



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Η.Μ.Ε ΚΑΙ ΠΡΟ.ΠΕ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΙΚΡΕΣ
ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ**

Σπουδαστής: Κατσαμάγκος Παναγιώτης-Νικόλαος

Επιβλέπων καθηγητής: Καββαδίας Κοσμάς

Αθήνα, 2021

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Καβαδίας Κοσμάς

ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Ζαφειράκης Δημήτριος



Μουστρής Κωνσταντίνος

Δήλωση ακαδημαϊκής ακεραιότητας

(Declaration of academic integrity)

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Παναγιώτης-Νικόλαος Κατσαμάγκος του Ανέστη**, με αριθμό μητρώου **46144400** φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



ΔΕΛΤΙΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	
Ακαδ. έτος	2020-2021
Τίτλος Εργασίας	Βέλτιστη επιλογή συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε μικρές υβριδικές μονάδες.
Φοιτητ-ές	Κατσαμάγκος Παναγιώτης-Νικόλαος
Τμήμα	Μηχανολόγων Μηχανικών
Επιβλ. Καθ.	Καββαδίας Κοσμάς
Ημερομηνία	14/02/2021
Λέξεις κλειδιά	Σύστημα αποθήκευσης, Μικρή υβριδική μονάδα, Βάθος εκφόρτισης, Βιωσιμότητα επένδυσης
<p>Περίληψη : Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει σε πρώτο στάδιο όλες τις ποσοτικά και ποιοτικά συγκριτικές ενέργειες οι οποίες είναι απαραίτητες να πραγματοποιηθούν με σκοπό την βέλτιστη επιλογή τεχνολογίας αποθήκευσης για τις ανάγκες μιας μικρής υβριδικής μονάδας, όπως π.χ. μιας εξοχικής κατοικίας. Η υβριδική αυτή μονάδα χρησιμοποιεί εξ' ολοκλήρου πράσινες μορφές ενέργειας στα πλαίσια της προστασίας του περιβάλλοντος και αποτελείται από μια ανεμογεννήτρια, συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων και σύστημα αποθήκευσης. Στο δεύτερο στάδιο της εργασίας πραγματοποιείται η διαστασιολόγηση του αποθηκευτικού συστήματος στη λογική της απορρόφησης όλης της ενέργειας που παράγεται και έπειτα υπολογίζεται ο χρόνος ζωής του. Σημαντικός είναι και ο υπολογισμός των τεχνικοοικονομικών κριτηρίων βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό της οικονομικής απόδοσης της επένδυσης. Τέλος, μελετάται η επίδραση της αλλαγής αποθηκευτικής ισχύος στο βάθος εκφόρτισης, στην βιωσιμότητα της επένδυσης και το χρόνο ζωής των συσσωρευτών σε ορίζοντα εικοσιπενταετίας.</p>	

PROJECT INFORMATION SHEET	
<i>Academic year</i>	2020-2021
<i>Title</i>	Optimal energy store unit choice in small hybrid units
<i>Students</i>	Katsamagkos Panagiotis-Nikolaos
<i>Department</i>	Mechanical Engineering
<i>Advisor</i>	Kavadias Kosmas
<i>Date</i>	14/02/2021
<i>Keywords</i>	Storage system, Small hybrid unit, Depth of discharge, Investment sustainability
<p>Abstract: <i>The present thesis work includes in the first stage all the quantitative and qualitative comparative actions which are necessary to be carried out in order to optimally select the storage technology for the needs of a small hybrid unit, such as e.g. of a country house. This hybrid unit uses all green energy sources in the context of environmental protection and consists of a wind turbine, a photovoltaic array and a storage system. In the second stage of the work, the dimensioning of the storage system is carried out in the logic of absorbing all the energy produced and then its life time is calculated. The evaluation of the technical-economic optimization criteria is needed, in order to imprint the financial return of the investment. Finally, the effect of storage power change on depth of discharge, investment's viability and battery's life over a twenty-five year horizon is studied.</i></p>	

Ευχαριστίες

Αυτήν την τελευταία μου εργασία ως φοιτητής θα ήθελα να την αφιερώσω στους δύο πιο σημαντικούς ανθρώπους που έχω, την γιαγιά μου και την μητέρα μου. Η αγάπη, οι συμβουλές και η αδιάκοπη υποστήριξη αυτών και άλλων συγγενικών μου προσώπων κατά την διάρκεια των σπουδών μου ήταν συγκινητική, και χωρίς αυτούς, δε θα ήμουν στη θέση αυτή σήμερα. Ένα μεγάλο ευχαριστώ επίσης οφείλω στον άνθρωπο που μου βγάζει στην επιφάνεια τον καλύτερο μου εαυτό και που μου στάθηκε σαν πυλώνας στις πολύ δύσκολες στιγμές που είχα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης διπλωματικής, την Άννα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα δύο φιλαράκια και συνοδοιπόρους μου στην σχολή τον Κώστα και τον Χρήστο για όλες τις πολύ όμορφες αναμνήσεις που είχαμε παρέα στα κτήρια της Θηβών!

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους καθηγητές με τους οποίους συνεργάστηκα και ιδιαίτερα τον υπεύθυνο καθηγητή μου για την εκπόνηση της διπλωματικής, κύριο Κοσμά Καββαδία, για την υπομονή, τις πολύτιμες συμβουλές του και την άμεση ανταπόκριση που έδειχνε πάντα στο πρόσωπο μου όλο αυτό το χρονικό διάστημα, αλλά και τον κύριο Δημήτρη Ζαφειράκη για τις βοηθητικές παρεμβάσεις του σε σημαντικά ζητήματα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΙΚΡΕΣ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ.....	1
1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	15
1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Ανεμογεννήτριες	16
1.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα	20
1.4 Υβριδικά συστήματα	25
1.5 Δυναμική ΑΠΕ στην Ελλάδα	25
1.6 Αντικείμενο της διπλωματικής	27
1.7 Δομή διπλωματικής - επεξήγηση	27
2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	29
2.1 Εισαγωγή	29
2.2 Μηχανική αποθήκευση ενέργειας	30
2.2.1 Αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά (Pumped Hydro)	30
2.2.2 Αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (CAES)	35
2.2.3 Σφόνδυλοι	40
2.3 Ηλεκτρική αποθήκευσης ενέργειας	42
2.3.1 Υπεραγώγιμα πηνία (SMES)	42
2.3.2 Πυκνωτές και Υπερπυκνωτές	44
2.4 Ηλεκτροχημική αποθήκευση ενέργειας	46
2.4.1 Συσσωρευτές Μολύβδου-Οξέος	49
2.4.2 Συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου	51
2.4.3 Συσσωρευτές Νατρίου-Θείου	53
2.4.4 Συσσωρευτές Ιόντων Λιθίου	55
2.5 Συστήματα αποθήκευσης αξιοποιώντας θερμική ενέργεια	56
2.6 Σύγκριση και επιλογή βέλτιστου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας	57
2.6.1 Εύρος λειτουργίας	57
2.6.2 Αποτύπωμα ενεργειακής απόδοσης κατά τη διάρκεια ζωής των συστημάτων αποθήκευσης	59
2.6.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	60
2.6.4 Αρχικό κόστος επένδυσης & κόστος ανά κύκλο	61

2.6.5	Συμπεράσματα – επιλογή βέλτιστης λύσης για τα δεδομένα της διπλωματικής	62
3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	64
3.1	Υπολογισμός χρόνου ζωής συστήματος αποθήκευσης	64
3.1.1	Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών	67
3.1.2	Λόγοι καταπόνησης συσσωρευτών	67
3.1.3	Προσέγγιση μέσω της μέτρησης μικροκύκλων	69
3.1.4	Υπολογισμός χρόνου ζωής συσσωρευτών	71
3.1.5	Διάγραμμα ροής υπολογισμού χρόνου ζωής συσσωρευτών	72
3.2	Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση επένδυσης	73
3.2.1	Κόστος επένδυσης	73
3.2.2	Έσοδα επένδυσης	74
3.2.3	Κριτήρια αξιολόγησης επένδυσης	75
3.2.3.1	Χρόνος αποπληρωμής (PBP), διπλασιασμού αρχικής επένδυσης (DCP) και υπολογισμός συντελεστή οικονομικής απόδοσης (i_n)	75
3.2.3.2	Οικονομική αξιολόγηση μέσω υπολογισμού καθαρής παρούσας αξίας (NPV) και εσωτερικού συντελεστή αξιολόγησης (IRR)	77
3.2.4	Διάγραμμα ροής οικονομικής αξιολόγησης	79
4	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	80
4.1	Εισαγωγή	80
4.2	Δεδομένα παραγωγής-διαστασιολόγηση	80
4.3	Οικονομικά δεδομένα	83
4.4	Διάγραμμα ροής προσομοίωσης	85
4.5	Εκτέλεση προσομοίωσης & οικονομικά αποτελέσματα	86
4.5.1	Προσομοιώσεις με αλλαγή της αποθηκευτικής ισχύος	86
4.5.2	Ανάλυση ευαισθησίας αποθηκευτικής ισχύος, βάθους εκφόρτισης, χρόνου ζωής και οικονομικής απόδοσης	91
5	ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	96
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	98

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1. Ετήσια μεταβολή της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύς αιολικών μηχανών μέχρι και το 2020	17
Σχήμα 1.2. Διαγράμματα I-V, P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	22
Σχήμα 1.3. Συμπεριφορά της καμπύλης I-V ενός ΦΒ πλαισίου από την ηλιακή ακτινοβολία και το σημείο λειτουργίας.....	24
Σχήμα 1.4. Στόχοι Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με το ποσοστό της παραγωγής που θα πρέπει να είναι από ΑΠΕ	26
Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τη χρονική διάρκεια χρήσης και την ισχύ που μπορούν να εξυπηρετήσουν	30
Σχήμα 2.2: Υδροηλεκτρικός σταθμός	31
Σχήμα 2.3: Τυπική διάταξη SMES.....	43
Σχήμα 2.4: Συμπεριφορά κύκλων μπαταρίας ανάλογα με το βάθος εκφόρτισης ..	49
Σχήμα 2.5: Κατανομή συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας ανάλογα με το εύρος λειτουργίας τους	58
Σχήμα 2.6: Συμπεριφορά βαθμού απόδοσης ανάλογα με την τεχνολογία και τους κύκλους ζωής των συστημάτων αποθήκευσης βαθιάς εκφόρτισης (80%)	59
Σχήμα 2.7: Σύγκριση μεγέθους αποθηκευτικού συστήματος-αποθηκευτικής ισχύος	60
Σχήμα 2.8: Κόστος παραγόμενης ενέργειας σε σύγκριση με το κόστος εγκατεστημένης ισχύος	61
Σχήμα 2.9: Κόστος για κάθε κύκλο ζωής του συστήματος αποθήκευσης	62
Σχήμα 3.1: Συμπεριφορά κύκλων ζωής μπαταρίας μολύβδου οξέος ανοιχτού τύπου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία και το βάθος εκφόρτισης «DOD»	69
Σχήμα 3.2: Μια προσομοιωμένη καμπύλη του ρεύματος μιας μπαταρίας σε συνάρτηση με το χρόνο όπου είναι εμφανείς οι μικροκύκλοι με i τον αριθμός τους	70
Σχήμα 4.5: Προφίλ ζήτησης σε σύγκριση με παραγωγή από ΑΠΕ	82
Σχήμα 4.6: Κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών σε σύγκριση με την αιχμή κατανάλωσης	83
Σχήμα 4.7: Συμπεριφορά DOD, L σε σχέση με την αύξηση της αποθηκευτικής ισχύος για συστοιχία μπαταριών μολύβδου-οξέος.....	92
Σχήμα 4.8: Μεταβολή του βάθους εκφόρτισης και του IRR συναρτήσει της αλλαγής αποθηκευτικής ισχύος μπαταρίας μολύβδου-οξέος.....	93

Σχήμα 4.9: Αποτύπωση οικονομικής αποδοτικότητας της επένδυσης σε σχέση με την ανάγκη μείωσης του DOD για επίτευξη μεγαλύτερου χρόνου ζωής μπαταριών μολύβδου-οξέος 94

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συστημάτων παραγωγής ενέργειας βασιζόμενα σε ΑΠΕ..... 16

Πίνακας 1.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα..... 20

Πίνακας 1.3: Βέλτιστη κλίση φ/β πλαισίων ανά μήνα του έτους..... 23

Πίνακας 1.4: Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα φ/β συστημάτων 24

Πίνακας 2.1: Εγκατεστημένες ισχύς Υδροηλεκτρικών ανά χώρα 33

Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Αναστρέψιμων Υδροηλεκτρικών 34

Πίνακας 2.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο πασίγνωστων CAES ανά τον κόσμο 37

Πίνακας 2.4: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συστημάτων αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES) 39

Πίνακας 2.5: Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα σφονδύλων 42

Πίνακας 2.6: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα SMES 44

Πίνακας 2.6: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υπερπυκνωτών 46

Πίνακας 2.8: Βασικά χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων τύπων συσσωρευτών 47

Πίνακας 2.9: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα συσσωρευτών μολύβδου-οξέος 51

Πίνακας 2.10: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα συσσωρευτών Νικελίου-Καδμίου..... 53

Πίνακας 2.11: Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συσσωρευτών Νατρίου-Θείου 54

Πίνακας 2.12: Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συσσωρευτών Ιόντων-Λιθίου 56

Πίνακας 3.1: Σύγκριση των μοντέλων που βασίζονται στην συνολική επίδοση κατά την λειτουργία με αυτά που βασίζονται στην μέτρηση κύκλων στα πλαίσια του υπολογισμού χρόνου ζωής μπαταρίας 66

Πίνακας 4.1: Ετήσια δεδομένα καταναλωτή.....	80
Πίνακας 4.2: Ετήσια παραγωγή	80
Πίνακας 4.3: Ικανοποίηση ανάγκης απορρόφησης 100% της ενέργειας που παράγεται – βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταρίας χρήσης	81
Πίνακας 4.4: Ώρες μη ικανοποίησης του κριτηρίου του «peak».....	81
Πίνακας 4.5: Οικονομικές μεταβλητές περιβάλλοντος καταναλωτή.....	84
Πίνακας 4.6: Αρχικά κόστη (μεταβλητά και σταθερά) και έσοδα	84
Πίνακας 4.7: Προσδόκιμο ζωής, DOD και αριθμός κύκλων για αποθηκευτική ισχύ 60 kWh.....	86
Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα οικονομικής προσομοίωσης για αποθηκευτική ισχύ 60 kWh	86
Πίνακας 4.9: Προσδόκιμο ζωής, DOD και αριθμός κύκλων για αποθηκευτική ισχύ 70 kWh.....	87
Πίνακας 4.10: Νέα διαμορφωμένα κόστη που προκύπτουν από την αύξηση αποθηκευτικής ισχύος από 60 σε 70 kWh	87
Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα οικονομικής προσομοίωσης για αποθηκευτική ισχύ 70 kWh.....	88
Πίνακας 4.12: Προσδόκιμο ζωής, DOD και αριθμός κύκλων για αποθηκευτική ισχύ 80 kWh	88
Πίνακας 4.13: Νέα διαμορφωμένα κόστη που προκύπτουν από την αύξηση αποθηκευτικής ισχύος από 70 σε 80 kWh	88
Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα οικονομικής προσομοίωσης για αποθηκευτική ισχύ 80 kWh.....	89
Πίνακας 4.15: Προσδόκιμο ζωής, DOD και αριθμός κύκλων για αποθηκευτική ισχύ 90 kWh	89
Πίνακας 4.16: Νέα διαμορφωμένα κόστη που προκύπτουν από την αύξηση αποθηκευτικής ισχύος από 80 σε 90 kWh	89
Πίνακας 4.17: Αποτελέσματα οικονομικής προσομοίωσης για αποθηκευτική ισχύ 90 kWh.....	90
Πίνακας 4.18: Προσδόκιμο ζωής, DOD και αριθμός κύκλων για αποθηκευτική ισχύ 100 kWh	90
Πίνακας 4.19: Νέα διαμορφωμένα κόστη που προκύπτουν από την αύξηση αποθηκευτικής ισχύος από 90 σε 100 kWh	90
Πίνακας 4.20: Αποτελέσματα οικονομικής προσομοίωσης για αποθηκευτική ισχύ 100 kWh	91

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου τύπου	18
Εικόνα 1.2: Ανεμογεννήτρια κάθετου τύπου	19
Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση φωτοβολταϊκού φαινομένου	21
Εικόνα 1.3: Φ/β πλαίσια με αυτόματη ρύθμιση βέλτιστης γωνίας κλίσης	23
Εικόνα 1.4: Τυπικό υβριδικό σπίτι.....	25
Εικόνα 2.1: Αναστρέψιμο Υδροηλεκτρικό	32
Εικόνα 2.2: Διάταξη διαβατικών συστημάτων CAES	35
Εικόνα 2.3: Διάταξη αδιαβατικού συστήματος CAES	36
Εικόνα 2.4: Εγκατάσταση CAES στο Hundorf της Γερμανίας	37
Εικόνα 2.5: Αξιοποίηση περίσσειας αιολικής ενέργειας για παραγωγή συμπιεσμένου αέρα σαν σύστημα αποθήκευσης	38
Εικόνα 2.6: Τυπικός σφόνδυλος και μηχανικές σχέσεις που ισχύουν	40
Εικόνα 2.7: Μπαταρίες μολύβδου-οξέος ανοιχτού τύπου βαθιάς εκφόρτισης για χρήση σε σύστημα ΑΠΕ.....	50
Εικόνα 2.8: Συσσωρευτής Νικελίου-Καδμίου σφραγισμένου τύπου.....	52
Εικόνα 2.9: Μπαταρία Νικελίου-Καδμίου με εκτονωτική βαλβίδα	52
Εικόνα 2.10: Μπαταρίες Νατρίου-Θείου.....	54
Εικόνα 2.11: Μπαταρία Ιόντων-Λιθίου.....	55

ΕΡΜΗΝΙΑ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

DOD: Depth Of Discharge

SOC: State Of Charge

SOH: State Of Health

CAES: Compressed Air Energy Storage

SMES: Superconducting Magnetizing Energy Storage Systems

NPV: Net Present Value

IRR: Internal Rate of Return

PBP: Pay Back Period

DCP: Double Capital Period

MPP: Maximum Power Unit

A/Γ: Ανεμογεννήτρια

Φ/B: Φωτοβολταϊκό

ANN: Artificial Neural Networks

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
c_0	τιμή διάθεσης της ενεργειακής παραγωγής τη στιγμή έναρξης λειτουργίας της επένδυσης	€/kWh
e	ετήσιος ρυθμός αναπροσαρμογής της τιμής της ενέργειας	%
i	απόδοση ίδιων κεφαλαίων	%
i'	κόστος του χρήματος	%
g_π	πληθωρισμός αγοράς	%
g_Σ	πληθωρισμός συντήρησης	%
β	συντελεστής δανειακών κεφαλαίων της επιχείρησης	%
γ	συντελεστής επιδότησης αρχικού κεφαλαίου της επένδυσης	%
m	συντελεστής ετήσιου κόστους συντήρησης αιολικών μηχανών	%
E	παραγόμενη ενέργεια	kWh
IC_0	αρχικό κόστος	€
FC_0	αρχικό κόστος συντήρησης	€
R_0	ετήσια έσοδα από τη διάθεση της ενεργειακής παραγωγής κατά το έτος ίδρυσης του ενεργειακού σταθμού	€
IC_n	διαχρονικό κόστος επένδυσης μετά από n-έτη λειτουργίας	€

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΙΚΡΕΣ
ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ

FC_n	διαχρονικό "σταθερό κόστος" συντήρησης και λειτουργίας μετά από n- έτη λειτουργίας	€
C_n	συνολικό διαχρονικό κόστος	€
R_n	διαχρονικά έσοδα της επένδυσης μετά από n- έτη λειτουργίας	€
G_n	διαχρονικά κέρδη μετά φόρων επιχείρησης μετά από n χρόνια	€
\bar{G}_n	αποπληρωρησμένα κέρδη επιχείρησης μετά από n χρόνια	€
PBP	εκτιμώμενος χρόνος αποπληρωμής της εγκατάστασης	χρόνια
DCP	εκτιμώμενος χρόνος διπλασιασμού κεφαλαίου της εγκατάστασης	χρόνια
NPV	καθαρά παρούσα αξία εγκατάστασης	€
IRR	εσωτερικός συντελεστής απόδοσης εγκατάστασης	%
η	εσωτερικός βαθμός απόδοσης εγκατάστασης	%
Υ	υπολείπουσα αξία εγκατάστασης	€
α	ίδια κεφάλαια	%
D	διάμετρος πτερωτής	m
ρ_α	πυκνότητα αέρα	kg/m ³
V	ταχύτητα ανέμου	m/s
C_p	αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης	%
η_{ηλ/μηχ}	ηλεκτρομηχανολογικός βαθμός απόδοσης ανεμογεννήτριας	%
I_{sc}	ρεύμα βραχυκύκλωσης φ/β	
V_{oc}	τάση βραχυκύκλωσης φ/β	
P	παραγόμενη ισχύς υδροστρόβιλου	kWh
ρ	πυκνότητα νερού	kg/m ³
QV	παροχή νερού	kg/m ³
g	επιτάχυνση βαρύτητας	m/s ²
H	υψομετρική διαφορά μεταξύ της άνω δεξαμενής και του στροβίλου	m
UE	ενέργεια αποθήκευσης πηνίου	J

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΙΚΡΕΣ
ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ

L	συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου	H
I	ρεύμα πηνίου	A
C_c	χωρητικότητα πυκνωτή	F
V_c	τάση πυκνωτή	V
Q_c	φορτίο πυκνωτή	C
A	εμβαδό κάθε οπλισμού πυκνωτή	m ³
d	απόσταση μεταξύ των οπλισμών	m
E_c	ενέργεια πυκνωτή	J
I_{discharge}	ρεύμα εκφόρτισης	A
C_i	αρχική χωρητικότητα μπαταρίας	Ah
DOD	μέσο ενεργό βάθος εκφόρτισης	%
DOD_i	μέσο βάθος εκφόρτισης του i μικροκύκλου	%
E_{thri}	ενεργειακή απόδοση i μικροκύκλου	kW
L	χρόνος ζωής συσσωρευτή μολύβδου οξέος	χρόνια
n	κύκλοι συσσωρευτή	ακέραιος αριθμός
E_{nom}	ονομαστική ισχύς συστήματος αποθήκευσης συσσωρευτών μολύβδου-οξέος	kWh
ΔE	διαφορά ενέργειας παραγωγής και ζήτησης	kW
N₀	εγκατεστημένη ισχύς αιολικών μηχανών	kW
ε₀	η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού	$N^{-1} \cdot m^{-2}$

1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Η απαίτηση για ηλεκτρική ενέργεια είναι μια από τις βασικές ανάγκες που έχει το ανθρώπινο είδος για την αρμονική διαβίωσή του. Στις μέρες μας το συντριπτικό ποσοστό σε ανάγκες για παραγωγή καλύπτεται από την καύση διάφορων ορυκτών, κυρίως υδρογονανθράκων. Η μαζική χρήση τέτοιων ουσιών για παραγωγή ενέργειας που καλύπτει ανάγκες για περίπου επτά δισεκατομμύρια ανθρώπους όλα αυτά τα χρόνια έχει προκαλέσει ανεπανόρθωτες ζημιές στον πλανήτη και έχει προβληματίσει στο μέγιστο βαθμό τους ηγέτες των κρατών αλλά και την επιστημονική κοινότητα που αγωνιά για τις τύχες του οικοσυστήματος του. Κάποιες από τις επιπτώσεις της μόλυνσης που έχει προκληθεί είναι η αύξηση της στάθμης του νερού, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ξηρασίες και απότομες ραγδαίες καταιγίδες. Ενδεικτικό σημάδι του προβληματισμού που επικρατεί στις τάξεις των ηγετών των κρατών τα τελευταία χρόνια είναι η υλοποίηση της συμφωνίας του Παρισιού το 2014 [2], η οποία προέβλεπε μείωση έως 45% των αερίων του θερμοκηπίου έως το 2030. Σε μεταγενέστερο χρόνο η δέσμευση αυτή μετατράπηκε σε ποσοστό 55%. Το σίγουρο πάντως είναι ότι θα πρέπει να εφαρμοστούν τα επόμενα χρόνια μαζικά νέες τεχνολογίες παραγωγής φιλικές προς το περιβάλλον.

Τέτοιες τεχνολογίες που βασίζονται σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) υπάρχουν ήδη στην αγορά και ο σχεδιασμός τους έχει ξεκινήσει πριν πολλές δεκαετίες. Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ορίζονται οι μορφές ενέργειας που προέρχονται από φυσικές δραστηριότητες (αέρας, ηλιοφάνεια κ.λπ.). Ενδεικτικά παραδείγματα τέτοιων τεχνολογιών είναι οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά πάρκα, οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, οι εγκαταστάσεις αξιοποίησης λυμάτων, η γεωθερμία κ.λπ.

Η Ελλάδα λόγω της γεωγραφίας και του κλίματός της γενικότερα έχει τεράστιες προοπτικές για αξιοποίηση τέτοιων τεχνολογιών. Ενδεικτικά, το αιολικό δυναμικό στο αιγαίο πέλαγος είναι εξαιρετικά υψηλό, γεγονός που ευνοεί πολύ την αξιοποίησή του με αιολικές μηχανές αλλά και, ας μην λησμονηθεί, το τεράστιο ποσοστό ηλιοφάνειας ανά έτος που διαθέτει. Ήδη έχει υπάρξει τεράστιο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια από εταιρίες κολοσσούς που ετοιμάζουν το έδαφος για να προχωρήσουν σε ανάλογες επενδύσεις.

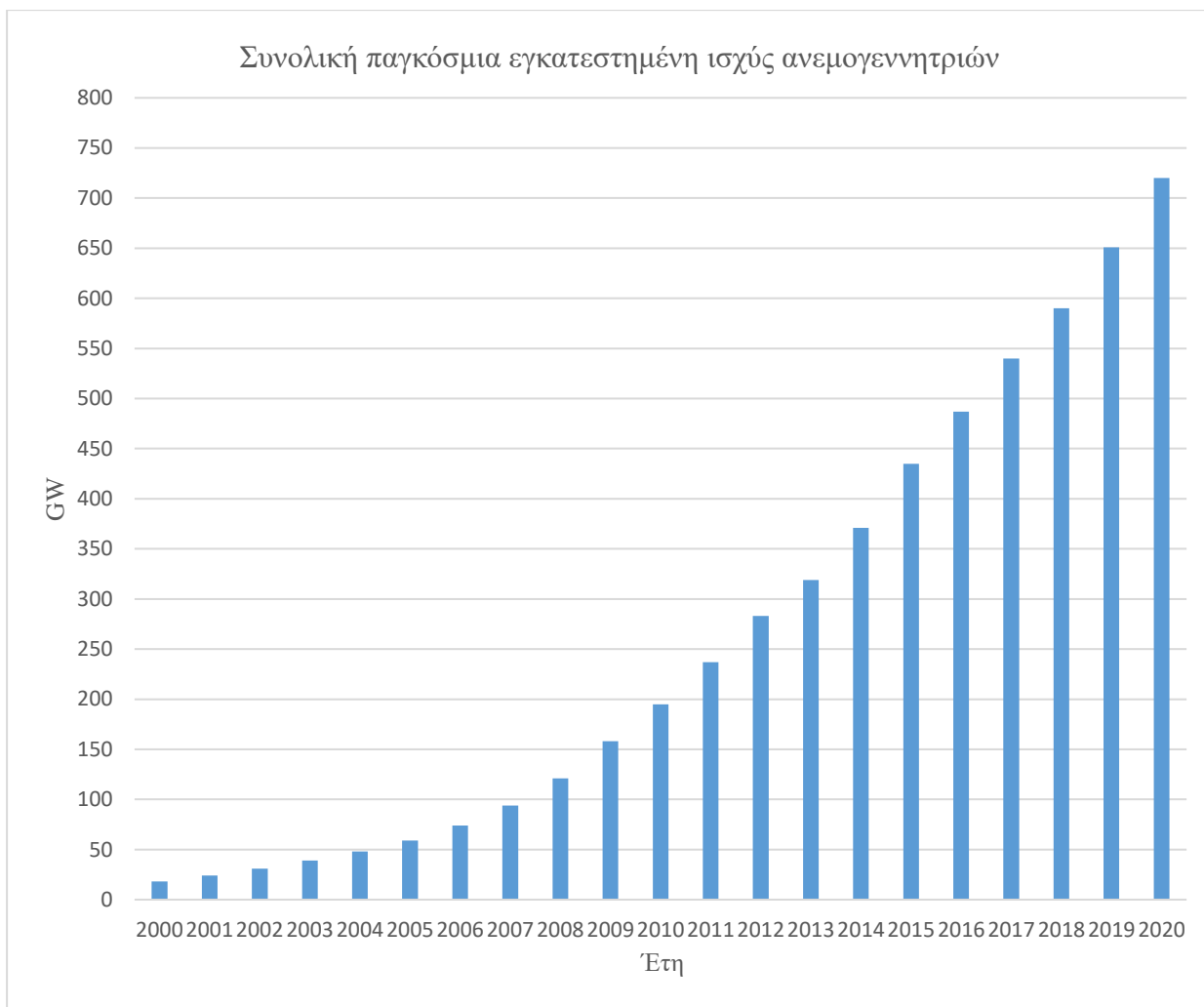
Πίνακας 1.1: Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συστημάτων παραγωγής ενέργειας βασιζόμενα σε ΑΠΕ

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Φιλικές προς το περιβάλλον	Μικρός συντελεστής απόδοσης
Δυνατότητα μερικής διαστασιολόγησης ανάλογα με τις τοπικές ανάγκες	Οι ανεμογεννήτριες προκαλούν θάνατο πουλιών
Μεγάλη διάρκεια ζωής επένδυσης	Άμεση εξάρτιση φορτίου παραγωγής από τα καιρικά φαινόμενα και ανάγκη υπερδιαστασιολόγησης
Βελτίωση κλίματος σε τοπικό επίπεδο	Ακριβά κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας
Ενεργειακή αυτονομία-απεξάρτηση από ορυκτά καύσιμα	
Δεν εξαντλούνται	

1.2 Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες ή αιολικές μηχανές είναι τα συστήματα που εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια που προσφέρει το αιολικό δυναμικό της εκάστοτε περιοχής με απώτερο σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πρωτοεμφανίστηκαν την 2^η χιλιετία π.Χ. με τη μορφή ανεμόμυλων από τους αρχαίους Έλληνες. Η μελέτη της εφαρμογής τους για παραγωγή ενέργειας άρχισε να εξετάζεται πολύ σοβαρά κατά την δεκαετία του 1970 λόγω της ενεργειακής κρίσης της εποχής.

Έτσι λοιπόν μέχρι τις αρχές του 2000 παγκοσμίως η συνολική ισχύς έφτασε τα 18.000 MW.



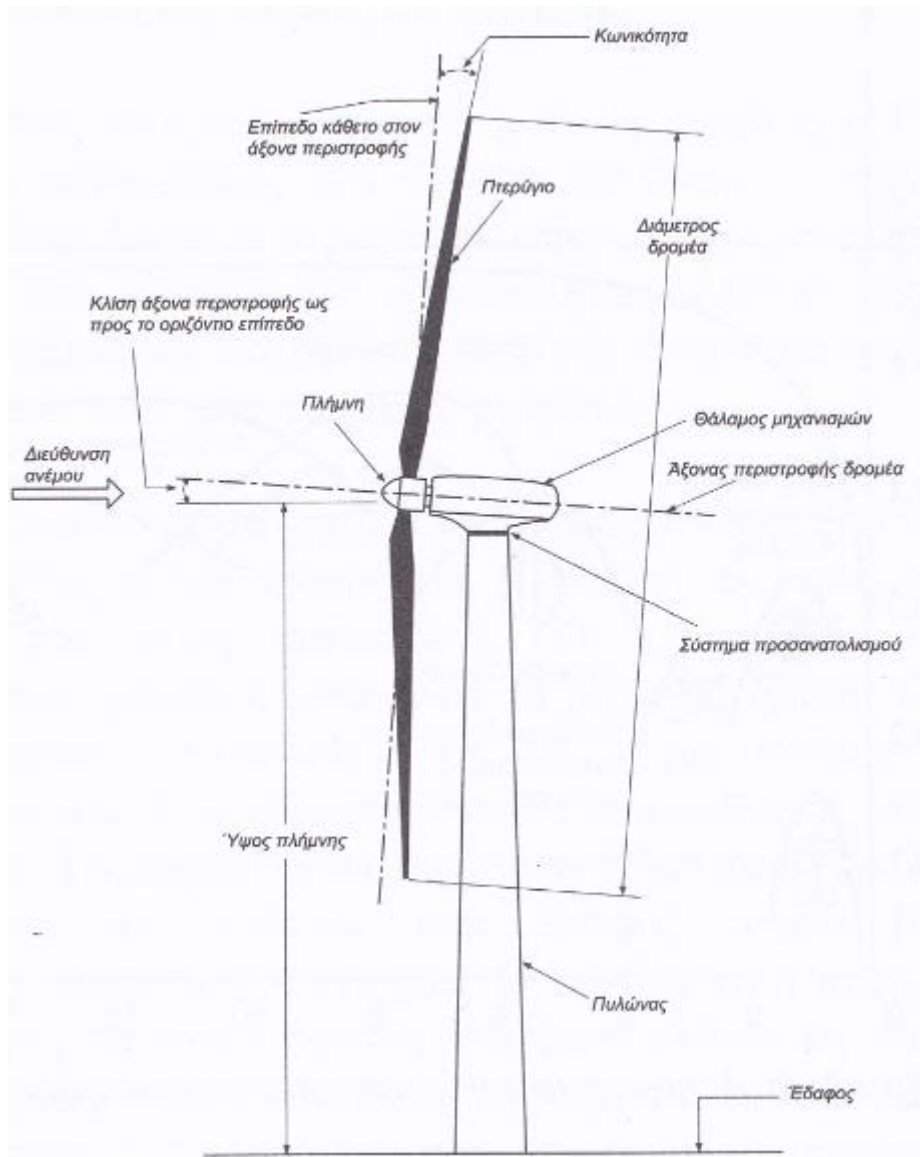
Σχήμα 1.1: Ετήσια μεταβολή της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύς αιολικών μηχανών μέχρι και το 2020 [3]

Στο σχήμα 1.1 αποτυπώνεται η αλλαγή κουλτούρας της παγκόσμιας κοινότητας σχετικά με την κλιματική αλλαγή με αποτέλεσμα την εκθετική αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ανεμογεννήτριες. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το 2020 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς έφτασε τα 760 GW αυξημένη κατά 742 GW μέσα σε περίοδο 20 χρόνων .

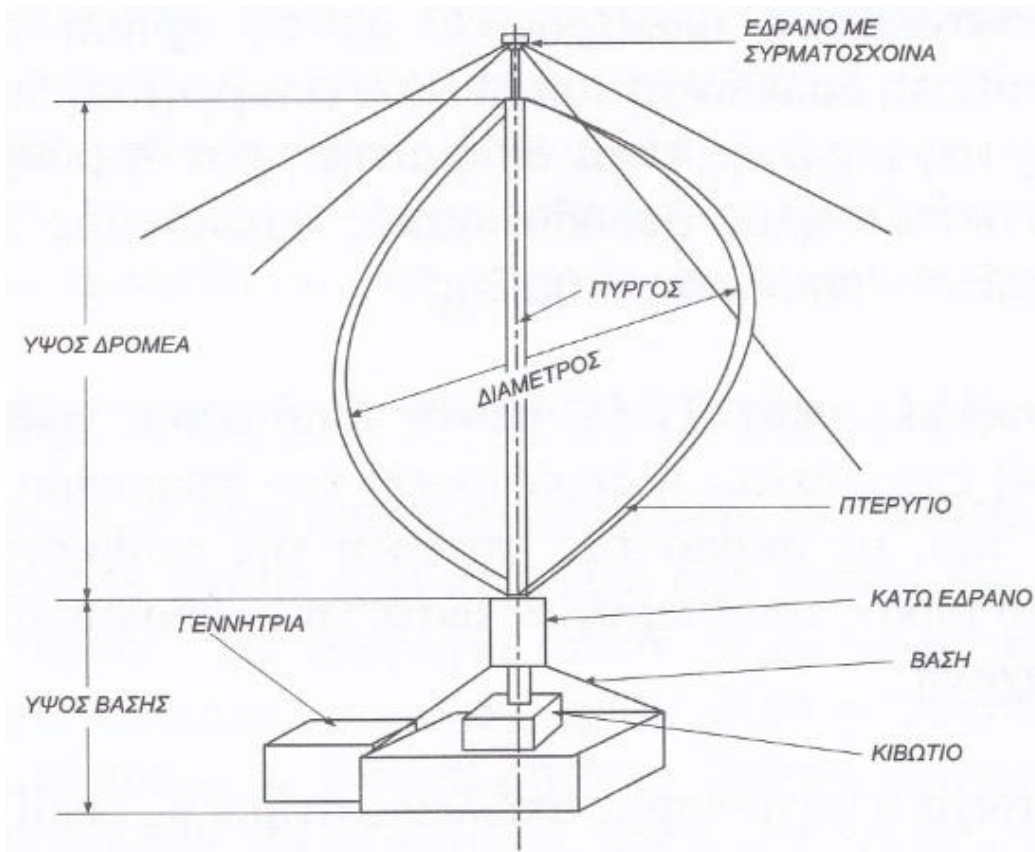
Όσον αφορά τον τύπο ανεμογεννητριών, υπάρχουν οι οριζόντιου και οι κάθετου. Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν τον άξονά τους παράλληλο με το έδαφος και συνήθως με την διεύθυνση του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου έχουν τη δυνατότητα να φέρουν την πτερωτή είτε μπροστά από τον πύργο στήριξης (κατά τη φορά του ανέμου), είτε πίσω από αυτόν. Κατά την κίνηση της πτερωτής μεταφέρεται η κινητική ενέργεια μέσω του άξονα αυτού και περνάει από ένα κιβώτιο ταχυτήτων όπου η μεγάλη ροπή εξόδου μετατρέπεται σε πάρα πολύ μεγάλο αριθμό στροφών που εν τέλει περιστρέφει την γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος. Κατά ευρεία πλειοψηφία οι αιολικές μηχανές σήμερα χρησιμοποιούν διάταξη με τρία πτερώγια. Αυτά έχουν πολύ μεγάλο

αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης ο οποίος είναι και από τους βασικούς λόγους για τους οποίους έχουν επικρατήσει οι οριζοντίου τύπου στην βιομηχανία σε σχέση με τους κάθετους.

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται σε τυχόν αλλαγές της φοράς του ανέμου γεγονός που αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα. Κατά την περιστροφή τους αυτή μεταδίδουν την κίνηση σε μια γεννήτρια που βρίσκεται στο έδαφος και παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά δεν είναι τόσο ελκυστικά για μαζική παραγωγή ενέργειας διότι έχουν αεροδυναμικό συντελεστή πολύ μικρότερο σε σχέση με του οριζοντίου άξονα. Αυτό μεταφράζεται σε διαφορά βαθμού απόδοσης περίπου 20-30% και γι' αυτό επιλέγονται τα δεύτερα στη βιομηχανία.



Εικόνα 1.1: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου τύπου [4]



Εικόνα 1.2: Ανεμογεννήτρια κάθετου τύπου [4]

Η ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα λοιπόν αποτελείται από την πτερωτή, τον άξονα που συνδέει την πτερωτή με το κιβώτιο μετάδοσης κίνησης και από τον πύργο στήριξης.

Η ισχύς του ανέμου που παράγεται κατά την κίνηση περιγράφεται από τον ακόλουθο τύπο [4] :

$$N_{\text{ΑΝΕΜΟΥ}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot V^3 \quad (2.1)$$

όπου,

D: διάμετρος πτερωτής

ρ_a : πυκνότητα ανέμου

V: ταχύτητα ανέμου

Η τελική ισχύς που παράγει η αιολική μηχανή είναι το γινόμενο της ισχύος του ανέμου πολλαπλασιασμένη με τον ηλεκτρομηχανολογικό βαθμό απόδοσης του κιβωτίου μετάδοσης (η) και του αεροδυναμικού βαθμού απόδοσης της πτερωτής (C_p). Περιγράφεται από τη σχέση 2.2 [4].

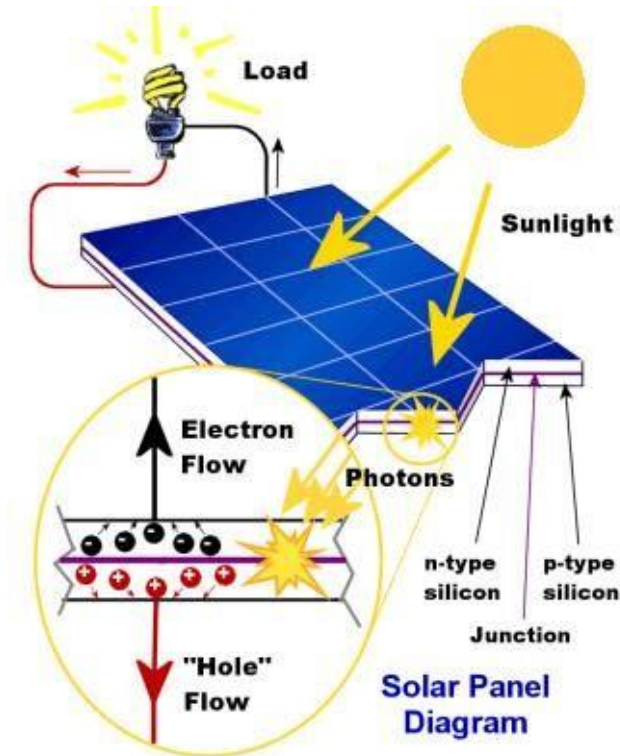
$$N_{\text{ex}} = C_p \cdot \eta_{\text{ηλ/μηχ}} \cdot N_{\text{ΑΝΕΜΟΥ}} \quad (2.2)$$

Πίνακας 1.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Εκκίνηση από χαμηλές ταχύτητες	Μείωση βαθμού απόδοσης λόγω απωλειών κατά τη μεταφορά
Φιλικές προς το περιβάλλον	Μέτριοι βαθμοί απόδοσης της τάξης του 20-35%
Πολύ καλό αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα	Παράγουν θόρυβο
Παροχή ικανοποιητικής ενέργειας για μικρές ταχύτητες ανέμων	Υψηλό κόστος αγοράς και συντήρησης
Χρήση συστήματος pitch για καλύτερο προσανατολισμό στην κατεύθυνση του ανέμου	Έχει κατηγορηθεί ότι προκαλεί τον θάνατο πτηνών

1.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Η φωτοβολταϊκά συστήματα σήμερα αποτελούν μια από τις πιο διαδεδομένες μορφές αξιοποίησης ενέργειας. Γενικότερα, είναι υπεύθυνα για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας μέσω ακτινοβολίας σε ηλεκτρική. Αυτό συμβαίνει γιατί η ηλιακή ακτινοβολία καθώς έρχεται σε επαφή με τις διόδους των ημιαγωγών πυριτίου που αποτελούν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, διαμορφώνεται μια διαφορά δυναμικού. Η διαδικασία αυτή μετατροπής ενέργειας ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



Εικόνα 1.2: Σχηματική απεικόνιση φωτοβολταϊκού φαινομένου [5]

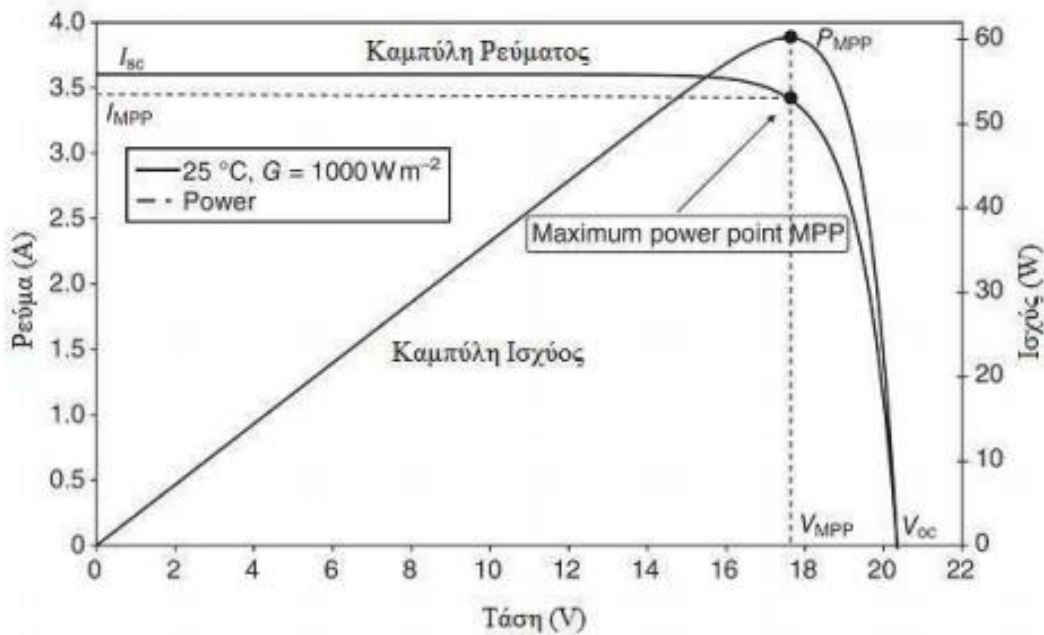
Αναλυτικότερα, η διαδικασία λειτουργίας των φ/β μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Σε πρώτο στάδιο το στοιχείο πυριτίου απορροφά την ακτινοβολία. Λόγω της εν λόγω επαφής αρχίζουν τα ηλεκτρόνια να κινούνται. Το αποτέλεσμα της κίνησης αυτής είναι η δημιουργία συνεχούς ρεύματος. Το ρεύμα συλλέγεται από τα καλώδια και στην συνέχεια πηγαίνει σε έναν μετατροπέα εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ως φωτοβολταϊκή μονάδα μπορούμε να ονομάσουμε ένα σύνολο ηλιακών κυψελών που είναι συνδεδεμένες ηλεκτρικά μεταξύ τους και συναρμολογούνται σε μια βάση στήριξης. Κάθε μονάδα παράγει συγκεκριμένα μεγέθη τάσης και ρεύματος. Αναλόγως με την ποσότητα του φωτός που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό παράγεται το αντίστοιχο ρεύμα. Πολλά στοιχεία μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους και να δημιουργήσουν μια συστοιχία όπου όσο μεγαλύτερη η επιφάνειά της τόσο πιο πολύ ηλεκτρικό ρεύμα θα παράξει. Τα πλαίσια μπορούν να είναι συνδεδεμένα είτε σε σειρά είτε παράλληλα και μπορούν να παράγουν οποιονδήποτε συνδυασμό τάσης-ρεύματος.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα κρυσταλλικού πυριτίου και τα λεπτού υμενίου. Τα πρώτα αποτελούνται από τα μονοκρυσταλλικά και τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία. Στην δεύτερη κατηγορία γνωστά είναι τα στοιχεία δισηληνοδιούχου χαλκού (CIGS). Τα μονοκρυσταλλικά είναι αυτά που έχουν τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης (12-20%) και παρουσιάζουν τις μικρότερες φθορές στην πάροδο του χρόνου, αυτός αποτελεί άλλωστε και τον λόγο της κυριαρχίας τους.

Μια σημαντική ιδιομορφία στα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι ότι παρουσιάζουν μεγάλες και ακανόνιστες μεταβολές στην τάση και το ρεύμα τους ακόμη και σε περίπτωση που η ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Η συμπεριφορά της τάσης (V) σε σύγκριση με την ένταση του ρεύματος (I) και την ισχύς (N) παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.2: Διαγράμματα I-V, P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου [6]

Στην περίπτωση βραχυκύκλωσης του συστήματος ($V=0$) προκύπτει το μεγαλύτερο ρεύμα I_{sc} ενώ στην αντίστοιχη περίπτωση ανοιχτοκύκλωσης ($I=0$) προκύπτει η μέγιστη τάση V_{oc} . Και στις δύο αυτές καταστάσεις η ισχύς του συστήματος μηδενίζεται. Το MPP (Maximum Power Unit) είναι το σημείο στο οποίο υπάρχει η μεγαλύτερη απόδοση και άρα το ιδανικό σημείο λειτουργίας του φ/β πλαισίου.

Κρίσιμος παράγοντας για τη βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης των συστημάτων αυτών είναι η γωνία κλίσης τα οποία είναι τοποθετημένα. Αυτό γίνεται κατανοητό λόγω της διακύμανσης της ακτινοβολίας που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης, λόγω του ότι η γη περιστρέφεται συνεχώς δεν είναι δυνατή η διατήρηση ούτε της ίδιας κλίσης αλλά ούτε και της ίδιας παραγωγικής ισχύος κατά τη διάρκεια ενός έτους. Αναλυτικότερα, το καλοκαίρι η ιδανική γωνία τοποθέτησης κυμαίνεται μεταξύ 10-15% ενώ το χειμώνα 50-55% [4]. Αυτή έχει άμεση σύνδεση με το μέγιστο ύψους ηλίου στο οποίο υπάρχει η καλύτερη δυνατή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του έτους. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σήμερα στα μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα χρησιμοποιούνται τεχνικές αναπροσαρμογής της γωνίας κλίσης (pitch) των πλαισίων ώστε να προσαρμόζονται στις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας κάθε στιγμή. Οι ενδεδειγμένες γωνίες τοποθέτησης αποτυπώνονται στον Πίνακα 1.3.

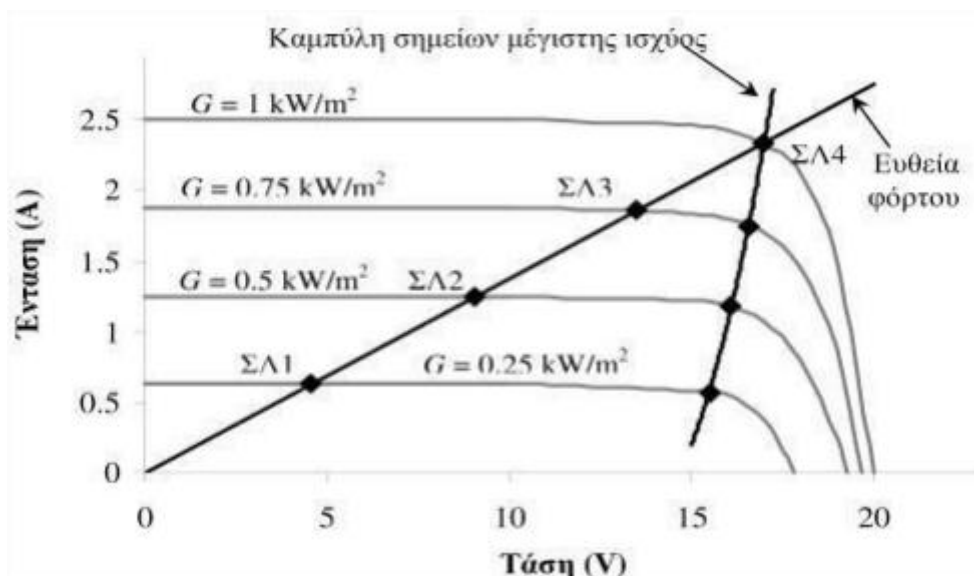


Εικόνα 1.3: Φ/β πλαίσια με αυτόματη ρύθμιση βέλτιστης γωνίας κλίσης [7]

Πίνακας 1.3: Βέλτιστη κλίση φ/β πλαισίων ανά μήνα του έτους [4]

Μήνας	Γωνία τοποθέτησης (°)	Μήνας	Γωνία τοποθέτησης (°)
Ιανουάριος	29	Ιούλιος	-24
Φεβρουάριος	18	Αύγουστος	-10
Μάρτιος	3	Σεπτέμβριος	-2
Απρίλιος	-10	Οκτώβριος	10
Μάιος	-22	Νοέμβριος	23
Ιούνιος	-25	Δεκέμβριος	30

Επιπλέον, η ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο πάνελ είναι απόλυτα λογικό να μεταβάλλει και την χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος. Όταν αυτή αλλάζει μεταβάλλεται και το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού. Η μεταβολή αυτή παρατηρείται στο σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.3: Συμπεριφορά της καμπύλης I-V ενός Φ/Β πλαισίου από την ηλιακή ακτινοβολία και το σημείο λειτουργίας [6]

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσής πολλών φ/β πλαισίων παραλλήλως ώστε να καλύπτει μεγάλα φορτία ισχύος.

Πίνακας 1.4: Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Φωτοβολταϊκών συστημάτων

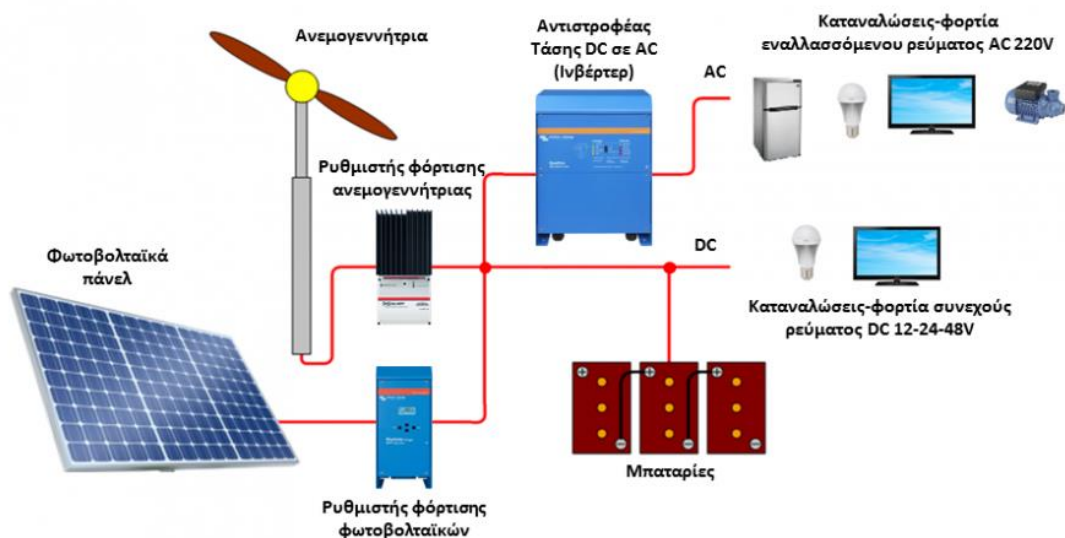
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Απουσία κινούμενων μερών	Πολύ χαμηλός βαθμός απόδοσης
Ενεργειακή αυτονομία	Είναι πιθανό να υποστούν εύκολα ζημιές (χαλαζόπτωση)
Μικρές σε μέγεθος κατασκευές, σχετικά εύκολη τοποθέτηση χωροταξικά	Υψηλό κόστος κατασκευής
Μεγάλη διάρκεια ωφέλιμης ζωής (> 30 ετών)	Ακριβότερη ενέργεια για τον καταναλωτή σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα
Χαμηλή αναλογία βάρους ανά αποδιδόμενη ισχύ	
Φιλικά προς το περιβάλλον	
Μικρές απαιτήσεις σε κόστος συντήρησης	

1.4 Υβριδικά συστήματα

Ο συνδυασμός τουλάχιστον δύο μονάδων που βασίζονται σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ΑΠΕ ή ακόμη και μονάδας συμβατικών καυσίμων με την ταυτόχρονη συνύπαρξη ενός συστήματος για αποθήκευση της παραγόμενης περίσσειας ενέργειας ονομάζεται υβριδικό σύστημα. Ο συνδυασμός της κατάλληλης επιλογής συστημάτων γίνεται ξεχωριστά κάθε φορά ανάλογα με τις ανάγκες αλλά και το κλίμα της εκάστοτε περιοχής εφαρμογής και γίνεται και εξονυχιστική σύγκριση των εκάστοτε οικονομικών στοιχείων.

Πιο αναλυτικά, στις μέρες μας τυπικά συστήματα που έχουν γνωρίσει ευρεία χρήση αποτελούνται από συνδυασμούς ανεμογεννητριών-φωτοβολταϊκών-συστοιχιών συσσωρευτών, φωτοβολταϊκών-γεννήτριας diesel (ή φυσικού αερίου)-συσσωρευτών ή ανεμογεννητριών-γεννητριών diesel (ή φυσικού αερίου)-συσσωρευτών. Επίσης, πολύ αποδοτικός συνδυασμός θα μπορούσε να ήταν η συνεργασία ανεμογεννητριών με αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά σαν σύστημα αποθήκευσης για τεράστια φορτία.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάζεται η βιωσιμότητα μιας πράσινης αυτόνομης κατοικίας με φωτοβολταϊκά πλαίσια και μια μικρή αιολική μηχανή. Σαν σύστημα αποθήκευσης για τέτοιες μονάδες ενδείκνυνται οι συσσωρευτές οι οποίοι διαστασιοποιούνται με βάση το «peak» του φορτίου ζήτησης μαζί με την ταυτόχρονη απορρόφηση όλου του ενεργειακού φορτίου που παράγεται.

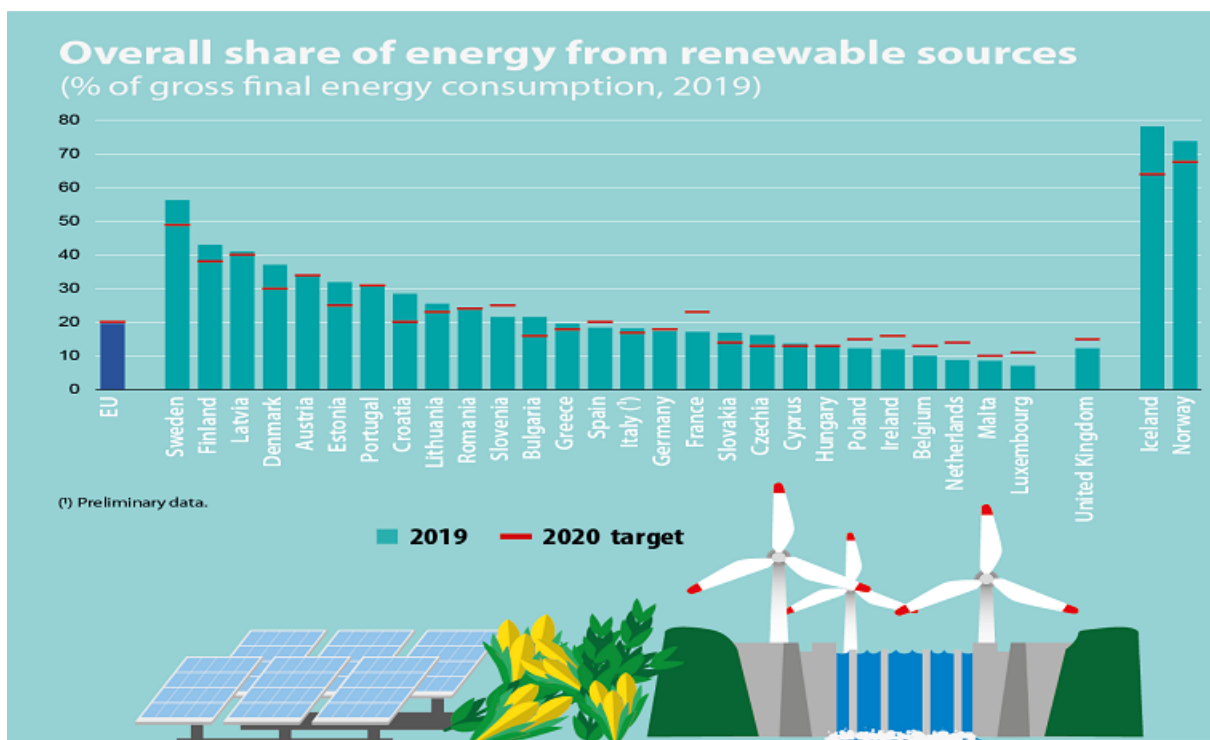


Εικόνα 1.4: Τυπικό υβριδικό σπίτι [8]

1.5 Δυναμική ΑΠΕ στην Ελλάδα

Ένα φιλόδοξο σχέδιο δράσης προκειμένου οι ΑΠΕ να αποκτήσουν ένα σημαντικό μερίδιο της κατανάλωσης μέχρι το 2020 παρουσιάστηκε το καλοκαίρι του 2010 από την Ελληνική Κυβέρνηση. Προέβλεπε μεταξύ άλλων στην καθιέρωση ενός εθνικού στόχου

παραγωγής ΑΠΕ ίσης περίπου με το 19% της συνολικής παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια αυτής της δεκαετίας υπήρξε μεγάλη περιβαλλοντική εγρήγορση, κυρίως από τα Ευρωπαϊκά κράτη, προκειμένου να υπάρξει γρηγορότερη και αποτελεσματικότερη αφομοίωση πράσινης ενέργειας σε όλα τα μέτωπα για το καλό του πλανήτη.



Σχήμα 1.4: Στόχοι Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με το ποσοστό της παραγωγής που θα πρέπει να είναι από ΑΠΕ [9]

Το ποσοστό της κατανάλωσης ενέργειας από ΑΠΕ αυξήθηκε από 7,2% το 2004 στο 19,7% το 2019, όσο ήταν και το ποσοστό της ΕΕ. Το 2018, το αντίστοιχο ποσοστό για την Ελλάδα ήταν 18,1% και για την ΕΕ 18,9% [9]. Η χώρα ξεπέρασε τους στόχους που έθεσε η Ε.Ε (για το 2020) το 2019 και σήμερα έφτασε να έχει συνολική παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από ΑΠΕ περίπου στο 1/4 με 1/3 της συνολικής παραγωγής ρεύματος. Είναι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι στις 14/09/2020 οι ΑΠΕ έφτασαν να καλύπτουν το 51% της συνολικής ζήτησης (68,7 GWh/135,8 GWh) εκ των οποίων το 40% προερχόταν από αιολική ενέργεια και μόλις το 11% από ηλιακή [10].

Συμπερασματικά, η Ελλάδα διαθέτει τεράστιο φυσικό πλούτο προς εκμετάλλευση. Αυτός δεν είναι άλλος από το αιολικό δυναμικό της και την ηλιοφάνεια. Αυτοί οι δύο παράγοντες, και σε συνδυασμό πάντα με τις ευλογίες και την θερμή καθοδήγηση της Ε.Ε, συμβάλλουν με γεωμετρική πρόοδο στην τελική επικράτηση των τεχνολογιών αυτών στο μέλλον και την καθιέρωση της πράσινης ενεργειακής τεχνολογίας.

1.6 Αντικείμενο της διπλωματικής

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια τάση ιδιαίτερα στην Ευρώπη αλλά και παγκοσμίως ως προς την επικράτηση απόψεων εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ενέργειας που είναι φιλικό προς το περιβάλλον. Έτσι τα τελευταία χρόνια μπήκαν στη ζωή μας σαν ιδέα και τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας μικρής κλίμακας που βασίζονται σε παραγωγή από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Τα συστήματα αυτά μπορεί να απευθύνονται για κάποιο εξοχικό σπίτι, κάποια πολυκατοικία ή ακόμη και για ένα συγκρότημα κατοικιών. Χαρακτηρίζονται ως μικρής κλίμακας διότι αναφέρονται σε σχετικά μικρά φορτία μερικών kW. Τα συστήματα αυτά πέρα από το θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο που έχουν, φέρουν στη συζήτηση και την έννοια της ενεργειακής αυτονομίας στο τραπέζι ειδικά σε απομακρυσμένες περιοχές της χώρας μας, όπως π.χ. νησιά αλλά και μη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται το οικονομικό αντίκτυπο μιας τέτοιας επένδυσης σε βάθος εικοσιπενταετίας όπου ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες του συστήματος και της ανάγκης αποθήκευσης όλης της ενέργειας που παράγεται, ορίζεται μία τυπική παραγωγή από αιολική και φωτοβολταϊκή χρήση ταυτόχρονα με τη συνύπαρξη ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Για το σύστημα αυτό δε, χρησιμοποιείται αλγόριθμος που υπολογίζει τον εκτιμώμενο χρόνο ζωής και του μέσου ενεργού βάθους εκφόρτισης της μπαταρίας.

Έτσι λοιπόν, αφού γίνει η επιλογή τύπου αποθηκευτικού συστήματος και ορισθεί πλήρως η αποθηκευτική ισχύς, εκτελείται η προσομοίωση αυτού σε σχέση με τα στοιχεία παραγωγής και ζήτησης του καταναλωτή, όπου και αποτυπώνεται η συμπεριφορά του χρόνου ζωής της μπαταρίας σε συνάρτηση με την καταπόνησή της, δηλαδή το βάθος εκφόρτισης που υπόκειται. Σε επόμενο στάδιο αξιολογείται η επένδυση συνολικά με την εφαρμογή κριτηρίων τεχνικοοικονομικής αξιολόγησης. Τέλος, εξετάζεται η συμπεριφορά της ενδεχόμενης αύξησης της συνολικής χωρητικότητας του συστήματος αποθήκευσης σε σχέση με την βιωσιμότητα της επένδυσης και με τη συμπεριφορά του βάθους εκφόρτισης και του χρόνου ζωής του.

1.7 Δομή διπλωματικής - επεξήγηση

Στο κεφάλαιο 1 αναλύονται εν συντομία τα στοιχεία που αποτελούν την ατμομηχανή των υβριδικών συστημάτων. Αυτά δεν είναι άλλα από τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά, για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια γενική αναφορά και επεξήγηση διαφόρων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Υπάρχει ένα κομμάτι που αφορά μηχανικά μέσα και ένα άλλο που έχει να κάνει με ηλεκτρικά και ηλεκτροχημικά συστήματα. Εν τέλη κατά την ολοκλήρωση του κεφαλαίου αυτού γίνονται αντιληπτές οι διάφορες μέθοδοι αποθήκευσης και επιλέγεται ο πλέον αποτελεσματικός για την περίπτωση ΑΠΕ της διπλωματικής εργασίας.

Το κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει το υπολογιστικό κομμάτι της εργασίας και χωρίζεται σε δύο μέρη. Στην πρώτη υποενότητα περιγράφεται η λογική που βασίζεται η εργασία προκειμένου να κατασκευασθεί ο αλγόριθμος εκτίμησης του χρόνου ζωής της μπαταρίας. Στην δεύτερη, αναφέρονται αναλυτικά οι πτυχές της τεχνικοοικονομικής πλατφόρμας για την υλοποίηση της οικονομικής αξιολόγησης.

Στο κεφάλαιο 4 αρχικά πραγματοποιείται προσομοίωση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο που υπολογίζει τον χρόνο ζωής της μπαταρίας και το μέσο βάθος εκφόρτισης για διάφορες χωρητικότητες. Στη συνέχεια για κάθε μία από αυτές τρέχει το πρόγραμμα οικονομικής αξιολόγησης και παράγει δεδομένα των οποίων εξετάζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Τέλος, γίνονται σχόλια για την αλληλεπίδραση των μεγεθών που υπολογίζονται.

Στο κεφάλαιο 5 αποτυπώνονται τα γενικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

Στο κεφάλαιο 6 αναγράφονται αναλυτικά οι βιβλιογραφικές αναφορές.

2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Το ζήτημα της αποθήκευσης ενέργειας αποτελεί τον πιο καιρίο παράγοντα και βασικό πυλώνα σε ένα υβριδικό σύστημα ΑΠΕ για τη λειτουργία του. Αναλυτικότερα, τα συστήματα αυτά είναι υπεύθυνα για την αποθήκευση και την εξυπηρέτηση του φορτίου του καταναλωτή ανά πάσα στιγμή μέσα στη διάρκεια του έτους και άρα σε περιπτώσεις που λόγω καιρικών συνθηκών ενδεχομένως να μην υπάρχει παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, είναι υπεύθυνα για την διασφάλιση ενεργειακής αυτονομίας και συμβάλλουν στην εξομάλυνση της ισχύος εξόδου των συστημάτων παραγωγής ΑΠΕ.

Δυστυχώς, εξ' αιτίας της ελλιπούς τεχνολογικής εξέλιξης στον χώρο αυτό, τα συστήματα αποθήκευσης δύναται να αυξάνουν κατά πολύ το αρχικό κόστος αγοράς και εγκατάστασης αλλά ακόμα χειρότερα να χρειάζεται να υπερδιαστασιοποιηθούν, λόγω του ότι μπορεί το αιολικό ή ηλιακό δυναμικό μιας περιοχής να μην είναι τόσο αποδοτικό και άραγε το σύστημα αποθήκευσης αναγκαστικά θα πρέπει να έχει πάντοτε επαρκές διαθέσιμο φορτίο ώστε να ικανοποιήσει τις ανάγκες ζήτησης δίνοντας έτσι στην επένδυση επιπλέον αρχικό κόστος και μειώνοντας την ελκυστικότητά της.

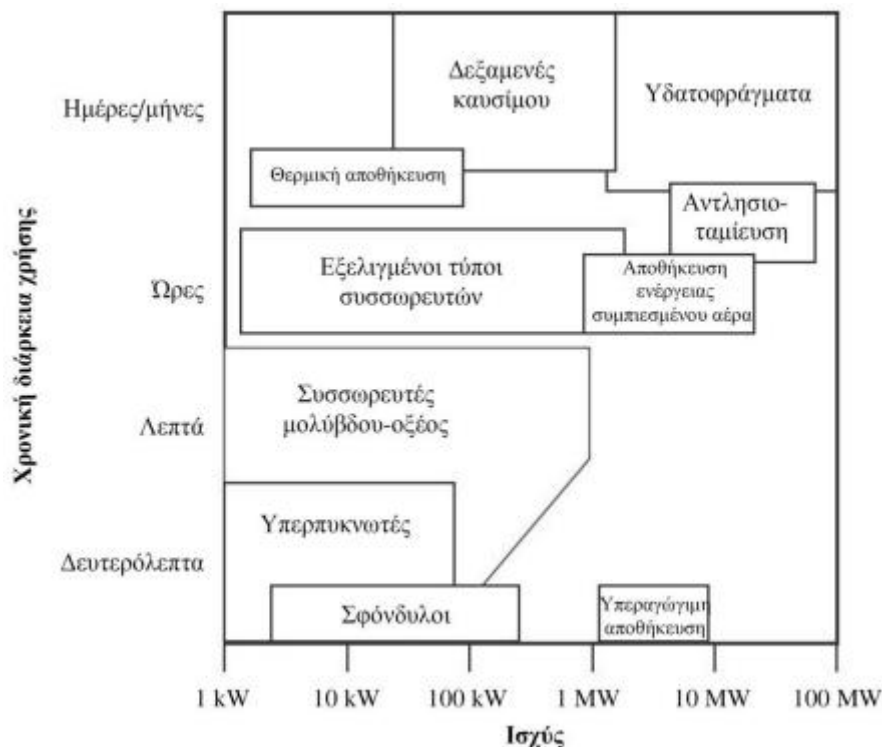
Ωστόσο, είναι αδύνατο να παραλείψει κάποιος τη μεγάλη τους σημασία και τη θετική τους συμβολή σε ένα σύστημα ΑΠΕ όπως περιγράφεται ακόλουθα:

- Επιτρέπουν ομαλή και σταθερή λειτουργία του Υβριδικού Συστήματος και σταθερή κάλυψη φορτίου παρά τις συνεχόμενες μεταβολές στη ζήτηση.
- Προσδίδουν ενέργεια για κάλυψη αναγκών σε περιόδους που κάποια μονάδα είναι εκτός λειτουργίας λόγω καιρικών συνθηκών
- Επιτρέπουν έναν ρυθμιζόμενο ρυθμό εξυπηρέτησης του δικτύου ανάλογα με τις ανάγκες των καταναλωτών και ανεξάρτητα του ρυθμού παραγωγής.
- Βοηθούν στην προστασία του περιβάλλοντος από τους ρύπους των ορυκτών καυσίμων.
- Τέλος, συμβάλλουν στην ενεργειακή αυτονομία του καταναλωτή.

Υπάρχει αρκετά μεγάλη ποικιλία συστημάτων αποθήκευσης για διαφορετικές χρήσεις. Το καιρίο ερώτημα είναι που και πότε χρησιμοποιείται το καθένα. Υπάρχουν άραγε κάποια συστήματα που ανταποκρίνονται καλύτερα σε ανάγκες ελάχιστων Wh, άλλα που έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε ανάγκες kWh και άλλα που απευθύνονται σε τεράστιες αποθηκευτικές ισχύς της τάξης των MWh. Επιπλέον, για τα συστήματα που ανταποκρίνονται σε παρόμοιας τάξης αποθηκευτικών μεγεθών θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο οι ποσοτικές διαφορές που μπορεί να αναφέρονται στην ίδια την τιμή αγοράς-εγκατάστασης, όσο και οι ποιοτικές που ενδεχομένως να υποδηλώνουν την συμπεριφορά της μπαταρίας στο μικρόκοσμο. Όλα αυτά τα διαφορετικά συστήματα θα αναλυθούν επαρκώς στο παρόν κεφάλαιο και εν συνεχεία ύστερα από σύγκριση θα

προκύπει η ιδανικότερη -για την περίπτωση της εργασίας αυτής- επιλογή τεχνολογίας αποθήκευσης.

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται ή που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στο εγγύς μέλλον είναι : οι συσσωρευτές, οι υπερπυκνωτές, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας, η αποθήκευση μηχανικής ενέργειας, σφόνδυλοι. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται αναλυτικά και παραστατικά το πεδίο λειτουργίας της κάθε τεχνολογίας ανάλογα με την ισχύ που εξυπηρετεί αλλά και τη χρονική διάρκεια της εξυπηρέτησης.



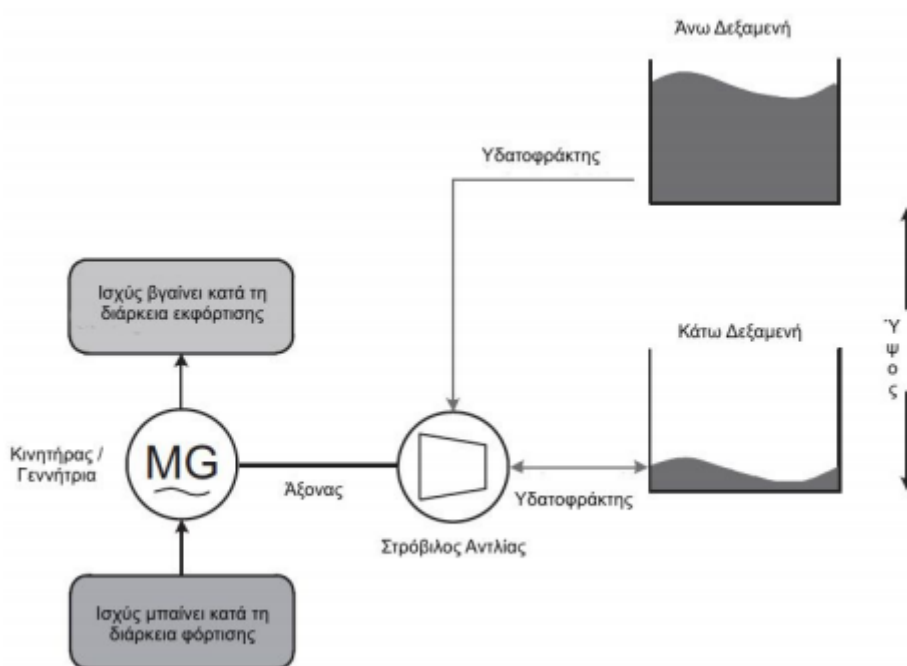
Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τη χρονική διάρκεια χρήσης και την ισχύ που μπορούν να εξυπηρετήσουν [12]

2.2 Μηχανική αποθήκευση ενέργειας

2.2.1 Αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά (Pumped Hydro)

Τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά είναι ένα από τα πιο γνωστά συστήματα αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην αξιοποίηση της δυναμικής ενέργειας λόγω της υψομετρικής διαφοράς που υπάρχει μεταξύ της δεξαμενής άντλησης και του στροβίλου, και στην μετατροπή της σε κινητική μέσω της μετακίνησης των πτερυγίων του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το σύστημα φορτίζεται με μία ηλεκτρική αντλία που στέλνει το νερό από την κάτω δεξαμενή στην πάνω και εκφορτίζεται μέσω της πτώσης του νερού στον στρόβιλο με

αποτέλεσμα την ενεργοποίησή του, γι' αυτό άλλωστε υπάρχει και ο όρος «αναστρέψιμο». Αναλυτικά μια τέτοια εγκατάσταση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2: Υδροηλεκτρικός Σταθμός [13]

Όπως φαίνεται στο σχήμα υπάρχουν δύο δεξαμενές σε διαφορετικά ύψη προκειμένου να δημιουργηθεί η απαιτούμενη δυναμική ενέργεια που προαναφέρθηκε, η αντλία που είναι στο ίδιο ύψος με την κάτω δεξαμενή και ο κινητήρας στον οποίο μεταφέρεται η κίνηση προκειμένου να παραχθεί το ηλεκτρικό ρεύμα.

Η ισχύς που παράγεται από τον κινητήρα προκύπτει με βάση τον εξής τύπο:

$$P = QV \cdot \rho \cdot g \cdot H$$

όπου:

P: παραγόμενη ισχύς

QV: παροχή νερού

g: επιτάχυνση βαρύτητας

ρ : πυκνότητα νερού

H: υψομετρική διαφορά μεταξύ της άνω δεξαμενής και του στροβίλου

Όλα τα μεγέθη είναι σε μεγέθη S.I.

Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, ότι προκειμένου να υπάρχει σταθερή παραγόμενη ισχύς, είναι απολύτως αναγκαία η συνύπαρξη ενός υδατοφράγματος και μιας σταθερής βροχόπτωσης ανά έτος.

Τα κύρια μέρη του υδροηλεκτρικού είναι τα εξής:

- Φράγμα: Χρησιμοποιείται για την περίφραξη νερού μελλοντικής χρήσης
- Στρόβιλος: Εκεί που πέφτει το νερό με ορμή και η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική
- Γεννήτρια: Η κίνηση που προκαλεί ο στρόβιλος κινεί και την γεννήτρια και δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα
- Υδροληψία-Σύστημα μεταφοράς: Περιλαμβάνει τους σωλήνες που μεταφέρουν το νερό από την λήψη του μέχρι να φτάσει στο στρόβιλο αλλά και αυτούς που μεταφέρουν το νερό πίσω στην άνω δεξαμενή κατά τη διάρκεια της αντίστροφης λειτουργίας
- Υδροταμιευτήρας: Εκεί που αποθηκεύεται το νερό
- Μεταφορά: Είναι οι γραμμές με τις οποίες μεταφέρεται το ηλεκτρικό ρεύμα στο δίκτυο.

Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται ένα εν δυνάμει υδροηλεκτρικό:



Εικόνα 2.1: Αναστρέψιμο Υδροηλεκτρικό [14]

Η τεχνολογία αυτή χαίρει τεράστιας εφαρμογής παγκοσμίως και θεωρείται η πιο αξιόπιστη ως προς την αποθηκευτική ισχύ πολύ μεγάλης κλίμακας. Παγκοσμίως έχει ξεπεράσει σε εφαρμογή τα 90 GW εγκατεστημένης ισχύος, ξεκινώντας πολλά χρόνια πριν, και συνεχίζει να αναπτύσσεται ραγδαία. Η Ιαπωνία διαθέτει την μεγαλύτερη εγκατεστημένη χωρητικότητα στον κόσμο ακολουθούμενη από την Κίνα και τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Η Κίνα έχει επι του παρόντος το πιο φιλόδοξο σχέδιο επέκτασης της εγκατάστασης μικρών υδροηλεκτρικών με υπό-κατασκευή 27 GW ισχύος με βλέψεις για περεταίρω επέκταση.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις εγκατεστημένες ισχύς πολύ γνωστές χώρες ανά τον κόσμο.

Πίνακας 2.1: Εγκατεστημένες ισχύς Υδροηλεκτρικών ανά χώρα [15]

Χώρα	Εγκατεστημένη ισχύς(MW)
Ιαπωνία	27.438
Κίνα	21.545
Ηνωμένες Πολιτείες	20.858
Ιταλία	7.071
Ισπανία	6.889
Γερμανία	6.388
Ελλάδα	699
Γαλλία	5.894
Ινδία	5.072
Αυστρία	4.808
Ηνωμένο Βασίλειο	2.828
Κορέα	4.700
Ελβετία	2.687
Ταϊβάν	2.608
Πορτογαλία	1.592
Νότια Αφρική	1.580
Ρωσία	1.246
Βουλγαρία	1.052
Ιράν	1.040
Αυστραλία	2.542
Πολωνία	1.745
Λουξεμβούργο	1.096
Τσεχία	1.145
Σλοβακία	1.017
Αργεντινή	974
Νορβηγία	967
Σερβία	614
Λιθουανία	900
Καναδάς	174
Βραζιλία	20

Τα συστήματα αυτά έχουν την δυνατότητα να γίνουν πιο αποδοτικά στο εγγύς μέλλον από την άποψη ότι με την εξέλιξη της τεχνολογίας προκύπτουν νέες κατασκευές στροβίλων που πιθανώς να αυξήσουν κι άλλο το βαθμό απόδοσης. Επιπλέον κατασκευάζονται και αντλίες που δουλεύουν «έξυπνα», δηλαδή αναπροσαρμόζουν την

ισχύ λειτουργίας τους ανάλογα με το φορτίο που πρέπει να εξυπηρετήσουν και όχι όπως το παρελθόν που αναγκαστικά έπρεπε να λειτουργούν στο «peak» τους. Αυτό συμβάλλει επίσης σημαντικά στην αύξηση του βαθμού απόδοσης μιας τέτοιας εγκατάστασης.

Ο βαθμός απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος ποικίλει μεταξύ 70-80% [16]. Τα τελευταία χρόνια λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας έχει φτάσει και το 85%. Έχει διάρκεια ζωής πάνω από 60 έτη και βάθος εκφόρτισης 80-100%. Έχει σημαντικά μικρό ανοιγμένο κόστος ανά διάρκεια ζωής, παραγόμενη ενέργεια και βαθμό απόδοσης (€/kWh·η·cycles), αμελητέο ποσοστό αυτοεκφόρτισης και άμεση απόκριση όταν χρειαστεί να τεθεί σε λειτουργία σε ώρες αιχμής φορτίου. Αυτό σημαίνει ότι είναι πάρα πολύ αξιόπιστα συστήματα αν αναλογιστεί κάποιος ότι είναι έτοιμα ανά πάσα στιγμή να καλύψουν τεράστια φορτία ζήτησης. Μοναδική προϋπόθεση είναι η ύπαρξη επαρκούς όγκου νερού στην αποταμίευση προκειμένου να τεθεί σε λειτουργία. Επίσης είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι τις ώρες που το σύστημα έχει περίσσεια ενέργειας την χρησιμοποιεί για να στέλνει νερό πίσω στην αποταμίευση και έτσι βελτιώνει κι άλλο την απόδοση του εν λόγω αποθηκευτικού μέσου.

Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό, στον παρακάτω πίνακα, συγκεντρώνονται μερικά από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των εν λόγω συστημάτων αποθήκευσης.

Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Αναστρέψιμων Υδροηλεκτρικών

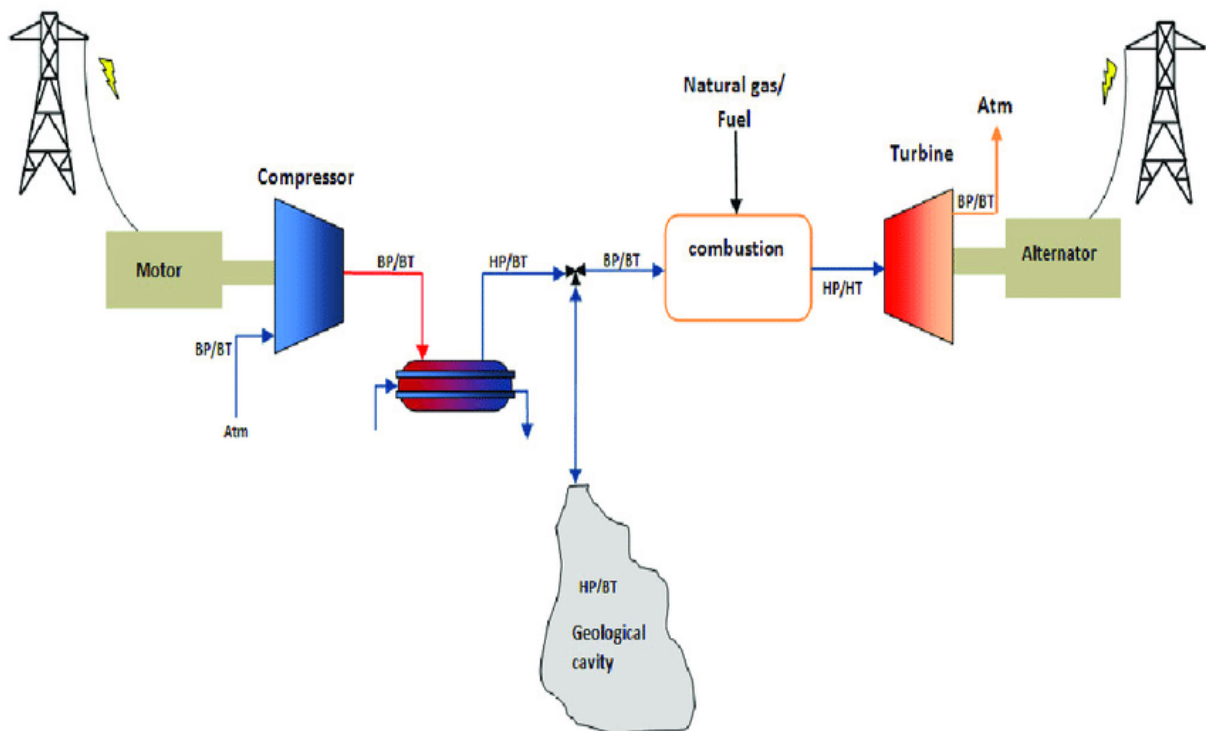
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Υψηλός βαθμός απόδοσης	Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα
Χαμηλή αυτοεκφόρτιση	Υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης
Μεγάλο προσδόκιμο ζωής	Βραχυπρόθεσμη έως αργή αποπληρωμή αρχικού κεφαλαίου
Χαμηλά κόστη αποθήκευσης	Διάφοροι περιορισμοί σε γεωγραφικά standards
Αξιοποιούν την περίσσεια ενέργειας κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης	Μεγάλος ανταγωνισμός από άλλα συστήματα παραγωγής ενέργειας
Κατάλληλα για χρήση σε περίοδο αιχμής, πολύ χαμηλός χρόνος απόκρισης όταν τίθεται σε λειτουργία	Δημιουργεί κοινωνικές εντάσεις λόγω αύξησης τιμής του ρεύματος
Θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο	Χρειάζεται τη δέσμευση μεγάλων εκτάσεων που πιθανότατα να έχουν ειδικές

	περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. περιοχές natura 2000)
Μικρό ανοιγμένο κόστος ανά διάρκεια ζωής, παραγόμενη ενέργεια και βαθμό απόδοσης	Αφορά μόνο μεγάλης κλίμακας εφαρμογές

2.2.2 Αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (CAES)

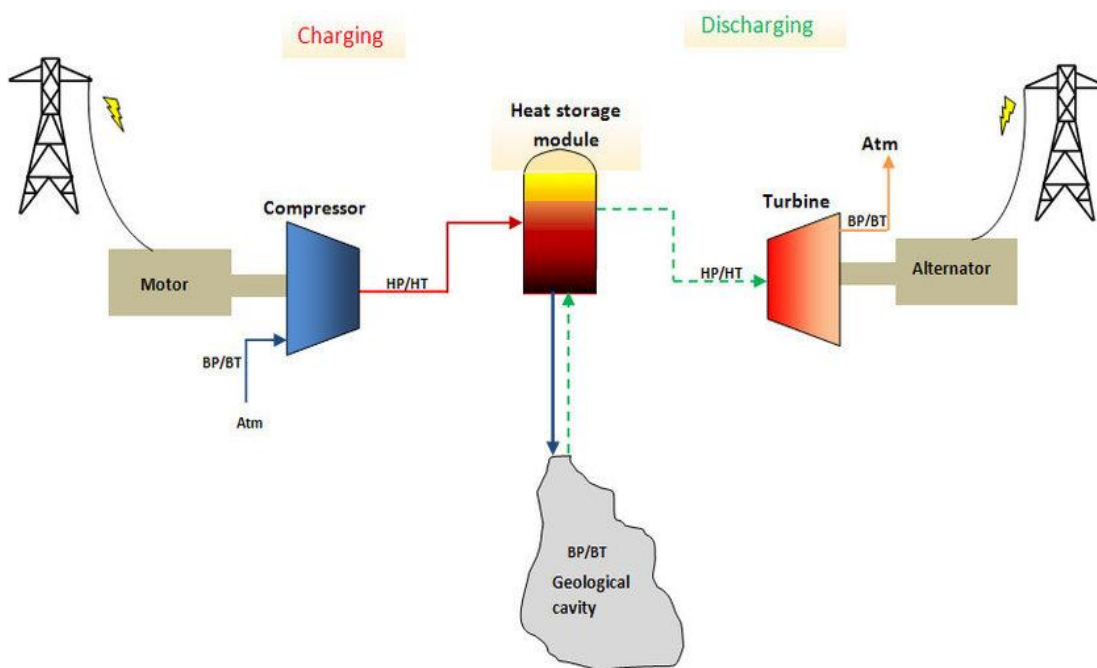
Τα συστήματα αποθήκευσης με συμπιεσμένο αέρα (Compressed Air Energy Storage, CAES) ξεκινούν τη χρήση τους από τη δεκαετία του 1970 και έπειτα. Η λογική τους είναι βασισμένη στην εκμετάλλευση της περίσσειας ενέργειας που παράγεται από ένα σύστημα προκειμένου να χρησιμοποιηθεί εκ νέου με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Η λογική των συστημάτων αυτών είναι ότι η περίσσεια ενέργειας κινεί ένα συμπιεστή υψηλής πίεσεως ο οποίος με τη σειρά του αποθηκεύει τον συμπιεσμένο αέρα, σε πιέσεις έως 75 bar σε υπόγειους θύλακες. Αυτή αποτελεί και την διαδικασία φόρτισης του συστήματος. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, απελευθερώνεται ο αέρας σε έναν θάλαμο καύσης (π.χ. φυσικού αερίου) και εκτονώνεται στα πτερύγια ενός στροβίλου υψηλής πίεσης με αποτέλεσμα να τον την κίνηση μιας γεννήτριας και την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος για το δίκτυο. Αυτά είναι τα λεγόμενα διαβατικά συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.



Εικόνα 2.2: Διάταξη διαβατικών συστημάτων CAES

Μια σημαντική υποκατηγορία των συστημάτων αυτών είναι τα αδιαβατικά CAES. Η λογική όσον αφορά την φόρτιση του συστήματος είναι ίδια με αυτήν που περιγράφηκε παραπάνω. Η θερμότητα που παράγεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης του συστήματος αποθηκεύεται σε έναν ειδικά διαμορφωμένο χώρο. Ωστόσο, όσον αφορά την εκφόρτιση του συστήματος, ο πεπιεσμένος αέρας εισέρχεται μέσα από το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας το οποίο προαναφέρθηκε και στην συνέχεια κινεί ένα στρόβιλο υψηλής πίεσης. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει μια σημαντική αύξηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος που ξεπερνά την τάξη του 10-15%.



Εικόνα 2.3: Διάταξη αδιαβατικού συστήματος CAES

Η αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα τοποθετείται στην ίδια κατηγορία με τα μικρά υδροηλεκτρικά και αναφέρεται πολύ σε μεγάλες εφαρμογές. Οι πιο γνωστές μονάδες που υπάρχουν ανά τον κόσμο εδώ και πολλά χρόνια είναι αυτές στο Hundorf της Γερμανίας με εγκατεστημένη ισχύ που αγγίζει τα 290MW και στην Alabama στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής με 110MW.



Εικόνα 2.4: Εγκατάσταση CAES στο Hundorf της Γερμανίας

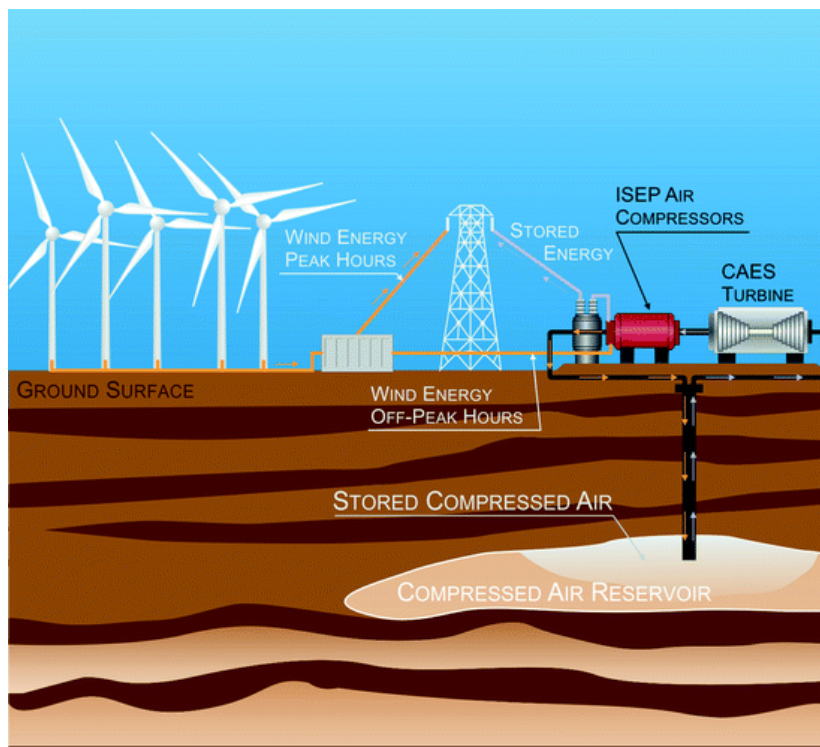
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι και οι δύο αυτές εγκαταστάσεις είναι διαβατικά CAES. Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών των δύο πασίγνωστων μονάδων.

Πίνακας 2.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο πασίγνωστων CAES ανά τον κόσμο [17]

Περιοχή	Hundorf, Γερμανία	Alabama, Η.Π.Α
Ημερομηνία κατασκευής	1978	1991
Βαθμός απόδοσης	42%	54%
Ροή αέρα:		
Για το συμπιεστή	417 kg/s	154 kg/s
Για το στρόβιλο	108 kg/s	96 kg/s
Εύρος πίεσης μέσα στα σπήλαια	4.6-7.2 Mpa	4.6-7.5 Mpa
Χωρητικότητα αποθήκευσης	310.000 m ³ (2 σπήλαια)	560.000 m ³

Ισχύς εξόδου	Παραγωγή ισχύος 290MW από λειτουργία στροβίλου (για χρονικό διάστημα < 3 ώρες), λειτουργία οδηγούμενη από συμπιεστή 60MW (για χρονικό διάστημα < 12 ώρες)	Λειτουργία με στρόβιλο 110 MW για 26 ώρες
---------------------	---	---

Όπως γίνεται αντιληπτό, τα διαβατικά συστήματα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα μπορούν να λειτουργούν αρμονικά και με μεγάλης κλίμακας αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα με την λογική ότι όλη αυτή η ηλεκτρική ενέργεια που απορρίπτεται λόγω μεγάλης παραγωγής, χρησιμοποιείται για να κινεί έναν συμπιεστή ώστε να αποθηκεύει τον αέρα σε πολύ υψηλές πιέσεις. Αυτό σε ακατοίκητα νησιά της Ελλάδας όπως η Γυάρος θα ήταν ιδανικότερη λύση, από την άποψη ότι στο αιγαίο υπάρχει τεράστιο αιολικό δυναμικό και ότι επίσης η Ελλάδα χαίρει μεγάλης ηλιοφάνειας ανά το έτος, πράγμα που θα μπορούσε να αποφέρει τεράστια πλεονάσματα ενέργειας.



Εικόνα 2.5: Αξιοποίηση περίσσειας αιολικής ενέργειας για παραγωγή συμπιεσμένου αέρα σαν σύστημα αποθήκευσης [18]

Σε τέτοιες εφαρμογές (δηλαδή μαζικής παραγωγής) τα συστήματα αυτά μοιάζουν εξαιρετικές λύσεις για φθηνή αποθήκευση. Ωστόσο, απαιτούν τεράστιες γεωγραφικές εκτάσεις και ειδικές μορφολογίες εδάφους γεγονός που κάνει την εφαρμογή τους εξαιρετικά δύσκολη. Αυτός είναι ο κύριος λόγος που δεν είναι τόσο διαδεδομένα όσο τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά συστήματα.

Επιπλέον, ένα άλλο μεγάλο μειονέκτημα είναι ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία δε θα μπορούσε σε καμία περίπτωση να χρησιμοποιηθεί για μικρές εφαρμογές και μικρά φορτία, όπως ένα μικρό υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, διότι δεν πληροί ούτε τις χωροταξικές ανάγκες αλλά ούτε και τις προϋποθέσεις απαιτούμενων φορτίων.

Όσον αφορά τα αδιαβατικά CAES, δεν υπάρχουν στην αγορά συστήματα τα οποία να είναι εν λειτουργία χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική. Φαίνεται ότι είναι υπό υλοποίηση κάποια τέτοια μοντέλα και ίσως στο εγγύς μέλλον να υπάρξουν και κάποια χειροπιαστά αποτελέσματα σχετικά με την εφαρμογή τους. Μελέτες δείχνουν ότι η αποθήκευση σε στερεά κατάσταση (π.χ. τηγμένο άλας) πάνω από το έδαφος είναι αρκετά αποτελεσματική και ίσως χρησιμοποιηθεί πιο εντατικά σε μελλοντικό χρόνο.

Η τεχνολογία των συστημάτων αυτών δεν έχει ωριμάσει αρκετά ακόμα. Πιθανότατα μεγάλο ρόλο σε αυτό να παίζει η ιδιαίτερη απαιτούμενη μορφολογία εδάφους που πρέπει να έχουν καθώς, ανά τον κόσμο, λίγα είναι τα σημεία στα οποία θα μπορούσε να «χτιστεί» μια τέτοια μονάδα. Οικονομικά μιλώντας δε, τα αδιαβατικά CAES είναι ενδεδειγμένα για υψηλό αριθμό κύκλων λόγω της μεγαλύτερης αποδοτικότητάς, ενώ, τα διαβατικά σε εφαρμογές με μικρούς αριθμούς κύκλων και χαμηλότερο επενδυτικό κόστος λόγω του ότι έχουν χαμηλότερο κόστος κύκλου ζωής.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των συστημάτων CAES.

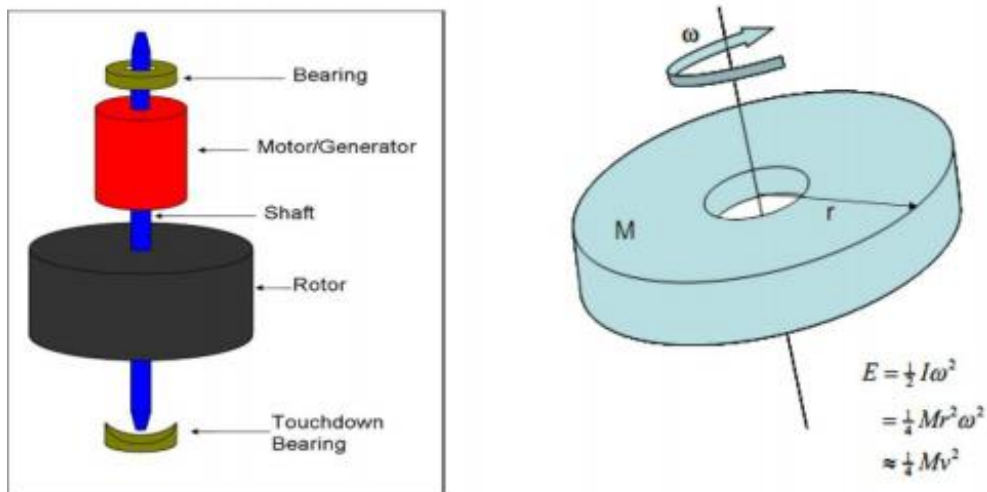
Πίνακας 2.4: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συστημάτων αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Χαμηλή έως αμελητέα αυτοεκφόρτιση της δεξαμενής αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα	Γεωγραφικοί περιορισμοί που αφορούν την ειδική απαιτούμενη μορφολογία εδάφους
Μεγάλη αποθηκευτική ισχύς	Υψηλό επενδυτικό κόστος
Μικρό κόστος αποθηκευτικής ισχύος	Χαμηλός βαθμός απόδοσης διαβατικού CAES

Μεγάλη διάρκεια ζωής	Απευθύνεται αποκλειστικά και μόνο σε τεράστιες μονάδες μαζικής παραγωγής
Αναμένεται μελλοντική εξέλιξη της τεχνολογίας	Βραχυπρόθεσμη αποπληρωμή αρχικού κεφαλαίου
Κατάλληλο και για αποθήκευση ενέργειας από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά μεγάλης κλίμακας	Μη ανταγωνιστικά συστήματα αποθήκευσης με αυτά που υπάρχουν στην αγορά
Υψηλός βαθμός απόδοσης αδιαβατικού CAES	Περιορισμένες τοποθεσίες εφαρμογής ανά τον κόσμο

2.2.3 Σφόνδυλοι

Οι σφόνδυλοι, σε αντίθεση με τα αντίστροφα υδροηλεκτρικά και τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα που αξιοποιούν την δυναμική ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρικής, χρησιμοποιούν την κινητική ενέργεια μέσω περιστροφής σαν μέσο αποθήκευσης και παραγωγής. Πιο αναλυτικά, μια μάζα περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα και παράγει ή αποθηκεύει ενέργεια. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6, ο ρυθμός με τον οποίο αποθηκεύει ενέργεια το σύστημα αυτό είναι ίσος με το μισό του γινομένου μεταξύ του τετραγώνου της γωνιακής ταχύτητας και της ροπής αδράνειας.



Εικόνα 2.6: Τυπικός σφόνδυλος και μηχανικές σχέσεις που ισχύουν [6]

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι λογικό επακόλουθο καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του σφόνδου να παράγεται και μεγαλύτερο ποσό κινητικής ενέργειας. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν άξονα ο οποίος συγκρατείται από δύο μαγνητικούς τριβείς με σκοπό την περιστροφή του στο κενό. Έτσι γίνεται εφικτή και η ραγδαία μείωση των απωλειών τριβής του συστήματος. Κατά τη διαδικασία της φόρτισης τους επιταχύνουν και παράγουν ενέργεια για όταν απαιτηθεί να δώσουν φορτίο στη ζήτηση. Αντιθέτως, η εκφόρτιση τους προκύπτει μέσα από την παύση της περιστροφής του άξονα.

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις σχετικά με την κατασκευή αυτών των συστημάτων. Η μία αναφέρεται σε πιο βαριές κατασκευές με μειωμένη ταχύτητα περιστροφής ενώ η άλλη σε πιο ελαφριές κατασκευές με μεγάλη ταχύτητα περιστροφής. Αν το ζητούμενο είναι η παροχή μεγάλης ισχύος τότε οι πρώτες είναι πιο αποτελεσματικές διότι παράγουν μεγάλες ροπές άρα και μεγαλύτερη ισχύς ενώ στην περίπτωση που χρειάζεται μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα προτιμώνται οι ελαφριές κατασκευές λόγω του ότι περιστρέφονται για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους οι σφόνδυλοι έχουν πολύ μεγάλο βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται κοντά στο 90%. Το προσδόκιμο ζωής τους είναι περίπου 15 χρόνια και το τυπικό βάθος εκφόρτισής τους είναι περίπου 70%. Ο κύκλος ζωής σε ένα τέτοιο σύστημα είναι αρκετά μεγάλος και το κόστος εγκατεστημένης ισχύος του κυμαίνεται κοντά στα 300 €/kW. Από την άλλη πλευρά δεν μπορεί να παραληφθεί ότι οι σφόνδυλοι έχουν τεράστια απώλεια ενέργειας από αυτοεκφόρτιση που σε ποσοστό είναι κοντά στο 50%. Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι ένα τέτοιο σύστημα δε θα μπορούσε σε καμία των περιπτώσεων να αντικαταστήσει τα συμβατικά μέσα αποθήκευσης ενέργειας σε μια παραγωγική μονάδα. Επιπλέον, για την μείωση των απωλειών ο σφόνδυλος θα πρέπει να περιστρέφεται σε κενό το οποίο για να δημιουργηθεί προϋποθέτει επιπρόσθετα έξοδα για την κατασκευή.

Όσον αφορά τη μορφή τους, είναι σχετικά μικρά συστήματα αποθήκευσης γεγονός που τα κάνει ελκυστικά από χωροταξική άποψη. Τέλος, όλα όσα προαναφέρθηκαν και σε συνδυασμό με την πολύ μικρή απόκριση που έχει (10 ms) τα κάνει ιδιαίτερα ελκυστικές εφαρμογές για ρύθμιση συχνότητας δικτύου, έλεγχο τάσης, εφαρμογές UPS. Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνονται ενδεικτικά κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών.

Πίνακας 2.5: Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα σφονδύλων

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Μεγάλη διάρκεια ζωής	Μεγάλη αυτό-εκφόρτιση
Γρήγορη απόκριση	Δεν είναι τόσο οικονομικά συμφέρουσες επιλογές
Γρήγορη φόρτιση	Πιθανά έξτρα κόστη συντήρησης μηχανικών μερών και αντλίας κενού
Βελτίωση της ποιότητας δικτύου	Έχουν πιάσει «ταβάνι» όσον αφορά την απόδοσή τους
Ρύθμιση συχνότητας	Έχουν μικρή ενεργειακή πυκνότητα
	Δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε παραγωγικές μονάδες για αποθήκευση ενέργειας

2.3 Ηλεκτρική αποθήκευση ενέργειας

2.3.1 Υπεραγώγιμα πηνία (SMES)

Τα πηνία από πολύ παλιά θεωρούνται από τα κύρια εξαρτήματα ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Αποτελούνται από ένα τύλιγμα από σύρμα και μέσα από την διέλευση ρεύματος μπορεί να αναπτύσσει ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες. Βασική ιδιότητα των πηνίων είναι ότι υπακούν στο φαινόμενο της αυτεπαγωγής. Η ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύει ένα πηνίο υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$UE = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

όπου:

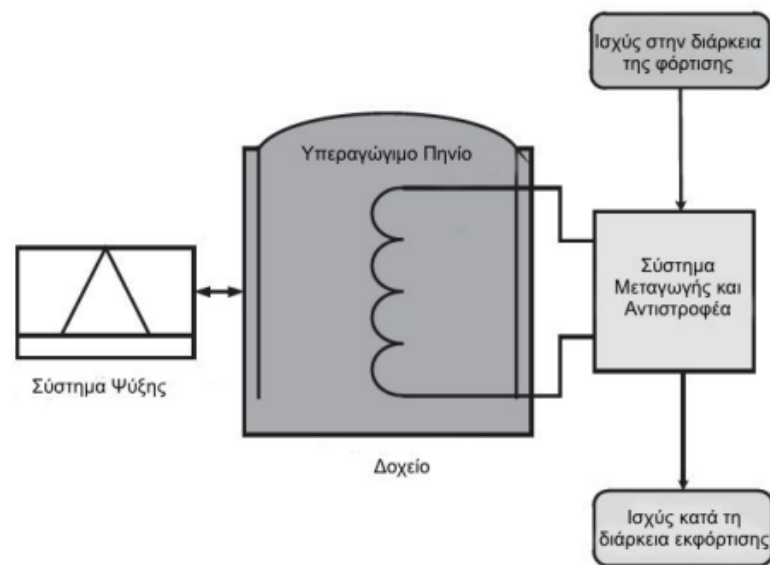
L: ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου

I: η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που ρέει στο πηνίο

Τα μεγέθη αυτά υπακούν στο S.I.

Πολύ βασικό χαρακτηριστικό τους αναπτύσσοντας τον παραπάνω συλλογισμό είναι ότι ανέκαθεν αποτελούσαν αποθήκη ηλεκτρικής ενέργειας.

Έχοντας αυτή τη βασική γνώση είναι σκόπιμο να αναλυθεί η έννοια της υπεραγωγιμότητας. Η υπεραγωγιμότητα είναι μια κατάσταση στην οποία η αντίσταση του πηνίου μηδενίζεται. Αυτό πρακτικά για να συμβεί θα πρέπει να ψυχθεί το πηνίο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (μόλις μερικούς βαθμούς Κέλβιν) με υλικά όπως το υγρό ήλιο ή το υγρό άζωτο. Στη λογική αυτή το 1970 αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά τα υπεραγώγυμα πηνία (Superconducting Magnet Energy Storage Systems, SMES).



Σχήμα 2.3: Τυπική διάταξη SMES [13]

Με τη βοήθεια της απεικόνισης (σχήμα 2.3) είναι πολύ ευκολότερη και η κατανόηση της εφαρμογής των συστημάτων αυτών. Όσον αφορά την φόρτιση λοιπόν, το πηνίο τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα (βασική προϋπόθεση λειτουργίας του) και παράλληλα ψύχεται στην κατάλληλη θερμοκρασία ώστε να φτάσει σε κατάσταση υπεραγωγιμότητας. Το αποτέλεσμα είναι η συνεχής δημιουργία και αποθήκευση ηλεκτρικού ρεύματος. Από την άλλη πλευρά, η εκφόρτιση του πηνίου γίνεται πολύ εύκολα με τη σύνδεση του δικτύου με ένα σύστημα μεταγωγής που «αντλεί» την παροχή ρεύματος στο δίκτυο.

Με την ανακάλυψη των στοιχείων αυτών επικρατούσε η άποψη στον επιστημονικό κόσμο ότι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για αποθηκευτικές ισχύς της τάξης των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών και των CAES. Θεωρητικά μιλώντας θα ήταν εφικτή μια τέτοια εφαρμογή. Παλαιότερα υπήρξε ένα φιλόδοξο πλάνο για κατασκευή μιας τέτοιας εγκατάστασης στη Βόρεια Αμερική της τάξης των 2400MW, ωστόσο απέτυχε παταγωδώς λόγω των τεράστιων εξόδων εγκατάστασης και λειτουργίας που τα

χαρακτηρίζει, αν αναλογιστεί κανείς τις ανάγκες για συρμάτινα τυλίγματα στο πηνίο και τις ανάγκες ψύξης για δημιουργία υπεραγωγιμότητας.

Τα συστήματα αυτά με τα καλά τους και τα κακά τους δεν άργησαν πολύ να τραβήξουν τα βλέμματα της βιομηχανίας. Εκ πρώτης όψεως αν σκεφτεί κανείς ότι έχουν τρομερά μικρούς χρόνους απόκρισης (της τάξης των ms) και έχουν παραπάνω από 95% βαθμό απόδοσης, τα κάνει αυτομάτως μια ελκυστική -προς μελέτη- λύση. Όσον αφορά τη διάρκεια ζωής τους δε, δεν έχει καμία εξάρτηση από τους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης.

Ένα από τα πρώτα SMES που χρησιμοποιήθηκαν στο εμπόριο ήταν από την αμερικάνικη Bonneville το 1980. Η μονάδα είχε ονομαστική ισχύ 10MW και αποθηκευτική χωρητικότητα 30MJ. Η μονάδα αυτή απελευθέρωνε 10MJ σε 1/3 του δευτερόλεπτου. Ένα τέτοιο σύστημα σήμερα ενδέχεται να αποδίδει 3MW σε 1 δευτερόλεπτο με χωρητικότητα 3MJ [19]. Τα συστήματα αυτά με την παρούσα τεχνολογία είναι εφικτό να δουλεύουν σε ονομαστικές τιμές της τάξης 1MW-10MW.

Πίνακας 2.6: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα SMES

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Μεγάλο προσδόκιμο ζωής	Τεράστιο κόστος αρχικής εγκατάστασης και συντήρησης
Μεταφορά μεγάλης ισχύος σε μικρό χρονικό διάστημα σε σχέση με άλλα μέσα	Πολύ μακροπρόθεσμη αποπληρωμή αρχικού κεφαλαίου πράγμα που το καθιστά ασύμφορο μέσο παραγωγής
Πρωτοποριακή τεχνολογία	Τεράστιες ανάγκες σε ψύξη
Αξιοπιστία και μικρές απώλειες ισχύος	Πολυπλοκότητα κατασκευής

2.3.2 Πυκνωτές και Υπερπυκνωτές

Οι πυκνωτές ήταν από τις πρώτες μορφές αποθήκευσης ενέργειας που ανακαλύφθηκαν. Αποτελούνται από δύο μεταλλικές πλάκες που ονομάζονται οπλισμοί, ανάμεσα στους οποίους υπάρχει μονωτικό υλικό (αέρας, πλαστικό, κ.λπ.). Όταν ο πυκνωτής είναι φορτισμένος οι οπλισμοί του είναι φορτισμένοι με το ίδιο μέτρο αλλά με αντίθετα πρόσημα. Μεταξύ άλλων, ανάμεσα στους δύο αυτούς οπλισμούς αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού ή τάση.

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή (σε Φαράντ, F) εκφράζει το πηλίκο του φορτίου του προς την διαφορά δυναμικού που επικρατεί στα άκρα των οπλισμών.

Αναλυτικότερα:

$$Cc = \frac{Qc}{Vc}$$

όπου:

Qc: φορτίο πυκνωτή

Vc: τάση πυκνωτή

Τα μεγέθη αυτά είναι στο S.I.

Πρακτικά όμως, η χωρητικότητα ενός πυκνωτή δεν εξαρτάται ούτε από το φορτίο ούτε και από την τάση στα άκρα των οπλισμών του. Συνδέεται άρρηκτα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αλλά και από τη φύση του διηλεκτρικού υλικού του. Η σχέση που περιγράφει τον πραγματικό υπολογισμό της χωρητικότητας είναι η παρακάτω [20] :

$$Cc = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

όπου:

ϵ : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υλικού

ϵ_0 : η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot Cc^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$

A: το εμβαδό του κάθε οπλισμού

d: η απόσταση μεταξύ των οπλισμών

Τα μεγέθη υπακούν στο S.I.

Η παραγόμενη ενέργεια στον πυκνωτή σε Joule υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση [20] :

$$Ec = \frac{Cc \cdot Vc^2}{2}$$

Οι πυκνωτές έχουν διάρκεια ζωής περίπου 5 ετών με τυπικό βαθμό απόδοσης μεταξύ 60% και 70% [21]. Απευθύνονται μόνο σε συστήματα λίγων kWh και η κύρια εφαρμογή τους είναι η διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Βέβαια μέσω της εξομάλυνση της τάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν προσθετικά σε συστήματα ΑΠΕ για την αύξηση του προσδόκιμου ζωής στις μπαταρίες. Σε καμία περίπτωση όμως δεν μπορούν αυτά τα συστήματα να είναι η βασική μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ειδοποιός διαφορά μεταξύ των πυκνωτών και των υπερπυκνωτών είναι ότι οι δεύτεροι χρησιμοποιούν για διηλεκτρικό υλικό υγρό ηλεκτρολύτη (π.χ. απιονισμένο νερό) σε αντίθεση με τους πρώτους που χρησιμοποιούν κατά κόρων στερεά υλικά. Τα συστήματα αυτά έχουν λίγο μεγαλύτερο χρόνο ζωής αλλά πολύ πιο μεγάλο βαθμό απόδοσης (άνω του 90%). Είναι πολύ σημαντικό ότι είναι πανάκριβοι και μπορούν να σημειώνονται τεράστιες απώλειες ενέργειας έως και 40% μέσα στη μέρα.

Κλείνοντας την ενότητα αυτή, είναι σημαντικό να κατανοηθεί το που μπορεί να είναι χρήσιμοι συστήματα όπως οι υπερπυκνωτές. Σίγουρα δε θα μπορούσε να είναι το βασικό σύστημα αποθήκευσης, σε ένα αιολικό πάρκο για παράδειγμα, για οικονομικούς, ποιοτικούς λόγους που προαναφέρθηκαν. Είναι όμως κρίσιμη η συμβολή τους σε περιπτώσεις στις οποίες είναι απαραίτητο ένα σύστημα ώστε να κρατάει την τάση σταθερή σε ένα δίκτυο και έτσι να βελτιώνεται τόσο η ποιότητα του δικτύου, όσο και η εξοικονόμηση χρημάτων από χρήση άλλων πιο ακριβών συστημάτων.

Πίνακας 2.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υπερπυκνωτών [21]

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης	Μικρός χρόνος ζωής (5-10 χρόνια)
Γρήγορη απόκριση	Υψηλό κόστος αγοράς (20.000€/kWh)
Εξομάλυνση τάσης δικτύου	Τεράστιες απώλειες ενέργειας
Μειώνει το κόστος εγκατάστασης σε περίπτωση που χρησιμοποιείται αντί για μετατροπέα AC/DC και άλλων συναφών συστημάτων	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας (2070MJ/m)
Υψηλή πυκνότητα ισχύος (100kW/kg)	

2.4 Ηλεκτροχημική αποθήκευση ενέργειας

Ο Αλεσάντρο βόλτα πιστώνεται την εφεύρεση της πρώτης μπαταρίας το 1800. Οι μπαταρίες σήμερα είναι το πιο διαδεδομένο μέσο αποθήκευσης ενέργειας σχεδόν για όλες τις χρήσεις. Από μικρής κλίμακας (smartphones) μέχρι τεράστια αιολικά πάρκα τις χρησιμοποιούν ευρέως σαν σύστημα αποθήκευσης. Η πρόοδος στην τεχνολογία έχει ελαττώσει αρκετά το κόστος των μπαταριών ανά τα έτη αλλά ακόμα και σήμερα είναι αρκετά υπολογίσιμο και κάνει το σύστημα ΑΠΕ λιγότερο ανταγωνιστικό οικονομικά σε σχέση με ένα σύστημα παραγωγής με ορυκτό καύσιμο. Ωστόσο, λόγω και της ραγδαίας επιδείνωσης του κλίματος εξ' αιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, τα κράτη (κυρίως της Ε.Ε) προσπαθούν με επιδοτήσεις να καλύπτουν όσο είναι εφικτό το οικονομικό χάσμα που δημιουργείται σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα.

Οι μπαταρίες λειτουργούν με συνεχές ρεύμα και τα βασικά χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων εξ' αυτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.8: Βασικά χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων τύπων συσσωρευτών [16]

	Οξέων & μολύβδου	Νικελίου & Καδμίου	Θείου & Νατρίου	Ιόντων Λιθίου	Ψευδαργύρου & Αέρα
Αποδιδόμενη ισχύς	x10 MW ~100MW	x10 MW	Κλίμακα MW	x10 kW	1-10 kW
Ειδική ενέργεια(Wh/Kg)	35-50	75	150-240	150-200	200-600
Ειδική ισχύς(W/Kg)	75-300	150-300	90-230	200-315	-
Κύκλοι Ζωής	500-1500	2500	2500	1000-10000+	100-200
Βαθμός απόδοσης φόρτισης-εκφόρτισης (%)	~80-90	~70	Έως 90	~95	~50
Αυτοεκφόρτιση	1-5% ανά μήνα	5-20% ανά μήνα	#	~1% ανά μήνα	-

Οι επικρατέστεροι συσσωρευτές στην αγορά για ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας ακόμη και σήμερα είναι αυτοί του μολύβδου-οξέος (Lead Acid) λόγω χαμηλότερου κόστους σε σύγκριση με τους υπόλοιπους, ανεξαρτήτως που μειονεκτούν σε όλα τα ειδικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται στον Πίνακα 2.8. Οι μπαταρίες λιθίου είναι αυτές που έχουν εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια και πλεονεκτούν σε όλα τα ειδικά χαρακτηριστικά των υπολοίπων. Δυστυχώς όμως αναφέρονται σε πολύ μικρές εγκαταστάσεις ισχύος. Πιθανότατα με την εξέλιξη της τεχνολογίας τα επόμενα χρόνια να κερδίσουν τη μάχη με αυτές του μολύβδου.

Το βασικό δομικό συστατικό της μπαταρίας είναι η κυψέλη. Αυτή με τη σειρά της αποτελείται από την άνοδο και την κάθοδο οι οποίες είναι δύο πλάκες. Ανάμεσα σε αυτές υπάρχει ηλεκτρολύτης. Ο ηλεκτρολύτης είναι η ουσία που παρεμβάλλεται στην χημική αντίδραση χωρίς να παίρνει μέρος και είναι υπεύθυνος για την αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος. Μερικές φορές κατά την αντίδραση μένουν κάποια κατάλοιπα (στην περίπτωση μολύβδου-οξέος) θεικού άλατος τα οποία επιδρούν αρνητικά στο προσδόκιμο ζωής της μπαταρίας.

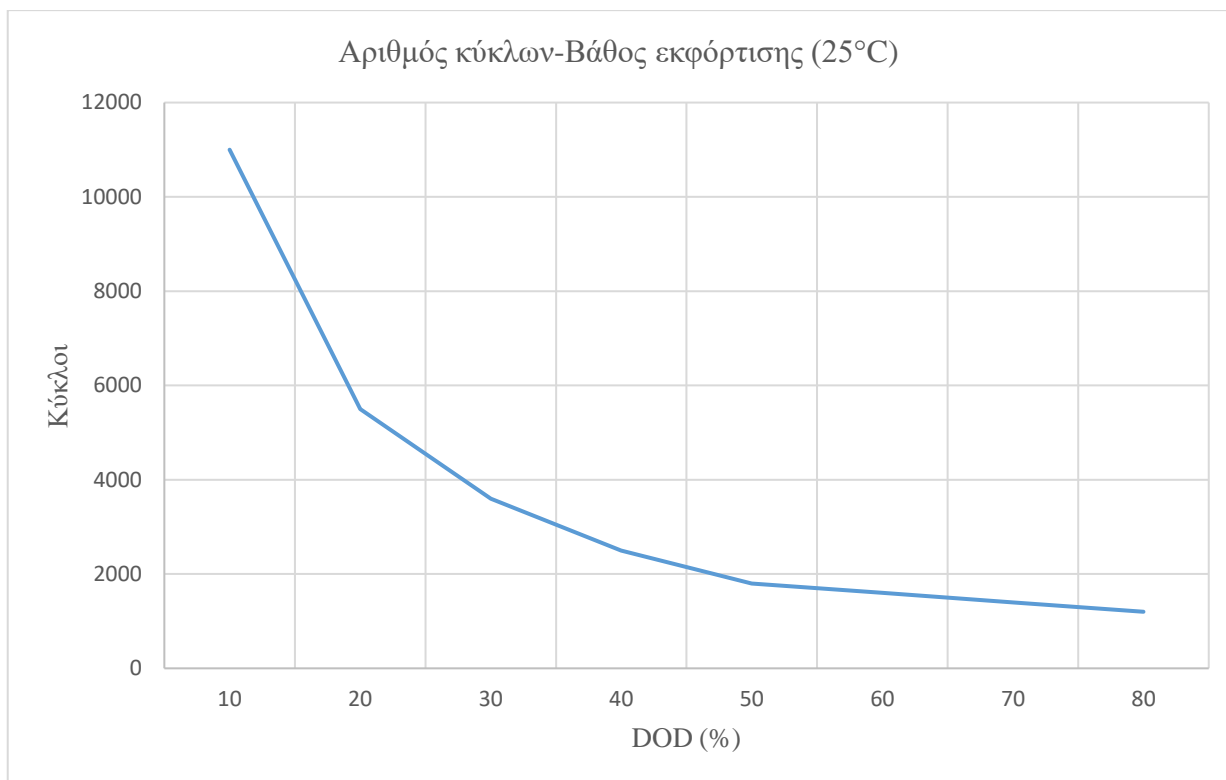
Συμπληρωματικά, υπάρχουν κάποιοι κύριοι παράγοντες αξιολόγησης της επίδοσης της μπαταρίας. Αυτοί είναι η χωρητικότητα της, η απόδοσή φόρτισης εκφόρτισης, ο ρυθμός με τον οποίο φορτίζεται ή εκφορτίζεται αλλά και ο τελικός χρόνος ζωής τους. Η χωρητικότητα, όπως προκύπτει και από την ετυμολογία της λέξης, εκφράζει το μέγιστο μέγεθος αποθηκευτικής ισχύος που έχει η μπαταρία σε Ah. Επιπλέον, ο βαθμός απόδοσης της μπαταρίας υποδηλώνει το πηλίκο της ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί σε σχέση με την αρχική ενέργεια συναλλαγής. Ο ρυθμός φόρτισης-εκφόρτισης

συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό σε έννοιες όπως η φθορά των συσσωρευτών. Εκφράζει επίσης την ικανότητα της μπαταρίας να απελευθερώνει ενέργεια ή να δέχεται σε σύγκριση με το χρόνο. Τα βάθη στα οποία μπορεί να εκφορτίζεται η μπαταρία είναι προκαθορισμένα από τον κατασκευαστή, και, σε περίπτωση που ξεπερνιούνται η διαδικασία «γήρανσης» της μπαταρίας επιταχύνεται με γοργούς ρυθμούς.

Επιπρόσθετα, ένας άλλος ενεργός παράγοντας που επηρεάζει το χρόνο ζωής της μπαταρίας είναι ο αριθμός κύκλων φόρτισης εκφόρτισης στον οποίο έχουν υποβληθεί. Αναλυτικότερα, ένας κύκλος φόρτισης-εκφόρτισης της μπαταρίας αναφέρεται σε εκφόρτιση της μπαταρίας από το 100% της χωρητικότητάς της μέχρι και το ονομαστικό βάθος εκφόρτισής της και ξανά την φόρτισή της μέχρι και το 100%.

Δευτερεύοντα ρόλο στην επίδοση των συσσωρευτών παίζουν η θερμοκρασία, η αυτοεκφόρτιση και η γήρανσή τους. Η θερμοκρασία θα μπορούσε να πει κανείς ότι δεν είναι και τόσο αμελητέος παράγοντας για να χαρακτηριστεί ως «δευτερεύον». Αυτό γιατί συνδέεται άμεσα τόσο με το βάθος εκφόρτισης, όσο και με τους κύκλους ζωής της μπαταρίας. Για παράδειγμα, στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες σε ένα συσσωρευτή μολύβδου-οξέος απελευθερώνονται θειικά υπολείμματα από τις αντιδράσεις με αποτέλεσμα να καταστρέφεται ο ηλεκτρολύτης και εν συνεχεία να μειώνεται το προσδόκιμο ζωής της μπαταρίας. Όπως γίνεται κατανοητό, αυτό συνδέεται άμεσα και με τον παράγοντα «γήρανση» που αναφέρεται σε απώλεια χωρητικότητας με την πάροδο του χρόνου. Όσον αφορά την αυτοεκφόρτιση δε, ο συσσωρευτής χάνει κάποια ποσά ενέργειας ακόμη και αν δεν είναι συνδεδεμένος σε φορτίο. Αυτά τα ποσά πλέον είναι αμελητέα για τα συστήματα μπαταριών που χρησιμοποιούνται στην αγορά.

Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται όπως είναι στο τεχνικό φυλλάδιο μιας μπαταρίας, η συμπεριφορά των ζωτικής σημασίας μεγεθών για την μπαταρία, που δεν είναι άλλα από το βάθος εκφόρτισης (Depth Of Discharge, DOD) και τους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισής της. Αυτά τα μεγέθη στο διάγραμμα αναφέρονται για θερμοκρασία 25°C. Σε περίπτωση που αλλάξει η θερμοκρασία είναι λογικό επακόλουθο να αλλάξει και η μορφή της καμπύλης.

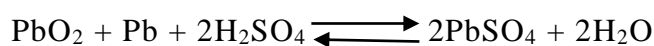


Σχήμα 2.4: Συμπεριφορά κύκλων μπαταρίας ανάλογα με το βάθος εκφόρτισης [22]

Τέλος, ένα άλλο στοιχείο που υπάρχει στα τεχνικά φυλλάδια των μπαταριών και συνήθως αμελείται, είναι ο ελάχιστος χρόνος αποφόρτισης της μπαταρίας C. Αυτός εκφράζει τις ώρες τις οποίες χρειάζεται μια μπαταρία προκειμένου να αποφορτίσει. Όσο πιο γρήγορα αποφορτίζει τόσο πιο μεγάλη είναι και η απώλεια χωρητικότητας σε συμπλήρωμα όσων αναφέρθηκαν στην ενότητα αυτή. Σε μονάδες παραγωγής επιλέγονται συσσωρευτές με μεγάλα C, βραχείς χρόνους αποφόρτισης δηλαδή.

2.4.1 Συσσωρευτές Μολύβδου-Οξέος

Η λειτουργία ενός συσσωρευτή μολύβδου-οξέος (Lead Acid) περιγράφεται από την ακόλουθη αντίδραση:



Όπου το πάνω βελάκι υποδηλώνει τη εκφόρτιση, ενώ το κάτω την φόρτιση της μπαταρίας.

Οι μπαταρίες αυτές είναι οι πιο διαδεδομένες στην αγορά. Αυτό διότι είναι πολύ ευέλικτες ως προς την χρήση τους (εξυπηρετούν από μερικά kW μέχρι πολύ μεγάλα φορτία MW) και οικονομικά ανταγωνιστικές (200-500€/kW περίπου). Επιπλέον συνδυάζουν αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης (έως 90% σήμερα) με αμελητέα ποσοστά αυτοεκφόρτισης (περίπου 1%). Από την άλλη έχουν σχετικά μικρό κύκλο ζωής (περίπου 500-2500 κύκλους), χαμηλή πυκνότητα ενέργειας και χρειάζονται συνεχή παρακολούθηση και συντήρηση. Τα τελευταία χρόνια έχει βελτιωθεί η τεχνολογία και

έχουν κατασκευαστεί και έως 3000 κύκλους μπαταρίες. Η τεχνολογία τους είναι μη φιλική προς το περιβάλλον.

Επιπρόσθετα, σε αυτήν την τεχνολογία είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην ανεβάζουν μεγάλες θερμοκρασίες εσωτερικά. Αυτό τις καταστρέφει πολύ γρήγορα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες πιο ανθεκτικές όπως οι λιθίου. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με αυτό αναφέρθηκαν στην αμέσως προηγούμενη ενότητα (2.4).

Αυτές οι μπαταρίες διακρίνονται σε κλειστού τύπου και ανοιχτού τύπου. Σε υβριδικές μονάδες μέσης και μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιούνται ανοιχτού τύπου λόγω του καλύτερου οικονομικού πακέτου. Επίσης, στις εφαρμογές αυτές επιλέγεται να είναι και βαθιάς εκφόρτισης για μεγαλύτερο προσδόκιμο ζωής. Οι κλειστού τύπου χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές όπως π.χ. στα αυτοκίνητα.



Εικόνα 2.7: Μπαταρίες μολύβδου-οξέος ανοιχτού τύπου βαθιάς εκφόρτισης για χρήση σε σύστημα ΑΠΕ

Πίνακας 2.9: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συσσωρευτών μολύβδου-οξέος

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Ευελιξία ως προς την χρήση τους σε μικρά, μεσαία και μεγάλα φορτία	Μικρός αριθμός κύκλων ζωής
Υψηλός βαθμός απόδοσης	Μεγάλη φθορά όταν λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες
Αρκετά φθηνές σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες	Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα
Ευρεία κυκλοφορία στην αγορά για κάλυψη κάθε ανάγκης	Μη φιλικές στο περιβάλλον
Πολύ διαδεδομένα συστήματα	Δεν υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας καθώς έχει φτάσει σε κορεσμό
Χαμηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης	

2.4.2 Συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου

Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου αποτελούν το αντίπαλο δέος των πλέον καθιερωμένων ως συμβατικές, μολύβδου-οξέος. Οι μπαταρίες αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις σφραγισμένες και αυτές με βαλβίδα εκτόνωσης. Οι σφραγισμένες είναι πολύ γνωστές διότι χρησιμοποιούνται σε καθημερινή βάση και είναι αυτές οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στο τηλεκοντρόλ της τηλεόρασης ή στο ρολόι του τοίχου. Έχουν και τη δυνατότητα επαναφόρτισης. Οι μπαταρίες με βαλβίδα εκτόνωσης είναι της ίδιας λογικής με τις σφραγισμένες, με την ειδοποιό διαφορά ότι υπάρχει μια ασφαλιστική εκτονωτική βαλβίδα που ανοίγει προκειμένου να απελευθερώνεται το αέριο λόγω υπερφόρτισης.



Εικόνα 2.8: Συσσωρευτής Νικελίου-Καδμίου σφραγισμένου τύπου



Εικόνα 2.9: Μπαταρία Νικελίου-Καδμίου με εκτονωτική βαλβίδα

Εκ πρώτης όψεως μπορεί να φαίνονται πιο ελκυστικές λόγω της μεγαλύτερης ειδικής ενέργειας (75Wh/Kg έναντι 35Wh/Kg κατ' εκτίμηση) και των κύκλων ζωής (2500 έναντι 500 κατ' εκτίμηση) που έχουν. Αν όμως μελετηθούν πλήρως όλες οι πτυχές και οι παράμετροι θα παρατηρηθεί ότι οι διαφορές αυτές, να μεν είναι αξιοσημείωτες, αλλά εν τέλει είναι εντελώς πλασματικές.

Αρχικά, λόγω της απόφασης της Ευρωπαϊκής ένωσης σχετικά με την επικινδυνότητα του καδμίου ως προς το περιβάλλον (2008), τα συστήματα αυτά γνώρισαν μεγάλη ύφεση. Επιπλέον έχουν τεράστιο κόστος για τα δεδομένα τους (1000€/kWh έναντι 300€/kWh του μολύβδου) γεγονός που τις υποβαθμίζει κατά πολύ. Ένας ακόμη

σημαντικός παράγοντας επίσης είναι οι μεγαλύτερες απώλειες αυτοεκφόρτισης που έχουν (5-20%/ μήνα έναντι 1% ανά μήνα του μολύβδου-οξέος).

Επιπλέον, τα στοιχεία αυτά έχουν μια περίεργη ιδιομορφία ως προς την συμπεριφορά τους με το δίκτυο. Αν δεν αποφορτιστούν πλήρως με το πέρας του κύκλου και την αρχή του επόμενου τείνουν να χάνουν χωρητικότητα. Αυτό το γεγονός τα βγάζει αμέσως από την κουβέντα σε περίπτωση που εξετάζεται μια λύση για ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής όπου οι παραγωγές αιολικής και ηλιακής ενέργειας είναι συνεχείς και ακανόνιστες.

Πίνακας 2.10: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα συσσωρευτών Νικελίου-Καδμίου

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Μεγάλος αριθμός κύκλων	Υψηλά ποσοστά αυτοεκφόρτισης
Μεγαλύτερη ειδική ενέργεια σε σύγκριση με τις μπαταρίες μολύβδου	Υψηλό ανοιγμένο κόστος ανά kWh
	Επικηρυγμένες από την Ευρωπαϊκή Ένωση για μόλυνση περιβάλλοντος
	Ιδιομορφία ως προς την συμπεριφορά με φόρτιση και εκφόρτιση στο δίκτυο

2.4.3 Συσσωρευτές Νατρίου-Θείου

Όσο περνούν τα χρόνια οι μπαταρίες νατρίου-θείου χαίρουν ολοένα και μεγαλύτερης εφαρμογής στη βιομηχανία. Αυτό είναι λογικότατο αν σκεφτεί κανείς ότι υπερτερούν σχεδόν σε όλα τα ειδικά τεχνικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις υπόλοιπες. Αναλυτικότερα, παρουσιάζουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα (150-240 kW/kg), αρκετά μεγάλο κύκλο φορτίσεων-εκφορτίσεων (2500+) και μεγάλη ενεργειακή απόδοση που αγγίζει περίπου το 90%. Επιπλέον, οι μπαταρίες αυτές έχουν πολύ χαμηλά κόστη συντήρησης και τεράστιο εύρος λειτουργίας που κυμαίνεται από μερικά kW έως και μια τάξη μεγέθους MW. Αυτό σημαίνει ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία συσσωρευτών μπορεί να χρησιμοποιείται και σε εφαρμογές ΑΠΕ από μικρής έως και μεγάλης κλίμακας. Όσον αφορά τη σχέση τους με το περιβάλλον, αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως ιδιαίτερα φιλική καθώς το αποτελούνται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από ανακυκλώσιμα υλικά.

Από την άλλη πλευρά όμως, οι παράγοντες που τις κάνουν να υστερούν αισθητά είναι αφενός το πολύ μεγάλο κόστος εγκατάστασης (περίπου 2000€/kW) και αφετέρου η ανάγκη διατήρησής τους σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 300°C) που αυξάνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας της.



Εικόνα 2.10: Μπαταρίες Νατρίου-Θείου

Πίνακας 2.11: Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συσσωρευτών Νατρίου-Θείου

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Υψηλή πυκνότητα ενέργειας	Υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης
Υψηλός βαθμός απόδοσης	Πολύ μεγάλα έξοδα λειτουργίας
Μεγάλη διάρκεια ζωής σε σχέση με τους υπόλοιπους συσσωρευτές	
Ευρύ πεδίο χρήσης (από μερικά kW μέχρι πολλά MW)	
Φίλικα προς το περιβάλλον	

2.4.4 Συσσωρευτές Ιόντων Λιθίου

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου εισήχθησαν στην αγορά το μακρινό 1991 από την Sony. Έκτοτε έχουν κυριαρχήσει σε διάφορες καθημερινές εφαρμογές που συνδέονται κυρίως με ηλεκτρονικά ήδη και αναπτύσσονται ολοένα και περισσότερο. Τα τελευταία χρόνια καταβάλλεται μια προσπάθεια προκειμένου οι συσσωρευτές αυτοί να γίνουν εφαρμόσιμοι τόσο στην μεταφορά όσο και στην σταθερή αποθήκευση. Η μπαταρία αυτή υπερτερεί σχεδόν σε όλες τις τεχνικές κατηγορίες σύγκρισης με τις υπόλοιπες μπαταρίες και αυτομάτως την κάνει μια άκρως ελκυστική λύση που υιοθετήθηκε μαζικά. Χρόνο με το χρόνο παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση της ζήτησης των μπαταριών αυτών λόγω και του υπερκαταναλωτισμού σε φορητά μέσα, ηλεκτρονικά είδη όπως κινητά, tablet, game consoles κ.λπ.

Η μπαταρία αυτή, δυστυχώς για την ανθρωπότητα, περιορίζεται αποκλειστικά και μόνο σε πολύ μικρές εφαρμογές για ισχύς της τάξης μερικών kW. Αυτό σημαίνει ότι δεν ενδείκνυται για εφαρμογές, όπως για παράδειγμα, η αποθήκευση ενέργειας σε ένα αιολικό πάρκο αρκετών MWh. Επίσης το αρχικό κόστος είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες συσσωρευτών.



Εικόνα 2.11: Μπαταρία Ιόντων-Λιθίου

Πίνακας 2.12: Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συσσωρευτών Ιόντων-Λιθίου

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Χαμηλή αυτοεκφόρτιση	Υψηλό αρχικό κόστος
Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα	Διαρροή αερίων κατά την υπερφόρτωση
Μεγάλος αριθμός κύκλων	Περιορίζονται για εφαρμογές μικρής ισχύος
Φορτίζουν γρηγορότερα σε σχέση με τις υπόλοιπες	Φθορά στη χημική σύσταση της μπαταρίας στις πάρα πολύ υψηλές θερμοκρασίες
Πιο ανθεκτικές στις υψηλές θερμοκρασίες σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες	
Μηδαμινά κόστη συντήρησης	
Προοπτική εξέλιξης της τεχνολογίας στο μέλλον	

2.5 Συστήματα αποθήκευσης αξιοποιώντας θερμική ενέργεια

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μας επιτρέπουν να διατηρούμε προσωρινά την ενέργεια που παράγεται με τη μορφή θερμότητας ή κρύου για χρήση σε διαφορετική χρονική στιγμή.

Αναλυτικότερα, μπορεί να χρησιμοποιείται ένας λέβητας ο οποίος παράγει θερμική ισχύς για την φόρτιση του συστήματος. Έπειτα η θερμότητα αυτή αποθηκεύεται σε ειδικά πυρίμαχα υλικά ή τηγμένο άλας. Στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης η θερμότητα αυτή εξάγεται από τον χώρο που είχε αποθηκευτεί και παράγεται ατμός ο οποίος στη συνέχεια κινεί έναν ατμοστρόβιλο με απώτερο σκοπό την παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος για το δίκτυο.

Αναλυτικότερα, στις σύγχρονες ηλιακές θερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, οι οποίες παράγουν όλη την ενέργειά τους όταν ο ήλιος λάμπει κατά τη διάρκεια της ημέρας, η περίσσεια ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια της αιχμής του ηλιακού φωτός αποθηκεύεται συχνά σε αυτές τις εγκαταστάσεις με τη μορφή λιωμένου αλατιού ή άλλων υλικών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί το βράδυ για να δημιουργήσει ατμό για

να οδηγήσει ένα στρόβιλο στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Εναλλακτικά, μια εγκατάσταση μπορεί να χρησιμοποιήσει «off-peak» ηλεκτρική ενέργεια (ώρες χαμηλού φορτίου) για την παραγωγή πάγου, η οποία μπορεί να ενσωματωθεί στο σύστημα ψύξης του κτιρίου για να μειώσει τη ζήτηση για ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Τα συστήματα αυτά είναι συστήματα μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας και επί του παρόντος βρίσκονται υπό μελέτη. Είναι σχετικά νέα και καθόλου ώριμα και υπάρχει ενδιαφέρον γύρω από την μελέτη τους. Μέσα στα επόμενα χρόνια ίσως μεγαλώσει κατά πολύ το πεδίο χρήσης τους. Αναφέρονται προφανώς μόνο σε μεγάλες τάξεις μεγεθών τύπου MW διότι μόνο σε αυτές μπορεί να είναι οικονομικά ελκυστικά. Αν συνυπολογιστεί και η δυνατότητα αποθήκευσης σε στερεά μορφή, δίνει ελπίδες ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές αντί για CAES τα οποία λόγω των γεωγραφικών απαιτήσεων είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν. Προκειμένου να αναπτυχθούν περεταίρω και να γίνουν αποδεκτά περισσότερο θα πρέπει να μεγιστοποιήσουν επίσης τη θερμο-οικονομική τους συμπεριφορά.

2.6 Σύγκριση και επιλογή βέλτιστου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

Στις μέρες μας έχουν δοκιμαστεί στην πράξη σχεδόν όλα τα συστήματα αποθήκευσης που έχουν σχεδιαστεί. Κάποια σίγουρα έχουν ξεχωρίσει λόγω των ιδιαίτερων τεχνικών τους χαρακτηριστικών, κάποια άλλα έχουν μείνει πίσω λόγω της ξεπερασμένης τεχνολογίας που μπορεί να χρησιμοποιούν ενώ άλλα μπορεί να μην καλύπτουν τα περιβαλλοντικά συμβόλαια της εποχής.

Το ενδιαφέρον με τα συστήματα αυτά είναι ότι παρόλο που συμπεριλαμβάνουν και πρωτοποριακές νέες πολύ υποσχόμενες τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, δεν τυχάνει να χαίρουν ένα ευρύ φάσμα χρήσης. Επίσης κάποιες τεχνολογίες όπως π.χ. τα CAES λόγω κάποιων περιορισμών ενέργειας δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μικρά φορτία.

Υπάρχουν κάποια κριτήρια λοιπόν που ακολουθούνται και συγκρίνουν τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης ως προς την χρήση τους και τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους (κόστος, ενεργειακή απόδοση, γεωμετρία), με απώτερο σκοπό την βέλτιστη επιλογή συστήματος σε κάθε περίπτωση.

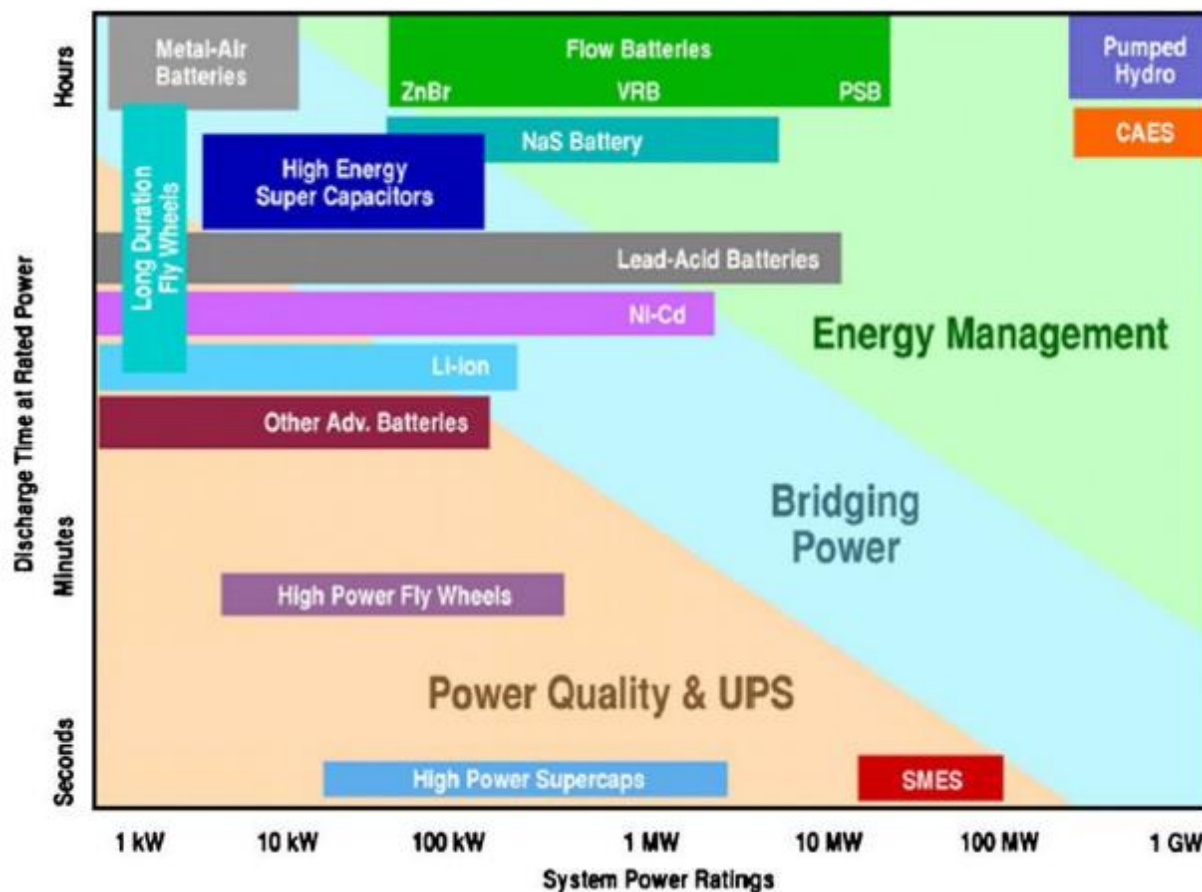
Δεδομένου ότι η συγκεκριμένη εργασία αναφέρεται σε ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας ονομαστικής ισχύος της τάξης των 9 kW, γίνεται μια σύγκριση με βάση όλα τα κριτήρια που θα αναλυθούν επαρκώς στη συνέχεια και στο τέλος επιλέγεται η πιο συμφέρουσα από όλες τις απόψεις λύση.

2.6.1 Εύρος λειτουργίας

Το πρώτο ερώτημα που υποβάλλει κανείς όταν καλείται να επιλέξει σύστημα αποθήκευσης έχει να κάνει με πληροφορίες σχετικά με το φορτίο που θα πρέπει να έχει

τη δυνατότητα να αποθηκεύει. Όπως είναι λογικό υπάρχει ένα εύρος που καλύπτει η κάθε τεχνολογία αποθήκευσης καθώς δεν είναι όλες για όλα τα φορτία.

Στο παρακάτω σχήμα κατανέμονται οι τεχνολογίες με βάση τις ανάγκες σε φορτίο που είναι δυνατόν να καλύψουν.



Σχήμα 2.5: Κατανομή συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας ανάλογα με το εύρος λειτουργίας τους [13]

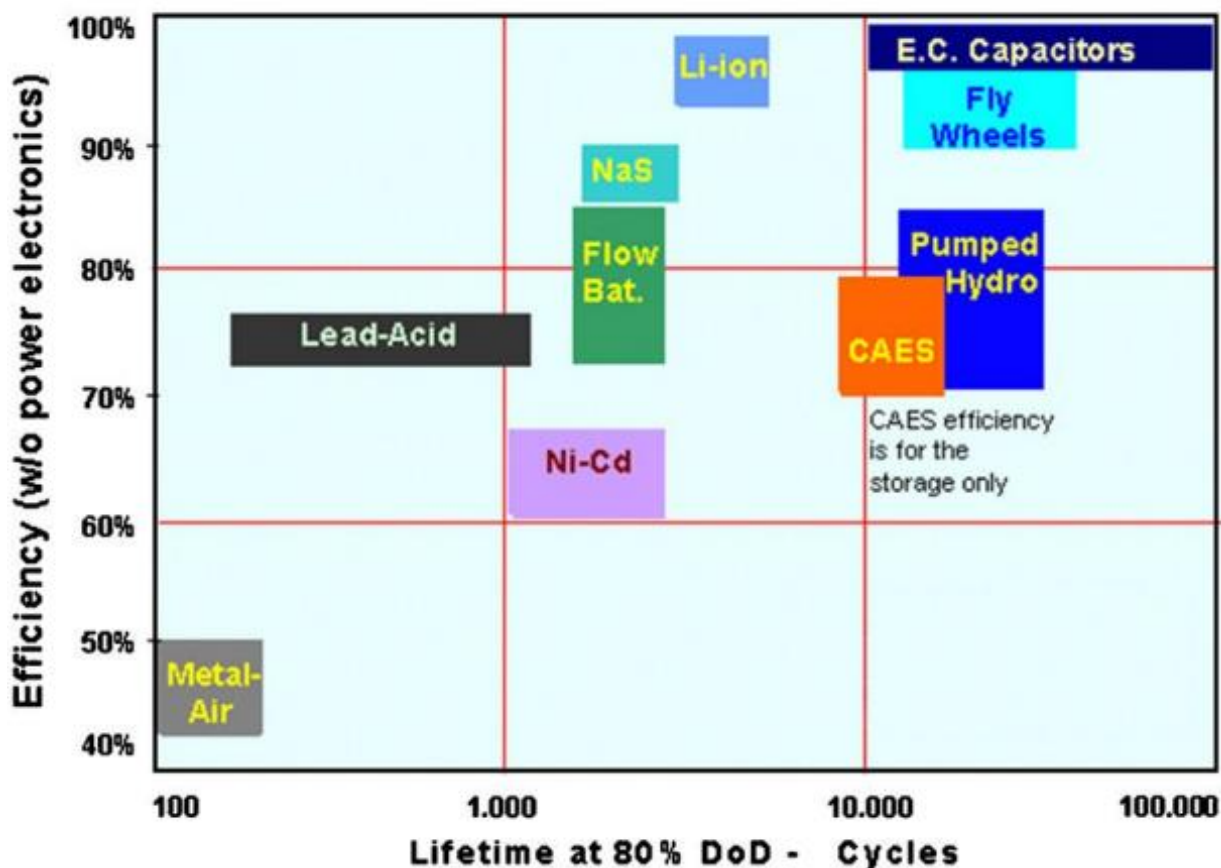
Υπάρχουν τρεις διαφορετικές χρήσεις που εξυπηρετούν οι τεχνολογίες των αποθηκευτικών μέσων. Αυτά τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για να βελτιώνουν την ποιότητα του δικτύου και είναι τα μικρότερης κλίμακας, αυτά που λειτουργούν σαν γέφυρα μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης προκειμένου να εξασφαλίζεται ενεργειακή επάρκεια και είναι τα μεσαίας κλίμακας και τέλος αυτά τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται μαζικά σε μεγάλες κλίμακες παραγωγής σαν τεράστιες αποθήκες ενέργειας. Τέτοια συστήματα είναι τα μικρά υδροηλεκτρικά και τα CAES και έχουν «ξεφύγει» στο εύρος λειτουργίας σε πολλά GW λόγω της πολύ αποδοτικής μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Στην περιοχή που υπάρχει ενδιαφέρον για τις ανάγκες της εργασίας, δηλαδή για ονομαστική ισχύς 9 kW, παρατηρείται ότι υπάρχουν πολλές διαθέσιμες τεχνολογίες

αποθήκευσης που εφαρμόζονται. Ωστόσο, οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σαν γέφυρες μεταξύ παραγωγής και ζήτησης είναι κυρίως οι μολύβδου-οξέος, οι νικελίου-καδμίου και οι υπερπυκνωτές.

2.6.2 Αποτύπωμα ενεργειακής απόδοσης κατά τη διάρκεια ζωής των συστημάτων αποθήκευσης

Ένα πολύ σημαντικό κεφάλαιο στην αξιολόγηση των συστημάτων αποθήκευσης είναι ο βαθμός της ενεργειακή απόδοσης που έχουν. Αυτό πρακτικά αποτυπώνει την ικανότητα τους να αποδεσμεύουν ποσά ενέργειας. Πιο αναλυτικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός απόδοσής τους τόσο μεγαλύτερο είναι και το κλάσμα της ενέργειας που μεταφέρθηκε ή αντίστροφα όσο πιο μικρός είναι τόσο μεγαλύτερο είναι το κλάσμα ενέργειας που χάθηκε κατά την μεταφορά.

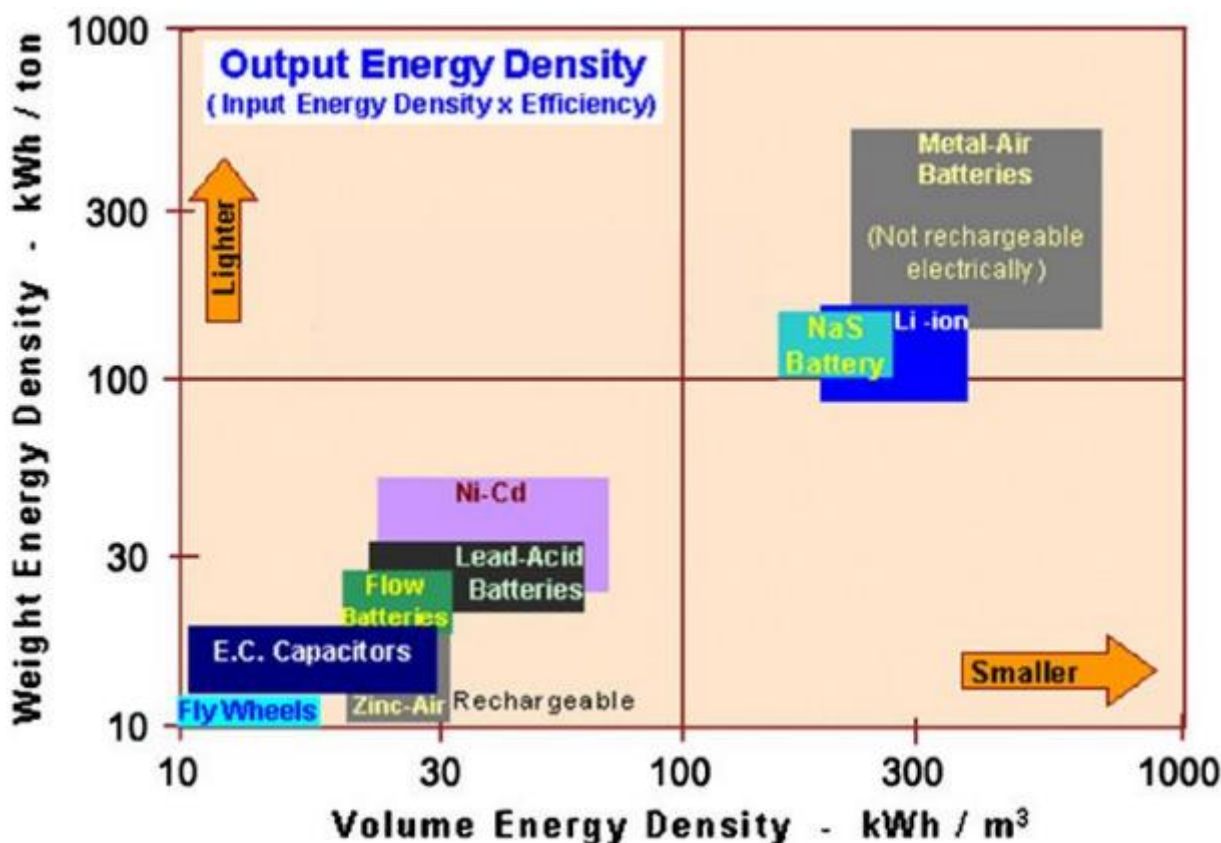


Σχήμα 2.6: Συμπεριφορά βαθμού απόδοσης ανάλογα με την τεχνολογία και τους κύκλους ζωής των συστημάτων αποθήκευσης βαθιάς εκφόρτισης (80%) [13]

Από το σχήμα 2.6 παρατηρείται ότι το σύστημα συσσωρευτών με τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης είναι οι υπερπυκνωτές. Επίσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι πλέον η τεχνολογία μολύβδου-οξέος έχει βαθμό απόδοσης περίπου 80-90% με βοήθεια ηλεκτρονικών ισχύος.

2.6.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Πέρα από τις ανάγκες για ισχύ, επιλογή βέλτιστης τεχνολογίας όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης κ.λπ. είναι πολύ σημαντικό να ικανοποιούνται και κάποια χωροταξικά κριτήρια. Για παράδειγμα, ένα smartphone προκειμένου να είναι μικρό και να χωράει στην τσέπη του παντελονιού θα πρέπει να έχει πολύ μικρή μπαταρία αλλά εξίσου ικανοποιητική απόδοση. Η εφαρμογή αυτή και μόνο, αποτυπώνει την τεράστια σημασία του αποθηκευτικού χώρου σε συνδυασμό πάντα με την παραγωγή ενέργειας και περιγράφεται για τις διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης στο σχήμα 2.7.

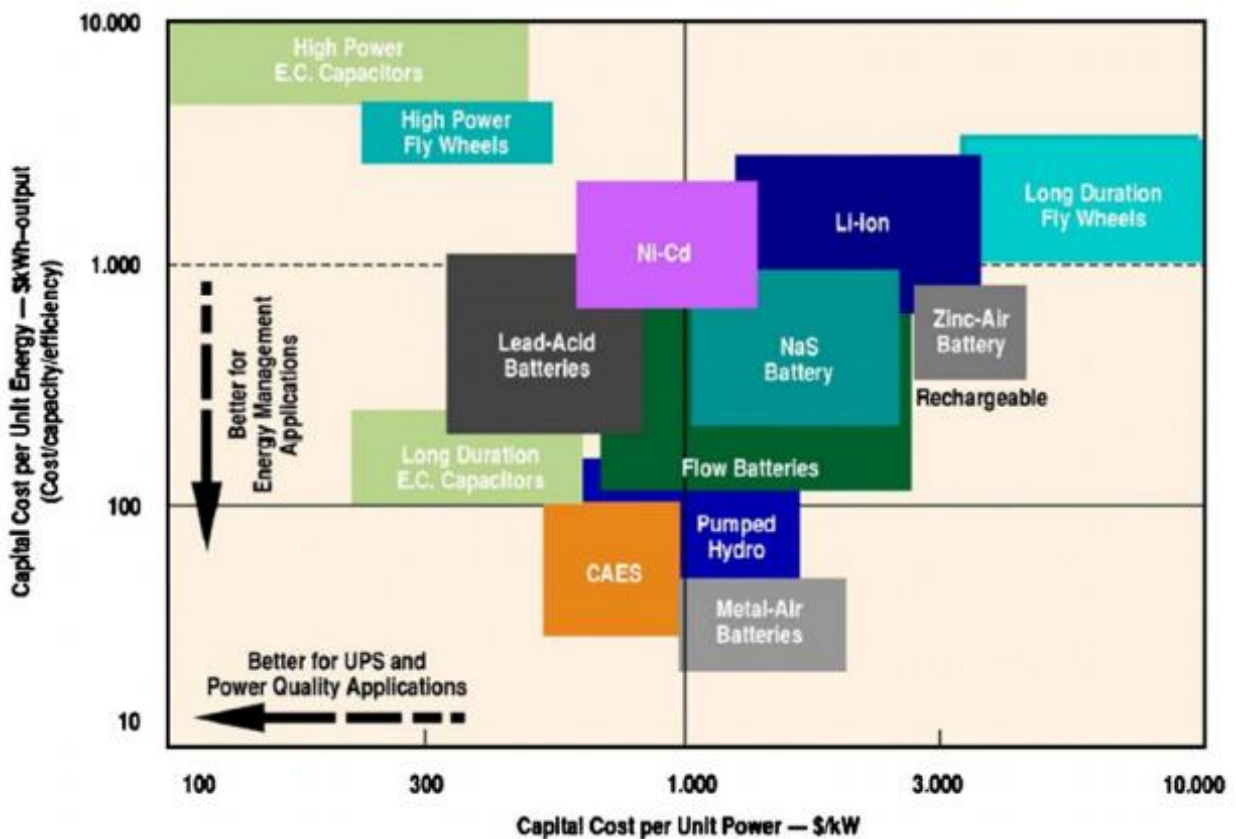


Σχήμα 2.7: Σύγκριση μεγέθους αποθηκευτικού συστήματος-αποθηκευτικής ισχύος [13]

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 2.7, ο πιο ανταγωνιστικός συνδυασμός μεγέθους αποθηκευτικής ισχύος για επαναφορτιζόμενη μπαταρία σήμερα δεν είναι άλλος από τις ιόντων λιθίου, που είναι άλλωστε και αυτές που χρήζουν της ευρείας χρήσης τους από την βιομηχανία (laptop, κινητά, tablet κ.λπ.). Εξασφαλίζουν λοιπόν την μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα στον μικρότερο δυνατό χώρο. Οι μολύβδου-οξέος και νικελίου-καδμίου είναι πιο ελαφριές και μικρότερες σε μέγεθος από τους υπερπυκνωτές.

2.6.4 Αρχικό κόστος επένδυσης & κόστος ανά κύκλο

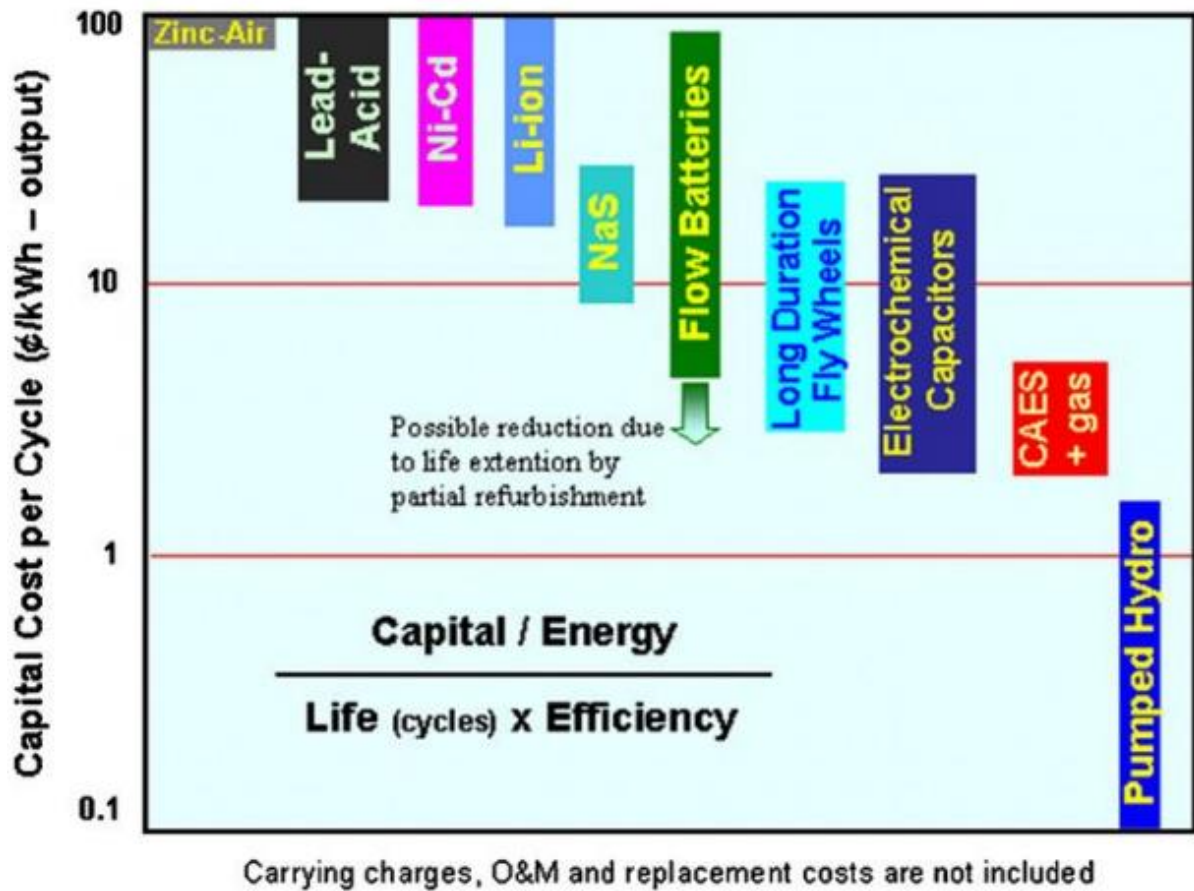
Ο οικονομικός παράγοντας ανάκαθεν έχει τον πρώτο και τον τελευταίο ρόλο σε επενδυτικές αποφάσεις. Έτσι και σε εφαρμογές αποθήκευσης εξετάζεται το κόστος αρχικής επένδυσης και το κόστος ανά κύκλο λειτουργίας. Έχοντας λάβει υπόψη λοιπόν την τάξη της αποθηκευτικής ισχύος και τα συστήματα αποθήκευσης τα οποία ενδείκνυται γι' αυτήν, εξετάζεται ποια από αυτά είναι οικονομικά συμφέρον να χρησιμοποιηθούν ή ποια είναι κοστοβόρα για να αποκλειστούν τελείως από τις επιλογές.



Σχήμα 2.8: Κόστος παραγόμενης ενέργειας σε σύγκριση με το κόστος εγκατεστημένης ισχύος [13]

Κρίνοντας από το σχήμα 2.8 παρατηρούμε ότι τα στοιχεία που εμφανίζουν μικρότερα κόστη εγκατάστασης, χρησιμοποιούνται καλύτερα για την βελτίωση της ποιότητας του δικτύου. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι τα συστήματα με μικρότερα κόστη παραγόμενης ενέργειας είναι κατάλληλα για εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας μεγάλης ενεργειακής κλίμακας. Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος είναι πιο φθηνοί και καλύτεροι για ενεργειακή διαχείριση σε σχέση με τους υπόλοιπους της κλίμακάς τους.

Συμπληρωματικά, ένα καθαρά οικονομικό κριτήριο το οποίο βοηθά αρκετά στην σύγκριση είναι το κόστος παραγωγής ενέργειας ανά κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης.



Σχήμα 2.9: Κόστος για κάθε κύκλο ζωής του συστήματος αποθήκευσης [13]

Με βάση το σχήμα 2.9 παρατηρείται ότι ο παράγοντας-κλειδί που συμβάλλει στο κόστος είναι οι κύκλοι ζωής του αποθηκευτικού συστήματος. Στη λογική αυτή αντικατοπτρίζεται η βασική αδυναμία των ηλεκτροχημικών αποθηκευτικών τεχνικών σε σύγκριση με τις μηχανικές. Αναλυτικότερα, γίνεται απόλυτα κατανοητή η επίπτωση του μικρού χρόνου ζωής τους, που είναι μόλις μερικά έτη, στο κόστος της εγκατάστασης σε σύγκριση π.χ. με τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά που έχουν διάρκεια ζωής περίπου 80 έτη.

2.6.5 Συμπεράσματα – επιλογή βέλτιστης λύσης για τα δεδομένα της διπλωματικής

Προκειμένου να γίνει η κατάλληλη επιλογή συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε ένα μοντέλο παραγωγής θα πρέπει πρώτα να γίνουν κατανοητά τα μεγέθη παραγωγής και ζήτησης στα οποία γίνεται αναφορά. Για παράδειγμα, όταν θα πρέπει να καλυφθούν οι ανάγκες μιας ολόκληρης μεγαλόπολης πολλών MWh θα πρέπει να αξιοποιηθεί ένα ανάλογο σύστημα το οποίο είναι ενδεδειγμένο για τεράστιες καταναλώσεις. Τέτοιο π.χ. θα μπορούσε να είναι ένα σύστημα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα. Αντιθέτως, για πολύ μικρά φορτία (π.χ. smartphones) ιδανική επιλογή είναι η μπαταρία ιόντων λιθίου

καθώς προσφέρει τον καλύτερο συνδυασμό γεωμετρίας, κόστους και κύκλων ζωής. Στην παρούσα διπλωματική όμως εξετάζεται η κάλυψη αναγκών σε ενέργεια ενός μικρού υβριδικού συστήματος ΑΠΕ. Αυτό θα μπορούσε να ήταν π.χ. ένα εξοχικό σπίτι. Οι ανάγκες ενός τέτοιου σπιτιού στην Ελλάδα είναι μερικές χιλιάδες kWh μέσα σε ένα έτος και χαρακτηρίζονται ως μικρομεσαίας κλίμακας.

Σε τέτοιες εφαρμογές έχει επικρατήσει η χρήση των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος βαθιάς εκφόρτισης. Παρόλο που υστερούν στα περισσότερα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με άλλες μπαταρίες(π.χ. νατρίου-θείου), αποτελούν τον καλύτερο συνδυασμό κόστους-χρόνου ζωής σε μια επένδυση ΑΠΕ. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι είναι σχετικά φθηνοί στην αγορά και έχουν σχεδόν μηδαμινά κόστη συντήρησης σε σύγκριση με τις άλλες τεχνολογίες, παρόλο που τα ειδικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους είναι σαφώς πιο μέτρια.

Όσον αφορά τα συστήματα με μεγαλύτερη ποιότητα ισχύος (αποδιδόμενη ενέργεια, μέγιστος αριθμός κύκλων) κυριαρχούν οι σφόνδυλοι και οι υπερπυκνωτές.

Συμπερασματικά, και, έχοντας εξετάσει αμερόληπτα όλες τις διαθέσιμες επιλογές που υπάρχουν στην αγορά και λαμβάνοντας υπόψη τα όσα περιγράφηκαν παραπάνω, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος καλύπτουν τις προϋποθέσεις όλων των κατηγοριών και αποτελούν το πιο ελκυστικό από όλες τις απόψεις σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για ένα μικρό υβριδικό σύστημα ΑΠΕ. Στην παρούσα εφαρμογή επιλέγονται οι μολύβδου-οξέος ανοιχτού τύπου βαθιάς εκφόρτισης διότι είναι πιο φθηνοί από τους κλειστού. Ωστόσο, παρόλο που διαχρονικά αποτελούν την καλύτερη επιλογή λόγω του δίπτυχου κόστους-απόδοση, θα πρέπει να βελτιωθεί αρκετά το προσδόκιμο ζωής τους προκειμένου οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να χαίρουν μεγαλύτερης εφαρμογής στη βιομηχανία παραγωγής.

3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην βελτιστοποίηση του χρόνου ζωής του συστήματος αποθήκευσης, πάντα στα πλαίσια της απαίτησης για οικονομική βιωσιμότητα. Οι μπαταρίες είναι το πιο σημαντικό κομμάτι ενός μικρού υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας διότι είναι αυτό το στοιχείο το οποίο αφήνει σε αυτό τεράστιο οικονομικό αποτύπωμα. Δεδομένου λοιπόν ότι ο οικονομικός παράγοντας σε μια επένδυση είναι η σημαντικότερη μεταβλητή θα πρέπει ο καταναλωτής να πειστεί εμπράκτως ότι μια τέτοια εφαρμογή θα είναι ελκυστικότερη από τις συμβατικές μεθόδους. Πρέπει λοιπόν να γίνει μια σάρωση στην αγορά μπαταριών και να γίνει επιλογή στη βάση της ελαχιστοποίησης κόστους. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σχεδιαστεί αλγόριθμος ο οποίος θα δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να υπολογίζει χρόνους ζωής συσσωρευτών. Τέλος, μέσω του προγράμματος τεχνικοοικονομικής αξιολόγησης που θα παρουσιαστεί μετέπειτα και σε συνδυασμό με το προαναφερθέν πρόγραμμα, ο επενδυτής θα μπορεί να συγκρίνει αν η τυχόν υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης, που έχει ως στόχο την μείωση του βάθους εκφόρτισης, είναι εν τέλει συμφέρουσα γι' αυτόν ή όχι και ποια θα μπορούσε να είναι η βέλτιστη χωρητικότητα.

3.1 Υπολογισμός χρόνου ζωής συστήματος αποθήκευσης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για ένα μικρό υβριδικό σύστημα ο υπολογισμός του χρόνου ζωής της μπαταρίας είναι υψίστης σημασίας. Ωστόσο αυτό είναι ένα πολύπλοκο εγχείρημα λόγω της εξάρτησης από πειραματικά δεδομένα.

Για την εύρεση του χρόνου ζωής της μπαταρίας υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες μοντέλων. Ο ένας βασίζεται στην συνολική επίδοση της μπαταρίας κατά τη χρήση της, ενώ ο άλλος βασίζεται στον υπολογισμό των κύκλων φόρτισης εκφόρτισης. Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία, οι τιμές της επίδοσης από την χρήση της μπαταρίας προσομοιώνονται με βάση κάποιες παραμέτρους απόδοσης. Η λογική είναι ότι όταν η τιμή μιας παραμέτρου πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή, τελειώνει ο χρόνος ζωής της μπαταρίας και διακόπτεται η προσομοίωση. Αυτές, ταξινομούνται σε τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες.

- Τα ηλεκτροχημικά μοντέλα, που χρειάζονται εκτεταμένη ανάλυση σχετικά με τις χημικές και φυσικές αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν εντός της μπαταρίας. Αυτά είναι τα πιο ακριβή μοντέλα υπολογισμού της δυναμικής μεταβολής της κατάστασης υγείας (State Of Health, SOH) και φόρτισης (State Of Charge, SOC) των μπαταριών, ωστόσο, λόγω της έλλειψης λεπτομερών πληροφοριών όπως για παράδειγμα η συγκέντρωση ιόντων λιθίου, συντελεστών διάχυσης και ιοντικής αγωγιμότητας, μειώνεται σημαντικά η εφαρμογή των μοντέλων αυτών ιδιαίτερα όταν συγκρίνονται και διαφορετικοί τύποι μπαταριών.
- Το Ισοδύναμο Μοντέλο Ηλεκτρικού Κυκλώματος (Equivalent Electrical Circuit Model) αντιπροσωπεύει την μπαταρία ως ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα που

περιλαμβάνει ηλεκτρικά στοιχεία όπως πυκνωτές, αντιστάσεις, τάση και πηγές ρεύματος. Αυτά τα είδη μοντέλων μπορούν επίσης να περιλαμβάνουν τις θερμικές τάσεις που σχετίζονται με τη γρήγορη φόρτιση για την ανάπτυξη βέλτιστων προφίλ φόρτισης.

- Τα Αναλυτικά Μοντέλα με Εμπειρική Προσαρμογή Δεδομένων, κατασκευάζονται με ανάκτηση εμπειρικών δεδομένων που λαμβάνονται μέσω πειραμάτων. Έχουν ως θεμέλιο την επεξεργασία και αξιολόγηση του ενεργειακού αποτυπώματος της μπαταρίας έπειτα από πειραματική χρήση και την μετέπειτα εφαρμογή της λογικής αυτής για σύγκριση διαφόρων μπαταριών.
- Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks, ANN), όπου επιτρέπουν τη δημιουργία μεταξύ των εξόδων του συστήματος και των συνθηκών λειτουργίας εισόδου, μιλώντας για ένα αρκετά μεγάλο σύνολο δεδομένων.

Τα μοντέλα που περιεγράφηκαν παραπάνω και παρακολουθούν την απόδοση της μπαταρίας (performance based) βασίζονται σε πειραματικές μεθόδους που μετρούν την φθορά της μπαταρίας όσο περνάει ο χρόνος, ή σε ημι-εμπειρικές προσεγγίσεις που αντιπροσωπεύουν τους μηχανισμούς γήρανσης της μπαταρίας χρησιμοποιώντας κάποιες συναρτήσεις. Το μεγαλύτερο πρόβλημα για τα μοντέλα αυτά είναι ότι σχεδιάζονται για συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και για συγκεκριμένους τύπους μπαταριών. Είναι κατανοητό λοιπόν ότι δεν υπάρχει μεγάλη ευελιξία και επίσης εγείρεται το ερώτημα κατά πόσο ακριβή είναι αυτά τα συστήματα ως προς τα αποτελέσματα που παράγουν.

Σε αντίθεση με τα μοντέλα που βασίζονται στην επίδοση των μπαταριών με το χρόνο, αυτά της μέτρησης κύκλων (cycle-counting) μπορούν και προσδιορίζουν δυναμικά την απώλεια χωρητικότητας τους και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αποτύπωση της υγείας της μπαταρίας κάθε στιγμή και το αποτέλεσμα είναι μακράν πιο ακριβές από τις προηγούμενες μεθόδους. Είναι ευρέως γνωστό άλλωστε ότι σε πειράματα που έχουν γίνει κατά το παρελθόν ότι είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος υπολογισμού χρόνου ζωής. Το πιο γνωστό παράδειγμα χρήσης του είναι στα έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smartphones) όπου ο χρήστης μπορεί να βλέπει την υγεία της μπαταρίας του κινητού του. Αυτά τα μοντέλα βασίζονται κυρίως στα δεδομένα που παρέχονται από τους κατασκευαστές, υποθέτοντας ότι η μπαταρία μπορεί επιτυγχάνει μια συνολική απόδοση σε όλη τη διάρκεια της ζωής της υπό ορισμένη συγκεκριμένοι παράγοντες καταπόνησης (stress factors) όπως βάθος εκφόρτισης και θερμοκρασία. Ο κανόνας Palmgren-Miner είναι ένα από τα πιο συνηθισμένα παραδείγματα που αντιπροσωπεύουν την κατηγορία των μοντέλων αυτών.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας ως προς την ανθεκτικότητα και η μακροημέρευση μιας μπαταρίας πρακτικά είναι η τεχνολογία της, δηλαδή η χημική της σύσταση. Δύο ίδιες σε ονομαστική τιμή, τύπο μπαταρίες διαφορετικών εταιριών, με όλα τα χαρακτηριστικά ίδια, θα διαφέρουν ενδεχομένως σε χρόνο ζωής λόγω της διαφορετικής τεχνολογίας τους ποιοτικά. Αυτό στην παρούσα εργασία δεν εξετάζεται καθώς είναι τελείως

εμπειρικό-ποιοτικό, αντιθέτως δίνεται έμφαση μόνο στο ενεργειακό αποτύπωμά της και στην συνολική «καταπόνησή» της μέσα από την λειτουργία της. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται σύγκριση των μοντέλων που βασίζονται στην επίδοση και αυτών που μετρούν κύκλους φόρτισης- εκφόρτισης.

Πίνακας 3.1: Σύγκριση των μοντέλων που βασίζονται στην συνολική επίδοση κατά την λειτουργία με αυτά που βασίζονται στην μέτρηση κύκλων στα πλαίσια του υπολογισμού χρόνου ζωής μπαταρίας [23]

Τύπος μοντέλου	Μοντέλο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Βασισμένο στην επίδοση της μπαταρίας από τη χρήση	Ηλεκτροχημικό	Πολύ μεγάλη ακρίβεια	Πολύπλοκα, πολύ χρονοβόρα
-	Ισοδύναμο μοντέλο ηλεκτρικού κυκλώματος	Καλή πρόγνωση της δυναμικής συμπεριφοράς της μπαταρίας	Η ακρίβεια εξαρτάται από τα πειραματικά δεδομένα, δεν είναι κατάλληλο για πρόγνωση χρόνου ζωής σε αυτή τη μορφή
-	Αναλυτικό μοντέλο με εμπειρική προσαρμογή δεδομένων	Διευκολύνει την προσομοίωση του μοντέλου λόγω των αναλυτικών συναρτήσεων, πολύ καλή ακρίβεια	Η επίδραση διάφορων παραγόντων καταπόνησης πρέπει να συνδυαστεί με τα πειραματικά δεδομένα, χρειάζεται μεγάλος αριθμός δεδομένων
-	Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	Ικανοποιητική ακρίβεια και σε γρήγορο χρονικό διάστημα, δε χρειάζεται γνώση των μηχανισμών της μπαταρίας	Η επαρκής κατάρτιση ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί τεράστιο όγκο δεδομένων
Βασισμένο στην μέτρηση κύκλων	Palmgren-Miner	Η απόκλιση από τις τυπικές συνθήκες λειτουργίας συλλαμβάνεται καλά, απλή εφαρμογή	Δεν είναι εμπειρικό, βασίζεται σε εμπειρικά δεδομένα

Στην συνέχεια θα σχεδιαστεί αναλυτικά μια μεθοδολογία υπολογισμού του χρόνου ζωής μπαταριών που βασίζεται σε πρακτικές μεθόδους υπολογισμού καίριων μεγεθών για την μπαταρία, για τα οποία θα γίνει αναφορά στο επόμενο κεφάλαιο, μετρώντας φυσικά και κύκλους προκειμένου να αποτυπωθεί η πραγματική φθορά της, λόγω ενεργειακής ανταλλαγής, και κυρίως θα μεταβάλλει δυναμικά αυτά τα κρίσιμα μεγέθη ανάλογα με την συμπεριφορά του προφίλ κατανάλωσης και ζήτησης του εκάστοτε καταναλωτή.

3.1.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών

Πολύ μεγάλη σημασία για την μελέτη αυτή καταλαμβάνουν οι έννοιες Depth Of Discharge (DOD) και State Of Charge (SOC) που είναι το βάθος εκφόρτισης και η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας αντίστοιχα. Το DOD είναι το βάθος στο οποίο κατεβαίνει η στάθμη της μπαταρίας κατά την χρήση της ενώ το SOC υποδηλώνει την κατάσταση φόρτισης, και τα δύο σαν κλάσμα της συνολικής χωρητικότητας. Όπως γίνεται αντιληπτό λοιπόν, τα δύο αυτά μεγέθη λειτουργούν συμπληρωματικά το ένα με το άλλο. Αναλυτικότερα, αν η κατάσταση φόρτισης είναι 60%, το βάθος εκφόρτισης είναι 40%. Το DOD μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη συμπεριφορά του ρεύματος εκφόρτισης με βάση την παρακάτω εξίσωση.

$$DOD = (\int_{t_i}^{t_f} I_{\text{discharge}} \cdot dt) / C_i \quad (3.1)$$

όπου t_f είναι ο χρόνος κατά την διαδικασία εκφόρτισης της μπαταρίας, t_i είναι η αρχική στιγμή, $I_{\text{discharge}}$ είναι το ρεύμα και C_i είναι η αρχική χωρητικότητα της μπαταρίας.

Άλλα μεγέθη που έχουν τεράστια σημασία στη μελέτη αυτή είναι ο κύκλος ζωής (Cycle life) και η κατάσταση υγείας (State of Health, SOH). Ως κύκλος ζωής της μπαταρίας μπορεί να χαρακτηριστεί ο αριθμός των κύκλων φορτίσεων-εκφορτίσεων που μπορεί να υποστεί διατηρώντας ένα συγκεκριμένο ποσοστό της αρχικής χωρητικότητας, μετά το οποίο η μπαταρία φτάνει το τέλος της ζωής της. Σαν κατάσταση υγείας (SOH) ονομάζεται το κλάσμα της ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας που είναι πραγματικά διαθέσιμη για τη διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης. Όσο φθείρεται η μπαταρία το SOH πέφτει από το 100% που είναι η αρχική τιμή. Όταν η τιμή του φτάσει το 80% τότε η μπαταρία φτάνει στο τέλος της ζωής της.

Επίσης μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι το ενεργό SOC/DOD, όπου αναφέρεται στην κατάσταση φόρτισης και στο βάθος εκφόρτισης την ώρα που η μπαταρία είναι σε χρήση. Η σημασία γύρω από το εγχείρημα είναι να βρεθούν τα ακριβή σημεία που συμβάλλουν στην καταπόνηση της μπαταρίας.

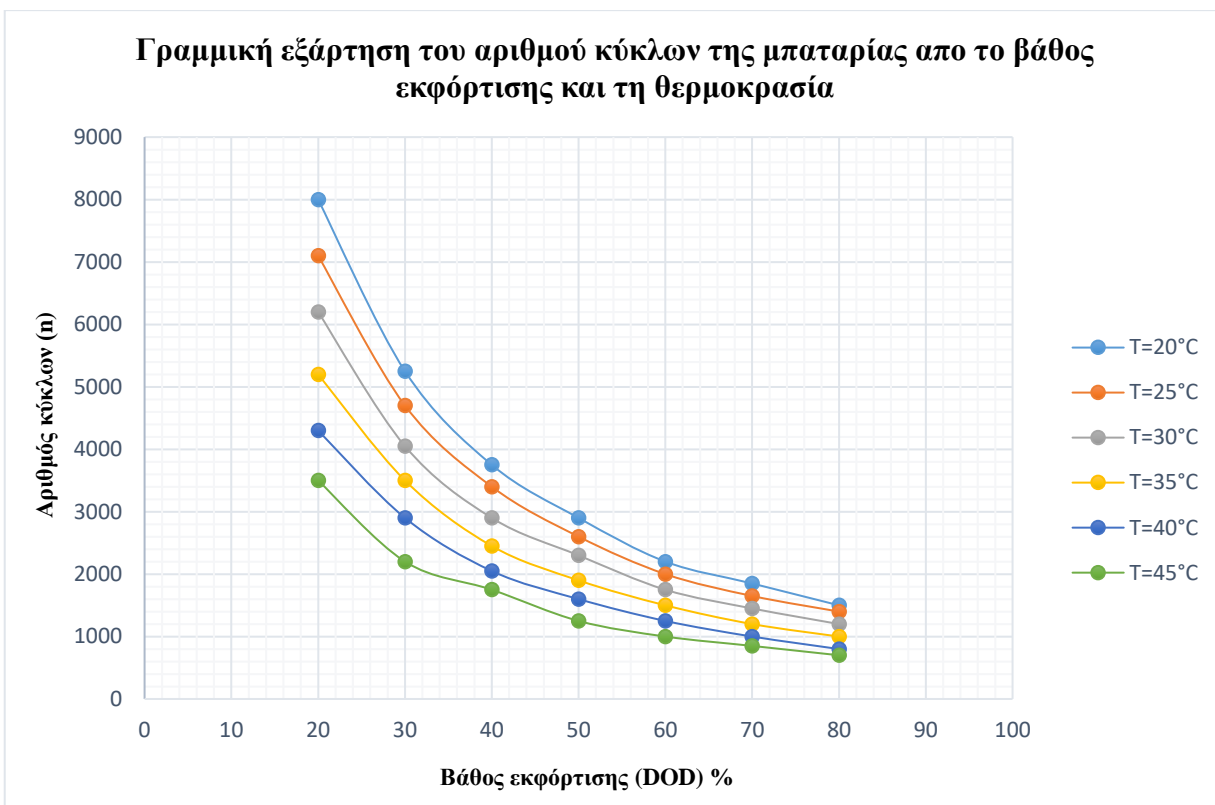
3.1.2 Λόγοι καταπόνησης συσσωρευτών

Οι μπαταρίες κατά την αποθήκευσή τους έχουν το χαρακτηριστικό ότι χάνουν χωρητικότητα επειδή λαμβάνουν χώρα συγκεκριμένοι χημικοί μηχανισμοί. Αυτοί οι μηχανισμοί έχουν να κάνουν με την περιορισμένη θερμική σταθερότητα των υλικών κατά την αποθήκευση, όπως οξειδίο αργύρου σε μπαταρίες αργύρου-ψευδαργύρου ή

διάβρωση των μεταλλικών ηλεκτροδίων, όπως δηλαδή του μολυβδου στις μπαταρίες μολυβδου οξέος. Η απόδοση της μπαταρίας μπορεί να πέσει εν χρήση, λόγω κάποιων παρασιτικών αντιδράσεων, όπως λόγου χάρη σε αντιδράσεις μετάλλου λιθίου με ηλεκτρολύτη μπαταριών σε επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές ιόντων λιθίου. Επίσης, ο τρόπος που υποβαθμίζεται η μπαταρία συνδέεται άμεσα με την θερμοκρασία αποθήκευσης αλλά και τις θερμοκρασιακές μεταβολές κατά την χρήση της.

Είναι ευρέως διαδεδομένο ότι ο πιο γνωστός ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται είναι υγρής μορφής (απιονισμένο νερό). Επίσης, είναι γνωστό ότι συμμετέχει σε αντιδράσεις διάβρωσης που λαμβάνουν χώρα μέσα στην μπαταρία, με αποτέλεσμα στις μπαταρίες μολυβδου οξέος, επειδή το οξύ είναι αρκετά συγκεντρωμένο, θα «επιτεθεί» και θα κάνει ζημιά στον μολυβδο, ασχέτως που ο δεύτερος είναι σχετικά μη αντιδραστικό μέταλλο. Όλη αυτή η διαδικασία οδηγεί σε μια υποβάθμιση της ίδιας της μπαταρίας που σημαίνει μείωση της χωρητικότητάς της. Ένα άλλο ζήτημα δε, είναι η δημιουργία του θεικού μολυβδου, που είναι προϊόν από τη διάβρωση, ο οποίος επιδρά αρνητικά στην επαναφόρτιση της μπαταρίας με συνέπεια την μακροπρόθεσμη μείωση της χωρητικότητας. Αυτά κάνουν αναγκαία την τακτική συμπλήρωση ηλεκτρολύτη (σε περίπτωση που γίνεται λόγος για μπαταρίες ανοιχτού τύπου).

Είναι συνεπώς επακόλουθο, σε συνδυασμό και με όσα προαναφέρθηκαν, ότι ο χρόνος ζωής που έχει μια μπαταρία να συνδέεται άρρηκτα με τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί. Οι δύο σημαντικότεροι παράμετροι που συνδέονται άμεσα με αυτόν είναι το βάθος εκφόρτισης (DOD) και η εσωτερική θερμοκρασία της μπαταρίας. Αυτά τα μεγέθη, εφόσον είναι γνωστά, βοηθούν στον υπολογισμό των ακριβών κύκλων ζωής της μπαταρίας. Η ενδεχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας σημαίνει μεγαλύτερη ηλεκτροχημική δραστηριότητα, και, παρόλο που το γεγονός αυτό μπορεί στιγμιαία να βελτιώνει την απόδοση στα κελιά της μπαταρίας, μακροπρόθεσμα προκαλεί φθορές στα μέταλλα και μειώνει την χωρητικότητα όπως προαναφέρθηκε. Τα δύο μεγέθη αυτά λειτουργούν αναλογικά και όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία λειτουργίας και βάθος εκφόρτισης έχει μια μπαταρία μεταφράζεται σε μεγαλύτερη φθορά σε κύκλους. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αναλυτικά.

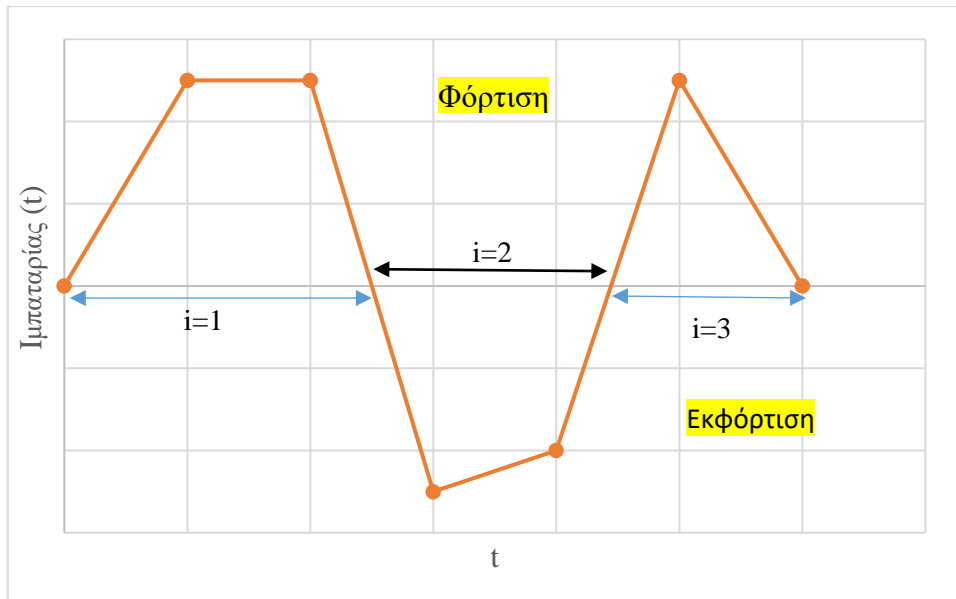


Σχήμα 3.1: Συμπεριφορά κύκλων ζωής μπαταρίας μολύβδου οξέος ανοιχτού τύπου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία και το βάθος εκφόρτισης «DOD» [1]

Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της τεράστιας δυσκολίας που υπάρχει σχετικά με τον προσδιορισμό υπολογιστικά της ακριβούς θερμοκρασίας της μπαταρίας από διάφορες αιτίες που συνδέονται με διάφορες τοπικές συνθήκες λειτουργίας στην εγκατάστασή της, λαμβάνεται ως θερμοκρασία λειτουργίας στη συγκεκριμένη μελέτη, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και παίρνει την τιμή $T=20^{\circ}\text{C}$, αφού θεωρείται ως η μέση θερμοκρασία κατά προσέγγιση στη διάρκεια ενός έτους στην Ελλάδα.

3.1.3 Προσέγγιση μέσω της μέτρησης μικροκύκλων

Η παρούσα προσέγγιση εστιάζει στον υπολογισμό του μέσου ενεργού DOD ο οποίος είναι απαραίτητος εν τέλει για τον υπολογισμό του χρόνου ζωής της μπαταρίας. Για μεγαλύτερη ακρίβεια λοιπόν, εμφανίζεται στην εξίσωση του προβλήματος μια νέα έννοια, ο μικροκύκλος. Ως μικροκύκλος μπορεί να οριστεί ένας μικρός κύκλος κατά το χρονικό διάστημα κάτω από το οποίο πραγματοποιούνται δύο διαδοχικοί μηδενισμοί του ρεύματος της μπαταρίας. Ο πιο ευκατανόητος τρόπος για την έννοια αυτή είναι ο απεικονιστικός και παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.2: Μια προσομοιωμένη καμπύλη του ρεύματος μιας μπαταρίας σε συνάρτηση με το χρόνο όπου είναι εμφανείς οι μικροκύκλοι με i τον αριθμό τους [23]

Στο σχήμα 3.2 απεικονίζεται ξεκάθαρα ότι στην καμπύλη αυτή υπάρχουν τρεις μικροκύκλοι καθώς λαμβάνουν χώρα δύο διαδοχικοί μηδενισμοί ανά διάστημα. Οι μικροκύκλοι είναι σαφέστατα μικρότεροι από έναν πλήρη κύκλο φόρτισης εκφόρτισης, ο οποίος είναι πρακτικά εκφόρτιση μέχρι το ονομαστικό βάθος και πάλι φόρτιση μέχρι το 100%, παρόλα αυτά χρησιμοποιούνται διότι εκτιμούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν, όπως το ενεργό μέσο DOD, σε πραγματικό χρόνο.

Όσον αφορά τη μέτρησή τους είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι κατά την προσομοίωση τα σημεία όπου έχουν ρεύμα μηδενικό αγνοούνται. Πρακτικά, δεν υπάρχει η δυνατότητα να μετρηθεί το ρεύμα. Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται η ισχύς της μπαταρίας που είναι ισοδύναμη, και, όποτε αλλάζει το πρόσημο της το πρόγραμμα αυτόματα μετράει ένα μικροκύκλο. Συνεπώς κατά το διάστημα στο οποίο υπάρχει ίδιο πρόσημο θεωρείται ένας μικροκύκλος. Όταν γίνεται εναλλαγή προσήμου σημαίνει πέρασμα σε επόμενο μικροκύκλο. Έτσι λοιπόν αφού εντοπισθούν όλα αυτά τα σημεία μπορεί εύκολα να υπολογιστεί και η ενεργειακή απόδοση (E_{thr_i}) και το βάθος εκφόρτισης (DOD_i) κάθε μικροκύκλου.

Έτσι λοιπόν το μέσο ενεργό DOD υπολογίζεται με βάση τη σχέση (3.2) [23].

$$\overline{DOD} = \frac{\sum_{i=1}^N \overline{DOD}_i \cdot E_{thr_i}}{\sum_{i=1}^N E_{thr_i}} \quad (3.2)$$

Όπου \overline{DOD}_i είναι το μέσο ενεργό βάθος εκφόρτισης στον i^{th} μικροκύκλο, E_{thr_i} η ενεργειακή απόδοση στον i^{th} μικροκύκλο και N ο συνολικός αριθμός μικροκύκλων.

3.1.4 Υπολογισμός χρόνου ζωής συσσωρευτών

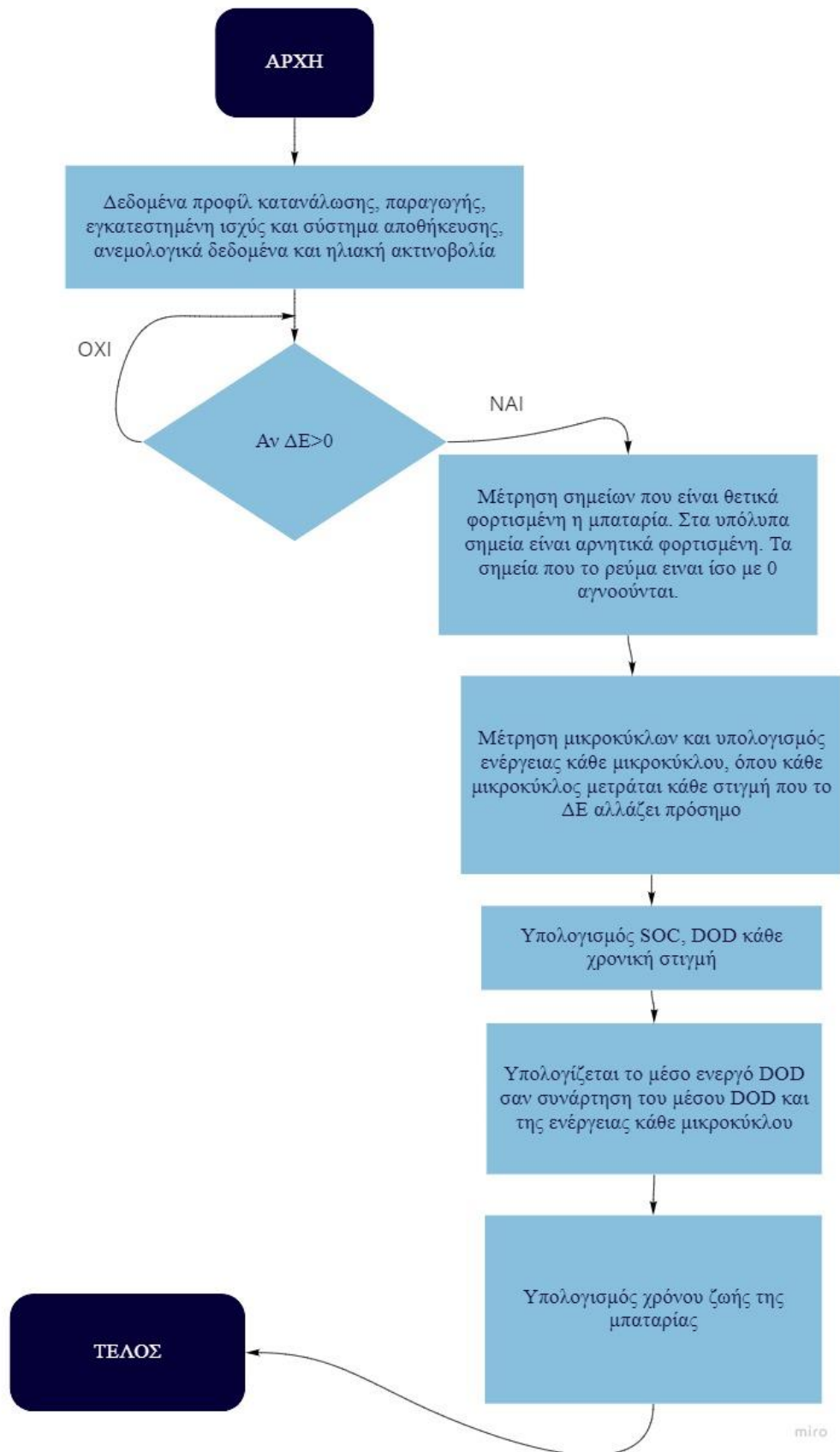
Από τη στιγμή που είναι γνωστό το μέσο ενεργό βάθος εκφόρτισης από τα πειραματικά δεδομένα της προσομοίωσης γίνεται εφικτός ο υπολογισμός του χρόνου ζωής της μπαταρίας από την ακόλουθη σχέση [23].

$$L = n \cdot \overline{DOD} \cdot \frac{2 \cdot E_{nom}}{\sum_{i=1}^N E_{thri}} \quad (3.3)$$

Όπου L, ο χρόνος ζωής της μπαταρίας σε χρόνια, E_{nom} η ονομαστική τιμή της μπαταρίας που χρησιμοποιείται, n οι κύκλοι ζωής της μπαταρίας που υπολογίζονται από το σχήμα 3.1 για γνωστό \overline{DOD} και θερμοκρασία $T=20^{\circ}\text{C}$ και τέλος $\sum_{i=1}^N E_{thri}$ το άθροισμα της ενεργειακής απόδοσης όλων των μικροκύκλων.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι λαμβάνεται ως παραδοχή ότι η μπαταρία κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης δεν χάνει χωρητικότητα πράγμα που κάνει τον υπολογισμό λιγότερο ακριβή. Αυτή η μέθοδος υπολογισμού βασίζεται στην λογική της αξιολόγησης της πορείας της μπαταρίας με βάση πειραματικά δεδομένα. Θα ήταν πιο σωστό να υπάρχει ένα μοντέλο που θα υπολόγιζε παράλληλα την απώλεια χωρητικότητας σε κάθε μικροκύκλο της μπαταρίας και με αυτόν τον τρόπο θα εξήγαγε μακράν πιο ακριβή αποτελέσματα ωστόσο θα χρειαζόταν τεράστιος όγκος δεδομένων. Στην διπλωματική αυτή, δεδομένη είναι η συμπεριφορά ενός προφίλ ζήτησης καταναλωτή και προφίλ παραγωγής για ένα έτος. Συνεπώς, το μόνο που μπορεί να γίνει είναι να υπολογίζεται ο χρόνος ζωής της μπαταρίας ημι-εμπειρικά με βάση αυτά τα δεδομένα.

3.1.5 Διάγραμμα ροής υπολογισμού χρόνου ζωής συσσωρευτών



Να σημειωθεί ότι ΔΕ είναι η διαφορά της ενέργειας παραγωγής με της ζήτησης.

3.2 Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση επένδυσης

Ο πιο σημαντικός παράγοντας σε μια επένδυση είναι η ελκυστικότητά της. Υπάρχει μια διαχρονική δυσκολία όσον αφορά την επικράτηση των υβριδικών συστημάτων έναντι των συμβατικών. Κύριος υπαίτιος δεν είναι άλλος από τα ακριβά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Έτσι, το στοίχημα αυτής της εργασίας είναι να προσπαθήσει να κάνει την επένδυση πιο ανταγωνιστική μέσα από το σχεδιασμό του όσο το δυνατόν μακροβιότερου συστήματος συσσωρευτών με το όσο το δυνατόν βιώσιμο συνδυασμό επένδυσης. Αναλυτικότερα, εξετάζεται επιμελώς το οικονομικό αποτύπωμα που αφήνουν οι διάφορες μεταβολές σε αποθηκευτική ισχύ στις μπαταρίες ανάλογα με τις ανάγκες που έχει ο καταναλωτής και για τις διάφορες μεταβολές που συμβαίνουν σε χρονικό διάστημα εικοσιπέντε ετών. Τέλος, θα αναλυθούν και θα επεξηγηθούν επαρκέστατα οι σχέσεις οι οποίες αποτελούν βασικό πυλώνα στην υλοποίηση του προγράμματος τεχνικοοικονομικής αξιολόγησης.

3.2.1 Κόστος επένδυσης

Το συνολικό κόστος της επένδυσης σε μελλοντικό χρόνο είναι η απόρροια του αθροίσματος του αρχικού κόστους επένδυσης της εγκατάστασης μαζί με αυτό της διαχρονικής συντήρησης και λειτουργίας. Το αρχικό κόστος IC_0 (σε €) της επένδυσης περιλαμβάνει την αγορά και την εγκατάσταση του εξοπλισμού δηλαδή της ανεμογεννήτριας, των φωτοβολταϊκών και των συστοιχιών μπαταριών. Αυτό, λαμβάνεται ως δεδομένο στην εργασία και προκύπτει από μια έρευνα αγοράς των φθηνότερων ανωτέρω λύσεων για τα απαιτούμενα ονομαστικά kW που χρειάζονται για τις ανάγκες παραγωγής. Συνεπώς ο υπολογισμός του γίνεται ως εξής:

- Κόστος αγοράς ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος X kW: 2500€
- Κόστος αγοράς συστοιχίας φωτοβολταϊκών ονομαστικής ισχύος Ψ kW: 8400€
- Κόστος αγοράς συστοιχίας συσσωρευτών ονομαστικής ισχύος Z kW: 10.000€

$$IC_0 = 2500 + 8400 + 10.000 = 20.900€$$

Να σημειωθεί ότι ο παραπάνω υπολογισμός αποτελεί παράδειγμα και ότι τα δεδομένα στην εργασία μπορεί να διαφέρουν.

Επιπλέον, η μελλοντική αξία του αρχικού κόστους επένδυσης εκτιμάται από την (3.4) [4] :

$$IC_n = \alpha \cdot IC_0 \cdot (1 + i)^n + \beta \cdot IC_0 \cdot (1 + i)^n \quad (3.4)$$

και επίσης ισχύει η εξής ισότητα,

$$\alpha + \beta = 1 - \gamma \quad (3.5)$$

Όσον αφορά δε το σταθερό κόστος συντήρησης και λειτουργίας των α/γ εκφράζεται ως το γινόμενο ενός συντελεστή (m) που εκφράζει ένα ποσοστό της αρχικής επένδυσης στο

οποίο υπάρχει μια μεταβολή στα έτη λόγω της επίρειας του πληθωρισμού συντήρησης. Υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση [4]:

$$FC_n = m \cdot IC_0 \cdot (1 + i)^{n-1} \cdot (1 + g_s) \cdot \left[1 + \left(\frac{1+g_s}{1+i} \right) + \dots + \left(\frac{1+g_s}{1+i} \right)^{n-1} \right] \quad (3.6)$$

Το σταθερό κόστος συντήρησης για τα φ/β ανέρχεται κατά μέσο όρο στα 15€/kWh [24].

Ο συντελεστής m υπολογίζεται από τον τύπο [4]:

$$m = -0,62 \cdot \ln(N_0) + 7,25 \quad (3.7)$$

όπου N_0 είναι η εγκατεστημένη ισχύς αιολικών μηχανών.

Επιπλέον, όσον αφορά το μεταβλητό κόστος των μπαταριών θα θεωρηθεί αμελητέο διότι οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται είναι μολύβδου οξέος ανοιχτού τύπου όπου η μόνη εργασία συντήρησης είναι τοποθέτηση απιονισμένου νερού ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Κόστος το οποίο θεωρείται μη υπολογίσιμο.

Συμπερασματικά το συνολικό διαχρονικό κόστος που προκύπτει για μια τέτοια επένδυση είναι

$$C_n = IC_n + FC_n \quad (3.7)$$

3.2.2 Έσοδα επένδυσης

Τα εν δυνάμει έσοδα σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας προκύπτουν από την διάθεση προς πώληση αυτής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως, ο παραγωγός ταυτίζεται με τον καταναλωτή καθώς η κύρια επιδίωξη είναι η αυτονομία του καταναλωτή-επενδυτή. Έτσι, όπως γίνεται αντιληπτό, η έννοια των εσόδων είναι εικονική καθώς στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύουν τα χρήματα που «γλιτώνει» ο καταναλωτής, λόγω της ιδιόχρησης.

Έτσι λοιπόν με δεδομένα τα παραπάνω, ορίζεται η τιμή διάθεσης της ενέργειας c_0 , και μέσα από τα πειραματικά δεδομένα για μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή λαμβάνεται ως δεδομένη η αντίστοιχη παραγωγή ανά έτος της ανεμογεννήτριας και των φωτοβολταϊκών. Σκοπός είναι ο καθορισμός, μέσω του αθροίσματος των δύο προαναφερθέντων, της συνολικής ετήσιας παραγωγής ενέργειας του υβριδικού συστήματος (E).

Τα συνολικά έσοδα για μια περίοδο n ετών, λαμβάνοντας υπόψη τις μελλοντικές αξίες του χρήματος δίνεται ως εξής [4] :

$$R_n = R_{n-1} \cdot (1 + i) + R_0 \cdot (1 + e)^n \quad (3.8)$$

με,

$$R_0 = E \cdot c_0 \quad (3.9)$$

Όπως γίνεται απολύτως κατανοητό η είσπραξη των εσόδων της επιχείρησης λειτουργεί προσθετικά από την μία χρονική στιγμή στην άλλη.

3.2.3 Κριτήρια αξιολόγησης επένδυσης

Η λήψη της απόφασης για την υλοποίηση και το σχεδιασμό μιας επένδυσης ΑΠΕ περιλαμβάνει τόσο ποιοτικά, όσο και ποσοτικά κριτήρια. Πιο συγκεκριμένα, να μεν εμπεριέχει από τη μια τον τομέα της πολιτικής και στρατηγικής της επιχείρησης, αλλά από την άλλη πλευρά, πρέπει να μπορεί να αποτυπώνεται ποσοτικά η βιωσιμότητά της ή μη. Για το λόγο αυτό λοιπόν υπάρχουν κάποια κριτήρια που αξιολογούν την ελκυστικότητα της επένδυσης. Αυτά διακρίνονται σε απλά κριτήρια, που βασίζονται σε απλούς δείκτες αποδοτικότητας και σε σύνθετα που εξαρτώνται από την μεταβολή της αξίας του χρήματος.

Ωστόσο, όπως επιμελώς αναφέρθηκε προηγουμένως, δεν είναι μόνο τα οικονομικά μεγέθη που επηρεάζουν μια τέτοια επένδυση. Υπάρχουν πολλές ποιοτικές μεταβλητές που λαμβάνουν σημαντικό ρόλο στη λήψη της τελικής απόφασης. Ενδεικτικά τέτοιες μπορεί να είναι:

- Η περιρέουσα πολιτική ατμόσφαιρα γύρω από τις επενδύσεις ΑΠΕ
- Η τεχνογνωσία στο αντικείμενο της επένδυσης
- Η νομοθεσία του εκάστοτε κράτους
- Η εναρμόνιση με τους περιβαλλοντικούς κανόνες και τους κατοίκους της εκάστοτε τοπικής κοινωνίας
- Προοπτικές σε βάθος χρόνου
- Το φορολογικό καθεστώς.

Όσον αφορά τα απλά ποσοτικά κριτήρια, έχουμε την περίοδο αποπληρωμής (PBP), την περίοδο διπλασιασμού αρχικού κεφαλαίου (DCP) και τον συντελεστή απόδοσης επένδυσης (η_n). Από την άλλη πλευρά, στα σύνθετα χρησιμοποιούνται ευρέως η Καθαρά Παρούσα Αξία (Net Present Value, NPV) και ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (Internal Rate Of Return, IRR).

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται και αναλύονται τόσο τα απλά κριτήρια όσο και τα πιο σύνθετα κριτήρια με εξονυχιστικό τρόπο. Ωστόσο, μεγαλύτερη βαρύτητα δίνεται στα σύνθετα διότι είναι αυτά που, λόγω της δυναμικής τους, αξιολογούν την επένδυση με μεγαλύτερη ακρίβεια.

3.2.3.1 Χρόνος αποπληρωμής (PBP), διπλασιασμού αρχικής επένδυσης (DCP) και υπολογισμός συντελεστή οικονομικής απόδοσης (η_n)

Ο χρόνος αποπληρωμής (Pay Back Period, PBP), ο χρόνος διπλασιασμού (Double Capital Period, DCP) και ο συντελεστής οικονομικής απόδοσης (η_n) είναι τρία από τα απλά κριτήρια οικονομικής αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη.

Όσον αφορά τον υπολογισμό του χρόνου αποπληρωμής, χρησιμοποιείται η προσέγγιση της εξίσωσης του νεκρού σημείου. Αναλυτικότερα, υπολογίζονται τα μετά φόρων κέρδη

της επιχείρησης « G_n » που είναι η διαφορά εσόδων-εξόδων της μετά από n έτη λειτουργίας:

$$G_n = R_n - C_n \quad (3.10)$$

Ο μηδενισμός των κερδών αυτών δίνει το χρόνο αποπληρωμής. Αναλυτικότερα, το έτος κατά το οποίο τα έσοδα της επιχείρησης θα είναι ίσα με τα έξοδα της ($R_n=C_n$), δηλαδή $G_n=0$, θα θεωρηθεί ως ο χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης.

Μια επίσης πολύ ενδιαφέρουσα οικονομική παράμετρος που είναι ένα από τα κριτήρια ελκυστικότητας μιας επένδυσης είναι και η περίοδος διπλασιασμού. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, είναι ο χρόνος κατά τον οποίο το αρχικά υπενδεδυμένο κεφάλαιο διπλασιάζεται, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο πληθωρισμός. Ο υπολογισμός προκύπτει ως εξής [4]:

$$\tilde{G}_n = (1 - \gamma) \cdot IC_0 \quad (3.11)$$

όπου:

$$\tilde{G}_n = \frac{G_n}{\sum_{i=1}^n (1+g)^i} \quad (3.12)$$

Το έτος κατά το οποίο λοιπόν τα αποπληρωρησμένα κέρδη της επιχείρησης θα είναι ίσα με το αρχικά επενδυμένο κεφάλαιο θεωρείται ως το έτος διπλασιασμού της αρχικής επένδυσης ($\tilde{G}_n = (1 - \gamma) \cdot IC_0$).

Ένα άλλο κριτήριο το οποίο ανήκει και αυτό στην κατηγορία των απλών κριτηρίων αξιολόγησης είναι ο οικονομικός βαθμός της επένδυσης n_n . Ορίζεται ως ο λόγος των αποπληρωρησμένων κερδών της επιχείρησης μετά από την πάροδο n ετών, προς την εκάστοτε διαφορά του αρχικά επενδυμένου κεφαλαίου αν από αυτό αφαιρέσουμε την υπολείπουσα αξία της εγκατάστασης (αξία ενεργητικού και εγκαταστάσεων μετά από n έτη).

$$n_n = \frac{\tilde{G}_n}{IC_0 \cdot (1 - \gamma) - \tilde{Y}_n}$$

Τη χρονική στιγμή κατά την οποία ο οικονομικός βαθμός απόδοσης γίνει ίσος με το μηδέν, αυτομάτως θεωρείται ως ο χρόνος αποπληρωμής του αρχικού κεφαλαίου της επένδυσης. Επιπλέον, όταν αυτός γίνει ίσος με τη μονάδα (δηλαδή απόδοση κεφαλαίου 100%), τότε λέγεται ότι είναι η στιγμή διπλασιασμού του αρχικού κεφαλαίου της επένδυσης.

Είναι αξιοσημείωτο ότι οι παραπάνω παράμετροι δίνουν στον επενδυτή μια συνολική πρώτη εικόνα σχετικά με την επένδυση. Ωστόσο, για διάφορους λόγους δεν θεωρούνται τόσο αξιόπιστες μέθοδοι για γενική αξιολόγηση της επένδυσης.

Αρχικά, η προσομοίωση σταματά το έτος κατά το οποίο ισχύει η εξίσωση του νεκρού σημείου και δεν λαμβάνονται υπόψη οι συνολικές χρηματοροές μέχρι το τελευταίο έτος αξιολόγησης. Επιπλέον, είναι τόσο απλές μέθοδοι που δεν μπορούν να υποστηρίξουν

τυχόν επανεπενδύσεις στο μεσοδιάστημα. Κλείνοντας, το σημαντικότερο από όλα είναι ότι τα κριτήρια αυτά αγνοούν τη δυναμική αποδοτικότητα του έργου.

3.2.3.2 Οικονομική αξιολόγηση μέσω υπολογισμού καθαρής παρούσας αξίας (NPV) και εσωτερικού συντελεστή αξιολόγησης (IRR)

Άκρως καταλυτικό ρόλο στον υπολογισμό των συντελεστών NPV και IRR συμβάλλει η κατανόηση της έννοιας της χρηματοροής. Ως χρηματοροή (F_j) ορίζεται η διαφορά των πραγματικών εσόδων και εξόδων σε παρούσα αξία χρήματος της επένδυσης. Γενικά ισχύει:

$$F_j = \text{Έσοδα} - \text{Κόστος Παραγωγής}$$

Έτσι λοιπόν, το άθροισμα όλων των χρηματοροών της επιχείρησης για n έτη λειτουργίας σε σημερινές αξίες χρήματος ονομάζεται Καθαρά Παρούσα Αξία (Net Present Value, NPV). Βασίζεται στην αναγωγή του αθροίσματος σε σημερινές αξίες των χρηματικών ροών και χρησιμοποιεί ένα ελάχιστο επιτόκιο προεξόφλησης (discounting rate, i). Συνεπώς έχουμε:

$$NPV = \sum_{j=1}^n \left[\frac{F_j}{(1+i)^j} \right] - IC_0 \quad (3.13)$$

όπου,

n : έτη επένδυσης

F_j : ετήσια χρηματοροή για n έτη

i : επιτόκιο σήμερα

IC_0 : Κόστος αρχικής επένδυσης

Στη βάση αυτή, και με τη βοήθεια του excel, γίνεται πολύ γρήγορα ο υπολογισμός του μεγέθους αυτού. Σε περίπτωση που είναι θετικός αριθμός ($NPV > 0$) η επένδυση προκρίνεται ως αξία να υλοποιηθεί. Σε αντίθετη περίπτωση ($NPV < 0$) η επιχείρηση χαρακτηρίζεται ως μη κερδοφόρα και έτσι το σενάριο απορρίπτεται. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας εξετάζουμε την καθαρά παρούσα αξία στα δέκα και στα εικοσιπέντε χρόνια της επένδυσης (NPV_{10} , NPV_{25}).

Το κριτήριο αυτό χρήζει ευρείας εφαρμογής για αξιολόγηση επενδύσεων διότι αφενός είναι σχετικά εύκολο να υπολογισθεί και αφετέρου λαμβάνει υπόψη οποιαδήποτε μορφής χρηματοροή. Αξιολογώντας τις χρηματοροές μπορεί ο επενδυτής να έχει σαφώς μια πολύ πιο ακριβή εικόνα της αποδοτικότητας της επένδυσης σε σχέση με τα πιο απλά κριτήρια που χρησιμοποιούνται (PBP, DCP, η). Από την άλλη πλευρά, δεν μπορεί από μόνο του να κρίνει μια επένδυση ως προς την κερδοφορία της και έτσι για μεγαλύτερη ασφάλεια υπολογίζουμε και τον εσωτερικό συντελεστή απόδοσης (IRR).

Ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (Internal Rate Of Return, IRR) ορίζεται ως το ελάχιστο προεξοφλητικό επιτόκιο για το οποίο η καθαρά παρούσα αξία όλων των

ταμειακών ροών θα είναι ίση με το μηδέν. Οι υπολογισμός του είναι βασισμένος στην σχέση (3.13) και έχει ως εξής:

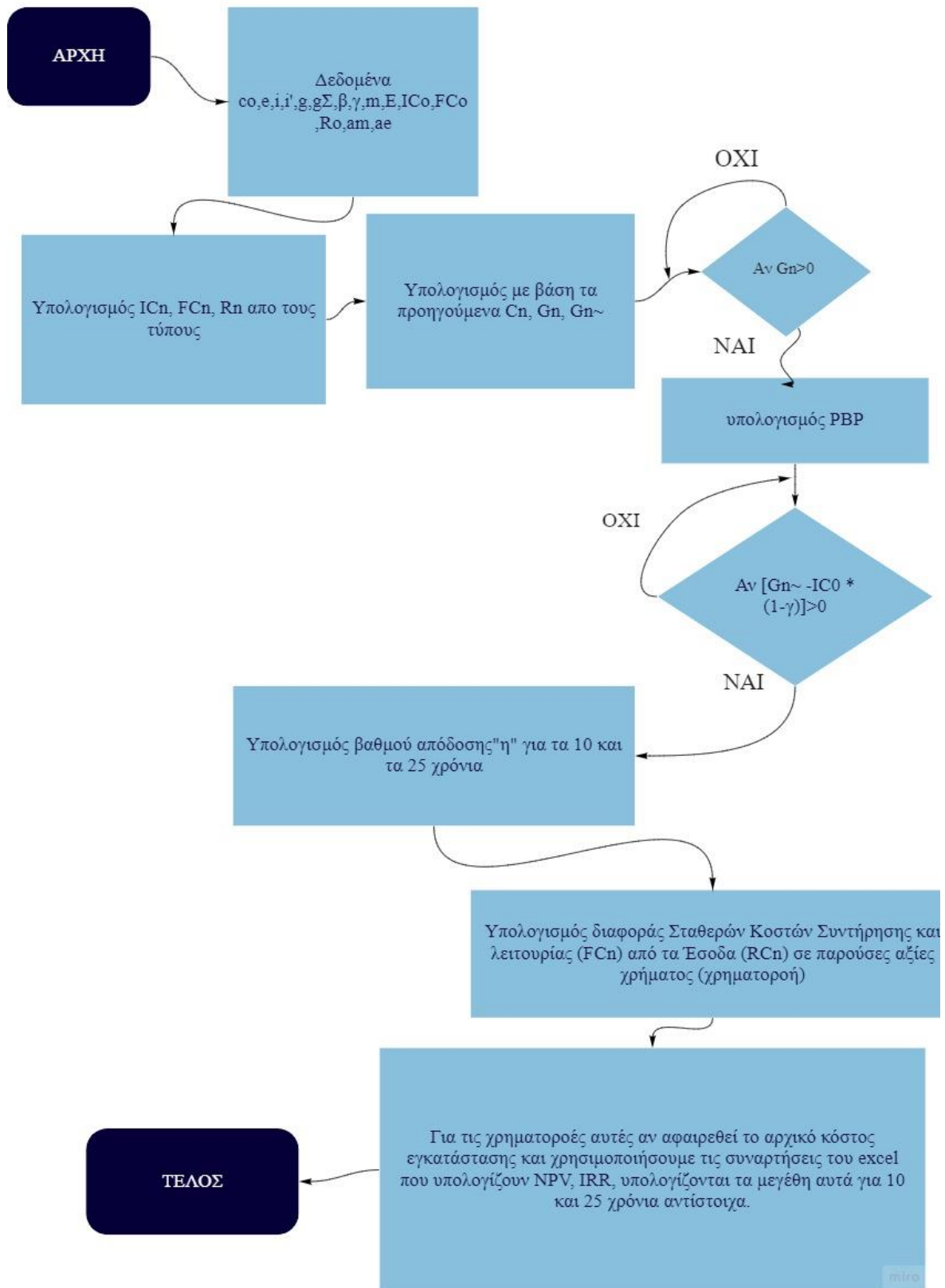
$$\sum_{j=1}^n \left[\frac{F_j}{(1 + IRR)^j} \right] - IC_0 = 0 \quad (3.14)$$

Το κριτήριο αυτό βασίζεται στον υπολογισμό του μέγιστου επιτοκίου το οποίο καλείται να πληρώσει ο επενδυτής προκειμένου η επιχείρηση να μη διατρέξει κίνδυνο να απωλέσει κεφάλαια. Με αυτόν τον τρόπο είναι εύκολο να επιλέξει εκ των προτέρων ο επενδυτής το μέγιστο επιτόκιο δανεισμού που μπορεί να έχει προκειμένου η επιχείρηση να διασφαλίσει ασφάλεια των επενδυμένων κεφαλαίων. Έτσι όπως είναι λογικό επόμενο ο επενδυτής θα επιλέξει να προχωρήσει σε μια επένδυση όταν το IRR είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το επιτόκιο δανεισμού. Πιο αναλυτικά:

- Αν $IRR > i$, η επένδυση εγκρίνεται
- Αν $IRR < i$, η επένδυση απορρίπτεται
- Αν $IRR = 0$, η επένδυση είναι οριακή

Στην τελευταία περίπτωση που η απόδοση της επένδυσης είναι οριακή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το πρόσημο του NPV. Αν είναι θετικό η περίπτωση οριακά εγκρίνεται ενώ σε αντίθετη περίπτωση απορρίπτεται. Σε σπάνια περίπτωση όπου το IRR είναι μεγαλύτερο του i ενώ το NPV αρνητικό αξιολογούνται ποσοτικά τα μεγέθη και συνήθως η απόφαση οδηγεί στην έγκριση της επένδυσης. Όπως συνεπάγεται λοιπόν, ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης είναι πιο ακριβές κριτήριο αποδοτικότητας.

3.2.4 Διάγραμμα ροής οικονομικής αξιολόγησης



4 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Η ανάγκη του καταναλωτή είναι αυτές που καθορίζουν τη διαστασιολόγηση του υβριδικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, κατά το σχεδιασμό σαν βασική προϋπόθεση θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κάθε στιγμή η υπερκάλυψη του «peak» της κατανάλωσης. Επιπλέον, στην συγκεκριμένη εργασία λαμβάνεται επίσης ως κριτήριο η εξάλειψη του ελλείματος ενέργειας (δηλαδή συντελεστής κάλυψης 100%). Το γεγονός ότι δεν επιτρέπεται στην ενέργεια να χαθεί, απεναντίας αποθηκεύεται, παρατηρείται ότι βοηθά τις μπαταρίες να διατηρούν πολύ υψηλά τη στάθμη φόρτισης και άρα να καταπονούνται λιγότερο, πράγμα που αυξάνει κατά πολύ παραπάνω τα χρόνια ζωής τους. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στα πλαίσια αυτής της εργασίας διότι εξετάζεται η βιωσιμότητα ενός υβριδικού συστήματος σε βάθος εικοσιπενταετίας. Συνεπώς, η λογική είναι ότι δεν θα «πετάγεται στα σκουπίδια» ενέργεια χωρίς λόγο, αλλά θα χρησιμοποιείται για τη διατήρηση μικρών βαθών εκφόρτισης και άρα σε περίοδο εικοσιπενταετίας να συμφέρει περισσότερο από το να υπάρχουν μεγάλα βάθη εκφόρτισης και να χρειάζεται αγορά νέων μπαταριών.

4.2 Δεδομένα παραγωγής-διαστασιολόγηση

Τα δεδομένα για τον συγκεκριμένο καταναλωτή αποτυπώνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Ετήσια δεδομένα καταναλωτή

Συνολική Ζήτηση (MWh)
7,44
Αιχμή Φορτίου (kW)
4,49

Όσον αφορά την παραγωγή χρησιμοποιούνται μια ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 3kW [25] και 15 φωτοβολταϊκά πλαίσια συνολικής ισχύος 6kW (400W έκαστο) [26].

Η συνολική παραγόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια του έτους είναι:

Πίνακας 4.2: Ετήσια παραγωγή

Παραγωγή ΑΠΕ (MWh)
20,45

Για τις ανάγκες διαστασιολόγησης, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, ζητείται να αποθηκεύεται το 100% της ενέργειας που παράγεται από τις ΑΠΕ. Για να γίνει αυτό εφικτό η συνολική χωρητικότητα των μπαταριών θα πρέπει να ανέρχεται στις 60 kWh. Για τις ανάγκες αυτές χρησιμοποιούνται μπαταρίες ανοιχτού τύπου μολύβδου-οξέος βαθιάς εκφόρτισης [27].

Πίνακας 4.3: Ικανοποίηση ανάγκης απορρόφησης 100% της ενέργειας που παράγεται – βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταρίας χρήσης

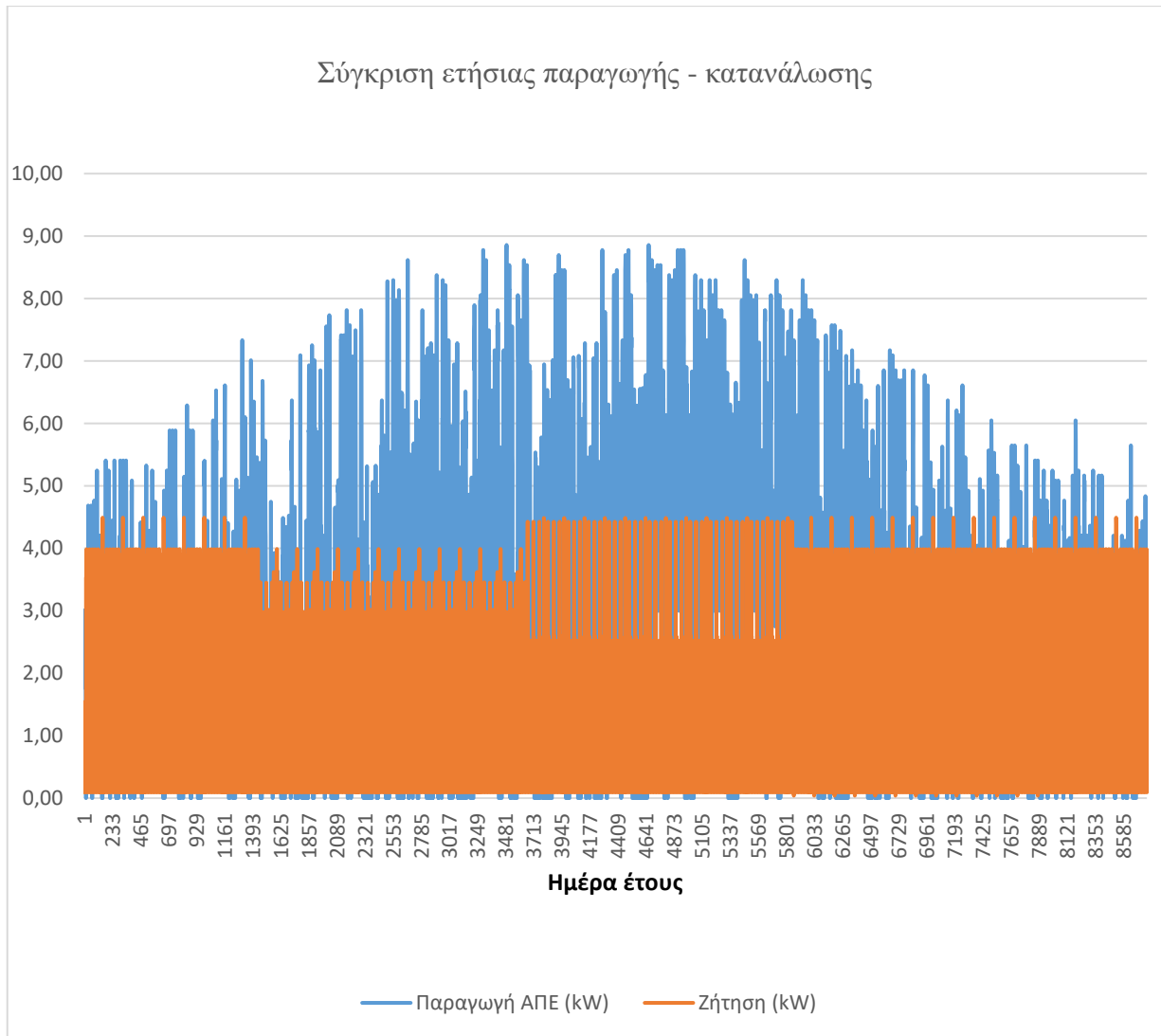
N_w (kW)	Συνολική Ζήτηση (MWh)
3	7,44
N_{pv} (kW)	Αιχμή Φορτίου (kW)
6	4,49
Ess (kWh)	Παραγωγή ΑΠΕ (MWh)
60	25,98
η φόρτισης	Έλλειμμα Ενέργειας (MWh)
90%	0,00
η εκφόρτισης	Συντελεστής Κάλυψης
90%	100,00%
DOD	Ώρες Απόρριψης Φορτίου
50%	0

Στον Πίνακα 4.3 το N_w , N_{pv} , είναι ονομαστικές ισχύς των ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών αντίστοιχα ενώ Ess είναι η συνολική αποθηκευτική ισχύς.

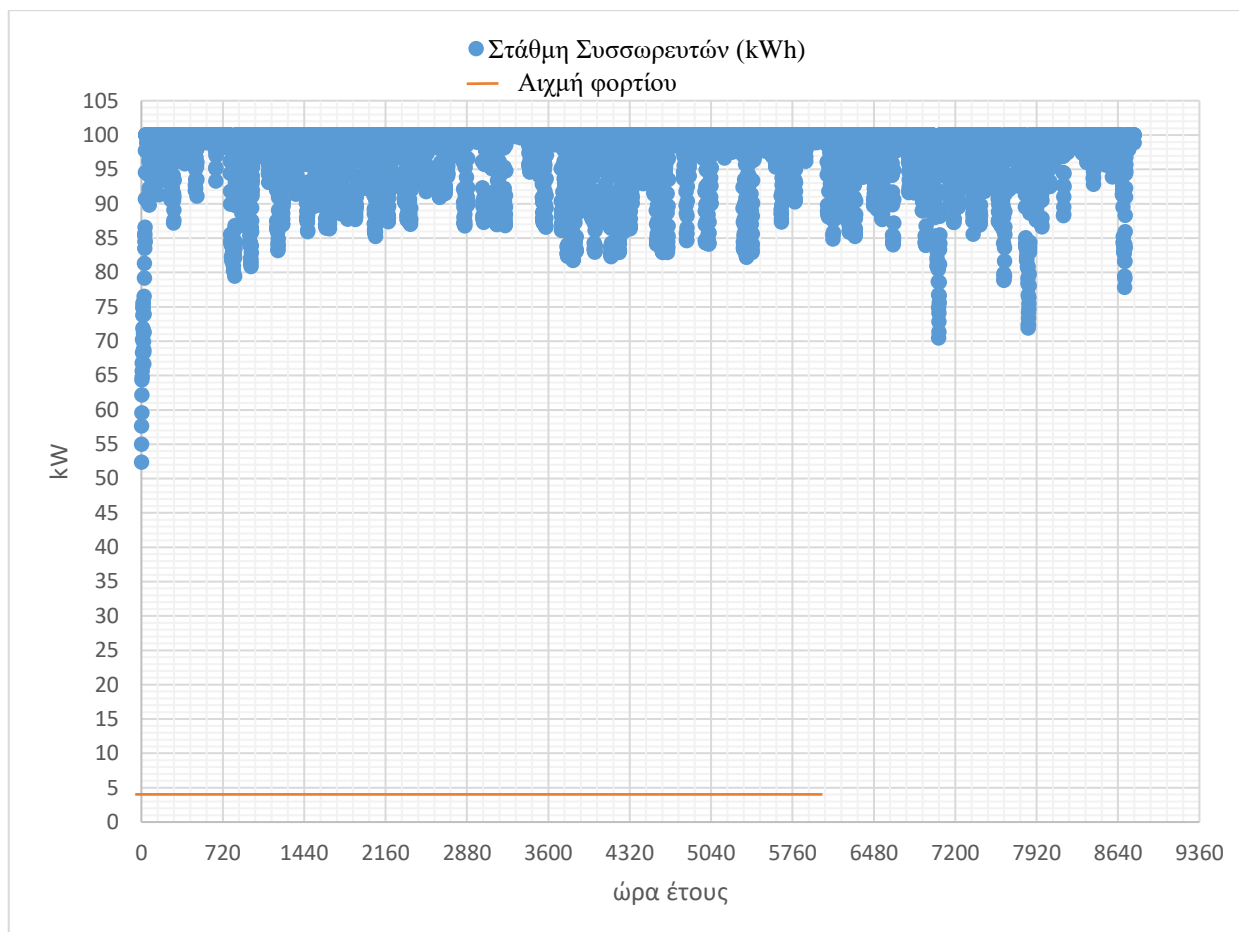
Επιπρόσθετα, αξίζει να σημειωθεί ότι καλύπτεται και το δεύτερο κριτήριο που αφορά την ανάγκη υπερκάλυψης του «peak» της κατανάλωσης καθώς η μπαταρία είναι φορτισμένη όλο το χρόνο πάνω από τη στάθμη αυτή.

Πίνακας 4.4: Ώρες μη ικανοποίησης του κριτηρίου του «peak»

Ώρες που η στάθμη της μπαταρίας είναι μικρότερη του peak
0,00



Σχήμα 4.5: Προφίλ ζήτησης σε σύγκριση με παραγωγή από ΑΠΕ



Σχήμα 4.6: Κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών σε σύγκριση με την αιχμή κατανάλωσης

Στο σχήμα 4.6 φαίνεται η ξεκάθαρη υπερκάλυψη των αναγκών για ζήτηση. Θεωρητικά θα μπορούσε να διαστασιολογηθεί ένα μικρότερο σύστημα παραγωγής που να καλύπτει τις ίδιες ανάγκες. Σε αυτήν την περίπτωση θα υπήρχε μεγάλη περίσσεια ενέργειας η οποία αναγκαστικά θα χανόταν. Ωστόσο, σε αυτήν την περίπτωση θα υπήρχαν μεγαλύτερα βάθη εκφόρτισης γεγονός που σημαίνει πολύ πιο γρήγορη φθορά της μπαταρίας. Με την υπερδιαστασιολόγηση που πραγματοποιείται μελετάται η συμπεριφορά της μείωσης του DOD της μπαταρίας ως προς το χρόνο ζωής αφενός αλλά και ως προς το οικονομικό αντίκτυπο που έχει στην επένδυση.

4.3 Οικονομικά δεδομένα

Όσον αφορά το οικονομικό κομμάτι της εργασίας μελετάται αρχικά, με βάση τα δεδομένα του κεφαλαίου 4.2, αν είναι βιώσιμη η επένδυση. Σε περίπτωση που είναι τότε παρακολουθείται η οικονομική συμπεριφορά της μέσω των ειδικών οικονομικών συντελεστών που έχουν αναλυθεί επαρκώς στο κεφάλαιο 3.2. Όσον αφορά την τελική αξιολόγηση δίνεται μεγαλύτερη βάση στα μεγέθη NPV, IRR διότι είναι πολύ πιο αξιόπιστα σε σχέση με τα απλά οικονομικά κριτήρια.

Το οικονομικό προφίλ του περιβάλλοντος του καταναλωτή αποτυπώνεται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.5: Οικονομικές μεταβλητές περιβάλλοντος καταναλωτή

c₀	0,066€/kWh
e	5%
i	10%
i'	8%
g	4%
g_Σ	4%
β	70%
γ	30%

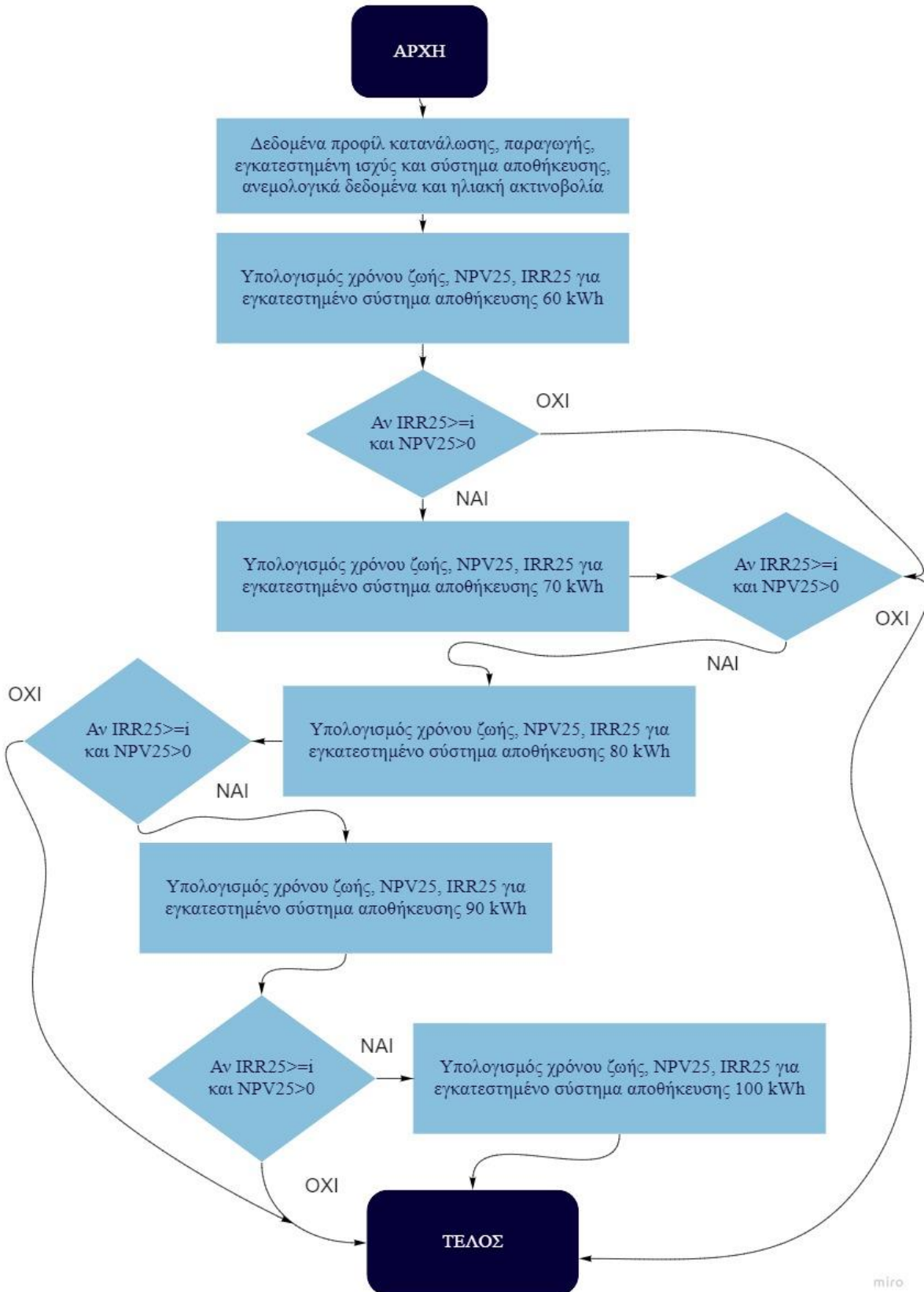
Να σημειωθεί ότι το ποσοστό της επιδότησης (γ) της επένδυσης θα μπορούσε να ήταν λίγο μεγαλύτερο (40-50%) για ένα Ευρωπαϊκό κράτος δεδομένου ότι η Ε.Ε προσφέρει κονδύλια για την ανάπτυξη σε συνδυασμό με τα ίδια τα κράτη που συμμετέχουν και από τον προϋπολογισμό τους.

Στον Πίνακα 4.8 περιγράφονται τα αρχικά σταθερά και μεταβλητά κόστη του πρώτου έτους συσσωρευτών, ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκών πλαισίων μαζί με τα αρχικά έσοδα της επένδυσης.

Πίνακας 4.6: Αρχικά κόστη (μεταβλητά και σταθερά) και έσοδα

IC₀	16.862 €
FC₀	297 €
R₀	1.715 €
IC_b	10.912 €
IC_w	2.950 €
IC_v	3.000 €

4.4 Διάγραμμα ροής προσομοίωσης



4.5 Εκτέλεση προσομοίωσης & οικονομικά αποτελέσματα

Σε αυτήν την φάση προσομοιώνεται αρχικά μέσω του ειδικού αλγορίθμου που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της εργασίας, η επίδοση του συστήματος αποθήκευσης και καταγράφονται ο συνολικός χρόνος ζωής τους και το μέσο βάθος εκφόρτισης. Αφού υπολογισθούν τα μεγέθη αυτά καταγράφονται. Έπειτα από τον δεύτερο αλγόριθμο που κατασκευάστηκε προχωρά η οικονομική προσομοίωση τους και μέσω των τιμών των οικονομικών συντελεστών που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3.2.4 κρίνεται η επένδυση σε βάθος εικοσιπενταετίας.

Η λογική που θα ακολουθηθεί στην προσομοίωση είναι απλή. Ξεκινώντας από τις 60 kWh που είναι η αρχικά διαστασιολογημένη χωρητικότητα θα υπολογίζεται χρόνος ζωής και το DOD. Έπειτα θα κρίνεται μέσω των χρηματοοικονομικών μεγεθών NPV, IRR. Στη συνέχεια θα ακολουθήσει η ίδια διαδικασία με αύξηση της χωρητικότητας στις 70, 80, στις 90 και στις 100 kWh αντίστοιχα. Μέσω της αύξησης χωρητικότητας το DOD θα μικρύνει. Ζητούμενο είναι η καταγραφή της συμπεριφοράς του DOD σε σχέση με την χωρητικότητα και τους οικονομικούς συντελεστές. Τέλος, σχολιάζονται τα αποτελέσματα και επιλέγεται η καλύτερη λύση με γνώμονα την αύξηση του χρόνου ζωής των μπαταριών με ταυτόχρονη διατήρηση της βιωσιμότητας της επένδυσης.

4.5.1 Προσομοιώσεις με αλλαγή της αποθηκευτικής ισχύος

Σε πρώτο στάδιο υπολογίζεται ο χρόνος ζωής και το βάθος εκφόρτισης και ο αριθμός κύκλων των μπαταριών για αποθηκευτική ισχύ 60 kWh.

Πίνακας 4.7: Προσδόκιμο ζωής, DOD και αριθμός κύκλων για αποθηκευτική ισχύ 60 kWh

Χρόνος ζωής (χρόνια)	11,96
Μέσο ενεργό βάθος εκφόρτισης (DOD)	31%
Αριθμός Κύκλων n	5188

Τα οικονομικά μεγέθη της προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα οικονομικής προσομοίωσης για αποθηκευτική ισχύ 60 kWh

	10 έτη	25 έτη
Βαθμός απόδοσης (η):	20%	462%
Καθαρά Παρούσα Αξία (NPV):	-961,12 €	3.486,07 €
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR):	8%	14%

Χρόνος απόσβεσης(PBP):	9	έτη
Χρόνος διπλασιασμού(DCP):	15	έτη

Κρίνοντας αρχικά από τα οικονομικά μεγέθη με την μεγαλύτερη βαρύτητα, ο εσωτερικός συντελεστής αξιολόγησης είναι μεγαλύτερος από το επιτόκιο στην αγορά που είναι 10% ($IRR_{25} > i$), αυτό σημαίνει ότι σε βάθος εικοσιπενταετίας τα αρχικά υπενδυμένα κεφάλαια θα έχουν υπεραπόδοση, δηλαδή θα έχει εξασφαλιστεί πάνω από 100% επιστροφή αρχικού κεφαλαίου. Σε συνδυασμό επίσης με το θετικό πρόσημο NPV_{25} , δηλαδή των μελλοντικών χρηματοροών με σημερινές αξίες χρήματος, επιβεβαιώνεται η πολύ καλή προοπτική της εν λόγω επένδυσης. Ο χρόνος αποπληρωμής του αρχικού κεφαλαίου είναι τα 9 έτη ενώ η περίοδος διπλασιασμού αρχικού κεφαλαίου τα 15 έτη. Ο οικονομικός βαθμός απόδοσης σε βάθος 25 ετών είναι 462%, πράγμα που σημαίνει ότι σε 25 χρόνια από την έναρξη της επένδυσης, χοντρικά το αρχικό κεφάλαιο θα έχει εννεαπλασιαστεί. Ωστόσο ο χρόνος ζωής των μπαταριών θα είναι τα 12 έτη. Αυτό σημαίνει ότι για διάρκεια 25 χρόνων θα πρέπει να αλλάξει ο καταναλωτής 2 φορές σύστημα αποθήκευσης.

Για 70 kWh αποθηκευτική ισχύ:

Πίνακας 4.9: Προσδόκιμο ζωής, DOD και αριθμός κύκλων για αποθηκευτική ισχύ 70 kWh

Χρόνος ζωής (χρόνια)	14,19
Μέσο ενεργό βάθος εκφόρτισης (DOD)	27%
Αριθμός Κύκλων n	6109

Τα νέα αρχικά κόστη που προκύπτουν από την προσθήκη τριών νέων συσσωρευτών (23 σε συνολικό αριθμό) προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη αποθηκευτική ισχύς παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.10: Νέα διαμορφωμένα κόστη που προκύπτουν από την αύξηση αποθηκευτικής ισχύος από 60 σε 70 kWh

IC_o	18.499 €
FC_o	297 €
R_o	1.715 €
IC_b	12.548,8€
IC_w	2.950 €
IC_v	3.000 €

Τα νέα οικονομικά μεγέθη φαίνονται στον Πίνακα 4.11.

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα οικονομικής προσομοίωσης για αποθηκευτική ισχύ 70 kWh

	10 έτη	25 έτη
Βαθμός απόδοσης (η):	6%	398%
Καθαρά Παρούσα Αξία (NPV):	-2.002,72 €	2.444,47 €
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR):	5%	13%
Χρόνος απόσβεσης(PBP):	10	έτη
Χρόνος διπλασιασμού(DCP):	16	έτη

Από ότι παρατηρείται και σε αυτήν την περίπτωση, ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης σε βάθος εικοσιπενταετίας γίνεται μεγαλύτερος του επιτοκίου και επειδή συνδυάζεται και με θετικό πρόσημο καθαρής παρούσας αξίας, η επένδυση κρίνεται ως οικονομικά υπεραποδοτική. Σημαντικό επίσης είναι το γεγονός ότι ο χρόνος ζωής των μπαταριών μεγάλωσε κατά 2 χρόνια σε σχέση με πριν, με μικρό ωστόσο χρηματοοικονομικό κόστος.

Για 80 kWh αποθηκευτική ισχύ:

Πίνακας 4.12: Προσδόκιμο ζωής, DOD και αριθμός κύκλων για αποθηκευτική ισχύ 80 kWh

Χρόνος ζωής (χρόνια)

16,20

Μέσο ενεργό βάθος εκφόρτισης (DOD)

24%

Αριθμός Κύκλων n

6897

Τα νέα αρχικά κόστη που προκύπτουν για τη νέα αποθηκευτική ισχύ φαίνονται στον Πίνακα 4.13.

Πίνακας 4.13: Νέα διαμορφωμένα κόστη που προκύπτουν από την αύξηση αποθηκευτικής ισχύος από 70 σε 80 kWh

IC_o	20.136 €
FC_o	297 €
R_o	1.715 €
IC_b	14.185,6 €
IC_w	2.950 €
IC_v	3.000 €

Τα νέα οικονομικά μεγέθη που προκύπτουν είναι τα εξής:

Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα οικονομικής προσομοίωσης για αποθηκευτική ισχύ 80 kWh

	10 έτη	25 έτη
Βαθμός απόδοσης (η):	0%	345%
Καθαρά Παρούσα Αξία (NPV):	-3.044,32 €	1.402,87 €
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR):	4%	12%
Χρόνος απόσβεσης(PBP):	11	έτη
Χρόνος διπλασιασμού(DCP):	17	έτη

Και στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε $IRR_{25} > i$, $NPV_{25} > 0$ συνεπώς η επένδυση είναι βιώσιμη. Ο χρόνος ζωής του συστήματος αποθήκευσης αυξήθηκε κατά περίπου δύο χρόνια ξανά.

Για 90 kWh αποθηκευτική ισχύ:

Πίνακας 4.15: Προσδόκιμο ζωής, DOD και αριθμός κύκλων για αποθηκευτική ισχύ 90 kWh

Χρόνος ζωής (χρόνια)

18,01

Μέσο ενεργό βάθος εκφόρτισης (DOD)

21%

Αριθμός Κύκλων n

7578

Τα νέα κόστη που προκύπτουν από την ένταξη τριών ακόμη μπαταριών φαίνονται στον Πίνακα 4.16.

Πίνακας 4.16: Νέα διαμορφωμένα κόστη που προκύπτουν από την αύξηση αποθηκευτικής ισχύος από 80 σε 90 kWh

IC_o	21.772 €
FC_o	297 €
R_o	1.715 €
IC_b	15.822,4€
IC_w	2.950 €
IC_v	3.000 €

Οι νέοι οικονομικοί συντελεστές φαίνονται στον Πίνακα 4.17.

Πίνακας 4.17: Αποτελέσματα οικονομικής προσομοίωσης για αποθηκευτική ισχύ 90 kWh

	10 έτη	25 έτη
Βαθμός απόδοσης (η):	0%	300%
Καθαρά Παρούσα Αξία (NPV):	-4.085,92 €	361,27 €
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR):	2%	10%
Χρόνος απόσβεσης(PBP):	12	έτη
Χρόνος διπλασιασμού(DCP):	18	έτη

Σε αυτήν την περίπτωση ο εσωτερικός συντελεστής (25 ετών) απόδοσης είναι ίσος με το επιτόκιο. Αυτό σημαίνει ότι η επένδυση είναι οριακή. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι χρήσιμη η αξιολόγηση της καθαρής παρούσας αξίας. Σε περίπτωση που είναι θετική η επένδυση εγκρίνεται διότι εμφανίζει θετικές χρηματοροές. Σε αυτό το σημείο τα απλά κριτήρια αγνοούνται διότι η αξιοπιστία τους είναι πολύ μικρή. Ο χρόνος ζωής της μπαταρίας συνολικά επιμηκύνθηκε κατά έξι έτη από την αρχή της προσομοίωσης, γεγονός αξιοσημείωτο.

Για 100 kWh αποθηκευτική ισχύ:

Πίνακας 4.18: Προσδόκιμο ζωής, DOD και αριθμός κύκλων για αποθηκευτική ισχύ 100 kWh

Χρόνος ζωής (χρόνια)

19,64

Μέσο ενεργό βάθος εκφόρτισης (DOD)

19%

Αριθμός Κύκλων n

8172

Τα νέα αρχικά κόστη φαίνονται στον Πίνακα 4.19 (33 μπαταρίες σύνολο)

Πίνακας 4.19: Νέα διαμορφωμένα κόστη που προκύπτουν από την αύξηση αποθηκευτικής ισχύος από 90 σε 100 kWh

IC_o	23.955 €
FC_o	297 €
R_o	1.715 €
IC_b	18.004,8€
IC_w	2.950 €
IC_v	3.000 €

Οι οικονομικοί συντελεστές φαίνονται στον Πίνακα 4.20.

Πίνακας 4.20: Αποτελέσματα οικονομικής προσομοίωσης για αποθηκευτική ισχύ 100 kWh

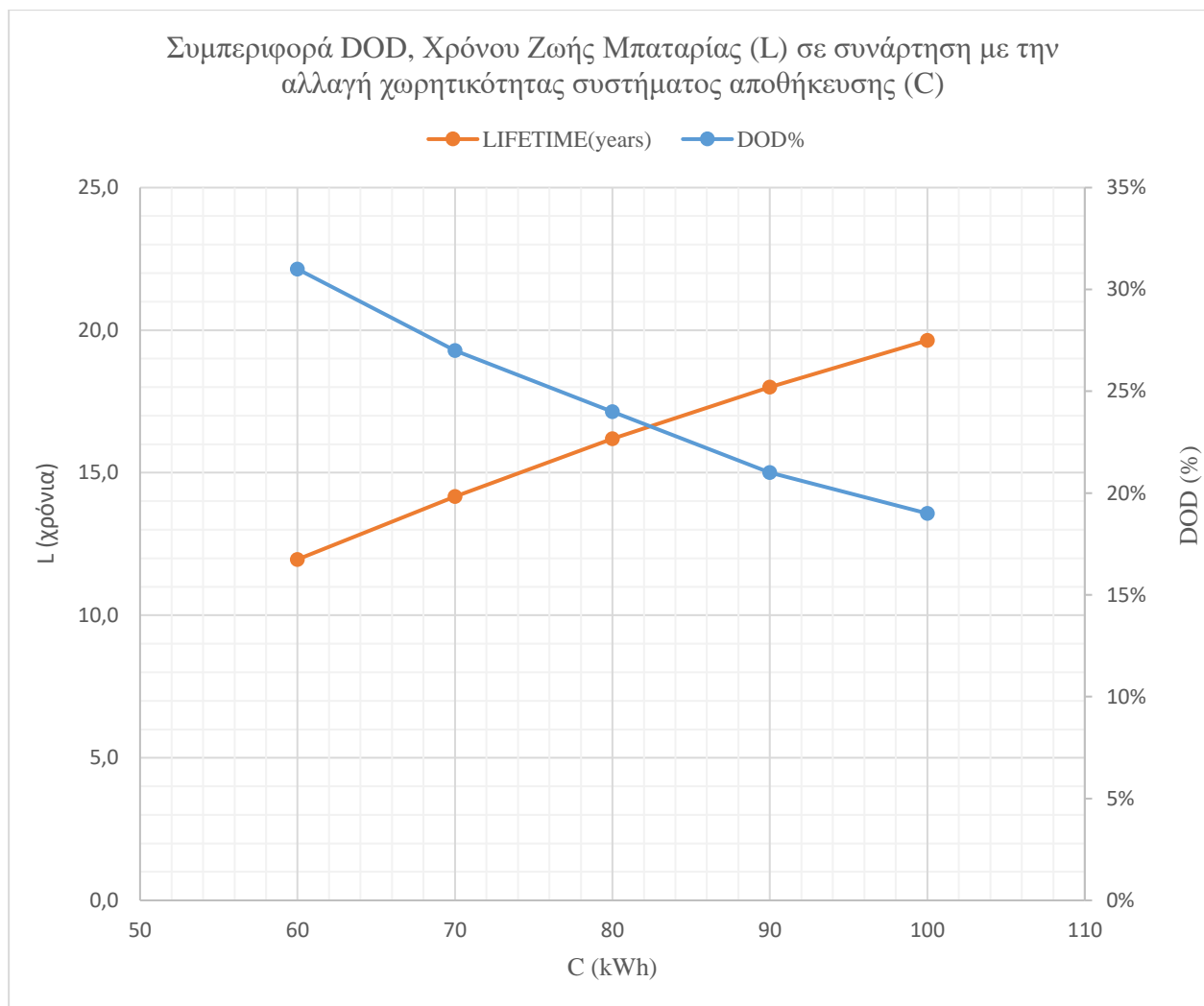
	10 έτη	25 έτη
Βαθμός απόδοσης (η):	0%	249%
Καθαρά Παρούσα Αξία (NPV):	-5.474,72 €	-1.027,53 €
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR):	0%	9%
Χρόνος απόσβεσης(PBP):	13	έτη
Χρόνος διπλασιασμού(DCP):	19	έτη

Στην περίπτωση αυτή, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο κρίνοντας από την προηγούμενη προσομοίωση, ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης είναι μικρότερος από το επιτόκιο αναγωγής ($IRR_{25} < i$). Σε συνδυασμό και με την αρνητική τιμή της καθαρής παρούσας αξίας, το συγκεκριμένο επενδυτικό πλάνο απορρίπτεται. Όπως είναι λογικό επακόλουθο, αυτό είναι και το τέλος της προσομοίωσης καθώς αν αυξηθεί κι άλλο η χωρητικότητα θα έχει ως συνέπεια την μείωση των NPV_{25} , IRR_{25} οπότε το επενδυτικό πλάνο εκ νέου μάταια θα απορριφθεί.

4.5.2 Ανάλυση ευαισθησίας αποθηκευτικής ισχύος, βάθους εκφόρτισης, χρόνου ζωής και οικονομικής απόδοσης

Κύρια ζητούμενα σε αυτό το στάδιο είναι να απεικονισθεί γραφικά η επιρροή του DOD στον χρόνο ζωής των μπαταριών αλλά και στο τελικό κόστος επένδυσης όπως επίσης και να κατανοηθεί η σύνδεση μεταξύ αποθηκευτικής ισχύος-βάθους εκφόρτισης-εκτιμώμενου χρόνου ζωής.

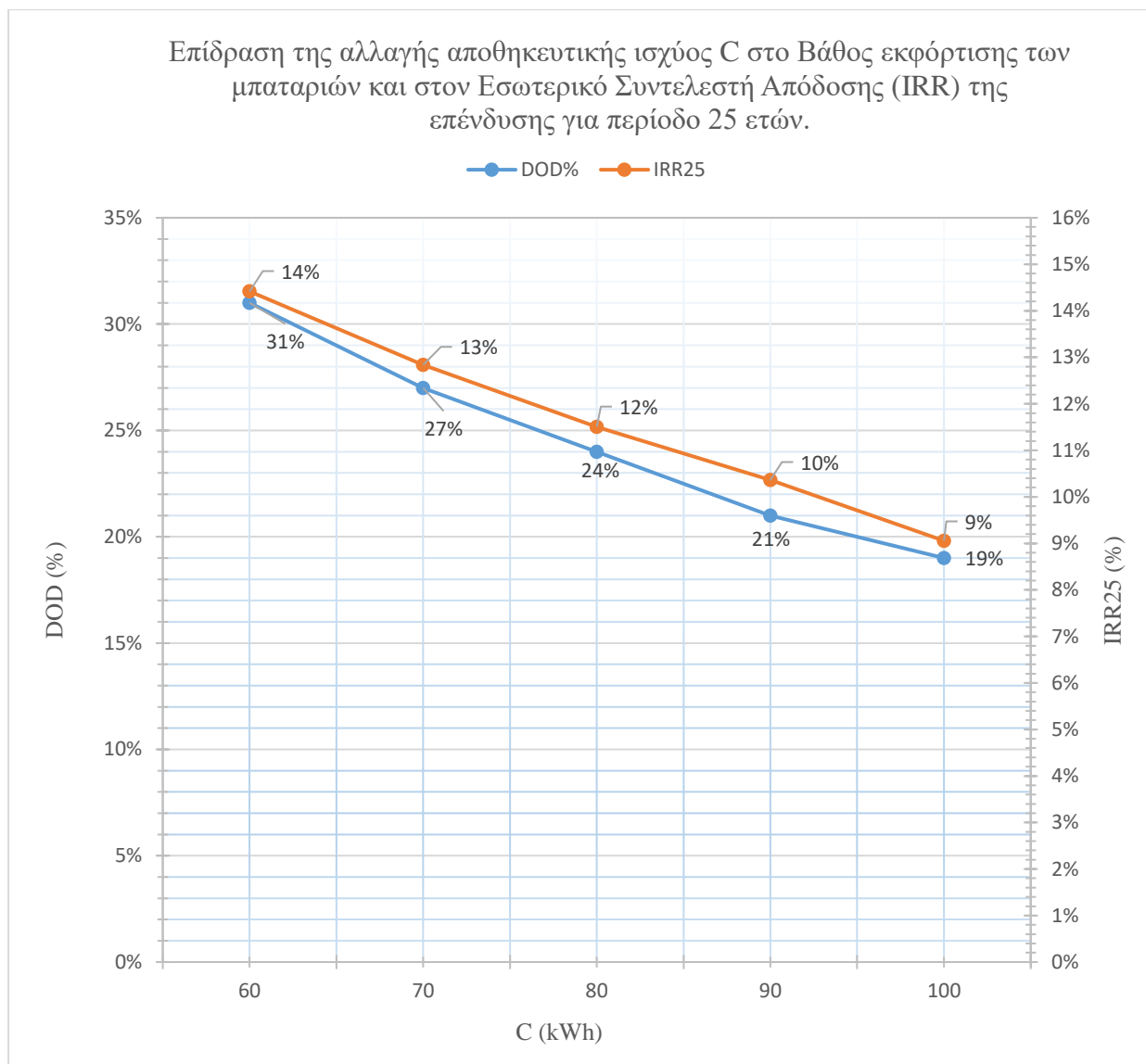
Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν τα σχήματα 4.7, 4.8, 4.9.



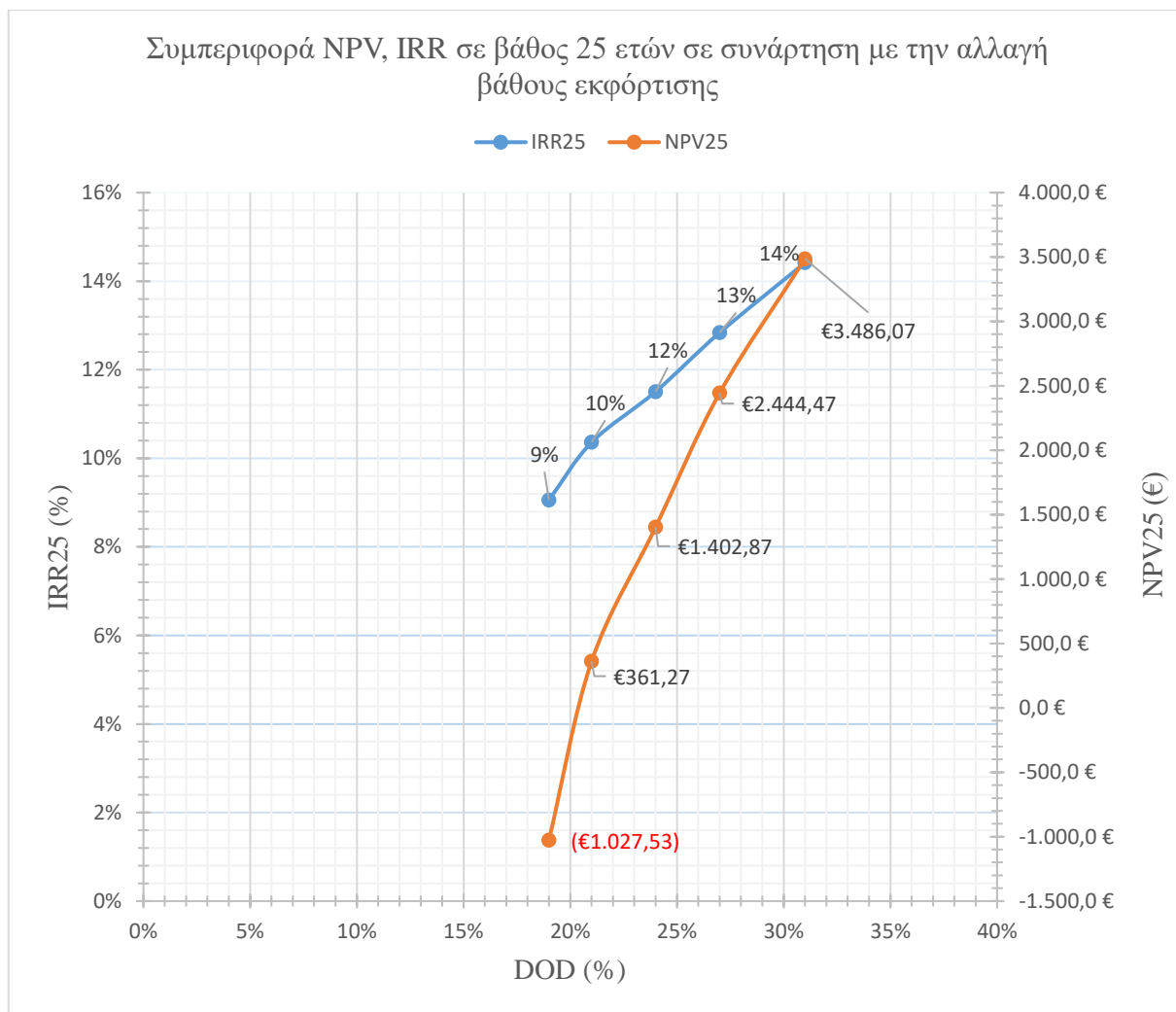
Σχήμα 4.7: Συμπεριφορά DOD, L σε σχέση με την αύξηση της αποθηκευτικής ισχύος για συστοιχία μπαταριών μολύβδου-οξέος

Στο σχήμα 4.7 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η αποθηκευτική ισχύς των μπαταριών τόσο μειώνεται το βάθος εκφόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι με την υπερδιαστασιολόγηση του αποθηκευτικού συστήματος επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της φθοράς των συσσωρευτών. Αυτό αποτυπώνεται έμπρακτα από την αύξηση του εκτιμώμενου χρόνου ζωής. Το βάθος εκφόρτισης και ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής της μπαταρίας αποτελούν μεγέθη που συμπεριφέρονται αντίθετα.

Αναλυτικότερα, στα σχήματα 4.8, 4.9 αποτυπώνεται η οικονομική επίπτωση της μεταβολής του βάθους εκφόρτισης.



Σχήμα 4.8: Μεταβολή του βάθους εκφόρτισης και του IRR συναρτήσει της αλλαγής αποθηκευτικής ισχύος μπαταρίας μολύβδου-οξέος



Σχήμα 4.9: Αποτύπωση οικονομικής αποδοτικότητας της επένδυσης σε σχέση με την ανάγκη μείωσης του DOD για επίτευξη μεγαλύτερου χρόνου ζωής μπαταριών μολύβδου-οξέος

Παρατηρείται ότι η ανάγκη για μείωση του βάθους εκφόρτισης προϋποθέτει την αύξηση της αποθηκευτικής ισχύος (σχήμα 4.8). Όμως, όταν συμβαίνει αυτό τα αρχικά κόστη της επένδυσης αλλάζουν καθώς στα ήδη υπάρχοντα κόστη προστίθενται νέα, που αφορούν αγορά παραπάνω συσσωρευτών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η οικονομική απόδοση της επένδυσης σε βάθος εικοσιπενταετίας.

Από το σχήμα 4.8 φαίνεται ότι η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή που μπορεί να πάρει το IRR είναι ίση με το επιτόκιο στην αγορά (10%). Τραβώντας την νοητή κάθετη γραμμή προς τον άξονα χ, φαίνεται ότι υπάρχει θετικό NPV (361,21€) και αυτό γίνεται για DOD ίσο με 21%. Έχοντας αυτά υπόψη, και με βάση το σχήμα 4.7, η αποθηκευτική ισχύς και ο χρόνος ζωής της μπαταρίας σε εκείνο το σημείο είναι 90 kWh και 18 χρόνια αντίστοιχα. Στην αρχή της προσομοίωσης με χωρητικότητα 60 kWh το σύστημα αποθήκευσης παρουσιάζει εκτιμώμενο χρόνο ζωής 12 έτη με βάθος εκφόρτισης 31%.

Συμπερασματικά, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω το καλύτερο σημείο λειτουργίας της επένδυσης είναι για χωρητικότητα αποθηκευτικής ισχύος 90 kWh. Αυτό γιατί τηρεί

το συμβόλαιο της μεγιστοποίησης του χρόνου ζωής του συστήματος αποθήκευσης με την παράλληλη διατήρηση της βιωσιμότητας της επένδυσης. Επίσης, παρατηρείται η αύξηση κατά 6 χρόνια του εκτιμώμενου χρόνου ζωής των μπαταριών σε σχέση με την αρχική προσομοίωση, ως απόρροια της αυξημένης χωρητικότητας αποθηκευτικού συστήματος, με στόχο τη μείωση της φθοράς τους λόγω υψηλότερων βαθμών εκφόρτισης. Φαίνεται λοιπόν, ότι η καλύτερη επιλογή κέρδους-χρόνου ζωής στην συγκεκριμένη περίπτωση συμβαίνει για αποθηκευτική ισχύ 90 kWh.

5 ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πιο κρίσιμος παράγοντας που αποθαρρύνει την κοινότητα ως προς την μαζική επενδυτική δραστηριότητα σε υβριδικά συστήματα ΑΠΕ μικρής κλίμακας (π.χ. τύπου πράσινης εξοχικής κατοικίας) είναι η σημαντική διαφορά κόστους εγκατάστασης και συντήρησης σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Γι' αυτό κύριος υπεύθυνος είναι τα πολύ ακριβά -και με σχετικά μικρό χρόνο ζωής- αποθηκευτικά συστήματα τύπου συσσωρευτών.

Μέχρι σήμερα, η καλύτερη τεχνολογία από τεχνικής άποψης είναι αυτή των ιόντων λιθίου. Απευθύνονται ωστόσο σε πολύ μικρά φορτία ισχύος και γι' αυτό χρήζουν ευρείας εφαρμογής σε ηλεκτρονικά μέσα και είναι πολύ ακριβές μπαταρίες. Οι συσσωρευτές που έχει παρατηρηθεί ότι έχουν την καλύτερη συμπεριφορά κόστους-χρόνου ζωής σε καταναλωτικές κλίμακες όπως ένα σπίτι είναι οι μολύβδου-οξέος. Πολύ καλά συστήματα είναι επίσης οι μπαταρίες νατρίου-θείου αλλά έχουν τεράστια κόστη συντήρησης.

Όσον αφορά τις μολύβδου-οξέος, διαχωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, τις κλειστού τύπου και ανοιχτού τύπου. Αυτές που χρησιμοποιούνται σε υβριδικά συστήματα κατά κόρων είναι οι δεύτερες διότι παρουσιάζουν καλύτερες τιμές στην αγορά. Μια τυπική τέτοια μπαταρία ανοιχτού τύπου βαθιάς εκφόρτισης 50% έχει πρακτικά διάρκεια ζωής 5-10 χρόνια σε ένα εύρος κύκλων 1000-2500.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας εξετάστηκε αν με την μείωση του βάθους εκφόρτισης, που είναι ο κύριος υπεύθυνος φθοράς της μπαταρίας, υπάρχει ταυτόχρονη αύξηση του χρόνου ζωής, και αν ναι, το κατά πόσο συμφέρον είναι. Για το λόγο αυτό έγιναν προσομοιώσεις για πέντε διαφορετικές χωρητικότητες συστήματος αποθήκευσης (60, 70, 80, 90, 100 kWh). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν καταγράφουν μείωση του DOD κατά 10%, δηλαδή από 31% που ήταν στις 60 kWh, στο 21% που έφτασε στις 90 kWh αποθηκευτικής ισχύος. Παράλληλα, ο χρόνος ζωής που κέρδισε το σύστημα αποθήκευσης από την υπερδιαστασιολόγηση είναι 6 έτη, νούμερο πολύ σημαντικό. Το σημείο λειτουργίας της επένδυσης που έχει τον καλύτερο συνδυασμό χρόνου ζωής-βιωσιμότητας επένδυσης είναι εκεί όπου η χωρητικότητα του συστήματος συσσωρευτών έχει ισχύ 90 kWh. Για το σημείο αυτό από την οικονομική προσομοίωση προκύπτει ένας εσωτερικός συντελεστής απόδοσης ίσος με 10% ενώ ξεκίνησε η προσομοίωση με συντελεστή 14%. Αυτό από μόνο του δείχνει το ότι η επένδυση είναι κρίσιμη ως προς την απώλεια κεφαλαίων (επιτόκιο ίσο με IRR_{25}), άρα για να κριθεί σωστά θα πρέπει να φανεί αν εμφανίζονται θετικές χρηματοροές το 25^ο έτος. Πράγμα που συμβαίνει ($NPV_{25} > 0$) συνεπώς η επένδυση εγκρίνεται.

Κλείνοντας, θα μπορούσε να πει κανείς ότι η επένδυση με χωρητικότητα 60 kWh και $IRR_{25} = 14\%$ είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά από αυτήν με τις 90 kWh και $IRR_{25} = 10\%$. Εκ πρώτης όψεως είναι μια σωστή σκέψη όμως δε λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι οι μπαταρίες στα 12 χρόνια θα έχουν «πεθάνει» και άρα το αρχικό κόστος της εν λόγω

επένδυσης θα είναι πολλαπλάσιο σε βάθος 25 ετίας. Συνεπώς λαμβάνεται ως βασικότερο κριτήριο η μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ‘Installation, commissioning and operating instructions for vented stationary leadacid batteries’. HOPPECKE, 2015, [Online]. Available: <https://www.solarworld.co.za/wp-content/uploads/2020/02/vlmanualen.pdf>.
- [2] ‘Συμφωνία των Παρισίων για την κλιματική αλλαγή’. <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/paris-agreement/>
- [3] ‘Figure 1. Global wind energy capacity growth. Data source: The Wind...’, *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Global-wind-energy-capacity-growth-Data-source-The-Wind-Power-Statistics-19_fig1_342995337
- [4] Ι. Καλδέλλης and Κ. Καββαδίας, *Εργαστηριακές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε, 2001.
- [5] ‘Φωτοβολταϊκό Στοιχείο’, *Science Wiki*.
- [6] Θ. Ηλιόπουλος, *Προσομοίωση και Αξιολόγηση Υβριδικών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας μικρής κλίμακας που εμπεριέχουν τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, 2014.
- [7] ‘Sulas Industries | Groundbreaking Solar Tracking Systems’. <https://www.sulasindustries.com/>
- [8] ‘Ανεμογεννήτρια για σπίτι τιμή και τρόπος λειτουργίας’, *OLENG*, Sep. 30, 2016. <https://www.oleng.eu/anemogenitria-times-leitourgia/>
- [9] ‘Home - Eurostat’. <https://ec.europa.eu/eurostat>
- [10] ‘Ινστιτούτο Ενέργειας Νοτιοανατολικής Ευρώπης’. <https://www.iene.gr/>
- [11] ‘energypress.gr’, *energypress.gr*. <https://energypress.gr/>
- [12] Ηλιόπουλος Α. Θεόδωρος, *Προσομοίωση και Αξιολόγηση Υβριδικών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας μικρής κλίμακας που εμπεριέχουν τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας*. Πολυτεχνείο Κρήτης Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης.
- [13] Β. Προύσαλης and Δ. Σταματέρη, *Εφαρμογές μέσω αποθήκευσης σε ενεργειακές υπηρεσίες στα συστήματα του PJM και της California*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2017.

- [14] ‘Κεφάλαιο 3: Υβριδικοί σταθμοί ηλεκτρικής ενέργειας’2021.
Available: https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/3556/1/02_chapter_3.pdf.
- [15] C.-J. Yang, ‘Pumped Hydroelectric Storage’, in *Storing Energy*, Elsevier, 2016,
pp. 25–38.
- [16] ‘ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ’, Αθήνα, 2013. Available:
www.sealab.gr.
- [17] J. Menendez and J. Loredo, ‘Compressed air energy storage plants in abandoned
underground mines: Preliminary analysis and potential’, Mar. 2019.
- [18] R. Guerrero-Lemus and J. M. Martínez-Duart, ‘Wind Power’, in *Renewable
Energies and CO₂: Cost Analysis, Environmental Impacts and Technological
Trends- 2012 Edition*, R. Guerrero-Lemus and J. M. Martínez-Duart, Eds. London:
Springer, 2013, pp. 153–180.
- [19] ‘Magnetic Energy Storage - an overview | ScienceDirect Topics’.
[https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/magnetic-
energy-storage](https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/magnetic-energy-storage)
- [20] ‘Πυκνωτής’, *Βικιπαίδεια*.
- [21] M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenbergglabe, and W. Rosehart, ‘Energy
storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated
review’, *Energy Sustain. Dev.*, vol. 14, no. 4, pp. 302–314, Dec. 2010, doi:
10.1016/j.esd.2010.09.007.
- [22] ‘EN_OPzV_datasafe.pdf’. Accessed: Jan. 30, 2021. [Online]. Available:
https://www.eurobathellas.gr/image/catalog/pdf/enersys/EN_OPzV_datasafe.pdf.
- [23] N. Narayan *et al.*, ‘Estimating battery lifetimes in Solar Home System design
using a practical modelling methodology’, 2018.
Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918310225>.
- [24] ‘Store-on grid scheme model for grid-tied solar photovoltaic systems for
industrial sector application_ Costs analysis | Elsevier Enhanced Reader’.
- [25] ‘Ισχύς ανεμογεννήτρια 3000W’, *Flexpro-industry.com*. [https://www.flexpro-
industry.com/e-commerce/el/emi-epaggelmatik/35--3kw-3000w.html](https://www.flexpro-industry.com/e-commerce/el/emi-epaggelmatik/35--3kw-3000w.html)

[26] ‘Φωτοβολταϊκό Πάνελ Amerisolar 400W 24V mono 144 half cells AS-6M-HC’,
Smart Solar. <https://www.smart-solar.gr>

[27] ‘Eco-PVV 1500 (2V 1580Ah C100)’. <https://www.mipesun.gr/vendors/eco-pvv/eco-pvv-1500-2v-1580ah-c100.htm>