



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας



ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ»

ΤΙΤΛΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

*Δυνατότητες Χρήσης Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας με Προοπτική
Ηλεκτρικής Δικτύωσης σε Επίπεδο Συνοικίας*

Θεοπούλου Ελένη



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Φούντη Μαρία

Καθ. Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2012

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας αποθηκεύουν την ηλεκτρική και θερμική ενέργεια από τις μονάδες παραγωγής σε κατάλληλη μορφή με σκοπό να την αποδώσουν στα ενεργειακά συστήματα σε χρονική στιγμή στην οποία υπάρχει αυξημένη απαίτηση ενέργειας. Έτσι, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί υπό την μορφή ηλεκτρικής, μηχανικής, χημικής και μαγνητικής ενέργειας και η θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε τη μορφή της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας σε στερεά, υγρά και αέρια μέσα. Οι διαθέσιμες τεχνολογίες για την αποθήκευση της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας ποικίλουν σε μέγεθος, απόδοση, κλίμακα εφαρμογής, διάρκεια της διατήρησης της αποθηκευμένης ενέργειας και μπορούν περαιτέρω να ταξινομηθούν σε τεχνολογίες αποθήκευσης βραχυπρόθεσμης, μεσοπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης διάρκειας. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης στα ενεργειακά συστήματα προσφέρουν πολλαπλά οφέλη και αποτελούν μέσα για τη βελτίωση της χρήσης της παραγόμενης ενέργειας και της απόδοσης των συστημάτων παραγωγής.

Στην παρούσα εργασία αξιολογείται η αξία και χρησιμότητα των τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και επιλέγονται οι αποδοτικότερες τεχνολογίες για εφαρμογές σε ηλεκτρικά δίκτυα μικρής κλίμακας σε επίπεδο συνοικίας. Αυτά τα δίκτυα, τα λεγόμενα μικροδίκτυα, με την διείσδυση της διανεμημένης παραγωγής και των τεχνολογιών ΑΠΕ θα παίξουν σημαντικό ρόλο στην αγορά ενέργειας. Με στόχο την αποτελεσματική λειτουργία τους, την εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας, τη μείωση της περιβαλλοντικής επίπτωσης και τη μεγαλύτερη διείσδυση τεχνολογιών παραγωγής από ΑΠΕ, οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας καλούνται να παίξουν ένα σημαντικό ρόλο και να αυξήσουν τη διείσδυσή τους στα δίκτυα του μέλλοντος.

Στα κεφάλαια 1 και 2 γίνεται μια εισαγωγή στο πεδίο εφαρμογής των διατάξεων αποθήκευσης και παρουσιάζονται βάσει της μορφής στην οποία αποθηκεύουν την ενέργεια, όλες οι διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια εισαγωγή στα ηλεκτρικά δίκτυα στα οποία διεισδύει η διανεμημένη παραγωγή όπως τα μικροδίκτυα, και τα έξυπνα δίκτυα που αποτελούν τα δίκτυα του μέλλοντος αλλά και στα δίκτυα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης.

Στο Κεφάλαιο 4 προτείνονται οι βέλτιστες τεχνολογίες αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας για εφαρμογές μικρής έως μεσαίας κλίμακας δικτύων σε επίπεδο συνοικίας. Επιλέγονται κριτήρια αποτίμησης και επιλογής τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε εφαρμογή ισχύος και ενέργειας στα μικροδίκτυα και βάση αυτών επιλέγονται οι αποδοτικότερες από τεχνικής, οικονομικής και περιβαλλοντικής σκοπιάς. Τέλος, αναπτύσσονται σενάρια δικτύωσης κτιρίων που συνιστούν ένα μικροδίκτυο σε θεωρητικό επίπεδο. Ο διαχωρισμός των σεναρίων γίνεται με κεντρική ή διανεμημένη παραγωγή ενέργειας στα πλαίσια του μικροδικτύου και με κεντρικές ή διανεμημένες τεχνολογίες αποθήκευσης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
1 Αποθήκευση Ενέργειας.....	8
1.1 Γενικά.....	8
1.2 Ταξινόμηση Μεθόδων Αποθήκευσης Ενέργειας.....	10
1.3 Χαρακτηριστικά των Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας.....	12
2 Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας.....	14
2.1 Τεχνολογίες Μηχανικής Αποθήκευσης Ενέργειας.....	14
2.1.1 Σύστημα Συμπιεσμένου Αέρα.....	14
2.1.1.1 Γενικά.....	14
2.1.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	16
2.1.2 Αντλησιοταμίευση.....	17
2.1.2.1 Γενικά.....	17
2.1.2.2 Αναστρέψιμο Υδροηλεκτρικό Σύστημα.....	20
2.1.2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	22
2.1.3 Σφόνδυλοι Κινητικής Ενέργειας.....	23
2.1.3.1 Γενικά.....	23
2.1.3.2 Εφαρμογές.....	25
2.1.3.3 Χαρακτηριστικά των Σφονδύλων.....	27
2.1.3.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	28
2.2 Χημική Αποθήκευση Ενέργειας.....	29
2.2.1 Μπαταρίες.....	30
2.2.1.1 Μπαταρίες Μολύβδου – οξέος.....	31

2.2.1.2 Αλκαλικές Μπαταρίες.....	34
2.2.1.3 Μπαταρίες Λιθίου.....	35
2.2.1.4 Μπαταρίες Θείου-Νατρίου.....	36
2.2.1.5 Μπαταρίες Μετάλλου-αέρα.....	37
2.2.1.6 Μπαταρίες Ροής.....	38
2.2.2 Υδρογονοαποθήκευση.....	41
2.2.2.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	43
2.2.2.2 Αποθήκευση Υδρογόνου.....	45
2.2.2.3 Παραγωγή – Διανομή Υδρογόνου.....	49
2.3 Θερμική Αποθήκευση Ενέργειας	51
2.3.1 Αισθητή Θερμότητα.....	52
2.3.1.1 Μέσα Αποθήκευσης.....	54
2.3.1.1.1 Υγρά Μέσα Αποθήκευσης	54
2.3.1.1.2 Στερεά Μέσα Αποθήκευσης	57
2.3.1.2 Υπέργειες Εφαρμογές Αποθήκευσης Αισθητής Θερμότητας.....	58
2.3.1.2.1 Αποθήκευση Αισθητής Θερμότητας σε Δεξαμενές Υγρού.....	58
2.3.1.2.2 Θερμική Κλίση Στερεών.....	61
2.3.1.2.3 Ηλιακή λίμνη	63
2.3.1.4 Υπόγειες Εφαρμογές Αποθήκευσης Αισθητής Θερμότητας	66
2.3.1.4.1 Γεωθερμία	68
2.3.1.4.1.1 Σύστημα Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας	69
2.3.1.4.2 Αποθήκευση σε σπήλαια (rock caverns).....	73
2.3.1.4.3 Αποθήκευση σε υπόγεια φυσικά υδροφόρα στρώματα (aquifers).....	74
2.3.1.4.4 Σύστημα γεώτρησης για αποθήκευση θερμότητας σε ξηρό έδαφος (Borehole energy storage).....	75

2.3.2 Λανθάνουσα Θερμότητα Τήξης	76
2.3.2.1 Υλικά Αλλαγής Φάσης	77
2.3.2.1.1 Ιδιότητες των PCM.....	78
2.3.2.1.2 Κατηγοριοποίηση Υλικών Αλλαγής Φάσης.....	79
2.3.2.1.2.1 Οργανικά PCM	79
2.3.2.1.2.2 Ανόργανα PCM	82
2.3.2.1.2.3 Εύτηκτα μείγματα	85
2.3.2.1.3 Συστήματα Αποθήκευσης με PCM	87
2.3.2.2 Αποθήκευση Πάγου	95
2.3.2.2.1 Συστήματα Αποθήκευσης Πάγου.....	97
2.3.2.2.1.1 Σύστημα Τήξης σε Σερπαντίνα	97
2.3.2.2.1.2 Σύστημα Θρυμματοποίησης Πάγου.....	102
2.3.2.2.1.3 Πάγος σε Μικροκάψουλες	104
2.3.2.2.1.4 Παγοπολτός	105
2.4 Άλλες Μορφές Αποθήκευσης Ενέργειας.....	108
2.4.1 Υπερπυκνωτές.....	108
2.4.1.1 Είδη Υπερπυκνωτών – Χαρακτηριστικά.....	109
2.4.2 Υπεραγώγιμα Υλικά.....	112
2.4.2.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	113
2.5 Σύνοψη Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ηλεκτρικής και Θερμικής Ενέργειας.....	114
3 Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής και Θερμικής Ενέργειας.....	123
3.1 Μικροδίκτυα.....	125
3.1.1 Αποθήκευση Ενέργειας στα Μικροδίκτυα.....	129

3.2 Έξυπνα Δίκτυα.....	130
3.2.1 Έξυπνοι μετρητές.....	132
3.3 Θερμικά Δίκτυα – Τηλεθέρμανση – Τηλεψύξη.....	133
3.3.1 Ταξινόμηση Συστημάτων Τηλεθέρμανσης – Τηλεψύξης.....	134
3.3.2 Βελτίωση της απόδοσης στα Θερμικά Δίκτυα – Αποθήκευση.....	138
3.3.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των Θερμικών Δικτύων.....	139
4 Ηλεκτρική Δικτύωση και Αποθήκευση Ενέργειας σε Επίπεδο Συνοικίας.....	140
4.1 Επιλογή Κριτηρίων Αξιολόγησης Τεχνολογιών Ηλεκτρικής Αποθήκευσης.....	142
4.2 Αξιολόγηση και Επιλογή Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ηλεκτρικής ενέργειας.....	150
4.3 Σενάρια Ηλεκτρικής Δικτύωσης με Ενεργειακή Αποθήκευση.....	157
4.3.1 Σενάριο κεντρικής παραγωγής με κεντρική αποθήκευση.....	159
4.3.2 Σενάριο Κεντρικής Παραγωγής με διανεμημένη αποθήκευση ενέργειας.....	162
4.3.3 Σενάριο κεντρικής παραγωγής συνδυάζοντας κεντρική και διανεμημένη αποθήκευση.....	164
4.3.4 Σενάριο Διανεμημένης Παραγωγής με Διανεμημένη Αποθήκευση Ενέργειας.....	166
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	168
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	174

1 Αποθήκευση ενέργειας

1.1 Γενικά

Σε κάθε ενεργειακό σύστημα το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι αυτό της διαχείρισης της παραγόμενης ενέργειας σύμφωνα με το απαιτούμενο φορτίο. Στα διάφορα ενεργειακά συστήματα είναι δυνατόν να παρατηρηθούν εποχική διακύμανση των ενεργειακών απαιτήσεων, διακύμανση κατά την παραγωγή ενέργειας και διαφορά στην ποσότητα παραγωγής και ζήτησης της ενέργειας. Η ανάγκη αντιμετώπισης αυτών των θεμάτων είναι αυξημένη και σε αυτό το σημείο έρχεται να παίζει το ρόλο του ρυθμιστή η αποθήκευση της ενέργειας ώστε να εξομαλύνει τα προαναφερθέντα ζητήματα.

Μια μονάδα αποθήκευσης της ενέργειας σε ένα οποιοδήποτε σύστημα παραγωγής ενέργειας είναι μια εγκατάσταση, συνήθως υποκείμενη σε ανεξάρτητο έλεγχο, η οποία αποθηκεύει την ενέργεια που παράγεται στο σύστημα παραγωγής και μπορεί να τη διατηρεί και να την αποδίδει όταν είναι απαραίτητο. Ένας κύκλος αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνει τη φόρτιση της ενεργειακής αποθήκης, τη διατήρηση της αποθηκευμένης ενέργειας και την αποφόρτιση της. Οι απώλειες τοποθετούνται στο σύστημα διατήρησης της αποθηκευμένης ενέργειας αλλά μπορούν να υπεισέρχονται σε οποιοδήποτε στάδιο.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα από την εφαρμογή τους [1]:

- Αυξάνουν την παραγωγική ικανότητα του συστήματος, αφού η ενέργεια που παράγεται σε περιόδους απαίτησης χαμηλού φορτίου μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους ενεργειακής αιχμής χωρίς το σύστημα να λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση με υψηλά φορτία.
- Ενδυναμώνουν την καλύτερη λειτουργία των συστημάτων συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού αφού με την αποθήκευση της ενέργειας τα συστήματα δε χρειάζεται να ενεργοποιούνται σύμφωνα με τις μεταβαλλόμενες ανάγκες του φορτίου.
- Αυξάνουν την αξιοπιστία του παραγωγικού συστήματος, αφού επιτρέπουν τη σταθερή παραγωγή χωρίς επικίνδυνες διακυμάνσεις.

- Μεταφέρουν την παραγωγή ενέργειας από τις περιόδους υψηλής ζήτησης σε περιόδους χαμηλής όπου το κόστος παραγωγής είναι μικρότερο με αποτέλεσμα το μειωμένο κόστος της ενέργειας.
- Αυξάνουν την προσαρμοστικότητα ενός συστήματος στις εκάστοτε ανάγκες.
- Μειώνουν το αρχικό κόστος και το κόστος συντήρησης του παραγωγικού συστήματος ενέργειας καθώς μειώνεται ο απαιτούμενος εξοπλισμός και η δυναμικότητα του.
- Μειώνουν την κατανάλωση των καυσίμων με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση κόστους και την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι πολλές και οι σημαντικότερες σήμερα είναι [1]:

- Σε εταιρίες κοινής ωφέλειας, είναι δυνατή η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους χαμηλού κοστολογίου με σκοπό την χρησιμοποίησή της σε περιόδους αιχμής, μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα (λιγνίτης, φυσικό αέριο, πετρέλαιο) και περιορίζοντας τη χρήση επιπλέον μονάδων παραγωγής για την κάλυψη των φορτίων.
- Στη βιομηχανία, απορροές υψηλής θερμότητας μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν σε στάδια προθέρμανσης και απόδοσης ενέργειας σε άλλες διεργασίες.
- Στην παραγωγή ενέργειας μέσω ΑΠΕ είναι δυνατή η αποθήκευση της ενέργειας σε περιόδους χαμηλού φορτίου ώστε να καλύψουν της ανάγκες αιχμών ή περιπτώσεων όπου η ανανεώσιμη ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη λόγω περιοδικότητας (π.χ. ηλιακά συστήματα, αιολικά συστήματα)
- Στον κτιριακό τομέα (οικιακό και εμπορικό) είναι δυνατή η αποθήκευση θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής ενέργειας σε εκτός αιχμής περιόδους, επιτρέποντας έτσι την εγκατάσταση μικρότερων μονάδων παραγωγής θερμικής ενέργειας για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών φορτίων, την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας και την μείωση των τιμολογίων της.

1.2 Ταξινόμηση μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας

Τα συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο γενικές κατηγορίες [1,2]:

1. Βάσει της διάρκειας αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας.
2. Βάσει της μορφής στην οποία αποθηκεύεται η παραγόμενη ενέργεια.

Βάσει της διάρκειας της αποθήκευσης της ενέργειας μπορούν οι εφαρμογές να χωριστούν σε μικρής, μεσαίας και μεγάλης διάρκειας ενεργειακή αποθήκευση.

Η μικρής διάρκειας αποθήκευση (βραχυπρόθεσμη) χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει τις αιχμές ζήτησης ενός ενεργειακού συστήματος για ορισμένο χρονικό διάστημα μέσα στη διάρκεια μιας ημέρας. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται το μέγεθος ενός ενεργειακού συστήματος, οι θερμικές απώλειες και οι μονάδες παραγωγής ενέργειας. Στα συστήματα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ανήκουν οι σφόνδυλοι, οι υπερπυκνωτές, τα υπεραγώγιμα υλικά, οι δεξαμενές αποθήκευσης υγρού.

Η μεσαίας διάρκειας αποθήκευση (μεσοπρόθεσμη) συστήνεται όταν το πλεόνασμα της ενέργειας ή το εποχιακό κέρδος μπορεί να μεταφερθεί με μια καθυστέρηση από μερικές ημέρες έως και λίγες εβδομάδες και να εξυπηρετήσει μελλοντική ζήτηση. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα συστήματα μπαταριών, υδρογονοαποθήκευσης, θερμοκλίνες στερεών.

Οι μεγάλης διάρκειας εφαρμογές αποθήκευσης αφορούν συστήματα με μεγάλη χωρητικότητα ενέργειας και μικρές ή μηδενικές απώλειες κατά την αποθήκευση, όπου μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια από μερικούς μήνες μέχρι και σε ετήσια βάση. Οι εφαρμογές αυτές μπορούν να εκμεταλλεύονται τις ετήσιες κλιματικές αλλαγές (διεποχική αποθήκευση) και να επιτυγχάνουν ελαχιστοποίηση των ετήσιων απαιτήσεων σε ενέργεια σε ένα σύστημα ή να εξυπηρετούν ένα πλήθος καταναλωτών (πόλη, οικισμός, βιομηχανικές και εμπορικές περιοχές) σε έκτακτες περιπτώσεις. Οι συνήθεις εφαρμογές για της μακροπρόθεσμη ενεργειακή αποθήκευση ή τη διεποχική αποθήκευση περιλαμβάνει τις τεχνολογίες της αντλησιοταμίευσης, της αποθήκευσης

συμπιεσμένου αέρα, τη γεωθερμία, την υπόγεια αποθήκευση θερμότητας σε στερεά ή υγρά μέσα.

Βάσει της μορφής στην οποία αποθηκεύεται η παραγόμενη ενέργεια, τα συστήματα χωρίζονται σε συστήματα αποθήκευσης [1]:

- Μηχανικής ενέργειας: Τα συστήματα αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας περιλαμβάνουν εκείνα τα συστήματα τα οποία αποθηκεύουν την ενέργεια υπό μορφή δυναμικής (υπερυψωμένων σωμάτων ή ελαστικών υλικών), κινητικής ενέργειας (είτε ευθύγραμμης είτε περιστροφικής κίνησης) και ενέργειας συμπιεσμένου αερίου. Βάση αυτών οι βασικές μέθοδοι είναι η αντλησιοταμίευση, οι περιστρεφόμενοι τροχοί (σφόνδυλοι) και το σύστημα συμπιεσμένου αέρα (CAES).
- Χημικής ενέργειας: Τα συστήματα χημικής αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνουν την ηλεκτροχημική αποθήκευση ενέργειας με χρήση μπαταριών, τη φωτοχημική αποθήκευση ενέργειας μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων, τη θερμοχημική αποθήκευση ενέργειας μέσω αμφίδρομων αντιδράσεων που απελευθερώνουν και αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας ή συστημάτων διάλυσης, απορρόφησης και προσρόφησης και την αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή υδρογόνου, το οποίο αποθηκεύεται σε υγρή ή αέρια ή στερεή μορφή και αξιοποιείται ως καύσιμο όταν απαιτείται.
- Θερμικής ενέργειας: Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας περιλαμβάνουν τα συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας σε στερεά ή υγρά μέσα και της λανθάνουσας θερμότητας σε διάφορα υλικά.
- Άλλης μορφής ενέργειας: Άλλα συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας αποτελούν τα συστήματα μαγνητικής αποθήκευσης σε υπεραγώγιμα υλικά και την αποθήκευση σε πυκνωτές και ηλεκτροχημικούς πυκνωτές του λεγόμενους υπερπυκνωτές.

Βάση των παραπάνω διακρίσεων των μεθόδων αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας μπορούν να προκύψουν ποικίλες εφαρμογές ενεργειακής αποθήκευσης οι οποίες να αντιμετωπίζουν κατά περίπτωση όλες τις απαιτήσεις των συστημάτων στα οποία εγκαθίστανται καλύπτοντας ένα ευρύ πεδίο εφαρμογής από τεχνικής και οικονομικής σκοπιάς.

Συνεπώς, τα διαθέσιμα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να βρουν εφαρμογή σε μεμονωμένα μικρά συστήματα (κατοικίες), σε μεμονωμένα μεγάλα συστήματα που περιλαμβάνουν υποσυστήματα με διαφορετικά ενεργειακά προφίλ κατανάλωσης ενέργειας (μεγάλα εμπορικά κέντρα ή συνοικίες), σε συστήματα που υπάρχουν στα δίκτυα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας ή σε συστήματα με εγκατεστημένες τεχνολογίες εκμετάλλευσης ΑΠΕ και άλλες τεχνολογίες διανεμημένης παραγωγής. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό, τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης μπορούν να εγκατασταθούν είτε κεντρικά είτε διανεμημένα.

Ο παραπάνω διαχωρισμός των αποθηκευτικών διατάξεων σχετίζεται με την ύπαρξη ενεργειακής δικτύωσης (ηλεκτρική ή και θερμική) σε ένα σύστημα. Στο κεφάλαιο 4, προτείνονται τρόποι ηλεκτρικής δικτύωσης κτιρίων σε επίπεδο συνοικίας και συσχετίζονται με την κεντρική ή διανεμημένη αποθήκευση ενέργειας δημιουργώντας σενάρια περιπτώσεων για τον έλεγχο της καταλληλότητας των διαθέσιμων τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης κατά περίπτωση.

1.3 Χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας ή των κατάλληλων τεχνολογιών αποθήκευσης για ένα δεδομένο ενεργειακό με σκοπό την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων για την ενεργειακή διαχείριση αποτελεί μια απαιτητική και πολυπαραμετρική διαδικασία.

Ο σωστός σχεδιασμός του συστήματος παραγωγής ενέργειας σε ένα σύστημα, οι απαιτήσεις σε ενέργεια στη διάρκεια του έτος και της ημέρας, η πρόβλεψη για επέκταση ή αλλαγή της τεχνολογίας, το κόστος και η διάθεση της αποθηκευτικής διάταξης, οι κλιματολογικές συνθήκες και η διαθεσιμότητα σε χώρο αποτελούν

μερικούς από τους παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη για την σωστή επιλογή και εφαρμογή μιας ή περισσότερων τεχνολογιών αποθήκευσης της ενέργειας.

Σχεδιάζοντας μια αποθηκευτική διάταξη είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη μια πληθώρα παραμέτρων όπως [3,4]:

- Η μορφή της αποθηκευμένης ενέργειας
- Η θερμοκρασία αποθήκευσης
- Η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας
- Η ποιότητα της αποθηκευμένης ενέργειας
- Η ισχύς εισόδου και εξόδου
- Η απόδοση
- Η διάρκεια αποθήκευσης
- Η χρονική απόκριση του συστήματος ανάλογα με τη ζήτηση
- Η ταχύτητα φόρτισης και εκφόρτισης του συστήματος
- Τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος (όγκος, βάρος)
- Η ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου
- Η πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα όγκου
- Το κόστος επένδυσης ανα μονάδα ενέργειας εξόδου
- Το κόστος ισχύος ανα μονάδα ισχύος εισόδου και εξόδου
- Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας
- Διάρκεια ζωής (σε κύκλους φόρτισης- εκφόρτισης, έτη)
- Οι κρίσιμες παράμετροι ασφαλείας
- Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον από τα υλικά και τη μέθοδο που χρησιμοποιείται
- Η συμβατότητα με τις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας
- Το ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας

2 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαθέσιμες και υπό ανάπτυξη και εμπορική τυποποίηση τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης βάσει της μορφής στην οποία αποθηκεύεται η ενέργεια.

Γίνεται περιγραφή των τεχνολογιών, αναφέρονται οι βασικές εφαρμογές τους, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν και τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά τους.

2.1 Τεχνολογίες Μηχανικής Αποθήκευσης Ενέργειας

Τα συστήματα αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας περιλαμβάνουν εκείνα τα συστήματα τα οποία αποθηκεύουν την ενέργεια υπο μορφή δυναμικής, κινητικής ενέργειας και ενέργειας συμπιεσμένου αερίου. Βάση αυτών οι βασικές μέθοδοι είναι η αντλησιοταμίευση, οι περιστρεφόμενοι τροχοί (σφόνδυλοι) και το σύστημα συμπιεσμένου αέρα (CAES).

2.1.1 Σύστημα συμπιεσμένου αέρα

2.1.1.1 Γενικά

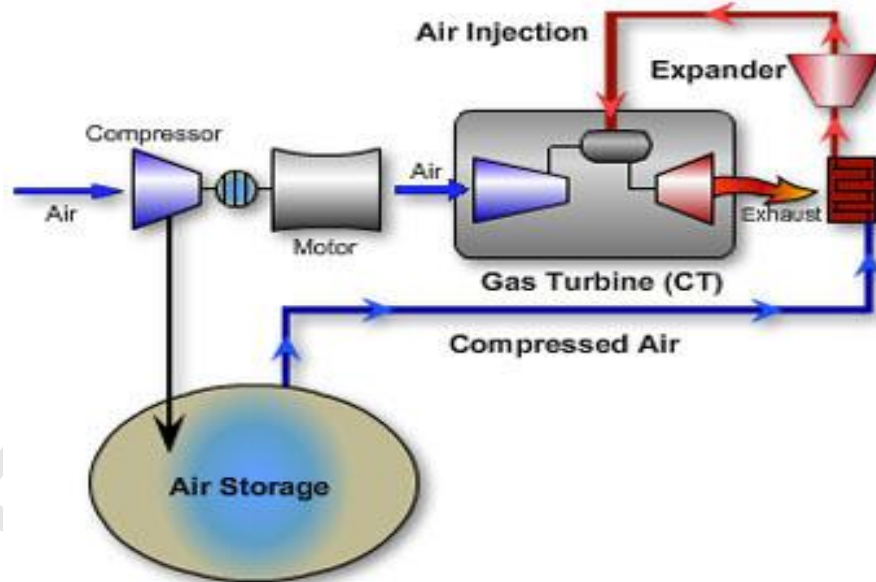
Τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES) αφορούν σε μακροπρόθεσμη και μεγάλης κλίμακας ενεργειακή αποθήκευση. Η ισχύς αυτών των συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης μπορεί να ξεκινά από 50 MW και να ξεπερνά τα 300 MW. Η απόδοση αυτών των συστημάτων είναι μεγάλη, περίπου 80%. [5]

Τα συστήματα CAES χρησιμοποιούν ενέργεια εκτός αιχμής για τη συμπίεση και την αποθήκευση ποσοτήτων αέρα σε μεγάλες πιέσεις (κοντά στα 75 bar) και σε υπόγειο αεροστεγή ταμειυτήρα. Όταν θεωρηθεί απαραίτητο (αιχμή ζήτησης) ποσότητες συμπιεσμένου αέρα αποδεσμεύονται από τον υπόγειο αεροστεγή ταμειυτήρα και στη συνέχεια θερμαίνονται και εκτονώνονται σε ένα στρόβιλο καύσης συνδεδεμένο με μια γεννήτρια, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η απορριπτόμενη από το στρόβιλο ενέργεια πριν απελευθερωθεί στο περιβάλλον οδηγείται σε προθερμαντήρα για την πρόσδοση ικανής θερμότητας στο συμπιεσμένο αέρα, πριν ο τελευταίος αναφλεχθεί στο

θάλαμο καύσης. Σχεδόν τα 2/3 του φυσικού αερίου σε ένα συμβατικό σταθμό παραγωγής καταναλώνονται για τη λειτουργία του συμπιεστή μέσω του στροβίλου. Αντίθετα, για να τεθεί σε ένα σύστημα CAES ο συμπιεστής σε λειτουργία χρησιμοποιείται χαμηλού κόστους συμπιεσμένος αέρα, εξοικονομώντας με αυτόν τον τρόπο σημαντικές ποσότητες φυσικού αερίου. [5]

Το σύστημα CAES βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλης κλίμακας έργα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αλλά η εφαρμογή του είναι περιορίζεται σε ορισμένα μεγάλα έργα σε παγκόσμιο επίπεδο καθώς πρόκειται για εφαρμογή που απαιτεί μεγάλη δαπάνη αλλά και εξαρτάται σημαντικά από κάποιο διαθέσιμο γεωλογικό σχηματισμό για την ταμίευση του αέρα. Είναι δυνατή η κατασκευή αεροστεγούς ταμιευτήρα, ωστόσο αυτό το έργο εκτοξεύει τη δαπάνη και έτσι καθιστά την τεχνολογία μη ελκυστική λύση. [5]

Η βασική εγκατάσταση ενός τυπικού συστήματος CAES αποτελείται από το τμήμα ισχύος, το τμήμα συμπίεσης, έναν υπόγειο αεροστεγή ταμιευτήρα, το κέντρο ελέγχου και τον βοηθητικό εξοπλισμό. [5]



Σχήμα 1: Σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Ο υπόγειος αεροστεγής ταμειυτήρας προορίζεται για την ταμίευση του συμπιεσμένου αέρα. Η υπόγεια αποθήκευση χωρίζεται σε αποθήκευση μεγάλης κλίμακας και μικρής κλίμακας. Στην αποθήκευση μεγάλης κλίμακας μπορούν να χρησιμοποιηθούν γεωλογικοί σχηματισμοί και περιλαμβάνουν τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα, τα υπόγεια σπήλαια και αλατωρυχεία και την κατασκευή υπόγειων σπηλαίων από βράχους. Και οι τρεις αυτοί τύποι ταμειυτήρων αποτελούν ιδανικές επιλογές για την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα, δεδομένου ότι ωφελούνται από τη γεωστατική πίεση, η οποία διευκολύνει τη συγκράτηση της μάζας αέρα. Ωστόσο, ένα μεγάλο πλήθος μελετών έδειξε ότι ο αέρα θα μπορούσε να συμπιεστεί και να αποθηκευτεί σε υπόγειες, υψηλής πίεσεως σωληνώσεις. Αυτή η μέθοδος θα μπορούσε να εξαλείψει τα γεωλογικά κριτήρια, καθιστώντας πιο εύκολη τη λειτουργία του συστήματος. Παρόλα αυτά, η σημερινή τεχνολογία δεν έχει αναπτυχθεί στον απαιτούμενο βαθμό για να κατασκευαστούν αυτοί οι υψηλής πίεσης σωλήνες χωρίς υψηλό κόστος. Στα συστήματα μικρής ή μεσσαίας κλίμακας ο συμπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε αεροφυλάκια. [5]

2.1.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα συστήματα CAES παρουσιάζουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, καθιστώντας την τεχνολογία τους εξαιρετικά ανταγωνιστική για εφαρμογές σε μεγάλης κλίμακας αποθηκευτικά έργα. Η ισχύς ενός συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα μπορεί να ξεκινά από 50MW και εύκολα να ξεπερνά τα 300MW. Μια εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση ενέργειας για περισσότερο από ένα έτος. [6]

Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί επίσης η γρήγορη εκκίνηση. Σε φυσιολογικές συνθήκες απαιτούνται περίπου 12 λεπτά ενώ σε περιπτώσεις ανάγκης η μονάδα έχει τη δυνατότητα εκκίνησης σε 9 λεπτά, χρόνοι εντυπωσιακοί αν αναλογιστούμε πως μια συμβατική μονάδα απαιτεί 20 με 30 λεπτά. [6]

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται φυσικός ταμειυτήρας, τα οφέλη είναι πολλαπλά, καθώς το αρχικό κόστος εγκατάστασης παρουσιάζεται σημαντικά μειωμένο και η περιβαλλοντική υποβάθμιση ασήμαντη. Παράλληλα, η εκπομπή των αερίων θερμοκηπίων είναι ουσιαστικά χαμηλότερη συγκριτικά με τις κανονικές εγκαταστάσεις αερίου.

Ωστόσο, τα συστήματα CAES παρουσιάζουν και ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα. Απώλειες ενέργειας παρατηρούνται τόσο κατά την αποθήκευση στον ταμιευτήρα όσο και κατά την άντληση του συμπιεσμένου αέρα από αυτόν καθώς και εξαιτίας των μηχανολογικών βαθμών αποδόσεων των επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης. Εκτιμήσεις αναφέρουν βαθμούς απόδοσης εγκαταστάσεων συμπιεσμένου αέρα της τάξης του 80%.

Επιπρόσθετα, η κατασκευή ενός υπόγειου ταμιευτήρα προϋποθέτει τη διάθεση σημαντικού αρχικού κεφαλαίου που σε πολλές περιπτώσεις καθιστά την πραγματοποίηση ανάλογων σχεδίων αδύνατη. Αν σε αυτό συμπεριλάβουμε και τη δυσκολία εύρεσης υπόγειου ταμιευτήρα, γίνεται κατανοητή η δυσκολία χρησιμοποίησης αυτής της μεθόδου ενεργειακής αποθήκευσης. Εντούτοις, για τις θέσεις όπου είναι κατάλληλο, μπορεί να παρέχει την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και μακράς διάρκειας περιόδους. [6]

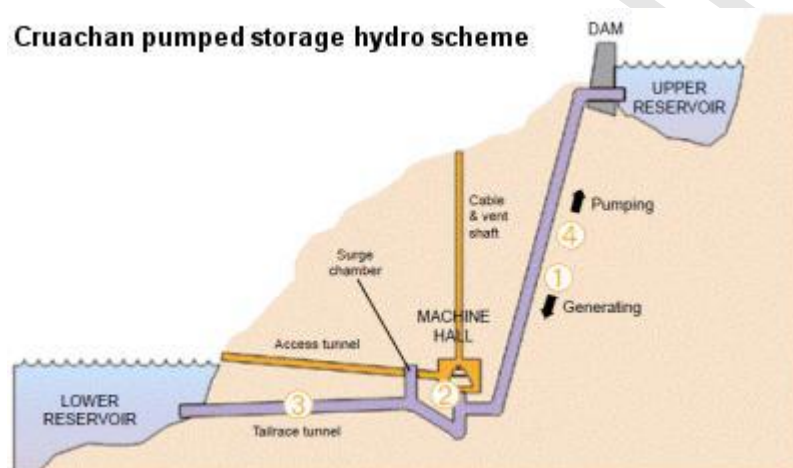
2.1.2 Αντλησιοταμίευση

2.1.2.1 Γενικά

Η αντλησιοταμίευση αποτελεί την πλέον αξιόπιστη τεχνολογία για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε επίπεδο μακράς διάρκειας και κυρίως τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά συστήματα. [6]

Η λειτουργία αυτών των συστημάτων βασίζεται στην εκμετάλλευση της υδροηλεκτρική ενέργειας. Το νερό διαθέτει δυναμική ενέργεια, η οποία εκφράζεται από τη στάθμη του ως προς τη στάθμη της θάλασσας. Η ενέργεια αυτή, η οποία μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια μέσω του υδροστροβίλου, είναι ανανεώσιμη καθώς προέρχεται από μία φάση του υδρολογικού κύκλου, τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Κινητήρια δύναμη του υδρολογικού κύκλου είναι η δράση του ήλιου, οπότε συνεπάγεται ότι η υδραυλική ενέργεια προέρχεται από την ηλιακή ενέργεια. Το σύνολο των έργων και του εξοπλισμού μέσω των οποίων η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ονομάζεται υδροηλεκτρικό έργο (ΥΗΕ). [6]

Κατά τη μέθοδο αυτή της αντλιοσταμείωσης αποθηκεύεται νερό σε δεξαμενή υψηλής σταθμής στη διάρκεια την νύχτας με χρήση αντλίας η οποία καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια. Στη διάρκεια της ημέρας όπου η ζήτηση είναι αυξημένη, το νερό απελευθερώνεται με σκοπό να κινήσει υδροστρόβιλο και παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα αυτό αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια υπό μορφή δυναμικής και κινητικής ενέργειας. Στην εικόνα παρακάτω, φαίνεται ένα σύστημα αντλιοσταμείωσης.



Σχήμα 1: Σύστημα αντλιοσταμείωσης

Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει και με άλλο τρόπο. Στη διάρκεια της ημέρας με χρήση ηλιακής ή αιολικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή, ο ηλεκτρισμός αυτός κινεί την αντλία η οποία μεταφέρει το νερό στη δεξαμενή αποθήκευσης και τη νύχτα όπου δεν υπάρχει ηλιοφάνεια ή τις περιόδους που δεν έχει αρκετό άνεμο, το σύστημα απελευθερώνει το νερό για ηλεκτροπαραγωγή για την κάλυψη των αναγκών.

Ο βαθμός απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος είναι περίπου 50% εξαιτίας των απωλειών κατά την άντληση και υδατόπτωση του νερού. Μπορεί να λειτουργήσει για περισσότερο από 20 χρόνια και απαιτεί μόλις 30 sec για να φτάσει στο μέγιστο της ισχύος του. [7]

Ένα τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από τα παρακάτω μέρη [7]:

- Μια αντλία ή ένα σύστημα αντλιών: περιλαμβάνεται μία ή περισσότερες αντλίες, που διακινούν ένα το νερό μεταξύ των δύο δεξαμενών, τις μηχανές κίνησης των αντλιών και το σύνολο των σωληνώσεων που συνδέουν τις δεξαμενές με την αντλία.
- Έναν υδροστρόβιλο ή ένα σύστημα υδροστροβίλων: οι σύγχρονοι υδροστρόβιλοι διακρίνονται σε 2 κατηγορίες, τους δράσεως ή μερικής προσβολής και τους αντιδράσεως ή μερικής προσβολής.
- Δύο δεξαμενές νερού, σε ικανή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους.
- Ένα σύνολο σωληνώσεων για την άντληση νερού και την προσαγωγή του νερού μεταξύ των δεξαμενών: Σε ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης διακρίνουμε δύο βασικές σχεδιαστικές εκδοχές, αυτής της μονής σωλήνωσης και αυτής της διπλής σωλήνωσης, όπου δηλαδή υπάρχει ανεξάρτητη σωλήνωση για τον στρόβιλο και για τη λειτουργία των αντλιών. Στη μονή σωλήνωση το σύστημα είναι οικονομικότερο λόγω μειωμένου κόστους εγκατάστασης αλλά τίθεται ο περιορισμός της προτεραιότητας της λειτουργίας είτε της αντλίας είτε του στροβίλου. Επιπλέον, υπάρχει και η περίπτωση της μονής σωλήνωσης με σύνθετη λειτουργία δηλαδή, υπάρχει η δυνατότητα διπλής ταυτόχρονης λειτουργίας με χρήση μονής σωλήνωσης. Πρόκειται για μια δεύτερη κατηγορία συστήματος αντλησιοταμίευσης, το λεγόμενο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα. Αυτή η προτεινόμενη λύση εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι είναι οικονομικότερη χωρίς να υστερεί λειτουργικά.
- Μια ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια σε κοινή άτρακτο με την αντλία και τον υδροστρόβιλο.

Η φιλοσοφία λειτουργίας του συστήματος αντλησιοταμίευσης είναι απλή. Η περίσσεια ενέργειας τροφοδοτεί τις αντλίες, μέσω των οποίων το εργαζόμενο μέσο (νερό) ανυψώνεται διά των σωληνώσεων ανόδου από την κάτω δεξαμενή στην άνω, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας με τη μορφή δυναμικής

ενέργειας. Όταν κάποια άλλη χρονική στιγμή απαιτείται ενέργεια, το νερό από την πάνω δεξαμενή αφήνεται να οδεύσει μέσω των σωληνώσεων καθόδου προς την κάτω δεξαμενή, διερχόμενο δε μέσω των υδροστροβίλων παράγει την επιθυμητή ενέργεια.

Οι διαστασιολογήσεις των δύο δεξαμενών είναι τέτοιες που να εξασφαλίζουν ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό από τον όγκο του αποθηκευμένου νερού θα χρησιμοποιείται και θα είναι ικανό για τις μετατροπές τις διατιθέμενης ενέργειας σε δυναμική και αντίστροφα, αποκλείοντας το ενδεχόμενο κάποια από τις δύο δεξαμενές να αδειάσει εντελώς. [8]

Η εναλλαγή της λειτουργίας τους μεταξύ άντλησης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να συμβαίνει μια ή περισσότερες φορές την ημέρα, μια φορά την εβδομάδα ή μια φορά τον χρόνο. Βέβαια, οι δύο τελευταίες περιπτώσεις εναλλαγής της λειτουργίας απαιτούν την ύπαρξη δεξαμενής αποθήκευσης (άνω ταμιευτήρα) πολύ μεγάλης χωρητικότητας.

Είναι προφανές η διαδικασία αυτή μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδραυλική (άντληση) και στη συνέχεια η εκ νέου μετατροπή της σε ηλεκτρική (λειτουργία υδροστροβίλων) συνοδεύεται από απώλειες ενέργειας. Οι συνολικές απώλειες ενέργειας σε έναν κύκλο άντλησης – παραγωγής ενέργειας φθάνει στο 23% περίπου (σε ένα υδροηλεκτρικό έργο μεσαίου μεγέθους). Οι συνολικές απώλειες είναι μεγαλύτερες όσο το μέγεθος των μηχανών μειώνεται. [8]

2.1.2.2 Αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα

Το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα αποτελεί μια δεύτερη κατηγορία συστήματος αντλησιοταμίευσης όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (μονή σωλήνωση-σύνθετο σύστημα). Η εγκατάσταση αυτή είναι εξοπλισμένη με αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή, την ονομαζόμενη στροβιλαντλία, η οποία έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί είτε ως αντλία (φάση αποθήκευσης) είτε ως στρόβιλος (φάση παραγωγής) με αντιστροφή της φορά περιστροφής της περωτής (του δρομέα) και της φοράς της ροής.[8]

Όσον αφορά στη λειτουργία του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος, σε αυτό ενσωματώνεται ένα πρωτότυπο σύστημα διανομής. Σύμφωνα με αυτό, όταν η παροχή νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή λόγω άντλησης, είναι μεγαλύτερη από την

απαιτούμενη παροχή για τη λειτουργία του στροβίλου, μέρος του αντλούμενου νερού πηγαίνει απευθείας στον στρόβιλο, και το υπόλοιπο στην άνω δεξαμενή. Δηλαδή η σωλήνωση μεταφέρει νερό προς τα πάνω. Όταν η παροχή της αντλητικής εγκατάστασης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του στροβίλου, όλο το νερό από την άντληση κατευθύνεται στο στρόβιλο και συμπληρωματικά χρησιμοποιείται νερό από την άνω δεξαμενή για να συμπληρωθεί η απαιτούμενη παροχή στροβίλου. Συνεπώς σε αυτήν την περίπτωση, η σωλήνωση μεταφέρει νερό από την άνω στην κάτω δεξαμενή. [8]

Το βασικό πλεονέκτημα του τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης (είτε με μονή είτε με διπλή σωλήνωση) είναι ότι κάθε μηχανή (υδροστρόβιλος και αντλία) επιλέγεται να λειτουργεί σε αντίστοιχο κανονικό σημείο λειτουργίας της. Αντίθετα, όπως θα γίνει φανερό και στη συνέχεια, στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα είναι ανάγκη να γίνεται συμβιβασμός στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της στροβιλοαντλίας. Βέβαια, το πρόβλημα αυτό έχει αρχίζει να ξεπερνιέται τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη αναστρέψιμων υδροδυναμικών μηχανών με δύο πτερωτές που μοιράζονται την ίδια άτρακτο και η μία λειτουργεί ως πτερωτή αντλίας και η άλλη ως δρομέας στροβίλου, επιτυγχάνοντας βέλτιστη λειτουργία και στις δύο περιπτώσεις.

Ωστόσο, το τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης χαρακτηρίζεται από σημαντικό κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, δεδομένου ότι είναι εξοπλισμένο από δύο υδροδυναμικές μηχανές και έναν συμπλέκτη, σε αντίθεση με το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα που περιλαμβάνει μόνο μια αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή. Επιπλέον, κάθε μονάδα καταλαμβάνει χώρο σημαντικά μεγαλύτερο σε σύγκριση με τη λύση της αναστρέψιμης υδροδυναμικής μηχανής. [8]

Επιπρόσθετα, σε περιπτώσεις όπου η προβλεπόμενη συχνότητα εναλλαγής της λειτουργίας στροβίλου – αντλίας είναι υψηλή, το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα μειονεκτεί έναντι του τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι οι αναστρέψιμες μονάδες θα πρέπει πρώτα να σταματήσουν και στη συνέχεια να αρχίσουν να περιστρέφονται αντίστροφα, με αποτέλεσμα να πρόκειται για μια χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία.

Συμπερασματικά, το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα εμφανίζει περισσότερα πλεονεκτήματα συγκριτικά με το τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης, με αποτέλεσμα να βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος όσον αφορά στην αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας υπό υδραυλική μορφή.

Άλλα συστήματα στα οποία μπορεί να βρεί εφαρμογή η αποθήκευση ενέργειας με την τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης είναι τα υβριδικά συστήματα με χρήση των τεχνολογιών ΑΠΕ αλλά και σε συνδυασμό με θερμικά συστήματα με σκοπό της εξοικονόμηση καυσίμου. Τέτοια συστήματα μελετώνται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια με σκοπό τη μεγάλη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στα ηλεκτρικά δίκτυα, ιδιαίτερα στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, αλλά και συγχρόνως την παραγωγή ενέργειας σε συμφωνία με τις Ευρωπαϊκές και Εθνικές πολιτικές για την ενέργεια και το περιβάλλον. [9]

2.1.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης έχουν διπλό όφελος καθώς απορροφούν την περίσσεια ενέργειας κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης μετατρέποντάς την σε υδραυλική ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται στον πάνω ταμιευτήρα αλλά και αποδίδουν στο δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής την ενέργεια που έχουν αποταμιεύσει, ενώ, στις περισσότερες περιπτώσεις, παράγουν και πρωτογενή ενέργεια από την αξιοποίηση των φυσικών εισροών στον άνω ταμιευτήρα. Η απόδοση αυτών των συστημάτων είναι της τάξης του 70-85%. [8,9]

Εκείνο που δίνει τη μεγαλύτερη ενεργειακή και οικονομική σημασία στην εκμετάλλευση της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι η ευελιξία των μονάδων ενεργειακής μετατροπής. Σε λιγότερο από ένα λεπτό μια τέτοια μονάδα μπορεί να τεθεί σε λειτουργία και να αναλάβει πλήρες φορτίο. Αυτό επιτρέπει τη χρήση της υδροηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αιχμών της ζήτησης και της προσδίδει έτσι περίπου διπλάσια οικονομική αξία, σε σχέση με τη συμβατική θερμική ενέργεια. Βέβαια, απαραίτητη προϋπόθεση για να υπάρχει αξιοπιστία αυτού του τύπου είναι η διαθεσιμότητα μεγάλου όγκου ταμίευσης νερού, ώστε να μπορεί να λειτουργούν οι μονάδες παραγωγής τις ώρες ακριβώς που χρειάζονται, ενώ τις υπόλοιπες ώρες οι εισροές νερού αποθηκεύονται.

Στα πλεονεκτήματα της εκμετάλλευσης της υδροηλεκτρικής ενέργειας για ενεργειακή αποθήκευση συγκαταλέγεται η θετική περιβαλλοντική επίδραση καθώς αποτελεί μη ρυπογόνο τεχνολογία και προέρχεται από εκμετάλλευση ανανεώσιμης πηγής ενέργειας.

Ωστόσο συνυπολογίζονται περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με το οικοσύστημα ιδιαίτερα στα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα από τη δημιουργία τεχνητών λιμνών για ταμίευση και την κατάκλιση μεγάλων εκτάσεων.

Το βασικό μειονέκτημα της τεχνολογίας αφορά στο κόστος της επένδυσης και αφορά εφαρμογές μόνο μεγάλης κλίμακας.

2.1.3 Σφόνδυλοι κινητικής ενέργειας

2.1.3.1. Γενικά

Οι σφόνδυλοι είναι διατάξεις αποθήκευσης κινητικής ενέργειας. Ένας σφόνδυλος αποτελείται από μια μάζα η οποία περιστρέφεται γύρω από ένα άξονα (ρότορας). Μια διάταξη αποθήκευσης σφονδύλου αποτελείται από τον σφόνδυλο και μια ενσωματωμένη ηλεκτρική συσκευή, η οποία μπορεί να λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια. [10]

Η ενέργεια αποθηκεύεται σε μια στρεφόμενη μάζα και μετατρέπεται από ηλεκτρική σε κινητική και αντίστροφα με ένα ρότορα/γεννήτρια. Η ηλεκτρική συσκευή λειτουργεί ως κινητήρας για να περιστρέφει το σφόνδυλο και να αποθηκεύει ενέργεια. Μόλις ο σφόνδυλος αρχίσει να περιστρέφεται αποτελεί ουσιαστικά μια μηχανική μπαταρία, που μπορεί να εμπεριέχει ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας. Το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας εξαρτάται από τη ροπή αδράνειας και την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα. Όσο πιο γρήγορα περιστρέφεται τόσο περισσότερη ενέργεια αποθηκεύει. Η αποθηκευμένη ενέργεια ανακτάται με την επιβράδυνση του σφονδύλου μέσω επιβραδυνόμενης στρεπτικής ροπής και επιστρέφοντας την κινητική ενέργεια στην ηλεκτρική συσκευή. Σε αυτή την περίπτωση, η συσκευή λειτουργεί ως γεννήτρια η οποία παράγει ηλεκτρισμό κατά τη ζήτηση χρησιμοποιώντας την ενέργεια που είχε αποθηκευτεί στο σφόνδυλο. Επιπλέον, για τη μείωση των ενεργειακών απωλειών χρησιμοποιούνται μαγνητικοί τριβείς και ένας θάλαμος υπό κενό. Ο θάλαμος συνεισφέρει στη μείωση των αεροδυναμικών απωλειών και των πιέσεων του στροφέα.

Υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμοι τύποι διατάξεων σφονδύλων ωστόσο υπάρχουν και τύποι υπό ανάπτυξη. Οι δύο βασικοί τύποι είναι τα συστήματα χαμηλής ταχύτητας και τα συστήματα υψηλής ταχύτητας. [10]

Τα συστήματα χαμηλής ταχύτητας αφορούν τους εμπορικά διαθέσιμους τύπους αποθήκευσης κινητικής ενέργειας και προορίζονται για διάρκεια αποθήκευσης 10-120 sec. Οι εφαρμογές αυτών των συστημάτων είναι αυτές των UPS και χρησιμοποιούνται για βελτίωση της ποιότητας ισχύος και για την αύξηση του φορτίου σε ώρες αιχμής. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του τύπου είναι ο χαλύβδινος ρότορας και τα συμβατικά ρουλεμάν, η τεχνολογική ωριμότητα και τα υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας. Τα συστήματα αυτά είναι ρεύματος και απαιτούν μετασχηματιστή για τη διασύνδεσή τους με το δίκτυο. Οι ρότορες έχουν ταχύτητα περιστροφής έως 8000 rpm και ενεργειακή πυκνότητα μέχρι 5 Wh/kg. [10]

Τα συστήματα υψηλής ταχύτητας αποτελούνται από ρότορες σύνθετων υλικών και τα ρουλεμάν χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλούς συντελεστές τριβής για τη μείωση του βάρους του ρότορα και την επίτευξη ταχυτήτων περιστροφής δεκάδων χιλιάδων rpm (μέχρι 100000 rpm). Επειδή η κινητική ενέργεια του ρότορα είναι συνάρτηση του τετραγώνου της γωνιακής ταχύτητας του, οι ρότορες με αυτά τα υλικά επιτρέπουν υψηλότερες αποθηκευτικές ικανότητες. Από την άλλη, οι ρότορες που είναι οπλισμένοι με σύνθετες ίνες αποτυγχάνουν σε σχέση με τους ατσάλινους και για αυτό είναι εγγενώς ασφαλέστεροι. Η ειδική ενέργεια των συστημάτων αυτών μπορεί να είναι μέχρι 100 Wh/kg. Τα συστήματα αυτά είναι υπό ανάπτυξη. [10]

Στη διάταξη του σφονδύλου όπως όλες οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης, χρησιμοποιούνται μετατροπείς ισχύος και ελεγκτές ισχύος. Ο μετατροπέας ισχύος είναι μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής, συνήθως αμφίδρομης ρύθμισης και παλλόμενου πλάτους. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να είναι μονοφασικός (εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα) ή διφασικός (εναλλασσόμενο σε συνεχές σε εναλλασσόμενο). Τέλος, ο ελεγκτής ισχύος είναι αναγκαίος για τον έλεγχο της μεταβλητότητας των ηλεκτρικών συστημάτων. [10]



Εικόνα 1: Σφόνδυλος κινητικής ενέργειας

2.1.3.2 Εφαρμογές

Οι διατάξεις σφονδύλων προορίζονται για εφαρμογές βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας και είναι κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν συνεχή φόρτιση, υψηλή αξιοπιστία και υψηλή ισχύ. Μέχρι τώρα τα συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές UPS στον εμπορικό και βιομηχανικό τομέα σε υβριδικές εγκαταστάσεις με εφεδρικές νηζελογεννήτριες και με το σύστημα να παρέχει αδιάκοπη ισχύ σε περίπτωση απώλειας της παροχής του ηλεκτρικού δικτύου. Αυτή η ανάγκη για βελτίωση της ποιότητας παροχής ηλεκτρισμού υπάρχει μόνο στον εμπορικό και βιομηχανικό τομέα όπου οι καταναλωτές έχουν οικονομικές επιπτώσεις από τις διακυμάνσεις ισχύος σε αντίθεση με τον οικιακό τομέα ο οποίος δεν έχει την αντίστοιχη ανάγκη σε τέτοιου είδους επενδύσεις. [10]

Νέες εφαρμογές αυτών των συστημάτων έχουν αρχίσει να παρουσιάζονται από τους κατασκευαστές όπως αυτή της ρύθμισης της συχνότητας με τα συστήματα σφονδύλων. Το πλεονέκτημα των σφονδύλων έναντι των επικουρικών εγκαταστάσεων ορυκτών καυσίμων είναι η μειωμένη περιβαλλοντική επίπτωση. [10]

Σε ότι αφορά στα ενεργειακά δίκτυα και τη διείσδυση της διανεμημένης παραγωγής οι σφόνδυλοι αποτελούν μια τεχνολογία που μπορεί να βρεί άμεση εφαρμογή ανάμεσα σε άλλες. Μπορεί να επιτρέπει στις εταιρίες αυξημένο έλεγχο του δικτύου, να βελτιώσει την ποιότητα και να αναστείλει επενδύσεις για αναβαθμίσεις δικτύου. Επιπλέον, μπορεί να αποδώσει όφελος από την διανεμημένη παραγωγή του ιδιώτη – καταναλωτή. Έτσι, καθώς η αποθήκευση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο φορτίο, οι πρώτες εφαρμογές στοχεύουν στα 20 MW. Αρκετοί σφόνδυλοι με ένα τυπικό περιέκτη και σε μια ημικινητή εγκατάσταση μπορούν να υποστηρίξουν επίπεδα παραγωγής της τάξης των MW για δεκάδες λεπτά. [10]

Ακόμα ένα όφελος των συστημάτων αποθήκευσης με σφονδύλους είναι η εξοικονόμηση ενέργειας. Η αποθήκευση μπορεί να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ σε περιόδους μέγιστης κατανάλωσης με αποτέλεσμα τη μείωση του ηλεκτρικού τιμολογίου. Επιπλέον, η μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση επιτρέπει, όπως για κάθε σύστημα αποθήκευσης, τον υποσχεδιασμό των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής. [10]

Με βάση τα παραπάνω και δεδομένου του υψηλού κόστους επένδυσης της τεχνολογίας, η εφαρμογή των σφονδύλων είναι ωφέλιμη για κτιριακές εφαρμογές στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις σε ισχύ και υπάρχει ανάγκη εφεδρικού συστήματος για παροχή φορτίων για μικρό χρονικό διάστημα (ανελκυστήρες). Ακόμα, μπορούν να εφαρμοστούν σε περιπτώσεις όπου ο καταναλωτής πουλά ηλεκτρισμό στο δίκτυο. Τέλος, σε περιπτώσεις λειτουργίας συστημάτων παραγωγής ενέργειας εκτός δικτύου μπορούν να εφαρμοστούν τα συστήματα σφονδύλων για την καλύτερη ενσωμάτωση της διανεμημένης παραγωγής. [10]

2.1.3.3 Χαρακτηριστικά των σφονδύλων

Η υψηλή ικανότητα των σφονδύλων για πολλούς κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό το οποίο είναι ανεξάρτητο από το ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης. Ένας μέσος χρόνος ζωής των συστημάτων αυτών εκτιμάται γύρω στα 20 χρόνια. Ένας σφόνδυλος λειτουργεί μεταξύ μιας μέγιστης και ελάχιστης ταχύτητας, το οποίο καθορίζει την ωφέλιμη αποθηκευμένη ενέργεια ή τη διαθέσιμη αποθηκευτική ικανότητα. Η διαθέσιμη ικανότητα αυξάνεται σε χαμηλούς χρόνους εκφόρτισης με τη μείωση της ελάχιστης ταχύτητας σε μειωμένη ροπή και ισχύ, ωστόσο αυτό θα μπορούσε να μειώσει τον κύκλο ζωής. [10]

Η τυπική απόδοση ενός συστήματος σφονδύλου είναι περίπου 90%. Μειώνεται σε χαμηλούς ρυθμούς εκφόρτισης κυρίως επειδή εξαρτάται από την απόδοση των ηλεκτρονικών συστημάτων. Ωστόσο, ο υψηλός σχετικά χρόνος αυτοεκφόρτισης σημαίνει τη μείωση της απόδοσης. Οι ρυθμοί αυτοεκφόρτισης είναι από 0.2 μέχρι 2 φορές πάνω από την αποθηκευτική ικανότητα την ώρα. Αυτές οι υψηλές τιμές επιβεβαιώνουν ότι οι σφόνδυλοι δεν είναι κατάλληλοι στις περισσότερες περιπτώσεις για εφαρμογές μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Τα τυπικά συστήματα έχουν χρόνους αποθήκευσης της τάξης των 5 sec μέχρι 2 min. [10]

Οι σφόνδυλοι είναι διατάξεις γρήγορης φόρτισης συχνά προσεγγίζοντας λόγο εκφόρτισης / φόρτισης τη μονάδα.

Οι κατασκευαστές δίνουν ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας μεταξύ -20°C και 40°C . Ωστόσο, ορισμένα εξαρτήματα των συστημάτων (ηλεκτρονικά ισχύος) περιορίζουν αυτό το εύρος. Η εξάρτηση των συστημάτων από τη θερμοκρασία φαίνεται να είναι μικρή ωστόσο μπορεί να είναι θετικό να γίνεται αποβολή της θερμότητας.

Τα συστήματα μπορούν να είναι είτε συνεχούς είτε εναλλασσόμενου ρεύματος. Τα συστήματα σφονδύλων χρειάζονται μια συνδεσμολογία ισχύος που περιλαμβάνει τη γεννήτρια (συνήθως μια σύγχρονη μόνιμα μαγνητισμένη μηχανή) ένα μεταβλητής ταχύτητας μετατροπέα και ένα ελεγκτή ισχύος. Η απόδοση των ηλεκτρονικών ισχύος είναι πάνω από 90% στα μέγιστα φορτία αλλά μικρότερη σε χαμηλά φορτία. Η διακύμανση της τάσης περιορίζεται από τους σφόνδυλους σε λιγότερο από 2%.

Οι ρότορες από χάλυβα (steel rotors) έχουν ενεργειακή πυκνότητα μέχρι 5 Wh/kg ενώ οι υψηλής ταχύτητας ρότορες σύνθετων υλικών έχουν ενεργειακή πυκνότητα μέχρι 100 Wh/kg. Ωστόσο, η ενεργειακή πυκνότητα και πυκνότητα ισχύος του συστήματος μπορεί να μειωθεί τουλάχιστον κατά ένα παράγοντα 10 αν ληφθεί υπόψη το βάρος του συστήματος. [10]

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα με τους σφονδύλους είναι ο θόρυβος και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την εισαγωγή τους σε κτιριακές εφαρμογές. Ορισμένοι κατασκευαστές δίνουν τιμές σε απόσταση ενός μέτρου κάτω από τα 70 dBA. [10]

Τα συστήματα σφονδύλων είναι συμπαγή και ελαφρά σε σύγκριση με τα συστήματα μπαταριών. Χαρακτηρίζονται από χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης και από υψηλές τιμές χρόνου μεταξύ αστοχιών (MTBF). [10]

Ένα από τα σημαντικά εμπόδια της τεχνολογίας είναι το υψηλό αρχικό κόστος. Παρόλο που τα σύνθετα υλικά είναι ακριβότερα από τα χαλύβδινα, το επιπλέον κόστος εξισοροπείται από τη μείωση της απαιτούμενης μάζας. Το κόστος του ρότορα είναι περίπου 700-800 €/kWh (2003). Το συνολικό κόστος ενός σφονδύλου βρίσκεται στην κλίμακα των 200-500€/kW για αποθήκευση 5 sec και 1000-3000€/kW για αποθήκευση μιας ώρας. Τα συστήματα αποθήκευσης μιας ώρας δεν είναι διαθέσιμα ακόμα. Όσον αφορά στο κόστος λειτουργίας υποθέτοντας ένα κύκλο ζωής 106 φορτίσεων ένα σύστημα αποθήκευσης 5 sec έχει ένα κόστος 0.14-0.36 \$/kWh. Συστήματα με μεγαλύτερο χρόνο αποθήκευσης έχουν μειωμένα κόστη λειτουργίας. [10]

2.1.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Συνοψίζοντας, τα σημαντικότερα οφέλη μιας αποθηκευτικής διάταξης σφονδύλου είναι:

- Η άμεση απόκριση στην απαίτηση ενέργειας. Οι σφόνδυλοι χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες φόρτισης και εκφόρτισης για πολλούς κύκλους.
- Η ικανότητα του σφονδύλου να δώσει στιγμιαία μεγάλα ποσά ενέργειας. Είναι κατάλληλοι και προτιμούνται σε περιπτώσεις ικανοποίησης της ζήτησης σε

ώρες αιχμής όπου υπάρχει απαίτηση για άμεση παροχή σχετικά μεγάλης ποσοτήτας ενέργειας.

- Η μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα η οποία κυμαίνεται από 5 μέχρι 100 Wh/kg.
- Η υψηλή ενεργειακή απόδοση η οποία μπορεί να φτάσει το 90%
- Η μεγάλη διάρκεια ζωής, που φτάνει τα 15-20 χρόνια για χρήση σε υψηλές συχνότητες καθώς και η ελάχιστη απαιτούμενη συντήρηση και παρακολούθηση που απαιτείται
- Η μη ευαισθησία σε θερμοκρασιακές διακυμάνσεις

Τα κύρια μειονεκτήματα της τεχνολογίας του σφονδύλου είναι το υψηλό κόστος, ο κίνδυνος ατυχήματος σε περίπτωση που σπάσει κάποιος δίσκος αλλά και οι ενεργειακές απώλειες όταν οι κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης δεν είναι συνεχείς. Τα ποσοστά αυτοεκφόρτισης είναι υψηλά με ελάχιστο ποσοστό 20% της αποθηκευτικής ικανότητας ανά ώρα. Αυτά τα υψηλά ποσοστά χειροτερεύουν την ενεργειακή απόδοση όταν ο κύκλος φόρτισης-εκφόρτισης δεν είναι συνεχής, για παράδειγμα όταν αποθηκεύεται ενέργεια για μια χρονική περίοδο μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης. Τέτοια υψηλά ποσοστά εκφόρτισης ενισχύουν την άποψη ότι ο σφόνδυλος δεν αποτελεί επαρκή διάταξη για μακροπρόθεσμη ενεργειακή αποθήκευση, αλλά μόνο για να παρέχει αξιόπιστη ενεργειακή εφεδρεία

2.2 Χημική Αποθήκευση Ενέργειας

Τα συστήματα χημικής αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνουν την ηλεκτροχημική αποθήκευση ενέργειας με χρήση μπαταριών, τη φωτοχημική αποθήκευση ενέργειας μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων, τη θερμοχημική αποθήκευση ενέργειας μέσω αμφίδρομων αντιδράσεων που απελευθερώνουν και αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας ή συστημάτων διάλυσης, απορρόφησης και προσρόφησης και την αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή υδρογόνου, το οποίο αποθηκεύεται σε υγρή ή αέρια ή στερεή μορφή και αξιοποιείται ως καύσιμο όταν απαιτείται. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν οι τεχνολογίες που παρουσιάζουν εμπορικό ενδιαφέρον για

συστήματα που μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη στον κτιριακό τομέα επομένως παρουσιάζονται μόνο η τεχνολογία αποθήκευσης σε μπαταρίες και η αποθήκευση υδρογόνου.

2.2.1 Μπαταρίες

Μια μπαταρία (συσσωρευτής) είναι μια χημική πηγή ρεύματος, ικανή να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια, μετατρέποντάς τη σε χημική, και όταν απαιτηθεί να την αποδώσει σε εξωτερικό κύκλωμα. Σχηματίζεται από ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ή και τα δύο, ανάλογα με την επιθυμητή παραγόμενη τάση. Το ηλεκτρικό στοιχείο αποτελείται από δύο πλάκες από διαφορετικά μέταλλα, οι οποίες είναι βυθισμένες σε ένα δοχείο με υγρό. Οι πλάκες, οι οποίες πρέπει να είναι αγώγιμες, ονομάζονται ηλεκτρόδια και το υγρό, επίσης αγώγιμο, είναι ο ηλεκτρολύτης. Τα ηλεκτρόδια αντιδρούν χημικά με τον ηλεκτρολύτη και η αντίδραση περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος. Η σύνδεση των ηλεκτροδίων σε εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα προκαλεί σε αυτό διέλευση ρεύματος (εκφόρτιση της ηλεκτρικής μπαταρίας). Η εκφορτισμένη ηλεκτρική μπαταρία φορτίζεται όταν περάσει από αυτήν συνεχές ρεύμα από άλλη πηγή, ενώ ταυτόχρονα αντίστροφες χημικές διεργασίες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική. [11-13]

Το αρνητικό ηλεκτρόδιο ή αλλιώς άνοδος, παρέχει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα/φορτίο και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Ακολούθως, το θετικό ηλεκτρόδιο, ή αλλιώς κάθοδος, δέχεται τα ηλεκτρόνια και συνεπώς μειώνεται το θετικό του φορτίο κατά τη διάρκεια της αντίδρασης. Ο ηλεκτρολύτης παρέχει το μέσο για την μεταφορά των ηλεκτρονίων μεταξύ ανόδου και καθόδου. Τέλος, για ηλεκτρική μόνωση χρησιμοποιούνται διαχωριστές ανάμεσα στα θετικά και τα αρνητικά ηλεκτρόδια.

Σήμερα χρησιμοποιούνται ή βρίσκονται υπό ανάπτυξη μια πληθώρα τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης με μπαταρίες. Προς το παρόν εμπορικά διαθέσιμες είναι οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου – οξέος και οι VRLA (ρυθμιζόμενες με βαλβίδα μολύβδου – οξέος), καθώς επίσης και μερικές αλκαλικές μπαταρίες (NiCd, NiMH). Ορισμένες εξελιγμένες μπαταρίες που βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης, είναι οι

μπαταρίες ψευδαργύρου/βρωμιδίου, οι λιθίου, οι νατρίου-θείου (NaS) και οι μετάλλου-αέρα. [11,14]

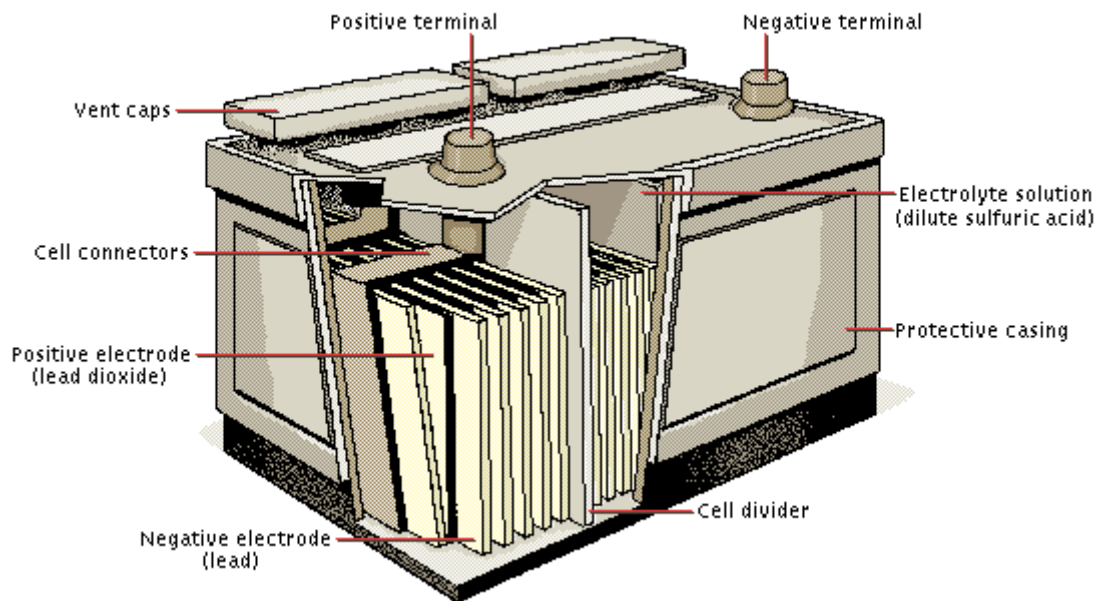
Οι μπαταρίες μέχρι σήμερα έχουν ευρεία εφαρμογή στα οχήματα και σε μικρές ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες για αδιάλειπτη παροχή ενέργειας ή σε εφεδρικά συστήματα. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται εντατικά στην ηλεκτροπαραγωγή με χρήση ΑΠΕ. Εμφανίζουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης της τάξης των 70-80% από τις εφαρμογές αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας.

Παρόλο που οι μπαταρίες είναι πολύ διαδεδομένο μέσον αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ορισμένα μειονεκτήματα:

- Μικρή ειδική ενέργεια αποθήκευσης
- Χαμηλή πυκνότητα ισχύος
- Περιορισμένη διάρκεια ζωής
- Το κόστος τους για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων είναι απαγορευτικό.

2.2.1.1 Μπαταρίες Μολύβδου – οξέος

Οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου – οξέος είναι ο παλαιότερος τύπος επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Βασίζονται σε χημικές αντιδράσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν διοξείδιο του μολύβδου (PbO_2) για το σχηματισμό του ηλεκτροδίου καθόδου, μολύβδο (Pb) για το σχηματισμό του ηλεκτροδίου ανόδου και θειικό οξύ (H_2SO_4) που ενεργεί ως ηλεκτρολύτης. Η τάση ενός στοιχείου μολύβδου – οξέος εκτιμάται στα 2 Volt και η τυπική ενεργειακή πυκνότητα είναι περίπου 30 Wh/kg (25-45 Wh/kg) , με πυκνότητα ισχύος γύρω στα 180 W/kg. Επιπρόσθετα, οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου - οξέος παρουσιάζουν ικανοποιητικές ενεργειακές αποδόσεις, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 60 και 95%, εγκαθίστανται εύκολα, απαιτούν χαμηλού επιπέδου συντήρηση και παρουσιάζουν χαμηλό κόστος επένδυσης. Ακόμα, τα ποσοστά αυτό-εκφόρτισης για αυτό το είδος μπαταριών είναι πολύ χαμηλά (γύρω στο 2-5% ανά μήνα), καθιστώντας τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος ιδανικές για εφαρμογές μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. [11-15]



Εικόνα 2: Μπαταρία Μολύβδου - Οξέος

Οι περιοριστικοί παράγοντες για αυτό το είδος μπαταριών είναι ο σχετικά χαμηλός αριθμός κύκλων φόρτισης - εκφόρτισης και η λειτουργική διάρκεια ζωής τους. Η τυπική διάρκεια ζωής των μπαταριών κυμαίνεται μεταξύ 300 και 1500 κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης - εκφόρτισης επηρεάζεται αρνητικά από το βάθος εκφόρτισης και τη θερμοκρασία. Οι προσπάθειες για πλήρη εκφόρτιση της μπαταρίας μπορούν να είναι ιδιαίτερα καταστρεπτικές για τα ηλεκτρόδια, μειώνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής τους. Όσον αφορά στα επίπεδα θερμοκρασιών, οι υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 45°C, είναι το ανώτερο όριο για τη λειτουργία) δύνανται να βελτιώσουν την απόδοση των μπαταριών από την άποψη της υψηλότερης χωρητικότητας, καθώς επίσης και την ενεργειακή τους απόδοση. [11-15]

Η αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες μολύβδου – οξέος, λόγω του χαμηλού τους κόστους, έχουν κυριαρχήσει στην αγορά. Συγκεκριμένα, είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μπαταρίες για εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων. Για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές της αιολικής ενέργειας, έχει προταθεί η αποθήκευση ισχύος της τάξης των 100 MW ή περισσότερο σε τέτοιου είδους μπαταρίες. [14]

Η τεχνολογία μπαταριών εμβάπτισης μολύβδου - οξέος βελτιώνεται σταδιακά και με πολλούς τρόπους. Παράδειγμα αποτελούν οι μπαταρίες VRLA, που χρησιμοποιούν την ίδια βασική ηλεκτροχημική τεχνολογία με τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος, με τη διαφορά αυτές φράσσονται με μια βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης. Επιπλέον, ο όξινος ηλεκτρολύτης είναι ακινητοποιημένος. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη προσθήκης νερού στις κυψέλες για να διατηρείται η κατάλληλη λειτουργία του ηλεκτρολύτη, ή ανάμειξη του ηλεκτρολύτη για να αποτρέπεται η διαστρωμάτωση. Η ανακύκλωση του οξυγόνου και οι βαλβίδες των VRLA αποτρέπουν τον εξαερισμό των αερίων υδρογόνου και οξυγόνου, καθώς και την είσοδο αέρα στις κυψέλες.

Το υποσύστημα των μπαταριών αυτών μπορεί να χρειάζεται να αντικαθίσταται συχνότερα από ότι με τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος, αυξάνοντας το σταθμισμένο κόστος του συστήματος. Οι μπαταρίες VRLA παρουσιάζουν δύο βασικά πλεονεκτήματα έναντι των μπαταριών εμβάπτισης σε οξύ:

- Μειώνεται δραματικά η απαραίτητη συντήρηση για να διατηρείται η μπαταρία σε λειτουργία.
- Οι κυψέλες των μπαταριών μπορούν να συσσωματώνονται πιο στενά λόγω της ερμητικά κλειστής κατασκευής και του ακινητοποιημένου ηλεκτρολύτη, οπότε έτσι μειώνεται το ίχνος και το βάρος της μπαταρίας.

Τα μειονεκτήματα των VRLA είναι ότι είναι λιγότεροι στιβαρές από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος, ενώ είναι πιο ακριβές και έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής. Οι VRLA θεωρούνται ως μη χρήσιμες συντήρησης και ασφαλείς και έχουν καταστεί δημοφιλείς για την εφεδρική τροφοδοσία ισχύος σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών, καθώς επίσης και για την αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε περιπτώσεις όπου δεν μπορούν να διατεθούν ειδικοί χώροι για την τοποθέτηση των μπαταριών. [15]

2.2.1.2 Αλκαλικές μπαταρίες

Οι αλκαλικές μπαταρίες είναι κυρίως οι μπαταρίες νικελίου – καδμίου (NiCd), νικελίου – υδριδίου μετάλλου (NiMH) και οι νικελίου – ψευδαργύρου (NiZn). Και οι τρεις αυτοί τύποι χρησιμοποιούν το ίδιο υλικό για το θετικό ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη, το οποίο είναι υδροξείδιο του νικελίου και υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου με υδροξείδιο του λιθίου αντίστοιχα. Όσον αφορά στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, η μπαταρία νικελίου – καδμίου (NiCd) χρησιμοποιεί υδροξείδιο του καδμίου, η νικελίου – υδριδίου μετάλλου (NiMH) ένα κράμα μετάλλων και η νικελίου – ψευδαργύρου (NiZn) υδροξείδιο του ψευδαργύρου. [11-15]

Η τάση για τις αλκαλικές μπαταρίες εκτιμάται γύρω στα 1,2 Volt (1,65 Volt για τον τύπο NiZn), ενώ οι τυπικές μέγιστες ενεργειακές πυκνότητες είναι υψηλότερες από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος. Συγκεκριμένα, η μπαταρία NiCd παρουσιάζει ενεργειακή πυκνότητα 50 Wh/kg, η NiMH 80 Wh/kg και η NiZn 60 Wh/kg. Η τυπική διάρκεια ζωής λειτουργίας και ο αριθμός κύκλων φόρτισης - εκφόρτισης των μπαταριών NiCd και NiMH οξέος (1000 - 2000 κύκλοι) είναι επίσης υψηλότεροι των μπαταριών μολύβδου - οξέος, ενώ η μπαταρία NiZn εμφανίζει παρόμοια ή μικρότερη διάρκεια ζωής από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος. Τέλος, και τα τρία αυτά είδη μπαταριών νικελίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χαμηλές θερμοκρασίες (έως τους -50°C), ενώ παράλληλα μπορούν να επαναφορτιστούν ταχέως. [11-15]

Παρά τα ανωτέρω πλεονεκτήματα των μπαταριών νικελίου (κυρίως των NiCd και NiMH) έναντι των μπαταριών μολύβδου – οξέος, και τα τρία αυτά είδη μπαταριών νικελίου παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα συγκριτικά με τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος από άποψη βιομηχανικής χρήσης, καθώς και της εφαρμογής για την ενίσχυση ηλεκτρικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. [11-15]

Γενικά, η μπαταρία NiCd είναι η μοναδική από τους τρεις τύπους αλκαλικών μπαταριών που χρησιμοποιείται σε συστήματα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Παρόλα αυτά, η μπαταρία NiCd μπορεί να είναι 4 φορές πιο ακριβή από μια μπαταρία μολύβδου – οξέος και 2 φορές ακριβότερη από τις μπαταρίες Λιθίου. Οι μπαταρίες νικελίου εμφανίζουν χαμηλότερες ενεργειακές αποδόσεις από τις μολύβδου – οξέος. Συγκεκριμένα, η ενεργειακή απόδοση της NiCd κυμαίνεται μεταξύ 65 και 70%, ενώ της NiZn είναι της τάξης του

80%. Οι μπαταρίες NiCd παρουσιάζουν υψηλότερα ποσοστά αυτό-εκφόρτισης από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος. Το σημαντικότερο, όμως, μειονέκτημα των μπαταριών Ni-Cd είναι η υψηλή τοξικότητα του καδμίου. Αν και αυτό το μέταλλο είναι ιδιαίτερα ανακυκλώσιμο, είναι υπερβολικά τοξικό. [11-15]

Όσον αφορά στις εφαρμογές των μπαταριών νικελίου, οι μπαταρίες Ni-Cd χρησιμοποιούνται ευρέως στις επικοινωνίες και τον ιατρικό εξοπλισμό, ενώ έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς και σε υπό ανάπτυξη ηλεκτρικά οχήματα. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής τους και στα ηλεκτρικά συστήματα παραγωγής ενέργειας. Οι μπαταρίες NiMH χρησιμοποιούνται προς το παρόν στους υπολογιστές, τον ιατρικό εξοπλισμό και σε άλλες εφαρμογές. Οι μπαταρίες NiZn είναι υπό ανάπτυξη και συνεπώς δεν είναι διαθέσιμες εμπορικά. [14]

2.2.1.3 Μπαταρίες Λιθίου

Η τεχνολογία των μπαταριών λιθίου δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα για ενεργειακή αποθήκευση στα πλαίσια ενός συστήματος αδιάκοπης παροχής ισχύος. Μέχρι σήμερα χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης και άλλο φορητό εξοπλισμό ενώ στο άμεσο μέλλον προβλέπεται να εφαρμοστούν σε υβριδικά ή ηλεκτρικά οχήματα. [14]

Διακρίνονται σε μπαταρίες λιθίου – ιόντος (Li-ion) και σε μπαταρίες πολυμερούς λιθίου (Li-pol). Συγκριτικά με τις NiCd και μολύβδου – οξέος, εμφανίζουν υψηλότερες ενεργειακές πυκνότητες και ενεργειακές αποδόσεις, χαμηλότερα ποσοστά αυτοεκφόρτισης, ενώ απαιτούν εξαιρετικά μικρή συντήρηση. Ειδικότερα οι Li-ion έχουν ονομαστική τάση γύρω στα 3.7 V, έχουν ενεργειακές πυκνότητες 80-150 Wh/kg ενώ οι ενεργειακές πυκνότητες των πολυμερούς λιθίου είναι 100-150 Wh/kg. η ενεργειακή απόδοση και για τους δυο τύπους μπαταρίας λιθίου είναι 90-100%. [14]

Στις μπαταρίες λιθίου-ιόντος το ποσοστό αυτοεκφορτισης είναι πολύ χαμηλό, μέχρι 5% το μήνα και η διάρκεια ζωής τους μπορεί να ξεπεράσει τους 1500 κύκλους. Ωστόσο η διάρκεια ζωής της μειώνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και σε πλήρεις φορτίσεις. Αυτός είναι και ο λόγος που είναι ακατάλληλες για εφαρμογές εφεδρείας όπου μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως. Επιπλέον, είναι εύθραυστες και απαιτούν ένα κύκλωμα

προστασίας για να διατηρηθούν σε ασφαλή λειτουργία. Το κύκλωμα ασφαλείας τοποθετείται σε κάθε συστοιχία και περιορίζει την τάση αιχμής κάθε στοιχείου κατά τη διάρκεια της φόρτισης και αποτρέπει την υπερβολική μείωση της τάσης στην εκφόρτιση. Ακόμα, η θερμοκρασία του στοιχείου ελέγχεται ώστε να μη λαμβάνει ακραίες τιμές. Το ρεύμα μέγιστης φόρτισης και εκφόρτισης ελέγχεται και περιορίζεται επίσης στις περισσότερες συστοιχίες. Αυτές οι προφυλάξεις είναι απαραίτητες ώστε να εξαιρεθεί κάθε δυνατότητα μεταλλικής επιμετάλλωσης του λιθίου, που προκαλείται λόγω υπερφόρτισης. [11-15]

Η διάρκεια ζωής των μπαταριών πολυμερούς λιθίου μπορεί να φτάσει τους 600 περίπου κύκλους. Το ποσοστό αυτοεκφόρτισης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και εκτιμάται γύρω στο 5% ανά μήνα. Σε σύγκριση με την μπαταρία λιθίου – ιόντος, οι λειτουργικές προδιαγραφές τους υπαγορεύουν ένα πολύ μικρό εύρος θερμοκρασιών αποφεύγοντας τις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ωστόσο, είναι ελαφρύτερες και ασφαλέστερες με ελάχιστο ποσοστό αυτανέφλεξης.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των μπαταριών λιθίου είναι το υψηλό κόστος τους. Αυτό οφείλεται στα εσωτερικά κυκλώματα προστασίας και στην ειδική τους συσκευασία. Έχουν μειωμένη περιβαλλοντική επίδραση δεδομένου ότι τα οξείδια και τα άλατα του λιθίου μπορούν να ανακυκλωθούν.

2.2.1.4 Μπαταρίες Θείου-Νατρίου

Είναι ο πιο εξελιγμένος τύπος μπαταρίας υψηλής θερμοκρασίας. Χρησιμοποιεί υγρό θείο για το θετικό ηλεκτρόδιο και υγρό νάτριο για το αρνητικό. Τα ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από ένα στερεό ηλεκτρολύτη από αλουμίνιο. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει στα θετικά ιόντα νατρίου να περάσουν και να αντιδράσουν με το θείο σχηματίζοντας πολυσουλφίδια νατρίου.

Παρουσιάζουν σχετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα η οποία κυμαίνεται από 150 μέχρι 240 Wh/kg. Ακόμα, η διάρκεια ζωής τους εκτιμάται γύρω στα 15 έτη (2500-4500 κύκλοι) και η ενεργειακή τους απόδοση φτάνει το 90%. Μπορούν επίσης να αποτελέσουν μια αποδεκτή αποθηκευτική διάταξη από οικονομικής απόψεως, η οποία διάταξη χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό χρόνο εκφόρτισης. Έχουν ελάχιστες

απαιτήσεις συντήρησης. Αυτά τα χαρακτηριστικά της την καθιστούν κατάλληλη για αποθήκευση μεγάλου ποσού αιολικής ενέργειας. Μπορούν να τροφοδοτούν το σύστημα με υψηλό ποσό ισχύος σε σύντομο χρονικό διάστημα ή με μεγάλο ποσό ενέργειας για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Έχει περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς τα υλικά κατασκευής της είναι αδρανή αλλά εγκυμονεί μικρός κίνδυνος από τις υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν για να διατηρήσουν το θείο τηγμένο. Αυτή την περίοδο χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ποιότητας ισχύος ή σε εφαρμογές εξομάλυνσης αιχμών. [11-15]



Εικόνα 3: Μπαταρία Θείου - Νατρίου

2.2.1.5 Μπαταρίες Μετάλλου-αέρα

Οι μπαταρίες αυτές είναι υπό συνεχή έρευνα και τεχνολογική ανάπτυξη για να γίνουν εμπορικά διαθέσιμες. Ως αρνητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιούνται συνήθως κατάλληλα μέταλλα όπως το αλουμίνιο, ο ψευδάργυρος, ο μόλυβδος ή ακόμη και ο σίδηρος τα οποία τοποθετούνται σε ρευστό ή πολυμερή ενσωματωμένο ηλεκτρολύτη πχ κάλιο και απελευθερώνουν ηλεκτρόνια κατά τη αντίδραση οξείδωσης. Τα ηλεκτρόνια καθώς

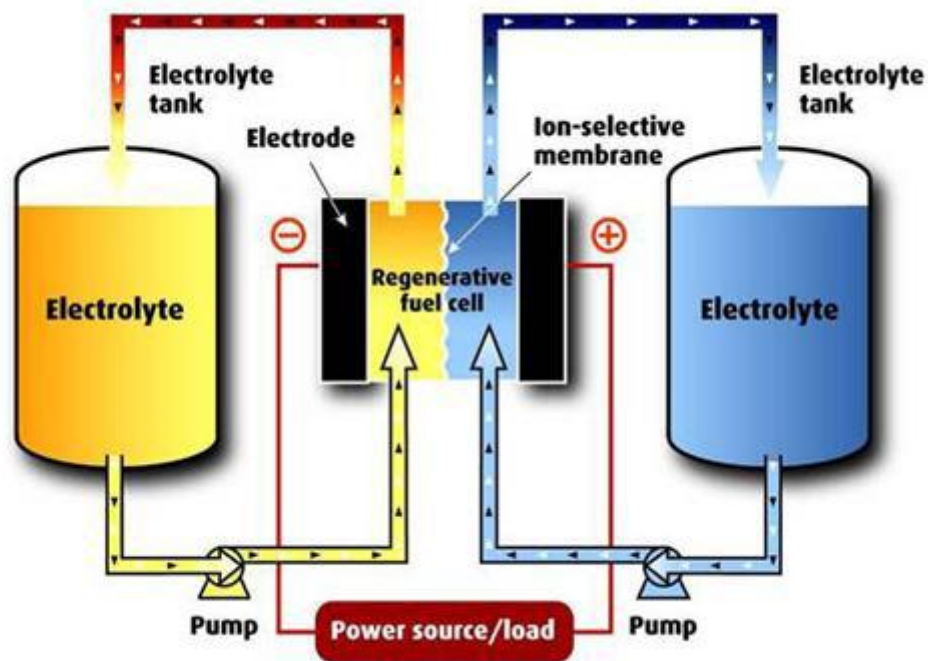
έλκονται από την κάθοδο καταλύτη και άνθρακα και καθώς ρέουν σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, δημιουργούν διαφορά δυναμικού στα άκρα της μπαταρίας.

Οι ενεργειακές πυκνότητες αυτών των μπαταριών είναι υψηλές σε σχέση με τη μπαταρία μολύβδου οξέος και κυμαίνονται μεταξύ 110-420 Wh/kg. Ακόμα, είναι από τις πιο φτηνές μπαταρίες και παρουσιάζουν περιβαλλοντική συμβατότητα αφού κανένα τοξικό υλικό δεν συμπεριλαμβάνεται στην κατασκευή τους. Σημαντικό όμως μειονέκτημα είναι η δυσκολία τους να επαναφορτιστούν με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν χαμηλή ενεργειακή απόδοση της τάξης του 50%. Επιπλέον το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας τους είναι περιορισμένο. [11,14,15]

2.2.1.6 Μπαταρίες Ροής

Η βασική διαφορά των μπαταριών ροής σε σχέση με τις συμβατικές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες έγκειται στο γεγονός ότι η ενέργεια της μπαταρίας εξαρτάται από τον όγκο των ηλεκτρολυτών ενώ η ισχύς εξόδου από το μέγεθος της αντίδρασης των στοιβάδων των κυψελών. Αυτό καθιστά την ενέργεια και την ισχύ ανεξάρτητα μεγέθη και γίνεται λόγω του διαχωρισμού του ηλεκτρολύτη και της κυψέλης. [14]

Οι μπαταρίες ροής είναι κατάλληλες να αποθηκεύουν υψηλές ποσότητες ισχύος κυμαινόμενες από μερικές εκατοντάδες kW έως 500 MW για περιόδους διάρκειας από 1 δευτερόλεπτο μέχρι 12 ώρες. Μπορούν να χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο αριθμό κύκλων, είναι πιο αποδοτικές και έχουν μεγαλύτερο χρόνο εκφόρτισης από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος. Οι αποδόσεις τους κυμαίνονται στα επίπεδα 70-85% έναντι των μπαταριών μολύβδου – οξέος που είναι στα 70-75% και ο χρόνος εκφόρτισης τους είναι της τάξης των ωρών σε σύγκριση με αυτόν των μπαταριών μολύβδου – οξέος που είναι μικρότερος της ώρας. Μια μπαταρία ροής αποκρίνεται είτε από τη λειτουργία αναμονής είτε από τη λειτουργία φόρτισης ή εκφόρτισης μέσα σε χιλιοστά του δευτερολέπτου ενώ μπορεί να εκκινήσει πλήρως μέσα σε μερικά λεπτά. Αυτές οι δυνατότητες τις καθιστούν κατάλληλες για εφαρμογές αδιάλειπτης παροχής ισχύος, ποιότητας ισχύος, τεχνολογίες ΑΠΕ, και εξοικονόμησης φορτίου. [14]



Σχήμα 3: Μπαταρία Ροής

Αποθηκεύουν και αποδεσμεύουν την ενέργεια μέσω μιας αντίστροφης ηλεκτροχημικής αντίδρασης μεταξύ δυο ηλεκτροδίων. Ο ηλεκτρολύτης αποθηκεύεται σε χωριστές δεξαμενές από τις οποίες ρέει μέσα σε σωλήνες συγκρατώντας τη συναρμολόγηση των ηλεκτροδίων. Αυτή η διάταξη διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τους ογκομετρικούς περιορισμούς που τίθενται σχετικά με την ποσότητα του ηλεκτρολύτη που μπορεί να συνδεθεί με ένα δεδομένο σύστημα και ως εκ τούτου αυξάνει και την ποσότητα ισχύος που μπορεί να αποθηκευτεί. Συνεπώς, το κόστος επέκτασης σε μια μπαταρία ροής εξαρτάται μόνο από τον όγκο της δεξαμενής που περιέχει τον ηλεκτρολύτη το οποίο είναι χαμηλό συγκριτικά με αυτό της αλλαγής κελιών σε μια συμβατική μπαταρία.

Η ηλεκτροχημική απελευθέρωση της ενέργειας εμφανίζεται όταν οι δυο διαφορετικές ενώσεις αλάτων (ηλεκτρολύτες) φέρονται κοντά η μία στην άλλη μέσα στην κυψέλη, χωριζόμενες από μια μεμβράνη διεξαγωγής ιόντων. Η ροή ρεύματος μέσω της μεμβράνης δημιουργεί διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια και συνεπώς ενέργεια σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Αυτή η ροή ρεύματος συνοδεύεται από χημικές μεταβολές και στους ηλεκτρολύτες. Αυτές οι μεταβολές αναιρούνται αν κατά τη διάρκεια του κύκλου επαναφόρτισης εφαρμοστεί εξωτερικά στα ηλεκτρόδια ένα αντίστροφο δυναμικό. Με

αυτό τον τρόπο οι συνδεδεμένοι ηλεκτρολύτες επιστρέφουν στην αρχική ηλεκτροχημική τους κατάσταση.

Συνοψίζοντας τα πλεονεκτήματα των μπαταριών ροής σε σχέση με τις συμβατικές μπαταρίες [14]:

- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Ταχύτητα απόκρισης στις μεταβολές φορτίου.
- Γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση
- Ευελιξία των ηλεκτρονικών ισχύος με την προγραμματιζόμενη στήριξη τάσης
- Επεκτασιμότητα
- Οι μπαταρίες ροής έχουν το χαμηλότερο οικολογικό αποτύπωμα σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες αποθήκευσης που βασίζονται σε τοξικές ουσίες όπως ο μόλυβδος και το κάδμιο. Οι ηλεκτρολύτες των συστημάτων αυτών έχουν απεριόριστη διάρκεια ζωής και είναι επαναχρησιμοποιήσιμοι.
- Δεν υποβαθμίζονται από επαναλαμβανόμενες βαθιές εκφορτίσεις και φορτίσεις. Το σύστημα μπορεί να εκφορτιστεί και φορτιστεί περισσότερες από 13000 φορές χωρίς υποβάθμιση στην συνολική απόδοση. Η απόδοση του συστήματος είναι περίπου 70-78%.
- Η ανάμιξη των ηλεκτρολυτών δεν οδηγεί σε μόλυνση των ηλεκτρολυτών.
- Απεριόριστη ζωή του ηλεκτρολύτη (χωρίς θέματα απόρριψης και μόλυνσης)
- Χαμηλά επίπεδα αυτό-εκφόρτισης
- Απλή συντήρηση
- Μπορεί να φορτιστεί τόσο ηλεκτρικά όσο και μηχανικά
- Λειτουργία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας αποτελούν η πολυπλοκότητα του συστήματος και ο απαιτούμενος όγκος του συστήματος. Το σύστημα περιλαμβάνει αντλίες, υδραυλικά συστήματα και βοηθητικό εξοπλισμό το οποίο μπορεί να αποτελέσει ένα βασικό μειονέκτημα. Ο λόγος kW/m^3 των μπαταριών ροής είναι υψηλότερος σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη μπαταρία γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα ιδιαίτερα τις περιπτώσεις στις οποίες υπάρχει απαίτηση χώρου εγκατάστασης και αυτή η παράμετρος μπορεί να αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την εγκατάσταση ενός αποθηκευτικού συστήματος.

Υπάρχουν τέσσερις κυρίαρχες τεχνολογίες μπαταριών ροής οι οποίες είναι [14]:

- Πολυσουλφιδίου – Βρωμιδίου (Polysulfide Bromide - PSB)
- Οξειδοαναγωγής Βαναδίου (Vanadium Redox - VRB)
- Ψευδαργύρου – βρωμιδίου (Zinc Bromine - ZnBr)
- Υδρογόνου – Βρωμιδίου (Hydrogen Bromine - HBr).

Από αυτές οι οξειδοαναγωγής βαναδίου (VRB) και οι Ψευδαργύρου – Βρωμιδίου (ZnBr) είναι διαθέσιμες προς εμπορική τυποποίηση. Οι VRB μπαταρίες ροής έχουν απόδοση 85% και μπορούν να εκφορτίζονται πλήρως χωρίς να μειώνεται η διάρκεια ζωής τους. Οι μπαταρίες ZnBr έχουν ενεργειακή πυκνότητα 37 Wh/kg και απόδοση 75%. Το κόστος ανά μονάδα ισχύος είναι χαμηλότερο από αυτό των συμβατικών μπαταριών και το κόστος ανά μονάδα ενέργειας είναι παρόμοιο ή μικρότερο από αυτό των συμβατικών. [14,15]

2.2.2 Υδρογονοαποθήκευση

Το υδρογόνο αποτελεί το 90% της συνολικής μάζας του σύμπαντος και είναι το ελαφρύτερο στοιχείο που υπάρχει στη φύση. Στην καθαρή του μορφή που είναι η αέρια συναντάται σπάνια και δεσμευμένο υπάρχει σχεδόν σε όλα τα ορυκτά της γης. Λόγω του μικρού του βάρους, δεν αποτελεί περισσότερο από το 1% της συνολικής μάζας της γης. [3,16]

Υπό ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, το υδρογόνο σαν αέριο είναι πολύ ελαφρύτερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Συγκεκριμένα, σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας ($P=1 \text{ atm}$, $T=0 \text{ }^\circ\text{C}$) πυκνότητα 0.0899 kg/m^3 , δηλαδή περίπου δέκα φορές μικρότερη από αυτήν του αέρα. Όταν η θερμοκρασία του αέριου υδρογόνου κατεβεί κάτω από τους $20,268 \text{ K}$ σε κανονικές συνθήκες πίεσης, αυτό αρχίζει να υγροποιείται, περνώντας σταδιακά από την αέρια στην υγρή του φάση. [3]

Όταν το μοριακό υδρογόνο θερμαίνεται πάνω από φλόγα, αντιδρά σε συνθήκες περιβάλλοντος βία με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα και δίνει σαν παράγωγα νερό και θερμότητα (με 285.83 kJ/mol παραγόμενου H_2O) σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Το υδρογόνο αποτελεί μια τομή για την ιστορική εξέλιξη της ενεργειακής παραγωγής από τον άνθρωπο, μιας και είναι ουσιαστικά το πρώτο καύσιμο που δεν βασίζεται καθόλου στον άνθρακα. Εκτός από την μηδενική του περιεκτικότητα σε άνθρακα, ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό που παρουσιάζει το υδρογόνο σαν καύσιμο, είναι ότι μπορεί να προσφέρει πολύ μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από τα αντίστοιχα ποσά των διαφόρων ορυκτών καυσίμων, τα οποία είναι ικανά να τροφοδοτήσουν τις περισσότερες από τις καθημερινές ανάγκες του ανθρώπου, ξεκινώντας από την ηλεκτροδότηση των σπιτιών και των πόλεών του, την κίνηση των μεταφορικών του μέσων και την ικανοποίηση των μικρότερων οικιακών ενεργειακών αναγκών.

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται σαν βιομηχανικό καύσιμο εδώ και αρκετές δεκαετίες. Από την άλλη μεριά, η χρήση του υδρογόνου σαν ενεργειακό καύσιμο είναι προς το παρόν περιορισμένη. Από την συνολική ποσότητα του υδρογόνου που παράγεται σε παγκόσμια κλίμακα, η βιομηχανία της αμμωνίας καταναλώνει περίπου το 50% αυτής, ενώ τα διυλιστήρια του πετρελαίου το 37%. Το υπόλοιπο 13%, καταναλώνεται σε διάφορους άλλους βιομηχανικούς τομείς, μεταξύ των οποίων το μεγαλύτερο ποσοστό σε κατανάλωση κατέχει η βιομηχανία των τροφίμων. [3,16]

Οι κυριότερες διατάξεις με τις οποίες παράγεται ενέργεια από το υδρογόνο είναι οι κυψέλες καυσίμου. Το υδρογόνο όμως, μπορεί να παράγει ενέργεια και μέσω της καύσης του με τον ατμοσφαιρικό αέρα μέσα σε ΜΕΚ, όπως σε καταλυτικούς καυστήρες, σε λέβητες αερίου, σε αεροστρόβιλους και σε κινητήρες εσωτερικής

καύσης. Η καύση του υδρογόνου με τον ατμοσφαιρικό αέρα παράγει σαν κύριο συστατικό το νερό, αλλά λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν κατά την διαδικασία αυτή, στη πράξη παράγονται επίσης και ορισμένες ποσότητες από οξείδια του αζώτου. [3,16]

Εικάζεται, ότι στις επόμενες δεκαετίες θα αρχίσει να καταλαμβάνει ολοένα και σημαντικότερο μερίδιο στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά και ότι στο απώτερο μέλλον θα αντικαταστήσει ένα μεγάλο μέρος της υπάρχουσας υποδομής σε παραγωγή, διανομή και κατανάλωση ενέργειας που βασίζεται σήμερα κατά πλείστον στα ορυκτά καύσιμα. Βραχυπρόθεσμα, η ενεργειακή χρήση του υδρογόνου προβλέπεται ότι θα αυξηθεί στη βιομηχανία και στον οικιακό τομέα, προκειμένου να διευκολυνθεί εκεί η παραγωγή και η αποθήκευση της ενέργειας, ενώ στη συνέχεια οι εφαρμογές του προβλέπεται ότι θα επεκταθούν και στον τομέα των μεταφορών. Η μετάβαση όμως, από το υπάρχον σύστημα παραγωγής και διανομής της ενέργειας που επί σειράς δεκαετιών βασίζεται κατά κύριο λόγο στα ορυκτά καύσιμα, σε ένα νέο το οποίο θα έχει σαν κύριο μέσο του το υδρογόνο, απαιτεί χρόνο και δαπανηρά βήματα από κυβερνήσεις και παραγωγούς της ενέργειας σε όλη την υφήλιο.

2.2.2.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Στη συνέχεια θα αναφέρουμε συνοπτικά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το υδρογόνο σαν μέσο παραγωγής ενέργειας, έναντι των συμβατικών ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται σήμερα για το σκοπό αυτό [3,16]:

- Σε σχέση με οποιοδήποτε συμβατικό καύσιμο, το υδρογόνο παρουσιάζει την μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ενέργειας ανά μονάδα βάρους του, η οποία ισούται περίπου με 120.7 kJ/kg. Η ενέργεια αυτή, είναι τρεις φορές μεγαλύτερη περίπου από την ενέργεια 1 kg συμβατικής βενζίνης.
- Κατά την καύση του (ή κατά την ηλεκτρόλυσή του μέσα σε κυψέλες καυσίμου), το υδρογόνο παράγει ελάχιστους ρύπους, οι οποίοι είναι πολύ λιγότεροι από αυτούς που παράγονται κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων.
- Το υδρογόνο είναι το ίδιο ακίνδυνο, από πλευράς αυθόρμητης ανάφλεξης, σε σχέση με τα υπόλοιπα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα (π.χ.

βενζίνη, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.τ.λ.). Μάλιστα, κατά την απουσία ατμοσφαιρικού αέρα και υπό συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος ($T=20^{\circ}\text{C}$, $P=1\text{atm}$), το υδρογόνο είναι λιγότερο εύφλεκτο από αυτά τα καύσιμα, έχοντας για θερμοκρασία αυθόρμητης ανάφλεξης του τους 585°C (αντίστοιχη θερμοκρασία αυθόρμητης ανάφλεξης της βενζίνης, απουσία ατμοσφαιρικού αέρα: $230^{\circ}\text{C} \div 480^{\circ}\text{C}$).

- Μπορεί να συμβάλει σταδιακά στη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων, επιφέροντας έτσι σημαντικές ωφέλειες στον περιβαλλοντικό, ενεργειακό αλλά και οικονομικό τομέα, μέσω της δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας για τον τελευταίο.
- Τέλος, το υδρογόνο μπορεί να παρασκευαστεί με πολυάριθμες μεθόδους και σε οποιοδήποτε μέρος της γης και επομένως μπορεί να βοηθήσει πολλά κράτη που είναι «φτωχά» σε διαθέσιμα κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων να αναπτύξουν τα δικά τους αυτόνομα και ολοκληρωμένα ενεργειακά συστήματα.

Όσον αφορά στα μειονεκτήματα του υδρογόνου έναντι των υπολοίπων συμβατικών πηγών ενέργειας, τα περισσότερα από αυτά έχουν να κάνουν με την σχετικά πρόσφατη στροφή της έρευνας προς την αξιοποίηση του υδρογόνου ως καύσιμο, με αποτέλεσμα να μην έχουν ακόμα εξελιχθεί οι κατάλληλες τεχνικές, ώστε να είναι ικανό να αξιοποιηθεί σε μαζική κλίμακα στη πράξη. Συνοπτικά, τα μειονεκτήματα αυτά έχουν ως εξής [3]:

- Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα το υδρογόνο σαν καύσιμο, αλλά και γενικότερα σαν βιομηχανικό προϊόν, είναι αυτό της αποτελεσματικής και ασφαλούς αποθήκευσής του. Οι ακραίες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που απαιτούνται για την αέρια ή την υγρή του αποθήκευση, συνεπάγονται και την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για την επίτευξή τους, με αποτέλεσμα η αέρια ή η υγρή αποθήκευση του υδρογόνου να είναι αρκετά δαπανηρή σαν μέθοδος αποθήκευσής του.

- Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει το υδρογόνο σαν καύσιμο παραγωγής ενέργειας είναι και το γεγονός, ότι το παγκόσμιο δίκτυο διανομής του προς το παρόν δεν υφίσταται, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μαζική κλίμακα και από όλες τις χώρες του κόσμου. Επιπλέον, λόγω της ανυπαρξίας του δικτύου διανομής του, το κόστος ανεφοδιασμού του υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα παραμένει ακόμα υψηλό, μιας και οι διάφορες τεχνολογίες παραγωγής του μέσω ΑΠΕ δεν έχουν εξελιχθεί ακόμα σε ικανοποιητικό βαθμό.
- Ένα τελευταίο πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα το υδρογόνο σαν καύσιμο μαζικής παραγωγής ενέργειας, είναι και το αυξημένο κόστος των διαφόρων ενεργειακών διατάξεων που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίησή του σαν καύσιμο (των κυψελών καυσίμου και των MEK υδρογόνου). Η τεχνολογία των διατάξεων αυτών, προς το παρόν, δε μπορεί ακόμα να θεωρηθεί ολοκληρωτικά αξιόπιστη, μιας και κατά την εφαρμογή τους παρουσιάζονται ορισμένα τεχνικά και οικονομικής φύσης προβλήματα που δεν καθιστούν ικανή τη μαζική χρησιμοποίησή τους.

2.2.2.2 Αποθήκευση Υδρογόνου

Το υδρογόνο προκειμένου να αποθηκευτεί απαιτείται να μειωθεί ο πολύ μεγάλος αέριος όγκος του, γεγονός που συνεπάγεται την ταυτόχρονη αύξηση της πίεσής του ή την ταυτόχρονη μείωση της θερμοκρασίας του (ή και τα δύο). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των διαφόρων τεχνικών αποθήκευσής του σε κατάλληλες διατάξεις ή σε διάφορα υλικά. Η αύξηση της πυκνότητας της αέριας μάζας του (ή αντίστοιχα η μείωση του αέριου όγκου του) που αυτό διαθέτει υπό συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος, επιτυγχάνεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους: είτε μέσω της αύξησης της πίεσής του, είτε μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας του, είτε, τέλος, μέσω της μείωσης της άπωσης που ασκείται μεταξύ των μορίων του, κατά τη διοχέτευσή του σε διάφορα στερεά υλικά (μεταλλικά υδρίδια, νανοσωλήνες).

Πολλές μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου που έχουν μέχρι σήμερα εφαρμογή στη βιομηχανία μπορούν να εφαρμοστούν στο μέλλον στις εφαρμογές της αγοράς υδρογόνου αλλά και σε ενεργειακά συστήματα που απαιτούν αποδοτικούς τρόπους αποθήκευσης ενέργειας.

Οι μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου μπορούν να διακριθούν βάση της διάρκειας αποθήκευσης σε μακροπρόθεσμες, βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες. Επιπλέον μπορούν να διακριθούν βάση της μορφής στην οποία αποθηκεύονται όπως για παράδειγμα σε υγρή ή αέρια μορφή και σε στερεά υλικά μέσω απορρόφησης.

Η παρουσίαση των τρόπων αποθήκευσης έχει γίνει βάση της κλίμακας αποθήκευσης και για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται και οι διάφορες μορφές στις οποίες αποθηκεύεται το υδρογόνο ανάλογα με τη διάρκεια αποθήκευσης.

Μεγάλης κλίμακας αποθήκευση Υδρογόνου

Μεγάλες ποσότητες υδρογόνου σε αέρια μορφή μπορούν να αποθηκευτούν σε υπόγειες αποθηκευτικές διατάξεις σε πιέσεις από μερικές εκατοντάδες μέχρι 1000 psi. Αυτές οι υπόγειες διατάξεις μπορούν να είναι πεδία κοιτασμάτων φυσικού αερίου ή πετρελαίου τα οποία έχουν εξαντληθεί, υπόγειοι υδροφορείς ή σπήλαια πετρωμάτων ή αλάτων. Υπάρχουν δυο εμπορικές εφαρμογές υπόγειας αποθήκευσης υδρογόνου στην Αγγλία σε σπήλαια αλάτων με περιεκτικότητα 95% σε καθαρό υδρογόνο το οποίο προορίζεται για βιομηχανικούς καταναλωτές, και στη Γαλλία σε υπόγειο υδροφορέα με περιεκτικότητα 50% σε υδρογόνο. [17]

Οι υπόγειοι σχηματισμοί που μπορούν να γίνουν υποδοχείς για αποθήκευση υδρογόνου έχουν μεγάλη χωρητικότητα, μέχρι 1000 m³ για υδροφορείς ή κοιτάσματα φυσικού αερίου και της τάξης του εκατομμυρίου m³ για υπόγεια σπήλαια. Για μεγάλα υπόγεια φρεάτια και υπόγειους υδροφορείς μόνο ένα ποσοστό αυτής της χωρητικότητας μπορεί να είναι διαθέσιμο για αποθήκευση (περίπου 35-65%) καθώς ένα τμήμα του όγκου πρέπει να καταλαμβάνεται με ένα στρώμα αερίου το οποίο προστατεύει και διατηρεί την πίεση. [17] Τα σπήλαια πετρωμάτων επιτρέπουν περίπου 25% απόδοση και τα σπήλαια αλάτων μπορούν να προσεγγίσουν το 100%. Αυτά τα συστήματα παρέχουν περίπου 10⁶-10⁷ m³ χωρητικότητα υδρογόνου ανά κύκλο αποθήκευσης. [17]

Το κόστος μιας εφαρμογής μεγάλης κλίμακας υπόγειας αποθήκευσης προσθέτει περίπου 2-6 \$/GJ στο κόστος του υδρογόνου. [17] Αυτό το κόστος μπορεί να είναι μεγαλύτερο αν η αποθήκευση είναι μακράς διάρκειας (διεποχική) λόγω των μεγαλύτερων απωλειών του συστήματος αποθήκευσης (μεγάλη αυτοεκφόρτιση). Εφόσον η αποθήκευση του υδρογόνου προορίζεται για εφαρμογές που απαιτούν σε ημερήσια βάση υδρογόνο όπως σε εφαρμογές μεταφορών, η παράμετρος του κόστους γίνεται πιο προσιτή. Γενικά το κόστος αποθήκευσης είναι οικονομικό για ημερήσια ή εβδομαδιαίο κύκλο αποθήκευσης. [17]

Μεσαίας και μικρής κλίμακας αποθήκευση Υδρογόνου

Για εφαρμογές μεσαίας και μικρής κλίμακας αποθήκευση υδρογόνου στη βιομηχανία γίνεται χρήση κυλινδρικών δεξαμενών στις οποίες περιέχεται το υδρογόνο είτε σε υγρή μορφή είτε σε αέρια (συμπιεσμένη).

Αποθήκευση σε υγρή μορφή [17]: το υδρογόνο μπορεί να υγροποιηθεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (θερμοκρασίας υγροποίησης $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) και να αποθηκευτεί σε κρυογενικές δεξαμενές για την μείωση των απωλειών θερμότητας. Η χωρητικότητα των δεξαμενών έχει ένα μεγάλο εύρος και φτάνει μέχρι και εκατοντάδες τόνους. Το πλεονέκτημα του υγροποιημένου υδρογόνου έναντι του συμπιεσμένου σε αέρια μορφή είναι το χαμηλότερο κόστος μεταφοράς και για αυτό σε βιομηχανικές χρήσεις ευνοείται η χρήση του όταν η μεταφορά γίνεται με οχήματα. Το μειονέκτημα όμως είναι το αυξημένο κόστος υγροποίησης και το κόστος της δεξαμενής αποθήκευσης. Περίπου το ένα τρίτο του ενεργειακού περιεχομένου του αποθηκευμένου υδρογόνου απαιτείται για κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να υγροποιηθεί. Έτσι, η υγροποίηση προσθέτει περίπου 5-10 \$/GJ στο κόστος του υδρογόνου.

Υπέργεια αποθήκευση υδρογόνου σε αέρια μορφή: αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για αποθήκευση σχετικά μικρής ποσότητας αερίου υδρογόνου (περίπου 10^6 scf). Οι εμπορικά διαθέσιμες δεξαμενές προσφέρουν πιέσεις 1200-8000 psi με τυπικές χωρητικότητες 6000-9000 scf/δεξαμενή. Το κόστος των δεξαμενών είναι περίπου 3000-5000 \$/GJ. Το κόστος συμπίεσης προσθέτει 2-20 \$/GJ στο κόστος του υδρογόνου. [17]

Νέες τεχνολογίες για αποθήκευση υδρογόνου

Προς το παρόν, βρίσκονται υπό έρευνα διάφορες νέες τεχνολογίες για αποθήκευση υδρογόνου. Αυτές οι μέθοδοι, αφορούν σε αποθήκευση σε ανθρακικά υλικά, σε υδρίδια μετάλλων και εναλλακτικά υδρίδια και σε υψηλής πίεσης αέρια αποθήκευση σε γυάλινα μικροσφαιρίδια.[17]

Η αποθήκευση σε μορφή άνθρακα είναι μια ελκυστική εναλλακτική καθώς είναι άμεσα διαθέσιμη και πιθανόν χαμηλού κόστους. Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις σε σχέση με την έρευνα σε ποιον τύπο άνθρακα μπορεί να γίνει η αποθήκευση όπως, προσρόφηση υδρογόνου σε νανο-ίνες γραφίτη, νανοσωλήνες άνθρακα, φουλερένια και σε ενεργοποιημένο άνθρακα σε χαμηλές θερμοκρασίες. [17]

Σύγκριση μεθόδων αποθήκευσης υδρογόνου

Τα υδρίδια μετάλλων είναι κατάλληλα για αποθήκευση μικρών ποσοτήτων (της τάξης του 1 kg) και όταν υπάρχει απαίτηση για ασφάλεια. [16] Για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου κατάλληλες μέθοδοι είναι αυτές της αποθήκευσης σε αέρια συμπιεσμένη μορφή και της υγροποίησης.

Αν κριτήριο επιλογής είναι η διαθεσιμότητα χώρου και η ασφάλεια πλεονεκτεί η υγροποίηση. Για την αποθήκευση σε υγρή μορφή απαιτείται κατανάλωση ενέργειας 12-15 kWh/kg, απαίτηση χώρου 15 lt/kg και κόστος της τάξης των 250-700 €/kg. Παρόλο που το υγροποιημένο υδρογόνο έχει υψηλή ενεργειακή απόδοση έχει συνολικά χαμηλή απόδοση λόγω των απωλειών κατά τη φάση υγροποίησης. [16]

Το συμπιεσμένο υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε διάφορες πιέσεις και να επιτευχθεί η απαίτηση σε χώρο. Η ενέργεια που απαιτείται για τη συμπίεση στα 480 bar σε δεξαμενή από πολυμερή υλικά είναι 2,6 – 3,6 kWh/kg και η απαίτηση σε χώρο είναι 40 lt/kg. Το κόστος είναι 330 €/kg για μαζική παραγωγή ενώ το κόστος των δεξαμενών από χάλυβα είναι 550 €/kg. [16]

2.2.2.3 Παραγωγή – Διανομή του Υδρογόνου

Παραγωγή

Σήμερα, υπάρχουν αρκετές μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να παραχθεί οικονομικά και σε μαζικές ποσότητες. Οι εμπορικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες [16]:

- Θερμοχημικές μέθοδοι
- Ηλεκτρολυτικές μέθοδοι
- Φωτολυτικές μέθοδοι

Με τις θερμοχημικές μεθόδους το υδρογόνο παράγεται από ορυκτά καύσιμα, από αεριοποίηση ή πυρόλυση βιομάζας, από πυρηνική ενέργεια και από τα σουλφίδια του. Η παραγωγή του υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα γίνεται με αναμόρφωση φυσικού αερίου ή ελαφρών πετρελαϊκών κλασμάτων, με αεριοποίηση γαιάνθρακα, με μερική οξείδωση φυσικού αερίου, με θερμική διάσπαση διαφόρων υδρογονανθράκων που περιέχονται σε ορυκτά καύσιμα. Η πυρόλυση της βιομάζας πραγματοποιείται με θέρμανση απουσία οξυγόνου ενώ η αεριοποίηση παρουσία περιορισμένων ποσοτήτων οξυγόνου κατά την οποία προκύπτει το αέριο σύνθεσης που αποτελείται από μίγμα ποσοτήτων CO και H₂ και άλλων αερίων προϊόντων. [3]

Το υδρογόνο που παράγεται μέσω της χρησιμοποίησης της τεχνολογίας των διαφόρων ΑΠΕ (ιδιαίτερα της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας) θεωρείται ως ιδανικό, γιατί προκαλεί πολύ λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους παραγωγής του αφού η παραγωγή του γίνεται μέσω ηλεκτρόλυσης από το νερό. Η μόνη έκλυση ρύπων που εμφανίζεται στην περίπτωση αυτή, προκύπτει κατά τις διαδικασίες κατασκευής, μεταφοράς και εγκατάστασης των διαφόρων ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του και δευτερευόντως κατά τη διαδικασία μεταφοράς του προς την κατανάλωση.

Προς το παρόν πάντως, η κύρια μέθοδος παραγωγής του υδρογόνου πραγματοποιείται μέσω της θερμοχημικής επεξεργασίας του φυσικού αερίου, μιας και αποτελεί τον οικονομικότερο τρόπο γι' αυτό. [3,16]

Διανομή

Το μελλοντικό δίκτυο διανομής του υδρογόνου που προβλέπεται να εφαρμοστεί στο μέλλον, παρουσιάζει ορισμένα θετικά σημεία έναντι του παρόντος δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται σήμερα (δευτερευόντως έναντι του δικτύου διανομής του πετρελαίου και του φυσικού αερίου), τα οποία μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: Η διανομή του υδρογόνου (σε αέρια κυρίως μορφή), θεωρείται πολύ πιο αποδοτική από την διανομή του ηλεκτρισμού μέσω μετασχηματιστών και καλωδίων, ενώ το αέριο υδρογόνο μπορεί επίσης να αποθηκευτεί πιο εύκολα και πιο αποδοτικά από την ηλεκτρική ενέργεια. [3,16]

Υπάρχουν πάντως και ορισμένα μειονεκτήματα, όσον αφορά τη διανομή του υδρογόνου σε αέρια ή υγρή κατάσταση, τα οποία αφορούν κυρίως την δυσκολία κατά την αποθήκευση και διανομή του σε κλειστούς χώρους, λόγω της δυνατότητάς του για εύκολη ανάφλεξη σ' αυτούς. Ένα δεύτερο, μικρότερης σημασίας μειονέκτημα, αφορά το γεγονός, ότι το υδρογόνο σε συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος σαν αέριο είναι άχρωμο και άοσμο, με αποτέλεσμα να είναι εύκολη η διαφυγή του από τα δίκτυα μεταφοράς του προς το περιβάλλον, χωρίς αυτό να γίνει άμεσα αντιληπτό. Το συγκεκριμένο όμως μειονέκτημα μπορεί να λυθεί σχεδόν ουσιαστικά, χρησιμοποιώντας τον τεχνητό χρωματισμό του ή την πρόσδωση σ' αυτό τεχνητής οσμής, όπως εφαρμόζεται και κατά την διανομή του φυσικού αερίου. [3]

Τέλος, οι νέες τεχνικές μέθοδοι αποθήκευσης του υδρογόνου που έχουν αρχίσει να εξελίσσονται τα τελευταία χρόνια, κυρίως μέσω της αποθήκευσης του μέσα σε στερεά υλικά (π.χ. μεταλλικά υδρίδια και στερεές ενώσεις του με τον άνθρακα) έχουν επίσης αρχίσει να επιφέρουν πολλές λύσεις στο εξίσου σημαντικό, σε σχέση με την διανομή του, πρόβλημα της αποθήκευσής του, με αποτέλεσμα η νέα γενιά τεχνολογιών του στα επόμενα από τώρα χρόνια να μπορεί να βασίζεται σε ασφαλή και αποτελεσματική του αποθήκευση. [3]

2.3 Θερμική Αποθήκευση Ενέργειας

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας παραδοσιακά γίνεται συνήθως βραχυπρόθεσμα και στις περισσότερες περιπτώσεις οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται είναι απλές με κυρίαρχο μέσο αποθήκευσης και μεταφοράς της αποθηκευμένης ενέργειας το νερό. Ωστόσο, ανάλογα με τις απαιτήσεις σε ένα σύστημα, τις κλιματολογικές συνθήκες της εφαρμογής και την αυξημένη ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας οι εφαρμογές δεν περιορίζονται μόνο στα συμβατικά συστήματα. Για κάθε περίπτωση μπορούν να εφαρμοστούν τεχνολογίες οι οποίες αποθηκεύουν τη θερμότητα με διάφορους τρόπους και για διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Η θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί με τρεις τρόπους: με αισθητή ροή θερμότητας, με λανθάνουσα θερμότητα και με θερμοχημικές αντιδράσεις.

Κατά την αποθήκευση με αισθητή ροή θερμότητας η ενεργειακή αποθήκευση βασίζεται στην θερμοκρασιακή αλλαγή του υλικού αποθήκευσης και εξαρτάται από τη θερμοχωρητικότητα του υλικού.

Η αποθήκευση με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας βασίζεται στην ιδιότητα των υλικών να αλλάζουν φάση σε μια ορισμένη θερμοκρασία και να απορροφούν ή εκλύουν ποσά θερμότητας κατά την αλλαγή φάσης τους. Έτσι η αποθηκευμένη ενέργεια ισούται με το άθροισμα της μεταβολής ενθαλπίας κατά την αλλαγή φάσης και την αισθητή θερμότητα στην περιοχή θερμοκρασιών που δουλεύει το σύστημα.

Οι θερμοχημικές αντιδράσεις μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά θερμότητας μέσα από αντιδράσεις διάσπασης δεσμών και μπορούν να αποδίδουν την αποθηκευμένη θερμότητα σε μεγάλα συστήματα με αμελητέες απώλειες με την ένωση των δεσμών.

Το ενδιαφέρον θα επικεντρωθεί στις τεχνολογίες της αισθητής θερμικής αποθήκευσης και της λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας με υλικά αλλαγής φάσης.

2.3.1 Αισθητή Θερμότητα

Σε αυτά τα συστήματα, η ενέργεια αποθηκεύεται σε υγρό ή στερεό μέσο το οποίο είτε θερμαίνεται είτε ψύχεται σε μια τιμή θερμοκρασίας ή σε ένα εύρος θερμοκρασιών χωρίς να λαμβάνει χώρα αλλαγή φάσης του υλικού. Η αποθηκευτική ικανότητα των υλικών εξαρτάται από την τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας τους και επομένως αυτό το μέγεθος αποτελεί το βασικό κριτήριο για την επιλογή των υλικών της αποθήκευσης. [14,18]

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές των βασικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.

Πίνακας 1: Βασικές ιδιότητες κύριων υγρών και στερεών υλικών αποθήκευσης αισθητής θερμότητας [18]

Υλικό	ρ (kg/m ³)	C_p (MJ/kgK)	C_v (MJ/m ³ K)
Πηλός	1458	0,879	1,28
Τούβλο	1800	0,837	1,51
Αμμόπετρα	2200	0,712	1,57
Ξύλο	700	2,390	1,67
Σκυρόδεμα	2000	0,880	1,76
Αλουμίνιο	2710	0,837	2,27
Σίδηρο	7900	0,452	3,57
Ατσάλι	7840	0,465	3,68
Πετρώματα υπεδάφους	2050	1,840	3,77
Μαγνητίτης	5177	0,752	3,89
Νερό	988	4,182	4,17

Ένα πλήθος υλικών έχει χρησιμοποιηθεί σε αυτά τα συστήματα όπως το νερό, τα έλαια, ορισμένα ανόργανα τηγμένα άλατα, πέτρες, πυρίμαχα υλικά και χαλίκι. Τα στερεά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι υλικά με πόρους ενώ η αποθήκευση και απόδοση της θερμότητας γίνεται σε ροή αέρα ή υγρού μέσα από τους πόρους τους. Η επιλογή του υλικού εξαρτάται από το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής. Το νερό χρησιμοποιείται για θερμοκρασίες μικρότερες από 100°C ενώ τα πυρίμαχα τούβλα για θερμοκρασίες κοντά στους 1000°C. Τα συστήματα αυτά είναι απλά στο σχεδιασμό σε σχέση με αυτά των υλικών αλλαγής φάσης, τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια. Ωστόσο έχουν το μειονέκτημα του μεγάλου μεγέθους και για αυτό το λόγο ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή του υλικού για αυτού του είδους την αποθήκευση είναι η τιμή του γινομένου ρC_p . Ακόμα ένα μειονέκτημα τους είναι ότι δεν μπορούν να αποθηκεύσουν ή να μεταφέρουν θερμότητα σε μια σταθερή θερμοκρασία. [14]

Παρακάτω αναφέρονται τα κριτήρια τα οποία εξετάζονται για την επιλογή των υλικών για τις εφαρμογές της αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Για να είναι κατάλληλα τα υλικά θα πρέπει να:

- Έχουν υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα
- Έχουν υψηλή θερμική διάχυση, δηλαδή υψηλό ρυθμό απελευθέρωσης ή απορρόφησης της θερμότητας
- Έχουν υψηλό ειδικό βάρος
- Είναι δυνατή η χρησιμοποίησή τους ως θερμικά και ψυκτικά μέσα
- Έχουν θερμική και γεωμετρική σταθερότητα
- Μην είναι εύφλεκτα, διαβρωτικά ή τοξικά
- Έχουν σχετικά χαμηλό κόστος
- Έχουν ικανοποιητική αντοχή
- Λειτουργούν σε ευρύ φάσμα εφαρμογών

Τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής ενέργειας μπορούν να είναι:

α) παθητικά και

β) ενεργητικά.

Σε ένα παθητικό σύστημα, το αποθηκευτικό μέσο έρχεται σε άμεση επαφή με το περιβάλλον και δεν μεσολαβούν άλλα εξαρτήματα. Παθητικά συστήματα είναι εκείνα τα οποία χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις βιοκλιματικού σχεδιασμού για αποθήκευση της θερμικής ενέργειας από το ίδιο το κέλυφος του κτιρίου και τα δομικά του στοιχεία.

Σε ένα ενεργητικό σύστημα περιλαμβάνονται και συσκευές εισόδου και εξόδου. Η διοχέτευση της θερμότητας στο υλικό αποθήκευσης γίνεται με χρήση συσκευών και κινούμενων μερών το οποίο βρίσκεται εντός της αποθηκευτικής δεξαμενής η οποία είναι μονωμένη για την παρεμπόδιση των θερμικών απωλειών. Στις δεξαμενές αυτές υπάρχει θερμική στρωμάτωση, η οποία είναι επιθυμητή γιατί αυξάνει την απόδοση του συστήματος κατά 10%. Η διατήρηση της θερμοκρασιακής κλίσης (στρωμάτωση) είναι απλούστερη στα συστήματα αποθήκευσης με στερεά υλικά παρά με υγρά. [18]

2.3.1.1 Μέσα αποθήκευσης

2.3.1.1.1 Υγρά μέσα αποθήκευσης

Το νερό λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητάς του είναι το πιο σύνηθες μέσο σε αυτές τις εφαρμογές. Έχει μεγάλη διαθεσιμότητα, είναι φθινό, έχει χαμηλή πυκνότητα και μπορεί εύκολα να αντληθεί και να μεταφερθεί, μεταφέροντας έτσι και την περιεχόμενη σε αυτό ενέργεια. Το νερό παραμένει οικονομικά ανταγωνιστικό και σε υψηλότερες θερμοκρασίες (έως 357°C) παρόλη την ανάγκη για συμπίεσή του. Ακόμη σαν υγρό επιτρέπει καλούς ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας. [14]

Τα περισσότερα συστήματα θέρμανσης χώρων και νερού χρησιμοποιούν δεξαμενές αποθήκευσης οι οποίες τοποθετούνται είτε εντός είτε εκτός του κτιρίου και σε ορισμένες περιπτώσεις υπογείως. Το μέγεθος των δεξαμενών ποικίλει από μερικές εκατοντάδες λίτρα μέχρι μερικές χιλιάδες κυβικά μέτρα. Οι δεξαμενές αποθήκευσης κατασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως ασφάλι, τσιμέντο και υαλοβάμβακα. Είναι κατάλληλα μονωμένες με υαλοβάμβακα, πετροβάμβακα ή πολυουρεθάνη. Το πάχος της

μόνωσης κυμαίνεται από 10 έως 20 cm και αποτελεί σημαντικό μέρος του κόστους μιας αποθηκευτικής δεξαμενής.

Για τις ενδιάμεσες τιμές θερμοκρασίας, 100-300°C, γίνεται χρήση ελαίων μεταφοράς θερμότητας. Έχουν μικρότερη θερμοχωρητικότητα από αυτή του νερού (περίπου 2,3 kJ/kgK). Δύο από τα έλαια που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές αποθήκευσης είναι τα Dowtherm και Therminal. [14]

Το πρόβλημα των συστημάτων με έλαια είναι ότι τα έλαια τείνουν να υποβαθμίζονται με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η υποβάθμιση είναι σημαντική όταν τα έλαια χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με θερμοκρασίες πάνω από ορισμένα όρια καθώς έχουν την τάση σε υψηλές θερμοκρασίες να διασπών και να αναδιαμορφώνουν τα πτητικά τους προϊόντα. Επίσης, η χρήση των ελαίων αντιμετωπίζει και προβλήματα σε σχέση με την ασφάλεια για περιπτώσεις ανάφλεξης πάνω από το σημείο ανάφλεξής τους. Ακόμη ένας περιορισμός για τη χρήση τους είναι το κόστος και συνεπώς χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές μικρής αποθηκευτικής κλίμακας. [14]

Τα τηγμένα άλατα εμφανίζουν μια θερμοχωρητικότητα περίπου 1.5 kJ/kgK και χρησιμοποιούνται για αποθήκευση σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα μειονεκτήματά τους είναι η εμφάνιση του φαινομένου της στερεοποίησης σε θερμοκρασίες κάτω από 150°C και του φαινομένου της διάβρωσης.

Μερικά τηγμένα ανόργανα άλατα έχουν εφαρμογή σε περιπτώσεις υψηλών θερμοκρασιών από τους 300°C και πάνω. Το ένα είναι ένα ευτηκτικό μείγμα από NaNO_2 (40% κ.β.), NaNO_3 (7% κ.β.) και KNO_2 (53% κ.β.) με την εμπορική ονομασία Hitec. Έχει χαμηλό σημείο τήξης (145°C) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές μέχρι τους 425°C. Πάνω από αυτή τη θερμοκρασία οξειδώνεται και αποσυντίθεται. Ένα άλλο τηγμένο άλας είναι το υδροξείδιο του νατρίου με σημείο τήξης τους 320 °C και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θερμοκρασίες πάνω από 800°C. Ωστόσο είναι αρκετά διαβρωτικό και αντιμετωπίζει δυσκολία στην αποθήκευσή του σε υψηλότερες θερμοκρασίες. [4]

Για θερμοκρασίες πάνω από τους 100°C, η αποθήκευση σε υδάτινες δεξαμενές θα πρέπει να επιτυγχάνει να περιέχει νερό στην τάση ατμών του και το κόστος της δεξαμενής αυξάνεται κατακόρυφα για θερμοκρασίες πάνω από αυτές. Τα οργανικά έλαια, τα ανόργανα τηγμένα άλατα και τα υγρά μέταλλα δεν αντιμετωπίζουν αυτό το

πρόβλημα αλλά έχουν άλλους περιορισμούς για τη χρήση τους που σχετίζονται με το κόστος, την μεταφορά και την ασφάλεια. Μεταξύ όλων των υγρών μέσων, το νερό φαίνεται να μπορεί να χρησιμοποιείται κατά προτίμηση καθώς είναι φτηνό και έχει υψηλή θερμοχωρητικότητα. [4,14]

Πίνακας 2: Κύριες θερμικές ιδιότητες των διαθέσιμων υγρών μέσων για αποθήκευση αισθητής θερμότητας [19]

Μέσο	Τύπος	Θερμοκρασιακό εύρος εφαρμογών αποθήκευσης (°C)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμική χωρητικότητα (J/kgK)	Θερμική αγωγιμότητα (W/mC)
Νερό	-	0-100	1000	4190	0,63 (38°C)
Μίγμα νερού – αιθυλενο-γλυκόλης (50/50)	-		1050	3470	-
Carolie HT 43	Έλαιο	-10 ως 315		2300	
Downtherm A	Έλαιο	12 - 260	867	2200	0,112 (260°C)
Therminal 55	Έλαιο	-18 ως 315		2400	
Therminal 66	Έλαιο	-9 ως 343	750	2100	0,106 (343°C)
Αιθυλενο-γλυκόλη			1116	2382	0,249 (20°C)
Hitec	Molten Salt	142-540	1680	1560	0,61
Engine oil	Έλαιο	Ως 160	888	1880	0.145
Draw salt	Molten Salt	220-540	1733	1550	0,57
Lithium	Υγρό άλας	180-1300	510	4190	38,1
Sodium	Υγρό άλας	100-760	960	1300	67,5
Αιθανόλη	Οργανικό υγρό	Ως 78	790	2400	-
Προπανάλη		Ως 97	800	2500	-
Βουτανόλη		Ως 118	809	2400	-
Ισοβουτανόλη		Ως 100	808	3000	-
Ισοπεντανόλη		Ως 148	831	2200	-

2.3.1.1.2 Στερεά μέσα αποθήκευσης

Η θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί σε διάφορα στερεά υλικά όπως πέτρες, βράχους ή χαλίκια τα οποία περιέχονται σε μονωμένα δοχεία. Αυτό το είδος της αποθήκευσης χρησιμοποιείται συχνά για θερμοκρασίες μέχρι 1000°C σε συνδυασμό με ηλιακούς θερμαντήρες αέρα. Είναι συστήματα απλά στο σχεδιασμό με σχετικά χαμηλό κόστος. Το χαρακτηριστικό μέγεθος των κομματιών της πέτρας που χρησιμοποιείται είναι από 1 μέχρι 5 cm. Προς το παρόν, τα περισσότερα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας είναι αυτά της αισθητής θερμότητας και έχουν πολλές εφαρμογές και ανεπτυγμένη τεχνολογία. [4,14,18]

Οι δυσκολίες και οι περιορισμοί που σχετίζονται με τα υγρά μέσα μπορούν να αποφευχθούν με τη χρήση στερεών μέσων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Επειδή όμως τα στερεά υλικά αποθήκευσης έχουν χαμηλότερη θερμοχωρητικότητα σε σύγκριση με το νερό, απαιτούνται μεγάλα ποσά όγκου στερεών υλικών για τις εφαρμογές. Το κόστος για την πέτρα ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας είναι αποδεκτό. Είναι απαραίτητη η άμεση επαφή του στερεού μέσου αποθήκευσης με ένα ρευστό μεταφοράς για την ελαχιστοποίηση του κόστους της εναλλαγής θερμότητας στα συστήματα αποθήκευσης σε στερεά μέσα. [14]

Το οξείδιο του μαγνησίου, το οξείδιο του αλουμινίου και το οξείδιο του πυριτίου αποτελούν πυρίμαχα υλικά κατάλληλα για εφαρμογές αποθήκευσης υψηλής θερμοκρασίας. Τα τούβλα από μαγνήσιο έχουν χρησιμοποιηθεί από πολλές χώρες για την αποθήκευση θερμότητας. Είναι διαθέσιμα σε συσκευές με στοιχεία ηλεκτρικών θερμαντικών ενσωματωμένα στο υλικό. Η θερμότητα αποθηκεύεται τη νύχτα (χαμηλή τιμή ηλεκτρισμού) και παρέχεται την ημέρα για θέρμανση χώρων επιτρέποντας τον αέρα να περάσει μέσα από τις συσκευές. [14]

Συνήθεις εφαρμογές των υλικών αυτών είναι στην πλήρωση της θερμικής κλίσης στερεών, στους τοίχους θερμικής αποθήκευσης, σαν δομικά υλικά του κελύφους των κτιρίων, στην μακράς διάρκειας υπόγεια αποθήκευση (με υλικά του εδάφους, πετρώματα).[4,14]

Πίνακας 3: Κύριες θερμικές ιδιότητες των διαθέσιμων στερεών μέσων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. [19]

Μέσο	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμοχωρητικότητα (J/kgK)	Θερμική αγωγιμότητα (W/mC)
Αλουμίνιο	2707	896	204 (20oC)
Οξείδιο του Αργιλίου	3900	840	-
Θευκό Αργίλιο	2710	750	-
Τούβλο	1698	840	0,69 (20oC)
Τούβλο μαγνησίου	3000	1130	5,07
Σκυρόδεμα	2240	1130	0,9-1,3
Χυτοσίδηρος	7900	837	29,3
Σίδηρος	7897	452	73 (20oC)
Χλωριούχο ασβέστιο	2510	670	-
Χαλκός	8954	383	385 (20oC)
Υγρό έδαφος	1700	2093	2,51
Ξηρό έδαφος	1260	795	0,25
Οξείδιο του μαγνησίου	3570	960	-
Χλωριούχο Κάλιο	1980	670	-
Θευκό Κάλιο	2260	920	-
Ανθρακικό νάτριο	2510	1090	-
Χλωριούχο νάτριο	2170	920	-
Θευκό νάτριο	2700	920	-
Πέτρα (γρανίτης)	2640	820	1,73-3,98
Πέτρα (ασβεστόλιθος)	2500	900	1,26-1,33
Πέτρα (μάρμαρο)	2600	800	2,07-2,94
Πέτρα (αμμόπετρα)	2200	710	1,83

2.3.1.2 Υπέργειες Εφαρμογές Αποθήκευσης Αισθητής Θερμότητας

2.3.1.2.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας σε δεξαμενές υγρού

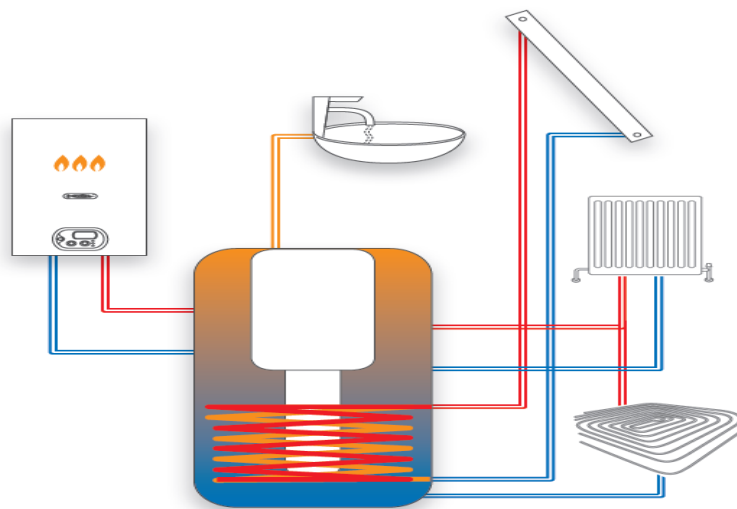
Ως συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, οι δεξαμενές αποθήκευσης ζεστού νερού αποτελούν την παραδοσιακή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο ιδιαίτερα σε οικιακές εφαρμογές. Ωστόσο η χρήση των δεξαμενών νερού δεν περιορίζεται μόνο στη χρήση τους ως αποθήκες θερμού νερού αλλά και ψυχρού για εφαρμογές ψύξης. Στη συνέχεια παρατίθενται τα συστήματα αποθήκευσης θερμού και ψυχρού ύδατος. [4]

Δεξαμενές αποθήκευσης θερμού ύδατος [4]

Οι υδάτινες θερμικές αποθήκες, χωρίζονται σε αποθήκες ομοιόμορφης θερμοκρασίας και σε αποθήκες με θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση. Στην πρώτη περίπτωση προσδίδεται θερμότητα στο υγρό μέσο με μια σχετικά αργή άνοδο της θερμοκρασίας του μέσο με αποτέλεσμα να επικρατεί σταθερή θερμοκρασία στον όγκο της αποθήκης.

Στην περίπτωση της αποθήκης με θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση υπάρχει θερμοκρασιακή κλίση μεταξύ του σημείου εισόδου του υγρού και του σημείου εξόδου. Αυτό επιτυγχάνεται με την είσοδο (φόρτιση) της αποθήκης με θερμό υγρό από το πάνω μέρος της δεξαμενής, ενώ το κρύο υγρό βρίσκεται και εξέρχεται από το κάτω μέρος με ταχύτητα τόσο αργή ώστε να μην συμβαίνει πρακτικά ανάμιξη το υγρού με τις διαφορετικές θερμοκρασίες. Η διατήρηση της θερμοκρασίας για μεγάλο χρονικό διάστημα γίνεται καθώς το θερμό υγρό έχει χαμηλότερο ειδικό βάρος και τείνει να μένει στην κορυφή και τα κρύο στον πυθμένα. Η φόρτιση και εκφόρτιση της αποθήκης μπορεί να γίνεται και ταυτόχρονα αντίθετα με μια θερμοκλίνη στερεών.

Το πλεονέκτημα της θερμικής στρωμάτωσης είναι ότι μέσα στην δεξαμενή αποθήκευσης δημιουργείται μια ομαλή μετάβαση από τις περιοχές με χαμηλότερη σε υψηλότερη φόρτιση και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών λόγω της ανάμιξης των ρευμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας. Έτσι αυτό το σύστημα σε σύγκριση με αυτό της ομοιόμορφης θερμοκρασίας θεωρείται ότι έχει αυξημένη απόδοση κατά 5-10%.



Σχήμα 4: Σύστημα θέρμανσης με θερμικά διαστρωματομένη δεξαμενή αποθήκευσης

Δεξαμενές αποθήκευσης ψυχρού ύδατος [4]

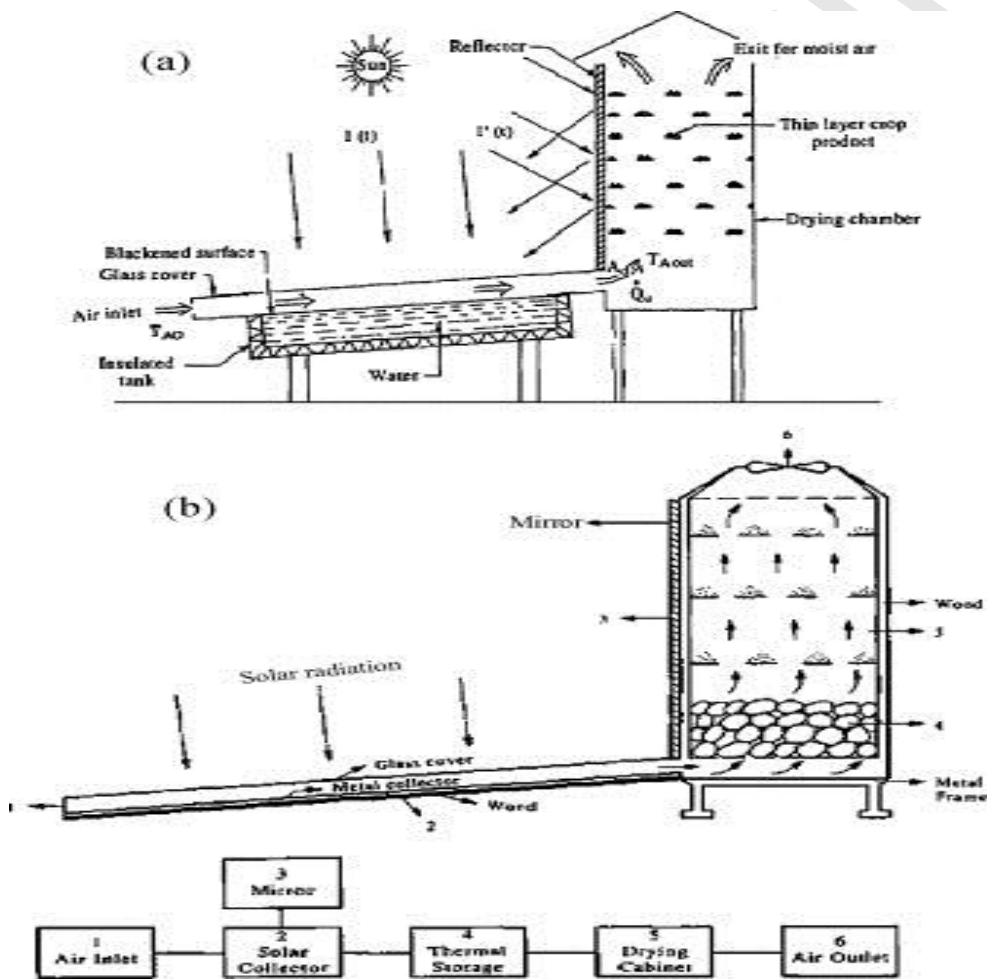
Η τεχνολογία είναι αντίστοιχη αυτής της αποθήκευσης θερμού ύδατος εφόσον εκμεταλλεύεται την αισθητή ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού. Μια δεξαμενή ψυχρού ύδατος η οποία συνήθως έχει μεγάλο όγκο σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα αποθήκευσης ζεστού νερού χρήσης, είναι κατάλληλη για αποθήκη νερού για πυροπροστασία αλλά μπορεί και να χρησιμοποιείται και ως αποθήκη θερμού νερού τους χειμερινούς μήνες.

Το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του αποθηκευμένου ψυχρού ύδατος και του θερμού νερού επιστροφής από το φορτίο. Όπως και στην περίπτωση της αποθήκευσης θερμού ύδατος, η απόδοση του συστήματος διαφοροποιείται ανάλογα με το πόσο διαχωρίζονται τα δυο ρεύματα νερού στο σύστημα. Βάση αυτού διακρίνονται τα παρακάτω συστήματα:

- Δεξαμενές με φυσική στρωμάτωση: η αρχή λειτουργίας είναι κοινή με αυτή της περίπτωσης της θερμοκρασιακής στρωμάτωσης στις δεξαμενές θερμού ύδατος. Αυτά τα συστήματα αποτελούν τον απλούστερο, αποδοτικότερο και οικονομικότερο τρόπο αποθήκευσης ψύξης.
- Μέθοδος πολλαπλών δεξαμενών: σε αυτά τα συστήματα γίνεται διαχωρισμός του ψυχρού νερού από το θερμό νερό επιστροφής αφού αποθηκεύονται σε χωριστές δεξαμενές. Έτσι επιτυγχάνεται σταθερή και ομοιόμορφη θερμοκρασία. Σε αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται δυο ή περισσότερες δεξαμενές και κατά την έναρξη του κύκλου φόρτισης τους η μια είναι πάντοτε άδεια.
- Δεξαμενή με μεμβράνη: η διάταξη αυτή χρησιμοποιεί μια εύκαμπτη διαχωριστική μεμβράνη ή ένα άκαμπτο διάφραγμα εντός της δεξαμενής και διαχωρίζονται έτσι το ψυχρό από το θερμό νερό. Η μεμβράνη μετακινείται αναλόγως όταν η δεξαμενή γεμίζει και αδειάζει.
- Συστήματα με καθρέφτες και λαβύρινθους: αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν το διαχωρισμό του χώρου αποθήκευσης σε πολλαπλά τμήματα, τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους με μερικά τοιχώματα.

2.3.1.2.2 Θερμική κλίνη στερεών

Η τεχνολογία αυτή περιλαμβάνει ένα σώμα υλικών στα οποία αποθηκεύεται η ενέργεια και μέσω του οποίου διέρχεται ρευστό (αέρας) που απορροφά τη θερμότητα (εκφόρτιση) ή προσδίδει ενέργεια στο θερμοαπορροφητικό σώμα υλικών (φόρτιση). Τα υλικά πλήρωσης, όπως προαναφέρθηκε μπορεί να είναι κεραμικά υλικά, στερεά από τσιμέντο, πέτρες κλπ.



Σχήμα 5: Σχηματικό παράδειγμα θερμικής κλίνης στερεών

Συνήθεις εφαρμογές της θερμοκλίνης στερεών αφορούν στη θέρμανση χώρων ή ζεστού νερού. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας έναντι της αποθήκευσης θερμού νερού είναι η ευκολότερη χρήση της για θερμοκρασίες άνω των 100°C. [4]

Άλλη εφαρμογή μπορεί να είναι η χρήση της τεχνολογίας σε συνδυασμό με ηλιοθερμικό σύστημα με δεξαμενή νερού (μέθοδος Harry Thomason). Κατά τη μέθοδο αυτή η δεξαμενή αποθήκευσης θερμού νερού περιβάλλεται από πληρωτικό υλικό (χαλίκι) το οποίο περιέχεται με τη σειρά του σε άλλο μονωμένο δοχείο. Με αυτό το σύστημα γίνεται αποδοτικότερα η μεταφορά θερμότητας στον αέρα λόγω υψηλής θερμοχωρητικότητας του νερού και της εκτεταμένης επιφάνειας που παρουσιάζει το δοχείο με το πληρωτικό υλικό. [4]

Μια άλλη εκδοχή της παραπάνω μεθόδου αφορά πάλι στη χρήση συστήματος ηλιοθερμίας για θέρμανση νερού και αποθήκευση του σε κυλινδρικό δοχείο το οποίο περιβάλλεται περιμετρικά από στρώμα στερεού υλικού διαμέσου του οποίου διέρχεται αέρας. Η χρήση του στρώματος στερεού λειτουργεί ως μονωτικό και το σύστημα προορίζεται για θέρμανση κατοικίας. [4]

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης θερμοκλινών στερεών είναι ο υψηλός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ αέρα και στερεού που οδηγεί στη θερμική στρωμάτωση, η μικρή θερμική αγωγιμότητα όταν δεν υπάρχει ροή αέρα, το χαμηλό κόστος του πληρωτικού υλικού και του δοχείου και ο απλός σχεδιασμός του συστήματος. [4]

Ωστόσο, οι θερμοκλίνες στερεών έχουν ορισμένα μειονεκτήματα. Παρουσιάζεται μεγάλη πτώση πίεσης στα συστήματα αέρα και έτσι απαιτούνται ανεμιστήρες οι οποίοι δαπανούν ενέργεια. Ο όγκος της κλίνης είναι μεγάλος (περίπου τρεις φορές μεγαλύτερος σε σχέση με την αποθήκη νερού) και συνεπώς αυξάνει το κόστος εγκατάστασης και τις απαιτήσεις σε χώρο. Η πυκνότητα ενέργειας είναι χαμηλή και ο χρόνος αποθήκευσης είναι μικρός. Τέλος, εμφανίζονται προβλήματα με την αντοχή των υλικών λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών.

2.3.1.2.3 Ηλιακή λίμνη

Αποτελεί μια μέθοδο για μακράς διάρκειας αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας. Στην ηλιακή λίμνη συλλέγεται, αποταμιεύεται και αξιοποιείται σε μεγάλες μάζες νερού η ηλιακή ενέργεια. Οι ηλιακές λίμνες διακρίνονται ανάλογα με τη σύσταση του περιεχόμενου σε αυτές νερού σε λίμνες γλυκού ύδατος, που περιέχουν καθαρό νερό και σε λίμνες αλμυρού ύδατος, που περιέχουν διαλυμένο κάποιο αλάτι μέσα στη μάζα του νερού. [4]

Η ηλιακή λίμνη αλμυρού ύδατος είναι μια αβαθής τεχνητή λίμνη, με προοδευτική από την επιφάνεια προς το βυθό αύξηση της περιεκτικότητάς της σε αλάτι και συνήθως ηλιοαπορροφητικό βυθό. Τα άλατα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το χλωριούχο (NaCl) νάτριο και πιο συχνά το χλωριούχο μαγνήσιο ($MgCl_2$). Το βάθος της λίμνης είναι περίπου 1-2 m, και σε αυτό διακρίνονται τρία στρώματα νερού. Το υδάτινο στρώμα επιφανείας, το οποίο έχει τη μικρότερη περιεκτικότητα σε αλάτι και συνήθως αποτελείται από φυσικό νερό. Το υδάτινο στρώμα φραγής, που έχει μια προοδευτικά αυξανόμενη περιεκτικότητα σε αλάτι και προφυλάσσει από τις θερμικές απώλειες προς τον αέρα το κατώτερο στρώμα. Τέλος, το κατώτερο θερμικό στρώμα, που έχει τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αλάτι και το μεγαλύτερο ειδικό βάρος από τα προηγούμενα και αποτελεί την κύρια αποθήκη της ηλιακής ενέργειας. Καθώς εγκλωβίζεται σε αυτό το στρώμα η ηλιακή ακτινοβολία η θερμοκρασία του διαλύματος φτάνει το σημείο ζέσεως.

Ο βυθός της λίμνης είναι συνήθως βαμμένος μαύρος για να απορροφά και να αποδίδει την ηλιακή ενέργεια που φτάνει εκεί στο θερμικό στρώμα. Ο βυθός και οι παράπλευρες επιφάνειες πρέπει να αποτελούνται από υλικά που θα παρουσιάζουν τις λιγότερες δυνατές διαρροές. Ο βυθός μονώνεται όταν μετρηθούν κάτω από αυτόν μεγάλες ταχύτητες κίνησης των υπόγειων υδάτων.

Η αποθήκευση αυτή στο έδαφος ισοδυναμεί σύμφωνα με κάποιους ερευνητές με νερό βάθους 1m επιπλέον. Η επιφάνεια της λίμνης μπορεί να σκεπαστεί με ένα πλαστικό δίκτυ. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται ο κυματισμός σε περίπτωση ισχυρών ανέμων που αφενός καταστρέφει τη στρωμάτωση της λίμνης, αφετέρου μειώνει το ποσοστό της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας λόγω μεγαλύτερης ανακλαστικότητας που παρουσιάζουν οι κυματισμοί στην ηλιακή ακτινοβολία.

Σε μια ηλιακή λίμνη η ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει απορροφάται από το υδάτινο σώμα κατά ποσοστό $(1-\rho)$, αν ρ είναι ο συντελεστής ανακλαστικότητας της επιφάνειας του νερού. Ειδικότερα, οι υπέρυθρες ακτινοβολίες απορροφώνται το πολύ στα πρώτα εκατοστά οι υπόλοιπες, όμως, διαπερνούν κατά μεγάλο μέρος το υδάτινο σώμα και απορροφώνται από το βυθό. Από το βυθό η θερμότητα διαδίδεται, με μεταφορά κυρίως, στο υπερκείμενο θερμικό στρώμα. Για το λόγο αυτό το θερμικό στρώμα παρουσιάζει μια διαρκή κίνηση και υψηλότερη θερμοκρασία αλλά λόγω μεγάλης αλατότητας δεν αναμειγνύεται με το υπερκείμενο σε αυτό στρώμα, που θεωρείται ακίνητο. Η ανύψωση της θερμοκρασίας θεωρητικά μπορεί να φτάσει τους 90°C .

Οι ηλιακές λίμνες κατασκευάζονται κυρίως για θέρμανση νερού και θέρμανση συγκροτημάτων κατοικιών, αφού παρουσιάζουν χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης και την ικανότητα παραγωγής και αποθήκευσης μεγάλων ποσών ενέργειας. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι ασθενέστερη και διαρκεί λιγότερους μήνες, οπότε η αποθήκευσή της είναι μεγάλης σημασίας.[4]

Η ηλιακή λίμνη μπορεί να έχει εφαρμογές την ηλεκτροπαραγωγή, στην αφαλάτωση, σε γεωργικές εφαρμογές, τηλεθέρμανση και θέρμανση νερού για βιομηχανικές διεργασίες.

Τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας της ηλιακής λίμνης είναι [4]:

- σταδιακή μείωση της διαφάνειας του νερού λόγω της σκόνης που μεταφέρεται από ανέμους
- μεγάλη εξάτμιση το καλοκαίρι, που εξαφανίζει το στρώμα επιφανείας το οποίο πρέπει να αναπληρωθεί
- ενδεχόμενη ανάμιξη των δύο κατώτερων υδάτινων στρωμάτων με συνέπεια τη μείωση της θερμοκρασίας του τελευταίου.
- Πρόβλημα μεταφοράς της θερμότητας προς χρήση

Η ηλιακή λίμνη αλμυρού ύδατος πλεονεκτεί έναντι άλλων ηλιοθερμικών εφαρμογών για αποθήκευση ενέργειας λόγω της απλότητας της κατασκευής της και το χαμηλό της κόστος αλλά και στην ενσωματωμένη μακρά αποθήκευση σε συνδυασμό με την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα.

Οι εφαρμογές της ηλιακής λίμνης καθορίζονται από τη θερμοκρασία εξαγωγής που είναι δυνατόν να φθάνει τους 100°C. Την απόδοση της καθορίζουν κυρίως δύο παράγοντες που σχετίζονται με το ποσοστό της δεσμευόμενης ακτινοβολίας και συνεπώς της θερμικής αποθήκευσης [4]:

1. Η ενέργεια που φτάνει στον πυθμένα της λίμνης
2. Η ανάκλαση της ακτινοβολίας στην επιφάνεια της λίμνης

Η ενέργεια, που φτάνει στον πυθμένα της λίμνης (στο κατώτερο στρώμα) μειώνεται με την αύξηση του βάθους της λίμνης. Αυτό οφείλεται στο ότι ένα μέρος της προσπίπτουσας στη λίμνη ακτινοβολίας απορροφάται από το διάλυμα νερού-άλατος. Επίσης, η αύξηση της περιεκτικότητας του διαλύματος σε αλάτι οδηγεί σε αύξηση της δεσμευμένης από το διάλυμα ακτινοβολίας. Βέβαια, αυτήν ακριβώς την ιδιότητα της λίμνης εκμεταλλευόμαστε. Επομένως, υπάρχει ένα βάθος, το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή και το οποίο βελτιστοποιεί την αποδοτικότητα της λίμνης. Συνήθης τιμή του βάθους είναι 1- 2 m.

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες, η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στον πυθμένα της ηλιακής λίμνης είναι μεταξύ 15-25% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκρίνοντας αυτή την τιμή με την αντίστοιχη ενός ηλιακού συλλέκτη είναι χαμηλότερη, ωστόσο το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας της τεχνολογίας ισοσταθμίζει αυτή τη διαφορά στην απόδοση του συστήματος και το καθιστά βιώσιμη εναλλακτική για παραγωγή και αποθήκευση θερμότητας.



Εικόνα X: Εφαρμογή ηλιακής λίμνης στο Ελ Πάσο του Τέξας

2.3.1.4 Υπόγειες Εφαρμογές Αποθήκευση Αισθητής Θερμότητας

Σε αυτές τις περιπτώσεις ως ενεργειακή αποθήκη θεωρείται μια υπόγεια δεξαμενή, σπηλιά ή το έδαφος. Επιτυγχάνεται μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας σε αυτά τα συστήματα τα οποία έχουν τις λεγόμενες διεποχικές εφαρμογές και ως συστήματα χαρακτηρίζονται από το μεγάλο όγκο τους. [4]

Αυτές οι εφαρμογές είναι κατάλληλες για κτιριακά συγκροτήματα καθώς τα ποσά ενέργειας που αποθηκεύονται είναι μεγάλα και το κόστος επιμερίζεται ώστε να γίνεται οικονομικότερη η επένδυση.

Η λογική αυτών των συστημάτων στηρίζεται στην διαδοχική θέρμανση και ψύξη του μέσου μεταφοράς της ενέργειας που αποθηκεύεται στην υπόγεια δεξαμενή ή το έδαφος και αποδίδεται κατάλληλα προς τους χώρους που πρόκειται να θερμανθούν ή να ψυχθούν.

Συνήθως σε αυτά τα συστήματα χρησιμοποιείται νερό ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας και αποθήκευσης της. Σε υπόγειες αποθήκες με νερό απαντώνται κυλινδρικές δεξαμενές με επίπεδο πυθμένα και κορυφής σε σχήμα θόλου. Για αποθήκευση στο έδαφος, το ξηρό έδαφος προσφέρεται ως υλικό και χώρος για αποθήκευση ενέργειας αλλά και ως μόνωση φορτίων που βρίσκονται σε υπόγεια

δεξαμενή μέσα σε αυτό. Το έδαφος μπορεί να χρησιμοποιηθεί, λοιπόν ως μονωτικό υλικό σε υπόγειες δεξαμενές νερού ή χαλικιών, ως αποθήκη σε βαθιά φρεάτια με νερό και ως αποθήκη με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη (συστήματα γεωθερμίας). Εδάφη τα οποία περιέχουν υγρασία ή κινούμενα νερά έχουν ελαττωμένες ιδιότητες σε σχέση με τα ξηρά για εφαρμογές αποθήκευσης καθώς η διάχυση και η απώλεια της θερμότητας που αποθηκεύεται γίνεται με αγωγή και με μεταφορά.[4]

Καθώς το θέμα των απωλειών σε αυτά τα συστήματα είναι μείζονος σημασίας, χρησιμοποιούνται δομικά υλικά για της υπόγειες δεξαμενές οι οποίες κατασκευάζονται τα οποία είναι συμπαγή για την εξασφάλιση της στιβαρότητας της κατασκευής, της οικονομίας λόγω χαμηλού κόστους των υλικών και την μείωση όσο το δυνατόν των θερμικών απωλειών. Ακόμα ένα πρόβλημα είναι η εμφάνιση διάβρωσης λόγω των ιδιοτήτων του νερού αλλά και οι διαρροές που μπορούν να προκύψουν. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων χρησιμοποιούνται στα εσωτερικά τοιχώματα των δεξαμενών λεπτές αδιάβροχες μεμβράνες και διπλή στρώση από πλακάκια με αποτέλεσμα την αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων και έτσι την μείωση των απωλειών στο έδαφος και των θερμικών απωλειών. Επιπλέον για την αποφυγή της υπερφόρτισης της δεξαμενής χρησιμοποιείται επικάλυψη του σφαιρικού θόλου από ένα συμπαγές και ελαφρύ στρώμα αργίλου. [4]

Η εφαρμογή των υδάτινων υπογείων αποθηκών μπορεί να γίνει με σκοπό τη θέρμανση ή / και την ψύξη των κτιρίων. Στην περίπτωση που συμβαίνουν περιοδικά και οι δύο λειτουργίες του συστήματος τότε γίνεται αναφορά σε διεποχική αποθήκευση ενέργειας.

Κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών το νερό θερμαίνεται (με το υπάρχον σύστημα θέρμανσης ή με χρήση ηλιακών συλλεκτών) και αποθηκεύεται στην υπόγεια δεξαμενή για να χρησιμοποιηθεί του χειμερινούς μήνες ως πηγή θερμότητας. Η απόδοση του συστήματος εξαρτάται από το επίπεδο της θερμοκρασίας στην οποία αποθηκεύεται το νερό και από τις απώλειες του αποθηκευτικού συστήματος.

Κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών και σε περιοχές όπου η θερμοκρασία είναι κοντά στους 0°C γίνεται ψεκασμός νερού σε μια δεξαμενή θερμοκρασίας ίση με την ατμοσφαιρική και το νερό παγώνει. Με το γέμισμα της δεξαμενής, κλείνεται και μονώνεται με σκοπό στην διάρκεια των θερινών μηνών ο πάγος να λιώσει και να κυκλοφορήσει ως ψυχρό νερό στα συστήματα ψύξης. Η απόδοση αυτών των

συστημάτων μειώνεται εάν προκύψουν χημικές αντιδράσεις στα τοιχώματα των δεξαμενών λόγω των θερμοκρασιών ή με ανάμιξη νερού διαφορετικής σύστασης οπότε μπορεί να υποστεί αλλαγές το πορώδες και η διαπερατότητα της αποθήκης. [4]

Στη συνέχεια περιγράφεται μια ειδικές κατηγορίες διεποχικής αποθήκευσης θερμότητας στο έδαφος ή σε υπόγεια ύδατα. Οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στη βόρεια Ευρώπη και απαιτούν ειδικούς γεωλογικούς σχηματισμούς.

2.3.1.4.1 Γεωθερμία

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα η οποία είναι αποθηκευμένη στο είτε έδαφος είτε στα υπόγεια ύδατα. Το κοινό κριτήριο για να χαρακτηριστεί και να ταξινομηθεί το έδαφος ως κατάλληλο για εφαρμογές γεωθερμίας είναι η ενθαλπία των ρευστών τα οποία μεταφέρουν τη θερμότητα από το έδαφος στην επιφάνεια. Βάση αυτού μπορεί να γίνει ο εξής διαχωρισμός σε σχέση με την ταξινόμηση και τις εφαρμογές [10]:

- ✓ Χαμηλής θερμοκρασίας (<90 °C)
- ✓ Μέτριας θερμοκρασίας (90-150°C)
- ✓ Υψηλής θερμοκρασίας (>150°C)

Οι πηγές υψηλής θερμοκρασίας προορίζονται κυρίως για ηλεκτροπαραγωγή ενώ οι άλλες δυο πηγές μπορούν να χωριστούν σε εφαρμογές στις οποίες γίνεται είτε άμεση χρήση της θερμότητας μέσω χρήσης του ρευστού από τη γη είτε έμμεση χρήση μέσω γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Συνήθως οι εφαρμογές της άμεσης χρήσης εκμεταλλεύονται τη θερμότητα του ρευστού για θερμοκρασίες από 40 μέχρι 150°C.[10,11]

Η έμμεση εκμετάλλευση που κάνει χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας χρησιμοποιεί το έδαφος ή υπόγεια ύδατα ως πηγή θερμότητας για το χειμώνα (εκφόρτιση) και ως σημείο απόρριψης για το καλοκαίρι (φόρτιση). Σε αυτές τις εφαρμογές οι θερμοκρασίες που επικρατούν κυμαίνονται από 4 μέχρι 40 °C. Αυτές είναι

και οι εφαρμογές οι οποίες πρόκειται να μελετηθούν για την αποθήκευση θερμότητας στο έδαφος σε κτιριακές εφαρμογές. [10,11,20]

Γενικά, για κτιριακές εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας ή ψύξης με συστήματα γεωθερμίας, η ισχύς των αντλιών μπορεί να είναι περίπου [4]:

- Για μονοκατοικίες <20 kW
- Για πολυκατοικίες ή μεγαλύτερα οικιακά συγκροτήματα 20 kW -100 kW
- Για εμπορικά κέντρα 100 kW - 1MW
- Για μικρούς συνοικισμούς 1 MW - 10 MW
- Για τηλεθέρμανση/τηλεψύξη 10 M W - 100 MW

2.3.1.4.1.1 Σύστημα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας

Η γεωθερμική αντλία θερμότητας ανταλλάσσει τη θερμότητα με τη βοήθεια ενός συστήματος σωληνώσεων, κατάλληλα τοποθετημένων, στο οποίο κυκλοφορεί το ρευστό μέσο (νερό). Ένα σύστημα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας αποτελείται από [17]:

- Το σύστημα εναλλαγής θερμότητας εντός εδάφους (γεωεναλλάκτης θερμότητας ή υδρογεώτρηση)
- Τη γεωθερμική αντλία θερμότητας (κυρίως αντλία θερμότητας νερού-νερού)
- Το σύστημα θέρμανσης/ψύξης εντός του κτιρίου

Ένα τέτοιο σύστημα λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο που λειτουργεί μια αναστρέψιμη ψυκτική διάταξη με λήψη θερμότητας από ένα χώρο και απόρριψή της σε έναν άλλο. Τη χειμερινή περίοδο η θερμότητα λαμβάνεται από το έδαφος ενώ τη θερινή περίοδο απορρίπτεται στο έδαφος και με αυτό τον τρόπο γίνεται η φόρτιση και εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης στο έδαφος.

Ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα γεωθερμικής αντλίας λειτουργεί με υψηλότερη απόδοση από αυτή ενός συστήματος αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα καθώς το νερό έχει καλύτερες ιδιότητες μετάδοσης της θερμότητας σε σχέση με τον αέρα και υπάρχει

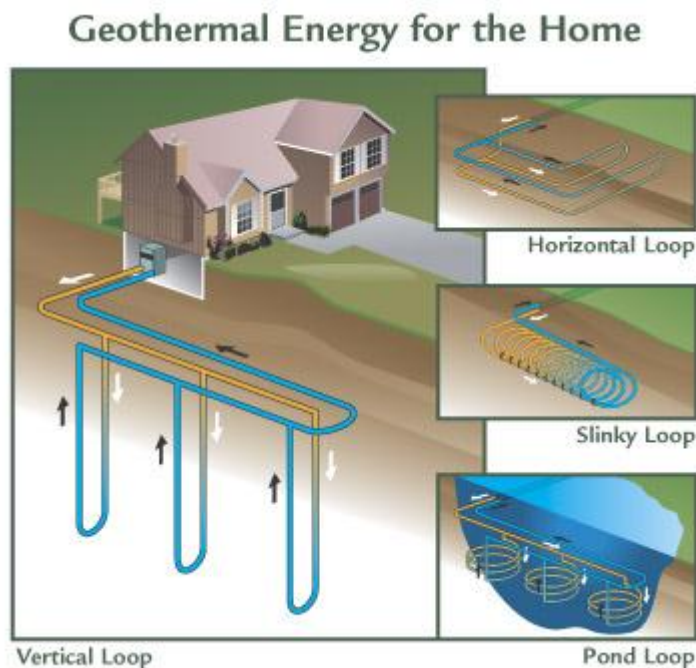
σταθερή θερμοκρασία που παρέχεται από τους γεωεναλλάκτες. Η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από τις ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες σε περιπτώσεις αιχμών του θερμικού φορτίου και χαμηλότερη στις περιπτώσεις αιχμών του ψυκτικού φορτίου.

Τα συστήματα εναλλαγής θερμότητας χωρίζονται σε συστήματα ανοιχτού και κλειστού βρόχου. Στα συστήματα ανοιχτού βρόχου μια υδρογεώτρηση ή μια μικρή λίμνη παίζει το ρόλο της πηγής θερμότητας ή απόρριψής της μέσω του εδάφους, συνεπώς το ρόλο της αποθήκης. Χρησιμοποιείται νερό από γεώτρηση ή πηγάδια ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας το οποίο κυκλοφορεί κατευθείαν μέσα από το σύστημα της αντλίας. Το νερό επιστρέφει στο έδαφος μέσω του πηγαδιού (υπόγειος ταμιευτήρας). Αυτή η λύση αφορά στις περιπτώσεις που είναι διαθέσιμη η παροχή καθαρού νερού και επιτρέπεται η γεώτρηση βάση κανονισμών.

Στα συστήματα κλειστού βρόχου ένας γεωθερμικός εναλλάκτης αποτελεί το σύστημα που απορροφά ή αποβάλλει θερμότητα στο έδαφος. Υπάρχουν δυο τύποι γεωεναλλακτών στα συστήματα γεωθερμίας, ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος και αποτελούν συστήματα κλειστού βρόχου. Οι κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες αποτελούνται από σωλήνες θαμμένους στο έδαφος σε κατακόρυφη διάταξη μέσα σε γεωτρήσεις. Ανοίγονται τρύπες διαμέτρου 10 cm σε βάθος 30-120 m και με 6 m απόσταση μεταξύ τους. Οι σωληνώσεις συνδέονται μεταξύ τους ώστε να σχηματίσουν ένα βρόχο. Στα οριζόντια συστήματα γεωεναλλάκτη αποτελούνται από σωλήνες θαμμένους στο έδαφος σε οριζόντια διάταξη μέσα σε χαντάκια σε βάθος 0,6-2 m από την επιφάνεια του εδάφους. [10,11]

Το τυπικό υλικό των σωλήνων είναι πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και τυπική εξωτερική διάμετρο 32 ή 40 mm. Εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία λειτουργίας, η πλήρωση του σωλήνα γίνεται με νερό ή με μίγμα νερού και αντιψυκτικού. Το ψυκτικό υγρό είναι δυνατό να ρέει μέσα σε ειδικές γεωθερμικές αντλίες θερμότητας απευθείας εκτόνωσης μέσω τους συστήματος γεωεναλλαγής θερμότητας. [10,11]

Παρόλο που οι κατακόρυφοι γεωθερμικοί εναλλάκτες έχουν υψηλότερο κόστος χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις καθώς απαιτούν λιγότερο διαθέσιμο χώρο και δεν αντιμετωπίζουν τεχνικές δυσκολίες όπως στις υδρογεωτρήσεις.



Εικόνα 4: Τρόποι εγκατάστασης γεωεναλλάκτη στα συστήματα γεωθερμίας

Η γεωθερμική αντλία θερμότητας νερού-νερού χρησιμοποιείται για θέρμανση και ψύξη ακόμα και για παραγωγή ΖΝΧ. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και αντλίες αέρα-νερού. Χρησιμοποιεί ηλεκτρισμό για την άντληση της απαιτούμενης ενέργειας. Το σύστημα προσδίδει ή απορροφά θερμότητα από το κτίριο. Συνήθως χρησιμοποιούνται σπειροειδείς συμπιεστές με ρύθμιση on-off και ως ψυκτικά υγρά τα R407C ή R134a με τάση να αντικατασταθούν από το R410A. Μια μελλοντική τάση είναι η χρήση συμπιεστών μεταβλητής ισχύος. [10,11,20]

Ο συντελεστής ενεργειακής απόδοσής τους (COP) ορίζεται σαν το λόγο της αποδιδόμενης ενέργειας προς την ηλεκτρική κατανάλωση. Ο εποχιακός συντελεστής απόδοσης είναι το ολοκλήρωμα του COP κατά την περίοδο θέρμανσης και ψύξης. Τυπικές τιμές αυτών των συντελεστών είναι μεταξύ 3,5 και 5 αντίστοιχα. Στις περιπτώσεις συστημάτων ανοιχτού βρόχου (υδρογεώτρηση) οι τιμές είναι 4 και 6. [10,11,20]

Η ενεργειακή απόδοση των συστημάτων γεωθερμίας ενισχύεται όταν η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης είναι χαμηλή. Σε περίπτωση ψύξης ενισχύεται όταν η θερμοκρασία ψύξης είναι υψηλότερη. Επομένως ιδανική λύση για θέρμανση η

χρήση ενδοδαπέδιας θέρμανσης, του ενδοτοιχίου συστήματος ακολουθούμενο από fan-coils και κεντρικές κλιματιστικές μονάδες με αεραγωγούς. Στην περίπτωση της ψύξης τα καλύτερα συστήματα είναι τα ενδοτοιχία και τα συστήματα οροφής.

Το περιβαλλοντικό κόστος των αντλιών θερμότητας είναι πολύ χαμηλό καθώς οι καταναλώσεις σε ηλεκτρισμό είναι σχετικά χαμηλές. Εφόσον γίνεται χρήση πράσινου ηλεκτρικού ρεύματος (ΑΠΕ, Κυψέλες καυσίμου) τότε έχει μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ο παράγοντας της κλιματικής ζώνης είναι πολύ σημαντικός για αυτές τις εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας στο έδαφος (γεωθερμία) ιδιαίτερα για τα οριζόντια συστήματα. Εφόσον υπάρχει διαθέσιμη προς εκμετάλλευση γη με αρκετό βάθος, δεν θα επηρεαστεί το σύστημα από μεταβολές στη θερμοκρασία του υπεδάφους, γεγονός πολύ σημαντικό καθώς η τεχνολογία των γεωθερμικών αντλιών εκμεταλλεύεται ουσιαστικά τη σταθερή θερμοκρασία του υπεδάφους. Το ποσό της αποθηκευμένης στο έδαφος θερμικής ενέργειας χαρακτηρίζεται ως επαρκές ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε κτιρίου και της θερμικής του απώλειες. Σε θερμότερα κλίματα, οι αντλίες θερμότητας γίνονται πιο αποδοτικές. Το κλίμα και η εξωτερική θερμοκρασία δεν επηρεάζει το σύστημα αποθήκευσης (έδαφος) για τις περιπτώσεις κατακόρυφου σχεδιασμού του γεωεναλλάκτη. [10]

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι πολλαπλά και σχετίζονται τόσο με τα ελάχιστα λειτουργικά κόστη όσο και με τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Πιο αναλυτικά [4,10,11,20]:

- Ελάχιστα κόστη συντήρησης και λειτουργίας
- Απόδοση συστήματος: αποτελεί σύμφωνα με την ΕΡΑ των Η.Π.Α το πιο αποδοτικό σύστημα για κλιματισμό κτιρίων. Επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι 70% στη θέρμανση και 50% στην ψύξη.
- Ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση αφού συγκαταλέγεται στην ΑΠΕ
- Ενδείκνυται για εφαρμογή στις περισσότερες κλιματικές ζώνες
- Μπορεί να παρέχεται θέρμανση και ψύξη ταυτόχρονα
- Δεν απαιτούνται τεχνολογίες όπως αυτή του πύργου ψύξης

Τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας είναι [10,11]:

- Υψηλό κόστος εγκατάστασης: ο χρόνος απόσβεσης κυμαίνεται ανάλογα με την περίπτωση από 5 έως 15 έτη
- Περιορισμός των θερμοκρασιών λειτουργίας (55-65°C)
- Πιθανά προβλήματα κατά τη γεώτρηση, μόλυνση υδάτων
- Πιθανά προβλήματα κατά την εγκατάσταση λόγω απαίτησης διαθέσιμης γης για την εγκατάσταση του γεωεναλλάκτη

2.3.1.4.2 Αποθήκευση σε σπήλαια (rock caverns)

Σπήλαια τα οποία έχουν δημιουργηθεί για εφαρμογές εξόρυξης και είναι ανενεργά μπορούν να διατεθούν για αυτές τις εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας μακράς διάρκειας και μεγάλης κλίμακας. Τα σπήλαια αποθηκεύουν νερό σε μεγάλους όγκους και το μεταφέρουν κατά την φόρτιση και εκφόρτιση με κατακόρυφο σύστημα σωληνώσεων. Επιτυγχάνεται υψηλή θερμική διαστρωμάτωση σε θερμοκρασίες από 30 έως 80 °C. Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι πως το κόστος κατασκευής της αποθήκευσης είναι χαμηλό αφού είναι διαθέσιμο το σπήλαιο και δεν χρησιμοποιείται μόνωση. [19]



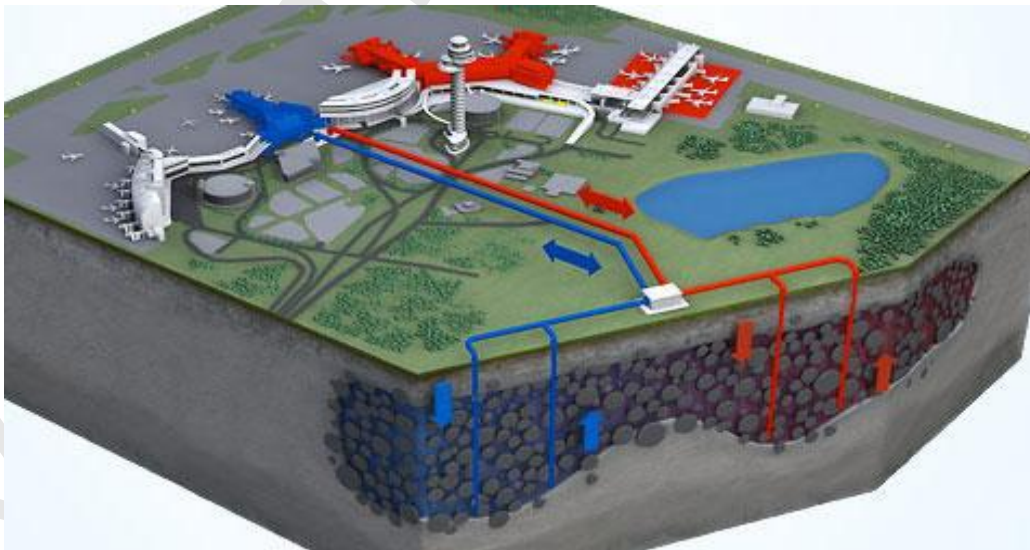
Εικόνα 5: Υπόγειο σπήλαιο αποθήκευσης στη Σουηδία

2.3.1.4.2 Αποθήκευση σε υπόγεια φυσικά υδροφόρα στρώματα (aquifers)

Τα aquifers αποτελούν γεωλογικές δομές σε βάθος από μερικές εκατοντάδες μέτρα και μπορούν να απορροφούν και παρακρατούν το νερό. Ο σχηματισμός των βράχων είναι διαπερατός και πορώδης και το νερό μπορεί να κυκλοφορεί εξαιτίας της ύπαρξης ρωγμών και διασυνδεδεμένων ανοιγμάτων. Τα πετρώματα μπορεί να είναι αμμόλιθοι, αμμοχάλικα ή ασβεστόλιθοι (ιζηματογενούς προέλευσης).

Η ιδέα της χρήσης αυτών των σχηματισμών για αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι σχετικά πρόσφατη καθώς οι σχηματισμοί συνήθως χρησιμοποιούνται για αποθήκευση φρέσκου νερού ή προϊόντων πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Η φόρτιση και εκφόρτιση της συγκεκριμένης αποθήκης γίνεται με έκχυση θερμού νερού στο aquifer και ανάκτηση μέσω φρεατίων όταν απαιτείται θερμική ενέργεια. Λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας των πετρωμάτων του, δεν εμφανίζονται μεγάλες θερμικές απώλειες. Έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύσουν θεωρητικά νερό σε θερμοκρασίες μέχρι 200 βαθμούς Κελσίου αλλά προς το παρόν περιορίζονται μέχρι τους 55. [19]

Μια τυπική εφαρμογή αυτού του συστήματος αποτελεί στο αεροδρόμιο στη Στοκχόλμη της Σουηδίας η χρήση aquifer για διεποχική αποθήκευση. Το καλοκαίρι το ψυχρό νερό χρησιμοποιείται για τον ψύξη των χώρων στο αεροδρόμιο ενώ το χειμώνα το αποθηκευμένο θερμό νερό χρησιμοποιείται για την προθέρμανση αέρα και το λιώσιμο των πάγων των αεροδιαδρόμων. [19]

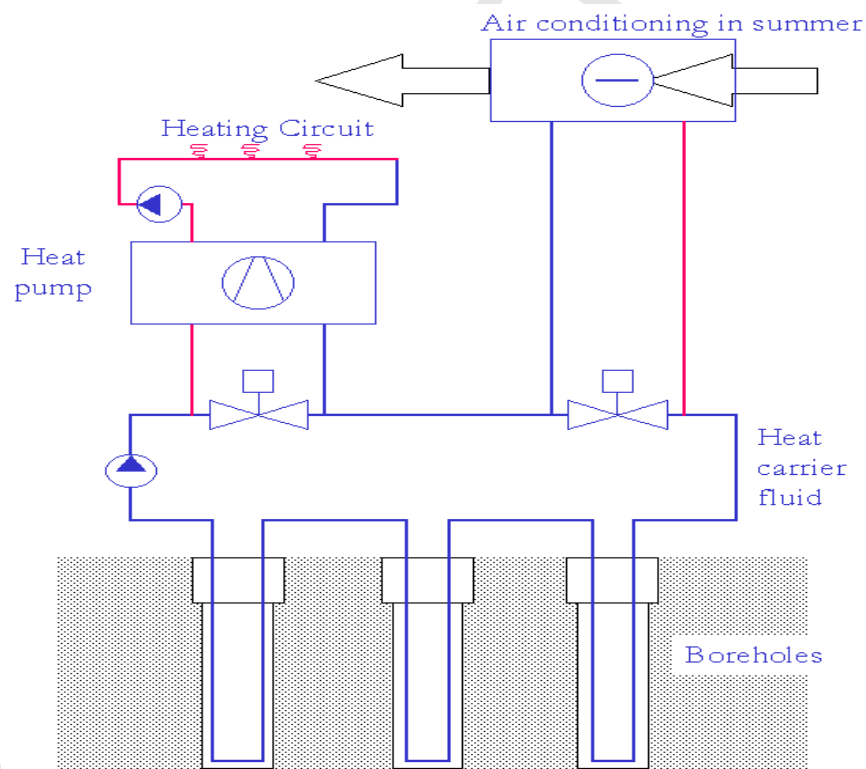


Εικόνα 6: Σύστημα διεποχικής αποθήκευσης με χρήση aquifer σε αεροδρόμιο στη Σουηδία.

2.3.1.4.3 Σύστημα γεώτρησης για αποθήκευση θερμότητας σε ξηρό έδαφος (Borehole energy storage)

Η τεχνολογία αυτή αποτελεί μια από τις γενικότερες εφαρμογές αποθήκευσης στο έδαφος στα πλαίσια της γεωθερμίας. Χρησιμοποιούνται αγωγοί στους οποίους διακινούνται τα ρευστά μεταφοράς της θερμότητας σε κατακόρυφη διάταξη και σχήμα U. Οι αγωγοί τοποθετούνται σε βάθος μέσα σε ξηρό έδαφος, άμμο ή βράχους.

Η αρχή λειτουργία είναι όμοια με εκείνη των κατακόρυφων συστημάτων γεωθερμίας. [19] Παρακάτω παρατίθεται το σχήμα λειτουργίας αυτών των συστημάτων.



Εικόνα X: Σχήμα λειτουργίας της αποθήκευσης με borehole για παροχή θερμότητας και ψύξης.

2.3.2 Λανθάνουσα θερμότητα τήξης

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας βασίζεται στην ιδιότητα των υλικών που αλλάζουν φάση να απορροφούν ή να απελευθερώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας (λανθάνουσα θερμότητα τήξης) κατά την ισοθερμοκρασιακή αλλαγή φάσης στην οποία βρίσκονται. [4,14]

Με αυτό τον τρόπο ένα υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποθήκη θερμότητας όταν το περίσσειμα της θερμικής ενέργειας διοχετευτεί σε αυτό έτσι ώστε να τηχθεί και το τήγμα να διατηρηθεί χωρίς απώλειες. Έτσι η αποθηκευμένη ενέργεια ισούται με το άθροισμα της μεταβολής ενθαλπίας κατά την αλλαγή φάσης και την αισθητή θερμότητα στην περιοχή θερμοκρασιών που δουλεύει το σύστημα. Όταν απαιτηθεί αυτή η θερμότητα ανακτάται από το τήγμα σε ποσότητα ίση με τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης, οπότε το τήγμα πήζει.

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή της μεθόδου αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι η μετατροπή νερού σε πάγο. Όμως η χρήση του πάγου σαν υλικό αλλαγής φάσης παρουσιάζει προβλήματα λόγω των ιδιοτήτων του νερού (μεγάλη μεταβολή πυκνότητας με τη θερμοκρασία, χαμηλή θερμοκρασία προσαγωγής στο σύστημα αποθήκευσης). Συνεπώς αναπτύχθηκαν υλικά με βάση το νερό, ώστε να παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα του (μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα, μεγάλη τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας) χωρίς όμως τα προβλήματα του νερού σε αυτές τις εφαρμογές (κυρίως λόγω χαμηλής θερμοκρασίας τήξης). Έτσι δημιουργήθηκαν τα πρώτα υλικά αλλαγής φάσης, τα ένυδρα άλατα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλα τα διαθέσιμα υλικά και οι ιδιότητές τους.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι η υψηλή πυκνότητα της αποθηκευμένης ενέργειας ανά μονάδα μάζας σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας και το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του συστήματος αφού η διεργασία της αλλαγής φάσης γίνεται σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Επιπλέον, δεν υπάρχει βαθμιαία μείωση στη θερμοκρασία καθώς το υλικό αποφορτίζεται. Με τα συστήματα αυτά υπάρχει η δυνατότητα της τροφοδοσίας της θερμότητας σε σταθερή θερμοκρασία. [4,14]

Η αλλαγή φάσης στα υλικά πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους. Η μετατροπή από στερεό σε αέριο και από υγρό σε αέριο, δηλαδή η μεταβολή φάσης από και προς την αέρια φάση δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί στις εφαρμογές αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας καθώς η μεταβολή όγκου των υλικών σε αυτές τις αλλαγές φάσης είναι μεγάλη και απαιτούνται πολύπλοκα συστήματα και εξοπλισμός συμπίεσης. Συνεπώς η περίπτωση αλλαγής φάσης η οποία εκμεταλλεύεται η τεχνολογία αφορά σε μεταβολή από στερεό σε υγρό και αντίστροφα.

2.3.2.1 Υλικά αλλαγής φάσης

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως υλικά αλλαγής φάσης (PCM, Phase Change Materials) για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας εκτός από το νερό μπορεί να είναι είτε οργανικά είτε ανόργανα. Παραδείγματα οργανικών ουσιών που χρησιμοποιούνται είναι οι παραφίνες και τα λιπαρά οξέα και ανόργανων ουσιών είναι τα ένυδρα άλατα. Τα οργανικά PCMs μπορεί να είναι αλειφατικές ενώσεις ή άλλες οργανικές. Λειτουργούν σε χαμηλά θερμοκρασιακά εύρη, έχουν μέτρια λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα μάζας και όγκου και είναι σχετικά ακριβά. Τα ανόργανα PCMs είναι υλικά βασισμένα σε ένυδρα άλατα. Τα μειονεκτήματά τους είναι ότι επέρχεται σε αυτά διαχωρισμός φάσεων και χάνουν την επανάκτηση της λανθάνουσας θερμότητας. Έχουν τάση για εμφάνιση του φαινομένου της υπόψυξης. [4,14]

Οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στον κτιριακό τομέα αφορούν στη θέρμανση χώρων και νερού, στη ρύθμιση και τον έλεγχο της θερμικής άνεσης ενός χώρου και στην αποθήκευση ψύξης. Για αυτές τις εφαρμογές υπάρχουν ορισμένα κριτήρια τα οποία πρέπει να ικανοποιούνται ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα [4]:

- υψηλή ενθαλπία μετάβασης ανά μονάδα μάζας
- Ικανότητα για πλήρη αντιστροφή της διαδικασίας
- Ικανή θερμοκρασία μετάβασης από τη μια φάση στην άλλη
- χημική ισορροπία και σταθερότητα με τον αποθηκευτικό χώρο
- ελάχιστη αλλαγή όγκου με την αλλαγή φάσης
- μη τοξικότητα

- χαμηλό κόστος

Το κύριο πλεονέκτημα των υλικών αλλαγής φάσης έναντι του πάγου είναι η δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας σε ένα μεγάλο εύρος από -40°C μέχρι και 110°C . Αυτό το χαρακτηριστικό είναι βασικό καθώς ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή η επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας τους και συνεπώς το σημείο τήξης τους πρέπει να είναι διαφορετικό. Το σημαντικότερο αυτών των κριτηρίων είναι το σημείο τήξεως του υλικού και από αυτή την άποψη τα επιθυμητά σημεία τήξεως για ορισμένες εφαρμογές αποθήκευσης σε κτίρια είναι [4]:

- Ηλιακά συστήματα θέρμανσης: $25-50^{\circ}\text{C}$
- Παθητικά ηλιακά συστήματα: $21-25^{\circ}\text{C}$
- Αποθήκευση ψύξης: $4,5-18^{\circ}\text{C}$
- Παθητική αποθήκευση θερμότητας: $16-28^{\circ}\text{C}$

2.3.2.1.1 Ιδιότητες των PCM

Η σημαντικότερη ιδιότητα, όπως έχει αναφερθεί είναι το σημείο τήξης του εκάστοτε υλικό το οποίο είναι επιθυμητό να βρίσκεται όσο το δυνατό κοντά στην περιοχή τιμών στις οποίες λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης ή ψύξης. Οι άλλες εξίσου σημαντικές θερμικές ιδιότητες που απαιτούνται είναι η υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης σε ογκομετρική βάση για την ελαχιστοποίηση του μεγέθους του συστήματος των PCM και η υψηλή θερμική αγωγιμότητα για την αποτελεσματικότερη μεταφορά θερμότητα κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση του υλικού.

Όσον αφορά στις φυσικές ιδιότητες των υλικών απαιτείται ευνοϊκή ισορροπία φάσης κατά τη διάρκεια της τήξης, υψηλή πυκνότητα για το σχεδιασμό μικρότερων συστημάτων, μικρή μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης του υλικού και χαμηλή τάση ατμών στη θερμοκρασία λειτουργίας ώστε να μπορεί το πρόβλημα της συσκευασίας να αντιμετωπίζεται ευκολότερα.

Οι απαιτούμενες κινητικές ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης αφορούν στο φαινόμενο της υπόψυξης και στο ρυθμό κρυστάλλωσης. Η υπόψυξη ειδικά για τα ένυδρα άλατα είναι ένα σημαντικό πρόβλημα και επηρεάζει την απόδοση της

αποθηκευμένης θερμότητας. Επομένως είναι επιθυμητός ο περιορισμός του φαινομένου για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.

Οι επιθυμητές χημικές ιδιότητες είναι η χημική σταθερότητα σε βάθος χρόνου, η συμβατότητα με τα δομικά υλικά και τα υλικά συσκευασίας, η μη τοξικότητα και η μη αναφλεξιμότητα. Ένα υλικό μπορεί με την πάροδο του χρόνου να υποβαθμιστεί χάνοντας υδατικά στοιχεία του γεγονός που θα καταστρέψει στην ουσία το σύστημα. Επομένως σε βάθος χρόνου απαιτείται οι ουσίες να είναι χημικά σταθερές και φυσικά να είναι συμβατές με όλα τα υλικά που έρχονται σε επαφή.

Τέλος, τα υλικά πρέπει να είναι εμπορικά διαθέσιμα και να έχουν ένα ελκυστικό κόστος τόσο το ίδιο το υλικό όσο και τα υλικά συσκευασίας τους.

2.3.2.1.2 Κατηγοριοποίηση Υλικών Αλλαγής Φάσης

2.3.2.1.2.1 Οργανικά PCM

Τα οργανικά υλικά αποτελούνται κυρίως από παραφίνες και μικροκρυσταλλικά κεριά, τα οποία είναι μείγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 έως 25. Εξίσου σημαντικές κατηγορίες των οργανικών είναι τα λιπαρά οξέα, οι εστέρες και αλκοόλες των λιπαρών οξέων ή και μείγματα αυτών.

Τα εμπορικά προϊόντα των οργανικών PCM είναι αρκετά φθηνότερα από τα ένυδρα άλατα αλλά έχουν μέτριες τιμές λανθάνουσας θερμότητας (περίπου 150 kJ/kg). Έχουν αμελητέα εμφάνιση υπόψυξης, είναι χημικά αδρανή και σταθερά, δεν εμφανίζουν διαχωρισμό φάσεων ή εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους. Έχουν όμως χαμηλή τιμή συντελεστή αγωγιμότητας και έτσι έχουν περιορισμένες εφαρμογές (0.2 W/mK). Για αυτό το λόγο έχουν εξεταστεί περιπτώσεις εμπλουτισμού τους με μεταλλικά αντικείμενα ή χρήση δοχείων και σωλήνων με πτερύγια με σκοπό την αύξηση του ρεύματος θερμότητας μέσα στο υλικό. [20,21]

Επίσης, στα οργανικά υλικά αλλαγής φάσης επηρεάζεται η πυκνότητα τους από τη φάση, ώστε όταν το υλικό στερεοποιηθεί και αυξηθεί η πυκνότητά του να αποκολληθεί από τα τοιχώματα του δοχείου γεγονός που επηρεάζει το φαινόμενα της αγωγής θερμότητας. Επιπλέον ένα ακόμα μειονέκτημα τους είναι η αναφλεξιμότητα παρόλο

που οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η χαμηλή τάση ατμών της παραφίνης δεν εγκυμονεί κινδύνους ανάφλεξης. [4,21]

Παραφίνες

Οι παραφίνες είναι ιδανικά υλικά αλλαγής φάσης. Έχουν μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας και μπορούν να δημιουργηθούν μέσω μειγμάτων υλικών τα οποία μπορούν να καλύψουν οποιαδήποτε εφαρμογή. Είναι ουσίες φθινές και άφθονες. Έχουν αρκετά καλή αποθηκευτική ικανότητα σε σχέση με άλλα υλικά και στερεοποιούνται χωρίς εμφάνιση υπόψυξης επομένως το υλικό αποδίδει τη μέγιστη αποθηκευτική του ικανότητα. [4,14,21]

Σαν οργανικές ουσίες δεν εμφανίζουν στη διάρκεια ζωής τους το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα τους έναντι άλλων υλικών για εφαρμογές θέρμανσης σε κτίρια είναι πως υπάρχει πλήθος παραφινών με σημεία τήξης από 20-26°C που είναι τα πλαίσια των απαιτήσεων των κτιριακών συστημάτων.[4,14,21]

Παρουσιάζουν χαμηλή τάση ατμών και αυτό ερμηνεύει τις ελάχιστες απώλειες υλικού σε μεγάλο βάθος χρόνου χρήσης και αποτελεί πλεονέκτημα για εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλος αριθμός κύκλων φορτίσεων του υλικού.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην επιλογή της παραφίνης καθώς οι παραφίνες πραγματοποιούν ολοκληρωμένα την αλλαγή της φάσης τους σε ένα θερμοκρασιακό εύρος 10°C, περίπου 9 βαθμούς πριν το σημείο τήξης και 1 βαθμό μετά το σημείο τήξης. [4,21]

Πίνακας 4: Θερμικές ιδιότητες των παραφινών [19]

No. of carbon atoms	Melting point (°C)	Latent heat of fusion (kJ/kg)	Group ^a
14	5.5	228	I
15	10	205	II
16	16.7	237.1	I
17	21.7	213	II
18	28.0	244	I
19	32.0	222	II
20	36.7	246	I
21	40.2	200	II
22	44.0	249	II
23	47.5	232	II
24	50.6	255	II
25	49.4	238	II
26	56.3	256	II
27	58.8	236	II
28	61.6	253	II
29	63.4	240	II
30	65.4	251	II
31	68.0	242	II
32	69.5	170	II
33	73.9	268	II
34	75.9	269	II

^a Ομάδα I: πιο υποσχόμενα, Ομάδα II: υποσχόμενα, Ομάδα III: λιγότερο υποσχόμενα, -: ανεπαρκή στοιχεία

Λιπαρά Οξέα

Τα λιπαρά οξέα είναι καρβοξυλικά οξέα με μακρά ανθρακική αλυσίδα κορεσμένη ή ακόρεστη. Έχουν σημεία τήξης και λανθάνουσα θερμότητα παρόμοια με των παραφινών. Οι δυο επικρατέστεροι τύποι των υλικών αυτών για κτιριακές εφαρμογές είναι το καπρικό οξύ με σημείο τήξης 31,5°C και το Καπριλικό Οξύ με σημείο τήξης 16.5 °C. [4]

Τα λιπαρά οξέα σε θερμοκρασία δωματίου υπόκεινται σε μια χημική αντίδραση, την αυτοοξειδωση. Σπάνε δηλαδή σε υδατάνθρακες, κετόνες, αλδεΐδες και μικρότερες ποσότητες αλκοολών και εποξικών. Ένα ακόμη μειονέκτημα τους είναι η κακοσμία η οποία περιορίζει τη χρηστικότητα τους σε χώρους. Ωστόσο αυτό το μειονέκτημα μπορεί να ξεπεραστεί με χρήση ειδικής συσκευασίας [4]

Πίνακας 5: Θερμικές ιδιότητες των λιπαρών οξέων [19]

Material	Formula	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group ^a
Acetic acid	CH ₃ COOH	16.7	184	I
Polyethylene glycol 600	H(OC ₂ H ₂) _n -OH	20-25	146	I
Capric acid	CH ₃ (CH ₂) ₈ -COOH	36	152	-
Eladic acid	C ₈ H ₇ C ₉ H ₁₆ -COOH	47	218	I
Lauric acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ -COOH	49	178	II
Pentadecanoic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₃ -COOH	52.5	178	-
Tristearin	(C ₁₇ H ₃₅ COO) ₃ C ₃ H ₅	56	191	I
Myristic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ -COOH	58	199	I
Palmatic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ -COOH	55	163	I
Stearic acid	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ -COOH	69.4	199	I
Acetamide	CH ₃ CONH ₂	81	241	I
Methyl fumarate	(CHCO ₂ NH ₃) ₂	102	242	I

^a Ομάδα I: πιο υποσχόμενα, Ομάδα II: υποσχόμενα, Ομάδα III: λιγότερο υποσχόμενα, -: ανεπαρκή στοιχεία

2.3.2.1.2.2 Ανόργανα PCM

Τα ένυδρα άλατα είναι ο κύριος εκπρόσωπος των ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης. Έχουν αρκετά καλές ιδιότητες (λανθάνουσα θερμότητα 250 kJ/kg και αγωγιμότητα 0.6 W/mK), μέτριο κόστος παραγωγής σε σχέση με τις παραφίνες αλλά υψηλό κόστος πώλησης λόγω της επιβεβλημένης ενσωμάτωσής τους σε προστατευτικό κάλυμμα και χρήση προσθέτων ουσιών σταθεροποίησης των ιδιοτήτων τους.

Έχουν μεγάλο εύρος σημείων τήξης από 0 έως 120°C και έτσι είναι κατάλληλα για θερμικές εφαρμογές και πέρα από τις κτιριακές. Ο χημικός τους τύπος είναι M_nH₂O με M μια ανόργανη ουσία ενυδατωμένη με n μόρια νερού. [22]

Η αρχή λειτουργίας των ένυδρων αλάτων βασίζεται στην αποβολή του κρυσταλλικού νερού, το οποίο αποβάλλεται όταν προσδοθεί θερμότητα στο άλας σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Έτσι αποθηκεύεται θερμότητα στο υλικό η οποία αποβάλλεται με επανακρυστάλλωση του νερού του άλατος. Βασικά μειονεκτήματα των ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης είναι η ασυμβατότητα με τα υλικά συσκευασίας γεγονός που οδηγεί σε φαινόμενα διάβρωσης στο δοχείο. [4,22]

Τα ένυδρα άλατα εμφανίζουν κι άλλα προβλήματα όπως για παράδειγμα η αφυδάτωση του ένυδρου άλατος λόγω συνεχούς και μακράς χρήσης κατά την οποία οι φάσεις διαχωρίζονται πλήρως λόγω της τάσης ατμών του νερού. Αυτό το φαινόμενο αντιμετωπίζεται με τη χρήση αεροστεγών δοχείων αποθήκευσης. Το φαινόμενο της

αποσύνθεσης τους ή αλλιώς του διαχωρισμού των φάσεων είναι σοβαρό και συμβαίνει λόγω της ανομοιομορφίας στην τήξη του υλικού, διαδικασία η οποία είναι μη αντιστρεπτή. [4,22]

Το άλας του Glauber ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) με τυπική κατά βάρος σύσταση 44% Na_2SO_4 και 56% H_2O είναι ένα από τα μελετημένα υλικά με θερμοκρασία τήξης 32.4°C και λανθάνουσα θερμότητα 254 kJ/kg . Αν και είναι φτηνό υλικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση θερμότητας, τα προβλήματα διαχωρισμού των φάσεων, ο σχηματισμός ιζήματος και το φαινόμενο υπόψυξης περιορίζουν το εύρος εφαρμογών του. [4,22]

Ερευνητές προτείνουν την προσθήκη επιπλέον ύδατος για την αποφυγή δημιουργίας ιζήματος, το οποίο όμως θα μείωνε την αποθηκευτική του ικανότητα. Αντί αυτού χρησιμοποιούνται πολλά υλικά για τη σταθεροποίησή του και παράλληλα για την αύξηση της αποθηκευτικής του ικανότητας. [22]

Τα κυριότερα προβλήματα τα οποία σχετίζονται με τη χρήση των ένυδρων αλάτων ως υλικά αλλαγής φάσης είναι η ανεπάρκεια της σταθερότητας της χημικής σύνθεσης του υλικού και του φαινομένου διάβρωσης μεταξύ του υλικού και της συσκευασίας του. Το βασικότερο πλεονέκτημα τους έναντι των παραφινών σε σχέση με τις κτιριακές εφαρμογές είναι η μη αναφλεξιμότητά τους.

Ο ρόλος της πυκνότητας των υλικών είναι σημαντικός ειδικά σε εγκαταστάσεις κτιρίων ή εφαρμογές που απαιτούν από τη φύση τους οικονομία χώρου. Γενικά τα ένυδρα άλατα είναι πυκνότερα από τα υπόλοιπα PCMs και παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου υλικού.

Πίνακας 6α: Θερμικές Ιδιότητες των ένυδρων αλάτων [19]

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group ^a
$K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$	14.0	109	II
$FeBr_3 \cdot 6H_2O$	21.0	105	II
$Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	25.5	148	II
$FeBr_3 \cdot 6H_2O$	27.0	105	II
$CaCl_2 \cdot 12H_2O$	29.8	174	I
$LiNO_3 \cdot 2H_2O$	30.0	296	I
$LiNO_3 \cdot 3H_2O$	30	189	I
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	32.0	267	II
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	32.4	241	II
$KFe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	33	173	I
$CaBr_2 \cdot 6H_2O$	34	138	II
$LiBr_2 \cdot 2H_2O$	34	124	I
$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	36.1	134	III
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	37.0	223	I
$Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	37.1	115	II
$Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$	40.0	279	II
$CoSO_4 \cdot 7H_2O$	40.7	170	I
$KF \cdot 2H_2O$	42	162	III
$MgI_2 \cdot 8H_2O$	42	133	III
$CaI_2 \cdot 6H_2O$	42	162	III
$K_2HPO_4 \cdot 7H_2O$	45.0	145	II
$Zn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	45	110	III
$Mg(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	47.0	142	II

Πίνακας 6β: Ιδιότητες των ένυδρων αλάτων [19]

Material	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group ^a
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	47.0	153	I
Fe(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	47	155	I
Na ₂ SiO ₃ ·4H ₂ O	48	168	II
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	48	99	II
Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	48.5	210	II
MgSO ₄ ·7H ₂ O	48.5	202	II
Ca(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	51	104	I
Zn(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O	55	68	III
FeCl ₃ ·2H ₂ O	56	90	I
Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	57.0	169	II
MnCl ₂ ·4H ₂ O	58.0	151	II
MgCl ₂ ·4H ₂ O	58.0	178	II
CH ₃ COONa·3H ₂ O	58.0	265	II
Fe(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	60.5	126	-
NaAl(SO ₄) ₂ ·10H ₂ O	61.0	181	I
NaOH·H ₂ O	64.3	273	I
Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O	65.0	190	-
LiCH ₃ COO·2H ₂ O	70	150	II
Al(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	72	155	I
Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O	78	265	II
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	89.9	167	II
KAl(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	91	184	II
MgCl ₂ ·6H ₂ O	117	167	I

^a Ομάδα I: πιο υποσχόμενα, Ομάδα II: υποσχόμενα, Ομάδα III: λιγότερο υποσχόμενα, -: ανεπαρκή στοιχεία

2.3.2.1.2.3 Εύτηκτα μείγματα

Εύτηκτα ονομάζονται τα μείγματα υλικών αλλαγής φάσης, τα οποία μπορεί να είναι είτε οργανικά είτε ανόργανα ή ακόμα και μείγμα ανόργανων με οργανικά υλικά. Τα μείγματα αυτά αναπτύχθηκαν για να παρέχουν δυνατότητες για επιθυμητά σημεία τήξης για την εκάστοτε εφαρμογή.

Θεωρείται ότι δεν συμπεριφέρονται και αντιμετωπίζονται σαν ένυδρα άλατα. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα και των δυο ομάδων ενώ δεν έχουν την τάση αυτή όσον αφορά τα μειονεκτήματά τους. Ωστόσο, έχουν αυξημένο

κόστος παραγωγής το οποίο είναι διπλάσιο έως και τριπλάσιο από αυτό των οργανικών και των ανόργανων υλικών. [4]

Συγκρίνοντας τις δυο μεγάλες κατηγορίες των υλικών αλλαγής φάσης προκύπτει ο παρακάτω πίνακας συγκεντρωτικός πίνακας των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους.

Πίνακας 7: Θερμικές Ιδιότητες των εύηκτων μιγμάτων [19]

Material	Composition (wt.%)	Melting point (°C)	Latent heat (kJ/kg)	Group ^a
CaCl ₂ ·6H ₂ O + CaBr ₂ ·6H ₂ O	45 + 55	14.7	140	-
Triethylolethane + water + urea	38.5 + 31.5 + 30	13.4	160	I
C ₁₄ H ₂₈ O ₂ + C ₁₀ H ₂₀ O ₂	34 + 66	24	147.7	-
CaCl ₂ + MgCl ₂ ·6H ₂ O	50 + 50	25	95	II
CH ₃ CONH ₂ + NH ₂ CONH ₂	50 + 50	27	163	II
Triethylolethane + urea	62.5 + 37.5	29.8	218	I
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O + Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	47 + 53	30	136	-
CH ₃ COONa·3H ₂ O + NH ₂ CONH ₂	40 + 60	30	200.5	I
NH ₂ CONH ₂ + NH ₄ NO ₃	53 + 47	46	95	II
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + NH ₄ NO ₃	61.5 + 38.5	52	125.5	I
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgCl ₂ ·6H ₂ O	58.7 + 41.3	59	132.2	I
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgCl ₂ ·6H ₂ O	50 + 50	59.1	144	-
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + Al(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	53 + 47	61	148	-
CH ₃ CONH ₂ + C ₁₇ H ₃₅ COOH	50 + 50	65	218	-
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + MgBr ₂ ·6H ₂ O	59 + 41	66	168	I
Napthalene + benzoic acid	67.1 + 32.9	67	123.4	-
NH ₂ CONH ₂ + NH ₄ Br	66.6 + 33.4	76	151	II
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NaNO ₃	25 + 65 + 10	80.5	113	-
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + KNO ₃	26.4 + 58.7 + 14.9	81.5	116	-
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NH ₄ Cl	27 + 68 + 5	81.6	108	-

^a Ομάδα I: πιο υποσχόμενα, Ομάδα II: υποσχόμενα, Ομάδα III: λιγότερο υποσχόμενα, -: ανεπαρκή στοιχεία

Στον Πίνακα 8 που ακολουθεί, συνοψίζονται τα κυριότερα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα των υλικών αλλαγής φάσης για συγκριτική ανάλυση μεταξύ των οργανικών υλικών και των ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης.

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας μειονεκτημάτων και πλεονεκτημάτων των PCM [4]

Οργανικά υλικά	Ανόργανα Υλικά
Πλεονεκτήματα	
Μη διαβρωτικά	Μεγαλύτερη Ενθαλπία – μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα – υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα
Ελάχιστη ή καθόλου υπόψυξη	
Χημική και θερμική σταθερότητα	
Χαμηλό κόστος	
Μειονεκτήματα	
Χαμηλότερη Ενθαλπία – αποθηκευτική ικανότητα	Εμφάνιση υπόψυξης
Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα	Διαχωρισμός φάσεων
Αναφλεξιμότητα	Έλλειψη θερμικής σταθερότητας
	Υψηλότερο κόστος

2.3.2.1.3 Συστήματα Αποθήκευσης με PCM

Μία εγκατάσταση αποθήκευσης με υλικά αλλαγής φάσης αποτελείται από το σύστημα που περιέχει το PCM και από το μέσο μεταφοράς της θερμότητας. Στην περίπτωση που το ίδιο το υλικό δεν αποτελεί δομικό στοιχείου του κτιρίου τότε απαιτείται χρήση εναλλάκτη θερμότητας.

Τα συστήματα αποθήκευσης με υλικά αλλαγής φάσης για κτιριακές εφαρμογές είναι [4,22]:

- Αποθήκευση σε δεξαμενές με εναλλάκτες θερμότητας
- Τοποθέτηση σε μακροκάψουλες
- Τοποθέτηση σε μικροκάψουλες
- Τοποθέτηση σε τοιχοποιία

Η επιλογή του καταλληλότερου συστήματος εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή, την ύπαρξη κατάλληλου PCM, τη μέθοδο και τις απαιτήσεις για μεταφορά θερμότητας, το κόστος και άλλους παράγοντες.

Η πιο σημαντική ιδιότητα είναι η συμβατότητα του υλικού κατασκευής με το PCM. Ως υλικά κατασκευής για τα συστήματα που περιέχουν PCM χρησιμοποιούνται μέταλλα, πλαστικά, και λιγότερο συχνά το τσιμέντο ή το γυαλί.

Σε γενικές γραμμές τα ένυδρα άλατα είναι συμβατά με τα πλαστικά ενώ τα οργανικά υλικά με τα μέταλλα. Εκτός από τις παραπάνω ιδιότητες είναι απαραίτητο το σύστημα να αντέχει στις συνήθειες για όλα τα δοχεία τάσεις κατά την αποστολή, τη μεταφορά, το χειρισμό ή τις επιδράσεις του περιβάλλοντος. Σημαντική δυσκολία των συστημάτων που περιέχουν PCM δεν είναι ο τύπος της τάσης αλλά η διάρκειά της γιατί τα PCM πρέπει να παραμένουν στα δοχεία για όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

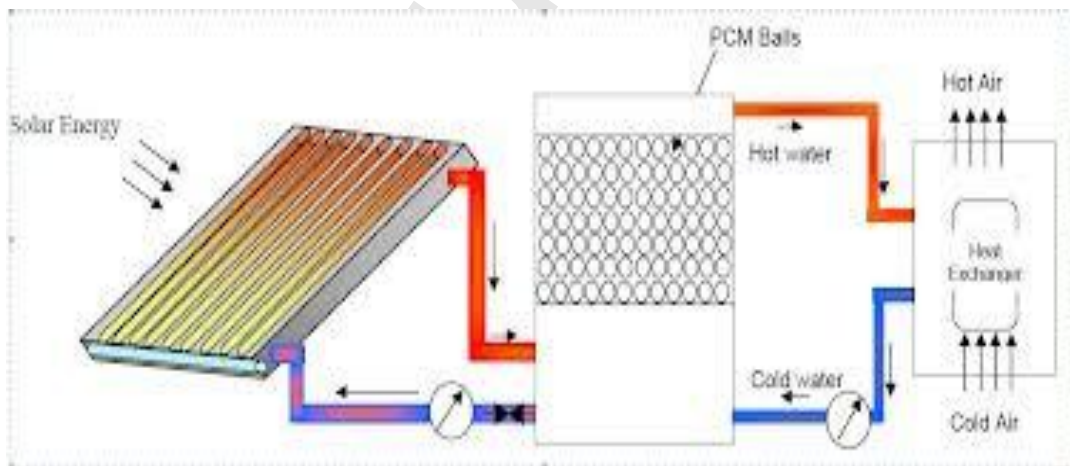
Αποθήκευση σε δεξαμενές [4,22]

Αυτή η μέθοδος επιλέγεται συνήθως όταν το μέσο μεταφοράς θερμότητας είναι υγρό. Στο σύστημα αυτό το PCM περιέχεται σε μία δεξαμενή της οποίας ο ρόλος είναι να συγκρατεί και να προστατεύει το PCM ενώ υπάρχει και μία επιφάνεια η οποία διαχωρίζει το μέσο μεταφοράς θερμότητας και το PCM διαμέσου της οποίας γίνεται η συναλλαγή θερμότητας.

Το κλειδί για τις δεξαμενές είναι η ανάγκη για πιο μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής ή για βελτίωση των ιδιοτήτων μεταφοράς θερμότητας γιατί κατά τη διεργασία τήξης-πήξης η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας τείνει να καλυφθεί με ένα στρώμα στερεοποιημένου PCM του οποίου το πάχος μεγαλώνει καθώς ο βρασμός εκφόρτισης αυξάνει. Το στερεό αυτό στρώμα συνεχώς μειώνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Επίσης, ενώ τα PCM λόγω της μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητάς τους απαιτούν μικρότερο όγκο συστήματος για την αποθήκευση ενός συγκεκριμένου ποσού θερμότητας, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, ο οποίος είναι ο ίδιος με τα άλλα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, επιβάλλει την ύπαρξη μίας μεγάλης επιφάνειας εναλλαγής.

Για την φόρτιση και την εκφόρτιση ενός τέτοιου συστήματος απαιτείται ένας κατάλληλος εναλλάκτης θερμότητας με μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής. Ο εναλλάκτης θα πρέπει να εξασφαλίζει έναν υψηλό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας έτσι ώστε να είναι δυνατή η ραγδαία φόρτιση και εκφόρτιση του συστήματος. Λόγω της μικρής αγωγιμότητας των PCM αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση μεταλλικών ελασμάτων, με φυσική ή εξαναγκασμένη κυκλοφορία του PCM ή ακόμη και με την προσθήκη περυγίων στους σωλήνες του εναλλάκτη. Ακόμα, ο εναλλάκτης πρέπει να επιτρέπει μόνο μικρές αλλαγές θερμοκρασίας για τη φόρτιση και την εκφόρτιση και να εξασφαλίζει υψηλή θερμική διαχυτότητα.

Οι εναλλάκτες σε αυτά τα συστήματα χωρίζονται σε δύο τύπους, τους παθητικούς και τους ενεργητικούς. Οι παθητικοί δεν διαθέτουν κινούμενα μέρη και περιλαμβάνουν σωλήνες μικρής διατομής μέσα στους οποίους βρίσκεται το PCM. Ενδέχεται να έχουν μικρά περύγια για αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας. Οι ενεργητικοί εναλλάκτες περιλαμβάνουν συστήματα για ανάδευση του υλικού αλλαγής φάσης για την παρεμπόδιση του διαχωρισμού φάσεων και την καλύτερη εναλλαγή θερμότητας.



Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση συστήματος θέρμανσης με χρήση δεξαμενής θερμικής αποθήκευσης με PCM.

Τα συστήματα αυτά βρίσκουν εφαρμογή σε [22]:

- σε εγκαταστάσεις αντλιών θερμότητας με κλειστή κυκλοφορία νερού για θέρμανση και ψύξη κτιρίων
- για άλλες οικιακές χρήσεις, όπως το μαγείρεμα
- σε βιομηχανικά συστήματα ανάκτησης θερμότητας
- σε συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε εκτός αιχμής περιόδους
- σε μονάδες λήψης ηλιακής ακτινοβολίας για διαστημικές εφαρμογές

Για τη θέρμανση και την ψύξη των κτιρίων που το μέσο μεταφοράς είναι αέρας είναι καλύτερο τα PCM να περιέχονται σε μακρό ή μικροκάψουλες. Στη συνέχεια περιγράφονται αυτά τα συστήματα συσκευασίας των υλικών.

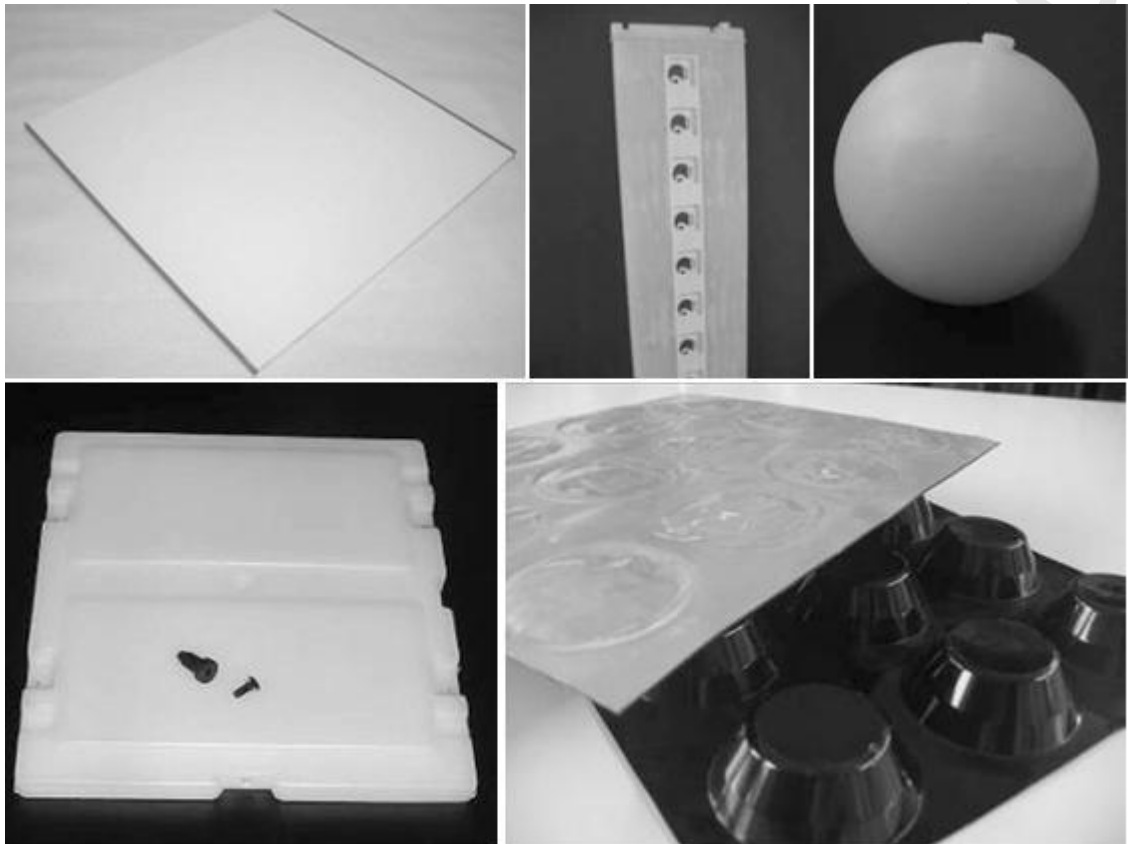
Τοποθέτηση σε μακροκάψουλες και μικροκάψουλες

Η χρήση των ΥΑΦ τις περισσότερες φορές απαιτεί την προστασία του υλικού σε κάποιο από τα είδη διαθέσιμης συσκευασίας (τοποθέτηση σε κάψουλες ή σακούλες, ενσωμάτωση στο πορώδες υλικό άλλων υλικών, εναλλάκτες θερμότητας ενισχυμένοι με ΥΑΦ) ώστε να προφυλαχθεί το υλικό από την επίδραση των συνθηκών του περιβάλλοντος ή και να διευκολύνει τη μετάδοση της αποθηκευμένης λανθάνουσας θερμότητας.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης των ΥΑΦ σε μακροκάψουλες ή μικροκάψουλες (σφαιρίδια διαμέτρου μικρότερης του 1mm) είναι ότι εξασφαλίζεται μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, ελαχιστοποιείται η αλληλεπίδραση του περιβάλλοντος με το ίδιο το ΥΑΦ, και η αλληλεπίδραση του ΥΑΦ με το υλικό του δοχείου, αφού γίνεται εκτεταμένος έλεγχος μεταβολής όγκου κατά την αλλαγή φάσης.

Το υλικό που συνήθως χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των ΥΑΦ σε προστατευτικό κέλυφος είναι πλαστικό ή συνθετικές ρητίνες. Η τοποθέτηση σε μακροκάψουλες, επιφέρει την επιθυμητή μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής που βελτιώνει τις συνθήκες μεταφοράς θερμότητας. Επίσης, οι μακροκάψουλες βελτιώνουν τη θερμική συμπεριφορά του συστήματος με τα ΥΑΦ, καθώς εμποδίζει την ανάπτυξη του

στέρεου τοιχώματος στην εσωτερική επιφάνεια μεταφοράς, φαινόμενο το οποίο είναι υπεύθυνο για την ανεπιθύμητη μείωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. [4,22]



Εικόνα 7: Υλικά αλλαγής φάσης σε συσκευασίες μακροκάψουλών (μακροενθηλάκωση)

Τα ΥΑΦ που χρησιμοποιούνται ενσωματωμένα σε μακροκάψουλες, πρέπει να είναι συμβατά με το υλικό της κάψουλας, το οποίο μπορεί να είναι πλαστικό για χαμηλές θερμοκρασίες και μέταλλο ή ειδική μεμβράνη για υψηλές θερμοκρασίες. Η παρουσία του υλικού της μακροκάψουλας μέσα στο χώρο αποθήκευσης θερμότητας, δεν μειώνει πρακτικά την πυκνότητα της αποθηκευμένης ενέργειας, καθώς έχουμε μικρή αναλογία ποσότητας υλικού κάψουλας ανά μάζα ΥΑΦ.[22]

Η τοποθέτηση σε μικροκάψουλες, επιφέρει την επιθυμητή προστασία του ΥΑΦ από τις περιβαλλοντικές δυσμενείς για το ΥΑΦ συνθήκες (π.χ. υγρασία). Η μεγάλη όμως αναλογία μάζας υλικού κάψουλας προς τη μάζα του ΥΑΦ, μειώνει σημαντικά την πυκνότητα της αποθηκευμένης ενέργειας, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα κατά τη χρήση σε μικροκάψουλες, σε συνδυασμό με το αυξημένο κόστος της εφαρμογής. Η χρήση σε μικροκάψουλες σε εφαρμογές των ΥΑΦ, χρησιμοποιείται μόνο όταν οι

μικροκάψουλες αποτελέσουν αναγκαία παράμετρο για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος. [22]

Στην περίπτωση των οργανικών ΥΑΦ, θέλουμε κυρίως να επιτύχουμε την αύξηση του συντελεστή αγωγιμότητας καθώς βρίσκεται στην περιοχή του 0,2 W/mK. Στην περίπτωση των ανόργανων ΥΑΦ, το ενδιαφέρον της συσκευασίας στρέφεται στην προστασία των υλικών που συνεργάζονται με το ΥΑΦ, καθώς αν έρθουν σε επαφή τα υλικά αυτά θα διαβρωθούν και θα αλληλεπιδράσουν αρνητικά για τη συνολική εγκατάσταση. [4,22]

Για να επιτύχουμε αύξηση του συντελεστή αγωγιμότητας, ενσωματώνουμε τα ΥΑΦ σε μακροκάψουλες ή μικροκάψουλες (συνήθως από πλαστικό ή ρητίνες) για να εξασφαλίσουμε μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της τοποθέτησης των ΥΑΦ σε κάψουλες, είναι η ελαχιστοποίηση της αλληλεπίδρασης του περιβάλλοντος αλλά και των υλικών των δοχείων αποθήκευσης. Το μεγάλο πλεονέκτημα της συσκευασίας σε μακροκάψουλες, είναι ο πλήρης έλεγχος της αλλαγής όγκου κατά την αλλαγή φάσης. Επίσης, θα πρέπει για να έχουμε επιτυχή ενσωμάτωση να έχουμε περιορισμένη έως και μηδενική «μετανάστευση» του ΥΑΦ από το πορώδες του υλικού, όταν το ΥΑΦ βρίσκεται στην υγρή κατάσταση. Η χρήση σφαιριδίων ενισχυμένων με ΥΑΦ, είναι ευρέως διαδεδομένη, καθώς αποφεύγεται ο σχηματισμός κοιλοτήτων εντός του υλικού ή ακόμα και η μερική αποκόλληση το υλικού από την επιφάνεια συναλλαγής κατά την αλλαγή φάσης (αύξηση ή μείωση του όγκου περίπου στο 10%), γεγονός που θα έριχνε σημαντικά την τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.[22]

Η ενσωμάτωση του υλικού στο πορώδες άλλου υλικού αποτελεί τη βάση του σύνθετου τελικού προϊόντος. Σε αυτήν την περίπτωση σημαντικό κριτήριο για την επιτυχημένη ενσωμάτωση είναι η μη αλληλεπίδραση του ΥΑΦ με το υλικό και η περιορισμένη έως μηδενική απώλειά του από το πορώδες όταν το ΥΑΦ βρίσκεται στην υγρή φάση.

Τοποθέτηση σε τοιχοποιία [4,22]

Το θερμικό κέλυφος των κτιρίων μέσω της θερμοχωρητικότητάς του μειώνει το εύρος των θερμοκρασιακών μεταβολών μέσα στο εσωτερικό των κτιρίων. Οι μεταβολές αυτές προκαλούνται είτε από τις αλλαγές της θερμοκρασίας στο εξωτερικό περιβάλλον, είτε από την ασυνεχή λειτουργία των συστημάτων ψύξης-θέρμανσης. Κτίρια με μεγάλες εξωτερικές επιφάνειες από γυαλί, όπως σύγχρονα κτίρια γραφείων ή κτίρια με παθητικά συστήματα θέρμανσης, συχνά παρουσιάζουν προβλήματα θερμικής άνεσης κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, όταν η ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση αλλά και για φυσικό φωτισμό. αλλά και σε κτίρια ελαφριάς κατασκευής, κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι, όπου τα ηλιακά θερμικά κέρδη είναι πολύ μεγαλύτερα από τις ανάγκες σε θέρμανση και η τοιχοποιία αρκετά ελαφριά για να απορροφήσει αυτήν την πλεονάζουσα ηλιακή θερμική ενέργεια.

Επομένως, η χρήση των PCM σε δομικά ή σαν δομικά στοιχεία αυτών των κτιρίων, καθίσταται αποτελεσματική, αφού οδηγεί στην αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας από το κτιριακό κέλυφος, χωρίς τις μεγάλες μεταβολές θερμοκρασίας και της μεγάλης δομικής μάζας που απαιτεί η θερμική αποθήκευση μέσω της αισθητής θερμότητας.

Τα PCM μπορούν να τοποθετηθούν [22]:

- με τη μορφή ενός συμπαγούς στρώματος, είτε ενιαίου, είτε με τη μορφή μιας μήτρας από μικροκάψουλες, πάνω σε μια υπάρχουσα τοιχοποιία του κτιρίου
- σε γύψινα πλαίσια, που έχουν εμποτιστεί με κάποιο PCM (σε αναλογία κατά μάζα περίπου 25%) και αυτά θα επικαλύψουν την τοιχοποιία
- σε πλαίσια από γύψο, τα οποία περιλαμβάνουν στο εσωτερικό τους σωλήνες που περιέχουν το PCM
- σε γυάλινα πλαίσια, διαμερή και από τις δύο πλευρές, για την αντικατάσταση παραθύρων από γυαλί, οπότε χρησιμοποιούνται και για να παρέχουν φωτισμό
- με τη μορφή στρώματος, για την αντικατάσταση του θερμοπετόν σε συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης.

- με τη μορφή στρώματος μόνωσης, ανάμεσα σε δύο επιφάνειες εξωτερικού και εσωτερικού τοίχου (στον όρο τοιχοποιία συμπεριλαμβάνονται και οι οροφές των κτιρίων)

Όλα τα πιθανά συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με χρήση PCM ουσιαστικά παρέχουν στα κτίρια ένα καλό θερμοκρασιακό έλεγχο και μια ρύθμιση της θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του κτιρίου. Μπορούν να εφαρμοστούν ως παθητικά συστήματα θέρμανσης, παθητικά συστήματα ψύξης αλλά έχουν εφαρμογή και στα ενεργητικά συστήματα ψύξης και θέρμανσης όπως σε εφαρμογές ενδοδαπέδιας θέρμανσης και σε συστήματα ψύξης οροφής. Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων αυτών σχετίζεται με τον κατάλληλο σχεδιασμό, την σωστή επιλογή του υλικού και την άριστη γνώση της συμπεριφοράς του κτιρίου και της κλιματικής ζώνης στην οποία ανήκει.

Σε ότι αφορά το κόστος των [10] των εμπορικών PCM, αυτό κυμαίνεται μεταξύ 0.5-10 €/kg και αυτό το μεγάλο εύρος τιμής επηρεάζει την εφαρμογή σε σχέση με την οικονομική της βιωσιμότητα. Οι τιμές των ένυδρων αλάτων είναι συνήθως χαμηλές, περίπου 1-3€/kg εκτός αν αγοραστούν σε καθαρή μορφή. Με μια εκτίμηση, η ενεργειακή τιμή τους είναι περίπου στο 0.5 €/kWh. Λαμβάνοντας μια μέση πυκνότητα αποθήκευσης των PCM 180kJ/kg, απαιτούνται περίπου 20 kg υλικού αλλαγής φάσης για να αποθηκεύσουν 3600 kJ ενέργειας, ποσό θερμότητας το οποίο αξίζει 0.€. Τα 30 kg υλικού κοστίζουν τουλάχιστον 10 € (0.5€/kg). Για να αποθηκευτεί θερμότητα αξίας ίσης με το κόστος της εγκατάστασης των PCM απαιτούνται 200 κύκλοι φόρτισης – εκφόρτισης (10€/0.5€) Το επιπλέον κόστος για τη συσκευασία του υλικού και του εναλλάκτη θερμότητας αλλά και το κόστος της αποθηκευμένης ενέργειας δεν έχουν ληφθεί υπόψη. Η εποχιακή αποθήκευση με PCM είναι συνεπώς ακόμη μη συμφέρουσα με τις παρούσες τιμές σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα. Για να μπορούν τα συστήματα αυτά να είναι ανταγωνιστικά, θα πρέπει να επιτυγχάνουν κύκλους φόρτισης ημερησίως και ίσως και σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα. [14]

2.3.2.2 Συστήματα Αποθήκευσης Πάγου

Ο πάγος αποτελεί μια κρυσταλλική στερεή μορφή του νερού διάφανη ή με ένα ιώδες χρώμα ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε ακαθαρσίες και εγκλωβισμένο αέρα. Η συνήθης αλλαγή φάσης του νερού σε πάγο γίνεται στους 0°C σε κανονικές πιέσεις ατμόσφαιρας. Σαν φυσικά υπάρχον κρυσταλλικό στερεό, ο πάγος κατατάσσεται στις ανόργανες ουσίες.

Ένα ασύνηθες φαινόμενο που χαρακτηρίζει το νερό υπό μορφή πάγου σε πίεση μίας ατμόσφαιρας είναι ότι το στερεό είναι περίπου 8% λιγότερο πυκνό από την υγρή μορφή. Το νερό είναι η μόνη μη μεταλλική ουσία που διαστέλλεται όταν στερεοποιείται, έχει πυκνότητα 0.917 g/cm³ στους 0 °C, τη στιγμή που το νερό έχει πυκνότητα 0.9998 g/cm³ στην ίδια θερμοκρασία. Η υγρή μορφή φτάνει το μέγιστο της πυκνότητάς της, το 1.00 g/cm³, στους 4°C και διαστέλλεται, καθώς τα μόρια του υγρού συγκεντρώνονται για να δημιουργήσουν την εξαγωνική μορφή των κρυστάλλων του πάγου, καθώς η θερμοκρασία πέφτει στους 0 °C. Η πυκνότητα του πάγου αυξάνει λίγο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (στους -180 °C είναι 0.9340 g/cm³).

Όταν το νερό παγώνει απορροφά τόση ενέργεια όση θα απορροφούσε για να θερμανθεί στους 80 °C από τους 0 °C. Είναι επίσης θεωρητικά δυνατόν να υπερθερμανθεί το νερό σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από το σημείο βρασμού, χωρίς να έχουμε τη μετάβαση στην αέρια φάση. Έρευνες όπου ακτίνες λέιζερ ενεργούσαν πάνω σε κομμάτι πάγου, απέδειξαν ότι ο πάγος μπορεί να θερμανθεί έως και σε θερμοκρασία δωματίου για πολύ σύντομη περίοδο (250 ps) χωρίς να λιώσει. Επίσης είναι πιθανό ο πυρήνας ενός κρυστάλλου πάγου να έχει σημείο τήξεως πάνω από τους 0 °C και το κανονικό σημείο των 0 °C να είναι απλά ένα επιφανειακό φαινόμενο.

Η αποθήκευση θερμότητας με τη βοήθεια πάγου, είναι σήμερα ένας τεχνητός και βιομηχανικός τρόπος αποθήκευσης ψυκτικής ισχύος σε μορφή πάγου στο σημείο τήξης του νερού. Για την παραγωγή αυτής της ενέργειας τα ψυκτικά μηχανήματα πρέπει να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από τις συνήθεις, ώστε να είναι διαθέσιμο ψυκτικό υγρό στους -6 έως -3°C, ανάλογα με τη διάρκεια του κύκλου. [22-24]

Στην αποθήκευση θερμότητας με πάγο γίνεται αξιοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας του νερού. Οι ψυκτικές εγκαταστάσεις που λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία είναι υποχρεωτικό να λειτουργούν σε θερμοκρασίες κατά πολύ χαμηλότερες

από αυτές που λαμβάνουν χώρα σε μία εφαρμογή κλιματισμού. Ανάλογα με την τεχνολογία της μονάδας, μπορεί να χρησιμοποιούνται είτε ειδικά μηχανήματα παραγωγής πάγου ή συνηθισμένοι ψύκτες διαμορφωμένοι κατάλληλα για χαμηλές θερμοκρασίες.

Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου παραγωγής ψύξης είναι η ελάττωση του ηλεκτρικού φορτίου αιχμής που απαιτείται και/ή ελάττωση της χωρητικότητας του απαραίτητου εγκατεστημένου ψύκτη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με συνδυασμό αποθήκευσης και κρύου νερού και πάγου. Κανονικά τα συστήματα αποθήκευσης πάγου έχουν αρχικό κόστος κατά 15-20% ακριβότερο από τα συστήματα αποθήκευσης κρύου νερού. Παρόλα αυτά ενώ το σύστημα πάγου απαιτεί 4-6 φορές μικρότερο όγκο αποθήκευσης, σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα νερού και μπορεί να αποδειχτεί ιδανική λύση για εφαρμογές όπου οι περιορισμοί του χώρου είναι ιδιαίτερος αυστηροί. [24]

Τα συστήματα αποθήκευσης πάγου μπορούν επίσης να εμφανίσουν πλεονεκτήματα όταν η διαφορά στην τιμή της ηλεκτρικής μονάδας μεταξύ ημέρας και νύχτας είναι σημαντική και συνεπώς να υπάρχει ένα επιπλέον κριτήριο για να αναλάβει το σύστημα πάγου μεγαλύτερο κομμάτι της ψυκτικής παραγωγής στο ενδιάμεσο περιόδων αιχμής και μη-αιχμής.

Κυρίως λόγω της μεγαλύτερης ψυκτικής ικανότητας ανά μονάδα επιφανείας σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης ψυχρού νερού, τα συστήματα πάγου μπορούν να προτιμηθούν παρόλο το βάρος της αρχικής επένδυσης. [24]

Πίνακας 9: Θερμικές ιδιότητες του πάγου [25]

Πυκνότητα	Θερμική αγωγιμότητα	Ειδική θερμότητα	Λανθάνουσα θερμότητα
910 (kg/m ³)	2,25 (W/mK)	2,108 (kJ/kgK)	335 (kJ/kg)

2.3.2.2.1 Συστήματα Αποθήκευσης Πάγου

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης πάγου, μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω [23,24]:

- Σύστημα Τήξης σε σερπαντίνα (Ice-on-coil)
- Σύστημα Θρυμματοποίησης πάγου (Ice slurry)
- Πάγος σε μικροκάψουλες (Encapsulated ice)
- Παγοπολτός – Διφασικό μίγμα

2.3.2.2.1.1 Σύστημα Τήξης σε σερπαντίνα

Υπάρχουν δύο βασικές εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής, η εξωτερική ή επιφανειακή και η εσωτερική τήξη. Και οι δύο εναλλακτικές χρησιμοποιούν την τεχνική κατά την οποία ο πάγος σχηματίζεται στην εξωτερική επιφάνεια σωλήνων ή σερπαντίνων, οι οποίες είναι βυθισμένες σε δεξαμενή νερού. Κατά την περίοδο φόρτισης το ψυκτικό μέσο (τυπικό για αυτές τις εφαρμογές: 25% προπυλογλυκόλη και 75% νερό) περνάει μέσα από τους σωλήνες και δημιουργεί στην εξωτερική τους επιφάνεια ένα στρώμα πάγου. [23,24]

Για την εφαρμογή εξωτερικής τήξης το σύστημα αποθήκευσης πάγου χρειάζεται ψύκτη ικανό να παράγει θερμοκρασίες φόρτισης από -7 έως -3°C για το σχηματισμό 40 mm πάγου. Για σύστημα σχηματισμού 65 mm πάγου, οι αντίστοιχες θερμοκρασίες θα πρέπει να είναι -12 έως -9°C . Το σύστημα χρησιμοποιεί συνήθεις ψύκτες, οι οποίοι εμφανίζουν θερμοκρασίες φόρτισης από -6 ως -3°C . [23,24]



Εικόνα 8: Απεικόνιση των σερπαντίνων (coils) στα συστήματα αποθήκευσης ice – on coil

Εξωτερική τήξη

Κατά την αποφόρτιση του συστήματος εξωτερικής τήξης το ζεστό νερό που επιστρέφει από το σύστημα επανακυκλοφορεί στη δεξαμενή, αυξάνοντας τη μέση θερμοκρασία του νερού με αποτέλεσμα να λιώσει ο πάγος από έξω προς τα μέσα, και ως άμεση συνέπεια, το νερό ψύχεται και πάλι. Αέρας οδηγείται μέσα στη δεξαμενή και απελευθερώνεται μέσα σε αυτήν κατά την εκκίνηση του κύκλου φόρτισης και κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης, ώστε να ευνοηθεί η ομοιόμορφη δημιουργία του στρώματος πάγου και η εξομάλυνση των τοπικών διαφορών θερμοκρασίας στη δεξαμενή. Ο πάγος διαμορφώνεται γύρω από τους σωλήνες κατά τη φάση της θερμικής φόρτισης σε πάχος έως και 65 mm. Συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται για να περιοριστεί το πάχος αυτού του στρώματος πάγου και να αποφευχθεί το φαινόμενο της "γεφύρωσης" του στρώματος μεταξύ δύο διαδοχικών σωλήνων, γεγονός το οποίο εμποδίζει την ελεύθερη κυκλοφορία του νερού στη δεξαμενή και ελαττώνει το βαθμό απόδοσης, καθώς η θερμοκρασία εξόδου του νερού είναι υψηλότερη λόγω της μικρότερης επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας. [23,24]

Οι δεξαμενές για τα συστήματα εξωτερικής τήξης είναι ανοιχτές άρα ατμοσφαιρικής πίεσης, πράγμα το οποίο απαιτεί κάποιο σύστημα ελέγχου και σταθεροποίησης της στατικής πίεσης του συστήματος ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο υπερχειλίσσης στην ανοιχτή δεξαμενή. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να γίνει είτε με εναλλάκτες θερμότητας είτε βαλβίδες σταθερής πίεσης και αντλίες. Το σύστημα επεξεργασίας του νερού δεν χρειάζεται κάποια ιδιαίτερη μετατροπή. Μπορεί να χρειαστεί προστασία εναντίον της διάβρωσης σε εγκαταστάσεις εξωτερικής τήξης, όπου το νερό στη δεξαμενή αερίζεται, αφού η δεξαμενή είναι ανοιχτή. Και σε αυτή την περίπτωση όμως, αν χρησιμοποιηθούν εναλλάκτες θερμότητας για τη σταθεροποίηση της στατικής πίεσης, το σύστημα διανομής του νερού παραμένει κλειστό και έτσι δεν χρειάζεται κάποια επιπλέον φροντίδα. Το σύστημα αποθήκευσης μπορεί επίσης να συνδυαστεί με περισσότερες δεξαμενές. Πολλαπλές δεξαμενές στις περισσότερες εφαρμογές είναι συνδεδεμένες παράλληλα. Η εν σειρά σύνδεση των δεξαμενών χρησιμοποιείται μερικές φορές όταν απαιτείται μεγάλος ρυθμός αποφόρτισης από το σύστημα, όπου ζητούμενο είναι η παραμονή του νερού στη δεξαμενή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Όμως, η ροή του νερού μεταξύ των εν σειρά συνδεδεμένων δεξαμενών γίνεται μόνο από την υψομετρική διαφορά στάθμης στις αντίστοιχες δεξαμενές. Μία σύνδεση με μεγάλη διατομή είναι

απαραίτητη ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πτώση πίεσης και η διαφορά στάθμης μεταξύ των δεξαμενών. Παρόλα αυτά η εν σειρά σύνδεση περισσότερων από δύο δεξαμενών γενικά δεν συνιστάται. [23]

Συστήματα αποθήκευσης πάγου εξωτερικής τήξης είναι ιδανικά για εφαρμογές και συστήματα που απαιτούν καθαρό νερό χωρίς πρόσθετα στον ψυκτικό κύκλο ή απαιτούν παροχή νερού σε θερμοκρασία 1-2°C. [23]

Χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές διατάξεις συστημάτων εξωτερικής τήξης [23]:

- Συστήματα που χρησιμοποιούν το ψυκτικό μέσο κατευθείαν μέσα στις σωληνώσεις
- Συστήματα που δημιουργούν πάγο έμμεσα χρησιμοποιώντας ένα δευτερεύον ψυκτικό το οποίο ψύχεται από ένα ψύκτη

Το σύστημα άμεσης ψύξης δημιουργεί πάγο με τις σωληνώσεις να λειτουργούν σαν ατμοποιητής, άρα το ψυκτικό περνάει μέσα από τη μονάδα αποθήκευσης. Αυτή η εφαρμογή χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία. [23]

Το δευτερεύον ψυκτικό σύστημα είναι πολύ σύνθηες για εφαρμογές HVAC καθώς είναι περισσότερο εύκολο και απλούστερο σε σχεδιασμό, εγκατάσταση και συντήρηση και επίσης λόγω του μειωμένου όγκου του ψυκτικού μέσου. Το σύστημα άμεσης ψύξης είναι περισσότερο αποδοτικό καθώς υπάρχει συγκριτικά λιγότερη μεταφορά θερμότητας μεταξύ ψυκτικού και επιφάνειας σχηματισμού πάγου. [23]

Η ελαχιστοποίηση του φαινομένου της γεφύρωσης των στρωμάτων πάγου καθώς και ο περιορισμός του πάχους αυτών κατά τη φάση της φόρτισης του συστήματος, είναι οι δύο βασικές έννοιες του συστήματος ελέγχου για εγκατάσταση αποθήκευσης με σωληνώσεις και εξωτερική τήξη. Για να μεγιστοποιηθεί την απόδοση και να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας και τα κόστος γενικότερα, όλη η ποσότητα του σχηματιζόμενου πάγου πρέπει να λιώνει τουλάχιστον μία φορά την εβδομάδα. Σε περιπτώσεις όπου η εγκατάσταση λειτουργεί σε μερικό φορτίο, ο ψυκτικός κύκλος πρέπει να περιορίζεται, ώστε να αποθηκεύεται μόνο η απαραίτητη ενέργεια. Η πλήρης αποφόρτιση του συστήματος βοηθά επίσης ώστε να μην εμφανίζεται το φαινόμενο της «γεφύρωσης». Το σύστημα ελέγχου του πάχους του πάγου πρέπει να διαθέτει αισθητήρα πάχους, και να μπορεί να σταματά τη φόρτιση του συστήματος όταν επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι τέτοιου ελέγχου, και ο πιο

απλώς από αυτούς βασίζεται στο γεγονός ότι ο πάγος έχει μεγαλύτερο όγκο από το νερό, οπότε ένας αισθητήρας στάθμης του νερού στη δεξαμενή μπορεί να ελέγξει τον αποθηκευμένο πάγο. Μια άλλη μέθοδος αποτελείται από καθετήρα γεμάτο με υγρό που τοποθετείται σε συγκεκριμένη απόσταση από τους σωλήνες του συστήματος. Καθώς σχηματίζεται πάγος αγκαλιάζει τον καθετήρα προκαλώντας την πήξη του υγρού στο εσωτερικό του, τότε αυξάνεται η πίεση, η οποία μπορεί τελικά να μετρηθεί. Κάθε μονάδα παραγωγής πάγου πρέπει να έχει και ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου του παραγόμενου πάγου. [23]

Εσωτερική τήξη

Το σύστημα εσωτερικής τήξης αποφορτίζεται καθώς το ζεστό νερό που επιστρέφει περνά μέσα από τους σωλήνες και λιώνει τον πάγο από μέσα προς τα έξω. Πρώτα τήκεται ο πάγος στο όριο του σωλήνα δημιουργώντας ένα στρώμα νερού μεταξύ του σωλήνα και του πάγου. Καθώς η διαδικασία προχωρά, το στρώμα του νερού διογκώνεται εις βάρος του πάγου έως ότου φτάσουμε στην κατάσταση που ο πάγος φτάνει σε οριακό πάχος σπάει και τα κομμάτια ανακατεύονται με το νερό στη δεξαμενή αποθήκευσης. [24]

Και εδώ υπάρχουν δύο συστήματα εσωτερικής τήξης όπου η αποθήκευση συνδέεται σε σειρά με τον ψύκτη με διάταξη είτε ανάντη είτε κατάντη. Για την ανάντη διάταξη ο ψύκτης προ-ψύχει το ζεστό νερό επιστροφής προτού αυτό εισέλθει στη δεξαμενή. Αποτέλεσμα είναι μια περισσότερο αποδοτική λειτουργία ψύξης λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας λειτουργίας. Από την άλλη η χαμηλότερη θερμοκρασία εισόδου στη δεξαμενή ελαττώνει την αποθηκευτική ικανότητα. Στην κατάντη διάταξη το νερό επιστροφής εισέρχεται στον ψύκτη αφού έχει ψυχθεί στη δεξαμενή αποθήκευσης. Αυτή η διάταξη παρέχει μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα, καθώς επίσης εξασφαλίζει και μία σταθερή θερμοκρασία παροχής. Οστόσο, η απόδοση του ψύκτη είναι χαμηλότερη και ο ψύκτης λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία εισόδου. [23,24]

Το πλέον συνηθισμένο υλικό το οποίο χρησιμοποιείται για τις σωληνώσεις στο σύστημα ice-on-coil με εσωτερική ψύξη είναι το πολυαιθυλένιο με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (0.31 W/m.K). Αναλύσεις συγκρίνουν το πολυαιθυλένιο με άλλα υλικά με διαφορετική αγωγιμότητα, υλικά με υψηλή αγωγιμότητα (372 W/m.K) όπως ο χαλκός

καθώς και με χαμηλή αγωγιμότητα (1.73 W/m.K) όπως το νικέλιο, το μαγνήσιο, ή μίγμα τιτανίου καθώς και διάφορα πλαστικά υλικά. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης έδειξε ότι τα μεταλλικά κράματα (πχ νικέλιο, μαγνήσιο, τιτάριο) ή φορμαλδεΐδη πλαστικά (πχ ούριο-φορμαλδεΐδη, μελαμίνη, πλαστικά φαινόλης, πολυεστέρες), βελτιώνουν τη μεταφορά θερμότητας, ελαττώνοντας τους χρόνους φόρτισης και αποφόρτισης της δεξαμενής. Το κόστος όμως τέτοιων υλικών είναι σε γενικές γραμμές υψηλότερο από το πολυαιθυλένιο. Σκοπός της εξέλιξης είναι η δημιουργία μεταλλικών κραμάτων φτηνών και καταλλήλων για τη διαμόρφωση τέτοιων σωλήνων. [23]

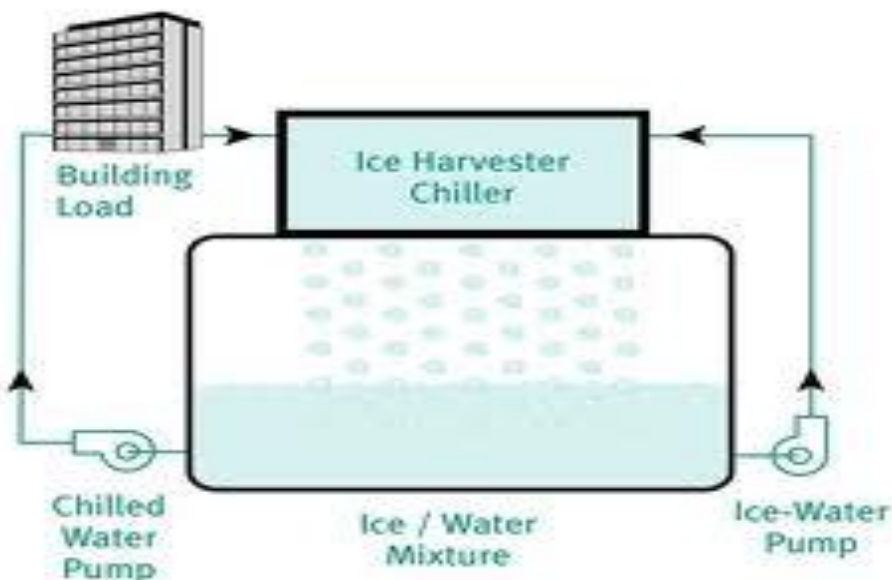
Στις εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ο ψυκτικός κύκλος της εγκατάστασης μπορεί να συνδεθεί κατευθείαν με τον ψυκτικό κύκλο ενός κτιρίου, ή να είναι συνδεδεμένοι μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Σε συστήματα ψύξης κατοικιών προτιμάται η μέθοδος του εναλλάκτη. Παρόλα αυτά σαν σύστημα εσωτερικής τήξης χρησιμοποιεί ένα διάλυμα γλυκόλης στους σωλήνες και είναι κατάλληλο σε συστήματα που χρησιμοποιούν γλυκόλη στον ψυκτικό κύκλο του κτιρίου και μπορούν να είναι περισσότερο αποδοτικά από τα συστήματα εξωτερικής τήξης. Είναι περισσότερο αποδοτικό να υπάρχουν περισσότερες μικρές δεξαμενές συνδεδεμένες, από το να υπάρχει μία μεγάλη δεξαμενή εξ αιτίας των πολλών σε αριθμό και μεγάλων σε μήκος σωλήνων που είναι απαραίτητες σε μία μεγάλη δεξαμενή. Το μεγάλο μήκος των σωλήνων είναι επιζήμιο στη θερμική απόδοση αφού η κλίση της θερμοκρασίας μεταξύ του δευτερεύοντος ψυκτικού και της διεπιφάνειας νερού/πάγου, ελαττώνεται όσο αυξάνει το μήκος του σωλήνα. Αύξηση του αριθμού των σωλήνων προκαλεί μείωση της αντίστοιχης παροχής με αποτέλεσμα την μειωμένη μεταφορά θερμότητας του δευτερεύοντος υγρού. Από την άλλη με μικρότερες δεξαμενές οι χρόνοι φόρτισης και αποφόρτισης ελαττώνονται. Η δεξαμενή του συστήματος εσωτερικής ψύξης έχει μικρό κόστος συντήρησης λόγω έλλειψης εσωτερικών κινούμενων εξαρτημάτων. Πέρα απ' αυτό, ο τρόπος σύνδεσης του συστήματος παρέχει τη δυνατότητα να προστεθεί εύκολα δεξαμενή σε παράλληλη με μικρό κόστος εγκατάστασης. [23]

Η εξωτερική τήξη παρέχει σταθερή θερμοκρασία αποφόρτισης περίπου στον +1°C, κάτι που είναι αποτέλεσμα των φυσαλίδων αέρα που οδηγείται στη δεξαμενή για να προωθήσει την ομοιομορφη δημιουργία και τήξη του πάγου, ομοιομορφία η οποία βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας. Για την εσωτερική τήξη ο πάγος γύρω από το σωλήνα λιώνει δίνοντας τη θέση του σε ένα υδάτινο δαχτυλίδι, μεταξύ του σωλήνα και

του πάγου το οποίο συνεχώς μεγαλώνει. Καθώς το νερό απομονώνει τους σωλήνες, πράγμα το οποίο αυξάνει την αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας, η θερμοκρασία της γλυκόλης αυξάνει με το χρόνο. [23]

2.3.2.1.2 Σύστημα Θρυματοποίησης πάγου

Το σύστημα θρυματοποίησης (sheet ice harvester) πάγου φτιάχνει πάγο πάνω σε μία μεγάλη επίπεδη επιφάνεια ενός εξατμιστή ή στο εσωτερικό ή εξωτερικό ενός κυλινδρικού εξατμιστή, ο οποίος και στις δύο περιπτώσεις βρίσκεται πάνω από μία δεξαμενή νερού/πάγου. Ο πάγος δημιουργείται από την ανακυκλοφορία νερού 0°C από τη δεξαμενή αποθήκευσης στην κορυφή των επιπέδων επιφανειών του εξατμιστή, όπου κυλά ελεύθερο σχηματίζοντας ένα λεπτό φιλμ πάνω στις επιφάνειες αυτές. Τα κομμάτια πάγου που δημιουργούνται από αυτή τη διαδικασία απελευθερώνονται, συνήθως με την κυκλοφορία ζεστού ψυκτικού αερίου στον εξατμιστή, και πέφτουν μέσα στη δεξαμενή όπου και ανακατεύεται με το ψυχρό νερό. Άλλοι τύποι συσκευών χρησιμοποιούν μηχανικές μεθόδους απελευθέρωσης του πάγου. Ο πάγος απελευθερώνεται περιοδικά όταν το πάχος του φιλμ φτάσει τα 6-10 mm. Μία αντλία ανακυκλοφορίας χρησιμοποιείται για να παρέχει ελάχιστη ροή για τη βροχή του παγοποιητή.[23]



Σχήμα 7: Απεικόνιση του συστήματος αποθήκευσης θρυματοποίησης πάγου

Η επίδοση του συστήματος κατά τη φόρτισή του παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως ποσότητας πάγου στη δεξαμενή, χαρακτηριστικό που δεν συναντάται σε άλλες εφαρμογές αποθήκευσης πάγου. Ο κύκλος φόρτισης διαρκεί από 10 έως 30 min. Ο χρόνος αποφόρτισης εξαρτάται από το σύστημα ελέγχου, την εγκατάσταση του ατμοποιητή και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτή λαμβάνει χώρα και κυμαίνεται από 20 έως 90 sec. Ο αποθηκευμένος πάγος μπορεί να λειώσει πού γρήγορα, αν είναι κατάλληλα βρεγμένος. Ο πάγος που παράγεται από 24ωρη φόρτιση της εγκατάστασης μπορεί να λειώσει σε λιγότερο από 3 λεπτά αν υπάρχει άμεση ανάγκη ψυκτικού φορτίου. Οι θερμοκρασίες αποφόρτισης από μία καλά σχεδιασμένη δεξαμενή αποθήκευσης παραμένουν περίπου μεταξύ 1 και 2°C έως ότου το 80-90% του δημιουργημένου πάγου έχει αφαιρεθεί. Σε αυτό το σημείο η επιφάνεια επαφής μεταξύ πάγου και του νερού στη δεξαμενή έχει ελαττωθεί αρκετά, οπότε η θερμοκρασία αυξάνεται. Το σύστημα θρυμματοποίησης πάγου μπορεί να λειτουργήσει σαν παραγωγός πάγου και σαν ψύκτης νερού. Η επιλογή μεταξύ των δύο λειτουργιών γίνεται αυτόματα και εξαρτάται από τη θερμοκρασία του νερού που εισέρχεται στον εξατμιστή. Αν το νερό βρίσκεται κοντά στο σημείο πήξης του, επιλέγεται η λειτουργία του παγοποιητή και ο κύκλος απόψυξης ενεργοποιείται περιοδικά ώστε να απελευθερώνεται ο πάγος. Στη λειτουργία του παγοποιητή το σύστημα παράγει θερμοκρασίες ατμοποίησης στο εύρος των -9 °C με -3°C και στη λειτουργία του ψύκτη 1°C ή και υψηλότερες. Το σύστημα θρυμματοποίησης ξεχωρίζει τις λειτουργίες παραγωγής πάγου και αποθήκευσης ενέργειας, πράγμα που κάνει την εγκατάσταση ευέλικτη ώστε να χρησιμοποιείται σε περιόδους μη-αιχμής. Αφού ο πάγος δεν αποθηκεύεται πάνω στην επιφάνεια παραγωγής, δεν είναι απαραίτητη η πλήρης τήξη του πάγου κάθε μέρα για τη διατήρηση υψηλού βαθμού απόδοσης λειτουργίας. [23]

Το σύστημα και η δεξαμενή αποθήκευσης είναι εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα πράγμα το οποίο σημαίνει ότι συστήματα ελέγχου ποιότητας του νερού και συστήματα προστασίας ενάντια της διάβρωσης είναι απαραίτητα, αφού το νερό στη δεξαμενή έρχεται συνεχώς σε επαφή με τον αέρα λόγω της ανακυκλοφορίας. Η δεξαμενή είναι γενικότερα απλή, χωρίς εσωτερικά εξαρτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα αποθήκευσης. Η γεωμετρία της δεξαμενής παρόλα αυτά μπορεί να επηρεάσει την αποθηκευτική ικανότητα της μονάδας, καθώς η γωνία με την οποία τα φιλμ του πάγου πέφτουν στη δεξαμενή μπορεί να έχουν σαν συνέπεια όταν η τελευταία γεμίζει, να

αφήνουν κενά στο εσωτερικό της όπου δεν υπάρχει καθόλου πάγος, πράγμα που προφανώς ελαττώνει την ποσότητα του πάγου που τελικά δέχεται η δεξαμενή. Οι δεξαμενές αυτές είναι αρκετά συχνά χτισμένες στον τόπο της εγκατάστασης, τσιμεντένιες και παραλληλεπίπεδες. Παρόλα αυτά συναρμολογίσιμο τσιμέντο (έτοιμοι τοίχοι), χάλυβας ή υαλοβάμβακας είναι υλικά τα οποία επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή δεξαμενής. Οι επιφάνειες του ατμοποιητή συνήθως είναι από ανοξείδωτο χάλυβα. [23]

2.3.2.2.1.3 Πάγος σε μικροκάψουλες

Αυτή η τεχνολογία γίνεται με μικροκάψουλες γεμάτες με νερό και εμβαπτισμένες σε δεξαμενή αποθήκευσης. Το νερό στο εσωτερικό της κάψουλας παγώνει και ο πάγος λιώνει όταν το δευτερεύον ψυκτικό πχ γλυκόλη/νερό, κυκλοφορεί μέσα στη δεξαμενή. Η θερμοκρασία φόρτισης είναι από -6 έως -3°C. [23]

Τα πλαστικά αυτά δοχεία μπορεί να είναι παραλληλεπίπεδα, σφαιρικά ή δακτυλιοειδή. Ο αριθμός των καψουλών που απαιτούνται για την εκάστοτε εφαρμογή εξαρτάται από την απαιτούμενη αποθηκευτική ικανότητα. Για παράδειγμα, 3.5kW αποθηκευτικής ικανότητας μπορούν να παραχθούν με περίπου 70 σφαίρες διαμέτρου 10cm. Η αποθήκευση πάγου σε κάψουλες απαιτεί περίπου 0.019 m³ με 0.023 m³ δεξαμενής ανά kWh διαθέσιμης αποθηκευτικής ικανότητας. Η δεξαμενή μπορεί να είναι ανοικτή και σε ατμοσφαιρική πίεση, ή κλειστή και υπό πίεση, κατασκευασμένη από χάλυβα, τσιμέντο, υαλοβάμβακα κλπ. Οι κάψουλες είναι κατασκευασμένες από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο και είναι σχεδιασμένες να ακολουθούν την διαστολή του παγωμένου νερού. Σε δεξαμενές με σφαιρικές κάψουλες το δευτερεύον ψυκτικό ρέει κάθετα στη δεξαμενή, ενώ για παραλληλεπίπεδες κάψουλες ρέει οριζόντια. Το σχήμα και το μέγεθος της δεξαμενής περιορίζεται μόνο από την τελική ικανότητα της δεξαμενής να εξασφαλίζει ίδια θερμοροή μεταξύ των δοχείων (κάψουλες). [23]

Ένα τέτοιο σύστημα ενσωματωμένου πάγου μπορεί να λειτουργήσει με τον ψύκτη ανάντη ή κατάντη, αντίστοιχα. Είναι επίσης δυνατή μια σύνδεση των δεξαμενών και του ψύκτη εν παραλλήλω.

Ο πάγος σε μικροκάψουλες έχει ένα σταθερά ελαττούμενο ρυθμό αποφόρτισης, αν διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία αποφόρτισης, ή μια σταθερά αυξανόμενη θερμοκρασία, αν διατηρείται σταθερός ο ρυθμός αποφόρτισης. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι αποτέλεσμα της συνεχώς ελαττούμενης επιφάνειας πάγου η οποία έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα του δοχείου καθώς λιώνει ο πάγος. [23]

Οι κάψουλες αυτές είναι ευαίσθητες στο φαινόμενο της υπόψυξης, πριν ξεκινήσει η παραγωγή πάγου. Η υπόψυξη, που λαμβάνει χώρα μόνο σε πλήρως αποφορτισμένες δεξαμενές όπου δεν υπάρχει καθόλου πάγος στο εσωτερικό τους, έχει σαν αποτέλεσμα ελαττωμένους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας στην αρχή της φόρτισης. Προσθέτοντας συμπυκνωτικούς παράγοντες η επίδραση του φαινομένου της υπέρψυξης μπορεί να εξομαλυνθεί. [23]

2.3.2.2.1.4 Παγοπολτός

Σε ένα σύστημα παγοπολτού (ice slurry), δημιουργούνται κομμάτια πάγου από μία γεννήτρια πάγου σε διμερές υγρό μίγμα (πχ νερό και γλυκόλη) και μεταφέρονται στη δεξαμενή αποθήκευσης, όπου τα κομμάτια πάγου αποθηκεύονται μαζί με νερό. Το διφασικό μίγμα οδηγείται από τη δεξαμενή στα σημεία που απαιτείται ψυκτικό φορτίο μέσω αντλιών, όπου ο πάγος του μίγματος λιώνει. Το ζεστό νερό επιστροφής επανατροφοδοτείται είτε στην παγογεννήτρια διάταξη είτε κατ' ευθείαν στη δεξαμενή για να ψυχθεί εκ νέου. Το σύστημα αποθήκευσης μπορεί να έχει διάφορες διατάξεις, οι πιο συνηθισμένες εκ των οποίων είναι οι μέθοδοι διανεμημένης και κεντρικής αποθήκευσης. [23]

Συστήματα διανεμημένης αποθήκευσης [23]

Σε ένα σύστημα διανεμημένης αποθήκευσης το διφασικό μίγμα πάγου οδηγείται σε ένα αριθμό από δεξαμενές και αποθηκεύεται. Κάθε τέτοια δεξαμενή βρίσκεται εγκατεστημένη σε κάθε ξεχωριστό κτίριο του δικτύου της ψυκτικής εγκατάστασης. Το διφασικό μίγμα πάγου εισέρχεται στη δεξαμενή όπου τα κομμάτια πάγου διαχωρίζονται από το νερό λόγω διαφοράς ειδικού βάρους. Το σύστημα έτσι έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί νερό χωρίς πάγο για τις ψυκτικές του ανάγκες.

Οι δεξαμενές αποθήκευσης του διανεμημένου συστήματος παρέχουν μία ρύθμιση του συστήματος διανομής και του επιμέρους ψυκτικού φορτίου κάθε κτιρίου.

Η απόζευξη του συστήματος ψύξης επιτρέπει στο σύστημα διανομής να παρέχει το μέσο ψυκτικό φορτίο και όχι το ψυκτικό φορτίο αιχμής. Εάν το μέσο ψυκτικό φορτίο είναι αισθητά χαμηλότερο από το φορτίο αιχμής, μπορεί να εγκατασταθεί δίκτυο σωληνώσεων διανομής μικρότερης διαμέτρου. Για να μπορέσει το σύστημα να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις του μέγιστου ψυκτικού φορτίου πρέπει η παραγωγή διφασικού μίγματος νερού/πάγου να είναι συνεχής. Αυτό το μίγμα οδηγείται μέσω αντλιών στις επιμέρους δεξαμενές. Ανάλογα με την ώρα της ημέρας, αν το φορτίο του κτιρίου είναι χαμηλό, το μίγμα θα συγκεντρωθεί στη δεξαμενή. Όταν το ψυκτικό φορτίο αυξηθεί, η δεξαμενή φορτίζεται από το σύστημα διανομής και ταυτόχρονα αποφορτίζεται για να ικανοποιήσει τις αυξημένες ψυκτικές ανάγκες.

Σε περιόδους όπου το ψυκτικό φορτίο είναι γενικά χαμηλό, το νερό επιστροφής ενδέχεται να βρίσκεται σε θερμοκρασία αρκετά χαμηλότερη από το σημείο σχεδίασης, αφήνοντας έτσι αχρησιμοποίητη ψυκτική ικανότητα. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας σωλίνες για ψυκτική ικανότητα λίγο μεγαλύτερη από τη μέση υπολογισμένη, ώστε οι προαναφερθείσες απώλειες να περιορίζονται κατά το δυνατόν.

Γενικά το σύστημα διανεμημένης αποθήκευσης είναι βέλτιστα οικονομικό όταν ο λόγος φορτίου αιχμής/μέσου είναι μεγαλύτερος του 2 και όταν ο λόγος λανθάνουσας / αισθητής θερμότητας μεγαλύτερος του 1.

Συστήματα κεντρικής αποθήκευσης [23]

Στο σύστημα κεντρικής αποθήκευσης, η ψυκτική εγκατάσταση εφοδιάζεται με μία κεντρική δεξαμενή, η οποία είναι τοποθετημένη κοντά στη μονάδα παραγωγής της ψύξης. Και σε αυτή τη διάταξη υπάρχει το πλεονέκτημα της ρύθμισης μεταξύ της μονάδας παραγωγής ψύξης και της πραγματικής ψυκτικής απαίτησης. Στο σύστημα κεντρικής αποθήκευσης το σύστημα διανομής δεν είναι αποχωρισμένο από το φορτίο του επιμέρους κτιρίου και ακολουθεί την πραγματική ψυκτική απαίτηση του κάθε κτιρίου ξεχωριστά. Ως εκ τούτου η διάμετρος των σωλήνων διανομής θα είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τους σωλίνες του συστήματος διανεμημένης αποθήκευσης.

Τα συστήματα κεντρικής αποθήκευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν βάσει δύο στρατηγικών λειτουργίας. Το διφασικό μίγμα νερού/ πάγου μπορεί να βρίσκεται αποθηκευμένο σε συγκεκριμένο σημείο, να μην κυκλοφορεί στο σύστημα και να χρησιμοποιείται για την ψύξη του θερμού νερού επιστροφής, ώστε να επιτυγχάνεται η συνεχής ανακυκλοφορία νερού στην ψυκτική εγκατάσταση σε θερμοκρασία πολύ κοντά στο σημείο στερεοποίησής του. Εναλλακτικά, το μίγμα μπορεί να αποθηκεύεται και να κυκλοφορεί στο σύστημα κατά τις ώρες ψυκτικού φορτίου αιχμής. Με οποιαδήποτε από τις δύο στρατηγικές, ο όγκος της αποθήκευσης είναι ελαττωμένος σε σχέση με ένα σύστημα κρύου νερού. Οι δε δεξαμενές αποθήκευσης για το διφασικό μίγμα μπορούν από άποψης κόστους να ελαττωθούν κατά 60% σε σύγκριση με τις δεξαμενές μιας συμβατικής ψυκτικής διάταξης.

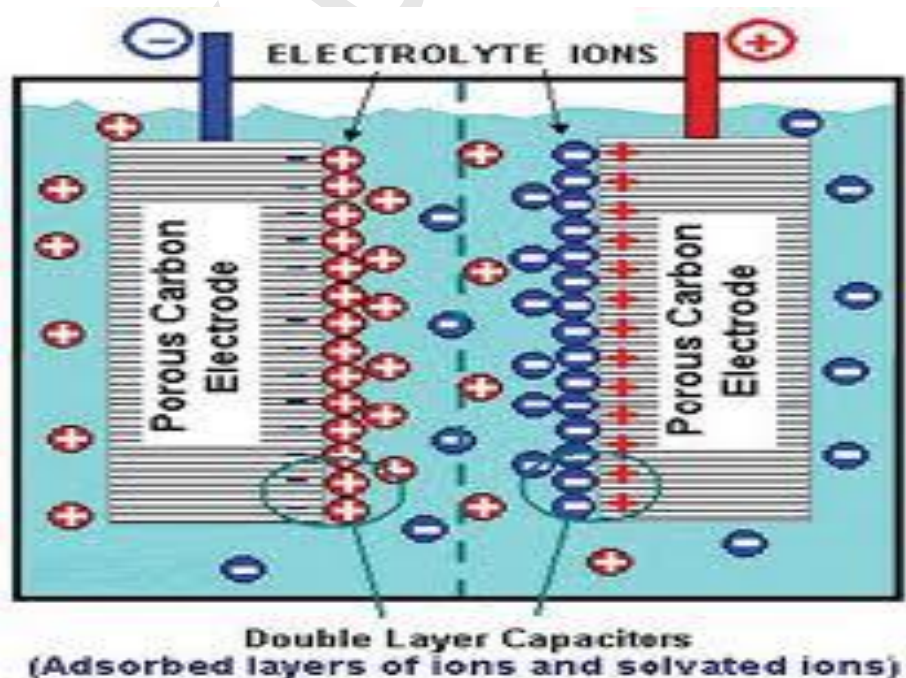
Προκειμένου για να αντιμετωπίσει το σύστημα το μέγιστο φορτίο σχεδίασης, το σύστημα ψύξης πρέπει να λειτουργεί συνεχώς. Σε περιόδους μικρής ψυκτικής απαίτησης το παραγόμενο διφασικό μίγμα οδηγείται στη δεξαμενή αποθήκευσης, από όπου απάγεται είτε μίγμα είτε κρύο νερό κατά περίπτωση, για την αντιμετώπιση αυτών των χαμηλών απαιτήσεων. Άρα για φορτία μικρότερα από το μέσο φορτίο λειτουργίας, η δεξαμενή φορτίζεται. Αντίστοιχα σε περιόδους υψηλού ψυκτικού φορτίου, η δεξαμενή αδειάζει για να ικανοποιηθεί το φορτίο αυτό, οπότε γίνεται και η αποφόρτισή της.

2.4 Άλλες Μορφές Αποθήκευσης Ενέργειας

2.4.1 Υπερπυκνωτές

Ο υπερπυκνωτής είναι ένας ηλεκτροχημικός πυκνωτής (EC capacitor ή Ultracapacitor ή SuperCapacitor) και σχετίζεται τόσο με μια μπαταρία όσο και με έναν πυκνωτή. Έτσι, η τάση ενός στοιχείου περιορίζεται σε μερικά Volt. Αποτελεί μια τεχνολογία που αξιοποιείται για την εξυπηρέτηση των γρήγορων και απότομων μεταβολών των φορτίων. Ως τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας βρίσκονται στα πρώτα στάδια της ανάπτυξής τους. [14]

Ένας υπερπυκνωτής αποτελείται από δυο αντίθετα φορτισμένα ηλεκτρόδια, έναν διαχωριστή, τον ηλεκτρολύτη και συλλέκτες ρεύματος. Ο υπερπυκνωτής χρησιμοποιεί ένα μοριακά λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη σαν διηλεκτρικό για το διαχωρισμό της φόρτισης. Η εμφάνιση του διηλεκτρικού γίνεται κάθε φορά που ασκείται τάση στους ακροδέκτες του. Με τον τρόπο αυτό, το φορτίο αποθηκεύεται ηλεκτροστατικά (δεν λαμβάνει χώρα χημική αντίδραση) μέσα στα πολωμένα στρώματα υγρού που βρίσκεται ανάμεσα στον ηλεκτρολύτη και το ηλεκτρόδιο. [14]



Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας των υπερπυκνωτών

2.4.1.1 Είδη Υπερπυκνωτών - Χαρακτηριστικά

Ανάλογα με την τεχνολογία των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλεκτροδίων, οι υπερπυκνωτές μπορούν να ταξινομηθούν σε ηλεκτροχημικούς πυκνωτές διπλού στρώματος (electrochemical double layer capacitors, ECDL) και σε ψευδοπυκνωτές (pseudocapacitors). Οι υβριδικοί πυκνωτές (hybrid capacitors) είναι επίσης μια νέα κατηγορία υπερπυκνωτών. Δεδομένου ότι οι ECDL υπερπυκνωτές είναι συνήθως οι λιγότερο δαπανηροί στην κατασκευή τους και οι πιο διαδεδομένοι τύποι υπερπυκνωτών δίνεται έμφαση σε αυτούς στη συνέχεια. [2,7,10]

Οι ECDL υπερπυκνωτές έχουν μια κατασκευή διπλού στρώματος που αποτελείται από ηλεκτρόδια, εμβαπτισμένα σε υγρό ηλεκτρολύτη (που περιέχει επίσης τον διαχωριστή). Ως υλικό ηλεκτροδίου χρησιμοποιείται συνήθως πορώδης ενεργός άνθρακας. Οι πρόσφατες τεχνολογικές πρόοδοι έχουν επιτρέψει να χρησιμοποιηθούν επίσης ως υλικό ηλεκτροδίου αεροζέλ άνθρακα και νανοσωληνές άνθρακα. Ο ηλεκτρολύτης είναι είτε οργανικός είτε υδατώδης. Οι οργανικοί ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούν συνήθως ακετονιτρίλιο και επιτρέπουν ονομαστική τάση μέχρι 3 Volt. Οι υδατώδεις ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούν είτε οξέα είτε βάσεις (H_2SO_4 , KOH), αλλά η ονομαστική τάση περιορίζεται σε 1 Volt. [6,11,14]

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, τα ηλεκτρικά φορτισμένα ιόντα στον ηλεκτρολύτη μεταναστεύουν προς τα ηλεκτρόδια αντίθετης πολικότητας, εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των φορτισμένων ηλεκτροδίων που έχει δημιουργηθεί από την εφαρμοζόμενη τάση. Κατά συνέπεια, παράγονται δύο ξεχωριστά φορτισμένα στρώματα. Παρόμοια με μια μπαταρία, ο διπλού στρώματος υπερπυκνωτής βασίζεται στην ηλεκτροστατική δράση. Δεδομένου όμως ότι δε λαμβάνει χώρα χημική αντίδραση, το αποτέλεσμα είναι εύκολα αναστρέψιμο με ελάχιστη υποβάθμιση σε μεγάλη φόρτιση ή υπερφόρτιση και η τυπική διάρκεια ζωής είναι εκατοντάδες χιλιάδες κύκλοι. Ο περιοριστικός παράγοντας από την άποψη της διάρκειας ζωής μπορεί να είναι τα έτη λειτουργίας. Συγκεκριμένα έχει αναφερθεί διάρκεια ζωής μέχρι 12 έτη. [6,11,14]

Ένας άλλος περιοριστικός παράγοντας είναι το υψηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης. Αυτό το ποσοστό είναι πολύ υψηλότερο στις μπαταρίες, που φθάνουν σε ένα επίπεδο 14% της ονομαστικής ενέργειας κάθε μήνα. Εκτός από την υψηλή αντοχή σε μεγάλες φορτίσεις, το γεγονός ότι καμία χημική αντίδραση δεν πραγματοποιείται σημαίνει ότι οι

υπερπυκνωτές μπορούν εύκολα να φορτιστούν και να εκφορτιστούν σε δευτερόλεπτα, πολύ ταχύτερα δηλαδή από τις μπαταρίες. Παράλληλα, ούτε θερμότητα ούτε επικίνδυνες ουσίες απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Η ενεργειακή απόδοση είναι πολύ υψηλή και κυμαίνεται από 85% έως 98%. [6,11,14]

Συγκριτικά με τους συμβατικούς πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές έχουν σημαντικά μεγαλύτερο εμβαδόν επιφάνειας ηλεκτροδίου. Η ποσότητα του ρεύματος που μπορεί να απορροφήσει ένας συμβατικός πυκνωτής εξαρτάται άμεσα από την εκτεθειμένη επιφάνεια των ηλεκτροδίων του. Η τεχνολογία, όμως, των υπερπυκνωτών βασίζεται στην ανάπτυξη «ενεργούς επιφάνειας» σε ολόκληρη τη μάζα των ηλεκτροδίων και όχι μόνο στην εξωτερική τους επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο συνολικός όγκος σε ένα μικρό μόλις κλάσμα αυτού των συμβατικών πυκνωτών και πολλαπλασιάζεται η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα βάρους. Έχει αναφερθεί χωρητικότητα υπερπυκνωτή 5.000 F, ενώ η ενεργειακή του πυκνότητα φθάνει τις 5 Wh/kg, σε αντίθεση με τους συμβατικούς πυκνωτές, που παρουσιάζουν τυπική ενεργειακή πυκνότητα 0,5 Wh/kg. Επιπρόσθετα, η πυκνότητα ισχύος των υπερπυκνωτών είναι εξαιρετικά υψηλή, παίρνοντας τιμές όπως 10.000 W/kg, πολύ μεγαλύτερη δηλαδή από τις πυκνότητες ισχύος των μπαταριών. Παρόλα αυτά, λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας του υπερπυκνωτή, το υψηλό αυτό ποσό ισχύος θα είναι διαθέσιμο μόνο για πολύ μικρή χρονική διάρκεια. [14]

Το κόστος του υπερπυκνωτή είναι ένα σημαντικό ζήτημα για την περαιτέρω εμπορική χρήση του σε βιομηχανικές εφαρμογές. Συγκριτικά με τα κόστη των καθιερωμένων τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης, όπως οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, ο υπερπυκνωτής εμφανίζει σημαντικά υψηλότερο κόστος. Επομένως, είναι απαραίτητη η δραστηκή μείωση του κόστους του ιδιαίτερα στους τομείς του άνθρακα, του ηλεκτρολύτη και του διαχωριστή. Σήμερα, η υψηλή ικανότητα αποθήκευσης ισχύος των υπερπυκνωτών σε συνδυασμό με τους πολύ σύντομους κύκλους εκφόρτισης, καθιστά ιδανική την εφαρμογή τους στην παροχή συμπληρωματικής φόρτισης για την ικανοποίηση ξαφνικών ενεργειακών αναγκών. [6,14]

Ωστόσο, πρόσφατες εξελίξεις στην κατασκευή του υπερπυκνωτή έχουν δείξει ότι η χρήση των κάθετα ευθυγραμμισμένων, μονοφλοιϊκών νανοσωλήνων του άνθρακα (οι οποίοι είναι μόνο μερικές ατομικές διαμέτροι σε πλάτος) αντί του πορώδους, άμορφου άνθρακα που συνήθως χρησιμοποιείται, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την χωρητικότητα και την πυκνότητα ισχύος του υπερπυκνωτή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το εμβαδόν της επιφάνειας των ηλεκτροδίων αυξάνεται εντυπωσιακά με τη χρήση τέτοιων υλικών. Ενεργειακές πυκνότητες της τάξης των 60 Wh/kg και πυκνότητες ισχύος της τάξης των 100.000 W/kg μπορούν να επιτευχθούν με αυτήν την τεχνολογία. [6,11,14]

Οι ψευδοπυκνωτές (pseudocapacitors) και οι υβριδικοί πυκνωτές (hybrid capacitors) είναι επίσης υποσχόμενες τεχνολογίες, επειδή μπορούν να επιτύχουν βελτιωμένες αποδόσεις σε τομείς που οι ECDL παρουσιάζουν κατώτερες δυνατότητες. Οι ψευδοπυκνωτές χρησιμοποιούν οξειδία μετάλλων ή αγώγιμα πολυμερή ως υλικό ηλεκτροδίου και μπορούν να αποθηκεύσουν 80% περισσότερη ενέργεια από τους ίδιων διαστάσεων ηλεκτροχημικούς πυκνωτές διπλού στρώματος, χάρη στη μεγαλύτερη πυκνότητα των ηλεκτροδίων τους. Οι υπερπυκνωτές μεταλλικών οξειδίων χρησιμοποιούν υδατώδεις ηλεκτρολύτες και μεταλλικά οξείδια, όπως το οξείδιο του ρουθηνίου, το οξείδιο του ιριδίου και το οξείδιο του νικελίου. Παρόλα αυτά, οι υπερπυκνωτές μεταλλικών οξειδίων είναι πολύ ακριβοί και μπορεί να «πάσχουν» από χαμηλότερες αποδόσεις και χαμηλότερη τάση, εξαιτίας της ανάγκης για υδατώδεις ηλεκτρολύτες. Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές μπορούν να επιτύχουν ακόμα υψηλότερες πυκνότητες ενέργειας και ισχύος από τους άλλους υπερπυκνωτές, είναι όμως ακόμα μια νέα τεχνολογία, που απαιτεί περισσότερη έρευνα για πληρέστερη κατανόηση. [6,11,14]

Προς το παρόν, υπερπυκνωτές πολύ μικρού μεγέθους της τάξης των 7 έως 10 Watt, διατίθενται στο εμπόριο για εφαρμογές ποιότητας ισχύος από την πλευρά του καταναλωτή και βρίσκονται συνήθως σε οικιακές ηλεκτρικές συσκευές. Η εξέλιξη για τους πυκνωτές μεγαλύτερης κλίμακας έχει εστιαστεί στα ηλεκτρικά οχήματα. Μέχρι σήμερα, η ποιότητα ισχύος μικρής κλίμακας (<250 kW) θεωρείται ως η πιο ελπιδοφόρος ηλεκτροπαραγωγική χρήση για τους υπερπυκνωτές. [6,14]

2.4.2 Υπεραγώγιμα υλικά

Ένας άλλος τύπος διάταξης που αναπτύσσεται κυρίως για την εξομάλυνση των διακυμάνσεων της τάσης του δικτύου και την ενίσχυση της ισχύος σε ώρες αιχμής, αλλά και με προοπτική για εφαρμογή σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι το υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES). [14]

Η τεχνολογία εκμεταλλεύεται τις εξελίξεις των υπεραγώγιμων υλικών και την μείωση κόστους των ηλεκτρονικών ισχύος. Η αποθήκευση γίνεται στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος σε ένα πηνίο από υπεραγώγιμο υλικό. Συγκεκριμένα, ένα σύστημα SMES επιτυγχάνεται την αποθήκευση με την είσοδο συνεχούς ρεύματος σε ένα πηνίο από υπεραγώγιμα καλώδια σχεδόν μηδενικής αντίστασης από συνήθως ίνες NbTi σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (-270°C). Το ρεύμα αυξάνει κατά τη φόρτιση και μειώνεται κατά την εκφόρτιση και απαιτεί τη μετατροπή σε εναλλασσόμενο ρεύμα. [11-14]

Προκειμένου να διατηρηθεί το πηνίο στην υπεραγώγιμη κατάστασή του, βυθίζεται σε υγρό ήλιο που περιέχεται σε έναν μονωμένο υπό κενό κρυστάτη. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης του υπεραγώγιμου πηνίου είναι τέτοια ώστε να εμφανίζουν σχεδόν μηδενική αντίσταση στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και να οδηγούν τον ηλεκτρισμό, σχεδόν χωρίς απώλειες, σε συστήματα ειδικά σχεδιασμένα για να “εγκλωβίζουν” αποτελεσματικά την ηλεκτρική ενέργεια μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε διατάξεις της τάξης των 1 - 10 MW. Οι διατάξεις μικροσυστημάτων διατίθενται για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. [14]

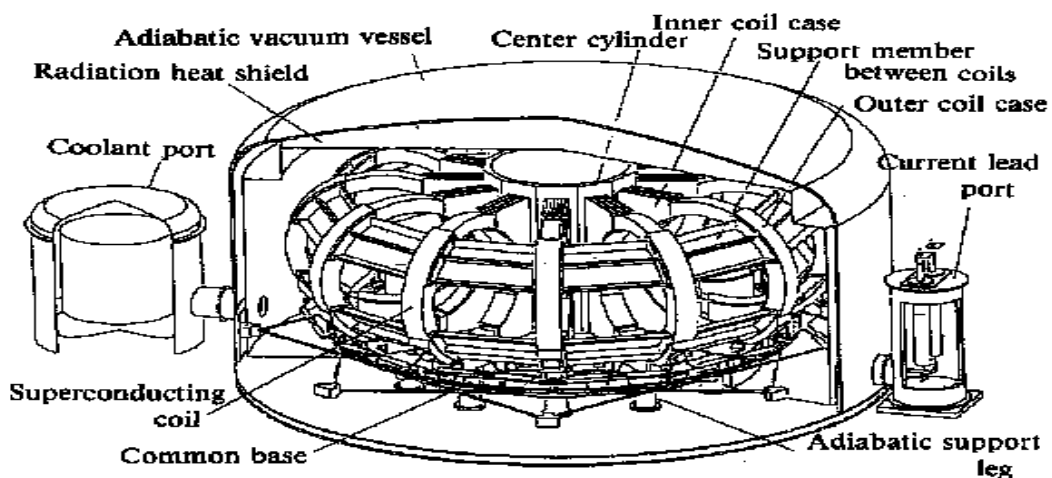
Τέλος, νέες παρουσιάσεις εφαρμογών διανομής ενέργειας στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη καθιστούν φανερό ότι και τα συστήματα υπεραγώγιμης ενεργειακής μαγνητικής αποθήκευσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να συμπληρώσουν τις ανανεώσιμες πηγές, ειδικά όπου υπάρχει ήδη κατάλληλη υποδομή ψύξης. Τελευταία εμφανίστηκαν υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγοί (High Temperature Superconductors), οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες σύμφωνες με τη βιομηχανικά τυποποιημένη ψύξη υγρού αζώτου, που είναι περισσότερο συμφέρουσα από την κρυογόνο ψύξη. Λόγω αυτού του γεγονότος, αρκετές αμερικανικές

επιχειρήσεις έχουν καταφέρει να κυκλοφορήσουν στο εμπόριο υπεραγώγιμα καλώδια και ταινίες. [11-14]

2.4.2.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του συστήματος SMES είναι η πολύ μικρή χρονική καθυστέρηση κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης. Η ισχύς διατίθεται σχεδόν στιγμιαία και η πολύ υψηλή παροχή ισχύος διατίθεται για σύντομη χρονική περίοδο. Ακόμα, η συχνή φόρτιση και εκφόρτιση δεν έχει καμία επίδραση στη διάρκεια ζωής του. Τα συστήματα αυτά έχουν μεγάλο κύκλο ζωής και, κατά συνέπεια, είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν σταθερή, πλήρη ανακύκλωση και συνεχή ρυθμό λειτουργίας. Η ενεργειακή απόδοση ενός συστήματος υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 97%. [14]

Στα μειονεκτήματα των συστημάτων SMES συγκαταλέγονται η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, αλλά και η αστάθεια που εμφανίζουν κυρίως τα μεγάλα συστήματα αυτού του είδους, η οποία προκαλείται από το δημιουργούμενο ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Επίσης, μειονέκτημα αποτελεί η απαίτηση του συστήματος ψύξης γιατί καθιστά το σύστημα πολύπλοκο και αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης και της λειτουργίας. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση των μεγάλων συστημάτων υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης, το προκύπτον μαγνητικό πεδίο μπορεί να έχει και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.



Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση συστήματος υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης

2.5 Σύνοψη Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ηλεκτρικής και Θερμικής Ενέργειας

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι διαθέσιμες τεχνολογίες για αποθήκευση ενέργειας. Η παρουσίαση των τεχνολογιών έγινε βάσει της μορφής στην οποία αποθηκεύεται η ενέργεια και συνεπώς οι τεχνολογίες ταξινομήθηκαν σε μηχανικής, θερμικής, χημικής και άλλες. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών αποθήκευσης της ενέργειας. Σε αυτή την παράγραφο οι τεχνολογίες ταξινομούνται και παρουσιάζονται βάσει των τεχνολογιών που αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια και των τεχνολογιών που αποθηκεύουν θερμική ενέργεια.

Στους Πίνακες 10-12 παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών που αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια. Ο Πίνακας 10 αφορά σε τεχνολογίες ηλεκτρικής αποθήκευσης μικρής ισχύος, ο Πίνακας 11 αφορά σε τεχνολογίες αποθήκευσης μεσαίας ισχύος και τέλος, ο πίνακας 12 αφορά αντίστοιχα σε τεχνολογίες ηλεκτρικής αποθήκευσης μεγάλης ισχύος. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται ενδεικτικά, καθώς οι περισσότερες τεχνολογίες έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και ισχύος και επομένως μπορούν να εφαρμόζονται τόσο σε ενεργειακά συστήματα χαμηλής ισχύος όσο και σε συστήματα μέσης ισχύος.

Στην συνέχεια παρατίθενται επεξηγήσεις σε σχέση με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των διαφόρων τεχνολογιών ηλεκτρικής αποθήκευσης:

- Η απόδοση των συστημάτων αφορά την απόδοση ενός κύκλου φόρτισης – εκφόρτισης, δηλαδή κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μια άλλη μορφή ενέργειας κατά την περίοδο φόρτισης της αποθήκης και την μετατροπή εκ νέου σε ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια εκφόρτισης. Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή ο κύκλος φόρτισης - εκφόρτισης συνοδεύεται από απώλειες είτε μικρές είτε μεγάλες.
- Επιπλέον, οι απώλειες αυτές ιδιαίτερα στην αποθήκευση σε μπαταρίες, μεγαλώνουν καθώς υποβαθμίζονται τα συστήματα με την πάροδο του χρόνου και έτσι η απόδοσή τους μειώνεται. Ακόμα ένας δείκτης – χαρακτηριστικό, το οποίο περιλαμβάνεται στους πίνακες για τις μπαταρίες αποτελεί η υποβάθμιση σε μεγάλο βάθος εκφόρτισης (depth of discharge – DOD). Οι περισσότερες από

αυτές τις τεχνολογίες επηρεάζονται αρνητικά από βαθιές εκφορτίσεις της αποθηκευμένης ενέργειας τους και αυτό επηρεάζει συνεπώς την απόδοση κύκλου φόρτισης – εκφόρτισης και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

- Τέλος, η καταλληλότητα για εφαρμογές ισχύος και εφαρμογές ενέργειας που αναφέρεται στα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών σχετίζεται με την γενικότερη δυνατότητα κάθε τεχνολογίας να έχει εφαρμοσιμότητα σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ισχύ και υψηλή αποθηκευμένη ενέργεια αντίστοιχα. Γενικότερα, οι εφαρμογές ισχύος απαιτούν αποθήκευση με γρήγορη απόκριση και μεγάλη ισχύ και προορίζονται για περιπτώσεις ποιότητας ισχύος και αξιοπιστίας του δικτύου. Οι εφαρμογές ενέργειας σχετίζονται με την ενεργειακή διαχείριση και αφορούν περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης με στόχο την εξομάλυνση μεταξύ παραγωγής και ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας και την ελαχιστοποίηση της εγκατεστημένης ισχύος στην παραγωγική μονάδα. Εκτενέστερη αναφορά στις εφαρμογές αυτές γίνεται στο κεφάλαιο 4.

Πίνακας 10: Συνοπτικός πίνακας κυριότερων χαρακτηριστικών τεχνολογιών ηλεκτρικής αποθήκευσης μικρής ισχύος. [6,11,26-31]

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΜΙΚΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ					
	Σφόνδυλοι (FW)	Υπερπυκνωτές (SC)	Μπαταρίες Μετάλλου – Αέρα (M/A)	Μπαταρίες Λιθίου (Li)	Μπαταρίες Νικελίου (Ni)
Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/kg)	5-100	0,1-17	110-1000	80-150	15-120
Πυκνότητα Ισχύος (W/kg)	1000	N/A	100-200	50-340	75-1000
Ισχύς	3-5 kW (υψηλής ενέργειας), 8 kW-5 MW (υψηλής ισχύος)	6-100 kW (υψηλής ενέργειας), 8 kW-5 MW (υψηλής ισχύος)	2 - 10 kW	1 - 100 kW	1 kW- 5 MW
Απόδοση (%)	85-95	85-98	40-50	90-100	60-65
Διάρκεια Ζωής (κύκλοι)	2-6 10 ⁴ , >20 y	<10 ⁶ , 10 y	100-300	3000-6000	1000-3000, 12-15 y
Αυτοεκφόρτιση	1-10% / hour	14%/ month	5-10% month	5-10% month	2-30% month
Κόστος εγκατάστασης	, 300 €/kW	3800-4000 €/kWh	-	175 €/kW	175 €/kW
Ανάπτυξη	Ναι	-	Αναπτυσσόμενη	Ναι	Ναι
Χρόνος Απόκρισης	ταχύτατη	ναι	Δίνει την ισχύ σε 1 msec	γρήγορη	γρήγορη
Υποβάθμιση σε DOD	Όχι	-	-	Ναι	Ναι
Πλεονεκτήματα	πυκνότητα ισχύος	απόδοση, διάρκεια ζωής	ενεργειακή πυκνότητα, κόστος	πυκνότητα ισχύος&ενέργειας, απόδοση	πυκνότητα ισχύος & ενέργειας
Μειονεκτήματα	ενεργειακή πυκνότητα	Πυκνότητα ενέργειας, τοξικά&διαβρωτικά στοιχεία	Απόδοση	Κόστος, ανακύκλωση	Τοξικότητα Cd, ανακύκλωση
Καταλληλότητα για εφαρμογές ισχύος /ενέργειας	Μεγάλη / Μικρή	Μεγάλη / Μέτρια	Μεγάλη / Μέτρια	Μεγάλη / Μέτρια	Μεγάλη / Μέτρια

Πίνακας 11: Συνοπτικός πίνακας κυριότερων χαρακτηριστικών τεχνολογιών ηλεκτρικής αποθήκευσης μεσαίας ισχύος. [6,11,26-31]

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΜΕΣΑΙΑΣ ΙΣΧΥΟΣ					
	Μολύβδου Οξέος (L/A)	Θείου-Νατρίου (NaS)	VRB (ροής)	ZnBr (ροής)	Αποθήκευση H ₂
Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/kg)	15-45	100-240	10-70	30-70	120-142 MJ/kg
Πυκνότητα Ισχύος (W/kg)	180	N/A	N/A	N/A	N/A
Ισχύς	1 kW - 20 MW	80 kW - 10 MW	80 kW - 30 MW	80 kW - 30 MW	10 ⁶ -10 ⁷ / m ³ μεγάλης κλίμακας αποθήκευση
Απόδοση (%)	60-95	85-90	65-85	65-85	40
Διάρκεια Ζωής (κύκλοι)	300-1500	2500-6500	2000-5000	2000-5000	N/A
Αυτοεκφόρτιση	5-20% month	N/A	Όχι	Όχι	3% day (liquid)
Κόστος εγκατάστασης	175 €/kW	150 €/ kW	175€/kW	175 €/kW	(1995 prices) 625 -2080 \$/kg (gas), 31-700 \$/kg (liquid), 820-60000 \$/kg (metal)
Ανάπτυξη	Ναι	Ναι	Εμπορευματοποίηση	Εμπορευματοποίηση	Ναι (gas & liquid tank)
Χρόνος Απόκρισης	γρήγορη	γρήγορη	Σχετικά αργή	1-3 mins	-
Υποβάθμιση σε DOD	Ναι	Μέτρια	Όχι	Όχι	-
Πλεονεκτήματα	κόστος	απόδοση, πυκνότητα ενέργειας & ισχύος	ανεξάρτητη ισχύς και ενέργεια, χωρητικότητα ενέργειας	ανεξάρτητη ισχύς και ενέργεια, χωρητικότητα ενέργειας	διάρκεια αποθήκευσης
Μειονεκτήματα	διάρκεια ζωής, ανακύκλωση Pb	Ανακύκλωση Να, κόστος	ενεργειακή πυκνότητα	ενεργειακή πυκνότητα	κόστος παραγωγής υδρογόνου
Καταλληλότητα για εφαρμογές ισχύος / ενέργειας	Μεγάλη/ Μέτρια	Μέτρια / Μεγάλη	Μέτρια /Μεγάλη	Μέτρια/ Μεγάλη	-

Πίνακας 12: Συνοπτικός πίνακας κυριότερων χαρακτηριστικών τεχνολογιών ηλεκτρικής αποθήκευσης μεγάλης ισχύος. [6,11,26-31]

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ			
	Αντλιοσταμείωση (PHS)	Συμπιεσμένος Αέρας (CAES)	Υπεραγώγιμη Μαγνητική Αποθήκευση (SMES)
Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/kg)	-	-	2,8 kWh/m ³
Πυκνότητα Ισχύος (W/kg)	-	-	1000-4000 W/lt
Ισχύς	200 MW - 1 GW	200 MW - 1 GW	1-100 MW
Απόδοση (%)	70-85	70-80	97-98
Διάρκεια Ζωής (κύκλοι)	2-5 10 ⁴ , 40-50 y	1-2 10 ⁴ , 30-40 y	10 ⁶ , 20 y
Αυτοεκφόρτιση	Όχι	-	-
Κόστος εγκατάστασης	300-500 €/kW	350-550 €/kW	350-1000 €/kW
Ανάπτυξη	Ναι	Ναι	-
Χρόνος Απόκρισης	1-3 λεπτά	10 λεπτά	ναι
Υποβάθμιση σε DOD	Όχι	Όχι	Όχι
Πλεονεκτήματα	χωρητικότητα ενέργειας, κόστος ανά μονάδα ενέργειας	Χωρητικότητα ενέργειας, κόστος ανά μονάδα ενέργειας	ισχύς
Μειονεκτήματα	χωροθέτηση, διαταραχή οικοσυστημάτων	Χωροθέτηση	επιπτώσεις στην υγεία
Καταλληλότητα για εφαρμογές ισχύος / ενέργειας	Όχι / Μεγάλη	Όχι/ Μέτρια	Μεγάλη / Μικρή

Στη συνέχεια παρατίθενται οι συγκεντρωτικοί πίνακες των τεχνολογιών αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Η ταξινόμηση σε αυτές τις τεχνολογίες γίνεται τόσο με βάση την κλίμακα εφαρμογής τόσο για τις τεχνολογίες αποθήκευσης θερμότητας όσο και για τις τεχνολογίες αποθήκευσης ψύξης.

Σε αντίθεση με τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα χαρακτηριστικά των διατάξεων της κάθε τεχνολογίας, οι τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, έχουν τη δυνατότητα τυποποίησης των γενικών χαρακτηριστικών που αφορούν σε κόστος εγκατάστασης, διάρκεια αποθήκευσης, απόδοσης κύκλου φόρτισης εκφόρτισης καθώς αυτά τα συστήματα διαφοροποιούνται ανά εφαρμογή και προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του εκάστοτε ενεργειακού συστήματος.

Οι επιδόσεις και τα χαρακτηριστικά τους διαφέρουν ανάλογα με το υλικό στο οποίο αποθηκεύεται η ενέργεια, τη θερμοκρασία λειτουργίας η οποία εξαρτάται από την διαθέσιμη τεχνολογία παραγωγής της θερμικής ενέργειας, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση των μέσων (δεξαμενές, περιέκτες κ.λπ.) και την ύπαρξη ή όχι μόνωσης. Οι Πίνακες 13 και 14 αφορούν τις τεχνολογίες αποθήκευσης θερμότητας για μικρής και μεγάλης κλίμακας εφαρμογές αντίστοιχα και ο πίνακας 15 αφορά αποκλειστικά σε τεχνολογίες αποθήκευσης ψύξης για μικρής ως μεσαίας κλίμακας εφαρμογές.

Πίνακας 13: Χαρακτηριστικά τεχνολογιών αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για αποθήκευση θερμότητας και αποθήκευση για εφαρμογές ψύξης απορρόφησης (μικρής – μεσαίας κλίμακας) [§2.3.1.2,24, 32, 37,38]

	Δεξαμενή θερμού ύδατος	Θερμοκλίνες στερεών	Δεξαμενή θερμού ύδατος με PCM	Έλαια	Εύτηκτα άλατα	Γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας
Θερμοκρασία (°C)	45-55 για ηλιοθερμικά συστήματα, 90-120 για ψύξη απορρόφησης (TDC)		Μεγάλο εύρος θερμοκρασιακής λειτουργίας ανάλογα με την εφαρμογή	100 – 300	290-380	Θερμοκρασία εδάφους
Όγκος	Από μερικές εκατοντάδες λίτρα μέχρι μερικές εκατοντάδες κυβικά μέτρα	Τάξης	Μειωμένος όγκος σε σχέση με δεξαμενές νερού.			Γεωεναλλάκτης σε οριζόντια ή κατακόρυφη διάταξη στο έδαφος
Διάρκεια ζωής	10-15 χρόνια	-	-	-	-	-
Πλεονεκτήματα	Χαμηλό κόστος, διαθεσιμότητα νερού, απλά συστήματα, χρήση και ως αποθήκη ψυχρού ύδατος	Σχετικά χαμηλό κόστος, κατάλληλο για χρήση αέρα ως μέσο μεταφοράς	Βελτιωμένη απόδοση, μειωμένος όγκος αποθήκης.	Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας	Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας	Μειωμένη λειτουργικά κόστη, διεποχική αποθήκη για θερμότητα και ψύξη.
Διαθεσιμότητα - ανάπτυξη	ναι	ναι	Υπό έρευνα και ανάπτυξη	ναι	-	ναι
Μειονεκτήματα	Περιορισμένο εύρος θερμοκρασιακής λειτουργίας,	όγκος	-	-	-	Μεγάλο κόστος επένδυσης. Διαθεσιμότητα χώρου

Πίνακας 14: Χαρακτηριστικά τεχνολογιών αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (θερμότητα και ψύξης) για μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης θερμότητας και διεποχική αποθήκευση [19,33,34,35, 36, §2.3.1.2 -2.3.1.4]

	Υπόγειες Δεξαμενές θερμού / ψυχρού ύδατος	Ηλιακή Λίμνη	Υπόγεια (rock cavern)	Υπόγεια (aquifer)	Υπόγεια (Borehole)
Θερμοκρασία αποθήκευσης (°C)	5-60	Θεωρητικά η θερμοκρασία φτάνει τους 90°C	5-55, θεωρητικά μπορεί να φτάσει 200	5-55, θεωρητικά μπορεί να φτάσει 200	N/A
Όγκος	Μερικές χιλιάδες μέχρι και τάξη των 100000 κυβικών μέτρων για μεγάλης κλίμακας	Για βάθος 1-2 m η επιφάνεια ποικίλει από εκατοντάδες μέχρι χιλιάδες τετραγωνικά μέτρα.	Μερικές εκατοντάδες χιλιάδες κυβικά μέτρα, εξαρτάται από το διαθέσιμο όγκο του υπόγειου σχηματισμού	N/A	Τάξη μεγέθους εκατοντάδων χιλιάδων κυβικών μέτρων
Πλεονεκτήματα	Απλή κατασκευή, χρήση ως αποθήκη ψύξης και θερμότητας	Απλό σύστημα	Μειωμένο κόστος εγκατάστασης ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας, ώριμη τεχνολογία στη Βόρεια Ευρώπη	Μεγάλη χωρητικότητα αποθηκευμένης ενέργειας	Κατακόρυφα φρεάτια που επιτρέπουν ευκολία στην εγκατάσταση, μειωμένο κόστος λειτουργίας
Μειονεκτήματα	Διαθεσιμότητα χώρου	Απαιτήση μεγάλης επιφάνειας για την εφαρμογή, διαθεσιμότητα χώρου, προβλήματα στη μεταφορά θερμότητας	Προϋπόθεση ύπαρξης του rock cavern		αυξημένο κόστος εγκατάστασης

Πίνακας 15: Χαρακτηριστικά τεχνολογιών αποθήκευσης ψύξης για εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας. [24,32]

	Δεξαμενή ψυχρού ύδατος	Θρυμματοποιητής Πάγου	Δεξαμενές εξωτερικής τήξης πάγου	Δεξαμενές εσωτερικής τήξης πάγου	Εγκλωβισμένος Πάγος	Εύτηκτο Άλας (Άλας Glauber)
Όγκος Δεξαμενής (m ³ /kWh)	0,09-0,17	0,02-0,03	0,023	0,019-0,023	0,019-0,023	0,048
Τύπος Ψύκτη	Ψύκτης νερού	Προκατασκευασμένος ή συνθετημένος εξοπλισμός παραγωγής	Χαμηλής θερμοκρασίας ψυκτικό ή συνθετημένη ψυκτική μονάδα	Χαμηλής θερμοκρασίας δευτερεύον ψυκτικό	Χαμηλής θερμοκρασίας δευτερεύον ψυκτικό	Ψύκτης νερού
COP ψύκτη	5-5,9	2,7-3,7	2,5-4,1	2,9-4,1	2,9-4,1	5-5,9
Θερμοκρασία Φόρτισης (°C)	4-6	(-9) – (-4)	(-9) – (-4)	(-6) – (-3)	(-6) – (-3)	4-6
Θερμοκρασία Εκφόρτισης (°C)	4-7	1-2	1-2	1-3	1-3	9-10
Εργαζόμενο μέσο	Νερό	Νερό	Νερό	Δευτερεύον ψυκτικό	Δευτερεύον ψυκτικό	Νερό
Διάρκεια ζωής (χρόνια)	10-15	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Πλεονεκτήματα	Χρήση υπαρχόντων ψυκτών, χρήση σε πυροπροστασία	υψηλοί στιγμιαίοι ρυθμοί εκφόρτισης, χαμηλή θερμοκρασία εκφόρτισης σε όλη τη διάρκεια του κύκλου	υψηλοί ρυθμοί εκφόρτισης	δομημένες δεξαμενές	Ελαστικότητα στην εκλογή σχήματος δεξαμενής	χρήση υπαρχόντων ψυκτών, ελαστικότητα στο σχήμα δεξαμενής

3 Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής και Θερμικής Ενέργειας

Τα υπάρχοντα ηλεκτρικά δίκτυα βασίζονται κυρίως σε μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής οι οποίοι συνδέονται με συστήματα μεταφοράς υψηλής τάσης και με τη σειρά τους αυτά συνδέονται με συστήματα μέσης και χαμηλής τάσης. Η διανομή και η μεταφορά γίνεται κατά κύριο λόγο μονοπωλιακά από δημόσιους φορείς ενώ στον τομέα της παραγωγής είναι δυνατόν να υπάρχει μεγάλος ανταγωνισμός. Η παροχή ισχύος και ο έλεγχος του δικτύου γίνονται από κεντρικές εγκαταστάσεις, με ελάχιστη ή καμία συμμετοχή των καταναλωτών και απουσιάζει η επικοινωνία. Τέτοιες διασυνδέσεις έχουν γίνει κυρίως για να είναι εφικτή η αμοιβαία υποστήριξη μεταξύ χωρών ή περιφερειών σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Έχει ξεκινήσει να αλλάζει το τοπίο σε σχέση με τα δίκτυα και σταδιακά θα αρχίσει να γίνεται η μετάβαση από το παλιό μοντέλο δικτύων σε ένα νέο μοντέλο, το λεγόμενο έξυπνο δίκτυο, το οποίο θα έχει ενεργό ρόλο και θα εξασφαλίζει αμφίδρομη ροή ισχύος. Ένα έξυπνο δίκτυο είναι ένα ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο μπορεί να ενσωματώνει ευφυώς τη συμπεριφορά και τις δράσεις όλων των χρηστών (παραγωγοί και καταναλωτές) σε αυτό, με σκοπό την εξασφάλιση της σταθερότητας, της ασφάλειας και της οικονομίας παροχής ενέργειας. Έτσι, ένα έξυπνο δίκτυο περιλαμβάνει ένα συνδυασμό λογισμικού και εξοπλισμού, δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να ελέγχουν τη ζήτηση ενέργειας.

Μέσα στα πλαίσια της Ευρώπης, τα ηλεκτρικά συστήματα εισέρχονται με ένα μοντέλο αγοράς στο οποίο οι μονάδες παραγωγής διανέμονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε αγοράς και το κέντρο ελέγχου του δικτύου αναλαμβάνει ένα γενικό ρόλο εποπτείας. Συνεπώς οι διανεμημένες μονάδες παραγωγής και οι τεχνολογίες ΑΠΕ θα διεισδύσουν όλο και περισσότερο υποκαθιστώντας σταδιακά τους μεγάλους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Παράλληλα σε αυτή την κατεύθυνση σε αυτά τα νέα δίκτυα θα διεισδύσουν οι συνεχώς αναπτυσσόμενες τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για παροχή εφεδρείας και κάλυψη άλλων απαιτήσεων. Έτσι, θα απαιτηθούν πολλές αλλαγές στα δίκτυα διανομής και μεταφοράς καθώς θα απαιτούνται πολλές διασυνδέσεις και άριστη επικοινωνία.

Τα γενικά χαρακτηριστικά των δικτύων του μέλλοντος αναμένεται να είναι:

- Συντονισμένη τοπική ενεργειακή διαχείριση και πλήρης διείσδυση διανεμημένης παραγωγής και τεχνολογιών ΑΠΕ στην μεγάλης κλίμακας παραγωγή ενέργειας.
- Εκτεταμένη μικρή και διανεμημένη παραγωγή τοπικά κοντά στο σημείο κατανάλωσης και τελικής χρήσης.
- Εναρμονισμένο νομικό πλαίσιο το οποίο θα επιτρέπει την διασυνοριακή συναλλαγή των υπηρεσιών ενέργειας και δικτύων.
- Ευέλικτη, βέλτιστη και στρατηγική λειτουργία, επέκταση και συντήρηση των δικτύων.
- Ευέλικτη διαχείριση της ζήτησης και ενσωμάτωση υπηρεσιών με τις οποίες ο καταναλωτής μπορεί να συμμετέχει σε αυτή.
- Η ποιότητα, η ασφάλεια και η αξιοπιστία μπορούν να καθορίζονται από το χρήστη στη νέα ψηφιακή εποχή.

Αναφορικά με το δεύτερο χαρακτηριστικό, την διανεμημένη παραγωγή κοντά στο τελικό σημείο κατανάλωσης, η σύνδεση τέτοιων μονάδων σε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης το οποίο εξυπηρετεί τοπικούς χρήστες (συνοικίες, μικρές περιοχές) συνιστά ένα νέο τύπο συστήματος ισχύος, το λεγόμενο μικροδίκτυο. Τα μικροδίκτυα μπορούν να συνδέονται στο κύριο δίκτυο (μακροδίκτυο) ή να λειτουργούν αυτόνομα (νησιδοποιημένη λειτουργία). Η ιδέα ενός μικροδικτύου βασίζεται στην ύπαρξη συνόλου θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων τα οποία προέρχονται από τις αντίστοιχες παραγωγικές τοπικές μονάδες θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής ισχύος μικρής κλίμακας και διατάξεις αποθήκευσης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Η διασύνδεση με τον τοπικό πάροχο ηλεκτρισμού είναι τέτοια ώστε ένα μικροδίκτυο να μοιάζει με ένα καλά συμπεριφερόμενο φορτίο.

Η διείσδυση της θερμικής δικτύωσης σε τοπικό επίπεδο, μέσω δημιουργίας δικτύων τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης, προέρχεται από την μελλοντική τάση για μεγαλύτερη εφαρμογή της τεχνολογίας της συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού και την τριπαραγωγή θερμότητας, ψύξης και ηλεκτρισμού για την σύσταση μικροδικτύων με σκοπό την εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και την καλύτερη ενεργειακή

διαχείριση. Τα συστήματα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στα δίκτυα του μέλλοντος και να επιφέρουν πολλαπλά οφέλη εξοικονόμησης στους καταναλωτές.

Τα ηλεκτρικά και θερμικά δίκτυα του μέλλοντος έχουν στόχο την προσαρμογή στις τοπικές ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, την εξοικονόμηση ενέργειας, την αξιοπιστία και την ασφάλεια των υπηρεσιών τους απέναντι στον τελικό χρήστη. Απαραίτητα στοιχεία για την επίτευξη των στόχων είναι η εκτεταμένη εφαρμογή διατάξεων αποθήκευσης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

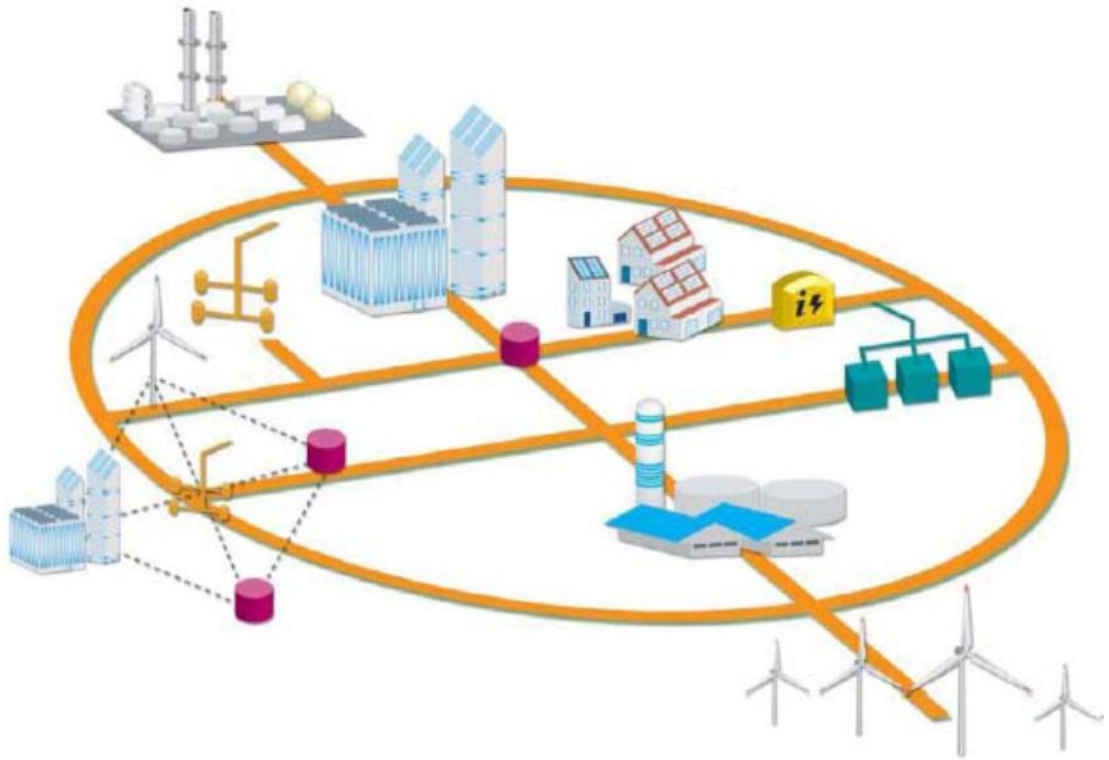
Στην παρούσα εργασία γίνεται ποιοτική διερεύνηση της εφαρμογής και συνεισφοράς των διατάξεων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε μικροδίκτυα επιπέδου συνοικίας και οι προοπτικές αποθήκευσης και η συνεισφορά τους σε θερμικά δίκτυα δεν εξετάζονται.

3.1 Μικροδίκτυα

Ένας ορισμός για τα μικροδίκτυα (microgrids) είναι: «Ένα μικροδίκτυο αποτελεί τη διασύνδεση μικρών μονάδων παραγωγής ενέργειας, τις λεγόμενες μονάδες διανεμημένης παραγωγής, με συσκευές αποθήκευσης ενέργειας και δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης. Τα μικροδίκτυα έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν συνδεδεμένα με το δίκτυο μέσης τάσης αλλά και απομονωμένα (islanding) με ένα οργανωμένο και ελεγχόμενο τρόπο.» [39]

Ένα τυπικό μικροδίκτυο αποτελείται από μία ή περισσότερες μονάδες διανεμημένης παραγωγής ενέργειας συνολικής ισχύος μερικών MW. [40] Αυτές οι μονάδες μπορεί να είναι γεννήτριες ντήζελ ή φυσικού αερίου, συμπαραγωγικές μονάδες (γεννήτριες, μικροστρόβιλοι κλπ), τεχνολογίες ΑΠΕ, κυψέλες καυσίμου, ηλιοθερμικοί σταθμοί, μονάδες καύσης βιομάζας ή βιοντήζελ ή οποιαδήποτε άλλης πηγή ενέργειας. Έτσι, ένα μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί εκεί όπου υπάρχει διαθέσιμη μια ή περισσότερες από αυτές τις πηγές ενέργειας και μπορεί να καλύψει τις τοπικές ανάγκες απαιτήσεις κατανάλωσης. Η κλίμακα εφαρμογής ενός μικροδικτύου ποικίλει και μπορεί να αφορά από μια οικία με φωτοβολταϊκά, γεννήτρια ντήζελ και μπαταρία, ένα νοσοκομείο με

συμπαγωγική μονάδα μέχρι μια πόλη με μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας και αιολικά πάρκα. [40]



Σχήμα 10: Σχηματική αναπαράσταση μικροδικτύου μικρής πόλης, με εγκατεστημένες κεντρικές και διανεμημένες μονάδες ΑΠΕ, μονάδες συμπαγωγής και σταθμούς παραγωγής, διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας

Επομένως το μικροδίκτυο αποτελεί ένα μικρό, πυκνό σύνολο γειτονικών ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων. Τα ηλεκτρικά φορτία συνδέονται μέσω δικτύου χαμηλής τάσης ενώ τα θερμικά μέσω συστήματος σωληνώσεων. Οι γεννήτριες και τα φορτία τοποθετούνται και λειτουργούν με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους τροφοδοσίας της ζήτησης ηλεκτρισμού και θέρμανσης, σύμφωνα με τις επικρατούσες συνθήκες της αγοράς, διατηρώντας παράλληλα ισορροπία ισχύος και προσφέροντας ασφάλεια και ποιότητα κατά τη λειτουργία. [41]

Οι δυνατότητες ενός μικροδικτύου από τεχνικής και οικονομικής σκοπιάς εξαρτώνται από:

- Τον τύπο του φορτίου (οικιακό, εμπορικό, βιομηχανικό ή συνδυασμός τους)
- Τον αριθμό των καταναλωτών
- Τον τύπο των πηγών της διανεμημένης παραγωγής, το μέγεθος τους και τον αριθμό τους
- Το επίπεδο αξιοπιστίας του συστήματος, δηλαδή το ποσοστό στο οποίο μπορεί να καλύψει το απαιτούμενο προβλεπόμενο φορτίο

Τα μικροδίκτυα έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν παράλληλα με το κεντρικό δίκτυο και να ανταλλάσσουν με αυτό ενέργεια, λαμβάνοντας ενέργεια από αυτό όταν δεν επαρκεί η τοπική ζήτηση και προσδίδοντας ενέργεια όταν υπάρχει πλεόνασμα παραγωγής. Σε περίπτωση κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου υπάρχει η δυνατότητα αξιοπιστής τροφοδότησης εντός του μικροδικτύου για την κάλυψη των απαιτούμενων φορτίων. [40] Λόγω της χαμηλής ισχύος των μονάδων παραγωγής ενέργειας στο μικροδίκτυο, η παραγωγή και διανομή της ενέργειας γίνεται στη χαμηλή τάση, επομένως το μέγεθος των παραγωγικών μονάδων καθορίζει τη στάθμη λειτουργίας και τον τρόπο διασύνδεσης με άλλα μικροδίκτυα ή το κεντρικό δίκτυο στη μέση ή την χαμηλή τάση. Η ποιότητα τάσης του μικροδικτύου πρέπει να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές του δικτύου και η απορροφούμενη ενέργεια να μην ξεπερνά τις απαιτήσεις ενός τυπικού καταναλωτή. [40] Ακόμα, ένα μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργεί ως υποστηρικτής του κεντρικού δικτύου ώστε να παρέχει ή να απορροφά ενεργό ή άεργο ισχύ όταν απαιτείται ακόμη και σε μικρά χρονικά διαστήματα. Σε αυτή τη περίπτωση απαιτείται μια μορφή επικοινωνίας μεταξύ των κέντρων ελέγχου του μικροδικτύου και του κεντρικού δικτύου. [40]

Εντός ενός μικροδικτύου, ιδιαίτερα αν βρίσκεται σε απομονωμένη λειτουργία (islanding) απαιτούνται διατάξεις αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας για την κάλυψη των υψηλών αιχμών στη ζήτηση αλλά και την εξοικονόμηση ενέργειας. Πέραν των διατάξεων που συνήθως χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ηλεκτρισμού (μπαταρίες, σφόνδυλοι κλπ), η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και με έμμεσο τρόπο σε άλλες μορφές όπως με τη μορφή θερμότητας (αποθήκευση

θερμότητας ή ψύξης με ηλεκτρική κατανάλωση) και με αποθήκευση υδρογόνου το οποίο παράγεται από ΑΠΕ μέσω της υδρόλυσης. [1] Επιπλέον, είναι δυνατή η χρήση θερμικής αποθήκευσης στις μονάδες παραγωγής θερμότητας και στο θερμικό δίκτυο αλλά και διανεμημένες μονάδες στους τελικούς χρήστες.

Η σχεδίαση και η λειτουργία των μικροδικτύων απαιτεί νέες τεχνολογίες σε σχέση με τα ηλεκτρονικά ισχύος, τα αναλογικά και ψηφιακά ηλεκτρονικά και τον έλεγχο και καθοριστικό ρόλο παίζουν τα επικοινωνιακά συστήματα και το δίκτυο των υπολογιστών, είτε η παραγόμενη ισχύς είναι διαρκώς μεταβαλλόμενη (π.χ. ενέργεια από φωτοβολταϊκά) είτε είναι ελεγχόμενη (π.χ. ενέργεια από νηξελογεννήτρια). Το βασικότερο στοιχείο ενός μικροδικτύου είναι συνήθως ένας ηλεκτρονικός αντιστροφέας ισχύος οποίος ελέγχει το ισοζύγιο ισχύος στο μικροδίκτυο. Αυτό μπορεί να γίνεται με την οδήγηση μιας ελεγχόμενης γεννήτριας ή με τη διαχείριση μικροστροβίλων ή αποθηκευτικών διατάξεων (π.χ. μπαταρίες), είτε με τον έλεγχο των ηλεκτρονικών ισχύος των άλλων μικρομονάδων παραγωγής ενέργειας. Επομένως, το τελικό αποτέλεσμα της χρήσης των μικροδικτύων είναι η μετατροπή τους από παθητικά σε ενεργητικά. Μελλοντικά αυτό θα οδηγήσει στην ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων (smart grids). Τα κύρια σημεία που απαιτείται έλεγχος εντός του μικροδικτύου είναι η συχνότητα, η τάση και η ποιότητα ισχύος. [40]

Η περιβαλλοντική σημασία των μικροδικτύων είναι μεγάλη. Αφενός, τα συστήματα παραγωγής εντός του μικροδικτύου αφορούν τεχνολογίες διανεμημένης παραγωγής κυρίως συμπαραγωγής και τεχνολογιών ΑΠΕ, επομένως τεχνολογίες που είναι ελάχιστα ή καθόλου ρυπογόνες σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κεντρικής παραγωγής. Από την άλλη μεριά, στα μικροδίκτυα οι απώλειες μεταφοράς της παραγόμενης ενέργειας είναι μειωμένες αφού η κατανάλωση γίνεται άμεσα τοπικά. Ωστόσο, ένα ποσοστό ρύπανσης δημιουργείται τοπικά, τόσο από τις εκπομπές των τεχνολογιών που απαιτούν καύση όσο και από την ηχορύπανση που μπορεί να δημιουργηθεί αν δεν γίνει σωστός σχεδιασμός και ηχομόνωση στα συστήματα. [40]

Μια εφαρμογή μικροδικτύου στην Ελλάδα αποτελεί το πιλοτικό μικροδίκτυο της Κύθνου το οποίο ηλεκτροδοτεί 12 κατοικίες και αποτελείται από φωτοβολταϊκά (10 kW), μια γεννήτρια νηξελ (5 kVA) και μπαταρία (53 kWh). [40]

3.1.1 Αποθήκευση ενέργειας στα μικροδίκτυα

Οι διατάξεις αποθήκευσης χρησιμοποιούνται για να καλύψουν την αιχμή της ζήτησης, για παράδειγμα για την εκκίνηση μεγάλων κινητήρων ή ψυγείων αλλά και να αποθηκεύσουν την περίσσεια ενέργειας που παράγεται από τις παραγωγικές μονάδες. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο και αποδοτικό όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί απομονωμένα από το κεντρικό δίκτυο.

Για να λειτουργεί σωστά ένα μικροδίκτυο, το σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης θα πρέπει να είναι ικανό να παρέχει ισχύ κατά τη διάρκεια μιας μη αποδεκτής κατάστασης. Έτσι το σύστημα αποθήκευσης θα πρέπει να μπορεί να παρέχει τις απαιτήσεις σε ενεργό και άεργο ισχύ κατά τη λειτουργία απομόνωσης από το μακροδίκτυο, με γρήγορη απόκριση και καλή απόδοση ώστε να υπάρχει σταθερότητα και να εξισορροπούνται στιγμιαίες αναντιστοιχίες στην ενεργό ισχύ.

Η διανεμημένη ενεργειακή αποθήκευση εμπλουτίζει τη συνολική επίδοση ενός μικροδικτύου με ποικίλους τρόπους:

- Σταθεροποιεί και επιτρέπει στις μονάδες διανεμημένης παραγωγής να λειτουργούν σε μια συνεχή και σταθερή ισχύ παρά τις διακυμάνσεις του φορτίου.
- Παρέχει αδιάλειπτη λειτουργία όταν υπάρχουν δυναμικές αλλαγές στην πρωτογενή ενέργεια (ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος)
- Επιτρέπει στη διανεμημένη παραγωγή να λειτουργεί φαινομενικά σαν μια μονάδα
- Αποσβήνει τις αιχμές ζήτησης και αντιμετωπίζει στιγμιαίες διαταραχές της ισχύος
- Αποθηκεύει ενέργεια για μελλοντική χρήση

3.2 Έξυπνα Δίκτυα

Η αναβάθμιση του υπάρχοντος δικτύου με εξυπνότερες τεχνολογίες αποτελεί από τις βασικότερες προτεραιότητες εντός της Ευρώπης για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, διείσδυση των τεχνολογιών ΑΠΕ και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης μέχρι το 2020. Τα έξυπνα δίκτυα είναι ένα μέσο που θα συμβάλλει στην επίτευξη του παραπάνω στόχου.

Ένα έξυπνο δίκτυο είναι ένα ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο μπορεί να ενσωματώνει ευφυώς τη συμπεριφορά και τις δράσεις όλων των χρηστών (παραγωγοί και καταναλωτές) σε αυτό, με σκοπό την εξασφάλιση της σταθερότητας, της ασφάλειας και της οικονομίας παροχής ενέργειας. Έτσι, περιλαμβάνει ένα συνδυασμό λογισμικού και εξοπλισμού, δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να ελέγχουν τη ζήτηση ενέργειας και επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη ροή ισχύος. [40]

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στα έξυπνα δίκτυα γίνεται με χρήση ψηφιακής τεχνολογίας διπλής κατεύθυνσης. Περιλαμβάνονται ευφυή συστήματα παρακολούθησης που καταγράφουν όλες τις ροές ηλεκτρικής ισχύος. Επίσης, χρησιμοποιούνται υπεραγώγιμες γραμμές μεταφοράς ισχύος για τη μείωση των απωλειών και την ενσωμάτωση των εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Οι λεγόμενοι έξυπνοι μετρητές αποτελούν συνήθως τμήματα ενός έξυπνου δικτύου αλλά από μόνοι τους δεν συνιστούν ένα έξυπνο δίκτυο. Οι τεχνολογίες οι οποίες κατά κανόνα απαρτίζουν ένα έξυπνο δίκτυο δεν αποτελούν καινοτόμες τεχνολογίες αλλά στην πλειοψηφία τους έχουν χρησιμοποιηθεί σε παραπλήσιες εφαρμογές όπως τις παραγωγικές διαδικασίες και τις τηλεπικοινωνίες.

Οι κύριοι άξονες των έξυπνων δικτύων είναι [40]:

- Η ευφυής συνύπαρξη κεντρικής και διανεμημένης παραγωγής για τη μείωση χρήσης άνθρακα και τον αποδοτικό χειρισμό της ζήτησης,
- Η εμπορία ενέργειας και βελτιστοποίηση του κόστους μέσω χρονομεταβλητών τιμολογίων και κινήτρων που εξαρτώνται από το μεταβαλλόμενο φορτίο,
- Η ενεργός συμμετοχή των καταναλωτών με βάση την αμφίδρομη επικοινωνία.

Ο στόχος των έξυπνων δικτύων είναι η αειφόρος ανάπτυξη με τη δημιουργία ενός αποδοτικού δικτύου διανομής με έμφαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τη διανεμημένη παραγωγή. Θα διευκολυνθεί η διασύνδεση περιοχών με διαφορετικές αλλά συμπληρωματικές ΑΠΕ. Το ποιοτικό αποτέλεσμα των έξυπνων δικτύων θα προσομοιάζεται με αυτό του διαδικτύου.

Μέσα σε αυτή τη φιλοσοφία υπάγεται και η ενσωμάτωση των μικροδικτύων σε τοπικό επίπεδο τα οποία αποτελούν μια κατηγορία των έξυπνων δικτύων. Με αυτό τον τρόπο, δηλαδή μέσω της τοπικής ενεργειακής δικτύωσης σε όλα τα επίπεδα (κτιριακό συγκρότημα, οικοδομικό τετράγωνο, οικισμός, πόλη) μπορεί να επιτευχθεί η απαιτούμενη εξοικονόμηση καυσίμων, η βέλτιστη ενεργειακή διαχείριση και η μείωση των εκπεμπόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων.

Όσον αφορά στους έξυπνους μετρητές, που έχουν κεντρικό ρόλο στα έξυπνα δίκτυα ως δομικά στοιχεία, αποτελούν αναβαθμισμένους ηλεκτρικούς μετρητές που ταυτοποιούν λεπτομερώς την κατανάλωση και μεταφέρουν τις σχετικές πληροφορίες μέσω του δικτύου με στόχο την παρακολούθηση και την κοστολόγηση της ενέργειας.

Συμπερασματικά στα έξυπνα δίκτυα ο καταναλωτής θα αποτελεί ενεργό μέλος της αγοράς και λαμβάνει οικονομικά κίνητρα για την συνεισφορά του στην αποδοτική λειτουργία των συστημάτων. Άλλωστε, στο μέλλον οι ενεργοβόρες ηλεκτρικές συσκευές θα διαθέτουν έξυπνες κάρτες για την παραμετροποίηση τους και την επικοινωνία με άλλες έξυπνες συσκευές, οι οποίες θα είναι σε θέση να προγραμματίζουν συντονισμένα τη λειτουργία τους σύμφωνα με τις προτιμήσεις των χρηστών τους, δηλαδή των καταναλωτών.

Παραδείγματα εφαρμογών έξυπνων δικτύων αποτελούν διάφορες προσπάθειες που γίνονται ανά τον κόσμο, κυρίως στις Η.Π.Α. Στον τομέα των έξυπνων δικτύων δραστηριοποιείται η εταιρία Cisco στις Η.Π.Α. Στο Κολοράντο πραγματοποιείται πιλοτικό πρόγραμμα για τη δημιουργία έξυπνης πόλης (έξυπνα σπίτια). Στο Όστιν του Τέξας γίνονται από το 2003 προσπάθειες για τη δημιουργία ενός έξυπνου δικτύου. Ανάλογες προσπάθειες γίνονται στο Οντάριο του Καναδά. Επίσης, εντός της Ευρώπης, στην Ιταλία ολοκληρώθηκε το πρώτο και μεγαλύτερο έργο το 2005 το οποίο επέφερε εξοικονόμηση ετησίως τα 500 εκ. € με κόστος κατασκευής 2,1 δις €.

3.2.1 Έξυπνοι μετρητές

Ένας έξυπνος μετρητής αποτελεί μια συσκευή που μετράει την ενέργεια που χρησιμοποιείται – καταναλώνεται και αποστέλλει τις πληροφορίες στο σύστημα. Από το σύστημα οι πληροφορίες καταλήγει στον τελικό χρήστη ο οποίος ανά πάσα στιγμή μπορεί να γνωρίζει την κατανάλωση ενέργειας των συσκευών του και των δραστηριοτήτων των ενεργειακών συστημάτων του αλλά και το κόστος αυτών. Η επικοινωνία μέσω των έξυπνων μετρητών είναι αμφίδρομη. Η λειτουργία τους αποτελεί ένα οικονομικό τρόπο για παρακολούθηση των καταναλώσεων των χρηστών και δίνει τη δυνατότητα για ρύθμιση της παραγωγής βάση ημερήσιων πραγματικού χρόνου δεδομένων και επακριβή κοστολόγηση βάση των μετρήσεων. Η συνεισφορά των έξυπνων μετρητών αφορά τόσο το διαχειριστή του δικτύου ο οποίος μπορεί να προβλέπει, να σχεδιάζει και να βελτιστοποιεί τη ροή ενέργειας στο δίκτυο, από την παραγωγή, την αποθήκευση μέχρι τη ζήτηση, όσο και τον τελικό χρήστη που μπορεί να αντιλαμβάνεται πραγματικά το ενεργειακό προφίλ των δραστηριοτήτων του με άμεσο αποτέλεσμα την βέλτιστη συμπεριφορά στην ενεργειακή κατανάλωση. [40]



Σχήμα 11: Απεικόνιση ενός τυπικού παραδείγματος έξυπνου δικτύου πόλης, με έξυπνους μετρητές, διανεμημένη παραγωγή ενέργειας, διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας, σταθμό παραγωγής H₂

3.3 Θερμικά δίκτυα – Τηλεθέρμανση - Τηλεψύξη

Η έντονη αύξηση των απαιτήσεων σε θερμική ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο οδηγεί στην ανάγκη για βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων που παρέχουν την απαιτούμενη θερμική ενέργεια. Μέσω της χρήσης της τηλεθέρμανσης συντελείται μεγάλη βελτίωση στην αγορά θερμότητας. Παράλληλα, έχει το δυνατότητα χρήσης μιας πληθώρας καυσίμων για την παραγωγή της επομένως και τεχνολογιών παραγωγής συνδυάζοντας τες με το βέλτιστο δυνατό τρόπο, αλλά μπορεί να κάνει χρήση απορριπτόμενης θερμότητας από άλλες διεργασίες, δίνοντας τη δυνατότητα να αυξηθεί η διεύθυνση της συμπαραγωγής στην αγορά ενέργειας. [35]

Η τηλεθέρμανση αποτελεί τεχνολογία η οποία βασίζεται στην μεταφορά της ενέργειας μέσω θερμού νερού ή ατμού από κεντρική μονάδα παραγωγής θερμότητας προς τον τελικό χρήστη-καταναλωτή. Ανάλογα, η τηλεψύξη στηρίζεται στη μεταφορά θερμικής ενέργειας μέσω ψυχρού νερού. Στα εγκατεστημένα συστήματα τηλεθέρμανσης-τηλεψύξης η θερμική ενέργεια παράγεται με υψηλά επίπεδα απόδοσης και συνεπώς τα συστήματα αυτά αποτελούν εναλλακτικές μέγιστης σημασίας από περιβαλλοντικής απόψεως σε σχέση με τις περισσότερες από τις τεχνολογίες. [42]

Συστήματα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης βρίσκονται σε πολλές περιοχές του κόσμου, κυρίως όμως στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της Ευρώπης, ενώ εμπορικά χρησιμοποιούνται από τις αρχές του περασμένου αιώνα. [42] Η πλέον αποδοτική εφαρμογή δικτύων τηλεθέρμανσης – τηλεψύξης είναι αυτή που προέρχεται από μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού. Στην Ελλάδα υπάρχουν 4 εγκατεστημένα δίκτυα τηλεθέρμανσης, στην Μεγαλόπολη (20 MW_{th}), το Αμύνταιο (40 MW_{th}), την Κοζάνη (81,4 MW_{th}) και την Πτολεμαΐδα (70 MW_{th}). [43,44]

Μια μονάδα συμπαραγωγής που συνδέεται με ένα δίκτυο τηλεθέρμανσης, χρησιμοποιεί το δίκτυο σαν ένα μεγάλο δοχείο απόρριψης της «απόβλητης» θερμότητας κατά την παραγωγική διαδικασία του ηλεκτρισμού. Τη θερμότητα αυτή απορροφά το νερό ψύξης εντός της παραγωγικής διαδικασίας και έτσι μεταφέρεται στο δίκτυο η θερμότητα. [42]

Ένα δίκτυο τηλεθέρμανσης μπορεί να εγκατασταθεί κοντά σε μια πόλη, σε βιομηχανική περιοχή ή σε αγροτική περιοχή και μπορεί να τροφοδοτεί με θερμική ενέργεια διαφορετικών ειδών ενεργειακά προφίλ. Εάν τροφοδοτεί μια πόλη ή ένα οικισμό τότε η θερμότητα προορίζεται για θέρμανση χώρων ή/και παραγωγή ζεστού νερού ή ψύξη

χώρων και διαφέρει από τα δίκτυα τηλεθέρμανσης τα οποία προορίζονται για αγροβιοτεχνική ή βιομηχανική χρήση καθώς σε αυτά τα συστήματα απαιτούνται θερμοκρασίες διαφορετικές από αυτές στα δίκτυα πόλεων ($>80^{\circ}\text{C}$). Τα αγροβιοτεχνικά φορτία (θερμοκήπια – ξηραντήρια κ.λπ.) απαιτούν χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ τα βιομηχανικά φορτία καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιακών απαιτήσεων. [44]

3.3.1 Ταξινόμηση και περιγραφή συστημάτων τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης

Τα συστήματα τηλεθέρμανσης – τηλεψύξης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάση διαφόρων κριτηρίων. Τα κριτήρια αυτά αφορούν την ενεργειακή πηγή από την οποία παράγεται η θερμική ενέργεια που προορίζεται για τηλεθέρμανση – τηλεψύξη, το μέσο μεταφοράς της θερμικής ενέργειας μέσα στο σύστημα διανομής της τηλεθέρμανσης και το είδος των καταναλωτών για τους οποίους προορίζεται η θερμική ενέργεια. [45]

Η πρώτη προφανής διάκριση είναι αυτή που διακρίνει τις εφαρμογές σε συστήματα τηλεθέρμανσης, τηλεψύξης και συνδυασμό και των δυο. Έτσι μπορεί να εγκατασταθεί δίκτυο τηλεθέρμανσης σε έναν οικισμό το οποίο να παρέχει μόνο θέρμανση ή μόνο ψύξη στους καταναλωτές του οικισμού αλλά υπάρχει και η δυνατότητα να παρέχεται και θέρμανση και ψύξη για την κάλυψη διαφορετικών αναγκών (ζεστό νερό χρήσης, εφαρμογές που απαιτούν θερμότητα και ψύξη).

Μια άλλη κατηγοριοποίηση αφορά στην επιλογή του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας που μπορεί να είναι θερμό ή ψυχρό νερό, ατμός χαμηλής πίεσης και σε ορισμένες περιπτώσεις θερμός αέρας. [45]. Οι διαφορές και προδιαγραφές των συστημάτων με διαφορετικά εργαζόμενα μέσα μεταφοράς αναλύονται παρακάτω.

Επιπλέον, τα συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν βάση του τύπου της πηγής ενέργειας που χρησιμοποιούν για την παραγόμενη τηλε-ενέργεια. Έτσι, μπορούν να διακριθούν εφαρμογές που προέρχονται από μια ή περισσότερες πηγές ενέργειας που προορίζονται καθαρά για την παραγωγή της τηλεθέρμανσης και από εφαρμογές που αξιοποιούν ανακτώμενη πηγή ενέργειας. Το πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα για παραγωγή αξιοποιήσιμης ενέργειας για εφαρμογές τηλεθέρμανσης-τηλεψύξης είναι η συμπαραγωγή. Σε ότι αφορά τις πηγές ενέργειας αυτές μπορεί να είναι ορυκτά καύσιμα, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, πυρηνική ενέργεια κ.λπ. Προς το παρόν, το φυσικό αέριο

αποτελεί την κυρίαρχη πηγή ενέργειας για τις εφαρμογές τηλεθέρμανσης και αναμένεται πως οι τεχνολογίες ΑΠΕ θα διεισδύσουν σημαντικά στις εφαρμογές τηλεθέρμανσης.[45] Επιπλέον, ο στα συστήματα τηλεθέρμανσης – τηλεψύξης απαιτείται συνήθως κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία κυκλοφορητών, ψυκτών, και βοηθητικού εξοπλισμού. Η ηλεκτρική ενέργεια επομένως μπορεί να παρέχεται είτε από το δίκτυο είτε από τεχνολογίες ΑΠΕ. [45]

Τέλος, σε ότι αφορά στο είδος των καταναλωτών για τους οποίους προορίζεται θερμική ενέργεια μπορεί να υπάρχουν οι περιπτώσεις [45]:

- Καταναλωτές σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές οι οποίοι διαμορφώνουν ένα πολύπλοκο σύστημα με ένα μεγάλο εύρος ενεργειακών προφίλ και συνεπώς τα δίκτυα αυτά είναι πολύπλοκα και απαιτούν μεγάλο κόστος επένδυσης.
- Καταναλωτές σε μεγάλα συγκροτήματα κατοικιών, μεγάλα κτίρια όπως πανεπιστημιακά ιδρύματα, δημόσια κτήρια, εμπορικά κέντρα και μη αστικές κατοικημένες περιοχές.
- Καταναλωτές σε βιομηχανικά συγκροτήματα με δίκτυα τηλεθέρμανσης που μοιάζουν αρκετά με την παραπάνω κατηγορία ωστόσο διαφοροποιούνται σε σχέση με τις υψηλές και πολύπλοκες απαιτήσεις σε θερμικά φορτία που τελικά καθορίζουν και τον τύπο του δικτύου και τα οικονομικά του.
- Καταναλωτές σε αραιοκατοικημένες περιοχές, συνήθως οικισμούς ή μικρά χωριά (μικρά κτήρια κατοικιών) και η εγκατάσταση αυτών των συστημάτων για παραγωγή της θερμικής ενέργειας δεν ξεπερνά τα 10 MW.

Ένα σύστημα τηλεθέρμανσης αποτελείται από τη μονάδα παραγωγής θερμότητας η οποία μπορεί να είναι εγκατεστημένη εντός του οικισμού ή της πόλης, κοντά ή μακριά από αυτόν, το σύστημα μεταφοράς θερμότητας (δίκτυο διδύμων αγωγών και δίκτυο διανομής) και τις εγκαταστάσεις εντός των κτιρίων και των κατοικιών που θερμαίνονται. [45]

Η μονάδα παραγωγής θερμότητας μπορεί να είναι μια οποιαδήποτε μονάδα παραγωγής αλλά συνήθως είναι μια συμπαραγωγική μονάδα (αερίου, βιομάζας, κυψέλη καυσίμου κ.λπ.). Άλλες πηγές θερμότητας για συστήματα τηλεθέρμανσης είναι η γεωθερμία, η ηλιοθερμία και η πυρηνική ενέργεια. [44] Η παραγωγή ψύξης που προορίζεται για εφαρμογές τηλεθέρμανσης μπορεί να προέρχεται επίσης από συμβατικές μονάδες παραγωγής ψύξης. Η τάση είναι η ψύξη στα δίκτυα τηλεψύξης να προέρχεται από μονάδες τριπαραγωγής οι οποίες αφορούν συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού και το θερμικό φορτίο ή μέρος αυτού προορίζεται για παραγωγή ψύξης με τις λεγόμενες TDC τεχνολογίες παραγωγής ψύξης (Thermally Driven Cooling) αλλά και με χρήση αντλιών θερμότητας. [45]

Το σύστημα μεταφοράς θερμότητας αποτελείται από γραμμές τροφοδοσίας προσαγωγής και επιστροφής του μέσου μεταφοράς της θερμότητας. Το μέσο μεταφοράς μπορεί να είναι θερμό νερό ή ατμός για τα συστήματα τηλεθέρμανσης και ψυχρό νερό για τα συστήματα τηλεψύξης. Η εγκατάσταση των σωληνώσεων γίνεται συνήθως υπογείως, ωστόσο υπάρχουν και υπέργεια συστήματα. Οι αγωγοί συνήθως είναι χαλύβδινοι με μόνωση ενώ στο σύστημα μεταφοράς μπορούν να εγκατασταθούν και συστήματα θερμικής αποθήκευσης για την ικανοποίηση αιχμών φορτίου στη ζήτηση [44]. Η κυκλοφορία του μέσου γίνεται με χρήση αντλιών (κυκλοφορητές). Αν το μέσο είναι ατμός το πλεονέκτημα της χρήσης του σε σχέση με το θερμό νερό στην τηλεθέρμανση, είναι πως μπορεί να τροφοδοτήσει παράλληλα και βιομηχανικές διεργασίες, αλλά αυξάνονται οι απώλειες μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα. [44] Γενικά, το δίκτυο μεταφοράς και διανομής της θερμότητας είναι ανάλογο με αυτό των δικτύων ύδρευσης πόλεων και φυσικού αερίου.

Όταν το μέσο μεταφοράς θερμότητας είναι ο ατμός τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για θέρμανση, μπορεί να κατευθυνθεί μέσω συστήματος μείωσης πίεσης για χρήση σε χαμηλές πιέσεις (<100 kPa) ή να διέλθει μέσω εναλλάκτη θερμότητας ατμού – νερού, ο οποίος είναι εγκατεστημένος σε κάθε κτίριο. Όταν το μέσο μεταφοράς είναι το νερό τότε χρησιμοποιείται απευθείας στα κτιριακά συστήματα. [44]

Σχεδιάζοντας ένα σύστημα τηλεθέρμανσης, πρέπει να γίνει η επιλογή του εργαζόμενου μέσου και της θερμοκρασίας αυτού. Τα συστήματα θερμού νερού χωρίζονται σε τρεις θερμοκρασιακές κλάσεις, συστήματα υψηλής θερμοκρασίας ($>175^{\circ}\text{C}$), συστήματα μέσης θερμοκρασίας ($120-175^{\circ}\text{C}$) και χαμηλής θερμοκρασίας ($<120^{\circ}\text{C}$). Όταν το μέσο απαιτείται να είναι ο ατμός, τότε ο διαχωρισμός των συστημάτων βάση της θερμοκρασίας διακρίνεται σε χαμηλής ($<120^{\circ}\text{C}$) και υψηλής θερμοκρασίας ($>120^{\circ}\text{C}$). [44]

Για ίση ποσότητα μεταφοράς θερμότητας τα συστήματα νερού απαιτούν δεκαπλάσια μάζα από ότι τα συστήματα ατμού καθώς ο ατμός περιλαμβάνει μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο λόγω της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης. [44] Παρόλο που απαιτείται μικρότερη μάζα ατμού σε σχέση με τα συστήματα νερού, λόγω της χαμηλής πυκνότητας του ατμού συνήθως απαιτεί σωληνώσεις μεγάλης διατομής στο δίκτυο προσαγωγής. Ωστόσο, το κόστος των σωληνώσεων για ατμό είναι συχνά συγκρίσιμα με αυτά του θερμού νερού, καθώς η διατομή των σωληνώσεων στο ρεύμα επιστροφής στο σύστημα ατμού μπορεί να είναι μικρή. Όμως οι σωληνώσεις επιστροφής συμπυκνώματος (επιστροφή ατμού) απαιτούν μεγαλύτερη συντήρηση από αυτές τις επιστροφής νερού λόγω της αυξημένης διάβρωσης των σωληνώσεων και των εξαρτημάτων σε σχέση με αυτή που υπόκεινται τα συστήματα θερμού νερού. [44] Οι απαιτήσεις πίεσης είναι αυξημένες στα συστήματα θερμού νερού σε σύγκριση με τα συστήματα ατμού λόγω της υψηλότερης πυκνότητας του νερού. Αυτό συνεπάγεται απώλειες και αυξομειώσεις στην πίεση με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγαλύτερης τάξης σωληνώσεις και αντλίες και συνεπώς προκύπτει αύξηση του κόστους. [44]

Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ προσαγωγής και επιστροφής του εργαζόμενου μέσου τόσο πιο αποδοτικό είναι το σύστημα τηλεθέρμανσης καθώς επιτυγχάνεται εξοικονόμηση στην κατανάλωση καυσίμου για την παραγωγή θερμότητας και επιπλέον μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας στη διανομή (αντλίες) αφού απαιτείται μικρότερος όγκος για την μεταφορά του απαιτούμενου ποσού θερμότητας. [44]

Η επιτυχής λειτουργία των συστημάτων τηλεψύξης επίσης εξαρτάται πολύ από την ικανότητα του συστήματος να επιτύχει μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας στην προσαγωγή και επιστροφή. Γενικά, από οικονομικής σκοπιάς είναι περισσότερο συμφέρον ο σχεδιασμός για υψηλό ΔT στα συστήματα τηλεψύξης καθώς επιτρέπουν μικρότερη διατομή σωληνώσεων στο δίκτυο. Ο έλεγχος του ΔT είναι ιδιαίτερα κρίσιμος για τα συστήματα τηλεψύξης καθώς λειτουργούν με πιο χαμηλό ΔT από τα συστήματα τηλεθέρμανσης τα οποία τυπικά λειτουργούν σε $\Delta T > 40^{\circ}\text{C}$. [46]

3.3.2 Βελτίωση απόδοσης στα θερμικά δίκτυα - Αποθήκευση

Τα δίκτυα τηλεθέρμανσης – τηλεψύξης μπορούν να αυξήσουν την αξιοπιστία και την απόδοσή τους μέσω χρήσης βοηθητικών τεχνολογιών. Μια δυνατότητα που έχουν είναι να αποκτήσουν τη λογική των ηλεκτρικών δικτύων, με δυνατότητα χρήσης έξυπνης τεχνολογίας και συστημάτων παρακολούθησης. Κάτι τέτοιο, θα μπορούσε να δώσει τη δυνατότητα ύπαρξης πολλαπλών παραγωγών ενέργειας, ακόμα και την ενσωμάτωση σε ένα τέτοιο σύστημα των ίδιων των καταναλωτών ως παραγωγούς.

Επιπλέον, η εντατικότερη ενσωμάτωση τεχνολογιών αποθήκευσης μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό παράγοντα βελτίωσης της απόδοσης και αξιοπιστίας των δικτύων θερμότητας. Στα συστήματα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης είναι συνήθης η χρήση θερμικής αποθήκευσης είτε διεποχική είτε βραχυπρόθεσμη. Η χρήση της αποθήκευσης επιτυγχάνει τη μείωση του εγκατεστημένου εξοπλισμού για την παραγωγή ενέργειας και επιπλέον, μειώνει τα λειτουργικά έξοδα εκτός από το κόστος εγκατάστασης. Έτσι τα συστήματα παραγωγής σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν παράγοντας φορτία κοντά στη μέση ζήτηση και τα φορτία αιχμής καλύπτονται από την αποθήκευση ή αν απαιτηθεί από συμπληρωματικές μονάδες εφεδρείας.

Στις εφαρμογές τηλεθέρμανσης οι τεχνολογίες αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι μακροπρόθεσμη (διεποχική) αποθήκευση θερμότητας σε υπόγειες δεξαμενές, βραχυπρόθεσμη αποθήκευση σε υπέργειες μονωμένες δεξαμενές θερμού νερού και σε δεξαμενές με χρήση υλικών αλλαγής φάσης.

Στις εφαρμογές τηλεψύξης συνήθως χρησιμοποιούνται η τεχνολογίες της αποθήκευσης πάγου και ψυχρού ύδατος. Η επιλογή του όγκου της δεξαμενής για την αποθήκευση ψύξης εξαρτάται από το ΔT . Για την πλειοψηφία των συστημάτων τηλεψύξης το μέγιστο ΔT είναι 11°C . Γενικά τα συστήματα αποθήκευσης πάγου έχουν μικρότερο όγκο συνήθως περίπου στο $\frac{1}{4}$ του όγκου που απαιτείται για το σύστημα ψυχρού ύδατος. Η χαμηλότερη θερμοκρασία του συστήματος σε συνδυασμό με τη λανθάνουσα θερμότητα που αποθηκεύει, πετυχαίνει τη μείωση του όγκου της δεξαμενής αποθήκευσης. [46]

3.3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των θερμικών δικτύων

Τα δίκτυα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης έχουν πολλά οφέλη για την κοινωνία και τις τοπικές κοινότητες στις οποίες εγκαθίστανται. Παρέχουν ευελιξία στην επιλογή των πηγών ενέργειας με αποτέλεσμα να δίνεται αφενός η δυνατότητα της βέλτιστης οικονομικά και τεχνικά επιλογής συστήματος και αφετέρου να επιτυγχάνεται εξοικονόμηση καυσίμων και μειωμένη περιβαλλοντική επίδραση. Για τις τοπικές κοινωνίες στις οποίες εφαρμόζονται τα δίκτυα αυξάνεται η δυνατότητα εκμετάλλευσης τοπικών πηγών ενέργειας με αποτέλεσμα την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ενεργειακή ανεξαρτησία. Επιπλέον, τα δίκτυα συμβάλλουν στην διαχείριση ενέργειας της τοπικής κοινωνίας και στην μείωση του κόστους καυσίμου, των λειτουργικών εξόδων, λειτουργικού χώρου στα κτίρια λόγω της απομάκρυνσης συμβατικού εξοπλισμού και αυξημένη αξιοπιστία στα συστήματα για τους καταναλωτές. [45]

Η εφαρμογή των δικτύων τηλεθέρμανσης – τηλεψύξης έχει και ορισμένα μειονεκτήματα. Πρωτίστως η τεχνογνωσία για τη βέλτιστη λειτουργία και εγκατάσταση των δικτύων είναι ανώριμη ακόμη. Ακόμη γίνονται προσπάθειες προς αυτή την κατεύθυνση, με στόχο τη μείωση των απωλειών στα δίκτυα και την κατάλληλη επιλογή βοηθητικών τεχνολογιών για αύξηση της συνολικής απόδοσης όπως οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας. [45] Η εγκατάσταση των δικτύων απαιτεί μεγάλο κεφάλαιο επένδυσης και η επιλογή της περιοχής ή της πόλης στην οποία μπορεί να εγκατασταθεί ένα τέτοιο δίκτυο είναι δύσκολη γιατί εξαρτάται από τις ανάγκες της τοπικής κοινωνίας και την ύπαρξη ή απαίτηση για ύπαρξη κοντινής πηγής θερμικής ενέργειας. [45]

4 Ηλεκτρική δικτύωση και αποθήκευση σε επίπεδο συνοικίας

Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να έχουν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογής ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε συστήματος. Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας των διατάξεων αυτών σε διάφορα συστήματα ηλεκτρικών δικτύων σε επίπεδο συνοικίας και επιλέγονται οι καταλληλότερες τεχνολογίες αποθήκευσης βάσει κριτηρίων. Αναπτύσσονται σενάρια δικτύωσης των ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων σε συνδυασμό με εφαρμογή αποθηκευτικών διατάξεων ανά σενάριο.

Αντίστοιχη διερεύνηση για επιλογή κριτηρίων καταλληλότητας των τεχνολογιών θερμικής αποθήκευσης και πρόταση σεναρίων θερμικής δικτύωσης σε θερμικά δίκτυα επιπέδου συνοικίας δεν υλοποιείται στην παρούσα εργασία. Όπως παρουσιάστηκε στους Πίνακες 13-15 (σελ. 120-122), τα δεδομένα για τις τεχνολογίες θερμικής αποθήκευσης ως ολοκληρωμένα συστήματα ήταν ελλιπή σε σχέση με αυτά των τεχνολογιών ηλεκτρικής αποθήκευσης. Απαραίτητα στοιχεία για μια τέτοια διαδικασία όπως το συνολικό κόστος εγκατάστασης, χωρητικότητα αποθήκευσης, απόδοση κύκλου φόρτισης εκφόρτισης, που θα μπορούσαν να αποτελέσουν δείκτες ή πιθανά κριτήρια επιλογής δεν έχουν βρεθεί σε επίπεδο ολοκληρωμένων και τυποποιημένων συστημάτων. Τα χαρακτηριστικά που είναι διαθέσιμα στην βιβλιογραφία στηρίζονται περισσότερο στις ιδιότητες των υλικών αποθήκευσης. Αυτά τα στοιχεία δεν είναι επαρκή για μια πλήρη αποτίμηση της καταλληλότητας των εφαρμογών θερμικής αποθήκευσης σε περιπτώσεις θερμικών μικροδικτύων.

Η θερμική αποθήκευση και συνεισφορά της σε ένα ενεργειακό σύστημα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως οι κλιματολογικές συνθήκες της εφαρμογής, η ύπαρξη μόνωσης, η επιλογή του υλικού που περιέχει το μέσο αποθήκευσης (υγρό ή στερεό) αλλά και από τον ορθό σχεδιασμό του συστήματος. Η θερμοκρασία αποθήκευσης μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με την τεχνολογία παραγωγής της ενέργειας. Η διαθεσιμότητα χώρου αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για τις περισσότερες από τις μεγάλης κλίμακας (διεποχική) εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης, οι οποίες αποτελούν και υπόγειες εφαρμογές. Επιπλέον οι διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης για μικρής διάρκειας αποθήκευση διατίθενται με ή χωρίς μόνωση, θερμικά διαστρωματωμένες ή

ομοιόμορφης θερμοκρασίας, με ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης ή χωρίς αυτά. Ειδικά για τα υλικά αλλαγής φάσης, οι δυνατότητες που προσφέρουν λόγω του μεγάλου εύρους της θερμοκρασίας λειτουργίας τους αλλά και ο μεγάλος αριθμός υλικών που μπορούν να αξιοποιηθούν για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, καθιστούν δύσκολη τη διαχείριση τους ώστε να αξιολογηθούν μέσα στα ίδια πλαίσια με αυτά που δύναται να γίνει για τις τεχνολογίες ηλεκτρικής αποθήκευσης.

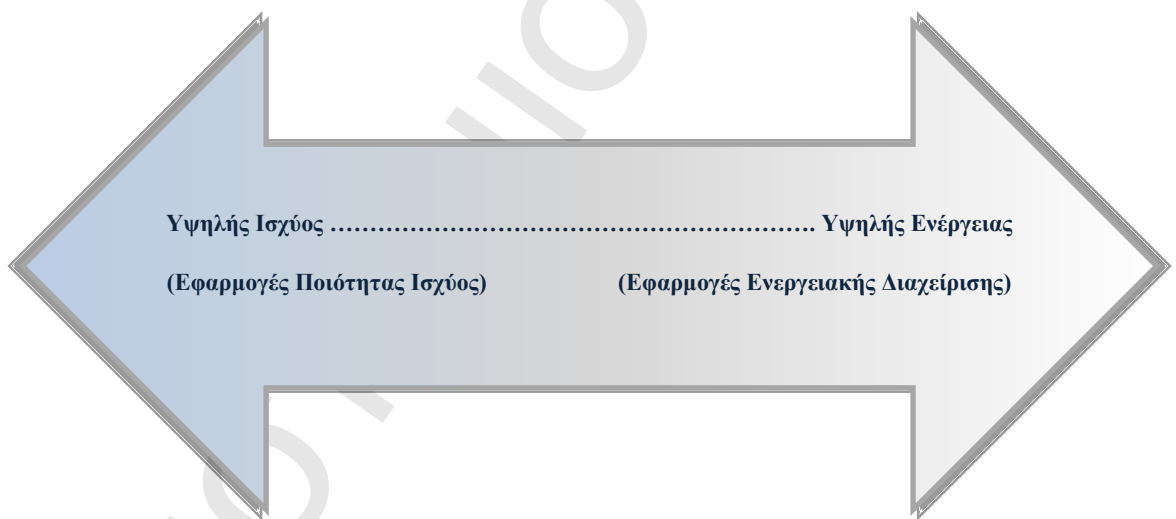
Στο παρόν κεφάλαιο, βάσει κριτηρίων που επιλέγονται, τα οποία αφορούν στην εφαρμοσιμότητα, βιωσιμότητα και καταλληλότητα των τεχνολογιών αποθήκευσης ταξινομούνται οι εφαρμογές των αποθηκευτικών διατάξεων σε γενικές κατηγορίες. Λαμβάνοντας υπόψη, την ηλεκτρική δικτύωση κτιρίων και τα πιθανά σενάρια που μπορούν να αναπτυχθούν, επιλέγονται μέσω των κριτηρίων οι κατάλληλες εφαρμογές αποθήκευσης για κάθε σενάριο δικτύωσης σε επίπεδο συνοικίας.

Τα κριτήρια αξιολόγησης και κατηγοριοποίησης των τεχνολογιών αποθήκευσης προκύπτουν από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάθε τεχνολογίας και εμπειρικά από μια πληθώρα παραδειγμάτων υφισταμένων εφαρμογών αποθήκευσης σε δίκτυα αλλά και προσομοιώσεων που απαντώνται στην βιβλιογραφία.

Το πεδίο εφαρμογής της ανάπτυξης των σεναρίων της ενεργειακής δικτύωσης δεν συμπεριλαμβάνει διερεύνηση καταλληλότητας των τεχνολογιών διανεμημένης παραγωγής και κανένα τεχνικό στοιχείο δεν παρουσιάζεται σε σχέση με την παραγωγή ενέργειας. Η ανάπτυξη των σεναρίων αφορά στους τρόπους δικτύωσης των κτιρίων και στην επιλογή και κατάλληλη τοποθέτηση των αποθηκευτικών διατάξεων (κεντρική ή διανεμημένη αποθήκευση ενέργειας). Η παραγωγή ενέργειας στο δίκτυα που αναπτύσσονται μπορεί να γίνεται είτε κεντρικά είτε διανεμημένα από οποιαδήποτε τεχνολογία παραγωγής που μπορεί να έχει εφαρμογή σε αυτά τα δίκτυα (συμπαραγωγή, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμβατικές μικρομονάδες).

4.1 Επιλογή κριτηρίων αξιολόγησης τεχνολογιών αποθήκευσης

Οι διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως παρουσιάζονται στα κεφάλαια 1 και 2, παρέχουν ένα μεγάλο φάσμα δυνατοτήτων, οι οποίες εκτελούν ένα αριθμό εφαρμογών στην αγορά ενέργειας. Αυτές οι δυνατότητες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες: 1) ενεργειακή διαχείριση, 2) γεφύρωση ισχύος και 3) ποιότητα ισχύος και αξιοπιστία. [47] Αυτές οι εφαρμογές μπορούν να αφορούν από γρήγορης απόκρισης εφαρμογές ισχύος με στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας των ενεργειακών συστημάτων μέχρι αργής ενεργειακής διαχείρισης εφαρμογές με στόχο την απόδοση των ενεργειακών συστημάτων. Έτσι, οι εφαρμογές απαιτούν από τα συστήματα αποθήκευσης ένα εύρος απόκρισης από μερικά κλάσματα του δευτερολέπτου (εφαρμογές υψηλής ισχύος) μέχρι μερικές ώρες (εφαρμογές υψηλής ενέργειας), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. [26]



Σχήμα 12: Το φάσμα των εφαρμογών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για διάρκεια αποθήκευσης από δευτερόλεπτα (ποιότητα ισχύος) μέχρι ώρες (διαχείριση ενέργειας)

Οι εφαρμογές ποιότητας ισχύος και αξιοπιστίας διατηρούν τη σταθερότητα του δικτύου και προστατεύουν ευαίσθητο εξοπλισμό από απρόβλεπτες αλλαγές οι οποίες μετρώνται σε κλάσματα δευτερολέπτου στην τάση και τη συχνότητα. Τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν ρύθμιση τάσης, ποιότητα ισχύος και σταθερότητα των συστημάτων. [26,47] Εφαρμογές που ανήκουν στο φάσμα της ενεργειακής διαχείρισης όπως εξισορρόπηση φορτίων, αναστολή χρήσης βοηθητικού εξοπλισμού και εξομάλυνση αιχμών συμβάλλουν στην εμπορευματική αξία της ενέργειας μεταξύ χαμηλού κόστους-εκτός αιχμής λειτουργίας και υψηλού κόστους-αιχμής λειτουργίας της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. [47] Εφαρμογές ενδιάμεσης ισχύος παρέχουν ισχύ με στόχο την συνέχεια των υπηρεσιών για δευτερόλεπτα μέχρι μερικά λεπτά, για τις περιπτώσεις μετάβασης από μια πηγή ενέργειας σε μια άλλη. Αυτές οι εφαρμογές περιλαμβάνουν αδιάλειπτη παροχή ισχύος (UPS) και εφεδρεία έκτακτης ανάγκης. [47] Γενικότερα, τα όρια διαχωρισμού μεταξύ των εφαρμογών ενεργειακής διαχείρισης, ενδιάμεσης κατάστασης και ποιότητας ισχύος δεν είναι πάντοτε σαφή και περισσότερο έχουν μια γενική διαβάθμιση σε σχέση με τον χαρακτηρισμό τους. [47]

Οι αποθηκευτικές διατάξεις σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο μπορούν να παίζουν σημαντικό ρόλο σε όλο το σχήμα της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το στάδιο της παραγωγής, το στάδιο της μεταφοράς, της διανομής και το στάδιο της τελικής χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Στη φάση της παραγωγής της ενέργειας, η αποθήκευση συμβάλλει σε [47]:

- Αποθήκευση παραγωγής: αποθηκεύοντας μεγάλο όγκο ενέργειας (bulk storage) ο οποίος παράγεται στη διάρκεια της νύχτας ή σε ώρες εκτός αιχμής επιτυγχάνεται ένα ομοιόμορφο φορτίο το οποίο μπορεί να αποδοθεί σε ώρες αιχμής.
- Περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης: η εφεδρεία σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης περιλαμβάνει χωρητικότητα ισχύος η οποία μπορεί να παρασχεθεί σε περιπτώσεις που η τροφοδοσία διακοπεί ή μια εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας καταρρεύσει. Η στρεφόμενη εφεδρεία πρέπει να παρέχεται άμεσα μέσω μακροπρόθεσμων αποθεμάτων ενέργειας.
- Ρύθμιση συχνότητας: διατήρηση μιας ισορροπίας στη συχνότητα που απαιτεί το ενεργειακό σύστημα υπό κανονικές και μη συνθήκες στο δίκτυο. Μεγάλες και ταχύτερες αλλαγές στο ηλεκτρικό φορτίο ενός συστήματος μπορούν να

καταστρέψουν μια γεννήτρια ενέργειας και ηλεκτρονικό εξοπλισμό καταναλωτών.

- Black start: η δυνατότητα μονάδων παραγωγής κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης του συστήματος να μεταβούν από απενεργοποιημένη κατάσταση σε κατάσταση λειτουργίας και να αρχίσει να παράγουν ενέργεια χωρίς να υποβοηθηθεί από το ηλεκτρικό σύστημα αλλά βοηθώντας άλλες μονάδες να εκκινήσουν και να συγχρονιστούν με το δίκτυο.

Στη φάση της μεταφοράς και της διανομής της ενέργειας η αποθήκευση ενέργειας συμβάλλει σε [47]:

- Σταθερότητα του συστήματος: η δυνατότητα διατήρησης όλων των παραμέτρων ενός συστήματος διανομής και μεταφοράς σε συγχρονισμένη λειτουργία για την αποτροπή της κατάρρευσης του συστήματος.
- Ρύθμιση τάσης: η διατήρηση μιας σταθερής τάσης μεταξύ όλων των γραμμών της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Asset Deferral: αναστολή της ανάγκης για πλεονάζουσες υπηρεσίες στο δίκτυο μεταφοράς οι οποίες υπάρχουν στα δίκτυα μεταφοράς και υπολειτουργούν επί έτη.

Στη φάση της παροχής ενέργειας και των υπηρεσιών η αποθήκευση ενέργειας συμβάλλει σε [47]:

- Ενεργειακή διαχείριση: επιτρέπει στους καταναλωτές να κάνουν εξομάλυνση αιχμών μεταφέροντας την ζήτηση ενέργειας σε άλλη χρονική στιγμή.
- Ποιότητα ισχύος: παρέχει ενέργεια στους καταναλωτές χωρίς διακυμάνσεις και ταλαντώσεις στην κυματομορφή του ηλεκτρισμού.
- Αξιοπιστία ισχύος: αδιάλειπτη παροχή ενέργειας. Σε συνδυασμό με την ενεργειακή διαχείριση η αδιάλειπτη παροχή επιτρέπει απομακρυσμένη λειτουργία του συστήματος.

Πρακτικά όλες οι τεχνολογίες αποθήκευσης μπορούν συμβάλλουν σε περισσότερες από μια από τις παραπάνω λειτουργίες σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. [47] Πέρα από την ενέργεια και την ισχύ που αποτελούν και ένα βασικό διαχωρισμό μεταξύ των εφαρμογών, κι άλλες παράμετροι παίζουν ρόλο για την διερεύνηση της καταλληλότητας είτε για μία είτε για περισσότερες από τις προαναφερθείσες εφαρμογές. Ανάλογα με τη μορφή ενός ηλεκτρικού δικτύου, τα φυσικά του χαρακτηριστικά, τις τεχνολογίες παραγωγής που διαθέτει και τους καταναλωτές στους οποίους απευθύνεται οι ανάγκες και οι απαιτήσεις για τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να διαφοροποιούνται. Επιπλέον, εφόσον δεν υπάρχουν διαθέσιμες μεμονωμένες τεχνολογίες αποθήκευσης οι οποίες να μπορούν να καλύψουν τεχνικά και οικονομικά ολόκληρο το παραπάνω φάσμα εφαρμογών η επιλογή μιας ή περισσότερων τεχνολογιών αποθήκευσης αποτελεί μια διαδικασία πολύπλοκη. [48] Συνεπώς, είναι απαραίτητη η διερεύνηση των δυνατοτήτων των διαθέσιμων τεχνολογιών για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και παράλληλα η ανάπτυξη κριτηρίων για τη βέλτιστη επιλογή ανάλογα με τις απαιτήσεις που μπορεί να έχει ένα δίκτυο.

Στο στάδιο της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας η εφαρμογή των τεχνολογιών αποθήκευσης γίνεται σε μεγάλη κλίμακα. Η τεχνολογία αποθήκευσης απαιτείται να συμπληρώνει την παραγωγική διαδικασία παρέχοντας ενέργεια στο δίκτυο με μεγάλη διάρκεια εκφόρτισης σε ημερήσια ή ωριαία βάση. Επιπλέον, σε αυτό το στάδιο οι διατάξεις αποθήκευσης παρέχουν στρεφόμενη εφεδρεία σε περιόδους που το δίκτυο έχει απότομη έλλειψη ενέργειας. Εάν αυτή η έλλειψη είναι μαζική και προκαλεί αστοχία στο δίκτυο τότε η τεχνολογία αποθήκευσης πρέπει να μπορούν να το ενεργοποιήσουν εκ νέου με την δυνατότητα για black-start.

Στο στάδιο της μεταφοράς και της διανομής οι τεχνολογίες αποθήκευσης πρέπει να διατηρούν τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του. Χαρακτηριστικά που καλούνται να διαθέτουν αποτελούν η γρήγορη προσφορά ισχύος και όχι ενέργειας και μικρό χρόνο εκφόρτισης αλλά ταχύτερη απόκριση.

Στο τελικό στάδιο, αυτό της κατανάλωσης ενέργειας, το λεγόμενο παραπάνω, στάδιο της υπηρεσίας της ενέργειας, οι τεχνολογίες αποθήκευσης καλούνται να βελτιώσουν τη χρήση της ισχύος στο σημείο κατανάλωσης και όχι να παρέχουν οικονομικά οφέλη. Αυτές οι τεχνολογίες δεν έχουν απαραίτητα μεγάλη διάρκεια εκφόρτισης όπως τα

μεγαλύτερα συστήματα αλλά επικεντρώνονται περισσότερο στο χρόνο απόκρισης και στη απόδοση ισχύος. Η αποθήκευση ενέργειας στο τμήμα της κατανάλωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί παίζοντας τρεις βασικούς ρόλους: τη μείωση του κόστους ενέργειας (εξομάλυνση αιχμών), τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος και την παροχή αυξημένης αξιοπιστίας της υπηρεσίας. Το μέγεθος της εφαρμογής εξαρτάται αποκλειστικά από τις απαιτήσεις του καταναλωτή. Γενικά, τα συστήματα αποθήκευσης των καταναλωτών σχεδιάζονται για αλληπάλλληλες, μικρές εκφορτίσεις ισχύος με τη δυνατότητα να παρέχουν ενδιάμεση ισχύ σε περιπτώσεις διακοπής της παροχής.

Λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες που προσφέρουν οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στα στάδια της παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης και με καθώς οι απαιτήσεις σε κάθε στάδιο είναι διαφορετικές, τα κριτήρια επιλογής κατάλληλων τεχνολογιών αποθήκευσης αναμένεται να διαφοροποιούνται τουλάχιστον ως προς το διαχωρισμό σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλά επίπεδα ενέργειας και υψηλά επίπεδα ισχύος.

Στους Πίνακες 10,11 και 12 του κεφαλαίου 2 (σελ. 116-118) έχουν παρουσιαστεί συνοπτικά τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των διαθέσιμων τεχνολογιών ηλεκτρικής αποθήκευσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν την ενεργειακή πυκνότητα του μέσου αποθήκευσης (Wh/kg ή Wh/m^3), την πυκνότητα ισχύος (W/kg ή W/m^3), την ανάπτυξη και ωριμότητα της κάθε τεχνολογίας, βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τη απόδοση του συστήματος, το κόστος, τη διάρκεια ζωής, τα ποσοστά αυτοεκφόρτισης, ο χρόνος απόκρισης των τεχνολογιών και η καταλληλότητα εφαρμογής των τεχνολογιών για εφαρμογές ισχύος και ενέργειας. Για τις τεχνολογίες της ηλεκτροχημικής αποθήκευσης (μπαταρίες) είναι διαθέσιμη και η υποβάθμιση του συστήματος σε βαθιές εκφορτίσεις (DOD).

Ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά μπορούν να αποτελέσουν και άλλες παράμετροι όπως η περιβαλλοντική επίδραση της εγκατάστασης και λειτουργίας της τεχνολογίας, η αξιοπιστία, η δυνατότητα των συσκευών να είναι φορητές, ζητήματα διάθεσης και απόρριψης των υλικών και η δυνατότητα τοποθέτησης των συσκευών αποθήκευσης σε εξωτερικό χώρο. [26] Η δυνατότητα των συσκευών να είναι φορητές αποτελεί μια παράμετρο που δεν απασχολεί τις εφαρμογές της παρούσας εργασίας καθώς η εφαρμογή των τεχνολογιών είναι στατική. Η περιβαλλοντική επίδραση δεν λαμβάνεται

υπόψη, ωστόσο μεμονωμένες τεχνολογίες οι οποίες έχουν σοβαρή περιβαλλοντική επίδραση ή επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, εντοπίζονται και αναφορά στα χαρακτηριστικά αυτά γίνεται στα μειονεκτήματά τους. Κάτι αντίστοιχο ισχύει και για τις ειδικές απαιτήσεις σε χωροθέτηση και ειδική εγκατάσταση της τεχνολογίας. Η αξιοπιστία κάθε τεχνολογίας αποτελεί μια συνισταμένη πολλών διαφορετικών δυνάμεων οι περισσότερες από τις οποίες ήδη αναφέρονται ως χαρακτηριστικά και επομένως παραλείπεται. Για παράδειγμα η αξιοπιστία της τεχνολογίας μιας μπαταρίας εξαρτάται από την απόδοση, την τεχνολογική ωριμότητα και διαθεσιμότητα, την υποβάθμιση σε βάθος εκφόρτισης κ.λπ. Τέλος, η δυνατότητα τοποθέτησης των συσκευών ή της συνολικής εγκατάστασης σε εξωτερικό χώρο δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα καθώς για τις τεχνολογίες οι οποίες απαιτούν προστασία από το εξωτερικό περιβάλλον (καιρικές συνθήκες) συνήθως γίνεται εγκατάσταση ενός τύπου καταφυγίου με ή χωρίς κλιματισμό η οποία προσθέτει επιπλέον κόστος εγκατάστασης το οποίο περιλαμβάνεται ήδη στο συνολικό κόστος επένδυσης της τεχνολογίας. [26]

Η παράμετρος του κόστους των συστημάτων αποθήκευσης είναι κριτήριο σημαντικό αλλά δύσκολα διαχειρίσιμο για επιλογή των καταλληλότερων τεχνολογιών τόσο για τις εφαρμογές ενεργειακής διαχείρισης όσο και για τις εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Γεγονός είναι πως οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας όταν δεν επιλέγονται με στόχο τη μείωση της εγκατεστημένης ισχύος μιας τεχνολογίας παραγωγής, αλλά παρέχουν κυρίως υπηρεσίες βοηθητικές και στοχεύουν στη βελτίωση των ενεργειακών συστημάτων, της ποιότητας και της αξιοπιστίας, προσθέτουν ένα σημαντικό κόστος στο συνολικό κόστος εγκατάστασης των ενεργειακών συστημάτων. Επιπλέον, το κόστος για κάθε τεχνολογία αποθήκευσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και δεν αποτελεί πάντα ένα κατάλληλο κριτήριο σύγκρισης των τεχνολογιών για λόγους όπως [26]:

- Το κόστος εγκατάστασης για ορισμένες τεχνολογίες οι οποίες είναι αναπτυσσόμενες και συνεχώς βελτιούμενες έχει την τάση να μειώνεται συνεχώς
- Το κόστος εγκατάστασης εξαρτάται κατά πολύ από το μέγεθος της εφαρμογής και επομένως για διαφορετικές εφαρμογές μπορεί η ίδια τεχνολογία αποθήκευσης βάση του κόστους να θεωρηθεί για μια περίπτωση βιώσιμη και για την άλλη ακατάλληλη και απαγορευτική.

- Η διάρκεια ζωής των τεχνολογιών διαφέρουν. Για παράδειγμα μια μπαταρία Pb-Acid που υπερτερεί από οικονομικής απόψεως σε σχέση με μια μπαταρία NaS ωστόσο, η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας Pb-Acid είναι περιορισμένη σε σχέση με αυτή της NaS και λαμβάνοντας υπόψη την μεγάλη υποβάθμιση σε βαθιές εκφορτίσεις το κόστος της μπαταρίας μπορεί ακόμα και να προσεγγίζει αυτό της NaS.
- Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης και αντικατάστασης των τεχνολογιών δεν είναι σαφή και γνωστά.
- Η απόδοση των συστημάτων εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή
- Τα κόστη απόρριψης στο τέλος του κύκλου ζωής των τεχνολογιών δεν είναι γνωστά

Από τα χαρακτηριστικά των Πινάκων 10-12 μπορεί να γίνει μια κατηγοριοποίηση της καταλληλότητας και εφαρμοσιμότητας των τεχνολογιών, για τις απαιτήσεις στα στάδια της παραγωγής, της διανομής και της κατανάλωσης.

Οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας στο στάδιο της παραγωγής πρέπει να μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας και να έχουν μεγάλη διάρκεια εκφόρτισης ώστε να μπορούν να συμβάλλουν στην εξισορρόπηση φορτίων, στη στρεφόμενη εφεδρεία και στη ρύθμιση συχνότητας των συσκευών. Γενικώς, σε δίκτυα διανεμημένης παραγωγής με πολλές μικροπηγές ενέργειας, κάθε μικροπηγή πρέπει να συνοδεύεται από μια αποθηκευτική διάταξη. Επομένως για την εγκατάσταση αποθηκευτικών διατάξεων σε αυτές τις περιπτώσεις τα βασικά κριτήρια είναι εκτός από την απόδοση, η ενεργειακή πυκνότητα, η χωρητικότητα ενέργειας, και η μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης και εκφόρτισης. Ειδικά κριτήρια αποτελούν το κόστος, οι απαιτήσεις σε ειδικό χώρο εγκατάστασης (π.χ. αντλησιοταμίευση, συμπιεσμένος αέρας) και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα οποία προσεγγίζονται με προσοχή σε σχέση με το βάρος τους στην επιλογή τεχνολογίας αποθήκευσης.

Οι απαιτήσεις για το στάδιο της διανομής αφορούν στη σταθερότητα και αξιοπιστία. Τα βασικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται από τις τεχνολογίες αποθήκευσης είναι ο γρήγορος χρόνος απόκρισης, ο μικρός χρόνος εκφόρτισης, τα επίπεδα ισχύος. Το κόστος και η περιβαλλοντική επίδραση, δεν έχουν το ίδιο βάρος ωστόσο συνυπολογίζονται όταν αντισταθμίζουν τη συνολική επίδοση με άλλα κριτήρια στα οποία δεν αποδίδουν ή αποτελούν αποτρεπτικό παράγοντα παράλο που μπορεί τα βασικά κριτήρια να είναι υψηλά σε επίδοση.

Στο στάδιο της κατανάλωσης, μπορούν να βρουν εφαρμογή τόσο τεχνολογίες οι οποίες έχουν καλά επίπεδα ισχύος αλλά και επίπεδα ενέργειας. Οι απαιτήσεις αυτού του σταδίου μπορεί να είναι η εξομάλυνση αιχμών, η ποιότητα ισχύος και η αδιάλειπτη παροχή ισχύος. Ανάλογα με το ποια ή ποιες από τις απαιτήσεις επιθυμεί ο καταναλωτής – τελικός χρήστης να καλύψει, οι τεχνολογίες μπορούν να έχουν μια πληθώρα χαρακτηριστικών. Το μέγεθος της εγκατάστασης συνήθως εξαρτάται από τον καταναλωτή αλλά η γενική τάση για αυτές τις εφαρμογές είναι η χρήση τεχνολογιών που είναι εφαρμόσιμες τόσο για απαιτήσεις ισχύος όσο και ενέργειας αλλά όχι απαραίτητα σε υψηλά επίπεδα. Επομένως, γενικά η διάρκεια εκφόρτισης δεν απαιτείται να είναι πολύ μεγάλη, αλλά απαιτείται γρήγορη απόκριση και καλή απόδοση ισχύος.

Πίνακας 16: Κριτήρια επιλογής τεχνολογίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε κατηγορία εφαρμογών.

Εφαρμογές αποθήκευσης στο στάδιο της παραγωγής	Εφαρμογές αποθήκευσης στο στάδιο της διανομής και μεταφοράς	Εφαρμογές αποθήκευσης στο σημείο κατανάλωσης
Απόδοση	Απόδοση	Απόδοση
Διάρκεια ζωής	Διάρκεια ζωής	Διάρκεια ζωής
Ενεργειακή πυκνότητα	Πυκνότητα ισχύος	Ενεργειακή πυκνότητα
Χωρητικότητα ενέργειας	Υψηλή ισχύς	Πυκνότητα ισχύος
Μεγάλος χρόνος εκφόρτισης (ώρες – ημέρα)	Μικρός χρόνος εκφόρτισης (sec – minutes)	Χρόνος εκφόρτισης (sec - λίγες ώρες)
Κόστος	Γρήγορη απόκριση	Γρήγορη απόκριση
Ειδικές απαιτήσεις χώρου για εγκατάσταση	Κόστος	Κόστος
Περιβαλλοντική επίδραση	Περιβαλλοντική επίδραση	Περιβαλλοντική επίδραση

Στον Πίνακα 16, παρουσιάζονται τα βασικά κριτήρια που έχουν επιλεγεί για τη διερεύνηση καταλληλότητας των εφαρμογών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά των Πινάκων 10-12 για τις διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης μπορούν να αξιολογηθούν για την καταλληλότητα εφαρμογής σε κάθε στάδιο του ενεργειακού συστήματος από την παραγωγή μέχρι την κατανάλωση.

4.2 Αξιολόγηση και επιλογή των τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Στην προηγούμενη παράγραφο αναλύθηκαν οι πιθανές εφαρμογές και οι βασικές απαιτήσεις των τεχνολογιών αποθήκευσης για κάθε στάδιο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Βάση αυτών επιλέχθηκαν βασικά ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια με τα οποία μπορούν να αξιολογηθούν και να επιλεγούν μια ή περισσότερες από τις διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης ανά εφαρμογή. Στη συνέχεια ακολουθούν οι πίνακες αξιολόγησης της επίδοσης των τεχνολογιών ανά για κάθε κριτήριο ανά εφαρμογή. Η επίδοση συμβολίζεται ποιοτικά με ως εξής: (✓) για χαρακτηριστικά τα οποία έχουν καλή επίδοση, (~) για χαρακτηριστικά που έχουν μέτρια επίδοση ή την ελάχιστη απαιτούμενη και (↓) για χαρακτηριστικά τα οποία έχουν κακή επίδοση ή κάποια αρνητική επίπτωση (π.χ. επιπτώσεις στην υγεία). Διευκρινίζεται πως οι συμβολισμοί κρίνουν την επίδοση και επομένως το σύμβολο (↓) για το κόστος δεν συνεπάγεται μειωμένο κόστος αλλά το αντίθετο.

Στον Πίνακα 17, συγκεντρώνονται όλες οι τεχνολογίες αποθήκευσης και η επίδοση βάσει των κριτηρίων αξιολόγησης και επιλογής τους για εφαρμογές στο στάδιο της παραγωγής που απαιτούν υψηλά επίπεδα ενέργειας και διάρκεια εκφόρτισης για εφαρμογές μαζικής αποθήκευσης ενέργειας με στόχο την παροχή στρεφόμενης εφεδρείας, την αντιστάθμιση φορτίων και τη διαχείριση των φορτίων της μεταξύ παραγωγής και ζήτησης.

Οι μπαταρίες Νικελίου γενικά σε επίδοση είναι κοντά στις μπαταρίες Μολύβδου – οξέος. Ωστόσο, απορρίπτονται από την επιλογή βέλτιστων τεχνολογιών για τις εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων σε ενέργεια έναντι των μπαταριών μολύβδου οξέος. Οι μπαταρίες Μολύβδου – οξέος δεν αποτελούν τη βέλτιστη επιλογή αλλά έχοντας τεχνολογική ωριμότητα και πολλές εφαρμογές δεν απορρίπτονται καθώς μπορούν να αποτελέσουν για ορισμένες λιγότερο απαιτητικές εφαρμογές μια οικονομικά και

τεχνικά βιώσιμη επιλογή. Οι μπαταρίες Μετάλλου - αέρα παρόλο που έχουν καλή επίδοση σε χωρητικότητα ενέργειας, διάρκεια εκφόρτισης, πυκνότητα ενέργειας και χαμηλό κόστος, απορρίπτονται λόγω της πολύ χαμηλής απόδοσης και διάρκεια ζωής τους που τις καθιστά προς το παρόν μη βιώσιμη επιλογή.

Συγκρίνοντας τις μπαταρίες Λιθίου με τις Μολύβδου – οξέος υπερτερούν στα βασικά κριτήρια επομένως μπορούν να αποτελέσουν μια βιώσιμη επιλογή ιδιαίτερα για τις εφαρμογές διανεμημένης παραγωγής. Έχουν υψηλή απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής και οι επιδόσεις τους σε διάρκεια εκφόρτισης και χωρητικότητα ενέργειας τις καθιστούν κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν ενέργεια. Κατάλληλες και υποσχόμενες τεχνολογίες στις υπό εξέταση εφαρμογές είναι οι μπαταρίες NaS και Μπαταρίες ροής. Οι NaS με μοναδικό μειονέκτημα το σχετικά αυξημένο κόστος σε σχέση με τις μπαταρίες Μολύβδου – οξέος και Λιθίου, επιτυγχάνει επιδόσεις σε απόδοση, διάρκεια ζωής, χωρητικότητα ενέργειας και διάρκεια εκφόρτισης. Αντίστοιχα, η τεχνολογία των μπαταριών ροής έχει σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς μπορεί να έχει μεγάλη χωρητικότητα ενέργειας, με μοναδικό μειονέκτημα την χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα.

Για εφαρμογές που απαιτούν διάρκεια εκφόρτισης από μερικά λεπτά μέχρι μια ώρα στις εφαρμογές που εξετάζονται οι τεχνολογίες των Υπερπυκνωτών και Σφονδύλων υψηλής ενέργειας μπορούν να έχουν εφαρμογή, καθώς αποτελούν τεχνολογίες υψηλής απόδοσης και μεγάλης διάρκειας ζωής ωστόσο δεν έχουν καλή πυκνότητα ενέργειας και γενικότερα δεν συναντώνται πρακτικά σε αντίστοιχες περιπτώσεις που απαιτούν υψηλά επίπεδα αποθηκευμένης ενέργειας. Η υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση χωλαίνει στα βασικά κριτήρια για εφαρμογές υψηλής ενέργειας και επιπλέον έχει μεγάλο κόστος.

Η αντλησιοταμίευση και η τεχνολογία συμπιεσμένου αέρα αποτελούν παραδοσιακά τις βέλτιστες περιπτώσεις για αποθήκευση υψηλής ενέργειας. Το κόστος τους ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας είναι μικρό και τα επίπεδα απόδοσης και χωρητικότητας ενέργειας υψηλά. Για εφαρμογές ενέργειας στην διανεμημένη παραγωγή, δεν αποτελούν προσιτές επιλογές με κύριο εμπόδιο την απαίτηση ειδικής τοποθέτησης και χρονοβόρας εγκατάστασης. Επομένως σαν τεχνολογίες, δεν απορρίπτονται αλλά

προτείνονται για εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου υπάρχει δυνατότητα να εγκατασταθούν.

Τέλος, η αποθήκευση με τη μορφή υδρογόνου αποτελεί μια υποσχόμενη τεχνολογία η οποία όμως είναι ακόμα ανώριμη και απαιτεί ειδική διαχείριση. Έχει κατάλληλα χαρακτηριστικά για εφαρμογές ενέργειας αλλά παράγοντες όπως το κόστος και η απόδοση μετατροπής της ενέργειας του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια προς το παρόν την καθιστούν λιγότερο ελκυστική. Η απόδοση βελτιώνεται αν ληφθεί υπόψη η δυνατότητα παραγωγής ωφέλιμης θερμικής ενέργειας (συμπαραγωγή με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου) και εφόσον το καύσιμο αποθηκευμένο υδρογόνο παράγεται με τη χρήση τεχνολογιών ΑΠΕ.

Συνεπώς, οι καταλληλότερες τεχνολογίες αποθήκευσης για εφαρμογές που απαιτούν καλά επίπεδα ενεργειακής πυκνότητας, ικανότητα για αποθήκευση ενέργειας (bulk storage) και σχετικά μεγάλη διάρκεια εκφόρτισης της αποθηκευμένης ενέργειας είναι οι τεχνολογίες μπαταριών **Λιθίου**, οι **μπαταρίες ροής** και οι **NaS**. Ακολουθούν οι μπαταρίες **Μολύβδου – οξέος** οι οποίες είναι κατάλληλες όταν ο παράγοντας του κόστους παίζει σημαντικό ρόλο και η τεχνολογίες **CAES** και **PHS** όταν απαιτούνται υψηλά επίπεδα χωρητικότητας ενέργειας και ισχύος και υπάρχει διαθέσιμος ο ειδικός χώρος που απαιτούνται για την εγκατάστασή τους.

Στον Πίνακα 18 συγκεντρώνονται οι τεχνολογίες αποθήκευσης και οι επιδόσεις βάσει των κριτηρίων για εφαρμογές στο στάδιο της μεταφοράς και διανομής που σχετίζονται με την ευστάθεια και την αξιοπιστία του συστήματος και απαιτούν γρήγορη απόκριση, μικρό χρόνο εκφόρτισης της αποθηκευμένης ισχύος και υψηλά επίπεδα ισχύος.

Για αυτές τις απαιτήσεις, δεν ενδείκνυται η επιλογή τεχνολογιών μπαταριών όπως οι μπαταρίες ροής και NaS καθώς έχουν μέτρια επίδοση σε σχέση με το χρόνο απόδοσης της ισχύος και είναι καλύτερη η εφαρμογή τους για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη διάρκεια. Η μπαταρία Μετάλλου – αέρα απορρίπτεται καθώς η απόδοσή της, και η διάρκεια ζωής της δεν την καθιστούν ακόμα κατάλληλη για τις υπό μελέτη εφαρμογές. Οι τεχνολογίες CAES και PHS δεν προτείνονται για εφαρμογές ποιότητας ισχύος και λαμβάνοντας υπόψη το κόστος κατασκευής και τις ειδικές απαιτήσεις σε χώρο απορρίπτονται.

Συνεπώς, οι καταλληλότερες τεχνολογίες για εφαρμογές στο δίκτυο που αφορούν καλές επιδόσεις για ποιότητα ισχύος ευστάθεια και αξιοπιστία είναι οι τεχνολογίες των **Υπερπυκνωτών (SC)**, η **Υπεραγωγίμη μαγνητική αποθήκευση (SMES)** και οι **Σφόνδυλοι (FW)**. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν ταχύτατη απόκριση, μεγάλη πυκνότητα ισχύος και απόδοσης, ωστόσο έχουν ακόμα υψηλό κόστος. Εναλλακτική αποτελούν, με καλές επιδόσεις στα βασικά απαιτούμενα κριτήρια και χαμηλότερο κόστος οι τεχνολογίες μπαταριών **Λιθίου, Μολύβδου – οξέος** και ορισμένες μπαταρίες **Νικελίου**.

Τέλος, στον Πίνακα 19 συγκεντρώνονται οι τεχνολογίες αποθήκευσης και τα κριτήρια για την επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας για το στάδιο της κατανάλωσης. Σε αυτές τις εφαρμογές απαιτείται γρήγορη απόκριση, απόδοση ισχύος και χωρητικότητα ενέργειας σε μέτρια επίπεδα χωρίς απαραίτητα μεγάλη διάρκεια εκφόρτισης της αποθηκευμένης ενέργειας.

Στο στάδιο αυτό, όπως έχει προαναφερθεί, η απόφαση για εγκατάσταση τεχνολογίας με απαίτηση μεγάλης ή μικρότερης χωρητικότητας ενέργειας εξαρτάται από τις επιλογές του καταναλωτή. Τα ελάχιστα απαιτούμενα χαρακτηριστικά αφορούν την γρήγορη απόκριση και την απόδοση. Το κόστος παίζει σημαντικότερο ρόλο σε αυτές τις εφαρμογές. Βάση αυτών των παραμέτρων κατάλληλες τεχνολογίες αποτελούν οι **Σφόνδυλοι**, και οι **Υπερπυκνωτές**, οι οποίοι εξασφαλίζουν ποιότητα ισχύος και UPS. Αποτελούν όμως τεχνολογίες οι οποίες έχουν αυξημένο κόστος και εναλλακτικά προτείνονται οι τεχνολογίες που εξασφαλίζουν τις ελάχιστες απαιτήσεις με ελκυστικό κόστος, σχετικά καλή απόδοση και έχουν τη δυνατότητα για αυξημένη αποθήκευση και μεγαλύτερη αυτονομία και μπορούν να βρουν εφαρμογή όπως μπαταρίες **Μολύβδου – οξέος, Νικελίου** και **Λιθίου**. Δεν προτείνονται τεχνολογίες NaS και μπαταριών ροής οι οποίες έχουν εφαρμοσιμότητα αλλά η βέλτιστη κλίμακα εφαρμογής τους σε συνδυασμό και με το κόστος τους αφορά εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας που συζητήθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 17: Αξιολόγηση τεχνολογιών αποθήκευσης για εφαρμογές υψηλής ενέργειας (μαζική αποθήκευση, στρεφόμενη εφεδρεία, ρύθμιση συχνότητας, αντιστάθμιση φορτίων) στο στάδιο της παραγωγής [Πίνακες 10-12, σελ. 116-118 και Πίνακας 16]

	L/A	Ni	Li	M/A	NaS	VRB	ZnBr	FW	PHS	CAES	SMES	SC	H ₂
Απόδοση (>80%)	~	↓	✓	↓	✓	~	~	✓	~	~	✓	✓	↓
Διάρκεια ζωής (2500)	↓	~	✓	↓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
πυκνότητα ενέργειας (100 kWh/m ³)	↓	↓	✓	✓	✓	↓	↓	↓	N/A	N/A	↓	↓	↓
Χωρητικότητα ενέργειας (MWh)	~	~	~	✓	✓	✓	✓	↓	✓	✓	↓	↓	✓
διάρκεια εκφόρτισης (h)	~	~	~	✓	✓	✓	✓	↓ [High energy min-1h]	✓	✓	↓	↓ [High energy min-1h]	✓
Κόστος 1000 €/kW)	✓	↓	~	✓	↓	↓	~	↓	✓	✓	~	↓	↓
Ευκολία στην τοποθέτηση - χωροθέτηση	✓	✓	✓	✓	✓	~	~	✓	↓	↓	~	~	~
Περιβαλλοντικά συμβατό	~	↓	~	✓	~	✓	✓	✓	↓	~	↓	↓	~

Πίνακας 18: Αξιολόγηση τεχνολογιών αποθήκευσης για εφαρμογές υψηλής ισχύος (ρύθμιση τάσης, ποιότητα ισχύος, ευστάθεια, αξιοπιστία) [Πίνακες 10-12, σελ. 116-118 και Πίνακας 16]

	L/A	Ni	Li	M/A	NaS	VRB	ZnBr	FW	PHS	CAES	SMES	SC	H ₂
Απόδοση (80%)	↓	↓	✓	↓	✓	~	~	✓	~	~	✓	✓	↓
Διάρκεια ζωής (2000)	↓	~	✓	↓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ποκνότητα ισχύος	~	✓	~	N/A				✓	N/A	N/A	✓	✓	✓
Επίπεδα ισχύος	✓	✓	~	↓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	~	✓
Μικρός χρόνος εκφόρτισης	~	~	~	~	↓	↓	↓	✓	↓	↓	✓	✓	↓
Γρήγορη απόκριση	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	↓	✓	✓	N/A
Κόστος	✓	↓	✓	✓	~	✓	✓	↓	✓	✓	↓	↓	↓
Περιβαλλοντική επίδραση	↓	↓	✓	✓	~	✓	✓	✓	↓	~	↓	↓	~

Πίνακας 19: Αξιολόγηση τεχνολογιών αποθήκευσης για ενδιάμεσης ισχύος στο τελικό σημείο κατανάλωσης (ποιότητα ισχύος, αδιάλειπτη παροχή ισχύος, εξομάλυνση αιχμών) [Πίνακες 10-12, σελ. 116-118 και Πίνακας 16]

	L/A	Ni	Li	M/A	NaS	VRB	ZnBr	FW	PHS	CAES	SMES	SC	H ₂
Απόδοση	↓	↓	✓	↓	✓	~	~	✓	~	~	✓	✓	↓
Διάρκεια ζωής	↓	~	✓	↓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ενεργειακή πυκνότητα	↓	↓	✓	✓	✓	↓	↓	↓	N/A	N/A	↓	↓	↓
Πυκνότητα ισχύος	~	✓	~					✓	N/A	N/A	✓	✓	✓
Χρόνος εκφόρτισης (sec -λίγες ώρες)	~	~	~	~	↓	↓	↓	✓	↓	↓	✓	✓	N/A
Γρήγορη απόκριση	~	~	~	~	~	~	~	✓	✓	↓	✓	✓	N/A
Κόστος	✓	↓	✓	✓	↓	↓	~	↓	✓	✓	↓	↓	↓
Περιβαλλοντική επίδραση	↓	↓	✓	~	~	✓	✓	↓	↓	~	↓	↓	~

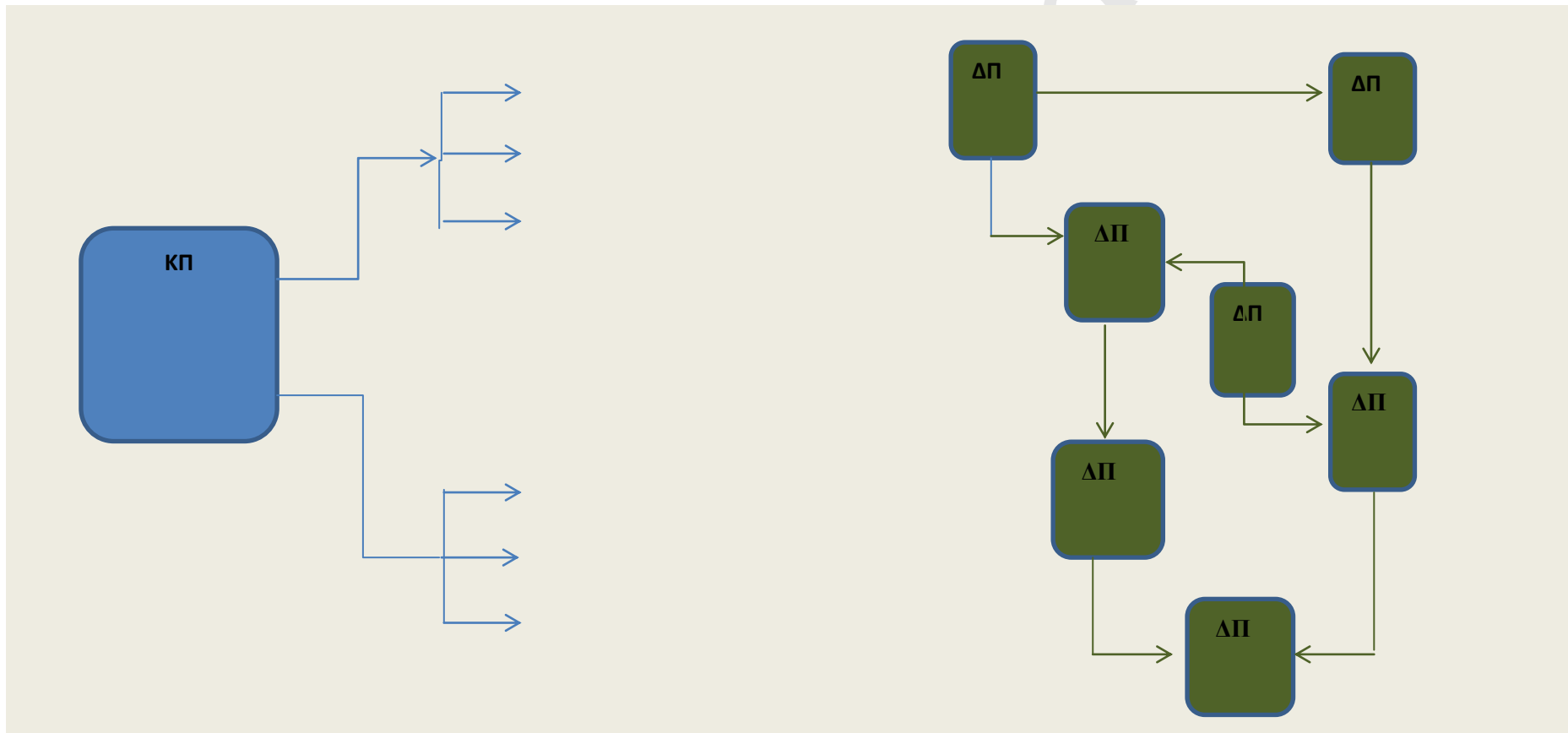
4.3 Σενάρια Ηλεκτρικής Δικτύωσης με ενεργειακή αποθήκευση

Η ηλεκτρική διασύνδεση κτιρίων με εγκατάσταση ενός μικροδικτύου το οποίο αποτελείται από κεντρικές ή διανεμημένες μονάδες παραγωγής ενέργειας και διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας (κεντρικά ή διανεμημένα) μπορεί να γίνει με ποικίλους τρόπους, ανάλογα με τις απαιτήσεις σε ηλεκτρικά φορτία, τις διαθέσιμες τεχνολογίες παραγωγής, τον τύπο κτιρίων και τα ενεργειακά προφίλ τους στη διάρκεια της ημέρας αλλά και σε ετήσιο και εποχικό επίπεδο, τις κλιματικές συνθήκες της εφαρμογής, κριτήρια κόστους και διαθεσιμότητας χώρου.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε μια αποτίμηση των διαθέσιμων τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης και επιλέχθηκαν διάφορες τεχνολογίες που θεωρούνται οικονομικά και τεχνικά κατάλληλες για εφαρμογές διανεμημένης παραγωγής, ποιότητας ισχύος και ενεργειακής διαχείρισης σε ενεργειακά συστήματα μικρής ή μεσαίας κλίμακας (μικροδίκτυα).

Η ηλεκτρική δικτύωση μιας μικρής περιοχής όπως μια μικρή πόλη ή μια συνοικία μπορεί να χωριστεί σε 2 γενικές κατηγορίες βάση του τρόπου με τον οποίο γίνεται η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κεντρική παραγωγή και διανεμημένη παραγωγή. Η παραγωγή της ενέργειας μπορεί να γίνεται με τεχνολογίες ΑΠΕ, μικρές μονάδες συμπαραγωγής και μικρής κλίμακας συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής. Το βασικό σχήμα μιας τέτοια δικτύωσης μπορεί να δοθεί ως ένα σκαρίφημα στο Σχήμα 4.

Έτσι η κεντρική παραγωγή, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει μια ή περισσότερες μονάδες, σε αυτά τα συστήματα γίνεται από μονάδες παραγωγής ενέργειας τοποθετημένες κοντά στους καταναλωτές τους οποίους τροφοδοτεί αλλά μπορεί να τοποθετηθεί και σε ένα καταναλωτή (on – site παραγωγή), ο οποίος μέσω της δικτύωσης τροφοδοτεί τους γειτονικούς και ηλεκτρικά συνδεδεμένους με αυτόν καταναλωτές. Στην περίπτωση της διανεμημένης παραγωγής οι καταναλωτές έχουν εγκατεστημένες μικρομονάδες παραγωγής (συνήθως μ-ΣΗΘ ή φωτοβολταϊκά) και συνιστούν ένα μικροδίκτυο [41-42], ανταλλάσσοντας ενέργεια μεταξύ τους.

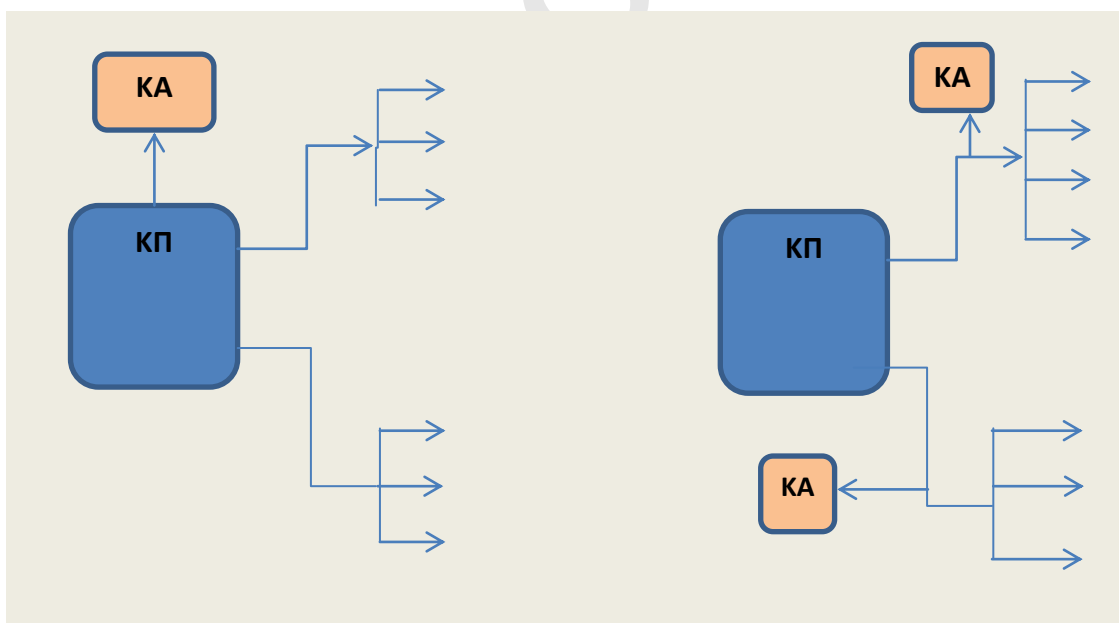


Σχήμα 13: Αριστερά : Κεντρική μονάδα παραγωγής που τροφοδοτεί μικρή πόλη ή συνοικία, Δεξιά: διανεμημένες μονάδες παραγωγής (ΔΠ ή on-site παραγωγή) σε κάθε κτίριο διασυνδεδεμένα ενεργειακά για ανταλλαγή ενέργειας.

Βάσει της παραπάνω ταξινόμησης η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να εγκατασταθεί είτε κεντρικά είτε διανεμημένα είτε συνδυάζοντας με το βέλτιστο τρόπο και τις δυο περιπτώσεις. Η παρουσίαση των σεναρίων δικτύωσης με εφαρμογή τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια ποιοτική προσέγγιση η οποία προκύπτει από προτάσεις ή πραγματικά παραδείγματα εφαρμογών.

4.3.1 Σενάριο κεντρικής παραγωγής με κεντρική αποθήκευση

Στο σενάριο αυτό (Σχήμα 14) η ενέργεια παράγεται κεντρικά από μια ή περισσότερες μονάδες παραγωγής. Οι παραγωγικές μονάδες μπορεί να είναι συμπαραγωγικές μονάδες οι οποίες λειτουργούν με διάφορα καύσιμα (βιομάζα, φυσικό αέριο, υδρογόνο, κ.λπ.), συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής μικρής ή μεσαίας κλίμακας ή και τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ (φωτοβολταϊκό πάρκο, αιολικό πάρκο κ.λπ.).



Σχήμα 14: Κεντρική Παραγωγή – Κεντρική Αποθήκευση, Αριστερά: Κεντρική παραγωγή με κεντρική αποθήκευση (τυπική εφαρμογή), Δεξιά: Κεντρική παραγωγή με Κεντρική αποθήκευση ανά ομάδα καταναλωτών (βιομηχανικοί καταναλωτές, εμπορικοί καταναλωτές, οικιακοί καταναλωτές)

Μια κεντρική εφαρμογή αποθηκευτικών διατάξεων σε αυτό το σενάριο, συνεπάγεται εγκατάσταση αυτών σε κάθε μονάδα παραγωγής για υποστήριξη του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής, λειτουργία των μονάδων στην ονομαστική ισχύ και για την περίπτωση των τεχνολογιών ΑΠΕ για διείσδυση αυτών στο ενεργειακό σύστημα λόγω της περιοδικότητας της διαθέσιμης ανανεώσιμης ενέργειας που εκμεταλλεύονται. Επιπλέον για την εξομάλυνση των αιχμών, την αδιάλειπτη παροχή ισχύος και την ευστάθεια του μικροδικτύου μπορούν να εγκατασταθούν μονάδες παραγωγής στο ηλεκτρικό δίκτυο εκτός από τα σημεία παραγωγής της ενέργειας.

Επομένως κεντρικές μονάδες αποθήκευσης, μπορούν να εξυπηρετούν την παραγωγική διαδικασία βοηθώντας την εκκίνηση των παραγωγικών μονάδων, την αλλαγή από τη μια τεχνολογία παραγωγής στην άλλη, την αποθήκευση πλεονάσματος παραγόμενης ενέργειας και απόδοση της σε αιχμή ζήτησης. Μπορούν να συμβάλλουν στην ευστάθεια του συστήματος διανομής και στην ποιότητα ισχύος και έτσι μπορούν να εγκατασταθούν και στο δίκτυο εκτός από τα σημεία παραγωγής, κοντά στα σημεία τελικής χρήσης των καταναλωτών. Σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων σε φορτία και ποιότητα ισχύος όπως εμπορικοί και βιομηχανικοί καταναλωτές, μπορεί μια αποθηκευτική διάταξη να εγκαθίσταται σε κλάδο του δικτύου όπως φαίνεται στο Σχήμα 14 δεξιά.

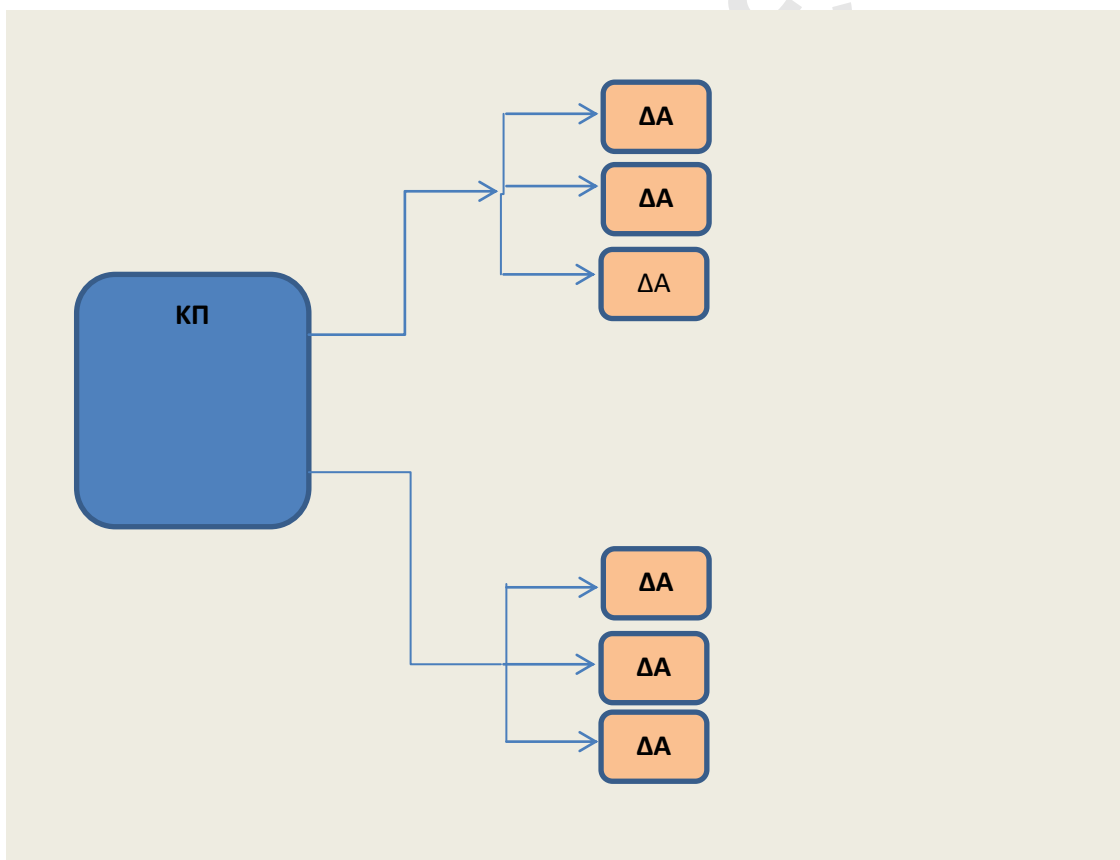
Οι τεχνολογίες που μπορούν να έχουν εφαρμογή σε ένα τέτοιο σενάριο δικτύωσης είναι οι περισσότερες από τις τεχνολογίες που έχουν κριθεί κατάλληλες για το στάδιο της παραγωγής και της διανομής στην προηγούμενη παράγραφο. Εφόσον η προηγούμενη αποτίμηση των τεχνολογιών ανέδειξε τις περισσότερο αποδοτικές τεχνολογίες που συγκεντρώνουν καλές επιδόσεις σε σχέση με ενεργειακή πυκνότητα και πυκνότητα ισχύος, διάρκεια ζωής και απόδοση όλες οι τεχνολογίες που αποτιμώνται και επιλέγονται στους Πίνακες 17 και 18 μπορούν να έχουν εφαρμογή. Ωστόσο, αν ληφθεί περισσότερο υπόψη το κόστος των τεχνολογιών, οι πιθανές ειδικές απαιτήσεις χώρου, και η χωρητικότητα ενέργειας και ισχύος όλων των τεχνολογιών για εφαρμογές αποθήκευσης σε επίπεδο ενός μικροδικτύου δεν μπορούν όλες οι τεχνολογίες να καταστούν εφαρμόσιμες από μικρής έως μέσης κλίμακας εφαρμογές.

Συνεπώς για αυτό το σενάριο δικτύωσης προτείνονται οι μπαταρίες **Λιθίου, NaS, Μπαταρίες Ροής, Μολύβδου – οξέος, Νικελίου** και οι **υψηλής ισχύος FWs και Υπερπυκνωτές**. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν ανταγωνιστικό κόστος και βέλτιστες επιδόσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες που αφορούν κυρίως εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας. Μπορούν να εγκατασταθούν πιο εύκολα και δεν έχουν μεγάλη περιβαλλοντική επίπτωση. Αποτελούν τεχνολογίες που είναι ρεαλιστικές από άποψη μεγέθους και κόστους για εφαρμογές σε μικροδίκτυα επιπέδου συνοικίας ή μικρής πόλης για κεντρική αποθήκευση ενέργειας.

Η τεχνολογία SMES δεν προτείνεται καθώς μπορεί να βρει καλύτερη εφαρμογή σε μεγάλης κλίμακας συστήματα, τα οποία εφαρμόζονται σε επίπεδο μακροδικτύου και επιπλέον το κόστος τους αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Κάτι ανάλογο προτείνεται για τις τεχνολογίες της αντλησιοταμίευσης και του συμπιεσμένου αέρα. Τα συστήματα αυτά λόγω υψηλού κόστους επένδυσης αποτελούν οικονομικά βιώσιμες επιλογές μόνο σε απομονωμένα συστήματα όπως για παράδειγμα σε νησιά με αυξημένη ζήτηση ενέργειας [49] και σε περιπτώσεις που υπάρχει διαθεσιμότητα στο χώρο εγκατάστασης. Τέλος, η αποθήκευση υδρογόνου μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα παραγωγής ενέργειας με καύσιμο υδρογόνο όπως οι κυψέλες καυσίμου Υδρογόνου και σε συνδυασμό με τεχνολογίες παραγωγής από ΑΠΕ για την παραγωγή της αποθηκευμένης ποσότητας υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού, ώστε να είναι βιώσιμη η εφαρμογή τους. Συνεπώς, δεν αποτελεί μια εναλλακτική η οποία για να είναι βιώσιμη οικονομικά, προτείνεται να εφαρμόζεται υπό προϋποθέσεις όπως και οι προαναφερθείσες τεχνολογίες SMES, PHS και CAES.

4.3.2 Σενάριο Κεντρικής Παραγωγής με διανεμημένη αποθήκευση ενέργειας

Στο σενάριο (Σχήμα 15) αυτό η παραγωγή γίνεται κεντρικά σε μια ή περισσότερες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο μικροδίκτυο. Οι παραγωγικές μονάδες μπορεί να είναι συμπαραγωγικές μονάδες οι οποίες λειτουργούν με διάφορα καύσιμα (βιομάζα, φυσικό αέριο, υδρογόνο, κ.λπ.), συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής μικρής ή μεσαίας κλίμακας ή και τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ (φωτοβολταϊκό πάρκο, αιολικό πάρκο κ.λπ.).



Σχήμα 15: Κεντρική Παραγωγή (ΚΠ) με εφαρμογές Διανεμημένης Αποθήκευσης (ΔΑ)

Η διαφοροποίηση με το προηγούμενο σενάριο, στο οποίο η αποθήκευση ενέργειας γίνεται κεντρικά, είναι ότι οι μονάδες αποθήκευσης εγκαθίστανται διανεμημένα και η συσσώρευση (αποθήκευση) της ενέργειας γίνεται on-site δηλαδή στον τελικό σημείο κατανάλωσης.

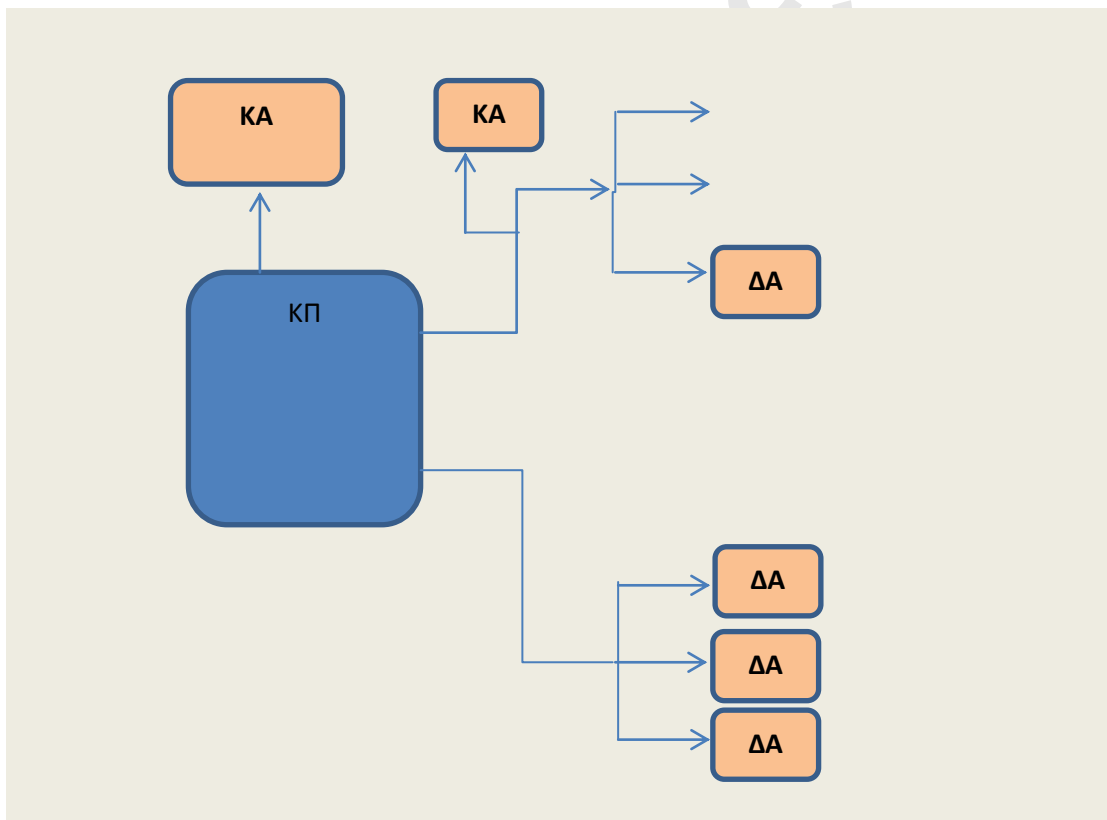
Η διανεμημένη αποθήκευση σε ένα μικροδίκτυο μπορεί να αφορά εφαρμογές ποιότητας ισχύος, ειδικά για καταναλωτές που έχουν αυξημένες απαιτήσεις ποιότητας ισχύος και αξιοπιστίας (πχ. βιομηχανικοί ή βιοτεχνικοί καταναλωτές ή μεγάλα εμπορικά κτίρια) αλλά και εξομάλυνσης αιχμών με στόχο την ενεργειακή διαχείριση. Τα σημαντικότερα κριτήρια σε αυτές τις περιπτώσεις είναι το κόστος, η απόκριση των συστημάτων και η κλίμακα εφαρμογής τους.

Βάση αυτών, οι καταλληλότερες τεχνολογίες για διανεμημένη αποθήκευση είναι οι **μικρής κλίμακας Σφόνδυλοι και Υπερπυκνωτές** για εφαρμογές ποιότητας ισχύος και οι μπαταρίες **Λιθίου, Νικελίου και Μολύβδου – οξέος** για εφαρμογές τόσο ισχύος όσο και ενεργειακής διαχείρισης για μικρής διάρκειας αποθήκευση. Άλλες τεχνολογίες που θα μπορούσαν να έχουν εφαρμογή λόγω επιδόσεων που σχετίζονται με την ισχύ και την απόκριση είναι οι SMES και οι μπαταρίες ροής και NaS ωστόσο, δεν αποτελούν ρεαλιστικές και οικονομικά αποδοτικές για την κλίμακα εφαρμογής που απαιτείται.

Η πρακτική εγκατάστασης αποθηκευτικών διατάξεων που έχουν σαν στόχο την μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης on-site δεν προτείνεται για συστήματα με κεντρική παραγωγή της ενέργειας. Η πρακτική της ενεργειακής διαχείρισης σε μεγάλη κλίμακα με χρήση τεχνολογιών με μεγάλη χωρητικότητα ενέργειας, θα μπορούσε να θεωρηθεί περισσότερο ρεαλιστική σε ειδικούς καταναλωτές όπως οι βιομηχανικοί καταναλωτές. Ειδικά για τους οικιακούς καταναλωτές η εγκατάσταση τέτοιων τεχνολογιών, που δίνουν τη δυνατότητα για μεγάλης διάρκειας αποθήκευση ενέργειας, με τα δεδομένα κόστη των τεχνολογιών απαιτεί μεγάλο κόστος εγκατάστασης. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση απομονωμένων οικιών, μη διασυνδεδεμένων σε κάποιο ηλεκτρικό δίκτυο, που συνιστούν μόνα τους ένα μικροδίκτυο σε επίπεδο οικίας. Σε αυτή την περίπτωση, ιδιαίτερα αν το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της οικίας βασίζεται σε τεχνολογία ΑΠΕ, τότε απαιτείται να καλύπτει μεγαλύτερη διάρκεια αποθήκευσης.

4.3.3 Σενάριο κεντρικής παραγωγής συνδυάζοντας κεντρική και διανεμημένη αποθήκευση

Στο σενάριο αυτό (Σχήμα 16) προτείνεται ένα πιο ρεαλιστικό σχήμα δικτύωσης με αποθήκευση στο οποίο μπορούν περισσότερες εναλλακτικές τεχνολογίες αποθήκευσης να έχουν εφαρμογή και να καλύπτουν όλο το φάσμα απαιτήσεων στο ενεργειακό σύστημα του μικροδικτύου από την παραγωγή μέχρι την κατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας.



Σχήμα 16: Συνδυασμός Κεντρικής Παραγωγής με Κεντρική και Διανεμημένη Αποθήκευση ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου και των καταναλωτών για εφαρμογές ενεργειακής διαχείρισης και ποιότητας ισχύος στο σύστημα.

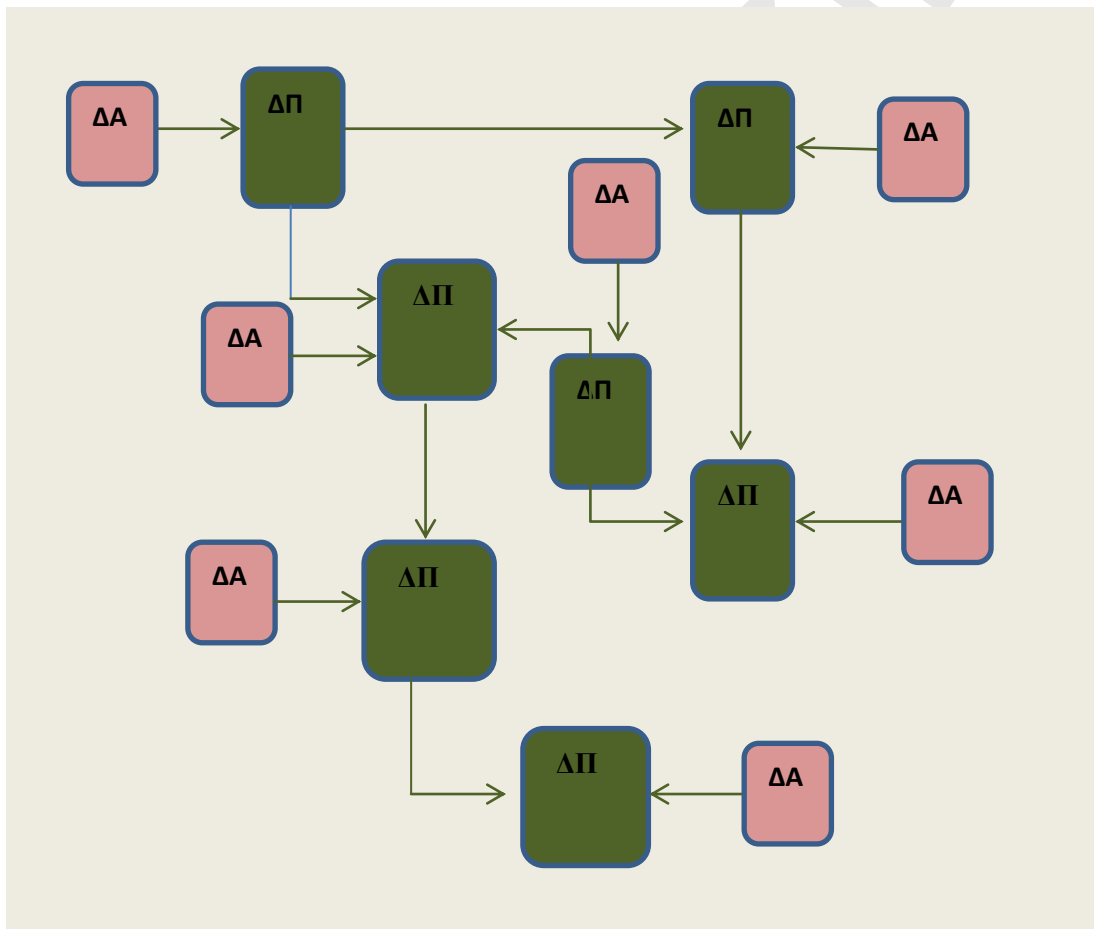
Ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε μικροδικτύου, τους καταναλωτές από τους οποίους απαρτίζεται και τις απαιτήσεις για ποιότητα ισχύος αλλά και βάσει των εγκατεστημένων τεχνολογιών παραγωγής μπορούν να εγκατασταθούν τεχνολογίες αποθήκευσης σε όλα τα στάδια και να εξυπηρετούν εφαρμογές ενέργειας και ισχύος.

Σε ένα τέτοιο σενάριο, στο στάδιο της κεντρικής παραγωγής εγκαθίστανται οι αποθηκευτικές διατάξεις οι οποίες υποστηρίζουν τη λειτουργία των παραγωγικών μονάδων (όπως και στο πρώτο σενάριο) και αυξάνουν την απόδοση και διείσδυση τεχνολογιών ΑΠΕ. Στο στάδιο της διανομής της ενέργειας μπορούν να εγκατασταθούν μονάδες αποθήκευσης για την ευστάθεια του συστήματος, τη ρύθμιση της τάσης και την ποιότητα ισχύος προς τους καταναλωτές. Στο στάδιο της κατανάλωσης μπορούν κατά περίπτωση να εγκαθίστανται διατάξεις για αδιάλειπτη παροχή ισχύος αλλά και περιπτώσεις που ο καταναλωτής επιθυμεί να εκμεταλλευτεί τιμολογιακή διαφορά στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύοντας τη σε περίοδο χαμηλού κόστους και καταναλώνοντας τη σε περίοδο που το κόστος και η ζήτηση αυξάνονται.

Σε αυτό το σενάριο όλες οι προαναφερθείσες τεχνολογίες των παραπάνω δυο σεναρίων έχουν εφαρμογή και μπορούν να εγκατασταθούν κατά περίπτωση ανάλογα με τις συνολικές απαιτήσεις του μικροδικτύου και από την πλευρά της παραγωγής και από την πλευρά της κατανάλωσης καλύπτοντας τις ελάχιστες απαιτούμενες προδιαγραφές για την ευσταθή και οικονομικότερη λειτουργία ενός μικροδικτύου ιδιαίτερα στην περίπτωση που βρίσκεται σε απομονωμένη λειτουργία.

4.3.4 Σενάριο Διανεμημένης Παραγωγής με Διανεμημένη Αποθήκευση Ενέργειας

Στο σενάριο της διανεμημένης παραγωγής, η παραγωγή γίνεται τοπικά (on – site) και οι καταναλωτές παίζουν το ρόλο του παραγωγού. Καταναλώνουν την ενέργεια που απαιτούν βάση της ζήτησης τους τοπικά και το πλεόνασμα το διοχετεύουν στο δίκτυο (μικροδίκτυο) ή / και σε διατάξεις αποθήκευσης.



Σχήμα 17: Σενάριο διανεμημένης παραγωγής (ΔΠ) με εγκατάσταση διανεμημένων μονάδων αποθήκευσης (ΔΑ) ενέργειας σε επίπεδο συνοικίας.

Οι τεχνολογίες παραγωγής αυτού του σεναρίου μπορούν να είναι φωτοβολταϊκά, μονάδες μικρής συμπαραγωγής ή τριπαραγωγής, μικρής κλίμακας μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.

Η τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας σε ένα τέτοιο σενάριο, απαιτούνται να έχουν γρήγορη απόκριση, υψηλή πυκνότητα ισχύος, χαμηλό ή ελκυστικό κόστος και καλή απόδοση. Το μέγεθος της αποθήκευσης μπορεί να αφορά τις ανάγκες του ίδιου του καταναλωτή καλύπτοντας φορτία αιχμής για λίγες ώρες, ώστε είναι επαρκής η παραγόμενη ενέργεια στα πλαίσια του δικτύου. Η χωρητικότητα ενέργειας δεν έχει τη μέγιστη σημασία και αυξάνει σημαντικά το κόστος της συνολικής εγκατάστασης. Ωστόσο, σε ένα τέτοιο σενάριο μπορεί να προταθεί σαν λύση η επιλογή μιας τεχνολογίας μεγαλύτερης κλίμακας, εφόσον χρησιμοποιείται για να υποστηρίξει το δίκτυο και τη ζήτηση σε αυτό και όχι τον ίδιο τον καταναλωτή, παίζοντας και το ρόλο της κεντρικής αποθήκης.

Επομένως, σε αυτό το σενάριο δικτύωσης, οι τεχνολογίες αποθήκευσης που μπορούν να έχουν εφαρμογή είναι οι μπαταρίες **Μολύβδου – οξέος, Νικελίου, Λιθίου, Υπερπυκνωτές και Σφόνδυλοι**. Οι διανεμημένες τεχνολογίες παραγωγής σε ένα τέτοιο σχήμα δεν έχουν απαιτήσεις μεγάλης χωρητικότητας ενέργειας ώστε να απαιτηθούν τεχνολογίες μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογής όπως οι μπαταρίες ροής ή μπαταρίες NaS και σε καμία περίπτωση δεν έχουν εφαρμοσιμότητα οι τεχνολογίες CAES και PHS και SMES. Για την περίπτωση που απαιτείται όπως αναφέρθηκε να υπάρχει η δυνατότητα μιας διάταξης που θα παίζει το ρόλο μιας κεντρικής αποθήκης η προτεινόμενη τεχνολογία είναι οι **μπαταρίες ροής** ή οι μπαταρίες **NaS**.

5 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η ηλεκτρική δικτύωση κτιρίων διαφόρων ενεργειακών προφίλ και απαιτήσεων που συνιστούν ένα μικρό δίκτυο από μικρή έως μεσαία κλίμακα εφαρμογής αποτελεί μια περίπτωση η οποία διαφοροποιείται πλήρως από το μέχρι τώρα σχήμα ενός ενεργειακού συστήματος. Προτεραιότητα αυτών των συστημάτων είναι να μπορούν να λειτουργούν χωρίς προβλήματα ποιότητας ισχύος και με αδιάλειπτη παροχή ενέργειας όταν βρίσκονται σε απομονωμένη λειτουργία. Επιπλέον η παραγόμενη ενέργεια από τις παραγωγικές μονάδες θα πρέπει να είναι ίση με την ζήτηση ενέργειας κάθε στιγμή.

Οι μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να συμβάλλουν σε αυτή την κατεύθυνση παρέχοντας υπηρεσίες αδιάλειπτης παροχής, ποιότητας ισχύος, ευστάθειας στο δίκτυο και αξιοπιστίας, εξοικονόμηση ενέργειας, διείσδυση τεχνολογιών παραγωγής ΑΠΕ και νέων αναδυόμενων τεχνολογιών όπως αυτή του Υδρογόνου, μεταβολή της καμπύλης ζήτησης από περιόδους υψηλής σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, αντιστάθμιση φορτίων, παροχή υποβοήθησης για εκκίνηση συσκευών παραγωγής ή αλλαγή παραγωγής από τη μία τεχνολογία στην άλλη στα πλαίσια της ενεργειακής διαχείρισης του δικτύου.

Μέχρι και σήμερα, το κόστος και η περιορισμένη εφαρμογή των τεχνολογιών αποθήκευσης τις καθιστά μη βιώσιμες λύσεις για την αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος της αυξημένης κατανάλωσης καυσίμων και της περιβαλλοντικής επίπτωσης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Με την όλο και μεγαλύτερη διείσδυση της διανεμημένης παραγωγής και των τεχνολογιών ΑΠΕ οι οποίες απαιτούν αποθήκευση ενέργειας, η έρευνα και ανάπτυξη των τεχνολογιών αποθήκευσης θα οδηγήσει σταδιακά στη μεγαλύτερη και οικονομικά βιώσιμη εφαρμογή τους.

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια ανασκόπησης των διαθέσιμων και αποδοτικότερων μεθόδων αποθήκευσης και επιλογής των καταλληλότερων διατάξεων για τις εφαρμογές της ενεργειακής διαχείρισης και ποιότητα ισχύος στα ηλεκτρικά δίκτυα με ποιοτικά και βασικά ποσοτικά κριτήρια. Η επιλογή των καταλληλότερων τεχνολογιών αποθήκευσης αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία και πολλαπλοί παράγοντες που σχετίζονται με τεχνικές απαιτήσεις για υποστήριξη σε όλα τα στάδια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (παραγωγή, διανομή, κατανάλωση), οικονομικά

και περιβαλλοντικά κριτήρια και σχεδιαστικές επιλογές για αυτονομία ή χωρητικότητα αποθηκευμένης ενέργειας ανά περίπτωση.

Στα πλαίσια μιας τέτοιας ανασκόπησης είναι δύσκολο να εξαχθούν ποσοτικά κριτήρια αποτίμησης της συνεισφοράς μιας ή περισσότερων αποθηκευτικών διατάξεων στα πλαίσια ενός μικροδικτύου σε επίπεδο συνοικίας. Έτσι, εξάγονται γενικευμένα συμπεράσματα καταλληλότητας και εφαρμοσιμότητας των διαφορών τεχνολογιών αποθήκευσης.

Συμπερασματικά, υπάρχουν διαθέσιμες τεχνολογίες, οι οποίες είναι κατάλληλες και μπορούν να εφαρμοστούν σε μικροδίκτυα παρέχοντας όλες τα δυνατά οφέλη τους για κάθε σενάριο δικτύωσης και για κάθε πιθανή εφαρμογή. Μπορούν να καλύψουν όλο το φάσμα των απαιτήσεων από εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ισχύ μέχρι υψηλή ενέργεια και να καλύπτουν ταυτόχρονα περισσότερες από μια εφαρμογές.

Τεχνολογίες μπαταριών όπως οι μπαταρίες Μολύβδου – οξέος και Νικελίου, με τεχνολογική ωριμότητα και μεγάλη εφαρμογή μέχρι σήμερα, προσφέρουν σχετικά καλή απόδοση και αξιόπιστες υπηρεσίες με το βέλτιστο δυνατό κόστος. Είναι κατάλληλες για εφαρμογές διανεμημένης παραγωγής. Άλλες προηγμένες μπαταρίες, όπως οι NaS, οι μπαταρίες Λιθίου και οι μπαταρίες ροής, αποτελούν συστήματα υποσχόμενα με περιθώρια τεχνολογικής βελτίωσης και κλιμάκωσης των δυνατοτήτων τους. Οι μπαταρίες Λιθίου αποτελούν τη βέλτιστη λύση για εφαρμογές διανεμημένης παραγωγής σε σύγκριση με τις καθιερωμένες Μολύβδου – οξέος και Νικελίου, ωστόσο έχουν περιορισμένη προς το παρόν κλίμακα ισχύος. Έχουν μεγαλύτερες δυνατότητες αλλά προς το παρόν το κόστος τους είναι αυξημένο. Η μπαταρία NaS θεωρείται ως η πιο προηγμένη τεχνολογία, ωστόσο εφαρμόζεται κυρίως για περιπτώσεις που απαιτούν μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης. Η μπαταρία Μετάλλου – αέρα αποτελεί ένα παράδειγμα τεχνολογίας η οποία απαιτεί βελτίωση σε σχέση με τη διάρκεια ζωής της και την απόδοση της καθώς είναι μια υποσχόμενη τεχνολογία.

Οι τεχνολογίες των υπερπυκνωτών των σφονδύλων και της υπεραγωγίσιμης μαγνητικής αποθήκευσης αποτελούν συστήματα αναδυόμενα και κατάλληλα να συμβάλλουν σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλά επίπεδα ισχύος και ταχύτατη απόκριση με χρόνου αποθήκευσης μέχρι μερικά λεπτά. Το κόστος τους προς το παρόν είναι αυξημένο,

γεγονός που καθιστά την χρήση τους ακόμα περιορισμένη. Είναι οι πλέον κατάλληλες τεχνολογίες για συστήματα διανεμημένης παραγωγής.

Τέλος, οι τεχνολογίες της αντλησιοταμίευσης και του συμπιεσμένου αέρα που παραδοσιακά χρησιμοποιούνται για μαζική αποθήκευση στα παραδοσιακά μεγάλης κλίμακας ενεργειακά συστήματα τόσο σε βραχυπρόθεσμη όσο και μακροπρόθεσμη διάρκεια αποθήκευσης, έχουν μεγάλη ανάπτυξη και ωριμότητα, μεγάλη απόδοση αλλά δεν αποτελούν τη βέλτιστη επιλογή αποθηκευτικής διάταξης σε μικρής κλίμακας ενεργειακά συστήματα όπως τα μικροδίκτυα λόγω του αυξημένου κόστους εγκατάστασης και εξοπλισμού και του περιορισμού τους για ειδικό χώρο εγκατάστασης.

Τα σενάρια δικτύωσης με ενεργειακή αποθήκευση που αναπτύχθηκαν, στηρίχθηκαν σε μια προσομοίωση σε μικρή κλίμακα του κλασσικού μοντέλου των ηλεκτρικών δικτύων (κεντρική παραγωγή) αλλά και στο αναδυόμενο μοντέλο ηλεκτρικών δικτύων (διανεμημένη παραγωγή) στηριζόμενο σε παραδείγματα από τη βιβλιογραφία για σενάρια δικτύωσης σε μικρά ηλεκτρικά δίκτυα σε επίπεδο συνοικίας αλλά και σε συστήματα με έντονη διείσδυση διανεμημένης παραγωγής.

Προτάθηκαν 4 σενάρια δικτύωσης, 3 από τα οποία αφορούν σε μικροδίκτυο με κεντρική παραγωγή ενέργειας και το τελευταίο σε μικροδίκτυο με διανεμημένη (on-site) παραγωγή ενέργειας

Στο σενάριο 1, στο οποίο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται κεντρικά από μια ή περισσότερες παραγωγικές μονάδες προτείνεται η κεντρική αποθήκευση ενέργειας για εξομάλυνση αιχμών ζήτησης, παροχή ισχύος για εκκίνηση των μονάδων και μεταβολή από τη μια παραγωγική μονάδα στην άλλη, εφαρμογές ποιότητας ισχύος και ευστάθειας του ηλεκτρικού δικτύου. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης οι οποίες προτείνονται για αυτό το σενάριο είναι οι μπαταρίες Νικελίου, Μολύβδου – Οξέος, Λιθίου, NaS, ροής, οι υψηλής ισχύος σφόνδυλοι και οι υψηλή ισχύος Υπερπυκνωτές. Η επιλογή των τεχνολογιών των σφονδύλων και υπερπυκνωτών υψηλής ισχύος, που επιλέχθηκαν για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ισχύ έγινε βάσει των κριτηρίων της γρήγορης απόκρισης, του κόστους, της πυκνότητας ισχύος και της απόδοσης κύκλου – φόρτισης εκφόρτισης. Η επιλογή των τεχνολογιών των μπαταριών που επιλέχθηκαν κυρίως για εφαρμογές ενεργειακής διαχείρισης αλλά και κατά περίπτωση παροχής ισχύος, έγινε με

έμφαση στην ενεργειακή πυκνότητα, τη χωρητικότητα αποθηκευμένης ενέργειας, το κόστος, την απόδοση κύκλου φόρτισης – εκφόρτισης και τη διάρκεια ζωής. Σταθμίζοντας αυτά τα κριτήρια και με γνώμονα την κλίμακα εφαρμογής για αυτό το σενάριο απορρίφθηκαν οι υπόλοιπες τεχνολογίες που είτε δεν πληρούσαν τα ελάχιστα απαιτούμενα κριτήρια, είτε αφορούν μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές (μακροδίκτυα).

Στο σενάριο 2, στο οποίο η παραγωγή ενέργειας παραμένει κεντρική με μία ή περισσότερες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής, προτείνεται η διανεμημένη αποθήκευση (on-site) ενέργειας στο σημείο τελικής κατανάλωσης. Αυτή η προσέγγιση αφορά εγκατάσταση τεχνολογιών αποθήκευσης οι οποίες επιλέγονται στο σημείο τελικής κατανάλωσης (βιομηχανικοί, οικιακοί ή εμπορικοί καταναλωτές) και εξυπηρετούν ανάγκες ενεργειακής διαχείρισης ή / και ποιότητας ισχύος του τελικού χρήστη. Ανάλογα με τις απαιτήσεις και το ενεργειακό προφίλ του τελικού καταναλωτή η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να παρέχει ποιότητα ισχύος, αδιάλειπτη παροχή ισχύος, εξομάλυνση αιχμών ζήτησης και του δίνει τη δυνατότητα να ρυθμίσει την ενεργειακή του κατανάλωση. Η κλίμακα αυτών των συστημάτων είναι μικρότερη από αυτή του προηγούμενου σεναρίου και τα κύρια κριτήρια επιλογής κατάλληλων τεχνολογιών είναι η απόκριση του συστήματος, το κόστος και η πυκνότητα ισχύος. Για αυτό το σενάριο προτάθηκαν μικρής κλίμακας σφόνδυλοι και υπερπυκνωτές για εφαρμογές παροχής ισχύος και αδιάλειπτης παροχής ενέργειας και οι μπαταρίες Μολύβδου – Οξέος, Νικελίου και Λιθίου για εφαρμογές ενέργειας για σχετικά μικρή διάρκεια εκφόρτισης (μέχρι λίγες ώρες). Στην επιλογή των μπαταριών έπαιξε σημαντικό ρόλο το κόστος των μπαταριών και η κλίμακα εφαρμογής τους, αφού η εγκατάσταση μεγαλύτερης κλίμακας τεχνολογίας αποθήκευσης για μεγαλύτερη χωρητικότητα ενέργειας και διάρκεια αποθήκευσης το κόστος αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα. Με τη χρήση αυτών των τεχνολογιών μπορεί να επιτευχθεί μια μέτρια ενεργειακή διαχείριση και είναι κατάλληλες για περιπτώσεις που απαιτούνται καλά επίπεδα ισχύος.

Το σενάριο 3, συνδυάζει την κεντρική με τη διανεμημένη αποθήκευση και αποτελεί μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση για απαιτήσεις αποθήκευσης σε ένα μικροδίκτυο. Η παραγωγή ενέργειας γίνεται και πάλι κεντρικά με μια ή περισσότερες τεχνολογίες παραγωγής και στο στάδιο της παραγωγής προτείνονται τεχνολογίες ανάλογες που προτάθηκαν στο σενάριο 1 οι οποίες αποτελούν την κεντρική αποθήκευση. Επίσης, οι ίδιες τεχνολογίες προτείνονται και στο στάδιο της διανομής του δικτύου και στο στάδιο

της κατανάλωσης στο οποίο γίνεται η εφαρμογή της διανεμημένης αποθήκευσης. Ένα τέτοιο σενάριο δικτύωσης με κεντρικές και διανεμημένες μονάδες είναι πιο ολοκληρωμένο και μπορεί να καλύψει απαιτήσεις ισχύος και ενέργειας σε όλα τα στάδια. Επιπλέον, το μέγεθος των αποθηκευτικών διατάξεων ιδιαίτερα στο στάδιο της παραγωγής μπορεί να ελαχιστοποιηθεί και να περιοριστεί σε χρήση αποθηκευτικών διατάξεων για τεχνολογίες ΑΠΕ εφόσον υπάρχουν και για την εκκίνηση των μηχανών ηλεκτροπαραγωγής, ενώ η ενεργειακή διαχείριση του συστήματος μπορεί να επιτυγχάνεται με μικρότερης κλίμακας κεντρική αποθήκευση σε συνδυασμό με τις εφαρμογές διανεμημένης αποθήκευσης στα σημεία τελικής κατανάλωσης.

Τέλος, το σενάριο 4 αφορά σε διανεμημένη παραγωγή (on-site) η οποία γίνεται στα σημεία κατανάλωσης και καθιστά τους καταναλωτές ως παραγωγούς μικρής κλίμακας μέσω χρήσης φωτοβολταϊκών, μονάδων μικροσυμπαγωγής και άλλων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας. Το σενάριο την διανεμημένης παραγωγής, περιλαμβάνει διανεμημένες μονάδες αποθήκευσης είτε κοντά σε κάθε μονάδα διανεμημένης παραγωγής είτε σε επιλεγμένα σημεία που υπάρχει απαίτηση κάλυψης διαφόρων αναγκών τόσο στο ηλεκτρικό μικροδίκτυο όσο και στα σημεία τελικής χρήσης. Σε αυτό το σενάριο οι απαιτήσεις των διατάξεων αποθήκευσης είναι όμοιες με εκείνες του δεύτερου σεναρίου. Επομένως τα κριτήρια επιλογής είναι η απόκριση, η πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και το κόστος. Επομένως για αυτό το σενάριο προτείνονται οι σφόνδυλοι, οι υπερπυκνωτές για εφαρμογές ισχύος και οι μπαταρίες Λιθίου, Μολύβδου – Οξέος και Νικελίου για εφαρμογές ενέργειας και περιορισμένες εφαρμογές ισχύος.

Η επιλογή των συστημάτων αποθήκευσης εξαρτάται από τα ελάχιστα απαιτούμενα τεχνικά χαρακτηριστικά ανά εφαρμογή αλλά και από σχεδιαστικές παραδοχές κατά περίπτωση. Το είδος των διανεμημένων και κεντρικών μονάδων παραγωγής, και το επίπεδο αυτονομίας των μικροδικτύων επηρεάζει το μέγεθος των αποθηκευτικών διατάξεων και τη διάρκεια αποθήκευσης στις εφαρμογές διαχείρισης της ενέργειας και ποιότητας ισχύος. Οι απαιτήσεις και η κλίμακα εφαρμογής επηρεάζουν το κόστος των τεχνολογιών αποθήκευσης. Ο παράγοντας επομένως του κόστους, η ζήτηση ενέργειας και οι διαθέσιμες τεχνολογίες παραγωγής παίζουν τον καθοριστικό ρόλο στην επιλογή των αποθηκευτικών διατάξεων.

Δεδομένου ότι η καταλληλότητα επιλογής μιας τεχνολογίας αποθήκευσης κρίνεται άμεσα από την τεχνολογία παραγωγής αλλά και από την τάξη μεγέθους ενός μικροδικτύου και τα είδη των καταναλωτών που είναι συνδεδεμένοι σε αυτό, πέρα από τον παράγοντα του κόστους και των επιδόσεων, η επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας αποθήκευσης μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Έτσι τα σενάρια που προτάθηκαν αποτελούν μια γενική απεικόνιση πιθανών γενικευμένων τρόπων δικτύωσης με εφαρμογές αποθήκευσης σε μικρή κλίμακα.

Αντίστοιχα με τα σενάρια ηλεκτρικής δικτύωσης, μπορούν να αναπτυχθούν και σενάρια θερμικής δικτύωσης, στα οποία είναι δυνατή η κεντρική ή διανεμημένη παραγωγή θερμότητας σε επίπεδο συνοικίας. Η αποθήκευση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας η οποία συμβάλλει στη μείωση της εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων παραγωγής, στην εξοικονόμηση καυσίμου και στη μέγιστη απορρόφηση και διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για παραγωγή θερμικής ενέργειας, μπορεί αναλόγως να διεισδύσει μέσω κεντρικής ή / και διανεμημένης εγκατάστασης στα θερμικά δίκτυα.

Ενδιαφέρον έχει η διανεμημένη θερμική αποθήκευση, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση των διατάξεων ηλεκτρικής αποθήκευσης για εφαρμογές ενεργειακής διαχείρισης και προτείνεται για περαιτέρω μελέτη και αξιολόγηση. Η θερμική αποθήκευση, η οποία χρησιμοποιεί ηλεκτρισμό για να παράγει και αποθηκεύσει θερμική ενέργεια με τη μορφή θερμότητας ή / και ψύξης, μπορεί να αξιοποιηθεί σε διανεμημένες εφαρμογές για εξομάλυνση αιχμών στο δίκτυο και αποθήκευση ενέργειας την περίοδο της νύχτας και εκφόρτισή της το πρωί ή σε περιόδους αιχμών. Στα πλαίσια αυτά μια ενδιαφέρουσα προοπτική είναι αυτή του συγκερασμού των μικροδικτύων ηλεκτρισμού με θερμικά δίκτυα σε επίπεδο συνοικίας μέσω της συμπαραγωγής και της τριπαραγωγής στην οποία παράγεται επιπρόσθετα ψύξη. Η θερμική αποθήκευση μέσα από αυτή την προσέγγιση μπορεί να συμβάλλει όχι μόνο στα δίκτυα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης αλλά και στο κομμάτι της ηλεκτρικής δικτύωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 Τσικαλάκης Α., «Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη Διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης», Διδακτορική Διατριβή, Ιούλιος 2008
- 2 Αγγελίδης Χ., «Συστήματα και τεχνολογίες για αποθήκευση ενέργειας σε κτίρια», Διπλωματική Εργασία, Ιούνιος 2010
- 3 Σαγάνη Α., «Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας – Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές», Διπλωματική Εργασία, 2009
- 4 Δεδεδήμος Γ. «Πειραματική Εξέταση Συστήματος Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας με Χρήση PCM», 2010
- 5 H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron “Energy storage systems—Characteristics and comparisons”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 5, June 2008, Pages 1221–1250
- 6 Efthimiou V., Hadjipaschalis I., Poullikkas A., “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”, 2008
- 7 Παπαντώνης Δ., «Υδροδυναμικές Μηχανές, Αντλίες – Υδροστρόβιλοι», Εκδόσεις Συμewών, 2004
- 8 Κάραλης Γ., «Ανάπτυξη και Ανάλυση Συστημάτων Ανεμοκινητήρων και Αντλιοσταμewυτήρων», 2007
- 9 Ζερβός Α., «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Ε.Μ.Π., 2007
- 10 Raúl Rodríguez, Fco. Javier Santiago, Eutimio Sánchez, Nagore Tellado, Eneritz Barreiro, “Technical requirements for project development”, D1.4, WP1 Messib EU Project, 2009
- 11 Κ.Α.Π.Ε., «Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ», 2001
- 12 Sérgio Faias, Patrícia Santos, Jorge Sousa, Rui Castro, “An Overview on Short and Long-Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications”

- 13 Ervin Spahić, Gerd Balzer, Britta Hellmich, Wolfram Münch, “Wind Energy Storages – Possibilities”
- 14 M. Founti, M. Stamatiadou, “Identification of products and technologies energy related, relevant stakeholders and building classification according their different uses and topologies”, D1.1. WP1 Messib EU project, 2009
- 15 Naish C., McCubbin I., Edberg O., Harfoot M., “Outlook of Energy Storage Technologies”, 2008
- 16 Βαλάκας Μ., «Χρήση του Υδρογόνου ως Εναλλακτική Πηγή Ενέργειας», Διπλωματική Εργασία, 2007
- 17 Ogden M. J., “Prospects for Building a Hydrogen Energy Infrastructure”, Annu. Rev. Energy Environ. 1999. 24:227–79
- 18 Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen, “Thermal energy Storage – Systems and Applications”, Wiley Editions
- 19 Μακρή Θ., «Αξιολόγηση θερμικής αποθήκης δημοτικού αθλητικού κέντρου Εύοσμου», Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη 2012
- 20 Κ.Α.Π.Ε, «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας σε οικιστικά σύνολα»
- 21 Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications”, 2007
- 22 Αποστόλου Γ. «Ενεργητικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης χώρου με χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) σε εξωτερική δεξαμενή αποθήκευσης», Διπλωματική Εργασία, 2010
- 23 IEA District Heating and Cooling, “Optimization of Cool Thermal Storage and Distribution”, 2002
- 24 Καράγιωργας Μ., «Προώθηση της Χρήσης Συστημάτων Αποθήκευσης Ψύξης», ΚΑΠΕ, 1996
- 25 Δικτυακός Ιστότοπος www.engineeringtoolbox.com “Ice Thermal Properties”
- 26 A. Nourai, “Large-Scale Electricity Storage Technologies for Energy Management”, American Electric Power Service Corporation, 2002

- 27 Leonard Wagner, “Overview of energy storage methods”, Mora Associates Ltd, 2007
- 28 Δικτυακός Ιστότοπος www.wikipedia.gr
- 29 H. Chen et al. “Progress in electrical energy storage system: A critical review”, *Progress in Natural Science* 19 (2009) 291–312
- 30 Wade A. Amos, “Costs of Storing and Transporting Hydrogen, National Renewable Energy Laboratory, 1998
- 31 Andreas Schroeder, “Modeling storage and demand management in power distribution grids”, 2011
- 32 Hassan E.S. Fath, “Technical Assessment of Solar Thermal Energy Storage Technologies”, *Renewable Energy*, Vol. 14, Nos. 1-4, pp. 35-40, 1998
- 33 D. Bauer, R. Marx, J. Nußbicker-Lux, F. Ochs, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen, “German central solar heating plants with seasonal heat storage”, *Solar Energy* 84 (2010) 612–623
- 34 Hideki Tanaka, Takashi Tomita, Masaya Okumiya, “Feasibility study of a district energy system with seasonal water thermal storage”, *Solar Energy* Vol. 69, No. 6, pp. 535–547, 2000
- 35 Alemayehu Gebremedhin, Heimo Zinko, “Seasonal Heat Storages in District Heating Systems”, Dept. of Management and Engineering/Energy Systems, Linköping University, Linköping, Sweden
- 36 Chris Cirone, “Salt gradient Solar Pond”, Power point Presentation, Διαθέσιμο στο διαδίκτυο «<http://www.findtoyou.co.id/freeppt/get/SCpi666D/solar-ponds.html>»
- 37 Αλέξης Φωκάς Κοσμετάτος, «Κανόνες Λειτουργίας Ηλιοθερμικών Σταθμών στη Νησιωτική Ελλάδα», Ημερίδα ΠΣΧΜ, ΕΜΠ 24 Νοεμβρίου 2009
- 38 Harold G. Lorsch, Kenneth W. Kauffman, Jesse C. Denton, “Thermal Energy Storage for Solar Heating and Off-peak Air Conditioning”, *Energy Conversion*, Vol. 15, pp. 1-8, Pergamon Press, 1975
- 39 Νίκος Χατζηαργυρίου, «Ευφυή δίκτυα διανομής για αυξημένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής», Εκδήλωση ΕΒΕΑ, 2007

- 40 Κασμάς Σ., «Η επίδραση των συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής με τεχνολογίες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού – θερμότητας και αποθήκευσης καθώς και της φορολογίας άνθρακα σε ένα μικροδίκτυο βάσει του μοντέλου DER-CAM», Διπλωματική Εργασία, 2009
- 41 Chris Marnay, Joseph S. Chard, Kristina S. Hamachi, Timothy Lipman, Mithra M.Moezzi, Boubekeur Ouaglal, and Afzal S. Siddiqui, «Modeling of customer adoption of distributed energy resources», 2003
- 42 Jonas Gustafsson, Jerker Delsing, Jan van Deventer, “Improved district heating substation efficiency with a new control strategy”, 2009
- 43 Δικτυακός Ιστότοπος www.hachp.gr
- 44 Λασποπούλου Τ., «Μελέτη τηλεθέρμανσης της πόλης των Γρεβενών με ενεργειακή αξιοποίηση της Δασικής Βιομάζας της περιοχής», 2008
- 45 Behnaz Rezaie, Marc A. Rosen, “District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements”, 2011
- 46 Bard Skagestad, Peter Mildenstein, “District heating and cooling connection Handbook”, Programme of Research, Development and Demonstration on District Heating and Cooling, IEA District Heating and Cooling
- 47 Jason Makansi, Jeff Abboud, “Energy Storage – The missing link in the electricity value chain”, Energy Storage Council, 2002
- 48 Gilles Nottona, Ludmil Stoyanov, Motaz Ezzat, Vladimir Lararov, Said Diaf, Christian Cristofari, “Integration Limit of Renewable Energy Systems in Small Electrical Grid”, 2010
- 49 J.K. Kaldellis, D. Zafirakis, “Optimum energy storage techniques for the improvement of renewable energy sources-based electricity generation economic efficiency”, 2007