



«Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας»

«Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών
Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός (Π.Σ.Χ.)»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία
«Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές με
έμφαση σε εφαρμογές νησιωτικών Περιφερειών»

Ελένη Κοτρώνη

Επιβλέπων Καθηγητής: Παπαευθυμίου Σπυρίδων

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2021

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

«Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές με
έμφαση σε εφαρμογές νησιωτικών Περιφερειών»

«Ελένη Κοτρώνη»

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

«Σπυρίδων Παπαευθυμίου»

«Αναπληρωτής Καθηγητής

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής
και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης»

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

«Γαρύφαλλος Αραμπατζής»

«Καθηγητής

Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης
Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, ΔΠΘ»

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2021

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Σπυρίδωνα Παπαευθυμίου επιβλέπων καθηγητή της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, για τη συνεχή υποστήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον Β' Επιβλέποντα κ. Γαρύφαλλο Αραμπατζή και τον κ. Ευθύμιο Ζέρβα για τη δυνατότητα που μου έδωσαν για να μελετήσω ένα τόσο σημαντικό και ενδιαφέρον θέμα.

Τέλος ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου για την ηθική συμπαράσταση, την υπομονή και κατανόηση που έδειξαν.

Περίληψη

Η παραγωγή ενέργειας αλλάζει στον κόσμο λόγω της ανάγκης μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στόχος είναι να μειωθεί η εξάρτηση από τις πηγές άνθρακα/ορυκτών και να εισαχθούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη μεγαλύτερη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι η χρησιμοποίηση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας για να ξεπεραστεί η ασυνέχεια στην παραγωγή ανανεώσιμων πηγών. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία επιλογών και σύνθετων χαρακτηριστικών των υπάρχοντων τεχνολογιών, με αποτέλεσμα να καθίσταται δύσκολη η επιλογή του κατάλληλου συστήματος.

Μέσω ανασκόπησης και ανάλυσης της επιστημονικής βιβλιογραφίας, η εργασία παρέχει μια επισκόπηση των διαθέσιμων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, εξηγεί τις αρχές λειτουργίας τους και περιγράφει τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά τους. Αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα/μειονεκτήματά τους καθώς και η συμβολή τους στην παραγωγή και διανομή της ενέργειας προς τον τελικό καταναλωτή. Επίσης, παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ των τεχνολογιών με διάφορα τεχνοοικονομικά κριτήρια.

Περιγράφονται εφαρμογές υβριδικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε νησιά, εκ των οποίων η πλειοψηφία βρίσκεται σε ερευνητικό επίπεδο. Παρουσιάζεται η ενεργειακή κατάσταση των ελληνικών Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών με έμφαση σε αυτά που τμήμα της απαιτούμενης ενέργειάς τους καλύπτεται από ΑΠΕ. Τέλος περιγράφονται τα υφιστάμενα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας των ελληνικών νησιών, τα οποία είναι πρωτοποριακά και αποτελούν πρότυπο για αντίστοιχα άλλα σε διεθνές επίπεδο.

Λέξεις – Κλειδιά

Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Υβριδικά Συστήματα, Πράσινα Νησιά

«Energy storage technologies from Renewable Sources with emphasis on applications in islandic Regions»

«Eleni Kotroni»

Abstract

Energy production is changing in the world due to the need to reduce greenhouse gas emissions. The aim is to reduce dependence on carbon / mineral sources and to introduce renewable energy sources. A prerequisite for greater penetration of Renewable Energy Sources is the use of energy storage systems to overcome the discontinuity in the production of renewable sources. There is a wide variety of options and complex features of existing technologies, making it difficult to choose the right system.

Through a review and analysis of the scientific literature, the paper provides an overview of available energy storage technologies, explains their operating principles and describes their technical and economic characteristics. Their advantages/ disadvantages are highlighted as well as their contribution to the production and distribution of energy to the final consumer. Also, a comparison between technologies with different techno-economic criteria is presented.

Applications of hybrid energy storage systems on islands are described, the majority of which are at research level. The energy situation of the Greek Non-Interconnected Islands is presented with emphasis on those whose part of the required energy is covered by RES. Finally, the existing hybrid energy production systems of the Greek islands are described, which are innovative and are a model for similar others at the international level.

Keywords

Energy Storage System, Renewable Energy Sources, Hybrid Systems, Green Islands

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract.....	vi
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος Σχημάτων.....	x
Κατάλογος Πινάκων.....	xii
Συντομογραφίες και Ακρωνύμια.....	xiii
Σημαντικότερα σημεία της εργασίας (highlights)	xv
Συνεισφορά της εργασίας.....	xvi
Εισαγωγή	1
Σκοπός της εργασίας.....	1
Δομή της εργασίας.....	1
1 Περιγραφή σύγχρονων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας από ΑΠΕ	3
1.1 Αποθήκευση ενέργειας σε μορφή μηχανικής ενέργειας.....	8
1.1.1 Υδροηλεκτρικά συστήματα αντλησιοταμίευσης (PHES)	9
1.1.2 Συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES).....	11
1.1.3 Συστήματα αποθήκευσης με σφόνδυλο (FES).....	15
1.1.4 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας βαρύτητας (GES)	18
1.2 Αποθήκευση ενέργειας σε ηλεκτροχημική μορφή	20
1.2.1 Μπαταρίες Μόλυβδου – Οξέος (Lead acid batteries)	22
1.2.2 Μπαταρίες Νικελίου – Καδμίου (Ni-Cd batteries)	23
1.2.3 Μπαταρίες ιόντων Λιθίου (Li-ion batteries).....	24
1.2.4 Μπαταρίες Θείου – Νατρίου (Na-S batteries).....	26
1.2.5 Μπαταρίες ροής Βαναδίου (VRB).....	28
1.2.6 Μπαταρίες ροής Ψευδαργύρου Βρωμίου (Zn-Br).....	30
1.2.7 Μπαταρίες ροής Βρωμιούχου Νατρίου Πολυσουλφιδίου (PSB)	30
1.3 Αποθήκευση ενέργειας σε χημική μορφή (CES)	31
1.3.1 Αποθήκευση ενέργειας σε μορφή Υδρογόνου (HES)	31
1.3.2 Κυψέλες καυσίμου (fuel cells)	33
1.3.3 Φυσικό αέριο σύνθεσης (SNG)	34
1.4 Αποθήκευση ενέργειας σε ηλεκτρική μορφή (EMESS).....	34
1.4.1 Υπεραγώγιμη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας (SMES)	35
1.4.2 Υπερπυκνωτές (SUPERCAPACITORS)	36
1.5 Συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES).....	38
1.5.1 Συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας (Sensible TES).....	40

1.5.2	Συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (Latent TES)	41
1.5.3	Συστήματα αποθήκευσης θερμοχημικής θερμότητας (TCS).....	44
1.5.4	Σύγκριση των τριών μεθόδων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.....	46
1.6	Διάφορα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	47
1.6.1	Power to Gas.....	47
1.6.2	Σύστημα ζεστού νερού	49
1.6.3	Σύστημα θερμικής αποθήκευσης λειωμένου άλατος	50
1.6.4	Σύστημα αποθήκευσης αμμωνίας.....	51
1.6.5	Μικροβιακή κυψέλη καυσίμου (MFC).....	52
1.6.6	Ηλιακά Καύσιμα.....	53
1.6.7	Ηλιακή αποθήκευση με γραφίτη	54
1.6.8	Μπαταρίες χαρτιού	56
2	Σύγκριση των ESS με διάφορα τεχνο-οικονομικά κριτήρια	58
2.1.	Πυκνότητα ενέργειας και ισχύος	58
2.2.	Χωρητικότητα αποθήκευσης/ Διάρκεια.....	60
2.3.	Ονομαστική ισχύς	60
2.4.	Χρόνος εκφόρτισης και αυτοεκφόρτιση	61
2.5.	Αποδοτικότητα κύκλου	61
2.6.	Τεχνολογική ωριμότητα	62
2.7.	Κόστος κεφαλαίου	63
2.8.	Χρόνος απόκρισης	64
2.9.	Επιπτώσεις στο περιβάλλον	65
3	Σύζευξη ΑΠΕ σε δίκτυο	67
3.1	Ενσωμάτωση ΑΠΕ στο δίκτυο	67
3.1.1	Μέτρα για την αντιμετώπιση της μεταβλητότητας της προσφοράς ανανεώσιμης ενέργειας όταν η ζήτηση και η προσφορά κινούνται μαζί.....	68
3.1.2	Ζητήματα που ταιριάζουν με τα αποθέματα κατά την ανανεώσιμη ενέργεια και την αναντιστοιχία ζήτησης.....	70
3.2.	Διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας (DG)	71
3.3	Μέτρα αντιμετώπισης ζητημάτων ενσωμάτωσης ΑΠΕ στο δίκτυο	73
3.3.1	Έξυπνα συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας πλέγματος με απόκριση ζήτησης (Smart Grid) 73	
3.3.2	Μικροδίκτυα (MicroGrid)	74
3.3.3	Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS)	76
3.3.4	Προηγμένες προβλέψεις	76
3.3.5	Ταχύτερη αποστολή αντί για σταθερό χρονοδιάγραμμα γεννητριών μεγάλης διάρκειας	77

3.3.6	Ευελιξία στη γεννήτρια	77
4	Εφαρμογές συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε μικρά νησιά	79
4.1	Υβριδικά Συστήματα (HESS)	82
4.2	Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε λειτουργία.....	85
4.2.1	El Hierro	85
4.2.2	Ικαρία	87
4.2.3	Τήλος.....	89
4.3	Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε ερευνητικό επίπεδο	91
5	Πράσινη ανάπτυξη ελληνικών νησιών – σημερινή κατάσταση	95
5.1	Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας	102
5.2	Έργο TILOS	106
5.3	Άη Στράτης – Πράσινο Νησί.....	110
5.4	«Αστυπάλαια 4.0»	113
6	Συμπεράσματα.....	115
	Προτάσεις	118
	Βιβλιογραφία	120
	Παράρτημα Α: Συνοπτική σύγκριση των ESS.....	125

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Θέση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [2]	6
Σχήμα 2: Ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [4]	6
Σχήμα 3: Ταξινόμηση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [5]	7
Σχήμα 4: Ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [5]	8
Σχήμα 5: Διάταξη συστήματος αντλησιοταμίευσης [4]	9
Σχήμα 6: Υδροηλεκτρικό εργοστάσιο Presenzano στην Ιταλία με τις δεξαμενές (άνω δεξιά και κάτω αριστερά). Αυτό το σύστημα αποθήκευσης με αντλία κλειστού βρόχου έχει κεφαλή 500 m, χωρητικότητα 1GW και αποθήκευση περίπου 6GWh [8]	10
Σχήμα 7: Διαγραμματική απεικόνιση της δομής ενός CAES [10]	12
Σχήμα 8: Ταξινόμηση των συστημάτων CAES με βάση την αλλαγή κατάστασης (D: Διαβατική, A: Αδιαβατική, I: Ισοθερμική) [11]	12
Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση FEES [13]	16
Σχήμα 10: Τυπικοί κύκλοι λειτουργίας για το FEES. Η κλίμακα ισχύος περιορίζεται από τη χαμηλότερη ταχύτητα στη λειτουργία εκφόρτισης, όπου εμφανίζεται η μέγιστη ροπή. Οι απώλειες ισχύος σε κατάσταση αναμονής εμφανίζονται δυσανάλογα για λόγους απεικόνισης [15]	17
Σχήμα 11: Διάφορα συστήματα GES: (a) Μονάδα ισχύος βαρύτητας, (b) Αποθήκευση βαρύτητας της Heindl Energy, (c) Μονάδα επίδειξης ARES, (d) Έργο MGES [16]	19
Σχήμα 12: Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας [7]	21
Σχήμα 13: Σχηματική απεικόνιση: (a) Ultrabattery και (b) Advanced lead-acid battery [18] ...	22
Σχήμα 14: Σχηματική παράσταση κελιού μπαταρίας Li-ion [19]	24
Σχήμα 15: Ηλεκτροχημεία της μπαταρίας Na-S [19]	26
Σχήμα 16: Δομή πηγής μπαταρίας ροής [2]	28
Σχήμα 17: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος μπαταρίας ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου [7] ..	29
Σχήμα 18: Σχηματική απεικόνιση τεχνολογίας αποθήκευσης υδρογόνου και κυψέλης καυσίμου [7]	32
Σχήμα 19: Τυπική διάταξη SMES [20]	35
Σχήμα 20: Σχηματική παράσταση ενός συστήματος supercapacitors [7]	37
Σχήμα 21: Ταξινόμηση συστημάτων θερμικής αποθήκευσης ανάλογα με τις θερμοκρασίες λειτουργίας τους [22]	40
Σχήμα 22: Μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (a) αισθητής θερμότητας, (b) λανθάνουσας θερμότητας, (c) θερμοχημικής θερμότητας [23]	40
Σχήμα 23: Μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει της θερμότητας που προσφέρεται σε ένα υλικό αλλαγής φάσης	42
Σχήμα 24: Σχηματικό διάγραμμα αλλαγής φάσης ενός PCM [27]	42
Σχήμα 25: Διαδικασίες σε κλειστό κύκλο TCS: φόρτιση, αποθήκευση, και εκφόρτιση [28]	45
Σχήμα 26: ΑΠΕ και CO ₂ υβριδικές τεχνικές αποθήκευσης [33]	48
Σχήμα 27: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αποθήκευσης ζεστού νερού [34]	50
Σχήμα 28: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος θερμικής αποθήκευσης λειωμένου αλατιού [34]	51
Σχήμα 29: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αποθήκευσης αμμωνίας [34]	52
Σχήμα 30: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από οργανικά απόβλητα μέσω της MFC [19]	53
Σχήμα 31: Διαδρομή της φωτοσύνθεσης στα ηλιακά καύσιμα [19]	54
Σχήμα 32: Θερμική ικανότητα γραφίτη σε σχέση με τη θερμοκρασία [19]	55
Σχήμα 33: Μοντέλο σχεδιασμού μπαταρίας χαρτιού [19]	56

Σχήμα 34: Σχηματική απεικόνιση της παραγωγής ενέργειας σε χαρτί που βασίζεται σε MFC [19].....	57
Σχήμα 35: Σύγκριση πυκνότητας ενέργειας και πυκνότητας ισχύος [7]	59
Σχήμα 36: Σύγκριση ονομαστικής ισχύος, ενεργειακού περιεχομένου και χρόνου εκφόρτισης διαφορετικών τεχνολογιών ES [5]	60
Σχήμα 37: Σύγκριση αποδοτικότητας κύκλου των τεχνολογιών EES [7].....	62
Σχήμα 38: Τεχνολογική ωριμότητα των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [5]	62
Σχήμα 39: Σύγκριση ενεργειακού κόστους κεφαλαίου και ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης [7]	64
Σχήμα 40: Σχηματική απεικόνιση των μικροδικτύων με DG και ESS [36]	67
Σχήμα 41: Δομή μικροπλέγματος [39].....	75
Σχήμα 42: Σύγκριση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά μέγεθος νησιών [3]	81
Σχήμα 43: Το διάγραμμα ροής ενέργειας τυπικού υβριδικού μεμονωμένου συστήματος ΑΠΕ [43].....	84
Σχήμα 44: Υλοποίηση του έργου Gorona del Viento [45]	86
Σχήμα 45: Υβριδικό Έργο Ικαρίας (Πηγή: ΔΕΗ Ανανεώσιμες).....	87
Σχήμα 46: Ναέρας – Κάτω Δεξαμενή (Πηγή: ΔΕΗ Ανανεώσιμες).....	88
Σχήμα 47: Υβριδικό Σύστημα Τήλου (www.tiloshorizon.eu)	89
Σχήμα 48: TILOS - Σύστημα συσσωρευτών ενέργειας (www.tiloshorizon.eu).....	90
Σχήμα 49: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικών (μπλε) και φωτοβολταϊκών (ροζ) μονάδων ΑΠΕ ανά μήνα από 01/2018 έως 11/2020 (Πληροφοριακό Δελτίο ΜΑΝ – ΔΕΔΔΗΕ Νοέμβριος 2020).....	97
Σχήμα 50: Παραγωγή Ενέργειας Μονάδων ΑΠΕ στα ΜΑΝ (Πληροφοριακό Δελτίο ΜΑΝ – ΔΕΔΔΗΕ Νοέμβριος 2020)	98
Σχήμα 51: Ηλεκτροπαραγωγή από θερμικά (πορτοκαλί) και ΑΠΕ (πράσινο) στα ΜΑΝ τα έτη 2018-2020 (Πληροφοριακό Δελτίο ΜΑΝ – ΔΕΔΔΗΕ Νοέμβριος 2020).....	99
Σχήμα 52: Διάταξη Υβριδικού Έργου Ικαρίας (google earth).....	103
Σχήμα 53: Ναέρας - Αιολικό (Πηγή: ΔΕΗ Ανανεώσιμες)	103
Σχήμα 54: Ναέρας – Άνω Δεξαμενή (Πηγή: ΔΕΗ Ανανεώσιμες)	104
Σχήμα 55: Ναέρας - Αντλιοστάσιο (Πηγή: ΔΕΗ Ανανεώσιμες)	105
Σχήμα 56: TILOS – Μικροδίκτυο (www.tiloshorizon.eu).....	106
Σχήμα 57: Μετεωρολογικοί σταθμοί της Τήλου και μετρητές φορτίου δικτύου [62]	107
Σχήμα 58: Το έξυπνο μικροπλέγμα της Τήλου (αριστερά) και περιγραφή της αρχιτεκτονικής MMP (δεξιά) [62]	108
Σχήμα 59: Γεωγραφική θέση εγκατάστασης υβριδικού στο νησί του Αγίου Ευστρατίου (Πηγή: Google Earth)	111
Σχήμα 60: Αποτύπωση ενεργειακής κατάστασης στον Άγιο Ευστράτιο μετά την εγκατάσταση του έργου (Πηγή: ΚΑΠΕ).....	112
Σχήμα 61: Σύγκριση της πυκνότητας ισχύος και της ενεργειακής πυκνότητας (σε σχέση με τον όγκο) των τεχνολογιών ES [5]	125
Σχήμα 62: Βαθμολογία ισχύος, Διάγραμμα Ragone [20]	125
Σχήμα 63: Σύγκριση συγκεκριμένης ενέργειας και ειδικής ισχύος [7]	126
Σχήμα 64: Σύγκριση της ονομαστικής ισχύος και της ονομαστικής ενεργειακής χωρητικότητας με τη διάρκεια του χρόνου εκφόρτισης στην ονομαστική ισχύ [7]	126
Σχήμα 65: Οι συνολικές τιμές απόδοσης για όλα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (παραμέληση της πηγής) [34].....	127
Σχήμα 66: Το συνολικό ποσοστό καταστροφής εξέργων για το ESS [34]	127
Σχήμα 67: Οι τιμές παραγωγής εντροπίας για το ESS [34]	128
Σχήμα 68: Οι τιμές εισόδου ενέργειας για όλα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας [34].....	128

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αντλησιοταμίευσης [4]	10
Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα CAES [4]	14
Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο [4]... ..	18
Πίνακας 4: Κύριες παράμετροι μπαταριών	20
Πίνακας 5: Χημικές αντιδράσεις & τάση μονάδας των κύριων μπαταριών που διατίθενται στο εμπόριο [7]	22
Πίνακας 6: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα SMES.....	36
Πίνακας 7: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα supercapacitors	38
Πίνακας 8: Κύριες επιθυμητές ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης [31].....	44
Πίνακας 9: Σύγκριση των τριών τύπων TES [28].....	46
Πίνακας 10: Σύγκριση των διάφορων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [5]	65
Πίνακας 11: Σύγκριση των διάφορων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [5]	66
Πίνακας 12: Συστήματα ESS ανάλογα με το μέγεθος των νησιών [3]	82
Πίνακας 13: Ταξινόμηση συστημάτων υψηλής ισχύος και υψηλής ενέργειας [19]	83
Πίνακας 14: Θεωρητικά δυνητικοί συνδυασμοί HESS [19]	84
Πίνακας 15: Συγκεντρωτικά στοιχεία ηλεκτροπαραγωγής για το έτος 2020, μεγάλα ΜΑΝ (Πληροφοριακό Δελτίο ΜΑΝ – ΔΕΔΔΗΕ Νοέμβριος 2020).....	100
Πίνακας 16: Συγκεντρωτικά στοιχεία ηλεκτροπαραγωγής για το έτος 2020, μικρά ΜΑΝ (Πληροφοριακό Δελτίο ΜΑΝ – ΔΕΔΔΗΕ Νοέμβριος 2020).....	101
Πίνακας 17: TILOS: Ένα καινοτόμο έργο [63]	109
Πίνακας 18: Τεχνική σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [64]	129
Πίνακας 19: Τεχνικές και οικονομικές εξειδικεύσεις διαφόρων τεχνολογιών ESS - I [19]	129
Πίνακας 20: Τεχνικές και οικονομικές εξειδικεύσεις διαφόρων τεχνολογιών ESS-II [19].....	130
Πίνακας 21: Υπηρεσίες αποθήκευσης, εφαρμογές και παρατηρήσεις [19]	131
Πίνακας 22: Χαρακτηριστικά συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [34].....	131

Συντομογραφίες και Ακρωνύμια

BES	Battery Energy Storage
CAES	Compressed Air Energy Storage
CES	Chemical Energy Storage
CSP	Concentrated Solar Power
DG	Distributed Generation
DoD	Depth of Discharge
EES	Electrical Energy Storage
EMESS	Electrostatic and Magnetic Energy Storage Systems
ESS	Energy Storage Systems
FBES	Flow Battery Energy Storage
FC	Fuel Cell
FES	Flywheel Energy Storage
GES	Gravity Energy Storage
GHG	Greenhouse Gas
HES	Hydrogen Energy Storage
HESS	Hybrid Energy Storage Systems
HTF	Heat Transfer Fluid
IC	Interconnection
IRENA	International Renewable Energy Agency
LCOE	Levelized Cost of Energy
MFC	Microbial Fuel Cell
ML	Mainland
O&M	Operating & Maintenance
PCM	Phase Change Materials
PHES	Pumped Hydro Energy Storage

PSB	Polysulfide Bromine Flow Battery
PtG	Power to Gas
SAPS	Stand Alone Power System
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
SoC	State of Charge
TCS	Thermo-chemical Storage
TES	Thermal Energy Storage
VRB	Vanadium Redox Flow Battery
vRES	Variable Renewable Energy Sources
WE	Wind Energy
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΕΔΔΗΕ	Διαχειριστής Εθνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΚΑΠΕ	Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας
ΜΔΝ	Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά
ΜΥΗΣ	Μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός

Σημαντικότερα σημεία της εργασίας (highlights)

- Ανάδειξη της ανάγκης χρησιμοποίησης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας για την επίτευξη μεγαλύτερης διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.
- Περιγραφή των υπαρχόντων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζοντας τη λειτουργία και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.
- Σύγκριση των τεχνολογιών με διάφορα τεχνοοικονομικά συστήματα.
- Παρουσίαση των εφαρμογών υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας σε νησιά
- Περιγραφή της ενεργειακής κατάστασης των ελληνικών νησιών με έμφαση στις ΑΠΕ, καθώς και των υφιστάμενων υβριδικών συστημάτων σε αυτά.

Συνεισφορά της εργασίας

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τις διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, περιγράφοντας τη λειτουργία τους και τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά τους. Αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, ενώ συγκρίνει τις τεχνολογίες αυτές με διάφορα τεχνοοικονομικά κριτήρια. Περιγράφει εφαρμογές υβριδικών συστημάτων σε νησιά, με έμφαση στην ενεργειακή κατάσταση των ελληνικών νησιών και των υφιστάμενων υβριδικών συστημάτων σε αυτά.

Εισαγωγή

Λόγω της μείωσης των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων, της σχετικής αστάθειας των τιμών και της σταδιακής θέσπισης πράσινων πολιτικών για την υποστήριξη της παραγωγής καθαρής ενέργειας και του μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, το μερίδιο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να καλύψει ένα σημαντικό μέρος της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας τα επόμενα χρόνια. Η μετάβαση που επιχειρείται σήμερα, από την εποχή των ορυκτών καυσίμων σε ένα μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε ΑΠΕ, πρέπει να επιταχυνθεί, λαμβάνοντας νέα στοιχεία και δομές και εμπλέκοντας νέες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές που θα εισαγάγουν συνολικά ένα πιο έξυπνο και αποδοτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί μια σημαντική συμπληρωματική λύση για μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ καθώς εξισορροπεί την προσφορά με τη ζήτηση ενέργειας. Τα νησιωτικά ηλεκτρικά δίκτυα θεωρούνται σήμερα τα ιδανικά τεστ για την υλοποίηση νέων, έξυπνων δικτύων που υποστηρίζουν υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής είναι η μελέτη συστημάτων – τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές οι οποίες, λόγω της χρονικά μεταβαλλόμενης παραγωγής και της αυξανόμενης διείσδυσής τους στο ενεργειακό μείγμα, εισάγουν ανισορροπίες φορτίου μεταξύ προσφοράς και ζήτησης.

Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στη μελέτη μικρότερων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μικρών νησιωτικών περιοχών με στόχο την ενεργειακή αυτονομία τους και τη μετατροπή τους σε «πράσινα νησιά».

Δομή της εργασίας

Στο **Κεφάλαιο 1** περιγράφονται αναλυτικά τα σύγχρονα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Μεγάλο τμήμα αυτών των συστημάτων παρουσιάζονται ταξινομημένα με βάση τη μορφή της αποθηκευμένης ενέργειας (μηχανική, ηλεκτροχημική,

χημική, ηλεκτρική, θερμική). Επιπλέον γίνεται αναφορά και σε πλέον καινούργιες, καινοτόμες και «έξυπνες» τεχνολογίες.

Στο **Κεφάλαιο 2** αναλύονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης και παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ αυτών με διάφορα τεχνο-οικονομικά κριτήρια.

Στο **Κεφάλαιο 3** εξετάζεται η ενσωμάτωση ΑΠΕ στο δίκτυο και τα μέτρα αντιμετώπισης αυτής. Επίσης, δίνονται πληροφορίες σχετικά με τη διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε μικρά νησιά, διακρίνοντάς τες σε αυτές που είναι σε λειτουργία και σε εκείνες που βρίσκονται σε ερευνητικό επίπεδο. Επιπλέον, γίνεται μια περιγραφή των υβριδικών συστημάτων.

Το **Κεφάλαιο 5** δίνει πληροφορίες σχετικά με τα υπάρχοντα υβριδικά συστήματα στα μικρά ελληνικά νησιά.

Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται μια ανακεφαλαίωση της εργασίας και εξάγονται συμπεράσματα και προοπτικές για το μέλλον.

1 Περιγραφή σύγχρονων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας από ΑΠΕ

Τα τελευταία χρόνια, σημειώθηκε ταχεία ανάπτυξη στην ανάπτυξη τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι πόροι ορυκτών καυσίμων εξαντλούνται και αυξάνεται η ρύπανση που προκαλεί την υπερθέρμανση του πλανήτη. Η μελλοντική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να βασίζεται στη μεγαλύτερη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μειώνοντας παράλληλα την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα για την επίτευξη των στόχων μείωσης των εκπομπών CO₂ και σεβασμού του περιβάλλοντος. Ωστόσο, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν προβληματική ασυνεπή παραγωγή λόγω της διαλείπουσας φύσης τους. Η μεταβλητότητα εξόδου αυτών των ανανεώσιμων πηγών καθιστά την ενεργειακή αξιοπιστία τους προβληματική. Η διατήρηση της παραγωγής και της ζήτησης ενέργειας αποτελεί μεγάλη πρόκληση για τους διαχειριστές δικτύου. Έχουν καταβληθεί προσπάθειες για τον εντοπισμό βιώσιμων λύσεων για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, όπως η διασύνδεση με εξωτερικά δίκτυα, η διαχείριση της ζήτησης μέσω μετατόπισης φορτίων και η χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Η περισσότερο υποσχόμενη λύση, μεταξύ των μελετημένων προσεγγίσεων, είναι η ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Τα συστήματα αποθήκευσης αναμένονται ως μέσο για την αύξηση της διείσδυσης των τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας. Σε γενικές γραμμές, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας εκτελούν πολλαπλούς ρόλους στη λειτουργία του δικτύου τροφοδοσίας. Ορισμένες από τις ελκυστικές λειτουργίες τους περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την παροχή διαχείρισης ενέργειας που ποικίλει στο χρόνο, την κάλυψη αιχμών ενεργειακών απαιτήσεων, την εξομάλυνση της διακύμανσης της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, την κάλυψη απομακρυσμένων φορτίων και τη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος. Ωστόσο, η βέλτιστη λειτουργία και το μέγεθος της αποθηκευμένης ενέργειας είναι διαφορετική και προβληματίζει, επειδή ένας σημαντικός αριθμός μεταβλητών αποφάσεων πρέπει να αντιμετωπιστεί προκειμένου να εντοπιστεί μια οικονομικά αποδοτική λύση [1].

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage Systems – ESS) ενσωματώνουν μια μέθοδο με την οποία η ηλεκτρική ενέργεια που εισάγεται από ηλεκτρικό δίκτυο, μετατρέπεται σε μια μορφή που θα μπορούσε να αποθηκευτεί σε περίοδο ζήτησης εκτός αιχμής, όταν το κόστος ενέργειας είναι γενικά χαμηλό ή εν μέσω πλεονασματικής παραγωγής, και μετατρέπεται πάλι σε ηλεκτρική ενέργεια σε περίοδο μέγιστης ζήτησης ή όταν απαιτείται [2].

Σύμφωνα με το [3], υπάρχουν πολλά σημαντικά τεχνικά αλλά και οικονομικά οφέλη από τη χρησιμοποίηση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ESS), τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια.

Τεχνικά οφέλη

- Χρονική μετατόπιση ενέργειας, για ισοπέδωση φορτίου και μέγιστη εξομάλυνση. Για παράδειγμα, τα ηλεκτρικά οχήματα αντιπροσωπεύουν έναν τύπο ESS που μπορεί να τα παρέχει οφέλη διαχείρισης ισχύος, που οδηγούν σε έξυπνο δίκτυο και ενσωμάτωση ΑΠΕ.
- Το ESS μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο.
- Η χρήση ESS αποτελεί εγγύηση για την αποτελεσματικότερη χρήση και συμβολή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, υποκινώντας επίσης τη χρήση επιλογών διανομής ενεργειακού εφοδιασμού σε δίκτυα.
- Αρκετές εγκαταστάσεις παραγωγής βασικού φορτίου δεν έχουν σχεδιαστεί για λειτουργία ως μερικό φορτίο ή για παροχή μεταβλητής εξόδου. Ωστόσο, η αποθήκευση μπορεί να προσφέρει ελκυστική λύση σε αυτά τα μειονεκτήματα ορίζοντας το βέλτιστο σημείο λειτουργίας, αντί της χρησιμοποίησης εφεδρικών γεννητριών.
- Η αποτελεσματική αποθήκευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή έως και δύο φορές της ικανότητας για εφαρμογές: χρησιμοποιώντας πλήρη φόρτιση (κάτω) και πλήρη εκφόρτιση (πάνω).
- Η έξοδος αποθήκευσης μπορεί να αλλάξει γρήγορα υποστηρίζοντας το δίκτυο.
- Η αποθήκευση είναι ένας πρακτικός τρόπος για να μειωθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση.
- Η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λύση για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των υπηρεσιών του δικτύου.
- Υπάρχουν πάντα ιδανικές τοποθεσίες για φορητά συστήματα αποθήκευσης σε ένα σύστημα διανομής. Επιπλέον, αυτά τα συστήματα μπορούν επίσης να μετεγκατασταθούν έτσι ώστε, μετά από έναν ορισμένο αριθμό ετών, όταν γίνει μια αναβάθμιση του συστήματος, το φορητό σύστημα αποθήκευσης να μπορεί να μετακινηθεί και να χρησιμοποιηθεί για να εκτελέσει ξανά την ίδια λειτουργία.
- Η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να ωφελήσει επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας επιτρέποντας την αναβάθμιση μετάδοσης και διανομής.

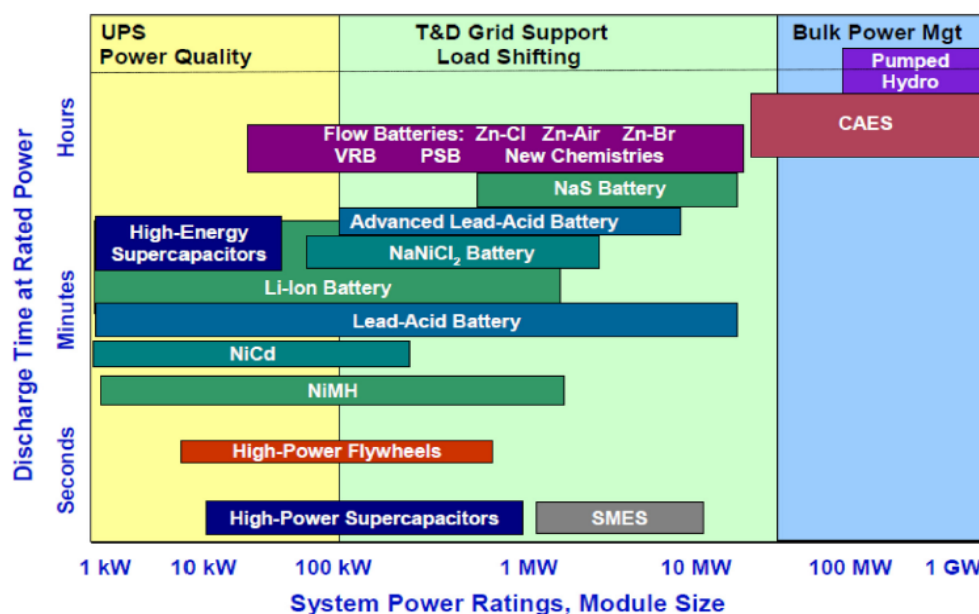
- Ένα ESS μπορεί να χρησιμεύσει ως εφεδρική πηγή ισχύος για υποσταθμούς και γραμμές διανομής ή για να προστεθούν μετασχηματιστές.
- Στο εγγύς μέλλον, οι τεχνολογίες ESS ενδέχεται να διευκολύνουν άλλες χρήσεις (μη ηλεκτρικής ενέργειας), όπως μεταφορά και παραγωγή θερμότητας.

Οικονομικά οφέλη

- Η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να μειώσει το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας.
- Σε γενικές γραμμές, η ηλεκτρική ενέργεια εκτός αιχμής είναι φθηνότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη αιχμής.
- Διαδραματίζει βασικό ρόλο στη σταθεροποίηση της τιμής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω εξάλειψης της αστάθειας που επιβάλλεται από τα ορυκτά καύσιμα.
- Η χρήση ESS καλύπτει επίσης την ανάγκη για παραγωγή ενέργειας αιχμής, με αποφυγή περιττών επιβαρύνσεων από γεννήτριες.
- Συμβάλει στην οικονομική ανάπτυξη και σε ευκαιρίες απασχόλησης για πολλές χώρες.
- Επιτρέπει αποτελεσματικότερη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ικανότητα παραγωγής εκτός αιχμής, ενθαρρύνοντας περισσότερες επενδυτικές ευκαιρίες σε αυτές τις τεχνολογίες.
- Μειώνει την ανάγκη για αναβαθμίσεις της δυναμικότητας μεταφοράς και διανομής, ελαχιστοποιώντας έτσι τις περιττές επενδύσεις.
- Αυξάνει και βελτιώνει τη διαθεσιμότητα βοηθητικών υπηρεσιών, μειώνοντας το κόστος γεννητριών καθώς και το κόστος υποδομών υπερδιαστασιολόγησης.
- Επιτρέπει την αποστολή ηλεκτρικής ενέργειας με γνώμονα την αγορά, προωθώντας την προληπτική συμμετοχική δράση των πελατών για την εξασφάλιση των ωφελειών τους και δημιουργεί ένα σύστημα κατανομής κόστους στο σύστημα ισχύος.
- Η αποθήκευση τείνει να μειώσει το αέριο του θερμοκηπίου και άλλες εκπομπές, μειώνοντας το κόστος άνθρακα. Ωστόσο, αυτή η μείωση του κόστους είναι συγκεκριμένη για τους πόρους και διαφέρει σημαντικά μεταξύ των τεχνολογιών.
- Σε σύγκριση με μια μέση τιμή εγκαταστάσεων που σχετίζονται με την ισχύ και είναι υπό κατασκευή σήμερα, το κόστος των εξαρτημάτων αποθήκευσης είναι σχετικά φθηνό.

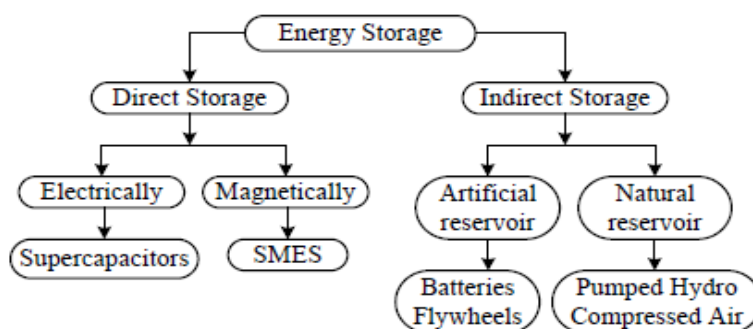
Υπάρχουν πολλές διαθέσιμες τεχνολογίες για την αποθήκευση ενέργειας. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για την κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Η

κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών αυτών μπορεί να βασίζεται σε συναρτήσεις, χρόνους απόκρισης ή περιόδους αποθήκευσης (Σχήμα 1).



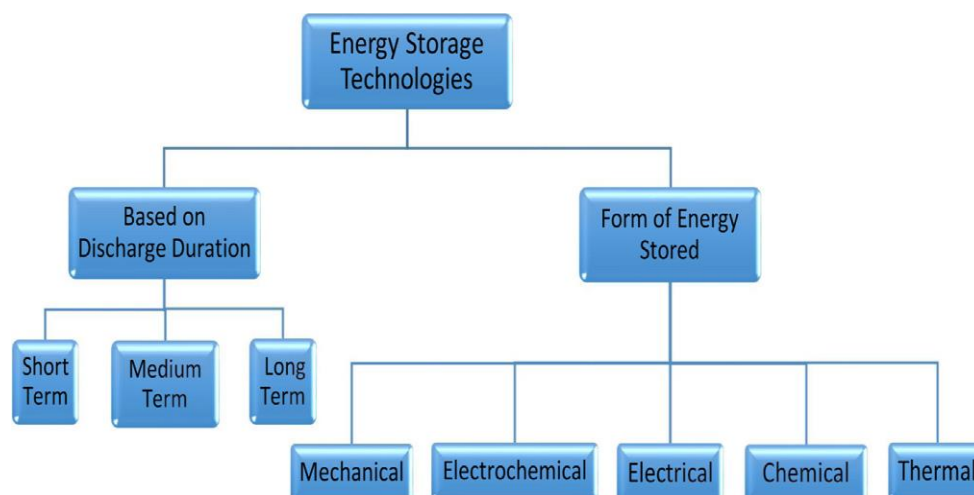
Σχήμα 1: Θέση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [2]

Σύμφωνα με το [4], μία ταξινόμηση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι σε άμεση και έμμεση αποθήκευση (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [4]

Σύμφωνα με το [5], οι πιο συνηθισμένες κατηγοριοποιήσεις των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας είναι με βάση α) τη χρονική περίοδο εκφόρτισης και β) τη μορφή της αποθηκευμένης ενέργειας (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Ταξινόμηση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [5]

Ταξινόμηση με βάση τη χρονική περίοδο εκφόρτισης

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας ανάλογα με τη χρονική περίοδο εκφόρτισης διακρίνονται σε βραχυπρόθεσμες (λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά), μεσοπρόθεσμες (λεπτά ή ώρες) και μακροπρόθεσμες (αρκετές ώρες έως μερικές ημέρες) [5].

Διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης

Πρόκειται για τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας οι οποίες έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος (MW/m^3) και ικανή απόκριση σε σύντομο χρονικό διάστημα. Χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση ποιότητας ισχύος και, κυρίως, για τη διατήρηση της σταθερότητας τάσης κατά τη διάρκεια μικρών (λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά) μεταβολών (βυθίσεων ή κυματισμών) [5].

Διατάξεις μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης

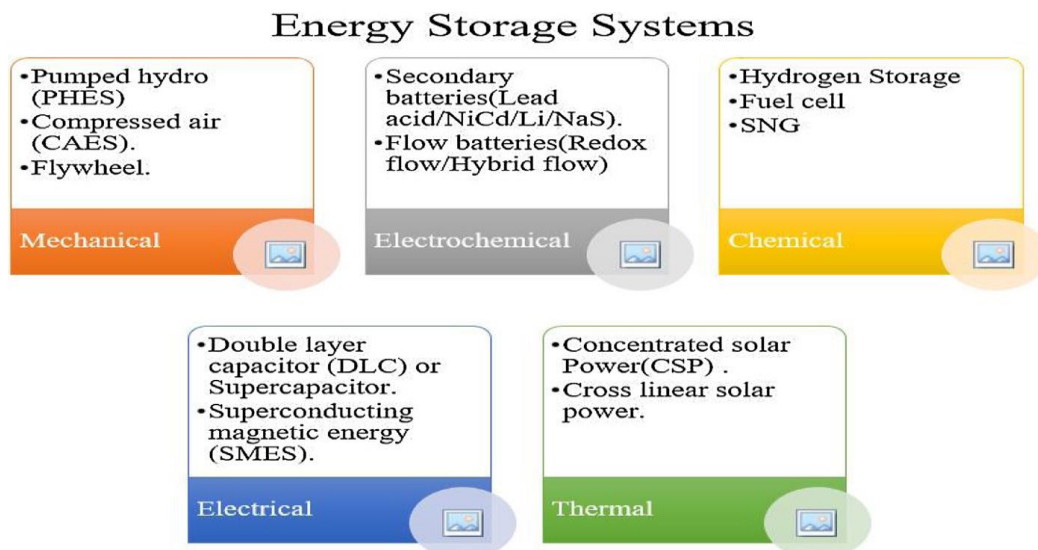
Αυτές οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας είναι σε θέση να συγκρατήσουν και να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια για χρονικές περιόδους από λίγα λεπτά έως κάποιες ώρες. Αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για τη ρύθμιση της συχνότητας, την αποσυμφόρηση του δικτύου και τη διαχείριση της ενέργειας [5].

Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης

Οι τεχνολογίες αυτές είναι σε θέση να παρακρατούν και να παρέχουν ενέργεια για μεγάλο χρονικό διάστημα (ημέρες, εβδομάδες ή μήνες). Αυτές εφαρμόζονται συνήθως για να καλύψουν το κενό ζήτησης για τουλάχιστον μια ημέρα ή και περισσότερο [5].

Ταξινόμηση με βάση τη μορφή της αποθηκευμένης ενέργειας

Η μορφή της μετατροπής ενέργειας καθορίζει ευρέως την ταξινόμηση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε πέντε μεγάλες κατηγορίες, όπως μηχανική, ηλεκτροχημική, χημική, ηλεκτρική και θερμική αποθήκευση ενέργειας όπως φαίνεται στο Σχήμα 4 [5].



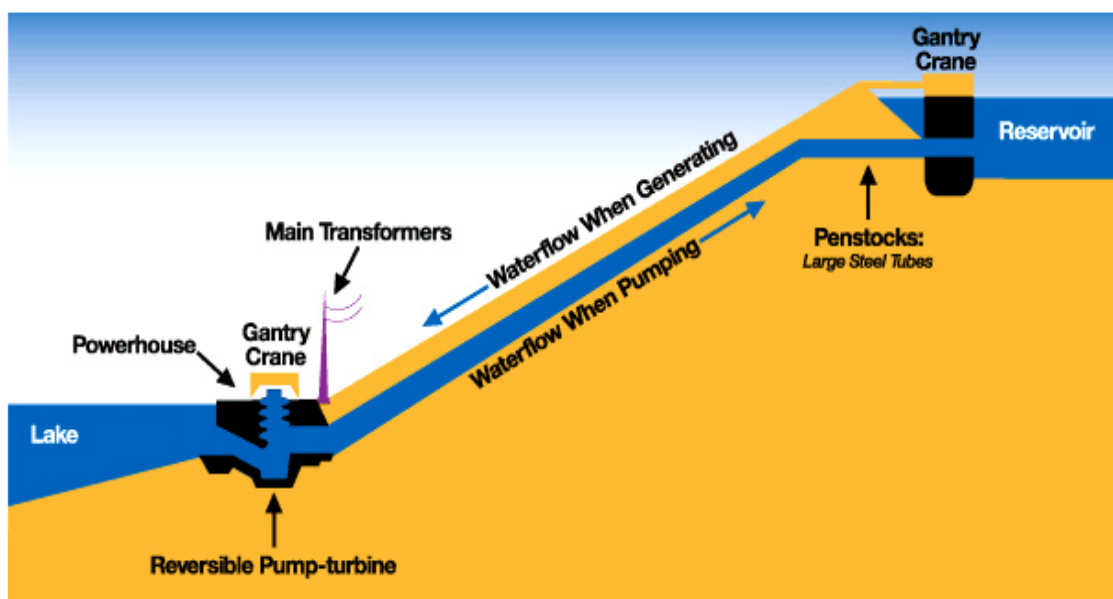
Σχήμα 4: Ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [5]

1.1 Αποθήκευση ενέργειας σε μορφή μηχανικής ενέργειας

Η αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιώντας μηχανικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας διεξάγεται μετατρέποντας την ενέργεια σε μηχανική και ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη διάρκεια των ωρών εκτός αιχμής, όταν η ζήτηση είναι χαμηλή, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια μέσω της αρχής της δυναμικής ή κινητικής ενέργειας ή ακόμη και πεπιεσμένου αερίου. Όταν η ζήτηση είναι υψηλή, η ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτοί οι τύποι συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι χρήσιμοι επειδή η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια. Οι συνηθισμένοι τύποι συστημάτων αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας είναι η αντλησιοταμίευση (PHES), η αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα (CAES), η αποθήκευση ενέργειας με σφόνδυλο (FES) και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας βαρύτητας (GES). Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται οι διάφοροι τύποι συστημάτων αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας [6].

1.1.1 Υδροηλεκτρικά συστήματα αντλησιοταμίευσης (PHES)

Η αντλησιοταμίευση (Pumped Hydro Energy Storage – PHES) είναι μια τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας με μακρά ιστορία, υψηλή τεχνική ωριμότητα και μεγάλη ενεργειακή ικανότητα. Ένα τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από δύο δεξαμενές νερού, τοποθετημένες κάθετα (Σχήμα 5). Κατά τη διάρκεια εκτός ωρών αιχμής ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας, το νερό αντλείται στη δεξαμενή υψηλότερου επιπέδου, ενώ κατά τις ώρες αιχμής ζήτησης, το νερό μπορεί να απελευθερωθεί πίσω στον ταμιευτήρα στο χαμηλότερο επίπεδο. Κατά τη διαδικασία αυτή, το νερό που ελευθερώνεται τροφοδοτεί τους στροβίλους που οδηγούν τις ηλεκτρικές μηχανές να παράγουν ηλεκτρισμό. Η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας εξαρτάται από τη διαφορά ύψους μεταξύ των δύο δεξαμενών και το συνολικό όγκο του νερού που έχει αποθηκευτεί. Η ονομαστική ισχύς των εγκαταστάσεων αντλησιοταμίευσης εξαρτάται από την πίεση του νερού, το ρυθμό ροής μέσω των στροβίλων και την ονομαστική ισχύ των μονάδων αντλίας / στροβίλου και γεννήτριας / κινητήρα [7].



Σχήμα 5: Διάταξη συστήματος αντλησιοταμίευσης [4]

Μέχρι στιγμής, η αντλησιοταμίευση αποτελεί την κορυφαία τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, η οποία αντιπροσωπεύει περίπου το 97% της παγκόσμιας ισχύος αποθήκευσης (160 GW) και το 99% της αποθηκευμένης ενέργειας. Το μεγαλύτερο μέρος του υπάρχοντος συστήματος αντλησιοταμίευσης σχετίζεται με υδροηλεκτρικά έργα σε ποτάμια. Τα συστήματα τα οποία είναι εκτός ποταμού περιλαμβάνουν συνήθως ένα ζευγάρι τεχνητών ταμιευτήρων (επιφάνειας λίγων τετραγωνικών χιλιομέτρων ο καθένας), που βρίσκεται κοντά ο ένας στον άλλο (απόσταση μερικών χιλιομέτρων) αλλά σε διαφορετικά υψόμετρα (200–1200 μέτρα διαφορά ύψους) και είναι συνδεδεμένοι μέσω σωλήνα ή σήραγγας (Σχήμα 6)[8]



Σχήμα 6: Υδροηλεκτρικό εργοστάσιο Presenzano στην Ιταλία με τις δεξαμενές (άνω δεξιά και κάτω αριστερά). Αυτό το σύστημα αποθήκευσης με αντλία κλειστού βρόχου έχει κεφαλή 500 m, χωρητικότητα 1GW και αποθήκευση περίπου 6GWh [8]

Σύμφωνα με το [4], τα κύρια χαρακτηριστικά ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης είναι τα ακόλουθα:

- Οι στρόβιλοι λειτουργούν στο $\pm 10\%$ ενός συμβατικού στρόβιλου.
- Υπάρχει δυνατότητα προσαρμογής της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά 70%.
- Υπάρχει δυνατότητα προσαρμογής της χωρητικότητας αποθήκευσης κατά 40%.
- Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης μπορούν να ρυθμίσουν τη συχνότητα σε δύο διαφορετικούς τρόπους, δηλαδή σε λειτουργία αντλίας και σε λειτουργία παραγωγής.
- Οι συντονισμοί μπορούν να αποφευχθούν λόγω της μεταβλητής συχνότητας που αυξάνει τη διάρκεια ζωής του προϊόντος και μειώνει τη συντήρηση.
- Η έξοδος ισχύος μπορεί να αλλάξει πολύ γρήγορα σε 10-30 ms.
- Απαιτείται σταθμός μεγάλης γενιάς και πολύ κοντά σε δεξαμενή νερού.

Σχετικά με το κόστος των συστημάτων αντλησιοταμίευσης, σύμφωνα με το Σύνδεσμο Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας (ESA), αυτό κυμαίνεται μεταξύ 500-1500 \$ / kW.

Στον ακόλουθο Πίνακα 1 καταγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος [4].

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αντλησιοταμίευσης [4]

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Είναι ασφαλές για το περιβάλλον	Η γεννήτρια πρέπει να βρίσκεται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας

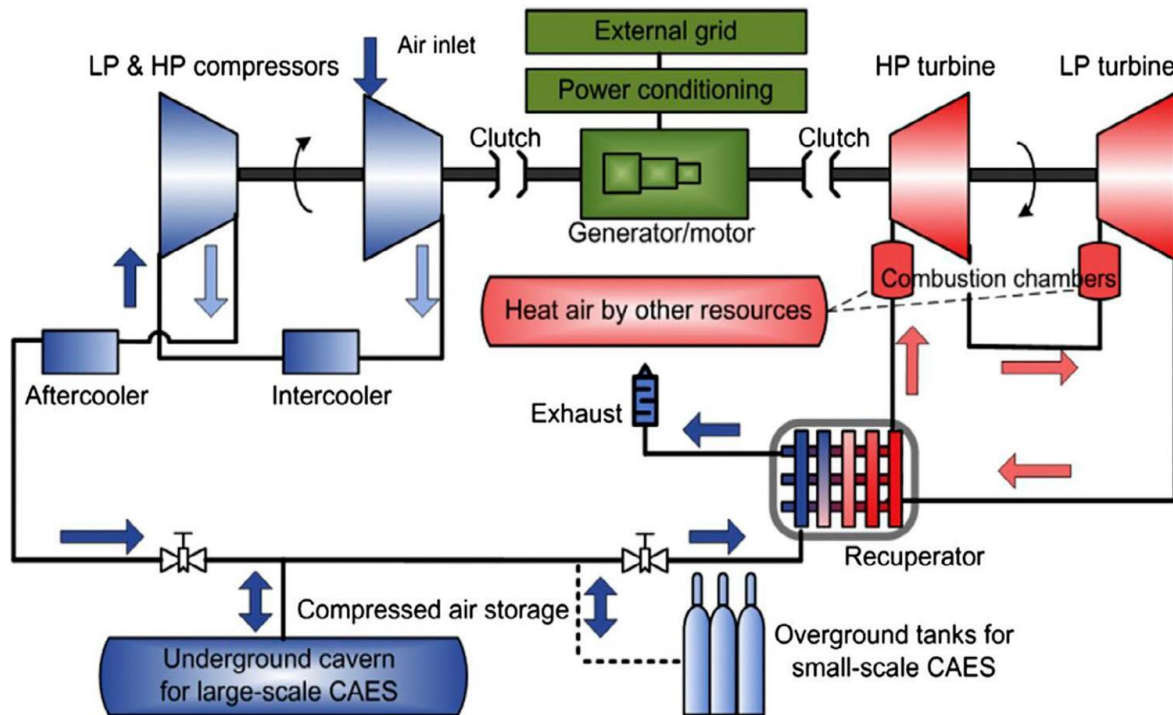
Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολύ μεγάλη κλίμακα για να παρέχει υψηλά επίπεδα ισχύος	Θα συν επιδράσει με την υδρόβια ζωή της περιοχής και είτε θα βλάψει το βιότοπό της, είτε θα καταστραφεί ο εξοπλισμός
Είναι μια αυτάρκης μέθοδος αποθήκευσης	Μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε ορισμένες περιοχές κοντά στο νερό
Είναι μια περαιτέρω αναπτυγμένη μέθοδος σε σχέση με τις περισσότερες άλλες, καθώς έχουν εισαχθεί διάφορες καινοτομίες με την πάροδο των ετών	Τα υπόγεια σπήλαια αποτελούν μεγάλο κίνδυνο
Βελτιώνεται εύκολα προκειμένου να ικανοποιήσει οποιαδήποτε απαίτηση	Σχετικά χαμηλή απόδοση
Μπορεί να ξεκινήσει από κατάσταση κλεισίματος χωρίς τη βοήθεια ρεύματος από δίκτυο	
Χαμηλός χρόνος εκκίνησης	
Πολύ υψηλή χωρητικότητα αποθήκευσης και διάρκεια ζωής	

1.1.2 Συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES)

Η λειτουργία ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage –CAES) διακρίνεται σε 3 φάσεις (φόρτιση, αποθήκευση, εκφόρτιση) και σε 5 υπό-διεργασίες (συμπίεση, ανταλλαγή θερμότητας σε φόρτιση και εκφόρτιση, επέκταση, αποθήκευση και μηχανική μετάδοση μεταξύ κινητήρα/γεννήτριας, συμπιεστή και διαστολέα).

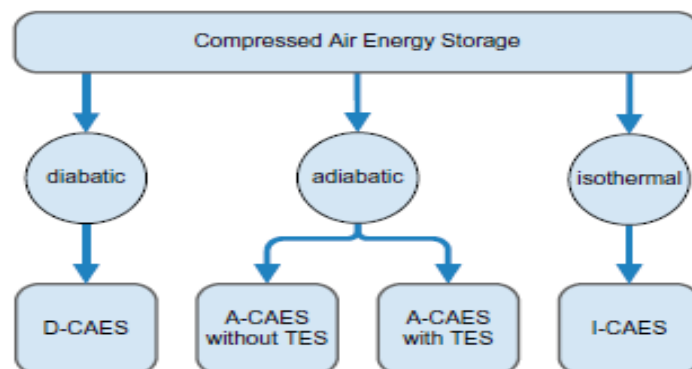
Στο στάδιο φόρτισης, η περίσσεια ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια των περιόδων αιχμής, χρησιμοποιείται για τη συμπίεση αέρα. Η περίσσεια ενέργειας μπορεί να προέρχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο ή από τη μετατροπή ανανεώσιμων πηγών. Πριν την αποθήκευση, η θερμότητα απομακρύνεται από τον αέρα και είτε απορρίπτεται είτε ανακτάται για προθέρμανση του αέρα κατά τη διαστολή. Η αποθήκευση πραγματοποιείται σε σπηλιές αλατιού, ορυχεία, πηγάδια, θαλάμους αερίων ή δεξαμενές. Στο στάδιο εκφόρτισης, ο αέρας θερμαίνεται για να διασταλεί σε μια τουρμπίνα για να παραχθεί μηχανική ενέργεια (ή ισχύς, εάν υπάρχει γεννήτρια). Η θέρμανση του αέρα γίνεται είτε από την καύση καυσίμου ή από τη θερμότητα που ανακτάται κατά τη διαδικασία ψύξης του σταδίου φόρτισης.

Η διαμόρφωση ενός βασικού συστήματος CAES φαίνεται στο Σχήμα 7 [9].



Σχήμα 7: Διαγραμματική απεικόνιση της δομής ενός CAES [10]

Σήμερα, υπάρχει μια τεράστια ποικιλία διαφορετικών εννοιών CAES σε διαφορετικά επίπεδα ανάπτυξης, με στόχο διαφορετικές εφαρμογές, και διαθέτοντας διαφορετικά πλεονεκτήματα και αδυναμίες. Μια γενική ταξινόμηση του συνόλου των εννοιών των CAES φαίνεται στο Σχήμα 8. Ανάλογα με τη στοχευμένη εξιδανικευμένη διαδικασία, οι τεχνολογίες CAES διαφοροποιούνται σε διαβατικές, αδιαβατικές και ισοθερμικές. Το κύριο κριτήριο για την κατηγοριοποίηση είναι το ερώτημα για το πώς χειρίζεται η θερμότητα κατά τη συμπίεση και πριν από τη διαστολή του αέρα [11].



Σχήμα 8: Ταξινόμηση των συστημάτων CAES με βάση την αλλαγή κατάστασης (D: Διαβατική, A: Αδιαβατική, I: Ισοθερμική) [11]

- Διαβατικά συστήματα CAES

Τα συστήματα D-CAES, παρόμοια με έναν συμβατικό αεριοστρόβιλο, παράγουν ενέργεια από ορυκτά καύσιμα. Η διαφορά είναι ότι η ενέργεια στη μορφή πεπιεσμένου αέρα αποθηκεύεται πρώτα σε δεξαμενές/σπηλιές και στη συνέχεια διαστέλλεται και επεκτείνεται στο στρόβιλο καθώς απαιτείται ενέργεια. Η θερμότητα που παράγεται στη συμπίεση απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, προστίθεται ένας θάλαμος καύσης για τη θέρμανση του αέρα και την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου.

- Αδιαβατικά συστήματα CAES

Η είσοδος της ενέργειας σε σύστημα A-CAES προέρχεται είτε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είτε από πλεονάζουσα ενέργεια κατά τις περιόδους εκτός αιχμής, ουσιαστικά εξαλείφοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Η θερμότητα από τη συμπίεση αποθηκεύεται σε ένα σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για προθέρμανση του αέρα πριν από τη διαστολή ή την παροχή θερμότητας για τους χρήστες. Ο κρύος αέρας από τη διαστολή χρησιμοποιείται για την ψύξη των ενδιάμεσων σταδίων του συμπιεστή ή για την κάλυψη των απαιτήσεων ψύξης. Ανεξάρτητα από την περίπτωση, η συνολική απόδοση του συστήματος βελτιώνεται, με αναμενόμενη απόδοση 70-75%.

- Ισοθερμικά συστήματα CAES

Παρόμοια με τον κύκλο Ericsson, μια σχεδόν σταθερή θερμοκρασία διατηρείται στις διαδικασίες διαστολής και συμπίεσης, έτσι ώστε δεν απαιτείται η καύση του καυσίμου πριν τη διαστολή. Στη συμπίεση επιτυγχάνονται υψηλότερες πιέσεις χωρίς μεταβολές θερμοκρασίας. Οι ισοθερμικές συνθήκες μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας υγρό αέρα ή ροή δύο φάσεων (σταγονίδια αέρα)[9].

Σύμφωνα με το [4], τα κύρια χαρακτηριστικά ενός συστήματος CAES είναι τα ακόλουθα:

- Μπορούν να λειτουργήσουν για μικρό χρονικό διάστημα για να διορθώσουν τις πτώσεις τάσης.
- Χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία συστημάτων μικρής κλίμακας κατανεμημένης παραγωγής.
- Γρήγορος χρόνος απόκρισης.

- Χαμηλός κίνδυνος θραύσης των δεξαμενών λόγω της εκ φύσεως υψηλής πίεσης του συστήματος.
- Βρίσκονται σε σπήλαια αλατιού ή τρούλους.

Σχετικά με το κόστος των συστημάτων CAES:

- Σύμφωνα με το Electric Power Research Institute, η τιμή ενός συστήματος CAES είναι περίπου 1,000 \$ / kWh
- Το κόστος κεφαλαίου κυμαίνεται μεταξύ 600-700 \$/kW.
- Αυτό το κόστος περιλαμβάνει το κόστος εγκατάστασης των υπόγειων αποθηκευτικών ενδιάμεσων αποθήκευσης για την εξάλειψη της θερμότητας, καθώς και συμπιεστές και διαστολείς για τον αέρα.

Στον ακόλουθο Πίνακα 2, καταγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος [4].

Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα CAES [4]

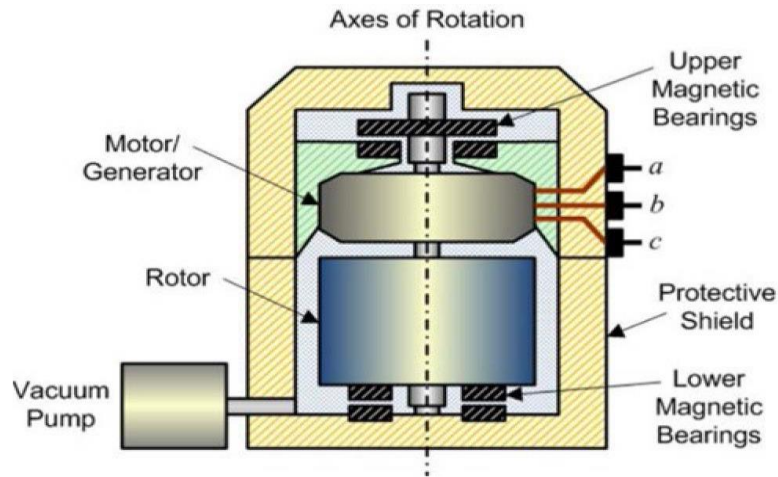
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Τα συστήματα CAES μπορούν να βελτιστοποιηθούν εύκολα	Η απόδοση του συστήματος είναι σχετικά χαμηλή. Κάποιες φορές επιτεύχθηκε αποτελεσματικότητα έως και 75%, ωστόσο κάποιες άλλες η αποδοτικότητα ήταν κοντά στο 40%
Είναι σε θέση να ξεκινήσουν από την κατάσταση κλεισίματος χωρίς να εξαρτώνται από το δίκτυο τροφοδοσίας	Τα υπόγεια σπήλαια θεωρούνται επικίνδυνα από τις εταιρείες κοινής ωφέλειας
Παρέχουν ένα μεγάλο οικονομικό όφελος καθώς αποθηκεύουν ενέργεια ενώ η ζήτηση είναι χαμηλή (άρα ενέργεια με χαμηλότερο κόστος) και παρέχουν αυτήν την ενέργεια σε περιόδους αιχμής, όταν το κόστος είναι υψηλότερο	Μεγάλος χρόνος απόκρισης
Η αξιοποίηση αυτής της μεθόδου αποθήκευσης μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ευκαιριών απασχόλησης	
Έχουν υψηλή ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας και ισχύος εξόδου	
Έχουν υψηλή διάρκεια εκφόρτισης στη μέγιστη ισχύ εξόδου	

1.1.3 Συστήματα αποθήκευσης με σφόνδυλο (FES)

Το σύστημα αποθήκευσης με σφόνδυλο (Flywheel Energy Storage - FES) λειτουργεί ως ενεργειακό απόθεμα το οποίο αποθηκεύει την ενέργεια με μορφή κινητικής ενέργειας σε περιστρεφόμενη μάζα υψηλής ταχύτητας που συνδυάζεται με τον κινητήριο άξονα της ηλεκτρικής μηχανής που παρέχει ηλεκτρομηχανική διεπαφή μεταξύ του τροχού και του συστήματος. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, το μηχανήμα λειτουργεί ως κινητήρας για να επιταχύνει την περιστροφική κίνηση του σφονδύλου και έτσι να αυξήσει την αποθηκευμένη ενέργεια και στη συνέχεια ο σφόνδυλος παραμένει σε κατάσταση αναμονής. Κατά τη διάρκεια ζήτησης ενέργειας, το μηχανήμα λειτουργεί ως γεννήτρια και επιβραδύνει τον τροχό ανακτώντας την αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα [12].

Στο σύστημα FES υπάρχει ενσωματωμένος ρότορας ηλεκτρικού μηχανήματος που μπορεί να λειτουργεί είτε σαν γεννήτρια, είτε σαν κινητήρας μετατροπής ενέργειας από μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα. Υπάρχουν πολλοί τύποι γεννητριών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα FES, όπως γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη και επαγωγικές μηχανές. Η λειτουργία του συστήματος FES συνοψίζεται ως εξής: όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας ο σφόνδυλος αποθηκεύει την ενέργεια, λειτουργώντας σαν ηλεκτρικός κινητήρας, διαφορετικός από έναν συμβατικό ηλεκτρικό κινητήρα. Η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται στο σφόνδυλο έχει πολύ μεγάλη ροπή αδράνειας και πολύ υψηλή ταχύτητα περιστροφής. Από την άλλη πλευρά, όταν υπάρχει μια ανώμαλη ταλάντωση στην πηγή ή στο φορτίο του σφονδύλου, αυτός δρα ως γεννήτρια που παρέχει την απαιτούμενη ισχύ για τη διατήρηση της σταθερότητας του συστήματος. Κατά τη διαδικασία εκφόρτισης της ενέργειας, η ταχύτητα του σφονδύλου μειώνεται σταδιακά με αποτέλεσμα μια συνεχώς μεταβαλλόμενη συχνότητα της τάσης [13].

Ένα σύγχρονο σύστημα FES αποτελείται από πέντε βασικά στοιχεία: ένας σφόνδυλος, μια ομάδα ρουλεμάν, ένας αναστρέψιμος ηλεκτρικός κινητήρας / γεννήτρια, η ηλεκτρονική μονάδα ισχύος και θάλαμος κενού [7]. Στο Σχήμα 9 φαίνεται μια απλοποιημένη δομή μιας σύγχρονης εγκατάστασης FES.



Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση FEES [13]

Η κινητική ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα σφόνδυλο δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$E_k = \frac{1}{2}(I\omega^2)$$

όπου: E_k : η κινητική ενέργεια που αποθηκεύεται στο σφόνδυλο (Joule)

I : η ροπή αδρανείας (kg m^2) που είναι συνάρτηση του σχήματος και της μάζας και

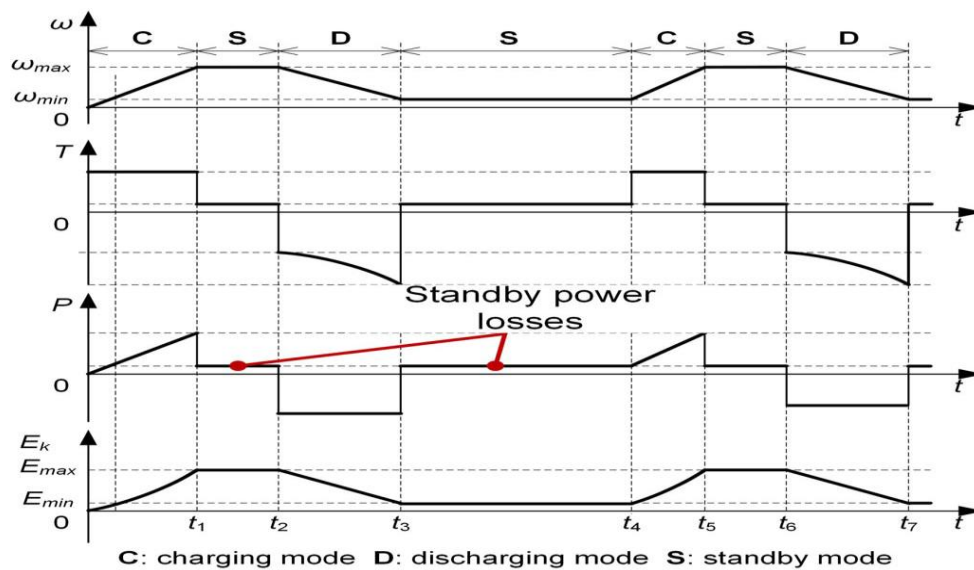
ω : η ταχύτητα περιστροφής (rad/s).

Ο σφόνδυλος χωρίζεται σε δύο βασικούς τύπους ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής:

- σφόνδυλος χαμηλής ταχύτητας που λειτουργεί στην περιοχή των χιλιάδων περιστροφών ανά λεπτό (rpm),
- Σφόνδυλος υψηλής ταχύτητας που μπορεί να φτάσει ταχύτητες σε δεκάδες χιλιάδες περιστροφές ανά λεπτό (rpm).

Το όριο ταχύτητας του σφονδύλου καθορίζεται από την πίεση του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του [14].

Το μηχάνημα και η μονάδα δίσκου λειτουργούν σε τρεις τρόπους λειτουργίας (φόρτιση, αναμονή και εκφόρτιση) μετατρέποντας τη μορφή ενέργειας (Σχήμα 10). Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας φόρτισης, το μηχάνημα λειτουργεί ως κινητήρας και επιταχύνει το σφόνδυλο, ενώ όταν βρίσκεται σε κατάσταση εκφόρτισης, η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια και εξάγει την αποθηκευμένη ενέργεια για να τροφοδοτήσει το φορτίο [15].



Σχήμα 10: Τυπικοί κύκλοι λειτουργίας για το FEES. Η κλίμακα ισχύος περιορίζεται από τη χαμηλότερη ταχύτητα στη λειτουργία εκφόρτισης, όπου εμφανίζεται η μέγιστη ροπή. Οι απώλειες ισχύος σε κατάσταση αναμονής εμφανίζονται δυσανάλογα για λόγους απεικόνισης [15]

Το κόστος της τεχνικής αποθήκευσης ενέργειας του σφονδύλου περιλαμβάνει:

- Κόστος κεφαλαίου: Αυτό αναφέρεται στο κόστος εγκατάστασης ενός πλήρους συστήματος.
- Κόστος ρύθμισης.
- Κόστος απόσβεσης.
- Λειτουργικό κόστος.

Το κόστος μιας αποθήκευσης ενέργειας σφονδύλου εκτιμάται σε περίπου 1630 \$ / kW. Αυτό περιλαμβάνει το κόστος λειτουργίας, το κόστος ρύθμισης και το κόστος απόσβεσης [4].

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο είναι τα ακόλουθα:

- Οι σφόνδυλοι τρίτης γενιάς συνδυάζουν υψηλή μάζα και ταχύτητα περιστροφής για μεγιστοποίηση της συνολικής αποθήκευσης.
- Οι σφόνδυλοι έχουν διαφορετικές δυνατότητες εκφόρτισης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε απορρίψεις μικρής ή μεγάλης διάρκειας.
- Η τρέχουσα τεχνολογία θέτει περιορισμό στη φύση της διπλής εκφόρτισης. Ζητήματα αποτελούν το υψηλό κόστος και η περιορισμένη χωρητικότητα.
- Ευέλικτο μέγεθος και εγκατάσταση.

- Μικρός όγκος και βάρος.
- Το εύρος λειτουργίας είναι 32 ° -104 ° F.

Στον ακόλουθο Πίνακα 3 καταγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος [4].

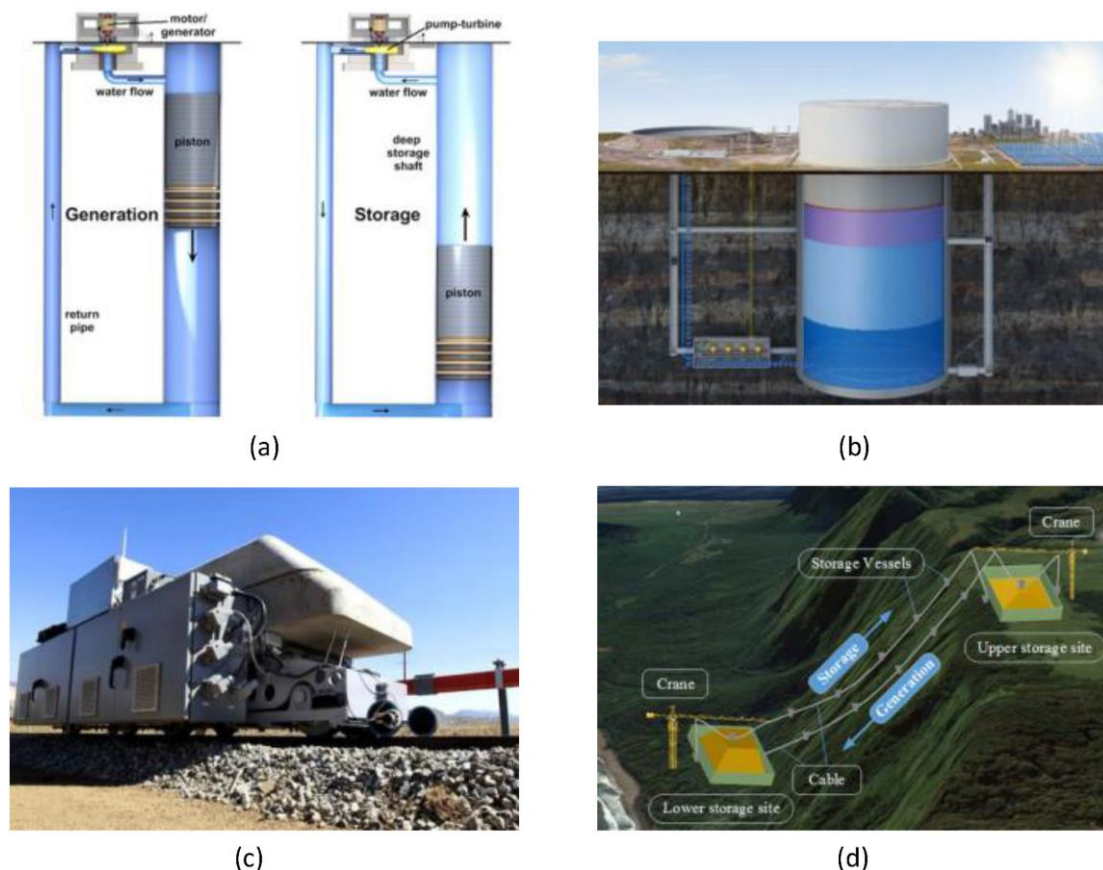
Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο [4]

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Κατά τη λειτουργία σε κενό, παρατηρούνται αρκετά υψηλές ηλεκτρικές και ηλεκτρικές αποδόσεις, έως και 90%	Υπάρχει κίνδυνος έκρηξης σφονδύλου, γεγονός που δημιουργεί την ανάγκη για ισχυρότερα δοχεία περιορισμού
Γρήγορος χρόνος απόκρισης	Μικρός χρόνος αποθήκευσης ενέργειας, λόγω απώλειας ενέργειας μέσω τριβής λόγω του δυναμικού προσανατολισμού της γης
Μπορούν να διατηρήσουν υψηλά επίπεδα ισχύος	Χαμένη ενέργεια μέσω τριβής λόγω του δυναμικού προσανατολισμού της γης
Δεν επηρεάζονται από τις αλλαγές θερμοκρασίας	Σχετικά χαμηλός χρόνος εκφόρτισης στο μέγιστο επίπεδο ισχύος
Υψηλή πυκνότητα ισχύος και πυκνότητα ενέργειας	

1.1.4 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας βαρύτητας (GES)

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας βαρύτητας (Gravity Energy Storage – GES) αποτελούν καινούργια τεχνολογία συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία αναπτύχθηκαν για να αποφευχθούν οι γεωλογικοί περιορισμοί. Τα συστήματα GES αποθηκεύουν ενέργεια στο ύψος θέσης ενός στερεού ή υγρού μέσου. Στη λειτουργία φόρτισης, το GES οδηγεί ηλεκτρικούς κινητήρες για ανύψωση μάζας σε υψηλότερο υψόμετρο. Αντιστρόφως, το GES ελευθερώνει τη μάζα για την περιστροφή γεννητριών για παραγωγή ηλεκτρισμού. Αυτή η τεχνολογία έχει ήδη εφαρμοστεί σε διάφορους τομείς όπως οι εξορυκτικές βιομηχανίες και οι κατασκευαστικές βιομηχανίες. Το GES έχει σχεδιαστεί σε διάφορες μορφές. Για παράδειγμα, μια εταιρεία που ονομάζεται Gravity Power αναπτύσσει μια τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας βαρύτητας μονάδας ισχύος όπως φαίνεται στο Σχήμα 11(a). Αυτή η τεχνολογία αποθηκεύει ή απελευθερώνει ενέργεια ανυψώνοντας ή ρίχνοντας ένα μεγάλο έμβολο το οποίο αιωρείται σε άξονα σε βαθιά νερά. Ωστόσο, πρέπει να σκαφτούν σε βάθος άξονες και σήραγγες που απαιτούν μεγάλο κόστος επένδυσης. Εν τω μεταξύ, η τριβή που προκαλείται από τις συρόμενες σφραγίδες οδηγεί σε απώλεια ενέργειας. Μια παρόμοια λύση GES που αναπτύχθηκε από την Heindl Energy δημιουργείται ανυψώνοντας μια πολύ μεγάλη μάζα βράχου μέσω αντλιών νερού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11(b). Σε σύγκριση με τη βαρυτική μονάδα ισχύος, λειτουργεί σε ημι-σφραγισμένη περίσταση. Η Advanced Rail Energy Storage (ARES) χρησιμοποιεί

ηλεκτρική πρόσφυση για να οδηγήσετε τα τρένα μεταφοράς προκειμένου να μεταφέρει συγκεκριμένη μάζα μεταξύ δύο διαφορετικών υψομέτρων. Η έννοια της επίδειξης ARES φαίνεται στο Σχήμα 11(c). Ωστόσο, οι σιδηροδρομικές γραμμές πρέπει να είναι κατασκευασμένες με αυτήν την τεχνολογία. Επιπλέον, η κλίση των σιδηροτροχιών μειώνει επίσης την αποδοτικότητα μετατροπής ενέργειας. Το Mountain Gravity Energy Storage (MGES) αναπτύσσει δύο γερανούς και στις δύο πλευρές μιας απότομης πλαγιάς σε ένα βουνό με αρκετή διαφορά ύψους για τη μεταφορά σκαφών αποθήκευσης μεταξύ του πυθμένα και της κορυφής του βουνού. Το δοχείο αποθήκευσης είναι γεμάτο με άμμο ή χαλίκι. Ένα έργο MGES παρουσιάζεται στο Σχήμα 11(d). Ωστόσο, το MGES υπόκειται σε τοπογραφικούς περιορισμούς, δηλαδή σε κατάλληλη διαφορά ύψους και σταθερό γεωλογικό περιβάλλον. Μια παρόμοια λύση GES που αναπτύχθηκε από την Energy Cache αποθηκεύει ενέργεια μετακινώντας κουβάδες με χαλίκι [16].



Σχήμα 11: Διάφορα συστήματα GES: (a) Μονάδα ισχύος βαρύτητας, (b) Αποθήκευση βαρύτητας της Heindl Energy, (c) Μονάδα επίδειξης ARES, (d) Έργο MGES [16].

1.2 Αποθήκευση ενέργειας σε ηλεκτροχημική μορφή

Ένα κλασικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε ηλεκτροχημική μορφή είναι οι ηλεκτροχημικές μπαταρίες οι οποίες έχουν ευρεία εφαρμογή. Σύμφωνα με το [17], οι κύριες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις μπαταρίες αποτυπώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 4:

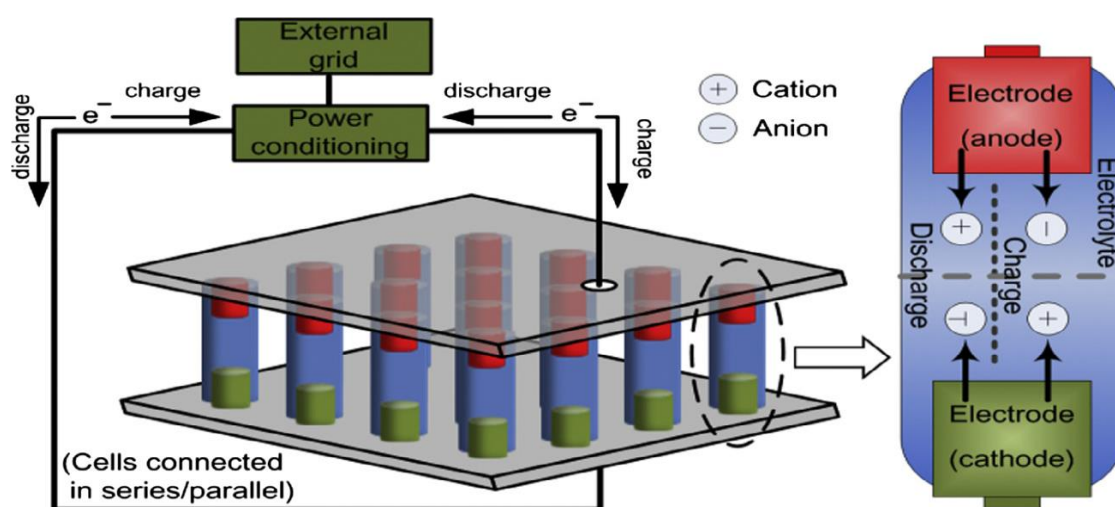
Πίνακας 4: Κύριες παράμετροι μπαταριών

A/A	Παράμετρος	Σύμβολο	Περιγραφή
1	Ονομαστική χωρητικότητα	Q_n, E_n	Χωρητικότητα μπαταρίας στην αρχή της ζωής της
2	Εναπομένουσα χωρητικότητα	Q_r, E_r	Χωρητικότητα μπαταρίας τη δεδομένη χρονική στιγμή
3	Κύκλος φόρτισης/εκφόρτισης	Cycle	<u>Μισός κύκλος</u> : μεταξύ 2 σημείων εναλλαγής λειτουργίας της μπαταρίας <u>Πλήρης κύκλος</u> : άθροισμα δύο συμμετρικών, ίδιου βάθους εκφόρτισης και αντίθετης φοράς μισών κύκλων
4	Επίπεδο φόρτισης	SoC	Ο λόγος της διαθέσιμης ενέργειας προς την εναπομένουσα χωρητικότητα
5	Βάθος εκφόρτισης	DoD	Ποσοστό της ενέργειας που έδωσε ή δέχτηκε η μπαταρία σε κάποια φάση της, προς την εναπομένουσα χωρητικότητα
6	Ρυθμός φόρτισης	C-Rate	Καταπόνηση της μπαταρίας κατά την φόρτιση/εκφόρτισή της
7	Θερμοκρασία μπαταρίας	T	Μέση θερμοκρασία της μπαταρίας
8	Χρόνος	t	Χρόνος παρατήρησης της μπαταρίας
9	Συντελεστής γήρανσης	L	Ποσοστό μείωσης της χωρητικότητάς της

Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας (Battery Energy Storage - BES)

Η επαναφορτιζόμενη μπαταρία είναι μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες (Electrical Energy Storage – EES) στη βιομηχανία και την καθημερινή ζωή. Το Σχήμα 12 δείχνει την απλοποιημένη λειτουργική αρχή ενός τυπικού συστήματος BES. Ένα σύστημα BES αποτελείται από έναν αριθμό ηλεκτροχημικών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά ή παράλληλα, που παράγουν ηλεκτρισμό με την επιθυμητή τάση από μία ηλεκτροχημική αντίδραση. Κάθε κελί περιέχει δύο ηλεκτρόδια (μία άνοδο και μία κάθοδο) με έναν ηλεκτρολύτη που μπορεί να είναι σε στερεά, υγρή ή παχύρρευστη κατάσταση. Ένα κελί μπορεί

να μετατρέψει ενέργεια αμφίδρομα μεταξύ ηλεκτρικής και χημικής ενέργειας. Κατά την εκφόρτιση, οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται στις ανόδους και στις καθόδους ταυτόχρονα. Στο εξωτερικό κύκλωμα, τα ηλεκτρόνια παράγονται στις ανόδους και συλλέγονται στις καθόδους. Στη διάρκεια της φόρτισης, πραγματοποιούνται οι αντίστροφες αντιδράσεις και η μπαταρία επαναφορτίζεται εφαρμόζοντας μια εξωτερική τάση στα δύο ηλεκτρόδια [7].



Σχήμα 12: Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας [7]

Οι μπαταρίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως σε διαφορετικές εφαρμογές, όπως ποιότητα ισχύος, διαχείριση ενέργειας, ισχύς μετάδοσης και συστήματα μεταφοράς. Η κατασκευή συστημάτων BES απαιτεί ένα σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα (περίπου εντός 12 μηνών). Η θέση εγκατάστασης μπορεί να είναι αρκετά ευέλικτη, είτε να στεγάζεται μέσα σε ένα κτίριο ή κοντά στις εγκαταστάσεις όπου χρειάζεται. Επί του παρόντος, οι σχετικά χαμηλοί χρόνοι και το υψηλό κόστος συντήρησης θεωρούνται ως τα κύρια εμπόδια στην εφαρμογή τους σε ευρείας κλίμακας εγκαταστάσεις.

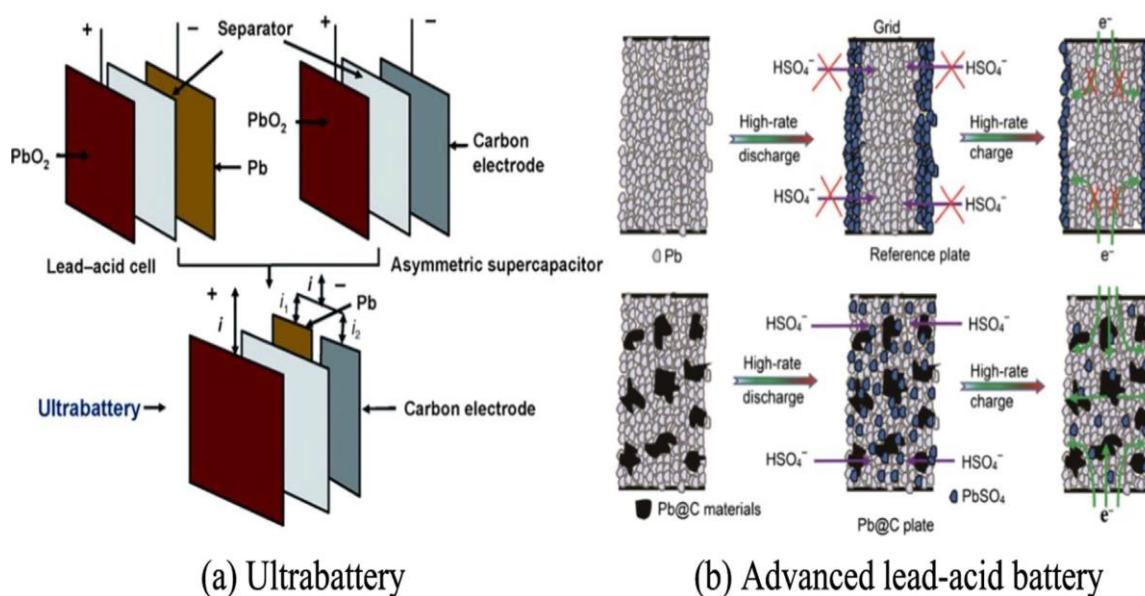
Πρέπει να ληφθεί υπόψη, για την απόρριψη ή την ανακύκλωση των μπαταριών που απορρίπτονται, εάν χρησιμοποιούνται τοξικά χημικά υλικά. Επιπλέον, πολλοί τύποι μπαταριών δεν μπορούν να αποφορτιστούν πλήρως λόγω της διάρκειας ζωής τους ανάλογα με το βάθος εκφόρτισης. Κάποιοι από τους πιο σημαντικούς τύπους μπαταριών αναφέρονται στη συνέχεια. Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε αυτούς τους τύπους μπαταριών αναφέρονται στον Πίνακα 5 [7].

Πίνακας 5: Χημικές αντιδράσεις & τάση μονάδας των κύριων μπαταριών που διατίθενται στο εμπόριο [7]

Battery type	Chemical reactions at anodes and cathodes	Unit voltage
Lead-acid	$\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \rightleftharpoons \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$ $\text{PbO}_2 + \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	2.0 V
Lithium-ion	$\text{C} + n\text{Li}^+ + n\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Li}_n\text{C}$ $\text{LiXXO}_2 \rightleftharpoons \text{Li}_{1-n}\text{XXO}_2 + n\text{Li}^+ + n\text{e}^-$	3.7 V
Sodium-sulfur	$2\text{Na} \rightleftharpoons 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^-$ $\chi\text{S} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \chi\text{S}^{2-}$	~2.08 V
Nickel-cadmium	$\text{Cd} + 2\text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Cd}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$ $2\text{NiOOH} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Ni}(\text{OH})_2 + 2\text{OH}^-$	1.0– 1.3 V
Nickel-metal hydride	$\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightleftharpoons 1/2\text{H}_2 + \text{OH}^-$ $\text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$	1.0– 1.3 V
Sodium nickel chloride	$2\text{Na} \rightleftharpoons 2\text{Na}^+ + 2\text{e}^-$ $\text{NiCl}_2 + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ni} + 2\text{Cl}^-$	~2.58 V

1.2.1 Μπαταρίες Μόλυβδου – Οξέος (Lead acid batteries)

Η μπαταρία μολύβδου-οξέος είναι δευτερεύουσα μπαταρία η οποία χρησιμοποιείται για πάνω από 150 χρόνια για διάφορες εφαρμογές και εξακολουθεί να χρησιμοποιείται για τη γενικότερη χρήση αποθήκευση ενέργειας σε τυπικές εφαρμογές όπως η ενέργεια έκτακτης ανάγκης σε συστήματα τροφοδοσίας, αυτόνομα συστήματα με PV, συστήματα μπαταριών για μετρίασμό της παραγωγής διακυμάνσεων από την αιολική ενέργεια και, σε οχήματα (Σχήμα 13).

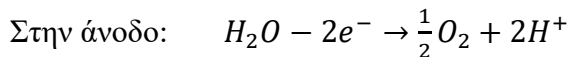
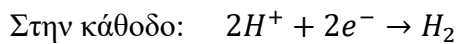
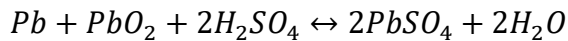


Σχήμα 13: Σχηματική απεικόνιση: (α) Ultrabattery και (β) Advanced lead-acid battery [18]

Η μπαταρία μολύβδου-οξέος αποτελείται από αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) από μολύβδο, διοξείδιο του μολύβδου ως θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) και έναν ηλεκτρολύτη υδατικού θεικού οξέος που μεταφέρει το φορτίο μεταξύ τους. Κατά τη στιγμή της εκφόρτισης, και τα

δύο ηλεκτρόδια καταναλώνουν θεικό οξύ από τον ηλεκτρολύτη και μετατρέπονται σε θεικό μόλυβδο. Κατά την επαναφόρτιση, ο θεικός μόλυβδος μετατρέπεται σε θεικό οξύ, δίνοντας καθαρό μόλυβδο στην άνοδο και ένα στρώμα διοξειδίου του μολύβδου στην κάθοδο [5].

Οι χημικές εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα είναι οι ακόλουθες [19]:



Το ποσοστό αυτοεκφόρτισης είναι χαμηλό αλλά η βαθιά απόρριψη οδηγεί σε διάβρωση της θετικής πλάκας. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι αξιόπιστες, με αποτελεσματικότητα 65-80% και με καλές δυνατότητες αύξησης. Είναι κυρίως κατάλληλες για αδιάλειπτη παροχή ρεύματος, περιστρεφόμενο απόθεμα και εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Έχουν χαμηλή τιμή σε σύγκριση με άλλες μπαταρίες. Έχουν μικρή διάρκεια ζωής (500-1000 κύκλοι), χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (30-50 Wh/kg), απελευθερώνουν εκρηκτικό αέριο και αναθυμιάσεις από το οξύ, απαιτούν τακτική συντήρηση και απαιτούν σύστημα θερμικής διαχείρισης καθώς δεν αποδίδουν αποτελεσματικά σε ψυχρές θερμοκρασίες [5].

Σήμερα, η έρευνα και η ανάπτυξη μπαταριών μολύβδου-οξέος επικεντρώνεται στα εξής: (α) καινοτόμα υλικά για βελτίωση της απόδοσης, όπως η παράταση του χρόνου κύκλου και η ενίσχυση της ικανότητας βαθιάς εκφόρτισης, (β) εφαρμογή της τεχνολογίας μπαταριών σε εφαρμογές αιολικής ενέργειας, ολοκλήρωση φωτοβολταϊκής ισχύος και τομείς αυτοκινήτων. Αρκετές προηγμένες μπαταρίες μολύβδου-οξέος που έχουν γρήγορες αποκρίσεις, συγκρίσιμες με τους σφονδύλους και τους υπερσυμπιεστές, έχουν αναπτυχθεί ή βρίσκονται στη φάση επίδειξης [7].

1.2.2 Μπαταρίες Νικελίου – Καδμίου (Ni-Cd batteries)

Οι μπαταρίες Ni-Cd αποτελούνται από:

- το αρνητικό ηλεκτρόδιο κατασκευασμένο από υδροξείδιο καδμίου (άνοδος)
- το θετικό ηλεκτρόδιο από υδροξείδιο νικελίου (κάθοδος)
- ένα διαχωριστικό και
- διαλυτό ηλεκτρολύτη.

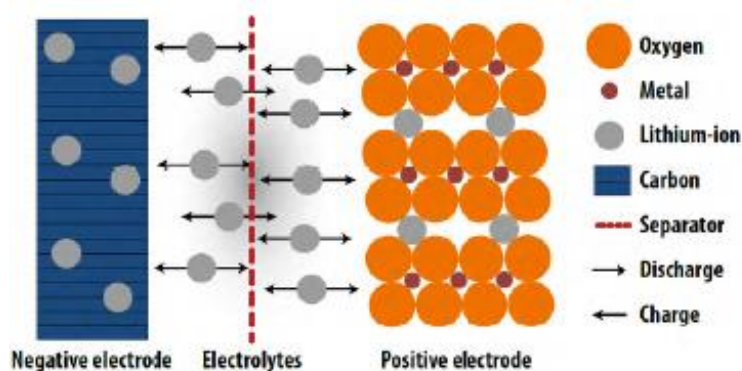
Οι μπαταρίες Ni-Cd κανονικά περικλείονται σε μέταλλο με μια πλάκα στεγανοποίησης εξοπλισμένη με βαλβίδα ασφαλείας. Οι μπαταρίες Ni-Cd είναι οι μόνες μπαταρίες που είναι ικανές να λειτουργούν καλά ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες (-20°C έως -40°C) [5].

Συνήθως έχουν σχετικά υψηλή αξιοπιστία και χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Οι αδυναμίες των μπαταριών Ni-Cd είναι ότι: (α) το κάδμιο και το νικέλιο είναι τοξικά βαρέα μέταλλα, με αποτέλεσμα την επιβάρυνση του περιβάλλοντος και, (β) η μπαταρία υποφέρει από τη μνήμη με αποτέλεσμα η μέγιστη χωρητικότητα να μπορεί να μειωθεί δραματικά εάν η μπαταρία επαναφορτίζεται επανειλημμένα αφού έχει αποφορτιστεί μόνο εν μέρει [7].

Δεδομένου ότι οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου (Ni-Cd) έχουν μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα ($50\text{--}75\text{ Wh/kg}$) και έχουν καλύτερη ζωή ($2000\text{--}2500$ κύκλοι), ανταγωνίζονται άμεσα με τις μπαταρίες μόλυβδου οξέος. Είναι κατάλληλες για αδιάλειπτη τροφοδοσία και εφαρμογές εκκίνησης γεννήτριας [5].

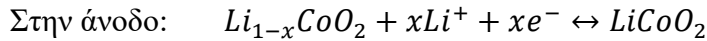
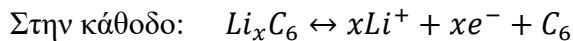
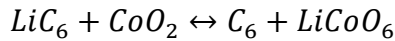
1.2.3 Μπαταρίες ιόντων Λιθίου (Li-ion batteries)

Σε μια μπαταρία ιόντων λιθίου, η κάθοδος είναι κατασκευασμένη από μεταλλικό οξείδιο λιθίου, όπως το LiCoO_2 και το LiMO_2 , και η άνοδος είναι κατασκευασμένη από γραφίτη άνθρακα. Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως ένα μη υδατικό οργανικό υγρό που περιέχει διαλυμένα άλατα λιθίου, όπως το LiClO_4 (Σχήμα 14).



Σχήμα 14: Σχηματική παράσταση κελιού μπαταρίας Li-ion [19]

Οι χημικές εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα είναι οι ακόλουθες [19]:



Η μπαταρία Li-ion θεωρείται κατάλληλη για εφαρμογές όπου ο χρόνος απόκρισης, η μικρή διάσταση ή/και το βάρος του εξοπλισμού είναι σημαντικά (χρόνος απόκρισης χιλιοστών του δευτερολέπτου, 1500-10.000 W/L, 75–200 Wh/kg, 150–2000 W/kg). Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν επίσης υψηλή απόδοση κύκλου, έως και 97%. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι ότι ο κύκλος DoD μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής αυτών των μπαταριών και η μπαταρία απαιτεί συνήθως έναν ενσωματωμένο υπολογιστή για τη διαχείριση της λειτουργίας της, γεγονός που αυξάνει το συνολικό κόστος της. Η τρέχουσα έρευνα για την μπαταρία ιόντων λιθίου περιλαμβάνει: (α) αύξηση της ικανότητας ισχύος της μπαταρίας με τη χρήση νανο-υλικών και (β) ενίσχυση της ειδικής ενέργειας της μπαταρίας με την ανάπτυξη ηλεκτροδίων από προηγμένα υλικά και διαλύματα ηλεκτρολυτών [7].

Πλεονεκτήματα των μπαταριών Li-ion:

- μπορούν να σχεδιαστούν σε οποιοδήποτε μέγεθος απαιτείται,
- υψηλή πυκνότητα ισχύος,
- ενεργειακή πυκνότητα 200 Wh/kg,
- υψηλή απόδοση 95% και παραπάνω,
- μεγάλος κύκλος ζωής των 3000 κύκλων στο 80%,
- χαμηλά ποσοστά αυτοεκφόρτισης,
- περίπου 100% αποδοτικότητα φόρτισης εκφόρτισης.

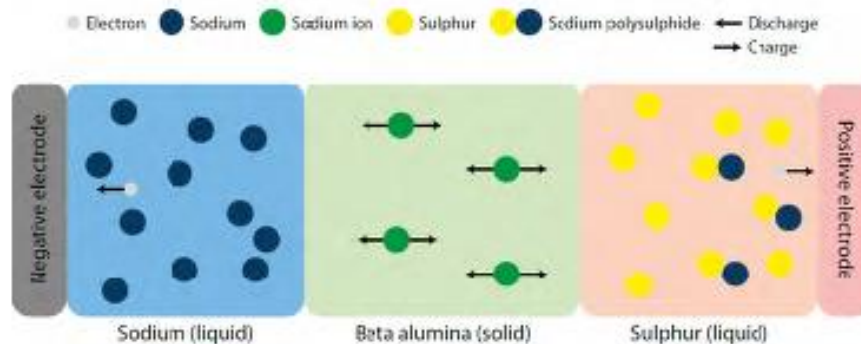
Μειονεκτήματα των μπαταριών Li-ion:

- υψηλό κόστος,
- απαίτηση πρόσθετου υλικού που απαιτείται για την ασφάλεια και την προστασία
- ευαίσθητες στη θερμοκρασία από την οποία εξαρτάται ο κύκλος ζωής

Σχετικά με την επίδραση στο περιβάλλον από την απόρριψη μετάλλων, π.χ. κοβάλτιο, υπάρχουν διαθέσιμες τεχνολογίες για ανάκτηση από τις χρησιμοποιημένες μπαταρίες [5].

1.2.4 Μπαταρίες Θείου – Νατρίου (Na-S batteries)

Οι μπαταρίες θείου νατρίου αποθηκεύουν χημική ενέργεια σε θείο και νάτριο διαχωρίζοντας πολυθειούχο νάτριο. Οι μπαταρίες θείου νατρίου, αποτελούνται από ρευστό (υγρό) θείο στο θετικό ηλεκτρόδιο και υγρό νάτριο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, ενώ ο κεραμικός ηλεκτρολύτης απομονώνει δυναμικά υλικά από μία ισχυρή β-αλουμίνα. Η θερμοκρασία της μπαταρίας διατηρείται στο εύρος 300°C–350°C για να διατηρούνται τα ηλεκτρόδια σε στάδιο τήξης. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει να περάσουν μόνο τα θετικά σωματίδια νατρίου διαμέσου αυτού και συντήκεται με θείο για να σχηματίσει πολυσουλφίδια νατρίου (Σχήμα 15) [5]



Σχήμα 15: Ηλεκτροχημεία της μπαταρίας Na-S [19]

Σύμφωνα με το [5], τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μπαταριών Na-S είναι:

Πλεονεκτήματα μπαταρίας Na-S:

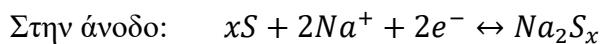
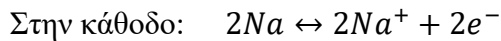
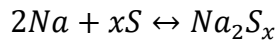
- υψηλή πυκνότητα ισχύος (150-240 W/kg),
- καλή απόδοση (75–90%),
- 600% ονομαστική ικανότητα παλμού που μπορεί να διαρκέσει 30 δευτερόλεπτα
- κύκλοι έως 2500 φορές
- φιλικές προς το περιβάλλον
- επαναχρησιμοποιούμενα υλικά σε ποσοστό >99% του γενικού βάρους

Μειονεκτήματα μπαταρίας Na-S:

- Το Νάτριο είναι επικίνδυνο υλικό

- Απαιτεί πηγή θερμότητας που εκμεταλλεύεται την αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας, μειώνοντας εν μέρει την απόδοση της μπαταρίας.

Οι χημικές εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα είναι οι ακόλουθες [19]:



Μπαταρίες ροής (Flow Battery Energy Storage – FBES)

Μια μπαταρία ροής αποθηκεύει ενέργεια σε δύο διαλυτά ζευγάρια οξειδοαναγωγής που περιέχονται σε εξωτερικές δεξαμενές υγρών ηλεκτρολυτών. Αυτοί οι ηλεκτρολύτες μπορούν να αντλούνται από τις δεξαμενές στη στοίβα κυψελών που αποτελείται από δύο διαμερίσματα ροής ηλεκτρολυτών διαχωρισμένα με μεμβράνες επιλεκτικών ιόντων. Η λειτουργία βασίζεται σε αντιδράσεις μείωσης-οξείδωσης των διαλυμάτων ηλεκτρολύτη. Κατά τη φάση φόρτισης, ένας ηλεκτρολύτης οξειδώνεται στην άνοδο και ένας άλλος ηλεκτρολύτης ανάγεται στην κάθοδο, και η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται στον ηλεκτρολύτη σε χημική ενέργεια. Η παραπάνω διαδικασία αντιστρέφεται κατά τη φάση εκφόρτισης (Σχήμα 16).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του συστήματος FBES είναι ότι η ισχύς ενός συστήματος FBES είναι ανεξάρτητη από τη χωρητικότητα αποθήκευσης. Η ισχύς του συστήματος FBES καθορίζεται από το μέγεθος των ηλεκτροδίων και τον αριθμό κελιών στη στοίβα, λαμβάνοντας υπόψη ότι η χωρητικότητα αποθήκευσης καθορίζεται από τη συγκέντρωση και την ποσότητα του ηλεκτρολύτη.

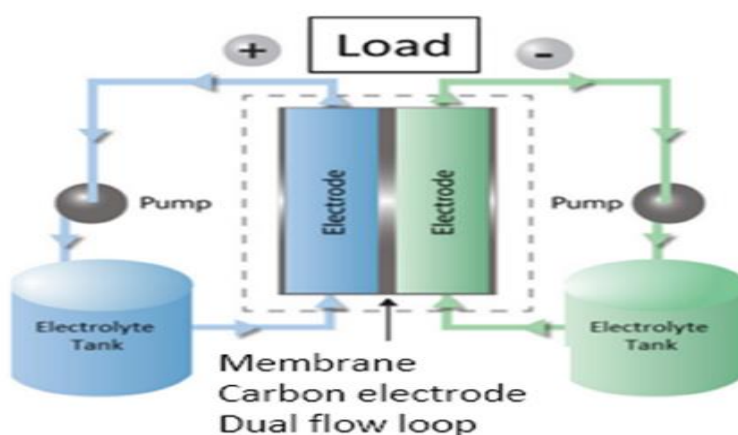
Επίσης, η πολύ μικρή αυτοεκφόρτιση είναι εγγενής δύναμη του συστήματος FBES και οφείλεται στο ότι οι ηλεκτρολύτες αποθηκεύονται σε ξεχωριστά σφραγισμένες δεξαμενές. Τα μειονεκτήματα των μπαταριών ροής αφορούν σε χαμηλή απόδοση που προκύπτει από τις μη ομοιόμορφες πτώσεις πίεσης και τον περιορισμό μεταφοράς της μάζας του αντιδρώντος, σχετικά υψηλό κόστος κατασκευής και άλλες περίπλοκες απαιτήσεις συστήματος σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μπαταρίες [7].

Οι μπαταρίες ροής έχουν σχετικά υψηλότερη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας και επακόλουθη κυκλοφορία (15 MWh – 120 MWh και απόδοση αποθήκευσης περίπου 75%).

Πλεονεκτήματα μπαταριών ροής

- γρήγορη επαναφόρτιση,
- μεγάλη διάρκεια ζωής (περίπου μία δεκαετία),
- πλήρης δυνατότητα εκφόρτισης,
- μη τοξικά υλικά στο δομή και
- λειτουργικά χαρακτηριστικά σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Η κινητικότητα των μηχανικών εξαρτημάτων είναι το κύριο μειονέκτημα του συστήματος, ο μείζων περιορισμός της εμπορικής προσαρμογής των μπαταριών ροής [2].



Σχήμα 16: Δομή πηγής μπαταρίας ροής [2]

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτρολυτών που χρησιμοποιούνται ως κεντρικό στοιχείο στις μπαταρίες ροής:

Βανάδιο → Vanadium Redox Flow Battery

Βρώμιο με Ψευδάργυρο → Zinc Bromine Flow Battery

Πολυσουλφίδιο Νατρίου, Βρωμιούχο Νάτριο → Polysulfide Bromine Flow Battery

Στη συνέχεια υπάρχει μια περιγραφή αυτών των τύπων μπαταριών [2].

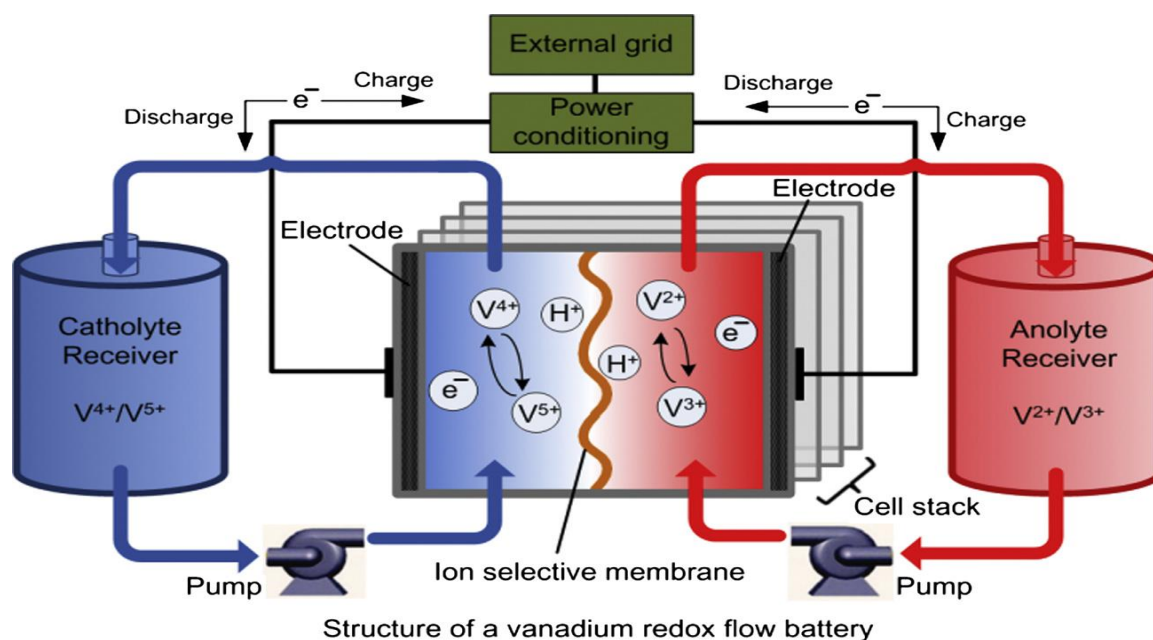
1.2.5 Μπαταρίες ροής Βαναδίου (VRB)

Οι μπαταρίες ροής Βαναδίου (Vanadium Redox Flow Battery - VRB) είναι ένα από τα πιο ώριμα συστήματα μπαταριών ροής. Το VRB αποθηκεύει ενέργεια χρησιμοποιώντας ζευγάρια οξειδοαναγωγής βαναδίου (V^{2+}/V^{3+} και V^{4+}/V^{5+}) σε δύο δεξαμενές ηλεκτρολυτών (Σχήμα 17). Τα VRB εκμεταλλεύονται το βανάδιο σε αυτές τις τέσσερις καταστάσεις οξείδωσης που κάνει τη μπαταρία ροής να έχει μόνο ένα ενεργό στοιχείο. Κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης

/εκφόρτισης, τα ιόντα H^+ ανταλλάσσονται μέσω της επιλεκτικής μεμβράνης ιόντων. Η χημική αντίδραση είναι:



και η τάση κυψέλης είναι 1,4 V.



Σχήμα 17: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος μπαταρίας ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου [7]

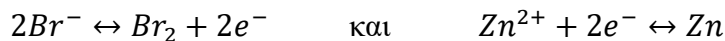
Τα VRB έχουν γρήγορες αποκρίσεις (γρηγορότερα από 0,001 s) και μπορούν να λειτουργήσουν για 10.000–16.000+ κύκλους, ενώ έχουν σχετικά υψηλή απόδοση, έως και 85%. Οι κατασκευαστές μπορούν να σχεδιάσουν VRB που παρέχουν συνεχή ισχύ (διάρκεια εκφόρτισης 24+ ώρες). Αν και τα VRB τείνουν τώρα να επεκτείνουν το εύρος των εφαρμογών τους με την ενίσχυση της φυσικής κλίμακας, υπάρχουν κάποιες τεχνικές προκλήσεις που πρέπει να λυθούν, για παράδειγμα, χαμηλή σταθερότητα ηλεκτρολυτών και διαλυτότητα που οδηγούν σε χαμηλή ποιότητα ενεργειακής πυκνότητας. Επίσης, το σχετικά υψηλό λειτουργικό κόστος πρέπει να μειωθεί περαιτέρω.

Τα VRB μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών, κυρίως συμπεριλαμβανομένης της βελτίωσης της ποιότητας ισχύος που χρησιμοποιείται για σταθερές εφαρμογές και συσκευές UPS, βελτιώνοντας τη σταθερότητα φορτίου και την ασφάλεια ισχύος, υποστηρίζοντας τη διαλείπουσα φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [7].

1.2.6 Μπαταρίες ροής Ψευδαργύρου Βρωμίου (Zn-Br)

Οι μπαταρίες ροής Ψευδαργύρου Βρωμίου (Zinc Bromine Flow Battery - Zn-Br) ανήκουν στην κατηγορία των υβριδικών μπαταριών ροής. Σε μια μπαταρία Zn-Br, τα δύο υδατικά διαλύματα ηλεκτρολύτη περιέχουν τα αντιδρώντα συστατικά, τα οποία βασίζονται σε στοιχεία ψευδαργύρου και βρωμίου, αποθηκευμένα σε δύο εξωτερικές δεξαμενές. Κατά τη διάρκεια των φάσεων φόρτισης/εκφόρτισης, αυτά τα δύο διαλύματα ηλεκτρολυτών ρέουν μέσω της στοίβας στοιχείου που αποτελείται από σύνθετα ηλεκτρόδια άνθρακα-πλαστικού με διαμερίσματα.

Έτσι, οι αναστρέψιμες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται σε αυτές τις ηλεκτρολυτικές κυσέλες. Οι αντίστοιχες χημικές αντιδράσεις είναι:



Η μπαταρία ροής Zn-Br έχει σχετικά υψηλή πυκνότητα ενέργειας (30–65 Wh/L) και τάση (1,8 V). Έχει επίσης μεγάλη ικανότητα εκφόρτισης και καλή αναστρεψιμότητα. Τα μεγέθη των μονάδων διαφέρουν από 3 kW έως 500 kW, με εκτιμώμενη διάρκεια ζωής 10-20 ετών και διάρκεια εκφόρτισης έως 10 ώρες. Τα μειονεκτήματα της μπαταρίας Zn-Br είναι: διάβρωση υλικού, σχηματισμός δενδρίτη και σχετικά χαμηλή απόδοση κύκλου (περίπου 65-75%) σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μπαταρίες, η οποία μπορεί να περιορίσει τις εφαρμογές της. Επιπλέον, οι μπαταρίες Zn-Br λειτουργούν κανονικά σε στενό εύρος θερμοκρασίας [7].

1.2.7 Μπαταρίες ροής Βρωμιούχου Νατρίου Πολυσουλφιδίου (PSB)

Ένα σύστημα μπαταριών ροής Βρωμιούχου Νατρίου (Polysulfide Bromine Flow Battery - PSB) χρησιμοποιεί βρωμιούχο νάτριο και πολυσουλφίδιο του νατρίου ως ηλεκτρολύτες του αλκαλικού διαλύματος. Οι χημικές αντιδράσεις είναι [7]:



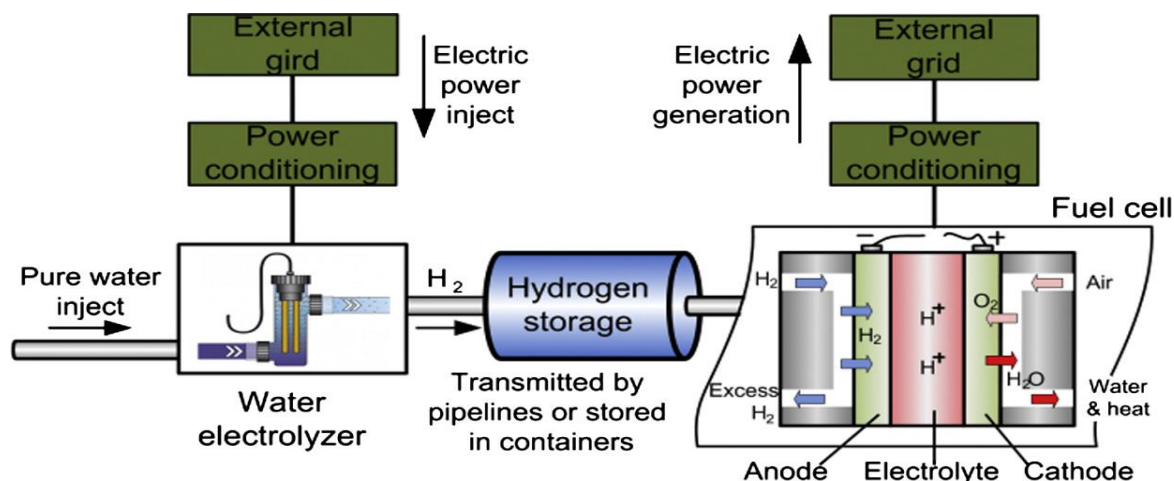
Τα σημαντικά πλεονεκτήματα του συστήματος PSB είναι: τα υλικά δύο ηλεκτρολυτών είναι άφθονα και πολύ διαλυτά σε υδατικούς ηλεκτρολύτες, και είναι επίσης αποδοτικά σε σχέση με το κόστος. Η τάση που δημιουργείται κατά μήκος της μεμβράνης είναι 1,5 V, ενώ το σύστημα PSB έχει γρήγορο χρόνο απόκρισης, αντιδρώντας μέσα σε 20 ms. Τα PSB έχουν ένα ευρύ φάσμα περιοχών για πιθανές εφαρμογές, ειδικά για έλεγχο συχνότητας ισχύος και τάσης συστήματος λόγω της χαρακτηριστικά γρήγορης απόκρισης. Επειδή το βρώμιο και οι κρύσταλλοι θεικού νατρίου παράγονται κατά τη διάρκεια των χημικών αντιδράσεων, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε περιβαλλοντικά ζητήματα [7].

1.3 Αποθήκευση ενέργειας σε χημική μορφή (CES)

Τα συστήματα αποθήκευσης χημικής ενέργειας (Chemical Energy Storage - CES) είναι από τα πλέον σημαντικότερα συστήματα μακροχρόνιας αποθήκευσης ενέργειας με τη μορφή χημικών δεσμών μοριακών ενώσεων. Η ισχύς παράγεται από την αναδιάταξη αυτών των μορίων μέσω χημικών αντιδράσεων μεταφοράς ηλεκτρονίων. Η κύρια ουσία από την οποία ανακτάται η ενέργεια μετατρέπεται σε εντελώς νέα ουσία ή σε άλλη μορφή ενέργειας. Η CES είναι τεχνολογία μηδενικών εκπομπών και απόλυτα φιλική προς το περιβάλλον, με χωρητικότητα αποθήκευσης άνω των 100 GWh. Στην CES, η τυπική διαδικασία της συνεχούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αυτό του χημικού ενεργειακού καυσίμου γίνεται από το στοιχείο καυσίμου (FC). Σε αντίθεση με το σύστημα μπαταριών, η FC παρέχει συνεχώς την ηλεκτρική ενέργεια όσο διατίθεται το ενεργό καύσιμο και οξειδωτικό που παρέχεται εξωτερικά, μειώνοντας την εξάρτηση από την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων καθώς και τις επιβλαβείς εκπομπές αερίων. Η άνοδος στην FC αποτελείται από υγρό ή αέριο καύσιμο και η κάθοδος μπορεί να είναι αέρας, οξυγόνο ή χλώριο. Σημαντική ποσότητα ενέργειας μπορεί να αποθηκευτεί σε FC βελτιστοποιώντας το μέγεθος της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου, ανεξάρτητα από την ονομαστική ισχύ [19].

1.3.1 Αποθήκευση ενέργειας σε μορφή Υδρογόνου (HES)

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε μορφή υδρογόνου (Hydrogen Energy Storage – HES) χρησιμοποιούν δύο ξεχωριστές διαδικασίες για αποθήκευση ενέργειας και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 18). Η χρήση μιας μονάδας ηλεκτρόλυσης νερού είναι ένας συνηθισμένος τρόπος παραγωγής υδρογόνου το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί σε δοχεία υψηλής πίεσης ή/και να μεταδοθεί μέσω αγωγών για μελλοντική χρήση. Όταν χρησιμοποιείται το αποθηκευμένο υδρογόνο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η κυψέλη καυσίμου θεωρείται ως η βασική τεχνολογία στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε μορφή υδρογόνου [7].



Σχήμα 18: Σχηματική απεικόνιση τεχνολογίας αποθήκευσης υδρογόνου και κυψέλης καυσίμου [7]

Ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη, μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου και μία κυψέλη καυσίμου. Ένας ηλεκτρολύτης είναι ένας μετατροπέας που δίνει νερό με τη βοήθεια ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο και οξυγόνο ηλεκτροχημικά. Για τη δημιουργία ισχύος, και τα δύο αέρια ρέουν στην κυψέλη καυσίμου όπου μια ηλεκτροχημική αντίδραση συμβαίνει: το υδρογόνο και το οξυγόνο αντιδρούν και απελευθερώνουν νερό, ενώ η θερμότητα αποβάλλεται ως ηλεκτρική ενέργεια. Η ισχύς σε περιόδους εκτός αιχμής, χρησιμοποιείται για την ηλεκτρόλυση του νερού για τη δημιουργία υδρογόνου για εφαρμογή αποθήκευσης ενέργειας. Αποθήκευση υδρογόνου σε διαφορετικές μορφές όπως συμπιεσμένο αέριο, υγροποιημένο αέριο, μεταλλικά υβρίδια ή νανοδομές άνθρακα είναι επίσης δυνατές. Σε σταθερές εφαρμογές, η αποθήκευση αερίων υπό υψηλή συμπίεση είναι η πιο διαδεδομένη. Μικρότερες ποσότητες υδρογόνου μπορούν να αποθηκευτούν σε δεξαμενές εδάφους ή φιάλες υπό πίεση έως 900 bar. Ένα αξιοσημείωτο μειονέκτημα είναι η σημαντική απώλεια ενέργειας σε έναν μόνο κύκλο (από την παραγωγή υδρογόνου έως την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου) στη χρήση υδρογόνου για αποθήκευση ενέργειας [5].

Στην τεχνική αποθήκευσης υδρογόνου, το υδρογόνο παράγεται χρησιμοποιώντας την περίσσεια ενέργειας, αποθηκεύεται και τελικά η ενέργεια ανακτάται από το αποθηκευμένο υδρογόνο. Η τελευταία φάση συντελείται σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας είτε ένα παραδοσιακό κινητήρα εσωτερικής καύσης ή μια κυψέλη καυσίμου. Το υδρογόνο έχει αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά ως καύσιμο. Έχει υψηλή θερμαντική αξία (HHV) 141,8 MJ / kg, η οποία είναι διπλάσια σε σύγκριση με αυτή του μεθανίου. Επιπλέον, το γεγονός ότι καίγεται σε στοιχειομετρικές συνθήκες με αναλογία αέρα προς καύσιμο 34,33, σε συνδυασμό με τα πολύ μεγάλα όρια ευφλεκτότητάς του, επιτρέπει την υλοποίηση καύσης

με πολύ χαμηλή κατανάλωση καυσίμου. Το κύριο μειονέκτημα προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητά του σε κατάσταση κανονικών συνθηκών, η οποία είναι πολύ χαμηλή, δηλαδή $0,084 \text{ kg} / \text{m}^3$. Αυτό επηρεάζει την τιμή της ενεργειακής πυκνότητας. Αυτός ο παράγοντας είναι ζωτικής σημασίας, δεδομένου ότι σηματοδοτεί τη δυσκολία αποθήκευσης υδρογόνου χρησιμοποιώντας παραδοσιακές μεθόδους, όπως συμπίεση αερίου ή υγροποίηση, και προτείνεται η χρήση κυψελών καυσίμου στη θέση του κινητήρα εσωτερικής καύσης, εάν ο επιθυμητός στόχος είναι μια πιο αποτελεσματική διαδικασία [20].

1.3.2 Κυψέλες καυσίμου (fuell cells)

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν μετατροπή ηλεκτροχημικής ενέργειας για αποθήκευση και παραγωγή ηλεκτρισμού. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται όταν το καύσιμο (άνοδος) και το οξειδωτικό (κάθοδος) αντιδρούν παρουσία ενός ηλεκτρολύτη. Τυπικά, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, τα αντιδρώντα ρέουν, τα προϊόντα της αντίδρασης θα ρέουν έξω ενώ ο ηλεκτρολύτης παραμένει στο κελί. Η ενέργεια παράγεται συνεχώς ενώ η ροή αντιδραστηρίων και προϊόντων διατηρείται. Οι κυψέλες καυσίμου διαφέρουν από τις μπαταρίες στο ότι τα αντιδραστήρια καταναλώνονται και πρέπει να αναπληρωθούν. Σχεδιάστηκαν αναστρέψιμες κυψέλες καυσίμου έτσι ώστε το αντιδραστήριο και ο ηλεκτρολύτης να παράγουν ηλεκτρισμό σαν προϊόν, που μπορεί να αντιστραφεί με την προσθήκη ηλεκτρικής ενέργειας για μετατροπή του προϊόντος πίσω στο αρχικό αντιδραστήριο. Τα καταλυτικά ηλεκτρόδια σε μια κυψέλη καυσίμου είναι σχετικά σταθερά. Σε κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, το υδρογόνο ενεργεί ως το αντιδραστήριο και το οξυγόνο ως το οξειδωτικό για το σχηματισμό νερού και ηλεκτρικής ενέργειας.

Πλεονεκτήματα

- πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας,
- δυνατότητα εφαρμογής σε μικρές και μεγάλες κλίμακες,
- απλή χρήση.

Μειονεκτήματα

- είναι ακριβά
- πολύ χαμηλή απόδοση μετ' επιστροφής.

Η κυψέλη καυσίμου είναι κατάλληλη για να χρησιμοποιήσει υδρογόνο. Η ανανεώσιμη ενέργεια εκτός αιχμής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τροφοδοσία μιας μονάδας ηλεκτρολύτη, που παράγει υδρογόνο και οξυγόνο από νερό. Το υδρογόνο μπορεί να διαχωριστεί και να αποθηκευτεί και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί όπως απαιτείται σε μια κυψέλη καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια εφαρμογή της κυψέλης καυσίμου είναι ως γεννήτρια ισχύος που είναι το πιο ενεργειακά αποδοτικό μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υδρογόνο [21].

1.3.3 Φυσικό αέριο σύνθεσης (SNG)

Η σύνθεση μεθανίου (Synthesis Natural Gas – SNG) είναι η δεύτερη εναλλακτική λύση για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική μορφή. Μετά το διαχωρισμό του νερού από έναν ηλεκτρολύτη, απαιτείται ένα άλλο βήμα στο οποίο το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα αντιδρά σε μεθάνιο σε έναν αντιδραστήρα μεθανοποίησης. Όπως ακριβώς στην περίπτωση υδρογόνου, το SNG που παράγεται μπορεί να μεταφερθεί σε δεξαμενές πίεσης, υπόγεια, ή να οδηγηθεί απευθείας στο δίκτυο αερίου. Διάφορες πηγές CO₂ είναι διαθέσιμες για τη διαδικασία σύνθεσης του μεθανίου, όπως για παράδειγμα, σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα, βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή μονάδες βιοαερίου. Η δημιουργία του SNG είναι ιδανική περίπτωση σε περιοχές όπου τόσο το CO₂ όσο και η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια είναι προσβάσιμα. Συγκεκριμένα, η χρήση CO₂ από διαδικασίες παραγωγής βιοαερίου είναι πολλά υποσχόμενες καθώς είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία.

Το βασικό μειονέκτημα είναι η χαμηλή απόδοση του SNG λόγω απωλειών κατά τη μεθανοποίηση, ηλεκτρόλυση, αποθήκευση, μεταφορά και παραγωγή ενέργειας. Έχει μια συνολική απόδοση AC-AC <35%, ακόμη χαμηλότερη από το υδρογόνο [5].

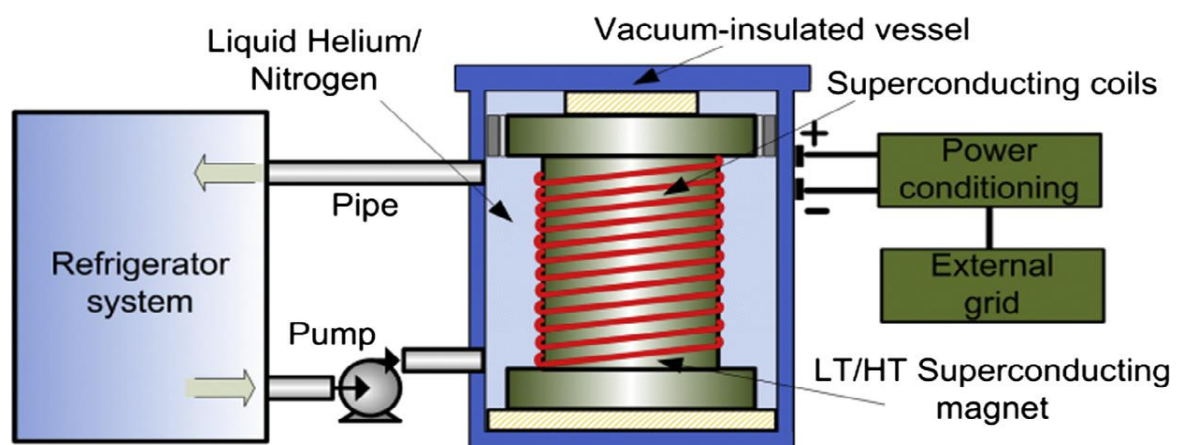
1.4 Αποθήκευση ενέργειας σε ηλεκτρική μορφή (EMESS)

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας απευθείας με τη μορφή φόρτισης και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όταν απαιτείται, είναι δυνατή από ηλεκτροστατικά και μαγνητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (Electrostatic and Magnetic Energy Storage Systems - EMESS). Οι υπερπυκνωτές και οι μαγνήτες υπεραγωγών χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της ενέργειας με τη μορφή ηλεκτροστατικών και μαγνητικών πεδίων. Πρόκειται για συσκευές αποθήκευσης υψηλής ισχύος και μέσης ενεργειακής πυκνότητας που βοηθούν στην επίτευξη της μέγιστης κατανάλωσης ενέργειας, εξομαλύνοντας την ισχύ εξόδου και την

ανάκτηση ενέργειας σε συστήματα μαζικής διαμετακόμισης [57]. Τα συστήματα EMESS περιέχουν κυρίως αποθήκευση ενέργειας πυκνωτή (SCES) και υπερ-αγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας (SMES) [19].

1.4.1 Υπεραγώγιμη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας (SMES)

Η υπεραγώγιμη μαγνητική ενέργεια αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES) βασίζεται σε ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται από την τρέχουσα κυκλοφορία σε ένα υπεραγώγιμο σύρμα (Σχήμα 19). Η ηλεκτρική ενέργεια φτάνει στο πηνίο διερχόμενη από ένα σύστημα ισχύος (συνήθως ένας μετατροπέας AC σε DC) και στη συνέχεια μετατρέπεται σε μαγνητικό πεδίο. Κατά την εκφόρτιση, το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται από το πηνίο στο δίκτυο και μετατρέπεται από έναν DC σε AC μετατροπέα. Το πηνίο SMES υψηλής θερμοκρασίας λειτουργεί περίπου στους 70° K ενώ το πηνίο SMES χαμηλής θερμοκρασίας διατηρείται περίπου στους 7° K [20].



Σχήμα 19: Τυπική διάταξη SMES [20]

Σύμφωνα με το [4], τα κύρια χαρακτηριστικά ενός συστήματος SMES είναι τα ακόλουθα:

- Η αλλαγή του ρεύματος στις περιελίξεις επιτρέπει την είσοδο ή την έξοδο ενέργειας από το σύστημα.
- Σε σταθερή κατάσταση, η ενέργεια μπορεί να διατηρηθεί επ' αόριστον.
- Το SMES έχει υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή συντήρηση, καθώς το κύριο μέρος είναι ακίνητο.

- Τα ψυκτικά συστήματα που ψύχουν τα SMES έχουν απώλειες ενέργειας επειδή έχουν κινούμενα μέρη.
- Η υψηλή ισχύς μπορεί να απελευθερωθεί αμέσως. Παρόλα αυτά, αυτό το επίπεδο ισχύος μπορεί να διατηρηθεί μόνο για μικρό χρονικό διάστημα.
- Η δικτύωση πολλών συστημάτων SMES μπορεί να αυξήσει την διαθέσιμη ενέργεια.

Σχετικά με το κόστος του συστήματος SMES, αυτό είναι περίπου 4,2 εκ. \$ για ένα πρωτότυπο 3,3kW. Για τοροειδές σχεδιασμό, κοστίζει περίπου 2000 \$ / kWh.

Στον ακόλουθο Πίνακα 6 καταγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος [4].

Πίνακας 6: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα SMES

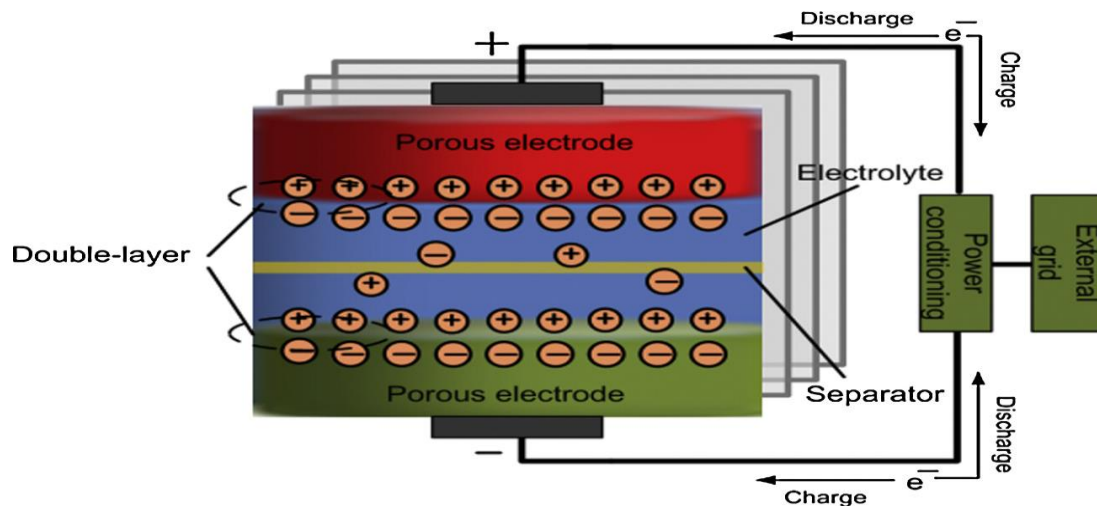
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Το σύστημα SMES έχει γρήγορο χρόνο απόκρισης με την ικανότητά του να αλλάζει από κατάσταση φόρτισης σε κατάσταση εκφόρτισης εντός δευτερολέπτων. Αυτό είναι πλεονέκτημα καθώς δεν υπάρχει πραγματικός χρόνος αναμονής για την αναγέννηση αυτού του συστήματος	Απαιτήση μεγάλης ποσότητας ισχύος για τη διατήρηση του πηνίου σε χαμηλές θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με το υψηλό συνολικό κόστος για τη χρήση μιας μονάδας.
Υψηλή απόδοση	Χαμηλή χωρητικότητα αποθήκευσης και διακοπή ισχύος
Μεγάλη διάρκεια ζωής	Χαμηλή διάρκεια εκφόρτισης στο μέγιστο επίπεδο ισχύος

1.4.2 Υπερπυκνωτές (SUPERCAPACITORS)

Οι υπεραπυκνωτές, που ονομάζονται επίσης ηλεκτρικοί πυκνωτές διπλού στρώματος ή υπερσυμπιεστές, περιέχουν δύο ηλεκτρόδια αγωγού, έναν ηλεκτρολύτη και έναν διαχωριστή πορώδους μεμβράνης (Σχήμα 20). Λόγω της δομής τους, οι υπερπυκνωτές μπορούν να έχουν τόσο τα χαρακτηριστικά των παραδοσιακών πυκνωτών όσο και των ηλεκτροχημικών μπαταριών. Η ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή στατικού φορτίου στις επιφάνειες μεταξύ του ηλεκτρολύτη και των δύο ηλεκτροδίων αγωγού. Οι υπερπυκνωτές με υψηλή απόδοση βασίζονται σε νανο υλικά για την αύξηση της επιφάνειας του ηλεκτροδίου για την ενίσχυση της χωρητικότητας.

Η ισχύς και η ενεργειακή πυκνότητα των υπερπυκνωτών είναι μεταξύ εκείνων των επαναφορτιζόμενων μπαταριών και των παραδοσιακών πυκνωτών. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά τους είναι οι μεγάλοι χρόνοι ποδηλασίας τους, περισσότερο από 1×10^5

κύκλους και η υψηλή απόδοση κύκλου (84–97%). Οι υπερπυκνωτές είναι κατάλληλοι για εφαρμογές βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης, αλλά όχι για μεγάλες και μακροπρόθεσμες EES [7].



Σχήμα 20: Σχηματική παράσταση ενός συστήματος supercapacitors [7]

Σύμφωνα με το [4], τα κύρια χαρακτηριστικά ενός συστήματος supercapacitors είναι τα ακόλουθα:

- Αυξάνοντας την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, αυξάνεται η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας.
- Οι συμμετρικοί πυκνωτές με ηλεκτρόδια ενεργού άνθρακα χρησιμοποιούνται ευρέως.
- Οι ασύμμετροι πυκνωτές έχουν υψηλότερες τάσεις λειτουργίας και μεγαλύτερη ικανότητα να παραμένουν εντός των ονομαστικών περιορισμών τάσης. Παρόλα αυτά, έχουν πλεονεκτήματα συσκευασίας και κατασκευής έναντι των συμμετρικών πυκνωτών.
- Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται γενικά για την αποκατάσταση μικρών διακοπών ισχύος.
- Είναι κατάλληλοι για τη σταθεροποίηση της στάθμης τάσης και της συχνότητας.
- Η σύνδεση μεταξύ των πυκνωτών μπορεί να αυξήσει τη διάρκεια του χρόνου και μπορούν να διορθώσουν τις διακοπές ρεύματος.
- Υψηλή πυκνότητα ισχύος.
- Η απόδοση είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία.

- Πολύ χαμηλή συντήρηση.
- Διάρκεια ζωής έως 20 έτη.

Το κόστος των supercapacitors κυμαίνεται σε εύρος 2400-6000 \$ / kWh.

Στον ακόλουθο Πίνακα 7 καταγράφονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος [4].

Πίνακας 7: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα supercapacitors

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Πολύ υψηλά ποσοστά φόρτισης και εκφόρτισης	Αν και έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος, η ενέργεια ανά μονάδα βάρους είναι σχετικά χαμηλή
Υψηλή ειδική ισχύς και απόδοση (έως 95%)	Υψηλή αυτοεκφόρτιση
Βελτιωμένη ασφάλεια, καθώς τα υλικά που χρησιμοποιούνται έχουν χαμηλή τοξικότητα	Δεν μπορεί να εφαρμοστεί μεμονωμένα, εκτός από τη σύνδεση σε σειρά με άλλους πυκνωτές
Χαμηλό κόστος ανά κύκλο	Υψηλή διηλεκτρική απορρόφηση
Γρήγορος χρόνος απόκρισης	Χαμηλή χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας
Μεγάλη διάρκεια ζωής	Χαμηλή διάρκεια εκφόρτισης στο μέγιστο επίπεδο ισχύος

1.5 Συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES)

Η αρχή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (Thermal Energy Storage – TES), είναι η θέρμανση ή η ψύξη ενός αποθηκευτικού μέσου και στη συνέχεια η χρήση του (θερμό ή ψυχρό) για τη μεταφορά θερμότητας σε μεταγενέστερο χρόνο.

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ευρέως παγκοσμίως, ενώ σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, η εγκατεστημένη χωρητικότητα των TES είναι 3,3 GW που αντιπροσωπεύει το 1,9% της παγκόσμιας αποθήκευσης ενέργειας το 2017. Καθώς οι ανάγκες θέρμανσης και ψύξης αποτελούν το 45% της χρησιμοποιούμενης ενέργειας για οικιακή και εμπορική χρήση, τα συστήματα TES μπορούν να υποστηρίξουν τις απαιτήσεις θέρμανσης/ ψύξης του οικιακού και εμπορικού τομέα συμβάλλοντας έτσι στις απαιτήσεις διαχείρισης του αντίστοιχου δικτύου.

Το σύστημα TES αποτελείται από τρία κύρια μέρη: δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης, μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας (σύστημα ψύξης, θερμότητα, κανάλια, αντλίες) και σύστημα ελέγχου περιορισμού.

Αρχικά η παραγόμενη θερμότητα αποθηκεύεται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης. Η αποθηκευμένη θερμότητα εξάγεται με μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας άμεσα ή έμμεσα για χρήση θερμικής ενέργειας ή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά κύκλο θερμότητας κινητήρα. Η μόνωση και η λειτουργία της δεξαμενής αποθήκευσης καθώς και το μέσο μεταφοράς θερμότητας παρακολουθούνται με σύστημα ελέγχου. Αν και η συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος TES είναι χαμηλή (30% -50%), τα πλεονεκτήματα όπως καθημερινή αυτοεκφόρτιση σχεδόν ίση με (1%), καλή ενεργειακή πυκνότητα (80-250 Wh/kg), φιλικότητα προς το περιβάλλον και επενδύσεις χαμηλού κόστους κεφαλαίου, κατατάσσουν τα συστήματα αυτά σαν τη βέλτιστη επιλογή για μεγάλη αποθήκευση ενέργειας χωρίς σημαντικούς κινδύνους σε πολλές εφαρμογές [19].

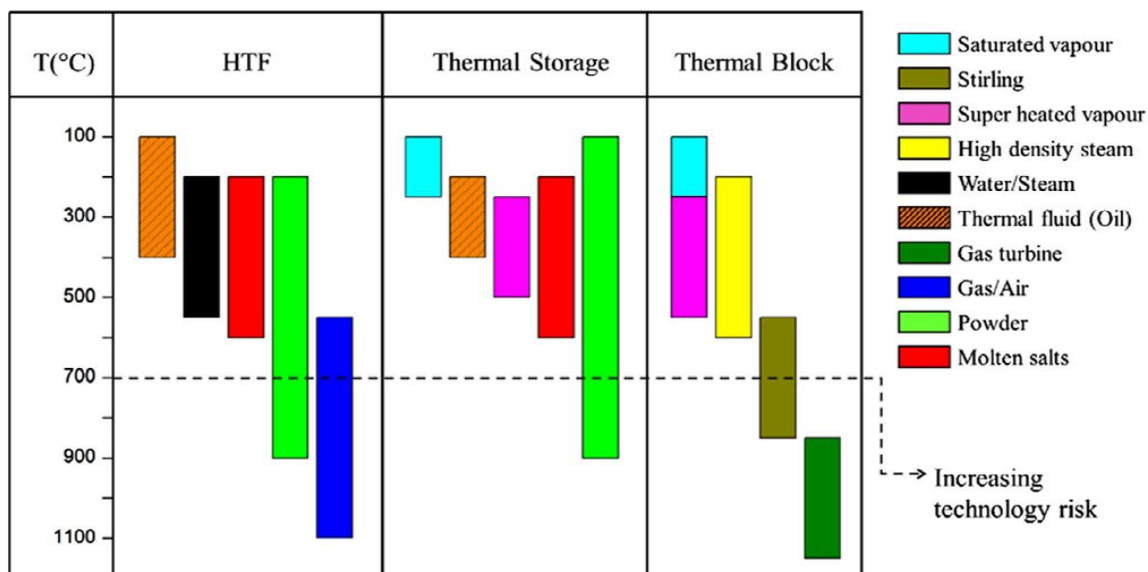
Σύμφωνα με το [22], τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με:

- το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας τους,
- το μηχανισμό αποθήκευσης,
- τη φύση κυκλοφορίας και
- τη διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης.

Ταξινόμηση με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας τους

Τα συστήματα TES κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις θερμοκρασίες λειτουργίας τους σε TES χαμηλής, μεσαίας και υψηλής θερμοκρασίας. Συστήματα αποθήκευσης που λειτουργούν στο εύρος 20°C έως 100°C θεωρούνται χαμηλής θερμοκρασίας, αυτά που λειτουργούν μεταξύ 100°C και 200°C είναι συστήματα αποθήκευσης μέσης θερμοκρασίας και αυτά που λειτουργούν πάνω από τη θερμοκρασία των 250°C ονομάζονται συστήματα θερμικής αποθήκευσης υψηλής θερμοκρασίας.

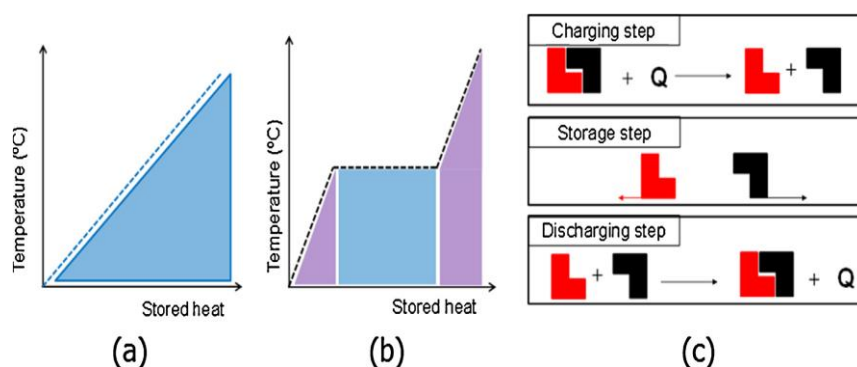
Το υγρό μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Fluid - HTF) είναι απαραίτητο για τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας από συλλέκτες ή συσκευές θέρμανσης και επιλέγεται με βάση το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος. Η ταξινόμηση των συστημάτων θερμικής αποθήκευσης ενέργειας, σύμφωνα με τις θερμοκρασίες λειτουργίας τους, αποτυπώνονται στο Σχήμα 21.



Σχήμα 21: Ταξινόμηση συστημάτων θερμικής αποθήκευσης ανάλογα με τις θερμοκρασίες λειτουργίας τους [22]

Ταξινόμηση με βάση το μηχανισμό αποθήκευσης

Τα συστήματα TES, με βάση το μηχανισμό αποθήκευσης, ταξινομούνται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες: συστήματα αποθήκευσης της αισθητής (sensible), της λανθάνουσας (latent) και της θερμο-χημικής (thermo-chemical) ενέργειας (Σχήμα 22).



Σχήμα 22: Μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (a) αισθητής θερμότητας, (b) λανθάνουσας θερμότητας, (c) θερμοχημικής θερμότητας [23]

1.5.1 Συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας (Sensible TES)

Ένα σύστημα Sensible TES αποθηκεύει και απελευθερώνει θερμότητα μέσω αλλαγής της θερμοκρασίας του θερμικού υλικού αποθήκευσης, το οποίο συνήθως είναι νερό, αλλά μπορεί να είναι και άμμος, άργιλος ή πέτρες. Το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται

από τη μάζα, την ειδική θερμότητα και τη διαφορά θερμοκρασίας (αρχική – τελική) του αποθηκευτικού μέσου.

Η αισθητή θερμότητα που εκλύεται ή αποθηκεύεται μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση [24]:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m c_p \Delta T \rightarrow Q = m c_p (T_f - T_i)$$

όπου Q: η θερμότητα (J)

m: η μάζα του υλικού (Kg)

c_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού (J/Kg K)

T_i : η αρχική θερμοκρασία (K)

T_f : η τελική θερμοκρασία (K)

ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας αρχικής και τελικής κατάστασης (K).

Η αποθήκευση της αισθητής θερμότητας είναι η πιο κοινή μέθοδος η οποία εφαρμόζεται εδώ και χρόνια με τη βοήθεια δεξαμενών αποθήκευσης ζεστού νερού.

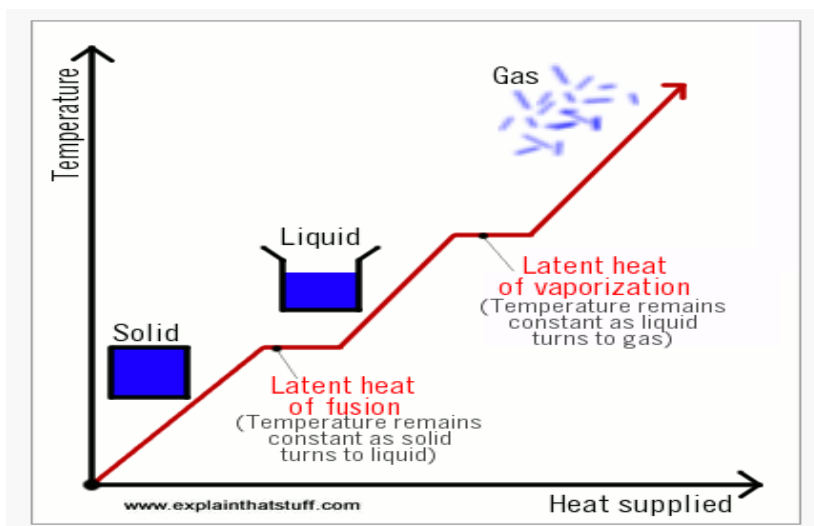
1.5.2 Συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (Latent TES)

Σε αυτά τα συστήματα, η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται/απελευθερώνεται από ένα υλικό κατά τη διάρκεια αλλαγής της φάσης του σε σταθερή θερμοκρασία. Είναι επίσης μια καθαρά φυσική διαδικασία χωρίς καμία χημική αντίδραση κατά τη διάρκεια της φόρτισης ή της εκφόρτισης. Η ποσότητα θερμότητας που αποθηκεύεται είναι γενικά η λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης (λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης για τη μεταβολή στερεού-υγρού και λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης για τη μεταβολή υγρού-ατμού) [25].

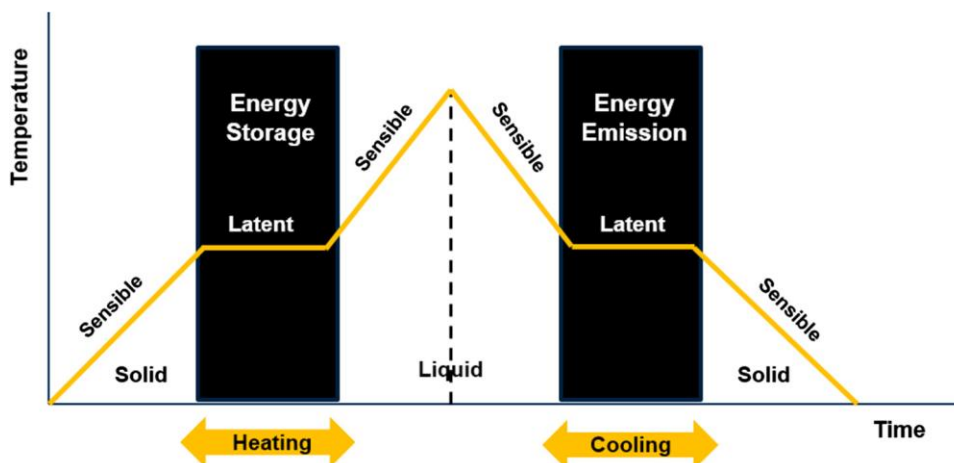
Για την αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας χρησιμοποιούνται τα υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials – PCM), θεωρώντας την αποθήκευση ως μια ξεχωριστή οντότητα ανάμεσα στην πηγή ενέργειας (όπως είναι η ηλιακή) και το σύστημα λήψης ή τον τελικό χρήστη [26].

Η πιο κοινή αλλαγή φάσης είναι από στερεό σε υγρό, ενώ από υγρό σε αέριο δεν είναι πρακτική. Η αλλαγή από στερεό σε στερεό (κρυστάλλωση) έχει συνήθως χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα. Όταν θερμανθεί ένα PCM, αρχικά συμπεριφέρεται ως μέσο αποθήκευσης

αισθητής θερμότητας και η θερμοκρασία του αυξάνεται. Όταν φτάσει τη θερμοκρασία στην οποία συμβαίνει η αλλαγή φάσης, το υλικό συνεχίζει να αποθηκεύει θερμότητα σε σταθερή θερμοκρασία μέχρι να πραγματοποιηθεί η αλλαγή φάσης του (Σχήμα 23). Όταν το PCM αλλάξει πάλι φάση και από υγρό γίνει ξανά στερεό, απελευθερώνεται η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί (Σχήμα 24). Αυτή η αποθηκευμένη θερμότητα είναι γνωστή ως λανθάνουσα θερμότητα [24].



Σχήμα 23: Μεταβολή της θερμοκρασίας συναρτήσει της θερμότητας που προσφέρεται σε ένα υλικό αλλαγής φάσης



Σχήμα 24: Σχηματικό διάγραμμα αλλαγής φάσης ενός PCM [27]

Η πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου υλικών μετάβαση στερεού-αερίου είναι χαμηλότερη. Τα PCM στερεών-υγρών χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της υψηλής πυκνότητας και της μικρής μεταβολής του όγκου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μετάβασης φάσης [28].

Η θερμότητα αποθήκευσης σε ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [24]:

$$Q = \int_{T_i}^{T_{pc}} m C_{p,s} dT + m \beta \Delta h + \int_{T_{pc}}^{T_f} m C_{p,l} dT \rightarrow$$

$$Q = m C_{p,s} (T_{pc} - T_i) + m \beta \Delta h + m C_{p,l} (T_f - T_{pc})$$

όπου: Q: η θερμότητα (J)

T_i: η αρχική θερμοκρασία (K)

T_{pc}: η θερμοκρασία αλλαγής φάσης (K)

T_f: η τελική θερμοκρασία (K)

m: η μάζα του PCM (Kg)

C_{p,s}: η ειδική θερμότητα του στερεού PCM (J/KgK)

C_{p,l}: η ειδική θερμότητα του υγρού PCM (J/KgK)

β: το κλάσμα όγκου του PCM που έχει αλλάξει φάση

Δh: η ειδική ενθαλπία του PCM (J/Kg)

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ηλιακών συστημάτων λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, της συμπαγούς φύσης και της σχεδόν σταθερής απαιτούμενης θερμοκρασίας για την αλλαγή φάσης [29].

Τα PCM μπορούν να καταταχθούν σε δύο βασικές κατηγορίες και συγκεκριμένα στις οργανικές και στις μη οργανικές ενώσεις [30]. Τα PCM που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι συνήθως στερεού – υγρού και πρέπει να έχουν τις ιδιότητες που παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 8:

Πίνακας 8: Κύριες επιθυμητές ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης [31]

Θερμικές – Φυσικές ιδιότητες	Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης
	Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου
	Υψηλή θερμική αγωγιμότητα τόσο στη στερεή όσο και στην υγρή φάση
	Μεγάλη μεταβολή ενθαλπίας κατά την αλλαγή φάσης
	Μικρή αλλαγή όγκου κατά την αλλαγή φάσης και χαμηλή τάση ατμών στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας
	Σταθερότητα στην κυκλική καταπόνηση
Κινητικές ιδιότητες	Να μην εμφανίζεται το φαινόμενο της υπόψυξης/ υπέρψυξης (subcooling/ supercooling)
	Υψηλός ρυθμός κρυστάλλωσης
Χημικές ιδιότητες	Μακροχρόνια χημική σταθερότητα
	Πλήρης αναστρέψιμος κύκλος ψύξης – τήξης
	Συμβατότητα με υλικά κατασκευής
	Μη τοξικά, μη εύφλεκτα και μη εκρηκτικά
Οικονομικές ιδιότητες	Χαμηλό κόστος
	Διαθεσιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα των περισσότερων PCM είναι ιδιαίτερα χαμηλή, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν χαμηλούς ρυθμούς φόρτισης/ αποφόρτισης, και επομένως να απαιτούνται τεχνικές για τη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας, για τις περισσότερες εφαρμογές αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας [32].

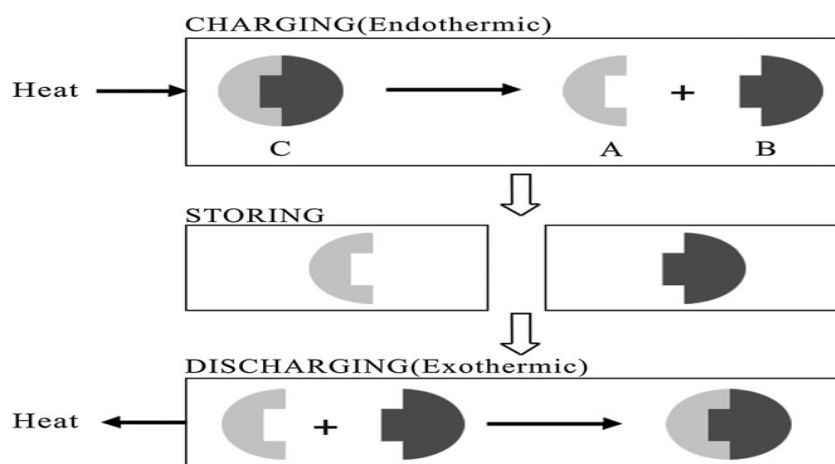
1.5.3 Συστήματα αποθήκευσης θερμοχημικής θερμότητας (TCS)

Προς το παρόν, η πιο προηγμένη τεχνολογία Concentrated Solar Power - CSP χρησιμοποιεί λιωμένο αλάτι ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας. Ωστόσο, το σημείο τήξης του αλάτος είναι γενικά 200 °C, και τα χαρακτηριστικά του περιορίζουν τη θερμοκρασία λειτουργίας κάτω από 600 °C. Αν και αυτή η θερμοκρασία είναι κατάλληλη για τον κύκλο Rankine, η θερμοδυναμική του απόδοση είναι περίπου 35%.

Μειονεκτήματα των τεχνολογιών Sensible TES και Latent TES είναι η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας και, η σύντομη περίοδος αποθήκευσης. Για να επιτευχθεί υψηλότερη θερμοκρασία αποθήκευσης ενέργειας και βελτίωση της αποτελεσματικότητας της αποθήκευσης ενέργειας, πρέπει να αναπτυχθούν νέα μέσα αποθήκευσης. Η μετατροπή θερμικής ενέργειας σε χημική ενέργεια δεν είναι μια εντελώς νέα ιδέα, αλλά λόγω της καλής σύζευξής της με το σύστημα CSP, έχει προκληθεί εκτεταμένο ερευνητικό ενδιαφέρον με την ανάπτυξη του CSP. Η πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας του TCS είναι περίπου 15 φορές μεγαλύτερη από αυτή της αισθητής και έξι φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της αλλαγής φάσης. Όπως και με το σύστημα Latent TES, το TCS μπορεί

να επιτύχει αποθήκευση και ανάκτηση θερμότητας στην ίδια θερμοκρασία. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης θερμότητας, το σημαντικό πλεονέκτημα του TCS είναι ότι θα μπορούσε να αποθηκεύσει και να μεταφέρει ενέργεια χωρίς απώλεια θερμότητας. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για τη διαπεριφερειακή μεταφορά θερμικής ενέργειας, για παράδειγμα, τη δημιουργία συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας σε υψηλή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας σε αραιοκατοικημένες περιοχές της ερήμου και χρήση της σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Η συγκεκριμένη διαδικασία TCS φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 25:



Σχήμα 25: Διαδικασίες σε κλειστό κύκλο TCS: φόρτιση, αποθήκευση, και εκφόρτιση [28]

Βασική αρχή αυτής της διαδικασίας είναι η χρήση συμπυκνωμένης ηλιακής ενέργειας για να οδηγήσει την ενδοθερμική χημική αντίδραση σε υψηλό χρόνο ακτινοβολίας. Δηλαδή, το αντιδραστήριο C απορροφά θερμότητα για την παραγωγή προϊόντων A και B και ταυτόχρονα η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική ενέργεια (στάδιο φόρτισης θερμότητας). Μεταφορά και μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας σε μορφή χημικής ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με την αποθήκευση των προϊόντων αντίδρασης A και B σε διαφορετικά δοχεία αντίστοιχα (αποθήκευση θερμότητας). Εάν η αντίδραση είναι εντελώς αναστρέψιμη, υπό την προϋπόθεση ανεπαρκούς ηλιακού φωτός, η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί πλήρως με αντίστροφη εξώθερμη αντίδραση. Δηλαδή, τα A και B αντιδρούν στη μορφή C, και η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια (στάδιο εκφόρτισης θερμότητας). Αν και η τεχνολογία TCS είναι ακόμα σε ανώριμο στάδιο και παραμένει στο εννοιολογικό επίπεδο, εξελίσσεται σε έναν πολύ ενεργό ερευνητικό τομέα [28].

1.5.4 Σύγκριση των τριών μεθόδων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Τα κύρια χαρακτηριστικά των τριών μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας αποτυπώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 9:

Πίνακας 9: Σύγκριση των τριών τύπων TES [28]

Χαρακτηριστικό	Sensible TES	Latent TES	TCS
Πυκνότητα ενέργειας	Χαμηλή (0.2 GJ/m ³)	Μεσαία (0.3-0.5 GJ/m ³)	Υψηλή (0.5-3 GJ/m ³)
Απώλεια θερμότητας	Σημαντική απώλεια θερμότητας με την πάροδο του χρόνου	Σημαντική απώλεια θερμότητας με την πάροδο του χρόνου	Μικρή απώλεια θερμότητας
Εύρος θερμοκρασίας	Θερμοκρασία βήματος φόρτισης	Θερμοκρασία βήματος φόρτισης	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
Διάρκεια ζωής	Μεγάλη	Περιορισμένη	
Μεταφορά	Μικρή απόσταση	Μικρή απόσταση	Απεριόριστη (θεωρητικά)
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> Χαμηλό κόστος Ωριμη τεχνολογία 	<ul style="list-style-type: none"> Μικρός όγκος Δυνατότητα μεταφοράς σε μικρή απόσταση 	<ul style="list-style-type: none"> Μεγάλη αποθηκευτική πυκνότητα Δυνατότητα μεταφοράς σε μεγάλη απόσταση Μικρές απώλειες θερμότητας
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> Σημαντική απώλεια θερμότητας με την πάροδο του χρόνου Απαίτηση μεγάλου όγκου 	<ul style="list-style-type: none"> Μικρή θερμική αγωγιμότητα Διάβρωση υλικών Σημαντικές απώλειες θερμότητας 	<ul style="list-style-type: none"> Τεχνική πολυπλοκότητα Υψηλά κόστη
Τεχνική πολυπλοκότητα	Μικρή	Μεσαία	Πολύπλοκη

Ταξινόμηση με βάση τη φύση του υγρού μεταφοράς θερμότητας

Με βάση αυτή την ταξινόμηση, το TES διακρίνεται σε ένα ενεργό σύστημα TES και ένα παθητικό TES.

Σε ένα ενεργό σύστημα θερμικής αποθήκευσης, το υλικό αποθήκευσης κυκλοφορεί μέσω του εναλλάκτη θερμότητας (ηλιακός δέκτης) χρησιμοποιώντας μια εξωτερική συσκευή (αντλία), και η ενέργεια απορροφάται ή απελευθερώνεται μέσω της αναγκαστικής μεταφοράς.

Ο ενεργός χώρος αποθήκευσης υποδιαιρείται μόνο σε άμεσο και έμμεσο. Σε ένα σύστημα άμεσης αποθήκευσης, το υλικό αποθήκευσης δρα τόσο ως HTF όσο και ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας, ενώ στην περίπτωση του έμμεσου συστήματος αποθήκευσης, το μέσο αποθήκευσης θα βρίσκεται σε στάσιμη θέση (σταθερή θέση) και το HTF κυκλοφορεί τη θερμική ενέργεια από την πηγή θερμότητας στο μέσο αποθήκευσης για την αποθήκευση της ενέργειας.

Σε ένα σύστημα παθητικής αποθήκευσης, το HTF κυκλοφορεί λόγω βαρύτητας ή λόγω των δυνάμεων πλευστότητας δια μέσω του μέσου αποθήκευσης χωρίς εξωτερική συσκευή.

Ταξινόμηση με βάση τη διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης

Τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης ταξινομούνται επίσης σύμφωνα με την περίοδο αποθήκευσής τους και κατηγοριοποιούνται σε βραχυπρόθεσμη και μακροχρόνια αποθήκευση.

Για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας, το σύστημα TES φορτίζεται και εκφορτίζεται καθημερινά ή εβδομαδιαίως για να ικανοποιηθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις κατά τη διάρκεια ημερών με συννεφιά και περιόδων αιχμής ζήτησης. Το βραχυπρόθεσμο σύστημα αποθήκευσης είναι κατάλληλο κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μονάδες CSP.

Σε περίπτωση συστήματος μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, η ενέργεια αποθηκεύεται για μήνες ή εποχές. Στη μακροχρόνια αποθήκευση, η διαθέσιμη ενέργεια κατά τη θερινή περίοδο αποθηκεύεται και η ενέργεια ανακτάται κατά τη χειμερινή περίοδο για θέρμανση νερού, θέρμανση αέρα, εφαρμογές κτιρίων κλπ. [22].

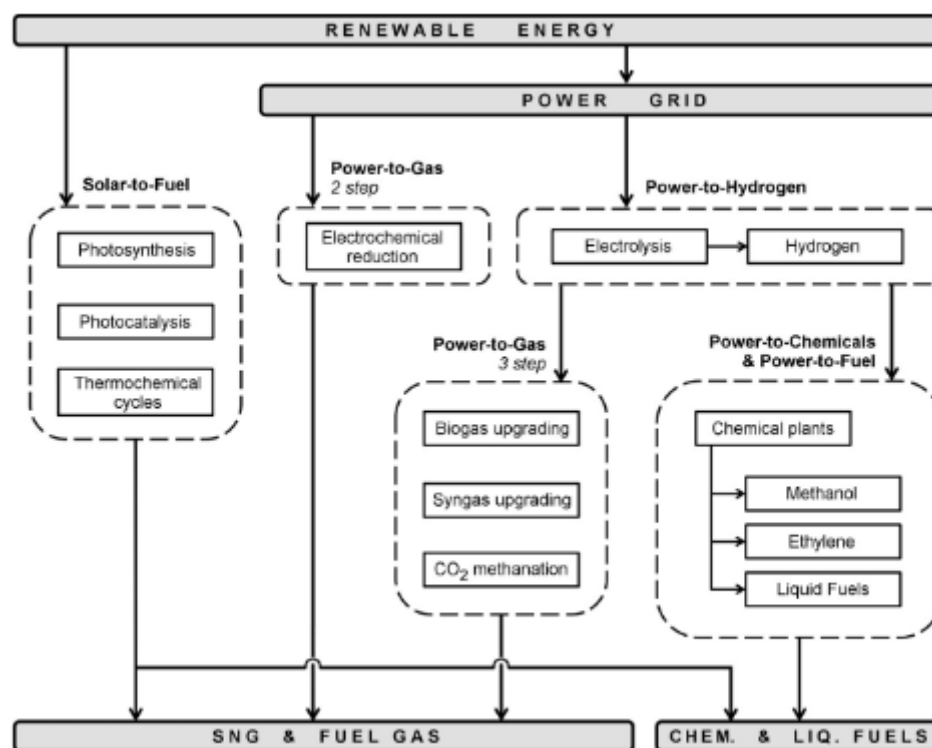
1.6 Διάφορα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Στη συνέχεια περιγράφονται διάφορα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας τα οποία μέχρι τώρα έχουν μικρή και εξειδικευμένη χρήση αλλά αποτελούν πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες στο μέλλον.

1.6.1 Power to Gas

Οι διεργασίες Power to Gas (PtG) έχουν εμφανιστεί τα τελευταία χρόνια ως μακροπρόθεσμη λύση για την αποθήκευση πλεονασματικών ανανεώσιμων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της παραγωγής μεθανίου. Αυτές οι πολλά υποσχόμενες τεχνικές θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μελλοντικό σενάριο αποθήκευσης ενέργειας, δεδομένου ότι αντιμετωπίζουν δύο

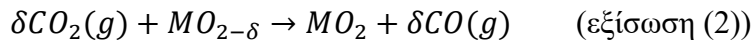
κρίσιμα ζητήματα: τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου σε σενάρια με υψηλό μερίδιο ανανεώσιμων πηγών και την απανθράκωση των καυσίμων υψηλής ενεργειακής πυκνότητας για μεταφορά. Υπάρχει μεγάλος αριθμός διαδρομών για τη μετατροπή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε αέρια ή υγρά καύσιμα μέσω του συνδυασμού με το υπόλοιπο διοξείδιο του άνθρακα (Σχήμα 26). Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα αυτών των συνθετικών καυσίμων επιτρέπει την αποθήκευση μεριδίου της αρχικής ανανεώσιμης ενέργειας μακροπρόθεσμα. Οι διαδικασίες Power to Gas εμφανίζονται ως πολλά υποσχόμενα συστήματα που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε συνθετικό φυσικό αέριο. Τα χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας επιτρέπουν τη σύνδεση δικτύων ηλεκτρικού και φυσικού αερίου σε ένα ενιαίο ενεργειακό σύστημα που εισάγει υψηλή ευελιξία στην ισορροπία του δικτύου [33].



Σχήμα 26: ΑΠΕ και CO₂ υβριδικές τεχνικές αποθήκευσης [33]

Οι θερμοχημικοί κύκλοι μειώνουν τα μεταλλικά οξείδια (εξίσωση (1)) σαν εσωτερικοί δέκτες κοιλότητας στη συγκέντρωση ηλιακών εγκαταστάσεων σε υψηλές θερμοκρασίες (1200-1600 °C). Αργότερα, όταν το οξείδιο του μετάλλου αναγεννάται με οξείδωση με διοξείδιο του άνθρακα, λαμβάνεται ένα συνθετικό αέριο που αποτελείται κυρίως από CO που μπορεί να μεθανοποιηθεί (εξίσωση (2)). Η τεχνική έχει ήδη αποδειχθεί επιτυχώς σε κλίμακα πάγκου και

πιλότου, αλλά ορισμένες κρίσιμες τεχνικές προκλήσεις παραμένουν άλυτες για την εμπορική εκμετάλλευσή της.

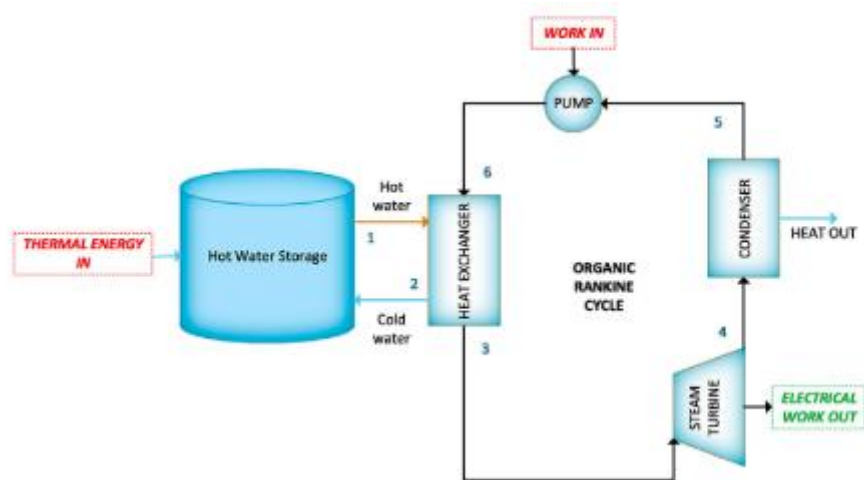


Η μέθοδος δύο βημάτων περιλαμβάνει την ηλεκτροχημική αναγωγή, όπου η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται για να δημιουργήσει ένα δυναμικό μεταξύ δύο ηλεκτροδίων προκειμένου να απομειωθεί το CO_2 . Ως εκ τούτου, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πρέπει προηγουμένως να μετατραπούν σε ηλεκτρική ενέργεια και αργότερα σε πολύτιμα χημικά. Μερικά από τα πιο ενδιαφέροντα προϊόντα που θα μπορούσαν να περιληφθούν στο σχήμα μέσω αυτής της μεθόδου, είναι το μυρμηκικό οξύ, η μεθανόλη και το μεθάνιο, τα οποία παράγονται από μονοπάτια αναγωγής δύο, έξι και οκτώ ηλεκτρονίων αντίστοιχα. Ωστόσο, απαιτούνται σημαντικές βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση προτού αυτή η τεχνική γίνει οικονομικά αποδοτική, σε σύγκριση με τους χρησιμοποιούμενους τρόπους παραγωγής των ίδιων προϊόντων [33].

1.6.2 Σύστημα ζεστού νερού

Το σύστημα αποθήκευσης ζεστού νερού έχει πέντε κύρια συστατικά: αποθήκευση ζεστού νερού, εναλλάκτη θερμότητας, ατμοστρόβιλο, συμπυκνωτή και αντλία. Η θερμική ενέργεια είναι η κύρια είσοδος αυτού του συστήματος. Αυτό το σύστημα αποτελείται από δύο κύκλους: ο ένας είναι για την αποθήκευση του ζεστού νερού και τον εναλλάκτη θερμότητας, όπου το ζεστό ρεύμα φεύγει από τη δεξαμενή αποθήκευσης και εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας, όπου κρύο νερό μπαίνει ξανά στη δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού, κάνοντας έναν κύκλο. Απαιτείται εξωτερική παροχή θερμότητας (από ανανεώσιμες πηγές όπως ηλιακοί συλλέκτες) για την παροχή θερμότητας στη δεξαμενή αποθήκευσης. Ο οργανικός κύκλος Rankine περιλαμβάνει τέσσερα κύρια συστατικά: έναν εναλλάκτη θερμότητας, αντλία, συμπυκνωτή και ατμοστρόβιλο. Ως ρευστό λειτουργίας αυτού του συστήματος επιλέγεται το η-πεντάνιο. Το υγρό πηγαίνει από τον εναλλάκτη θερμότητας και εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο. Μετά την επέκταση για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εισέρχεται στον συμπυκνωτή, την αντλία και το νερό και επιστρέφει στον εναλλάκτη θερμότητας, όπως φαίνεται σαφώς στο Σχήμα 27. Ο εναλλάκτης θερμότητας αυξάνει τη θερμοκρασία υγρού που τρέχει εντός του οργανικού κύκλου Rankine (ORC). Στη συνέχεια, εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συμπυκνωτής μετατρέπει τον ατμό

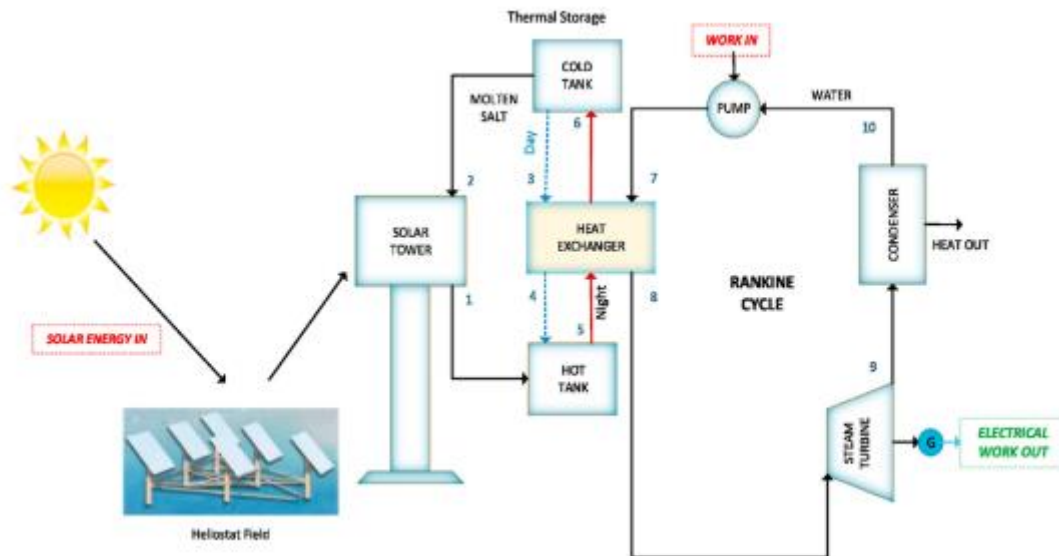
σε υγρό με απόρριψη θερμότητας. Απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια για την πίεση του υγρού πίσω στον εναλλάκτη θερμότητας, όπου το κρύο νερό εισέρχεται για άλλη μια φορά στην αποθήκευση ζεστού νερού για να ολοκληρωθεί η διαδικασία [34].



Σχήμα 27: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αποθήκευσης ζεστού νερού [34]

1.6.3 Σύστημα θερμικής αποθήκευσης λειωμένου άλατος

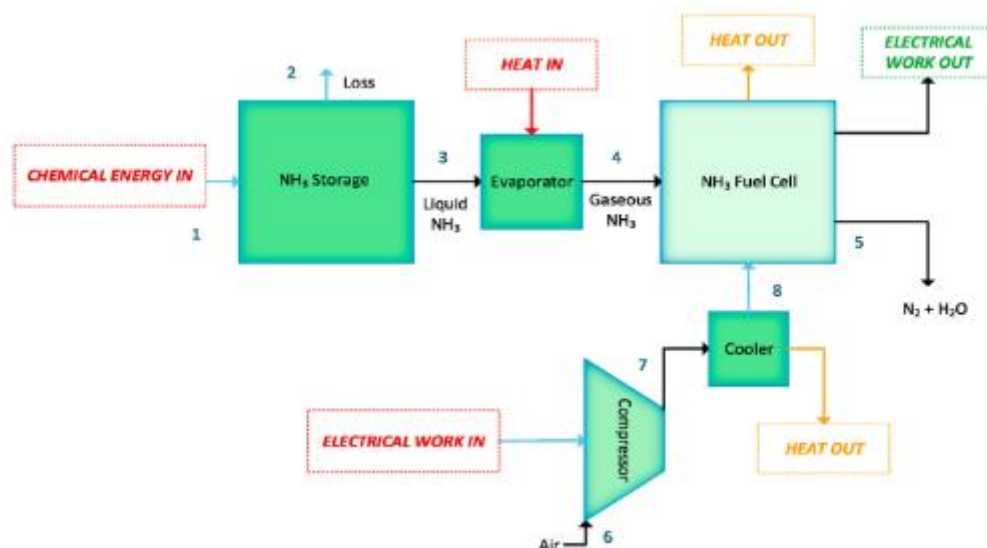
Το σύστημα λιωμένου αλατιού έχει επτά κύρια συστατικά: ηλιακό πεδίο και πύργο ηλιοστάτη, ψυκτική δεξαμενή, εναλλάκτη θερμότητας, ζεστό ρεζερβουάρ, αντλία, συμπυκνωτή και ατμοστρόβιλο. Γενικά, περιλαμβάνει έναν κύκλο Rankine που τροφοδοτείται από ηλιακή ενέργεια. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί την ακτινοβολία του ήλιου για τη θέρμανση ενός κυκλοφορούντος υγρού (λιωμένο αλάτι) μέσω ενός πεδίου ηλιοστάτη. Αυτή η θερμότητα μετατρέπει το υγρό νερό σε ατμό και στη συνέχεια διέρχεται από μια τουρμπίνα, παράγοντας ενέργεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 28. Η κύρια ανανεώσιμη πηγή θεωρείται αρχικά η ηλιακή ενέργεια. Ο πύργος ηλιακής ενέργειας μετατρέπει τον ήλιο σε καθαρό ηλεκτρικό Tricity, καθώς χρησιμοποιεί ηλιοστάτες, και έτσι εστιάζει το φως του ήλιου σε έναν δέκτη στην κορυφή ενός πύργου. Ο εναλλάκτης θερμότητας βοηθά στην αύξηση της θερμοκρασίας λειωμένου άλατος που τρέχει εντός του πρώτου κύκλου. Μόλις αυξηθεί η θερμοκρασία του νερού που ρέει στον κύκλο Rankine, εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αργότερα, ο ατμός συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή ως αποτέλεσμα θερμικής απόρριψης [34].



Σχήμα 28: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος θερμικής αποθήκευσης λειωμένου αλατιού [34]

1.6.4 Σύστημα αποθήκευσης αμμωνίας

Η αμμωνία είναι ένας φορέας ενέργειας και διαθέτει σημαντικά χαρακτηριστικά αποθήκευσης όσον αφορά τόσο την πίεση όσο και τη θερμοκρασία. Είναι υγρή σε πίεση περιβάλλοντος και περίπου -34°C . Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξισορρόπηση ισχύος δικτύου και ως μετατόπιση χρόνου ανανεώσιμης ενέργειας. Η κύρια διαφορά από το σύστημα υδρογόνου είναι η αποθήκευση αμμωνίας σε υγρή μορφή. Ως εκ τούτου, έχει έναν εξατμιστή που μετατρέπει την υγρή αμμωνία σε αέρια αμμωνία, καθώς αυτή η κυψέλη καυσίμου έχει σχεδιαστεί για αέρια αμμωνία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 29. Τα κύρια συστατικά του συστήματος αμμωνίας είναι η δεξαμενή αποθήκευσης υγρής αμμωνίας, ο εξατμιστής, ο συμπιεστής, η ψυκτική μονάδα και η κυψέλη καυσίμου αμμωνίας [34].

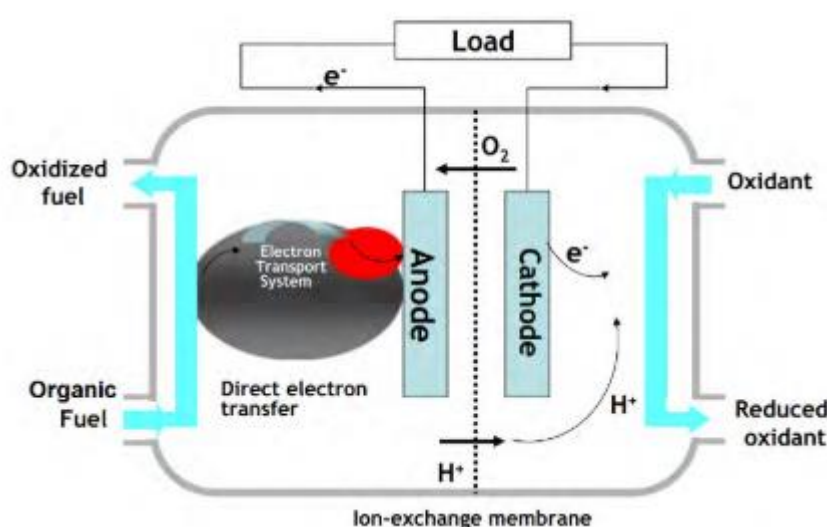


Σχήμα 29: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αποθήκευσης αμμωνίας [34]

1.6.5 Μικροβιακή κυψέλη καυσίμου (MFC)

Η μικροβιακή κυψέλη καυσίμου (Microbial Fuel Cell - MFC) εκμεταλλεύεται το μικροβιακό μεταβολισμό και τον στερεό δέκτη ηλεκτρονίων για να μετατρέψει τη χημική ενέργεια των αποβλήτων σε ηλεκτρική ενέργεια όπως τα βιο-ηλεκτροχημικά συστήματα. Το MFC λειτουργεί παρόμοια με το χημικό FC, παρόλα αυτά οι μικροοργανισμοί των βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων (επίσης γνωστοί ως εξωηλεκτρογόνα) θα οξειδωθούν στην άνοδο και θα δώσουν ηλεκτρόνια στο MFC. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 30, το τερματικό μόριο δέκτη (συνήθως O_2) στην κάθοδο θα μειωθεί από τα ηλεκτρόνια που ρέουν από το εξωτερικό κύκλωμα φορτίου. Μεγάλη γκάμα αποβλήτων χαμηλής ποιότητας, όπως οικιακά λύματα, απόβλητα τροφίμων, εκπλύματα υγειονομικής ταφής, βιομηχανικά απόβλητα, λάσπη λυμάτων, ζωικά απόβλητα και απόβλητα φυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε MFC, ωστόσο η FC περιορίζεται σε ορισμένες χημικές ουσίες μόνο. Επίσης, το MFC είναι ασφαλέστερο και πιο αξιόπιστο λόγω εργασίας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ουδέτερη τιμή pH σε αντίθεση με τη χημική FC όπου απαιτούνται πρόσθετες ρυθμίσεις λόγω θερμοκρασίας λειτουργίας 500-1000°C και για την αποθήκευση όξινων και αλκαλικών υλικών. Η άμεση μετατροπή χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα άλλο πιθανό πλεονέκτημα του MFC έναντι της αναερόβιας ψηφιοποίησης (καύση βιοαερίου), όπου το 65% της ενέργειας θα χαθεί κατά τη μετατροπή ενέργειας πολλαπλών βημάτων. Εκτός αυτού, το CO_2 που απελευθερώνεται από το MFC είναι περιβαλλοντικά ουδέτερο και δεν συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Ωστόσο, η μη γραμμική φύση του MFC είναι ένας σημαντικός περιορισμός για την παραγωγή μεγάλης

ισχύος, η οποία είναι δυνατή σε χημικά FC μέσω συνδέσεων σε σειρά και παράλληλα. Οι θερμοδυναμικοί περιορισμοί και η υψηλή εσωτερική απώλεια ενέργειας είναι επίσης αιτίες χαμηλής ισχύος (συνήθως 200 W/L) του MFC. Η κατασκευή του MFC μπορεί να βασίζεται σε διαμεσολαβητές ή χωρίς διαμεσολαβητή ανάλογα με τις απαιτήσεις. Ο διαμεσολαβητής χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση της μεταφοράς ηλεκτρονίων στο ηλεκτρόδιο κατά τη διάρκεια της κυτταρικής αντίδρασης, ενώ στο MFC χωρίς διαμεσολαβητή, ηλεκτροχημικά ενεργά βακτήρια χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των ηλεκτρονίων στο ηλεκτρόδιο. Οι εφαρμογές του MFC περιλαμβάνουν επεξεργασία λυμάτων, παραγωγή υδρογόνου, ηλεκτρονικές και ιατρικές εφαρμογές χαμηλής ισχύος [19].



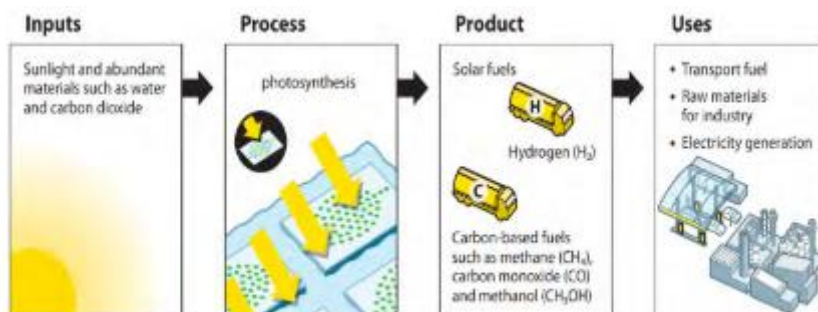
Σχήμα 30: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από οργανικά απόβλητα μέσω της MFC [19]

1.6.6 Ηλιακά Καύσιμα

Τα ηλιακά καύσιμα (Solar Fuel) μπορούν να είναι μια αποδοτική, ανθεκτική, φιλική προς το περιβάλλον και οικονομικά αποδοτική επιλογή αποθήκευσης ενέργειας. Σήμερα βρίσκονται στο αρχικό στάδιο της ανάπτυξης με τις τελευταίες επιστημονικές ανακαλύψεις σχετικά με τη συλλογή της ενέργειας του ήλιου και την παραγωγή καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλιακά καύσιμα συλλέγουν την ακτινοβολούμενη ενέργεια του ηλιακού φωτός μέσω παραβολικών κατόπτρων σε χημικούς δεσμούς υλικού και αυτά τα καύσιμα μπορούν να μεταφερθούν ή να αποθηκευτούν για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η διάρκεια αποθήκευσης μπορεί να είναι από λίγες ώρες έως λίγους μήνες με δυναμικότητα ισχύος 20 MW και ειδική ενέργεια σε εύρος (800-100.000 Wh/kg). Τα ηλιακά καύσιμα είναι συστήματα «100% εικονικής απόδοσης αποθήκευσης»,

επειδή η αποθήκευση αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του ενεργειακού κύκλου σε αντίθεση με τα ενδιάμεσα στοιχεία που οδηγούν σε απώλεια ενέργειας. Στα κύρια καύσιμα μολύβδου, η αλλαγή στην απόδοση μετατροπής, με και χωρίς αποθήκευση, θα είναι κοντά στο μηδέν.

Η φωτοσύνθεση είναι το σύστημα της φύσης μέσω του οποίου τα φυτά, τα φύκια και ορισμένοι τύποι βακτηρίων απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν το οξυγόνο και τους υδατάνθρακες από το CO_2 και το νερό. Οι παραγόμενοι υδατάνθρακες (σάκχαρα και άμυλα) θα αντιμετωπίζονται ως καύσιμο σε τεχνολογία κυψελών ηλιακού καυσίμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 31, το οποίο περιλαμβάνει τρεις κύριες προσεγγίσεις: φυσική φωτοσύνθεση, τεχνητή φωτοσύνθεση και θερμοχημική προσέγγιση. Τα καύσιμα που παράγονται κατά τη φωτοσύνθεση είναι υδρογόνο (H_2), καύσιμα με βάση τον άνθρακα (CH_4 , CO και CH_3OH) και ηλιακός χημικός σωλήνας θερμότητας. Η φυσική φωτοσύνθεση βασίζεται σε μετατροπή με βάση τη χλωροφύλλη, ενώ η τεχνητή φωτοσύνθεση βασίζεται σε καταλύτες διαχωρισμού νερού (π.χ. ρουθίνιο και ρήνιο) για να συλλέξει το ηλιακό φως και να μετατρέψει το νερό και το CO_2 σε οξυγόνο και άλλα υλικά. Η θερμοχημική προσέγγιση εξαρτάται από την ισχυρή ακτινοβολούμενη ηλιακή ακτινοβολία σε πολύ υψηλή θερμοκρασία σε ένα κλειστό περιβάλλον για τη διεξαγωγή ενδοθερμικής διαδικασίας και τη διάσπαση του νερού στα συστατικά μέρη του για την παραγωγή υδρογόνου και άλλων υλικών [19].

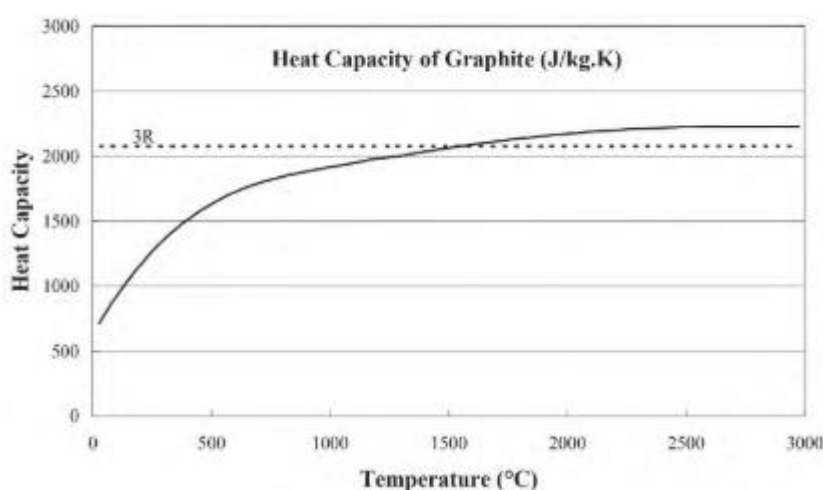


Σχήμα 31: Διαδρομή της φωτοσύνθεσης στα ηλιακά καύσιμα [19]

1.6.7 Ηλιακή αποθήκευση με γραφίτη

Ο γραφίτης είναι μια σταθερή μορφή άνθρακα υπό τυπικές συνθήκες και θεωρείται ως ο υψηλότερος βαθμός άνθρακα γνωστός και ως μετα-ανθρακίτης με δυνατότητα τροφοδότησης μελλοντικής καθαρής ενέργειας. Η ιδέα είναι να συλλέξουμε και να αποθηκεύσουμε την ηλιακή θερμική ενέργεια σε μπλοκ γραφίτη που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του κύκλου ατμού Rankine ή άλλων κύκλων κινητήρων θερμότητας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 32, ο γραφίτης είναι ένα ιδανικό μέσο για την

αποθήκευση ενέργειας λόγω του πολύ υψηλού σημείου τήξεως (3500°C) και της υψηλής ειδικής θερμικής ικανότητας (ικανότητα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας) που κυμαίνεται από 300 kWh/τόνο στους 750°C έως 1000 kWh/τόνο στους 1800°C . Θα είναι πολύ επωφελείς όταν ενσωματώνονται σε τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας. Μια τέτοια εγκατάσταση προγραμματίζεται στο Queens της Αυστραλίας, όπου οι κύβοι γραφίτη ανυψώνονται για να εντοπίζονται από καθρέφτες για τη συλλογή της ηλιακής θερμότητας. Τα μπλοκ θερμαίνονται σε θερμοκρασία 1800°C , ικανή να παράγει ατμό για στροβίλους κατά παραγγελία. Ένα άλλο έργο ηλιακής αποθήκευσης υβριδικού γραφίτη αναπτύχθηκε από την εταιρεία «Larkden Pty Ltd» στο Cooma της Αυστραλίας [19].

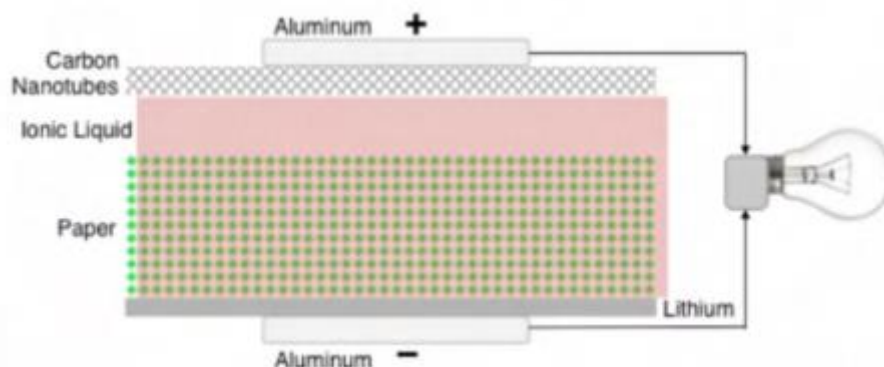


Σχήμα 32: Θερμική ικανότητα γραφίτη σε σχέση με τη θερμοκρασία [19]

Όπου μια μεγάλη θερμική μπαταρία γραφίτη επιδεικνύεται να αποθηκεύσει την ηλιακή θερμότητα, υπάρχει ένας ρυθμιστής ανταλλαγής θερμότητας για την ανάκτηση και τον έλεγχο της θερμικής ενέργειας από τον γραφίτη. Για μια εγκατάσταση 50 MW που χρησιμοποιεί θερμική μπαταρία γραφίτη, η ενέργεια ανά kWh θα είναι περίπου 80% λιγότερο δαπανηρή από την τεχνολογία ηλεκτρικής μπαταρίας. Τα ηλιακά συστήματα γραφίτη μπορούν να καλυφθούν για να αποφευχθεί η σκόνη και να εξακολουθούν να συλλέγουν την ενέργεια από τον ατμοσφαιρικό αέρα, σε αντίθεση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα όπου η απόδοση θα σχετίζεται με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και την εγκατάσταση σκόνης. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα του γραφίτη έναντι των χημικών μπαταριών είναι: χαμηλό κόστος, χημικά αδρανές, ανθεκτικός στη διάβρωση, ισχυρός και σταθερός σε υψηλές θερμοκρασίες, πολύ δύσκολο να αναφλεγεί (επιβραδυντικό φλόγας) και υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα [19].

1.6.8 Μπαταρίες χαρτιού

Οι μπαταρίες χαρτιού είναι πολύ λεπτές, εύκαμπτες και ελαφριές συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο ως μπαταρίες όσο και ως πυκνωτές. Διαμορφώνονται με συνδυασμό σύνθετου χαρτιού νανο-μεγέθους (90% κυτταρίνης) και νανοσωλήνων άνθρακα. Οι μπαταρίες χαρτιού έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν τόσο βραχυπρόθεσμη όσο και μακροπρόθεσμη σταθερή παραγωγή ισχύος και ριπές ενέργειας (εάν απαιτείται) για ηλεκτρονικά, ιατρικά βοηθήματα και υβριδικά οχήματα επόμενης γενιάς. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εύρος θερμοκρασίας -77°C - 100°C και έχουν πάχος 0,5-0,025 mm (μικρότερο από χαρτί εκτυπωτή) το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διπλωμένο, στριμμένο, χυτευμένο, τσαλακωμένο, σχηματισμένο και κομμένο σε ποικιλία εφαρμογών χωρίς απώλεια ενέργειας. Το νανο σύνθετο χαρτί συνδυάζει το χαρακτηριστικό του υπερ-πυκνωτή (υψηλή ενεργειακή πυκνότητα) και της μπαταρίας (υψηλή ενεργειακή χωρητικότητα) ικανό να παράγει τις εκρήξεις ακραίας ισχύος κατά παραγγελία [19]. Μεταξύ των διαφορετικών τρόπων κατασκευής μιας μπαταρίας χαρτιού, ο πιο αποτελεσματικός και απλός φαίνεται στο Σχήμα 33.



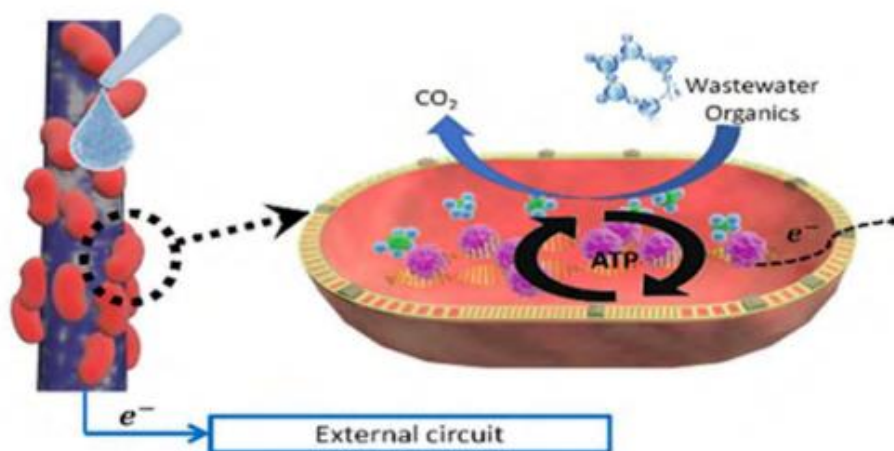
Σχήμα 33: Μοντέλο σχεδιασμού μπαταρίας χαρτιού [19]

Ένα συνηθισμένο χαρτί κυτταρίνης θα επικαλυφθεί με ιοντικό διάλυμα στη μία πλευρά της επιφάνειας του χαρτιού και το ειδικά κατασκευασμένο μελάνι άνθρακα νανοσωλήνων θα απλωθεί σε ιοντική επιφάνεια η οποία θα λειτουργήσει ως κάθοδος. Η άλλη πλευρά του χαρτιού θα ελασματοποιηθεί με ένα πολύ λεπτό στρώμα λιθίου που λειτουργεί ως άνοδο. Συνδέονται οι δύο επιφάνειες με ηλεκτρόδια αλουμινίου για να ρέει ο ηλεκτρισμός που παράγεται από χημικές αντιδράσεις μεταξύ ηλεκτρολύτη-άνθρακα και ηλεκτρολύτη-μετάλλου σε όλο το κύκλωμα φόρτωσης. Το δυναμικό που δημιουργείται θα είναι κοντά στα 1,5 V, το οποίο μπορεί να τροποποιηθεί τοποθετώντας διαφορετικές μπαταρίες χαρτιού το ένα πάνω στο άλλο. Αυτά είναι βιοαποικοδομήσιμα, μη τοξικά, ανθεκτικά, πολύ ελαφριά, ανθεκτικά σε

διαρροές και εύκολα ανακυκλώσιμα. Παρ' όλα αυτά, είναι επιβλαβή για τους πνεύμονες σε περίπτωση εισπνοής, ενώ δημιουργούν ηλεκτρική σπατάλη και είναι αντισυμβατικά για υψηλή βαθμολογία ισχύος.

Αναπτύσσεται ένα άλλο σύστημα μπαταριών MFC με χαρτί που χρησιμοποιεί βακτήρια για παραγωγή ενέργειας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 34, τα «εξωλεκτρογόνα» είναι ένας ειδικός τύπος βακτηρίων που μπορούν να μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια έξω από τα κύτταρα τους ενώ παράγουν την ενέργεια για τον εαυτό τους. Η ροή ηλεκτρονίων χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία της μπαταρίας που μπορεί να ενεργοποιηθεί προσθέτοντας απλώς νερό ή υγρό σε αυτήν.

Μεταξύ όλων των μπαταριών με βάση το χαρτί, η MFC με βάση το χαρτί είναι χαμηλού κόστους, εύκολης κατασκευής, αυτοβιώσιμη, αυτοεξυπηρετούμενη και φιλική. Ωστόσο, λόγω των μειονεκτημάτων της χαμηλής απόδοσης (που προκαλείται από το εμποτισμό των ηλεκτρονίων από το οξυγόνο πριν φτάσουν στο ηλεκτρόδιο) και της αβεβαιότητας σχετικά με τη βιοαποικοδομησιμότητα, αυτή η τεχνολογία βρίσκεται υπό ανάπτυξη [19].



Σχήμα 34: Σχηματική απεικόνιση της παραγωγής ενέργειας σε χαρτί που βασίζεται σε MFC [19]

2 Σύγκριση των ESS με διάφορα τεχνο-οικονομικά κριτήρια

Κάθε τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας έχει διάφορες ιδιότητες και χαρακτηριστικά, με κάποια από αυτά να είναι εξειδικευμένα και να κάνουν τις διαφοροποιήσεις μεταξύ των τεχνολογιών. Με τη βοήθεια αυτών των ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών, είναι δυνατόν να επιλεγεί η πιο κατάλληλη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας για συγκεκριμένες συνθήκες. Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, βάση των οποίων γίνεται η αξιολόγησή τους, είναι τα ακόλουθα:

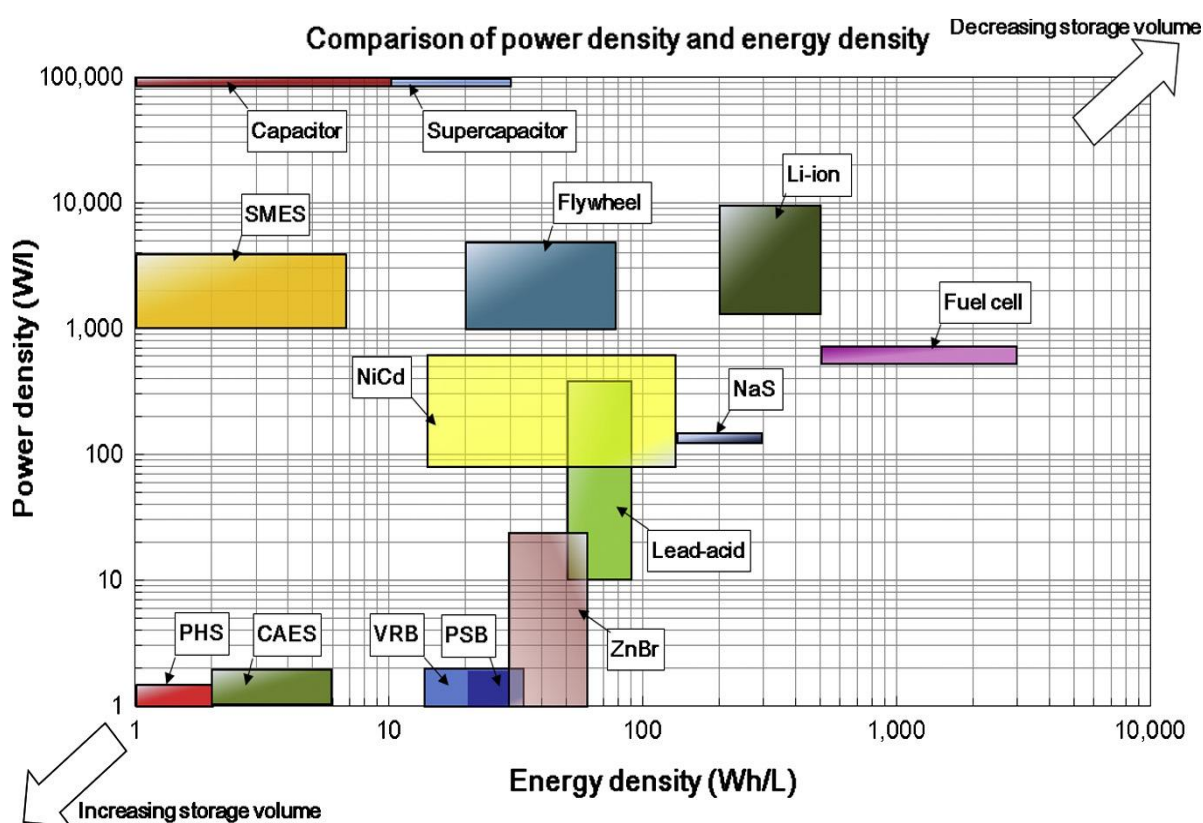
- Πυκνότητα ενέργειας και ισχύος
- Χωρητικότητα αποθήκευσης/ Διάρκεια
- Βαθμολογία ισχύος
- Χρόνος εκφόρτισης και αυτοεκφόρτιση
- Αποδοτικότητα κύκλου
- Τεχνολογική ωριμότητα
- Κόστος κεφαλαίου
- Χρόνος απόκρισης
- Επιπτώσεις στο περιβάλλον

2.1. Πυκνότητα ενέργειας και ισχύος

Η πυκνότητα ισχύος οποιασδήποτε τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας (EES) χαρακτηρίζεται ως η ονομαστική απόδοση ισχύος δια του όγκου της συσκευής. Η μονάδα μέτρησής της είναι W/kg ή W/l . Αυτό δεν είναι οριακά το ίδιο με την πυκνότητα ενέργειας που χαρακτηρίζεται ως η αποθηκευμένη ενέργεια διαιρεμένη με τον όγκο της συσκευής αποθήκευσης (Wh/kg ή Wh/l) [5].

Το μέγεθος των συσκευών αποθήκευσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας για πολλές εφαρμογές. Το Σχήμα 35 δείχνει τη σύγκριση της πυκνότητας ισχύος και της πυκνότητας ενέργειας διαφορετικών τεχνολογιών EES. Για δεδομένη ποσότητα ενέργειας, όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, τόσο μικρότερος είναι ο όγκος του απαιτούμενου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Στο Σχήμα 36, οι τεχνολογίες που είναι κατάλληλες για εφαρμογές με περιορισμένο όγκο βρίσκονται στην επάνω δεξιά γωνία και τα συστήματα αποθήκευσης μεγάλου όγκου βρίσκονται στην κάτω αριστερή γωνία. Μπορεί να φανεί ότι οι περισσότερες μπαταρίες, σφόνδυλοι και κυψέλες καυσίμου έχουν σχετικά μέτριες πυκνότητες

ενέργειας και πυκνότητες ισχύος. Τα συστήματα PHES και CAES έχουν χαμηλότερες πυκνότητες, επομένως χρησιμοποιούνται κυρίως σε σταθερά EES και απαιτούν μεγάλες δεξαμενές για εφαρμογές κλίμακας δικτύου. Οι υπερπυκνωτές και οι πυκνωτές έχουν πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος αλλά χαμηλή πυκνότητα ενέργειας. Οι πυκνότητες των μπαταριών ροής είναι συνήθως χαμηλότερες από εκείνες των συμβατικών μπαταριών. Η μπαταρία ιόντων λιθίου έχει τόσο υψηλή πυκνότητα ενέργειας όσο και υψηλή πυκνότητα ισχύος, γεγονός που οδηγεί σε εκτεταμένες χρήσεις σε φορητές συσκευές και είναι πολλά υποσχόμενη στις μεταφορές και σε άλλες εφαρμογές EES μικρής κλίμακας [7].



Σχήμα 35: Σύγκριση πυκνότητας ενέργειας και πυκνότητας ισχύος [7]

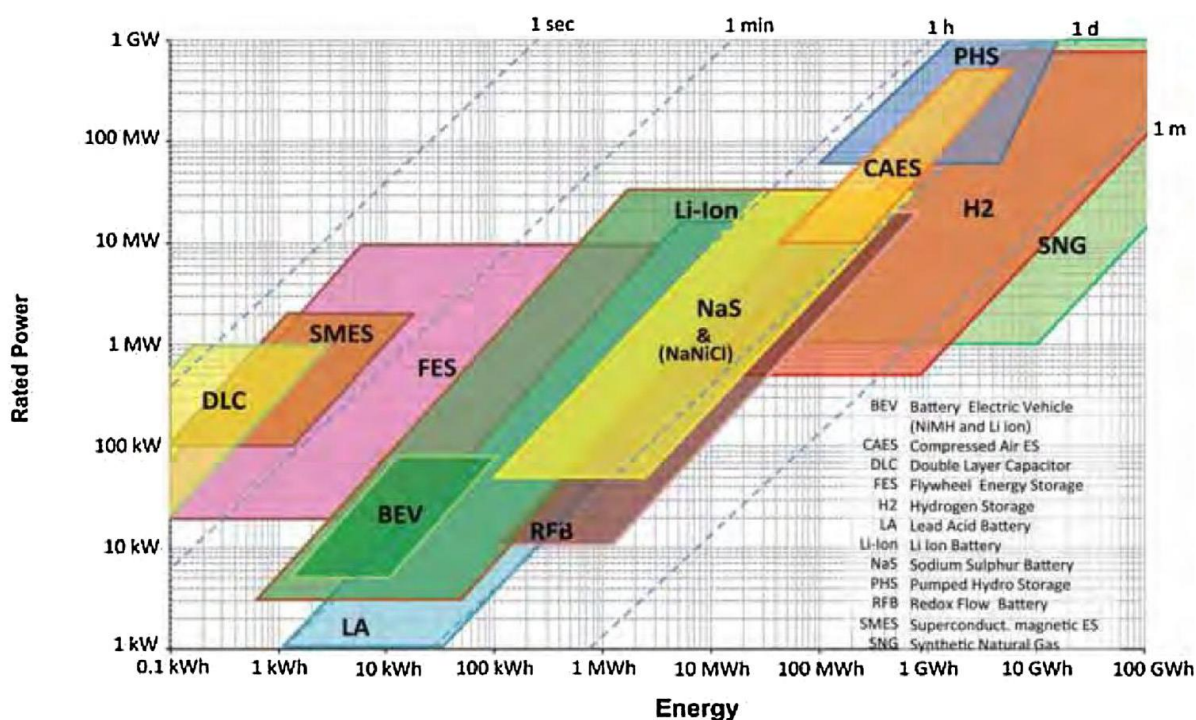
Παρατηρείται ότι τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με υψηλότερη πυκνότητα ισχύος χρησιμοποιούνται συχνά για βραχυπρόθεσμης διάρκειας εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη απόκριση, όπως συντήρηση τάσης δικτύου. Συστήματα αποθήκευσης με υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας συχνά χρησιμοποιούνται για μεγάλης διάρκειας εφαρμογές όπως μετατόπιση φορτίου ανανεώσιμης ενέργειας [35].

2.2. Χωρητικότητα αποθήκευσης/ Διάρκεια

Η συνολική διαθέσιμη ενέργεια ή αυτή που αποθηκεύεται στη συσκευή αποθήκευσης ενέργειας μετά τη φόρτιση αναφέρεται σαν χωρητικότητα αποθήκευσης. Μετριέται σε Watthour (Wh). Η διάρκεια αποθήκευσης οποιασδήποτε συσκευής αποθήκευσης ενέργειας συμπεριφέρεται σαν κρίσιμη ιδιότητα επίσης. Αναφέρεται στην αποθηκευμένη ενέργεια που μπορεί να παρέχεται από μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας για μια χρονική περίοδο. Ο Πίνακας 11 δείχνει ότι τα PHES και CAES έχουν μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης που τα καθιστά κατάλληλα για ενέργεια κλίμακας δικτύου [5].

2.3. Ονομαστική ισχύς

Η σύγκριση της ονομαστικής ισχύος διαφόρων συσκευών αποθήκευσης ενέργειας αποτυπώνεται τόσο Σχήμα 36 όσο και στον Πίνακα 11 όπου δίνονται πληροφορίες σχετικά με την εγκατεστημένη χωρητικότητα του συστήματος για τεχνολογίες από λίγα watt έως χιλιάδες megawatts [5].



Σχήμα 36: Σύγκριση ονομαστικής ισχύος, ενεργειακού περιεχομένου και χρόνου εκφόρτισης διαφορετικών τεχνολογιών ES [5]

2.4. Χρόνος εκφόρτισης και αυτοεκφόρτιση

Ο χρόνος εκφόρτισης είναι ο χρόνος κατά τον οποίο η μέγιστη ισχύς απελευθερώνεται σε μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας (διάρκεια εκφόρτισης μέγιστης ισχύος). Το μέρος της ενέργειας στη συσκευή αποθήκευσης, το οποίο αποθηκεύτηκε αρχικά μετά τη φόρτιση και έχει διαχυθεί σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα μη χρήσης, αναφέρεται στην αυτοεκφόρτιση της συσκευής αποθήκευσης [5]. Ενδεικτικές τιμές των χρόνων αυτών αναφέρονται στους Πίνακες 10 και 11.

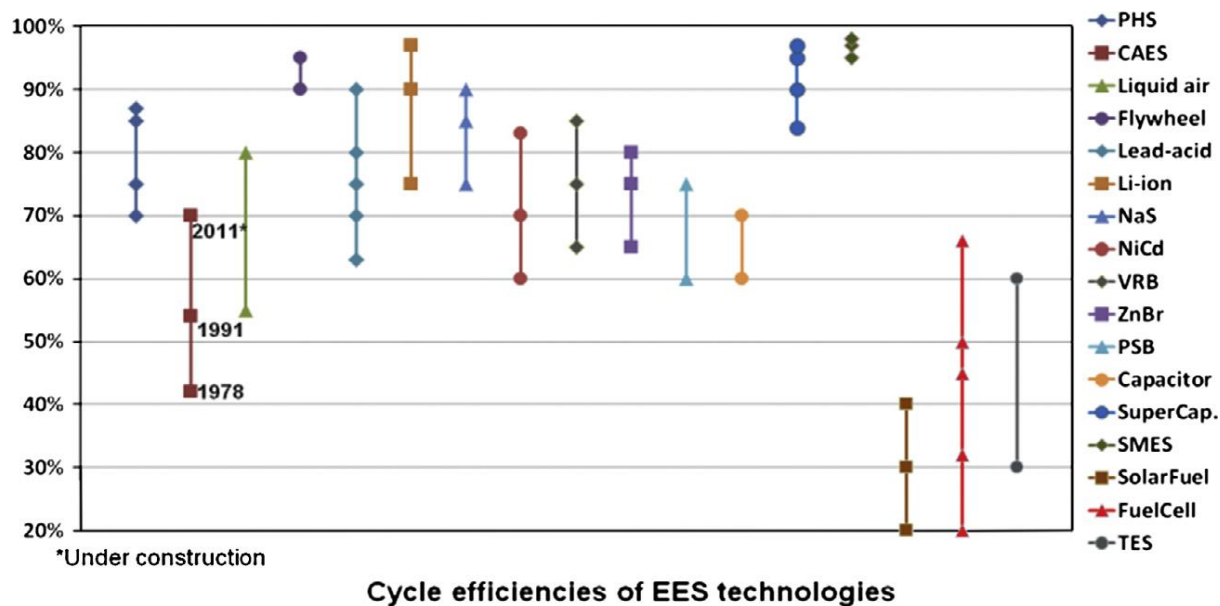
Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έχουν χρόνους εκφόρτισης που κυμαίνονται από λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου έως πολλές ώρες. Κατά συνέπεια, σύμφωνα με το [20], είναι δυνατή η ταξινόμηση των συστημάτων αποθήκευσης ως ακολούθως:

- Μικρού χρόνου εκφόρτισης: λιγότερο από 1 ώρα (σφόνδυλοι και υπερσυμπιεστές)
- Μέσου χρόνου εκφόρτισης: έως 10 ώρες (μικρής κλίμακας CAES και μπαταρίες)
- Μεγάλου χρόνου εκφόρτισης: μεγαλύτερος από 10 ώρες (PHES και μεγάλης κλίμακας CAES)

2.5. Αποδοτικότητα κύκλου

Η αποδοτικότητα κύκλου είναι ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την ηλεκτρική ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα. Έτσι, SMES, υπερπυκνωτές, σφόνδυλοι και Li-ion μπαταρίες με πολύ υψηλή αποδοτικότητα κύκλου $> 90\%$, βρίσκονται στην κορυφή μεταξύ των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. PHES, CAES, μπαταρίες και μπαταρίες ροής έχουν υψηλή απόδοση κύκλου στο εύρος $60\text{-}90\%$. Αλλά στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και υδρογόνου, η αποθήκευση ενέργειας εμφανίζει απόδοση κύκλου χαμηλότερη από 60% [5].

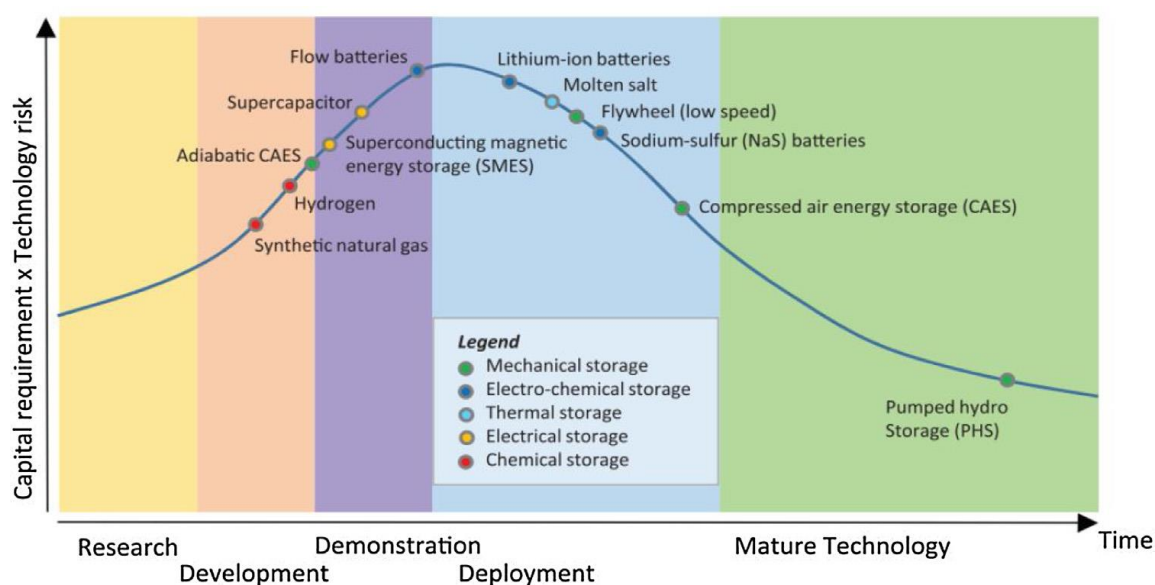
Στο Σχήμα 37 αποτυπώνεται διαγραμματικά μια σύγκριση της αποδοτικότητας κύκλου διάφορων τεχνολογιών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.



Σχήμα 37: Σύγκριση αποδοτικότητας κύκλου των τεχνολογιών EES [7]

2.6. Τεχνολογική ωριμότητα

Η τεχνολογική ωριμότητα παίζει καθοριστικό ρόλο στην επιλογή της τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας. Συνήθως προτιμάται μια ώριμη τεχνολογία λόγω περισσότερων εφαρμογών στο πεδίο. Καθώς η τεχνολογία γίνεται πιο ώριμη, υπάρχει μείωση της απαιτούμενης επένδυσης (Σχήμα 38) [5].



Σχήμα 38: Τεχνολογική ωριμότητα των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [5]

Η ωριμότητα των τεχνολογιών EES συνδέεται με το επίπεδο της εμπορευματοποίησης, τον τεχνικό κίνδυνο και τα σχετικά οικονομικά οφέλη. Το επίπεδο της τεχνολογικής ωριμότητας για εφαρμογές EES μπορεί να ταξινομηθεί σε πέντε κατηγορίες:

- Ανάπτυξη (AA-CAES, PSB και ηλιακά καύσιμα)
- Επίδειξη (αποθήκευση υγρού αέρα, Li-ion, VRB, ZnBr, supercapacitor, MME, κυψέλη καυσίμου και TES)
- Πρώιμη εμπορευματοποίηση (over-ground μικρά CAES και σφόνδυλος)
- Διαθέσιμα στο εμπόριο (συμβατικά CAES, NaS, NiCd και πυκνωτής)
- Ωριμότητα (PHS & μόλυβδος-οξύ).

Αρκετές τεχνολογίες εξελίσσονται και μεταπίπτουν από τη μια κατηγορία στην άλλη. Οι τεχνολογίες που βρίσκονται στο στάδιο ανάπτυξης έχουν μεγάλες δυνατότητες για να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικά έργα EES [7].

2.7. Κόστος κεφαλαίου

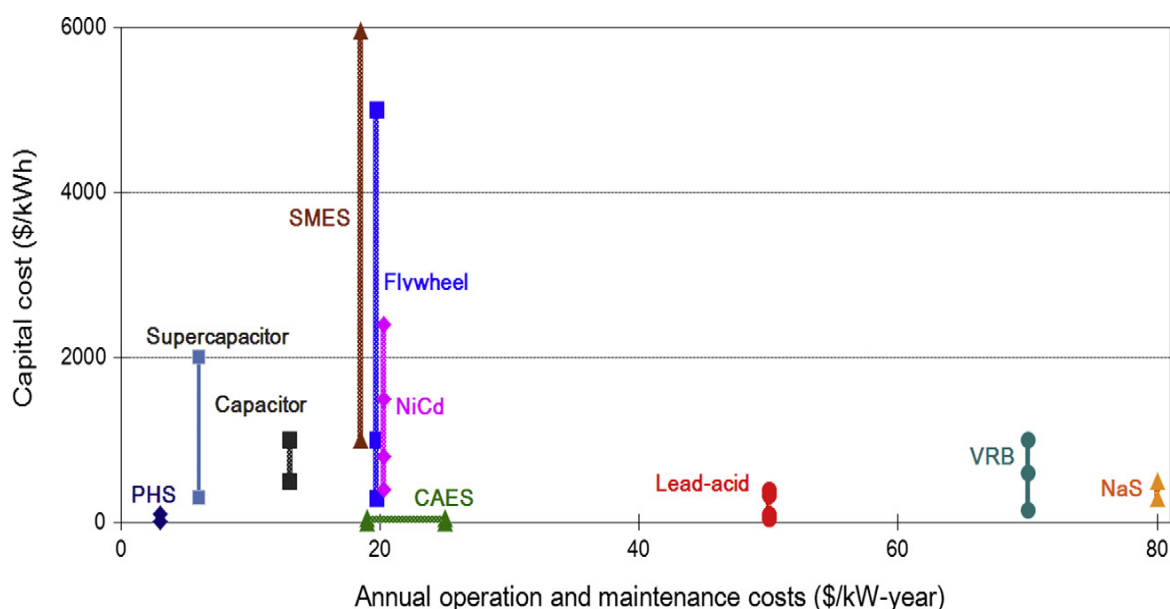
Για ευρεία χρήση οποιασδήποτε τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας, το κόστος κεφαλαίου είναι ένας καθοριστικός παράγοντας. Το κόστος εκφράζεται σε κόστος ανά kWh και ανά kW. Τα συμπληρωματικά μέρη που χρησιμοποιούνται από κάποια τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας προστίθενται στο συνολικό κόστος κεφαλαίου του συστήματος [5].

Στο Σχήμα 39 παρουσιάζεται η σύγκριση του ενεργειακού κόστους κεφαλαίου και του ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης (Operating & Maintenance - O&M). Μία ολοκληρωμένη οικονομική ανάλυση των EES συστημάτων, πρέπει να λάβει υπόψη όχι μόνο το κόστος κεφαλαίου, αλλά και το κόστος O&M και την επίδραση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού. Για παράδειγμα, αν και το ενεργειακό κόστος κεφαλαίου της μπαταρίας μολύβδου-οξέος είναι σχετικά χαμηλό, μπορεί να μην είναι η καλύτερη επιλογή για εφαρμογές EES μεγάλης κλίμακας λόγω του σχετικά υψηλού κόστους O&M και της σύντομης διάρκειας ζωής. Το κόστος των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας τείνει να μειώνεται με τη συνεχή έρευνα και ανάπτυξη, και μερικές βασικές τεχνολογικές ανακαλύψεις μπορούν να οδηγήσουν σε δραματικές αλλαγές του κόστους.

Σύμφωνα με το Σχήμα 39, μεταξύ των ώριμων και εμπορικών τεχνικών, οι τεχνολογίες PHES και CAES έχουν χαμηλότερο ενεργειακό κόστος κεφαλαίου σε σύγκριση με όλες τις άλλες

τεχνολογίες, οι μπαταρίες Na-S, VRB και μολύβδου-οξέος έχουν σχετικά υψηλό κόστος Ο&Μ.

Σύμφωνα με έρευνες, η τεχνολογία TES βρίσκεται στο χαμηλό εύρος ως προς το κόστος κεφαλαίου ενέργειας, ενώ οι τεχνολογίες SMES και σφονδύλου είναι κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής ισχύος και μικρής κλίμακας καθώς είναι φθηνές όσον αφορά το κόστος κεφαλαίου ισχύος αλλά ακριβές σε σχέση με το ενεργειακό κόστος κεφαλαίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος κεφαλαίου ενός συγκεκριμένου συστήματος EES ποικίλλει ως προς το χρονοδιάγραμμα της κατασκευής EES, τη θέση της εγκατάστασης και το μέγεθος του συστήματος. Οι οικονομικές αναλύσεις των διαφόρων τεχνολογιών EES σε διάφορα σενάρια εφαρμογών, προσελκύουν την προσοχή λόγω των μεγάλων προοπτικών εφαρμογής τους [7].



Σχήμα 39: Σύγκριση ενεργειακού κόστους κεφαλαίου και ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης [7]

2.8. Χρόνος απόκρισης

Ο χρόνος απόκρισης μιας τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας αναφέρεται βασικά στο πόσο γρήγορα μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας απελευθερώνει την αποθηκευμένη ενέργεια προκειμένου να ικανοποιήσει την απαιτούμενη ζήτηση. Flywheel, SMES και Supercapacitors έχουν πολύ γρήγορο χρόνο απόκρισης σε χιλιοστά του δευτερολέπτου, οι μπαταρίες έχουν χρόνο απόκρισης σε δευτερόλεπτα και οι τεχνολογίες PHES, CAES σε λεπτά. Αυτά αποτυπώνονται στον Πίνακα 11.

2.9. Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Στον σημερινό παγκόσμιο κόσμο, η αειφόρος ανάπτυξη, οι εκπομπές αερίων και η κλιματική αλλαγή αποτελούν σημαντικό σημείο ανησυχίας. Σαν αποτέλεσμα, η επίδραση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας στο περιβάλλον αποτελεί μια σημαντική πτυχή στην επιλογή τους για οποιαδήποτε εφαρμογή. Η επίδραση διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας αποτυπώνεται στον Πίνακας 11.

Στους Πίνακες 10 και 11 αποτυπώνεται μια σύγκριση μεταξύ των διάφορων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [5].

Πίνακας 10: Σύγκριση των διάφορων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [5]

ES Technology	Energy Density Wh/kg (Wh/l)	Power Density W/kg (W/l)	Discharge Time	Life Time (Years)	Capital Cost		Technological Maturity
					\$/KW	\$/KWh	
Mechanical Energy Storage							
PHES	0.5–1.5 (0.5–1.5)	–	1–24 h +	40–60	600–2000	5–100	Matured
CAES	30–60 (3–6)	(0.5–2.0)	1–24 h +	20–40	400–800	2–50	Developed
Flywheel	10–30	400–1500	Millisecs–15 min	15	250–300	500–1000	Commercial
Electrochemical Energy Storage							
Lead Acid Battery	30–50 (50–80)	75–300 (10–400)	Secs–hrs	5–15	200–300	120–150	Commercial
NiCd Battery	50–75 (60–150)	150–300	Secs–hrs	10–20	500–1500	800–1500	Commercial
Sodium Sulfur (NaS) Battery	150–240 (150–250)	150–230	Secs–hrs	10–15	1000–3000	300–500	Commercial
Lithium Battery (Li-ion)	75–200 (200–250)	150–315	Mins–hrs	5–15	1200–4000	300–1300	Demonstration
VRFB	10–30 (16–33)	–	Secs–10h	5–10	600–1500	150–1000	Demonstration
Electrical Energy Storage							
Double Layer Capacitor/ super Capacitor	2.5–15 (10–30)	500–5000 (100,000 +)	Millisecs–60 min	20+	100–300	300–2000	Developed
SMES	0.5–5	500–2000	Millisecs–secs	20+	200–300	1000–10,000	Demonstration
Chemical Energy Storage							
Hydrogen Fuel Cells	800–10,000 (500–3000)	500+ (500+)	Secs–24h+	5–15	–	6000–20,000	Developing
SNG	10,000(1800)	(0.2–2)	1–24 h +	10–30	–	–	Developing
Thermal Energy Storage							
CSP	(~43.05)	–	Mins–hrs	30	–	3500–7000	Developing

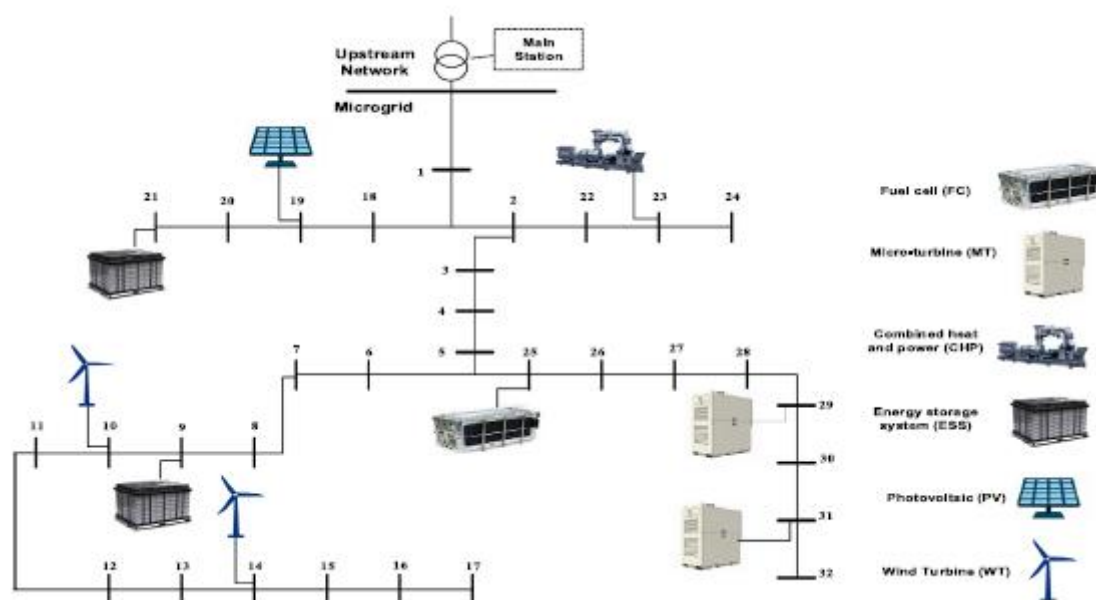
Πίνακας 11: Σύγκριση των διάφορων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [5]

ES Technology	Power Rating	Storage duration	Self Discharge Per day	Cycle Life (cycles)	Round trip Efficiency (%)	Response time	Class	Impact on Environment
Mechanical Energy Storage								
PHES	100–5000 MW	Hours–months	Very small	–	65–87%	1–2 min	Real long term	Significant, huge areas of natural landscapes are required.
CAES	5–300 MW	Hours–months	Small	–	50–89%	1–2 min	Real long term	Emissions from combustion of natural gas.
Flywheel	0–250 kW	Sec–mins	100%	–	85–95%	1–2 min	Short term	Negligible, only for production, construction.
Electrochemical Energy Storage								
Lead Acid Battery	0–20 MW	Mins–days	0.1–0.3%	500–1000	75–80%	Seconds	Long term	Lead is known to be very poisonous and contaminating for soil and water.
NiCd Battery	0–40 MW	Mins–days	0.2–0.6%	2000–2500	85–90%	Seconds	Long term	Cadmium is toxic and dangerous for health and environment.
Sodium Sulfur (NaS) battery	50 kW–8 MW	Sec–hours	20%	2500	80–90%	Seconds	Short term	Significant as the liquid sodium reacts easily with the water in the atmosphere.
Lithium Battery (Li-ion)	0–100 kW	Mins–days	0.1–0.3%	1000–10000+	85–90%	Seconds	Long term	Rather low, impact mostly through emissions in manufacturing of the cells.
VRFB	30 kW–3 MW	Hrs–months	Small	12000+	85–90%	Seconds	Real long term	Toxic remains.
Electrical Energy Storage								
Double Layer Capacitor/ super Capacitor	0–300 kW	Sec–hours	20–40%	100,000+	90–95%	Milliseconds	Short term	Negligible, no heavy metal or disposal issue.
SMES	100 kW–10 MW	Mins–hours	10–15%	100,000+	95–98%	Milliseconds	Short term	Harmful due to very strong magnetic field.
Chemical Energy Storage								
Hydrogen Fuel cell	0–50 MW	Hrs–months	Almost Zero	100+	20–50%	Sec–mins	Real Long term	Negligible, as by product is water and little amount of CO ₂ .
SNL	–	–	–	1000–10,000	30–38%	Mins	Real Long term	Very low, only for construction.
Thermal Energy Storage								
CSP	10 kW–200 MW	–	1%	–	<60%	10 min	Long term	Negligible, only for construction.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται διάφορες συγκρίσεις μεταξύ των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, υπό μορφή Διαγραμμάτων και Πινάκων, οι οποίες έχουν αντληθεί από τη βιβλιογραφία.

3 Σύζευξη ΑΠΕ σε δίκτυο

Σήμερα, η διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας (DG – Distributed Generation) συμπεριλαμβανομένων των ανανεώσιμων πηγών (ΑΠΕ) και των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (NRES), τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) και άλλες συσκευές διανέμονται στο δίκτυο ισχύος για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αλλάζοντας την κατάσταση του συστήματος ισχύος, ιδίως στο δίκτυο διανομής (Σχήμα 40). Επιπλέον, η κακοδιαχείριση αυτών των τεχνολογιών στο δίκτυο διανομής μπορεί να προκαλέσει νέες ανησυχίες όπως η μείωση της ευελιξίας, της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του δικτύου, επιδεινώνοντας το δίκτυο καθώς και άλλα προβλήματα [36].



Σχήμα 40: Σχηματική απεικόνιση των μικροδικτύων με DG και ESS [36]

3.1 Ενσωμάτωση ΑΠΕ στο δίκτυο

Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο χρησιμοποιούμενο δίκτυο έρχεται με πολλές προκλήσεις. Οι κύριες προκλήσεις περιλαμβάνουν το ζήτημα της τοποθεσίας καθώς και τη μεταβλητότητα και την αβεβαιότητα των ανανεώσιμων πόρων.

Η θέση των ανανεώσιμων πόρων

Η διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πόρων σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία παίζει σημαντικό ρόλο στην απόφαση για τη χρησιμοποίηση ΑΠΕ. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από

ανεμογεννήτριες έχει ορισμένες απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται, όπως η διαθεσιμότητα αιολικής κίνησης σταθερής ή ομοιόμορφης ταχύτητας για μια καθορισμένη διάρκεια και σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, ελάχιστη απόφραξη στη διαδρομή του ανέμου προτού χτυπήσει τις λεπίδες της τουρμπίνας και, εάν είναι δυνατόν, μια τοποθεσία όπου η διαθεσιμότητα του ανέμου μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια έως ένα βαθμό. Λόγω αυτών και πολλών άλλων λόγων, όπως ανησυχίες για τη ρύπανση και το θόρυβο, ένα αιολικό πάρκο πρέπει γενικά να εγκατασταθεί πολύ μακριά από κατοικημένες ή κατοικημένες περιοχές. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα από την άλλη πλευρά μπορούν ουσιαστικά να εγκατασταθούν οπουδήποτε όπου υπάρχει άφθονη ηλιοφάνεια με τη μορφή ηλιακών συλλεκτών οροφής για κατοικημένες περιοχές και ηλιακών συλλεκτών για μονάδες παραγωγής ηλιακής ενέργειας. Επίσης, τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι φορητά και ως τέτοια μπορούν να εγκατασταθούν οπουδήποτε και να μεταφερθούν αν είναι απαραίτητο [37].

Η μεταβλητότητα και η αβεβαιότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Η μεταβλητότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ένα άλλο σημαντικό ζήτημα που αντιμετωπίζει η ενσωμάτωση ΑΠΕ στο δίκτυο. Η ισχύς από ΑΠΕ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον καιρό. Η μεταβλητότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προκύπτει ως αποτέλεσμα της μεταβλητής φύσης της διαθεσιμότητας των ανανεώσιμων πόρων. Η αβεβαιότητα και η απρόβλεπτη πτυχή της διαθεσιμότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από την άλλη πλευρά οφείλεται κυρίως σε αναπόφευκτα σφάλματα που είναι εγγενή στα δεδομένα πρόβλεψης που χρησιμοποιούνται ως εισροές σε μοντέλα πρόβλεψης ΑΠΕ [37].

3.1.1 Μέτρα για την αντιμετώπιση της μεταβλητότητας της προσφοράς ανανεώσιμης ενέργειας όταν η ζήτηση και η προσφορά κινούνται μαζί

Ορισμένα μέτρα για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας της ανανεώσιμης παραγωγής όταν η προσφορά από ΑΠΕ αυξάνεται και μειώνεται με τα πρότυπα ζήτησης συζητούνται παρακάτω:

(i) Ορθή διαχείριση και λειτουργία συμβατικών αποθεματικών ταχείας δράσης βάσει συνεχώς ενημερωμένων προγνώσεων καιρού

Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο απαιτεί την ανάγκη εφαρμογής κατάλληλων σχεδίων έκτακτης ανάγκης, όπως η ανάγκη για ένα σταθερό και αξιόπιστο αποθεματικό περιστροφής, το οποίο μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση φορτίου σε περίπτωση βλάβης ή μη διαθεσιμότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για σύντομο χρονικό διάστημα.

Οι ΑΠΕ παράγουν ενέργεια με βάση τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πόρων όπως ο άνεμος και η ηλιακή ενέργεια, η οποία μπορεί να προβλεφθεί μέσω καιρικών προβλέψεων. Στην περίπτωση που κατά τη διάρκεια υψηλής ζήτησης οι ανανεώσιμες μονάδες δεν μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση επαρκώς λόγω περιορισμών πόρων, όπως μείωση της ταχύτητας ανέμου για ανεμογεννήτριες ή συννεφιασμένο ουρανό για ηλιακά εργοστάσια, μια εναλλακτική πηγή πρέπει να τροφοδοτήσει το έλλειμμα στην ζήτηση. Αυτή η εναλλακτική πηγή θα πρέπει να έχει την ίδια ή υψηλότερη ικανότητα παραγωγής με εκείνη των ανανεώσιμων σταθμών παραγωγής ενέργειας και θα πρέπει να έχει προβλεφθεί για γρήγορη λειτουργία και σύνδεση στο δίκτυο για την τροφοδοσία του φορτίου με ελάχιστη χρονική καθυστέρηση. Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας που βασίζονται σε πόρους, όπως οι γεννήτριες με βενζίνη, είναι πιο κατάλληλοι για να παίζουν το ρόλο των αποθεμάτων ταχείας δράσης λόγω της ικανότητάς τους για γρήγορη εκκίνηση και λιγότερη κατανάλωση χρόνου για να φτάσουν στη βέλτιστη λειτουργία απόδοσης.

(ii) Εγκαθιστώντας ESS υψηλής χωρητικότητας σε κατάλληλες τοποθεσίες στο δίκτυο

Εξετάστηκε η δυνατότητα εφαρμογής μεγάλων συσκευών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε συγκεκριμένες τοποθεσίες στο δίκτυο που θα αποθηκεύουν ενέργεια όταν υπάρχει υπερβολική ενέργεια και θα τροφοδοτούν την αποθηκευμένη ενέργεια όταν αυξάνεται η ζήτηση. Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αποθηκευτεί σε πολλές μορφές όπως επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, τεχνολογία σφονδύλου, θερμική ενέργεια, μηχανική ενέργεια και πολλές άλλες μορφές ενέργειας που μπορούν να μετατραπούν σε ηλεκτρική ενέργεια όταν απαιτείται. Εγκαθιστώντας συσκευές με δυνατότητα μεγάλης αποθήκευσης στο δίκτυο, η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε τεράστιες ποσότητες και αυτή η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν αυξηθεί η ζήτηση ή κατά τη διάρκεια έκτακτης ανάγκης.

(iii) Με τη διάδοση εγκαταστάσεων ΑΠΕ σε μια ευρεία περιοχή

Η διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πόρων ποικίλλει σε μια ευρεία περιοχή, και αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να παρατηρηθούν ακόμη και όταν εξετάζουμε έναν τόπο όπως μια πόλη. Μερικές φορές, μπορεί να παρατηρηθεί ότι ενώ ένα μέρος της πόλης είναι ηλιόλουστο, υπάρχει βροχόπτωση στο άλλο μέρος της πόλης. Ακόμα και κατά τις καιρικά καθαρές μέρες, η παρουσία περιστασιακών νεφών επηρεάζει την εκτεθειμένη περιοχή κατά ένα μέρος καθώς επίσης και την ταχύτητα του ανέμου η οποία δεν παραμένει σταθερή σε ολόκληρη την πόλη, αλλά ποικίλλει παντού. Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις μικρές λεπτομέρειες, μπορεί να

παρατηρηθεί ότι η εγκατάσταση μικρών διασυνδεδεμένων ΑΠΕ σε διαφορετικές τοποθεσίες της πόλης θα παρείχε μια πιο σταθερή τροφοδοσία σε σύγκριση με τη δημιουργία ενός τεράστιου εργοστασίου σε μια καθορισμένη τοποθεσία που παράγει μέγιστη ισχύ όταν είναι διαθέσιμοι ανανεώσιμοι πόροι και αμελητέα ισχύ σε περίπτωση μη διαθεσιμότητα πόρων. Έτσι, αντί να δημιουργηθεί ένας τεράστιος σταθμός παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε μια τοποθεσία, η εγκατάσταση μικρών διασυνδεδεμένων ΑΠΕ σε μια ευρεία περιοχή θα συμβάλει σημαντικά στην παροχή σταθερής μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Προς το παρόν, η μεταβλητότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αντιμετωπίζεται ως επί το πλείστον με την εγκατάσταση και τον σωστό έλεγχο των ενεργειακών αποθεμάτων. Καθώς η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο αυξάνεται όλο και περισσότερο, η εγκατάσταση των ESS και η ελεγχόμενη μετάδοση γίνεται πιο ελκυστική.

3.1.2 Ζητήματα που ταιριάζουν με τα αποθέματα κατά την ανανεώσιμη ενέργεια και την αναντιστοιχία ζήτησης

Η μεταβλητότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αντιμετωπίζεται σχετικά εύκολα μέσω των προαναφερόμενων προσεγγίσεων όταν η ζήτηση και η προσφορά ανανεώσιμης ενέργειας κινούνται μαζί, δηλαδή, υψηλή διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πόρων όταν η ζήτηση είναι υψηλή και αντιστρόφως. Όταν η ζήτηση και η προσφορά κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις, η λειτουργία συμβατικών αποθεματικών για την αντιμετώπιση της κατάστασης γίνεται πιο δύσκολη τόσο από πλευράς κόστους όσο και διαχείρισης πόρων. Οι δύο μεγάλες περιπτώσεις αναντιστοιχίας ανανεώσιμης ενέργειας με ζήτηση περιλαμβάνουν:

(i) Διαθεσιμότητα υψηλής ανανεώσιμης ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης

Αυτή η κατάσταση αφορά κυρίως στην αιολική ενέργεια. Στα αιολικά πάρκα, μερικές φορές λόγω μη φυσιολογικών καιρικών συνθηκών, μπορεί να υπάρξει διαθεσιμότητα υψηλού όγκου ανανεώσιμων πόρων (αιολική κίνηση σε υψηλές ταχύτητες) κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης, όπως τη νύχτα. Αυτό οδηγεί σε μια κατάσταση πλεονασματικής διαθεσιμότητας ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, η οποία δε χρησιμοποιείται, καθώς η ζήτηση είναι χαμηλή. Η ενσωμάτωση ηλεκτρικού ESS συζητείται ως ένα από τα πιθανά μέτρα για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος. Με την εγκατάσταση ESS υψηλής χωρητικότητας σε κατάλληλες τοποθεσίες στο δίκτυο, μπορεί να εκτραπεί τυχόν πλεόνασμα ή υπερβολική ενέργεια για τη φόρτιση του ESS, και αυτή η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να τροφοδοτηθεί ξανά στο σύστημα όποτε απαιτείται ή όταν η ζήτηση αυξάνεται.

(ii) Η απουσία ανανεώσιμης ενέργειας όταν η ζήτηση είναι υψηλή ή κατά τη διάρκεια αιχμής

Στο άλλο άκρο είναι η κατάσταση της απουσίας ανανεώσιμης ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής. Η ενέργεια που παράγεται από τεχνολογίες ηλιακής και αιολικής ενέργειας χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις για την ικανοποίηση της μέγιστης ζήτησης. Με την παραγωγή ενέργειας από ηλιακές και αιολικές τεχνολογίες να εξαρτώνται πλήρως από τις καιρικές συνθήκες, τυχόν ανώμαλες καιρικές συνθήκες για παρατεταμένη χρονική περίοδο που διαρκεί από αρκετές ημέρες έως εβδομάδες, θα έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο δίκτυο και στις χειρότερες περιπτώσεις δεν θα μπορεί να παραχθεί ενέργεια από ΑΠΕ κατά τη διάρκεια της επηρεαζόμενης χρονικής περιόδου. Για τέτοιο ενδεχόμενο, πρέπει να προγραμματιστούν εκ των προτέρων εναλλακτικές ρυθμίσεις για να διασφαλιστεί ότι θα παρέχεται η ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η εγκατάσταση και η σωστή διαχείριση των αποθεμάτων εξετάζεται για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, αλλά το κόστος που συνεπάγεται η δημιουργία των αποθεματικών αυτών χρησιμεύει ως εμπόδιο. Η χρησιμοποίηση διασυνδεδεμένων ΑΠΕ σε μια πολύ ευρεία περιοχή προκειμένου να συλλεχθούν πόροι από περισσότερες τοποθεσίες είναι επίσης μια άλλη επιλογή που εξετάζεται, αλλά έχει ορισμένους περιορισμούς, όπως η απώλεια ισχύος κατά τη μετάδοση μεταξύ των διαφόρων περιοχών, καθώς και ανησυχίες για την ασφάλεια και το κόστος συντήρησης των διασυνδεδεμένων μεμονωμένων μονάδων ανανεώσιμης ενέργειας. Η αντιμετώπιση των δύο παραπάνω περιπτώσεων εξακολουθεί να αποτελεί μείζονα πρόκληση που αντιμετωπίζει η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο, και διεξάγεται ακόμη έρευνα για την εξεύρεση της καλύτερης δυνατής λύσης για την ορθή αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων. Η διακοπτόμενη προσφορά λόγω της φύσης της μεταβλητότητας και του απρόβλεπτου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αντιμετωπίζεται επί του παρόντος μέσω ευελιξίας στην παραγωγή, υποστηριζόμενη με αξιόπιστα και ακριβή δεδομένα πρόγνωσης καιρού για ακριβή πρόβλεψη διαθεσιμότητας καθώς και τη χρήση μονάδων ESS σε στρατηγικές και βέλτιστες τοποθεσίες, και υιοθέτηση αποτελεσματικών και ενεργειακών πρακτικών και ενεργειών εξοικονόμησης ενέργειας στη χρήση της διαθέσιμης ηλεκτρικής παροχής [37].

3.2. Διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας (DG)

Η ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) προσφέρει ένα αξιοσημείωτο όφελος για την αειφόρο παραγωγή ενέργειας σε όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλές εκπομπές ρύπανσης του περιβάλλοντος σε σύγκριση με την παραγωγή ενέργειας με βάση

συμβατικές πηγές ενέργειας. Η πιο σημαντική πτυχή της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, γνωστή ως διεσπαρμένη παραγωγή (DG), έχει σχεδόν μηδενικό κόστος καυσίμου. Ωστόσο, το υπάρχον σύστημα ισχύος που συνδέεται με τη DG δημιουργεί ανησυχίες για περίπλοκα προβλήματα λειτουργίας και ελέγχου του συστήματος [38].

Τα τελευταία χρόνια, με την ηλεκτρική ενέργεια να γίνεται πιο προσβάσιμη και οι εφαρμογές της πιο ευέλικτες, η ζήτηση για σταθερή και επαρκή παροχή ηλεκτρικού ρεύματος αυξάνεται συνεχώς. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτές οι αυξανόμενες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αντιμετωπιστεί ανεπαρκώς με την επέκταση της χωρητικότητας των υπαρχόντων σταθμών παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, με την υποδομή μεταφοράς να παραμένει η ίδια, καθίσταται όλο και πιο δύσκολο για ένα συγκεντρωτικό δίκτυο να ανταποκριθεί στις αυξανόμενες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας. Για να αντιμετωπιστεί το αυξανόμενο φορτίο, μία από τις πολλά υποσχόμενες λύσεις είναι η ενσωμάτωση μικρών μονάδων παραγωγής απευθείας από την πλευρά της ζήτησης. Αυτές οι μικρές μονάδες παραγωγής που συνήθως συνδέονται με τον τομέα διανομής, για την κάλυψη των απαιτούμενων απαιτήσεων ισχύος κυρίως κατά τις ώρες αιχμής, αποτελούν τη διεσπαρμένη παραγωγή (DG). Η διεσπαρμένη παραγωγή είναι ένας γενικός όρος και χρησιμοποιείται για να εκφράσει έναν αριθμό από μεμονωμένες μονάδες παραγωγής που συνδέονται με την τοποθεσία διανομής. Η ενσωμάτωση της DG στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι ένα σημαντικό πεδίο όσον αφορά στην ανακούφιση του κεντρικού συστήματος ισχύος από τις συνθήκες υπερφόρτωσης. Με την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, προκύπτει η ανάγκη αναζήτησης εναλλακτικών πηγών ηλεκτρικής ενέργειας. Επί του παρόντος, πολλοί διαχειριστές συστημάτων αντιμετωπίζουν τις προκλήσεις της αντιστοίχισης της διαθέσιμης ηλεκτροπαραγωγής με το ρυθμό κατανάλωσης, ειδικά κατά τις ώρες αιχμής. Αυτό το περιθώριο διαφοράς μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης ισχύος μπορεί να ρυθμιστεί, έως ένα ορισμένο βαθμό, με τη δημιουργία μονάδων φορτίου αιχμής που θα λειτουργούν μόνο όταν απαιτείται, δηλαδή κατά τις ώρες αιχμής, για την τροφοδοσία του φορτίου. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) αντί των συμβατικών πηγών για τη λειτουργία αυτών των μονάδων φορτίου αιχμής προσφέρει πρόσθετα πλεονεκτήματα, όπως μείωση του κόστους λειτουργίας και λιγότερες εκπομπές ρύπανσης. Επομένως, σε σύγκριση με τον άνθρακα ή το πετρέλαιο με βάση την παραγωγή ενέργειας, η ολοκλήρωση της παραγωγής ενέργειας με βάση ΑΠΕ είναι πιο ευεργετική για το δίκτυο, ενώ καθιστά επίσης το δίκτυο πιο φιλικό προς το περιβάλλον [37].

3.3 Μέτρα αντιμετώπισης ζητημάτων ενσωμάτωσης ΑΠΕ στο δίκτυο

Οι διατάξεις και τα μέτρα για την αντιμετώπιση ορισμένων από τα θέματα της ολοκλήρωσης ΑΠΕ συζητούνται παρακάτω.

3.3.1 Έξυπνα συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας πλέγματος με απόκριση ζήτησης (Smart Grid)

Τα Smart Grid μπορεί να οριστούν ως τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας πλήρως εξοπλισμένα και ενσωματωμένα με αισθητήρες παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο και προηγμένα πρότυπα επικοινωνίας που ενσωματώνουν έξυπνα τις γεννήτριες με τους καταναλωτές, είναι αυτοθεραπευτικά, ανθεκτικά, βιώσιμα, αποτελεσματικά προσαρμοστικά, ασφαλή και παρέχουν αποτελεσματικά ηλεκτρική ενέργεια. Σε σύγκριση με την ενσωμάτωση ΑΠΕ σε συμβατικό ηλεκτρικό δίκτυο, το Smart Grid ΑΠΕ παρέχει ορισμένα πλεονεκτήματα και προνόμια που περιλαμβάνουν, αλλά δεν περιορίζονται σε, εγκαταστάσεις για την υλοποίηση οικονομικά αποδοτικότερης διείσδυσης ΑΠΕ στο δίκτυο με αξιοσημείωτες βελτιώσεις στην ποιότητα ισχύος, την αξιοπιστία και ανθεκτικότητα. Επίσης, στο έξυπνο δίκτυο, οι καταναλωτές θεωρούνται επίσης ενεργά συμμετέχοντες στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και τυχόν δραστηριότητες των καταναλωτών αντικατοπτρίζονται στη λειτουργία του δικτύου. Στους καταναλωτές παρέχονται κίνητρα προκειμένου να τους παρακινήσουν και να τους ενθαρρύνουν να εργαστούν για έναν τρόπο ζωής που επιφέρει περισσότερη εξοικονόμηση στην κατανάλωση ενέργειας. Στο έξυπνο δίκτυο, η εφαρμογή προγραμμάτων ανταπόκρισης στη ζήτηση βάσει των καταναλωτικών προτύπων οδηγεί σε πολλά πλεονεκτήματα και εξοικονόμηση για το ηλεκτρικό δίκτυο. Η απόκριση ζήτησης επικεντρώνεται στον έλεγχο της ζήτησης ώστε να ταιριάζει με την προσφορά αντί να επικεντρώνεται στο προμήθεια. Η ενεργός συμμετοχή των καταναλωτών στις καθημερινές δραστηριότητες ενός δικτύου συστήματος ισχύος είναι ένα μέτρο που έχει διερευνηθεί εδώ και πολύ καιρό από διαφορετικούς διανοούμενους και μελετητές ως μέτρο για την ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου. Η ευελιξία από την πλευρά της ζήτησης μπορεί να αντιμετωπίσει ορισμένα από τα προβλήματα που οφείλονται στη μεταβλητή ολοκλήρωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με την ενεργό συμμετοχή των καταναλωτών, όχι μόνο μειώνεται σημαντικά το κόστος λειτουργίας του δικτύου αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικότερα η ισχύς από τις ΑΠΕ [37].

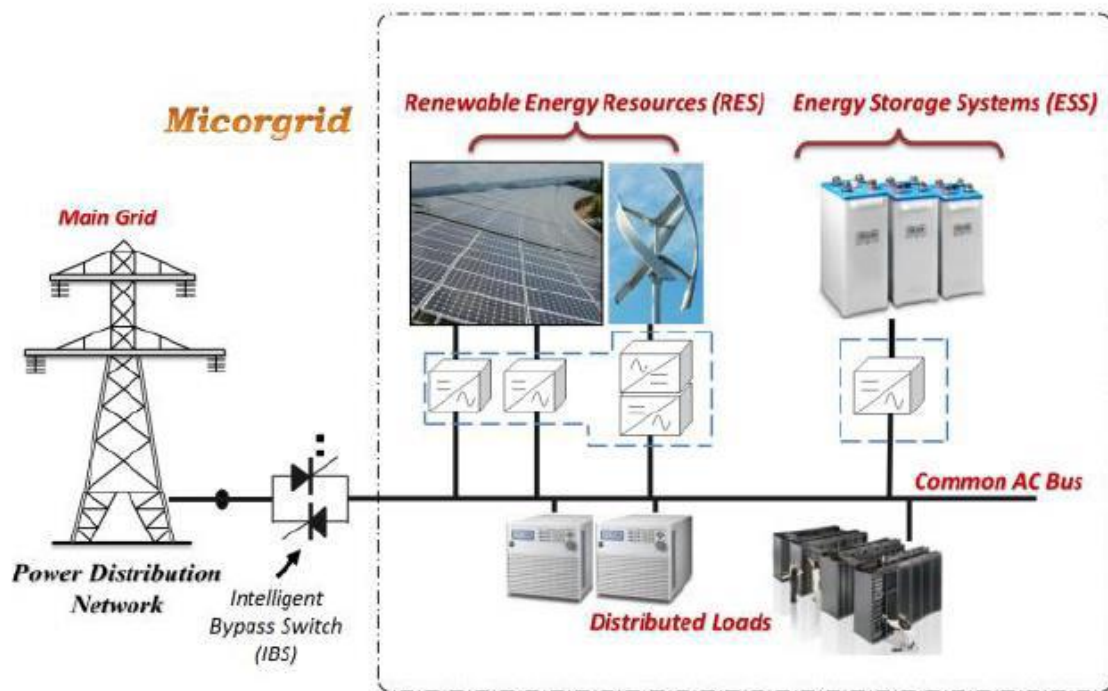
3.3.2 Μικροδίκτυα (MicroGrid)

Όταν διαφορετικές DG συγκεντρώνονται σε μια ενιαία ενσωματωμένη μονάδα μαζί με εξαρτήματα όπως μετατροπείς με βάση ηλεκτρονικά ισχύος, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) και άλλο απαραίτητο εξοπλισμό για την παροχή σταθερής τροφοδοσίας σε υπάρχον συμβατικό δίκτυο μέσω συνδέσμου διασύνδεσης, ξεκινά η ιδέα του μικροδικτύου (MicroGrid) [37].

Σε όλο τον κόσμο, υπάρχουν πολλά χωριά που δεν έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια λόγω της απόστασης. Ευτυχώς, σε πολλά από αυτά τα μέρη, όπως στα ωκεάνια νησιά, υπάρχουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σημαντική ηλιακή ακτινοβολία και αιολική ενέργεια επίσης. Αυτοί οι ενεργειακοί πόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν από απομονωμένα μικροδίκτυα για την κάλυψη των τοπικών ενεργειακών αναγκών.

Με στόχο την ηλεκτροδότηση απομακρυσμένων περιοχών και νησιών, το μικροδίκτυο κερδίζει όλο και περισσότερη δημοτικότητα. Πόροι όπως κυψέλες καυσίμου, φωτοβολταϊκές συστοιχίες και ανεμογεννήτριες μαζί με ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (π.χ. μπαταρίες, σούπερ πυκνωτές και σφόνδυλοι) και φορτία πελατών, θα μπορούσαν να λειτουργούν ανεξάρτητα.

Τα μικροπλέγματα θεωρούνται συχνά ως τοπικό πλέγμα με συνδυασμό από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), συστήματα ESS και φορτία, έτοιμα για να λειτουργούν είτε σε συνδεδεμένο πλέγμα είτε σε νησιωτική λειτουργία μικροδικτύου το οποίο θα παρέχει καθαρή, αξιόπιστη και αδιάλειπτη ισχύ (Σχήμα 41).



Σχήμα 41: Δομή μικροπλέγματος [39]

Το Σχήμα 41 δείχνει μια γενική δομή του συστήματος που αποτελείται από μικροπλέγμα, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και ESS με μπαταρίες, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει είτε σε πλέγμα, σε συνδεδεμένη λειτουργία, είτε σε νησιά σύμφωνα με την κατάσταση του διακόπτη Intelligent Bypass (IBS).

Το νησιωτικό μικροδίκτυο αποτελείται από το ESS και το Φωτοβολταϊκό (Φ/Β), όπου η μονάδα ESS είναι μονάδα σχηματισμού δικτύου και το Φ/Β σύστημα λειτουργεί ως μονάδα τροφοδοσίας δικτύου. Καθώς στο νησιωτικό μικροδίκτυο δεν υπάρχει ανταλλαγή ισχύος μεταξύ του κεντρικού δικτύου και του microgrid, το ESS χρησιμοποιείται ως μονάδα αποθήκευσης ενέργειας για εξισορρόπηση της ισχύος μεταξύ πηγών και φορτίων. Το ESS είναι σημαντικό για την επίτευξη του στόχου της ισορροπίας ισχύος και επιπλέον υποστηρίζει τη διατήρηση της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας σε ασφαλές εύρος. Εάν συμβεί ανισορροπία μεταξύ κατανάλωσης και παραγωγής, αυτή η στρατηγική έξυπνης ισχύος θα κάνει το SoC εκτός ασφαλούς περιοχής ελέγχου. Αυτές οι καταστάσεις ονομάζονται υπερφόρτιση και εκφόρτιση και είναι γνωστό ότι μπορεί να προκαλέσουν μόνιμη ζημιά στα συστήματα ESS. Ως εκ τούτου, η συντονισμένη στρατηγική ελέγχου θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την κατάσταση όλων των στοιχείων του μικροδικτύου όπως το SoC του ESS, τη διαθέσιμη ισχύ από τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα και τη ζήτηση κατανάλωσης ενέργειας [39].

Το μικροπλέγμα μπορεί να λειτουργήσει ως μονάδα κατανεμημένης παραγωγής ή ως αυτόνομο εργοστάσιο ή σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το Micro-Grid λειτουργεί ως μια κοινή ομάδα ηλεκτρικής ενέργειας, όπου όλες οι συνδεδεμένες πηγές ενέργειας διαθέτουν διατάξεις για την ομαλή ενσωμάτωση στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο. Σε ένα μικροπλέγμα, οι μικρο πηγές πρέπει να είναι σε θέση να ενσωματώνονται απρόσκοπτα καθώς και να αποσυνδέονται με το υπάρχον μικροδίκτυο χωρίς την ανάγκη εκτεταμένης τροποποίησης των υπάρχουσών μικρο πηγών [37].

3.3.3 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS)

Τα Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας έχουν δυνατότητες αποθήκευσης τεράστιου ποσού ηλεκτρικής ενέργειας, η αποθηκευμένη ενέργεια των οποίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί όποτε απαιτείται. Οι βελτιώσεις στην τεχνολογία που συνδέονται με το EES μπορούν να αντιμετωπίσουν ορισμένα από τα προβλήματα, όπως ζητήματα με τη διαχείριση φορτίου αιχμής, τη βελτίωση της σταθερότητας ηλεκτρικής ενέργειας και τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί επίσης να αποθηκευτεί με τη μορφή πιθανής ενέργειας μέσω μηχανισμών, όπως η άντληση νερού σε υψηλές τοποθεσίες σε τεράστιες ποσότητες κατά τη διαθεσιμότητα υψηλής πλεονάζουσας ισχύος, και αυτή η αποθηκευμένη δυνητική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτρικών στροβίλων που μετατρέπει το μηχανική ενέργεια μετακίνησης νερού σε ηλεκτρική ενέργεια η οποία μπορεί στη συνέχεια να τροφοδοτείται στο δίκτυο όταν αυξάνεται η ζήτηση για ενέργεια. Η σωστή εφαρμογή και εγκατάσταση ESS σε ολοκληρωμένα συστήματα ισχύος ΑΠΕ μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην εξασφάλιση ότι για ξαφνικές στιγμιαίες πτώσεις στην τάση του συστήματος, το σύστημα αντισταθμίζεται για αυτές τις μικρές περιόδους χωρίς την ανάγκη έναρξης νέων εγκαταστάσεων παραγωγής. Μερικά από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα τρέχοντα ESS περιλαμβάνουν το ρόλο και το σχεδιασμό του ESS, περιορισμένη χωρητικότητα αποθήκευσης, περιορισμένη διάρκεια ζωής των μπαταριών κ.λπ. [37].

3.3.4 Προηγμένες προβλέψεις

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μιας μονάδας παραγωγής που βασίζεται σε ΑΠΕ εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της διαθεσιμότητας των πηγών, όπως η αιολική και η ηλιακή, ενώ η διαθεσιμότητά τους εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, είναι πλέον δυνατή η πρόβλεψη καιρικών συνθηκών σε όλο τον κόσμο, ώρες και μέρες

μπροστά με υψηλή ακρίβεια χρησιμοποιώντας δορυφόρους καιρού και άλλα μέσα. Η χρήση αυτού και άλλων ήδη διαθέσιμων μέσων για την ακρίβεια των μετεωρολογικών προβλέψεων μιας συγκεκριμένης περιοχής, ώρες και μέρες μπροστά, ειδικά όσον αφορά τη διαθεσιμότητα αιολικών και ηλιακών πόρων, παρέχει επίσης κάποια βοήθεια στην επίλυση της φύσης της μεταβλητότητας αυτών των πηγών. Προβλέποντας με ακρίβεια το μετεωρολογικό μοτίβο εκ των προτέρων, μπορεί επίσης να επιτευχθεί ταχύτερη λειτουργία των αποθεμάτων για την παράδοση τυχόν ανεπάρκειας στον εφοδιασμό, λόγω αποτυχίας λειτουργίας ανανεώσιμων πηγών [37].

3.3.5 Ταχύτερη αποστολή αντί για σταθερό χρονοδιάγραμμα γεννητριών μεγάλης διάρκειας

Σε γενικές γραμμές, οι γεννήτριες καλούνται να λειτουργούν με ένα σταθερό χρονοδιάγραμμα για την παροχή της ζήτησης για μια συγκεκριμένη περίοδο. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου προγραμματισμένης λειτουργίας, οι επιλεγμένες γεννήτριες δεσμεύονται πλήρως για τα σταθερά τους χρονοδιαγράμματα και δεν θα είναι διαθέσιμες για να κάνουν άλλες εργασίες, όπως παροχή βοήθειας για την ανακούφιση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους καταστάσεων βλάβης ή προγραμματισμένων αποκλίσεων. Έτσι, κατά τη διάρκεια της σταθερής προγραμματισμένης λειτουργίας των γεννητριών, εάν η ζήτηση του δικτύου αυξάνεται ξαφνικά, οι δεσμευμένες γεννήτριες δεν θα είναι σε θέση να εξισορροπήσουν το φορτίο, παρόλο που μπορεί να έχουν την ικανότητα να το πράξουν. Τώρα, αντί να δεσμεύονται οι γεννήτριες για μεγάλα χρονικά διαστήματα καθορισμένων προγραμμάτων, εάν οι γεννήτριες λειτουργούν με ταχύτερα διαστήματα αποστολής, τότε γίνεται όλο και πιο εύκολο να ταιριάζουν με τα επίπεδα φορτίου και παραγωγής και μπορεί να αντιμετωπιστεί γρήγορα οποιαδήποτε υπερπαραγωγή ισχύος ή έλλειψη τροφοδοσίας [37].

3.3.6 Ευελιξία στη γεννήτρια

Η ευελιξία μιας γεννήτριας είναι η ικανότητα μιας γεννήτριας να ξεκινά γρήγορα, να επιτυγχάνει βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας στο λιγότερο χρονικό διάστημα και να σταματά όταν είναι επιθυμητό. Η ευελιξία μιας μονάδας γεννήτριας ή μιας μονάδας παραγωγής (στόλος ευέλικτων γεννητριών) απαιτείται έντονα εάν θέλουμε να ενσωματώσουμε ΑΠΕ ομαλά, αποτελεσματικά και γρήγορα. Η μεταβλητότητα των ανανεώσιμων πόρων οδηγούν στην ισχύ που παράγεται από ΑΠΕ να είναι απρόβλεπτης και μεταβλητής φύσης. Έτσι, καθίσταται όλο και πιο δύσκολο να ενσωματωθεί η ΑΠΕ σε υπάρχουσες άκαμπτες και προγραμματισμένες

μονάδες παραγωγής. Εάν, από την άλλη πλευρά, οι μονάδες παραγωγής είναι εύκαμπτες με την ικανότητα να αυξάνουν εύκολα καθώς και να μειώνουν τη λειτουργία τους χωρίς να αντιμετωπίζουν σημαντικές αντιδράσεις ή αρνητικές επιπτώσεις στις μεμονωμένες γεννήτριες τους, τότε σε ένα τόσο ευέλικτο δίκτυο, η ενσωμάτωση μεταβλητής ΑΠΕ γίνεται ευκολότερη. Σε ένα τόσο ευέλικτο δίκτυο, κατά τη διάρκεια της διαθεσιμότητας τροφοδοσίας ΑΠΕ, οι γεννήτριες δικτύου μπορούν να απενεργοποιηθούν εύκολα για να εξυπηρετήσουν την ισχύ που λαμβάνεται από τις ΑΠΕ. Οι ευέλικτες γεννήτριες δικτύου μπορούν να ξεκινήσουν γρήγορα στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας τους και να συνδεθούν στο δίκτυο για να παραδώσουν το φορτίο [37].

4 Εφαρμογές συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε μικρά νησιά

Υπάρχουν περισσότερα από 50 χιλιάδες νησιά στη γη, με συνολική έκταση πάνω από το 1/6 της συνολικής ηπειρωτικής περιοχής και πάνω από 740 εκ. κατοίκους. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι πολύ σημαντικό ζήτημα στα νησιά καθώς τα περισσότερα συστήματα παραγωγής ενέργειας στα νησιά βασίζονται κυρίως στα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα.

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) προκαλούν παγκόσμια υπερθέρμανση. Το CO₂ είναι το πρωταρχικό αέριο θερμοκηπίου ενώ η καύση του ορυκτού καυσίμου αντιπροσωπεύει το 90% των εκπομπών CO₂. Τα νησιά είναι τα μεγαλύτερα θύματα της υπερθέρμανσης του πλανήτη και ειδικά τα εδάφη με χαμηλό υψόμετρο καθώς και οι ακτές.

Συνήθως δεν υπάρχει σύνδεση στο δίκτυο μεταξύ των νησιών και της ηπειρωτικής χώρας, και ούτε μεταξύ των γειτονικών νησιών λόγω των υψηλών τιμών των υποβρύχιων καλωδίων μετάδοσης. Ως εκ τούτου, η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος είναι ασταθής και αναξιόπιστη, ειδικά κάτω από ακραίες καιρικές συνθήκες. Λόγω αυτής της ανασφάλειας, οι κάτοικοι των νησιών προσπάθησαν να βρουν εναλλακτικές λύσεις και έτσι χρησιμοποιήθηκαν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [40].

Η ενεργειακή αυτονομία σε μη διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα δεν έχει επιτευχθεί μέχρι τώρα με επιτυχία όπως σε διασυνδεδεμένα συστήματα. Οι πιο συχνά συναντούμενες πηγές πρωτογενούς ενέργειας στο νησιωτικό σύστημα είναι η αιολική ενέργεια και η ηλιακή ακτινοβολία. Σε μερικά νησιά θα μπορούσε επίσης να είναι το δυναμικό βιομάζας ή τα υψηλής /μεσαίας ενθαλπίας γεωθερμικά πεδία. Αυτό σημαίνει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ο μόνος δρόμος προς την ενεργειακή αυτονομία σε νησιωτικά αυτόνομα συστήματα είναι μέσω της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας και της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή δύο πηγές ενέργειας που χαρακτηρίζονται από στοχαστική, μη εγγυημένη διαθεσιμότητα. Για να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα, ο σταθμός παραγωγής ενέργειας στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) πρέπει να υποστηρίζεται από μια μονάδα αποθήκευσης, σχηματίζοντας επομένως, συνολικά το λεγόμενο «υβριδικό εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας». Γενικά, ένας υβριδικός σταθμός παραγωγής ενέργειας αποτελείται από τα ακόλουθα διακριτά συστατικά:

- μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ΑΠΕ (μη εγγυημένη μονάδα παραγωγής ενέργειας)
- μονάδα αποθήκευσης ενέργειας
- εφεδρικές γεννήτριες.

Το υβριδικό εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας στοχεύει στη μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τη μονάδα ΑΠΕ. Αυτό σημαίνει ότι η απορρόφηση της ισχύος που παράγεται από τη μονάδα ΑΠΕ, είτε μέσω της άμεσης διείσδυσης στο ηλεκτρικό δίκτυο ή μέσω της αποθήκευσης παραγωγής ενέργειας, παρουσιάζει μέγιστη προτεραιότητα. Το σύστημα αποθήκευσης στοχεύει στην προσαρμογή της στοχαστικής ισχύος των ΑΠΕ είτε με τη ζήτηση ενέργειας, είτε με την προκαθορισμένη εγγυημένη παραγωγή ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό παραγωγής ενέργειας. Η αποθήκευση πραγματοποιείται όποτε η παραγωγή ισχύος από τη μονάδα ΑΠΕ υπερβαίνει είτε τη ζήτηση ισχύος είτε τη μέγιστη στιγμιαία διείσδυση της αιολικής ενέργειας. Τέλος, οι εφεδρικές μονάδες (συνήθως οι πετρελαιοκινητήρες) χρησιμοποιούνται μόνο σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει δυνατότητα κάλυψης της ζήτησης ισχύος από τη μονάδα ΑΠΕ ή την ισχύ του συστήματος αποθήκευσης [41].

Σύμφωνα με το IRENA (International Renewable Energy Agency) υπάρχουν πολλές εμπειρίες σχετικά με νησιωτικά έργα στον κόσμο. Μερικά από τα κρίσιμα ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ανάπτυξη των συστημάτων ESS είναι: η σωστή διαστασιολόγηση του ESS, η οικονομική βιωσιμότητα του έργου, η πολυπλοκότητα και η ολοκλήρωση του συστήματος, και η συστηματική στρατηγική ανάπτυξης.

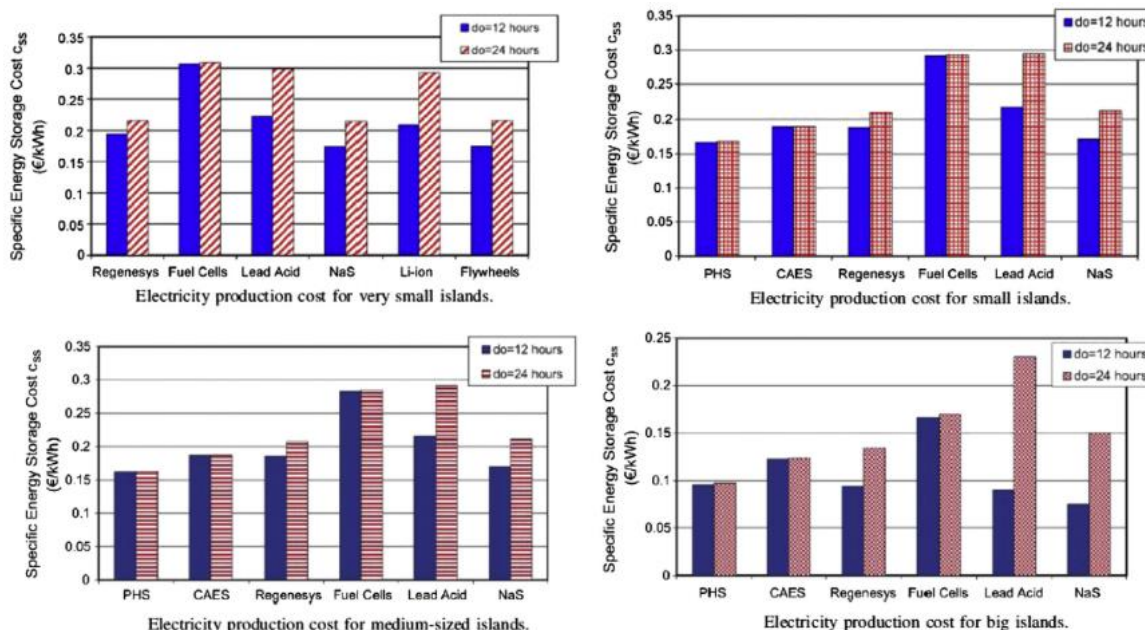
Η εμπειρία δείχνει ότι δεν υπάρχει μοναδική κατάλληλη τεχνολογική λύση αποθήκευσης και η αποθήκευση δεν είναι πάντα απαραίτητα κατάλληλη για ενεργειακά νησιωτικά συστήματα. Για παράδειγμα, η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να προσθέσει τιμή σε συστήματα μεταφοράς με περιορισμούς χωρητικότητας ή να υποφέρει από χαμηλής ποιότητας ισχύ στο τέλος του συστήματος διανομής. Αντίθετα, μπορεί να μην είναι επαρκής για την επίλυση της χρόνιας έλλειψης παροχής αποθήκευσης ή την ανεπαρκή απόδοση των συστημάτων μεταφοράς και διανομής.

Επομένως, η βασική ιδέα των εφαρμογών ESS σε νησιωτικά δίκτυα δεν είναι να υποστηρίξει τη βασική παραγωγή ντίζελ, καθώς είναι ένα πολύ γνωστό γεγονός ότι η αποθήκευση βελτιώνει σίγουρα την απόδοση του ντίζελ. Ωστόσο, ο στόχος είναι ελαφρώς διαφορετικός λόγω της αυξημένης ανάγκης για ΑΠΕ και της ολοκλήρωσης και εκπλήρωσης κώδικα πλέγματος σε απομονωμένα πλέγματα. Επιπλέον, τα νησιά έχουν ειδικά χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν από την ηπειρωτική χώρα με διασυνδεδεμένα δίκτυα. Κατά συνέπεια, υπάρχουν πρόσθετες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών του πλέγματος τους.

Τα βασικά ζητήματα που προκύπτουν με την εφαρμογή ESS σε ένα νησιωτικό πλέγμα, μπορούν να συνοψιστούν σε τρεις κύριες ομάδες:

- Υψηλές προκλήσεις διείσδυσης ΑΠΕ στα συστήματα ισχύος
- Οικονομικές και τεχνικές προκλήσεις σε εξ αποστάσεως συστήματα ισχύος, όπως νησιά ή μεμονωμένα ηπειρωτικά σημεία
- Ζητήματα που υπάρχουν στο αυτόνομο συστήματα ισχύος SAPS (Stand Alone Power Systems)

Τα νησιά χωρίζονται σε τέσσερις ομάδες, ανάλογα με την μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (MW) και τη μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (GWh), ενώ λαμβάνονται οι μέσες τιμές για τον ορισμό των χαρακτηριστικών του συστήματος ισχύος. Η μελέτη διεξάγεται για δύο περιόδους ενεργειακής αυτονομίας (12 ώρες και 24 ώρες), όπως φαίνεται στο Σχήμα 42 [3].



Σχήμα 42: Σύγκριση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά μέγεθος νησιών [3]

Τα συστήματα ESS έχουν καταχωρηθεί με βάση το ειδικό κόστος αποθήκευσης ενέργειας (€/kWh) για τα διαφορετικά σενάρια (Πίνακας 12). Αυτές οι ταξινομήσεις μπορούν να χρησιμεύσουν για να παρέχουν μια γενική έννοια της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των διαφόρων συστημάτων ESS στα νησιά ανάλογα με το μέγεθος του πλέγματός τους.

Πίνακας 12: Συστήματα ESS ανάλογα με το μέγεθος των νησιών [3]

	Έως 12 ώρες ενεργειακής αυτονομίας	24 ώρες ενεργειακής αυτονομίας
Πολύ μικρά νησιά (<1 MW & <2 GWh)	Μπαταρία NaS < Σφόνδυλος <Μπαταρία ροής < Μπαταρία Li-Ion < Μπαταρία Μόλυβδου-οξέος	Μπαταρία NaS < Μπαταρία ροής
Μικρά Νησιά ([1-5 MW] & [2-15 GWh])	Μπαταρία PHES <NaS <CAES < Μπαταρία ροής <Μπαταρία Μόλυβδου-οξέος	Μπαταρία PHES <CAES <Μπαταρία ροής <NaS
Νησιά Μεσαίου μεγέθους ([5-35 MW] & [15-100 GWh])	Μπαταρία PHES <NaS <CAES < Μπαταρία ροής	Μπαταρία PHES <CAES < Μπαταρία ροής <NaS
Μεγάλα Νησιά (> 35/40 MW & > 100 GWh)	Μπαταρία NaS (δεν χρησιμοποιείται ακόμη σε αυτήν την κλίμακα) <Lead-Acid (δεν χρησιμοποιείται ακόμη σε αυτήν την κλίμακα) <PHES < Μπαταρία ροής <CAES	PHES <CAES

Το ενδιαφέρον της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για το ενεργειακό ζήτημα των νησιών βρίσκεται στην κορύφωσή του. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλά βασικά βήματα προς την ανάπτυξη βιώσιμων νησιωτικών ενεργειακών συστημάτων. Ξεκινώντας από την Πρωτοβουλία Smart Island και προχωρώντας στη Διακήρυξη της Βαλέτας (Valletta Declaration), τα νησιά έχουν αναγνωριστεί ως ιδανική τοποθεσία για να αποδειχθεί η τεχνική και οικονομική σκοπιμότητα των ενεργειακών συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας Υψηλών Μεταβλητών (vRES). Στη δεκαετία του '90, το ενδιαφέρον για Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ήταν πολύ υψηλό, κυρίως σε υδροηλεκτρική, αιολική και βιομάζα.

Καθώς αυξάνεται το μερίδιο των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο, αυξάνονται και οι ανησυχίες για την ευελιξία του δικτύου ισορροπίας. Πράγματι, το υψηλό ποσοστό διείσδυσης των vRES στο ηλεκτρικό δίκτυο προκαλεί τεχνικά ζητήματα στα νησιωτικά ηλεκτρικά πλέγματα που συχνά είναι παλιά και δεν μπορούν να φιλοξενήσουν τέτοια αστάθεια [42].

4.1 Υβριδικά Συστήματα (HESS)

Τα υβριδικά συστήματα είναι η διαδικασία δημιουργίας μιας υπερσυσκευής μαζί με συμπληρωματικά χαρακτηριστικά δύο ή περισσότερων ετερογενών συστημάτων αποθήκευσης

μαζί. Αντιμετωπίζοντας το σκληρό περιβάλλον εργασίας εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο, ένα μεμονωμένο σύστημα ESS δεν μπορεί να ικανοποιήσει όλες τις επιθυμητές τεχνικές (ενεργειακή πυκνότητα, βαθμολογία ισχύος, θερμοκρασία λειτουργίας, ρυθμός εκφόρτισης, κύκλος ζωής και κόστος). Με τα υβριδικά συστήματα μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν βέλτιστη απόδοση με βελτιωμένη απόδοση κύκλου συνδυάζοντας τα μεμονωμένα πλεονεκτήματα κάθε μοναδικού ESS. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 13, ο κύριος στόχος όλων των συστημάτων HESS είναι ο συνδυασμός συσκευών υψηλής ενεργειακής πυκνότητας (συνήθως συστήματα αργής απόκρισης) με συσκευές υψηλής πυκνότητας ισχύος (συστήματα γρήγορης απόκρισης) για την επίτευξη υψηλής απόδοσης ενέργειας και υψηλής ισχύος.

Πίνακας 13: Ταξινόμηση συστημάτων υψηλής ισχύος και υψηλής ενέργειας [19]

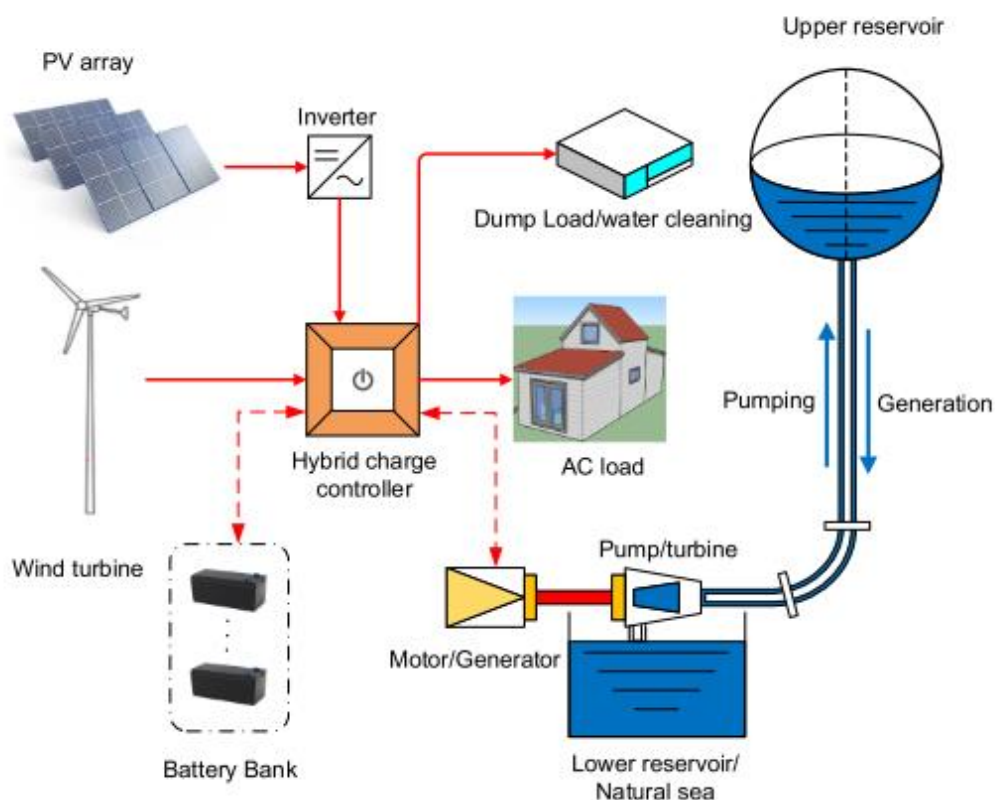
<i>High Power Devices (Fast Response)</i>	<i>High Energy Devices (Slow Response)</i>
FES	PHS
SCES	CAES
SMES	FC
BES	BES

Από τα προαναφερόμενα διαφαίνεται ότι τα συστήματα μπαταριών μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο στην περιοχή υψηλής ισχύος όσο και στην αντίστοιχη υψηλής ενέργειας λόγω των διαφορετικών και μοναδικών δυνατοτήτων τους. Στο σύστημα HESS, η οργάνωση ετερογενών συστημάτων θα γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε, βραχυπρόθεσμες ανάγκες υψηλής ισχύος να παρέχονται από συσκευές υψηλής ισχύος, ενώ οι μακροπρόθεσμες ενεργειακές απαιτήσεις θα καλύπτονται από συσκευές υψηλής ενέργειας. Διαφορετικοί ετερογενείς συνδυασμοί αποθήκευσης ενέργειας παρατίθενται στον Πίνακα 14, μερικοί από τους οποίους είναι εφικτοί και ώριμοι ενώ άλλοι συνδυασμοί υπόκεινται σε περιορισμούς. Το μέγεθος και ο πιθανός συνδυασμός του συστήματος HESS εξαρτάται από παράγοντες του περιβάλλοντος, της οικονομίας και του τύπου χρήσης [19].

Πίνακας 14: Θεωρητικά δυνητικοί συνδυασμοί HESS [19]

High Energy Supplier	High Power Supplier
PHS [158][159][160]	SMES SCES FES BES
CAES [161][162][30]	SMES SCES FES BES
FC [163][164][165]	SMES SCES FES BES
BES [60][166][167]	SMES SCES FES

Τα συστατικά ενός υβριδικού συστήματος αντλησιοταμίευσης και μπαταριών με ΑΠΕ, καθώς και η ροή ενέργειας φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα 43:



Σχήμα 43: Το διάγραμμα ροής ενέργειας τυπικού υβριδικού μεμονωμένου συστήματος ΑΠΕ [43]

Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας από ΑΠΕ σε νησιά υπάρχουν ελάχιστα εγκατεστημένα (σε λειτουργία), ενώ αντίθετα υπάρχουν πολλές μελέτες/ έρευνες σχετικά με προτεινόμενα συστήματα εγκατάστασης και βελτιστοποίησης.

4.2 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε λειτουργία

Στην Ευρώπη λειτουργούν μόνο τρία υβριδικά συστήματα με αποθήκευση ενέργειας σε νησιά. Ένα σύστημα στην Ισπανία (El Heirro) και δύο στην Ελλάδα (Τήλος, Ικαρία) τα οποία ξεκίνησαν τη λειτουργία τους μέσα στο 2019.

4.2.1 El Hierro

Η νήσος El Hierro βρίσκεται στα νοτιοδυτικά του Αρχιπελάγους των Καναρίων Νήσων και το 2000 έχει χαρακτηριστεί από την UNESCO ως δεξαμενή βιόσφαιρας, ενώ είναι το λιγότερο κατοικημένο νησί των κανάριων Νήσων [44].

Για λόγους οικονομίας, αυτάρκειας και οικολογίας προτάθηκε ένα νέο ενεργειακό μοντέλο στο νησί Gorona del Viento με στόχο την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών των κατοίκων κατά 100%. (Σχήμα 44). Η γεωμορφολογία του νησιού ενδείκνυται για αυτή την επένδυση και την ολοκλήρωσή της. Η θέση των ανεμογεννητριών βρίσκεται στην κορυφή ενός εξαφανισμένου ηφαιστείου καθώς στο νησί υπάρχουν υψηλά επίπεδα ανέμου. Επιπλέον πλεονέκτημα αποτέλεσε η χρήση του κρατήρα La Caldera ως φυσική (άνω) δεξαμενή του υδροηλεκτρικού σταθμού [45].



Σχήμα 44: Υλοποίηση του έργου Gorona del Viento [45]

Το νέο σύστημα αιολικής ενέργειας ενσωματώνει ένα αιολικό πάρκο και μία υδροηλεκτρική μονάδα άντλησης-αποθήκευσης για αποθήκευση πλεονασματικής ενέργειας ανανεώσιμων πηγών. Στο σύστημα ενσωματώνεται η αντλιοσταμείωση σαν σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Έχει σχεδιαστεί για μακροπρόθεσμη αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Το αιολικό πάρκο μπορεί να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια απευθείας στο δίκτυο και, ταυτόχρονα, να τροφοδοτεί ένα αντλιοστάσιο το οποίο αντλεί νερό σε μια άνω δεξαμενή ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο εκμεταλλεύεται την αποθηκευμένη δυναμική ενέργεια, διασφαλίζοντας την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και τη σταθερότητα του δικτύου.

Το σύστημα αποθήκευσης αποτελείται από τα ακόλουθα:

Άνω δεξαμενή: βρίσκεται στον κρατήρα «La Caldera», με μέγιστη χωρητικότητα 350.000 m³.

Το ανάστροφο υψόμετρο είναι στα 698 m.

Κάτω λεκάνη: βρίσκεται κοντά στο εργοστάσιο Llanos Blancos, με ικανότητα αποθήκευσης 150.000 m³. Η αντίστροφη ανύψωση είναι 43 μέτρα και βάθος νερού στα 56 μέτρα.

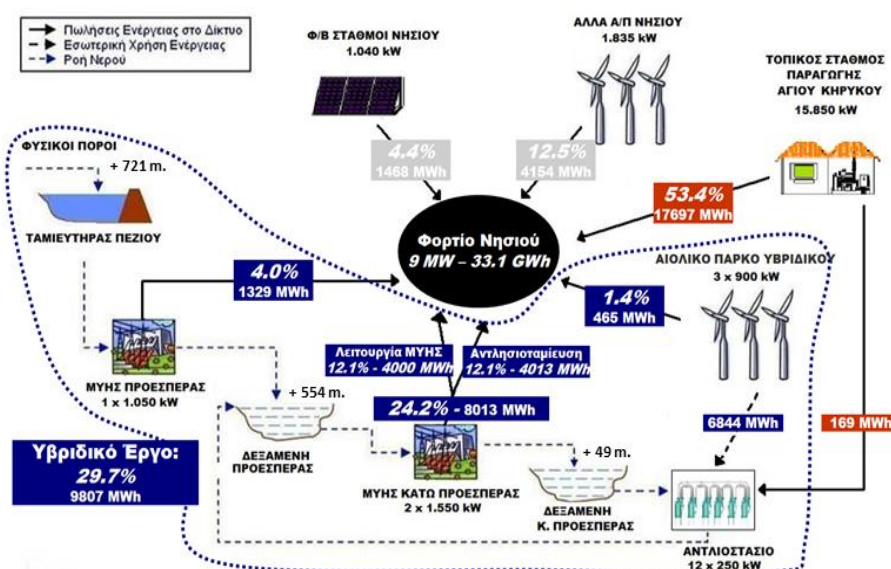
Το σύστημα υποστηρίζεται από σωληνώσεις, αντλιοστάσιο και 4 στροβίλους Pelton.

Η εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή ενέργειας είναι στα 19,34 GWh, ενώ το 72,4% της παραγόμενης αιολικής ενέργειας θα χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση με αναμενόμενη απόδοση αποθήκευσης 66,2% [46].

4.2.2 Ικαρία

Στο νησί της Ικαρίας της Περιφέρειας Βορείου Αιγαίου της Ελλάδας, λειτουργεί ένα υβριδικό ενεργειακό έργο το οποίο συνδυάζει την αιολική με την υδροηλεκτρική ενέργεια (Σχήμα 45).

Λειτουργία Υβριδικού Έργου-Μελλοντικό Ενεργειακό Ισοζύγιο Ικαρίας



Σχήμα 45: Υβριδικό Έργο Ικαρίας (Πηγή: ΔΕΗ Ανανεώσιμες)

Το υβριδικό αυτό έργο λειτουργεί μόνο κατά τη μη αρδευτική περίοδο ενώ σε όλη τη διάρκεια του έτους το νερό κυκλοφορεί μεταξύ των δύο δεξαμενών (άνω και κάτω δεξαμενή). Η κυκλοφορία του νερού πραγματοποιείται μέσω 2 αγωγών (καταθλιπτικού και προσαγωγού) και 12 αντλιών.

Η ενέργεια παράγεται από τον ΜΥΗΣ Προεσπέρα με την εκμετάλλευση της υπερχείλισης του φράγματος στο Πέζι. Η αιολική ενέργεια που παράγεται από το αιολικό πάρκο στη Στραβοκουντούρα τροφοδοτεί το αντλιοστάσιο και χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του, ενώ η ενέργεια που δεν απορροφάται από το έργο, αποθηκεύεται και αποδίδεται στο ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού με τη μορφή υδροηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 46). Στο συγκεκριμένο σύστημα συνδυάζονται επιτυχώς δύο βασικές ΑΠΕ (αιολική και υδροηλεκτρική) και δημιουργείται η υβριδική ενέργεια.



Σχήμα 46: Ναέρας – Κάτω Δεξαμενή (Πηγή: ΔΕΗ Ανανεώσιμες)

Υπολογίζεται ότι από το Ναέρα θα παράγεται συνολική καθαρή ενέργεια 9,8 GWh/έτος, η οποία θα καλύπτει ένα μεγάλο τμήμα των ετήσιων ενεργειακών αναγκών του νησιού, και ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες (www.ppcr.gr).

4.2.3 Τήλος

Στο νησί της Τήλου της Περιφέρειας Βορείου Αιγαίου της Ελλάδας, λειτουργεί ένα έξυπνο, καινοτόμο μικροδίκτυο ηλεκτροδότησης με το ακρωνύμιο TILOS (Technology Innovation for the Local Scale, Optimum Integration of Battery Energy Storage). Το μικροδίκτυο αυτό βασίζεται σε υβριδικό σχήμα ΑΠΕ (αιολικά και Φ/Β) και προηγμένης τεχνολογίας συσσωρευτές (μπαταρίες) (Σχήμα 47).



Σχήμα 47: Υβριδικό Σύστημα Τήλου (www.tiloshorizon.eu)

Το πλέον βασικό στοιχείο του μικροδικτύου της Τήλου είναι το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (Σχήμα 48). Το σύστημα αποτελείται από 2 ξεχωριστές συστοιχίες συσσωρευτών ενέργειας (μπαταρίες), οι οποίες αποθηκεύουν αιολική και ηλιακή ενέργεια κατά τις ώρες περίσσειας παραγωγής, και την αποδίδουν στο σύστημα τις ώρες μεγάλης ζήτησης. Οι μπαταρίες έχουν έναν πολύπλευρο ρόλο. Συμβάλλουν στην αποτελεσματική ενεργειακή διαχείριση του μικροδικτύου, στη μεγιστοποίηση της διείσδυσης καθαρών μορφών ενέργειας και στη σταθερότητα του δικτύου, παρέχοντας ταυτόχρονα υποστηρικτικές υπηρεσίες για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στο κύριο δίκτυο. Οι μπαταρίες μπορούν να λειτουργήσουν τόσο αυτόνομα, εντός του δικτύου της Τήλου, όσο και ως μέρος του κυρίως δικτύου (www.tiloshorizon.eu).



Σχήμα 48: TILOS - Σύστημα συσσωρευτών ενέργειας (www.tiloshorizon.eu)

Κάθε μια από τις 2 συστοιχίες μπαταριών, τεχνολογίας NaNiCl_2 , έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης 1.44 MWh/400 kW, εξασφαλίζοντας έτσι την απόδοση στο δίκτυο 400 kW για 5 ώρες ημερησίως. Οι μπαταρίες τοποθετήθηκαν το φθινόπωρο του 2017 σε θέση πλησίον του φωτοβολταϊκού πάρκου. Η ομαλή λειτουργία των επί μέρους στοιχείων ελέγχθηκε στα εργαστήρια της γαλλικής Επιτροπής Εναλλακτικής Ενέργειας και Ατομικής Ενέργειας (CEA).

Η ορθή λειτουργία των μπαταριών, αλλά και η αξιοπιστία του δικτύου, συνδέεται άμεσα τόσο με τα εργαλεία πρόγνωσης της ενεργειακής ζήτησης που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του έργου Tilos, όσο και με την εφαρμογή πολιτικών διαχείρισης της κατανάλωσης, που θα συμβάλλουν στην εξομάλυνση των αιχμών ζήτησης ενέργειας (www.tiloshorizon.eu).

Οι σύγχρονοι συσσωρευτές τεχνολογίας NaNiCl_2 θα αποτελούν την καρδιά του προτεινόμενου συστήματος ικανοποιώντας:

- Εξαγωγές πράσινης ενέργειας προς το σύστημα Νίσυρος-Κως υπό εγγυημένους όρους
- Ευστάθεια του τοπικού ηλεκτρικού μικροδικτύου
- Μέγιστη διείσδυση ΑΠΕ και υψηλά επίπεδα ενεργειακής αυτονομίας για το έξυπνο μικροδίκτυο (~100%) αλλά και ολόκληρο το νησί της Τήλου (>60%)
- Επικουρικές υπηρεσίες προς το δίκτυο του συστήματος Νίσυρος-Κως

4.3 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε ερευνητικό επίπεδο

Σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν εκπονηθεί εκτεταμένες εργασίες σχετικά με την αποθήκευση ενέργειας από ΑΠΕ σε νησιά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες από αυτές.

Κανάρια νησιά

Μελετήθηκε η επίδραση διαφορετικών διαμορφώσεων PHES στο κόστος προγραμματισμού και στον περιορισμό των ΑΠΕ στο νησί Gran Canary, με την εφαρμογή προγραμματισμού του συστήματος ισχύος βάσει των προβλέψεων της επόμενης μέρας. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι οι νέες διαμορφώσεις συνεισφέρουν στη μείωση του κόστους προγραμματισμού και στην αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ [47].

Λέσβος

Διερευνήθηκε ο ρόλος των ανεμογεννητριών μεγάλης κλίμακας με την τοπική αποθήκευση ενέργειας κατά το σχεδιασμό της διασύνδεσης της νήσου Λέσβου με το ηπειρωτικό δίκτυο. Το αποτέλεσμα της έρευνας ήταν (α) η προσθήκη PHES μπορεί να μειώσει τις περικοπές των ανεμογεννητριών καθώς και να καλύψει ένα τμήμα της εισαγόμενης ενέργειας από την ηπειρωτική χώρα και, (β) η διασύνδεση του νησιού με την ηπειρωτική χώρα μπορεί να είναι οικονομικά βιώσιμη μόνο αν συνοδεύεται από μεγάλης κλίμακας αιολική ενέργεια [48].

Κρήτη

Οι [49] διερεύνησαν την πιθανή ενσωμάτωση των ΑΠΕ μέσω της χρήσης διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης στο νησί της Κρήτης. Πραγματοποιήθηκε τεχνοοικονομική αξιολόγηση των τεχνολογιών αποθήκευσης CAES, PHES και μπαταριών Νατρίου – Θείου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα CAES έχει το χαμηλότερο LCOE. Για την Κρήτη, το σύστημα CAES είναι φθηνότερο κατά 20% και 50% σε σύγκριση με το PHES και τις μπαταρίες αντίστοιχα [49].

Οι [50] εφάρμοσαν ένα δυναμικό μαθηματικό μοντέλο με τη χρήση PHES για την περίσσεια της παραγόμενης ενέργειας από ανεμογεννήτριες στην Κρήτη. Τα αποτελέσματα έδειξαν την οικονομική βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος σε τιμές ενέργειας 60€/MWh.

Σάμος

Μελετήθηκε η επίδραση της εγκατάστασης ενός υβριδικού σταθμού αιολικής με σύστημα PHES στη λειτουργία του νησιωτικού συστήματος ισχύος της Σάμου. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η συμβολή της υβριδικής ισχύος στη λειτουργία του σταθμού, εξετάζοντας τρεις εναλλακτικές δυνατότητες εξόδου υβριδικού σταθμού παραγωγής ενέργειας που αντιστοιχούν

περίπου στο 1/9, 2/9 και 1/3 του ετήσιου μέγιστου φορτίου, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συνολική διείσδυση υβριδικού σταθμού μπορεί να φτάσει στο 34%, η ετήσια μείωση του κόστους στο 39% και οι νέες καμπύλες φορτίου να είναι πολύ πιο ομαλές [51].

Σίφνος

Υλοποιήθηκε μια τεχνοοικονομική ανάλυση ενός υβριδικού συστήματος σχεδιασμένου για την παροχή 100% ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί της Σίφνου αξιοποιώντας το δυναμικό του ανέμου και ένα θαλάσσιο σύστημα PHES. Με βάση τα αποτελέσματα, το PHES φαίνεται να είναι η βέλτιστη τεχνολογία αποθήκευσης ανεξάρτητα από το μέτρο κατανάλωσης ενέργειας [41].

Νησιά στη Θάλασσα της Ανατολικής Κίνας

Μελετήθηκαν τρία μικροπλέγματα πραγματικών περιπτώσεων που αναπτύχθηκαν σε διαφορετικά νησιά της Ανατολικής Κίνας. Επιλέχθηκαν τεχνολογίες αποθήκευσης για συστήματα που κυμαίνονται μεταξύ 200-2000 kW εγκατεστημένης παραγωγικής ικανότητας. Για τις μικρότερες παραγωγικές ικανότητες χρησιμοποιήθηκαν μπαταρίες μολύβδου-οξέος, ενώ οι διαμορφώσεις μολύβδου-οξέος/ φωσφορικού σιδήρου λιθίου και φωσφορικού λιθίου σιδήρου, χρησιμοποιήθηκαν για συστήματα εγκατεστημένης ισχύος μεταξύ 800-2.500kW [52].

Νησιά Αιγαίου Πελάγους

Διερευνήθηκε η παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρόλυση και αποθήκευση μέσω της χρήσης ενός αλγόριθμου βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκε σε 9 νησιά στην περιοχή του Αιγαίου Πελάγους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που ανακτήθηκαν, μια σημαντική ποσότητα υδρογόνου μπορεί να παραχθεί από τις περικοπές μονάδων παραγωγής ενέργειας ΑΠΕ που βρίσκονται στη συγκεκριμένη περιοχή, με μέση απόδοση υψηλότερη από 63%, ενώ η συνολική μέση απόδοση των διαδικασιών παραγωγής-αποθήκευσης εκτιμήθηκε σε 57% [53].

Νήσος Faial Azores

Προτάθηκε μια βελτιστοποιημένη σχεδίαση για το ενεργειακό σύστημα της νήσου Faial που βρίσκεται στις Αζόρες, η οποία μεγιστοποιεί τη διείσδυση των ΑΠΕ. Η βέλτιστη διαμόρφωση περιλαμβάνει 5,5 MW γεωθερμικών γεννητριών και 6,2 MWh χωρητικότητα μπαταριών [54].

Κύπρος

Αξιολογήθηκε η επίδραση των ΑΠΕ στο συνολικό κόστος παραγωγής, με τη χρήση ετήσιων στοιχείων σχετικά με το ενεργειακό σύστημα της Κύπρου. Για την ενίσχυση της ευελιξίας του

συστήματος χρησιμοποιήθηκαν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας τα οποία μελετήθηκαν μέσω ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η υψηλότερη καθαρή παρούσα αξία μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μπαταρία ροής Βαναδίου, ενώ η ασφαλέστερη επένδυση είναι η μπαταρία Θείου Νατρίου με αμέσως επόμενη αυτή του Μόλυβδου – Οξέος [55].

Τζαμάϊκα

Διερευνήθηκε η δυνατότητα αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων από ΑΠΕ στα μικρά νησιά, με ενσωμάτωση των συστημάτων αποθήκευσης μπαταρίας στα σχέδια μετάβασης ενέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίτευξη υψηλού μεριδίου των ΑΠΕ με οικονομικό τρόπο μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση μπαταριών ιόντων Λιθίου [56].

Νησί Μεσογείου

Μελετήθηκε ένα μικρο-δίκτυο σε ένα νησί της Μεσογείου, με στόχο να προσδιοριστεί το βέλτιστο μέγεθος των ΑΠΕ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά) σε 3 σενάρια αποθήκευσης ενέργειας: (α) χρήση PHES για μακροπρόθεσμη αποθήκευση, (β) μπαταρίες για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση και (γ) χωρίς χρήση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το βέλτιστο σενάριο ήταν αυτό με τη χρήση PHES. Επιπλέον, έδειξαν ότι οι τεχνικές και οικονομικές παράμετροι των ΑΠΕ επηρεάζονται σημαντικά από τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας ανάλογα με τον τύπο και τη χωρητικότητα και των δύο (ΑΠΕ και ESS) [57].

Φιλιππίνες

Εξετάστηκαν οι διαμορφώσεις των υβριδικών συστημάτων για μικρά νησιωτικά πλέγματα στις Φιλιππίνες. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, επιτυγχάνεται μια μείωση LCOE κατά 20% με τη χρήση ΑΠΕ-Μπαταρίες έναντι της χρήσης ντίζελ. Επιπλέον, η χρήση μπαταριών βελτιώνει σημαντικά τα οικονομικά της ενεργειακής μετάβασης στο νησί [58].

Prince Edward Island

Μελετήθηκαν συγκεκριμένες επιλογές αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης διάρκειας για το ενεργειακό σύστημα από ΑΠΕ του νησιού Prince Edward Island. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε σύγκριση μεταξύ τεχνολογίας μπαταρίας Λιθίου (αποτελεσματική αλλά δαπανηρή) και συστήματος TES – στροβίλου (χαμηλό κόστος αλλά λιγότερο αποδοτικό). Τελικά, το σύστημα TES – στροβίλου αποδείχθηκε πιο ανταγωνιστικό [59].

Σύμη, Αστυπάλεια, Καστελόριζο

Διερευνήθηκε η βέλτιστη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας μέσω μιας Τεχνοοικονομικής ανάλυσης σκοπιμότητας για μικρά νησιά που τροφοδοτούνται από ΑΠΕ. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για 3 περιπτώσεις συστημάτων ESS: (α) PHES, (β) μπαταρίες Μόλυβδου-οξέος, και (γ) μπαταρίες ιόντων Λιθίου, στα νησιά Σύμη, Αστυπάλεια και Καστελόριζο. Η μελέτη κατέδειξε ότι στα μεγαλύτερα νησιά το PHES αποτελεί μια ανταγωνιστική λύση, ενώ στα μικρότερα νησιά η χρήση μπαταριών ήταν η βέλτιστη επιλογή [60].

Νησιά Faroe

Διερευνήθηκε η προοπτική το ενεργειακό σύστημα των νήσων Feroe να γίνει 100% ΑΠΕ. Εξετάζονται 2 συστήματα αιολικά/φωτοβολταϊκά συνδυαστικά με PHES. Διαπιστώθηκε ότι μπορεί να επιτευχθεί διείσδυση ΑΠΕ άνω του 90% με τη χρήση συστήματος PHES και ηλεκτροχημικών μπαταριών ως μονάδες αποθήκευσης διασποράς [61].

5 Πράσινη ανάπτυξη ελληνικών νησιών – σημερινή κατάσταση

Η περιοχή του Αιγαίου Πελάγους περιλαμβάνει μια πληθώρα διάσπαρτων νησιών, εκ των οποίων τα περισσότερα δεν είναι διασυνδεδεμένα με το Ηπειρωτικό Σύστημα (Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά - ΜΔΝ). Συγκεκριμένα, υπάρχουν 64 ΜΔΝ εκ των οποίων τα 32 αφορούν σε Ηλεκτρικά Συστήματα (11 Σύμπλεγμα Νησιών και 21 Αυτόνομα Νησιά), τα 31 σε Απομονωμένα Δίκτυα και 1 είναι Μικρό Απομονωμένο Σύστημα (Κρήτη).

Λόγω της γεωγραφικής ιδιαιτερότητας της νησιωτικής Ελλάδας αλλά και των περιορισμών της λειτουργίας ενός ενεργειακού δικτύου, η διαχείριση της ηλεκτροδότησης των νησιών υλοποιείται με διαφορετικό τρόπο από την αντίστοιχη διαχείριση της ηπειρωτικής Ελλάδας. Η πλειονότητα των νησιών τροφοδοτούνται από τοπικούς σταθμούς παραγωγής που καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα (κυρίως πετρέλαιο και παράγωγά του) με αυξημένο κόστος. Το πρόβλημα ηλεκτροδότησης των ΜΔΝ είναι αρκετά σύνθετο με αποτέλεσμα να είναι ιδιαίτερα δύσκολη η επίτευξη της ασφάλειας και αξιοπιστίας του συστήματος. Υπάρχουν αρκετές ιδιαιτερότητες με αποτέλεσμα ο συντελεστής του φορτίου να είναι συχνά χαμηλός:

- Υπάρχει μικρός αριθμός μονάδων συμβατικής παραγωγής και ειδικότερα στα μικρά νησιά
- Μικρές βλάβες στα συστήματα μεταφοράς και παραγωγής ή/και εργασίες συντήρησης, μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στο σύστημα
- Μια φυσική καταστροφή (φωτιές, σεισμοί, δυνατοί άνεμοι) που είναι συχνό φαινόμενο στον ελλαδικό χώρο, μπορεί να προκαλέσει black out στο σύστημα
- Υπάρχει μεγάλη διακύμανση της ζήτησης μεταξύ των εποχών και συγκεκριμένα η αιχμή της ζήτησης τους θερινούς μήνες μπορεί να είναι υπερδιπλάσια της αντίστοιχης του χειμώνα

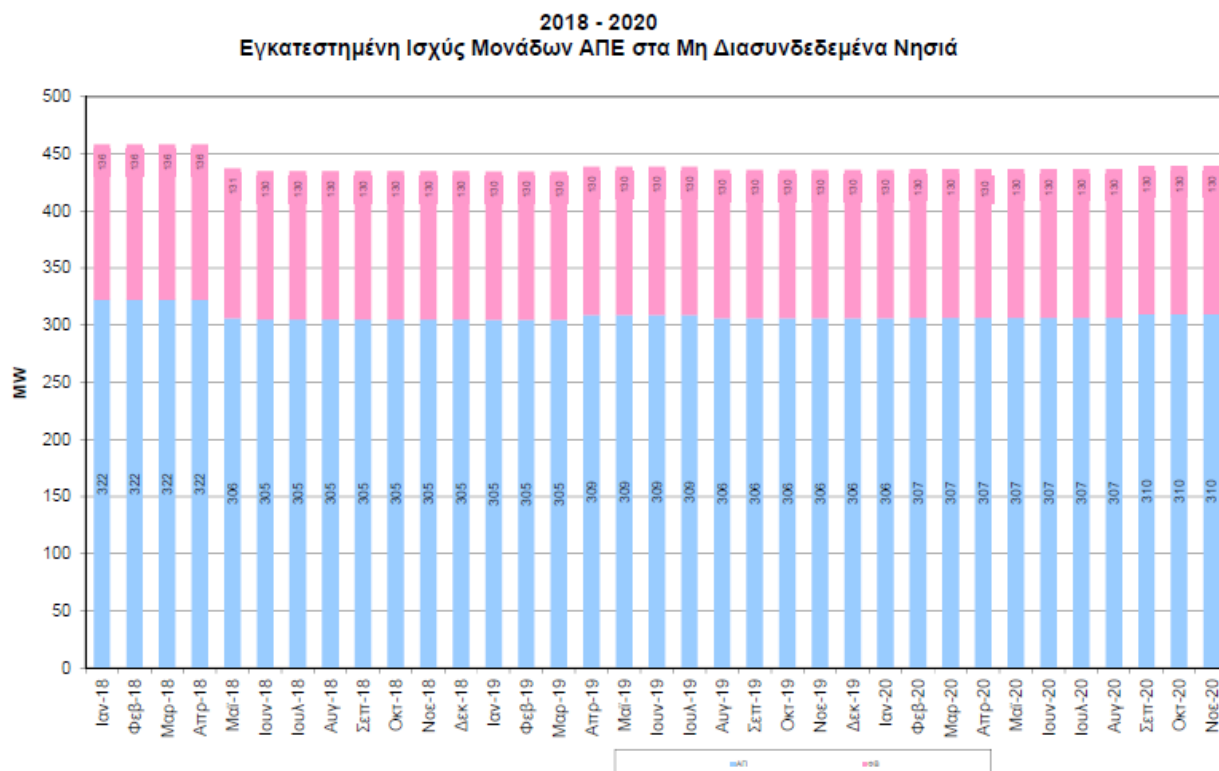
Αποτέλεσμα της σημερινής κατάστασης των ΜΔΝ (όσον αφορά στον τρόπο κάλυψης των ενεργειακών τους αναγκών) είναι να μη διασφαλίζεται η επάρκεια και η ευστάθεια του συστήματος, καθώς και να διατηρείται ψηλό το κόστος παραγωγής της ενέργειας και ταυτόχρονα ιδιαίτερα ρυπογόνο. Η μείωση της ενεργειακής εξάρτησης στα ΜΔΝ είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ η οποία ευνοείται από το γεγονός ότι το Αιγαίο Πέλαγος διαθέτει συγκριτικά πλεονεκτήματα στον τομέα των ΑΠΕ και συγκεκριμένα:

- Διαθέτει το ισχυρότερο αιολικό δυναμικό της Ελλάδας και ένα από τα ισχυρότερα στην Ευρώπη
- Παρουσιάζει πολύ υψηλό ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας
- Στα νησιά Μήλου – Νισύρου έχει εντοπιστεί αξιόλογο γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας

Η ραγδαία αύξηση διείσδυσης των ΑΠΕ στα ηπειρωτικά συστήματα έχει προχωρήσει και στα συστήματα των ΜΔΝ, για τους εξής λόγους:

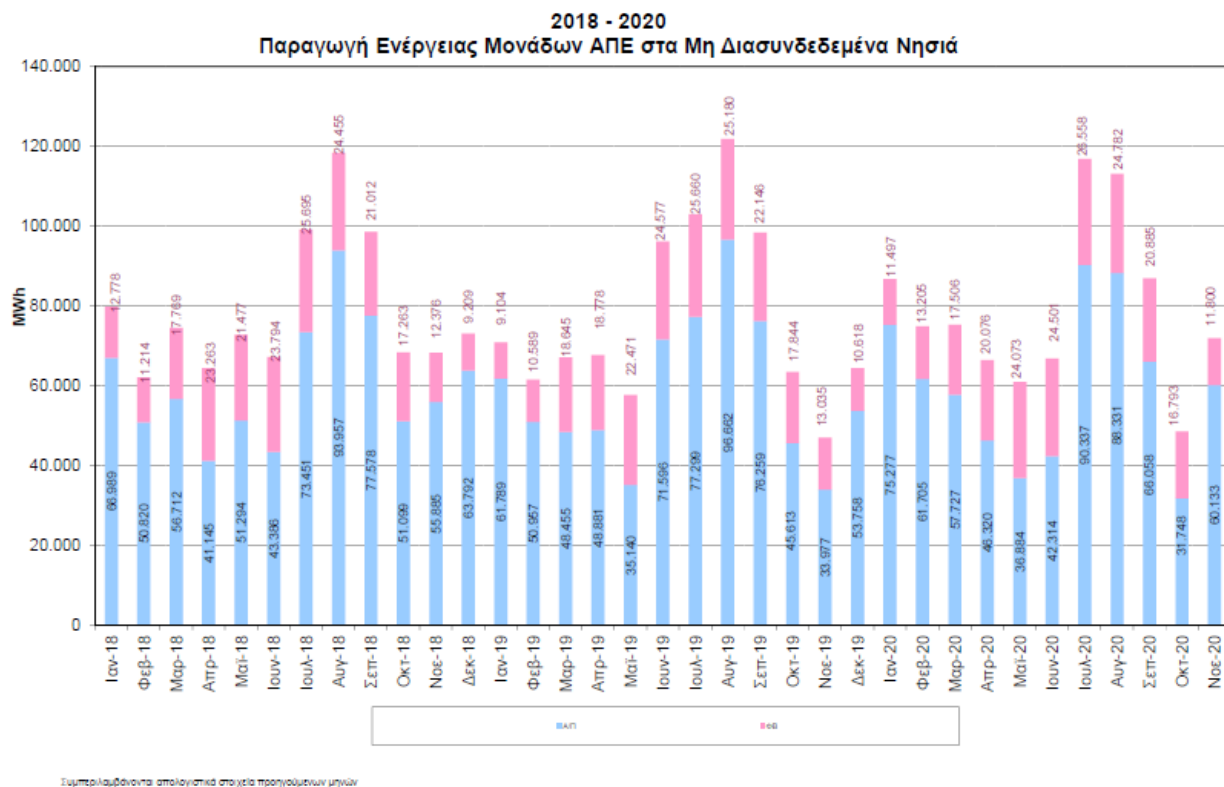
- Ανάγκη μείωσης της χρήσης συμβατικών καυσίμων
- Ανάγκη μείωσης κόστους λειτουργίας
- Σημαντική συμβολή των συστημάτων ΜΔΝ στην κατανάλωση συμβατικών καυσίμων της Ελλάδας για την παραγωγή ενέργειας
- Αυξημένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ανά MWh) στα ΜΔΝ σε σχέση με το αντίστοιχο κόστος στο ηπειρωτικό σύστημα, το οποίο επιμερίζεται σε όλους τους πελάτες (μέσω των Υπηρεσιών Κοινής Ωφέλειας) και όχι μόνο στους κατοίκους των νησιών

Η αύξηση της εγκατάστασης όλο και μεγαλύτερης ισχύος ΑΠΕ στα ΜΔΝ, τα τελευταία χρόνια, αποτυπώνεται στο ακόλουθο Σχήμα 49. Είναι εμφανής η υπεροχή των αιολικών πάρκων (ΑΠ) έναντι των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) (www.deddie.gr).



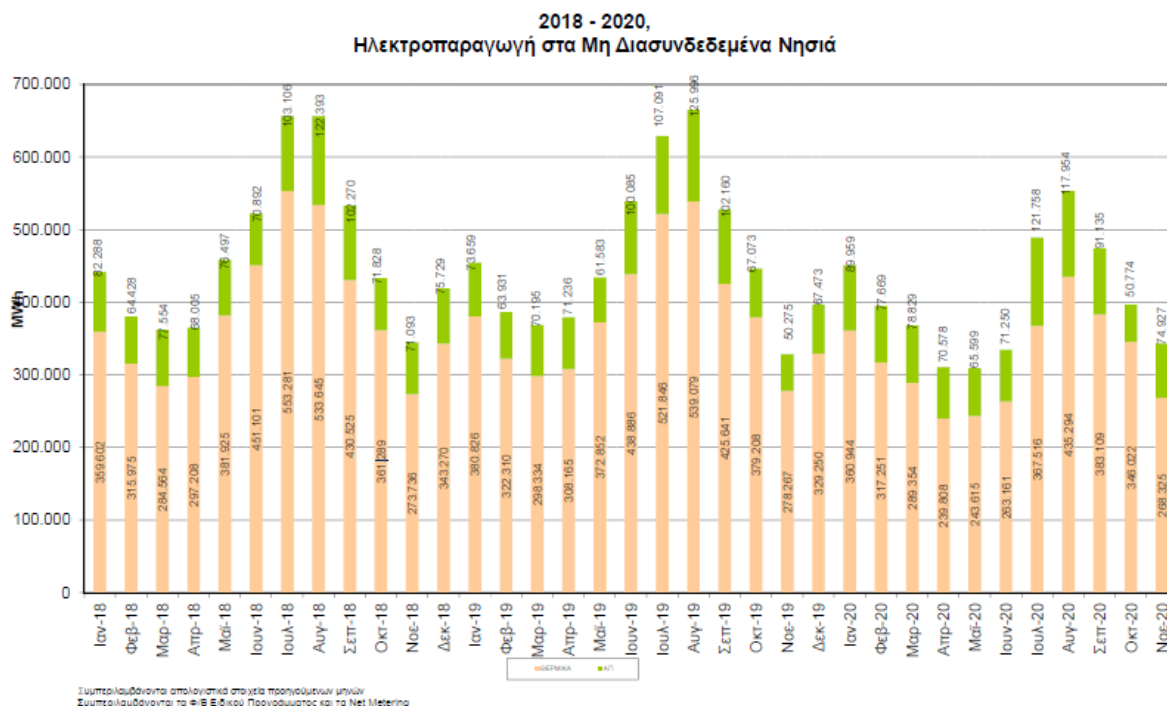
Σχήμα 49: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικών (μπλε) και φωτοβολταϊκών (ροζ) μονάδων ΑΠΕ ανά μήνα από 01/2018 έως 11/2020 (Πληροφοριακό Δελτίο ΜΔΝ – ΔΕΔΔΗΕ Νοέμβριος 2020)

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 50 αποτυπώνονται τα δεδομένα παραγωγής ΑΠΕ στα ΜΔΝ για το διάστημα 2018-2020. Από το σχήμα είναι εμφανής η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω μεγαλύτερης κατανάλωσης. Όσον αφορά στα φωτοβολταϊκά είναι εμφανής η αύξηση της παραγωγής το καλοκαίρι λόγω αντίστοιχης αύξησης της ηλιοφάνειας, ενώ το αιολικό δυναμικό παρουσιάζει μια πιο σταθερή εικόνα καθόλη τη διάρκεια του έτους (www.deddie.gr).



Σχήμα 50: Παραγωγή Ενέργειας Μονάδων ΑΠΕ στα ΜΑΝ (Πληροφοριακό Δελτίο ΜΑΝ – ΔΕΔΔΗΕ Νοέμβριος 2020)

Ωστόσο, παρόλη την αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ, η αξιοποίησή τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα ελληνικά νησιά είναι χαμηλή (Σχήμα 51) (www.deddie.gr).



Σχήμα 51: Ηλεκτροπαραγωγή από θερμικά (πορτοκαλί) και ΑΠΕ (πράσινο) στα ΜΑΝ τα έτη 2018-2020 (Πληροφοριακό Δελτίο ΜΑΝ – ΔΕΔΔΗΕ Νοέμβριος 2020)

Στα συστήματα των πολύ μικρών νησιών (μικρό φορτίο και λίγες μονάδες συμβατικής παραγωγής), δεν εισάγεται μεγάλη αναλογικά εγκατεστημένη ισχύς Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Πίνακας 15). Τα μεγαλύτερα συστήματα (Κρήτη, Ρόδος) μπορούν να έχουν μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, στη Ρόδο παρατηρούνται χαμηλά ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ. Αντίθετα η Σάμος, παρόλο το μικρό σύστημα που διαθέτει (αιχμή στα 29,90 MW), εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό διείσδυσης (26,10%) (www.deddie.gr).

Πίνακας 15: Συγκεντρωτικά στοιχεία ηλεκτροπαραγωγής για το έτος 2020, μεγάλα ΜΑΝ (Πληροφοριακό Δελτίο ΜΑΝ – ΔΕΔΔΗΕ Νοέμβριος 2020)

ΠΙΝΑΚΑΣ 9	Β. Συγκεντρωτικά Στοιχεία Ηλεκτροπαραγωγής στα ΜΑΝ – Νοέμβριος 2020						
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΑΝ	ΕΓΚΑΤ. ΙΣΧΥΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ 2019 (MW)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΤΗΣΙΑ ΑΙΧΜΗ ΖΗΤΗΣΗΣ 2019 (MW)*	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ (MWh)***	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ (MWh)	ΜΠΚΠ_ΜΑΝ (€/MWh)	ΜΜΚ_ΜΑΝ (€/MWh)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ
ΚΡΗΤΗ	819,42	676,40	53.946,17	157.012,00	188,86	152,00	25,57%
ΡΟΔΟΣ	326,96	215,90	4.947,16	32.667,74	247,15	111,88	13,15%
ΛΕΙΒΟΣ	102,60	65,38	4.614,09	17.296,14	173,79	103,05	21,06%
ΚΩΣ-ΚΑΛΥΜΝΟΣ	138,74	100,60	3.669,45	15.699,04	157,98	101,08	18,95%
ΛΗΜΝΟΣ	26,15	14,00	826,17	3.677,61	215,91	117,02	18,34%
ΜΗΛΟΣ	22,98	12,72	657,77	2.786,74	161,10	94,88	19,10%
ΧΙΟΣ	77,78	45,30	2.355,15	13.206,68	130,90	77,15	15,13%
ΣΑΜΟΣ	49,63	29,90	2.381,48	6.742,54	185,72	88,56	26,10%
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	19,05	11,46	305,71	1.983,30	227,83	119,16	13,36%
ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΗΣ**	169,98		1.221,46	17.253,20			6,61%
ΣΥΝΟΛΟ	1.753,29		74.926,60	268.324,99			21,83%

Σημειώνεται ότι τα στοιχεία διατίθενται στην τρέχουσα έκδοση 11^η 2020

* Οι αιχμές είναι στιγμιαίες αναβάσεις

** Αναλυτικά στοιχεία για τα υπόλοιπα ΗΣ παρουσιάζονται στον Πίνακα 10

*** Συμπροκαυδώνονται τα ΦΒ Εθνικού Προγράμματος και τα Net Metering

Τα μικρά νησιωτικά συστήματα (έως 55 MW σε αιχμή) εμφανίζουν πολύ μικρά ή και μηδενικά ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ (Πίνακας 16). Εξαίρεση αποτελεί η Ικαρία (με ποσοστό διείσδυσης 25,92%) η οποία επωφελείται από την ύπαρξη υβριδικού σταθμού παραγωγής (www.deddie.gr).

Πίνακας 16: Συγκεντρωτικά στοιχεία ηλεκτροπαραγωγής για το έτος 2020, μικρά ΜΔΝ (Πληροφοριακό Δελτίο ΜΔΝ – ΔΕΔΔΗΕ Νοέμβριος 2020)

ΠΙΝΑΚΑΣ 10	Στοιχεία Ηλεκτροπαραγωγής στα Υπόλοιπα ΜΔΝ – Νοέμβριος 2020						
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΔΝ	ΕΓΚΑΤ. ΙΣΧΥΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ 2019 (MW)	ΜΕΓΙΣΤΗ* ΕΤΗΣΙΑ ΑΙΧΜΗ ΖΗΤΗΣΗΣ 2019 (MW)	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΕ (MWh)**	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ (MWh)	ΜΠΚΠ_ΜΔΝ (€/MWh)	ΜΜΚ_ΜΔΝ (€/MWh)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ
ΑΓΙΟΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ	0,84	0,33	0,00	87,40	475,05	235,11	0,00%
ΑΓΑΘΟΝΗΣΙ	0,64	0,20	0,00	63,24	802,02	354,30	0,00%
ΑΜΟΡΓΟΣ	6,20	3,24	32,19	678,45	389,27	192,56	4,53%
ΑΝΑΦΗ	1,15	0,57	0,00	77,96	577,73	227,32	0,00%
ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΑ	0,41	0,09	0,00	24,74	1.249,31	246,75	0,00%
ΑΡΚΙΟΙ	0,41	0,16	0,00	25,21	961,04	369,33	0,00%
ΑΣΤΥΠΑΛΛΙΑ	5,10	2,34	40,44	401,87	700,93	258,95	9,14%
ΓΑΥΔΟΣ	0,43	0,14	0,00	34,30	812,68	295,89	0,00%
ΔΟΝΟΥΣΑ	0,99	0,51	0,67	54,31	1.165,29	269,33	1,21%
ΕΡΕΙΚΟΥΣΑ	0,77	0,45	0,00	50,36	1.081,35	252,37	0,00%
ΘΗΡΑ	80,19	51,60	61,99	8.785,77	165,63	100,66	0,70%
ΙΚΑΡΙΑ	20,02	7,94	570,45	1.629,99	356,08	195,87	25,92%
ΚΥΘΝΟΣ	7,20	3,42	25,13	625,97	386,48	201,19	3,86%
ΜΕΓΙΣΤΗ	1,64	1,09	0,00	228,55	404,76	218,48	0,00%
ΟΘΩΝΟΙ	0,66	0,30	0,00	43,57	1.263,53	302,59	0,00%
ΠΑΤΜΟΣ	8,93	5,63	206,77	1.000,98	390,51	236,98	17,12%
ΣΕΡΙΦΟΣ	6,69	3,80	13,30	541,79	408,76	207,81	2,40%
ΣΙΦΝΟΣ	11,48	6,51	223,90	960,93	445,35	218,23	18,90%
ΣΚΥΡΟΣ	7,65	4,20	31,36	1.136,32	356,94	187,55	2,69%
ΣΥΜΗ	8,60	4,00	15,27	801,49	360,44	229,14	1,87%

* Οι αιχμές είναι στιγμιαίες ακαθάρσιες

** Συμπεριλαμβάνονται τα ΦΒ Εθνικού Προγράμματος και τα Net Metering

Η δέσμευση της Ελλάδας για αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στο μείγμα ηλεκτροπαραγωγής στο 35% έως το 2030, εντείνει την αναγκαιότητα των επενδύσεων σε ΑΠΕ στην περιοχή του Αιγαίου Πελάγους. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, προωθείται η εγκατάσταση Υβριδικών Σταθμών ΑΠΕ, είτε μέσω πιλοτικών έργων, είτε μέσω ιδιωτικών έργων:

- Μετατροπή του Άη Στράτη σε «Πράσινο Νησί» (έργο του ΚΑΠΕ)
- «Εξυπνα Νησιά»: Καστελόριζο, Αστυπάλαια, Σύμη (έργο του ΔΕΔΔΗΕ)
- Ένταξη 10 νησιών (Σάμος, Κύθηρα, Σπέτσες, Σύμη, Κάσος, Πάτμος, Αμοργός, Σίφνος, Κρήτη, και Ζάκυνθος) στην πρωτοβουλία «Clean Energy for EU Islands» που υποστηρίζει τη μετάβαση των νησιωτικών περιοχών σε χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα. Μεταξύ των 25 ευρωπαϊκών νησιών που θα στηριχθούν σε προχωρημένο επίπεδο, βρίσκονται 3 ελληνικά νησιά (Κύθηρα, Σπέτσες, Κάσος).
- Σίφνος: Σχεδιασμός για πλήρη ενεργειακή αυτονομία που θα στηρίζεται σε ΑΠΕ, αποθήκευση ενέργειας και καινοτόμες τεχνολογικά λύσεις για τις θαλάσσιες μεταφορές από και προς το νησί (τομέας που καταναλώνει με διαφορά την περισσότερη ενέργεια).

Μέχρι τώρα, έχουν τεθεί σε λειτουργία δύο Υβριδικοί Σταθμοί ΑΠΕ, ο ένας στην Ικαρία με αποθήκευση με αντλησιοταμίευση και ο άλλος στο νησί της Τήλου με αποθήκευση με μπαταρία, οι οποίοι και περιγράφονται στη συνέχεια. Επίσης, γίνεται αναφορά και στις προγραμματισμένες ενέργειες για την πράσινη ανάπτυξη των νησιών Αγίου Ευστρατίου και Αστυπάλαιας.

5.1 Υβριδικό Ενεργειακό Έργο Ικαρίας

Το Υβριδικό Ενεργειακό Έργο της Ικαρίας είναι ένα πρωτοποριακό υβριδικό ενεργειακό έργο σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο (με το ακρωνύμιο Ναέρας) που συνδυάζει την αιολική και υδραυλική ενέργεια (Σχήμα 52).



Σχήμα 52: Διάταξη Υβριδικού Έργου Ικαρίας (google earth)

Ο Ναέρας αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα (www.ppcr.gr):

- Το Αιολικό Πάρκο (Α/Π) στην περιοχή του λόφου Στραβοκουντούρα, με τρεις ανεμογεννήτριες των 900 kW η καθεμία (Σχήμα 53).



Σχήμα 53: Ναέρας - Αιολικό (Πηγή: ΔΕΗ Ανανεώσιμες)

- Τον Μικρό Υδροηλεκτρικό Σταθμό (ΜΥΗΣ) Προεσπέρας, με έναν υδροστρόβιλο ισχύος 1,05 MW, ο οποίος αξιοποιεί μόνο την περίσσεια νερών του ταμιευτήρα του Φράγματος στο Πέζι (αφού πρώτα καλυφθούν οι υποχρεώσεις για ύδρευση, οικολογική παροχή και άρδευση).

- Τον ΜΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας, με δύο υδροστρόβιλους ισχύος 3,1 MW συνολικά, που αξιοποιεί τόσο την περίσσεια νερών του ταμιευτήρα όσο και τα νερά που προέρχονται από αντλησιοταμίευση (υβριδική ενέργεια).
- Δύο δεξαμενές νερού χωρητικότητας 80.000 m³ εκάστη στις περιοχές Προεσπέρας και Κάτω Προεσπέρας, που θα εξυπηρετούν τις ανάγκες της αντλησιοταμίευσης για την απορρόφηση της αιολικής ενέργειας και έναν ταμιευτήρα νερού συνολικού όγκου περίπου 910.000 m³ στο Πέζι (Σχήμα 54).



Σχήμα 54: Ναέρας – Άνω Δεξαμενή (Πηγή: ΔΕΗ Ανανεώσιμες)

- Το Αντλιοστάσιο Κάτω Προεσπέρας, με 12 αντλίες ονομαστικής ισχύος 250 kW εκάστη, εκ των οποίων οι 4 είναι μεταβλητών στροφών (Σχήμα 55).



Σχήμα 55: Ναέρας - Αντλιοστάσιο (Πηγή: ΔΕΗ Ανανεώσιμες)

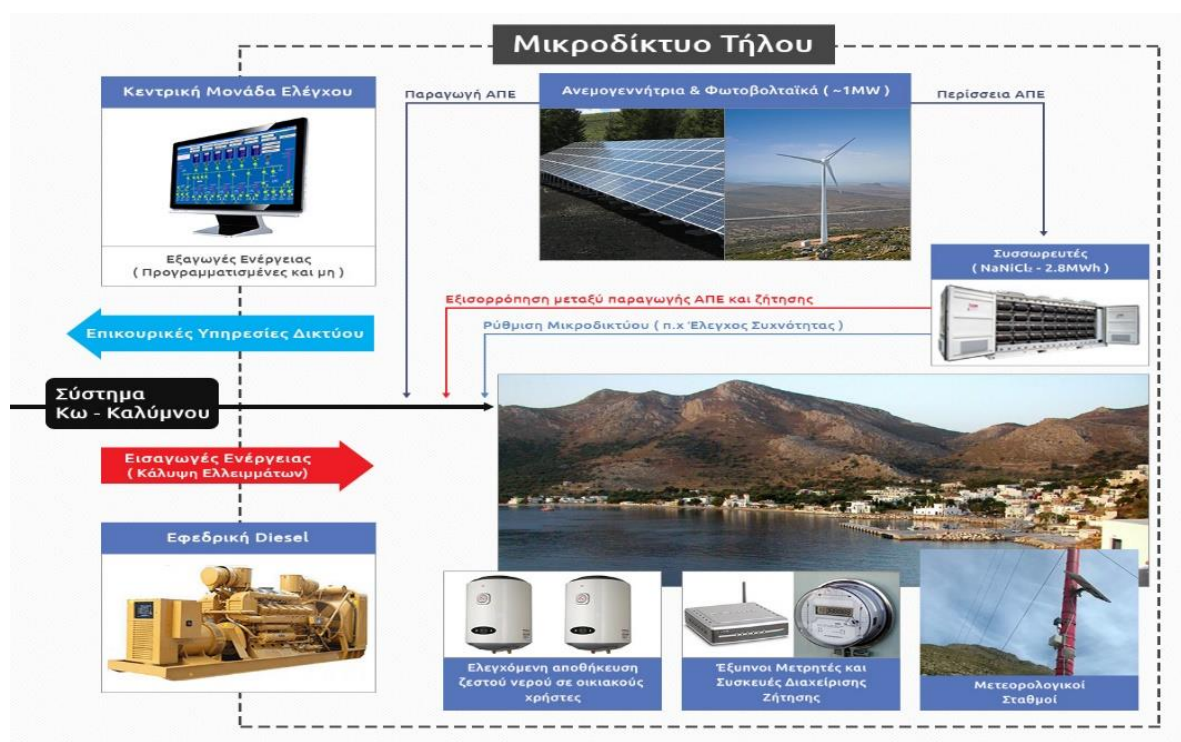
- Τα Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας και Κατανομής Φορτίου του Ναέρα και της Ικαρίας, που θα εγκατασταθούν σε χώρο εντός του Τοπικού Σταθμού Παραγωγής στον Άγιο Κήρυκο, εξασφαλίζοντας τόσο την επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους τμημάτων του Έργου όσο και την ενεργειακή ασφάλεια του νησιού και την αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος.

Ο Ναέρας θα προσφέρει άμεσα και έμμεσα σημαντικά οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη στο νησί της Ικαρίας:

- Μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων CO₂ της τάξεως των 13.800 τόνων ετησίως.
- Ενίσχυση της ενεργειακής επάρκειας του νησιού.
- Κατασκευή ενισχυμένης διπλής γραμμής Μέσης Τάσης 20 kV με την οποία επιτυγχάνεται δραστική μείωση των διακοπών ρεύματος λόγω βλαβών.
- Αναστροφή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την κατασκευή του Έργου.
- Οικονομική ενίσχυση της τοπικής κοινωνίας.
- Αναβάθμιση της Ικαρίας στον τομέα του τουρισμού.

5.2 Έργο TILOS

Το έργο TILOS αποτελεί πρωτοποριακό Ευρωπαϊκό έργο, με στόχο την ενεργειακή αυτονόμηση του νησιού της Τήλου μέσω της ανάπτυξης και λειτουργίας του πρώτου έξυπνου ηλεκτρικού μικροδικτύου και του πρώτου υβριδικού σταθμού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και αποθήκευσης ενέργειας σε νησί της Μεσογείου (Σχήμα 56). Στο έργο TILOS, στο οποίο συμμετέχουν 13 εταίροι από 7 ευρωπαϊκές χώρες (www.tiloshorizon.eu).



Σχήμα 56: TILOS – Μικροδίκτυο (www.tiloshorizon.eu)

Σκοπός του ερευνητικού έργου TILOS είναι η λειτουργία και ανάπτυξη ενός έξυπνου, καινοτόμου μικροδικτύου ηλεκτροδότησης στο νησί της Τήλου, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κατοίκων της κοινότητας των Λιβαδιών (~500 κάτοικοι).

Το έξυπνο μικροδίκτυο θα βασίζεται σε υβριδικό σχήμα ΑΠΕ (αιολικά και Φ/Β) και συσσωρευτές προηγμένης τεχνολογίας, θα υιοθετεί στρατηγικές διαχείρισης της ζήτησης και θα αλληλοεπιδρά με το ηλεκτρικό σύστημα Νισύρου-Κω μέσω της υφιστάμενης ηλεκτρικής διασύνδεσης. Τέλος, θα ενσωματώνει πλήρως αυτοματοποιημένο λογισμικό ενεργειακής διαχείρισης και επικοινωνίας.

Ο υβριδικός σταθμός που βασίζει τη λειτουργία του αποκλειστικά σε ΑΠΕ, αποτελείται από ανεμογεννήτρια 800kW, φωτοβολταϊκό πάρκο 160kW και σύγχρονη μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές 2.88MWh/800kW. Επιπρόσθετα, μέσω της χρήσης έξυπνων συσκευών μέτρησης και διαχείρισης της ηλεκτρικής ζήτησης, οι οποίες έχουν εγκατασταθεί σε όλες σχεδόν τις κατοικίες του νησιού, οι κάτοικοι της Τήλου συμμετέχουν ενεργά στη λειτουργία του έξυπνου μικροδικτύου, συνεισφέροντας στη μέγιστη αξιοποίηση της τοπικής παραγωγής ΑΠΕ και στην αποφυγή εισαγωγών πετρελαίου (Σχήμα 57).



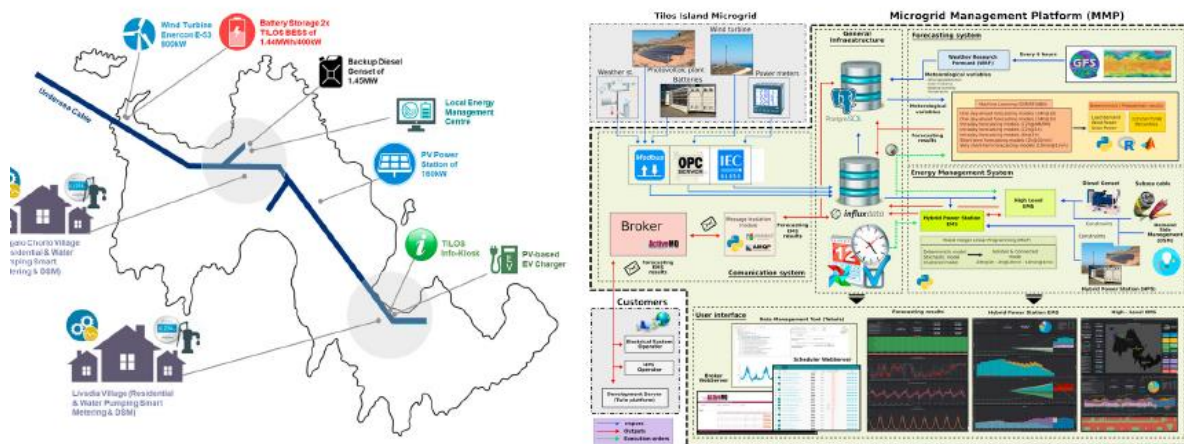
Σχήμα 57: Μετεωρολογικοί σταθμοί της Τήλου και μετρητές φορτίου δικτύου [62]

Το φωτοβολταϊκό πάρκο μπορεί να παράγει κατά τη διάρκεια μιας μέσης ημέρας του καλοκαιριού έως και 900kWh ηλεκτρικής ενέργειας, καλύπτοντας έτσι περίπου το 10% της συνολικής κατανάλωσης του νησιού. Η δε ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού, της τάξης των 265MWh, θα εξοικονομεί περίπου 62 χιλιάδες λίτρα πετρελαίου, μειώνοντας παράλληλα τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), οξειδίων του αζώτου (NO_x) και διοξειδίου του θείου (SO₂) κατά 170, 0,25 και 2,7 τόνους αντίστοιχα.

Η μέγιστη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας της ανεμογεννήτριας ετησίως είναι της τάξης των 2,1 GWh, δηλαδή το 70% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται σε ολόκληρη την Τήλο. Μάλιστα, εκτιμάται πως κατά τη διάρκεια ημερών με ισχυρό άνεμο, η παραγόμενη αιολική ενέργεια θα υπερκαλύπτει την κατανάλωση του νησιού, ακόμα και κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Τα περιβαλλοντικά οφέλη είναι εξίσου σημαντικά, καθώς η λειτουργία της ανεμογεννήτριας αντικαθιστά ετησίως περί τις 480 χιλιάδες λίτρων πετρελαίου, που χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στον σταθμό της ΔΕΗ στην Κω, αποτρέποντας έτσι την εκπομπή 1.350 τόνων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), 2 τόνων οξειδίων

του αζώτου (NOX) και 21 τόνων διοξειδίου του θείου (SO₂). Κατά την επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στη βιοποικιλότητα του νησιού, ενώ ταυτόχρονα εξετάστηκαν τα ανεμολογικά δεδομένα που θα εξασφάλιζαν ικανή ενεργειακή παραγωγή (www.tiloshorizon.eu).

Οι στόχοι του έργου επιτυγχάνονται επί του παρόντος μέσω της σταδιακής ανάπτυξης και λειτουργίας ενός ολοκληρωμένου, έξυπνου μικροδικτύου στο νησί της Τήλου (Σχήμα 58), με στόχο την ελαχιστοποίηση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το πετρέλαιο που μεταφέρεται σήμερα από το νησί της Κω μέσω υποθαλάσσιου καλωδίου.



Σχήμα 58: Το έξυπνο μικροπλέγμα της Τήλου (αριστερά) και περιγραφή της αρχιτεκτονικής MMP (δεξιά) [62]

Το TILOS μετατρέπει το ενεργειακό σύστημα σε ένα νέο εξυπνότερο και αυτόνομο σύστημα. Δημιουργεί ένα νέο έξυπνο ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα με μεγαλύτερα επίπεδα αποκέντρωσης και παροχή ασφαλούς, ανθεκτικού, καθαρού, χαμηλού άνθρακα και οικονομικού συστήματος ενέργειας. Επιπλέον, καταφέρνει να ελαχιστοποιήσει τη ζήτηση ενέργειας, να συνδυάσει τις διάφορες μορφές ενέργειας, να μεγιστοποιήσει τους οικονομικά αποδοτικούς συνδυασμούς επιλογών αποθήκευσης και να παρατάσσει έξυπνες πλατφόρμες, τεχνολογίες και πρωτοποριακή διαχείριση. Το Πρόγραμμα TILOS κατασκευάζει μια αγορά ενέργειας που αναγνωρίζει και επιβραβεύει όλους τους παίκτες επιτρέποντας τη μετάβαση σε ένα ευέλικτο ενεργειακό σύστημα με γνώμονα τη ζήτηση.

Το έργο TILOS είναι ένα κορυφαίο ολοκληρωμένο έργο ενεργειακής αυτονομίας ενός μη διασυνδεδεμένου νησιού στην ελληνική επικράτεια. Το TILOS δεν είναι απλώς ένα παράδειγμα, αλλά είναι ένας φάρος για την Ενεργειακή Κουλτούρα, την Ενεργειακή Εκπαίδευση, την Ενεργειακή Απόδοση και την Ενεργειακή Αυτονομία για τα μη

διασυνδεδεμένα νησιά. Η Εφαρμογή παρέχει επιστημονικό σχέδιο υψηλού επιπέδου τεχνολογικής έρευνας, τεκμηριωμένα στοιχεία βιώσιμης καινοτομίας, σε ένα σκληρό περιβάλλον κατά τη διάρκεια μιας δύσκολης περιόδου με μια ισχυρή εταιρική σχέση τοπικής κοινότητας που προσφέρει ξεχωριστές γνώσεις και δομή μιας ισχυρής ανθεκτικής ενεργειακής μετάβασης [63].

Ο Πίνακας 17 παρουσιάζει εν συντομία τις καινοτομίες του έργου που το κάνουν πιθανό παράδειγμα, το οποίο θα μπορούσε να αναπαραχθεί και να αναπτυχθεί.

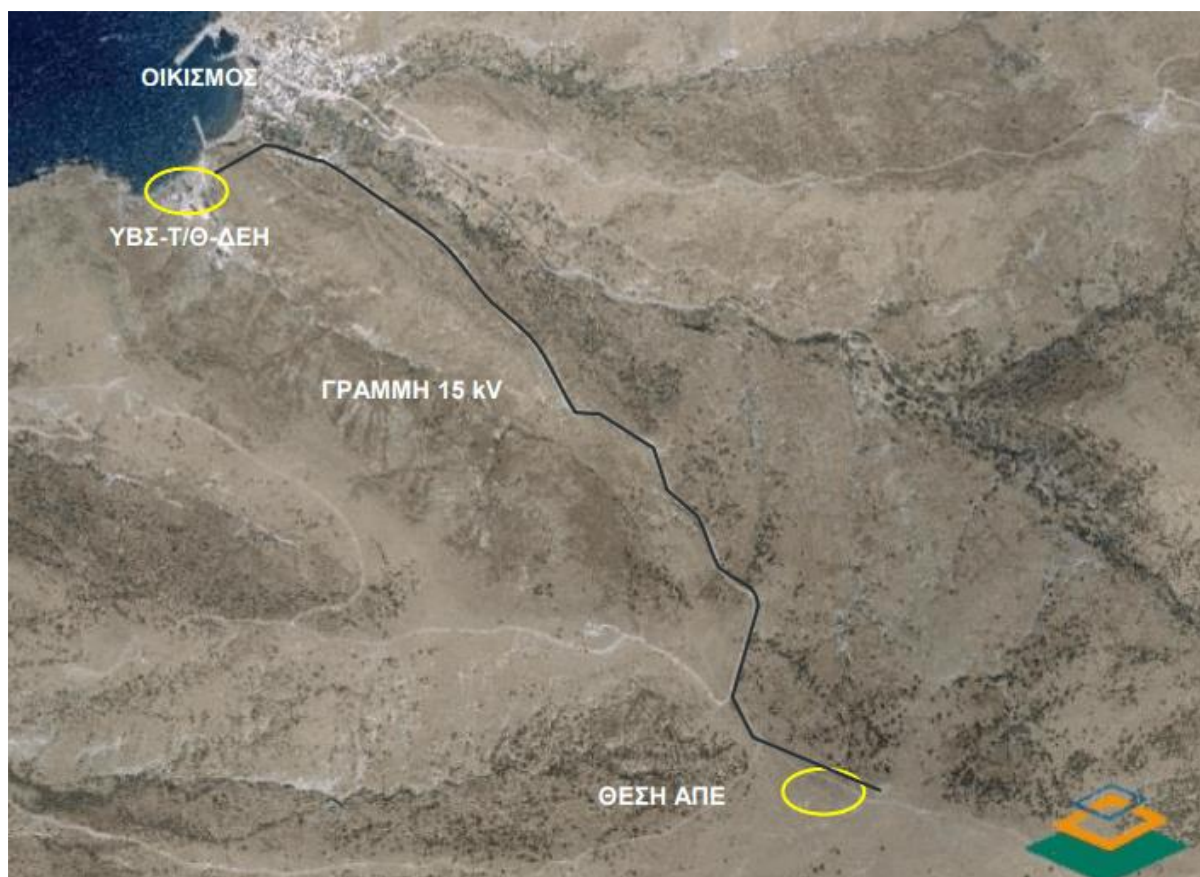
Πίνακας 17: TILOS: Ένα καινοτόμο έργο [63]

ΑΛΛΑΓΗ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ	ΑΝΑΠΤΥΞΗ
Τα επιστημονικά και τεχνολογικά πρότυπα αποτελούνται από πεποιθήσεις, υποθέσεις, αντιληπτά προβλήματα, επιδιωκόμενες λύσεις και την κοινότητα που περιέχει αυτά τα στοιχεία	Η δυνατότητα αναπαραγωγής δεδομένων σημαίνει απλώς ότι είναι δυνατόν για ένα πείραμα να πραγματοποιηθεί ξανά, είτε από τον ίδιο επιστήμονα είτε από άλλον	Είναι ένα μέρος όπου τα χρήματα, το υλικό, ο άνθρωπος, η μέθοδος και η μηχανή συγκεντρώνονται για την κατασκευή των προϊόντων
Το έργο TILOS είναι για την αντιμετώπιση προβλημάτων ενεργειακού εφοδιασμού νησιωτικών περιοχών, μέσω της εφαρμογής της βέλτιστης ενσωμάτωσης, σε τοπική κλίμακα, συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με βάση ΑΠΕ, τα οποία μπορούν επίσης να ενσωματωθούν στο δίκτυο	Ενσωμάτωση υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και λύσεις συστημάτων αποθήκευσης επεκτάσιμης μπαταρίας μπορούν να προσφέρουν ευελιξία και ποικιλία στο βιομηχανικό τομέα	Το έργο TILOS είναι ο πρώτος υβριδικός σταθμός παραγωγής ενέργειας στην Ελλάδα από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, με υπογεγραμμένη Σύμβαση Αγοράς Ισχύος
Άδεια παραγωγής για τον υβριδικό σταθμό παραγωγής ενέργειας μπαταρία ΑΠΕ της Τήλου, ο πρώτος του είδους του στην Ελλάδα και μεταξύ πολύ λίγων στην Ευρώπη	Διάχυση συστημάτων ΑΠΕ στον οικιακό τομέα (π.χ. ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά κτίρια) μαζί με έξυπνα συστήματα	Το TILOS Project είναι το μόνο ολοκληρωμένο έργο ενεργειακής αυτονομίας ενός μη διασυνδεδεμένου νησιού στην Ελλάδα
Δύο πρωτότυπα, δηλαδή ο ενσωματωμένος μετατροπέας μπαταρίας και ο έξυπνος μετρητής και συσκευή DSM, και τα δύο με καινοτόμα χαρακτηριστικά και που αποτελούν βασικά στοιχεία του έργου TILOS	Εφαρμογές κλίμακας χρησιμότητας λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο: εξομάλυνση ισχύος και υπηρεσίες ποιότητας ισχύος, θα μπορούσαν επίσης να είναι αντιμέτωπες με τεχνολογίες μπαταριών πολλαπλών εργασιών που, λόγω της επεκτασιμότητάς	Τα κοινωνικά ζητήματα εξετάζονται επίσης καλά μέσω δημόσιας συζήτησης και αναπτύσσοντας νέα επιχειρηματικά μοντέλα και μέσα πολιτικής

	τους, δεν περιορίζονται σε εφαρμογές σε τοπικό επίπεδο	
Υλοποιούμενο ως το προσχέδιο για τοπικής κλίμακας υβριδικούς σταθμούς με βάση τις μπαταρίες, το TILOS συνέβαλε επίσης στη δημιουργία του Νέου Αναπτυξιακού Νόμου της Ελλάδας (4399/2016)	Μέσω της υλοποίησης του έργου, οι βιομηχανικοί εταίροι στοχεύουν στην ανάπτυξη ενός τυποποιημένου ολοκληρωμένου συστήματος αποθήκευσης μπαταρίας, δηλαδή το σύστημα TILOS το οποίο στη συνέχεια θα προσφέρεται ως εμπορική λύση, ικανή να ικανοποιήσει πολλαπλές ενεργειακές διαδικασίες	Το TILOS είναι ένα πολυεθνικό Ευρωπαϊκό και ερευνητικό πρόγραμμα. Μια ισχυρή και διαφορετική κοινοπραξία, καθορίζοντας υψηλά πρότυπα και καλύπτοντας όλες τις πτυχές του προβλήματος που διερευνήθηκε, ενώ παράλληλα εγγυάται την επιτυχία του έργου

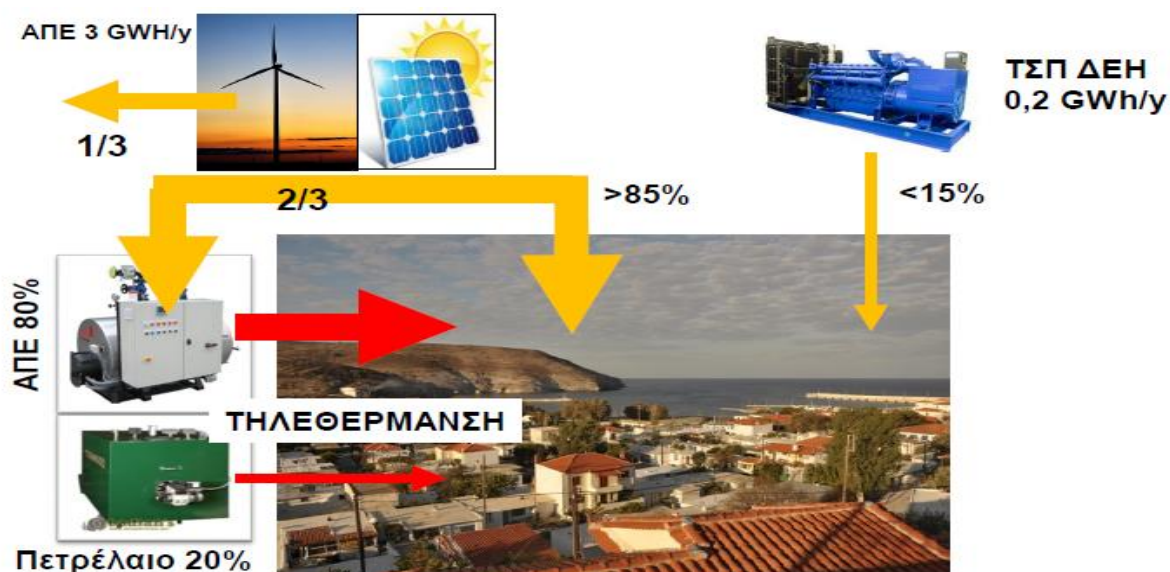
5.3 Άη Στράτης – Πράσινο Νησί

Ο Άγιος Ευστράτιος είναι ένα μικρό νησί του Αιγαίου του οποίου οι ηλεκτρικές ανάγκες καλύπτονται από τον τοπικό σταθμό της ΔΕΗ που λειτουργεί με diesel, ενώ η θέρμανση της πλειονότητας των κατοικιών και των λοιπών κτηρίων παρέχεται από λέβητες πετρελαίου. Επίσης, σύμφωνα με πρόσφατη απόφαση της ΡΑΕ, ο Άη Στράτης είναι το μοναδικό νησί του Αιγαίου που εξαιρείται από την υποβρύχια ηλεκτρική διασύνδεση με το ΕΣΜΗΕ, συνεχίζοντας την μέχρι τώρα αυτόνομη πορεία ανάπτυξης του ηλεκτρικού του συστήματος, έχοντας λάβει υπόψη και το προς υλοποίηση έργο (Σχήμα 59).



Σχήμα 59: Γεωγραφική θέση εγκατάστασης υβριδικού στο νησί του Αγίου Ευστρατίου (Πηγή: Google Earth)

Το έργο «Άη Στράτης – Πράσινο Νησί» αποτελεί ερευνητικό-επιδεικτικό έργο στο οποίο θα εφαρμοστούν τεχνολογικά ώριμες τεχνολογίες ΑΠΕ καθώς και τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας στον κτιριακό τομέα. Η καινοτομία του έργου αφορά στη μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ (άνω του 85%) στο αυτόνομο ασθενές δίκτυο του νησιού του Αγ. Ευστρατίου με ταυτόχρονη κάλυψη του μεγαλύτερου μέρους των αναγκών θέρμανσης των κατοίκων (Σχήμα 60).



Σχήμα 60: Αποτύπωση ενεργειακής κατάστασης στον Άγιο Ευστράτιο μετά την εγκατάσταση του έργου (Πηγή: ΚΑΠΕ)

Για την επίτευξη του στόχου αυτού προβλέπεται:

- Η εγκατάσταση ενός υβριδικού συστήματος από ΑΠΕ συνολικής ισχύος 1 MW αποτελούμενο από:
 - Δύο ανεμογεννήτριες (Α/Γ) συνολικής ισχύος 500-800 kW
 - Φωτοβολταϊκό (Φ/Β) σταθμό συνολικής ισχύος 100-250 kWp
 - Κεντρικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με συσσωρευτές συνολικής ενέργειας 4.000-6.000 kWh
 - Σύστημα αποθήκευσης με συσσωρευτές στη θέση του Φ/Β σταθμού
 - Μονάδα ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου ονομαστικής ισχύος της τάξης των 100 kW
 - Δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου σε αέρια μορφή υπό πίεση χωρητικότητας 200 Kg.
- Η κατασκευή σταθμού μετατροπής της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας των ΑΠΕ σε θερμική ενέργεια, η οποία θα αποθηκεύεται σε δεξαμενές ζεστού νερού.
- Η κατασκευή δικτύου τηλεθέρμανσης σε ολόκληρο τον οικισμό για τη διανομή ζεστού νερού

Το νέο υβριδικό σύστημα θα αλλάξει την ενεργειακή εικόνα του νησιού, καθώς θα έχει προτεραιότητα έναντι του σταθμού της ΔΕΗ, ο οποίος θα περιοριστεί στο ελάχιστο (15%), διατηρώντας όμως τη σημερινή του μορφή για λόγους εφεδρείας. Επιπλέον, θα επιτευχθεί

μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 1.250 CO₂eq ετησίως και θα βελτιωθούν οι συνθήκες διαβίωσης των κατοίκων.

Η κατασκευή του έργου προκηρύχθηκε μέσω διεθνούς διαγωνισμού το καλοκαίρι του 2020 από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) και, αναμένεται να λειτουργήσει στις αρχές του 2023 (www.cres.gr).

5.4 «Αστυπάλαια 4.0»

Σε ενεργειακά καθαρό και αυτόνομο νησί, με μηδενικό ανθρακικό αποτύπωμα μετατρέπεται η Αστυπάλαια με την επένδυση της Volkswagen για την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης η οποία θα συνδυαστεί με Ανανεώσιμες Πηγές και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, που θα εξασφαλίσουν σε μεγάλο βαθμό την ενεργειακή αυτονομία του νησιού. Το έργο αφορά στον εξηλεκτρισμό των μεταφορών - σε συνεργασία με την VW- κάτι που θα συνδυαστεί με την εγκατάσταση σύγχρονων μονάδων ΑΠΕ και την υιοθέτηση καινοτόμων συστημάτων αποθήκευσης και διαχείρισης της ενέργειας.

Σε ό,τι αφορά το ηλεκτρικό σύστημα του νησιού, ο ΔΕΔΔΗΕ έχει ήδη ολοκληρώσει μια μελέτη για την επίτευξη ποσοστού διείσδυσης των ΑΠΕ άνω του 60 %. Προβλέπει την ανάπτυξη ενός υβριδικού συστήματος που θα συνδυάζει παραγωγή από ΑΠΕ - αιολική και ηλιακή - με αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες. Η συνολική ισχύς ΑΠΕ που απαιτείται ώστε το νησί να φτάσει το 60% ποσοστό διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι περίπου 3 MW σε συνδυασμό με μπαταρίες ισχύος 2 MW και χωρητικότητας τουλάχιστον 7 MWh.

Η μελέτη αυτή επικαιροποιείται με γνώμονα τις νέες ενεργειακές ανάγκες για φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και τις εξελίξεις στο κόστος εγκατάστασης και εξοπλισμού, και αναμένεται να είναι έτοιμη στο επόμενο διάστημα. Σημειώνεται πάντως ότι η ηλεκτροκίνηση αυξάνει τις ενεργειακές ανάγκες μόνο κατά 15% σε ετήσια βάση σύμφωνα με τις αρχικές εκτιμήσεις, μέγεθος που θεωρείται διαχειρίσιμο. Τα αποτελέσματα της επικαιροποιημένης μελέτης θα χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του υβριδικού συστήματος που θα αναπτυχθεί στο νησί, όσον αφορά το μέγεθός του, την τεχνολογία και το κόστος.

Οι τέσσερις βασικούς πυλώνες του σχεδίου για το έργο «Αστυπάλαια 4.0» είναι:

- Όσον αφορά στην ενέργεια, θα σταματήσει σταδιακά ο τρόπος τροφοδότησης του νησιού και θα εγκατασταθεί ένα υβριδικό σύστημα εναλλακτικών πηγών από τον άνεμο και τον ήλιο, με την ενέργεια να αποθηκεύεται σε ένα σύστημα μπαταριών.
- Θα δοθεί η δυνατότητα να αντικατασταθούν όλα τα οχήματα με ηλεκτρικά, διασφαλίζοντας ότι θα θεσμοθετηθούν σημαντικά υψηλότερα (ίσως και διπλάσια) κίνητρα για τους κατοίκους της Αστυπάλαιας, θα δημιουργηθεί δίκτυο ηλεκτρικών οχημάτων, αυτοκινήτων, σκούτερ και ποδηλάτων και θα αντικατασταθούν τα οχήματα του δημοσίου (ασθενοφόρα, κλπ).
- Οι συγκοινωνίες θα είναι α λα καρτ, δηλαδή κατά παραγγελία. Οι πολίτες δε θα χρειάζεται να περιμένουν στις στάσεις για το λεωφορείο, αλλά θα μπορούν να στέλνουν ένα γραπτό μήνυμα ή να καλούν σε έναν αριθμό ώστε να περνά ένα ηλεκτρικό βαν να τους παραλαμβάνει από το σημείο που βρίσκονται και να τους μεταφέρει στον προορισμό τους 24 ώρες το 24ωρο.
- Θα δημιουργηθούν οι κατάλληλες υποδομές οδικού δικτύου και σήμανσης ώστε να μπορεί να δοκιμαστεί και η αυτόνομη οδήγηση.

Το έργο αυτό υλοποιείται μέσω της συνεργασίας του Δήμου Αστυπάλαιας, του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ) και του ομίλου της Volkswagen (www.astypalaia.gr, www.mfa.gr).

6 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην εργασία, κατόπιν ανασκόπησης της επιστημονικής βιβλιογραφίας, προέκυψε ότι η χρησιμοποίηση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας συμβάλλει στην αύξηση διείσδυσης των ΑΠΕ καθώς εξισορροπεί την προσφορά και τη ζήτηση της ενέργειας. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης αποτελεί μια δύσκολη και πολύ-επίπεδη διαδικασία, ενώ δεν υπάρχει μοναδική κατάλληλη τεχνολογική λύση αποθήκευσης. Η κορυφαία τεχνολογία αποθήκευσης είναι η αντλησιοταμίευση. Αντιπροσωπεύει περίπου το 97% της παγκόσμιας ισχύος αποθήκευσης (160 GW) και το 99% της αποθηκευμένης ενέργειας.

Όσον αφορά στα νησιά, σε πολλές περιπτώσεις, η ενεργειακή αυτονομία νησιωτικών αυτόνομων συστημάτων μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και κυρίως μέσω της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας και της ηλιακής ακτινοβολίας. Η αποθήκευση ενέργειας συμβάλλει στην επίτευξη αυτού του σκοπού παρόλο που δεν είναι πάντα απαραίτητα κατάλληλη για ενεργειακά νησιωτικά συστήματα (για παράδειγμα, μπορεί να αυξήσει το κόστος ή/και να παρέχει χαμηλής ποιότητας ισχύ). Η βασική εφαρμογή των ESS σε νησιωτικά δίκτυα δεν είναι να υποστηρίξει τη βασική παραγωγή ντίζελ, αλλά να ενισχύσει τη διείσδυση των ΑΠΕ σε αυτά. Στην Ευρώπη λειτουργούν μόνο τρία υβριδικά συστήματα με αποθήκευση ενέργειας σε νησιά (El Hierro, Τήλος, Ικαρία) εκ των οποίων τα δύο είναι στην Ελλάδα. Αντίθετα, σε παγκόσμιο επίπεδο, έχουν εκπονηθεί εκτεταμένες εργασίες σχετικά με την αποθήκευση ενέργειας από ΑΠΕ σε νησιά.

Το Ευρωπαϊκό δίκαιο και οι διεθνείς συμβάσεις υποχρεώνουν την Ελλάδα να αυξήσει τη συμμετοχή των ΑΠΕ στο μείγμα ηλεκτροπαραγωγής στο 35% έως το 2030. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, πρέπει να υλοποιηθούν επενδύσεις σε ΑΠΕ στην περιοχή του Αιγαίου Πελάγους και συγκεκριμένα πρέπει να προωθηθούν εγκαταστάσεις Υβριδικών Σταθμών ΑΠΕ, είτε μέσω πιλοτικών έργων, είτε μέσω ιδιωτικών έργων. Στο πλαίσιο αυτό, έχουν τεθεί σε λειτουργία δύο Υβριδικοί Σταθμοί ΑΠΕ, ένας στην Τήλο με αποθήκευση με μπαταρία και ο άλλος στην Ικαρία με αντλησιοταμίευση. Η μείωση της ενεργειακής εξάρτησης στα Μη Διασυνδεδεμένα Ελληνικά Νησιά είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ. Παρόλη την αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ, η αξιοποίησή τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα ελληνικά νησιά είναι χαμηλή. Τα μικρά νησιωτικά συστήματα στην Ελλάδα (έως 55 MW σε αιχμή) εμφανίζουν πολύ μικρά ή και μηδενικά ποσοστά διείσδυσης

ΑΠΕ, με εξαίρεση την Ικαρία (ποσοστό διείσδυσης 25,92%), η οποία επωφελείται από την ύπαρξη υβριδικού σταθμού παραγωγής.

Σύμφωνα με τη σύγκριση των διάφορων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας που αναλύθηκαν στην εργασία, προκύπτει ότι καμία τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας δεν πληροί ιδανικά όλες τις απαιτήσεις. Διαπιστώνεται ότι κάθε τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας έχει μερικά μοναδικά χαρακτηριστικά που της δίνει πλεονέκτημα σε σχέση με τις άλλες και επομένως η επιλογή τους εξαρτάται από το έργο που πρέπει να εξυπηρετήσουν.

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης και αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα λόγω μακράς διάρκειας εκφόρτισης είναι κατάλληλα για διαχείριση ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Οι κυψέλες υδρογόνου, τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και οι μπαταρίες ροής βρίσκουν εφαρμογή σε μεσαίας κλίμακας διαχείριση ενέργειας. Συσκευές γρήγορης απόκρισης όπως υπεραγώγιμη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας, υπερπυκνωτές, σφόνδυλοι και μπαταρίες είναι κατάλληλες για τη διατήρηση της ποιότητας ισχύος όπως, πτώση τάσης και μείωση διακυμάνσεων. Οι μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής και η τεχνολογία υδρογόνου έχουν συγκριτικά μακρά διάρκεια εκφόρτισης.

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε μορφή υδρογόνου έχει τεράστια υψηλή ενεργειακή πυκνότητα ενώ οι τεχνολογίες αντλησιοταμίευσης, υπεραγώγιμης αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας, capacitor/supercapacitor και σφόνδυλοι έχουν λιγότερη ενεργειακή πυκνότητα. Οι τεχνολογίες μπαταριών, θερμικών συστημάτων και συμπιεσμένου αέρα διατηρούν μέση ενεργειακή πυκνότητα. Μεταξύ των μπαταριών, οι μπαταρίες Na-S και Li-ion έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα.

Αντλησιοταμίευση, συμπιεσμένου αέρα και μπαταρίες ροής έχουν πολύ μικρή αυτοεκφόρτιση και μπορεί να παρέχουν ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους, ενώ οι μπαταρίες μολύβδου οξέος, Ni-Cd, Li-ion και τα θερμικά συστήματα έχουν μέτρια αυτοεκφόρτιση. Οι μπαταρίες Na-S και οι υπερπυκνωτές έχουν 10-40% αυτοεκφόρτιση ανά ημέρα, η οποία είναι αρκετά υψηλή μεταξύ των επιλεγμένων συσκευών αποθήκευσης ενέργειας.

Σε σχέση με το κόστος κεφαλαίου ανά kWh, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης και συμπιεσμένου αέρα, βρίσκονται στο χαμηλό εύρος, με τα δεύτερα να απαιτούν χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου ανά kWh από τα πρώτα. Οι σφόνδυλοι, και οι υπερπυκνωτές έχουν και μεγάλη πυκνότητα ισχύος και υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kWh, ενώ η κυψέλη καυσίμου είναι η πιο ακριβή μεταξύ όλων.

Όσον αφορά τον χρόνο ζωής, οι τεχνολογίες συμπιεσμένου αέρα, αντλησιοταμίευσης και υδρογόνου έχουν συνήθως μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι υπερπυκνωτές έχουν επίσης συγκριτικά μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ η χημική αλλοίωση των μπαταριών μειώνει τη διάρκεια ζωής τους.

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας είναι μία από τις καταλληλότερες επιλογές μεταξύ των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας για τις απαιτήσεις των ενεργειακών αναγκών του αγροτικού τομέα καθώς είναι εύκολα διαθέσιμη, είναι η πιο ώριμη τεχνολογία και είναι φορητή. Μπορεί επίσης να αυξηθεί ανάλογα με τη ζήτηση.

Προτάσεις

Εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω μελέτες σχετικά με την ικανότητα, τη διάρκεια ζωής, το κόστος, καθώς και την ασφάλεια για ορισμένες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, όπως η ηλεκτροχημική αποθήκευση ενέργειας. Λόγω της τεχνολογικής προόδου, η ανάγκη για τεχνολογία αποθήκευσης φυσικής ενέργειας με υψηλή απόδοση αλλά χαμηλό κόστος έχει υψηλή ζήτηση τα τελευταία χρόνια. Περισσότερες έρευνες για προσομοιώσεις αποθήκευσης ενέργειας σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση λειτουργίας θα πρέπει να είναι ενεργή ερευνητική κατεύθυνση σε μελλοντικές έρευνες. Αυτό θα ενισχύσει την εφαρμογή της τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας από θεωρητική άποψη και θα προωθήσει επίσης την ανάπτυξη έργων επίδειξης. Όλες αυτές οι διαδικασίες θα υποστηρίξουν τη βιομηχανοποίηση καθώς και την εμπορευματοποίηση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Υπάρχει η ανάγκη για καλή επαγγελματική συνοχή, λογική ταξινόμηση, διαφάνεια και πρότυπα αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό θα βελτιώσει την ανάπτυξη καθώς και τις ερευνητικές δραστηριότητες σε τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη όλους αυτούς τους παράγοντες προσεκτικά, είναι πιθανό να αυξηθεί η παραγωγή ενεργειακών συσκευών αποθήκευσης ενώ θα διευρυνθεί επίσης και η εφαρμογή τους.

Το κύριο ζήτημα που σχετίζεται με την αποθήκευση ενέργειας και την πιθανή ενσωμάτωσή της σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει να κάνει με το επιπλέον κόστος, δηλαδή την προσθήκη στο συνολικό κόστος του συστήματος. Μια μείωση κόστους στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας θα απαιτήσει περαιτέρω έρευνες για νέα υλικά κατάλληλα για την κατασκευή αυτών των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Η έλλειψη πολιτικών για την υποστήριξη της ανάπτυξης της τεχνολογίας είναι επίσης ένας άλλος παράγοντας που οδηγεί σε αύξηση του κόστους της τεχνολογίας. Υπάρχει ανάγκη για μια σαφή αξία εφαρμογής για αυτές τις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας καθώς και μια υγιή προσέγγιση της αγοράς. Είναι επιτακτική ανάγκη να προτείνονται συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με τη συμμετοχή χρηστών ηλεκτρικής ενέργειας, ηλεκτρικών επιχειρήσεων, ερευνητών και οικονομικών οργανισμών. Παρομοίως, πρέπει να υποστηριχθεί ο κατάλληλος μηχανισμός της αγοράς της βιομηχανίας καθώς και μια πολιτική επιδοτήσεων.

Οι εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας όπως το TES στους τομείς της θερμικής ηλιακής ενέργειας ή της βιομηχανικής θερμότητας είναι λιγότερο ανεπτυγμένες. Για αυτόν τον λόγο, το μεγαλύτερο μέρος της τρέχουσας έρευνας και ανάπτυξης εστιάζεται σε θερμική αποθήκευση CSP και σε άλλα συστήματα αποθήκευσης υψηλής θερμοκρασίας. Ωστόσο, απαιτείται λεπτομερής διερεύνηση και σε άλλες εφαρμογές για υψηλές θερμοκρασίες TES που

μπορούν να βελτιώσουν τις θερμικές ιδιότητες και να καταστέλλουν τα χαρακτηριστικά υπερψύξης των PCM.

Βιβλιογραφία

- [1] A. Berrada and K. Loudiyi, "Operation, sizing, and economic evaluation of storage for solar and wind power plants," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1117–1129, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.048.
- [2] A. Z. AL Shaqsi, K. Sopian, and A. Al-Hinai, "Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 288–306, 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.07.028.
- [3] E. M. G. Rodrigues, R. Godina, S. F. Santos, A. W. Bizuayehu, J. Contreras, and J. P. S. Catalão, "Energy storage systems supporting increased penetration of renewables in islanded systems," *Energy*, vol. 75, pp. 265–280, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.07.072.
- [4] S. R. Salkuti and C. M. Jung, "Comparative analysis of storage techniques for a grid with renewable energy sources," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 970–976, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i3.12728.
- [5] A. K. Rohit, K. P. Devi, and S. Rangnekar, "An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector: Part I – Technologies and Comparison," *J. Energy Storage*, vol. 13, pp. 10–23, 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.06.005.
- [6] A. G. Olabi, C. Onumaegbu, T. Wilberforce, M. Ramadan, M. A. Abdelkareem, and A. H. Al – Alami, "Critical review of energy storage systems," *Energy*, vol. 214, p. 118987, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.118987.
- [7] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081.
- [8] A. Blakers, M. Stocks, B. Lu, C. Cheng, and R. Stocks, "Pathway to 100% Renewable Electricity," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 9, no. 6, pp. 1828–1833, 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2938882.
- [9] F. S. Vieira, J. A. P. Balestieri, and J. A. Matelli, "Applications of compressed air energy storage in cogeneration systems," *Energy*, vol. 214, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.118904.
- [10] J. Wang, L. Ma, K. Lu, S. Miao, D. Wang, and J. Wang, "Current research and development trend of compressed air energy storage," *Syst. Sci. Control Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 434–448, 2017, doi: 10.1080/21642583.2017.1377645.
- [11] M. Budt, D. Wolf, R. Span, and J. Yan, "A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments," *Appl. Energy*, vol. 170, pp. 250–268, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.02.108.
- [12] B. Amel, Z. Soraya, and C. Abdelkader, "Intelligent control of flywheel energy storage system associated with the wind generator for uninterrupted power supply," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 4, pp. 2062–2072, 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i4.pp2062-2072.
- [13] X. P. Nguyen and A. T. Hoang, "The Flywheel Energy Storage System: An Effective Solution to Accumulate Renewable Energy," *2020 6th Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Syst. ICACCS 2020*, vol. 482, pp. 1322–1328, 2020, doi: 10.1109/ICACCS48705.2020.9074469.
- [14] P. Pathomchaiwat and B. Neammanee, "Control of power management in the renewable energy system by using Flywheel Energy Storage," *ECTI-CON 2017 - 2017 14th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol.*, pp. 513–516, 2017, doi: 10.1109/ECTICon.2017.8096287.

- [15] M. G. Kesgin, P. Han, N. Taran, and D. M. Ionel, "Overview of flywheel systems for renewable energy storage with a design study for high-speed axial-flux permanent-magnet machines," *8th Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2019*, pp. 1026–1031, 2019, doi: 10.1109/ICRERA47325.2019.8996526.
- [16] X. Wu *et al.*, "Day-Ahead Scheduling of a Gravity Energy Storage System Considering the Uncertainty," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 12, no. 2, pp. 1020–1031, 2021, doi: 10.1109/TSTE.2020.3030815.
- [17] S. Karagiannopoulos, A. Rigas, N. Hatziargyriou, G. Hug, and A. Oudalov, "Battery energy storage capacity fading and control strategies for deterministic and stochastic power profiles," *19th Power Syst. Comput. Conf. PSCC 2016*, pp. 1–7, 2016, doi: 10.1109/PSCC.2016.7540956.
- [18] C. Zhang, Y. L. Wei, P. F. Cao, and M. C. Lin, "Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. July 2017, pp. 3091–3106, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.030.
- [19] F. Nadeem, S. M. S. Hussain, P. K. Tiwari, A. K. Goswami, and T. S. Ustun, "Comparative review of energy storage systems, their roles, and impacts on future power systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 4555–4585, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2888497.
- [20] R. Amirante, E. Cassone, E. Distaso, and P. Tamburrano, "Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies," *Energy Convers. Manag.*, vol. 132, pp. 372–387, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.11.046.
- [21] A. Evans, V. Strezov, and T. J. Evans, "Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 4141–4147, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.03.048.
- [22] C. Suresh and R. P. Saini, "Review on solar thermal energy storage technologies and their geometrical configurations," *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 6, pp. 4163–4195, 2020, doi: 10.1002/er.5143.
- [23] A. De Gracia and L. F. Cabeza, "Phase change materials and thermal energy storage for buildings," *Energy Build.*, vol. 103, pp. 414–419, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.007.
- [24] I. Sarbu and C. Sebarchievici, "A comprehensive review of thermal energy storage," *Sustain.*, vol. 10, no. 1, 2018, doi: 10.3390/su10010191.
- [25] U. Pelay, L. Luo, Y. Fan, D. Stitou, and M. Rood, "Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. January, pp. 82–100, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.139.
- [26] H. Nazir *et al.*, "Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 129, pp. 491–523, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126.
- [27] K. Du, J. Calautit, Z. Wang, Y. Wu, and H. Liu, "A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges," *Appl. Energy*, vol. 220, no. February, pp. 242–273, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.005.
- [28] D. Liu, L. Xin-Feng, L. Bo, Z. Si-quan, and X. Yan, "Progress in thermochemical energy storage for concentrated solar power: A review," *Int. J. Energy Res.*, vol. 42, no. 15, pp. 4546–4561, 2018, doi: 10.1002/er.4183.
- [29] P. B. Salunkhe and D. Jaya Krishna, "Investigations on latent heat storage materials for solar water and space heating applications," *J. Energy Storage*, vol. 12, pp. 243–260, 2017, doi:

10.1016/j.est.2017.05.008.

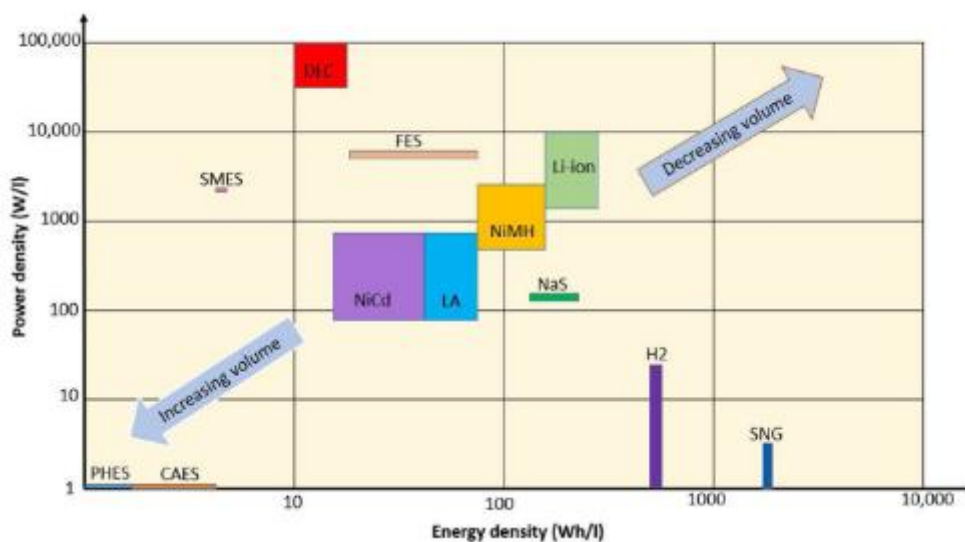
- [30] J. Pereira da Cunha and P. Eames, "Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials - A review," *Appl. Energy*, vol. 177, pp. 227–238, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.097.
- [31] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [32] Y. Lin, Y. Jia, G. Alva, and G. Fang, "Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. October 2017, pp. 2730–2742, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.002.
- [33] M. Bailera, P. Lisbona, L. M. Romeo, and S. Espatolero, "Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. January 2016, pp. 292–312, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.130.
- [34] M. AlShafi and Y. Bicer, "Thermodynamic performance comparison of various energy storage systems from source-to-electricity for renewable energy resources," *Energy*, vol. 219, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119626.
- [35] S. Koohi-Fayegh and M. A. Rosen, "A review of energy storage types, applications and recent developments," *J. Energy Storage*, vol. 27, no. October 2019, p. 101047, 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101047.
- [36] A. Dini, S. Pirouzi, M. Norouzi, and M. Lehtonen, "Hybrid stochastic/robust scheduling of the grid-connected microgrid based on the linear coordinated power management strategy," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 24, p. 100400, 2020, doi: 10.1016/j.segan.2020.100400.
- [37] D. Sarkar and Y. Odyuo, "An ab initio issues on renewable energy system integration to grid," *Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag.*, vol. 23, pp. 27–38, 2019, doi: 10.5278/ijsepm.2802.
- [38] B. Banthasit, C. Jamroen, and S. Dechanupaprittha, "Optimal generation scheduling of power system for maximum renewable energy harvesting and power losses minimization," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 8, no. 4, pp. 1954–1966, 2018, doi: 10.11591/ijece.v8i4.pp1954-1966.
- [39] S. Bagal and S. Nikumbh, "Interconnected islanded microgrid system using smart frequency bus signaling method with PV integration," *Proc. Int. Conf. Intell. Sustain. Syst. ICISS 2017*, no. Icss, pp. 142–147, 2018, doi: 10.1109/ISS1.2017.8389386.
- [40] Y. Kuang *et al.*, "A review of renewable energy utilization in islands," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 504–513, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.014.
- [41] D. Al Katsaprakakis and M. Voumvoulakis, "A hybrid power plant towards 100% energy autonomy for the island of Sifnos, Greece. Perspectives created from energy cooperatives," *Energy*, vol. 161, pp. 680–698, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.07.198.
- [42] D. Groppi, A. Pfeifer, D. A. Garcia, G. Krajačić, and N. Duić, "A review on energy storage and demand side management solutions in smart energy islands," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, no. July 2020, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110183.
- [43] M. S. Javed, D. Zhong, T. Ma, A. Song, and S. Ahmed, "Hybrid pumped hydro and battery storage for renewable energy based power supply system," *Appl. Energy*, vol. 257, no. May 2019, p. 114026, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114026.
- [44] C. Bueno and J. A. Carta, "Technical-economic analysis of wind-powered pumped hydrostorage

- systems. Part II: Model application to the island of El Hierro,” *Sol. Energy*, vol. 78, no. 3, pp. 396–405, 2005, doi: 10.1016/j.solener.2004.08.007.
- [45] G. Frydrychowicz-Jastrzębska, “El Hierro renewable energy hybrid system: A tough compromise,” *Energies*, vol. 11, no. 10, 2018, doi: 10.3390/en1102812.
- [46] F. J. Garcia Latorre, J. J. Quintana, and I. de la Nuez, “Technical and economic evaluation of the integration of a wind-hydro system in El Hierro island,” *Renew. Energy*, vol. 134, pp. 186–193, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.11.047.
- [47] D. Fernández-Muñoz and J. I. Pérez-Díaz, “Contribution of non-conventional pumpedstorage hydropower plant configurations in an isolated power system with an increasing share of renewable energy,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 14, no. 4, 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2019.0874.
- [48] M. Kapsali and J. S. Anagnostopoulos, “Investigating the role of local pumped-hydro energy storage in interconnected island grids with high wind power generation,” *Renew. Energy*, vol. 114, pp. 614–628, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.07.014.
- [49] G. Caralis, T. Christakopoulos, S. Karellas, and Z. Gao, “Analysis of energy storage systems to exploit wind energy curtailment in Crete,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 103, no. December 2018, pp. 122–139, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.12.017.
- [50] T. Nikolaou, G. S. Stavrakakis, and K. Tsamoudalis, “Modeling and optimal dimensioning of a pumped hydro energy storage system for the exploitation of the rejected wind energy in the non-interconnected electrical power system of the Crete Island, Greece,” *Energies*, vol. 13, no. 11, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/en13112705.
- [51] N. Bouzounierakis, Y. Katsigiannis, K. Fiorentzis, and E. Karapidakis, “Effect of hybrid power station installation in the operation of insular power systems,” *Inventions*, vol. 4, no. 3, 2019, doi: 10.3390/inventions4030038.
- [52] B. Zhao, J. Chen, L. Zhang, X. Zhang, R. Qin, and X. Lin, “Three representative island microgrids in the East China Sea: Key technologies and experiences,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 96, no. July, pp. 262–274, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.07.051.
- [53] K. A. Kavadias, D. Apostolou, and J. K. Kaldellis, “Modelling and optimisation of a hydrogen-based energy storage system in an autonomous electrical network,” *Appl. Energy*, vol. 227, no. January 2017, pp. 574–586, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.050.
- [54] M. Barbaro and R. Castro, “Design optimisation for a hybrid renewable microgrid: Application to the case of Faial island, Azores archipelago,” *Renew. Energy*, vol. 151, pp. 434–445, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.11.034.
- [55] P. Nikolaidis, S. Chatzis, and A. Poullikkas, “Renewable energy integration through optimal unit commitment and electricity storage in weak power networks,” *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 38, no. 4, pp. 398–414, 2019, doi: 10.1080/14786451.2018.1516669.
- [56] A. A. Chen, A. J. Stephens, R. Koon Koon, M. Ashtine, and K. Mohammed-Koon Koon, “Pathways to climate change mitigation and stable energy by 100% renewable for a small island: Jamaica as an example,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 121, no. March 2019, p. 109671, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109671.
- [57] L. Al-Ghussain, O. Taylan, and D. K. Baker, “An investigation of optimum PV and wind energy system capacities for alternate short and long-term energy storage sizing methodologies,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 43, no. 1, pp. 204–218, 2019, doi: 10.1002/er.4251.

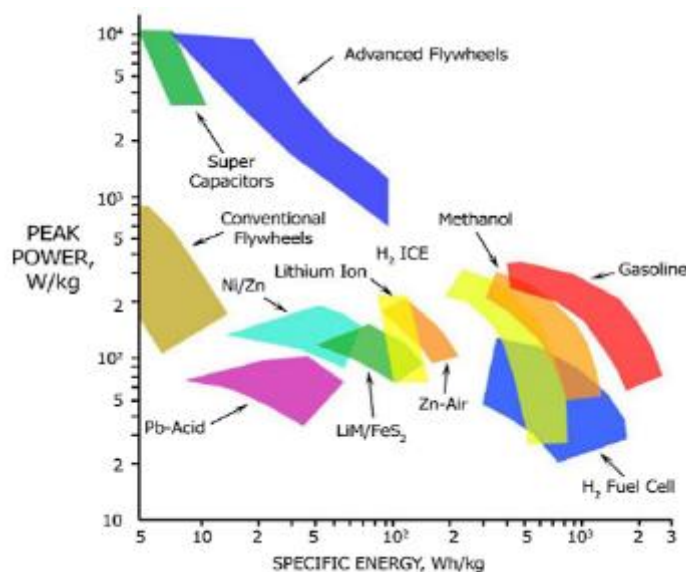
- [58] J. D. Ocon and P. Bertheau, "Energy transition from diesel-based to solar photovoltaics-battery-diesel hybrid system-based island grids in the Philippines – Techno-economic potential and policy implication on missionary electrification," *J. Sustain. Dev. Energy, Water Environ. Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 139–154, 2019, doi: 10.13044/j.sdewes.d6.0230.
- [59] A. Swingler and M. Hall, "Initial comparison of lithium battery and high-temperature thermal-turbine electricity storage for 100% wind and solar electricity supply on Prince Edward Island," *Energies*, vol. 11, no. 12, 2018, doi: 10.3390/en11123470.
- [60] D. Al Katsaprakakis, I. Dakanali, C. Condaxakis, and D. G. Christakis, "Comparing electricity storage technologies for small insular grids," *Appl. Energy*, vol. 251, no. February, p. 113332, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113332.
- [61] D. Al Katsaprakakis, B. Thomsen, I. Dakanali, and K. Tzirakis, "Faroe Islands: Towards 100% R.E.S. penetration," *Renew. Energy*, vol. 135, no. 2019, pp. 473–484, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.12.042.
- [62] D. H. Alamo *et al.*, "An Advanced Forecasting System for the Optimum Energy Management of Island Microgrids," *Energy Procedia*, vol. 159, pp. 111–116, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.12.027.
- [63] D. Boulogiorgou and P. Ktenidis, "TILOS local scale Technology Innovation enabling low carbon energy transition," *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 397–403, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.06.130.
- [64] J. C. Beardsall, C. A. Gould, and M. Al-Tai, "Energy storage systems: A review of the technology and its application in power systems," *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, vol. 2015-Novem, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1109/UPEC.2015.7339794.

Παράρτημα Α: Συνοπτική σύγκριση των ESS

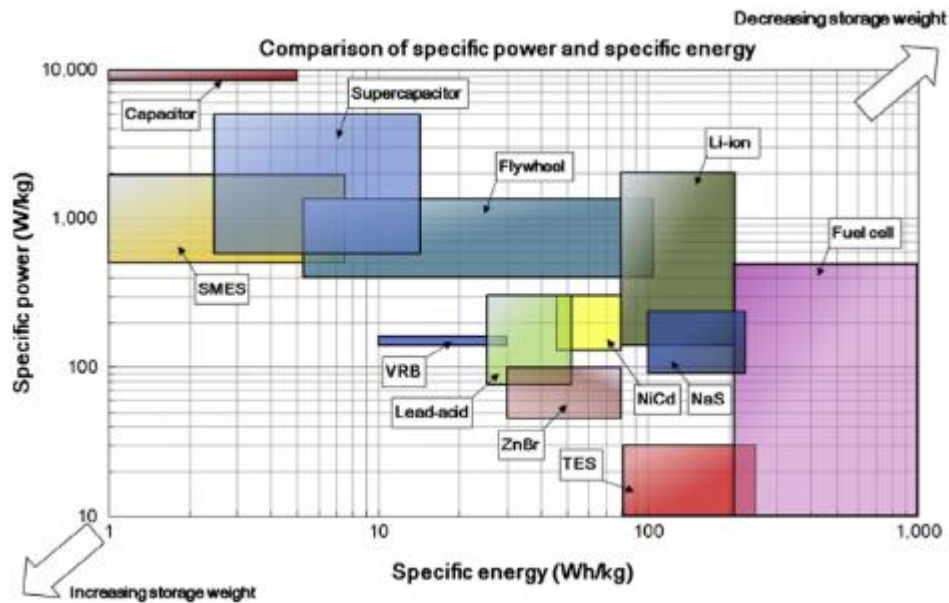
Σχηματική σύγκριση ESS



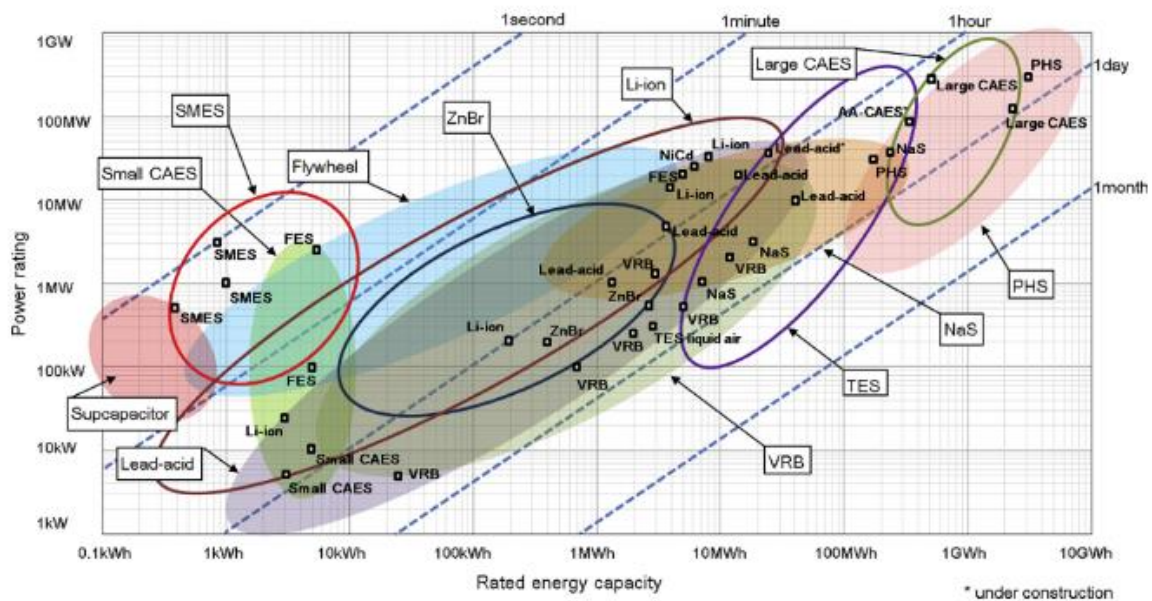
Σχήμα 61: Σύγκριση της πυκνότητας ισχύος και της ενεργειακής πυκνότητας (σε σχέση με τον όγκο) των τεχνολογιών ES [5]



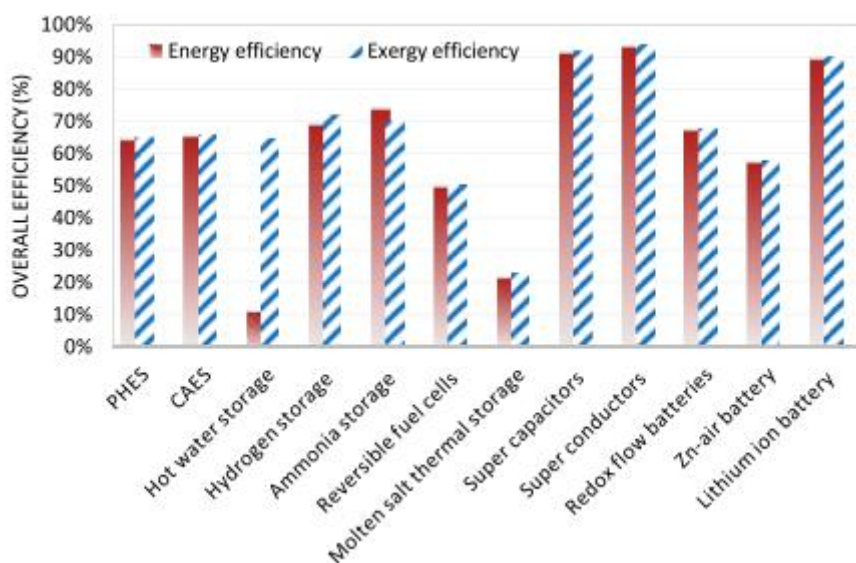
Σχήμα 62: Βαθμολογία ισχύος, Διάγραμμα Ragone [20]



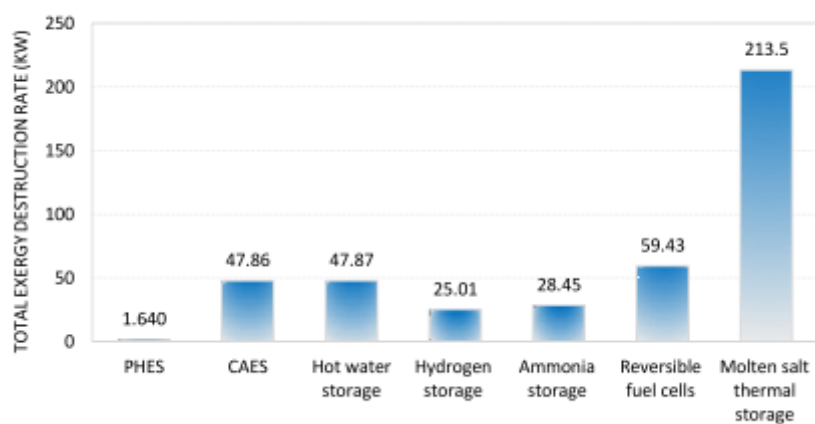
Σχήμα 63: Σύγκριση συγκεκριμένης ενέργειας και ειδικής ισχύος [7]



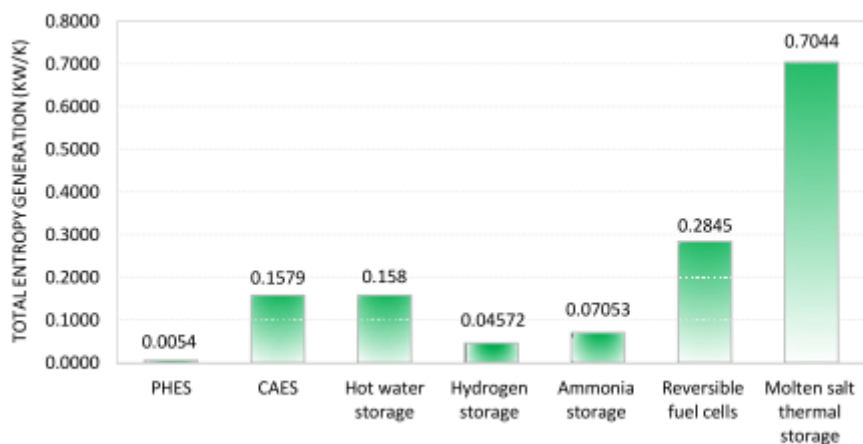
Σχήμα 64: Σύγκριση της ονομαστικής ισχύος και της ονομαστικής ενεργειακής χωρητικότητας με τη διάρκεια του χρόνου εκφόρτισης στην ονομαστική ισχύ [7]



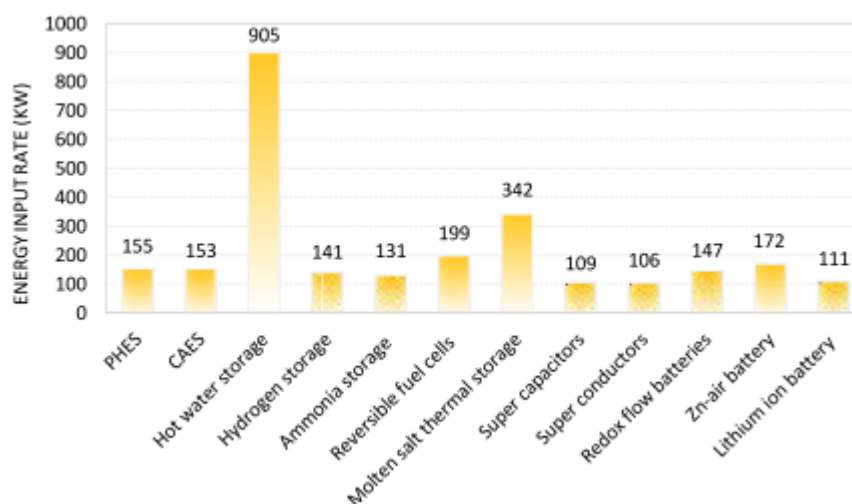
Σχήμα 65: Οι συνολικές τιμές απόδοσης για όλα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (παραμέληση της πηγής) [34]



Σχήμα 66: Το συνολικό ποσοστό καταστροφής εξέργων για το ESS [34]



Σχήμα 67: Οι τιμές παραγωγής εντροπίας για το ESS [34]



Σχήμα 68: Οι τιμές εισόδου ενέργειας για όλα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας [34]

Πινακοποιημένη σύγκριση ESS

Πίνακας 18: Τεχνική σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [64]

Storage Device	Density (Wh/kg)	Eff. (%)	Discharge Time	Stage of Development	Capital Cost (€/kW)	Life-time (yrs)	Advantages	Disadvantages
Super Capacitor	0.1-5	85-98	Sec./Min	Developing	200-1000	30-40	Long Life Cycle, High Efficiency	Low Energy Density, toxic compound
Lead-Acid Batteries	24-45	60-95	Min./Hours	Available	50-150	2-10	Low Cost	Lead Requires Recycling
Lithium Batteries	80-150	90-100		Available	150-250		High Power, Energy Density & Eff.	High Cost, Lithium oxide & Salt require recycling.
Nickel Batteries	20-120	60-91		Available	200-750		High Power & Energy Density, Good Efficiency	NiCd highly toxic, NiZn, NiMH & NA-NiCl ₂ require recycling
Sodium Sulphur Batteries	150-240	>86		Available	170		High Energy Density & Eff.	High Production Cost.
ZnBr FB	37	75	Min./Hours	Early Phase of Commercialisation	900€/kWh	10	High Capacity	Low Energy Density
Vanadium FB	-	85		Early Phase of Commercialisation	1280		High Capacity	Low Energy Density
SMES	-	97-98	Sec./Min	Developed to 10MW. Potential for 2000MW	350	40	High Power	Health Impact for Large Scale Sites
PHES	-	75-85	Days	Available	140-680m for 1000MW	40	High Capacity, low cost per unit capacity	Disturbs Local Wildlife and Water Levels
CAES	-	80	Days	Available	400	30	High Capacity, relatively low cost per unit capacity	Problematic in obtaining sites suitable for use
Flywheel	30-100	90	Sec./Min	Available	3000-10000	20-30	High Power	Low Energy Density

Πίνακας 19: Τεχνικές και οικονομικές εξειδικεύσεις διαφόρων τεχνολογιών ESS - I [19]

ESS technology	Power range (MW)	Energy rating (kWh)	Energy density (Wh/kg)	Power density (W/kg)	Discharge time (ms-h)	Response time (ms-h)	Round trip efficiency (%)
Mechanical Energy Storage Systems							
PHS	10-5000	2x10 ⁵ - 5x10 ⁵	0.5-1.5	—	1 - 24+ hrs	min	70-85
FES	0.01-0.25	25-5k	5-80	700-12000	sec - 15 min	sec	90-95
CAES (underground)	5-300	2x10 ⁵ - 10 ⁶	30-60	—	1 - 24+ hrs	min	41-75
CAES (overground)	3-15	2 - 8.3	140-300 bar	—	2 - 4 hrs	sec - min	70-90
Electrical Energy Storage Systems							
SCES	0.01-0.3	10 ³ - 5	0.05 - 15	10 - 10 ⁵	ms - min	ms	85 - 95
SMES	0.01-10	15-100, 5x10 ⁶	0.5 - 5	500 - 2k	ms - sec	ms	90 - 97
Thermal Energy Storage Systems							
Low temp TES	0.01-300	—	100-200	10 - 30	1 - 8 hrs	Slower	30 - 50
High temp TES	1-60	—	80-250	—	1 - 24+ hrs	not rapid	80
Chemical Energy Storage Systems							
Hydrogen (FC)	0.3-50	< 200k	600-1.2k	5 - 800	sec - 24 hrs	Sec	30 - 50
Electrochemical Energy Storage Systems							
Conventional Pb-A	< 20	18k-100k	30-50	200-400	sec - 5 hrs	ms	70-90
Ni-Cd	< 40	6.75k	15-55	150-350	1 - 8 hrs	ms	75
Ni-MH	< 0.03	0.01-500	60-80	150-460	hrs	ms	70-80
Advanced Li-ion	0.05-100	250-25k	120-230	150-2k	min - 1 hr	ms	85-95
Na-S	10-34	245k	150-240	150-230	6 - 7.2 hrs	ms	75-90
Na-MeCl ₂ (ZEBRA)	0.005-1	120-5k	86-140	180-245	sec-hr	ms	90
Metal air Zn-air	0.01-1	60-150	1k - 1.3k	90-105	10 - 15 hrs	ms	50 - 65
Flow Battery VRFB	0.01-10	4k-40k	25 - 35	—	5 - 10 hrs	ms	60-75
HFB (ZBB)	2-10	50-500	65 - 75	—	8 - 10 hrs	ms	60-80

Πίνακας 20: Τεχνικές και οικονομικές εξειδικεύσεις διαφόρων τεχνολογιών ESS-II [19]

ESS technology	Lifetime (yr)	Lifecycle (cycles)	Total capital cost		Daily self-discharge (%)	Operating temperature (°C)	Nominal Voltage (V)	Technical maturity
			Power cost \$/kW	Energy cost \$/kWh				
Mechanical Energy Storage Systems								
PHS	30-60	—	500-2k	5-100	Null	Ambient	—	Mature
FES	15-20	20k-100k	100-300	1000-5000	1.3-100	20 to 50+	—	Commercial
CAES (underground)	20-40	8k-13k	500-1.8k	50-400	~ 0	Ambient	—	Developed
CAES (overground)	~ 20	0.5k-1.8k	1k-1.55k	200-250	~ 0	Ambient	—	Developed
Electrical Energy Storage Systems								
SCES	25-30	100k-500k	100-300	300-2k	10 - 40	-40 to 85	2.3-400	Developing
SMES	20-30	20k – 100k	200-350	1k – 10k	10-15	-162 to -253	—	Demo/early
Thermal Energy Storage Systems								
Low temp TES	10 – 40	—	200-300	20-50	0.5 - 1	-12 to -150	—	Developing
High temp TES	5 – 15	—	200-300	30-60	0.05 - 1	400-1k	—	Demo/early
Chemical Energy Storage Systems								
Hydrogen (FC)	5 - 15	1k – 10k	400-2k	1 – 15	~ 0	50-100, 600-1k	0.2 - 1.1	Developing/Demo
Electrochemical Energy Storage Systems								
Conventional Pb-A	5-15	500-2k	175-600	150-400	0.1 – 0.4	-30 to 50	2.0-2.35	Mature
Ni-Cd	10-20	800-2.5k	500-1.5k	600-2.4k	0.2-0.3	-45 to 60	1.2	Mature
Ni-MH	5-10	800-3k	120% of Ni-Cd	120% of Ni-Cd	0.4-1.2	-20 to 45	1.2	Mature
Advanced Li-ion	20–25	1k – 10k	1.2k-4k	400-2.5k	0.15-0.3	10 to 60, -20 to 60	3.6-4.2	commercial
Na-S	10-15	2.5k-4k	3.2k-4k	300-500	0.05-20	300-350	2.1	commercial
Na-MeCl ₂ (ZEBRA)	5-15	1k-1.2k	150-300	230-345	15	270-350	2.58	commercial
Metal air Zn-air	>1	1k - 2k	100-250	60-160	very small	0-50	1.0 – 1.3	Demo
Flow Battery VRFB	10-20	>12k	1.4k – 3.7k	500-800	small	10 - 40	1.4 – 1.5	Developing
HFB (ZBB)	5-10	>2k	1.8k – 2k	100-700	small	20 - 30	1.82	Developing

Πίνακας 21: Υπηρεσίες αποθήκευσης, εφαρμογές και παρατηρήσεις [19]

Storage service	Service applications	Suitable Options	
		Technology	Remarks
Long Duration (frequent)	<ul style="list-style-type: none"> • Load levelling • Hot reserve • Arbitrage • Bulk energy storage • Peak shaving • Frequency regulation • Intermittent seasonal balancing • Renewable penetration • Area control 	PHS	Site-specific and habitat species limitation, large construction time and high capital cost
		CAES (underground)	Long construction time, site-specific plant, gas required as fuel, low round trip efficiency and high capital cost
		TES	Low round trip efficiency, slow response and high operational cost
		VRFB / HFB	Relatively low energy density, expensive than other EcSS, toxic remains in last, electrolyte leakage protection required, too heavy, not yet proven cycle life and developing technology
		FC	High cost, low efficiency, combustion of fossil fuel and developing technology
		Pb-A	Too heavy weight, risk of hazardous gas emissions, relatively small life time, potential lead pollution and thermal management system required
		Ni-Cd / Ni-MH	Toxic materials, intolerant to temperature extremes, memory effect, costly recycling, safety process and low cell voltage
		Na-S	Very high operating temperature, safety concerns, light weighted and high initial cost
Medium Duration (fast response)	<ul style="list-style-type: none"> • Black start • Valley filling • Demand side management • Distributed storage • Loss reduction • Investment deferral • Contingency service • Area control • Spinning reserve • Capacity credit • T&D support 	CAES (above ground)	Special site requirements, low response time, high capital cost, relatively low discharge time and combustion of gas fuel
		Pb-A	Same as mentioned for "long duration"
		Na-MeCl ₂ (ZEBRA)	Safety concerns, very high operating temperature, light weighted and high initial cost
		Li-ion	High capital cost, sophisticated charge control electronics required, light weighted, fire protection scheme required, safety and recycling of toxic lithium oxide & salt required
		VRFB / HFB	Same as mentioned for "long duration"
		FC	Same as mentioned for "long duration"
		Ni-Cd / Ni-MH	Same as mentioned for "long duration"
		TES	Same as mentioned for "long duration"
		FES	Low energy density, constructional limitations, long recharging time due to frictional losses, large standby losses, short term power and high capital cost
		Metal-air (Zn-air)	Relatively new and untested, limited shelf and cycle life, voltage drop at the beginning of discharge, electric charging is difficult and only few options available
Short Duration (highly frequent)	<ul style="list-style-type: none"> • Power quality • Intermittency mitigation • Transient stability • End-user application • Frequency regulation • Renewable integration • Fluctuations smoothing • Emergence power bridging 	FES	Same as mentioned for "long duration"
		SCES	High operational cost, infancy technology, short term power, relatively low energy density, toxic compound and high capital cost
		Pb-A	Same as mentioned for "long duration"
		Na-MeCl ₂ (ZEBRA)	Same as mentioned for "medium duration"
		Li-ion	Same as mentioned for "medium duration"
		Ni-Cd / Ni-MH	Same as mentioned for "long duration"
		SMES	Same as mentioned for "medium duration"

Πίνακας 22: Χαρακτηριστικά συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [34]

ESS method	Overall energy efficiency (%)	Overall exergy efficiency (%)	Total exergy destruction rate (kW)	Total entropy generation (kW/K)	Energy input from source (kW)
PHES	65%	65%	1.64	0.005409	155 (Electricity)
CAES	66.1%	66.1%	47.86	0.1579	153 (Electricity)
Hydrogen storage	69.1%	71.3%	25.01	0.04572	141 (Chemical)
Ammonia storage	74.0%	69.3%	28.45	0.07053	131 (Chemical)
Hot water storage	10.9%	64.6%	47.87	0.1580	905 (Thermal)
RFC	50.4%	50.4%	59.43	0.2845	199 (Electricity)
Molten salt thermal storage	21.9%	23.1%	213.5	0.7044	342 (Thermal)