



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τομέας Θερμότητας  
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης  
Θερμοδυναμικής

## ΜΙΚΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΟΙΚΙΑΚΗ ΧΡΗΣΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
Ευθύμερος Αναστάσιος

Επιβλέπουσα  
Αναπλ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. Κορωνάκη Ειρήνη

ΑΘΗΝΑ , ΙΟΥΛΙΟΣ 2020



## **Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κα Ειρήνη Κορωνάκη, αναπληρώτρια καθηγήτρια Ε.Μ.Π.. Πέρα από τη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής, μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ ερευνητικά στο ιδιαίτερα ενδιαφέρον πεδίο των μικρών συστημάτων συμπαραγωγής για οικιακή χρήση. Ένα τομέα που απασχολεί και θα συνεχίσει να απασχολεί έντονα τους ερευνητές τα επόμενα χρόνια.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους μου και όλους όσους ήταν κοντά μου κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Η υποστήριξη τους αυτά τα χρόνια αποτέλεσε αρωγό για την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Τέλος το μεγαλύτερο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, και ιδιαίτερα στους γονείς μου, Νίκο και Αντωνία, για την απεριόριστη ενθάρρυνση και στήριξη τους σ' όλη τη μέχρι σήμερα εκπαιδευτική, και όχι μόνο, πορεία μου.



## Περίληψη

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η θεωρητική προσέγγιση μικρών συστημάτων συμπαραγωγής και η μοντελοποίηση μιας κατοικίας και των ενεργειακών συστημάτων που συνδέονται με αυτή για την κάλυψη ζεστού νερού χρήσης καθώς και τις ανάγκες θέρμανσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο ακολουθεί η παρουσίαση διαφόρων ερευνών και εφαρμογών στο πεδίο των τεχνολογιών της μικροσυμπαραγωγής, οι οποίες έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική επισκόπηση μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας (TES) θερμικές εφαρμογές, όπως η θέρμανση χώρου και η ψύξη.

Τέλος, το τρίτο κεφάλαιο αφιερώνεται στην περιγραφή του υπολογιστικού μοντέλου μιας κατοικίας και παρουσιάζονται τα ενεργειακά συστήματα, τα οποία καλύπτουν τις ανάγκες θέρμανσης και ζεστού νερού.

## **Abstract**

The purpose of this thesis is the theoretical approach of micro-chp systems for residential applications and the modeling of a house and the energy systems associated with it to cover hot water use as well as heating needs.

The first chapter follows the presentation of various researches and applications in the field of micro-chp technologies, which have been done in recent years.

The second chapter presents the bibliographic overview of energy storage methods (TES) thermal applications, such as space heating and cooling.

Finally, the third chapter is devoted to the description of the computer model of a house and presents the energy systems, which cover the heating and hot water needs.

## Περιεχόμενα

1.1. Εισαγωγή.....	9
1.2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση .....	9
1.2.1. Έρευνες και εφαρμογές micro-CHP σε οικιακή κλίμακα.....	9
1.3. Συμπεράσματα .....	23
2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2 Θερμική Ενέργεια .....	28
2.3 Θερμική αποθήκευση ενέργειας .....	29
2.3.1 Βασική αρχή του TES.....	32
2.3.2 Πλεονεκτήματα TES.....	38
2.3.3 Κριτήρια αξιολόγησης TES .....	39
2.3.4 Εκτιμήσεις αγοράς TES .....	47
2.3.5 Εφαρμογές TES σε θέρμανση και ψύξη .....	50
2.3.6 Λειτουργικά χαρακτηριστικά TES.....	56
2.4 Ηλιακή ενέργεια και TES .....	57
2.4.1 TES προκλήσεις για τις ηλιακές εφαρμογές.....	58
2.4.2 Τύποι TES και συστήματα ηλιακής ενέργειας.....	59
2.4.3 Διάρκεια αποθήκευσης και ηλιακές εφαρμογές .....	60
2.4.4 Κατασκευή εφαρμογών TES και ηλιακής ενέργειας.....	62
2.4.5 Σχεδιασμός ζητημάτων για TES που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια.....	65
2.5 TES μέθοδοι.....	66
2.6 Λογικά TES.....	67
2.6.1 Θερμικά στρωματοποιημένες δεξαμενές TES.....	68
2.6.2 Σκυρόδεμα TES .....	71
2.6.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας ακουαφέρ (ATES) .....	72
2.7 Λανθάνοντα TES .....	76
2.7.1 Επιχειρησιακές πτυχές του λανθάνοντος TES.....	78

2.7.2 Υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) .....	79
2.8 Αποθήκευση ψυχρής θερμικής ενέργειας CTES .....	82
2.8.1 Αρχή εργασίας .....	83
2.8.2 Λειτουργικό φορτίο του CTES .....	85
2.8.3 Θέματα σχεδιασμού .....	87
2.8.4 Επιλογή και χαρακτηριστικά μέσων αποθήκευσης σε CTES.....	88
2.9 Εποχικά TES .....	90
2.9.1 Εποχικά TES για τη θερμική ικανότητα .....	90
2.9.2 Εποχικά TES για τη ψυκτική ικανότητα.....	91
2.10 Καταληκτικές παρατηρήσεις .....	92
3.1. Γενικά.....	94
3.1.1. Γενική Επισκόπηση Μοντέλου.....	94
3.1.2. Γενική Επισκόπηση TRNSYS .....	94
3.1.3. Δεδομένα - Σκοπός .....	96
3.2 Ενεργειακό σύστημα ζεστού νερού χρήσης.....	96
3.2.1. Γενικά.....	96
3.2.2. Προφίλ φορτίου ζεστού νερού.....	97
3.2.3. Βαλβίδα σκλήρυνσης – Μίκτης.....	98
3.2.4. Αντλία – Ελεγκτής .....	99
3.2.5. Ηλιακοί συλλέκτες.....	103
3.2.6. Σωλήνας εξόδου.....	106
3.2.7. Δεξαμενή νερού .....	107
3.3 Ενεργειακό σύστημα θέρμανσης χώρου .....	111
3.3.1 Μοντελοποίηση κτιρίου μονής ζώνης .....	111
3.3.2 Αντλία θερμότητας .....	114
3.4 Συμπεράσματα .....	117
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>119</b>





# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1. Εισαγωγή

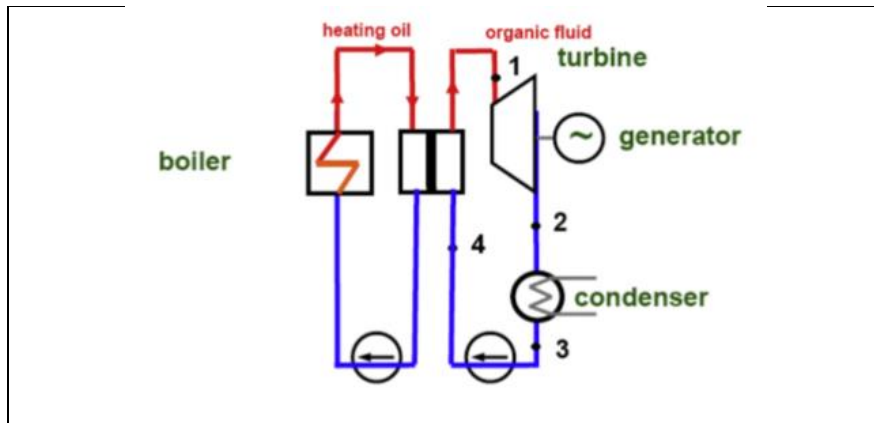
Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονη αύξηση στη χρήση κατανεμημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η μικροσυμπαγωγή (micro-CHP) οικιακής κλίμακας είναι μία τεχνολογία η οποία έχει γίνει αντικείμενο μελέτης για πολλούς ερευνητές σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο.

## 1.2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

### 1.2.1. Έρευνες και εφαρμογές micro-CHP σε οικιακή κλίμακα

Το 2010 οι ερευνητές Mikielewicz Dariusz και Mikielewicz Jaroslaw [1] ανέπτυξαν ένα θερμοδυναμικό μοντέλο σχετικά με την επιλογή του κατάλληλου οργανικού εργαζόμενου μέσου σε θερμοδυναμικό οργανικό κύκλο Rankine (ORC) για το βέλτιστο βαθμό απόδοσης του κύκλου. Χρησιμοποίησαν 20 διαφορετικά ρευστά (ammonia, perfluorobutane, C5F12, methanol, ethanol, heptane, isohexane, R11, R12, R123, toluene, R152, R134a, R141b, R227, R245ea, R245ca, R365mfc, SES36, water), ανέλυσαν τα θερμοδυναμικά τους χαρακτηριστικά και σύγκριναν τα αποτελέσματα τόσο για υποκρίσιμο όσο και για υπερκρίσιμο οργανικό κύκλο Rankine. Υπολόγισαν αρχικά το θερμικό βαθμό απόδοσης (1) ενώ στη συνέχεια εισήγαγαν σε αυτόν τις αδιάστατες παραμέτρους  $\eta_{\text{carnot}}$  και Ja (Ιακωβιανός αριθμός) σε υποκρίσιμο (2) και υπερκρίσιμο (3) κύκλο. Η απόδοση του κύκλου σχετίζεται αρκετά με αυτούς τους αδιάστατους αριθμούς.

$n = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$	(1)
$n = 1 - \frac{\frac{\Delta H(T_2)}{h_{lv}(T_1)}}{\frac{C_p T_1}{h_{lv}(T_1)} n_c + 1} = 1 - \frac{\frac{\Delta H(T_2)}{h_{lv}(T_1)}}{Ja(T_1) n_c + 1}$	(2)
$n = 1 - \frac{1}{\frac{C_p T_1}{\Delta H(T_2)} n_c} = 1 - \frac{1}{Ja(T_1, T_2) n_c}$	(3)



ΣΧΗΜΑ 1.1- Micro CHP με θερμοδυναμικό κύκλο Rankine [1]

Μορφοποίηση: Γραμματοσειρά: 11 στ., Ελληνικά

Αλλαγή κωδικού πεδίου

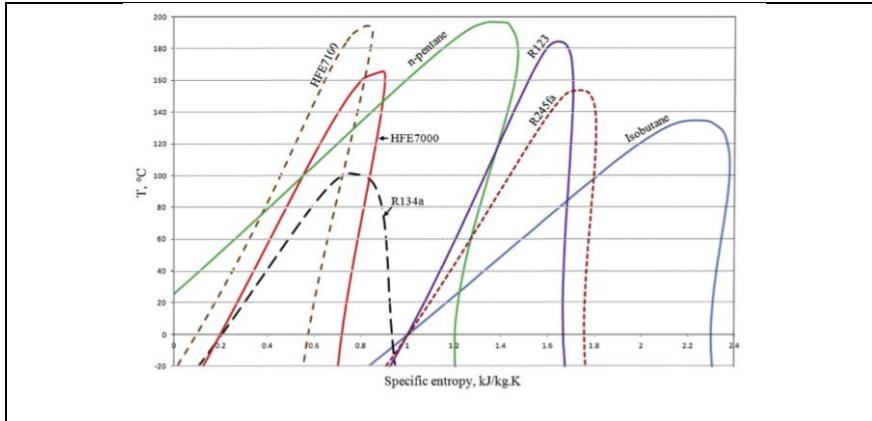
Το θερμικό έλαιο θερμαίνεται στους 320 °C και στους 280 °C στο λέβητα , ενώ η θερμοκρασία του εργαζόμενου ρευστού μετά τον ατμοποιητή είναι στους 170 °C και 200 °C στον υποκρίσιμο και τον υπερκρίσιμο κύκλο αντίστοιχα. Η θερμοκρασία συμπύκνωσης δίνεται στους 50 °C.

Από τα είκοσι ρευστά που ερευνήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι τα πιο κατάλληλα για μικρής κλίμακας οικιακές εφαρμογές είναι τα ethanol, R123, R141b. Η συγκεκριμένη μελέτη έδειξε ακόμη ότι ο υπερκρίσιμος κύκλος ORC σε σύγκριση με τον υποκρίσιμο κύκλο ORC παρουσιάζει μια βελτίωση κατά 5% στην ολική απόδοση του κύκλου.

Την άποψη ότι η επιλογή του εργαζόμενου μέσου είναι σημαντική γιατί ένα επαρκές οργανικό ρευστό μπορεί να βελτιώσει τη λειτουργία ενός κύκλου ORC στα πλαίσια ενός συστήματος micro-CHP, ενστερνίστηκε ο Guoquan Qiu [2]. Ασχολήθηκε με τη μεθοδολογία επιλογής του κατάλληλου οργανικού ρευστού συγκρίνοντας τα 8 πιο εφαρμοσμένα οργανικά ρευστά HFE700, HFE7100, PF5050, R123, n-pentane, R245fa, R134a και isobutene.

Οι επιθυμητές θερμοδυναμικές ιδιότητες ενός οργανικού ρευστού, το χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, η υψηλή ασφάλεια και το χαμηλό κόστος αποτελούν κριτήρια για την κατάλληλη επιλογή. Ο ερευνητής χρησιμοποίησε το "bucket effect"

για την εξάλειψη ODP και GWP και τη μέθοδο "spinal point" για την κατάταξη των εργαζόμενων οργανικών ρευστών.

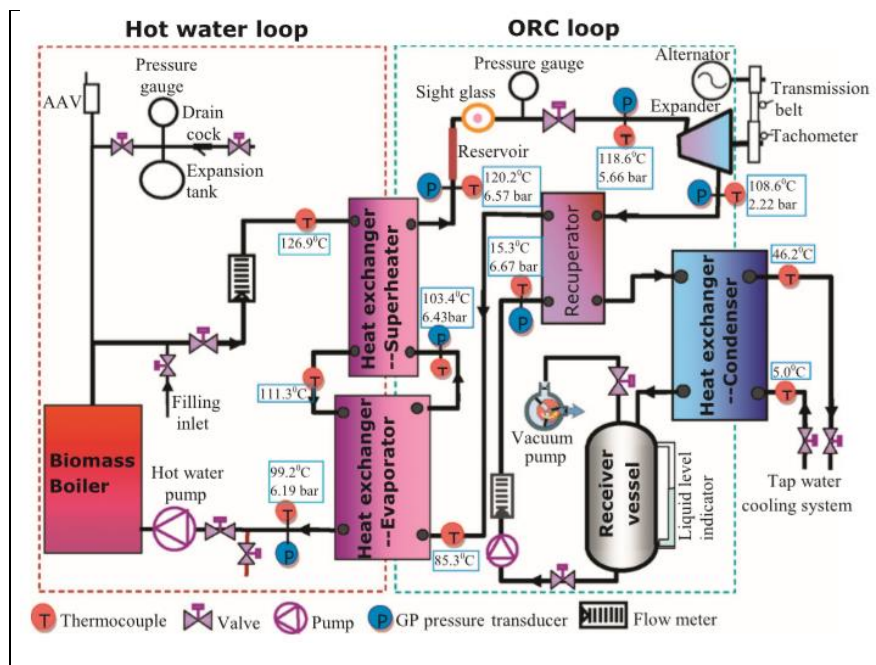


ΣΧΗΜΑ1. 2- Σύγκριση καμπυλών T-s για τα πιο εφαρμοσμένα οργανικά εργαζόμενα ρευστά [2]

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πειραματικές μελέτες δε δίνουν πάντα το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στόχος και επίτευγμα όμως του ερευνητή είναι να κατανοήσει πώς η αστοχία του πειράματος θα οδηγήσει σε βελτίωση του αντικείμενου μελέτης.

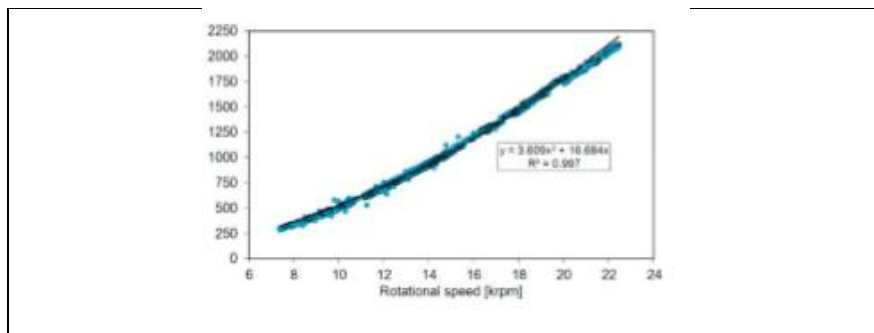
Ο Guoquan Qiu και οι συνεργάτες του [3] μελέτησαν πειραματικά την καύση βιομάζας σε συνδυασμό με ORC σε σύστημα micro-CHP. Χρησιμοποίησαν λέβητα βιομάζας-pellet ισχύος 50 KW και παρήγαγαν 861 W ηλεκτρικής ισχύος ( $\eta_{el}=1.41\%$ ) και 47,26 KW θερμότητα. Ως εργαζόμενο μέσο του οργανικού κύκλου Rankine χρησιμοποιήθηκε HFE7000. Η συνολική απόδοση του CHP ήταν 78.69%. Η θερμοκρασία του ζεστού νερού λόγω της καύσης βιομάζας έφτασε τους 126.9 °C.

Ο λέβητας βιομάζας σχεδιάστηκε με την προοπτική ότι θα παρέχει στο σύστημα ζεστό νερό θερμοκρασίας 180 °C ενώ το θερμοδυναμικό μοντέλο της εγκατάστασης προέβλεπε  $\eta_{CHP} \geq 80\%$  και  $\eta_{el} \geq 10\%$ . Τελικά οι ερευνητές συμπέραναν ότι ο εναλλάκτης θερμότητας στο λέβητα βιομάζας, ο εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας και ο στρόβιλος θα πρέπει να τροποποιηθούν ως προς το σχεδιασμό τους.



ΣΧΗΜΑ1. 3– Micro CHP σύστημα καύσης βιομάζας με ORC [3]

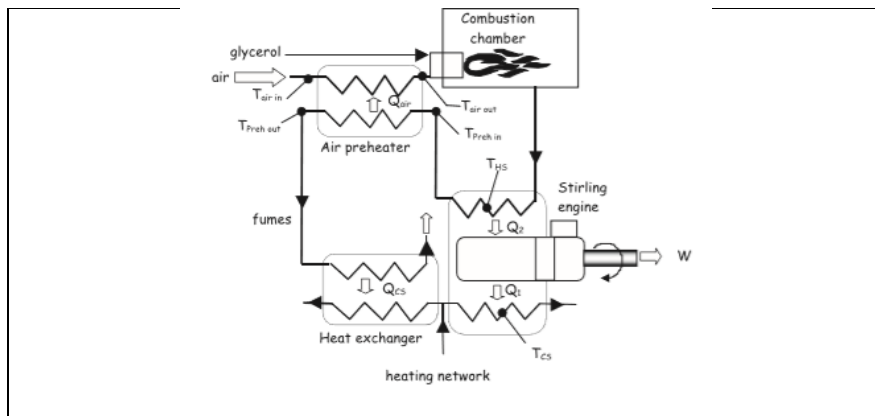
Πρόσφατα, ο Zywicki και οι συνεργάτες του [4] διεξήγαγαν μία πειραματική έρευνα ενός συστήματος CHP ORC για διάφορες συνθήκες λειτουργίας προκειμένου να καλύψουν τις ανάγκες θέρμανσης και ζεστού νερού σε μία μονοκατοικία. Η ηλεκτρική και η θερμική ισχύς του συστήματος είναι 2.5 kW<sub>e</sub> και 25 kW<sub>t</sub>. Ο ηλεκτρισμός παράγεται σαν παραπροϊόν της παραγωγής θερμότητας. Ο μέγιστος καθαρός βαθμός απόδοσης του ORC είναι 4.5%. Η έρευνα αυτή εκτελείται υπό συνθήκες εργαστηρίου, οι οποίες συνήθως διαφέρουν από τις πραγματικές. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών εκτιμήθηκε η λειτουργία του συστήματος βασισόμενη στις αλλαγές παραμέτρων όπως το θερμικό φορτίο, οι παροχές των εργαζόμενων μέσων και το ηλεκτρικό φορτίο του στροβίλου. Από τα αποτελέσματα αυτά οι ερευνητές εξήγαγαν το συμπέρασμα ότι το πρωτότυπο σύστημα ORC είναι ικανό να λειτουργήσει σωστά παρά τις απότομες αλλαγές μερικών παραμέτρων. Επιπλέον οι πειραματικές δοκιμές έδειξαν ότι ο στροβίλος μπορεί να λειτουργήσει σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων περιστροφής επιτρέποντας την προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος στην εκάστοτε ζήτηση ενέργειας.



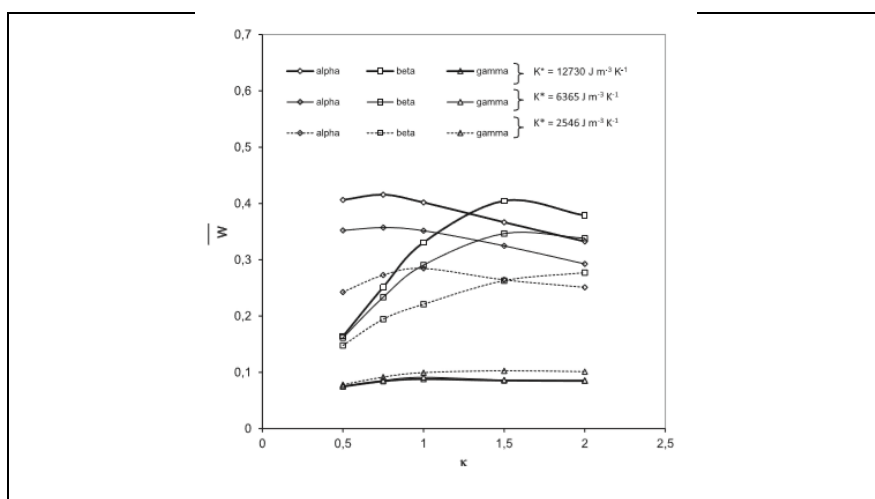
ΣΧΗΜΑ1. 4-Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τη γεννήτρια μετά το στρόβιλο σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής [4]

Μεγάλο ενδιαφέρον παρατηρείται στη χρήση τεχνολογίας Stirling σε μονάδες συμπαραγωγής. Οι μηχανές αυτές έχουν τη δυνατότητα να καταναλώνουν διαφορετικά είδη καυσίμων καθώς η καύση γίνεται εξωτερικά της μηχανής και τα προϊόντα της καύσης δεν έρχονται σε επαφή με τα κινούμενα τμήματα της μηχανής.

Μία σχετική μελέτη πραγματεύεται τη λειτουργία συστήματος CHP Stirling με καύσιμο ακατέργαστης glycerol [5]. Η μελέτη επικεντρώνεται στην αναζήτηση κατάλληλων τιμών των γεωμετρικών παραμέτρων της μηχανής και θερμοκρασιών λειτουργίας ώστε να ελαχιστοποιείται η ειδική κατανάλωση καυσίμου. Συγκεκριμένα, η βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας της θερμής πηγής της μηχανής και η βέλτιστη αλλαγή φάσης γωνίας ανάμεσα στο έμβολο και στον εκτοπιστή καθορίζονται για μηχανές Stirling τύπου alpha, beta, gamma ανάλογα με το swept volume ratio. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας  $K$  ορίζει τις διακυμάνσεις των θερμοκρασιών στα υποσυστήματα της μηχανής και μεταξύ των πηγών και των υποσυστημάτων της. Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν ότι η ελάχιστη ειδική κατανάλωση glycerol είναι  $1024 \text{ g}_{\text{gly}}/\text{kWh}$ . Η τιμή αυτή προκύπτει για μηχανή Stirling τύπου alpha λειτουργώντας σε θερμοκρασία θερμής πηγής  $1150 \text{ K}$ , γωνία φάσης  $71^\circ$ ,  $k=1$  και  $K=12730 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Παρ' όλο που η μηχανή Stirling τύπου alpha πετυχαίνει τη μικρότερη ειδική κατανάλωση, η μηχανή Stirling τύπου beta είναι εκείνη που προσφέρει τη μέγιστη παραγωγή έργου ενώ παράλληλα επιτρέπει πολύ μικρή κατανάλωση καυσίμου με  $\text{THS}=1160 \text{ K}$ ,  $\theta_{\text{ph}}=32^\circ$ ,  $k=1.5$  και  $K=12730 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ .



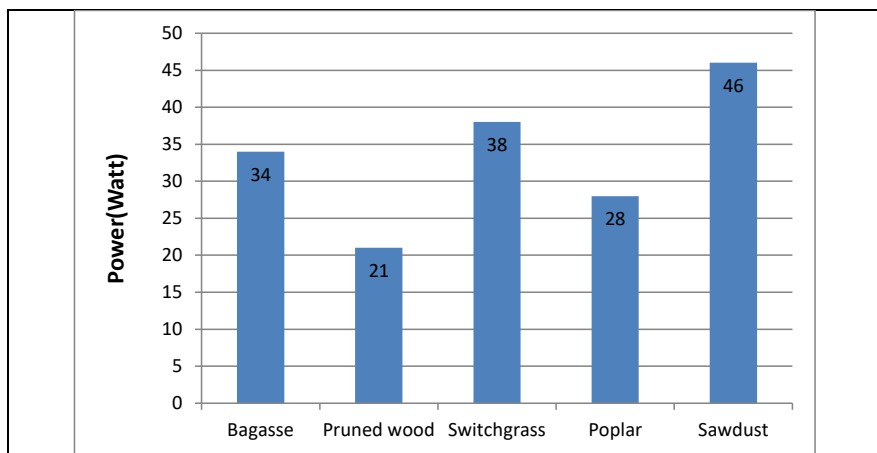
ΣΧΗΜΑ1. 5-Σύστημα CHP Stirling με προθερμαντή αέρα καύσης [5]



ΣΧΗΜΑ1. 6-Παραγόμενο έργο στην ελάχιστη ειδική κατανάλωση καυσίμου [5]

Σε μία χρονικά προηγούμενη έρευνα που έγινε [6], μελετήθηκε ότι η αύξηση της παραγόμενης θερμότητας και της θερμοκρασίας ανάφλεξης των καυσίμων οδηγούν σε μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη μηχανή Stirling. Οι ερευνητές, συγκρίνοντας κάποια καύσιμα βιομάζας σε σύστημα CHP βιομάζας Stirling, παρατήρησαν ότι η χρήση sawdust (πριονίδια) ως καύσιμο είχε τη μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος (46 Watt) καθώς και το μικρότερο χρόνο ανάφλεξης (4 min). Η μέγιστη θερμοκρασία φλόγας ( 460 °C ) σημειώθηκε για παροχή μάζας 0.14 gr/s

καυσίμου sawdust. Στα πλαίσια μέγιστης ενέργειας, ο θερμικός βαθμός απόδοσης της μηχανής Stirling μετρήθηκε 16% .



ΣΧΗΜΑ1. 7 - Μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος για διαφορετικά καύσιμα βιομάζας και χρόνος ανάφλεξης καυσίμων βιομάζας [6]



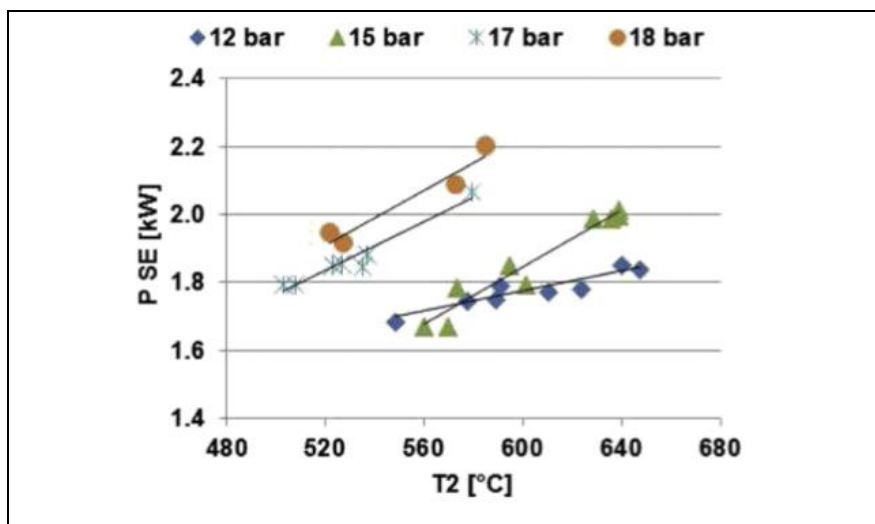
ΣΧΗΜΑ1. 8 - Χρόνος ανάφλεξης καυσίμων βιομάζας [6]

Σε άλλη μελέτη [7] εκτιμήθηκε πειραματικά η ενσωμάτωση καυστήρα pellet 20 KW<sub>th</sub> και μηχανής Stirling 1 KW<sub>e</sub> για παραγωγή θερμότητας και ενέργειας σε οικιακή χρήση. Συγκρίθηκαν 2 μεγέθη καυσίμου pellet και διαπιστώθηκε ότι όταν χρησιμοποιείται Ø8 mm αντί για Ø6 mm pellet η αναλογία της θερμοκρασίας στη



μηχανή Stirling είναι χαμηλότερη και η αποτελεσματικότητα του αναγεννητή υψηλότερη. Η χρήση Ø8 mm pellet οδηγεί δηλαδή σε μεγαλύτερη θερμική απόδοση. Η θερμότητα που απορροφά η Stirling αυξάνεται με τη θερμοκρασία στο ζεστό μέρος της μηχανής και για αυτό θα πρέπει η συσσώρευση της τέφρας να μετακινείται καθώς προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας. Σε παρόμοια εύρη θερμοκρασιών, οι υψηλές πιέσεις οδηγούν σε υψηλότερη απορροφούμενη θερμική ισχύ από τη μηχανή.

Αξίζει τέλος να αναφερθεί ότι η θέση της μηχανής Stirling αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αξιοποίηση της θερμότητας από τον καυστήρα βιομάζας. Τελικά, η συνολική απόδοση του συστήματος στη αναφερθείσα μελέτη ξεπέρασε το 72%.



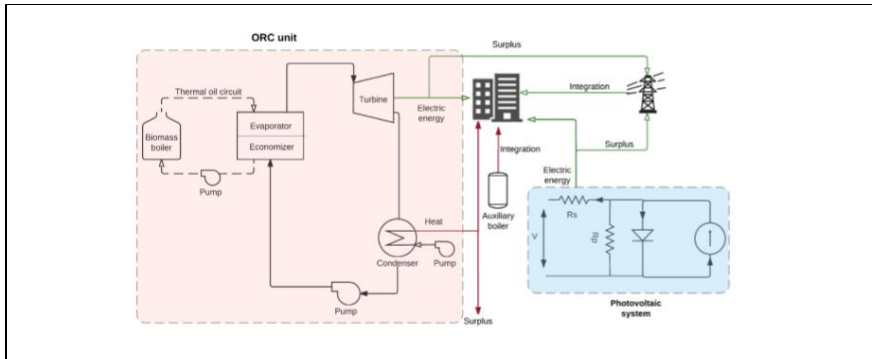
ΣΧΗΜΑ1. 9-Απορροφούμενη θερμική ισχύς από τη Stirling στο ζεστό μέρος της μηχανής για Ø8mm pellet [7]

Σε αρκετά από τα σημερινά συστήματα μικρο-συμπαγωγής βρίσκει μεγάλη εφαρμογή η εγκατάσταση μηχανών εσωτερικής καύσης, MEK, με καύσιμο το φυσικό αέριο. Οι Farrokhi, Noie & Akbarzadeh [8] σχεδίασαν ένα σύστημα micro-CHP καύσης φυσικού αερίου σε συνδυασμό με ORC. Ως εργαζόμενο μέσο του οργανικού κύκλου Rankine χρησιμοποιήθηκε isopentane. Επίσης σχεδιάστηκε ένας στρόβιλος με πτερύγια. Η λειτουργία του συστήματος ερευνήθηκε πειραματικά για διαφορετικές

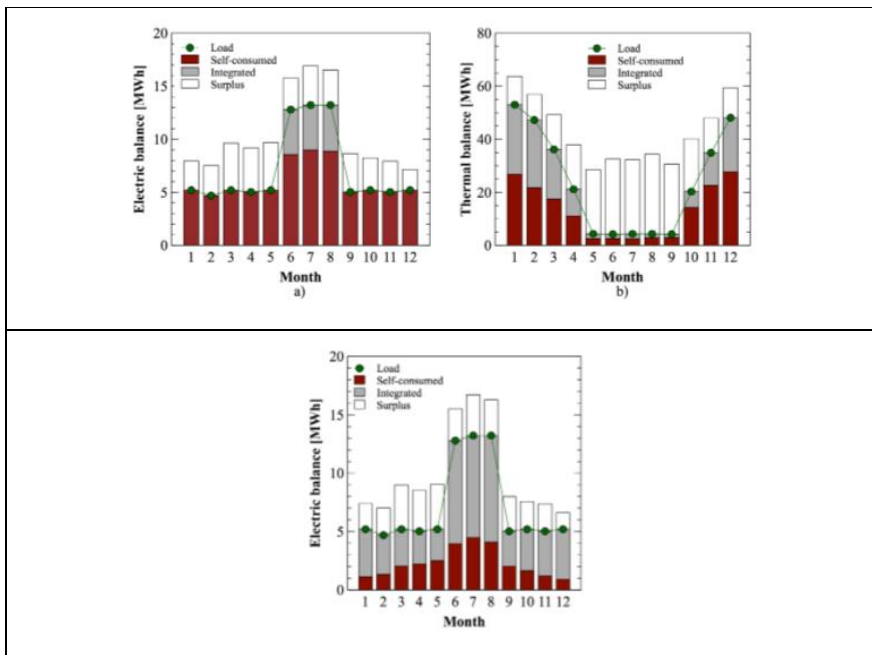
θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας. Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς των 77.4 W παράχθηκε για θερμοκρασία 84.1 °C εισόδου ζεστού νερού, η οποία απέδωσε  $n_{el} = 1.66\%$ . Η θερμική απόδοση του παρόντος συστήματος βασίστηκε στη συσκευή θέρμανσης νερού και επομένως οι διακυμάνσεις του σε διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας ήταν μικρές.

Το 2017 δημοσιεύτηκε η μελέτη ενός καινοτόμου συστήματος CHP [9] στο οποίο τα υποσυστήματα ORC και PV εργάζονται σε παραλληλία για την ικανοποίηση των ηλεκτρικών απαιτήσεων 40 κατοικιών. Το μέγεθος της μονάδας των φωτοβολταϊκών (37.3 kW<sub>el</sub>) έχει επιλεγεί ώστε να περιορίσει το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας σε μια τιμή όχι πολύ υψηλότερη από την παραγόμενη ενέργεια των ιδιοκαταναλώσεων. Η ονομαστική ισχύς του οργανικού κύκλου Rankine έχει καθορισθεί έτσι ώστε να ικανοποιεί τις μέγιστες ηλεκτρικές απαιτήσεις του χειμώνα (14.07 kW<sub>el</sub>). Ένας συμβατικός λέβητας έχει ενσωματωθεί για την ικανοποίηση των ολικών θερμικών απαιτήσεων για οικιακή χρήση όταν το PV σύστημα εργάζεται αποκλειστικά. Ο λέβητας παρέχει τη θερμότητα την οποία το υβριδικό σύστημα CHP δε μπορεί να παράγει.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα το σύστημα ORC μπορεί να ξεπεράσει τα προβλήματα διακοπής λόγω ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνοντας την ηλεκτρική ενέργεια για ιδιοκαταναλώσεις και παράγοντας θερμική ενέργεια, αποθηκεύοντας με αυτόν τον τρόπο φυσικό αέριο για θερμικούς σκοπούς. Την ίδια στιγμή, όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι σημαντική, το ORC σύστημα μπορεί να τεθεί εκτός λειτουργίας ή να λειτουργεί με μερικό φορτίο. Η υβριδική μονάδα παρέχει το 84.9% και 54.9% των ετήσιων ηλεκτρικών και θερμικών απαιτήσεων αντίστοιχα, εξασφαλίζοντας μια σημαντική ποσότητα αποθήκευσης φυσικού αερίου (17.260 m<sup>3</sup>). Συγκεκριμένα, το μέγιστο ποσοστό αποθήκευσης φυσικού αερίου υφίσταται τον Οκτώβριο (70.3%) και το ελάχιστο το Φεβρουάριο (46.1%). Το μέγιστο ηλεκτρικό και θερμικό πλεόνασμα παρατηρείται από το Μάιο ως το Σεπτέμβριο.



ΣΧΗΜΑ2. 10– Υβριδικό σύστημα CHP [9]



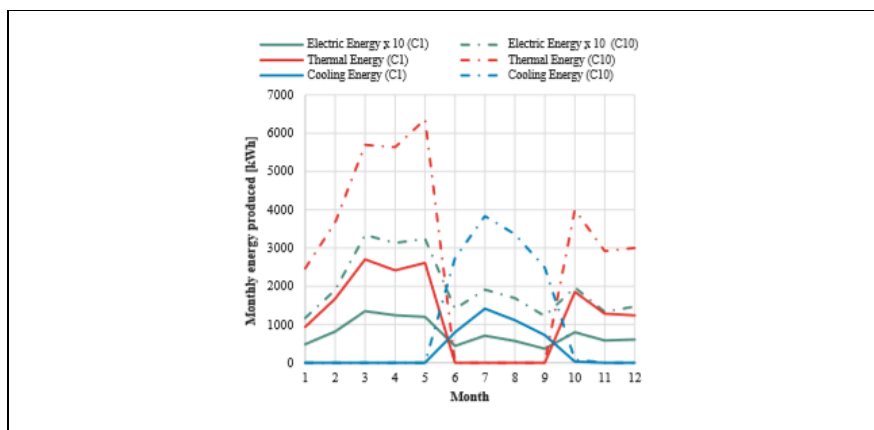
ΣΧΗΜΑ1. 11-Μηνιαία ηλεκτρική (a) και θερμική (b) ισορροπία για το υβριδικό σύστημα CHP και μηνιαία ηλεκτρική ισορροπία για το PV σύστημα [9]

Στη διάρκεια του ίδιου έτους οι Cioccolanti, Tascioni & Arteconi [10] παρουσίασαν την έρευνα που διενήργησαν για ένα σύστημα ORC (2 kW<sub>e</sub>) σε συνδυασμό με ένα συγκεντρωτικό γραμμικό ηλιακό συλλέκτη Fresnel (LFR), χρησιμοποιώντας μια

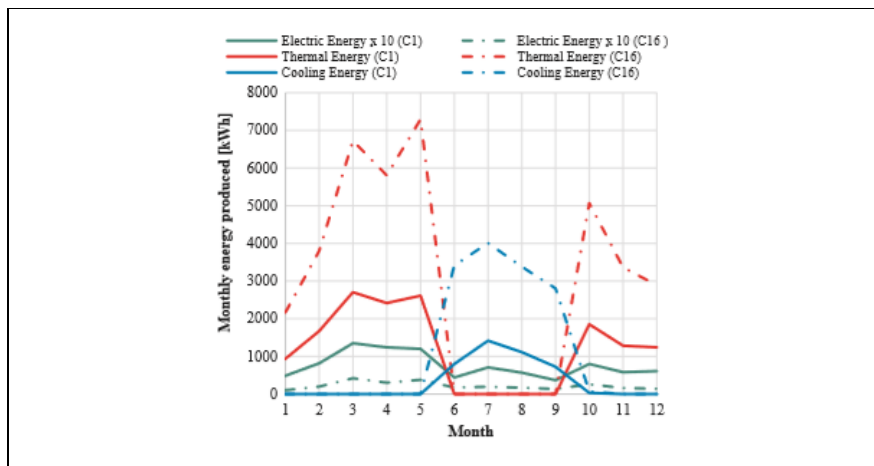
ανάλυση προσομοίωσης στο προγραμματιστικό πακέτο TRNSYS. Στη μελέτη δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις σχεδιαστικές παραμέτρους (περιοχή ηλιακού πεδίου και δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας- TES tank) και στις θερμοκρασίες λειτουργίας του συστήματος ORC γιατί σχετίζονται με την ηλεκτρική απόδοση του ORC και την ετήσια ηλεκτρική παραγωγή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα το πάνω όριο θερμοκρασίας της δεξαμενής TES μπορεί να ορισθεί στους 200 °C . Σε αυτή τη θερμοκρασία υφίσταται ο μέγιστος θεωρητικός βαθμός απόδοσης ORC. Η κατάλληλη επιλογή του κάτω ορίου θερμοκρασίας (150 °C) οφείλεται στη διατήρηση μιας σχετικά υψηλής θερμοκρασίας στη δεξαμενή TES αλλά και στην επάρκεια του χρόνου εργασίας του ORC. Η ύπαρξη υψηλής θερμοκρασίας στη δεξαμενή TES και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προϋποθέτουν ότι η περιοχή ηλιακού πεδίου και η χωρητικότητα της δεξαμενής δε μπορούν να μειωθούν αρκετά. Για τη συγκεκριμένη ανάλυση έχει αποδειχθεί ότι οι τιμές 148 m<sup>3</sup> και 3 m<sup>3</sup> είναι καλές.

Ο ίδιος ερευνητής [11], χρησιμοποιώντας ξανά το TRNSYS για ανάλυση προσομοίωσης, μελέτησε ένα σύστημα μικρής κλίμακας το οποίο αποτελείται από μία μονάδα σύνθετου συγκεντρωτικού ηλιακού συλλέκτη με περιοχή ηλιακού πεδίου 50 m<sup>2</sup>, ένα οργανικό κύκλο Rankine ηλεκτρικής ισχύος 3.5 KW<sub>e</sub> και έναν ψύκτη απορρόφησης ψυκτικής ισχύος 17 KW<sub>c</sub> . Επειδή οι θερμοκρασίες εισόδου του ρευστού στον κύκλο ORC και τον ψύκτη απορρόφησης πρέπει να βρίσκονται σε ένα συγκεκριμένο εύρος, χρησιμοποιούνται δύο δεξαμενές (χωρητικότητας 3 m<sup>3</sup>) υψηλής (HTT) και χαμηλής θερμοκρασίας (LTT), αντίστοιχα. Ο περιορισμένος χώρος των συλλεκτών μειώνει τις ώρες λειτουργίας του συστήματος και την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Αντίθετα, η θερμική απόδοση του ORC είναι υψηλή κατά τη διάρκεια του χρόνου και η παραγωγή θερμικής και ψυκτικής ενέργειας σημαντική. Οι ερευνητές, στην προσπάθεια τους να εκτιμήσουν πιο αποδοτικές διαμορφώσεις του συστήματος, έκαναν παραμετρική ανάλυση. Σύγκριναν την αρχική διαμόρφωση του συστήματος με άλλες, αλλάζοντας α) το εύρος της θερμοκρασίας του ρευστού στη δεξαμενή HTT, β) την παροχή μάζας των ρευστών στους βρόχους του συστήματος, γ) την ηλιακή πολλαπλότητα (SM) η οποία αποτελεί την αναλογία μεταξύ της ικανότητας ισχύος και της αναμενόμενης ισχύος λόγω σχεδιασμού του ηλιακού πεδίου, δ) την αδράνεια του συστήματος και ε) την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI).

Συγκεκριμένα, η μείωση του εύρους θερμοκρασίας στη δεξαμενή HTT επιτρέπει την επέκταση της λειτουργίας του συστήματος τριπαραγωγής κατά τη διάρκεια του χρόνου και αυξάνει την πρωταρχική παραγόμενη ενέργεια κατά 6.5 % σε σχέση με αυτή του αρχικού συστήματος. Αντίθετα, οι αλλαγές στην παροχή μάζας έχουν αμελητέες ή και αρνητικές επιδράσεις στη λειτουργία του συστήματος. Η αύξηση της ηλιακής πολλαπλότητας και ειδικότερα σε μειωμένο εύρος θερμοκρασίας επιδρά θετικά στις ώρες λειτουργίας του συστήματος, στην ηλεκτρική απόδοση του ORC και στη συνολική παραγωγή ενέργειας. Η μείωση της αδράνειας του συστήματος επιτρέπει την αύξηση των ωρών λειτουργίας και της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας της μονάδας ORC σε σχέση με την αρχική διαμόρφωσή του. Παρ' όλα αυτά η επίδραση δεν είναι σημαντική. Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία στην πόλη Orte δεν είναι μεγάλη, οι μελετητές εκτίμησαν την επιρροή της DNI, θεωρώντας ένα σύστημα με μειωμένο θερμοκρασιακό εύρος και SM=2 στην πόλη Palermo. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η υψηλή ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ολική παραγωγή ενέργειας και να αντισταθμίσει την υψηλή πολυπλοκότητα του συστήματος. Οι ερευνητές συμπέραναν ότι η σωστή επιλογή των παραμέτρων λειτουργίας μπορεί να βελτιώσει τη λειτουργία του συστήματος χωρίς κάποιο επιπρόσθετο κόστος και ειδικότερα σε περιοχή με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία.



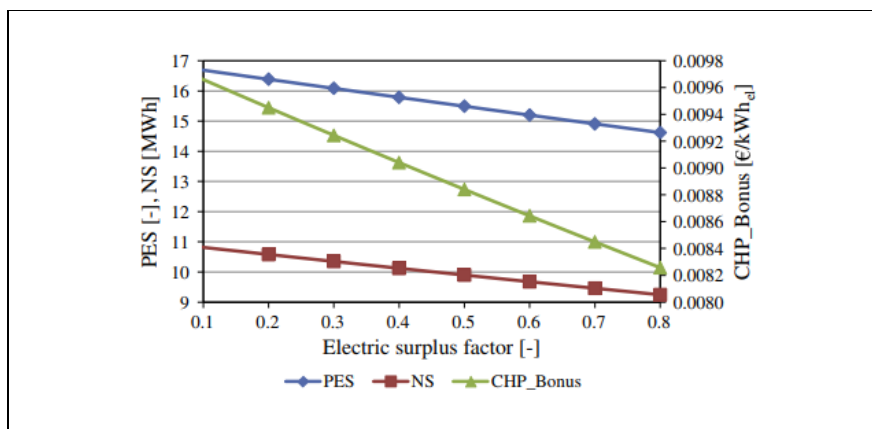
ΣΧΗΜΑ1. 12-Μηνιαία παραγωγή ενέργειας του συστήματος τριπαραγωγής με SM = 2 σε μειωμένο θερμοκρασιακό εύρος [11]



ΣΧΗΜΑ1. 13-Μηνιαία παραγωγή ενέργειας του συστήματος τριπαραγωγής στην πόλη Palermo [11]

Οι Boyaghchi και Heidarnjad [12] έκαναν θερμοοικονομική εκτίμηση ενός συστήματος τριπαραγωγής CCHP ενσωματωμένο με οργανικό κύκλο Rankine. Εγκατέστησαν δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για να διορθώσουν την αναντιστοιχία μεταξύ της παροχής ηλιακής ενέργειας και της απαίτησης της καταναλισκόμενης θερμότητας από τα υποσυστήματα του CCHP. Για το καλοκαίρι, η θερμική απόδοση, η απόδοση εξέργειας και το κόστος παραγωγής είναι 23.66%, 9.51% και 5114.5\$/year, ενώ για το χειμώνα οι τιμές είναι 48.45%, 13.76% και 5688.1 \$/year. Οι 5 παράμετροι που επιλέγονται για την εξέταση της βελτίωσης της λειτουργίας του ολικού συστήματος είναι η θερμοκρασία και η πίεση στην είσοδο του στροβίλου, η πίεση στην έξοδο του στροβίλου, οι θερμοκρασίες στον ατμοποιητή και στην έξοδο του θερμαντή. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το καλοκαίρι, παρατηρείται χαμηλότερο κόστος παραγωγής στο CCHP όταν η πίεση στην είσοδο του στροβίλου αυξάνεται και η πίεση στην έξοδό του μειώνεται. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, το κόστος παραγωγής είναι μειωμένο όταν η πίεση και η θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου καθώς και η θερμοκρασία του θερμαντή έχουν υψηλότερες τιμές ενώ η πίεση στην έξοδο του στροβίλου έχει χαμηλότερη τιμή. Τελικά, η θερμική απόδοση, η απόδοση εξέργειας και το κόστος παραγωγής στη βέλτιστη περίπτωση υφίστανται βελτίωση κατά 28%, 27% και 17% αντίστοιχα κατά τους θερινούς μήνες. Για το χειμώνα αυτές οι τιμές είναι αντίστοιχα, 4%, 13% και 18%.

Ο Angrisani [13] διερεύνησε την τεχνο-οικονομική σκοπιμότητα ενός συστήματος τριπαραγωγής ξεκινώντας από προηγούμενες πειραματικές δοκιμές του **κύριου κινητήρα**. Το σύστημα που χρησιμοποιείται για την παροχή κλιματισμού σε αίθουσα διαλέξεων και ζεστού νερού οικιακής χρήσης σε ένα κοντινό νοικοκυριό έχει παρουσιάσει ενδιαφέρουσες επιδόσεις, που συντέθηκαν σε 82,1% συνολικής αποτελεσματικότητας της πρωτογενούς ενέργειας και μείωσε τις ενεργειακές συνεισφορές σε σύγκριση με το σύστημα αναφοράς. Συγκεκριμένα, ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο ενός συστήματος μικροτριπαραγωγής με απώτερο στόχο τον προσδιορισμό της εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας μέσω του συντελεστή εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμου (FESR). Εφαρμόζουν επίσης μια ανάλυση ευαισθησίας για την εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας, την καθαρή εξοικονόμηση και το κέρδος παραγωγής CHP σε σχέση με το συντελεστή ηλεκτρικού πλεονάσματος από τη μονάδα CCHP. Ωστόσο, δεν έχει δοθεί προσοχή στην επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού και ρύθμισης της απόδοσης των εγκαταστάσεων.



ΣΧΗΜΑ1. 14-Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας, καθαρή εξοικονόμηση και το κέρδος παραγωγής CHP σε σχέση με το συντελεστή ηλεκτρικού πλεονάσματος [13]

### 1.3. Συμπεράσματα

Με την πάροδο των χρόνων οι μελέτες στον τομέα της μικροσυμπαγωγής οικιακής κλίμακας έχουν αυξηθεί και έχουν βοηθήσει τους επιστήμονες να καταλήξουν σε βασικά και γενικά συμπεράσματα. Η χρήση οργανικών ρευστών αντί για νερό σε θερμοδυναμικό κύκλο Rankine είναι προτιμότερη λόγω της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου καθώς τα οργανικά ρευστά αεροποιούνται σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες από ότι το νερό. Το κόστος της βιομάζας σε σύγκριση με άλλα καύσιμα είναι μικρότερο αλλά απαιτούνται μεγαλύτερες επενδύσεις για την καύση της από ότι σε κλασσικούς λέβητες. Παρατηρείται ότι σε ένα σύστημα βιομάζας – ORC ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι χαμηλός και κυμαίνεται από 1% ως 18%. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός συστήματος που θα καλύπτει τις θερμικές ανάγκες και τη θέρμανση του νερού χρήσης μίας κατοικίας. Η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για παραγωγή ενέργειας με φιλικότερους τρόπους προς το περιβάλλον και εξοικονόμησης ορυκτών καυσίμων κάνει την τεχνολογία ORC μία αξιόπιστη λύση για την εκμετάλλευση θερμικής ενέργειας από την κάυση βιομάζας. Ο κατάλληλος σχεδιασμός και το μέγεθος των εναλλακτών θερμότητας και των στροβίλων μπορούν να βελτιώσουν την ολική απόδοση ενός συστήματος CHP. Μία ενδιαφέρουσα ιδέα για το σχεδιασμό ενός συστήματος μικροσυμπαγωγής αποτελούν οι μηχανές Stirling. Οι μηχανές Stirling είναι αθόρυβες, έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν με πολλά καύσιμα και να χρησιμοποιούν θερμότητα από διάφορες πηγές. Η αξιοποίηση της θερμότητας από την εκάστοτε πηγή εξαρτάται σημαντικά από τη θέση της μηχανής. Το υψηλό κόστος της όμως αποτελεί τροχοπέδη για την εγκατάστασή της σε μία κατοικία στα πλαίσια της μικροσυμπαγωγής. Η χρήση ηλιακών συστημάτων σε CHP αποτελεί καινοτομικό σχεδιασμό συστήματος συμπαγωγής καθώς μπορούν και εκμεταλλεύονται την κυριότερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία είναι η ηλιακή, ενώ έχουν την ευχέρεια να χρησιμοποιούνται σε παραλληλία και σε σειρά με άλλα υποσυστήματα. Όταν η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή και ειδικότερα κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά πάνελ τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, ενώ τα υποσυστήματα ORC είναι αποσυνδεδεμένα. Με αυτόν τον τρόπο αποθηκεύεται σημαντική ποσότητα καυσίμου η οποία απαιτείται για τη λειτουργία του ORC, τις θερμικές και ηλεκτρικές ανάγκες κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες και θερμοδυναμικός οργανικός κύκλος Rankine μπορούν να λειτουργούν σε σειρά και να καλύπτουν τις παραπάνω ανάγκες μίας κατοικίας. Το ηλιακό πεδίο και η δεξαμενή αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας είναι δύο παράμετροι που λαμβάνονται σοβαρά υπόψη σε μία μελέτη ενός CHP. Η υψηλή ηλιακή ακτινοβολία και το κατάλληλο εύρος θερμοκρασίας στη δεξαμενή αποθήκευσης TES



οδηγούν σε αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και σε υψηλότερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης στο σύστημα ORC. Τέλος, κρίνεται απαραίτητη η σύγκριση πειραματικής έρευνας, θερμοδυναμικού μοντέλου και προσομοίωσης σε υπολογιστή για το βέλτιστο σχεδιασμό CHP οικιακής κλίμακας.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (TES)

### 2.1 Εισαγωγή

Οι ενεργειακές απαιτήσεις στους εμπορικούς, βιομηχανικούς και βοηθητικούς τομείς ποικίλουν σε ημερήσιες, εβδομαδιαίες και εποχιακές βάσεις. Αυτές οι απαιτήσεις μπορούν να συνδυαστούν με τη βοήθεια συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES) που λειτουργούν συνεργικά. Η χρήση του TES για θερμικές εφαρμογές όπως η θέρμανση χώρου και νερού, ψύξη, κλιματισμό και ούτω καθεξής έχει λάβει πρόσφατα μεγάλη προσοχή. Μια ποικιλία τεχνικών TES έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες τέσσερις ή πέντε δεκαετίες, καθώς οι βιομηχανικές χώρες έχουν γίνει ιδιαίτερα ηλεκτροφόρες. Αυτά τα συστήματα TES έχουν τεράστιες δυνατότητες και καταστούν αποτελεσματικότερη τη χρήση εξοπλισμού θερμικής ενέργειας, καθώς ακόμα διευκολύνουν τις υποκαταστάσεις ενέργειας μεγάλης κλίμακας από οικονομική άποψη.

Σε γενικές γραμμές, απαιτείται ένα συντονισμένο σύνολο δράσεων σε διάφορους τομείς του ενεργειακού συστήματος προκειμένου να υλοποιηθούν πλήρως τα δυνητικά οφέλη της θερμικής αποθήκευσης. Πολλοί τύποι αποθήκευσης ενέργειας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ενέργειας. Σε διαδικασίες που παράγεται ενέργεια αποβλήτων η οποία μπορεί να ανακτηθεί, η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση καυσίμων υψηλής ποιότητας. Η ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται με πολλούς τρόπους, αλλά δεδομένου ότι σε μεγάλο μέρος της οικονομίας σε πολλές χώρες, η ενέργεια παράγεται και μεταφέρεται ως θερμότητα, το δυναμικό για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας δικαιολογεί τη μελέτη λεπτομερώς. Οι χημικές μπαταρίες έγιναν γνωστές στα μέσα του 19ου αιώνα και παρείχαν την ενέργεια για τους τηλεγράφους, το φωτισμό σημάτων, και άλλες ηλεκτρικές συσκευές. Μέχρι τη δεκαετία του 1890, οι κεντρικοί σταθμοί παρείχαν τόσο θέρμανση όσο και φωτισμό, και πολλοί έκαναν και τα δύο. Τα ηλεκτρικά συστήματα ήταν σχεδόν όλα τα άμεσα ρεύματα (dc)· έτσι, η ενσωμάτωση των μπαταριών ήταν σχετικά εύκολη. Το 1896, ο εφευρέτης του Τολέδο, Όμηρος T. Yagyan, εγκατέστησε μια θερμική δεξαμενή αποθήκευσης σε μια από τις χαμηλών θερμοκρασιών εγκαταστάσεις θέρμανσης ζεστού νερού σε εκείνη την πόλη για να επιτρέψει τη σύλληψη της υπερβολικής θερμότητας όταν η ηλεκτρική ζήτηση ήταν

υψηλή. Άλλες εγκαταστάσεις χρησιμοποίησαν τις δεξαμενές αποθήκευσης ατμού, οι οποίες δεν ήταν γενικά τόσο επιτυχείς. Άλλες μορφές TES χρησιμοποιήθηκαν για να τροφοδοτήσουν συμβατικά αυτοκίνητα στη δεκαετία του '90, συμπεριλαμβανομένου του πεπιεσμένου αέρα και του υψηλής θερμοκρασίας νερού. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και τα φορτηγά ήταν αρκετά κοινά πριν από τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο. Μετά από τον πόλεμο όμως, επικράτησαν οι βενζινοκίνητες μηχανές εσωτερικής καύσης.

Το TES ασχολείται με την αποθήκευση ενέργειας με ψύξη, θέρμανση, τήξη, στερεοποίηση ή εξάτμιση υλικού. Η θερμική ενέργεια είναι διαθέσιμη όταν η διαδικασία αντιστρέφεται. Η αποθήκευση με την πρόκληση ενός υλικού, κατά την οποία έχουμε θερμοκρασιακή αύξηση ή μείωση, καλείται λογική αποθήκευση θερμότητας. Η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από την ειδική θερμότητα του υλικού αποθήκευσης και, εάν ο όγκος είναι σημαντικός, από την πυκνότητά του. Η αποθήκευση με αλλαγή φάσης (η μετάβαση από στερεό σε υγρό ή από υγρό σε ατμό χωρίς αλλαγή θερμοκρασίας) είναι ένας τρόπος tes γνωστός ως λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας. Τα λογικά συστήματα αποθήκευσης χρησιμοποιούν συνήθως τους βράχους, το έδαφος, ή το νερό ως μέσο αποθήκευσης. Η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται με την αύξηση της αποθήκευσης της μέσης θερμοκρασίας. Τα λανθάνοντα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας αποθηκεύουν ενέργεια με τη βοήθεια υλικών αλλαγής φάσης (PCMs). Όταν το υλικό αλλάζει φάση, συνήθως από στερεό σε υγρό, αποθηκεύεται θερμική ενέργεια. Η ειδική θερμότητα της στερεοποίησης/τήξης ή της εξάτμισης και η θερμοκρασία στην οποία η αλλαγή φάσης εμφανίζεται είναι υψηλής σημασίας. Τόσο η λογική όσο και η λανθάνουσα τεχνολογία TES μπορούν να εμφανιστούν στο ίδιο υλικό αποθήκευσης.

Τα PCM είτε συσκευάζονται σε εξειδικευμένα δοχεία, όπως σωλήνες, ρηγά πάνελ, πλαστικές σακούλες, είτε περιέχονται σε συμβατικά δομικά στοιχεία (π.χ. τοίχοι και οροφές) είτε συναντώνται ως αυτόνομα στοιχεία. Η παλαιότερη μορφή TES περιλαμβάνει πιθανώς τη συγκομιδή του πάγου από τις λίμνες και τους ποταμούς και την αποθήκευσή του στις καλά-μονωμένες αποθήκες για χρήση καθ' όλη τη διάρκεια του έτους για σχεδόν όλους τους στόχους που η μηχανική ψύξη ικανοποιεί σήμερα, συμπεριλαμβανομένης της συντήρησης των τροφίμων, των ποτών, και του κλιματισμού. Το κτίριο του ογγρικού κοινοβουλίου στη Βουδαπέστη εξακολουθεί να είναι κλιματιζόμενο, με πάγο που συγκομίζεται από τη λίμνη Balaton το χειμώνα.

Το TES ήταν πάντα στενά συνδεδεμένο με ηλιακές εγκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων τόσο της ηλιακής θέρμανσης όσο και των φωτοβολταϊκών εφαρμογών. Σήμερα, χρησιμοποιούνται αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα, μπαταρίες, αποθήκευση διατηρημένου με απλή ψύξη και ζεστό νερό, αποθήκευση πάγου, όλα σχεδιασμένα για να πληρούν έναν ή περισσότερους από τους σκοπούς που αναφέρονται παραπάνω. Πολλές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας παρέχουν άμεσα κίνητρα για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας, ενώ τα ποσοστά ώρας της ημέρας και τα υψηλά τέλη ζήτησης προσελκύουν έμμεσα τους πελάτες να εξετάσουν αυτές τις ευκαιρίες.

Το TES περιλαμβάνει γενικά προσωρινή αποθήκευση υψηλής ή χαμηλής θερμοκρασίας θερμικής ενέργειας για μελλοντική χρήση. Παραδείγματα TES είναι η αποθήκευση ηλιακής ενέργειας για ολονύκτια θέρμανση, η αποθήκευση της θερμικής θερμότητας για χειμερινή χρήση, του χειμερινού πάγου για την ψύξη χώρου το καλοκαίρι, και της θερμότητας ή της δροσιάς που παράγονται ηλεκτρικά κατά τη διάρκεια των ωρών εκτός αιχμής για χρήση κατά τη διάρκεια των επόμενων ωρών αιχμής όπου υπάρχει ζήτηση. Η ηλιακή ενέργεια, σε αντίθεση με την ενέργεια από ορυκτά καύσιμα, δεν είναι διαθέσιμη όλη την ώρα. Τα φορτία ψύξης, τα οποία σχεδόν συμπίπτουν με τα μέγιστα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, είναι συχνά παρόντα μετά το ηλιοβασίλεμα. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη χρονική υστέρηση όταν τα αντικείμενα θερμαίνονται από την ηλιακή ενέργεια και όταν απελευθερώνουν τη θερμότητα στον περιβάλλοντα αέρα. Το TES μπορεί να βοηθήσει στην αντιστάθμιση της ασυμφωνίας της διαθεσιμότητας και της ζήτησης.

Η ενέργεια έχει σημαντικό ρόλο στην οικονομική ευημερία και την τεχνολογική ανταγωνιστικότητα ενός έθνους. Επειδή η πρόβλεψη της μελλοντικής διαθεσιμότητας, της ζήτησης και της τιμής των ενεργειακών μορφών είναι στην καλύτερη περίπτωση προσεγγιστική και συχνά ανακριβής, είναι σημαντικό να υπάρχει ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών, διαθέσιμων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του μέλλοντος. Επιπλέον, οι τεχνολογίες που αναπτύσσονται θα πρέπει να είναι εκείνες που διασφαλίζουν την ενεργειακή ασφάλεια, την αποδοτικότητα και την ποιότητα του περιβάλλοντος για ένα έθνος. Το TES είναι μια τέτοια τεχνολογία, και προωθείται επειδή μπορεί να μειώσει σημαντικά τη συνολική κατανάλωση ενέργειας, υποστηρίζοντας έτσι τα εγχώρια ορυκτά καύσιμα και μειώνοντας τις δαπανηρές εισαγωγές πετρελαίου. Δεδομένου ότι τα τεχνικά και οικονομικά προβλήματα και οι

κίνδυνοι μειώνονται μέσω αποδεδειγμένων διαδικασιών, η TES αναμένεται να γίνει αποδεκτή ως μία ελκυστική επιλογή στους βιομηχανικούς και εμπορικούς τομείς, που θα οδηγήσει μεταξύ άλλων οφελών, στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και στα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα. Το TES έχει αναγνωριστεί ως μέθοδος για τη σημαντική μείωση των μέγιστων ηλεκτρικών απαιτήσεων, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση των προβλεπόμενων ελλείψεων μέγιστης ισχύος στο μέλλον. Το TES παρέχει ένα δυναμικό οικονομικό μέσο χρήσης της απορριπτόμενης θερμότητας και των κλιματικών ενεργειακών πόρων για την κάλυψη ενός σημαντικού μέρους των αυξανόμενων αναγκών μας για θέρμανση και ψύξη, ειδικά για βιομηχανικές εγκαταστάσεις και εμπορικά κτίρια. Τα περιβαλλοντικά οφέλη συνοδεύουν επίσης τη χρήση του TES σε πολλές εφαρμογές. Η τεχνολογία TES έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες μορφές και εφαρμογές. Μερικές από τις πιο κοινές εφαρμογές περιλαμβάνουν τη χρήση λογικών TES (έλαια, λιωμένα άλατα) ή λανθάνοντων TES (πάγος, υλικό αλλαγής φάσης) για ψύξη ή/και διαστημικές ανάγκες θέρμανσης και ψύξης. Οι ερευνητικές δραστηριότητες στο TES συνεχίζονται σε διάφορα εθνικά εργαστήρια, πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα σε όλο τον κόσμο, καθώς και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

## 2.2 Θερμική Ενέργεια

Οι ποσότητες θερμικής ενέργειας διαφέρουν σε θερμοκρασία. Με την αύξηση την θερμοκρασίας μιας ουσίας, παρατηρείται αύξηση και στο ενεργειακό της περιεχόμενο. Η ενέργεια  $E$  που απαιτείται για τη θέρμανση ενός όγκου  $V$  μιας ουσίας από θερμοκρασία  $T_1$  έως θερμοκρασία  $T_2$  δίνεται από τον τύπο

$$E = mC(T_2 - T_1) = \rho VC(T_2 - T_1)$$

όπου  $C$  είναι η ειδική θερμότητα της ουσίας. Μια δεδομένη ποσότητα ενέργειας μπορεί να θερμάνει το ίδιο βάρος ή όγκο άλλων ουσιών και να αυξήσει τη θερμοκρασία σε τιμή μεγαλύτερη ή χαμηλότερη από  $T_2$ . Η τιμή του  $C$  μπορεί να κυμαίνεται από περίπου 1 kcal/kgC για νερό έως 0,0001 kcal/kgC για ορισμένα υλικά σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

Η ενέργεια που απελευθερώνεται από ένα υλικό καθώς η θερμοκρασία του μειώνεται, ή η ενέργεια η οποία απορροφάται από ένα υλικό καθώς η θερμοκρασία του αυξάνεται, καλείται λογική θερμότητα. Η λανθάνουσα θερμότητα σχετίζεται με τις

αλλαγές κατάστασης ή την αλλαγή φάσης ενός υλικού. Για παράδειγμα, για τη μετατροπή του πάγου σε νερό, για την αλλαγή του νερού σε ατμό και για την τήξη του κεριού παραφίνης απαιτείται ενέργεια. Η ενέργεια που απαιτείται για να προκαλέσει αυτές τις αλλαγές ονομάζεται θερμότητα της σύντηξης στο σημείο τήξης και θερμότητα της εξάτμισης στο σημείο βρασμού. Η λογική θερμότητα ποικίλλει από το ένα υλικό στο άλλο για μια δεδομένη αλλαγή θερμοκρασίας. Η λανθάνουσα θερμότητα ποικίλλει επίσης σημαντικά μεταξύ των διαφορετικών ουσιών για ένα δεδομένο τύπο αλλαγής φάσης.

Είναι σχετικά απλό να προσδιοριστεί η αξία της λογικής θερμότητας για τα στερεά και τα υγρά, αλλά η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη για τα αέρια. Εάν ένα αέριο που περιορίζεται σε έναν ορισμένο όγκο θερμαίνεται, τότε η θερμοκρασία και η πίεση αυξάνονται. Η ειδική θερμότητα που παρατηρείται σε αυτήν την περίπτωση καλείται ειδική θερμότητα στο σταθερό όγκο,  $C_v$ . Εάν, αντίθετα, ο όγκος επιτρέπεται να ποικίλλει και η πίεση είναι σταθερή, λαμβάνεται η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση,  $C_p$ . Η αναλογία  $C_p / C_v$  και το κλάσμα της θερμότητας που παράγεται κατά τη συμπίεση μπορεί να αποθηκευτεί, επηρεάζοντας σημαντικά την απόδοση αποθήκευσης.

### 2.3 Θερμική αποθήκευση ενέργειας

Ως μία προηγμένη ενεργειακή τεχνολογία, η TES έχει προσελκύσει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις θερμικές εφαρμογές όπως η θέρμανση χώρου, το ζεστό νερό, η ψύξη, και ο κλιματισμός. Τα συστήματα TES έχουν τη δυνατότητα να αυξήσουν την αποτελεσματική χρήση του εξοπλισμού θερμικής ενέργειας και να διευκολύνουν μεγάλη κλίμακα μετατροπής καυσίμου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα TES είναι χρήσιμο για την αντιμετώπιση της αναντιστοιχίας μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης της ενέργειας.

Υπάρχουν κυρίως δύο τύποι συστημάτων TES, λογικοί (π.χ. νερό και βράχοι) και λανθάνοντες (π.χ. νερό/πάγος και ενυδατωμένο αλάτι). Η επιλογή ενός συστήματος TES εξαρτάται κυρίως από την περίοδο αποθήκευσης που απαιτείται (ημερήσια ή εποχιακή), την οικονομική βιωσιμότητα, τις συνθήκες λειτουργίας. Πολλές δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα της ενέργειας έχουν επικεντρωθεί στην αποδοτική χρήση της ενέργειας και την εξοικονόμηση ενέργειας. Τα συστήματα

TES φαίνεται να είναι μία από τις πιο ελκυστικές θερμικές τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί .

Με τον όρο TES εννοούμε ουσιαστικά την προσωρινή "εκμετάλλευση" της ενέργειας για μελλοντική χρήση. Η θερμοκρασία στην οποία η ενέργεια κρατιέται, εν μέρει καθορίζει την πιθανή εφαρμογή. Παραδείγματα συστημάτων TES είναι η αποθήκευση ηλιακής ενέργειας για νυχτερινή χρήση και το Σαββατοκύριακο, η ζέστη του καλοκαιριού για θέρμανση χώρου το χειμώνα και ο πάγος κατά το χειμώνα για την ψύξη χώρου το καλοκαίρι. Επιπλέον, η θερμότητα ή η ψύξη που παράγεται ηλεκτρικά κατά τη διάρκεια των ωρών εκτός αιχμής μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια των επόμενων ωρών αιχμής της ζήτησης. Η ηλιακή ενέργεια, σε αντίθεση με την ενέργεια από τα ορυκτά, τα πυρηνικά, και κάποια άλλα καύσιμα, δεν είναι διαθέσιμη ανά πάσα στιγμή. Ακόμη και τα φορτία ψύξης, τα οποία συμπίπτουν κάπως με τα μέγιστα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας αλλά υστερούν κατά μια χρονική περίοδο, είναι συχνά παρόντα μετά από το ηλιοβασίλεμα. Το TES μπορεί να παρέχει έναν σημαντικό μηχανισμό για την αντιστάθμιση αυτής της αναντιστοιχίας μεταξύ των χρόνων διαθεσιμότητας ενέργειας και της ζήτησης.

Οι αυξανόμενες κοινωνικές απαιτήσεις ενέργειας, οι ελλείψεις ορυκτών καυσίμων και οι ανησυχίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις παρέχουν ώθηση στην ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια, η βιομάζα και η αιολική ενέργεια. Λόγω της διαλείπουσας φύσης τους, η αποτελεσματική χρήση αυτών και άλλων πηγών ενέργειας εξαρτάται εν μέρει από τη διαθεσιμότητα αποδοτικών και αποτελεσματικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

Η τεχνολογία TES περιλαμβάνει την αποθήκευση ενέργειας με θέρμανση (ή ψύξη) ή τήξη ή εξάτμιση (ή στερεοποίηση ή υγροποίηση) ενός υλικού ή μέσω θερμοχημικών αντιδράσεων. Η ενέργεια ανακτάται ως θέρμανση ή ψύξη όταν αντιστρέφεται η διαδικασία. Η αποθήκευση με την πρόκληση μιας αύξησης θερμοκρασίας είναι γνωστή ως λογική TES και με την πρόκληση μιας αλλαγής φάσης ως λανθάνουσα TES.

Η TES διαθέτει μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, η πλειονότητα των οποίων σχετίζεται με τη θέρμανση και την ψύξη. Η τεχνολογία αυτή παρέχει μια σύνδεση και έναν απομονωτή μεταξύ μιας πηγής θερμότητας και ενός χρήστη θερμότητας. Ένα κοινό παράδειγμα ενός συστήματος TES είναι το ηλιακό σύστημα αποθήκευσης ζεστού

νερού. Η πηγή ενέργειας είναι η ηλιακή ακτινοβολία και ο χρήστης θερμότητας είναι το πρόσωπο που απαιτεί ζεστό νερό. Σε αυτήν την περίπτωση, απαιτείται αποθήκευση, επειδή ο ρυθμός παροχής ενέργειας είναι μικρός σε σύγκριση με τη στιγμιαία ζήτηση και η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι πάντα διαθέσιμη όταν απαιτείται ζεστό νερό.

Ως παράδειγμα της εξοικονόμησης κόστους και της αυξημένης αποτελεσματικότητας που μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης TES, εξετάζεται η ακόλουθη περίπτωση. Σε ορισμένα κλίματα, είναι απαραίτητο να παρέχεται θέρμανση το χειμώνα και ψύξη το καλοκαίρι. Χαρακτηριστικά, αυτές οι υπηρεσίες παρέχονται με τη χρήση της ενέργειας για τη λειτουργία των θερμάστρων και των κλιματιστικών μηχανημάτων. Με το TES, είναι δυνατή η αποθήκευση θερμότητας από τους ζεστούς καλοκαιρινούς μήνες για χρήση το χειμώνα, ενώ οι χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος του χειμώνα μπορούν να φορτίσουν ένα δροσερό κατάστημα και στη συνέχεια να παρέχουν ψύξη το καλοκαίρι. Αυτό είναι ένα παράδειγμα εποχιακής αποθήκευσης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών που προκαλούνται από τις εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Προφανώς, ένα τέτοιο σύστημα απαιτεί μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης λόγω των μεγάλων χρονοδιαγραμμάτων αποθήκευσης. Η ίδια αρχή μπορεί να εφαρμοστεί σε μικρότερη κλίμακα για να εξομαλύνει τις ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να θερμάνει τα πλακάκια σε ένα πάτωμα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τη νύχτα, καθώς η θερμοκρασία περιβάλλοντος πέφτει, τα πλακάκια απελευθερώνουν την αποθηκευμένη θερμότητα τους για να επιβραδύνουν την πτώση θερμοκρασίας στο δωμάτιο. Ένα άλλο παράδειγμα μιας εφαρμογής TES είναι η χρήση της θερμικής αποθήκευσης για να επωφεληθούμε από off-peak τιμολόγια ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μονάδες ψύξης μπορούν να τρέξουν τη νύχτα όταν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχετικά χαμηλό. Αυτές οι μονάδες χρησιμοποιούνται για να ψύξουν μια θερμική αποθήκευση, η οποία στη συνέχεια παρέχει την απαιτούμενη ψύξη για τον κλιματισμό καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι, όχι μόνο το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται, αλλά και η αποδοτικότητα του ψύκτη αυξάνεται λόγω των χαμηλότερων νυκτερινών περιβαλλοντικών θερμοκρασιών. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι να μειώνεται και η μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για ηλεκτρικές εφοδιαστικές χρήσεις.



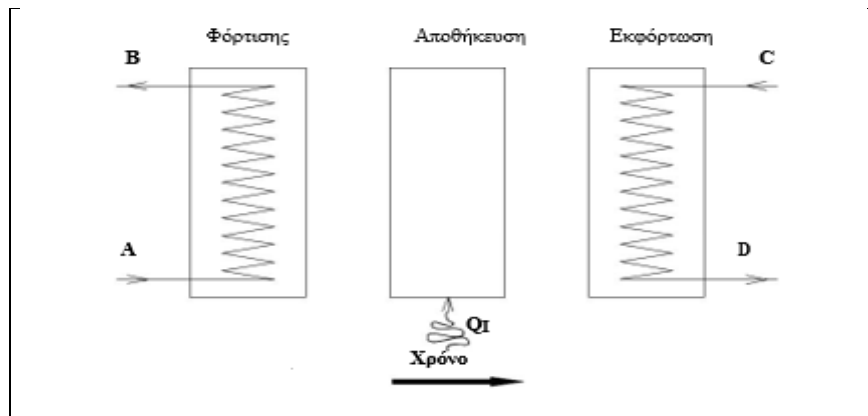
### 2.3.1 Βασική αρχή του TES

Η βασική αρχή είναι η ίδια σε όλες τις εφαρμογές TES. Η ενέργεια παρέχεται σε ένα σύστημα αποθήκευσης για την αφαίρεση και τη χρήση σε μεταγενέστερο χρόνο. Αυτό που ποικίλλει κυρίως είναι η κλίμακα της αποθήκευσης και η μέθοδος αποθήκευσης που χρησιμοποιείται. Η εποχιακή αποθήκευση απαιτεί τεράστια χωρητικότητα αποθήκευσης. Μια εποχιακή μέθοδος TES περιλαμβάνει την αποθήκευση θερμότητας σε υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Μια άλλη προτεινόμενη μέθοδος είναι η κυκλοφορία θερμού αέρα σε υπόγεια σπήλαια γεμάτα με στερεά για την αποθήκευση λογικής θερμότητας. Η οικιακή εκδοχή αυτής της έννοιας αποθηκεύει τη θερμότητα από καυτούς βράχους σε ένα κελάρι. Στο αντίθετο άκρο του φάσματος αποθήκευσης-διάρκειας είναι η αποθήκευση της θερμότητας σε ωριαία ή καθημερινή βάση. Η προαναφερθείσα χρήση των πλακακίων για την αποθήκευση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ένα τυπικό παράδειγμα, το οποίο εφαρμόζεται συχνά σε παθητικό ηλιακό σχεδιασμό.

#### *Διεργασίες TES*

Μια πλήρης διαδικασία αποθήκευσης περιλαμβάνει τουλάχιστον τρία βήματα: φόρτιση, αποθήκευση και αποφόρτιση. Ένας απλός κύκλος αποθήκευσης μπορεί να εικονογραφηθεί όπως στο παρακάτω σχήμα, στο οποίο τα τρία βήματα εμφανίζονται ως διακριτά. Στα πρακτικά συστήματα, ορισμένα από τα βήματα μπορεί να συμβούν ταυτόχρονα (π.χ. φόρτιση και αποθήκευση) και κάθε βήμα μπορεί να συμβεί περισσότερες από μία φορές σε κάθε κύκλο αποθήκευσης.

Από την άποψη των μέσων αποθήκευσης, μια ευρεία ποικιλία των επιλογών υπάρχει ανάλογα με τη σειρά και την εφαρμογή θερμοκρασίας. Για τη λογική αποθήκευση θερμότητας, το νερό είναι μια κοινή επιλογή επειδή, μεταξύ των άλλων θετικών ιδιοτήτων του, έχει μια από τις υψηλότερες ειδικές θερμότητες από τα περισσότερα υγρά σε περιβαλλοντικές θερμοκρασίες.



Σχήμα 2.1 - Οι τρεις διεργασίες σε ένα γενικό σύστημα TES: φόρτιση (αριστερά), αποθήκευση (μεσαία) και εκφόρτιση (δεξιά).

Ενώ η ειδική θερμότητα του νερού δεν είναι τόσο υψηλή όσο αυτή για πολλά στερεά, έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ένα υγρό που μπορεί εύκολα να αντληθεί για τη μεταφορά θερμικής ενέργειας. Ως υγρό, το νερό επιτρέπει επίσης τα καλά ποσοστά μεταφοράς θερμότητας. Τα στερεά έχουν το πλεονέκτημα των υψηλότερων ειδικών θερμοχωρητικότητας, οι οποίες επιτρέπουν τις συμπαγέστερες μονάδες αποθήκευσης. Όταν εμπλέκονται υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως για την προθέρμανση αέρα φούρνου, τα στερεά γίνονται η προτιμώμενη λογική αποθήκη θερμότητας. Συνήθως τα πυρίμαχα χρησιμοποιούνται ως υλικά αποθήκευσης. Εάν το μέσο αποθήκευσης πρέπει να αντληθεί, χρησιμοποιούνται συχνά υγρά μέταλλα.

Τα TES που χρησιμοποιούν λανθάνουσες αλλαγές θερμότητας έχουν λάβει μεγάλη προσοχή. Το πιο κοινό παράδειγμα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας είναι η μετατροπή του νερού σε πάγο. Τα συστήματα ψύξης που ενσωματώνουν την αποθήκευση πάγου έχουν ένα ευδιάκριτο πλεονέκτημα μεγέθους σε σχέση με τις μονάδες απλής ψύξης-νερού λόγω της σχετικά μεγάλης ποσότητας ενέργειας που αποθηκεύεται μέσω της αλλαγής φάσης. Το μέγεθος είναι το σημαντικότερο πλεονέκτημα της λανθάνουσας θερμικής αποθήκευσης. Η NASA έχει εξετάσει τη χρήση αλάτων φθορίου λιθίου για την αποθήκευση θερμότητας στο περιβάλλον μηδενικής βαρύτητας του διαστημικού λεωφορείου. Μια άλλη ενδιαφέρουσα εξέλιξη είναι η χρήση των PSMs στην επένδυση τοίχων. Αυτές οι επενδύσεις ενσωματώνουν τις ενώσεις που υποβάλλονται στις στερεές δομικές αλλαγές φάσης. Με την κατάλληλη επιλογή του υλικού, η αλλαγή φάσης εμφανίζεται στη περιβαλλοντική

θερμοκρασία. Κατόπιν, αυτά τα υλικά, όταν ενσωματώνονται στις επενδύσεις, ενεργούν ως υψηλής πυκνότητας πηγές θερμότητας που αντιστέκονται στις αλλαγές της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας δωματίου.

Η άλλη κατηγορία αποθήκευσης θερμότητας είναι μέσω της χρήσης αναστρέψιμων χημικών αντιδράσεων. Σε αυτή τη μέθοδο, οι αντιδράσεις περιλαμβάνουν το σπάσιμο και τη διαμόρφωση χημικών δεσμών. Έτσι, πολλή ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ανά μάζα μονάδων του υλικού αποθήκευσης. Αν και δεν είναι προς το παρόν βιώσιμη, μια ποικιλία αντιδράσεων διερευνάται. Αυτές περιλαμβάνουν τις καταλυτικές αντιδράσεις, όπως η αντίδραση αναμόρφωσης του ατμού με μεθάνιο και η αποσύνθεση του τριοξειδίου του θείου και αντιδράσεις θερμικής αποσύνδεσης που αφορούν οξείδια μετάλλων και μεταλλικά υδρίδια. Οι αντιδράσεις αυτές αναμένεται να είναι χρήσιμες σε πυρηνικούς κύκλους υψηλής θερμοκρασίας και συστήματα ηλιακής ενέργειας, καθώς και ως κύκλοι επικάλυψης για βιομηχανικούς λέβητες. Επί του παρόντος, οι αντιδράσεις χαμηλότερης θερμοκρασίας (<300°C) δεν έχουν αποδειχθεί ελπιδοφόρες. Το TES μπορεί να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης του κόστους και αύξησης της αποτελεσματικότητας. Αν και η αποτελεσματική θερμοχημική αποθήκευση δεν έχει εδραιωθεί ακόμα, η λανθάνουσα και λογική αποθήκευση θερμότητας είναι ήδη καθιερωμένες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το TES έχει τη δυνατότητα να αποφέρει σημαντικά οφέλη, ιδιαίτερα για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης χαμηλής θερμοκρασίας. Τα οφέλη αυτά θα πρέπει να επιτρέπουν στο TES να αποκομίσει ευρύτερη αποδοχή.

### **Θέματα Έρευνας**

Τα συστήματα TES σε συνδυασμό με εφαρμογές θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Πολλές σχετικές μελέτες έχουν διεξαχθεί σε διάφορες χώρες, κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες, την Ευρώπη και την Ιαπωνία. Οι μελέτες αυτές αφορούν τεχνικά ζητήματα που προκύπτουν από νέες έννοιες σχετικές με TES και τις βελτιώσεις που απαιτούνται για την απόδοση αυτών των υφιστάμενων συστημάτων. Μελέτες έχουν επίσης διερευνήσει το σχεδιασμό των συμπαγών συστημάτων TES και τη χρήση τους σε ηλιακές εφαρμογές. Η έρευνα και ανάπτυξη των TES ήταν ευρείας βάσης και παραγωγική, και κατευθύνεται τόσο προς την επίλυση συγκεκριμένων θεμάτων TES όσο και προς τις δυνατότητες για νέα συστήματα και υλικά αποθήκευσης. Οι ακόλουθες συζητήσεις συνοψίζουν πολλές έρευνες και υποδεικνύουν το πεδίο των μελετών TES.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, πολλά άρθρα έχουν εμφανιστεί στη βιβλιογραφία σχετικά με έρευνες των συστημάτων TES και τις εφαρμογές τους (ειδικά με την ηλιακή ενέργεια), τα χαρακτηριστικά απόδοσης του πεδίου και τις αξιολογήσεις τους, τις βασικές αρχές σχεδιασμού και τις θερμικές αναλύσεις για το σύστημα και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Επιπλέον, έχουν διεξαχθεί θεωρητικές, πειραματικές και αριθμητικές μελέτες σχετικά με τις θερμοφυσικές ιδιότητες των νέων υλικών TES, τα κριτήρια επιλογής TES, την ενσωμάτωση των συστημάτων TES σε ηλιακούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας και τις οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις των TES. Μερικές λεπτομέρειες σχετικά με αυτές τις μελέτες δίνονται παρακάτω:

- Για τη λογική αποθήκευση θερμότητας, έχουν ερευνηθεί οι επιδόσεις και τα θερμικά χαρακτηριστικά των συσκευασμένων-κρεβατιών συστημάτων αποθήκευσης, η χρήση των διαφορετικών υλικών αποθήκευσης και οι χρήσεις για τους υδροφόρους ορίζοντες TES, TES με νερό, και ηλιακές λίνες .
- Έχουν πραγματοποιηθεί θερμικές αναλύσεις των PCM και η χρήση τους για την εξοικονόμηση ενέργειας σε κτίρια. Έχουν επίσης πραγματοποιηθεί πειραματικές και θεωρητικές έρευνες και αξιολογήσεις επιδόσεων των PCM σε λανθάνουσες εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας.
- Έχουν μελετηθεί πτυχές των συστημάτων και των υλικών TES κατά τη λειτουργία, συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς θερμότητας και μάζας, της παροδικής συμπεριφοράς, καθώς και της βελτιστοποίησης και απόδοσης του δεύτερου νόμου.
- Πολλές πρακτικές εφαρμογές της ηλιακής θέρμανσης χρησιμοποιώντας TES έχουν επίσης αναφερθεί.
- Πολυάριθμες έρευνες εξέτασαν συγκεκριμένα συστήματα και εφαρμογές TES, τους γενικούς στόχους των TES και τη διατήρηση της ενέργειας, καθώς και συναφή οφέλη από διαφορετικές μεθόδους TES.

Υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση των ημερήσιων, ή καθημερινών TES για τη διαχείριση του ηλεκτρικού φορτίου τόσο σε νέα όσο και σε υπάρχοντα κτίρια. Οι τεχνολογίες TES επιτρέπουν τη μείωση του κόστους κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας με τη μετατόπιση των απαιτήσεων ηλεκτρικής θέρμανσης και ψύξης σε περιόδους κατά τις οποίες οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας είναι

χαμηλότερες, συνήθως κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η μετατόπιση φορτίου μπορεί επίσης να μειώσει τα τέλη ζήτησης, τα οποία μπορούν να αντιπροσωπεύουν σημαντικό ποσοστό του συνολικού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας για εμπορικά κτίρια.

Πολλές μελέτες στοχεύουν στην ενημέρωση των επαγγελματιών που ασχολούνται με τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης κτιρίων σχετικά με τα χαρακτηριστικά των TES, στην εξέταση της ανάπτυξης των σχετικών τεχνολογιών και στην αξιολόγηση της εφαρμογής τους στο πεδίο με τη χρήση δεδομένων από μελέτες σε διάφορες χώρες. Άλλες μελέτες εξετάζουν επίσης παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση της τεχνολογίας.

Η θέρμανση χώρου με τη χρήση ηλεκτρικών TES έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική. Τα μέσα αποθήκευσης μπορούν να περιλαμβάνουν τα κεραμικά τούβλα, το συντριμμένο βράχο, το νερό, τη μάζα οικοδόμησης. Έχουν εισαχθεί πολλές βελτιώσεις σε τέτοια συστήματα τα τελευταία χρόνια, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης νέων PSM για λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας, οι οποίες πρόσφατα έγιναν διαθέσιμες στο εμπόριο.

Η ψυκτική αποθήκευση χρησιμοποιεί τον πάγο, το νερό, ή τα ευτηκτικά άλατα δεδομένου ότι τα μέσα αποθήκευσης εφαρμόζονται ευρέως στις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου οι θερινές απαιτήσεις ψύξης είναι υψηλές. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται επίσης στην Ευρώπη, συχνά σε συνδυασμό με την ανάκτηση θερμότητας και την αποθήκευση ζεστού νερού, καθώς και στην Αυστραλία, τον Καναδά, την Κορέα, την Ιαπωνία, την Ταϊβάν και τη Νότια Αφρική.

Τα συστήματα TES μπορούν να εγκατασταθούν σε κατοικίσιμα και εμπορικά κτίρια, και μπορούν να είναι οικονομικά αποδοτικά. Τα αποτελέσματα πολλών από τα εποπτευόμενα έργα υποδεικνύουν περιόδους μικρότερες από τρία χρόνια. Εάν υπάρχουν τιμολόγια χρόνου χρήσης, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για τον καταναλωτή μπορεί να μειωθεί με τη μετατόπιση των κύριων ηλεκτρικών φορτίων σε περιόδους κατά τις οποίες οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερες. Αφότου τα τέλη ζήτησης εκτιμηθούν, μπορούν να μειωθούν σημαντικά από τη μετατόπιση ή την κατανομή του φορτίου. Η διαστασιολόγηση και ο έλεγχος κάθε συστήματος αποθήκευσης, οδηγούν στην ελαχιστοποίηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας και λοιπών εξόδων.

Τα συστήματα τηλεθέρμανσης και ψύξης συχνά ενσωματώνουν τεχνολογία TES και μπορούν να επωφεληθούν από την προσεκτική ενσωμάτωσή της στο συνολικό σύστημα.

Επιπλέον, τα συστήματα TES προσφέρουν οφέλη για τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας ηλεκτρικής ενέργειας. Η μετατόπιση των φορτίων σε περιόδους εκτός αιχμής όχι μόνο κατανέμει τη ζήτηση κατά την περίοδο παραγωγής, αλλά μπορεί επίσης να επιτρέψει τη μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τους ακριβότερους σταθμούς παραγωγής. Σε όλο τον κόσμο, υπάρχουν προγράμματα παροχής κινήτρων για την προώθηση της χρήσης τεχνολογιών αποθήκευσης, πολλά από τα οποία υφίστανται στο πλαίσιο προγραμμάτων διαχείρισης της ζήτησης. Τέτοια προγράμματα μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την οικονομική σκοπιμότητα της εγκατάστασης της θερμικής αποθήκευσης, προσφέροντας οικονομικές εκπτώσεις, πληροφορίες ή ειδικές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για τους καταναλωτές. Τα προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης για τα TES είναι απαραίτητα σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των ακόλουθων που σχετίζονται με εφαρμογές TES που βασίζονται σε βοηθητικά προγράμματα:

- Δημιουργία ποσοτικών μοντέλων για την εξακρίβωση των επιπτώσεων και των οφελών των αλλαγών στα επίπεδα χωρητικότητας αποθήκευσης σχετικά με την αξιοπιστία των υπηρεσιών, τα βέλτιστα μείγματα παραγωγής και τα περιθώρια διατήρησης. Τα μοντέλα αυτά πρέπει να ενσωματώνουν λεπτομερείς προβλέψεις ζήτησης για το μέλλον που να αντικατοπτρίζουν πιθανές αλλαγές στα χαρακτηριστικά του φορτίου κοινής ωφέλειας.
- Καθορισμός των οφελών της διασκορπισμένης αποθήκευσης σε συνάρτηση με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά χρήσης και ζήτησης των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας. Οι εργασίες θα πρέπει να διεξάγονται σε περιφερειακή βάση, όπου αυτό είναι δυνατό, και σε μέση εθνική βάση, όπου είναι απαραίτητο.
- Καθορισμός των πιθανών αλληλεπιδράσεων μεταξύ αποθήκευσης και ελέγχου φορτίου για περιοχές διαφορετικών χαρακτηριστικών φορτίου.
- Συσχέτιση της διασκορπισμένης αποθήκευσης με τη διασκορπισμένη παραγωγή, ιδίως στο πλαίσιο των συστημάτων ολικής ενέργειας.

Παράλληλα με τις μελέτες αυτές, υπάρχει ανάγκη για την έρευνα και την ανάπτυξη της υποστήριξης ελπιδοφόρων εννοιών αποθήκευσης, προκειμένου να διασφαλιστεί η

έγκαιρη διαθεσιμότητά τους και να περιληφθεί ένα ευρύ φάσμα λειτουργικών χαρακτηριστικών.

### 2.3.2 Πλεονεκτήματα TES

Αν και τα TES χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών, όλα έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε κυκλική βάση (συνήθως καθημερινά, περιστασιακά, εποχιακά). Τα συστήματα επιτυγχάνουν οφέλη εκπληρώνοντας έναν ή περισσότερους από τους ακόλουθους σκοπούς:

- Αύξηση της παραγωγικής ικανότητας. Η ζήτηση για θέρμανση, ψύξη ή ισχύ σπάνια είναι σταθερή με την πάροδο του χρόνου, και η υπερβολική παραγωγή που είναι διαθέσιμη κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φορτίσει ένα TES προκειμένου να αυξηθεί η πραγματική ικανότητα παραγωγής κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ζήτησης. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την εγκατάσταση μιας μικρότερης μονάδας παραγωγής (ή την προσθήκη δυναμικότητας χωρίς την αγορά πρόσθετων μονάδων) και έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο συντελεστή φορτίου για τις μονάδες.
- Δυνατότητα καλύτερης λειτουργίας των μονάδων συμπαραγωγής. Οι συνδυασμένες εγκαταστάσεις θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, ή συμπαραγωγής, λειτουργούν γενικά για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του συνδεδεμένου θερμικού φορτίου, το οποίο οδηγεί συχνά στην υπερβολική ηλεκτρική παραγωγή κατά τη διάρκεια των περιόδων χαμηλής χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας. Με την ενσωμάτωση ενός TES, η μονάδα δεν χρειάζεται να λειτουργεί για να ακολουθεί ένα φορτίο.
- Μετατόπιση της αγοράς ενέργειας σε περιόδους χαμηλού κόστους. Το μέτρο αυτό αποτελεί τη ζητούμενη εφαρμογή πρωτίστης σημασίας όπως αναφέρεται και επιτρέπει στους καταναλωτές ενέργειας να μετατοπίσουν τις αγορές ενέργειας από περιόδους υψηλού έως χαμηλού κόστους.
- Αύξηση την αξιοπιστίας του συστήματος. Οποιαδήποτε μορφή αποθήκευσης ενέργειας, από την αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος ενός μικρού προσωπικού υπολογιστή σε ένα μεγάλο αντλούμενο έργο αποθήκευσης, αυξάνει κανονικά την αξιοπιστία του συστήματος.

- Ενοποίηση με άλλες λειτουργίες. Σε εφαρμογές όπου απαιτείται άμεση αποθήκευση νερού για πυροπροστασία, μπορεί να είναι εφικτή η ενσωμάτωση της θερμικής αποθήκευσης σε μια κοινή δεξαμενή αποθήκευσης. Ομοίως, ο εξοπλισμός που έχει σχεδιαστεί για την επίλυση προβλημάτων ποιότητας ισχύος μπορεί να προσαρμόζεται σε σκοπούς αποθήκευσης ενέργειας.

Μπορεί κανείς να ρωτήσει: ποιο είναι το πιο σημαντικό όφελος ενός συστήματος TES; Μια κοινή απάντηση είναι η μείωση των ηλεκτρικών λογαριασμών με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας εκτός αιχμής για την παραγωγή και την αποθήκευση ενέργειας για την ψύξη κατά τη διάρκεια της ημέρας. Πράγματι, τα TES λειτουργούν με επιτυχία σε γραφεία, νοσοκομεία, σχολεία, πανεπιστήμια, αεροδρόμια και άλλες εγκαταστάσεις σε πολλές χώρες, μετατοπίζοντας την κατανάλωση ενέργειας από περιόδους μέγιστων ποσοστών ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους χαμηλότερων τιμών. Το όφελος αυτό συνοδεύεται από το πρόσθετο πλεονέκτημα των χαμηλότερων τελών ζήτησης.

### **2.3.3 Κριτήρια αξιολόγησης TES**

Υπάρχουν πολλά κριτήρια για την αξιολόγηση των συστημάτων και εφαρμογών TES, όπως τα τεχνικά, περιβαλλοντικά, ψυχολογικά, οικονομικά, ενεργητικά, σχετικά με το μέγεθος, τη σκοπιμότητα, την ολοκλήρωση και τη διάρκεια αποθήκευσης. Καθένα από αυτά τα κριτήρια θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά για να εξασφαλιστεί η επιτυχής υλοποίηση του TES.

#### ***Τεχνικά κριτήρια για τα TES***

Είναι δύσκολο να καθοριστούν ανεξάρτητα τεχνικά κριτήρια για τα συστήματα αποθήκευσης, δεδομένου ότι συνήθως αφορούν συγκεκριμένες περιπτώσεις και συνδέονται στενά και επηρεάζονται από τα οικονομικά των τελικών συστημάτων. Ωστόσο, ορισμένα τεχνικά κριτήρια είναι επιθυμητά, αν και πρέπει να γίνουν κατάλληλοι συμβιβασμοί με άλλα κριτήρια όπως

- χωρητικότητα αποθήκευσης,
- διάρκεια ζωής
- μέγεθος
- κόστος
- χρήση των πόρων,



- αποδοτικότητα
- εμπορική βιωσιμότητα,
- ασφάλεια
- εγκατάσταση, και
- περιβαλλοντικά πρότυπα.

Πριν από τη συνέχιση ενός έργου, ένας σχεδιαστής TES θα πρέπει να διαθέτει ή να λαμβάνει τεχνική ενημέρωση σχετικά με το TES, όπως τους τύπους αποθήκευσης που είναι κατάλληλοι για την εφαρμογή, την απαιτούμενη ποσότητα αποθήκευσης, την επίδραση της αποθήκευσης στις επιδόσεις του συστήματος, την αξιοπιστία και το κόστος, καθώς και τα διαθέσιμα συστήματα ή σχέδια αποθήκευσης.

Το TES είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σε τοποθεσίες που υπάρχουν σοβαροί περιορισμοί χώρου. Επίσης, οι δεξαμενές TES έχουν συχνά σημαντικό πρώτο κόστος κεφαλαίου. Η οικονομική ανάλυση για έργα που βασίζονται σε TES μπορεί να είναι πολύπλοκη, αν και οι περισσότεροι μηχανικοί- σύμβουλοι ενέργειας είναι πλέον σε θέση να εκτελούν οικονομικούς υπολογισμούς και να αξιολογούν τα οφέλη των TES.

#### ***Περιβαλλοντικά κριτήρια για το TES***

Ο βασικός σχεδιασμός, τα υλικά και οι επιχειρησιακές πρακτικές που χρησιμοποιούνται για τα TES δεν θα πρέπει κατά προτίμηση να βλάπτουν υπερβολικά τη δημόσια υγεία ή τη φυσική οικολογία και το περιβάλλον. Δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται υλικά που είναι τοξικά ή επικίνδυνα όταν απελευθερώνονται ή που θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά το περιβάλλον κατά την κατασκευή, διανομή, εγκατάσταση ή λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης.

#### ***Οικονομικά κριτήρια για τα TES***

Η οικονομική αιτιολόγηση των συστημάτων αποθήκευσης απαιτεί κανονικά το ετήσιο κεφάλαιο και το κόστος λειτουργίας των TES να είναι λιγότερα από εκείνα που απαιτούνται για τον πρωτογενή εξοπλισμό παραγωγής που παρέχει τα ίδια φορτία κατά περιόδους εξυπηρέτησης. Σε γενικές γραμμές, τα συστήματα TES συγκεντρώνουν εξοικονόμηση κόστους καυσίμου σε σχέση με τον πρωτογενή εξοπλισμό παραγωγής, αλλά συχνά αυτό γίνεται εις βάρος του υψηλότερου αρχικού κόστους κεφαλαίου.

Τα βασικά χαρακτηριστικά επιδόσεων που σχετίζονται με την αξιολόγηση της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των TES είναι :

- τα ωριαία θερμικά φορτία για την ημέρα αιχμής·
- το προφίλ ηλεκτρικού φορτίου του βασικού συστήματος με το οποίο συγκρίνεται το TES
- το μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης και οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ελέγχου.

Οι οικονομικές πληροφορίες που απαιτούνται περιλαμβάνουν

- τέλη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και κόστος χρόνου χρήσης·
- το κόστος της αποθεματοποίησης
- διαθέσιμα οικονομικά κίνητρα.

Οι παράμετροι οικονομικής αξιολόγησης και σύγκρισης που συχνά καθορίζονται, περιλαμβάνουν την απλή περίοδο αποπληρωμής. Επίσης, χρησιμοποιούνται κάποιες άλλες μέθοδοι για τη σύγκριση του ετήσιου κόστους επένδυσης ενός TES με την ετήσια εξοικονόμηση κόστους ηλεκτρικής ενέργειας.

#### ***Κριτήρια εξοικονόμησης ενέργειας για τα TES***

Τα τελευταία χρόνια έχει υπάρξει μια σημαντική αλλαγή στην κατανόηση της οικονομικής και περιβαλλοντικής επίδρασης των TES. Σήμερα, τα καλά σχεδιασμένα συστήματα TES μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις να μειώσουν το πρώτο κόστος για ορισμένα έργα. Επιπλέον, μπορούν να μειώσουν την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί μια εγκατάσταση, όχι μόνο το ποσό που καταβάλλει. Πολλοί μηχανικοί πλέον διαπιστώνουν ότι η τεχνολογία TES μπορεί να μειώσει σημαντικά τη χρήση και τη ζήτηση ενέργειας, γεγονός που μεταφράζεται σε χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.

Επιπλέον, η τεχνολογία TES έχει περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται τη νύχτα, όταν οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας λειτουργούν γενικά τις πιο αποδοτικές εγκαταστάσεις τους. Ως αποτέλεσμα, μια σημαντική εξοικονόμηση "ενέργειας πηγής" (άνθρακας, φυσικό αέριο, πετρέλαιο ή πυρηνικό καύσιμο) συσσωρεύεται σε ηλεκτρικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και μειώνει τις εκπομπές ρύπων.

Ο κλιματισμός αντιπροσωπεύει χαρακτηριστικά ένα μεγάλο μέρος της ενεργειακής χρήσης ενός κτιρίου. Μία ή περισσότερες ψυκτικές μονάδες χρησιμοποιούνται συνήθως για να ταιριάζουν με το ψυκτικό φορτίο, το οποίο αυξάνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και κορυφώνεται το απόγευμα. Με τα TES, η μέγιστη ηλεκτρική χρήση μπορεί να μειωθεί, έτσι ώστε οι μικρότεροι ψύκτες να μπορούν να χειριστούν το φορτίο. Επιπλέον, ο αερόψυκτος εξοπλισμός μπορεί να εκμεταλλευτεί τις χαμηλότερες νυχτερινές θερμοκρασίες περιβάλλοντος για την αύξηση της λειτουργικής αποδοτικότητας. Επίσης, δεδομένου ότι το νερό από τα συστήματα TES μπορεί να είναι ψυχρότερο από το συμβατικό διατηρημένο με απλή ψύξη νερό, μικρότεροι σωλήνες, αντλίες, και χειριστές αέρα μπορούν να ενσωματωθούν στο σχέδιο κτιρίου.

Ίσως η μεγαλύτερη αλλαγή στη σκέψη για τις πιθανές χρήσεις των TES προέρχεται από την αυξανόμενη χρήση της διανομής ψυχρού αέρα. Η διανομή ψυχρού αέρα απαιτεί συνήθως 30% λιγότερο κρύο αέρα από τα συμβατικά συστήματα ψύξης για ένα παρόμοιο φορτίο, με αποτέλεσμα μικρότερους ανεμιστήρες και αγωγούς. Η σχετική εξοικονόμηση κόστους συχνά αντισταθμίζει το ασφάλιστρο πρώτου κόστους ενός TES.

Η ικανότητα της ψυκτικής αποθήκευσης για τη μετατόπιση μεγάλων ποσοτήτων μέγιστης ηλεκτρικής ζήτησης στις περιόδους μη αιχμής οδηγεί συνήθως σε μέγιστο ενδιαφέρον για TES. Όταν συνδυάζονται με τη διανομή ψυχρού αέρα, τα συστήματα TES μπορούν να αποφέρουν σημαντική εξοικονόμηση κόστους και να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση και το επίπεδο άνεσης ενός κτιρίου. Ωστόσο, οι ιδιοκτήτες κτιρίων συχνά διστάζουν να χρησιμοποιήσουν συστήματα TES, πιστεύοντας εσφαλμένα ότι η εγκατάστασή τους είναι δαπανηρή. Τα TES σε συνδυασμό με τη διανομή ψυχρού αέρα προσφέρουν μια πιο αποτελεσματική, και συχνά πιο αποδοτική επιλογή ψύξης, η οποία ανταγωνίζεται τη συμβατική τεχνολογία και προσφέρει μια ελπιδοφόρα περίοδο απόσβεσης.

Η ενσωμάτωση TES με τη διανομή κρύου αέρα κατά τη διάρκεια του σχεδίου και της κατασκευής ενός γραφείου και άλλων κτηρίων επιτρέπει στους ιδιοκτήτες κτηρίων να προσθέτουν χώρο πατωμάτων για σκοπούς χρήσης ή ενοικίασης. Αυτός ο χώρος γίνεται διαθέσιμος επειδή τέτοια συστήματα απαιτούν μικρότερες μονάδες διαχείρισης αέρα και συχνά δεν χρειάζονται μηχανικό χώρο. Ο προσεκτικός

σχεδιασμός ενός TES συχνά αποφέρει εξοικονόμηση πρώτου κόστους επιτρέποντας τη χρήση

- μικρότερων μονάδων διαχείρισης αέρα,
- μικρότερους αγωγούς,
- μικρότερο μεταβλητό όγκο αέρα (VAV).

Η διανομή ψυχρού αέρα μπορεί να αυξήσει την ικανότητα των υπάρχοντων συστημάτων κλιματισμού ή να χρησιμοποιηθεί για την αντικατάσταση παλαιότερων ψυκτικών συγκροτημάτων.

#### ***Κριτήρια αλλαγής μεγέθους για το TES***

Υπάρχει ανάγκη για βελτιωμένες τεχνικές μεγέθους TES, καθώς οι αναλύσεις έργων αποκαλύπτουν τόσο συστήματα μικρού μεγέθους όσο και υπερμεγέθη συστήματα. Τα μικρού μεγέθους μπορεί να οδηγήσουν σε φτωχά επίπεδα εσωτερικής άνεσης, ενώ τα αποτελέσματα υπερμεγέθυνσης οδηγούν σε υψηλότερες από τις απαραίτητες αρχικές δαπάνες και σε πιθανή σπατάλη της ηλεκτρικής ενέργειας, εάν περισσότερη ενέργεια αποθηκεύεται από όση απαιτείται. Μια άλλη απαίτηση για ένα επιτυχές TES, όσο αφορά το μέγεθος, είναι η κατάλληλη εγκατάσταση και ο έλεγχος. Η χρήση εξοπλισμού τελευταίας τεχνολογίας, τα κατάλληλα σχεδιασμένα και ελεγχόμενα συστήματα αποθήκευσης συχνά δεν χρησιμοποιούν περισσότερη ενέργεια από τους συμβατικούς εξοπλισμούς θέρμανσης και ψύξης.

Τα δεδομένα επιδόσεων που περιγράφουν τη χρήση του TES για θέρμανση και ψύξη με τη μετατόπιση των μέγιστων φορτίων σε περιόδους εκτός αιχμής είναι περιορισμένα, αν και οι δυνατότητες για τις τεχνολογίες αυτές είναι σημαντικές. Το αρχικό κόστος των συστημάτων αυτών μπορεί να είναι χαμηλότερο από εκείνο για άλλα συστήματα. Για την απόδοση των οφελών, απαιτούνται νέες τεχνικές κατασκευής μαζί με τη χρήση πιο εξελιγμένων υπολογισμών θερμικού σχεδιασμού που είναι, μέχρι στιγμής, άγνωστοι σε πολλούς σχεδιαστές.

Το κόστος των συστημάτων TES για θέρμανση κυμαίνεται από 20 έως 60 Αμ. δολάρια ανά kWh στον Καναδά. Τα σύγχρονα συστήματα αποθήκευσης μπορούν να μετατοπίσουν σχεδόν όλη τη χρήση ενέργειας θέρμανσης χώρου σε ώρες εκτός αιχμής, ενώ με συμβατικά συστήματα, καταναλώνεται μόνο το 50% περίπου της

ενέργειας για θέρμανση κατά τη διάρκεια περιόδων εκτός αιχμής. Οι περίοδοι εκτός αιχμής διαρκούν συνήθως περισσότερο από 7 ώρες [14].

Η ενεργειακή χρήση για τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης τείνει να είναι μικρότερη από εκείνη για τους θερμαντήρες αποθήκευσης για τα δωμάτια αλλά μεγαλύτερη από αυτήν για τα κεντρικά συστήματα για νερό αποθήκευσης. Τα βασικού τύπου συστήματα θέρμανσης ποικίλλουν πολύ και περιλαμβάνουν άμεσα την ηλεκτρική-αντίσταση από θερμαντήρες και αντλίες θερμότητας. Οι λεπτομερείς συγκρίσεις της χρήσης ενέργειας για TES και τα βασικού τύπου συστήματα περιπλέκονται συχνά από τις παραλλαγές άλλων παραμέτρων, όπως η ηλικία και η θερμική ακεραιότητα των κτηρίων και των σπιτιών. Η χρήση της αποθήκευσης εκτός αιχμής για θέρμανση σε εμπορικά κτίρια αυξάνεται καθώς οι κατασκευαστές παράγουν πιο εξελιγμένο εξοπλισμό αποθήκευσης που είναι κατάλληλος για μεγαλύτερα κτίρια. Το μέγεθος των συστημάτων μπορεί, ωστόσο, να είναι δύσκολο λόγω των πιο πολύπλοκων ενεργειακών προβληματισμών και των μεταβλητών προτύπων χωρητικότητας για τα κτίρια αυτά. Οι εξελίξεις στα συστήματα ελέγχου της ενέργειας επιτρέπουν στους φορείς εκμετάλλευσης κτιρίων να ελέγχουν αποτελεσματικότερα τα συστήματα HVAC και φωτισμού. Οι βελτιώσεις αυτές με τη σειρά τους, επιτρέπουν την καλύτερη ενσωμάτωση της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με άλλα ενεργειακά συστήματα. Οι περίοδοι αποπληρωμής για τέτοια συστήματα κυμαίνονται συχνά από ένα έως δέκα έτη, ανάλογα με τη χωρητικότητα και την εφαρμογή.

Τα συστήματα TES για ψυκτική ικανότητα είναι πιο επιτυχημένα σε μεγαλύτερα κτίρια, αν και η έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη για την ανάπτυξη μικρότερων μονάδων. Αντίθετα από την αποθήκευση θερμότητας, μέρος του κόστους της κρύας αποθήκευσης μπορεί να πληρωθεί μέσω της αποταμίευσης που προέρχεται από την εγκατάσταση ενός μικρότερου ψύκτη από αυτό που θα απαιτούνταν για ένα συμβατικό σύστημα ψύξης. Το κόστος για το κρύο TES συχνά κυμαίνεται από US \$ 15 έως US \$ 50 ανά kWh, και πολλοί σχεδιαστές ισχυρίζονται ότι το αρχικό κόστος για τα συστήματα αποθήκευσης εν ψυχρώ είναι κάτω από εκείνο για τη συμβατική ψύξη [14]. Τα συστήματα CTES για τα περισσότερα κτίρια χρησιμοποιούν ως μέσο αποθήκευσης, πάγο ή παγωμένο νερό στη μάζα δαπέδου. Τα συστήματα μπορεί να περιλαμβάνουν πλήρη και μερική ζήτηση αποθήκευσης. Οι περίοδοι αποπληρωμής

για ορισμένα συστήματα, με βάση δεδομένα και εκτιμήσεις, κυμαίνονται από λιγότερο από ένα έτος έως 15 έτη.

### ***Κριτήρια σκοπιμότητας για το TES***

Μια ποικιλία παραγόντων είναι γνωστό ότι επηρεάζουν δραματικά την επιλογή, την εφαρμογή και τη λειτουργία ενός συστήματος TES. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαίο να διεξαχθεί συνολική αξιολόγηση σκοπιμότητας που να λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν το κόστος και τα οφέλη των εξεταζόμενων συστημάτων TES. Ωστόσο, δεν είναι πάντα δυνατό να ακολουθηθούν όλα τα βήματα μιας μελέτης σκοπιμότητας για μια εφαρμογή και, σε τέτοιες περιπτώσεις, θα πρέπει να εξεταστούν και να μελετηθούν όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία. Σε αυτές τις μελέτες σκοπιμότητας του TES, ένας κατάλογος ελέγχου μπορεί να είναι χρήσιμος για να διασφαλιστεί ότι εξετάζονται σημαντικά ζητήματα που σχετίζονται με το έργο και ότι οι λεπτομέρειες σχετικά με την αξιολόγηση, την επιλογή, την εφαρμογή και τη λειτουργία του συστήματος αξιολογούνται σωστά.

### ***Κριτήρια ενοποίησης για το TES***

Κατά την εξέταση της ενσωμάτωσης του TES σε υφιστάμενη θερμική εγκατάσταση, ένας πρόσθετος κατάλογος ελέγχου μπορεί να βοηθήσει στη διεξαγωγή της μελέτης σκοπιμότητας του TES και της ενσωμάτωσής του στην εγκατάσταση.

### ***Κριτήρια διάρκειας αποθήκευσης για το TES***

Στην πράξη, είναι χρήσιμο να χαρακτηριστούν διαφορετικοί τύποι TES ανάλογα με τη διάρκεια αποθήκευσης:

βραχυπρόθεσμα, μεσοπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα.

Η βραχυπρόθεσμη αποθήκευση χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση των φορτίων αιχμής ισχύος που διαρκούν από λίγες ώρες έως μία ημέρα, προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος των συστημάτων ή να αξιοποιηθούν οι καθημερινές δομές των τιμολογίων ενέργειας. Βραχυπρόθεσμη ονομάζεται συχνά η ημερήσια αποθήκευση.

Συνιστάται όμως μεσοπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη αποθήκευση, όταν τα φορτία θερμότητας ή εποχιακής ενέργειας μπορούν να μεταφερθούν με καθυστέρηση μερικών εβδομάδων έως αρκετούς μήνες. Οι μακροπρόθεσμες αποθήκες που

αξιοποιούν τις εποχιακές κλιματικές διακυμάνσεις αναφέρονται συχνά ως ετήσια ή εποχιακή αποθήκευση.

Το TES μπορεί να διαχωριστεί σε συστήματα υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας, όπου το TES χαμηλής θερμοκρασίας είναι ο αποθηκευτικός χώρος στον οποίο εισέρχεται η θερμότητα και φεύγει σε θερμοκρασίες κάτω από 120°C. Η αποθήκευση ψυκτικής ικανότητας εξετάζεται επίσης σε αυτή την κατηγορία. Η αποθήκευση χαμηλής θερμοκρασίας επιτρέπει συχνά την αποδοτική χρησιμοποίηση της θερμότητας που ειδικά θα ήταν μερικώς ή εξ ολοκλήρου σπαταλημένη. Η χαμηλή θερμοκρασία TES επιτρέπει επίσης την αποθήκευση θερμότητας που λαμβάνεται από την ηλιακή ακτινοβολία από μέρα σε νύχτα ή από καλοκαίρι σε χειμώνα, και επιτρέπει την αποθήκευση θερμότητας από κεντρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, από περιόδους χαμηλής ζήτησης έως ώρες υψηλής ζήτησης τόσο σε ημερήσιες όσο και σε εποχιακές βάσεις.

Το TES επιτρέπει επίσης την αποθήκευση κρύου για σκοπούς κλιματισμού, από νύχτα σε μέρα και από χειμώνα σε καλοκαίρι. Σε ημερήσια βάση, η ενεργειακή απόδοση αποθήκευσης μπορεί να υπερβεί το 90%, ενώ σε εποχιακή βάση δεν είναι συνήθως πολύ πάνω από το 70%. Το TES χαμηλής θερμοκρασίας έχει ευρεία δυνατότητα εφαρμογής στα οικιακά συστήματα ζεστού νερού.

Ένα άλλο είδος ημερήσιου TES είναι η χρήση ηλεκτρικών θερμαντήρων που παράγουν θερμότητα τη νύχτα χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια χαμηλού κόστους και αποθηκεύουν τη θερμική ενέργεια στη μάζα των τούβλων.

Ο εξοπλισμός ημερήσιας αποθήκευσης μειώνει συχνά το κόστος HVAC ή αποφεύγει την ανάγκη για εφεδρικό εξοπλισμό θέρμανσης ή ψύξης. Η ημερήσια αποθήκευση χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο ως τεχνολογία διαχείρισης από την πλευρά της ζήτησης (ειδικά με την αποθήκευση εν ψυχρώ σε κλιματιζόμενα κτίρια). Η ευρύτερη χρήση του κλιματισμού σε κτίρια σε συνδυασμό με την ανάγκη μείωσης των μέγιστων ενεργειακών απαιτήσεων δίνει κίνητρο στην ανάπτυξη του TES.

Οι κανονισμοί της ενέργειας είναι μάλλον ουδέτεροι προς το TES, αν και η μεγάλης κλίμακας εποχιακή αποθήκευση υπόκειται σε έναν μεγάλο αριθμό κωδικών και προτύπων που μπορούν να συγκρουστούν με τα σχέδια των διευθυντών κτηρίων. Για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση, η ασφάλεια (π.χ. που σχετίζεται με το χειρισμό PCM) και οι κανονισμοί υγιεινής εμποδίζουν σε κάποιο βαθμό την ανάπτυξη των αγορών

TES. Οι ασφαλιστικές εταιρείες είναι συχνά απρόθυμες να υποστηρίξουν την ενσωμάτωση προϊόντων ή εξοπλισμών που δεν έχουν λάβει την κατάλληλη πιστοποίηση, όπως συμβαίνει συχνά με καινοτόμες συσκευές.

### **2.3.4 Εκτιμήσεις αγοράς TES**

Δεδομένου ότι το TES είναι μια επιλογή ενεργειακής απόδοσης που συμπληρώνει άλλες στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας, η κυβερνητική στήριξη θα μπορούσε να ενισχύσει την ανάπτυξη τέτοιων τεχνολογιών. Επί του παρόντος, τα προϊόντα ή ο εξοπλισμός TES δεν συμβάλλουν σημαντικά στο διεθνές εμπόριο. Ένα καλό επίπεδο γνώσεων του TES υπάρχει στις ανεπτυγμένες χώρες. Ο κύριος τομέας στον οποίο θα μπορούσε να αυξηθεί το εμπόριο είναι η αποθήκευση πάγου, η οποία διατίθεται ήδη ευρέως στην αγορά των Ηνωμένων Πολιτειών.

Η ευρεία εφαρμογή της μεγάλης εποχιακής αποθήκευσης φαίνεται απίθανη στο εγγύς μέλλον. Στη Γαλλία και σε άλλες χώρες της Νότιας Ευρώπης, οι εφαρμογές TES μεγάλης κλίμακας θα παραμείνουν πιθανώς περιορισμένες εν μέρει, επειδή υπάρχουν λίγα δίκτυα τηλεθέρμανσης (ή ψύξης). Τα TES αποτελούν πολύτιμο συμπλήρωμα αυτών των δικτύων. Στην πράξη, τα TES μεγάλης κλίμακας θα αντιμετωπίσουν προκλήσεις εφαρμογής παρόμοιες με εκείνες της τηλεθέρμανσης, λόγω του συμπληρωματικού χαρακτήρα τους. Μια άλλη πρόκληση για την τεχνολογία TES είναι η απουσία μιας ομάδας υποστήριξης του κλάδου που μπορεί να εξυμνήσει τα οφέλη ενός TES, να προωθήσει τη χρήση του και να παρέχει πληροφορίες. Αυτές οι ομάδες υποστήριξης είναι κοινές και σημαντικές σε άλλους τομείς.

### ***Εμπόδια στην υιοθέτηση των TES***

Αν και η τεχνολογία TES είναι αποδεδειγμένη και οικονομικά βιώσιμη, μερικές φορές δεν είναι εύκολα αποδεκτή. Τα εμπόδια στην υιοθέτηση TES μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορους τύπους:

- έλλειψη κατάλληλης πληροφόρησης·
- έλλειψη εμπορικών επιλογών·
- υψηλό αρχικό κόστος·
- περιορισμοί υποδομής.

Το πρώτο από αυτά τα εμπόδια μπορεί να ξεπεραστεί με κατάλληλη διάδοση πληροφοριών και συναφείς δραστηριότητες (επιτόπιες επισκέψεις, δημοσίευση



ανεξάρτητων αποτελεσμάτων παρακολούθησης κ.λπ.). Το υψηλό αρχικό κόστος ως εμπόδιο μπορεί να ξεπεραστεί μόνο με τη δημιουργία επιστρεπτέων κεφαλαίων που προορίζονται για επενδύσεις μεγάλων έργων. Βραχυπρόθεσμα, οι εξελίξεις στα TES δεν είναι πιθανό να μειώσουν σημαντικά το αρχικό κόστος τους. Για παράδειγμα, η ευρωπαϊκή κοινότητα θα μπορούσε να οργανώσει με τις τράπεζες ένα πρόγραμμα χρηματοδότησης τρίτων για επενδύσεις TES. Οι περιορισμοί στις υποδομές, όπως οι τύποι κτιρίων και οι ενεργειακές υποδομές που υπάρχουν σε μεγάλο βαθμό, φαίνεται να είναι οι πλέον δύσκολο να ξεπεραστούν, διότι συνδέονται με ευρύτερα ζητήματα πολιτικής, ιδίως στην περίπτωση των TES. Για τις βραχυπρόθεσμες TES, η υποστήριξη των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον οικοδομικό τομέα και του παθητικού ηλιακού σχεδιασμού μπορεί να βοηθήσει στην υπέρβαση αυτού του φραγμού.

### ***Θέση αγοράς των TES***

Οι εφαρμογές TES βρίσκονται σε διάφορες καταστάσεις ανάπτυξης, ανάλογα με την εξεταζόμενη χώρα. Η ημερήσια αποθήκευση θερμότητας δεν έχει λάβει μεγάλο μερίδιο αγοράς σε καμία χώρα, με εξαίρεση την αποθήκευση εν ψυχρώ σε κλιματιζόμενα κτίρια για σκοπούς διαχείρισης της ζήτησης (κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες, τον Καναδά και την Ιαπωνία) καθώς και σε ορισμένες εμπορικές εγκαταστάσεις στην Ευρώπη και σε σπίτια «μηδενικής ενέργειας» στη Φινλανδία. Στις Ηνωμένες Πολιτείες επιτρέπεται ημερήσια ψυκτική αποθήκευση μεγέθους περίπου 15 GW της ψυκτικής ισχύος να μετατοπιστεί σε περιόδους εκτός αιχμής. Η εποχιακή αποθήκευση διερευνήθηκε και δοκιμάστηκε τη δεκαετία του 1980 με τις κύριες τοποθεσίες να βρίσκονται σε χώρες της Βόρειας Ευρώπης (ιδίως στη Σουηδία) και να συνδέονται με δίκτυα τηλεθέρμανσης. Η εποχιακή αποθήκευση στους υδροφόρους ορίζοντες αναπτύσσεται καλά στην Κίνα. Έχουν εγκατασταθεί μεγάλες εποχιακές εγκαταστάσεις TES είτε για τη συμπλήρωση των ηλιακών συστημάτων συλλογής σε μεγάλης κλίμακας οικοδομικά έργα είτε σε συνδυασμό με τις μονάδες τηλεθέρμανσης. Συνεπώς, η μακροπρόθεσμη εποχιακή ανάπτυξη του TES συνδέεται με την κατάσταση της αγοράς αυτών των τεχνολογιών.

Μεμονωμένα σπίτια ή εμπορικά κτίρια (συμπεριλαμβανομένων των γραφείων) μπορούν να χρησιμοποιούν ημερήσια TES είτε για εφαρμογές θέρμανσης είτε για ψύξη. Ωστόσο, τα σχέδια επίδειξης και η διάδοση πληροφοριών είναι απαραίτητα για την αύξηση της ευαισθητοποίησης των διευθυντών κτιρίων σχετικά με αυτές τις

επιλογές. Οι ανάγκες της παθητικής, υβριδικής, και άλλων τεχνικών ψύξης χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας θα πρέπει να προωθήσουν την ανάπτυξη αυτού του είδους TES.

Οι απαιτήσεις της αγοράς για TES συνδέονται με τη γενική ενεργειακή πολιτική. Για παράδειγμα, η αυξημένη στήριξη και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα οδηγούσε σε μεγάλες προσπάθειες ενημέρωσης των σχεδιαστών των ενεργών ηλιακών τεχνολογιών και άλλων σχετικά με τις δυνατότητες που προσφέρει η τεχνολογία TES. Οι σχετικά υψηλοί κίνδυνοι θεωρούνται ως υφιστάμενοι για τα εποχιακά TES (ειδικά όταν χρησιμοποιούνται με υδροφόρο ορίζοντα). Πιθανές τεχνικές δυσκολίες με τις αντλίες και τα συστήματα καυσαερίων (φραγμένα σουρωτήρια αντλίας, πνιγμένα φίλτρα) μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα απόδοσης και ασφάλειας, τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να προκαλέσουν υψηλότερο αρχικό κόστος.

Η αποθήκευση πάγου αποτελεί εξαίρεση σε αυτές τις ανησυχίες, καθώς πολλά συστήματα έχουν εφαρμοστεί και έχουν παρουσιάσει υψηλή σχέση κόστους και αποτελεσματικότητας. Όταν οι οικονομικές αξιολογήσεις των TES βασίζονται στις τρέχουσες δομές των τιμών της ενέργειας, οι κίνδυνοι συνδέονται με τροποποιημένες δομές τιμών. Οι ευρέως διαδεδομένες πληροφορίες σχετικά με επιτυχημένες λειτουργίες μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των αντιληπτών κινδύνων. Η μεταφορά και η ανταλλαγή γνώσεων διεθνώς μέσω λεπτομερών προδιαγραφών μπορεί να περιορίσει τους κινδύνους των έργων που έχουν προκύψει στο παρελθόν και, ως εκ τούτου, να προωθήσει την ανάπτυξη των TES.

Η περιβαλλοντική νομοθεσία που ελέγχει άμεσα την ανάπτυξη του TES δεν υπάρχει, αλλά η αυξανόμενη ανησυχία για την ποιότητα των υδάτων στους υδροφόρους ορίζοντες και τη χρήση των διαφόρων PCM έχει προκαλέσει τον έλεγχο ορισμένων τεχνολογιών TES και εμποδίζει τους φορείς λήψης αποφάσεων να τις υιοθετήσουν. Οι κυβερνήσεις ανησυχούν επίσης για τη διασφάλιση της ύπαρξης κατάλληλων κανονισμών των TES, ότι δεν προκαλούν περιβαλλοντικά προβλήματα.

Οι χρηματοοικονομικοί παράγοντες επηρεάζουν την εμπορευσιμότητα των TES. Για παράδειγμα, η πρόσβαση σε κεφάλαια ή η δυνατότητα άντλησης κεφαλαίων με εύλογα επιτόκια μπορεί να παρεμποδίσει τους δυνητικούς επενδυτές. Η πρόσβαση σε κεφάλαια δεν αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για την τεχνολογία TES, αλλά οι

προβλεπόμενες περίοδοι αποπληρωμής συχνά δεν είναι ελκυστικές για πολλούς φορείς λήψης αποφάσεων στον οικοδομικό τομέα. Μερικές φορές, μια οικονομική κοινοπραξία είναι απαραίτητη για μεγάλες εγκαταστάσεις TES. Οι κοινοπραξίες αυτές μπορούν να περιλαμβάνουν τοπικές αρχές, οι οποίες ενδέχεται να έχουν ή να μην έχουν πρόσβαση σε κεφάλαια, και επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας στον τομέα της ενέργειας, οι οποίες μπορούν συνήθως να λάβουν την αναγκαία χρηματοδότηση.

Τα μακροπρόθεσμα συστήματα TES με μεγάλες δυνατότητες αποθήκευσης (>1000 MWh) έχουν χρησιμοποιηθεί από τη δεκαετία του 1980. Το μέσο αποθήκευσης είναι γενικά νερό ή βράχοι, και το «εμπορευματοκιβώτιο» είναι συχνά υδροφόροι ορίζοντες, σπήλαια βράχου, και υπόγειες γεωτρήσεις. Οι κυριότερες αγορές για μακροπρόθεσμα (εποχιακά) TES έχουν εγκατασταθεί σε χώρες της Βόρειας Ευρώπης, ιδίως στη Σουηδία, όπου χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μεγάλης κλίμακας συστήματα τηλεθέρμανσης.

Διαπιστώθηκε ότι η βραχυχρόνια αποθήκευση ψύχους για τον κλιματισμό είναι οικονομικά αποδοτική κατά την εφαρμογή της στις Ηνωμένες Πολιτείες και τον Καναδά. Η Ιαπωνία και η Ευρώπη έχουν επίσης χρησιμοποιήσει αυτά τα συστήματα. Τα PCMs δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί πλήρως για τον οικοδομικό τομέα, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί για ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές.

Στο μέλλον, τα TES φαίνεται να είναι σε θέση να συμβάλλουν στη μείωση της ποσότητας των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης κατά 50 – 70%, το οποίο με τη σειρά του μπορεί να αποφέρει εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της καλύτερης απόδοσης των συστημάτων που λειτουργούν κοντά σε τιμές αναφοράς. Άλλες απώλειες μπορεί να περιορίσουν ορισμένες από τις δυνατότητες εξοικονόμησης, μειώνοντας το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας των TES σε περίπου 5 - 10%.

### **2.3.5 Εφαρμογές TES σε θέρμανση και ψύξη**

Η χρήση συστημάτων TES για θερμικές εφαρμογές όπως η θέρμανση και η ψύξη έχει πρόσφατα λάβει μεγάλη προσοχή. Σε διάφορους ενεργειακούς τομείς, τα πιθανά οφέλη των TES για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης έχουν υλοποιηθεί πλήρως. Στις ακόλουθες δύο υποενότητες, περιγράφουμε τη θέρμανση και την ψύξη συστημάτων TES λεπτομερώς.

### **Θέρμανση TES**

Η ηλεκτρική ενέργεια, το φυσικό αέριο, το προπάνιο και τα καύσιμα μπορούν να παράγουν τη θέρμανση χώρου. Η θέρμανση TES που χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια, λειτουργεί τις θερμάστρες αντίστασης τη νύχτα όταν είναι χαμηλά τα ποσοστά ηλεκτρικής ενέργειας για να παράγουν τη θέρμανση για χρήση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η θερμότητα που παράγεται από τις ηλεκτρικές θερμάστρες αντίστασης τη νύχτα αποθηκεύεται σε τέτοια μέσα αποθήκευσης όπως τα γήινα υλικά ή τα κεραμικά τούβλα στα μονωμένα εμπορευματοκιβώτια. Η παραγωγή θερμότητας τη νύχτα εκμεταλλεύεται τα ηλεκτρικά ποσοστά εκτός αιχμής, τα οποία είναι γενικά 33 - 75% λιγότερο ακριβά από τα μέγιστα ποσοστά. Όταν αυξάνεται η ζήτηση θερμότητας (π.χ. για θέρμανση χώρου), η θερμότητα ανακτάται από τη μονάδα αποθήκευσης και μεταφέρεται στο δωμάτιο.

Η χρήση της γης ως μέσου TES περιορίζεται συνήθως σε νέες κατασκευές, δεδομένου ότι η εφαρμογή απαιτεί τα ηλεκτρικά πλέγματα αντίστασης να τοποθετούνται 0,5 έως 1 m στο έδαφος, κάτω από μια δομή. Η ανάγκη να τοποθετηθούν τα πλέγματα κάτω από ένα κτήριο καθιστά την εργασία μετασκευής εξαιρετικά δύσκολη για οποιαδήποτε εγκατάσταση χωρίς ένα υπόγειο. Ένα άκαμπτο και αδιάβροχο μονωτικό υλικό τοποθετείται κάθετα γύρω από την περίμετρο του κτιρίου και εκτείνεται περίπου τέσσερα πόδια κάτω από το επίπεδο γήινου βαθμού. Η μόνωση εξασφαλίζει ότι η θερμότητα που αποθηκεύεται στο έδαφος ακτινοβολείται κυρίως στη δομή και όχι στη περιβάλλουσα γη. Το ηλεκτρικό πλέγμα αντίστασης καλύπτεται με περίπου δύο ίντσες άμμου και γήινων υλικών.

Τα κεραμικά τούβλα παρέχουν ένα άριστο μέσο αποθήκευσης θερμότητας και αποτελούν νέες εφαρμογές κατασκευής λόγω του μεγέθους τους, της ευκολίας της εγκατάστασης, και των υψηλών ικανοτήτων διατήρησης της θερμότητας. Αυτές οι μονάδες κατασκευάζονται κανονικά σε διάφορα μεγέθη και μεταφέρονται στις περιοχές του κτηρίου. Η ανακατασκευή αυτού του τύπου TES αποτελείται συνήθως από ένα μονωμένο κουτί, περίπου το μέγεθος μιας συμβατικής μονάδας με ζεστό νερό, γεμάτη με κεραμικά τούβλα. Ο αριθμός τούβλων σε μια ενότητα εξαρτάται από την απαίτηση αποθήκευσης θερμότητας. Η μονάδα περιλαμβάνει επίσης έναν μικρό ανεμιστήρα. Τα κεραμικά τούβλα περιέχουν τις ηλεκτρικές θερμάστρες λουριδών

αντίστασης στις τρύπες τους. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, οι μονάδες θέρμανσης ταινιών παράγουν θερμότητα, η οποία απορροφάται από τα κεραμικά τούβλα. Η μόνωση που περιβάλλει τα τούβλα περιορίζει τις απώλειες θερμότητας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ένας συμβατικός θερμοστάτης χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του κλασματικού ανεμιστήρα ιπποδύναμης που κυκλοφορεί αέρα από το δωμάτιο σε όλα τα κεραμικά τούβλα για να ανακτήσει την αποθηκευμένη θερμότητα και να τη μεταφέρει στο δωμάτιο. Ο ελεγκτής του θερμοστάτη κλείνει τον ανεμιστήρα που κυκλοφορεί όταν η θερμοκρασία δωματίου είναι αποδεκτή.

Τα συστήματα θέρμανσης TES μπορούν να δικαιολογηθούν οικονομικά για τις περισσότερες εγκαταστάσεις που έχουν σημαντικές ανάγκες θέρμανσης χώρου και χρεώνονται σύμφωνα με τα χρονοδιαγράμματα ηλεκτρικής τιμής που έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ της μέγιστης και εκτός αιχμής ηλεκτρικής κατανάλωσης.

#### ***Ψύξη TES***

Τα συστήματα ψύξης TES μπορεί να μειώσουν το κόστος ενέργειας ψύξης διατηρώντας παράλληλα ένα άνετο περιβάλλον. Οι λογαριασμοί κλιματισμού καλοκαιριού έχουν δύο στοιχεία: ένα ηλεκτρικό φορτίο ζήτησης και ένα ηλεκτρικό τέλος χρήσης. Τα τέλη χρήσης και ζήτησης συχνά διαιρούνται περαιτέρω σε περιόδους αιχμής και εκτός αιχμής. Η περίοδος αιχμής λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων κλιματισμού εμφανίζεται συνήθως κατά τη διάρκεια των περιόδων ζήτησης και χρήσης υψηλού κόστους (δηλαδή, το καλοκαιρινό απόγευμα). Τα συστήματα TES έχουν σχεδιαστεί για να μετατοπίζουν την περίοδο αιχμής λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων κλιματισμού στις λιγότερο ακριβές νυχτερινές περιόδους.

Τα συστήματα κλιματισμού ψύχονται αφαιρώντας τη θερμότητα μέσω δικτύου ψυχρού νερού ή απευθείας από ένα ρεύμα αέρα. Τα περισσότερα συστήματα κλιματισμού παράγουν μια επίδραση ψύξης ακριβώς όταν απαιτείται ψύξη σε ένα κτήριο ή ένα δωμάτιο. Τα συστήματα κλιματισμού που βασίζονται σε ψυχρό TES λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο, αλλά αφαιρούν τη θερμότητα από μια ενδιάμεση ουσία όταν το κτίριο δεν χρειάζεται ψύξη, παράγοντας μια ψυκτική δεξαμενή που αποθηκεύεται μέχρι να υπάρξει ανάγκη ψύξης. Η ενδιάμεση ουσία είναι συνήθως διάλυμα νερού, πάγου ή ευτηκτικού άλατος.

Το πιο δημοφιλές μέσο θερμικής αποθήκευσης είναι ο πάγος. Η μετατροπή 1 kg νερού σε πάγο σε 0C απαιτεί την αφαίρεση 152 kJ θερμότητας. Ομοίως, η προσθήκη 152 kJ θερμότητας στον πάγο προκαλεί τη διαμόρφωση νερού στους 0C. Τη νύχτα, η θερμότητα αφαιρείται από το νερό για την παραγωγή πάγου (φόρτιση της αποθήκευσης). Κατά τη διάρκεια της ημέρας που το κτίριο απαιτεί ψύξη, η θερμότητα αφαιρείται από το κτίριο και προστίθεται στον πάγο (εκφόρτιση). Ο λιωμένος πάγος επαναχρησιμοποιείται στην επόμενη περίοδο φόρτισης. Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος ψύξης είναι ότι η κύρια ηλεκτροκίνητη συσκευή στα συστήματα ψύξης, δηλαδή ο κινητήρας συμπιεστή, λειτουργεί κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλού ηλεκτρικού κόστους.

Πολλά συστήματα ψύξης TES χρησιμοποιούν συστήματα ψυχρού νερού για τη μεταφορά της ψυκτικής ικανότητας από την αποθήκευση στο σύστημα διανομής αέρα κτιρίου. Αν και τα συστήματα διανομής ψυχρού νερού περιορίζονται συνήθως σε μεγάλα κτίρια με συμβατικό κλιματισμό, τα συστήματα διανομής παγωμένου νερού με TES σχεδιάζονται πλέον για μικρότερα κτίρια. Τα συστήματα ψύξης TES συμφέρουν γενικά μια νέα εγκατάσταση που έχει μεγάλα φορτία ψύξης κατά τη διάρκεια της ημέρας και λίγο ή καθόλου φορτίο ψύξης τη νύχτα.

Το TES αποτελεί ένα ευεργετικό συστατικό των τεχνολογιών ψύξης. Το TES μπορεί να μειώσει σημαντικά το μέγεθος ενός συστήματος ψύξης και την ηλεκτρική χρήση του κατά τη διάρκεια περιόδων μέγιστης ζήτησης. Χρησιμοποιείται συνήθως σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που καλύπτουν κυρίως μέγιστα φορτία ή που έχουν σημαντικά διαφορετικές δομές εσόδων για την εκτός αιχμής σε σχέση με την εντός αιχμής.

Παραδείγματος χάριν, εάν ένας στρόβιλος αερίου λειτουργεί μόνο 4 h ανά ημέρα, συνήθως δεν έχει πολύ νόημα να χτιστεί μια μονάδα ψύξης που λειτουργεί επίσης σε πλήρες φορτίο για μόνο 4 h ανά ημέρα. Αυτό είναι επειδή η ικανότητα ψύξης, αντίθετα από την ηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να αποθηκευτεί εύκολα. Είναι συνήθως λογικότερο να ταξινομηθεί το σύστημα ψύξης για να ικανοποιήσει περίπου 20% του μέγιστου ψυκτικού φορτίου και να αποθηκευτεί η ικανότητα ψύξης κατά τη διάρκεια άλλων περιόδων έτσι ώστε να μπορεί να απορριφθεί κατά τη διάρκεια των μέγιστων όρων.

### ***TES και ψύξη αερίου***

Μια εναλλακτική λύση στο κρύο TES είναι η χρήση ψυκτών αερίου με κινητήρα ή ψυκτών απορρόφησης αερίου για φορτία μέγιστης ψύξης. Το υψηλότερο πρώτο κόστος αυτών των συστημάτων ψύξης είναι συγκρίσιμο με το υψηλό κόστος κεφαλαίου των δεξαμενών και των υποδομών TES. Το υψηλό ηλεκτρικό φορτίο ενός τυποποιημένου συστήματος ψύξης ατμού-συμπίεσης μετατοπίζεται από καθεμία από αυτές τις αερόψυκτες εναλλακτικές λύσεις. Ένα ψυγείο με κινητήρα συμφέρει συχνά για μια περιοχή που έχει τις περιορισμένες ώρες λειτουργίας ανά ημέρα το χρόνο. Ένα ψυγείο απορρόφησης αερίου μπορεί να έχει νόημα για τις περιοχές που έχουν τις πιο μακροχρόνιες ώρες λειτουργίας.

Ένα πρόσθετο όφελος των τεχνολογιών TES και ψύξης αερίου είναι ότι επιτρέπουν την ελαχιστοποίηση των αλλαγών στην ηλεκτρική υποδομή μιας τοποθεσίας. Μια πρόκληση για την πίσω τοποθέτηση ηλεκτρικών συστημάτων συμπίεσης ατμού στις περισσότερες περιοχές είναι η τοποθέτηση και η σύνδεση ενός μεγάλου μετασχηματιστή για τα νέα ηλεκτρικά φορτία. Με τις τεχνολογίες TES και ψύξης αερίου, το ηλεκτρικό φορτίο του νέου εξοπλισμού μειώνεται σημαντικά και μπορεί να υπάρχει επαρκής χωρητικότητα στα υπάρχοντα κέντρα ελέγχου της μονάδας για τα μικρότερα φορτία.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για την ψύξη του φυσικού αερίου με TES σε βιομηχανίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το κρύο TES και οι τεχνολογίες ψύξης του φυσικού αερίου αναμένεται να αναλάβουν πιο εξέχοντες ρόλους σε προηγμένα έργα ψύξης στο μέλλον.

Η ενσωμάτωση της αποθήκευσης σε ένα σύστημα ψύξης του αέρα είναι επιθυμητή για τη μείωση του μεγέθους του ψύκτη και των εξαρτημάτων απόρριψης θερμότητας και τη σημαντική μείωση της μέγιστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για ηλεκτρικά συστήματα. Το ψυγείο είναι συνήθως το πιο ακριβό συστατικό αυτών των συστημάτων και έτσι, η μείωση του μεγέθους και του κόστους του εις βάρος της προσθήκης της αποθήκευσης μπορεί να είναι οικονομικώς αποδοτική. Η μείωση της μέγιστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντική, διότι η αύξηση της μέγιστης ισχύος είναι συνήθως ο πρωταρχικός στόχος της ψύξης του αέρα καύσης-στροβίλων. Το παγωμένο νερό και ο πάγος είναι τα προτιμώμενα μέσα αποθήκευσης για συστήματα ψύξης του αέρα. Και τα δύο ισχύουν για την ημερήσια αποθήκευση,

ενώ η αποθήκευση πάγου ισχύει επίσης για εβδομαδιαίους κύκλους αποθήκευσης. Η εποχιακή αποθήκευση του πάγου μέσω των κατασκευασμένων λιμνών πάγου ή χιονιού ή του παγωμένου νερού είναι επίσης δυνατή για την ψύξη εισερχόμενου αέρα αν και πάσχουν από συγκεκριμένους περιορισμούς. Τα ευθηκτικά άλατα είναι μια άλλη μέση δυνατότητα αποθήκευσης, αλλά τα άλατα που είναι ακριβότερα από το νερό, υφίστανται απώλειες διαθεσιμότητας στη δαπάνη και την απαλλαγή, και πάσχουν από την περιορισμένη απαλλαγή εφαρμογής. Οι κυλινδρικές δεξαμενές χάλυβα ή σκυροδέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση νερού ή πάγου. Η εξωτερική μόνωση είναι συνήθως αρκετά παχιά για να αποφευχθεί η συμπύκνωση. Το παγωμένο νερό συνήθως προστίθεται και αφαιρείται από τον πυθμένα των δεξαμενών αποθήκευσης νερού, ενώ το ζεστό νερό προστίθεται ή αφαιρείται από την κορυφή, έτσι ώστε να σχηματιστεί μια θερμικά στρωματοποιημένη δεξαμενή. Η προτιμώμενη μέθοδος παρασκευής πάγου χρησιμοποιεί μια προσέγγιση συγκομιδής που περνά περιοδικά ζεστό ψυκτικό μέσο από το συμπιεστή μέσω του εξατμιστή και απελευθερώνει πάγο από την επιφάνεια του εξατμιστή. Ο πάγος πέφτει από τον εξατμιστή. Αρκετοί εξατμιστές χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στη διανομή του πάγου. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι να δημιουργηθούν τα κούτσουρα του πάγου γύρω από τις σπείρες εξατμιστή που τρέχουν πέρα δώθε σε όλη τη δεξαμενή. Αν και ο κύκλος απόψυξης αυξάνει το αποτελεσματικό φορτίο ψύξης κατά περίπου 15%, η θεριζοαλωνιστική μηχανή πάγου είναι λιγότερο δαπανηρή επειδή απαιτεί την πολύ λιγότερη επιφάνεια εξατμιστή και το απόθεμα ψυκτικών μέσων.

Η επιλογή των μέσων αποθήκευσης για την ψύξη του αέρα εισαγωγής εξαρτάται εν μέρει από τον τύπο του ψυκτικού. Τα διαλύματα βρωμιούχου λιθίου μπορούν να χρησιμοποιήσουν μόνο την αποθήκευση νερού. Είτε το νερό είτε η αποθήκευση πάγου χρησιμοποιούνται για τη συμπίεση ατμού. Το κύριο πλεονέκτημα του πάγου είναι η μεγαλύτερη πυκνότητα ψυκτικής αποθήκευσής του, και το πλεονέκτημα του νερού είναι η μηχανική απλότητα του συστήματος αποθήκευσης. Η αποθήκευση πάγου επιτρέπει γενικά στον αέρα προς τα μέσα να ψυχθεί σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή της αποθήκευσης νερού, αλλά η παραγωγή πάγου απαιτεί μια χαμηλότερη θερμοκρασία εξατμιστών ψύκτη, η οποία οδηγεί στη φτωχότερη αποδοτικότητα και το υψηλότερο κόστος ψύκτη.



### **2.3.6 Λειτουργικά χαρακτηριστικά TES**

Ένας σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της σκοπιμότητας του TES είναι το σχήμα της ημερήσιας καμπύλης ηλεκτρικού φορτίου για ένα βοηθητικό πρόγραμμα και ο αντίκτυπός της στη διαθεσιμότητα ενέργειας για τη φόρτιση ενός TES. Για παράδειγμα, μια αστική επιχείρηση κοινής ωφέλειας με ζήτηση αιχμής το καλοκαίρι μπορεί να έχει μια κορυφή μέτριας διάρκειας κατά τη διάρκεια της ημέρας και πολύ μειωμένο φορτίο για μικρή διάρκεια τη νύχτα. Έτσι, η συσκευή αποθήκευσης μπορεί να υποχρεωθεί να παρέχει ενέργεια για 10 ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ σημαντική ικανότητα φόρτισης είναι διαθέσιμη μόνο για 6 ώρες τη νύχτα. Μια τέτοια συσκευή αποθήκευσης θα πρέπει είτε να φορτιστεί με ταχύτερο ρυθμό από ό,τι έχει αποφορτιστεί, είτε να λειτουργεί σε εβδομαδιαίο κύκλο με μέρος της φόρτισης να λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια του Σαββατοκύριακου.

Οι ποικίλες συνθήκες λειτουργίας για διαφορετικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας προκαλούν σημαντικές διακυμάνσεις στους κύκλους λειτουργίας των συστημάτων TES. Οι τιμές προϋποθέτουν απόδοση αποθήκευσης 75%.

#### ***Ημερήσιο έναντι εποχιακού TES***

Το κύριο χαρακτηριστικό ενός εποχιακού συστήματος αποθήκευσης είναι η πολύ μεγάλη χωρητικότητα που απαιτείται (της τάξης των εκατό φορές της χωρητικότητας μιας καθημερινής αποθήκευσης). Οι θερμικές απώλειες είναι πολύ σημαντικές για μια τέτοια μακροπρόθεσμη αποθήκευση. Ως εκ τούτου, λαμβάνεται μεγαλύτερη μέριμνα για την πρόληψη θερμικών απωλειών σε ένα εποχιακό σύστημα από ό,τι σε ένα σύστημα καθημερινής αποθήκευσης. Ενώ τα ημερήσια συστήματα μπορούν γενικά να εγκατασταθούν μέσα σε ένα κτήριο, η εποχιακή αποθήκευση απαιτεί τέτοιους μεγάλους όγκους αποθήκευσης που απαιτούν συχνά πρόσθετες θέσεις.

Το κόστος κεφαλαίου που συνδέεται με το μέγεθος και τη μόνωση που απαιτούνται για τα εποχιακά συστήματα αποθήκευσης αποτέλεσε τροχοπέδη ώστε να γίνουν οικονομικά. Οι νέες τεχνολογίες, το αυξημένο ενεργειακό κόστος και η γενική επιθυμία διατήρησης των λιγοςτών πηγών ενέργειας μπορεί να δικαιολογούν την αναθεώρηση των εποχιακών συστημάτων αποθήκευσης. Ωστόσο, η ημερήσια και βραχυπρόθεσμη αποθήκευση βρίσκει ευρύτερη εφαρμογή, και σε πολλές περιπτώσεις έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο σε μια χώρα ανά πάσα στιγμή.

### ***Μεμονωμένα και Συγκεντρωτικά Συστήματα TES***

Μια σχέση μεγέθους παρόμοια με εκείνη για ημερήσιες/εποχιακές εφαρμογές προκύπτει από την εξέταση της ατομικής έναντι της συνολικής χρήσης των συστημάτων TES. Όταν μεμονωμένες μονάδες συγκεντρώνονται σε ένα σύστημα αρκετά μεγάλο για κτίρια, ο συνολικός όγκος αποθήκευσης γίνεται το άθροισμα των όγκων των επιμέρους μονάδων. Με μεγαλύτερο όγκο, ο χαμηλότερος λόγος επιφάνειας – όγκου της συνολικής μονάδας μειώνει τις θερμικές απώλειες για πανομοιότυπες περιόδους αποθήκευσης.

Το χαμηλότερο κόστος αποθήκευσης μονάδων προκύπτει επίσης γενικά ως μέγεθος και αυξάνεται από τη συγκέντρωση των μεμονωμένων συστημάτων. Ανάλογα με την πυκνότητα οικοδόμησης και των φορτίων, οι θερμικές δαπάνες και οι απώλειες μετάδοσης μπορούν να αποβάλουν οποιαδήποτε αποταμίευση που προκύπτει από τη συνάθροιση. Ο έλεγχος μπορεί να είναι δυσκολότερος όταν χρησιμοποιείται ένα ενιαίο σύστημα αποθήκευσης συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων για πολλά κτίρια. Εάν τηρούνται μεμονωμένοι λογαριασμοί, οι χρεώσεις κόστους μπορεί να είναι δύσκολες, καθώς η κατανομή του ενεργειακού κόστους σε μια συγκεντρωτική κατάσταση απαιτεί έναν δίκαιο και φθηνό τρόπο αύξησης της κατανάλωσης θερμικής ενέργειας. Οι προτιμήσεις για μεμονωμένα ή συγκεντρωτικά συστήματα εξαρτώνται από τις περιστάσεις κάθε συγκεκριμένης περίπτωσης. Τα συνολικά συστήματα είναι απίθανο να ευνοηθούν για εφαρμογές που χαρακτηρίζονται από μικρά φορτία, ιδιοκτησίες κτιρίων και ποικιλία καταναλωτικών προτύπων, όπως μονοκατοικίες.

## **2.4 Ηλιακή ενέργεια και TES**

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια σημαντική εναλλακτική πηγή ενέργειας που πιθανότατα θα χρησιμοποιηθεί στο μέλλον. Ένας κύριος παράγοντας που περιορίζει την εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας είναι ότι είναι ένας κυκλικός, εξαρτώμενος από το χρόνο ενεργειακός πόρος. Ως εκ τούτου, τα συστήματα ηλιακής ενέργειας απαιτούν αποθήκευση ενέργειας για την παροχή ενέργειας κατά τις νυχτερινές και συννεφιασμένες περιόδους. Αν και η ανάγκη για TES υπάρχει επίσης για πολλές άλλες θερμικές εφαρμογές, είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτη για τις ηλιακές εφαρμογές.

#### 2.4.1 TES προκλήσεις για τις ηλιακές εφαρμογές

Το TES είναι σημαντικό για την επιτυχία πολλών πηγών ενέργειας στην ικανοποίηση της ζήτησης. Αυτό το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα σοβαρό για την ηλιακή ενέργεια, επειδή συνήθως απαιτείται περισσότερο όταν η ηλιακή διαθεσιμότητα είναι χαμηλότερη, δηλαδή, το χειμώνα. Το TES περιπλέκει τα συστήματα ηλιακής ενέργειας με δύο κύριους τρόπους. Πρώτον, ένα υποσύστημα TES πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να επιτρέπει στο σύστημα να λειτουργεί σε περιόδους ανεπαρκούς ηλιοφάνειας. Η εναλλακτική λύση είναι να έχουμε ένα εφεδρικό ενεργειακό εφοδιασμό, η οποία προσθέτει ένα κόστος κεφαλαίου και παρέχει μια μονάδα που παραμένει αδρανής. Βραχυπρόθεσμα, η ηλιακή ενέργεια μπορεί και πρέπει να ενσωματωθεί σε συστήματα που χρησιμοποιούν επίσης συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Μακροπρόθεσμα, ωστόσο, μπορεί να έχουμε επιθυμητά αυτόνομα συστήματα ηλιακής ενέργειας.

Η δεύτερη σημαντική επιπλοκή που επιβάλλει η τεχνολογία TES είναι ότι το πρωτογενές σύστημα συλλογής πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο για την κατασκευή της παροχής αποθηκευμένης ενέργειας σε περιόδους επαρκούς ακινητοποίησης. Έτσι, απαιτείται πρόσθετη περιοχή συλλογής (και το πρόσθετο κόστος κεφαλαίου της). Οι εξετάσεις των τυπικών αρχείων ηλιοφάνειας δείχνουν ότι ακόμη και στην έρημο, οι περίοδοι συννεφιάς και καθαρού καιρού είναι περίπου εξίσου κατανεμημένες. Εν μέρει νεφελώδεις ημέρες μπορεί να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση και να κάνουν τη διαφορά μεταξύ πρακτικής και ανέφικτης αποθήκευση ενέργειας. Εάν η συνολική ενέργεια μιας νεφελώδους ημέρας μπορεί να συλλεχθεί, τότε οι περίοδοι που απαιτούν την ενεργειακή αποθήκευση μειώνονται πολύ.

Η συγκέντρωση των ηλιακών συστημάτων πρέπει να αντιμετωπίσουν τη διαλείπουσα φύση του άμεσου ηλιακού φωτός σε μια συνεφιασμένη ημέρα. Συνεπώς, οι απορροφητές και οι λέβητες πρέπει να σχεδιάζονται με προσοχή για να αποφευχθούν τα προβλήματα καύσης όταν ο ήλιος επιστρέφει ξαφνικά με πλήρη λαμπρότητα. Τα συστήματα μη συγκέντρωσης αντιμετωπίζουν το θεμελιώδες πρόβλημα της προσπάθειας παροχής επαρκούς υψηλής απόδοσης σε μεσαίες θερμοκρασίες ώστε να αποφέρουν ενεργειακή παραγωγή με λογικό κόστος. Συνεπώς, το κόστος του TES πρέπει να είναι εύλογο.

#### 2.4.2 Τύποι TES και συστήματα ηλιακής ενέργειας

Στις εφαρμογές ηλιακής ενέργειας, το TES μπορεί να παρέχει εξοικονόμηση σε συστήματα που περιλαμβάνουν ταυτόχρονη θέρμανση και ψύξη, είτε θέρμανση ή ψύξη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές του έτους. Οι περισσότερες εφαρμογές TES περιλαμβάνουν έναν ημερήσιο κύκλο αποθήκευσης. Ωστόσο, χρησιμοποιείται επίσης εβδομαδιαία και εποχιακή αποθήκευση. Οι εφαρμογές ηλιακής ενέργειας απαιτούν την αποθήκευση θερμικής ενέργειας για περιόδους που κυμαίνονται από πολύ σύντομες διάρκειες έως ετήσια χρονοδιαγράμματα κύκλου. Τα περισσότερα συστήματα ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούν ημερήσια αποθήκευση, όπου η ενέργεια αποθηκεύεται για το πολύ μια ή δύο ημέρες. Η ημερήσια αποθήκευση προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως

- χαμηλές επενδύσεις κεφαλαίου για την αποθήκευση και την απώλεια ενέργειας·
- μικρότερες συσκευές που μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν εκτός των εγκαταστάσεων·
- μέγεθος της καθημερινής αποθήκευσης για μια εφαρμογή το οποίο δεν είναι τόσο κρίσιμο όσο το μέγεθος για τις μεγαλύτερες ετήσιες αποθήκες.

Οι εποχιακές αποθήκες έχουν, εντούτοις, μερικά πλεονεκτήματα. Οι μεγαλύτερες αποθήκες έχουν χαμηλότερες απώλειες θερμότητας λόγω των χαμηλότερων αναλογιών επιφάνειας όγκου. Η ανάγκη για εφεδρικά συστήματα μπορεί να εξαλειφθεί, δεδομένου ότι οι περίοδοι δυσμενών καιρικών συνθηκών έχουν μικρή επίδραση στη μακροπρόθεσμη διαθεσιμότητα θερμικής ενέργειας. Κατά συνέπεια, οι χώροι συλλογής μπορούν να μειωθούν. Επίσης, τα ετήσια συστήματα TES συμπληρώνουν καλά σχεδιασμένα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης στα οποία η υπερβολική θερμότητα ή δροσιά από το περιβάλλον ή τις παρακείμενες κατασκευές αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση. Ένα TES, σχεδιασμένο κυρίως για την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας, δεν περιορίζεται κατ' ανάγκη στην πηγή αυτή. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση πλεονάζουσας ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συνήθως με τη μορφή αποβλήτων ενέργειας από κλιματιστικά ή βιομηχανικές διεργασίες κ.ο.κ. Η εν λόγω χρήση αποθήκευσης μπορεί να μην ισχύει για μικρές κατοικίες, αλλά θα μπορούσε να είναι χρήσιμη για συστήματα κεντρικής θέρμανσης μεγάλης κλίμακας.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα ενεργητικά και παθητικά συστήματα αποθήκευσης για την αποτελεσματική αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Τα παθητικά συστήματα, τα οποία δεν χρειάζονται αντλίες είναι συχνά κατάλληλα για οικιακές εφαρμογές μικρής κλίμακας, και χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλη την Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Οι πέντε κύριοι τύποι τέτοιων παθητικών συστημάτων είναι:

- άμεσο κέρδος θερμότητας,
- συλλογή και αποθήκευση θερμότητας,
- χώρος στον ήλιο,
- αποθήκευση θερμότητας οροφής,
- θερμοσίφωνο.

Η αποτελεσματική χρήση της ηλιακής ενέργειας βασίζεται τόσο στα TES, ώστε τα ηλιακά συστήματα χωρίς εγκαταστάσεις TES να είναι πιθανώς χρησιμοποιήσιμα μόνο στις πιο στοιχειώδεις εφαρμογές. Μερικά παραδείγματα ηλιακών θερμικών εφαρμογών που δεν χρειάζονται αποθήκευση είναι τα ηλιακά στεγνωτήρια σιτηρών, τα ηλιακά αποστακτήρια και οι ηλιακοί κλίβανοι. Σε αυτά τα συστήματα η ηλιακή θερμότητα χρησιμοποιείται αμέσως μόλις γίνεται διαθέσιμη. Ωστόσο, στις ηλιακές εφαρμογές θέρμανσης χώρου η κατάσταση είναι διαφορετική, επειδή το ηλιακό σύστημα παρέχει συνήθως περισσότερη θερμότητα από ό, τι απαιτείται από το κτίριο κατά τη διάρκεια της περιόδου συλλογής. Για να καταστούν αυτά τα συστήματα ηλιακής ενέργειας βιώσιμα και ελκυστικά, μακροπρόθεσμα ή βραχυπρόθεσμα, απαιτείται αποθήκευση.

#### **2.4.3 Διάρκεια αποθήκευσης και ηλιακές εφαρμογές**

Τα ετήσια συστήματα TES ηλιακής ενέργειας σχεδιάζονται για να συλλέξουν την ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών και να διατηρήσουν τη θερμότητα στην αποθήκευση για τη χρήση κατά τη διάρκεια του επόμενου χειμώνα. Αν και η τεχνολογία υπάρχει για την κατασκευή ετήσιων συστημάτων αποθήκευσης, και μερικά έχουν αποδειχθεί, είναι δύσκολο να καταστούν αυτά τα συστήματα οικονομικά αποδοτικά. Το κύριο εμπόδιο είναι η έλλειψη οικονομικά αποδοτικών μέσων για τον περιορισμό της θερμότητας για μεγάλα χρονικά διαστήματα (π.χ. τρεις μήνες). Το TES που βασίζεται στο έδαφος έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε ορισμένες δικαιοδοσίες. Οι οικονομικές ανακαλύψεις στο TES είναι φυσικά δυνατές,

ενδεχομένως μέσω της ετήσιας αποθήκευσης σε κοινοτική κλίμακα, η οποία θα μπορούσε να μειώσει τις δαπάνες και να βελτιώσει εντυπωσιακά την αξιοπιστία της ηλιακής θέρμανσης.

Τα βραχυπρόθεσμα συστήματα TES ηλιακής ενέργειας σχεδιάζονται για να αποθηκεύσουν τη θερμότητα μέχρι και μερικές ημέρες. Αν και τα συστήματα ηλιακής ενέργειας που χρησιμοποιούν την ετήσια αποθήκευση μπορούν να συμβάλλουν κοντά σε 100% των αναγκών θέρμανσης κτηρίου, τα βραχυπρόθεσμα συστήματα TES συμβάλλουν σπάνια περισσότερο από 60%. Ωστόσο, τα συστήματα TES βραχυπρόθεσμης ηλιακής ενέργειας μπορούν να λειτουργούν σε ανταγωνιστική βάση με συμβατικά καύσιμα.

Κάθε σύστημα ηλιακής ενέργειας έχει κάποιο βαθμό TES, είτε σκόπιμα παρέχονται ως συσκευή στην οποία να αποθηκεύουν ενέργεια, ή μέσω της θερμικής αδράνειας του εκτεταμένου συστήματος των συλλεκτών και της θερμότητας μεταφοράς υγρού. Το TES θεωρείται οικονομικώς αποδοτικό μόνο για σύντομες περιόδους (ώρες έως ημέρες), το οποίο γενικά δεν είναι αρκετό για να μεταφέρει ένα σύστημα μέσω πολύ χειμερινού καιρού. Η αύξηση της χωρητικότητας του TES είναι συνήθως οικονομικά απαγορευτική. Μια εξαίρεση είναι η πρόσθετη περίπτωση των αλατούχων ηλιακών λιμνών, οι οποίες ενεργούν και ως ηλιακοί συλλέκτες και TES που έχουν τις εβδομάδες της ικανότητας αποθήκευσης.

Το TES είναι συχνά συνδυάζεται με την ηλιακή ενέργεια, επειδή η τελευταία συνδέεται συχνά μόνο με τεχνολογίες που μεταφράζουν το φως του ήλιου απευθείας σε θερμική ενέργεια ή ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλιακή τεχνολογία περιλαμβάνει σήμερα ένα ευρύ φάσμα των εννοιών που διαφέρουν πολύ στις απαιτήσεις τους για την αποθήκευση. Η φυτική ύλη, ή η βιομάζα, είναι ιδανικά για μεγάλες περιόδους. Η αιολική ενέργεια είναι μια άλλη μορφή έμμεσα παραγόμενης ηλιακής ενέργειας που, αν και είναι διαλείπουσα, είναι διαθέσιμη πιο συχνά κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας από το άμεσο ηλιακό φως σε πολλές περιοχές. Το TES είναι συχνά σημαντικό για την ηλιακή θέρμανση του νερού, θέρμανση των κτιρίων, και βιομηχανικές διαδικασίες θέρμανσης.

Ένας παράγοντας που μπορεί να διευκολύνει τις εφαρμογές αποθήκευσης και την επίλυση των προκλήσεων είναι η κίνηση της ενεργειακής οικονομίας προς μεγαλύτερο συντονισμό του ενεργειακού εφοδιασμού και των απαιτήσεων.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί επίσης να αναπτυχθεί χωρίς αποθήκευση στο μέλλον, καθώς υπάρχουν κάποιες διαμορφώσεις στις οποίες οι πηγές ηλιακής ενέργειας μπορούν να ενσωματωθούν με ενεργειακά συστήματα, ιδιαίτερα ηλεκτρικά συστήματα, χωρίς μαζική αποθήκευση. Ωστόσο, ακόμη και με αισιόδοξους ρυθμούς ανάπτυξης, η συμβολή της ηλιακής ενέργειας θα παραμείνει σχετικά μικρή στο εγγές μέλλον. Έτσι, τα παραδοσιακά ενεργειακά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιστάθμιση των διακυμάνσεων του εφοδιασμού με ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να αντιστοιχηθεί η κυμαινόμενη ενεργειακή ζήτηση, ιδίως για την ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς να τεθεί σε κίνδυνο η σταθερότητα των ηλεκτρικών δικτύων. Δεδομένου ότι οι μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας μεταδίδονται συνήθως μέσω μεγάλων αποστάσεων, το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για την εξομάλυνση και την εξισορρόπηση των διακυμάνσεων της ηλιακής πηγής ενέργειας. Εάν η ηλιακή ενέργεια αυξάνεται σε πάρα πολύ μεγάλο μέρος του συνόλου, η γενική σταθερότητα ενός ηλεκτρικού δικτύου μπορεί να επηρεαστεί δυσμενώς, αλλά πολλές μελέτες δείχνουν ότι αυτός ο περιορισμός είναι απίθανο να είναι ένα πρόβλημα έως ότου φθάσει η διείσδυση ηλιακής δύναμης 15 - 20%.

#### **2.4.4 Κατασκευή εφαρμογών TES και ηλιακής ενέργειας**

Η δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι σημαντική για την αποτελεσματική χρήση της ηλιακής ενέργειας στα κτίρια. Σήμερα, μεγάλο ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε παθητικά συστήματα θέρμανσης χώρου και ενεργητικά συστήματα θέρμανσης νερού. Για τη θέρμανση οικοδόμησης, τα συμβατικά παθητικά υλικά TES περιλαμβάνουν το νερό, τους βράχους, την τοιχοποιία, και το σκυρόδεμα. Για να αποδώσουν καλά, αυτά τα υλικά αποθήκευσης πρέπει να είναι ογκώδη επειδή οι επιτρεπόμενες θερμοκρασίες ταλάντευσης τους περιορίζονται από τους όρους άνεσης που πρέπει να διατηρηθούν μέσα στο κτίριο.

Με τις πρακτικές κατασκευής ελαφριάς οικοδόμησης στις Ηνωμένες Πολιτείες, ένα ελαφρύ λανθάνον σύστημα TES που εγκαθίσταται εύκολα σε ένα κτίριο θα μπορούσε να είναι ευεργετικό. Ένα πρόβλημα είναι ο αποτελεσματικός και οικονομικός περιορισμός ενός PCM στην υγρή φάση του. Σωλήνες, ράβδοι, φιάλες και δοχεία που περιέχουν PCMs και λιώνουν στο εύρος θερμοκρασίας δωματίου, έχουν μελετηθεί με διάφορους βαθμούς επιτυχίας. Οι περισσότεροι έχουν αποδειχθεί αντικοινωνικοί. Μια πιο ενδιαφέρουσα προσέγγιση είναι ένα wallboard που περιέχει ένα PCM. Το

wallboard παρέχει τη συγκράτηση του PCM, εξυπηρετεί μια αρχιτεκτονική λειτουργία και τα οικονομικά βελτιώνονται. Περαιτέρω, η μεγάλη περιοχή μεταφοράς θερμότητας του wallboard υποστηρίζει τις μεγάλες ροές θερμότητας που οδηγούνται από τις μικρές διαφορές θερμοκρασίας.

Η εποχιακή αποθήκευση έχει δοκιμαστεί και χρησιμοποιείται σε αρκετές χώρες για την αποθήκευση ηλιακής ενέργειας για την παροχή θέρμανσης χειμερινού χώρου, σε συνδυασμό με συστήματα τηλεθέρμανσης. Η Σουηδία έχει πολλά τέτοια συστήματα. Ένα σύστημα TES που εξετάστηκε από το Πανεπιστήμιο της Μασαχουσέτης στο Amherst (Tomlinson και Kannberg, 1990) άρχισε να χρησιμοποιεί μια μακροπρόθεσμη εποχιακή θερμική αποθήκευση της ηλιακής θερμότητας σε ένα υπόγειο σχηματισμό αργίλου για τη θέρμανση ενός τοπικού αθλητικού κέντρου. Η χρήση της εποχιακής αποθήκευσης μπορεί να μειώσει το κόστος στα ηλιακά ενεργειακά συστήματα που μπορούν να παρέχουν 100% των ενεργειακών αναγκών λόγω της μειωμένης περιοχής συλλεκτών που απαιτείται. Σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη, η αποθήκευση είναι ουσιαστικά απαραίτητη για την παροχή μεγάλου ποσοστού θέρμανσης από την ηλιακή ενέργεια. Τα οικονομικά της κλίμακας αυτής ευνοούν τα σχετικά μεγάλα συστήματα.

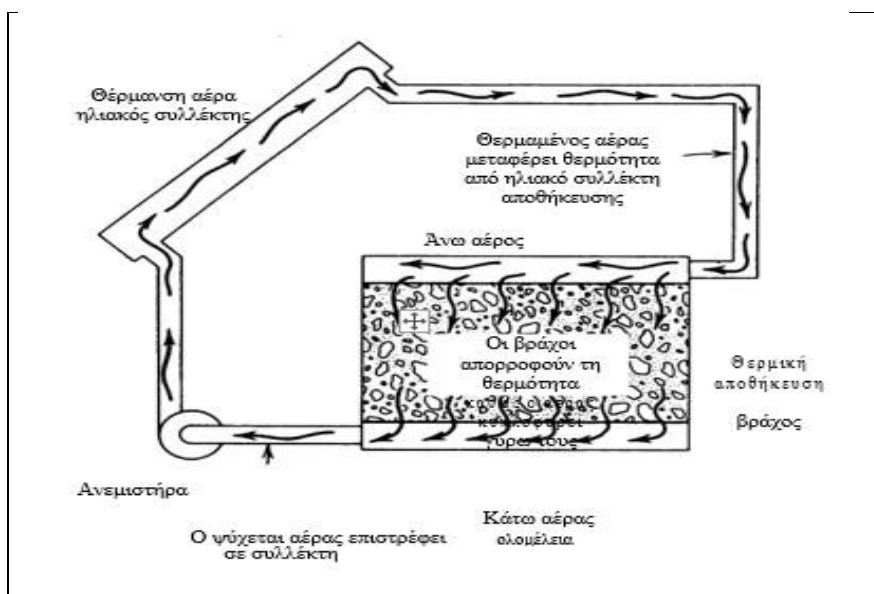
Τα εμπορικά κτίρια γίνονται πλέον πιο περίπλοκα. Όχι μόνο τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως οι κοινοί φεγγίτες, αλλά οι περίπλοκοι έλεγχοι στον εξοπλισμό HVAC χρησιμοποιούνται σε μια προσπάθεια να προσφερθούν η καλύτερη άνεση και οι χαμηλότερες ενεργειακές δαπάνες. Αυτές οι καταστάσεις καθιστούν δύσκολο το γεγονός να προσδιοριστεί η οικονομική σκοπιμότητα των συστημάτων TES. Επιπλέον, απαιτούν προγράμματα προσομοίωσης ηλεκτρονικών υπολογιστών για τη μοντελοποίηση των πολύπλοκων συστημάτων, ελέγχων και οικονομικών παραμέτρων των εμπορικών κτιρίων.

Το σύστημα αποθήκευσης είναι η καρδιά ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης και ψύξης. Η αποθήκευση εξισώνει τα άκρα της θερμοκρασίας που προκαλούνται από τον καθημερινό κύκλο της ηλιακής διαθεσιμότητας, επιτρέποντας στα εσωτερικά τη θερμική άνεση κατά τη διάρκεια της ημέρας και παρέχοντας τη θερμότητα τη νύχτα. Το εξάρτημα αποθήκευσης ενός συστήματος ηλιακής ενέργειας επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό και την κατασκευή και ως εκ τούτου το κόστος. Το μέσο αποθήκευσης και η "αξιοπιστία" που απαιτείται από ένα σύστημα, καθορίζουν το μέγεθος της αποθήκευσης και, σε κάποιο βαθμό, τη θέση του. Τα περισσότερα συστήματα



αποθήκευσης δεν είναι μεγέθους για να παρέχουν 100% τις ανάγκες θέρμανσης όταν η ηλιοφάνεια δεν είναι διαθέσιμη. Δεδομένου ότι η διαθεσιμότητα και η μη διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας είναι δύσκολο να προβλεφθούν στις περισσότερες περιπτώσεις, τα συστήματα αποθήκευσης θα ήταν πολύ μεγάλα. Όμως το μεγαλύτερο μέρος της χωρητικότητας θα παρέμενε αχρησιμοποίητο τις περισσότερες φορές. Όντας πρόθυμοι να ανεχθούν κάποιες καθημερινές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, μπορεί να μειώσουν το μέγεθος των εν λόγω TES.

Όλες οι ουσίες έχουν θερμική ικανότητα και ικανότητα να κατέχουν μια ορισμένη ποσότητα θερμότητας. Το νερό μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλες ποσότητες θερμότητας. Ο βράχος έχει περίπου το ένα πέμπτο της θερμικής ικανότητας του νερού, αλλά όπως το τούβλο και το σκυρόδεμα, είναι πυκνότερο. Ο βράχος, όταν χρησιμοποιείται ως μέσο αποθήκευσης, τοποθετείται συνήθως σε ένα μονωμένο κρεβάτι κάτω από ή συνδέεται με ένα κτήριο. Το σχήμα 2.2 απεικονίζει ένα ηλιακό σύστημα TES με ρόμπα με συλλέκτες θέρμανσης αέρα. Όπως φαίνεται από το σχήμα, ο αέρας από τους συλλέκτες μεταφέρει την απορροφημένη ηλιακή θερμότητα στα βράχια. Καθώς ο θερμός αέρας ρέει γύρω από τους βράχους, απορροφάται η θερμότητα, και ο δροσισμένος αέρας επιστρέφει στους ηλιακούς συλλέκτες που θερμαίνονται πάλι.



Σχήμα 2.2 – Ηλιακό σύστημα TES πετρωμάτων

#### **2.4.5 Σχεδιασμός ζητημάτων για TES που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια**

Η ενέργεια από ηλιακούς συλλέκτες τείνει να είναι σε χαμηλές θερμοκρασίες και απαιτεί μια μεγάλη μάζα αποθήκευσης όταν αποθηκεύεται ως λογική θερμότητα. Αν και η ενεργειακή αποδοτικότητα των ηλιακών συλλεκτών αυξάνεται (και το κόστος συλλεκτών μειώνεται πιθανώς) δεδομένου ότι η θερμοκρασία της παραγωγής συλλεκτών μειώνεται προς τη χωρική σειρά άνεσης 20 – 25 , η γενική μάζα και ο όγκος της συσκευής αποθήκευσης αυξάνονται περαιτέρω. Για τις περισσότερες θέσεις, εντούτοις, ένα χωρικό σύστημα κλιματισμού που χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια πρέπει να συμπληρωθεί από μια ηλεκτρική ή τροφοδοτημένη με καύσιμα βοηθητική πηγή ενέργειας. Έτσι, είναι σημαντική η βέλτιστη χρήση και των δύο πηγών ενέργειας μέσω του TES για το σχεδιασμό κτιριακών κατασκευών και συστημάτων TES.

Ένα σημαντικό ερώτημα στο σχεδιασμό των ηλιακών συστημάτων TES περιλαμβάνει την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που θα αποθηκευτεί. Το σύστημα αποθήκευσης πρέπει να είναι επαρκές για την παροχή θερμότητας όχι μόνο κατά τη διάρκεια της νύχτας, αλλά και για αρκετές συνεχόμενες συνεφιασμένες ημέρες, εάν είναι επιθυμητή η πλήρης ανεξαρτησία από εξωτερικές πηγές ενέργειας. Σε πολλές περιοχές, οι χειμερινές περιόδους χωρίς ηλιοφάνεια είναι τόσο μεγάλες που η πλήρης ανεξαρτησία δεν είναι εφικτή. Επιπλέον, το σύστημα ηλιακής συλλογής, για την επίτευξη ανεξαρτησίας, πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο για να θερμάνει τη δομή ακόμα και ενώ αποθηκεύει περισσότερη θερμότητα για την επόμενη περίοδο. Οι ημέρες μπορούν να εκτείνονται λιγότερο από 8 ώρες κατά τη διάρκεια των βόρειων χειμώνων, και υπό αυτές τις συνθήκες, το κόστος του συνδυασμένου συστήματος συλλογής και αποθήκευσης μπορεί να περιορίσει αποτελεσματικά το βαθμό στον οποίο το ηλιακό σύστημα μπορεί να παρέχει οικονομικά την απαιτούμενη ενέργεια. Εάν ένα εναλλακτικό σύστημα θέρμανσης με μια άλλη πηγή ενέργειας είναι απαραίτητο ως ένα αντίγραφο ασφαλείας για εκτεταμένες περιόδους χωρίς ήλιο, τότε η χρήση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να είναι ακόμη πιο περιορισμένη. Εντούτοις, εάν ένα σύστημα αποθήκευσης δικαιολογείται οικονομικά, ίσως επειδή εκμεταλλεύεται τις χαμηλές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας από αιχμής, κατόπιν η αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας μπορεί επιπλέον να ενισχύσει εκείνο το όφελος.

Η ενέργεια από ηλιακούς συλλέκτες δεν χρειάζεται να χρησιμοποιείται απευθείας σε χωρικά συστήματα. Μια εναλλακτική και ελπιδοφόρα εφαρμογή είναι να

χρησιμοποιηθεί ως πηγή θερμότητας για μια αντλία θερμότητας σε ένα ηλιακό-επαυξημένο σύστημα αντλίας θερμότητας. Για τέτοιες χρήσεις, οι θερμοκρασίες εξόδου ηλιακών συλλεκτών μπορούν να είναι χαμηλότερες από εκείνες που επιτυγχάνονται με την άμεση θέρμανση. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ενεργειακή αποδοτικότητα και μειώνεται πιθανώς το κόστος. Επιπλέον, έχοντας υψηλότερες θερμοκρασίες διαθέσιμες για την αντλία θερμότητας αυξάνεται ο συντελεστής απόδοσής της (COP) και μειώνεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος αντλίας θερμότητας εξαρτάται, εν μέρει, από τις διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας. Με ελάχιστη ή καθόλου αποθήκευση, ο ηλιακός συλλέκτης βελτιώνει μόνο την αποδοτικότητα των αντλιών θερμότητας κατά τη διάρκεια των ωρών του φωτός του ήλιου. Με μεγαλύτερη αποθήκευση, η ηλιακή είσοδος παρέχει επίσης μια δεξαμενή υψηλότερων θερμοκρασιών πηγής για τις λειτουργίες της αντλίας θερμότητας κατά τη διάρκεια ανήλιων περιόδων. Εάν το συνολικό σύστημα έχει σχεδιαστεί για να περιορίσει τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας σε ώρες εκτός αιχμής, τότε είναι απαραίτητο ένα σύστημα διπλού χώρου αποθήκευσης (ένα σύστημα για την αποθήκευση ηλιακών εισροών και ένα δεύτερο για την αποθήκευση της ενέργειας εξόδου της αντλίας θερμότητας για χρήση όλο το εικοσιτετράωρο στο χώρο κλιματισμού).

## **2.5 TES μέθοδοι**

Το TES μπορεί να βοηθήσει στην αποτελεσματική χρήση και παροχή θερμικής ενέργειας κάθε φορά που υπάρχει αναντιστοιχία μεταξύ της παραγωγής και της χρήσης ενέργειας. Διάφορα υποσύνολα των διαδικασιών TES έχουν ερευνηθεί και αναπτυχθεί για την οικοδόμηση της θέρμανσης και της ψύξης, των βιομηχανικών εφαρμογών, και των συστημάτων χρησιμότητας και χωρικής δύναμης. Η περίοδος αποθήκευσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας. Τα ημερήσια συστήματα αποθήκευσης έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα: οι επενδύσεις κεφαλαίου και οι ενεργειακές απώλειες είναι συνήθως χαμηλές, και οι μονάδες είναι μικρότερες και μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν. Το μέγεθος της καθημερινής αποθήκευσης για κάθε εφαρμογή δεν είναι σχεδόν τόσο κρίσιμο όσο είναι για τη μεγαλύτερη ετήσια αποθήκευση. Η ετήσια αποθήκευση, ωστόσο, μπορεί να καταστεί οικονομική μόνο σε σχέδια πολυκατοικιών ή βιομηχανικών πάρκων, και συχνά απαιτεί ακριβά συστήματα διανομής ενέργειας και νέες θεσμικές ρυθμίσεις που σχετίζονται με την ιδιοκτησία και τη χρηματοδότηση. Στις ηλιακές εφαρμογές TES, η βέλτιστη διάρκεια

αποθήκευσης ενέργειας είναι συνήθως αυτή που προσφέρει την τελική παραδοθείσα ενέργεια με ελάχιστο κόστος όταν ενσωματώνεται με το πεδίο συλλογής.

## 2.6 Λογικά TES

Σε λογικά συστήματα TES, η ενέργεια αποθηκεύεται με την αλλαγή της θερμοκρασίας ενός εργαζόμενου μέσου αποθήκευσης όπως το νερό, ο αέρας, το πετρέλαιο, οι βράχοι, τα τούβλα, η άμμος, ή το χώμα. Η ποσότητα της ενέργειας που εισάγεται σε TES από μια λογική συσκευή θερμότητας είναι ανάλογη με τη διαφορά μεταξύ των τελικών και αρχικών θερμοκρασιών αποθήκευσης, της μάζας του μέσου αποθήκευσης και της θερμικής του ικανότητας. Κάθε μέσο έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, το νερό έχει περίπου δύο φορές την ειδική θερμότητα του βράχου και του χώματος. Η υψηλή θερμοχωρητικότητα του νερού (4,2 kJ/kg C) συχνά καθιστά τις δεξαμενές νερού μια λογική επιλογή για τα συστήματα TES που λειτουργούν σε εύρος θερμοκρασίας που απαιτείται για την κατασκευή θέρμανσης ή ψύξης. Η σχετικά χαμηλή θερμοχωρητικότητα των πετρωμάτων και των κεραμικών (0,84 kJ/kgC) αντισταθμίζεται κάπως από τις μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας λόγω των υλικών και των σχετικών υψηλών πυκνοτήτων τους [15].

Ένα λογικό TES αποτελείται από ένα μέσο αποθήκευσης, ένα εμπορευματοκιβώτιο, και τις συσκευές εισαγωγής/εξόδου. Τα εμπορευματοκιβώτια πρέπει να διατηρούν το υλικό αποθήκευσης και να αποτρέπουν τις απώλειες θερμικής ενέργειας. Η θερμική διαστρωμάτωση και η ύπαρξη θερμικής κλίσης σε όλη την αποθήκευση, είναι επιθυμητές. Η διατήρηση της διαστρωμάτωσης είναι πολύ απλούστερη στα στερεά μέσα αποθήκευσης από ό, τι στα ρευστά.

Τα λογικά υλικά TES δεν υφίστανται καμία αλλαγή στη φάση με την αλλαγή της θερμοκρασίας, η οποία αντιμετωπίζεται κατά τη διαδικασία αποθήκευσης. Το νερό έχει υψηλή αξία και είναι φθινό, αλλά επειδή είναι υγρό πρέπει να περιέχεται σε ένα δοχείο καλύτερης ποιότητας από ένα στερεό.

Το υλικό πρέπει να είναι φθινό και να έχει καλή θερμική ικανότητα, ώστε να είναι χρήσιμο σε εφαρμογές TES. Μια άλλη σημαντική παράμετρος στα λογικά TES είναι ο ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα μπορεί να απελευθερωθεί. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι συνάρτηση της θερμικής διάχυσης. Για το λόγο αυτό, το iron

shot είναι ένα εξαιρετικό μέσο θερμικής αποθήκευσης, με υψηλή θερμική ικανότητα και υψηλή θερμική αγωγιμότητα.

Για υψηλής θερμοκρασίας λογικά TES, ο σίδηρος και τα οξειδία του σιδήρου έχουν θερμικές ιδιότητες που είναι συγκρίσιμες με εκείνες του νερού ανά μονάδα όγκου αποθήκευσης. Το κόστος είναι μέτριο είτε για σφαιρίδια του οξειδίου ή μεταλλικές μπάλες. Δεδομένου ότι ο σίδηρος και το οξειδιά του έχουν παρόμοια θερμικά χαρακτηριστικά, η αργή οξείδωση του μετάλλου σε ένα υψηλής θερμοκρασίας υγρό ή σύστημα αέρα δεν θα υποβαθμίσει την απόδοσή του.

Ο βράχος είναι ένα καλό λογικό υλικό TES από την άποψη του κόστους, αλλά η ογκομετρική θερμική ικανότητά του είναι μόνο η μισή από αυτή του νερού. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι οι δεξαμενές αποθήκευσης πετρωμάτων είναι πρακτικές, με κύριο πλεονέκτημά τους το γεγονός ότι μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση θερμότητας σε θερμοκρασία άνω των 100 ° C.

#### **2.6.1 Θερμικά στρωματοποιημένες δεξαμενές TES**

Οι δεξαμενές TES, για χρήση στη θέρμανση, τον κλιματισμό και άλλες εφαρμογές, έχουν λάβει αυξανόμενη προσοχή τα τελευταία χρόνια. Περιγράφονται πλέον θερμικά στρωματοποιημένες δεξαμενές αποθήκευσης, οι οποίες σταδιακά έχουν πιο διαδεδομένη χρήση.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει μια θερμικά στρωματοποιημένη δεξαμενή αποθήκευσης, τις θέσεις της εισόδου και της εξόδου για καλώς και κακώς σχεδιασμένες περιπτώσεις. Επίσης φαίνεται η θερμικά αποτελεσματική ποσότητα του νερού που προκύπτει από αυτές τις θέσεις. Η απώλεια θερμότητας και το κέρδος εμφανίζονται από τη δεξαμενή, αφού η ίδια αποθηκεύει θερμική ενέργεια για περιόδους τουλάχιστον αρκετών ωρών.

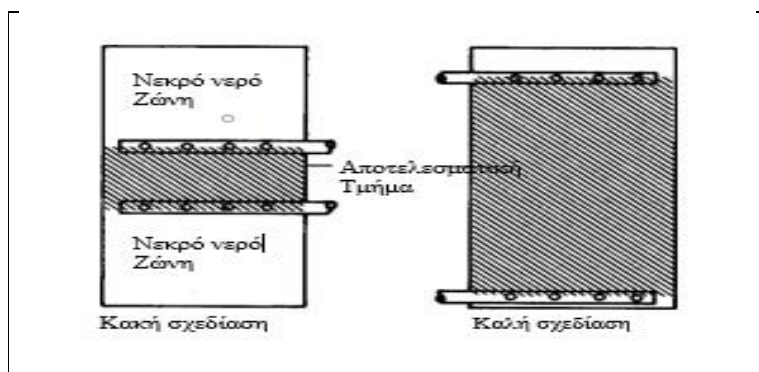
#### **Τύποι και χαρακτηριστικά των διαφόρων στρωματοποιημένων δεξαμενών TES**

Το σύστημα TES που χρησιμοποιείται συχνότερα αυτή τη στιγμή είναι το λογικό TES που χρησιμοποιεί το νερό ως μέσο αποθήκευσης. Ο όρος «θερμική» αποθήκευση χρησιμοποιείται αντί της αποθήκευσης «θερμότητας» επειδή ο πρώτος υπονοεί την αποθήκευση της θερμότητας ή του κρύου. Μια αποτελεσματική δεξαμενή TES που χρησιμοποιεί το νερό ως μέσο αποθήκευσης ικανοποιεί τις ακόλουθες τρεις γενικές απαιτήσεις:

- Η δεξαμενή πρέπει να στρωματοποιείται, δηλαδή, πρέπει να κρατάει τους χωριστούς όγκους νερού στις διαφορετικές θερμοκρασίες. Η ανάμειξη των όγκων πρέπει να είναι ελάχιστη, ακόμη και κατά τη διάρκεια περιόδων φόρτισης και αποφόρτισης.
- Η πραγματική χωρητικότητα αποθήκευσης θα πρέπει να ελαχιστοποιεί την ποσότητα του νερού νεκρού νερού στη δεξαμενή.
- Η απώλεια θερμότητας ή το κέρδος από τη δεξαμενή πρέπει να ελαχιστοποιούνται.

Πολλοί τύποι δεξαμενών TES έχουν αναπτυχθεί για να ικανοποιήσουν αυτές τις απαιτήσεις.

Μια θερμική στρωματοποιημένη δεξαμενή αποθήκευσης δεν έχει εσωτερικά χωρίσματα και έχει την ακόλουθη αρχή λειτουργίας. Το ζεστό νερό έχει χαμηλή πυκνότητα και επιπλέει στην κορυφή της δεξαμενής, ενώ το ψυχρό νερό είναι υψηλότερης πυκνότητας και βρίσκεται στο κατώτατο σημείο. Ο όγκος αποθήκευσης με αυτόν τον τύπο συστήματος μειώνεται σε σχέση με άλλα συστήματα, επειδή ο όγκος του νερού νεκρού νερού είναι σχετικά χαμηλός και η ενεργειακή απόδοση σχετικά υψηλή.



Σχήμα 2.3 - Θέση εισόδου και εξόδου και πραγματική ποσότητα νερού για θερμικά στρωματοποιημένα TES [16]

### Εκτιμήσεις σχεδίου για τις στρωματοποιημένες δεξαμενές TES

Ο σχεδιασμός μιας θερμικής στρωματοποιημένης δεξαμενής αποθήκευσης, ακολουθεί τα παρακάτω κριτήρια:

- **Γεωμετρικές εκτιμήσεις.** Σε ένα δοχείο αποθήκευσης βαθέων υδάτων είναι επιθυμητό να βελτιωθεί η θερμική του διαστρωμάτωση. Το στόμιο εισόδου και εξόδου νερού πρέπει να εγκατασταθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγει ομοιόμορφη ροή νερού για να αποφευχθεί η ανάμειξη. Για την ελαχιστοποίηση του όγκου του νεκρού νερού, οι συνδέσεις εξόδου και εισόδου πρέπει να βρίσκονται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο πάνω και κάτω μέρος του όγκου αποθήκευσης, αντίστοιχα. Η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το νερό αποθήκευσης πρέπει να ελαχιστοποιηθεί.

- **Λειτουργικές εκτιμήσεις.** Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των άνω και κάτω τμημάτων της δεξαμενής πρέπει να είναι μεγάλη, τουλάχιστον 5 – 10 C. Η χρήση ελεγκτών για τη διατήρηση σταθερών θερμοκρασιών νερού στα άνω και κάτω μέρη της δεξαμενής, είναι επιθυμητή. Η ταχύτητα του νερού που ρέει μέσα και έξω από τη δεξαμενή πρέπει να είναι χαμηλή.

- **Άλλες σκέψεις.** Τα μονωτικά και στεγανοποιητικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής πρέπει να είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να πληρούν τις κατάλληλες προδιαγραφές.

#### **Στρωματοποιημένες διαμορφώσεις δεξαμενών TES**

Το πλεονέκτημα των συστημάτων αποθήκευσης ενός μέσου, στα οποία το υγρό μεταφοράς θερμότητας είναι επίσης το μέσο αποθήκευσης, είναι ότι δεν απαιτείται εσωτερική ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του υγρού μεταφοράς και του μέσου αποθήκευσης, αποφεύγοντας έτσι τις επακόλουθες απώλειες θερμοκρασίας. Εάν το υγρό έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και επιτρέπει καλή θερμική διαστρωμάτωση (π.χ. νερό ή θερμικό λάδι), η μία θερμοκλίνη δεξαμενής απαιτεί τον ελάχιστο όγκο αυτής, δεδομένου ότι τα ζεστά και κρύα μέσα περιέχονται σε ένα μόνο δοχείο. Όταν η αποθηκευτική μέση θερμική αγωγιμότητα είναι υψηλότερη, όπως στα λιωμένα άλατα ή νάτριο, εμφανίζεται ταχεία εξισορρόπηση των περιοχών θερμής και ψυχρής θερμοκρασίας, καθιστώντας απαραίτητες ξεχωριστές ζεστές και κρύες δεξαμενές. Δεδομένου ότι σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται διπλάσιος όγκος δεξαμενής από την περιεκτικότητα σε υγρά, συνιστάται συχνά ένα σύστημα τριών δεξαμενών στο οποίο υπάρχει μόνο 1,5 φορά μεγαλύτερος όγκος δεξαμενής από την περιεκτικότητα σε υγρά. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά είναι δύσκολο να ελεγχθούν αφού περιλαμβάνουν εκτεταμένες σωληνώσεις και υπόκεινται σε αυξημένες απώλειες θερμότητας από υψηλότερες αναλογίες επιφάνειας όγκου. Συχνά χρησιμοποιούνται διαφορετικά μέσα μεταφοράς και αποθήκευσης, επειδή το μέσο αποθήκευσης

(συνήθως στερεό) είναι λιγότερο ακριβό από το ρευστό μεταφοράς. Το μέσο μεταφοράς ανταλλάσσει τη θερμότητα μέσω της άμεσης ή έμμεσης επαφής με το μέσο αποθήκευσης, σχηματίζοντας μια θερμοκλίνη. Εκτός από την πτώση της θερμοκρασίας μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης λόγω της ενδιάμεσης ανταλλαγής θερμότητας, η έννοια του διπλού μέσου έχει ένα άλλο λειτουργικό μειονέκτημα σε σχέση με τα ενός μέσου συστήματα δεξαμενής. Ενώ το τελευταίο διατηρεί σταθερές θερμοκρασίες εξόδου κατά τη φόρτιση και την αποφόρτιση (μέχρι αδειάσει η δεξαμενή), σε ένα διπλό μεσαίο σύστημα αποθήκευσης, η θερμοκρασία εξόδου του μέσου μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται όσο περισσότερο φορτίζεται και μειώνεται όσο περισσότερο απορρίπτεται, οδηγώντας σε μη χρήσιμες δυνατότητες αποθήκευσης.

### 2.6.2 Σκυρόδεμα TES

Το σκυρόδεμα επιλέγεται μερικές φορές λόγω του χαμηλού κόστους, της διαθεσιμότητας σε όλο τον κόσμο, και της εύκολης επεξεργασίας. Τα ανέξοδα σύνολα στο σκυρόδεμα είναι ευρέως διαθέσιμα. Το σκυρόδεμα έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά ως μέσο αποθήκευσης:

- υψηλή ειδική θερμότητα
- καλές μηχανικές ιδιότητες (π.χ. συμπιεστική αντοχή)
- συντελεστή θερμικής διαστολής κοντά στον συντελεστή του χάλυβα (υλικό σωλήνων)
- υψηλή μηχανική αντίσταση στην κυκλική θερμική φόρτωση.

Όταν το σκυρόδεμα θερμαίνεται, πραγματοποιούνται διάφοροι μετασχηματισμοί και αντιδράσεις που επηρεάζουν τη δύναμή του και άλλες φυσικές ιδιότητες. Όταν το σκυρόδεμα θερμαίνεται σε περίπου 100 C, το νερό αποβάλλεται (έως 130 κιλά νερού ανά m<sup>3</sup> σκυροδέματος). Το υπόλοιπο νερό (50 έως 60 kg νερού ανά m<sup>3</sup> σκυροδέματος), είτε δεσμεύεται φυσικά σε μικρότερους πόρους είτε κατακρατείται χημειοπλαστικά, στο τέλος αποβάλλεται, καθώς οι θερμοκρασίες αυξάνονται από 120 σε 600 C. Η μεγαλύτερη αφυδάτωση εμφανίζεται μεταξύ 30 και 300 C. Αυτή η απώλεια νερού μειώνει το βάρος του σκυροδέματος κατά 2 - 4%. Η ειδική θερμότητα μειώνεται στο εύρος θερμοκρασίας μεταξύ 20 και 120 C, και η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται μεταξύ 20 και 280 C. Οι μηχανικές ιδιότητες επηρεάζονται επίσης ελαφρώς



από την απώλεια νερού, η συμπίεστική δύναμη μειώνεται κατά περίπου 20% σε 400 C συγκρινόμενη με αυτή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για την ελαχιστοποίηση τέτοιων προβλημάτων, χρησιμοποιείται μερικές φορές σκυρόδεμα βασάλτη. Οι βελόνες χάλυβα και η ενίσχυση προστίθενται μερικές φορές στο σκυρόδεμα για να εμποδίσουν το ράγισμα. Με τον τρόπο αυτό, η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται κατά περίπου 15% σε 100 C και 10% σε 250 C.

### 2.6.3 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας ακουαφέρ (ATES)

Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι μια δεξαμενή υπόγειων υδάτων. Η λέξη υδροφόρος ορίζοντας προέρχεται από τις λατινικές λέξεις "aqua" που σημαίνει νερό και "ferre" η έννοια να μεταφέρουν. Το υλικό σε έναν υδροφόρο ορίζοντα είναι ιδιαίτερα διαπερατό στο νερό, και το στρώμα ορίου αποτελείται από τα πιο αδιαπέραστα υλικά όπως ο άργιλος ή ο βράχος. Υδροφόροι ορίζοντες βρίσκονται σε όλο τον κόσμο. Για παράδειγμα, δύο τύποι υδροφόρου ορίζοντα βρίσκονται στη Σουηδία. Ο πιο κοινός τύπος αποτελείται από άμμο και χαλίκι από την υποχώρηση των πάγων από την Εποχή των Παγετώνων. Ο δεύτερος τύπος αποτελείται από αμμόπετρα ή ασβεστόλιθο, και μπορεί να βρεθεί κυρίως στο νότιο τμήμα της Σουηδίας. Το νερό από την πτώση διαρρέει συνεχώς κάτω σε έναν υδροφόρο ορίζοντα και ρέει αργά μέσω αυτού, μέχρι τελικά να φθάσει σε μια λίμνη ή τη θάλασσα. Οι υδροφόροι ορίζοντες χρησιμοποιούνται συχνά ως πηγές γλυκού νερού.

Οι υδροφόροι ορίζοντες έχουν συχνά μεγάλους όγκους, που συχνά υπερβαίνουν τα εκατομμύρια των κυβικών μέτρων, και επειδή το 25% τους είναι νερό, έχουν μια υψηλή ικανότητα TES. Όταν οι αποδόσεις εξαγωγής και φόρτισης θερμότητας είναι καλές, μπορούν να επιτευχθούν υψηλές δυνάμεις θέρμανσης και ψύξης. Η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε υδροφόρο ορίζοντα εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες, όπως

- επιτρεπόμενη μεταβολή της θερμοκρασίας·
- θερμική αγωγιμότητα·
- φυσικές ροές υπόγειων υδάτων.

Η έννοια ATES είναι γνωστή εδώ και αρκετές δεκαετίες. Τα συστήματα υδροφόρου ορίζοντα έχουν λάβει παγκόσμια προσοχή λόγω των δυνατοτήτων τους για μεγάλης

κλίμακας και μακροπρόθεσμα συστήματα TES. Η πιο κοινή τεχνική περιλαμβάνει την αποθήκευση υπερβολικής θερμότητας σε έναν υδροφόρο ορίζοντα και την ανάκτησή της αργότερα κατά τη διάρκεια περιόδων θερμικής ζήτησης. Με τις αυξανόμενες ανησυχίες για την υπερθέρμανση του πλανήτη, η έννοια λαμβάνει ανανεωμένη προσοχή ως βιώσιμο μέσο διατήρησης της ενέργειας και μείωσης της χρήσης ορυκτών καυσίμων. Το αυξανόμενο αυτό ενδιαφέρον αντικατοπτρίζεται στις επιταχυνόμενες ερευνητικές δραστηριότητες στις χώρες της Βόρειας Ευρώπης και στον Καναδά. Κατά την ανάπτυξη συστημάτων ATES, οι φυσικές διεργασίες που διέπουν τη συμπεριφορά των μεταφορών θερμικής ενέργειας στα υπόγεια ύδατα πρέπει να είναι καλά κατανοητές. Τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης διαδραματίζουν βασικό ρόλο στη συμβολή σε αυτή την κατανόηση και είναι απαραίτητα για το σχεδιασμό αποτελεσματικών εγκαταστάσεων ATES.

Η έγχυση θερμαινόμενου νερού σε υδροφόρο ορίζοντα μπορεί επίσης να είναι απαραίτητη για λόγους διαφορετικούς από τη διατήρηση της ενέργειας. Για παράδειγμα, όταν προκύπτουν ζητήματα για τα δικαιώματα του νερού σχετικά με την ποιότητα της γης ή του νερού, το νερό που εξάγεται για σκοπούς ψύξης μπορεί να εγχυθεί ξανά στον υδροφόρο ορίζοντα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε την επίδραση της θερμότητας στο σύστημα υπόγειων υδάτων και να είμαστε σε θέση να προβλέψουμε συνέπειες όπως η επιταχυνόμενη βροχόπτωση των διαλυμένων ουσιών ή οι αλλαγές στο βιολογικό καθεστώς.

Η έρευνα για τα συστήματα ATES συνεχίζεται εδώ και αρκετές δεκαετίες στη Βόρεια Αμερική και στην Ευρώπη. Οι εργασίες στη Δανία, για παράδειγμα, παρουσιάζουν υψηλό επίπεδο ανάπτυξης. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, πρωτοποριακή έρευνα έχει γίνει στο Πανεπιστήμιο Auburn και στο Γενικό Ηλεκτρικό Κέντρο Προηγμένων Μελετών στη Σάντα Μπάρμπαρα της Καλιφόρνιας. Έρευνες για τα ATES διεξάγονται επίσης σε πολλές άλλες ευρωπαϊκές χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Σουηδίας, της Γερμανίας, της Δανίας και της Γαλλίας.

Ένα σύστημα αποθήκευσης υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περιόδους αποθήκευσης που κυμαίνονται από μεγάλες έως σύντομες, συμπεριλαμβανομένων των ημερήσιων, εβδομαδιαίων, εποχιακών ή μικτών κύκλων. Για να αποφευχθούν ανεπιθύμητες μόνιμες μεταβολές της στάθμης της θερμοκρασίας στον υδροφόρο ορίζοντα, η είσοδος και η παραγωγή θερμότητας πρέπει να έχουν το ίδιο μέγεθος τουλάχιστον μετά από αρκετούς κύκλους. Το σύστημα θα πρέπει να

είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να ρυθμίζεται σε περίπτωση που οι μακροπρόθεσμες ενεργειακές ροές δεν εξισορροπούνται. Η χωρητικότητα του TES θα πρέπει να είναι κατάλληλη για τα φορτία θέρμανσης και ψύξης.

Απαιτούνται συνήθως εκτεταμένες έρευνες και δοκιμές για την πρόβλεψη της απόδοσης ενός ATES πριν από το σχεδιασμό του ενεργειακού συστήματος. Αυτές οι προπαρασκευαστικές εργασίες μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι σχετικά δαπανηρές. Υδροφόροι ορίζοντες με υπόγεια ύδατα, ή το ίδιο το έδαφος (έδαφος, βράχος), μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο αποθήκευσης σε συστήματα ATES. Τα συστήματα υδροφόρου ορίζοντα είναι τα καταλληλότερα για συστήματα υψηλής χωρητικότητας. Οι υπάρχουσες χωρητικότητες κυμαίνονται σε μέγεθος από λιγότερο από 50 έως πάνω από 10.000 kW.

#### **Απόδοση της ATES**

Η βιωσιμότητα και η σχέση κόστους και αποτελεσματικότητας ενός συστήματος ATES εξαρτώνται από το μηχανικό σχεδιασμό και τη θερμοδυναμική απόδοση της υπέργειας εγκατάστασης, καθώς και από τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες εντός του υδροφόρου ορίζοντα. Οι χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, καθώς και η συνολική ενέργεια, έχουν βρεθεί να είναι κρίσιμοι παράγοντες για τον προσδιορισμό των επιδόσεων ATES.

Οι φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας εντός ενός υδροφόρου ορίζοντα αποθήκευσης περιλαμβάνουν την οριζόντια μεταφορά, τη διασπορά και τη διάχυση. Η διάχυση της θερμότητας εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα και τη θερμοχωρητικότητα του υδροφόρου ορίζοντα. Σε ένα σύνθετο μέσο, όπως ένας υδροφόρος ορίζοντας, οι ιδιότητες τόσο της υγρής όσο και της στερεάς φάσης, διαδραματίζουν σημαντικούς ρόλους στη μεταφορά θερμότητας και τελικά ελέγχουν την απόδοση ανάκτησης της αποθηκευμένης ενέργειας. Επιπλέον, η μεταφορά θερμότητας από το σύστημα υδροφόρου ορίζοντα σε παρακείμενα 'ενυδρεία', μπορεί να αποτελεί μια σημαντική διαδικασία για την αφαίρεση της θερμότητας από το σύστημα ATES. Τα 'ενυδρεία' είναι μια ζώνη εντός της γης δίπλα σε έναν υδροφόρο ορίζοντα που έχει χαμηλή διαπερατότητα και έτσι περιορίζει τη ροή των υπόγειων υδάτων από τον ένα υδροφόρο ορίζοντα στον άλλο. Ένα 'ενυδρείο' μπορεί να χρησιμεύσει ως μονάδα αποθήκευσης των υπόγειων υδάτων.

Οι χημικές αντιδράσεις που προκύπτουν από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και από την ανάμειξη του νερού έγχυσης με τα απομείναντα υπόγεια ύδατα, μπορούν να αλλάξουν το πορώδες και τη διαπερατότητα του υδροφόρου ορίζοντα, να μειώσουν καλά την αποδοτικότητα και να αυξήσουν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των εναλλακτών θερμότητας. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη δραστηριότητα των υποεπιφανειακών μικροοργανισμών, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της διαπερατότητας και σε αύξηση του κόστους συντήρησης.

### **Επέκταση εφαρμογών ATES**

Οι πηγές θερμότητας για πολλά ελπιδοφόρα συστήματα μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες ομάδες:

- **Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.** Η ηλιακή θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ATES για να παρέχει τη θερμότητα στα δίκτυα τηλεθέρμανσης, μαζί με τα εφεδρικά βοηθητικά συστήματα θέρμανσης. Η ηλιακή θερμότητα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με αντλίες θερμότητας, αποφεύγοντας την ανάγκη για βοηθητική θέρμανση. Μια άλλη χρήση ATES μπορεί να είναι για τη γεωθερμική θέρμανση, επιτρέποντας την αποθήκευση της υπερβολικής παραγωγής το καλοκαίρι και την κάλυψη των κορυφών το χειμώνα, ή για την αποθήκευση της θερμότητας αποβλήτων από τις γεωθερμικές εγκαταστάσεις παραγωγής.

- **Απόβλητα ή υπερβολική θερμότητα.** Η αποθήκευση αποχετευτικής θερμότητας από συμπαραγωγή ή βιομηχανικές διεργασίες μπορεί να απαιτείται σε εποχιακό ή άλλο κύκλο. Το ATES μπορεί επίσης να εφαρμοστεί ως εφεδρικό για διεργασίες που χρησιμοποιούν βιομηχανική θερμότητα, για την κάλυψη του θερμικού φορτίου κατά τη διάρκεια περιόδων διακοπής της βιομηχανικής διαδικασίας (για διακοπές παραγωγής, επισκευές κ.λπ.). Ομοίως, το ATES μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ισολόγηση φορτίου σε ένα σύστημα τηλεθέρμανσης, όπου το σύστημα φορτίζεται πάντα σε περιόδους χαμηλής ζήτησης θερμότητας και εκφορτώνεται κατά τη διάρκεια περιόδων θέρμανσης αιχμής.

## 2.7 Λανθάνοντα TES

Η αποτελεσματική χρήση, των εξαρτώμενων από το χρόνο, ενεργειακών πόρων απαιτεί τις κατάλληλες μεθόδους TES για να μειωθεί ο χρόνος και η ποσοστιαία αναντιστοιχία μεταξύ του ενεργειακού εφοδιασμού και της ζήτησης. Το TES παρέχει υψηλό βαθμό ευελιξίας, καθώς μπορεί να ενσωματωθεί με μια ποικιλία ενεργειακών τεχνολογιών, για παράδειγμα, ηλιακούς συλλέκτες, καυστήρες βιοκαυσίμων, αντλίες θερμότητας και γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας εκτός αιχμής.

Η μεταφορά θερμότητας που υφίσταται όταν μια ουσία αλλάζει από τη μία φάση στην άλλη ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα. Η λανθάνουσα αλλαγή θερμότητας είναι συνήθως πολύ υψηλότερη από τη λογική αλλαγή θερμότητας για ένα δεδομένο μέσο λόγω της ειδικής θερμότητάς του. Όταν το νερό μετατρέπεται σε ατμό, η λανθάνουσα αλλαγή θερμότητας είναι της τάξης των 2 MJ/kg. Τα περισσότερα πρακτικά συστήματα που χρησιμοποιούν την αποθήκευση ενέργειας αλλαγής φάσης περιλαμβάνουν λύσεις αλάτων στο νερό.

Πολλά προβλήματα συνδέονται με τέτοια συστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Υπέρψυξη του PCM, αντί για κρυστάλλωση με απελευθέρωση θερμότητας. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί εν μέρει με την προσθήκη μικρών κρυστάλλων.
- Δυσκολία κατασκευής εναλλάκτη θερμότητας ικανού να ασχοληθεί με τη συσσώρευση διαφόρων μεγεθών κρυστάλλων που επιπλέουν στο υγρό.
- Αδυναμία πλήρους αντιστροφής της λειτουργίας του συστήματος.

Κάθε λανθάνον σύστημα TES πρέπει να διαθέτει τουλάχιστον τα ακόλουθα τρία συστατικά :

- Μια ουσία αποθήκευσης θερμότητας που υποβάλλεται σε μια μετάβαση φάσης μέσα στην επιθυμητή λειτουργούσα σειρά θερμοκρασίας, και όπου ο όγκος της προστιθέμενης θερμότητας αποθηκεύεται ως λανθάνουσα θερμότητα.
- Περιορισμός της ουσίας αποθήκευσης.
- Επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας για τη μεταφορά θερμότητας από την πηγή θερμότητας στην ουσία αποθήκευσης και από την τελευταία στη ψύκτρα.

Ορισμένα συστήματα χρησιμοποιούν είτε  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ή  $\text{H}_2\text{O}$  ή  $\text{CaCl}_2$  κρύσταλλα ως μέσα αποθήκευσής τους, και χρησιμοποιούν έλαια για ανταλλαγή θερμότητας. Το λάδι αντλείται στο κάτω μέρος της αποθήκευσης και ανεβαίνει ως σφαιρίδιο μέσω του υγρού χωρίς ανάμειξη. Άλλες υποσχόμενες λανθάνουσες εφαρμογές TES είναι εκείνες των διακρυσταλλικών αλλαγών. Πολλά από αυτά λαμβάνουν χώρα σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες.

Οι εφαρμογές ηλιακής ενέργειας απαιτούν μεγάλες χωρητικότητες συστημάτων TES για να καλύψουν τουλάχιστον 1 - 2 ημέρες θερμικής ζήτησης. Αυτή η χωρητικότητα επιτυγχάνεται συνήθως με τη λογική αποθήκευση θερμότητας στις μεγάλες δεξαμενές νερού. Μια εναλλακτική λύση προσφέρεται από λανθάνοντα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, όπου η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται ως λανθάνουσα θερμότητα σε ουσίες που υποβάλλονται σε μετάβαση φάσης, όπως η θερμότητα της σύντηξης στη στερεά - υγρή μετάβαση. Το κύριο πλεονέκτημα των λανθανόντων συστημάτων TES είναι οι υψηλές χωρητικότητές τους ανά μονάδα μάζας σε σύγκριση με εκείνα των λογικών συστημάτων θερμότητας.

Οι ενώσεις άλατος που απορροφούν μια μεγάλη ποσότητα θερμότητας κατά τη διάρκεια της τήξης είναι χρήσιμες για την ενέργεια. Τα ευθηκτικά άλατα και οι ενυδατώσεις άλατος χρησιμοποιούνται ευρέως. Το Αλάτι Glauber είναι ένα κορυφαίο PCM, επειδή έχει υψηλή χωρητικότητα αποθήκευσης θερμότητας (280 kJ/kg) και θερμοκρασία αλλαγής φάσης που είναι συμβατή με τα συστήματα ηλιακής ενέργειας (31,5 C).

PCM μπορεί να περιέχεται σε ράβδους ή πλαστικούς φακέλους για να διευκολυνθεί το πάγωμα και η απόψυξη του κύκλου. Αυτές οι μικρές ενότητες και ο μικρός αριθμός ενότητων που απαιτούνται για την αποθήκευση, καθιστούν την αποθήκευση φάσης αλλαγής ιδιαίτερα κατάλληλη για χρήση στο συμβατικό σχέδιο.

Η λανθάνουσα τεχνολογία αποθήκευσης TES είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική αποθήκευσης, καθώς παρέχει υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας, είναι δεύτερη μόνο στην αποθήκευση χημικής ενέργειας, και μπορεί να αποθηκεύσει και να απελευθερώσει θερμότητα σε σταθερή θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία μετάβασης φάσης του μέσου αποθήκευσης θερμότητας.

Μια άλλη σημαντική κατηγορία υλικού, ικανή να αποθηκεύσει την ενέργεια μέσω της αλλαγής φάσης, είναι η παραφίνη. Οι παραφίνες έχουν το πλεονέκτημα της πολύ

υψηλής σταθερότητας σε σχέση με τους επαναλαμβανόμενους κύκλους λανθάνουσας λειτουργίας TES χωρίς υποβάθμιση. Διάφοροι τύποι ανταλλαγής θερμότητας έχουν χρησιμοποιηθεί για να ανακτήσουν την ενέργεια από αυτό το μέσο αποθήκευσης: ένας κυλινδρικός σωλήνας, ένας ενιαίος ακτινικός σωλήνας και ένας πολλαπλάσιος ακτινικός σωλήνας. Έχουν πραγματοποιηθεί πειραματικές δοκιμές για κάθε μία από τις διαφορετικές διαμορφώσεις και έχουν συζητηθεί τα σχετικά πλεονεκτήματα των ιδιοτήτων ανταλλαγής θερμότητας και της συνολικής ανταλλαγής ενέργειας.

### **2.7.1 Επιχειρησιακές πτυχές του λανθάνοντος TES**

Επί του παρόντος, τα προβλήματα που αφορούν την αδυναμία πλήρους αντιστροφής της διαδικασίας αποθήκευσης περιορίζουν τις πρακτικές εφαρμογές των χημικών μέσων αποθήκευσης. Αφ' ενός, τα μέσα αποθήκευσης που υποβάλλονται στις φυσικές διαδικασίες μπορούν συνήθως να έχουν αντιστρέψει συνολικά τη διαδικασία αποθήκευσης, αλλά περιλαμβάνουν λιγότερο TES ανά βάρος μονάδων της συσκευής από τη χημική αποθήκευση. Τα λανθάνοντα συστήματα TES έχουν έτσι το πλεονέκτημα της πυκνότητας σε σύγκριση με τις λογικές συσκευές TES (καθώς επίσης και το λειτουργικό πλεονέκτημα μιας σχεδόν σταθερής θερμοκρασίας αποθήκευσης κύκλων).

Μεταξύ των θερμοδυναμικών αλλαγών φάσης σε σταθερή θερμοκρασία με την απορρόφηση ή την απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας, οι πιο κατάλληλες μεταβάσεις για TES είναι οι στερεές-υγρές και στερεές-στερεές. Οι στερεές μεταβάσεις αερίου, ακόμα κι αν περιλαμβάνουν συχνά τις μεγαλύτερες αλληλεπιδράσεις θερμότητας ανά βάρος μονάδας, παρουσιάζουν το μειονέκτημα των πολύ μεγάλων αλλαγών όγκου.

Τα σημαντικότερα κριτήρια που πρέπει να πληρεί το υλικό αποθήκευσης για ένα λανθάνον TES στο οποίο το υλικό υποβάλλεται σε στερεά-υγρή ή στερεά-στερεά μετάβαση φάσης είναι τα εξής:

- υψηλή ενθαλπία μετάβασης ανά μάζα μονάδας·
- ικανότητα πλήρους αντιστροφής της μετάβασης·
- κατάλληλη θερμοκρασία μετάβασης·
- χημική σταθερότητα και συμβατότητα με το κοντέινερ (εάν υπάρχει)·
- περιορισμένη μεταβολή του όγκου με τη μετάβαση·

- μη τοξικότητα.
- χαμηλό κόστος, σε σχέση με την προβλεπόμενη αίτηση.

### **2.7.2 Υλικά αλλαγής φάσης (PCMs)**

Όταν ένα υλικό λιώνει ή εξατμίζεται, απορροφά τη θερμότητα. Όταν αλλάζει σε ένα στερεό (κρυσταλλώνει) ή σε ένα υγρό (συμπυκνώνει), απελευθερώνει αυτή τη θερμότητα. Αυτή η αλλαγή φάσης χρησιμοποιείται για την αποθήκευση θερμότητας σε PCMs. Τυπικά PCMs είναι το νερό και ο πάγος, το ενυδατωμένο αλάτι και ορισμένα πολυμερή. Δεδομένου ότι οι πυκνότητες ενέργειας για λανθάνοντα TES υπερβαίνουν εκείνες για λογικά TES, οι μικρότερες και ελαφρύτερες συσκευές αποθήκευσης και οι χαμηλότερες απώλειες αποθήκευσης οδηγούν κανονικά.

Η συμφέρουσα χρήση της λανθάνουσας θερμότητας σύντηξης ενός PCM επιτρέπει σε ένα TES να είναι μέτριο σε μέγεθος (περίπου 0,155 m<sup>3</sup> ανά τόνο για ολόκληρο το σύστημα TES, το οποίο περιλαμβάνει επικεφαλίδες σωληνώσεων και νερό στη δεξαμενή).

#### **Παραφίνες**

Ένας μεγάλος αριθμός οργανικών ενώσεων, κατάλληλων για αποθήκευση της ηλιακής θέρμανσης, έχει ερευνηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Οι πιο ελπιδοφόροι υποψήφιοι φαίνεται να είναι οι κανονικές παραφίνες. Οι στερεές –υγρές μεταβάσεις τους (συγχωνεύσεις) πληρούν ικανοποιητικά επτά σημαντικά κριτήρια για pcms. Για παράδειγμα, η θερμότητα της σύντηξης έχει μέση τιμή 35 - 40 kcal/kg, δεν υπάρχουν προβλήματα στην αντιστροφή της αλλαγής φάσης και τα σημεία μετάβασης διαφέρουν σημαντικά με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα στις αλυσίδες. Επίσης, οι κανονικές παραφίνες είναι χημικά αδρανείς, μη τοξικές, και διαθέσιμες με χαμηλό κόστος. Μόνο η αλλαγή του όγκου με τη μετάβαση, η οποία είναι της τάξης του 10%, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα μικρό πρόβλημα.

#### **Ζεολίτες**

Οι ζεολίτες είναι φυσικά ορυκτά. Λόγω της υψηλής θερμότητας προσρόφησης και της ικανότητάς τους να ενυδατώνουν και να αφυδατώνουν, διατηρώντας παράλληλα τη δομική σταθερότητα, είναι χρήσιμες σε διάφορα συστήματα θερμικής αποθήκευσης και ηλιακής ψύξης. Αυτή η υγροσκοπική ιδιότητα σε συνδυασμό με την ταχεία εξώθερμη αντίδραση που εμφανίζεται όταν οι ζεολίτες λαμβάνονται από



αφυδατωμένη σε ενυδατωμένη μορφή (όταν απελευθερώνεται η θερμότητα της προσρόφησης), καθιστά τους φυσικούς ζεολίτες ένα αποτελεσματικό υλικό αποθήκευσης για την ηλιακή ενέργεια και την ενέργεια θερμότητας αποβλήτων.

### **Επιλογή PCM για λανθάνον TES**

Κανένα υλικό δεν έχει όλα τα βέλτιστα χαρακτηριστικά για ένα PCM, και η επιλογή ενός PCM για μια δεδομένη εφαρμογή απαιτεί προσεκτική εξέταση των ιδιοτήτων των διαφόρων ουσιών. Μεταξύ των PCMs, το οξικό νάτριο αξίζει ιδιαίτερης προσοχής για τη μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης – κρυστάλλωσης (264 – 289 kJ/kg) και τη θερμοκρασία τήξης του (58 – 58,4 C). Ωστόσο, η ουσία αυτή παρουσιάζει σημαντική υπόψυξη, αποτρέποντας τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, παρόλο που έχουν γίνει προσπάθειες για την εύρεση τρόπων καταστολής ή μείωσης αυτού του φαινομένου.

Οι προσομοιώσεις ενεργειακού ισοζυγίου ενός τοίχου PCM ως TES σε παθητικό ηλιακό σπίτι άμεσης αύξησης υποδηλώνουν ότι η θερμοκρασία τήξης PCM θα πρέπει να προσαρμόζεται στη βέλτιστη θερμοκρασία που αφορά το κλίμα για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση της αποθήκευσης. Μια μη βέλτιστη θερμοκρασία τήξης μειώνει σημαντικά την λανθάνουσα ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας. Για παράδειγμα, μια θερμοκρασία μη βέλτιστης διάρκειας 3 ° C προκαλεί απώλεια 50% [17].

Πρακτικής σημασίας για την επιλογή των PCM για ηλιακές και άλλες θερμικές εφαρμογές είναι οι

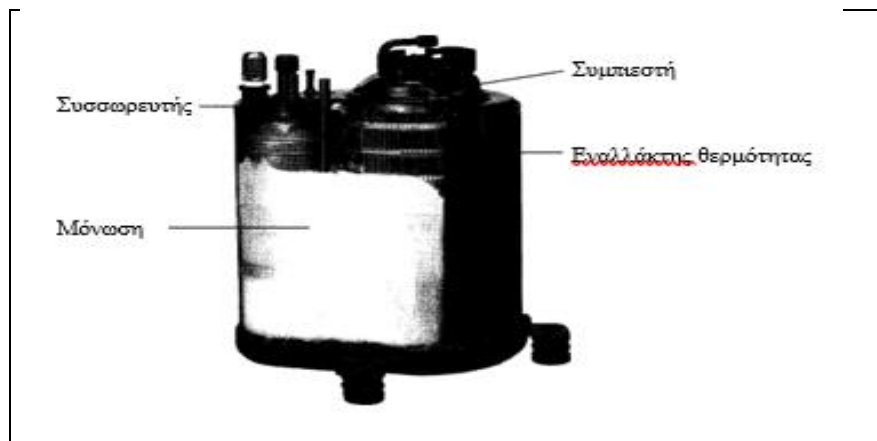
- θερμότητα της σύντηξης,
- ικανότητα θερμότητας στερεών και υγρών,
- θερμική αγωγιμότητα στερεού και υγρού, και
- πυκνότητα στερεών και υγρών.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας στην επιλογή PCM είναι η υπέρψυξη και η πυρήνωση. Αρκετά PCMs παρουσιάζουν υπέρψυξη, δηλαδή, στην προσπάθεια να παγώσει το υλικό, η θερμοκρασία πέφτει πολύ κάτω από το σημείο τήξης. Παρόλο που η θερμοκρασία ανεβαίνει στο σημείο τήξης, η υπέρψυξη είναι έτσι και αλλιώς ανεπιθύμητη σε λανθάνοντα TES, αφού μπορεί και αποτρέπει την απόσυρση της

αποθηκευμένης θερμότητας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται μερικές φορές υλικά πυρήνων.

### Λανθάνοντα TES αντλιών θερμότητας

Μια αντλία θερμότητας ενσωματώθηκε με λανθάνον TES για να επιτρέψει τη γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας δωματίου και την απόψυξη. Αυτό το inverter κλιματιστικό μηχανήμα δωματίων αντλίας θερμότητας τέθηκε στην αγορά από Daikin Industries Ltd. στην Ιαπωνία το 1989. Το λανθάνον TES αποτελείται από το PCM (πολυαιθυλενογλυκόλη), η οποία περιβάλλει ένα περιστροφικό συμπιεστή, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η θερμότητα που απελευθερώνεται από το συμπιεστή μεταφέρεται στο TES μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Το TES χρησιμοποιείται κατά την εκκίνηση και κατά την απόψυξη. Κατά τη διάρκεια της εκκίνησης, το TES μειώνει το χρόνο που απαιτείται για την επίτευξη θερμοκρασίας αέρα 45C απότομα κατά 50%. Κατά την απόψυξη, διατίθεται θερμαντική ικανότητα 3,5 kW από το TES, η οποία αποφεύγει τη μείωση της θερμοκρασίας δωματίου. Η ενσωμάτωση του συστήματος βελτίωσε την ικανότητα θερμότητας κατά περίπου 10% και το COP κατά 5%. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος βελτιώθηκαν επίσης με το TES. Ο απαιτούμενος χώρος εγκατάστασης είναι ο ίδιος με αυτόν για μια συμβατική αντλία θερμότητας ή κλιματιστικό.



Σχήμα 2.4 – Λανθάνον TES ενσωματωμένο με αντλία θερμότητας [18]

## 2.8 Αποθήκευση ψυχρής θερμικής ενέργειας CTES

Η ψυκτική ικανότητα μπορεί να αποθηκευτεί είτε με ψύξη ή κατάψυξη νερού (ή με άλλα υλικά όπως η γλυκόλη και τα ευτηκτικά άλατα). Το νερό είναι το υλικό αποθήκευσης που επιλέγεται για διάφορους πρακτικούς και θερμοδυναμικούς λόγους. Επιλέγεται κυρίως λόγω της άμεσης διαθεσιμότητάς του, της σχετικής αβλάβιας και της συμβατότητάς του με μια ευρεία διαθεσιμότητα των εξοπλισμών για την αποθήκευση και το χειρισμό του. Η επιλογή του κατά πόσον το νερό θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε λογικούς ή λανθάνοντες τύπους, ποιος εξοπλισμός θα πρέπει να χρησιμοποιείται, εάν πρέπει να εφαρμόζονται ευτηκτικά άλατα για την αύξηση των θερμοκρασιών κατάψυξης, και ούτω καθεξής, συχνά δεν είναι απλή. Οι επιλογές είναι πολυάριθμες, και οι απαντήσεις δεν είναι σαφείς. Σε τελική ανάλυση, η επιλέγουσα μέθοδος CTES πρέπει να ανταποκρίνεται στις ιδιαίτερες ανάγκες και τους περιορισμούς της συγκεκριμένης εγκατάστασης στην οποία βρίσκεται.

Το CTES είναι ένας καινοτόμος τρόπος αποθήκευσης της νυχτερινής ενέργειας εκτός αιχμής για χρήση αιχμής κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σε πολλές τοποθεσίες, η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια κορυφώνεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και κυρίως κατά τη διάρκεια των ζεστών μεσημεριανών ωρών λόγω του κλιματισμού. Τότε η ενέργεια είναι πιο ακριβή. Δεδομένου ότι, τη νύχτα, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας έχουν εφεδρική ηλεκτρική ικανότητα παραγωγής, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια της ("εκτός αιχμής"), είναι πολύ λιγότερο δαπανηρή.

Στην ουσία, μπορεί κανείς να έχει κλιματισμό κατά τη διάρκεια της ημέρας χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται τη νύχτα. Τα συστήματα CTES έχουν γίνει ένα από τα κύρια μέσα για την αντιμετώπιση της ανισορροπίας ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ της υψηλής ημερήσιας ζήτησης και της υψηλής διάρκειας της νύχτας σε αφθονία. Εάν έχουν σχεδιαστεί, εγκατασταθεί, λειτουργήσει και συντηρηθεί σωστά, τα συστήματα CTES μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετατόπιση των μέγιστων φορτίων ψύξης σε περιόδους εκτός αιχμής, κατανέμοντας έτσι ομοιόμορφα τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και αποφεύγοντας τις ελλείψεις που συνήθως συναντώνται κατά τις περιόδους αιχμής.

Αν και η φράση "cool TES" μπορεί να φαίνεται αντιφατική, δεν είναι. Η φράση TES χρησιμοποιείται ευρέως για να περιγράψει την αποθήκευση τόσο της θερμικής όσο και της ψυκτικής ενέργειας. Στα θερμικά TES συνήθως χρησιμοποιείται θερμότητα

στις ανωτέρω θερμοκρασίες περιβάλλοντος από ποικίλες πηγές, ώστε να θερμανθεί το μέσο αποθήκευσης για μεταγενέστερη χρήση. Αντίθετα, στα κρύα TES χρησιμοποιείται ενέργεια εκτός αιχμής για την παροχή ψυκτικής ικανότητας με την εξαγωγή θερμότητας από ένα μέσο αποθήκευσης, όπως πάγο, παγωμένο νερό ή PCMs. Συνήθως, ένα σύστημα CTES χρησιμοποιεί εξοπλισμό ψύξης τη νύχτα για να δημιουργήσει μια δεξαμενή ψυχρού υλικού, το οποίο χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας για την παροχή ψυκτικής ικανότητας.

Τα συστήματα CTES έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Οι χαμηλότερες νυχτερινές θερμοκρασίες επιτρέπουν στον εξοπλισμό ψύξης να λειτουργεί πιο αποτελεσματικά από ό,τι κατά τη διάρκεια της ημέρας, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, απαιτείται χαμηλότερη χωρητικότητα ψύκτη, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερο κόστος εξοπλισμού. Επίσης, χρησιμοποιώντας την εκτός αιχμής ηλεκτρική ενέργεια για την αποθήκευση ενέργειας για χρήση κατά τις ώρες αιχμής της ζήτησης, μειώνονται οι ημερήσιες κορυφές της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, αναβάλλοντας μερικές φορές την ανάγκη κατασκευής νέων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα συστήματα CTES λειτουργούν επί του παρόντος σε πολλά εμπορικά και βιομηχανικά κτίρια σε διάφορες χώρες. Μερικά δεν έχουν επιτύχει την αναμενόμενη απόδοση σχεδίου, συχνά επειδή οι μηχανικοί σχεδίου των TES και οι κατασκευαστικές επιχειρήσεις δεν είχαν την κατάλληλη εμπειρία. Τώρα, τα συστήματα TES που είναι διαθέσιμα και χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τα τύπου συσκευασίας, τα οποία περιλαμβάνουν απλούστερο σχεδιασμό και εγκατάσταση για συμβατικά συστήματα κλιματισμού.

### **2.8.1 Αρχή εργασίας**

Τα συστήματα CTES, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν σημαντική εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους, είναι πιθανότερο να είναι οικονομικώς αποδοτικά όταν

- το μέγιστο φορτίο ψύξης μιας εγκατάστασης είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέσο φορτίο·
- η διάρθρωση των επιτοκίων κοινής ωφέλειας έχει υψηλότερα τέλη ζήτησης για περιόδους αιχμής της ζήτησης·

- ένα υπάρχον σύστημα ψύξης επεκτείνεται·
- διατίθεται υπάρχουσα δεξαμενή·
- υπάρχει περιορισμένη επιτόπια ηλεκτρική ενέργεια·
- είναι επιθυμητή η εφεδρική ψυκτική ικανότητα·
- η κατανομή του ψυχρού αέρα είναι επιθυμητή ή συμφέρουσα

Είναι δύσκολο να γενικευτεί πότε τα ψυκτικά συστήματα αποθήκευσης είναι οικονομικώς αποδοτικά. Όμως αν ένα ή περισσότερα από τα παραπάνω κριτήρια πληρούνται, μια λεπτομερής ανάλυση μπορεί να αποδειχθεί ότι αξίζει τον κόπο.

Ορισμένα συστήματα CTES παράγουν πάγο κατά τις ώρες εκτός αιχμής και τον αποθηκεύουν για χρήση σε ημερήσια ψύξη. Μέχρι πρόσφατα, η μείωση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας και η πληθώρα αξιόπιστων ψυκτικών εξοπλισμών είχαν επιβραδύνει την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας, η οποία υπάρχει για περισσότερο από μισό αιώνα. Σήμερα, οι αυξήσεις στις μέγιστες απαιτήσεις ισχύος, οι σημαντικές αλλαγές στις ηλεκτρικές δομές ποσοστού, και η εμφάνιση των υποστηριγμένων προγραμμάτων κινήτρων έχουν εμπνεύσει ένα ανανεωμένο ενδιαφέρον για CTES. Για παράδειγμα, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας συχνά αντιμετωπίζουν μέγιστες ηλεκτρικές απαιτήσεις για 4 έως 6 ώρες κατά τη διάρκεια των ζεστών θερινών απογευμάτων, όταν τα φορτία κλιματισμού κορυφώνονται. Για αυτό το λόγο εφαρμόζουν τα ποσοστά χρόνου χρήσης για να αποθαρρύνουν την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων αιχμής της ζήτησης. Ένας στόχος είναι το ψυγείο αέρα να κλείσει κατά τις ώρες αιχμής και να έχει ένα σύστημα TES που παρέχει ψύξη για την εγκατάσταση εκείνη την εποχή.

Ένα σύστημα παγοσφαιρίσεων χρησιμοποιεί ψύκτες για την κατασκευή πάγου τη νύχτα. Οι μπάλες πάγου επιπλέουν σε διάλυμα γλυκόλης που περνά μέσα από ψύκτες το βράδυ. Αυτά τα ψυκτικά διαλύματα, τα οποία έχουν ρυθμιστεί σε  $-7,5$  έως  $-6,5$  C, παγώνουν τις μπάλες πάγου στις δεξαμενές αποθήκευσης και η γλυκόλη κυκλοφορεί γύρω από τις μπάλες πάγου. Η παγωμένη γλυκόλη αντλείται στο κάτω μέρος της δεξαμενής για να παγώσει τις μπάλες πάγου, ζεσταίνει καθώς αυξάνεται και εξάγει θερμότητα από τις μπάλες πάγου. Αργότερα, ο κύκλος αντιστρέφεται και η γλυκόλη αντλείται στην κορυφή της δεξαμενής. Το διάλυμα ψυχρής γλυκόλης περνά στη συνέχεια μέσω εναλλάκτη θερμότητας και συνδέεται με το σύστημα κρύου νερού

του κτιρίου, το οποίο συνδέεται με τον χειριστή αέρα. Έτσι η ψύξη επιτυγχάνεται ενώ λειτουργούν μόνο οι ανεμιστήρες στους χειριστές αέρα.

### **2.8.2 Λειτουργικό φορτίο του CTES**

Διάφορες στρατηγικές είναι διαθέσιμες για τη φόρτιση και την απαλλαγή μιας αποθήκευσης για να ικανοποιήσουν τη ζήτηση ψύξης κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής. Οι κύριες στρατηγικές είναι η πλήρης αποθήκευση και η μερική αποθήκευση.

#### **CTES πλήρους αποθήκευσης**

Μια στρατηγική πλήρους αποθήκευσης μετατοπίζει ολόκληρο το μέγιστο φορτίο ψύξης σε ώρες εκτός αιχμής. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί συνήθως για να λειτουργεί τις πιο ζεστές αναμενόμενες ημέρες σε πλήρη χωρητικότητα κατά τη διάρκεια όλων των ωρών μη ωραρίου αιχμής, προκειμένου να φορτίσει την αποθήκευση. Αυτή η στρατηγική είναι πιο ελκυστική όταν τα μέγιστα τέλη ζήτησης είναι υψηλά ή η περίοδος αιχμής είναι σύντομη.

Τα σχέδια πλήρους αποθήκευσης (μετατόπιση φορτίου) είναι εκείνα που χρησιμοποιούν την αποθήκευση για να αποσυνδέσουν πλήρως τη λειτουργία του εξοπλισμού παραγωγής θέρμανσης ή ψύξης από το μέγιστο φορτίο θέρμανσης ή ψύξης. Η μέγιστη θέρμανση ή το φορτίο ψύξης ικανοποιείται μέσω της χρήσης (δηλαδή, της αποφόρτισης) της αποθήκευσης, ενώ ο εξοπλισμός παραγωγής θέρμανσης ή ψύξης είναι αδρανής. Τα συστήματα πλήρους αποθήκευσης ενδέχεται να είναι οικονομικώς συμφέροντα μόνο υπό μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- οι αιχμές στην καμπύλη μέγιστου φορτίου είναι μικρής διάρκειας·
- οι ρυθμοί ενέργειας χρόνου χρήσης βασίζονται σε περιόδους αιχμής μικρής διάρκειας·
- υπάρχουν σύντομες επικαλύψεις μεταξύ των φορτίων αιχμής και των περιόδων αιχμής της ενέργειας·
- προσφέρονται μεγάλα χρηματικά κίνητρα για τη χρήση του TES·
- ισχύουν υψηλά τέλη μέγιστης ζήτησης.

Για παράδειγμα, ένα σχολείο ή μια επιχείρηση της οποίας η ηλεκτρική ζήτηση μειώνεται δραματικά μετά τις 5 μ.μ. και τα μέγιστα τέλη ενέργειας και ζήτησης

ισχύουν μεταξύ 1 μ.μ. και 9 μ.μ., μπορούν συνήθως να εφαρμόσουν από οικονομική άποψη ένα πλήρες CTES. Ψύξη διάρκειας 4 ωρών μεταξύ 1 μ.μ. και 5 μ.μ. μπορεί να μετατοπιστεί πλήρως, δηλαδή, μπορεί να επιτευχθεί με ένα σχετικά μικρό και οικονομικά αποδοτικό σύστημα CTES και χωρίς υπερτίμηση του εξοπλισμού ψύξης.

### **CTES μερικής αποθήκευσης**

Σε μια μέθοδο μερικής αποθήκευσης, το ψυγείο λειτουργεί για να καλύψει μέρος του φορτίου ψύξης περιόδου αιχμής, και το υπόλοιπο ικανοποιείται με την κατάρτιση από την αποθήκευση. Το ψυγείο έχει μέγεθος μικρότερης χωρητικότητας από το φορτίο σχεδιασμού. Τα συστήματα μερικής αποθήκευσης μπορούν να λειτουργούν ως εργασίες στάθμισης φόρτου ή περιορισμού της ζήτησης. Σε ένα σύστημα ισοπέδωσης φορτίου, το ψυγείο διαστασιολογείται ώστε να λειτουργεί σε πλήρη ισχύ για 24 ώρες τις θερμότερες ημέρες. Η στρατηγική είναι πιο αποτελεσματική όταν το μέγιστο φορτίο ψύξης είναι πολύ υψηλότερο από το μέσο φορτίο. Σε ένα σύστημα περιορισμού της ζήτησης, το ψυκτικό σύστημα λειτουργεί με μειωμένη χωρητικότητα κατά τις ώρες αιχμής και συχνά ελέγχεται για τον περιορισμό της μέγιστης χρέωσης ζήτησης της εγκατάστασης. Η εξοικονόμηση ζήτησης και το κόστος εξοπλισμού είναι υψηλότερο από ό,τι θα ήταν για ένα σύστημα εξισορρόπησης φόρτου και χαμηλότερο από εκείνο για ένα σύστημα πλήρους αποθήκευσης.

Η μερική αποθήκευση είναι συχνότερα η πιο οικονομική επιλογή και, ως εκ τούτου, αντιπροσωπεύει την πλειονότητα των εγκαταστάσεων θερμικής αποθήκευσης. Αν και η μερική αποθήκευση δεν μετατοπίζει τόσο πολύ φορτίο (σε μια ημέρα σχεδίου) ως σύστημα πλήρους-αποθήκευσης, τα μερικής αποθήκευσης συστήματα μπορούν να έχουν τις χαμηλότερες αρχικές δαπάνες, ιδιαίτερα εάν το σχέδιο ενσωματώνει το μικρότερο εξοπλισμό με τη χρήση των χαμηλής θερμοκρασίας συστημάτων διανομής νερού και κρύου αέρα.

Για πολλές εφαρμογές, μια μορφή μερικής αποθήκευσης γνωστή ως ισοστάθμιση φορτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ελάχιστο κόστος κεφαλαίου. Ένα σύστημα εξισορρόπησης φορτίου έχει σχεδιαστεί με τον εξοπλισμό θέρμανσης ή ψύξης, μεγέθους για συνεχή λειτουργία κοντά στην πλήρη ικανότητά του να ανταποκρίνεται στα ημερήσια φορτία σχεδιασμού. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός με ελάχιστη χωρητικότητα (και κόστος).

### 2.8.3 Θέματα σχεδιασμού

Τα CTES λαμβάνουν πολλές μορφές για να ταιριάζουν σε μια ποικιλία εφαρμογών, όπως εκτός αιχμής κλιματισμός, βιομηχανική ψύξη, εκτός αιχμής θέρμανση.

Η επιλογή ενός συστήματος αποθήκευσης και των χαρακτηριστικών του απαιτεί συνήθως μια λεπτομερή μελέτη σκοπιμότητας. Μια ανάλυση εμπλέκεται, και επιτυγχάνεται καλύτερα μετά από μια καθιερωμένη διαδικασία. Τα δεδομένα που απαιτούνται για την ανάλυση σκοπιμότητας μπορούν να περιλαμβάνουν i) ένα προφίλ 24ωρης δόμησης για την ημέρα σχεδιασμού και (ii) περιγραφή ενός βασικού συστήματος μη αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων της χωρητικότητας του ψυκτικού χώρου, των συνθηκών λειτουργίας και της αποτελεσματικότητας. Η περιγραφή ενός CTES συχνά ορίζει τα ακόλουθα:

- τη βάση μεγέθους (πλήρης αποθήκευση ή ισοπέδωση φορτίου ή περιορισμός της ζήτησης)·
- υπολογισμούς μεγέθους που δείχνουν τη χωρητικότητα του ψυκτικού διαλύτη και τη χωρητικότητα αποθήκευσης, λαμβάνοντας υπόψη την απαιτούμενη θερμοκρασία τροφοδοσίας·
- το προφίλ λειτουργίας του σχεδιασμού, που δείχνει το φορτίο, την έξοδο του ψυκτικού χώρου και την ποσότητα θερμότητας που προστίθεται ή λαμβάνεται από την αποθήκευση για κάθε ώρα της ημέρας σχεδιασμού·
- συνθήκες λειτουργίας του ψυκτικού κατά τη φόρτιση του χώρου αποθήκευσης και, κατά περίπτωση, κατά την άμεση πλήρωση του φορτίου·
- την απόδοση του ψύκτη υπό κάθε κατάσταση λειτουργίας·
- περιγραφή της στρατηγικής ελέγχου του συστήματος, για τη λειτουργία της ημέρας σχεδιασμού και του μέρους φορτίου.

Η ανάλυση λειτουργικού κόστους περιλαμβάνει

- αξιολόγηση της εξοικονόμησης ζήτησης·
- προσδιορισμό των μεταβολών της κατανάλωσης ενέργειας και του κόστους·
- περιγραφή και αιτιολόγηση των παραδοχών που χρησιμοποιούνται για τις ετήσιες εκτιμήσεις ενεργειακής ζήτησης και χρήσης.



#### 2.8.4 Επιλογή και χαρακτηριστικά μέσων αποθήκευσης σε CTES

Το μέσο αποθήκευσης καθορίζει το μέγεθος και τη διαμόρφωση της δεξαμενής αποθήκευσης, του συστήματος HVAC και των εξαρτημάτων. Οι κύριες επιλογές περιλαμβάνουν παγωμένο νερό, πάγο και ευτηκτικά άλατα. Τα συστήματα πάγου προσφέρουν την πυκνότερη χωρητικότητα αποθήκευσης, αλλά διαθέτουν τον πιο σύνθετο εξοπλισμό φόρτισης και εκκένωσης. Τα συστήματα νερού προσφέρουν τη χαμηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης, και είναι τα λιγότερο σύνθετα. Τα ευτηκτικά άλατα έχουν ενδιάμεσα χαρακτηριστικά. Ορισμένες λεπτομέρειες για κάθε μέσο αποθήκευσης είναι οι εξής:

- **Παγωμένο νερό.** Τα συστήματα ψυχόμενου νερού απαιτούν τις μεγαλύτερες δεξαμενές αποθήκευσης, αλλά μπορούν εύκολα να διασυνδεθούν με τα υπάρχοντα συστήματα ψύξης. Τα συστήματα CTES με παγωμένο νερό χρησιμοποιούν τη λογική θερμική ικανότητα του νερού για την αποθήκευση της ψυκτικής ικανότητας. Λειτουργούν σε θερμοκρασίες (3,3 - 5,5 C) και συμβαδίζουν με τυποποιημένα συστήματα ψύξης.
- **Πάγος.** Τα συστήματα πάγου χρησιμοποιούν μικρότερες δεξαμενές και προσφέρουν τη δυνατότητα χρήσης συστημάτων αέρα χαμηλής θερμοκρασίας, αλλά απαιτούν πιο σύνθετα συστήματα ψύξης. Τα συστήματα CTES πάγου χρησιμοποιούν την λανθάνουσα θερμότητα της σύντηξης νερού (335 kJ/kg) για την αποθήκευση ψυκτικής ικανότητας. Η αποθήκευση ενέργειας σε θερμοκρασία πάγου απαιτεί ψυκτικό εξοπλισμό που παρέχει υγρά φόρτισης σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από το κανονικό εύρος λειτουργίας του συμβατικού εξοπλισμού κλιματισμού. Χρησιμοποιείται ειδικός εξοπλισμός παρασκευής πάγου ή τυποποιημένα ψυκτικά ψυγεία που έχουν τροποποιηθεί για σέρβις χαμηλής θερμοκρασίας. Οι χαμηλές θερμοκρασίες ψύξης νερού που διατίθενται από την αποθήκευση πάγου επιτρέπουν τη χρήση της κατανομής του ψυχρού αέρα. Τα οφέλη αυτής περιλαμβάνουν τη δυνατότητα χρήσης μικρότερων ανεμιστήρων και αγωγών και την εισαγωγή λιγότερου υγρού αέρα σε κατειλημμένους χώρους. Με τον πάγο ως μέσο αποθήκευσης, υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες διαθέσιμες για τη φόρτιση και την απαλλαγή της αποθήκευσης. Τα συστήματα συγκομιδής πάγου χαρακτηρίζουν μια επιφάνεια εξατμιστήρα στην οποία ο πάγος διαμορφώνεται και απελευθερώνεται περιοδικά σε μια δεξαμενή αποθήκευσης που γεμίζει μερικώς με νερό. Στα εξωτερικά συστήματα πάγου σε πηνίο χρησιμοποιούνται βυθισμένοι σωλήνες μέσω των οποίων

κυκλοφορεί ψυκτικό μέσο ή δευτερεύον ψυκτικό μέσο. Ο πάγος συσσωρεύεται στο εξωτερικό των σωλήνων. Η αποθήκευση απορρίπτεται με την κυκλοφορία του θερμού νερού επιστροφής πέρα από τους σωλήνες, που λιώνουν τον πάγο από το εξωτερικό. Τα εσωτερικά συστήματα πάγου σε πηνίο λιώνουν και επίσης διαθέτουν βυθισμένους σωλήνες στους οποίους σχηματίζεται πάγος. Η αποθήκευση απορρίπτεται με την κυκλοφορία θερμού ψυκτικού μέσου μέσω των σωλήνων, λιώνοντας τον πάγο από το εσωτερικό. Το κρύο ψυκτικό μέσο αντλείται στη συνέχεια μέσω του συστήματος ψύξης του κτιρίου ή χρησιμοποιείται για να δροσίσει ένα δευτερεύον ψυκτικό μέσο που κυκλοφορεί μέσω του συστήματος ψύξης του κτιρίου. Τα έγκλειστα συστήματα πάγου χρησιμοποιούν νερό μέσα σε βυθισμένα πλαστικά δοχεία που παγώνουν και ξεπαγώνουν καθώς το κρύο ή ζεστό ψυκτικό διανέμεται μέσω της δεξαμενής αποθήκευσης που κρατά τα δοχεία. Τα συστήματα κοπριάς πάγου αποθηκεύουν διαλύματα νερού ή νερού/γλυκόλης σε κατάσταση υδαρούς κοπριάς (ένα μερικώς παγωμένο μείγμα υγρών και κρυστάλλων πάγου που μοιάζει με λάσπη). Για να ικανοποιηθεί η απαίτηση ψύξης, η υδαρής κοπριά μπορεί να αντληθεί άμεσα στο φορτίο ή σε έναν εναλλάκτη θερμότητας που δροσίζει ένα δευτερεύον ρευστό το οποίο κυκλοφορεί μέσω του συστήματος με απλή ψύξη νερού του κτιρίου. Τα εσωτερικά συστήματα πάγου σε πηνίο τήξης είναι ο συνηθέστερος τύπος τεχνολογίας αποθήκευσης πάγου στις εμπορικές εφαρμογές. Τα εξωτερικά συστήματα τήξης και συγκομιδής πάγου είναι πιο συνηθισμένα στις βιομηχανικές εφαρμογές, αν και μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε εμπορικά κτίρια και συστήματα ψύξης περιοχής. Τα έγκλειστα συστήματα πάγου είναι επίσης κατάλληλα για πολλές εμπορικές εφαρμογές. Τα συστήματα υδαρούς κοπριάς πάγου δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εμπορικές εφαρμογές.

- **Ευτηκτικά άλατα.** Τα ευτηκτικά άλατα μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα υπάρχοντα ψυκτικά αλλά λειτουργούν συνήθως σε θερμότερες θερμοκρασίες από τα συστήματα πάγου ή με απλή ψύξη-νερού. Τα ευτηκτικά άλατα χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό ανόργανων αλάτων, νερού και άλλων στοιχείων για να δημιουργήσουν ένα μείγμα που παγώνει σε επιθυμητή θερμοκρασία. Το υλικό είναι έγκλειστο στα πλαστικά εμπορευματοκιβώτια που στοιβάζονται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης μέσω της οποίας το νερό κυκλοφορεί. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μείγμα για θερμική αποθήκευση παγώνει στους 8,3 C, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση τυποποιημένου εξοπλισμού ψύξης για τη φόρτιση της αποθήκευσης, αλλά οδηγεί σε

υψηλότερες θερμοκρασίες εκκένωσης. Αυτές οι θερμοκρασίες, με τη σειρά τους, περιορίζουν τις στρατηγικές λειτουργίας που μπορούν να εφαρμοστούν. Για παράδειγμα, τα ευτηκτικά άλατα μπορούν να χρησιμοποιούνται μόνο σε πλήρη λειτουργία αποθήκευσης μόνο εάν οι απαιτήσεις αφύγρανσης είναι χαμηλές.

## 2.9 Εποχιακά TES

Πολλά συστήματα θέρμανσης, ιδίως εκείνα που χρησιμοποιούν αντλίες θερμότητας, και περιλαμβάνουν σχεδόν όλα τα ενεργά ηλιακά συστήματα θέρμανσης χώρου, ενσωματώνουν συστήματα TES ικανά να αποθηκεύουν θερμότητα από περιόδους κατά τις οποίες διατίθενται υπερβολικά ποσά, καθώς και σε περιόδους κατά τις οποίες δεν είναι διαθέσιμα ή ακριβά. Η περίοδος αποθήκευσης μπορεί να ποικίλει από μερικές ώρες για τους ημερήσιους κύκλους αποθήκευσης, σε πολλούς μήνες για τους εποχιακούς (ετήσιους) κύκλους. Τα εποχιακά TES στα ηλιακά συστήματα θέρμανσης ευνοούνται ιδιαίτερα στις θέσεις υψηλού γεωγραφικού πλάτους, όπου

- η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη περισσότερο κατά τη διάρκεια των μακρών θερινών ημερών (όταν δεν είναι απαραίτητη), απ'ό, τι κατά τη διάρκεια των σύντομων χειμερινών ημερών, (όταν πρέπει να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις θέρμανσης) και
- οι ψυχρές συνθήκες περιβάλλοντος, συχνά κάτω από 0 C, είναι διαθέσιμες κατά τη διάρκεια του χειμώνα με τις σύντομες ημέρες του, όταν δεν απαιτείται ψύξη, από ό,τι κατά τη διάρκεια των μεγάλων καλοκαιρινών ημερών, όταν πρέπει να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ψύξης χώρου.

Υπάρχει η δυνατότητα εποχιακής αποθήκευσης θερμικής ικανότητας από το καλοκαίρι μέχρι το χειμώνα στην πρώτη περίπτωση, ενώ υπάρχει η δυνατότητα εποχιακής αποθήκευσης ψυκτικής ικανότητας από το χειμώνα μέχρι το καλοκαίρι στην τελευταία περίπτωση.

### 2.9.1 Εποχιακά TES για τη θερμική ικανότητα

Το νερό αποτελεί το συχνότερο μέσο αποθήκευσης στα εποχιακά συστήματα TES επειδή μπορεί να λειτουργήσει όχι μόνο ως μέσο μεταφοράς θερμότητας αλλά και ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας. Ακόμη εξαλείφει το κόστος και τις θερμοδυναμικές απώλειες της λειτουργίας ανταλλαγής θερμότητας και ικανοποιεί τις προτιμήσεις εφαρμοσμένης μηχανικής για ένα χαμηλού κόστους, μη τοξικό, χημικά σταθερό, συγκεκριμένης θερμότητας ρευστό.

Πολλά δοχεία αποθήκευσης χρησιμοποιούνται για εποχιακά TES, συμπεριλαμβανομένων των δεξαμενών και των σπηλαίων. Οι εποχιακές απαιτήσεις αποθήκευσης για τη χωρητικότητα θέρμανσης ικανοποιούνται συχνά από μεγάλα, μονωμένα και με ζεστό νερό συστήματα.

Η βέλτιστη μορφή για τέτοιες μεγάλες δεξαμενές φαίνεται να είναι ο κυκλικός κύλινδρος με κατακόρυφο άξονα. Οι δεξαμενές αυτής της μορφής έχουν χαμηλές αναλογίες επιφάνειας προς όγκο. Χτίζονται και στηρίζονται στην επίγεια επιφάνεια, ή θάβονται μερικώς ή πλήρως. Συχνά οι κορυφές των δεξαμενών σε θαμμένες διαμορφώσεις τροποποιούνται για άλλους σκοπούς (π.χ στρωμένες για χρήση ως χώρος στάθμευσης ή διαμορφωμένες για χρήση ως πάρκο). Όλες οι απώλειες θερμότητας ή διεισδύσεις από θαμμένες δεξαμενές ρέουν μέσα από το έδαφος και τελικά φθάνουν σε μία από τις δύο ψύκτρες: διεπαφή εδάφους αέρα και υδροφόρο ορίζοντα. Σημειώνεται για αυτή την κυλινδρική γεωμετρία ότι η κατάσταση όπου το ύψος και η ακτίνα είναι περίπου ίσες, τείνει να ελαχιστοποιηθεί η συνολική απώλεια θερμότητας της δεξαμενής, καθώς δίνει την ελάχιστη αναλογία επιφάνειας προς όγκο. Το εσωτερικό της δεξαμενής καλύπτεται συχνά με ένα στρώμα μόνωσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν αναπτυχθεί και μελετηθεί διάφορες μεθοδολογίες για την ανάλυση των χαρακτηριστικών απώλειας θερμότητας, αρκετών μακροπρόθεσμων αποθηκών [19]. Ειδικότερα, η επίγεια δεξαμενή έχει ήδη λάβει την προσοχή, και έχουν αναπτυχθεί οι μεθοδολογίες σχεδιασμού για αυτή την περίπτωση. Οι θερμικές ιδιότητες του εδάφους γύρω από τη δεξαμενή, εξαρτώνται μερικές φορές από τη θέση, το χρόνο, και τη θερμοκρασία. Παραδείγματος χάριν, οι αλλαγές στην περιεκτικότητα σε υγρασία χώματος μπορούν να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια των βροχών ή της τήξης του χιονιού και του πάγου, και μπορούν να αλλάξουν τις θερμικές ιδιότητες του χώματος.

### **2.9.2 Εποχιακά TES για τη ψυκτική ικανότητα**

Πολλά συστήματα εποχιακής αποθήκευσης κρύου έχουν προταθεί και δοκιμαστεί. Τα περισσότερα από αυτά βασίζονται στην αποθήκευση πάγου, και ισχύουν σε κλίματα όπου οι θερμοκρασίες είναι κάτω από 0 C για μεγάλο μέρος του χειμώνα.

Σε ένα σύστημα, ένα κατάστημα πάγου χτίζεται καθ' όλη τη διάρκεια του χειμώνα με τον ψεκασμό του νερού σε μια δεξαμενή, που εκτίθεται στην περιβαλλοντική ατμόσφαιρα όταν οι συνθήκες είναι κατάλληλες για το παγωμένο νερό. Κατά τη

διάρκεια άλλων χρόνων, η δεξαμενή, η οποία είναι μονωμένη, είναι κλειστή. Το καλοκαίρι, όταν απαιτείται ψύξη χώρου, ο πάγος επιτρέπεται να λιώσει και το κρύο νερό κυκλοφορεί όπως απαιτείται για την ψύξη. Η δεξαμενή έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει αρκετό πάγο που θα δημιουργηθεί το χειμώνα για να καλύψει τις περισσότερες ή όλες τις ανάγκες ψύξης του καλοκαιριού. Ένα τέτοιο σύστημα έχει δοκιμαστεί στην Οτάβα του Καναδά.

## 2.10 Καταληκτικές παρατηρήσεις

Αν και η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί με πολλούς τρόπους (π.χ., σε μηχανικές, κινητικές ή χημικές μορφές), δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος της οικονομίας περιλαμβάνει θερμική ενέργεια, η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Το TES ασχολείται με την αποθήκευση ενέργειας με ψύξη, θέρμανση, τήξη, στερεοποίηση ή εξάτμιση ενός υλικού, με την ενέργεια να καθίσταται διαθέσιμη ως θερμότητα όταν αντιστρέφεται η διαδικασία. Το TES είναι μια προσωρινή αποθήκευση ενέργειας υψηλής ή χαμηλής θερμοκρασίας για μελλοντική χρήση. Υπάρχουν κυρίως δύο τύποι συστημάτων TES: λογικοί (π.χ. νερό και βράχοι) και λανθάνοντες (π.χ. ένυδρες ουσίες πάγου και αλατιού). Η αποθήκευση με την πρόκληση ενός υλικού, ώστε να αυξηθεί ή να μειωθεί η θερμοκρασία του, καλείται λογική αποθήκευση θερμότητας. Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από την ειδική θερμότητα του υλικού και, εάν ο όγκος είναι σημαντικός, την πυκνότητα του υλικού αποθήκευσης. Η αποθήκευση από την αλλαγή φάσης, η μετάβαση από στερεό σε υγρό ή από το υγρό στον ατμό χωρίς την αλλαγή στη θερμοκρασία, είναι γνωστή ως λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας.

Η βραχυπρόθεσμη αποθήκευση (ημερήσια αποθήκευση) χρησιμοποιείται για τη διαχείριση φορτίων μέγιστης ισχύος από λίγες ώρες έως μία ημέρα, προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος των συστημάτων ή και να αξιοποιηθούν τα τιμολόγια ενέργειας. Η μεσοπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη αποθήκευση είναι πιο συχνή όταν τα φορτία θερμότητας ή εποχιακής ενέργειας μπορούν να μεταφερθούν, με καθυστέρηση μερικών εβδομάδων έως αρκετούς μήνες, για την κάλυψη εποχιακών αναγκών. Αυτός ο τύπος TES ονομάζεται εποχιακή ή ετήσια αποθήκευση.

Η επιλογή των συστημάτων TES εξαρτάται κυρίως από την απαιτούμενη περίοδο αποθήκευσης (π.χ. ημερήσια ή εποχιακή), την οικονομική βιωσιμότητα, τις συνθήκες λειτουργίας κ.ο.κ. Ορισμένες παράμετροι που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα ενός TES

περιλαμβάνουν θερμικά φορτία εγκαταστάσεων, θερμικά και ηλεκτρικά προφίλ φορτίου, διαθεσιμότητα αποβλήτων ή υπερβολική θερμική ενέργεια, ηλεκτρικό κόστος και δομές ρυθμού, τύπο θερμικού εξοπλισμού παραγωγής και τύπο κτιρίου και πληρότητα. Η οικονομική αιτιολόγηση των συστημάτων TES συνήθως απαιτεί το ετήσιο κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας να είναι μικρότερο από το κόστος για τον πρωτογενή εξοπλισμό παραγωγής που παρέχει τα ίδια φορτία και περιόδους εξυπηρέτησης. Η ουσιαστική ενέργεια που εξοικονομείται μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εκμετάλλευση του TES, όπως η χρήση της ενέργειας αποβλήτων και της θερμότητας πλεονάσματος, η μείωση των ηλεκτρικών δαπανών απαίτησης, και η αποφυγή των αγορών εξοπλισμού θέρμανσης, ψύξης, ή κλιματισμού.

Σήμερα τα συστήματα TES θεωρούνται προηγμένη ενεργειακή τεχνολογία. Η χρήση των συστημάτων TES έχει προσελκύσει όλο και περισσότερο ενδιαφέρον για διάφορες θερμικές εφαρμογές, όπως, ενεργητική και παθητική ηλιακή θέρμανση, θέρμανση νερού, ψύξη και κλιματισμό. Τα TES είναι συχνά η πιο οικονομική τεχνολογία αποθήκευσης για εφαρμογές HVAC.

Για τις ηλιακές θερμικές εφαρμογές, η χρήση των συστημάτων TES είναι απαραίτητη λόγω των διακυμάνσεων στην εισαγωγή ηλιακής ενέργειας. Διάφορες κατηγορίες αποθήκευσης μπορεί να απαιτηθούν για μία μόνο εγκατάσταση, ανάλογα με τον τύπο και την κλίμακα του σταθμού ηλιακής ενέργειας, καθώς και τη φύση της ενσωμάτωσής του με τα συμβατικά συστήματα κοινής ωφέλειας. Το TES μπορεί να συμβάλει στη διόρθωση της αναντιστοιχίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης ενέργειας και μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην κάλυψη των αναγκών της κοινωνίας για πιο αποδοτική, περιβαλλοντικά καλοήθη χρήση ενέργειας. Έτσι, η τεχνολογία TES διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ενέργειας και μπορεί να αποφέρει σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων υψηλής ποιότητας.

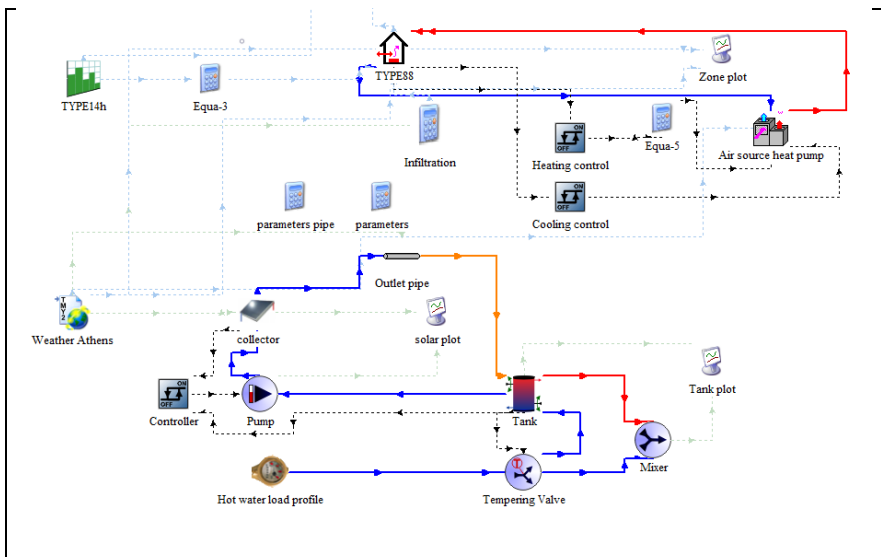
Το TES παρουσιάζει τεράστιες δυνατότητες και καταστεί τη χρήση του εξοπλισμού θερμικής ενέργειας πιο αποτελεσματική. Απαιτείται ένα συντονισμένο σύνολο δράσεων σε διάφορους τομείς ενεργειακών συστημάτων προκειμένου να υλοποιηθούν τα μέγιστα οφέλη της αποθήκευσης [20].

## 3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

### 3.1. Γενικά

#### 3.1.1. Γενική Επισκόπηση Μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η μικροσυμπαγωγή είναι μία τεχνολογία η οποία αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος πολλών ερευνητών. Στην παρούσα μελέτη θα παρουσιαστεί η μοντελοποίηση ενός ενεργειακού συστήματος που έχει ως σκοπό την εξυπηρέτηση των θερμικών αναγκών και του ζεστού νερού χρήσης μίας οικίας χωρίς τη χρήση κάποιου οργανικού καυσίμου. Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση ηλιακών συλλεκτών και αντλίας θερμότητας για το ζεστό νερό χρήσης και τις θερμικές ανάγκες αντίστοιχα. Η μοντελοποίηση αυτή γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού TRNSYS.



Σχήμα 3.1- Μοντέλο του παρόντος ενεργειακού συστήματος

#### 3.1.2. Γενική Επισκόπηση TRNSYS

Το λογισμικό TRNSYS χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε αυτή την πτυχιακή εργασία. Το TRNYS αποτελεί ένα εμπορικό λογισμικό πακέτο το οποίο είναι βασισμένο σε στοιχεία λογισμικού προσομοίωσης και αναπτύχθηκε στα εργαστήρια ηλιακών ενεργειακών συστημάτων του πανεπιστημίου Wisconsin κατά τη δεκαετία του 1970.

Χρησιμοποιείται κυρίως στους τομείς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και της προσομοίωσης κτιρίων τόσο για παθητικό όσο και για ενεργητικό ηλιακό σχεδιασμό. Μία από τις πρωτότυπες εφαρμογές ήταν η πραγματοποίηση δυναμικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς ενός ηλιακού συστήματος ζεστού νερού για ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος, ώστε να μπορεί να διαπιστωθεί η μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση κόστους ενός τέτοιου συστήματος [14].

Το πρόγραμμα καλεί υπορουτίνες FORTRAN οι οποίες αντιπροσωπεύουν κάθε στοιχείο που έχει υποστεί μοντελοποίηση. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι επαναληπτική, με στοιχεία που καλούνται σε μια προκαθορισμένη ακολουθία για έναν καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων ή μέχρι να επιτευχθεί η ανοχή σύγκλισης. Χρησιμοποιώντας το προσομοιωτικό στούντιο για την κατασκευή του μοντέλου αυτοματοποιείται η διαδικασία σύνδεσης των εξόδων και των εισροών εξαρτημάτων.

Το TRNSYS διαθέτει μια εσωτερική βιβλιοθήκη εξαρτημάτων για μια ποικιλία εφαρμογών. Αυτά τα στοιχεία περιλαμβάνουν βοηθητικές εφαρμογές όπως εκτυπωτές, plotters και ολοκληρωτές τιμών καθώς και εξαρτήματα HVAC, ηλεκτρονικά, υδραυλικά και πολλά άλλα. Εκτός από αυτήν την προεπιλεγμένη βιβλιοθήκη, ο διανομέας ειδικών θερμικών ενεργειακών συστημάτων (TESS) διαθέτει μια εκτεταμένη βιβλιοθήκη βελτιωμένη και τροποποιημένη με πρόσθετα εξαρτήματα. Τέλος, λόγω της φύσης των συστατικών στοιχείων TRNSYS, ο χρήστης μπορεί να αναπτύξει νέα στοιχεία που καλούνται χωρίς να χρησιμοποιηθεί ο πηγαίος κώδικας οποιουδήποτε φυσικού στοιχείου. Οι βιβλιοθήκες TRNSYS περιλαμβάνουν επίσης στοιχεία με τα οποία συνδέονται διάφορα εξωτερικά προγράμματα, όπως το Matlab, το EES και το Excel.

Το TRNSYS συνδυάζει τη μεταβατική μοντελοποίηση του ενεργειακού συστήματος με τη μοντελοποίηση κτιρίων. Το λογισμικό οικοδόμησης που συνοδεύει το TRNSYS ονομάζεται TRNBuild και συνδέεται με το TRNSYS μέσω του στοιχείου τύπου 56 [22]. Το TRNBuild μοντελοποιεί κτίρια ως μια συλλογή από διασυνδεδεμένες θερμικές μάζες, που ονομάζονται ζώνες. Κάθε ζώνη έχει όγκο, θερμική χωρητικότητα και οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες περιλαμβάνουν υλικά τοιχώματος, παρακείμενες περιοχές, ρυθμούς εξαερισμού και διήθησης και προσανατολισμό. Αυτό θα εξεταστούν λεπτομερέστερα στην περιγραφή του μοντέλου κτιρίου. Επίσης, στις ζώνες δίνονται κέρδη, προγραμματισμένα ή σταθερά, για να μιμούνται τα θερμικά κέρδη που προκαλούνται τη χρήση. Οι ζώνες αντιμετωπίζονται ως



ισοτροπικές μάζες, που σημαίνει ότι τιμές όπως η διήθηση μεταξύ των ζωνών προσεγγίζονται και δεν είναι απευθείας υπολογισμένες.

Σε οποιαδήποτε προσομοίωση που απαιτεί δεδομένα καιρού, το TRNSYS έχει ένα εγγενές στοιχείο για να διαβάσει ένα αρχείο TMY2. Τα τυπικά δεδομένα μετεωρολογικών ετών παρέχονται από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL) και προέρχονται από δεδομένα που συλλέχθηκαν μεταξύ 1961-1990. Κάθε μήνας TMY2 είναι δεδομένα από έναν πραγματικό μήνα, που επιλέχθηκαν ως ο πιο "μέσος" των ετών που περιλαμβάνονται [15]. Αυτό σημαίνει ότι ενώ τα δεδομένα είναι πραγματικά δεδομένα καιρού και έχουν την εγγενή ποικιλομορφία των πραγματικών καιρικών συνθηκών, δεν είναι εξαιρετικά. Επομένως, οι προσομοιώσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας τα τυπικά πρότυπα καιρού διαφόρων Ηνωμένων Πολιτειών και διεθνών τοποθεσιών για τις οποίες έχουν συλλεγεί δεδομένα.

### 3.1.3. Δεδομένα - Σκοπός

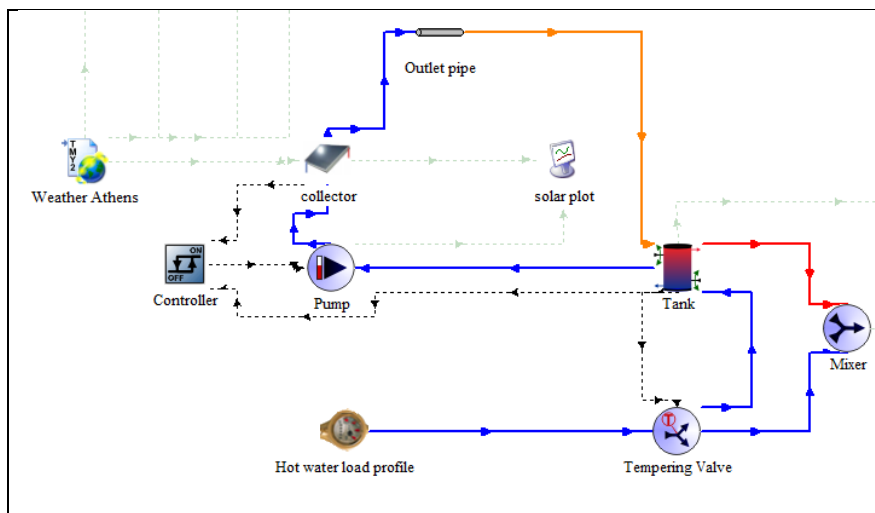
Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία χρησιμοποιούνται τα πρότυπα του καιρού για την πόλη της Αθήνας στην Ελλάδα. Η επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών είναι  $A_{coll} = 4m^2$ , η μέγιστη παροχή του ρευστού που διέρχεται από την αντλία είναι  $m_d = 230 \frac{kg}{hr}$  και η χωρητικότητα της δεξαμενής είναι  $V_{tank} = 300 lt$ . Σκοπός αυτής της μελέτης είναι το εξερχόμενο ζεστό νερό χρήσης από τη δεξαμενή να μην ξεπερνά τους  $45^\circ C$  και η θερμοκρασία στο χώρο του σπιτιού να κυμαίνεται από  $22$  ως  $24^\circ C$ .

## 3.2 Ενεργειακό σύστημα ζεστού νερού χρήσης

### 3.2.1. Γενικά

Το μοντέλο του συστήματος ζεστού νερού χρήσης αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες, την αντλία, τη δεξαμενή νερού καθώς και από κάποια άλλα δευτερεύοντα αλλά εξίσου σημαντικά στοιχεία όπως το προφίλ φορτίου ζεστού νερού, τη βαλβίδα

σκλήρυνσης, το μίκτη και το σωλήνα εξόδου από τον οποίο διέρχεται το ρευστό από τους ηλιακούς συλλέκτες προς τη δεξαμενή νερού.



Σχήμα 3.2- Μοντέλο του συστήματος ζεστού νερού χρήσης

### 3.2.2. Προφίλ φορτίου ζεστού νερού

Σε μια παροδική προσομοίωση, μερικές φορές είναι βολικό να χρησιμοποιείται μια χρονική συνάρτηση αναγκαστικής λειτουργίας η οποία έχει μια συμπεριφορά που χαρακτηρίζεται από ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο. Το μοτίβο της λειτουργίας εξαναγκασμού καθορίζεται από ένα σύνολο με διακριτά σημεία δεδομένων που δείχνουν την τιμή της συνάρτησης σε διάφορους χρόνους σε έναν κύκλο. Παρέχεται γραμμική παρεμβολή προκειμένου να δημιουργηθεί μια συνεχής λειτουργία εξαναγκασμού από τα διακριτά δεδομένα. Ο κύκλος θα επαναλαμβάνεται κάθε  $N$  ώρες όπου  $N$  είναι η τελευταία τιμή του καθορισμένου χρόνου. Η συγκεκριμένη έκδοση του εξαρτήματος χρησιμοποιεί μονάδες  $\frac{kg}{hr}$  έτσι ώστε να είναι πιο χρήσιμη για τη δημιουργία λειτουργιών εξαναγκασμού νερού. Το προφίλ του φορτίου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

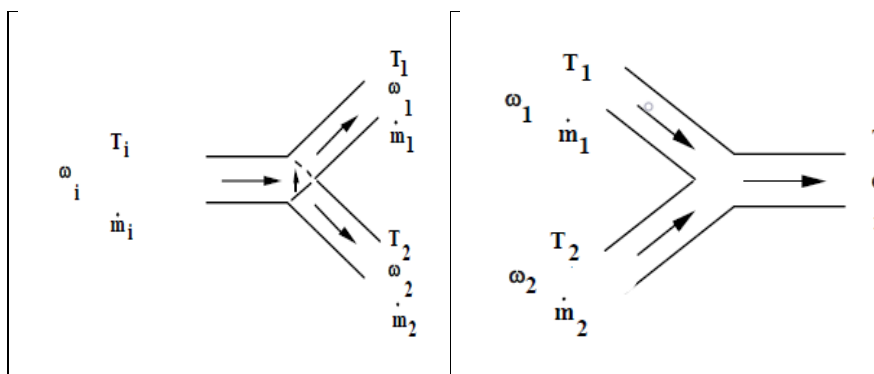
Πίνακας 1. Προφίλ φορτίου ζεστού νερού

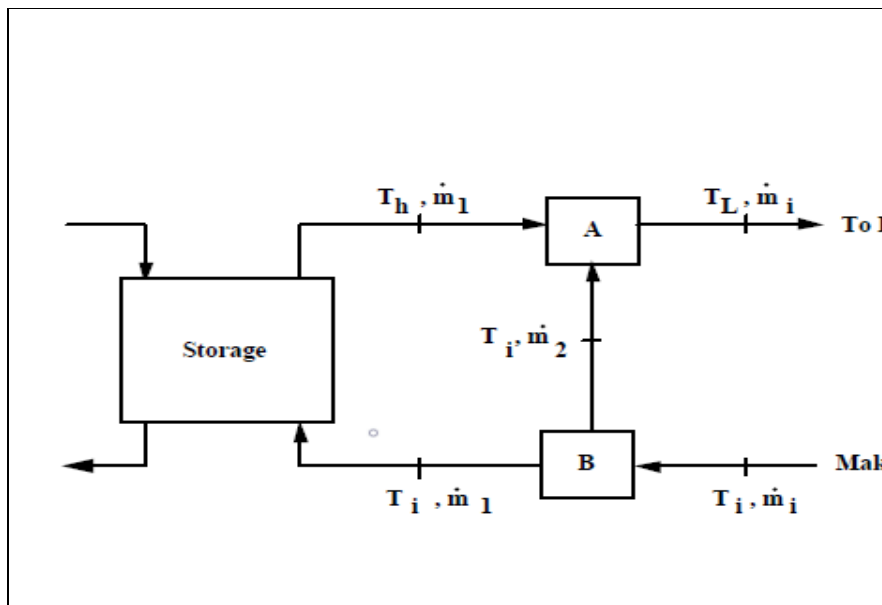
Ωρα	Παροχή( kg/hr )
7 am – 9 am	80

12 pm – 1 pm	100
5 pm – 10 pm	50

### 3.2.3. Βαλβίδα σκλήρυνσης – Μίκτης

Η χρήση βαλβίδων σκλήρυνσης και μικτών που υπόκεινται σε εξωτερικό έλεγχο είναι συχνά απαραίτητη σε θερμικά συστήματα. Στο συγκεκριμένο μοντέλο η βαλβίδα σκλήρυνσης λειτουργεί ως εκτροπέας ροής ελεγχόμενης θερμοκρασίας από τη δεξαμενή νερού. Δέχεται ως είσοδο το προφίλ φορτίου νερού και το εκτρέπει σε δύο ρεύματα τα οποία οδηγούν στη δεξαμενή νερού και στη μίκτη. Στο μίκτη αναμιγνύονται δύο ρεύματα εισόδου του ίδιου υγρού σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Το "ζεστό" ρεύμα προέρχεται από την κορυφή της δεξαμενής ενώ το "κρύο" από τη βαλβίδα σκλήρυνσης. Στην έξοδο του μίκτη καταλήγει το ρεύμα της επιθυμητής θερμοκρασίας για το ζεστό νερό χρήσης.





Σχήμα 3.3- Βαλβίδα σκλήρυνσης (πάνω αριστερά), μίκτης (πάνω δεξιά) και παράδειγμα χρήσης βαλβίδας σκλήρυνσης.

### 3.2.4. Αντλία – Ελεγκτής

Η αντλία τύπου 110 που έχουμε επιλέξει αφορά μια αντλία μεταβλητής ταχύτητας που είναι σε θέση να διατηρεί οποιοδήποτε ρυθμό ροής μάζας εξόδου μεταξύ μηδέν και ονομαστικής τιμής. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η μέγιστη παροχή που διέρχεται από την αντλία είναι  $m_d = 230 \frac{kg}{hr}$ . Ο ρυθμός ροής μάζας της αντλίας ποικίλλει γραμμικά με τη ρύθμιση σήματος ελέγχου. Η αντλία δε χρειάζεται να λειτουργεί συνεχώς, παρά μόνο όταν υπάρχει σημαντική θερμοκρασιακή διαφορά στον ηλιακό συλλέκτη. Στη βιβλιοθήκη του TRNSYS υπάρχουν στοιχεία τα οποία επιτρέπουν σε μία μηχανή να λειτουργεί συγκεκριμένες ώρες μέσα στη μέρα. Στο παρόν μοντέλο χρησιμοποιείται όμως ελεγκτής τύπου 2 ο οποίος ελέγχει τη λειτουργία της αντλίας με σήματα ON/OFF. Επειδή όμως η αντλία δε γίνεται να ανοιγοκλείνει συνεχώς, ο έλεγχός της γίνεται με τη βοήθεια δύο “νεκρών ζωνών” θερμοκρασιακών διαφορών, όπως φαίνεται παρακάτω.

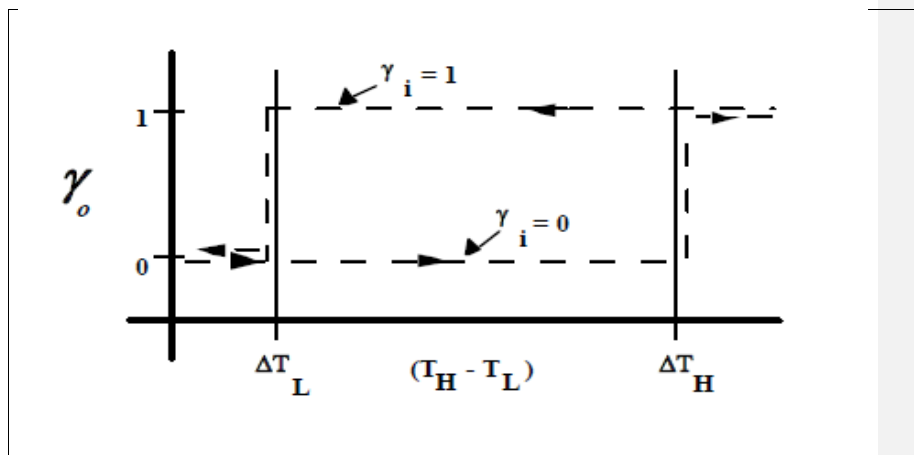
Πίνακας 2. Λειτουργία αντλίας με ελεγκτή

Προηγούμενος η αντλία ήταν κλειστή	Προηγούμενος η αντλία ήταν ανοικτή
------------------------------------	------------------------------------

$\Delta T_H \leq T_H - T_L, \gamma_0 = 1$	$\Delta T_L \leq T_H - T_L, \gamma_0 = 1$
$\Delta T_H > T_H - T_L, \gamma_0 = 0$	$\Delta T_L > T_H - T_L, \gamma_0 = 0$

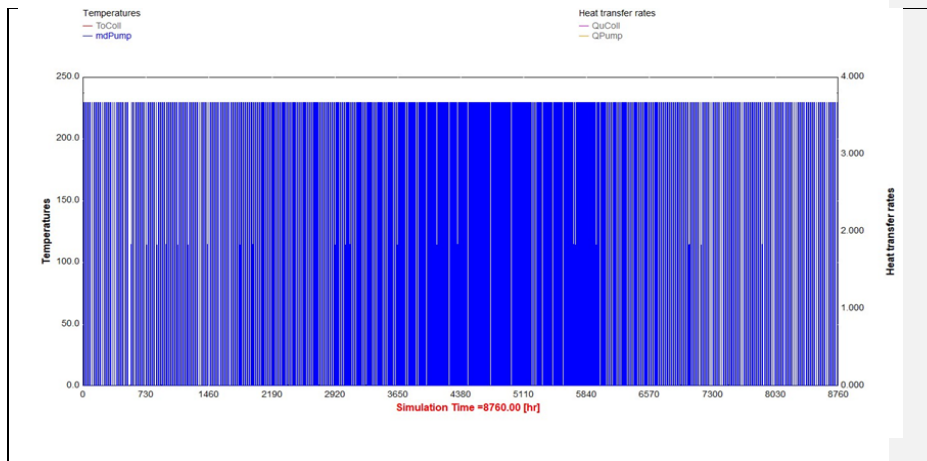
Όπου :

- $\Delta T_H$  [°C] = 10 : θερμοκρασιακή διαφορά πάνω νεκρής ζώνης
- $\Delta T_L$  [°C] = 2 : θερμοκρασιακή διαφορά κάτω νεκρής ζώνης
- $T_H$  [°C] : εξερχόμενη θερμοκρασία από ηλιακό συλλέκτη
- $T_L$  [°C] : εξερχόμενη θερμοκρασία από τα κάτω στρώματα της δεξαμενής
- $\gamma_0$  : σήματα ελέγχου τύπου 0 , 1.

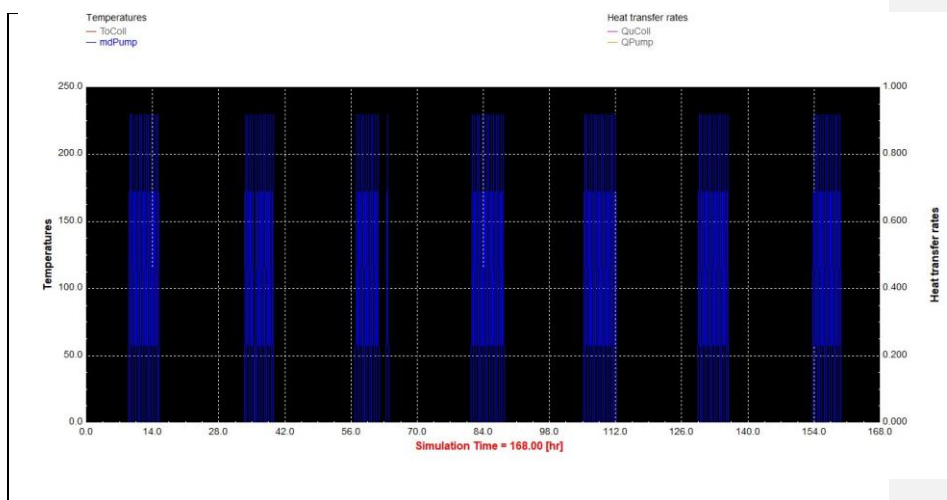


Σχήμα 3.4 – Λειτουργία ελεγκτή

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η διακύμανση της παροχής μάζας που διέρχεται από την αντλία στη διάρκεια ενός έτους.



Σχήμα 3.5- Παροχή μάζας (kg/hr) αντλίας στη διάρκεια ενός έτους  
 Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας της αντλίας ακολουθεί διάγραμμα στο οποίο αναλύεται η παροχή μάζας στη διάρκεια μίας εβδομάδας.

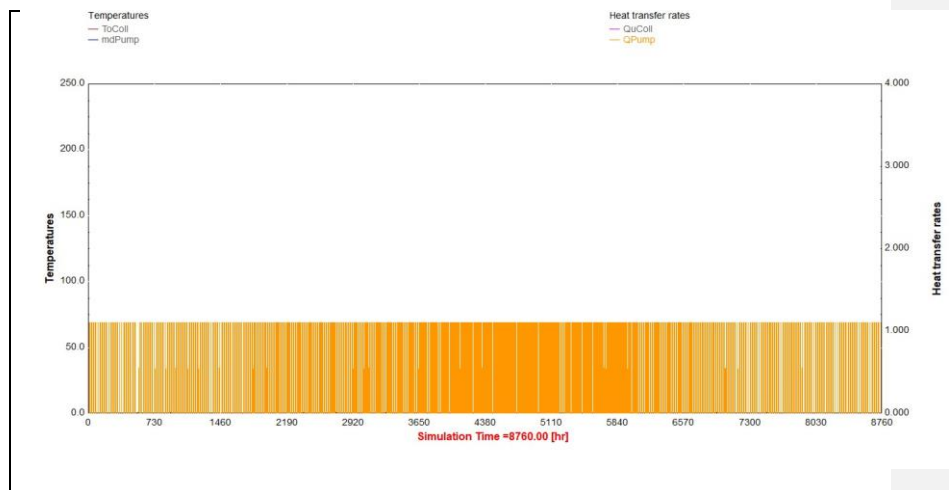


Σχήμα 3.6- Παροχή μάζας (kg/hr) αντλίας στη διάρκεια μίας εβδομάδας

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται καλύτερα η διακύμανση της διερχόμενης από την αντλία παροχής μάζας μέσα στη μέρα. Η αντλία όταν είναι ανοικτή φαίνεται να λειτουργεί στην ονομαστική της τιμή, ενώ κάθε φορά που η θερμοκρασιακή διαφορά πέφτει κάτω από 2 °C η αντλία κλείνει. Χάρη σε αυτή τη

στρατηγική ελέγχου κατά τη διάρκεια της νύκτας , όπου η θερμοκρασιακή διαφορά στους ηλιακούς συλλέκτες δεν είναι θετική , η αντλία παραμένει κλειστή.

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η κατανάλωση ενέργειας της αντλίας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Όπως διακρίνεται , η μέγιστη τιμή της δεν ξεπερνά τα 1.11 KW.



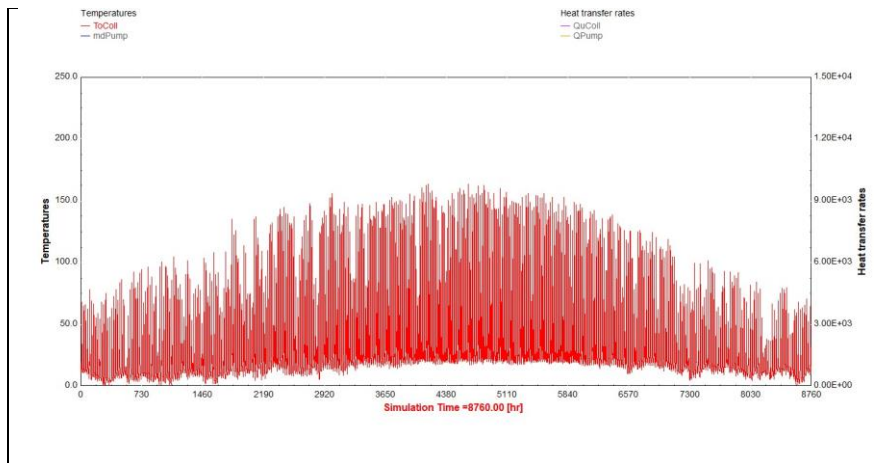
Σχήμα 3.7 – Κατανάλωση ενέργειας αντλίας  $Q_{pump}$  (KW)

### 3.2.5. Ηλιακοί συλλέκτες

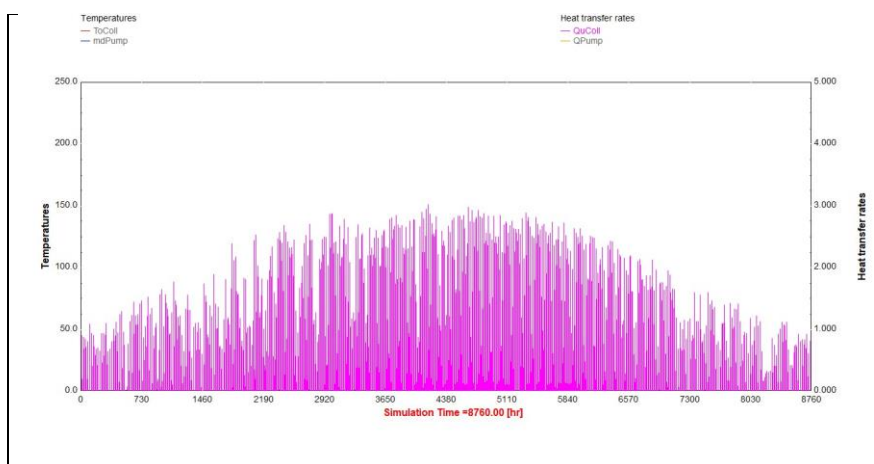
Οι ηλιακοί συλλέκτες που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο είναι τύπου 1 τετραγωνικής απόδοσης. Αυτό το εξάρτημα μοντελοποιεί τη θερμική απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη επίπεδης πλάκας. Η συστοιχία ηλιακών συλλεκτών μπορεί να αποτελείται από συλλέκτες συνδεδεμένους σε σειρά και παράλληλα. Η θερμική απόδοση της συστοιχίας συλλεκτών καθορίζεται από τον αριθμό των μονάδων σε σειρά και τα χαρακτηριστικά κάθε μονάδας. Η θερμοκρασία υγρού μπορεί να είναι η θερμοκρασία εισόδου, η μέση θερμοκρασία ή η θερμοκρασία εξόδου. Στον τύπο 1, υπάρχουν 5 δυνατότητες για την εξέταση των επιπτώσεων της μη φυσιολογικής ηλιακής συχνότητας. Σε αυτήν την περίπτωση του τύπου 1 χρησιμοποιείται μια τετραγωνική συνάρτηση δεύτερης τάξης για τον υπολογισμό του τροποποιητή γωνίας συχνότητας.

Έχοντας ως επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών  $A_{coll} = 4m^2$  και χρησιμοποιώντας ως εργαζόμενο μέσο το νερό, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα τα οποία αφορούν την εξερχόμενη θερμοκρασία του υγρού από τους ηλιακούς συλλέκτες και τα θερμικά κέρδη ενέργειας για ένα ολόκληρο έτος.



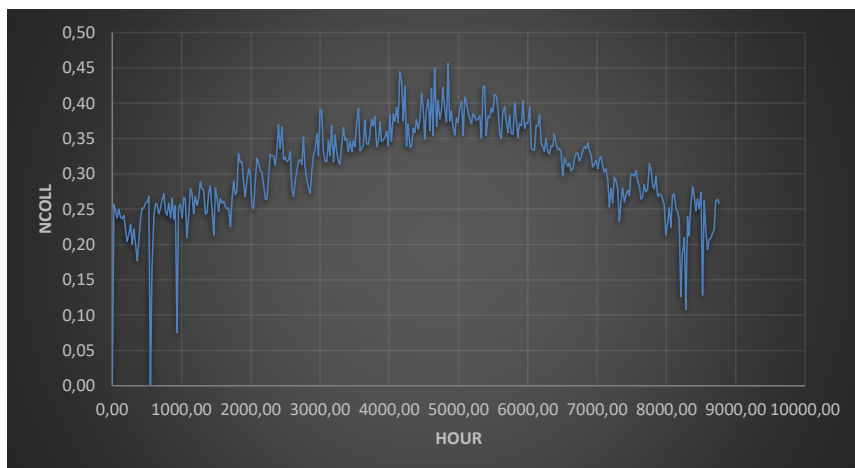


Σχήμα 3.8 – Εξερχόμενη θερμοκρασία υγρού από ηλ. συλλέκτες  $T_{0coll}$  (C)

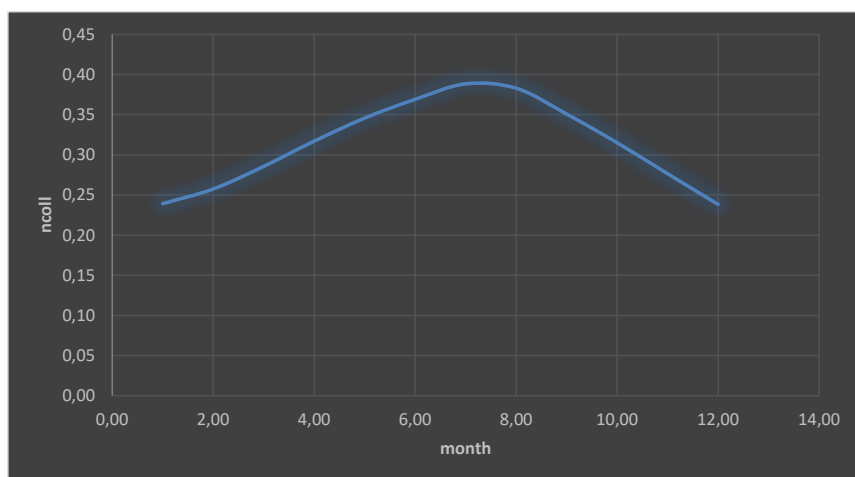


Σχήμα 3.9 – Θερμικά κέρδη ενέργειας ηλ. συλλέκτη  $Q_U$  (KW)

Όπως παρατηρείται κατά τους θερινούς μήνες η θερμική ενέργεια αυξάνεται και σε ορισμένες περιπτώσεις πλησιάζει τα 3 KW. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθούν και να παρουσιαστούν η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών ημερησίως και μηνιαίως καθώς και η μέση μηνιαία θερμοκρασία τους. Η απόδοση προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:  $n_{coll} = \frac{\text{θερμική ενέργεια}}{\text{ηλιακή ακτινοβολία}} = \frac{Q_U}{IT \cdot A_{coll} + 0.0001}$ , όπου 0.0001 χρησιμοποιείται για τις νυχτερινές ώρες κατά τις οποίες η ακτινοβολία είναι 0.

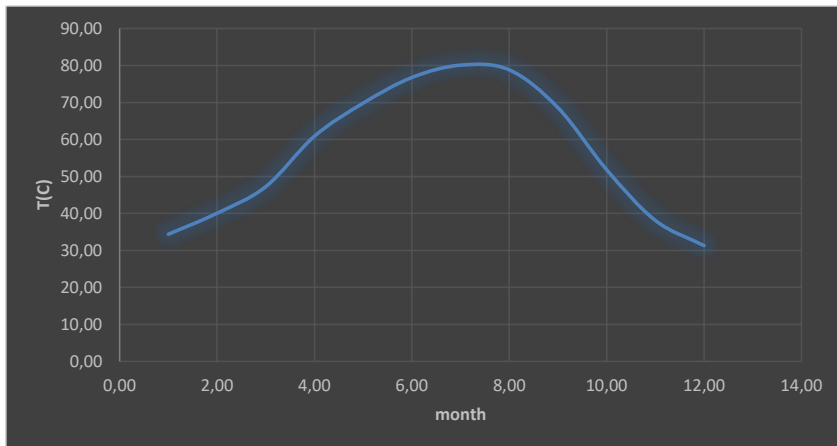


Σχήμα 3.10 – Ημερήσια απόδοση ηλ. συλλεκτών



Σχήμα 3.11 – Μηνιαία απόδοση ηλ. συλλεκτών

Σε ημερήσια κλίμακα η απόδοση των συλλεκτών φτάνει τη μέγιστη τιμή 0.46 ενώ σε μηνιαία έχει ως μέγιστη τιμή 0.39. Οι δύο αυτές τιμές σημειώνονται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.



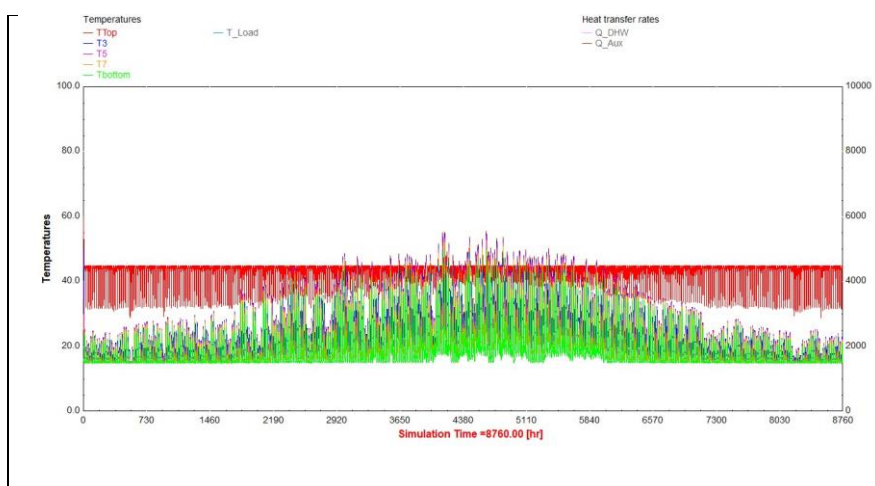
Σχήμα 3.12 – Μέση μηνιαία θερμοκρασία ηλ. συλλεκτών

### 3.2.6. Σωλήνας εξόδου

Αυτό το εξάρτημα διαμορφώνει τη θερμική συμπεριφορά της ροής ρευστού σε σωλήνα ή αγωγό χρησιμοποιώντας τμήματα υγρού μεταβλητού μεγέθους. Η είσοδος υγρού από τους ηλιακούς συλλέκτες αλλάζει τη θέση των υπαρχόντων τμημάτων. Η μάζα του νέου τμήματος ισούται με το ρυθμό ροής όσες φορές το χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Η θερμοκρασία του νέου τμήματος είναι εκείνη του εισερχόμενου υγρού. Η έξοδος αυτού του σωλήνα είναι μια συλλογή των στοιχείων που ωθούνται από τη ροή εισόδου. Αυτό το μοντέλο plug-flow δεν λαμβάνει υπόψη ανάμιξη ή αγωγή μεταξύ γειτονικών στοιχείων. Επιτρέπονται έως 25 τμήματα στο σωλήνα. Όταν επιτυγχάνεται το μέγιστο, τα δύο γειτονικά τμήματα με τις πλησιέστερες θερμοκρασίες συνδυάζονται για να φτιάξουν ένα τμήμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι για μήκος και διάμετρο σωλήνα έχουμε αντίστοιχα  $L = 10 \text{ m}$  και  $D = 0.02 \text{ m}$ .

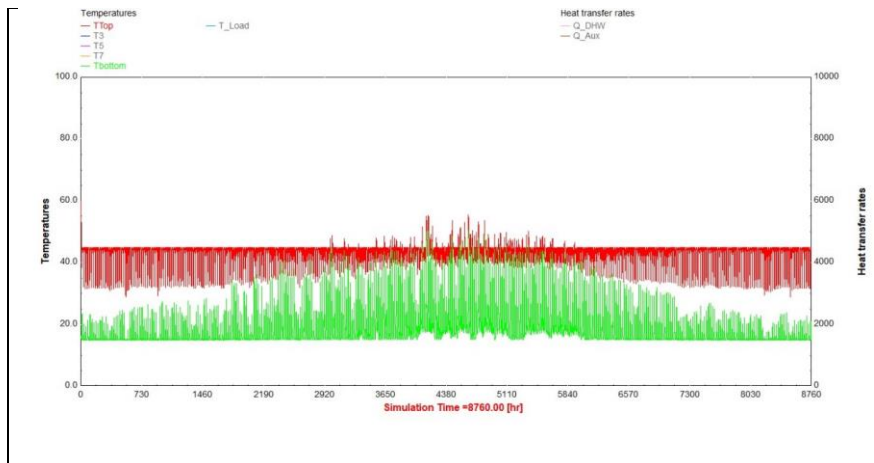
### 3.2.7. Δεξαμενή νερού

Η δεξαμενή νερού αποτελεί σημαντικό κομμάτι του μοντέλου στην παρούσα εργασία καθώς είναι το στοιχείο στο οποίο αποθηκεύεται η απαραίτητη θερμική ενέργεια για το επιθυμητό ζεστό νερό χρήσης. Χρησιμοποιείται δεξαμενή τύπου 4 η οποία υπόκειται σε θερμική στρωματοποίηση με την υπόθεση ότι η δεξαμενή αποτελείται από  $N$  ( $N \leq 15$ ) πλήρως αναμεμιγμένα τμήματα ίσου όγκου (εδώ  $N=10$ ). Αυτή η περίπτωση του Τύπου 4 διαμορφώνει μια στρωματοποιημένη δεξαμενή που έχει μεταβλητές θέσεις εισόδου έτσι ώστε το εισερχόμενο ρευστό να μπορεί να προστεθεί στη δεξαμενή σε θερμοκρασία όσο το δυνατόν πιο ίση με τη δική της θερμοκρασία.



Σχήμα 3.13 - Θερμική διαστρωμάτωση δεξαμενής νερού με 10 κόμβους

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η θερμική διαστρωμάτωση της δεξαμενής έχοντας χρησιμοποιήσει 10 κόμβους και αρχικές θερμοκρασίες οι οποίες είναι πιο χαμηλές όσο πλησιάζουμε το κάτω μέρος της δεξαμενής. Αυτό μπορεί να το παρατηρήσει καλύτερα κάποιος στο επόμενο διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται μόνο οι θερμοκρασίες του πρώτου (πάνω μέρος) και του τελευταίου (κάτω μέρος) κόμβου.

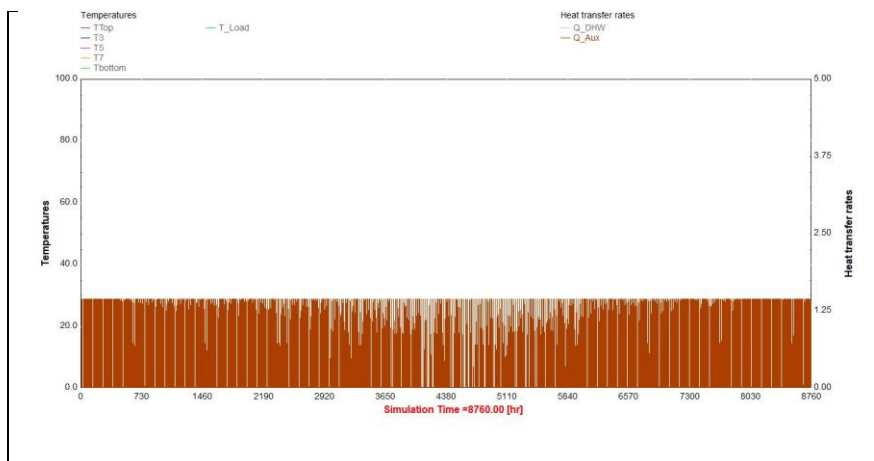


Σχήμα 3.14 – Θερμική διαστρωμάτωση πάνω και κάτω μέρους δεξαμενής

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι στην κορυφή της δεξαμενής η θερμοκρασία σταθεροποιείται κοντά στους 45 °C. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια ενός θερμαντικού στοιχείου το οποίο έχει τοποθετηθεί στην κορυφή της δεξαμενής. Η συγκεκριμένη δεξαμενή έχει 2 εισόδους και 2 εξόδους. Η είσοδος στην κορυφή εισάγει το ‘ζεστό’ ρεύμα από τους ηλιακούς συλλέκτες στη δεξαμενή ενώ η είσοδος στο κάτω μέρος εισάγει το ‘κρύο’ ρεύμα από τη βαλβίδα σκλήρυνσης η οποία έχει αναλυθεί παραπάνω. Η έξοδος στο κάτω μέρος καταλήγει στην αντλία ενώ η έξοδος στο πάνω μέρος οδηγεί στο μίκτη, στην έξοδο του οποίου προκύπτει η επιθυμητή θερμοκρασία για το ζεστό νερό χρήσης. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ο ρυθμός με τον οποίο αφαιρείται η ενέργεια από τη δεξαμενή για την τροφοδοσία φορτίου  $Q_{DHW}$  (KW) καθώς και τα θερμικά κέρδη  $Q_{AUX}$  (KW) από το θερμαντικό στοιχείο. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας  $Q_{DHW}$  (KW) δεν ξεπερνά τα 3.5 KW, ενώ ο  $Q_{AUX}$  (KW) φτάνει μέχρι τα 1.44 KW.

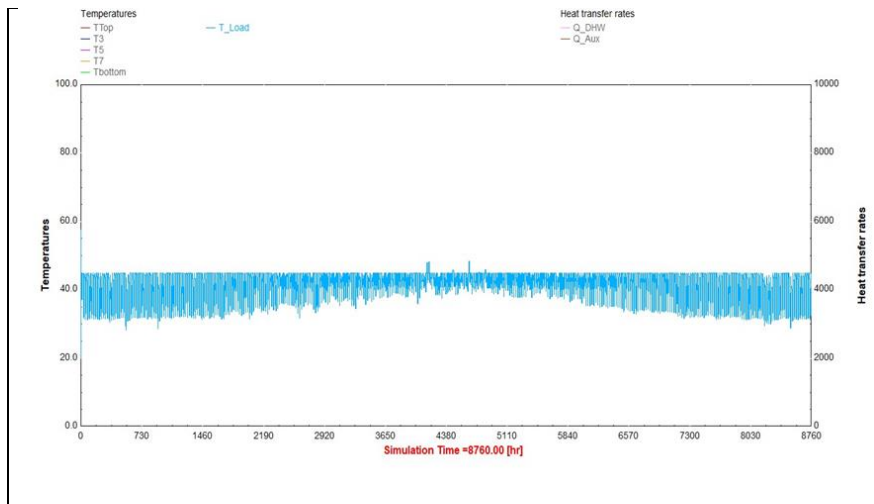


Σχήμα 3.15 – Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ζεστού νερού χρήσης  $Q_{DHW}$  (KW)



Σχήμα 3.16 – Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας θερμικού στοιχείου  $Q_{AUX}$  (KW)

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η θερμοκρασία του εξερχόμενου ζεστού νερού χρήσης από τη δεξαμενή. Η θερμοκρασία φαίνεται να κυμαίνεται από 37 ως 45 °C.

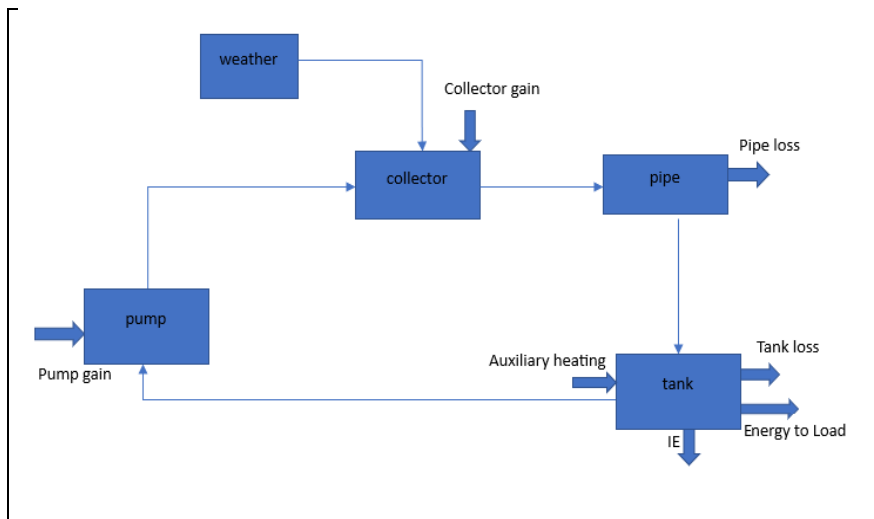


Σχήμα 3.17 – Θερμοκρασία εξερχόμενου ζεστού νερού χρήσης Tload (°C)

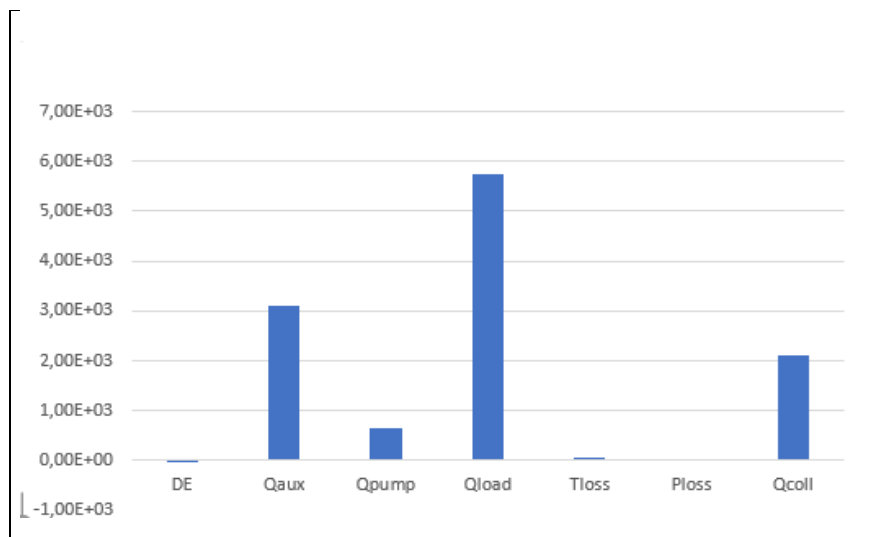
Είναι σημαντικό για το σχεδιασμό του μοντέλου να υπάρχει μια γενική εποπτεία των ενεργειακών κερδών και απωλειών του συστήματος. Η εξίσωση της ενεργειακής ισορροπίας του συστήματος δίνεται ως :

$$+Q_{coll} + Q_{aux} + Q_{pump} - Q_{load} - T_{loss} - P_{loss} - IE_{change} \approx 0$$

Όπου  $IE_{change}$  είναι η εσωτερική ενέργεια αλλαγής της δεξαμενής σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες.



Σχήμα 3.18 – Σχηματική διάταξη συστήματος για ενεργειακή ισορροπία



Σχήμα 3.19 – Ενεργειακά κέρδη και απώλειες του συστήματος (KJ/hr)

### 3.3 Ενεργειακό σύστημα θέρμανσης χώρου

#### 3.3.1 Μοντελοποίηση κτιρίου μονής ζώνης

Στο μοντέλο μας χρησιμοποιείται κτίριο μονής ζώνης τύπου 88. Αυτό το εξάρτημα διαμορφώνει μια απλή δομή μονής ζώνης χωρητικότητας που υπόκειται σε εσωτερικά κέρδη. Παραμελεί τα ηλιακά κέρδη και αναλαμβάνει μια συνολική τιμή  $U$  για ολόκληρη τη δομή. Η χρησιμότητά του προέρχεται από την ταχύτητα με την οποία μπορεί να προστεθεί ένα σύστημα θέρμανσης ή το ψυκτικό φορτίο σε μια προσομοίωση του συστήματος.

Έχοντας ορίσει ως επιφάνεια κτιρίου  $A_{building} = 162 \text{ m}^2$ , όγκο κτιρίου  $Vol = 136 \text{ m}^3$  και πυκνότητα αέρα κτιρίου  $d = 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  υπολογίζουμε την παροχή μάζας αέρα διήθησης  $I(\text{kg/h})$ .

$$I = \text{Infiltration} * d * Vol$$

Όπου τη διήθηση τη βρίσκουμε από τον εμπειρικό τύπο

$$\text{Infiltration} = 0.07 * V + 0.4 \text{ (air change per hour)}$$



και V: ταχύτητα ανέμου (m/s).

Η διήθηση είναι η παροχή μάζας αέρα που ο ατμοσφαιρικός αέρας διαρρέει από τις ρωγμές και τα ανοίγματα σε ένα κτίριο με φυσικό τρόπο.

Επιπλέον, κάτι σημαντικό για τη μοντελοποίηση του κτιρίου που πρέπει να αναφερθεί, είναι ο υπολογισμός των φορτίων του κτιρίου. Για την εύρεση των φορτίων πρέπει να γνωρίζουμε το χρονοδιάγραμμα πληρότητας καθώς και τα θερμικά κέρδη από τα φώτα, τον εξοπλισμό του κτιρίου και τους ανθρώπους. Με τη βοήθεια ενός 'forcing function' τύπου 14h , ορίζουμε ως χρόνο πληρότητας από τις 5 το απόγευμα ως τις 8 το πρωί για 7 μέρες την εβδομάδα και θεωρούμε ως θερμικά κέρδη τα παρακάτω :

$$Q_{lights} = 3000 \frac{KJ}{hr} , Q_{equipment} = 1200 \frac{KJ}{hr} , Q_{people} = 800 \frac{KJ}{hr}$$

Τα φορτία θέρμανσης και ψύξης για τον προαναφερόμενο χρόνο πληρότητας βρίσκονται αντίστοιχα από τις εξισώσεις:

$$Q_{heat} = CAP * (T_{setHeat} - T_{zone})$$

$$Q_{cool} = CAP * (T_{zone} - T_{setCool})$$

Όπου :

$T_{zone}$  (°C) : Η θερμοκρασία της ζώνης

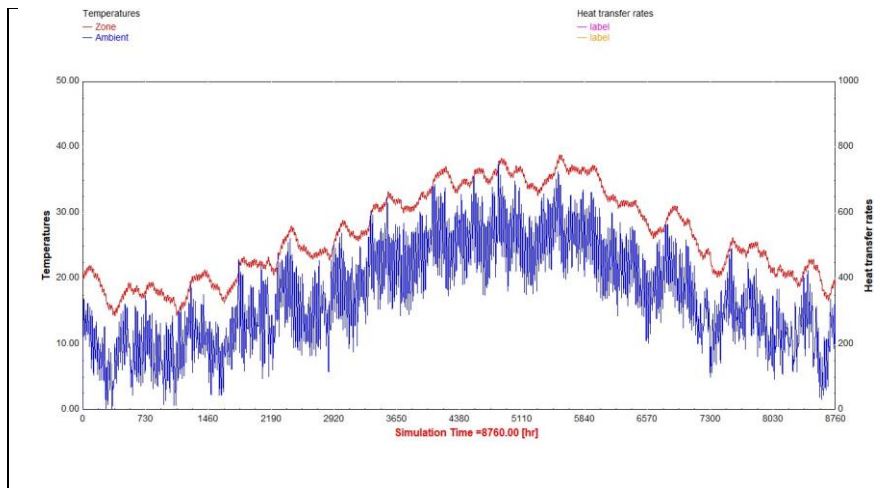
$T_{setHeat}$  (°C) = 20 : Η θερμοκρασία αναφοράς για τη θέρμανση

$T_{setCool}$  (°C) = 24 : Η θερμοκρασία αναφοράς για την ψύξη

$$CAP = d * Vol * Cp * 1.2$$

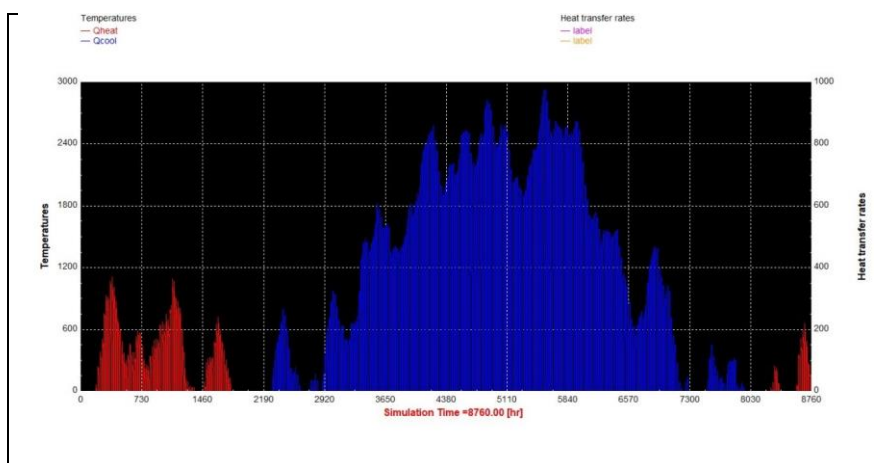
$$Cp = 1.006 \frac{KJ}{kg * ^\circ C}$$

Στο διάγραμμα που ακολουθεί , παρουσιάζεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η θερμοκρασία ζώνης της κατοικίας.

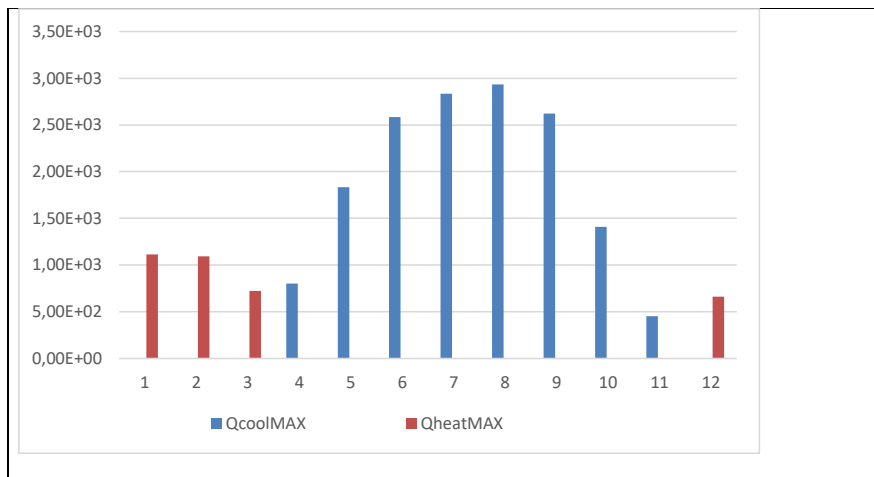


Σχήμα 3.20 – Θερμοκρασία ζώνης κατοικίας  $T_{zone}$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) (κόκκινο) και θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_{ambient}$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) (μπλε)

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνονται τα φορτία θέρμανσης και ψύξης για το χρόνο πληρότητας του μοντέλου για ολόκληρο το έτος. Όπως θα δούμε φορτία θέρμανσης προκύπτουν κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ κατά τους θερινούς προκύπτουν μεγαλύτερα ψυκτικά φορτία.



Σχήμα – 3.21 Φορτία θέρμανσης  $Q_{heat}$  (κόκκινο), φορτία ψύξης  $Q_{cool}$  (μπλε)



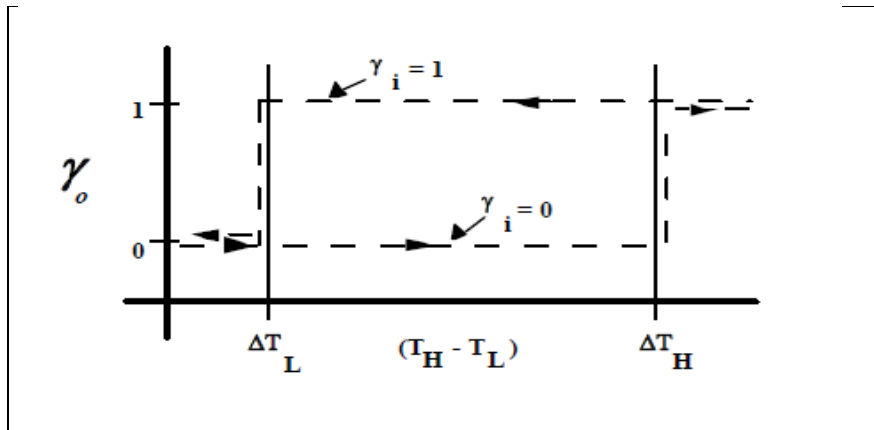
Σχήμα – 3.22 Μέγιστα μηνιαία φορτία θέρμανσης και ψύξης

Στο παραπάνω διάγραμμα προβάλλονται τα μέγιστα φορτία θέρμανσης και ψύξης κατά μήνα. Το μέγιστο ψυκτικό φορτίο παρατηρείται κατά τον Αύγουστο και είναι 2932 KJ , ενώ το μέγιστο φορτίο θέρμανσης τον Ιανουάριο και είναι 1114 KJ.

### 3.3.2 Αντλία θερμότητας

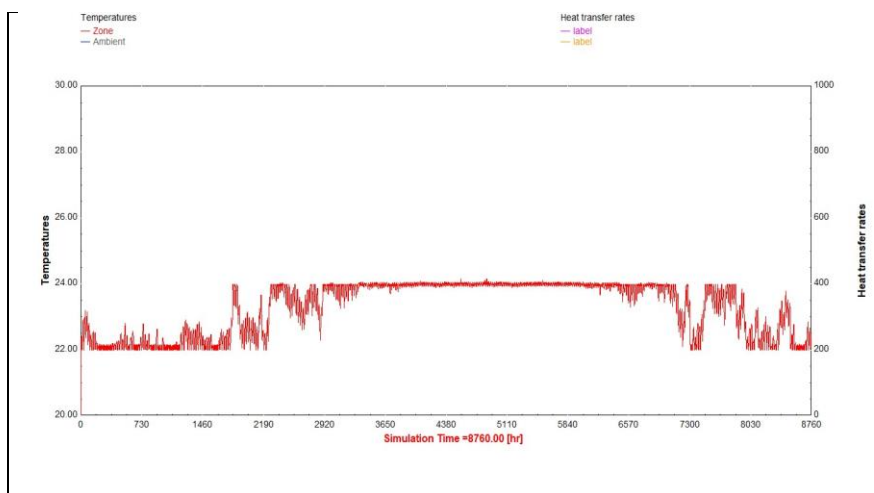
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα από τα παραπάνω διαγράμματα και θέλοντας η θερμοκρασία της ζώνης στο σπίτι να κυμαίνεται από 22 ως 24 °C, θα χρησιμοποιηθεί αντλία θερμότητας αέρα – αέρα τύπου 665. Η συγκεκριμένη αντλία χρησιμοποιεί μια προσέγγιση δεδομένων καταλόγου κατασκευαστή για να μοντελοποιήσει μια αντλία θερμότητας πηγής αέρα. Ο αέρας ρέει από τις πλευρές του συμπυκνωτή και του εξατμιστή της συσκευής. Το μοντέλο περιλαμβάνει αλγόριθμους ανάμειξης και ρυθμίσεις αποσβεστήρα έτσι ώστε ο εσωτερικός αέρας να μπορεί να είναι αποτέλεσμα δύο ροών από διαφορετικές πηγές.

Για τη λειτουργία και τον έλεγχο της αντλίας θερμότητας χρησιμοποιούνται δύο ελεγκτές τύπου 2 , ένας για τη θέρμανση και ένας για την ψύξη. Για την ψύξη ο έλεγχος γίνεται σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα. Για τη θέρμανση αρκεί να αναστρέψουμε το παρακάτω σήμα.

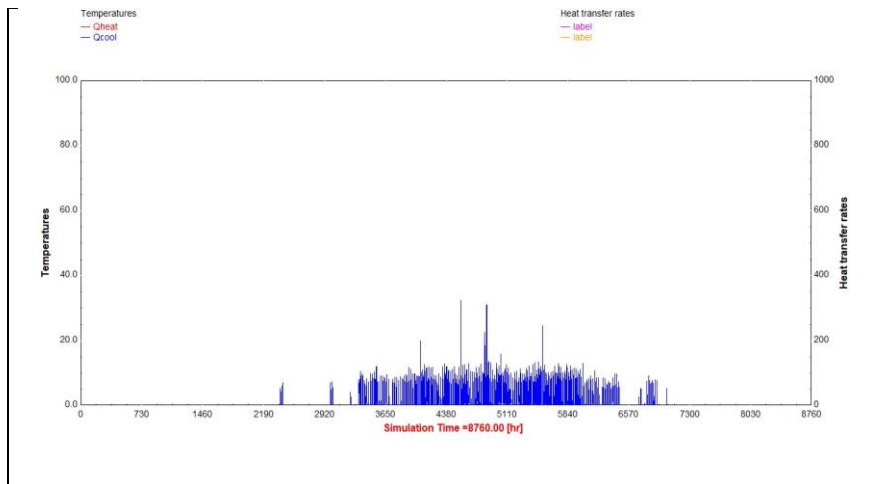


Σχήμα 3.23 – Λειτουργία ελεγκτή ψύξης

Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν τη διακύμανση της θερμοκρασίας ζώνης της κατοικίας καθώς και τα φορτία θέρμανσης και ψύξης κατά τη διάρκεια του έτους με τη χρήση αντλίας θερμότητας. Η θερμοκρασία κυμαίνεται από 22 ως 24 °C. Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι τα φορτία θέρμανσης έχουν μηδενιστεί ενώ τα φορτία ψύξης έχουν ελαχιστοποιηθεί αρκετά.



Σχήμα 3.24 – Θερμοκρασία ζώνης κατοικίας με χρήση αντλίας θερμότητας



Σχήμα 3.25 – Φορτία θέρμανσης και ψύξης με χρήση αντλία θερμότητας

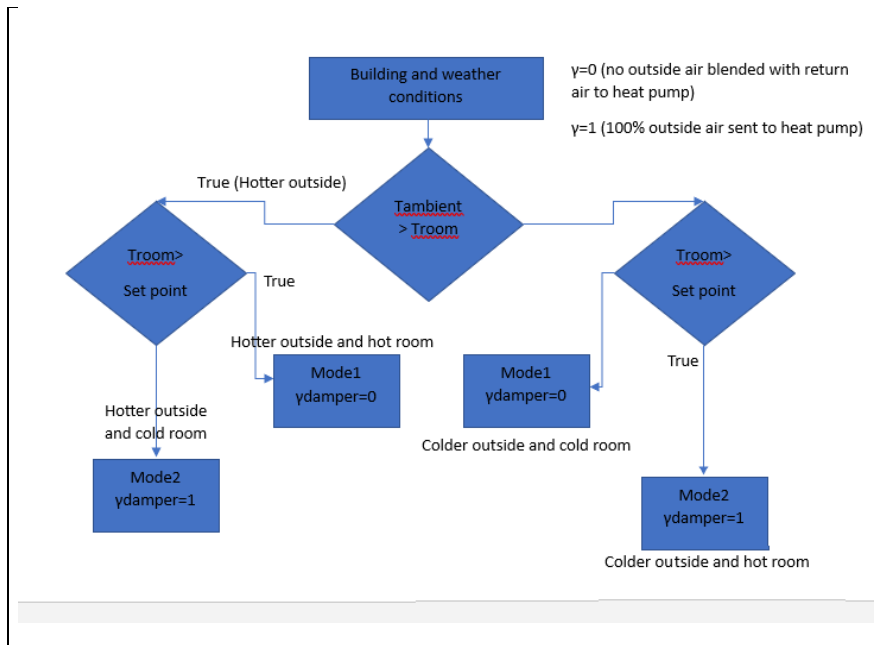
### 3.4 Συμπεράσματα

Το μοντέλο που παρουσιάστηκε αποτελεί μοντέλο συμπαραγωγής καθώς χρησιμοποιήθηκαν ηλιακοί συλλέκτες και στρωματοποιημένη δεξαμενή νερού TES για το ζεστό νερό χρήσης και αντλία θερμότητας αέρα αέρα για τη θέρμανση του χώρου.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν ηλιακοί συλλέκτες με επιφάνεια  $A_{\text{coil}}=4\text{m}^2$ , αντλία με μέγιστη παροχή ρευστού  $m_d=230\text{ kg/hr}$  και δεξαμενή με χωρητικότητα  $V_{\text{tank}}=300\text{ lt}$ . Η επιφάνεια των συλλεκτών, η παροχή του ρευστού στην αντλία και το προφίλ νερού είναι παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία του επιθυμητού ζεστού νερού για οικιακή χρήση. Για αυτό το λόγο, είναι σημαντικό για το σχεδιασμό του μοντέλου να υπάρχει μια γενική εποπτεία των ενεργειακών κερδών και απωλειών του συστήματος, ώστε αλλάζοντας τις παραπάνω παραμέτρους να έχουμε μία εικόνα των ενεργειών του συστήματος. Με αυτό τον τρόπο καταλήξαμε στις παραπάνω τιμές και η θερμοκρασία του εξερχόμενου ζεστού νερού χρήσης από τη δεξαμενή τελικά κατέληξε να κυμαίνεται από 37 ως 45 °C. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η κατάλληλη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση στη δεξαμενή νερού αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη σταθεροποίηση του εξερχόμενου ζεστού νερού, θέτοντας ως μέγιστη τιμή αυτού τους 45 °C.

Σχετικά με τη θέρμανση της κατοικίας χρησιμοποιήθηκε αντλία θερμότητας αέρα αέρα, τα αποτελέσματα της οποίας είναι εμφανή αν συγκρίνει κάποιος τα φορτία και τη θερμοκρασία της ζώνης της κατοικίας χωρίς και με την παρουσία της στα διαγράμματα 3.21, 3.24, 3.25. Η αντλία θερμότητας με την κατάλληλη στρατηγική ελέγχου της εξομάλυνε τα φορτία ψύξης και θέρμανσης, τόσο το καλοκαίρι όσο και το χειμώνα. Το χειμώνα τα φορτία εκμηδενίστηκαν ενώ το καλοκαίρι ελαχιστοποιήθηκαν αρκετά. Όπως φαίνεται η θερμοκρασία μέσα στην κατοικία κυμαίνεται πλέον από 22 ως 24 °C. Τελικά, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η αντλία θερμότητας μπορεί και χρησιμοποιείται κατά όλη τη διάρκεια του χρόνου και δεν αποτελεί αδικώς μία καινοτόμη ενεργειακή τεχνολογία η οποία θα απασχολεί το χώρο των ενεργειακών συστημάτων τα επόμενα χρόνια.

Τα δύο βασικά ζητούμενα του μοντέλου ήρθαν εις πέρας, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι ο σχεδιασμός του μοντέλου δεν έχει περιθώρια βελτίωσης. Με βάση τη βιβλιογραφία του κεφαλαίου 2, ένας διαφορετικός τύπος δεξαμενής TES θα μπορούσε να βελτιώσει το μοντέλο τόσο για τη χρήση ζεστού νερού όσο και για τη θέρμανση και ψύξη του χώρου. Ακόμη αξίζει να σημειωθεί ότι και μία άλλη στρατηγική ελέγχου της αντλίας θερμότητας, όπως φαίνεται παρακάτω θα μπορούσε να βελτιώσει το παραπάνω μοντέλο.



Σχήμα 3.26 – Προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου της αντλίας θερμότητας [24]

## Βιβλιογραφία

- [1] D. Mikielewicz και J. Mikielewicz, «A thermodynamic criterion for selection of working fluid for subcritical and supercritical domestic micro CHP,» *Applied Thermal Engineering* 30, pp. 2357-2362, 2010.
- [2] G. Qiu, «Selection of working fluids for micro-CHP systems with ORC,» *Renewable Energy* 48, pp. 565-570, 2012.
- [3] G. Qiu, Y. Shao, J. Li, H. Liu και S. B. Riffat, «Experimental investigation of a biomass-fired ORC-based micro-CHP for domestic applications,» *Fuel* 96, pp. 374-382, 2012.
- [4] G. Zywica, T. Z. Kaczmarczyk, E. Innatowicz και T. Turzynski, «Experimental investigation of the domestic CHP ORC system in transient operating conditions,» pp. 637-643, 2017.
- [5] M. Marion, H. Louahlia και H. Gualous, «Performances of a CHP Stirling system fuelled with glycerol,» pp. 182-191, 2016.
- [6] I. Arashnia, G. Najafi, B. Ghobadian, T. Yusaf, R. Mamat και M. Kettner, «Development of micro-scale biomass-fuelled CHP system using Stirling Engine,» *Energy Procedia* 75, pp. 1108-1113, 2015.
- [7] E. Cardozo, C. Erlich, A. Malmquist και L. Alejo, «Integration of a wood pellet burner and a Stirling engine to produce residential heat and power,» *Applied Thermal Engineering* 73, pp. 671-680, 2014.
- [8] M. Farrokhi, S. H. Noie και A. A. Akbarzadeh, «Preliminary experimental investigation of a natural gas-fired ORC-based micro-CHP system for residential buildings,» *Applied Thermal Engineering* 69, pp. 221-229, 2014.
- [9] J. Settino, P. Morrone, A. Algieri, T. Sant, C. Micallef, M. Farrugia, C. Spitieri-Staines, J. Licari και A. Micallef, «Integration of an Organic Rankine Cycle and a Photovoltaic Unit for Micro-Scale CHP Applications in the Residential Sector,» *Energy Procedia* 126, pp. 597-604, 2017.



- [10] L. Cioccolanti, R. Tascioni και A. Arteconi , «Simulation analysis of an innovative micro-solar 2kWe Organic Rankine Cycle plant for residential applications,» *Energy Procedia* 142, pp. 1629-1634, 2017.
- [11] L. Cioccolanti, R. Tascioni , E. Bocci και M. Villarini, «Parametric analysis of a solar Organic Rankine Cycle trigeneration system for residential applications,» τόμ. 163, pp. 407-419, 2018.
- [12] F. A. Boyaghchi και P. Heidarnjad, «Thermoeconomic assessment and multi objective optimization of a solar micro CCHP based on Organic Rankine Cycle for domestic application,» τόμ. 97, pp. 224-234, 2015.
- [13] G. Angrisani, C. Roselli, M. Sasso και F. Tariello, «Dynamic performance assessment of a micro-trigeneration system with a desiccant-based air handling unit in Southern Italy climatic conditions,» pp. 188-201, 2014.
- [14] CADDET, «Learning from Experiences with Thermal Energy Storage: Managing Electrical Loads in Buildings,» Paris, 1997.
- [15] J. a. K. Tomlinson, « Thermal energy storage, Mechanical Engineering 112,» 1990, pp. 68-72.
- [16] M. a. F. K. Shimizu, «Actual efficiencies of thermally-stratified thermal storage tanks, IEA Heat Pump Center News letter,» 1985, pp. 20-25.
- [17] I. a. D. S. Dincer, « A perspective on thermal energy storage systems for solar energy applications,International Journal of Energy Research,» 1996, pp. 547-557.
- [18] IEA, «Thermal storage, IEA Heat Pump Center Newsletter 8,» 1990.
- [19] M. Rosen, «A semi-empirical model for assessing the effects of berms on the heat loss from partially buried heat storage tanks,» σε *International Journal of Solar Energy* 20, 1998, pp. 57-77.
- [20] I. Dincer, σε *thermal energy storage systems and applications*, 2010.
- [21] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/TRNSYS>.
- [22] «TRNSYS,» 2016.

- [23] «Solar Energy Laboratory,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [sel.me.wisc.edu/trnsys/weather/tmy2data.htm](http://sel.me.wisc.edu/trnsys/weather/tmy2data.htm). [Πρόσβαση 1 April 2020].
- [24] A. Mcdowell, «udemy,» [Ηλεκτρονικό].