



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική εργασία

**Συστήματα Αποθήκευσης σε Αυτόνομα Κτίρια
Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης**

**Energy Storage Systems in Autonomous Zero
Energy Buildings**

Λυγεράκης Φίλιππος

A.M.: 2015050029

Επιτροπή:

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Κολοκοτσά Διονυσία
Καθηγητής Τσούτσος Θεοχάρης
Καθηγητής Λαζαρίδης Μιχάλης

Χανιά Ιούλιος 2020

Περίληψη

Τα κτίρια Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (MEK) είναι πλέον ευρέως γνωστά και χρησιμοποιούνται παγκοσμίως σε μεγάλο βαθμό με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων. Ωστόσο πολλές περιοχές σε τοπικό αλλά και αρκετές χώρες σε εθνικό επίπεδο πασχίζουν από την έλλειψη δικτύου παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, δημιουργώντας την ανάγκη εφαρμογής κατάλληλων μέτρων στα κτίρια MEK για την προσθήκη του χαρακτηριστικού της αυτονομίας. Όταν ένα κτίριο MEK είναι αυτόνομο παράγει και αποθηκεύει την ενέργεια που απαιτεί για την εξυπηρέτηση των αναγκών του, χωρίς την ανάγκη του δικτύου ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι στην παρούσα μελέτη εξετάζονται τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία μόλυβδου-οξέος, μπαταρία λιθίου, μπαταρία ροής βαναδίου, με σφονδύλους, συμπιεσμένου αέρα, βαρυτικής επιτάχυνσης, αντλιοσταμείωσης και υδρογόνου, σε κτίριο MEK αστικού ιστού, με αυτονομία τριών ημερών και με στόχο την διεξαγωγή συμπερασμάτων για την καταλληλότητα ή όχι των υπό εξέταση αποθηκευτικών συστημάτων.

Abstract

Zero Energy Buildings (ZEB) are widely known nowadays and are being used in a large scale worldwide in order to conserve both energy and resources. Although, many regions in local and many countries in national level are struggling from the lack of electrical grid, creating the need of adding extra features on ZEBs in order to give them the characteristic of autonomy. When a ZEB is autonomous, it produces and stores the energy it demands to cover its needs, without relying on the grid. So, in this study the energy storage systems that are being examined are lead-acid batteries, lithium batteries, vanadium flow batteries, compressed air system, gravitricity system, hydro pumped system and hydrogen fuel cell system, in a residential ZEB with three days autonomy, in order to produce conclusions about the appropriateness or not of the energy storage systems that are up for consideration.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	3
Πίνακας εικόνων	4
1. Εισαγωγή	8
2.Μεθοδολογία.....	10
3. Θεωρητικό Υπόβαθρο	11
3.1 Κτίρια Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (MEK)	11
3.2 Αυτονομία και Αυτόνομα Κτίρια	11
3.3 Μπαταρίες και Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας.....	13
3.4 Αναφορές σε παρόμοιες μελέτες	15
3.5 Χημικά Συστήματα Αποθήκευσης	17
3.5.1 Συστήματα Αποθήκευσης με Μπαταρίες Μόλυβδου-Οξέος.....	17
3.5.2 Συστήματα Αποθήκευσης με Μπαταρίες Λιθίου.....	19
3.5.3 Συστήματα Αποθήκευσης με Μπαταρίες Ροής Βαναδίου.....	20
3.6.Μηχανικά Συστήματα Αποθήκευσης	21
3.6.1 Σφόνδυλοι	21
3.6.2 Σύστημα Αποθήκευσης Συμπιεσμένου Αέρα.....	22
3.6.3 Συστήματα Αποθήκευσης Αντλιοσταμείωσης.....	23
3.6.4 Συστήματα Αποθήκευσης Βαρυτικής Επιτάχυνσης	24
3.7 Ηλεκτρικά Συστήματα Αποθήκευσης.....	26
3.7.1 Συστήματα Αποθήκευσης Υδρογόνου	26
3.8 Βιβλιογραφική Σύγκριση.....	27
4.Μελέτη περίπτωσης	31
4.1 Leaf House	31
4.2 Λογισμικό Homer Pro.....	37
4.3 Προσομοιώσεις	44
4.3.1 Προσομοίωση μπαταρίας μόλυβδου-οξέος.....	50
4.3.2 Προσομοίωση μπαταρίας λιθίου.....	56
4.3.3 Προσομοίωση μπαταρίας ροής βαναδίου	62
4.3.4 Προσομοίωση σφονδύλου.....	68
4.3.5 Προσομοίωση συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.....	74
4.3.6 Προσομοίωση συστήματος αποθήκευσης βαρυτικής επιτάχυνσης	80
4.3.7 Προσομοίωση συστήματος αποθήκευσης άντλησης νερού	86
4.3.8 Προσομοίωση συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου	92

5.Ανάλυση αποτελεσμάτων	98
6.Συμπεράσματα	101
Βιβλιογραφία	103

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής ενέργειας σε ένα αυτόνομο κτίριο MEK	12
Εικόνα 2: Παράδειγμα μπαταριών με σύνδεση σε σειρά	13
Εικόνα 3: Παράδειγμα μπαταριών με παράλληλη σύνδεση	14
Εικόνα 4 Μπαταρία μόλυβδου-οξέος	18
Εικόνα 5: Μπαταρία λιθίου	19
Εικόνα 6:Μπαταρία ροής βαναδίου	20
Εικόνα 7:Σύστημα σφονδύλου	21
Εικόνα 8::Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα	23
Εικόνα 9:Σύστημα αντλιοταμείωσης	24
Εικόνα 10:Σύστημα αποθήκευσης με βαρυτική επιτάχυνσης	25
Εικόνα 11:Σύστημα παραγωγής ενέργειας με καύσιμο υδρογόνο	26
Εικόνα 12: Βόρεια όψη του Leaf House	32
Εικόνα 13: Σχεδιάγραμμα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο του Leaf House	33
Εικόνα 14: Σύστημα θέρμανσης, ψύξης και αερισμού του Leaf House	35
Εικόνα 15: Διάγραμμα ηλεκτρικών καταναλώσεων που απαιτεί το Leaf House για το έτος 2019 από δεδομένα των μετρητών του κτιρίου	36
Εικόνα 16: Απεικόνιση της διάταξης λειτουργίας του μοντέλου κινητικής μπαταρίας	42
Εικόνα 17: Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας 1kW	44
Εικόνα 18: Προφίλ μέσων τιμών μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας από δεδομένα της NASA για 22 χρόνια	46
Εικόνα 19: Προφίλ μέσων τιμών μηνιαίας ταχύτητας ανέμου από δεδομένα της NASA για 22 χρόνια	46
Εικόνα 20: Διάταξη προσομοίωσης με μπαταρία μόλυβδου-οξέος στο Homer	52
Εικόνα 21:Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με μπαταρία μόλυβδου-οξέος	52
Εικόνα 22: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία μόλυβδου-οξέος όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2	53
Εικόνα 23:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα με μπαταρία μόλυβδου-οξέος	53
Εικόνα 24: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία μόλυβδου-οξέος όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8	54
Εικόνα 25 Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα με μπαταρία μόλυβδου-οξέος	54
Εικόνα 26: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία μόλυβδου-οξέος όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12	55
Εικόνα 27:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα με μπαταρία μόλυβδου-οξέος	55
Εικόνα 28: Διάταξη προσομοίωσης με μπαταρία λιθίου στο Homer	58
Εικόνα 29: Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με μπαταρία λιθίου	58

Εικόνα 30: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία λιθίου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2	59
Εικόνα 31:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα με μπαταρία λιθίου	59
Εικόνα 32:Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία λιθίου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8	60
Εικόνα 33:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα με μπαταρία λιθίου	60
Εικόνα 34: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία λιθίου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12	61
Εικόνα 35:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα με μπαταρία λιθίου	61
Εικόνα 36:Διάταξη προσομοίωσης με μπαταρία ροής βαναδίου στο Homer	64
Εικόνα 37:Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με μπαταρία ροής βαναδίου	64
Εικόνα 38: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία λιθίου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2	65
Εικόνα 39:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα με μπαταρία λιθίου	65
Εικόνα 40: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία λιθίου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8	66
Εικόνα 41:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 2/8 για το σύστημα με μπαταρία λιθίου	66
Εικόνα 42: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με λιθίου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12	67
Εικόνα 43:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα με μπαταρία λιθίου	67
Εικόνα 44:Διάταξη προσομοίωσης με σφόνδυλο στο Homer	70
Εικόνα 45:Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με σφόνδυλο	70
Εικόνα 46: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με σφόνδυλο όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2	71
Εικόνα 47:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα με σφόνδυλο	71
Εικόνα 48:Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με σφόνδυλο όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8	72
Εικόνα 49 :Διάγραμμα ισχύοςγια παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα με σφόνδυλο	72
Εικόνα 50:Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με σφόνδυλο όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12	73
Εικόνα 51:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα με σφόνδυλο	73
Εικόνα 52 Διάταξη προσομοίωσης με σύστημα συμπιεσμένου αέρα στο Homer	76
Εικόνα 53:Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με σύστημα συμπιεσμένου αέρα	76
Εικόνα 54: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος συμπιεσμένου αέρα όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2	77

Εικόνα 55:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα συμπιεσμένου αέρα.....	77
Εικόνα 56: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος συμπιεσμένου αέρα όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8	78
Εικόνα 57:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα συμπιεσμένου αέρα.....	78
Εικόνα 58: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος συμπιεσμένου αέρα όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12	79
Εικόνα 59:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα συμπιεσμένου αέρα.....	79
Εικόνα 60:Διάταξη προσομοίωσης με σύστημα βαρυτικής επιτάχυνσης στο Homer	82
Εικόνα 61:Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με σύστημα βαρυτικής επιτάχυνσης.....	82
Εικόνα 62: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος βαρυτικής επιτάχυνσης όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2	83
Εικόνα 63:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα βαρυτικής επιτάχυνσης.....	83
Εικόνα 64: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος βαρυτικής επιτάχυνσης όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8	
Εικόνα 65:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα βαρυτικής επιτάχυνσης.....	84
Εικόνα 66: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος βαρυτικής επιτάχυνσης όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12	85
Εικόνα 67:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα βαρυτικής επιτάχυνσης.....	85
Εικόνα 68:Διάταξη προσομοίωσης με σύστημα αντλιοταμίευσης στο Homer	88
Εικόνα 69: Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με σύστημα αντλιοταμίευσης.....	88
Εικόνα 70: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος αντλιοταμίευσης όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2	89
Εικόνα 71:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα αντλιοταμίευσης.....	89
Εικόνα 72: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος αντλιοταμίευσης όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8	90
Εικόνα 73 :Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα αντλιοταμίευσης.....	90
Εικόνα 74: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος αντλιοταμίευσης όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12	91
Εικόνα 75:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα αντλιοταμίευσης.....	91
Εικόνα 76:Διάταξη προσομοίωσης με σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου στο Homer	94
Εικόνα 77:Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου	94
Εικόνα 78: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος υδρογόνου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2.....	95
Εικόνα 79:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα υδρογόνου	95

Εικόνα 80: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος υδρογόνου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8	96
Εικόνα 81: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα υδρογόνου	96
Εικόνα 82: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος υδρογόνου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12	97
Εικόνα 83: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα υδρογόνου	97

1. Εισαγωγή

Λαμβάνοντας υπόψιν την ολοένα αυξανόμενη αντικατάσταση των συμβατικών πηγών ενέργειας από τις ανανεώσιμες, καθώς και την εφαρμογή αυτών σε όσο το δυνατόν περισσότερες κατασκευές, είναι πλέον σύνηθες να γίνεται αναφορά στα κτίρια μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (MEK) καθώς και στην συνεχή βελτίωση αυτών για την καλύτερη απόδοσή τους. Μάλιστα το ποσοστό της κατανάλωσης ενέργειας από τον κτιριακό τομέα είναι περίπου 40% σύμφωνα με στοιχεία της ΕΕ, που δείχνει την αναγκαιότητα λήψης μέτρων και τεχνολογιών.¹ Ο τομέας των κτιρίων MEK έχει αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια και έχουν γίνει σημαντικές μελέτες που έχουν οδηγήσει στην ολοένα και μεγαλύτερη αναβάθμιση των υφιστάμενων κτιρίων σε κτίρια MEK καθώς και την δημιουργία καινούριων αυστηρά μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης καθώς και μηδενικού άνθρακα. Στόχος των κτιρίων αυτών είναι να μην επιβαρύνουν το περιβάλλον καθώς και να μην ζημιώνουν τον χρήστη οικονομικά από την διαδικασία αυτή.

Ωστόσο ολοένα αυξανόμενα είναι και τα κτίρια MEK τα οποία προσπαθούν να αποσυνδεθούν από το κεντρικό δίκτυο ρεύματος και να αποκτήσουν ενεργειακή αυτονομία. Η διαδικασία αυτή είναι δύσκολη διότι δημιουργεί την ανάγκη πρόβλεψης των αναγκαίων ενεργειακών φορτίων για τον σχεδιασμό των κατάλληλων προδιαγραφών, καθώς επίσης αυξάνει και το κόστος σε μεγάλο βαθμό. Επίσης είναι σημαντικός και ο σχεδιασμός του αποθηκευτικού εξοπλισμού, ο οποίος θα πρέπει να καλύπτει τις ανάγκες του κτιρίου σε μια περίοδο που οι ΑΠΕ θα υπολειτουργούν. Αυτή η διαδικασία προϋποθέτει λεπτομερή μελέτη σχεδιασμού και πρέπει να εξασφαλίζει ότι ο αποθηκευτικός εξοπλισμός είναι περιβαλλοντικά φιλικός και δεν θα δημιουργεί περισσότερα προβλήματα από αυτά που λύνει. Η εφαρμογή της αυτονομίας στα κτίρια MEK αρχικά προέρχεται από αίτια ενεργειακής ανάπτυξης. Ένα πλήρες αυτόνομο κτίριο MEK εξασφαλίζει την μηδενική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτούς πόρους και επομένως την μηδενική παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα, συμβάλλοντας έτσι στην μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος.

Από την άλλη πλευρά η ενεργειακή αυτονομία μπορεί να εξυπηρετεί απομακρυσμένες κατοικήσιμες περιοχές, όπως σε χώρες του τρίτου κόσμου όπου δεν υπάρχει διαθέσιμο δίκτυο ρεύματος, με σχεδόν 1,1 δισεκατομμύρια ανθρώπων ζουν χωρίς παροχή ηλεκτρισμού.² Έτσι δημιουργείται η δυνατότητα τοποθέτησης αυτόνομων κτιρίων σε

κάθε γωνιά του πλανήτη, χωρίς την επιβάρυνσή του από ρύπους προερχόμενους από την παραγωγή ηλεκτρισμού. Παρόλα αυτά υπάρχει κατανάλωση ενέργειας και πόρων, καθώς και δημιουργία ρύπων κατά την παραγωγή των υλικών του κτιρίου καθώς και κατά την παραγωγή των συστημάτων αποθήκευσης. Ωστόσο έχει γίνει σοβαρή μείωση των εκπομπών λόγω της αυτονομίας που δεν μπορεί αγνοηθεί, όμως πρέπει σε κάθε περίπτωση να εξετασθεί και ο κύκλος ζωής των υλικών και του εξοπλισμού αποθήκευσης. Επομένως έχει δημιουργηθεί μία χρήσιμη λύση με αρκετά μειωμένες εκπομπές.

Στην εργασία αυτή λαμβάνεται σαν κτίριο μελέτης το Leaf House με σκοπό την εξέταση διάφορων συστημάτων αποθήκευσης, εφαρμόζοντάς τα σε αυτό και με στόχο την ενεργειακή αυτονομία για τρεις μέρες.³ Η μελέτη αυτή γίνεται με προσομοιώσεις σεναρίων στο πρόγραμμα Homer και περιλαμβάνουν ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών πάνελ και ανεμογεννητριών, μετατροπέα ενέργειας και το εκάστοτε σύστημα αποθήκευσης. Το κτίριο είναι αποκομμένο από το δίκτυο ρεύματος και οι εναλλακτικές που εξετάζονται είναι η μπαταρία μολυβδου-οξέος, η μπαταρία λιθίου, η μπαταρία ροής βαναδίου, οι σφόνδυλοι, το σύστημα αποθήκευσης με συμπιεσμένο αέρα, το σύστημα αποθήκευσης με βαρυτική επιτάχυνση, το σύστημα αποθήκευσης με αντλιοσταμείωση και το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου, όλα εκ των οποίων δεν λειτουργούν με καύση και έτσι δεν υπάρχει παραγωγή CO₂. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίνονται μεταξύ τους και δείχνουν πώς επηρεάζουν οι χρονικές στιγμές, που η ενέργεια των ΑΠΕ δεν καλύπτει τις ανάγκες του κτιρίου και γίνεται εκτεταμένη χρήση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, τον σχεδιασμό και το μέγεθος ολόκληρου του συστήματος, για την δυνατότητα κάλυψης των περιόδων αυτών.

2.Μεθοδολογία

Παρακάτω αναφέρονται τα βήματα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή της μελέτης:

- Παρουσίαση επιλογών συστημάτων αποθήκευσης και εισαγωγή σε βασικές έννοιες
- Παρουσίαση της τοποθεσίας, των υλικών και των συστημάτων κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου μελέτης Leaf House
- Λήψη δεδομένων των ενεργειακών καταναλώσεων του Leaf House για το έτος 2019 από την πλατφόρμα MyLeaf
- Παρουσίαση του υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας με φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες και αυτονομίας με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας
- Εισαγωγή των δεδομένων των καταναλώσεων του κτιρίου για το έτος 2019 από την πλατφόρμα MyLeaf καθώς και δεδομένων κόστους και λειτουργικών χαρακτηριστικών για τα φωτοβολταϊκά, τις ανεμογεννήτριες, τους μετατροπείς και τα συστήματα αποθήκευσης στο λογισμικό Homer
- Εισαγωγή παραδοχών για τα συστήματα αποθήκευσης στο λογισμικό Homer
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων βέλτιστων τιμών κόστους και διαστασιολόγησης των μερών του συστήματος από τις προσομοιώσεις
- Ανάλυση, σχολιασμός και σύγκριση των αποτελεσμάτων για κάθε σύστημα αποθήκευσης ενέργειας
- Εξαγωγή συμπερασμάτων

3. Θεωρητικό Υπόβαθρο

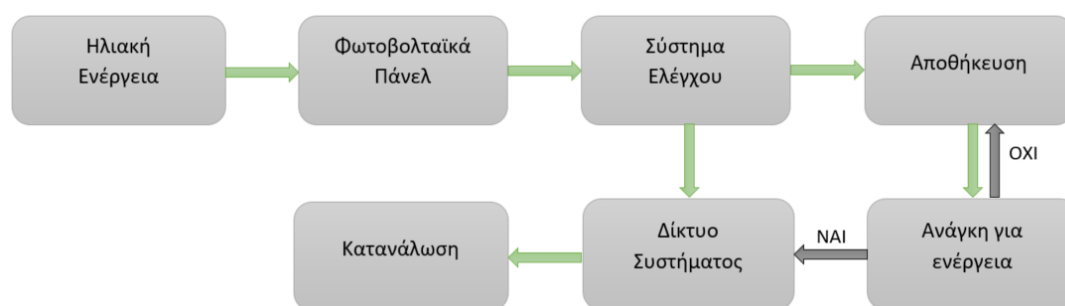
3.1 Κτίρια Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης (MEK)

Με τον όρο κτίριο με Μηδενική Ενεργειακή Κατανάλωση ενέργειας, χαρακτηρίζονται τα κτίρια εκείνα με υψηλή ενεργειακή απόδοση, όπου η σχεδόν μηδενική, ή πολύ χαμηλή ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου θα πρέπει να προέρχεται σε πολύ μεγάλο ποσοστό ή εξολοκλήρου από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, που βρίσκονται εγκατεστημένες στο κτίριο.⁴ Η διαδικασία δημιουργίας ενός τέτοιου κτιρίου περιλαμβάνει αρχικά την εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης στο κτιριακό κέλυφος και την συμπεριφορά των χρηστών του μέσα σε αυτό. Κάποια από τα μέτρα εξοικονόμησης στο κτιριακό κέλυφος είναι η εφαρμογή εξωτερικής θερμομόνωσης στους τοίχους και στην ταράτσα, η εφαρμογή διπλών ή τριπλών τζαμιών, η χρήση συσκευών και λαμπτήρων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης κ.α.. Στην συνέχεια οι μειωμένες ανάγκες του κτιρίου δύναται να καλυφθούν από τεχνολογίες ΑΠΕ στο μεγαλύτερο ποσοστό τους. Οι τεχνολογίες αυτές ποικίλουν, με περισσότερο καθιερωμένη αυτήν των φωτοβολταϊκών πάνελ και ακολουθούν τεχνολογίες όπως οι ανεμογεννήτριες, καυστήρες βιομάζας, γεωθερμικές κατασκευές κ.α.. Έτσι έχει δημιουργηθεί ένα κτίριο συνδεδεμένο στο κεντρικό δίκτυο ρεύματος που ιδανικά καλύπτει τις ανάγκες του από τις ΑΠΕ και ότι περισσεύει από την παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο για να χρησιμοποιηθεί όταν οι ΑΠΕ δεν θα είναι σε θέση να καλύψουν τις ανάγκες του κτιρίου.

3.2 Αυτονομία και Αυτόνομα Κτίρια

Αυτόνομα κτίρια ονομάζονται αυτά όπου η ενέργεια που καλύπτει τις ανάγκες του κτιρίου παράγεται και αποθηκεύεται εξολοκλήρου στο ίδιο, απουσία δηλαδή της σύνδεσης του κτιρίου στο κεντρικό δίκτυο ρεύματος. Τα κτίρια αυτά δεν διαφέρουν πολύ από αυτά των MEK, ως προς την γενική ιδέα. Παρόλα αυτά περιλαμβάνουν τον σχεδιασμό συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία πρέπει να σχεδιαστούν με βάση τις ιδιαιτερότητες του κάθε κτιρίου. Οι ιδιαιτερότητες του κτιρίου έχουν να κάνουν αρχικά με τις ενεργειακές ανάγκες του, το κλίμα της περιοχής, καθώς και τις συνήθειες των χρηστών. Τα συστήματα πρέπει να αποθηκεύουν την ενέργεια των ΑΠΕ που δεν καταναλώνεται από το κτίριο όταν παράγεται, για να χρησιμοποιηθεί όταν αυτές δεν παράγουν την απαιτούμενη ενέργεια. Οι περιπτώσεις που δεν παράγουν έχουν να κάνουν με την τεχνολογία ΑΠΕ που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, στη πιο συνηθισμένη εφαρμογή ΑΠΕ που είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ, δεν γίνεται

παραγωγή ενέργειας μετά την δύση του ηλίου και αν δεν υπάρχει άλλη τεχνολογία ΑΠΕ να καλύπτει τις ανάγκες του κτιρίου θα πρέπει να έχει αποθηκευτεί ενέργεια σε συστήματα αποθήκευσης για να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες μέχρι να ξεκινήσει ξανά η παραγωγή. Άρα γίνεται αντιληπτό ότι οι συνθήκες κάθε κτιρίου διαφέρουν και έτσι πρέπει να λαμβάνονται διαφορετικά μέτρα για το καθένα. Ένα διάγραμμα ροής ενέργειας σε αυτόνομο κτίριο ΜΕΚ φαίνεται στην εικόνα 1.



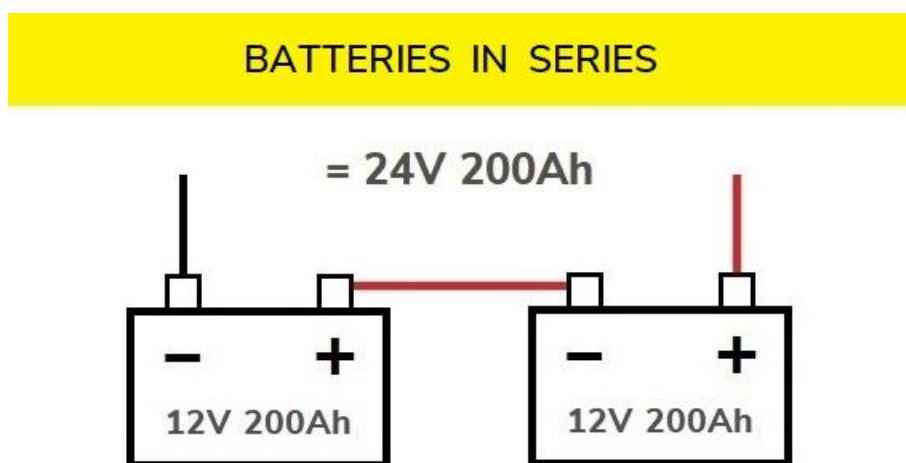
Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής ενέργειας σε ένα αυτόνομο κτίριο ΜΕΚ

Τα αυτόνομα κτίρια σχεδιάζονται για περιπτώσεις όπου η σύνδεση με το δίκτυο παροχής ενέργειας δεν είναι δυνατή ή συμφέρουσα. Παράδειγμα τέτοιων περιπτώσεων είναι οι απομακρυσμένες από τα αστικά κέντρα περιοχές, καθώς περιοχές χωρών του τρίτου κόσμου. Η εφαρμογή αυτόνομων κτιρίων γίνεται από άτομα που επιλέγουν να κατοικήσουν εκτός πόλης και σε μέρη που είναι δύσκολη η σύνδεση με το δίκτυο, είτε γιατί επιθυμούν μία ζωή απομακρυσμένη από τις συνήθειες μιας πόλης είτε γιατί δεν έχουν άλλη επιλογή. Μεγαλύτερης σημασίας εφαρμογή αυτών των κτιρίων γίνεται σε χώρες του τρίτου κόσμου, όπου δεν υπάρχουν οι βάσεις για την δημιουργία συμβατικών κτιρίων. Η απουσία κεντρικού δικτύου ρεύματος, καθώς και άλλων βασικών αναγκών χρήζουν την δημιουργία αυτόνομων κτιρίων που θα εξυπηρετούν τις ανάγκες του πληθυσμού και θα φέρουν άμεση ανάπτυξη και εξέλιξη στην τοπική κοινωνία των περιοχών εφαρμογής.

3.3 Μπαταρίες και Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας

Όσον αφορά τους αποθηκευτικούς χώρους ή μπαταρίες είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η σωστή επιλογή αυτών αποτελεί ένα δύσκολο καθώς και σημαντικό κομμάτι των αυτόνομων κτιρίων. Η τεχνολογία αυτή πρέπει να αποθηκεύει την παραγόμενη ενέργεια για χρήση αυτής σε περιόδους όπου οι ΑΠΕ δεν αρκούν να καλύψουν τις ανάγκες του κτιρίου. Επιπλέον τα συστήματα αποθήκευσης πρέπει να προέρχονται από φιλικά προς το περιβάλλον υλικά και να μην δημιουργούν επικίνδυνους ρύπους μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους. Έτσι δεν ακυρώνεται η βασική ιδέα του κτιρίου ΜΕΚ, όπου εξοικονομείται ενέργεια στην λειτουργία και επομένως μειώνονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Αν για την απόσυρση και διαχείριση των μπαταριών μετά την χρήση τους δημιουργούνται περισσότερα προβλήματα από ότι προσπαθούν να αποφευχθούν στο κομμάτι της λειτουργίας, τότε όλη η ιδέα των κτιρίων ΜΕΚ καταρρίπτεται. Για τον λόγο αυτό βρίσκονται σε εξέλιξη πολλές έρευνες για την αναζήτηση μπαταριών υψηλής απόδοσης και χαμηλής ρύπανσης.

Βασικές κατηγορίες συστημάτων αποθήκευσης είναι τα χημικά που αποθηκεύουν ενέργεια σε ηλεκτροχημική, χημική ή θερμοχημική μορφή, τα θερμικά που αποθηκεύουν ενέργεια σε συστήματα χαμηλής ή υψηλής θερμοκρασίας, τα μηχανικά που αποθηκεύουν ενέργεια σε κινητική ή δυναμική μορφή και τα ηλεκτρικά που αποθηκεύουν ενέργεια με την χρήση πυκνωτών και υπερπυκνωτών.

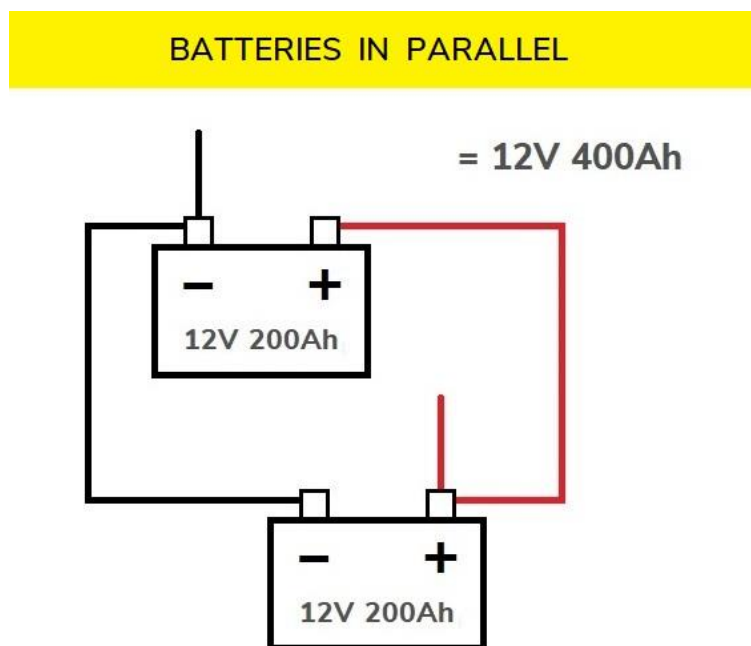


Εικόνα 2: Παράδειγμα μπαταριών με σύνδεση σε σειρά⁵

Σημαντικό ρόλο για τις μπαταρίες έχει και ο τρόπος σύνδεσης αυτών, εφόσον απαιτείται παραπάνω από μία. Είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις πλήθος μικρής χωρητικότητας μπαταριών αντί για μία μεγάλης

χωρητικότητα. Έτσι η σύνδεση των επιμέρους μπαταριών γίνεται με σκοπό την δημιουργία ενός μεγαλύτερου συστήματος και μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε σύνδεση σε σειρά είτε παράλληλα.

Η σύνδεση σε σειρά μεγαλώνει την τάση του ηλεκτρικού συστήματος ανάλογα με τον αριθμό των συνδεδεμένων μπαταριών, κρατώντας ωστόσο σταθερή την χωρητικότητα. Αν για παράδειγμα συνδεθούν σε σειρά δύο ίδιες μπαταρίες η τάση θα διπλασιαστεί, ενώ η χωρητικότητα θα παραμείνει η ίδια, όπως φαίνεται στην εικόνα 2. Η παράλληλη σύνδεση από την άλλη αυξάνει την χωρητικότητα κρατώντας σταθερή την τάση, δηλαδή αν συνδεθούν παράλληλα δύο ίδιες μπαταρίες θα διπλασιαστεί η χωρητικότητα, ενώ η τάση θα παραμείνει ίδια, όπως φαίνεται στην εικόνα 3. Για ένα σύστημα χωρίς σύνδεση στο κεντρικό δίκτυο ρεύματος και με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ και ανεμογεννήτριες, όσο μεγαλύτερη η άμεση τάση που φορτίζει τις μπαταρίες τόσο λιγότερη ενέργεια χάνεται κατά μήκος των καλωδίων.



Εικόνα 3: Παράδειγμα μπαταριών με παράλληλη σύνδεση⁵

3.4 Αναφορές σε παρόμοιες μελέτες

Οι M M Wei, J Z Wang and Z J Huang μελέτησαν το 2019 την εφαρμογή υβριδικού συστήματος ΑΠΕ σε κτίριο εστιών του Πανεπιστημίου Τεχνολογίας του Ανχουέι στην κεντρική Κίνα με ή χωρίς πρόσβαση στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος.⁶ Το σύστημα που ήταν συνδεδεμένο στο δίκτυο αποτελούνταν από φωτοβολταϊκά πάνελ και ανεμογεννήτριες και έγινε σύγκριση δύο σεναρίων με δύο διαφορετικές τιμές κοστολόγησής του ρεύματος από το δίκτυο, ενώ το σύστημα που δεν ήταν συνδεδεμένο με το δίκτυο αποτελούνταν από τι ίδιες ΑΠΕ καθώς επίσης και από μπαταρίες μόλυβδου-οξέος και έγινε σύγκριση αυτού με ένα σύστημα αποτελούμενο από τον ίδιο εξοπλισμό σε συνδυασμό με γεννήτρια ντίζελ. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι από τα συστήματα εκτός σύνδεσης, αυτό με την γεννήτρια ντίζελ έχει χαμηλότερο κόστος από αυτό που δεν την συμπεριλάμβανε. Επίσης σχολιάζουν ότι το αρχικό κεφάλαιο για τις ΑΠΕ είναι το κύριο εμπόδιο για τις μεγάλου μεγέθους προωθήσεις της τεχνολογίας αυτής και ότι δεν έχει συμπεριληφθεί το κόστος και το μεγάλο μέγεθος της έκτασης γης που χρειάζεται για να τοποθετηθούν τα πάνελ και οι ανεμογεννήτριες, το οποίο είναι ένα πρακτικό πρόβλημα της εφαρμογής τους. Ωστόσο στην περίπτωση αυτή, η ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου καλύπτονται και από γεννήτρια ντίζελ, η οποία δεν είναι ΑΠΕ και παράγει εκπομπές CO₂ που προσπαθούν να αποφευχθούν στα κτίρια MEK.

Παρόμοια αποτελέσματα είχαν και οι Zhengen Ren, Phillip Paevere, Dong Chen το 2019 στην μελέτη τους για την απόδοση συστημάτων σε τρία σενάρια, εκτός σύνδεσης με φωτοβολταϊκά πάνελ και μπαταρίες, εκτός σύνδεσης με φωτοβολταϊκά πάνελ, μπαταρίες και γεννήτριας πετρελαίου και MEK με σύνδεση στο δίκτυο.⁷ Αυτά τα σενάρια μελετήθηκαν για διάφορες κλιματικές ζώνες για δύο κτίρια στην Αυστραλία και έδειξαν ότι το πρώτο είχε το μεγαλύτερο κόστος, ενώ το δεύτερο με τη γεννήτρια πετρελαίου μείωνε το απαιτούμενο κόστος και με το τελευταίο σενάριο να είναι λιγότερα επιβαρυνμένο. Όμως το ίδιο πρόβλημα προκύπτει και σε αυτήν την μελέτη, όπου η εφαρμογή της γεννήτριας και η σύνδεση με το δίκτυο δημιουργούν εκπομπές CO₂ που προσπαθούν να αποφευχθούν.

Πάνω σε ίδιο σύστημα δούλεψαν και οι Randa Kallel, Ghada Boukettaya και Lotfi Krichen για να δείξουν ότι η στρατηγική αυτή μπορεί να αποφέρει κερδοφόρα αποτελέσματα.⁸

Το 2019 οι Chaouki Ghenai και Maamar Bettayeb εξέτασαν ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών, αποθήκευσης υδρογόνου και γεννήτριας πετρελαίου το οποίο δεν θα ήταν συνδεδεμένο με το δίκτυο και θα αφορούσε το διοικητικό κτίριο του πανεπιστημίου του Σάρτζα.⁹ Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι το κόστος και οι εκπομπές του συστήματος που προτείνουν ήταν χαμηλά.

Ωστόσο οι Prashant Malik, Mamta Awasthi και Sunanda Sinha στην μελέτη τους εξετάζουν ένα σύστημα φωτοβολταϊκών πάνελ, ανεμογεννητριών, γεννητριών βιομάζας και μπαταριών το οποίο δεν θα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο και θα καλύπτει τις ανάγκες ενός θεσμικού κτιρίου.¹⁰ Τα αποτελέσματα που προτείνουν έχουν βελτιστοποιηθεί και παρουσιάζουν ένα σύστημα που δεν παράγει εκπομπές CO₂.

Ο Reza Hemmati το 2019 στην μελέτη του παρουσίασε ένα σύστημα αποσυνδεδεμένο από το δίκτυο ρεύματος, αποτελούμενο από φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες και υδροηλεκτρικές γεννήτριες για παραγωγή ρεύματος και ένα σύστημα υδρογόνου για αποθήκευση ενέργειας.¹¹ Το σύστημα αυτό εφαρμόστηκε σε κτίριο οικιακής χρήσης και τα αποτελέσματα παρουσίασαν τις βέλτιστες τιμές του συστήματος. Να σημειωθεί ότι οι εκπομπές CO₂ για την παραγωγή ενέργειας είναι μηδενικές.

Οι Dominique Villela, Vijayanathan Veerasamy Kasinathan, Scott De Valle, Mark Alvarez, George Frantziskonis, Pierre Deymier και Krishna Muralidharan μελέτησαν το 2010 ένα σύστημα με φωτοβολταϊκά πάνελ και σύστημα συμπίεσμένου αέρα για αποθήκευση ενέργειας σε ένα κτίριο αποσυνδεδεμένο από το δίκτυο ρεύματος, δίνοντας αποτελέσματα για ένα χαμηλού κόστους και φιλικού προς το περιβάλλον συστήματος.¹²

Οι Ana Guerello, Shannon Page, Guy Holburn και Michaela Balzarova το 2019 εξέτασαν στην μελέτη τους την επιρροή των υβριδικής ενέργειας συστημάτων σε κτίρια εκτός σύνδεσης από το δίκτυο ρεύματος με διάφορες στρατηγικές βελτιστοποίησης.¹³

Τέλος, οι Kingsley Ukoba, Olugbenga Fadare και Tien-Chien Jen παρουσιάζουν ένα μοντέλο βασισμένο σε φωτοβολταϊκά και μπαταρίες, αποκομμένο από το δίκτυο ρεύματος, για ένα σπίτι οικιακής χρήσης στην νότια περιοχή της Νιγηρίας.²

Από τις παραπάνω αναφορές σε παρόμοιες μελέτες γίνεται αντιληπτό ότι η προσπάθεια δημιουργίας κτιρίων MEK καθώς και μετατροπής ήδη υπαρχόντων είναι σύνηθες

φαινόμενο. Σύνηθες είναι επίσης και η εφαρμογή υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ και αποφυγή παραγωγής ενέργειας εξολοκλήρου από μία τεχνολογία ΑΠΕ, ειδικά αν η παραγωγή γίνεται σε κτίριο αποκομμένο από το δίκτυο ρεύματος. Οι διαφορετικές πηγές παραγωγής ενέργειας εξομαλύνουν την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου. Επιπλέον γίνεται κατανοητό ότι για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε ένα κτίριο αποκομμένο από το δίκτυο ρεύματος, το κόστος θα είναι υψηλό. Ακόμα πρέπει να αναφερθεί ότι στις αναφορές που έγιναν δεν συμπεριλαμβάνεται πάντα στα συστήματα ο παράγοντας της παραγωγής CO₂. Η δημιουργία MEK κτιρίων και η εφαρμογή αυτονομίας είναι διαδικασίες που στόχο έχουν την μείωση της παραγωγής ενέργειας από συμβατικούς τρόπους, δηλαδή καύση υδρογονανθράκων. Έτσι συμπεραίνεται ότι η αποφυγή παραγωγής CO₂ είναι εφικτή σε τέτοια συστήματα και πρέπει να υιοθετείται από τις αντίστοιχες μελέτες. Τέλος, όσον αναφορά τις τοποθεσίες των μελετών που αναφέρθηκαν, γίνεται αντιληπτό ότι τα αποκομμένα από το δίκτυο κτίρια MEK λαμβάνουν χώρα σε απομακρυσμένα από τα αστικά κέντρα μέρη, αλλά και μέσα σε αυτά. Το γεγονός αυτό δείχνει από την μία, την ανάγκη δημιουργίας αυτόνομων κτιρίων MEK λόγω απουσίας του δικτύου ρεύματος και από την άλλη, την επιλογή δημιουργίας αυτόνομων κτιρίων MEK, λόγω των πλεονεκτημάτων που επιφέρουν.

3.5 Χημικά Συστήματα Αποθήκευσης

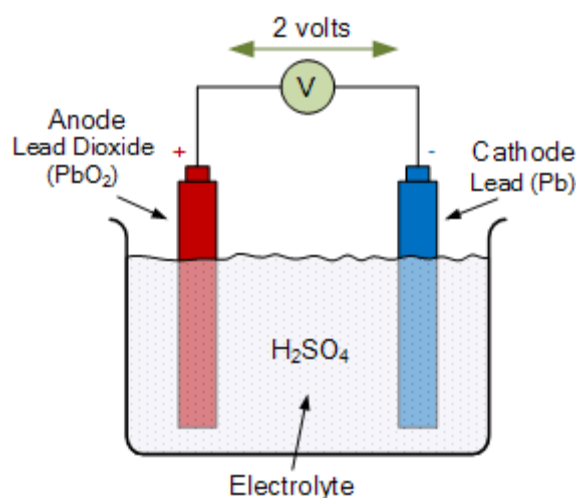
Τα περισσότερα διαδεδομένα συστήματα αποθήκευσης που εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια για την αποθήκευση ενέργειας σε κτίρια MEK είναι αυτά με τις χημικές μπαταρίες, με πιο διαδεδομένες τις μπαταρίες μολυβδού. Γίνονται μελέτες για πολλές μπαταρίες αλλά οι περισσότερες καταλήγουν να μην έχουν τις προδιαγραφές που απαιτούνται για την χρήση σε κτίρια. Στόχος τους είναι να μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας, να έχουν πολλούς κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης και πολύ σημαντικό είναι να μπορεί να αποσυρθεί χωρίς να δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στο περιβάλλον. Παρακάτω θα αναφερθούν οι πιο σημαντικές χημικές μπαταρίες, μολυβδού, ιόντων λιθίου και ροής βαναδίου. Υπάρχουν πολλές ακόμα που δεν θα αναφερθούν λόγω της πειραματικής τους φάσης ή της χαμηλής αποτελεσματικότητάς τους.

3.5.1 Συστήματα Αποθήκευσης με Μπαταρίες Μολυβδού-Οξέος

Οι μπαταρίες αυτές χρησιμοποιούνται σχεδόν 200 χρόνια, καθιστώντας τις σε μία γνώριμη τεχνολογία, όσον αναφορά την χρήση της καθώς και την λειτουργία της.¹⁴ Η

παραγωγή της γίνεται πλέον εύκολα και το κόστος της χαρακτηρίζεται μικρό. Ακόμη σημαντικά χαρακτηριστικά της είναι η μεγάλη της χωρητικότητα, η υψηλή απόδοση (70-90%) καθώς και οι μικροί ρυθμοί αυτοεκφόρτισης. Επίσης έχουν την δυνατότητα παρακολούθησης των γρήγορων εναλλαγών των φορτίων, δίνοντας έτσι ισχύ υψηλής ποιότητας.

Ωστόσο η τεχνολογία αυτή δεν έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και το βάθος εκφόρτισης είναι μικρό. Κατά την διάρκεια λειτουργίας της είναι συχνό φαινόμενο η έκλυση θερμότητας ή και κάποιον αερίων από αυτήν, που καθιστά αναγκαίο τον σωστό αερισμό του χώρου στέγασης. Η φόρτισή της πρέπει να είναι πλήρης πριν χρησιμοποιηθεί από το κτίριο ειδάλλως, η διάρκεια ζωής της μικραίνει σημαντικά. Το μειονέκτημα αυτό είναι σημαντικό, διότι η μπαταρία φορτίζεται από μία ανεξέλεγκτη πηγή όπως ο ήλιος και συνεπώς δεν εξασφαλίζονται σταθερά ποσά ενέργειας καθημερινά. Τέλος εξίσου σημαντικό είναι ότι ο ηλεκτρολύτης(θειικό οξύ) που χρησιμοποιεί καθώς και τα κομμάτια μολυβδου από τα οποία αποτελείται δεν ανακυκλώνονται καθώς είναι μη φιλικά προς το περιβάλλον.



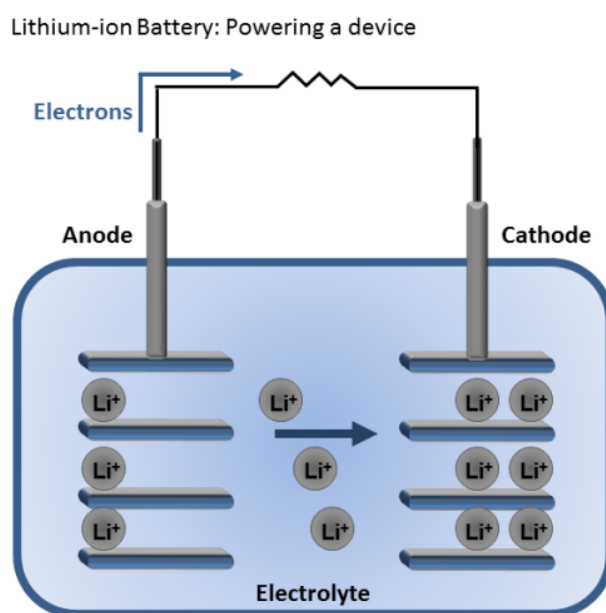
Εικόνα 4 Μπαταρία μολυβδου-οξέος¹⁵

Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι η τεχνολογία αυτή, παρόλο την γνώση που υπάρχει γύρω της καθώς και την χαμηλή της τιμή, δεν συμβαδίζει με την ιδέα ενός αυτόνομου MEK κτιρίου, λόγω του μικρού κύκλου ζωής της και των μη φιλικών προς το περιβάλλον προϊόντων που παράγει μετά το τέλος της χρήσης της. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε πολλά κτίρια MEK αυτήν την στιγμή γίνεται χρήση της, μειώνοντας έτσι την περιβαλλοντική τους αξία, εξαιτίας των μειονεκτημάτων που αναφέρθηκαν.

3.5.2 Συστήματα Αποθήκευσης με Μπαταρίες Λιθίου

Η τεχνολογία αυτή είναι πιο σύγχρονη από αυτή του μόλυβδου οξέος, έχοντας έτσι τα δικά της πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα.¹⁴ Αρχικά η μπαταρία αυτή χαρακτηρίζεται από την υψηλή της χωρητικότητα καθώς και την εξαιρετική απόδοση, σχεδόν 100%. Η διάρκεια ζωής της όπως και το βάθος εκφόρτισης είναι σημαντικά μεγάλα και ο χρόνος φόρτισης μικρός, καθιστώντας την μία καλή επιλογή για κτίρια. Επιπροσθέτως ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι μικρός και δεν απαιτείται συντήρηση κατά την διάρκεια ζωής της. Δεν υπάρχει έκλυση αερίων, γεγονός που είναι σημαντικό για την εγκατάστασή της σε ένα κτίριο. Συνεχίζοντας να αναφερθεί ότι οι κύκλοι φόρτισης δεν χρειάζεται να είναι πλήρεις, αφού λειτουργούν εξίσου αποδοτικά και με χαμηλότερα ποσοστά φόρτισης.

Από την άλλη πλευρά οι μπαταρίες λιθίου έχουν υψηλό κόστος αγοράς σε σχέση με τις υπόλοιπες. Επιπλέον παρόλο που τα υλικά από τα οποία είναι φτιαγμένη είναι περισσότερο φιλικά από τις υπόλοιπες, δεν παύει να δημιουργεί προϊόντα που δεν ανακυκλώνονται μετά τον κύκλο ζωής της.



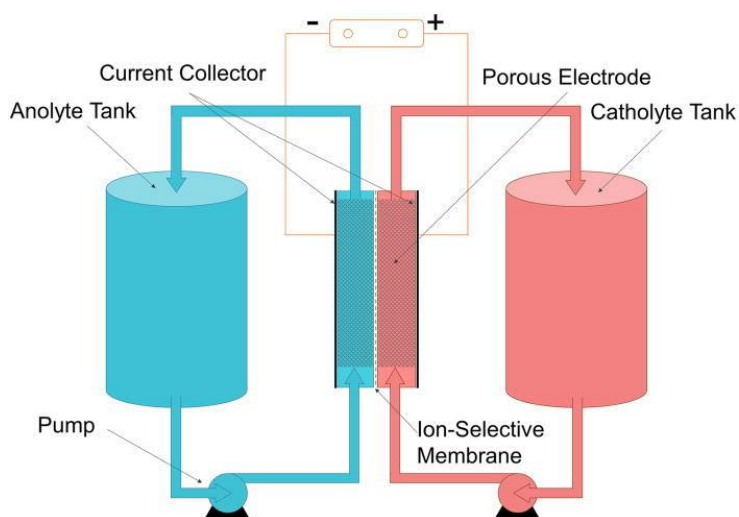
Εικόνα 5: Μπαταρία λιθίου¹⁶

Τα πλεονεκτήματα της μπαταρίας αυτής φαίνεται να κυριαρχούν, γεγονός που συμβαδίζει με το ότι χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό παγκοσμίως. Έτσι η επιλογή της για εφαρμογή σε κτίρια MEK θα ήταν συνετή και θα επέφερε υψηλό βαθμό απόδοσης για αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Παρόλα αυτά υπάρχουν

επιπτώσεις στο περιβάλλον μετά το τέλος του κύκλου ζωής της, γεγονός που συγκρούεται με το σκεπτικό των MEK κτιρίων.

3.5.3 Συστήματα Αποθήκευσης με Μπαταρίες Ροής Βαναδίου

Η μπαταρία αυτή έγινε διαθέσιμη στο κοινό την περασμένη δεκαετία (2010) και ολοένα και εξελίσσεται.¹⁴ Η τεχνολογία που χρησιμοποιεί είναι ένα καινούριο μοντέλο το οποίο εφαρμόζεται με διάφορες εναλλακτικές. Οι μπαταρίες αυτές χαρακτηρίζονται από την υψηλή τους ισχύ για μεγάλα χρονικά διαστήματα λειτουργίας, την ευέλικτη προσαρμογή του μεγέθους τους για την κάθε τους εφαρμογή, την γρήγορη εναλλαγή τους από φόρτιση σε αποφόρτιση και την μη ύπαρξη αυτοεκφόρτισης λόγω του σχεδιασμού τους. Πιο συγκεκριμένα για την μπαταρία ροής βαναδίου, σημαντικό της χαρακτηριστικό είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής σε κατάσταση εκφόρτισης με μεγάλο βάθος, όπως επίσης και τα φιλικά προς το περιβάλλον υλικά από τα οποία αποτελείται. Επιπλέον δεν υπάρχουν προβλήματα θέρμανσης της μπαταρίας.



Εικόνα 6: Μπαταρία ροής βαναδίου¹⁷

Παρόλα αυτά υπάρχουν προβλήματα όπως η χαμηλή τους απόδοση λόγω των αντλιών που χρησιμοποιεί καθώς και των απωλειών από τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα. Το υψηλό κόστος αποτελεί άλλο ένα μειονέκτημά τους καθώς και η χαμηλή πυκνότητα ενέργειας.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, η μπαταρία ροής βαναδίου αποτελεί ένα παράδειγμα αποθηκευτικού χώρου φιλικού προς το περιβάλλον, καθιστώντας την άξια προς εφαρμογή σε κτίρια MEK. Ωστόσο το μειονέκτημα της απόδοσης ίσως

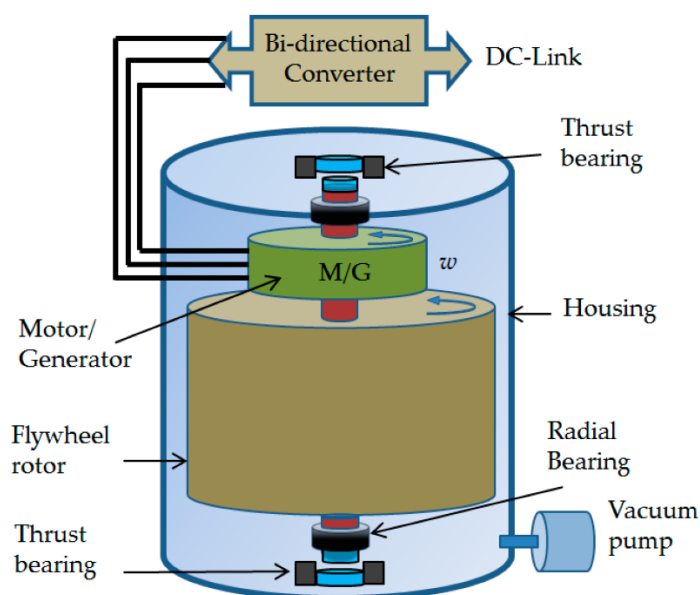
δημιουργεί θέμα στην χωρική τοποθέτηση τους, καθώς και στο υψηλό κόστος ου θα δημιουργήσει.

3.6.Μηχανικά Συστήματα Αποθήκευσης

Τα μηχανικά συστήματα αποθήκευσης αποτελούν μια τεχνολογία κατά την οποία γίνεται χρήση της παραγόμενης από μια πηγή ενέργειας για δημιουργία μηχανικού έργου, το οποίο επιλέγεται να δοθεί πίσω με διάφορους τρόπους όταν αυτό ζητηθεί.

3.6.1 Σφόνδυλοι

Μία από τις τεχνολογίες αποθήκευσης με μηχανικό τρόπο είναι οι σφόνδυλοι, οι οποίοι αποθηκεύουν ενέργεια υπό μορφή κινητικής ενέργειας.¹⁴ Η χωρητικότητα αυτής της τεχνολογίας δεν υποβαθμίζεται, αφού η φόρτιση και αποφόρτισή της δεν επηρεάζει την διάρκεια ζωής της, η οποία είναι μεγάλη. Λειτουργεί εξίσου καλά σε συνθήκες χαμηλής αλλά και βαθιάς εκφόρτισης, με μικρό χρόνο επαναφόρτισης. Η θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί από την κινητική ενέργεια δεν επηρεάζει του σφονδύλους, επομένως δεν απαιτείται συχνή συντήρηση. Αποτελούνται από φιλικά προς το περιβάλλον υλικά και σε συνδυασμό με την υψηλή τους απόδοση τους καθιστούν μια καλή μέθοδο αποθήκευσης.



Εικόνα 7:Σύστημα σφονδύλου¹⁸

Από την άλλη πλευρά οι σφόνδυλοι έχουν ένα μικρό αλλά σημαντικό ποσοστό απώλειας ενέργειας λόγω τριβής κατά την περιστροφή τους και εξίσου σημαντική είναι η πιθανότητα υπερφόρτωσής τους, με αποτέλεσμα να υπάρχει πιθανότητα δημιουργίας κάποιας μικρής έκρηξης ή εκτόξευσης των εξαρτημάτων.

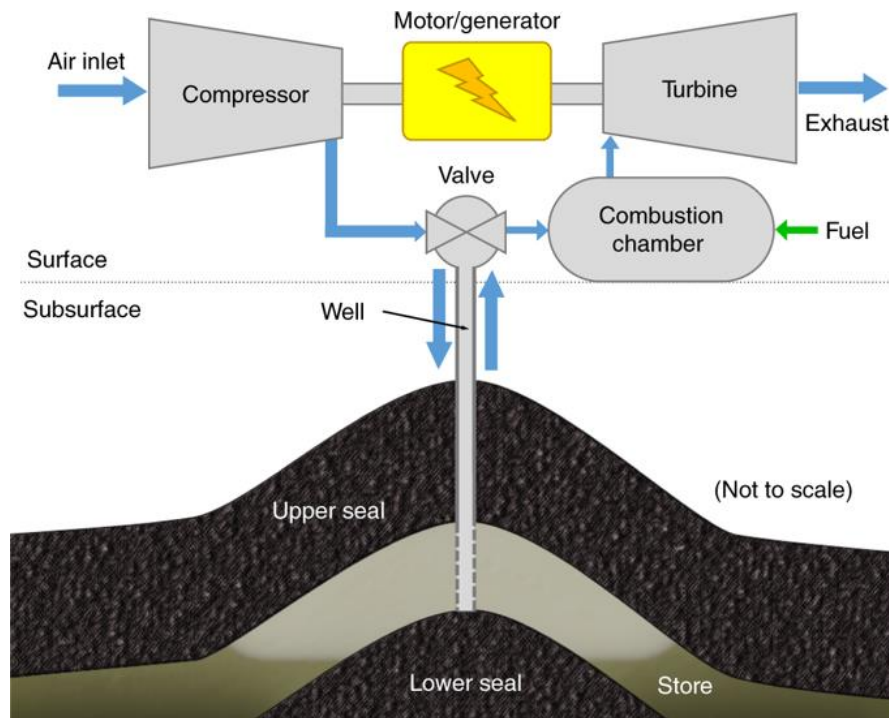
Επομένως η τεχνολογία αυτή θα χαρακτηριζόταν κατάλληλη για αυτόνομα κτίρια MEK και αυτό δικαιολογείται από την υψηλή απόδοση της σε συνδυασμό με την φιλική προς το περιβάλλον φύση της και το χαμηλό της κόστος. Τα προβλήματα που υπάρχουν στην τεχνολογία αυτή ολοένα και αδρανοποιούνται με διάφορες μελέτες που γίνονται πάνω σε αυτήν.

3.6.2 Σύστημα Αποθήκευσης Συμπιεσμένου Αέρα

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί υπόγειες δεξαμενές φυσικές ή τεχνητές, με σκοπό την αποθήκευση συμπιεσμένου συνήθως αέρα, τις ώρες που οι ΑΠΕ παράγουν περίσσεια ενέργειας και στην συνέχεια αξιοποίηση του συμπιεσμένου αέρα σε γεννήτρια ρεύματος για την παραγωγή ηλεκτρισμού.¹⁴ Η τεχνολογία αυτή είναι χρήσιμη για διαχείριση μεγάλων ποσών ενέργειας, δημιουργώντας έτσι μια μεγάλη υπόγεια μπαταρία. Επιπλέον τα υλικά και η μέθοδος λειτουργίας της είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Για την αποθήκευση του αερίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπόγειοι γεωλογικοί σχηματισμοί, που πιθανόν να μην υπάρχουν στην διαθέσιμη τοποθεσία, αλλά και τεχνητές υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης, που θα μπορούν να δημιουργηθούν. Ο τρόπος λειτουργίας της μπαταρίας απεικονίζεται στην εικόνα 8.

Ωστόσο η απόδοση του συστήματος αυτού είναι σχετικά μικρή λόγω της ανάγκης συμπίεσης και θέρμανσης του αέρα πριν και μετά την αποθήκευσή του αντίστοιχα. Επιπλέον η διαδικασία δημιουργίας του έχει υψηλό κόστος και η απόκρισή του στην ζήτηση ενέργειας είναι αργή. Επίσης οι σεισμικές δονήσεις μπορούν να αποβούν μοιραίες για την λειτουργία τους.

Έτσι γίνεται λόγος για ένα φιλικό προς το περιβάλλον σύστημα αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας, με μικρή απόδοση και χρόνο απόκρισης, καθιστώντας το, συμβατό με την ιδέα των κτιρίων MEK, αλλά όχι και συμφέρον σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες.



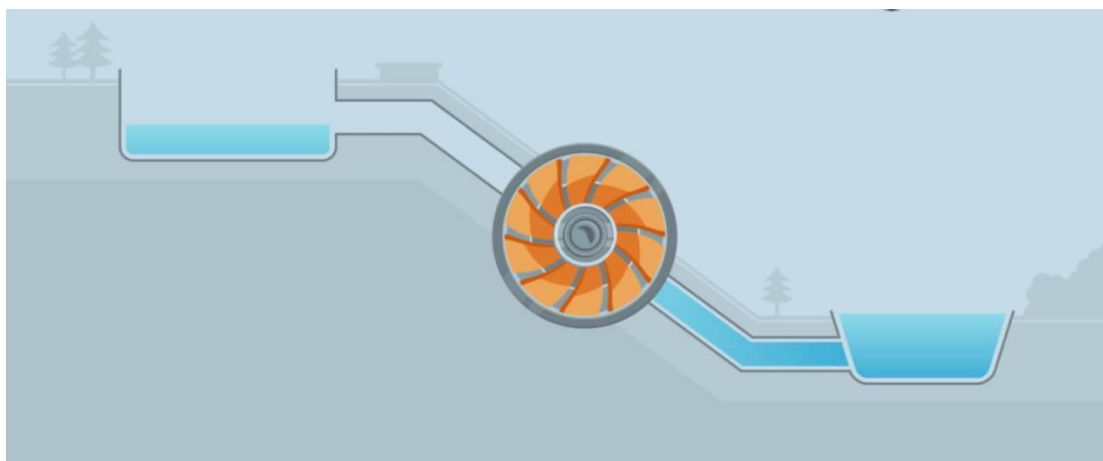
Εικόνα 8::Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα¹⁹

3.6.3 Συστήματα Αποθήκευσης Αντλιοταμίευσης

Η αντλιοταμίευση είναι από τις πιο παλιές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, η οποία εφαρμόζεται σχεδόν έναν αιώνα.¹⁴ Το βασικό της χαρακτηριστικό είναι η μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας που την καθιστά κατάλληλη για την χρήση της στην ηλεκτροπαραγωγή. Αρχή της λειτουργίας της είναι η αποθήκευση ποσών νερού σε μία δεξαμενή κάνοντας χρήση της περίσσειας ενέργεια από το δίκτυο και η φυσική ροή αυτού σε γεννήτρια χαμηλότερου ύψους για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την περίοδο έλλειψής της. Η τεχνολογία αυτή είναι κατάλληλη για αποθήκευση ΑΠΕ και είναι φιλική προς το περιβάλλον και έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και μεγάλη απόδοση.

Από την άλλη πλευρά η τεχνολογία αυτή απαιτεί συγκεκριμένο χώρο και προδιαγραφές που την καθιστά εφαρμόσιμη μόνο σε ειδικές περιπτώσεις. Επιπλέον σε αντίθεση με τις περισσότερες δεν πωλείται μεμονωμένα αλλά σχεδιάζεται και χτίζεται ανάλογα τις ανάγκες του εκάστοτε συστήματος.

Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι η τεχνολογία παρόλο που συμβαδίζει με την ιδέα των ΜΕΚ κτιρίων και της αυτονομίας, με την φιλική προς το περιβάλλον φύση της και την μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας, είναι σημαντική η ιδιαιτερότητα της κατασκευής και του συγκεκριμένου χώρου που απαιτεί. Προφανώς η χρήση της είναι δυνατή, αλλά όχι σε όλες τις περιπτώσεις.



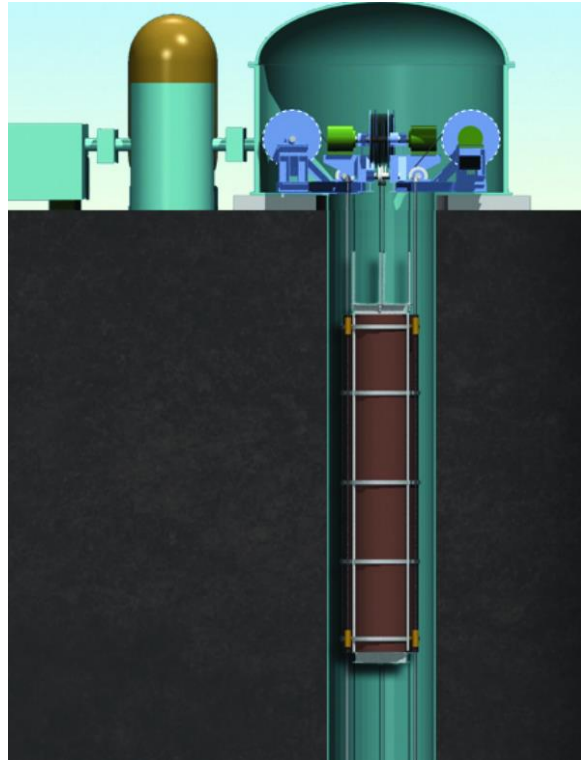
Εικόνα 9: Σύστημα αντλιοσταμείωσης²⁰

3.6.4 Συστήματα Αποθήκευσης Βαρυτικής Επιτάχυνσης

Μια καινούρια τεχνολογία που κάνει χρήση γνωστών τεχνικών είναι η αποθήκευση ενέργειας μέσω της βαρύτητας.²¹ Το σύστημα αυτό αποτελείται από την ένα βαρίδιο το οποίο υψώνεται ή χαμηλώνεται σε μία υπόγεια κατακόρυφη σήραγγα, με σκοπό την αποθήκευση μέσω δυναμικής ενέργειας και την επιστροφή της μέσω γεννήτριας. Επιπλέον το σύστημα αποθήκευσης αυτό είναι φτιαγμένο από φιλικά προς το περιβάλλον υλικά και έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Επίσης χαρακτηρίζεται από την γρήγορη απόκρισή του και την σχετικά υψηλή του απόδοση. Ακόμη έχει την δυνατότητα προσαρμογής σε γρήγορες ή αργές ταχύτητες, δηλαδή σε υψηλή ή χαμηλή ζήτηση ενέργειας και το κόστος του δεν είναι υψηλό που το καθιστά μαζί με τα παραπάνω αρκετά ελκυστική επιλογή.

Παρόλα αυτά η τεχνολογία αυτή απαιτεί τις σωστές προδιαγραφές για την δημιουργία της. Είναι σημαντικό ότι το βάθος της φτάνει τα 150 μέτρα και ότι κατά την λειτουργία του πιθανόν να παράγει αρκετό θόρυβο, ο οποίος όμως μπορεί να καλυφθεί με την κατάλληλη ηχομόνωση. Έτσι η εφαρμογή του προδιαθέτει την ήδη ύπαρξη μια τέτοια κατακόρυφης σήραγγας από προηγούμενες εργασίες, όμως δεν την απαιτεί αφού μπορεί κάλλιστα να δημιουργηθεί.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι η τεχνολογία αυτή είναι αρκετά ελκυστική, με την προϋπόθεση ότι πρέπει να υπάρχει η σήραγγα ή να κατασκευαστεί. Πληρεί όλες τις προδιαγραφές για εφαρμογή σε αυτόνομα κτίρια MEK και φαίνεται να είναι συμβατή με την ιδέα των απομακρυσμένων περιοχών ή των χωρών του τρίτου κόσμου.



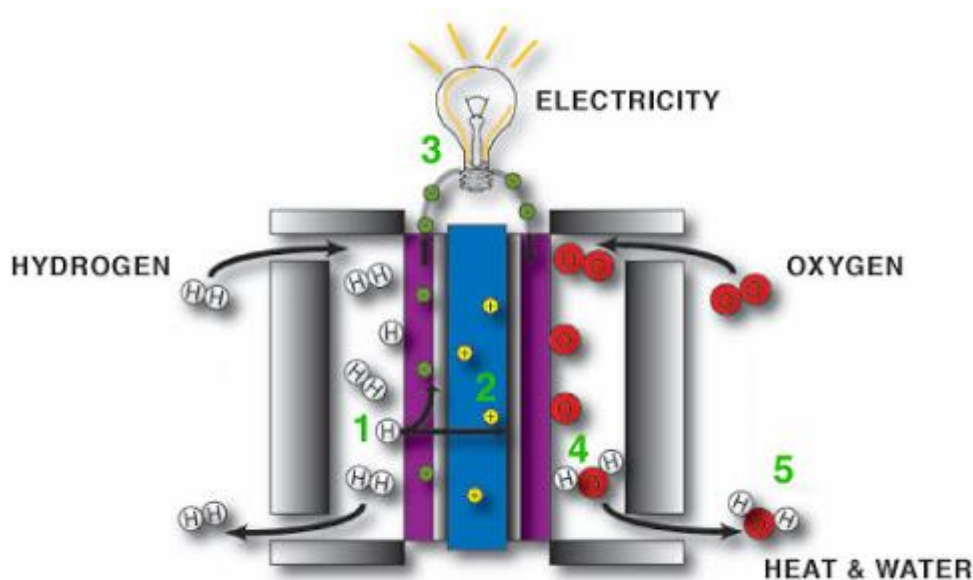
Εικόνα 10: Σύστημα αποθήκευσης με βαρυτική επιτάχυνσης²⁶

3.7 Ηλεκτρικά Συστήματα Αποθήκευσης

3.7.1 Συστήματα Αποθήκευσης Υδρογόνου

Τα συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου χρησιμοποιούνται εδώ και χρόνια για μεγάλα ποσά ενέργειας.²² Η περίσσεια ενέργειας που παράγεται από τις ΑΠΕ με μορφή ηλεκτρισμού χωρίζει τα μόρια υδρογόνου από του οξυγόνου και όταν οι ΑΠΕ δεν λειτουργούν ξανασυνδέονται παράγοντας ενέργεια προς χρήση. Είναι μια μορφή ηλεκτροχημικής μπαταρίας που εντάσσεται στην τεχνολογία κυψέλης καυσίμου. Έχει υψηλή πυκνότητα ενέργειας και δυνατότητα λειτουργίας σε μεγάλες τιμές ισχύος. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι έχει την μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας.

Ωστόσο η τεχνολογία αυτή έχει υψηλό κόστος λόγω των μετάλλων από τα οποία αποτελείται, γεγονός που αντιμετωπίζεται με τον καιρό. Επιπλέον η απόδοση του συστήματος αυτού είναι αρκετά χαμηλή και ο χρόνος απόκρισης μεγάλος, καθιστώντας το λιγότερο ελκυστικό.



Εικόνα 11: Σύστημα παραγωγής ενέργειας με καύσιμο υδρογόνο²³

Τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι αρκετά σημαντικά για να επισκιάσουν την υψηλή της ικανότητα για αποθήκευση. Ακόμη συνίσταται για μεγάλο χρόνο αποθήκευσης. Ίσως η εφαρμογή της για αποθήκευση σε άλλο πεδίο να είναι πιο συμβατή, διότι η εφαρμογή της για αποθήκευση σε κτίρια ΜΕΚ φαίνεται να μην είναι σωστή. Η απόδοση πρέπει να είναι μεγάλη και η ενέργεια να διοχετεύεται γρήγορα.

3.8 Βιβλιογραφική Σύγκριση

Έχοντας αναλύσει ένα μεγάλο μέρος επιλογών αποθήκευσης ενέργειας, που χρησιμοποιούνται συνήθως σε κτίρια MEK, επόμενο είναι η επιλογή μίας ή περισσότερων ως καλύτερη εφαρμογή σε αυτόνομο κτίριο MEK. Σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή των συστημάτων αποθήκευσης είναι η ανάγκη για αποθήκευση μεγάλων ποσών ενέργειας, η μεγάλη διάρκεια ζωής, η φιλική προς το περιβάλλον φύση της, η γρήγορη απόκριση, η μεγάλη απόδοση, το κόστος καθώς και η ευκολία χωροθέτησης. Τα συστήματα που εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια αναφέρονται συνοπτικά με τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους στον πίνακα 1 και με τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά τους στον πίνακα 2.

Συστήματα Αποθήκευσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μόλυβδου-Οξέος	Μικρό μέγεθος Χαμηλό κόστος	Μη φιλική προς το περιβάλλον Μικρή διάρκεια ζωής
Λιθίου	Υψηλή χωρητικότητα Υψηλή απόδοση	Ακριβή Μη φιλική στο περιβάλλον
Ροής Βαναδίου	Μεγάλη διάρκεια ζωής Φιλική προς το περιβάλλον	Χαμηλή απόδοση Υψηλό κόστος
Σφόνδυλοι	Φιλική προς το περιβάλλον Γρήγορη απόκριση	Γρήγορη αποφόρτιση Υψηλό κόστος
Συμπιεσμένος Αέρας	Μέτριο κόστος Φιλική προς το περιβάλλον Μεγάλη διάρκεια ζωής	Μεγάλο μέγεθος Περιορισμός τοποθέτησης
Ανλιοταμίευση	Φιλική προς το περιβάλλον Μεγάλη διάρκεια ζωής	Μεγάλο μέγεθος Περιορισμός τοποθέτησης
Βαρυτικής Επιτάχυνσης	Φιλική προς το περιβάλλον Μεγάλη διάρκεια ζωής Γρήγορη απόκριση Υψηλή απόδοση	Μεγάλο μέγεθος Περιορισμός τοποθέτησης
Υδρογόνου	Μεγάλα ποσά ενέργειας Φιλική προς το περιβάλλον	Αργή απόκριση Χαμηλή απόδοση Υψηλό κόστος

Πίνακας 1: Πίνακας πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των υπο μελέτη συστημάτων αποθήκευσης

Είδος	Σύστημα Αποθήκευσης	Διάρκεια Ζωής	Περιβαλλοντικά Φίλικό	Χρόνος Απόκρισης	Μέγεθος Αποθήκευσης	Απόδοση (%)	Ποσοστό Απωλειών Ημερησίως (%)	Κόστος
Χημικά	Μόλυβδου-Οξέος	Μικρή	Όχι	Μέτρια	Μικρό	70-90	0.15-0.25	Χαμηλό
	Λιθίου	Μεσαία-Μεγάλη	Όχι	Γρήγορα	Μεγάλο	80-100	0.15-0.25	Υψηλό
	Ροής Βαναδίου	Μεγάλη	Ναι	Γρήγορα	Μεγάλο	65-85	~0	Χαμηλό
Μηχανικά	Σφόνδυλοι	Μεγάλη	Ναι	Πολύ γρήγορα	Μεσαίο	90-95	5-20	Μεσαίο
	Συμπιεσμένος Αέρας	Μεσαία	Ναι	Αργά	Μεγάλο	50-75	<10	Μεσαίο
	Βαρυτικής Επιτάχυνσης	Μεγάλη	Ναι	Πολύ γρήγορα	Μεγάλο	80-90	~0	Μεσαίο
	Αντλιοταμίευσης	Μεγάλη	Ναι	Μέτρια	Μεγάλο	70-85	<0.5	Μεσαίο
Ηλεκτροχημικά	Υδρογόνου	Μεγάλη	Ναι	Αργά	Πολύ μεγάλο	40-66	~0	Υψηλό

Πίνακας 2: Πίνακας ποιοτικών χαρακτηριστικών των υπο μελέτη συστημάτων αποθήκευσης ^{24,25}

Στους πίνακες αυτούς παρατηρείται ότι φιλικά προς το περιβάλλον είναι τα συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες ροής βαναδίου και όλα τα μηχανικά συστήματα αποθήκευσης, ενώ μη φιλικά είναι τα συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες μόλυβδου-οξέος και λιθίου. Πολύ γρήγορο χρόνο απόκρισης έχουν τα συστήματα αποθήκευσης βαρυτικής επιτάχυνσης και με σφονδύλους, γρήγορη απόκριση τα συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες λιθίου και ροής βαναδίου, μέτρια απόκριση τα συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες μόλυβδου οξέος και αντλιοταμίευσης, ενώ τα υπόλοιπα συστήματα έχουν αργή απόκριση. Στην συνέχεια αναφέρεται ότι η δυνατότητα αποθήκευσης είναι μεγάλη για τα συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου, συμπιεσμένου αέρα, βαρυτικής επιτάχυνσης και αντλιοταμίευσης, καθώς και με μπαταρίες λιθίου και ροής βαναδίου, ενώ μεσαίο μέγεθος έχουν τα συστήματα αποθήκευσης με σφονδύλους και μικρό τα συστήματα με μπαταρίες μόλυβδου-οξέος. Ακολουθώς αναφέρεται ότι μεγάλη απόδοση έχουν τα συστήματα με μπαταρίες λιθίου και ροής βαναδίου καθώς και τα συστήματα με σφονδύλους και βαρυτικής επιτάχυνσης, μεσαία τα συστήματα με μπαταρίες ροής βαναδίου και αντλιοταμίευσης, ενώ μικρή απόδοση έχουν τα συστήματα συμπιεσμένου αέρα και υδρογόνου. Τέλος, το κόστος είναι υψηλό για τα συστήματα υδρογόνου και μπαταρίας λιθίου, μεσαίας τάξης για τα μηχανικά συστήματα και χαμηλό για τα συστήματα με μπαταρίες μόλυβδου-οξέος και ροής βαναδίου.

Μία συγκριτική παράμετρος είναι και η απαίτηση ειδικού χώρου που μπορεί να χρειάζεται ένα σύστημα για την εγκατάστασή του, όπως το σύστημα συμπιεσμένου αέρα που χρειάζονται υπόγεια δεξαμενή, βαρυτικής επιτάχυνσης που χρειάζεται υπόγεια σήραγγα και αντλιοταμίευσης που χρειάζεται την υψομετρική διαφορά. Στα υπόλοιπα γίνεται διαχωρισμός του μεγέθους τους για ίδιες τιμές αποθήκευσης.

Τελικά το κάθε σύστημα αποθήκευσης υπερτερεί από τα άλλα σε κάποιον παράγοντα, όπως φαίνεται στον πίνακα 3. Το σύστημα με μπαταρίες μόλυβδου-οξέος στο χαμηλό της κόστος, με μπαταρίες λιθίου στην υψηλή της απόδοση, με μπαταρίες ροής βαναδίου για την δυνατότητα επέκτασης, με σφονδύλους για την φιλική προς το περιβάλλον φύση τους, συμπιεσμένου αέρα για την διάρκεια ζωής, βαρυτικής επιτάχυνσης για τον χρόνο απόκρισης και την διάρκεια ζωής και υδρογόνου και αντλιοταμίευσης για την ικανότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσών ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Μπαταρία	Χαρακτηριστικό που υπερτερεί
Μόλυβδου-Οξέος	Χαμηλό κόστος
Λιθίου	Απόδοση
Ροής Βαναδίου	Εύκολη δυνατότητα επέκτασης
Σφόνδυλοι	Φιλική προς το περιβάλλον
Συμπιεσμένος Αέρας	Διάρκεια Ζωής
Βαρυτικής Επιτάχυνσης	Χρόνος απόκρισης, Διάρκεια Ζωής
Αντλιοταμείευσης	Χωρητικότητα
Υδρογόνου	Χωρητικότητα

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των υπό εξέταση συστημάτων αποθήκευσης

4.Μελέτη περίπτωσης

4.1 Leaf House

Τοποθεσία και βασικές πληροφορίες

Στην εργασία αυτή λαμβάνεται ως κτίριο μελέτης το Leaf House, ένα κτίριο MEK που βρίσκεται στην περιοχή Angeli di Rosora στην πόλη Ανκόνα της Ιταλίας (γεωγραφικό πλάτος 43°28'04.16 N, γεωγραφικό μήκος 13°04'00.65 E, υψόμετρο 130 m πάνω από την θάλασσα) και χτίστηκε το 2008.³ Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται εύκρατο, με την ετήσια θερμοκρασία να κυμαίνεται από 5-37°C. Το κτίριο αποτελείται από τρεις ορόφους με δύο διαμερίσματα ο καθένας, σύνολο έξι, εκ των οποίων τα δύο κατοικούνται συχνά, ενώ τα άλλα τέσσερα κατοικούνται συνέχεια από δύο κατοίκους το καθένα. Το κτίριο έχει νότια κατεύθυνση και ο λόγος της νότιας προς την ανατολική πρόσοψη είναι 1,34, για την μεγιστοποίηση της θερμότητας του ήλιου τους χειμερινούς μήνες. Το εξωτερικό κέλυφος του κτιρίου αποτελείται από τοίχους με U-value 0,41W/m²K και παράθυρα με U-value 0,73-1,49W/m²K.. Η οροφή, τα ηλιοθερμικά πάνελ και τα μπαλκόνια λειτουργούν ως σκίαστρα για την αποσυμφόρηση από τον ήλιο τους θερινούς μήνες. Στο κτίριο έχουν συμπεριληφθεί υψηλή μόνωση, αεριζόμενη οροφή, σωλήνες ηλιακού φωτισμού, τεχνολογίες παρακολούθησης και ελέγχου των συσκευών, ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά πάνελ, χρήση γεωθερμίας και αντλιών θερμότητας, ηλιακοί συλλέκτες, αποθήκευση ενέργειας και εύκολη διαχείριση των συστημάτων λειτουργίας του κτιρίου.

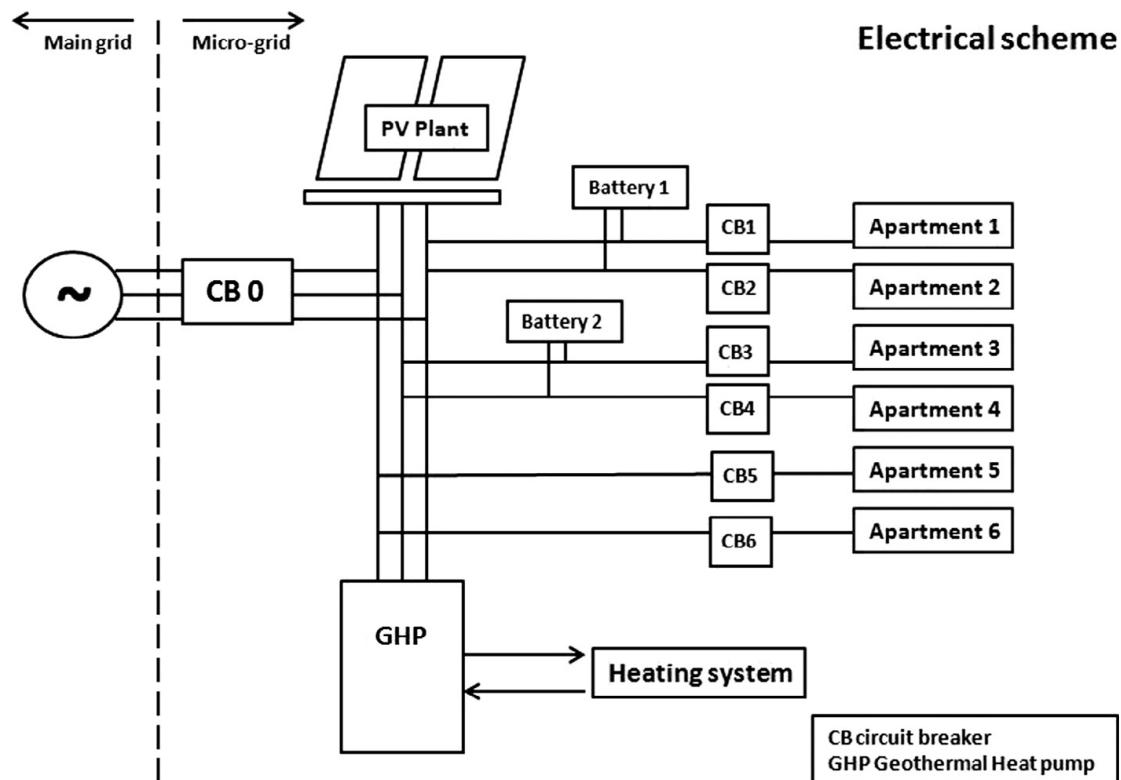
Κάλυψη αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας

Επιπλέον υπάρχουν εγκατεστημένα 20kWp φωτοβολταϊκά πάνελ στην οροφή του κτιρίου, τα οποία είναι φτιαγμένα από μονοκρυσταλικά πλαίσια και είναι τοποθετημένα στην 21° κεκλιμένη οροφή. Η ενέργεια των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιείται επί των πλείστον για να λειτουργούν οι αντλίες θερμότητας και για την μείωση της συνολικής κατανάλωσης. Έτσι, για την κάλυψη αυτών των αναγκών έχουν εγκατασταθεί 117 πάνελ με 150m² έκταση. Αποτελεί μέρος μίας έρευνας για τα έξυπνα



Εικόνα 12: Βόρεια όψη του Leaf House²⁶

κτίρια και την ενσωμάτωσή τους στα έξυπνα δίκτυα, γεγονός που εξηγεί την ύπαρξη συστημάτων παρακολούθησης των ενεργειακών καταναλώσεων σε όλα τα σημεία του κτιρίου.²⁷ Το σύστημα παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά του Leaf House αποτελείται από τρία μονοφασικά κυκλώματα συνδεδεμένα με σκοπό τη δημιουργία ενός σταθεροποιημένου τριφασικού κυκλώματος. Τα διαμερίσματα είναι ομαδοποιημένα σε ζευγάρια, εκ των οποίων το κάθε ένα ζευγάρι είναι συνδεδεμένο μεταξύ του για την δημιουργία ενός τριφασικού κυκλώματος. Τα δύο συστήματα αποθήκευσης εξυπηρετούν δύο ζευγάρια διαμερισμάτων και αποθηκεύουν ενέργεια από δύο από τις τρεις συστοιχίες φωτοβολταϊκών πάνελ. Η επιλογή αυτή έγινε διότι τα τέσσερα από τα έξι διαμερίσματα κατοικούνται συνήθως και η διάταξη που προαναφέρθηκε φαίνεται στην εικόνα 13.²⁸



Εικόνα 13: Σχεδιάγραμμα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο του Leaf House³⁶

Η κατανάλωση της παραγόμενης στο κτίριο ενέργειας μεγιστοποιείται αποθηκεύοντας ενέργεια όταν η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά υπερβαίνει την κατανάλωση, καθώς τροφοδοτεί απευθείας το κτίριο. Για την μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του κτιρίου ακολουθούνται οι παρακάτω αρχές:

- Οι μπαταρίες εξυπηρετούν μόνο τα διαμερίσματα, ενώ το σύστημα θέρμανσης, ψύξης και αερισμού του κτιρίου δεν τροφοδοτείται από το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Κατά την φάση της αποφόρτισης, η μπαταρία τροφοδοτεί το 90% για την κάλυψη του φορτίου και το 10% τροφοδοτείται πάντα από το δίκτυο παροχής ρεύματος, με σκοπό την αποφυγή τροφοδοσίας ενέργειας πίσω στο δίκτυο.
- Η διαδικασία αποφόρτισης δεν επιτρέπεται για ποσοστό κάτω του 30% της ονομαστικής χωρητικότητας του συστήματος αποθήκευσης, διότι κάτω από το ποσοστό αυτό η διαδικασία αποφόρτισης γίνεται πολύ γρήγορα και οι ενδείξεις της εναπομένουσας ενέργειας καθίστανται μη αξιόπιστες και μπορεί να οδηγήσουν στην απώλεια ελέγχου της διαδικασίας αποφόρτισης. Αν συμβεί αυτό και η μπαταρία αδειάσει πλήρως, το σύστημα δεν μπορεί να επανεκκινήσει αυτόματα, λόγω της διαφοράς τάσης μεταξύ του μετατροπέα

ρεύματος και της μπαταρίας. Επιπλέον οι μεγάλες αποφορτίσεις οδηγούν στην μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

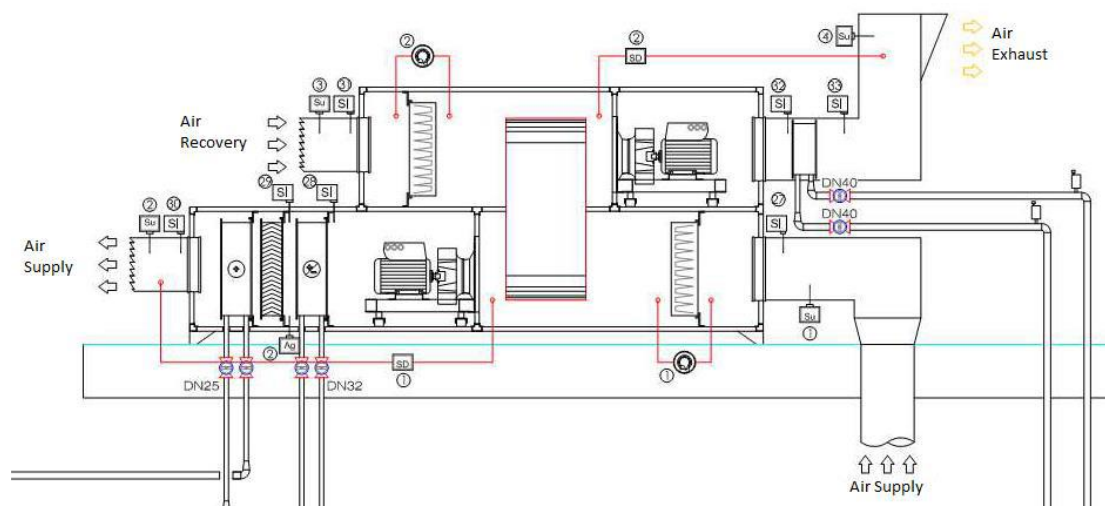
- Η μπαταρία τροφοδοτεί το σύστημα όταν η κατανάλωση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή των φωτοβολταϊκών. Ωστόσο, αν ξεκινήσει η διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας, δεν μπορεί να παρέχει ενέργεια στο σύστημα έως ότου φορτίσει τουλάχιστον 65% της ονομαστικής της ισχύος. Αυτό συμβαίνει για να περιοριστεί η συχνότητα των κύκλων φόρτισης και αποφόρτισης.

Κάλυψη αναγκών θερμικής ενέργειας

Το κτίριο διαθέτει επίσης και ένα σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας το οποίο χρησιμοποιείται για θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό χρήσης, του οποίου τα τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 4. Τα διαμερίσματα τροφοδοτούνται με ενδοδαπέδια θερμότητα τις περιόδους που έχει κρύο, καθώς με τον ίδιο τρόπο αφαιρείται η θερμότητα τους ζεστούς μήνες. Η σύνδεση μεταξύ της υπόγειας πηγής και της ενδοδαπέδιας θέρμανσης μειώνει το χάσμα που θα δημιουργούταν κατά την συμπύκνωση και εξάτμιση, επομένως αυξάνεται με τον τρόπο αυτό η απόδοση του συστήματος. Επιπλέον, στην παραγωγή ζεστού νερού χρήσης συνεισφέρουν και επτά ηλιακοί συλλέκτες θερμότητας σε συνδυασμό με μια δεξαμενή νερού 1300l, η οποία λειτουργεί σαν σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Στην περίπτωση ανεπαρκούς παραγωγής ζεστού νερού από τα ηλιοθερμικά, έχει εγκατασταθεί ένας ηλεκτρικός καυστήρας 15kWt. Η ποσότητα της ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, που παρέχεται στα διαμερίσματα, ρυθμίζεται από ψηφιακές βαλβίδες που ελέγχουν την ροή του νερού στις ενδοδαπέδιες σωληνώσεις. Η διάταξη του συστήματος θέρμανσης, ψύξης και αερισμού φαίνεται στην εικόνα 14.

Τύπος αντλίας θερμότητας	Ισχύς για θέρμανση (kW)	COP για θέρμανση	Ισχύς για ψύξη (kW)	COP για ψύξη	Electrical Power Installed (kW)
B0/W35	16.6	4.6	13	3.61	3.6
B2/W45	17	3.76	12.5	2.78	4.5
B3/W55	16.2	2.94	10.6	1.93	5.5

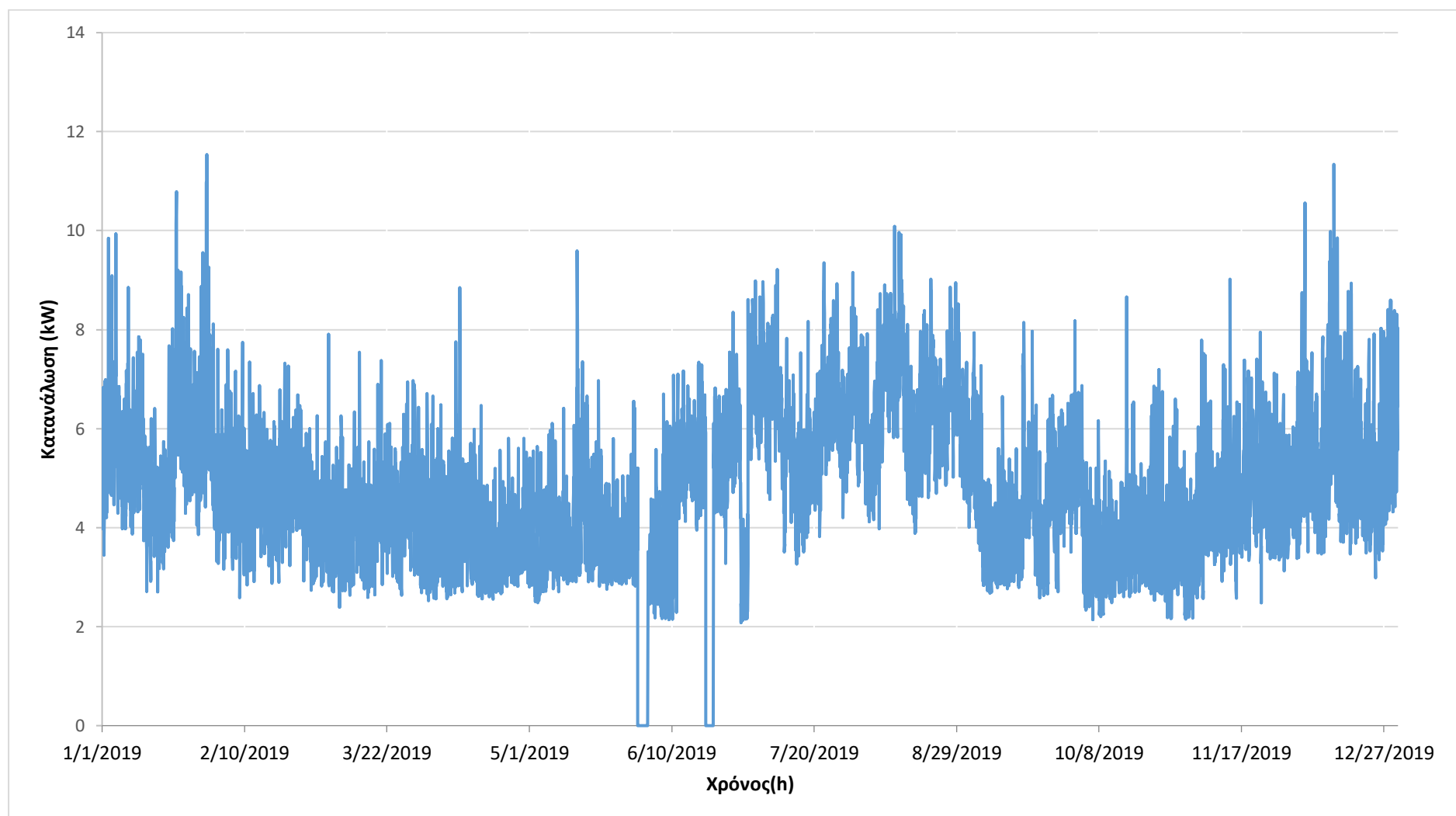
Πίνακας 4: Τεχνικά χαρακτηριστικά των αντλιών θερμότητας του Leaf House



Εικόνα 14: Σύστημα θέρμανσης, ψύξης και αερισμού του Leaf House ²⁷

Παρακολούθηση της ροής ενέργειας

Τα διαμερίσματα του Leaf House είναι εξοπλισμένα με οθόνες αφής που παρέχουν πληροφορίες για την ροή ενέργειας και δίνουν πρόσβαση σε ένα σύστημα παρακολούθησης των εσωτερικών συνθηκών, των δεδομένων που σχετίζονται με την ενέργεια και διαχείρισης των αυτόματων ρυθμίσεων του συστήματος θέρμανσης, ψύξης και αερισμού, του φωτισμού, των σκίαστρων κ.α.. Επίσης τα δεδομένα των διαμερισμάτων του Leaf House είναι διαθέσιμα στην πλατφόρμα MyLeaf. Σύμφωνα με τα δεδομένα της πλατφόρμας αυτής και για το έτος 2019 οι ενεργειακές ανάγκες ήταν 41.112,3kWh. Το διάγραμμα των ενεργειακών καταναλώσεων του κτιρίου για το έτος 2019 φαίνονται στην εικόνα 15. Σε αυτό γίνεται αντιληπτό ότι η ωριαία ισχύς κυμαίνεται από 2 έως 12 kWh, με εξαίρεση βέβαια δυο σημείων του γραφήματος όπου η κατανάλωση μηδενίζεται, πιθανόν λόγω απουσίας των ενοίκων εκείνο το χρονικό διάστημα.



Εικόνα 15: Διάγραμμα ηλεκτρικών καταναλώσεων που απαιτεί το Leaf House για το έτος 2019 από δεδομένα των μετρητών του κτιρίου

4.2 Λογισμικό Homer Pro

Για την προσομοίωση εφαρμογής και λειτουργίας των τεχνολογιών αποθήκευσης θα γίνει χρήση του λογισμικού Homer. Σε αυτό γίνεται η υπόθεση ότι η παραγωγή ενέργειας γίνεται από φωτοβολταϊκά πάνελ σε συνδυασμό με ανεμογεννήτριες και η περίσσεια ενέργεια αποθηκεύεται για χρήση κατά την διάρκεια που αυτά βρίσκονται σε αδράνεια. Επίσης η αυτονομία του κτιρίου θα είναι τρεις μέρες χωρίς παραγωγή από τις ΑΠΕ. Κύριο μέλημα δεν είναι ο σχεδιασμός των ΑΠΕ αλλά ούτε και του εξοπλισμού αποθήκευσης ενέργειας με σκοπό την εφαρμογή τους στο κτίριο, αλλά η μελέτη και η σύγκριση διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης πάνω στο συγκεκριμένο κτίριο και τελικά η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τον τρόπο κάλυψης των ενεργειακών αναγκών από το εκάστοτε σύστημα και την διεξαγωγή συμπερασμάτων.

Το λογισμικό Homer (Hybrid Optimization Model for Electrical Renewable) Pro προσομοιώνει την συμπεριφορά ενεργειακών συστημάτων για κάθε μία ώρα για διάρκεια ενός έτους και αποδίδει ως αποτελέσματα διάφορους δυνατούς τρόπους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών και του κόστους ζωής. Κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης, το λογισμικό ερευνά για διάφορες πιθανές ρυθμίσεις παραμέτρων, το μέγεθος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, εφαρμόζοντας ωστόσο περιορισμούς με σκοπό την επιλογή της πιο οικονομικής λύσης.

Συνολικό κόστος ζωής (Net Present Cost/NPC)

Κύριος στόχος του λογισμικού είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (Net Present Cost/NPC), το οποίο είναι η παρούσα τιμή του κόστους για όλα τα μέλη ενός συστήματος, τόσο για την εγκατάσταση όσο και για την λειτουργία τους, για όλη την διάρκεια ζωής του, μείον την παρούσα τιμή όλων των εσόδων, για όλη την διάρκεια ζωής του. Η τιμή αυτή περιλαμβάνει το κόστος κεφαλαίου, το κόστος αντικατάστασης, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμων και το κόστος αγοράς ρεύματος από το δίκτυο παροχής. Τα έσοδα περιλαμβάνουν την υπολειμματική αξία των μελών του συστήματος και εκπτώσεις του δικτύου παροχής, που στην περίπτωση που εξετάζεται δεν θα συμπεριληφθεί, λόγω απουσίας δικτύου παροχής. Η έκφραση αυτή έχει και μαθηματική μορφή που φαίνεται στην εξίσωση (1) και ελαχιστοποιείται περιορισμένη από τις ανισότητες (2) έως (5)^{29,30}

$$\min(C_{NPC,i}) = \sum_{AllElements} \left[-R_{0,i} + \sum_{t=0}^T \frac{R_{t,i}}{(1+x)^t} \right] \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{shedding} \leq 0.05 \cdot P_{load}, & (2) \\ f_{PV} \geq 0.15 \cdot E_{gen}, & (3) \\ r_{load,t} \geq 0.10 \cdot P_{load,t}, & (4) \\ r_{peak\ load} \geq 0.10 \cdot P_{load}, & (5) \end{cases}$$

Όπου

- $C_{NPC,i}$ = το συνολικό κόστος καθόλη την διάρκεια ζωής του στοιχείου i (\$)
- R_0 = τιμή αρχικής επένδυσης (\$)
- R_t = το συνολικό κόστος ροής για κάθε στοιχείο (\$)
- x = συντελεστής έκπτωσης (%)
- t = χρόνος ροής χρημάτων (y)
- P_{load} = το φορτίο την χρονική στιγμή t (kWh)
- f_{PV} = το κλάσμα των φωτοβολταϊκών (%)
- E_{gen} = η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (kWh/y)
- $r_{load,t}$ = το λειτουργικό απόθεμα εκφρασμένο σαν ποσοστό του φορτίου κάθε χρονική στιγμή t (%)
- $r_{peak\ load}$ = το λειτουργικό απόθεμα εκφρασμένο σαν ποσοστό του ετήσιου φορτίου αιχμής (%)

Όσον αφορά το κόστος για κάθε μέλος του συστήματος, η εξίσωση (6) συμπεριλαμβάνει τις παραμέτρους για όλη την διάρκεια ζωής.

$$C_{element,i} = \sum C_{capital,i} + C_{O\&M,i} + C_{replacement,i} + C_{fuel,i} \quad (6)$$

Όπου

- $C_{element,i}$ = το κόστος που σχετίζεται με το στοιχείο i για όλη την διάρκεια ζωής του (\$)
- $C_{Capital,i}$ = το κόστος κεφαλαίου του στοιχείου i (\$)
- $C_{O\&M,i}$ = το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του στοιχείου i (\$/y)
- $C_{replacement,i}$ = το κόστος αντικατάστασης του στοιχείου i (\$)
- $C_{fuel,i}$ = το κόστος του καυσίμου που μπορεί να χρειάζεται το στοιχείο i (\$)

Τα έσοδα από την υπολειμματική αξία των μελών του συστήματος δίνεται από την εξίσωση (7)

$$C_{salvage,i} = C_{replacement,i} \cdot \frac{R_{rem,i}}{R_{element,i}} \quad (7)$$

Όπου

- $R_{rem,i}$ = το υπόλοιπο ζωής του στοιχείου i (y)
- $R_{element,i}$ = ο χρόνος ζωής του στοιχείου i (y)

Το κλάσμα των φωτοβολταϊκών (PV) που εμφανίζεται και στην εξίσωση (3) υπολογίζεται από την εξίσωση (8).

$$f_{PV} = 1 - \frac{E_{nonren} + H_{nonren}}{E_{served} + H_{served}} \quad (8)$$

Όπου

- E_{nonren} = η παραγωγή ενέργειας από μη ανανεώσιμες πηγές (kWh/y)
- H_{nonren} = η παραγωγή θερμικής ενέργειας από μη ανανεώσιμες πηγές (kWh/y)
- E_{served} = το συνολικό φορτίο που καλύφθηκε (kWh/y)
- H_{served} = το θερμικό φορτίο που καλύφθηκε (kWh/y)

Το λειτουργικό απόθεμα, $r_{load,t}$ και $r_{peakload}$, είναι εφαρμοσμένο στις εξισώσεις (9) και (10) για να εξασφαλίσουν ένα αξιόπιστο σύστημα κατά την διάρκεια ξαφνικής αύξησης του φορτίου ή ξαφνικής μείωσης της παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Το Homer Pro υπολογίζει το ελάχιστο λειτουργικό απόθεμα στο δίκτυο του συνεχούς και του εναλλασσόμενου ρεύματος ξεχωριστά μέσω των εξισώσεων (9) και (10).

$$L_{res,AC} = r_{load,t} \cdot L_{prim,AC} + r_{peakload} \cdot L_{highestprim,AC} \quad (9)$$

$$L_{res,DC} = r_{load,t} \cdot L_{prim,DC} + r_{peakload} \cdot L_{highestprim,DC} \quad (10)$$

Όπου

- $L_{res,AC}$ = το ελάχιστο λειτουργικό απόθεμα στον ιστό του εναλλασσόμενου ρεύματος (kWh)

- $L_{res,DC}$ = το ελάχιστο λειτουργικό απόθεμα στον ιστό του συνεχούς ρεύματος (kWh)
- $L_{prim,AC}$ = το μέσο φορτίο εναλλασσόμενου ρεύματος την κάθε χρονική στιγμή (kWh)
- $L_{prim,DC}$ = το μέσο φορτίο συνεχούς ρεύματος την κάθε χρονική στιγμή (kWh)
- $L_{highest\ prim,AC}$ = το μέγιστο ετήσιο φορτίο εναλλασσόμενου ρεύματος (kWh)
- $L_{highest\ prim,DC}$ = το μέγιστο ετήσιο φορτίο συνεχούς ρεύματος (kWh)

Φωτοβολταϊκά πάνελ (PV)

Το Homer υπολογίζει την παραγωγή των φωτοβολταϊκών πάνελ από την εξίσωση (11)

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \cdot \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) [1 + a_p \cdot (T_c - T_{c,STC})] \quad (11)$$

Όπου:

- Y_{PV} = η ονομαστική χωρητικότητα των φωτοβολταϊκών πάνελ, δηλαδή η ισχύς που παράγει κάτω από τυπικές συνθήκες δοκιμής (kW)
- f_{PV} = ο συντελεστής απομείωσης των φωτοβολταϊκών (%)
- G_T = η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στα φωτοβολταϊκά για κάθε χρονική στιγμή (kW/m^2)
- $G_{T,STC}$ = η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε τυπικές συνθήκες δοκιμής (1kW/m^2)
- a_p = η θερμοκρασιακή σταθερά της ισχύος ($\%/^{\circ}\text{C}$)
- T_c = η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πάνελ την κάθε χρονική στιγμή ($^{\circ}\text{C}$)
- $T_{c,STC}$ = η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πάνελ σε τυπικές συνθήκες δοκιμής (25°C)

Αν επιλεγεί να μην επηρεάζει η θερμοκρασία των πάνελ την παραγωγή τους, τότε η εξίσωση (11) απλουστεύεται στην εξίσωση (12).

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \cdot \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) \quad (12)$$

Ανεμογεννήτριες (Wind Generators)

Το Homer υπολογίζει την παραγωγή ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες κάθε χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας μια διαδικασία τριών σταδίων. Αρχικά υπολογίζει την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της ανεμογεννήτριας, στην συνέχεια υπολογίζει την ισχύ που παράγει για την τυπική τιμή πυκνότητας αέρα και τέλος προσαρμόζει την παραγωγή ενέργειας με την πραγματική τιμή πυκνότητας του αέρα.

Η ταχύτητα στο ύψος της ανεμογεννήτριας δίνεται από την εξίσωση (13)

$$U_{hub} = U_{anem} \cdot \frac{\ln\left(\frac{Z_{hub}}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_{anem}}{Z_0}\right)} \quad (13)$$

Όπου:

- U_{hub} = η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της ανεμογεννήτριας (m/s)
- U_{anem} = η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του ανεμόμετρου (m/s)
- Z_{hub} = το ύψος της ανεμογεννήτριας (m)
- Z_{anem} = το ύψος του ανεμόμετρου (m)
- Z_0 = το μήκος της επιφανειακής τραχύτητας (m)

Αν επιλεγεί να εφαρμοστεί ο νόμος της δύναμης, τότε το Homer υπολογίζει την ταχύτητα χρησιμοποιώντας την εξίσωση (14)

$$U_{hub} = U_{anem} \cdot \left(\frac{Z_{hub}}{Z_{anem}}\right)^\alpha$$

Όπου:

- α = η σταθερά του νόμου της δύναμης

Αφού το Homer υπολογίσει την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιεί το διάγραμμα ισχύος της ανεμογεννήτριας για να υπολογίσει την αναμενόμενη παραγωγή ενέργειας για την ταχύτητα που υπολογίστηκε και για τις τυπικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Αν η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της ανεμογεννήτριας δεν είναι μέσα στα όρια που ορίζει η καμπύλη ισχύος, τότε δεν παράγεται καθόλου ισχύς.

Για την προσαρμογή των πραγματικών συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης, το Homer πολλαπλασιάζει την τιμή της ισχύος που υπολογίστηκε από την καμπύλη ισχύος με τον λόγο πυκνότητας του αέρα, όπως φαίνεται στην εξίσωση (14).

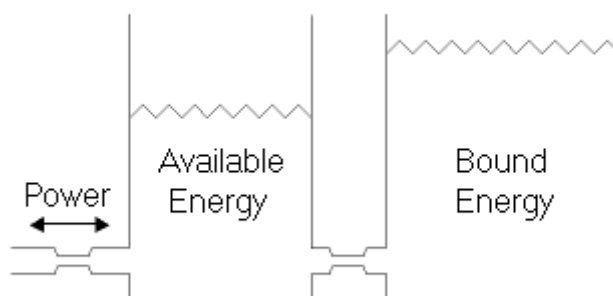
$$P_{WTG} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \cdot P_{WTG,STP} \quad (14)$$

Όπου:

- P_{WTG} = η παραγωγή ενέργειας της ανεμογεννήτριας (kW)
- $P_{WTG,STP}$ = η παραγωγή ενέργειας της ανεμογεννήτριας σε τυπικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (kW)
- ρ = η πραγματική πυκνότητα του αέρα (kg/m^3)
- ρ_0 = η πυκνότητα του αέρα σε τυπικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (1.225 kg/m^3)

Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Το Homer χρησιμοποιεί το μοντέλο κινητικής μπαταρίας για να προσδιορίσει τα ποσά ενέργειας που μπορούν να αποθηκευτούν ή να δοθούν πίσω στο σύστημα από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για κάθε χρονική στιγμή.³¹ Το μοντέλο κινητικής μπαταρίας είναι ένα μοντέλο δύο δεξαμενών με συμπεριφορά όπως αυτή των μπαταριών μόλυβδου-οξέος. Η πρώτη δεξαμενή περιέχει την διαθέσιμη ενέργεια, ή την άμεσα διαθέσιμη ενέργεια για μετατροπή σε συνεχές ρεύμα. Η δεύτερη δεξαμενή περιέχει την δεσμευμένη ενέργεια, ή την ενέργεια που είναι χημικά δεσμευμένη και για τον λόγο αυτό όχι άμεσα διαθέσιμη, όπως φαίνεται και στην εικόνα 14.



Εικόνα 16: Απεικόνιση της διάταξης λειτουργίας του μοντέλου κινητικής μπαταρίας

Το σύστημα αυτό περιγράφεται από τρεις παραμέτρους, την μέγιστη χωρητικότητα Q_{\max} , η οποία είναι το συνολικό ποσό ενέργειας που μπορούν να χωρέσουν οι δύο δεξαμενές, τον λόγο χωρητικότητας c , ο οποίος είναι ο λόγος του μεγέθους της

δεξαμενής διαθέσιμης ενέργειας προς το μέγεθος των δυο δεξαμενών μαζί και η σταθερά k , η οποία σχετίζεται με την αγωγιμότητα μεταξύ των δύο δεξαμενών, δηλαδή ένα μέτρο έκφρασης του πόσο γρήγορα μπορεί να μετατραπεί η ενέργεια από την μία δεξαμενή στην άλλη. Οι παράμετροι αυτοί καθορίζονται από το Homer μέσω της καμπύλης χωρητικότητας του συστήματος αποθήκευσης. Η συνολική ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί είναι το άθροισμα της διαθέσιμης και της δεσμευμένης ενέργειας.

Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα σύστημα αποθήκευσης δίνεται από την εξίσωση (15).

$$P_{batt,dmax,kgm} = \frac{-kcQ_{max} + kQ_1e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (15)$$

Παρομοίως, η ενέργεια που μπορεί να δοθεί από ένα σύστημα αποθήκευσης για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα Δt δίνεται από την εξίσωση (16).

$$P_{batt,cmax,kgm} = \frac{kQ_1e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (16)$$

Οι εξισώσεις (15) και (16) δίνουν το δυνατό εύρος από και προς το σύστημα αποθήκευσης για κάθε χρονική στιγμή. Έτσι, αφού το Homer υπολογίσει την πραγματική ενέργεια κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση, υπολογίζει επίσης τα ποσά της διαθέσιμης και δεσμευμένης ενέργειας στο τέλος κάθε χρονικής στιγμής σύμφωνα με τις εξισώσεις (17) και (18).

$$Q_{1,end} = Q_1e^{-k\Delta t} + \frac{(Qkc - P)(1 - e^{-k\Delta t})}{k} + \frac{Pc(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})}{k} \quad (17)$$

$$Q_{2,end} = Q_2e^{-k\Delta t} + Q(1 - c)(1 - e^{-k\Delta t}) + \frac{P(1 - c)(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})}{k} \quad (18)$$

Όπου:

- Q_1 = η διαθέσιμη ενέργεια στην αρχή της χρονικής στιγμής (kWh)
- Q_2 = η δεσμευμένη ενέργεια στην αρχή της χρονικής στιγμής (kWh)
- $Q_{1,end}$ = η διαθέσιμη ενέργεια στο τέλος της χρονικής στιγμής (kWh)
- $Q_{2,end}$ = η δεσμευμένη ενέργεια στο τέλος της χρονικής στιγμής (kWh)
- P = η ισχύς εντός(+) ή εκτός(-) του συστήματος αποθήκευσης (kW)

- Δt = το χρονικό διάστημα (h)

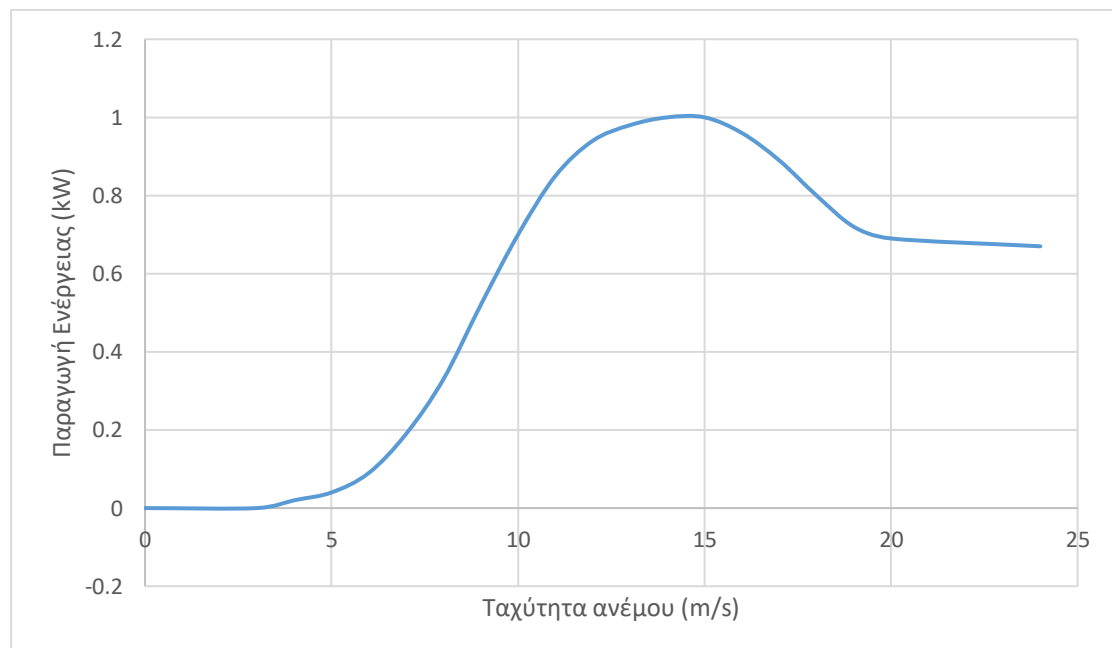
4.3 Προσομοιώσεις

Φωτοβολταϊκά πάνελ (PV)

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που θα χρησιμοποιηθούν για τις προσομοιώσεις των συστημάτων αποθήκευσης βρίσκονται στην βιβλιοθήκη του Homer και είναι η επιλογή ενός γενικού τύπου φωτοβολταϊκών (generic flat plate PV), το οποίο δεν έχει συγκεκριμένη ισχύ, με σκοπό να προσαρμόζεται στις ανάγκες της κάθε περίπτωσης και να δίνει σαν αποτέλεσμα την ακριβή τιμή της ισχύος που απαιτείται σε κάθε περίπτωση. Το κόστος εγκατάστασής τους είναι 1.000€/kW, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης 5€/y/kW και η διάρκεια ζωής 25y. Στην προσομοίωση δεν συμπεριλήφθηκε κόστος αντικατάστασης.

Ανεμογεννήτριες (WG)

Οι ανεμογεννήτριες που θα χρησιμοποιηθούν για τις προσομοιώσεις είναι γενικού τύπου 1kW (generic 1kW) και βρίσκονται στην βιβλιοθήκη του Homer. Το κόστος εγκατάστασης είναι 3.000€/kW, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης 10€/y/kW και η διάρκεια ζωής 20y. Στην εικόνα 17 φαίνεται η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας που παρουσιάζει την παραγόμενη ισχύ της ανεμογεννήτρια σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου. Στην προσομοίωση δεν συμπεριλήφθηκε κόστος αντικατάστασης.



Εικόνα 17: Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας 1kW

Μετατροπέας ρεύματος (Converter)

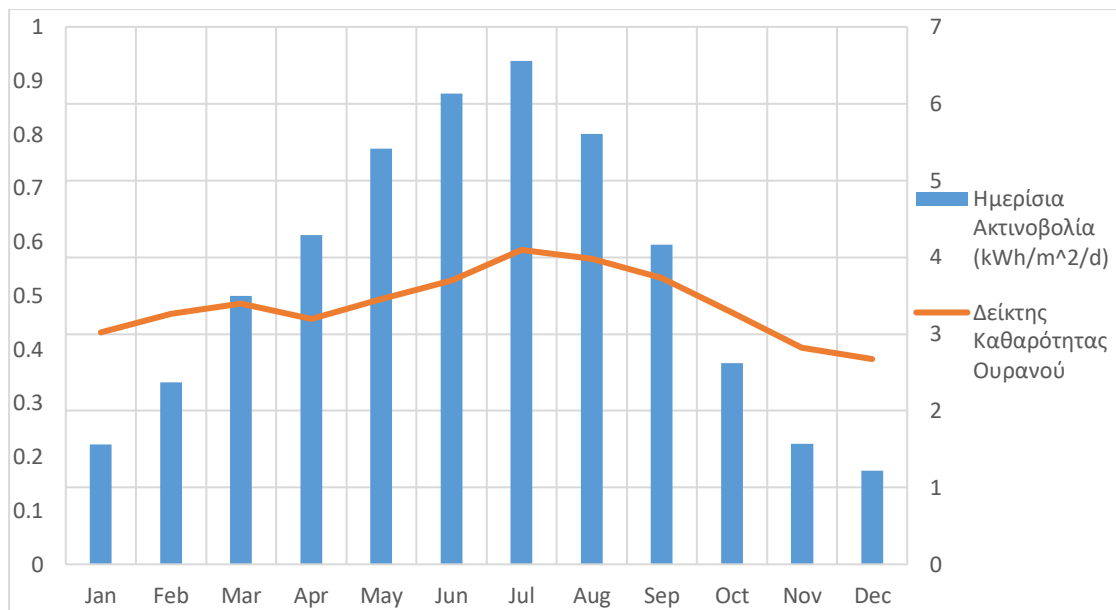
Ο μετατροπέας που επιλέχθηκε βρίσκεται στην βιβλιοθήκη του Homer και σκοπός του είναι η μετατροπή του ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο, ο οποίος δεν έχει συγκεκριμένη ισχύ, με σκοπό να προσαρμόζεται στις ανάγκες της κάθε περίπτωσης και να δίνει σαν αποτέλεσμα την ακριβή τιμή της ισχύος που απαιτείται σε κάθε περίπτωση. Οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά πάνελ και τα συστήματα αποθήκευσης χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα, επομένως για αξιοποίηση της ενέργειας αυτής για κάλυψη του φορτίου πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Το κόστος εγκατάστασης είναι 160€/kW, ενώ το κόστος λειτουργίας και συντήρησης και το κόστος αντικατάστασης δεν συμπεριλήφθηκαν στην προσομοίωση. Η διάρκεια ζωής του μετατροπέα είναι 15y και η απόδοσή του 95%.

	Κόστος (€/kW)	O&M (€/y/kW)	Διάρκεια Ζωής (y)
Φωτοβολταϊκά	1.000	5	25
Ανεμογεννήτριες	3.000	10	20
Μετατροπείς	160	0	15

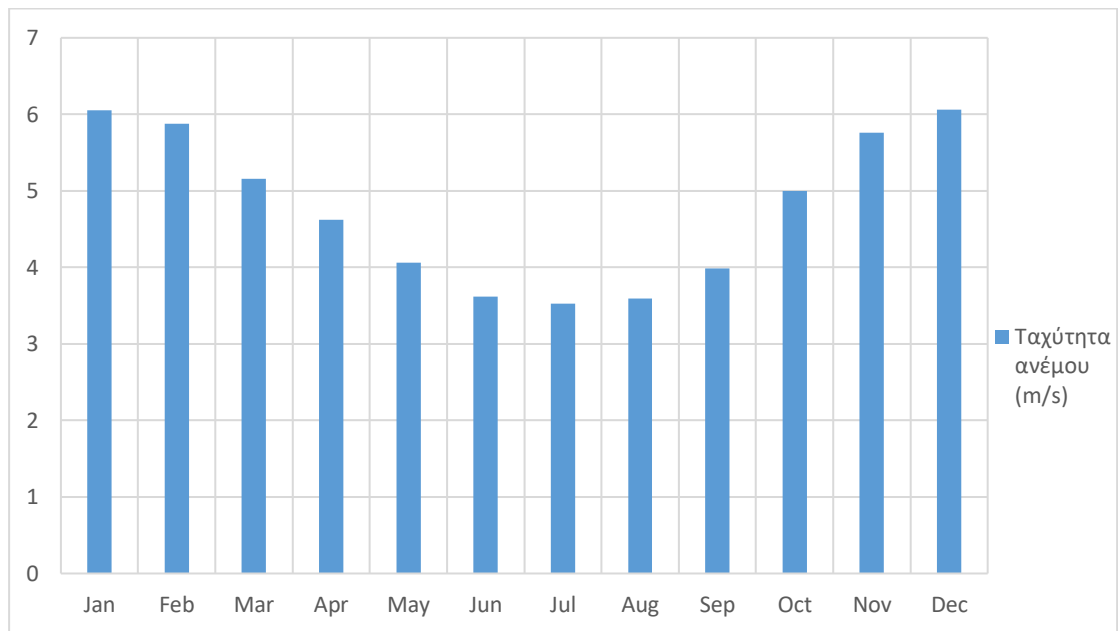
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά εισόδου των φωτοβολταϊκών, των ανεμογεννητριών και του μετατροπέα

Δεδομένα Εισόδου

Οι τιμές των μετεωρολογικών δεδομένων τόσο για τα φωτοβολταϊκά, όσο και για τις ανεμογεννήτριες, προέρχονται από βάσεις δεδομένων της NASA και τα οποία εισάγει το Homer σύμφωνα με την τοποθεσία που έχει επιλεγεί. Τα δεδομένα των καταναλώσεων του Leaf House για το έτος 2019 προέρχονται από την πλατφόρμα MyLeaf, στην οποία είναι αποθηκευμένες οι τιμές όλων των μετρητών του κτιρίου από την αρχή λειτουργίας του. Τα προφίλ των μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιεί το Homer απεικονίζονται στις εικόνες 18 και 19, για την ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα του ανέμου αντίστοιχα. Το προφίλ των ενεργειακών καταναλώσεων του Leaf House παρουσιάστηκε ξανά στην εικόνα 15.



Εικόνα 18: Προφίλ μέσων τιμών μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας από δεδομένα της NASA για 22 χρόνια



Εικόνα 19: Προφίλ μέσων τιμών μηνιαίας ταχύτητας ανέμου από δεδομένα της NASA για 22 χρόνια

Συστήματα Αποθήκευσης

Τα συστήματα αποθήκευσης που θα εξετασθούν είναι οι χημικές μπαταρίες τεχνολογίας λιθίου, μόλυβδου-οξέος και ροής βαναδίου, τα μηχανικά συστήματα αποθήκευσης όπως συμπιεσμένου αέρα, σφόνδυλοι, αντλιοταμείωσης και αποθήκευση βασισμένη στην βαρύτητα καθώς και τα ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου.

Η μπαταρία μόλυβδου οξέος που έχει επιλεγεί για τις προσομοιώσεις έχει χωρητικότητα 1 kWh, ονομαστική τάση 12V, απόδοση 80%, διάρκεια ζωής 10y και ελάχιστο ποσοστό φόρτισης 40%. Η μπαταρία αυτή βρίσκεται στην βιβλιοθήκη του Homer και το κόστος έχει εκτιμηθεί 100 €/kWh, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης 10€/y/kWh και δεν έχει συμπεριληφθεί κόστος αντικατάστασης.

Η μπαταρία λιθίου που έχει επιλεγεί για τις προσομοιώσεις, βρίσκεται στην βιβλιοθήκη του Homer και έχει χωρητικότητα 1 kWh. Επίσης η ονομαστική τάση της είναι 6V, η απόδοσή της 97%, η διάρκεια ζωής 15y και το ελάχιστο ποσοστό φόρτισης 20%. Το κόστος έχει εκτιμηθεί 200 €/kWh, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης 0 €/y/kWh και δεν έχει συμπεριληφθεί κόστος αντικατάστασης. Το κόστος συντήρησης έχει κοστολογηθεί με αυτήν την τιμή, διότι η μπαταρίες λιθίου δεν χρειάζονται συντήρηση.

Η μπαταρία ροής βαναδίου που έχει επιλεγεί για τις προσομοιώσεις έχει χωρητικότητα 40 kWh, ονομαστική τάση 48V, απόδοση 65%, διάρκεια ζωής 20y και δεν έχει ελάχιστο ποσοστό φόρτισης. Η μπαταρία αυτή βρίσκεται στην βιβλιοθήκη του Homer και το κόστος έχει εκτιμηθεί 150 €/kWh, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης 15€/y/kWh και δεν έχει συμπεριληφθεί κόστος αντικατάστασης. Το ελάχιστο ποσοστό φόρτισης είναι μηδέν, διότι η μορφή της μπαταρίας αυτής την καθιστά ικανή να φορτίζει και να αποφορτίζει πλήρως χωρίς οι συχνοί κύκλοι να επηρεάζουν την απόδοσή της.

Το σύστημα αποθήκευσης με σφονδύλους έχει χωρητικότητα 25kWh και επιλέγεται από την βιβλιοθήκη του Homer. Ωστόσο το σύστημα αυτό είναι συνδεδεμένο με το εναλλασσόμενο ρεύμα, γεγονός που το Homer δεν μπορεί να μοντελοποιήσει, διότι δέχεται τα συστήματα αποθήκευσης να είναι συνδεδεμένα μόνο με το δίκτυο του συνεχούς ρεύματος. Για τον λόγο αυτό το Homer συνδέει το σύστημα αποθήκευσης με το συνεχές δίκτυο ρεύματος και μηδενίζει το κόστος στον μετατροπέα ρεύματος καθώς επίσης αυξάνει την απόδοση στο 100%. Επιπλέον το σύστημα με σφονδύλους απαιτεί

τη μοντελοποίηση με χρονικό βήμα το ένα λεπτό, για την μοντελοποίηση της γρήγορης συμπεριφοράς του συστήματος. Επειδή το σύστημα περιλαμβάνει και τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες, για το συνδυασμό και των σφονδύλων, το κόστος του μετατροπέα προστίθεται στο κόστος των φωτοβολταϊκών και οι ΑΠΕ συνδέονται στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος. Έτσι το κόστος των φωτοβολταϊκών αλλάζει στα 1.045,70€/kW. Η ονομαστική τάση 825V, η απόδοση 85%, η διάρκεια ζωής 20y και δεν έχει ελάχιστο ποσοστό φόρτισης. Το κόστος έχει εκτιμηθεί 200 €/kWh, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης 12€/y/kWh και δεν έχει συμπεριληφθεί κόστος αντικατάστασης. Το ελάχιστο ποσοστό φόρτισης είναι μηδέν, διότι η μορφή της μπαταρίας αυτής την καθιστά ικανή να φορτίζει και να αποφορτίζει πλήρως χωρίς οι συχνοί κύκλοι να επηρεάζουν την απόδοσή της.

Το σύστημα αποθήκευσης με συμπιεσμένο αέρα που έχει επιλεγεί για τις προσομοιώσεις έχει χωρητικότητα 340 kWh, ονομαστική τάση 230V, απόδοση 60% και διάρκεια ζωής 25y. Η μπαταρία αυτή δεν βρίσκεται στην βιβλιοθήκη του Homer και επομένως μοντελοποιείται πάνω στο πρότυπο του μοντέλου αντλιοταμίευσης. Το κόστος έχει εκτιμηθεί 150 €/kWh, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης 400€/y και δεν έχει συμπεριληφθεί κόστος αντικατάστασης.

Το σύστημα αποθήκευσης με βαρυτική επιτάχυνση που έχει επιλεγεί για τις προσομοιώσεις έχει χωρητικότητα 340 kWh, ονομαστική τάση 250V, απόδοση 85% και διάρκεια ζωής 50y. Η μπαταρία αυτή δεν βρίσκεται στην βιβλιοθήκη του Homer και επομένως μοντελοποιείται πάνω στο πρότυπο του μοντέλου αντλιοταμίευσης. Το κόστος έχει εκτιμηθεί 200 €/kWh, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης 510€/y και δεν έχει συμπεριληφθεί κόστος αντικατάστασης.

Το σύστημα αποθήκευσης με αντλιοταμίευση που έχει επιλεγεί για τις προσομοιώσεις έχει χωρητικότητα 340 kWh, ονομαστική τάση 240V, απόδοση 80% και διάρκεια ζωής 20y. Η μπαταρία αυτή βρίσκεται στην βιβλιοθήκη του Homer με χωρητικότητα 245kWh, αλλά για τις Ανάγκες του Leaf House δημιουργήθηκε με πρότυπο αυτήν, ένα σύστημα αντλιοταμίευσης με χωρητικότητα 340 kWh. Το κόστος έχει εκτιμηθεί 165 €/kWh, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης 560€/y και δεν έχει συμπεριληφθεί κόστος αντικατάστασης.

Το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου που έχει επιλεγεί για τις προσομοιώσεις αποτελείται από την συσκευή ηλεκτρόλυσης που μετατρέπει την περίσσεια ενέργεια

σε υδρογόνο, την δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου και την γεννήτρια ρεύματος με καύσιμο το αποθηκευμένο υδρογόνο. Η συσκευή ηλεκτρόλυσης έχει απόδοση 85%, διάρκεια ζωής 15y, κόστος 100€/kW και κόστος λειτουργίας και συντήρησης 1€/y/kW. Η δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου έχει αρχικό ποσοστό πληρότητας 10%, κόστος 50€/kg και μηδενικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Η γεννήτρια έχει διάρκεια ζωής 15,000h λειτουργίας, κόστος 500€/kW και κόστος λειτουργίας και συντήρησης 0,03€/h λειτουργίας. Όλα τα μέλη του συστήματος βρίσκονται στην βιβλιοθήκη του Homer.

Συστήματα Αποθήκευσης	Κόστος (€/kWh)	Απόδοση (%)	Χρόνος Ζωής (y)	Συσκευή Ηλεκτρόλυσης (€/kW)	Δεξαμενή Υδρογόνου (€/kg)	Γεννήτρια (€/kW)
Μόλυβδου-Οξέος	100	80	10	-	-	-
Λιθίου	200	97	15	-	-	-
Ροής Βαναδίου	150	65	20	-	-	-
Σφόνδυλοι	200	85	20	-	-	-
Συμπιεσμένου Αέρα	150	60	25	-	-	-
Βαρυτικής Επιτάχυνσης	200	85	50	-	-	-
Αντλιοταμείωσης	165	80	20	-	-	-
Υδρογόνου	-	-	-	100	50	500

Πίνακας 6: Ποσοτικά χαρακτηριστικά των υπο εξέταση συστημάτων αποθήκευσης^{32,33,34,35}

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις και τα αποτελέσματα αυτών σύμφωνα με όσες παραδοχές παρουσιάστηκαν. Επιπλέον αναλύονται τρία τριήμερα κατά τη διάρκεια του έτους για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, το πρώτο είναι 1/2 με 3/2, το δεύτερο 1/8 με 3/8 και το τελευταίο 21/12 με 23/12, τα οποία επιλέχθηκαν λόγω της μεγάλης χρήσης της μπαταρίας στις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, γεγονός που δικαιολογεί τελικά το μέγεθος των αποτελεσμάτων σε κάθε περίπτωση.

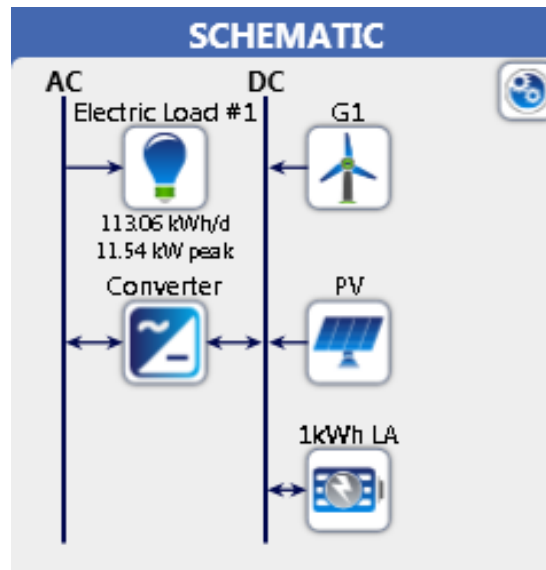
4.3.1 Προσομοίωση μπαταρίας μολυβδου-οξέος

Στην προσομοίωση αυτή χρησιμοποιούνται μπαταρίες μολυβδου οξέος για αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας, Το σύστημα αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, τις ανεμογεννήτριες, τις μπαταρίες και έναν μετατροπέα ηλεκτρικού ρεύματος, όπως φαίνεται και στην εικόνα 20. Έχει επιλεγεί μία μπαταρία με αποθηκευτικό χώρο 1kWh και μέσω του Homer υπολογίζεται ο αριθμός τους καθώς και των υπόλοιπων στοιχείων του συστήματος, τα οποία φαίνονται στην εικόνα 21. Εκεί παρατηρείται ότι χρειάζονται για το σύστημα 58,9kW φωτοβολταϊκά πάνελ, 23kW ανεμογεννήτριες, 16,2kW μετατροπέας ρεύματος και 570kWh μπαταρίες μολυβδου οξέος, για 72,7h (~3 μέρες) αυτονομία. Το κόστος επένδυσης του συστήματος αυτού έχει εκτιμηθεί στα 267.951€.






















Στις εικόνες 22,24 και 26 φαίνεται η ενέργεια που βρίσκεται στο σύστημα από τα φωτοβολταϊκά, τις ανεμογεννήτριες και τις μπαταρίες, όταν έχει καλυφθεί το φορτίο που απαιτείται για τις ανάγκες του κτιρίου, δηλαδή η περίσσεια ή η έλλειψη ενέργειας και την χρήση της μπαταρίας, για κάθε τριήμερο που αναφέρθηκε. Επομένως η ενέργεια αυτή είναι το άθροισμα της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες με την ενέργεια του συστήματος αποθήκευσης και από την τιμή αυτή αφαιρείται το φορτίο καταναλώσεων. Στον άξονα της ισχύος οι θετικές τιμές δείχνουν την περίσσεια ενέργειας, δηλαδή την ενέργεια που παράγεται και δεν χρησιμοποιείται την ίδια στιγμή, αλλά αποθηκεύεται ως ένα ποσό στα συστήματα αποθήκευσης, ενώ οι αρνητικές, την χρήση και του συστήματος αποθήκευσης για την κάλυψη των αναγκών. Στην εικόνα 22 για το πρώτο τριήμερο παρατηρείται υψηλή περίσσεια ενέργειας που φτάνει τα 50kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και μέτρια τις άλλες δύο που φτάνουν τα 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 10kW ωριαίας ισχύος, με εξαίρεση την τελευταία μέρα που υπάρχει περίσσεια ενέργειας της τάξης των 30kW ωριαίας ισχύος. Στην εικόνα 24 για το δεύτερο τριήμερο παρατηρείται ότι περίσσεια ενέργειας φτάνει τα 20kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και 8kW και 18 kW τις άλλες δύο αντίστοιχα, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ στην εικόνα 26 για το τρίτο τριήμερο γίνεται αντιληπτό ότι παραγωγή περίσσειας ενέργειας υπάρχει μόνο το μεσημέρι της πρώτης μέρας με 50kW ωριαίας ισχύος και δεν υπάρχει σημαντική παραγωγή για το υπόλοιπο του τριημέρου, γεγονός που τρέπει το σύστημα να χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη ενέργεια με ποσό που φτάνει τα 15kW ωριαίας ισχύος.

Αυτό το τριήμερο είναι παράδειγμα των ακραίων περιπτώσεων για το οποίο δικαιολογείται το μέγεθος των αποτελεσμάτων του συστήματος.

Στις εικόνες 23,25 και 27 φαίνεται η ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ σε σχέση με την λειτουργία της μπαταρίας και το φορτίο του κτιρίου, για κάθε ένα τριήμερο αντίστοιχα. Για το πρώτο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 23 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 50kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγει μέχρι 15kW ωριαίας ισχύος. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική εκτός από την τελευταία μέρα που γίνεται παραγωγή έως και 20kW ωριαίας ισχύος. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει όλες τις μέρες μέχρι και 10kW ωριαίας ισχύος καθώς και το τελευταίο βράδυ, ενώ τα υπόλοιπα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 5kW. Για το δεύτερο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 25 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγουν μέχρι 10kW και 15kW ωριαίας ισχύος αντίστοιχα. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή του φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 10kW ωριαίας ισχύος, 4kW την δεύτερη και 9kW την τρίτη, ενώ τα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ μέχρι και 8kW. Για το τελευταίο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 27 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 45kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική, όπως και το βράδυ. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει όλες τις μέρες μέχρι και 25kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα, ενώ την υπόλοιπη περίοδο αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 8kW. Τα διαγράμματα αυτά δικαιολογούν και όσα αναφέρθηκαν για την περίσσεια ή έλλειψη ενέργειας.

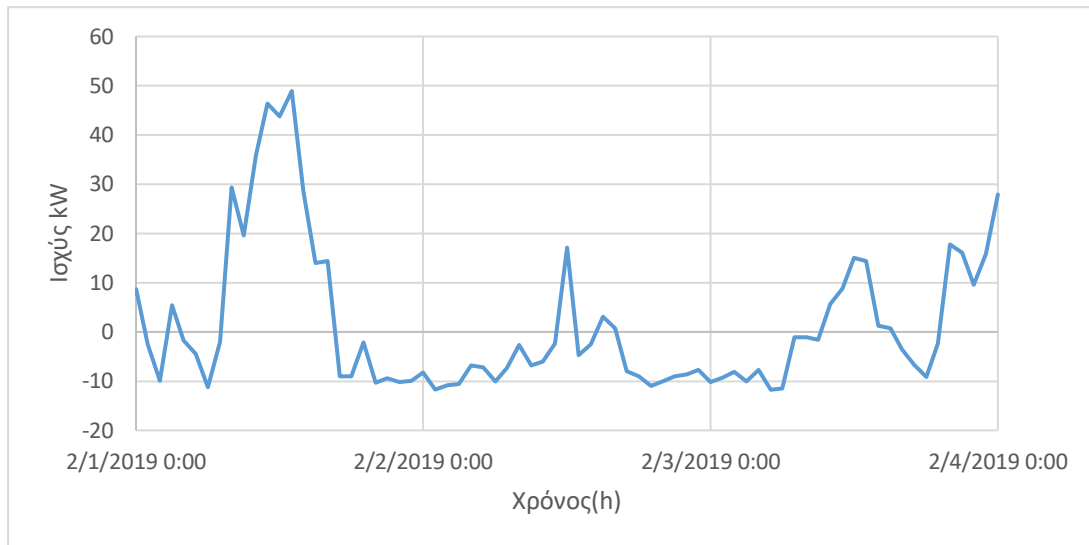


Εικόνα 20: Διάταξη προσομοίωσης με μπαταρία μόλυβδου-οξέος στο Homer

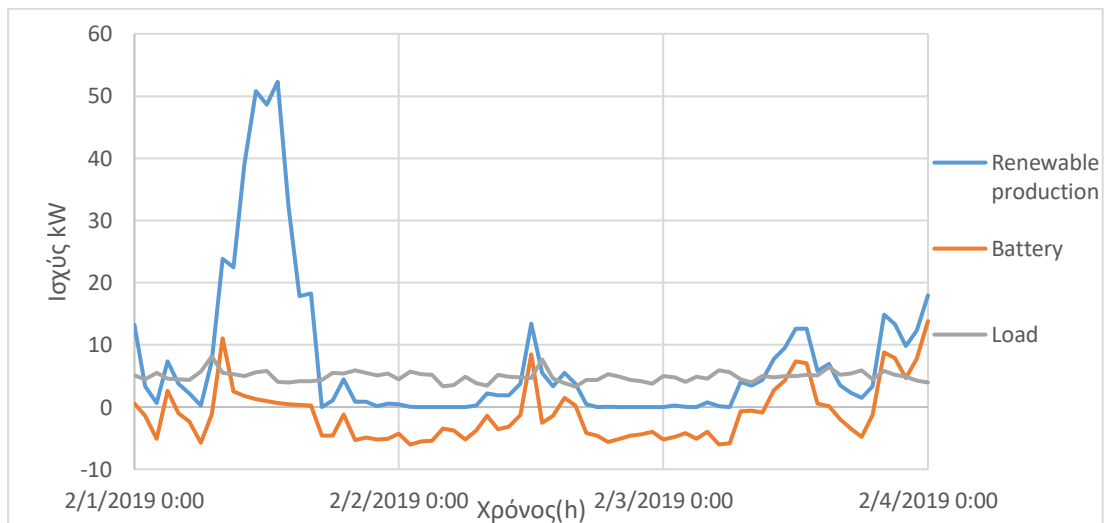
Architecture								Cost				System		PV		
				PV (kW) 	G1 	1kWh LA 	Converter (kW) 	Dispatch 	NPC (\$) 	COE (\$) 	Operating cost (\$/yr) 	Initial capital (\$) 	Ren Frac (%) 	Total Fuel (L/yr) 	Capital Cost (\$) 	Production (kWh/yr) 
				58.9	23	570	16.2	CC	\$267,951	\$0.503	\$6,224	\$187,484	100	0	58,893	73,681
G1				1kWh LA								Converter				
Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)	O&M Cost (\$)	Autonomy (hr)	Annual Throughput (kWh/yr)	Operating hours (hours)	Nominal Capacity (kWh)	Usable Nominal Capacity (kWh)	Rectifier Mean Output (kW)	Inverter Mean Output (kW)							
69,000	14,537	230	72.7	22,612	0	570	342	0	4.71							

Εικόνα 21:Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με μπαταρία μόλυβδου-οξέος

Περίοδος 1/2/19-3/2/19

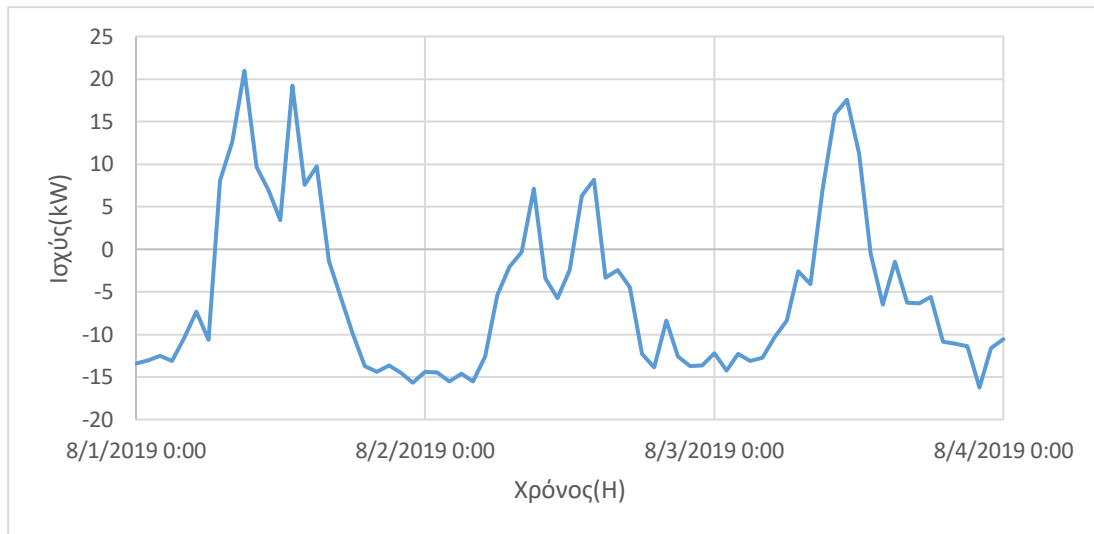


Εικόνα 22: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία μολυβδου-οξέος όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2

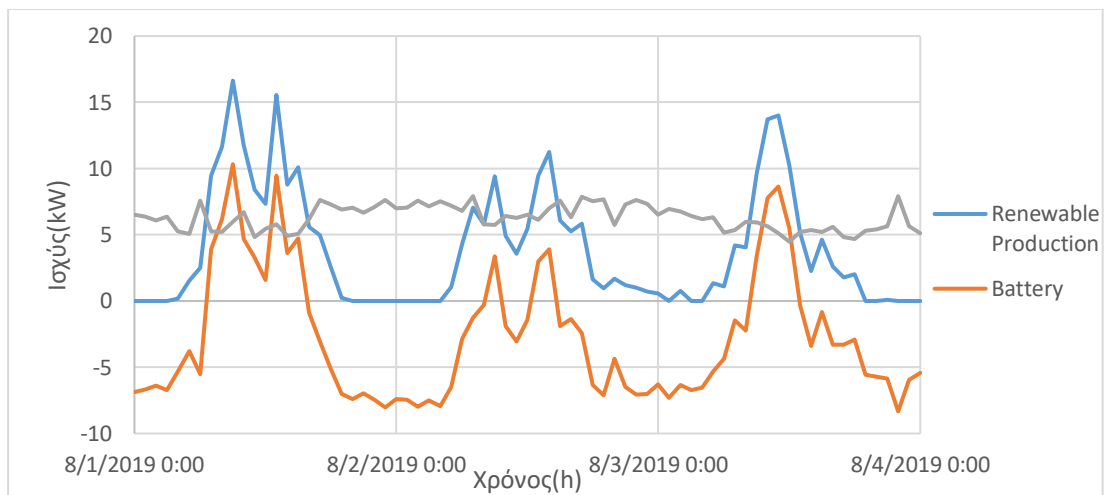


Εικόνα 23: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα με μπαταρία μολυβδου-οξέος

Περίοδος 1/8/19-3/8/19

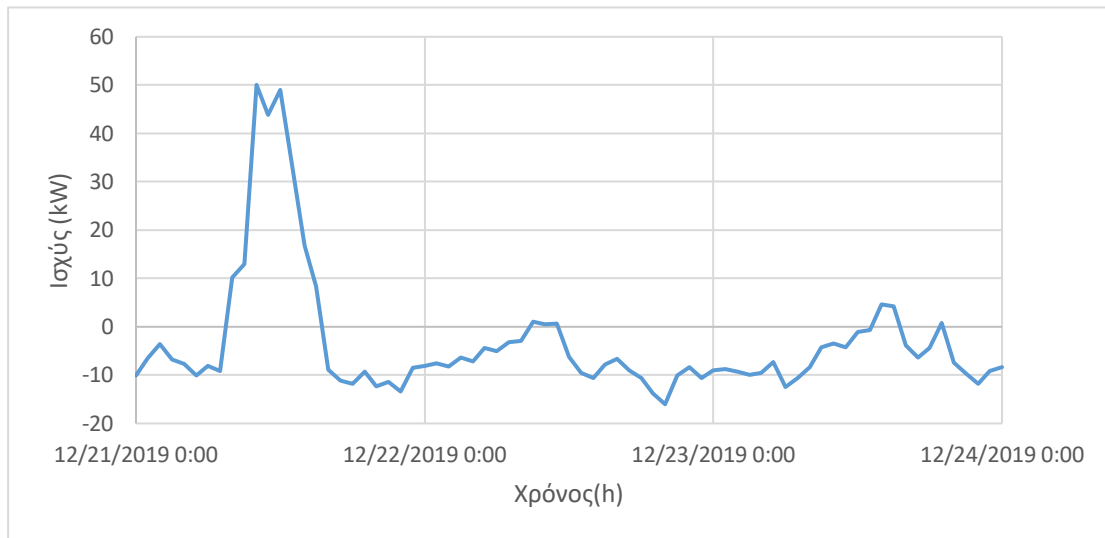


Εικόνα 24: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία μολυβδου-οξέος όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8

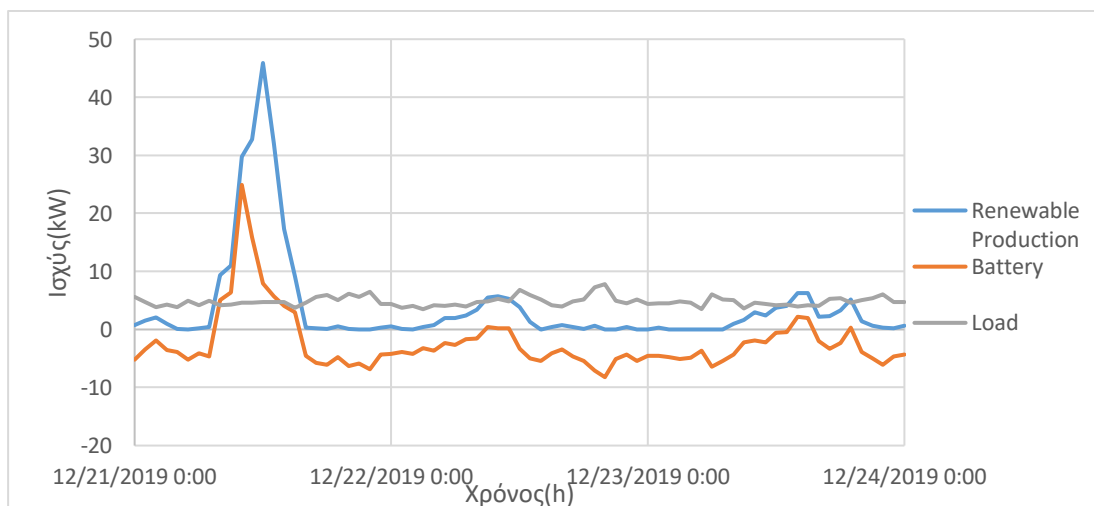


Εικόνα 25 Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα με μπαταρία μολυβδου-οξέος

Περίοδος 21/12/19-23/12/19



Εικόνα 26: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία μολυβδου-οξέος όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12



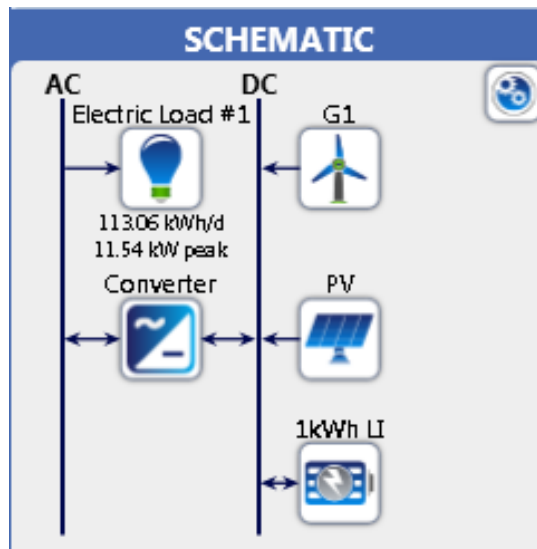
Εικόνα 27: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα με μπαταρία μολυβδου-οξέος

4.3.2 Προσομοίωση μπαταρίας λιθίου











Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν μπαταρίες λιθίου για την αποθήκευση περίσσειας ενέργειας προερχόμενης από φωτοβολταϊκά πάνελ. Η διάταξη του συστήματος απεικονίζεται στην εικόνα 28 και αποτελείται από τα πάνελ, τις ανεμογεννήτριες, τις μπαταρίες και έναν μετατροπέα ρεύματος. Στην εικόνα 29 δίνονται τα αποτελέσματα του Homer, στα οποία γίνεται κατανοητό ότι για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών χρειάζονται 81,2kW φωτοβολταϊκά πάνελ, 14kW ανεμογεννήτριες, 14,2kW μετατροπέα και 425kWh μπαταρίες λιθίου με αυτονομία 73,4h (~ 3 μέρες). Το κόστος επένδυσης στην περίπτωση αυτή είναι 217.527€.

Στις εικόνες 30,32 και 34 φαίνεται η ενέργεια που βρίσκεται στο σύστημα από τα φωτοβολταϊκά, τις ανεμογεννήτριες και τις μπαταρίες, όταν έχει καλυφθεί το φορτίο που απαιτείται για τις ανάγκες του κτιρίου, δηλαδή η περίσσεια ή η έλλειψη ενέργειας και την χρήση της μπαταρίας, για κάθε τριήμερο που αναφέρθηκε. Επομένως η ενέργεια αυτή είναι το άθροισμα της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες με την ενέργεια του συστήματος αποθήκευσης και από την τιμή αυτή αφαιρείται το φορτίο καταναλώσεων. Στον άξονα της ισχύος οι θετικές τιμές δείχνουν την περίσσεια ενέργειας, δηλαδή την ενέργεια που παράγεται και δεν χρησιμοποιείται την ίδια στιγμή, αλλά αποθηκεύεται ως ένα ποσό στα συστήματα αποθήκευσης, ενώ οι αρνητικές, την χρήση και του συστήματος αποθήκευσης για την κάλυψη των αναγκών. Στην εικόνα 30 για το πρώτο τριήμερο παρατηρείται υψηλή περίσσεια ενέργειας που φτάνει τα 65kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και μέτρια τις άλλες δύο που φτάνουν τα 20kW ωριαίας ισχύος, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 10kW ωριαίας ισχύος, με εξαίρεση την τελευταία μέρα που υπάρχει περίσσεια ενέργειας της τάξης των 15kW ωριαίας ισχύος. Στην εικόνα 32 για το δεύτερο τριήμερο παρατηρείται ότι περίσσεια ενέργειας φτάνει τα 30kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και 15kW και 30 kW τις άλλες δύο αντίστοιχα, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ στην εικόνα 34 για το τρίτο τριήμερο γίνεται αντιληπτό ότι παραγωγή περίσσειας ενέργειας υπάρχει μόνο το μεσημέρι της πρώτης μέρας με 65kW ωριαίας ισχύος και δεν υπάρχει σημαντική παραγωγή περίσσειας για το υπόλοιπο του τριημέρου, γεγονός που τρέπει το σύστημα να χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη ενέργεια με ποσό που φτάνει τα 15kW ωριαίας ισχύος. Αυτό το τριήμερο είναι παράδειγμα των ακραίων περιπτώσεων για το οποίο δικαιολογείται το μέγεθος των αποτελεσμάτων του συστήματος.

Στις εικόνες 31,33 και 35 φαίνεται η ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ σε σχέση με την λειτουργία της μπαταρίας και το φορτίο του κτιρίου, για κάθε ένα τριήμερο αντίστοιχα. Για το πρώτο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 31 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 70kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγει μέχρι 15kW ωριαίας ισχύος. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική εκτός από την τελευταία μέρα που γίνεται παραγωγή έως και 10kW ωριαίας ισχύος. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή του φτάνει όλες τις μέρες μέχρι και 15kW ωριαίας ισχύος καθώς και το τελευταίο βράδυ, ενώ τα υπόλοιπα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 5kW. Για το δεύτερο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 33 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 23kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγουν μέχρι 15kW και 20kW ωριαίας ισχύος αντίστοιχα. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 15kW ωριαίας ισχύος, 8kW την δεύτερη και 13kW την τρίτη, ενώ τα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ μέχρι και 8kW. Για το τελευταίο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 35 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 60kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική, όπως και το βράδυ. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει όλες τις μέρες μέχρι και 30kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα, ενώ την υπόλοιπη περίοδο αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 8kW. Τα διαγράμματα αυτά δικαιολογούν και όσα αναφέρθηκαν για την περίσσεια ή έλλειψη ενέργειας.

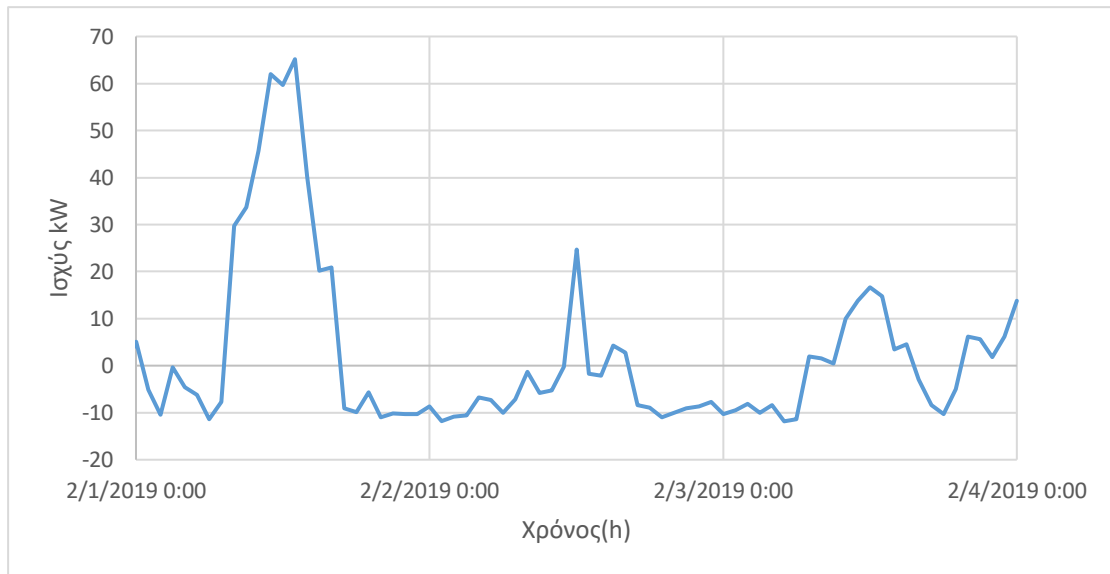


Εικόνα 28: Διάταξη προσομοίωσης με μπαταρία λιθίου στο Homer

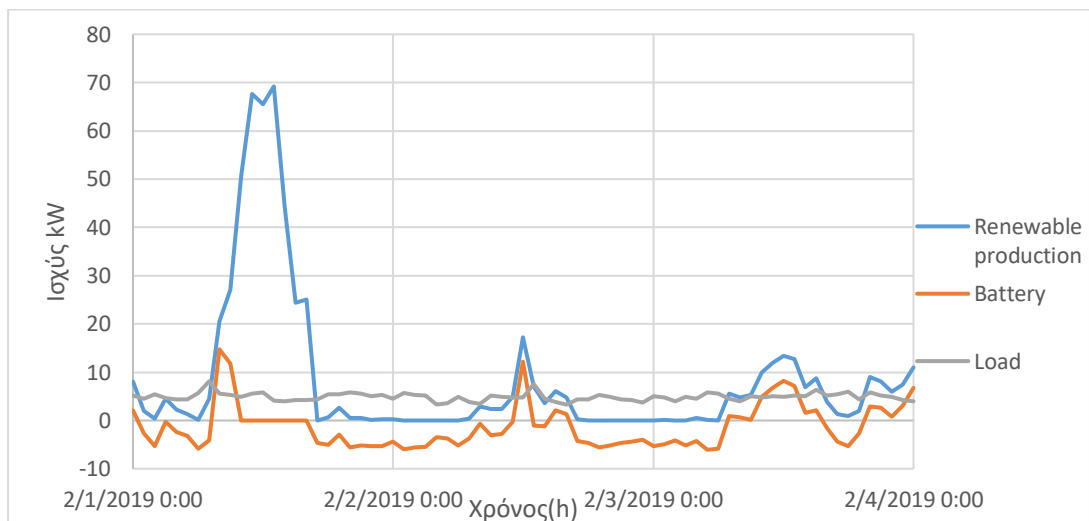
Architecture								Cost				System		PV	
			PV (kW)		1kWh LI		Dispatch			Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren. Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)
			81.2	14	425	14.2	CC	\$217,527	\$0.408	\$545.95	\$210,470	100	0	81,191	101,578
G1					1kWh LI								Converter		
Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)	O&M Cost (\$)	Autonomy (hr)	Annual Throughput (kWh/yr)	Operating hours (hours)	Nominal Capacity (kWh)	Usable Nominal Capacity (kWh)	Rectifier Mean Output (kW)	Inverter Mean Output (kW)						
42,000	8,849	140	72.2	22,101	0	425	340	0	4.71						

Εικόνα 29: Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με μπαταρία λιθίου

Περίοδος 1/2/19-3/2/19

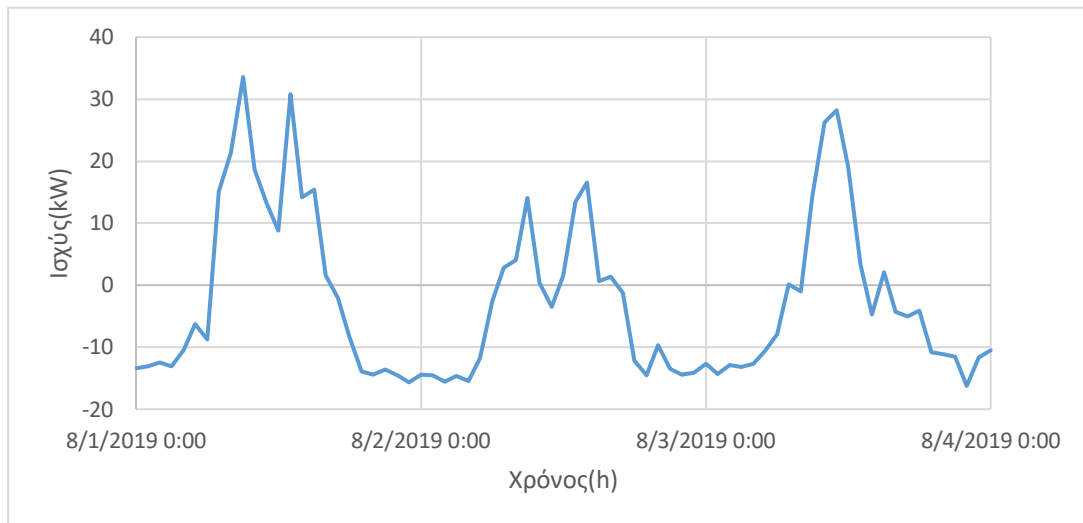


Εικόνα 30: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία λιθίου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2

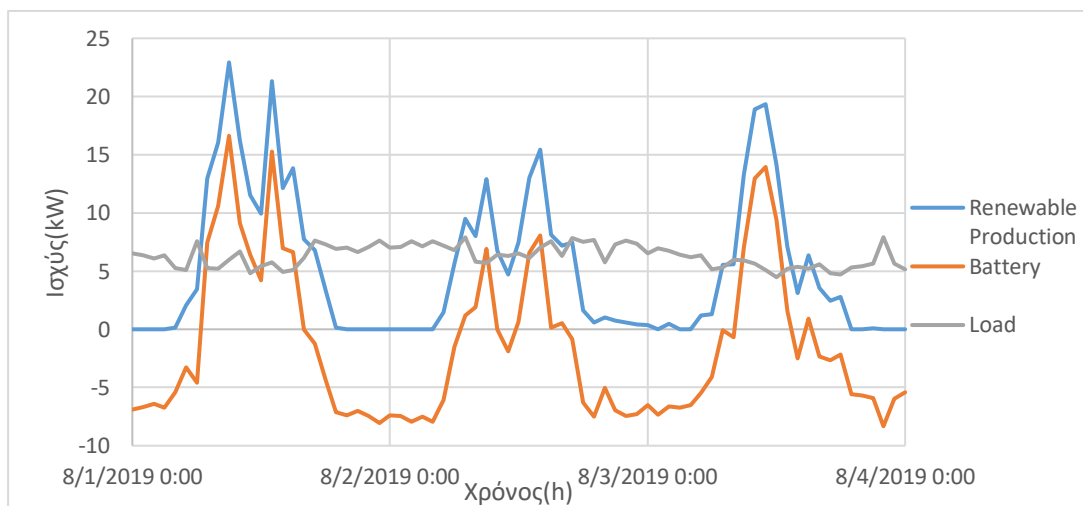


Εικόνα 31: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα με μπαταρία λιθίου

Περίοδος 1/8/19-3/8/19

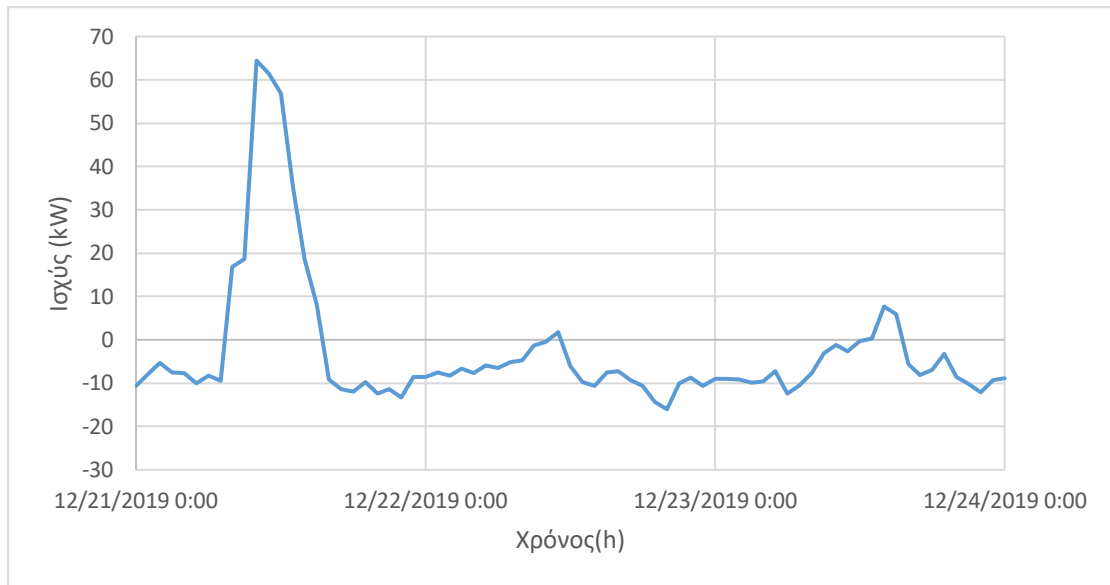


Εικόνα 32:Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία λιθίου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8

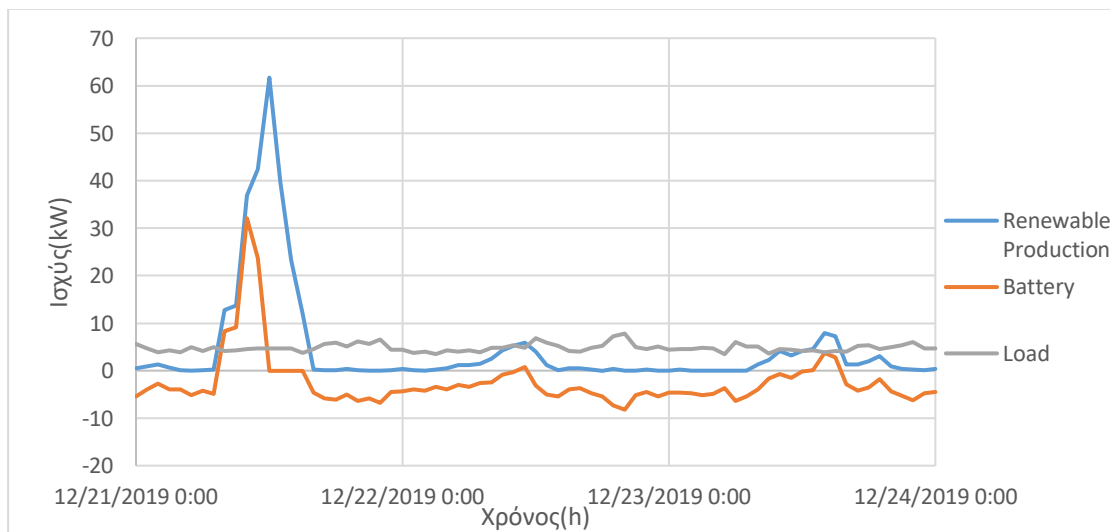


Εικόνα 33:Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα με μπαταρία λιθίου

Περίοδος 21/12/19-23/12/19



Εικόνα 34: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία λιθίου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12



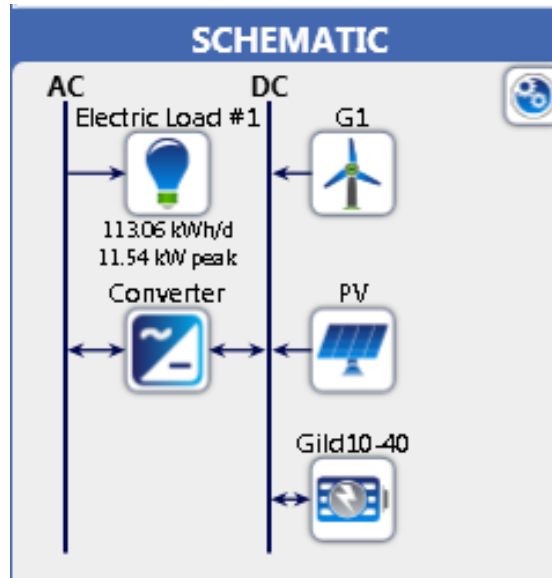
Εικόνα 35: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα με μπαταρία λιθίου

4.3.3 Προσομοίωση μπαταρίας ροής βαναδίου

Η προσομοίωση αυτή γίνεται με αποθήκευση περίσσειας ενέργειας σε μπαταρίες ροής βαναδίου. Η διάταξη εμφανίζεται στην εικόνα 36 και δείχνει ότι αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ και ανεμογεννήτριες για παραγωγή ενέργειας, μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας και μπαταρίες ροής βαναδίου για αποθήκευση. Τα αποτελέσματά της βρίσκονται στην εικόνα 37 και δείχνουν ότι χρειάζονται για την υπό εξέταση περίπτωση 66,6kW φωτοβολταϊκά πάνελ, 25kW ανεμογεννήτριες, 17,1kW μετατροπέα και 360kWh μπαταρίες ροής βαναδίου με αυτονομία 76,4h (~3 μέρες). Το κόστος της περίπτωσης αυτής ανέρχεται στα 275.630€.

Στις εικόνες 38,40 και 42 φαίνεται η ενέργεια που βρίσκεται στο σύστημα από τα φωτοβολταϊκά, τις ανεμογεννήτριες και τις μπαταρίες, όταν έχει καλυφθεί το φορτίο που απαιτείται για τις ανάγκες του κτιρίου, δηλαδή η περίσσεια ή η έλλειψη ενέργειας και την χρήση της μπαταρίας, για κάθε τριήμερο που αναφέρθηκε. Επομένως η ενέργεια αυτή είναι το άθροισμα της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες με την ενέργεια του συστήματος αποθήκευσης και από την τιμή αυτή αφαιρείται το φορτίο καταναλώσεων. Στον άξονα της ισχύος οι θετικές τιμές δείχνουν την περίσσεια ενέργειας, δηλαδή την ενέργεια που παράγεται και δεν χρησιμοποιείται την ίδια στιγμή, αλλά αποθηκεύεται ως ένα ποσό στα συστήματα αποθήκευσης, ενώ οι αρνητικές την χρήση και του συστήματος αποθήκευσης για την κάλυψη των αναγκών. Στην εικόνα 38 για το πρώτο τριήμερο παρατηρείται υψηλή περίσσεια ενέργειας που φτάνει τα 55kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και μέτρια τις άλλες δύο που φτάνουν τα 20kW ωριαίας ισχύος, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 10kW ωριαίας ισχύος, με εξαίρεση την τελευταία μέρα που υπάρχει περίσσεια ενέργειας της τάξης των 30kW ωριαίας ισχύος. Στην εικόνα 40 για το δεύτερο τριήμερο παρατηρείται ότι περίσσεια ενέργειας φτάνει τα 25kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και 10kW και 20 kW τις άλλες δύο αντίστοιχα, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ στην εικόνα 42 για το τρίτο τριήμερο γίνεται αντιληπτό ότι παραγωγή περίσσειας ενέργειας υπάρχει μόνο το μεσημέρι της πρώτης μέρας με 65kW ωριαίας ισχύος και δεν υπάρχει σημαντική παραγωγή περίσσειας για το υπόλοιπο του τριημέρου, γεγονός που τρέπει το σύστημα να χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη ενέργεια με ποσό που φτάνει τα 15kW ωριαίας ισχύος. Αυτό το τριήμερο είναι παράδειγμα των ακραίων περιπτώσεων για το οποίο δικαιολογείται το μέγεθος των αποτελεσμάτων του συστήματος.

Στις εικόνες 39,41 και 43 φαίνεται η ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ σε σχέση με την λειτουργία της μπαταρίας και το φορτίο του κτιρίου, για κάθε ένα τριήμερο αντίστοιχα. Για το πρώτο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 39 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 60kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγει μέχρι 15kW ωριαίας ισχύος. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική εκτός από την τελευταία μέρα που γίνεται παραγωγή έως και 20kW ωριαίας ισχύος. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή του φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 20kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες έως 10kW ωριαίας ισχύος. Το τελευταίο βράδυ η φόρτισή του συστήματος αποθήκευσης φτάνει μέχρι και 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ τα υπόλοιπα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 5kW. Για το δεύτερο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 41 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 18kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγουν μέχρι 13kW και 16kW ωριαίας ισχύος αντίστοιχα. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 12kW ωριαίας ισχύος, 5kW την δεύτερη και 10kW την τρίτη, ενώ τα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ μέχρι και 8kW. Για το τελευταίο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 43 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 50kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική, όπως και το βράδυ. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την όλες της μέρες μέχρι και 30kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα, ενώ την υπόλοιπη περίοδο αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 8kW. Τα διαγράμματα αυτά δικαιολογούν και όσα αναφέρθηκαν για την περίσσεια ή έλλειψη ενέργειας.

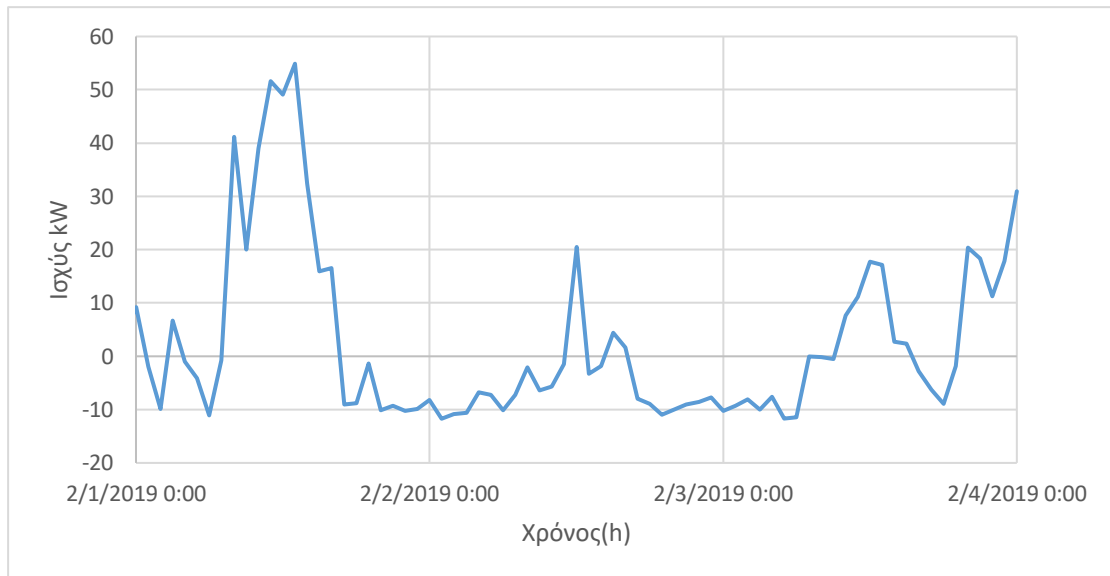


Εικόνα 36:Διάταξη προσομοίωσης με μπαταρία ροής θαναδίου στο Homer

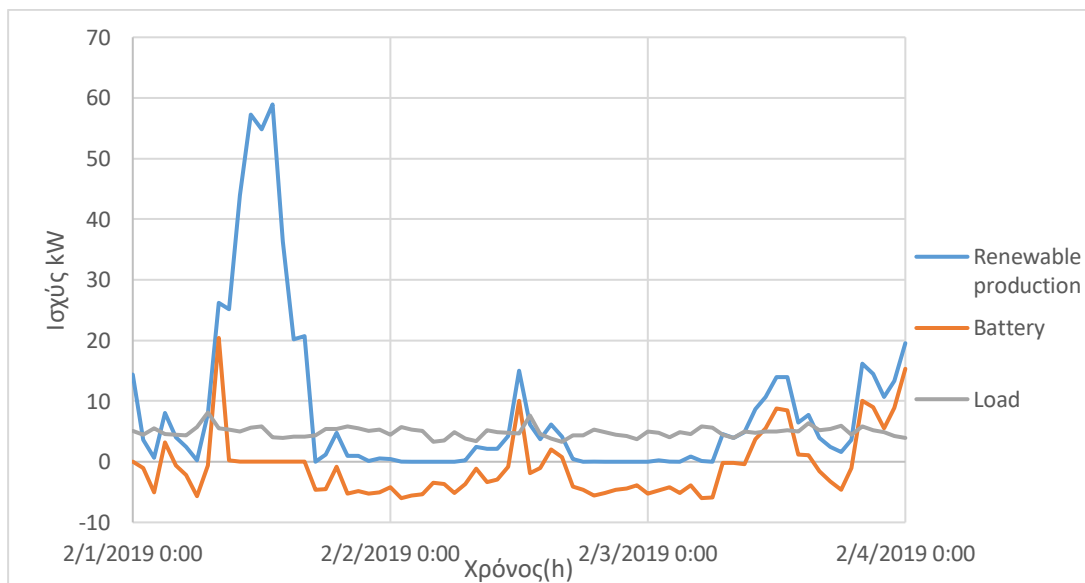
Architecture							Cost				System		PV	
	PV (kW)	G1	Gild10-40	Converter (kW)	Dispatch		NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren. Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)
	66.6	25	9	17.1	CC		\$275,630	\$0.517	\$5,983	\$198,288	100	0	66,553	83,264
G1				Gild10-40					Converter					
Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)	O&M Cost (\$)	Autonomy (hr)	Annual Throughput (kWh/yr)	Operating hours (hours)	Nominal Capacity (kWh)	Usable Nominal Capacity (kWh)	Rectifier Mean Output (kW)	Inverter Mean Output (kW)					
75,000	15,801	250	76.4	24,680	0	360	360	0	4.71					

Εικόνα 37:Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με μπαταρία ροής θαναδίου

Περίοδος 1/2/19-3/2/19

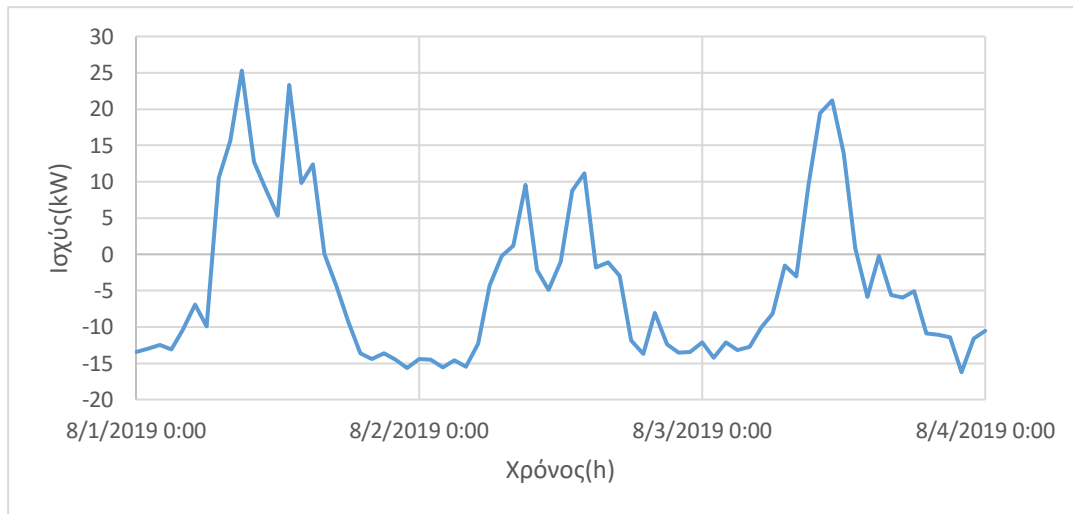


Εικόνα 38: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία λιθίου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2

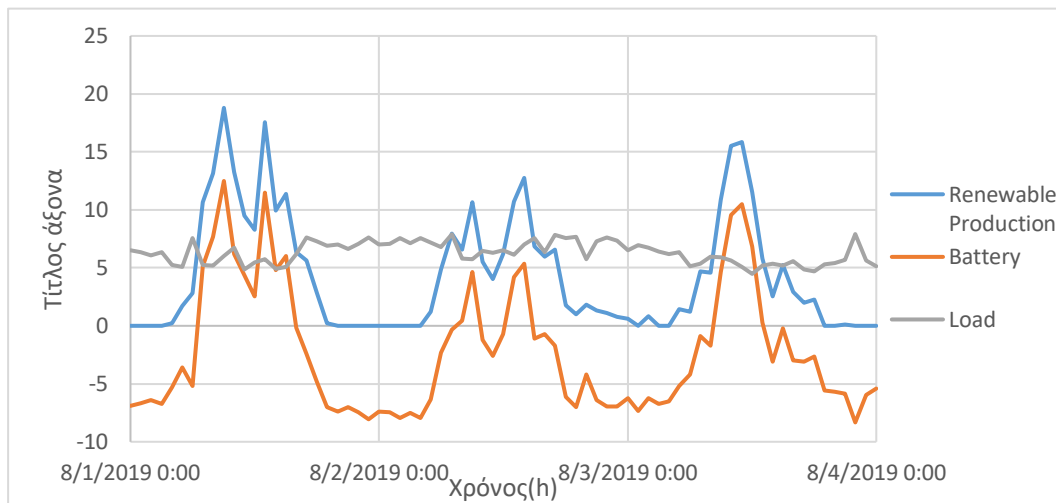


Εικόνα 39: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα με μπαταρία λιθίου

Περίοδος 1/8/19-3/8/19



Εικόνα 40: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με μπαταρία λιθίου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8

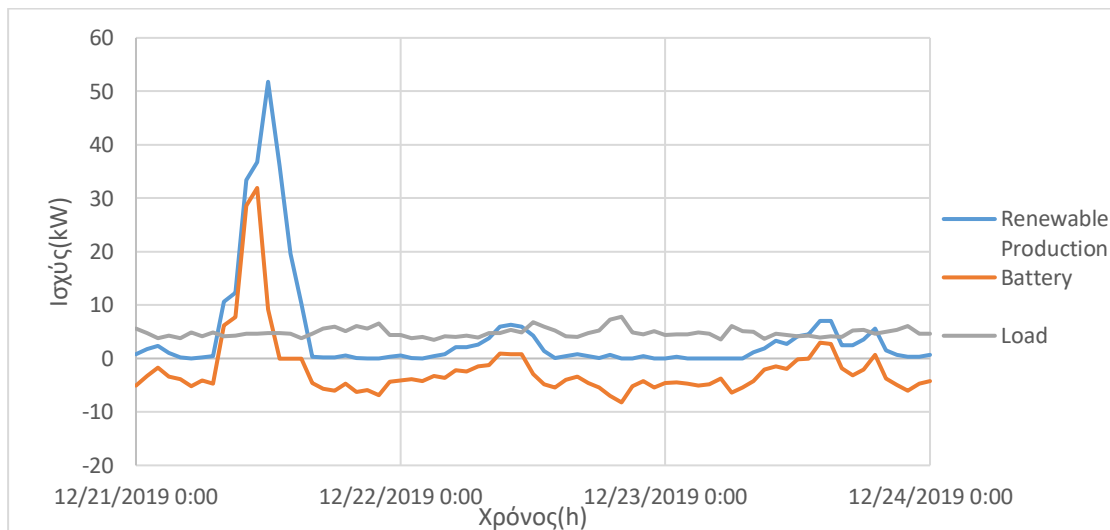


Εικόνα 41: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 2/8 για το σύστημα με μπαταρία λιθίου

Περίοδος 21/12/19-23/12/19



Εικόνα 42: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με λιθίου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12



Εικόνα 43: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα με μπαταρία λιθίου

4.3.4 Προσομοίωση σφονδύλου

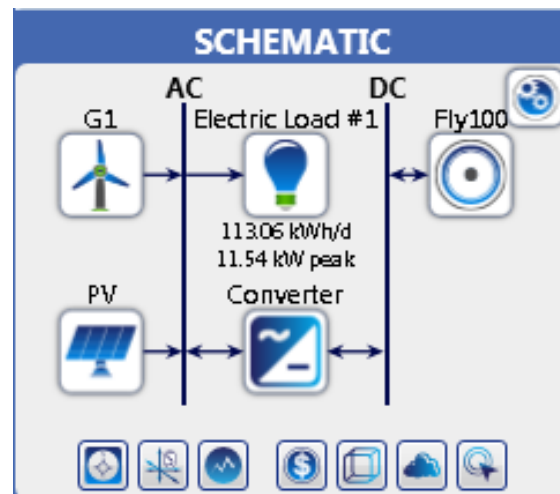
Αυτή η προσομοίωση γίνεται με αποθήκευση ενέργειας σε σφονδύλους. Η διάταξη αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες, μετατροπέα ρεύματος και μπαταρίες με σφονδύλους. Ωστόσο έχει μοντελοποιηθεί όπως φαίνεται στο στην εικόνα 44, λόγω της αδυναμίας του Homer να δεχτεί την αποθήκευση ενέργειας σε μορφή AC. Έτσι χρησιμοποιείται μετατροπέας χωρίς κόστος και με απόδοση 100% για την μεταφορά της μπαταρίας από DC σε AC. Επιπλέον τα φωτοβολταϊκά πάνελ και οι ανεμογεννήτριες μεταφέρονται σε AC προσθέτοντας όμως στην τιμή του κάθε kW φωτοβολταϊκού το κόστος του μετατροπέα. Η μοντελοποίηση του μετατροπέα έχει γίνει ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 45 και δείχνουν ότι για την σωστή λειτουργία του συστήματος χρειάζονται 51,2kW φωτοβολταϊκών πάνελ, 17kW ανεμογεννήτριες, 14,1kW μετατροπέα και 350kWh μπαταρίες σφονδύλων με αυτονομία 74.3h (~3 μέρες). Το συνολικό κόστος για το σύστημα αυτό προσεγγίζεται στα 234.379€.

Στις εικόνες 46,48 και 50 φαίνεται η ενέργεια που βρίσκεται στο σύστημα από τα φωτοβολταϊκά, τις ανεμογεννήτριες και τις μπαταρίες, όταν έχει καλυφθεί το φορτίο που απαιτείται για τις ανάγκες του κτιρίου, δηλαδή η περίσσεια ή η έλλειψη ενέργειας και την χρήση της μπαταρίας, για κάθε τριήμερο που αναφέρθηκε. Επομένως η ενέργεια αυτή είναι το άθροισμα της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες με την ενέργεια του συστήματος αποθήκευσης και από την τιμή αυτή αφαιρείται το φορτίο καταναλώσεων. Στον άξονα της ισχύος οι θετικές τιμές δείχνουν την περίσσεια ενέργειας, δηλαδή την ενέργεια που παράγεται και δεν χρησιμοποιείται την ίδια στιγμή, αλλά αποθηκεύεται ως ένα ποσό στα συστήματα αποθήκευσης, ενώ οι αρνητικές, την χρήση και του συστήματος αποθήκευσης για την κάλυψη των αναγκών. Η όψη των διαγραμμάτων διαφέρουν από τις υπόλοιπες προσομοιώσεις, διότι το λογισμικό Homer για την μοντελοποίηση σφονδύλου απαιτούσε βήμα ενός λεπτού, ενώ τα δεδομένα του φορτίου δίνουν τιμές για κάθε μία ώρα, δημιουργώντας έτσι αυτήν την σταθερή τιμή για κάθε μία ώρα. Στην εικόνα 46 για το πρώτο τριήμερο παρατηρείται υψηλή περίσσεια ενέργειας που φτάνει τα 70kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και μέτρια τις άλλες δύο που φτάνουν τα 10kW ωριαίας ισχύος, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 10kW ωριαίας ισχύος, με εξαίρεση την τελευταία μέρα που υπάρχει περίσσεια ενέργειας της τάξης των 20kW ωριαίας ισχύος. Στην εικόνα 48 για το δεύτερο τριήμερο παρατηρείται ότι περίσσεια

ενέργειας φτάνει τα 15kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και 5kW και 15 kW τις άλλες δύο αντίστοιχα , ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ στην εικόνα 50 για το τρίτο τριήμερο γίνεται αντιληπτό ότι παραγωγή περίσσειας ενέργειας υπάρχει μόνο το μεσημέρι της πρώτης μέρας με 65kW ωριαίας ισχύος και δεν υπάρχει σημαντική παραγωγή περίσσειας για το υπόλοιπο του τριημέρου, γεγονός που τρέπει το σύστημα να χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη ενέργεια με ποσό που φτάνει τα 10kW ωριαίας ισχύος. Αυτό το τριήμερο είναι παράδειγμα των ακραίων περιπτώσεων για το οποίο δικαιολογείται το μέγεθος των αποτελεσμάτων του συστήματος.

Στις εικόνες 47,49 και 51 φαίνεται η ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ σε σχέση με την λειτουργία της μπαταρίας και το φορτίο του κτιρίου, για κάθε ένα τριήμερο αντίστοιχα. Για το πρώτο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 47 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 45kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγει μέχρι 10kW ωριαίας ισχύος. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική εκτός από την τελευταία μέρα που γίνεται παραγωγή έως και 10kW ωριαίας ισχύος. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή του φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 30kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες έως 5kW ωριαίας ισχύος. Το τελευταίο βράδυ η φόρτισή του συστήματος αποθήκευσης φτάνει μέχρι και 5kW ωριαίας ισχύος, ενώ τα υπόλοιπα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 5kW. Για το δεύτερο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 49 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγουν μέχρι 10kW και 13kW ωριαίας ισχύος αντίστοιχα. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 8kW ωριαίας ισχύος, 3kW την δεύτερη και 6kW την τρίτη, ενώ τα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ μέχρι και 8kW. Για το τελευταίο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 51 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 40kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική, όπως και το βράδυ. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την όλες της μέρες μέχρι και 30kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα, ενώ την υπόλοιπη περίοδο αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και

8kW. Τα διαγράμματα αυτά δικαιολογούν και όσα αναφέρθηκαν για την περίσσεια ή έλλειψη ενέργειας.

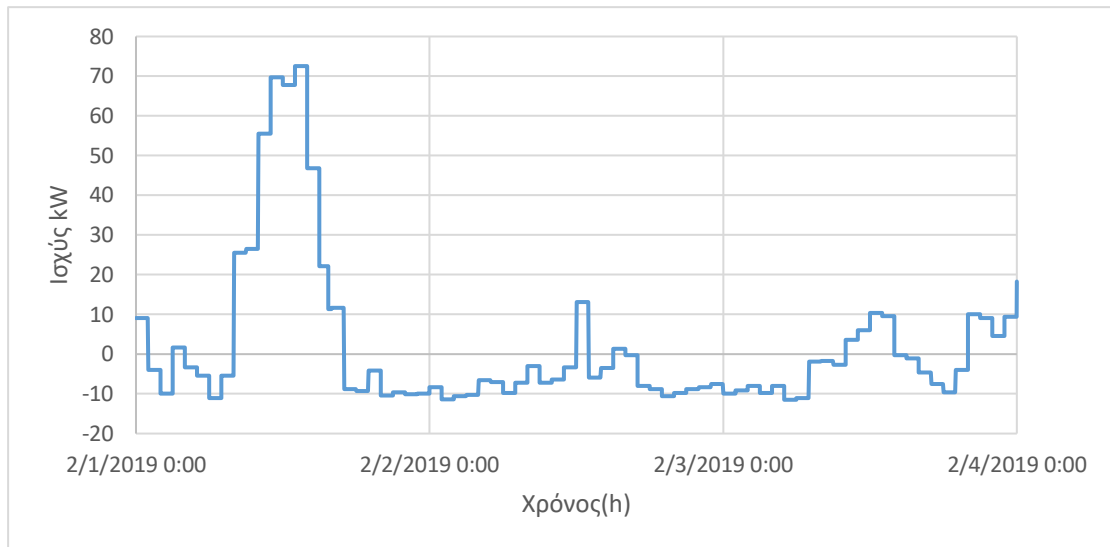


Εικόνα 44:Διάταξη προσομοίωσης με σφόνδυλο στο Homer

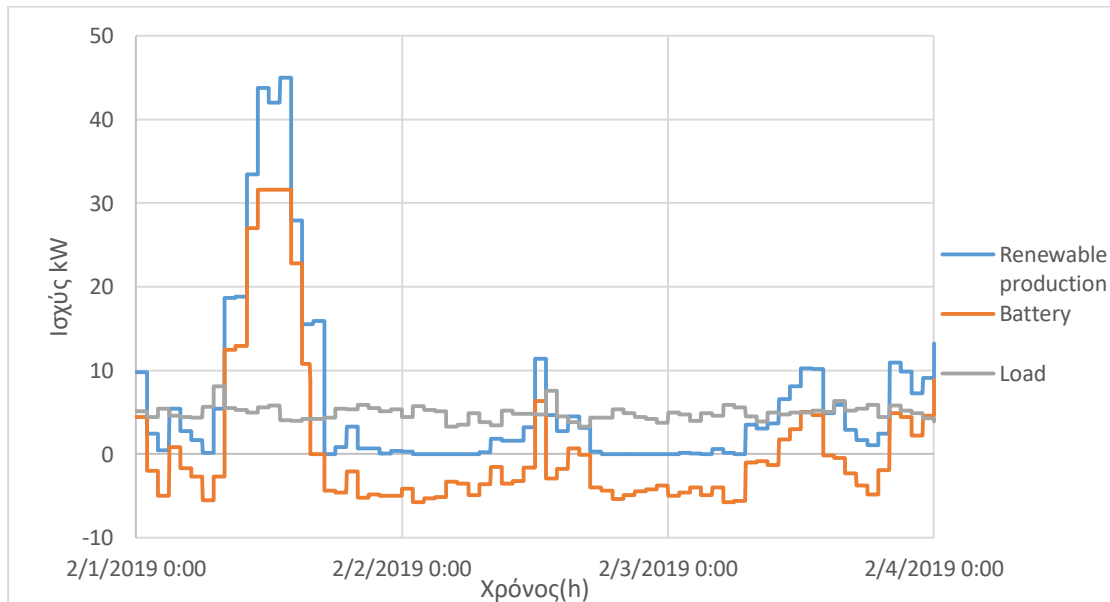
Architecture							Cost				System		PV	
	PV (kW)	G1	Fly100	Converter (kW)	Dispatch		NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)
	51.2	17	14	31.6	CC		\$234,379	\$0.440	\$4,626	\$174,574	100	0	53,574	64,098
G1					Fly100					Converter				
Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)	O&M Cost (\$)	Autonomy (hr)	Annual Throughput (kWh/yr)	Operating hours (hours)	Nominal Capacity (kWh)	Usable Nominal Capacity (kWh)	Rectifier Mean Output (kW)	Inverter Mean Output (kW)					
51,000	10,745	170	74.3	21,769	0	350	350	2.68	2.29					

Εικόνα 45:Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με σφόνδυλο

Περίοδος 1/2/19-3/2/19

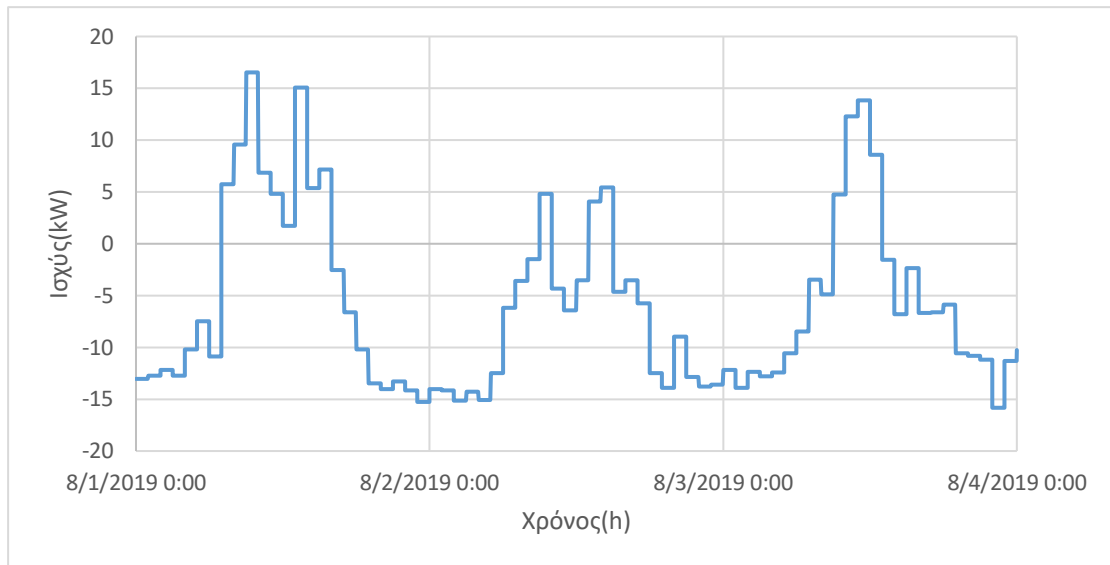


Εικόνα 46: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με σφόνδυλο όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2

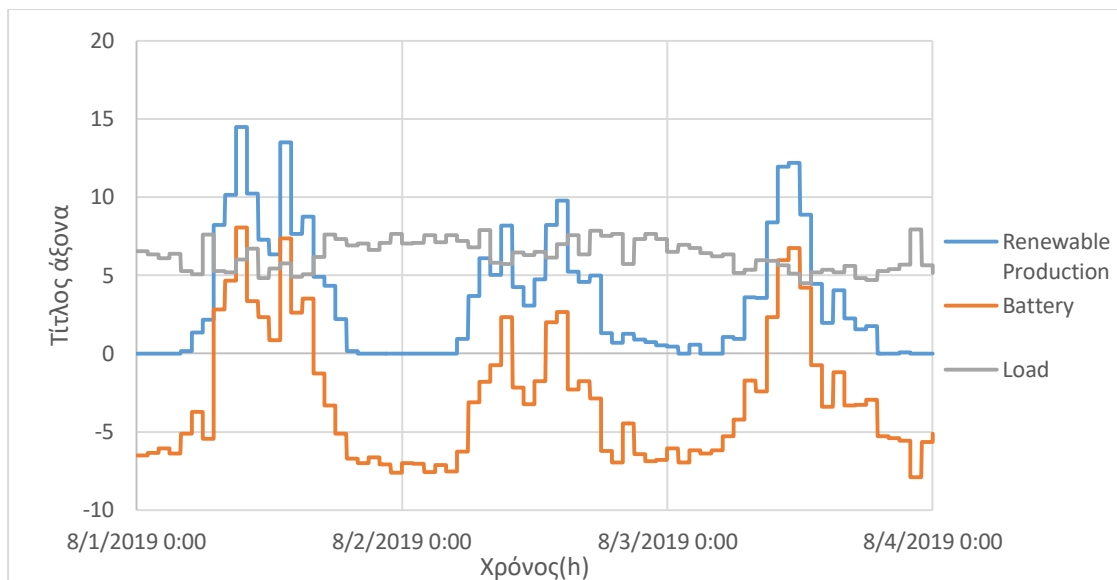


Εικόνα 47: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα με σφόνδυλο

Περίοδος 1/8/19-3/8/19

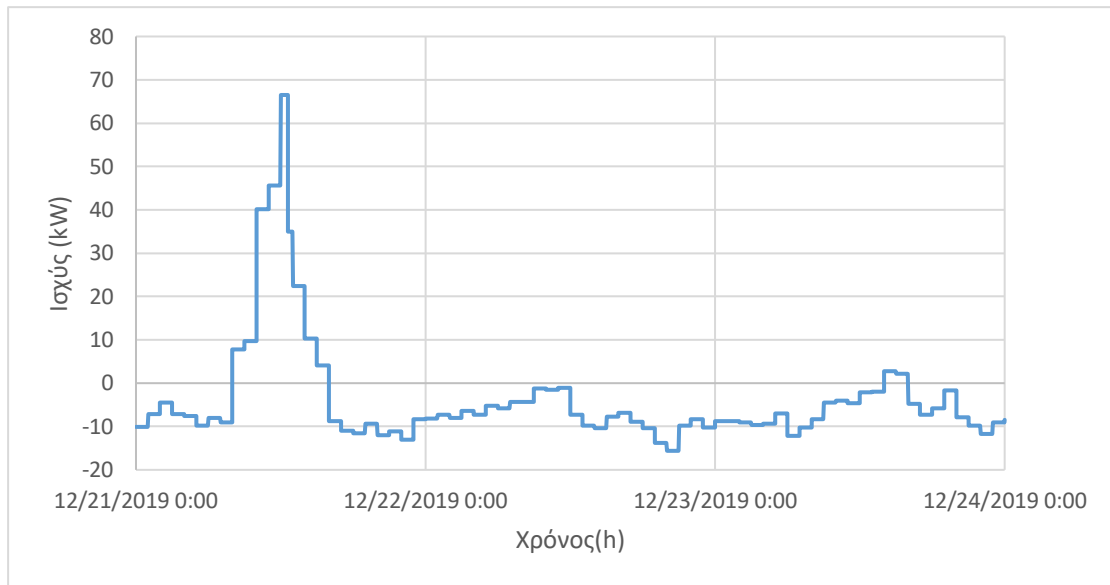


Εικόνα 48: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με σφόνδυλο όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8

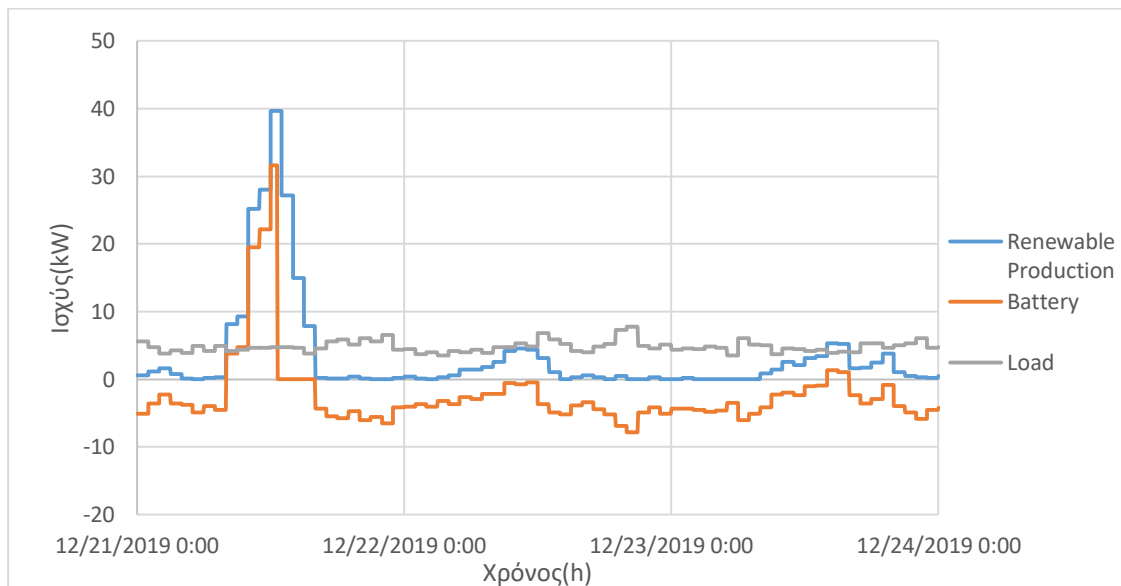


Εικόνα 49: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα με σφόνδυλο

Περίοδος 21/12/19-23/12/19



Εικόνα 50: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος με σφόνδυλο όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12



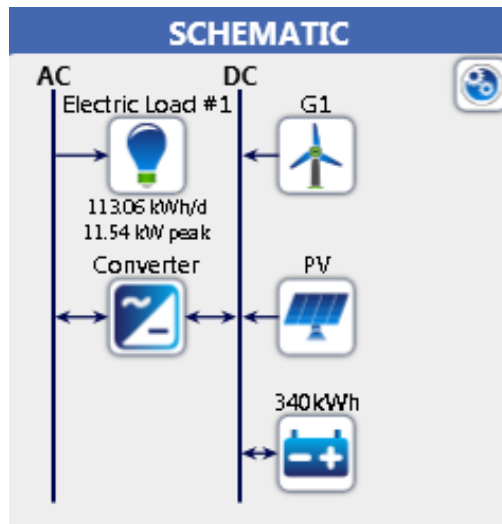
Εικόνα 51: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα με σφόνδυλο

4.3.5 Προσομοίωση συστήματος αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Στην περίπτωση αυτή η αποθήκευση περίσσειας ενέργειας γίνεται με αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα . Η διάταξη του συστήματος φαίνεται στην εικόνα 52 και αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, τις ανεμογεννήτριες, τον μετατροπέα ενέργειας και την το σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εμφανίζονται στην εικόνα 53 και είναι 74kW φωτοβολταϊκά, 31kW ανεμογεννήτριες, 15,8kW μετατροπέα και ένα σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα 340kWh, με αυτονομία 72,2h (~3μέρες). Το κόστος υπολογίζεται στα 234.507€.

Στις εικόνες 54,56 και 58 φαίνεται η ενέργεια που βρίσκεται στο σύστημα από τα φωτοβολταϊκά, τις ανεμογεννήτριες και τις μπαταρίες, όταν έχει καλυφθεί το φορτίο που απαιτείται για τις ανάγκες του κτιρίου, δηλαδή η περίσσεια ή η έλλειψη ενέργειας και την χρήση της μπαταρίας, για κάθε τριήμερο που αναφέρθηκε. Επομένως η ενέργεια αυτή είναι το άθροισμα της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες με την ενέργεια του συστήματος αποθήκευσης και από την τιμή αυτή αφαιρείται το φορτίο καταναλώσεων. Στον άξονα της ισχύος οι θετικές τιμές δείχνουν την περίσσεια ενέργειας, δηλαδή την ενέργεια που παράγεται και δεν χρησιμοποιείται την ίδια στιγμή, αλλά αποθηκεύεται ως ένα ποσό στα συστήματα αποθήκευσης , ενώ οι αρνητικές, την χρήση και του συστήματος αποθήκευσης για την κάλυψη των αναγκών. Στην εικόνα 54 για το πρώτο τριήμερο παρατηρείται υψηλή περίσσεια ενέργειας που φτάνει τα 55kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και μέτρια τις άλλες δύο που φτάνουν τα 20kW ωριαίας ισχύος , ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 10kW ωριαίας ισχύος, με εξαίρεση την τελευταία μέρα που υπάρχει περίσσεια ενέργειας της τάξης των 30kW ωριαίας ισχύος. Στην εικόνα 56 για το δεύτερο τριήμερο παρατηρείται ότι περίσσεια ενέργειας φτάνει τα 30kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και 15kW και 25 kW τις άλλες δύο αντίστοιχα , ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ στην εικόνα 58 για το τρίτο τριήμερο γίνεται αντιληπτό ότι παραγωγή περίσσειας ενέργειας υπάρχει μόνο το μεσημέρι της πρώτης μέρας με 65kW ωριαίας ισχύος και δεν υπάρχει σημαντική παραγωγή περίσσειας για το υπόλοιπο του τριημέρου, γεγονός που τρέπει το σύστημα να χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη ενέργεια με ποσό που φτάνει τα 15kW ωριαίας ισχύος. Αυτό το τριήμερο είναι παράδειγμα των ακραίων περιπτώσεων για το οποίο δικαιολογείται το μέγεθος των αποτελεσμάτων του συστήματος.

Στις εικόνες 55,57 και 59 φαίνεται η ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ σε σχέση με την λειτουργία της μπαταρίας και το φορτίο του κτιρίου, για κάθε ένα τριήμερο αντίστοιχα. Για το πρώτο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 55 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 60kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγει μέχρι 15kW ωριαίας ισχύος. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική εκτός από την τελευταία μέρα που γίνεται παραγωγή έως και 15kW ωριαίας ισχύος. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή του φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 13kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες έως 10kW ωριαίας ισχύος. Το τελευταίο βράδυ η φόρτισή του συστήματος αποθήκευσης φτάνει μέχρι και 20kW ωριαίας ισχύος, ενώ τα υπόλοιπα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 5kW. Για το δεύτερο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 57 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 20kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγουν μέχρι 15kW και 18kW ωριαίας ισχύος αντίστοιχα. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 14kW ωριαίας ισχύος, 6kW την δεύτερη και 12kW την τρίτη, ενώ τα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ μέχρι και 8kW. Για το τελευταίο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 59 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 60kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική, όπως και το βράδυ. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την όλες της μέρες μέχρι και 30kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα, ενώ την υπόλοιπη περίοδο αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 8kW. Τα διαγράμματα αυτά δικαιολογούν και όσα αναφέρθηκαν για την περίσσεια ή έλλειψη ενέργειας.

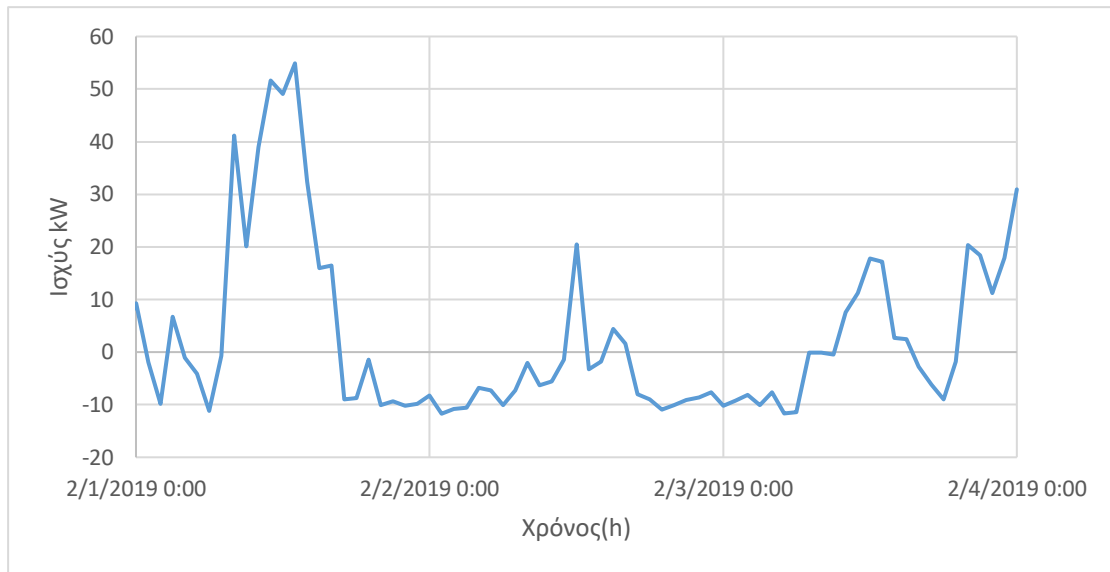


Εικόνα 52 Διάταξη προσομοίωσης με σύστημα συμπιεσμένου αέρα στο Homer

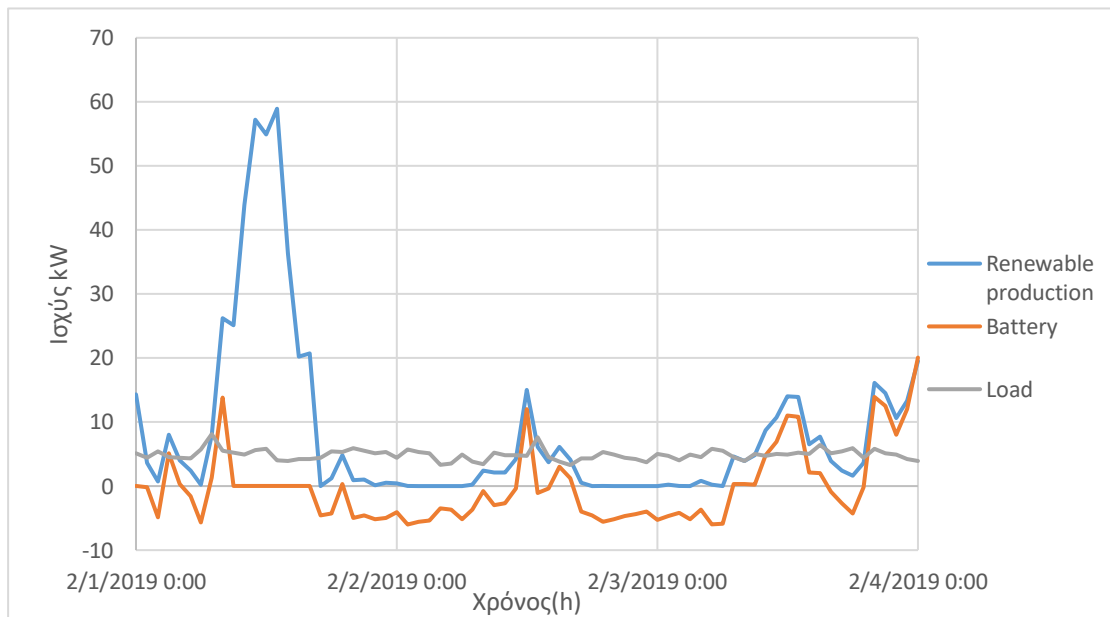
Architecture							Cost				System		PV			
		PV (kW)	G1	340kWh	Converter (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren. Frac. (%)	Total Fuel (L/yr)	Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)		
			74.0	31	1		15.8	CC	\$234,507	\$0.440	\$1,080	\$220,544	100	0	74,011	92,595
G1					340kWh							Converter				
Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)		O&M Cost (\$)	Autonomy (hr)	Annual Throughput (kWh/yr)	Operating hours (hours)	Nominal Capacity (kWh)		Usable Nominal Capacity (kWh)		Rectifier Mean Output (kW)		Inverter Mean Output (kW)			
93,000	19,593		310	72.2	24,393	0	340		340		0		4.71			

Εικόνα 53:Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με σύστημα συμπιεσμένου αέρα

Περίοδος 1/2/19-3/2/19

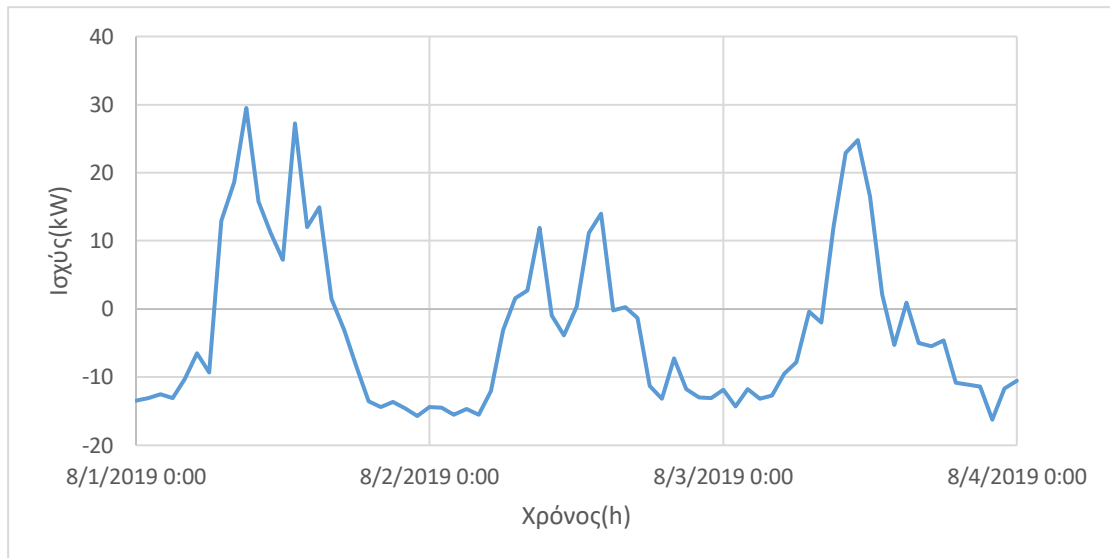


Εικόνα 54: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος συμπιεσμένου αέρα όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2

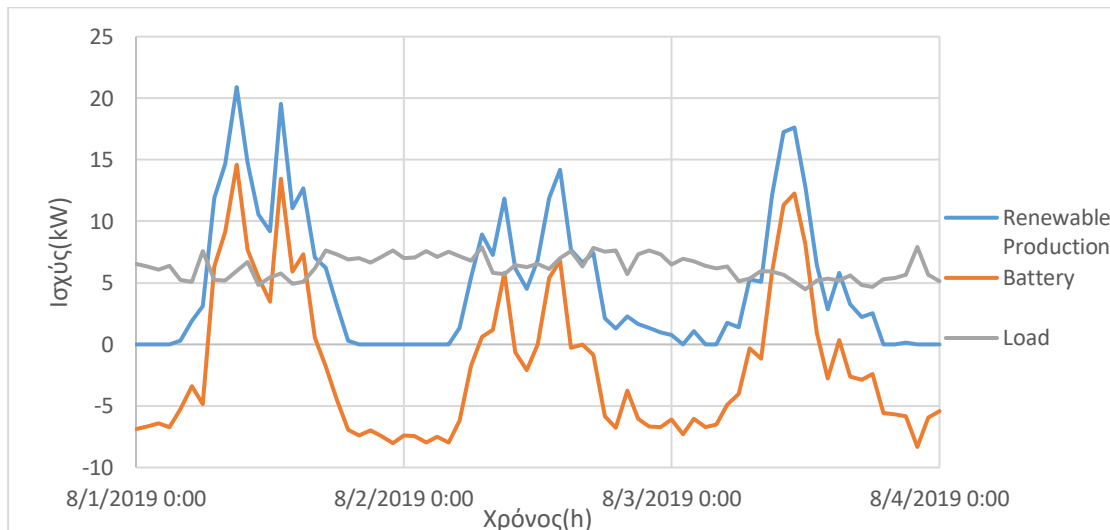


Εικόνα 55: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα συμπιεσμένου αέρα

Περίοδος 1/8/19-3/8/19

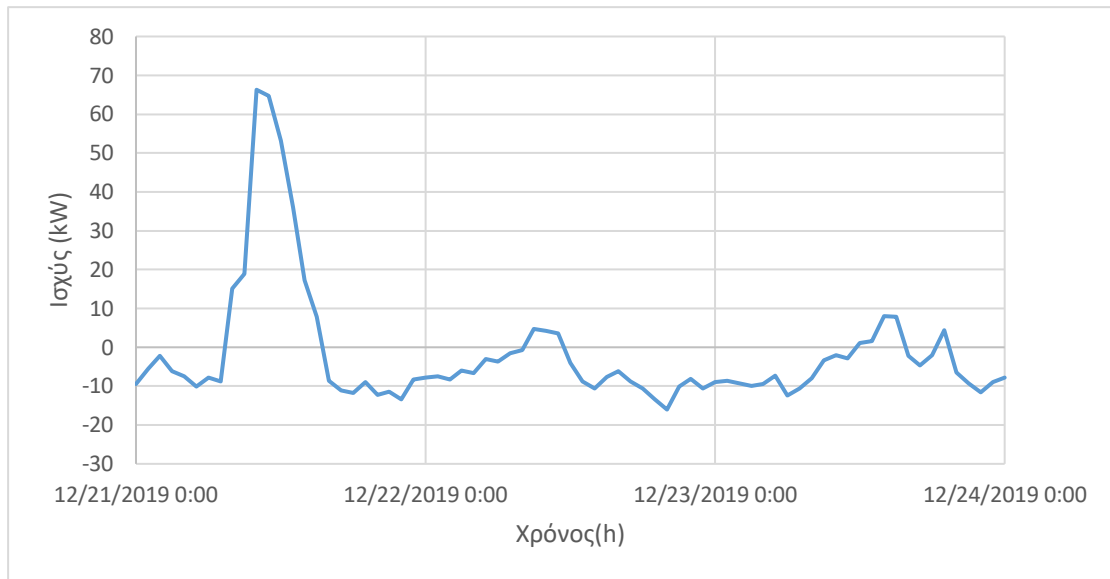


Εικόνα 56: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος συμπιεσμένου αέρα όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8

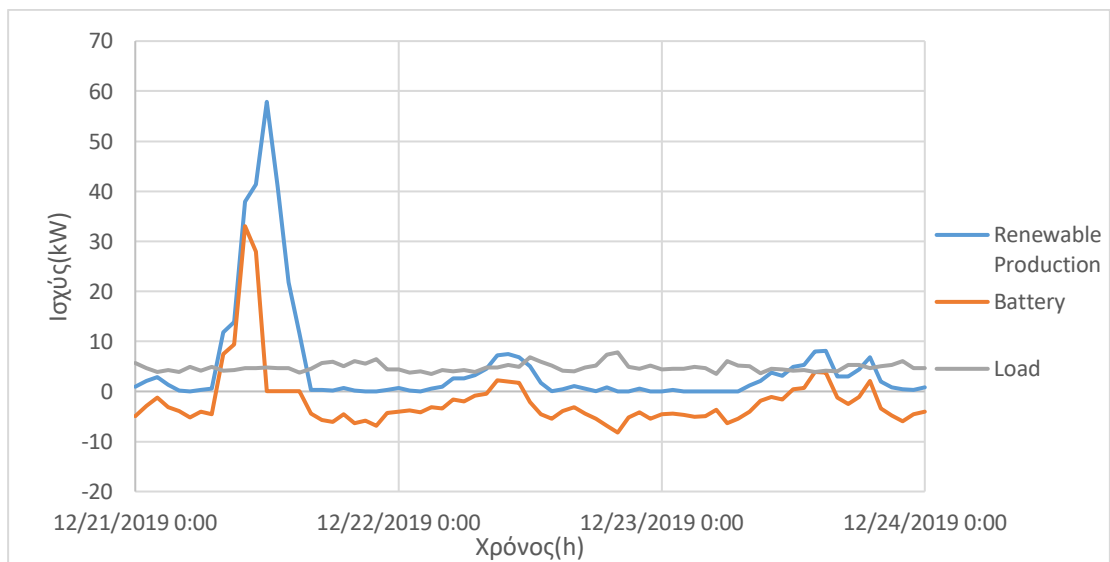


Εικόνα 57: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα συμπιεσμένου αέρα

Περίοδος 21/12/19-23/12/19



Εικόνα 58: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος συμπιεσμένου αέρα όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12



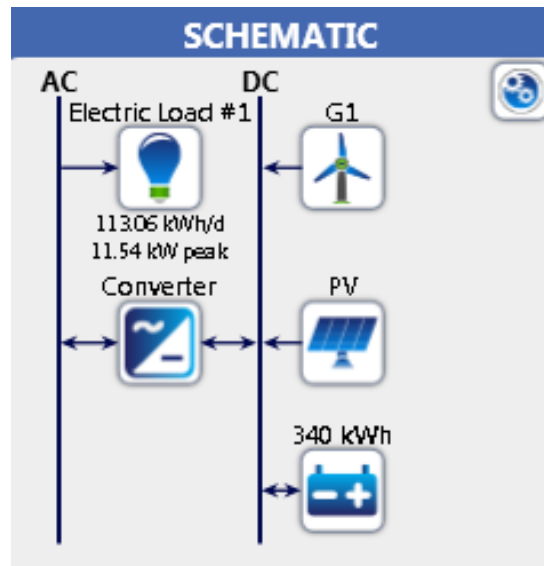
Εικόνα 59: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα συμπιεσμένου αέρα

4.3.6 Προσομοίωση συστήματος αποθήκευσης βαρυτικής επιτάχυνσης

Κατά την προσομοίωση αυτή γίνεται αποθήκευση ενέργειας μέσω συστήματος βαρυτικής επιτάχυνσης. Το σύστημα και τα επί μέρους στοιχεία του φαίνονται στην εικόνα 60 και είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ, οι ανεμογεννήτριες, ο μετατροπέας και το σύστημα αποθήκευσης βαρυτικής επιτάχυνσης. Στην εικόνα 61 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία είναι 93,9kW φωτοβολταϊκών, 13kW ανεμογεννήτριες, 14,6kW μετατροπέα και ένα σύστημα αποθήκευσης 340kWh, με αυτονομία 72,2h (~3 μέρες). Το κόστος προσεγγίστηκε στα 217.581€.

Στις εικόνες 62,64 και 66 φαίνεται η ενέργεια που βρίσκεται στο σύστημα από τα φωτοβολταϊκά, τις ανεμογεννήτριες και τις μπαταρίες, όταν έχει καλυφθεί το φορτίο που απαιτείται για τις ανάγκες του κτιρίου, δηλαδή η περίσσεια ή η έλλειψη ενέργειας και την χρήση της μπαταρίας, για κάθε τριήμερο που αναφέρθηκε. Επομένως η ενέργεια αυτή είναι το άθροισμα της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες με την ενέργεια του συστήματος αποθήκευσης και από την τιμή αυτή αφαιρείται το φορτίο καταναλώσεων. Στον άξονα της ισχύος οι θετικές τιμές δείχνουν την περίσσεια ενέργειας, δηλαδή την ενέργεια που παράγεται και δεν χρησιμοποιείται την ίδια στιγμή, αλλά αποθηκεύεται ως ένα ποσό στα συστήματα αποθήκευσης, ενώ οι αρνητικές, την χρήση και του συστήματος αποθήκευσης για την κάλυψη των αναγκών. Στην εικόνα 62 για το πρώτο τριήμερο παρατηρείται υψηλή περίσσεια ενέργειας που φτάνει τα 75kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και μέτρια τις άλλες δύο που φτάνουν τα 30kW και 20kW ωριαίας ισχύος, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 10kW ωριαίας ισχύος, με εξαίρεση την τελευταία μέρα που υπάρχει περίσσεια ενέργειας της τάξης των 10kW ωριαίας ισχύος. Στην εικόνα 64 για το δεύτερο τριήμερο παρατηρείται ότι περίσσεια ενέργειας φτάνει τα 40kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και 20kW και 35 kW τις άλλες δύο αντίστοιχα, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ στην εικόνα 66 για το τρίτο τριήμερο γίνεται αντιληπτό ότι παραγωγή περίσσειας ενέργειας υπάρχει μόνο το μεσημέρι της πρώτης μέρας με 75kW ωριαίας ισχύος και δεν υπάρχει σημαντική παραγωγή περίσσειας για το υπόλοιπο του τριημέρου, γεγονός που τρέπει το σύστημα να χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη ενέργεια με ποσό που φτάνει τα 15kW ωριαίας ισχύος. Αυτό το τριήμερο είναι παράδειγμα των ακραίων περιπτώσεων για το οποίο δικαιολογείται το μέγεθος των αποτελεσμάτων του συστήματος.

Στις εικόνες 63,65 και 67 φαίνεται η ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ σε σχέση με την λειτουργία της μπαταρίας και το φορτίο του κτιρίου, για κάθε ένα τριήμερο αντίστοιχα. Για το πρώτο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 63 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 80kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγει μέχρι 20kW ωριαίας ισχύος. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική εκτός από την τελευταία μέρα που γίνεται παραγωγή έως και 10kW ωριαίας ισχύος. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή του φτάνει την πρώτη και δεύτερη μέρα μέχρι και 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ την τρίτη μέρα έως 10kW ωριαίας ισχύος. Το τελευταίο βράδυ η φόρτισή του συστήματος αποθήκευσης φτάνει μέχρι και 5kW ωριαίας ισχύος, ενώ τα υπόλοιπα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 5kW. Για το δεύτερο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 65 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 25kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγουν μέχρι 18kW και 22kW ωριαίας ισχύος αντίστοιχα. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 20kW ωριαίας ισχύος, 10kW την δεύτερη και 15kW την τρίτη, ενώ τα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ μέχρι και 8kW. Για το τελευταίο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 67 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 70kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική, όπως και το βράδυ. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την όλες της μέρες μέχρι και 38kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα, ενώ την υπόλοιπη περίοδο αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 8kW. Τα διαγράμματα αυτά δικαιολογούν και όσα αναφέρθηκαν για την περίσσεια ή έλλειψη ενέργειας.

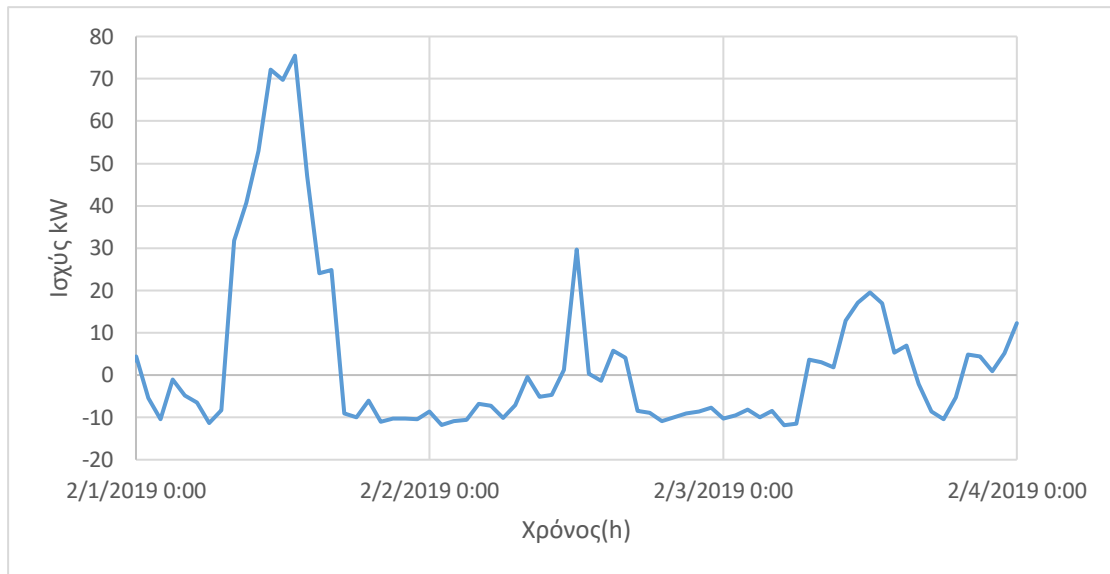


Εικόνα 60:Διάταξη προσομοίωσης με σύστημα βαρυτικής επιτάχυνσης στο Homer

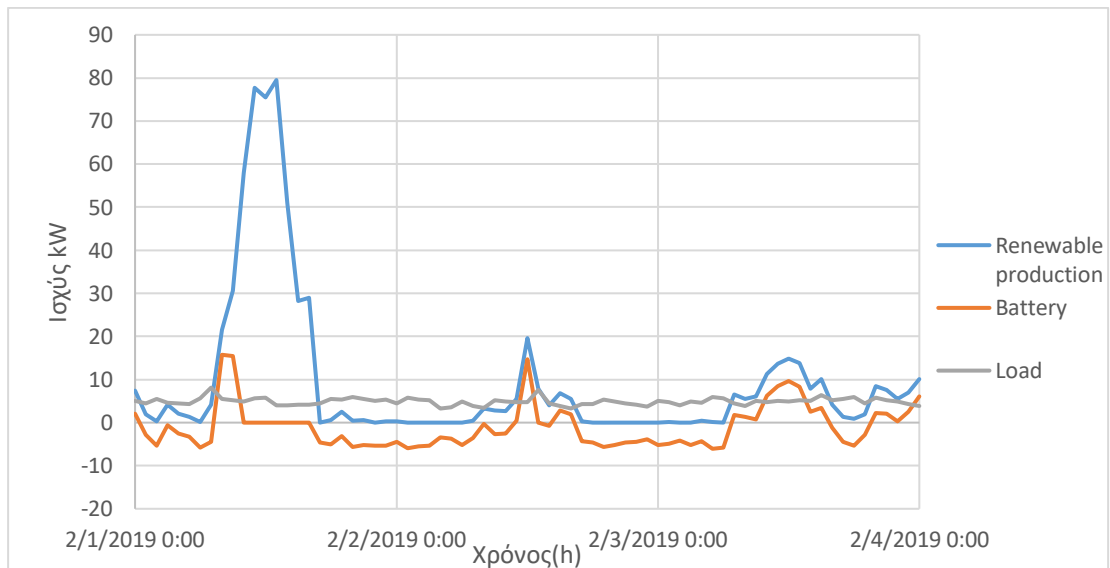
Architecture							Cost				System		PV	
							NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren. Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)
							\$217,581	\$0.408	\$1,109	\$203,239	100	0	93,896	117,473
G1				340 kWh				Converter						
Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)	O&M Cost (\$)	Autonomy (hr)	Annual Throughput (kWh/yr)	Operating hours (hours)	Nominal Capacity (kWh)	Usable Nominal Capacity (kWh)	Rectifier Mean Output (kW)	Inverter Mean Output (kW)					
39,000	8,216	130	72.2	22,671	0	340	340	0	4.71					

Εικόνα 61:Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με σύστημα βαρυτικής επιτάχυνσης

Περίοδος 1/2/19-3/2/19

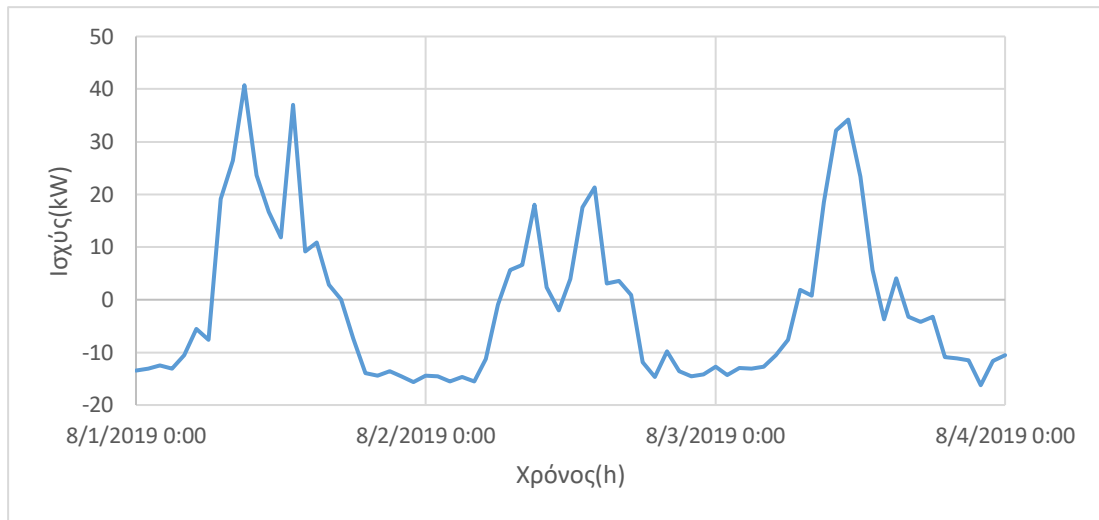


Εικόνα 62: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος βαρυτικής επιτάχυνσης όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2

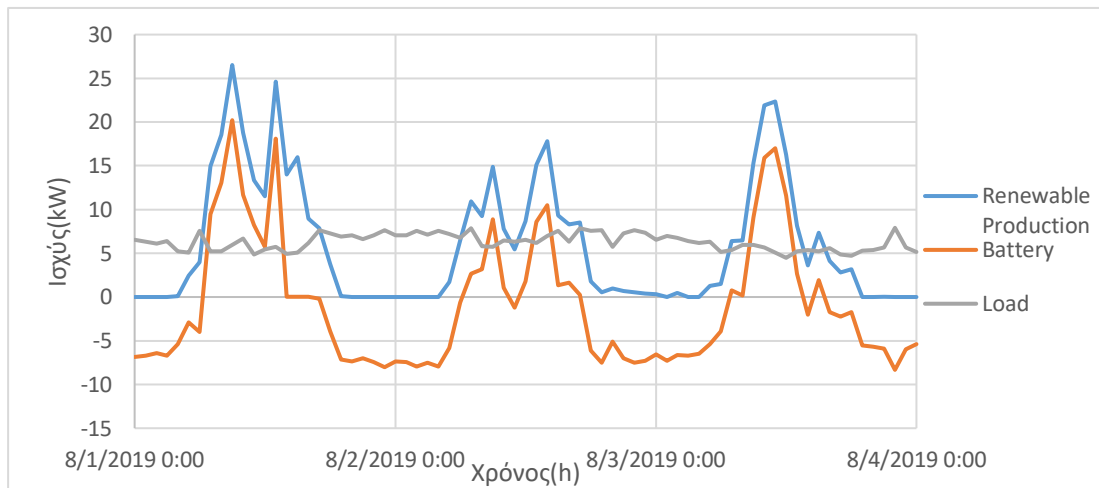


Εικόνα 63: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα βαρυτικής επιτάχυνσης

Περίοδος 1/8/19-3/8/19

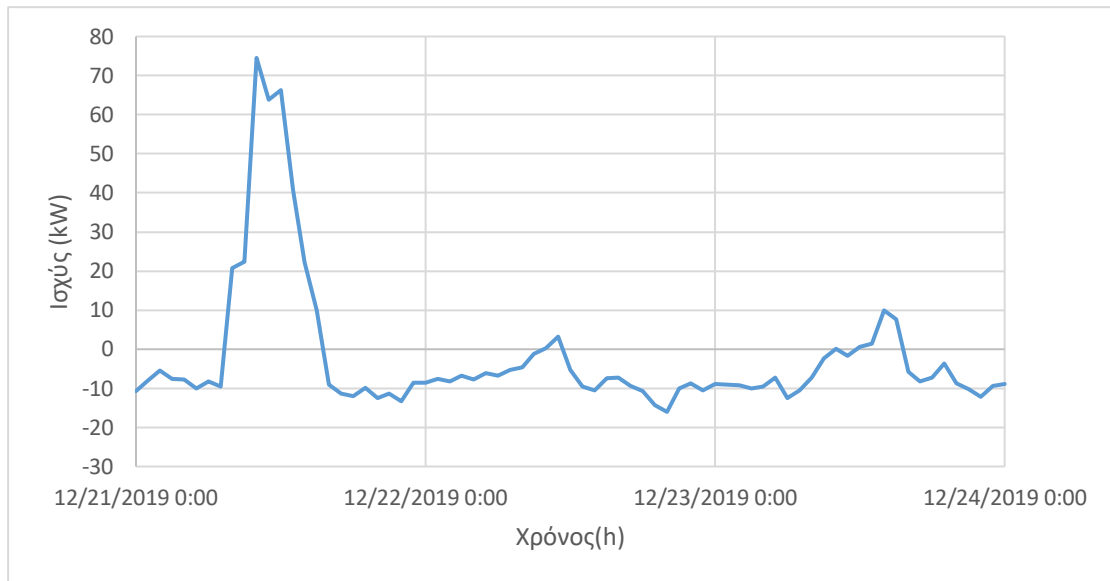


Εικόνα 64: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος βαρυτικής επιτάχυνσης όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8

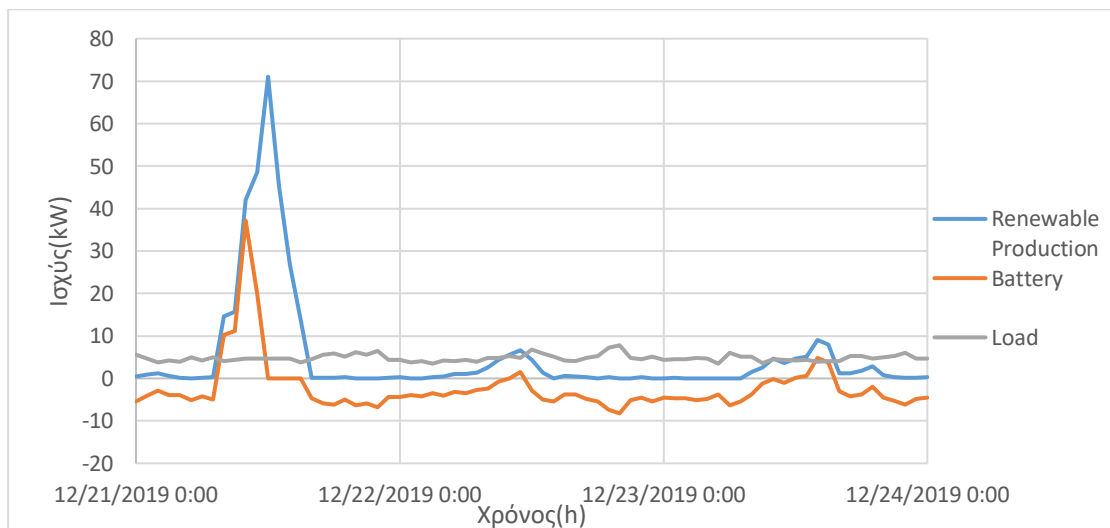


Εικόνα 65: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα βαρυτικής επιτάχυνσης

Περίοδος 21/12/19-23/12/19



Εικόνα 66: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος βαρυτικής επιτάχυνσης όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12



Εικόνα 67: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα βαρυτικής επιτάχυνσης

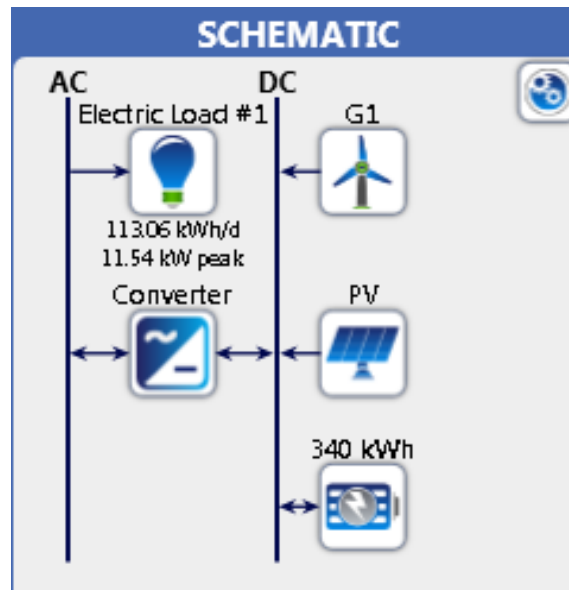
4.3.7 Προσομοίωση συστήματος αποθήκευσης άντλησης νερού

Η προσομοίωση αυτή γίνεται με χρήση της τεχνολογίας αντλιοσταμείωσης και η διάταξη αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες, μετατροπέα ενέργειας και την μπαταρία άντλησης νερού, όπως φαίνεται στην εικόνα 68. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 69 και είναι 75,5kW φωτοβολταϊκών πάνελ, 19kW ανεμογεννήτριες, 13,6kW μετατροπέα και ένα σύστημα άντλησης νερού 340kWh, με αυτονομία 72,2h (~3 μέρες). Το κόστος ανέρχεται στα 205.370€.


Στις εικόνες 70,72 και 74 φαίνεται η ενέργεια που βρίσκεται στο σύστημα από τα φωτοβολταϊκά, τις ανεμογεννήτριες και τις μπαταρίες, όταν έχει καλυφθεί το φορτίο που απαιτείται για τις ανάγκες του κτιρίου, δηλαδή η περίσσεια ή η έλλειψη ενέργειας και την χρήση της μπαταρίας, για κάθε τριήμερο που αναφέρθηκε. Επομένως η ενέργεια αυτή είναι το άθροισμα της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες με την ενέργεια του συστήματος αποθήκευσης και από την τιμή αυτή αφαιρείται το φορτίο καταναλώσεων. Στον άξονα της ισχύος οι θετικές τιμές δείχνουν την περίσσεια ενέργειας, δηλαδή την ενέργεια που παράγεται και δεν χρησιμοποιείται την ίδια στιγμή, αλλά αποθηκεύεται ως ένα ποσό στα συστήματα αποθήκευσης, ενώ οι αρνητικές, την χρήση και του συστήματος αποθήκευσης για την κάλυψη των αναγκών. Στην εικόνα 70 για το πρώτο τριήμερο παρατηρείται υψηλή περίσσεια ενέργειας που φτάνει τα 60kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και μέτρια τις άλλες δύο που φτάνουν τα 20kW ωριαίας ισχύος, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 10kW ωριαίας ισχύος, με εξαίρεση την τελευταία μέρα που υπάρχει περίσσεια ενέργειας της τάξης των 20kW ωριαίας ισχύος. Στην εικόνα 72 για το δεύτερο τριήμερο παρατηρείται ότι περίσσεια ενέργειας φτάνει τα 30kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και 15kW και 25 kW τις άλλες δύο αντίστοιχα, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ στην εικόνα 74 για το τρίτο τριήμερο γίνεται αντιληπτό ότι παραγωγή περίσσειας ενέργειας υπάρχει μόνο το μεσημέρι της πρώτης μέρας με 65kW ωριαίας ισχύος και δεν υπάρχει σημαντική παραγωγή περίσσειας για το υπόλοιπο του τριημέρου, γεγονός που τρέπει το σύστημα να χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη ενέργεια με ποσό που φτάνει τα 15kW ωριαίας ισχύος. Αυτό το τριήμερο είναι παράδειγμα των ακραίων περιπτώσεων για το οποίο δικαιολογείται το μέγεθος των αποτελεσμάτων του συστήματος.

Στις εικόνες 71,73 και 75 φαίνεται η ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ σε σχέση με την λειτουργία της μπαταρίας και το φορτίο του κτιρίου, για κάθε ένα τριήμερο

αντίστοιχα. Για το πρώτο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 71 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 65kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγει μέχρι 15kW ωριαίας ισχύος. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική εκτός από την τελευταία μέρα που γίνεται παραγωγή έως και 15kW ωριαίας ισχύος. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή του φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 18kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες έως 10kW ωριαίας ισχύος. Το τελευταίο βράδυ η φόρτισή του συστήματος αποθήκευσης φτάνει μέχρι και 10kW ωριαίας ισχύος, ενώ τα υπόλοιπα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 5kW. Για το δεύτερο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 73 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 20kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγουν μέχρι 15kW και 18kW ωριαίας ισχύος αντίστοιχα. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 20kW ωριαίας ισχύος, 10kW την δεύτερη και 17kW την τρίτη, ενώ τα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ μέχρι και 8kW. Για το τελευταίο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 75 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 70kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική, όπως και το βράδυ. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την όλες της μέρες μέχρι και 38kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα, ενώ την υπόλοιπη περίοδο αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 8kW. Τα διαγράμματα αυτά δικαιολογούν και όσα αναφέρθηκαν για την περίσσεια ή έλλειψη ενέργειας.

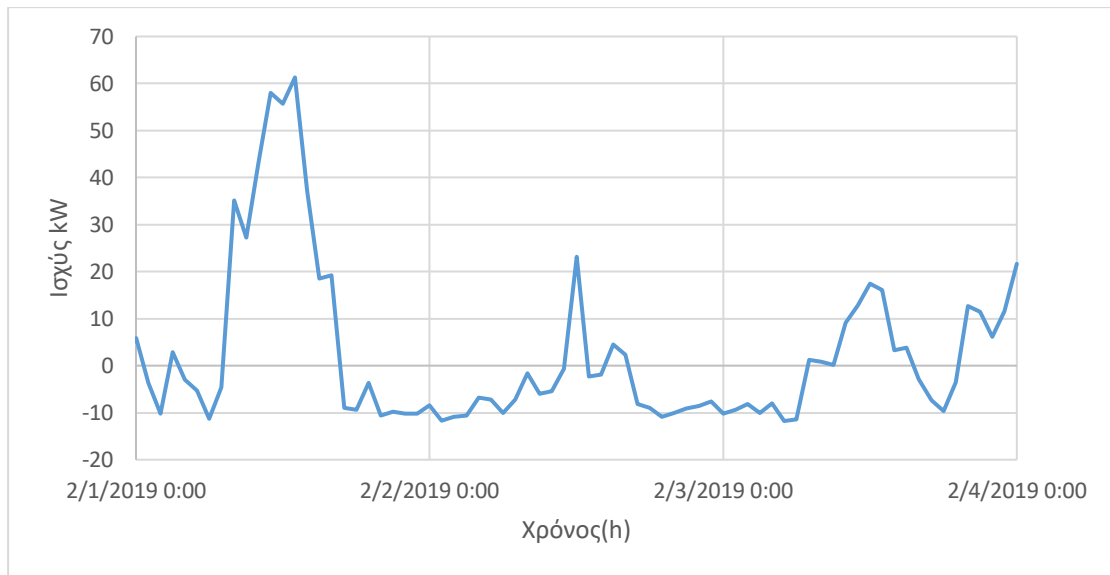


Εικόνα 68: Διάταξη προσομοίωσης με σύστημα αντλιοσταμείωσης στο Homer

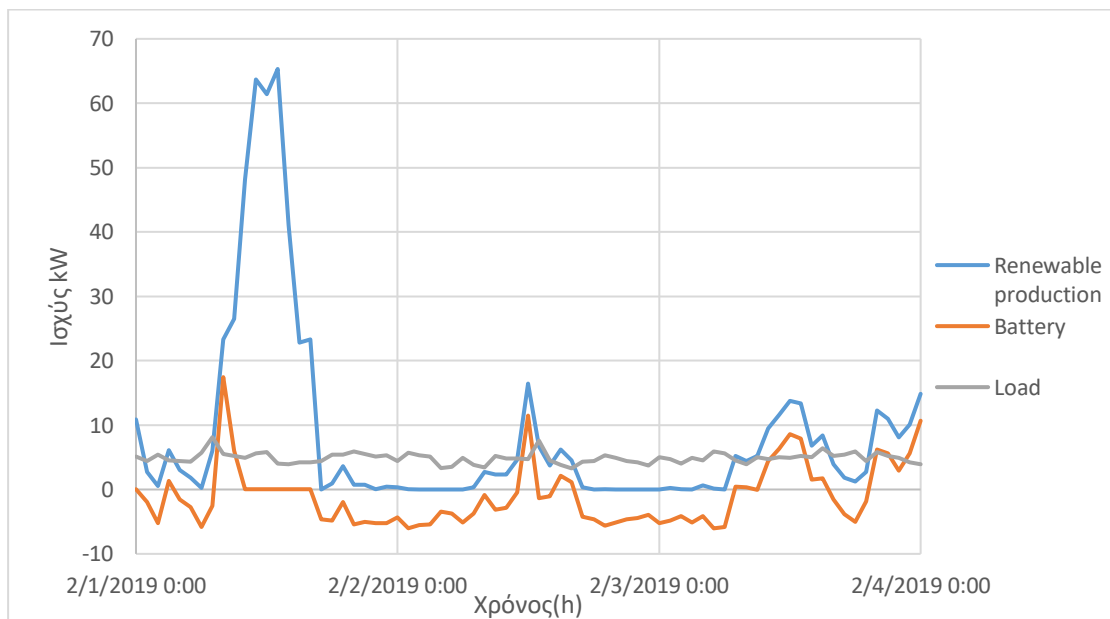
Architecture					Cost				System		PV	
												
												
G1					340 kWh					Converter		
												

Εικόνα 69: Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με σύστημα αντλιοσταμείωσης

Περίοδος 1/2/19-3/2/19

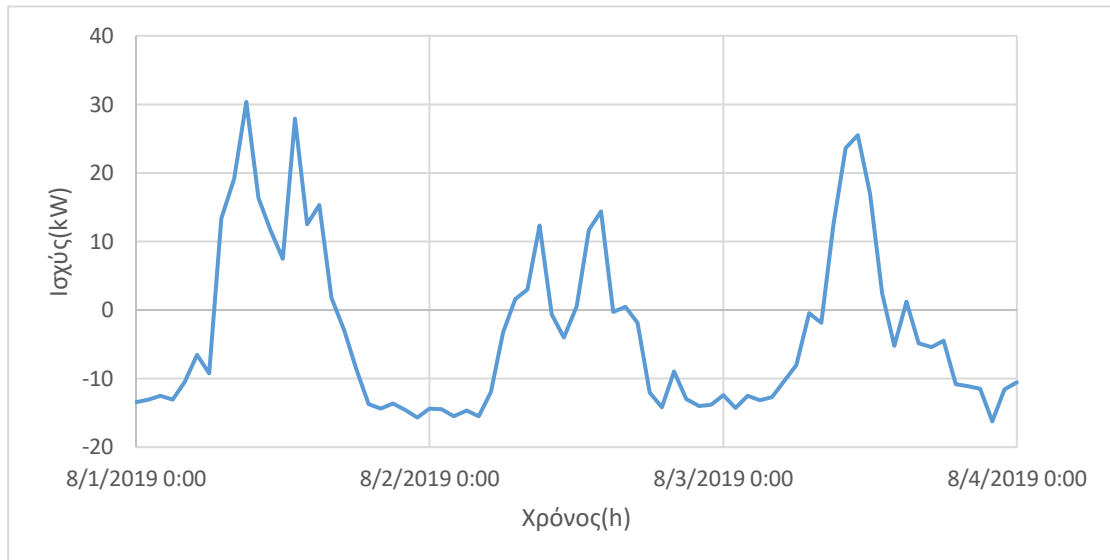


Εικόνα 70: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος αντλιοσταμείωσης όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2

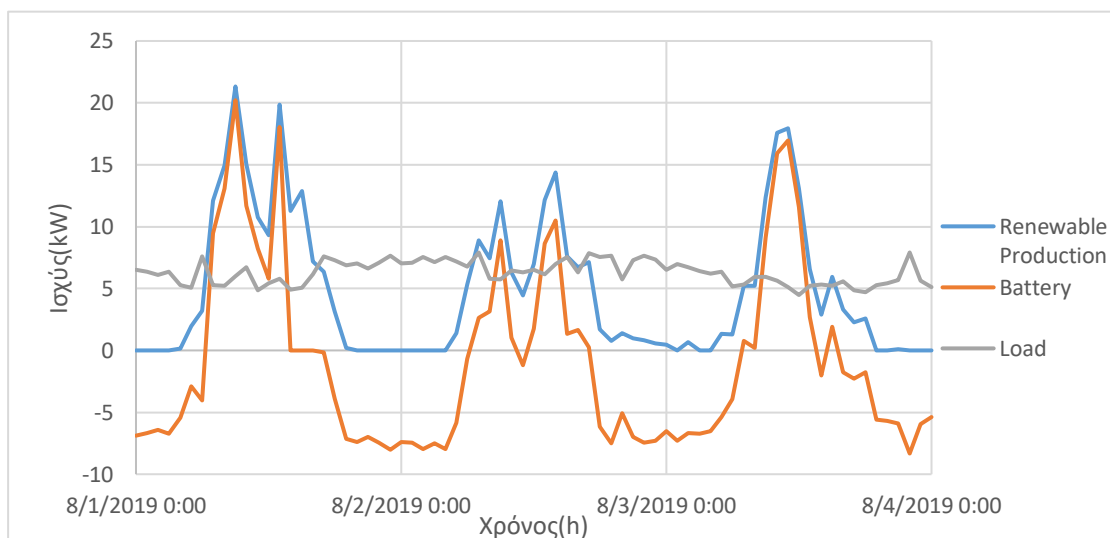


Εικόνα 71: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα αντλιοσταμείωσης

Περίοδος 1/8/19-3/8/19

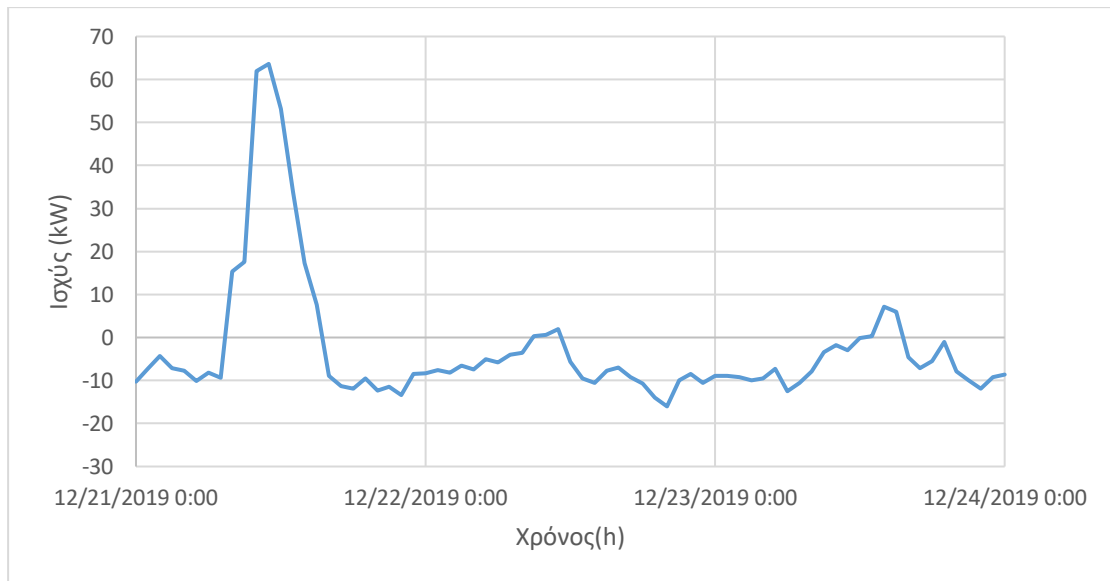


Εικόνα 72: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος αντλιοσταμείωσης όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8

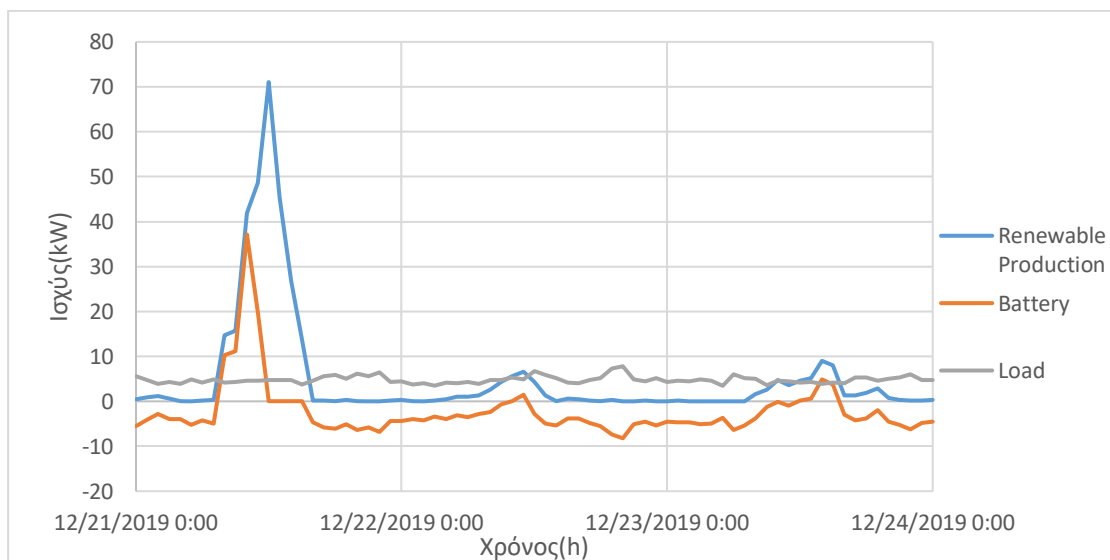


Εικόνα 73 :Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα αντλιοσταμείωσης

Περίοδος 21/12/19-23/12/19



Εικόνα 74: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος αντλιοσταμείωσης όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12



Εικόνα 75: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα αντλιοσταμείωσης

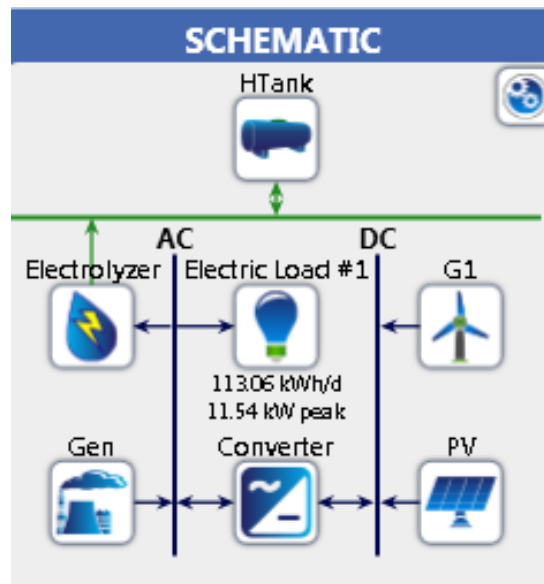
4.3.8 Προσομοίωση συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου

Στην περίπτωση αυτή η αποθήκευση περίσσειας ενέργειας γίνεται με αποθήκευση υδρογόνου. Το σύστημα αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες, μετατροπέα ενέργειας, συσκευή ηλεκτρόλυσης, δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου και γεννήτρια ενέργειας που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το υδρογόνο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 76. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην εικόνα 77 και δείχνουν ότι χρειάζονται 142kW φωτοβολταϊκά, 28kW ανεμογεννήτριες, 72,1kW μετατροπέα, 50kW συσκευή ηλεκτρόλυσης, 1500kg δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου και 13kW γεννήτρια. Η αυτονομία του συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερη από τον στόχο, αλλά έχουν υπολογιστεί οι μικρότερες τιμές των στοιχείων της διάταξης. Επίσης το κόστος εκτιμάται στα 367.240€.










Στις εικόνες 78,80 και 82 φαίνεται η ενέργεια που βρίσκεται στο σύστημα από τα φωτοβολταϊκά, τις ανεμογεννήτριες, την γεννήτρια και την συσκευή ηλεκτρόλυσης, όταν έχει καλυφθεί το φορτίο που απαιτείται για τις ανάγκες του κτιρίου, δηλαδή η περίσσεια ή η έλλειψη ενέργειας και την χρήση της μπαταρίας, για κάθε τριήμερο που αναφέρθηκε. Επομένως η ενέργεια αυτή είναι το άθροισμα της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες με την ενέργεια του συστήματος αποθήκευσης και από την τιμή αυτή αφαιρείται το φορτίο καταναλώσεων. Στον άξονα της ισχύος οι θετικές τιμές δείχνουν την περίσσεια ενέργειας, δηλαδή την ενέργεια που παράγεται και δεν χρησιμοποιείται την ίδια στιγμή, αλλά αποθηκεύεται ως ένα ποσό στα συστήματα αποθήκευσης, ενώ οι αρνητικές, την χρήση και του συστήματος αποθήκευσης για την κάλυψη των αναγκών. Στην εικόνα 78 για το πρώτο τριήμερο παρατηρείται υψηλή περίσσεια ενέργειας που φτάνει τα 170kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και μέτρια τις άλλες δύο που φτάνουν τα 45kW και 40 kW ωριαίας ισχύος, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 10kW ωριαίας ισχύος, με εξαίρεση την τελευταία μέρα που υπάρχει περίσσεια ενέργειας της τάξης των 40kW ωριαίας ισχύος. Στην εικόνα 80 για το δεύτερο τριήμερο παρατηρείται ότι περίσσεια ενέργειας φτάνει τα 65kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα και 40kW και 55 kW τις άλλες δύο αντίστοιχα, ενώ το βράδυ το φορτίο καλύπτει η μπαταρία με 15kW ωριαίας ισχύος, ενώ στην εικόνα 82 για το τρίτο τριήμερο γίνεται αντιληπτό ότι παραγωγή περίσσειας ενέργειας υπάρχει μόνο το μεσημέρι της πρώτης μέρας με 155kW ωριαίας ισχύος και δεν υπάρχει σημαντική παραγωγή περίσσειας για το υπόλοιπο του τριημέρου, γεγονός που τρέπει το σύστημα να χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη ενέργεια με ποσό που

φτάνει τα 15kW ωριαίας ισχύος. Αυτό το τριήμερο είναι παράδειγμα των ακραίων περιπτώσεων για το οποίο δικαιολογείται το μέγεθος των αποτελεσμάτων του συστήματος.

Στις εικόνες 79,81 και 83 φαίνεται η ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ σε σχέση με την λειτουργία της αποθήκευσης υδρογόνου και το φορτίο του κτιρίου, για κάθε ένα τριήμερο αντίστοιχα. Για το πρώτο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 79 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 120kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγει μέχρι 30kW και 20kW ωριαίας ισχύος αντίστοιχα. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική εκτός από την τελευταία μέρα που γίνεται παραγωγή έως και 20kW ωριαίας ισχύος. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή του φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 50kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες έως 20kW ωριαίας ισχύος. Το τελευταίο βράδυ η φόρτισή του συστήματος αποθήκευσης φτάνει μέχρι και 18kW ωριαίας ισχύος, ενώ τα υπόλοιπα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 5kW. Για το δεύτερο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 81 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 40kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες παράγουν μέχρι 28kW και 33kW ωριαίας ισχύος αντίστοιχα. Το βράδυ η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την πρώτη μέρα μέχρι και 30kW ωριαίας ισχύος, 18kW την δεύτερη και 28kW την τρίτη, ενώ τα βράδια αποφορτίζει με ωριαία ισχύ μέχρι και 8kW. Για το τελευταίο τριήμερο, φαίνεται στην εικόνα 82 ότι οι ΑΠΕ παράγουν την πρώτη μέρα μέχρι και 70kW ωριαίας ισχύος, ενώ τις άλλες δύο μέρες η παραγωγή είναι σχεδόν μηδενική, όπως και το βράδυ. Στην ίδια εικόνα παρατηρείται ότι η καμπύλη ωριαίας ισχύος του συστήματος αποθήκευσης έχει παρόμοια μορφή με αυτήν της παραγωγής ΑΠΕ, όμως η φόρτισή της φτάνει την όλες της μέρες μέχρι και 50kW ωριαίας ισχύος την πρώτη μέρα, ενώ την υπόλοιπη περίοδο αποφορτίζει με ωριαία ισχύ τα μέχρι και 8kW. Τα διαγράμματα αυτά δικαιολογούν και όσα αναφέρθηκαν για την περίσσεια ή έλλειψη ενέργειας.



Εικόνα 76:Διάταξη προσομοίωσης με σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου στο Homer

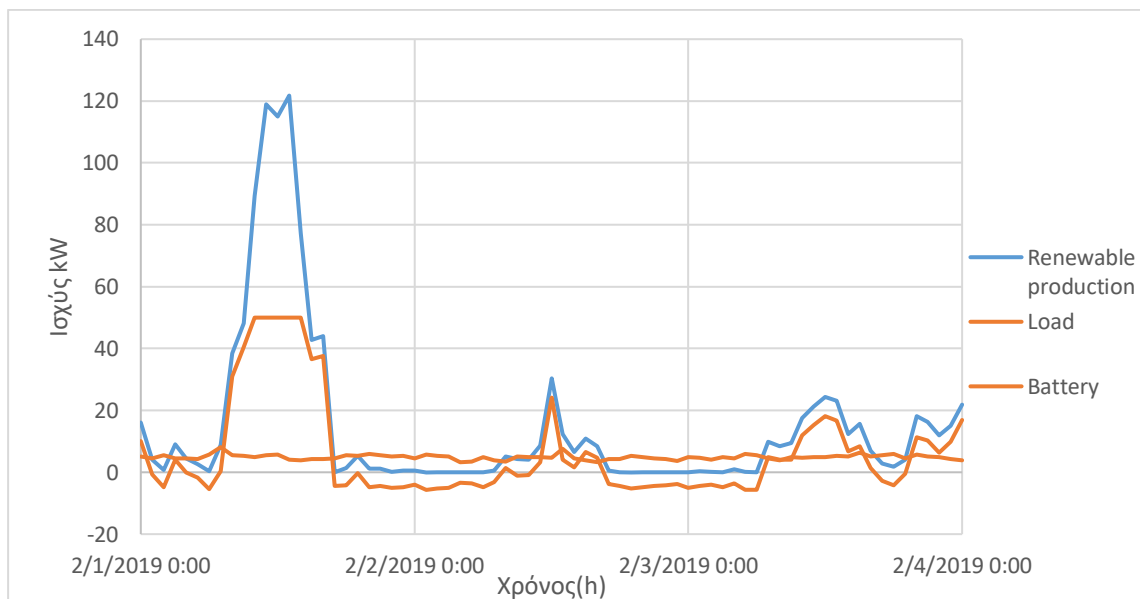
Architecture										Cost				System			
					PV (kW)	G1	Gen (kW)	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren. Frac (%)	Total Fuel (kg/yr)
					142	28	13.0	50.0	1,500	72.1	CC	\$367,240	\$0.689	\$3,326	\$324,238	100	2,918
Gen								PV			G1				Converter		
Hours	Production (kWh)	Fuel (kg)	O&M Cost (\$/yr)	Fuel Cost (\$/yr)	Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)	Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)	O&M Cost (\$)	Rectifier Mean Output (kW)	Inverter Mean Output (kW)						
5,860	23,851	2,918	2,285	0	142,196	177,955	84,000	17,697	280	0	16.7						

Εικόνα 77:Αποτελέσματα του Homer για την βέλτιστη λύση της προσομοίωσης με σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου

Περίοδος 1/2/19-3/2/19

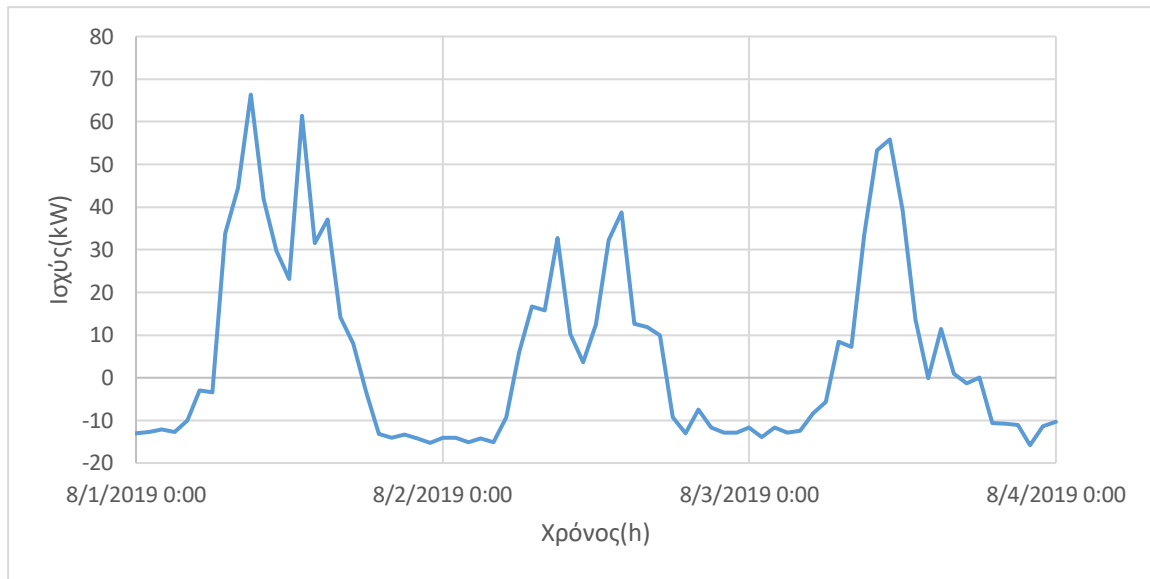


Εικόνα 78: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος υδρογόνου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/2 έως 3/2

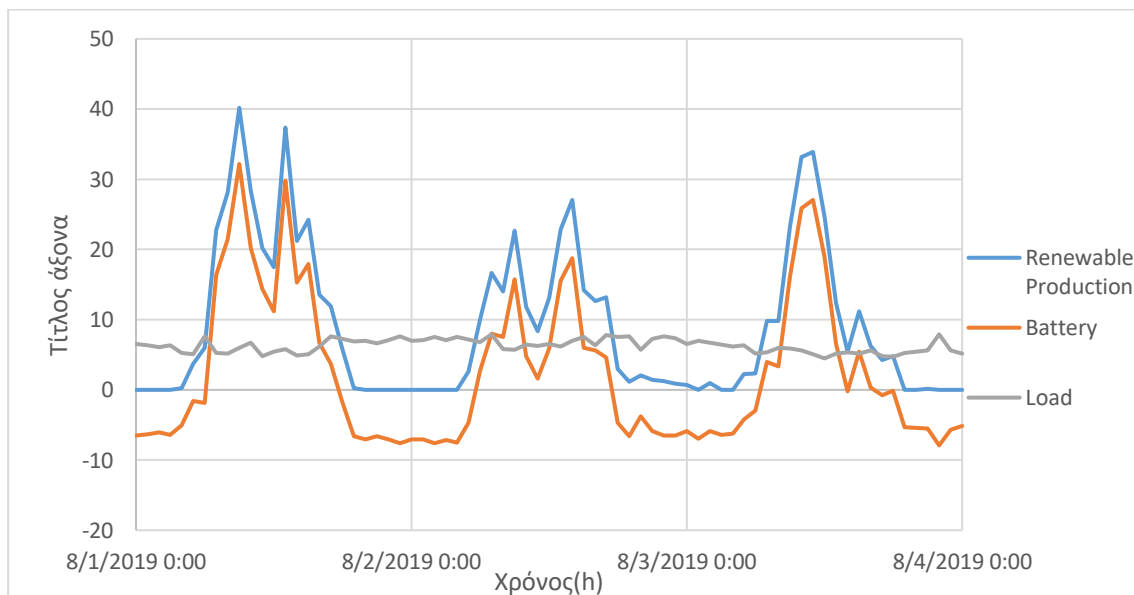


Εικόνα 79: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/2 έως 3/2 για το σύστημα υδρογόνου

Περίοδος 1/8/19-3/8/19



Εικόνα 80: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος υδρογόνου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 1/8 έως 3/8

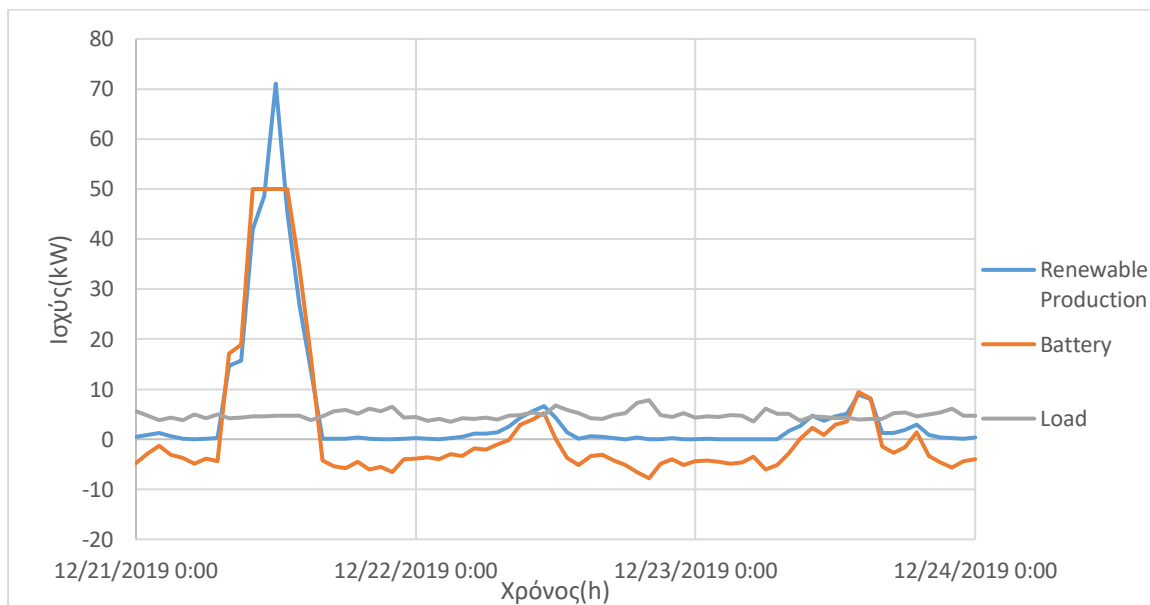


Εικόνα 81: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 1/8 έως 3/8 για το σύστημα υδρογόνου

Περίοδος 21/12/19-23/12/19



Εικόνα 82: Διάγραμμα ισχύος του συστήματος υδρογόνου όταν το φορτίο έχει καλυφθεί για 21/12 έως 23/12



Εικόνα 83: Διάγραμμα ισχύος για παραγωγή ΑΠΕ, αποθήκευση και φορτίου από 21/12 έως 23/12 για το σύστημα υδρογόνου

5.Ανάλυση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν στο Homer παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4. Σε αυτόν αρχικά αναφέρεται η ισχύς των φωτοβολταϊκών πάνελ, των ανεμογεννητριών και των μετατροπέων ενέργειας για κάθε μπαταρία. Στόχος όπως έχει αναφερθεί είναι η κάλυψη των αναγκών του κτιρίου από τα πάνελ και τις ανεμογεννήτριες κατά την περίοδο που οι συνθήκες το επιτρέπουν και αποθήκευση κατάλληλων ποσών ενέργειας στις μπαταρίες για χρήση της όταν οι ΑΠΕ δεν δύναται να παράγουν την αναγκαία ενέργεια. Επίσης στα ποσά αυτά έχει συμπεριληφθεί και αυτονομία τριών ημερών , για περιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων ή απουσίας ηλιοφάνειας ή ανέμων. Στο κομμάτι αυτό παρατηρείται ότι το σύστημα υδρογόνου χρειάζεται την περισσότερη παραγωγή ενέργειας μέσω ΑΠΕ , ενώ στην συνέχεια το σύστημα συμπιεσμένου αέρα και το σύστημα βαρυτικής επιτάχυνσης καταλαμβάνουν τις υψηλότερες τιμές. Την χαμηλότερη τιμή έχει ο σφόνδυλος , ενώ οι υπόλοιπες κυμαίνονται στις ίδιες τιμές.

Ακολούθως αναφέρεται το συνολικό κόστος κάθε περίπτωσης, που βρίσκεται στο ίδιο μέγεθος σε όλες, με υψηλότερη τιμή αυτή της περίπτωσης αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία μόλυβδου-οξέος και με εξαίρεση το σύστημα υδρογόνου το οποίο αποκλίνει σημαντικά. Ωστόσο το κόστος αυτό περιλαμβάνει τις τιμές των πάνελ, των μετατροπέων, των μπαταριών και σε κάποιες περιπτώσεις του κόστους συντήρησης. Κάθε προσομοίωση διαφέρει στον τρόπο κοστολόγησης και θα αναφερθεί αναλυτικά παρακάτω.

Συνεχίζοντας, ο πίνακας δίνει τιμές για την παραγωγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών καθώς και το εκάστοτε κόστος. Οι τιμές αυτές ακολουθούν την κατάταξη των τιμών ισχύος και αναφέρονται ποσοτικά στον πίνακα. Να σημειωθεί ότι στο κόστος των φωτοβολταϊκών στην περίπτωση όπου η αποθήκευση γίνεται με σφονδύλους, συμπεριλαμβάνει και το κόστος του μετατροπέα για λόγους σχεδιασμού που προαναφέρθηκαν.

Επιπλέον αναφέρονται οι ώρες αυτονομίας, η ονομαστική χωρητικότητα και το κόστος κάθε συστήματος αποθήκευσης. Η αυτονομία βρίσκεται κοντά στον στόχο των τριών ημερών ή 72 ωρών, με μικρές αποκλίσεις που οφείλονται στην χρήση ήδη υπαρχόντων μπαταριών και την προσπάθεια προσαρμογής τους στις απαιτήσεις της μελέτης. Όσον αναφορά το μεγαλύτερο κόστος από τα συστήματα αποθήκευσης έχει το σύστημα

υδρογόνου, με σχεδόν διπλάσια τιμή από τις υπόλοιπες και ακολουθεί η μπαταρία λιθίου με εξίσου μεγάλη τιμή. Τα υπόλοιπα συστήματα κυμαίνονται στο ίδιο εύρος με χαμηλότερη αυτή του συστήματος συμπιεσμένου αέρα.

Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται σε κάθε προσομοίωση γίνεται αντιληπτός ο τρόπος σχεδιασμού του συστήματος, δηλαδή τις λίγες μέρες μέσα στο εξεταζόμενο έτος που η ενέργεια των ΑΠΕ δεν είναι επαρκής για την κάλυψη των αναγκών του κτιρίου, το αποθηκευτικό σύστημα ενέργειας πρέπει να καλύψει υψηλά ποσά ενέργειας και εκ τούτου τα σημεία αυτά καθορίζουν το μέγεθος του συστήματος. Με την δημιουργία μεγάλων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας συνεπάγεται και μεγάλη απαίτηση ενέργειας από ΑΠΕ για την τροφοδοσία τους. Έτσι υπάρχουν περιπτώσεις που παράγεται παραπάνω ενέργεια από ότι χρησιμοποιείται, με σκοπό την κάλυψη των αναγκών σε χρονικές στιγμές μέσα στο έτος που το σύστημα βρίσκεται σε επιβαρυνμένη κατάσταση.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα συστήματα που εξετάστηκαν αποφεύγουν την μέθοδο καύσης για παραγωγή ενέργειας και επομένως σε κανένα σύστημα δεν υπάρχει παραγωγή CO₂ κατά την λειτουργία τους.

Συστήματα Αποθήκευσης		Μόλυβδου-Οξέος	Λιθίου	Ροής Βαναδίου	Σφόνδυλοι	Συμπιεσμένος Αέρας	Βαρυτικής Επιτάχυνσης	Αντλιοσταμείωση	Υδρογόνου
Στοιχεία Συστήματος	Φωτοβολταϊκά Πάνελ (kW)	58,9	81,2	66,6	51,2	74,0	93,9	75,5	142
	Μετατροπέας (kW)	16,2	14,2	17,1	14,1	15,8	14,6	13,6	72,1
	Ανεμογεννήτριες (kW)	23	14	25	17	31	13	19	28
Οικονομικά	Συνολικό Κόστος (€)	267.951	217.527	257.630	235.368	234.507	217.581	205.370	367.240
Φωτοβολταϊκά Πάνελ	Παραγωγή Ενέργειας (kWh/y)	73.681	101.578	83.264	64.098	92.595	117.473	94.456	177.955
	Κόστος (€)	58.893	81.191	66.533	54.563	74.011	93.896	75.498	142.196
Ανεμογεννήτρια	Παραγωγή Ενέργειας (kWh/y)	14.537	8.849	15.801	10.745	19.593	8.216	12.009	17.697
	Κόστος (€)	96.000	42.000	75.000	51.000	93.000	39.000	57.000	84.000
Αποθήκευση	Αυτονομία (h)	72,7	72,2	76,4	74,3	72,2	72,2	72,2	-
	Ονομαστική Χωρητικότητα (kWh)	570	425	360	350	340	340	340	-
	Κόστος (€)	57.000	85.000	54.000	70.000	51.000	68.000	56.100	-
Υδρογόνο	Μονάδα Ηλεκτρόλυσης (kW)	-	-	-	-	-	-	-	50
	Δεξαμενή H ₂ (kg)	-	-	-	-	-	-	-	1500
	Γεννήτρια (kW)	-	-	-	-	-	-	-	13
	Κόστος Συστήματος (€)	-	-	-	-	-	-	-	86.500

Πίνακας 7: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων του Homer για τα υπό μελέτη συστήματα αποθήκευσης

6.Συμπεράσματα

Στην μελέτη αυτή εξετάστηκαν τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία μόλυβδου-οξέος, μπαταρία λιθίου, μπαταρία ροής βαναδίου, με σφονδύλους, συμπιεσμένου αέρα, βαρυτικής επιτάχυνσης, αντλιοταμείωσης και υδρογόνου, με κτίριο μελέτης το Leaf House, αποκομμένο από το δίκτυο παροχής ρεύματος και με αυτονομία τριών ημερών. Η μοντελοποίηση και οι προσομοιώσεις έγιναν στο λογισμικό Homer και δόθηκαν τιμές για την διαστασιολόγηση των μελών του εκάστοτε συστήματος καθώς και τιμές κόστους. Η κύρια διάταξη που ακολουθήθηκε από όλες τις περιπτώσεις είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ, οι ανεμογεννήτριες, ο μετατροπέας ενέργειας και το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Το φορτίο που καλύφθηκε προέρχεται από τιμές των μετρητών του Leaf House για το έτος 2019.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι οι από τα συστήματα αποθήκευσης που εξετάστηκαν, χαμηλότερο κόστος είχε το σύστημα αποθήκευσης με αντλιοταμείωση και το σύστημα αποθήκευσης με μπαταρία λιθίου. Το πρώτο είναι μια φιλική προς το περιβάλλον επιλογή, αφού διαχειρίζεται μόνο την δυναμική ενέργεια του νερού για την αποθήκευση ενέργειας. Ωστόσο έχει την ιδιαιτερότητα απαίτησης ειδικού χώρου για την εγκατάστασή του, θέτοντας έτσι προϋποθέσεις για την εγκατάστασή του. Η μπαταρία λιθίου από την άλλη είναι μια μη φιλική προς το περιβάλλον επιλογή, η οποία όμως λόγω και της απόδοσής της φαίνεται να είναι κατάλληλη για την εξυπηρέτηση των αναγκών του κτιρίου. Επιπλέον η μπαταρία αυτή δεν έχει την χωρική ιδιαιτερότητα που έχει το σύστημα αποθήκευσης με αντλιοταμείωση. Τα συστήματα αποθήκευσης που ακολουθούν ως οικονομικότερες λύσεις είναι το σύστημα αποθήκευσης με βαρυτική επιτάχυνση, το σύστημα αποθήκευσης με συμπιεσμένο αέρα, το σύστημα αποθήκευσης με σφονδύλους, το σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες ροής βαναδίου, το σύστημα αποθήκευσης με μπαταρία μόλυβδου-οξέος και τέλος το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου. Από την παραπάνω κατάταξη φαίνεται ότι τις πιο οικονομικές λύσεις τις παρέχουν τα μηχανικά συστήματα αποθήκευσης, παρόλο την απαίτησή τους για ειδικές χωρικές συνθήκες.

Γίνεται επίσης κατανοητό ότι τα συστήματα που εξετάστηκαν διαχειρίζονται μεγάλα ποσά ενέργειας, τόσο κατά την παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ όσο και κατά την αποθήκευση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι την μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας χρειάστηκε το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου και το σύστημα αποθήκευσης

συμπιεσμένου αέρα, ενώ την ελάχιστη παραγωγή ενέργειας χρειάστηκε το σύστημα αποθήκευσης με σφονδύλους. Συμπεραίνεται επομένως ότι για την κάλυψη των αναγκών του συστήματος η ενέργεια που παράγεται στην περίπτωση συστήματος αποθήκευσης με σφονδύλους είναι η μικρότερη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα συστήματα αποθήκευσης που εξετάστηκαν.

Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι το μέγεθος των μελών της διάταξης καθώς και το κόστος για την δημιουργία τέτοιων συστημάτων είναι μεγάλο και οφείλεται στην ιδιαιτερότητα του συστήματος να είναι αποκομμένο από το δίκτυο ρεύματος. Οι χρονικές στιγμές του έτους, όπου οι ΑΠΕ δεν παρέχουν αρκετή ενέργεια για την κάλυψη του φορτίου, οδηγούν στην ανάγκη κάλυψης αυτού από τα συστήματα αποθήκευσης, τα οποία πρέπει να είναι φορτισμένα καταλλήλως. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί ότι η παραγόμενη ενέργεια από τις ΑΠΕ δεν χρησιμοποιείται πάντα, δηλαδή κάποια ποσά περίσσειας ενέργεια δεν αποθηκεύεται στα συστήματα αποθήκευσης λόγω του ότι φορτίζονται πλήρως. Αυτό συμβαίνει διότι δεν απαιτούν όλες οι χρονικές στιγμές μέσα στο έτος το ίδιο ποσό ενέργειας. Επομένως η διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης βασίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις χρονικές στιγμές μικρής παραγωγής ενέργειας από τις ΑΠΕ και υψηλής τροφοδοσίας από τα συστήματα αποθήκευσης.

Τέλος τα συστήματα αποθήκευσης που μελετήθηκαν καθώς και η παραγωγή ενέργειας δεν δημιουργούν εκπομπές CO₂ κατά την λειτουργία τους, γεγονός που τα καθιστά φιλικά προς το περιβάλλον.

Βιβλιογραφία

1. Singer LE, Peterson D. *International Energy Outlook 2010*. Vol 0484.; 2011.
2. Ukoba K, Fadare O, Jen TC. Powering Africa Using An Off-Grid, Stand-Alone, Solar Photovoltaic Model. *J Phys Conf Ser*. 2019;1378(2). doi:10.1088/1742-6596/1378/2/022031
3. Kampelis N, Gobakis K, Vagias V, et al. Evaluation of the performance gap in industrial, residential & tertiary near-Zero energy buildings. *Energy Build*. 2017;148:58-73. doi:10.1016/j.enbuild.2017.03.057
4. Marszal AJ, Heiselberg P, Bourrelle JS, et al. Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. *Energy Build*. 2011;43(4):971-979. doi:10.1016/j.enbuild.2010.12.022
5. How to connect multiple batteries together? <https://www.mpptsolar.com/en/batteries-series-parallel.html>. Published 2020.
6. Wei MM, Wang JZ, Huang ZJ. Comparative analysis of hybrid systems for on-grid and off-grid applications in central China: Case study of university dormitory in Ma'an Shan. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2019;238(1). doi:10.1088/1755-1315/238/1/012028
7. Ren Z, Paevere P, Chen D. Feasibility of off-grid housing under current and future climates. *Appl Energy*. 2019;241(March):196-211. doi:10.1016/j.apenergy.2019.03.068
8. Kallel R, Boukettaya G, Krichen L. Demand side management of an isolated hybrid energy production unit supplying domestic loads. *2014 IEEE 11th Int Multi-Conference Syst Signals Devices, SSD 2014*. 2014:1-5. doi:10.1109/SSD.2014.6808893
9. Ghenai C, Bettayeb M. Modelling and performance analysis of a stand-alone hybrid solar PV/Fuel Cell/Diesel Generator power system for university building. *Energy*. 2019;171:180-189. doi:10.1016/j.energy.2019.01.019
10. Malik P, Awasthi M, Sinha S. Analysis of sensitive parameters influencing a SPV/WT/Biomass/Battery based hybrid system. *2019 8th Int Conf Power Syst Transit Toward Sustain Smart Flex Grids, ICPS 2019*. 2019. doi:10.1109/ICPS48983.2019.9067637
11. Hemmati R. Stochastic energy investment in off-grid renewable energy hub for autonomous building. *IET Renew Power Gener*. 2019;13(12):2232-2239. doi:10.1049/iet-rpg.2018.6254
12. Villela D, Kasinathan VV, De Valle S, et al. Compressed-air energy storage systems for stand-alone off-grid photovoltaic modules. *Conf Rec IEEE Photovolt Spec Conf*. 2010:962-967. doi:10.1109/PVSC.2010.5614596
13. Guerello A, Page S, Holburn G, Balzarova M. Energy for off-grid homes: Reducing costs through joint hybrid system and energy efficiency optimization. *Energy Build*. 2020;207. doi:10.1016/j.enbuild.2019.109478
14. ΤΣΑΚΑΝΙΚΑΣ ΜΑ. Μελέτη Συσσωρευτών Τύπου AGM. 2012.
15. Alternative Energy Tutorials. Deep Cycle Batteries. <https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/deep-cycle-batteries.html>. Published 2015.

16. Troiano J. How do Lithium Ion Batteries Work? A Nanotechnology Explainer. <http://sustainable-nano.com/2013/10/15/how-do-lithium-ion-batteries-work/>. Published 2013.
17. Daggett J. Can Flow Batteries compete with Li-ion? <https://blogs.dnvgl.com/energy/can-flow-batteries-compete-with-li-ion>. Published 2019.
18. Amiryar ME, Pullen KR. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. *Appl Sci*. 2017;7(3). doi:10.3390/app7030286
19. Micu A. The North Sea could become the UK's largest battery — one that lasts for the whole winter. <https://www.zmescience.com/science/uk-caes-battery-north-sea-82536324/>. Published 2019.
20. Energy GR. PUMP HYDRO TURBINE. <https://www.ge.com/renewableenergy/hydro-power/large-hydropower-solutions/hydro-turbines/pump-turbine>. Published 2016.
21. Gravitricity Technology. <https://www.gravitricity.com/>. Published 2020.
22. Schiller M. Hydrogen Energy Storage: A New Solution To the Renewable Energy Intermittency Problem. <https://www.renewableenergyworld.com/2014/07/16/hydrogen-energy-storage-a-new-solution-to-the-renewable-energy-intermittency-problem/#gref>. Published 2014.
23. Greenspec. Fuel Cells: Heat and Electricity. <https://www.greenspec.co.uk/building-design/fuel-cells/>.
24. Few S, Gambhir A, Offer G, Nelson J, Brandon N. Which energy storage technology can meet my needs ? *Grantham Inst*. 2015. www.imperial.ac.uk/grantham/energy-storage.
25. BSRIA. Energy storage for buildings. https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Energy_storage_for_buildings. Published 2019.
26. Nouban F, Abazid M. Plastic degrading fungi *Trichoderma viride* and *Aspergillus nomius* isolated from Nouban, F. and Abazid, M. (2017) 'Plastic degrading fungi *Trichoderma viride* and *Aspergillus nomius* isolated from local landfill soil in Medan', *Iopscience.Iop.Org*, 8(February . *Iopscience.Iop.Org*. 2017;8(February 2018):68-74. doi:10.1088/1755-1315
27. SmartGems. Smart Grid Energy Management Staff Exchange D2 . 2 Webinars in smart grids and smart communities : Recordings. 2014.
28. Comodi G, Giantomassi A, Severini M, et al. Multi-apartment residential microgrid with electrical and thermal storage devices: Experimental analysis and simulation of energy management strategies. *Appl Energy*. 2015;137:854-866. doi:10.1016/j.apenergy.2014.07.068
29. Rousis AO, Tzelepis D, Konstantelos I, Booth C, Strbac G. Design of a hybrid ac/dc microgrid using homer pro: Case study on an islanded residential application. *Inventions*. 2018;3(3):1-14. doi:10.3390/inventions3030055
30. HOMER Energy LLC. HOMER Pro Version 3.7 User Manual. *HOMER Energy*. 2016;(August):416. <http://www.homerenergy.com/pdf/HOMERHelpManual.pdf>.

31. Kuzu I, Bicknell R, Fletcher CDM, Gatter KC. Expression of adhesion molecules on the endothelium of normal tissue vessels and vascular tumors. *Lab Investig*. 1993;69(3):322-328.
32. Cost of Mobile and Renewable Power.
https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_1006_cost_of_mobile_power.
Published 2020.
33. Mongird K, Fotedar V, Viswanathan V, et al. Energy storage technology and cost characterization report. *Pacific Northwest Natl Lab*. 2019;(July):1-120.
[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/07/f65/Storage Cost and Performance Characterization Report_Final.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/07/f65/Storage_Cost_and_Performance_Characterization_Report_Final.pdf).
34. Andrews R. Short-term energy storage with “Gravitricity” – iron versus ion.
<http://euanmearns.com/short-term-energy-storage-with-gravitricity-iron-versus-ion/>. Published 2018.
35. Conca J. Can Vanadium Flow Batteries beat Li-ion for utility-scale storage? 2019.
<https://energypost.eu/can-vanadium-flow-batteries-beat-li-ion-for-utility-scale-storage/>.