του αρνητικού ηλεκτροδίου και ο ηλεκτρολύτης. Μία από αυτές τις ουσίες μπορεί να μειώσει τη χωρητικότητα και αν έχει καταναλωθεί, η τάση της μπαταρίας καταρρέει και η μπαταρία αποφορτίζεται.

Είναι, λοιπόν, πιο πρακτικό να αναφερόμαστε στην ονομαστική τιμή της χωρητικότητας, η οποία δίνεται από τον κατασκευαστή για την εγγυημένη χωρητικότητα μιας καινούργιας μπαταρίας που εκφορτίζεται με κάποια τυποποιημένη διαδικασία. Για τις μπαταρίες αυτοκινήτου, η μπαταρία αποφορτίζεται σε 20 ώρες με σταθερό ρεύμα ως μία προκαθορισμένη τιμή τάσης. Το ρεύμα αυτό επισημαίνεται με I_{20} και η αντίστοιχη χωρητικότητα με C_{20} . Η χωρητικότητα μπορεί να διαφέρει από την ονομαστική τιμή. Πολλαπλές παράμετροι επηρεάζουν τη χωρητικότητα όπως η θερμοκρασία, η προηγούμενη φόρτιση, ο χρόνος από την τελευταία φόρτιση, η ηλικία της μπαταρίας, η συμπεριφορά ως προς το ρεύμα, η τάση αποφόρτισης κ.λπ.

Στην κανονική λειτουργία υπάρχουν τέσσερις κύριοι λόγοι για την γήρανση των μπαταριών:

- Βαθεία εκφόρτιση
- Υπερφόρτιση
- Χαμηλό επίπεδο ηλεκτρολύτη
- Υψηλή θερμοκρασία μπαταρίας

Ως παράδειγμα, ο χρόνος ζωής της μπαταρίας μειώνεται δραματικά αν αφεθεί σε βαθιά αποφόρτιση για πολύ καιρό (περισσότερο από μερικές μέρες). Μία τέτοια κατάσταση μπορεί να προκύψει αν το φορτίο είναι μεγάλο σε σχέση με την ενέργεια που δίνει η φωτοβολταϊκή πηγή και ο ρυθμιστής φόρτισης δεν έχει κάποια ειδική προστασία για αποσύνδεση των μπαταριών σε κατάσταση χαμηλής φόρτισης. Σε τέτοιες περιπτώσεις η μπαταρία θα πρέπει να αποσυνδεθεί αμέσως από το φορτίο και να φορτιστεί με άλλα μέσα πριν τεθεί ξανά σε λειτουργία. Ένας καλός ρυθμιστής δεν θα επέτρεπε να φτάσουν οι μπαταρίες που επιβλέπει σε τέτοιες επικίνδυνες καταστάσεις.

Μια μπαταρία μολύβδου οξέως σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα δε χρειάζεται να δίνει υψηλό ρεύμα κατά την εκφόρτιση ή να υπόκειται σε ταχεία φόρτιση. Θα πρέπει όμως να έχει υψηλή χωρητικότητα. Μία μπαταρία αυτοκινήτου που συνδέεται

σε φωτοβολταϊκό σύστημα θα δουλέψει καλά για 1-5 ημέρες, αλλά η αντοχή σε κύκλους σε θα μπορέσει να καλύψει το σύστημα για περισσότερο χρόνο. Για το λόγο αυτό οι μπαταρίες που εγκαθίστανται σε φωτοβολταϊκά συστήματα σχεδιάζονται για περισσότερους κύκλους.

Τα βήματα της διαδικασίας φόρτισης είναι τα εξής:

- Κύρια φόρτιση, όπου η μπαταρία φορτίζεται ως ένα επίπεδο τάσης που ξεκινά ο βρασμός του υγρού και η τάση αυξάνεται.
- Φόρτιση για το 100%, όπου η μπαταρία φορτίζεται από μία κατάσταση του 90-95% για να φτάσει το 100%.
- Φόρτιση εξισορρόπησης, όπου η χωρητικότητα των επιμέρους στοιχείων εξισώνεται, ώστε όλα τα στοιχεία να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο φόρτισης.
- Φόρτιση συντήρησης, ώστε να διατηρείται σε μέγιστο επίπεδο η χωρητικότητα της μπαταρίας που είναι ήδη φορτισμένη αλλά δεν έχει αποφορτιστεί για κάποιο χρόνο.

Οι μπαταρίες δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην κύρια φόρτιση, εκτός από την αύξηση της θερμοκρασίας που αυτή επιφέρει. Είναι προτιμότερο να μην ξεκινήσει κανείς να φορτίζει μια μπαταρία που έχει υψηλή θερμοκρασία αν μπορεί με κάποιο τρόπο να τη ρίξει πρώτα. Όταν ο ρυθμιστής ρυθμίζει τη λειτουργία της φόρτισης σύμφωνα με την τάση, θεωρείται πως όλα τα στοιχεία έχουν την ίδια τάση. Επειδή αυτό δεν είναι πάντα αληθές, μερικά στοιχεία μπορεί να μην φορτιστούν πλήρως. Είναι λοιπόν σημαντικό να ελέγχεται συχνά η τάση σε κάθε στοιχείο.

2.6.2 Τύποι Μπαταριών

2.6.2.1 Μπαταρίες μολύβδου - οξέως

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα ως μπαταρίες εκκίνησης και ως εκ τούτου είναι διαθέσιμες σε όλο τον κόσμο. Μπορούν να σχεδιαστούν ειδικά για βαθιά εκφόρτιση και να εγκαθίστανται σε συστήματα με φωτοβολταϊκά στοιχεία και ανεμογεννήτριες. Πλεονεκτήματα είναι το χαμηλό κόστος, η αντοχή σε κύκλους λειτουργίας και η ικανότητα φόρτισης/εκφόρτισης. Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους, η διάρκειας ζωής τους σε θερμά κλίματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας και τη λειτουργία του ρυθμιστή των μπαταριών.

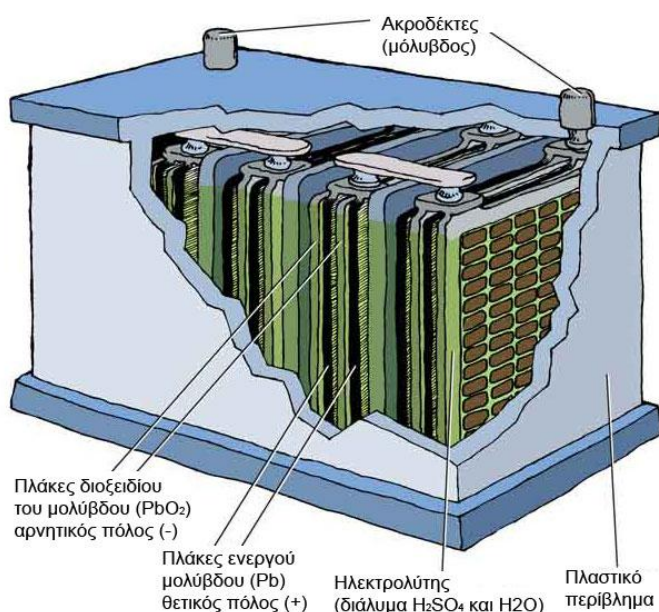
Η ροή ενέργειας σε ένα αυτόνομο σύστημα με φωτοβολταϊκά στοιχεία και μπαταρίες μπορεί να κατευθύνεται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια προς τις μπαταρίες και από τις μπαταρίες προς το φορτίο. Συνήθως, δεν υπάρχει μόνο ένα στοιχείο μπαταρίας, αλλά πολλά στοιχεία που συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα ανάλογα με την επιθυμητή τάση του συστήματος. Διαμορφώνεται έτσι, μια συστοιχία μπαταριών με μια συγκεκριμένη τάση και ονομαστικό ρεύμα στην έξοδό της.

Το κόστος των μπαταριών μολύβδου - οξέως είναι χαμηλό και η διαθεσιμότητα τους υψηλή, λόγω του ότι χρησιμοποιούνται και στις επίγειες εφαρμογές κίνησης. Η σύγκριση γίνεται με άλλες τεχνολογίες μπαταριών όπως λιθίου και νικελίου-υδριδίου

μετάλλου. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής, μπορεί ο σχεδιαστής να επιλέξει μεταξύ διαφορετικών επιπέδων χωρητικότητας και διαστάσεων. Η δομή μιας μπαταρίας μολύβδου - οξέος φαίνεται στην Εικόνα 2.29.

Υπάρχουν δύο τύποι μπαταριών βαθιάς εκφόρτισης: ανοικτού ή κλειστού τύπου. Οι μπαταρίες ανοικτού τύπου αποτελούνται από σπιραρές πλάκες και ηλεκτρολυτικό διάλυμα και απαιτούν συντήρηση κάθε 6-12 μήνες με συμπλήρωση απιονισμένου νερού. Οι μπαταρίες κλειστού τύπου, όπως οι AGM και GEL, δεν απαιτούν συντήρηση. Στα πλεονεκτήματα των μπαταριών βαθιάς εκφόρτισης συγκαταλέγονται η μεγάλη αντοχή σε κύκλους και ο μεγάλος χρόνος ζωής. Σε τεχνολογίες με μικρότερο βάθος εκφόρτισης (25%), οι πλάκες είναι πιο λεπτές και είναι κατασκευασμένες από κράματα ασβεστίου – μολύβδου.

Στις μπαταρίες ανοικτού τύπου τα μικρά ποσά υδρογόνου και οξυγόνου, τα οποία παράγονται στα ηλεκτρόδια κατά τη λειτουργία της μπαταρίας, απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μέσω μικρών οπών στο επάνω μέρος της μπαταρίας. Αντίθετα, στις μπαταρίες κλειστού τύπου το υδρογόνο και το οξυγόνο επανενώνονται με τη βοήθεια μιας ειδικής διάταξης καταλύτη που βρίσκεται μέσα στη μπαταρία, με αποτέλεσμα να μην δημιουργείται απώλεια υγρού και να μην υπάρχουν απαιτήσεις συχνής συντήρησης.

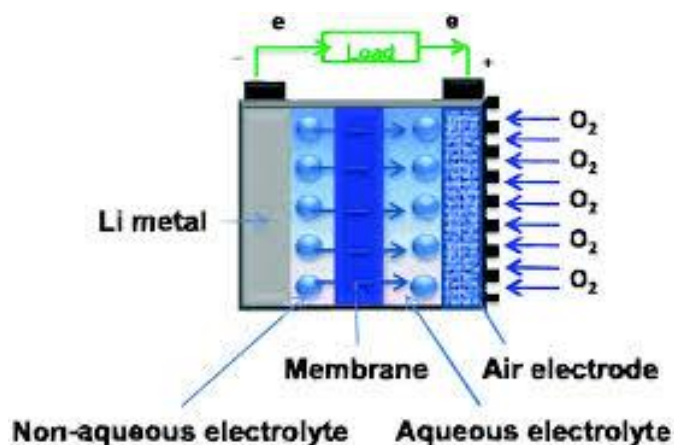


Εικόνα 2.29 Δομή μπαταρίας μολύβδου οξέος. [30]

2.6.2.2 Μπαταρίες λιθίου - αέρα

Οι μπαταρίες λιθίου - αέρα με βάση την υψηλή θεωρητική ειδική ενέργειά τους, αποτελούν μια εξαιρετικά ελκυστική τεχνολογία για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας που θα μπορούσε να καταστήσει τα ηλεκτρικά οχήματα μεγάλου βεληνεκούς ευρέως προσιτά. Ωστόσο, η χρήση αυτής της τεχνολογίας μέχρι στιγμής υπολείπεται των δυνατοτήτων της, γεγονός που οφείλεται σε πολλές αποθαρρυντικές

προκλήσεις. Στα μη υδατικά κύτταρα λιθίου - αέρα, η αναστρέψιμη χημεία με υψηλή απόδοση ρεύματος κατά αρκετούς κύκλους, δεν έχει ακόμη καθοριστεί και η εναπόθεση ενός ηλεκτρικά αντιστατικού παραγωγού φαίνεται να περιορίζει την χωρητικότητα. Τα υδατικά κύτταρα απαιτούν μεμβράνες με προστασία λιθίου και σταθερότητα στο νερό που τείνουν να έχουν μεγάλο πάχος, βάρος και υψηλή αντίσταση. Και οι δύο τύποι κυττάρων (υδατικοί και μη υδατικοί) υποφέρουν από κακή κινητική της οξειδοαναγωγής οξυγόνου στο θετικό ηλεκτρόδιο και επιβλαβείς αλλαγές του όγκου και της μορφολογίας στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Τα κλειστά συστήματα λιθίου - αέρα που περιλαμβάνουν αποθήκευση του οξυγόνου είναι πολύ μεγαλύτερα και βαρύτερα από τα ανοιχτά συστήματα, αλλά μέχρι στιγμής οι μεμβράνες τους δεν είναι αποτελεσματικές στην πρόληψη της μόλυνσης των κυττάρων. Παρ' όλα αυτά, οι μπαταρίες λιθίου - αέρα θα εξακολουθήσουν να αποτελούν μέρος της έρευνας για τα επόμενα χρόνια. Ωστόσο, αν μπορέσουν να αντιμετωπιστούν οι βασικές προκλήσεις, η μπαταρία λιθίου - αέρα έχει τη δυνατότητα να ξεπεράσει σημαντικά την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας των μπαταριών ιόντων λιθίου σήμερα. Η δομή μιας μπαταρίας λιθίου - αέρα φαίνεται στην Εικόνα 2.30.



Εικόνα 2.30 Δομή μπαταρίας λιθίου αέρα. [1]

2.6.2.3 Μπαταρίες ιόντων λιθίου

Για πολλά χρόνια, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου αποτελούσαν τη μόνη κατάλληλη λύση για τον φορητό εξοπλισμό, από τις ασύρματες επικοινωνίες ως τους φορητούς υπολογιστές. Οι μπαταρίες νικελίου υδριδίου μετάλλου και ιόντων λιθίου εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και με δυσκολία κέρδισαν την ευρύτερη αποδοχή. Σήμερα, η τεχνολογία ιόντων λιθίου είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη και πλέον υποσχόμενη κατηγορία μπαταριών.

Η ανάπτυξη της μπαταρίας λιθίου από την εταιρεία Pioneer ξεκίνησε το 1912 υπό την επίβλεψη του G.N. Lewis, αλλά δεν ήταν μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970, που οι πρώτες μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου έγιναν εμπορικά διαθέσιμες. Το λίθιο είναι το ελαφρύτερο όλων των μετάλλων, έχει το μεγαλύτερο ηλεκτροχημικό δυναμικό και παρέχει την μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα βάρους.

Οι προσπάθειες να αναπτυχθούν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου απέτυχαν λόγω προβλημάτων ασφάλειας. Λόγω της εγγενούς αστάθειας του λιθίου, ειδικά κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η έρευνα μετατοπίζεται σε μια μη μεταλλική

μπαταρία λιθίου χρησιμοποιώντας ιόντα λιθίου. Αν και ελαφρώς χαμηλότερες σε ενεργειακή πυκνότητα από το μέταλλο λίθιο, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ασφαλείς, υπό τον όρο ότι πληρούνται ορισμένες προφυλάξεις κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση. Το 1991, η Sony Corporation εμπορευματοποιεί την πρώτη μπαταρία ιόντων λιθίου. Άλλοι κατασκευαστές ακολούθησαν το παράδειγμά τους.

Η ενεργειακή πυκνότητα της μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι συνήθως διπλάσια σχετικά με τη μπαταρία νικελίου-καδμίου. Υπάρχει δυνατότητα για υψηλότερες πυκνότητες ενέργειας. Τα χαρακτηριστικά φόρτισης είναι αρκετά καλά και παρόμοια με αυτά της μπαταρίας νικελίου-καδμίου όσον αφορά την εκφόρτιση. Η υψηλή τάση των στοιχείων 3.6V επιτρέπει διατάξεις συστοιχιών με μόνο ένα στοιχείο. Τα περισσότερα από τα κινητά τηλέφωνα σήμερα λειτουργούν με μόνο ένα κύτταρο. Μια συστοιχία μπαταριών με βάση το νικέλιο θα απαιτούσε τρία στοιχεία 1.2V που συνδέονται σε σειρά.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι χαμηλής συντήρησης, ένα πλεονέκτημα που οι περισσότερες άλλες μπαταρίες δεν κατέχουν. Δεν υπάρχει μνήμη μπαταρίας και δεν πρέπει να προγραμματιστούν οι κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης ώστε να παραταθεί η διάρκεια ζωής τους. Επιπλέον, η αυτό-εκφόρτιση σε κατάσταση αποθήκευσης είναι λιγότερη από το μισό σε σύγκριση με τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου, καθιστώντας την τεχνολογία ιόντων λιθίου κατάλληλη για σύγχρονες εφαρμογές μετρητή καυσίμων. Επίσης, οι κυψέλες ιόντων λιθίου προκαλούν μικρή βλάβη/ρύπανση όταν απορρίπτονται.

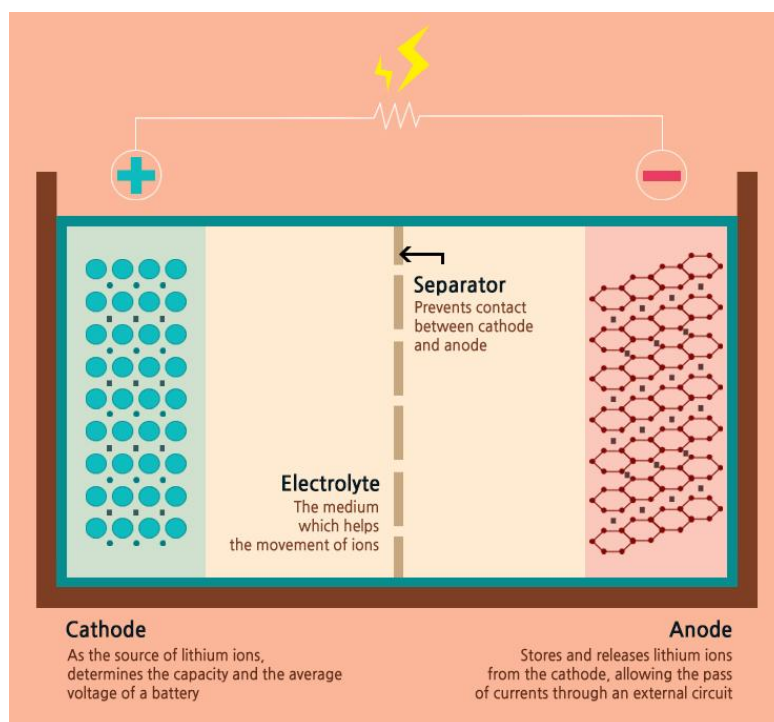
Παρά τα αρκετά πλεονεκτήματά τους, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν και κάποια μειονεκτήματα. Είναι εύθραυστες και απαιτούν ένα κύκλωμα προστασίας για να διατηρηθεί η ασφαλής λειτουργία. Ενσωματωμένο σε κάθε πακέτο, το κύκλωμα προστασίας περιορίζει την τάση αιχμής του κάθε στοιχείου κατά τη διάρκεια φόρτισης και εμποδίζει την τάση αιχμής του κάθε στοιχείου κατά τη διάρκεια φόρτισης και εμποδίζει την τάση κυττάρων από μείωση σε πολύ χαμηλά επίπεδα κατά την εκφόρτιση. Επιπλέον, η θερμοκρασία του θαλάμου των στοιχείων θα πρέπει να παρακολουθείται ώστε να αποτραπούν ακραίες θερμοκρασίες. Με αυτές τις προφυλάξεις, η πιθανότητα εμφάνισης μεταλλικών ελασμάτων λιθίου που συμβαίνουν λόγω υπερφόρτισης, σχεδόν εξαλείφεται.

Το ζήτημα της γήρανσης αποτελεί έναν προβληματισμό για τις περισσότερες μπαταρίες ιόντων λιθίου και πολλοί κατασκευαστές παραμένουν σιωπηλοί σχετικά με αυτό το θέμα. Η μείωση της χωρητικότητας είναι εμφανής μετά από ένα έτος, ανεξάρτητα από το εάν η μπαταρία είναι σε χρήση ή όχι. Η μπαταρία βγαίνει εκτός λειτουργίας συχνά, μετά από δύο ή τρία χρόνια. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι και άλλες τεχνολογίες σχετίζονται επίσης με εκφυλιστικές επιδράσεις γήρανσης. Αυτό συμβαίνει σε μεγάλο βαθμό στις μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου αν εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Την ίδια στιγμή, οι συστοιχίες των μπαταριών ιόντων λιθίου μπορεί να διαρκέσουν ως και πέντε έτη σε ορισμένες εφαρμογές.

Οι κατασκευαστές βελτιώνουν τις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Οι νέες και βελτιωμένες τεχνολογίες με συνδυασμούς χημικών στοιχείων εισάγονται κάθε έξι μήνες περίπου. Με μια τέτοια ταχεία πρόοδος, είναι δύσκολο να εκτιμηθεί η απόδοση της μπαταρίας κατά τη γήρανση.

Η αποθήκευση σε δροσερό μέρος επιβραδύνει τη διαδικασία γήρανσης της μπαταρίας ιόντων λιθίου (και άλλων τεχνολογιών). Οι κατασκευαστές συνιστούν αποθήκευση σε θερμοκρασίες των 15 °C (59 ° F). Επιπλέον, η μπαταρία πρέπει να

φορτιστεί εν μέρει κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Ο κατασκευαστής συνιστά φόρτιση κατά 40%. Η δομή μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου φαίνεται στην Εικόνα 2.31.



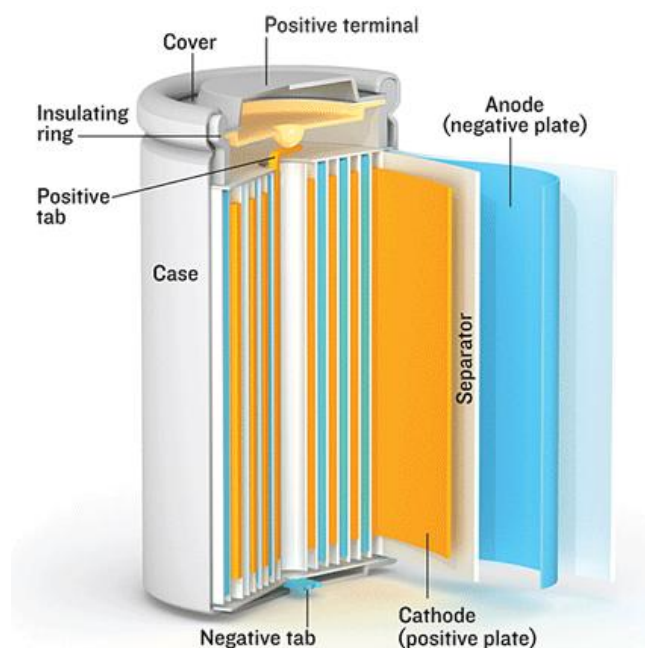
Εικόνα 2.31 Δομή μπαταρίας ιόντων λιθίου. [14]

Η πιο οικονομική μπαταρία ιόντων λιθίου από την άποψη της σχέσης κόστους-ενέργειας είναι η κυλινδρική 18650 (18mm x 65,2 mm), η δομή της οποίας φαίνεται στην Εικόνα 2.32. Αυτό το κύτταρο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές κινητών, υπολογιστών και άλλες εφαρμογές που δεν απαιτούν εξαιρετικά λεπτή γεωμετρία. Εάν απαιτείται ένα ιδιαίτερα λεπτό στοιχείο, η πρισματική μπαταρία ιόντων λιθίου είναι η καλύτερη επιλογή. Αυτά τα στοιχεία έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με την αποθηκευμένη ενέργεια.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, δύο εκ των οποίων είναι η υψηλή ενεργειακή τους πυκνότητα και οι δυνατότητές τους για ακόμη υψηλότερες χωρητικότητες. Επίσης, δεν απαιτείται παρατεταμένη πλήρωση όταν η μπαταρία είναι νέα, καθώς μία κανονική φόρτιση είναι το μόνο που χρειάζεται. Χαρακτηριστικό των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι η σχετικά χαμηλή τους αυτοεκφόρτιση (λιγότερο από το ήμισυ των μπαταριών νικελίου), όπως και η χαμηλή συντήρησή τους. Δε χρειάζονται περιοδική εκφόρτιση αφού δεν υπάρχει μνήμη. Τέλος, διαθέτουν εξειδικευμένα κύτταρα, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν πολύ υψηλό ρεύμα σε εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά εργαλεία.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι ότι απαιτείται κύκλωμα προστασίας προκειμένου να διατηρηθεί η τάση και το ρεύμα εντός ασφαλών ορίων. Επίσης, παρατηρείται γήρανση των μπαταριών ιόντων λιθίου ακόμη και αν δεν είναι σε χρήση. Προκειμένου να μειωθεί ο ρυθμός γήρανσης μιας μπαταρίας τέτοιου τύπου, συνιστάται η αποθήκευσή τους σε δροσερό μέρος κατά τη φόρτιση. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι είναι μία αρκετά ακριβή μπαταρία, περίπου 40% πιο ακριβή από τις μπαταρίες νικελίου – καδμίου. Όσον αφορά την τεχνολογία των μπαταριών ιόντων λιθίου, δεν είναι μια πλήρως ώριμη τεχνολογία, αφού τα μέταλλα και οι χημικές ενώσεις αλλάζουν σε συνεχή βάση. Τέλος, υπάρχουν κάποιοι

περιορισμοί που σχετίζονται με την μεταφορά των μπαταριών αυτών, καθώς η μεταφορά μεγαλύτερων ποσοτήτων μπορεί να υπόκειται σε ρυθμιστικό έλεγχο.



Εικόνα 2.32 Δομή κυλινδρικής μπαταρίας ιόντων λιθίου. [5]

2.6.2.4 Μπαταρίες πολυμερών λιθίου

Η μπαταρία πολυμερούς λιθίου διαφοροποιείται από τα συμβατικά συστήματα μπαταρίας του τύπου ηλεκτρολύτη. Το αρχικό σχέδιο, που χρονολογείται από τη δεκαετία του 1970, χρησιμοποιεί ξηρούς στερεούς πολυμερείς ηλεκτρολύτες. Η διάταξη αυτή μοιάζει με έναν πλαστικό ηλεκτρολύτη σαν ταινία που δεν άγει τον ηλεκτρισμό, αλλά επιτρέπει την ανταλλαγή ιόντων (ηλεκτρικά φορτισμένα άτομα ή ομάδες ατόμων). Οι πλαστικοί ηλεκτρολύτες αντικαθιστούν το παραδοσιακό πορώδες διαχωριστικό, το οποίο είναι εμποτισμένο με ηλεκτρολύτη.

Ο ξηρός σχεδιασμός του πολυμερούς προσφέρει απλουστεύσεις σε σχέση με την κατασκευή, την τραχύτητα, την ασφάλεια και προφίλ λεπτής γεωμετρίας. Το πάχος του κάθε στοιχείου φτάνει το ένα χιλιοστό (0.039 ίντσες) και ως εκ τούτου οι σχεδιαστές μπορούν να πάρουν πολλές αποφάσεις ως προς τη μορφή, το σχήμα και το μέγεθος. Η δομή μιας μπαταρίας πολυμερούς λιθίου φαίνεται στην Εικόνα 2.33.

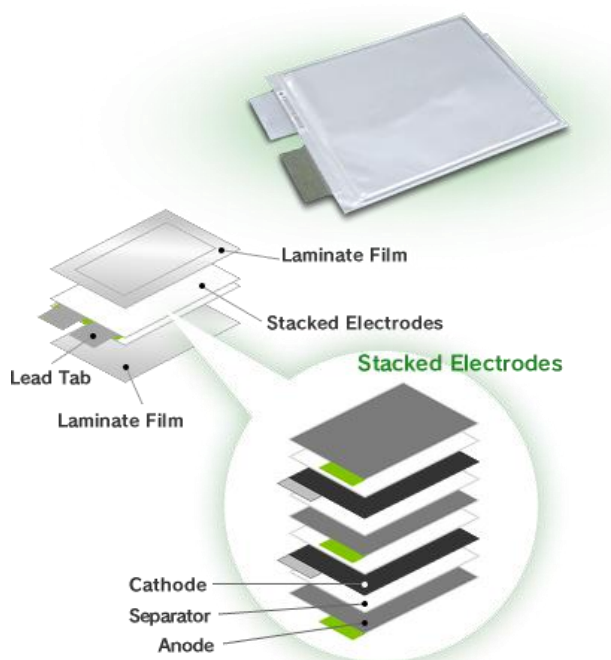
Δυστυχώς, η ξηρή μπαταρία πολυμερούς λιθίου υποφέρει από κακή αγωγιμότητα. Η εσωτερική αντίσταση είναι πολύ υψηλή και δεν μπορεί να αποδώσει τα υψηλά ρεύματα αιχμής που απαιτούνται για να τροφοδοτήσουν τις σύγχρονες συσκευές επικοινωνίας και τους σκληρούς δίσκους του κινητού εξοπλισμού πληροφορικής. Η θέρμανση του κυττάρου στους 60 °C (140 °F) οδηγεί σε υψηλότερες αυξήσεις της αγωγιμότητας, απαίτηση η οποία είναι ακατάλληλη για φορητές εφαρμογές.

Προς συμβιβασμό, έχει προστεθεί ένας ηλεκτρολύτης gel. Τα εμπορικά στοιχεία χρησιμοποιούν μια μεμβράνη διαχωριστή /ηλεκτρολύτη που παρασκευάζεται από τον ίδιο παραδοσιακό πορώδες διαχωριστικό από πολυαιθυλένιο ή πολυπροπυλένιο γεμάτο με ένα πολυμερές, το οποίο πηζει κατά την πλήρωση με τον υγρό ηλεκτρολύτη. Έτσι, τα εμπορικά στοιχεία πολυμερούς λιθίου-ιόντων είναι πολύ

παρόμοια στη χημεία και τα υλικά με τα αντίστοιχα υγρά στοιχεία. Τα πολυμερή ιόντων λιθίου δεν έχουν αναπτυχθεί όπως αναμενόταν από κάποιους ερευνητές, καθώς δεν έχει ακόμα γίνει αντιληπτή η υπεροχή των στοιχείων αυτών και το χαμηλό κόστος παραγωγής.

Ένα από τα πλεονεκτήματα των μπαταριών αυτών είναι η βελτίωση της ασφάλειας τους, καθώς έχουν μεγάλη αντοχή στην υπερφόρτιση και οι πιθανότητες για διαρροή ηλεκτρολυτών είναι μειωμένες. Επίσης, χαρακτηριστικό τους είναι το μικρό τους βάρος, το προφίλ τους και η ευέλικτη μορφή τους. Υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία κάθε μεγέθους και οι κατασκευαστές δεν δεσμεύονται από τυποποιημένες μορφές κελιών.

Οι μπαταρίες πολυμερών λιθίου έχουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως είναι η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και ο μειωμένος αριθμός των κύκλων σε σύγκριση με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Έχουν υψηλό κόστος και δεν υπάρχουν τυποποιημένα μεγέθη. Τα περισσότερα κύτταρα παράγονται για καταναλωτικές αγορές υψηλού όγκου. Τέλος, η αναλογία κόστους – ενέργειας είναι υψηλότερη συγκριτικά με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου.



Εικόνα 2.33 Δομή μπαταρίας πολυμερούς λιθίου. [2]

3 Μικροδίκτυα [27]

3.1 Τρόπος Λειτουργίας

Βασικό χαρακτηριστικό των μικροδικτύων είναι ο συντονισμένος έλεγχος, ώστε να μην επιβαρύνουν το δίκτυο. Επιπλέον, μπορούν να λειτουργούν σε διττή λειτουργία, δηλαδή να συνδέονται και να αποσυνδέονται από το δίκτυο ανάλογα με τις ανάγκες τους, βάση των σημάτων που λαμβάνουν από το σύστημα ελέγχου τους, και παράλληλα να συνεχίζουν τη λειτουργία τους αδιάλειπτα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα μικροδίκτυα δε χρειάζεται να λαμβάνουν σήματα από το σύστημα ελέγχου του κεντρικού δικτύου και έτσι δεν το επιβαρύνουν.

Αυτή η δυνατότητα, βεβαίως, απαιτεί εξελιγμένες υποδομές προστασίας, ελέγχου και τηλεπικοινωνιών προκειμένου να είναι σε θέση να απομονώσουν το μικροδίκτυο και να παρέχουν σταθερή και αυτόνομη λειτουργία. Η διαρκής, όμως, πρόοδος στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και ελεγκτών των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής συμβάλλει, ώστε αυτή η λειτουργία να γίνεται ολοένα και περισσότερο εύκολο να επιτευχθεί τόσο τεχνικά όσο και οικονομικά.

Οι πηγές ενέργειας μπορεί να είναι:

- Ανεμογεννήτριες
- Φωτοβολταϊκά
- Κυψέλες καυσίμου
- Βιομάζα
- Γεννήτριες Diesel
- Γεννήτριες φυσικού αερίου
- Συμπαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού χρήσης
- Γεωθερμία
- Ηλιοθερμία

Τα συνδεδεμένα φορτία μπορεί να είναι κρίσιμα ή μη κρίσιμα. Τα κρίσιμα φορτία απαιτούν αξιόπιστη πηγή ενέργειας και αυστηρές προδιαγραφές ποιότητας ισχύος. Τα φορτία αυτά συνήθως κατέχουν τις μικροπηγές επειδή απαιτούν συνεχή παροχή ενεργειακού εφοδιασμού. Τα μη κρίσιμα φορτία μπορεί να απορριφθούν κατά τη διάρκεια συνθηκών έκτακτης ανάγκης και όταν απαιτείται, όπως ορίζεται από τις πολιτικές λειτουργίας του μικροδικτύου.

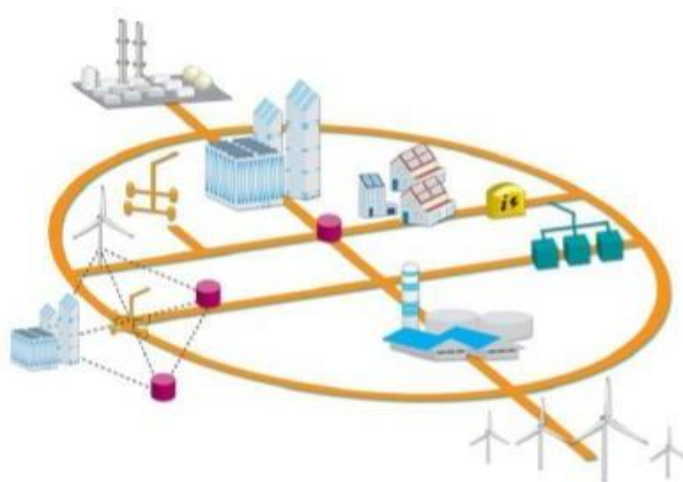
Η ενδιάμεση συσκευή αποθήκευση ενέργειας αποτελείται από αντιστροφέα, συστοιχία μπαταριών, υπερπυκνωτές (supercapacitors) ή σφονδύλους. Η συσκευή αποθήκευσης στο μικροδίκτυο είναι ανάλογη με την στρεφόμενη εφεδρεία των μεγάλων γεννητριών στο συμβατικό δίκτυο. Εξασφαλίζει την ισορροπία μεταξύ της ενέργειας παραγωγής και κατανάλωσης, ιδίως κατά τη διάρκεια της απότομης αλλαγής στο φορτίο ή στην παραγωγή.

Οι μονάδες αποθήκευσης σε ένα μικροδίκτυο μπορεί να είναι:

- Μπαταρίες (ηλεκτρικοί συσσωρευτές) μολύβδου οξέως βαθιάς εκφόρτισης.
- Αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα (Compressed Air Energy Storage, CAES). Η συμπίεση του αέρα γίνεται με κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, ο πεπιεσμένος αέρας κινεί τον στρόβιλο και παράγει εκ νέου ηλεκτρική ενέργεια.
- Σφόνδυλοι (flywheels). Πρόκειται για διατάξεις όπου μέσω ενός κινητήρα - γεννήτριας μπορεί να γίνει αποθήκευση με την μορφή κινητικής ενέργειας σε μια στρεφόμενη μάζα.
- Υπεραγώγιμες διατάξεις. Εφαρμογές με διατάξεις που χρησιμοποιούν υγρό ήλιο είναι ήδη σε εμπορική εκμετάλλευση ενώ επίσης διατάξεις υγρού αζώτου αναμένονται στο άμεσο μέλλον.
- Αντλησιοταμίευση. Η ενέργεια που παράγεται από αιολικά κυρίως πάρκα και υβριδικά συστήματα σε νησιά, αξιοποιείται για την άντληση και αποταμίευση νερού σε υψηλότερη στάθμη. Στη συνέχεια το νερό αυτό μπορεί να απελευθερωθεί και μέσω υδροστροβίλου να παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

Ένα μικροδίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως μια οντότητα που ελέγχεται από το ενεργειακό σύστημα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεμονωμένα φορτία ή ως δευτερεύουσα δραστηριότητα που λειτουργεί ως υποστήριξη δικτύου. Ως προς τον καταναλωτή, το μικροδίκτυο μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού, παρόμοια με τα παραδοσιακά δίκτυα διανομής μέσης τάσης, αλλά επίσης ενισχύει την τοπική αξιοπιστία, τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και βελτιώνει την ποιότητα ισχύος. Ένα τυπικό μικροδίκτυο μεγάλης έκτασης απεικονίζεται στην Εικόνα 3.1.

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του μικροδικτύου είναι ότι ενώ υπό κανονικές συνθήκες συνδέεται με την κανονική λειτουργία του δικτύου, μπορεί να τοποθετηθεί αυτόματα σε λειτουργία σε μεμονωμένες περιπτώσεις. Επομένως, ένα μικροδίκτυο με τα κατάλληλα οικονομικά κίνητρα μπορεί να προσφέρει και βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο καθώς διαθέτει την υποδομή των συστημάτων ελέγχου.



Εικόνα 3.1 Ένα τυπικό μικροδίκτυο μεγάλης έκτασης.

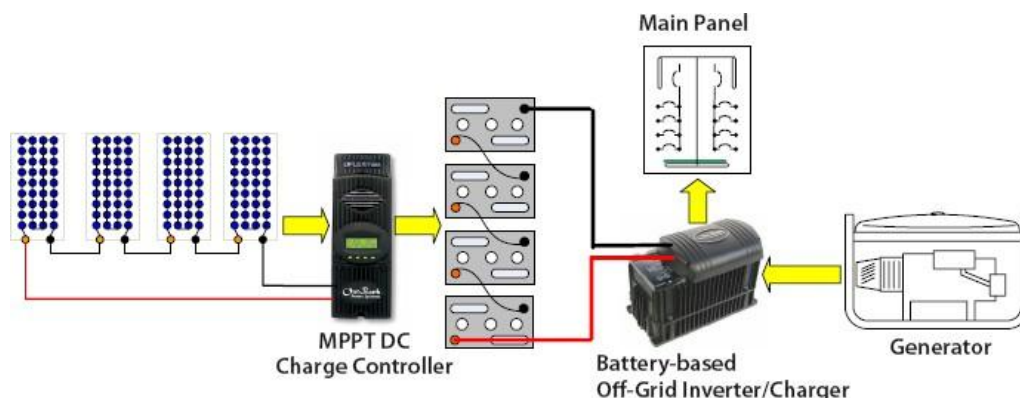
3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Στο υβριδικό σύστημα του μικροδικτύου ενσωματώνονται διάφορες μονάδες που αξιοποιούν ανανεώσιμες πηγές, όπως φωτοβολταϊκοί συλλέκτες, ανεμογεννήτριες κ.λπ. Συνήθως εγκαθίσταται ως εφεδρεία γεννήτρια diesel. Παλαιότερα αποτελούσε κοινή πρακτική η σύζευξη των επιμέρους συστημάτων στην DC πλευρά του συστήματος. Στη διαμόρφωση με DC σύζευξη, τα φωτοβολταϊκά ή/και η ανεμογεννήτρια φορτίζουν τις μπαταρίες μέσω κατάλληλων ρυθμιστών. Στη συνέχεια, η αποθηκευμένη ενέργεια των μπαταριών αντλείται για την άμεση τροφοδότηση φορτίων DC ή, μέσω αντιστροφών, για την κάλυψη των AC καταναλώσεων.

Η σύζευξη AC σε συστήματα τροφοδοσίας για δίκτυα απομακρυσμένων περιοχών αποτελεί την τεχνολογία του μέλλοντος, εφόσον παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η διάταξη των μικροδικτύων με σύζευξη στην πλευρά AC περιέχει τα εξής στοιχεία:

- Απλό αντιστροφέα (inverter) δικτύου χωρίς μπαταρίες που μετατρέπει το DC ρεύμα που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές σε AC.
- Έναν αντιστροφέα μπαταριών που διαμορφώνει το AC δίκτυο και αποτελεί κεντρικό μέρος του συστήματος. Ο εν λόγω αντιστροφέας διαχειρίζεται την φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών.
- Η ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές κατευθύνεται προς τις μπαταρίες μέσω δύο διαδοχικών μετατροπών DC / AC (στον αντιστροφέα της πηγής) και AC / DC (στον κεντρικό αντιστροφέα).

Στην Εικόνα 3.2 απεικονίζεται ένα αυτόνομο σύστημα με σύζευξη DC. Συγκεκριμένα, η φωτοβολταϊκή πηγή φορτίζει τη συστοιχία μπαταριών μέσω ρυθμιστή, ο οποίος εκτελεί τη λειτουργία ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Ο αντιστροφέας διαχειρίζεται τις μπαταρίες και ελέγχει τη λειτουργία της εφεδρικής γεννήτριας. Μέσω της μετατροπής DC/AC καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες των φορτίων του συστήματος.



Εικόνα 3.2 Αυτόνομο σύστημα με σύζευξη DC.

Τα βασικά πλεονεκτήματα του μικροδικτύου AC είναι η επεκτασιμότητα και η ευκολία στη διαμόρφωση λόγω της χρήσης τυποποιημένου εξοπλισμού. Κάθε επιμέρους σύστημα (πηγές, φορτία, μπαταρίες) συνδέεται σε ένα δίκτυο AC. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την εφαρμογή καθιερωμένων προτύπων για τη διασύνδεση των διατάξεων σε δίκτυα AC χαμηλής τάσης. Η επέκταση του συστήματος, όταν οι

ενεργειακές ανάγκες αυξηθούν, γίνεται εύκολα, σαν να εγκαθίσταται και να συνδέεται ένα νέο σύστημα στο δίκτυο. Η εκτίμηση των μελλοντικών ενεργειακών αναγκών είναι δύσκολη υπόθεση (ειδικά σε μεγάλα συστήματα) και συχνά οδηγεί σε υπέρ- ή υπό-διαστασιολόγηση. Κάθε πηγή συνδέεται στο δίκτυο AC και με αυτόν τον τρόπο διαμορφώνεται ένας μικρός σταθμός παραγωγής που επεκτείνεται εύκολα ανάλογα με τις ανάγκες.

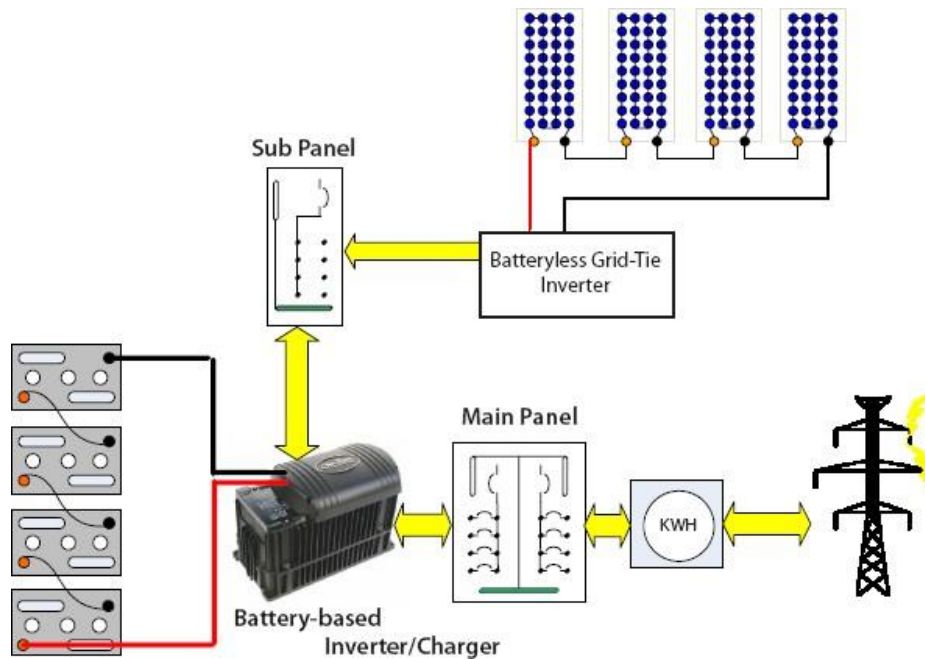
Επιπλέον, τα μικροδίκτυα έχουν τη δυνατότητα διασύνδεσης και λειτουργίας βάσει κοινών παραμέτρων. Έτσι, πολλά μικρά συστήματα μπορούν να συνδυαστούν απλά, με σύνδεση στην AC πλευρά. Το γεγονός αυτό διευκολύνει την διαμόρφωση μεγαλύτερων συστημάτων, για παράδειγμα σε επίπεδο κοινότητας, ενώ παράλληλα ενισχύει την αξιοπιστία εξασφαλίζοντας σε μεγαλύτερο βαθμό την κάλυψη των φορτίων.

Τα μικροδίκτυα AC έχουν τη δυνατότητα της σύνδεσης με το δημόσιο δίκτυο οποιαδήποτε στιγμή. Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, ιδιαίτερα σε περιοχές που το δίκτυο επεκτείνεται γρήγορα. Ακόμα όμως και σε περίπτωση παράλληλης με το δίκτυο λειτουργίας, το μικροδίκτυο θα συνεχίσει να τροφοδοτεί τα φορτία όταν η παροχή από το δημόσιο δίκτυο διακοπεί.

Το μόνο μειονέκτημα των μικροδικτύων AC είναι η λίγο μικρότερη απόδοση σε σύγκριση με τα δίκτυα DC σύζευξης, λόγω των περισσότερων μετατροπών από DC σε AC και αντίστροφα. Αυτό μπορεί να επηρεάσει περισσότερα συστήματα στα οποία η κατανάλωση και η παραγωγή συμβαίνουν σε διαφορετικούς χρόνους, οπότε και μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας αποθηκεύεται στις μπαταρίες.

Τεχνικά, η μεγαλύτερη πρόκληση σε ένα μικροδίκτυο AC είναι ο συντονισμός των επιμέρους συστημάτων και ιδιαίτερα των αντιστροφών μπαταριών, αφού αυτοί συνήθως διαμορφώνουν το δίκτυο AC. Η διαδικασία έχει ως εξής: Ο αντιστροφέας μπαταριών σχηματίζει το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, ρυθμίζοντας την τάση και τη συχνότητα στην πλευρά AC. Τα φορτία και τα συστήματα παραγωγής ενέργειας συνδέονται απευθείας στην πλευρά AC. Τα φορτία και τα συστήματα παραγωγής ενέργειας συνδέονται απευθείας στο δίκτυο αυτό. Εάν ανιχνευθεί πλεόνασμα ενέργειας λόγω λειτουργίας των μονάδων παραγωγής, ο αντιστροφέας μπαταριών λαμβάνει ενέργεια από το δίκτυο και φορτίζει τις μπαταρίες. Σε περίπτωση που οι πηγές δεν καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες του φορτίου, ο κεντρικός αντιστροφέας αντλεί ενέργεια από τις μπαταρίες.

Στην Εικόνα 3.3 απεικονίζεται ένα σύστημα σύζευξης AC με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο. Όπως φαίνεται, το φωτοβολταϊκό σύστημα διαθέτει τυπικό αντιστροφέα δικτύου και αποδίδει την ενέργεια που παράγει στο δίκτυο AC. Οι μπαταρίες συνδέονται στον αντιστροφέα /φορτιστή και το όλο σύστημα συνδέεται στο δίκτυο. Η ενέργεια που παράγεται από την πηγή φορτίζει τις μπαταρίες και το πλεονάζον μέρος διοχετεύεται στο δημόσιο δίκτυο. Στο συγκεκριμένο σύστημα, θα μπορούσε να προστεθεί και ανεμογεννήτρια, η οποία θα συνδεθεί στο μικροδίκτυο μέσω αντιστροφέα DC/AC.



Εικόνα 3.3 Σύστημα σύζευξης AC με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο.

Εάν σε κάποιο σύστημα λειτουργούν περισσότεροι του ενός κεντρικοί αντιστροφείς μπαταριών, αυτοί θα πρέπει να έχουν ακριβώς την ίδια συχνότητα και φάση, μοιράζοντας ισότιμα τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης. Αυτό συνήθως πραγματοποιείται με την επικοινωνία των αντιστροφών σε λειτουργία master/slave. Η υλοποίηση αυτή επιτρέπει την επεκτασιμότητα σε μικρά συστήματα αλλά δεν λειτουργεί καλά σε περίπτωση συνδυασμού πολλών επιμέρους μικροδικτύων αφού απαιτείται σημαντικός επανασχεδιασμός. Μια νέα μέθοδος που ονομάζεται drooping επιτρέπει την multi-master λειτουργία, αφού χρησιμοποιεί ως μέσο επικοινωνίας την τάση και συχνότητα του δικτύου.

Στο μικροδίκτυο AC μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί συμβατική γεννήτρια η οποία λειτουργεί εφεδρικά. Η απευθείας σύνδεση στο δίκτυο AC απαιτεί τη χρήση διατάξεων ελέγχου υψηλού κόστους. Έτσι, η γεννήτρια ελέγχεται από τον αντιστροφέα μπαταριών.

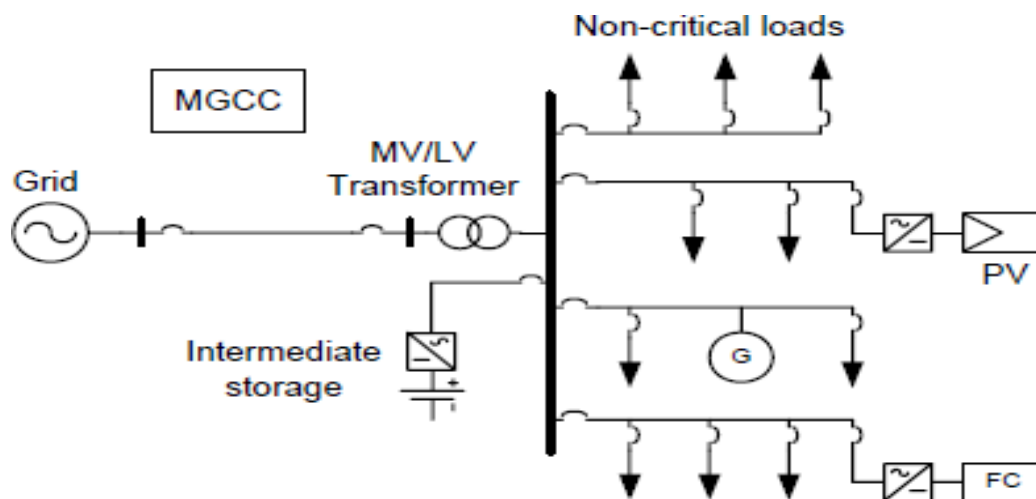
Η βασική λειτουργία των αντιστροφών (ή μετατροπών DC/AC) είναι ότι μετατρέπουν την DC ισχύ που παράγεται από την μία πηγή σε AC, χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά ισχύος. Μπορεί να είναι κατάλληλοι για διασύνδεση στο δημόσιο δίκτυο ή για αυτόνομη λειτουργία, καθώς και για λειτουργία σε συνδυασμό με μέσα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες), πηγές ενέργειας και σύνδεση με το δίκτυο. Διαφοροποιούνται εκτός από την εφαρμογή, στην ονομαστική ισχύ, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και την απόδοση.

3.3 Έλεγχος Μικροδικτύου

Τα συστατικά ενός μικροδικτύου (Εικόνα 3.4) ελέγχονται χρησιμοποιώντας μία αποκεντρωμένη διαδικασία λήψης αποφάσεων, προκειμένου να επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ ζήτησης και προσφοράς που προέρχεται από τις πηγές ενέργειας και το δίκτυο. Ο ιεραρχικός έλεγχος κάνει χρήση ενός κεντρικού ελεγκτή (κεντρικός ελεγκτής μικροδικτύου ή Microgrid Central Controller (MGCC)). Η λειτουργία του κεντρικού ελεγκτή (MGCC) αφορά στην επίβλεψη του συνολικού συστήματος ελέγχου και του συστήματος προστασίας του μικροδικτύου διαμέσου των ελεγκτών μικροπηγής και των ελεγκτών φορτίου.

Κάποιες από τις βασικές λειτουργίες του είναι η διατήρηση της ποιότητας ισχύος και της αξιοπιστίας για το σύνολο του μικροδικτύου, η παροχή των τιμών ισχύος και τάσης των σημείων λειτουργίας (set points) σε κάθε μικροελεγκτή, η διασφάλιση της κάλυψης θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων, της ανταλλαγής ποσοτήτων ισχύος και της ομαλής συνεργασίας μεταξύ του μικροδικτύου και του δικτύου μεταφοράς. Ακόμη, ελαχιστοποιεί τις εκπομπές ρύπων καθώς και τις απώλειες του συστήματος και μεγιστοποιεί την αποδοτικότητα των μικροπηγών. Επίσης, παρέχει προγραμματισμό για οικονομική παραγωγή των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, καθώς και στρατηγικές ελέγχου για νησιδοποίηση και επανασύνδεση του μικροδικτύου. Τέλος, διατηρεί σε συγκεκριμένα επίπεδα τη συχνότητα και την τάση για τα ηλεκτρικά φορτία.

Ο κεντρικός ελεγκτής, συνήθως, σχεδιάζεται για να λειτουργεί σε αυτόματη λειτουργία με πρόβλεψη για χειροκίνητη ανθρώπινη παρέμβαση, εάν κάτι τέτοιο απαιτείται.



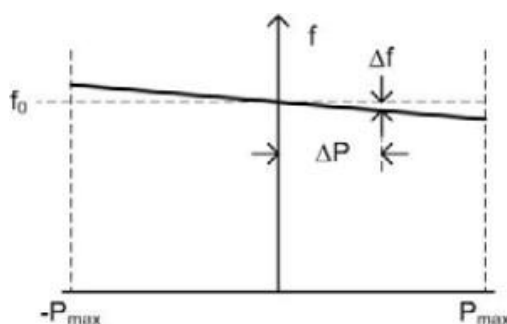
Εικόνα 3.4 Σχηματικό διάγραμμα μικροδικτύου.

Όταν ένα μικροδίκτυο είναι διασυνδεδεμένο, συμπεριφέρεται ως ελεγχόμενο φορτίο ή πηγή. Δεν θα πρέπει ενεργά να ρυθμίζει την τάση του, καθώς συνδέεται στο δίκτυο και αυτό είναι που ρυθμίζει την τάση. Επιπλέον, οι αρμονικές και το συνεχές ρεύμα που διοχετεύει στο δίκτυο θα πρέπει να είναι κάτω από τα απαιτούμενα επίπεδα. Κατά τη διάρκεια αυτού του τόπου λειτουργίας, η κύρια λειτουργία του μικροδικτύου είναι να ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις του φορτίου και των συμβατικών υποχρεώσεων με το δίκτυο.

Το μικροδίκτυο πρέπει να αποσυνδέεται όταν μια ανώμαλη κατάσταση εμφανίζεται στο δίκτυο. Μετατίθεται σε λειτουργία νησιδοποίησης και το μικροδίκτυο έρχεται αντιμέτωπο με τα ακόλουθα θέματα:

3.3.1 Διαχείριση τάσης και συχνότητας

Η τάση και η συχνότητα καθορίζονται από το δίκτυο όταν το μικροδίκτυο είναι διασυνδεδεμένο. Όταν το μικροδίκτυο είναι αυτόνομο, μία ή περισσότερες πρωτογενείς πηγές ενέργειας θα πρέπει να αποτελούν το δίκτυο και να ρυθμίζουν την τάση και τη συχνότητα, διαφορετικά, το μικροδίκτυο θα καταρρεύσει. Τόσο η τάση όσο και η συχνότητα θα πρέπει να ρυθμίζονται μέσα στα αποδεκτά όρια. Εάν η συχνότητα έχει πέσει σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα, κάποια φορτία μπορεί να απορριφθούν για να επιταχύνουν την ανάκαμψή της προς την ονομαστική τιμή (Εικόνα 3.5.)



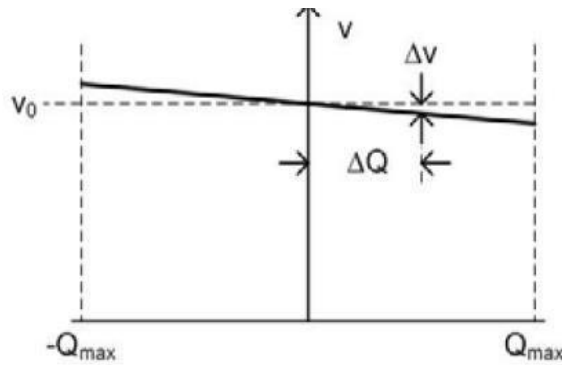
Εικόνα 3.5 Απόρριψη φορτίων (ρύθμιση ενεργού ισχύος) για τον έλεγχο της συχνότητας του μικροδικτύου.

3.3.2 Ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης

Αν το μικροδίκτυο εξάγει ή εισάγει ρεύμα προς το δίκτυο πριν από την αποσύνδεση, τότε δευτερεύουσες ενέργειες ελέγχου θα πρέπει να εφαρμοστούν για την εξισορρόπηση της παραγωγής και της κατανάλωσης στην αυτόνομη λειτουργία. Εάν το συνδεδεμένο φορτίο υπερβαίνει τη διαθέσιμη παραγωγή, θα πρέπει να εφαρμοστούν μέτρα διαχείρισης της ζήτησης. Επίσης, θα πρέπει να υπάρχει επαρκής ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας προκειμένου να εξασφαλίσει την αρχική ισορροπία μετά από μια απότομη αλλαγή στο φορτίο ή στην παραγωγή.

3.3.3 Ποιότητα ισχύος

Το μικροδίκτυο πρέπει να διατηρήσει μία αποδεκτή ποιότητα ισχύος σε αυτόνομη λειτουργία. Θα πρέπει να υπάρχει επαρκής παροχή άεργου ισχύος για τον περιορισμό της βύθισης τάσης. Η συσκευή αποθήκευσης ενέργειας θα πρέπει να είναι ικανή να αντιδρά γρήγορα στις αποκλίσεις της συχνότητας και της τάσης και την έγχυση ή απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ισχύος (Εικόνα 3.6). Τέλος, το μικροδίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει τις αρμονικές που απαιτούνται από τα μη γραμμικά φορτία.



Εικόνα 3.6 Έλεγχος βυθίσεων (ρύθμιση αέργου ισχύος) του μικροδικτύου.

3.3.4 Θέματα μικροπηγών ενέργειας

Μία σημαντική διαφορά μεταξύ των πρωτογενών πηγών ενέργειας στο δίκτυο και των πηγών του μικροδικτύου είναι ότι οι τελευταίες δεν έχουν αδράνεια. Το μικροδίκτυο δεν έχει τις στρεφόμενες εφεδρείες που ενυπάρχουν στο συμβατικό δίκτυο. Οι περισσότερες *microsources* (π.χ. κυψέλες καυσίμου) έχουν αργή απόκριση ή ράμπα χρόνου κατά την εφαρμογή του δευτεροβάθμιου ελέγχου τάσης και συχνότητας. Οι ενδιαμέσες μονάδες αποθήκευσης και οι πηγές του μικροδικτύου με συστοιχίες μπαταριών επομένως, αναμένεται να δώσουν τα οφέλη που θα μπορούσαν να εξαχθούν από τις εφεδρείες. Η διασύνδεση των ηλεκτρονικών ισχύος επέτρεψε σε αυτές τις συσκευές να ανταποκρίνονται γρήγορα σε απότομα σήματα εντολών και αλλαγές στα επίπεδα της ροής ισχύος.

3.3.5 Επικοινωνία μεταξύ των εξαρτημάτων του μικροδικτύου

Η διαθεσιμότητα της επικοινωνιακής υποδομής μεταξύ των εξαρτημάτων του μικροδικτύου είναι μια άλλη πτυχή που λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή της μεθόδου ελέγχου σε αυτόνομο μικροδίκτυο. Το μικροδίκτυο πρέπει να έχει *Plug and play* αρχιτεκτονική, έτσι ώστε οι πηγές να βασιστούν σε τοπικά διαθέσιμες πληροφορίες για τον έλεγχο της παραγόμενης ενέργειας. Εάν απαιτείται η επικοινωνία μεταξύ των εξαρτημάτων (π.χ. αποστολή ονομαστικών τιμών μικροπηγών ή διαπραγμάτευση μεταξύ παραγόντων ελέγχου μέσω του κεντρικού ελεγκτή MGCC), η προθεσμία εντός της επικοινωνίας δικτύου δεν πρέπει να παρουσιάζει προβλήματα. Οι μικροπηγές και οι συσκευές αποθήκευσης θα πρέπει να συνεργαστούν μεταξύ τους για να διατηρηθεί η ισορροπία και η ακεραιότητα του μικροδικτύου.

4 Αυτόνομες ενεργειακές πλατφόρμες

Οι αυτόνομες ενεργειακές πλατφόρμες εκμεταλλεύονται τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Μία τέτοια ενεργειακή πλατφόρμα είναι το πλωτό επιστημονικό εργαστήριο που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία πρόκειται να κατασκευαστεί βόρεια του Ηρακλείου. Μία αυτόνομη ενεργειακή πλατφόρμα μπορεί να συνδυάσει την ηλιακή, την αιολική ή ακόμη και την κυματική ενέργεια με μία συμβατική μονάδα παραγωγής. Βασικό πλεονέκτημα των πλωτών συστημάτων είναι η εκμετάλλευση όγκων νερού, όπως θάλασσες, λίμνες και ποτάμια με μεγάλο πλάτος και μικρή ροή. Η σημερινή τάση της εγκατάστασης υβριδικών συστημάτων σε χερσαία εδάφη, από τη μία πλευρά χρησιμοποιεί μία ή περισσότερες μονάδες ΑΠΕ χωρίς να επιβαρύνει τα περιβαλλοντικά προβλήματα με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, αλλά από την άλλη καταλαμβάνει έδαφος που θα μπορούσε να έχει πολλές άλλες διαφορετικές χρήσεις, όπως για παράδειγμα, τη παραγωγή τροφίμων. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι μια συμβατική εγκατάσταση απαιτεί την ενοικίαση ή την αγορά μιας έκτασης για την εγκατάσταση του υβριδικού συστήματος, καθώς και τα έργα που απαιτούνται για να καταστεί η έκταση αυτή κατάλληλη για την εγκατάσταση. Τέτοια έργα είναι η διάνοιξη δρόμων προς την εγκατάσταση, ο καθαρισμός της έκτασης από άγρια βλάστηση, καθώς και η εξασφάλιση της μη ύπαρξης πράσινου στην έκταση της εγκατάστασης.

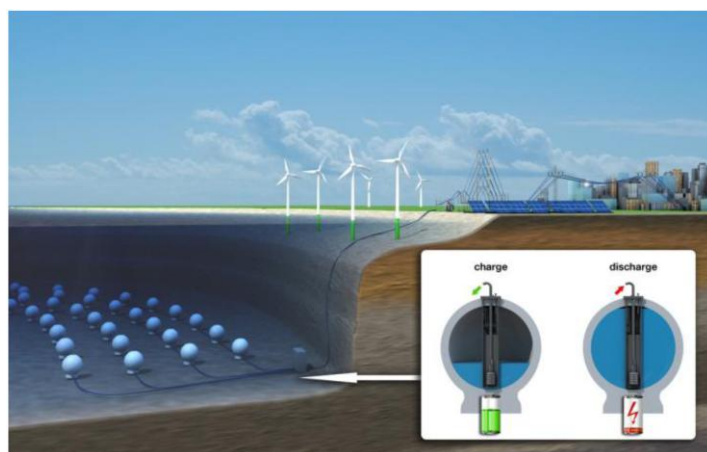
Εκτός όμως από τα πλεονεκτήματα των πλωτών συστημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, οι αυτόνομες ενεργειακές πλατφόρμες παρουσιάζουν κάποιους περιορισμούς. Ένας από αυτούς είναι ο περιορισμένος χώρος που διαθέτει. Έτσι, το υβριδικό σύστημα που θα εγκατασταθεί πρέπει να αποτελείται από συγκεκριμένο μέγεθος φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθώς και περιορισμένο αριθμό ανεμογεννητριών λόγω της περιορισμένου χώρου στην πλατφόρμα, αλλά και του μεγάλου βάρους των μονάδων ΑΠΕ. Για την μοντελοποίηση του πλωτού επιστημονικού εργαστηρίου που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία, ορίστηκε μία ανεμογεννήτρια και συγκεκριμένο μέγεθος φωτοβολταϊκών στοιχείων, ενώ υπολογίστηκε το συνολικό βάρος των μπαταριών και το εμβαδόν που καταλαμβάνουν στην πλωτή πλατφόρμα. Ένας άλλος περιορισμός, είναι η μεταφορά των εργαζομένων στις εγκαταστάσεις της πλατφόρμας, σε περίπτωση που δεν βρίσκεται κοντά σε χερσαίο έδαφος. Ακόμη, το κόστος μιας πλωτής ενεργειακής πλατφόρμας είναι υψηλότερο από το κόστος μιας εγκατάστασης με μονάδες ΑΠΕ σε χερσαίο έδαφος.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά ορισμένες μελέτες για υπεράκτιες πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Συγκεκριμένα, εξετάζουν τον περιορισμό των ορυκτών καυσίμων και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων ή/και ανεμογεννητριών, καθώς και συστημάτων αποθήκευσης της ενέργειας των κυμάτων.

4.1 Βέλτιστος σχεδιασμός και διαχείριση του απομονωμένου υβριδικού ενεργειακού συστήματος στο νησί Kish (νότιο Ιράν) [15]

Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος αναζήτησης βασισμένος στη βαρύτητα «Gravitational Search optimization Algorithm (GSA)» προκειμένου να καθοριστεί το βέλτιστο μέγεθος των υβριδικών ενεργειακών συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς για την αξιοπιστία του ενεργειακού συστήματος. Αρχικά, προσομοιώθηκε ένα απομονωμένο υβριδικό σύστημα (Εικόνα 4.1) με φωτοβολταϊκά πλαίσια, ανεμογεννήτριες και σύστημα αποθήκευσης κυματικής ενέργειας χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα καιρού του νησιού Kish που βρίσκεται στο Ιράν.

Το νησί Kish είναι ένα νησί στον Περσικό Κόλπο στο νότιο Ιράν, που δεν συνδέεται με το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και η ζήτηση στο νησί καλύπτεται από τον σταθμό παραγωγής φυσικού αερίου στο Kish (η μόνη μονάδα παραγωγής ενέργειας που διατίθεται στο νησί Kish), που έχει δυναμικό παραγωγής 275 MW. Γι' αυτό, κυρίως το καλοκαίρι, οι καταναλωτές έρχονται αντιμέτωποι με διακοπές μεγάλης διάρκειας ισχύος. Όμως, η χρήση υβριδικών συστημάτων μπορεί να λύσει το πρόβλημα αυτό. Σύμφωνα με τα μετεωρολογικά δεδομένα το νησί Kish είναι ευνοϊκή τοποθεσία για την εγκατάσταση υβριδικών ενεργειακών συστημάτων στο Ιράν.



Εικόνα 4.1 Η δομή του υβριδικού συστήματος που αποτελείται από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και σύστημα αποθήκευσης κυματικής ενέργειας.

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών, των φωτοβολταϊκών και του συστήματος αποθήκευσης κυματικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών, των φωτοβολταϊκών και του συστήματος αποθήκευσης κυματικής ενέργειας.

Wind Generator	
Technology	Vestas V47
Nominal Power	660 kW
Cut-in Speed	4 m/s
Cut-out Speed	25 m/s
Initial Cost	396000 \$
Operation and Maintenance Cost	19800 \$
Lifetime	25 Year
Photovoltaic Panels	
Technology	LG250s1c
Maximum Power	250 W
Efficiency	15.5%
Open Circuit Voltage (V_{oc})	37.1 V
Short Circuit Current (I_{sc})	8.76 A
Initial Cost	380 \$
Operation Temperature	-40°C ~ +90°C
Lifetime	25 Year
Ocean Renewable Energy Storage	
Total Storage Capacity	0.703 MWh
Efficiency	85%
Installation Depth	50 m
Discharge Rate	0.176 MW/Hour
Charging Rate	0.207 MW/Hour
Initial Cost	300000 \$
Lifetime	30 Year

Η οικονομικότερη και βέλτιστη λύση για το υβριδικό σύστημα αποτελείται από 4 ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά συνολικής χωρητικότητας 2MW και 9 «σφαίρες» για την αποθήκευση της κυματικής ενέργειας.

4.2 Μελέτη για τη βιωσιμότητα πλωτής πλατφόρμας στην Αφρική βασισμένη στην ηλιακή ενέργεια [18]

Η μελέτη αυτή αξιολογεί τις δυνατότητες της ηλιακής ενέργειας για τις υπεράκτιες επιχειρήσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου στην Αφρική, με σκοπό τον περιορισμό των ζητημάτων που συνδέονται με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, εξασφαλίζοντας έτσι τη βιωσιμότητα της βιομηχανίας πετρελαίου στην Αφρική. Αρχικά, υπολογίστηκε το μέγεθος των φωτοβολταϊκών στοιχείων που πρέπει να τοποθετηθούν στην πλατφόρμα, προκειμένου να ικανοποιείται το απαιτούμενο φορτίο. Εκτιμήθηκαν επίσης, οι κατάλληλες περιοχές και η έκταση της ενδεχόμενης εφαρμογής ηλιακής ενέργειας σε αυτήν την εξέδρα δειγματοληψίας. Στη συνέχεια, ακολουθήθηκε κάποια ανάλυση κόστους για να συγκριθεί το κόστος εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών με το κόστος κατανάλωσης πετρελαίου.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής είναι:

- Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις.
- Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αντικαταστήσει εν μέρει τα ορυκτά καύσιμα σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Αυτό οφείλεται κυρίως στον περιορισμένο χώρο στις εξέδρες και στο περιορισμένο βάρος.
- Η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με ηλιακούς συλλέκτες στις εξέδρες θα καθοριστεί κυρίως από το μέγεθος και τη φύση της απαιτούμενης ενέργειας

και τη διαθεσιμότητα του χώρου. Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις μπορεί να αυξηθεί καθώς οι ηλιακοί συλλέκτες καθίστανται αποτελεσματικότεροι.

- Η χρήση ηλιακής ενέργειας στις εξέδρες μπορεί αρχικά να κοστίζει πολύ, αλλά μπορεί να είναι φθηνότερη σε σχέση με το Diesel μακροπρόθεσμα.

Στην Εικόνα 4.2 απεικονίζεται μια υπεράκτια εξέδρα γεώτρησης για επιχειρήσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου, η οποία χρησιμοποιεί ορυκτό καύσιμο.



Εικόνα 4.2 Υπεράκτια εξέδρα γεώτρησης (Mayeda, 2010).

4.3 Μελέτη για την αξιοποίηση της αιολικής και ηλιακής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών πλατφόρμας πετρελαίου και φυσικού αερίου στη Μαλαισία [20]

Η μελέτη αυτή επικεντρώνεται στην αξιοποίηση της αιολικής και ηλιακής ενέργειας με σκοπό την ικανοποίηση της ζήτησης που απαιτείται για τις δραστηριότητες της πλατφόρμας πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η τυπική κατανάλωση ισχύος μιας πλατφόρμας κυμαίνεται από 10 MW έως 50 MW, ενώ η κατανάλωση ισχύος για μικρότερες μη επανδρωμένες κυμαίνεται από 6 MW έως 7 MW. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα - *SHELL Malaysia Oil and Gas Sabah Water Platform* - έχει ονομαστική κατανάλωση ισχύος περίπου 10 MW.

Η μεγαλύτερη ισχύς που μπορεί να παραχθεί από μία ανεμογεννήτρια είναι 492 kW, ενώ από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι 20 kW. Δεδομένου ότι μια μόνο μονάδα φωτοβολταϊκού ή ανεμογεννήτριας είναι ανεπαρκής για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε τέτοιου είδους πλατφόρμες, αυτές οι εφαρμογές μπορούν να εγκαθίστανται σε πολλαπλές μονάδες για να παράγουν το ηλεκτρικό ρεύμα που απαιτείται. Και τα δύο αυτά συστήματα μπορούν επίσης, να συνδυαστούν μεταξύ τους λόγω των διαφορετικών δυνατοτήτων τους και να ικανοποιήσουν το απαιτούμενο φορτίο της πλατφόρμας, ανάλογα βέβαια με τις καιρικές συνθήκες και κλιματικές αλλαγές.

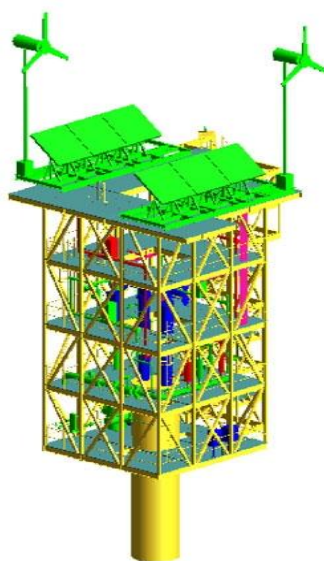
Στις Εικόνες 4.3, 4.4 και 4.5 παρουσιάζονται κάποια σχέδια για αυτόνομες υπεράκτιες πλατφόρμες, στις οποίες βρίσκονται εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες και ηλιακοί συλλέκτες.



Εικόνα 4.3 Πολλαπλές μονάδες ανεμογεννητριών και ηλιακών συλλεκτών, εγκατεστημένες σε υπεράκτια πλατφόρμα.



Εικόνα 4.4 Σχεδιασμός της πλατφόρμας. [8]



Εικόνα 4.5 Ανεμογεννήτριες και ηλιακοί συλλέκτες σε υπεράκτια πλατφόρμα. [8]

5 Περιγραφή λογισμικού HOMER [26] [29] [32]

Το λογισμικό βελτιστοποίησης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας HOMER αναπτύχθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών (NREL) για να βοηθήσει στο σχεδιασμό συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας και να διευκολύνει τη σύγκριση των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός μεγάλου εύρους εφαρμογών. Το HOMER μοντελοποιεί τη φυσική συμπεριφορά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και το κόστος του κύκλου ζωής του, το οποίο είναι το συνολικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του. Το HOMER επιτρέπει στο χρήστη να συγκρίνει πολλές διαφορετικές επιλογές σχεδιασμού στην τεχνική τους και οικονομική τους υπόσταση. Επιπλέον, βοηθά στην κατανόηση των συστημάτων αυτών και ποσοτικοποιεί τις επιδράσεις της αβεβαιότητας ή των αλλαγών στις μεταβλητές εισόδου.

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας παράγει ηλεκτρική ενέργεια, και πιθανόν θερμότητα, για να εξυπηρετήσει ένα φορτίο που βρίσκεται πλησίον αυτού. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει οποιονδήποτε συνδυασμό συστημάτων παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ή αυτόνομο. Το HOMER μπορεί να μοντελοποιήσει οποιαδήποτε από τα παραπάνω συστήματα, που μπορούν να αποτελούνται από φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πλαίσια, ανεμογεννήτριες (Α/Γ), μικρά υδροηλεκτρικά έργα, νηξελογεννήτριες, γεννήτριες βιομάζας, μικρογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες και αποθήκευση υδρογόνου.

Το HOMER εκτελεί τρεις βασικές εργασίες:

- Προσομοίωση
- Βελτιστοποίηση
- Ανάλυση ευαισθησίας

Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, το HOMER μοντελοποιεί τη λειτουργία ενός συστήματος χρησιμοποιώντας όλους τους ενεργειακούς υπολογισμούς που έχουν γίνει για κάθε μια από τις 8760 ώρες ενός έτους. Για κάθε ώρα, το HOMER συγκρίνει την ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας με την αντίστοιχη ωριαία παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Για τα συστήματα που περιλαμβάνουν μπαταρίες ή γεννήτριες (νηξελογεννήτριες, γεννήτριες βιομάζας, κλπ), το HOMER αποφασίζει επίσης για κάθε ώρα του έτους πώς θα ενεργοποιηθούν οι γεννήτριες ή πώς θα φορτιστούν και θα εκφορτιστούν οι μπαταρίες. Το HOMER εκτελεί αυτούς τους υπολογισμούς ενεργειακής ισορροπίας για κάθε συνδυασμό συστημάτων. Έπειτα, καθορίζει εάν ένας συνδυασμός είναι εφικτός, δηλαδή εάν μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και εφόσον μπορεί, τότε υπολογίζει το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος αυτού καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του.

Μετά τη διαδικασία προσομοίωσης όλων των πιθανών συνδυασμών των συστημάτων ενέργειας, ακολουθεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης κατά την οποία το HOMER επιδεικνύει έναν κατάλογο συνδυασμών που ταξινομούνται σύμφωνα με το καθαρό παρόν κόστος, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνει σύγκριση των επιλογών που έχουν γίνει προκειμένου να υιοθετηθεί το κατάλληλο σύστημα ενέργειας. Πρέπει να αναφερθεί ότι η ταξινόμηση των συστημάτων ενέργειας είναι

πλήρης, δηλαδή έχουν εξεταστεί και αποτυπωθεί όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί εφικτών συστημάτων.

Η διαδικασία της *ανάλυσης ευαισθησίας* λαμβάνει χώρα όταν οριστούν μεταβλητές ευαισθησίας ως δεδομένα εισόδου, οπότε το HOMER επαναλαμβάνει τη διαδικασία βελτιστοποίησης για κάθε μεταβλητή ευαισθησίας που εισάγεται. Για παράδειγμα, εάν καθοριστεί η ταχύτητα αέρα ως μεταβλητή ευαισθησίας, το HOMER θα προσομοιώσει όλους τους συνδυασμούς των συστημάτων για το εύρος των τιμών ταχύτητας αέρα που καθορίστηκαν από το χρήστη.

Ένα συστατικό είναι ένας μηχανισμός που είναι τμήμα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν προστεθεί ένα συστατικό, το οποίο απαιτεί πληροφορίες σχετικές με τους πόρους του, προστίθενται στην κατηγορία των πόρων.

Το λογισμικό HOMER διαμορφώνει τους εξής τύπους συστατικών και συνδυασμούς τους:

- Ανεμογεννήτριες
- Υδροηλεκτρικά
- Φωτοβολταϊκά
- Μετατροπείς
- Μονάδα ηλεκτρόλυσης
- Μπαταρία
- Δεξαμενή υδρογόνου
- Υβριδικό ηλεκτρικό όχημα
- Γεννήτρια

5.1 Μοντελοποίηση του αυτόνομου πλωτού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη Σούδα


Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά τα συστατικά του συστήματος της ήδη υπάρχουσας αυτόνομης πλατφόρμας που βρίσκεται εγκατεστημένη στον κόλπο της Σούδας. Η δημιουργία αυτής της ενεργειακής πλατφόρμας, στην οποία έχει γίνει η εγκατάσταση τεσσάρων φωτοβολταϊκών πλαισίων, μιας ανεμογεννήτριας, ενός αντιστροφέα και τεσσάρων συσσωρευτών για αποθήκευση της ενέργειας, εξυπηρετεί την κάλυψη του φορτίου ζήτησης που απαιτείται για συγκεκριμένες λειτουργίες. Πιο συγκεκριμένα, η πλατφόρμα αυτή δημιουργήθηκε με σκοπό να καλύψει τις ενεργειακές απαιτήσεις μιας μονάδας ιχθυοκαλλιέργειας με σύγχρονο εξοπλισμό.

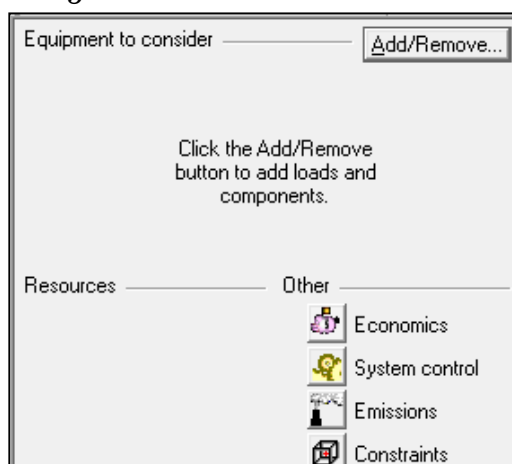
Το ήδη υπάρχον μικροδίκτυο της Σούδας προσομοιώθηκε στο λογισμικό HOMER με σκοπό την αξιολόγηση των λειτουργικών και οικονομικών χαρακτηριστικών του, όπως την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το ηλεκτρικό φορτίο που εξυπηρετείται σε ένα έτος, το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας αν υπάρχει, τη συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το έλλειμμα παραγωγικής ικανότητας, το φορτίο που δεν εξυπηρετείται κτλ. Το λογισμικό HOMER εκτελεί την προσομοίωση και προσπαθεί να βελτιστοποιήσει το σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του συστήματος και ελαχιστοποιώντας το καθαρό τρέχον κόστος του συστήματος. Σ' αυτό το στάδιο το σύστημα προσομοιώθηκε στην υπάρχουσα κατάσταση και αξιολογήθηκε από τεχνοοικονομική άποψη. Μελλοντικός στόχος είναι η βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος και της οικονομικής βιωσιμότητάς του.

Το αυτόνομο σύστημα της Σούδας αποτελείται από:

- Τέσσερα φωτοβολταϊκά συνολικής ισχύος 320W (4*80W PV modules της Shell)
- Μια ανεμογεννήτρια 400W (Newmeil X-400)
- Έναν αντιστροφέα 2 kW
- Τέσσερις συσσωρευτές 150 Ah έκαστος (WINNER PROTEUS)

5.1.1 Δημιουργία νέου αρχείου HOMER και επεξεργασία του Schematic

Η δημιουργία ενός νέου αρχείου HOMER γίνεται επιλέγοντας *File -> New* ή το εικονίδιο . Στη συνέχεια, εμφανίζεται ένα κενό Schematic στο κύριο παράθυρο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1 Κενό Schematic για την προσθήκη παραμέτρων.

Το HOMER συγκρίνει πολλαπλές επιλογές τεχνολογίας για το σχεδιασμό του συστήματος. Το Schematic αντιπροσωπεύει όλες τις επιλογές τεχνολογίας που θέλει ο χρήστης να εξετάσει το HOMER.

Κάνοντας κλικ στο *Add / Remove* ο χρήστης επιλέγει τα στοιχεία, από τα οποία θα δομείται το σύστημα που θα μοντελοποιηθεί. Εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο που περιλαμβάνει τρεις βασικές κατηγορίες εξαρτημάτων:

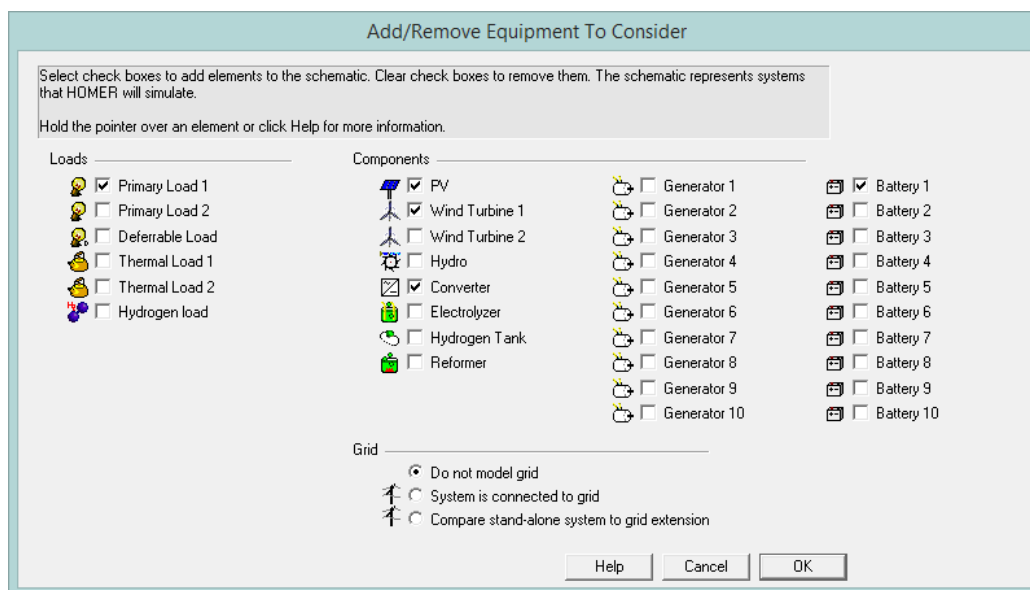
- **Loads (Φορτία):** Είναι οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, οι οποίες πρέπει να ικανοποιηθούν από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Το HOMER μπορεί να μοντελοποιήσει ηλεκτρικά φορτία, θερμικά φορτία και φορτία υδρογόνου. Τα ηλεκτρικά φορτία είτε χρειάζεται να ικανοποιηθούν σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή (primary loads), είτε μπορούν να ικανοποιηθούν οποιαδήποτε στιγμή μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα (deferrable loads), π.χ. αντλίες νερού.
- **Grid (Δίκτυο):** Υπάρχουν τρεις επιλογές για τη μοντελοποίηση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.
1^η επιλογή: Εάν ο χρήστης επιθυμεί να μοντελοποιήσει ένα σύστημα εκτός δικτύου για το οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση επέκτασης του υπάρχοντος δικτύου και σύνδεσης του συστήματος με αυτό, επιλέγει το *Do not model grid*.

2^η επιλογή: Εάν ο χρήστης επιθυμεί να μοντελοποιήσει ένα σύστημα διασυνδεδεμένο με το δίκτυο, επιλέγει το System is connected to grid.

3^η επιλογή: Εάν ο χρήστης επιθυμεί να μοντελοποιήσει ένα σύστημα εκτός δικτύου, αλλά και να συγκρίνει οικονομικά αυτή την επιλογή σε σχέση με την επέκταση του δικτύου και σύνδεση του συστήματος σε αυτό, επιλέγει το Compare stand-alone system to grid extension.

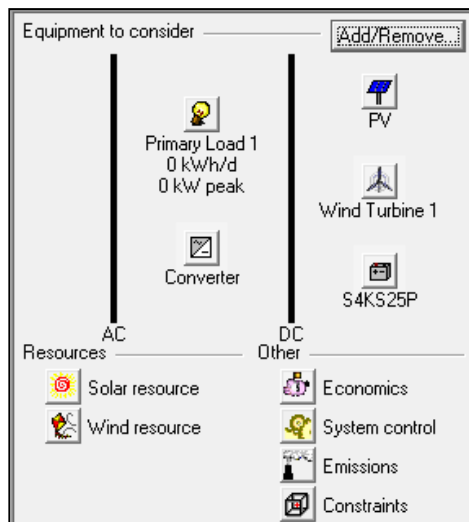
- **Components (Συστατικά):** Ένα συστατικό (component) είναι ένας μηχανισμός που αποτελεί τμήμα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν προστεθεί ένα συστατικό - το οποίο απαιτεί πληροφορίες σχετικές με τους πόρους του - προστίθεται ένα επιπλέον εικονίδιο στην κατηγορία των πόρων (Resources). Έτσι, εάν π.χ. προστεθεί μια ανεμογεννήτρια στο σύστημα, εμφανίζεται στην κατηγορία των πόρων ένα εικονίδιο, με τίτλο *Wind resource*, στο οποίο χρειάζεται να εισαχθούν δεδομένα ταχύτητας ανέμου.

Στην Εικόνα 5.2 φαίνονται τα στοιχεία που επιλέχθηκαν για την μοντελοποίηση της αυτόνομης πλατφόρμας στη Σούδα. Στο πεδίο *Loads* επιλέχθηκε *Primary Load 1*, στο πεδίο *Grid* επιλέχθηκε *Do not model grid* γιατί το σύστημα είναι αυτόνομο και στο πεδίο *Components* επιλέχθηκαν τα 4 συστατικά όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2.




Εικόνα 5.2 Επιλογή στοιχείων για την αυτόνομη πλατφόρμα της Σούδας.

Στην ενότητα *Resources* (κάτω από το Schematic της Εικόνας 5.3), εμφανίζονται οι πόροι που θα χρησιμοποιήσει κάθε στοιχείο που επιλέχθηκε. Η αναλυτική παρουσίασή τους θα γίνει σε επόμενη ενότητα.



Εικόνα 5.3 Το Schematic μετά την προσθήκη του εξοπλισμού.

5.1.2 Ανάλυση Φορτίου

Η ρύθμιση των λεπτομερειών του φορτίου γίνεται επιλέγοντας το εικονίδιο *Primary Load 1* . Υπάρχουν δυο τρόποι για να γίνει η εισαγωγή των στοιχείων που απαιτούνται για το φορτίο. Πιο συγκεκριμένα:

- *1^{ος} τρόπος*: Δημιουργία ενός ξεχωριστού αρχείου το οποίο θα περιέχει τη ζητούμενη ισχύ για κάθε ώρα του έτους, δηλαδή 8.760 τιμές. Το αρχείο αυτό εισάγεται στο HOMER και έτσι υπολογίζεται το καθημερινό προφίλ του φορτίου, καθώς δημιουργείται επίσης ένα σχεδιάγραμμα γι' αυτό. Στην Εικόνα 5.4 παρατηρείται ότι το HOMER κάνει και άλλους υπολογισμούς, όπως τον υπολογισμό της μέσης κατανάλωσης ενέργειας κάθε ημέρας, καθώς και της κορυφής (peak) του φορτίου. Επίσης, εκτός από την ανάλυση μιας μέσης ημέρας και την κατανάλωση για κάθε ώρα της ημέρας, το HOMER δημιουργεί και ένα γράφημα με την κατανάλωση ενέργειας για κάθε μήνα του έτους (Εικόνα 5.4). Έτσι, είναι εύκολο να γίνει αντιληπτό πόσο διαφέρει το φορτίο ανάλογα με την εποχή του έτους.
- *2^{ος} τρόπος*: Εισαγωγή ενός τυπικού ωριαίου προφίλ του φορτίου για ένα 24ωρο κάθε μήνα.

Στην περίπτωση της αυτόνομης πλατφόρμας στη Σούδα το φορτίο ρυθμίστηκε με βάση τον δεύτερο τρόπο που αναφέρεται παραπάνω. Αρχικά, επιλέχθηκε ο τύπος του φορτίου (AC) και στη συνέχεια έγινε η καταχώρηση των ωριαίων τιμών του φορτίου για ένα 24ωρο κάθε μήνα. Ακόμη, πραγματοποιήθηκε η ρύθμιση της μεταβολής της κατανάλωσης από ημέρα σε ημέρα και από ώρα σε ώρα με τη βοήθεια του πίνακα στον οποίο απεικονίζονται:

- ο μέσος όρος κατανάλωσης ημερησίως (kWh/d)
- ο μέσος όρος κατανάλωσης ανά ώρα (kW)
- το μέγιστο που έχει καταγραφεί κατά τη διάρκεια του χρόνου (kW)
- ο συντελεστής φορτίου

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το HOMER παρέχει τη δυνατότητα καταχώρησης των ωριαίων τιμών του φορτίου ανάλογα με τον τύπο της ημέρας, δηλαδή αν είναι καθημερινή ή σαββατοκύριακο. Στην περίπτωση της συγκεκριμένης πλατφόρμας οι τιμές που συμπληρώθηκαν στον πίνακα του HOMER είναι ίδιες για κάθε μήνα και τύπο ημέρας. Το τελικό φορτίο για κάθε μήνα καθορίστηκε επιλέγοντας κατάλληλες τιμές για τη μεταβολή της κατανάλωσης από ημέρα σε ημέρα και από ώρα σε ώρα.

Οι απαιτήσεις του φορτίου για την πλατφόρμα της Σούδας είναι οι ακόλουθες:

1. 40 ταϊστρες δόνησης 10W, οι οποίες δουλεύουν 16 ώρες την ημέρα (από 06:00-22:00) περιοδικά για λίγα δευτερόλεπτα ανά περιόδους 10-30 λεπτών. Η λειτουργία τους είναι *ετεροχρονισμένη* – δηλ. καμιά ταϊστρα δεν δουλεύει ταυτόχρονα με την άλλη. Η κάθε ταϊστρα λειτουργεί για 0,24 h/day. Ως αποτέλεσμα, η συνολική ημερήσια κατανάλωση ενέργειας είναι:
 $40 \times 10W \times 0,24 \text{ h/day} = 96 \text{ Wh/day}$
2. Λοιπές καταναλώσεις από τις ακόλουθες συσκευές, οι οποίες δουλεύουν περιοδικά κατά τη διάρκεια της ημέρας και περιλαμβάνουν:
 - Fish eye sonar (4,8 W)
 - Sonar's H/Y (max 90 W)
 - Ασύρματη Δικτυακή σύνδεση (Max 50W)
 - Φορητός H/Y (Max 90 W)
 - Υποβρύχια κάμερα (50W)
 - ROV και οθόνες (50W)

Η μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας των παραπάνω συσκευών εκτιμάται στις 1.430 Wh/day. Οι συσκευές αυτές λειτουργούν ετεροχρονισμένα όσο είναι εφικτό, λόγω της αυτόνομης λειτουργίας του συστήματος.

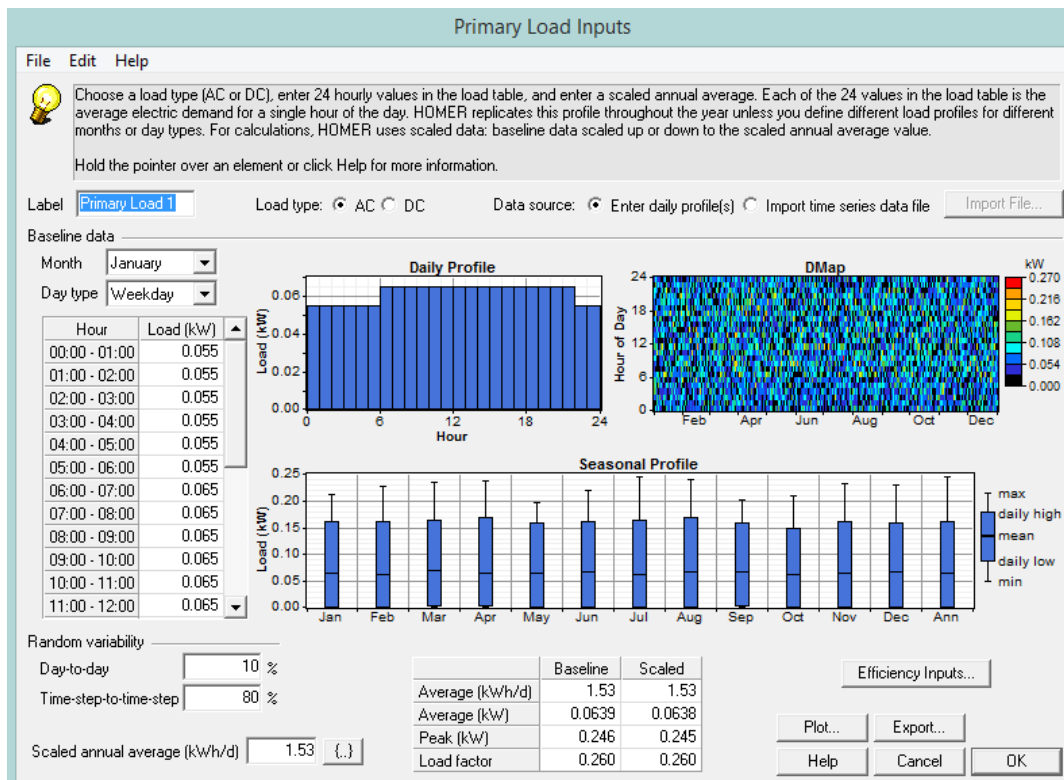
Σε ωριαία βάση, το μέσο ωριαίο φορτίο (σε kW) διαμορφώθηκε όπως φαίνεται στον ακόλουθο Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Μέσο ωριαίο φορτίο πλατφόρμας Σούδας.

Ώρα	Φορτίο (kW)	Ώρα	Φορτίο (kW)
00:00 - 01:00	0,055	12:00 - 13:00	0,065
01:00 - 02:00	0,055	13:00 - 14:00	0,065
02:00 - 03:00	0,055	14:00 - 15:00	0,065
03:00 - 04:00	0,055	15:00 - 16:00	0,065
04:00 - 05:00	0,055	16:00 - 17:00	0,065
05:00 - 06:00	0,055	17:00 - 18:00	0,065
06:00 - 07:00	0,065	18:00 - 19:00	0,065
07:00 - 08:00	0,065	19:00 - 20:00	0,065
08:00 - 09:00	0,065	20:00 - 21:00	0,065
09:00 - 10:00	0,065	21:00 - 22:00	0,065
10:00 - 11:00	0,065	22:00 - 23:00	0,055
11:00 - 12:00	0,065	23:00 - 00:00	0,055

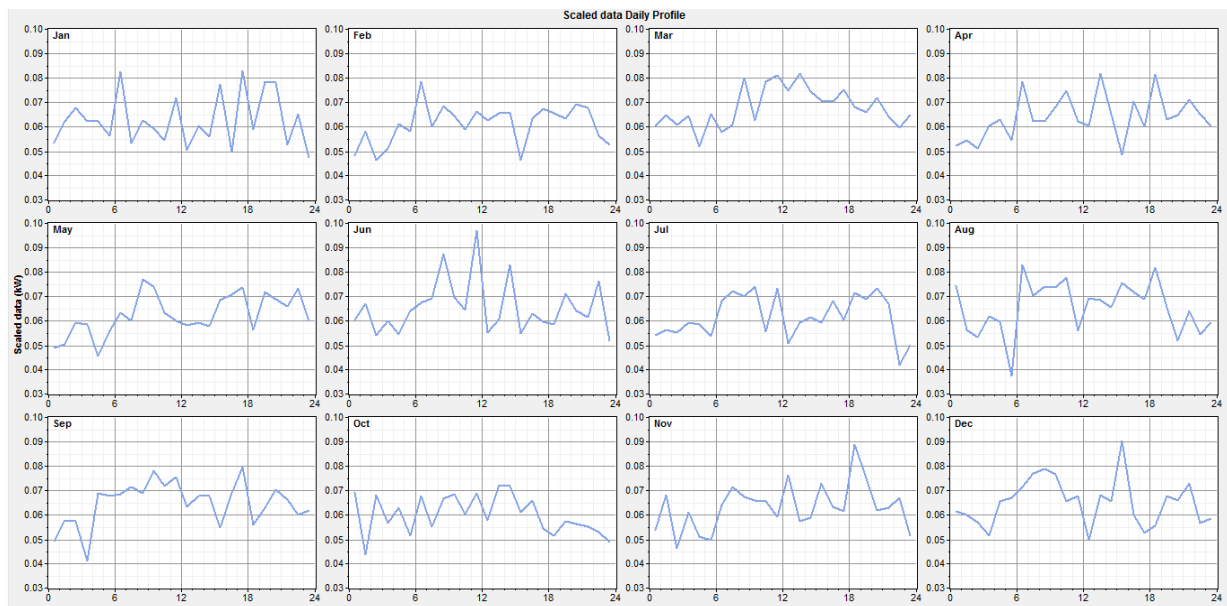
Η ημερήσια μεταβλητότητα του φορτίου (*Day-to-day*) έχει θεωρηθεί ίση με 10% και η μεταβλητότητα ανά χρονικό βήμα (*Time-step-to-time-step*) (1 ώρα) ίση με 80%. Ως αποτέλεσμα, η μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας είναι 1,53 kWh/day και το ετήσιο φορτίο αιχμής (peak) 245 W.

Με την ολοκλήρωση της εισαγωγής δεδομένων, εμφανίζεται στην ίδια οθόνη με εκείνη της εισαγωγής αποτελεσμάτων, ένα τυπικό ημερήσιο προφίλ (daily profile) και ένα DMap (Data Map), στον οποίο απεικονίζεται η μεταβολή της ζήτησης ανά εποχή και ανά τύπο ώρας.




Εικόνα 5.4 Παράθυρο δεδομένων εισόδου φορτίου.

Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζονται δώδεκα διαφορετικά προφίλ φορτίου ανά ώρα για κάθε μήνα του έτους.



Εικόνα 5.5 Τυπικό προφίλ ανά ώρα για κάθε μήνα.

5.1.3 Φωτοβολταϊκά

Η εισαγωγή των δεδομένων για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια γίνεται επιλέγοντας το εικονίδιο . Τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών που πρέπει να αρχικοποιηθούν φαίνονται στην Εικόνα 5.6. Αρχικά, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να συμπληρώσει την συνολική ισχύ σε (kW) και τη διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών. Η συνήθης διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών είναι 20 χρόνια, όμως το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης ευαισθησίας σε αυτές τις τιμές. Ακόμη, ο χρήστης μπορεί να ορίσει το αρχικό κεφάλαιο (*Capital Cost*), το κόστος αντικατάστασης (*Replacement*) και το κόστος συντήρησης (*O&M*) των φωτοβολταϊκών. Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από το μέγεθος σε kW του συγκεκριμένου συστήματος που μελετάται, καθώς και από τις κατασκευάστριες εταιρίες.

Στον πίνακα του κόστους εισάγεται το κόστος της καμπύλης των φωτοβολταϊκών, δηλαδή η μεταβολή του κόστους ανάλογα με το μέγεθος των φωτοβολταϊκών. Με δεδομένο ότι το κόστος των φωτοβολταϊκών είναι ανάλογο προς το μέγεθος, συμπληρώνεται συνήθως μια γραμμή στον πίνακα κόστους. Τα κόστη κεφαλαίου και αντικατάστασης συμπεριλαμβάνουν όλα τα κόστη που σχετίζονται με τα υποσυστήματα του φωτοβολταϊκού, όπως για παράδειγμα τα πλαίσια, την τοποθέτηση, το σύστημα διεύθυνσης, το σύστημα ελέγχου, τα καλώδια και το κόστος εγκατάστασης. Το κόστος κεφαλαίου αναφέρεται στο κόστος αγοράς του συστήματος, ενώ το κόστος αντικατάστασης στο κόστος που έχει η αντικατάσταση του φωτοβολταϊκού στο τέλος του κύκλου ζωής του.

Η αντανάκλαση του εδάφους (*Ground reflectance*) είναι ο λόγος της τυχαίας ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από το έδαφος. Μια τυπική τιμή για τις περιοχές που καλύπτονται από γκαζόν είναι 20%, ενώ για χιονισμένες περιοχές η αντανάκλαση του εδάφους είναι 70%. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τυχαίας ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά που τοποθετούνται υπό κλίση, αλλά η συγκεκριμένη τιμή έχει μικρή επίδραση.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει τον παράγοντα μείωσης (*Derating factor*), ο οποίος εφαρμόζεται στην έξοδο του φωτοβολταϊκού για να την μειώσει και να την φέρει στα επίπεδα που θα είναι όταν λειτουργεί σε πραγματικές συνθήκες. Στη συνέχεια υπάρχουν δύο παράγοντες που σχετίζονται με το πώς θα τοποθετηθεί το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ο πρώτος είναι η κλίση (*Slope*), η οποία είναι η γωνία που έχουν τα φωτοβολταϊκά σε σχέση με τον ορίζοντα και ο δεύτερος είναι το αζιμούθιο (*Azimuth*) που ορίζει την κατεύθυνση προς την οποία είναι στραμμένα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6, υπάρχουν κάποια χαρακτηριστικά που μπορεί να εισάγει ο χρήστης, τα οποία αναφέρονται ως “προχωρημένα” (*Advanced*). Ένα από αυτά είναι η ύπαρξη και το είδος tracking system, δηλαδή ενός συστήματος στρέψης των φωτοβολταϊκών ανάλογα με το που βρίσκεται ο ήλιος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης, το λογισμικό επιτρέπει να ληφθεί υπόψη η μεταβολή της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στο σχεδιασμό. Η θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει τις παραμέτρους λειτουργίας του φωτοβολταϊκού.

Αν τσεκαριστεί η επιλογή *Consider effect of temperature* πρέπει να οριστούν οι ακόλουθες τιμές:

- Ο θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος (*Temperature coefficient of power*), που δείχνει αν η παραγόμενη ισχύς από το πάνελ εξαρτάται από τη

θερμοκρασία. Η τιμή αυτή είναι αρνητική επειδή η παραγόμενη ισχύς μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Η τιμή αυτή λαμβάνεται από τον κατασκευαστή του φωτοβολταϊκού.

- Η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας (*Nominal operating cell temperature*), δηλαδή η θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει το φωτοβολταϊκό, αν εκτεθεί στα $0,8 \text{ kW/m}^2$ ηλιακής ακτινοβολίας, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C , με ταχύτητα ανέμου 1 m/sec . Στην ουσία, δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού με την θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ηλιακή ακτινοβολία και δίνεται από τον κατασκευαστή.
- Η απόδοση σε πρότυπες συνθήκες δοκιμών (*Efficiency at standard test conditions*), δηλαδή η απόδοση με την οποία το φωτοβολταϊκό μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια στο μέγιστο σημείο ισχύος κάτω από πρότυπες συνθήκες δοκιμών. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται από το HOMER για να υπολογίσει την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού.

PV Inputs

File Edit Help

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the PV (photovoltaic) system, including modules, mounting hardware, and installation. As it searches for the optimal system, HOMER considers each PV array capacity in the Sizes to Consider table.

Note that by default, HOMER sets the slope value equal to the latitude from the Solar Resource Inputs window.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
0.080	90	90	0

Costs

Properties

Output current: ☐ AC ☒ DC

Lifetime (years): {..}

Derating factor (%): {..}

Slope (degrees): {..}

Azimuth (degrees W of S): {..}

Ground reflectance (%): {..}

Advanced

Tracking system:

☒ Consider effect of temperature

Temperature coeff. of power (%/°C): {..}

Nominal operating cell temp. (°C): {..}

Efficiency at std. test conditions (%): {..}

Cost Curve

Size (kW)

Cost (\$)

Capital Replacement

Help Cancel OK

Εικόνα 5.6 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τα φωτοβολταϊκά.

Τα φωτοβολταϊκά που βρίσκονται εγκατεστημένα στην πλατφόρμα της Σούδας είναι της εταιρείας Shell και η συνολική τους ισχύ είναι 320 W . Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6, μελετήθηκε και η περίπτωση για εγκατάσταση επιπρόσθετων φωτοβολταϊκών πλαισίων, ισχύος 160 W . Έγινε η υπόθεση και αυτής της περίπτωσης λόγω μελλοντικής αναβάθμισης της πλατφόρμας.

Η εισαγωγή ορισμένων τιμών των φωτοβολταϊκών στο HOMER έγινε με βάση το φυλλάδιο του κατασκευαστή. Τα χαρακτηριστικά τους απεικονίζονται στην Εικόνα 5.7.

Data at Standard Test Conditions (STC)		
STC: irradiance level 1000W/m ² , spectrum AM 1.5 and cell temperature 25°C		
Rated power	P _r	80W
Peak power	P _{mpp}	80W
Peak power voltage	V _{mpp}	8.75*/17.5V
Peak power current	I _{mpp}	9.17*/4.58A
Open circuit voltage	V _{oc}	10.9*/21.8V
Short circuit current	I _{sc}	9.7*/4.85A
Series fuse rating		15A
Minimum peak power	P _{mpp min}	75W
The abbreviation 'mpp' stands for Maximum Power Point.		


Typical data at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) conditions		
NOCT: 800W/m ² irradiance level, AM 1.5 spectrum, wind velocity 1m/s, T _{amb} 20°C		
Temperature	T _{NOCT}	46°C
Mpp power	P _{mpp}	58W
Mpp voltage	V _{mpp}	16V
Open circuit voltage	V _{oc}	20V
Short circuit current	I _{sc}	3.95A
* The Shell SQ80 may be reconfigured in the field for 6V operation		

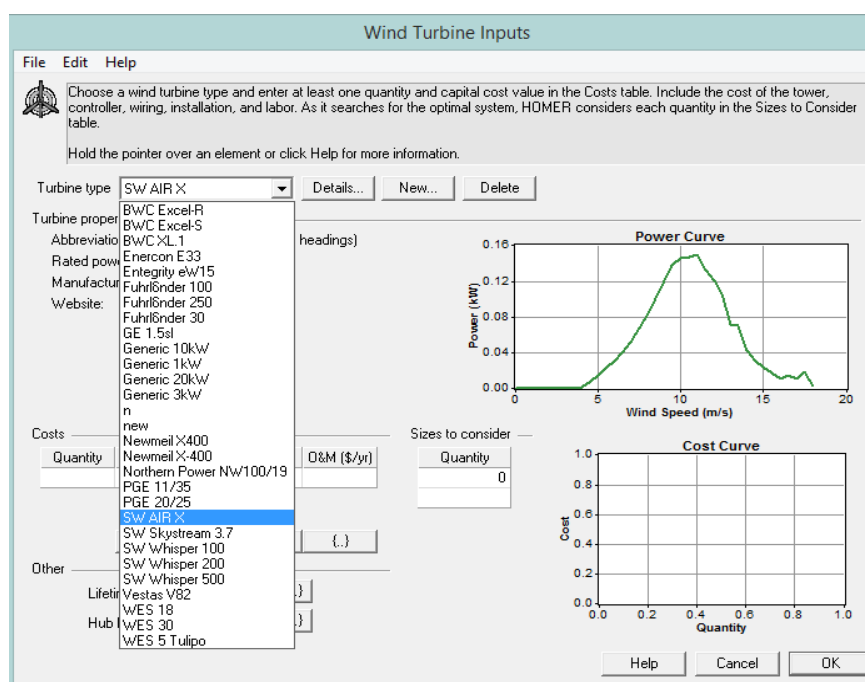
Outside dimensions (in)	47.2 x 20.8
Thickness (inc. junction box) (in)	2.2
Thickness (exc. junction box) (in)	1.3
Weight (lbs)	16.7

Typical data at low irradiance	
The relative reduction of module efficiency at an irradiance of 200W/m ² in relation to 1000W/m ² both at 25°C cell temperature and AM 1.5 spectrum is 8%.	
Temperature coefficients	
α P _{mpp}	-0.52%/°C
α V _{mpp}	-84mV/°C
α I _{sc}	1.4mA/°C
α V _{oc}	-81mV/°C
Maximum system voltage: 600 Vdc (UL) and 715 Vdc (TUV Safety Class II)	

Εικόνα 5.7 Τα χαρακτηριστικά των ήδη εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών της εταιρείας Shell στην πλατφόρμα της Σούδας. [16]

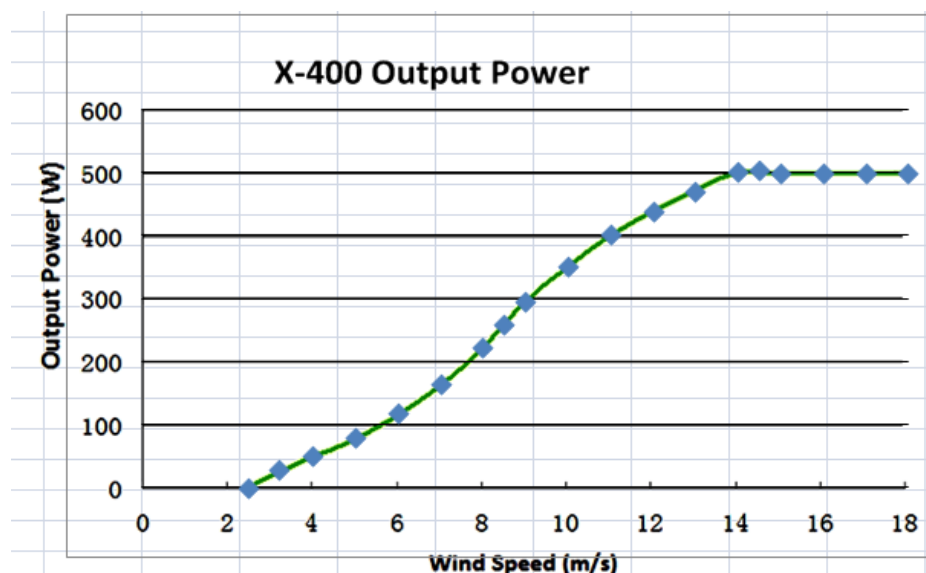
5.1.4 Ανεμογεννήτρια

Επιλέγοντας το εικονίδιο που συμβολίζει την ανεμογεννήτρια στο λογισμικό HOMER , ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει τις παραμέτρους όπως επιθυμεί. Αρχικά, πρέπει να γίνει η επιλογή του μοντέλου της ανεμογεννήτριας. Το HOMER παρέχει μια ποικιλία από μοντέλα ανεμογεννητριών και κάθε μια συνοδεύεται από μια χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος, που συνδέει την ισχύ με την ταχύτητα του ανέμου. Κάθε ανεμογεννήτρια που προτείνει το HOMER έχει συγκεκριμένη ισχύ, η οποία δεν μπορεί να τροποποιηθεί. Δίνεται επίσης η δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει το μοντέλο της ανεμογεννήτριας που θέλει επιλέγοντας το εικονίδιο *New...* που φαίνεται στην Εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8 Προτεινόμενα μοντέλα ανεμογεννητριών στο HOMER.

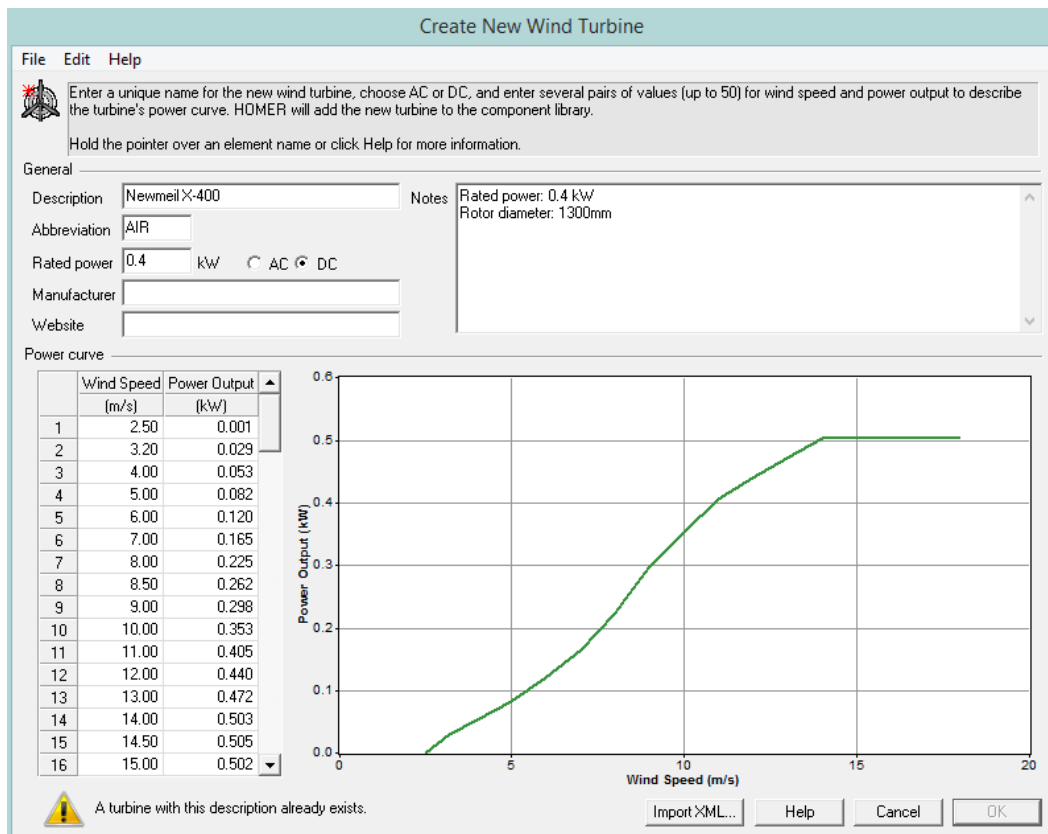
Το μοντέλο ανεμογεννήτριας που επιλέχθηκε να εγκατασταθεί στην πλατφόρμα της Σούδας είναι το X-400 της εταιρείας Newmeil, το οποίο δεν υπάρχει ως προτεινόμενο στο λογισμικό HOMER. Η μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος από το φυλλάδιο του κατασκευαστή, η οποία εισήχθη στο HOMER προσεγγίζοντας την καμπύλη της Εικόνας 5.9 με τη χρήση πολλαπλών σημείων, όπως διακρίνεται στον Πίνακα 5.2. Η εισαγωγή των τιμών στο HOMER για τη δημιουργία του νέου μοντέλου της ανεμογεννήτριας φαίνεται στην Εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.9 Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας Newmeil X-400. [12]

Πίνακας 5.2 Πίνακας τιμών που δημιουργήθηκε στο Excel.

Wind speed(m/s)	Output Power(kW)
2,5	0,0005
3,2	0,029
4	0,053
5	0,082
6	0,12
7	0,165
8	0,225
8,5	0,262
9	0,298
10	0,353
11	0,405
12	0,44
13	0,472
14	0,503
14,5	0,505
15	0,502
16	0,502
17	0,502
18	0,502



Εικόνα 5.10 Εισαγωγή των τιμών από το αρχείο Excel στο HOMER για τη δημιουργία του νέου μοντέλου της ανεμογεννήτριας.

Στη συνέχεια πρέπει να σημειωθεί το κόστος των ανεμογεννητριών (*Capital*) ανάλογα με τον αριθμό τους (*Quantity*). Επίσης, σε ότι έχει να κάνει με τα οικονομικά, στον πίνακα κόστους συμπληρώνεται το κόστος αντικατάστασης (*Replacement*) και το κόστος για συντήρηση και λειτουργία (*O&M*), το οποίο εκφράζεται σε χρηματικές μονάδες ανά χρόνο. Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να καταχωρήσει τον αριθμό των ανεμογεννητριών, καθώς και πόσες περιπτώσεις θα ληφθούν υπόψη στην προσομοίωση (δηλαδή τον αριθμό των ανεμογεννητριών σε κάθε προσομοίωση που θα τρέξει το HOMER). Τέλος, άλλα δυο χαρακτηριστικά που συμπληρώθηκαν, είναι η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας (*Lifetime*) και η απόσταση από το έδαφος του κέντρου του δρομέα της μηχανής (*Hub height*).

Στην Εικόνα 5.11 φαίνονται οι τιμές που ορίστηκαν στο λογισμικό HOMER για την ανεμογεννήτρια της πλατφόρμας στη Σούδα, καθώς και η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας.

Wind Turbine Inputs

File Edit Help

Choose a wind turbine type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include the cost of the tower, controller, wiring, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Turbine type: **Newmill X-400** Details... New... Delete

Turbine properties

Abbreviation: AIR (used for column headings)
 Rated power: 0.4 kW DC
 Manufacturer:
 Website:

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	500	500	0

Other

Lifetime (yrs) {...}
 Hub height (m) {...}

Sizes to consider

Quantity
1


Power Curve

Cost Curve

Help Cancel OK

Εικόνα 5.11 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για την ανεμογεννήτρια.

5.1.5 Μπαταρίες

Η εισαγωγή των δεδομένων για τις μπαταρίες γίνεται επιλέγοντας το εικονίδιο . Όπως και στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει κάποιο από τα έτοιμα μοντέλα μπαταριών που παρέχονται στο HOMER. Διαφορετικά, μπορεί να μοντελοποιήσει και να προσθέσει στην ήδη υπάρχουσα λίστα των προτεινόμενων μπαταριών μία νέα μπαταρία, πατώντας το κουμπί New... . Για την πλατφόρμα της Σούδας μοντελοποιήθηκε στο HOMER η μπαταρία: *WINNER PROTEUS 150Ah – 12V*.

Battery Details

The properties of this battery appear below. Once a battery is created you cannot edit its properties. To change a battery's properties, create a copy (click New in the Battery Inputs window) and modify the properties of the copy. Hold the pointer over an element name or click Help for more information.

General

Description: PROTEUS-FINAL
 Abbreviation: PROTEUS
 Manufacturer:
 Website:
 Notes:

Nominal capacity: 150 Ah
 Nominal voltage: 12 V
 Round trip efficiency: 80 %
 Min. state of charge: 20 %
 Float life: 10 yrs
 Max. charge rate: 1 A/Ah
 Max. charge current: 45 A
 Lifetime throughput: 729 kWh
 Suggested value: 729 kWh

Capacity curve

Current (A)	Capacity (Ah)
345.25	28.76
260.74	43.46
230.10	57.53
137.66	68.83
89.06	89.06
54.82	109.64
37.41	112.23
25.53	127.65
15.00	150.00
7.72	154.40

Lifetime curve

Depth of Discharge (%)	Cycles to Failure
15	1,795
30	1,465
50	870
80	530
100	408

Calculated parameters

Maximum capacity: 155 Ah
 Capacity ratio, c: 0.220
 Rate constant, k: 4.63 1/hr

Capacity (Ah) vs Discharge Current (A)

Cycles to Failure vs Depth of Discharge (%)

Export XML Help Close

Εικόνα 5.12 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τη μοντελοποίηση της νέας μπαταρίας.

Πέραν από τις βασικές παραμέτρους οι οποίες είναι διαθέσιμες στο βασικό μενού των μπαταριών, αυτή η καρτέλα (Εικόνα 5.12) περιλαμβάνει πληροφορίες για τα παρακάτω:

- *Round Trip Efficiency (%)*: Τη συνολική απόδοση του κύκλου φόρτισης/εκφόρτισης.
- *Min. State of charge (%)*: Το ελάχιστο ποσοστό φόρτισης.
- *Float life (Yrs)*: Ακόμη και αν τα βάθη εκφόρτισης είναι μικρά, δεν πρόκειται να διατηρηθεί η μπαταρία περισσότερα χρόνια από την τιμή που περιγράφεται στη συγκεκριμένη περίπτωση.
- *Max. Charge Rate (A/Ah)*: Αυτή η τιμή δείχνει πόσο μεγάλο μπορεί να είναι το ρεύμα φόρτισης όταν η μπαταρία είναι σε συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης και υπολείπεται για να φορτιστεί. Για παράδειγμα για κ Ah το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να δεχθεί είναι κ*Max Charge Rate. Όσο πιο φορτισμένη είναι η μπαταρία, τόσο πιο δύσκολη είναι η τελική φόρτισή της εξαιτίας αυτής της παραμέτρου. Επίσης, αν μείνει μία μπαταρία στο φορτιστή συνεχίζει να καταναλώνει ισχύ.
- *Max. Charge current (A)*: Το μέγιστο ρεύμα το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη φόρτιση/ εκφόρτιση. Για αυτό το λόγο ο ρυθμιστής φόρτισης ο οποίος θα εφαρμοστεί σε συνδυασμό με την μπαταρία αυτή θα πρέπει να περιορίζει το συγκεκριμένο ρεύμα.
- *Maximum Capacity (Ah)*: Είναι η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας, αν το ρεύμα φόρτισης είναι σημαντικά μικρότερο από το ονομαστικό.

Ο πίνακας *Capacity Curve* περιλαμβάνει στοιχεία για το πως μεταβάλλεται η χωρητικότητα της μπαταρίας ανάλογα με το εφαρμοζόμενο ρεύμα. Αν διαιρεθεί η στήλη Capacity με το ρεύμα Current, προκύπτουν οι ώρες στις οποίες φορτίζεται/εκφορτίζεται η συγκεκριμένη μπαταρία με σταθερό ρεύμα. Αν αυτό μεταβάλλεται με το χρόνο και είναι μεγαλύτερο του ονομαστικού, η τελική χωρητικότητα είναι κάπως περίπλοκο να αποτιμηθεί.

Ο δεύτερος πίνακας, *Lifetime Curve*, μας δίνει τον αριθμό κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης που αντέχει μία μπαταρία ανάλογα με το βάθος εκφόρτισης του κύκλου. Αν λοιπόν εκφορτίσεται μία μπαταρία στη μισή χωρητικότητά της και μετά επαναφορτιστεί, αυτό αποτελεί έναν κύκλο φόρτισης/εκφόρτισης με βάθος εκφόρτισης 50%. Αυτήν την διαδικασία είναι δυνατόν να επαναληφθεί συνολικά 870 φορές πριν η μπαταρία αχρηστευθεί πλήρως και οδηγηθεί για ανακύκλωση.

Παρακάτω (Εικόνα 5.13) παρουσιάζεται η καρτέλα με τα στοιχεία της νέας μπαταρίας που προστέθηκε, καθώς και κάποιες πληροφορίες από το φυλλάδιο του κατασκευαστή στο οποίο βασίστηκε η μοντελοποίηση της νέας μπαταρίας.

Specifications		Characteristics	
Nominal Voltage	12V	Capacity 25°C	150Ah 10HR (1.80V)
Nominal Operating Range	25°C ± 5°C	Int. Resistance (25 °C)	4.2 mΩ
Dimensions		Charging Voltage (25 °C)	
Length	483 mm	Float use	13.6 to 13.8 VDC/unit
Width	170 mm	Cycle Use	14.6 to 14.8 VDC/unit
Total Height	241 mm	Max Charging Current	45A
Weight	45 Kg	Self-Discharge (25°C)	less than 3% per month
Terminals	F25	Max Discharge Current	1500A (5sec)
Float Service Lifetime	10 years	Operating Temperature Range	
Container Material	A.B.S. UL94-HB, UL94-V0 Optional.	Discharge	-20 to +60°C
		Charge	0 to +50°C
		Storage	-20 to +60°C

Εικόνα 5.13 Στοιχεία μπαταρίας WINNER PROTEUS 150Ah-12V. [21]

Ο Πίνακας 5.3 από το φυλλάδιο του κατασκευαστή ήταν χρήσιμος για την εύρεση των τιμών για τον πρώτο πίνακα της Εικόνας 5.12 (*Capacity curve*). Πιο συγκεκριμένα, για να υπολογιστεί η χωρητικότητα (Capacity (Ah)) μετατράπηκαν τα λεπτά σε ώρες και επιλέγοντας τα ρεύματα του Πίνακα 5.3 για $V=1,80$ V, πολλαπλασιάστηκε κάθε ρεύμα (A) με τον αντίστοιχο χρόνο σε ώρες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

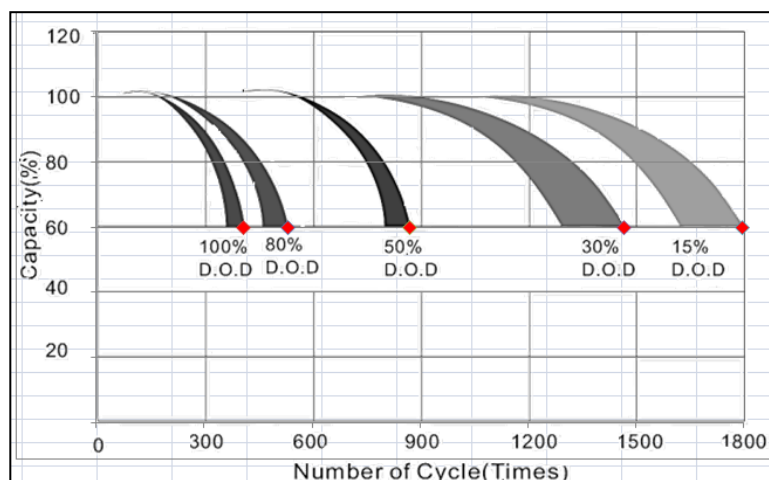
Πίνακας 5.3 Πίνακας σταθερού ρεύματος εκφόρτισης. [21]

Constant Current Discharge Table : Amperes (25°C)											
[A]	MINUTES - AMPERE CONSTANT CURRENT DISCHARGE (25 °C)										
	F.V	5	10	15	30	60	120	180	300	600	1200
	1,80	345,25	260,74	230,10	137,66	89,06	54,82	37,41	25,53	15,00	7,72
	1,75	382,50	285,93	249,62	142,37	90,32	55,27	37,85	25,66	15,14	7,80
	1,70	425,97	309,86	262,17	146,40	91,44	56,00	38,19	25,87	15,29	7,95
	1,65	438,99	321,20	266,35	148,67	92,32	56,60	38,53	26,04	15,45	8,10
	1,60	452,05	337,57	271,93	150,60	93,56	57,76	39,26	26,28	15,60	8,26

Πίνακας 5.4 Υπολογισμός της χωρητικότητας(Capacity).

Για $V=1,80$ V	I (A)	Minutes (min)	Hours (h)	Capacity (Ah)
	345,25	5	0,083	28,76
	260,74	10	0,1667	43,46
	230,10	15	0,25	57,53
	137,66	30	0,5	68,83
	89,06	60	1	89,06
	54,82	120	2	109,64
	37,41	180	3	112,23
	25,53	300	5	127,65
	15,00	600	10	150,00
	7,72	1200	20	154,40

Στη συνέχεια, ο δεύτερος πίνακας της Εικόνας 5.12 (*Lifetime Curve*) δημιουργήθηκε με βάση το σχήμα της Εικόνας 5.14, το οποίο υπήρχε στο φυλλάδιο του κατασκευαστή. Με σκοπό να γίνει η αντιστοίχιση των τιμών στον άξονα x με ακρίβεια έγινε η εισαγωγή του διαγράμματος στο excel και δημιουργήθηκε ο Πίνακας 5.5 (ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με την μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας).



Εικόνα 5.14 Χαρακτηριστικά ζωής της μπαταρίας από κυκλική χρήση. [21]

Πίνακας 5.5 Πίνακας τιμών που δημιουργήθηκε στο Excel.

Depth Of Discharge (%)	Number Of Cycles (Times)
100	408
80	530
50	870
30	1.465
15	1.795

Αφού μοντελοποιήθηκε η νέα μπαταρία έγινε η εισαγωγή του κόστους των μπαταριών (*Capital*), του κόστους αντικατάστασης τους (*Replacement*), καθώς και του κόστους συντήρησης και λειτουργίας τους (*O&M*). Τέλος, ορίστηκε ο αριθμός των μπαταριών που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε προσομοίωση που θα εκτελέσει το HOMER. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να ενωθούν δυο ή περισσότερες μπαταρίες εν σειρά και να δημιουργηθεί μια αλυσίδα προκειμένου να αυξηθεί η τάση που θα δίνει η συστοιχία των μπαταριών. Στη συνέχεια, για να δημιουργηθεί η συστοιχία, συνδέονται οι αλυσίδες παράλληλα. Όλα τα παραπάνω στοιχεία εισάγονται στο παράθυρο που απεικονίζεται στην Εικόνα 5.15.

Battery Inputs

File Edit Help

Choose a battery type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the battery bank, such as mounting hardware, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Battery type: **PROTEUS-FINAL** Details... New... Delete

Battery properties

Manufacturer: _____ Nominal voltage: 12 V
 Website: _____ Nominal capacity: 150 Ah (1.8 kWh)
 Lifetime throughput: 729 kWh

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	400	400	0.00
{.}	{.}	{.}	{.}

Sizes to consider

Batteries
4

Advanced


Batteries per string: 1 (12 V bus)
☐ Minimum battery life (yr): 4 {.}

Cost Curve

Help Cancel OK

Εικόνα 5.15 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τις μπαταρίες.

5.1.6 Αντιστροφέας

Ένα ακόμη απαραίτητο στοιχείο για να είναι ολοκληρωμένο και λειτουργικό το σύστημα της πλατφόρμας στη Σούδα, είναι ο μετατροπέας (converter). Η παρουσία του είναι αναγκαία για να μπορέσει να τροφοδοτηθεί το φορτίο από τις πηγές που έχουν έξοδο συνεχές ρεύμα. Η ρύθμιση των παραμέτρων του γίνεται επιλέγοντας το εικονίδιο . Οι τιμές που πρέπει να οριστούν φαίνονται στην Εικόνα 5.16.

Converter Inputs

File Edit Help

A converter is required for systems in which DC components serve an AC load or vice-versa. A converter can be an inverter (DC to AC), rectifier (AC to DC), or both.

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the converter, such as hardware and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each converter capacity in the Sizes to Consider table. Note that all references to converter size or capacity refer to inverter capacity.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Costs

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1.000	220	220	0
{.}	{.}	{.}	{.}

Sizes to consider

Size (kW)
2.000

Cost Curve

Inverter inputs

Lifetime (years): 20 {.
 Efficiency (%): 95 {.
☒ Inverter can operate simultaneously with an AC generator

Rectifier inputs

Capacity relative to inverter (%): 100 {.
 Efficiency (%): 90 {.

Help Cancel OK

Εικόνα 5.16 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τον αντιστροφέα.

Αρχικά, όπως και στα προηγούμενα στοιχεία του συστήματος, έγινε η εισαγωγή του κόστους του μετατροπέα (*Capital*) και πώς αυτό σχετίζεται με την ισχύ του (*Size*). Ακόμη, ορίστηκε το κόστος αντικατάστασης (*Replacement*) και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας (*O&M*). Στη συνέχεια πρέπει, και εδώ, να οριστούν τα μεγέθη των μετατροπέων που θα χρησιμοποιήσει το HOMER στις προσομοιώσεις.

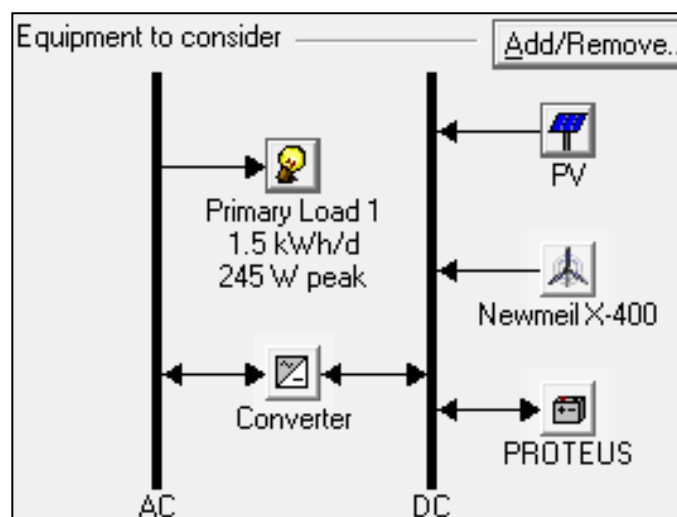
Στον πίνακα κόστους εισάγεται το κόστος της καμπύλης του μετατροπέα, δηλαδή η μεταβολή του κόστους ανάλογα με το μέγεθος του μετατροπέα. Το κόστος κεφαλαίου (*Capital*) είναι η αρχική τιμή αγοράς του μετατροπέα, το κόστος αντικατάστασης (*Replacement*) είναι το κόστος για την αντικατάσταση του μετατροπέα στο τέλος της διάρκειας ζωής του και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας (*O&M*) είναι το ετήσιο κόστος για τη συντήρησή του.

Υπάρχουν δυο ξεχωριστές κατηγορίες παραμέτρων ανάλογα με το αν ο μετατροπέας λειτουργεί ως αντιστροφέας (*Inverter*) ή ως ανορθωτής (*Rectifier*). Συγκεκριμένα:

- Για να λειτουργήσει ο μετατροπέας ως αντιστροφέας (*Inverter*), ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο, πρέπει να οριστούν ως μεταβλητές ο χρόνος ζωής σε χρόνια (*Lifetime*) και η απόδοση με την οποία ο μετατροπέας μετατρέπει το συνεχές σε εναλλασσόμενο ρεύμα σε ποσοστό επί τοις % (*Efficiency*).
- Για να λειτουργήσει ως ανορθωτής (*Rectifier*), ο οποίος μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές, πρέπει να οριστεί η σχετική χωρητικότητα σε σχέση με τον inverter σε ποσοστό επί τοις % (*Efficiency*) και η απόδοση με την οποία μετατρέπεται το εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα (*Capacity relative to inverter*). Οι μεταβλητές αυτές μπορεί να οριστούν ως μεταβλητές ευαισθησίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν πραγματοποιείται διαφοροποίηση της λειτουργίας ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο μετατροπέα.

5.1.7 Τελική μορφή του συστήματος

Η διαδικασία εισαγωγής στοιχείων για τα συστατικά του συστήματος έχει πλέον ολοκληρωθεί και η τελική του μορφή απεικονίζεται στην Εικόνα 5.17.




Εικόνα 5.17 Τελική μορφή του συστήματος της πλατφόρμας στον κόλπο της Σούδας.

5.2 Πόροι του συστήματος (Resources)

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η εισαγωγή δεδομένων για τους πόρους του συστήματος.

5.2.1 Ηλιακό δυναμικό

Προκειμένου να μοντελοποιηθεί ένα σύστημα με φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι απαραίτητη η εισαγωγή των δεδομένων του ηλιακού φορτίου της περιοχής εγκατάστασης. Ο χρήστης επιλέγοντας το εικονίδιο  , μπορεί να εισάγει τα δεδομένα για το ηλιακό δυναμικό. Αρχικά, πρέπει να προσδιοριστεί το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της περιοχής εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, καθώς η ζώνη ώρας (*Time Zone*).


Ο δείκτης καθαρότητας (*Clearness Index*) είναι ένα μέτρο της καθαρότητας της ατμόσφαιρας. Είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1 και ορίζεται ως η ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης διαιρούμενη με την ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα. Διαφορετικά, μπορεί να οριστεί ως το κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που μεταφέρεται διαμέσου της ατμόσφαιρας για να χτυπήσει την επιφάνεια της γης. Αν η ημέρα είναι ηλιόλουστη, ο δείκτης καθαρότητας παίρνει μεγάλες τιμές, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε περίπτωση συννεφιάς.

Τα ηλιακά δεδομένα μπορεί να εισαχθούν στο λογισμικό σε τρεις μορφές: μέση ωριαία ηλιακή ακτινοβολία στην οριζόντια επιφάνεια (kW/m^2), μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στην οριζόντια επιφάνεια ($\text{kW}/\text{m}^2/\text{day}$) ή ως μέσος μηνιαίος συντελεστής καθαρότητας. Στην περίπτωση που τα δεδομένα του ηλιακού δυναμικού έχουν τη μορφή μηνιαίας ηλιακής πηγής, το HOMER τα αναλύει με τη βοήθεια ενός αλγόριθμου ο οποίος χρησιμοποιεί τη μέση ηλιακή ακτινοβολία και το γεωγραφικό μήκος της περιοχής εγκατάστασης. Τα δεδομένα του ηλιακού δυναμικού μπορεί να ληφθούν είτε από μετεωρολογικούς σταθμούς είτε από το ίδιο το λογισμικό πατώντας το κουμπί «Get Data via Internet» για αμερικανικές περιοχές εγκατάστασης. Έχοντας καθορίσει τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής εγκατάστασης το HOMER αναζητάει τις βάσεις δεδομένων του και εισάγει τα κατάλληλα δεδομένα. Άλλη πηγή αναζήτησης μετεωρολογικών δεδομένων είναι ο σταθμός μέτρησης της παγκόσμιας ηλιακής ενέργειας της NASA που περιέχει δεδομένα για τη μέση ηλιακή ακτινοβολία σε όλον τον κόσμο.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.18 επιλέχθηκε το γεωγραφικό μήκος και πλάτος για την περιοχή εγκατάστασης της αυτόνομης πλατφόρμας και η εισαγωγή των δεδομένων του ηλιακού φορτίου έγινε ορίζοντας τη μέση ωριαία ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή εισάγοντας ένα αρχείο με 8.760 τιμές. Στην Εικόνα 5.19 παρουσιάζεται το τυπικό προφίλ της ηλιακής ακτινοβολίας ανά ώρα για κάθε μήνα, όπως διαμορφώθηκε από τα δεδομένα εισόδου του ηλίου.

Solar Resource Inputs

File Edit Help

 HOMER uses the solar resource inputs to calculate the PV array power for each hour of the year. Enter the latitude, and either an average daily radiation value or an average clearness index for each month. HOMER uses the latitude value to calculate the average daily radiation from the clearness index and vice-versa.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Location

Latitude ° ' ☒ North ☐ South Time zone

Longitude ° ' ☒ East ☐ West

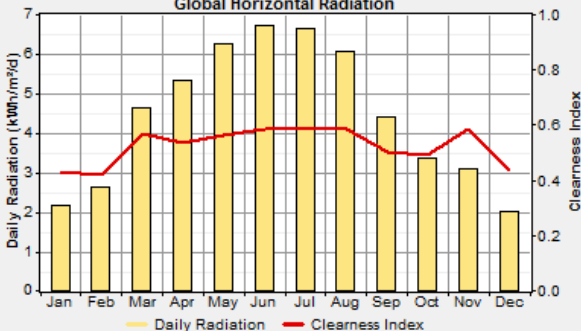
Data source: ☐ Enter monthly averages ☒ Import time series data file

Baseline data (from Horizontal solar.sol)

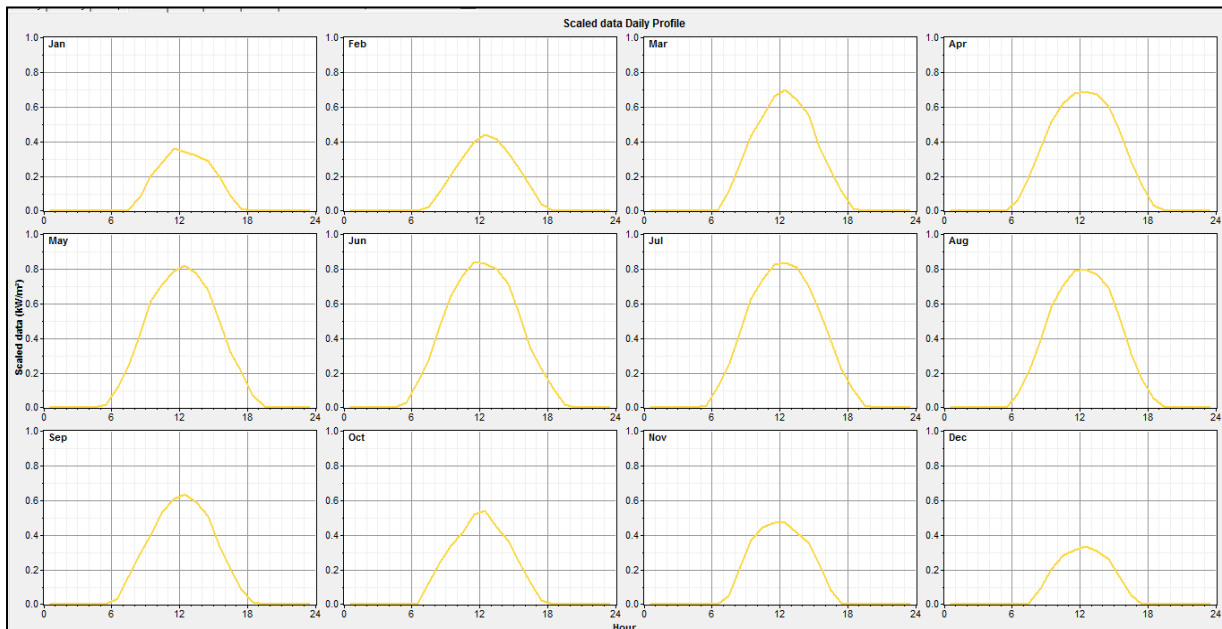
Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m ² /d)
January	0.432	2.160
February	0.417	2.644
March	0.569	4.643
April	0.536	5.322
May	0.566	6.280
June	0.584	6.743
July	0.588	6.640
August	0.587	6.061
September	0.503	4.397
October	0.492	3.381
November	0.584	3.090
December	0.436	2.002
Average:	0.539	4.457

Scaled annual average (kWh/m²/d)

Global Horizontal Radiation




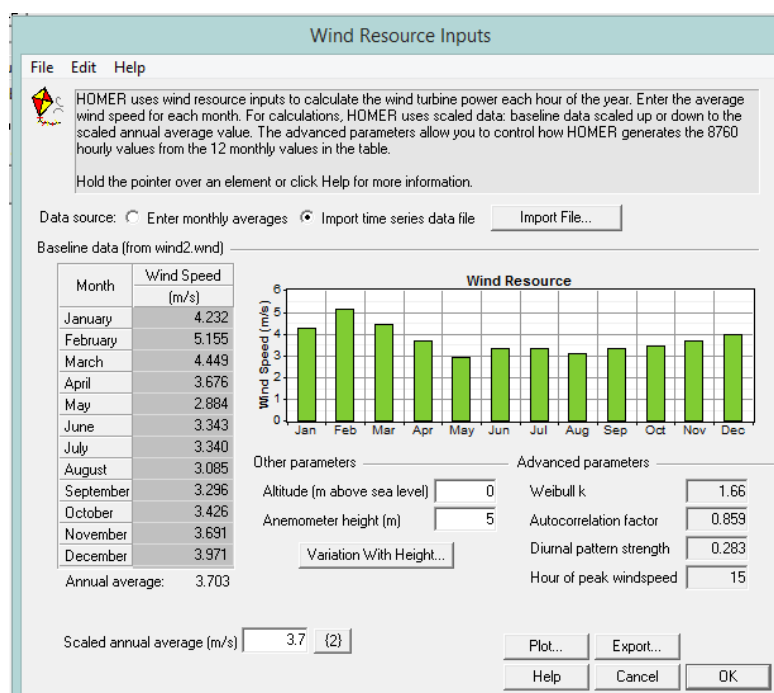
Εικόνα 5.18 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τους ηλιακούς πόρους.



Εικόνα 5.19 Τυπικό προφίλ ηλιακής ακτινοβολίας ανά ώρα για κάθε μήνα.

5.2.2 Αιολικό Δυναμικό

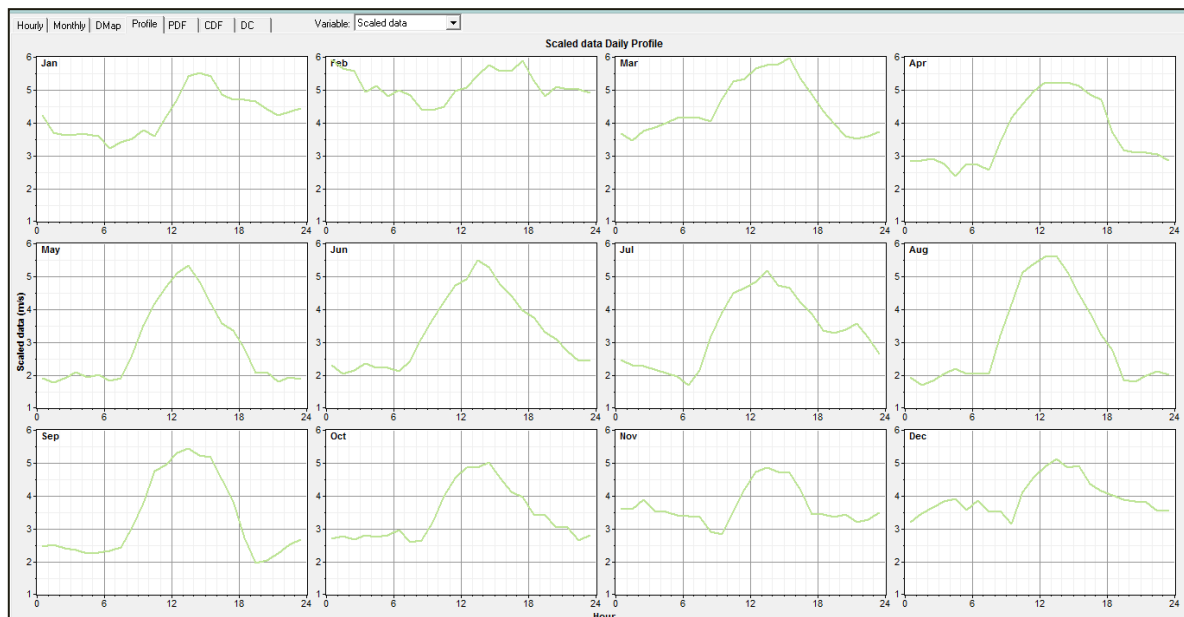
Η ρύθμιση των λεπτομερειών των αιολικών πόρων πραγματοποιείται επιλέγοντας το εικονίδιο . Τα ανεμολογικά δεδομένα εισάγονται στο λογισμικό είτε με τη μορφή ενός αρχείου, το οποίο περιέχει τις ωριαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου για ένα έτος (8.760 τιμές), είτε με την καταχώρηση της μέσης μηνιαίας ταχύτητας του ανέμου. Αν ο χρήστης επιλέξει την εισαγωγή ενός αρχείου με τις ωριαίες τιμές, το HOMER θα υπολογίσει στη συνέχεια το μέσο όρο της ταχύτητας του ανέμου για κάθε μήνα και θα εμφανίσει τις τιμές σε κατάλληλο πίνακα και διάγραμμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.20.



Εικόνα 5.20 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για το αιολικό δυναμικό.

Οι παράμετροι που απεικονίζονται στη δεξιά πλευρά της Εικόνας 5.20 (*Advanced parameters*) μπορούν να τροποποιηθούν μόνο στην περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει να καταχωρήσει τις μέσες μηνιαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Οι τέσσερις αυτές παράμετροι είναι η μεταβλητή Weibull k , ο παράγοντας αυτοσυσχέτισης (*Autocorrelation factor*), το ημερήσιο σχέδιο δύναμης (*Diurnal pattern strength*) και η ώρα παρουσίασης της αιχμής ταχύτητας του ανέμου (*Hour of peak windspeed*). Ακόμη ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει κατάλληλες τιμές για το ύψος του ανεμομέτρου (*Anemometer height*) καθώς και για το υψόμετρο μεταξύ της ανεμογεννήτριας και της θάλασσας (*Altitude*).

Στην Εικόνα 5.21 παρουσιάζεται το τυπικό προφίλ ταχύτητας του ανέμου ανά ώρα για κάθε μήνα, όπως διαμορφώθηκε από τα δεδομένα εισόδου του ανέμου.



Εικόνα 5.21 Τυπικό προφίλ ταχύτητας του ανέμου ανά ώρα για κάθε μήνα.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.22, έγινε ανάλυση ευαισθησίας στην μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας του ανέμου.

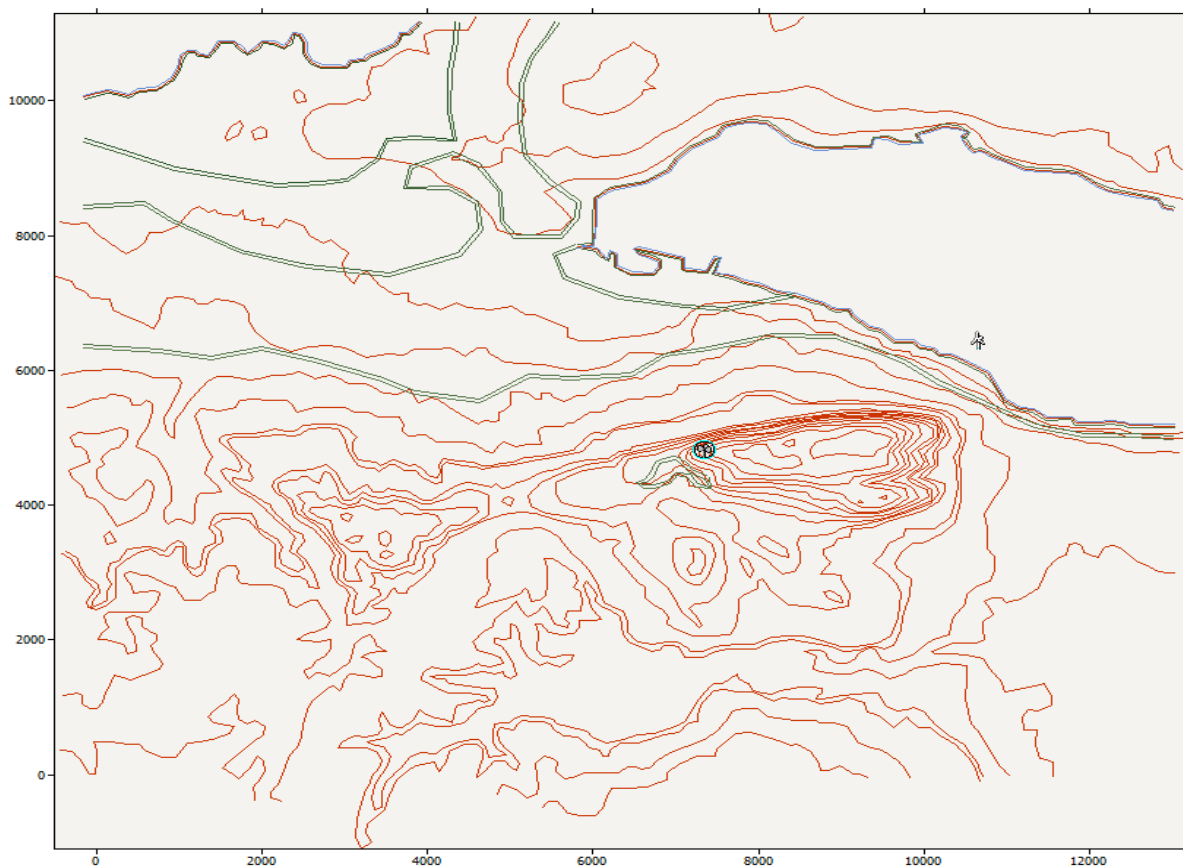
Από το εικονίδιο Scaled annual average (m/s) 3.7 {2} φαίνεται ότι η συγκεκριμένη παράμετρος έχει 2 τιμές που θα εξεταστούν στην ανάλυση ευαισθησίας. Η διαδικασία της προσομοίωσης θα επαναληφθεί 2 φορές (μία για κάθε τιμή της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου). Οι τιμές ευαισθησίας που εισήχθησαν για τον άνεμο παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.22.

Εικόνα 5.22 Παράθυρο εισαγωγής τιμών ευαισθησίας για τον άνεμο.

5.2.2.1 Τρόπος υπολογισμού των ανεμολογικών δεδομένων που εισήχθησαν στο λογισμικό HOMER για την περιοχή εγκατάστασης της πλατφόρμας

Για τον υπολογισμό των ανεμολογικών δεδομένων στο χώρο του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. , που βρίσκεται εντός του κόλπου της Σούδας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό WAsP (έκδοση 9.1). Το λογισμικό αυτό μπορεί να υπολογίσει τα ανεμολογικά δεδομένα σε ολόκληρο το χάρτη μιας περιοχής, αν είναι γνωστά τα ανεμολογικά δεδομένα σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χάρτη. Επιπλέον, μπορεί να υπολογίσει την αναμενόμενη ετήσια παραγωγή ενέργειας της/των ανεμογεννητριών που πρόκειται να εγκατασταθούν σε περιοχές του χάρτη, αν δοθούν συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών.

Τα ανεμολογικά δεδομένα έχουν χρονική διάρκεια 1 έτους (σε ωριαία βάση) και προέρχονται από τον ιστό του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου (ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.) που είχε εγκατασταθεί στις κεραίες της Μαλάξας (σε υψόμετρο 550 μέτρων) και παρουσίαζε μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 4,45 m/s. Στην Εικόνα 5.23 δείχνονται οι θέσεις της εγκατάστασης του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (οι υπολογισμοί έγιναν για ύψος 5 μέτρων και η μέση ταχύτητα που προέκυψε ήταν 3,7 m/s) και του ιστού του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.. Στην κλίμακα που παρουσιάζεται οι αποστάσεις είναι σε μέτρα. Επιπλέον, στο χάρτη της Εικόνας 5.23 οι κόκκινες γραμμές αντιπροσωπεύουν περιοχές του χάρτη με το ίδιο ύψος (ισοϋψείς γραμμές), ενώ οι διπλές πράσινες-μπλε γραμμές αντιπροσωπεύουν διαφορετικού είδους ανάγλυφα του εδάφους (λόγω της παρουσίας πόλεων ή χωριών), τα οποία επηρεάζουν τις ανεμολογικές μετρήσεις.

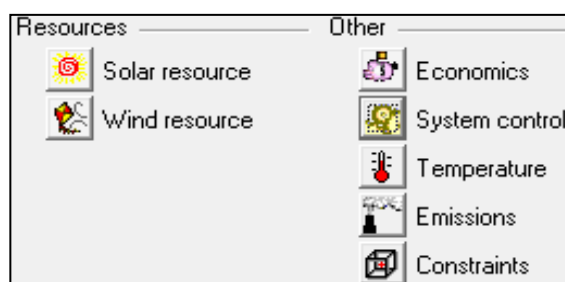


Εικόνα 5.23 Χάρτης περιοχής και θέσεις μετρήσεων και εγκατάστασης.

5.3 Άλλοι παράμετροι και περιορισμοί του συστήματος


Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.24, δίπλα από τους πόρους του συστήματος υπάρχουν τα εξής στοιχεία που πρέπει να ρυθμιστούν προκειμένου να λειτουργεί αποδοτικά το προσομοιωμένο σύστημα:

- Οικονομικοί παράμετροι
- Στρατηγική ελέγχου
- Θερμοκρασία
- Εκπομπές αέριων ρύπων
- Περιορισμοί

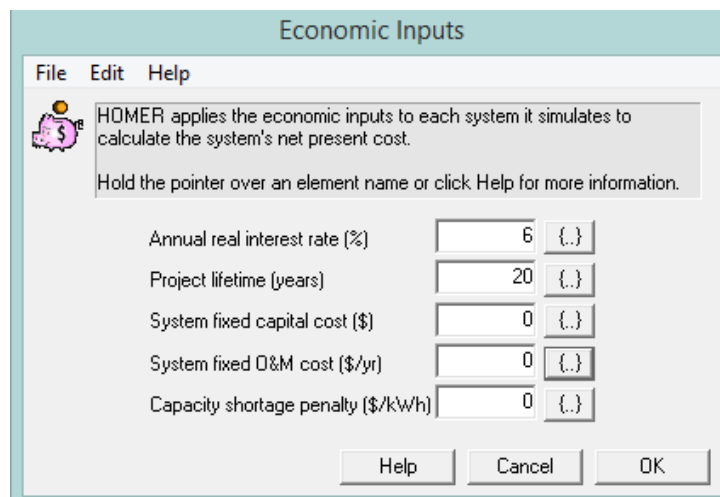


Εικόνα 5.24 Άλλοι παράμετροι και περιορισμοί που καλείται ο χρήστης να ρυθμίσει.

5.3.1 Οικονομικές παράμετροι (Economics)


Οι οικονομικοί παράμετροι μπορούν να οριστούν στο λογισμικό HOMER επιλέγοντας το εικονίδιο . Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.25 ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει:

- το ετήσιο πραγματικό επιτόκιο (*Annual real interest rate*)
- τη διάρκεια ζωής του συστήματος (*Project lifetime*)
- το σταθερό κόστος του συστήματος ανεξαρτήτου μεγέθους (*System fixed capital cost*)
- το σταθερό κόστος συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος ανεξάρτητα από το μέγεθος του (*System fixed O&M cost*)
- το πρόστιμο για έλλειψη παραγωγικής ικανότητας (*Capacity shortage penalty*)



Εικόνα 5.25 Παράθυρο εισαγωγής οικονομικών παραμέτρων.

5.3.2 Στρατηγική ελέγχου (System control)


Επιλέγοντας το εικονίδιο  ρυθμίζονται οι παράμετροι σχετικά με τη μοντελοποίηση λειτουργίας του συστήματος (Εικόνα 5.26).

Ο χρόνος με τον οποίο εκτελούνται τα βήματα του μοντέλου ορίζεται στο πεδίο *Simulation time step (minutes)*. Με την επιλογή *Load following* (στρατηγική παρακολούθησης φορτίου), στο πεδίο *Dispatch strategy*, οι συσσωρευτές δεν φορτίζονται από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν οι γεννήτριες, αλλά μόνο από την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας των τεχνολογιών ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής (φωτοβολταϊκά ή/και ανεμογεννήτρια). Η μόνη περίπτωση κατά την οποία μια γεννήτρια φορτίζει το συσσωρευτή είναι όταν η ζητούμενη ενέργεια που πρέπει να προσφερθεί από τη γεννήτρια είναι μικρότερη της ελάχιστης ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από αυτήν, ενώ ταυτόχρονα ο συσσωρευτής δεν είναι πλήρως φορτισμένος.

Με την στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή (*Cycle charging*), όταν μια γεννήτρια χρειάζεται να εξυπηρετήσει το φορτίο παρέχει τη μέγιστη δυνατή ισχύ (που αντιστοιχεί και στον υψηλότερο βαθμό απόδοσής της), και η περίσσεια ενέργειας (εάν υπάρχει) αποθηκεύεται στο συσσωρευτή. Η στρατηγική αυτή προϋποθέτει και τον καθορισμό ενός σημείου κατάστασης φόρτισης, που δείχνει το επίπεδο φόρτισης που πρέπει να φτάσει ο συσσωρευτής πριν σταματήσει να λειτουργεί η γεννήτρια (*Apply setpoint state of charge*). Η προεπιλεγμένη από το HOMER τιμή είναι 80%.

System Control Inputs

File Edit Help

 The system control inputs define how HOMER models the operation of the battery bank and generators. The dispatch strategy determines how the system charges the battery bank.
Hold the pointer over an element name or click Help for more information.

Simulation _____
Simulation time step (minutes) {..}

Dispatch strategy _____
☒ Load following
☒ Cycle charging
☒ Apply setpoint state of charge (%) {..}


Generator control _____
☒ Allow systems with multiple generators
☒ Allow multiple generators to operate simultaneously
☒ Allow systems with generator capacity less than peak load

Other settings _____
☐ Allow systems with two types of wind turbines
☐ Allow excess electricity to serve thermal load
☐ Limit excess thermal output (% of load) {..}

Help Cancel OK


Εικόνα 5.26 Παράθυρο επιλογών ελέγχου συστήματος.

5.3.3 Θερμοκρασία (Temperature)

Η εισαγωγή των δεδομένων για τη θερμοκρασία πραγματοποιείται με την επιλογή του εικονιδίου . Τα στοιχεία της θερμοκρασίας εισάγονται στο λογισμικό είτε με τη μορφή ενός αρχείου, το οποίο περιέχει τις ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας (8760 τιμές), είτε με την καταχώρηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας (Εικόνα 5.27).

Temperature Inputs

File Edit Help

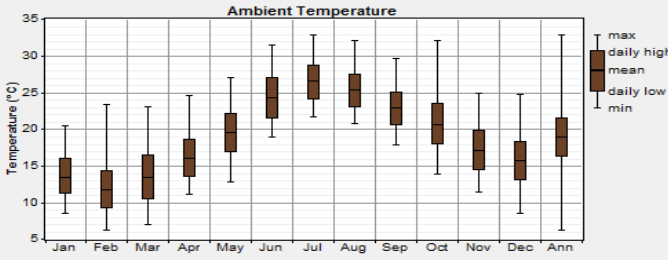
 HOMER uses ambient temperature data to calculate the power produced by the PV array in each time step. For calculations, HOMER uses scaled data: baseline data scaled up or down to the scaled annual average value.
Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Data source: ☐ Enter monthly averages ☒ Import time series data file

Baseline data (from temperature.txt)

Month	Temperature (°C)
January	13.5
February	11.8
March	13.5
April	16.1
May	19.6
June	24.3
July	26.5
August	25.4
September	22.9
October	20.6
November	17.2
December	15.7
Annual average:	19.0

Ambient Temperature




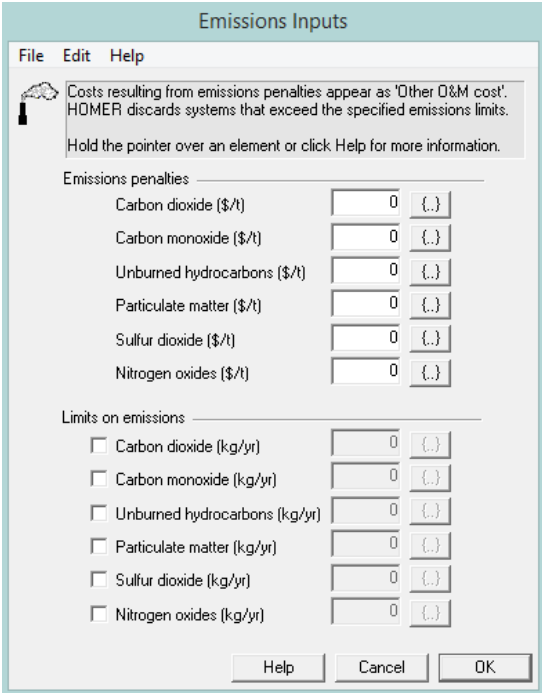
Scaled annual average (°C) {..}

Plot... Export...
Help Cancel OK

Εικόνα 5.27 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων θερμοκρασίας.

5.3.4 Εκπομπές αέριων ρύπων (Emissions)

Ο χρήστης επιλέγοντας το εικονίδιο  έχει τη δυνατότητα να ορίσει τις παραμέτρους που σχετίζονται με τις ποινές λόγω εκπομπών αέριων ρύπων του συστήματος (Εικόνα 5.28). Για την περίπτωση της πλατφόρμας στον κόλπο της Σούδας, οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι μηδενικές, αφού δεν χρησιμοποιείται ντηζελογεννήτρια παρά μόνο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.




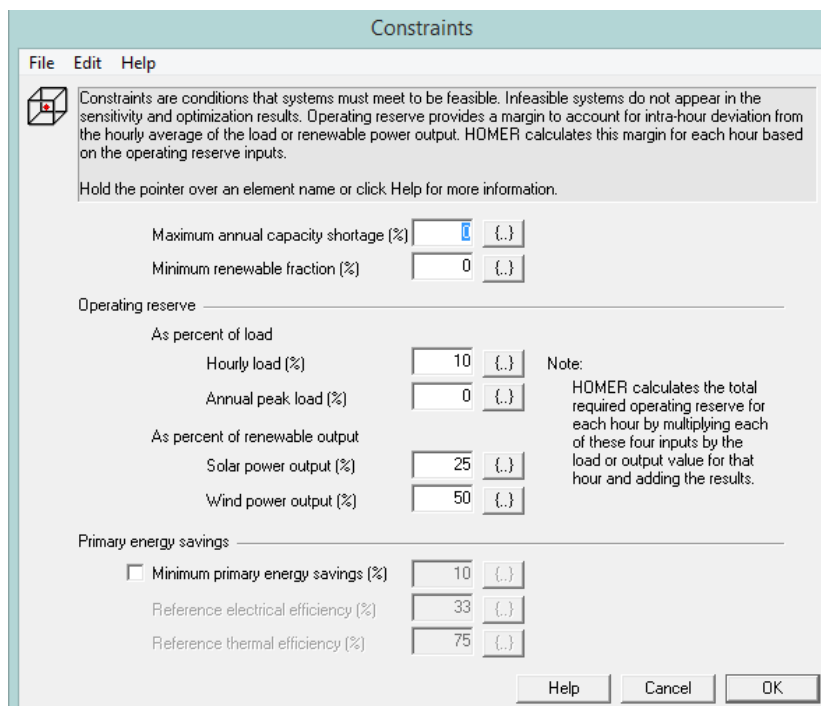
Emissions penalties		
Carbon dioxide (\$/t)	0	{.}
Carbon monoxide (\$/t)	0	{.}
Unburned hydrocarbons (\$/t)	0	{.}
Particulate matter (\$/t)	0	{.}
Sulfur dioxide (\$/t)	0	{.}
Nitrogen oxides (\$/t)	0	{.}

Limits on emissions		
<input type="checkbox"/> Carbon dioxide (kg/yr)	0	{.}
<input type="checkbox"/> Carbon monoxide (kg/yr)	0	{.}
<input type="checkbox"/> Unburned hydrocarbons (kg/yr)	0	{.}
<input type="checkbox"/> Particulate matter (kg/yr)	0	{.}
<input type="checkbox"/> Sulfur dioxide (kg/yr)	0	{.}
<input type="checkbox"/> Nitrogen oxides (kg/yr)	0	{.}

Εικόνα 5.28 Παράθυρο ορισμού παραμέτρων εκπομπών αέριων ρύπων.


5.3.5 Περιορισμοί (Constraints)

Ο χρήστης, επιλέγοντας το εικονίδιο , έχει τη δυνατότητα να ορίσει διάφορους περιορισμούς (Εικόνα 5.29), όπως το μέγιστο ποσοστό έλλειψης ηλεκτροδότησης του φορτίου (*Maximum annual capacity shortage*) και το ελάχιστο ποσοστό του συντελεστή διεισδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με τη στρεφόμενη εφεδρεία (*Operating reserve*) μπορεί να περιοριστεί η εφεδρεία της ωριαίας αιχμής του φορτίου (*Hourly load*) και της ετήσιας αιχμής του φορτίου (*Annual peak load*). Επίσης, δίνεται η δυνατότητα να περιοριστεί το απόθεμα για την παραγωγή των ανανεώσεων πηγών ενέργειας των φωτοβολταϊκών (*Solar power output*) και των αιολικών (*Wind power output*).

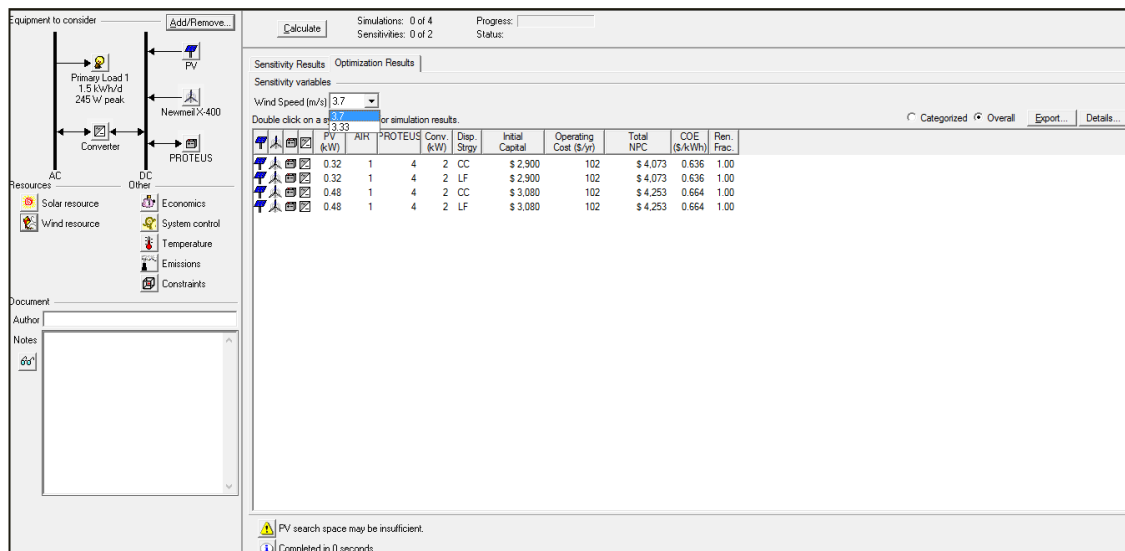


Εικόνα 5.29 Παράθυρο ορισμού διάφορων περιορισμών.

5.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η προσομοίωση και βελτιστοποίηση των διατάξεων του συστήματος, που περιλαμβάνουν όλους τους συνδυασμούς των συστατικών και των στρατηγικών που έχουν οριστεί από το χρήστη, γίνεται πατώντας το κουμπί **Calculate**. Το HOMER απορρίπτει από τα αποτελέσματα όλες τις ανέφικτες διατάξεις του συστήματος, δηλαδή αυτές που δεν ικανοποιούν επαρκώς το φορτίο, τους διαθέσιμους πόρους ή τους περιορισμούς που έχουν τεθεί. Η επιλογή *Categorized* προβάλλει τη βέλτιστη λύση για καθεμιά διαφορετική διάταξη του συστήματος, ενώ η επιλογή *Overall* προβάλλει όλους τους εφικτούς δυνατούς συνδυασμούς του συστήματος. Η ταξινόμηση των αποτελεσμάτων γίνεται κατά αύξουσα σειρά του καθαρού παρόντος κόστους (Net Present Cost – NPC), ενώ εμφανίζονται δεδομένα σχετικά με τη διάταξη του συστήματος, το κόστος της ενέργειας (Cost of Energy – COE), κλπ. Υπάρχει πιθανότητα στο κάτω μέρος της οθόνης να εμφανιστούν κάποια Warnings σχετικά με το εύρος τιμών των φωτοβολταϊκών, των ανεμογεννητριών και του μετατροπέα. Επιλέγοντας το εικονίδιο , ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να βρει περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη βελτίωση του εύρους των τιμών των στοιχείων του συστήματος.

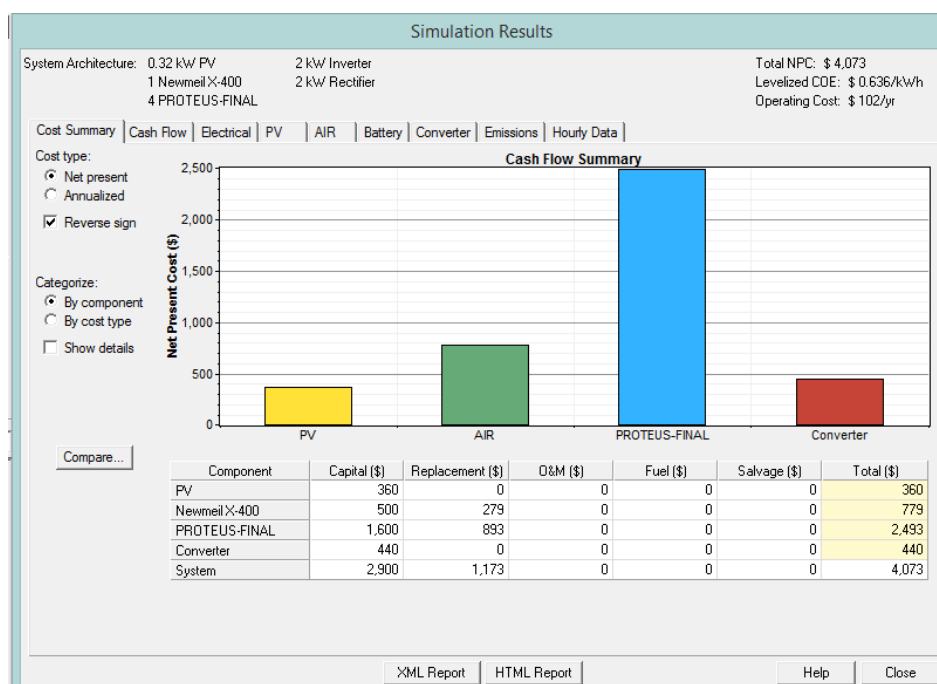
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 3,7 m/s παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.30. Κάνοντας διπλό κλικ σε μία από τις προσομοιωμένες διατάξεις που προτείνει το HOMER, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μελετήσει αναλυτικότερα την κάθε διάταξη. Το HOMER παρέχει πληροφορίες για τα κόστη, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη λειτουργία των εξαρτημάτων, τις εκπομπές αέριων ρύπων του συστήματος, καθώς και την επεξεργασία των δεδομένων που έχουν προκύψει.



Εικόνα 5.30 Εμφάνιση τελικών αποτελεσμάτων προσομοίωσης, (μέση ετήσια ταχύτητα ανέμων 3,7 m/s).

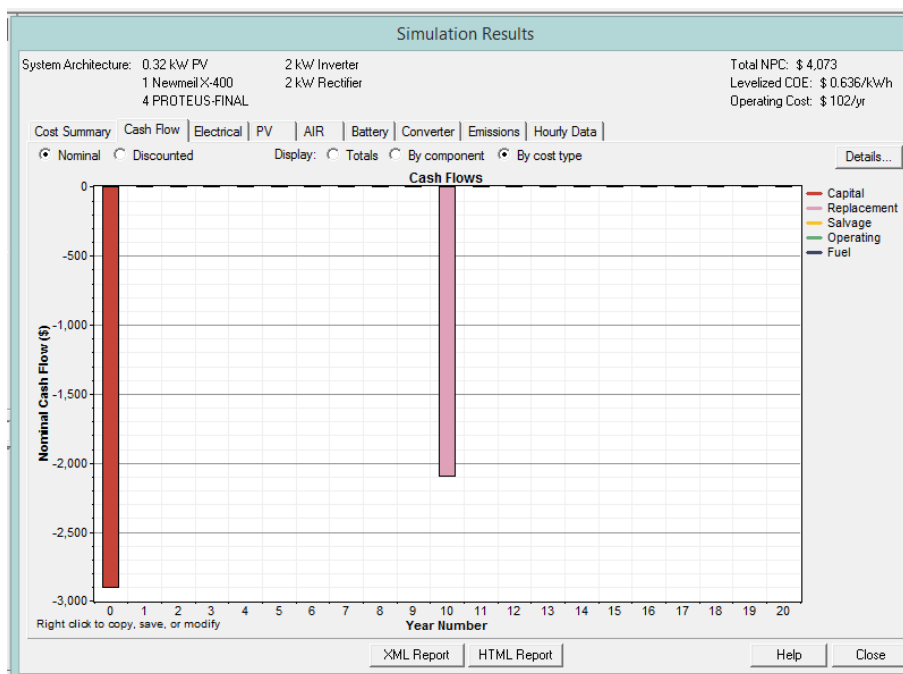
Στην καρτέλα *Cost summary* (Εικόνα 5.31) δίνονται τα αποτελέσματα για τρία διαφορετικά κόστη: η συνολική καθαρή παρούσα αξία, το διαβαθμισμένο κόστος της ενέργειας και το λειτουργικό κόστος.

Η καθαρή παρούσα αξία (Net Present Cost) αντιπροσωπεύει την παρούσα αξία της ροής μετρητών που προεξοφλούνται στο χρόνο μηδέν χρησιμοποιώντας τον ετήσιο πραγματικού ρυθμού επιτοκίου. Το HOMER υπολογίζει το NPC χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση: $NPC = C_{ann,tot} / CRF(I, R_{prof})$ όπου $C_{ann,tot}$ είναι το μέσο ετήσιο κόστος σε (€/yr) που είναι το άθροισμα των ετήσιων κόστων κάθε στοιχείου που αποτελεί το σύστημα συν οποιοδήποτε άλλο ετήσιο κόστος, CRF είναι ο συντελεστής ανάκτησης του κεφαλαίου που εξαρτάται από το ετήσιο επιτόκιο και τη διάρκεια ζωής του έργου.



Εικόνα 5.31 Καρτέλα Cost Summary.

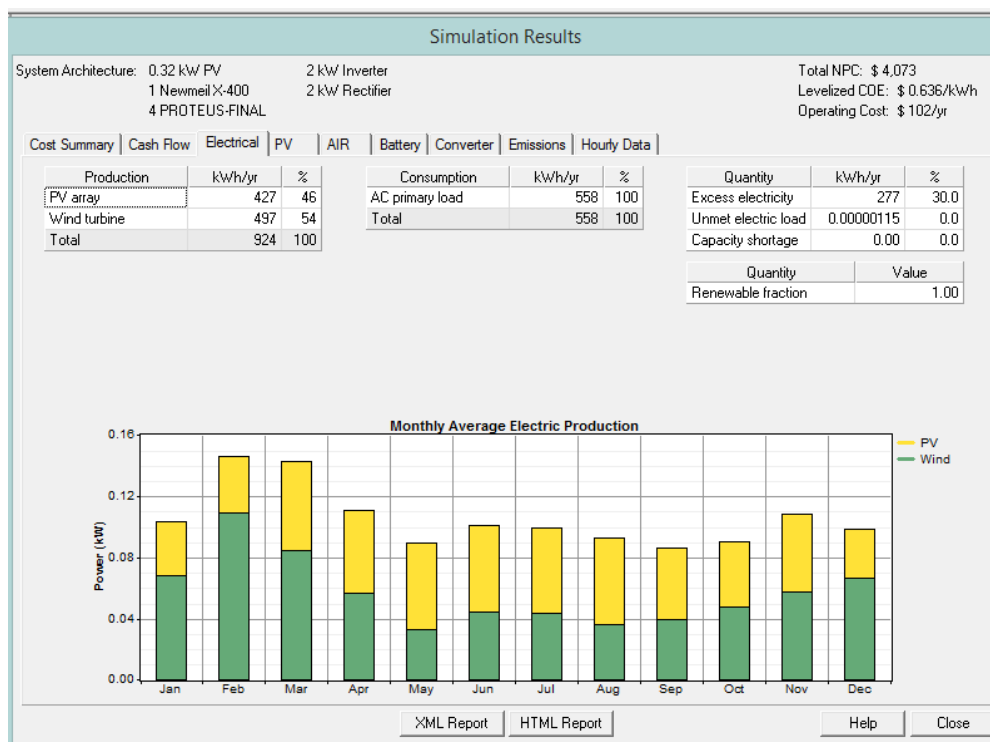
Στην καρτέλα *cash flow* μπορεί κανείς να αναζητήσει τη χρηματοροή ανά έτος και ανά συνιστώσα, όπως χαρακτηριστικά παρουσιάζει η παρακάτω Εικόνα 5.32. Η χρηματοροή μπορεί να αναλυθεί τόσο σε πραγματικές τιμές όσο και σε τιμές ανοιγμένες σε καθαρή παρούσα αξία. Επίσης μπορεί να αναλυθεί κατά είδος (κεφαλαίου, αντικατάστασης κλπ) ή κατά συνιστώσα (μπαταρία, δίκτυο, φωτοβολταϊκά κλπ).



Εικόνα 5.32 Καρτέλα cash flow.

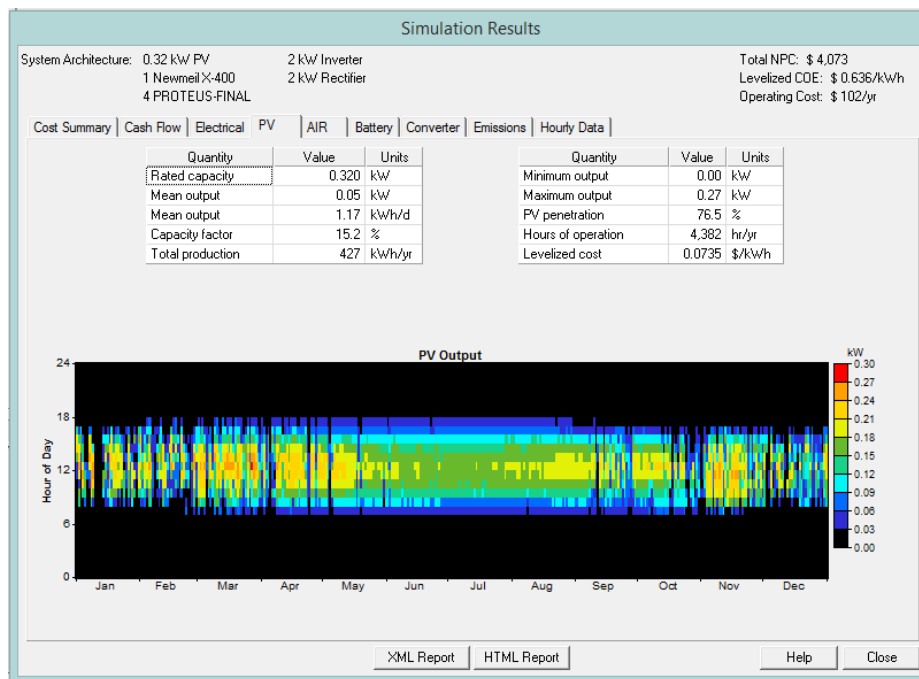
Στην καρτέλα *Electrical* (Εικόνα 5.33), ο χρήστης μπορεί να πληροφορηθεί για την παραγωγή και την κατανάλωση από τις διάφορες συνιστώσες του δικτύου. Η παράμετρος *Excess Electricity* αναφέρεται σε περιπτώσεις που περισσεύει παραγωγή από ΑΠΕ. Σε αυτήν την οθόνη, ο χρήστης λαμβάνει μία πρώτη εικόνα του μηνιαίου ενεργειακού ισοζυγίου.

Στην ετήσια παραγωγή ενέργειας αναφέρεται η ετήσια παραγωγή από κάθε στοιχείο του συστήματος. Ο συντελεστής που δείχνει το ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ονομάζεται *Renewable factor*. Επιπλέον, στην καρτέλα αυτή αναφέρονται τα ποσά της ενέργειας που τροφοδοτούνται για την εξυπηρέτηση εναλλασσόμενων και φορτίων συνεχούς ρεύματος.



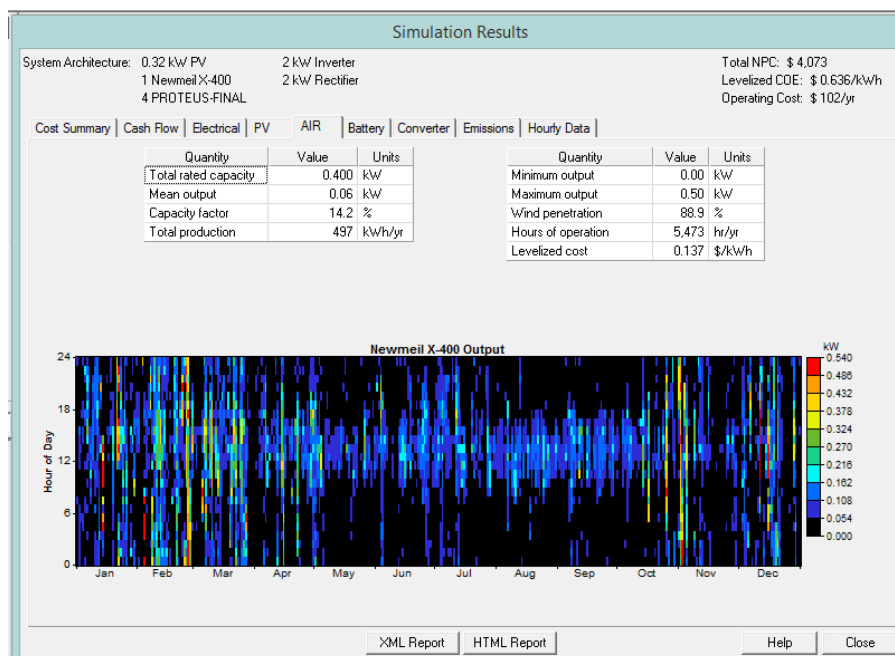
Εικόνα 5.33 Καρτέλα Electrical – Ισοζύγιο ισχύος.

Επιλέγοντας την καρτέλα *PV* (Εικόνα 5.34), ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εξάγει πληροφορίες για την συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών, καθώς και για το ενεργειακό ισοζύγιο. Συγκεκριμένα, μπορεί να λάβει δεδομένα για τη μέση ποσότητα παραγόμενης ισχύος σε kWh/day, την ελάχιστη παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού ετησίως, όπως επίσης και για τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού ετησίως. Επιπλέον, παρέχονται πληροφορίες για την ηλιακή διείσδυση, δηλαδή τη μέση ισχύ εξόδου από το φωτοβολταϊκό διαιρεμένη με το μέσο κύριο φορτίο, καθώς και για το συντελεστή χωρητικότητας, που είναι η μέση παραγόμενη ισχύ από το φωτοβολταϊκό διαιρεμένη με την ονομαστική ισχύ και τις ώρες λειτουργίας (αριθμός ωρών σε έναν χρόνο που η παραγωγή από το φωτοβολταϊκό είναι θετική). Ο όρος *Levelized cost* είναι το μέσο κόστος ανά kWh της χρήσιμης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το σύστημα, το οποίο υπολογίζεται διαιρώντας το ετήσιο κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με την ετήσια παραγωγή χρήσιμης ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 5.34 Καρτέλα φωτοβολταϊκών (PV).

Στην καρτέλα *AIR* (Εικόνα 5.35), παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για την εγκατεστημένη ανεμογεννήτρια στο πλωτό σύστημα της Σούδας. Όπως και για τα φωτοβολταϊκά, παρέχονται πληροφορίες για την ελάχιστη παραγόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας ετησίως, τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας ετησίως, τη μέση ισχύ εξόδου από την ανεμογεννήτριας, καθώς και για το συντελεστή χωρητικότητας.



Εικόνα 5.35 Καρτέλα ανεμογεννήτριας (AIR).

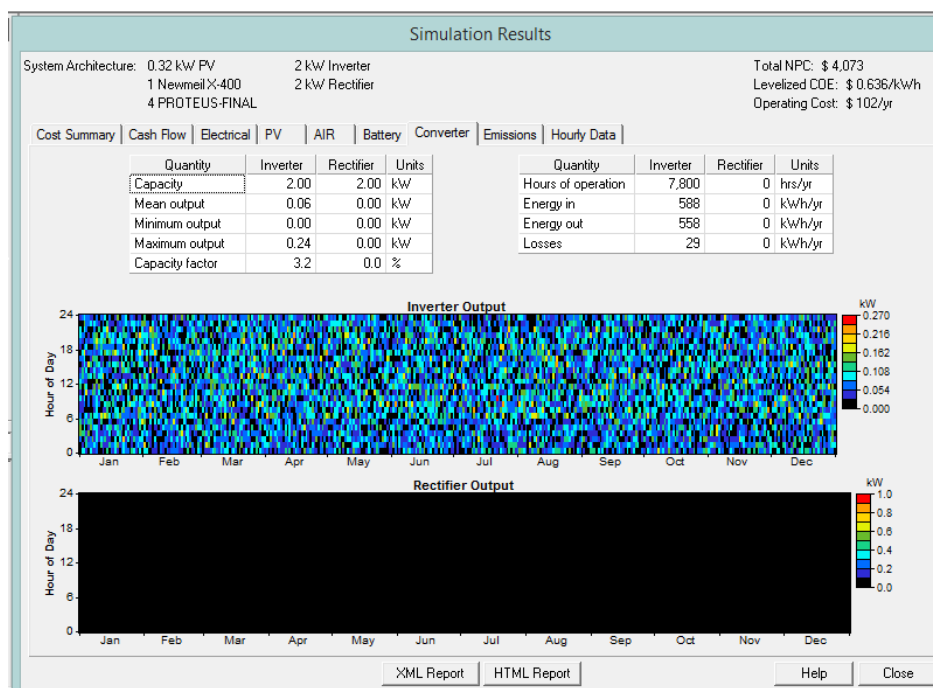
Στην καρτέλα *Battery* (Εικόνα 5.36), παρουσιάζεται αναλυτικά η συμπεριφορά των εγκατεστημένων μπαταριών του συστήματος. Συγκεκριμένα, δίνονται πληροφορίες για την ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών, την ονομαστική

χρησιμοποιούμενη χωρητικότητά τους, τις ώρες αυτονομίας τους, τη διάρκεια ζωής τους σε kWh κ.ά.



Εικόνα 5.36 Καρτέλα μπαταρίας (Battery).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.37, ο χρήστης μπορεί να λάβει πληροφορίες και για τη συμπεριφορά του αντιστροφέα, επιλέγοντας την καρτέλα Converter.



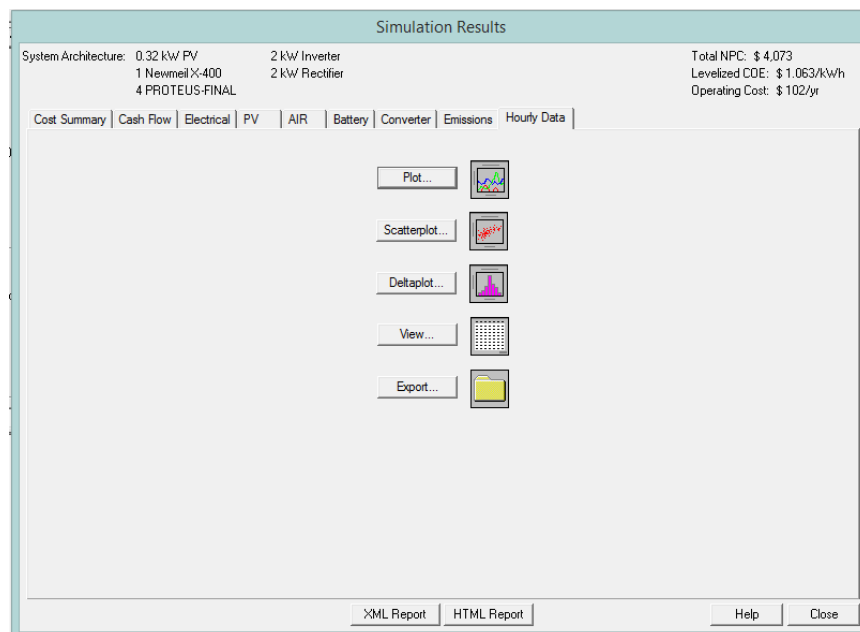
Εικόνα 5.37 Καρτέλα αντιστροφέα (Converter).

Η καρτέλα *Emissions* (Εικόνα 5.38) δίνει στον χρήστη πληροφορίες για την εκπομπή αέριων ρύπων μετά το πέρας της προσομοίωσης. Το συγκεκριμένο σύστημα που μοντελοποιήθηκε για την αυτόνομη πλατφόρμα στη Σούδα, αποτελείται μόνο από μονάδες ΑΠΕ, με αποτέλεσμα οι εκπομπές ρύπων να είναι μηδενικές.

Simulation Results			
System Architecture: 0.32 kW PV 1 Newmeil X-400 4 PROTEUS-FINAL		2 kW Inverter 2 kW Rectifier	Total NPC: \$ 4,073 Levelized COE: \$ 1.063/kWh Operating Cost: \$ 102/yr
Cost Summary	Cash Flow	Electrical	PV AIR Battery Converter Emissions Hourly Data
		Pollutant	Emissions (kg/yr)
		Carbon dioxide	0
		Carbon monoxide	0
		Unburned hydrocarbons	0
		Particulate matter	0
		Sulfur dioxide	0
		Nitrogen oxides	0

Εικόνα 5.38 Καρτέλα εκπομπών αέριων ρύπων (Emissions).

Τέλος, ο χρήστης μπορεί να λάβει χρήσιμες εικόνες και να αποθηκεύσει αρχεία εξόδου σε μορφή .txt, επιλέγοντας την καρτέλα *Hourly Data* (Εικόνα 5.39).



Εικόνα 5.39 Καρτέλα Hourly Data.

Συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας

Πίνακας 5.6 Σύγκριση των βασικών στοιχείων των συστημάτων που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας

	Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου: 3,33 m/s	Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου: 3,7 m/s
Καθαρό παρόν κόστος συστήματος (€)	4.159	4.073
Κόστος ενέργειας (COE) (€/kWh)	0,650	0,636
Κόστος λειτουργίας (€/έτος)	110	102
Newmeil X-400 (Α/Γ)	1	1
Μέγεθος Φ/Β (kW)	0,32	0,32
Μέγεθος Μετατροπέα (kW)	2	2
Αριθμός Μπαταριών	4	4
Αντικατάσταση Μπαταριών	σε 9,6 χρόνια	σε 10 χρόνια

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.6, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές. Όταν η μέση τιμή του ανέμου είναι 3,7 m/s, το σύστημα είναι οικονομικότερο. Η ανεμογεννήτρια παράγει 497 kWh/yr και τα φωτοβολταϊκά 427 kWh/yr, προκειμένου να καλυφθεί το απαιτούμενο φορτίο. Στην περίπτωση όπου η μέση τιμή του ανέμου είναι χαμηλή, δηλαδή 3,33 m/s, είναι αναμενόμενο η ανεμογεννήτρια να μην παράγει την ίδια ενέργεια με την περίπτωση όπου η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι 3,7 m/s. Συγκεκριμένα, η ανεμογεννήτρια παράγει 396 kWh/yr, ενώ η παραγωγή των φωτοβολταϊκών παραμένει σταθερή.

Αναφορικά με τις μπαταρίες, η διάρκεια ζωής τους στην περίπτωση με μέση ταχύτητα ανέμου 3,33 m/s (9,6 χρόνια) φαίνεται να είναι μειωμένη, σε σύγκριση με τη διάρκεια ζωής των μπαταριών στην περίπτωση με αυξημένη τη μέση τιμή ταχύτητας του ανέμου (10 χρόνια).

6 Μοντελοποίηση πλωτής πλατφόρμας - επιστημονικού εργαστηρίου (βόρεια του Ηρακλείου) με τη χρήση του λογισμικού HOMER - Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα υλοποιηθεί ο βέλτιστος ενεργειακός σχεδιασμός μιας πλωτής πλατφόρμας – επιστημονικού εργαστηρίου, η οποία πρόκειται να κατασκευαστεί βόρεια του Ηρακλείου. Πιο συγκεκριμένα, στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα πολλών διαφορετικών σεναρίων μοντελοποίησης της συγκεκριμένης πλατφόρμας με στόχο την ασφαλή κάλυψη των ενεργειακών της αναγκών. Για το σενάριο της αυτόνομης λειτουργίας της πλατφόρμας επιλέχθηκαν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά), καθώς και άλλα στοιχεία που απαιτούνται για την ικανοποίηση του φορτίου ζήτησης (νηπζελογεννήτρια, κυψέλη καυσίμου), την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες), καθώς και την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο για να μπορέσει να τροφοδοτηθεί το φορτίο από τις πηγές που έχουν έξοδο συνεχές ρεύμα (converter). Επίσης, μελετήθηκε το σενάριο σύνδεσης της πλωτής πλατφόρμας με το δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα αποτελείται μόνο από φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολία, της ταχύτητα του ανέμου, καθώς και της θερμοκρασίας που ορίστηκαν στο HOMER και χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση των προσομοιώσεων είναι μέσες μηνιαίες τιμές, οι οποίες μέσω αλγορίθμων και εξισώσεων που χρησιμοποιεί το λογισμικό μετατρέπονται σε ωριαίες τιμές. Οι μέσες μηνιαίες τιμές προέρχονται από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο αεροδρόμιο του Ηρακλείου. Είναι σημαντικό, λοιπόν, να αναφερθεί ότι οι τιμές των μετρήσεων που εισήχθησαν στο HOMER, αποτελούν ένα «απαισιόδοξο» σενάριο, καθώς υπάρχουν εμπόδια στην περιοχή υπολογισμού των μετρήσεων, τα οποία μειώνουν την ταχύτητα του ανέμου, τη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία. Τα δεδομένα αυτά, και ιδιαίτερα η ταχύτητα του ανέμου στην τοποθεσία όπου θα κατασκευαστεί η πλωτή πλατφόρμα, η οποία θα βρίσκεται στη θάλασσα, μακριά από εμπόδια, θα είναι αρκετά αυξημένα.

6.1 Σενάρια Φορτίου

Το πλωτό επιστημονικό εργαστήριο, που πρόκειται να κατασκευαστεί βόρεια του Ηρακλείου, θα είναι εξοπλισμένο με σύγχρονα μηχανήματα. Το συνολικό φορτίο που καλείται να εξυπηρετήσει η πλατφόρμα αυτή, προέρχεται από συγκεκριμένες λειτουργίες, όπως είναι:

- Αυτόματο σύστημα ταΐσματος ψαριών
- 24ωρη παρακολούθηση της μονάδας μέσω καμερών
- Φωτισμός της πλατφόρμας
- Σύστημα καθαρισμού διχτυών
- Σύστημα μεταφοράς και συγκομιδής ψαριών
- Σύστημα ανέλκυσης διχτυών (για 3 ιχθυοκλωβούς)

Παρακάτω, στον Πίνακα 6.1. φαίνονται οι καταναλώσεις της πλωτής πλατφόρμας για ένα 24ωρο. Τα φορτία 1, 2 και 3 λειτουργούν καθημερινά τις ώρες που αναγράφονται στον Πίνακα 6.1, ενώ για τα φορτία 4, 5 και 6 υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί. Συγκεκριμένα:

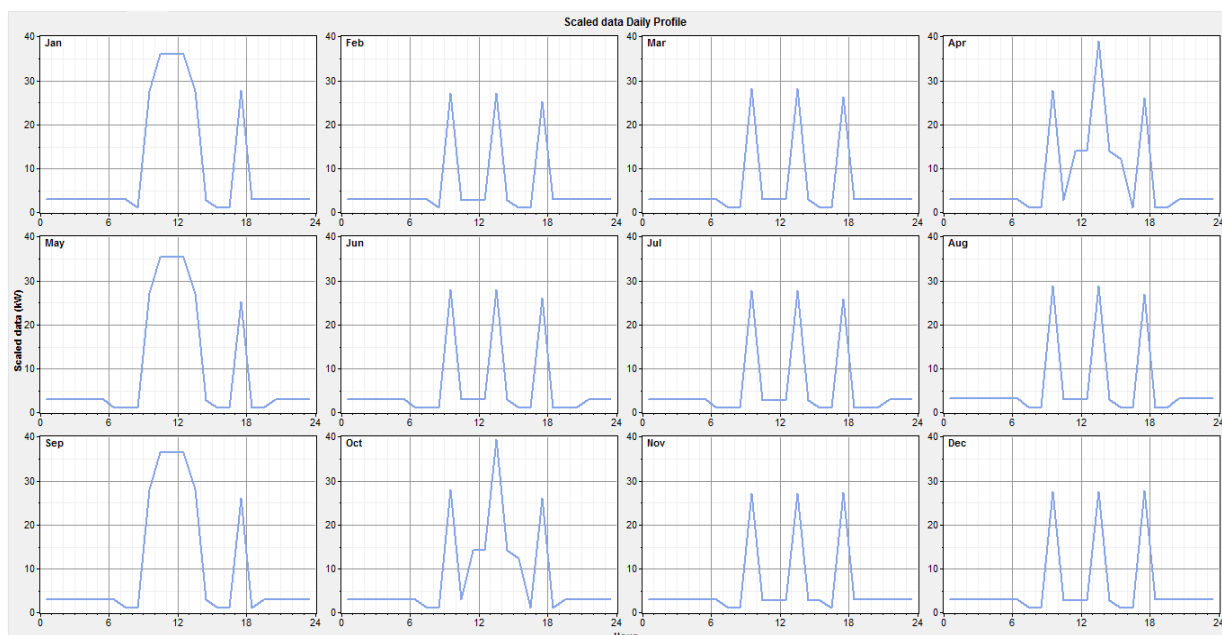
- το σύστημα καθαρισμού διχτυών λειτουργεί 3 φορές / μήνα
- το σύστημα μεταφοράς και συγκομιδής ψαριών λειτουργεί 2 φορές / έτος
- το σύστημα ανέλκυσης διχτυών λειτουργεί 3 φορές / έτος

Ένας ακόμη περιορισμός που λήφθηκε υπόψη για τη διαμόρφωση του συνολικού φορτίου στο λογισμικό HOMER είναι ότι τα φορτία 4 (Σύστημα καθαρισμού διχτυών), 5 (Σύστημα μεταφοράς και συγκομιδής ψαριών) και 6 (Σύστημα ανέλκυσης διχτυών) δεν συγχρονίζονται κατά τη διάρκεια της ίδιας ημέρας, δηλαδή θεωρούνται ανεξάρτητα στο χρόνο.

Πίνακας 6.1 Περιγραφή των φορτίων της πλατφόρμας του Ηρακλείου.

	Φορτίο 1	Φορτίο 2	Φορτίο 3	Φορτίο 4	Φορτίο 5	Φορτίο 6
Περιγραφή	Σύστημα ταΐσματος ψαριών	Κάμερες	Φωτισμός	Σύστημα καθαρισμού διχτυών	Σύστημα μεταφοράς και συγκομιδής ψαριών	Σύστημα ανέλκυσης διχτυών (για 3 ιχθυοκλωβούς)
Ισχύς	25 kW	1 kW	2 kW	18,6 kW	11,2 kW	33,6 kW
Ώρα	<i>Προφίλ φορτίου</i>	<i>Προφίλ φορτίου</i>	<i>Προφίλ φορτίου</i>	<i>Προφίλ φορτίου</i>	<i>Προφίλ φορτίου</i>	<i>Προφίλ φορτίου</i>
0:00	0	1	1	0	0	0
1:00	0	1	1	0	0	0
2:00	0	1	1	0	0	0
3:00	0	1	1	0	0	0
4:00	0	1	1	0	0	0
5:00	0	1	1	0	0	0
6:00	0	1	1	0	0	0
7:00	0	1	0	0	0	0
8:00	0	1	0	0	0	0
9:00	1	1	0	1	0	0
10:00	0	1	0	1	0	1
11:00	0	1	0	1	1	1
12:00	0	1	0	1	1	1
13:00	1	1	0	1	1	0
14:00	0	1	0	1	1	0
15:00	0	1	0	0	1	0
16:00	0	1	0	0	0	0
17:00	1	1	0	0	0	0
18:00	0	1	0	0	0	0
19:00	0	1	1	0	0	0
20:00	0	1	1	0	0	0
21:00	0	1	1	0	0	0
22:00	0	1	1	0	0	0
23:00	0	1	1	0	0	0
Ώρες λειτουργίας	3	24	12	6	5	3
Ενέργεια (kWh)	75	24	24	112	56	101

Οι συνολικές καταναλώσεις της πλατφόρμας υπολογίστηκαν για κάθε μήνα με βάση τον Πίνακα 6.1, καθώς και τους περιορισμούς για τα φορτία 4, 5 και 6 που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στο λογισμικό HOMER, έγινε η εισαγωγή ενός τυπικού ωριαίου προφίλ του φορτίου για ένα 24ωρο κάθε μήνα (Εικόνα 6.1).



**Εικόνα 6.1 Τυπικό προφίλ ανά ώρα για κάθε μήνα
(1^η περίπτωση σεναρίου, Αιχμή: 50 kW).**

Η παραπάνω πρόβλεψη του φορτίου είναι συγκρατημένη, με αποτέλεσμα να υπάρξουν σημαντικές αυξήσεις στο συνολικό φορτίο που καλείται να εξυπηρετήσει η συγκεκριμένη πλατφόρμα. Το γεγονός αυτό οδήγησε στη θεώρηση 4 διαφορετικών σεναρίων (Πίνακας 6.2).

Πίνακας 6.2 Επιλεγμένα σενάρια φορτίου.

Σενάρια φορτίου	Μέσος όρος κατανάλωσης ημερησίως (kWh/day)	Αιχμή (kW)
1 ^ο σενάριο	168	50
2 ^ο σενάριο	336	99
3 ^ο σενάριο	672	198
4 ^ο σενάριο	1008	297

Στη συνέχεια έγινε η μελέτη τριών διαφορετικών περιπτώσεων λειτουργίας της πλατφόρμας, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3. Έτσι, τα σενάρια του Πίνακα 6.2 εξετάστηκαν για κάθε μία από τις περιπτώσεις λειτουργίας της πλατφόρμας με στόχο τη μελέτη και την κάλυψη όλων των δυνατών σεναρίων μοντελοποίησης της.

Πίνακας 6.3 Επιλεγμένα σενάρια λειτουργίας της πλωτής πλατφόρμας – επιστημονικού εργαστηρίου.

	Σενάρια λειτουργίας πλωτής πλατφόρμας
1^ο σενάριο	Αυτόνομη λειτουργία με χρήση μονάδων ΑΠΕ, Γεννήτριας Diesel και συσσωρευτών
2^ο σενάριο	Αυτόνομη λειτουργία με χρήση μονάδων ΑΠΕ, Κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου και συσσωρευτών
3^ο σενάριο	Σύνδεση με το δίκτυο

6.2 Περιγραφή στοιχείων που αποτελούν το πλωτό ενεργειακό σύστημα

6.2.1 Επιλογή κατάλληλου τύπου ανεμογεννήτριας

Τα δύο μοντέλα ανεμογεννητριών που χρησιμοποιήθηκαν σε ξεχωριστά σενάρια για την εκπόνηση των προσομοιώσεων της πλωτής πλατφόρμας είναι:

- Enercon E-33
- EWT - DW54

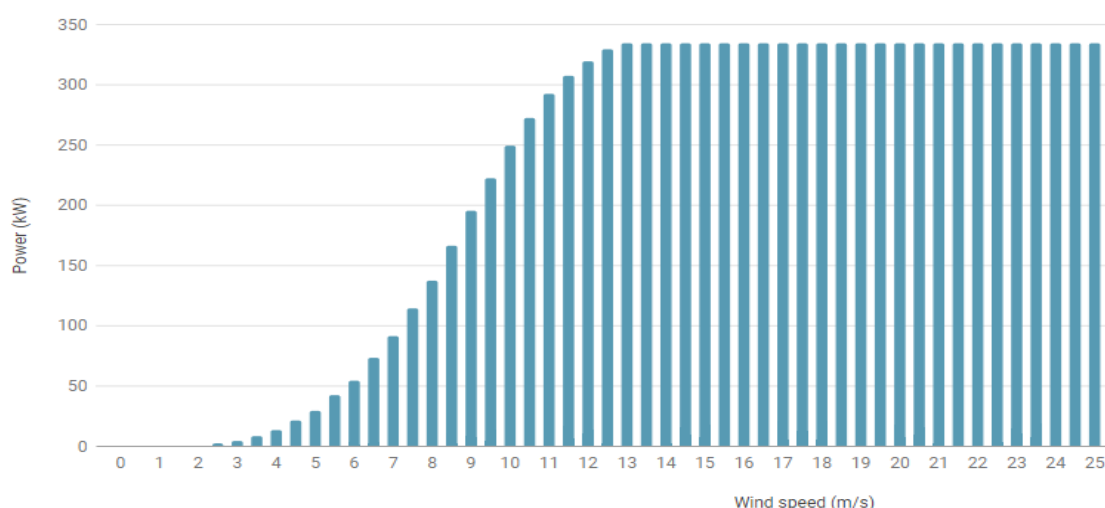
6.2.1.1 Ανεμογεννήτρια Enercon E-33 [19]

Το συγκεκριμένο μοντέλο ανεμογεννήτριας υπάρχει ως προτεινόμενο στο λογισμικό HOMER. Το κόστος του ανέρχεται στα 350.000 €. Στον Πίνακα 6.4 παρέχονται κάποιες γενικές πληροφορίες και χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας:

Πίνακας 6.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά Enercon E-33.

Κατασκευαστής	Enercon (Germany)
Μοντέλο	E33/330
Ονομαστική ισχύς	330 kW
Διάμετρος δρομέα	33,4 m
Αριθμός πτερυγίων	3
Ελάχιστη ταχύτητα δρομέα	18 rd/min
Μέγιστη ταχύτητα δρομέα	39 rd/min
Ταχύτητα εκκίνησης	2,5 m/s
Ταχύτητα αποκοπής	28 m/s
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	13 m/s
Ελάχιστο ύψος πλήμνης	37 m
Μέγιστο ύψος πλήμνης	50 m

Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.2.



Εικόνα 6.2 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος Enercon E-33. [19]

Στην Εικόνα 6.3 απεικονίζεται η ανεμογεννήτρια Enercon-E33, καθώς και τα μέρη από τα οποία αποτελείται.



Εικόνα 6.3 Ανεμογεννήτρια Enercon E-33. [19]

6.2.1.2 Ανεμογεννήτρια EWT – DW54 [7]

Το μοντέλο EWT – DW54 (Εικόνα 6.5) είναι ιδανικό για μικροδίκτυα, καθώς η αιολική ενέργεια που παράγεται, τροφοδοτείται στο μικροδίκτυο μέσω ενός σύγχρονου μετατροπέα πλήρους ισχύος. Επιπλέον, η ανεμογεννήτρια διαθέτει έναν αριθμό προγραμματιζόμενων λειτουργιών, όπως η δυνατότητα ρύθμισης του συντελεστή ισχύος καθώς και της τάσης με σκοπό να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του μικροδικτύου. Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας αυτής δε διατίθεται στη λίστα προτεινόμενων ανεμογεννητριών του λογισμικού HOMER και η μοντελοποίηση του πραγματοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε στην μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας στην πλατφόρμα της Σούδας (ενότητα 5.1.4). Το κόστος του μοντέλου EWT-DW54 ανέρχεται στα 550.000 €.

Στην Εικόνα 6.4 παρουσιάζονται τα μέρη της ανεμογεννήτριας EWT-DW54.



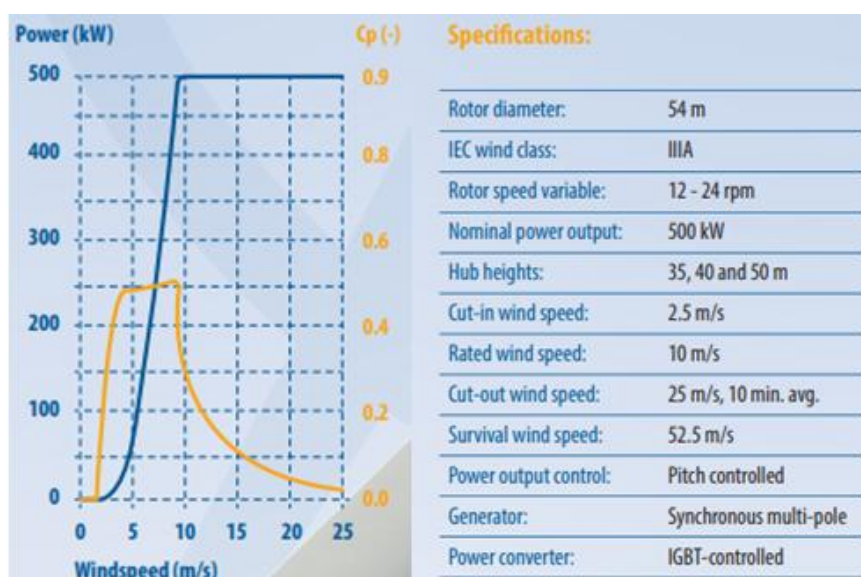
1. **Πτερύγια δρομέα:** Μεγάλη διάμετρος δρομέα για επίτευξη υψηλών ενεργειακών αποδόσεων. Βέλτιστη αεροδυναμική απόδοση με χαμηλά επίπεδα θορύβου.
2. **Μεταβλητό βήμα:** Κάθε πτερύγιο ρυθμίζεται αυτόματα για να ελέγχει την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας.
3. **Σχέδιο νασέλας:** Ευρύχωρος σχεδιασμός νασέλας για αρίστη εξυπηρέτηση και μέγιστη ασφάλεια.
4. **Γεννήτρια άμεσης μετάδοσης κίνησης:** Τα λιγότερα περιστρεφόμενα μέρη μειώνουν τη μηχανική καταπόνηση. Η ανάγκη συντήρησης μειώνεται, ενώ τα επίπεδα διαθεσιμότητας αυξάνονται.
5. **Σχεδιασμός θαλάμου μηχανισμών:** Τύπος κωνικού, σωληνωτού χάλυβα. Εσωτερική ανάβαση.

Εικόνα 6.4 Μέρη ανεμογεννήτριας EWT – DW54. [7]

Η Εικόνα 6.6 απεικονίζει τη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας EWT-DW54, όπως επίσης και ορισμένες πληροφορίες και χαρακτηριστικά για το μοντέλο αυτό.



Εικόνα 6.5 Ανεμογεννήτρια EWT – DW54. [7]



Εικόνα 6.6 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος και πληροφορίες – χαρακτηριστικά λειτουργίας ανεμογεννήτριας *EWT-DW54*. [7]

6.2.2 Επιλογή κατάλληλου τύπου συσσωρευτών

Οι τύποι των συσσωρευτών που χρησιμοποιήθηκαν σε ξεχωριστά σενάρια για την εκπόνηση των προσομοιώσεων της πλωτής πλατφόρμας είναι:

- Μπαταρία ιόντων - λιθίου: **RELiON – RB300** (12,8 V, 300 Ah)
- Μπαταρία μολύβδου – οξέως: **RES OPzV** (2 V, 1.940 Ah)

Οι μπαταρίες αυτές δεν υπάρχουν ως προτεινόμενες στο λογισμικό HOMER και έτσι, μοντελοποιήθηκαν με βάση τα χαρακτηριστικά τους από τα φυλλάδια των κατασκευαστών (όπως περιγράφηκε και στην περίπτωση της πλατφόρμας στη Σούδα στην ενότητα 5.1.5). Παρακάτω παρέχονται ορισμένες πληροφορίες για κάθε ένα μοντέλο μπαταρίας ξεχωριστά.

6.2.2.1 Συσσωρευτής RELiON – RB300 [11]

Η RELiON – RB300 είναι μία μπαταρία ιόντων λιθίου βαθιάς εκφόρτισης. Είναι μία κατάλληλη επιλογή για την πλωτή πλατφόρμα λόγω του μικρού βάρους της συγκριτικά με την μπαταρία μολύβδου – οξέως. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η μεγαλύτερη διάρκειά ζωής της. Παρόλο που το αρχικό κόστος της είναι υψηλότερο από άλλους τύπους μπαταριών, και συγκεκριμένα 3.100 €/μπαταρία, η RELiON – RB300 έχει έως και 10 φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και δεν απαιτεί συντήρηση.

Τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας RELiON – RB300 παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.7. Οι μπαταρίες συνδέθηκαν στο HOMER σε στοιχειοσειρές των τεσσάρων μπαταριών.

LITHIUM IRON PHOSPHATE BATTERY

ELECTRICAL SPECIFICATIONS		MECHANICAL SPECIFICATIONS	
Nominal Voltage	12.8 V	Dimensions (L x W x H)	20.5 x 10.5 x 9.0"
Nominal Capacity	300 Ah		520 x 267 x 228 mm
Capacity @ 25A	720 min	Weight	83 lbs (37.5 kg)
Energy	3840 Wh	Terminal Type	M8
Resistance	≤30 mΩ @ 50% SOC	Terminal Torque	80 - 100 in-lbs (9 - 11 N-m)
Efficiency	99%	Case Material	ABS
Self Discharge	<3% per Month	Enclosure Protection	IP56
Maximum Modules in Series	6	Cell Type - Chemistry	Cylindrical - LiFePO ₄
DISCHARGE SPECIFICATIONS		CHARGE SPECIFICATIONS	
Maximum Continuous Discharge Current	100 A	Recommended Charge Current	15 A - 50 A
Peak Discharge Current	200 A (7.5 s ±2.5 s)	Maximum Charge Current	100 A
BMS Discharge Current Cut-Off	280 A ±50 A (9 ±4 ms)	Charge Current (0 to -10 °C)	≤0.1 C
Recommended Low Voltage Disconnect	11 V	Charge Current (-20 to -10 °C)	≤0.05 C
BMS Discharge Voltage Cut-Off	8 V (2.0 ±0.08 vpc) (140 ±60 ms)	Recommended Charge Voltage	14.2 V - 14.6 V
Reconnect Voltage	9.2 V (2.3 ±0.1 vpc)	BMS Charge Voltage Cut-Off	15.6 V (3.9 ±0.025 vpc) (1.1 ±0.4 s)
Short Circuit Protection	200-600 μs	Reconnect Voltage	15.2 V (3.8 ±0.05 vpc)
TEMPERATURE SPECIFICATIONS		Balancing Voltage	14.4 V (3.6 ±0.025 vpc)
Discharge Temperature	-4 to 140 °F (-20 to 60 °C)	COMPLIANCE SPECIFICATIONS	
Charge Temperature	-4 to 113 °F (-20 to 45 °C)	Certifications	CE (battery) UN38.3 (battery) UL1642 & IEC62133 (cells)
Storage Temperature	23 to 95 °F (-5 to 35 °C)	Shipping Classification	UN 3480, CLASS 9
BMS High Temperature Cut-Off	176 °F (80 °C)		
Reconnect Temperature	122 °F (50 °C)		

Εικόνα 6.7 Χαρακτηριστικά μπαταρίας RELiON – RB300.

6.2.2.2 Συσσωρευτής RES OPzV [13]

Οι μπαταρίες υψηλής ποιότητας RES OPzV της εταιρίας SUNLIGHT είναι σχεδιασμένες για εφαρμογές που απαιτούν τακτικά βαθιά εκφόρτιση. Πρόκειται για μία λύση αποθήκευσης ενέργειας, η οποία δεν απαιτεί συντήρηση και προσφέρει αξιοπιστία και απόδοση σε κάθε είδους εγκατάσταση με εξαιρετικές ιδιότητες επαναφόρτισης. Ο βέλτιστος σχεδιασμός, ο λιγότερος χώρος που απαιτεί η εγκατάστασή τους, η χρήση υλικών υψηλής ποιότητας, η στιβαρή κατασκευή, καθώς και η τελευταίας τεχνολογίας διαδικασίες κατασκευής καθιστούν τις μπαταρίες μολύβδου - οξέως RES OPzV μία προτεινόμενη λύση για την πλωτή ενεργειακή πλατφόρμα. Το κόστος της μπαταρίας RES OPzV, που ορίστηκε και στο HOMER, είναι 810 €/μπαταρία.

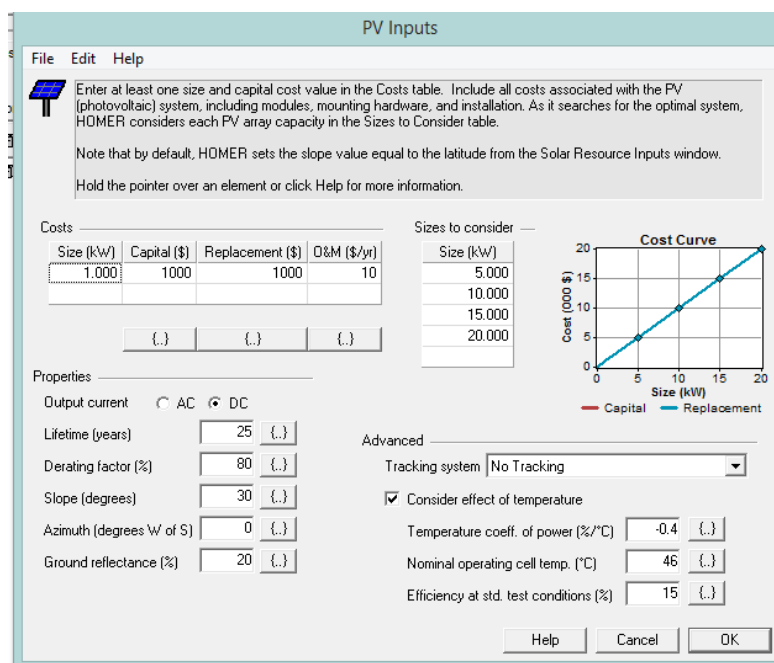
Τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή RES OPzV παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5. Οι μπαταρίες συνδέθηκαν στο HOMER σε στοιχειοσειρές των είκοσι τεσσάρων μπαταριών.

Πίνακας 6.5 Χαρακτηριστικά μπαταρίας RES OPzV.

Nominal Voltage	2 V
Nominal Capacity	1.940 Ah
Efficiency	92 %
Min. state of charge	20%
Float life	15 years
Dimensions	Length: 275 mm Width: 210 mm Height 1: 796 Height 2: 824 mm
Weight	105 kg

6.2.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που μοντελοποιήθηκαν στο HOMER για την εκπόνηση των προσομοιώσεων είναι τυπικά φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Πρόκειται για σταθερά συστήματα, χωρίς δυνατότητα κίνησης των αξόνων τους (*No tracking system*). Λόγω του περιορισμένου χώρου στην πλωτή πλατφόρμα, το μέγεθος των φωτοβολταϊκών ορίστηκε από 5 kW έως 20 kW, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.8. Η διάρκεια ζωής του φωτοβολταϊκού αρχικοποιήθηκε στα 25 χρόνια, ενώ ο παράγοντας μείωσης που εφαρμόζεται στην έξοδο του φωτοβολταϊκού προκειμένου να μειωθεί και να έρθει στα επίπεδα λειτουργίας σε πραγματικές συνθήκες (*Derating factor*) ορίστηκε 80%. Η κλίση των φωτοβολταϊκών (*Slope*) ορίστηκε 30°, καθώς σε αυτήν την κλίση τα φωτοβολταϊκά παράγουν περισσότερη ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος ορίστηκε 0.4 % ανά 1 °C (*Temperature coeff. of power*), η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού (*Nominal operating cell temperature*) είναι 46 °C, ενώ η απόδοση σε πρότυπες συνθήκες δοκιμών (*Efficiency at standard test conditions*) ορίστηκε στο 15%. Το κόστος αγοράς αρχικοποιήθηκε 1000 €/kW. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το HOMER δε λαμβάνει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου για την εκπόνηση των υπολογισμών. Για το 4^ο σενάριο φορτίου (αιχμή 297 kW), προστέθηκαν πλωτά φωτοβολταϊκά ισχύος 25 kW κοντά στην αυτόνομη, πλωτή πλατφόρμα, με σκοπό την εξυπηρέτηση του αυξημένου φορτίου του 4^{ου} σεναρίου. Η τιμή των πλωτών φωτοβολταϊκών είναι αρκετά αυξημένη, σε σύγκριση με την τιμή των φωτοβολταϊκών που θα εγκατασταθούν επάνω στην πλατφόρμα.



Εικόνα 6.8 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πλωτής πλατφόρμας.

6.2.4 Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)

Η μοντελοποίηση του αυτόνομου υβριδικού συστήματος πραγματοποιήθηκε, πέρα από τη χρήση της γεννήτριας Diesel, και με τη χρήση κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs). Η τιμή αγοράς της κυψέλης καυσίμου συγκεκριμένου τύπου είναι πολύ υψηλή σε σύγκριση με τη γεννήτρια Diesel. Η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου, στη συγκεκριμένη περίπτωση, καταναλώνει υγραέριο. Όμως, στο HOMER ορίστηκε η κατανάλωση προπανίου, λόγω του ότι το υγραέριο δεν υπάρχει ως προτεινόμενο στο λογισμικό HOMER και είναι παραπλήσιο του υγραερίου. Η απόδοση της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) φτάνει το 60% και η διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 35.000 ώρες, σε αντίθεση με τη γεννήτρια Diesel, η οποία έχει διάρκεια ζωής 15.000 ώρες.

6.3 Υπολογισμός εμβαδού του χώρου εγκατάστασης των μπαταριών

Σε όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν, υπολογίστηκε και ο χώρος που καταλαμβάνουν οι μπαταρίες, των οποίων οι διαστάσεις και ο αριθμός διαφέρουν από σενάριο σε σενάριο. Μεταξύ των μπαταριών, λήφθηκε υπόψη ότι υπάρχει κενό 30 mm για όλες τις πλευρές τους. Ο τρόπος υπολογισμού του εμβαδού και για τους δύο τύπους συσσωρευτών, που αναλύθηκαν στην ενότητα 6.2.2, παρουσιάζεται παρακάτω.

- Παράδειγμα υπολογισμού του εμβαδού με συσσωρευτές RES OPzV

Διαστάσεις μπαταρία RES OPzV: 275 mm x 210 mm

Κενό μεταξύ των μπαταριών: 30 mm

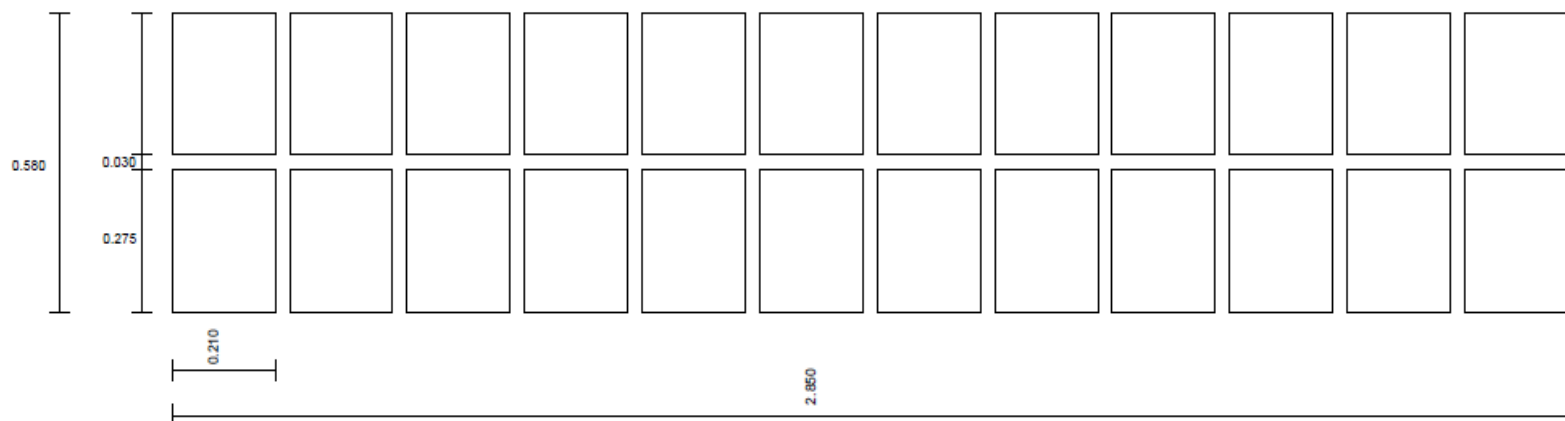
Αριθμός μπαταριών στο 1^ο σενάριο φορτίου

(Enercon E33 & RES OPzV & Dsl Generator - Αιχμή 50 kW):

24 μπαταρίες συνολικά

Υπολογισμός Εμβαδού βάσει της Εικόνας 6.9:

$$\begin{aligned} E &= ((275 \text{ mm} * 2 \text{ μπαταρίες στην πρώτη στήλη}) + (30 \text{ mm} * 1 \text{ κενό μεταξύ των μπαταριών στην πρώτη στήλη})) \times \\ &((210 \text{ mm} * 12 \text{ μπαταρίες στην πρώτη σειρά}) + (30 \text{ mm} * 11 \text{ κενά μεταξύ των μπαταριών στην πρώτη σειρά})) \\ &= 580 \text{ mm} \times 2.850 \text{ mm} = 1.653.000 \text{ mm}^2 = 1,653 \text{ m}^2 \end{aligned}$$



Εικόνα 6.9 Σχέδιο τοποθέτησης των μπαταριών RES OPzV.

- Παράδειγμα υπολογισμού του εμβαδού με συσσωρευτές RELiON RB300

Διαστάσεις μπαταρίας RELiON RB300: 520 mm x 267 mm

Κενό μεταξύ των μπαταριών: 30 mm

Αριθμός μπαταριών στο 1^ο σενάριο φορτίου

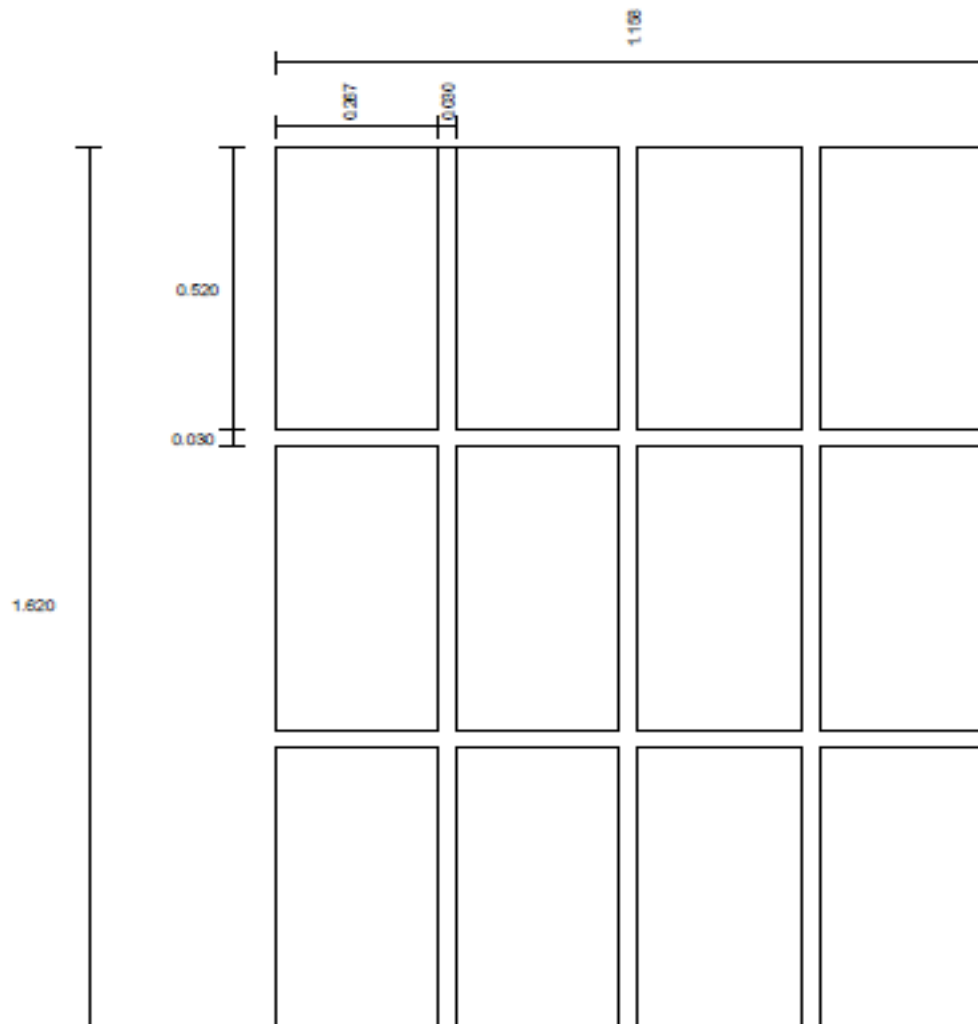
(Enercon E33 & RELiON RB300 & Dsl Generator - Αιχμή 50 kW):

12 μπαταρίες συνολικά

Υπολογισμός Εμβαδού βάσει της Εικόνας 6.10:

$$E = ((520 \text{ mm} * 3 \text{ μπαταρίες στην πρώτη στήλη}) + (30 \text{ mm} * 2 \text{ κενά μεταξύ των μπαταριών στην πρώτη στήλη})) \times ((267 \text{ mm} * 4 \text{ μπαταρίες στην πρώτη σειρά}) + (30 \text{ mm} * 3 \text{ κενά μεταξύ των μπαταριών στην πρώτη σειρά}))$$

$$= 1,620 \text{ mm} \times 1.158 \text{ mm} = 1.875.960 \text{ mm}^2 = 1,87596 \text{ m}^2$$



Εικόνα 6.10 Σχέδιο τοποθέτησης των μπαταριών RELiON RB300.

6.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων που έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού HOMER με σκοπό τη μελέτη όλων των συνδυασμών των σεναρίων που αναφέρθηκαν στην ενότητα 6.1. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.6, για κάθε ένα από τα τέσσερα σενάρια φορτίου, καθώς και για κάθε μία από τις περιπτώσεις λειτουργίας της πλατφόρμας ως αυτόνομη (με νηξελογεννήτρια ή κυψέλη καυσίμου) θα παρουσιαστούν τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί, κάθε φορά με διαφορετικό μοντέλο ανεμογεννήτριας ή συσσωρευτών, συμπεριλαμβανομένων και των υπόλοιπων στοιχείων που απαιτούνται για τη λειτουργικότητα του συστήματος (νηξελογεννήτρια ή κυψέλη καυσίμου, φωτοβολταϊκά στοιχεία και μετατροπέα). Για το σενάριο σύνδεσης της πλατφόρμας με το δίκτυο απαιτούνται μόνο φωτοβολταϊκά στοιχεία, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.6 Σύνολο όλων των δυνατών συνδυασμών που προσομοιώθηκαν για την αυτόνομη λειτουργία της πλατφόρμας.

Αυτόνομη λειτουργία πλωτής πλατφόρμας			
Νηξελογεννήτρια		Κυψέλη καυσίμου	
1 ^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 50 kW)	2 ^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 99 kW)	3 ^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 198 kW)	4 ^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 297 kW)
Φ/Β Στοιχεία & Ανεμογεννήτρια: <i>Enercon E33</i> & Συσσωρευτής: <i>RELiON RB300</i>			
Φ/Β Στοιχεία & Ανεμογεννήτρια: <i>EWT DW54</i> & Συσσωρευτής: <i>RELiON RB300</i>			
Φ/Β Στοιχεία & Ανεμογεννήτρια: <i>Enercon E33</i> & Συσσωρευτής: <i>RES OPzV</i>			
Φ/Β Στοιχεία & Ανεμογεννήτρια: <i>EWT DW54</i> & Συσσωρευτής: <i>RES OPzV</i>			

Πίνακας 6.7 Σενάρια σύνδεσης της πλατφόρμας με το δίκτυο.

Σύνδεση της πλωτής πλατφόρμας με το δίκτυο			
1 ^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 50 kW)	2 ^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 99 kW)	3 ^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 198 kW)	4 ^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 297 kW)
Φ/Β Στοιχεία			

6.4.1 Αυτονομία Πλατφόρμας

Σε αυτό το σενάριο λειτουργίας της πλατφόρμας ως αυτόνομη και για τα 3 πρώτα σενάρια του φορτίου (με αιχμή 50, 99 και 198 kW αντίστοιχα), τέθηκαν στο λογισμικό HOMER ορισμένοι περιορισμοί. Αρχικά, λόγω περιορισμένου χώρου στην πλωτή πλατφόρμα του Ηρακλείου, ορίστηκε η ισχύς των φωτοβολταϊκών από 5 έως 20 kW (5, 10, 15 και 20 kW). Επίσης, για όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν ορίστηκε μόνο μία ανεμογεννήτρια. Λόγω των περιορισμών αυτών, χρησιμοποιήθηκε το κατάλληλο μέγεθος νηζελογεννήτριας ή κυψέλης καυσίμου με σκοπό την ασφαλή κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της πλωτής πλατφόρμας.

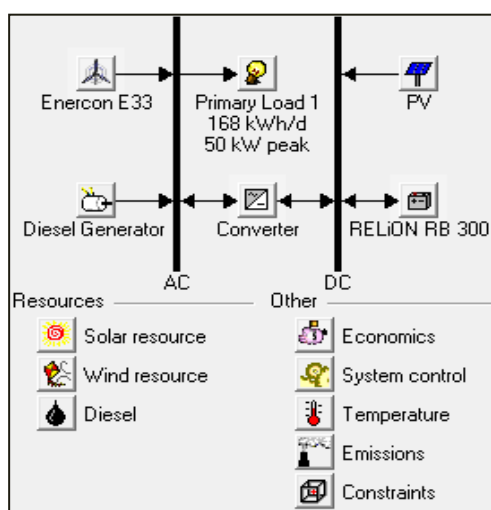
Για το 4^ο σενάριο (αιχμή 297 kW) θεωρήθηκε η προσθήκη πλωτών φωτοβολταϊκών κοντά στην αυτόνομη, πλωτή πλατφόρμα. Έτσι, μελετήθηκε το σενάριο εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στοιχείων μεγέθους 20 kW στην κύρια πλατφόρμα και πρόσθετων πλωτών φωτοβολταϊκών στοιχείων μεγέθους 25 kW, με σκοπό την εξυπηρέτηση του αυξημένου φορτίου του 4^{ου} σεναρίου.

6.4.1.1 Σενάριο αυτόνομης λειτουργίας πλατφόρμας με γεννήτρια Diesel, Φωτοβολταϊκά, Ανεμογεννήτρια και Συσσωρευτές

1^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 50 kW)

- *Enercon E33 & RELiON RB300*

Για το 1^ο σενάριο φορτίου με αιχμή 50 kW, εξετάστηκε αρχικά η περίπτωση λειτουργίας της πλατφόρμας ως αυτόνομο σύστημα με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων, νηζελογεννήτριας, μετατροπέα, της ανεμογεννήτριας *Enercon E33* και των μπαταριών *RELiON RB 300*. Στην Εικόνα 6.11 φαίνεται το μοντέλο του αυτόνομου υβριδικού συστήματος στο περιβάλλον HOMER, ενώ στον Πίνακα 6.8 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

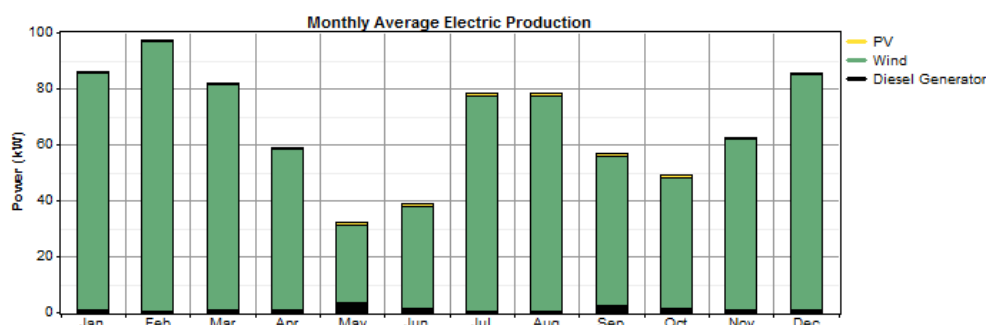


Εικόνα 6.11 Οικονομικότερο μοντέλο υβριδικού συστήματος για την αυτόνομη λειτουργία της πλατφόρμας, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία- *Enercon E33 & RELiON RB300 & Dsl Generator*).

**Πίνακας 6.8 Στοιχεία υβριδικού συστήματος,
(1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία Enercon E33 & RELiON RB300 & Dsl Generator).**

System architecture - Optimum economic layout	5 kW PV
	1 Enercon E33
	35 kW Diesel Generator
	12 RELiON RB-300
	15 kW Inverter
	15 kW Rectifier
	Load Following

Στην Εικόνα 6.12 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία ηλεκτρική ισχύς κάθε μονάδας σε μορφή ραβδογράμματος για το βελτιστοποιημένο σύστημα, όπου φαίνεται ότι η παραγωγή ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο από την ανεμογεννήτρια (97%), ενώ κατά ένα μικρό μέρος από τα φωτοβολταϊκά. Η μονάδα Diesel συμμετέχει επίσης με πολύ μικρό ποσοστό που οφείλεται κυρίως στον μήνα Μάιο. (Εικόνα 6.13)



Εικόνα 6.12 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, γεννήτριας Diesel και μπαταρίες, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - Enercon E33 & RELiON RB300 & Dsl Generator).

Production			Consumption			Quantity		
	kWh/yr	%		kWh/yr	%		kWh/yr	%
PV array	7,235	1	AC primary load	61,297	100	Excess electricity	527,229	89.5
Wind turbine	570,152	97	Total	61,297	100	Unmet electric load	23.4	0.0
Diesel Generator	11,552	2				Capacity shortage	59.1	0.1
Total	588,938	100						
						Quantity		Value
						Renewable fraction		0.980

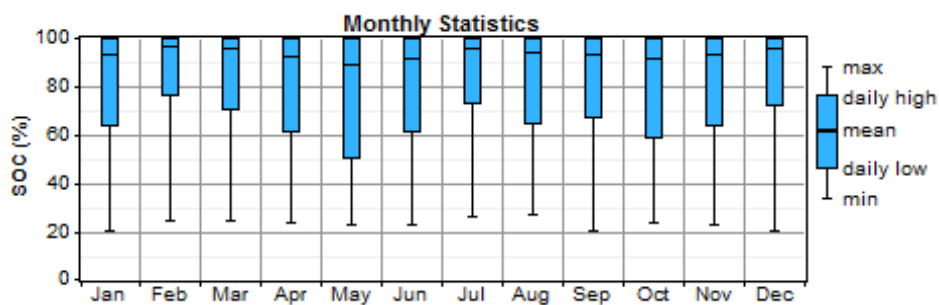
Εικόνα 6.13 Βασικά στοιχεία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας

Στον Πίνακα 6.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τα στοιχεία κόστους κάθε μονάδας, καθώς και του συνολικού συστήματος. Επίσης, τα κόστη διαχωρίζονται σε κατηγορίες, όπως είναι το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος αντικατάστασης, τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου και η υπολειμματική αξία. Ο κυριότερος συντελεστής κόστους στην περίπτωση αυτή είναι η αγορά, η αντικατάσταση, η συντήρηση και λειτουργία της ανεμογεννήτριας, το συνολικό κόστος της οποίας ανέρχεται στα 430.289 €.

Πίνακας 6.9 Συγκεντρωτικά στοιχεία κόστους ανά κατηγορία για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, γεννήτριας Diesel και μπαταρίες, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία- Enercon E33 & RELiON RB300 & Dsl Generator).

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
<i>PV</i>	5.000	0	573	0	-312	5.262
<i>Enercon E33</i>	350.000	0	80.289	0	0	430.289
<i>Diesel Generator</i>	14.000	0	2.931	79.196	-116	96.010
<i>RELiON RB-300</i>	37.200	0	0	0	0	37.200
<i>Converter</i>	7.500	3.129	0	0	-1.559	9.070
<i>System</i>	413.700	3.129	83.794	79.196	-1.987	577.831

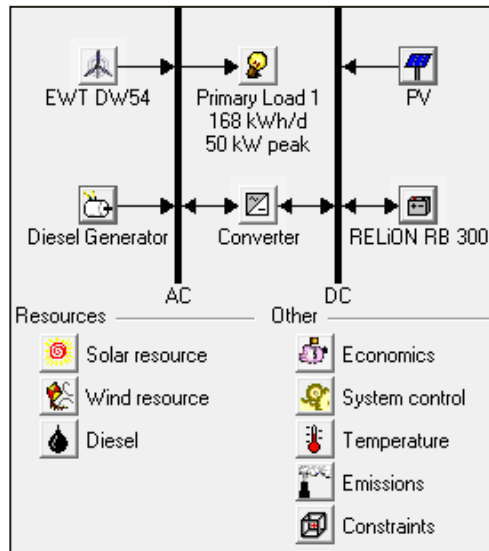
Το διάγραμμα της Εικόνας 6.14 απεικονίζει το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών για κάθε μήνα. Τον Ιανουάριο, τον Σεπτέμβριο και τον Δεκεμβριο, οι συσσωρευτές φτάνουν στο κατώτερο ποσοστό φόρτισης, το οποίο είναι 20%.



Εικόνα 6.14 Μηνιαία στατιστικά φόρτισης των συσσωρευτών, (1^ο σενάρι φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - Enercon E33 & RELiON RB300 & Dsl Generator).

- *EWT DW54 & RELiON RB300*

Στη συνέχεια, για το ίδιο σενάριο φορτίου (αιχμή 50 kW), εξετάστηκε η περίπτωση λειτουργίας της πλατφόρμας ως αυτόνομο σύστημα με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων, νηξελογεννήτριας, μετατροπέα, της ανεμογεννήτριας *EWT DW54* και των μπαταριών *RELiON RB 300*. Στην Εικόνα 6.15 φαίνεται το μοντέλο του αυτόνομου υβριδικού συστήματος στο περιβάλλον HOMER, ενώ στον Πίνακα 6.10 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

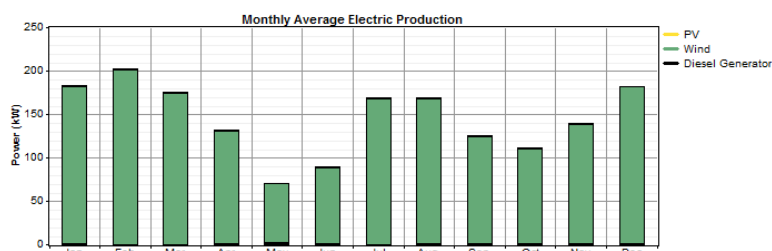


Εικόνα 6.15 Οικονομικότερο μοντέλο υβριδικού συστήματος για την αυτόνομη λειτουργία της πλατφόρμας, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - *EWT DW54 & RELiON RB300 & Dsl Generator*).

Πίνακας 6.10 Στοιχεία υβριδικού συστήματος, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - *EWT DW54 & RELiON RB300 & Dsl Generator*).

System architecture - Optimum economic layout	5 kW PV
	1 EWT DW54
	35 kW Diesel Generator
	8 RELiON RB-300
	10 kW Inverter
	10 kW Rectifier
	Load Following

Στην Εικόνα 6.16 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία ηλεκτρική ισχύς κάθε μονάδας σε μορφή ραβδογράμματος για το βελτιστοποιημένο σύστημα, όπου φαίνεται ότι η παραγωγή ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο από την ανεμογεννήτρια (99%), ενώ τα φωτοβολταϊκά και η μονάδα Diesel συμμετέχουν με πολύ μικρό ποσοστό (περίπου 2% συνολικά) (Εικόνα 6.17).



Εικόνα 6.16 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, γεννήτριας Diesel και μπαταρίες, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - EWT DW54 & RELiON RB300 & Dsl Generator).

Production			Consumption			Quantity		
	kWh/yr	%		kWh/yr	%		kWh/yr	%
PV array	7,235	1	AC primary load	61,300	100	Excess electricity	1,212,943	95.2
Wind turbine	1,258,228	99	Total	61,300	100	Unmet electric load	20.0	0.0
Diesel Generator	9,093	1				Capacity shortage	55.6	0.1
Total	1,274,555	100						

Quantity	Value
Renewable fraction	0.993

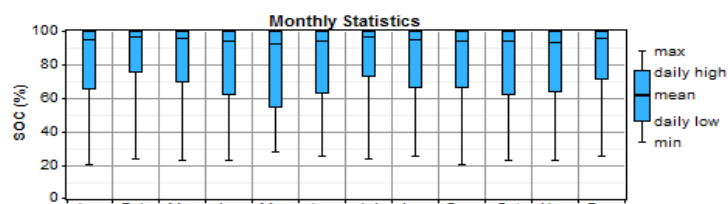
Εικόνα 6.17 Βασικά στοιχεία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Στον Πίνακα 6.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τα στοιχεία κόστους κάθε μονάδας, καθώς και του συνολικού συστήματος. Επίσης, τα κόστη διαχωρίζονται σε κατηγορίες, όπως είναι το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος αντικατάστασης, τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου και η υπολειμματική αξία. Ο κυριότερος συντελεστής κόστους στην περίπτωση αυτή είναι η αγορά, η αντικατάσταση, η συντήρηση και λειτουργία της ανεμογεννήτριας, το συνολικό κόστος της οποίας ανέρχεται στα 676.169 €.

Πίνακας 6.11 Συγκεντρωτικά στοιχεία κόστους ανά κατηγορία για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, γεννήτριας Diesel και μπαταρίες, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία- EWT DW54 & RELiON RB300 & Dsl Generator).

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
PV	5.000	0	573	0	-312	5.262
EWT DW54	550.000	0	126.169	0	0	676.169
Diesel Generator	14.000	0	2.493	64.427	-751	80.169
RELiON RB-300	24.800	0	0	0	0	24.800
Converter	5.000	2.086	0	0	-1.039	6.047
System	598.800	2.086	129.236	64.427	-2.102	792.446

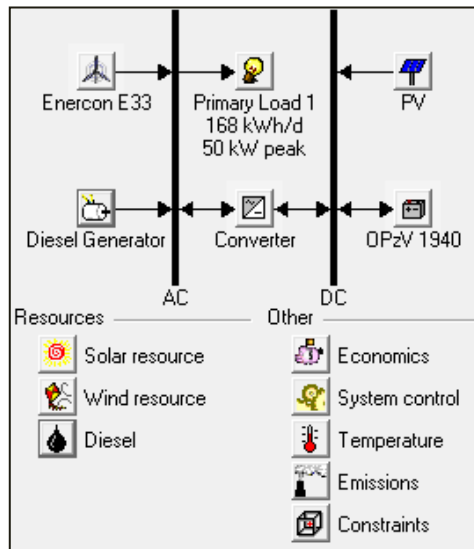
Το διάγραμμα της Εικόνας 6.18 απεικονίζει το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών για κάθε μήνα. Τον Ιανουάριο και τον Σεπτέμβριο, οι συσσωρευτές φτάνουν στο κατώτερο ποσοστό φόρτισης, το οποίο είναι 20%.



Εικόνα 6.18 Μηνιαία στατιστικά φόρτισης των συσσωρευτών, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - EWT DW54 & RELiON RB300 & Dsl Generator).

- *Enercon E33 & RES OPzV*

Ο επόμενος συνδυασμός στοιχείων που μελετήθηκε στο λογισμικό HOMER για το 1^ο σενάριο φορτίου (αιχμή 50 kW) με σκοπό την αυτόνομη λειτουργία της πλωτής πλατφόρμας είναι: φωτοβολταϊκά στοιχεία, νηζελογεννήτρια, μετατροπέας, ανεμογεννήτρια *Enercon E33* και μπαταρίες *RES OPzV*. Στην Εικόνα 6.19 φαίνεται το μοντέλο του αυτόνομου υβριδικού συστήματος στο περιβάλλον HOMER, ενώ στον Πίνακα 6.12 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

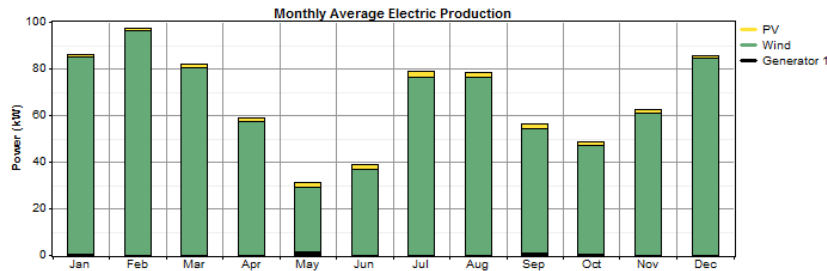


Εικόνα 6.19 Οικονομικότερο μοντέλο υβριδικού συστήματος για την αυτόνομη λειτουργία της πλατφόρμας, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – *Enercon E33 & RES OPzV & Dsl Generator*)

Πίνακας 6.12 Στοιχεία υβριδικού συστήματος (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – *Enercon E33 & RES OPzV & Dsl Generator*).

System architecture - Optimum economic layout	10 kW PV
	1 Enercon E33
	35 kW Diesel Generator
	24 RES OPzV
	35 kW Inverter
	35 kW Rectifier
	Load Following

Στην Εικόνα 6.20 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία ηλεκτρική ισχύς κάθε μονάδας σε μορφή ραβδογράμματος για το βελτιστοποιημένο σύστημα, όπου φαίνεται ότι η παραγωγή ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο από την ανεμογεννήτρια (97%), ενώ κατά ένα μικρό μέρος από τα φωτοβολταϊκά. Η μονάδα Diesel συμμετέχει επίσης με πολύ μικρό ποσοστό που οφείλεται κυρίως στον μήνα Μάιο. (Εικόνα 6.21)



Εικόνα 6.20 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, γεννήτριας Diesel και μπαταρίες, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – Enercon E33 & RES OPzV & Dsl Generator).

Production			Consumption			Quantity		
	kWh/yr	%		kWh/yr	%		kWh/yr	%
PV array	14,469	2	AC primary load	61,308	100	Excess electricity	523,494	89.2
Wind turbine	570,152	97	Total	61,308	100	Unmet electric load	12.1	0.0
Generator 1	2,124	0				Capacity shortage	39.4	0.1
Total	586,745	100						
						Quantity	Value	
						Renewable fraction	0.996	

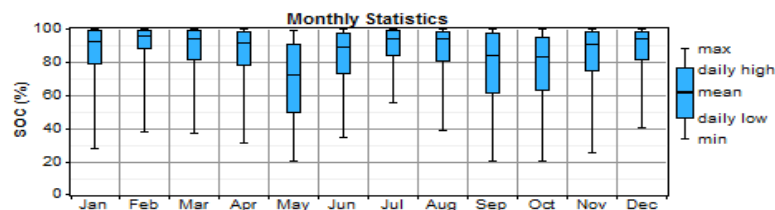
Εικόνα 6.21 Βασικά στοιχεία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Στον Πίνακα 6.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τα στοιχεία κόστους κάθε μονάδας, καθώς και του συνολικού συστήματος. Επίσης, τα κόστη διαχωρίζονται σε κατηγορίες, όπως είναι το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος αντικατάστασης, τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου και η υπολειμματική αξία. Ο κυριότερος συντελεστής κόστους στην περίπτωση αυτή είναι η αγορά, η αντικατάσταση, η συντήρηση και λειτουργία της ανεμογεννήτριας, το συνολικό κόστος της οποίας ανέρχεται στα 430.289 €.

Πίνακας 6.13 Συγκεντρωτικά στοιχεία κόστους ανά κατηγορία για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, γεννήτριας Diesel και μπαταρίες, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – Enercon E33 & RES OPzV & Dsl Generator).

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
PV	10.000	0	1.147	0	-624	10.523
Enercon E33	350.000	0	80.289	0	0	430.289
Diesel Generator	14.000	0	610	15.360	-3.481	26.489
RES OPzV	19.440	8.112	0	0	-4.041	23.511
Converter	17.500	7.302	0	0	-3.638	21.164
System	410.940	15.414	82.047	15.360	-11.783	511.977

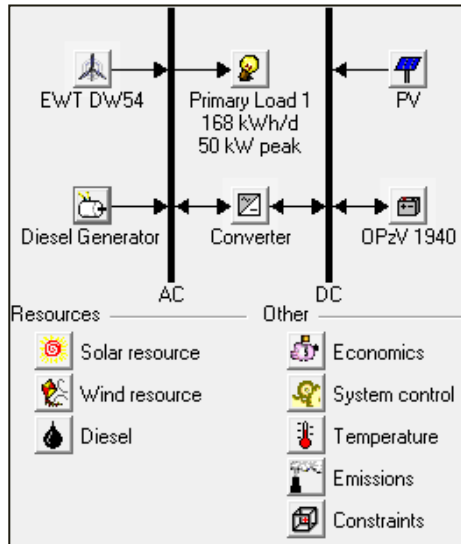
Το διάγραμμα της Εικόνας 6.22 απεικονίζει το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών για κάθε μήνα. Τον Μάιο, τον Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο, οι συσσωρευτές φτάνουν στο κατώτερο ποσοστό φόρτισης, το οποίο είναι 20%.



Εικόνα 6.22 Μηνιαία στατιστικά φόρτισης των συσσωρευτών, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – Enercon E33 & RES OPzV & Dsl Generator).

- *EWT DW54 & RES OPzV*

Τέλος, για το ίδιο σενάριο φορτίου (αιχμή 50 kW), εξετάστηκε η περίπτωση λειτουργίας της πλατφόρμας ως αυτόνομο σύστημα με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων, νηζελογεννήτριας, μετατροπέα, της ανεμογεννήτριας *EWT DW54* και των μπαταριών *RES OPzV*. Στην Εικόνα 6.23 φαίνεται το μοντέλο του αυτόνομου υβριδικού συστήματος στο περιβάλλον HOMER, ενώ στον Πίνακα 6.14 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

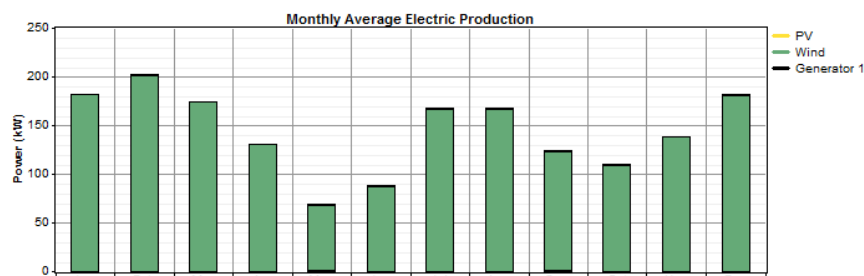


Εικόνα 6.23 Οικονομικότερο μοντέλο υβριδικού συστήματος για την αυτόνομη λειτουργία της πλατφόρμας, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – *EWT DW54 & RES OPzV & Dsl Generator*).

Πίνακας 6.14 Στοιχεία υβριδικού συστήματος, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία –*EWT DW54 & RES OPzV & Dsl Generator*).

System architecture - Optimum economic layout	5 kW PV
	1 EWT DW54
	35 kW Diesel Generator
	24 RES OPzV
	30 kW Inverter
	30 kW Rectifier
	Load Following

Στην Εικόνα 6.24 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία ηλεκτρική ισχύς κάθε μονάδας σε μορφή ραβδογράμματος για το βελτιστοποιημένο σύστημα, όπου φαίνεται ότι η παραγωγή ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο από την ανεμογεννήτρια (99%), ενώ κατά ένα μικρό μέρος από τα φωτοβολταϊκά. Η μονάδα Diesel συμμετέχει επίσης με πολύ μικρό ποσοστό. (Εικόνα 6.25)



Εικόνα 6.24 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, γεννήτριας Diesel και μπαταρίες, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – EWT DW54 & RES OPzV & Dsl Generator).

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%	Quantity	kWh/yr	%
PV array	7,235	1	AC primary load	61,310	100	Excess electricity	1,204,415	95.0
Wind turbine	1,258,228	99	Total	61,310	100	Unmet electric load	10.3	0.0
Generator 1	1,776	0				Capacity shortage	34.8	0.1
Total	1,267,238	100						

Quantity	Value
Renewable fraction	0.999

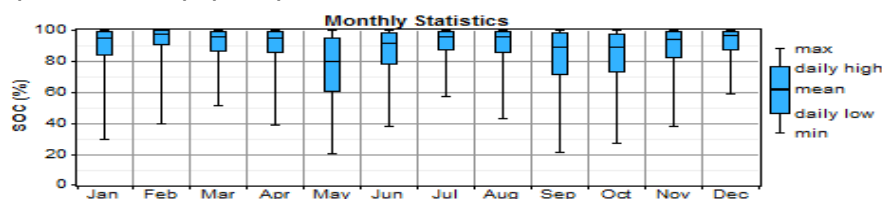
Εικόνα 6.25 Βασικά στοιχεία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Στον Πίνακα 6.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τα στοιχεία κόστους κάθε μονάδας, καθώς και του συνολικού συστήματος. Επίσης, τα κόστη διαχωρίζονται σε κατηγορίες, όπως είναι το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος αντικατάστασης, τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου και η υπολειμματική αξία. Ο κυριότερος συντελεστής κόστους στην περίπτωση αυτή είναι η αγορά, η αντικατάσταση, η συντήρηση και λειτουργία της ανεμογεννήτριας, το συνολικό κόστος της οποίας ανέρχεται στα 676.169 €.

Πίνακας 6.15 Συγκεντρωτικά στοιχεία κόστους ανά κατηγορία για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, γεννήτριας Diesel και μπαταρίες, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – EWT DW54 & RES OPzV & Dsl Generator).

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
PV	5.000	0	573	0	-312	5.262
EWT DW54	550.000	0	126.169	0	0	676.169
Diesel Generator	14.000	0	522	12.976	-3.609	23.890
RES OPzV	19.440	8.112	0	0	-4.041	23.511
Converter	15.000	6.259	0	0	-3.118	18.141
System	603.440	14.371	127.265	12.976	-11.079	746.972

Το διάγραμμα της Εικόνας 6.26 απεικονίζει το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών για κάθε μήνα. Τον Μάιο και τον Σεπτέμβριο, οι συσσωρευτές φτάνουν στο κατώτερο ποσοστό φόρτισης, το οποίο είναι 20%.



Εικόνα 6.26 Μηνιαία στατιστικά φόρτισης των συσσωρευτών, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – EWT DW54 & RES OPzV & Dsl Generator).

Συγκριτική παρουσίαση 1^{ου} σεναρίου λειτουργίας της πλατφόρμας ως αυτόνομη (με τη χρήση ΑΠΕ και Γεννήτριας Diesel)

Αυτόνομο σύστημα – 1^ο σενάριο φορτίου: Αιχμή 50 kW

Πίνακας 6.16 Σύγκριση των βασικών στοιχείων των συστημάτων που παρουσιάστηκαν για το 1^ο σενάριο φορτίου με αιχμή 50 kW.

	Enercon E33 & RELiON RB300	EWT DW54 & RELiON RB300	Enercon E33 & RES OPzV	EWT DW54 & RES OPzV
Καθαρό παρόν κόστος συστήματος (€)	577.831	792.446	511.977	746.972
Αρχική επένδυση κεφαλαίου (€)	413.700	598.800	410.940	603.440
Κόστος λειτουργίας (€/έτος)	14.310	16.883	8.809	12.514
Κόστος ενέργειας (COE) (€/kWh)	0,822	1,127	0,728	1,062
Μέγεθος Φ/Β (kW)	5	5	10	5
Μέγεθος Γεννήτριας Diesel (kW)	35	35	35	35
Ώρες λειτουργίας γεννήτριας Diesel/έτος	730	621	152	130
Κατανάλωση καυσίμου Diesel (L/έτος)	4.932	4.012	957	808
Αντικατάσταση Γεννήτριας Diesel	σε 20,5 χρόνια	σε 24,2 χρόνια	σε 98,7 χρόνια	σε 115 χρόνια
Μέγεθος Μετατροπέα (kW)	15	10	35	30
Αριθμός Μπαταριών	3 παράλληλες σειρές 4 ^{ων} μπαταριών (12 μπαταρίες)	2 παράλληλες σειρές 4 ^{ων} μπαταριών (8 μπαταρίες)	1 παράλληλη σειρά 24 ^{ων} μπαταριών (24 μπαταρίες)	1 παράλληλες σειρές 24 ^{ων} μπαταριών (24 μπαταρίες)
Βάρος Μπαταριών (kg)	450	300	2.520	2.520
Αντικατάσταση Μπαταριών	σε 20 χρόνια	σε 20 χρόνια	σε 15 χρόνια	σε 15 χρόνια
Εμβαδόν χώρου εγκατάστασης μπαταριών (m ²)	1,9	1,2	1,7	1,7

Αυτόνομο σύστημα – 2^ο σενάριο φορτίου: Αιχμή 99 kW

Πίνακας 6.17 Σύγκριση των βασικών στοιχείων των συστημάτων το 2^ο σενάριο φορτίου με αιχμή 99 kW.

	Enercon E33 & RELiON RB300	EWT DW54 & RELiON RB300	Enercon E33 & RES OPzV	EWT DW54 & RES OPzV
Καθαρό παρόν κόστος συστήματος (€)	788.859	957.447	620.563	834.899
Αρχική επένδυση κεφαλαίου (€)	572.300	674.900	489.320	656.380
Κόστος λειτουργίας (€/έτος)	18.881	24.634	11.442	15.564
Κόστος ενέργειας (COE) (€/kWh)	0,561	0,681	0,441	0,594
Μέγεθος Φ/Β (kW)	20	10	20	5
Μέγεθος Γεννήτριας Diesel (kW)	65	70	65	75
Αντικατάσταση Γεννήτριας Diesel	σε 27,8 χρόνια	σε 22 χρόνια	σε 78,1 χρόνια	78,5 χρόνια
Ώρες λειτουργίας γεννήτριας Diesel/έτος	540	681	192	191
Κατανάλωση καυσίμου Diesel (L/έτος)	7.953	9.252	2.177	2.625
Μέγεθος Μετατροπέα (kW)	55	25	70	65
Αριθμός Μπαταριών	12 παράλληλες σειρές 4 ^{ων} μπαταριών (48 μπαταρίες)	6 παράλληλες σειρές 4 ^{ων} μπαταριών (24 μπαταρίες)	3 παράλληλες σειρές 24 ^{ων} μπαταριών (72 μπαταρίες)	2 παράλληλες σειρές 24 ^{ων} μπαταριών (48 μπαταρίες)
Βάρος Μπαταριών (kg)	1.800	900	7.560	5.040
Αντικατάσταση Μπαταριών	σε 20 χρόνια	σε 20 χρόνια	σε 15 χρόνια	σε 14,8 χρόνια
Εμβαδόν χώρου εγκατάστασης μπαταριών (m²)	7,6	3,8	5,1	3,4

Αυτόνομο σύστημα – 3^ο σενάριο φορτίου: Αιχμή 198 kW

Πίνακας 6.18 Σύγκριση των βασικών στοιχείων των συστημάτων το 3^ο σενάριο φορτίου με αιχμή 198 kW.

	Enercon E33 & RELiON RB300	EWT DW54 & RELiON RB300	Enercon E33 & RES OPzV	EWT DW54 & RES OPzV
Καθαρό παρόν κόστος συστήματος (€)	1.329.097	1.699.073	1.146.874	1.353.945
Αρχική επένδυση κεφαλαίου (€)	860.500	834.100	679.460	810.640
Κόστος λειτουργίας (€/έτος)	40.854	75.412	40.751	47.368
Κόστος ενέργειας (COE) (€/kWh)	0,473	0,604	0,408	0,481
Μέγεθος Φ/Β (kW)	20	20	20	20
Μέγεθος Γεννήτριας Diesel (kW)	140	145	155	135
Ώρες λειτουργίας γεννήτριας Diesel/έτος	717	877	324	203
Κατανάλωση καυσίμου Diesel (L/έτος)	22.632	25.088	8.970	4.921
Αντικατάσταση Γεννήτριας Diesel	σε 20,9 χρόνια	σε 17,1 χρόνια	σε 46,3 χρόνια	σε 73,9 χρόνια
Μέγεθος Μετατροπέα (kW)	125	65	145	140
Αριθμός Μπαταριών	30 παράλληλες σειρές 4 ^{ων} μπαταριών (120 μπαταρίες)	14 παράλληλες σειρές 4 ^{ων} μπαταριών (56 μπαταρίες)	9 παράλληλες σειρές 24 ^{ων} μπαταριών (216 μπαταρίες)	6 παράλληλες σειρές 24 ^{ων} μπαταριών (144 μπαταρίες)
Βάρος Μπαταριών (kg)	4.500	2.100	22.680	15.120
Αντικατάσταση Μπαταριών	σε 20 χρόνια	σε 20 χρόνια	σε 15 χρόνια	σε 15 χρόνια
Εμβαδόν χώρου εγκατάστασης μπαταριών (m²)	19,1	8,9	15,6	10,3

Αυτόνομο σύστημα – 4^ο σενάριο φορτίου: Αιχμή 297 kW

Πίνακας 6.19 Σύγκριση των βασικών στοιχείων των συστημάτων το 4^ο σενάριο φορτίου με αιχμή 297 kW.

	Enercon E33 & RELiON RB300	EWT DW54 & RELiON RB300	Enercon E33 & RES OPzV	EWT DW54 & RES OPzV
Καθαρό παρόν κόστος συστήματος (€)	1.923.691	2.152.703	1.653.020	1.621.497
Αρχική επένδυση κεφαλαίου (€)	1.138.000	1.195.500	951.420	1.009.840
Κόστος λειτουργίας (€/έτος)	68.500	83.453	61.169	53.327
Κόστος ενέργειας (COE) (€/kWh)	0,456	0,510	0,392	0,384
Μέγεθος Φ/Β (kW)	45	45	45	45
Μέγεθος Γεννήτριας Diesel (kW)	215	200	175	205
Ώρες λειτουργίας γεννήτριας Diesel/έτος	859	679	478	207
Κατανάλωση καυσίμου Diesel (L/έτος)	40.751	30.617	20.015	7.559
Αντικατάσταση Γεννήτριας Diesel	σε 17,5 χρόνια	σε 22,1 χρόνια	σε 31,4 χρόνια	σε 72,5 χρόνια
Μέγεθος Μετατροπέα (kW)	180	155	255	220
Αριθμός Μπαταριών	45 παράλληλες σειρές 4 ^{ων} μπαταριών (180 μπαταρίες)	35 παράλληλες σειρές 4 ^{ων} μπαταριών (140 μπαταρίες)	18 παράλληλες σειρές 24 ^{ων} μπαταριών (432 μπαταρίες)	11 παράλληλες σειρές 24 ^{ων} μπαταριών (264 μπαταρίες)
Βάρος Μπαταριών (kg)	6.750	5.250	45.360	27.720
Αντικατάσταση Μπαταριών	σε 20 χρόνια	σε 20 χρόνια	σε 15 χρόνια	σε 15 χρόνια
Εμβαδόν χώρου εγκατάστασης μπαταριών (m ²)	28,6	22,3	31,2	19

Όπως φαίνεται στους παραπάνω πίνακες (Πίνακες 6.16, 6.17, 6.18 και 6.19), στα συστήματα που περιέχονται μπαταρίες μολύβδου-οξέως (RES OPzV), η γεννήτρια Diesel φαίνεται να έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και η αντικατάστασή της θα πρέπει να γίνει σε περισσότερα χρόνια, σε σύγκριση με τα συστήματα τα οποία δομούνται από μπαταρίες ιόντων λιθίου (RELiON RB300). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται στις μπαταρίες μολύβδου οξέως είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που αποθηκεύεται στις μπαταρίες ιόντων λιθίου, λόγω της σημαντικής διαφοράς στον αριθμό τους, καθώς και στην ονομαστική χωρητικότητά τους (*RES OPzV: 1940 Ah, RELiON RB300: 300 Ah*). Έτσι, η γεννήτρια Diesel λειτουργεί με μεγαλύτερο ποσοστό στα συστήματα με τις μπαταρίες RELiON RB300, προκειμένου να ικανοποιηθεί το απαιτούμενο φορτίο. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό από τις ώρες λειτουργίας ανά έτος της γεννήτριας Diesel, καθώς και από την κατανάλωση του πετρελαίου. Αντίθετα στα συστήματα με μπαταρίες RES OPzV, η νηξελογεννήτρια λειτουργεί με μικρό ποσοστό λόγω της μεγαλύτερης αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που επιτυγχάνεται με τις συγκεκριμένες μπαταρίες. Η γεννήτρια Diesel σε όλα τα σενάρια λειτουργεί πολύ λίγες ώρες. Συγκεκριμένα, στη διάρκεια ενός έτους λειτουργεί λιγότερο από το 10% των συνολικών ωρών του έτους (876 ώρες).

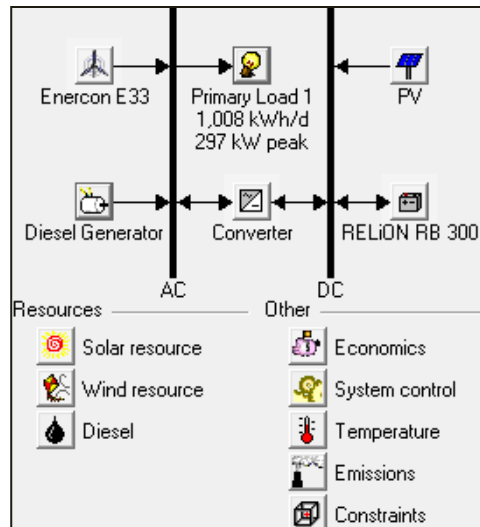
Ένα μειονέκτημα των συστημάτων που αποτελούνται από τις μπαταρίες RES OPzV είναι το μεγάλο βάρος τους, καθώς η μία μπαταρία ζυγίζει 105 kg, σε αντίθεση με τις μπαταρίες RELiON RB300 με βάρος 37,5 kg η καθεμία. Επίσης, η διάρκεια ζωής των μπαταριών RELiON RB300 (20 χρόνια) είναι μεγαλύτερη από αυτή των μπαταριών RES OPzV (15 χρόνια). Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι οι μπαταρίες μολύβδου – οξέως, παρότι έχουν μικρότερες διαστάσεις από μια μπαταρία ιόντων λιθίου, λόγω του αυξημένου αριθμού μπαταριών που απαιτούνται στην πλειοψηφία των σεναρίων για την αυτόνομη λειτουργία του συστήματος, καταλήγουν να καλύπτουν μεγαλύτερη επιφάνεια στην πλωτή πλατφόρμα από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα δύο προσομοιώσεων του Πίνακα 6.19 που αναλύθηκαν στο λογισμικό HOMER για το 4^ο σενάριο φορτίου.

4^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 297 kW)

- *Enercon E33 & RELiON RB300*

Για το 4^ο σενάριο φορτίου με αιχμή 297 kW, εξετάστηκε η περίπτωση λειτουργίας της πλατφόρμας ως αυτόνομο σύστημα με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων, νηζελογεννήτριας, μετατροπέα, της ανεμογεννήτριας *Enercon E33* και των μπαταριών *RELiON RB 300*. Στην Εικόνα 6.27 φαίνεται το μοντέλο του αυτόνομου υβριδικού συστήματος στο περιβάλλον HOMER, ενώ στον Πίνακα 6.20 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

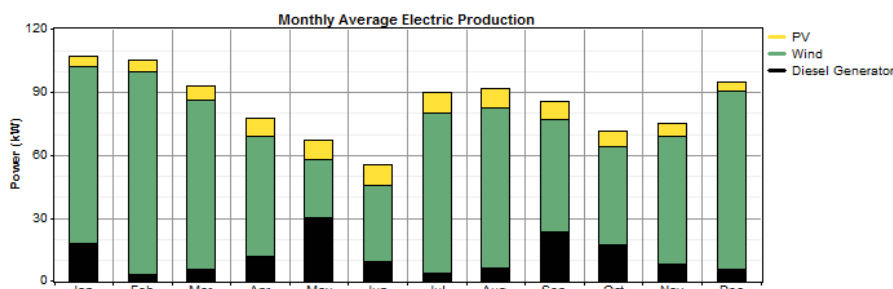


Εικόνα 6.27 Οικονομικότερο μοντέλο υβριδικού συστήματος για την αυτόνομη λειτουργία της πλατφόρμας, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - *Enercon E33 & RELiON RB300 & Dsl Generator*).

Πίνακας 6.20 Στοιχεία υβριδικού συστήματος, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - *Enercon E33 & RELiON RB300 & Dsl Generator*).

System architecture - Optimum economic layout	45 kW PV
	1 Enercon E33
	215 kW Diesel Generator
	180 RELiON RB-300
	180 kW Inverter
	180 kW Rectifier
	Load Following

Στην Εικόνα 6.28 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία ηλεκτρική ισχύς κάθε μονάδας σε μορφή ραβδογράμματος για το βελτιστοποιημένο σύστημα, όπου φαίνεται ότι η παραγωγή ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο από την ανεμογεννήτρια (77%), ενώ κατά ένα μικρό μέρος από τα φωτοβολταϊκά (9%). Η μονάδα Diesel συμμετέχει επίσης με ένα ποσοστό 14% που οφείλεται κυρίως στους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο. (Εικόνα 6.29)



Εικόνα 6.28 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, γεννήτριας Diesel και μπαταρίες, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - Enercon E33 & RELiON RB300 & Dsl Generator).

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%	Quantity	kWh/yr	%
PV array	65,111	9	AC primary load	367,828	100	Excess electricity	360,963	48.8
Wind turbine	570,152	77	Total	367,828	100	Unmet electric load	91.3	0.0
Diesel Generator	103,906	14				Capacity shortage	246	0.1
Total	739,168	100						
						Quantity	Value	
						Renewable fraction	0.859	

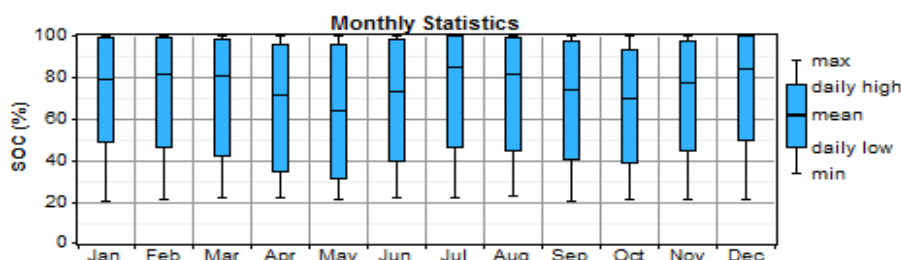
Εικόνα 6.29 Βασικά στοιχεία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Στον Πίνακα 6.21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τα στοιχεία κόστους κάθε μονάδας, καθώς και του συνολικού συστήματος. Επίσης, τα κόστη διαχωρίζονται σε κατηγορίες, όπως είναι το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος αντικατάστασης, τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου και η υπολειμματική αξία. Ο κυριότερος συντελεστής κόστους στην περίπτωση αυτή είναι η αγορά και η αντικατάσταση της γεννήτριας Diesel σε συνδυασμό με το αυξημένο κόστος καυσίμου.

Πίνακας 6.21 Συγκεντρωτικά στοιχεία κόστους ανά κατηγορία για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, γεννήτριας Diesel και μπαταρίες, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία- Enercon E33 & RELiON RB300 & Dsl Generator).

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
PV	54.000	0	6.194	0	-3.367	56.826
Enercon E33	350.000	0	80.289	0	0	430.289
Diesel Generator	86.000	31.089	21.183	654.376	-22.918	769.730
RELiON RB-300	558.000	0	0	0	0	558.000
Converter	90.000	37.554	0	0	-18.708	108.846
System	1.138.000	68.643	107.666	654.376	-44.994	1.923.691

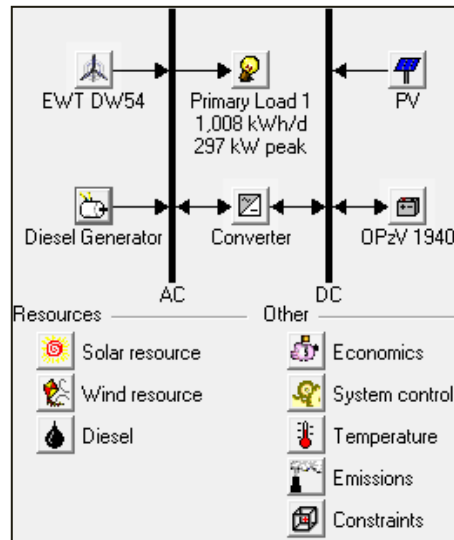
Το διάγραμμα της Εικόνας 6.30 απεικονίζει το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών για κάθε μήνα. Κάθε μήνα οι συσσωρευτές φτάνουν στο κατώτερο ποσοστό φόρτισης, το οποίο είναι 20%.



Εικόνα 6.30 Μηνιαία στατιστικά φόρτισης των συσσωρευτών, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - Enercon E33 & RELiON RB300 & Dsl Generator).

- *EWT DW54 & RES OPzV*

Στη συνέχεια, για το ίδιο σενάριο φορτίου (αιχμή 297 kW), εξετάστηκε η περίπτωση λειτουργίας της πλατφόρμας ως αυτόνομο σύστημα με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων, νηξελογεννήτριας, μετατροπέα, της ανεμογεννήτριας *EWT DW54* και των μπαταριών *RES OPzV*. Στην Εικόνα 6.31 φαίνεται το μοντέλο αυτόνομου του υβριδικού συστήματος στο περιβάλλον HOMER, ενώ στον Πίνακα 6.22 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

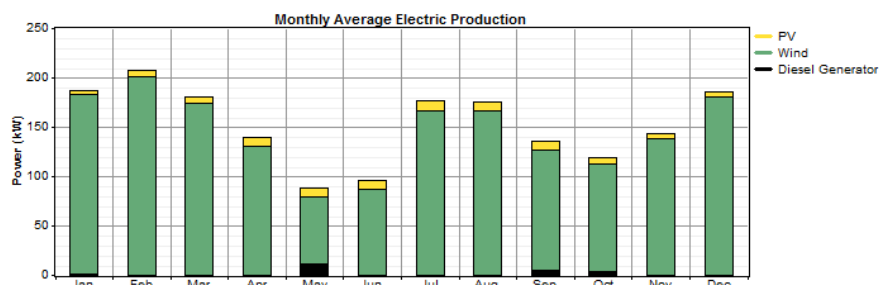


Εικόνα 6.31 Οικονομικότερο μοντέλο υβριδικού συστήματος για την αυτόνομη λειτουργία της πλατφόρμας, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – *EWT DW54 & RES OPzV & Dsl Generator*).

Πίνακας 6.22 Στοιχεία υβριδικού συστήματος, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – *EWT DW54 & RES OPzV & Dsl Generator*).

System architecture - Optimum economic layout	45 kW PV
	1 EWT DW54
	205 kW Diesel Generator
	264 RES OPzV
	220 kW Inverter
	220 kW Rectifier
	Load Following

Στην Εικόνα 6.32 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία ηλεκτρική ισχύς κάθε μονάδας σε μορφή ραβδογράμματος για το βελτιστοποιημένο σύστημα, όπου φαίνεται ότι η παραγωγή ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο από την ανεμογεννήτρια (94%), ενώ κατά ένα μικρό μέρος από τα φωτοβολταϊκά (5%). Η μονάδα Diesel συμμετέχει επίσης με ένα ποσοστό 1% που οφείλεται κυρίως στον μήνα Μάιο. (Εικόνα 6.33)



Εικόνα 6.32 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, γεννήτριας Diesel και μπαταρίες, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – EWT DW54 & RES OPzV & Dsl Generator).

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%	Quantity	kWh/yr	%
PV array	65,111	5	AC primary load	367,895	100	Excess electricity	949,520	70.9
Wind turbine	1,258,228	94	Total	367,895	100	Unmet electric load	23.8	0.0
Diesel Generator	16,656	1				Capacity shortage	318	0.1
Total	1,339,994	100						

Quantity	Value
Renewable fraction	0.988

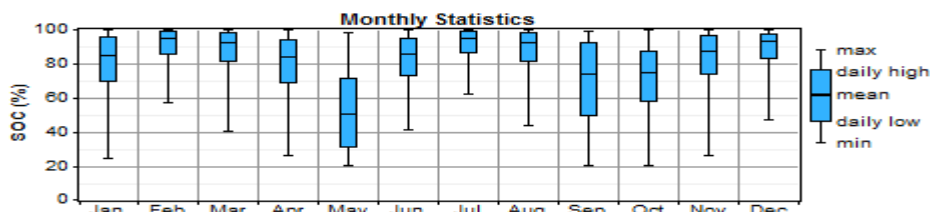
Εικόνα 6.33 Βασικά στοιχεία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Στον Πίνακα 6.23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τα στοιχεία κόστους κάθε μονάδας, καθώς και του συνολικού συστήματος. Επίσης, τα κόστη διαχωρίζονται σε κατηγορίες, όπως είναι το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος αντικατάστασης, τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου και η υπολειμματική αξία. Ο κυριότερος συντελεστής κόστους στην περίπτωση αυτή είναι η αγορά, η αντικατάσταση, η συντήρηση και λειτουργία της ανεμογεννήτριας, το συνολικό κόστος της οποίας ανέρχεται στα 983.287 €.

Πίνακας 6.23 Συγκεντρωτικά στοιχεία κόστους ανά κατηγορία για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, γεννήτριας Diesel και μπαταρίες, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – EWT DW54 & RES OPzV & Dsl Generator).

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
PV	54.000	0	6.194	0	-3.367	56.826
EWT DW54	550.000	307.117	126.169	0	0	983.287
Diesel Generator	82.000	0	4.867	121.378	-18.511	189.734
RES OPzV	213.840	89.228	0	0	-44.451	258.617
Converter	110.000	45.899	0	0	-22.866	133.033
System	1.009.840	442.245	137.230	121.378	-89.195	1.621.497

Το διάγραμμα της Εικόνας 6.34 απεικονίζει το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών για κάθε μήνα. Τον Μάιο, τον Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο, οι συσσωρευτές φτάνουν στο κατώτερο ποσοστό φόρτισης, το οποίο είναι 20%.



Εικόνα 6.34 Μηνιαία στατιστικά φόρτισης των συσσωρευτών, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – EWT DW54 & RES OPzV & Dsl Generator).

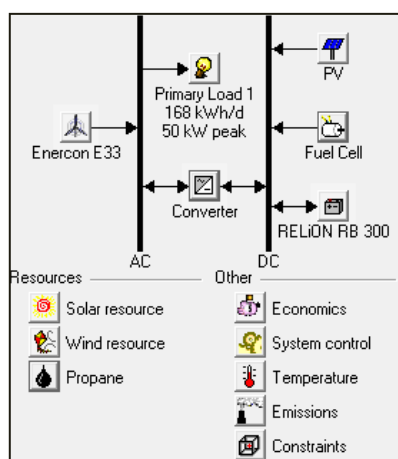
6.4.1.2 Σενάριο λειτουργίας πλατφόρμας με Κυψέλη Καυσίμου Στερεού Οξειδίου (SOFC), Φωτοβολταϊκά, Ανεμογεννήτρια και Συσσωρευτές

1^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 50 kW)

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δύο οικονομικότερων σεναρίων του Πίνακα 6.28 που αναλύθηκαν στο λογισμικό HOMER για το 1^ο σενάριο φορτίου.

- *Enercon E33 & RELiON RB300*

Για το 1^ο σενάριο φορτίου με αιχμή 50 kW, εξετάστηκε η περίπτωση λειτουργίας της πλατφόρμας ως αυτόνομο σύστημα με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων, κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC), μετατροπέα, της ανεμογεννήτριας *Enercon E33* και των μπαταριών *RELiON RB 300*. Στην Εικόνα 6.35 φαίνεται το μοντέλο του αυτόνομου υβριδικού συστήματος στο περιβάλλον HOMER, ενώ στον Πίνακα 6.24 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

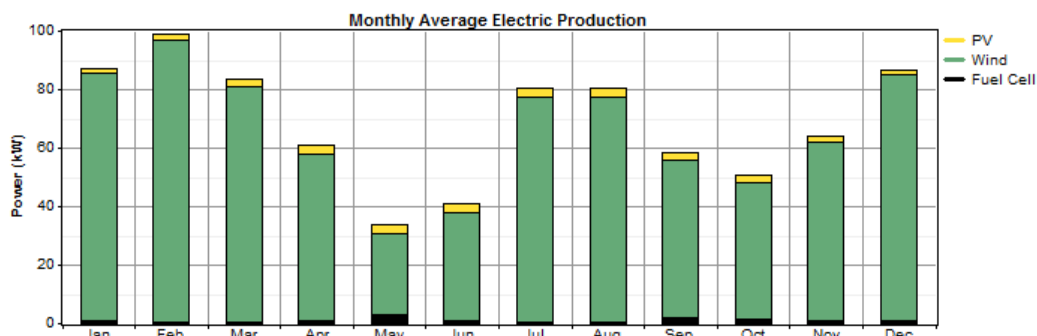


Εικόνα 6.35 Οικονομικότερο μοντέλο υβριδικού συστήματος για την αυτόνομη λειτουργία της πλατφόρμας, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - *Enercon E33 & RELiON RB300 & SOFC*).

Πίνακας 6.24 Στοιχεία υβριδικού συστήματος, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία –*Enercon E33 & RELiON RB300 & SOFC*).

System architecture - Optimum economic layout	15 kW PV
	1 Enercon E33
	35 kW Fuel Cell
	12 RELiON RB-300
	45 kW Inverter
	45 kW Rectifier
	Load Following

Στην Εικόνα 6.36 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία ηλεκτρική ισχύς κάθε μονάδας σε μορφή ραβδογράμματος για το βελτιστοποιημένο σύστημα, όπου φαίνεται ότι η παραγωγή ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο από την ανεμογεννήτρια (95%), ενώ κατά ένα μικρό μέρος από τα φωτοβολταϊκά (4%). Η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) συμμετέχει επίσης με ένα μικρό ποσοστό 2% που οφείλεται κυρίως στους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο. (Εικόνα 6.37)



Εικόνα 6.36 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, SOFC και μπαταρίες, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - Enercon E33 & RELiON RB300 & SOFC).

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%	Quantity	kWh/yr	%
PV array	21,704	4	AC primary load	61,303	100	Excess electricity	540,422	89.7
Wind turbine	570,152	95	Total	61,303	100	Unmet electric load	17.3	0.0
Fuel Cell	10,639	2				Capacity shortage	50.2	0.1
Total	602,495	100						
						Quantity	Value	
						Renewable fraction	0.982	

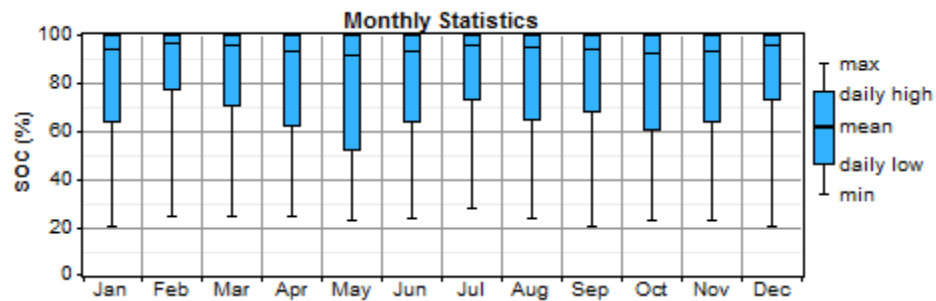
Εικόνα 6.37 Βασικά στοιχεία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Στον Πίνακα 6.25 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τα στοιχεία κόστους κάθε μονάδας, καθώς και του συνολικού συστήματος. Επίσης, τα κόστη διαχωρίζονται σε κατηγορίες, όπως είναι το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος αντικατάστασης, τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου και η υπολειμματική αξία. Ο κυριότερος συντελεστής κόστους στην περίπτωση αυτή είναι η αγορά, η αντικατάσταση, η συντήρηση και λειτουργία της ανεμογεννήτριας, το συνολικό κόστος της οποίας ανέρχεται στα 430.289 €.

Πίνακας 6.25 Συγκεντρωτικά στοιχεία κόστους ανά κατηγορία για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, SOFC και μπαταρίες, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία- Enercon E33 & RELiON RB300 & SOFC).

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
PV	15.000	0	1.720	0	-935	15.785
Enercon E33	350.000	0	80.289	0	0	430.289
Fuel Cell	280.000	0	0	24.119	-54.379	249.741
RELiON RB-300	37.200	0	0	0	0	37.200
Converter	22.500	9.388	0	0	-4.677	27.211
System	704.700	9.388	82.010	24.119	-59.991	760.227

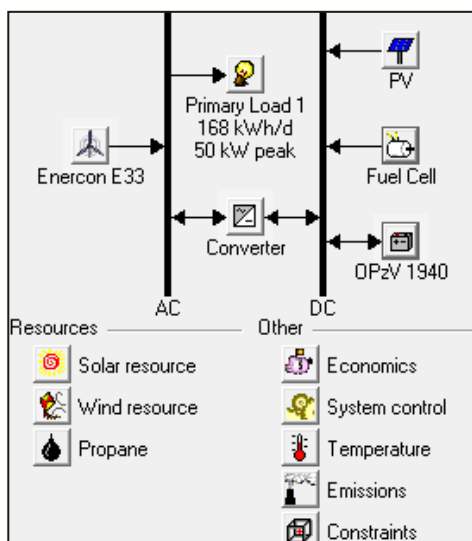
Το διάγραμμα της Εικόνας 6.38 απεικονίζει το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών για κάθε μήνα. Τον Ιανουάριο, τον Σεπτέμβριο και τον Δεκέμβριο, οι συσσωρευτές φτάνουν στο κατώτερο ποσοστό φόρτισης, το οποίο είναι 20%, καθώς και τον μήνα Δεκέμβριο φτάνουν πολύ κοντά στο 20%.



**Εικόνα 6.38 Μηνιαία στατιστικά φόρτισης των συσσωρευτών,
(1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία - Enercon E33 & RELiON RB300 & SOFC).**

- *Enercon E33 & RES OPzV*

Ένας από τους συνδυασμούς στοιχείων που μελετήθηκε στο λογισμικό HOMER για το 1^ο σενάριο φορτίου (αιχμή 50 kW) με σκοπό την αυτόνομη λειτουργία της πλωτής πλατφόρμας είναι: φωτοβολταϊκά στοιχεία, κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC), μετατροπέας, ανεμογεννήτρια *Enercon E33* και μπαταρίες *RES OPzV*. Στην Εικόνα 6.39 φαίνεται το μοντέλο του αυτόνομου υβριδικού συστήματος στο περιβάλλον HOMER, ενώ στον Πίνακα 6.26 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

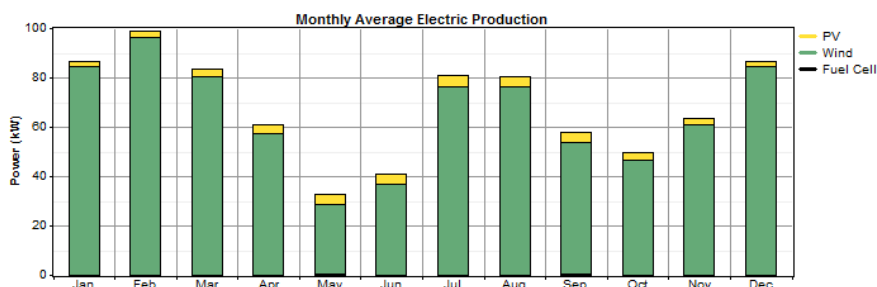


Εικόνα 6.39 Οικονομικότερο μοντέλο υβριδικού συστήματος για την αυτόνομη λειτουργία της πλατφόρμας, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – *Enercon E33 & RES OPzV & SOFC*).

Πίνακας 6.26 Στοιχεία υβριδικού συστήματος, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – *Enercon E33 & RES OPzV & SOFC*).

System architecture - Optimum economic layout	20 kW PV
	1 Enercon E33
	20 kW Fuel Cell
	48 RES OPzV
	50 kW Inverter
	50 kW Rectifier
	Cycle Charging

Στην Εικόνα 6.40 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία ηλεκτρική ισχύς κάθε μονάδας σε μορφή ραβδογράμματος για το βελτιστοποιημένο σύστημα, όπου φαίνεται ότι η παραγωγή ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο από την ανεμογεννήτρια (99%), ενώ κατά ένα μικρό μέρος από τα φωτοβολταϊκά και την κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC). (Εικόνα 6.41)



Εικόνα 6.40 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, SOFC και μπαταρίες, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – Enercon E33 & RES OPzV & SOFC).

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%	Quantity	kWh/yr	%
PV array	28,938	5	AC primary load	61,290	100	Excess electricity	536,739	89.5
Wind turbine	570,152	95	Total	61,290	100	Unmet electric load	29.5	0.0
Fuel Cell	861	0				Capacity shortage	60.9	0.1
Total	599,951	100						

Quantity	Value
Renewable fraction	0.999

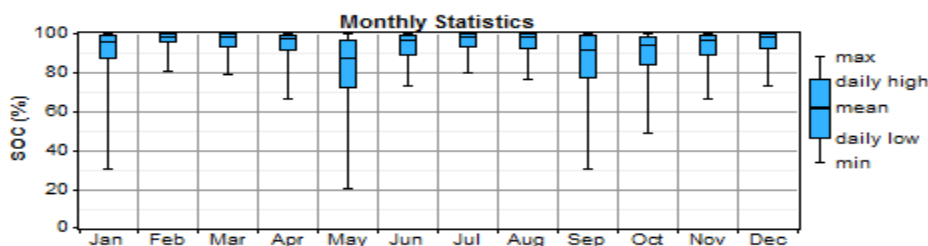
Εικόνα 6.41 Βασικά στοιχεία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Στον Πίνακα 6.27 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τα στοιχεία κόστους κάθε μονάδας, καθώς και του συνολικού συστήματος. Επίσης, τα κόστη διαχωρίζονται σε κατηγορίες, όπως είναι το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος αντικατάστασης, τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου και η υπολειμματική αξία. Ο κυριότερος συντελεστής κόστους στην περίπτωση αυτή είναι η αγορά, η αντικατάσταση, η συντήρηση και λειτουργία της ανεμογεννήτριας, το συνολικό κόστος της οποίας ανέρχεται στα 430.289 €.

Πίνακας 6.27 Συγκεντρωτικά στοιχεία κόστους ανά κατηγορία για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, SOFC και μπαταρίες, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – Enercon E33 & RES OPzV & SOFC).

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
<i>PV</i>	20.000	0	2.294	0	-1.247	21.047
<i>Enercon E33</i>	350.000	0	80.289	0	0	430.289
<i>Fuel Cell</i>	160.000	0	0	1.951	-47.551	114.400
<i>RES OPzV</i>	38.880	16.223	0	0	-8.082	47.021
<i>Converter</i>	25.000	10.432	0	0	-5.197	30.235
<i>System</i>	593.880	26.655	82.583	1.951	-62.077	642.993

Το διάγραμμα της Εικόνα 6.42 απεικονίζει το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών για κάθε μήνα. Μόνο τον Μάιο, οι συσσωρευτές φτάνουν στο κατώτερο ποσοστό φόρτισης, το οποίο είναι 20%.



Εικόνα 6.42 Μηνιαία στατιστικά φόρτισης των συσσωρευτών, (1^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – Enercon E33 & RES OPzV & SOFC).

Συγκριτική παρουσίαση 2^{ου} σεναρίου λειτουργίας της πλατφόρμας ως αυτόνομη (με τη χρήση ΑΠΕ και Κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC))

Αυτόνομο σύστημα – 1^ο σενάριο φορτίου: Αιχμή 50 kW

Πίνακας 6.28 Σύγκριση των βασικών στοιχείων των συστημάτων για το 1^ο σενάριο φορτίου με αιχμή 50 kW.

	Enercon E33 & RELiON RB300	EWT DW54 & RELiON RB300	Enercon E33 & RES OPzV	EWT DW54 & RES OPzV
Καθαρό παρόν κόστος συστήματος (€)	760.227	971.320	642.993	875.296
Αρχική επένδυση κεφαλαίου (€)	704.700	889.500	593.880	783.880
Κόστος λειτουργίας (€/έτος)	4.841	7.133	4.282	7.970
Κόστος ενέργειας (COE) (€/kWh)	1,081	1,382	0,915	1,245
Μέγεθος Φ/Β (kW)	15	15	20	10
Μέγεθος SOFC (kW)	35	30	20	20
Ώρες λειτουργίας γεννήτριας SOFC / έτος	660	299	82	23
Κατανάλωση καυσίμου υγραερίου (L/έτος)	2.696	1.364	218	65
Αντικατάσταση SOFC	σε 53 χρόνια	σε 117 χρόνια	σε 427 χρόνια	σε 1.522 χρόνια
Μέγεθος Μετατροπέα (kW)	45	45	50	50
Αριθμός Μπαταριών	3 παράλληλες σειρές 4 ^{ων} μπαταριών (12 μπαταρίες)	5 παράλληλες σειρές 4 ^{ων} μπαταριών (20 μπαταρίες)	2 παράλληλες σειρές 24 ^{ων} μπαταριών (48 μπαταρίες)	2 παράλληλες σειρές 24 ^{ων} μπαταριών (48 μπαταρίες)
Βάρος Μπαταριών (kg)	450	750	5.040	5.040
Αντικατάσταση Μπαταριών	σε 20 χρόνια	σε 20 χρόνια	σε 15 χρόνια	σε 15 χρόνια
Εμβαδόν χώρου εγκατάστασης μπαταριών (m²)	1,9	3,2	3,4	3,4

Αυτόνομο σύστημα – 2^ο σενάριο φορτίου: Αιχμή 99 kW

Πίνακας 6.29 Σύγκριση των βασικών στοιχείων των συστημάτων για το 2^ο σενάριο φορτίου με αιχμή 99 kW.

	Enercon E33 & RELiON RB300	EWT DW54 & RELiON RB300	Enercon E33 & RES OPzV	EWT DW54 & RES OPzV
Καθαρό παρόν κόστος συστήματος (€)	1.141.885	1.319.765	881.711	1.092.444
Αρχική επένδυση κεφαλαίου (€)	1.123.800	1.283.800	854.140	1.024.700
Κόστος λειτουργίας (€/έτος)	1.577	3.136	2.404	5.906
Κόστος ενέργειας (COE) (€/kWh)	0,812	0,939	0,627	0,777
Μέγεθος Φ/Β (kW)	20	20	20	10
Μέγεθος SOFC (kW)	70	65	40	40
Αντικατάσταση SOFC	σε 66,5 χρόνια	σε 105 χρόνια	σε 354 χρόνια	σε 365 χρόνια
Ώρες λειτουργίας γεννήτριας SOFC / έτος	526	332	99	96
Κατανάλωση καυσίμου υγραερίου (L/έτος)	5.528	3.432	670	565
Μέγεθος Μετατροπέα (kW)	90	90	95	95
Αριθμός Μπαταριών	12 παράλληλες σειρές 4 ^{ωv} μπαταριών (48 μπαταρίες)	12 παράλληλες σειρές 4 ^{ωv} μπαταριών (48 μπαταρίες)	6 παράλληλες σειρές 24 ^{ωv} μπαταριών (144 μπαταρίες)	5 παράλληλες σειρές 24 ^{ωv} μπαταριών (120 μπαταρίες)
Βάρος Μπαταριών (kg)	1.800	1.800	15.120	12.600
Αντικατάσταση Μπαταριών	σε 20 χρόνια	σε 20 χρόνια	σε 15 χρόνια	σε 15 χρόνια
Εμβαδόν χώρου εγκατάστασης μπαταριών (m²)	7,6	7,6	10,3	8,6

Αυτόνομο σύστημα – 3^ο σενάριο φορτίου: Αιχμή 198 kW

Πίνακας 6.30 Σύγκριση των βασικών στοιχείων των συστημάτων για το 3^ο σενάριο φορτίου με αιχμή 198 kW.

	Enercon E33 & RELiON RB300	EWT DW54 & RELiON RB300	Enercon E33 & RES OPzV	EWT DW54 & RES OPzV
Καθαρό παρόν κόστος συστήματος (€)	2.014.329	2.412.386	1.748.984	1.873.717
Αρχική επένδυση κεφαλαίου (€)	1.992.000	2.065.200	1.579.660	1.540.780
Κόστος λειτουργίας (€/έτος)	1.947	30.269	14.762	29.027
Κόστος ενέργειας (COE) (€/kWh)	0,721	0,858	0,622	0,666
Μέγεθος Φ/Β (kW)	20	20	20	20
Μέγεθος SOFC (kW)	145	140	105	80
Ώρες λειτουργίας γεννήτριας SOFC / έτος	696	598	242	121
Κατανάλωση καυσίμου υγραερίου (L/έτος)	15.647	13.502	4.565	1.687
Αντικατάσταση SOFC	σε 50,3 χρόνια	σε 58,5 χρόνια	σε 145 χρόνια	σε 289 χρόνια
Μέγεθος Μετατροπέα (kW)	180	180	195	195
Αριθμός Μπαταριών	30 παράλληλες σειρές 4 ^{ων} μπαταριών (120 μπαταρίες)	23 παράλληλες σειρές 4 ^{ων} μπαταριών (92 μπαταρίες)	14 παράλληλες σειρές 24 ^{ων} μπαταριών (336 μπαταρίες)	12 παράλληλες σειρές 24 ^{ων} μπαταριών (288 μπαταρίες)
Βάρος Μπαταριών (kg)	4.500	3.450	35.280	30.240
Αντικατάσταση Μπαταριών	σε 20 χρόνια	σε 20 χρόνια	σε 15 χρόνια	σε 15 χρόνια
Εμβαδόν χώρου εγκατάστασης μπαταριών (m²)	19,1	14,6	24,3	20,8

Αυτόνομο σύστημα – 4^ο σενάριο φορτίου: Αιχμή 297 kW

Πίνακας 6.31 Σύγκριση των βασικών στοιχείων των συστημάτων για το 4^ο σενάριο φορτίου με αιχμή 297 kW.

	Enercon E33 & RELiON RB300	EWT DW54 & RELiON RB300	Enercon E33 & RES OPzV	EWT DW54 & RES OPzV
Καθαρό παρόν κόστος συστήματος (€)	2.937.637	3.180.295	2.452.966	2.408.236
Αρχική επένδυση κεφαλαίου (€)	2.871.900	2.887.400	2.247.200	2.108.620
Κόστος λειτουργίας (€/έτος)	5.731	25.536	17.940	26.122
Κόστος ενέργειας (COE) (€/kWh)	0,696	0,754	0,581	0,571
Μέγεθος Φ/Β (kW)	45	45	45	45
Μέγεθος SOFC (kW)	220	205	140	115
Ώρες λειτουργίας γεννήτριας SOFC / έτος	810	549	259	75
Κατανάλωση καυσίμου υγραερίου (L/έτος)	26.909	20.058	8.195	3.256
Αντικατάσταση SOFC	σε 43,2 χρόνια	σε 63,8 χρόνια	σε 135 χρόνια	σε 467 χρόνια
Μέγεθος Μετατροπέα (kW)	275	270	280	275
Αριθμός Μπαταριών	46 παράλληλες σειρές 4 ^{ov} μπαταριών (184 μπαταρίες)	41 παράλληλες σειρές 4 ^{ov} μπαταριών (164 μπαταρίες)	30 παράλληλες σειρές 24 ^{ov} μπαταριών (720 μπαταρίες)	23 παράλληλες σειρές 24 ^{ov} μπαταριών (552 μπαταρίες)
Βάρος Μπαταριών (kg)	6.900	6.150	75.600	57.960
Αντικατάσταση Μπαταριών	σε 19,6 χρόνια	σε 20 χρόνια	σε 15 χρόνια	σε 15 χρόνια
Εμβαδόν χώρου εγκατάστασης μπαταριών (m²)	29,3	26,1	52,1	40

Όπως φαίνεται στους παραπάνω πίνακες (Πίνακας 6.28, 6.29, 6.30 και 6.31), στα συστήματα που περιέχονται μπαταρίες μολύβδου-οξέως (RES OPzV), η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) φαίνεται να έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και η αντικατάσταση της θα πρέπει να γίνει σε περισσότερα χρόνια, σε σύγκριση με τα συστήματα τα οποία δομούνται από μπαταρίες ιόντων λιθίου (RELiON RB300). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται στις μπαταρίες μολύβδου οξέως είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που αποθηκεύεται στις μπαταρίες ιόντων λιθίου, λόγω της σημαντικής διαφοράς στον αριθμό τους, καθώς και στην ονομαστική χωρητικότητά τους (*RES OPzV: 1940 Ah, RELiON RB300: 300 Ah*). Έτσι, η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) λειτουργεί με μεγαλύτερο ποσοστό στα συστήματα με τις μπαταρίες RELiON RB300, προκειμένου να ικανοποιηθεί το απαιτούμενο φορτίο. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό από τις ώρες λειτουργίας ανά έτος της γεννήτριας SOFC, καθώς και από την κατανάλωση του υγραερίου. Αντίθετα, στα συστήματα με μπαταρίες RES OPzV, η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) λειτουργεί με μικρό ποσοστό λόγω της μεγαλύτερης αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που επιτυγχάνεται με τις συγκεκριμένες μπαταρίες. Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου σε όλα τα σενάρια λειτουργούν πολύ λίγες ώρες, δηλαδή στη διάρκεια ενός έτους λειτουργούν λιγότερο από το 10% των συνολικών ωρών του έτους (876 ώρες). Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις, η διάρκεια ζωής τους υπερβαίνουν το χρόνο ζωής της πλωτής πλατφόρμας.

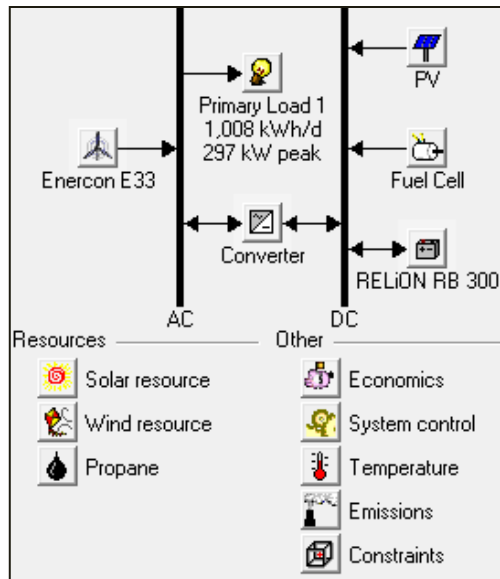
Ένα μειονέκτημα των συστημάτων που αποτελούνται από τις μπαταρίες RES OPzV είναι το μεγάλο βάρος τους, καθώς η μία μπαταρία ζυγίζει 105 kg, σε αντίθεση με τις μπαταρίες RELiON RB300 με βάρος 37,5 kg η καθεμία. Επίσης, η διάρκεια ζωής των μπαταριών RELiON RB300 (20 χρόνια) είναι μεγαλύτερη από αυτή των μπαταριών RES OPzV (15 χρόνια). Πρέπει όμως να σημειωθεί και εδώ, ότι οι μπαταρίες μολύβδου – οξέως, παρότι έχουν μικρότερες διαστάσεις από μια μπαταρία ιόντων λιθίου, λόγω του αυξημένου αριθμού μπαταριών που απαιτούνται στην πλειοψηφία των σεναρίων για την αυτόνομη λειτουργία του συστήματος, καταλήγουν να καλύπτουν μεγαλύτερη επιφάνεια στην πλωτή πλατφόρμα από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα δύο σεναρίων του Πίνακα 6.31 που αναλύθηκαν στο λογισμικό HOMER για το 4^ο σενάριο φορτίου.

4^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 297 kW)

- *Enercon E33 & RELiON RB300*

Ένας από τους συνδυασμούς στοιχείων που μελετήθηκε στο λογισμικό HOMER για το 4^ο σενάριο φορτίου (αιχμή 297 kW) με σκοπό την αυτόνομη λειτουργία της πλωτής πλατφόρμας είναι: φωτοβολταϊκά στοιχεία, κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC), μετατροπέας, ανεμογεννήτρια *Enercon E33* και μπαταρίες *RELiON RB 300*. Στην Εικόνα 6.43 φαίνεται το αυτόνομου μοντέλο του υβριδικού συστήματος στο περιβάλλον HOMER, ενώ στον Πίνακα 6.32 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

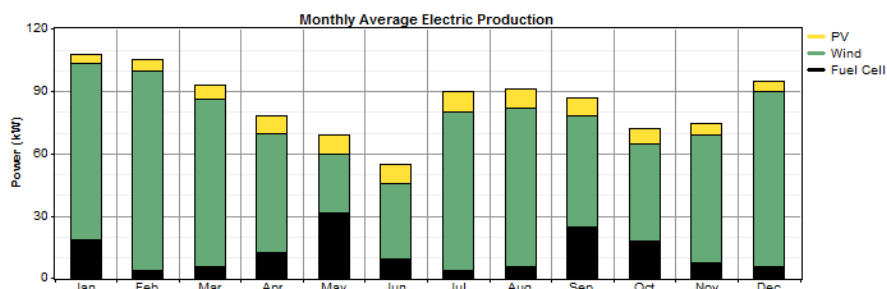


Εικόνα 6.43 Οικονομικότερο μοντέλο υβριδικού συστήματος για την αυτόνομη λειτουργία της πλατφόρμας, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – *Enercon E33 & RELiON RB300 & SOFC*).

Πίνακας 6.32 Στοιχεία υβριδικού συστήματος, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – *Enercon E33 & RELiON RB300 & SOFC*).

System architecture - Optimum economic layout	45 kW PV
	1 Enercon E33
	220 kW Fuel Cell
	184 RELiON RB-300
	275 kW Inverter
	275 kW Rectifier
	Load Following

Στην Εικόνα 6.44 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία ηλεκτρική ισχύς κάθε μονάδας σε μορφή ραβδογράμματος για το βελτιστοποιημένο σύστημα, όπου φαίνεται ότι η παραγωγή ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο από την ανεμογεννήτρια (77%). Τα φωτοβολταϊκά συμμετέχουν με ποσοστό 9%, ενώ η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) συμμετέχει με μεγαλύτερο ποσοστό 14%. (Εικόνα 6.45)



Εικόνα 6.44 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, SOFC και μπαταρίες, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – Enercon E33 & RELiON RB300 & SOFC).

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%	Quantity	kWh/yr	%
PV array	65,111	9	AC primary load	367,815	100	Excess electricity	358,821	48.4
Wind turbine	570,152	77	Total	367,815	100	Unmet electric load	104	0.0
Fuel Cell	106,191	14				Capacity shortage	339	0.1
Total	741,454	100						

Quantity	Value
Renewable fraction	0.857

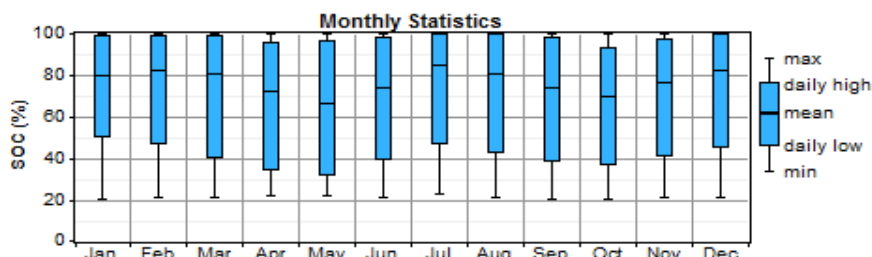
Εικόνα 6.45 Βασικά στοιχεία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Στον Πίνακα 6.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τα στοιχεία κόστους κάθε μονάδας, καθώς και του συνολικού συστήματος. Επίσης, τα κόστη διαχωρίζονται σε κατηγορίες, όπως είναι το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος αντικατάστασης, τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου και η υπολειμματική αξία. Ο κυριότερος συντελεστής κόστους στο σενάριο αυτό, είναι η αγορά και συντήρηση της γεννήτριας ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής σε συνδυασμό με την κατανάλωση καυσίμου.

Πίνακας 6.33 Συγκεντρωτικά στοιχεία κόστους ανά κατηγορία για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, SOFC και μπαταρίες, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – Enercon E33 & RELiON RB300 & SOFC).

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
PV	54.000	0	6.194	0	-3.367	56.826
Enercon E33	350.000	0	80.289	0	0	430.289
Fuel Cell	1.760.000	0	0	240.741	-294.772	1.705.970
RELiON RB300	570.400	182.067	0	0	-174.207	578.259
Converter	137.500	57.374	0	0	-28.582	166.292
System	2.871.900	239.441	86.483	240.741	-500.929	2.937.637

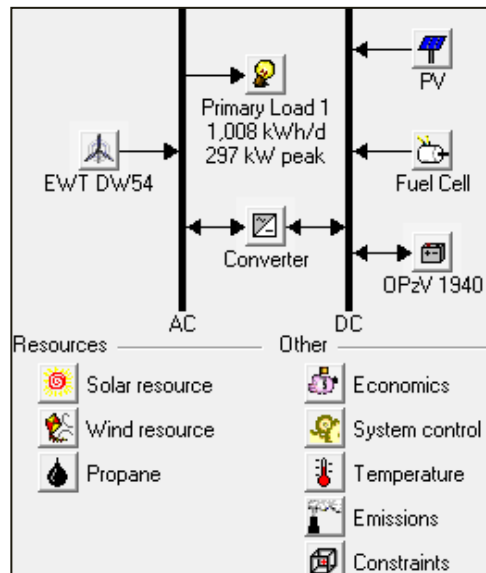
Το διάγραμμα της Εικόνας 6.46 απεικονίζει το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών για κάθε μήνα. Κάθε μήνα οι συσσωρευτές φτάνουν στο κατώτερο ποσοστό φόρτισης, το οποίο είναι 20%.



Εικόνα 6.46 Μηνιαία στατιστικά φόρτισης των συσσωρευτών, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – Enercon E33 & RELiON RB300 & SOFC).

- *EWT DW54 & RES OPzV*

Για το 4^ο σενάριο φορτίου με αιχμή 297 kW, εξετάστηκε η περίπτωση λειτουργίας της πλατφόρμας ως αυτόνομο σύστημα με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων, κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC), μετατροπέα, της ανεμογεννήτριας *EWT DW54* και των μπαταριών *RES OPzV*. Στην Εικόνα 6.47 φαίνεται το μοντέλο του αυτόνομου υβριδικού συστήματος στο περιβάλλον HOMER, ενώ στον Πίνακα 6.34 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

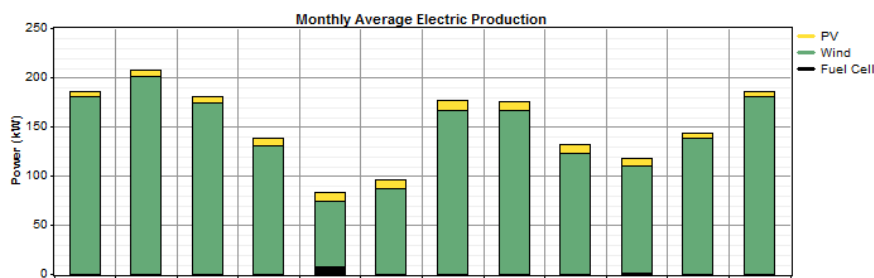


Εικόνα 6.47 Οικονομικότερο μοντέλο υβριδικού συστήματος για την αυτόνομη λειτουργία της πλατφόρμας, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – *EWT DW54 & RES OPzV & SOFC*).

Πίνακας 6.34 Στοιχεία υβριδικού συστήματος, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – *EWT DW54 & RES OPzV & SOFC*).

System architecture - Optimum economic layout	45 kW PV
	1 EWT DW54
	115 kW Fuel Cell
	552 RES OPzV
	275 kW Inverter
	275 kW Rectifier
	Cycle Charging

Στην Εικόνα 6.48 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία ηλεκτρική ισχύς κάθε μονάδας σε μορφή ραβδογράμματος για το βελτιστοποιημένο σύστημα, όπου φαίνεται ότι η παραγωγή ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο από την ανεμογεννήτρια (94%). Τα φωτοβολταϊκά συμμετέχουν με ποσοστό 5%, ενώ η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) συμμετέχει με πολύ μικρό ποσοστό 1%. (Εικόνα 6.49)



Εικόνα 6.48 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, SOFC και μπαταρίες, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – EWT DW54 & RES OPzV & SOFC).

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%	Quantity	kWh/yr	%
PV array	65,111	5	AC primary load	367,818	100	Excess electricity	936,697	70.4
Wind turbine	1,258,228	95	Total	367,818	100	Unmet electric load	102	0.0
Fuel Cell	6,905	1				Capacity shortage	364	0.1
Total	1,330,243	100						

Quantity	Value
Renewable fraction	0.995

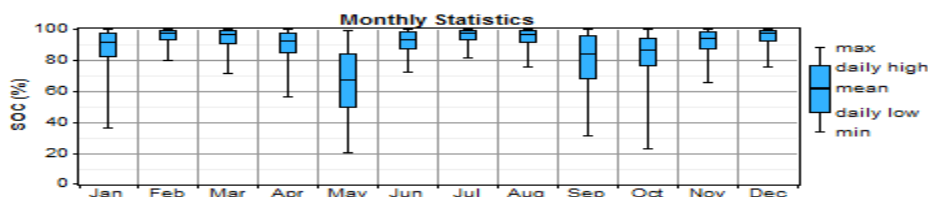
Εικόνα 6.49 Βασικά στοιχεία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Στον Πίνακα 6.35 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τα στοιχεία κόστους κάθε μονάδας, καθώς και του συνολικού συστήματος. Επίσης, τα κόστη διαχωρίζονται σε κατηγορίες, όπως είναι το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος αντικατάστασης, τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου και η υπολειμματική αξία. Ο κυριότερος συντελεστής κόστους στην περίπτωση αυτή είναι η αγορά, η αντικατάσταση, η συντήρηση και λειτουργία της ανεμογεννήτριας, το συνολικό κόστος της οποίας ανέρχεται στα 983.287 €.

Πίνακας 6.35 Συγκεντρωτικά στοιχεία κόστους ανά κατηγορία για το μοντέλο χρήσης μονάδων ΑΠΕ, SOFC και μπαταρίες, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – EWT DW54 & RES OPzV & SOFC).

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
PV	54.000	0	6.194	0	-3.367	56.826
EWT DW54	550.000	307.117	126.169	0	0	983.287
Fuel Cell	920.000	0	0	15.653	-274.567	661.086
RES OPzV	447.120	186.568	0	0	-92.943	540.745
Converter	137.500	57.374	0	0	-28.582	166.292
System	2.108.620	551.059	132.363	15.653	-399.459	2.408.236

Το διάγραμμα της Εικόνας 6.50 απεικονίζει το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών για κάθε μήνα. Τον Μάιο, οι συσσωρευτές φτάνουν στο κατώτερο ποσοστό φόρτισης, το οποίο είναι 20%, καθώς και τον Οκτώβριο φτάνουν πολύ κοντά στο 20%.



Εικόνα 6.50 Μηνιαία στατιστικά φόρτισης των συσσωρευτών, (4^ο σενάριο φορτίου: Αυτόνομη λειτουργία – EWT DW54 & RES OPzV & SOFC).

6.4.2 Σύνδεση πλωτής πλατφόρμας με το δίκτυο

Το τελευταίο σενάριο που μελετήθηκε είναι η σύνδεση της πλωτής πλατφόρμας με το δίκτυο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν μόνο φωτοβολταϊκά στοιχεία. Όπως και στις προσομοιώσεις της αυτόνομης πλατφόρμας, έγινε η ανάλυση και η μελέτη τεσσάρων σεναρίων αιχμών φορτίου, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.36.

Το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του καλωδίου, καθώς και του μετασχηματιστή, ο οποίος κρίνεται απαραίτητος για τη λειτουργία του διασυνδεδεμένου συστήματος ανέρχεται στα 4,5 εκατομμύρια ευρώ. Το καλώδιο θεωρήθηκε 15 km και αποτελεί το «χειρότερο σενάριο», δεδομένου ότι η ακριβής τοποθεσία της πλωτής πλατφόρμας θα καθορίσει τα km του καλωδίου, τα οποία δε θα ξεπερνούν τα 15. Η χωρητικότητά του και στις δύο κατευθύνσεις ορίστηκε στα 1000 kW, λόγω πιθανής μελλοντικής αναβάθμισης και εξέλιξης του πλωτού εργαστηρίου και από την πλευρά της ζήτησης και από την πλευρά της παραγωγής.

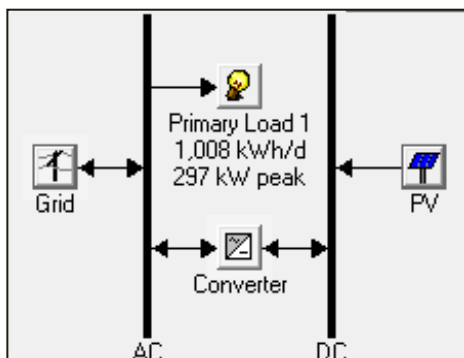
Πίνακας 6.36 Σενάρια φορτίου πλωτής πλατφόρμας συνδεδεμένης με το δίκτυο.

	1^ο σενάριο φορτίου (50 kW)	2^ο σενάριο φορτίου (99 kW)	3^ο σενάριο φορτίου (198 kW)	4^ο σενάριο φορτίου (297 kW)
Καθαρό παρόν κόστος συστήματος (€)	4.576.959	4.651.088	4.800.102	4.931.804
Αρχική επένδυση κεφαλαίου (€)	4.507.500	4.507.500	4.507.500	4.506.000
Κόστος λειτουργίας (€/έτος)	6.038	12.519	25.510	37.124
Κόστος ενέργειας (COE) (€/kWh)	6,507	3,306	1,706	1,169
Μέγεθος Φ/Β (kW)	5	5	5	20
Μέγεθος Μετατροπέα (kW)	5	5	5	10
Δίκτυο (kW)	1.000	1.000	1.000	1.000

Παρακάτω παρουσιάζεται η προσομοίωση του 4^{ου} σενάριο φορτίου (με αιχμή 297 kW) στο λογισμικό HOMER.

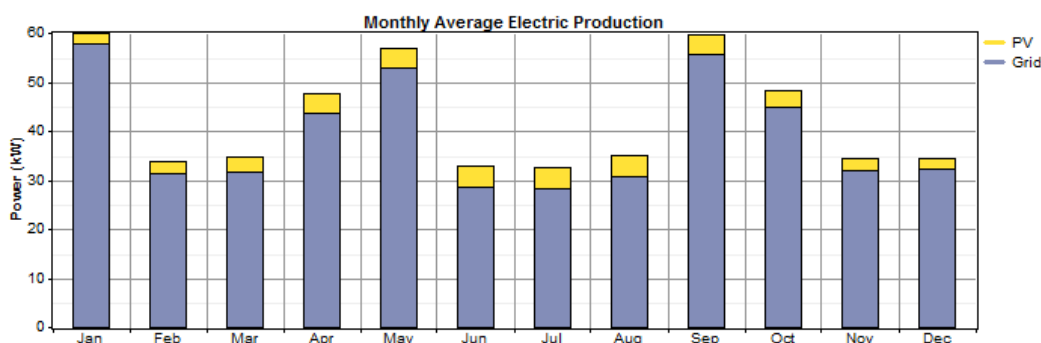
4^ο σενάριο φορτίου (Αιχμή: 297 kW)

Στην εικόνα 6.51 παρουσιάζεται το διασυνδεδεμένο σύστημα όπως μοντελοποιήθηκε στο λογισμικό HOMER. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, το σύστημα αποτελείται μόνο από φωτοβολταϊκά στοιχεία και από έναν αντιστροφέα που είναι απαραίτητος για τη σωστή λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 6.51 Οικονομικότερο μοντέλο για το διασυνδεδεμένο σύστημα, (4^ο σενάριο φορτίου, Αιχμή 297 kW).

Στην Εικόνα 6.52 παρουσιάζεται η μέση μηνιαία ηλεκτρική ισχύς που λαμβάνεται από το δίκτυο, καθώς και της ισχύς που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά σε μορφή ραβδογράμματος για το βελτιστοποιημένο σύστημα. Η ενέργεια που λαμβάνεται από το δίκτυο (344.102 kWh/yr) είναι προφανώς πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με την παραγωγή των φωτοβολταϊκών (28.938 kWh/yr), καθώς η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών είναι μόνο 20 kW λόγω του περιορισμένου χώρου στην πλωτή πλατφόρμα. (Εικόνα 6.53)



Εικόνα 6.52 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα, (4^ο σενάριο φορτίου, Αιχμή 297 kW).

Production			Consumption			Quantity		
	kWh/yr	%		kWh/yr	%		kWh/yr	%
PV array	28,938	8	AC primary load	367,919	100	Excess electricity	3,000	0.80
Grid purchases	344,102	92	Grid sales	823	0	Unmet electric load	0.00	0.00
Total	373,040	100	Total	368,742	100	Capacity shortage	0.00	0.00
						Quantity	Value	
						Renewable fraction	0.0776	

Εικόνα 6.53 Βασικά στοιχεία παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Στον Πίνακα 6.37 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τα στοιχεία κόστους των φωτοβολταϊκών στοιχείων, του αντιστροφέα, της σύνδεσης με το δίκτυο, καθώς και του συνολικού συστήματος. Επίσης, παρουσιάζονται ξεχωριστά τα κόστη ανά κατηγορία (αρχικό κεφάλαιο, κόστος

αντικατάστασης, κόστος συντήρησης και λειτουργίας). Ο κυριότερος συντελεστής κόστους είναι η αγορά και εγκατάσταση του καλωδίου και του μετασχηματιστή.

Πίνακας 6.37 Συγκεντρωτικά στοιχεία κόστους ανά κατηγορία για το συνδεδεμένο στο δίκτυο μοντέλο, (4^ο σενάριο φορτίου, Αιχμή 297 kW).

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
<i>PV</i>	1.000	0	115	0	-62	1.052
<i>Grid</i>	0	0	424.705	0	0	424.705
<i>Converter</i>	5.000	2.086	0	0	-1.039	6.047
<i>Other</i>	4.500.000	0	0	0	0	4.500.000
<i>System</i>	4.506.000	2.086	424.819	0	-1.102	4.931.804

Στο διασυνδεδεμένο σύστημα ενέργειας που μοντελοποιήθηκε εφαρμόστηκε ο ενεργειακός συμψηφισμός (net - metering), ο οποίος διενεργείται σε ετήσια βάση. Στον Πίνακα 6.38 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σχετικά με την ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο, καθώς και την ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και διοχετεύεται στο δίκτυο. Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, η ενέργεια που αγοράζεται κάθε μήνα από το δίκτυο είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με την ενέργεια που παράγεται από τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά, των οποίων η ισχύς είναι μόλις 20 kW.

Πίνακας 6.38 Μηνιαία στοιχεία διασυνδεδεμένου συστήματος.

Μήνας	Ενέργεια που αγοράστηκε από το δίκτυο (kWh)	Ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο (kWh)	Καθαρές αγορές (kWh)	Μέγιστη ζήτηση (kW)	Χρέωση ενέργειας (€)	Χρέωση ζήτησης (€)
Ιανουάριος	42.994	29	42.965	259	0	1.552
Φεβρουάριος	21.092	37	21.055	185	0	1.107
Μάρτιος	23.646	68	23.578	203	0	1.217
Απρίλιος	31.548	36	31.512	290	0	1.739
Μάιος	39.302	139	39.163	249	0	1.493
Ιούνιος	20.641	118	20.524	211	0	1.268
Ιούλιος	21.110	117	20.992	195	0	1.169
Αύγουστος	22.963	114	22.849	195	0	1.169
Σεπτέμβριος	40.160	105	40.056	264	0	1.583
Οκτώβριος	33.529	19	33.510	265	0	1.590
Νοέμβριος	23.026	24	23.003	198	0	1.190
Δεκέμβριος	24.090	18	24.072	225	0	1.352
Ετήσια	344.102	823	343.278	290	20.597	16.431

7 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός αυτόνομου πλωτού επιστημονικού εργαστηρίου, το οποίο πρόκειται να κατασκευαστεί βόρεια του Ηρακλείου. Η μοντελοποίηση και η οικονομοτεχνική ανάλυση του υβριδικού συστήματος ενέργειας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού HOMER (Hybrid Optimization Model for Energy Resources) με σκοπό να επιτευχθεί η μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με το μικρότερο δυνατό κόστος, καθώς και η βελτιστοποίηση του συστήματος. Κρίθηκε αρκετά εύχρηστο και ευέλικτο λογισμικό, με πληθώρα επιλογών και δυνατοτήτων, που συντέλεσαν σε μεγάλο βαθμό στην επιτυχή ανάλυση του συστήματος.

Αρχικά, μελετήθηκε το σενάριο της αυτόνομης λειτουργίας της πλωτής πλατφόρμας έχοντας ως κύριες ενεργειακές πηγές, μία ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά στοιχεία και μία γεννήτρια Diesel. Στη συνέχεια, μελετήθηκε και η περίπτωση λειτουργίας του υβριδικού συστήματος με τη χρήση κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs), ως μονάδα ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής. Επίσης, έγινε η επιλογή δύο διαφορετικών μοντέλων ανεμογεννητριών, μιας ανεμογεννήτριας με ονομαστική ισχύ 330 kW (Enercon - E33) και μίας μεγαλύτερης, με ονομαστική ισχύ 500 kW (EWT – DW54). Παράλληλα, επιλέχθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι μπαταριών για την εκπόνηση των προσομοιώσεων, με σκοπό την επιλογή του πιο αποδοτικού και κατάλληλου συνδυασμού στοιχείων. Συγκεκριμένα, το αυτόνομο σύστημα μοντελοποιήθηκε με συσσωρευτές τύπου ιόντων – λιθίου (RELiON RB300), καθώς και με συσσωρευτές τύπου μολύβδου – οξέως (RES OPzV). Οι προσομοιώσεις των παραπάνω συνδυασμών στοιχείων επαναλήφθηκαν για τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις φορτίου, λόγω της πιθανής μελλοντικής εξέλιξης και αναβάθμισης της πλωτής πλατφόρμας.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση της λειτουργίας του αυτόνομου υβριδικού συστήματος, είχαν αρκετό ενδιαφέρον. Ο οικονομικότερος συνδυασμός στοιχείων που ανέδειξε το HOMER για όλα τα σενάρια του φορτίου και στην περίπτωση λειτουργίας της πλατφόρμας με τη χρήση γεννήτριας Diesel, αλλά και με τη χρήση κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου, περιλαμβάνει την ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 330 kW (Enercon E33) και τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως (RES OPzV). Όμως, πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλά κριτήρια για την επιλογή του ιδανικού συνδυασμού στοιχείων. Ένα από αυτά είναι το μεγάλο βάρος των μπαταριών μολύβδου - οξέως, 105 kg η καθεμία, συγκριτικά με την μπαταρία ιόντων λιθίου που ζυγίζει 37,5 kg. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, πέρα από το μικρό βάρος τους, υπερτερούν των μπαταριών μολύβδου – οξέως, λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής τους. Μία μπαταρία μολύβδου – οξέως έχει μικρότερες διαστάσεις από μία μπαταρία ιόντων λιθίου, αλλά λόγω του αυξημένου αριθμού μπαταριών - συγκριτικά με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου - που απαιτούνται, στην πλειοψηφία των σεναρίων, για την αυτόνομη λειτουργία του συστήματος, καταλήγουν να καλύπτουν μεγαλύτερη επιφάνεια στην πλωτή πλατφόρμα από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η γεννήτρια Diesel και η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου λειτουργούν ελάχιστα σε όλα τα σενάρια. Πιο συγκεκριμένα, οι ώρες λειτουργίας τους ανά έτος είναι λιγότερες από το 10% των συνολικών ωρών του έτους. Ένα άλλο ενδιαφέρον συμπέρασμα που εξήχθη, είναι ότι η διάρκεια ζωής της γεννήτριας Diesel και της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου είναι αυξημένη στα συστήματα που δομούνται από μπαταρίες ιόντων λιθίου (RELiON RB300), λόγω της

μεγαλύτερης συνολικής χωρητικότητας τους, σε σύγκριση με τις μπαταρίες μολύβδου οξέως (RES OPzV). Έτσι, η συμβατική μονάδα παραγωγής (γεννήτρια Diesel) ή η μονάδα ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής (SOFC) λειτουργεί με μικρό ποσοστό λόγω της μεγαλύτερης αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που επιτυγχάνεται με τις συγκεκριμένες μπαταρίες. Όμως, μία σημαντική διαφορά των συστημάτων που περιλαμβάνουν γεννήτρια Diesel και κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου είναι το συνολικό κόστος των συστημάτων. Η κυψέλη καυσίμου έχει πολύ υψηλή απόδοση, αλλά το κόστος αγοράς και συντήρησής της είναι πολύ αυξημένο σε σύγκριση με τη γεννήτρια Diesel.

Ως τελευταίο σενάριο παρουσιάστηκε η σύνδεση του πλωτού επιστημονικού εργαστηρίου με το δίκτυο. Το κόστος του διασυνδεδεμένου συστήματος με αιχμή φορτίου 297 kW ξεπερνάει τα 4,9 εκατομμύρια ευρώ, ενώ ο ακριβότερος συνδυασμός στοιχείων για το αυτόνομο σύστημα με κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου είναι 3,18 εκατομμύρια ευρώ. Επίσης, το διασυνδεδεμένο σύστημα ξεπερνάει κατά πολύ το συνολικό κόστος του αυτόνομου συστήματος με τη χρήση γεννήτριας Diesel. Το κόστος της ενέργειας (COE) στο διασυνδεδεμένο σύστημα κυμαίνεται από 1,169 – 6,507 €/kWh, ενώ για το αυτόνομο σύστημα με γεννήτρια Diesel το κόστος ενέργειας ξεκινάει από 0,384 €/kWh και φτάνει μέχρι και το 1,127 €/kWh. Επομένως, η σύνδεση στο δίκτυο μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία μη συμφέρουσα λύση.

Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που μελετήθηκαν, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη συγκεκριμένα κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού στοιχείων, προκειμένου να μοντελοποιηθεί η αυτόνομη λειτουργία της πλωτής πλατφόρμας. Η λειτουργία και κατασκευή ενός πλωτού συστήματος, όπως αυτό που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και εμπεριέχει τεχνολογικές προκλήσεις.

8 Βιβλιογραφία

- [1] Balaish Moran, Alexander Kraytsberg, and Ein Eli Yair. "A critical review on lithium–air battery electrolytes." Paper, 2014.
- [2] DNK. <https://www.dnkpowers.com/lithium-polymer-battery-guide/lipo-battery-structure/>.
- [3] Elcogen - Fuel Cell Technology. *SOFC White Paper*. 2018.
- [4] *Energy Industry*. <https://energy-industry.gr/%CF%84%CE%BF-%CE%B5%CE%BB%CE%BB%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C-%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%86%CE%AF%CE%BB-%CF%83%CE%B5-%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CE%BA%CE%B1%CF%84/>.
- [5] *Engineered Materials Solutions*. <https://www.emsclad.com/solutions-by-sector/energy-storage.html>.
- [6] *Eurostat Statistics Explained*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_from_renewable_sources&oldid=330611.
- [7] EWT. https://ewtdirectwind.com/brochures/ewt_flyer-dw54-500kw/.
- [8] *Green Car Congress - Fossil Fuel Platform Runs on Renewable Energy*. https://www.greencarcongress.com/2006/04/fossilfuel_plat.html.
- [9] *International Energy Agency, IEA*. <https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Energy%20supply&indicator=TPESbySource&mode=chart&dataTable=BALANCES>
- [10] *International Renewable Energy Agency, IRENA*. <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/>.
- [11] *Lithium Iron Phosphate Battery – RELiON RB300*. <https://relionbattery.com/products/lithium>.
- [12] Newmeil. *X-400, Instruction Manual*.
- [13] *Reserve Power Batteries – RES OPzV*. <https://www.systems-sunlight.com/product/applications/telecommunications/res-opzv/>.
- [14] *SAMSUNG SDI*. <https://www.samsungsdi.com/column/technology/detail/55272.html?listType=gallery>.
- [15] Shahinzadeh Hossein, Alizera Gheiratmand, Hamid Fathi S. and Jalal Moradi. "Optimal Design and Management of Isolated Hybrid Renewable Energy System (WT/PV/ORES)." 21st Electrical Power Distribution Conference, 2016.
- [16] Shell. «Shell SQ80 - Photovoltaic Solar Module.» Product Information Sheet.

- [17] SOLARGIS. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download>.
- [18] Tawiah Samuel, Solomon Adjei Marfo and Daniel Benah Jnr. «Solar Power for Sustainable Offshore Petroleum Exploration and Production in Africa.» Search and Discovery Article #42027, 2017.
- [19] *The wind power - E33 Wind Turbine*.
https://www.thewindpower.net/turbine_en_1_enercon_e33-330.php.
- [20] Tiong Y K, M A Zahari, S F Wong and S S Dol. «The Feasibility of Wind and Solar Energy Application for Oil and Gas Offshore Platform.» Materials Science and Engineering 78, 2015.
- [21] WINNER. *Winner Proteus150-12, AGM Deep Cycle Series, Datasheet Q2*. 2016.
- [22] World Bank Group, ESMAP and SERIS. *Where Sun Meets Water: Floating Solar Market Report-Executive Summary*. Washington, 2018.
- [23] Γαλιφός Σπυρίδων και Ευθύμιος Ρούβαλης. «Γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη για εφαρμογή στην αιολική ηλεκτροπαραγωγή.» ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ, 2017.
- [24] Δινοπούλου Βαϊά. «Σχεδιασμός και Προσομοίωση Λειτουργίας Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Χρήση ΑΠΕ και Κυψελών Υδρογόνου.» Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2016.
- [25] Ελμπακιάν Χοβάννες. «Μελέτη και Κατασκευή Πλωτού Φωτοβολταϊκού Συστήματος.» Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2017.
- [26] Κατσιγιαννης Ιωάννης. «Μοντελοποίηση Υβριδικών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας Μικρής Κλίμακας με το Λογισμικό HOMER.»
- [27] Κολοκύθας Οδυσσέας. «Επισκόπηση της λειτουργίας και της διαχείρισης μικροδικτύου μέσης τάσης με αποθήκευση ενέργειας.» Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017.
- [28] Κωνσταντινίδης Γεώργιος. «Οικονομοτεχνική Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος για την Τροφοδότηση Ηλεκτρικής Ενέργειας ενός Κτιρίου.» Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017.
- [29] Παπαϊωάννου Δημήτριος. «Βελτιστοποίηση και Ανάλυση Ευαισθησίας Μικροδικτύων χρησιμοποιώντας το Λογισμικό HOMER – Μία μελέτη περίπτωσης.» Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2015.
- [30] Σταυρακάκης Γεώργιος. «Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.» Πρόγραμμα επικαιροποίησης γνώσεων αποφοίτων - Φωτοβολταϊκά Ενεργειακά Συστήματα.
- [31] Τάμπασης Ιωάννης. «Ανασκόπηση της εξέλιξης των κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFCs).» Διπλωματική Εργασία, ΤΕΙ Κρήτης, 2011.
- [32] Τσικαλάκης Αντώνιος. «Εισαγωγή στο λογισμικό HOMER.»