



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ
ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

Ταγάρα Ζωή

Επιβλέπουσα: Τσομπανοπούλου Παναγιώτα

Σεπτέμβριος 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

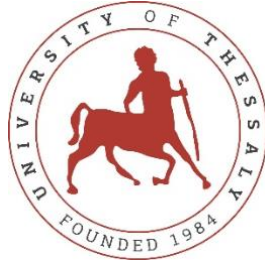
**ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ
ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

Ταγάρα Ζωή

Επιβλέπουσα: Τσομπανοπούλου Παναγιώτα

Σεπτέμβριος 2021



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

TECHNOECONOMIC ANALYSIS OF RENEWABLE ENERGY

RESOURCES MICROGRID

Diploma Thesis

Tagara Zoi

Supervisor: Tsompanopoulou Panagiota

September 2021

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπουσα

Τσομπανοπούλου Παναγιώτα

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Δασκαλοπούλου Ασπασία

Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Φεύγας Αθανάσιος

Ε.ΔΙ.Π., Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ
ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

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

Η Δηλούσα

Ταγάρα Ζωή

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

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

The Declarant

Tagara Zoi

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, που ήταν δίπλα μου σε όλο αυτό το ταξίδι και με στήριξαν και με στηρίζουν σε κάθε μου βήμα και απόφαση.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αναλυτική περιγραφή της έννοιας του μικροδικτύου και η ανάλυση, τόσο σε τεχνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο, ενός μικροδικτύου που βασίζεται κυρίως σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που περιγράφονται και χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση ως οι κύριες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά. Η τοποθέτησή τους και το αν θα είναι βέλτιστες, τόσο οικονομικά όσο και ενεργειακά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το κλίμα της περιοχής εγκατάστασης και οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, τα Συστήματα αποθήκευσης και διαχείρισης ενέργειας κατέχουν, ίσως τον σημαντικότερο ρόλο στην λειτουργία ενός μικροδικτύου και στην ασφαλή και αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για αυτό και περιγράφονται λεπτομερώς στην παρούσα διπλωματική. Τέλος, από την προσομοίωση ενός μικροδικτύου, με ανάγκες οικιακού επιπέδου, που αποτελείται από φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, μπαταρίες και γεννήτρια πετρελαίου εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά την απόδοση και την βιωσιμότητα μιας τέτοιας εγκατάστασης αλλά και τον αντίκτυπο στο περιβάλλον.

Λέξεις-κλειδιά:

Μικροδίκτυο, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Αυτονομία, Ανεμογεννήτριες, Φωτοβολταϊκά πάνελ,
HOMER Energy, Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας, Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας

Abstract

The scope of this thesis is the detailed description of the concept of microgrid and the analysis, both technically and economically, of a microgrid based mainly on renewable energy sources. The renewable energy sources described and used in the simulation as the main units of electricity generation are wind turbines and photovoltaics. Their installation and whether they will be optimal, both economically and energetically depends on many factors, such as the climate of the installation area and the requirements for electricity. Additionally, Energy Storage and Management Systems play, perhaps, the most important role in the operation of a microgrid and in the safe and uninterrupted supply of electricity and for that they are described in detail in this thesis. Finally, from the simulation of a microgrid, with household needs, consisting of photovoltaics, wind turbines, batteries and diesel generator, important conclusions are drawn regarding the efficiency and viability of such an installation and the impact on the environment.

Keywords:

Microgrid, Renewable energy resources, Autonomy, Wind Turbines, Photovoltaic panels, HOMER Energy, Energy Management System, Energy Storage System

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	xiii
Περίληψη	xv
Abstract.....	xvii
Κατάλογος εικόνων.....	xxiii
Κατάλογος πινάκων	xxv
Συνομογραφίες	xxix
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής.....	2
1.2 Οργάνωση του τόμου.....	2
Κεφάλαιο 2 Εισαγωγή στα Μικροδίκτυα.....	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Ορισμός Μικροδικτύου.....	5
2.3 Κατανεμημένη παραγωγή.....	6
2.4 Χαρακτηριστικά και Αρχιτεκτονική Μικροδικτύου.....	8
2.4.1 Χαρακτηριστικά Μικροδικτύου	8
2.4.2 Αρχιτεκτονική Μικροδικτύου.....	9
2.5 Βασικές Συνιστώσες και Ταξινόμηση Μικροδικτύων.....	10
2.5.1 Βασικές Συνιστώσες	10
2.5.2 Ταξινόμηση Μικροδικτύων.....	12
2.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μικροδικτύου	13
Κεφάλαιο 3 Τεχνολογίες Μικροδικτύου.....	15
3.1 Ανεμογεννήτριες – Αιολική Ενέργεια.....	15
3.1.1 Εισαγωγή.....	15
3.1.2 Αιολικό Δυναμικό.....	15
3.1.3 Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών.....	15
3.1.4 Συστήματα Ανεμογεννητριών.....	22

3.2 Φωτοβολταϊκά – Ηλιακή Ενέργεια	24
3.2.1 Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί	24
3.2.2 Ηλιακό Δυναμικό.....	25
3.2.3 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού κελιού.....	25
3.2.4 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	28
3.2.5 Φωτοβολταϊκή συστοιχία	29
3.3 Βιομάζα	31
3.4 Γεννήτρια πετρελαίου.....	33
3.5 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας	33
3.5.1 Εισαγωγή	33
3.5.2 Επισκόπηση Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας	34
3.5.3 Τύποι Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας	37
3.5.4 Θέματα και Προκλήσεις των Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας στις Εφαρμογές για Μικροδίκτυα	45
Κεφάλαιο 4 Έλεγχος και Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας	47
4.1 Εισαγωγή.....	47
4.2 Έλεγχος Μικροδικτύου.....	47
4.2.1 Ιεραρχικός έλεγχος.....	47
4.2.2 Συντονισμός ελέγχου	47
4.2.3 Λειτουργίες ελέγχου του μικροδικτύου	48
4.2.4 Βασικές τεχνικές ελέγχου	49
4.3 Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας	50
4.3.1 Εισαγωγή.....	50
4.3.2 Ορισμός Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας	50
4.3.3 Λειτουργίες του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας	55
4.3.4 Αρχιτεκτονική και Φιλοσοφία Ελέγχου	56
4.3.5 Προκλήσεις και Ευκαιρίες για τα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας των Μικροδικτύων	61
4.3.6 Προγραμματιστικές μέθοδοι διαχείρισης ενέργειας μικροδικτύων.....	63
4.3.7 Συμπεράσματα.....	64
Κεφάλαιο 5 Προσομοίωση στο λογισμικό HOMER	66
5.1 Εισαγωγή στο λογισμικό HOMER Pro	66
5.2 Δεδομένα μικροδικτύου HOMER.....	66
5.2.1 Ηλεκτρικό φορτίο	67
5.2.2 Ηλιακή ακτινοβολία	69

5.2.3 Δεδομένα για τον άνεμο	70
5.3 Συνιστώσες του μικροδικτύου στο HOMER.....	71
5.3.1 Συμβατική γεννήτρια πετρελαίου.....	72
5.3.2 Converter.....	73
5.3.3 Μπαταρία ιόντων λιθίου 1kWh.....	74
5.3.4 Μπαταρία μόλυβδου οξέος 1kWh.....	75
5.3.5 Φωτοβολταϊκά πάνελ.....	76
5.3.6 Ανεμογεννήτρια	77
5.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης	78
Κεφάλαιο 6 - Εκτεταμένα Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	79
6.1 Εισαγωγή.....	79
6.2 Οικονομικοί όροι.....	79
6.3 Εκτεταμένα αποτελέσματα προσομοίωσης.....	81
6.3.1 Βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	81
6.3.2 2 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	87
6.3.3 3 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	88
6.3.4 4 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	89
6.3.5 5 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	90
6.3.6 6 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	91
6.3.7 7 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	92
6.3.8 8 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	93
6.3.9 9 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	94
6.3.10 10 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	94
6.3.11 11 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	95
6.3.12 12 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	96
6.3.13 13 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	97
6.3.14 14 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	98
6.3.15 15 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	98
6.3.16 16 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	99
6.3.17 17 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	100
6.3.18 18 ^η βέλτιστη αρχιτεκτονική.....	101
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα.....	102
Κεφάλαιο 8 Βιβλιογραφία.....	103
Παράρτημα.....	105

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Γενική εικόνα της έννοιας του μικροδικτύου [3]	6
Εικόνα 2: Διάφοροι τύποι κατανεμημένης παραγωγής και τεχνολογίες [4]	7
Εικόνα 3: Λεπτομερής περιγραφή ενός μικροδικτύου [2]	10
Εικόνα 4: Ταξινόμηση μικροδικτύων [7]	13
Εικόνα 5: Τριπτέρυγη πολύστροφη ΑΟΑ [8]	17
Εικόνα 6: ΑΚΑ τύπου Darrieus σταθερών πτερυγίων σχήματος αυγού [8]	17
Εικόνα 7: ΑΚΑ τύπου Darrieus διευθυνόμενων πτερυγίων [8]	17
Εικόνα 8: ΑΚΑ τύπου Darrieus σταθερών πτερυγίων σχήματος πλεξούδας [8]	18
Εικόνα 9: ΑΟΑ σε δύο όψεις [8]	21
Εικόνα 10: Εσωτερικό νασέλας ΑΟΑ [8]	21
Εικόνα 11: Αιολικό Πάρκο [9]	24
Εικόνα 12: Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων [8]	26
Εικόνα 13: Στοιχειώδες ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β κελιού [8]	27
Εικόνα 14: Φ/Β συστοιχία [8]	29
Εικόνα 15: Επισκόπηση εφαρμογών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [10]	34
Εικόνα 16: Οι δύο βασικές διαμορφώσεις των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [10]	35
Εικόνα 17: Λεπτομερής ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με βάση τη μορφή της ενέργειας και τα υλικά [10]	36
Εικόνα 18: Δομή και συνιστώσες μηχανής υψηλής στρεφόμενης αδράνειας [10]	38
Εικόνα 19: Απλοποιημένο διάγραμμα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένα αέρα [10]	39
Εικόνα 20: Διάγραμμα αποθήκευσης ενέργειας βαρύτητας [10]	40
Εικόνα 21: Βασική δομή μιας μπαταρίας οξειδοαναγωγής βαναδίου [10]	41
Εικόνα 22: Μηχανισμός Κυψέλης Καυσίμου Υδρογόνου	43
Εικόνα 23: Τα επίπεδα ελέγχου ενός μικροδικτύου [11]	50
Εικόνα 24: Διαχείριση ενέργειας μικροδικτύου [12]	51
Εικόνα 25: Περιγραφή των λειτουργιών ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας [13] ...	52

Εικόνα 26: Μεθοδολογίες διαχείρισης ενέργειας στα μικροδίκτυα [14]	53
Εικόνα 27: Λειτουργίες συστήματος διαχείρισης ενέργειας [7]	55
Εικόνα 28: Κεντροποιημένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας [13]	57
Εικόνα 29: Αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας [13]	58
Εικόνα 30: Απαιτούμενο ηλεκτρικό φορτίο [HOMER]	67
Εικόνα 31: Ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας τις καθημερινές [HOMER]	68
Εικόνα 32: Ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας τα σαββατοκύριακα [HOMER]	69
Εικόνα 33: Δεδομένα για ηλιακή ακτινοβολία και δείκτη καθαρότητας [HOMER]	70
Εικόνα 34: Δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου [HOMER]	71
Εικόνα 35: Ο γενικός σχηματισμός του μικροδικτύου της προσομοίωσης [HOMER]	72
Εικόνα 36: Χαρακτηριστικά γεννήτριας [HOMER]	73
Εικόνα 37: Χαρακτηριστικά μετατροπέα [HOMER]	74
Εικόνα 38: Χαρακτηριστικά μπαταρίας ιόντων λιθίου [HOMER]	75
Εικόνα 39: Χαρακτηριστικά μπαταρίας μόλυβδου οξέος [HOMER]	76
Εικόνα 40: Χαρακτηριστικά Φ/Β πάνελ [HOMER]	77
Εικόνα 41: Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας [HOMER]	77
Εικόνα 42: Αποτελέσματα προσομοίωσης [HOMER]	78
Εικόνα 43: Περίληψη αποτελεσμάτων και σύγκριση της βασικής αρχιτεκτονικής με το βέλτιστο υβριδικό σύστημα [HOMER]	82
Εικόνα 44: Περίληψη κόστους για το υβριδικό σύστημα [HOMER]	83
Εικόνα 45: Cash Flow [HOMER]	84
Εικόνα 46: Οικονομική σύγκριση του υβριδικού συστήματος με την βασική αρχιτεκτονική [HOMER]	85

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών με βάση την ισχύ [8].....	16
Πίνακας 2: Συνιστώσες του μικροδικτύου που ελέγχονται από ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας [13].....	54
Πίνακας 3: Σύγκριση μεταξύ του κεντροκοποιημένου και κατανεμημένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας στα μικροδίκτυα [13].....	61
Πίνακας 4: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κάθε συνιστώσα	85
Πίνακας 5: Συνολική κατανάλωση καυσίμου (diesel).....	86
Πίνακας 6: Εκπομπές	86
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά του Φ/Β πάνελ.....	86
Πίνακας 8: Επιπλέον χαρακτηριστικά του Φ/Β πάνελ	87
Πίνακας 9: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	87
Πίνακας 10: Εκπομπές	88
Πίνακας 11: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και το συνολικό κόστος.....	88
Πίνακας 12: Εκπομπές	89
Πίνακας 13: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	89
Πίνακας 14: Εκπομπές	90
Πίνακας 15: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	90
Πίνακας 16: Εκπομπές	91
Πίνακας 17: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	91
Πίνακας 18: Εκπομπές	92
Πίνακας 19: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	92
Πίνακας 20: Εκπομπές	93
Πίνακας 21: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	93
Πίνακας 22: Εκπομπές	94
Πίνακας 23: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	94
Πίνακας 24: Εκπομπές	95
Πίνακας 25: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	96
Πίνακας 26: Εκπομπές	96

Πίνακας 27: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	97
Πίνακας 28: Μεγέθη του μικροδικτύου και συνολικό κόστος.....	97
Πίνακας 29: Εκπομπές	98
Πίνακας 30: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	98
Πίνακας 31: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	99
Πίνακας 32: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	100
Πίνακας 33: Εκπομπές	100
Πίνακας 34: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	101
Πίνακας 35: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος	101

Συντομογραφίες

Η.Π.Α	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
DER	Distributed Energy Resources
CHP	Combined Heat Power
PCC	Point of Common Coupling
AOA	Ανεμογεννήτρια Οριζόντιου Άξονα
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
AKA	Ανεμογεννήτρια Κατακόρυφου Άξονα
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
Φ/Β	Φωτοβολταϊκά
BIPV	Building Integrated Photovoltaics
DC	Direct Current
AC	Alternative Current
ΜΕΚ	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης
MGCC	Microgrid Central Controller
NPC	Net Present Cost
LCOE	Levelized Cost Of Energy
IRR	Internal Rate of Return
ROI	Return of Investment
O&M	Operation and Maintenance

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι εδώ και πολλά χρόνια μία από τις βασικότερες ανάγκες των ανεπτυγμένων αλλά και των αναπτυσσόμενων χωρών. Είναι καίριας σημασίας για την επιβίωση του ανθρώπου αλλά και για την βελτίωση της καθημερινότητάς του. Θεωρείται δεδομένη από πολλούς και είδος πολυτελείας για κάποιους άλλους. Με τον ένα ή με τον άλλο τρόπο, η ηλεκτρική ενέργεια κατέχει έναν από τους σημαντικότερους ρόλους στις κοινωνίες όλου του πλανήτη ανεξαιρέτως. Επιπλέον, οι ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα της μόλυνσης του περιβάλλοντος είναι πλέον αντιληπτές και επηρεάζουν όλο και περισσότερες χώρες. Η κλιματική αλλαγή, τα ακραία καιρικά φαινόμενα, το φαινόμενο του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με την υπερθέρμανση του πλανήτη και οι καταστροφικές πυρκαγιές είναι μερικά από τα πολλά παραδείγματα της ανυπολόγιστης καταστροφής που έχει προκαλέσει ο άνθρωπος στον πλανήτη. Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με την αυξανόμενη μείωση των ορυκτών καυσίμων του πλανήτη έχουν οδηγήσει τα κράτη, σε παγκόσμια κλίμακα, στην αναζήτηση λύσεων, οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμων. Οι λύσεις πρέπει να έχουν άμεση ισχύ και να είναι άμεσα αποτελεσματικές. Εκτός από το θέμα που αφορά την μόλυνση του περιβάλλοντος, η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως είναι η αξιοπιστία και η αδιάκοπη και χωρίς σφάλματα ροή, είναι γεγονός. Η ζήτηση ολοένα και αυξάνεται ενώ οι άνθρωποι γίνονται πιο απαιτητικοί. Η ηλεκτρική ενέργεια αποκτά συνεχώς μεγαλύτερο μερίδιο στην παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση. Εξαιτίας όλων των παραπάνω, μία πρώτη λύση βρέθηκε στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά, οι ανεμογεννήτριες, η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μερικές από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για να δώσουν μία λύση στο πρόβλημα. Όμως αρκετά προβλήματα προέκυψαν στην πορεία. Η δυσκολία πρόβλεψης των καιρικών φαινομένων, της ηλιακής ακτινοβολίας, της ταχύτητας του ανέμου αποτελούν σημαντικό εμπόδιο για την χρήση αποκλειστικά και μόνο των παραπάνω τεχνολογιών. Ως συνέπεια, η εκπλήρωση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι βέβαιη και αυτό είναι ένα από τα μειονεκτήματα των συγκεκριμένων τεχνολογιών. Έπειτα σε κάποιες από τις παραπάνω τεχνολογίες η αλλοίωση του περιβάλλοντος είναι αναπόφευκτη.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω οδήγησαν τελικά στην αναζήτηση ενός τρόπου που θα συνδυάζει διάφορες τεχνολογίες, διάφορους τρόπους και με εφαρμογή οπουδήποτε στον κόσμο με στόχο την αδιάκοπη και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Μία, λοιπόν, τέτοια λύση είναι τα Μικροδίκτυα. Αυτό ακριβώς έχει σκοπό αυτή η διπλωματική, να εξετάσει αν το μικροδικτύου είναι οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμο και αν μπορεί να αποτελέσει μία μακροπρόθεσμη και αξιόπιστη λύση.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μία γενική εισαγωγή στην έννοια του μικροδικτύου και δίνεται ο ορισμός του. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στην κατανεμημένη παραγωγή, στα χαρακτηριστικά και την αρχιτεκτονική ενός μικροδικτύου. Τέλος, παρατίθενται ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της συγκεκριμένης εγκατάστασης.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι τεχνολογίες, από τις οποίες μπορεί να αποτελείται ένα μικροδίκτυο, πιο συγκεκριμένα, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, βιομάζα και βέβια συμβατική γεννήτρια πετρελαίου. Έπειτα, αναλύονται τα Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας, απαραίτητη συνιστώσα για τη λειτουργία του μικροδικτύου.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται εκτενής αναφορά στον έλεγχο του μικροδικτύου και στα συστήματα διαχείρισης ενέργειας που περιλαμβάνει. Παρατίθενται ορισμένες τεχνικές ελέγχου και στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας που βασίζονται σε διάφορα είδη προγραμματισμού και αλγορίθμων.

Στο Κεφάλαιο 5 αρχικά, περιγράφεται το λογισμικό HOMER, τα βασικά, δηλαδή, χαρακτηριστικά και στη συνέχεια παρατίθενται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση. Έπειτα, αναφέρονται οι συνιστώσες του μικροδικτύου στο HOMER μαζί με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και τέλος, παρατίθενται συνοπτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται εκτενέστερα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αρχικά, επεξηγούνται οι οικονομικοί όροι που χρησιμοποιήθηκαν για να γίνει η ανάλυση της αρχιτεκτονικής που επιλέχθηκε. Έπειτα, παρατίθεται λεπτομερώς κάθε δυνατή αρχιτεκτονική, από την βέλτιστη έως τη χειρίστη και για κάθε μία από αυτές γίνεται η αντίστοιχη ανάλυση.

Τέλος, στο **Error! Reference source not found.** παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα από την προσομοίωση που έχει γίνει στα προηγούμενα κεφάλαια και εξετάζεται αν η συγκεκριμένα βέλτιστη αρχιτεκτονική μπορεί να αποτελέσει μία λύση και μία αρχή για μια νέα εποχή στο τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 2 Εισαγωγή στα Μικροδίκτυα

2.1 Εισαγωγή

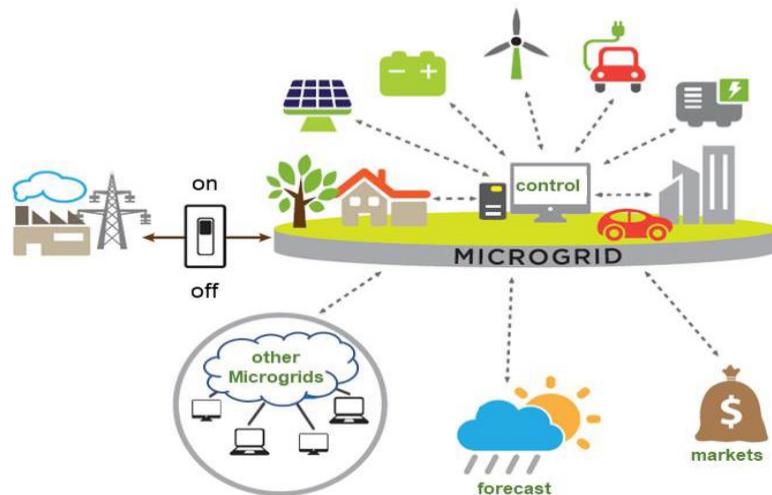
Το μικροδίκτυο είναι μια μικρογραφία του συμβατικού δικτύου. Μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ανεξάρτητο σύνολο που περιλαμβάνει ό,τι και το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όπως το γνωρίζουμε σήμερα, δηλαδή γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καταναλωτές, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Όμως, μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιοδήποτε μέρος και με τις κατάλληλες προϋποθέσεις ενώ μπορεί να προσφέρει αυτονομία και αξιόπιστη, αδιάλειπτη ηλεκτρική ενέργεια.

2.2 Ορισμός Μικροδικτύου

Σύμφωνα με το Τμήμα Ενέργειας των Η.Π.Α. [1]:

«Ένα μικροδίκτυο είναι μία ομάδα από διασυνδεδεμένα φορτία και κατανεμημένες πηγές ενέργειας, μέσα σε καλώς ορισμένα ηλεκτρικά όρια, η οποία ενεργεί ως μία ανεξάρτητη ελεγχόμενη μονάδα σε σχέση με το δίκτυο. Ένα μικροδίκτυο έχει τη δυνατότητα να συνδέεται και να αποσυνδέεται από το δίκτυο, ενεργοποιώντας τις δυο λειτουργίες του, συνδεδεμένο στο δίκτυο και τελείως ανεξάρτητο»

Ένα μικροδίκτυο, λοιπόν, περιλαμβάνει κατανεμημένη παραγωγή και φορτία, τα οποία μπορούν να επιβλέπονται και παράλληλα να ελέγχονται από ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου. Επίσης, μία τέτοια μονάδα μπορεί να συνδέεται, εκτός από το δίκτυο και με άλλες αντίστοιχες μονάδες [2]. Συμπερασματικά, ένα μικροδίκτυο είναι μία μικρογραφία του συμβατικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται με κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά που βελτιώνουν την λειτουργία και την αξιοπιστία του. Μπορεί, τέλος, να βοηθήσει τους καταναλωτές να ανεξαρτητοποιηθούν από τα συμβατικά συστήματα παραγωγής ενέργειας, παρέχοντας διαφορετικούς τύπους ενέργειας, όπως είναι η θερμική [1]. Την γενική ιδέα ενός μικροδικτύου και τις βασικές συνιστώσες του μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Γενική εικόνα της έννοιας του μικροδικτύου [3]

2.3 Καταναμημένη παραγωγή

Τα μικροδίκτυα, κατά κύριο λόγο, βασίζονται στην καταναμημένη παραγωγή και στις καταναμημένες πηγές ενέργειας. Η σύνδεση της ανανεώσιμης παραγωγής στο ηλεκτρικό σύστημα επιτυγχάνεται με έναν συγκεντρωτικό τρόπο, δηλαδή μεγάλες μονάδες παραγωγής όπως φωτοβολταϊκά πάνελ ή ανεμογεννήτριες συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς και με έναν αποκεντρωμένο τρόπο, δηλαδή μέσω της σύνδεσης της καταναμημένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής. Η σύνδεση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο επίπεδο διανομής, μαζί με άλλα συστήματα παραγωγής και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, οι λεγόμενοι καταναμημένοι ενεργειακοί πόροι, κοντά στους σταθμούς κατανάλωσης, προωθεί την ανάπτυξη των μικροδικτύων.

Η καταναμημένη παραγωγή, κυρίως γνωστή με τον αγγλικό όρο DER, δηλαδή, Distributed Energy Resources, είναι μικρής κλίμακας συστήματα παραγωγής ενέργειας, τα οποία βρίσκονται κοντά στην τοποθεσία που χρειάζεται την ηλεκτρική ενέργεια, παρέχοντας ένα εναλλακτικό και συγχρόνως βελτιστοποιημένο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η καταναμημένη παραγωγή είναι μία ταχύτερη, φθηνότερη επιλογή σε σύγκριση με τις μεγάλες, κεντρικές μονάδες παραγωγής και τις υψηλής-τάσης γραμμές μεταφοράς. Άλλα πλεονεκτήματα είναι ότι παρέχεται η δυνατότητα για χαμηλότερο κόστος, μεγαλύτερη αξιοπιστία, καλύτερη ποιότητα δικτύου, αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα και ενεργειακή ανεξαρτησία. Τέλος, η καταναμημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από

ανανεώσιμες πηγές όπως ο άνεμος, ο ήλιος, η γεωθερμία, η βιομάζα ή η υδροηλεκτρική ενέργεια έχει πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα που έχουν άμεσο αντίκτυπο στο περιβάλλον και στη συνέχεια στον άνθρωπο .

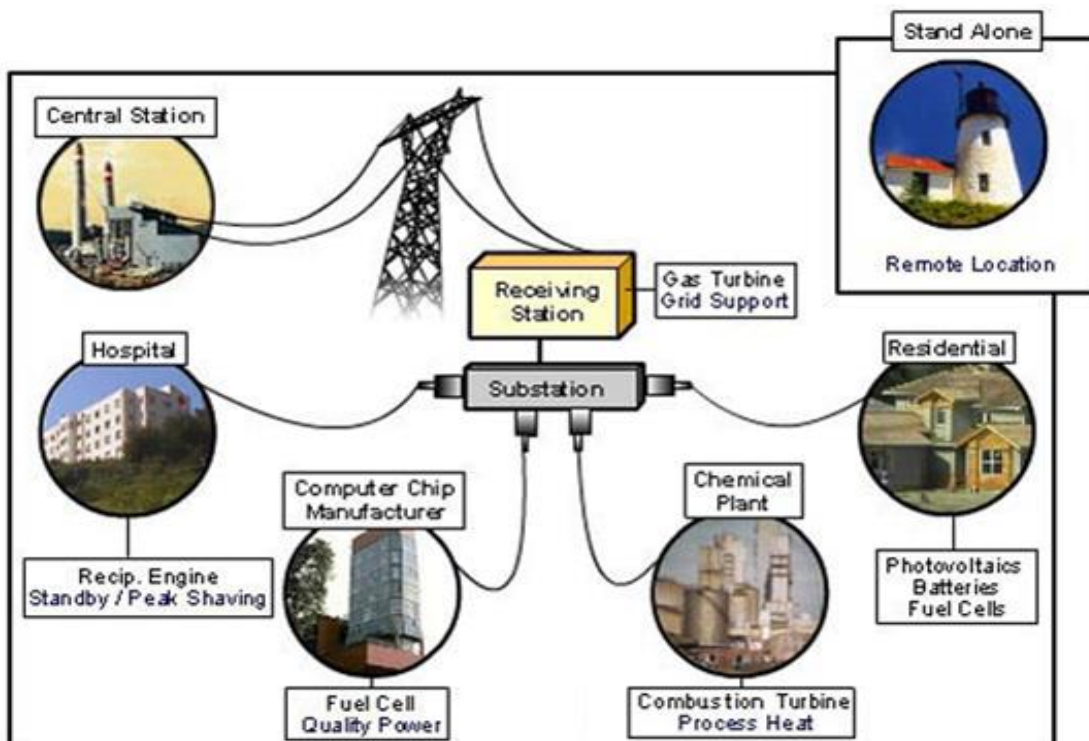
Σύμφωνα με [4]:

«Κατανεμημένη παραγωγή είναι οποιαδήποτε τεχνολογία παράγει ενέργεια εκτός του συμβατικού δικτύου (π.χ. κυψέλες καυσίμου, φωτοβολταϊκά)»

«Κατανεμημένη Ενέργεια είναι οποιαδήποτε τεχνολογία παράγει ενέργεια ή αποθηκεύει ενέργεια (π.χ. μπαταρίες)»

«Κατανεμημένες Ενεργειακές Πηγές είναι οποιαδήποτε τεχνολογία περιλαμβάνεται στις δυο προαναφερθείσες έννοιες. Υπό αυτή την διαμόρφωση, ενέργεια μπορεί να πωληθεί στο δίκτυο όταν αυτό επιτρέπεται από τον κανονισμό λειτουργίας»

Όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 2, οι τύποι κατανεμημένης παραγωγής ποικίλουν όπως και οι τεχνολογίες που μπορούν να αποτελέσουν μέρος του μικροδικτύου.



Εικόνα 2: Διάφοροι τύποι κατανεμημένης παραγωγής και τεχνολογίες [4]

2.4 Χαρακτηριστικά και Αρχιτεκτονική Μικροδικτύου

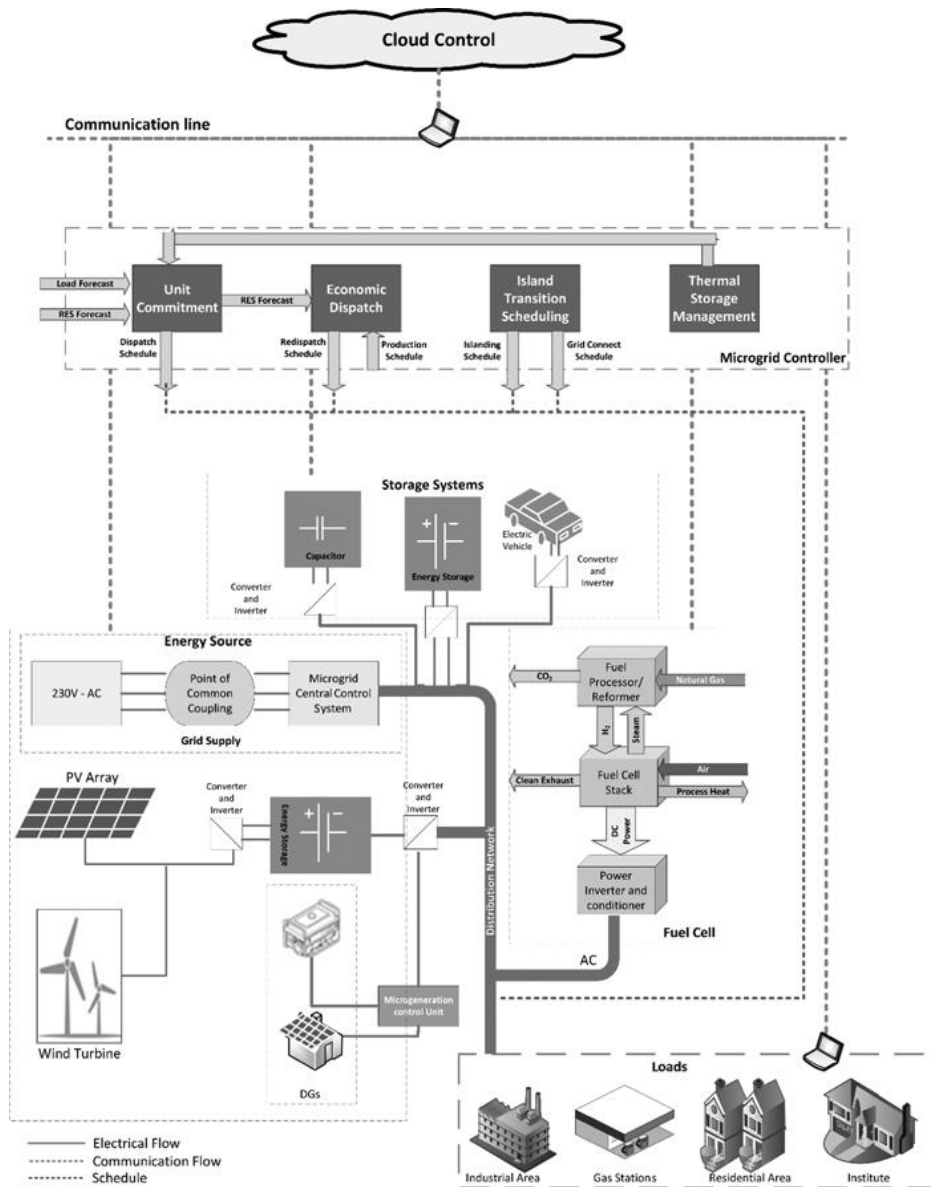
2.4.1 Χαρακτηριστικά Μικροδικτύου

Το μικροδίκτυο είναι μία οντότητα, περιορισμένη σε ένα γεωγραφικό χώρο, η οποία συνδέεται με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του κοινού σημείου ζεύξης, όρος ο οποίος είναι ευρέως γνωστός και με την αγγλική του μετάφραση, ως Point of Common Coupling. Ένα μικροδίκτυο χρησιμοποιεί ένα μόνο υποσταθμό και οι εναλλαγές του τρόπου λειτουργίας του, δηλαδή συνδεδεμένο στο δίκτυο ή αποσυνδεδεμένο και αντίστροφα, γίνονται αυτόματα. Επίσης, το μικροδίκτυο λειτουργεί σε πλήρη συγχρονισμό με το δίκτυο, όταν είναι συνδεδεμένο με αυτό ενώ οι συσκευές που είναι υπεύθυνες για την προστασία του πρέπει να είναι αξιόπιστες [2]. Τέλος, απαιτείται να ακολουθεί τους κανόνες για κατανεμημένη παραγωγή του δικτύου χωρίς να συμμετέχει στην λειτουργία του κεντρικού συστήματος ισχύος [5].

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει με δύο τρόπους, συνδεδεμένο στο δίκτυο και πλήρως απομονωμένο, αποσυνδεδεμένο από αυτό. Στην πρώτη περίπτωση, το μικροδίκτυο μπορεί να αγοράζει ή να τροφοδοτεί το δίκτυο με ηλεκτρική ενέργεια, ανάλογα πάντα με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει και τις απαιτήσεις των καταναλωτών του. Στη δεύτερη περίπτωση, όταν δηλαδή το μικροδίκτυο αποσυνδέεται από το κεντρικό δίκτυο και λειτουργεί τελείως ανεξάρτητα, είτε λόγω ορισμένων σφαλμάτων είτε προγραμματισμένης συντήρησης είτε επειδή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να τροφοδοτεί τα φορτία του χωρίς τη βοήθεια του συμβατικού δικτύου, τότε βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στις συνιστώσες του για την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας [1]. Επίσης, σε αυτή την περίπτωση το μικροδίκτυο θα πρέπει να μπορεί να χειριστεί τις ακόλουθες καταστάσεις: να υπάρχει ισορροπία ζήτησης και παραγωγής, αποδεκτή ποιότητα ενέργειας, ισορροπία τάσης και συχνότητας και τέλος επικοινωνία μεταξύ των συνιστωσών του [5].

2.4.2 Αρχιτεκτονική Μικροδικτύου

Το μικροδίκτυο, όπως έχει προαναφερθεί, είναι μία μικρότερη εκδοχή του συμβατικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, αφού αποτελείται από τις ίδιες συνιστώσες αλλά σε μικρότερη κλίμακα. Ορισμένα παραδείγματα από αυτές τις συνιστώσες περιλαμβάνουν πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια και οι κυψέλες καυσίμου, διάφορα συστήματα αποθήκευσης όπως μπαταρίες και υπερσυμπιεστές, συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος φορτία, μετατροπείς και τέλος ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Είναι λογικό ότι η αρχιτεκτονική του μικροδικτύου εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως είναι η γεωγραφική θέση, οικονομικοί και τεχνικοί λόγοι. Οι παραπάνω παράμετροι κατέχουν πολύ σημαντικό ρόλο στον καθορισμό και στην επιλογή των κατάλληλων γεννητριών και ανανεώσιμων πηγών, οι οποίες θα πρέπει να είναι προσιτές σε κάθε τοποθεσία [2]. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η λεπτομερής αρχιτεκτονική ενός μικροδικτύου.



Εικόνα 3: Λεπτομερής περιγραφή ενός μικροδικτύου [2]

2.5 Βασικές Συνιστώσες και Ταξινόμηση Μικροδικτύων

2.5.1 Βασικές Συνιστώσες

1. Σύστημα κατακεμημένης παραγωγής ισχύος. Τα συγκεκριμένα συστήματα μπορεί να περιλαμβάνουν διάφορες πηγές ενέργειας όπως φυσικό αέριο, βιοαέριο, ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια, κυψέλες καυσίμου, γεννήτριες πετρελαίου. Οι σημαντικότερες τεχνολογίες, ανανεώσιμες ή μη, που χρησιμοποιούνται στα μικροδίκτυα είναι: κινητήρες ντίζελ ή φυσικού αερίου, αεριοστρόβιλοι, μικροστρόβιλοι, κυψέλες καυσίμου, αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, βιομάζα,

υδροηλεκτρική ενέργεια, ενέργεια των ωκεανών και γεωθερμία. Εξαιτίας της διαθεσιμότητας πολλών πηγών παραγωγής ενέργειας, το σύστημα είναι πιο αξιόπιστο και είναι λιγότερο πιθανό να διακοπεί η παροχή λόγω κάποιου σφάλματος [2]. Επίσης, στην παραπάνω κατηγορία ανήκουν και τα συστήματα που παράγουν ταυτόχρονα θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια, πιο γνωστά με τον αγγλικό τους όρο CHP, δηλαδή Combined Heat and Power [6].

2. Φορτία του μικροδικτύου. Το μικροδίκτυο έχει τη δυνατότητα να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε διάφορους καταναλωτές: οικιακούς, εμπορικούς και βιομηχανικούς. Οι εμπορικοί και βιομηχανικοί καταναλωτές ορίζονται ως κρίσιμα ή ευαίσθητα φορτία, τα οποία απαιτούν μεγάλη αξιοπιστία, ποιότητα και δεν υπάρχει χώρος για σφάλματα. Μέρος των μη-κρίσιμων φορτίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ελεγχόμενο φορτίο, για να βελτιωθεί η λειτουργικότητα του δικτύου [6].
3. Συσκευές αποθήκευσης. Η χρήση συσκευών αποθήκευσης κατέχει καθοριστικό ρόλο στην βελτίωση της αξιοπιστίας, της ποιότητας της ισχύος, της σταθερότητας και γενικά της καθολικής λειτουργίας του μικροδικτύου [2]. Μπαταρίες, μηχανές υψηλής στρεφόμενης αδράνειας, (πιο διαδεδομένος ο αγγλικός όρος flywheels) και υπερσυμπιεστές είναι μερικές από τις πιο ευρέως εφαρμόσιμες τεχνολογίες στα μικροδίκτυα [6]. Επίσης, σε επίπεδο οικιακών καταναλωτών χρησιμοποιούνται και πιο απλές τεχνολογίες, όπως οι μπαταρίες ιόντων λιθίου και μόλυβδου οξέος.
4. Έλεγχος και Διαχείριση της ενέργειας. Πολλά ζητήματα σχετικά με την λειτουργία του μικροδικτύου, όπως η ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας, κάποια σφάλματα στη λειτουργία των κατανεμημένων γεννητριών, η ανισορροπία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής αλλά και η επιλογή των κατάλληλων μονάδων αποθήκευσης πρέπει να αντιμετωπίζονται άμεσα όταν συμβαίνουν και να λύνονται άμεσα, κάτι που γίνεται μέσω του ελέγχου του μικροδικτύου. Ο έλεγχος του μικροδικτύου μπορεί να διαιρεθεί σε τρία επίπεδα, το πρωταρχικό επίπεδο, που είναι υπεύθυνο για τον τοπικό έλεγχο των κατανεμημένων γεννητριών, το δευτερεύον επίπεδο που αντιμετωπίζει προβλήματα που έχουν να κάνουν με την τάση και την συχνότητα και τέλος το τρίτο επίπεδο, που είναι γνωστό ως Σύστημα

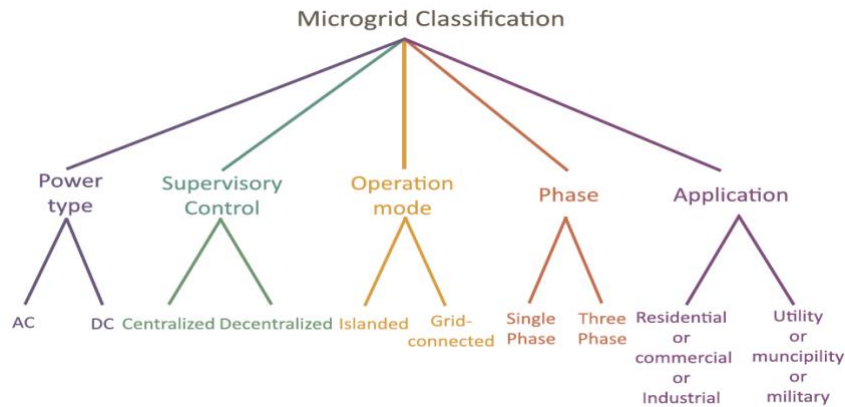
Διαχείρισης Ενέργειας, είναι υπεύθυνο για την διαχείριση της ενέργειας και της ισχύος ανάμεσα στις γεννήτριες και τη ζήτηση.

5. Κοινό σημείο ζεύξης (Point of Common Coupling, PCC). Το κοινό σημείο ζεύξης βρίσκεται, στις περισσότερες περιπτώσεις, εκεί όπου το μικροδίκτυο συνδέεται με το κύριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία συγχρονισμού όσον αφορά την τάση, την συχνότητα και την γωνία φάσης, μεταξύ του κύριου δικτύου και του μικροδικτύου γίνεται σε αυτό το σημείο. Μία διάταξη εξαγωγής ενέργειας στο δίκτυο γίνεται πάλι σε αυτό το σημείο, εφόσον η παραγωγή ενέργειας από τις συνιστώσες του μικροδικτύου είναι υψηλότερη από τις απαιτήσεις των φορτίων του [2].

2.5.2 Ταξινόμηση Μικροδικτύων

Τα μικροδίκτυα μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες με βάση διάφορα κριτήρια [1], όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 4:

- 1 Με κριτήριο τον τύπο, τα μικροδίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πανεπιστημιακά, στρατιωτικά, οικιακά, εμπορικά και βιομηχανικά.
- 2 Με κριτήριο το μέγεθος, τα μικροδίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μικρά και απλά (μερικά εκατοντάδες KWs), σε χαμηλής ή μέσης τάσης τροφοδοτώντας μερικούς καταναλωτές και σε μεγάλα και περίπλοκα (μερικά MWs).
- 3 Με κριτήριο την εφαρμογή, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μικροδίκτυα που παρέχουν βοηθητικές υπηρεσίες και σε μικροδίκτυα που παρέχουν εξαιρετικής ποιότητας ισχύ.
- 4 Με κριτήριο την λειτουργία, κατηγοριοποιούνται σε συνδεδεμένα με το δίκτυο και ανεξάρτητα.
- 5 Με κριτήριο την διαμόρφωση, κατηγοριοποιούνται σε συνεχούς ρεύματος, σε εναλλασσόμενου ρεύματος και σε υβριδικά συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος.
- 6 Με κριτήριο τον εποπτικό έλεγχο, κατηγοριοποιούνται σε κεντρικοποιημένα και αποκεντρωμένα.
- 7 Τέλος, με κριτήριο την φάση λειτουργίας, τα μικροδίκτυα κατηγοριοποιούνται σε τριφασικά και μονοφασικά.



Εικόνα 4: Ταξινόμηση μικροδικτύων [7]

2.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μικροδικτύου

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων είναι [1]:

- Μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και του κόστους των καυσίμων κυρίως εξαιτίας της χρήσης όλο και περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Επίτευξη μεγαλύτερης αξιοπιστίας και ποιότητας της ισχύος.
- Λιγότερες απώλειες, με τοπική παροχή ενέργειας.
- Προστασία από οποιαδήποτε διαταραχή του δικτύου.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα των μικροδικτύων είναι [1]:

- Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κάποιες ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή, βασίζεται εξολοκλήρου στα καιρικά φαινόμενα, επομένως η παραγωγή είναι μη προβλέψιμη.
- Το επενδυτικό κόστος είναι, παρά την τεχνολογική πρόοδο αρκετά υψηλό, αφού οι νέες αυτές τεχνολογίες είναι αρκετά ακριβές και μη προσιτές.
- Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει το μικροδίκτυο, όταν είναι αποσυνδεδεμένο από το δίκτυο, είναι να διατηρήσει την ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης συνεχόμενα. Μεγάλες διαταραχές μπορεί εύκολα να οδηγήσουν σε αστάθεια.

Κεφάλαιο 3 Τεχνολογίες Μικροδικτύου

3.1 Ανεμογεννήτριες – Αιολική Ενέργεια

3.1.1 Εισαγωγή

Οι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας λέγονται αιολικές μηχανές ή ανεμοκινητήρες. Οι ανεμογεννήτριες (wind turbines) είναι αιολικές μηχανές που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια πρώτα σε περιστροφική (μηχανική) και μετά σε ηλεκτρική. Ο όρος, όμως, ανεμογεννήτρια χρησιμοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις καταχρηστικά αντί του σωστού και γενικότερου όρου, ανεμοκινητήρας. Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται πολλές μαζί σε συγκεκριμένες και κατάλληλες περιοχές που διαθέτουν υψηλό αιολικό δυναμικό σχηματίζοντας τα λεγόμενα αιολικά πάρκα που τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια το δίκτυο. Η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως η εξοικονόμηση χρημάτων σε μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, ενώ τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται και θαλάσσια αιολικά πάρκα με επιπρόσθετα πλεονεκτήματα [8].

3.1.2 Αιολικό Δυναμικό

Ο άνεμος, δηλαδή η κίνηση αερίων μαζών εμπεριέχει ένα πολύ σημαντικό ποσό κινητικής ενέργειας που ονομάζεται αιολική ενέργεια, την οποία και εκμεταλλεύονται οι αιολικές μηχανές. Τα βασικά χαρακτηριστικά του ανέμου είναι η ταχύτητα και η διεύθυνσή του [8].

3.1.3 Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών

Ανάλογα με την ισχύ: Μια ενδεικτική ταξινόμηση των ανεμογεννητριών ως προς την ισχύ παρουσιάζει ο Πίνακας 1:

Πίνακας 1: Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών με βάση την ισχύ [8]

Μέγεθος Α/Γ	Ισχύς Εξόδου(kW)	Διάμετρος στροφείου (m)	Ύψος Πύργου (m)	Επιφάνεια σάρωσης (m ²)
Μicro	<1	<1		<1
Μικρό	1-50	1-16	5-30	1-200
Μεσαίο	50 με 1,000	16 με 55	30 με 70	200 με 2,400
Μεγάλο	>1,000	>55	>50	>2,400

Ανάλογα με τον τρόπο αλληλεπίδρασης του ανέμου με την ανεμογεννήτρια: Αν το πτερύγιο είναι τοποθετημένο και διαμορφωμένο έτσι ώστε η ροή του ανέμου να δημιουργεί μια ωστική ροπή, παρά ένα μοντέλο ροής όπως στην άνωση (τύπου άνωσης), τότε λέγεται τύπου οπισθέλκουσας. Δηλαδή, οι ανεμογεννήτριες του συγκεκριμένου τύπου βασίζονται στην κίνησή τους στην αντίσταση που παρουσιάζουν στη ροή του αέρα και όχι στην άνωση.

Ανάλογα της διεύθυνσης του άξονα περιστροφής: Οι ανεμογεννήτριες ταξινομούνται ανάλογα με τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (ΑΟΑ) (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) και κατακόρυφου άξονα (ΑΚΑ) (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT). Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονά τους παράλληλο προς την επιφάνεια της γης και στις περισσότερες περιπτώσεις παράλληλα και με τη διεύθυνση του ανέμου. Οι παραπάνω τύποι ανεμογεννητριών απεικονίζονται στις Εικόνα 5, Εικόνα 6, Εικόνα 7, Εικόνα 8.

Γενικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα:

- Πολύ μεγαλύτερη εμπειρία και τεχνογνωσία από τις ΑΚΑ.
- Έχουν ελαφρά μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από τις ΑΚΑ.
- Εύκολη συναρμολόγηση.
- Παραγωγή θορύβου από την λειτουργία τους.
- Χρειάζονται υψηλότερη κατασκευή πύργου από τις ΑΚΑ, αλλά λόγω του ύψους της ανεμογεννήτριας, μπορούν να εκμεταλλευτούν και άνεμο μεγαλύτερης ταχύτητας.

- Λόγω του μεγέθους, η κατασκευή και η μεταφορά τους κοστίζει αρκετά.



Εικόνα 5: Τριπτέρυγη πολύστροφη ΑΟΑ [8]



Εικόνα 6: ΑΚΑ τύπου Darrieus σταθερών πτερυγίων σχήματος αυγού [8]



Εικόνα 7: ΑΚΑ τύπου Darrieus διευθυνόμενων πτερυγίων [8]



Εικόνα 8: ΑΚΑ τύπου Darrieus σταθερών πτερυγίων σχήματος πλεξούδας [8]

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα μπορούν να εκμεταλλευτούν τον άνεμο ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό του και τη διεύθυνσή του, συνεπώς δεν υπάρχει η ανάγκη για ρύθμιση του στροφείου με αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου. Οι συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες περιστρέφονται γύρω από έναν κάθετο άξονα προς την διεύθυνση του ανέμου. Στη συνέχεια το μηχανικό έργο που παράγεται μεταφέρεται μέσω του κατακόρυφου άξονα στο έδαφος, όπου είναι εγκατεστημένη η γεννήτρια ηλεκτρικής ενέργειας.

Γενικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα:

- Χαμηλότερη απόδοση σχετικά με τις ΑΟΑ.
- Εύκολη συντήρηση και τοποθέτηση του συστήματος μετάδοσης της γεννήτριας και του συστήματος ελέγχου αφού αυτά τοποθετούνται κοντά στο έδαφος.
- Παράγουν λιγότερο θόρυβο διότι δουλεύουν με χαμηλότερες μέσες ταχύτητες ανέμου.
- Μπορούν να λειτουργήσουν με άνεμο από όλες τις κατευθύνσεις, χωρίς να χρειάζονται επιπλέον μηχανισμό ειδικό για προσανατολισμό.
- Έχουν μικρό μέγεθος και εξαιτίας αυτού δεν μπορούν να λειτουργήσουν με υψηλές ταχύτητες ανέμου.

- Είναι εφικτό να τοποθετηθούν σε πολλά μέρη όπως μέσα σε πόλεις, σε αυτοκινητόδρομους, λόγω μεγέθους.

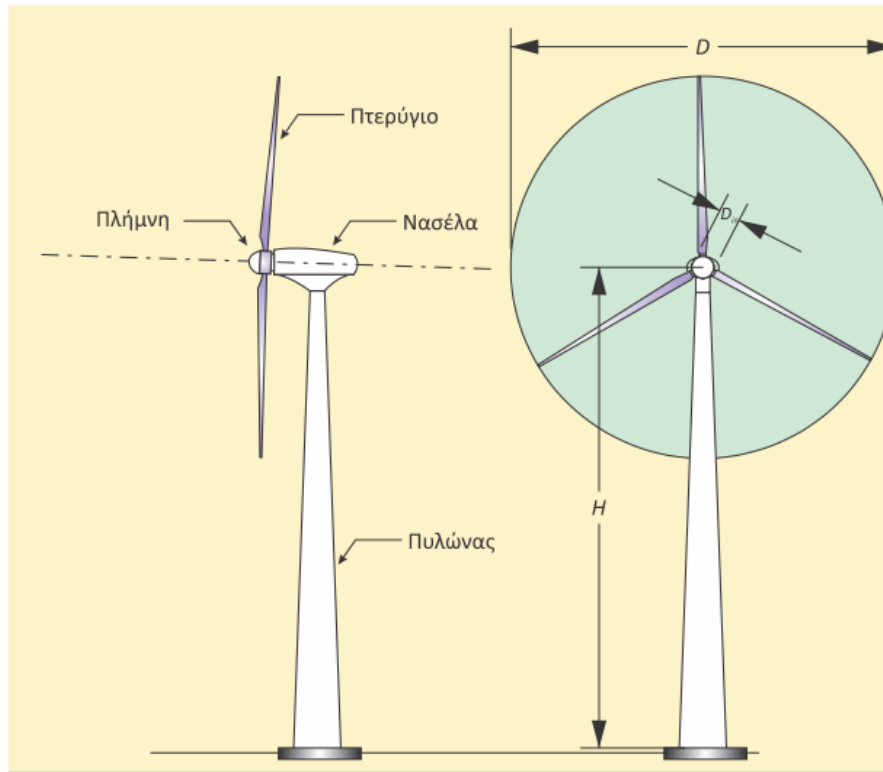
Ανάλογα με τη θέση τοποθέτησης: Η κατασκευή και η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών μπορεί να είναι στη στεριά (επίγειες) αλλά και στη θάλασσα (υπεράκτιες, offshore), οι οποίες είναι συνήθως οργανωμένες σε θαλάσσια αιολικά πάρκα [8].

Τα κύρια μηχανικά μέρη των ΑΟΑ, που φαίνονται στις Εικόνα 9, Εικόνα 10 είναι:

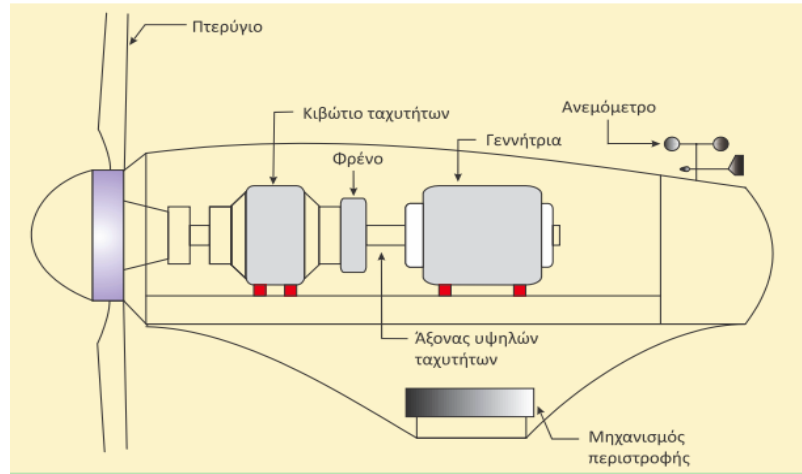
- Ο πύργος ή πυλώνας αποτελεί τον κορμό της ανεμογεννήτριας όπου στηρίζεται το στροφείο και το κέλυφος ή αλλιώς νασέλα εντός του οποίου βρίσκονται η ηλεκτρογεννήτρια, το σύστημα μετάδοσης και άλλοι μηχανισμοί. Το ύψος έχει πολύ σημαντικό ρόλο στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας αφού σε μεγαλύτερα ύψη η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη και κατά συνέπεια αυξάνεται και η παραγωγή ενέργειας, αλλά συγχρόνως τα κόστη τοποθέτησης και κατασκευής είναι ανάλογα υψηλότερα.
- Το στροφείο ή πτερωτή ή ρότορας ή δρομέας (rotor, runner) είναι η σημαντικότερη συνιστώσα σε μια ανεμογεννήτρια διότι εκεί γίνεται η μετατροπή μέρους της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε περιστροφική μηχανική στον άξονα. Το στροφείο αποτελείται από τα πτερύγια και την πλήμνη. Οι πιο σύγχρονες ανεμογεννήτριες διαθέτουν επίσης ρύθμιση βήματος, δηλαδή στρεφόμενα πτερύγια που βοηθούν στην μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Τα σύγχρονα στροφεία διαθέτουν συνήθως δύο ή τρία πτερύγια και πιο σπάνια ένα. Όσον αφορά την ρύθμιση της παραγόμενης ισχύος, υπάρχουν τρεις τρόποι για να επιτευχθεί: Ο πρώτος γίνεται με την αλλαγή του προσανατολισμού ολόκληρου του στροφείου έτσι ώστε η επιφάνεια σάρωσης να μην είναι κάθετη στην διεύθυνση ροής του ανέμου. Ο δεύτερος πραγματοποιείται με την μεταβολή του προσανατολισμού ολόκληρου του πτερυγίου ή μέρους του ακροπτερυγίου ως προς την διεύθυνση του ανέμου. Και οι δύο τρόποι απαιτούν την ύπαρξη σερβομηχανισμού (αυτόματες συσκευές που χρησιμοποιούνται για να ελέγχουν αν η λειτουργία ενός μηχανισμού γίνεται σωστά, για να διατηρούν την τιμή ενός μεγέθους σταθερή και για να καθορίζουν τη θέση ενός οργάνου σε σχέση με ένα

άλλο) και εφαρμόζονται σε ανεμογεννήτριες μικρής, μεσαίας αλλά κυρίως μεγάλης ισχύος.

- Το σύστημα μετάδοσης περιλαμβάνει τους άξονες, τις εδράσεις και το κιβώτιο ταχυτήτων (πολλαπλασιαστής στροφών, gear box). Με τη βοήθεια του κιβωτίου ταχυτήτων, η ταχύτητα περιστροφής ανυψώνεται και μεταφέρεται με τη βοήθεια του άξονα υψηλών ταχυτήτων στη γεννήτρια. Η συγκεκριμένη ανύψωση γίνεται με σκοπό η ταχύτητα περιστροφής να είναι συμβατή με τον τύπο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας και της συχνότητας του εναλλασσόμενου ρεύματος του δικτύου. Η διάρκεια ζωής, ο θόρυβος λειτουργίας αλλά και ο βαθμός απόδοσης είναι μερικά βασικά κριτήρια επιλογής κιβωτίου ταχυτήτων.
- Η γεννήτρια (generator) μετατρέπει την περιστροφική κινητική ενέργεια του άξονα σε ηλεκτρική. Στις ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις τύποι γεννητριών: επαγωγικές (ασύγχρονες) γεννήτριες σταθερών στροφών, επαγωγικές (ασύγχρονες) γεννήτριες μεταβλητών στροφών διπλής τροφοδοσίας με μεταβλητή ταχύτητα και μεταβλητό έλεγχο γωνίας κλίσης πτερυγίων και σύγχρονες γεννήτριες μεταβλητών στροφών με μόνιμο μαγνήτη και χωρίς κιβώτιο. Στις ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιείται κυρίως ο δεύτερος τύπος γεννητριών.
- Αισθητήρες και μηχανισμός περιστροφής/προσανατολισμού. Στις μεγάλες ανεμογεννήτριες υπάρχουν μετρητικά όργανα ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου, τα οποία βοηθούν στον έλεγχο ώστε οι μηχανές να αποδίδουν πάντα τη μέγιστη δυνατή ισχύ και να προστατεύεται ο εξοπλισμός.
- Συστήματα ελέγχου και ασφάλειας. Συστήματα ελέγχου είναι όλα τα ηλεκτρομηχανικά συστήματα που έχουν ως στόχο την σωστή και εύρυθμη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Αυτά τα συστήματα εκμεταλλεύονται πληροφορίες από τα ανεμόμετρα, σχετίζονται με την ηλεκτρική ενέργεια και το δίκτυο, τα καταγραφικά συστήματα ισχύος και ενέργειας και τα συστήματα επικοινωνίας.



Εικόνα 9: ΑΟΑ σε δύο όψεις [8]



Εικόνα 10: Εσωτερικό νασέλας ΑΟΑ [8]

Δύο είναι τα βασικά είδη ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα, οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius και οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus.

Η απλότητα κατασκευής της ανεμογεννήτριας Savonius έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να κατασκευαστεί με ερασιτεχνικά μέσα. Η ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus είναι μηχανή που χαρακτηρίζεται από καμπυλωτά πτερόγυια. Έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να

εκκινήσει μόνη της όταν φυσάει ο άνεμος εξαιτίας της σχετικά χαμηλής αρχικής ροπής εκκίνησης. Ένας συνδυασμός, ωστόσο, ανεμογεννήτριας Darrieus και μίας μικρής ανεμογεννήτριας Savonius παρέχει μία λύση στο παραπάνω πρόβλημα. Τα λοιπά υποσυστήματα της ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, σύστημα πέδησης άξονα, γεννήτρια κ.λπ. δε διαφέρουν από τα υποσυστήματα ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα.

3.1.4 Συστήματα Ανεμογεννητριών

Η πυκνότητα της αιολικής ενέργειας είναι σχετικά μικρή με αποτέλεσμα για να μπορεί να παραχθεί αρκετή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία να μπορεί να συγκριθεί με αυτή που παράγεται από τις συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, απαιτείται σημαντικός αριθμός ανεμογεννητριών. Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση αρκετών ανεμογεννητριών σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από υψηλή ένταση ανέμου, δημιουργώντας με αυτό το τρόπο μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που ονομάζεται αιολικό πάρκο. Σε αυτές τις μονάδες εφαρμόζεται μία τεχνική γνωστή ως οικονομία κλίμακας, δηλαδή επιτυγχάνεται μείωση του κόστους μέσω της χωροταξικής συγκέντρωσης περισσότερων μονάδων παραγωγής.

Μερικοί οικονομικοί παράγοντες που καθορίζουν την οικονομική βιωσιμότητα μιας επένδυσης εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας:

- Κόστος κίνησης των ανεμογεννητριών
- Κόστος αγοράς ή ενοικίασης της γης
- Κόστος κατασκευής υποδομών
- Το αιολικό δυναμικό της περιοχής

Οι βασικές και πιο σημαντικές παράμετροι για την επιλογή της θέσης εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας ή ενός αιολικού πάρκου είναι οι ακόλουθοι:

- Αιολικό δυναμικό. Η γνώση όσον αφορά το αιολικό δυναμικό, δηλαδή της συμπεριφοράς του ανέμου, της έντασης και της διεύθυνσης του, καθώς και των διακυμάνσεων που παρουσιάζει αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιλογή της θέσης εγκατάστασης.

- Όσον αφορά το περιβάλλον, είναι επιτακτική η ανάγκη η εγκατάσταση να μην έχει αρνητικές επιπτώσεις. Επιπλέον, δεν πρέπει να γίνεται αλλοίωση των φυσικών χαρακτηριστικών και η εγκατάσταση να είναι αποδεκτή τόσο από την τοπική κοινότητα όσο και από τους τοπικούς φορείς.
- Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας πρέπει να είναι συμβατή με τη λειτουργία του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου.
- Τέλος, θα πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη τυχόν ακραία καιρικά φαινόμενα που πλήττουν την συγκεκριμένη περιοχή όπως καταιγίδες, θυελλώδεις άνεμοι, πάγος, που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την λειτουργία της ανεμογεννήτριας, ακόμη και να την καταστρέψουν ή να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές.

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι παραπάνω παράγοντες εμφανίζουν και ένα βαθμό αβεβαιότητας όπως είναι λογικό. Απαιτείται, λοιπόν, πολύ προσεκτικός σχεδιασμός λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες [8]. Ένα από τα βασικά αντικείμενα μελέτης της εγκατάστασης είναι η χωροθέτηση των ανεμογεννητριών μέσα στο αιολικό πάρκο, που καθορίζεται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Την τοπογραφία της περιοχής
- Την διεύθυνση και την ένταση του ανέμου
- Τους τεχνολογικούς και φυσικούς περιορισμούς (π.χ. ακατάλληλο έδαφος)
- Τους νομοθετικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς

Οι ανεμογεννήτριες, στις περισσότερες περιπτώσεις, τοποθετούνται σε κάθετες σειρές ως προς την κύρια διεύθυνση του ανέμου. Μια ανεμογεννήτρια δεσμεύει ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου ενώ παράλληλα υποβαθμίζει τη διαθέσιμη ενέργεια του ανέμου δημιουργώντας στροβιλισμούς με αποτέλεσμα οι επόμενες σε σειρά ανεμογεννήτριες, να δέχονται άνεμο με χαμηλότερη ταχύτητα και λιγότερη διαθέσιμη ενέργεια. Η ροή επανέρχεται στην αρχική της ταχύτητα σταδιακά και μετά από αρκετά μεγάλη απόσταση. Η ενεργειακή παραγωγή του πάρκου είναι ίση με το άθροισμα της παραγωγής ενέργειας της κάθε ανεμογεννήτριας.

Η συνολική παραγόμενη ενέργεια από το αιολικό πάρκο δεν ισούται με το άθροισμα των N ανεμογεννητριών αλλά είναι μικρότερη από αυτό. Οι απώλειες της παραγόμενης ενέργειας οφείλονται στην επίδραση των υπόλοιπων ανεμογεννητριών και ονομάζονται απώλειες ομόρρου (array losses). Υπολογισμός αυτών των απωλειών γίνεται με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού και υπολογιστικών μεθόδων που λαμβάνουν υπόψη διάφορους παράγοντες. Εμπειρικά, εκτίμηση των απωλειών μπορεί να γίνει με βάση τη διαθέσιμη έκταση, τον αριθμό των ανεμογεννητριών και τη διάταξη τους.

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αιολικά πάρκα, παράγουν εναλλασσόμενη τριφασική ισχύ σε τάση 690V. Για να μειωθούν οι απώλειες μεταφοράς, άμεσα, το ηλεκτρικό ρεύμα ανυψώνεται σε τάση συνήθως 34.5kV για τη μεταφορά του εντός του πάρκου μέχρι τον τελικό μετασχηματιστή ή υποσταθμό. Έπειτα, εκεί μετατρέπεται σε μέση ή υψηλή τάση και τροφοδοτεί το δίκτυο. Ένα αιολικό πάρκο με τις απαραίτητες συνιστώσες αλλά και υποδομές φαίνεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Αιολικό Πάρκο [9]

3.2 Φωτοβολταϊκά – Ηλιακή Ενέργεια

3.2.1 Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) κελιά (photovoltaic cell) είναι συσσωρευτές ξηράς φόρτισης, οι οποίοι όταν εκτεθούν στο ηλιακό φως εμφανίζουν διαφορά δυναμικού. Τα φωτοβολταϊκά κελιά αποτελούνται από δύο λεπτά στρώματα ημιαγωγού, που συνήθως είναι το πυρίτιο. Τα συγκεκριμένα στρώματα αναμειγνύονται με άλλα στοιχεία, έτσι ώστε το ένα στρώμα

να αποκτά πλεόνασμα ηλεκτρονίων και το άλλο έλλειμμα. Τα δύο στρώματα του φωτοβολταϊκού κελιού συνδέονται με ένα εξωτερικό κύκλωμα. Η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει με τη μορφή φωτονίων στην επιφάνεια των δυο στρωμάτων και οδηγεί στην ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού στα άκρα του κελιού. Συμπερασματικά, δημιουργείται ένα ρεύμα που μέσω εξωτερικού κυκλώματος επιστρέφει στην άλλη πλευρά της ένωσης. Για αυτό το λόγο εάν τέτοιου είδους κελιά τοποθετηθούν σε σειρά, τότε είναι εφικτό να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα στην επιθυμητή τάση. Για παράδειγμα, ένα στρογγυλό κελί διαμέτρου 100mm κατά τη διάρκεια του μεσημεριού, αποδίδει ισχύ 1W με τάση μικρότερη του 0.5V [8].

3.2.2 Ηλιακό Δυναμικό

Σε ετήσια βάση ένα ποσοστό περίπου 20% την ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα απορροφάται από την ατμόσφαιρα και τα σύννεφα, ένα ποσοστό 30% ανακλάται πίσω στο διάστημα και τελικά ένα ποσοστό μικρότερο του 50% φτάνει στο έδαφος με τη μορφή άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία δεν έχει υποστεί κάποιου είδους ανάκλαση και έχει ως βασικό χαρακτηριστικό ότι μπορεί να κατευθυνθεί και να συγκεντρωθεί κάπου. Η διάχυτη ακτινοβολία είναι το αποτέλεσμα της σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο μόρια της ατμόσφαιρας, των σύννεφων, της εν γένει υγρασίας και της σκόνης. Η εκτίμηση του διαθέσιμου ηλιακού δυναμικού είναι αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδιασμού, της ανάλυσης και της υλοποίησης φωτοβολταϊκών συστημάτων.

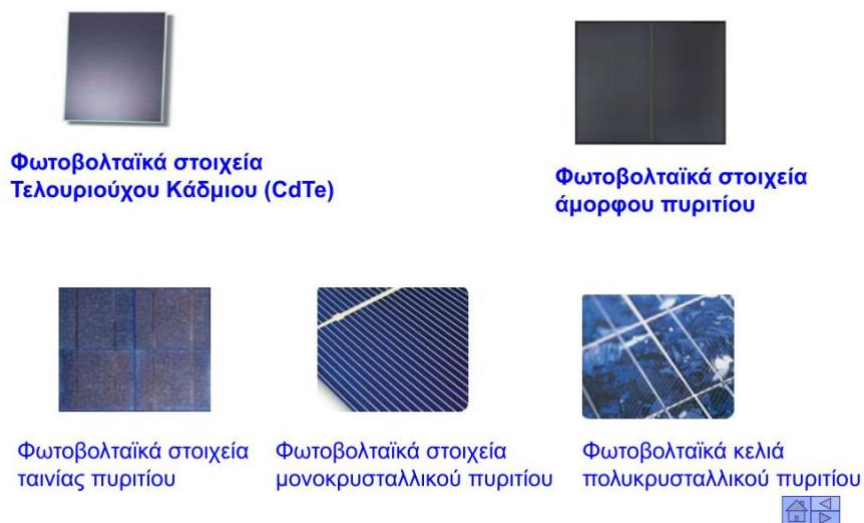
3.2.3 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού κελιού

Το στοιχείο στο οποίο γίνεται η παραγωγή ενέργειας είναι το Φ/Β κελί ή στοιχείο. Υπάρχουν διάφοροι τύποι Φ/Β κελιών ανάλογα με το υλικό και τον τρόπο παραγωγής με διαφορές, όπως είναι φυσικό, στο κόστος και στην απόδοση. Οι τύποι των Φ/Β που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές είναι:

- Μονοκρυσταλλικού πυριτίου, (mono-Si). Επιτυγχάνουν βαθμό απόδοσης από 20 έως 21%, αλλά έχουν ακριβότερη και δυσκολότερη διαδικασία παραγωγής. Επίσης, λόγω της συγκεκριμένης διαδικασίας παραγωγής έχουν σημαντική ποσότητα αποβλήτων. Όσον αφορά την εμφάνιση, έχουν ομοιόμορφο μπλε σκούρο/μαύρο χρώμα και σχήμα τετραγωνικής κυψέλης, Εικόνα 12.

- Πολυκρυσταλλικού πυριτίου, (poly-Si). Είναι τα συνηθέστερα Φ/Β στην αγορά αλλά έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης που φθάνει έως 18%. Στα πλεονεκτήματα, η διαδικασία παραγωγής τους είναι απλή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουν μειωμένα απόβλητα. Έχουν μπλε χρώμα το οποίο δεν είναι ομοιόμορφο σε όλη την έκταση του κελιού και το σχήμα τους είναι τετραγωνικό ή τετραγωνικής κυψέλης, Εικόνα 12.
- Λεπτού υμενίου. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει ως χαρακτηριστικά τον χαμηλό βαθμό απόδοσης αλλά και το χαμηλό κόστος. Οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι άμορφου πυριτίου (a-Si) με χαμηλό βαθμό απόδοσης έως 9%, καδμίου-τελούριου (CdTe) και χαλκού-ινδίου-γαλλίου (CIS). Το χρώμα τους ανάλογα με τον τύπο είναι μαύρο, μπλε ή σκούρο μωβ, ενώ έχουν τετράγωνο σχήμα, Εικόνα 12.

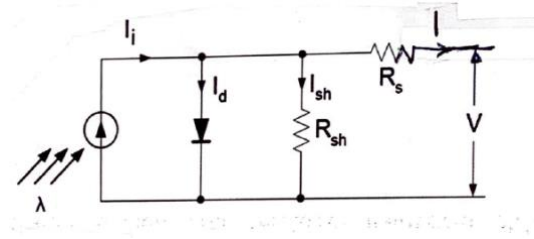
ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



Εικόνα 12: Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων [8]

Τα φωτοβολταϊκά κελιά στηρίζονται στην ικανότητα των ημιαγωγών να μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία δημιουργεί κίνηση φορτισμένων σωματιδίων στο εσωτερικό του ημιαγωγού παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.

Το στοιχειώδες κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού κελιού μοντελοποιείται από μια δίοδο, μια πηγή ρεύματος, μια αντίσταση παράλληλα σε αυτή και τέλος μια αντίσταση σε σειρά (Εικόνα 13). Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η R_{sh} είναι μεγαλύτερη των 500Ω.



Εικόνα 13: Στοιχειώδες ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β κελιού [8]

Η ένταση της πηγής ρεύματος ονομάζεται φωτόρευμα και σχετίζεται με την ηλιακή ακτινοβολία. Η χαρακτηριστική εξίσωση έντασης ρεύματος – τάσης της διόδου δίνεται από τη σχέση του Shokley:

$$I_d = I_o * \left[e^{q_e * \frac{V_d}{k * T}} - 1 \right]$$

Όπου I_o το ρεύμα κόρου, q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου, k η σταθερά του Boltzman, V_d η τάση στα άκρα της διόδου και T η θερμοκρασία της διόδου. Το ρεύμα στα άκρα του κυκλώματος θα είναι (νόμος του Kirchoff):

$$I = I_i - I_d - I_{sh}$$

Όπου I_i είναι το φωτόρευμα και I_{sh} είναι το ρεύμα που διαρρέει την παράλληλη αντίσταση. Συνδυάζοντας τις δυο παραπάνω εξισώσεις έχουμε :

$$I = I_i - I_o * \left[e^{q_e * \frac{V_d}{k * T}} - 1 \right] - I_{sh}$$

Και με αντικατάσταση από το νόμο του Ohm για την παράλληλη αντίσταση R_{sh} από το απλοποιημένο κύκλωμα έχουμε:

$$I = I_i - I_o * \left[e^{q_e * \frac{V_d}{k * T}} - 1 \right] - \frac{V_d}{R_{sh}}$$

Η τάση V_d σχετίζεται με την τάση στους ακροδέκτες οπότε τελικά έχουμε την παρακάτω απλοποιημένη εξίσωση:

$$I = I_i - I_o * \left[e^{q_e * \frac{V_d}{k * T}} - 1 \right] - \frac{V - I * R_s}{R_{sh}}$$

Σε ένα φωτοβολταϊκό κελί, η ηλεκτρική ισχύς εξαρτάται από το φορτίο, αυτό σημαίνει ότι η παραγόμενη ισχύς δεν είναι σταθερή, πρέπει να καθοριστεί το σημείο μέγιστης ισχύος ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και έντασης ακτινοβολίας που υπάρχουν και να χρησιμοποιηθούν σε λειτουργία συσκευών ελέγχου και μέτρησης.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο σαν πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει περίπλοκη και ασυνήθιστη συμπεριφορά, δηλαδή η τάση μεταβάλλεται μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος ακόμα και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή, κάτι που δεν ισχύει για τις περισσότερες ηλεκτρικές πηγές [8].

3.2.4 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά πλαίσια, κυρίως γνωστά με τον αγγλικό όρο panels, τα οποία ουσιαστικά είναι φωτοβολταϊκά κελιά κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Εάν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από N_s φωτοβολταϊκά κελιά συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους και N_p σειρές συνδεδεμένες παράλληλα τότε η τάση και η ένταση του ρεύματος στα άκρα του πλαισίου θα είναι αντίστοιχα:

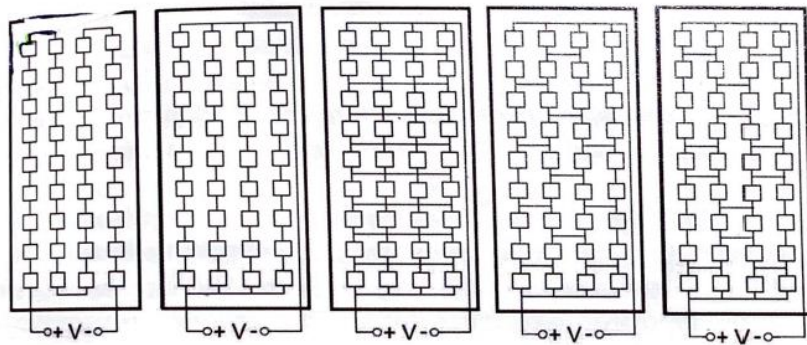
$$V_{panel} = N_s * V$$

$$I_{panel} = N_p * I$$

Ένα ενδιαφέρον φαινόμενο και πολύ συχνό που αξίζει να αναφερθεί είναι αυτό της σκίασης. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που υπάρχουν εμπόδια στον ορίζοντα όπως κτίρια, βλάστηση είτε σε περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης όπως για παράδειγμα στις στέγες κτιρίων όπου προκαλείται σκίαση από τη μία σειρά στην επόμενη. Έτσι είναι πολύ σημαντικό να γίνεται λεπτομερής προσδιορισμός των απωλειών. Για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, το μέρος που βρίσκεται σε σκιά λειτουργεί ως μια μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα. Η παρατεταμένη σκίαση ενός στοιχείου σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπόλοιπων μπορεί να έχει ολέθρια αποτελέσματα για το στοιχείο αυτό και κατά συνέπεια να οδηγήσει στην αχρήστευση ολόκληρου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης ενός κατεστραμμένου στοιχείου. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο Hot Spot (κατάσταση «Θερμής κηλίδας») [8].

3.2.5 Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία (array ή string) αποτελείται από πλαίσια κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους (είτε σε σειρά είτε παράλληλα) έτσι ώστε στους ακροδέκτες της συστοιχίας να υπάρχουν ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τα οποία θα επιτρέψουν την σύνδεση με άλλες συσκευές και την πραγματοποίηση κάποιας συγκεκριμένης εργασίας. Επίσης, μια Φ/Β συστοιχία φαίνεται και στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14: Φ/Β συστοιχία [8]

Υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στο σχεδιασμό μιας συστοιχίας:

- Η σύνδεση ανόμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων στην ίδια συστοιχία απαγορεύεται αφού τα διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά δημιουργούν απώλειες. Ακόμη και φωτοβολταϊκά πλαίσια του ίδιου μοντέλου έχουν κάποιες μικρές διαφορές στα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά. Για αυτό στην πράξη γίνεται ταίριασμα των χαρακτηριστικών, περισσότερο γνωστό με τον αγγλικό όρο *matching*, με βάση το πιστοποιητικό μετρήσεων που συνοδεύει κάθε πλαίσιο.
- Τα πλαίσια της κάθε συστοιχίας πρέπει να έχουν κοινό προσανατολισμό. Ο διαφορετικός προσανατολισμός αλλάζει την ένταση της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στα πλαίσια με αποτέλεσμα διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και απώλειες.
- Η μερική σκίαση των πλαισίων πρέπει να αποφεύγεται με κάθε τρόπο γιατί είναι πολύ πιθανό για σημαντικά διαστήματα να υπάρχει μειωμένη παραγωγή. Εάν υπάρχουν φωτοβολταϊκά σε σκίαση τότε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο λειτουργεί σαν διακόπτης με αποτέλεσμα να χάνεται η παραγωγή όχι μόνο από το πλαίσιο

που είναι σκιασμένο αλλά από όσα πλαίσια είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Για τον παραπάνω λόγο χρησιμοποιούνται δίοδοι παράκαμψης, μειώνοντας τις απώλειες.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε συστοιχίες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα συστήματα, όπως διασυνδεδεμένα συστήματα, αυτόνομα συστήματα με μπαταρία, συστήματα συνεχούς ρεύματος, υβριδικά συστήματα και βέβαια μικροδίκτυα. Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων που συμμετέχουν σε κάθε σύστημα εξαρτάται από τις ενεργειακές ανάγκες, το σκοπό της χρήσης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλαισίου. Υπάρχουν συστήματα που αποτελούνται από μόνο ένα πλαίσιο μέχρι μερικές χιλιάδες. Υπάρχει η δυνατότητα αυτά τα συστήματα να εγκατασταθούν σε κτίρια, είτε στην οροφή είτε στο κέλυφος (BIPV- Building Integrated Photovoltaics), σε εκτάσεις γης, τα λεγόμενα φωτοβολταϊκά πάρκα.

Η ισχύς που θα αποδώσει μια φωτοβολταϊκή συστοιχία εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας του συστήματος, δηλαδή από την τάση και την ένταση του ρεύματος. Το σημείο λειτουργίας καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, τα οποία επηρεάζονται ως επί το πλείστον από την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία και το ηλεκτρικό φορτίο (κατανάλωση) που είναι συνδεδεμένο στους ακροδέκτες της συστοιχίας.

Η πιο συνηθισμένη κατηγορία Φ/Β συστημάτων είναι αυτή των διασυνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η εγκατεστημένη ισχύς τους κυμαίνεται από λίγα kW έως δεκάδες MW. Στα διασυνδεδεμένα συστήματα η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά, παρέχεται κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Για να γίνει όμως αυτό χρειάζεται ένας αντιστροφέας (Inverter), ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (DC) που παράγεται από τη συστοιχία, σε εναλλασσόμενο (AC) για σύνδεση στο δίκτυο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας που συλλέγεται από ένα συλλέκτη εγκαθίστανται συσκευές που παρακολουθούν την θέση του ήλιου και περιστρέφουν τη συλλεκτική επιφάνεια έτσι ώστε να είναι κάθετη στις ακτίνες του ήλιου ελαχιστοποιώντας τη γωνία πρόσπτωσης. Οι συγκεκριμένες συσκευές που παρακολουθούν την θέση του ήλιου ονομάζονται ηλιοστάτες (trackers). Στην

πραγματικότητα, οι ηλιοστάτες αλλάζουν θέση κάθε μερικά λεπτά, ενώ υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στις μέγιστες γωνίες περιστροφής [8].

3.3 Βιομάζα

Με τον όρο βιομάζα, αποκαλείται το αρχικό βιολογικό υλικό, το οποίο προέρχεται από ζώντες οργανισμούς και μπορεί να είναι απόβλητο αστικής φύσης, ζωικό απόβλητο ή φυτικό προϊόν. Τα καύσιμα που έχουν παραχθεί με μηχανικές, χημικές ή βιοχημικές και θερμικές διεργασίες ονομάζονται βιοκαύσιμα. Η τελική μορφή των οποίων εξαρτάται από το είδος της βιομάζας, δηλαδή την χημική σύσταση, την κυτταρική δομή, την προέλευση αλλά και από το είδος της επεξεργασίας. Τα βιοκαύσιμα είναι κυρίως υγρά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στον τομέα των μεταφορών και στόχος είναι να αντικαταστήσουν τα προϊόντα πετρελαίου. Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τα συστήματα που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη τη βιομάζα ονομάζεται βιο-ισχύς.

Όσον αφορά τη φυτική βιομάζα, μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στην κυτταρική και την αμυλούχα. Και στις δύο περιπτώσεις, η παραγωγή γίνεται μέσω της φωτοσύνθεσης, δεσμεύοντας CO₂, το βασικότερο αέριο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθιστώντας τα βιοκαύσιμα ασφαλή για το περιβάλλον, αφού ουσιαστικά δεν παράγουν νέο CO₂ αλλά ανακυκλώνουν το ήδη υπάρχον.

Οι πρώτες ύλες βιομάζας που χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτούν τα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής είναι:

1. Υπολείμματα ξύλου: Το ξύλο είναι το πλέον διαδεδομένο καύσιμο βιομάζας για την παραγωγή θερμότητας και ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται κυρίως υπολείμματα ξύλου από τις βιομηχανίες, τα λεγόμενα πριονίδια, τα υπολείμματα ξυλαποθηκών που προέρχονται από χωματερές καθώς και υπολείμματα ξύλου από οικοδομές ή κατεδαφίσεις.
2. Γεωργικά υπολείμματα: Περιλαμβάνουν γεωργικά κατάλοιπα, όπως άχυρα σιτηρών, στελέχη καλαμποκιού, κλαδέματα οπωρώνων, φλοιοί ρυζιού και βαγάση (ο πολτός που απομένει μετά τον θρυμματισμό του ζαχαροκάλαμου).
3. Απορρίμματα: βιομηχανικά, αστικά στερεά, ζωικά και αστικά λύματα.

Τα βασικά είδη βιοκαυσίμων είναι τα παρακάτω:

1. Υγρά βιοκαύσιμα, που χρησιμοποιούνται κυρίως στον τομέα των μεταφορών, όπως είναι η βιο-αιθανόλη, η βιο-μεθανόλη, το biodiesel, το βιοαέριο.
2. Στερεά βιοκαύσιμα, που κατηγοριοποιούνται με βάση τη φυσική μορφή και την προέλευση τους και οι συνηθέστερες μορφές τους είναι τα καυσόξυλα, τα ξυλοκάρβουνα και τα pellets.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η κάθε πηγή βιομάζας έχει τα δικά της χαρακτηριστικά, όπως είναι η δομή και οι φυσικές και χημικές ιδιότητες, τα οποία καθορίζουν τον τρόπο μετατροπής της σε βιοκαύσιμο αλλά και τα αποτελέσματα αυτής της μετατροπής.

Συμπερασματικά, η βιομάζα είναι ένα ανεξάντλητο υλικό, αφού πρόκειται για μία αποθήκη ηλιακής ενέργειας, που συνδυάζει μειωμένες εκπομπές CO₂ (ανακύκλωση CO₂, δεν παράγεται νέο, διατηρείται το ισοζύγιο του άνθρακα), μειωμένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου με την προσεκτική ρύθμιση της διεργασίας της καύσης και μείωση των εκπομπών υδρογονανθράκων κατά 10% σε σχέση με τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα. Επίσης, πλεονεκτήματα της χρήσης βιομάζας είναι μείωση του όγκου των απορριμμάτων, η προστασία των δασών από πυρκαγιές με ελεγχόμενη υλοτόμηση και τέλος, η μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα γενικά και ειδικά από το πετρέλαιο. Από την άλλη, υπάρχουν και αρκετοί περιορισμοί στην ανάπτυξη της βιομάζας, όπως το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα, που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει και το τριπλάσιο του αντίστοιχου κόστους από ορυκτά καύσιμα και το μεγάλο κόστος μεταφοράς αφού οι ποσότητες που πρέπει να μεταφερθούν είναι πολύ μεγάλες (αυτό το μειονέκτημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με την τοποθέτηση των μονάδων μετατροπής στο χώρο παραγωγής, χρήση στο μικροδίκτυο). Άλλο ένα σημαντικό θέμα που προκύπτει είναι η ποιότητα και η ποσότητα των υλικών που φτάνουν στη μονάδα, οι οποίες πρέπει να είναι σταθερές και αξιόπιστες. Επίσης, η βιομάζα χαρακτηρίζεται από χαμηλή θερμογόνο δύναμη και τέλος, παρατηρείται μέτρια ισχύς των εργοστασίων ηλεκτροπαραγωγής με χρήση βιομάζας (<50MW) [8].

3.4 Γεννήτρια πετρελαίου

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης ή γεννήτριες πετρελαίου παρέχουν σημαντική υποστήριξη στην παραγωγή και την κατανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές. Η συγκεκριμένη τεχνολογία, πολλές φορές, απαιτεί υψηλό κόστος λειτουργίας, διατήρηση συχνότητας και φυσικά ένα μεγάλο μειονέκτημα είναι η μόλυνση του περιβάλλοντος [2]. Οι πετρελαιοκινητήρες/βενζινοκινητήρες είναι μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), δηλαδή η καύση, η παραγωγή θερμικής ενέργειας από χημική και η μετατροπή της θερμικής σε μηχανική γίνεται στον ίδιο χώρο. Η λειτουργία τους βασίζεται κυρίως στην παλινδρομική κίνηση εμβόλων. Επίσης, η λειτουργία τους χωρίζεται σε διαφορετικές φάσεις-χρόνους που διαδέχονται περιοδικά η μία την άλλη, ενώ συμβαίνουν στον ίδιο χώρο, στο εσωτερικό του κυλίνδρου. Η ισχύς παράγεται στην φάση της εκτόνωσης και μόνο κατά τη διάρκεια αυτής. Η θερμική απόδοση των συγκεκριμένων μηχανών είναι αρκετά υψηλή και μπορεί να φθάσει και το ποσοστό του 47% [8]. Ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η αυξημένη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, γεγονός που οδηγεί στην σταδιακή εγκατάλειψη της.

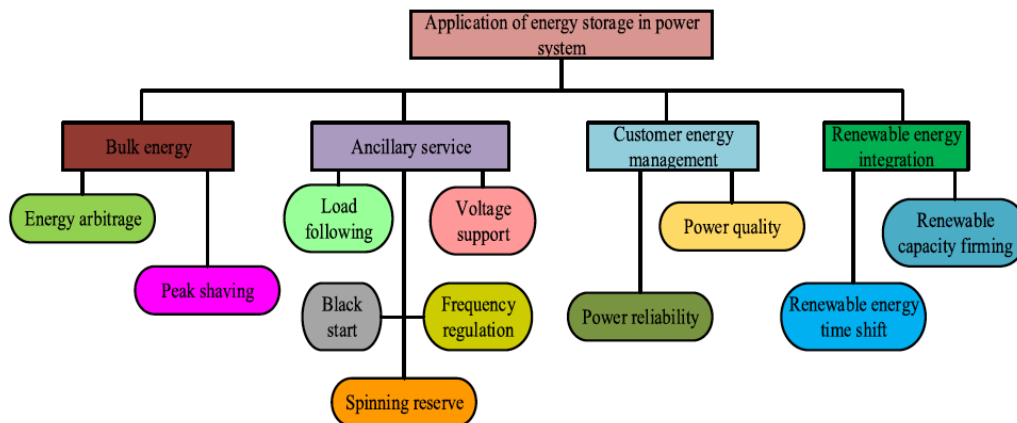
3.5 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας

3.5.1 Εισαγωγή

Το μικροδίκτυο είναι μία τοπική μονάδα που αποτελείται από πηγές κατανεμημένης παραγωγής και έχει ως στόχο την βιώσιμη ενέργεια και την αξιόπιστη παραγωγή αυτής. Κάτι τέτοιο για να επιτευχθεί χρειάζεται τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας σε συνεργασία με συστήματα αποθήκευσης, αφού έτσι επιτυγχάνεται η αποθήκευση ενέργειας σε ώρες εκτός αιχμής και η παροχή σε ώρες αιχμής. Ωστόσο, η βέλτιστη διαχείριση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας παραμένει μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στο σημερινό δίκτυο. Επιπλέον, ένα πιο ανεπτυγμένο σύστημα αποθήκευσης απαιτείται όσον αφορά την χωρητικότητα, την προστασία, τον έλεγχο, την διαχείριση ενέργειας και τα χαρακτηριστικά που χρειάζονται για να βελτιστοποιηθεί η απόδοση [10].

Μερικές εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας όπως η υποστήριξη τάσης, η διαδικασία επαναφοράς ενός σταθμού ή μέρος ενός σταθμού σε λειτουργία χωρίς να βασίζεται στο εξωτερικό δίκτυο (black start), η ρύθμιση της συχνότητας, της ποιότητας, η

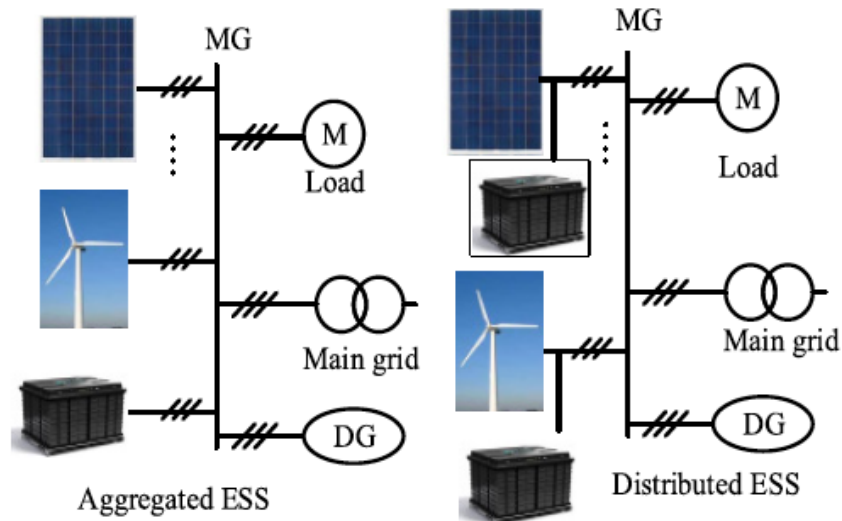
αξιοπιστία και η διασύνδεση ανανεώσιμων συστημάτων ενέργειας, παρουσιάζονται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15: Επισκόπηση εφαρμογών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [10]

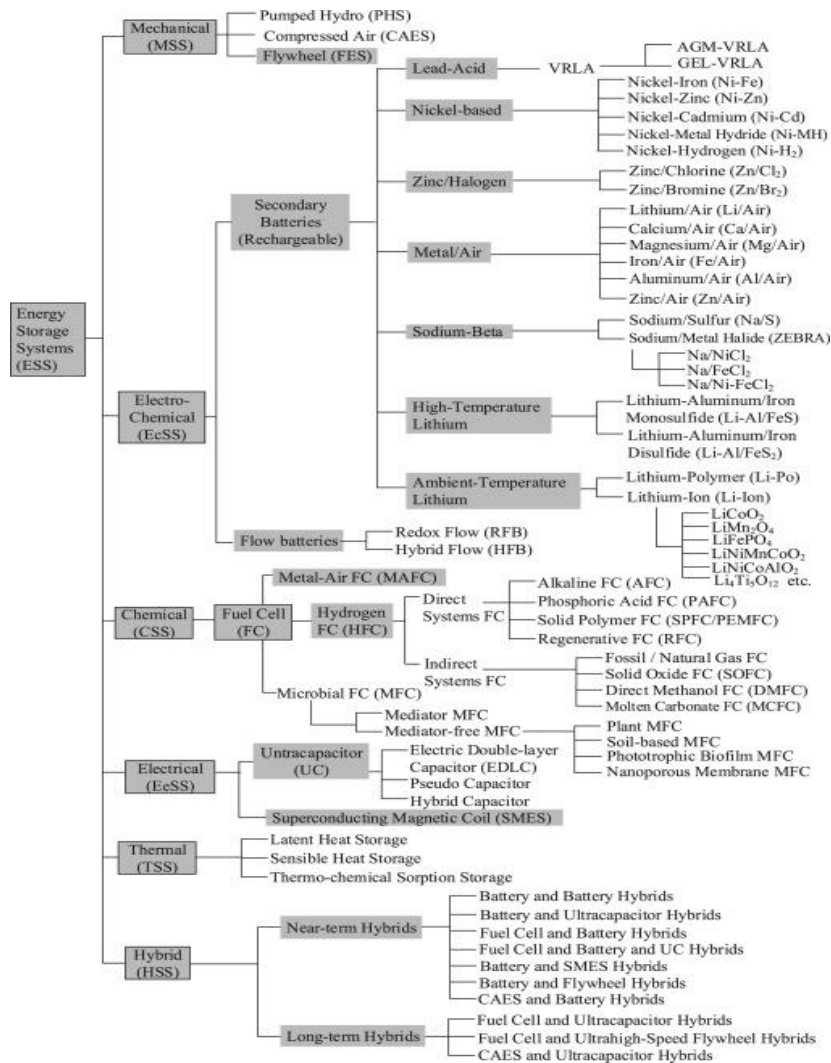
3.5.2 Επισκόπηση Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας

Δυο πολύ χαρακτηριστικές τεχνολογίες για αποθήκευση ενέργειας σε μικροδίκτυα είναι τα συγκεντρωτικά και τα καταναμημένα συστήματα. Για τα συγκεντρωτικά συστήματα, το ποσό της ενέργειας που ρέει από τις καταναμημένες πηγές προς το σημείο κοινής ζεύξης παραμένει πάντα σταθερό. Επιπλέον, η συνολική χωρητικότητα αυτών των συστημάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειωθούν οι διακυμάνσεις της ροής ισχύος. Από την άλλη, μικρής-κλίμακας και καταναμημένες συσκευές αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιόπιστη και αποτελεσματική ρύθμιση ισχύος. Οι συσκευές αυτές είναι απευθείας συνδεδεμένες με συγκεκριμένες καταναμημένες πηγές μέσω πολυάριθμων διεπαφών. Στην Εικόνα 16 φαίνονται οι δυο τεχνολογίες.



Εικόνα 16: Οι δύο βασικές διαμορφώσεις των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [10]

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ταξινομούνται με βάση την χρήση της ενέργειας σε συγκεκριμένη μορφή, δηλαδή, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μηχανικά, ηλεκτροχημικά, χημικά, ηλεκτρικά, θερμικά και υβριδικά συστήματα. Στη συνέχεια, αυτά τα συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν και σε περαιτέρω υποκατηγορίες ανάλογα με την διαδικασία των σχηματισμών και των υλικών που χρησιμοποιούνται. Μπαταρίες, αποθήκευση ενέργειας συμπιεσμένου αέρα, μηχανές υψηλής στροφόμενης αδράνειας (γνωστές και με τον αγγλικό όρο, flywheels), υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας, αποθήκευση υδρογόνου και υβριδική αποθήκευση ενέργειας είναι μερικές από τις πιο χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας στα μικροδίκτυα. Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται ο διαχωρισμός των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με βάση τα παραπάνω [10].



Εικόνα 17: Λεπτομερής ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με βάση τη μορφή της ενέργειας και τα υλικά [10]

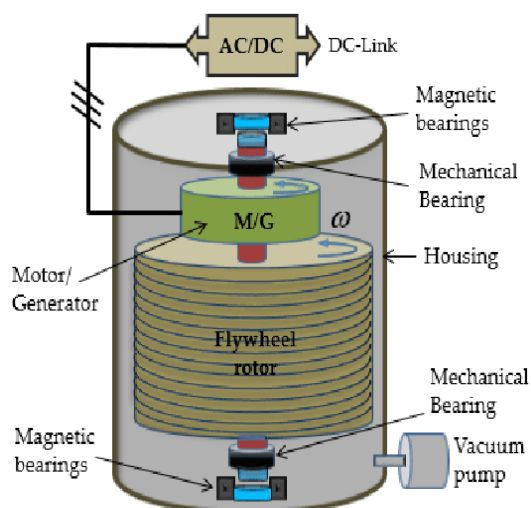
Τα συστήματα αποθήκευσης μπορούν να διαιρεθούν σε 3 στάδια: το στάδιο της κεντρικής αποθήκευσης, το στάδιο μετασχηματισμού ισχύος και το στάδιο ελέγχου. Στην κεντρική αποθήκευση, ενέργεια αποθηκεύεται μετά την μετατροπή, ο μετασχηματισμός ισχύος λειτουργεί ως διεπαφή μεταξύ της κεντρικής αποθήκευσης και του συστήματος ισχύος με αμφίδρομη μεταφορά [10]. Στο στάδιο του ελέγχου, το επίπεδο της φόρτισης και της αποφόρτισης της αποθηκευμένης ενέργειας καθορίζεται από τη χρήση αισθητήρων και άλλων συσκευών μέτρησης.

3.5.3 Τύποι Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας

3.5.3.1 Μηχανικά Συστήματα

Τα μηχανικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας πλεονεκτούν σε σχέση με άλλα αφού μπορούν να λειτουργούν με ευελιξία, να μετατρέπουν και να αποθηκεύουν ενέργεια. Από τεχνολογική άποψη, τα μηχανικά συστήματα αποθήκευσης αποτελούνται από τρεις τεχνικές: τις μηχανές υψηλής στρεφόμενης αδράνειας (flywheels), τα pumped hydro storage συστήματα και τις τεχνολογίες ενέργειας συμπιεσμένου αέρα [10].

Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας με Μηχανές υψηλής στρεφόμενης αδράνειας (Flywheels): Η μηχανή υψηλής στρεφόμενης αδράνειας, που αποτελεί την κύρια συνιστώσα αυτών των συστημάτων, είναι ένας ογκώδης περιστρεφόμενος κύλινδρος (δίσκος), ο οποίος στηρίζεται σε στάτορα με μαγνητικά ανυψωμένα ρουλεμάν. Τα συστήματα αυτά μπορούν να διακριθούν σε 2 κατηγορίες: τα υψηλής-ταχύτητας και τα χαμηλής-ταχύτητας. Η δομή αυτών των συστημάτων φαίνεται στην Εικόνα 18. Η μηχανή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ομαλή λειτουργία και μπορεί να αποθηκεύσει μηχανικά την κινητική ενέργεια του ρότορα, ο οποίος περιστρέφεται σε υψηλές ταχύτητες. Η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια στο σύστημα σχετίζεται με την ταχύτητα και την αδράνεια. Τα συστήματα χαμηλής-ταχύτητας περιέχουν έναν ατσάλινο δίσκο με υψηλή αδράνεια και χαμηλή ταχύτητα, ενώ τα συστήματα υψηλής-ταχύτητας έχουν ένα σύνθετο δίσκο με σχετικά χαμηλότερη αδράνεια και υψηλή ταχύτητα. Καθώς η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα αυξάνεται, η αποθηκευμένη ενέργεια αυξάνεται αναλόγως. Αυτή η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω επιβραδύνοντας τη ροπή του ρότορα (λειτουργία αποφόρτισης) και επιστρέφοντας την κινητική ενέργεια στο ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος λειτουργεί σαν γεννήτρια [10].

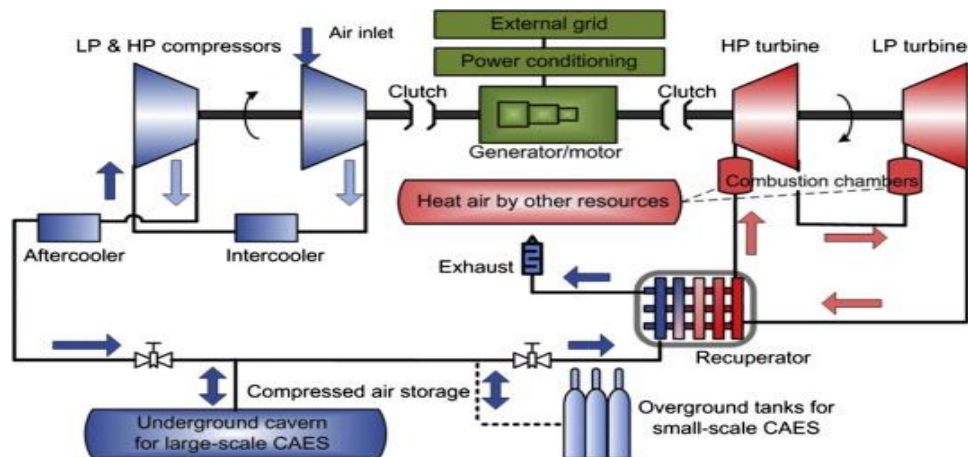


Εικόνα 18: Δομή και συνιστώσες μηχανής υψηλής στρεφόμενης αδράνειας [10]

Επίσης, οι μηχανές υψηλής στρεφόμενης αδράνειας μπορούν να τοποθετηθούν παράλληλα για να αυξηθεί η συγκεκριμένη ενέργεια. Σε μία περίπτωση ξαφνικής αδυναμίας του συστήματος στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, ένα σύστημα όπως αυτό που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να αποδώσει καλύτερα από ένα απλό σύστημα με μπαταρίες. Τα συστήματα αυτά έχουν εφαρμοστεί σε ποικίλους τομείς, κυρίως εξαιτίας των μοναδικών χαρακτηριστικών τους, όπως η υψηλή πυκνότητα ισχύος, φιλικότητα προς το περιβάλλον, υψηλή αποδοτικότητα, χαμηλό κόστος συντήρησης και μεγάλο κύκλο περιόδου. Ωστόσο, τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν τα μειονεκτήματα του υψηλού αρχικού κόστους και των υψηλών ποσοστών αυτό-εκφόρτισης [10].

Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα: Αυτά τα συστήματα γενικά αποθηκεύουν την ενέργεια πίεσης με τη συμπίεση αερίου (συνήθως αέρα) μέσα στη δεξαμενή. Μία τουρμπίνα χρησιμοποιείται για την διαστολή του πεπιεσμένου αερίου, το οποίο μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια. Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα για αυτή την τεχνολογία. Κατά τη διάρκεια χαμηλής ζήτησης ισχύος, περίσσεια ισχύ κινεί έναν αναστρέψιμο κινητήρα ή μια γεννήτρια, η οποία με τη σειρά της κινεί μία αλυσίδα από συμπιεστές για να εισάγει τον αέρα μέσα στη μονάδα αποθήκευσης. Αυτή η μονάδα αποθήκευσης μπορεί να είναι είτε υπόγεια (σε υπόγειες κοιλότητες) είτε πάνω στο έδαφος. Ωστόσο, κατά την διάρκεια χαμηλής παραγωγής, ο αποθηκευμένος συμπιεσμένος αέρας απελευθερώνεται και θερμαίνεται από την

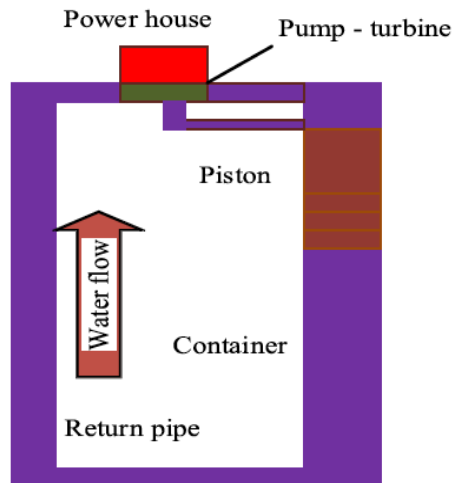
θερμαντική πηγή. Η ενέργεια από τον συμπιεσμένο αέρα αργότερα μεταφέρεται στην τουρμπίνα. Μια μονάδα ανάκτησης χρησιμοποιείται σε αυτό το σημείο για να ανακυκλώνει την θερμική ενέργεια που περισσεύει, γεγονός που μειώνει ακόμη περισσότερο την κατανάλωση καυσίμου και την αποδοτικότητα κύκλου.



Εικόνα 19: Απλοποιημένο διάγραμμα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένα αέρα [10]

Το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μικρής και μεγάλης κλίμακας μικροδίκτυα. Ωστόσο, είναι κατάλληλα για μεγάλης κλίμακας μονάδες που περιλαμβάνουν εφαρμογές του δικτύου όπως μετατόπιση φορτίου, έλεγχο συχνότητας. Η μεγαλύτερη πρόκληση των συστημάτων αυτών είναι η επιλογή της κατάλληλης γεωγραφικής θέσης με φυσικές υπόγειες κοιλότητες [10].

Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας Βαρύτητας: Το συγκεκριμένο σύστημα είναι ευρέως διαδεδομένο τα τελευταία χρόνια καθώς αποτελεί μία εναλλακτική για τα μεγάλης κλίμακας συστήματα. Είναι μία καινούργια τεχνολογία και ακόμη βρίσκεται στο στάδιο της επεξεργασίας και της ανάπτυξης. Είναι ένα κλειστό σύστημα που αποτελείται από αντιστρέψιμη αντλία/στρόβιλο, γεννήτρια, έμβολο και ένα κιβώτιο με επιστρεφόμενο σωλήνα [10]. Η Εικόνα 20 δείχνει τη βασική δομή αυτού του συστήματος.



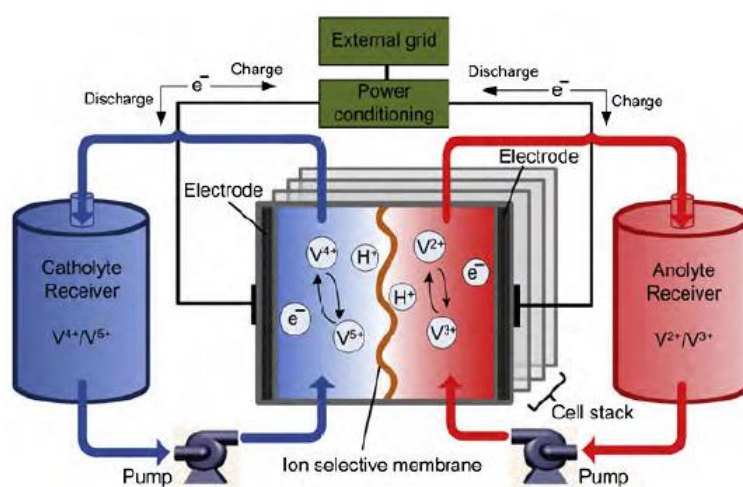
Εικόνα 20: Διάγραμμα αποθήκευσης ενέργειας βαρύτητας [10]

Όταν η ζήτηση είναι υψηλή, το έμβολο σπρώχνει το νερό μέσα στο κιβώτιο και έπειτα αυτό περνάει μέσω του επιστρεφόμενου σωλήνα για να οδηγήσει το στρόβιλο. Ο στρόβιλος, με τη σειρά του, μετατρέπει την κινητική ενέργεια του νερού σε μηχανική, η οποία περιστρέφει την γεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν η ζήτηση μειώνεται, η πλεονάζουσα ενέργεια παρέχεται στον κινητήρα και ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία. Η παραγόμενη κινητική ενέργεια σπρώχνει το έμβολο στην κορυφή του δοχείου και η μηχανική ενέργεια αποκαθίστανται για περαιτέρω χρήση.

3.5.3.2 Ηλεκτροχημικά Συστήματα

Σε αυτού του είδους τα συστήματα, χημική ενέργεια στο ενεργό υλικό μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η τεχνική μετατροπής ολοκληρώνεται με μία χημική αντίδραση και ενέργεια αποθηκεύεται ως ηλεκτρικό ρεύμα για συγκεκριμένη τάση και χρόνο. Το επίπεδο της τάσης και του ρεύματος παράγεται μέσω της σύνδεσης σε σειρά ή παράλληλα των κυψελών. Οι συμβατικές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και οι μπαταρίες ροής είναι δυο τεχνολογίες που αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια σε ηλεκτροχημική μορφή. Ωστόσο, οι χημικές αντιδράσεις μειώνουν το προσδόκιμο ζωής και την ενέργεια των μπαταριών παρόλο που χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση. Οι ηλεκτροχημικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας είναι διαθέσιμες σε διαφορετικά μεγέθη, κάτι το οποίο είναι και το κύριο πλεονέκτημά τους. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια από τα βασικότερα παραδείγματα αυτής της τεχνολογίας.

Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας με μπαταρίες οξειδοαναγωγής (Redox flow battery storage systems): Οι συγκεκριμένες μπαταρίες λειτουργούν σε κατάσταση φόρτισης ή αποφόρτισης μέσω μίας (αντιστρέψιμης) χημικής αντίδρασης. Η χημική αυτή αντίδραση συμβαίνει ανάμεσα στους ηλεκτρολύτες της μπαταρίας. Αυτοί οι δύο ηλεκτρολύτες του συγκεκριμένου τύπου περιέχονται σε ξεχωριστές δεξαμενές. Η χωρητικότητα των μπαταριών είναι άμεσα εξαρτημένη από την χωρητικότητα της δεξαμενής, ενώ παράλληλα επηρεάζεται από τον αριθμό των κελιών των μπαταριών και των υλικών. Ηλεκτρική ενέργεια παράγεται όταν η χημική αντίδραση οξειδοαναγωγής (αναγωγή-οξείδωση) λαμβάνει χώρα κατά την λειτουργία της μπαταρίας. Ο συγκεκριμένος τύπος έχει υψηλή απόδοση με μεγάλο κύκλο ζωής, σταθερότητα και χωρητικότητα αποθήκευσης με ευέλικτα χαρακτηριστικά λειτουργίας στο ηλεκτρικό σύστημα. Επιπλέον, είναι αποδοτικά για εφαρμογές σε αυτόνομα συστήματα [10]. Ένα παράδειγμα αυτής της τεχνολογίας είναι οι μπαταρίες οξειδοαναγωγής βαναδίου, η βασική δομή των οποίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21: Βασική δομή μιας μπαταρίας οξειδοαναγωγής βαναδίου [10]

Τα συστήματα αυτά έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αρκετές περιπτώσεις και ότι μπορούν να στηρίξουν την διακοπτόμενη λειτουργία των ανανεώσιμων πηγών. Από την άλλη, το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι η περίπλοκη δομή τους επηρεάζει την αξιοπιστία του συστήματος. Επιπλέον, έχουν υψηλό κόστος και χρειάζονται εξωτερική τροφοδοσία για να λειτουργήσουν.

Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας με Μπαταρίες: Τα συγκεκριμένα συστήματα είναι ευρέως εφαρμόσιμα για ποικίλους σκοπούς σε όλους τους τομείς (παραγωγή, μεταφορά, διανομή) των ηλεκτρικών συστημάτων και παρέχουν αρκετά πλεονεκτήματα στους καταναλωτές και θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση του συγκεκριμένου project. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας, η οποία μπορεί να οριστεί ως η συνολική ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να παραδοθεί σε μία μόνο αποφόρτιση από το κελί. Η κατάσταση φόρτισης μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της εναπομένουσας χωρητικότητας προς την ονομαστική χωρητικότητα [10].

Μερικά παραδείγματα τέτοιων τεχνολογιών είναι [10]:

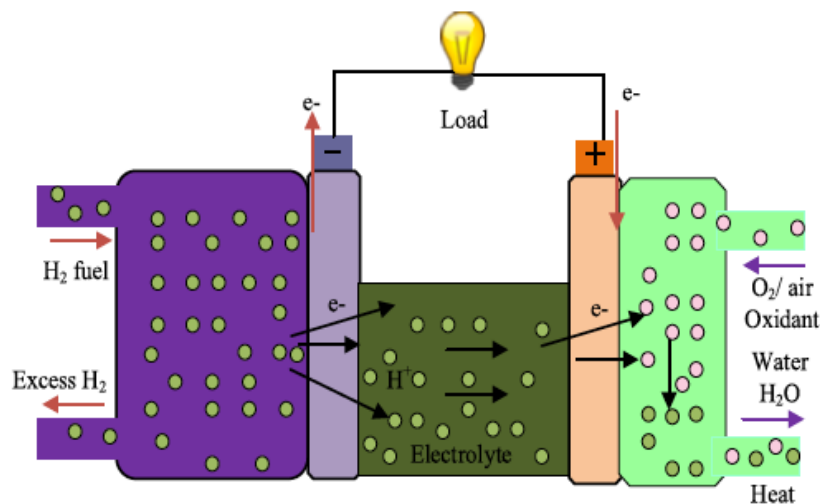
- Συστήματα αποθήκευσης μόλυβδου-οξέος: Τα δυο άκρα τους, η άνοδος και η κάθοδος, είναι φτιαγμένα από οξειδίο του μόλυβδου και μόλυβδο, αντίστοιχα, ενώ χρησιμοποιείται θειικό οξύ ως ηλεκτρολύτης. Είναι λιγότερα ακριβά σε σχέση με άλλες τεχνολογίες μπαταριών και είναι κατάλληλα για μεγάλης-κλίμακας εφαρμογές σε μικροδίκτυα. Άλλα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι παρέχουν πολύ καλή διατήρηση της φόρτισης και της ενεργειακής πυκνότητας και μεγάλο κύκλο ζωής.
- Μπαταρία ιόντων λιθίου (Lithium-Ion Storage System): Μία συσκευή αποθήκευσης ιόντων λιθίου μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια σε επίπεδο Megawatt. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι τα αυξημένα επίπεδα χωρητικότητας που οφείλονται σε χαρακτηριστικά όπως η υψηλή απόδοση, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και ο γρήγορος χρόνος απόκρισης (milliseconds). Ένα μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι το υψηλό κόστος. Παρόλα αυτά, αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα δημοφιλής εξαιτίας του μικρού μεγέθους της, του μικρού βάρους της και της δυναμικής της.

3.5.3.3 Χημικά Συστήματα

Ένα χημικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας είναι κατάλληλο για αποθήκευση ενός σημαντικού ποσού ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Σε αυτά τα συστήματα, η ενέργεια αποθηκεύεται στους χημικούς δεσμούς των ατόμων και των μορίων και μπορεί

να απελευθερωθεί μέσω αντιδράσεων μεταφοράς ηλεκτρονίων για να παραχθεί κατευθείαν ηλεκτρική ενέργεια.

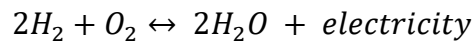
Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας με Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου [10]: Τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον παγκοσμίως αφού είναι κατάλληλα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς ρυπογόνες εκπομπές και μπορούν να εφαρμοστούν στην κατανεμημένη παραγωγή. Όταν καίγεται το υδρογόνο απελευθερώνει μόνο υδρατμούς στο περιβάλλον. Επιπλέον, καίγεται πιο γρήγορα και περιέχει σημαντική χημική ενέργεια. Η Εικόνα 22 παρουσιάζει τον μηχανισμό της συγκεκριμένης τεχνολογίας.



Εικόνα 22: Μηχανισμός Κυψέλης Καυσίμου Υδρογόνου

Σύμφωνα με το σχήμα, όταν το καύσιμο υδρογόνου φτάνει στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, διαχωρίζεται σε H⁺ και e⁻. Τα H⁺ κινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη και φτάνουν στο ηλεκτρόδιο οξυγόνου. Το ηλεκτρόνιο αρχίζει να ταξιδεύει μέσω εξωτερικού κυκλώματος και παρέχει ισχύ στο φορτίο. Ανιόντα υδρογόνου, οξυγόνο και ηλεκτρόνια συνδυάζονται για να σχηματίσουν νερό. Ένας ηλεκτρολύτης ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαχωρίσει τα μόρια του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο στην αναγεννητική κλειστού-κύκλου διαδικασία και να παραχθεί ηλεκτρισμός. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να παραχθεί η απαιτούμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η συνολική χημική αντίδραση σε μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου είναι:



Το υδρογόνο που απαιτείται μπορεί να παραχθεί επί τόπου ή να αγοραστεί από διαφορετική εξωτερική πηγή. Η πρώτη περίπτωση είναι προφανώς φθηνότερη από την αγορά υδρογόνου από άλλη πηγή [10].

3.5.3.4 Ηλεκτρικά Συστήματα Αποθήκευσης

Τα ηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρισμού και τελικά να προμηθεύσουν το φορτίο όταν χρειαστεί. Ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί τροποποιώντας τα ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία με τη βοήθεια πυκνωτών ή υπεραγωγίων μαγνητών.

Supercapacitor storage συστήματα: Αυτά τα συστήματα μπορούν να οριστούν ως συσκευές αποθήκευσης που μπορούν να αποθηκεύσουν ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ δυο αγώγιμων ηλεκτροδίων. Αυτή η τεχνολογία δεν έχει καθόλου χημικές αντιδράσεις. Επιπλέον, έχει τα χαρακτηριστικά της υψηλής πυκνότητας ισχύος και μεγάλης διάρκειας ζωής. Ωστόσο, παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα όπως το υψηλό ποσοστό αυτό - εκφόρτισης και υψηλό κόστος [10].

Super magnetic energy storage συστήματα: Ο συγκεκριμένος τύπος συστήματος λειτουργεί κυρίως βασιζόμενος στις αρχές της θερμοδυναμικής. Ενέργεια αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο με την κυκλοφορία του ρεύματος σε μία υπεραγωγίμη σπείρα με τη βοήθεια ενός μετατροπέα (λειτουργία φόρτισης). Ωστόσο, η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να απελευθερωθεί πίσω στο δίκτυο χρησιμοποιώντας την αντίστροφη λειτουργία του παραπάνω μετατροπέα (λειτουργία αποφόρτισης). Τα συστήματα αυτά διακρίνονται σε δυο υποκατηγορίες: τα υψηλής θερμοκρασίας που λειτουργούν περίπου στους 70 βαθμούς Kelvin και τα χαμηλής θερμοκρασίας που λειτουργούν περίπου στους 7 βαθμούς Kelvin.

3.5.3.5 Θερμικά Συστήματα Αποθήκευσης

Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν ενέργεια σε μορφή θερμότητας ή πάγου, η οποία απελευθερώνεται αργότερα όταν απαιτείται. Είναι

μια εναλλακτική τεχνολογία που έχει σκοπό να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα και να βοηθήσει έτσι ώστε να καθιερωθούν βιώσιμες τεχνολογίες [10].

Αυτή η τεχνολογία είναι κατάλληλη για βιομηχανική και οικιακή χρήση, όπως η θέρμανση και η ψύξη και η μετατόπιση φορτίου. Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 2 ομάδες ανάλογα με την θερμοκρασία λειτουργίας τους: χαμηλής-θερμοκρασίας και υψηλής-θερμοκρασίας.

3.5.3.6 Υβριδικά Συστήματα Αποθήκευσης

Στα συστήματα αυτά γίνεται μία ενσωμάτωση δυο ή περισσότερων συστημάτων αποθήκευσης, που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη των πλεονεκτημάτων του κάθε ενός από αυτά για την απόκτηση εξαιρετικών χαρακτηριστικών σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή [2]. Για την εφαρμογή σε μικροδίκτυα, τα υβριδικά συστήματα έχουν καλύτερη απόδοση όσον αφορά την σταθεροποίηση της συχνότητας σε σχέση με τα συστήματα που αποτελούνται μόνο από μπαταρίες. Ένα παράδειγμα τέτοιου υβριδικού συστήματος σε μικροδίκτυο είναι η εφαρμογή ενός συστήματος αποθήκευσης που συνδυάζει μπαταρία και supercapacitor, το οποίο παρέχει συγκριτικά μεγάλη αποθηκευτική χωρητικότητα με γρήγορη φόρτιση και αποφόρτισης [10].

3.5.4 Θέματα και Προκλήσεις των Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας στις Εφαρμογές για Μικροδίκτυα

- **Επιλογή Υλικών.** Η επιλογή των υλικών, το κόστος και η διαθεσιμότητα είναι μερικά από τα πιο σημαντικά κριτήρια για ένα σύστημα αποθήκευσης, καθώς τα υλικά καθορίζουν τον κύκλο ζωής της αποθηκευτικής συσκευής. Τα υπάρχοντα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης όπως είναι οι μηχανές υψηλής στρεφόμενης αδράνειας, είναι αρκετά ακριβά στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Κόστος και Μέγεθος των Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας.** Το μέγεθος και το κόστος των διαφορετικών τεχνολογιών είναι αρκετά υψηλά. Εάν αυξάνεται το μέγεθος είναι επόμενο ότι αυξάνεται και το κόστος. Υπερμεγέθη συστήματα δεν είναι κατάλληλα, στο κόστος τους περιλαμβάνονται και τα κόστη εγκατάστασης και

συντήρησης. Αν και τα κόστη των διαφορετικών συστημάτων είναι υψηλά για διαφορετικές κατηγορίες και απαιτούν σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία, είναι μία αναπόφευκτη λύση για τα μικροδίκτυα. Επιπλέον, η υιοθέτηση μιας ολοκληρωμένης πρότασης πολιτικής αποθήκευσης ενέργειας για να επιτευχθεί ισορροπία, να μειωθεί το κόστος και να αυξηθεί η αξιοπιστία, αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τα ανανεώσιμα και συμβατικά δίκτυα.

- Περιβάλλον. Περιβαλλοντικά απόβλητα υπάρχουν από τα ορυκτά καύσιμα, τα μαγνητικά πεδία, τα ανακυκλώσιμα υλικά ή τα χημικά ορισμένων συστημάτων αποθήκευσης. Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να ενσωματώσουν τις διακοπτόμενες ανανεώσιμες πηγές στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά και να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμων και τα τοξικά απόβλητα.
- Ασφάλεια. Η ασφάλεια των συστημάτων αποθήκευσης είναι μία από τις απαιτήσεις για τα σύγχρονα μικροδίκτυα. Για την ασφαλή λειτουργία, πολλοί παράγοντες όπως τα μαγνητικά χαρακτηριστικά των υλικών, ο κύκλος ζωής, η θερμοκρασία, η υπερφόρτιση πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν. Αυτή η διαδικασία μπορεί να μειώσει την αβεβαιότητα και την διακοπτόμενη λειτουργία του συστήματος [10].

Κεφάλαιο 4 Έλεγχος και Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι βασικές αρχές που αφορούν τον έλεγχο ενός μικροδικτύου και η οργάνωση των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας του μικροδικτύου, απαραίτητη συνιστώσα για την βέλτιστη και οικονομική λειτουργία του. Επίσης, θα γίνει σύνδεση ανάμεσα στον έλεγχο και το σύστημα διαχείρισης, αφού τα δυο αυτά είναι αλληλένδετα μεταξύ τους.

4.2 Έλεγχος Μικροδικτύου

4.2.1 Ιεραρχικός έλεγχος

Ο ιεραρχικός, πολυεπίπεδος έλεγχος υιοθετείται για τον αποτελεσματικό έλεγχο των Μικροδικτύων, συμπεριλαμβανομένων των 3 επιπέδων που περιγράφονται παρακάτω:

Πρωταρχικός έλεγχος: έργο του είναι ο έλεγχος της τάσης, του ρεύματος και της τοπικής ισχύος.

Δευτερεύον έλεγχος: αυτό το επίπεδο αντιμετωπίζει ζητήματα όπως η βέλτιστη κατανομή φορτίων, η αποκατάσταση συχνότητας, η επαναφορά τάσης σε σημεία που έχουν βγει εκτός. Επίσης, σε αυτό το επίπεδο ο κεντρικός ελεγκτής του μικροδικτύου καθορίζει τα σημεία που χρειάζεται να ακολουθούνται από τους υπόλοιπους τοπικούς ελεγκτές στο πρωταρχικό επίπεδο. Μερικά πολύ σημαντικά ζητήματα, όπως οι συναρτήσεις πρόβλεψης και η οικονομική κατανομή, μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε αυτό το επίπεδο.

Τριτογενής έλεγχος: αυτό το επίπεδο ασχολείται με άλλα ζητήματα, όπως ο συγχρονισμός του μικροδικτύου και η πώληση/αγορά ηλεκτρικής ενέργειας [1].

4.2.2 Συντονισμός ελέγχου

Ο συντονισμός ελέγχου ενός μικροδικτύου μπορεί να διακριθεί σε συγκεντρωτικό, κατανεμημένο ή συνδυασμό των δυο, που ονομάζεται υβριδικός. Ο τύπος της συντονισμένης δομής ελέγχου που σχεδιάζεται για το μικροδίκτυο εξαρτάται από την

ύπαρξη κατανεμημένων ενεργειακών πόρων, το μέγεθος του μικροδικτύου, τις διαθέσιμες τεχνολογίες και την υποδομή επικοινωνίας. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένες πληροφορίες για καθένα από τα παραπάνω είδη ελέγχου [1].

Κεντριοποιημένος έλεγχος: για να κατασκευαστεί ένας κεντρικός ελεγκτής που θα μπορεί να επικοινωνεί με όλες τις μονάδες ελέγχου απαιτείται εκτεταμένη υποδομή επικοινωνίας και σημαντικοί πόροι υπολογιστών. Ένας τέτοιου είδους έλεγχος τυπικά προτείνεται για μικρές δομές όπως εκπαιδευτικά κέντρα ή νοσοκομεία [1].

Κατανεμημένος έλεγχος: στον κατανεμημένο έλεγχο, κάθε τοπικός ελεγκτής λειτουργεί μόνος του χωρίς περαιτέρω οδηγίες από τον κεντρικό ελεγκτή. Οποιοσδήποτε κατάλληλες πράξεις ελέγχου καθορίζονται τοπικά και βασίζονται σε τοπική εκτίμηση και σε πληροφορίες που μοιράζονται ανάμεσα σε γειτονικούς τοπικούς ελεγκτές του μικροδικτύου, μέσω ισοδύναμης επικοινωνίας (peer-to-peer). Ο πολυπρακτορικός έλεγχος είναι ένα παράδειγμα μιας τέτοιας τοπολογίας που επιτρέπει σε κάθε συνιστώσα να ανταλλάσσει πληροφορίες με τους γείτονές της σαν μια αυτόνομη οντότητα η οποία μπορεί να αποφασίσει για τη δική της κατάσταση χωρίς κάποια εξωτερική εντολή [1].

Υβριδικός έλεγχος: ένα υβριδικό σύστημα ελέγχου, όπως υποδηλώνει και το όνομά του, είναι ένας συνδυασμός από κεντρικούς και κατανεμημένους ελεγκτές. Ο υβριδικός ιεραρχικός έλεγχος αποτελείται από διάφορους κεντρικούς ελεγκτές με μία κατανεμημένη τοπολογία. Κάθε κεντρικός ελεγκτής περιέχει αρκετούς τοπικούς ελεγκτές που μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα [1].

4.2.3 Λειτουργίες ελέγχου του μικροδικτύου

Οι σημαντικότερες αρχιτεκτονικές ελέγχου για την λειτουργία των μικροδικτύων διαίρουνται σε 4 κατηγορίες [5]:

1. Αυτόνομη αρχιτεκτονική ελέγχου, στην οποία το μικροδίκτυο είναι σχεδιασμένο να τρέχει αυτόνομα εξασφαλίζοντας σταθερή, βιώσιμη και αξιόπιστη λειτουργία.
2. Πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική ελέγχου, στην οποία χρησιμοποιούνται ελεγκτές στις πηγές και στα φορτία. Ο κεντρικός ελεγκτής του μικροδικτύου παρέχει στους παραπάνω ελεγκτές τις απαιτήσεις ζήτησης μεταξύ άλλων λειτουργιών ελέγχου.

3. Αρχιτεκτονική ελέγχου που βασίζεται σε πράκτορες, στην οποία οι διάφορες λειτουργίες ελέγχου παρουσιάζονται ως παράγοντες που μπορεί να είναι στοιχεία λογισμικού ή υλικού.
4. Σύστημα διαχείρισης ενέργειας με ουδέτερο δίκτυο, στο οποίο έχουν χρησιμοποιηθεί νευρωνικά δίκτυα πολλαπλών επιπέδων για την εκτέλεση λειτουργιών ελέγχου εντός του μικροδικτύου.

4.2.4 Βασικές τεχνικές ελέγχου

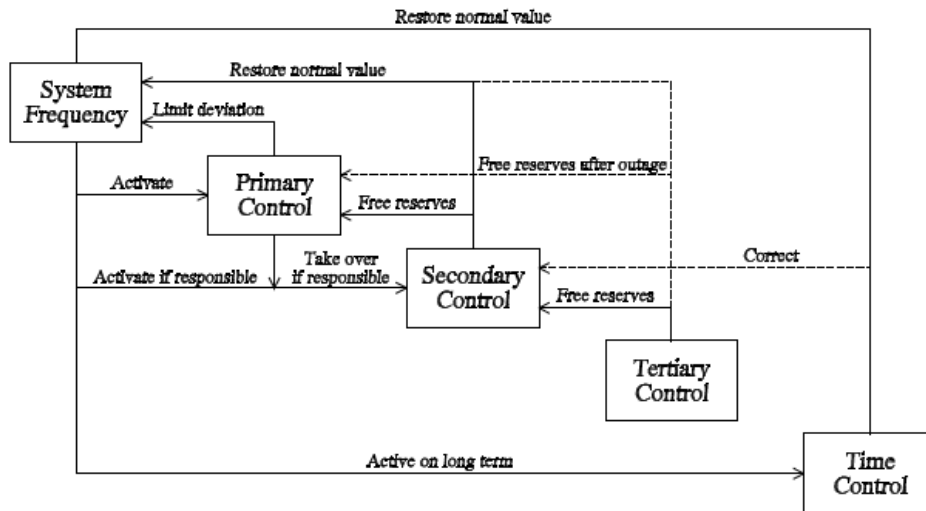
Υπάρχουν αρκετές τεχνικές ελέγχου οι οποίες βοηθούν στη διαχείριση του επιπέδου των στοιχείων ενός καταναμημένου συστήματος [5]:

1. Master and slave έλεγχος = ο master βελτιώνει τις τιμές της τάσης και της συχνότητας, ενώ ο slave ελέγχει τις πηγές του ρεύματος.
2. Έλεγχος του ρεύματος και της ροής ισχύος = αυτή η μέθοδος ελέγχει το ρεύμα και την κατανομή της ισχύος χρησιμοποιώντας σήματα ελέγχου.
3. Droop control = αυτή η μέθοδος είναι μία βελτιωμένη μέθοδος που συνδυάζεται με τις προηγούμενες μεθόδους αφού οι μετατροπείς συμπεριφέρονται σαν μη ιδανικές πηγές τάσης.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι μια ιεραρχική αρχιτεκτονική ελέγχου για την ανάπτυξη ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας είναι η καλύτερη επιλογή, καθώς επίσης είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη στη βιβλιογραφία. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική έχει ως απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία της την ύπαρξη ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος για να επικοινωνεί ένα επίπεδο καταναμημένου ελέγχου με ένα υψηλότερο επίπεδο, όπου γίνεται η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του μικροδικτύου. Αυτό το επίπεδο έχει αναπτυχθεί σε μία μονάδα που καλείται κεντρικός ελεγκτής του μικροδικτύου γνωστός και με τον αγγλικό του όρο Microgrid Central Controller (MGCC). Ενσωματώνει αμφίδρομα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, καταναμημένους και κεντρικούς ελεγκτές, καταναμημένες γεννήτριες και διαχείριση φορτία, για να μπορέσει να προσφέρει αυξημένη αξιοπιστία, ασφάλεια και ενεργειακή απόδοση [11].

Όπως παρατηρείται από την Εικόνα 23, ο πρωταρχικός έλεγχος είναι κυρίως υπεύθυνος για τον έλεγχο των μονάδων καταναμημένης παραγωγής ώστε να προσθέτουν επιπλέον

αδράνεια και να ελέγχουν τις αντιστάσεις εξόδου. Ο δευτερεύον έλεγχος ασχολείται με διορθώσεις σε σφάλματα σταθερής κατάστασης. Και ο τριτογενής έλεγχος σχεδιάζεται για κάθε σύστημα με βάση διάφορα κριτήρια, όπως η σταθερότητα του μικροδικτύου και περιβαλλοντικά ζητήματα [11].



Εικόνα 23: Τα επίπεδα ελέγχου ενός μικροδικτύου [11]

4.3 Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας

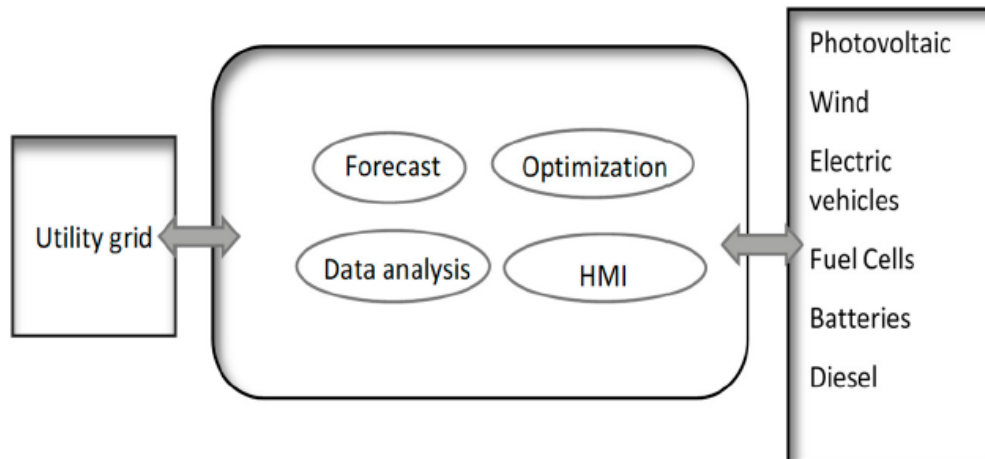
4.3.1 Εισαγωγή

Η διαχείριση της ενέργειας στα μικροδίκτυα ορίζεται ως ένα σύστημα ελέγχου και πληροφοριών που παρέχει την απαραίτητη λειτουργικότητα, η οποία διασφαλίζει ότι τόσο τα συστήματα παραγωγής όσο και τα συστήματα διανομής παρέχουν ενέργεια με τα ελάχιστα λειτουργικά κόστη. Η βελτιστοποίηση της διαχείρισης της ενέργειας στα μικροδίκτυα θεωρείται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης εκτός σύνδεσης [12]. Ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας είναι απαραίτητο για την βέλτιστη χρήση των κατανεμημένων πόρων με ευφυή, ασφαλή, αξιόπιστο και συντονισμένο τρόπο [7].

4.3.2 Ορισμός Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας

Ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας ορίζεται ως ένα πληροφοριακό σύστημα, το οποίο παρέχει την απαραίτητη λειτουργικότητα όταν υποστηρίζεται σε μία πλατφόρμα για να διασφαλίσει ότι η παραγωγή, η μεταφορά και η κατανομή παρέχουν ενέργεια με το ελάχιστο κόστος. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να αποτελείται από διάφορες συνιστώσες κατανεμημένης παραγωγής που συνδέονται με το συμβατικό δίκτυο μέσω ενός κοινού

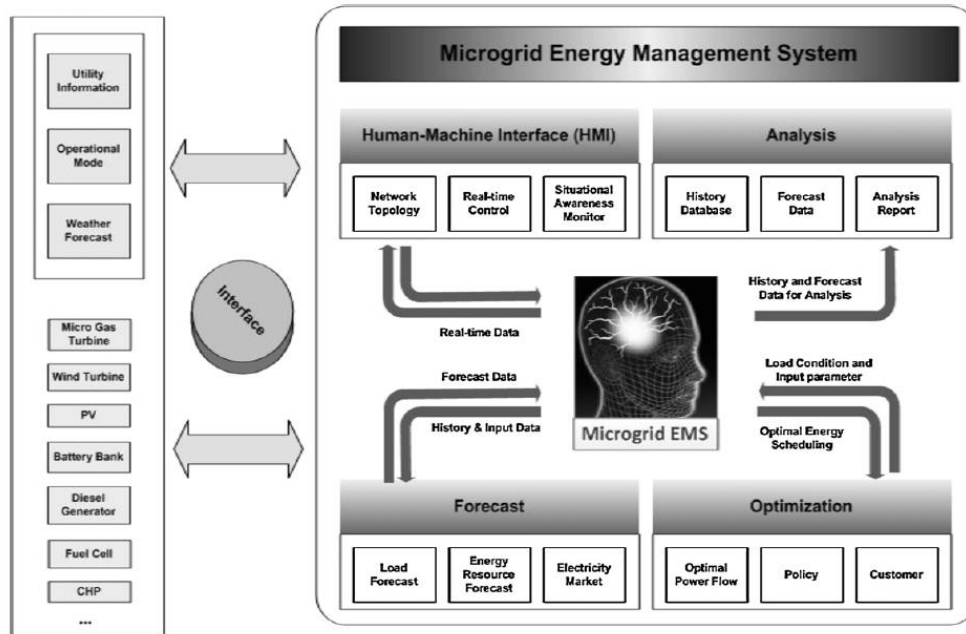
σημείου. Στην Εικόνα 24 απεικονίζεται ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας μαζί με διάφορα χαρακτηριστικά, όπως modules διεπαφής ανθρώπου μηχανής (HMI, Human Machine Interface), ελέγχου και απόκτησης δεδομένων, πρόβλεψης φορτίου, βελτιστοποίησης [13].



Εικόνα 24: Διαχείριση ενέργειας μικροδικτύου [12]

Με άλλα λόγια ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενός μικροδικτύου είναι ένα λογισμικό ελέγχου που μπορεί να κατανέμει βέλτιστα την ισχύ εξόδου ανάμεσα στις μονάδες κατανεμημένης παραγωγής, να εξυπηρετεί οικονομικά το φορτίο και να ενεργοποιεί αυτόματα την απόκριση επανασυγχρονισμού του συστήματος στη μετάβαση λειτουργίας μεταξύ διασυνδεδεμένων και νησιωτικών λειτουργιών βάση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας των στοιχείων του μικροδικτύου και της κατάστασης του συστήματος. Ένα αρκετά ανεπτυγμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενός μικροδικτύου πρέπει να λειτουργεί και να συντονίζει μια ποικιλία από κατανεμημένες γεννήτριες, κατανεμημένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και φορτία ώστε να παρέχει υψηλή ποιότητα, αξιόπιστη, βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον ενέργεια και βέβαια όλα τα παραπάνω με αποδοτικό τρόπο [13]. Στην Εικόνα 25 παρουσιάζεται συνολικά ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας μαζί με τις διεπαφές που έχει και τα inputs που παίρνει από διάφορες συνιστώσες του μικροδικτύου. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας χωρίζεται σε 4 modules, την διεπαφή ανθρώπου-μηχανής, την ανάλυση, την πρόβλεψη και την βελτιστοποίηση. Τέλος, λαμβάνει τις απαραίτητες

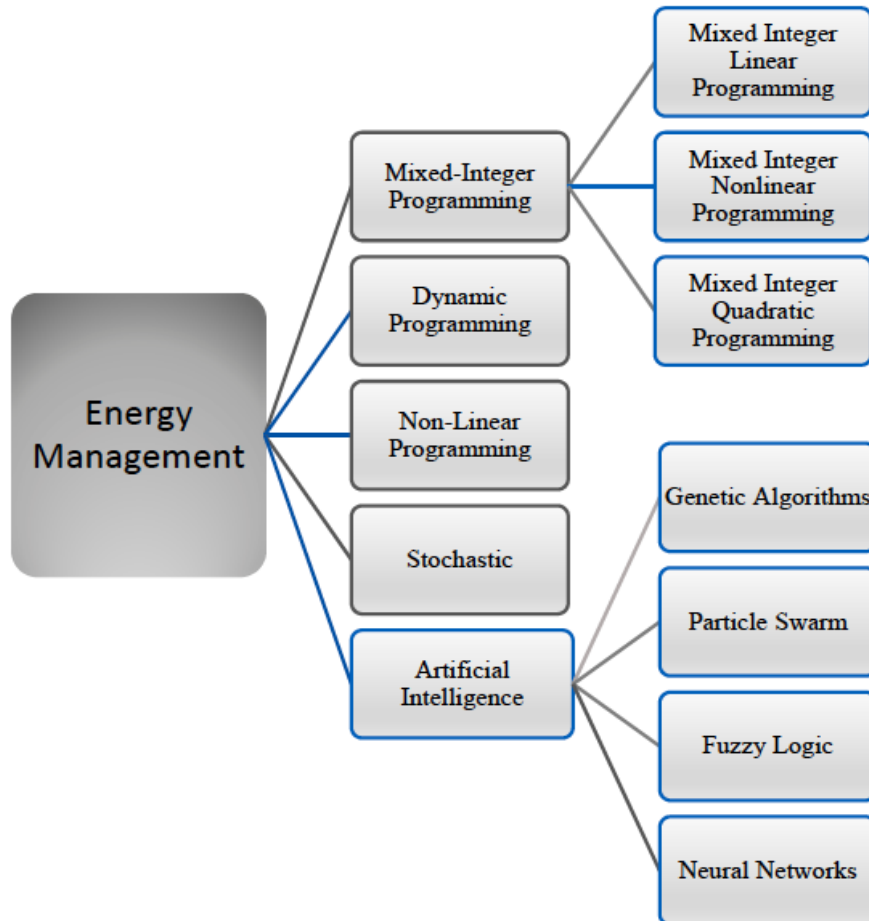
πληροφορίες από τις συνιστώσες του μικροδικτύου και στέλνει τα αποτελέσματα πίσω σε αυτές.



Εικόνα 25: Περιγραφή των λειτουργιών ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας [13]

Η διαχείριση της ενέργειας στα μικροδίκτυα περιλαμβάνει ένα λογισμικό ελέγχου που επιτρέπει την βέλτιστη λειτουργία του συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας το ελάχιστο απαιτούμενο κόστος και τους δυο τρόπους λειτουργίας του μικροδικτύου. Η διαχείριση ενέργειας, λοιπόν, περιέχει ένα ολοκληρωμένο αυτοματοποιημένο σύστημα που έχει πρωταρχικό στόχο να επιτύχει βέλτιστο προγραμματισμό πόρων. Βασίζεται σε ανεπτυγμένη τεχνολογία πληροφοριών και μπορεί να βελτιστοποιήσει την διαχείριση των κατανεμημένων ενεργειακών πηγών και των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης τυπικά περιλαμβάνει τους ακόλουθους στόχους: μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου των γεννητριών σε συγκεκριμένο χρόνο, ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του μικροδικτύου, μεγιστοποίηση του κύκλου ζωής των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού κόστους. Στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται μία περίληψη των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για την διαχείριση ενέργειας των μικροδικτύων. Πολλές μέθοδοι βασίζονται σε κλασσικές προσεγγίσεις όπως είναι οι mixed integer γραμμικός και μη γραμμικός προγραμματισμός. Ο γραμμικός προγραμματισμός θεωρείται από τις

καταλληλότερες μεθόδους που βασίζεται σε μια κεντρική συνάρτηση και μεταβλητές, ενώ η τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιείται κυρίως για να προσεγγίσει καταστάσεις όπου άλλες μεθοδολογίες αδυνατούν, συμπεριλαμβανομένων της πρόβλεψης παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την βέλτιστη λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [12].



Εικόνα 26: Μεθοδολογίες διαχείρισης ενέργειας στα μικροδίκτυα [14]

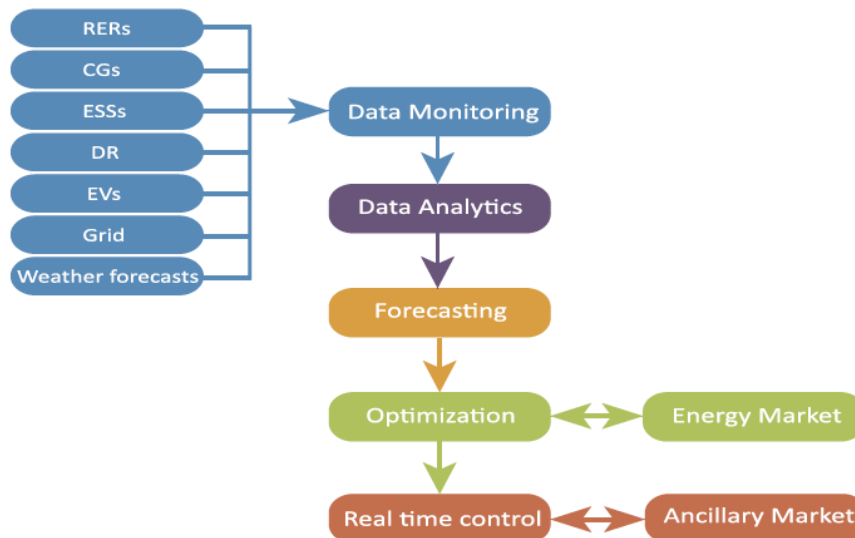
Η διαχείριση της ενέργειας και η βελτιστοποίηση του ελέγχου σε ένα μικροδίκτυο μπορεί να έχει μία ή περισσότερες συναρτήσεις. Αυτές οι συναρτήσεις μπορεί να ποικίλουν ανάλογα πάντα με το πρόβλημα βελτιστοποίησης που καλούνται να λύσουν. Ένα μοντέλο διαχείρισης ενέργειας για ένα μικροδίκτυο περιλαμβάνει συστήματα απόκτησης δεδομένων, εποπτευόμενο έλεγχο, διεπαφή ανθρώπου μηχανής και την παρακολούθηση και ανάλυση των δεδομένων που αφορούν μετεωρολογικές μεταβλητές [13]. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τις [15] βασικές συνιστώσες του μικροδικτύου που ελέγχονται από ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας.

Πίνακας 2: Συνιστώσες του μικροδικτύου που ελέγχονται από ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας [13]

Συνιστώσες	Παραδείγματα	Λειτουργίες
Κατανεμημένες γεννήτριες	Παλινδρομικοί κινητήρες εσωτερικής καύσης με γεννήτριες, κυψέλες καυσίμου, ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας και φωτοβολταϊκές συστοιχίες	Παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και χρήσιμη θερμότητα σε τοπικούς χρήστες και χρησιμοποιούν μία ποικιλία από ενεργειακούς πόρους
Κατανεμημένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	Μπαταρίες, flywheels, super-capacitors, compressed air energy storage	Αποθηκεύουν περίσσια ενέργειας σε ώρες εκτός αιχμής και λειτουργούν σαν γεννήτριες σε ώρες αιχμής
Ελεγχόμενο φορτίο	Θέρμανση, αερισμός, εξαερισμός, κλιματισμός, ηλεκτρικά οχήματα, εμπορικά και οικιακά κτίρια	Κατανέμουν το φορτίο έτσι ώστε να μειώνονται τα σφάλματα στο δίκτυο και να μεγιστοποιούνται οι προτιμήσεις των καταναλωτών
Κρίσιμο φορτίο	Σχολεία, Νοσοκομεία	Χρησιμεύει ως βασικό φορτίο Χρειάζεται υποστήριξη ποιότητας ισχύος
Σημείο κοινής ζεύξης	Στατικός διακόπτης	Εναλλαγή μεταξύ νησιωτικής και διασυνδεδεμένης λειτουργίας

4.3.3 Λειτουργίες του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας

Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του μικροδικτύου αναμένεται να παρακολουθεί τις συνθήκες λειτουργίας και να αποστέλλει με βέλτιστο τρόπο ισχύ από τους κατανεμημένους ενεργειακούς πόρους και τα συστήματα κατανεμημένης αποθήκευσης ενέργειας για να προμηθεύει τα ελεγχόμενα και κρίσιμα φορτία. Τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας στα μικροδίκτυα σχετίζονται με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, την πρόβλεψη του φορτίου και της κατανεμημένης παραγωγής, τους καταναλωτές, την χρησιμότητα, τα φορτία, τις κατανεμημένες γεννήτριες και τα κατανεμημένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας λαμβάνει τα δεδομένα πρόβλεψης που αφορούν τα φορτία και τις πηγές ενέργειας, τις πληροφορίες και τις προτιμήσεις των καταναλωτών, την πολιτική καθώς και πληροφορίες που αφορούν την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε να καθορίζει τις καλύτερες διαθέσιμες στρατηγικές ελέγχου για την ροή ισχύος, τις αγορές ηλεκτρικού ρεύματος, την κατανομή φορτίου και τον προγραμματισμό των κατανεμημένων γεννητριών και των κατανεμημένων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 27. Κάθε σύστημα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά που μπορούν να προσαρμοστούν στο εκάστοτε μικροδίκτυο [13].



Εικόνα 27: Λειτουργίες συστήματος διαχείρισης ενέργειας [7]

4.3.4 Αρχιτεκτονική και Φιλοσοφία Ελέγχου

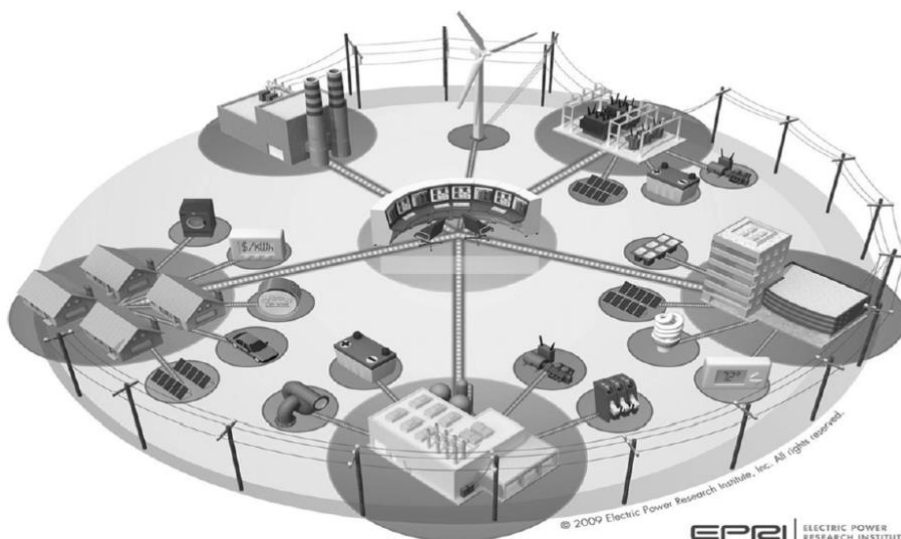
4.3.4.1 Συγκεντρωτικό Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας

Από την μεριά της διαχείρισης της ενέργειας και του ελέγχου, ένα μικροδίκτυο αποτελείται από τρία βασικά επίπεδα: τον διαχειριστή δικτύου διανομής και τον διαχειριστή αγοράς, τον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου (MGCC) και τοπικούς ελεγκτές που σχετίζονται με κάθε κατανεμημένη γεννήτρια, κάθε κατανεμημένο σύστημα αποθήκευσης και κάθε φορτίο. Ο διαχειριστής αγοράς είναι υπεύθυνος για την ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στο μικροδίκτυο και την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Ο διαχειριστής δικτύου διανομής είναι ένα υψηλού επιπέδου σύστημα διαχείρισης που συγκεντρώνει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο και εντολές λειτουργίας ανάμεσα σε πολλαπλά μικροδίκτυα. Ο κεντρικός ελεγκτής λειτουργεί σαν μια πύλη ανάμεσα στους δυο παραπάνω διαχειριστές και στους τοπικούς ελεγκτές μέσα στο μικροδίκτυο. Ιδανικά, ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενός μικροδικτύου είναι ένα κέντρο πληροφοριών και ελέγχου ενσωματωμένο μέσα σε ένα κεντρικό ελεγκτή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28.

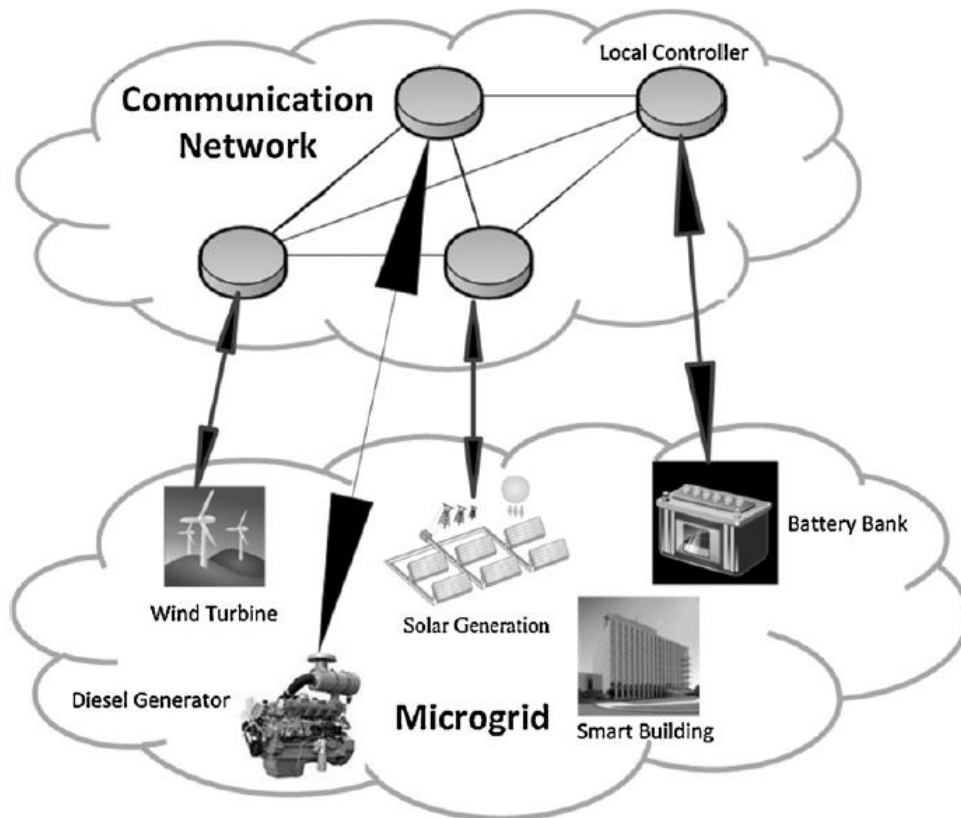
Ο κεντρικός ελεγκτής είναι κατασκευασμένος για δυο πολύ σημαντικές λειτουργίες για τα συστήματα διανομής. Αρχικά, ο παραπάνω ελεγκτής έχει ένα κανάλι επικοινωνίας δυο δρόμων με τον διαχειριστή δικτύου διανομής και τον διαχειριστή αγοράς για να πληροί τις απαιτήσεις του δικτύου και να συμμετέχει στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, παρακολουθεί τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, αντιμετωπίζει τις όποιες διαταραχές και αλλάζει/επανασυγχρονίζει τους τρόπους λειτουργίας του μικροδικτύου. Έπειτα, λαμβάνει πληροφορίες και αιτήματα από πολλούς τοπικούς ελεγκτές μέσα στο μικροδίκτυο. Δεδομένου του καθορισμένου σημείου που στέλνεται από τους διαχειριστές αγοράς και δικτύου διανομής, ένας κεντρικός ελεγκτής παίρνει την απόφαση για την ομοιόμορφη κατανομή της ισχύος ανάμεσα στα κατανεμημένα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης με βάση μια συγκεκριμένη συνάρτηση που ορίζεται εξ αρχής. Στη συνέχεια, ο κεντρικός ελεγκτής θα στείλει πίσω τα σήματα ελέγχου και τις αναφορές προγραμματισμού της ισχύος στα αντίστοιχα συστήματα. Ολόκληρη η διαδικασία προγραμματισμού υπόκειται σε συγκεκριμένες μεταβλητές συμπεριλαμβανομένων των απαιτήσεων αποθεματικού, των αβεβαιοτήτων των ανανεώσιμων πηγών και των φυσικών μεταβλητών των κατανεμημένων γεννητριών και των κατανεμημένων μονάδων αποθήκευσης [13].

4.3.4.2 Αποκεντρωμένο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας

Ο κατακεντρωμένος έλεγχος σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποτελείται από ένα πλαίσιο όπου κάθε συνιστώσα του μικροδικτύου ρυθμίζεται από έναν ή περισσότερους τοπικούς ελεγκτές σε αντίθεση με το κεντροποιημένο σύστημα που ρυθμίζονται όλοι από ένα κεντρικό ελεγκτή. Κάθε τοπικός ελεγκτής παρακολουθεί και επικοινωνεί με τους άλλους ελεγκτές μέσω του δικτύου επικοινωνίας, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 29. Οι τοπικοί ελεγκτές έχουν την νοημοσύνη να παίρνουν τις δικές τους λειτουργικές αποφάσεις, χωρίς να λαμβάνουν σήματα ελέγχου από έναν master ελεγκτή. Οι τοπικοί ελεγκτές, στη συνέχεια, ανταλλάσσουν πληροφορίες με τους γείτονές τους για να επιτευχθεί ομοφωνία. Επειδή οι τοπικοί ρυθμιστές χρειάζεται να επικοινωνούν μόνο με τους γείτονες τους, ο όγκος της πληροφορίας που μεταφέρεται είναι σαφώς μικρότερος από αυτόν που χρειάζεται στο συγκεντρωτικό σύστημα. Οι ελεγκτές των φορτίων δεν βασίζονται πλέον σε έναν κεντρικό ελεγκτή για να καθορίσει την βέλτιστη ισχύ εξόδου. Όμως, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένας κεντρικός ελεγκτής και το συσχετιζόμενο σύστημα διαχείρισης ενέργειας με αυτόν κατέχει πολύ σημαντικό ρόλο ακόμη και στο αποκεντρωμένο σύστημα [13].



Εικόνα 28: Κεντροποιημένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας [13]



Εικόνα 29: Αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας [13]

Ωστόσο, επειδή οι τοπικοί ελεγκτές είναι περισσότερο υπεύθυνοι για την ρύθμιση, τα εγγενή ζητήματα ασφάλειας κάνουν το αποκεντρωμένο σύστημα πιο ευάλωτο σε φυσικές και ηλεκτρονικές επιθέσεις. Για να επιτευχθεί μία ευέλικτη λειτουργία του μικροδικτύου, ηλεκτρονικές διεπαφές ισχύος και έλεγχοι ενσωματώνονται με τις κατακεντρωμένες πηγές ενέργειας για την παρακολούθηση της ποιότητας για συνεχή και αξιόπιστη παροχή ισχύος [7].

Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενός μικροδικτύου περιλαμβάνει και τον τομέα της ζήτησης αλλά και της παροχής, ικανοποιώντας τους περιορισμούς του συστήματος, για να φτάσει σε μία οικονομική, βιώσιμη και αξιόπιστη λειτουργία του μικροδικτύου. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως σωστή κατανομή της ενέργειας, εξοικονόμηση ενέργειας, υποστήριξη άεργης ισχύος, ρύθμιση συχνότητας, αξιοπιστία, μείωση κόστους απώλειας, ενεργειακή ισορροπία, μειωμένη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, συμμετοχή και ιδιωτικότητα των καταναλωτών [7].

Όλη η λειτουργία του μικροδικτύου ελέγχεται και ρυθμίζεται από τον κεντρικό ελεγκτή και διάφορους τοπικούς ελεγκτές. Η αποτελεσματική διαχείριση και ο συντονισμός των κατανεμημένων πηγών ενέργειας στο μικροδίκτυο έχει ως αποτέλεσμα την βελτιωμένη επίδοση και την βιώσιμη ανάπτυξη. Το μικροδίκτυο αποτελείται κυρίως από βιώσιμα ενεργειακά συστήματα, όπως τα συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας και τα ενεργειακά αποδοτικά συστήματα που χρησιμοποιούν τοπικά απόβλητα θερμότητας. Η βελτιστοποίηση αυτών των συστημάτων επιτυγχάνεται από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του μικροδικτύου που είναι υπεύθυνο για τις στρατηγικές λήψης αποφάσεων. Αυτές οι στρατηγικές έχουν ως στόχους την αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα, την αυξημένη αξιοπιστία, την μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση, τα μειωμένα λειτουργικά κόστη για τις κατανεμημένες πηγές, τις μειωμένες απώλειες συστήματος και την μείωση των αερίων του θερμοκηπίου για βιώσιμη ανάπτυξη.

Όσον αφορά την κεντριοποιημένη αρχιτεκτονική ελέγχου, λόγω της αυξημένης διεύθυνσης των κατανεμημένων πηγών ενέργειας στο σύστημα ισχύος, εμφανίζονται κάποια προβλήματα όπως ο υψηλός υπολογιστικός χρόνος, μειωμένη ικανότητα προσαρμογής του συστήματος και υψηλή αστάθεια σε περιπτώσεις σφαλμάτων. Αντιθέτως, η αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική ελέγχου απαιτεί συνεχή διαθεσιμότητα ενός αμφίδρομου συνδέσμου επικοινωνίας ανάμεσα στις συνιστώσες του μικροδικτύου και τον συγχρονισμό τους που έχει ως αποτέλεσμα αυξημένο κόστος συστήματος. Επιπλέον, το κόστος αναβάθμισης αυτών των επικοινωνιακών συστημάτων απαιτεί περαιτέρω βελτιστοποίηση.

Η λειτουργία του συστήματος διαχείρισης ενέργειας ενός μικροδικτύου μπορεί επίσης να διαιρεθεί σε 2 κατηγορίες: προγραμματισμός μια μέρα πριν και προγραμματισμός σε πραγματικό χρόνο. Η πρώτη κατηγορία μπορεί να διαιρεθεί και επιπλέον σε προγραμματισμό ανά ώρα ώστε να λαμβάνονται υπόψιν και σφάλματα πρόβλεψης. Οι τιμές αναφοράς στέλνονται στους τοπικούς ελεγκτές σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας συνδέσμους επικοινωνίας. Για αγροτικές, οικιακές και απομακρυσμένες περιοχές μικροδικτύων, η επιλογή των τεχνολογιών επικοινωνίας κυρίως βασίζεται στο κόστος ανάπτυξης και στο ρυθμό δεδομένων. Wi-fi, Bluetooth και z-wave (ένα

πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιείται κυρίως για οικιακό αυτοματισμό) είναι μερικές από τις τεχνολογίες που προτιμώνται σε τέτοιες περιπτώσεις. Ωστόσο, για μικροδίκτυα σε επίπεδα δήμων και κοινής ωφέλειας το εύρος κάλυψης και ο ρυθμός δεδομένων είναι εξαιρετικά σημαντικά και για αυτό το παθητικό οπτικό δίκτυο, τα 3G και 4G είναι καλύτερες τεχνολογίες. Ο κεντρικός ελεγκτής εκτελεί λειτουργίες διαχείρισης ενέργειας με τη βοήθεια των SCADA, HMI και πληροφοριών που λαμβάνει από τους τοπικούς ελεγκτές. Τέλος, συστήματα διαχείρισης ενέργειας μικροδικτύων σχεδιάζονται από εταιρίες όπως Schneider Electric, ABB, General Electric, Siemens, Alstom, Tesla και πολλές άλλες [7].

Στον Πίνακα 3 γίνεται μία σύγκριση μεταξύ του κεντροποιημένου και του κατακεκομημένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας και αναφέρονται κάποια βασικά μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα.

Πίνακας 3: Σύγκριση μεταξύ του κεντρικοποιημένου και κατακεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας στα μικροδίκτυα [13]

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Κεντρικοποιημένος έλεγχος	<ul style="list-style-type: none"> • Εύκολο στην εφαρμογή • Εύκολο στην συντήρηση • Σχετικά χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> • Δύσκολα επεκτάσιμο • Μοναδικό σημείο αποτυχίας • Υπολογιστικό κόστος
Αποκεντρωμένος έλεγχος	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό υπολογιστικό κόστος • Αποφυγή μοναδικού σημείου αποτυχίας • Κατάλληλο για πολύπλοκα, μεγάλης κλίμακας συστήματα 	<ul style="list-style-type: none"> • Χρειάζεται συγχρονισμό • Περισσότερος χρόνος για ομοφωνία από τους τοπικούς ελεγκτές • Χρειάζεται νέα δομή επικοινωνίας

4.3.5 Προκλήσεις και Ευκαιρίες για τα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας των Μικροδικτύων

- Δυναμική παροχή ενέργειας. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να έχει μία εξαιρετικά δυναμική τοπολογία και έναν αριθμό από ετερογενείς συσκευές. Αφού οι

περισσότερες κατανεμημένες πηγές και τα κατανεμημένα συστήματα αποθήκευσης σε ένα μικροδίκτυο είναι τοπικές ιδιοκτησίες και λειτουργούν επίσης τοπικά, οι καταναλωτές μπορούν να αποκτήσουν περισσότερη ανεξαρτησία από το συμβατικό ηλεκτρικό δίκτυο. Οι καταναλωτές μπορούν να λειτουργούν τα συστήματα βέλτιστα για να προμηθεύουν τα δικά τους φορτία ή για να παρέχουν βοηθητικές υπηρεσίες στο κύριο δίκτυο, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις τιμές. Τα μικροδίκτυα είναι ικανά για γρήγορη επαναδιαμόρφωση χωρίς να χρειάζεται να επανασχεδιάσουν το σύστημα διαχείρισης ενέργειας.

- Διακοπτόμενη ανανεώσιμη ενέργεια. Τα μικροδίκτυα μπορεί να είναι μια άμεση λύση για καλύτερη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Από μία μακροπρόθεσμη άποψη όσον αφορά τη λειτουργία, τα λειτουργικά κόστη αυτών των κατανεμημένων πηγών που βασίζονται σε ανανεώσιμη ενέργεια είναι αμελητέα. Οι τιμές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τείνουν να αυξάνονται και να μειώνονται ανάλογα με την ώρα της ημέρας και την περίοδο του χρόνου. Αυτή η μεταβλητότητα και η αβεβαιότητα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη στο σχεδιασμό των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας των μικροδικτύων.
- Άλλες αβεβαιότητες. Με αυξανόμενα φορτία ελέγχου, η ακριβής πρόβλεψη των φορτίων γίνεται όλο και περισσότερο δυσκολότερη. Γενικά, το προφίλ των φορτίων ποικίλει ανάλογα με την εποχή και το χρόνο. Ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας μικροδικτύου που έχει σχεδιαστεί σωστά λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους, πρέπει να ενσωματώνει τόσο χωρικές όσο και χρονικές κλίμακες.
- Απαιτήσεις επικοινωνίας. Γενικά, τα επικοινωνιακά δίκτυα κατηγοριοποιούνται ως εξής: wide area network (WAN), δηλαδή δίκτυο ευρείας περιοχής, field area network (FAN), δηλαδή δίκτυο περιοχής πεδίου και home area network HAN, δηλαδή δίκτυο σε επίπεδο οικίας. Το αναγκαίο δίκτυο επικοινωνιών για ένα μικροδίκτυο ανήκει στις κατηγορίες των FAN και των HAN. Ένα δίκτυο FAN, το οποίο μπορεί να είναι βασισμένο στο πεδίο ή στον πελάτη με διαφορετικές απαιτήσεις, εφαρμόζεται κανονικά στο σύστημα κατανομής. Το HAN συνήθως εφαρμόζεται για οικιακούς καταναλωτές για να ενεργοποιεί τις λειτουργίες

έξυπνου δικτύου. Ένα αξιόπιστο και συμβατό δίκτυο επικοινωνιών απαιτείται για να παρακολουθεί και να διαχειρίζεται αποτελεσματικά έναν αρκετά μεγάλο αριθμό από συνιστώσες του μικροδικτύου, όπως οι κατανεμημένες γεννήτριες και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αλλά και τα φορτία. Η αμφίδρομη επικοινωνία, δηλαδή, η αμφίδρομη ροή ισχύος και πληροφορίας είναι αναπόσπαστο κομμάτι και ο ακρογωνιαίος λίθος του μικροδικτύου [13].

4.3.6 Προγραμματιστικές μέθοδοι διαχείρισης ενέργειας μικροδικτύων

Συστήματα διαχείρισης ενέργειας που βασίζονται σε κλασσικές μεθόδους

Γραμμικές και μη γραμμικές προγραμματιστικές μέθοδοι: σε όλα τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας με τις συγκεκριμένες προγραμματιστικές μεθόδους χρησιμοποιείται κεντρική αρχιτεκτονική ελέγχου. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι στοχεύουν κυρίως στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του μικροδικτύου. Ωστόσο, περισσότερη έμφαση πρέπει να δοθεί σε κάποιους τομείς όπως η λειτουργία και η απόδοση των μπαταριών, οι επιδράσεις των αερίων του θερμοκηπίου στο περιβάλλον, τα ζητήματα που αφορούν την ιδιωτικότητα των καταναλωτών, η ενσωμάτωση των κατανεμημένων πηγών και τέλος η αξιοπιστία του συστήματος [7].

Συστήματα διαχείρισης ενέργειας που βασίζονται σε δυναμικό προγραμματισμό: αυτά τα συστήματα στοχεύουν κυρίως στην βελτιστοποίηση της ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές και στην ανταλλαγή ενέργειας με το συμβατικό δίκτυο. Ωστόσο, αρκετή πρόοδος απαιτείται ακόμη όσον αφορά τη μείωση των ρύπων στο περιβάλλον, τη μελέτη των κατανεμημένων πηγών και ζητήματα που αφορούν την ιδιωτικότητα των καταναλωτών [7].

Συστήματα διαχείρισης ενέργειας που βασίζονται σε genetic και swarm βελτιστοποίηση: αρκετές παράμετροι αξίζει να μελετηθούν εις βάθος όπως για παράδειγμα η περίπλοκη υπολογιστική των συγκεκριμένων προσεγγίσεων, ο υποβιβασμός του κόστους της μπαταρίας, οι επιδράσεις των αερίων του θερμοκηπίου στο περιβάλλον και η αξιοπιστή και βιώσιμη λειτουργία των μικροδικτύων κατά την περίοδο που βρίσκονται αποσυνδεδεμένα από το δίκτυο [7].

Συστήματα διαχείρισης ενέργειας που βασίζονται σε meta-heuristic προσεγγίσεις: σε αυτές τις μεθόδους, αρκετή πρόοδος απαιτείται ακόμη στην θεώρηση της μείωσης του λειτουργικού κόστους και των περιβαλλοντικών ρύπων, της μείωσης των απωλειών του συστήματος μέσα στο μικροδίκτυο, της ενσωμάτωσης των κατανεμημένων πηγών και της αξιόπιστης βελτίωσης.

Συστήματα διαχείρισης ενέργειας που βασίζεται σε fuzzy-logic και νευρωνικά δίκτυα: οι περισσότερες από τις συνεισφορές των συγκεκριμένων προσεγγίσεων αφορούν την μείωση του λειτουργικού κόστους των κατανεμημένων πηγών, την μείωση των ρύπων και την ανταλλαγή ενέργειας με το κυρίως δίκτυο. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι είναι αρκετά περίπλοκες υπολογιστικά, υπάρχουν αρκετά θέματα που αφορούν την ιδιωτικότητα των καταναλωτών, την αξιοπιστία του συστήματος αλλά και τα κόστη των απωλειών του συστήματος του μικροδικτύου [7].

Συστήματα διαχείρισης ενέργειας που βασίζονται σε πολυπρακτορικές μεθόδους: η υπολογιστική χρονική πολυπλοκότητα της συγκεκριμένης μεθόδου, μειωμένα εκπεμπόμενα αέρια του θερμοκηπίου, ασφαλές και αξιόπιστο σύστημα για αποκεντρωμένη λειτουργία του μικροδικτύου, επιδράσεις της απόδοσης του μικροδικτύου, μείωση των διακοπών της λειτουργίας είναι μερικά θέματα που δεν έχουν διερευνηθεί αρκετά [7].

Συστήματα διαχείρισης ενέργειας που βασίζονται σε άλλες μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης: σε αυτές τις προσεγγίσεις, περισσότερη έμφαση πρέπει να δοθεί στο κόστος των επικοινωνιακών συστημάτων για την αποκεντρωμένη λειτουργία του μικροδικτύου, στη μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων, στα κόστη απωλειών, στην ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων και στη ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας για να διασφαλιστεί και πάλι η αξιόπιστη και βιώσιμη λειτουργία των μικροδικτύων [7].

4.3.7 Συμπεράσματα

Ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας είναι πολύ σημαντικό για βιομηχανικούς, οικιακούς και εμπορικούς τομείς για την ενεργειακά αποδοτική λειτουργία. Έχει στόχο να βελτιστοποιήσει τον προγραμματισμό των κατανεμημένων πηγών, να μειώσει την

κατανάλωση της ενέργειας και τους περιβαλλοντικούς ρύπους. Χρησιμοποιεί δεδομένα για να βελτιστοποιήσει την απόδοση του συστήματος στην παραγωγή, την μεταφορά και την διανομή. Είναι αναπόσπαστο κομμάτι στο σχεδιασμό ενός μικροδικτύου και βέβαια στην μελέτη για την απόδοσή του.

Κεφάλαιο 5 Προσομοίωση στο λογισμικό HOMER

5.1 Εισαγωγή στο λογισμικό HOMER Pro

Το λογισμικό HOMER Pro που δημιουργήθηκε από την HOMER Energy είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται σε παγκόσμια κλίμακα για την βέλτιστη σχεδίαση μικροδικτύων σε όλους τους τομείς [15]. Το HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables) απλοποιεί την διαδικασία αξιολόγησης της σχεδίασης των μικροδικτύων, συνδεδεμένων ή όχι στο δίκτυο. Το HOMER, λοιπόν, είναι ένα λογισμικό που παρέχει μία εκτενή οικονομική και τεχνική ανάλυση ενός μικροδικτύου. Είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, που χρησιμοποιείται για την εύρεση βέλτιστης λύσης ανάμεσα σε πολλές τοπολογίες μικροδικτύων. Το HOMER καθορίζει το βέλτιστο μέγεθος κάθε συνιστώσας, το οποίο ενσωματώνεται στο υβριδικό σύστημα του μικροδικτύου και παρέχει πολύ σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις ενεργειακές πηγές [16]. Επίσης, συν όλα τα παραπάνω, επιτυγχάνεται και η τεχνοοικονομική ανάλυση και η πρόβλεψη φορτίου.

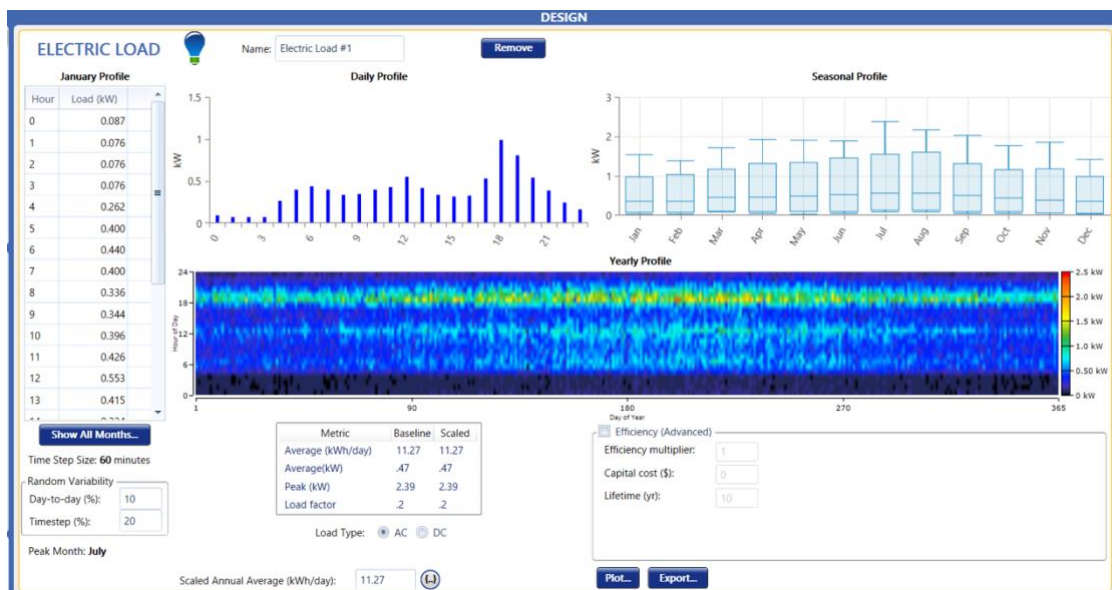
5.2 Δεδομένα μικροδικτύου HOMER

Αρχικά για να μπορέσουμε να προσομοιώσουμε ένα σύστημα μικροδικτύου στο εν λόγω λογισμικό χρειαζόμαστε κάποια δεδομένα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση και εφόσον έχει αποφασιστεί εκ των προτέρων ποιες ακριβώς θα είναι οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που θα χρησιμοποιηθούν, το HOMER δίνει την δυνατότητα, επιλέγοντας ακριβώς την τοποθεσία που θα εγκατασταθεί το μικροδίκτυο που εξετάζεται, δηλαδή στον ελληνικό χώρο, να κατέβουν αυτόματα μέσω του λογισμικού τα επίσημα δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία, την θερμοκρασία αλλά και την ταχύτητα του ανέμου για την συγκεκριμένη τοποθεσία, δεδομένα που έχουν δημοσιοποιηθεί από το επίσημο εργαστήριο της NASA και έχουν δοθεί στην HOMER Energy ώστε να γίνεται πιο εύκολη η προσομοίωση των μικροδικτύων.

Επιπλέον, χρειαζόμαστε τις απαιτήσεις του μικροδικτύου σε ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή χρειαζόμαστε τον ηλεκτρικό φορτίο που θα πρέπει να καλύπτεται από τις τεχνολογίες που θα επιλέξουμε.

5.2.1 Ηλεκτρικό φορτίο

Στην Εικόνα 30, απεικονίζεται το απαιτούμενο ετήσιο μέσο ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο, όπως παρατηρούμε είναι 11.27 kWh την ημέρα. Επιπλέον, έχουμε εισάγει στο λογισμικό ότι ο μήνας που παρατηρείται η μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο Ιούλιος αφού το καλοκαίρι πλέον στην Ελλάδα είναι αρκετά και πάνω από τα επιτρεπτά όρια, ζεστό και η χρήση κλιματιστικών και άλλων ηλεκτρικών συσκευών έχει ως αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Το ηλεκτρικό φορτίο είναι εναλλασσόμενου ρεύματος. Επίσης από την Εικόνα 30 και το ημερήσιο προφίλ παρατηρούμε ότι η μέγιστη ζήτηση κατά τη διάρκεια της ημέρας παρατηρείται το απόγευμα στις 18.00 μ.μ. και είναι 0.985kW.



Εικόνα 30: Απαιτούμενο ηλεκτρικό φορτίο [HOMER]

Στις Εικόνα 31, Εικόνα 32 φαίνονται οι απαιτήσεις σε ηλεκτρικό φορτίο για όλους τους μήνες του χρόνου, ενδεικτικά για μία μέρα του μήνα, για καθημερινές και σαββατοκύριακα. Παρατηρούμε πως τον Ιούλιο οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια είναι αρκετά αυξημένες, κάτι που επαληθεύει όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.

Yearly Load Data

Weekdays		Weekends										
Hour	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
0	0.087	0.090	0.098	0.109	0.120	0.128	0.131	0.128	0.120	0.109	0.098	0.090
1	0.076	0.079	0.085	0.095	0.105	0.111	0.114	0.111	0.105	0.095	0.085	0.079
2	0.076	0.079	0.085	0.095	0.105	0.111	0.114	0.111	0.105	0.095	0.085	0.079
3	0.076	0.079	0.085	0.095	0.105	0.111	0.114	0.111	0.105	0.095	0.085	0.079
4	0.262	0.271	0.294	0.327	0.360	0.383	0.392	0.383	0.360	0.327	0.294	0.271
5	0.400	0.415	0.450	0.500	0.550	0.585	0.600	0.585	0.550	0.500	0.450	0.415
6	0.440	0.457	0.495	0.550	0.605	0.644	0.660	0.644	0.605	0.550	0.495	0.457
7	0.400	0.415	0.450	0.500	0.550	0.585	0.600	0.585	0.550	0.500	0.450	0.415
8	0.336	0.349	0.378	0.420	0.462	0.491	0.504	0.491	0.462	0.420	0.378	0.349
9	0.344	0.357	0.387	0.430	0.473	0.503	0.516	0.503	0.473	0.430	0.387	0.357
10	0.396	0.411	0.446	0.495	0.545	0.579	0.594	0.579	0.545	0.495	0.446	0.411
11	0.426	0.442	0.480	0.533	0.586	0.624	0.640	0.624	0.586	0.533	0.480	0.442
12	0.553	0.574	0.622	0.691	0.760	0.808	0.829	0.808	0.760	0.691	0.622	0.574
13	0.415	0.431	0.467	0.519	0.571	0.607	0.623	0.607	0.571	0.519	0.467	0.431
14	0.334	0.347	0.376	0.418	0.460	0.489	0.502	0.489	0.460	0.418	0.376	0.347
15	0.318	0.330	0.357	0.397	0.437	0.464	0.476	0.464	0.437	0.397	0.357	0.330
16	0.327	0.339	0.368	0.409	0.450	0.479	0.491	0.479	0.450	0.409	0.368	0.339
17	0.526	0.546	0.592	0.658	0.724	0.770	0.790	0.770	0.724	0.658	0.592	0.546
18	0.985	1.022	1.108	1.231	1.354	1.440	1.477	1.440	1.354	1.231	1.108	1.022
19	0.802	0.832	0.903	1.003	1.103	1.174	1.204	1.174	1.103	1.003	0.903	0.832
20	0.541	0.561	0.608	0.676	0.744	0.791	0.811	0.791	0.744	0.676	0.608	0.561
21	0.384	0.398	0.432	0.480	0.528	0.562	0.576	0.562	0.528	0.480	0.432	0.398
22	0.240	0.249	0.270	0.300	0.330	0.351	0.360	0.351	0.330	0.300	0.270	0.249
23	0.163	0.169	0.184	0.204	0.224	0.239	0.245	0.239	0.224	0.204	0.184	0.169

Copy changes to right
 Copy changes to weekend

Εικόνα 31: Ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας τις καθημερινές [HOMER]

Yearly Load Data

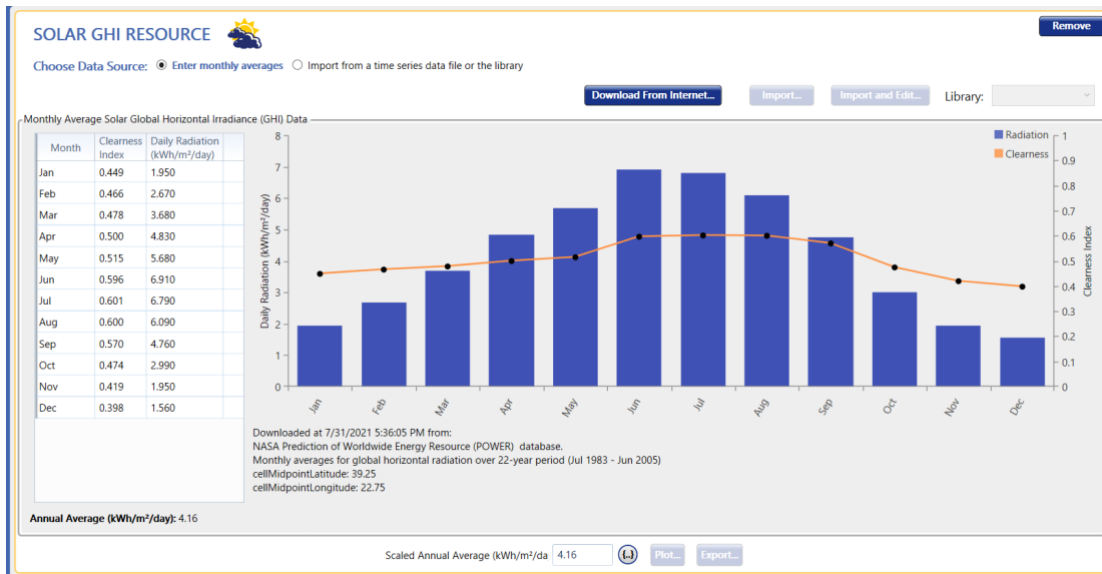
Hour	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
0	0.087	0.090	0.098	0.109	0.120	0.128	0.131	0.128	0.120	0.109	0.098	0.090
1	0.076	0.079	0.085	0.095	0.105	0.111	0.114	0.111	0.105	0.095	0.085	0.079
2	0.076	0.079	0.085	0.095	0.105	0.111	0.114	0.111	0.105	0.095	0.085	0.079
3	0.076	0.079	0.085	0.095	0.105	0.111	0.114	0.111	0.105	0.095	0.085	0.079
4	0.262	0.271	0.294	0.327	0.360	0.383	0.392	0.383	0.360	0.327	0.294	0.271
5	0.400	0.415	0.450	0.500	0.550	0.585	0.600	0.585	0.550	0.500	0.450	0.415
6	0.440	0.457	0.495	0.550	0.605	0.644	0.660	0.644	0.605	0.550	0.495	0.457
7	0.400	0.415	0.450	0.500	0.550	0.585	0.600	0.585	0.550	0.500	0.450	0.415
8	0.370	0.383	0.416	0.462	0.508	0.541	0.554	0.541	0.508	0.462	0.416	0.383
9	0.378	0.393	0.426	0.473	0.520	0.553	0.568	0.553	0.520	0.473	0.426	0.393
10	0.436	0.452	0.490	0.545	0.599	0.637	0.653	0.637	0.599	0.545	0.490	0.452
11	0.469	0.487	0.528	0.586	0.645	0.686	0.704	0.686	0.645	0.586	0.528	0.487
12	0.608	0.631	0.684	0.760	0.836	0.889	0.912	0.889	0.836	0.760	0.684	0.631
13	0.457	0.474	0.514	0.571	0.628	0.668	0.685	0.668	0.628	0.571	0.514	0.474
14	0.368	0.382	0.414	0.460	0.506	0.538	0.552	0.538	0.506	0.460	0.414	0.382
15	0.349	0.362	0.393	0.437	0.480	0.511	0.524	0.511	0.480	0.437	0.393	0.362
16	0.360	0.373	0.405	0.450	0.495	0.526	0.540	0.526	0.495	0.450	0.405	0.373
17	0.526	0.546	0.592	0.658	0.724	0.770	0.790	0.770	0.724	0.658	0.592	0.546
18	0.985	1.022	1.108	1.231	1.354	1.440	1.477	1.440	1.354	1.231	1.108	1.022
19	0.802	0.832	0.903	1.003	1.103	1.174	1.204	1.174	1.103	1.003	0.903	0.832
20	0.541	0.561	0.608	0.676	0.744	0.791	0.811	0.791	0.744	0.676	0.608	0.561
21	0.384	0.398	0.432	0.480	0.528	0.562	0.576	0.562	0.528	0.480	0.432	0.398
22	0.240	0.249	0.270	0.300	0.330	0.351	0.360	0.351	0.330	0.300	0.270	0.249
23	0.163	0.169	0.184	0.204	0.224	0.239	0.245	0.239	0.224	0.204	0.184	0.169

Copy changes to right
 Copy changes to weekend

Εικόνα 32: Ετήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας τα σαββατοκύριακα [HOMER]

5.2.2 Ηλιακή ακτινοβολία

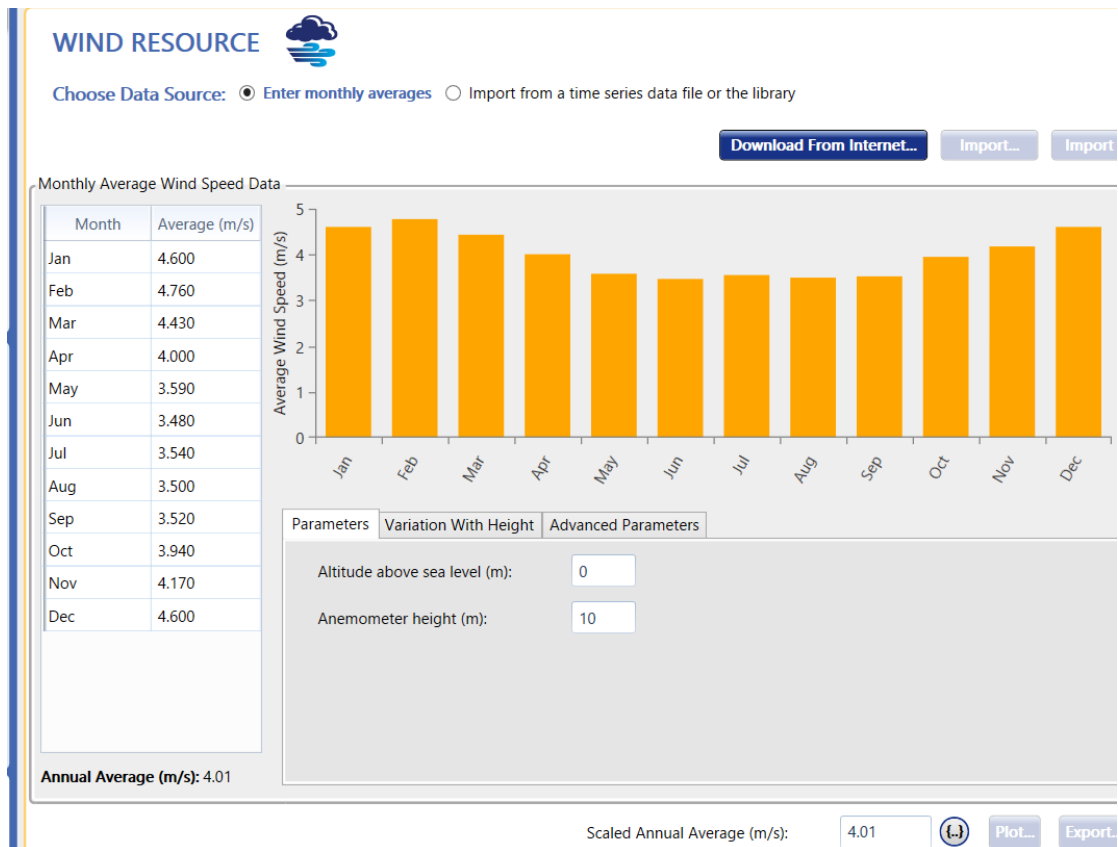
Όσον αφορά την ηλιακή ακτινοβολία μπορούμε να παρατηρήσουμε από την Εικόνα 33 πως κυρίως τους μήνες του καλοκαιριού και της άνοιξης είναι αρκετά υψηλή, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο, ενώ μια ενδεικτική τιμή της μέσης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, όπως υπολογίζεται από το πρόγραμμα είναι $4.16 \text{ kWh/m}^2/\text{μέρα}$. Στο συγκεκριμένο σχήμα μπορούμε, επίσης, να δούμε και την καθαρότητα της ατμόσφαιρας καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου, η οποία είναι ένας διαστατικός αριθμός μεταξύ 0 και 1. Ο δείκτης καθαρότητας έχει υψηλότερες τιμές όταν οι συνθήκες είναι καλύτερες, με ήλιο και καθαρό ουρανό, ενώ παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές σε περιόδους με συννεφιά.



Εικόνα 33: Δεδομένα για ηλιακή ακτινοβολία και δείκτη καθαρότητας [HOMER]

5.2.3 Δεδομένα για τον άνεμο

Τα δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου απεικονίζονται στην Εικόνα 34, όπου φαίνεται ότι κατά τους χειμερινούς μήνες κυρίως έχουμε τις μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου ενώ η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου είναι 4.01 m/s.

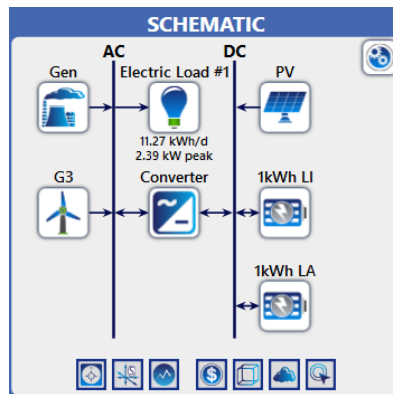


Εικόνα 34: Δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου [HOMER]

5.3 Συνιστώσες του μικροδικτύου στο HOMER

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει περιγραφή των συνιστωσών του μικροδικτύου που προσομοιώθηκε στο HOMER, με την παράθεση όλων των απαραίτητων χαρακτηριστικών, τεχνικών αλλά και οικονομικών. Στην Εικόνα 35 παρουσιάζεται το μικροδίκτυο όπως προσομοιώθηκε στο HOMER. Αρχικά, θα γίνει μια παράθεση των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, συνοπτικά, και αυτά είναι: συμβατική γεννήτρια πετρελαίου, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά πάνελ, μπαταρίες ιόντων λιθίου και μόλυβδου οξέος και ένας μετατροπέας. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν δυο ζυγοί, ένας AC, δηλαδή εναλλασσόμενου ρεύματος και ένας DC, δηλαδή συνεχούς ρεύματος. Οι δυο αυτοί ζυγοί είναι απαραίτητοι για την σωστή λειτουργία του μικροδικτύου, αφού η συμβατική γεννήτρια πετρελαίου καθώς επίσης και οι ανεμογεννήτριες παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα, ενώ οι μπαταρίες και τα φωτοβολταϊκά πάνελ παράγουν συνεχές ρεύμα. Απαραίτητη είναι επίσης και η παρουσία του μετατροπέα (converter). Το ηλεκτρικό

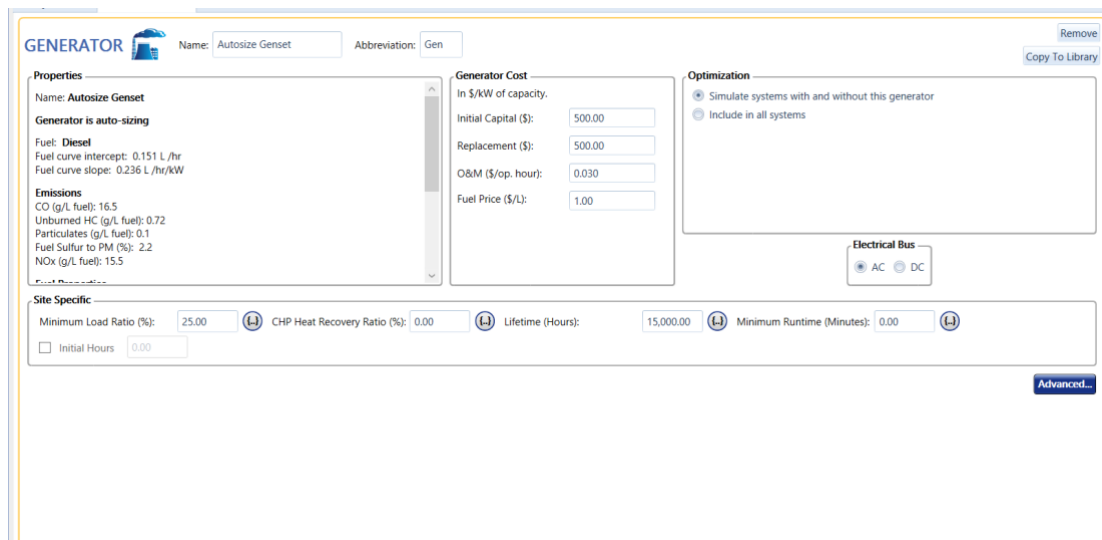
φορτίο, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως είναι εναλλασσόμενου ρεύματος. Να αναφέρουμε πως όλα τα ποσά που θα εξεταστούν και αναφερθούν παρακάτω δίνονται από το λογισμικό HOMER σε USD και έχει γίνει η μετατροπή τους σε € σύμφωνα με την αντιστοίχιση ότι 1 USD = 0.852€ (10/08/2021).



Εικόνα 35: Ο γενικός σχηματισμός του μικροδικτύου της προσομοίωσης [HOMER]

5.3.1 Συμβατική γεννήτρια πετρελαίου

Στην Εικόνα 36 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας που επιλέχθηκε καθώς επίσης και κάποιες επιπλέον πληροφορίες, όπως το αρχικό κεφάλαιο που είναι 426.375€, το κόστος αντικατάστασης, το οποίο είναι το ίδιο με το αρχικό κόστος και τέλος έχουμε το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι 0.02558€/χρόνο. Επίσης, δίνεται και μια ενδεικτική τιμή όσον αφορά το καύσιμο, 0.85275€/λίτρο. Μπορούμε να δούμε και κάποιες επιπλέον πληροφορίες, όπως για παράδειγμα τις εκπομπές CO₂, που είναι 16.5 γραμμάρια ανά λίτρο. Τέλος, βλέπουμε ότι η διάρκεια ζωής της γεννήτριας είναι 15,000 ώρες, η ελάχιστη αναλογία φορτίου, (minimum load ratio), που είναι το ελάχιστο επιτρεπτό φορτίο στη γεννήτρια εκφρασμένο σαν ποσοστό της χωρητικότητάς της, είναι 25%.



Εικόνα 36: Χαρακτηριστικά γεννήτριας [HOMER]

5.3.2 Converter

Στην Εικόνα 37 φαίνονται τα χαρακτηριστικά του μετατροπέα που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη προσομοίωση. Παρατηρούμε ότι η χωρητικότητα του συγκεκριμένου στοιχείου είναι 1kW, ενώ τα κόστη κεφαλαίου και αντικατάστασης είναι και τα δυο 255.825€, ενώ δεν έχουμε κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Επίσης, η διάρκεια ζωής του είναι 15 χρόνια, ενώ η απόδοσή του είναι 95%. Ο μετατροπέας είναι απαραίτητη συνιστώσα στο μικροδίκτυο, διότι δίχως αυτόν το μικροδίκτυο δεν μπορεί να λειτουργήσει. Κάθε σύστημα που περιέχει και AC και DC συνιστώσες απαιτεί έναν converter.

The screenshot displays the HOMER software interface for configuring a 'System Converter'. The main configuration area includes:

- Properties:** Name: System Converter, Abbreviation: Converter, Notes: This is a generic system converter.
- Costs Table:**

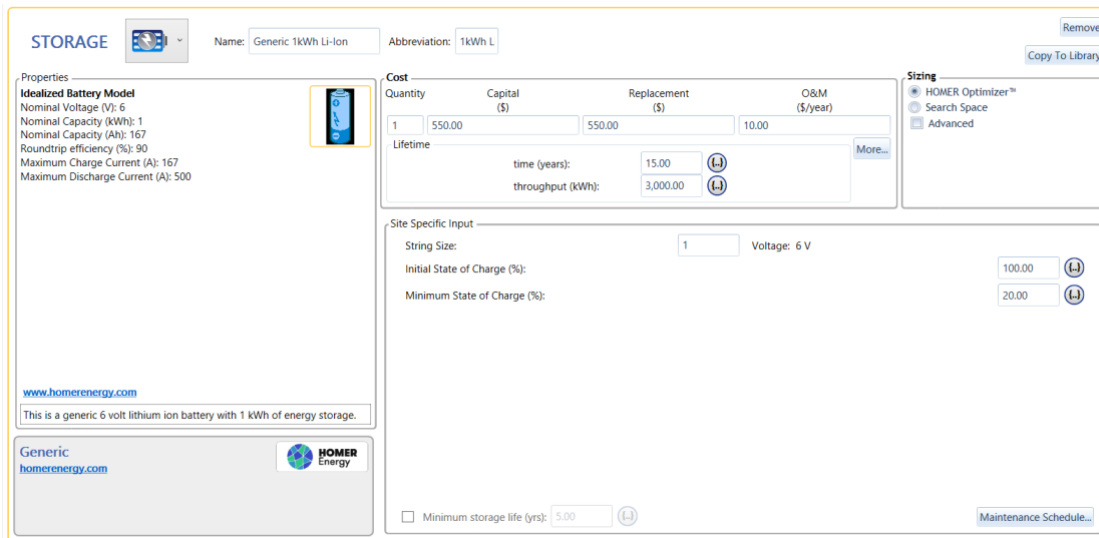
Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$300.00	\$300.00	\$0.0
- Capacity Optimization:** Includes options for HOMER Optimizer™, Search Space, and Advanced.
- Input Parameters:**
 - Inverter Input:** Lifetime (years): 15.00, Efficiency (%): 95.00, Parallel with AC generator? (checked).
 - Rectifier Input:** Relative Capacity (%): 100.00, Efficiency (%): 95.00.

A banner at the bottom promotes 'NODE X' as a 'Decentralized Microgrid which start at 6kVA and capable to expand as your project grow' by LEONICS.

Εικόνα 37: Χαρακτηριστικά μετατροπέα [HOMER]

5.3.3 Μπαταρία ιόντων λιθίου 1kWh

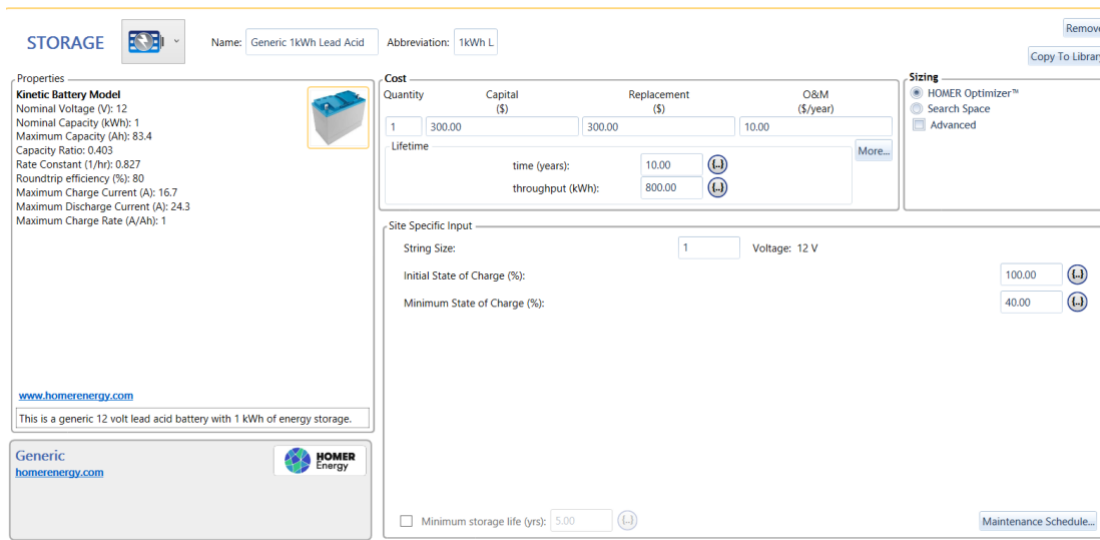
Ο συγκεκριμένος τύπος μπαταρίας που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του μικροδικτύου έχει, όπως βλέπουμε στην Εικόνα 38, ονομαστική τάση 6V, ονομαστική χωρητικότητα 1kWh και απόδοση 90%. Παρατηρούμε πως το κόστος κεφαλαίου και αντικατάστασης είναι έκαστο 468.5175€, ενώ το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι 8.5185€/χρόνο. Επιπλέον, έχουμε ορίσει την διάρκεια ζωής της μπαταρίας στα 15 χρόνια ή εναλλακτικά 3000 kWh χρόνο απόδοσης. Αφού έχουν οριστεί και οι δυο αυτοί παράμετροι, η αντικατάσταση του συγκεκριμένου στοιχείου θα συμβεί όταν ολοκληρωθεί ένα από τα δυο. Τέλος, ορίζουμε την αρχική κατάσταση φόρτισης σε ποσοστό, δηλαδή την κατάσταση λειτουργίας της μπαταρίας στην αρχή της προσομοίωσης και όπως παρατηρούμε έχει οριστεί στο 100% και την ελάχιστη κατάσταση φόρτισης, που δηλώνει το κατώτατο όριο, στο 20%.



Εικόνα 38: Χαρακτηριστικά μπαταρίας ιόντων λιθίου [HOMER]

5.3.4 Μπαταρία μόλυβδου οξέος 1kWh

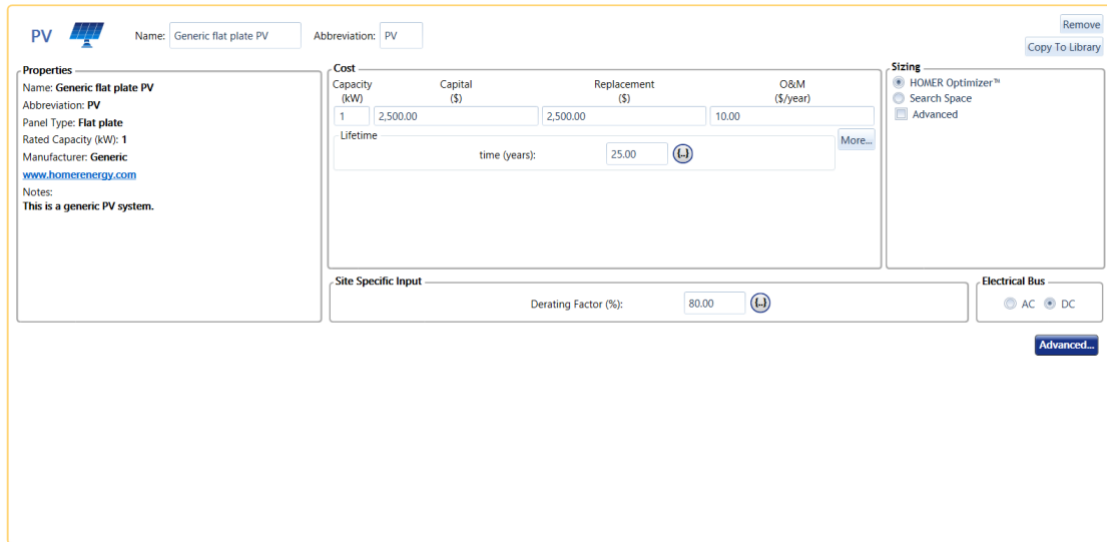
Το μοντέλο αυτό μπαταρίας που χρησιμοποιείται σε αυτή την προσομοίωση είναι ένα σύστημα δυο δεξαμενών, το οποίο διαχωρίζει την διαθέσιμη ενέργεια, που χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρισμού από την δεσμευμένη ενέργεια που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Από την Εικόνα 39, παρατηρούμε ότι η ονομαστική τάση είναι 12V και η ονομαστική χωρητικότητα 1kWh. Επίσης, η απόδοση του συγκεκριμένου μοντέλου είναι 80%. Έχουμε ορίσει το κόστος κεφαλαίου και το κόστος αντικατάστασης να είναι 255.555€, το καθένα, ενώ το κόστος λειτουργίας και συντήρησης να είναι 8.5185€/χρόνο. Όσον αφορά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, έχει οριστεί να είναι 10 χρόνια ή 800kWh. Ισχύει η ίδια συνθήκη με την μπαταρία ιόντων λιθίου. Τέλος, η αρχική κατάσταση φόρτισης έχει οριστεί στο 100%, δηλαδή όπως και παραπάνω η προσομοίωση ξεκινά και με τις δυο μπαταρίες πλήρως φορτισμένες, ενώ η ελάχιστη κατάσταση φόρτισης ορίζεται στο 40%.



Εικόνα 39: Χαρακτηριστικά μπαταρίας μόλυβδου οξέος [HOMER]

5.3.5 Φωτοβολταϊκά πάνελ

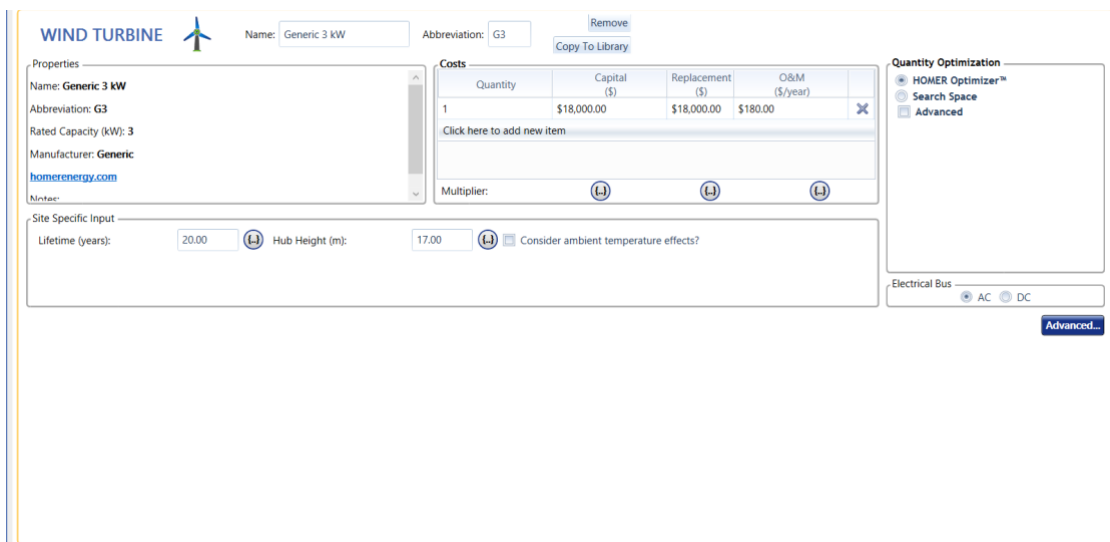
Το φωτοβολταϊκό πάνελ που χρησιμοποιήθηκε για την σχεδίαση και την προσομοίωση του μικροδικτύου που μελετάται είναι ένα απλό φωτοβολταϊκό πάνελ, με ονομαστική χωρητικότητα 1kW, όπως φαίνεται στην Εικόνα 40. Το κόστος κεφαλαίου όπως και το κόστος αντικατάστασης είναι 2,131.875€. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι 8.52750€ το χρόνο. Η διάρκεια ζωής του Φ/Β είναι 25 χρόνια, ενώ ο derating factor είναι 80%, ο οποίος είναι ένας συντελεστής κλιμάκωσης που εφαρμόζεται στην ισχύ εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για να υπολογίσει τη μειωμένη απόδοση σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας σε σύγκριση με τις συνθήκες λειτουργίας στις οποίες η συστοιχία μοντελοποιήθηκε.



Εικόνα 40: Χαρακτηριστικά Φ/Β πάνελ [HOMER]

5.3.6 Ανεμογεννήτρια

Η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη προσομοίωση, είναι μια απλή (AOA), με ονομαστική χωρητικότητα 3 kW, με κόστος κεφαλαίου 15,349.5€, το ίδιο ποσό για κόστος αντικατάστασης, ενώ 153.495€/χρόνο είναι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Παρατηρούμε, επίσης, ότι η διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας είναι 20 χρόνια, ενώ το ύψος είναι 17 μέτρα. Όλα τα παραπάνω παρουσιάζονται στην Εικόνα 41.



Εικόνα 41: Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας [HOMER]

5.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Αξίζει να σημειωθεί ότι το φορτίο που έχουμε επιλέξει αντιστοιχεί στις απαιτήσεις ενός οικιακού φορτίου ενώ το λογισμικό από όλες τις εναλλακτικές που έχουμε εισάγει επιλέγει τις βέλτιστες. Στην Εικόνα 42 φαίνονται όλα τα πιθανά σενάρια, δηλαδή όλα τα πιθανά μικροδίκτυα που μπορούν να προκύψουν από τις συνιστώσες που έχουμε εισάγει στο HOMER. Παρατηρούμε πως το μικροδίκτυο με Φ/Β πάνελ, συμβατική γεννήτρια πετρελαίου, μπαταρία ιόντων λιθίου και φυσικά converter είναι ο πιο αποδοτικός και οικονομικός σχεδιασμός. Όπως μπορούμε να δούμε, αμέσως αποδοτικότερο σύστημα είναι αυτό με την ίδια αρχιτεκτονική αλλά με μπαταρία μολυβδου οξέος, μετά έχουμε τα συστήματα με την γεννήτρια και μία εκ των δύο προβλεπόμενων μπαταριών. Έπειτα, έχουμε τα συστήματα με Φ/Β πάνελ, ανεμογεννήτρια, συμβατική γεννήτρια και μία εκ των δυο μπαταριών. Το ακριβότερο μοντέλο, δηλαδή με την υψηλότερη καθαρή παρούσα αξία είναι αυτό με ανεμογεννήτριες και μπαταρία μολυβδου οξέος.

Architecture		Cost				System				Gen					
PV (kW)	Gen (kW)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren. Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (L)	O&M Cost (\$/yr)	Fuel Cost (\$/yr)	Capital C (\$)
2.49	2.70	9	1.12	\$24,743	\$0.465	\$918.97	\$12,863	59.2	537	933	1,679	537	75.6	537	6,226
2.43	2.70	13	1.80	\$30,676	\$0.577	\$1,455	\$11,872	53.9	582	888	1,896	582	71.9	582	6,084
2.70	2.70	3	2.20	\$32,461	\$0.611	\$2,228	\$3,661	0	1,404	1,848	4,767	1,404	150	1,404	
2.70	2.70	5	0.583	\$40,798	\$0.769	\$2,930	\$3,025	0	1,704	4,064	4,624	1,704	329	1,704	
2.20	2.70	8	1.17	\$42,194	\$0.794	\$974.61	\$29,595	75.5	326	584	1,007	326	47.3	326	5,493
1.89	2.70	11	0.900	\$46,052	\$0.855	\$1,424	\$27,647	75.0	419	1,169	1,027	419	94.7	419	4,727
1	2.70	3	2.06	\$46,120	\$0.887	\$7,395	\$21,617	21.9	950	1,269	3,212	950	103	950	
1	2.70	7	1.33	\$53,127	\$0.999	\$2,458	\$21,849	21.7	1,049	1,913	3,221	1,049	155	1,049	
9.60	2.70	24	2.51	\$55,789	\$1.05	\$954.27	\$43,453	100	0						24,000
0.0160	2.70		0.0204	\$56,662	\$1.07	\$4,279	\$1,395	0	2,821	8,760	6,354	2,821	710	2,821	
9.64	2.70	50	2.98	\$56,700	\$1.07	\$4,278	\$1,396	0	2,821	8,760	6,350	2,821	710	2,821	40.0
1	2.70			\$59,482	\$1.12	\$1,506	\$40,008	100	0						24,112
1	2.70			\$74,450	\$1.40	\$4,262	\$19,350	0	2,559	8,024	5,713	2,559	650	2,559	
10.5	1	29	2.40	\$78,633	\$1.44	\$1,214	\$60,945	100	0						26,250
10.5	1	43	2.83	\$79,892	\$1.50	\$1,693	\$58,000	100	0						26,250
0.438	2	2.70	0.271	\$93,817	\$1.76	\$4,277	\$38,525	0	2,319	7,303	5,156	2,319	592	2,319	1,094
7		73	5.05	\$325,273	\$4.24	\$4,456	\$167,665	100	0						
9		89	6.31	\$266,622	\$5.02	\$5,881	\$190,592	100	0						

Εικόνα 42: Αποτελέσματα προσομοίωσης [HOMER]

Κεφάλαιο 6 - Εκτεταμένα Αποτελέσματα Προσομοίωσης

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά θα γίνει μία επεξήγηση των οικονομικών όρων που χρησιμοποιήθηκαν για να γίνει η οικονομική ανάλυση της συγκεκριμένης προσομοίωσης. Έπειτα θα αναλυθούν όλες οι πιθανές τοπολογίες του μικροδικτύου, ξεκινώντας από την βέλτιστη και καταλήγοντας στην λιγότερο αποδοτική.

6.2 Οικονομικοί όροι

Η καθαρή παρούσα αξία (net present cost), ή κόστος κύκλου ζωής είναι η τρέχουσα τιμή όλων των δαπανών εγκατάστασης και λειτουργίας των συνιστωσών του μικροδικτύου σε όλη τη διάρκεια ζωής του, μείον όλα τα τρέχοντα έσοδα που αποκομίζει κατά τη διάρκεια της ζωής του. Το HOMER υπολογίζει το NPC για κάθε συνιστώσα του μικροδικτύου και συνολικά για όλο το σύστημα. Η καθαρή παρούσα αξία, είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο κριτήριο που χρησιμοποιούν οι οικονομικοί αναλυτές, σύμφωνα με αυτό φέρνουμε σε παρούσες αξίες τις καθαρές χρηματικές ροές (έσοδα-έξοδα) και τα συγκρίνουμε με το αρχικό κόστος επένδυσης. Εάν τα οφέλη σε παρούσες αξίες είναι μεγαλύτερα από τα κόστη σε παρούσες αξίες, τότε το έργο που εξετάζουμε είναι οικονομικά αποδοτικό [16].

Levelized cost of energy ορίζεται ως το μέσο κόστος ανά kWh της χρήσιμης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το σύστημα. Είναι ένα μέτρο του μέσου καθαρού τρέχοντος κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για ένα σύστημα παραγωγής καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του. Μονάδα μέτρησης: \$/kWh.

Κόστος λειτουργίας (operating cost) είναι η ετήσια τιμή όλων των δαπανών και των εσόδων εκτός από το αρχικό κόστος κεφαλαίου. Μονάδα μέτρησης: \$/year.

Το αρχικό κόστος κεφαλαίου (initial capital cost) ενός στοιχείου είναι το συνολικό κόστος εγκατάστασης του στοιχείου στην αρχή του έργου.

Το κλάσμα ανανεώσιμων πηγών (renewable fraction) είναι το κλάσμα της ενέργειας που αποδίδεται στο φορτίο που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το HOMER υπολογίζει το συγκεκριμένο κλάσμα χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$F_{ren} = 1 - \frac{E_{nonren} + H_{nonren}}{E_{served} + H_{served}}$$

Όπου

E_{nonren} = παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μη ανανεώσιμες πηγές

H_{nonren} = παραγωγή θερμικής ενέργειας από μη ανανεώσιμες πηγές

E_{served} = συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που εξυπηρετείται

H_{served} = συνολικό θερμικό φορτίο που εξυπηρετείται

Η τιμή διάσωσης (salvage value) είναι η τιμή που έχει παραμείνει σε μια συνιστώσα του συστήματος ισχύος μετά το τέλος της διάρκειας ζωής του έργου. Το HOMER υποθέτει γραμμική απόσβεση των συνιστωσών, δηλαδή η αξία διάσωσης μιας συνιστώσας είναι ευθέως ανάλογη με την εναπομένουσα ζωή του. Υποθέτει επίσης ότι η συγκεκριμένη τιμή εξαρτάται από το κόστος αντικατάστασης και όχι από το αρχικό κόστος κεφαλαίου και περιλαμβάνει το προβλεπόμενο κόστος συντήρησης από το τελευταίο γεγονός έως το τέλος του έργου. Για να γίνει καλύτερα αντιληπτό παρατίθεται η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συγκεκριμένης τιμής:

$$S = C_{rep} * \frac{R_{rem}}{R_{comp}}$$

Όπου

R_{rem} = η εναπομένουσα διάρκεια ζωής της συνιστώσας

C_{rep} = το κόστος αντικατάστασης

R_{comp} = η διάρκεια ζωής της συνιστώσας

Περίοδος επανείσπραξης (payback period) είναι ο αριθμός των ετών που απαιτούνται για την επανείσπραξη της αρχικής δαπάνης της επένδυσης. Με άλλα λόγια, είναι το πόσο

γρήγορα θα πάρει ο επενδυτής πίσω τα κεφάλαια που έχει δεσμεύσει για την παρούσα επένδυση [16].

IRR, internal rate of return, δηλαδή, εσωτερικός συντελεστής απόδοσης είναι εκείνο το επιτόκιο που μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία. Μια ερμηνεία του συγκεκριμένου δείκτη είναι ότι αποτελεί το μεγαλύτερο δυνατό επιτόκιο με το οποίο θα μπορούσε ο επενδυτής να δανειστεί όλα τα κεφάλαια που αφιερώνονται στην επένδυση και να μην έχει ζημία. Με την υπόθεση φυσικά, ότι η εξυπηρέτηση του δανείου θα γίνεται από τις καθαρές χρηματικές ροές της επένδυσης. Σημαίνει ότι ακόμη και αν δανειστεί με επιτόκιο ίσο με τον IRR, η επένδυση μπορεί να καλύψει τα δάνεια, όμως δεν θα έχει επιπλέον κέρδη.

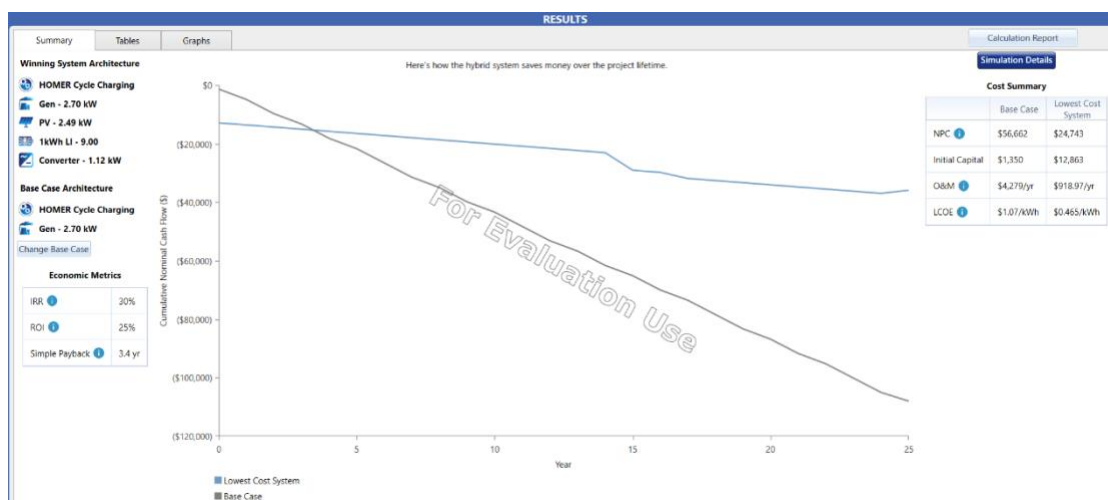
Η απόδοση της επένδυσης, return of investment, (ROI), είναι η ετήσια εξοικονόμηση κόστους σε σχέση με την αρχική επένδυση.

6.3 Εκτεταμένα αποτελέσματα προσομοίωσης

6.3.1 Βέλτιστη αρχιτεκτονική

Το HOMER λαμβάνει υπόψιν τις παραμέτρους που έχουμε εισάγει, σε συνδυασμό με τις συνιστώσες που έχουμε επιλέξει και θεωρεί μία βασική αρχιτεκτονική, δηλαδή την αρχιτεκτονική με το χαμηλότερο αρχικό κόστος κεφαλαίου, η οποία όπως βλέπουμε στην Εικόνα 43, περιλαμβάνει μόνο την συμβατική γεννήτρια πετρελαίου και συγκρίνει κάθε περίπτωση μικροδικτύου με αυτή τη βασική αρχιτεκτονική. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε το έργο μας έχει ένα προσδόκιμο ζωής γύρω στα 25 χρόνια και για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα γίνεται η μελέτη. Πάνω από τη βασική αρχιτεκτονική, υπάρχει η αρχιτεκτονική του πιο αποδοτικού συστήματος με βάση το NPC, στην οποία το μικροδίκτυο θα αποτελείται από μία συμβατική γεννήτρια πετρελαίου 2.70kW, που λειτουργεί κυρίως βοηθητικά σε περιόδους με μεγάλη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, Φ/Β πάνελ 2.49 kW, μπαταρίες ιόντων λιθίου (9 strings) και φυσικά έναν converter 1.12 kW. Τέλος, υπό την Cycle Charging στρατηγική που ακολουθεί το συγκεκριμένο λογισμικό, όποτε μια γεννήτρια απαιτείται, λειτουργεί σε πλήρη χωρητικότητα και παρέχει την επιπλέον ενέργεια στις μπαταρίες.

Από τη γραφική παράσταση στο κέντρο στην Εικόνα 43, μπορούμε να δούμε πώς το υβριδικό σύστημα εξοικονομεί χρήματα κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει το σύστημα που περιλαμβάνει και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενώ η γκρι γραμμή αντιπροσωπεύει τη βασική αρχιτεκτονική με τη συμβατική γεννήτρια. Το simple payback, που είναι και μία εκ των παραμέτρων σύγκρισης, συμβαίνει όταν οι δυο γραμμές διασταυρώνονται μεταξύ τους. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, το υβριδικό σύστημα έχει μια πιο σταθερή πορεία, με κάποιες μικρές πτώσεις, ενώ η βασική αρχιτεκτονική έχει εμφανώς πιο καθοδική πτώση, κάτι που σημαίνει ότι στο εν λόγω σύστημα δεν θα υπάρχει η εξοικονόμηση χρημάτων με το πέρασμα των χρόνων που θα υπάρξει για το υβριδικό.



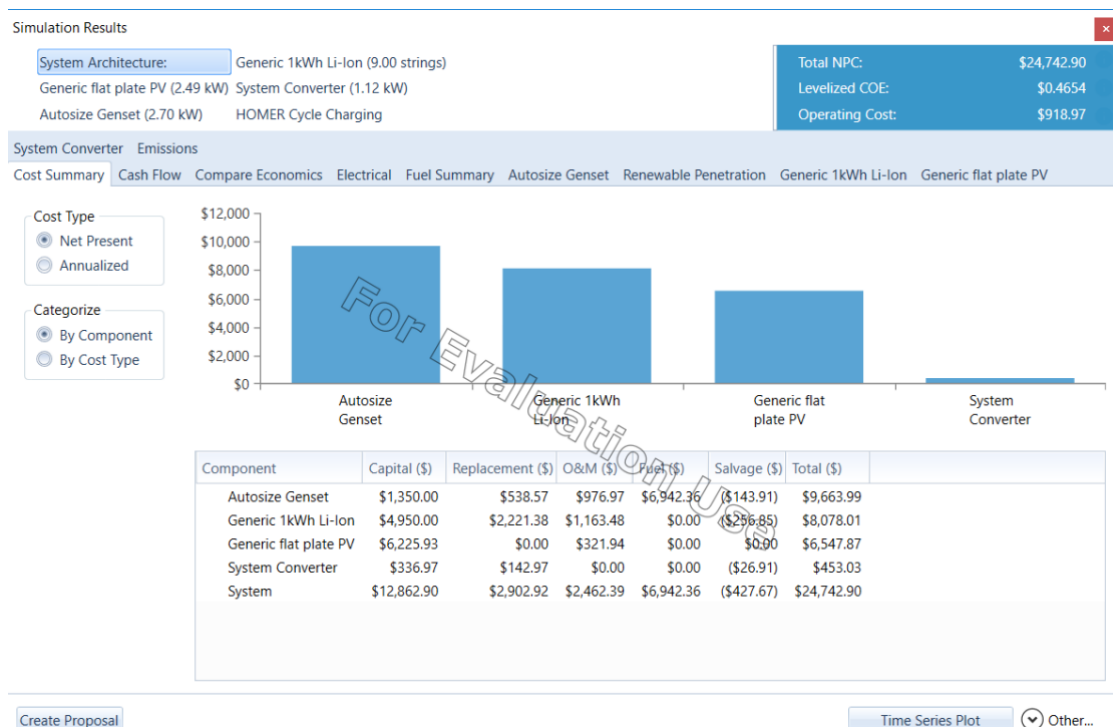
Εικόνα 43: Περίληψη αποτελεσμάτων και σύγκριση της βασικής αρχιτεκτονικής με το βέλτιστο υβριδικό σύστημα [HOMER]

Έπειτα, παρατηρούμε από την Εικόνα 43 τον πίνακα Economic Metrics, ο οποίος δείχνει οικονομικές μετρήσεις που αντιπροσωπεύουν την αξία της διαφοράς μεταξύ των δυο συστημάτων και περιέχει τους τρεις όρους: IRR που είναι 30%, ROI που είναι 25% και Simple payback που είναι 3.4 χρόνια, αυτό σημαίνει ότι σε 3.4 χρόνια το σύστημα θα έχει αποσβέσει το αρχικό κεφάλαιο που δαπανήθηκε για να γίνει η εγκατάσταση.

Τέλος, έχουμε τον πίνακα Cost Summary, ο οποίος περιέχει 4 όρους, NPC, Initial Capital, O&M, LCOE και συγκρίνει με βάση αυτούς τους όρους το βασικό σύστημα και το σύστημα

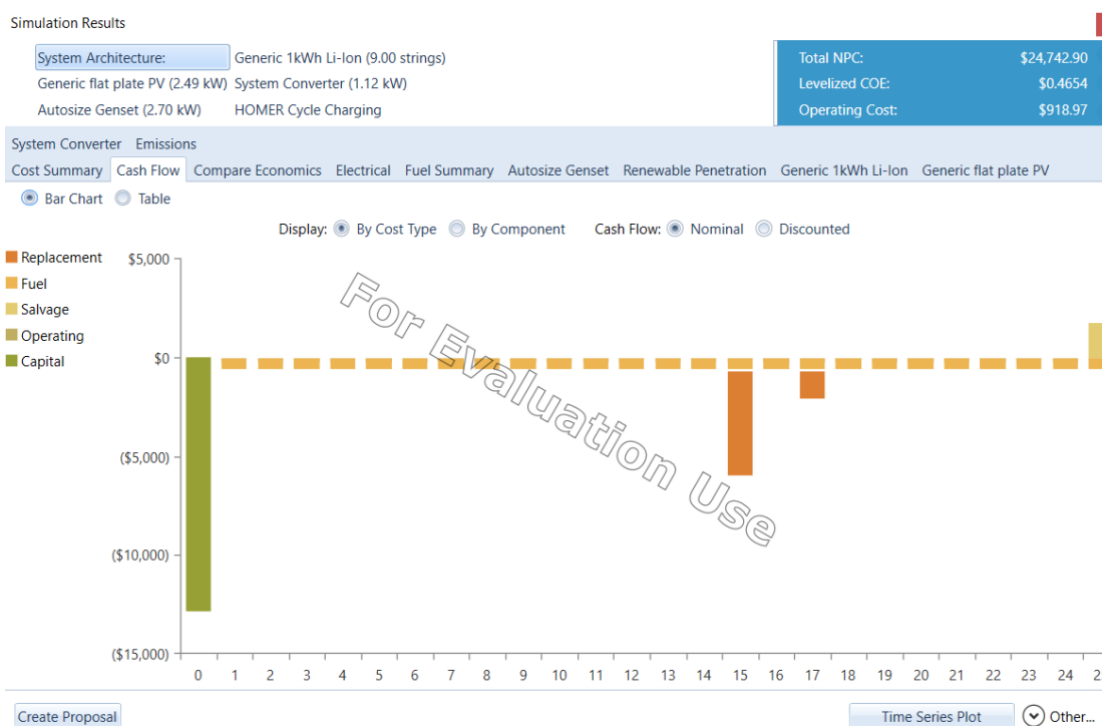
με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το NPC για τη βασική περίπτωση είναι 48,005€, ενώ για το βέλτιστο σύστημα είναι 20,963.70€, παρατηρούμε, λοιπόν, ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά στα δυο κόστη. Έπειτα, το αρχικό κόστος κεφαλαίου για το βασικό σύστημα είναι 1,143.88€, αρκετά λιγότερο από το αρχικό κόστος κεφαλαίου της βέλτιστης αρχιτεκτονικής που είναι 10,898.66€. Τέλος, μεγάλη διαφορά παρατηρείται και στο κόστος συντήρησης και λειτουργίας του κάθε συστήματος αφού για την βασική αρχιτεκτονική το συγκεκριμένο κόστος είναι 3,625.65€ το χρόνο, ενώ για την βέλτιστη αρχιτεκτονική είναι 778.65€ το χρόνο.

Στην Εικόνα 44, βλέπουμε περιληπτικά διάφορες τιμές που έχουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή αρχιτεκτονικής για το μικροδίκτυο. Παρατηρούμε πως υπάρχουν συγκεντρωμένα για κάθε συνιστώσα το κόστος κεφαλαίου, το κόστος αντικατάστασης σε περίπτωση βλάβης, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, το salvage και τέλος υπάρχει το συνολικό κόστος. Υπάρχει, επίσης, γραφική παράσταση που δείχνει το κόστος για κάθε συνιστώσα του μικροδικτύου. Τέλος, παρατηρούμε πως υπάρχουν το NPC, το LCOE και το operating cost.



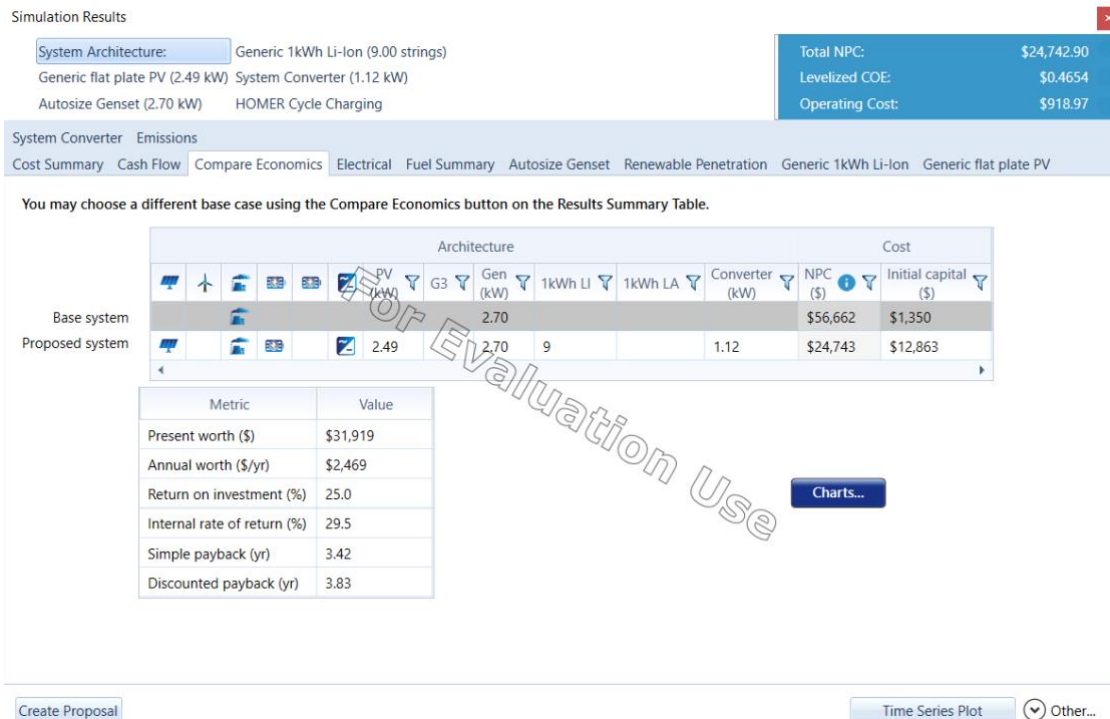
Εικόνα 44: Περίληψη κόστους για το υβριδικό σύστημα [HOMER]

Κάθε γραμμή στο γράφημα στην Εικόνα 45 αντιπροσωπεύει είτε μια συνολική εισροή είτε μια συνολική εκροή χρημάτων για ένα έτος. Η πρώτη γραμμή, για το έτος μηδέν, έτος δηλαδή που γίνεται η εγκατάσταση, δείχνει το κόστος κεφαλαίου του συστήματος, το οποίο εμφανίζεται επίσης και στα αποτελέσματα προσομοίωσης παραπάνω. Μια αρνητική τιμή αντιπροσωπεύει μια εκροή ή δαπάνη για καύσιμα, αντικατάσταση εξοπλισμού ή και έξοδα για λειτουργία και συντήρηση (O&M). Μια θετική τιμή αντιπροσωπεύει μια εισροή χρημάτων, η οποία μπορεί να είναι από την salvage value του εξοπλισμού στο τέλος της διάρκειας ζωής του έργου.



Εικόνα 45: Cash Flow [HOMER]

Στην Εικόνα 46, παρατηρούμε ότι γίνεται μια σύγκριση των οικονομικών δεδομένων του υβριδικού συστήματος και της βασικής αρχιτεκτονικής, που περιλαμβάνει μόνο τη γεννήτρια. Αρχικά, παρατηρούμε πως η παρούσα αξία, που είναι η διαφορά ανάμεσα στα NPC των δυο αρχιτεκτονικών που εξετάζουμε, η οποία είναι 27,049.28€. Όταν η συγκεκριμένη τιμή είναι θετική, όπως και σε αυτή τη περίπτωση, το σύστημα εξοικονομεί χρήματα στην διάρκεια ζωής του έργου σε σχέση με την βασική αρχιτεκτονική.



Εικόνα 46: Οικονομική σύγκριση του υβριδικού συστήματος με την βασική αρχιτεκτονική [HOMER]

Τέλος, στους κάτωθι πίνακες, Πίνακας 4, Πίνακας 5, Πίνακας 6, Πίνακας 7, Πίνακας 8 παρατίθενται ορισμένα πολύ σημαντικά δεδομένα για το οικονομικότερο υβριδικό σύστημα όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την γεννήτρια και από το Φ/Β πάνελ, σε kWh/yr αλλά και σε ποσοστό επί %, την συνολική κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές των επιβλαβών για την υγεία και το περιβάλλον ρύπων. Παρατηρούμε πως το μεγαλύτερο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από το Φ/Β πάνελ 66.6%, γεγονός που οδηγεί σε συνολική κατανάλωση καυσίμου αρκετά μικρή, 537 λίτρα συνολικά. Επίσης, οι εκπομπές ρύπων κυμαίνονται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα, επιθυμητό αποτέλεσμα που οφείλεται στη μεγαλύτερη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ενώ το κλάσμα ανανεώσιμων πηγών είναι 59.2%.

Πίνακας 4: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κάθε συνιστώσα

Παραγωγή	kWh/yr	Ποσοστό επί %
Φ/Β πάνελ	3,350	66.6
Γεννήτρια	1,679	33.4
Σύνολο	5,029	100

Πίνακας 5: Συνολική κατανάλωση καυσίμου (diesel)

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Συνολική κατανάλωση	537	lt
Μέσο καύσιμο τη μέρα	1.47	Lt/day
Μέσο καύσιμο την ώρα	0.0613	Lt/hour

Πίνακας 6: Εκπομπές

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα	1,406	Kg/yr
Μονοξείδιο του άνθρακα	8.86	Kg/yr
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	0.387	Kg/yr
Αιωρούμενα σωματίδια	0.0537	Kg/yr
Διοξείδιο του θείου	3.44	Kg/yr
Οξειδία του αζώτου	8.32	Kg/yr

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά του Φ/Β πάνελ

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Ονομαστική χωρητικότητα	2.49	kW
Μέση είσοδος	0.382	kW
Μέση έξοδος	9.18	kW/day
Συνολική παραγωγή	3,350	kWh/yr

Πίνακας 8: Επιπλέον χαρακτηριστικά του Φ/Β πάνελ

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Ελάχιστη έξοδος	0	kW
Μέγιστη έξοδος	2.59	kW
Φ/Β διείσδυση	81.5	%
Ώρες λειτουργίας	4.383	Hrs/yr
Levelized cost	0.151	\$/kWh

6.3.2 2^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Η αμέσως επόμενη αποδοτικότερη αρχιτεκτονική περιλαμβάνει Φ/Β πάνελ, συμβατική γεννήτρια πετρελαίου, μπαταρίες μόλυβδου οξέος (13 strings) και converter (Πίνακας 9). Το συνολικό κόστος είναι 26,158.80€, περιλαμβάνει το αρχικό κεφάλαιο, το κόστος αντικατάστασης, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου και το salvage κόστος για κάθε συνιστώσα αλλά και για το δίκτυο συνολικά. Παρατηρούμε ότι χρειάζονται 13 strings μπαταριών μόλυβδου οξέος 1kWh, ενώ στην αντίστοιχη βέλτιστη αρχιτεκτονική με μπαταρίες ιόντων λιθίου χρειάστηκαν 9 strings. Τα Φ/Β πάνελ κατέχουν το 63.3% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενώ το υπόλοιπο 36.7% το έχει η γεννήτρια. Το κλάσμα ανανεώσιμων πηγών είναι 53.9%, ενώ οι εκπομπές βλαβερών αερίων παραμένουν σε φυσιολογικά επίπεδα (Πίνακας 10).

Πίνακας 9: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Γεννήτρια	2.70 kW	8,649.33€
Μπαταρία μόλυβδου οξέος 1kWh	13 strings	11,431.94€
Φ/Β πάνελ	2.43 kW	5,455.85€
Converter	1.80 kW	617.66€
Συνολικό σύστημα	-	26,158.80€

Πίνακας 10: Εκπομπές

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα	1,522	Kg/yr
Μονοξείδιο του άνθρακα	9.59	Kg/yr
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	0.419	Kg/yr
Αιωρούμενα σωματίδια	0.0582	Kg/yr
Διοξείδιο του θείου	3.73	Kg/yr
Οξείδια του αζώτου	9.01	Kg/yr

6.3.3 3^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε μια γεννήτρια, μπαταρίες ιόντων λιθίου και converter συστήματος, Πίνακας 11. Παρατηρούμε πως το κόστος που αφορά την γεννήτρια έχει αυξηθεί σημαντικά και οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει κάποια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και έτσι χρειαζόμαστε περισσότερο καύσιμο, δηλαδή πετρέλαιο, επομένως αυξάνονται και τα έξοδα που το αφορούν. Έπειτα, αυξάνεται και το κόστος συντήρησης και οι ώρες λειτουργίας της γεννήτριας. Επίσης, αυξάνονται και οι εκπομπές επιβλαβών αερίων, Πίνακας 12.

Πίνακας 11: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και το συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Γεννήτρια	2.70 kW	19,497.61€
Μπαταρία ιόντων λιθίου 1kWh	3 strings	7,483.52€
Converter	2.20 kW	757.89€
Συνολικό σύστημα	-	27,693.59€

Πίνακας 12: Εκπομπές

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα	3,675	Kg/yr
Μονοξείδιο του άνθρακα	23.2	Kg/yr
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	1.01	Kg/yr
Αιωρούμενα σωματίδια	0.140	Kg/yr
Διοξείδιο του θείου	9.00	Kg/yr
Οξείδια του αζώτου	21.8	Kg/yr

6.3.4 4^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε την ίδια αρχιτεκτονική με την παραπάνω με μόνη διαφορά τις μπαταρίες μόλυβδου οξέος. Μπορούμε να παρατηρήσουμε πως και σε αυτή τη περίπτωση το κόστος για την γεννήτρια είναι αρκετά υψηλό, υψηλότερο και από την προηγούμενη περίπτωση, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι η γεννήτρια είναι υπεύθυνη για την τροφοδοσία του φορτίου, Πίνακας 13. Επίσης, με αυτό τον τύπο μπαταρίας χρειαζόμαστε περισσότερα strings από ότι με την μπαταρία ιόντων λιθίου, δηλαδή 5 στον αριθμό από 3 που ήταν στην προηγούμενη περίπτωση. Ο Πίνακας 14 περιέχει τις εκπομπές βλαβερών αερίων, οι οποίες είναι και σε αυτή την περίπτωση αυξημένες. Τέλος, παρατηρούμε μια πτώση στην ισχύ του converter και επομένως πτώση και στο κόστος του.

Πίνακας 13: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Γεννήτρια	2.70 kW	27,040.75€
Μπαταρία μόλυβδου οξέος 1kWh	5 strings	7,649.13€
Converter	0.583 kW	200.74€
Συνολικό σύστημα	-	34,896.44€

Πίνακας 14: Εκπομπές

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα	4,461	Kg/yr
Μονοξείδιο του άνθρακα	28.1	Kg/yr
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	1.23	Kg/yr
Αιωρούμενα σωματίδια	0.170	Kg/yr
Διοξείδιο του θείου	10.9	Kg/yr
Οξείδια του αζώτου	26.4	Kg/yr

6.3.5 5^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Στην συγκεκριμένη περίπτωση τα δεδομένα διαφοροποιούνται αρκετά, αφού έχουμε Φ/Β πάνελ, ανεμογεννήτρια, γεννήτρια, μπαταρία ιόντων λιθίου και converter. Παρατηρούμε ότι εδώ τα επιμέρους κόστη για την γεννήτρια και τις μπαταρίες έχουν μειωθεί αισθητά, παρόλα αυτά η ανεμογεννήτρια είναι μια αρκετά ακριβή τεχνολογία και αυξάνει αρκετά το συνολικό κόστος του συγκεκριμένου σχεδιασμού, Πίνακας 15. Το χαμηλό κόστος που αφορά την γεννήτρια οφείλεται στο γεγονός ότι στην αρχιτεκτονική αυτή έχουμε μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ποσοστό που μπορεί να φτάσει και το 75.5%. Τα Φ/Β πάνελ παράγουν το 49% της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η γεννήτρια το 16.7% και η ανεμογεννήτρια το υπόλοιπο 34.3%. Οι εκπομπές των επιβλαβών ουσιών είναι σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, Πίνακας 16.

Πίνακας 15: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Γεννήτρια	2.70 kW	5,260.87€
Μπαταρία ιόντων λιθίου 1kWh	8 strings	5.931.97€
Ανεμογεννήτρια	3 kW (1.00)	19,488.13€
Φ/Β πάνελ	2.20 kW	4,931.34€
Converter	1.17 kW	403.59€
Συνολικό σύστημα	-	36,018.65€

Πίνακας 16: Εκπομπές

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα	852	Kg/yr
Μονοξείδιο του άνθρακα	5.37	Kg/yr
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	0.234	Kg/yr
Αιωρούμενα σωματίδια	0.0326	Kg/yr
Διοξείδιο του θείου	2.09	Kg/yr
Οξείδια του αζώτου	5.05	Kg/yr

6.3.6 6^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική στη δομή είναι ίδια με την προηγούμενη ενώ η μονή διαφορά τους είναι ότι εδώ έχουμε μπαταρία μόλυβδου οξέος (Πίνακας 17). Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα ποσά κυμαίνονται στα ίδια όρια με την 5^η αρχιτεκτονική. Επίσης, χρειαζόμαστε περισσότερα strings μπαταριών ιόντων λιθίου και για αυτό το συνολικό κόστος τους έχει αυξηθεί. Τα Φ/Β πάνελ παράγουν το 45.1% της ηλεκτρικής ενέργειας, η γεννήτρια το 18.2% και το υπόλοιπο 36.6% η ανεμογεννήτρια, ενώ το ποσοστό ανανεώσιμων πηγών είναι 75%. Ενώ τα επίπεδα CO₂ και άλλων επιβλαβών ουσιών κυμαίνονται περίπου στα ίδια επίπεδα με την προηγούμενη περίπτωση, Πίνακας 18.

Πίνακας 17: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Γεννήτρια	2.70 kW	7,061.97€
Μπαταρία μόλυβδου οξέος 1kWh	11 strings	7,921.95€
Ανεμογεννήτρια	3 kW (1.00)	19,519.54€
Φ/Β πάνελ	1.89 kW	4,250.31€
Converter	0.9 kW	310.52€
Συνολικό σύστημα	-	39,375.76€

Πίνακας 18: Εκπομπές

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα	1,096	Kg/yr
Μονοξείδιο του άνθρακα	6.91	Kg/yr
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	0.302	Kg/yr
Αιωρούμενα σωματίδια	0.0419	Kg/yr
Διοξείδιο του θείου	2.68	Kg/yr
Οξείδια του αζώτου	6.49	Kg/yr

6.3.7 7^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Στην 7^η βέλτιστη αρχιτεκτονική περιλαμβάνονται μία γεννήτρια, μπαταρίες ιόντων λιθίου (3 strings), μια ανεμογεννήτρια και ένας converter. Παρατηρούμε από ότι το συνολικό κόστος δεν έχει μεγάλη διαφορά από το συνολικό κόστος της προηγούμενης αρχιτεκτονικής. Το συνολικό κόστος που αφορά τη γεννήτρια έχει αυξηθεί διότι η ανεμογεννήτρια δεν είναι αρκετή για να καλύψει το φορτίο, επομένως χρειαζόμαστε περισσότερο καύσιμο. Τέλος, το συνολικό κόστος που αφορά την γεννήτρια έχει μία αύξηση της τάξεως των 5,26€, διαφορά που μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, Πίνακας 19. Η γεννήτρια παράγει το 60.9% της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται ενώ η ανεμογεννήτρια το υπόλοιπο 39.1%. Το ποσοστό ανανεώσιμων πηγών είναι 21.9% ενώ οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι αρκετά αυξημένες, Πίνακας 20 .

Πίνακας 19: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Γεννήτρια	2.70 kW	13,429.35€
Μπαταρία ιόντων λιθίου 1kWh	3 strings	5,775.66€
Ανεμογεννήτρια	3 kW (1.00)	19,524.80€
Converter	2.06 kW	709.92€
Συνολικό σύστημα	-	39,438.64€

Πίνακας 20: Εκπομπές

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα	2,486	Kg/yr
Μονοξείδιο του άνθρακα	15.7	Kg/yr
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	0.684	Kg/yr
Αιωρούμενα σωματίδια	0.0950	Kg/yr
Διοξείδιο του θείου	6.09	Kg/yr
Οξείδια του αζώτου	14.7	Kg/yr

6.3.8 8^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Σε αυτήν την αρχιτεκτονική το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 45,440.23€, ενώ ο Πίνακας 21 παρουσιάζει τις συνιστώσες που αποτελούν την συγκεκριμένη αρχιτεκτονική καθώς και το μέγεθος καθεμίας από αυτές. Τα ποσοστά παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα ίδια με την προηγούμενη περίπτωση ενώ το ποσοστό ανανεώσιμων πηγών είναι 21.7%. Ο Πίνακας 22 περιλαμβάνει τις εκπομπές των ρυπογόνων αερίων για την συγκεκριμένη αρχιτεκτονική.

Πίνακας 21: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Γεννήτρια	2.70 kW	15,748.46€
Μπαταρία μόλυβδου οξέος 1kWh	7.00 strings	9,704.99€
Ανεμογεννήτρια	3 kW (1.00)	19,524.80€
Converter	1.33 kW	458.97€
Συνολικό σύστημα	-	45,440.23€

Πίνακας 22: Εκπομπές

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα	2,745	Kg/yr
Μονοξείδιο του άνθρακα	17.3	Kg/yr
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	0.755	Kg/yr
Αιωρούμενα σωματίδια	0.105	Kg/yr
Διοξείδιο του θείου	6.72	Kg/yr
Οξείδια του αζώτου	16.3	Kg/yr

6.3.9 9^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική αποτελείται από μπαταρίες ιόντων λιθίου, 34 strings, Φ/Β πάνελ και converter, όπως μπορούμε να δούμε, Πίνακας 23, το συνολικό κόστος ανέρχεται στις 47,722.25€, ενώ μόνο για τις μπαταρίες χρειαζόμαστε 25,260.88€, διότι σε αυτή τη περίπτωση έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μόνο από Φ/Β πάνελ, επομένως τα 34 strings μπαταριών είναι απολύτως απαραίτητα. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι οι ρύποι και οι εκπομπές CO₂ στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική είναι μηδενικά, ενώ όλη η απαιτούμενη ενέργεια παράγεται από τα Φ/Β πάνελ.

Πίνακας 23: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Μπαταρία ιόντων λιθίου 1kWh	34.00 strings	25,260.88€
Φ/Β πάνελ	9.60 kW	21,587.56€
Converter	2.51 kW	865.70€
Συνολικό σύστημα	-	47,722.25€

6.3.10 10^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική είναι η βασική περίπτωση που έχουμε ορίσει για να γίνει η σύγκριση με την βέλτιστη αρχιτεκτονική. Αποτελείται από μία γεννήτρια που καλύπτει όλο το απαιτούμενο φορτίο. Το συνολικό κόστος ανέρχεται στις 48,450.81€ ενώ σε αυτή την

περίπτωση, όπως είναι αναμενόμενο, το κόστος καυσίμου είναι αρκετά υψηλό, δηλαδή 31,197.80€. Επίσης, οι εκπομπές CO₂ και άλλων επιβλαβών ουσιών είναι πολύ αυξημένες, όπως παρατηρούμε, Πίνακας 24.

Πίνακας 24: Εκπομπές

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα	7,386	Kg/yr
Μονοξείδιο του άνθρακα	46.6	Kg/yr
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	2.03	Kg/yr
Αιωρούμενα σωματίδια	0.282	Kg/yr
Διοξείδιο του θείου	18.1	Kg/yr
Οξείδια του αζώτου	43.7	Kg/yr

6.3.11 11^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική περιλαμβάνει γεννήτρια, Φ/Β πάνελ και converter. Βλέπουμε πως το συνολικό κόστος ανέρχεται στις 48,537.87€ (Πίνακας 25). Δεν υπάρχει μπαταρία και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η γεννήτρια να χρησιμοποιείται κατά κόρον, αφού τα Φ/Β πάνελ δεν μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις του δικτύου και η ενέργεια που παράγεται τις ώρες αιχμής, δηλαδή τις ώρες με την περισσότερη ηλιοφάνεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί κάπου ώστε να χρησιμοποιηθεί αργότερα. Για τους παραπάνω λόγους το ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει η γεννήτρια είναι 99.7% και τα Φ/Β πάνελ 0.338%. Οι εκπομπές επιβλαβών ουσιών και αερίων του θερμοκηπίου είναι αρκετά αυξημένες (Πίνακας 26).

Πίνακας 25: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Γεννήτρια	2.70 kW	48,496.22€
Φ/Β πάνελ	0.0160 kW	36.03€
Converter	0.0204 kW	7.05€
Συνολικό κόστος	-	48,537.87€

Πίνακας 26: Εκπομπές

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα	7,383	Kg/yr
Μονοξείδιο του άνθρακα	46.5	Kg/yr
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	2.03	Kg/yr
Αιωρούμενα σωματίδια	0.282	Kg/yr
Διοξείδιο του θείου	18.1	Kg/yr
Οξείδια του αζώτου	43.7	Kg/yr

6.3.12 12^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική περιλαμβάνει μπαταρία μολυβδου οξέος, Φ/Β πάνελ και converter (Πίνακας 27). Για την αρχιτεκτονική αυτή χρειαζόμαστε 50,887.57€ και παρατηρούμε πως δεν υπάρχει γεννήτρια, δηλαδή τα Φ/Β πάνελ κατέχουν το 100% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ, όπως παρατηρούμε, χρειάζονται 50 strings μπαταριών μολυβδου οξέος. Επίσης, όπως είναι αναμενόμενο δεν υπάρχει εκπομπή επιβλαβών αερίων στην ατμόσφαιρα.

Πίνακας 27: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Μπαταρία μόλυβδου οξέος 1kWh	50.00 strings	28,169.27€
Φ/Β πάνελ	9.64 kW	21,700.56€
Converter	2.98 kW	1,030.19€
Συνολικό σύστημα	-	50,887.57€

6.3.13 13^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική αυτή περιλαμβάνει μια γεννήτρια και μια ανεμογεννήτρια, Πίνακας 28. Σε αυτή την περίπτωση δεν χρειαζόμαστε converter, αφού και οι δυο συνιστώσες παράγουν AC ρεύμα. Επίσης, ούτε σε αυτή τη περίπτωση έχουμε μπαταρία επομένως το μεγαλύτερο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από την γεννήτρια, 73.4%, ενώ το υπόλοιπο 26.6% παράγεται από την ανεμογεννήτρια. Τέλος, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι ιδιαίτερα αυξημένες, και σε αυτήν την αρχιτεκτονική εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης της γεννήτριας πετρελαίου, Πίνακας 29.

Πίνακας 28: Μεγέθη του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Γεννήτρια	2.70 kW	44,156.30€
Ανεμογεννήτρια 3kW	1.00	19,529.46€
Συνολικό σύστημα	-	63,682.76€

Πίνακας 29: Εκπομπές

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα	6,699	Kg/yr
Μονοξείδιο του άνθρακα	42.2	Kg/yr
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	1.84	Kg/yr
Αιωρούμενα σωματίδια	0.256	Kg/yr
Διοξείδιο του θείου	16.4	Kg/yr
Οξείδια του αζώτου	39.7	Kg/yr

6.3.14 14^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική αυτή περιλαμβάνει μόνο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχουμε μια ανεμογεννήτρια, Φ/Β πάνελ, μπαταρίες ιόντων λιθίου και converter (Πίνακας 30). Παρατηρούμε πως το συνολικό κόστος έχει αυξηθεί αρκετά, ενώ χρειαζόμαστε 29 strings μπαταριών ιόντων λιθίου για να μπορέσει να λειτουργήσει η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική. Αξίζει να αναφερθεί ότι εδώ έχουμε μηδενικές εκπομπές ρύπων. Τα Φ/Β πάνελ παράγουν το 87.2% της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενώ το υπόλοιπο 12.8% η ανεμογεννήτρια.

Πίνακας 30: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Μπαταρία ιόντων λιθίου 1kWh	29.00 strings	21,543.50€
Ανεμογεννήτρια 3kW	1.00	19,529.46€
Φ/Β πάνελ	10.5 kW	23,608.24€
Converter	2.48 kW	856.40€
Συνολικό σύστημα	-	65,518.93€

6.3.15 15^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική του συγκεκριμένου μικροδικτύου περιλαμβάνει ανεμογεννήτρια, Φ/Β πάνελ, μπαταρία μόλυβδου οξέος και converter, Πίνακας 31. Η διαφορά με την παραπάνω

αρχιτεκτονική είναι ότι εδώ χρησιμοποιούνται μπαταρίες μολυβδου οξέος και όχι μπαταρίες ιόντων λιθίου. Τέλος, έχουμε και σε αυτή την αρχιτεκτονική μηδενικούς ρύπους, αφού η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται εξολοκλήρου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα Φ/Β πάνελ παράγουν το 87.2% της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενώ το υπόλοιπο 12.8% η ανεμογεννήτρια.

Πίνακας 31: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Μπαταρία μολυβδου οξέος 1kWh	43.00 strings	24,211.60€
Ανεμογεννήτρια 3kW	1.00	19,529.46€
Φ/Β πάνελ	10.5 kW	23,610.68€
Converter	2.83 kW	977.36€
Συνολικό σύστημα	-	68,328.37€

6.3.16 16^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, οι συνιστώσες του μικροδικτύου είναι μια γεννήτρια, δυο ανεμογεννήτριες, Φ/Β πάνελ και converter (Πίνακας 32). Στο συγκεκριμένο μικροδίκτυο δεν έχουμε κάποια μπαταρία, για αυτό και αυξάνεται ο αριθμός των ανεμογεννητριών. Το συνολικό κόστος της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής είναι 80,262.95€. Η γεννήτρια κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, 52.2%, ενώ η ανεμογεννήτρια 41.8% και το υπόλοιπο 5.96% παράγεται από τα Φ/Β πάνελ. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι επίσης αυξημένες εξαιτίας της συμβατικής γεννήτριας πετρελαίου.

Πίνακας 32: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Γεννήτρια	2.70 kW	40,109.20€
Ανεμογεννήτρια 3kW	2.00	39,059.42€
Φ/Β πάνελ	0.438 kW	983.95€
Converter	0.271 kW	93.44€
Συνολικό σύστημα	-	80,262.95€

Πίνακας 33: Εκπομπές

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Διοξείδιο του άνθρακα	6,070	Kg/yr
Μονοξείδιο του άνθρακα	38.3	Kg/yr
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	1.67	Kg/yr
Αιωρούμενα σωματίδια	0.232	Kg/yr
Διοξείδιο του θείου	14.9	Kg/yr
Οξείδια του αζώτου	35.9	Kg/yr

6.3.17 17^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Σε αυτή την αρχιτεκτονική, το μικροδίκτυο περιλαμβάνει ανεμογεννήτριες, μπαταρία ιόντων λιθίου και converter (Πίνακας 34). Παρατηρούμε πως το συνολικό κόστος για τις ανεμογεννήτριες είναι αρκετά υψηλό, δηλαδή 136,751.10€, αφού για να λειτουργήσει το σύστημα αυτό χρειαζόμαστε 7 ανεμογεννήτριες. Επίσης, χρειαζόμαστε 73 strings μπαταριών ιόντων λιθίου και συνολικό κόστος 54,261.71€. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι μηδενικές.

Πίνακας 34: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Μπαταρία ιόντων λιθίου 1kWh	73.00 strings	54,261.71€
Ανεμογεννήτρια 3kW	7.00	136,751.10€
Converter	5.05 kW	1,743.34€
Συνολικό σύστημα	-	192,756.39€

6.3.18 18^η βέλτιστη αρχιτεκτονική

Τέλος, σε αυτή την αρχιτεκτονική έχουμε 9 ανεμογεννήτριες, μπαταρία μόλυβδου οξέος(89.00 strings) και converter (Πίνακας 35). Παρατηρούμε πως το συνολικό κόστος του συστήματος που είναι αρκετά υψηλό, 228,088.59€. Και σε αυτήν την περίπτωση, οι εκπομπές επιβλαβών αερίων στην ατμόσφαιρα είναι μηδενικές.

Πίνακας 35: Μεγέθη των συνιστωσών του μικροδικτύου και συνολικό κόστος

Συνιστώσα	Μέγεθος	Συνολικό κόστος
Μπαταρία μόλυβδου οξέος 1kWh	89.00 strings	50,126.40€
Ανεμογεννήτρια 3kW	9.00	175,785.87€
Converter	6.31 kW	2,175.94€
Συνολικό σύστημα	-	228,088.59€

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι να καθορίσει αν είναι εφικτό ένα αυτόνομο σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που θα έχει την ικανότητα να καλύπτει τις απαιτούμενες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια, και να παρουσιάσει τη βέλτιστη αρχιτεκτονική του μικροδικτύου, χρησιμοποιώντας το λογισμικό HOMER. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του μικροδικτύου για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής, προσφέρουν τεράστια πλεονεκτήματα ως η κύρια παροχή για το σύστημα. Ωστόσο, ένα αυτόνομο σύστημα που εξαρτάται αποκλειστικά από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει αρκετές αδυναμίες, όπως το υψηλό αρχικό κόστος που οφείλεται στο ότι οι συγκεκριμένες τεχνολογίες είναι σχετικά ακριβές. Ο σωστός σχεδιασμός του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις σχετικές παραμέτρους, έχει πολύ μεγάλη σημασία για την αποδοτικότητά του. Όπως παρατηρήσαμε από την παραπάνω προσομοίωση, το αρχικό κόστος, δηλαδή αυτό που θα χρειαστεί για να ολοκληρωθεί η εγκατάσταση είναι αρκετά υψηλό, όμως σε μικρό χρονικό διάστημα, 3 – 4 χρόνια, θα μπορέσει αυτό το πόσο να αποσβεστεί. Επίσης, εκτός από το οικονομικό μέρος, όσον αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου βλέπουμε πως είναι αρκετά μειωμένες και πολλές φορές αμελητέες, όταν το μικροδίκτυο βασίζεται κατά κύριο λόγο σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό είναι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που θα μπορούσαμε να αποκομίσουμε.

Η συμβολή της παρούσας διπλωματικής έγκειται στη σύγκριση πολλών σεναρίων, τόσο με καθαρά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όσο και με συμβατικές γεννήτριες πετρελαίου, με βελτιστοποίηση HOMER. Αυτές οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για ζήτηση φορτίου σε οικιακό επίπεδο και εφαρμόστηκαν στο πρόβλημα βέλτιστου μεγέθους των μικροδικτύων.

Κεφάλαιο 8 Βιβλιογραφία

- [1] A. Anvari-Moghaddam, A. Abdi, B. Mohammadi-Ivatloo and N. Hatziargyriou, *Microgrids: Advances in Operation, Control, and Protection*, Springer International Publishing, 2021.
- [2] S. Padmanaban, K. Nithiyathan, S. Prabhakar Kathrikeyan and J. B. Holm-Nielsen, *Microgrids*, CRC Press, 2020.
- [3] M. Stadler and A. Nasle, "Planning and Implementation of bankable microgrids," *The Electricity Journal*, vol. 32, no. 5, pp. 24-29, 2019.
- [4] L. Barney and L. Capehart, "Distributed Energy Resources," [Online]. Available: <https://www.wbdg.org/resources/distributed-energy-resources-der>. [Accessed 14 Ιούλιος 2021].
- [5] M. S. Mahmoud, *Microgrid: Advanced control methods and renewable energy integration*, Butterworth-Heinemann, 2016.
- [6] N. W. A. Lidula and A. D. Rajapakse, "Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 186-202, 2011.
- [7] M. F. Zia, E. Elbouchikhi and M. Benbouzid, "Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects," *Applied Energy*, vol. 222, pp. 1033-1055, 2018.
- [8] Π. Α., *Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος*, P.H.C., 2017.
- [9] «Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.rae.gr/>. [Πρόσβαση 2 Ιούλιος 2021].
- [10] F. M., "Review of Energy Storage System Technologies in Microgrid Applications: Issues and Challenges," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35143-35164, 2018.
- [11] L. I. Minchala-Avila, L. E. Garza-Castanon, A. Vargas-Martinez and Y. Zhang, "A Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of Microgrids," *Procedia Computer Science*, vol. 52, pp. 780-787, 2015.

- [12] Y. E. Garcia Vera, R. Dufo-Lopez and J. L. Bernal-Agustin, "Energy Management in Microgrids with Renewable Energy Sources: A Literature Review," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 18, p. 3854, 2019.
- [13] W. Su and J. Wang, "Energy Management Systems in Microgrid Operations," *The Electricity Journal*, vol. 25, no. 8, pp. 45-60, 2012.
- [14] P. H. Shaikh, A. Shaikh, Z. A. Memon, A. A. Lashari and Z. H. Leghari, "Microgrids: A review on optimal hybrid technologies, configurations, and applications," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 9, pp. 12564-12597, 2021.
- [15] «Homer Software,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>.
- [16] "Homer Energy," [Online]. Available: <https://www.homerenergy.com/>. [Accessed 27 Ιούλιος 2021].

Παράρτημα

Υλικό που χρησιμοποιήθηκε:

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε λογισμικό Windows 10 64 bit.

Επεξεργαστής: Intel(R) Core(TM) i3-4000M CPU 2.40Hz 2.39Hz

Εγκατεστημένη RAM: 6,00GB

Τύπος συστήματος: Λειτουργικό σύστημα 64 bit, επεξεργαστής τεχνολογίας x64