



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Διπλωματική Εργασία
του
Ορέστη Ιωάννη Αμιράλη

Τεχνικές Αυτάρκειας και Ανθεκτικότητας-Μέθοδοι Αποθήκευσης
Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) σε Μικρή Κλίμακα



Επιβλέπων: Γ.-Φοίβος Σαργέντης-Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

ΑΘΗΝΑ ΜΑΡΤΙΟΣ 2026

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κατάλογος Σχημάτων	6
Κατάλογος πινάκων	8
Πρόλογος	9
Περίληψη	10
Summary	11
1 Εισαγωγή	12
2 Ο Ρόλος της Αποθήκευσης Ενέργειας	15
2.1 Η Αναγκαιότητα της Αποθήκευσης στο Σύγχρονο Ενεργειακό Τοπίο	15
2.2 Duck curve - Η Καμπύλη της «πάπιας»	17
2.2.1 Σχέση duck curve και ενεργειακής αποθήκευσης.....	18
2.2.2 Ηλιακή ενέργεια.....	18
2.3 Αποθήκευση	19
2.4 Ταξινόμηση Χρονικών Κλιμάκων Αποθήκευσης Ενέργειας	20
2.4.1 Βραχυπρόθεσμη Αποθήκευση (Short-Term Energy Storage)	20
2.4.2 Μεσοπρόθεσμη Αποθήκευση (Medium-Term Energy Storage).....	22
2.4.3 Μακροπρόθεσμη και Εποχιακή Αποθήκευση (Long-Term / Seasonal Storage).....	23
3 Μηχανική και Βαρυτική αποθήκευση ενέργειας	25
3.1 Αποθήκευση ενέργειας μέσω βαρύτητας	25
3.1.1 Σύνοψη της τεχνολογίας και παραδείγματα.....	25
3.1.2 Φυσική αρχή	25
3.1.3 Αρχιτεκτονική EVx.....	25
3.1.4 Τεχνολογία Αντλησιοταμίευσης (PHES: Pumped Hydro Energy Storage).....	27
3.1.5 Τεχνολογία Gravitricity: Αποθήκευση Ενέργειας μέσω Βαριών Μαζών σε Φρέατα.....	29
3.1.6 Τεχνολογία ARES: Αποθήκευση Ενέργειας μέσω Σιδηροδρομικών Οχημάτων	31
3.1.7 Σύστημα Υποθαλάσσιας Αντλησιοταμίευσης StEnSea (Stored	

	Energy in the Sea).....	32
3.1.7.1	Περιγραφή του StEnSea	33
3.1.7.2	Αρχή λειτουργίας και φυσική θεμελίωση	34
3.1.7.3	Κλίμακα και διαστασιολόγηση	34
3.1.7.4	Αρχιτεκτονική συστήματος και ρόλος του φορέα	35
3.1.7.5	Απόδοση, λειτουργικά χαρακτηριστικά και σύγκριση	35
4	Εισαγωγή στην Έννοια της Θερμικής Αποθήκευσης Ενέργειας	37
4.1.1	Θερμική μπαταρία άμμου	37
4.1.2	Λόγοι χρήσης της άμμου ως μέσου αποθήκευσης.....	38
4.1.3	Απόδοση, θερμικές απώλειες και λειτουργική αξιολόγηση συστημάτων μπαταρίας άμμου	40
	Τηλεθέρμανση και θέρμανση κτιρίων.....	41
4.2	Συστήματα Θερμικής Αποθήκευσης Υψηλής Θερμοκρασίας με Τήγματα Αλάτων	42
4.2.1	Θεωρητική θεμελίωση και αρχή λειτουργίας	42
4.2.2	Θερμοφυσικές ιδιότητες και χρησιμοποιούμενα άλατα.....	43
4.2.3	Τεχνολογική διάταξη δύο δεξαμενών	43
4.2.4	Περιορισμοί και τεχνολογικές προκλήσεις	44
4.2.5	Πεδία Εφαρμογής και Ιδανικές Χρήσεις.....	44
4.3	Συστήματα Θερμικής Αποθήκευσης σε Δεξαμενές Νερού	45
4.3.1	Αρχή λειτουργίας και θερμική στρωμάτωση	46
4.3.2	Τεχνολογικές διατάξεις και κλιμάκωση συστημάτων.....	46
4.3.3	Πλεονεκτήματα και τεχνικοί περιορισμοί.....	48
4.3.4	Πεδία εφαρμογής και ενεργειακός ρόλος	48
4.4	Ενσωμάτωση Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM) σε Κτιριακά Κελύφη	49
4.4.1	Εισαγωγή και ερευνητικό πλαίσιο	49
4.4.2	Αρχή λειτουργίας Υλικών Αλλαγής Φάσης (Phase Change Materials – PCM).....	50
4.4.3	Φυσικοχημική βάση και κατηγοριοποίηση των PCM	51
4.4.4	Ρόλος των PCM στην παθητική θερμική ρύθμιση κτιρίων.....	53
4.4.5	Άμεση Ενσωμάτωση και Εμποτισμός.....	54
4.4.6	Τεχνολογίες Εγκλωβισμού (Encapsulation).....	55
4.4.7	Υλικά Σταθεροποιημένου Σχήματος (Shape-Stabilized PCMs).....	56

4.5	Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά Συστήματα (CSP): Τεχνολογία και Δυνατότητα Εφαρμογής σε Μικρή Κλίμακα.....	56
4.5.1	Εισαγωγή.....	56
4.5.2	Μελέτη περίπτωσης: Gemasolar ως πρότυπο πύργου με αποθήκευση τηγμένων αλάτων.....	57
4.5.3	Βασικές Εξισώσεις και Θερμοδυναμική Ανάλυση Συστημάτων CSP	59
4.5.4	Ο κύκλος Rankine και η εφαρμογή του σε ηλιοθερμικά συστήματα	60
4.5.5	Χρήση του Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) και η εφαρμογή του σε μικρής κλίμακας ηλιοθερμικά συστήματα	60
5	Κρυογενική, Ηλεκτρική, Μαγνητική και Υλική Αποθήκευση	63
5.1	Κρυογενική Αποθήκευση Ενέργειας μέσω Υγροποίησης Αέρα (Liquid Air Energy Storage – LAES).....	63
5.2	Έμμεση θερμική αποθήκευση μέσω κρυογενικών διεργασιών: Η περίπτωση της ψυχρής ενέργειας (Cold Energy Recovery) LNG	65
5.2.1	Έμμεση θερμική αποθήκευση ενέργειας από την ψυχρή ενέργεια (Cold Energy Recovery) του LNG	65
5.2.2	Μαθηματική και ενεργειακή μεθοδολογία αξιολόγησης της ψυχρής ενέργειας LNG.....	67
5.2.3	Κτιριακές εφαρμογές ψυχρής ενέργειας LNG και σύνδεση με Nearly Zero Energy Buildings (nZEB).....	69
5.3	Μαγνητική αποθήκευση ενέργειας σε υπεραγώγιμα πηνία (SMES Superconducting Magnetic Energy Storage).....	71
5.4	Ηλεκτρικό Τσιμέντο (electron-conducting carbon concrete, ec ³) του MIT-Από παθητικό σκυρόδεμα σε δομικό υπερπυκνωτή.....	73
5.4.1	Εισαγωγή και κίνητρο υποδομών	73
5.4.2	Η έννοια του ec ³ ως δομικού υπερπυκνωτή (EDLC).....	74
5.4.3	Υλικά, μικροδομή και μηχανισμός αγωγιμότητας (θεωρία διήθησης)	74
5.4.4	Σύνδεση της μικροδομής του ec ³ με τη φρακταλική γεωμετρία (fractal geometry)	74
5.4.5	Από το εργαστήριο στην αρχιτεκτονική κλίμακα: η πρόοδος 2023–2025	75
5.4.6	Διαδικασία παραγωγής και η λογική του cast-in electrolyte	76
5.4.7	Επιδόσεις του ec ³	76
5.4.8	Ηλεκτρολύτες, τάση λειτουργίας και ασφάλεια	76
5.4.9	Αυτοεκφόρτιση (Self-discharge) και χρονική κλίμακα εφαρμογών	77

6	Περιγραφή και υλοποίηση αποκεντρωμένου ενεργειακού συστήματος ορεινού χωριού στη Βόρεια Εύβοια	78
6.1	Γενική σύλληψη και αρχιτεκτονική του συστήματος	78
6.2	Υπολογιστικό Μοντέλο-Συζήτηση Αποτελεσμάτων	79
7	Συμπεράσματα	89
8	Βιβλιογραφία	91

Κατάλογος Σχημάτων

- Σχήμα 1.1 Γενικές θέσεις των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. (U.S. Energy Information Administration)**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 2.1 Ενδεικτική καμπύλη καθαρού φορτίου (Καμπύλη της Πάπιας) ηλεκτρικού συστήματος με αυξανόμενη διείσδυση φωτοβολταϊκής παραγωγής [11]**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 2.2 Μηχανισμός φόρτισης και εκφόρτισης υπερπυκνωτή διπλού ηλεκτρικού στρώματος (EDLC) [110]**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 2.3 Δομή συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο (FESS) [111]**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 2.4 Απεικόνιση των επιμέρους στοιχείων μιας μπαταρίας ροής Vanadium REDOX [112]**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 3.1 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας βαρύτητας EVx της Energy Vault [113]**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 3.2 Σχηματική Αναπαράσταση Αντλησιοταμίευσης (PHES) με χρήση τεχνητής νοημοσύνης**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 3.3 Απεικόνιση Συστήματος Gravitricity [114]..**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 3.4 Απεικόνιση συστήματος ARES με χρήση τεχνητής νοημοσύνης**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 3.5 Αναπαράσταση υποθαλάσσιας αντλησιοταμίευσης τύπου StEnSea [33]**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 4.1 Απεικόνιση Θερμικής Μπαταρίας Αμμου [115]**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 4.2 Αριστερά: Εναέρια λήψη εγκατάστασης Sand Battery ισχύος 1 MW στο Pornainen της Φινλανδίας, Δεξιά: περίβλημα πολλαπλών στρωμάτων μονωτικών υλικών γύρω από το σιλό για βέλτιστη μόνωση [116].**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 4.3 Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας θερμικής μπαταρίας άμμου με χρήση τεχνητής νοημοσύνης μετά από καθοδήγηση**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 4.4 Διάταξη κύκλου με σύστημα θερμικής αποθήκευσης με τήγματα αλάτων δύο δεξαμενών (Two-tank molten salt TES) [108]......**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 4.5 Αριστερά: Σχηματική απεικόνιση συστήματος εποχιακής θερμικής αποθήκευσης σε υπόγεια δεξαμενή τύπου Pit Thermal Energy Storage (PTES) και Δεξιά: Γενικευμένη διάταξη αποθήκευσης σε μίγμα χαλικιού–νερού (gravel/water thermal battery) [109]......**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 4.6. Διάγραμμα θερμοκρασίας–ενεργειακού περιεχομένου (T–H) Υλικού Αλλαγής Φάσης, που απεικονίζει τη διαδικασία αποθήκευσης και απόδοσης θερμότητας μέσω αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας κατά τους κύκλους τήξης και κρυστάλλωσης [117]......**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 4.7 Σχηματική απεικόνιση των βασικών περιορισμών των οργανικών Υλικών

- Αλλαγής Φάσης (χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και διαρροή κατά την τήξη) και των σύγχρονων τεχνολογικών προσεγγίσεων αντιμετώπισής τους μέσω νανοενίσχυσης, μικροεγκλωβισμού και σταθεροποίησης [118]......**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 4.8 Σχηματική απεικόνιση ρυθμιζόμενου υλικού αλλαγής φάσης (PCM) ενσωματωμένου σε ηλεκτροχημικό σύστημα αποθήκευσης [120].**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 4.9 Ο ηλιοθερμικός σταθμός συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας Gemasolar με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με τηγμένα άλατα [119].**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 5.1 Γενική αρχή λειτουργίας συστήματος κρυογενικής αποθήκευσης ενέργειας μέσω υγροποίησης αέρα (Liquid Air Energy Storage – LAES), με διακριτές φάσεις φόρτισης, αποθήκευσης και εκφόρτισης [81]......**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 5.2 Σχηματική απεικόνιση της αλυσίδας εφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) από την παραγωγή έως τους τελικούς χρήστες, με ταυτόχρονη παρουσίαση των βασικών ενεργειακών ροών και απωλειών εξεργείας.**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 5.3 Σχηματική διάταξη συστήματος μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας σε υπεραγώγιμο πηνίο (Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES). Η αποθήκευση πραγματοποιείται απευθείας στο μαγνητικό πεδίο του υπεραγώγιμου πηνίου, το οποίο λειτουργεί σε κρυογενικές θερμοκρασίες [96]**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 5.4 Φρακταλική δομή του "ηλεκτρικού τσιμέντου ec3 του MIT" [105]**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 5.5 Αναπαράσταση διαδικασίας παρασκευής του "ηλεκτρικού τσιμέντου του MIT ec3" με χρήση τεχνητής νοημοσύνης [105]**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 6.1 Ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα παραδοσιακού ορεινού οικισμού στην Ελλάδα: συνδυασμός φωτοβολταϊκών, αποθήκευσης βαρύτητας σε παλαιό μεταλλευτικό φρέαρ. (η σύνθεση της εικόνας έγινε κατόπιν περιγραφής στο ChatGPT).....**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 6.3 Προφίλ ηλεκτρικής κατανάλωσης ανά κάτοικο, προφίλ θερμοκρασίας, και ενεργειακών αναγκών για την ψύξη θέρμανση στην περιοχή μελέτης (Βόρεια Εύβοια) με ημερήσιο βήμα.**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 6.4 Καμπύλη ισχύος φωτοβολταϊκών**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 6.5 Προφίλ παραγωγής 15m² φωτοβολταϊκών και κατανάλωσης ανά κάτοικο με ωριαίο βήμα για τα έτη 2015-2025**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 6.6 Χρονική μεταβολή της κατανάλωσης ενέργειας, των απαιτούμενων εισροών μετά την παραγωγή των φωτοβολταϊκών και της αποθηκευμένης ενέργειας *S* για την περίοδο 2015–2025.....**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 6.7 Ετήσια μεταβολή της κατανάλωσης ενέργειας, των καθαρών ενεργειακών εισροών μετά τη συνεισφορά των φωτοβολταϊκών και της αποθηκευμένης ενέργειας**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Σχήμα 6.8 Μεταβολή της κατανάλωσης ενέργειας, των καθαρών ενεργειακών εισροών μετά τη

συνεισφορά των φωτοβολταϊκών και της αποθηκευμένης ενέργειας S κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος-Ιούλιος).**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

Σχήμα 6.9 Μεταβολή της κατανάλωσης ενέργειας, των καθαρών ενεργειακών εισροών μετά τη συνεισφορά των φωτοβολταϊκών και της αποθηκευμένης ενέργειας S κατά τη χειμερινή περίοδο (μήνας Δεκέμβριος)**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

Σχήμα 6.10 Σχηματική αναπαράσταση φόρτισης και εκφόρτισης του υβριδικού συστήματος του ορεινού οικισμού με χρήση τεχνητής νοημοσύνης ...**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 4.1 Συγκριτική Αξιολόγηση Τύπων PCM για Κτιριακές Εφαρμογές **Σφάλμα!** Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

Πρόλογος

Φτάνοντας στο τέλος αυτού του κύκλου σπουδών, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς όλους εκείνους που συνέβαλαν στην επιστημονική και ακαδημαϊκή μου εξέλιξη.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γ.-Φοίβο Σαργέντη. Τον ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε προτείνοντάς μου ένα τόσο επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για την καθοδήγηση, την πολύτιμη υποστήριξη και την υπομονή του σε κάθε στάδιο αυτής της ερευνητικής προσπάθειας.

Τέλος, την πιο βαθιά μου ευγνωμοσύνη την οφείλω στην οικογένειά μου, το σταθερό μου στήριγμα καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η αμέριστη συμπαράσταση, η αγάπη και η κατανόησή τους θα αποτελούν για εμένα παντοτινή κινητήρια δύναμη

Ορέστης Αμιράλης
Αθήνα 28 Φεβρουαρίου 2026

Περίληψη

Η συγκεκριμένη εργασία εξετάζει τις τεχνικές αυτάρκειας και ανθεκτικότητας μέσω μεθόδων αποθήκευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) σε μικρή κλίμακα, αναδεικνύοντας τον κρίσιμο ρόλο της αποθήκευσης στη διασφάλιση της ευστάθειας και της ευελιξίας των σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων. Παρουσιάζεται μια εκτενής ταξινόμηση και τεχνική ανάλυση διαφόρων τεχνολογιών, που καλύπτει μηχανικά και βαρυτικά συστήματα (όπως η αντλησιοταμίευση, η τεχνολογία Gravitricity και το σύστημα StEnSea), θερμική αποθήκευση (μπαταρίες άμμου, τήγματα αλάτων, δεξαμενές νερού και υλικά αλλαγής φάσης PCM), καθώς και πιο εξειδικευμένες λύσεις όπως η κρυογενική, η μαγνητική αποθήκευση και το πρωτοποριακό "ηλεκτρικό τσιμέντο" (ec^3) του MIT. Η θεωρητική αυτή θεμελίωση μετουσιώνεται σε μια πρακτική μελέτη περίπτωσης για έναν ορεινό οικισμό, όπου προτείνεται ένα αποκεντρωμένο υβριδικό σύστημα που συνδυάζει φωτοβολταϊκή παραγωγή με βαρυτική και θερμική αποθήκευση, αποδεικνύοντας ότι ο στοχευμένος συνδυασμός τεχνολογιών μπορεί να επιτύχει υψηλό βαθμό ενεργειακής αυτονομίας, λειτουργική σταθερότητα και οικονομική βιωσιμότητα.

Summary

This work investigates pathways toward energy self-sufficiency and system resilience through the deployment of small-scale renewable energy storage solutions, emphasizing the pivotal role of storage in safeguarding the stability, reliability, and operational flexibility of contemporary energy systems. A systematic classification and in-depth technical assessment of storage technologies is provided, encompassing mechanical and gravity-based systems (including pumped hydro storage, Gravitricity technology, and the StEnSea concept), thermal energy storage options (such as sand-based storage, molten salts, water reservoirs, and phase change materials – PCMs), as well as advanced and emerging approaches including cryogenic storage, magnetic storage, and the innovative “electric cement” (ec^3) concept of MIT. Building upon this theoretical framework, the study develops a practical case analysis for a mountainous settlement, proposing a decentralized hybrid energy configuration that integrates photovoltaic generation with gravity-based and thermal storage. The results demonstrate that a carefully optimized combination of storage technologies can deliver high levels of energy autonomy, enhanced operational robustness, and long-term techno-economic feasibility.

1 Εισαγωγή

Η παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση προς ένα σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα συνιστά μία από τις πιο βαθιές τεχνικές και δομικές αλλαγές που έχουν επιχειρηθεί στην ιστορία των ενεργειακών συστημάτων. Η αντικατάσταση των συμβατικών, ελεγχόμενων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ δεν συνεπάγεται απλώς διαφοροποίηση του καυσίμου, αλλά μεταβολή της ίδιας της λογικής λειτουργίας του συστήματος. Για πρώτη φορά, η παραγωγή ενέργειας καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από στοχαστικά φυσικά φαινόμενα και όχι από τη ζήτηση, ανατρέποντας τη θεμελιώδη αρχή της προσαρμογής της παραγωγής στο φορτίο.

Η αυξανόμενη διείσδυση της ηλιακής και αιολικής ενέργειας επιφέρει έντονες χρονικές ασυμμετρίες μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, τόσο σε ημερήσια όσο και σε εποχιακή κλίμακα. Φαινόμενα όπως η καμπύλη της «πάπιας», οι υψηλοί ρυθμοί μεταβολής ισχύος και οι παρατεταμένες περίοδοι χαμηλής παραγωγής αναδεικνύουν τα όρια των συμβατικών δικτύων και καθιστούν σαφές ότι η απλή ενίσχυση της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ δεν αρκεί για την επίτευξη ενός αξιόπιστου ενεργειακού συστήματος. Αντιθέτως, καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη ενδιάμεσων μηχανισμών που μπορούν να απορροφούν, να αποθηκεύουν και να αναδιανέμουν την ενέργεια στον χρόνο.

Σε αυτό το πλαίσιο, η αποθήκευση ενέργειας αναδεικνύεται σε κεντρικό πυλώνα της ενεργειακής μετάβασης. Ο ρόλος της δεν περιορίζεται στη διαχείριση πλεονασμάτων, αλλά επεκτείνεται στη συνολική ευστάθεια, την ευελιξία και την ανθεκτικότητα των ενεργειακών συστημάτων. Τα συστήματα αποθήκευσης επιτρέπουν τη μετατροπή της μεταβλητής παραγωγής σε λειτουργικά εγγυημένη ισχύ, μειώνουν τις περικοπές ΑΠΕ και περιορίζουν την ανάγκη για εφεδρικές μονάδες ορυκτών καυσίμων. Παράλληλα, παρέχουν κρίσιμες επικουρικές υπηρεσίες, όπως ρύθμιση συχνότητας, υποστήριξη τάσης και κάλυψη αιχμών φορτίου.

Ωστόσο, η έννοια της αποθήκευσης ενέργειας συχνά ταυτίζεται μονοδιάστατα με τις ηλεκτροχημικές μπαταρίες, ιδιαίτερα με τις τεχνολογίες ιόντων λιθίου. Αν και οι τεχνολογίες αυτές προσφέρουν υψηλή απόδοση και ταχεία απόκριση, συνοδεύονται από περιορισμούς που σχετίζονται με το κόστος, τη διάρκεια ζωής, την ανάγκη εξειδικευμένης συντήρησης και την εξάρτηση από κρίσιμες πρώτες ύλες. Η πραγματικότητα των ενεργειακών συστημάτων μεγάλης διάρκειας και χαμηλής πολυπλοκότητας απαιτεί μια

ευρύτερη προσέγγιση, η οποία να αξιοποιεί διαφορετικές φυσικές μορφές αποθήκευσης, προσαρμοσμένες στις πραγματικές ανάγκες του φορτίου.

Στα Κεφάλαια 2 έως 5 αναπτύσσεται εκτενώς το θεωρητικό και τεχνολογικό υπόβαθρο της αποθήκευσης ενέργειας, με έμφαση στην ταξινόμηση των τεχνολογιών βάσει χρονικών κλιμάκων και λειτουργικών ρόλων. Παρουσιάζονται μηχανικές και βαρυτικές λύσεις αποθήκευσης, συστήματα θερμικής αποθήκευσης αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας, καθώς και πιο εξειδικευμένες τεχνολογίες, όπως η κρυογενική και η μαγνητική αποθήκευση. Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στη θερμική αποθήκευση, η οποία, λόγω του χαμηλού κόστους ανά μονάδα ενέργειας και της μεγάλης διάρκειας αποθήκευσης, εμφανίζει σημαντικό δυναμικό για εφαρμογές που υπερβαίνουν τη βραχυχρόνια εξισορρόπηση του ηλεκτρικού δικτύου.

Η θεωρητική αυτή ανάλυση οδηγεί φυσικά στο ερώτημα της πρακτικής εφαρμογής: πώς μπορούν οι διαφορετικές μορφές αποθήκευσης να συνδυαστούν σε ένα πραγματικό, λειτουργικό ενεργειακό σύστημα, το οποίο να είναι ταυτόχρονα αποδοτικό, ανθεκτικό και οικονομικά βιώσιμο; Η απάντηση στο ερώτημα αυτό αποτελεί τον βασικό στόχο του Κεφαλαίου 6 στο οποίο γίνεται η περιγραφή και υλοποίηση ενός αποκεντρωμένου υβριδικού ενεργειακού συστήματος για έναν ορεινό οικισμό μικρής κλίμακας. Ο οικισμός αντιμετωπίζεται ως αυτόνομο ενεργειακό σύστημα (microgrid), με σαφώς καθορισμένα ηλεκτρικά και θερμικά φορτία, περιορισμούς γεωγραφίας και ανάγκες υψηλής αξιοπιστίας. Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου οικισμού δεν είναι τυχαία, καθώς οι ορεινές και απομακρυσμένες κοινότητες αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα περιοχών όπου η ενεργειακή ανθεκτικότητα και η μείωση της εξάρτησης από εξωτερικές υποδομές είναι κρίσιμης σημασίας.

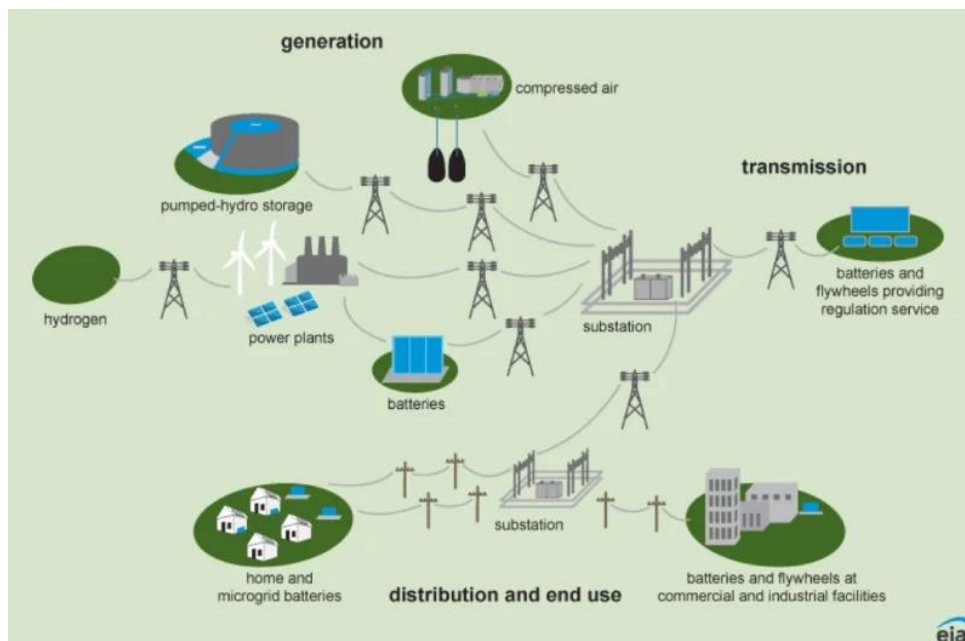
Η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος βασίζεται σε μία ιεραρχημένη λογική διαχείρισης της ενέργειας. Η φωτοβολταϊκή παραγωγή αποτελεί την πρωτογενή πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η αποθήκευση δεν αντιμετωπίζεται ενιαία, αλλά διαχωρίζεται λειτουργικά. Η ηλεκτρική αποθήκευση περιορίζεται σε μηχανική αποθήκευση βαρύτητας, αποκλειστικά για την κάλυψη κρίσιμων ηλεκτρικών φορτίων, ιδίως κατά τις νυχτερινές ώρες. Αντίθετα, το μεγαλύτερο μέρος της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε θερμική μέσω διεργασιών power-to-heat και αποθηκεύεται σε κεντρική θερμική δεξαμενή μεγάλης χωρητικότητας.

Η επιλογή αυτή αποτελεί άμεση εφαρμογή των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τα προηγούμενα κεφάλαια: όταν το φορτίο είναι κατά κύριο λόγο θερμικό, η αποθήκευση θερμότητας υπερτερεί σαφώς της ηλεκτρικής αποθήκευσης ως προς το

κόστος, τη διάρκεια ζωής και την απλότητα. Το Κεφάλαιο 6 δείχνει πώς αυτή η θεωρητική αρχή μεταφράζεται σε ωριαίο ενεργειακό ισοζύγιο, όπου κάθε ροή ενέργειας είναι αιτιωδώς συνεπής και ποσοτικά τεκμηριωμένη.

Η ανάλυση ολοκληρώνεται με την εκτίμηση του κόστους κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος, καθώς και με τη σύγκρισή του με ένα συμβατικό ενεργειακό σενάριο. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία δεν περιορίζεται στη θεωρητική ή τεχνική αρτιότητα, αλλά εξετάζει συνολικά τη βιωσιμότητα του προτεινόμενου μοντέλου σε βάθος χρόνου, αναδεικνύοντας τον ρόλο των αποκεντρωμένων, υβριδικών ενεργειακών συστημάτων ως ρεαλιστική λύση για την ενεργειακή μετάβαση μικρών κοινοτήτων.

Συνολικά, η παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι η αποθήκευση ενέργειας δεν αποτελεί αυτοσκοπό, αλλά εργαλείο σχεδιασμού ολοκληρωμένων ενεργειακών συστημάτων. Το Κεφάλαιο 6 λειτουργεί ως το σημείο σύγκλισης θεωρίας και πράξης, αποδεικνύοντας ότι ο κατάλληλος συνδυασμός τεχνολογιών αποθήκευσης, προσαρμοσμένος στα πραγματικά φορτία και στις τοπικές συνθήκες, μπορεί να οδηγήσει σε συστήματα υψηλής αυτονομίας, ανθεκτικότητας και οικονομικής αποδοτικότητας.



Σχήμα 1.1 Γενικές θέσεις των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. (U.S. Energy Information Administration)

2 Ο Ρόλος της Αποθήκευσης Ενέργειας

2.1 Η Αναγκαιότητα της Αποθήκευσης στο Σύγχρονο Ενεργειακό Τοπίο

Η παγκόσμια ενεργειακή πολιτική των τελευταίων δεκαετιών χαρακτηρίζεται από μια ριζική μεταβολή του παραδοσιακού μοντέλου ηλεκτροπαραγωγής, με κυρίαρχο στόχο τη δραστική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας εντός του 21ου αιώνα. Στο πλαίσιο αυτό, η μαζική διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και κυρίως της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας, αποτελεί θεμελιώδη στρατηγικό άξονα των εθνικών και παγκόσμιων ενεργειακών σχεδιασμών [1].

Η μετάβαση αυτή, ωστόσο, δεν συνιστά απλώς αντικατάσταση των συμβατικών μονάδων καύσης από τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Αντιθέτως, επιφέρει έναν βαθύ δομικό μετασχηματισμό στη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος, καθώς το παραγωγικό σκέλος παύει να είναι πλήρως ελεγχόμενο και εξαρτάται πλέον άμεσα από στοχαστικά φυσικά φαινόμενα. Η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου χαρακτηρίζονται από έντονες χρονικές διακυμάνσεις, τόσο σε ωριαία όσο και σε εποχιακή κλίμακα, γεγονός που εισάγει υψηλό βαθμό αβεβαιότητας στην ισορροπία παραγωγής-ζήτησης [2].

Σε αντίθεση με τις συμβατικές θερμικές μονάδες, οι οποίες δύνανται να προσαρμόζουν την ισχύ τους σύμφωνα με τις ανάγκες του φορτίου, οι μονάδες ΑΠΕ λειτουργούν κατά βάση ως μη ελεγχόμενες πηγές ισχύος (non-dispatchable generation). Η ασυμφωνία αυτή οδηγεί σε συχνά φαινόμενα υπερπαραγωγής κατά περιόδους χαμηλής ζήτησης και, αντιστρόφως, σε ελλείμματα ισχύος κατά τις ώρες αιχμής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ημερήσια ηλιακή παραγωγή, η οποία μεγιστοποιείται τις μεσημβρινές ώρες, ενώ η ζήτηση κορυφώνεται συνήθως μετά τη δύση του ηλίου [3].

Η αδυναμία άμεσης χρονικής προσαρμογής της παραγωγής οδηγεί αναπόφευκτα σε φαινόμενα απόρριψης παραγόμενης ενέργειας (renewable curtailment), τα οποία αυξάνονται εκθετικά με την περαιτέρω διείσδυση των ΑΠΕ. Το φαινόμενο αυτό όχι μόνο μειώνει τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος, αλλά υπονομεύει και τη βιωσιμότητα των επενδύσεων, καθώς περιορίζει την αξιοποιήσιμη παραγόμενη ενέργεια και αυξάνει το πραγματικό κόστος ανά παραδιδόμενη κιλοβατώρα [4].

Στο πλαίσιο αυτό, η αποθήκευση ενέργειας αναδεικνύεται σε κομβικό τεχνολογικό πυλώνα του σύγχρονου ενεργειακού συστήματος. Ο ρόλος της υπερβαίνει την απλή χρονική μετατόπιση της ενέργειας, καθώς λειτουργεί ως ενδιάμεσος ρυθμιστικός μηχανισμός (buffer) μεταξύ στοχαστικής παραγωγής και δυναμικής κατανάλωσης. Μέσω της αποθήκευσης, η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να δεσμευθεί κατά τις περιόδους υψηλής παραγωγής και να αποδοθεί στο δίκτυο όταν η ζήτηση το απαιτεί, μετατρέποντας έτσι την ασταθή παραγωγή σε λειτουργικά εγγυημένη ισχύ (dispatchable power) [5].

Η σημασία της αποθήκευσης καθίσταται ακόμη πιο κρίσιμη υπό συνθήκες παρατεταμένης χαμηλής παραγωγής από ΑΠΕ, φαινόμενα τα οποία στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται ως *Dunkelflaute*¹. Κατά τη διάρκεια τέτοιων περιόδων, η απουσία επαρκούς αποθηκευμένης ενέργειας θα απαιτούσε εκτεταμένη εφεδρεία από ορυκτά καύσιμα, αναιρώντας τα περιβαλλοντικά οφέλη της ενεργειακής μετάβασης [6].

Παράλληλα, ο επιταχυνόμενος εξηλεκτρισμός τομέων όπως οι μεταφορές και η θέρμανση, μέσω της ευρείας υιοθέτησης ηλεκτρικών οχημάτων και αντλιών θερμότητας, αυξάνει σημαντικά τόσο το συνολικό φορτίο όσο και την ένταση των αιχμών ζήτησης. Η εξέλιξη αυτή επιβαρύνει τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής, τα οποία δεν έχουν σχεδιαστεί για τόσο δυναμικά και αποκεντρωμένα προφίλ κατανάλωσης [7].

Η στρατηγική ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης σε διαφορετικά επίπεδα του ηλεκτρικού συστήματος, από κεντρικές μονάδες μεγάλης κλίμακας έως αποκεντρωμένες οικιακές εγκαταστάσεις, προσφέρει σημαντικά οφέλη ευελιξίας, ενισχύοντας τη λειτουργική ανθεκτικότητα του δικτύου και μειώνοντας την ανάγκη για εκτεταμένες επενδύσεις σε νέες υποδομές μεταφοράς [8]. Υπό αυτή την έννοια, η αποθήκευση λειτουργεί όχι μόνο ως ενεργειακή τεχνολογία, αλλά ως δομικό στοιχείο βελτιστοποίησης του συνολικού ενεργειακού συστήματος.

Συνοψίζοντας, η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί τον καταλύτη που καθιστά δυνατή τη μετάβαση από ένα σύστημα υψηλής εξάρτησης από τον καιρό σε ένα αξιόπιστο, ευέλικτο και κλιματικά ουδέτερο ενεργειακό μοντέλο. Χωρίς την ύπαρξη αποθηκευτικών υποδομών, οι ΑΠΕ παραμένουν συμπληρωματικές πηγές. Με την ενσωμάτωσή τους, όμως,

¹ Ο όρος *Dunkelflaute* (γερμανικής προέλευσης, από τις λέξεις *dunkel* = σκοτάδι και *Flaute* = άπνοια) χρησιμοποιείται στην ενεργειακή βιβλιογραφία για να περιγράψει μια περίοδο κατά την οποία η παραγωγή από βασικές ΑΠΕ δείχνει ταυτόχρονη και παρατεταμένη πτώση, λόγω συνδυασμού χαμηλής ηλιοφάνειας και ασθενών ανέμων. Το φαινόμενο εμφανίζεται κυρίως τον χειμώνα σε εύκρατες περιοχές.

μετασχηματίζονται σε βασικό πυλώνα της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής του 21ου αιώνα [9].

2.2 Duck curve - Η Καμπύλη της «πάπιας»

Η λεγόμενη duck curve (καμπύλη «πάπιας») αποτελεί ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά φαινόμενα που αναδύθηκαν με τη μαζική διείσδυση των ΑΠΕ, και ειδικότερα της φωτοβολταϊκής παραγωγής, στα σύγχρονα ηλεκτρικά συστήματα ισχύος. Ο όρος αναφέρεται στη χρονική μεταβολή του καθαρού φορτίου (net load), το οποίο ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της συνολικής ηλεκτρικής ζήτησης του συστήματος και της μη ελεγχόμενης παραγωγής από ΑΠΕ, κυρίως από ηλιακή ενέργεια [10].

Μαθηματικά, το καθαρό φορτίο μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P_{\text{net}}(t) = P_{\text{load}}(t) - P_{\text{RES}}(t) \quad (2.1)$$

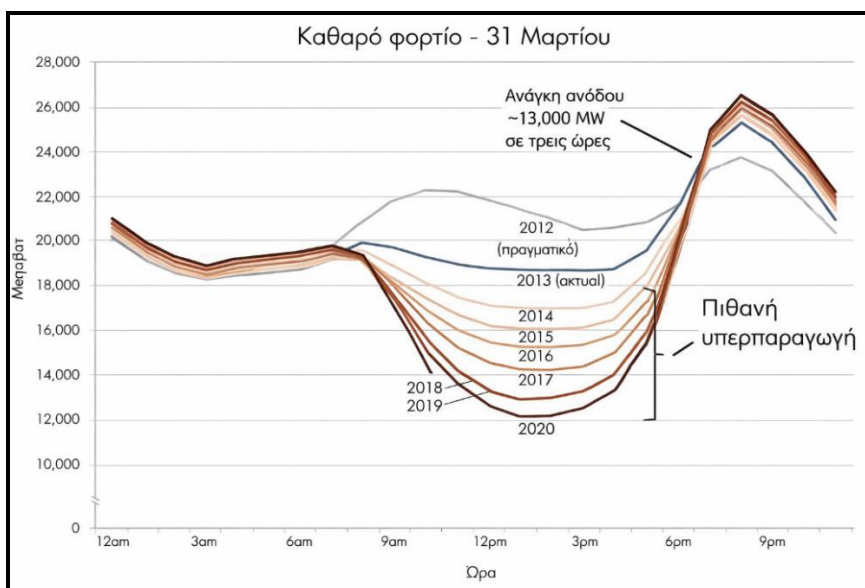
όπου $P_{\text{load}}(t)$ είναι η συνολική ζήτηση του συστήματος και $P_{\text{RES}}(t)$ η παραγωγή από ΑΠΕ.

Η γραφική παράσταση του καθαρού φορτίου κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου παρουσιάζει χαρακτηριστική μορφολογία, η οποία ομοιάζει με το σχήμα μίας καθιστής πάπιας: χαμηλό «σώμα» κατά τις μεσημβρινές ώρες λόγω υψηλής φωτοβολταϊκής παραγωγής και απότομη «ανύψωση του λαιμού» κατά τις απογευματινές ώρες, όταν η ηλιακή παραγωγή μειώνεται ταχύτατα ενώ η ζήτηση αυξάνεται σημαντικά [11].

Η έννοια της duck curve εισήχθη επισήμως το 2012 από τον California Independent System Operator ²(CAISO), στο πλαίσιο μελετών λειτουργικής επάρκειας του ηλεκτρικού συστήματος της Καλιφόρνιας, όπου η ταχεία ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων οδήγησε σε πρωτόγνωρες προκλήσεις ευστάθειας.

Το Σχήμα 2.1 ξεκινά με το πραγματικό προφίλ καθαρού φορτίου των ημερομηνιών 31 Μαρτίου 2012 και 31 Μαρτίου 2013 και στη συνέχεια παρουσιάζει προβλέψεις έως το 2020, καθώς αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα πλέον χαρακτηριστικά στοιχεία του γραφήματος είναι η έντονη μείωση του καθαρού φορτίου κατά τις μεσημβρινές ώρες, καθώς και η απότομη αύξησή του στο χρονικό διάστημα μεταξύ 15:00 και 19:00. Η πτώση που παρατηρείται στο μέσο της ημέρας οφείλεται στη μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και στη συνακόλουθη αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα, ενώ η απογευματινή αιχμή προκύπτει από την παύση της ηλιακής παραγωγής σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

² Ανεξάρτητος Διαχειριστής Ηλεκτρικού Συστήματος της Καλιφόρνιας



Σχήμα 2.1 Ενδεικτική καμπύλη καθαρού φορτίου (Καμπύλη της Πάπιας) ηλεκτρικού συστήματος με αυξανόμενη διείσδυση φωτοβολταϊκής παραγωγής [11]

2.2.1 Σχέση duck curve και ενεργειακής αποθήκευσης

Η duck curve θεωρείται σήμερα βασικός παράγοντας που τεκμηριώνει την αναγκαιότητα της αποθήκευσης ενέργειας. Η δυνατότητα μεταφοράς πλεονάζουσας ενέργειας από τις ώρες χαμηλού καθαρού φορτίου προς τις ώρες αιχμής μπορεί να εξομαλύνει σημαντικά την καμπύλη λειτουργίας του συστήματος [12]-[13].

Σύγχρονες μελέτες σε έγκυρα επιστημονικά περιοδικά καταδεικνύουν ότι συστήματα αποθήκευσης μεγάλης διάρκειας (LDES: Long-Duration Energy Storage), όπως θερμική αποθήκευση, αντλησιοταμίευση και θερμικές μπαταρίες στερεών υλικών, μπορούν να μειώσουν δραστικά:

- i. το βάθος της κοιλότητας της πάπιας,
- ii. τους απαιτούμενους ρυθμούς αύξησης ισχύος (ramping),
- iii. και τις περικοπές φωτοβολταϊκής παραγωγής (curtailment)

Η duck curve, επομένως, δεν αποτελεί απλώς γραφική απεικόνιση, αλλά έναν δομικό δείκτη μετάβασης των ηλεκτρικών συστημάτων προς υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, αναδεικνύοντας τη μετάβαση από συστήματα βασισμένα στην παραγωγή προς συστήματα βασισμένα στην ευελιξία [14], [15].

2.2.2 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια συγκαταλέγεται στις πλέον διαδεδομένες μορφές ΑΠΕ,

παρουσιάζοντας εκθετική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος τις τελευταίες δύο δεκαετίες, κυρίως λόγω της τεχνολογικής ωρίμανσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων και της σημαντικής μείωσης του κόστους παραγωγής τους [10]. Η στοχαστική φύση της ηλιακής ακτινοβολίας και η έντονη ημερήσια μεταβλητότητα της παραγωγής αποτελούν, ωστόσο, βασικούς περιορισμούς για την ασφαλή ένταξή της σε ηλεκτρικά συστήματα μεγάλης κλίμακας. Σε περιοχές με εξαιρετικά υψηλή διείσδυση κατανεμημένης φωτοβολταϊκής παραγωγής, όπως η Χαβάη, το φαινόμενο καθίσταται ακόμη εντονότερο, οδηγώντας σε ακραίες μεταβολές καθαρού φορτίου που στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως Nessie curve (Τέρας του Λοχ Νεζ) [12]. Οι συνθήκες αυτές αυξάνουν τον κίνδυνο αστάθειας τάσης και συχνότητας, ενώ παράλληλα περιορίζουν την ικανότητα απορρόφησης επιπλέον ανανεώσιμης ισχύος από το δίκτυο.

Η αντιμετώπιση των φαινομένων αυτών χωρίς την ύπαρξη αποθήκευσης προϋποθέτει τη διατήρηση μονάδων ταχείας απόκρισης, όπως αεριοστροβίλων, γεγονός που αυξάνει το λειτουργικό κόστος και μειώνει το περιβαλλοντικό όφελος της ηλιακής ενέργειας [16]. Για τον λόγο αυτό, η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ως αναγκαίο συμπλήρωμα της μαζικής διείσδυσης φωτοβολταϊκών [13].

Η αντλησιοταμίευση (PSHP: Pumped-Storage Hydropower) αποτελεί την πλέον ώριμη τεχνολογία αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας, με υψηλή αξιοπιστία και δυνατότητα παροχής ισχύος πολλών εκατοντάδων MW [14]. Παράλληλα, οι ηλεκτροχημικές μπαταρίες μεγάλης κλίμακας αναπτύσσονται ραγδαία, προσφέροντας ταχεία απόκριση και δυνατότητα εξομάλυνσης βραχυχρόνιων διακυμάνσεων της ηλιακής παραγωγής [15].

Η συνδυασμένη λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων και τεχνολογιών αποθήκευσης καθίσταται, συνεπώς, θεμελιώδης προϋπόθεση για την επίτευξη ηλεκτρικών συστημάτων υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, επιτρέποντας τη μείωση των μεταβατικών φαινομένων, τη βελτίωση της ευστάθειας και την αύξηση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης.

2.3 Αποθήκευση

Ο όρος ESS (Energy Storage System) αναφέρεται σε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, δηλαδή σε μια τεχνολογία που αποθηκεύει ενέργεια και την απελευθερώνει αργότερα, με σκοπό τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αξιοπιστίας των ενεργειακών συστημάτων. Με απλά λόγια, ένα ESS συλλέγει ενέργεια από διάφορες πηγές, την

αποθηκεύει και τη χρησιμοποιεί όταν και όπου χρειάζεται, εξασφαλίζοντας βέλτιστη διαχείριση της διαθέσιμης ενέργειας.

Η λειτουργία ενός ESS βασίζεται σε τρία βασικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, η ενέργεια συλλέγεται από πηγές όπως φωτοβολταϊκά συστήματα, ανεμογεννήτριες ή ακόμη και από το ηλεκτρικό δίκτυο σε ώρες χαμηλής ζήτησης. Στο δεύτερο στάδιο, η ενέργεια αυτή μετατρέπεται και αποθηκεύεται σε μια σταθερή και αξιοποιήσιμη μορφή, συνήθως μέσω τεχνολογιών όπως οι μπαταρίες. Στο τρίτο στάδιο, η αποθηκευμένη ενέργεια απελευθερώνεται με ελεγχόμενο τρόπο όταν η ζήτηση αυξάνεται ή όταν οι πηγές παραγωγής δεν είναι διαθέσιμες.

Στο στάδιο της συλλογής, η ενέργεια παράγεται από τις διαθέσιμες πηγές: τα φωτοβολταϊκά πάνελ μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ οι ανεμογεννήτριες αξιοποιούν την κινητική ενέργεια του ανέμου. Στο επόμενο στάδιο, η παραγόμενη ενέργεια μετατρέπεται και αποθηκεύεται, με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου να αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες και αποδοτικές λύσεις. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής, καθιστώντας τα ESS κατάλληλα για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από οικιακά συστήματα έως μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές χρήσεις.

2.4 Ταξινόμηση Χρονικών Κλιμάκων Αποθήκευσης Ενέργειας

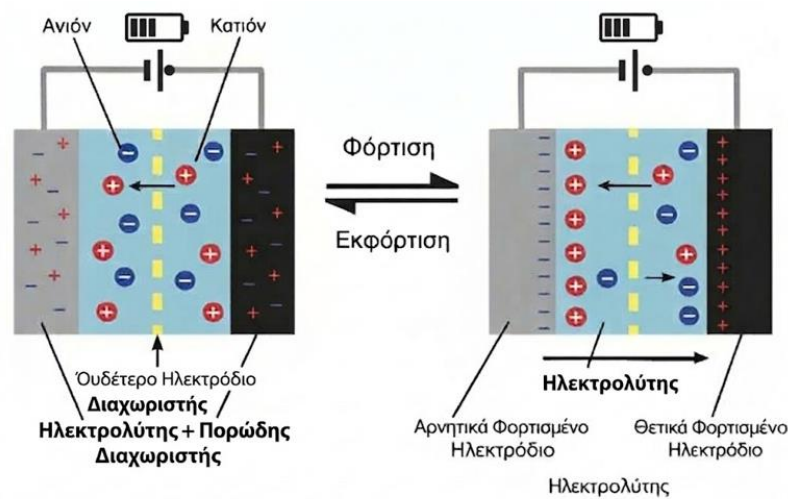
Η διεθνής επιστημονική βιβλιογραφία κατατάσσει τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας βάσει της χρονικής διάρκειας εκφόρτισης και της δυναμικής απόκρισής τους, διαμορφώνοντας τρεις κύριες κατηγορίες: βραχυπρόθεσμη, μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη (εποχιακή) αποθήκευση [17]–[18]. Η κατηγοριοποίηση αυτή αντανακλά τις διαφορετικές λειτουργικές απαιτήσεις του ηλεκτρικού δικτύου, από τη ρύθμιση συχνότητας έως την εποχιακή εξισορρόπηση ενέργειας.

2.4.1 Βραχυπρόθεσμη Αποθήκευση (Short-Term Energy Storage)

Η βραχυπρόθεσμη αποθήκευση αφορά χρονικές κλίμακες από μερικά δευτερόλεπτα έως λίγες ώρες συνήθως μικρότερες των τεσσάρων ωρών (<4h). Στην κατηγορία αυτή, ο πρωταρχικός στόχος δεν είναι η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, αλλά η παροχή υψηλής ισχύος με εξαιρετικά γρήγορη απόκριση. Οι τεχνολογίες βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης διαδραματίζουν καίριο ρόλο στη διατήρηση της ποιότητας

ισχύος, στη ρύθμιση της συχνότητας και στην απόσβεση στιγμιαίων διαταραχών του συστήματος. Η σημασία τους εντείνεται σε δίκτυα με υψηλή συμμετοχή μονάδων ισχύος βασισμένων σε ηλεκτρονικά ισχύος, όπου απουσιάζει η φυσική αδράνεια των συμβατικών γεννητριών [19], [20]. Οι κύριες τεχνολογίες βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης είναι οι:

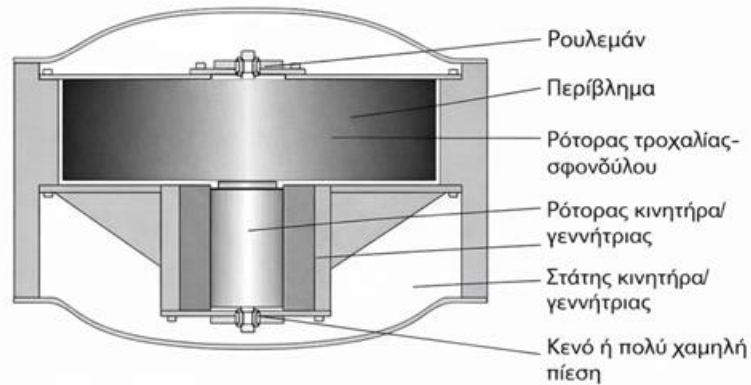
- i. **Υπερπυκνωτές (Supercapacitors): Αποθηκεύουν ενέργεια σε ηλεκτρικό πεδίο, προσφέροντας εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα ισχύος και χρόνο απόκρισης της τάξης των χιλιοστών του δευτερολέπτου [21].** Ο υπερπυκνωτής αποτελείται από δύο πορώδη ηλεκτρόδια άνθρακα, διαχωρισμένα μέσω πορώδους μονωτικού διαφράγματος και εμποτισμένα με ηλεκτρολύτη. Κατά τη φόρτιση, η εφαρμογή διαφοράς δυναμικού προκαλεί τη μετακίνηση κατιόντων και ανιόντων του ηλεκτρολύτη προς τα αντίθετα φορτισμένα πορώδη ηλεκτρόδια, οδηγώντας στον σχηματισμό διπλών ηλεκτρικών στρωμάτων στις διεπιφάνειες ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη. Το πορώδες διαχωριστικό επιτρέπει τη διέλευση ιόντων, αποτρέποντας παράλληλα την ηλεκτρική επαφή των ηλεκτροδίων. Κατά την εκφόρτιση, τα ιόντα επανέρχονται σε ουδέτερη κατανομή, αποδίδοντας την αποθηκευμένη ενέργεια στο εξωτερικό κύκλωμα (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Μηχανισμός φόρτισης και εκφόρτισης υπερπυκνωτή διπλού ηλεκτρικού στρώματος (EDLC) [110]

- ii. **Σφόνδυλοι (Flywheel Energy Storage Systems): Αποθηκεύουν κινητική ενέργεια σε περιστρεφόμενη μάζα, παρουσιάζοντας πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων ζωής και υψηλή αξιοπιστία [22].** Οι σφόνδυλοι (Σχήμα 2.3) αποτελούνται από μια περιστρεφόμενη μάζα, όπως έναν χαλύβδινο ή σύνθετο δίσκο, έναν κινητήρα/γεννήτρια, ένα ρουλεμάν και έναν θάλαμο κενού. Όταν παρέχεται ρεύμα στον κινητήρα, ο σφόνδυλος περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα, έως και δεκάδες

χιλιάδες στροφές ανά λεπτό. Η ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύεται σε ένα σφόνδυλο είναι ανάλογη με τη μάζα και το τετράγωνο της γωνιακής ταχύτητας του σφόνδουλου. Η ενεργειακή πυκνότητα των βολάν είναι μέτρια και κυμαίνεται από 10 έως 130 Wh/kg. [19].



Σχήμα 2.3 Δομή συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο (FESS) [111]

- iii. **Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion): Χαρακτηρίζονται από ταχεία απόκριση και χρησιμοποιούνται ευρέως σε υπηρεσίες πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας [23].**

2.4.2 Μεσοπρόθεσμη Αποθήκευση (Medium-Term Energy Storage)

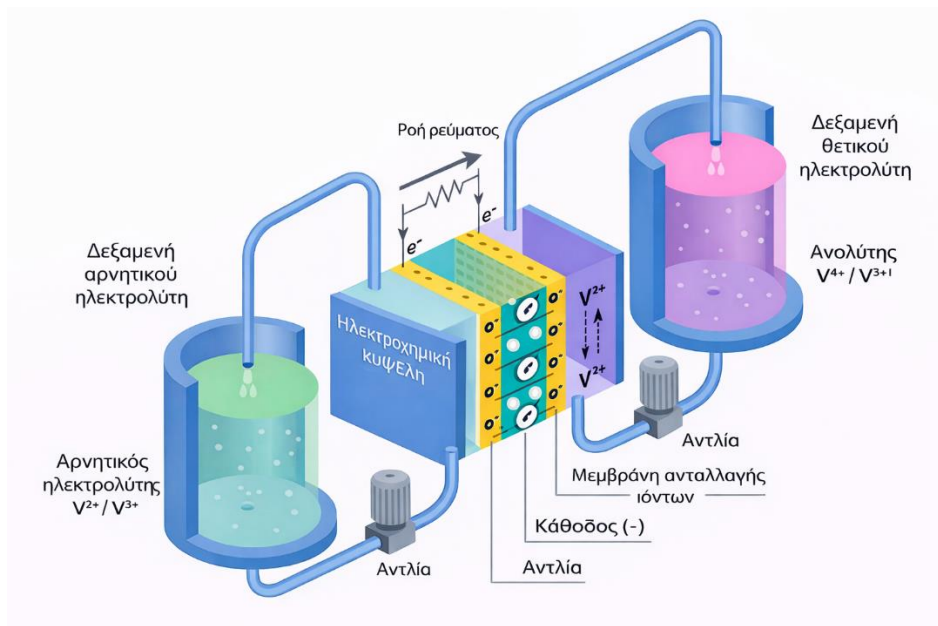
Η μεσοπρόθεσμη αποθήκευση καλύπτει χρονικούς ορίζοντες από μερικές ώρες έως αρκετές ημέρες και συνδέεται κυρίως με τη διαχείριση του ημερήσιου κύκλου φορτίου (diurnal cycle). Σε αυτή την κλίμακα, η αποθήκευση λειτουργεί ως μηχανισμός ενεργειακής μετατόπισης, επιτρέποντας τη μεταφορά πλεονάζουσας παραγωγής σε περιόδους αυξημένης ζήτησης. Τα συστήματα αυτά υποστηρίζουν λειτουργίες energy arbitrage³ και συμβάλλουν στη μείωση των αιχμών φορτίου, βελτιώνοντας την οικονομική και τεχνική απόδοση του συστήματος [17].

Οι κύριες τεχνολογίες μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης είναι:

- i. **Αντλησιοταμίευση (Pumped Hydro Storage): Η πλέον ώριμη τεχνολογία**

³ Ενεργειακή εκμετάλλευση διαφορών τιμής είναι η πρακτική κατά την οποία μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας φορτίζει όταν η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή και εκφορτίζει όταν η τιμή είναι υψηλή, αποκομίζοντας οικονομικό όφελος από τη διαφορά τιμής.

- αποθήκευσης παγκοσμίως, με υψηλή απόδοση και μεγάλη διάρκεια εκφόρτισης [24].
- ii. **Μπαταρίες ροής (Redox Flow Batteries):** Χρησιμοποιούν υγρά ηλεκτρολύτη σε δεξαμενές. Είναι εύκολα επεκτάσιμες απλώς αυξάνοντας τον όγκο των δεξαμενών (Σχήμα 2.4). Διαχωρίζουν την ισχύ από την ενεργειακή χωρητικότητα, προσφέροντας υψηλή ευελιξία σε εφαρμογές δικτύου [25].
 - iii. **Θερμική αποθήκευση (Thermal Energy Storage):** Χρήση θερμότητας για την κίνηση στροβίλων αργότερα. Ιδιαίτερα διαδεδομένη σε συγκεντρωτικά ηλιοθερμικά συστήματα μέσω τηγμάτων αλάτων [26].
 - iv. **Μπαταρίες ιόντων νατρίου:** Αναδυόμενη τεχνολογία εναλλακτική του λιθίου με χαμηλότερο κόστος πρώτων υλών για στατικές εφαρμογές [27].



Σχήμα 2.4 Απεικόνιση των επιμέρους στοιχείων μιας μπαταρίας ροής Vanadium REDOX [112]

2.4.3 Μακροπρόθεσμη και Εποχιακή Αποθήκευση (Long-Term / Seasonal Storage)

Η μακροπρόθεσμη αποθήκευση αφορά χρονικούς ορίζοντες εβδομάδων ή μηνών και αποσκοπεί στην αντιμετώπιση της εποχιακής μεταβλητότητας της παραγωγής από ΑΠΕ [28]. Στην εποχιακή αποθήκευση η δυνατότητα μακροχρόνιας διατήρησης ενέργειας με ελάχιστες απώλειες υπερσχύει της συνολικής απόδοσης μετατροπής [29].

Οι κύριες τεχνολογίες μακροπρόθεσμης αποθήκευσης είναι:

- i. **Αντλησιοταμίευση (Pumped Hydro Storage):** Η πιο ώριμη τεχνολογία παγκοσμίως. Το νερό αντλείται σε έναν πάνω ταμιευτήρα όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας και απελευθερώνεται για παραγωγή υδροηλεκτρικής

ενέργειας όταν χρειάζεται.

- ii. *Power-to-Gas και πράσινο υδρογόνο: Μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης και αποθήκευση σε υπόγειες αλατούχες κοιλότητες* [30].
- iii. *Μεγάλης κλίμακας θερμική αποθήκευση: Αποθήκευση αισθητής θερμότητας (sensible heat) σε στερεά ή υγρά μέσα με χαμηλό κόστος ανά kWh* [31].
- iv. *Compressed Air Energy Storage (CAES): Αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα υπό υψηλή πίεση σε υπόγειες γεωλογικές δομές με δυνατότητα πολυήμερης εκφόρτισης* [32].

3 Μηχανική και Βαρυτική αποθήκευση ενέργειας

3.1 Αποθήκευση ενέργειας μέσω βαρύτητας

3.1.1 Σύνοψη της τεχνολογίας και παραδείγματα

Η αρχή λειτουργίας της αποθήκευσης ενέργειας μέσω βαρυτικών συστημάτων βασίζεται στην ανύψωση βαρυτικών δομικών στοιχείων κατασκευασμένων από σύνθετα υλικά, με τη χρήση ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος δύναται να τροφοδοτείται και από ΑΠΕ.

Κατά τη φάση φόρτισης του συστήματος, τα δομικά αυτά στοιχεία τοποθετούνται σε προκαθορισμένη χωρική διάταξη, αποκτώντας βαρυτική δυναμική ενέργεια. Κατά την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή τη φάση εκφόρτισης, τα στοιχεία επανέρχονται ελεγχόμενα προς χαμηλότερο υψόμετρο, μετατρέποντας την αποθηκευμένη δυναμική ενέργεια σε μηχανική και, μέσω γεννήτριας, σε ηλεκτρική ενέργεια κατάλληλη προς αξιοποίηση στο δίκτυο. Το σύστημα παρουσιάζει δυνατότητα χρονικής αποθήκευσης από δύο έως δώδεκα ώρες, ενώ υπό κατάλληλες συνθήκες σχεδιασμού δύναται να υποστηρίξει και μεγαλύτερη διάρκεια αποθήκευσης [33].

3.1.2 Φυσική αρχή

Η αποθηκευμένη ενέργεια προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$E = mgh \quad (3.1)$$

όπου m η μάζα που ανυψώνεται, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και h το καθαρό ύψος. Η παρεχόμενη ισχύς κατά την εκφόρτιση προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$P = \eta \dot{m}gh \quad (3.2)$$

όπου \dot{m} ο ρυθμός μάζας καθόδου ανα δευτερόλεπτο και η ο συνολικός βαθμός απόδοσης της διεργασίας. Για παραχθεί ενέργεια ίση με 100 MWh απαιτείται ρυθμός μάζας καθόδου της τάξης των $4,6 \cdot 10^8 kg/s$ από 100m ύψος και με βαθμό απόδοσης 80%. Για να επιτευχθεί ισχύς 25 MW για πτώση από το ίδιο ύψος, απαιτείται ρυθμός μάζας καθόδου της τάξης των $32 \cdot 10^3 kg/s$. Επιστημονικές μελέτες επιβεβαιώνουν το πλεονέκτημα της μεγάλης διάρκειας ζωής και ασφάλειας σε σχέση με χημικές μπαταρίες, ενώ αναδεικνύουν ως προκλήσεις την ενεργειακή πυκνότητα και το κόστος των έργων [34], [35].

3.1.3 Αρχιτεκτονική EVx

Η αρχιτεκτονική του συστήματος EVx βασίζεται σε κλειστή και αρθρωτή κατασκευή, σχεδιασμένη για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω βαρυτικής

δυναμικής. Η δομή του συστήματος αποτελείται από πολλαπλές ανεξάρτητες διατάξεις ανύψωσης, οι οποίες λειτουργούν συνδυαστικά υπό τον έλεγχο κεντρικού βιομηχανικού συστήματος αυτοματισμού. Η κλειστή κατασκευή εξασφαλίζει αυξημένη μηχανική σταθερότητα, προστασία του εξοπλισμού από εξωτερικές περιβαλλοντικές επιδράσεις και υψηλό επίπεδο λειτουργικής ασφάλειας.

Κεντρικό δομικό στοιχείο του EVx αποτελούν τα βαρυτικά δομικά στοιχεία από σύνθετα υλικά, τα οποία λειτουργούν ως φορείς αποθήκευσης της δυναμικής ενέργειας. Τα στοιχεία αυτά ανυψώνονται και κατέρχονται κατακόρυφα ή οριζόντια μέσω μηχανισμών ανύψωσης που περιλαμβάνουν ηλεκτροκινητήρες, τύμπανα, συρματόσχοινα και συστήματα μετάδοσης κίνησης. Η ανύψωση πραγματοποιείται κατά τη φάση φόρτισης του συστήματος, ενώ η ελεγχόμενη καθοδική κίνηση ενεργοποιεί γεννήτριες για την ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας.

Το EVx περιλαμβάνει επίσης ολοκληρωμένο ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα, το οποίο συνδυάζει κινητήρες διπλής λειτουργίας (motor-generator), μετατροπείς ισχύος και ηλεκτρικούς πίνακες διασύνδεσης με το δίκτυο. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο τη θέση, την ταχύτητα και το φορτίο κάθε βαρυτικού στοιχείου, επιτρέποντας ακριβή ρύθμιση της ισχύος φόρτισης και εκφόρτισης. Παράλληλα, η αρθρωτή φύση της αρχιτεκτονικής επιτρέπει την κλιμάκωση της εγκατάστασης, καθιστώντας δυνατή την προσαρμογή της ισχύος και της χωρητικότητας ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις. Συνολικά, η αρχιτεκτονική EVx συνδυάζει μηχανική απλότητα με προηγμένα συστήματα αυτοματισμού, προσφέροντας αξιόπιστη, ασφαλή και μακροχρόνια λύση αποθήκευσης ενέργειας για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.[\[4\]](#)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της τεχνολογίας EVx αποτελεί η εγκατάσταση στο Rudong της Κίνας, η οποία διαθέτει ονομαστική ισχύ 25 MW και ενεργειακή χωρητικότητα 100 MWh. Το έργο τέθηκε σε λειτουργία και διασυνδέθηκε με το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο το Δεκέμβριο του 2023. Παράλληλα, έχει ανακοινωθεί η ανάπτυξη τριών επιπλέον έργων εντός της χώρας, με συνολική αποθηκευτική ικανότητα που εκτιμάται σε περίπου 468 MWh, γεγονός που καταδεικνύει το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την τεχνολογία βαρυτικής αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας [\[36\]](#), [\[37\]](#). Η πρόσφατη συνεργασία της Energy Vault (*Σχήμα 3.1*) και της SOM στοχεύει στην ενσωμάτωση της τεχνολογίας EVx σε κτίρια ώστε ο φέρων οργανισμός να αναλαμβάνει τα φορτία και ο αποθηκευτικός μηχανισμός να λειτουργεί σε προστατευμένο περιβάλλον [\[36\]](#), [\[37\]](#). Παρόμοια ιδέα έχει παρουσιάσει η Lift Energy Storage Technology όπου αξιοποιούνται ανελκυστήρες και κενοί χώροι κτιρίων για μικρότερης κλίμακας βαρυτική αποθήκευση

[38].



Σχήμα 3.1 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας βαρύτητας EVx της Energy Vault [113]

3.1.4 Τεχνολογία Αντλησιοταμίευσης (PHES: Pumped Hydro Energy Storage)

Η αντλησιοταμίευση αποτελεί την πλέον ώριμη και ευρέως εφαρμοσμένη τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας παγκοσμίως. Η βασική της αρχή στηρίζεται στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδραυλική, μέσω της άντλησης νερού από κατώτερο σε ανώτερο ταμιευτήρα, και στην ανάκτηση της ενέργειας κατά την αντίστροφη ροή. Η τεχνολογία χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες για την εξισορρόπηση φορτίου, την κάλυψη αιχμών ζήτησης και τη σταθεροποίηση των ηλεκτρικών δικτύων.

Η λειτουργία ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης περιλαμβάνει δύο βασικές φάσεις: τη φάση φόρτισης και τη φάση εκφόρτισης. Κατά τη φάση φόρτισης, η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια, συνήθως προερχόμενη από μονάδες βάσης ή ΑΠΕ, χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση αντλιών, οι οποίες μεταφέρουν το νερό από τον κατώτερο ταμιευτήρα στον ανώτερο. Το νερό αποθηκεύεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο, αποκτώντας δυναμική ενέργεια. Κατά τη φάση εκφόρτισης, το νερό απελευθερώνεται

ελεγχόμενα και διέρχεται μέσω υδροστροβίλων, μετατρέποντας τη δυναμική ενέργεια σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω γεννητριών (Σχήμα 3.2).

Η ενεργειακή ικανότητα ενός έργου αντλησιοταμίευσης εξαρτάται άμεσα από τη μάζα του αποθηκευμένου νερού και από τη διαθέσιμη υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο ταμιευτήρων. Η αποθηκευόμενη ενέργεια μπορεί να προσεγγιστεί θεωρητικά από τη σχέση

$$E = \rho \cdot g \cdot H \cdot V \quad (3.3)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, H η υψομετρική διαφορά και V ο όγκος του νερού.

Τα σύγχρονα συστήματα αντλησιοταμίευσης χρησιμοποιούν κατά κανόνα αναστρέψιμες υδροηλεκτρικές μηχανές, οι οποίες λειτουργούν τόσο ως αντλίες όσο και ως υδροστρόβιλοι. Οι μηχανές αυτές επιτρέπουν γρήγορη εναλλαγή μεταξύ των δύο φάσεων λειτουργίας, προσφέροντας αυξημένη ευελιξία στο δίκτυο. Ο χρόνος απόκρισης είναι ιδιαίτερα μικρός, γεγονός που καθιστά την αντλησιοταμίευση κατάλληλη για υπηρεσίες ρύθμισης συχνότητας και εφεδρείας ισχύος.

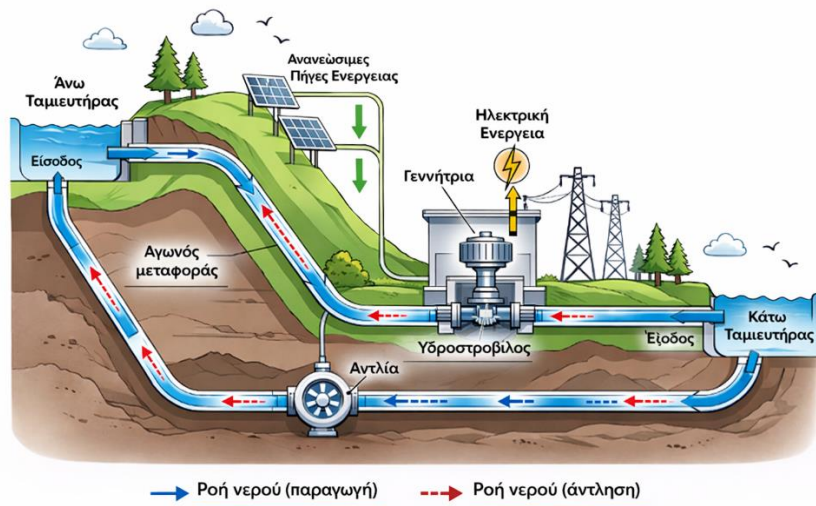
Από πλευράς απόδοσης, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης παρουσιάζουν συνολικό βαθμό απόδοσης της τάξης του 70–85%, ο οποίος επηρεάζεται από τις υδραυλικές απώλειες, τις μηχανικές τριβές και τις απώλειες μετατροπής [9]. Παρά τις απώλειες αυτές, η τεχνολογία παραμένει εξαιρετικά ανταγωνιστική, κυρίως λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής των εγκαταστάσεων, η οποία συχνά υπερβαίνει τα 50 έτη λειτουργίας.

Σημαντικό πλεονέκτημα της αντλησιοταμίευσης αποτελεί η δυνατότητα αποθήκευσης πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, σε επίπεδα εκατοντάδων ή και χιλιάδων MWh. Η ιδιότητα αυτή την καθιστά κατάλληλη για μακροχρόνια αποθήκευση και για την αντιστάθμιση της στοχαστικής παραγωγής από αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα. Ιδιαίτερα σε ηλεκτρικά δίκτυα με αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ, η αντλησιοταμίευση διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση της ευστάθειας και της αξιοπιστίας του συστήματος.

Ωστόσο, η ανάπτυξη έργων αντλησιοταμίευσης συνοδεύεται και από σημαντικούς περιορισμούς. Η ανάγκη ύπαρξης κατάλληλου γεωμορφολογικού ανάγλυφου, με επαρκή υψομετρική διαφορά και διαθέσιμους υδατικούς πόρους, περιορίζει τις πιθανές θέσεις εγκατάστασης. Επιπλέον, τα έργα αυτά απαιτούν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης (CAPEX) και εκτεταμένες περιβαλλοντικές αδειοδοτήσεις, καθώς ενδέχεται να επηρεάσουν υδρολογικά συστήματα και τοπικά οικοσυστήματα.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για νέες μορφές αντλησιοταμίευσης, όπως τα κλειστά συστήματα χωρίς φυσική υδατική σύνδεση με

ποτάμια ή λίμνες. Στα συστήματα αυτά, οι ταμιευτήρες λειτουργούν ως κλειστό κύκλωμα, περιορίζοντας σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Παράλληλα, εξετάζεται η αξιοποίηση εγκαταλελειμμένων ορυχείων και τεχνητών δεξαμενών, με στόχο τη μείωση του κόστους και την ευρύτερη γεωγραφική εφαρμογή της τεχνολογίας.



Σχήμα 3.2 Σχηματική Αναπαράσταση Αντλιοσταμείωσης (PHES) με χρήση τεχνητής νοημοσύνης

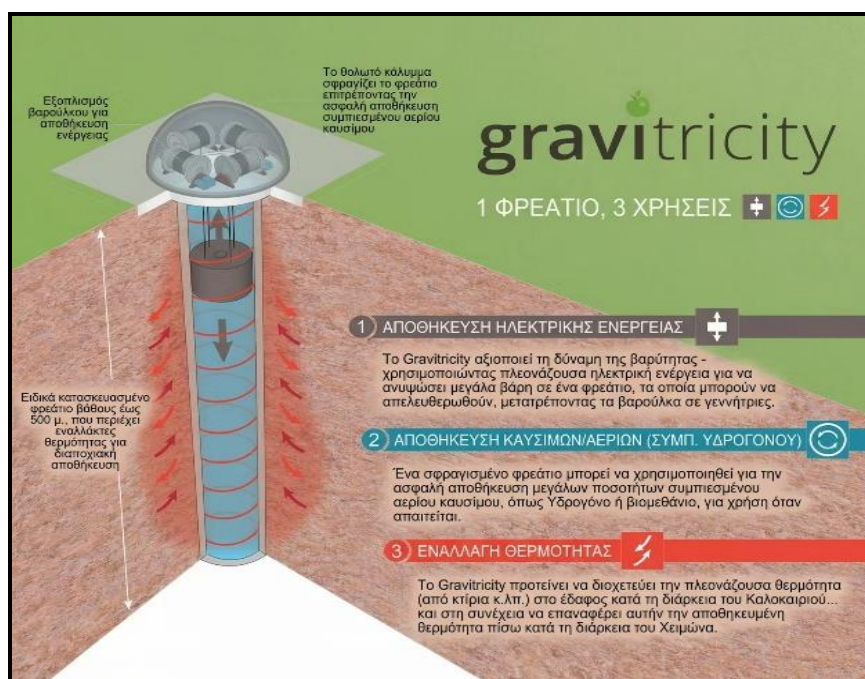
3.1.5 Τεχνολογία Gravitricity: Αποθήκευση Ενέργειας μέσω Βαριών Μαζών σε Φρέατα

Η τεχνολογία Gravitricity αποτελεί μία καινοτόμο μορφή αποθήκευσης ενέργειας μέσω βαρύτητας, η οποία βασίζεται στην κατακόρυφη μετακίνηση βαριών μαζών εντός βαθιών φρεάτων. Η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος συνίσταται στην ανύψωση συμπαγών βαριών σωμάτων, συνήθως κατασκευασμένων από χάλυβα ή σκυρόδεμα υψηλής πυκνότητας, με τη χρήση ηλεκτροκινητήρων και συστημάτων ανύψωσης.

Η αποθηκευόμενη ενέργεια εξαρτάται άμεσα από τη μάζα των φορτίων και το βάθος του φρέατος. Η αξιοποίηση μεγάλων κατακόρυφων αποστάσεων επιτρέπει την επίτευξη σημαντικής ενεργειακής πυκνότητας ανά μονάδα επιφάνειας, καθιστώντας την τεχνολογία ιδιαίτερα ελκυστική σε περιοχές με περιορισμένο διαθέσιμο χώρο. Ιδιαίτερο πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα εγκατάστασης σε εγκαταλελειμμένα ορυχεία, μειώνοντας σημαντικά το κόστος πολιτικών έργων και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Το σύστημα Gravitricity περιλαμβάνει βασικά υποσυστήματα όπως τον μηχανισμό ανύψωσης, τα συρματόσχοινα ή τις αλυσίδες μεταφοράς φορτίου, τις ηλεκτρικές μηχανές διπλής λειτουργίας (motor-generator), καθώς και το σύστημα πέδησης και ελέγχου. Η λειτουργία του ελέγχεται από προηγμένα συστήματα αυτοματισμού, τα οποία ρυθμίζουν την ταχύτητα καθόδου των μαζών, επιτρέποντας ακριβή έλεγχο της παρεχόμενης ισχύος

και ταχεία απόκριση σε μεταβολές του φορτίου.



Σχήμα 3.3 Απεικόνιση Συστήματος Gravitricity [114]

Ένα από τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του Gravitricity είναι ο εξαιρετικά μικρός χρόνος απόκρισης, ο οποίος μπορεί να είναι της τάξης των δευτερολέπτων. Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά την τεχνολογία ιδιαίτερα κατάλληλη για παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο, όπως ρύθμιση συχνότητας και στιγμιαία εφεδρεία ισχύος.

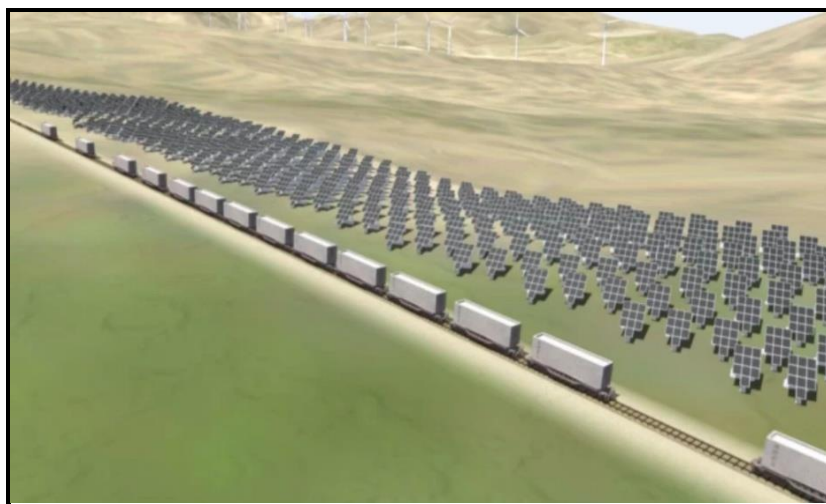
Από πλευράς απόδοσης, τα συστήματα Gravitricity μπορούν να επιτύχουν συνολικό βαθμό απόδοσης της τάξης του 80–90%, δεδομένου ότι οι απώλειες περιορίζονται κυρίως σε μηχανικές τριβές και ηλεκτρικές απώλειες μετατροπής. Παράλληλα, η θεωρητική διάρκεια ζωής του συστήματος μπορεί να υπερβαίνει τα 25-50 έτη, γεγονός που προσδίδει σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των ηλεκτροχημικών τεχνολογιών αποθήκευσης.

Ωστόσο, η εφαρμογή της τεχνολογίας συνοδεύεται και από ορισμένους περιορισμούς. Η ενεργειακή χωρητικότητα παραμένει σχετικά μικρότερη σε σύγκριση με την αντλησιοταμίευση ή τα μεγάλης κλίμακας βαρυτικά συστήματα επιφανείας, καθώς περιορίζεται από το διαθέσιμο βάθος του φρέατος και τη μέγιστη επιτρεπόμενη μάζα. Επιπλέον, η κατασκευή νέων φρεάτων ενδέχεται να είναι οικονομικά ασύμφορη, γεγονός που καθιστά τη χρήση υφιστάμενων ορυχείων ιδιαίτερα κρίσιμη για τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας. Το Gravitricity θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές βραχυχρόνιας έως μεσαίας διάρκειας αποθήκευσης, με χρόνους εκφόρτισης από λίγα λεπτά έως μερικές

ώρες [39]. Αν και βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο εμπορικής ανάπτυξης, παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές ως συμπληρωματικό εργαλείο στο μελλοντικό ενεργειακό σύστημα, ιδιαίτερα σε περιοχές με διαθέσιμες υπόγειες υποδομές [34],[40].

3.1.6 Τεχνολογία ARES: Αποθήκευση Ενέργειας μέσω Σιδηροδρομικών Οχημάτων

Η τεχνολογία ARES (Advanced Rail Energy Storage) αποτελεί μία εναλλακτική μορφή αποθήκευσης ενέργειας μέσω βαρύτητας, η οποία βασίζεται στη μετακίνηση σιδηροδρομικών οχημάτων κατά μήκος κεκλιμένων διαδρομών. Η λειτουργία της στηρίζεται στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και εν συνεχεία σε βαρυτική δυναμική, μέσω της ανύψωσης βαρέων συρμών σε υψηλότερο υψόμετρο, και στην ανάκτηση της ενέργειας κατά την καθοδική τους πορεία. Πρόκειται για τεχνολογία καθαρά μηχανικού χαρακτήρα, η οποία δεν απαιτεί χημικά μέσα αποθήκευσης, γεγονός που της προσδίδει αυξημένη αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής.



Σχήμα 3.4 Απεικόνιση συστήματος ARES με χρήση τεχνητής νοημοσύνης

Κατά τη φάση φόρτισης του συστήματος, πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο ή από ΑΠΕ χρησιμοποιείται για την κίνηση ηλεκτροκίνητων σιδηροδρομικών οχημάτων προς ανάντη κατά μήκος ειδικά σχεδιασμένης κεκλιμένης σιδηροδρομικής γραμμής. Τα οχήματα μεταφέρουν σημαντική μάζα, συνήθως μέσω ενσωματωμένων βαριδίων ή φορτίων, και η άνοδος σε μεγαλύτερο υψόμετρο οδηγεί στην αποθήκευση ενέργειας υπό μορφή δυναμικής ενέργειας. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με ελεγχόμενο τρόπο, ώστε να προσαρμόζεται στις εκάστοτε συνθήκες παραγωγής και ζήτησης.

Κατά τη φάση εκφόρτισης, τα σιδηροδρομικά οχήματα κινούνται καθοδικά, με τη

βαρυτική δύναμη να τίθεται σε εκμετάλλευση μέσω συστημάτων ανάκτησης ενέργειας. Οι ηλεκτροκινητήρες λειτουργούν αντίστροφα ως γεννήτριες, μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια της καθόδου σε ηλεκτρική ισχύ, η οποία επανεισάγεται στο δίκτυο. Η παρεχόμενη ισχύς μπορεί να ρυθμιστεί με ακρίβεια μέσω του ελέγχου της ταχύτητας και του αριθμού των οχημάτων που βρίσκονται σε κίνηση, προσφέροντας υψηλή ευελιξία λειτουργίας.

Η τεχνολογία αξιοποιεί σχετικά μικρές κλίσεις, ωστόσο η μεγάλη μάζα των συρμών επιτρέπει την επίτευξη αξιόλογης ενεργειακής χωρητικότητας. Σε σύγκριση με άλλες μορφές βαρυτικής αποθήκευσης, η ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα επιφάνειας παραμένει χαμηλότερη, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη διαθεσιμότητα εκτεταμένων χερσαίων εκτάσεων. Ο βαθμός απόδοσης της τεχνολογίας εκτιμάται ότι μπορεί να υπερβαίνει το 80%, με απώλειες κυρίως λόγω μηχανικών τριβών και ηλεκτρικών μετατροπών.

Η τεχνολογία παρουσιάζει υψηλή ανθεκτικότητα, καθώς τα μηχανικά της μέρη μπορούν να λειτουργούν για δεκαετίες χωρίς ουσιαστική υποβάθμιση της απόδοσης. Η συντήρηση επικεντρώνεται κυρίως στη σιδηροδρομική υποδομή και στα συστήματα κύλισης. Ωστόσο, η εφαρμογή του ARES συνοδεύεται και από σημαντικούς περιορισμούς. Η ανάγκη ύπαρξης κατάλληλων κεκλιμένων εδαφών περιορίζει σημαντικά τις διαθέσιμες τοποθεσίες εγκατάστασης. Επιπλέον, η μεγάλη έκταση που απαιτείται καθιστά δύσκολη την ένταξη της τεχνολογίας σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Η ενεργειακή χωρητικότητα επηρεάζεται άμεσα από τη γεωμετρία της διαδρομής, γεγονός που περιορίζει την κλιμάκωση σε επίπεδα πολύ μεγάλης αποθήκευσης.

Από πλευράς εφαρμογών, η τεχνολογία ARES θεωρείται κατάλληλη κυρίως για αποθήκευση μεσαίας διάρκειας και για την εξομάλυνση της παραγωγής από αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα. Η σχετικά γρήγορη απόκριση επιτρέπει τη συμμετοχή σε υπηρεσίες εξισορρόπησης φορτίου, ενώ η δυνατότητα ακριβούς ελέγχου της ισχύος καθιστά το σύστημα λειτουργικά ευέλικτο. Παρά ταύτα, η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε περιορισμένο στάδιο εμπορικής εφαρμογής, με ελάχιστα έργα επίδειξης.

3.1.7 Σύστημα Υποθαλάσσιας Αντλησιοταμίευσης StEnSea (Stored Energy in the Sea)

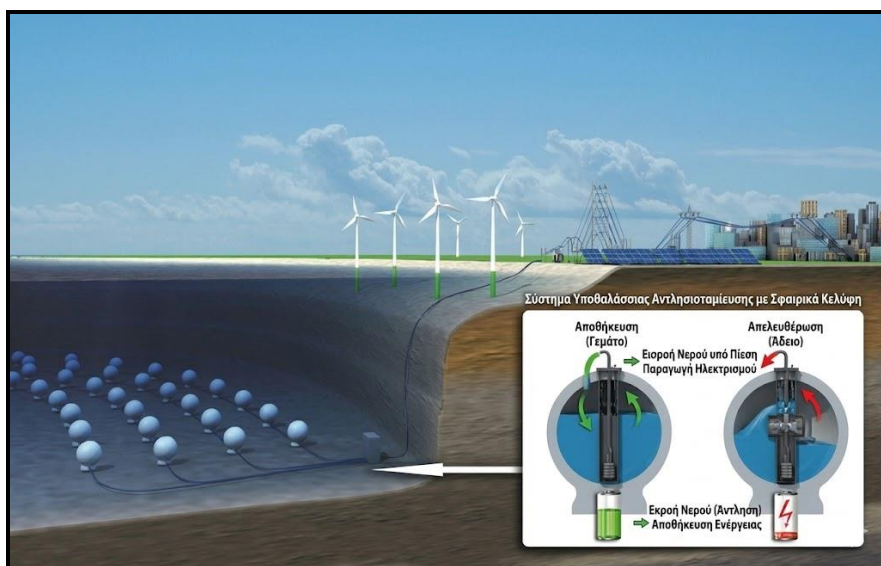
Η ανάγκη για συστήματα αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας και μεγάλης διάρκειας καθίσταται ιδιαίτερα έντονη στο πλαίσιο της αυξανόμενης διείσδυσης των υπεράκτιων ΑΠΕ, όπου η χωροθέτηση χερσαίων έργων συχνά συναντά τεχνικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς περιορισμούς. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύσσονται εναλλακτικές προσεγγίσεις που αξιοποιούν το θαλάσσιο περιβάλλον όχι μόνο ως χώρο εγκατάστασης

παραγωγικών μονάδων, αλλά και ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας. Μία από τις πλέον χαρακτηριστικές και τεχνολογικά ώριμες προτάσεις αυτής της κατηγορίας είναι η υποθαλάσσια αντλιοσταμείωση τύπου StEnSea (Stored Energy in the Sea).

3.1.7.1 Περιγραφή του StEnSea

Η τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας StEnSea (Stored Energy in the Sea) αποτελεί ειδική μορφή υποθαλάσσιας αντλιοσταμείωσης, η οποία μεταφέρει τη θεμελιώδη αρχή της κλασικής αντλιοσταμείωσης από τους χερσαίους ορεινούς ταμιευτήρες στον θαλάσσιο πυθμένα. Στην περίπτωση αυτή, ο άνω ταμιευτήρας αντιστοιχεί στο σύνολο της θαλάσσιας μάζας, ενώ ο κάτω ταμιευτήρας υλοποιείται ως κοίλη σφαιρική κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα, αγκυρωμένη στον πυθμένα (Σχήμα 3.5).

Η βασική ιδέα διατυπώθηκε αρχικά από τους Schmidt-Böcking και Luther και αναπτύχθηκε συστηματικά από το Fraunhofer IEE σε συνεργασία με τη Hochtief, με στόχο τη δημιουργία μιας μη χημικής, μεγάλης διάρκειας υποδομής αποθήκευσης, κατάλληλης για άμεση σύζευξη με υπεράκτια αιολικά πάρκα και λοιπές θαλάσσιες ΑΠΕ [33]–[41], [42]. Η φιλοσοφία του συστήματος βασίζεται στην αξιοποίηση της υδροστατικής πίεσης σε μεγάλα βάθη, χωρίς την ανάγκη κατασκευής επιφανειακών φραγμάτων ή εκτεταμένων χερσαίων έργων, γεγονός που καθιστά την τεχνολογία ιδιαίτερα ελκυστική σε περιοχές με κατάλληλα θαλάσσια βάθη [43], [35].



Σχήμα 3.5 Αναπαράσταση υποθαλάσσιας αντλιοσταμείωσης τύπου StEnSea [33]

3.1.7.2 Αρχή λειτουργίας και φυσική θεμελίωση

Η λειτουργία του StEnSea είναι ανάλογη με αντλιοσταμειωτικό σταθμό. Κατά τη φόρτιση, όταν υπάρχει πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια, αντλίες απομακρύνουν το νερό από το εσωτερικό της σφαίρας προς τη θάλασσα, μειώνοντας την εσωτερική στάθμη και αυξάνοντας τη διαφορά πίεσης μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού. Κατά την εκφόρτιση, επιτρέπεται ελεγχόμενη εισροή νερού από το εξωτερικό προς το εσωτερικό μέσω αντλιοστρόβιλου, με την υδροστατική πίεση να οδηγεί τη ροή και να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια [33],[41],[39]. Η θάλασσα λειτουργεί ως σταθερός άνω ταμειυτήρας υψηλής πίεσης και η σφαίρα ως κάτω ταμειυτήρας χαμηλής πίεσης. Ο όγκος της σφαίρας δίνεται από τη σχέση:

$$V_{sphere} = \frac{1}{6}\pi D^3 \quad (3.4)$$

Όπου D η διάμετρος της σφαίρας

Σε βάθος H η εξωτερική πίεση είναι περίπου ίση με $\rho g H$. Αρχικά, όταν η σφαίρα είναι σχεδόν άδεια, η διαφορά πίεσης μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού είναι μέγιστη. Καθώς η σφαίρα γεμίζει, η πίεση στο εσωτερικό αυξάνεται και η διαφορά πίεσης μειώνεται. Από την ολοκλήρωση της μεταβολής προκύπτει ότι η ιδανική αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση

$$E_{ideal} = 0.5\rho gHV \quad (3.5)$$

όπου ο ωφέλιμος όγκος της σφαίρας [33],[41]. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική απόδοση κύκλου (αντλία, στρόβιλος, ηλεκτρονικά ισχύος, διαρροές), η ρεαλιστική αποθηκευμένη ενέργεια εκτιμάται ως:

$$E = \eta 0.5\rho gHV \quad (3.6)$$

Η έκφραση αυτή δείχνει ότι η ενεργειακή πυκνότητα αυξάνεται γραμμικά με το βάθος και τον όγκο, οδηγώντας σε προτεινόμενα βάθη εγκατάστασης περίπου 600 έως 800 μέτρων ως τεχνικοοικονομικά βέλτιστα [43],[41],[35].

3.1.7.3 Κλίμακα και διαστασιολόγηση

Η πρώτη πιλοτική δοκιμή πραγματοποιήθηκε στη λίμνη Κωνσταντίας με σφαίρα διαμέτρου περίπου 3 m σε βάθος περίπου 100 m, επιβεβαιώνοντας ότι η θεμελιώδης αρχή λειτουργεί, ότι η σφαίρα αντέχει μηχανικά και ότι η λειτουργία είναι δυνατή χωρίς μόνιμη σύνδεση αέρα με την επιφάνεια [39],[42]. Στη συνέχεια, μέσω τεχνικών εκθέσεων και ανακοινώσεων, περιγράφεται η ανάπτυξη πρωτότυπου ενδιάμεσης κλίμακας με διάμετρο

περίπου 9 m, μάζα περίπου 400t, βάθη 500 έως 600 m και ονομαστικά μεγέθη 0,5 MW και 0,4 MWh, με στόχο δοκιμή σε πραγματικές θαλάσσιες συνθήκες [36],[37],[44].

Σε επίπεδο εμπορικής κλίμακας, τα σενάρια πλήρους μεγέθους για σφαίρα διαμέτρου περίπου 30 m, με ωφέλιμο εσωτερικό όγκο της τάξης των 12000 m³, σε βάθη περίπου 600 έως 800 m, δίνουν αποθηκευμένη ενέργεια περίπου 18 έως 20 MWh ανά σφαίρα, με ισχύ γύρω στα 5 MW και διάρκεια εκφόρτισης μερικών ωρών, για συνολική απόδοση κύκλου της τάξης του 75 έως 85 τοις εκατό [33],[37],[34],[35],[45]. Αντίστοιχες τεχνοοικονομικές μελέτες δείχνουν ότι ένα πάρκο πολλαπλών σφαιρών μπορεί να φτάσει συνολικές χωρητικότητες εκατοντάδων MWh, καθιστώντας την τεχνολογία συγκρίσιμη με έργα αντλησιοταμίευσης ή μεγάλης κλίμακας συστοιχίες μπαταριών από άποψη ενεργειακού μεγέθους [34],[35],[45].

3.1.7.4 Αρχιτεκτονική συστήματος και ρόλος του φορέα

Η αρχιτεκτονική StEnSea περιλαμβάνει ένα σφαιρικό κέλυφος από οπλισμένο σκυρόδεμα, αγκυρωμένο στον πυθμένα, στο οποίο ενσωματώνεται αφαιρούμενη τεχνική μονάδα με αντλιοστρόβιλο, γεννήτρια, βαλβίδες και συστήματα αυτοματισμού [33],[43],[41]. Το κέλυφος διαστασιολογείται ώστε να αντέχει εξωτερικές πιέσεις δεκάδων bar, με κατάλληλο πάχος και οπλισμό, εξασφαλίζοντας επάρκεια έναντι ρηγμάτωσης, διατμητικών τάσεων και φαινομένων κόπωσης, ενώ το ίδιο βάρος σε συνδυασμό με την αγκύρωση εξασφαλίζει ότι η σφαίρα δεν ανυψώνεται λόγω άντωσης [33],[41],[45]. Η τεχνική μονάδα σχεδιάζεται ως cartridge που μπορεί να ανασυρθεί για συντήρηση, μειώνοντας την ανάγκη σύνθετων υποβρύχιων εργασιών [36],[37]. Η ηλεκτρική διασύνδεση γίνεται μέσω υποβρύχιων καλωδίων προς χερσαίους ή υπεράκτιους υποσταθμούς, διευκολύνοντας άμεση σύζευξη με υπεράκτια αιολικά πάρκα [43],[34],[46]. Η συνολική λύση απαιτεί στενή συνέργεια υδραυλικής, στατικής ανάλυσης, θαλάσσιας τεχνολογίας και αξιοπιστίας ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων.

3.1.7.5 Απόδοση, λειτουργικά χαρακτηριστικά και σύγκριση

Οι στόχοι σχεδιασμού για σφαίρες διαμέτρου 30 m σε βάθη 600 έως 800 m τοποθετούν την απόδοση περίπου στο 75% έως 80%, ανάλογα με τις απώλειες άντλησης, τις υδραυλικές απώλειες και την απόδοση μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος [33],[37],[45]. Η τεχνολογία στοχεύει αποθήκευση της τάξης των 4 έως 8 ωρών ανά σφαίρα, κατάλληλη για εξομάλυνση παραγωγής υπεράκτιων αιολικών και μετατόπιση

φορτίου [34],[35]. Σε σύγκριση, η κλασική αντλησιοταμίευση σε ταμιευτήρες εμφανίζει τυπικό εύρος απόδοσης 70% έως 87% [38], οι μπαταρίες ιόντων λιθίου 77% έως 95% αλλά με χημική γήρανση και μικρότερη διάρκεια ζωής [47], ενώ τα συμβατικά CAES έχουν χαμηλότερες αποδόσεις, με τα προηγμένα A-CAES να στοχεύουν περίπου 60% έως 70% [40]. Έτσι, το StEnSea κατατάσσεται στην κατηγορία της μεγάλης διάρκειας αποθήκευσης με αποδόσεις συγκρίσιμες με αντλησιοταμίευση, χωρίς ανάγκη επιφανειακών δεξαμενών, αλλά με αυξημένες τεχνικές απαιτήσεις υποθαλάσσιων έργων [34],[35],[45],[40].

Η δυναμική απόκρισης εξαρτάται από τον έλεγχο της αναστρέψιμης μηχανής (αντλία/στρόβιλος) και των ηλεκτρονικών ισχύος και μπορεί να βρίσκεται σε κλίμακα δευτερολέπτων έως λίγων λεπτών, επαρκής για παροχή υπηρεσιών εξισορρόπησης και υποστήριξης συστήματος σε συνδυασμό με υπεράκτιες ΑΠΕ [45],[40]. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής του σκυροδέματος εκτιμάται σε 50 έως 60 έτη, ενώ οι ηλεκτρομηχανολογικές διατάξεις απαιτούν ανακαίνιση ή αντικατάσταση ανά περίπου 20 έτη [36],[45].

4 Εισαγωγή στην Έννοια της Θερμικής Αποθήκευσης Ενέργειας

Η θερμική αποθήκευση ενέργειας (TES: Thermal Energy Storage) ορίζεται ως το σύνολο των τεχνολογιών που επιτρέπουν την προσωρινή δέσμευση θερμικής ενέργειας με σκοπό τη μεταγενέστερη αξιοποίησή της, γεφυρώνοντας το χρονικό και ποσοτικό χάσμα μεταξύ προσφοράς και ζήτησης ενέργειας [33]. Στο πλαίσιο της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης, η TES αναδεικνύεται σε κρίσιμο πυλώνα του σύγχρονου ενεργειακού συστήματος, καθώς καθιστά εφικτή την αποδοτική ενσωμάτωση της διαλείπουσας παραγωγής από ΑΠΕ στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο [43].

Η δυνατότητα αποθήκευσης της πλεονάζουσας ενέργειας κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης και η απόδοσή της σε χρονικές στιγμές αιχμής συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της ευστάθειας του ηλεκτρικού δικτύου, στη μείωση των περικοπών παραγωγής και στην αύξηση της συνολικής ενεργειακής αποδοτικότητας [43]. Παράλληλα, η θερμική αποθήκευση επιτρέπει την αποσύνδεση της στιγμιαίας παραγωγής ενέργειας από την τελική της χρήση, γεγονός κρίσιμης σημασίας για υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

Η θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί μέσω τριών βασικών φυσικοχημικών μηχανισμών. Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας (Sensible Heat Storage) βασίζεται στην αύξηση της θερμοκρασίας ενός μέσου χωρίς μεταβολή της φάσης του, με χαρακτηριστικά παραδείγματα το νερό, την άμμο και τα τήγματα αλάτων [41]. Η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας (Latent Heat Storage) πραγματοποιείται μέσω υλικών αλλαγής φάσης (PCM: Phase Change Materials), προσφέροντας αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα σε περιορισμένο θερμοκρασιακό εύρος [39]. Τέλος, η θερμοχημική αποθήκευση βασίζεται σε αναστρέψιμες χημικές αντιδράσεις και παρουσιάζει τη μέγιστη θεωρητική ενεργειακή πυκνότητα, αν και βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο [36]. Η εφαρμογή συστημάτων θερμικής αποθήκευσης προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στο ενεργειακό σύστημα, ιδιαίτερα στον κτιριακό και βιομηχανικό τομέα, οι οποίοι ευθύνονται για το μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας τελικής ενεργειακής κατανάλωσης υπό μορφή θερμότητας [37]. Τεχνολογίες όπως η τηλεθέρμανση μεγάλης κλίμακας, η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από βιομηχανικές διεργασίες και η εποχιακή αποθήκευση θερμότητας αποτελούν βασικά εργαλεία επίτευξης των στόχων κλιματικής ουδετερότητας [34].

4.1.1 Θερμική μπαταρία άμμου

Η θερμική μπαταρία άμμου (Σχήμα 4.1) συνιστά τεχνολογία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας βασισμένη στην αποθήκευση αισθητής θερμότητας σε στερεά

κοκκώδη ανόργανα μέσα, εντασσόμενη στη γενικότερη κατηγορία των TES. Η λειτουργική της αρχή στηρίζεται στη μετατροπή πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας, κατά κύριο λόγο προερχόμενης από στοχαστικές ΑΠΕ, σε θερμότητα μέσω ηλεκτρικών θερμαντικών στοιχείων ή θερμού ρευστού, και στη μεταφορά αυτής της θερμότητας σε μάζα άμμου μέσω κυκλοφορίας θερμού αέρα. Η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται ως αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του στερεού υλικού χωρίς μεταβολές φάσης ή χημικές αντιδράσεις. Τα εμπορικά συστήματα λειτουργούν συνήθως σε θερμοκρασίες της τάξης των 500-600 °C, ενώ κατά την εκφόρτιση επιτρέπουν ρυθμιζόμενη παροχή θερμότητας σε ευρύ θερμοκρασιακό εύρος, από επίπεδα τηλεθέρμανσης έως θερμοκρασίες κατάλληλες για βιομηχανικές διεργασίες.

4.1.2 Λόγοι χρήσης της άμμου ως μέσου αποθήκευσης

Η άμμος αποτελεί υλικό εξαιρετικά χαμηλού κόστους, παγκοσμίως διαθέσιμο και μη τοξικό, χωρίς ουσιώδεις περιβαλλοντικούς κινδύνους. Η σύστασή της βασίζεται κυρίως σε διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), καθώς και σε άλλα αδρανή ορυκτά υλικά, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή θερμική σταθερότητα και μακροχρόνια αντοχή σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες, εξασφαλίζουν μακροχρόνια λειτουργική αξιοπιστία με ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης και αναμενόμενη διάρκεια ζωής που υπερβαίνει τα 30 έτη [33], [37], [34]. Σε αντίθεση με τα τηγμένα άλατα που χρησιμοποιούνται σε ορισμένα ηλιοθερμικά συστήματα, η άμμος δεν εμφανίζει προβλήματα στερεοποίησης ούτε απαιτεί ενεργειακή δαπάνη για διατήρηση ελάχιστης θερμοκρασίας λειτουργίας. Η δυνατότητα λειτουργίας σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες αυξάνει τη διαφορά θερμοκρασίας λειτουργίας και συνεπώς τη δυνητική ενεργειακή πυκνότητα της αποθήκης.

Από πλευράς θερμικής συμπεριφοράς, η σχετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα της άμμου και ο εγκλωβισμένος αέρας μεταξύ των κόκκων δημιουργούν ένα είδος ενδογενούς θερμομόνωσης, περιορίζοντας τη διάχυση θερμότητας προς τα τοιχώματα της δεξαμενής. Το φαινόμενο αυτό, σε συνδυασμό με τη μείωση του λόγου επιφάνειας προς όγκο σε μεγάλες εγκαταστάσεις, οδηγεί σε χαμηλές σχετικές απώλειες και σε αυξημένη αποδοτικότητα διατήρησης θερμότητας. Πρακτικά, σε καλά μονωμένα συστήματα, οι απώλειες κατά την αποθήκευση μπορούν να παραμείνουν κάτω από 5% για χρονικά διαστήματα εβδομάδων, ενώ οι βοηθητικές καταναλώσεις ανεμιστήρων και συστημάτων κυκλοφορίας οδηγούν σε συνολικό βαθμό απόδοσης κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης της τάξης του 90%–95% για κύκλους ημερών. Πιλοτικές εγκαταστάσεις μικρότερης κλίμακας έχουν εμφανίσει χαμηλότερες αποδόσεις, γεγονός που αποδίδεται στις δυσμενέστερες

αναλογίες επιφάνειας προς όγκο και όχι σε εγγενείς περιορισμούς της τεχνολογίας.

Ωστόσο, η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες συνεπάγεται αυξημένες θερμικές απώλειες σε πολύ μεγάλες περιόδους αποθήκευσης, γεγονός που καθιστά την τεχνολογία καταλληλότερη για αποθήκευση μεσοπρόθεσμης διάρκειας (ώρες έως εβδομάδες) παρά για αυστηρά εποχιακή αποθήκευση πολλών μηνών. Σε αυτό το χρονικό εύρος, οι θερμικές μπαταρίες άμμου μπορούν να λειτουργήσουν ως αποτελεσματικοί εξομαλυντές της στοχαστικότητας των ΑΠΕ, καλύπτοντας περιόδους μειωμένης παραγωγής και τροφοδοτώντας δίκτυα τηλεθέρμανσης ή βιομηχανικές διεργασίες.

Η μετατροπή της αποθηκευμένης θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τεχνικά εφικτή μέσω θερμοδυναμικών κύκλων Rankine ή Brayton, αλλά συνεπάγεται σημαντικές απώλειες και αυξημένη επενδυτική πολυπλοκότητα. Για τον λόγο αυτό, η άμεση αξιοποίηση της θερμότητας αποτελεί σήμερα τη βέλτιστη ενεργειακά λύση. Σε εφαρμογές συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, η συνολική αξιοποίηση της ενέργειας μπορεί να προσεγγίσει το 90% , όπως αναφέρεται σε εμπορικές εφαρμογές της Polar Night Energy [43], [39], ενώ για μετατροπή Power-to-Heat-to-Power η καθαρή ηλεκτρική απόδοση περιορίζεται περίπου στο 30-40%. [33], [43],[36],[37],[34]. Παράλληλα, το κόστος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας παραμένει εξαιρετικά χαμηλό, καθώς με την επίτευξη οικονομιών κλίμακας εκτιμάται ότι μπορεί να περιοριστεί στην περιοχή των 4-10 USD/kWh_{th}, τιμή σημαντικά χαμηλότερη από τις περισσότερες τεχνολογίες αποθήκευσης μεγάλης διάρκειας [36], [37].



Σχήμα 4.1 Απεικόνιση Θερμικής Μπαταρίας Άμμου [115]

4.1.3 Απόδοση, θερμικές απώλειες και λειτουργική αξιολόγηση συστημάτων μπαταρίας άμμου

Παρότι η αποθήκευση θερμότητας σε στερεά υλικά έχει μελετηθεί θεωρητικά επί δεκαετίες, η πρακτική εφαρμογή θερμικών μπαταριών άμμου σε πραγματικές ενεργειακές υποδομές ξεκίνησε μόλις τα τελευταία χρόνια. Η πρώτη εμπορική εγκατάσταση υλοποιήθηκε το 2022 από τη φινλανδική εταιρεία Polar Night Energy στο δίκτυο τηλεθέρμανσης της πόλης Kankaanpää. Το σύστημα, με θερμική ισχύ περίπου 200 kW και αποθηκευτική ικανότητα 8 MWh, βασίζεται σε κυλινδρικό σιλό που περιέχει άμμο και λειτουργεί σε συνεχή σύνδεση με το δίκτυο τηλεθέρμανσης. Ιδιαίτερη σημασία έχει η αξιοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας από κέντρο δεδομένων, η οποία αναβαθμίζεται θερμοκρασιακά ώστε να καταστεί κατάλληλη για διανομή, επιτρέποντας παράλληλα την απορρόφηση φθηνής ή πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Το Σχήμα 4.2 δείχνει μια εναέρια λήψη εγκατάστασης Sand Battery ισχύος 1 MW/100 MWh στο Pornainen της Φινλανδίας, η οποία αποθηκεύει θερμική ενέργεια σε 2.000 τόνους θρυμματισμένου σαπουνόλιθου (υποπροϊόν βιομηχανίας τζακιών). Η μονωμένη δεξαμενή (κυλινδρική κατασκευή στο κέντρο) έχει διάμετρο 15 m και ύψος 13 m. Η ενέργεια φορτίζεται από πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια και αποθηκεύεται ως θερμότητα 500 °C, επαρκής για να καλύψει σχεδόν έναν μήνα θέρμανσης το καλοκαίρι (χαμηλή ζήτηση) ή περίπου μία εβδομάδα τον χειμώνα στο τοπικό δίκτυο τηλεθέρμανσης [4,13].

Όσον αφορά την μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια, αυτή είναι τεχνικά εφικτή αλλά επιφέρει επιπλέον απώλειες λόγω του περιορισμένου βαθμού απόδοσης των θερμοδυναμικών κύκλων (Rankine, Brayton κ.ά.) και απαιτεί πρόσθετες επενδύσεις σε στροβίλους και γεννήτριες [5,6]. Σήμερα, οι μπαταρίες άμμου αξιοποιούνται κυρίως για άμεση παροχή θερμότητας, ώστε να αποφεύγονται τα στάδια μετατροπής και να μεγιστοποιείται η συνολική αποδοτικότητα [1]-[3].



Σχήμα 4.2 Αριστερά: Εναέρια λήψη εγκατάστασης Sand Battery ισχύος 1 MW στο Pornainen της Φινλανδίας, Δεξιά: περίβλημα πολλαπλών στρωμάτων μονωτικών υλικών γύρω από το σιλό για βέλτιστη μόνωση [116].

Τηλεθέρμανση και θέρμανση κτιρίων

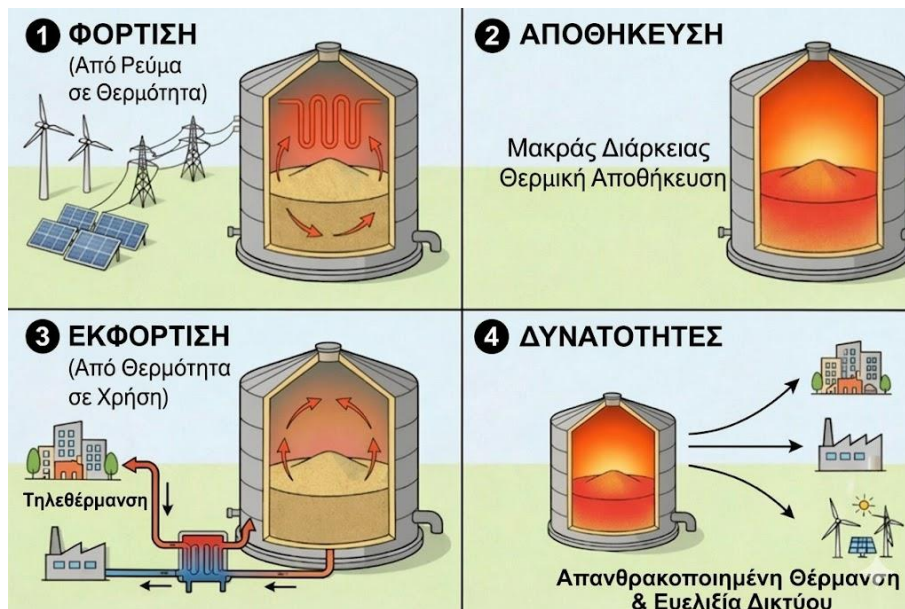
Η πλέον ώριμη και τεχνολογικά καθιερωμένη εφαρμογή των θερμικών μπαταριών άμμου αφορά την τροφοδότηση δικτύων τηλεθέρμανσης και συστημάτων κεντρικής θέρμανσης κτιρίων. Ιδίως στις χώρες της Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης, όπου οι θερμικές ανάγκες είναι αυξημένες για μεγάλο μέρος του έτους, η τεχνολογία προσφέρει ουσιαστική δυνατότητα απεξάρτησης από λέβητες πετρελαίου και φυσικού αερίου, αντικαθιστώντας τους με θερμότητα παραγόμενη από ηλεκτρική ενέργεια ανανεώσιμης προέλευσης [41], [39], [42].

Το Σχήμα 4.3 δείχνει τα στάδια λειτουργίας μιας θερμικής μπαταρίας άμμου, την πορεία και μετατροπή της ενέργειας από τη μια μορφή στην άλλη. Τα στάδια είναι: (1) φόρτιση μέσω μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα (Power-to-Heat), (2) αποθήκευση θερμότητας μεγάλης διάρκειας, (3) εκφόρτιση και παροχή θερμότητας προς τελική χρήση και (4) εφαρμογές σε τηλεθέρμανση, βιομηχανική θερμότητα και ευελιξία δικτύου.

Η δυνατότητα φόρτισης των συστημάτων κατά περιόδους χαμηλών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και εκφόρτισής τους σε χρονικά μεταγενέστερο στάδιο επιτρέπει την κάλυψη θερμικών φορτίων ακόμη και κατά τους χειμερινούς μήνες μειωμένης ηλιοφάνειας ή παρατεταμένων περιόδων άπνοιας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στη θέρμανση, χωρίς να απαιτείται υπερδιαστασιολόγηση των ηλεκτρικών δικτύων.

Μέσω της θερμικής αναβάθμισης (temperature upgrading), η χαμηλής ποιότητας

θερμότητα δύναται να μετατραπεί σε χρήσιμο ενεργειακό προϊόν κατάλληλο για δίκτυα τηλεθέρμανσης [41]. Για τους δήμους και τους φορείς διαχείρισης τηλεθέρμανσης, η προσέγγιση αυτή συνεπάγεται μείωση λειτουργικού κόστους, σταθεροποίηση των τιμολογίων και περιορισμό της έκθεσης σε διακυμάνσεις των διεθνών τιμών καυσίμων [39].



Σχήμα 4.3 Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας θερμικής μπαταρίας άμμου με χρήση τεχνητής νοημοσύνης μετά από καθοδήγηση

4.2 Συστήματα Θερμικής Αποθήκευσης Υψηλής Θερμοκρασίας με Τήγματα Αλάτων

4.2.1 Θεωρητική θεμελίωση και αρχή λειτουργίας

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη χρήση τηγμένων αλάτων αποτελεί μία από τις πλέον ώριμες και τεχνολογικά καθιερωμένες λύσεις μεγάλης κλίμακας στον τομέα των συστημάτων Thermal Energy Storage (TES). Η τεχνολογία αυτή έχει αναπτυχθεί και βελτιστοποιηθεί κυρίως στο πλαίσιο των σταθμών Συγκεντρωτικής Ηλιακής Ισχύος (CSP: Concentrated Solar Power), όπου η δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας επιτρέπει την αποσύνδεση της στιγμιαίας ηλιακής ακτινοβολίας από την ηλεκτροπαραγωγή, εξασφαλίζοντας συνεχή και ελεγχόμενη παροχή ισχύος ακόμη και μετά τη δύση του ηλίου [48], [49].

Σε αντίθεση με απλούστερα συστήματα αποθήκευσης σε στερεά μέσα, τα τήγματα αλάτων λειτουργούν ως υγρά θερμικά ρευστά, επιτρέποντας την ενεργό μεταφορά θερμότητας και τη σύζευξη με θερμοδυναμικούς κύκλους παραγωγής ηλεκτρικής

ενέργειας. Το χαρακτηριστικό αυτό τα καθιστά ιδιαίτεως κατάλληλα για εφαρμογές όπου η μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρισμό αποτελεί πρωταρχικό στόχο, διαφοροποιώντας τα ουσιαστικά από τεχνολογίες όπως οι μπαταρίες άμμου, οι οποίες στοχεύουν κυρίως στην άμεση θερμική χρήση [50].

4.2.2 Θερμοφυσικές ιδιότητες και χρησιμοποιούμενα άλατα

Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο μέσο αποθήκευσης είναι το αποκαλούμενο «ηλιακό άλας» (solar salt), ένα δυαδικό μίγμα νιτρικού νατρίου (NaNO_3) και νιτρικού καλίου (KNO_3), συνήθως σε αναλογία 60:40 κατά βάρος. Το μίγμα αυτό παρουσιάζει θερμοκρασία τήξης περίπου 220–240 °C και σταθερή λειτουργία σε θερμοκρασιακό εύρος 290-560°C, συνδυάζοντας υψηλή ειδική θερμότητα, χαμηλή τάση ατμών και ικανοποιητική χημική σταθερότητα σε επαναλαμβανόμενους θερμικούς κύκλους [51], [52].

Η αποθηκευόμενη ενέργεια προσδιορίζεται μέσω του μηχανισμού της αισθητής θερμότητας, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q=m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

όπου m είναι η μάζα του άλατος, c_p η ειδική θερμότητα και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ κατάστασης φόρτισης και εκφόρτισης. Η δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλό θερμοκρασιακό εύρος επιτρέπει την επίτευξη υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, στοιχείο κρίσιμο για εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας [49], [53].

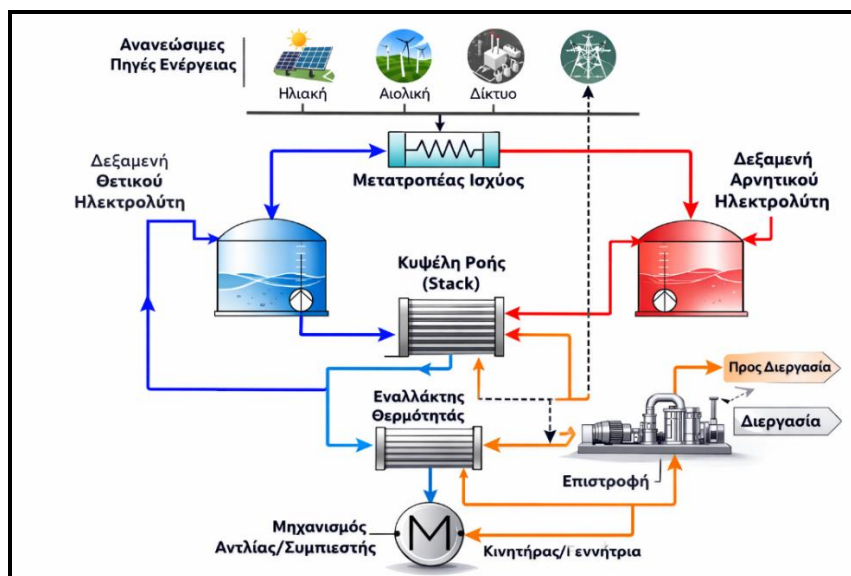
4.2.3 Τεχνολογική διάταξη δύο δεξαμενών

Η επικρατούσα βιομηχανική αρχιτεκτονική είναι το σύστημα δύο δεξαμενών (Two-tank molten salt storage). Στη διάταξη αυτή (Σχήμα 4.4) διαχωρίζεται πλήρως το θερμό και το ψυχρό άλας, επιτρέποντας σταθερή παροχή θερμικής ισχύος ανεξάρτητα από το ποσοστό φόρτισης της αποθήκης [48].

Κατά τη φάση φόρτισης, το άλας αντλείται από τη δεξαμενή ψυχρού μέσου και θερμαίνεται είτε μέσω ηλιακού συλλέκτη είτε μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Στη συνέχεια αποθηκεύεται στη θερμή δεξαμενή, η οποία διαθέτει εκτεταμένα συστήματα θερμομόνωσης για τον περιορισμό των θερμικών απωλειών. Κατά την εκφόρτιση, το θερμό άλας διέρχεται από εναλλάκτη θερμότητας, αποδίδοντας την ενέργεια σε κύκλωμα νερού-ατμού, πριν επιστρέψει στη δεξαμενή ψυχρού άλατος και ολοκληρώσει τον κύκλο [51], [54].

Η διάταξη αυτή προσφέρει υψηλή λειτουργική αξιοπιστία, σταθερή παροχή ισχύος

και ανεξαρτησία μεταξύ της ισχύος του συστήματος και της αποθηκευτικής του χωρητικότητας, επιτρέποντας ευέλικτη κλιμάκωση έως επίπεδα GWh [48].



Σχήμα 4.4 Διάταξη κύκλου με σύστημα θερμικής αποθήκευσης με τήγματα αλάτων δύο δεξαμενών (Two-tank molten salt TES) [108].

4.2.4 Περιορισμοί και τεχνολογικές προκλήσεις

Παρά τα πλεονεκτήματα, τα τήγματα αλάτων συνοδεύονται από σημαντικές τεχνικές προκλήσεις. Η υψηλή θερμοκρασία πήξης επιβάλλει τη συνεχή διατήρηση του συστήματος άνω των 220 °C, απαιτώντας βοηθητικά συστήματα θέρμανσης και αυξάνοντας την πολυπλοκότητα της λειτουργίας [51]. Επιπλέον, η αυξημένη διαβρωτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες καθιστά αναγκαία τη χρήση εξειδικευμένων κραμάτων και επιστρώσεων, επηρεάζοντας το συνολικό κόστος επένδυσης [55].

4.2.5 Πεδία Εφαρμογής και Ιδανικές Χρήσεις

Τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης με τη χρήση τηγμένων αλάτων εντάσσονται πρωτίστως σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπου απαιτείται υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας και δυνατότητα παροχής ισχύος σε συνεχή ή ελεγχόμενη βάση. Ο κυριότερος και πλέον ώριμος τομέας εφαρμογής τους είναι οι σταθμοί συγκεντρωτικής ηλιακής ισχύος (CSP), στους οποίους η θερμική αποθήκευση αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο του συνολικού ενεργειακού σχεδιασμού [48], [49].

Στους ηλιοθερμικούς πύργους και στα παραβολικά συστήματα, τα τηγμένα άλατα

λειτουργούν τόσο ως μέσο μεταφοράς όσο και ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας, επιτρέποντας τη χρονική αποσύζευξη της συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό, οι μονάδες CSP αποκτούν τη δυνατότητα λειτουργίας μετά τη δύση του ηλίου ή κατά τη διάρκεια περιόδων μειωμένης ηλιοφάνειας, μετατρέπόμενες ουσιαστικά από διαλείπουσες μονάδες σε μονάδες βάσης με προβλέψιμη ισχύ εξόδου [50]. Η δυνατότητα λειτουργίας σε θερμοκρασίες της τάξης των 500-600°C επιτρέπει την τροφοδοσία συμβατικών αμμοστρόβιλων με υψηλό θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης, καθιστώντας την τεχνολογία ιδιαίτερα ανταγωνιστική σε επίπεδο ηλεκτροπαραγωγής μεγάλης κλίμακας [51].

Πέραν της ηλιακής ηλεκτροπαραγωγής, τα συστήματα με τήγματα αλάτων παρουσιάζουν σημαντικό δυναμικό στον τομέα της βαριάς βιομηχανίας, όπου μεγάλο ποσοστό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης αφορά θερμότητα διεργασίας υψηλής και μεσαίας θερμοκρασίας. Βιομηχανικοί κλάδοι όπως τα δυλιστήρια, η χημική βιομηχανία, η παραγωγή λιπασμάτων και η μεταλλουργία απαιτούν συνεχή παροχή ατμού υψηλής πίεσης και θερμικής ενέργειας με αυστηρές απαιτήσεις σταθερότητας. Στα περιβάλλοντα αυτά, η αποθήκευση σε τηγμένα άλατα μπορεί να λειτουργήσει ως ενδιάμεσος θερμικός ταμιευτήρας, απορροφώντας μεταβολές στη ζήτηση και επιτρέποντας τη σταθεροποίηση της λειτουργίας των διεργασιών [52]-[54].

Η τεχνολογία αυτή εμφανίζει ιδιαίτερο πλεονέκτημα σε σύγκριση με τις ηλεκτροχημικές μπαταρίες όσον αφορά το κόστος αποθήκευσης μεγάλης διάρκειας, καθώς η αύξηση της ενεργειακής χωρητικότητας επιτυγχάνεται κυρίως με την προσθήκη επιπλέον μέσου αποθήκευσης και όχι με την αναλογική αύξηση πολύπλοκων ηλεκτροχημικών συστημάτων [49], [56]. Για τον λόγο αυτό, τα τήγματα αλάτων θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές κλίμακας εκατοντάδων MWh έως και GWh, όπου η διάρκεια αποθήκευσης εκτείνεται από αρκετές ώρες έως και ημέρες.

4.3 Συστήματα Θερμικής Αποθήκευσης σε Δεξαμενές Νερού

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε δεξαμενές νερού αποτελεί την πλέον ώριμη, τεχνολογικά αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική μορφή αποθήκευσης αισθητής θερμότητας (Sensible Heat Storage). Η ευρεία διάδοσή της οφείλεται στις εξαιρετικές θερμοφυσικές ιδιότητες του νερού, στη χαμηλή πολυπλοκότητα των απαιτούμενων εγκαταστάσεων και στη δυνατότητα άμεσης ενσωμάτωσης στα υφιστάμενα συστήματα θέρμανσης, ψύξης και τηλεθέρμανσης [57], [58].

Το νερό χαρακτηρίζεται από υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα, χαμηλό κόστος, μη τοξικότητα και απόλυτη περιβαλλοντική ασφάλεια. Επιπλέον, σε αντίθεση με άλλα αποθηκευτικά μέσα, μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα ως φορέας μεταφοράς και ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά τον μηχανολογικό σχεδιασμό και μειώνει τις θερμικές αντιστάσεις του συστήματος [53]. Για τους λόγους αυτούς, οι δεξαμενές νερού αποτελούν τη βασική τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης σε κτιριακές εφαρμογές, δίκτυα τηλεθέρμανσης και συστήματα εποχιακής αποθήκευσης ενέργειας.

4.3.1 Αρχή λειτουργίας και θερμική στρωμάτωση

Η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης σε δεξαμενές νερού βασίζεται στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας του υγρού μέσου. Κατά τη φάση φόρτισης, θερμότητα προερχόμενη από ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες, αντλίες θερμότητας, λέβητες, μονάδες συμπαραγωγής ή πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ μεταφέρεται στο νερό της δεξαμενής. Στα συστήματα ατμοσφαιρικής πίεσης, η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 40°C και 95°C, ώστε να αποφεύγεται ο βρασμός [59].

Κρίσιμο φαινόμενο για την αποδοτική λειτουργία των δεξαμενών αποτελεί η θερμική στρωμάτωση (thermal stratification). Λόγω της εξάρτησης της πυκνότητας του νερού από τη θερμοκρασία, το θερμότερο και ελαφρύτερο νερό τείνει να ανέρχεται στο ανώτερο τμήμα της δεξαμενής, ενώ το ψυχρότερο και πυκνότερο παραμένει στη βάση. Ο φυσικός αυτός διαχωρισμός δημιουργεί θερμικά στρώματα διαφορετικής ποιότητας ενέργειας, επιτρέποντας την άμεση άντληση υψηλής θερμοκρασίας ακόμη και όταν η δεξαμενή δεν βρίσκεται σε πλήρη φόρτιση [57].

Η διατήρηση της στρωμάτωσης αποτελεί βασικό σχεδιαστικό στόχο. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται ειδικές διατάξεις εισόδου και εξόδου (diffusers), οι οποίες μειώνουν την ταχύτητα ροής και περιορίζουν την τυρβώδη ανάμιξη των θερμικών στρωμάτων. Η ποιότητα της στρωμάτωσης επηρεάζει άμεσα τη διαθέσιμη θερμοκρασία εξόδου και, κατ' επέκταση, τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος [60].

4.3.2 Τεχνολογικές διατάξεις και κλιμάκωση συστημάτων

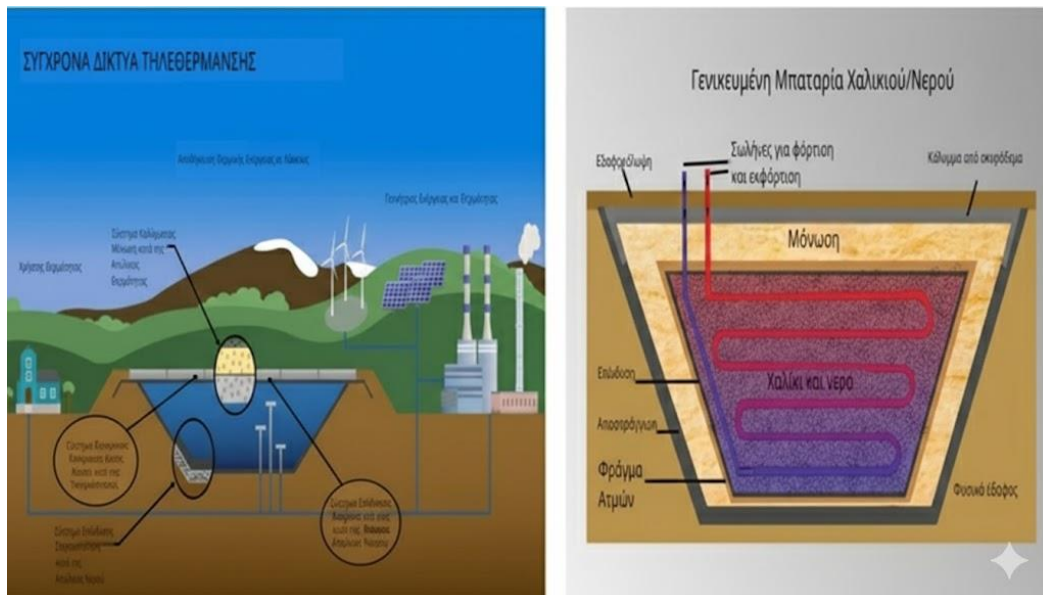
Η τεχνολογία των δεξαμενών νερού παρουσιάζει εξαιρετική ευελιξία κλίμακας, καλύπτοντας εφαρμογές από μερικές εκατοντάδες λίτρα έως εγκαταστάσεις όγκου

εκατοντάδων χιλιάδων κυβικών μέτρων. Στις μικρές και μεσαίες κλίμακες, οι δεξαμενές ενσωματώνονται σε κτιριακά συστήματα θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης, λειτουργώντας ως θερμικοί συσσωρευτές εξομάλυνσης φορτίου.

Σε μεγαλύτερη κλίμακα, συναντώνται υπέργειες χαλύβδινες δεξαμενές, κυλινδρικής μορφής, με ισχυρή θερμομόνωση, οι οποίες χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε δίκτυα τηλεθέρμανσης. Το μεγάλο ύψος τους ευνοεί την ανάπτυξη έντονης θερμικής στρωμάτωσης, ενώ η κατασκευή τους επιτρέπει υψηλή αξιοπιστία και διάρκεια ζωής που υπερβαίνει συχνά τα 30–40 έτη [54].

Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν οι αποθήκες τύπου PIT (PTES: Pit Thermal Energy Storage), οι οποίες προορίζονται για εποχιακή αποθήκευση θερμότητας (Σχήμα 4.5). Πρόκειται για μεγάλες υπόγειες δεξαμενές, διαμορφωμένες μέσω εκσκαφής, επενδεδυμένες με στεγανωτικές μεμβράνες και καλυμμένες με πλωτή θερμομόνωση. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως στη Βόρεια Ευρώπη, όπου επιτρέπουν την αποθήκευση θερινής ηλιακής θερμότητας και την αξιοποίησή της κατά τη χειμερινή περίοδο [58], [61].

Σε ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές εφαρμόζονται δεξαμενές υπό πίεση, ώστε το νερό να παραμένει σε υγρή φάση σε θερμοκρασίες άνω των 100 °C. Η λύση αυτή αυξάνει την ενεργειακή πυκνότητα του συστήματος, συνοδεύεται όμως από υψηλότερο κόστος κατασκευής και αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας [53].



Σχήμα 4.5 Αριστερά: Σχηματική απεικόνιση συστήματος εποχιακής θερμικής αποθήκευσης σε υπόγεια δεξαμενή τύπου Pit Thermal Energy Storage (PTES) και Δεξιά: Γενικευμένη διάταξη αποθήκευσης σε μίγμα χαλικιού–νερού (gravel/water thermal battery) [109].

4.3.3 Πλεονεκτήματα και τεχνικοί περιορισμοί

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της αποθήκευσης σε νερό είναι η υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα, η οποία υπερβαίνει εκείνη των περισσότερων κοινών υλικών. Σε συνδυασμό με τη χαμηλή θερμική αντίσταση και την άμεση μεταφορά θερμότητας, τα συστήματα παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλό βαθμό απόδοσης στον κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης, ο οποίος συχνά υπερβαίνει το 90% [57].

Το νερό είναι άφθονο, μη εύφλεκτο, πλήρως ανακυκλώσιμο και απολύτως ασφαλές από περιβαλλοντική άποψη. Η τεχνολογία χαρακτηρίζεται από χαμηλό επενδυτικό κόστος ανά kWh αποθηκευμένης θερμότητας και από μεγάλη διάρκεια ζωής, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές μεγάλης διάρκειας.

Ωστόσο, ο βασικός περιορισμός της τεχνολογίας αφορά το σχετικά στενό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας. Η αποθήκευση περιορίζεται πρακτικά κάτω από τους 100 °C σε συστήματα ατμοσφαιρικής πίεσης, γεγονός που καθιστά τις δεξαμενές νερού ακατάλληλες για διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας ή για αποδοτική μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια [62].

Επιπλέον, ζητήματα διάβρωσης των μεταλλικών επιφανειών, θερμικών απωλειών από μεγάλης επιφάνειας δεξαμενές και αυξημένων απαιτήσεων θεμελίωσης σε πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις αποτελούν σημαντικές παραμέτρους σχεδιασμού που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη [59].

4.3.4 Πεδία εφαρμογής και ενεργειακός ρόλος

Οι δεξαμενές θερμικής αποθήκευσης νερού χρησιμοποιούνται σε όλα τα επίπεδα του ενεργειακού συστήματος. Στον οικιακό τομέα αποτελούν βασικό στοιχείο των συστημάτων Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX) και της λειτουργίας αντλιών θερμότητας, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε αστική και περιφερειακή κλίμακα, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στα δίκτυα τηλεθέρμανσης, επιτρέποντας την αποσύζευξη της παραγωγής θερμότητας από τη ζήτηση και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP) [58]. Παράλληλα, επιτρέπουν τη μέγιστη αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών και απορριπτόμενης θερμότητας από βιομηχανίες και κέντρα δεδομένων.

Στον τριτογενή τομέα και στα μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα, οι δεξαμενές νερού χρησιμοποιούνται ευρέως για μετατόπιση φορτίου (load shifting), αποθηκεύοντας ενέργεια σε ώρες χαμηλού κόστους και αποδίδοντάς την σε ώρες αιχμής. Με τον τρόπο αυτό,

συμβάλλουν ουσιαστικά στη μείωση του ενεργειακού κόστους και του ανθρακικού αποτυπώματος των κτιρίων, ενισχύοντας τη μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο αστικό ενεργειακό σύστημα.

4.4 Ενσωμάτωση Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM) σε Κτιριακά Κελύφη

4.4.1 Εισαγωγή και ερευνητικό πλαίσιο

Ο κτιριακός τομέας συγκαταλέγεται μεταξύ των πλέον ενεργοβόρων τομέων της παγκόσμιας οικονομίας, ευθυνόμενος για περίπου το 40% της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας και για σημαντικό ποσοστό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [63]. Το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης αυτής σχετίζεται άμεσα με τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων, οι οποίες καλύπτονται κατά κύριο λόγο μέσω συστημάτων HVAC⁴ υψηλής ενεργειακής έντασης. Η αυξανόμενη συχνότητα ακραίων θερμοκρασιών, ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής, εντείνει περαιτέρω τη ζήτηση ψύξης, οδηγώντας σε έναν φαύλο κύκλο αυξανόμενης ενεργειακής κατανάλωσης και περιβαλλοντικής επιβάρυνσης [64].

Στο πλαίσιο αυτό, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας (TES: Thermal Energy Storage) αναδεικνύεται σε βασικό εργαλείο εξομάλυνσης της θερμικής ζήτησης και ενίσχυσης της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων. Η κλασική προσέγγιση βασίζεται στην αποθήκευση αισθητής θερμότητας (SHS: Sensible Heat Storage), μέσω υλικών υψηλής θερμικής μάζας, όπως το σκυρόδεμα και η λιθοδομή. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή απαιτεί μεγάλους όγκους υλικών και συνοδεύεται από σημαντικές μεταβολές θερμοκρασίας, περιορίζοντας τη λειτουργική και αρχιτεκτονική ευελιξία των κατασκευών [65].

Η ανάγκη για αποδοτικότερες και θερμοκρασιακά ελεγχόμενες λύσεις οδήγησε στην ανάπτυξη των Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCMs: Phase Change Materials), τα οποία επιτρέπουν την αποθήκευση θερμότητας υπό μορφή λανθάνουσας ενέργειας. Η δυνατότητα απορρόφησης και απελευθέρωσης μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία καθιστά τα PCMs ιδιαιτέρως κατάλληλα για παθητικές εφαρμογές θερμικής ρύθμισης στο κτιριακό κέλυφος [66].

⁴ Heat Ventilation and Air Conditioning (Συστήματα Θέρμανσης, Αερισμού και Κλιματισμού)

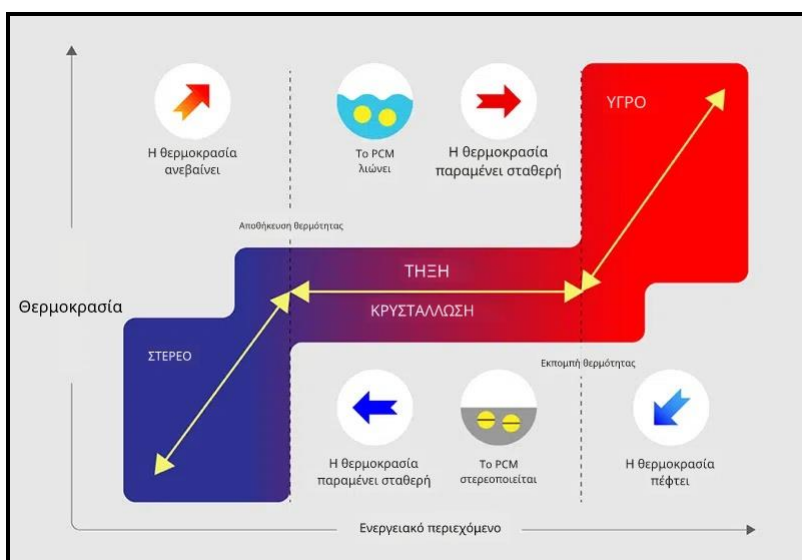
4.4.2 Αρχή λειτουργίας Υλικών Αλλαγής Φάσης (Phase Change Materials – PCM)

Η λειτουργία των Υλικών Αλλαγής Φάσης βασίζεται στον μηχανισμό της λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας, κατά τον οποίο σημαντικά ποσά θερμικής ενέργειας αποθηκεύονται ή αποδίδονται κατά τη μετάβαση του υλικού από τη στερεά στην υγρή φάση και αντιστρόφως, χωρίς ουσιαστική μεταβολή της θερμοκρασίας του συστήματος. Η συμπεριφορά αυτή διαφοροποιεί θεμελιωδώς τα PCM από τα συμβατικά υλικά αισθητής θερμότητας, στα οποία η αποθήκευση ενέργειας συνοδεύεται πάντοτε από συνεχή αύξηση της θερμοκρασίας.

Όπως απεικονίζεται στο *Σχήμα 4.6*, η θερμική απόκριση ενός PCM μπορεί να αναλυθεί μέσω του διαγράμματος θερμοκρασίας–ενεργειακού περιεχομένου (T–H). Στο αρχικό στάδιο, το υλικό βρίσκεται στη στερεά κατάσταση και η προσδιδόμενη θερμότητα οδηγεί σε γραμμική αύξηση της θερμοκρασίας, σύμφωνα με τη σχέση της αισθητής θερμότητας. Στο τμήμα αυτό, η κλίση της καμπύλης καθορίζεται από την ειδική θερμοχωρητικότητα του στερεού PCM. Όταν η θερμοκρασία προσεγγίσει το χαρακτηριστικό σημείο τήξης του υλικού, ξεκινά η φάση αλλαγής κατάστασης. Στο μεταβατικό αυτό στάδιο, η θερμοκρασία παραμένει σχεδόν σταθερή, παρά τη συνεχή εισροή θερμότητας. Η προσδιδόμενη ενέργεια δεν αξιοποιείται πλέον για την αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά για τη διάσπαση των μοριακών δεσμών και την αλλαγή της μικροδομής του υλικού από κρυσταλλική σε υγρή. Η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται ως λανθάνουσα θερμότητα τήξης, η οποία αποτελεί και το κύριο πλεονέκτημα των PCM, καθώς επιτρέπει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε στενό θερμοκρασιακό εύρος. Με την ολοκλήρωση της τήξης, το υλικό βρίσκεται πλέον σε υγρή φάση και οποιαδήποτε επιπλέον παροχή θερμότητας οδηγεί ξανά σε αύξηση της θερμοκρασίας, σύμφωνα με τη θερμοχωρητικότητα του υγρού PCM. Η περιοχή αυτή αντιστοιχεί και πάλι σε αποθήκευση αισθητής θερμότητας, αλλά με μικρότερη ενεργειακή αποδοτικότητα συγκριτικά με τη λανθάνουσα φάση.

Κατά την αντίστροφη διεργασία, δηλαδή την εκφόρτιση του συστήματος, η μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί αρχικά ψύξη του υγρού PCM έως το σημείο κρυστάλλωσης. Στο στάδιο αυτό, η θερμοκρασία παραμένει εκ νέου σχεδόν σταθερή, ενώ το υλικό στερεοποιείται αποδίδοντας στο περιβάλλον την αποθηκευμένη λανθάνουσα θερμότητα. Η εκλυόμενη ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για τη διατήρηση της θερμικής άνεσης σε κτιριακούς χώρους ή για την εξομάλυνση θερμικών αιχμών, γεγονός που καθιστά τα PCM ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε παθητικά και υβριδικά ενεργειακά συστήματα.

Η σχεδόν ισόθερμη συμπεριφορά κατά την τήξη και την κρυστάλλωση αποτελεί το κρίσιμο πλεονέκτημα των PCM, καθώς επιτρέπει τη θερμική ρύθμιση χώρων χωρίς απότομες διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Για τον λόγο αυτό, τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται ευρέως σε κτιριακά κελύφη, δάπεδα, οροφές και συστήματα σκίασης, λειτουργώντας ως θερμικοί ρυθμιστές που απορροφούν την πλεονάζουσα θερμότητα κατά τις ώρες αιχμής και την αποδίδουν όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μειώνεται.



Σχήμα 4.6. Διάγραμμα θερμοκρασίας-ενεργειακού περιεχομένου (T-H) Υλικού Αλλαγής Φάσης, που απεικονίζει τη διαδικασία αποθήκευσης και απόδοσης θερμότητας μέσω αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας κατά τους κύκλους τήξης και κρυστάλλωσης [117].

4.4.3 Φυσικοχημική βάση και κατηγοριοποίηση των PCM

Η λειτουργία των PCMs βασίζεται στη διαδικασία μετάβασης φάσης, συνήθως από στερεά σε υγρή κατάσταση και αντιστρόφως, κατά την οποία αποθηκεύεται ή αποδίδεται λανθάνουσα θερμότητα χωρίς ουσιαστική μεταβολή της θερμοκρασίας του υλικού. Η θερμοκρασία τήξης αποτελεί κρίσιμη παράμετρο σχεδιασμού, καθώς πρέπει να βρίσκεται εντός ή κοντά στο θερμοκρασιακό εύρος θερμικής άνεσης των εσωτερικών χώρων, τυπικά μεταξύ 18 °C και 30 °C για κτιριακές εφαρμογές [67]. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, τα PCMs διακρίνονται σε οργανικά, ανόργανα και ευτηκτικά υλικά.

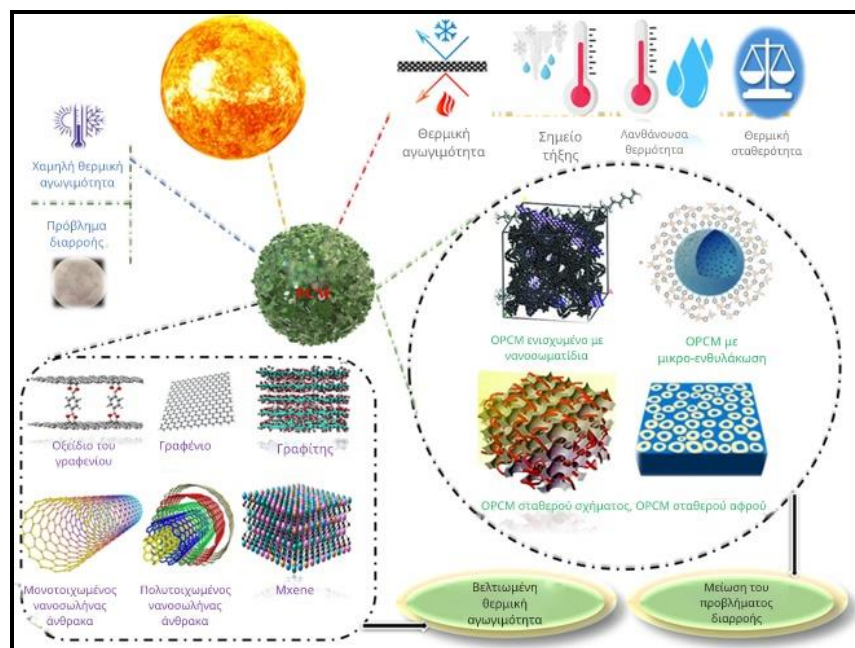
Τα οργανικά PCMs περιλαμβάνουν κυρίως παραφίνες και μη-παραφινικές ενώσεις. Οι παραφίνες χαρακτηρίζονται από υψηλή χημική σταθερότητα, αναστρέψιμη θερμική συμπεριφορά και αντοχή σε μεγάλο αριθμό κύκλων τήξης-πήξης, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα αξιόπιστες για μακροχρόνια χρήση [68]. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, εμφανίζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και είναι εύφλεκτες, γεγονός που επιβάλλει τη

χρήση τεχνικών εγκλεισμού ή προσθέτων επιβράδυνσης φλόγας. Οι μη-παραφινικές οργανικές ενώσεις, όπως τα λιπαρά οξέα και τα πολυμερή γλυκόλης, παρουσιάζουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα και σταθερή θερμική συμπεριφορά, αλλά συχνά συνοδεύονται από αυξημένο κόστος και ενδεχόμενα προβλήματα χημικής συμβατότητας με δομικά υλικά [69].

Τα ανόργανα PCMs, κυρίως ένυδρα άλατα, προσφέρουν υψηλότερη ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα και καλύτερη θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με τα οργανικά. Ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή τους περιορίζεται από φαινόμενα όπως η υποψύξη και η ασύμμετρη τήξη, τα οποία οδηγούν σε διαχωρισμό φάσεων και υποβάθμιση της απόδοσης με την πάροδο του χρόνου [66], [70].

Τα ευτηκτικά μίγματα, τέλος, αποτελούν τεχνητούς συνδυασμούς υλικών με ακριβώς καθορισμένο σημείο τήξης, επιτρέποντας στοχευμένο θερμικό σχεδιασμό. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, το κόστος και η σύνθετη διαδικασία παρασκευής περιορίζουν προς το παρόν τη χρήση τους σε εξειδικευμένες εφαρμογές [67].

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται ενδεικτικά νανοϋλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας (γραφένιο, γραφίτης, οξείδιο γραφενίου, νανοσωλήνες άνθρακα και MXene), καθώς και προηγμένες μορφές οργανικών PCM, όπως νανοενισχυμένα, μικρο-εγκλωβισμένα και σταθεροποιημένα PCM, οι οποίες οδηγούν σε βελτιωμένη θερμική απόδοση, αυξημένη λειτουργική σταθερότητα και σημαντική μείωση του φαινομένου διαρροής κατά τη φάση τήξης.

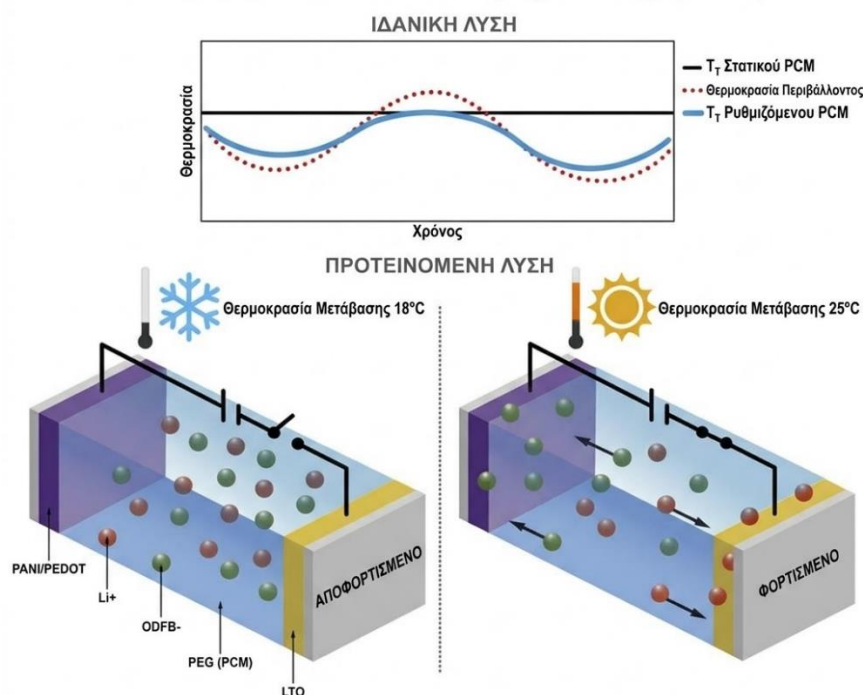


Σχήμα 4.7 Σχηματική απεικόνιση των βασικών περιορισμών των οργανικών Υλικών Αλλαγής Φάσης (χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και διαρροή κατά την τήξη) και των σύγχρονων τεχνολογικών προσεγγίσεων αντιμετώπισής τους μέσω νανοενίσχυσης, μικροεγκλωβισμού και σταθεροποίησης [118].

4.4.4 Ρόλος των PCM στην παθητική θερμική ρύθμιση κτιρίων

Η ενσωμάτωση των PCM στο κτιριακό κέλυφος μετατρέπει τα δομικά στοιχεία σε ενεργά συστήματα θερμικής αποθήκευσης. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν τα ηλιακά και εσωτερικά θερμικά κέρδη αυξάνονται, το PCM απορροφά θερμότητα και υφίσταται τήξη, περιορίζοντας την άνοδο της εσωτερικής θερμοκρασίας. Κατά τις νυχτερινές ώρες ή σε περιόδους χαμηλής θερμικής φόρτισης, το υλικό στερεοποιείται αποδίδοντας σταδιακά την αποθηκευμένη θερμότητα [71]. Η συμπεριφορά αυτή οδηγεί σε μείωση των θερμικών αιχμών, εξομάλυνση των ημερήσιων θερμοκρασιακών διακυμάνσεων και σημαντική μείωση της απαιτούμενης ισχύος των συστημάτων HVAC. Παράλληλα, η παθητική λειτουργία των PCM βελτιώνει τη θερμική άνεση χωρίς κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας τα ιδιαίτερα ελκυστικά για κτίρια χαμηλής και σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (nZEB: net Zero Energy Buildings) [72]. Το Σχήμα 4.8 αναπαραστά ηλεκτροχημικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με ενσωματωμένο ρυθμιζόμενο υλικό αλλαγής φάσης (PCM), στο οποίο η θερμοκρασία μετάβασης προσαρμόζεται ώστε να ευθυγραμμίζεται με τις θερμικές συνθήκες λειτουργίας της διάταξης. Η χρήση PCM επιτρέπει παθητική θερμική διαχείριση μέσω απορρόφησης και αποδέσμευσης λανθάνουσας θερμότητας κατά τους κύκλους φόρτισης–εκφόρτισης, συμβάλλοντας στη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας, στη βελτίωση της ηλεκτροχημικής απόδοσης και στην αύξηση της διάρκειας ζωής του συστήματος.

Ρυθμιζόμενο Υλικό Αλλαγής Φάσης (PCM)



Σχήμα 4.8 Σχηματική απεικόνιση ρυθμιζόμενου υλικού αλλαγής φάσης (PCM) ενσωματωμένου σε ηλεκτροχημικό σύστημα αποθήκευσης [120].

Πίνακας 4.1 Συγκριτική Αξιολόγηση Τύπων PCM για Κτιριακές Εφαρμογές

Ιδιότητα	Οργανικά (Παραφίνες)	Ανόργανα (Ενύδρα Άλατα)	Ευθηκτικά
Λανθάνουσα θερμοότητα	Υψηλή κατά μάζα, μέτρια κατ' όγκο	Πολύ υψηλή κατ' όγκο	Υψηλή
Θερμική αγωγιμότητα	Χαμηλή ($\approx 0.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)	Μέτρια ($\approx 0.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)	Εξαρτάται από τη σύσταση
Υποψύξη (supercooling)	Ελάχιστη	Σημαντική (απαιτεί πρόσθετα)	Ελάχιστη
Διαχωρισμός φάσεων	Όχι	Ναι (ασύμμετρη τήξη)	Όχι
Κόστος	Υψηλό	Χαμηλό	Υψηλό
Ευφλεκτότητα	Εύφλεκτα	Μη εύφλεκτα	Εξαρτάται από τη σύσταση
Διαβρωτικότητα	Μη διαβρωτικά	Διαβρωτικά για μέταλλα	Ποικίλει

4.4.5 Άμεση Ενσωμάτωση και Εμποτισμός

Η απλούστερη και οικονομικότερη προσέγγιση αφορά την άμεση ενσωμάτωση του PCM στο δομικό υλικό. Στην περίπτωση της άμεσης ανάμιξης, το PCM προστίθεται απευθείας στο μίγμα σκυροδέματος, κονιάματος ή γύψου είτε σε υγρή μορφή είτε ως

κονιοποιημένο υλικό. Παρότι η μέθοδος αυτή παρουσιάζει χαμηλό κόστος και ευκολία εφαρμογής, έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε σοβαρά τεχνικά προβλήματα. Η τήξη του PCM προκαλεί μετακίνηση του υλικού προς την επιφάνεια, με αποτέλεσμα φαινόμενα διαρροής, δημιουργία πόρων και αισθητή μείωση της μηχανικής αντοχής. Επιπλέον, το PCM παρεμβαίνει στη διαδικασία ενυδάτωσης του τσιμέντου, επηρεάζοντας αρνητικά την ανάπτυξη των κρυσταλλικών φάσεων και μειώνοντας τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος έως και 30–40% [65].

Μια εναλλακτική μορφή άμεσης ενσωμάτωσης είναι ο εμποτισμός πορωδών δομικών υλικών. Στην τεχνική αυτή, κεραμικοί πλίνθοι, μπλοκ σκυροδέματος ή ελαφροσκυρόδεμα βυθίζονται σε υγρό PCM, το οποίο διεισδύει στο εσωτερικό τους μέσω τριχοειδών φαινομένων. Η μέθοδος παρουσιάζει καλύτερη κατανομή του υλικού σε σύγκριση με την άμεση ανάμιξη, ωστόσο απαιτεί πρόσθετη επιφανειακή στεγανοποίηση προκειμένου να αποτραπεί η διαρροή κατά την τήξη. Χωρίς επαρκή σφράγιση, η μακροχρόνια απόδοση του συστήματος υποβαθμίζεται σημαντικά [73].

4.4.6 Τεχνολογίες Εγκλωβισμού (Encapsulation)

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων διαρροής και χημικής ασυμβατότητας, η τεχνολογία του εγκλωβισμού έχει καθιερωθεί ως η πλέον αξιόπιστη λύση για κτιριακές εφαρμογές. Στον εγκλωβισμό, το PCM περικλείεται σε προστατευτικό κέλυφος, το οποίο απομονώνει το υλικό από το δομικό περιβάλλον και επιτρέπει την επαναλαμβανόμενη αλλαγή φάσης χωρίς απώλειες.

Ο μικρο-εγκλωβισμός βασίζεται στη δημιουργία μικροκάψουλων διαμέτρου από 1 έως 1000 μm, συνήθως με πολυμερικά κελύφη (π.χ. πολυμεθακρυλικά ή ουρία-φορμαλδεΰδη). Οι μικροκάψουλες μπορούν να ενσωματωθούν απευθείας σε κονιάματα, γυψοσανίδες, σοβάδες και ακόμη και σε θερμορυθμιστικά χρώματα. Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ο πολύ μεγάλος λόγος επιφάνειας προς όγκο, ο οποίος ευνοεί την ταχεία θερμική ανταλλαγή. Ωστόσο, το κέλυφος μειώνει το ποσοστό ενεργού PCM, αυξάνει τη θερμική αντίσταση και επιβαρύνει το κόστος παραγωγής [65].

Ο μακρο-εγκλωβισμός αποτελεί εναλλακτική προσέγγιση, κατά την οποία το PCM τοποθετείται σε μεγαλύτερους περιέκτες, όπως πλαστικά πάνελ, σωλήνες, σακούλες ή μεταλλικές κάψουλες, οι οποίοι ενσωματώνονται στο δομικό στοιχείο. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τη χρήση φθηνότερων PCMs και παρέχει υψηλό επίπεδο ασφάλειας έναντι διαρροών. Παράλληλα όμως, η θερμική αντίσταση μεταξύ περιέκτη και δομικού υλικού,

καθώς και η πιθανή δημιουργία κενών αέρα, περιορίζουν την πραγματική θερμική απόδοση του συστήματος [64].

4.4.7 Υλικά Σταθεροποιημένου Σχήματος (Shape-Stabilized PCMs)

Μία από τις πλέον εξελιγμένες τεχνολογίες ενσωμάτωσης αποτελεί η ανάπτυξη Υλικών Αλλαγής Φάσης Σταθεροποιημένου Σχήματος (Shape-Stabilized PCMs-SSPCMs). Στα σύνθετα αυτά υλικά, το PCM συγκρατείται εντός πορώδους ή πολυμερικού φορέα, όπως διοξείδιο του πυριτίου, διογκωμένος γραφίτης ή θερμοπλαστικά πολυμερή (π.χ. HDPE), μέσω δυνάμεων επιφανειακής τάσης και φυσικής προσρόφησης. Με τον τρόπο αυτό, ακόμη και όταν το PCM μεταβαίνει σε υγρή φάση, το σύνθετο υλικό διατηρεί τη μακροσκοπική του μορφή και δεν εμφανίζει ροή [74].

Η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα για δομικές εφαρμογές, καθώς συνδυάζει υψηλή μηχανική σταθερότητα, απουσία διαρροών και δυνατότητα άμεσης ενσωμάτωσης σε δάπεδα, τοιχοποιίες και πάνελ. Επιπλέον, η χρήση αγώγιμων φορέων όπως ο γραφίτης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη θερμική αγωγιμότητα του συστήματος, υπερβαίνοντας έναν από τους βασικούς περιορισμούς των οργανικών PCMs. Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή SSPCM δαπέδων με βάση παραφίνη-πολυαιθυλένιο μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της μέσης εσωτερικής θερμοκρασίας κατά περίπου 2°C κατά τη χειμερινή περίοδο, βελτιώνοντας αισθητά τη θερμική άνεση χωρίς πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας [75].

4.5 Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά Συστήματα (CSP): Τεχνολογία και Δυνατότητα Εφαρμογής σε Μικρή Κλίμακα

4.5.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία των συγκεντρωτικών ηλιοθερμικών συστημάτων (CSP: Concentrated Solar Power) συγκαταλέγεται στις πιο ουσιαστικές επιλογές ΑΠΕ για την αντιμετώπιση των σημερινών και μελλοντικών προκλήσεων στην ηλεκτροπαραγωγή καθώς αξιοποιεί την ηλιακή θερμότητα και, σε αντίθεση με πολλές άλλες ΑΠΕ, επιτρέπει την ενσωμάτωση συστημάτων θερμικής αποθήκευσης. Η δυνατότητα συλλογής θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας και αξιοποίησής της σε μεταγενέστερο χρόνο περιορίζει τη διαλείπουσα λειτουργία και καθιστά την παραγωγή περισσότερο ελεγχόμενη, επιτρέποντας σε ορισμένες εφαρμογές την ανταγωνιστική λειτουργία έναντι συμβατικών μονάδων

ορυκτών καυσίμων.

Στη διεθνή πρακτική έχουν επικρατήσει τέσσερις βασικές τεχνολογικές διατάξεις CSP: τα παραβολικά κοίλα κάτοπτρα (parabolic troughs), οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel (linear Fresnel), τα συστήματα δίσκου–μηχανής Stirling (dish–Stirling) και οι ηλιακοί πύργοι (solar power towers). Οι τεχνολογίες αυτές αναπτύχθηκαν σταδιακά κατά τον 20ό αιώνα, με πρώιμες εφαρμογές ήδη από τις αρχές του, ενώ ιδιαίτερη σημασία απέκτησαν οι ηλιακοί πύργοι λόγω της δυνατότητάς τους να επιτυγχάνουν υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας και αυξημένη θερμοδυναμική απόδοση. Η τεχνολογική ωρίμανση αποτυπώθηκε σε έργα επίδειξης όπως το Solar One, ενώ ορόσημο για την εμπορική αξιοποίηση της CSP θεωρείται η εγκατάσταση SEGS I, η οποία σηματοδότησε την κλιμάκωση της τεχνολογίας σε επίπεδα εκατοντάδων MW τις επόμενες δεκαετίες.

Μεταξύ 1991 και 2005 παρατηρήθηκε διεθνώς στασιμότητα στην ανάπτυξη νέων σταθμών CSP, η οποία αντιστράφηκε μετά το 2006, όταν ξεκίνησε νέα φάση δυναμικής ανάπτυξης. Η αναβίωση του ενδιαφέροντος συνδέεται άμεσα με τη βελτίωση των αποδόσεων, την αύξηση του συντελεστή φορτίου μέσω θερμικής αποθήκευσης και τη συμβολή της τεχνολογίας στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, με εκτιμώμενη αποφυγή εκπομπών της τάξης του 1 kg CO₂ ανά παραγόμενη kWh σε σύγκριση με συμβατικές μορφές ηλεκτροπαραγωγής.

4.5.2 Μελέτη περίπτωσης: Gemasolar ως πρότυπο πύργου με αποθήκευση τηγμένων αλάτων

Χαρακτηριστικό και διεθνώς αναγνωρισμένο παράδειγμα αυτής της τεχνολογίας αποτελεί το έργο Gemasolar στη νότια Ισπανία. Το Gemasolar είναι εμπορικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τύπου ηλιακού πύργου εγκατεστημένος στην περιοχή Fuentes de Andalucía, κοντά στη Σεβίλλη (Σχήμα 4.8). Η εγκατεστημένη ηλεκτρική του ισχύς ανέρχεται σε περίπου 20 MW, ενώ η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται μεταξύ 80 και 110 GWh, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και τη διαθεσιμότητα του συστήματος. Η τεχνολογική ιδιαιτερότητα τέτοιων σταθμών δεν έγκειται μόνο στην υψηλή στιγμιαία θερμική ισχύ του πεδίου, αλλά κυρίως στη δυνατότητα «αποδέσμευσης» της ηλεκτροπαραγωγής από το ηλιακό παράθυρο μέσω αποθήκευσης. Στην πράξη, η αποθήκευση υλοποιείται τυπικά με διάταξη δύο δεξαμενών (θερμή/ψυχρή), όπου το άλας θερμαίνεται στον δέκτη και αποθηκεύεται στη θερμή δεξαμενή, ενώ κατά την εκφόρτιση μεταφέρει θερμότητα σε ατμοπαραγωγό και επιστρέφει ψυχρότερο στην ψυχρή

δεξαμενή [76]. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τον συντελεστή αξιοποίησης της εγκατάστασης και μειώνει την ανάγκη θερμικής εφεδρείας, ειδικά σε αγορές όπου η ευστάθεια και η προβλεψιμότητα ισχύος αποτιμώνται οικονομικά [77], [76].

Η λειτουργία του Gemasolar βασίζεται σε ένα εκτεταμένο ηλιακό πεδίο αποτελούμενο από περισσότερους από 2.600 ηλιοστάτες, οι οποίοι παρακολουθούν την πορεία του ήλιου και κατευθύνουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία προς έναν κεντρικό δέκτη στην κορυφή πύργου ύψους περίπου 140 μέτρων. Στον δέκτη αυτό θερμαίνεται το θερμικό ρευστό, το οποίο στο συγκεκριμένο έργο είναι μίγμα λιωμένων νιτρικών αλάτων νατρίου και καλίου. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας υπερβαίνουν τους 500 °C, επιτρέποντας την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων θερμικής ενέργειας με σχετικά χαμηλές απώλειες και υψηλή θερμική πυκνότητα [76].

Κεντρικό στοιχείο της λειτουργίας του Gemasolar αποτελεί το σύστημα θερμικής αποθήκευσης, το οποίο διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαφοροποίησή του από άλλες μορφές ηλιακής ηλεκτροπαραγωγής. Η αποθήκευση πραγματοποιείται σε δεξαμενές θερμού και ψυχρού άλατος, επιτρέποντας την αξιοποίηση της αποθηκευμένης θερμότητας για την παραγωγή ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας έως και 15 ώρες μετά τη δύση του ήλιου. Το χαρακτηριστικό αυτό επιτρέπει στο εργοστάσιο να λειτουργεί με υψηλό συντελεστή διαθεσιμότητας, προσεγγίζοντας σε ορισμένες περιόδους τα χαρακτηριστικά μονάδας βάσης και μειώνοντας την ανάγκη για εφεδρικές συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής (IEA, 2014).



Σχήμα 4.9 Ο ηλιοθερμικός σταθμός συγκεντροτικής ηλιακής ενέργειας Gemasolar με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με τηγμένα άλατα [119].

4.5.3 Βασικές Εξισώσεις και Θερμοδυναμική Ανάλυση Συστημάτων CSP

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την ποσοτική και θερμοδυναμική ανάλυση συστημάτων Συγκεντρωτικής Ηλιακής Θερμικής Ενέργειας (CSP: Concentrated Solar Power). Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο για τον σχεδιασμό, τη μοντελοποίηση και την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης τέτοιων συστημάτων και χρησιμοποιούνται εκτενώς στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία.

Κρίσιμη παράμετρος για τη λειτουργία των συστημάτων CSP είναι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI: Direct Normal Irradiance), η οποία εκφράζει την ηλιακή ισχύ που προσπίπτει κάθετα σε μοναδιαία επιφάνεια. Σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία αξιοποιούν τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη ακτινοβολία, η CSP εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από το DNI, γεγονός που περιορίζει τη γεωγραφική της εφαρμογή σε περιοχές με υψηλή και σταθερή ηλιακή ακτινοβολία.

Η συνολική θερμική ισχύς που συλλέγεται από το ηλιακό πεδίο ενός συστήματος CSP μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$Q_{\text{solar}} = \text{DNI} \cdot A_{\text{heliostat}} \cdot \eta_{\text{opt}} \quad (4.2)$$

όπου DNI είναι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2), $A_{\text{heliostat}}$ η συνολική ενεργή ανακλαστική επιφάνεια των ηλιοστατών και η_{opt} η οπτική απόδοση του ηλιακού πεδίου. Η οπτική απόδοση λαμβάνει υπόψη απώλειες λόγω σκίασης, γεωμετρικών αποκλίσεων, μη ιδανικής ανακλαστικότητας των κατόπτρων και ατμοσφαιρικής απορρόφησης.

Η θερμική ισχύς που τελικά μεταφέρεται στο θερμικό ρευστό του δέκτη είναι μικρότερη της συλλεγόμενης λόγω θερμικών απωλειών, όπως απώλειες ακτινοβολίας και συναγωγής προς το περιβάλλον. Η θερμική απόδοση του συστήματος ορίζεται ως:

$$\eta_{\text{th}} = Q_{\text{useful}} / Q_{\text{solar}} \quad (4.3)$$

όπου Q_{useful} είναι η χρήσιμη θερμική ισχύς που παραδίδεται στο θερμικό ρευστό μετά την αφαίρεση των απωλειών στον δέκτη. Η αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος οδηγεί σε βελτίωση της θερμικής απόδοσης, γεγονός που εξηγεί το συγκριτικό πλεονέκτημα των συστημάτων ηλιακού πύργου έναντι άλλων διαμορφώσεων CSP, καθώς επιτρέπουν λειτουργία σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους $500\text{ }^\circ\text{C}$.

Η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω ενός θερμοδυναμικού κύκλου, συνήθως κύκλου Rankine, με ατμό ως ρευστό εργασίας. Η ηλεκτρική απόδοση του κύκλου Rankine ορίζεται ως:

$$\eta_{\text{el}} = W_{\text{net}} / Q_{\text{boiler}} \quad (4.4)$$

όπου W_{net} είναι το καθαρό παραγόμενο ηλεκτρικό έργο του στροβίλου μετά την αφαίρεση των ιδιοκαταναλώσεων του συστήματος και Q_{boiler} η θερμική ισχύς που παρέχεται στον ατμοπαραγωγό. Η ηλεκτρική απόδοση εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία και την πίεση εισόδου του ατμού, καθώς και από την απόδοση των επιμέρους μηχανικών στοιχείων.

Η συνολική ενεργειακή απόδοση ενός σταθμού CSP μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο των επιμέρους αποδόσεων του συστήματος:

$$\eta_{total} = \eta_{opt} \cdot \eta_{th} \cdot \eta_{el} \quad (4.5)$$

Η σχέση αυτή καταδεικνύει ότι η συνολική απόδοση ενός συστήματος CSP εξαρτάται από τη συνδυασμένη βελτιστοποίηση του ηλιακού πεδίου, του θερμικού δέκτη και του ηλεκτρικού κύκλου μετατροπής. Για τον λόγο αυτό, η μελέτη και ο σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων βασίζονται συνήθως σε ολοκληρωμένα ενεργειακά και θερμοδυναμικά μοντέλα, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων.

4.5.4 Ο κύκλος Rankine και η εφαρμογή του σε ηλιοθερμικά συστήματα

Στα συστήματα ηλιακής θερμικής ηλεκτροπαραγωγής συγκεντρωτικού τύπου (CSP: Concentrated Solar Power), ο κυρίαρχος θερμοδυναμικός κύκλος μετατροπής της απορροφούμενης θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ισχύ είναι ο κύκλος Rankine με εργαζόμενο μέσο νερό-ατμό [77]. Σε εφαρμογές χαμηλότερων θερμοκρασιακών επιπέδων, ιδίως σε συστήματα μικρότερης κλίμακας ή σε περιπτώσεις αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας, χρησιμοποιείται συχνά και ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC: Organic Rankine Cycle), ο οποίος βασίζεται σε οργανικά ρευστά με χαμηλότερα σημεία βρασμού [78]. Ο ORC επιτρέπει την αποδοτική αξιοποίηση θερμότητας χαμηλής ή μέσης ποιότητας.

4.5.5 Χρήση του Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) και η εφαρμογή του σε μικρής κλίμακας ηλιοθερμικά συστήματα

Η χρήση του Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC: Organic Rankine Cycle) σε μικρής κλίμακας συγκεντρωτικά ηλιοθερμικά συστήματα για ηλεκτροπαραγωγή (CSP) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε εφαρμογές τοπικής ενεργειακής τροφοδότησης, όπως η κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών απομονωμένων ή ημιαπομονωμένων περιοχών πληθυσμιακού μεγέθους της τάξης των 1.000 κατοίκων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η απαίτηση δεν αφορά τη μεγιστοποίηση της θερμοδυναμικής απόδοσης σε απόλυτους όρους, αλλά τη διασφάλιση αξιόπιστης, σταθερής και τεχνικά απλής ηλεκτροπαραγωγής,

με περιορισμένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας.

Οι ενεργειακές ανάγκες ενός οικισμού 1.000 κατοίκων αντιστοιχούν τυπικά σε μέση ηλεκτρική ισχύ της τάξης των 300–600 kW, ανάλογα με το επίπεδο κατανάλωσης, τη διείσδυση ηλεκτρικών συσκευών και τη χρήση κλιματισμού. Η κάλυψη αυτού του φορτίου μέσω συμβατικών συστημάτων CSP μεγάλης κλίμακας με κύκλο ατμού Rankine δεν είναι τεχνικοοικονομικά βέλτιστη, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, οι απαιτήσεις σε πίεση, καθώς και η πολυπλοκότητα των αμοστροβίλων συνεπάγονται αυξημένο επενδυτικό κόστος, ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού και περιορισμένη ευελιξία λειτουργίας σε μερικά φορτία.

Σε αυτό το πλαίσιο, ο ORC αναδεικνύεται ως καταλληλότερη τεχνολογική επιλογή, καθώς μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά σε χαμηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα, συνήθως μεταξύ 120 και 300 °C, τα οποία είναι συμβατά με απλοποιημένα συγκεντρωτικά ηλιοθερμικά συστήματα, όπως κοίλα παραβολικά κάτοπτρα μικρής κλίμακας ή γραμμικοί συλλέκτες Fresnel. Η χρήση οργανικών ρευστών εργασίας με χαμηλό σημείο ζέσεως επιτρέπει την παραγωγή μηχανικού έργου χωρίς την ανάγκη υπερθέρμανσης του ρευστού σε θερμοκρασίες που θα απαιτούσαν βαριά και δαπανηρή θερμομηχανολογική υποδομή.

Από πλευράς συστημικού σχεδιασμού, τα CSP–ORC συστήματα μικρής κλίμακας εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα για τοπική ηλεκτροδότηση. Ο ORC χαρακτηρίζεται από απλούστερη κατασκευή, χαμηλότερες πιέσεις λειτουργίας και μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης σε σύγκριση με τον κλασικό κύκλο ατμού Rankine. Αυτό μεταφράζεται σε αυξημένη αξιοπιστία, μειωμένο λειτουργικό κόστος και μεγαλύτερη ανεκτικότητα σε διακυμάνσεις θερμικού φορτίου, χαρακτηριστικά κρίσιμα για εφαρμογές σε απομονωμένες περιοχές με περιορισμένη τεχνική υποστήριξη.

Η ενσωμάτωση θερμικής αποθήκευσης σε τέτοια συστήματα, ακόμη και περιορισμένης διάρκειας (π.χ. 4–6 ώρες), επιτρέπει την εξομάλυνση της ημερήσιας καμπύλης παραγωγής και τη μερική κάλυψη των βραδινών φορτίων. Σε αντίθεση με τους μεγάλους σταθμούς CSP, όπου η αποθήκευση λιωμένων αλάτων σε υψηλές θερμοκρασίες αποτελεί τον κανόνα, στα συστήματα μικρής κλίμακας CSP–ORC μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλούστερες τεχνολογίες θερμικής αποθήκευσης, όπως δεξαμενές θερμού λαδιού ή υλικά αλλαγής φάσης χαμηλότερης θερμοκρασίας, μειώνοντας το συνολικό κόστος και την πολυπλοκότητα.

Επιπλέον, σε οικισμούς της τάξης των 1.000 κατοίκων, η χρήση ORC επιτρέπει τη συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (συμπαράγωγή), μέσω της αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας του συμπυκνωτή για ανάγκες θέρμανσης

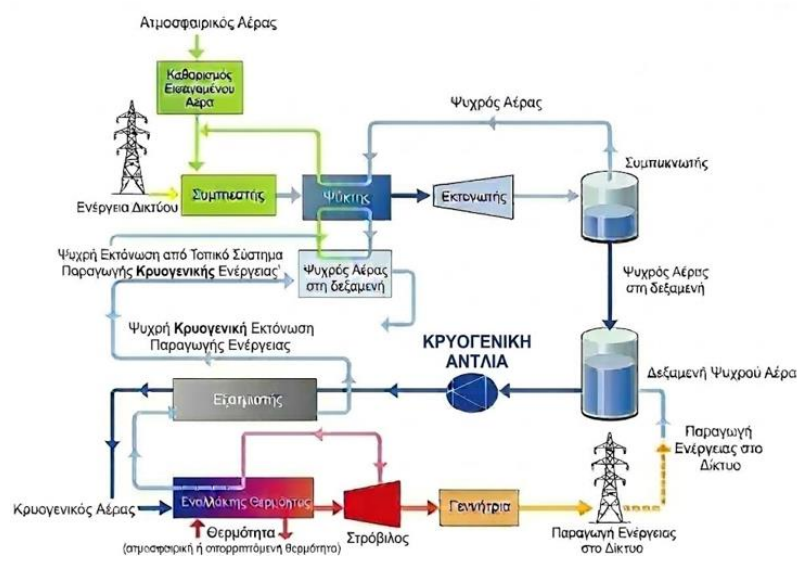
χώρων, ζεστού νερού χρήσης ή αγροδιατροφικών εφαρμογών. Η δυνατότητα αυτή αυξάνει σημαντικά τον συνολικό βαθμό ενεργειακής εκμετάλλευσης του συστήματος και ενισχύει τη βιωσιμότητά του, ιδίως σε περιοχές με εποχιακές θερμικές ανάγκες.

Παρά το γεγονός ότι η ηλεκτρική απόδοση ενός ORC είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με έναν κύκλο Rankine υψηλής θερμοκρασίας, η συνολική αξιολόγηση σε επίπεδο μικρής κλίμακας έργων καταδεικνύει ότι το πλεονέκτημα της απλότητας, της αξιοπιστίας και της καλύτερης προσαρμογής σε χαμηλά φορτία υπερκαλύπτει τη μειωμένη θερμοδυναμική απόδοση. Για τον λόγο αυτό, ο ORC θεωρείται τεχνολογία ιδιαίτερα κατάλληλη για αποκεντρωμένα συστήματα CSP, τα οποία στοχεύουν όχι στη μεγιστοποίηση της ισχύος, αλλά στην παροχή ενεργειακής αυτονομίας και ασφάλειας εφοδιασμού σε μικρές κοινότητες.

5 Κρυογενική, Ηλεκτρική, Μαγνητική και Υλική Αποθήκευση

5.1 Κρυογενική Αποθήκευση Ενέργειας μέσω Υγροποίησης Αέρα (Liquid Air Energy Storage – LAES)

Η κρυογενική αποθήκευση ενέργειας μέσω υγροποίησης αέρα, γνωστή διεθνώς ως Liquid Air Energy Storage (LAES) αποτελεί μία αναδυόμενη τεχνολογία μηχανικής αποθήκευσης με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για εφαρμογές δικτύου. Η λειτουργία της τεχνολογίας LAES βασίζεται στη θερμοδυναμική ιδιότητα του αέρα να υγροποιείται σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, της τάξης των -196°C , υπό ατμοσφαιρική πίεση. Κατά τη φάση φόρτισης του συστήματος, ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη συμπίεση και ψύξη του ατμοσφαιρικού αέρα μέσω κρυογενικών κύκλων ψύξης, έως ότου επιτευχθεί η υγροποίησή του. Η ενέργεια αποθηκεύεται έμμεσα με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας και της πυκνής ενεργειακής κατάστασης του υγρού αέρα, ο οποίος φυλάσσεται σε θερμικά μονωμένες δεξαμενές χαμηλής πίεσης [79],[80].



Σχήμα 5.1 Γενική αρχή λειτουργίας συστήματος κρυογενικής αποθήκευσης ενέργειας μέσω υγροποίησης αέρα (Liquid Air Energy Storage – LAES), με διακριτές φάσεις φόρτισης, αποθήκευσης και εκφόρτισης [81].

Κατά τη φάση φόρτισης, ο αέρας θεωρείται αρχικά ως ιδανικό αέριο σε περιβαλλοντικές συνθήκες, με πίεση p_0 και θερμοκρασία T_0 . Ο αέρας συμπιέζεται σε έναν ή περισσότερους συμπιεστές (πολυβάθμια συμπίεση) και ενδιάμεση ψύξη, ώστε να περιοριστεί το απαιτούμενο έργο. Το ειδικό έργο συμπίεσης για έναν ιδανικό ισεντροπικό συμπίεστη δίνεται από τη σχέση:

$$w_c = c_p T_0 \left[\left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (5.1)$$

όπου c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση και γ ο αδιαβατικός εκθέτης. Στην πραγματικότητα, το πραγματικό έργο συμπίεσης αυξάνεται λόγω της ισεντροπικής απόδοσης η_c , σύμφωνα με τη σχέση:

$$w_{c,real} = w_c / \eta_c \quad (5.2)$$

Μετά τη συμπίεση, ο αέρας οδηγείται σε εναλλάκτες θερμότητας και κρυογενικούς ψύκτες, όπου η θερμοκρασία του μειώνεται σταδιακά μέχρι να επιτευχθεί η υγροποίηση. Η διεργασία αυτή μπορεί να περιγραφεί μέσω ενός κύκλου τύπου Claude ή Linde–Hampson, όπου η ψύξη προκύπτει είτε από ισενθαλπική εκτόνωση μέσω βαλβίδας Joule–Thomson είτε από ισεντροπική εκτόνωση σε στροβιλοεκτονωτές [80], [81]. Η ενεργειακή απαίτηση για την υγροποίηση ανά μονάδα μάζας αέρα συνδέεται άμεσα με τη μεταβολή ενθαλπίας:

$$q_{liq} = h_{gas}(T_1, p_1) - h_{liq}(T_{cryo}, p_{atm}) \quad (5.3)$$

όπου h_{gas} και h_{liq} είναι οι ειδικές ενθαλπίες του αέρα σε αέρια και υγρή φάση αντίστοιχα. Η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα κατά τη φάση φόρτισης ισούται με το ολοκλήρωμα του έργου συμπίεσης και των απωλειών ψύξης επί τη παροχή μάζας του αέρα. Κατά τη φάση αποθήκευσης, ο υγροποιημένος αέρας διατηρείται σε δεξαμενές χαμηλής πίεσης και πολύ χαμηλής θερμοκρασίας. Οι θερμικές απώλειες κατά την αποθήκευση θεωρούνται μικρές και συνήθως μοντελοποιούνται ως σταθερό θερμικό φορτίο, το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως ποσοστό απώλειας μάζας ή ενέργειας ανά μονάδα χρόνου. Η φάση εκφόρτισης περιλαμβάνει τη θέρμανση του υγρού αέρα και την επαναεριοποίησή του, διαδικασία που οδηγεί σε απότομη αύξηση του ειδικού όγκου. Η παροχή θερμότητας q_{in} μπορεί να προέρχεται είτε από το περιβάλλον είτε από εξωτερικές πηγές απορριπτόμενης θερμότητας. Η εκτόνωση του αέρα (σε κατάσταση αερίου) πραγματοποιείται σε στροβίλους, όπου το παραγόμενο ειδικό έργο δίνεται από:

$$w_t = c_p T_{in} \left[1 - \left(\frac{p_{out}}{p_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \eta_T \quad (5.4)$$

όπου η_T είναι η ισεντροπική απόδοση του στροβίλου. Το συνολικό παραγόμενο έργο εξαρτάται γραμμικά από τη παροχή μάζας και τη θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο, γεγονός που καθιστά κρίσιμη τη διαθεσιμότητα θερμότητας υψηλής ποιότητας.

Η συνολική απόδοση κύκλου φόρτισης–εκφόρτισης του συστήματος LAES ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά τη φόρτιση:

$$\eta_{RT} = \frac{W_{out}}{W_{in}} \quad (5.5)$$

Θερμοδυναμικές αναλύσεις δείχνουν ότι, χωρίς ανάκτηση ψυχρής ενέργειας, η απόδοση περιορίζεται σε τιμές κάτω του 45%. Ωστόσο, με την ενσωμάτωση συστημάτων cold storage και ανάκτησης εξέργειας, η απόδοση μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, προσεγγίζοντας το 60% [79], [80]. Η ανάλυση εξέργειας καταδεικνύει ότι οι μεγαλύτερες απώλειες εντοπίζονται στη φάση υγροποίησης, όπου οι μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές οδηγούν σε μη αναστρέψιμες διεργασίες.

Η ενεργειακή απόδοση κύκλου φόρτισης–εκφόρτισης των συστημάτων LAES παραμένει χαμηλότερη σε σύγκριση με τις σύγχρονες ηλεκτροχημικές μπαταρίες, κυμαινόμενη συνήθως μεταξύ 45% και 60%. Ωστόσο, η απόδοση αυτή μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά μέσω της ανάκτησης της ψυχρής ενέργειας κατά την επαναεριοποίηση του υγρού αέρα και της συνδυασμένης χρήσης εξωτερικών πηγών θερμότητας. Σύμφωνα με μελέτες θερμοδυναμικής ανάλυσης, η ολοκληρωμένη ενσωμάτωση συστημάτων ανάκτησης θερμότητας και ψύξης μπορεί να αυξήσει αισθητά τη συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα της εγκατάστασης [79], [80].

5.2 Έμμεση θερμική αποθήκευση μέσω κρυογενικών διεργασιών: Η περίπτωση της ψυχρής ενέργειας (Cold Energy Recovery) LNG

Η μέχρι τώρα ανάλυση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας ανέδειξε ότι η αποτελεσματικότητα ενός ενεργειακού συστήματος δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά από τη συνολική διαχείριση των ενεργειακών ροών και των απωλειών τους. Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν μορφές αποθήκευσης που ενσωματώνονται έμμεσα στις ενεργειακές αλυσίδες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ψυχρή ενέργεια του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG), η οποία προσφέρει τη δυνατότητα ανάκτησης και λειτουργικής αποθήκευσης υψηλής ποιότητας εξέργειας. Η ακόλουθη ενότητα εξετάζει την ψυχρή ενέργεια LNG ως ιδιαίτερη μορφή θερμικής αποθήκευσης, αναλύοντας τόσο τη θερμοδυναμική της βάση όσο και τη συστημική και κτιριακή της αξιοποίηση

5.2.1 Έμμεση θερμική αποθήκευση ενέργειας από την ψυχρή ενέργεια (Cold Energy Recovery) του LNG

Τα τελευταία χρόνια η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει ολοένα και περισσότερο

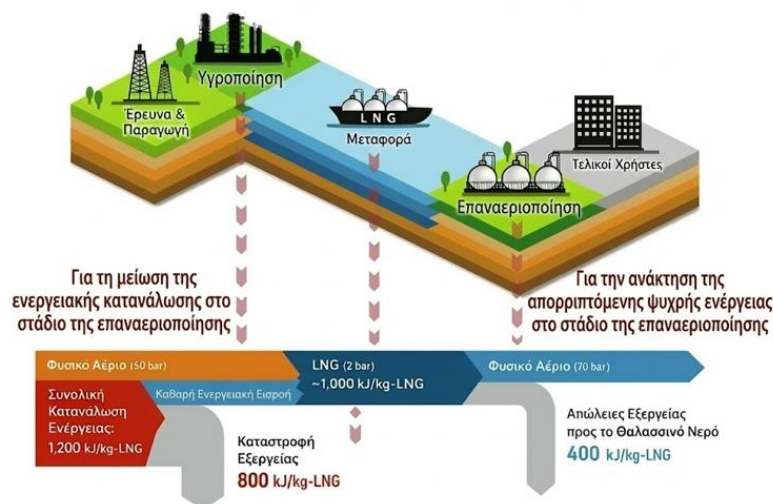
τη σημασία της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε χαμηλές ή κρυογενικές θερμοκρασίες, ιδίως στο πλαίσιο της αξιοποίησης απορριπτόμενης ενέργειας από βιομηχανικές διεργασίες [82]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ψυχρή ενέργεια που παράγεται κατά την επαναεριοποίηση του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) και αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα έμμεσης θερμικής αποθήκευσης μέσω κρυογενικών διεργασιών. Κατά τη διαδικασία υγροποίησης, το φυσικό αέριο ψύχεται σε θερμοκρασίες της τάξης των -160 °C, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του όγκου του και τη δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς του σε υγρή μορφή. Η διαδικασία αυτή ισοδυναμεί θερμοδυναμικά με αποθήκευση ενέργειας υπό τη μορφή ψυχρής εξέργειας, η οποία παραμένει ενσωματωμένη στο LNG μέχρι τη στιγμή της επαναεριοποίησης [83].

Σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνολογίες θερμικής αποθήκευσης, όπου η ενέργεια αποθηκεύεται σκόπιμα σε δεξαμενές ή υλικά αποθήκευσης, στην περίπτωση του LNG η αποθήκευση προκύπτει ως αναπόσπαστο στάδιο της ενεργειακής αλυσίδας. Η ψυχρή ενέργεια δεν δημιουργείται με στόχο την αποθήκευση, αλλά αποτελεί υποπροϊόν της υγροποίησης, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί ή να απορριφθεί. Όταν η επαναεριοποίηση πραγματοποιείται χωρίς ανάκτηση της ψυχρής ενέργειας, αυτή αποβάλλεται στο περιβάλλον μέσω θαλασσινού νερού ή αέρα, προκαλώντας απώλειες εξέργειας και τοπικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αντιθέτως, η ανάκτησή της μετατρέπει το LNG σε φορέα θερμικής αποθήκευσης με σημαντική ενεργειακή και οικονομική αξία.

Η θερμοδυναμική φύση της αποθήκευσης αυτής μπορεί να χαρακτηριστεί ως αποθήκευση αισθητής θερμότητας σε αρνητικό θερμοκρασιακό εύρος. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του LNG και του περιβάλλοντος δημιουργεί ένα ισχυρό θερμοδυναμικό δυναμικό, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλές θερμοκρασίες, όπως βιομηχανική ψύξη, κρυογενικός διαχωρισμός αερίων και αγροδιατροφικές εφαρμογές [82], [84]. Από άποψη εξέργειας, η ψυχρή ενέργεια LNG χαρακτηρίζεται από υψηλή ποιότητα, καθώς η μεγάλη θερμοκρασιακή απόκλιση αυξάνει τη δυνατότητα παραγωγής χρήσιμου έργου ή την υποκατάσταση ενεργοβόρων διεργασιών ψύξης [85].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ενσωμάτωση της ψυχρής ενέργειας LNG σε συστήματα που λειτουργούν συνεχώς ή εποχικά, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις η αποθήκευση ενέργειας εκδηλώνεται όχι μόνο ως θερμική δεξαμενή, αλλά και ως μηχανισμός εξομάλυνσης χρονικών διακυμάνσεων. Η δυνατότητα διατήρησης σταθερής θερμοκρασίας σε υδατοκαλλιέργειες ή βιομηχανικές διεργασίες επιτρέπει τη μεταφορά της «αποθηκευμένης» ψυχρής ενέργειας από τη χρονική στιγμή της επαναεριοποίησης στη

χρονική στιγμή της χρήσης, ακόμα και αν αυτές δεν συμπίπτουν απόλυτα. Με αυτόν τον τρόπο, η ψυχρή ενέργεια λειτουργεί ως λειτουργική αποθήκη θερμικής σταθερότητας, μειώνοντας τις ανάγκες για πρόσθετη ενεργειακή υποστήριξη αιχμής (FAO, 2022), [82], [84]. Για τον λόγο αυτό αντιμετωπίζεται ως συμπληρωματική τεχνολογία που μπορεί να μειώσει την ανάγκη για ηλεκτρική αποθήκευση μέσω αποφυγής κατανάλωσης (storage by avoidance) και ενίσχυσης της συστημικής αποδοτικότητας [86]. Το Σχήμα 5.2 απεικονίζει την αλυσίδα εφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) από την παραγωγή έως τους τελικούς χρήστες, με ταυτόχρονη παρουσίαση των βασικών ενεργειακών ροών και απωλειών εξεργείας. Το διάγραμμα αναδεικνύει την υψηλή ενεργειακή κατανάλωση στο στάδιο της υγροποίησης και τη σημαντική διαθέσιμη ψυχρή ενέργεια κατά την επαναεριοποίηση, η οποία μπορεί να ανακτηθεί για ενεργειακές εφαρμογές.



Σχήμα 5.2 Σχηματική απεικόνιση της αλυσίδας εφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) από την παραγωγή έως τους τελικούς χρήστες, με ταυτόχρονη παρουσίαση των βασικών ενεργειακών ροών και απωλειών εξεργείας.

5.2.2 Μαθηματική και ενεργειακή μεθοδολογία αξιολόγησης της ψυχρής ενέργειας LNG

Η αξιολόγηση της ψυχρής ενέργειας που ενσωματώνεται στο LNG και ανακτάται κατά τη διαδικασία επαναεριοποίησης βασίζεται στη θεμελιώδη εφαρμογή ισοζυγίων μάζας, ενέργειας και εξεργείας σε ανοικτά συστήματα. Ο τερματικός σταθμός LNG προσεγγίζεται ως σύστημα μόνιμης κατάστασης (steady-state), στο οποίο η ροή μάζας του LNG μετατρέπεται σε ροή αερίου φυσικού αερίου χωρίς χημική μεταβολή.

Ισοζύγιο μάζας

Για το σύστημα επαναεριοποίησης ισχύει:

$$\dot{m}_{LNG} = \dot{m}_{NG} \quad (5.6)$$

όπου \dot{m} είναι η παροχή μάζας (kg/s). Η σχέση αυτή επιβεβαιώνει ότι η αποθήκευση ενέργειας εξετάζεται αποκλειστικά σε θερμοδυναμικό επίπεδο και όχι σε επίπεδο μάζας.

Ισοζύγιο ενέργειας επαναεριοποίησης

Το ενεργειακό ισοζύγιο στον εναλλάκτη θερμότητας επαναεριοποίησης διατυπώνεται ως:

$$\dot{Q}_{in} + \dot{m}_{LNG} h_{in} = \dot{m}_{NG} h_{out} \quad (5.7)$$

ή ισοδύναμα:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{LNG} (h_{out} - h_{in}) \quad (5.8)$$

όπου:

\dot{Q}_{in} (kW) είναι η θερμότητα που απορροφά το LNG από το περιβάλλον,

h_{in} (kJ/kg) η ειδική ενθαλπία του LNG στη θερμοκρασία υγροποίησης,

h_{out} (kJ/kg) η ειδική ενθαλπία του φυσικού αερίου στην έξοδο.

Η ποσότητα \dot{Q}_{in} εκφράζει το θεωρητικά διαθέσιμο ψυκτικό φορτίο, το οποίο στις περισσότερες συμβατικές εγκαταστάσεις απορρίπτεται στο περιβάλλον.

Διαθέσιμη ψυχρή ενέργεια ως θερμική αποθήκη

Η ειδική ψυχρή ενέργεια ανά μονάδα μάζας LNG ορίζεται ως:

$$\text{Cold Energy } CE = h_{out} - h_{in} \quad (5.9)$$

Για τυπική σύσταση LNG, η βιβλιογραφία [82],[84] αναφέρει:

$$CE \approx 830-900 \text{ MJ}/t_{LNG}$$

Η συνολική ετήσια «αποθηκευμένη» ψυχρή ενέργεια δίνεται από:

$$CE_{annual} = M_{LNG} \cdot CE \quad (5.10)$$

όπου M_{LNG} η ετήσια παροχή LNG. Η σχέση αυτή είναι άμεσα συγκρίσιμη με την ενεργειακή χωρητικότητα συμβατικών συστημάτων θερμικής αποθήκευσης.

Εξέργεια ψυχρής ενέργειας (Exergy of cold storage)

Η ποιοτική αξιολόγηση της αποθήκευσης απαιτεί εξεργειακή ανάλυση. Η ειδική εξέργεια ορίζεται ως:

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5.11)$$

όπου:

T_0 είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος,

h_0, s_0 οι ιδιότητες αναφοράς στο περιβάλλον.

$(T - T_0)$ Η υψηλή τιμή της διαφοράς για το LNG συνεπάγεται υψηλή εξέργεια, γεγονός που καθιστά την ψυχρή ενέργεια LNG θερμική αποθήκη υψηλής ποιότητας, σε αντίθεση με χαμηλής θερμοκρασίας θερμικές δεξαμενές σε όρους δευτέρου νόμου [87]

Βαθμός αξιοποίησης θερμικής αποθήκευσης

Ορίζεται ο βαθμός αξιοποίησης της ψυχρής ενέργειας ως:

$$\eta_{CE} = \frac{\dot{Q}_{useful}}{\dot{Q}_{in}} \quad (5.12)$$

όπου \dot{Q}_{useful} είναι το ψυκτικό φορτίο που αξιοποιείται σε τελική εφαρμογή (π.χ. υδατοκαλλιέργεια, ψυχρή αλυσίδα).

Τυπικές τιμές:

$$\eta_{CE} = 0.2-0.4$$

ανάλογα με τον βαθμό ολοκλήρωσης του συστήματος [82].

Σύνδεση με θερμική αποθήκευση (Thermal Energy Storage – TES)

Η ψυχρή ενέργεια LNG μπορεί να προσεγγιστεί μαθηματικά ως σύστημα θερμικής αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, όπου:

$$Q_{TES} = m_{eff} c_p (T_{env} - T_{LNG}) \quad (5.13)$$

Η διαφορά έγκειται στο ότι:

- i. το «μέσο αποθήκευσης» δεν είναι δεξαμενή, αλλά το ίδιο το LNG,
- ii. η αποθήκευση είναι έμμεση και προϋπάρχουσα,
- iii. η απώλεια αποθήκευσης (thermal loss) είναι ελάχιστη λόγω κρυογενικής μόνωσης [83], [84].
- iv. Λειτουργική αποθήκευση μέσω θερμοκρασιακής σταθερότητας

Σε εφαρμογές όπως οι υδατοκαλλιέργειες, η αποθήκευση εκδηλώνεται μέσω σταθεροποίησης θερμοκρασίας. Το ισοζύγιο νερού γράφεται:

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{out} - T_{in}) \quad (5.14)$$

και η συνθήκη ενεργειακής επάρκειας:

$$\dot{Q}_{cooling} \leq \dot{Q}_{useful} \quad (5.15)$$

Η θερμική αυτή «αποθήκη» επιτρέπει χρονική αποσύζευξη μεταξύ παραγωγής και χρήσης ψυχρής ενέργειας, χαρακτηριστικό γνώρισμα συστημάτων αποθήκευσης.

5.2.3 Κτιριακές εφαρμογές ψυχρής ενέργειας LNG και σύνδεση με Nearly Zero Energy Buildings (nZEB)

Η αξιοποίηση της ψυχρής ενέργειας που ενσωματώνεται στο υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) σε κτιριακές εφαρμογές μικρής κλίμακας συνιστά συμπληρωματική στρατηγική ενεργειακής διαχείρισης, η οποία μετατοπίζει το βάρος από την ηλεκτρική αποθήκευση στη θερμική/εξεργειακή αξιοποίηση χαμηλών θερμοκρασιών. Σε αντίθεση με τη βιομηχανική κλίμακα, όπου η ανάκτηση ψυχρής ενέργειας στοχεύει κυρίως στη συνολική ενεργειακή βελτιστοποίηση διεργασιών, στον κτιριακό τομέα η ψυχρή ενέργεια

αξιοποιείται ως λειτουργική θερμική αποθήκη που υποστηρίζει συστήματα κλιματισμού (HVAC) και μειώνει την ανάγκη μηχανικής ψύξης [83], [82].

Σε επίπεδο κτιρίου, η «αποθήκευση» αποτιμάται πρωτίστως μέσω της εξομάλυνσης θερμικών φορτίων, της μείωσης αιχμών ισχύος και της σταθεροποίησης εσωτερικών συνθηκών. Υπό αυτή τη λογική, η ψυχρή ενέργεια LNG δεν λειτουργεί ως αυτόνομη δεξαμενή, αλλά ως πηγή υψηλής ποιότητας ψυκτικού δυναμικού, που μεταφέρεται σε ενδιάμεσο θερμικό μέσο και μπορεί να αποδοθεί χρονικά ελεγχόμενα στο κτίριο. Τυπικές διατάξεις περιλαμβάνουν δεξαμενές ψυχρού νερού ή/και λανθάνουσα αποθήκευση με υλικά αλλαγής φάσης (PCM), ώστε να επιτυγχάνεται χρονική αποσύζευξη μεταξύ διαθεσιμότητας ψύξης (π.χ. κατά την επαναεριοποίηση) και τελικής χρήσης [83], [82], [88], [89].

Η λειτουργική αρχή συνοψίζεται στη μετατροπή της ψυχρής ενέργειας σε αποθηκεύσιμο ψυκτικό φορτίο (π.χ. chilled-water/ice/PCM storage) και στην προγραμματισμένη απόδοσή του στο HVAC. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η προψύξη (χώρων ή/και δομικών στοιχείων), η μείωση της στιγμιαίας απαίτησης ψυκτικής ισχύος και η ομαλότερη λειτουργία των ψυκτών, με θετική επίδραση στους εποχικούς δείκτες απόδοσης και μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης αιχμής [89]. Από θερμοδυναμική σκοπιά, η αξιοποίηση είναι συμβατή με τις αρχές του δεύτερου νόμου, καθώς πόρος υψηλής εξεργειακής ποιότητας (λόγω μεγάλης θερμοκρασιακής απόκλισης) κατευθύνεται σε εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας, μειώνοντας τη συνολική μη αντιστρεπτότητα [87].

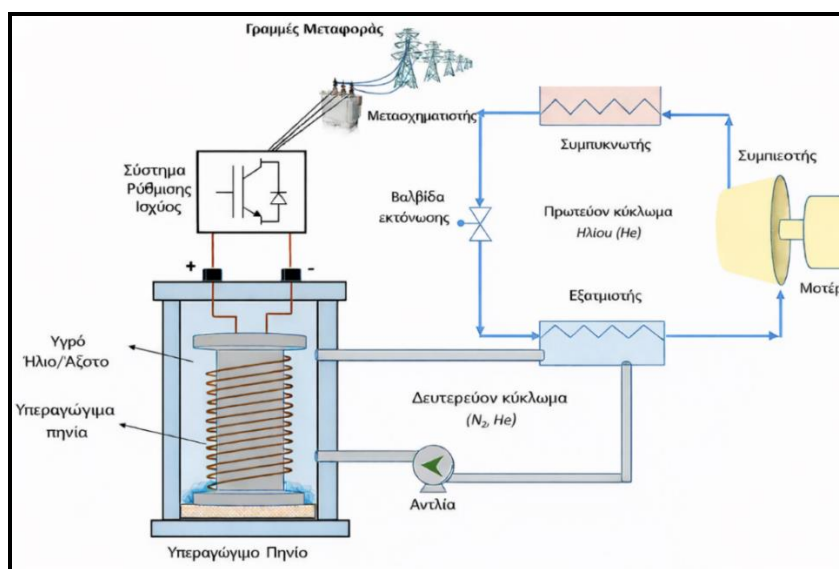
Η συμβολή της ψυχρής ενέργειας LNG είναι ιδιαίτερα συναφής με τα nearly Zero Energy Buildings (nZEB), τα οποία χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή πρωτογενή κατανάλωση και αυξημένη συμμετοχή ΑΠΕ. Παρά την υψηλή θερμική προστασία, τα ψυκτικά φορτία παραμένουν το κρίσιμο μέγεθος (ιδίως σε θερμά κλίματα και κτίρια υψηλών απαιτήσεων άνεσης), ενώ η ευελιξία φορτίου και η μείωση αιχμών αποτελούν πλέον σχεδιαστικό ζητούμενο στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής πολιτικής και της εξέλιξης από nZEB προς πιο «ευέλικτα»/θετικά ενεργειακά κτίρια [90], [91]. Σε τέτοιο πλαίσιο, η ένταξη της ψυχρής ενέργειας (κυρίως μέσω τοπικών/δικτυακών λύσεων ψύξης) μπορεί να περιορίσει την απαιτούμενη εγκατεστημένη ψυκτική ισχύ, να μειώσει το peak demand και να ενισχύσει τη λειτουργική ανθεκτικότητα του κτιρίου/συστήματος [92], [93], [89].

Ο βασικός περιορισμός αφορά τη γεωγραφική και λειτουργική εγγύτητα σε υποδομές LNG και σε δίκτυα/κόμβους θερμικής ολοκλήρωσης (π.χ. λιμένες, ενεργειακά clusters, district cooling). Ωστόσο, σε ειδικά σενάρια (παράκτια κτίρια, τουριστικά συγκροτήματα, υποδομές κοντά σε τερματικούς σταθμούς ή περιοχές με σταθερά ψυκτικά

φορτία), η ψυχρή ενέργεια LNG μπορεί να λειτουργήσει ως τοπικός θερμικός πόρος που συμπληρώνει ΑΠΕ και TES, μειώνοντας την ηλεκτρική κατανάλωση για ψύξη και τις αιχμές φορτίου, άρα υποστηρίζοντας έμμεσα την επίτευξη των στόχων nZEB [86], [92], [93].

5.3 Μαγνητική αποθήκευση ενέργειας σε υπεραγώγιμα πηνία (SMES Superconducting Magnetic Energy Storage)

Η μαγνητική αποθήκευση ενέργειας σε υπεραγώγιμα πηνία (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage) αποτελεί μία τεχνολογία άμεσης αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία βασίζεται στη δημιουργία και διατήρηση μαγνητικού πεδίου μέσω κυκλοφορίας συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος σε υπεραγώγιμο πηνίο [94]. Η λειτουργική αρχή και ο ρόλος της μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας σε υπεραγώγιμα πηνία αποτυπώνονται στο Σχήμα 5.3, όπου παρουσιάζεται η βασική διάταξη ενός συστήματος SMES, αποτελούμενη από το υπεραγώγιμο πηνίο, το κρυογενικό σύστημα και τους μετατροπείς ισχύος που επιτρέπουν την αμφίδρομη ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας με το δίκτυο. Σε αντίθεση με τις μηχανικές ή θερμικές τεχνολογίες αποθήκευσης, η SMES αποθηκεύει την ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρομαγνητική μορφή, χωρίς ενδιάμεσες μετατροπές, γεγονός που οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλές αποδόσεις και ταχύτατους χρόνους απόκρισης [95].



Σχήμα 5.3 Σχηματική διάταξη συστήματος μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας σε υπεραγώγιμο πηνίο (Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES). Η αποθήκευση πραγματοποιείται απευθείας στο μαγνητικό πεδίο του υπεραγώγιμου πηνίου, το οποίο λειτουργεί σε κρυογενικές θερμοκρασίες [96]

Η φυσική βάση της τεχνολογίας SMES στηρίζεται στο φαινόμενο της

υπεραγωγιμότητας, κατά το οποίο η ηλεκτρική αντίσταση του υλικού μηδενίζεται όταν η θερμοκρασία του πέσει κάτω από μία κρίσιμη τιμή T_c . Υπό αυτές τις συνθήκες, το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να κυκλοφορεί στο πηνίο επ' αόριστον χωρίς απώλειες Joule, επιτρέποντας τη μακροχρόνια διατήρηση της αποθηκευμένης ενέργειας, υπό την προϋπόθεση ότι διατηρείται η κρυογενική κατάσταση.

Η αποθηκευμένη ενέργεια σε ένα ιδανικό επαγωγικό στοιχείο δίνεται από τη γνωστή σχέση:

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (5.16)$$

όπου L είναι η αυτεπαγωγή του πηνίου και I το ρεύμα που το διαρρέει. Η αυτεπαγωγή εξαρτάται από τη γεωμετρία του πηνίου και τις μαγνητικές ιδιότητες του χώρου και μπορεί να εκφραστεί, για ένα σωληνοειδές πηνίο, ως:

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 A}{l} \quad (5.17)$$

$\mu_0 \mu_r N A$ όπου είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, η σχετική μαγνητική διαπερατότητα, ο αριθμός των σπειρών, το εμβαδόν της διατομής και το μήκος του πηνίου [94]. Η σχέση αυτή αναδεικνύει ότι η αύξηση της αποθηκευμένης ενέργειας επιτυγχάνεται είτε μέσω αύξησης του ρεύματος είτε μέσω αύξησης της αυτεπαγωγής, με την πρώτη επιλογή να περιορίζεται από το κρίσιμο ρεύμα του υπεραγωγίμου υλικού [97].

Κατά τη φάση φόρτισης του συστήματος SMES, ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο μετατρέπεται σε αυξανόμενο ρεύμα στο πηνίο μέσω ενός συστήματος ισχύος, συνήθως βασισμένου σε μετατροπείς AC/DC [98]. Η δυναμική της φόρτισης περιγράφεται από την εξίσωση του επαγωγικού κυκλώματος:

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (5.18)$$

όπου V είναι η εφαρμοζόμενη τάση. Η σχέση αυτή δείχνει ότι η ταχύτητα φόρτισης και εκφόρτισης μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλή, περιοριζόμενη κυρίως από τις δυνατότητες των ηλεκτρονικών ισχύος και όχι από φυσικούς περιορισμούς του μέσου αποθήκευσης.

Κατά τη φάση εκφόρτισης, το αποθηκευμένο μαγνητικό πεδίο καταρρέει ελεγχόμενα και το ρεύμα μειώνεται, επιστρέφοντας ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο [99]. Η εκφόρτιση μπορεί να θεωρηθεί συμμετρική της φόρτισης, με την ισχύ εξόδου να δίνεται από τη σχέση :

$$P = VI = LI \frac{dI}{dt} \quad (5.19)$$

Η άμεση αυτή μετατροπή επιτρέπει αποδόσεις κύκλου φόρτισης–εκφόρτισης που υπερβαίνουν το 95%, καθιστώντας τη SMES μία από τις πλέον αποδοτικές τεχνολογίες

αποθήκευσης ενέργειας από πλευράς δυναμικής απόκρισης και ενεργειακών απωλειών [94], [95].

Ωστόσο, η λειτουργία της SMES δεν είναι θερμοδυναμικά ουδέτερη, καθώς η διατήρηση της υπεραγώγιμης κατάστασης απαιτεί συνεχή ψύξη σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Το ενεργειακό κόστος της κρυογενικής ψύξης μπορεί να προσεγγιστεί μέσω του συντελεστή απόδοσης ψύξης (COP: Coefficient of Performance), με την απαιτούμενη ισχύ ψύξης να δίνεται από:

$$P_{cool} = \frac{Q_{loss}}{COP} \quad (5.20)$$

όπου Q_{loss} είναι το θερμικό φορτίο από αγωγή, ακτινοβολία και αναντιστρεπτότητες του συστήματος. Αν και οι απώλειες αυτές δεν επηρεάζουν άμεσα την ηλεκτρική απόδοση του κύκλου, μειώνουν τη συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα σε μακροχρόνια λειτουργία.

Από άποψη πυκνότητας ενέργειας, η SMES υστερεί σημαντικά σε σχέση με χημικές ή θερμικές τεχνολογίες αποθήκευσης. Η αποθηκευμένη ενέργεια περιορίζεται από το μέγιστο επιτρεπτό μαγνητικό πεδίο και τις μηχανικές τάσεις που αναπτύσσονται στο πηνίο, οι οποίες εξαρτώνται με το τετράγωνο του ρεύματος. Οι τάσεις αυτές επιβάλλουν αυστηρούς δομικούς περιορισμούς και αυξάνουν το κόστος κατασκευής και περιορίζουν τη δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας σε μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ενέργειας.

Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η SMES παρουσιάζει μοναδικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές όπου απαιτείται εξαιρετικά ταχεία απόκριση και υψηλή ποιότητα ισχύος. Η μαθηματική ανάλυση της λειτουργίας της καταδεικνύει ότι πρόκειται για τεχνολογία ιδανική για εξομάλυνση διακυμάνσεων, σταθεροποίηση συχνότητας και προστασία κρίσιμων φορτίων, παρά για μακροχρόνια αποθήκευση ενέργειας [100], [101]. Ως εκ τούτου, η SMES καταλαμβάνει έναν εξειδικευμένο αλλά στρατηγικά σημαντικό ρόλο στο φάσμα των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.

5.4 Ηλεκτρικό Τσιμέντο (electron-conducting carbon concrete, ec³) του MIT-Από παθητικό σκυρόδεμα σε δομικό υπερπυκνωτή

5.4.1 Εισαγωγή και κίνητρο υποδομών

Η ερευνητική κατεύθυνση που αναπτύχθηκε στο MIT προτείνει μια ριζικά διαφορετική στρατηγική: αντί της συνεχούς αύξησης της ενεργειακής πυκνότητας ανά μονάδα μάζας ή όγκου, αξιοποιείται ένα υλικό χαμηλής εντατικής ενεργειακής απόδοσης αλλά τεράστιου διαθέσιμου δομικού όγκου, δηλαδή το σκυρόδεμα. Η έννοια του electron-conducting carbon concrete (ec³) συνίσταται στη μετατροπή του σκυροδέματος από παθητικό δομικό φορέα σε ενεργό στοιχείο αποθήκευσης και απόδοσης ηλεκτρικής

ενέργειας, χωρίς να αναιρείται ο πρωταρχικός του ρόλος ως φέρον υλικό [102],[103].

5.4.2 Η έννοια του ec^3 ως δομικού υπερπυκνωτή (EDLC)

Η λειτουργία των δομικών υπερπυκνωτών διαφέρει ουσιωδώς από αυτή των μπαταριών. Το ec^3 δεν λειτουργεί ως μπαταρία με την κλασική έννοια της ηλεκτροχημικής αποθήκευσης. Η βασική αρχή λειτουργίας του βασίζεται στον μηχανισμό της ηλεκτροστατικής διπλοστοιβάδας (electric double layer capacitor, EDLC), όπου η αποθήκευση ενέργειας πραγματοποιείται μέσω της αναστρέψιμης προσρόφησης ιόντων στις διεπιφάνειες αγωγίμου υλικού και ηλεκτρολύτη. Σε αντίθεση με τις μπαταρίες, όπου η ενέργεια αποθηκεύεται μέσω βραδέων και συχνά μη πλήρως αναστρέψιμων χημικών αντιδράσεων που οδηγούν σε γήρανση των ηλεκτροδίων, οι υπερπυκνωτές χαρακτηρίζονται από υψηλή ισχύ, ταχεία φόρτιση και εκφόρτιση, καθώς και εξαιρετική αντοχή σε μεγάλο αριθμό κύκλων που ξεπερνά τους 10.000. Στο ec^3 , δύο χωρικά διακριτές ζώνες αγωγίμου σκυροδέματος λειτουργούν ως ηλεκτρόδια, διαχωρισμένες από ιοντικά αγωγίμο ηλεκτρολύτη, σχηματίζοντας έναν δομικά ενσωματωμένο υπερπυκνωτή μεγάλης κλίμακας [102],[104].

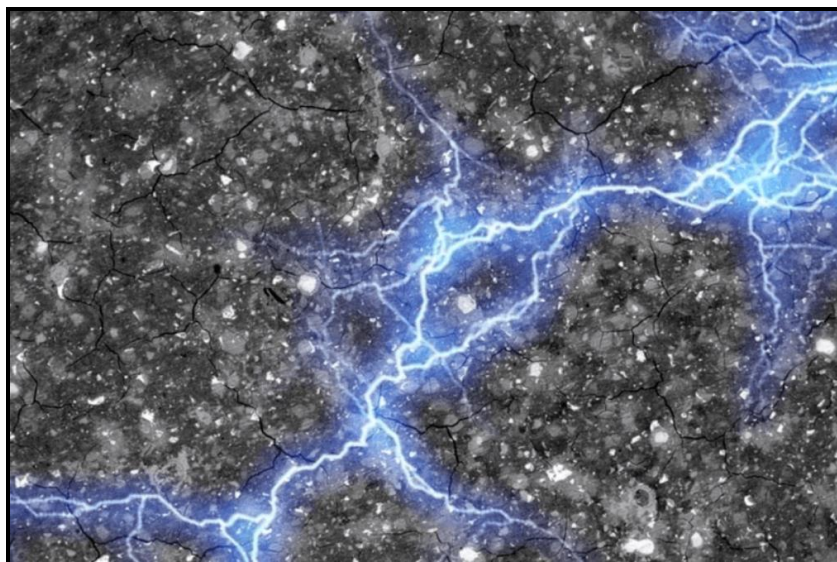
5.4.3 Υλικά, μικροδομή και μηχανισμός αγωγιμότητας (θεωρία διήθησης)

Το συμβατικό τσιμέντο και το σκυρόδεμα είναι ηλεκτρικά μονωτικά υλικά. Η μετατροπή τους σε αγωγίμο επιτυγχάνεται με την προσθήκη νανοκλίμακας μαύρου άνθρακα (carbon black) στο τσιμεντοειδές μίγμα. Κατά τη διαδικασία ενυδάτωσης, το νερό καταναλώνεται και αναδιατάσσεται, οδηγώντας στον σχηματισμό ενός πολύπλοκου πορώδους δικτύου. Τα υδρόφοβα νανοσωματίδια άνθρακα τείνουν να αυτο-οργανώνονται εντός αυτού του πορώδους, και όταν η περιεκτικότητά τους υπερβεί το κρίσιμο όριο διήθησης (percolation threshold), σχηματίζεται ένα συνεχές αγωγίμο δίκτυο που εκτείνεται σε ολόκληρο τον όγκο του υλικού. Σε αυτό το σημείο, το σκυρόδεμα αποκτά μακροσκοπική ηλεκτρική αγωγιμότητα και μπορεί να λειτουργήσει ως ηλεκτρόδιο μεγάλης κλίμακας [102],[103].

5.4.4 Σύνδεση της μικροδομής του ec^3 με τη φρακταλική γεωμετρία (fractal geometry)

Η δομή του αγωγίμου δικτύου άνθρακα που αναπτύσσεται στο ec^3 δεν είναι γραμμική ούτε ομοιόμορφη, αλλά παρουσιάζει έντονα χαρακτηριστικά φρακταλικής γεωμετρίας (Σχήμα 5.4). Το δίκτυο αποτελείται από ιεραρχικά οργανωμένα μονοπάτια αγωγιμότητας που επαναλαμβάνονται σε πολλαπλές κλίμακες, από τη νανοκλίμακα των σωματιδίων έως τη μικροκλίμακα των πόρων και τελικά στη μακροκλίμακα του δομικού στοιχείου. Η

φρακταλική φύση του δικτύου έχει καθοριστική σημασία για τη λειτουργία του ec^3 , διότι επιτρέπει τη δραστική αύξηση της ειδικής επιφάνειας χωρίς αντίστοιχη αύξηση του όγκου ή της μάζας του υλικού. Στο πλαίσιο των υπερπυκνωτών, η χωρητικότητα είναι άμεσα ανάλογη της διαθέσιμης επιφάνειας επαφής μεταξύ ηλεκτροδίου και ηλεκτρολύτη [\[102\],\[105\]](#).



Σχήμα 5.4 Φρακταλική δομή του "ηλεκτρικού τσιμέντου ec^3 του MIT" [\[105\]](#)

5.4.5 Από το εργαστήριο στην αρχιτεκτονική κλίμακα: η πρόοδος 2023–2025

Η αρχική δημόσια παρουσίαση της ιδέας του energy-storing concrete supercapacitor από ερευνητές του MIT υπό την καθοδήγηση των Stefaniuk και Masic ανέφερε ότι όγκος περίπου $45 \text{ m}^3 ec^3$ θα μπορούσε να αποθηκεύσει περί τις 10 kWh, τιμή ενδεικτική της ημερήσιας κατανάλωσης μιας τυπικής κατοικίας. Η εκτίμηση αυτή ανέδειξε αφενός τη χαμηλή ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τις μπαταρίες λιθίου, αφετέρου όμως κατέδειξε τη δομική εφικτότητα της αποθήκευσης, δεδομένου ότι τέτοιοι όγκοι σκυροδέματος είναι συνήθεις σε θεμελιώσεις και φέροντα στοιχεία [\[104\]](#). Οι εξελίξεις της περιόδου 2024–2025 οδήγησαν σε σημαντική βελτίωση της ενεργειακής πυκνότητας, με αναφορές για μείωση του απαιτούμενου όγκου κατά περίπου μία τάξη μεγέθους για την ίδια αποθηκευόμενη ενέργεια, αποτέλεσμα βελτιστοποίησης της μικροδομής, της διασποράς του άνθρακα και της ενσωμάτωσης του ηλεκτρολύτη. Έτσι, η βελτιστοποίηση της μεθόδου παραγωγής μείωσε τον απαιτούμενο όγκο στα 5 κυβικά μέτρα. [\[102\],\[103\]](#). Σε εργαστηριακές υλοποιήσεις, μπλοκ ηλεκτρικού τσιμέντου έχουν επιδείξει την ικανότητα τροφοδότησης μικρών ηλεκτρονικών φορτίων, όπως ενδεικτικά μια δίοδος LED, επιβεβαιώνοντας την πρακτική λειτουργικότητα της διάταξης.

5.4.6 Διαδικασία παραγωγής και η λογική του cast-in electrolyte

Ένα από τα βασικά τεχνολογικά εμπόδια στην κλιμάκωση των δομικών υπερπυκνωτών είναι η ομοιόμορφη διανομή του ηλεκτρολύτη στο εσωτερικό του πορώδους. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις του MIT (cast-in) υιοθετούν τη λογική της ενσωμάτωσης του ηλεκτρολύτη ήδη κατά τη φάση της ανάμιξης και διάστρωσης του υλικού, αντί της εκ των υστέρων εμποτιστικής διαδικασίας (Σχήμα 5.5). Η στρατηγική αυτή εξασφαλίζει ομοιογενή ιοντική αγωγιμότητα, αποτρέπει τη δημιουργία «νεκρών ζωνών» σε μεγάλα πάχη και αυξάνει τη βιομηχανική επαναληψιμότητα της παραγωγής. Παράλληλα, απαιτείται αυστηρός έλεγχος της διασποράς του carbon black, καθώς η συσσωμάτωση μειώνει την ενεργή επιφάνεια, αποσταθεροποιεί την αγωγιμότητα και επιβαρύνει τις μηχανικές ιδιότητες [103],[105].

5.4.7 Επιδόσεις του ec^3

Ως υπερπυκνωτής, το ec^3 παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης, καθιστώντας το κατάλληλο για επαναλαμβανόμενη ημερήσια χρήση και εξομάλυνση φορτίου [102]. Το ec^3 του MIT επιτυγχάνει περίπου 304 Wh/m³ σε επίπεδο συστήματος (bulk) [103]. Αν συγκριθεί με μια μπαταρία λιθίου (περίπου 250.000 Wh/m³), η απόδοση φαίνεται αμελητέα. Η αξία του όμως έγκειται στην «εντατική» (intensive) φύση της ιδιότητας: επειδή το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σε τόνους, η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια σε ένα κτίριο είναι τεράστια, καθιστώντας τη χαμηλή πυκνότητα αποδεκτή [105].

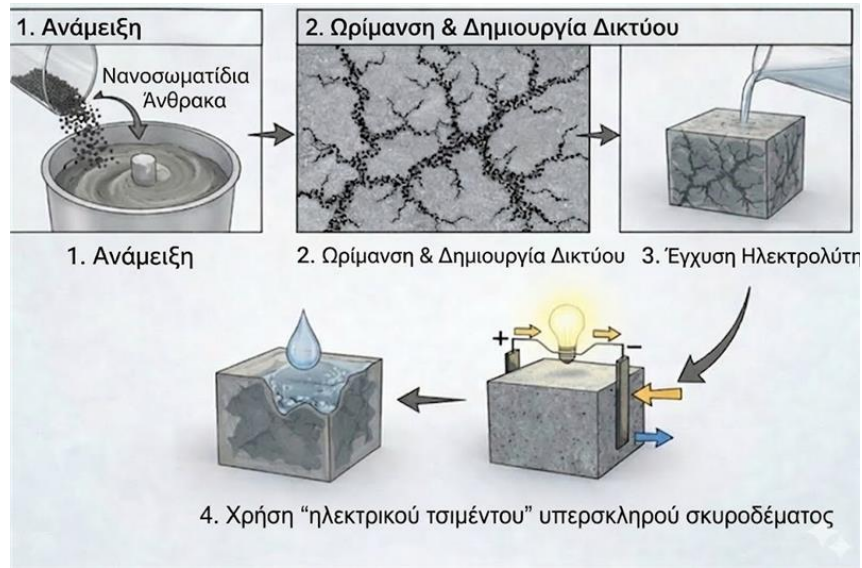
5.4.8 Ηλεκτρολύτες, τάση λειτουργίας και ασφάλεια

$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$ Η επιλογή ηλεκτρολύτη επηρεάζει καθοριστικά την ενεργειακή απόδοση και την ασφάλεια. Αν και οι οργανικοί ηλεκτρολύτες επιτρέπουν υψηλότερες τάσεις λειτουργίας και συνεπώς μεγαλύτερη αποθηκευόμενη ενέργεια, οι υδατικοί ηλεκτρολύτες προσφέρουν πλεονεκτήματα ασφάλειας, χαμηλού κόστους και περιβαλλοντικής συμβατότητας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση θαλασσινού νερού σε λιμενικές ή παράκτιες εφαρμογές, όπου ο ηλεκτρολύτης είναι ουσιαστικά διαθέσιμος χωρίς πρόσθετο κόστος [103],[104]. Η επιλογή ηλεκτρολύτη αποτελεί πεδίο έντονου προβληματισμού. Οι οργανικοί ηλεκτρολύτες (π.χ. με ακετονιτρίλιο) επιτρέπουν υψηλότερες τάσεις (3-4 V) και άρα τετραπλάσια ενέργεια. Παρόλα αυτά, το ακετονιτρίλιο είναι τοξικό και εύφλεκτο, καθιστώντας το ακατάλληλο για οικιακές εφαρμογές [106]. Αντιθέτως, οι υδατικοί ηλεκτρολύτες (KCl, NaCl) περιορίζονται στο 1 V λόγω της ηλεκτρόλυσης του νερού, αλλά είναι απόλυτα ασφαλείς και φθηνοί. Η χρήση θαλασσινού νερού έχει αποδειχθεί εξίσου αποτελεσματική, ανοίγοντας τον δρόμο για λιμενικά έργα με

μηδενικό κόστος ηλεκτρολύτη [103].

5.4.9 Αυτοεκφόρτιση (Self-discharge) και χρονική κλίμακα εφαρμογών

Όπως όλοι οι υπερπυκνωτές, το ec^3 παρουσιάζει υψηλότερους ρυθμούς αυτοεκφόρτισης σε σχέση με τις μπαταρίες. Λόγω των ρευμάτων διαρροής, η αποθηκευμένη ενέργεια μειώνεται σημαντικά εντός 24 ωρών [107]. Ως εκ τούτου, η τεχνολογία είναι καταλληλότερη για βραχυπρόθεσμη έως μεσοπρόθεσμη αποθήκευση, όπως η ημερήσια μεταφορά ηλιακής ενέργειας από τις ώρες παραγωγής στις ώρες κατανάλωσης, και όχι για εποχική αποθήκευση [102],[103].



Σχήμα 5.5 Αναπαράσταση διαδικασίας παρασκευής του "ηλεκτρικού τσιμέντου του MIT ec^3 " με χρήση τεχνητής νοημοσύνης [105]

6 Περιγραφή και υλοποίηση αποκεντρωμένου ενεργειακού συστήματος ορεινού χωριού στη Βόρεια Εύβοια

6.1 Γενική σύλληψη και αρχιτεκτονική του συστήματος

Η προτεινόμενη εγκατάσταση (Σχήμα 6.1) αφορά τον αποκεντρωμένο ενεργειακό σχεδιασμό οικισμού πληθυσμού 100 κατοίκων στην Βόρεια Εύβοια [124], [126], [127], [140] με βασικό στόχο την ασφαλή και αδιάλειπτη κάλυψη των κρίσιμων ηλεκτρικών φορτίων και των θερμικών αναγκών θέρμανσης/ZNX (Ζεστού Νερού Χρήσης) μέσω τεχνολογιών χαμηλής πολυπλοκότητας, υψηλής διαθεσιμότητας και αυξημένης ανθεκτικότητας σε δυσμενείς κλιματικές και λειτουργικές συνθήκες. Ως κεντρική σχεδιαστική αρχή υιοθετείται η ιεράρχηση της χρήσης της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας προς θερμική αξιοποίηση (power-to-heat), με σκοπό την ελαχιστοποίηση της εξάρτησης από συστήματα ηλεκτρικής αποθήκευσης υψηλής πολυπλοκότητας (π.χ. μεγάλης κλίμακας συστοιχίες μπαταριών) και τη μετατόπιση της “αποθήκης” ενέργειας σε μέσα αισθητής θερμότητας.

Η συνολική αρχιτεκτονική συγκροτείται ως υβριδικό, ιεραρχημένο σύστημα τριών επιπέδων:

Επίπεδο I — Αποκεντρωμένη παραγωγή (Distributed Generation):

Η πρωτογενής παραγωγή επιτυγχάνεται με διασπορά μονάδων ΑΠΕ (Φ/Β, ώστε να περιορίζονται οι απώλειες μεταφοράς, να ενισχύεται η λειτουργική εφεδρεία και να μειώνεται η ευπάθεια του συστήματος σε μεμονωμένες αστοχίες.

Επίπεδο II — Κεντρική αποθήκευση ενέργειας: Η αποθήκευση ενέργειας υλοποιείται μέσω βαρυτικής αποθήκευσης τύπου Gravitricity

Η ηλεκτρική περίσσεια αξιοποιείται για την ανύψωση μαζών. Η αποθηκευμένη δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω γεννήτριας κατά τη φάση εκφόρτισης. Το σύστημα αυτό λειτουργεί ως μηχανική «μπαταρία» μεγάλης διάρκειας ζωής, με ελάχιστες απώλειες γήρανσης και υψηλή ανθεκτικότητα σε ακραίες θερμοκρασίες, χαρακτηριστικά ιδιαίτερα σημαντικά για ορεινά περιβάλλοντα.

Επίπεδο III — Τοπική διανομή και διαχείριση φορτίων

Η ενέργεια διανέμεται μέσω τοπικού δικτύου χαμηλής τάσης και, όπου είναι εφικτό, μέσω δικτύου διανομής θερμότητας ή επιμέρους θερμικών υποσταθμών. Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται σε ιεραρχημένη διαχείριση φορτίων, με προτεραιότητα:

- i. κρίσιμες ηλεκτρικές ανάγκες (φωτισμός, επικοινωνίες, ιατρικός εξοπλισμός)
- ii. βασικές θερμικές ανάγκες

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται υψηλός βαθμός ενεργειακής αυτονομίας, σταθερότητα λειτουργίας και ελαχιστοποίηση της εξάρτησης από συμβατικές εφεδρικές πηγές [121], [123], [134], [136].

Με τη συγκεκριμένη δομή, το σύστημα επιδιώκει: (α) υψηλό βαθμό ενεργειακής αυτονομίας, (β) λειτουργική ευστάθεια με ελάχιστες εξειδικευμένες απαιτήσεις συντήρησης, και (γ) ορθολογική αξιοποίηση της μεταβλητότητας των ΑΠΕ μέσω του gravitricity αντί ηλεκτροχημικής αποθήκευσης.



Σχήμα 6.1 Ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα παραδοσιακού ορεινού οικισμού στην Ελλάδα: συνδυασμός φωτοβολταϊκών, αποθήκευσης βαρύτητας σε παλιό μεταλλευτικό φρέαρ. (η σύνθεση της εικόνας έγινε κατόπιν περιγραφής στο ChatGPT)

6.2 Υπολογιστικό Μοντέλο-Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης θεωρείται ότι ο εξεταζόμενος οικισμός αποτελείται από περίπου σαράντα κατοικίες. Με βάση τη σύγχρονη δημογραφική δομή

μικρών αγροτικών οικισμών της Ελλάδας, υποτίθεται ότι κάθε κατοικία φιλοξενεί κατά μέσο όρο 2.5 άτομα όπου αντιστοιχούν 20 m² στο καθένα. Συνολικά εκτιμάται ένας πληθυσμός 100 κατοίκων. Ο αριθμός αυτός χρησιμοποιείται ως βασική κλίμακα αναφοράς σε όλους τους ενεργειακούς υπολογισμούς που ακολουθούν.

Σύμφωνα με τα δεδομένα του ENTSO-E ⁵η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση ανά κάτοικο θεωρείται ίση με 6.220 kWh ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά συνέπεια, η μέση συνολική ημερήσια ηλεκτρική ζήτηση του χωριού προκύπτει ίση $E_{el,day} = 1.704$ kWh.

Για να δούμε το τι ενεργειακές ανάγκες απαιτούνται για την θέρμανση-ψύξη του χώρου, χρησιμοποιούμε τις παρακάτω εξισώσεις που καθορίζουν τις ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με την απόσταση των θερμοκρασιών από την ζώνη θερμικής άνεσης ($T_{base,h} = 18^{\circ} C \rightarrow T_{base,c} = 26^{\circ} C$).

$$E_h = \sum \max(0, T_{base,h} - T_i) A k_h \quad (6.1)$$

Ενώ η ενεργειακές ανάγκες για ψύξη δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$E_c = \sum \max(0, T_i - T_{base,c}) A k_c \quad (6.2)$$

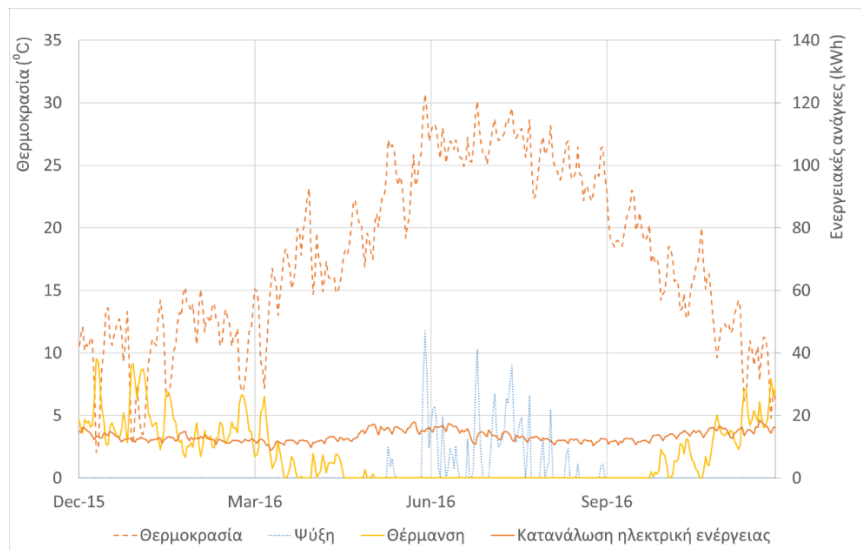
όπου $A = 20$ m² αντιπροσωπεύει την επιφάνεια κατοικίας ανά κάτοικο, ενώ για τις παραμέτρους k_h και k_c έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές 0,12 και 0,05 αντίστοιχα, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως γενικές τιμές [125], [135],[137].

Το Σχήμα 6.3 παρουσιάζει τη συσχέτιση μεταξύ των κλιματικών συνθηκών και των ενεργειακών απαιτήσεων ενός ορεινού οικισμού ανά κάτοικο στη Βόρεια Εύβοια κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η διακεκομμένη καμπύλη απεικονίζει τη μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας, η οποία παρουσιάζει σαφή εποχικότητα, με χαμηλότερες τιμές κατά τους χειμερινούς μήνες και υψηλότερες κατά τη θερινή περίοδο. Οι ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση εμφανίζονται κυρίως κατά τους χειμερινούς μήνες, όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή, ενώ κατά τη θερινή περίοδο παρατηρούνται αυξημένες απαιτήσεις για ψύξη λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών περιβάλλοντος.

Παράλληλα, η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση παρουσιάζει σχετικά μικρότερες διακυμάνσεις σε σύγκριση με τις θερμικές ανάγκες, ωστόσο εμφανίζει ελαφρά αύξηση κατά τις περιόδους έντονης χρήσης συστημάτων ψύξης ή θέρμανσης. Η κατανομή των

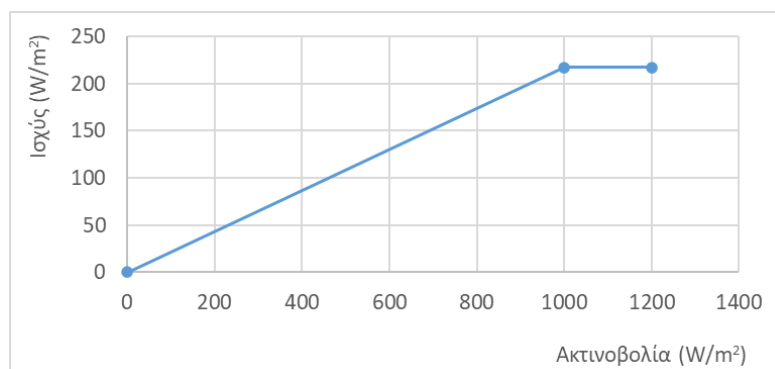
⁵ Ο ευρωπαϊκός σύνδεσμος 'European Network of Transmission System Operators for Electricity' (ENTSO-E) αντιπροσωπεύει 42 Διαχειριστές Συστημάτων Μεταφοράς από 35 χώρες της Ε.Ε. και αποστολή του αποτελούν η ολοκλήρωση της ευρωπαϊκής εσωτερικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η βέλτιστη λειτουργία της.

ενεργειακών φορτίων κατά τη διάρκεια του έτους αναδεικνύει την ισχυρή επίδραση των κλιματικών συνθηκών στις ενεργειακές απαιτήσεις του οικισμού [138, [139].



Σχήμα 6.2 Προφίλ ηλεκτρικής κατανάλωσης ανά κάτοικο, προφίλ θερμοκρασίας, και ενεργειακών αναγκών για την ψύξη θέρμανση στην περιοχή μελέτης (Βόρεια Εύβοια) με ημερήσιο βήμα.

Η διαλείπουσα φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις στη διαχείριση της ενέργειας και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις κλιματικές συνθήκες κάθε περιοχής [128], [130], [131]. Για την υπό μελέτη περιοχή εκτιμήθηκε η απαιτούμενη επιφάνεια 15 m² ανα κάτοικο για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (PV) συστημάτων τα οποία δίνουν κατ' απόλυτο μέγεθος αντίστοιχη παραγωγή (~5,800 kWh ανά έτος) με την κατανάλωση ενέργειας (~6,200 kWh ανά έτος). Οι καμπύλες απόδοσης ισχύος των φωτοβολταϊκών συστημάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.4

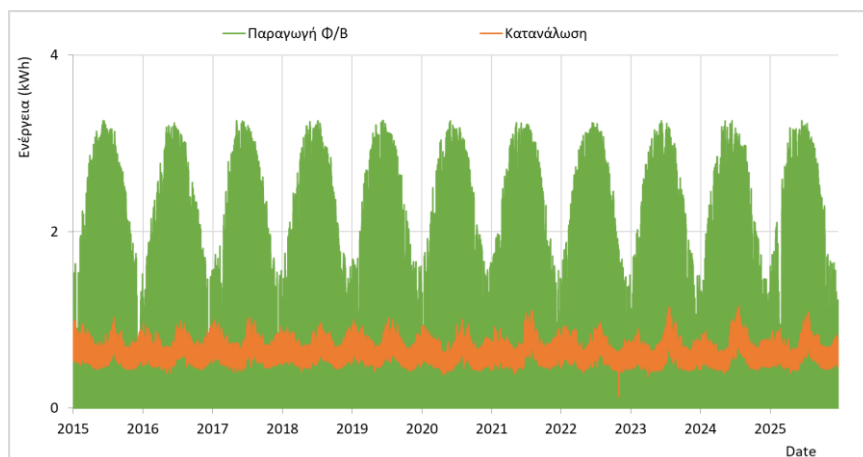


Σχήμα 6.3 Καμπύλη ισχύος φωτοβολταϊκών

Το Σχήμα 6.5 παρουσιάζει τη χρονική μεταβολή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά και της αντίστοιχης κατανάλωσης ανά κάτοικο για την εξεταζόμενη δεκαετία. Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών εμφανίζει έντονη εποχική

περιοδικότητα, με υψηλότερες τιμές κατά τους θερινούς μήνες λόγω της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας και της μεγαλύτερης διάρκειας της ημέρας, ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες παρατηρείται σημαντική μείωση της παραγόμενης ενέργειας. Αντίθετα, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει μικρότερες διακυμάνσεις και διατηρείται σε σχετικά σταθερά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με περιορισμένες αυξομειώσεις που σχετίζονται με τις ενεργειακές ανάγκες των χρηστών.

Η σύγκριση των δύο καμπυλών δείχνει ότι κατά τις περιόδους υψηλής ηλιακής παραγωγής η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά υπερβαίνει σημαντικά την κατανάλωση, δημιουργώντας πλεόνασμα ενέργειας, ενώ κατά τη χειμερινή περίοδο η παραγωγή είναι χαμηλότερη και η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών απαιτεί πρόσθετες ενεργειακές πηγές ή αξιοποίηση συστημάτων αποθήκευσης. Το διάγραμμα αναδεικνύει τη σημασία της αποθήκευσης ενέργειας και της κατάλληλης ενεργειακής διαχείρισης για την αποτελεσματική αξιοποίηση της φωτοβολταϊκής παραγωγής.



Σχήμα 6.4 Προφίλ παραγωγής 15m² φωτοβολταϊκών και κατανάλωσης ανά κάτοικο με ωριαίο βήμα για τα έτη 2015-2025

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η χρονική διάρκεια κατά την οποία η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να καλυφθεί μέσω συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας διαφορετικής χωρητικότητας. Για την περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης χρησιμοποιείται το μοντέλο που ορίζεται από τις διεργασίες των εξισώσεων (6.3) και (6.4)

$$S_T = \max(0, \min(K, S_{T-1} + x_T - R_T)) \quad (6.3)$$

$$R_T = a \cdot S_{T-1} \quad (6.4)$$

όπου T είναι ο χρόνος, S_T είναι το απόθεμα στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, x_T είναι η εισροή ενέργειας μετά την κατανάλωση, R_T είναι η εκροή ενέργειας η οποία

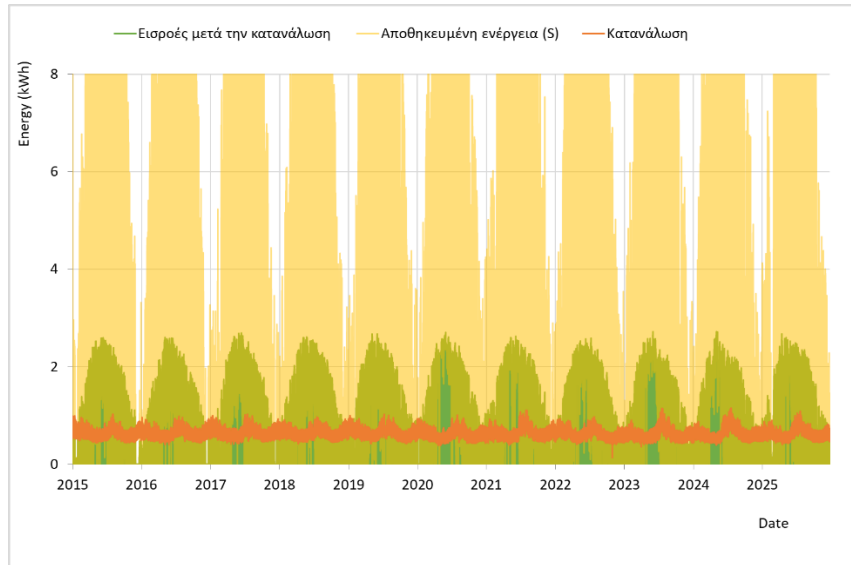
θεωρείται ανάλογη του αποθέματος, α είναι μια σταθερά που καθορίζει την εκφόρτιση και στην περίπτωση αυτή είναι ίση με 1 και K είναι η χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης.

Το συμπέρασμα είναι ότι ένα σύστημα Φ/Β πάρκου καλύπτει τις ανάγκες 35% του συνολικού χρόνου ενώ συνδιασμένο με ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας 8 kWh/κάτοικο, (περίπου η μισή καταναλισκόμενη ημερήσια ενέργεια ανά κάτοικο) βελτιώνει τον χρόνο κάλυψης των αναγκών στο 77%.

Το Σχήμα 6.6 παρουσιάζει τη μακροχρόνια εξέλιξη της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, της αποθηκευμένης ενέργειας στο σύστημα αποθήκευσης (S: Stored Energy) και των απαιτούμενων εισροών ενέργειας μετά τη συνεισφορά των φωτοβολταϊκών για την περίοδο 2015–2025. Η πορτοκαλί καμπύλη απεικονίζει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος, η οποία εμφανίζει σχετικά μικρές διακυμάνσεις και παραμένει σε παρόμοια επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια της δεκαετίας, υποδηλώνοντας σταθερό προφίλ φορτίου. Η πράσινη καμπύλη αντιστοιχεί στις εισροές ενέργειας που απαιτούνται αφού αφαιρεθεί η παραγωγή των φωτοβολταϊκών. Παρατηρείται έντονη περιοδικότητα σε ετήσια βάση, η οποία σχετίζεται με την εποχική μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας. Κατά τους θερινούς μήνες η παραγωγή των Φ/Β είναι υψηλότερη, με αποτέλεσμα οι απαιτούμενες εισροές ενέργειας να μειώνονται σημαντικά, ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες οι εισροές αυξάνονται λόγω μειωμένης ηλιακής παραγωγής. Η κίτρινη καμπύλη απεικονίζει την αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα αποθήκευσης, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0 και περίπου 8 kWh ανα κάτοικο, που αντιστοιχεί στη μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης.

Η μορφή της καμπύλης παρουσιάζει επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης σε ημερήσια και εποχική βάση. Κατά τις περιόδους αυξημένης ηλιακής παραγωγής, η περίσσεια ενέργειας που αποθηκεύεται οδηγεί σε αύξηση της αποθηκευμένης ενέργειας, ενώ σε περιόδους χαμηλής παραγωγής η αποθήκευση χρησιμοποιείται για την κάλυψη της ζήτησης.

Συνολικά, το διάγραμμα καταδεικνύει τη μακροχρόνια λειτουργία ενός υβριδικού ενεργειακού συστήματος φωτοβολταϊκών με αποθήκευση, όπου η αποθήκευση ενέργειας συμβάλλει στην εξισορρόπηση της διαφοράς μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, μειώνοντας τις απαιτήσεις εισαγωγής ενέργειας από το δίκτυο και ενισχύοντας την ενεργειακή αυτονομία του συστήματος [122], [129], [131], [132].

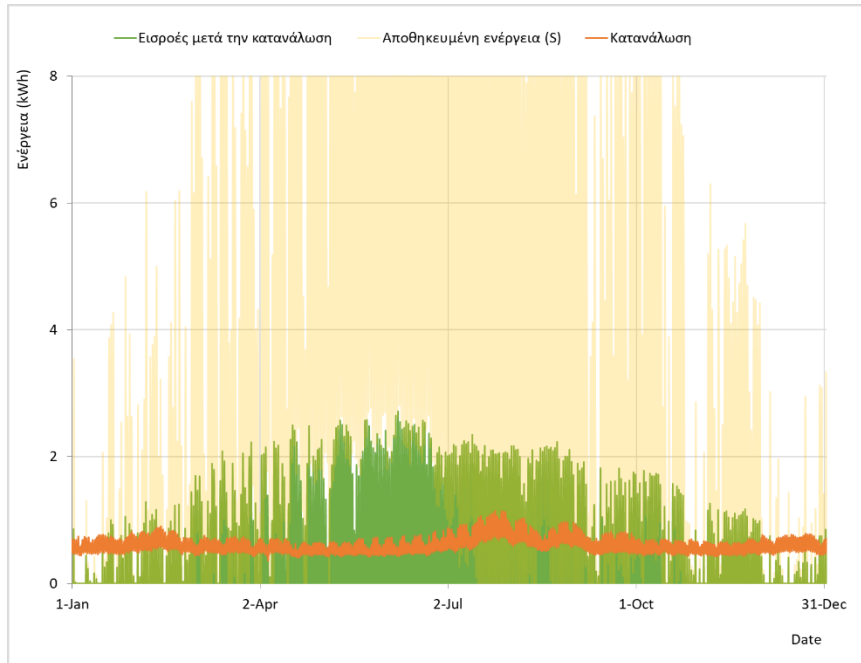


Σχήμα 6.5 Χρονική μεταβολή της κατανάλωσης ενέργειας, των απαιτούμενων εισροών μετά την παραγωγή των φωτοβολταϊκών και της αποθηκευμένης ενέργειας S για την περίοδο 2015–2025.

Στο Σχήμα 6.7 παρατηρείται έντονη εποχική συμπεριφορά του συστήματος. Η κατανάλωση ενέργειας παραμένει σχετικά σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με μικρές αυξομειώσεις που πιθανόν σχετίζονται με μεταβολές στο φορτίο. Αντίθετα, οι καθαρές ενεργειακές εισροές εμφανίζουν σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των εποχών.

Κατά την περίοδο της άνοιξης και του καλοκαιριού αυξάνεται η παραγωγή των φωτοβολταϊκών, γεγονός που μειώνει την ανάγκη για εξωτερικές εισροές ενέργειας. Την ίδια περίοδο παρατηρείται συχνότερη φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης, με την αποθηκευμένη ενέργεια να προσεγγίζει συχνά τη μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος.

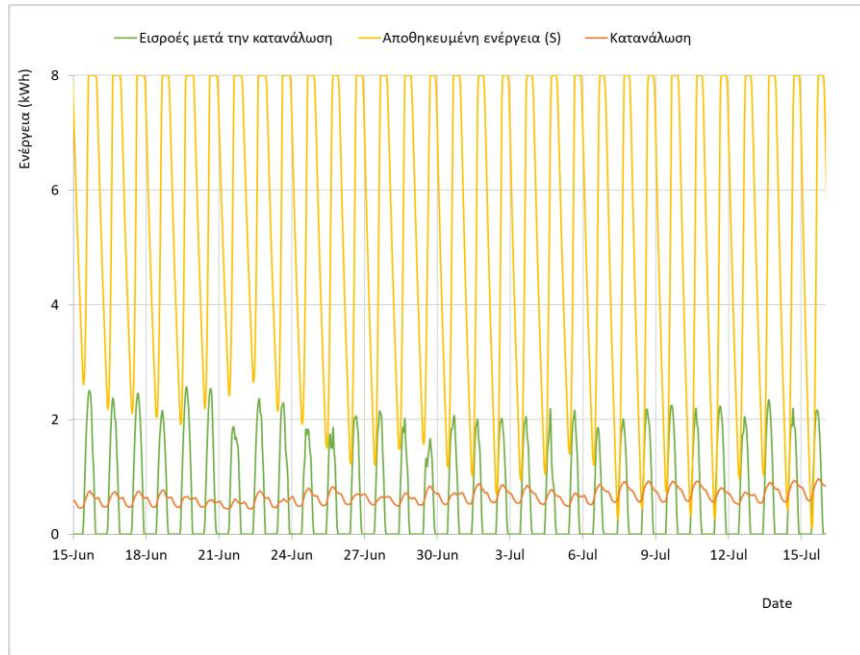
Αντίθετα, κατά τους χειμερινούς μήνες η μειωμένη ηλιακή παραγωγή οδηγεί σε χαμηλότερα επίπεδα αποθηκευμένης ενέργειας και σε μεγαλύτερη ανάγκη ενεργειακών εισροών. Σε σύγκριση με το δεκαετές διάγραμμα, η ετήσια απεικόνιση επιτρέπει την πιο καθαρή παρατήρηση της εποχικής μεταβολής του συστήματος και της άμεσης επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη λειτουργία της αποθήκευσης και στις απαιτούμενες εισροές ενέργειας.



Σχήμα 6.6 Ετήσια μεταβολή της κατανάλωσης ενέργειας, των καθάρων ενεργειακών εισροών μετά τη συνεισφορά των φωτοβολταϊκών και της αποθηκευμένης ενέργειας

Το Σχήμα 6.8 δείχνει ότι κατά τη θερινή περίοδο παρατηρείται αυξημένη παραγωγή από το φωτοβολταϊκό σύστημα, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία της αποθήκευσης και τις απαιτούμενες ενεργειακές εισροές. Η κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει σχετικά μικρές ημερήσιες διακυμάνσεις και διατηρείται σε παρόμοια επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Η υψηλή διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας οδηγεί σε συχνή φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης, με την αποθηκευμένη ενέργεια να προσεγγίζει επανειλημμένα τη μέγιστη χωρητικότητα των περίπου 8 kWh ανα κάτοικο.

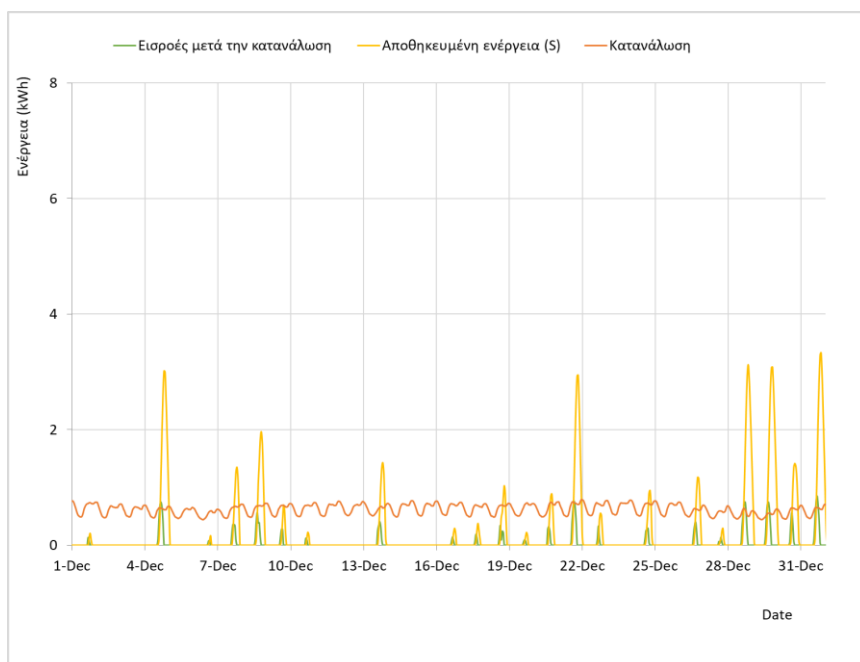
Παράλληλα, οι καθαρές ενεργειακές εισροές εμφανίζονται κυρίως σε χρονικές περιόδους μειωμένης ή μηδενικής ηλιακής παραγωγής, όπως κατά τις νυχτερινές ώρες ή σε περιόδους χαμηλότερης ακτινοβολίας. Συνεπώς, κατά τη θερινή περίοδο το φωτοβολταϊκό σύστημα καλύπτει σε μεγάλο βαθμό τις ενεργειακές ανάγκες του φορτίου, ενώ η αποθήκευση ενέργειας συμβάλλει στην κάλυψη των βραχυχρόνιων διαφορών μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης.



Σχήμα 6.7 Μεταβολή της κατανάλωσης ενέργειας, των καθαρών ενεργειακών εισροών μετά τη συνεισφορά των φωτοβολταϊκών και της αποθηκευμένης ενέργειας S κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος-Ιούλιος).

Το Σχήμα 6.9 δείχνει ότι κατά τον χειμερινό μήνα του Δεκεμβρίου παρατηρείται σημαντικά μειωμένη παραγωγή από το φωτοβολταϊκό σύστημα σε σύγκριση με τη θερινή περίοδο, γεγονός που επηρεάζει τη λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης και τις απαιτούμενες ενεργειακές εισροές. Η κατανάλωση ενέργειας διατηρείται σε σχετικά σταθερά επίπεδα με μικρές ημερήσιες διακυμάνσεις, παρόμοιες με αυτές που παρατηρούνται και στις άλλες χρονικές περιόδους.

Ωστόσο, λόγω της χαμηλότερης ηλιακής ακτινοβολίας και της μικρότερης διάρκειας της ημέρας, η φόρτιση της αποθήκευσης είναι περιορισμένη. Η αποθηκευμένη ενέργεια εμφανίζει μικρότερες και σποραδικές αυξήσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε περιόδους κατά τις οποίες η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι επαρκής για να δημιουργήσει πλεόνασμα ενέργειας. Συνεπώς, το σύστημα βασίζεται περισσότερο σε εξωτερικές ενεργειακές εισροές για την κάλυψη της ζήτησης, ενώ η συμβολή της αποθήκευσης στην ενεργειακή εξισορρόπηση είναι σαφώς μικρότερη σε σχέση με τη θερινή περίοδο.



Σχήμα 6.8 Μεταβολή της κατανάλωσης ενέργειας, των καθαρών ενεργειακών εισροών μετά τη συνεισφορά των φωτοβολταϊκών και της αποθηκευμένης ενέργειας S κατά τη χειμερινή περίοδο (μήνας Δεκέμβριος)

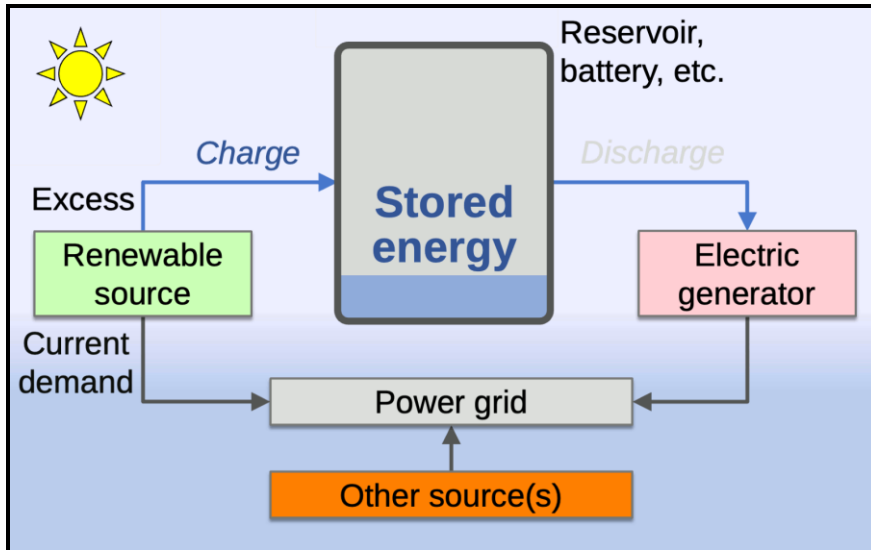
Επομένως αυτό που απαιτείται είναι ένα σύστημα αποθήκευσης τύπου Gravitricity χωρητικότητας 8 kWh ανά άτομο. Έτσι θα αυξηθεί η κάλυψη των αναγκών από 35% του χρόνου σε 77% του χρόνου.

Στη παρούσα μελέτη προτείνεται η μετατροπή του παλιού μεταλλευτικού φρέατος βάθους $h=100$ m σαν σύστημα αποθήκευσης ενέργειας Gravitricity το οποίο θα ανυψώνει $n=12$ blocks μάζας $m=245$ t το κάθε ένα. Τοποθετούμε πολλαπλά blocks γιατί επιτρέπουν μεταβλητούς ρυθμούς εκφόρτισης, δηλαδή υπάρχει η δυνατότητα ρίψης μεμονωμένων blocks για σταθερή παραγωγή ενέργειας ή ταυτόχρονη ρίψη για άμεση κάλυψη ακραίας ζήτησης όπως ένα blackout. Η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί δίνεται από τη σχέση:

$$E = nmgh = 12 \cdot 245.000 \cdot 9.81 \cdot 100 \quad (6.5)$$

$$E = 2.88414 \cdot 10^9 \text{ J} = 2.88414 \cdot 10^6 \text{ kJ} \approx \boxed{801.15 \text{ kWh}}$$

η οποία ισοδυναμεί με την ετήσια αποθήκευση ενέργειας 8.0115 kWh/άτομο



Σχήμα 6.9 Σχηματική αναπαράσταση φόρτισης και εκφόρτισης του υβριδικού συστήματος του ορεινού οικισμού με χρήση τεχνητής νοημοσύνης

7 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τον καθοριστικό ρόλο της αποθήκευσης ενέργειας στη μετάβαση προς ενεργειακά συστήματα υψηλής διείσδυσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Η στοχαστική φύση της ηλιακής και αιολικής παραγωγής δημιουργεί σημαντικές χρονικές ασυμμετρίες μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, γεγονός που καθιστά την αποθήκευση βασικό μηχανισμό εξισορρόπησης και λειτουργικής σταθερότητας των σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων. Η ανάλυση κατέδειξε ότι χωρίς την ύπαρξη επαρκών υποδομών αποθήκευσης, η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ θα οδηγούσε σε αυξημένες περικοπές παραγωγής, υψηλότερη εξάρτηση από εφεδρικές μονάδες ορυκτών καυσίμων και σε περιορισμούς ως προς την περαιτέρω ανάπτυξη των ανανεώσιμων τεχνολογιών.

Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας παρουσιάστηκε μια εκτενής ταξινόμηση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας με βάση τη χρονική κλίμακα λειτουργίας και τον φυσικό μηχανισμό αποθήκευσης. Αναλύθηκαν μηχανικά και βαρυτικά συστήματα, θερμικές μέθοδοι αποθήκευσης, καθώς και αναδυόμενες τεχνολογίες όπως η κρυογενική και η μαγνητική αποθήκευση. Από τη συγκριτική αξιολόγηση προκύπτει ότι καμία τεχνολογία δεν μπορεί να καλύψει από μόνη της το σύνολο των ενεργειακών αναγκών ενός συστήματος. Αντίθετα, η αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας προϋποθέτει τον συνδυασμό διαφορετικών μορφών αποθήκευσης, καθεμία από τις οποίες εξυπηρετεί συγκεκριμένες λειτουργικές απαιτήσεις, όπως η ταχεία απόκριση, η ημερήσια μετατόπιση ενέργειας ή η μακροχρόνια αποθήκευση.

Ιδιαίτερη σημασία αποδόθηκε στη θερμική αποθήκευση, η οποία εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές όπου το ενεργειακό φορτίο είναι κυρίως θερμικό. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης θερμότητας, όπως οι δεξαμενές νερού, τα υλικά αλλαγής φάσης και τα συστήματα με τήγματα αλάτων, χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας και μεγάλη διάρκεια ζωής, καθιστώντας τις ιδιαίτερα ελκυστικές για αποκεντρωμένα ενεργειακά συστήματα.

Μέσα από την ανάλυση και την εφαρμογή των τεχνολογιών στη μελέτη περίπτωσης του ορεινού οικισμού στη Βόρεια Εύβοια, αναδεικνύεται ότι η αποθήκευση δεν είναι ένα ομοιογενές τεχνικό πρόβλημα, αλλά μια σύνθετη πρόκληση που εξαρτάται άμεσα από τη φύση και τη χρονική κατανομή των φορτίων. Η έρευνα απέδειξε ότι η θερμική αποθήκευση επιτρέπει την αποτελεσματική κάλυψη των αναγκών θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού χρήσης χωρίς την ανάγκη εκτεταμένης και δαπανηρής ηλεκτρικής αποθήκευσης,

προσφέροντας μια λύση με χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Η στρατηγική επιλογή της μηχανικής αποθήκευσης βαρύτητας, μέσω της τεχνολογίας Gravitricity, επιβεβαίωσε ότι η χρήση βαριών μαζών σε φρέατα ορυχείων αποτελεί μια εξαιρετικά αξιόπιστη εναλλακτική στις χημικές μπαταρίες, καθώς προσφέρει διάρκεια ζωής έως και 50 έτη, υψηλή απόδοση που αγγίζει το 90% και αυξημένη ανθεκτικότητα σε ακραίες κλιματικές συνθήκες χωρίς τις περιβαλλοντικές προκλήσεις των υλικών λιθίου.

Ποσοτικά, η εργασία κατέδειξε ότι ενώ ένα απλό φωτοβολταϊκό σύστημα καλύπτει τις ανάγκες του οικισμού μόλις το 35% του συνολικού χρόνου, η ενσωμάτωση αποθήκευσης χωρητικότητας 8 kWh ανά κάτοικο βελτιώνει θεαματικά την αξιοπιστία, αυξάνοντας τον χρόνο κάλυψης των αναγκών στο 77%. Η επιτυχία του προτεινόμενου συστήματος βασίζεται στην ιεραρχημένη διαχείριση των φορτίων και στον λειτουργικό διαχωρισμό της ενέργειας, όπου η ηλεκτρική αποθήκευση χρησιμοποιείται αποκλειστικά για κρίσιμες ανάγκες, ενώ η περίσσεια ισχύος μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω διεργασιών power-to-heat.

Συνολικά, η εργασία καταδεικνύει ότι η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για τον σχεδιασμό ανθεκτικών και βιώσιμων ενεργειακών συστημάτων. Ο συνδυασμός διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης, προσαρμοσμένων στα χαρακτηριστικά του φορτίου και στις τοπικές συνθήκες, μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία αποκεντρωμένων ενεργειακών υποδομών υψηλής αξιοπιστίας. Τα αποτελέσματα της μελέτης υπογραμμίζουν τη σημασία των υβριδικών ενεργειακών συστημάτων για την ενεργειακή μετάβαση, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες ή ενεργειακά ευάλωτες περιοχές.

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει στη λεπτομερέστερη προσομοίωση της λειτουργίας τέτοιων συστημάτων σε ετήσια κλίμακα, στην αξιολόγηση διαφορετικών τεχνολογικών συνδυασμών αποθήκευσης, καθώς και στην ενσωμάτωση προηγμένων αλγορίθμων διαχείρισης ενέργειας και τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των μικροδικτύων.

8 Βιβλιογραφία

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook 2020, Paris, France, 2020.
- [2] M. Gunderson et al., “Stochastic characteristics of renewable generation,” *Applied Energy*, vol. 285, 2021.
- [3] D. Lew et al., “The impact of solar and wind variability on power systems,” *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 15, no. 6, 2017.
- [4] I. Dincer and M. Ezan, *Energy Storage Systems and Applications*, Wiley, 2017.
- [5] H. Lund et al., “Energy storage and smart energy systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, 2017.
- [6] P. Brown et al., “Dunkelflaute events in European power systems,” *Energy Policy*, vol. 118, 2018.
- [7] J. Neubauer and E. Wood, “The impact of EVs on load profiles,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, 2018.
- [8] A. Sioshansi, *Energy Storage Modeling in Electric Power Systems*, Elsevier, 2022.
- [9] Z. Chen et al., “Progress in electrical energy storage systems,” *Progress in Natural Science*, vol. 19, 2019.
- [10] J. Cochran et al., *Flexibility in 21st Century Power Systems*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2014.
- [11] P. Denholm, M. O’Connell, G. Brinkman, and J. Jorgenson, “Overgeneration from solar energy in California: A field guide to the duck chart,” NREL/TP-6A20-65023, 2015.
- [12] A. Ulbig and G. Andersson, “Analyzing operational flexibility of electric power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 1988–1997, 2015.
- [13] L. Luo et al., “Overview of current development in electrical energy storage technologies,” *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015.
- [14] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas and V. Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1513–1522, 2009.
- [15] IEA, *Energy Storage – Tracking Clean Energy Progress*, International Energy Agency, 2023.
- [16] M. Milligan et al., “Curtailement of renewable energy in electricity systems,” *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 15, no. 3, pp. 22–34, 2017.
- [17] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li and Y. Ding, “Progress in electrical

energy storage system: A critical review,” *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, 2009.

[18] IRENA, *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*, Abu Dhabi, 2017.

[19] M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberglabe and W. Rosehart, “Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 14, no. 4, pp. 302–314, 2010.

[20] IEEE Power & Energy Society, *Grid-Forming Inverters: Concepts and Applications*, IEEE, 2020.

[21] B. E. Conway, *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*, Springer, 1999.

[22] A. Hadjipaschalis, S. Poullikkas and V. Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies,” *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1513–1522, 2009.

[23] P. Denholm et al., *The Role of Energy Storage in Grid Modernization*, NREL, 2019.

[24] International Energy Agency, *Tracking Energy Storage*, Paris, 2022.

[25] M. Weber et al., “Redox flow batteries: A review,” *Applied Energy*, vol. 211, pp. 116–130, 2018.

[26] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell et al., “State of the art on high-temperature thermal energy storage,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 31–55, 2010.

[27] D. A. Stevens and J. R. Dahn, “High capacity anode materials for sodium-ion batteries,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 147, pp. 1271–1273, 2017.

[28] M. Schlachtberger et al., “The benefits of cooperation in a highly renewable European electricity network,” *Energy*, vol. 134, pp. 469–481, 2018.

[29] I. Dincer and M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, 2nd ed., Wiley, 2021.

[30] M. Götz et al., “Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review,” *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1371–1390, 2016.

[31] L. F. Cabeza et al., “Thermal energy storage technologies and systems for buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 57–69, 2015.

[32] T. Budt, D. Wolf, R. Span and J. Yan, “A review on compressed air energy storage,” *Applied Energy*, vol. 170, pp. 250–268, 2016.

[33] Puchta, M., Bard, J., & Dick, C. (2015). *StEnSea – Stored energy in the sea*. Fraunhofer IWES & Hochtief. https://www.researchgate.net/publication/272318141_STENSEA_-

_Stored_energy_in_the_Sea

[34] Cai, K. (2024). Gravity energy storage: A review on system types, techno-economic assessment and integration with renewable energy. *WIREs Energy and Environment*, 13(6), e543.

<https://doi.org/10.1002/wene.543><https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wene.543>

[35] Wang, R., Zhang, L., Shi, C., & Zhao, C. (2025). A review of gravity energy storage. *Energies*, 18(7), 1812. <https://doi.org/10.3390/en18071812><https://www.mdpi.com/1996-1073/18/7/1812>

[36] Energy Vault Holdings, Inc. (2024, May 30). Energy Vault and Skidmore, Owings & Merrill (SOM) announce exclusive global gravity energy storage partnership to integrate energy storage into building design [Press release]. *Business Wire*. <https://www.businesswire.com/news/home/20240530019120/en/Energy-Vault-and-Skidmore-Owings-Merrill-SOM-Announce-Exclusive-Global-Gravity-Energy-Storage-Partnership-to-Integrate-Energy-Storage-into-Building-Design>

[37] Energy-Storage.news. (2024, June 3). Energy Vault partners with architects SOM for gravity storage in skyscrapers. <https://www.energy-storage.news/energy-vault-partners-with-architects-som-for-gravity-storage-in-skyscrapers/>

[38] Hunt, J. D., Nascimento, A., Zakeri, B., Jurasz, J., Dąbek, P. B., Barbosa, P. S. F., Brandão, R., de Castro, N. J., Leal Filho, W., & Riahi, K. (2022). Lift Energy Storage Technology: A solution for decentralized urban energy storage. *Energy*, 254, 124102. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124102>(Open copy: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/18031/1/1-s2.0-S0360544222010052-main.pdf>)

[39] Dick, C., Puchta, M., & Haberstroh, M. (2021). StEnSea: Results from the pilot test at Lake Constance. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 26, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100445>

[40] New York State Energy Research and Development Authority. (2024, June 6). Energy storage system performance impact evaluation report. <https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Project/Nyserda/Files/Publications/PPSER/NYSERDA/2024-Energy-Storage-Impact-Evaluation-Report.pdf>

[41] Fraunhofer IEE. (2025). Research Project StEnSea – Stored Energy in the Sea. Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology. https://www.iee.fraunhofer.de/en/research_projects/search/2013/stensea.html

[42] Goethe University Frankfurt. (2016, November 11). Energy storage system of tomorrow tested for the first time in Lake Constance. <https://aktuelles.uni->

frankfurt.de/en/english/energy-storage-system-of-tomorrow-tested-for-the-first-time-in-lake-constance/

[43] Fraunhofer IEE. (2025). StEnSea – Stored Energy in the Sea (topic page). Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology. <https://www.iee.fraunhofer.de/en/topics/stensea.html>

[44] ESS News / pv magazine. (2024, November). Subsea pumped storage tech secures funding from US, German governments. <https://pv-magazine-usa.com/2024/11/01/subsea-pumped-storage-tech-secures-funding-from-u-s-german-governments/>

[45] National Renewable Energy Laboratory. (2025, February 26). Pumped storage hydropower — 2024 Electricity ATB. https://atb.nrel.gov/electricity/2024/pumped_storage_hydropower

[46] Virtanen, N. (2024). Offshore energy storage [Master's thesis, LUT University]. LUTPub. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/167357>

[47] TIME. (2024, October 30). Using the power of gravity. <https://time.com/7094811/energy-vault-evx/>

[48] Bauer, T., Laing, D., & Tamme, R. (2021). Molten salts for solar power plants and thermal energy storage. Springer.

[49] Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high-temperature thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 31–55.

[50] Pelay, U., Luo, L., Fan, Y., Stitou, D., & Rood, M. (2017). Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 82–100.

[51] Bradshaw, R. W., & Siegel, N. P. (2009). Molten nitrate salt development for thermal energy storage in parabolic trough solar power systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 131(4), 041002.

[52] Herrmann, U., Kelly, B., & Price, H. (2004). Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants. *Energy*, 29(5–6), 883–893.

[53] Dincer, I., & Rosen, M. A. (2021). *Thermal energy storage: Systems and applications* (3rd ed.). Wiley.

[54] IRENA. (2020). *Innovation outlook: Thermal energy storage*. International Renewable Energy Agency.

[55] Vignarooban, K., Xu, X., Arvay, A., Hsu, K., & Kannan, A. M. (2015). Heat transfer fluids and thermal energy storage materials at high temperatures. *Applied Energy*, 146,

383–396.

[56] Ribeiro, M. C. C. (2016). Structure and dynamics of molten salts. *Chemical Reviews*, 116(8), 4906–4954.

[57] Hahne, E., & Chen, Y. (1998). Numerical study of stratification in a thermal storage tank. *Solar Energy*, 64(1–3), 9–18.

[58] Dahash, A., Ochs, F., Bianchi, M., & Streicher, W. (2019). Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications. *Energy Procedia*, 158, 2052–2059.

[59] Hasnain, S. M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management*, 39(11), 1127–1138.

[60] I. Sarbu and C. Sebarchievici, "A comprehensive review of thermal energy storage," *Sustainability*, vol. 10, no. 1, Art. no. 191, 2018, doi: 10.3390/su10010191.

[61] T. Schmidt, D. Mangold, and H. Müller-Steinhagen, "Central solar heating plants with seasonal storage in Germany," *Solar Energy*, vol. 76, nos. 1–3, pp. 165–174, 2004, doi: 10.1016/j.solener.2003.07.025.

[62] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, and A. I. Fernández, "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.018.

[63] A. Ahmad and S. A. Memon, "Optimizing energy performance of phase-change material-enhanced building envelopes through novel performance indicators," *Buildings*, vol. 15, no. 15, Art. no. 2678, 2025, doi: 10.3390/buildings15152678.

[64] ARANER, "Phase change materials for thermal energy storage," [Online]. Available: <https://www.araner.com/blog/phase-change-materials-for-thermal-energy-storage-what-you-need-to-know>. Accessed: Dec. 11, 2025.

[65] K. Jiao, L. Lu, L. Zhao, and G. Wang, "Towards passive building thermal regulation: A state-of-the-art review on recent progress of PCM-integrated building envelopes," *Sustainability*, vol. 16, no. 15, Art. no. 6482, 2024, doi: 10.3390/su16156482.

[66] M. Beiranvand and M. R. Mohaghegh, "Energy analysis and simulation of PCM-enhanced building envelopes in commercial buildings: A case study," *Energy Storage*, 2021, doi: 10.1002/est2.246.

[67] Sustainability Directory, "How Do Solar Carports Reduce Heat?," [Online]. Available: <https://energy.sustainability-directory.com/question/how-do-solar-carports-reduce-heat/>. Accessed: Dec. 11, 2025.

- [68] M. Dongellini, G. Martino, C. Naldi, S. Lorente, and G. L. Morini, "Experimental study on the heat transfer performance of finned-tube heat exchangers in latent thermal energy storages: Effects of PCM types and operating conditions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 271, Art. no. 126273, 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126273.
- [69] V. V. Tyagi and D. Buddhi, "PCM thermal storage in buildings: A state of art," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, pp. 1146–1166, 2007, doi: 10.1016/j.rser.2005.10.002.
- [70] U.S. Department of Energy, "Multipurpose Latent Heat Storage System for Building Applications," Mar. 24, 2021. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/multipurpose-latent-heat-storage-system-building-applications>. Accessed: Dec. 11, 2025.
- [71] V. Butala and U. Stritih, "Experimental investigation of PCM cold storage," *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 3, pp. 354–359, 2009.
- [72] W.-L. Cheng, Y.-K. Huo, and Y.-L. Nian, "Performance of solar still using shape-stabilized PCM: Experimental and theoretical investigation," *Desalination*, vol. 455, pp. 89–99, 2019.
- [73] ResearchGate, "Investigated window shutters (Fig. 4)," [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/nvestigated-window-shutters-upper-and-window-blade-filled-with-PCM-lower-23_fig4_309221529. Accessed: Dec. 11, 2025.
- [74] ResearchGate, "Schematic of the sun shading systems with and without PCM (Fig. 9)," [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-sun-shading-systems-with-and-without-PCM_fig9_272179269. Accessed: Dec. 11, 2025.
- [75] Y. Zhang et al., "Experimental Study on the Thermal Performance of the Shape-Stabilized Phase Change Material Floor Used in Passive Solar Buildings," *J. Solar Energy Eng.*, vol. 128, no. 2, pp. 255–257, May 2006, doi: 10.1115/1.2189866.
- [76] ResearchGate, "Publication 229285962," [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/229285962>. Accessed: Dec. 11, 2025.
- [77] ResearchGate, "Publication 236224384," [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/236224384>. Accessed: Dec. 11, 2025.
- [78] U.S. Department of Energy, *Achieving the 30% Goal: Energy and Cost Savings Analysis of ASHRAE Standard 90.1-2010*, Washington, DC, USA, 2011.
- [79] G. L. Guizzi, M. Manno, A. Tolomei, and R. M. Vitali, "Thermodynamic analysis of a liquid air energy storage system," *Energy*, vol. 93, pp. 1639–1647, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.030.

- [80] A. Vecchi, Y. Li, Y. Ding, P. Mancarella, and A. Sciacovelli, "Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives," *Advances in Applied Energy*, vol. 3, Art. no. 100047, 2021, doi: 10.1016/j.adapen.2021.100047.
- [81] Morgan, R., Nelmes, S., Gibson, E., & Brett, G. (2015). Liquid air energy storage – Analysis and first results from a pilot scale demonstration plant. *Applied Energy*, 137, 845–853.
- [82] Y. Chen et al., "Utilization of LNG cold energy: A review of current status and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 103, pp. 133–147, 2019.
- [83] S. Mokhatab, J. Y. Mak, J. V. Valappil, and D. A. Wood, *Handbook of Liquefied Natural Gas*. Gulf Professional Publishing, 2014.
- [84] D. Zhang, W. Li, M. Xie, and Q. Chen, "Cold energy recovery from LNG regasification," *Energy Conversion and Management*, vol. 205, 112355, 2020.
- [85] FAO, *Recirculating Aquaculture Systems*, 2022.
- [86] International Energy Agency (IEA), *Energy Efficiency and System Integration*, 2023.
- [87] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. Moran, *Thermal Design and Optimization*. John Wiley & Sons, 1996.
- [88] B. S. Ayalew et al., "Recent Advancements in Latent Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials (PCMs) for HVAC Applications," *Energies*, vol. 18, no. 15, Art. 4000, 2025.
- [89] "Building Thermal Energy Storage — Concepts and Applications," Technical report, DTU
- [90] European Commission, "Directive (EU) 2018/844 on the energy performance of buildings," 2018.
- [91] A. Magrini et al., "From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): A review," *Results in Engineering*, 2020.
- [92] Y. Luo et al., "Liquid Natural Gas Cold Energy Recovery for Integration of LNG Regasification in District Cooling Systems," *Inventions*, vol. 8, no. 5, Art. 121, 2023.
- [93] A. Mugnini et al., "Potential of District Cooling Systems: A Case Study on the Use of Cold Waste Derived from LNG," 2019.
- [94] J. G. Bitterly, "Superconducting magnetic energy storage," *IEEE Spectrum*, vol. 25, no. 5, pp. 30–36, 1988.
- [95] H. Chen et al., "Progress in electrical energy storage system: A critical review,"

Progress in Natural Science, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, 2009.

[96] Bitterly, J. G. (1988). Superconducting magnetic energy storage. IEEE Spectrum.

[97] D. C. Larbalestier et al., “High-temperature superconducting materials for electric power applications,” Nature, vol. 414, pp. 368–377, 2001.

[98] K. N. Leung et al., “Application of superconducting magnetic energy storage for power system stabilization,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp. 1754–1757, 2003.

[99] Y. A. Çengel and M. A. Boles, Thermodynamics: An Engineering Approach, 8th ed., McGraw-Hill, 2015.

[100] R. Hemmati and H. Saboori, “Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 65, pp. 11–23, 2016.

[101] T. Hasegawa et al., “Power system stabilization by SMES,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 1, pp. 12–18, 1996.

[102] D. Stefaniuk, J. C. Weaver, F.-J. Ulm, and A. Masic, “High energy density carbon-cement supercapacitors for architectural energy storage,” Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), vol. 122, no. 39, e2511912122, 2025. <https://doi.org/10.1073/pnas.2511912122>

[103] Massachusetts Institute of Technology (MIT) News Office, “Concrete ‘battery’ developed at MIT now packs ten times more energy,” MIT News, Cambridge, MA, USA, Oct. 1, 2025.

[104] Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, “MIT engineers create an energy-storing supercapacitor from ancient materials,” MIT CEE Research News, Cambridge, MA, USA, Jul. 31, 2023.

[105] Massachusetts Institute of Technology, EC³ (Electron-Conducting Carbon Concrete) Hub, “Next-generation concrete: Combining load-bearing and energy storage solutions,” Research briefs and technical resources, MIT, Cambridge, MA, USA, 2024–2025.

[106] Kyocera AVX. (n.d.). Safety of Acetonitrile-Based Supercapacitors. <https://www.kyocera-avx.com/docs/techinfo/PulseSupercapacitors/Safety-of-Acetonitrile-Based-Supercapacitors.pdf>

[107] Eaton. (n.d.). Supercapacitors vs. batteries: White paper. <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/brochure/eaton-supercapacitor-vs-batteries-white-paper-elx1150-en.pdf>

- [108] <https://rpow.es/energy-storage-solutions/molten-salt-energy-storage/>
- [109] <https://www.quarrymagazine.com/gravel-batteries-and-renewable-energy/>
- [110] <https://el.shieldchannel.com/blogs/portable-power-station/capacitor-energy-storage>
- [111] https://www.researchgate.net/publication/223071124_Flywheel_energy_and_power_storage_systems_Renew_Sustain_Energy_Rev_112235
- [112] <https://www.globalsources.com/knowledge/flow-batteries-safety-cycle-life-advantages/>
- [113] <https://www.energyvault.com/projects/cn-rudong>
- [114] <https://www.theengineer.co.uk/content/news/gravitricity-and-arup-look-underground-for-hydrogen-storage>
 1#:~:text=Gravitricity%20and%20Arup%20have%20secured%20%C2%A3300%2C000%20in,of%20storing%20hydrogen%20in%20purpose%2Dbuilt%20underground%20shafts.
- [115] <https://polarnightenergy.com/news/what-is-a-sand-battery>
- [116] <https://polarnightenergy.com/reference/solution-for-clean-energys-big-problem/>
- [117] <https://thermtest.com/phase-change-material-pcm>
- [118] <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/09506608241292406>
- [119] https://en.wikipedia.org/wiki/Gemasolar_Thermosolar_Plant
- [120] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666386421003313>
- [121] Angelakis, A.N.; Sargentis, G.-F.; Gigourtakis, N.; Kourgialas, N.N. Hydro-Technologies in Greece from Prehistory to Modern Times: A Review of Water Management, Sustainability, and Resilience. *Water* 2026, 18, 560. <https://doi.org/10.3390/w18050560>
- [122] Sargentis, G.-F.; Markatos, E.; Malamos, N.; Iliopoulou, T. Enhancing Resilience and Self-Sufficiency in the Water–Energy–Food Nexus: A Case Study of Hydroponic Greenhouse Systems in Central Greece. *Earth* 2025, 6, 95. <https://doi.org/10.3390/earth6030095>
- [123] Sargentis, G.-F.; Iliopoulou, T.; Ioannidis, R.; Kougia, M.; Benekos, I.; Dimitriadis, P.; Koukouvinos, A.; Dimitrakopoulou, D.; Mamassis, N.; Tsouni, A.; Sigourou, S.; Pagana, V.; Kontoes, C.; Koutsoyiannis, D. Technological Advances in Flood Risk Assessment and Related Operational Practices Since the 1970s: A Case Study in the Pikrodafni River of Attica. *Water* 2025, 17(1), 112. <https://doi.org/10.3390/w17010112>

- [124] Sargentis G.-F.; Ioannidis R.; Dimitriadis,P.; Malamos N.; Lyra O.; Kitsou O.; Kougkia M.; Mamassis N.; Koutsoyiannis D. Energy Self-Sufficiency in Rural Areas, Case Study: North Euboea, Greece. *Advances in Environmental and Engineering Research*, 2024, 2766-6190. <https://doi.org/10.21926/aer.2404025>
- [125] Sargentis G.-F.; Ioannidis R.; Mamassis N.; Zoukos V.; Koutsoyiannis D. A Review of the Energy Policy in Greece in the Last 50 Years and Its Implications for Prosperity. *Clean Energy and Sustainability* 2024, 2, 10021. <https://doi.org/10.70322/ces.2024.10021>
- [126] Sargentis G.-F.; Ioannidis R. The impacts of altering biodiversity to the Water–Energy–Food nexus: case study North Euboea, Greece. *Discover Water*, Springer-Nature, 2024, 4, 105. <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00165-y>
- [127] Sargentis G.-F.; Mamassis N.; Kitsou O.; Koutsoyiannis D. The role of technology in the water–energy–food nexus. A case study: Kerinthos, North Euboea, Greece. *Front. Water* 6:1343344, 2024. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1343344>
- [128] Dimitriadis, P.; Iliopoulou, T.; Sargentis, G.-F.; Koutsoyiannis, D. Spatial Hurst–Kolmogorov Clustering. *Encyclopedia* 2021, 1, 1010-1025. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1040077>
- [129] Sargentis, G.-F.; Dimitriadis, P.; Ioannidis, R.; Iliopoulou, T.; Frangedaki, E.; Koutsoyiannis, D. Optimal utilization of water resources for local communities in mainland Greece (case study of Karyes, Peloponnese), *Procedia Manufacturing*, Volume 44, 2020, Pages 253-260, ISSN 2351-9789. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.229>
- [130] Sargentis, G.-F.; Dimitriadis, P.; Ioannidis, R.; Iliopoulou, T.; Koutsoyiannis, D. Stochastic Evaluation of Landscapes Transformed by Renewable Energy Installations and Civil Works. *Energies* 2019, 12, 2817. <https://doi.org/10.3390/en12142817>
- [131] Sargentis, G.-F.; Ioannidis, R.; Karakatsanis, G.; Sigourou, S.; Lagaros, N.D.; Koutsoyiannis, D. The Development of the Athens Water Supply System and Inferences for Optimizing the Scale of Water Infrastructures. *Sustainability* 2019, 11, 2657. <https://doi.org/10.3390/su11092657>
- [132] Hadjibiros, K.; Katsiri, A.; Andreadakis, A.; Koutsoyiannis, D.; Stamou, A.; Christofides, A.; Efstratiadis, A.; Sargentis, G.-F. Multi-criteria reservoir water management, *Global NEST Journal*, 7(3), 386-394, 2005. <https://doi.org/10.30955/gnj.000394>

- [133] Sargentis, G.-F.; Dimitriadis, P.; Iliopoulou, T.; Ioannidis, R.; Koutsoyiannis, D. Stochastic investigation of the Hurst-Kolmogorov behaviour in arts, European Geosciences Union General Assembly 2018, Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, Vienna, EGU2018-17082, European Geosciences Union, 2018
- [134] Sargentis, G.-F.; Chatzimpiros A.; Symeonidis, N. Determination method of thermal conductivity of building parts in situ through ir imaging by minimizing the influence of environmental parameters, *11th International Conference on Environmental Science and Technology*, Crete, Department of Environmental Studies, University of the Aegean, 2009.
- [135] Sargentis, G.-F.; Bartsioka, K.; Symeonidis, N.; Hadjibiros, K. Evaluation method regarding the effect of building design in the context of sustainable development, 10th International Conference on Environmental Science and Technology, Kos island, Department of Environmental Studies, University of the Aegean, 2007.
- [136] Hadjibiros, K.; Katsiri, A.; Andreadakis, A.; Koutsoyiannis, D.; Stamou, A.; Christofides, A.; Efstratiadis A.; Sargentis, G.- F. Multi-Criteria Reservoir Water Management, 9th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes island, Department of Environmental Studies, University of the Aegean, 2005.
- [137] Efstratiadis, A.; Koutsoyiannis, D.; Hadjibiros, K.; Andreadakis, A.; Stamou, A.; Katsiri, A.; Sargentis, G.-F.; Christofides, A. A multicriteria approach for the sustainable management of the Plastiras reservoir, Greece, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, Nice, European Geophysical Society, 2003.
- [138] Hadjibiros, K.; Koutsoyiannis, D.; Katsiri, A.; Stamou, A.; Andreadakis, A.; Sargentis, G.-F.; Christofides, A.; Efstratiadis, A.; Valassopoulos, A. Management of water quality of the Plastiras reservoir, 4th International Conference on Reservoir Limnology and Water Quality, Ceske Budejovice, Czech Republic, 2002.
- [139] Sargentis, G.-F.; Ioannidis, R.; Meletopoulos, I. T.; Dimitriadis, P.; Koutsoyiannis, D. Aesthetical issues with stochastic evaluation, European Geosciences Union General Assembly 2020, Geophysical Research Abstracts, Vol. 22, Online, EGU2020- 19832, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-19832>, European Geosciences Union, 2020
- [140] Moraiti, K.; Sigourou, S.; Kougia, M.; Sargentis, G.-F.; Koutsoyiannis, D. On-site inspection in monitoring of water flow for the calibration of hydraulic models and the statistical analysis of the hydraulic output. Case study: The river Nileas in North Euboea Greece, before and after the storm Elias in September 2023, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-5186, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-5186>, 2024.