



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

*Αξιολόγηση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας με χρήση της
μεθόδου πολυκριτήριας ανάλυσης MABAC: η περίπτωση του
μικροδικτύου*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ματθαίος Μ. Σαματακής

Επιβλέπων : Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

*Αξιολόγηση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας με χρήση της
μεθόδου πολυκριτήριας ανάλυσης MABAC: η περίπτωση του
μικροδικτύου*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ματθαίος Μ. Σαματακής

Επιβλέπων : Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16η Ιουλίου 2024.

.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δημήτριος Ασκούνης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ευάγγελος Μαρινάκης
Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2024

.....
Ματθαίος, Μιχαήλ, Σαματακής

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ματθαίος Μ. Σαματακής, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, στο επίκεντρο των διεθνών και ευρωπαϊκών πολιτικών βρίσκεται το περιβάλλον και η ενέργεια. Για την αντιμετώπιση της ρύπανσης που προκαλείται κυρίως από τα ορυκτά καύσιμα, κρίνεται επιτακτική η χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Ωστόσο, στις μέρες μας, η ενεργειακή ζήτηση δεν μπορεί να καλυφθεί μόνο με ΑΠΕ, καθώς η παραγωγή ενέργειας είναι διακοπτόμενη. Ως λύση στο πρόβλημα καθίστανται οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας. Σε αυτό το πλαίσιο, έχουν προταθεί τα μικροδίκτυα τα οποία δύνανται, είτε να είναι αυτόνομα, είτε συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο για υποστήριξη. Πιο συγκεκριμένα, τα μικροδίκτυα είναι μικρογραφία ενός ηλεκτρικού δικτύου και περιλαμβάνουν την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ, την αποθήκευση, τη μεταφορά και τον έλεγχο στα έξυπνα μικροδίκτυα. Κύριος σκοπός ενός μικροδικτύου, όπως και του κεντρικού, παραμένει η κάλυψη της ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια.

Η ενσωμάτωση των συστημάτων αποθήκευσης στα μικροδίκτυα απαιτεί τη λήψη αποφάσεων σχετικά με, την κατά περίπτωση, επιλογή της πιο κατάλληλης τεχνολογίας. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να δομηθεί ως ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπου διαφορετικές τεχνολογίες αποθήκευσης αξιολογούνται βάσει κριτηρίων που καλύπτουν τεχνολογικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις μεταξύ άλλων. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στη διερεύνηση των βέλτιστων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας για την περίπτωση του μικροδικτύου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται η αντησιοταμίευση, τα συστήματα αποθήκευσης με συμπιεσμένο αέρα, ο σφόνδυλος, η μπαταρία ιόντων-λιθίου, η μπαταρία νατρίου-θείου, η μπαταρία μολύβδου-οξέος, η μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής, ο υπερ-πυκνωτής, το σύστημα υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης και υδρογόνου. Για την αξιολόγησή τους, επιλέχθηκαν συγκεκριμένα κριτήρια όπως είναι η ενεργειακή πυκνότητα, η πυκνότητα ισχύος, το κεφαλαιουχικό κόστος, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ο ρυθμός ισχύος, η απόδοση κύκλου, ο χρόνος απόκρισης και ο χρόνος ζωής.

Οι εν λόγω εναλλακτικές, μαζί με το σύνολο των κριτηρίων, ορίζουν ένα κλασικό πρόβλημα πολυκριτηριακής ανάλυσης. Για αυτόν τον λόγο, επιλέχθηκε η μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης MABAC, η οποία βασίζεται στην προσέγγιση της απόστασης από τη συνοριακή περιοχή των κριτηρίων. Για τη στάθμιση των κριτηρίων, επιλέχθηκε η μέθοδος αναλυτικής ιεράρχησης (ΑΗΡ), βασισμένη σε κατάλληλο ερωτηματολόγιο για την εκμείωση της άποψης ειδικών. Για τη συνάθροιση των μεμονωμένων απαντήσεων και την εκτίμηση των τελικών βαρών, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της συνάθροισης των μεμονωμένων κρίσεων (ΑΙJ). Σύμφωνα με την παρούσα ανάλυση, ως πιο κατάλληλες τεχνολογίες για τη περίπτωση του μικροδικτύου καταλήγουν να είναι ο υπερπυκνωτής, η αντησιοταμίευση και ο σφόνδυλος.

Λέξεις κλειδιά: αποθήκευση ενέργειας, τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, MABAC, ΑΗΡ, κριτήρια, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, περιβάλλον, μικροδίκτυα, πολυκριτηριακή ανάλυση

Abstract

In the last years, energy and environment have been posed in center of national and European policies. To mitigate pollution, coming mainly from fossil fuels combustion, the use of Renewable Energy Sources (RES) has been characterized as imperative. On the other hand, energy demand cannot be covered only by RES, due to the intermittent nature of RES production. Therefore, energy storage is the necessary pathway towards the increased penetration of RES in the power system. In this context, microgrids have been rapidly developed, operated either in autonomous or in connected to the central network. More precisely, microgrids constitute a micro-scale electrical network, including RES production, storage, transmission and control in smart grids. The main objective within a microgrid, likewise the central ones, is to cover the electricity demand.

The integration of storage systems in microgrids requires decision making processes on selecting the most appropriate technology. This problem may be formulated as a multi-criteria analysis problem, in which various storage technologies may be evaluated across criteria covering various technology, economic, environmental, and social aspects among others. In this context, the present diploma thesis aims at exploring the best energy storage technologies for the case of microgrid. More precisely, we examine pumped hydro energy storage, compressed air energy storage, flywheel, lithium-ion batteries, sodium-sulfur batteries, redox-flow batteries, lead-acid batteries, super-capacitors, superconducting magnetic energy storage system, molten salts, hydrogen. For criteria, we consider power density, energy density, capital cost, environmental impact, power rating, cycle efficiency, response time, life time.

Storage technologies, along with criteria set, define a classical multi-criteria analysis problem. To tackle with this problem, MABAC method was selected, which is based on the approximate distance from the border area. To weigh criteria, Analytic Hierarchy Process (AHP) method was employed, based on an appropriate questionnaire in order to elicit experts' point of view. Moreover, to aggregate individual answers, the Aggregation of Individual Judgment (AIJ) technique was used. According to the present analysis, technologies that outperformed were super-capacitor, pumped hydro energy storage and flywheel.

Key words: energy storage, energy storage technologies, MABAC, AHP, criteria, renewable energy sources, environment, microgrid, multi-criteria decision analysis

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ψαρρά για την ευκαιρία και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής. Επιπλέον ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Γεώργιο Τραχανά ερευνητή του εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης που ήταν συνεχώς δίπλα μου, για την υπομονή και την καθοδήγησή του για την ολοκλήρωση της διπλωματικής. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη στην προσπάθειά μου σε όλη τη διάρκεια φοίτησής μου.

Πίνακας εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΑΙ ΑΙΛΙΚΩΝ ΑΠΕ (ΠΗΓΗ: HTTPS://WWW.OT.GR/2023/04/12/ENERGEIA/ENERGEIA-I-ELLADA-EK-TON-IGETIDON-STI-DIEISDYSI-TON-ARE-STO-ENERGEIAKO-MEIGMA/)	19
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ :(ΠΗΓΗ: FU ET AL, 2021)	26
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΝΟΣ SMART ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ (SMART MICROGRID CONTROLLER).....	27
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΝΟΣ SMART ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ (ΠΗΓΗ: SMART MICROGRIDS, X.X.)	28
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΝΟΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ [MICROGRID Η ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ, X.X.]	29
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ ΣΤΗΝ ΤΗΛΟ (ΠΗΓΗ: TILOS PROJECT,X.X.).....	31
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ, NAVY YARD, FILADELFIA (ΠΗΓΗ: NAVY YARD MICROGRID, X.X.).....	31
ΕΙΚΟΝΑ 8: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ, LAC-ΜÉGANTIC, ΚΕΜΠΕΚ (ΠΗΓΗ: LAC-ΜÉGANTIC MICROGRID, X.X.).....	32
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΠΗΓΗ: SHARMA ET AL, 2022).....	36
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΟΙ ΔΥΟ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ (ΠΗΓΗ: FAISAL ET AL, 2018)	38
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ (ΠΗΓΗ: ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ, 2016)	40
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΙ PHES (ΠΗΓΗ: REHMAN ET AL, 2015)	41
ΕΙΚΟΝΑ 13: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΜΦΙΛΟΧΙΑ (ΠΗΓΗ: ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗ: ΣΤΗΝ ΑΜΦΙΛΟΧΙΑ ΤΟ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ, 2020).....	43
ΕΙΚΟΝΑ 14: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (ΠΗΓΗ: ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ, 2016) 45	
ΕΙΚΟΝΑ 15: ΠΙΟ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΤΩΝ CAES (ΠΗΓΗ: ΜΑΗΛΙΑ ET AL, 2014).....	46
ΕΙΚΟΝΑ 16: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ CAES ΣΤΟ HUNTORF ΤΗΣ ΓΕΡΜΑΝΙΑΣ ΜΕ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑ 290 MW (ΠΗΓΗ: ΜΑΗΛΙΑ ET AL, 2014)	48
ΕΙΚΟΝΑ 17: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ CAES ΣΤΟ MCINTOSH ΤΗΣ ΑΛΑΜΠΑΜΑ ΜΕ ΙΣΧΥ 110 MW) (ΠΗΓΗ: CAVALLO, 2007).....	48
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΣΦΟΝΔΥΛΟΥ ΚΑΙ Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ (ΠΗΓΗ: ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ, 2016)	49
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΦΟΝΔΥΛΩΝ (ΠΗΓΗ: ΜΑΗΛΙΑ ET AL, 2014).....	50
ΕΙΚΟΝΑ 20: ΔΕΥΤΕΡΗ ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΣΦΟΝΔΥΛΩΝ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ (ΠΗΓΗ: LI ET PALAZZOLO, 2022)	50
ΕΙΚΟΝΑ 21: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΜΕ ΣΦΟΝΔΥΛΟ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ (ΠΗΓΗ: OLABI ET AL, 2021).....	51
ΕΙΚΟΝΑ 22: ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΦΟΝΔΥΛΩΝ (ΠΗΓΗ: GLOBAL FLYWHEEL ENERGY STORAGE MARKET FORECAST 2020-2028, X.X.)	52
ΕΙΚΟΝΑ 23: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΑΣ ΟΠΟΙΑΔΗΠΟΤΕ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ (ΠΗΓΗ: ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES: CHALLENGES AND OUTLOOK, 2020).....	54
ΕΙΚΟΝΑ 24: ΣΤΑΘΜΟΣ HORNSDALE POWER RESERVE ΤΗΣ TESLA ΣΤΗΝ ΑΥΣΤΡΑΛΙΑ (ΠΗΓΗ: ALVAREZ, 2018).....	56
ΕΙΚΟΝΑ 25: ΔΟΜΗ ΜΙΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ (ΠΗΓΗ: ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ, 2016)	57
ΕΙΚΟΝΑ 26: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΜΟΛΥΒΔΟΥ ΟΞΕΟΣ (ΠΗΓΗ: HUANG ET AL, 2015).....	58
ΕΙΚΟΝΑ 27: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΜΟΛΥΒΔΟΥ ΟΞΕΟΣ (ΠΗΓΗ: RISING RENEWABLE ENERGY INSTALLATIONS INFLATE THE DEMAND FOR STATIONARY LEAD ACID BATTERIES MARKET, 2021)	59

ΕΙΚΟΝΑ 28: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΝΑΤΡΙΟΥ- ΘΕΙΟΥ [ΠΗΓΗ: GANTHIA ET AL, 2022].	60
ΕΙΚΟΝΑ 29: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΘΕΙΟΥ ΝΑΤΡΙΟΥ (ΠΗΓΗ: PARNELL, 2017)...	61
ΕΙΚΟΝΑ 30: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΛΙΘΙΟΥ (ΠΗΓΗ: MICROGRIDS, X.X.)	62
ΕΙΚΟΝΑ 31: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΛΙΘΙΟΥ (ΠΗΓΗ: KOSEOGLU ET AL, 2018) ..	63
ΕΙΚΟΝΑ 32: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΡΟΗ ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗΣ ΒΑΝΑΔΙΟΥ (ΠΗΓΗ: ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΡΟΗΣ VANADIUM 5KW, VANADIUM REDOX FLOW BATTERY, X.X.)	65
ΕΙΚΟΝΑ 33: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΡΟΗ ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗΣ (ΠΗΓΗ: CLEMENTE ET COSTA- CASTELLO, 2020).....	66
ΕΙΚΟΝΑ 34: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΥΓΜΕΝΩΝ ΑΛΑΤΩΝ (ΠΗΓΗ: ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES: CHALLENGES AND OUTLOOK, 2020).....	70
ΕΙΚΟΝΑ 35: ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΤΗΓΜΕΝΩΝ ΑΛΑΤΩΝ (ΠΗΓΗ: ALSHAfi ET BICER, 2021)	70
ΕΙΚΟΝΑ 36: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΓΜΕΝΟΥ ΑΛΑΤΟΣ (ΠΗΓΗ: AURORA LI, 2023)	73
ΕΙΚΟΝΑ 37: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΗ (ΠΗΓΗ: SUPERCAPACITORS – A VIABLE ALTERNATIVE TO LITHIUM-ION BATTERY TECHNOLOGY?, 2020)	75
ΕΙΚΟΝΑ 38: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ (ΠΗΓΗ: HOW SUPERCAPACITORS ADDRESS MODERN ELECTRICAL SUPPLY CHALLENGES, X.X.)	77
ΕΙΚΟΝΑ 39: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (ΠΗΓΗ: EERA, SUPERCONDUCTING MAGNETIC ENERGY STORAGE, X.X.)	78
ΕΙΚΟΝΑ 40: ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ 69 ΕΩΣ 500KV (ΠΗΓΗ: ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ, 2016).....	80
ΕΙΚΟΝΑ 41: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΩΝΟΥ (ΠΗΓΗ: ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ, 2016)	81
ΕΙΚΟΝΑ 42: ΜΟΝΑΔΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ 25 kW (ΠΗΓΗ: ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ, 2016)	82
ΕΙΚΟΝΑ 43: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΩΝΟΥ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (GREEN HYDROGEN ENERGY STORAGE SYSTEM MARKET IS SET TO FLY HIGH IN YEARS TO COME, 2023)	83
ΕΙΚΟΝΑ 44: ΣΧΗΜΑ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ (ΠΗΓΗ: TORKAYESH, 2023)	102
ΕΙΚΟΝΑ 45: ΙΔΙΟΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΑΠΟ OCTAVE	107
ΕΙΚΟΝΑ 46: ΙΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΑΠΟ OCTAVE	107
ΕΙΚΟΝΑ 47: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΙΔΙΟΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΑΠΟ OCTAVE	108
ΕΙΚΟΝΑ 48: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕ ΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΠΗΓΗ: ΜΑΗΛΙΑ ET AL, 2014).....	115

Πίνακες

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ (ΠΗΓΗ: SHARMA ET AL, 2022)	90
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ.....	90
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ.....	91
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΚΛΙΜΑΚΑ ΕΝΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ	95
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΑ ΒΑΡΗ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ.....	108
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΒΑΡΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ.....	109
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ	110
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ	111
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ	112
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ	112
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΙΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ	113
ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΑΒΑC.....	114
ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΜΑΒΑC	114

Πίνακας ακρωνύμων

Ακρωνύμια	Σημασία
AC	Alternating Current
AEP	American Electric Power
AHP	Analytic Hierarchy Process
AIJ	Aggregation of Individual Judgment
ARAS	Additive Ratio Assessment
ARPA-E	Advanced Research Projects Agency–Energy
BEV	Battery Energy Vehicles
BNEF	Bloomberg New Energy Foundation
CAES	Compressed Air Energy System
CERTS	Consortium for Electric Reliability Technology Solution
CSP	Concentrated Solar Power
DC	Direct Current
DES	Distributed Energy Storage
DOE	Department of Energy
ECDL	Electrochemical Double Layer Capacitors
ESS	Energy Storage System
FESS	Flywheel Energy Storage System
FRT	Fault Ride Through

MACBETH	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique
MCDA	Multiple-Criteria Decision Analysis
MCDM	Multiple-Criteria Decision Method
MULTIMOORA	Multi-Objective Optimization Ratio Analysis
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion
P.R.	Power Rating
P2G	Power to Gas
PCS	Power Conditioning System
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
PHES	Pumped Hydro Energy System
PHS	Pumped Hydro System
PV	Φωτοβολταϊκά
RFB	Redox-Flow Batteries
RV	Recreational Vehicle
SHS	Solar Home Systems
SMES	Superconducting Magnetic Energy System
SWARA	Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis
TEPCO	Tokyo Electric Power Corporation

TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
VRB	Vanadium Redox Batteries
VRFB	Vanadium Redox-Flow Batteries
A.K.	Απόδοση Κύκλου
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Ε.Π.	Ενεργειακή Πυκνότητα
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΣΕΚ	Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα
Κ.Κ.	Κεφαλαιουχικό Κόστος
ΟΗΕ	Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών
Π.Α.	Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα
Π.Ι.	Πυκνότητα Ισχύος
ΡΑΕ	Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
ΣΗΘ	Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού Θερμότητας
ΣΠ	Συμβατική παραγωγή
Χ.Α.	Χρόνος απόδοσης
Χ.Ζ.	Χρόνος Ζωής

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	7
Πίνακας εικόνων.....	8
Πίνακες	9
Πίνακας ακρονύμων	10
1 Εισαγωγή.....	15
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	15
1.1.1 Ο κρίσιμος ρόλος τους	15
1.1.2 Παγκόσμια δρώμενα για ΑΠΕ και η θέση της Ελλάδας	16
1.1.3 Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	20
1.2 ΑΠΕ και Τεχνολογίες Αποθήκευσης	21
1.2.1 Ρόλος των Συστημάτων αποθήκευσης	21
1.2.2 Παγκόσμια δεδομένα για συστήματα αποθήκευσης και η θέση της Ελλάδας	23
1.3 Μικροδίκτυα	24
1.3.1 Ορισμός του Μικροδικτύου	24
1.3.2 Κατηγορίες Μικροδικτύων.....	26
1.3.3 Συνεισφορά του μικροδικτύου στην παραγωγή ενέργειας.....	29
1.3.4 Παραδείγματα στον κόσμο και την Ελλάδα.....	30
2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	33
3. Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας	36
3.1 Εισαγωγή	36
3.2 Μηχανικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.....	39
3.2.1 Αντλησιοταμίευση (PHES).....	39
3.2.2 Αποθήκευση Ενέργειας σε Συμπύεση Αέρα (CAES)	44
3.2.3 Σφόνδυλοι (Flywheels).....	48
3.3 Ηλεκτροχημικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.....	53
3.4 Μπαταρίες.....	53
3.4.1.1 Μπαταρίες μολύβδου-οξέος (LEAD-ACID)	56
3.4.1.2 Μπαταρίες Νατρίου- Θείου (Sodium-Sulfur).....	59
3.4.1.3 Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Lithium-Ion Battery)	61
3.4.1.4 Μπαταρίες Ροής Οξειδοαναγωγής (REDOX-FLOW)	64
3.5 Θερμικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας	68
3.5.1 Τηγμένα άλατα (Molten-Salts)	68

3.6	Ηλεκτρικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας	73
3.6.1	Υπερ-πυκνωτές (Super- capacitors)	73
3.6.2	Σύστημα Υπεραγωγίμης Μαγνητικής Αποθήκευσης Ενέργειας (Super Magnetic Energy System ή SMES)	77
3.7	Χημικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας	81
3.7.1	Υδρογόνο (Hydrogen, H ₂)	81
4.	Κριτήρια Αξιολόγησης	87
4.1	Πυκνότητα Ισχύος	87
4.2	Ενεργειακή πυκνότητα	87
4.3	Κόστος Κεφαλαίου	88
4.4	Περιβαλλοντικό αποτύπωμα	88
4.5	Ρυθμός ισχύος	88
4.6	Απόδοση κύκλου	88
4.7	Χρόνος Απόκρισης.....	89
4.8	Διάρκεια Ζωής.....	89
5.	Δεδομένα.....	90
6.	Μεθοδολογία.....	92
6.1	Μέθοδος Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP)	92
6.1.1	Εισαγωγή.....	92
6.1.2	Περιγραφή.....	93
6.1.3	Εφαρμογή.....	96
6.1.4	Συμπεράσματα	100
6.2	Μέθοδος MABAC	100
6.2.1	Εισαγωγή.....	100
6.2.2	Περιγραφή.....	102
6.2.3	Εφαρμογές	106
7.	Υπολογισμοί.....	107
7.1	Μέθοδος AHP	107
7.2	Μέθοδος MABAC	109
8.	Αποτελέσματα	114
9.	Συμπεράσματα.....	115
10.	Παράρτημα	117
11.	Αναφορές.....	121

1 Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1.1.1 Ο κρίσιμος ρόλος τους

Η ενέργεια και το περιβάλλον προβλέπεται να γίνουν δύο από τα πιο δύσκολα και μεγάλα ζητήματα του κόσμου στο μέλλον (Zhidong, 2003; Benestad et al, 1993; Omer, 2008). Σύμφωνα με την British Petroleum, η κατανάλωση καυσίμου βαίνει αυξανόμενη σημαντικά τα τελευταία 30 χρόνια, από 6630 Mtoe το 1980 σχεδόν σε 11.630 Mtoe το 2009 (Mahlia et al, 2014). Από την άλλη πλευρά, οι συνολικές εκπομπές αερίων CO₂ αυξήθηκαν σημαντικά, από 9,396 εκατομμύρια μετρικούς τόνους το 1960 σε 32,083 εκατομμύρια μετρικούς τόνους το 2008 (Cheralathan et al, 2007). Έτσι, για την αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων, η μετάβαση από την εξάρτηση από τις συμβατικές πηγές ενέργειας στην υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σηματοδοτεί μια καθοριστική στροφή προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον. Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν οριστεί οι ενεργειακοί πόροι που υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν γίνει προσπάθειες προκειμένου να ενσωματωθούν καινοτόμες τεχνολογίες για την ανακούφιση από τα περιβαλλοντικά προβλήματα, την έλλειψη ενέργειας και τη μείωση του υψηλού κόστους των νέων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Πολλές ερευνητικές και επιστημονικές εργασίες έχουν γίνει για τον εντοπισμό και την εφαρμογή της καταλληλότερης τεχνολογίας ώστε να αντιμετωπιστούν ορισμένα από αυτά τα προβλήματα (Abdelaziz et al, 2011; Mekhilef et al, 2011; Saidur et al, 2011; Chong et al, 2011; Mahlia et al, 2001; Mahlia et al, 2002). Οι ΑΠΕ προσφέρουν ενέργεια άφθονα και είναι συνεχώς ανανεούμενες, προωθώντας μια αρμονική σχέση μεταξύ της φύσης και της τεχνολογικής προόδου. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που συχνά αναφέρονται ως πράσινη ενέργεια, αντιπροσωπεύουν την τρέχουσα και μελλοντική πορεία της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς πόρους, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αξιοποιούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας φυσικά στοιχεία όπως είναι ο ήλιος, ο άνεμος και το νερό. Αυτό, όχι μόνο μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, αλλά διασφαλίζει επίσης έναν βιώσιμο ενεργειακό εφοδιασμό για τις επόμενες γεννιές. Επιπλέον, η ανάγκη για αποθήκευση των ενεργειακών αποβλήτων από μια ποικιλία βιομηχανικών, εμπορικών ή οικιακών διεργασιών και η ανάγκη για ελαχιστοποίηση της απώλειας ενέργειας έχει πολύ σημαντικό αντίκτυπο στις κοινωνίες (Mahlia et al, 2014). Ταυτόχρονα, έχει θετικό αντίκτυπο και στην οικονομία, καθώς οδηγεί στην ανάπτυξη, σταθεροποιεί τις τιμές της ενέργειας, και προσφέρει ασφάλεια και αυτονομία στον τομέα την ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, η παραγωγή με ΑΠΕ είναι πιο οικονομική, με τη φθηνότερη να είναι η αιολική ενέργεια (Ελλάδα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, 2024). Η ανάγκη για βιώσιμες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι επιτακτική για την αντικατάσταση των πεπερασμένων ορυκτών καυσίμων και την κάλυψη της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας. Η μείωση των εκπομπών άνθρακα και η δημιουργία ενός βιώσιμου

ενεργειακού τοπίου μέσω ανανεώσιμων πηγών, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, διασφαλίζει έναν υγιή πλανήτη για τις σημερινές και τις μελλοντικές γενιές. Οι τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας συμβάλλουν σημαντικά στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και επιβραδύνοντας την υπερθέρμανση του πλανήτη. Η μετάβαση από τα ορυκτά καύσιμα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρέχει πολλά οφέλη, όπως η μείωση των ακραίων καιρικών φαινομένων και η αποτροπή της ανόδου της στάθμης της θάλασσας. Παράλληλα, η επένδυση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενισχύει τη βιώσιμη ανάπτυξη, δημιουργώντας νέες θέσεις εργασίας, ενισχύοντας τις τοπικές βιομηχανίες και προωθώντας την καινοτομία, την έρευνα και την ανάπτυξη. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διαφοροποιούν τον ενεργειακό εφοδιασμό, μειώνοντας την εξάρτηση από πεπερασμένους πόρους και τη σχετική αστάθεια των τιμών. Επιπλέον, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, μειώνοντας τους ρύπους που προκαλούν αναπνευστικές ασθένειες και άλλες περιβαλλοντικές ζημιές. Παρά τις αρχικές υψηλές επενδύσεις, οι ανανεώσιμες πηγές προσφέρουν μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση κόστους, καθώς οι λειτουργικές δαπάνες είναι χαμηλές και οι πόροι είναι άμεσα διαθέσιμοι και σταθεροί. Συνολικά, η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί κεντρικό πυλώνα για ένα βιώσιμο μέλλον και μια υγιή πλανητική κοινότητα.

1.1.2 Παγκόσμια δρώμενα για ΑΠΕ και η θέση της Ελλάδας

Οι ΑΠΕ είναι μια «αναπόφευκτη» λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς είναι ανεξάντλητες, δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον και η αξιοποίησή τους εξαρτάται μόνο από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά βιώσιμων τεχνολογιών για την εκμετάλλευσή τους. Η στροφή προς την ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών ξεκίνησε μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και εδραιώθηκε τη δεκαετία που πέρασε με την αναγνώριση των σοβαρών παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Σε πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν εγχώρια πηγή ενέργειας εξασφαλίζοντας την ενίσχυση του ενεργειακού τους ισοζυγίου και τη μείωση της εξάρτησης από ακριβές εισαγωγές πετρελαίου, ενισχύοντας την ασφάλεια του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Επιπλέον, βελτιώνουν την ποιότητα του περιβάλλοντος, καθώς ο ενεργειακός τομέας είναι η κύρια πηγή ρύπανσης. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, έθεσε στόχο το 1992 στη συνδιάσκεψη του Ρίο για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη, να περιορίσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στα επίπεδα του 1993 μέχρι το 2000. Για να επιτύχει αυτόν τον στόχο, πρέπει να επιταχύνει την ανάπτυξη των ΑΠΕ (Ανανεώσιμες Πηγές, 2024). Η μετάβαση είναι ήδη εμφανής σε παγκόσμιο επίπεδο, με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να αντιπροσωπεύουν σημαντικό μέρος των νέων προσθηκών ενεργειακής δυναμικότητας. Η τάση αυτή υπογραμμίζει την αυξανόμενη αναγνώριση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως της πλέον συμφέρουσας πηγής ενέργειας, όχι μόνο για τη διατήρηση του περιβάλλοντος, αλλά και για την οικονομική ανάπτυξη. Υιοθετώντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που καλύπτει ολόκληρη την αλυσίδα αξίας και ευθυγραμμίζεται με τις αρχές της βιωσιμότητας, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δημιουργούν κοινή αξία, προωθούν μια κυκλική οικονομία και συμβάλλουν στην επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης του ΟΗΕ.

Η Ευρώπη και ο υπόλοιπος κόσμος αντιμετωπίζουν έναν υπαρξιακό κίνδυνο από την κλιματική κρίση και τις επιπτώσεις της στο περιβάλλον. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία

έχει θέσει το περίγραμμα, με τη μορφή του “Fit for 55” και τη επακόλουθη σειρά νομοθετικών μέτρων, με στόχο να γίνει η Ευρώπη η πρώτη ήπειρος που θα είναι ουδέτερη ως προς τον άνθρακα έως το 2050, διασφαλίζοντας παράλληλα σε κοινωνικό επίπεδο ότι ευάλωτες ομάδες δεν θα μείνουν πίσω. Όλοι οι οικονομικοί κλάδοι θα πρέπει να είναι ενεργοί για να ανταποκριθούν σε αυτό τον στόχο, μέσω δράσεων που περιλαμβάνουν επενδύσεις σε φιλικές προς το περιβάλλον καινοτομίες, ενθαρρύνοντας τη βιομηχανία να προχωρήσει σε στροφή σε φθηνότερες, πιο συμφέρουσες μορφές ιδιωτικών και τις δημόσιων συγκοινωνιών, απανθρακοποιώντας τον ενεργειακό τομέα, διασφαλίζοντας ότι τα κτίρια είναι περισσότερο ενεργειακά αποδοτικά και σε συνεργασία με διεθνείς εταίρους να επιτευχθούν παγκόσμιες περιβαλλοντικές αλλαγές. Οι προαναφερθέντες στόχοι μπορούν να επιτευχθούν μόνο μέσω ολοκληρωμένων δράσεων. Η συνεχιζόμενη ενεργειακή κρίση, η οποία ξεκίνησε στα τέλη του 2021, έχει πυροδοτήσει τη δημιουργία ενός συνόλου από “REPowerEU” μέτρα, με στόχο την επίτευξη της ανάπτυξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ώστε να διασφαλιστεί η ασφάλεια του εφοδιασμού, διατηρώντας παράλληλα τη βιωσιμότητα ως πρωταρχικό στόχο (Symeonidou & Papadopoulos, 2022). Πριν από την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, η Συμφωνία του Παρισιού είχε ήδη καταστήσει σαφές ότι οι κυβερνήσεις πρέπει να μειώσουν τις εκπομπές παγκοσμίως το συντομότερο δυνατό, ώστε να επιτευχθεί ο μακροπρόθεσμος στόχος της θερμοκρασίας, να μην αυξηθεί περισσότερο από 2 °C. Για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο να ενωθούν όλες οι χώρες γύρω από τον κοινό στόχο να ξεκινήσουν φιλόδοξες πρωτοβουλίες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και την προετοιμασία για τις συνέπειές της. Επιπλέον, οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών παρέχουν μια περιεκτική περιγραφή των στόχων που πρέπει να επιτευχθούν, προκειμένου να βελτιωθεί η ανθρώπινη ευημερία και η περιβαλλοντική επιβίωση, και των στόχων που έχουν καθοριστεί για τη μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Το εγχείρημα αυτό απαιτεί δράση από όλα τα έθνη, συμπεριλαμβανομένων εκείνων με χαμηλά, μεσαία και υψηλά εισοδήματα, προκειμένου να προωθηθεί η ευημερία και η διατήρηση του περιβάλλοντος. Είναι αυτονόητο ότι οι πρακτικές αντιμετώπισης και οι τεχνολογικές βελτιώσεις προς ένα περιβάλλον ουδέτερο από άνθρακα είναι μείζονος σημασίας (European Green Deal Call: €1 billion investment to boost the green and digital transition , 2020; European Commission: The European Green Deal). Τέλος, η συνεχιζόμενη ενεργειακή κρίση, η οποία μπορεί να καταλήξει ως το χειρότερο γεγονός από την πετρελαϊκή κρίση του 1973, έχει επηρεάσει ιδιαίτερα την Ευρώπη, καθώς οι τιμές του φυσικού αερίου έχουν φτάσει σε πρωτοφανή επίπεδα, ενώ παράλληλα, ακολούθησαν, αν και σε μικρότερο βαθμό, οι τιμές του πετρελαίου. Ωστόσο, η πραγματική απειλή έγκειται σε ελλείψεις στον εφοδιασμό από φυσικό αέριο, που αποτελεί πραγματική απειλή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οδηγεί πολλούς παρόχους ενέργειας στα όρια της χρεοκοπίας, παρουσιάζοντας παράλληλα σημαντικό κίνδυνο για τους περισσότερους βιομηχανικούς τομείς. Ωστόσο, πρέπει να έχουμε κατά νου ότι αυτή η κρίση πηγάζει από έναν συνδυασμό γεγονότων, αρχής γενομένης της πανδημίας COVID-19, η οποία δημιούργησε έντονες αβεβαιότητες, τόσο στον ενεργειακό τομέα, όσο και στην παγκόσμια οικονομία. Η οικονομική ύφεση οδήγησε σε κατάρρευση της ενεργειακής ζήτησης το 2020, με τις τιμές του πετρελαίου να είναι εξαιρετικά χαμηλές, ενώ η πτώση αυτή διορθώθηκε με το «άνοιγμα» της παγκόσμιας οικονομικής δραστηριότητας (Παρώνη, 2022). Στην Ευρώπη, το

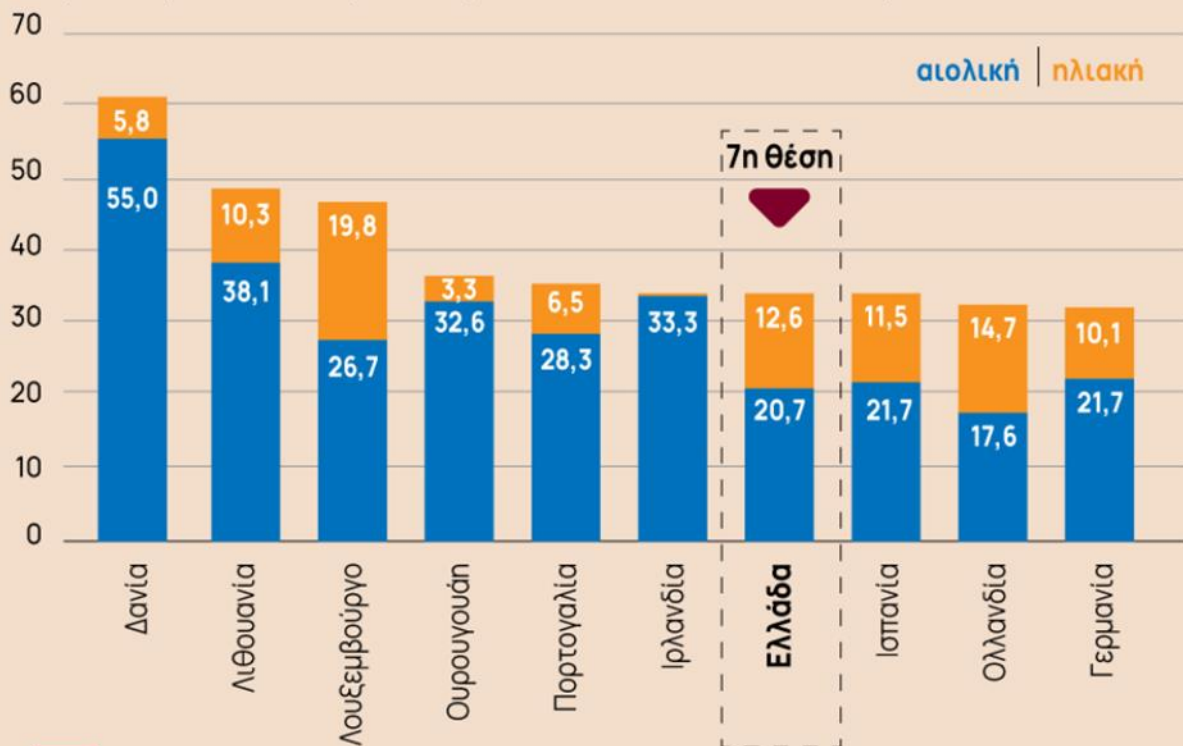
ενεργειακό κόστος για τα νοικοκυριά έχει ήδη αυξηθεί κατά 20–30% το 2021, σε 1450 ευρώ κατά μέσο όρο ετησίως, ενώ το 2022 αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω κατά 20-40% στα 1850 ευρώ, με πρόβλεψη για μεγαλύτερη αύξηση και το 2024 (Giama, 2022). Ταυτόχρονα, οι βιομηχανικοί καταναλωτές θα αντιμετωπίσουν επίσης ένα μεγάλο πλήγμα, καθώς οι αυξήσεις των τιμών στο ηλεκτρικό ρεύμα έφθασαν στο 20% και στο φυσικό αέριο το 15% το 2021, και περαιτέρω αύξηση 70 και 100%, αντίστοιχα, προβλέπεται το 2022, ενώ το 2024 αναμένεται να επιφέρει περαιτέρω αυξήσεις στις τιμές του φυσικού αερίου (Symeonidou & Papadopoulos, 2022).

Η Ελλάδα καταλαμβάνει μία από τις κορυφαίες θέσεις όσον αφορά το ποσοστό των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το 2022 σημειώθηκε ρεκόρ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, με το 12% της παραγόμενης ενέργειας να προέρχεται από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες. Αυτό προκύπτει από την τελευταία έκθεση της Ember για την παγκόσμια αγορά ενέργειας το 2022. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1, πρώτη θέση κατέχει η Δανία με ποσοστό 55,8%, ακολουθούμενη από τη Λιθουανία με 48,4% και το Λουξεμβούργο με 46,5%. Η Ουρουγουάη κατέχει την τέταρτη θέση με 35,9%, η Πορτογαλία την πέμπτη με 34,8% και η Ιρλανδία την έκτη με 33,3%, η οποία είναι η μόνη χώρα από τις δέκα πρώτες όπου όλη η καθαρή ενέργεια προέρχεται από ανεμογεννήτριες. Πίσω από την Ελλάδα με 33,3% (μέχρι τη δέκατη θέση) βρίσκονται η Ισπανία με 33,2%, η Ολλανδία με 32,3% και δέκατη η Γερμανία με 31,8%.

Το 2022 ήταν μια κρίσιμη χρονιά για τη μετάβαση της παγκόσμιας κοινότητας προς την καθαρή ενέργεια. Σε σχέση με το 2021, όπου το ποσοστό συνεισφοράς της ηλιακής και αιολικής ενέργειας στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν 10%, το 2022 αυξήθηκε σε ποσοστό 12%, το οποίο αποτελεί ιστορικό υψηλό ρεκόρ. Συμπεριλαμβάνοντας την ενέργεια από πυρηνικούς σταθμούς, το 39% της παγκόσμιας ενέργειας προήλθε από καθαρές πηγές, επίσης ένα ακόμα ιστορικό υψηλό. Η παραγωγή ηλιακής ενέργειας αυξήθηκε κατά 24%, διατηρώντας τη θέση της ως η ταχύτερα αναπτυσσόμενη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας για 18 συνεχόμενα έτη, ενώ η παραγωγή αιολικής ενέργειας αυξήθηκε κατά 17% (Παγκαλιάς, 2023).

Η Ελλάδα μεταξύ των χωρών με τη μεγαλύτερη συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα

Μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική και ηλιακή ενέργεια το 2022



Εικόνα 1: Παγκόσμια κατάταξη με βάση την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών και αιολικών ΑΠΕ (Πηγή: <https://www.ot.gr/2023/04/12/energeia/energeia-i-ellada-ek-ton-igetidon-sti-dieisdysi-ton-ape-sto-energeiako-meigma/>)

Όπως αναφέρθηκε πιο πριν, επί του παρόντος, η κυρίαρχη πηγή ενέργειας για την παραγωγή και τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, είναι τα ορυκτά καύσιμα. Οι περισσότερες χώρες εξαρτώνται από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα, και ως εκ τούτου, ενδέχεται να αντιμετωπίσουν οικονομική αστάθεια όταν η τιμή των ορυκτών καυσίμων μεταβάλλεται στη διεθνή αγορά. Σύμφωνα με την έκθεση της Υπηρεσίας Πληροφοριών Ενέργειας (Energy Information Agency, EIA), μια σημαντική αύξηση των τιμών του πετρελαίου θα παρατηρηθεί τις επόμενες δύο δεκαετίες. Ως εκ τούτου, η κυβέρνηση και οι ενεργειακές εταιρείες λαμβάνουν μέτρα για να κινηθούν προς τις ΑΠΕ. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα μειωθούν με την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από ΑΠΕ, πράγμα που θα οδηγήσει σε ανάπτυξη και στον βιομηχανικό τομέα. Ωστόσο, οι ΑΠΕ θα παρουσιάσουν προκλήσεις όταν ενσωματωθούν στο υπάρχον σύστημα λόγω της διαλείπουσας φύσης τους. Ως εκ τούτου, μια μπαταρία θεωρείται σημαντικό στοιχείο για την καταστολή της διακοπόμενης παροχής ισχύος από ΑΠΕ. Σε αντίθεση με το συμβατικό δίκτυο, απαιτείται ένα τροποποιημένο ηλεκτρικό σύστημα για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις της βιώσιμης, οικονομικής και αξιόπιστης ηλεκτρικής ενέργειας με την εγκατάσταση ΑΠΕ σε υψηλότερο επίπεδο (Sufyan et al, 2019).

Η χρήση ΑΠΕ, για την κάλυψη των αναγκών της ηλεκτρικής ενέργειας, έρχεται στην προσοχή ως λύση στο ενεργειακό πρόβλημα όπως επίσης ιδιαίτερα σημαντικές είναι και για

περιοχές που είναι δύσκολο να προσεγγιστούν από τα υπάρχοντα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση των ΑΠΕ συνεχώς αυξάνεται, ενώ η εφαρμογή τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δοκιμάζεται σε διάφορες μορφές. Η εκκίνηση έγινε από τα πιο απλά συστήματα, όπως η αξιοποίηση φωτοβολταϊκών (Φ/Β) σε ηλιακά οικιακά συστήματα (Solar Home Systems, SHS) και την εφαρμογή των ΑΠΕ στα μικροδίκτυα (Hartono et al, 2013). όμως, ορισμένες μορφές ΑΠΕ όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις στην σταθερότητα του ενεργειακού συστήματος. Η αποθήκευση της ενέργειας από ΑΠΕ είναι απαραίτητη και συνιστά ακόμη μια τεχνική πρόκληση, αν και η έρευνα προχωρά δυναμικά και σε αυτό το πεδίο. Συνοψίζοντας, οι ΑΠΕ αποτελούν ένα αναπόσπαστο μέρος της στρατηγικής για μια βιώσιμη και καθαρή ενεργειακή ανάπτυξη στο μέλλον. Παρά τα προκλήσεις που αντιμετωπίζουν, τα πλεονεκτήματα τις καθιστούν απαραίτητες για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας.

1.1.3 Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναφέρονται σε διάφορες επιλογές που αποτελούν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις αντί της συμβατικής ενέργειας. Έχουμε την ηλιακή ενέργεια, μια καθαρή, ευρέως διαθέσιμη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας από την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα και τα ηλιακά θερμικά συστήματα χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες για να μετατρέψουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια ή ισχύ θέρμανσης/ψύξης. Την αιολική, όπου οι ανεμογεννήτριες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της κινητικής ενέργειας – αξιοποιούν τον άνεμο και στη συνέχεια περιστρέφουν τα πτερύγια τους, μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια σε ισχύ. Αυτή η ευέλικτη τεχνολογία έχει κάνει την αιολική ενέργεια σημαντικό μέρος του χαρτοφυλακίου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας του πλανήτη μας. Την υδραυλική ή υδροηλεκτρική ενέργεια που εκμεταλλεύεται τη δύναμη των πηγών νερού, όπως τα ποτάμια ή οι ωκεανοί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατασκευάζοντας φράγματα που αποθηκεύουν και απελευθερώνουν νερό όταν απαιτείται, οι γεννήτριες στροβίλων μπορούν να μετατρέψουν αυτή τη δυναμική ενέργεια σε ηλεκτρικό ρεύμα. Επιπλέον η ισχύς του ωκεανού μπορεί να είναι πηγή ενέργειας με τεχνολογίες όπως η κυματική και η παλιρροιακή ενέργεια, που μετατρέπουν τις κινήσεις πάνω-κάτω σε ηλεκτρική ενέργεια ή τη μετατροπή θερμικής ενέργειας των ωκεανών (OTEC), που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας από διαφορές θερμοκρασίες. Αν και βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη, η ωκεάνια ενέργεια είναι ένας εξαιρετικός ανανεώσιμος πόρος με μεγάλες δυνατότητες βιωσιμότητας. Άλλος τρόπος είναι αξιοποιώντας τη θερμότητα από τον πυρήνα της Γης, όπου οι γεωθερμικές εταιρείες χρησιμοποιούν υπόγειες δεξαμενές ατμού ή ζεστού νερού για να κινήσουν τουρμπίνες και να δημιουργήσουν ηλεκτρική ενέργεια. Ως ένας αξιόπιστος ανανεώσιμος πόρος που εκπέμπει πολύ λίγα αέρια θερμοκηπίου, η γεωθερμική παραγωγή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιοχές πλούσιες σε γεωλογική δραστηριότητα ή θερμές πηγές. Τέλος, οι πόροι βιοενέργειας προέρχονται από οργανικές πηγές, όπως καλλιέργειες, υπολείμματα δασών και απόβλητα από νοικοκυριά και βιομηχανίες - όλα αυτά μπορούν να υποστούν επεξεργασία για να παρέχουν θερμότητα, ηλεκτρισμό και καύσιμα μεταφοράς. Για τη μετατροπή της βιομάζας σε ενέργεια για τη λήψη βιοενέργειας, μπορούν να

χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι όπως η καύση, η αναερόβια χώνευση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση.

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι διττή: αφορά την παραγωγή ενέργειας από πράσινες πηγές για τον μετασχηματισμό του ενεργειακού μείγματος υπέρ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την παροχή βοήθειας στους ανθρώπους παγκοσμίως προκειμένου να έχουν συνεχή ασφαλή πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια. Η τεχνολογική καινοτομία βοηθά και στα δύο μέτωπα. Η ολοένα και πιο διαδεδομένη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οφείλεται στις συνεχείς βελτιώσεις των τεχνικών παραγωγής. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής γίνονται όλο και πιο αποδοτικοί, καθιστώντας αυτό το είδος ηλεκτρικής ενέργειας οικονομικά προσιτό και ανταγωνιστικό στην αγορά, επομένως η βιώσιμη ενέργεια είναι επωφελής τόσο για τους βιομηχανικούς όσο και για τους οικιακούς χρήστες. Στις αναπτυσσόμενες χώρες, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι συχνά ο μόνος τρόπος για τον εξηλεκτρισμό ολόκληρων αγροτικών περιοχών. Οι καινοτόμες λύσεις παρέχουν στις πιο μειονεκτούσες κοινότητες σταθερή ασφαλή πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο και θα αντέξουν στη δοκιμασία του χρόνου. Η πράσινη ενέργεια κλείνει το χάσμα που υπάρχει στην πρόσβαση στην ενέργεια και εγγυάται τις ίδιες ευκαιρίες ανάπτυξης σε ολόκληρο τον κόσμο. Η ανάγκη για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει καταστεί απαραίτητη για την αντιμετώπιση παγκόσμιων προκλήσεων, τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. (Γνωρίστε τη μεγάλη σημασία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, 2023; Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, 2024)

1.2 ΑΠΕ και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

1.2.1 Ρόλος των Συστημάτων αποθήκευσης

Η εγκατάσταση ΑΠΕ έχει αυξηθεί σημαντικά και αναμένεται να επεκταθεί ραγδαία τα επόμενα χρόνια. Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μειώσει τις απώλειες και να ελαχιστοποιήσει το αποτύπωμα άνθρακα. Ωστόσο, η ασυνεχής και δύσκολα προβλέψιμη φύση των ΑΠΕ μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στη διατήρηση της ισορροπίας του δικτύου, δηλαδή την ισορροπία μεταξύ φορτίου και παραγωγής. Οι ταχείες διακυμάνσεις, ειδικά από μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά (PV) και αιολικά πάρκα, ασκούν μεγαλύτερη πίεση στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως διακυμάνσεις τάσης, ανάστροφη ροή ισχύος, αποκλίσεις συχνότητας κ.λπ. Σε ακραίες περιπτώσεις, αυτά τα φαινόμενα μπορεί να οδηγήσουν σε κατάρρευση του συστήματος, δηλαδή σε πλήρη διακοπή ρεύματος. Η αρνητική επίδραση των ΑΠΕ προκύπτει από τη μεταβλητή ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα του ανέμου που αλλάζουν εποχιακά, μηνιαία, ημερήσια, ωριαία και ακόμη και ανά δευτερόλεπτα. Παραμορφώσεις αρμονικών και ταλαντώσεις τάσης είναι μερικά από τα επιπρόσθετα προβλήματα που προκύπτουν με τη μεγάλη κλίμακας διείσδυση των ηλιακών και των αιολικών σταθμών παραγωγής. Καθώς το επίπεδο διείσδυσης ΑΠΕ αυξάνεται, οι συχνές διακυμάνσεις στην παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ μπορεί να επιβαρύνουν επιπλέον τις μονάδες συμβατικής παραγωγής (ΣΠ) για να διατηρήσουν την τάση και τη συχνότητα εντός αποδεκτών ορίων. Αυτό θα μειώσει τη διάρκεια ζωής των μονάδων ΣΠ και θα αυξήσει το λειτουργικό κόστος τους.

Για να ελαχιστοποιήσουν τις επιπτώσεις των ΑΠΕ στο δίκτυο, πολλές χώρες ήδη διατηρούν υποχρεωτικούς κωδικούς δικτύου που λαμβάνουν υπόψη τέτοιες απρόβλεπτες καταστάσεις για να διασφαλίσουν ελεγχόμενες διακυμάνσεις και αξιόπιστη λειτουργία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εντός του αποδεκτού λειτουργικού εύρους. Οι κωδικοί δικτύου περιλαμβάνουν όρια σε ρυθμούς ανόδου, ικανότητα ανοχής βλαβών (Fault Ride Through, FRT), ικανότητα ρύθμισης τάσης και συχνότητας, δυνατότητα αποστολής κ.λπ. Λίγες χώρες όπως η Ιταλία, η Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο έχουν ήδη επιβάλει οικονομικές ποινές σε περίπτωση που οι ΑΠΕ δεν διατηρήσουν το υποσχόμενο πρόγραμμα παραγωγής ισχύος. Εάν δεν προβλεφθούν βοηθητικές εφεδρείες, καθώς αυξάνεται η διείσδυση ΑΠΕ, το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αντιμετωπίσει σοβαρές βλάβες, δηλαδή οι διακοπές ρεύματος μπορεί να είναι πιο συχνές στο μέλλον. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν την έξοδό τους και έτσι να ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις της αβεβαιότητας των ΑΠΕ. Μεταξύ πολλών υπάρχουσών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, έχουμε τις εξής: αντλησιοταμίευση, σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα, σφόνδυλος, υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας, υπερπυκνωτές, υδρογόνο, μπαταρίες μολύβδου-οξέος, μπαταρίες λιθίου, τηγμένο άλας, μπαταρίες νατρίου-θείου, μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής, όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια (Datta et al, 2020).

Στο ηλεκτρικό δίκτυο η παροχή ενέργειας πρέπει να καλύπτει συνεχώς την ζήτηση. Για να αντιμετωπιστούν οι αναμενόμενες αλλαγές στη ζήτηση, που οφείλονται σε καθημερινές ανθρώπινες δραστηριότητες ή απρόσμενες βλάβες, απαιτούνται συνεχείς προσαρμογές στην παραγωγή ενέργειας. Η αποθήκευση ενέργειας διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο σε αυτή τη διαδικασία, προσφέροντας ευελιξία και αξιοπιστία στο δίκτυο, ώστε να διασφαλίζεται η συνεχής παροχή ενέργειας στους καταναλωτές, όποτε και όπου τη χρειάζονται και να καλύπτεται η ζήτηση κάθε στιγμή. Επιπλέον, οι ΑΠΕ αυξάνονται διαρκώς στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Δεδομένης της στοχαστικής τους φύσης και της χρονικής αναντιστοιχίας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, οι τεχνολογίες αποθήκευσης παρέχουν σημαντικές δυνατότητες για καλύτερη αξιοποίηση της ενέργειας από αυτές τις πηγές. Έτσι, κατά την έντονη ηλιοφάνεια ή την περίοδο αυξημένου ανέμου, η περίσσεια ενέργεια από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί όταν αυτά τα φαινόμενα δεν είναι παρόντα. Σήμερα, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, όπως για παροχή σταθερής ισχύος σε μη διασυνδεδεμένα συστήματα, για μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για αποδοτικότερη χρήση του δικτύου, για παροχή εφεδρικής ενέργειας, σε έξυπνα μικροδίκτυα και έξυπνα κτίρια, και σε ηλεκτρικά οχήματα. Η αποθήκευση ενέργειας, συμβάλλοντας στην ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο δίκτυο, είναι καθοριστική για την επίτευξη ενός πραγματικά βιώσιμου ενεργειακού μετασχηματισμού. Για αυτό τον λόγο, η βιομηχανία, οι πολιτικοί φορείς, και άλλοι εμπλεκόμενοι φορείς πρέπει να συνεχίσουν να συνεργάζονται ώστε να δημιουργηθεί ένα υποστηρικτικό ρυθμιστικό πλαίσιο που θα επιτρέψει στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας να αναπτυχθεί. Επομένως, η ενσωμάτωση ΑΠΕ στο δίκτυο παρουσιάζει δύο κύρια προβλήματα: την εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες και τις διακυμάνσεις στην παραγωγή, που προκαλούν αστάθεια, και τη δυσκολία προσαρμογής των υφιστάμενων συστημάτων. Η αποθήκευση ενέργειας προσφέρει λύσεις,

καθώς απορροφά και απελευθερώνει ενέργεια όταν χρειάζεται, προσφέροντας σταθερότητα και ευελιξία στο δίκτυο. Αυτό βοηθά στη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ ζήτησης και παραγωγής, διευκολύνοντας την ευρεία υιοθέτηση ΑΠΕ και την αξιοποίησή τους.

1.2.2 Παγκόσμια δεδομένα για συστήματα αποθήκευσης και η θέση της Ελλάδας

Στον νέο ευρωπαϊκό κλιματικό νόμο, περιγράφεται ο βασικός στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης - η επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 - ο οποίος θα επιτευχθεί μέσω της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας. Η ευρεία χρήση των ΑΠΕ αποτελεί βασικό πυλώνα της ευρωπαϊκής ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής στον δρόμο προς την κλιματική ουδετερότητα. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται το μερίδιο των ΑΠΕ, αυξάνεται και η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας, ώστε η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ να καλύπτει τη ζήτηση. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς μπορούν να λειτουργούν για περιόδους που κυμαίνονται από λίγες ώρες έως μήνες ή και ολόκληρες εποχές. Υπάρχουν παγκοσμίως 1363 έργα αποθήκευσης ενέργειας σε λειτουργία, σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία της βάσης δεδομένων του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ, με συνολική ισχύ 173,7 GW. Η αντλησιοταμίευση είναι μακράν η πιο διαδεδομένη τεχνολογία αποθήκευσης, κατέχοντας το 97% της παγκόσμιας αποθηκευτικής ισχύος με 167,8 GW. Στη δεύτερη θέση με μερίδιο 1,4% ή 2,4 GW βρίσκονται οι τεχνολογίες θερμικής αποθήκευσης, ενώ οι διάφορες τεχνολογίες ηλεκτροχημικής αποθήκευσης, συσσωρευτές (μπαταρίες) κατέχουν μερίδιο 1% με 1,79 GW. Επιπλέον, σημαντική θέση έχουν και τα συστήματα ηλεκτρομηχανικής αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων πεπιεσμένου αέρα με 1,66 GW, που αντιστοιχούν σε ποσοστό 0,95% της παγκόσμιας αποθηκευτικής ισχύος, ενώ ξεκίνησαν πρόσφατα να λειτουργούν και τα πρώτα 9 έργα αποθήκευσης ενέργειας με τεχνολογίες υδρογόνου. Στην Ελλάδα υπάρχουν σήμερα μόνο δύο αντλησιοταμιευτικοί σταθμοί, στον Θησαυρό (Δράμα) και τη Σφηκιά (Ημαθία), συνολικής ισχύος 699 MW. Επίσης, δύο πολύ μικρότερα συστήματα αποθήκευσης υπάρχουν στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο. Ειδικότερα το πρώτο υβριδικό ΑΠΕ στη Μεσόγειο τέθηκε σε λειτουργία το 2018, συγκεκριμένα στο νησί της Τήλου, το οποίο αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό ισχύος 160kW, μια μικρή ανεμογεννήτρια ισχύος 800kW και δύο μικρές μπαταρίες NaNiCl₂ αποθηκευτικής ικανότητας 2,8MWh. Ακόμα, το 2019 στην Ικαρία, το υβριδικό σύστημα «Ναέρας» της ΔΕΗ αποτελούμενο από 3 ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 2,7MW, δύο μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα 1,05MW και 3,1MW και συνολική αντλητική ισχύ 3 MW. Τον Δεκέμβριο του 2019, υποβλήθηκε στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), στο οποίο προβλέπεται η κατασκευή νέων αντλησιοταμιευτικών συστημάτων με εκτιμώμενη συνολική ισχύ 700 MW έως το 2025, με στόχο να στηρίζει τη διείσδυση των ΑΠΕ στην τελική ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό 61% μέχρι το 2030. Η προβλεπόμενη ενέργεια από τον ΕΣΕΚ που αποθηκεύεται σε συστήματα αποθήκευσης μικρών αποκεντρωμένων συστημάτων μπαταριών το 2030, εκτιμάται ότι μπορεί να ανέλθει έως και 2,2 TWh.

Τον Μάιο του 2020, η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) ολοκλήρωσε μελέτη, στην οποία υπολογίστηκε η αναλογία αποθηκευτικής ισχύος μπαταριών και αντλησιοταμίευσης μέσης και μεγάλης ισχύος που θα επιτεύξει τους στόχους του ΕΣΣΕΚ, παρέχοντας παράλληλα τα μέγιστα οικονομικά οφέλη για το σύστημα. Η μελέτη διαπίστωσε ότι πετύχει η διείσδυση

ΑΠΕ κατά 60% μέχρι το 2030 χρειάζεται καινούργια αποθηκευτική ισχύς τάξεως των 1,5-1,75 GW, με την βέλτιστη αναλογία να είναι 1-1,25 GW αντησιοταμίευσης και 0,5 GW συσσωρευτών. Οι στόχοι αυτοί για την αποθήκευση ενέργειας βασίζονται στον προηγούμενο κλιματικό στόχο της ΕΕ για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 40% μέχρι το 2030 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, ενώ πρέπει να αναθεωρηθούν για μεγαλύτερες βλέψεις, όπως και το σύνολο του ΕΣΕΚ. Ωστόσο, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει πλέον θέσει έναν πιο φιλόδοξο στόχο μείωσης των εκπομπών κατά τουλάχιστον 55% μέχρι το 2030. Η επίτευξη αυτού του στόχου είναι δυνατή μόνο με τη συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, που έχει σαν αποτέλεσμα να αυξήσει τις ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας. Για να πετύχει η Ελλάδα τον πανευρωπαϊκό κλιματικό στόχο μείωσης εκπομπών κατά 55% το 2030, η εφαρμογή των σεναρίων που αναλύθηκαν στη σχετική μελέτη επιπτώσεων (impact assessment) έδειξε ότι η συμμετοχή των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας πρέπει να κυμαίνεται στο 83% με 88%. Αυτό σημαίνει αύξηση 22 με 27% σε σχέση με τον στόχο του 61% στο υφιστάμενο ΕΣΕΚ. Η αύξηση αυτή θα οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της αποθηκευτικής ισχύος ως το 2030, εκτιμώμενη ότι πρέπει να ξεπεράσει τα 3 GW, συνδυάζοντας διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης, αλλά και των τεχνολογιών πράσινου υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας έχουν κεντρικό ρόλο και στη Μακροχρόνια Στρατηγική της Ελλάδας για το 2050 καθώς ο στόχος είναι 95% μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με το 1990. Στα δύο σεναρία που προσεγγίζουν την κλιματική ουδετερότητα στα μέσα του αιώνα, η αποθηκευτική ισχύς το 2050 κυμαίνεται μεταξύ 8,5 και 28,1 GW, ενώ η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια κυμαίνεται μεταξύ 22,4 TWh και 42,4 TWh ετησίως. Συνεπώς οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας θα αποκτήσουν αυξημένη σημασία στο ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας αλλά και γενικά όλης της Ευρώπης, καθοδόν προς την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας (Energy Storage Technologies: Challenges and Outlook , 2020)

1.3 Μικροδίκτυα

1.3.1 Ορισμός του Μικροδικτύου

Στη σημερινή εποχή το ηλεκτρικό ρεύμα είναι αναπόσπαστο μέρος της καθημερινότητάς του καθενός. Συνεπώς οι απαιτήσεις είναι τεράστιες καθώς υπάρχει συνεχής αύξηση της ζήτησης ενέργειας. Παράλληλα, η ευρεία χρήση των ΑΠΕ προσθέτει τον παράγοντα της μεταβλητότητας (π.χ. τα φωτοβολταϊκά εξαρτώνται από την ηλιοφάνεια, οι ανεμογεννήτριες από τον άνεμο), κάνοντας πιο περίπλοκο τον έλεγχο του δικτύου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε δυσκολίες στη διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου και να προκαλέσει διακοπές ρεύματος. Στο πρόβλημα αυτό προσφέρεται σαν λύση το μικροδίκτυο, το οποίο είναι μια μικρογραφία του ενεργειακού δικτύου που μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα. Αποτελείται από πηγές παραγωγής ενέργειας (συμβατικές και Α.Π.Ε.), συσκευές ελέγχου, μέσα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες), μετατροπείς (που μετατρέπουν την τάση σε συνεχή ή εναλλασσόμενη) και φορτία (συσκευές που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια) (Λιακάκης, 2024).

Η έννοια του Μικροδικτύου (Microgrid) προτάθηκε από το Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS) για την ενίσχυση της τοπικής αξιοπιστίας και

ευελιξίας των ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν πολλαπλούς διανεμημένους ενεργειακούς πόρους (distributed energy resources), καταναλωτές, μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και να μπορούν να λειτουργούν είτε απομονωμένα είτε συνδεδεμένα με τα δίκτυα κοινής ωφέλειας (Lee et al, 2009; Peter, 2012). Λόγω της αυξανόμενης έλλειψης ορυκτών καυσίμων και των πιέσεων για περιβαλλοντική προστασία, νέες πηγές ενέργειας υψηλής απόδοσης, όπως οι κυψέλες καυσίμου και οι μικροστρόβιλοι αερίου, καθώς και οι ΑΠΕ, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, γίνονται σημαντικοί πόροι. Για παράδειγμα η παραγωγή από ΑΠΕ απαιτούσε να φτάσει το 20% μέχρι το 2017 στην Καλιφόρνια, το 15% μέχρι το 2020 στην Κίνα, και το 60% μέχρι το 2020 στη Γερμανία (Allen et al, 2010).

Το CERTS έχει προτείνει την έννοια του μικροδικτύου ως ένα δίκτυο χαμηλής ή μέσης τάσης που αποτελείται από καταναλωτές, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage Systems - ESSs) και ηλεκτρικά φορτία (Olivares et al, 2014). Τα μικροδίκτυα προσφέρουν πολλαπλά οφέλη, όπως είναι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η βελτίωση του προφίλ τάσης μέσω υποστήριξης της αέργου ισχύος, η ενσωμάτωση θερμικών φορτίων, η αποκεντρωμένη παροχή ενέργειας και άλλα (Abdalla et al, 2021). Από την οπτική γωνία του καταναλωτή, το μικροδίκτυο καλύπτει ανάγκες αξιοπιστίας, καλύτερης απόδοσης, μείωσης απωλειών και αδιάλειπτης παροχής ισχύος (Cagnano et al, 2020). Ένα μικροδίκτυο μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα του δικτύου με τη λειτουργική του ευελιξία, είτε σε απομονωμένη είτε σε συνδεδεμένη με το δίκτυο λειτουργία (Yang et al, 2016). Η σταθεροποίηση της συχνότητας είναι μια πρόκληση σε απομακρυσμένα νησιά, αλλά οι καταναλωτές και τα συστήματα αποθήκευσης μπορούν να σταθεροποιήσουν το μικροδίκτυο σε αυτόνομη λειτουργία (Asl et al, 2020). Ωστόσο, τα μικροδίκτυα παρουσιάζουν και μειονεκτήματα, όπως είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης ΑΠΕ, η ανάγκη βελτιστοποιημένης χρήσης συστημάτων αποθήκευσης, θέματα ελέγχου και προστασίας, κανονιστικά πρότυπα και προστασία της ιδιωτικότητας των καταναλωτών, κ.α. . Η διαχείριση ενέργειας σε ένα μικροδίκτυο είναι κρίσιμη για τη βιώσιμη, οικονομική και αξιόπιστη λειτουργία του (Kusakana, 2021; Vaikund et Srivani, 2021). Τα σημαντικά πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης συστημάτων αποθήκευσης σε ένα μικροδίκτυο περιλαμβάνουν την αποθήκευση ενέργειας, την υποστήριξη της αέργου ισχύος, τη ρύθμιση συχνότητας, τη μείωση κόστους και εκπομπών, τη συμμετοχή των καταναλωτών και την προστασία της ιδιωτικότητας (Choudhury, 2022).

Ένα μικροδίκτυο που συνδυάζει ΑΠΕ και διανεμημένες πηγές παραγωγής (distributed generation) μπορεί να αποτελεί μια προτιμητέα λύση για την ενεργειακή κρίση και μια συμπληρωματική επιλογή στα κεντρικά σύγχρονα δίκτυα (Sofla et Gharehpetian, 2011). Ωστόσο, λόγω της μικρής τους χωρητικότητας, η κανονική λειτουργία των μικροδικτύων μπορεί να είναι ευάλωτη στις τυχαίες μεταβολές μεταξύ προμηθευτών και φορτίων, με αποτέλεσμα την αδυναμία εγγύησης της λειτουργικότητας και της ποιότητας της ισχύος (Al-Saedi et al, 2012). Όταν ένα μικροδίκτυο λειτουργεί σε απομονωμένη κατάσταση, πιθανές δυσλειτουργίες μπορεί να προκαλέσουν άμεση έλλειψη ισχύος, η οποία μπορεί να καλυφθεί προσωρινά με απόθεση φορτίου, αλλά απαιτείται άμεση αντιστάθμιση από άλλη πηγή, καθιστώντας την τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας κρίσιμη και αναγκαία. Η

διακοπτόμενη φύση πολλών ΑΠΕ και καταναμημένων πηγών, λόγω κλιματολογικών συνθηκών προκαλεί διακυμάνσεις στην παραγωγή ενέργειας, γεγονός που καθιστά την αποθήκευση ενέργειας αναγκαία για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Μια λεπτομερής ανασκόπηση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας σε μικροδίκτυα, εξετάζοντας τις κύριες τεχνολογίες, τα οφέλη, τις διασυνδέσεις ηλεκτρονικών ισχύος και τις στρατηγικές ελέγχου μπορεί να βρεθεί στην εργασία των Tan et al, 2013.

Η λειτουργία του μικροδικτύου είναι σχετικά απλή. Με τους μετρητές καταγράφουμε τη ζήτηση των φορτίων μας και με τη βοήθεια των ελεγκτών, την καλύπτουμε. Αυτό συμβαίνει με τον πιο συμφέροντα και διαθέσιμο τρόπο τη συγκεκριμένη στιγμή. Πιο συγκεκριμένα επιλέγουμε την οικονομικότερη λύση και, αν αυτή δεν είναι εφικτή, προχωράμε στην επόμενη επιλογή. Το πλεόνασμα ενέργειας από τις Α.Π.Ε., αποθηκεύεται στις μπαταρίες για μελλοντική χρήση.

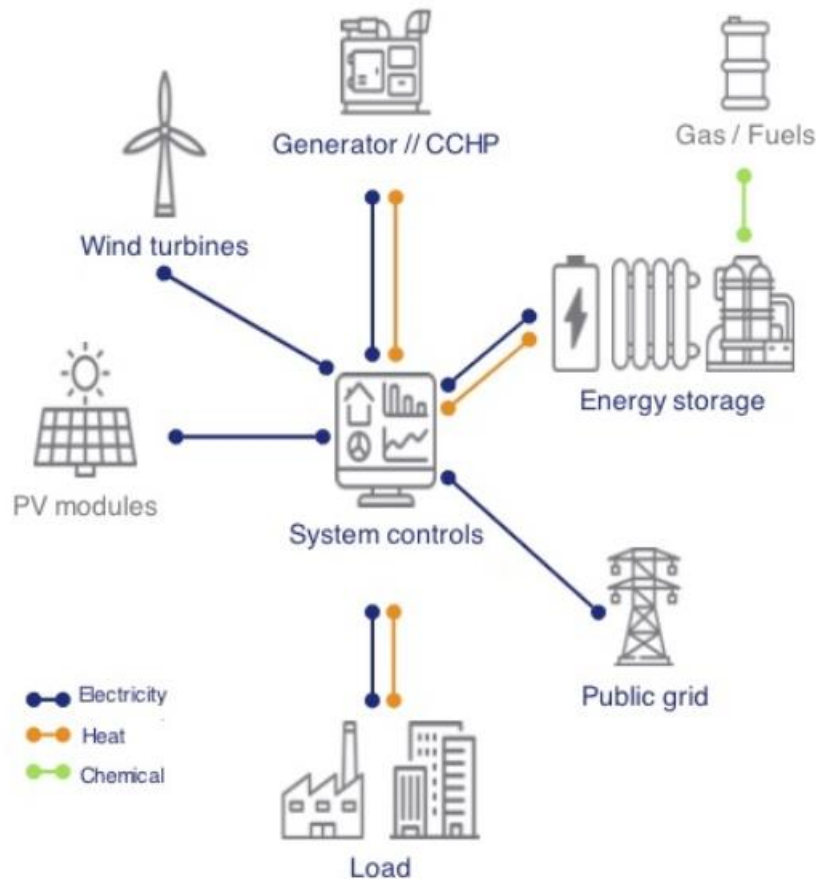


Εικόνα 2: Σχηματικό παράδειγμα μικροδικτύου :(Πηγή: Fu et al, 2021)

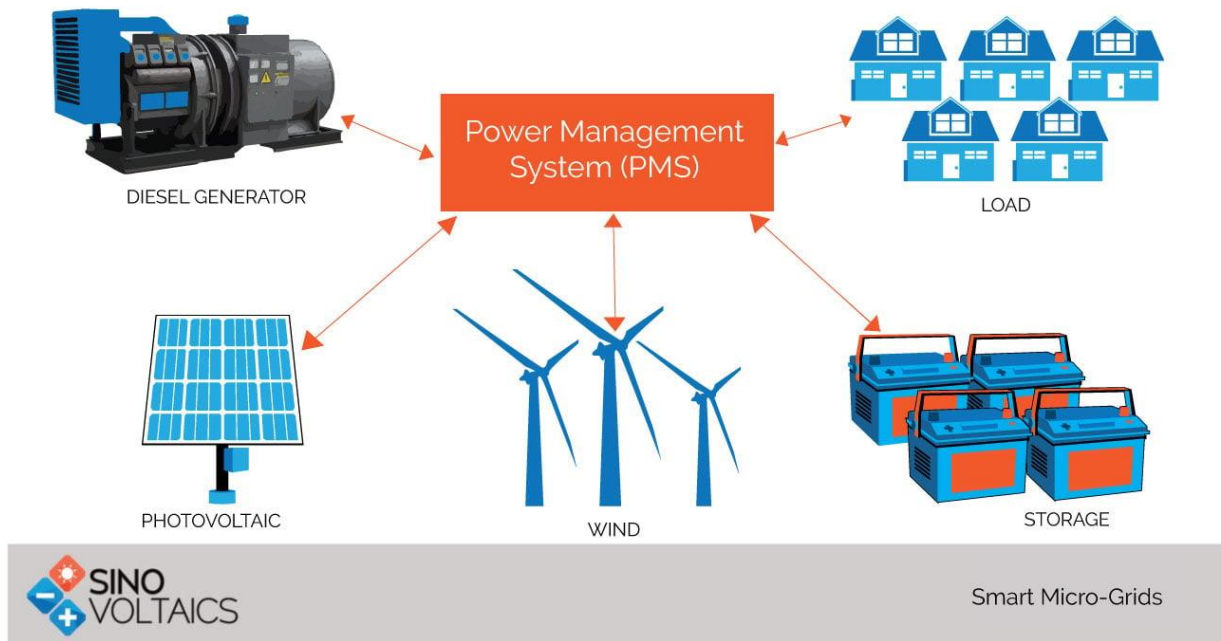
1.3.2 Κατηγορίες Μικροδικτύων

Τα μικροδίκτυα λόγω του ότι έχουν πολλές λειτουργίες ανάλογα με κάποια χαρακτηριστικά χωρίζονται σε κατηγορίες. Καταρχάς, υπάρχουν τα έξυπνα (smart) μικροδίκτυα. Τα έξυπνα μικροδίκτυα είναι μια νεότερη τεχνολογία και μια επέκταση των κανονικών μικροδικτύων. Χρησιμοποιούν λογισμικό και έξυπνους ελέγχους για τη διαχείριση της ροής ηλεκτρικής ενέργειας στα δίκτυα. Τα έξυπνα μικροδίκτυα χρησιμοποιούν: 1) ψηφιακές πληροφορίες και έλεγχο, 2) προσπάθειες σε πραγματικό χρόνο για βελτιστοποίηση των λειτουργιών του δικτύου, 3) έξυπνο σύστημα μέτρησης, έξυπνη ενσωμάτωση σε πραγματικό χρόνο (πληροφορίες απόκρισης σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας) και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, τα έξυπνα δίκτυα έχουν άλλα πλεονεκτήματα, όπως: μπορεί να χρησιμοποιεί καταναμημένους ενεργειακούς πόρους και να παρέχει

υψηλότερη ποιότητα ισχύος και υψηλότερο συντελεστή χωρητικότητας. Οι τύποι τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στα έξυπνα μικροδίκτυα είναι: έξυπνοι διακόπτες, ρελέ και αισθητήρες που καλύπτουν τις ανάγκες ισχύος πιο αποτελεσματικά και αξιόπιστα. Η υποδομή τους είναι αρκετά καλά προστατευμένη. Επίσης περιέχει μηχανογραφημένους ελέγχους σε πραγματικό χρόνο που μπορούν να προβλέψουν πιθανές αστάθειες για να διορθώσουν προβλήματα προτού οι χρήστες αντιμετωπίσουν οποιαδήποτε διακοπή στην ενεργειακή υπηρεσία (Smart MicroGrids).



Εικόνα 3: Σχηματικό παράδειγμα ενός smart μικροδικτύου (πηγή: Smart microgrid controller)



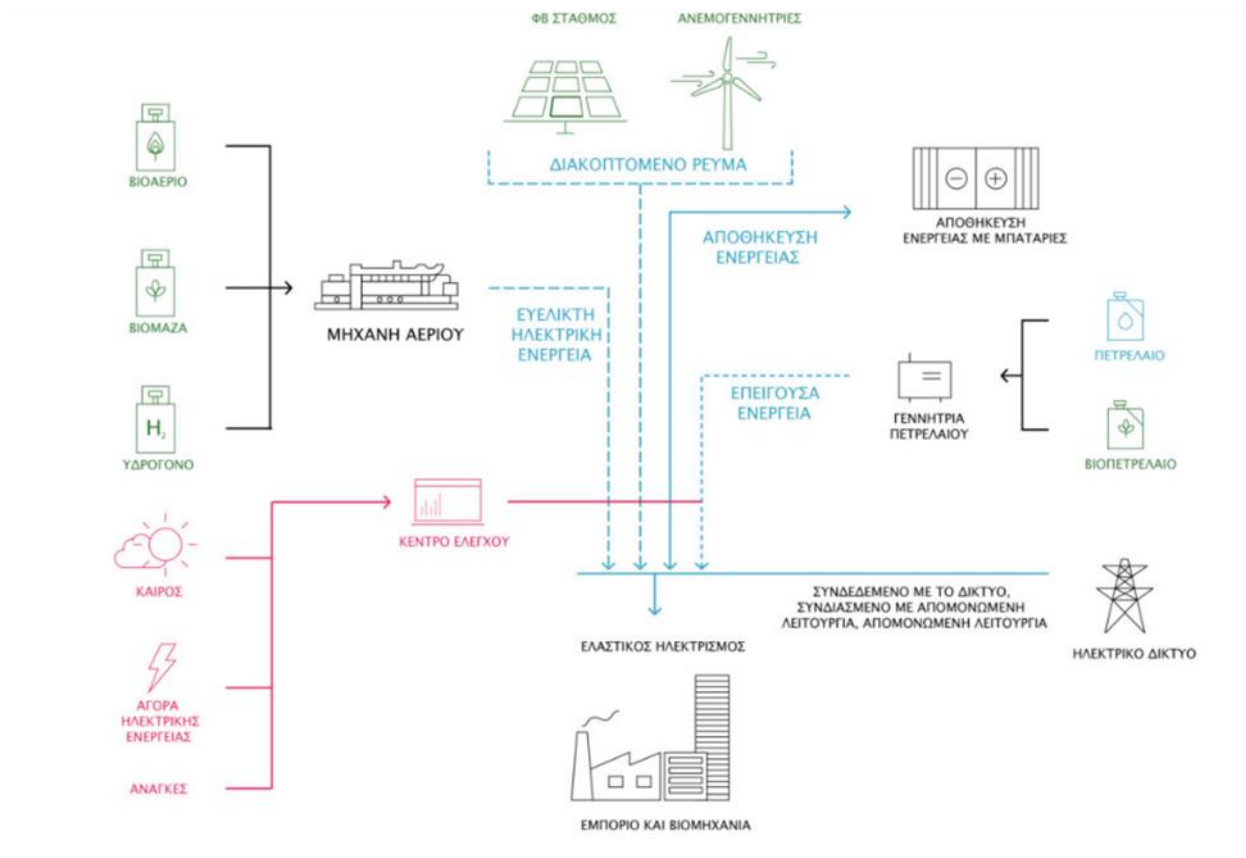
Εικόνα 4: Δεύτερο σχηματικό παράδειγμα ενός smart μικροδικτύου (Πηγή: Smart MicroGrids, 2024)

Ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης των μικροδικτύων είναι η σύνδεση ή όχι με το κεντρικό δίκτυο. Όταν δεν είναι συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο, λειτουργούν σε απομονωμένη λειτουργία (island mode). Αυτά τα αυτόνομα μικροδίκτυα δεν παρέχουν πλεόνασμα ενέργειας ούτε μπορούν να λάβουν ηλεκτρικό ρεύμα από το δημόσιο δίκτυο. Αντίθετα τα μικροδίκτυα που είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο έχουν το πλεονέκτημα της ενεργειακής αυτάρκειας, ενώ μπορούν να δέχονται ή να παρέχουν ηλεκτρισμό στο δημόσιο δίκτυο. Τέλος, υπάρχουν μικροδίκτυα που μπορούν να λειτουργούν τόσο συνδεδεμένα με το δίκτυο όσο και σε απομονωμένη λειτουργία, παρέχοντας σταθερή ενέργεια σε περίπτωση βλάβης του δημόσιου δικτύου.

Τα μικροδίκτυα είναι ιδανικά για τις εξής περιπτώσεις:

- Εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις (εμπορικά κέντρα, ξενοδοχεία, μουσεία, σούπερ-μάρκετ, πανεπιστήμια)
- Περιοχές με ασταθές δίκτυο ηλεκτρισμού
- Απομακρυσμένες περιοχές
- Πανεπιστημιούπολεις
- Πράσινα λιμάνια
- Αεροδρόμια
- Κρίσιμες υποδομές όπως data centers, νοσοκομεία, στρατόπεδα κ.α..

Τελευταία κατηγοριοποίηση των μικροδικτύων αφορά τους χρήστες. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να εξυπηρετεί από ένα εργοστάσιο μέχρι μια ομάδα καταναλωτών. Έχουμε το οικιακό (residential) όπου οι καταναλωτές είναι απλές κατοικίες, το βιομηχανικό (industrial), που περιλαμβάνει μεγαλύτερους καταναλωτές όπως βιομηχανίες και εμπορικά κέντρα, και το εμπορικό (commercial).



Εικόνα 5: Σχηματικό παράδειγμα ενός μικροδικτύου για εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις (πηγή: Microgrid ή Μικροδίκτυα, 2024)

1.3.3 Συνεισφορά του μικροδικτύου στην παραγωγή ενέργειας

Τα μικροδίκτυα προσφέρουν σημαντικά οφέλη, όπως χαμηλό κόστος, καθαρή και αποδοτική ενέργεια. Η ενσωμάτωση ΑΠΕ, όπως φωτοβολταϊκά και αιολικοί σταθμοί, σε συνδυασμό με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και προηγμένα συστήματα ελέγχου, μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και σωματιδίων, συμβάλλοντας στη μείωση της περιβαλλοντικής επίδρασης. Τα μικροδίκτυα ενισχύουν την αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου, μειώνοντας τη συμφόρηση του κεντρικού δικτύου και τα φορτία αιχμής, ενώ προσφέρουν και βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο. Επιπλέον, μειώνουν την απόσταση μεταξύ κατανάλωσης και παραγωγής ενέργειας, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερες απώλειες και κόστη μεταφοράς και διανομής (About microgrids: Features and Benefits, 2024).

Η εξοικονόμηση είναι επίσης ένα μεγάλο πλεονέκτημα των μικροδικτύων. Με την υλοποίηση υψηλής απόδοσης συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας

(ΣΗΘ), μειώνεται η χρήση καυσίμου και το ανθρακικό αποτύπωμα, προσφέροντας σημαντική οικονομική ωφέλεια. Επιπλέον, η χρήση τοπικών ενεργειακών και εργασιακών πόρων ενισχύει τις τοπικές αγορές ενέργειας και συμβάλλει στην ενίσχυση των αποκεντρωμένων περιοχών. Τα μικροδίκτυα μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες απομακρυσμένων καταναλωτών ή οικισμών που δεν μπορούν να συνδεθούν με το κεντρικό δίκτυο λόγω υψηλού κόστους, προσφέροντας μια αξιόπιστη παροχή ενέργειας (Microgrid ή Μικροδίκτυα, 2024).

Παρά τα πλεονεκτήματα, τα μικροδίκτυα αντιμετωπίζουν και σημαντικές προκλήσεις. Το υψηλό κόστος των μονάδων ΑΠΕ και η ανάγκη αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας σε μπαταρίες αποτελούν κρίσιμα θέματα λόγω του απαιτούμενου χώρου και της ανάγκης για συντήρηση. Επιπλέον, οι τεχνικές δυσκολίες που προκύπτουν από τη διαχείριση μεγάλου αριθμού μικροπαραγωγών και ο συγχρονισμός τους με το κεντρικό δίκτυο αποτελούν εξίσου σημαντικά προβλήματα. Παράλληλα, για τη λειτουργία και προστασία των μικροδικτύων δεν υπάρχουν κανονισμοί και πρότυπα, καθώς και εκπαιδευμένοι ειδικοί στον τομέα των μικροδικτύων, λόγω της σχετικά πρόσφατης υλοποίησής τους. (The Pros and Cons of Microgrids, 2021).

Τα μικροδίκτυα χρησιμοποιούν διάφορες πηγές ενέργειας και συνδυάζουν την παραγωγή και την κατανάλωση τοπικά, ενισχύοντας την απόδοση και τη σταθερότητα του συστήματος. Το κέντρο ελέγχου ενός μικροδικτύου επιτρέπει τη συγχρονισμένη λειτουργία των στοιχείων του για βέλτιστη απόδοση. Παρέχουν σταθερό ρεύμα ανάλογα με τις ανάγκες του καταναλωτή και συμβάλλουν στη μείωση ρύπων και των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, χάρη στη χρήση ΑΠΕ [Microgrid ή Μικροδίκτυα, 2024].

Εν κατακλείδι, τα μικροδίκτυα προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως εξοικονόμηση, περιβαλλοντική βιωσιμότητα, βελτίωση της σταθερότητας και της αξιοπιστίας του τοπικού δικτύου και υποστήριξη των απομακρυσμένων περιοχών. Ωστόσο, οι προκλήσεις που σχετίζονται με το κόστος, την αποθήκευση ενέργειας, τις τεχνικές δυσκολίες, την έλλειψη κανονισμών και την αντίδραση των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας απαιτούν προσεκτική διαχείριση και σχεδιασμό [Λιακάκης, 2024]

1.3.4 Παραδείγματα στον κόσμο και την Ελλάδα

Τα τελευταία χρόνια, στη Φιλαδέλφεια των ΗΠΑ, ένα εγκαταλελειμμένο ναυπηγείο έχει μετατραπεί σε ένα δυναμικό εμπορικό κέντρο (εικόνα 7), που περιλαμβάνει μια ποικιλία επιχειρήσεων, μοντέρνων και ιστορικών κτιρίων, ερευνητικών εγκαταστάσεων και χώρων αναψυχής. Αυτό το κέντρο εφοδιάζεται με ενέργεια από ένα από τα πιο προηγμένα μικροδίκτυα στη χώρα, με παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά στέγης 400 kW, γεννήτριες φυσικού αερίου συνολικής ισχύος 8 MW και κυψέλες καυσίμου 600 kW. Επίσης, σχεδιάζεται η κατασκευή ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες ιόντων λιθίου και η επέκταση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σε αναπτυξιακό στάδιο (Wood, 2019).

Στο Lac-Mégantic του Καναδά, ένα μικροδίκτυο έχει εγκατασταθεί για να παρέχει καθαρή ενέργεια σε περισσότερα από 30 κτίρια, χρησιμοποιώντας ηλιακά πάνελ και μπαταρίες με

συνολική χωρητικότητα 700 kWh (εικόνα 8), και έχουν εγκατασταθεί έξυπνα εξαρτήματα για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων (Church, 2021).

Στην Ελλάδα, η Τήλος έχει καθιερωθεί ως το πρώτο αυτόνομο νησί της Μεσογείου, με ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας που περιλαμβάνει ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες και σύστημα διαχείρισης για συνεχή ενεργειακή ασφάλεια όπως φαίνεται στην εικόνα 6 (Tilos Project, 2024; Σιμιτλιώτου, 2022).



Εικόνα 6: Μικροδίκτυο στην Τήλο (πηγή: Tilos Project, 2024)



Εικόνα 7: Παράδειγμα μικροδικτύου, Navy yard, Filadelfia (Πηγή: Navy Yard Microgrid, 2024.)



Εικόνα 8: Παράδειγμα μικροδικτύου, Lac-Mégantic, Κεμπέκ (Πηγή: Lac-Mégantic Microgrid, 2024.)

2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Οι πολυκριτηριακές μέθοδοι ανάλυσης αποφάσεων (MCDA methods) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την αξιολόγηση και την κατάταξη διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Αυτές οι μέθοδοι συχνά συνδυάζουν τις κρίσεις των ειδικών με συστηματικές αναλυτικές τεχνικές για την εξαγωγή ολοκληρωμένων αξιολογήσεων. Οι Barin et al. (2009) εφάρμοσαν τη μέθοδο της αναλυτικής ιεράρχησης (AHP) και την ασαφή λογική για να αξιολογήσουν πέντε τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας (HPS, CAES, Hydrogen, Flywheel και Super-capacitors) με βάση τις κρίσεις ειδικών. Οι Montignac et al. (2015) εφαρμόσαν τη μέθοδο MACBETH για την αξιολόγηση συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου για ηλεκτρικά οχήματα με βάση τις έρευνες ειδικών. Οι Ozkan et al. (2015) χρησιμοποίησαν μεθόδους την AHP και την ασαφή TOPSIS για την αξιολόγηση τριών τεχνολογιών αποθήκευσης υδρογόνου για την περίπτωση της Τουρκίας με βάση επίσης τις κρίσεις των ειδικών. Οι Gumus et al. (2013) χρησιμοποίησαν ασαφείς μεθόδους βασισμένες στην επέκταση Buckley, μαζί με την κρίση ειδικών, για την αξιολόγηση και την κατάταξη τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Οι Gim και Kim (2014) εφάρμοσαν επίσης τεχνικές της ασαφούς AHP για να αξιολογήσουν και να συγκρίνουν την απόδοση πέντε τεχνολογιών αποθήκευσης υδρογόνου, κατάλληλες για αυτοκίνητα στη Νότια Κορέα, με βάση επίσης τις κρίσεις των ειδικών. Οι Daim et al. (2012) χρησιμοποίησαν κρίσεις ειδικών και την ασαφή μέθοδο Delphi για να αξιολογήσουν τρεις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας (PHS, CAES, Sodium-sulfur battery). Οι Vo et al. (2017) πραγματοποίησαν συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων αποθήκευσης με βάση το κόστος, την αποδοτικότητα, την ευελιξία, τη χωρητικότητα αποθήκευσης, τον χρόνο εκφόρτισης και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα δεδομένα για κάθε τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας συλλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία και κανονικοποιήθηκαν με ένα γραμμικό συναθροιστικό μοντέλο. Επίσης, εφαρμόστηκε έρευνα δέκα εμπειρογνομόνων για την στάθμιση των κριτηρίων. Η πολυκριτηριακή ανάλυση παρείχε την εξής κατάταξη: P2G, HPS και CAES που δείχνει ότι το P2G αξιολογήθηκε ως προτιμότερο. Οι Ren και Ren (2018) αξιολόγησαν πέντε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (HPS, CAES, Lead-acid battery, Li-Ion και Flywheel). Οι Bulut και Ozcan (2021) συνδύασαν την AHP με την TOPSIS για την αξιολόγηση της τεχνολογικής απόδοσης πέντε τεχνολογιών (Lead-acid, Li-Ion, VRB, Sodium Sulphur και Sodium nickel chloride). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα πιο σημαντικά κριτήρια τεχνολογικής απόδοσης είναι η διάρκεια ζωής, η ενεργειακή απόδοση, ο χρόνος εκφόρτισης καθώς και τα κριτήρια κύκλου ζωής. Προκειμένου να βρεθεί το καλύτερο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για την ηλεκτροδότηση ενός χωριού στην Ινδία, οι Maisanam et al. (2020) έδωσαν προτεραιότητα σε δέκα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας εφαρμόζοντας την κλασική μέθοδο TOPSIS. Οι μπαταρίες PHS, CAES και Lead-acid επιλέχθηκαν ως οι πλέον προτιμώμενες εναλλακτικές λύσεις. Οι Colak και Kaya (2020) συνδύασαν την Delphi AHP με τη VIKOR, σε ασαφές περιβάλλον, για την αξιολόγηση εννέα τεχνολογιών. Οι συγγραφείς παρείχαν μια μελέτη περίπτωσης για την Τουρκία και διαπίστωσαν ότι η τεχνολογία CAES είναι η καταλληλότερη. Οι Albawab et al. (2020) εισήγαγαν έναν δείκτη απόδοσης βιωσιμότητας για την αξιολόγηση και την κατάταξη επτά τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Οι συγγραφείς συνδύασαν τις εκτεταμένες προσεγγίσεις Βηματικής Ανάλυσης Αναλογίας και Αξιολόγησης Βάρους (SWARA) και Αξιολόγησης

Προσθετικής Αναλογίας (ARAS). Το κύριο ερευνητικό κενό που κάλυψαν ήταν ότι οι περισσότερες μελέτες πολυκριτηριακής ανάλυσης για την αξιολόγηση και την κατάταξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, στόχευαν στην επιλογή της καλύτερης επιλογής αποθήκευσης ενέργειας μεταξύ πολλών εναλλακτικών. Ωστόσο, οι προηγούμενες μελέτες κατέταξαν τις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μόνο με βάση τις κρίσεις των ειδικών και πολύ περιορισμένα υποκειμενικά κριτήρια αξιολόγησης (Balezentis et al, 2021). Η αναθεωρημένη βιβλιογραφία καταδεικνύει μια ποικιλόμορφη εφαρμογή των μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης, υπογραμμίζοντας τη σημασία τους στην αξιολόγηση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Ωστόσο, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να στοχεύει στην αντιμετώπιση των κενών που εντοπίστηκαν ενσωματώνοντας ευρύτερα κριτήρια και πιο αντικειμενικά μέτρα για την ενίσχυση των διαδικασιών λήψης αποφάσεων στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η αποθήκευση ενέργειας είναι αλληλένδετες, επομένως είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο τρόπος επιλογής της τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας που ταιριάζει με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η επιλογή τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας είναι ένα πρόβλημα επιλογής τεχνολογίας (technology selection problem) (Liu & Du, 2020). Όσον αφορά την επιλογή της τεχνολογίας, οι περισσότεροι μελετητές τείνουν να αξιοποιήσουν μια μέθοδο λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDM) για να ταξινομήσουν τις εναλλακτικές λύσεις τεχνολογίας. Σε αυτό το πλαίσιο, Η εργασία των Hsu et al. (2010) σχετίζεται κυρίως με το ασαφές μοντέλο, η εργασία των Ren and Ren (2018) με το διαισθητικό ασαφές μοντέλο, οι Intepe et al. (2013) και Onar et al. (2015) βασίζονται στα διαστήματα αξίας, οι Van De Kaa et al. (2014) βασίζονται στους τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς, οι Qu et al. (2019) βασίζονται στους τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς με διαστήματα, οι Khishtandar et al. (2017) βασίζονται σε ένα διστακτικό ασαφές γλωσσικό σύνολο, ο Oztaysi (2014) βασίζεται σε γκρίζους αριθμούς, οι Liu et al. (2014) βασίζονται σε γλωσσικές μεταβλητές και, τέλος, οι Qu et al. (2016) χρησιμοποιούν τραπεζοειδείς ασαφείς αριθμούς με διαστήματα. Η κύρια μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως από τους μελετητές είναι η διαδικασία αναλυτικής ιεραρχίας (AHP), όπως στους Tang et al. (2014), η μέθοδος PROMETHEE, όπως στους Qu et al. (2019) και ούτω καθεξής. Η διαφορετική τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας δεν έχει μόνο άμεσο αντίκτυπο στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά επηρεάζει επίσης τις σχετικές οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές πτυχές. Προκειμένου να επιλεγεί η καλύτερη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, η υπάρχουσα έρευνα έχει παράσχει πληθώρα αναλυτικών μεθόδων. Οι Satkin et al. (2014) χρησιμοποίησαν μαθηματικό προγραμματισμό για να επιλέξουν την τοποθεσία για σταθμούς αποθήκευσης ενέργειας πεπιεσμένου από αιολικό αέρα στο Ιράν. Με βάση τα ασαφή σύνολα τύπου-2, μια υβριδική μέθοδος MCDM που αποτελείται από την AHP και την TOPSIS προτάθηκε για την επιλογή της καταλληλότερης εναλλακτικής αποθήκευσης ενέργειας στους Ozkan et al. (2015).

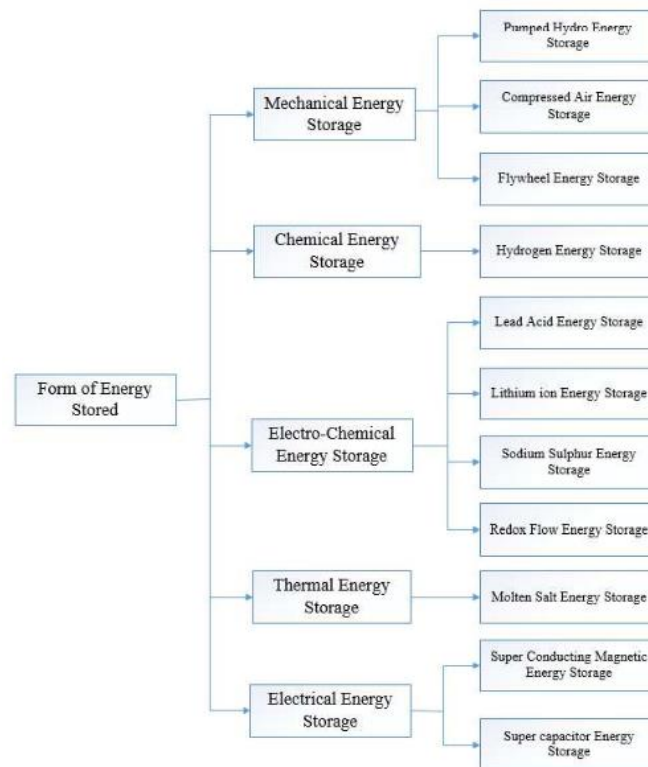
Ομοίως, οι Raza et al. (2014) αναγνώρισαν τη σημασία της βιωσιμότητας. Πρότειναν ένα κριτήριο αξιολόγησης για το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Για να βρεθεί το καταλληλότερο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που να συνάδει με μια προτεραιότητα ποιότητας ισχύος, οι Barin et al. (2011) παρουσίασαν μια προσέγγιση βασισμένη στην AHP

και ασαφή σύνολα. Οι Li et al. (2018) κατασκεύασαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων για την επιλογή τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας. Οι Zhang et al. (2019) επέκτειναν τη βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων με την ανάλυση αναλογίας συν την πλήρη πολλαπλασιαστική μορφή (MULTIMOORA) σε διαισθητικό ασαφές περιβάλλον, το οποίο στοχεύει στον εντοπισμό της καταλληλότερης τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας. Σύμφωνα με την υπάρχουσα έρευνα, το ζήτημα της επιλογής τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας θεωρείται ως επί το πλείστον ως πρόβλημα πολυκριτήριας ανάλυσης. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, ο αποφασίζων πρέπει να αλληλεπιδράσει με τα εμπλεκόμενα μέρη για να επιλέξουν μία ή περισσότερες τεχνολογίες αποθήκευσης βάσει πολλαπλών κριτηρίων αξιολόγησης. Αυτό είναι ένα πρόβλημα ομαδικής λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων που περιλαμβάνει κριτήρια αξιολόγησης πολλαπλών δράσεων, εμπειρογνώμονες και εναλλακτικές τεχνολογίες αποθήκευσης. Επιπλέον, λόγω της πολυπλοκότητας, της αβεβαιότητας και του κινδύνου της τεχνολογίας, η χρήση ασαφών συνόλων, διαισθητικών ασαφών συνόλων, ασαφών συνόλων τύπου 2 κ.λπ. που αντιπροσωπεύουν τις πληροφορίες αξιολόγησης της τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας είναι δύσκολο να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας και για αυτό απαιτείται μια νέα μέθοδος αναπαράστασης της μη ακριβούς πληροφορίας. Επιτέλους, πρέπει επίσης να βελτιωθούν τα επιστημονικά και εύλογα κριτήρια αξιολόγησης των τεχνολογιών αποθήκευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

3. Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας

3.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η απευθείας αποθήκευση ενέργειας δεν είναι φθηνότερη, μπορεί να αποθηκευτεί αφού μετατραπεί σε άλλη μορφή και όταν απαιτείται ξανά μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Όταν η ισχύς είναι πλεονάζουσα, τότε αποθηκεύεται σε άλλη μορφή έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια του χρόνου αιχμής της ζήτησης, η αποθηκευμένη ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψει τις απαιτήσεις φορτίου. Για την αποθήκευση της ενέργειας χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες και παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία. Οι τεχνικές αποθήκευσης ενέργειας ταξινομούνται με βάση τη διάρκεια εκφόρτισης (discharge duration) και τη μορφή της αποθηκευμένης ενέργειας (Simeon et al, 2018). Η ενέργεια μπορεί πρώτα να μετατραπεί σε διαφορετική μορφή για αποθήκευση και στη συνέχεια να μετατραπεί ξανά σε χρησιμοποιήσιμη μορφή. Με βάση τη μορφή της αποθηκευμένης ενέργειας, η αποθήκευση ενέργειας ταξινομείται σε πέντε κατηγορίες (Zhou et al, 2017) : αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, μηχανική αποθήκευση ενέργειας, αποθήκευση θερμικής ενέργειας, αποθήκευση ηλεκτροχημικής ενέργειας και αποθήκευση χημικής ενέργειας (Kumar et Kumar, 2020; Sharma et al, 2022). Σε αυτή την εργασία θα ακολουθηθεί αυτή η κατηγοριοποίηση.



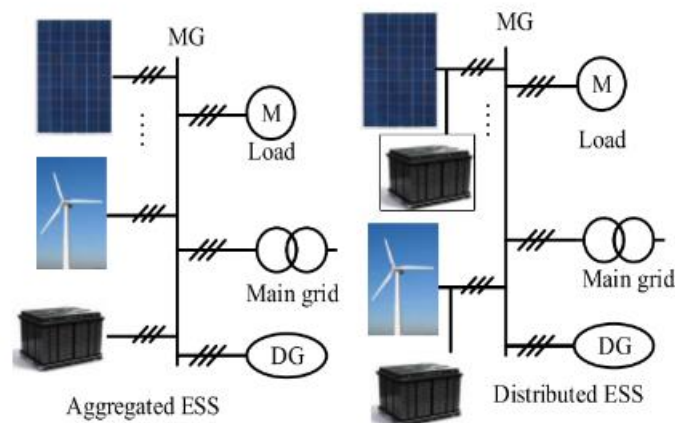
Εικόνα 9: Κατηγοριοποίηση τεχνολογιών αποθήκευσης με βάση την αποθηκευμένη ενέργεια (Πηγή: Sharma et al, 2022)

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν τόσο με τεχνικά όσο και με οικονομικά κριτήρια. Επιπλέον, μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το αν είναι εγκατεστημένα κεντρικά ή διανεμημένα, καθώς εφαρμόζονται σε μεμονωμένα μικρά συστήματα όπως οι κατοικίες, σε μεγαλύτερα συστήματα όπως εμπορικά ή γειτονιές, σε συστήματα του δικτύου διανομής ενέργειας ή σε λειτουργία εγκατάστασης ΑΠΕ. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας εξαρτώνται από την περίοδο αποστράγγισης (drain period) ή τη φάση εκφόρτισης (discharge). Με βάση τη διάρκεια αποφόρτισης ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες, δηλαδή:

- Βραχυπρόθεσμη αποθήκευση. Εξυπηρετεί τις αιχμές της ζήτησης ενέργειας για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα εντός της ημέρας. Έτσι, μειώνεται η ζήτηση σε κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, συστήματα μεταφοράς και διανομής. Για τέτοιες εφαρμογές, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει αποθήκευση ενέργειας σφόνδου (Flywheel), αποθήκευση ενέργειας υπερπυκνωτών (Super-capacitors) και αποθήκευση υπεραγώγιμης μαγνητικής ενέργειας (SMES).
- Μεσοπρόθεσμη αποθήκευση. Χρησιμοποιείται όταν η υπερβολική ενέργεια ή το εποχικό κέρδος μπορούν να αποθηκευτούν για κάποιο χρονικό διάστημα (από μερικές ημέρες έως μερικές εβδομάδες) και να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για την κάλυψη της ζήτησης. Τέτοια μέσα είναι οι μπαταρίες όπως μολύβδου-οξέος (Lead-acid), ιόντων λιθίου (Lithium-ion), θείου νατρίου (Sodium-sulfur), οξειδοαναγωγής ροής ενέργειας (Redox-flow) και η αποθήκευση ενέργειας τηγμένου άλατος (Molten-salt)
- Αποθήκευση μεγάλης διάρκειας (μακροπρόθεσμη). Χρησιμοποιούνται σε συστήματα με υψηλή ενεργειακή αποθηκευτική ικανότητα και ελάχιστες ή πολύ χαμηλές απώλειες ενέργειας. Η περίοδος αποθήκευσης μπορεί να κυμαίνεται από μερικούς μήνες έως και ολόκληρο το έτος. Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν αυτά τα συστήματα εκμεταλλεύονται τις ετήσιες κλιματικές διακυμάνσεις και επιδιώκουν να μειώσουν τις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις ή να εξυπηρετήσουν μεγάλο αριθμό καταναλωτών, όπως πόλεις, οικισμούς ή βιομηχανικές περιοχές, σε εξαιρετικές περιπτώσεις. Οι πιο κοινές τεχνολογίες είναι η αντλησιοταμίευση (PHES), η αποθήκευση ενέργειας υδρογόνου (Hydrogen) και η αποθήκευση ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (CAES) (Symeonidou et Papadopoulos, 2022)

Οι δύο βασικές διαμορφώσεις των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας για εφαρμογές σε μικροδίκτυα είναι το συγκεντρωτικό και το κατανεμημένο. Για τη συγκεντρωτική διαμόρφωση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, η ποσότητα ροής ισχύος από τις κατανεμημένες πηγές (distributed energy resources) παραμένει σε σταθερή τιμή. Επιπλέον, η συνολική χωρητικότητα των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να εφαρμοστεί για να μετριάσει τις διακυμάνσεις της ροής ισχύος. Εάν η χωρητικότητα μιας συσκευής αποθήκευσης ενέργειας αυξηθεί, αυξάνεται και το κόστος. Η κατασκευή και ο έλεγχος μεγάλων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι δύσκολη. Έτσι, μικρές και

καταναμημένες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη αξιόπιστης και αποτελεσματικής ρύθμισης ισχύος. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε διαμορφώσεις καταναμημένης αποθήκευσης συνδέονται απευθείας με συγκεκριμένες πηγές διανομής με πολυάριθμες διεπαφές. Ωστόσο, ο έλεγχος της ροής ισχύος είναι η κύρια πρόκληση που αντιμετωπίζει το καταναμημένο σύστημα. Επιπλέον, η διαδικασία αποθήκευσης εξακολουθεί να υφίσταται απώλειες μέσω ηλεκτρονικών διεπαφών ισχύος για καταναμημένους πόρους και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. (Faisal et al, 2018)



Εικόνα 10: Οι δύο κατηγορίες συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε μικροδίκτυα (Πηγή: Faisal et al, 2018)

Βέβαια προκειμένου να συνδεθεί ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με το δίκτυο, πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα μετατροπής ισχύος (Power Conditioning System – PCS), το οποίο τοποθετείται ανάμεσα στη μονάδα αποθήκευσης (Storage Unit) και το δίκτυο. Το PCS είναι ένας μετατροπέας εναλλασσόμενου σε συνεχές (AC-DC converter), πιο συγκεκριμένα είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος που μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα από εναλλασσόμενο σε συνεχές και αντίστροφα. Οι μπαταρίες φορτίζονται με συνεχές ρεύμα, ενώ το δίκτυο λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Η αποθηκευτική ικανότητα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και ο χώρος που απαιτείται για την εγκατάστασή του είναι άμεσα συνδεδεμένα. Αντί να δεσμεύονται μεγάλοι χώροι για την εγκατάσταση μεγάλων συστημάτων αποθήκευσης, προτείνεται η χρήση μικρότερων μονάδων αποθήκευσης σε διάφορα σημεία του συστήματος διανομής. Για αυτόν τον λόγο ορίζεται η καταναμημένη αποθήκευση ενέργειας (Distributed Energy Storage – DES). Οι τεχνολογίες DES συνήθως περιλαμβάνουν σφονδύλους (flywheels), υπεραγωγία μαγνητικά συστήματα αποθήκευσης (SMES), μπαταρίες και υπερπυκνωτές (supercapacitors). Από αυτές τις τεχνολογίες, οι μπαταρίες και οι σφόνδυλοι είναι οι πιο διαδεδομένες. Αντίθετα, οι τεχνολογίες αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage) και αντλησιοταμίευσης (PHES) είναι ογκώδεις και απαιτούν μεγάλους χώρους για την εγκατάστασή τους (Πανατζόπουλος, 2023).

3.2 Μηχανικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

3.2.1 Αντλησιοταμίευση (PHES)

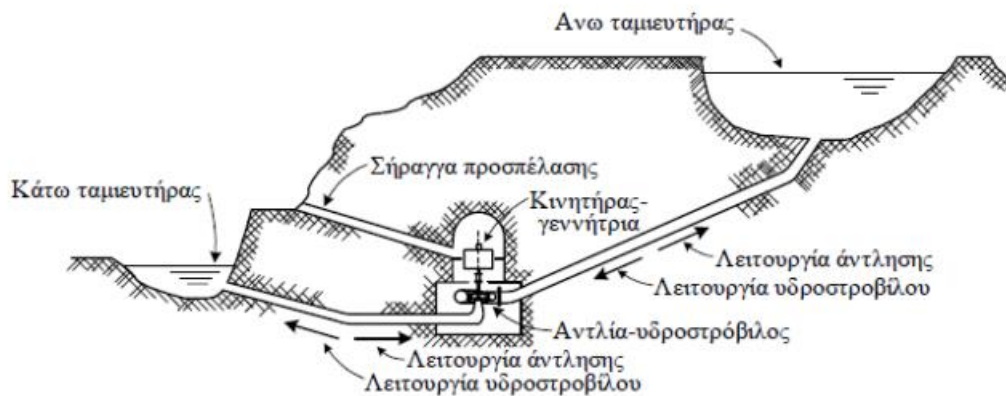
Περιγραφή

Η τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1890 στην Ιταλία και την Ελβετία, ενώ το 1930 αναπτύχθηκαν οι πρώτοι αναστρέψιμοι υδροστρόβιλοι. Έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν και σαν αντλίες για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και σαν στρόβιλοι παραγωγής ενέργειας. Οι αναστρέψιμοι υδροστρόβιλοι ήταν σημαντικός παράγωντας για τη διάδοση της, κυρίως στις ΗΠΑ και στην Ιαπωνία, λόγω αυξημένης ανάγκης διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από πυρηνικούς σταθμούς.

Η λειτουργία της βασίζεται στη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε δυναμική κατά την αποθήκευση ή "φόρτιση" και ξανά σε ηλεκτρική κατά την παραγωγή ή "αποφόρτιση". Η αποθήκευση ενέργειας γίνεται με την άντληση νερού. Αποτελείται από δύο ταμιευτήρες με σημαντική διαφορά υψομέτρου, τον άνω και τον κάτω, καθώς και από ένα κύκλωμα αγωγών για την κυκλοφορία του νερού. Σε κάποιες παραλλαγές του συστήματος χρησιμοποιείται ένας αγωγός μαζί με αναστρέψιμο υδροστρόβιλο και βοηθητικό αντλιοστάσιο με δεύτερο αγωγό. Επίσης, έχει δοκιμαστεί η χρήση της θάλασσας ως κάτω ταμιευτήρας, όπως στον αντλησιοταμιευτικό σταθμό Rance Tidal στη Γαλλία, ο οποίος είναι ο πρώτος αυτού του είδους.

Ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από τα εξής:

- Δύο δεξαμενές νερού, ταμιευτήρες με σημαντική υψομετρική διαφορά.
- Έναν υδροστρόβιλο, αλλά μπορεί να έχουν και σύστημα υδροστροβίλων.
- Μια αντλία ή ένα σύστημα αντλιών.
- Μια ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια σε κοινή άτρακτο με την αντλία και τον υδροστρόβιλο.
- Ένα σύνολο από σωλήνες για την άντληση νερού από τις δεξαμενές (μεταφορά από την κάτω στην άνω).
- Ένα σύνολο σωληνώσεων για την αντίστροφη διαδικασία, (προσαγωγή νερού από την άνω προς την κάτω), με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 11: Παράδειγμα λειτουργίας αντλιοσταμείωσης (Πηγή: Σταυρακάκης, 2016)

Η υψομετρική διαφορά, πρέπει να ληφθεί υπόψιν για την ορθή και καλύτερη λειτουργία τους. Σε μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές μεταξύ των δύο ταμιευτήρων, μικρότερη ποσότητα νερού παρέχει την ίδια χωρητικότητα, με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιούνται μικρότερης διαμέτρου αγωγοί πτώσεως για την παραγωγή της ίδιας ισχύος.

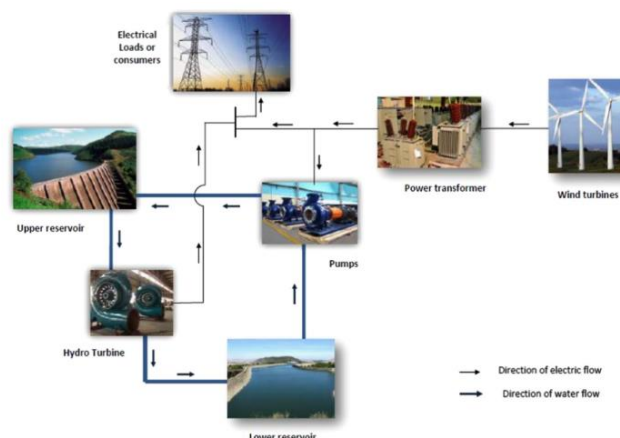
Στα συστήματα αντλιοσταμείωσης, υπάρχουν δύο βασικές σχεδιαστικές εκδοχές: η μονή σωλήνωση και η διπλή σωλήνωση. Στη μονή σωλήνωση υπάρχει κοινή σωλήνωση για τον στρόβιλο και την αντλία, κάτι που είναι οικονομικότερο, έχει λιγότερα έξοδα εγκατάστασης, αλλά δεν επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία τους. Θα πρέπει να καθοριστεί σειρά προτεραιότητας μεταξύ στροβίλου και αντλίας. Στη διπλή σωλήνωση, οι σωληνώσεις είναι ανεξάρτητες, επιτρέποντας την ταυτόχρονη λειτουργία, αλλά είναι ακριβότερη. Αν και φαίνεται ότι η άμεση απορρόφηση ισχύος από τις μονάδες βάσεως μπορεί να υποκαταστήσει την ανάγκη για αντλίες, αυτό δεν είναι πάντα εφικτό λόγω των περιορισμών του δικτύου. Για τον λόγο αυτό χρειάζονται να λειτουργούν ταυτόχρονα. Ένας ακόμα λόγος είναι ότι η χρονική κατανομή της απορριπτόμενης ισχύος επηρεάζεται από τη διαθέσιμη παραγόμενη ενέργεια και τις διακυμάνσεις της ζήτησης. Σε ώρες αιχμής, μπορεί να χρειάζεται ταυτόχρονη λειτουργία των αντλιών για την εκμετάλλευση της περίσσειας ισχύος και λειτουργία του στροβίλου λόγω υψηλής ζήτησης. Η αλλαγή από λειτουργία αντλίας σε λειτουργία στροβίλου απαιτεί χρόνο, χάνοντας το πλεονέκτημα της άμεσης απόκρισης. Τόσο στη μονή όσο και στη διπλή σωλήνωση, οι μηχανές (αντλία, υδροστροβίλος, κινητήρας/γεννήτρια) τοποθετούνται σε κοινή άτρακτο με την ίδια φορά περιστροφής. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος με μονή σωλήνωση, όπου η υδροδυναμική μηχανή λειτουργεί είτε ως αντλία είτε ως στρόβιλος, προσφέροντας οικονομικότερη και λειτουργική λύση (Σταυρακάκης, 2016).

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός αντλιοσταμειωτικού συστήματος περιλαμβάνουν τον διαθέσιμο όγκο αποθήκευσης και την εκμετάλλευση της υψομετρικής διαφοράς, τα οποία καθορίζουν την αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης αυτών των συστημάτων μπορεί να φτάσει έως και το 80%, καθώς κατά τη διάρκεια ενός

πλήρους κύκλου λειτουργίας υπάρχουν απώλειες ενέργειας τόσο κατά την άντληση όσο και κατά την παραγωγή, στους υδροστρόβιλους και αντίστοιχα στις γεννήτριες. Επιπλέον, για μεγάλες περιόδους αποθήκευσης, οι απώλειες εξάτμισης του νερού από τον ταμιευτήρα αποκτούν ιδιαίτερη σημασία.

Σύμφωνα με τους Symeonidou and Papadopoulos (2022), η πιο αξιόπιστη λύση για την αποθήκευση παραγόμενης ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα σήμερα είναι τα αντλησιοταμιευτικά συστήματα, ειδικότερα τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά συστήματα. Η περίσσεια ενέργειας που εμφανίζεται κατά τις ώρες παραγωγής χαμηλού φορτίου και υψηλής περιεκτικότητας σε ΑΠΕ χρησιμοποιείται για την άντληση νερού στην άνω δεξαμενή και αποθηκεύεται με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Η αποτελεσματικότητα του PHEs κυμαίνεται μεταξύ 75 και 85%. Σε όλο τον κόσμο, το μέγεθος του PHEs κυμαίνεται από 100 σε 5.000 MW. Το σύστημα PHEs έχει πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής περίπου 40-60 χρόνια και 104-6×10⁴ κύκλους. Το κεφαλαιουχικό κόστος του συστήματος PHEs είναι περίπου 600-2.000 \$/kW και το κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας είναι περίπου 5-100 \$/kWh. Η ενεργειακή πυκνότητα του συστήματος PHEs είναι 0,2-2 W/L, 0,5-1,5 Wh/kg, 0,5-1,5 kW/km³ και η πυκνότητα ισχύος είναι 0,5-1,5 kW/m³. Το σύστημα PHEs είναι η καλύτερη επιλογή για το σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και για το ηλεκτρικό δίκτυο. Μερικά από τα κύρια μειονεκτήματα του συστήματος PHEs είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου, αφού το μέγεθος της μονάδας είναι πολύ μεγάλο, καθώς και ο τοπογραφικός περιορισμός (Balali and Stegen, 2021; Pamkaj, 2022).

Με άλλα λόγια η αντλησιοταμίευση μετατρέπει την ενέργεια του κινούμενου νερού σε ηλεκτρική. Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια από τις πιο παλιές και πιο ώριμες ενεργειακές τεχνολογίες και χρησιμοποιείται με διάφορες μορφές εδώ και χιλιάδες χρόνια. Η υδροηλεκτρική ενέργεια παρέχει πλέον κάποιο επίπεδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε περισσότερες από 160 χώρες (Hydropower / Pumped Hydro Energy Storage, 2024).



Εικόνα 12: Παράδειγμα με ανεμογεννήτριες και PHEs (Πηγή: Rehman et al, 2015)

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της αντλησιοταμίευσης είναι η γρήγορη απόκριση και η άμεση προσαρμογή στις αλλαγές στο φορτίο. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο σταθμός αντλησιοταμίευσης Dinorwig στη βόρεια Ουαλία που μπορεί να αναλάβει φορτίο περίπου 1.7GW σε λιγότερο από 16 δευτερόλεπτα.

Ωστόσο, η δυσκολία στην εύρεση κατάλληλων περιοχών για να κατασκευαστούν οι δύο ταμιευτήρες και το ένα ή δύο φράγματα που απαιτούνται για τη λειτουργία του συστήματος είναι ένα βασικό μειονέκτημα. Απαιτεί συγκεκριμένες γεωγραφικές και υδραυλικές συνθήκες, κάτι που περιορίζει την εφαρμογή του σε ορισμένες περιοχές. Απαιτούνται ορισμένες ειδικές συνθήκες για το PHES, όπως η διαθεσιμότητα νερού, η διαφορά στη στάθμη του νερού ή το υψόμετρο του νερού. Εάν δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις, τότε το PHES είναι αδύνατον να εγκατασταθεί. Οι σύγχρονες εξελίξεις περιλαμβάνουν τη χρήση θαλασσινού νερού και υπόγειων δεξαμενών για την αποθήκευση ενέργειας, ενώ η τεχνολογία μεταβλητής ταχύτητας βελτιώνει την απόδοση και την ευελιξία των συστημάτων (EERA, 2016). Επιπλέον, τόσο η εύρεση όσο και η κατασκευή αυτών των ταμιευτήρων είναι μια πολύ κοστοβόρα και χρονοβόρα διαδικασία που συχνά διαρκεί έως και 10 χρόνια. Επιπλέον, συνήθως συνοδεύεται από σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η επέμβαση σε ενδημικά είδη - ιδιαίτερα υδάτινα οικοσυστήματα, η αποψίλωση δασών και η αφαίρεση μεγάλων ποσοτήτων βλάστησης πριν τοποθετηθούν οι ταμιευτήρες.

Ωστόσο, πολλά από αυτά τα μειονεκτήματα μετριάζονται όταν χρησιμοποιούνται ταμιευτήρες υφιστάμενων υδροηλεκτρικών φραγμάτων. Η μετατροπή υδροηλεκτρικών φραγμάτων σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με αντλησιοταμίευση περιλαμβάνει την προσαρμογή των αγωγών άντλησης και την εγκατάσταση των απαραίτητων αντλητικών συστημάτων, μειώνοντας έτσι το κόστος και το χρόνο κατασκευής, καθώς και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Συνολικά, η Αντλησιοταμίευση Υδροηλεκτρικών Συστημάτων (PHES) παραμένει μια από τις πιο αποδοτικές και ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα, παρέχοντας αξιόπιστες λύσεις για την ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα ενεργειακά δίκτυα.



Εικόνα 13: Παράδειγμα αντλιοσταμείωσης στην Αμφιλοχία (Πηγή: Αντλιοσταμείωση: Στην Αμφιλοχία το μεγαλύτερο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας στην Ελλάδα, 2020)

Υπάρχουσες Εγκαταστάσεις

Υπάρχουν 325 συστήματα αντλιοσταμείωσης που λειτουργούν σε όλο τον κόσμο, συνολικής ισχύος 167,8 GW, που αντιπροσωπεύουν το 97% της συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας των 173,7 GW. Σε δέκα χώρες συγκεντρώνονται πάνω από τα τρία τέταρτα της παγκόσμιας αντλιοσταμειωτικής ισχύος, με τις Κίνα (31,4 GW), Ιαπωνία (27,4 GW) και ΗΠΑ (22,6 GW) να κατέχουν περίπου τη μισή (48,5%) από αυτήν. Η Ισπανία διαθέτει τη μεγαλύτερη αντλιοσταμειωτική ισχύ στην ΕΕ και την τέταρτη παγκοσμίως (8 GW), ενώ ακολουθούν η Ιταλία (7,1 GW) και η Γερμανία (6,5 GW).

Στο Bath County των ΗΠΑ βρίσκεται το μεγαλύτερο σύστημα αντλιοσταμείωσης με αντλητική ισχύ άνω των 3 GW. Στον Καναδά προγραμματίζεται η κατασκευή ενός νέου συστήματος ισχύος 4 GW. Στην Κίνα, τα μεγαλύτερα συστήματα αντλιοσταμείωσης έχουν ισχύ 2,45 GW και 2,4 GW αντίστοιχα. Στην ΕΕ, το πιο μεγάλο σύστημα βρίσκεται στην Ισπανία με ισχύ 2 GW.

Στην Ελλάδα, σύμφωνα με μια μελέτη της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας, εντοπίστηκαν επτά υφιστάμενοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ που με μικροεπεμβάσεις μπορούν να μετατραπούν σε σταθμούς αντλιοσταμείωσης. Το κόστος εγκατάστασης για μια επιπλέον αντλητική ισχύ περίπου 400 MW εκτιμάται στα 520€ ανά kW. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν στην έκθεση του WWF Ελλάς για την εξέταση εναλλακτικών λύσεων για την κατασκευή της νέας λιγνιτικής μονάδας "Πτολεμαΐδα 5". Η έκθεση ανέδειξε ότι υβριδικοί συνδυασμοί αιολικών, φωτοβολταϊκών και των αντλητικών σταθμών μπορούν να καλύψουν το σταθμισμένο κόστος ενέργειας για το φορτίο βάσης της νέας λιγνιτικής μονάδας κάθε ώρα του χρόνου, προσφέροντας σημαντικά χαμηλότερο κόστος από τις συμβατικές επιλογές (Energy Storage Technologies: Challenges and Outlook , 2020).

Στην Ελλάδα, υπάρχουν δύο συστήματα αντλιοσταμείωσης συνολικής ισχύος περίπου 700 MW, ενώ άλλα δύο βρίσκονται στο στάδιο αδειοδότησης. Το σύστημα στην Αμφιλοχία έχει

ισχύ 680 MW και το σύστημα στο Αμάρι Κρήτης ισχύος 140 MW, τα οποία θα υπερδιπλασιάσουν την αποθηκευτική ικανότητα της χώρας σε ενέργεια με την ολοκλήρωσή τους. Ωστόσο, η έλλειψη νέας νομοθεσίας παρακωλύει την έναρξη αυτών των έργων και την καθορισμένη τους λειτουργία. Επιπλέον, στην ηπειρωτική Ελλάδα υπάρχουν 36 ταμιευτήρες, 16 από τους οποίους μέρος υδροηλεκτρικών έργων και 20 για άλλες χρήσεις, που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για τη δημιουργία συστημάτων αντλησιοταμίευσης, καθιστώντας τη χώρα μια ενεργειακή μπαταρία ικανή να υποστηρίξει τις ενεργειακές ανάγκες της.

3.2.2 Αποθήκευση Ενέργειας σε Συμπύεση Αέρα (CAES)

Περιγραφή

Η αποθήκευση ενέργειας με συμπύεση αέρα (CAES) εισήχθη τη δεκαετία του 1970 για την παροχή παρακολούθησης φορτίου και την κάλυψη της ζήτησης αιχμής (Mahlia et al, 2014). Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας πεπιεσμένου αέρα (CAES) εφαρμόζονται σε αποθήκευση μεγάλης κλίμακας. Με εξαίρεση την αντλησιοταμίευση, καμία άλλη μέθοδος δεν έχει την ικανότητα αποθήκευσης τόσο μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για μεγάλες περιόδους. Είναι σύνθετες εγκαταστάσεις, αφού αποτελούνται από το τμήμα ισχύος, το τμήμα συμπύεσης, χειριστήρια, βοηθητικά συστήματα και, το πιο σημαντικό, απαιτούν υπόγεια δεξαμενή για την αποθήκευση του πεπιεσμένου αέρα (Choudhury, 2022; Σταυρακάκης, 2016; Faisal et al, 2018; Bohra, S.S., 2022; Symeonidou et Papadopoulos, 2022).

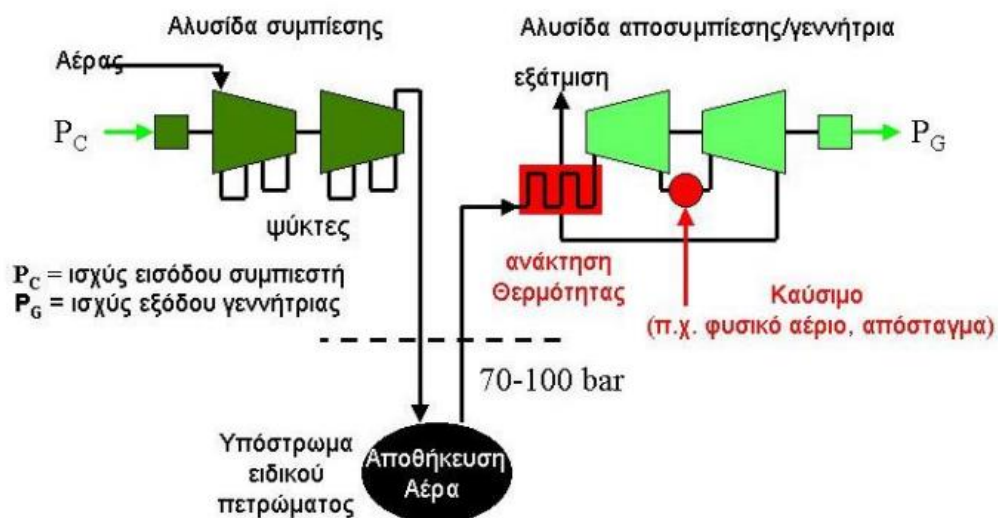
Η βασική εγκατάσταση του συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα αποτελείται από τα εξής:

- Το τμήμα ισχύος περιλαμβάνει τον προθερμαντήρα/μονάδα επιλεκτικής καταλυτικής μείωσης, το στρόβιλο αέρα, το στρόβιλο καύσης και την ηλεκτρική γεννήτρια.
- Το τμήμα συμπύεσης αποτελείται από τον ηλεκτρικό κινητήρα, τους αξονικούς και φυγοκεντρικούς συμπιεστές, ενισχυμένους με δοχεία ψύξης για οικονομική συμπύεση και μείωση της υγρασίας του αέρα.
- Ο υπόγειος αεροστεγής ταμιευτήρας χρησιμοποιείται για την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα.
- Το κέντρο ελέγχου του εξοπλισμού διαχειρίζεται τη λειτουργία του στροβίλου καύσης, του συμπιεστή και των βοηθητικών εξοπλισμών, ενώ ελέγχει τη μετάβαση από την παραγωγή στην αποθήκευση.
- Ο βοηθητικός εξοπλισμός περιλαμβάνει μηχανικά και ηλεκτρικά συστήματα για την αποθήκευση και διαχείριση του καυσίμου, καθώς και εναλλάκτες θερμότητας.

Ειδικότερα, συναρμολογείται με πέντε κύρια εξαρτήματα: κινητήρας/γεννήτρια, ένας συμπιεστής για την πίεση του αέρα σε μια δεξαμενή, ένας στρόβιλος, ένα δοχείο για αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα και συστήματα ελέγχου και μονάδες εναλλάκτη θερμότητας. Γενικά, οι εγκαταστάσεις CAES είναι μεσαίας και μεγάλης κλίμακας για να επιτευχθεί η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Η υπερβάλλουσα ισχύ αποθηκεύεται σε υπόγειες/υπέργειες δεξαμενές με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Όταν είναι απαραίτητο, ο πεπιεσμένος αέρας επαναθερμαίνεται σε μια διαβατική διαδικασία και εγχέεται σε

συμβατικούς αεριοστρόβιλους (Oliveira et al, 2021). Η αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα είναι παρόμοια με την αντλησιοταμίευση νερού, αλλά αντί να αντλείται νερό, συμπιέζεται αέρας σε υπόγειες σπηλιές κατά τη διάρκεια περιόδων πλεονάζουσας ενέργειας. Σε περιόδους ενεργειακής ανάγκης, ο συμπιεσμένος αέρας θερμαίνεται και διοχετεύεται σε τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια (Szablowski et al, 2017, Hüttermann et al, 2019). Οι δύο σημαντικότεροι παράγοντες για τα συστήματα CAES είναι οι συμπιεστές και οι διαστολές, καθώς και τα αποθέματα αέρα. Η θερμότητα που δημιουργείται κατά τη συμπίεση μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί αργότερα κατά την εκτόνωση, βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος (Venkataramani et al, 2019, Olabi et al, 2021). Το CAES γενικά αποθηκεύει την ενέργεια πίεσης με τη συμπίεση αερίου (συνήθως αέρα) μέσα στη δεξαμενή. Για τη διαστολή του συμπιεσμένου αερίου χρησιμοποιείται στρόβιλος (Amirante et al, 2017). Κατά τη διάρκεια χαμηλής ζήτησης ισχύος, η υπερβολική ισχύς οδηγεί έναν αναστρέψιμο κινητήρα ή μια γεννήτρια μονάδα, η οποία με τη σειρά της λειτουργεί μια αλυσίδα συμπιεστών για την έγχυση του αέρα στη μονάδα αποθήκευσης. Η μονάδα αποθήκευσης μπορεί να έχει τη μορφή υπόγειου σπηλαιού ή υπέργειας δεξαμενής. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια παραγωγής χαμηλής ισχύος για τη ζήτηση φορτίου, ο αποθηκευμένος συμπιεσμένος αέρας απελευθερώνεται και στη συνέχεια θερμαίνεται από την πηγή θερμότητας. Η ενέργεια του αέρα μεταφέρεται αργότερα στον στρόβιλο. Εδώ χρησιμοποιείται μια μονάδα ανάκτησης για την ανακύκλωση της θερμικής ενέργειας, η οποία μειώνει περαιτέρω την κατανάλωση καυσίμου και την απόδοση του κύκλου (Faisal et al, 2018).

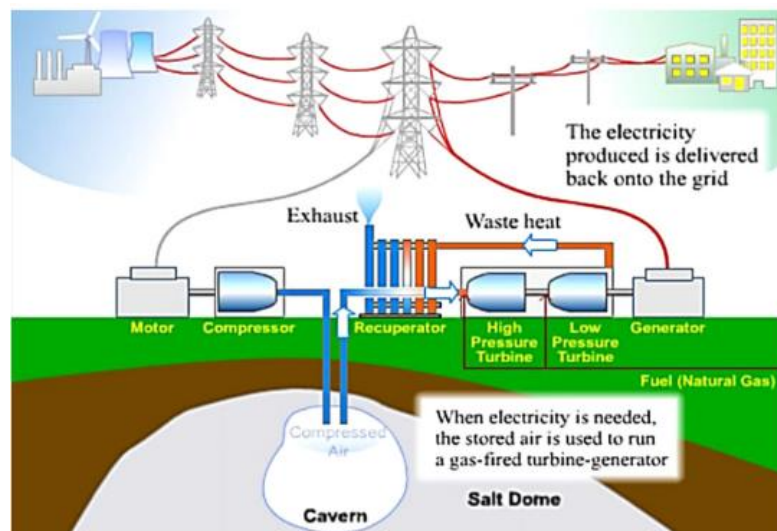
Σύστημα συμπίεσης αέρα (CAES)



Εικόνα 14: Περιγραφή ενός συστήματος συμπιεσμένου αέρα (Πηγή: Σταυρακάκης, 2016)

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε εγκαταστάσεις CAES είναι παραλλαγή του κύκλου ενός συμβατικού αεριοστρόβιλου. Κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας ή όταν παράγεται περίσσεια από ΑΠΕ, ο αέρας συμπιέζεται σε πίεση 70-100 bar και αποθηκεύεται σε στεγανούς αποθηκευτικούς χώρους. Προηγουμένως, ο αέρας ψύχεται για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή αποθήκευση ενέργειας. Κατά τις ώρες αιχμής, ο αποθηκευμένος αέρας απελευθερώνεται, προθερμαίνεται, αναμιγνύεται με μικρή ποσότητα καυσίμου και εισέρχεται στο θάλαμο καύσης της εγκατάστασης. Ως μέσα αποθήκευσης

χρησιμοποιούνται πετρώδη σπήλαια, σπήλαια άλατος, εξαντλημένα κοιτάσματα αερίων και αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες, με τους αλατούχους υδροφόρους ορίζοντες να θεωρούνται η πιο οικονομική και διαδεδομένη επιλογή. Πιο συγκεκριμένα, στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας πεπιεσμένου αέρα, ο αέρας συμπιέζεται και αποθηκεύεται. Κατά τη διάρκεια της ζήτησης ενέργειας ή των ωρών αιχμής, ο πεπιεσμένος αέρας μπορεί να απελευθερωθεί σε μια τουρμπίνα και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια (Lund et Salgi, 2009; Aneke and M. Wang, 2016). Ο αέρας συμπιέζεται σε μια καθορισμένη πίεση χρησιμοποιώντας ένα έμβολο και στη συνέχεια χρησιμοποιείται φυσικό αέριο για την καύση του για τις τουρμπίνες που το χρησιμοποιούν ως μηχανική αποθήκευση ενέργειας που παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν χρειάζεται. Αποθηκεύει μεγάλη ποσότητα ενέργειας χωρίς ανάγκη εγκατάστασης συγκεκριμένης τοποθεσίας (Mirzaei et al, 2022/ Wang et al, 2019; Georgious et al, 2021). Η αποτελεσματικότητα του CAES κυμαίνεται μεταξύ 70-89 % και είναι μια ώριμη τεχνολογία. Η διάρκεια ζωής του CAES είναι 20-40 χρόνια και 104-3×104 κύκλοι. Το κόστος κεφαλαίου του συστήματος CAES είναι περίπου 400-800 \$/kW και το κόστος ανά μονάδα ενέργειας είναι 2-50 \$/kWh. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι 30-60 Wh/kg (μάζα), 2-6 kW/m³ (ογκομετρική), 2-6 W/l και η πυκνότητα ισχύος είναι 0,2-0,6 kW/m³ (ογκομετρική) (Alami, 2020). Απαιτεί λιγότερη συντήρηση και χαμηλότερο λειτουργικό κόστος. Το κύριο μειονέκτημα του συστήματος CAES είναι η χαμηλή ογκομετρική χωρητικότητα αποθήκευσης που απαιτεί μεγάλο όγκο αποθήκευσης (Lehner et Tichler, 2014, Sharma et al, 2022).



Εικόνα 15: Αναλυτικό παράδειγμα της περιγραφής των CAES (Πηγή: Mahlia et al, 2014)

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Τα συστήματα συμπιεσμένου αέρα διαθέτουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, θέτοντας την τεχνολογία τους εξαιρετικά ανταγωνιστική για εφαρμογές σε αποθηκευτικά έργα μεγάλης κλίμακας. Η περίοδος αποθήκευσης μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας. Για παράδειγμα μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια για περισσότερο από ένα έτος. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων συμπιεσμένου

αέρα είναι η γρήγορη εκκίνηση τους. Σε φυσιολογικές συνθήκες, απαιτούνται 12 λεπτά περίπου, ενώ σε περιπτώσεις ανάγκης η μονάδα μπορεί να ξεκινήσει σε 9 λεπτά, εντυπωσιακοί χρόνοι αν αναλογιστούμε ότι μια συμβατική μονάδα απαιτεί 20 με 30 λεπτά.

Ωστόσο, τα συστήματα CAES παρουσιάζουν και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Υπάρχουν απώλειες ενέργειας τόσο κατά την αποθήκευση στον ταμιευτήρα όσο και κατά την άντληση του συμπιεσμένου αέρα, καθώς και εξαιτίας των μηχανολογικών βαθμών απόδοσης των επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης. Επιπλέον, η κατασκευή ενός υπόγειου ταμιευτήρα απαιτεί σημαντικό αρχικό κεφάλαιο, γεγονός που συχνά καθιστά την υλοποίηση τέτοιων σχεδίων αδύνατη. Αν συνυπολογίσουμε και τη δυσκολία εύρεσης κατάλληλου υπόγειου ταμιευτήρα, γίνεται κατανοητή η πρόκληση της χρήσης αυτής της μεθόδου ενεργειακής αποθήκευσης. Παρ' όλα αυτά, σε θέσεις όπου είναι κατάλληλο, μπορεί να παρέχει την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για μακρές χρονικές περιόδους (Σταυρακάκης, 2016).

Παγκόσμιες Εγκαταστάσεις

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα χρησιμοποιούνται σε έργα αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας. Εκτός από τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά συστήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, καμία άλλη μέθοδος δεν μπορεί να αποθηκεύσει τόσο μεγάλες ποσότητες ενέργειας για τόσο εκτεταμένες χρονικές περιόδους.

Το πρώτο εργοστάσιο της CAES εγκαταστάθηκε στο Huntorf της Γερμανίας με δυναμικότητα 290 MW για την υποστήριξη πυρηνικού σταθμού και ικανό να υποστηρίξει ηλεκτρικό δίκτυο για 3 ώρες. Κατασκευάστηκε το δεύτερο εργοστάσιο CAES το 1991, στο McIntosh της Αλαμπάμα με ισχύ 110 MW για 26 ώρες (Cavallo, 2007, Mahlia et al, 2014). Η αποθήκευση ενέργειας σε συμπίεση αέρα χαρακτηρίζεται από χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα για αυτό απαιτεί μεγάλους όγκους κατάλληλων αποθηκευτικών χώρων, όμως μπορεί έτσι να επιτευχθεί η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα, απεριόριστες φορτίσεις/εκφορτίσεις και πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται περίπου από 42 ως 55% κι αυτό είναι από τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου. Σε παγκόσμιο επίπεδο, δύο μεγάλες εγκαταστάσεις CAES που υπάρχουν είναι αυτή στο Huntorf της Γερμανίας (290MW) και η άλλη στο McIntosh (Αλαμπάμα, ΗΠΑ, 110MW).

Ξεχωρίζει μια νέα μονάδα (120MWh) αποθήκευσης ενέργειας σε υπόγειες δεξαμενές συμπιεσμένου αέρα οι οποίες απαιτούν πολύ μικρότερους χώρους εγκατάστασης από ότι οι αντίστοιχες μονάδες συμβατικής αντλησιοταμίευσης κι έχει ανακοινωθεί ότι θα κατασκευαστεί στο Ισραήλ από την Augwind (Air Battery System, AirX technology). Τεχνικές λεπτομέρειες δεν έχουν ανακοινωθεί ακόμη, όμως σύμφωνα με όσα στοιχεία έχουν δοθεί, διαφέρει σημαντικά από τις συνήθεις αντίστοιχες περιπτώσεις CAES καθώς έχει βαθμό απόδοσης 75-81% για ισχύ άνω των 5MW.

Στην Ελλάδα έχουν βρεθεί δύο θέσεις υπόγειων αλατούχων σχηματισμών που είναι κατάλληλοι για αποθήκευση ενέργειας σε συμπιεσμένο αέρα (Τρύφος και Αχυρά Αιτωλοακαρνανίας). Σημειωτέον πρόκειται για προτάσεις δυνητικών θέσεων αποθήκευσης που συνιστούν αρχικά σενάρια, χρειάζεται ωστόσο διερεύνηση για επιβεβαίωση της καταλληλότητας. Σε αποκεντρωμένο επίπεδο, π.χ. για κτιριακή χρήση, η νέα μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ΑΠΕ σε συμπιεσμένο αέρα (Green-Y Energy) εκμεταλλεύεται και χρησιμοποιεί την θερμότητα που παράγεται κατά την συμπίεση του αέρα (φόρτιση) αλλά και την ψύξη που παράγεται κατά την αποσυμπίεση (εκφόρτιση) καθώς συγχρόνως παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 16: Παράδειγμα CAES στο Huntorf της Γερμανίας με δυναμικότητα 290 MW (Πηγή: Mahlia et al, 2014)

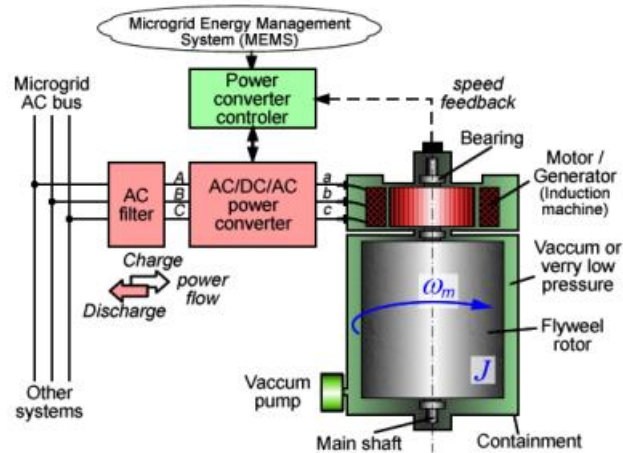


Εικόνα 17: Παράδειγμα CAES στο McIntosh της Αλαμπάμα με ισχύ 110 MW (Πηγή: Cavallo, 2007)

3.2.3 Σφόνδυλοι (Flywheels)

Περιγραφή

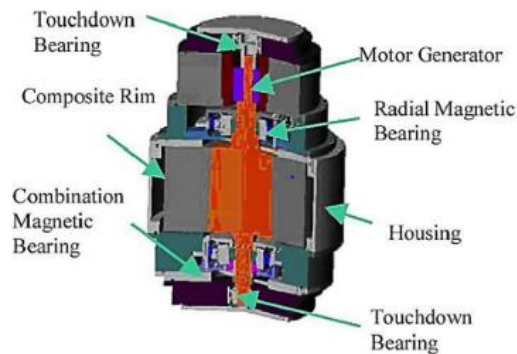
Ο σφόνδυλος (flywheel) αποθηκεύει ενέργεια μηχανικά με τη μορφή κινητικής ενέργειας. Πιο αναλυτικά είναι μια περιστρεφόμενη μάζα γύρω από έναν άξονα. Μια διάταξη αποθήκευσης σφονδύλου περιλαμβάνει τον σφόνδυλο και μια ενσωματωμένη ηλεκτρική συσκευή, η οποία λειτουργεί είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας. Όταν η ηλεκτρική συσκευή περιστρέφει τον σφόνδυλο αποθηκεύει ενέργεια και η συσκευή λειτουργεί ως κινητήρας. Λειτουργεί ουσιαστικά ως μηχανική μπαταρία που αποθηκεύει ενέργεια ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής και τη ροπή αδράνειας του σφονδύλου που περιστρέφεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής, τόσο περισσότερη ενέργεια αποθηκεύεται. Σήμερα, οι σφόνδυλοι μπορούν να περιστρέφονται με ταχύτητες που ξεπερνούν τις 50.000 RPM. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί επιβραδύνοντας τον σφόνδυλο μέσω στρεπτικής ροπής, επιστρέφοντας την κινητική ενέργεια στην ηλεκτρική συσκευή. Σε αυτή την περίπτωση, η ηλεκτρική συσκευή λειτουργεί ως γεννήτρια, παράγοντας ηλεκτρική ισχύ κατά ζήτηση, χρησιμοποιώντας την αποθηκευμένη ενέργεια του σφονδύλου.



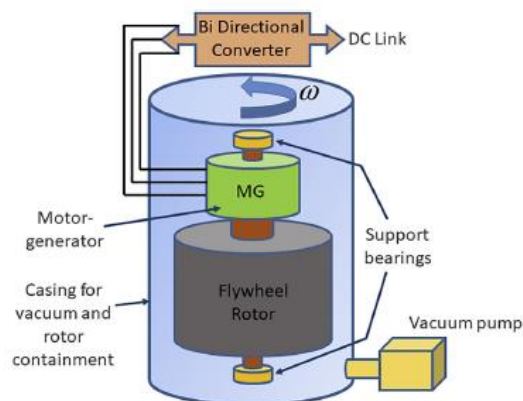
Εικόνα 18: Παράδειγμα δομής ενεργειακής μονάδας σφονδύλου (Πηγή: Tameghe,, 2015)

Αποτελούνται από μια περιστρεφόμενη μάζα εγκατεστημένη σε ένα θάλαμο κενού, μειώνοντας έτσι τις αεροδυναμικές απώλειες και τις πιέσεις του στροφέα, για την αποθήκευση ενέργειας σε κινητική μορφή και συνδέονται στον ίδιο άξονα με γεννήτρια. Μια μάζα (σφόνδυλος) σε συνδυασμό με ηλεκτρική μηχανή περιστρέφεται σε δύο μαγνητικά ρουλεμάν για να μειώσει την τριβή σε υψηλή ταχύτητα. Η ενέργεια μεταφέρεται στον σφόνδυλο όταν η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας (ο σφόνδυλος επιταχύνει) και αντίστροφα (επιβράδυνση του σφονδύλου) (Mahela et Shaik, 2016). Όταν η ενέργεια αποθηκεύεται, η περιστρεφόμενη μάζα επιταχύνεται. Κατά την εκφόρτιση (discharge), ο σφόνδυλος χάνει ταχύτητα και παρέχει ρεύμα στο δίκτυο. Συνοψίζοντας, το πλήρες σύστημα σφονδύλου περιλαμβάνει τον ρότορα σφονδύλου, αντλία κενού, μαγνητικά ρουλεμάν, γεννήτρια και μετατροπέα ισχύος (Oliveira et al, 2021). Με άλλα λόγια, όπως η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα αυξάνεται, η αποθηκευμένη ενέργεια αυξάνεται επίσης αναλογικά και η αποθηκευμένη ενέργεια ποικίλλει. Αυτή η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω με την επιβράδυνση του ρότορα ροπής (τρόπος εκφόρτισης) και επιστροφή της κινητικής ενέργειας στον ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος ενεργεί ως γεννήτρια. Το FESS μπορεί να χαρακτηριστεί σε δύο βασικές κατηγορίες: υψηλής ταχύτητας και χαμηλής ταχύτητας FESS (Hadjipaschalis et al, 2009). Σφόνδυλοι με ταχύτητα κάτω των 10.000 RPM θεωρούνται χαμηλής ταχύτητας, που είναι περισσότερο δημοφιλείς στις βιομηχανίες (Hyytinen, 2013). Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια στον σφόνδυλο σχετίζεται με την ταχύτητα και την αδράνεια. Χαμηλής ταχύτητας σφόνδυλος περιέχει έναν χαλύβδινο δίσκο με υψηλή αδράνεια και χαμηλή ταχύτητα. Από την άλλη, υψηλής ταχύτητας σφόνδυλος έχει σύνθετο δίσκο με σχετικά μικρότερη αδράνεια και υψηλή ταχύτητα (Faisal et al, 2018).

Ο σφόνδυλος μεταφέρει την κινητική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτρικής μηχανής. Η περιστρεφόμενη μάζα αυτού λαμβάνει την ισχύ φόρτισης που θα αποθηκευτεί και θα χρησιμοποιηθεί αργότερα ως ηλεκτρική ενέργεια όταν εκφορτιστεί κατ' απαίτηση (Ter-Gazarian, 2020, Koochi-Fayegh et Rosen, 2020, Georgious et al, 2021). Ένα σύστημα αποθήκευσης σφονδύλου θεωρείται ένα βραχυπρόθεσμο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας καθώς ο σφόνδυλος μπορεί να απελευθερώσει τεράστια ποσότητα ενέργειας μέσα σε ένα δευτερόλεπτο ή λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο (Dunlap, 2020). Η αποδοτικότητα του κύκλου του σφονδύλου κυμαίνεται μεταξύ 93-95% (Purohit et al, 2018). Η διάρκεια ζωής του σφονδύλου είναι 20-30 ετών και 104-105 κύκλοι. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι 20-80 Wh/l, 10-30 Wh/kg, 20-80 Wh/m³, και η πυκνότητα ισχύος είναι 1.000-2.000 kW/m³. Το κεφαλαιουχικό κόστος του είναι περίπου 250-350 \$/kW και το κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας είναι 1.000-5.000 \$/kWh (Sharma et al, 2022).



Εικόνα 19: Σχηματική περιγραφή των σφονδύλων (Πηγή: Mahlia et al, 2014)



Εικόνα 20: Δευτερη σχηματική περιγραφή των σφονδύλων με σύνδεση στο δίκτυο (Πηγή: Li et Palazzolo, 2022)

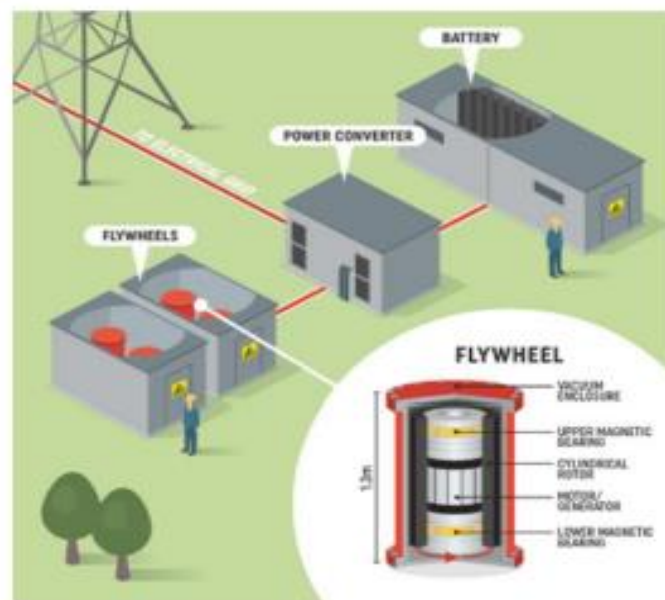
Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο είναι η μη ρύπανση. Έχει υψηλή ενέργεια χωρητικότητα αποθήκευσης και απαιτεί μικρό χώρο. Ακόμα, προσφέρει υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα, άμεση παράδοση ισχύος, μικρή ανάγκη συντήρησης, μακρά διάρκεια ζωής και είναι φιλικός προς το περιβάλλον. Σε αντίθεση με τις μπαταρίες, τα συστήματα σφονδύλων δεν επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και η απόδοσή τους είναι αρκετά υψηλή. Επίσης, έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Διακρίνονται για τον μεγάλο χρόνο ζωής τους και απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και παρακολούθηση (Olabi et al, 2021).

Τα κύρια μειονεκτήματα της τεχνολογίας του σφονδύλου περιλαμβάνουν τον κίνδυνο ατυχήματος σε περίπτωση θραύσης κάποιου δίσκου, το υψηλό κόστος, καθώς και τις ενεργειακές απώλειες όταν οι κύκλοι φόρτισης και εκφόρτισης δεν είναι συνεχείς. Τα συστήματα σφονδύλων παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά αυτό-εκφόρτισης (self-discharge), με ελάχιστο ποσοστό 20% της αποθηκευτικής ικανότητας ανά ώρα. Αυτά τα υψηλά ποσοστά αυτό-εκφόρτισης μειώνουν την ενεργειακή απόδοση, ιδιαίτερα όταν η ενέργεια αποθηκεύεται για μια χρονική περίοδο πριν την εκφόρτιση. Λόγω αυτών των υψηλών

ποσοστών εκφόρτισης, η τεχνολογία του σφονδύλου δεν θεωρείται κατάλληλη για μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας, αλλά μπορεί να παρέχει αξιόπιστη εφεδρική λύση (Chen et al, 2020).

Οι σφονδύλοι είναι κατάλληλοι για εφαρμογές ισχύος λόγω της δυνατότητάς τους να εκφορτίζονται γρήγορα, μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα αν απαιτείται. Αυτό τους καθιστά όλο και πιο προτιμητέους για εκτεταμένες εφαρμογές ΑΠΕ και για την κάλυψη της ζήτησης ενέργειας σε ώρες αιχμής, όπου απαιτείται άμεση παροχή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Υπάρχει η άποψη ότι οι σφονδύλοι θα μπορούσαν να συμπληρώσουν τις μπαταρίες στα συστήματα ισχύος από ανανεώσιμες πηγές, καθώς θα μπορούσαν να αντισταθμίσουν τις απότομες και γρήγορες μεταβολές στο φορτίο. Αυτού του είδους οι μεταβολές θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε γρήγορη φθορά των μπαταριών λόγω των περιορισμένων κύκλων ζωής τους. Όμως παρά την εξέλιξη, η χρήση των τροχών αδράνειας μειώθηκε με την ανάπτυξη του ηλεκτρικού δικτύου, αλλά πρόσφατες βελτιώσεις στα υλικά, τα μαγνητικά έδρανα και τα ηλεκτρονικά ισχύος έχουν ανανεώσει το ενδιαφέρον για την τεχνολογία.



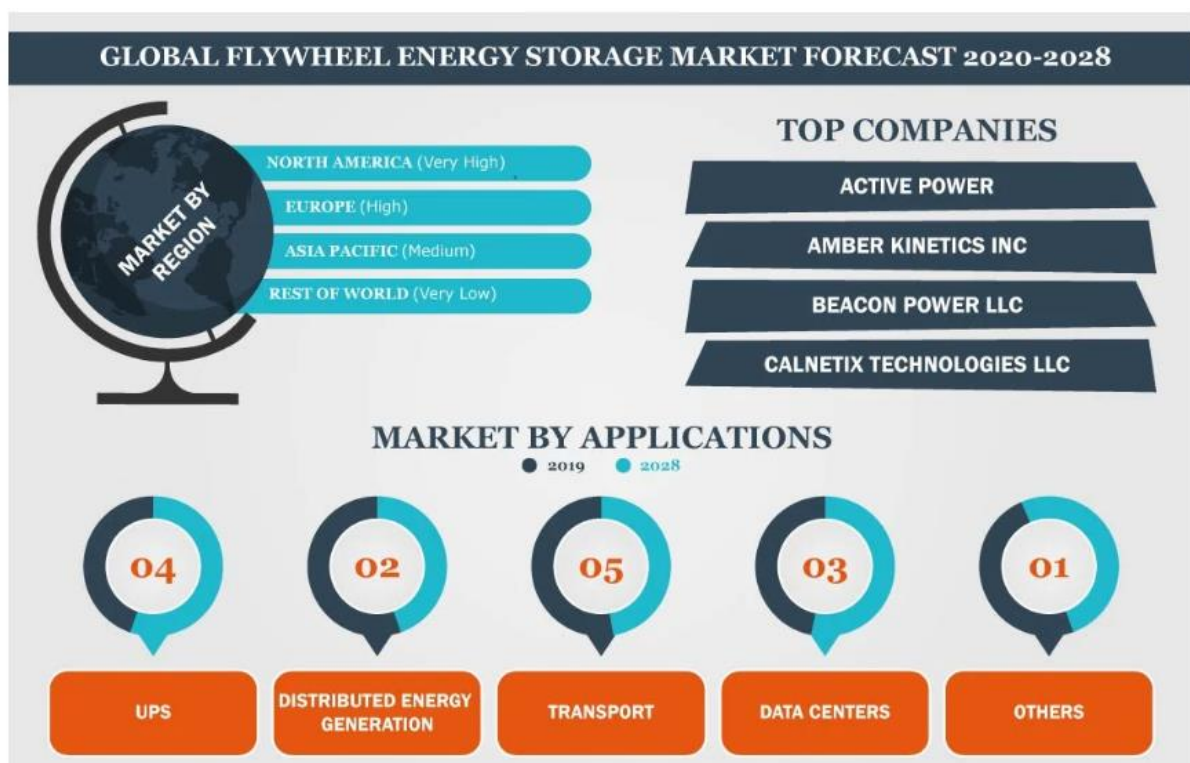
Εικόνα 21: Σχηματικό παράδειγμα μπαταρίας με σφόνδυλο σε δίκτυο (Πηγή: Olabi et al, 2021)

Κατά την επιλογή σφονδύλου για μια εφαρμογή μερικά από τα σημαντικά σημεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι το ρουλεμάν, τα χαρακτηριστικά υλικού ρότορα, το δοχείο γεννήτριών, η σύνδεση με το φορτίο και το σύστημα ψύξης. Οι τροχοί αδράνειας χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς, όπως η βελτίωση της ποιότητας ισχύος, τα UPS, οι υβριδικές εφαρμογές οχημάτων, τα στρατιωτικά έργα και η ολοκλήρωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εταιρείες όπως η NASA, η Boeing και η Beacon Power έχουν εφαρμόσει τροχούς αδράνειας σε διάφορα έργα, όπως η σταθερότητα της συχνότητας και η εφεδρική ισχύς όπως φαίνεται στην εικόνα 21 όπου έχουμε σφόνδυλο με μπαταρία. Αποτελούν μια αξιόπιστη λύση για αποθήκευση ενέργειας σε πολλές βιομηχανίες, ανταγωνιζόμενοι άλλες

τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας χάρη στην απόδοσή τους, την προσαρμοστικότητα τους και τη διάρκεια ζωής τους (Amiryar et Pullen, 2017).

Παγκόσμιες εγκαταστάσεις

Η αποθήκευση ενέργειας είναι σημαντική στην ανανεώσιμη παραγωγή ενέργειας, καθώς οι πηγές όπως ο άνεμος και ο ήλιος είναι διαλείπουσες. Η τεχνολογία του σφονδύλου μπορεί να ανταποκριθεί 100 φορές γρηγορότερα από τις παραδοσιακές πηγές, προσφέροντας σταθερότητα στο δίκτυο. Για παράδειγμα, η Beacon Power έχει σχεδιάσει σφόνδυλους που παρέχουν 20 MW ενέργειας με χρόνο απόκρισης λιγότερο από τέσσερα δευτερόλεπτα. Η αποθήκευση ενέργειας είναι κρίσιμη για τη ρύθμιση της τάσης και την εφεδρεία. Πολλές αναπτυσσόμενες χώρες επενδύουν σε τεχνολογίες αποθήκευσης για τη βελτιστοποίηση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατανομημένη παραγωγή ενέργειας είναι η κορυφαία σε έσοδα στον παγκόσμιο τομέα αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλους, μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και προάγοντας τις ανανεώσιμες πηγές. Στις ΗΠΑ, η Beacon Power πρωτοστάτησε στη χρήση της τεχνολογίας σφονδύλου για τη ρύθμιση της συχνότητας με ένα εργοστάσιο 20 MW. Ωστόσο, η αγορά περιορίζεται από τη δημοτικότητα των μπαταριών, το υψηλό αρχικό κόστος και τη χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό των σφονδύλων.



Εικόνα 22: Παγκόσμια ποσοστά και εφαρμογές των σφονδύλων (Πηγή: *global flywheel energy storage market forecast 2020-2028, 2024*)

Παρά τον ανταγωνισμό από τις μπαταρίες, η αγορά αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλους συνεχίζει να αναπτύσσεται, με τη Βόρεια Αμερική να κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς το 2019. Η Ευρώπη προβλέπεται να έχει τον ταχύτερο ρυθμό ανάπτυξης λόγω των επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σημαντικά ευρήματα δείχνουν ότι η Βόρεια

Αμερική ηγείται της αγοράς, ενώ η Ευρώπη αναμένεται να έχει τον ταχύτερο ρυθμό ανάπτυξης, με την κατανεμημένη παραγωγή ενέργειας να αυξάνεται σημαντικά. Η ζήτηση για αδιάλειπτη παροχή ισχύος και η ανάπτυξη της αυτοκινητοβιομηχανίας ενισχύουν την ανάπτυξη της παγκόσμιας αγοράς αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδλους (global flywheel energy storage market forecast 2020-2028, 2024).

3.3 Ηλεκτροχημικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

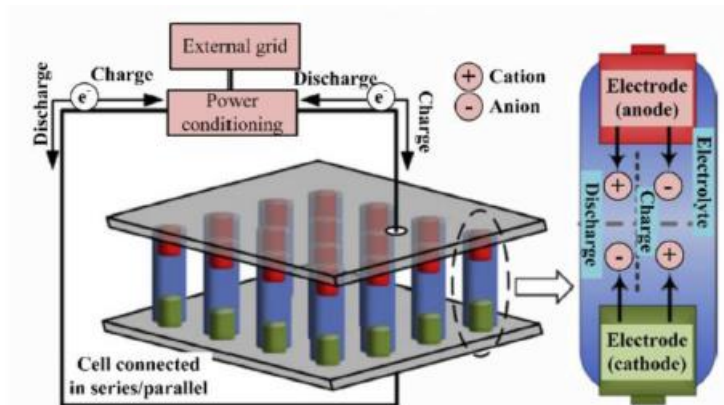
3.4 Μπαταρίες

Περιγραφή

Το δοχείο Leyden (Leyden jar) είναι η πρώτη μπαταρία παγκοσμίως, το οποίο αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο υψηλής τάσης ανάμεσα σε ηλεκτρικούς αγωγούς εντός και εκτός ενός γυάλινου δοχείου. Ανακαλύφθηκε από τον Ewald Georg von Kleist, γερμανό κληρικό, το 1745 και από τον Pieter van Musschenbroek του Πανεπιστημίου του Leiden (Leyden), ολλανδό φυσικό. Η ανακάλυψη πήρε το όνομα της πόλης. Η πρώτη ηλεκτροχημική μπαταρία κατασκευάστηκε από τον Ιταλό φυσικό Αλεσάντρο Βόλτα το 1800 και αποτελούνταν από στοίβα δίσκων χαλκού και ψευδαργύρου που διαχωρίζονταν από δίσκους χαρτιού, εμποτισμένους σε άλατα, παράγοντας σταθερό ρεύμα για αξιοσημείωτο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, η πρώτη μπαταρία που εφαρμόστηκε ευρέως ήταν το κελί Daniell, το οποίο ανακαλύφθηκε το 1836 από τον Βρετανό χημικό John Frederic Daniell. Από τότε, η τεχνολογία των μπαταριών έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο και έχει εφαρμοστεί ευρέως.

Μια μπαταρία είναι μια ηλεκτροχημική τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, δηλαδή μπορεί να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντάς την σε χημική ενέργεια. Στη συνέχεια, αυτή την ενέργεια μπορεί να αποδώσει σε ένα εξωτερικό κύκλωμα όταν απαιτηθεί. Μια μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά κύτταρα, τα οποία μπορούν να είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ανάλογα με την επιθυμητή τάση εξόδου. Κάθε ηλεκτρικό κύτταρο αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια (μεταλλικές πλάκες), κατασκευασμένα από διαφορετικά μέταλλα, τα οποία βυθίζονται σε ένα ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης, που είναι αγωγίμο υγρό, επιτρέπει στα ηλεκτρόδια να αλληλεπιδρούν χημικά. Κατά τη διάρκεια αυτής της χημικής αντίδρασης, γίνεται μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος. Η σύνδεση των ηλεκτροδίων σε ένα εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα προκαλεί ροή ρεύματος, η οποία εκφορτίζει την ηλεκτρική μπαταρία. Όταν η μπαταρία εξαντληθεί, μπορεί να φορτιστεί ξανά με τη διέλευση συνεχούς ρεύματος (DC) μέσω αυτής, καθώς και με αντίστροφες χημικές διεργασίες που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική (Σταυρακάκης, 2016). Με άλλα λόγια, η μπαταρία λειτουργεί δημιουργώντας διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο διαφορετικών ηλεκτροδίων που βυθίζονται σε ένα ηλεκτρολύτη. Αυτό δημιουργείται από ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, κατά τις οποίες η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Κάθε κελί της μπαταρίας αποτελείται από ένα ζεύγος αντίθετα φορτισμένων ηλεκτροδίων - την άνοδο και την κάθοδο - τα οποία βυθίζονται σε έναν ηλεκτρολύτη. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, στην άνοδο γίνεται η οξείδωση ενώ στην κάθοδο η αναγωγή, παραχωρώντας ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα. Αυτά τα ηλεκτρόνια καθοδηγούνται προς την κάθοδο,

δημιουργώντας ρεύμα. Κατά τη φόρτιση, οι αντίστροφες αντιδράσεις διεξάγονται και τα ηλεκτρόνια μετακινούνται από την κάθοδο προς την άνοδο. Για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των εφαρμογών, πολλά κελιά συνδέονται σε σειρά για να παρέχουν την απαιτούμενη τάση εξόδου.



Εικόνα 23: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας μιας οποιαδήποτε μπαταρίας (Πηγή: *Energy Storage Technologies: Challenges and Outlook*, 2020)

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Οι μπαταρίες προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Μία από τις κύριες τους δυνατότητες είναι η ταχύτατη απόκριση, καθώς λειτουργούν χωρίς μηχανικά μέρη και μπορούν να ανταποκριθούν σε δεκάδες δευτερολέπτων. Επιπλέον, πλεονέκτημά τους είναι οι σύντομοι χρόνοι κατασκευής, όπως φαίνεται από την επιτυχημένη χρήση τους στο σύστημα της Tesla στην Αυστραλία. Επιπλέον, οι μπαταρίες παρέχουν πολλαπλές χρήσεις όπως η επανεκκίνηση από απόλυτη διακοπή (black-start capability), η εξομάλυνση των αιχμών φόρτισης (peak shaving), η ρύθμιση της συχνότητας, η αποθήκευση ενέργειας κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και η παροχή κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης (load leveling), καθώς και η γρήγορη προσαρμογή στην παραγωγή ενέργειας ανάλογα με τις αλλαγές στη ζήτηση (load following). Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, οι οποίες είναι κυρίαρχες στην αγορά, προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ενέργειας, χαμηλότερο ρυθμό αυτοαποφόρτισης σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες, καθώς και το κόστος συντήρησής τους είναι χαμηλό.

Ωστόσο, ένα από τα μειονεκτήματα των μπαταριών είναι ο περιορισμένος χρόνος ζωής τους σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης. Χάνουν σημαντικό μέρος της ονομαστικής τους ισχύος μετά από σχετικά λίγους κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης. Επιπλέον, η περιορισμένη διαθεσιμότητα πρώτων υλών, όπως το λίθιο, καθώς και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον από την απόρριψή τους μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους, καθώς δεν ανακυκλώνονται, καθιστούν απαραίτητη την έρευνα για ανάπτυξη μεθόδων ανακύκλωσης και επαναχρήσης τους. Οι αναλυτές της βιομηχανίας προβλέπουν ότι μέχρι το 2030 θα υπάρχουν 2 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι μπαταριών λιθίου που θα έχουν φτάσει στο τέλος ζωής τους. Παράλληλα, υπολογίζεται ότι στις μέρες μας ανακυκλώνεται μόνο το 2-3% στην Αυστραλία και λιγότερο από 5% στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ. Η πρόοδος στην

ανακύκλωση, που είναι κρίσιμη για την αύξηση της χρήσης τους, απαιτεί την υπέρβαση τεχνικών περιορισμών, οικονομικών εμποδίων και κανονιστικών κενών. Επιπλέον, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι γενικά ευαίσθητες και φθείρονται πιο εύκολα κατά τη χρήση σε σύγκριση με άλλες μπαταρίες. Για αυτό το λόγο, παρακολουθείται η θερμοκρασία τους προσεκτικά ώστε να μην φτάνουν ακραίες θερμοκρασίες. Τέλος, αντιμετωπίζουν προβλήματα ασφάλειας, αναγκάζοντας τους κατασκευαστές να εγκαθιστούν κύκλωμα προστασίας, το οποίο θέτει σε περιορισμό τη μέγιστη τάση κάθε κυψέλης κατά τη διάρκεια της φόρτισης και αποτρέπει κατά την εκφόρτιση την πτώση της τάσης (Energy Storage Technologies: Challenges and Outlook, 2020).

Παγκόσμιες εγκαταστάσεις

Σήμερα υπάρχουν παγκοσμίως 768 συστήματα μπαταριών μεγάλης κλίμακας σε λειτουργία, με σύνολο αποθηκευτικής ισχύς 1,79 GW, σύμφωνα με τη βάση δεδομένων του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. Αυτές οι τεχνολογίες κατατάσσονται τρίτες στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, μετά τα συστήματα αντλησιοταμίευσης (168 GW) και τη θερμική αποθήκευση (2,44 GW). Μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών συσσωρευτών, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (lithium-ion) κατέχουν τη μεγαλύτερη θέση, με 74%, οι μπαταρίες νατρίου (sodium-based) ακολουθούν στη δεύτερη θέση με 8,5%. Στην Αυστραλία βρίσκεται το μεγαλύτερο σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες στον κόσμο από το 2017, ο σταθμός Hornsdale Power Reserve. Κατασκευάστηκε σε λιγότερο από 100 ημέρες από την Tesla και βρίσκεται δίπλα στο ομώνυμο αιολικό πάρκο. Έχει ισχύ 100 MW και αποθηκευτική ικανότητα 129 MWh. Το σύστημα αυτό συμβάλει στην αποφυγή διακοπών ρεύματος λόγω υπερφόρτωσης δικτύου, παράλληλα παρέχει ευστάθεια σε απότομες πτώσης της παραγωγής ενέργειας από το αιολικό πάρκο ή σε άλλα προβλήματα δικτύου.

Παρά τη σχετικά μικρή τωρινή τους δύναμη, οι προοπτικές για την αύξηση της χρήσης των μπαταριών είναι πολύ μεγάλες, χάρη στην τεχνολογική πρόοδο και τη σημαντική μείωση του κόστους. Το 2019 το κόστος των συσσωρευτών υπέστη μείωση 86,8% κατά την τελευταία δεκαετία, από 1183\$/kWh το 2010 σε 156\$/kWh, όπως έδειξε το Bloomberg New Energy Foundation (BNEF). Αυτή η εντυπωσιακή μείωση οφείλεται στην αύξηση του μεγέθους τους, στην αυξημένη πώληση ηλεκτρικών οχημάτων (Battery Electric Vehicles - BEV) και την αυξανόμενη χρήση καθόδων υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Η ίδια ερευνητική εταιρεία προβλέπει ότι το κόστος των μπαταριών το 2030 θα φτάσει τα 61 \$/KWh. Το μέγεθος της αγοράς των μπαταριών αναμένεται να πενταπλασιαστεί από το 2019 μέχρι το 2030, φτάνοντας τα 116 δις δολάρια ετησίως, με αποτέλεσμα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς μπαταριών παγκοσμίως, μαζί με αυτή των ηλεκτρικών οχημάτων, να αναμένεται να εκτοξευθεί από τα 9 GW το 2018 στα 1095 GW το 2040. Καθοριστικοί παράγοντες να συνεχίσει να μειώνεται το κόστος και για την αύξηση της διείσδυσης των μπαταριών είναι η αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας που επιτρέπει την αποδοτικότερη χρήση υλικών, οι νέες τεχνολογίες πυριτίου και λιθίου για την κατασκευή ανόδων, καθώς και τα νέα υλικά για καθόδους.

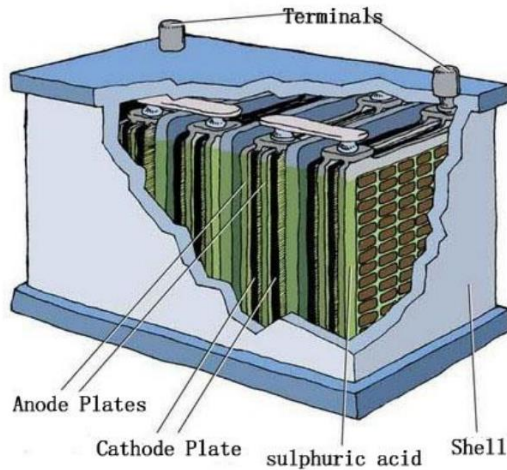


Εικόνα 24: Σταθμός Hornsdale Power Reserve της Tesla στην Αυστραλία (πηγή: Alvarez, 2018)

3.4.1.1 Μπαταρίες μολύβδου-οξέος (LEAD-ACID)

Περιγραφή

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος βαθιάς εκφόρτισης διαθέτουν παχύτερες πλάκες, οι οποίες τοποθετούνται σε μεγαλύτερα περιβλήματα που προσφέρουν επιπλέον χώρο πάνω και κάτω από τις πλάκες. Ως αποτέλεσμα, αυτές οι μπαταρίες είναι μεγάλες και βαριές. Έχουν σχεδιαστεί για να εκφορτίζονται επανειλημμένα μέχρι το 80% της ικανότητάς τους χωρίς να υφίστανται ζημιά, αν και τέτοιες βαθιές εκφορτίσεις μειώνουν τον αριθμό των κύκλων ζωής τους. Όταν είναι πλήρως φορτισμένες, αποτελούνται από ένα ηλεκτρόδιο μολύβδου (άνοδος) και ένα ηλεκτρόδιο διοξειδίου του μολύβδου (κάθοδος), τα οποία είναι βυθισμένα σε έναν ηλεκτρολύτη με περιεκτικότητα περίπου 37% σε θειικό οξύ. Στην πλήρη εκφόρτιση τους, και τα δύο ηλεκτρόδια αποτελούνται από θειικό μόλυβδο, ο ηλεκτρολύτης δεν περιέχει πλέον θειικό οξύ, μετατρέπεται σε νερό και η τάση στα άκρα του στοιχείου μηδενίζεται.

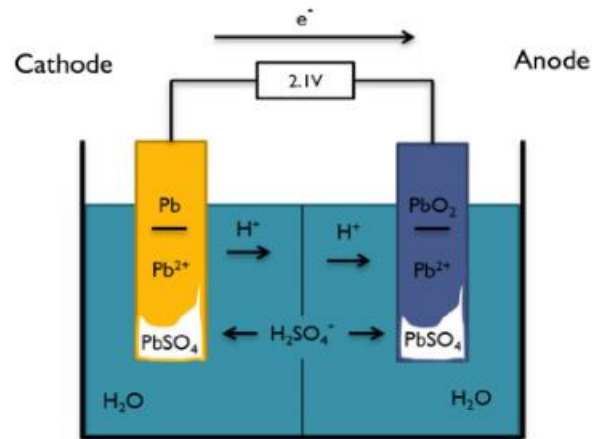


Εικόνα 25: Δομή μιας μπαταρίας μολύβδου-οξέος (Πηγή: Peng, 2011)

Καθώς η μπαταρία μολύβδου-οξέος πλησιάζει σε πλήρη εκφόρτιση, η τάση του στοιχείου μειώνεται απότομα και η εσωτερική της αντίσταση αυξάνεται. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, προσφέρεται ένας ακριβής δείκτης της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας, καθώς το ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη μειώνεται με τα ιόντα θειϊκού άλατος να αποχωρούν από το διάλυμα. Η μπαταρία γίνεται πιο ευάλωτη στην ψύξη όταν είναι εκφορτισμένη, επειδή μειώνεται η αντιψυκτική δράση του θειϊκού οξέος. Μια πλήρως εκφορτισμένη μπαταρία μολύβδου-οξέος μπορεί να παγώσει στους -8°C , ενώ μια πλήρως φορτισμένη δεν παγώνει έως ότου η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη πέσει κάτω από τους -57°C . Σε πολύ κρύες συνθήκες, η ανησυχία για ψύξη μπορεί να περιορίσει το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης της μπαταρίας. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, συμβαίνουν αντίθετες αντιδράσεις: η τάση της μπαταρίας και το ειδικό βάρος αυξάνονται, ενώ η θερμοκρασία ψύξης και η εσωτερική αντίσταση μειώνονται. Το θειϊκό άλας απομακρύνεται από τις πλάκες και επανέρχεται στον ηλεκτρολύτη ως ιόντα θειϊκού άλατος. Δυστυχώς, δεν επιστρέφουν όλα τα θειϊκά άλατα στο διάλυμα, και κάθε κύκλος φόρτισης/εκφόρτισης αφήνει λίγο περισσότερο θειϊκό άλας μόνιμα στις πλάκες. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για την περιορισμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η ποσότητα του PbSO_4 που προσκολλάται στα ηλεκτρόδια εξαρτάται από τη διάρκεια αυτού του φαινομένου, γεγονός που καθιστά σημαντικό να κρατάμε τις μπαταρίες όσο το δυνατόν περισσότερο πλήρως φορτισμένες και να τις φορτίζουμε πλήρως τακτικά. Αυτό δείχνει τη σημασία ύπαρξης ενός συστήματος με εφεδρική γεννήτρια για να επαναφορτίζει τις μπαταρίες (Σταυρακάκης, 2016).

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος διακρίνονται ανάλογα με τη σύνθεση της ανόδου, τον σχεδιασμό των πλακών και την κατανομή του ηλεκτρολύτη. Τα συμβατικά μοντέλα έχουν πλάκες από διοξείδιο του μολύβδου και μόλυβδο, ενώ τα βελτιωμένα μοντέλα περιλαμβάνουν πρόσθετο άνθρακα για καλύτερη απόδοση και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (Oliveira et al, 2021). Αυτές οι μπαταρίες αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, δηλαδή, κάθοδο (θετική) και άνοδο (αρνητική). Η κάθοδος αποτελείται από διοξείδιο του μολύβδου (PbO_2) και η άνοδος αποτελείται από μόλυβδο. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, το ηλεκτρόδιο ανόδου και καθόδου χρησιμοποιεί θειϊκό οξύ (H_2SO_4) και το μετατρέπει σε

θεικό μόλυβδο (PbSO_4). Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, ο θεικός μόλυβδος (PbSO_4) μετατρέπεται ξανά σε θειικό οξύ (Zhao et al, 2015). Η απόδοση αυτών των μπαταριών είναι περίπου 75-90%, η ενεργειακή πυκνότητα είναι 50-80 kWh/m^3 , 30-50 Wh/kg και η πυκνότητα ισχύος είναι 10-400 W/m^3 . Λόγω της σύντομης ζωής του κύκλου (100-2.000), η διάρκεια ζωής είναι 5-15 χρόνια με χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα. Αυτές οι μπαταρίες δεν χρησιμοποιούνται για εφαρμογές αποθήκευσης πλέγματος. Το κεφαλαιουχικό κόστος των μπαταριών μολύβδου-οξέος είναι περίπου 300-600 $\text{\$/kW}$ και το κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας είναι 200-400 $\text{\$/kWh}$ (Sharma et al, 2022).



Εικόνα 26: Σχηματική περιγραφή των μπαταριών μολύβδου οξέος (Πηγή: Huang et al, 2015)

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Έχοντας πολλά πλεονεκτήματα όπως είναι το σχετικά χαμηλό κόστος, η απλότητα κατασκευής, η γρήγορη ηλεκτροχημική αντίδραση και ο καλός κύκλος ζωής υπό μετρημένες συνθήκες τις έχει κάνει αρκετά ελκυστικές με αποτέλεσμα την κυριαρχία στην αγορά. Ωστόσο, η χρήση στατικού βαρέος μετάλλου είναι το κύριο μειονέκτημα αυτού του τύπου μπαταρίας, πράγμα που τις καθιστά τοξικές και επικίνδυνες για το περιβάλλον. Από την άλλη πλευρά, η χρήση στατικών μπαταριών μολύβδου-οξέος για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας δεν είναι ευνοϊκή και θεωρείται ακατάλληλη λόγω υψηλότερου κόστους, περιορισμένης διάρκειας ζωής και πρακτικές δυσκολίες στην κατασκευή (Zhang et al, 2011).

Πρόσθετα όπως το ασβέστιο, το σελήνιο και το αντιμόνιο έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί από κατασκευαστές μπαταριών για τη βελτίωση της απόδοσης των μπαταριών μολύβδου-οξέος. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος βελτιώνονται σταδιακά με διάφορους τρόπους. Καταρχάς εφαρμόζοντας ηλεκτρολύτες σε μορφή gel αντί για υγρούς, επιτρέπει στις μπαταρίες να λειτουργούν σε οποιαδήποτε θέση χωρίς την ανάγκη αναπλήρωσης, και να είναι ανθεκτικές σε κραδασμούς και κλονισμούς. Στις μπαταρίες μολύβδου-οξέος (VRLA) με ρυθμιζόμενη από βαλβίδα διαφυγής αερίου, η ρύθμιση γίνεται μέσω ευαίσθητων βαλβίδων πίεσης. Οι καινοτόμες τεχνικές φόρτισης, όπως οι παλμικές μέθοδοι φόρτισης βελτιώνουν τον χρόνο ζωής των μπαταριών μολύβδου-οξέος και την απόδοσή τους. Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι τύποι μπαταριών μολύβδου-οξέος που αναπτύχθηκαν, συγκεκριμένα, μπαταρίες αντιμόνιου μολύβδου, μπαταρίες SLI (Starting Lighting and Ignition), μπαταρίες μολύβδου

με ρυθμιζόμενη βαλβίδα (VRLA), μπαταρίες ασβεστίου μολύβδου, AGM Absorbed Glass Mat Battery, Gel Cell, και Deep Cycle Batteries. Τα προβλήματα με τις στατικές μπαταρίες μολύβδου-οξέος βρίσκονται στην εξισορρόπηση κατανάλωσης και παραγωγής ενέργειας, στάθμιση φορτίου (load leveling) and ελάττωση της κορυφής ζήτησης (peak shaving) που μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Αυτές οι σχετικά νέες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να συνδυαστούν με ηλιακές και αιολικές πηγές οι οποίες έχουν πολύ απρόβλεπτες συμπεριφορές λόγω καιρικών συνθηκών (Mahlia et al, 2014).



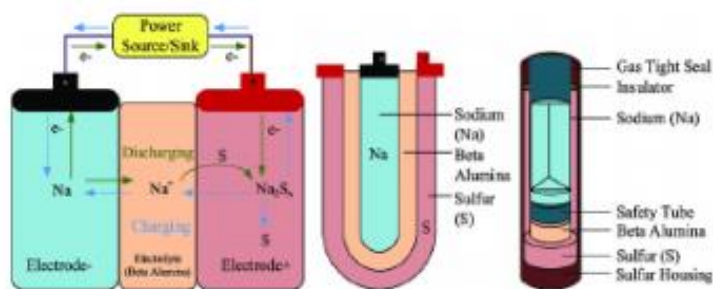
Εικόνα 27: Παράδειγμα εγκατάστασης μπαταριών μολύβδου οξέος (Πηγή: Rising renewable energy installations inflate the demand for stationary lead acid batteries market, 2021)

Οι εφαρμογές των μπαταριών μολύβδου-οξέος εκτείνονται από τις μπαταρίες αυτοκινήτων έως τις μεγάλης κλίμακας συστοιχίες μπαταριών που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, είναι αποτελεσματικές για τη σταθεροποίηση των ηλεκτρικών δικτύων με υψηλά επίπεδα ανανεώσιμης ενέργειας. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι οι πιο κοινές για αυτές τις εφαρμογές. Παρόλο που έχουν χαμηλό κόστος και απλή τεχνολογία, έχουν μικρή διάρκεια ζωής και χρειάζονται αντικατάσταση κάθε 4-5 χρόνια, ενώ οι μελλοντικές μειώσεις κόστους είναι μικρές. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος έχουν αργή φόρτιση, έχουν περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης/αποφόρτισης και δεν μπορούν να αποφορτιστούν πλήρως. Επιπλέον οι τοξικές ουσίες τους δημιουργούν περιβαλλοντικούς κινδύνους. Νέες τεχνολογίες, όπως οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, νατρίου-θείου και ροής, εισέρχονται στην αγορά. Σε εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι μπαταρίες βαθέως κύκλου συνδέονται σε συστοιχίες για σταθεροποίηση της παραγωγής ενέργειας από αιολικά πάρκα και φωτοβολταϊκά συστήματα (Dhundharaa et al, 2018; Poullikkas, 2013).

3.4.1.2 Μπαταρίες Νατρίου- Θείου (Sodium-Sulfur)

Περιγραφή

Στις μπαταρίες νατρίου- θείου (Sodium-Sulfur) τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από υγρό θείο και υγρό νάτριο. Το υγρό νάτριο δρα ως άνοδος και το υγρό θείο ως κάθοδος. Η άνοδος και η κάθοδος διαχωρίζονται από ένα στερεό κεραμικό, νάτριο βήτα αλουμίνα που λειτουργεί ως ηλεκτρολύτης. Οι μπαταρίες νατρίου- θείου βασίζονται στην ηλεκτροχημική αντίδραση φόρτισης-εκφόρτισης [Boicea, 2014]. Η μπαταρία απαιτεί ένα εύρος θερμοκρασίας 300-360 °C για να διατηρηθεί το θείο και το νάτριο σε τετηγμένη κατάσταση. Η αποτελεσματικότητα του νατρίου- θείου είναι περίπου 85% και η απόκριση είναι σε χιλιοστά του δευτερολέπτου. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι 150-250 kWh/m³, 10-250 Wh/kg και η πυκνότητα ισχύος είναι 140-180 kW/m³, 150-240 W/kg. Η διάρκεια ζωής του Na-S είναι 15 χρόνια και 4.500 κύκλοι. Ο χρόνος εκφόρτισης του νατρίου- θείου είναι περίπου 6,0-7,2 ώρες (Purohit et al, 2018). Το κεφαλαιουχικό κόστος του είναι περίπου 1.000–3.000 \$/kW και το κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας είναι 300-500 \$/kWh (Sharma et al, 2022).



Εικόνα 28: Σχηματική περιγραφή μπαταρίας νατρίου- θείου [Πηγή: Ganthia et al, 2022]

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Η μπαταρία θείου νατρίου είναι μια προηγμένη τεχνολογία που πρωτοπορεί στην Ιαπωνία από το 1983 από την Tokyo Electric Power Corporation (TEPCO) και NGK (Kamibayashi et Tanaka, 2001). Είναι ο πιο ανεπτυγμένος τύπος μπαταρίας υψηλής θερμοκρασίας, αν και σχετικά νέα σε εφαρμογές συστημάτων ισχύος. Λόγω της εξαιρετικής ενέργειάς της πυκνότητας, της υψηλής απόδοσης φόρτισης/εκφόρτισης, της μηδενικής συντήρησης, της κατασκευής από φθηνά υλικά και του μεγάλου κύκλου, την έκαναν ελκυστική για χρήση σε σχετικά μεγάλης κλίμακας εφαρμογές συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Ωστόσο, αναφέρεται ότι υπάρχουν αρκετές προϋποθέσεις που περιορίζουν τις εφαρμογές σε σταθερά συστήματα μεγάλης κλίμακας. Η υψηλή κατάσταση θερμοκρασίας που απαιτεί τη διατήρηση του θείου μέσα του λωμένη μορφή αντιμετωπίζεται ως απειλή για τους χειριστές και περιβάλλον. Παρ' όλα αυτά, οι τεχνολογικές προόδους από το 1980 και μετά έχουν βελτιώσει την ενεργειακή πυκνότητα και μείωσαν το κόστος. Ερευνάται η μείωση του ορίου θερμοκρασίας διατηρώντας υψηλή την ενεργειακή πυκνότητα. Η μπαταρία θείου

νατρίου έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και γρήγορη απόκριση, καθιστώντας την κατάλληλη για μικροδίκτυα. Χώρες όπως η Ιαπωνία και η Κίνα επενδύουν σε βιομηχανικές εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας (Faisal et al, 2018). Επιπλέον, το σύστημα πρέπει να προστατεύεται αντιδρώντας με την ατμόσφαιρα καθώς το καθαρό νάτριο εκρήγνυται αμέσως με την επαφή με τον αέρα. Επιπλέον, Η American Electric Power (AEP) και Τόκιο η Electric Power Company (TEPCO) είναι επιτυχημένα παραδείγματα στην ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούν μπαταρίες νατρίου-θείου (Oliveira et al, 2021). Επομένως τα πλεονεκτήματα του νατρίου-θείου είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και η μεγάλη διάρκεια ζωής του κύκλου. Μείζων μειονεκτήματα του νατρίου-θείου είναι η ανάγκη για θερμική διαχείριση και ανησυχίες για την ασφάλεια λόγω του αντίδραση νατρίου με θείο.



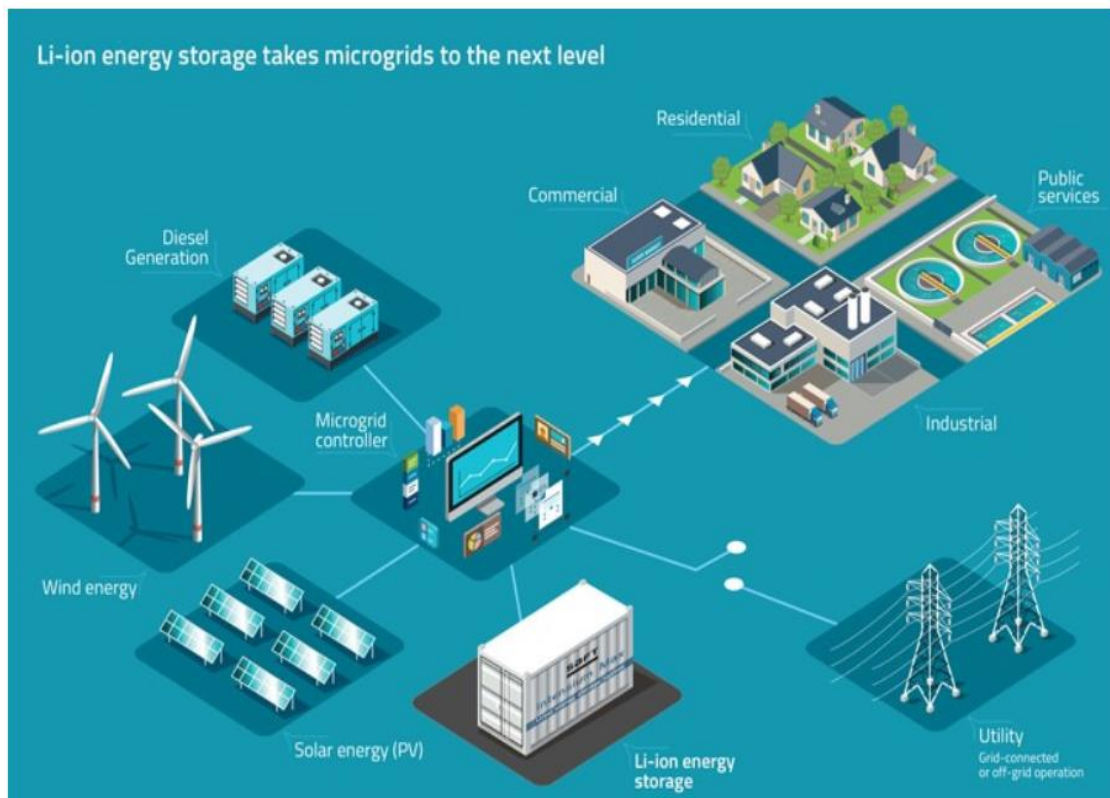
Εικόνα 29: Παράδειγμα εγκατάστασης μπαταριών θείου νατρίου (Πηγή: Parnell, 2017)

3.4.1.3 Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Lithium-Ion Battery)

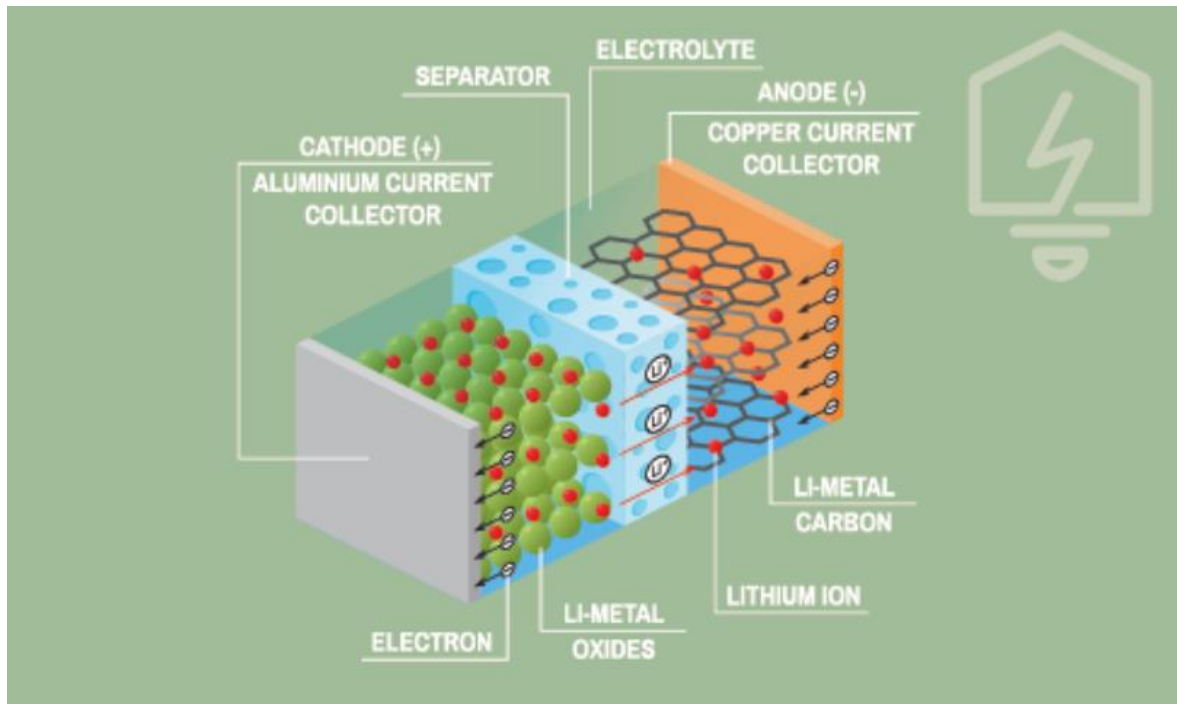
Περιγραφή

Η λειτουργία των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι διαφορετική από τις υπόλοιπες μπαταρίες. Το 1991, η Sony εισήγαγε τις μπαταρίες ιόντων λιθίου στο εμπόριο. Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται στις μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελείται από άλατα λιθίου, LiPF₆. Κατά τη διάρκεια του χρόνου φόρτισης, τα ιόντα λιθίου στην κάθοδο γίνονται ιόντα, τα οποία

μετακινούνται από την κάθοδο στην άνοδο μέσω ενός ηλεκτρολύτη. Αυτή η διαδικασία λειτουργεί αντίστροφα, ενώ οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αρχίζουν να αποφορτίζονται (Fan et al, 2020). Η αποτελεσματικότητα των ιόντων λιθίου βρίσκεται μεταξύ 90-97%. Η διάρκεια ζωής είναι 5-15 χρόνια και 103-104 κύκλοι. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι 200-500 kW/m³, 75-200 Wh/kg και η πυκνότητα ισχύος είναι 1.500-10.000 kW/m³ (Salkuti, 2020). Το κεφαλαιουχικό κόστος του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με λίθιο είναι περίπου 1.200-4.000 \$/kW και το κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας είναι 100-2.500 \$/kWh. Η κύρια εφαρμογή αυτών των μπαταριών είναι στα ηλεκτρικά οχήματα (Bisschop, 2020). Η χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου έχει αυξηθεί λόγω των πλεονεκτημάτων τους έναντι των άλλων τεχνολογιών όπως η μεγάλη διάρκεια ζωής, η υψηλή απόδοση, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, η υψηλή πυκνότητα ισχύος και η χαμηλή απόδοση αυτοεκφόρτισης.



Εικόνα 30: Παράδειγμα μικροδικτύου με μπαταρία λιθίου (Πηγή: *Microgrids*,2024)



Εικόνα 31: Σχηματική περιγραφή των μπαταριών λιθίου (Πηγή: Koseoglou et al, 2018)

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα όπως το χαμηλό βάρος, η ασφάλεια και το χαμηλό κόστος κατασκευής του καθοδικού υλικού αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για μελλοντικές εφαρμογές. Οι μπαταρίες λιθίου προσφέρουν υψηλότερες πυκνότητες φόρτισης και έχουν περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω των οξειδίων και των αλάτων του λιθίου που μπορούν να ανακυκλωθούν. Αυτές οι μπαταρίες διαθέτουν εξαιρετική απόδοση, υψηλή πυκνότητα ενέργειας και μεγάλη διάρκεια ζωής. Λόγω του ότι το λίθιο είναι ελαφρύ στερεό στοιχείο, οι μπαταρίες που βασίζονται σε αυτό μπορούν να είναι αισθητά ελαφρύτερες από τις κανονικές. Αυτό τις καθιστά ιδανικές για κινητά τηλέφωνα και φορητούς υπολογιστές, λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή τους αποτελεσματικότητα. Ακόμα ο χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης (self-discharge), η ελάχιστη ανάγκη συντήρησης και η ικανότητά τους να παρέχουν ρεύματα υψηλής ισχύος είναι μερικά από τα πλεονεκτήματά τους. Ωστόσο, το υψηλό κόστος της μπαταρίας λόγω της ειδικής συσκευασίας και το εσωτερικό κύκλωμα προστασίας από υπερφόρτιση αποτελούν αδυναμίες. Οι μπαταρίες λιθίου είναι το κύριο εμπόδιο τους για να ανταγωνιστούν άλλους τύπους μπαταρίας. Επίσης, οι μπαταρίες αυτές επηρεάζονται αρνητικά από υψηλές θερμοκρασίες και μπορεί να μειώσουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους. Επιπλέον, η υπερβολικά βαθιά εκφόρτιση μπορεί να προκαλέσει δραστική μείωση αυτής της διάρκειας ζωής, καθιστώντας τις ακατάλληλες για εφεδρικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον αρνητικά χαρακτηριστικά είναι ο περιορισμένος ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης καθώς και η μεγάλη ευαισθησία τους σε περίπτωση υπερφόρτισης. Τέλος είναι εξαιρετικά αντιδραστική, εύφλεκτη και φυσική υποβάθμιση.

Η διερεύνηση προηγμένων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας λιθίου έχει εξαπλωθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Οι νέες προηγμένες μπαταρίες λιθίου που αναπτύχθηκαν από τον Υί

Cui χρησιμοποιώντας νανοσύρματα πυριτίου είναι ικανές να αποδίδουν 10 φορές περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από τις υπάρχουσες μπαταρίες ιόντων λιθίου. Η σημαντική βελτίωση της χωρητικότητας αποθήκευσης κάνει τις μπαταρίες λιθίου να γίνονται πιο ελκυστικές για τους κατασκευαστές ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Στο παρελθόν, η ηλεκτρική χωρητικότητα αποθήκευσης μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου περιοριζόταν από την ποσότητα λιθίου που μπορεί να συγκρατείται στην άνοδο της μπαταρίας. Σε συμβατική μπαταρία Li, ο άνθρακας χρησιμοποιείται ως άνοδος. Ωστόσο, αντί αποθήκευσης σε άνθρακα, αποθηκεύοντας το λίθιο σε ένα πλέγμα μικροσκοπικού πυριτίου νανοσύρματα με διάμετρο 1000ο το πάχος ενός φύλλου χαρτί, μια σημαντική αύξηση της ποσότητας λιθίου που αποθηκεύεται στο μπαταρία μπορεί να επιτευχθεί με αποτέλεσμα την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα (Mahlia et al, 2014).

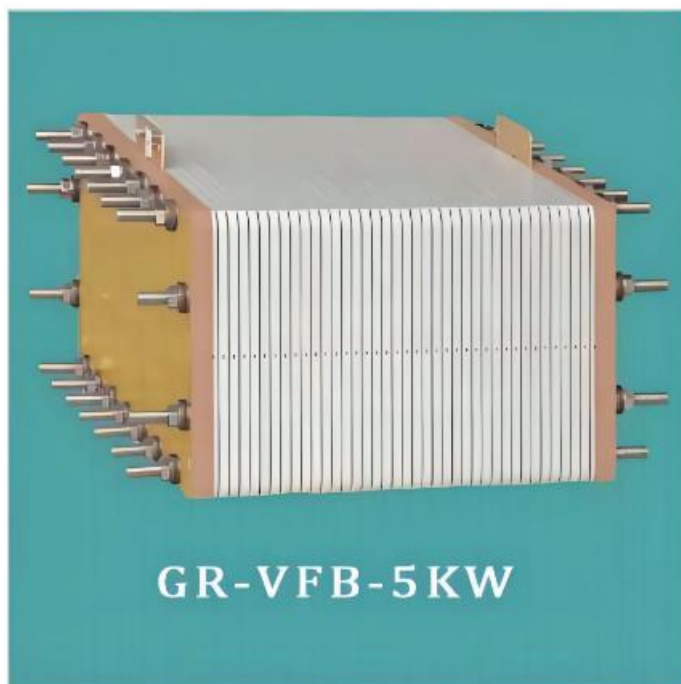
Οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων έχουν επιτύχει σημαντική διείσδυση στην αγορά ηλεκτρονικών καταναλωτικών προϊόντων και μεταβαίνουν σε υβριδικές και ηλεκτρικές εφαρμογές οχημάτων, με ευκαιρίες για αποθήκευση στο δίκτυο. Εάν η ανάπτυξη της βιομηχανίας σε αυτούς τους τομείς αποφέρει βελτιώσεις και οικονομίες κλίμακας στην κατασκευή, πιθανώς θα βρουν το δρόμο τους και στις εφαρμογές αποθήκευσης στο δίκτυο. Οι προγραμματιστές επιδιώκουν τη μείωση του κόστους συντήρησης και λειτουργίας, την παροχή υψηλής απόδοσης και τον έλεγχο μεγάλων τραπεζών μπαταριών. Η συνεχής μείωση του κόστους, η βελτίωση της διάρκειας ζωής και της κατάστασης φόρτισης θα είναι κρίσιμα για αυτή τη χημεία μπαταριών να επεκταθεί στις εφαρμογές δικτύου. Υπάρχουν τρεις τύποι μπαταριών λιθίου-ιόντων σε εμπορική χρήση: κοβάλτιο, μαγγάνιο και φωσφορικό. Για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, οι μπαταρίες λιθίου-ιόντων χρησιμοποιούνται για ρυθμίσεις και υπηρεσίες διαχείρισης ισχύος για λίγα λεπτά λειτουργίας (Hesse et al, 2018; Poullikkas, 2013).

3.4.1.4 Μπαταρίες Ροής Οξειδοαναγωγής (REDOX-FLOW)

Περιγραφή

Οι μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής, επίσης γνωστές ως μπαταρίες ροής (Redox-flow Batteries, RFB) παράγονται από την αντίδραση οξειδοαναγωγής των ηλεκτρολυτών τους. Η λέξη "οξειδοαναγωγή" αποτελεί σύντμηση της αναγωγής-οξείδωσης, περιγράφοντας τις χημικές διεργασίες κατά τις οποίες τα άτομα αλλάζουν το επίπεδο της οξείδωσής τους. Σε μια κυψέλη ροής οξειδοαναγωγής, οι δύο ηλεκτρολύτες διαχωρίζονται από ημιδιαπερατή μεμβράνη, η οποία επιτρέπει τη ροή ιόντων αλλά εμποδίζει την ανάμιξη των υγρών. Η ηλεκτρική επαφή παρέχεται μέσω αγωγών στα υγρά, καθώς τα ιόντα μεταφέρονται μέσω της μεμβράνης, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα στους αγωγούς. Το ενδιαφέρον για τις RFB έχει αυξηθεί λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για αποθήκευση στατικής ενέργειας και της έλλειψης άλλων επιλογών. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει αυτόνομο σχεδιασμό της ισχύος και της αποθήκευσης ενέργειας, παρόμοιο με τις κυψέλες καυσίμου, προσφέροντας οφέλη σε κόστος και απλοποιώντας τις μελλοντικές αναβαθμίσεις στα συστήματα μπαταριών.

Σε αυτές τις μπαταρίες, ο ηλεκτρολύτης περιέχει ιόντα που μετακινούνται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο στο θετικό ηλεκτρόδιο κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση μέσω μιας μεμβράνης. Η αντίδραση λαμβάνει χώρα μεταξύ των ηλεκτρολυτών της μπαταρίας. Αυτοί οι δύο ηλεκτρολύτες των μπαταριών ροής οξειδοαναγωγής περιέχονται σε ξεχωριστές δεξαμενές. Η χωρητικότητα είναι ευθέως ανάλογη με τη χωρητικότητα των μπαταριών και η χωρητικότητα της μπαταρίας επηρεάζεται από τον αριθμό των στοιχείων και των υλικών της μπαταρίας. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται όταν η χημική αντίδραση (αναγωγή-οξείδωση) λαμβάνει χώρα κατά τη λειτουργία (Kousksou et al, 2014). Έχει υψηλή σταθερότητα και χωρητικότητα αποθήκευσης με ευέλικτα λειτουργικά χαρακτηριστικά στο ηλεκτρικό σύστημα. Έτσι, η μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής γίνεται ωφέλιμη για εφαρμογή σε αυτόνομο και αυτόνομο δίκτυο (Noack et al, 2015). Ένα κοινό παράδειγμα μπαταριών ροής οξειδοαναγωγής είναι η μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου (VRFB) (Chen et al, 2009). Οι μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου είναι οι πιο ώριμες και διαδεδομένες στην αγορά. Άλλες αναπτυσσόμενες τεχνολογίες περιλαμβάνουν εκείνες που βασίζονται σε οργανικές ενώσεις κινόνης και σε συνδυασμούς υδρογόνου και βρωμίου . (Redox Flow Batteries: Potential, Alternatives and Challenges, 2024).

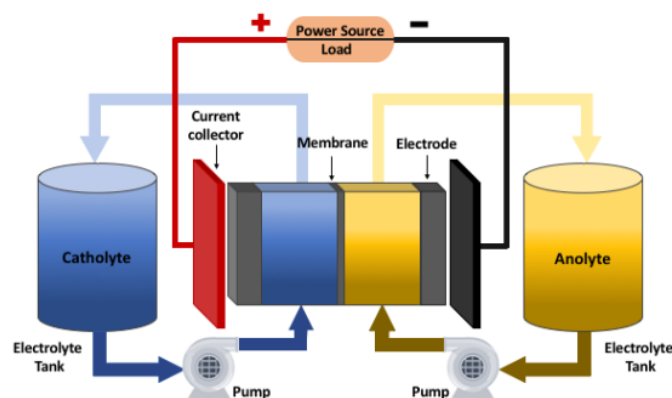


Εικόνα 32: Παράδειγμα μπαταρίας ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου (Πηγή: Μπαταρία ροής Vanadium 5kw, Vanadium Redox Flow Battery, 2024)

Ένα σύστημα ψύξης απαιτείται γιατί κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση παράγεται τεράστια ποσότητα θερμότητας. Η χημική σύνθεση των ηλεκτρολυτών είναι βανάδιο (vanadium) και ψευδάργυρο-βρώμιο (zinc-bromine). Η θερμοκρασία των μπαταριών ροής οξειδοαναγωγής είναι συνήθως 20-40°C (Suberu et al, 2014). Το εύρος απόδοσης βρίσκεται μεταξύ 65-80%. Η διάρκεια ζωής είναι 15 χρόνια και 10.000-20.000 κύκλοι. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι 16-33 kW/m³, 15-50 Wh/kg και η πυκνότητα ισχύος είναι 0,5-2 kW/m³. Το

κεφαλαιουχικό κόστος της ροής οξειδοαναγωγής σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών είναι περίπου 600-1.500 \$/kW και το κόστος ανά μονάδα ενέργειας αποθηκευμένο είναι 150-1000 \$/kWh (Sharma et al, 2022).

Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες ηλεκτροχημικής αποθήκευσης, στις μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής η μετατροπή ισχύος είναι ανεξάρτητη από την αποθήκευση ενέργειας, επιτρέποντας πρακτικά απεριόριστη χωρητικότητα. Επίσης, οι αντιδράσεις στις μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής είναι πλήρως αναστρέψιμες, επιτρέποντας την ίδια κυψέλη να λειτουργεί τόσο για την αποθήκευση όσο και για την παραγωγή ενέργειας. Ωστόσο, η πυκνότητα ισχύος και ενέργειας των RFBs είναι χαμηλή σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες, γεγονός που τα καθιστά ακατάλληλα για κινητές εφαρμογές. Οι ενεργές περιοχές και οι μεμβράνες των κυψελών είναι μεγάλες, αυξάνοντας τις διαστάσεις της μπαταρίας και προκαλώντας υψηλές εγκάρσιες κλίσεις των λύσεων προς τους πόλους ηλεκτροχημικής δραστηριότητας μέσα στα ηλεκτρόδια. Αυτό μειώνει την μέση πυκνότητα ρεύματος και το ονομαστικό ρεύμα σε σχέση με τις μέγιστες θεωρητικές τιμές. Επειδή οι ηλεκτρολύτες είναι αγωγάιμοι, είναι επιρρεπείς σε shunt ρεύματα, τα οποία προκαλούν πρόσθετες απώλειες και επηρεάζουν την ηλεκτρική απόδοση. Απαιτείται προσεκτικός έλεγχος της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη για να αποφευχθεί η καθίζηση του διαλύματος σε θερμοκρασίες κάτω των 15°C και άνω των 35°C, κάτι που απαιτεί συστήματα ελέγχου θερμότητας/θερμοκρασίας. Παρά το γεγονός ότι οι RFBs έχουν αναπτυχθεί για μεγάλες εφαρμογές και κάποιες έχουν επιδειχθεί σε επίπεδο μεγαβάτ, δεν έχουν ακόμη ευρέως εμπορευματοποιηθεί λόγω μεγάλου κόστους και χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας. Οι πρόσφατες έρευνες εστιάζουν σε νέα είδη οξειδοαναγωγικών ζευγών για αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας και βελτίωση της απόδοσης. Συνολικά, οι μπαταρίες redox flow θεωρούνται υποσχόμενες για στατική αποθήκευση ενέργειας λόγω της ευέλικτης λειτουργίας και του μέτριου κόστους συντήρησης, παρά τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν σε όρους ενεργειακής πυκνότητας και εμπορικής διάθεσης (Pan et Wang, 2015, Alotto et al, 2013).



Εικόνα 33: Παράδειγμα μπαταρίας ροής οξειδοαναγωγής (Πηγή: Clemente et Costa-Castelló, 2020)

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Η σύγχρονη ανάπτυξη των μπαταριών ροής οξειδοαναγωγής ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970 από τη NASA, χρησιμοποιώντας ζευγάρια οξειδοαναγωγής $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ και $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{2+}$. Το πρωτότυπο είχε προβλήματα διασταυρούμενης μόλυνσης των ενεργών υλικών, γεγονός που οδήγησε στην ανάπτυξη μεικτών ηλεκτρολυτών. Μια άλλη λύση ήταν να αλλάζουν οι καταστάσεις οξείδωσης χρησιμοποιώντας το ίδιο στοιχείο. Η ιδέα υλοποιήθηκε το 1980 από το Πανεπιστήμιο της Νέας Νότιας Ουαλίας με την ανάπτυξη της μπαταρίας ροής πλήρως βαναδίου (VRB). Από τότε, η έρευνα επικεντρώθηκε στη βελτιστοποίηση των VRB μέσω ανάπτυξης ηλεκτρολυτών, μεμβρανών και ηλεκτροδίων. Μετά το 2010, η τεχνολογία RFB προσέελκυσε ενδιαφέρον για την ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες ροής με βάση το λίθιο-μέταλλο. Ωστόσο, οι πρώιμες RFB είχαν περιορισμούς, όπως τη χρήση επικίνδυνων χημικών και υψηλών θερμοκρασιών. Η μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου, εφευρεθείσα το 1984, απέφυγε τη διασταυρούμενη μόλυνση χρησιμοποιώντας τον ίδιο ηλεκτρολύτη και στα δύο μέρη του στοιχείου.

Οι μπαταρίες ροής έχουν τοποθετηθεί σε διάφορες τοποθεσίες για ποικίλες εφαρμογές. Αποτελούν μια αξιόπιστη, οικονομική και περιβαλλοντικά φιλική μέθοδο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικά από τα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν:

- Η τεχνολογία των μπαταριών ροής είναι ευέλικτη και κλιμακούμενη, επιτρέποντας την κατασκευή συστημάτων που καλύπτουν εύρος εφαρμογών από λίγα W έως πολλά MW και με διάρκεια λειτουργίας που φτάνει ακόμα και μέρες.
- Οι μπαταρίες αυτές μπορούν να κατασκευαστούν από χαμηλού κόστους και εύκολα προσβάσιμα υλικά, όπως θερμοπλαστικά και υλικά με βάση τον άνθρακα. Μεγάλο μέρος των συστατικών τους είναι ανακυκλώσιμο. Οι ηλεκτρολύτες είναι επίσης ανακυκλώσιμοι και επαναχρησιμοποιήσιμοι, μειώνοντας το κόστος ιδιοκτησίας.
- Τα υλικά της μπαταρίας έχουν χαμηλή αναφλεξιμότητα και είναι περιβαλλοντικά φιλικές.
- Οι ηλεκτρολύτες μπορούν να συμβάλλουν στη διαχείριση της θερμότητας της μπαταρίας, μειώνοντας την ανάγκη για περίπλοκες διαδικασίες θέρμανσης ή ψύξης και μειώνοντας το κόστος λειτουργίας.
- Η κατάσταση φόρτισης του συστήματος μπορεί να παρακολουθείται αποτελεσματικά, καθώς οι κυψέλες μοιράζονται έναν κοινό ηλεκτρολύτη, ενισχύοντας την ισορροπία και τη λειτουργία της μπαταρίας.
- Τα ηλεκτρόδια και οι ηλεκτρολύτες δεν θα υποστούν συνήθως μόνιμη ζημιά από υπερφόρτιση ή πλήρη εκφόρτιση.
- Η αυτοεκφόρτιση σε κατάσταση αδράνειας είναι περιορισμένη και δεν υπάρχει αυτοεκφόρτιση όταν είναι απενεργοποιημένες.
- Η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας είναι ανεξάρτητη από την ονομαστική ισχύ τους, καθιστώντας τις μπαταρίες ροής ιδανικές για μακροχρόνια αποθήκευση ενέργειας. Το συνολικό κόστος μιας μπαταρίας μακράς διάρκειας είναι συχνά χαμηλότερο από άλλους τύπους μπαταριών, λόγω του χαμηλού κόστους των υλικών και της τεχνολογίας.

Παρά τις προοπτικές, υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις, όπως η εκβιομηχάνιση της παραγωγής, η βελτίωση της ενεργειακής πυκνότητας και η διαχείριση της θερμότητας. Η ενσωμάτωση αυτών των μπαταριών σε υπάρχοντα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και η ρύθμιση της αγοράς αποτελούν επίσης προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν για τη διευκόλυνση της μεγάλης κλίμακας ανάπτυξης.

Αυτές οι μπαταρίες μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας για παρατεταμένες περιόδους χωρίς σημαντική υποβάθμιση της χωρητικότητάς τους. Αυτό τους επιτρέπει να αντισταθμίζουν τη μεταβλητότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και να απελευθερώνουν ενέργεια κατά τη διάρκεια ζήτησης αιχμής, διευκολύνοντας την αποτελεσματικότερη ενσωμάτωσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης, παίζουν κρίσιμο ρόλο στη σταθεροποίηση του δικτύου, ρυθμίζοντας την ποιότητα της ισχύος και μετριάζοντας τις διακυμάνσεις της τάσης. Οι μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής αποτελούν μια υποσχόμενη εναλλακτική λύση για μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας, ιδιαίτερα για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Η αγορά τους αναμένεται να αναπτυχθεί με σύνθετο ετήσιο ρυθμό 19,9% έως το 2030, κυρίως λόγω της καταλληλότητάς τους για την αποθήκευση ενέργειας από διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές όπως ο ήλιος και ο άνεμος. Επομένως, απαιτείται μελλοντική ανάπτυξη για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα όπως το μειωμένο μέγεθος μπαταρίας, βελτιωμένη πυκνότητα ενέργειας και αυξημένο ημερολογιακό κύκλο. Με συνεχή καινοτομία και επενδύσεις στην έρευνα, οι μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής έχουν τη δυνατότητα να παίξουν καθοριστικό ρόλο στην παγκόσμια αποθήκευση ενέργειας, υποστηρίζοντας τη μετάβαση σε ένα καθαρότερο και πιο σταθερό ενεργειακό μέλλον.

3.5 Θερμικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

3.5.1 Τηγμένα άλατα (Molten-Salts)

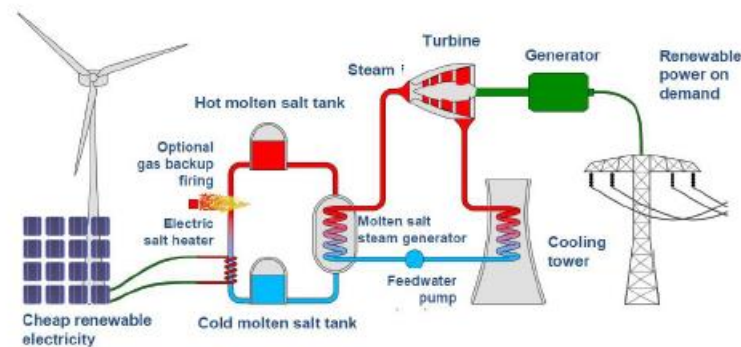
Η μέθοδος αποθήκευσης με τηγμένα άλατα χρησιμοποιείται για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας, η οποία μπορεί να προέλθει από πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές όπως είναι ο άνεμος και ο ήλιος. Τα τηγμένα άλατα είναι ένα μείγμα 60% νάτριο και 40% νιτρικό κάλιο που είναι μη τοξικό και μη εύφλεκτο (KNO_3 και NaNO_3). Αποθηκεύεται σε υγρή μορφή στην ψυχρή δεξαμενή αποθήκευσης. Επίσης αντλείται σε έναν πύργο υποδοχής, όπου θερμαίνεται από μια μονάδα συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (Concentrated Solar Power, CSP) μέσω του ηλιακού φωτός. Το ζεστό τηγμένο άλας στη συνέχεια αποθηκεύεται σε μια μονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης. Έπειτα αντλείται στον υπερθερμαντήρα και στη συνέχεια πηγαίνει στη γεννήτρια ατμού που παράγει τον ατμό και λειτουργεί μηχανική τουρμπίνα ατμού σε συνδυασμό με γεννήτριες, και παράγει την ηλεκτρική ενέργεια. Το κρύο τηγμένο άλας αποθηκεύεται και πάλι σε μια μονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης ψυχρού τηγμένου αλατιού. Η αποθήκευση ενέργειας είναι έως 20 ώρες. Με άλλα λόγια μπορούν διατηρούν τη θερμική ενέργεια έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέθοδος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Το τηγμένο άλας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υψηλότερο εύρος θερμοκρασίας 550-570 °C. Η απόδοση

κύκλου κυμαίνεται από 80-90%. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι 80-500 kW/m³, 80-250 Wh/kg. Το κεφαλαιουχικό κόστος της αποθήκευσης ενέργειας από τηγμένο αλάτι είναι περίπου 400-700 \$/kW και το κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας είναι 3.500-7.000 \$/kWh (Sharma et al, 2022).

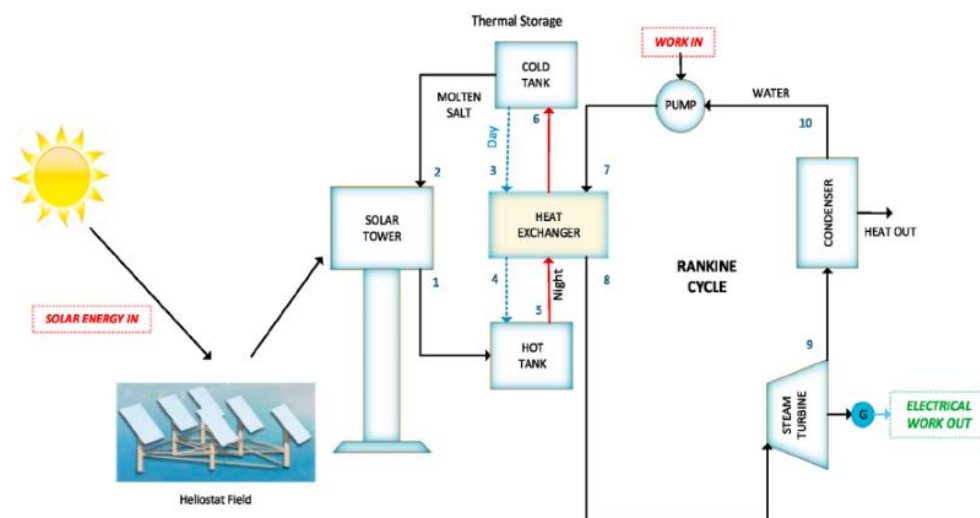
Η αποθηκευμένη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ώρες αιχμής για την παροχή θερμικής ενέργειας, αντικαθιστώντας τους λέβητες άνθρακα ή φυσικού αερίου, βελτιώνοντας τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου και μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων. Η αξία της αποθήκευσης θερμότητας με τηγμένο άλας περιλαμβάνει την αύξηση της αξιοποίησης και σταθερότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέσω του συντονισμού μεταξύ αιολικής, ηλιακής και θερμικής ενέργειας, την κάλυψη αιχμών και βυθίσεων του δικτύου, βελτιώνοντας την ασφάλεια και οικονομία του ηλεκτρικού δικτύου, και την καθαρή και αποδοτική θέρμανση και παροχή ατμού, μειώνοντας τις εκπομπές άνθρακα και το κόστος σε διάφορους τομείς. Η εφαρμογή ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας λιωμένου αλατιού είναι η παραγωγή ζεστού νερού, θέρμανση του χώρου και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικά από τα κύρια μειονεκτήματα είναι ότι το τηγμένο άλας είναι διαβρωτικό και περιορισμένο στην τεχνολογία CSP. Η αποθήκευση με τηγμένο άλας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ηλιακά θερμοηλεκτρικά εργοστάσια, βιομηχανική παραγωγή θερμότητας, αποθήκευση ενέργειας σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας και άλλες εφαρμογές, όπως η αξιοποίηση απορριμμάτων θερμότητας. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε εφαρμογές όπου η τελική ενεργειακή ανάγκη είναι θερμική και όχι ηλεκτρική. Η αποθήκευση με τηγμένο άλας είναι η τρίτη μεγαλύτερη μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας παγκοσμίως, με την αγορά να αναπτύσσεται σταθερά. Η Κίνα, η Ισπανία και οι ΗΠΑ είναι οι κύριες χώρες στην αγορά αυτή, με την Κίνα να αναμένεται να αυξήσει σημαντικά την εγκατεστημένη της χωρητικότητα μέχρι το 2030, με πολλαπλές εφαρμογές που περιλαμβάνουν την ηλιακή θερμοηλεκτρική παραγωγή και την ευελιξία των θερμικών μονάδων παραγωγής ενέργειας (Aurora Li, 2023).

Τα συστήματα τηγμένων αλάτων συνήθως χρησιμοποιούνται σε συστήματα αποθήκευσης που συνδυάζονται με ηλιοθερμικά συστήματα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται νιτρικό νάτριο και νιτρικό κάλιο, λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητάς τους. Επιπλέον, αυτά τα άλατα συχνά χρησιμοποιούνται ως συστατικά σε πολλά λιπάσματα. Ένα σύστημα αποθήκευσης με τηγμένα άλατα μπορεί να συνδυαστεί με μια υπάρχουσα μονάδα καύσης λιγνίτη ή λιθάνθρακα. Για να γίνει αυτό, ο αρχικός λέβητας της μονάδας καύσης αντικαθίσταται από έναν κατάλληλο εναλλάκτη θερμότητας. Αυτός ο εναλλάκτης λειτουργεί σε συνδυασμό με δύο δεξαμενές αλάτων (μία χαμηλής και μία υψηλής θερμοκρασίας). Η ηλεκτρική ενέργεια από αιολικά ή φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπεται μέσω ηλεκτρικής αντίστασης σε θερμότητα. Αυτή η θερμότητα χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία των αλάτων στους 600°C, όπου βρίσκονται σε υγρή μορφή. Το ρεύμα των αλάτων υψηλής θερμοκρασίας περνά από τον εναλλάκτη θερμότητας, δημιουργώντας ατμό από το ρεύμα νερού, καθώς τα άλατα ψύχονται και επανέρχονται στη δεξαμενή αλάτων χαμηλής θερμοκρασίας. Τα υπόλοιπα στάδια της ηλεκτροπαραγωγής παραμένουν παρόμοια με αυτά σε μονάδες καύσης λιγνίτη ή λιθάνθρακα, καθώς ο παραγόμενος ατμός τροφοδοτεί τον στρόβιλο παραγωγής ηλεκτρικής

ενέργειας. Η βασική διαφορά είναι ο τρόπος παραγωγής του ατμού: στην περίπτωση του συστήματος αποθήκευσης τηγμένων αλάτων, ο ατμός παράγεται από τη θερμότητα των τηγμένων αλάτων, η οποία προέρχεται από την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια αιολικών ή ηλιακών πηγών.



Εικόνα 34: Παράδειγμα λειτουργίας τεχνολογίας αποθήκευσης τηγμένων αλάτων (Πηγή: Energy Storage Technologies: Challenges and Outlook, 2020)



Εικόνα 35: Δεύτερο σχηματικό παράδειγμα λειτουργίας των τηγμένων αλάτων (Πηγή: AlShafi et Bicer, 2021)

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Η μετατροπή των λιγνιτικών μονάδων σε μονάδες θερμικής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτούνται από ΑΠΕ προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Αξιοποιεί τις υφιστάμενες μονάδες καύσης λιγνίτη και λιθάνθρακα καθώς και τις συνοδευτικές υποδομές τους, αντί να αποσυρθούν οριστικά. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται ο δεύτερος κύκλος ζωής των πιο ρυπογόνων υποδομών ηλεκτροπαραγωγής, μειώνοντας τις εκπομπές

αερίων του θερμοκηπίου. Η εν λόγω πρακτική προσφέρει κρίσιμες υπηρεσίες αποθήκευσης, καθιστώντας την απαραίτητη για τα ηλεκτροπαραγωγικά συστήματα που βασίζονται σε ώριμες τεχνολογίες ΑΠΕ.

- Η τεχνολογία αποθήκευσης θερμότητας μέσω λιωμένου αλατιού χρησιμοποιείται σε φωτοθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Αυτοί οι σταθμοί χαρακτηρίζονται από την ενσωμάτωση μέσω αποθήκευσης και μεταφοράς θερμότητας, κάτι που απλοποιεί τη συναρμολόγηση του εξοπλισμού τους και διευκολύνει την μετέπειτα λειτουργία και συντήρησή τους. Παράλληλα, αυτή η τεχνολογία μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα χρήσης της ηλιακής ενέργειας, να μειώσει τις διακυμάνσεις στην παραγωγή ισχύος και να αυξήσει την ευελιξία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, συμβάλλει στη σταθερότητα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και μειώνει τα προβλήματα περιορισμού ισχύος κατά την ανάπτυξη νέων ενεργειακών πηγών.
- Η καθαρή θέρμανση αποτελεί τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, όπως εκείνη που παράγεται από εγκαταλελειμμένες αιολικές ή φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις χαμηλής ισχύος, η οποία μπορεί να αποθηκευτεί και να απελευθερωθεί κατά την ανάγκη, με στόχο τη μείωση του κόστους ενέργειας για τους χρήστες και τη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος. Αυτή η πρακτική μπορεί να εξομαλύνει την ισχύ εξόδου από φωτοηλεκτρικές και αιολικές πηγές ενέργειας, ενώ βελτιώνει την ικανότητα απορρόφησης της νέας παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον, παρέχει σταθερό και συνεχή ατμό, ζεστό αέρα και άλλες πηγές θερμότητας υψηλής ποιότητας για την επεξεργασία τροφίμων, την κλωστοϋφαντουργία και άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες.
- Κινητή αποθήκευση θερμότητας και θέρμανση: καμία απώλεια θερμότητας αγωγού, υψηλό ποσοστό χρήσης θερμότητας. Μπορεί να επιτύχει υψηλής απόδοσης-ανάκτηση και χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας και διπλά οφέλη από την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών. Χωρίς τοποθέτηση αγωγών, λιγότερες επενδύσεις και χαμηλό κόστος λειτουργίας. Ο εξοπλισμός είναι ευέλικτος, ασφαλής και απλός στη χρήση. Μπορεί να πραγματοποιήσει επιχειρήσεις ή εργοστάσια που δεν μπορούν να ακτινοβοληθούν από το δίκτυο σωλήνων θέρμανσης.
- Μείωση του θερμικού φορτίου των θερμαντικών μονάδων ή αύξηση του εύρους ρύθμισης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τους, προκειμένου να βελτιωθεί η ευελιξία λειτουργίας των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας.
- Ολοκληρωμένες ενεργειακές υπηρεσίες, μέσω της συνδυασμένης χρήσης φωτοβολταϊκών, αιολικών, πυρηνικών και άλλων συστημάτων. Παροχή στους χρήστες αποτελεσματικής και έξυπνης πολλαπλής παροχής ενέργειας, βελτιώνοντας τη χρήση της ενέργειας. Ενοποίηση της παραγωγής ενέργειας με την περιβαλλοντική διακυβέρνηση για μείωση των εκπομπών ρύπων και του κόστους κατανάλωσης ενέργειας των επιχειρήσεων. Αύξηση του ποσοστού καθαρής ενέργειας και βελτιστοποίηση της ενεργειακής δομής (Αποθήκευση ενέργειας λιωμένου αλατιού: η πρώτη επιλογή-μεγάλης κλίμακας τεχνολογίας αποθήκευσης θερμότητας μεσαίας και υψηλής θερμοκρασίας επί του παρόντος, 2022).

- Τέλος έχει θετικό αντίκτυπο στη βιομηχανία λιγνίτη καθώς διατηρούνται οι θέσεις εργασίας με την εφαρμογή τέτοιων μετατροπών, που συνδυάζει μέρος της μονάδας καύσης με το σύστημα θερμικής αποθήκευσης, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις λιγνιτικές περιοχές που βρίσκονται σε φάση μετάβασης. Εκτός από την εγκατάσταση των δεξαμενών τηγμένων αλάτων και της αντίστασης που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα, απαιτείται ουσιαστικά μόνο η αντικατάσταση του παλιού λέβητα με έναν κατάλληλο εναλλάκτη θερμότητας. Κατά τα λοιπά, η λειτουργία και η συντήρηση της λιγνιτικής μονάδας παραμένει η ίδια.

Ωστόσο, ο συνδυασμός τεχνολογιών θερμικής αποθήκευσης με μονάδες καύσης λιγνίτη ή λιθάνθρακα είναι νέος, γεγονός που φέρνει διάφορα τεχνικά εμπόδια, κυρίως λόγω της μεγάλης κλίμακας ισχύος των υπάρχουσών μονάδων καύσης. Επιπλέον, ο συνολικός βαθμός απόδοσης τέτοιων συστημάτων είναι χαμηλότερος σε σύγκριση με τις δύο πιο διαδεδομένες τεχνολογίες αποθήκευσης, δηλαδή την αντλησιοταμίευση και τους συσσωρευτές.

Παγκόσμιες εγκαταστάσεις

Σχετικά με τις εφαρμογές των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας τηγμένου αλάτος, υπάρχει ένα ενδιαφέρον έργο με την ονομασία "Store2Power", το οποίο επιδιώκει να μετατρέψει τις λιγνιτικές μονάδες της RWE στη Βόρεια Ρηνανία-Βεστφαλία της Γερμανίας σε μονάδες αποθήκευσης ενέργειας τηγμένων αλάτων. Αναμένεται να επιτύχει συνολικό βαθμό απόδοσης περίπου 40%. Το έργο αυτό αποτελεί συνεργασία μεταξύ της RWE, της μεγαλύτερης εταιρίας ηλεκτροπαραγωγής στην Ευρώπη, του Γερμανικού Αεροδιαστημικού Κέντρου και του Πανεπιστημίου του Aachen. Η ιδέα έχει την πλήρη υποστήριξη των μεγαλύτερων πολιτικών κομμάτων της Γερμανίας, καθώς από το 2018 περιλαμβάνεται στη συμφωνία των κομμάτων που συμμετέχουν στη γερμανική κυβέρνηση συνεργασίας. Επιπλέον, έχει συμπεριληφθεί στις προτάσεις της Γερμανικής Επιτροπής για την αποσύνδεση από τον λιγνίτη και τον λιθάνθρακα (Coal Commission), ενώ επιλέχθηκε το 2019 από το Γερμανικό Υπουργείο Οικονομικών και Ενέργειας ως ένα από τα κύρια έργα του προγράμματος "Reallabore für die Energiewende" για την ενεργειακή μετάβαση στη Γερμανία. Επίσης περιλαμβάνεται στον κατάλογο των έργων που συνοδεύουν τον πρόσφατο γερμανικό νόμο για την απεξάρτηση από τον λιγνίτη και τον λιθάνθρακα μέχρι το 2038. Σύμφωνα με τον γερμανικό νόμο θα διοχετευθούν 40 δισεκατομμύρια ευρώ για την ενίσχυση της οικονομίας των λιγνιτικών περιοχών που βρίσκονται σε μετάβαση.

Η Χιλή, σε συνεργασία με το Γερμανικό Υπουργείο Περιβάλλοντος, το Γερμανικό Αεροδιαστημικό Κέντρο (DLR), την GIZ GmbH και το Υπουργείο Ενέργειας της Χιλής, έχει ξεκινήσει έργα μετατροπής λιγνιτικών μονάδων με τη χρήση της τεχνολογίας των τηγμένων αλάτων στο πλαίσιο του προγράμματος απανθρακοποίησης του ενεργειακού τομέα της Χιλής. Ταυτόχρονα, διερευνούνται παρόμοια έργα και σε άλλες χώρες.

Ένα άλλο κρίσιμο ζήτημα που χρειάζεται λεπτομερή ανάλυση είναι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που θα παράγει ένα τέτοιο σύστημα και το πώς αυτό θα επηρεάσει το

δίκτυο. Σύμφωνα με εκτιμήσεις ειδικών του Γερμανικού Αεροδιαστημικού Κέντρου στην περίπτωση της Ελλάδας, εάν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενο από φωτοβολταϊκά μειωθεί σε 20€/MWh, το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που θα διοχετεύεται στο δίκτυο για ένα σύστημα με συνολικό βαθμό απόδοσης 40%, αναμένεται να κυμαίνεται μεταξύ 60 και 70 €/MWh.

Η RWE είναι πρωτοπόρος στις τεχνολογίες θερμικής αποθήκευσης και ήδη συνεργάζεται με τη ΔΕΗ για ένα έργο φωτοβολταϊκών ισχύος 2 GW στη Δυτική Μακεδονία. Υπάρχει ευκαιρία επέκτασης αυτής της συνεργασίας για την ενσωμάτωση των τεχνολογιών των τηγμένων αλάτων. Συγκεκριμένη πρόταση για τη μετατροπή λιγνιτικών μονάδων σε υποδομές αποθήκευσης ενέργειας με τη χρήση της τεχνολογίας των τηγμένων αλάτων περιλαμβάνεται στον οδικό χάρτη μετάβασης για την Περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας, ο οποίος εκπονήθηκε από την ομάδα εμπειρογνομόνων της Παγκόσμιας Τράπεζας σε συνδυασμό με το Σχέδιο Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης για τις λιγνιτικές περιοχές της Ελλάδας (*Energy Storage Technologies: Challenges and Outlook, 2020*).



Εικόνα 36: Παράδειγμα εγκατάστασης τηγμένου άλατος (Πηγή: Aurora Li, 2023)

3.6 Ηλεκτρικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

3.6.1 Υπερ-πυκνωτές (Super- capacitors)

Περιγραφή

Ο υπερπυκνωτής είναι ένας ηλεκτροχημικός πυκνωτής που συνδυάζει στοιχεία της τεχνολογίας των μπαταριών και των πυκνωτών. Η τάση λειτουργίας του περιορίζεται σε μερικά Volt. Ο υπερπυκνωτής χρησιμοποιεί έναν μοριακά λεπτό ηλεκτρολύτη ως

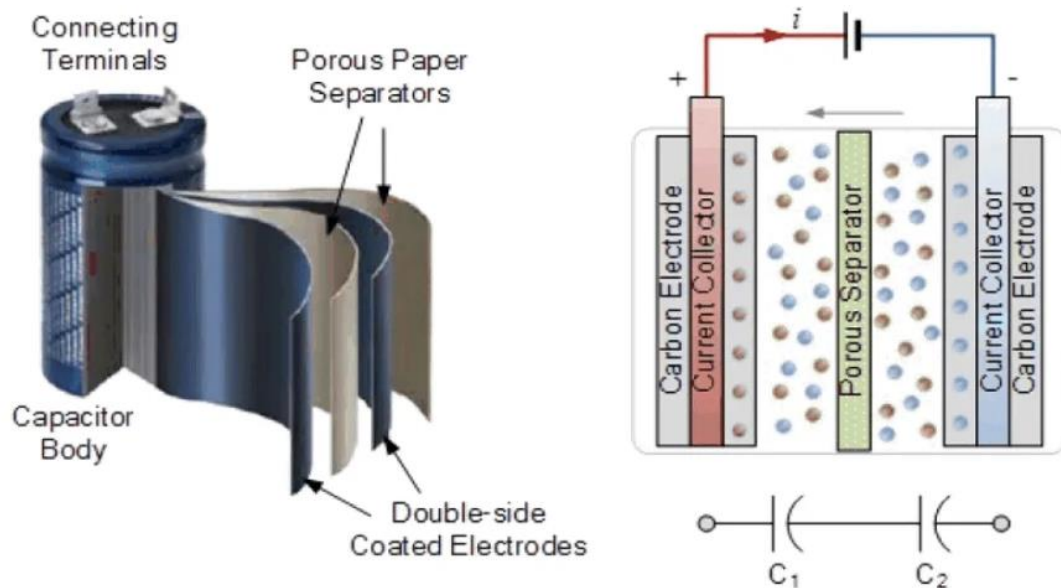
διηλεκτρικό υλικό για την αποθήκευση φορτίου. Η διεπαφή του ηλεκτρολύτη φορτίζεται κάθε φορά που εφαρμόζεται τάση στους ακροδέκτες του, επιτρέποντας την ηλεκτροστατική αποθήκευση φορτίου χωρίς χημικές αντιδράσεις. Ένας υπερπυκνωτής αποτελείται από δύο αντίθετα φορτισμένα ηλεκτρόδια, ένα διαχωριστικό, τον ηλεκτρολύτη και συλλέκτες ρεύματος. Ανάλογα με την τεχνολογία των υλικών των ηλεκτροδίων, οι υπερπυκνωτές διακρίνονται σε ψευδοπυκνωτές (pseudocapacitors), ηλεκτροχημικοί διπλού στρώματος πυκνωτές (electrochemical double layer capacitors, ECDL) και τέλος οι υβριδικοί πυκνωτές (hybrid capacitors).

Ο πυκνωτής, όπως κάθε άλλο ηλεκτρονικό στοιχείο, χαρακτηρίζεται από μια σειρά χαρακτηριστικών. Ο κατασκευαστής του πυκνωτή καθορίζει τα χαρακτηριστικά του, τα οποία μπορούν να βρεθούν στα φύλλα δεδομένων που παρέχει. Το πιο σημαντικό είναι η ονομαστική τιμή της χωρητικότητας C ενός πυκνωτή. Μετριέται σε pico-Farads (pF), nano-Farads (nF) ή micro-Farads (μ F) και αναγράφεται στο σώμα του πυκνωτή με αριθμούς, γράμματα ή έγχρωμες λωρίδες. Έχουν επίσης μια τιμή ανοχής που μπορεί να κυμαίνεται από -20% έως και +80%, ιδίως για τους ηλεκτρολυτικούς αλουμινίου, που επηρεάζει την πραγματική τους τιμή.

Αποτελείται από δύο ηλεκτροχημικά στρώματα φορτίου για την αποθήκευση ενέργειας. Όταν εφαρμόζεται η τάση, τα ιόντα συνδέονται με το ηλεκτρόδιο κατά τη διάρκεια του χρόνου φόρτισης και τα ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα κατά τον χρόνο εκφόρτισης. Οι υπερπυκνωτές είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί στο εύρος 80-90% και η διάρκεια ζωής είναι πάνω από 20 χρόνια και 100.000 κύκλοι. Ο υπερπυκνωτής θεωρείται μια τεχνολογία βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας με ενεργειακή πυκνότητα 0,5-5 Wh/kg, 2-10 kW/m³ και η πυκνότητα ισχύος είναι μεγαλύτερη από 105. Το κόστος κεφαλαίου του των super-capacitors είναι περίπου 100-300 \$/kW και το κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας είναι 300-2.000 \$/ kWh (Tran et Fowler, 2020). Ο υπερπυκνωτής μπορεί να λειτουργήσει σε εύρος θερμοκρασίας από -40 έως 70 °C (Sharma et al, 2022).

Οι υπερπυκνωτές τύπου διπλού στρώματος (EDL) είναι συνήθως οι λιγότερο ακριβοί στην κατασκευή τους και είναι επί του παρόντος οι πιο διαδεδομένοι τύποι υπερπυκνωτών. Όπως οι μπαταρίες, βασίζονται σε ηλεκτροστατική δράση (Zhu et al, 2022, Rahman et al, 2020, Rezaeimozafer et al, 2022). Ωστόσο, το αποτέλεσμα είναι αναστρέψιμο εύκολα καθώς δεν συμβαίνει καμία χημική αντίδραση. Έτσι οι υπερπυκνωτές μπορούν εύκολα να φορτιστούν και αποφορτίζονται σε δευτερόλεπτα, πολύ πιο γρήγορα από τις μπαταρίες. Παράλληλα υπόκεινται σε ελάχιστη υποβάθμιση σε υψηλή φόρτιση ή υπερφόρτιση και η τυπική διάρκεια ζωής είναι εκατοντάδες χιλιάδες κύκλοι. Ταυτόχρονα ούτε ζέστη ούτε κατά τη φόρτιση απελευθερώνονται επικίνδυνες ουσίες. Ένας περιοριστικός παράγοντας είναι ο υψηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης. Επιπλέον, οι υβριδικοί πυκνωτές είναι ένας συνδυασμός ψευδοπυκνωτών και διπλής στρώσης υπερπυκνωτές, με το ένα ηλεκτρόδιο να χρησιμοποιεί ηλεκτρικό μηχανισμό διπλής στρώσης και το άλλο ψευδο-χωρητικό υλικό. Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας δύο κατάλληλα νοθευμένα αγωγικά υλικά ή μικτά οξειδία μετάλλων. Πολυμερές αλουμίνιο και Το υβριδικό υγρό ταντάλιο είναι μερικά από τα παραδείγματα υβριδικών πυκνωτών (Zhao et al, 2019, Symeonidou et Papadopoulos, 2022, Prakash et Shaik, 2016)

Ο υπερπυκνωτής είναι μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές. Αποτελεί έναν ηλεκτροχημικό πυκνωτή που προσφέρει υψηλή ηλεκτρική χωρητικότητα σε μικρές διαστάσεις. Λόγω της υψηλής ισχύος που μπορεί να παρέχει, ο υπερπυκνωτής είναι καίριος σε πολλές εφαρμογές, ακόμα και για γρήγορες μεταβολές φορτίου. Η χωρητικότητά του είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τους κλασικούς πυκνωτές, αν και έχει χαμηλότερα όρια τάσης, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ ηλεκτρονικών επικοινωνιών και επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Αντί να αποθηκεύει ενέργεια ηλεκτροχημικά άμεσα, ο υπερπυκνωτής την αποθηκεύει μέσω ηλεκτρικού πεδίου.



Εικόνα 37: Παράδειγμα υπερπυκνωτή (Πηγή: Supercapacitors – A Viable Alternative to Lithium-Ion Battery Technology?, 2020)

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Παράγοντες που περιορίζουν τη διάρκεια ζωής είναι η χρονική διάρκεια λειτουργίας, με αναφορές έως 12 έτη, και το υψηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης, που φτάνει το 14% της ονομαστικής ενέργειας κάθε μήνα. Εκτός από την αντοχή σε μεγάλες φορτίσεις, οι υπερπυκνωτές φορτίζονται και εκφορτίζονται σε δευτερόλεπτα, γρηγορότερα από τις μπαταρίες, χωρίς παραγωγή θερμότητας ή εκπομπή επικίνδυνων ουσιών κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Η ενεργειακή απόδοση είναι υψηλή, κυμαίνεται από 85% έως 98%.

Σε σύγκριση με τους συμβατικούς πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές διαθέτουν σημαντικά μεγαλύτερη επιφάνεια ηλεκτροδίου. Η ικανότητα ενός συμβατικού πυκνωτή να απορροφήσει ρεύμα εξαρτάται αποκλειστικά από την εξωτερική επιφάνεια των ηλεκτροδίων του. Αντίθετα, η τεχνολογία των υπερπυκνωτών βασίζεται στην ανάπτυξη «ενεργού επιφάνειας» σε όλο τον όγκο των ηλεκτροδίων τους, αυξάνοντας την αποθηκευτική ικανότητα ανά μονάδα βάρους και μειώνοντας το συνολικό τους όγκο σε ένα μικρό κλάσμα των συμβατικών πυκνωτών. Έχουν αναφερθεί χωρητικότητες υπερπυκνωτών έως και 5000F, με ενεργειακή πυκνότητα που φτάνει τα 5Wh/kg, αντίθετα με τους συμβατικούς πυκνωτές που έχουν τυπική ενεργειακή πυκνότητα 0.5Wh/kg. Επιπλέον, η πυκνότητα ισχύος των υπερπυκνωτών είναι ιδιαίτερα υψηλή, σημαντικά υψηλότερη από

αυτήν των μπαταριών. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας των υπερπυκνωτών, το υψηλό αυτό επίπεδο ισχύος είναι διαθέσιμο μόνο για περιορισμένο χρονικό διάστημα.

Το κόστος των υπερπυκνωτών αποτελεί ένα σημαντικό εμπόδιο για την ευρύτερη εμπορική χρήση τους στη βιομηχανία. Οι υπερπυκνωτές εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερο κόστος. Τελικά όμως, η συνδυασμένη υψηλή ικανότητα αποθήκευσης ισχύος και οι πολύ σύντομοι κύκλοι εκφόρτισης καθιστούν τους υπερπυκνωτές ιδανική λύση για την παροχή συμπληρωματικής φόρτισης και την ικανοποίηση απρόοπτων ενεργειακών αναγκών (Σταυρακάκης, 2016).

Παγκόσμιες εγκαταστάσεις

Οι ηλεκτροχημικοί υπερπυκνωτές είναι ακόμα σχετικά νέες συσκευές στον τομέα της τεχνολογίας, καθώς δεν έχουν εφαρμοστεί ευρέως μέχρι σήμερα. Αυτό οφείλεται στις περιορισμένες τους δυνατότητες σε ισχύ και ενέργεια, καθιστώντας τους χρήσιμους κυρίως σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος και ενέργειας. Παρ' όλα αυτά, έχουν σημειωθεί σημαντικές προόδους στη βελτίωση των χαρακτηριστικών τους, όπως η ενεργειακή απόδοση και η πυκνότητα ισχύος. Οι υπερπυκνωτές έχουν βρει εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως στα ηλεκτρικά οχήματα, στην ενίσχυση των μπαταριών, στην εφεδρική μνήμη και στη βελτίωση της ποιότητας της ενέργειας, μεταξύ άλλων.



Εικόνα 38: Παράδειγμα υπερπυκνωτών για δίκτυα (Πηγή: How supercapacitors address modern electrical supply challenges, 2024)

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως σε διάφορες εφαρμογές επειδή αυτοί οι πυκνωτές θεωρούνται μεταξύ των γενικών πυκνωτών και των μπαταριών. Αυτά είναι πολύ δημοφιλή λόγω της γρήγορης φύσης τους. Μία από τις βασικές εφαρμογές του είναι η αποθήκευση της ενέργειας στα 'Συστήματα Ανάκτησης Κινητικής Ενέργειας' της βιομηχανίας Αυτοματισμού. Στο μέλλον, όλες οι άλλες συσκευές όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί υπολογιστές που λειτουργούσαν με διάφορες μπαταρίες μπορούν να αντικατασταθούν από αυτούς τους πυκνωτές. Τα παραπάνω που συζητήθηκαν είναι μερικές από τις κύριες εφαρμογές των υπερπυκνωτών. Σε σύγκριση με την μπαταρία, αυτοί έχουν χαμηλή πυκνότητα όσον αφορά τη φόρτιση. Ακόμη χειροτερεύει όταν λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά της εκφόρτισης αυτών των πυκνωτών. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να φορτιστούν και να αποφορτιστούν απεριόριστες φορές. Με σωστή συντήρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να διαρκέσει για πολλά χρόνια (Super Capacitor που λειτουργεί, κύκλωμα φόρτισης & εφαρμογές 2021, 2024).

Αυτήν τη στιγμή, μικροί υπερπυκνωτές ισχύος περίπου 7-10W είναι διαθέσιμοι στην αγορά για εφαρμογές ποιότητας ισχύος στον τομέα των οικιακών ηλεκτρικών συσκευών. Η εξέλιξη στους υπερπυκνωτές μεγαλύτερης κλίμακας έχει επικεντρωθεί κυρίως στα ηλεκτρικά οχήματα. Μέχρι σήμερα, η πιο ελπιδοφόρα εφαρμογή για τους υπερπυκνωτές σε μικρή κλίμακα ισχύος (<250kW) θεωρείται η ηλεκτροπαραγωγική χρήση.

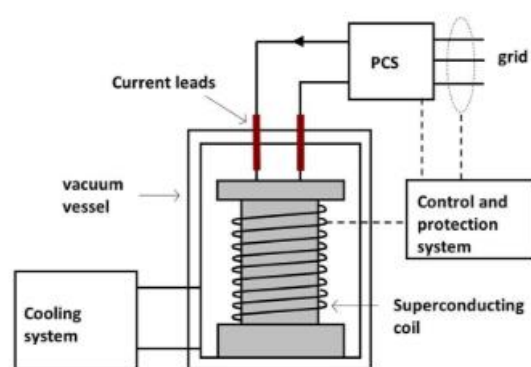
3.6.2 Σύστημα Υπεραγωγίμης Μαγνητικής Αποθήκευσης Ενέργειας (Super Magnetic Energy System ή SMES)

Περιγραφή

Σε ένα σύστημα υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας, δημιουργείται μαγνητικό πεδίο από τη ροή DC σε ένα πηνίο κατασκευασμένο από υπεραγωγίμο υλικό. Έτσι αποθηκεύεται η ενέργεια. Αυτά τα συστήματα μετατρέπουν το AC από ένα ηλεκτρικό σύστημα σε DC μέσα από τη χρήση μιας υπεραγωγίμης σπείρας και αποθηκεύουν την ενέργεια ως μαγνητικό πεδίο. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να αποδοθεί στο σύστημα AC όταν αυτό απαιτείται.

Για να διατηρηθεί το πηνίο στην υπεραγωγίμη κατάστασή του, στα πρώτα συστήματα υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας βυθίζονταν σε υγρό ήλιο εντός ενός μονωμένου υπό κενό κρυοστάτη. Αυτή η μέθοδος ψύξης ήταν δαπανηρή. Πρόσφατα, εμφανίστηκαν υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγοί, οι οποίοι μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες που μπορούν να ψυχθούν με υγρό άζωτο, κάτι που είναι πιο οικονομικά αποδοτικό από την κρυογόνο ψύξη. Τα χαρακτηριστικά του υπεραγωγίμου πηνίου είναι τέτοια ώστε να έχουν σχεδόν μηδενική αντίσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και να οδηγούν το ηλεκτρισμό σε συστήματα που σχεδιάστηκαν ειδικά για να αποθηκεύουν αποτελεσματικά την ηλεκτρική ενέργεια μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο.

Στα συστήματα SMES, η ενέργεια αποθηκεύεται σε μορφή συνεχούς ρεύματος που ρέει μέσω των υπεραγωγίων καλωδίων και διατηρείται ως μαγνητικό πεδίο συνεχούς ρεύματος. Αποτελείται από ένα υπεραγωγίμο υλικό που δεν έχει αντίσταση. Ενώ το συνεχές ρεύμα (DC) που ρέει σε ένα υπεραγωγίμο πηνίο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο στο οποίο το αποθηκεύεται ενέργεια. Για τη διατήρηση των υπεραγωγίων ιδιοτήτων, ένα σύστημα ψύξης (υγρό άζωτο) απαιτείται. Το σύστημα SMES είναι μια τεχνολογία βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. Απαιτεί λιγότερη συντήρηση και επιτυγχάνει υψηλή απόδοση, μόνο 2-3% απώλειες συμβαίνουν λόγω της μετατροπής εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές ρεύμα. Η απόδοση του κύκλου του συστήματος SMES είναι 85-95%. Η διάρκεια ζωής είναι πάνω από 20 χρόνια και 104-105 κύκλοι. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι 0,2-14 kW/m³ και η πυκνότητα ισχύος είναι 300-4.000 kW/m³. Το κεφαλαιουχικό κόστος του συστήματος MME είναι περίπου 200-300 \$/kW και το κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας είναι 1.000-10.000 \$/kWh. Διάφορες οι εφαρμογές των SMES είναι το backup του δικτύου, η παλμική ισχύς και η σταθεροποίηση δικτύου. Μερικά από τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η υψηλή απόδοση, η γρήγορη απόκριση, η υψηλή πυκνότητα ισχύος, ο λιγότερος χρόνος φόρτισης και απαιτεί λιγότερη συντήρηση. Μερικά μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι το υψηλό κόστος ενέργειας, πολυπλοκότητα συστήματος και βραχυπρόθεσμη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας (Sharma et al, 2022).



Εικόνα 39: Σχηματική περιγραφή εσωτερικού συστήματος υπεραγωγίμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης (Πηγή: EERA, Superconducting Magnetic Energy Storage, 2024)

Με άλλα λόγια η λειτουργία του SMES βασίζεται στην ιδέα ότι ένα ρεύμα συνεχίζει να ρέει σε έναν υπεραγωγό ακόμα και μετά την εξάλειψη της τάσης (Ali et al, 2010). Τα συστήματα SMES ανταποκρίνονται γρήγορα, μεταβαίνοντας από τη φόρτιση στην εκφόρτιση μέσα σε δευτερόλεπτα. Για αυτό το λόγο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές όπου άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως η αντλησιοταμίευση και η αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα, είναι αδύνατες. Η εφαρμογή του SMES για την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει κερδίσει σημαντική προσοχή. Ο SMES έχει αποδειχθεί ότι είναι βιώσιμη και ανταγωνιστική επιλογή για τη μείωση των διακυμάνσεων στην απόδοση, τον έλεγχο της συχνότητας, την ενίσχυση της μεταβατικής σταθερότητας και τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Adetokun et al, 2022).

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

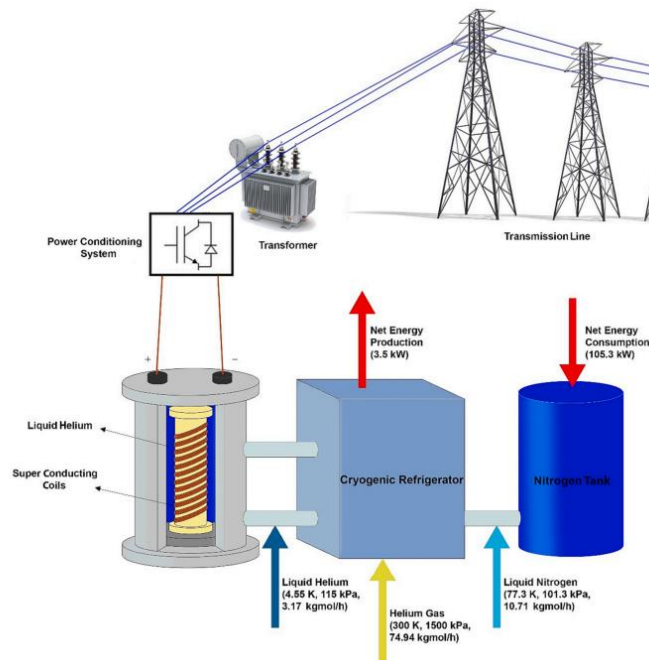
Η υιοθέτηση υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας παρέχει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλους τύπους αποθήκευσης ενέργειας. Το κυριότερο πλεονέκτημα είναι η ελάχιστη χρονική καθυστέρηση μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης, με την ισχύ να είναι σχεδόν αμέσως διαθέσιμη και να μπορεί να παρέχει υψηλή ισχύ για σύντομα χρονικά διαστήματα. Η υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας χαρακτηρίζεται από μικρή αντίσταση στα ηλεκτρικά ρεύματα, μειώνοντας τις απώλειες ισχύος σε σύγκριση με άλλα συστήματα. Επιπλέον, τα κύρια εξαρτήματα της είναι σταθερά και έχουν υψηλή αξιοπιστία. Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν την υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας μια βιώσιμη και αξιόπιστη εναλλακτική λύση, ιδιαίτερα όταν απαιτείται άμεση απόκριση στις ενεργειακές ανάγκες. Μερικά ακόμα οφέλη τους είναι τα εξής:

- Βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας για σημαντικές φορτίσεις και παροχή ενέργειας κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος και πτώσεων τάσης.
- Βελτίωση της εξισορρόπησης του φορτίου μεταξύ ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (αιολική, ηλιακή) και του δικτύου μεταφοράς και διανομής.
- Η υπεραγωγιμότητα είναι πιο οικολογική σε σύγκριση με τις μπαταρίες, καθώς δεν απαιτεί χημική αντίδραση και δεν παράγει ρύπους.
- Η υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας προσφέρει υψηλό δυναμικό εύρος και σχεδόν απεριόριστες δυνατότητες κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης, με ποσοστό ανάκτησης ενέργειας κοντά στο 100%, βελτιώνοντας έτσι τη χωρητικότητα και την απόδοση των γραμμών μεταφοράς.
- Η συμπαγής σχεδίαση των συστημάτων μακροχρόνιας αποθήκευσης υπεραγωγίμης μαγνητικής ενέργειας είναι εφικτή λόγω της υψηλής λειτουργικής απόδοσης, μειώνοντας το κόστος υλικών και του συστήματος.

Τα συστήματα υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζουν μειονεκτήματα όπως η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και η αστάθεια, ιδίως σε μεγάλα συστήματα, η οποία οφείλεται στο ισχυρό μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν. Αν και πιο οικολογική, πολλές φορές σε μεγάλα συστήματα μπορούν να έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω του παράγοντος αυτού του μαγνητικού πεδίου.

Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με υπεραγωγίμους μαγνήτες ξεκίνησαν με την καθημερινή εξισορρόπηση του φορτίου στο ηλεκτρικό δίκτυο, αν και τελικά αποδείχθηκαν μη ρεαλιστικές λόγω του υψηλού κόστους ψύξης. Οι κύριες εφαρμογές των τεχνολογιών υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας αφορούν τη βελτίωση της σταθερότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και την ποιότητα ισχύος. Η πρώτη πρακτική εφαρμογή τους έγινε το 1981 και κατέδειξε την ικανότητά τους να βελτιώνουν την ικανότητα μεταφοράς μέσω της απόσβεσης των διατοπικών ταλαντώσεων. Έκτοτε, έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες και έχουν αναπτυχθεί πρωτότυπα για τη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων μεταφοράς. Διάφορες μελέτες συνοψίζουν την πρόοδο της τεχνολογίας υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας και αναφέρουν

τις τρέχουσες εξελίξεις στις ΗΠΑ, την Ευρώπη και την Ιαπωνία, συζητώντας παράλληλα και το κόστος των συστημάτων αυτών (Mahlia et al, 2014).



Εικόνα 40: Σύστημα υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας σε σύνδεση με το δίκτυο (Πηγή: Esmaeili et Mehrpooya, 2023)

Παγκόσμιες Εγκαταστάσεις

Η ανάπτυξη των συστημάτων υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας έχει εξελιχθεί σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Αρχικά, οι έρευνες ξεκίνησαν στις αρχές της δεκαετίας του 1970 στο Πανεπιστήμιο του Ουισκόνσιν και άλλα μέρη των Ηνωμένων Πολιτειών, με στόχο την αξιολόγηση της τεχνολογίας και την εξέταση των οικονομικών προοπτικών της. Από τότε, πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για την ανάπτυξη συστημάτων εμπορικής κλίμακας που να είναι οικονομικά ανταγωνιστικά με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες.

Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE) χρηματοδοτεί ένα σημαντικό έργο μέσω του Οργανισμού Προηγμένων Ερευνητικών Έργων για την Ενέργεια (ARPA-E), με στόχο την ανάπτυξη ενός οικονομικά ανταγωνιστικού συστήματος υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας σε εμπορική κλίμακα, με χωρητικότητα από 1 έως 2 MWh. Η ομάδα που συμμετέχει περιλαμβάνει το Εθνικό Εργαστήριο Brookhaven, το Πανεπιστήμιο του Χιούστον, την ABB και τη SuperPower, με συνολική χρηματοδότηση 5,3 εκατομμυρίων δολαρίων, από τα οποία 4,2 εκατομμύρια δολάρια παρέχονται από το DOE. Το σύστημα που αναπτύσσονται είναι σε θέση να απορροφά και να απελευθερώνει έως και 10 MJ ενέργειας σε συχνότητα 0,35 Hz. Μια μονάδα υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας χωρητικότητας 30 MJ (8,4 kWh), με μετατροπέα 10 MW, έχει εγκατασταθεί και τεθεί σε λειτουργία στον υποσταθμό της Bonneville Power Administration στη Tacoma, Ουάσιγκτον.

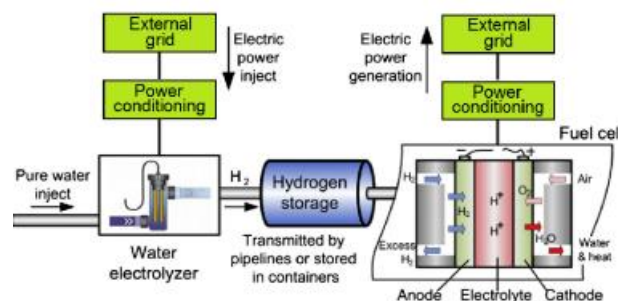
Σε άλλες εφαρμογές, συστήματα υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας έχουν εγκατασταθεί στο βόρειο Ουισκόνσιν για τη σταθεροποίηση του δικτύου από την American Superconductor Company, ενώ στη Βόρεια Καρολίνα και στη Νότια Αφρική έχουν επίσης υλοποιηθεί προγράμματα προστασίας από τις βυθίσεις τάσης στις γραμμές παραγωγής. Στην Ιαπωνία, ένα SMES 5 MW 7 MJ εγκαταστάθηκε για την αντιστάθμιση των βυθίσεων τάσης σε εγκαταστάσεις παραγωγής κρυστάλλων.

3.7 Χημικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

3.7.1 Υδρογόνο (Hydrogen, H₂)

Περιγραφή

Το υδρογόνο (Hydrogen, H₂) στην στοιχειακή του μορφή είναι άχρωμο, άοσμο και άγευστο αμέταλλο, το οποίο είναι εξαιρετικά εύφλεκτο, διατομικό αέριο. Αποτελεί το ελαφρύτερο χημικό στοιχείο και είναι το πιο απλό και διαδεδομένο στοιχείο στον κόσμο. Παρόλο που σπανίζει στη φύση σε ατομική του μορφή, καθώς σχηματίζει ενώσεις με άλλα στοιχεία, υπάρχει μικρή ποσότητα αυτού του αερίου στη γήινη ατμόσφαιρα. Το υδρογόνο μπορεί να σχηματίσει χημικές ενώσεις με σχεδόν όλα τα άλλα στοιχεία, και γι' αυτό μπορεί να παράγει περισσότερες ενώσεις σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο στοιχείο. Μερικά από αυτές τις ενώσεις περιλαμβάνουν το νερό, την αμμωνία, τα οξέα, τα υδροξείδια, διάφορους υδρογονάνθρακες όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, καθώς και ένα μεγάλο ποσοστό των οργανικών ενώσεων.

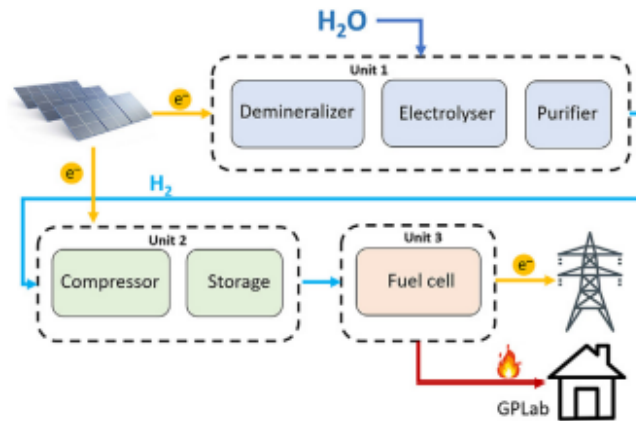


Εικόνα 41: Περιγραφή λειτουργίας τεχνολογίας αποθήκευσης υδρογόνου (Πηγή: Kleperis et al, 2016)

Η χημική εγκατάσταση παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου αποτελείται από τα εξής συστήματα:

- Μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού
- Δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων
- Συμβατική δεξαμενή υδρογόνου
- Συμπιεστή υδρογόνου
- Σταθμό πλήρωσης φιαλών

- Κλειστό σύστημα για ψύξη νερού
- Τέλος σύστημα πεπιεσμένου αέρα



Εικόνα 42: Αναπαράσταση λειτουργίας τεχνολογίας υδρογόνου (Πηγή: Bono et al, 2023)

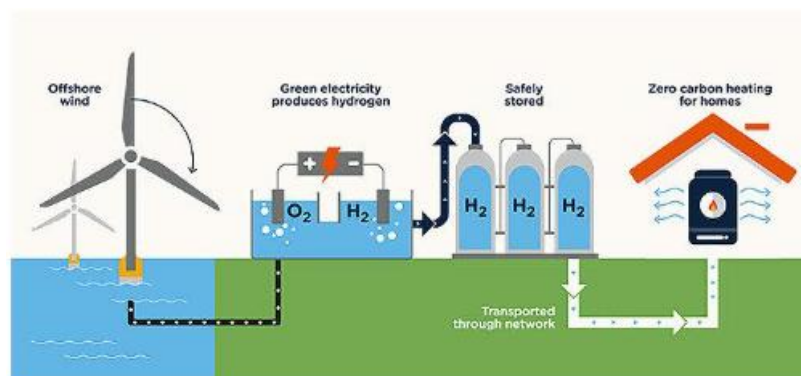
Αυτό το σύστημα αποθήκευσης μπορεί να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια σε υδρογόνο μέσω χημικής μετατροπής. Ο ηλεκτρολύτης μπορεί να διασπάσει το νερό σε οξυγόνο και υδρογόνο. Αυτή η διαδικασία μπορεί να αντιστραφεί, με το υδρογόνο και το οξυγόνο να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, η οποία τροφοδοτεί το δίκτυο. Η αποδοτικότητα κυμαίνεται από 35% έως 55%, η διάρκεια ζωής είναι 5-15 χρόνια και οι κύκλοι ζωής υπερβαίνουν τους 1.000 . Η ενεργειακή πυκνότητα είναι 500-3.000 Wh/m³, 500+ W/kg, και η πυκνότητα ισχύος είναι 500+ W/m³. Το κεφαλαιουχικό κόστος είναι περίπου 500-10.000 \$/kW, και το κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας είναι 6.000-20.000 \$/kWh. Αυτή η τεχνολογία έχει χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά παρουσιάζει μειονεκτήματα όπως η χαμηλή απόδοση μετ' επιστροφής, η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το υψηλό κόστος κεφαλαίου και οι ανησυχίες για την ασφάλεια (Sharma et al, 2022, Symeonidou et Papadopoulos, 2022).

Ένα ακόμα ενδιαφέρον μέρος της τεχνολογίας H₂ είναι οι κυψέλες υδρογόνου (Hydrogen Fuel Cells - HFC) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς εκπομπές ρύπων και μπορούν να εφαρμοστούν στην αυτοκινητοβιομηχανία. Κατά την καύση του, απελευθερώνει μόνο υδρατμούς και έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα κατά βάρος. Η λειτουργία τους περιλαμβάνει τη διάσπαση του υδρογόνου σε ιόντα και ηλεκτρόνια, με τα ιόντα να κινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη και να συνδυάζονται με το οξυγόνο για να σχηματίσουν νερό, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν τρεις τύποι ηλεκτρολύτη: αλκαλική, μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEM) και υψηλής θερμοκρασίας στερεού οξειδίου. Η αλκαλική είναι οικονομικότερη, ενώ η PEM έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα αλλά είναι ακριβή. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί επιτόπου ή να αγοραστεί, με την επιτόπια παραγωγή να είναι φθηνότερη .

Η αποθήκευση υδρογόνου μπορεί να γίνει φυσικά ή με βάση τα υλικά, αλλά κάθε μέθοδος έχει τις προκλήσεις της. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την αποθήκευση υδρογόνου είναι το συμπιεσμένο αέριο και το υγρό υδρογόνο (Georgious et al, 2021). Η τεχνολογία αποθήκευσης υδρογόνου αν και παραμένει ακριβή, η απόδοσή της είναι σημαντική για την ανάπτυξή της (Faisal et al, 2018).

Σήμερα, η κύρια επικέντρωση στην παραγωγή υδρογόνου από ΑΠΕ εστιάζεται σε διάφορες τεχνολογίες, οι οποίες συνοψίζονται ως εξής:

- Ηλεκτρόλυση του νερού, χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια από αιολικά πάρκα, υδροηλεκτρικές δεξαμενές, ηλιακά συστήματα, κύματα ή γεωθερμικές πηγές, καθώς και από την καύση βιομάζας
- Αναμόρφωση καυσίμων που προέρχονται από βιομάζα, καθώς και αεριοποίηση ή πυρόλυση βιομάζας.
- Βιολογικές και βιομηχανικές μέθοδοι όπως η βιοφωτόλυση και η ζύμωση
- Ηλιοθερμικές αντιδράσεις, όπως η θερμόλυση του νερού, εκμεταλλευόμενες τη θερμική ενέργεια από ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις.
- Φωτοηλεκτροχημική παραγωγή μέσω της φωτοηλεκτρόλυσης



Εικόνα 43: Παράδειγμα λειτουργίας τεχνολογιών αποθήκευσης υδρογόνου με αιολικά συστήματα (Green Hydrogen Energy Storage System Market is Set To Fly High in Years to Come, 2023)

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Το υδρογόνο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας, λόγω πολλών πλεονεκτημάτων. Καταρχάς, διαθέτει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους σε σχέση με άλλες εναλλακτικές πηγές. Επιπλέον, είναι αφθονό στο σύμπαν, αποτελώντας το 90% της μάζας του, συνδυάζεται όμως και με άλλα στοιχεία. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά του είναι ότι το προϊόν της χρησιμοποίησής του, είτε μέσω καύσης είτε ηλεκτροχημικής μετατροπής, είναι νερό ή υδρατμοί. Επιπλέον, μπορεί να αποθηκευτεί ως αέριο, υγρό ή στερεό, και είναι δυνατή η μεταφορά του μέσω αγωγών, δεξαμενών ή βυτιοφόρων. Τέλος, είναι φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς η καύση του σε υψηλές θερμοκρασίες με ατμοσφαιρικό αέρα παράγει αμελητέες ποσότητες NO_x.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν και μειονεκτήματα. Καταρχάς η αποθήκευση. Εξαιτίας του εξαιρετικά χαμηλού βάρους του υδρογόνου, η συμπίεση μεγάλων ποσοτήτων σε

μικρότερες δεξαμενές είναι πρόκληση λόγω των υψηλών πιέσεων που απαιτούνται για την υγροποίηση. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης περιλαμβάνουν δεξαμενές με συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο έως 10.000 λίβρες ανά τετραγωνικό ίντσα, υγρό υδρογόνο που ψύχεται στους -253°C σε μονωμένες δεξαμενές, και χημικές ενώσεις υδρογόνου με άλλα υλικά όπως υδρίδια μετάλλων. Ακόμα η έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής αποτελεί μειονέκτημα. Δεν υπάρχει ακόμα ευρεία διανομή υδρογόνου, που θα περιλάμβανε δίκτυα αγωγών υψηλής πίεσης, τρέιλερ και δεξαμενές σε φορτηγά και πλοία. Τέλος η προέλευση ενέργειας, που απαιτείται. Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή υδρογόνου, ειδικά αν προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, ακυρώνει σχεδόν το συνολικό περιβαλλοντικό όφελος, λαμβάνοντας υπόψη και την ενέργεια που χρειάζεται για τη συμπίεση και τη διαχείριση του.

Παρά τις μεγάλες δυνατότητες του πράσινου υδρογόνου, σήμερα μόλις το 1% του παραγόμενου υδρογόνου προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής του. Η υπόλοιπη ποσότητα παράγεται από ορυκτό αέριο, λιθάνθρακα ή λιγνίτη, με εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Επίσης, η χρήση του υδρογόνου στα κτίρια, στις μεταφορές και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ελάχιστη σήμερα. Η βιομηχανία αποτελεί τον κύριο χρήστη υδρογόνου (σε δυλιστήρια, παραγωγή υψηλής θερμότητας, παραγωγή αμμωνίας, μεθανόλης και διεργασίες παραγωγής χάλυβα), αλλά η χρήση αυτή δεν συμβάλλει στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος λόγω της παραγωγής υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα. Για να το πράσινο υδρογόνο αποκτήσει τον κρίσιμο ρόλο που του αναλογεί στην απανθρακοποίηση της ευρωπαϊκής οικονομίας, απαιτούνται μακροπρόθεσμες πολιτικές που θα αυξήσουν τη ζήτηση σε πολλαπλές εφαρμογές και θα ενισχύσουν την έρευνα και ανάπτυξη (R&D). Αυτό θα επιτρέψει στην παραγωγή πράσινου υδρογόνου να γίνει οικονομικά ανταγωνιστική (Energy Storage Technologies: Challenges and Outlook, 2020).

Παγκόσμιες εγκαταστάσεις

Το υδρογόνο έχει πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως:

- Ηλεκτροπαραγωγή: Χρησιμοποιείται σε μίγματα φυσικού αερίου και υδρογόνου, με χώρες όπως η Κορέα και η Ιαπωνία να ηγούνται στη χρήση του. Στην Ιταλία λειτουργεί ήδη αεριοστρόβιλος 16MW με 100% υδρογόνο.
- Παραγωγή συνθετικών καυσίμων: Χρησιμοποιείται για κλιματικά ουδέτερα καύσιμα, με συνδυασμό ενεργειακών φυτών και βιοκαυσίμων.
- Ναυσιπλοία: Χρησιμοποιείται σε μηχανές διπλού καυσίμου και κυψέλες καυσίμου για πλοία.
- Μεταφορές: Χρησιμοποιείται σε βαρέα οχήματα και αεροπορικές μεταφορές, ενώ η αμμωνία προσφέρει ευκολία μεταφοράς.
- Παραγωγή μεθανόλης: Συνδυάζεται με εκπομπές άνθρακα για καύσιμα και άλλες χρήσεις.

- Βιομηχανία: Χρησιμοποιείται σε τομείς με υψηλές εκπομπές, όπως η παραγωγή χάλυβα και τσιμέντου.
- Θέρμανση κτιρίων: Χρησιμοποιείται σε παλιές εγκαταστάσεις με λέβητες υδρογόνου.
- Διυλιστήρια: Χρησιμοποιείται για αποθείωση του πετρελαίου.

Επιπλέον, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκεύεται για μακροχρόνια χρήση από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτή τη στιγμή, χρησιμοποιείται σε μικρό ποσοστό (0,2%) για την ηλεκτροπαραγωγή σε διυλιστήρια, χαλυβουργίες και πετροχημικά εργοστάσια. Αυτό μπορεί να αλλάξει στο μέλλον, καθώς το υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να παράγει ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να επιβαρύνει το περιβάλλον. Η χρήση του γίνεται με δύο τύπους ηλεκτροπαραγωγής.

Πρώτον, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από υδρογόνο γίνεται μέσω κλασικών αεριοστροβίλων ή στροβίλων συνδυασμένου κύκλου που χρησιμοποιούν ορυκτό αέριο ως καύσιμο. Ωστόσο, η ικανότητα των υφιστάμενων στροβίλων να αντέχουν υδρογόνο είναι περιορισμένη σε ποσοστά 3-5%, με λίγους να μπορούν να φτάσουν έως και 30%. Μια εξαίρεση αποτελεί ο σταθμός της Fusina στην Ιταλία, ο οποίος λειτουργεί αποκλειστικά με υδρογόνο από το 2009. Αυτός ο σταθμός, ιδιοκτησίας Enel και με ισχύ 16 MW, παράγει περίπου 60 GWh ετησίως από υδρογόνο που προέρχεται από τη γειτονική βιομηχανική περιοχή της Porto Marghera και τα διυλιστήρια της Polimeri Europa. Ο ειδικός στρόβιλος, ο οποίος μπορεί να λειτουργεί με 100% υδρογόνο, κατασκευάστηκε σε συνεργασία με την General Electric. Παρά τις τεχνικές δυσκολίες, η βιομηχανία εκφράζει αισιοδοξία για την μετατροπή υφιστάμενων στροβίλων ορυκτού αερίου για χρήση με 100% υδρογόνο έως το 2030. Ένα παράδειγμα είναι το έργο HYFLEXPOWER του προγράμματος Horizon 2020, το οποίο στοχεύει στη μετατροπή μιας μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας από ορυκτό αέριο σε χρήση με μίγματα υδρογόνου-ορυκτού αερίου, με μερίδια υδρογόνου από 80% έως 100%. Η μονάδα ανήκει στην Engie και ο στρόβιλος θα προσαρμοστεί από τη Siemens, η οποία ηγείται του έργου, με την συμμετοχή άλλων έξι εταιρών, συμπεριλαμβανομένου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, το οποίο θα πραγματοποιήσει τις αξιολογήσεις του έργου σε οικονομικό, κοινωνικό και περιβαλλοντικό επίπεδο.

Ο δεύτερος τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υδρογόνο είναι μέσω κυψελών υδρογόνου. Αυτές οι κυψέλες μπορούν να έχουν υψηλή απόδοση περίπου 60%, ενώ δεν εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα κατά την διαδικασία λειτουργίας τους. Η λειτουργία τους μπορεί να θεωρηθεί ως αντίστροφη ηλεκτρόλυση, καθώς το υδρογόνο μετατρέπεται σε νερό, θερμότητα και ηλεκτρισμό στην κυψέλη. Παρ' όλα αυτά, αυτά τα συστήματα κυψελών που υπάρχουν σήμερα είναι σημαντικά μικρότερα σε μέγεθος σε σύγκριση με αυτά με στροβίλους που χρησιμοποιούν υδρογόνο ως καύσιμο. Παγκοσμίως, τα συστήματα κυψελών υδρογόνου ανέρχονται μόλις σε 70 MW, αποτελώντας ένα μικρό μέρος των συστημάτων κυψελών καυσίμων γενικά, τα οποία φτάνουν τα 1,6 GW καθολικά και χρησιμοποιούν ως καύσιμο το ορυκτό αέριο. Επιπλέον, οι κυψέλες υδρογόνου έχουν συνήθως μικρότερη διάρκεια ζωής (μεταξύ 10.000 και 40.000 ωρών λειτουργίας) και είναι

ακριβότερες σε σύγκριση με τους στροβίλους. Αν και υπάρχουν αισιόδοξες προβλέψεις για μείωση του κόστους εγκατάστασης των κυψελών υδρογόνου στα 425 δολάρια ανά κιλοβάτ ως το 2030, περίπου τετραπλάσια χαμηλότερο από το σημερινό κόστος των 1600 δολαρίων ανά κιλοβάτ, η ανάπτυξή τους παραμένει προκλητική.

Πέραν της έρευνας και των διαφόρων πιλοτικών έργων, η Κορέα και η Ιαπωνία έχουν θέσει φιλόδοξους στόχους για την ενσωμάτωση του υδρογόνου στην ηλεκτροπαραγωγή, με στόχο τη μείωση του κόστους. Συγκεκριμένα, η Ιαπωνία στοχεύει να επιτύχει ισχύ 1 GW από συστήματα ηλεκτροπαραγωγής με υδρογόνο έως το 2030 και μπορεί να φτάσει τα 15-30 GW στο μέλλον. Από την άλλη, η Κορέα έχει ακόμα πιο φιλόδοξους στόχους, με σχεδιασμό για ισχύ 1,5 GW σε κυψέλες υδρογόνου έως το 2022 και εξελίσσεται προς τα 15 GW μέχρι το 2040 (Energy Storage Technologies: Challenges and Outlook, 2020).

Η παραγωγή υδρογόνου (από φυσικό αέριο με δέσμευση και χρήση του CO₂) και η χρήση του για παραγωγή αμμωνίας ήδη επιτευχθεί στη Σαουδική Αραβία από την Aramco το δε φορτίο απεστάλη στην Ιαπωνία για ηλεκτροπαραγωγή – η Mitsubishi είναι από τους μεγάλους κατασκευαστές που ετοιμάζουν αεριοστροβίλους που κάνουν χρήση υδρογόνου. Το δεσμευμένο CO₂ χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια εν μέρει για παραγωγή μεθανόλης και εν μέρει για διευκόλυνση στην εξόρυξη πετρελαίου. Στην Ελλάδα έχουν προταθεί 4 δυνητικές θέσεις αποθήκευσης υδρογόνου, στους αλατούχους δόμους Τρύφου και Αχυρών Αιτωλοακαρνανίας, Κεφαλονιάς και Κέρκυρας.

Πολλές και μεγάλες προοπτικές έχει η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από μεταβλητές ΑΠΕ (μέσω ηλεκτρολυτών νερού) σε υδρογόνο, το επονομαζόμενο στην προκειμένη περίπτωση πράσινο υδρογόνο. Η μέθοδος συχνά αναφέρεται και ως Power to Gas αφού το παραγόμενο υδρογόνο μπορεί να όχι μόνο χρησιμοποιείται το ίδιο αλλά και να αποτελεί την πρώτη ύλη για Παρασκευή άλλων καυσίμων όπως πχ η αμμωνία, το μεθάνιο, το συνθετικό φυσικό αέριο κλπ. Οι τεχνολογίες υδρογόνου έχουν επί δεκαετίες πολλές χρήσεις πχ στα καύσιμα των πυραύλων προώθησης δορυφόρων στο διάστημα. Είναι η οικονομία υδρογόνου όμως που βρίσκεται ήδη πια σε φάση απογείωσης το τελευταίο διάστημα, νέα πλάνα και νέες πολιτικές ανακοινώνονται, μέσα στους τελευταίους μήνες έχει έρθει πολύ ορμητικά στο προσκήνιο, είναι σαφές ότι θα έχει κεντρικό ρόλο στην ενεργειακή μετάβαση ειδικά στην Ευρώπη κατ' αρχάς. Σύμφωνα με παλιότερες προβλέψεις της IRENA (9/2019, δηλαδή λίγο πριν αρχίσει να ανακοινώνεται η μεγάλη σειρά πλάνων για την οικονομία του υδρογόνου) το κόστος των ηλεκτρολυτών για την παραγωγή “πράσινου” υδρογόνου αναμένεται να φτάσει σε ανταγωνιστικά επίπεδα προς την δεκαετία του 2030 όμως καθώς ήδη (φθινόπωρο 2020) προβλέπεται να αρχίσουν σύντομα να πραγματοποιούνται μεγάλα έργα κι εφαρμογές υδρογόνου, μεγέθους μεγαλύτερου του αναμενόμενου ως πρόσφατα είναι πιθανό να επιταχυνθούν οι εξελίξεις. Και σημειωτέον λόγω της τεχνολογικής συνάφειας μεταξύ ηλεκτρολυτών και κυψελών καυσίμου η ταχύτητα των εξελίξεων είναι πιθανό να αυξηθεί λόγω και αυτής της αλληλεπίδρασης. Συμπερασματικά λοιπόν: υδρογόνο ως καύσιμο, ως ενεργειακό ρευστό, ως πρώτη ύλη για παραγωγή κλιματικά ουδέτερων καυσίμων, ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας. Υδρογόνο για βιομηχανική χρήση αλλά και για οικιακή χρήση (Hydrogen: A renewable energy perspective, 2019).

4. Κριτήρια Αξιολόγησης

4.1 Πυκνότητα Ισχύος

Η πυκνότητα ισχύος (power density) (W/kg) είναι ένα μέτρο της ισχύος εξόδου ανά μονάδα όγκου. Αν και δεν χρησιμοποιείται τόσο συχνά ως μέτρηση όσο η ενεργειακή πυκνότητα, εξακολουθεί να είναι χρήσιμο στη συζήτηση γύρω από ενεργειακά συστήματα (συχνά για φορητές εφαρμογές όπως οι μεταφορές). Εάν ένα σύστημα έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος, τότε μπορεί να παράγει μεγάλες ποσότητες ενέργειας με βάση τον όγκο του (Donev et al, 2024).

Η υψηλή πυκνότητα ισχύος, είναι απαραίτητη όταν υπάρχει ανάγκη για γρήγορη απελευθέρωση ενέργειας. Για παράδειγμα, η εκκίνηση του κινητήρα ενός σκάφους, η οδήγηση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου σε έναν απότομο λόφο ή ακόμη και η λειτουργία ορισμένων ηλεκτρικών εργαλείων απαιτεί μπαταρία με υψηλή πυκνότητα ισχύος.

Επίσης, η υψηλή πυκνότητα ισχύος επιτρέπει στη συσκευή να επαναφορτίζεται γρήγορα. Εάν μια μπαταρία μπορεί να αποδώσει γρήγορα πολλή ενέργεια (υψηλή πυκνότητα ισχύος), συχνά μπορεί επίσης να απορροφήσει γρήγορα πολλή ενέργεια. Αυτή η δυνατότητα γρήγορης επαναφόρτισης μπορεί να είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε ηλεκτρικά οχήματα ή άλλες συσκευές που απαιτούν συχνή ή γρήγορη επαναφόρτιση (Energy Density vs Power Density: What's Their Differences?, 2024).

4.2 Ενεργειακή πυκνότητα

Η ενεργειακή πυκνότητα (Wh/m^3) αναφέρεται στην ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα δεδομένο σύστημα. Μπορεί να μετρηθεί είτε ως ενέργεια ανά μονάδα όγκου είτε ως ενέργεια ανά μονάδα μάζα. Η αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα ενός συστήματος ή υλικού σημαίνει ότι έχει αποθηκεύσει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας.

Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα είναι σημαντική σε εφαρμογές όπου η «μακροζωία» της ισχύος είναι προτεραιότητα. Για παράδειγμα, για την τροφοδοσία ενός τροχόσπιτου (recreational vehicle, RV) σε μεγάλο ταξίδι, μια μπαταρία με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα θα παρέχει μια σταθερή πηγή ενέργειας για μεγαλύτερη περίοδο, επιτρέποντάς τη χρήση συσκευών χωρίς συχνή επαναφόρτιση. Ομοίως, στην αποθήκευση ενέργειας στο σπίτι, μια μπαταρία με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα μπορεί να αποθηκεύσει μια σημαντική ποσότητα ηλιακής ή αιολικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας για να τροφοδοτήσει ένα σπίτι κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα μπορεί επίσης να μειώσει το βάρος και το μέγεθος της μπαταρίας, κάτι που είναι κρίσιμο σε εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά οχήματα, όπου κάθε κιλό μετράει για τη συνολική απόδοση του οχήματος. Επιτρέπει σε μια συσκευή να λειτουργεί περισσότερο μεταξύ των φορτίσεων, αυξάνοντας έτσι την πρακτικότητα και την ευκολία της συσκευής (Energy Density vs Power Density: What's Their Differences?, 2024).

4.3 Κόστος Κεφαλαίου

Το κόστος κεφαλαίου (\$/kWh) (capital cost) περιλαμβάνει τόσο την εγκατάσταση όσο και τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης. Πολλές τεχνολογίες έχουν χαμηλό αρχικό κόστος, αλλά απαιτούν συχνή συντήρηση κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Συχνά χρησιμοποιούνται μονάδες κόστους στην ανάλυση, ιδιαίτερα το κόστος ισχύος (\$/kW) και το κόστος ενέργειας (\$/kWh). Στην πραγματικότητα, η συγκεκριμένη ισχύς και ενέργεια μπορεί να διαφέρουν σημαντικά άρα και το κόστος ενέργειας και ισχύος μπορεί επίσης να διαφέρει.

4.4 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (environmental impact) σχετίζεται με τον αντίκτυπο της κάθε τεχνολογίας στο περιβάλλον. Έχουν σημαντική περιβαλλοντική επίδραση, τόσο θετική, όσο και αρνητική. Από τη μια πλευρά, συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (greenhouse gas emissions), επιτρέποντας τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, με πιο αποδοτικό τρόπο. Αυτό βοηθά στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Από την άλλη πλευρά, η παραγωγή και η διάθεση των τεχνολογιών αυτών μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικά προβλήματα. Η εξόρυξη πρώτων υλών, όπως το λίθιο και το κοβάλτιο, μπορεί να προκαλέσει σοβαρή καταστροφή των τοπικών οικοσυστημάτων και ρύπανση του εδάφους και των υδάτων. Επιπλέον, η ανακύκλωση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας συνιστά μια πρόκληση, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε τοξικά απόβλητα αν δεν πραγματοποιηθεί ορθά. Επομένως, είναι κρίσιμη η ανάπτυξη βιώσιμων πρακτικών και κανονισμών για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενώ παράλληλα προωθείται η χρήση καθαρής ενέργειας.

4.5 Ρυθμός ισχύος

Η ονομαστική ισχύς (power rating) (MW ή kW) αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να χειριστεί το σύστημα κατά τις φάσεις φόρτισης και εκφόρτισης, ενώ η ενέργεια συχνά συνδέεται με τη χωρητικότητα του συστήματος (Amirante et al, 2017).

Οι προδιαγραφές MW και MWh ενός συστήματος αποθήκευσης με μπαταρία (BESS) είναι και οι δύο σημαντικές, αλλά εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς. Η ονομαστική τιμή MW καθορίζει πόση ισχύ μπορεί να αποδώσει το σύστημα ανά πάσα στιγμή, ενώ η ονομαστική τιμή MWh καθορίζει για πόσο χρόνο το σύστημα μπορεί να αποδώσει αυτήν την ισχύ. Με άλλα λόγια, η βαθμολογία σε MW αφορά την «ταχύτητα» παροχής ενέργειας, ενώ η βαθμολογία MWh αφορά τη διάρκεια απόδοσης της (Understanding MW and MWh in Battery Energy Storage Systems (BESS): Key Specifications Explained, 2023).

4.6 Απόδοση κύκλου

Ως απόδοση κύκλου (cycle efficiency) (%) ορίζεται η αναλογία μεταξύ της εκφορτιζόμενης ενέργειας (που παρέχεται στα φορτία) και της ενέργειας που απαιτείται για να αποκατασταθεί η αρχική κατάσταση της φόρτισης. Η αποδοτικότητα λαμβάνει υπόψη τις διάφορες απώλειες που είναι χαρακτηριστικές για κάθε σύστημα, είτε μηχανικές απώλειες για PHES, CAES και FESS είτε ωμικές και χημικές απώλειες για BESS.

4.7 Χρόνος Απόκρισης

Ο χρόνος απόκρισης (response time) (ms) των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα αυτών των συστημάτων. Ο χρόνος απόκρισης αναφέρεται στο διάστημα που απαιτείται για να μεταβεί ένα σύστημα αποθήκευσης από την κατάσταση ηρεμίας στην ενεργή κατάσταση παροχής ή αποθήκευσης ενέργειας. Οι διαφορετικές τεχνολογίες αποθήκευσης, όπως οι μπαταρίες, τα συστήματα συμπιεσμένου αέρα και οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί αντλησιοταμίευσης, έχουν διαφορετικούς χρόνους απόκρισης που εξαρτώνται από τον σχεδιασμό και τη λειτουργία τους. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες λιθίου μπορούν να ανταποκριθούν σε χιλιοστά του δευτερολέπτου, καθιστώντας τις κατάλληλες για άμεσες απαιτήσεις ισχύος. Αντίθετα, οι αντλησιοταμιευτικές εγκαταστάσεις μπορεί να χρειάζονται αρκετά λεπτά για να ξεκινήσουν την παραγωγή ενέργειας, αλλά προσφέρουν σημαντική αποθηκευτική ικανότητα για μακροπρόθεσμη χρήση. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας αποθήκευσης με βάση τον χρόνο απόκρισης είναι κρίσιμης σημασίας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών και τη βελτιστοποίηση της σταθερότητας και της αποδοτικότητας του ενεργειακού δικτύου.

4.8 Διάρκεια Ζωής

Η διάρκεια ζωής (life time) (έτη) αναφέρεται στον αριθμό των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης που μπορεί να χειριστεί το σύστημα χωρίς να χάσει σημαντικά την ισχύ, την ενέργεια και τις δυνατότητές του. Γενικά, τα συστήματα μηχανικής αποθήκευσης έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, ενώ άλλα συστήματα επηρεάζονται από χημική φθορά και ακόμη και φαινόμενα που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

5. Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον πίνακα αποφάσεων στον οποίο εφαρμόστηκε η πολυκριτηριακή μέθοδος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 1:

Τεχνολογίες/κριτήρια	Πυκν. Ισχύος (W/kg)	Ενεργ. Πυκν. (Wh/m ³)	Κόστος Κεφαλαίου (\$/kWh)	Περιβαλλοντικό αποτύπωμα	Power rating	Cycle efficiency (%)	Χρόνος απόκρισης (ms)	Χρόνος ζωής (years)
Αντλησιοταμίευση	0	1	1300	8	2550 MW	80	30000	50
Σύστημα συμπιεσμένου αέρα	0	4.5	600	8	152.5 MW	79.5	60000	30
Σφόνδυλος	950	50	600	2	125 kW	94	500	15
Υπερπυκνωτής	2750	6	200	5	150 kW	92.5	1	20
Υπεραγωγίμο μαγνητικό σύστημα	1250	15	250	8	5.05 MW	96.5	50	20
Μπαταρίες Νατριο-θείο	190	200	2000	8	4.025 MW	85	1	15
Μπαταρίες Ιόντων λιθίου	232.5	350	2600	8	50 kW	90	1	10
Μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής	0	24.5	1050	8	1.515 MW	75	1000	15
Μπαταρίες μολύβδου οξέος	187.5	65	450	8	20.025 MW	82.5	1000	10
Τηγμένο αλάτι	0	290	550	5	30 MW	85	60000	30
Υδρογόνο	500	1750	5250	1	25 MW	45	1000	10

Πίνακας 1: Δεδομένα του πίνακα απόφασης (Πηγή: Sharma et al, 2022)

Για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μετατρέψαμε τα ποιοτικά δεδομένα σε ποσοτικά με την εξής αντιστοίχιση:

Κλίμακα	
1	Small positive
2	Almost zero
3	Zero
4	Very Small
5	Small
6	Important
7	Almost negative
8	Negative
9	Very Negative

Πίνακας 2: Ποσοτικά δεδομένα για το κριτήριο Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα

Έπειτα χρησιμοποιώντας τις απαντήσεις των ειδικών στο ερωτηματολόγιο (Παράρτημα), μετά την μετατροπή σε ποσοτικά μεγέθη (ισότητα = 1, περισσότερο= 3, πολύ περισσότερο = 5) προκύπτει ο συγκεντρωτικός πίνακας, όπου κάθε στοιχείο προκύπτει από την εξής πράξη (μέθοδος AIJ, aggregation of individual judgment):

$$G_{ij} = ((ans_{ij})_1 * (ans_{ij})_2 * \dots * (ans_{ij})_k)^{1/k}, \quad (1)$$

όπου k οι ειδικοί.

Ο συγκεντρωτικός πίνακας φαίνεται παρακάτω:

	Π.Ι.	Ε.Π.	Κ.Κ.	Π.Α.	P.R.	A.Κ.	Χ.Α.	Χ.Ζ.
Πυκνότητα ισχύος (Π.Ι.)	1	0.9522	1.3077	1.1435	0.6327	1.5050	1.0435	1.0889
Ενεργειακή πυκνότητα (Ε.Π.)	1.0502	1	0.7980	0.7235	0.6368	0.8327	1.4422	1.0889
Κόστος Κεφαλαίου (Κ.Κ.)	0.7647	1.2532	1	0.7980	0.7598	0.7235	1.006	0.8745
Περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Π.Α.)	0.8745	1.3821	1.2532	1	0.6368	1	1.006	1.2009
POWER RATING (P.R.)	1.5805	1.5704	1.3161	1.5704	1	0.8745	1.5604	2.2505
Απόκριση κύκλου (Α.Κ.)	0.6645	1.2009	1.3821	1	1.1435	1	0.9184	0.7550
Χρόνος απόκρισης (Χ.Α.)	0.9583	0.6934	0.9936	0.9936	0.6409	0.9936	1	0.6934
Χρόνος ζωής (Χ.Ζ.)	0.9184	0.9184	1.1435	0.8327	0.4444	1.3245	1.4422	1

Πίνακας 3: Συγκεντρωτικός πίνακας απαντήσεων ερωτηματολογίου

6. Μεθοδολογία

6.1 Μέθοδος Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP)

6.1.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP), προτάθηκε από τον T.L. Saaty τη δεκαετία του 1970 και έχει σημαντικά βελτιωθεί από τότε, βασιζόμενη στην αρχή ότι η εμπειρία και η γνώση των ανθρώπων είναι το ίδιο σημαντική με τα διαθέσιμα δεδομένα (Dağdeviren and Yüksel, 2008). Η AHP διαθέτει τρεις βασικές ιδιότητες:

- Είναι αναλυτική, περιλαμβάνοντας μαθηματική και λογική αιτιολόγηση για τη λήψη αποφάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, συμβάλλει στην αποσύνθεση του προβλήματος σε λογικές βάσεις και στη μετατροπή των σκέψεων σε αριθμητικές αξιολογήσεις.
- Το πρόβλημα δομείται σε υπο-προβλήματα με μια ιεραρχία, στοχεύοντας στη μείωση της πολυπλοκότητας.
- Τέλος, η AHP προσφέρει μια σαφή διαδικασία για τη λήψη αποφάσεων, ενσωματώνοντας την εμπειρία των εμπειρογνομόνων στην επιστημονική βάση της, προωθώντας έτσι τη συλλογική λήψη αποφάσεων.

Η AHP παρέχει ένα ορθολογικό πλαίσιο ποσοτικοποιώντας τα κριτήρια και τις εναλλακτικές επιλογές του και για τη συσχέτιση αυτών των στοιχείων με τον συνολικό στόχο. Οι εμπειρογνώμονες και, γενικά, τα εμπλεκόμενα μέρη, συγκρίνουν τη σημασία των κριτηρίων, μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη. Η AHP μετατρέπει αυτές τις αξιολογήσεις σε αριθμούς, οι οποίοι μπορούν να συγκριθούν με όλα τα πιθανά κριτήρια. Αυτή η δυνατότητα ποσοτικοποίησης προκρίνει συχνά την AHP από άλλες τεχνικές λήψης αποφάσεων.

Η AHP είναι πιο χρήσιμη όταν λαμβάνονται αποφάσεις για πολύπλοκα προβλήματα με υψηλό ρίσκο. Ξεχωρίζει από άλλες τεχνικές λήψης αποφάσεων καθώς ποσοτικοποιεί κριτήρια και επιλογές που παραδοσιακά είναι δύσκολο να μετρηθούν. Η AHP βοηθά τους αποφασίζοντας να βρουν αυτή που ταιριάζει καλύτερα στις αξίες τους και στην κατανόησή τους για το πρόβλημα. Επιπλέον, η χρήση της AHP ενισχύει το ηθικό καθώς όλοι αισθάνονται ότι οι φωνές τους ακούγονται και μπορούν τελικά να καταλάβουν πώς ελήφθη μια απόφαση. Έχοντας τη συμμετοχή όλων των ενδιαφερομένων, τα κριτήρια αποκτούν ιδιαίτερη αξία.

Πρόκειται για μια γενική υπολογιστική διαδικασία που συνδυάζει παραγωγική και επαγωγική λογική για την ανάλυση πολλαπλών παραγόντων ταυτόχρονα. Αυτή η μέθοδος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η απλή τεκμηρίωση, η εύκολη επαναληψιμότητα, ο πολυκριτηριακός χαρακτήρας, η κατανόηση του προβλήματος μέσω ιεραρχικής δομής, ο συνδυασμός ποιοτικών και ποσοτικών δεδομένων, καθώς και η εκμετάλλευση της εμπειρίας των ειδικών. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ιδιαίτερα σημαντικά στην ανάλυση.

Η ιεραρχία του προβλήματος ξεκινά με τον καθορισμό των βασικών συνιστωσών, των κριτηρίων, ακολουθούμενη από τη συγκριτική κατάταξή τους, η οποία βασίζεται συνήθως στην εμπειρία των ειδικών. Τέλος, γίνεται η σύνθεση αυτών των κριτηρίων για τη δημιουργία του τελικού αποτελέσματος, το οποίο αποτελεί τη βέλτιστη εναλλακτική λύση βάσει των προτεραιοτήτων και των στόχων που έχει θέσει ο ερευνητής. Παρά την ευρεία διάδοσή της, η μεθοδολογία AHP έχει υποστεί κριτική λόγω της αδυναμίας της να διαχειριστεί την αβεβαιότητα στις αποφάσεις των εμπειρογνομόνων. Η κλασική AHP αναπαριστά τις ανθρώπινες απόψεις με απόλυτες τιμές εντός ενός αυστηρού αριθμητικού πλαισίου. Ωστόσο, στην πράξη, η εκφραστική ακρίβεια των προτιμήσεων είναι περίπλοκο να επιτευχθεί με έναν μοναδικό αριθμό σε μια συγκεκριμένη κλίμακα. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, έχουν αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές της AHP, όπως η ασαφής αναλυτική ιεράρχηση (fuzzy AHP), η οποία βασίζεται στη θεωρία της ασαφούς λογικής (Dağdeviren and Yüksel, 2008).

Επομένως, για να ληφθούν αποφάσεις, να τεθούν προτεραιότητες και να κατανεμηθούν οι πόροι με βέλτιστο τρόπο, συχνά πρέπει να καταταχθούν οι διαθέσιμες επιλογές (εναλλακτικές) και να γίνει επιλογή μεταξύ αυτών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω κατάλληλων κριτηρίων, τα οποία χρειάζεται να σταθμίσουμε και να αξιολογήσουμε τις εναλλακτικές λύσεις απέναντί τους (τα πιο σημαντικά κριτήρια θα πρέπει να έχουν υψηλότερα βάρη). Χρησιμοποιώντας τη διεργασία της αναλυτικής ιεράρχησης (AHP), μπορούμε να εξαγάγουμε τέτοια βάρη πραγματοποιώντας ανά ζεύγη συγκρίσεις κριτηρίων σε σχέση με τη σημασία, την πιθανότητα ή την προτίμησή τους. Η AHP μας επιτρέπει να ενσωματώσουμε τα σχετικά στοιχεία (μαρτυρίες κ.λπ.) με ποιοτικούς παράγοντες (π.χ. ηθικές, αξίες). Επομένως, μπορούμε να αξιολογήσουμε και να αντιμετωπίσουμε σχετικές αντισταθμίσεις (trade-offs).

6.1.2 Περιγραφή

Η μέθοδος της αναλυτικής ιεράρχησης προσφέρει ένα πλαίσιο με σκοπό την οργάνωση ενός προβλήματος λήψης απόφασης, επιτρέποντας την αναπαράσταση και ποσοτικοποίηση των παραμέτρων του, τη σύνθεσή τους προς έναν τελικό στόχο και την αξιολόγηση των εναλλακτικών επιλογών για την επίτευξη αυτού του στόχου. Η προσέγγιση αυτή μοντελοποιεί το πρόβλημα μέσω μιας ιεραρχίας κριτηρίων που έχει δομή δέντρου. Στην κορυφή του βρίσκεται ο κεντρικός στόχος του προβλήματος, δηλαδή η επιθυμητή βέλτιστη απόφαση/επιλογή. Ο κεντρικός στόχος αναλύεται σε κριτήρια, τα οποία με τη σειρά τους διαχωρίζονται περαιτέρω σε υποκριτήρια, μέχρι να φτάσουμε στα βασικά δομικά στοιχεία της ιεραρχίας στη βάση του δέντρου (Aragon, 2017).

Με τη διεξαγωγή συγκρίσεων, η μέθοδος αποδίδει βάρη σε κάθε κριτήριο και βαθμούς προτίμησης σε κάθε κατηγορία, λαμβάνοντας υπόψη την άποψη του αποφασίζοντα ή των ειδικών/εμπειρογνομόνων για το εκάστοτε πρόβλημα. Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει δύο κύριες φάσεις: τη δόμηση της ιεραρχίας και την αξιολόγηση των επιμέρους κριτηρίων και υποκριτηρίων. Η αξιολόγηση βασίζεται στις συγκρίσεις ανά ζεύγη (pairwise comparisons) των διαφόρων κριτηρίων και επιλογών. Τα ερωτήματα που τίθενται

σε αυτή τη φάση έχουν τη μορφή «Δεδομένου ενός κριτηρίου και δύο υποκριτηρίων, ποιο υποκριτήριο συμβάλλει περισσότερο στη διαμόρφωση του κριτηρίου και σε ποιον βαθμό;».

Το αποτέλεσμα αυτών των συγκρίσεων είναι η δημιουργία ενός πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη (comparison matrix). Από κάθε τέτοιο πίνακα, προκύπτει ένα ιδιοδιάνυσμα, το οποίο αντικατοπτρίζει τη μονοδιάστατη κλίμακα, στην οποία ποσοτικοποιούνται οι συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων και υποκριτηρίων σε κάθε επίπεδο της ιεραρχίας. Έτσι, τα στοιχεία κάθε επιπέδου της ιεραρχίας συγκρίνονται μεταξύ τους, ανά ζεύγη, με βάση τη συμβολή τους στην επίτευξη ενός καθορισμένου στόχου, ο οποίος ανήκει στο αμέσως παραπάνω επίπεδο της ιεραρχίας. Αυτή η διαδικασία παράγει μια σχετική κλίμακα μέτρησης της βαρύτητας ή προτεραιότητας κάθε στοιχείου, σε σχέση με τα κριτήρια που βρίσκονται στο ανώτερο επίπεδο και συνδέονται με αυτό. Τα τρία στάδια είναι τα εξής:

- Ένας συγκριτικός πίνακας για κάθε επίπεδο της ιεραρχίας
- Υπολογισμός των συντελεστών βαρύτητας για κάθε στοιχείο της ιεραρχίας
- Εκτίμηση του δείκτη συνέπειας (consistency index)

Αυτά τα τρία στάδια πραγματοποιούνται διαδοχικά για όλα τα επίπεδα της ιεραρχίας. Ο τελικός συντελεστής βαρύτητας που αποδίδεται σε κάθε στοιχείο του χαμηλότερου επιπέδου της ιεραρχίας προκύπτει από τον συνυπολογισμό όλων των επιμέρους συντελεστών βαρύτητας των στοιχείων των ανωτέρων επιπέδων, που σχετίζονται με κάθε εναλλακτική. Αυτή η προσέγγιση είναι γνωστή ως προσθετικός κανόνας και πλεονεκτεί λόγω της εύκολης κατανόησης της κατανομής της συνολικής βαρύτητας στα επιμέρους τμήματά της. Έτσι δημιουργούνται τα διάφορα σενάρια αξιολόγησης των τελικών επιλογών και λήψης απόφασης από τα σύνθετα βάρη που προκύπτουν τα οποία αποδίδουν τη σημαντικότητα των κριτηρίων (Malczewski, 1999).

Η AHP βασίζεται σε τρία αξιώματα. Το πρώτο, το οποίο ονομάζεται "αντίστροφο αξίωμα", δηλώνει ότι υπάρχει ένα συγκριτικό ζεύγος στοιχείων $P_c(E_a, E_b)$, όπου C αναπαριστά την αριθμητική σχέση μεταξύ των a και b , τότε $P_c(E_a, E_b) = 1/P_c(E_b, E_a)$. Για παράδειγμα, εάν το a είναι 5 φορές μεγαλύτερο από το b , τότε το b είναι το $1/5$ του a . Το δεύτερο αξίωμα, το "αξίωμα ομοιογένειας", δηλώνει ότι τα συγκρινόμενα στοιχεία δεν πρέπει να παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Διαφορετικά, το αποτέλεσμα μπορεί να έχει σημαντικό σφάλμα. Η ομοιογένεια αφορά στις τιμές των μεταβλητών και, σε κάποιο βαθμό, στους συντελεστές βαρύτητας. Η λεκτική κλίμακα σύγκρισης ανά ζεύγη στην AHP κυμαίνεται από 1 έως 9 σε σειρά σπουδαιότητας. Η αριθμητική ή γραφική μέθοδος επιλογής από τους ειδικούς (Expert Choice) αποδίδει συντελεστές βαρύτητας στα επιμέρους κριτήρια, επιτρέποντας τη «χαλάρωση» του αξιώματος. Έτσι, αποδίδονται συντελεστές βαρύτητας στο διάστημα 0-1, οι οποίοι έχουν άθροισμα ίσο με 1. Το τρίτο αξίωμα, το "αξίωμα ανεξαρτησίας", δηλώνει ότι οι αξιολογήσεις για τα στοιχεία ή οι προτεραιότητες των στοιχείων σε μια ιεράρχηση δεν εξαρτώνται από στοιχεία σε κατώτερο επίπεδο. Αυτό το αξίωμα εφαρμόζεται μόνο στο πλαίσιο μιας ιεραρχικής σύνθεσης. Ενώ τα δύο πρώτα αξιώματα είναι, βάσει εμπειρίας, απόλυτα συνεπή με τις εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο, το τρίτο αξίωμα απαιτεί προσεκτική εξέταση και συχνά παραβιάζεται.

Οι ιεραρχίες παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη μελέτη των επιπτώσεων των εναλλακτικών επιλογών στους αντικειμενικούς στόχους ενός συστήματος. Με την περιγραφή του προβλήματος μέσω μιας ιεραρχικής δομής, είναι δυνατόν να αναγνωριστούν όλοι οι σημαντικοί παράγοντες και τα επίπεδα στα οποία ανήκουν, καθώς και να μετρηθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των επιπέδων. Οποιοδήποτε πολύπλοκο πρόβλημα που απαιτεί συγκρότηση, μέτρηση και σύνθεση κριτηρίων, αποτελεί ιδανικό πεδίο ανάπτυξης της μεθοδολογίας "Αναλυτικής Ιεράρχησης". Παρόλα αυτά, η ΑHP σπάνια χρησιμοποιείται μόνη της, κυρίως χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες μεθοδολογίες (Forman and Gass, 2001).

Πίνακες ποσοτικής αξιολόγησης των κριτηρίων

Στη μέθοδο αναλυτικής ιεράρχησης, κάθε κριτήριο συγκρίνεται με κάθε άλλο. Για κάθε σύγκριση δύο κριτηρίων, διερωτόμαστε αν το ένα κριτήριο είναι πιο σημαντικό (ή αποτελεσματικό, πιθανό, προτιμητέο κ.λπ.) από το άλλο. Αν ναι, σε ποιο βαθμό; Για να καθορίσουμε το πόσο (πολύ περισσότερο), χρησιμοποιούμε την παρακάτω κλίμακα - μια ποιοτική, διατακτική κλίμακα με ιδιότητες αναλογίας.

Τιμή (i)	Ορισμός	Επεξήγηση
1	Ισότητα	Τα δύο κριτήρια συμβάλλουν το ίδιο στην εναλλακτική
3	Περισσότερο προτιμότερο	Το ένα κριτήριο συμβάλλει περισσότερο από το άλλο στην εναλλακτική
5	Πολύ περισσότερο προτιμότερο	Το ένα κριτήριο συμβάλλει πολύ περισσότερο από το άλλο στην εναλλακτική

Πίνακας 4: Πίνακας με κλίμακα έντασης για τη σύγκριση των κριτηρίων

Εάν δύο κριτήρια έχουν ίδια τιμή, τότε «τα δύο κριτήρια είναι ίσης σημασίας». Αν ένα το κριτήριο είναι ισχυρότερο έναντι ενός άλλου, τότε «το κριτήριο αυτό είναι πιο σημαντικό το άλλο.» Εάν ένα κριτήριο είναι πολύ ισχυρότερο έναντι ενός άλλου, τότε «το κριτήριο αυτό είναι πολύ πιο σημαντικό το άλλο.» Η βαθμολογία έντασης (i) είναι μια κλίμακα που συνοδεύεται από αντίστροφες τιμές (1/i). Για παράδειγμα, αν το Κριτήριο A βαθμολογείται με ένταση i σε σύγκριση με το Κριτήριο B, τότε το Κριτήριο B έχει αντίστροφη τιμή έντασης 1/i σε σύγκριση με το Κριτήριο A. Τα αποτελέσματα για τη βαθμολογία των κριτηρίων προέκυψαν από γνώμες ειδικών που κατεγράφησαν μέσω ειδικά σχεδιασμένου ερωτηματολογίου, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Αφού συλλέχθηκαν οι απαντήσεις των ειδικών για κάθε απάντηση, δημιουργήθηκε ο πίνακας σύγκρισης, ο οποίος περιέχει τις τιμές έντασης που προέκυψαν από το ερωτηματολόγιο.

Εύρεση των βαρών κάθε κριτηρίου

Για κάθε απάντηση, προέκυψε ο πίνακας με τις τιμές έντασης ($=p_{ij}$). Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο τύπος για να ευρεθεί ο κανονικοποιημένος πίνακας αξιολόγησης των κριτηρίων:

$$p_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n p_{ij}} \quad (2)$$

Το αποτέλεσμα θα είναι ο κανονικοποιημένος πίνακας όπου στο επόμενο βήμα της μεθόδου ακολουθεί ο υπολογισμός των ιδιοτιμών και τα ιδιοδιανύσματα του (οι υπολογισμοί γίνανε με το matlab με τις εντολές: $e = eig(A)$, για τις ιδιοτιμές και $[V,D] = eig(A)$ για τα ιδιοδιανύσματα).

Στη συνέχεια, από τα αποτελέσματα επιλέγεται η μεγαλύτερη ιδιοτιμή και το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα. Το τελικό βάρος προκύπτει διαιρώντας κάθε στοιχείο του διανύσματος με το άθροισμα όλων των συνιστωσών του, ώστε τα βάρη να κανονικοποιηθούν.

6.1.3 Εφαρμογή

Η Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP) αποτελεί ένα πολυδιάστατο εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορους τομείς για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Εδώ παρουσιάζονται οι εφαρμογές της AHP σε διάφορους τομείς με συγκεκριμένα παραδείγματα:

Στρατηγική Λειτουργιών (Operations Strategy)

1. Κατασκευή

- **Αποφάσεις κατασκευής ή αγοράς:** Η AHP βοηθά στην απόφαση αν μια επιχείρηση θα πρέπει να κατασκευάσει ένα προϊόν εσωτερικά ή να το αγοράσει από προμηθευτή.
- **Επιλογή εγκαταστάσεων:** Η αξιολόγηση και επιλογή των κατάλληλων εγκαταστάσεων βάσει διαφόρων κριτηρίων όπως το κόστος, η τοποθεσία και οι δυνατότητες παραγωγής.

2. Τεχνολογία

- **Αξιολόγηση πατεντών:** Η AHP χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αξίας των πατεντών.
- **Αξιολόγηση επιπτώσεων της τεχνολογίας:** Αξιολόγηση του αντίκτυπου νέων τεχνολογιών σε μια επιχείρηση.
- **Χαρτογράφηση τεχνολογικών δρόμων:** Σχεδιασμός της μελλοντικής πορείας των τεχνολογικών εξελίξεων.

3. Κοινωνικο-οικονομική στρατηγική

- **Εναλλακτικά καύσιμα:** Αξιολόγηση και επιλογή στρατηγικών για τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων.
- **Διαχείριση εκπομπών:** Ανάπτυξη στρατηγικών για τη μείωση των εκπομπών ρύπων.

4. Περιβαλλοντική στρατηγική

- **Διαχείριση στερεών αποβλήτων:** Υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων.
- **Αξιολόγηση πολιτικών για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής:** Επιλογή και αξιολόγηση των καλύτερων πολιτικών για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.
- **Επιλογή προμηθευτών με περιβαλλοντικά κριτήρια:** Χρήση της AHP για την επιλογή προμηθευτών που τηρούν περιβαλλοντικά κριτήρια.
- **Ανακύκλωση υλικών και διαχείριση ηλεκτρονικών προϊόντων:** Λήψη αποφάσεων για την ανακύκλωση και την απόρριψη ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών προϊόντων.

Σχεδιασμός προϊόντων και διαδικασιών (Product and Process Design)

1. Σχεδιασμός παραγωγής προϊόντων

- **Επιλογή μηχανών κοπής:** Αξιολόγηση και επιλογή των κατάλληλων μηχανών κοπής για την παραγωγή προϊόντων.
- **Στρατηγικές για την εφαρμογή της ταυτόχρονης μηχανικής:** Ανάπτυξη στρατηγικών για την ταυτόχρονη ανάπτυξη προϊόντων και διαδικασιών παραγωγής.

2. Πρόβλεψη

- **Πρόβλεψη απόδοσης της αγοράς ακινήτων:** Αξιολόγηση των τάσεων στην αγορά ακινήτων.
- **Πρόβλεψη τεχνολογικών δυνατοτήτων:** Εκτίμηση των μελλοντικών δυνατοτήτων των τεχνολογιών.

3. Διαχείριση ποιότητας

- **Μέτρηση ποιότητας υπηρεσιών:** Αξιολόγηση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών.
- **Σύγκριση ποιότητας (Benchmarking):** Συγκριτική αξιολόγηση της ποιότητας των προϊόντων ή υπηρεσιών με αντίστοιχες αγορές.

4. Μέτρηση και βελτίωση της απόδοσης

- **Σύγκριση απόδοσης ξενοδοχείων και νοσοκομείων:** Αξιολόγηση της απόδοσης σε τομείς όπως η φιλοξενία και η υγεία.
- **Ανάπτυξη δεικτών προτεραιότητας απόδοσης:** Καθορισμός των κύριων δεικτών απόδοσης που πρέπει να παρακολουθούνται.
- **Ανάπτυξη μέτρων παραγωγικότητας με στόχους:** Δημιουργία μέτρων που βοηθούν στην επίτευξη συγκεκριμένων στόχων παραγωγικότητας.

5. Σχεδιασμός εγκαταστάσεων

- **Σχεδιασμός διάταξης:** Αξιολόγηση και επιλογή της βέλτιστης διάταξης των εγκαταστάσεων παραγωγής.
- **Ταξινόμηση συστημάτων παραγωγής:** Καθορισμός και αξιολόγηση των διαφόρων τύπων συστημάτων παραγωγής.

6. Διαχείριση χωρητικότητας

- **Σχεδιασμός εγκαταστάσεων και εργατικού δυναμικού:** Αξιολόγηση και σχεδιασμός της χωρητικότητας των εγκαταστάσεων και του εργατικού δυναμικού.
- **Αξιολόγηση κινδύνων στις σχέσεις πελάτη-προμηθευτή:** Διαχείριση και αξιολόγηση των κινδύνων στις σχέσεις με τους προμηθευτές.

Σχεδιασμός και προγραμματισμός πόρων (Planning and Scheduling Resources)

1. Κατανομή πόρων

- **Κατανομή άυλων πόρων:** Αξιολόγηση και κατανομή πόρων που δεν είναι υλικοί, όπως ο χρόνος και οι γνώσεις.
- **Προγραμματισμός εκτάκτων ιατρών:** Χρήση της AHP για τον προγραμματισμό των καθηκόντων των ιατρών έκτακτης ανάγκης.

2. Σχεδιασμός εργασίας και μέτρηση εργασίας

- **Επιλογή χειριστών αποθήκης:** Αξιολόγηση και επιλογή των κατάλληλων χειριστών για την αποθήκη.
- **Κατανομή Kanban σε σειριακούς σταθμούς εργασίας:** Βελτιστοποίηση της κατανομής των καρτελών Kanban σε διάφορους σταθμούς εργασίας.

Διαχείριση έργων (Project Management)

1. Εκτίμηση έργων

- **Αξιολόγηση και επιλογή έργων:** Χρήση της AHP για την αξιολόγηση και επιλογή των καταλληλότερων έργων προς υλοποίηση.

2. Προγραμματισμός έργων

- **Ανάλυση παραγόντων κινδύνου σε έργα ERP:** Εκτίμηση των παραγόντων κινδύνου σε έργα λογισμικού ERP.

3. Έλεγχος έργων

- **Αξιολόγηση της απόδοσης του σχεδιασμού:** Έλεγχος και αξιολόγηση της απόδοσης του σχεδιασμού ενός έργου.

Διαχείριση της αλυσίδας εφοδιασμού (Supply chain management)

1. Διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας και logistics

- **Επιλογή προμηθευτών:** Αξιολόγηση και επιλογή των καλύτερων προμηθευτών για την αλυσίδα εφοδιασμού.
- **Επιλογή τοποθεσίας εργοστασίων/αποθηκών:** Αξιολόγηση και επιλογή των κατάλληλων τοποθεσιών για εργοστάσια και αποθήκες.
- **Αξιολόγηση εναλλακτικών στρατηγικών logistics:** Επιλογή των καταλληλότερων στρατηγικών logistics για την επιχείρηση.

2. Ανάθεση σε εξωτερικούς συνεργάτες (Outsourcing)

- **Ανάθεση IT:** Αξιολόγηση και επιλογή των κατάλληλων παρόχων υπηρεσιών IT.
- **Αξιολόγηση επιχειρηματικών διαδικασιών ανάθεσης (BPO):** Επιλογή των καλύτερων παρόχων BPO.
- **Λιανικό εμπόριο στο διαδίκτυο:** Εκτίμηση και επιλογή των κατάλληλων στρατηγικών για το ηλεκτρονικό εμπόριο.

3. Διαχείριση αποθεμάτων

- **Ταξινόμηση αποθεμάτων ανταλλακτικών:** Καθορισμός και αξιολόγηση της διαχείρισης των αποθεμάτων ανταλλακτικών.
- **Διαχείριση βιομηχανίας ανταλλακτικών υπηρεσιών:** Βελτιστοποίηση

Η ΑHP αποδεικνύεται πολύτιμη για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων σε πολλούς τομείς, προσφέροντας μια συστηματική και δομημένη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη πολλαπλά κριτήρια και παράγοντες. Η χρήση της συμβάλλει στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας των αποφάσεων, προάγοντας την ορθολογική και τεκμηριωμένη διαχείριση (Subramanian et Ramanathan, 2012)

6.1.4 Συμπεράσματα

Χρησιμοποιώντας τις συγκρίσεις κατά ζεύγη της μεθόδου AHP, αξιολογούμε εάν ένα κριτήριο υπερέχει έναντι ενός άλλου και, αν ναι, ποια είναι η σχετική ένταση αυτής της υπεροχής. Αυτή η σύγκριση βασίζεται σε μια τακτική κλίμακα με ιδιότητες αναλογίας που ονομάζεται θεμελιώδης κλίμακα. Η μέθοδος AHP μας επιτρέπει να συνδυάσουμε τις ερμηνείες των σχετικών στοιχείων (μαρτυρίες κ.λπ.) με ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως είναι η προτίμηση. Αυτό από μόνο του μετατρέπει την AHP σε ένα απίστευτα ισχυρό και πρακτικό εργαλείο λήψης αποφάσεων. Στη χειρότερη περίπτωση, η AHP μπορεί να βελτιώσει τη λήψη των αποφάσεων μας. Ενώ η AHP απαιτεί κάποια άλγεβρα πινάκων, αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα χρησιμοποιώντας ένα υπολογιστικό λογισμικό (βλ. Παράρτημα). Συμπερασματικά, βλέπουμε ότι η πολυκριτηριακή ανάλυση, πχ μέσω της AHP, είναι απλώς «συστηματική κοινή λογική» που εφαρμόζεται σε σημαντικές αποφάσεις και αυτή η αίσθηση ελέγχου και εμπιστοσύνης θα αυξηθεί με τη χρήση τέτοιων αλγοριθμικών διαδικασιών. Τα πολυκριτηριακά συστήματα αποφάσεων προσφέρουν μια συστηματική προσέγγιση στη λήψη αποφάσεων, καθώς και σε προβλήματα προτεραιοποίησης και βέλτιστης κατανομής πόρων. Ενώ η AHP είναι η πιο κοινή μέθοδος λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων που χρησιμοποιείται παγκοσμίως, δεν χρησιμοποιείται συνήθως στην υγεία και τις ιατρικές επιστήμες εκτός από μερικές εξαιρέσεις. Ωστόσο, τελευταία αρχίζει να κερδίζει δημοτικότητα και σε αυτά τα πεδία.

6.2 Μέθοδος MABAC

6.2.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος MABAC (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison) παρουσιάστηκε από τους Pamular και Cirovic το 2015. Η βασική ιδέα σε αυτή τη μέθοδο είναι ο καθορισμός της απόστασης των εναλλακτικών από την προσεγγιστική περιοχή των συνόρων. Μάλιστα, κάθε εναλλακτική αξιολογείται και κατατάσσεται προσδιορίζοντας τη διαφορά μεταξύ των σχετικών αποστάσεων. Σε αυτή τη μέθοδο, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των κριτηρίων μετατρέπονται σε ποσοτικά χαρακτηριστικά και είναι ανεξάρτητα το ένα από το άλλο.

Η είσοδος καθορίζεται από ένα πίνακα απόφασης διάστασης $n \times m$, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$X = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mj} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}, \quad i=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, n \quad (3)$$

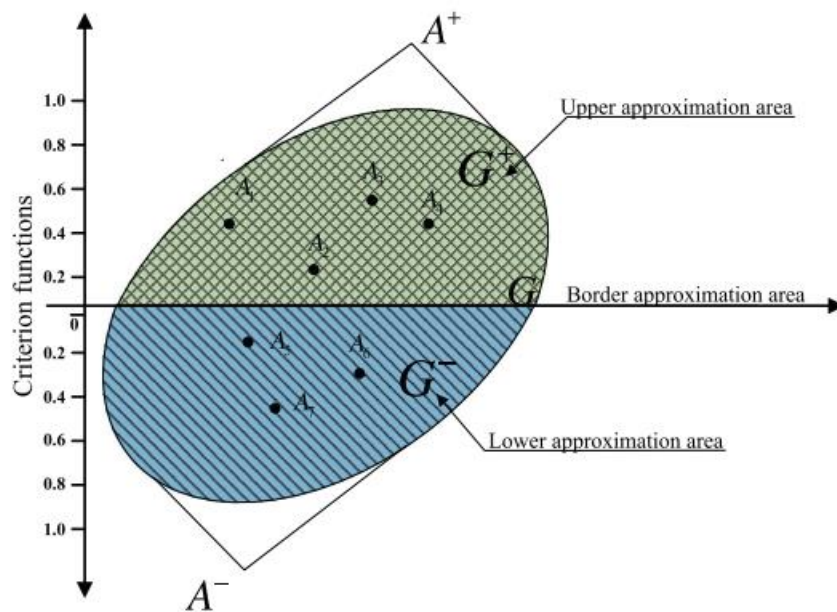
όπου r_{ij} τα στοιχεία του πίνακα αποφάσεων της i -οστής εναλλακτικής απέναντι στο j -οστό κριτήριο. Επίσης, πρέπει να επισημάνουμε ότι χρησιμοποιούνται βάρη $[w_1, w_2, \dots, w_n]$ για τη

στάθμιση των κριτηρίων, όπως είναι αυτά που προκύπτουν με την εφαρμογή της μεθόδου AHP μέσω ειδικού ερωτηματολογίου.

Η μέθοδος MABAC από το 2015 και μέχρι σήμερα, έχει βρει ευρεία εφαρμογή για την αντιμετώπιση πολλών προβλημάτων του πραγματικού κόσμου. Τα κύρια πλεονεκτήματα του πλαισίου πολλαπλών κριτηρίων της MABAC περιλαμβάνουν:

- (i) Παρέχει σταθερά αποτελέσματα σε περίπτωση αλλαγής στις μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται για την εμφάνιση των τιμών κριτηρίου των εναλλακτικών.
- (ii) Η μέθοδος MABAC παρέχει σταθερές λύσεις σε περίπτωση αλλαγής του τύπου της διατύπωσης κριτηρίων, δηλαδή σε περιπτώσεις που το κριτήριο μετατρέπεται από τύπο οφέλους σε τύπο κόστους.
- (iii) Ο αλγόριθμος της μεθόδου MABAC είναι κατάλληλος για την επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων που περιλαμβάνουν πολλά κριτήρια και εναλλακτικές, καθώς η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος δεν περιπλέκεται από την αύξηση του αριθμού των εναλλακτικών και κριτηρίων.

Η μαθηματική διατύπωση της μεθόδου MABAC βασίζεται στον προσδιορισμό της απόστασης των εναλλακτικών από την κατά προσέγγιση περιοχή ορίου (Ω). Με βάση τις καθορισμένες αποστάσεις των εναλλακτικών από το όριο, όλες οι εναλλακτικές ταξινομούνται σε δύο σύνολα, τα οποία ονομάζουμε ανώτερη κατά προσέγγιση περιοχή (Ω^+) και κατώτερη κατά προσέγγιση περιοχή (Ω^-). Εφόσον η ιδανική εναλλακτική είναι στο Ω^+ , όλες οι εναλλακτικές στην παραπάνω κατά προσέγγιση περιοχή ανήκουν σε κυρίαρχες εναλλακτικές. Από την άλλη πλευρά, όλες οι εναλλακτικές που βρίσκονται στο Ω^- ανήκουν σε μη κυρίαρχες εναλλακτικές, καθώς είναι κοντά στην αντι-ιδανική εναλλακτική. Οι εναλλακτικές στο Ω^+ έχουν θετικές τιμές κριτηρίων (q_{ij}), ενώ οι εναλλακτικές στο Ω^- έχουν αρνητικές τιμές κριτηρίων (q_{ij}). Επιλέγεται η εναλλακτική που ανήκει στο Ω^+ σύμφωνα με τον μεγαλύτερο αριθμό κριτηρίων (Torkayesh, 2023).



Εικόνα 44: Σχήμα των περιοχών (Πηγή: Torkayesh, 2023)

6.2.2 Περιγραφή

Η βασική υπόθεση της μεθόδου MABAC αντικατοπτρίζεται στον ορισμό της απόστασης ως συνάρτησης κριτηρίων κάθε παρατηρούμενης εναλλακτικής από την κατά προσέγγιση περιοχή των συνόρων. Στο επόμενο μέρος παρουσιάζεται η διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου MABAC, δηλαδή η μαθηματική διατύπωσή της, η οποία αποτελείται από έξι επιμέρους βήματα:

Βήμα 1. Σχηματισμός αρχικού πίνακα απόφασης (X).

Στο πρώτο βήμα πραγματοποιείται η αξιολόγηση m εναλλακτικών με n κριτήρια. Οι εναλλακτικές παρουσιάζονται με τα διανύσματα $A_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ όπου x_{ij} , είναι η τιμή της εναλλακτικής i με το κριτήριο j ($i = 1, 2, \dots, m$ και $j = 1, 2, \dots, n$).

$$X = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

όπου m ο αριθμός των εναλλακτικών (τεχνολογίες) και n ο αριθμός των κριτηρίων

Βήμα 2. Κανονικοποίηση του πίνακα (X).

Βήμα 3. Υπολογισμός του σταθμισμένου πίνακα (V):

Βήμα 4. Προσδιορισμός του πίνακα προσέγγισης των συνοριακών περιοχών (G).

Βήμα 5. Υπολογισμός πίνακα με τις αποστάσεις από τη συνοριακή περιοχή (Q)

Βήμα 6. Κατάταξη εναλλακτικών (Božanić et al, 2016)

Κανονικοποίηση Πίνακα Απόφασης

Για την κανονικοποίηση του πίνακα απόφασης τα κριτήρια χωρίζονται σε θετικά (επιθυμείται η μεγιστοποίηση) και αρνητικά (επιθυμείται η ελαχιστοποίηση). Στη συνέχεια υπολογίζονται τα r_{ij}^* , δηλαδή τις κανονικοποιημένες τιμές του πίνακα απόφασης της i -οστή εναλλακτική για j -οστό κριτήριο, ως εξής.

- Για θετικού τύπου κριτήρια:

$$r_{ij}^* = \frac{r_{ij} - r_i^-}{r_i^+ - r_i^-}, \quad i=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, n$$

- Για κοστοβόρα κριτήρια:

$$r_{ij}^* = \frac{r_i^+ - r_{ij}}{r_i^+ - r_i^-}, \quad i=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, n$$

Με

$$r_i^- = \min(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$$

$$r_i^+ = \max(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}) \quad (5)$$

Σε αυτό το βήμα προκύπτει ο πίνακας (N) όπως φαίνεται παρακάτω:

$$N = \begin{bmatrix} r_{11}^* & r_{12}^* & \dots & r_{1n}^* \\ r_{21}^* & r_{22}^* & \dots & r_{2n}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1}^* & r_{m2}^* & \dots & r_{mn}^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

r_i^+ αντιπροσωπεύει τις μέγιστες τιμές του παρατηρούμενου κριτηρίου από εναλλακτικές λύσεις και r_i^- αντιπροσωπεύει τις ελάχιστες τιμές του παρατηρούμενου κριτηρίου από εναλλακτικές λύσεις.

Σταθμισμένος Κανονικοποιημένος Πίνακας

Μετά τις υπολογισμένες κανονικοποιημένες τιμές του πίνακα αποφάσεων και των δοθέντων βαρών των κριτηρίων $[w_1, w_2, \dots, w_n]$ (AHP method) ακολουθεί ο υπολογισμός των σταθμισμένων κανονικοποιημένων τιμών (\hat{r}_{ij}). Έτσι προκύπτει ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας (V):

$$V = \begin{bmatrix} \hat{r}_{11} & \hat{r}_{12} & \dots & \hat{r}_{1n} \\ \hat{r}_{21} & \hat{r}_{22} & \dots & \hat{r}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{r}_{m1} & \hat{r}_{m2} & \dots & \hat{r}_{mn} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

Του οποίου στα στοιχεία (v_{ij}) υπολογίζονται με τον εξής τύπο:

$$\hat{r}_{ij} = w_j + r_{ij}^* w_j, \quad i=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, n \quad (8)$$

όπου το w παρουσιάζει συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων (αποτελέσματα της AHP) του κάθε κριτηρίου.

Πίνακας προσέγγισης των συνοριακών περιοχών

Οι τιμές του πίνακα προσέγγισης των συνοριακών περιοχών, υπολογίζονται ως εξής:

$$g_j = (\prod_{i=1}^m \hat{r}_{ij})^{1/m}, \quad j=1, \dots, n \quad (9)$$

Μετά τον υπολογισμό των τιμών g_i , σχηματίζεται ο πίνακας προσέγγισης των συνοριακών περιοχών (G) με τη μορφή $n \times 1$ (το n παρουσιάζει συνολικό αριθμό κριτηρίων με τα οποία εκτελείται η επιλογή των εναλλακτικών που προσφέρονται).

$$G = [g_1 \quad g_2 \quad \dots \quad g_n] \quad (10)$$

Η απόσταση από τη συνοριακή περιοχή

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{m1} & q_{m2} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Η εναλλακτική απόσταση από την κατά προσέγγιση περιοχή συνόρων (q_{ij}) προσδιορίζεται ως η διαφορά των σταθμισμένων στοιχείων μήτρας (V) και των τιμών της κατά προσέγγιση περιοχής συνόρων (G):

$$Q = V - G$$

$$q_{ij} = \hat{r}_{ij} - g_j, \quad i=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, n \quad (12)$$

Η εναλλακτική A_i μπορεί να ανήκει στην κατά προσέγγιση περιοχή περιγράμματος (G), στην άνω κατά προσέγγιση περιοχή (G^+) ή στην κάτω κατά προσέγγιση περιοχή (G^-).

Η άνω κατά προσέγγιση περιοχή (G^+) παρουσιάζει την περιοχή όπου βρίσκεται η ιδανική εναλλακτική λύση, ενώ η κάτω κατά προσέγγιση περιοχή (G^-) παρουσιάζει την περιοχή στην οποία βρίσκεται η αντί-ιδανική εναλλακτική.

Η αναγωγή της εναλλακτικής A_i στην κατά προσέγγιση περιοχή (G , G^+ ή G^-) προσδιορίζεται με βάση την έκφραση:

$$A_i \in \begin{cases} G^+ & \text{αν } q_{ij} > 0 \\ G & \text{αν } q_{ij} = 0 \\ G^- & \text{αν } q_{ij} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Για να επιλεγεί ως το καλύτερο από το σύνολο, το A_i θα πρέπει να ανήκει στην άνω κατά προσέγγιση περιοχή (G^+) με όσο το δυνατόν περισσότερα κριτήρια. Για παράδειγμα, εάν το εναλλακτικό A_i ανήκει στην ανώτερη κατά προσέγγιση περιοχή κατά 5 κριτήρια (από τα συνολικά 6 κριτήρια) και κατά ένα κριτήριο ανήκει στην κατώτερη κατά προσέγγιση περιοχή (G^-), αυτό σημαίνει ότι σύμφωνα με 5 κριτήρια είναι κοντά ή ίση με την ιδανική εναλλακτική, αλλά με ένα κριτήριο είναι κοντά ή ίση με την αντι-ιδανική εναλλακτική.

Συνολικές αποστάσεις

Ο υπολογισμός των συνολικών αποστάσεων προκύπτει ως το άθροισμα των αποστάσεων των εναλλακτικών από την κατά προσέγγιση περιοχή των συνόρων. Αθροίζοντας τα στοιχεία του πίνακα Q κατά γραμμές προκύπτουν οι τελικές τιμές της συνάρτησης κριτηρίων των εναλλακτικών: Υπολογίζονται αθροίζοντας όλες τις προηγούμενες αποστάσεις, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$S_i = \sum_{j=1}^n q_{ij} , \quad i=1, \dots, m \quad (14)$$

Τελική κατάταξη

Οι τιμές των συνολικών αποστάσεων των εναλλακτικών, από τον πίνακα προσέγγισης των συνοριακών περιοχών που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο, καθορίζουν την τελική κατάταξη των εναλλακτικών, με φθίνουσα σειρά.

Η κύρια ιδέα της μεθόδου MABAC έγκειται στον προσδιορισμό της απόστασης των εναλλακτικών από τη συνοριακή περιοχή. Αντίστοιχα, αφού καθοριστεί η πίνακας απόφασης, τα βάρη των κριτηρίων χαρακτηριστικών και μετατροπή των ποιοτικών χαρακτηριστικών σε ποσοτικά, οι εναλλακτικές κατατάσσονται εφαρμόζοντας τα πέντε βήματα παραπάνω. Στην πραγματικότητα, προσδιορίζοντας τον πίνακα της κατά προσέγγιση περιοχής συνόρων ($1 \times n$), προσδιορίζεται η απόσταση των εναλλακτικών από την κατά προσέγγιση περιοχή των συνόρων και οι εναλλακτικές κατατάσσονται υπολογίζοντας τη συνολική απόσταση κάθε εναλλακτικής.

6.2.3 Εφαρμογές

Η μέθοδος MABAC (Multi-Attributive Border Approximation area Comparison) είναι από τις αποτελεσματικότερες και σύγχρονες μεθόδους για την επίλυση προβλημάτων πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων (MCDM). Αναπτύχθηκε για να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων όταν υπάρχουν πολλαπλά κριτήρια που πρέπει να αξιολογηθούν και να συγκριθούν. Οι εφαρμογές της μεθόδου MABAC καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τομέων, συμπεριλαμβανομένων των εξής:

1. **Διοίκηση Επιχειρήσεων και Στρατηγικός Σχεδιασμός:** Η μέθοδος MABAC χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση και επιλογή στρατηγικών επιχειρηματικών αποφάσεων, όπως η επιλογή προμηθευτών, η αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων και η ανάπτυξη νέων προϊόντων.
2. **Βιομηχανία και Παραγωγή:** Στον τομέα της βιομηχανίας, η MABAC βοηθά στην επιλογή των βέλτιστων τεχνολογιών παραγωγής, την αξιολόγηση της απόδοσης των διαδικασιών παραγωγής και τη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας.
3. **Περιβάλλον και Αειφορία:** Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την επιλογή βιώσιμων λύσεων. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου διαχείρισης αποβλήτων ή την αξιολόγηση προγραμμάτων ανανεώσιμης ενέργειας.
4. **Δημόσια Διοίκηση και Πολιτική:** Στον δημόσιο τομέα, η μέθοδος MABAC εφαρμόζεται για την αξιολόγηση και επιλογή πολιτικών, την κατανομή πόρων και τη λήψη αποφάσεων που αφορούν τη βελτίωση της δημόσιας υγείας, την εκπαίδευση και τις υποδομές.
5. **Υγεία και Ιατρική:** Στην ιατρική, η MABAC βοηθά στην επιλογή των καλύτερων θεραπειών, την αξιολόγηση των ιατρικών συσκευών και την ανάπτυξη στρατηγικών για τη διαχείριση των υγειονομικών υπηρεσιών.
6. **Τουρισμός και Φιλοξενία:** Εφαρμόζεται για την αξιολόγηση και βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών, την επιλογή τουριστικών προορισμών και τη στρατηγική ανάπτυξη των τουριστικών επιχειρήσεων.

Η μέθοδος MABAC προσφέρει μια συστηματική και διαφανή προσέγγιση για την αξιολόγηση σύνθετων αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια, παρέχοντας στους αποφασίζοντες τη δυνατότητα να λαμβάνουν τεκμηριωμένες και αντικειμενικές αποφάσεις.

7. Υπολογισμοί

7.1 Μέθοδος AHP

Αφού κατασκευάστηκαν από τα δεδομένα οι πίνακες των απαντήσεων από το ερωτηματολόγιο ακολουθεί η εύρεση των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων του συγκεντρωτικού πίνακα.

```
octave:2> eig(A)
ans =

    8.1446 + 0i
   -0.0592 + 0.9780i
   -0.0592 - 0.9780i
   -0.0406 + 0.5320i
   -0.0406 - 0.5320i
    0.0395 + 0.1501i
    0.0395 - 0.1501i
   -0.0238 + 0i
```

Εικόνα 45: Ιδιοτιμές του συγκεντρωτικού πίνακα απαντήσεων από Octave

```
octave:3> [V,D]=eig(A)
V =

Columns 1 through 4:

   -0.3626 + 0i   -0.2611 + 0.2081i   -0.2611 - 0.2081i   0.2572 + 0.2320i
   -0.3159 + 0i   0.2255 + 0.1120i   0.2255 - 0.1120i   -0.2429 - 0.3372i
   -0.3021 + 0i   0.0674 - 0.2196i   0.0674 + 0.2196i   -0.2380 + 0.0156i
   -0.3475 + 0i   0.0290 - 0.0510i   0.0290 + 0.0510i   -0.0556 + 0.4376i
   -0.4921 + 0i   0.6065 + 0i   0.6065 - 0i   0.4950 + 0i
   -0.3453 + 0i   -0.2423 - 0.4456i   -0.2423 + 0.4456i   -0.1003 - 0.0857i
   -0.2938 + 0i   -0.1287 + 0.0824i   -0.1287 - 0.0824i   0.2700 - 0.2615i
   -0.3300 + 0i   -0.1357 + 0.3193i   -0.1357 - 0.3193i   -0.2103 + 0.0895i

Columns 5 through 8:

    0.2572 - 0.2320i    0.4621 + 0i    0.4621 - 0i    0.4809 + 0i
   -0.2429 + 0.3372i    0.2560 - 0.0604i    0.2560 + 0.0604i   -0.1745 + 0i
   -0.2380 - 0.0156i   -0.1164 - 0.3009i   -0.1164 + 0.3009i    0.5864 + 0i
   -0.0556 - 0.4376i   -0.2047 - 0.3036i   -0.2047 + 0.3036i   -0.5668 + 0i
    0.4950 - 0i   -0.0495 + 0.3868i   -0.0495 - 0.3868i   -0.0202 + 0i
   -0.1003 + 0.0857i    0.1169 + 0.3599i    0.1169 - 0.3599i   -0.1965 + 0i
    0.2700 + 0.2615i   -0.2534 - 0.1780i   -0.2534 + 0.1780i   -0.1790 + 0i
   -0.2103 - 0.0895i   -0.1666 + 0.2452i   -0.1666 - 0.2452i    0.0463 + 0i
```

Εικόνα 46: Ιδιανύσματα του συγκεντρωτικού πίνακα απαντήσεων από Octave

D =

Diagonal Matrix

Columns 1 through 4:

8.1446 +	0i	0	0	0
0	-0.0592 + 0.9780i	0	0	0
0	0	-0.0592 - 0.9780i	0	0
0	0	0	-0.0406 + 0.5320i	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Columns 5 through 8:

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
-0.0406 - 0.5320i	0	0	0	0
0	0.0395 + 0.1501i	0	0	0
0	0	0.0395 - 0.1501i	0	0
0	0	0	-0.0238 +	0i

Εικόνα 47: Πίνακας με ιδιοτιμές του συγκεντρωτικού πίνακα απαντήσεων από Octave

Από τα παραπάνω, η μέγιστη ιδιοτιμή είναι $\lambda_{\max}=8,1446$

Αφού προσδιοριστεί η μέγιστη τιμή των ιδιοτιμών και τα ακόλουθα ιδιοδιανύσματα προκύπτει ένας πίνακας $n \times 1$ και έπειτα υπολογίζονται τα κανονικοποιημένα βάρη:

Wj
0.3626
0.3159
0.3021
0.3475
0.4921
0.3453
0.2938
0.33
Sum=2.78930

Πίνακας 5: Πίνακας με τα βάρη των κριτηρίων

Κανονικοποιημένο Wj
0.129996773
0.113254221
0.108306744
0.124583229
0.176424192
0.1237945
0.105331087
0.118309253

Πίνακας 6: Κανονικοποιημένα βάρη κριτηρίων

7.2 Μέθοδος MABAC

Ο πίνακας απόφασης:

R_{ij}	Πυκν. Ισχύος (W/kg)	Ενεργ. Πυκν. (Wh/m ³)	Κόστος Κεφαλαίου (\$/kWh)	Περιβαλλοντικό αποτύπωμα.	Power rating	Cycle efficiency (%)	Χρόνος Απόκρισης (ms)	Χρόνος Ζωής (χρόνια)
Αντλησιοταμίευση	0	1	1300	8	2550	80	30000	50
Σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα	0	4.5	600	8	152.5	79.5	60000	30
Σφόνδυλος	950	50	600	2	0.125	94	500	15
Υπερ-πυκνωτές	2750	6	200	5	0.15	92.5	1	20
Υπεραγωγίμο μαγνητικό σύστημα αποθήκευσης	1250	15	250	8	5.05	96.5	50	20

Μπαταρία Νατρίου-θείου	190	200	2000	8	4.025	85	1	15
Μπαταρία ιόντων λιθίου	232.5	350	2600	8	0.05	90	1	10
Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής	0	24.5	1050	8	1.515	75	1000	15
Μπαταρία μολύβδου-οξέος	187.5	65	450	8	20.025	82.5	1000	10
Τηγμένο αλάτι	0	290	550	5	30	85	60000	30
Υδρογόνο	5	1750	5250	1	25	45	1000	10
ri+			5250	8			60000	
ri-	0	1			0.05	45		10
(ri+) - (ri-)	2750	1749	5000	7	2549.95	51.5	59999	40

Πίνακας 7: Πίνακας απόφασης

Ο κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης φαίνεται παρακάτω:

R_{ij}^*	Πυκν. Ισχύος (W/kg)	Ενεργ. Πυκν. (Wh/m ³)	Κόστος Κεφαλαίου (\$/kWh)	Περιβαλλοντικό αποτύπωμα.	Power rating	Cycle efficiency (%)	Χρόνος Απόκρισης (ms)	Χρόνος Ζωής (χρόνια)
Αντλησιοταμίευση	0	0	0.79	0	1	0.6796	0.5000	1
Σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα	0	0.0020	0.93	0	0.0598	0.6699	0	0.5
Σφόνδυλος	0.3455	0.0280	0.93	0.8571	2.9412	0.9515	0.9917	0.125
Υπερ-πυκνωτές	1	0.0029	1.01	0.4286	3.9216	0.9223	1	0.25
Υπεραγωγίμο μαγνητικό σύστημα αποθήκευσης	0.4545	0.0080	1	0	0.0020	1	0.9992	0.25

Μπαταρία Νατρίου-θείου	0.0691	0.1138	0.65	0	0.0016	0.7767	1	0.125
Μπαταρία ιόντων λιθίου	0.0845	0.1995	0.53	0	0	0.8738	1	0
Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής	0	0.0134	0.84	0	0.0006	0.5825	0.9833	0.125
Μπαταρία μολύβδου-οξέος	0.0682	0.0366	0.96	0	0.0078	0.7282	0.9833	0
Τηγμένο αλάτι	0	0.1652	0.94	0.4286	0.0117	0.7767	0	0.5
Υδρογόνο	0.0018	1	0	1	0.0098	0	0.9833	0

Πίνακας 8: Κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης

Ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας:

Στάθμιση	Πυκν. Ισχύος (W/kg)	Ενεργ. Πυκν. (Wh/m ³)	Κόστος Κεφαλαίου (\$/kWh)	Περιβαλλοντικό αποτύπωμα.	Power rating	Cycle efficiency (%)	Χρόνος Απόκρισης (ms)	Χρόνος Ζωής (χρόνια)
Αντλησιότητα	0	0.1300	0.1939	0.1246	0.3528	0.2079	0.1580	0.2366
Σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα	0	0.1302	0.2090	0.1246	0.1870	0.2067	0.1053	0.1775
Σφόνδυλος	0.04491	0.1332	0.2090	0.2314	0.1764	0.2416	0.2098	0.1331
Υπερ-πυκνωτές	0.1300	0.1303	0.2177	0.1780	0.1764	0.2380	0.2107	0.1479
Υπεραγωγικό μαγνητικό σύστημα αποθήκευσης	0.0591	0.1309	0.2166	0.1246	0.1768	0.2476	0.2106	0.1479

Μπαταρία Νατρίου-θείου	0.0090	0.1429	0.1787	0.1246	0.1767	0.2200	0.2107	0.1331
Μπαταρία ιόντων λιθίου	0.0110	0.1526	0.1657	0.1246	0.1764	0.2320	0.2107	0.1183
Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής	0	0.1315	0.1993	0.1246	0.1765	0.1959	0.2089	0.1331
Μπαταρία μολύβδου-οξέος	0.0089	0.1341	0.2123	0.1246	0.1778	0.2139	0.2089	0.1183
Τηγμένο αλάτι	0	0.1487	0.2101	0.1780	0.1785	0.2199	0.1053	0.1775
Υδρογόνο	0.0002	0.2433	0.1083	0.2492	0.1782	0.1238	0.2089	0.1183

Πίνακας 9: Σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης

Ο πίνακας προσέγγισης των συνοριακών περιοχών:

border approximation	Πυκν. Ισχύος (W/kg)	Ενεργ. Πυκν. (Wh/m ³)	Κόστος Κεφαλαίου (\$/kWh)	Περιβαλλοντικό αποτύπωμα.	Power rating	Cycle efficiency (%)	Χρόνος Απόκρισης (ms)	Χρόνος Ζωής (χρόνια)
g_j	0	0.1436	0.1896	0.1498	0.1895	0.2103	0.1804	0.1459

Πίνακας 10: Πίνακας προσέγγισης των συνοριακών περιοχών

Η απόσταση από τον πίνακα προσέγγισης των συνοριακών περιοχών:

q_{ij}	Πυκν. Ισχύος (W/kg)	Ενεργ. Πυκν. (Wh/m ³)	Κόστος Κεφαλαίου (\$/kWh)	Περιβαλλοντικό αποτύπωμα.	Power rating	Cycle efficiency (%)	Χρόνος Απόκρισης (ms)	Χρόνος Ζωής (χρόνια)
Αντλησιοταμίευση	0	-0.0136	0.0043	-0.0252	0.1634	-0.0024	-0.0224	0.0907
Σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα	0	-0.0134	0.0194	-0.0252	-0.0025	-0.0036	-0.0751	0.0316
Σφόνδυλος	0.0449	-0.0104	0.0194	0.0816	-0.0130	0.0313	0.0293	-

								0.0128
Υπερ-πυκνωτές	0.1300	-0.0133	0.0281	0.0282	-0.0130	0.0277	0.0302	0.0020
Υπεραγωγίμο μαγνητικό σύστημα αποθήκευσης	0.059	-0.0127	0.0270	-0.0252	-0.0127	0.0373	0.0301	0.0020
Μπαταρία Νατρίου-θείου	0.0090	-0.0007	-0.0109	-0.0252	-0.0128	0.0096	0.0302	- 0.0128
Μπαταρία ιόντων λιθίου	0.0110	0.0090	-0.0239	-0.0252	-0.0130	0.0216	0.0302	- 0.0276
Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγή ς	0	-0.0121	0.0097	-0.0252	-0.0129	-0.0144	0.0285	- 0.0128
Μπαταρία μολύβδου- οξέος	0.0089	-0.0095	0.0227	-0.0252	-0.0117	0.0036	0.0285	- 0.0276
Τηγμένο αλάτι	0	0.0051	0.0205	0.0282	-0.0110	0.0096	-0.0751	0.0316
Υδρογόνο	0.0002	0.0997	-0.0813	0.0994	-0.0113	-0.0865	0.0285	- 0.0276

Πίνακας 11: Πίνακας με τις αποστάσεις από τον πίνακα προσέγγισης των συνοριακών περιοχών

8. Αποτελέσματα

Το αποτέλεσμα της μεθόδου ΑΗΡ είναι τα κανονικοποιημένα βάρη κανονικοποιημένα όπως φαίνονται στον Πίνακα 12:

Κανονικοποιημένο W_j
0.1300
0.1133
0.1083
0.1246
0.1764
0.1238
0.1053
0.1183

Πίνακας 12: Πίνακας αποτελεσμάτων της MABAC

Η κατάταξη, όπως προέκυψε από τη μέθοδο MABAC, φαίνεται στον Πίνακα 13:

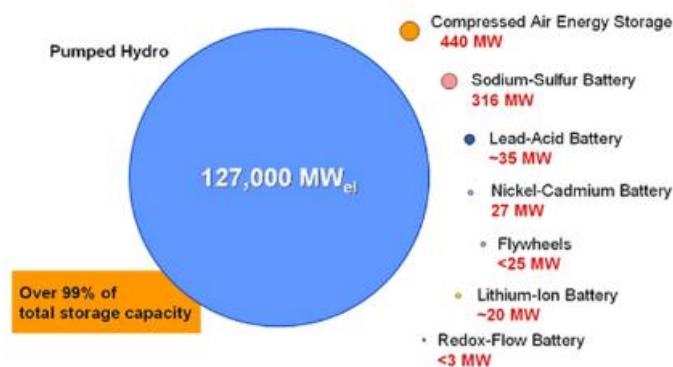
1	Υπερ-πυκνωτές	0.219872054
2	Αντλησιοταμίευση	0.194768555
3	Σφόνδυλος	0.170299953
4	Υπεραγωγίμο μαγνητικό σύστημα αποθήκευσης	0.104939729
5	Υδρογόνο	0.021051503
6	Τηγμένο άλας	0.008967002
7	Μπαταρία μολύβδου-οξέος	-0.010242759
8	Μπαταρία Νατρίου-θείου	-0.013513028
9	Μπαταρία ιόντων λιθίου	-0.017832534
10	Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής	-0.039245835
11	Σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα	-0.068741385

Πίνακας 13: Πίνακας κατάταξης των τεχνολογιών με βάση το αποτέλεσμα της MABAC

Από Πίνακα 13, οι πέντε εναλλακτικές που ξεχωρίζουν είναι οι υπερπυκνωτές ως κυρίαρχη τεχνολογία με τη μεγαλύτερη βαθμολογία. Ακολουθεί η αντλησιοταμίευση, ο σφόνδυλος, το σύστημα υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας και τέλος το υδρογόνο. Τελευταίο στην κατάταξη είναι το σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.

9. Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία, χρησιμοποιήθηκε μια πολυκριτηριακή προσέγγιση λήψης αποφάσεων για την ιεράρχηση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Δείξαμε ότι υπήρξε μια σειρά από ανταγωνιστικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που διαθέτουν διαφορετικές ιδιότητες και κάποιες από αυτές είναι καλύτερες από άλλες. Προκειμένου να εξορθολογισθεί η διαδικασία του ενεργειακού σχεδιασμού, χρειάζεται να ληφθούν υπόψη όλα τα κριτήρια εξέτασης ταυτόχρονα. Επομένως, προσαρμόσαμε την τεχνική πολυκριτηριακής ανάλυσης MABAC που επιτρέπει τη σύγκριση των τεχνολογιών και την ταξινόμησή τους. Ένα τέτοιο πλαίσιο επιτρέπει την εξέταση πολλαπλών τύπων χαρακτηριστικών (κριτηρίων) με σκοπό να επιφέρει το αναμενόμενο αποτέλεσμα. Με την αύξηση της διεύθυνσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ανάγκη για παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε κλίμακα ευρείας χρησιμότητας με τεχνολογίες αποθήκευσης είναι ολοένα και πιο σημαντική για τον μετριασμό των προβλημάτων της διαλείπουσας λειτουργίας, την ασφαλή παροχή ενέργειας σε περιόδους αιχμής της ζήτησης και την υποστήριξη της αξιοπιστίας του συστήματος μεταφοράς. Τα κριτήρια για τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας αξιολογήθηκαν από την απαντήσεις ενός ερωτηματολογίου από ειδικούς, όπου προσαρμόστηκε το διάγραμμα βάρους, μέσω της μεθοδολογίας AHP. Αυτό επέτρεψε επίσης να ελεγχθεί η ευρωστία των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις διαταραχές στο διάγραμμα βάρους. Από την AHP τα μεγαλύτερα βάρη χαρακτήριζαν την πυκνότητα ισχύος και την ονομαστική ισχύ. Με βάση τα δεδομένα σε αυτά τα κριτήρια μεγαλύτερες τιμές έχουν οι υπερπυκνωτές και η αντλησιοταμίευση. Οι τεχνολογίες αυτές εμφανίστηκαν ως οι πιο κυρίαρχες. Από την άλλη πλευρά έχουμε τους υπερπυκνωτές. Μπορούν να παρέχουν ενέργεια ακόμα και κατά τις γρήγορες μεταβολές του φορτίου. Η χωρητικότητά τους είναι σημαντικά μεγαλύτερη από άλλους πυκνωτές, αν και έχουν χαμηλότερα όρια τάσης, που βοηθούν στη γέφυρα μεταξύ ηλεκτρονικών επικοινωνιών και επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα, για την ενίσχυση των μπαταριών, ως εφεδρική μνήμη, για τη βελτίωση της ποιότητας της ενέργειας και σε πολλές άλλες εφαρμογές. Από την άλλη πλευρά η αντλησιοταμίευση είναι μία από τις πιο διαδεδομένες και κατέχουν σημαντική θέση στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας.



Εικόνα 48: Διάγραμμα με ορισμένες τεχνολογίες ενέργειας στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας (Πηγή: Mahlia et al, 2014)

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης μπορούν να αναλάβουν φορτίο σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και να εκφορτίσουν έως και 95% της αποθηκευμένης ενέργειας τους χωρίς να επηρεάζεται η διάρκεια ζωής τους. Το κύριο πλεονέκτημα της αντλησιοταμίευσης είναι ότι προσφέρει εγγυημένη ισχύ, κάτι που δεν μπορούν να εξασφαλίσουν οι

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας λόγω της μεταβλητής τους φύσης. Έτσι, προσφέρεται η δυνατότητα αύξησης της αναλογίας της αιολικής και γενικότερα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε νησιωτικά συστήματα, τα οποία αλλιώς περιορίζονται από τεχνικά και δυναμικά όρια απόκρισης. Σε πολλές βιβλιογραφίες και έρευνες με πολυκριτηριακή αξιολόγηση τεχνολογιών αποθήκευσης συμπεραίνουν ότι η αντήσιοταμίευση κατέχει τις υψηλές θέσεις στις κατατάξεις. Από την άλλη πλευρά έχουμε τις μπαταρίες με τα συστήματα αποθήκευσης συμπίεσως αέρα να κατέχουν τις τελευταίες θέσης της κατάταξης.

Τέλος υπάρχουν πολλοί ακόμα τρόποι ταξινόμησης λαμβάνοντας υπόψιν και άλλα κριτήρια όπως ο μέγιστος κύκλος (Maximum Cycle), ο χρόνος φόρτισης (Charge Time), ο χρόνος εκφόρτισης (Discharge Time), η αυτό-εκφόρτιση (Self-Discharge), οι απώλειες τριβής (Friction Losses) κ.τ.λ.. Ακόμα εκτός από την επιλογή κριτηρίων, η επιλογή μεθοδολογίας παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο. Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός της MABAC και AHP. Πιο συγκεκριμένα καθοριστικό ρόλο στην τελική απόφαση συνέβαλαν οι απόψεις των ειδικών που καθόρισαν τα βάρη, δηλ. τη σημαντικότητα των κριτηρίων. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μέθοδος που να συνυπολογίσει και τις αβεβαιότητες που προκύπτουν. Με αυτό τον τρόπο θα έχουμε ακόμα καλύτερη εικόνα σχετικά με την καλύτερη επιλογή τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε περίπτωσης. Επιπλέον η εργασία αυτή εξετάζει την περίπτωση αποθήκευσης σε μικροδίκτυα. Ωστόσο, τα μικροδίκτυα είναι μονάδες που αποτελούνται και από άλλες συνιστώσες εκτός από την αποθήκευση όπως η παραγωγή, η μεταφορά ενέργειας, ο έλεγχος σε περιπτώσεις smart μικροδικτύου κ.α. Συμπερασματικά ο κλάδος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι στο επίκεντρο των ερευνών για ένα βέλτιστο μέλλον και μπορεί να δεχτεί επιπλέον ανάπτυξη.

10. Παράρτημα

MCDM Storage Systems for Microgrids

The following form is a questionnaire to rate the relative importance of the decision criteria for the storage system technologies for microgrids. You are invited, as experts, to rate according your preference, the following criteria, to the degree of importance you consider.

The after mentioned decision criteria are :

1. Power Density (W/kg)
2. Energy Density (Wh/m³)
3. Capital Cost (\$/kWh)
4. Environmental impact
5. Power rating (kW, MW)
6. Cycle efficiency (%)
7. Responce time (sec, min, ms)
8. Life Time (years)

The criteria are pairwise compared, producing 7 questions which you are called to answer regarding the level of importance of the criteria.

samatakis@gmail.com [Εναλλαγή λογαριασμού](#)



Δεν κοινοποιήθηκε

* Υποδεικνύει απαιτούμενη ερώτηση

A. Power Density *

	A. Extreme Importance over B.	A. Moderate Importance over B.	A. equal to B.	B. Moderate Importance over A.	B. Extreme Importance over A.
B. Energy Density	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Capital Cost	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Environmental impact	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Power rating	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Cycle efficiency	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Responce time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Life Time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

A. Energy Density *

	A. Extreme Importance over B.	A. Moderate Importance over B.	A. equal to B.	B. Moderate Importance over A.	B. Extreme Importance over A.
B.Capital Cost	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Environmental impact	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Power rating	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Cycle efficiency	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Responce time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Life Time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

A. Capital Cost *

	A. Extreme Importance over B.	A. Moderate Importance over B.	A. equal to B.	B. Moderate Importance over A.	B. Extreme Importance over A.
B.Environmental impact	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Power rating	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Cycle efficiency	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Responce time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B.Life Time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

A. Environmental impact *

	A. Extreme Importance over B.	A. Moderate Importance over B.	A. equal to B.	B. Moderate Importance over A.	B. Extreme Importance over A.
B. Power rating	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B. Cycle efficiency	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B. Response time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B. Life Time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

A. Power rating *

	A. Extreme Importance over B.	A. Moderate Importance over B.	A. equal to B.	B. Moderate Importance over A.	B. Extreme Importance over A.
B. Cycle efficiency	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B. Response time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B. Life Time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

A. Cycle efficiency *

	A. Extreme Importance over B.	A. Moderate Importance over B.	A. equal to B.	B. Moderate Importance over A.	B. Extreme Importance over A.
B. Responce time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
B. Life Time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

A. Responce time *

	A. Extreme Importance over B.	A. Moderate Importance over B.	A. equal to B.	B. Moderate Importance over A.	B. Extreme Importance over A.
B. Life Time	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Υποβολή

Εκκαθάριση φόρμας

Αυτό το περιεχόμενο δεν έχει δημιουργηθεί και δεν έχει εγκριθεί από την Google. [Αναφορά κακής χρήσης](#) - [Όροι Παροχής Υπηρεσιών](#) - [Πολιτική απορρήτου](#)

Google Φόρμες

11. Αναφορές

Abdalla, A. N., Nazir, M. S., Tiezhu, Z., Bajaj, M., Sanjeevikumar, P., & Yao, L. (2021). Optimized economic operation of microgrid: combined cooling and heating power and hybrid energy storage systems. *Journal of Energy Resources Technology*, *143*(7), 070906.

Abdelaziz, E. A., Saidur, R., & Mekhilef, S. (2011). A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and sustainable energy reviews*, *15*(1), 150-168.

About microgrids: Features and Benefits. Ανακτήθηκε από <https://www.districtenergy.org/microgrids/about-microgrids97/features> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Aceon, Microgrids. Ανακτήθηκε από <https://www.aceongroup.com/battery-energy-storage/microgrids-uk/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Adetokun, B. B., Oghorada, O., & Abubakar, S. J. A. (2022). Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications. *Journal of Energy Storage*, *55*, 105663.

Alami, A. H. (2020). *Mechanical energy storage for renewable and sustainable energy resources* (p. 98). Cham, Switzerland: Springer.

Albawab, M., Ghenai, C., Bettayeb, M., & Janajreh, I. (2020). Sustainability performance index for ranking energy storage technologies using multi-criteria decision-making model and hybrid computational method. *Journal of Energy Storage*, *32*, 101820.

Ali, M. H., Wu, B., & Dougal, R. A. (2010). An overview of SMES applications in power and energy systems. *IEEE transactions on sustainable energy*, *1*(1), 38-47.

Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019). *New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM)* (Vol. 277, pp. 199-203). Cham: Springer. {βιβλίο Mabac}

Allen, D., Brown, C., Hickey, J., Le, V., & Safuto, R. (2010). Energy storage in the New York electricity markets. *New York Independent System Operator*.

Alotto, P., Guarnieri, M., & Moro, F. (2014). Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, *29*, 325-335.

Al-Saedi, W., Lachowicz, S. W., Habibi, D., & Bass, O. (2012). Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using particle swarm optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *42*(1), 139-149.

AlShafi, M., & Bicer, Y. (2021). Thermodynamic performance comparison of various energy storage systems from source-to-electricity for renewable energy resources. *Energy*, *219*, 119626.

Alvarez, S. (2018), Tesla says its SA battery response time is too fast for utility billing system. Ανακτήθηκε από <https://www.teslarati.com/tesla-sa-battery-response-time-billing-system/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Amirante, R., Cassone, E., Distaso, E., & Tamburrano, P. (2017). Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies. *Energy Conversion and Management*, 132, 372-387.

Amirante, R., Cassone, E., Distaso, E., & Tamburrano, P. (2017). Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies. *Energy Conversion and Management*, 132, 372-387.

Amiryar, M. E., & Pullen, K. R. (2017). A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. *Applied Sciences*, 7(3), 286.

Aneke, M., & Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350-377.

Aragon, T. J. (2017). Deriving criteria weights for health decision making: A brief tutorial.

Asl, S. A. F., Gandomkar, M., & Nikoukar, J. (2020). Optimal protection coordination in the micro-grid including inverter-based distributed generations and energy storage system with considering grid-connected and islanded modes. *Electric Power Systems Research*, 184, 106317.

Aurora Li (2023). Molten salt storage technology: a revolutionary breakthrough in energy storage. Ανακτήθηκε από <https://www.huntkeyenergystorage.com/molten-salt-storage/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Balali, Y., & Stegen, S. (2021). Review of energy storage systems for vehicles based on technology, environmental impacts, and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110185.

Balezentis, T., Streimikiene, D., & Siksnylyte-Butkiene, I. (2021). Energy storage selection for sustainable energy development: The multi-criteria utility analysis based on the ideal solutions and integer geometric programming for coordination degree. *Environmental Impact Assessment Review*, 91, 106675.

Barin, A., Canha, L. N., Abaide, A. R., Magnago, K. F., Wottrich, B., & Machado, R. Q. (2011). Multiple criteria analysis for energy storage selection. *Energy and Power Engineering*, 3(04), 557.

Barin, A., Canha, L. N., da Rosa Abaide, A., & Magnago, K. F. (2009, November). Selection of storage energy technologies in a power quality scenario—the AHP and the fuzzy logic. In *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics* (pp. 3615-3620). IEEE.

Benestad, O., Brinck, L., Emborg, L., Juul-Kristensen, B., Kristiansen, A., Meyer, N. I., ... & Vaattinen, A. (1993). Energy and environment: Nordic energy scenarios for 2010 and 2030. *Energy policy*, 21(12), 1225-1236.

Bisschop, R., Willstrand, O., & Rosengren, M. (2020). Handling lithium-ion batteries in electric vehicles: preventing and recovering from hazardous events. *Fire technology*, 56, 2671-2694.

Bohra, S. S., & Anvari-Moghaddam, A. (2022). A comprehensive review on applications of multicriteria decision-making methods in power and energy systems. *International Journal of Energy Research*, 46(4), 4088-4118.

Bovo, A., Poli, N., Trovo, A., Marini, G., & Guarnieri, M. (2023). Hydrogen energy storage system in a Multi-Technology Microgrid: technical features and performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(32), 12072-12088.

Božanić, D. I., Pamučar, D. S., & Karović, S. M. (2016). Application the MABAC method in support of decision-making on the use of force in a defensive operation. *Tehnika*, 71(1), 129-136.

Bulut, M., & Özcan, E. (2021). A novel approach towards evaluation of joint technology performances of battery energy storage system in a fuzzy environment. *Journal of Energy Storage*, 36, 102361.

Cagnano, A. E. D. T., De Tuglie, E., & Mancarella, P. (2020). Microgrids: Overview and guidelines for practical implementations and operation. *Applied Energy*, 258, 114039.

Cavallo, A. (2007). Controllable and affordable utility-scale electricity from intermittent wind resources and compressed air energy storage (CAES). *Energy*, 32(2), 120-127.

Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in natural science*, 19(3), 291-312.

Chen, T., Jin, Y., Lv, H., Yang, A., Liu, M., Chen, B., ... & Chen, Q. (2020). Applications of lithium-ion batteries in grid-scale energy storage systems. *Transactions of Tianjin University*, 26(3), 208-217.

Cheralathan, M., Velraj, R., & Renganarayanan, S. (2007). Performance analysis on industrial refrigeration system integrated with encapsulated PCM-based cool thermal energy storage system. *International Journal of Energy Research*, 31(14), 1398-1413.

Chinavet, Μπαταρία ροής Vanadium 5kw, Vanadium Redox Flow Battery. Ανακτήθηκε από <https://el.china-vet.com/vanadium-flow-battery-5kw-vanadium-redox-flow-battery.html> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Chong, W. T., Naghavi, M. S., Poh, S. C., Mahlia, T. M. I., & Pan, K. C. (2011). Techno-economic analysis of a wind-solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application. *Applied Energy*, 88(11), 4067-4077.

Choudhury, S. (2022). Review of energy storage system technologies integration to microgrid: Types, control strategies, issues, and future prospects. *Journal of Energy Storage*, 48, 103966.

Church, B. (2021) Quebec Town Begins Operating Clean Energy Microgrid Following Fossil Fuel Disaster. Ανακτήθηκε από <https://www.microgridknowledge.com/editors-choice/article/11427879/quebec-town-begins-operating-clean-energy-microgrid-following-fossil-fuel-disaster> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Cima, Lac-Mégantic Microgrid. Ανακτήθηκε από <https://www.cima.ca/en/project/lac-megantic-microgrid/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Clemente, A., & Costa-Castelló, R. (2020). Redox flow batteries: A literature review oriented to automatic control. *Energies*, 13(17), 4514.

Çolak, M., & Kaya, İ. (2020). Multi-criteria evaluation of energy storage technologies based on hesitant fuzzy information: A case study for Turkey. *Journal of Energy Storage*, 28, 101211.

Dağdeviren, M., & Yüksel, İ. (2008). Developing a fuzzy analytic hierarchy process (AHP) model for behavior-based safety management. *Information sciences*, 178(6), 1717-1733.

Daim, T. U., Li, X., Kim, J., & Simms, S. (2012). Evaluation of energy storage technologies for integration with renewable electricity: Quantifying expert opinions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 3, 29-49.

Datta, U., Kalam, A., & Shi, J. (2021). A review of key functionalities of battery energy storage system in renewable energy integrated power systems. *Energy Storage*, 3(5), e224.

Dhundhara, S., Verma, Y. P., & Williams, A. (2018). Techno-economic analysis of the lithium-ion and lead-acid battery in microgrid systems. *Energy conversion and management*, 177, 122-142.

Dunlap, R. A. (2022). *Renewable Energy: Volumes 1–3*. Springer Nature.

EERA, Pumped Hydro Energy Storage (2016). Ανακτήθηκε από https://www.eera-energystorage.eu/component/attachments/?task=download&id=683:EERA_Factsheet_Pumped-Hydro-Energy-Storage (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

EERA, Superconducting Magnetic Energy Storage. Ανακτήθηκε από https://www.eera-energystorage.eu/component/attachments/?task=download&id=566:EERA_JPES_SP5_Fact_sheet_final (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Energy Density vs Power Density: What's Their Differences?. Ανακτήθηκε από <https://www.polinovelgroup.com/energy-density-vs-power-density-differences/>

Energy Storage Technologies: Challenges and Outlook (2020, Δεκεμβριος). Ανακτήθηκε από https://thegreentank.gr/wp-content/uploads/2020/12/202012_StorageTechnologies_GreenTankReport.pdf (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Esmaeili, M. S., & Mehrpooya, M. (2023). Modeling and exergy analysis of an integrated cryogenic refrigeration system and superconducting magnetic energy storage. *Journal of Energy Storage*, 73, 109033.

Eunice, Tilos Project. Ανακτήθηκε από <https://eunice-group.com/projects/tilos-project/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

European Commission: The European Green Deal. Ανακτήθηκε από https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

European Green Deal Call: €1 billion investment to boost the green and digital transition (2020). Ανακτήθηκε από <https://trimis.ec.europa.eu/news/european-green-deal-call-eu1-billion-investment-boost-green-and-digital-transition> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Faisal, M., Hannan, M. A., Ker, P. J., Hussain, A., Mansor, M. B., & Blaabjerg, F. (2018). Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges. *Ieee Access*, 6, 35143-35164.

Forman, E. H., & Gass, S. I. (2001). The analytic hierarchy process—an exposition. *Operations research*, 49(4), 469-486.

Fu, Q., Hamidi, A., Nasiri, A., Bhavaraju, V., Krstic, S. B., & Theisen, P. (2013). The Role of Energy Storage in a Microgrid Concept: Examining the opportunities and promise of microgrids. *IEEE Electrification Magazine*, 1(2), 21-29.

Ganthia, B. P., Suriyakrishnaan, K., Prakash, N., Harinarayanan, J., Thangaraj, M., & Mishra, S. (2022). Comparative Analysis on Various Types of Energy Storage Devices for Wind Power Generation. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2161, No. 1, p. 012066). IOP Publishing.

Georgious, R., Refaat, R., Garcia, J., & Daoud, A. A. (2021). Review on energy storage systems in microgrids. *Electronics*, 10(17), 2134.

Giama, E. (2021). Review on ventilation systems for building applications in terms of energy efficiency and environmental impact assessment. *Energies*, 15(1), 98.

Gim, B., & Kim, J. W. (2014). Multi-criteria evaluation of hydrogen storage systems for automobiles in Korea using the fuzzy analytic hierarchy process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(15), 7852-7858.

Green Hydrogen Energy Storage System Market is Set To Fly High in Years to Come (2023, 14 Ιουνίου). Ανακτήθηκε από <https://www.openpr.com/news/3088881/green-hydrogen-energy-storage-system-market-is-set-to-fly-high> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Gumus, A. T., Yayla, A. Y., Çelik, E., & Yildiz, A. (2013). A combined fuzzy-AHP and fuzzy-GRA methodology for hydrogen energy storage method selection in Turkey. *Energies*, 6(6), 3017-3032.

Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6-7), 1513-1522.

Hartono, B. S., Budiyanto, Y., & Setiabudy, R. (2013, June). Review of microgrid technology. In *2013 international conference on QiR* (pp. 127-132). IEEE.

Hesse, H. C., Schimpe, M., Kucevic, D., & Jossen, A. (2017). Lithium-ion battery storage for the grid—A review of stationary battery storage system design tailored for applications in modern power grids. *Energies*, 10(12), 2107.

How supercapacitors address modern electrical supply challenges. Ανακτήθηκε από <https://www.eaton.com/us/en-us/markets/buildings/knowledge-center/eaton-how-supercapacitors-address-modern-electrical-supply-challenges-white-paper.html> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Hsu, Y. L., Lee, C. H., & Kreng, V. B. (2010). The application of Fuzzy Delphi Method and Fuzzy AHP in lubricant regenerative technology selection. *Expert systems with applications*, 37(1), 419-425.

Huang, P. H., Kuo, J. K., & Huang, C. Y. (2016). A new application of the UltraBattery to hybrid fuel cell vehicles. *International Journal of Energy Research*, 40(2), 146-159.

Hüttermann, L., & Span, R. (2019). Influence of the heat capacity of the storage material on the efficiency of thermal regenerators in liquid air energy storage systems. *Energy*, 174, 236-245.

Hydrogen: A renewable energy perspective (2019, Σεπτέμβρης). Ανακτήθηκε από <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Hydropower / Pumped Hydro Energy Storage. Ανακτήθηκε από <https://arena.gov.au/renewable-energy/pumped-hydro-energy-storage/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Hyytinen, T. (2013). Hybrid power generation concept for small grids.

Inkwood Research, GLOBAL FLYWHEEL ENERGY STORAGE MARKET FORECAST 2020-2028. Ανακτήθηκε από <https://inkwoodresearch.com/reports/flywheel-energy-storage-market/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Intepe, G., Bozdog, E., & Koc, T. (2013). The selection of technology forecasting method using a multi-criteria interval-valued intuitionistic fuzzy group decision making approach. *Computers & Industrial Engineering*, 65(2), 277-285.

J.M.K.C. Donev et al. (2024). Energy Education. Available: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Power_density (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Kamibayashi, M., & Tanaka, K. (2001, November). Recent sodium sulfur battery applications. In *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No. 01CH37294)* (Vol. 2, pp. 1169-1173). IEEE.

Khishtandar, S., Zandieh, M., & Dorri, B. (2017). A multi criteria decision making framework for sustainability assessment of bioenergy production technologies with hesitant fuzzy linguistic term sets: The case of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 1130-1145.

Kleperis, J., Fylenko, V. V., Vanags, M., Volkovs, A., Lesnicenoks, P., Grinberga, L., & Solovey, V. V. (2016). Energy storage solutions for small and medium-sized self-sufficient alternative energy objects. *Kleperis, VV Fylenko, M. Vanags, A. Volkovs, P. Lesnicenoks, L. Grinberga, VV Solovey//Bulgarian Chemical Communications.–Sofia: Bulgarian Academy of Sciences, Union of Chemists in Bulgaria*, 48, 290-296.

Koochi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27, 101047.

Koseoglou, M., Tsioumas, E., Jabbour, N., & Mademlis, C. (2018, December). An improved active Li-ion battery equalization scheme for enhancing the performance of a nearly zero energy building and electric vehicle microgrid. In *2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC)* (pp. 1-7). IEEE.

- Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T., & Zeraouli, Y. (2014). Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *120*, 59-80.
- Kumar, P., & Kumar, V. (2020, July). Energy storage options for enhancing the reliability of Power system in the presence of Renewable Energy Sources. In *2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)* (pp. 1071-1076). IEEE.
- Kusakana, K. (2021). Optimal energy management of a retrofitted Rubber Tyred Gantry Crane with energy recovery capabilities. *Journal of Energy Storage*, *42*, 103050.
- Lee, K., Son, K. M., & Jang, G. (2009, October). Smart storage system for seamless transition of customers with intermittent renewable energy sources into microgrid. In *INTELEC 2009-31st International Telecommunications Energy Conference* (pp. 1-5). IEEE.
- Lehner, M., Tichler, R., Steinmüller, H., & Koppe, M. (2014). *Power-to-gas: technology and business models* (pp. 7-17). Cham: Springer International Publishing.
- Li, L., Liu, P., Li, Z., & Wang, X. (2018). A multi-objective optimization approach for selection of energy storage systems. *Computers & Chemical Engineering*, *115*, 213-225.
- Li, X., & Palazzolo, A. (2022). A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities. *Journal of Energy Storage*, *46*, 103576.
- Liu, H. C., You, J. X., Lu, C., & Shan, M. M. (2014). Application of interval 2-tuple linguistic MULTIMOORA method for health-care waste treatment technology evaluation and selection. *Waste Management*, *34*(11), 2355-2364.
- Liu, Y., & Du, J. L. (2020). A multi criteria decision support framework for renewable energy storage technology selection. *Journal of Cleaner Production*, *277*, 122183.
- Lund, H., & Salgi, G. (2009). The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems. *Energy conversion and management*, *50*(5), 1172-1179.
- Mahela, O. P., & Shaik, A. G. (2016). Comprehensive overview of grid interfaced wind energy generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *57*, 260-281.
- Mahlia, T. I., Masjuki, H. H., & Choudhury, I. A. (2002). Potential electricity savings by implementing energy labels for room air conditioner in Malaysia. *Energy Conversion and Management*, *43*(16), 2225-2233.
- Mahlia, T. M. I., Abdulmuin, M. Z., Alamsyah, T. M. I., & Mukhlisien, D. (2001). An alternative energy source from palm wastes industry for Malaysia and Indonesia. *Energy conversion and management*, *42*(18), 2109-2118.
- Mahlia, T. M. I., Saktisahdan, T. J., Jannifar, A., Hasan, M. H., & Matseelar, H. S. C. (2014). A review of available methods and development on energy storage; technology update. *Renewable and sustainable energy reviews*, *33*, 532-545.
- Maisanam, A. K. S., Biswas, A., & Sharma, K. K. (2020). An innovative framework for electrical energy storage system selection for remote area electrification with renewable energy system: Case of a remote village in India. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *12*(2).
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & sons.

Mekhilef, S., Siga, S., & Saidur, R. (2011). A review on palm oil biodiesel as a source of renewable fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1937-1949.

Microgrid ή Μικροδίκτυα. Ανακτήθηκε από <https://www.geogreen.gr/microgrid-i-mikrodiktyo/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Mirzaei, M. A., Zare Oskouei, M., Mohammadi-Ivatloo, B., Loni, A., Zare, K., Marzband, M., & Shafiee, M. (2020). Integrated energy hub system based on power-to-gas and compressed air energy storage technologies in the presence of multiple shiftable loads. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(13), 2510-2519.

Montignac, F., Mousseau, V., Bouyssou, D., Aloulou, M. A., Rousval, B., & Damart, S. (2015). An MCDA approach for evaluating hydrogen storage systems for future vehicles. *Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria: Case Studies*, 501-532.

Noack, J., Roznyatovskaya, N., Herr, T., & Fischer, P. (2015). The chemistry of redox-flow batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, 54(34), 9776-9809.

Olabi, A. G., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M. A., & Alami, A. H. (2021). Compressed air energy storage systems: Components and operating parameters—A review. *Journal of Energy Storage*, 34, 102000.

Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Cañizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., ... & Hatziargyriou, N. D. (2014). Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on smart grid*, 5(4), 1905-1919.

Oliveira, D. Q., Saavedra, O. R., Santos-Pereira, K., Pereira, J. D., Cosme, D. S., Veras, L. S., ... & Riboldi, V. B. (2021). A critical review of energy storage technologies for microgrids. *Energy Systems*, 1-30.

Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(9), 2265-2300.

Onar, S. C., Oztaysi, B., Otay, İ., & Kahraman, C. (2015). Multi-expert wind energy technology selection using interval-valued intuitionistic fuzzy sets. *Energy*, 90, 274-285.

Özkan, B., Kaya, İ., Cebeci, U., & Başlıgil, H. (2015). A hybrid multicriteria decision making methodology based on type-2 fuzzy sets for selection among energy storage alternatives. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 8(5), 914-927.

Oztaysi, B. (2014). A decision model for information technology selection using AHP integrated TOPSIS-Grey: The case of content management systems. *Knowledge-Based Systems*, 70, 44-54.

Pacific Data Integrators, The Pros and Cons of Microgrids (2021, 27 Ιουλίου). Ανακτήθηκε από <https://www.pacificdataintegrators.com/blogs/microgrid-pros-and-cons> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Pan, F., & Wang, Q. (2015). Redox species of redox flow batteries: A review. *Molecules*, 20(11), 20499-20517.

Parnell, J. (2017). NGK's NAS sodium sulfur grid-scale batteries in depth, PVTECH. Ανακτήθηκε από <https://www.pv-tech.org/sponsored-ngks-nas-sodium-sulfur-grid-scale-batteries-in-depth/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Peng, W. (2011). Accurate circuit model for predicting the performance of lead-acid AGM batteries.

Pennoni, Navy Yard Microgrid. Ανακτήθηκε από <https://www.pennoni.com/projects/navy-yard-microgrid/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Peter, A. (2012). Microgrids distributed energy systems for campus, military, remote, community, and commercial & industrial power applications: market analysis and forecasts. *Pike Report*.

Poullikkas, A. (2013). A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 27, 778-788.

Purohit, I., Sundaray, S., & Motiwala, S. (2018). Familiarization with energy storage technologies and their relevance for renewable energy (RE) based power generation. *Low Carbon Energy Supply: Trends, Technology, Management*, 273-326.

Purohit, I., Sundaray, S., & Motiwala, S. (2018). Familiarization with energy storage technologies and their relevance for renewable energy (RE) based power generation. *Low Carbon Energy Supply: Trends, Technology, Management*, 273-326.

Qu, J., Meng, X., & You, H. (2016). Multi-stage ranking of emergency technology alternatives for water source pollution accidents using a fuzzy group decision making tool. *Journal of hazardous materials*, 310, 68-81.

Qu, J., Meng, X., Jiang, X., You, H., Wang, P., & Shoemaker, C. A. (2019). Effective aggregation of expert opinions to inform environmental management: An integrated fuzzy group decision-making framework with application to cadmium-contaminated water treatment alternatives evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 209, 834-845.

Rahman, M. M., Oni, A. O., Gemechu, E., & Kumar, A. (2020). Assessment of energy storage technologies: A review. *Energy Conversion and Management*, 223, 113295.

Raza, S. S., Janajreh, I., & Ghenai, C. (2014). Sustainability index approach as a selection criteria for energy storage system of an intermittent renewable energy source. *Applied Energy*, 136, 909-920.

Redox Flow Batteries: Potential, Alternatives and Challenges (2024, 14 Μαΐου). Ανακτήθηκε από <https://cicenergigune.com/en/blog/redox-flow-batteries-potential-alternatives-challenges> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Rehman, S., Al-Hadhrani, L. M., & Alam, M. M. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 586-598.

Ren, J., & Ren, X. (2018). Sustainability ranking of energy storage technologies under uncertainties. *Journal of cleaner production*, 170, 1387-1398.

Rezaeimozafer, M., Monaghan, R. F., Barrett, E., & Duffy, M. (2022). A review of behind-the-meter energy storage systems in smart grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 164, 112573.

Rising renewable energy installations inflate the demand for stationary lead acid batteries market (2021, 11 Αυγούστου). Ανακτήθηκε από <https://www.canadianmanufacturing.com/manufacturing/rising-renewable-energy->

[installations-inflate-the-demand-for-stationary-lead-acid-batteries-market-272174/](#)

(τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Saidur, R., Atabani, A. E., & Mekhilef, S. (2011). A review on electrical and thermal energy for industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2073-2086.

Salkuti, S. R. (2020). Energy storage technologies for smart grid: a comprehensive review. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 14(1), 39-48.

Satkin, M., Noorollahi, Y., Abbaspour, M., & Yousefi, H. (2014). Multi criteria site selection model for wind-compressed air energy storage power plants in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 579-590.

Sharma, P., Salkuti, S. R., & Kim, S. C. (2022). Advancements in energy storage technologies for smart grid development. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 12(4), 3421.

Simeon, M., Adoghe, A. U., Wara, S. T., & Oloweni, J. O. (2018, June). Renewable energy integration enhancement using energy storage technologies. In *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica* (pp. 864-868). IEEE.

Sinovoltaics, Smart MicroGrids. Ανακτήθηκε από <https://sinovoltaics.com/learning-center/system-design/smart-microgrids/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Smart microgrid controller. Ανακτήθηκε από <https://smartmicrogridcontroller.com/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Sofla, M. A., & Gharehpetian, G. B. (2011). Dynamic performance enhancement of microgrids by advanced sliding mode controller. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(1), 1-7.

Subramanian, N., & Ramanathan, R. (2012). A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management. *International Journal of Production Economics*, 138(2), 215-241.

Sufyan, M., Rahim, N. A., Aman, M. M., Tan, C. K., & Raihan, S. R. S. (2019). Sizing and applications of battery energy storage technologies in smart grid system: A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(1).

Super Capacitor που λειτουργεί, κύκλωμα φόρτισης & εφαρμογές (2021, 18 Οκτωβρίου). Ανακτήθηκε από <https://el.fmuser.net/content/?18957.html> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Supercapacitors – A Viable Alternative to Lithium-Ion Battery Technology? (2020, 11 Νοεμβρίου). Ανακτήθηκε από <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-mobility/supercapacitors-a-viable-alternative-to-lithium-ion-battery-technology/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Symeonidou, M., & Papadopoulos, A. M. (2022). Selection and dimensioning of energy storage systems for standalone communities: a review. *Energies*, 15(22), 8631.

Szablowski, L., Krawczyk, P., Badyda, K., Karellas, S., Kakaras, E., & Bujalski, W. (2017). Energy and exergy analysis of adiabatic compressed air energy storage system. *Energy*, 138, 12-18.

Tameghe, T. T., Wamkeue, R., & Kamwa, I. Modelling and Simulation of a Flywheel Energy Storage System for Microgrids Power Plant Applications CCTC 2015 Paper Number 1570034251.

Tan, X., Li, Q., & Wang, H. (2013). Advances and trends of energy storage technology in microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 44(1), 179-191.

Tang, Y., Sun, H., Yao, Q., & Wang, Y. (2014). The selection of key technologies by the silicon photovoltaic industry based on the Delphi method and AHP (analytic hierarchy process): Case study of China. *Energy*, 75, 474-482.

Ter-Gazarian, A. G. (1994). *Energy storage for power systems* (No. 6). Iet.

Torkayesh, A. E., Tirkolaei, E. B., Bahrini, A., Pamucar, D., & Khakbaz, A. (2023). A systematic literature review of MABAC method and applications: An outlook for sustainability and circularity. *Informatica*, 34(2), 415-448.

Tran, M. K., & Fowler, M. (2020). A review of lithium-ion battery fault diagnostic algorithms: Current progress and future challenges. *Algorithms*, 13(3), 62.

Understanding MW and MWh in Battery Energy Storage Systems (BESS): Key Specifications Explained (2023, 28 Ιουνίου). Ανακτήθηκε από <https://www.tls-containers.com/tls-blog/understanding-mw-and-mwh-in-battery-energy-storage-systems-bess-key-specifications-explained> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Vaikund, H., & Srivani, S. G. (2021). Trends in energy management system for smart microgrid—an overview. *Advances in Signal and Data Processing: Select Proceedings of ICSDP 2019*, 15-28.

Van de Kaa, G., Rezaei, J., Kamp, L., & de Winter, A. (2014). Photovoltaic technology selection: A fuzzy MCDM approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 662-670.

Venkataramani, G., Vijayamithran, P., Li, Y., Ding, Y., Chen, H., & Ramalingam, V. (2019). Thermodynamic analysis on compressed air energy storage augmenting power/polygeneration for roundtrip efficiency enhancement. *Energy*, 180, 107-120.

Vo, T. T., Xia, A., Rogan, F., Wall, D. M., & Murphy, J. D. (2017). Sustainability assessment of large-scale storage technologies for surplus electricity using group multi-criteria decision analysis. *Clean technologies and environmental policy*, 19, 689-703.

Wang, P., Zhao, P., Xu, W., Wang, J., & Dai, Y. (2019). Performance analysis of a combined heat and compressed air energy storage system with packed bed unit and electrical heater. *Applied Thermal Engineering*, 162, 114321.

Wood, E. (2019). The Philadelphia Navy Yard Story: The Remarkable Emergence of an Unintentional Microgrid. Ανακτήθηκε από <https://microgridknowledge.com/philadelphia-navy-yard-microgrid/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Yang, L., Tai, N., Fan, C., & Meng, Y. (2016). Energy regulating and fluctuation stabilizing by air source heat pump and battery energy storage system in microgrid. *Renewable energy*, 95, 202-212.

Yekini Suberu, M., Wazir Mustafa, M., & Bashir, N. (2014). Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35(C), 499-514.

Zhang, C. P., Sharkh, S. M., Li, X., Walsh, F. C., Zhang, C. N., & Jiang, J. C. (2011). The performance of a soluble lead-acid flow battery and its comparison to a static lead-acid battery. *Energy Conversion and Management*, 52(12), 3391-3398.

Zhang, C., Chen, C., Streimikiene, D., & Balezentis, T. (2019). Intuitionistic fuzzy MULTIMOORA approach for multi-criteria assessment of the energy storage technologies. *Applied Soft Computing*, 79, 410-423.

Zhao, G., Shi, L., Feng, B., Sun, Y., & Su, Y. (2019, March). Development status and comprehensive evaluation method of battery energy storage technology in power system. In *2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)* (pp. 2080-2083). IEEE.

ZhiDong, L. (2003). An econometric study on China's economy, energy and environment to the year 2030. *Energy policy*, 31(11), 1137-1150.

Zhou, X., Fan, Z., Ma, Y., & Gao, Z. (2017, July). Research review on electrical energy storage technology. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)* (pp. 10674-10678). IEEE.

Zhu, H., Goh, H. H., Zhang, D., Ahmad, T., Liu, H., Wang, S., ... & Wu, T. (2022). Key technologies for smart energy systems: Recent developments, challenges, and research opportunities in the context of carbon neutrality. *Journal of Cleaner Production*, 331, 129809.

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ανακτήθηκε από <https://principia-energy.com/ananeosimes-phges-energeias> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Ανανεώσιμες πηγές. Ανακτήθηκε από <http://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Αντλησιοταμίευση: Στην Αμφιλοχία το μεγαλύτερο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας στην Ελλάδα (2020, 20 Μαΐου). Ανακτήθηκε από https://sinidisi.gr/antlisiertamieysi-stin-amfilochia-to-megalytero-systima-apothikeysis-energeias-stin-ellada/#google_vignette (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Αποθήκευση ενέργειας λιωμένου αλατιού: η πρώτη επιλογή-μεγάλης κλίμακας τεχνολογίας αποθήκευσης θερμότητας μεσαίας και υψηλής θερμοκρασίας επί του παρόντος (2022). Ανακτήθηκε από <https://gr.bingshengchemical.com/info/molten-salt-energy-storage-the-first-choice-o-69640211.html> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Γνωρίστε τη μεγάλη σημασία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (2023, Ιούνιος 02). Ανακτήθηκε από <https://www.beny.com/el/importance-of-renewable-energy/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

Ελλάδα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Ανακτήθηκε από <https://www.ox2.com/el/greece/ox2-in-greece/greece-and-renewable-energy-sources/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)

- Λιακάκης, Δ. (2024). Τι είναι τα Μικροδίκτυα και ποια τα οφέλη τους. Ανακτήθηκε από <https://www.offlinepost.gr/2024/01/20/ti-einai-ta-mikrodiktia-kai-poia-ta-ofeli-tous/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)
- Παγκαλιάς, Γ. (2023). Ενέργεια: Η Ελλάδα εκ των ηγέτιδων στη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα. Ανακτήθηκε από <https://www.ot.gr/2023/04/12/energeia/energeia-i-ellada-ek-ton-igetidon-sti-dieisdysi-ton-ape-sto-energeiako-meigma/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)
- Πανταζόπουλος, Γ. (2023), Αποθήκευση Ενέργειας: Η προσεχής επανάσταση στον ενεργειακό τομέα, Industry news. Ανακτήθηκε από <https://industry-news.gr/apothikeysi-energeias-i-prosechis-epanastasi-ston-energeiako-tomea-2/> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)
- Παρώνη, Κ. (2022). Η Ενεργειακή Κρίση του 2022. Ανακτήθηκε από <https://www.envinow.gr/post/i-energeiaki-krisi-tou-2022> (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)
- Σμιτλιώτου, Μ. (2022). *Χρήση συσσωρευτών σε μικροδίκτυα με ενσωμάτωση ΑΠΕ* (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).
- Σταυρακάκης, Γ. (2016). Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Ανακτήθηκε από http://repository.edulll.gr/edulll/bitstream/10795/2430/2/2430_3_1_%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1_%CE%A3%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82.pdf (τελευταία πρόσβαση: 20/06/2024)