



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΨΥΞΗΣ, ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΣΟΥΠΕΡΜΑΡΚΕΤ**

ΣΥΓΓΟΥΝΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ (ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ)

ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2017

Copyright © ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΣΥΓΓΟΥΝΑΣ 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστίες ...

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Τζιβανίδη Χρήστο, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το παρόν θέμα της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα και φίλο Μητσόπουλο Γεώργιο για τη διαρκή συνεργασία μας και την επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ταυτόχρονα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Μπέλλο Ευάγγελο για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε στη διεκπεραίωση της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αναγνωστάτο Σταύρο (Υπεύθυνο Ενεργειακής Διαχείρισης της METRO ΑΕΒΕ), για την άψογη φιλοξενία στους χώρους της εταιρίας, καθώς και για τα δεδομένα της εταιρίας, στα οποία μου δόθηκε ελεύθερη πρόσβαση.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξη και συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, και ιδιαίτερα τους γονείς μου, στους οποίους οφείλω ό,τι έχω καταφέρει μέχρι σήμερα.

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η πειραματική και υπολογιστική μελέτη της ψυκτικής εγκατάστασης ενός σουπερμάρκετ. Η ανάλυση αυτή, υλοποιείται χρησιμοποιώντας μετρήσεις πραγματικού χρόνου από την εγκατάσταση, καθώς και με χρήση κώδικα που αναπτύχθηκε στο λογισμικό EES (Engineering Equation Solver). Πιο συγκεκριμένα, αναπτύσσεται υπολογιστικό μοντέλο για την ανάλυση των επιμέρους ψυκτικών κυκλωμάτων μέσης (MT) και χαμηλής θερμοκρασίας (LT). Μέσω του μοντέλου αυτού, υπολογίζονται οι ηλεκτρικές καταναλώσεις των κυκλωμάτων, προκειμένου να προσδιοριστούν στη συνέχεια μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας στην εγκατάσταση.

Για το σκοπό αυτό, ελέγχεται αρχικά η ακρίβεια του υπολογιστικού μοντέλου, μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων του με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις, εμφανίζοντας μέγιστη απόκλιση της τάξης του 3%. Ακολούθως, αναπτύσσεται μοντέλο πρόβλεψης του ψυκτικού φορτίου σε κάθε κύκλωμα, με μοναδική παράμετρο την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συνεπώς, με χρήση των βασικών θερμοδυναμικών εξισώσεων του ψυκτικού κύκλου, υπολογίζονται οι μηνιαίες ηλεκτρικές καταναλώσεις των κυκλωμάτων MT και LT, οι οποίες ανταποκρίνονται στις πραγματικές, σημειώνοντας μέγιστες αποκλίσεις, κατά 5.3% στο κύκλωμα MT και κατά 2.8% στο κύκλωμα LT. Οι υπολογισμοί αυτοί δίνουν τη δυνατότητα για γρήγορη και αξιόπιστη μελέτη της ετήσιας απόδοσης του εξεταζόμενου συστήματος.

Επιπλέον, διερευνώνται οι ήδη υλοποιημένες ενέργειες εξοικονόμησης ηλεκτρικής κατανάλωσης, σημαντικότερη των οποίων είναι η ρύθμιση της πίεσης συμπίκνωσης σε χαμηλότερα επίπεδα. Το σύνολο των ενεργειών εξοικονόμησης, επιφέρουν 16.8% αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς COP και 12.78% μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος του κυκλώματος MT, ενώ στο κύκλωμα LT σημειώνεται 23% αύξηση και 29.55% μείωση στα αντίστοιχα μεγέθη. Από τη διερεύνηση προέκυψε, ότι η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ισχύος στο κύκλωμα LT, οφείλεται κατά 23% στην αύξηση του COP και κατά 77% στη μείωση του ψυκτικού φορτίου του κυκλώματος. Αντίθετα, για το κύκλωμα MT, προέκυψε μικρότερη εξάρτηση από τη μεταβολή των σημείων λειτουργίας των συμπυκνωτών, λόγω της ύπαρξης συστήματος ελέγχου inverter σε αυτό. Ωστόσο, παρατηρήθηκε μεγάλη εξάρτηση από τη δραστηριότητα ανοίγματος των θυρίδων των ψυγείων, κατά τις ημέρες λειτουργίας του καταστήματος, η οποία αυξάνει κατά 24% το ψυκτικό φορτίο του κυκλώματος MT.

Τέλος, εξετάζονται εναλλακτικά ψυκτικά μέσα, για την αντικατάσταση του υπάρχοντος R-404a. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται σε επίπεδο έτους, οι μηνιαίες ηλεκτρικές καταναλώσεις και το μηνιαίο κόστος λειτουργίας κάθε κυκλώματος, για την περίπτωση χρήσης κάθε εξεταζόμενου ψυκτικού μέσου και γίνεται σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη του υπάρχοντος ψυκτικού. Το ψυκτικό μέσο R-134a εμφανίζει ενεργειακή και οικονομική βελτίωση έως 8%, ενώ ψυκτικά μέσα τα οποία απαιτούν ελάχιστες μετατροπές στον υπάρχον εξοπλισμό για απευθείας χρησιμοποίησή τους, όπως το R-410a και το R-507a σημειώνουν εξοικονόμηση ενέργειας της τάξεως του 1%.

Abstract

The objective of this diploma thesis is the experimental and computational study of a supermarket refrigeration system. This analysis is carried out by using real-time measurements from the installation, as well as by using a code, developed on the Engineering Equation Solver (EES) software. Particularly, a computational model is developed for the analysis of the individual medium (MT) and low temperature (LT) cooling circuits. Through this model, each circuit's electrical consumption is calculated, in order then to specify energy saving methods in the installation.

For this purpose, at first, computational model's accuracy is validated, by comparing its results with the corresponding experimental measurements, resulting in a maximum deviation of 3%. Next, a prediction model of the cooling load in each circuit is developed, with the only parameter being the external ambient temperature. Therefore, by using the basic thermodynamic equations of the refrigeration cycle, the monthly electrical consumption of MT and LT circuits is calculated, which corresponds to the real ones, with a discrepancy of 5.3% in the MT circuit and 2.8% in the LT circuit. Through these calculations, there is the potentiality of a quick and reliable study of the annual performance of the considering system.

In addition, the electricity consumption saving operations, that have already been carried out, are examined, with the most important being the regulation of the condensing pressure at lower levels. All these saving operations lead to a 16.8% rise in the performance coefficient (COP) and to a 12.78% reduction in the power consumption of the MT circuit, while on the LT circuit there is a 23% rise and a 29.55% reduction in the corresponding figures. The investigation has shown that electrical power savings on the LT circuit are due, to the extent of 23%, to the increase of COP and, to the extent of 77%, to the reduction of the cooling load in the circuit. On the contrary, as for the MT circuit, there was less dependence on the change of condenser's operating point due to the inverter control system in it. However, there was noticed a strong dependence on the activity of opening coolers' ports during the operating days of the store, which increases the cooling load of the MT circuit by 24%.

Finally, alternative refrigerants are examined in order to replace the existing R-404a. More precisely, for each investigated refrigerant, the monthly electricity consumption and the monthly operating cost of each circuit are calculated and then they are being compared to the corresponding figures of the existing refrigerant. The R-134a refrigerant shows an energy and economic improvement of up to 8%, while refrigerants which require few modifications to the current equipment for retrofitting, such as the R-410a and the R-507a, show an energy saving of around 1%.

Περιεχόμενα

| | |
|---|------|
| Περίληψη | v |
| Abstract..... | vii |
| Επεξήγηση συμβόλων..... | xiii |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Ενεργειακή κατάσταση και εμπορική ψύξη..... | 1 |
| 1.1 Υφιστάμενη Ενεργειακή Κατάσταση | 1 |
| 1.2 Εμπορική ψύξη | 4 |
| 1.3 Κατανομή ενεργειακής κατανάλωσης στα σουπερμάρκετ | 6 |
| 1.3.1 Ηλεκτρισμός..... | 7 |
| 1.3.1.1 Ψύξη..... | 7 |
| 1.3.1.2 Θέρμανση, εξαερισμός, κλιματισμός | 9 |
| 1.3.1.3 Φωτισμός..... | 11 |
| 1.3.1.4 Ειδικές υπηρεσίες | 12 |
| 1.3.1.5 Μη μετρούμενες καταναλώσεις..... | 12 |
| 1.3.2 Φυσικό αέριο | 12 |
| 1.3.2.1 Θέρμανση | 12 |
| 1.3.2.2 Μαγείρεμα..... | 13 |
| 1.3.2.3 Συμπαγωγή (CHP) | 13 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Ψυκτικές εγκαταστάσεις σε σουπερμάρκετ | 15 |
| 2.1 Περιγραφή συνήθους ψυκτικής εγκατάστασης..... | 15 |
| 2.2 Τύποι ψυκτικών εγκαταστάσεων σε σουπερμάρκετ..... | 18 |
| 2.2.1 Κεντρικό σύστημα άμεσης εκτόνωσης – Centralised Direct Expansion System (DX)..... | 18 |
| 2.2.2 Κατανεμημένο σύστημα άμεσης εκτόνωσης – Distributed Direct Expansion System..... | 19 |
| 2.2.3 Σύστημα Cascade | 20 |
| 2.2.4 Δευτερεύον σύστημα..... | 21 |
| 2.2.5 Booster υπερκρίσιμο σύστημα CO2 | 22 |
| 2.3 Στοιχεία ψυκτικής εγκατάστασης..... | 23 |
| 2.3.1 Συμπιεστής..... | 23 |
| 2.3.1.1 Παλινδρομικοί (εμβολοφόροι) συμπιεστές | 23 |
| 2.3.1.2 Σπειροειδείς συμπιεστές - Scroll | 24 |
| 2.3.1.3 Περιτροφικοί συμπιεστές | 27 |
| 2.3.1.4 Φυγοκεντρικοί συμπιεστές..... | 28 |
| 2.3.2 Συμπυκνωτής | 30 |

| | |
|---|----|
| 2.3.2.1 Αερόψυκτοι συμπυκνωτές..... | 31 |
| 2.3.2.2 Υδροψυκτοι συμπυκνωτές..... | 31 |
| 2.3.2.3 Συμπυκνωτές εξαμιζόμενου τύπου..... | 31 |
| 2.3.3 Εκτονωτική βαλβίδα | 32 |
| 2.3.3.1 Τριχοειδής σωλήνας | 32 |
| 2.3.3.2 Θερμοστατική εκτονωτική βαλβίδα ή θερμοεκτονωτική βαλβίδα..... | 33 |
| 2.3.3.3 Ηλεκτρονική εκτονωτική βαλβίδα | 34 |
| 2.3.3.4 Εκτονωτική βαλβίδα επίπλευσης | 36 |
| 2.3.4 Ατμοποιητής..... | 37 |
| 2.3.4.1 Κατηγοριοποίηση με βάση το χρησιμοποιούμενο εκτονωτικό μέσο (βαλβίδα) | 37 |
| 2.3.4.1 Κατηγοριοποίηση με βάση την κατασκευαστική μορφή της εξωτερικής τους επιφάνειας:..... | 38 |
| 2.3.4.1 Κατηγοριοποίηση με βάση το είδος της κυκλοφορίας του ψυκτικού αέρα: | 39 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Ψυκτικά μέσα | 41 |
| 3.1 Επιθυμητές ιδιότητες ψυκτικών μέσων | 41 |
| 3.1.1 Χημικές ιδιότητες..... | 41 |
| 3.1.2 Θερμικές ιδιότητες..... | 41 |
| 3.1.3 Φυσιολογικές ιδιότητες..... | 42 |
| 3.1.4 Οικονομικές απαιτήσεις | 43 |
| 3.2 Ιστορικό χρήσης ψυκτικών μέσων..... | 43 |
| 3.3 Μεγέθη καταλληλότητας ψυκτικών μέσων | 46 |
| 3.3.1 Δυναμικό καταστροφής του όζοντος - Ozone Depletion Potential (ODP) | 46 |
| 3.3.2 Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη- Global Warming Potential (GWP)..... | 47 |
| 3.3.3 Κλάσεις επικινδυνότητας της ASHRAE - ASHRAE Safety Class..... | 48 |
| 3.4 Ψυκτικά μέσα στα σουπερμάρκετ..... | 48 |
| 3.4.1 Υδροθφοράνθρακες - HFCs..... | 49 |
| 3.4.1.1 R-134a | 50 |
| 3.4.1.2 R-404A..... | 51 |
| 3.4.1.3 R-407A..... | 51 |
| 3.4.1.4 R-407C..... | 52 |
| 3.4.1.5 R-407F | 52 |
| 3.4.1.6 R-410A..... | 53 |
| 3.4.1.7 R-448A..... | 53 |
| 3.4.1.8 R-449A..... | 53 |

| | |
|--|----|
| 3.4.1.9 R-507A..... | 54 |
| 3.4.1.10 R-32 | 54 |
| 3.4.2 Φυσικά ψυκτικά μέσα | 54 |
| 3.4.2.1 R-717 (Αμμωνία – NH ₃) | 54 |
| 3.4.2.2 R-744 (Διοξείδιο του άνθρακα – CO ₂)..... | 55 |
| 3.4.2.3 Υδρογονάνθρακες | 56 |
| 3.5. Συγκεντρωτικά στοιχεία ψυκτικών μέσων | 57 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Μελετηθέν σουπερμάρκετ..... | 59 |
| 4.1 Συνοπτικά στοιχεία του σουπερμάρκετ | 59 |
| 4.2 Περιγραφή ψυκτικής εγκατάστασης | 61 |
| 4.2.1 Εισαγωγικά στοιχεία | 61 |
| 4.2.2 Ψυγεία, καταψύκτες και ψυκτικοί θάλαμοι..... | 61 |
| 4.2.3 Συμπιεστές | 63 |
| 4.2.4 Συμπυκνωτές..... | 66 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Θεωρία και εργαλεία μελέτης..... | 69 |
| 5.1 Θερμοδυναμική ανάλυση ψυκτικού κύκλου..... | 69 |
| 5.2 Μετρητική διάταξη | 74 |
| 5.2.1 Αναλυτής απόδοσης Climacheck | 74 |
| 5.2.2 Μετρούμενα μεγέθη..... | 75 |
| 5.2.3 Υπολογισμός μεγεθών | 76 |
| 5.2.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων..... | 78 |
| 5.2.4.1 Διαγράμματα ροής των ψυκτικών κυκλωμάτων | 78 |
| 5.2.4.2 Πίνακας αποτελεσμάτων | 80 |
| 5.2.4.3 Γραφήματα απόδοσης..... | 81 |
| 5.2.5 Πρακτικά οφέλη..... | 84 |
| 5.3 Λογισμικό επίλυσης – EES (Engineering Equation Solver)..... | 84 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Ενέργειες εξοικονόμησης ενέργειας..... | 87 |
| 6.1 Απενεργοποίηση 3 ^{ου} συμπιεστή στο κύκλωμα LT | 87 |
| 6.2 Ρύθμιση της συχνότητας έναρξης/διακοπής λειτουργίας των scroll συμπιεστών στο κύκλωμα MT | 88 |
| 6.3 Ρύθμιση της υψηλής πίεσης λειτουργίας των κυκλωμάτων MT και LT..... | 90 |
| 6.4 Αποτελέσματα | 93 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Ανάλυση ψυκτικής εγκατάστασης | 97 |
| 7.1 Επιβεβαίωση ακριβούς λειτουργίας υπολογιστικού μοντέλου | 97 |

| | |
|--|-----|
| 7.1.1 Διαδικασία επιβεβαίωσης ακρίβειας υπολογιστικού μοντέλου..... | 97 |
| 7.1.2 Κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας (MT)..... | 99 |
| 7.1.3 Κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας (LT) | 100 |
| 7.2 Παραμετρική θερμοδυναμική ανάλυση της ψυκτικής εγκατάστασης | 106 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Υπολογισμός καταναλώσεων | 115 |
| 8.1 Μοντέλο πρόβλεψης ψυκτικού φορτίου | 115 |
| 8.1.1 Κύκλωμα MT | 115 |
| 8.1.2 Κύκλωμα LT | 127 |
| 8.2 Υπολογισμός μηνιαίων καταναλώσεων | 138 |
| 8.2.1 Διαδικασία υπολογισμού μηνιαίου ψυκτικού φορτίου | 138 |
| 8.2.2 Κύκλωμα MT | 139 |
| 8.2.2 Κύκλωμα LT | 141 |
| 8.3 Κατανάλωση ψυκτικών κυκλωμάτων MT και LT για χρήση εναλλακτικών ψυκτικών μέσων . | 143 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 Συμπεράσματα | 151 |
| Βιβλιογραφία | 157 |
| Παραρτήματα | 161 |
| A. Πεδία λειτουργίας συμπιεστών των κυκλωμάτων MT και LT | 161 |
| B. Διαστασιολόγηση συμπυκνωτών κυκλωμάτων MT και LT | 163 |

Επεξήγηση συμβόλων

Μεγέθη

| | |
|---------------|---|
| CF | Συντελεστής φορτίου (%) |
| E_{el} | Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη διάταξη των συμπιεστών (kWh) |
| E_{evap} | Ενέργεια ατμοποίησης (kWh) |
| eff_{comp} | Ισοδύναμος βαθμός απόδοσης συμπιεστή (%) |
| eff_{isen} | Μετρούμενος ισεντροπικός βαθμός απόδοσης (%) |
| h | Ενθαλπία (kJ/kg) |
| $m_{ψυκτ}$ | Παροχή ψυκτικού μέσου (kg/sec) |
| n | Πλήθος ημερών του μήνα (-) |
| $n_{sundays}$ | Πλήθος Κυριακών του μήνα (-) |
| P_{el} | Προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ στη διάταξη συμπιεστών (kW) |
| P_{el}^* | Μέση μηνιαία ηλεκτρική ισχύς συνεχούς λειτουργίας (kW) |
| P_{evap} | Πίεση ατμοποίησης (bar) |
| P_{evap} | Πίεση συμπύκνωσης (bar) |
| Q^* | Μέσο ισοδύναμο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας μηνός (kW) |
| Q' | Ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας (kW) |
| q_{con} | Θερμότητα συμπυκνώσεως (kJ/kg) |
| Q_{evap} | Φορτίο ατμοποίησης (kW) |
| Q_{evap} | Φορτίο συμπύκνωσης (kW) |
| Q_{loss} | Απώλειες θερμότητας μεταξύ συμπιεστή και αισθητήρα μετρητικής διάταξης (kW) |
| $q_{ψ}$ | Ανηγγμένη ψυκτική ισχύς (kJ/kg) |
| $Q_{ψ}$ | Ψυκτικό φορτίο (kW) |
| R^2 | Συντελεστής προσδιορισμού |
| RHL | Σχετικές θερμικές απώλειες (Relative Heat Losses) (%) |

| | |
|-------------------|--|
| S | Εντροπία (kJ/kgK) |
| T _{amb} | Θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος (°C) |
| T _{con} | Θερμοκρασία συμπύκνωσης (°C) |
| T _{evap} | Θερμοκρασία ατμοποίησης (°C) |
| T _m | Μέση θερμοκρασία του έτους (°C) |
| w _{el} | Ανηγγμένη ηλεκτρική ισχύς (kJ/kg) |
| zeros | Πλήθος ωρών της ημέρας κατά τις οποίες δεν λειτουργεί η διάταξη συμπιεστών (-) |

Ελληνικά σύμβολα

| | |
|------------------|--|
| Δt _{SC} | Θερμοκρασιακή διαφορά υπόψυξης (K) |
| Δt _{SH} | Θερμοκρασιακή διαφορά υπερθέρμανσης (K) |
| η _{is} | Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης (%) |
| η _m | Μηχανικός βαθμός απόδοσης (%) |
| Κ.Λ | Κόστος λειτουργίας ψυκτικού κυκλώματος (€) |

Ακρωνύμια

| | |
|-------|---|
| CFCs | Χλωροφθοράνθρακες (Chlorofluorocarbons) |
| CHP | Συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (Combined Heat and Power) |
| COP | Συντελεστής συμπεριφοράς (Coefficient Of Performance) |
| DX | Κεντρικό σύστημα ψύξης άμεσης εκτόνωσης (Centralised Direct Expansion System) |
| EES | Engineering Equation Solver |
| EEV | Ηλεκτρονική εκτονωτική βαλβίδα (Electronic Expansion Valve) |
| GHG | Αέριο του θερμοκηπίου (Greenhouse Gas) |
| GWP | Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential) |
| HCFCs | Υδροχλωροφθοράνθρακες (Hydrochlorofluorocarbons) |
| HFCs | Υδροφθοράνθρακες (Hydrofluorocarbons) |
| HFOs | Υδροφθορολεφίνες (Hydrofluoroolefins) |
| HP | Υψηλή πίεση λειτουργίας (High Pressure) |

| | |
|------|---|
| LCCP | Κλιματική απόδοση του κύκλου ζωής (Life Cycle Climate Performance) |
| LP | Χαμηλή πίεση λειτουργίας (Low Pressure) |
| LT | Ψυκτικό κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας (Low Temperature circuit) |
| LTHW | Καυτό νερό χαμηλής θερμοκρασίας (Low Temperature Hot Water) |
| MT | Ψυκτικό κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας (Medium Temperature circuit) |
| ODP | Δυναμικό καταστροφής του όζοντος (Ozone Depletion Potential) |
| SC | Υπόψυξη (Subcooling) |
| SH | Υπερθέρμανση (Superheating) |
| TEV | Θερμοεκτονωτική βαλβίδα (Thermostatic Expansion Valve) |
| TEWI | Συνολικές ισοδύναμες επιπτώσεις θέρμανσης (Total Equivalent Warming Impact) |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ενεργειακή κατάσταση και εμπορική ψύξη

1.1 Υφιστάμενη Ενεργειακή Κατάσταση

Η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται παράλληλα με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και της οικονομίας. Η αύξηση της ενεργειακής ζήτησης, ιδίως της ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, αυξάνει της εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα, γεγονός που συμβάλλει στην επιδείνωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα με σοβαρές επιπτώσεις για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με την ενεργειακή κατανάλωση, με βάση τις τρέχουσες πολιτικές, θα είναι κατά 40% υψηλότερες το 2030 σε σχέση με το 2007 [1].

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η αύξηση της χρήσης ορυκτών καυσίμων, οι βιομηχανικές χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο και η Ευρωπαϊκή Ένωση αναπτύσσουν μια φιλόδοξη ενεργειακή πολιτική για την αντιμετώπιση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και της αλλαγής του κλίματος. Για το σκοπό αυτό έχουν τεθεί ορισμένοι πρωταρχικοί στόχοι για την κλιματική αλλαγή και την ενεργειακή βιωσιμότητα:

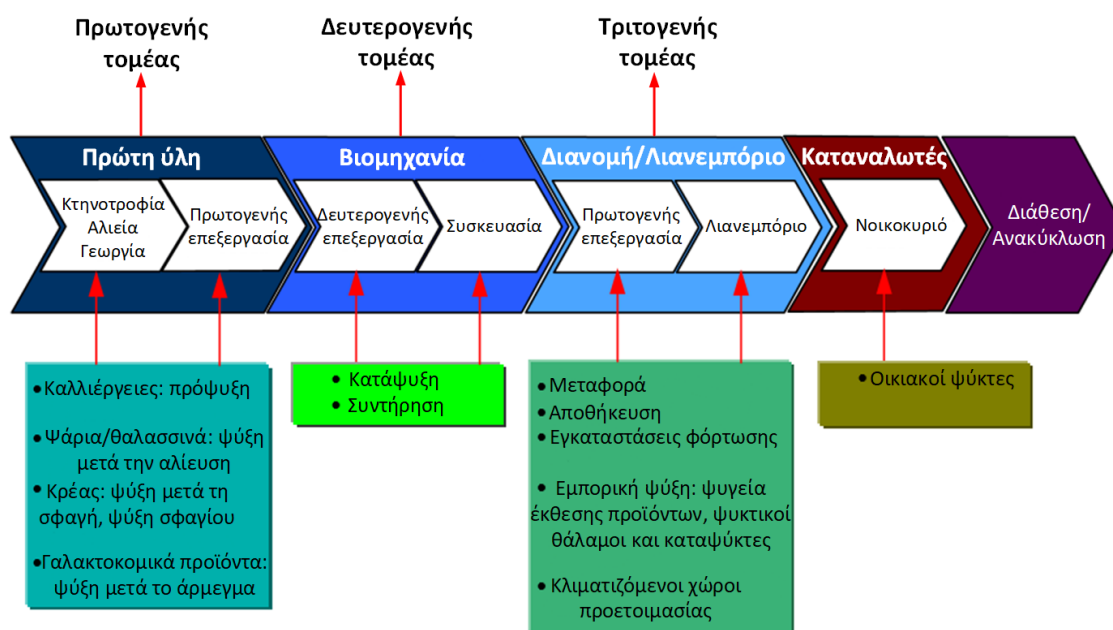
- i) μείωση κατά 20% των ενωσιακών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990
- ii) αύξηση κατά 20% του ποσοστού της ενωσιακής κατανάλωσης ενέργειας που παράγεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
- iii) βελτίωση κατά 20% της ενεργειακής απόδοσης της ΕΕ σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 [2].

Στις ανεπτυγμένες χώρες, υπάρχει επίσης μια τάση αύξησης της κατανάλωσης τροφίμων, τα οποία επηρεάζουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Green-House-Gases). Εκτιμάται ότι για τη Δυτική Ευρώπη η βιομηχανία τροφίμων είναι υπεύθυνη για το 20-30% των εκπομπών GHG. Μια σημαντική πηγή εκπομπών είναι η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή, τη διανομή και λιανική πώληση των τροφίμων. Στην ΕΕ, η διανομή τροφίμων και η λιανική τους πώληση ευθύνονται περίπου για το 7% των συνολικών εκπομπών GHG. Η ψύξη, η οποία είναι ολοένα και πιο σημαντική στην επεξεργασία και συντήρηση των τροφίμων, ενδέχεται να είναι υπεύθυνη για σημαντικό

ποσό εκπομπών GHG. Συγκεκριμένα υπολογίζεται ότι η τεχνολογία ψύξης ευθύνεται για το 15% του συνόλου της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό ποσοστό αν αναλογιστεί κανείς ότι περίπου το 72% των επιπτώσεων μιας ψυκτικής μονάδας στην υπερθέρμανση του πλανήτη οφείλεται στην κατανάλωση ενέργειας. Συνεπώς, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στις ψυκτικές εγκαταστάσεις καθίσταται βασική προτεραιότητα για τη δραστική μείωση των εκπομπών GHG στον τομέα της επεξεργασίας, διανομής και συντήρησης τροφίμων [1].

Μια άλλη σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στις εγκαταστάσεις ψύξης, είναι η διαρροή ψυκτικού μέσου από την εγκατάσταση προς το περιβάλλον. Το μεγάλο μήκος σωλήνων και οι πολλαπλές τους συνδέσεις αυξάνουν την πιθανότητα διαρροής ψυκτικού. Οι υδροφθοράνθρακες – HFCs οι οποίοι χρησιμοποιούνται προς το παρόν κατά κόρον στις εγκαταστάσεις ψύξης τροφίμων, έχουν μηδενικό δυναμικό καταστροφής του όζοντος (Ozone-Depletion-Potential) και παρέχουν συγκρίσιμες επιδόσεις με ψυκτικά μέσα όπως οι χλωροφθοράνθρακες – CFCs και οι υδροχλωροφθοράνθρακες – HCFCs, των οποίων η χρήση έχει απαγορευθεί. Ωστόσο, η διαρροή ψυκτικών μέσων HFCs στην ατμόσφαιρα, συμβάλει σημαντικά στην αύξηση των εκπομπών GHG, λόγω του υψηλού δυναμικού τους υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global-Warming-Potential) [1].

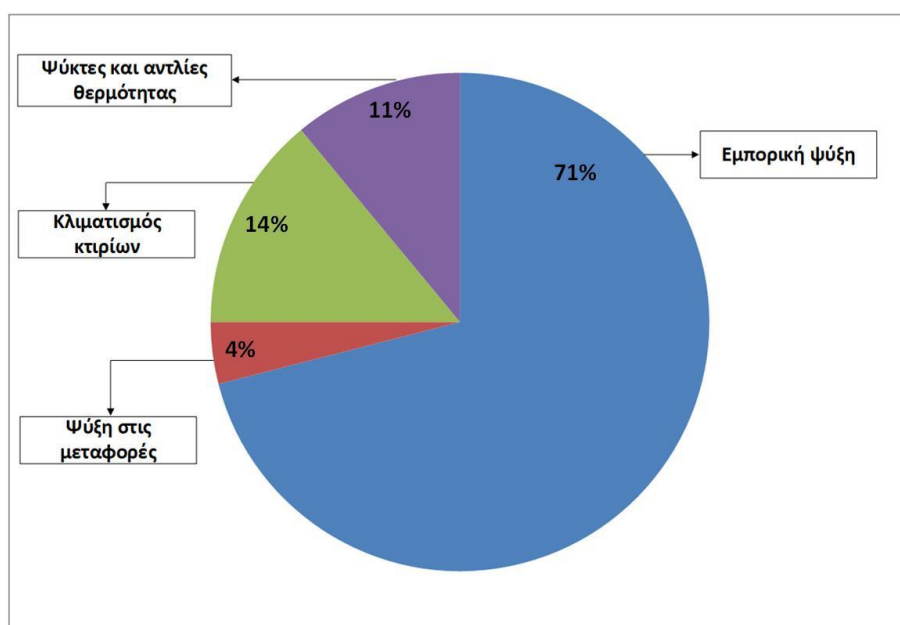
Προκειμένου να εκτιμηθούν οι εκπομπές GHG στη βιομηχανία τροφίμων, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη τα στάδια σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος διατροφής. Αυτά τα στάδια απεικονίζονται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Ψυκτική αλυσίδα και τεχνολογίες ψύξης στα στάδια του κύκλου ζωής των προϊόντων διατροφής [1]

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 1.1 η ψύξη χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των προϊόντων διατροφής, για τον έλεγχο της θερμοκρασίας που απαιτείται για τη διατήρηση της ποιότητας των τροφίμων από τη συγκομιδή έως την κατανάλωση στο σπίτι. Ωστόσο, η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για ψύξη στην Ε.Ε προέρχεται από τον τομέα λιανικής πώλησης τροφίμων, αποτελώντας περίπου το 45% του συνόλου της κατανάλωσης ενέργειας στην ψυκτική αλυσίδα.

Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η κατανομή της συνολικής ενέργειας ψύξης στον τριτογενή τομέα παραγωγής στην ΕΕ, για το 2010 σε όλους τους τύπους εξοπλισμού. Η πλειοψηφία του εξοπλισμού ψύξης και κλιματισμού που χρησιμοποιείται στον τριτογενή τομέα είναι τύπου μαζικής παραγωγής, εκτός ορισμένων μηχανών που αγοράζονται ολόκληρες ή εντάσσονται στον υπάρχον εξοπλισμό και οι οποίες δεν απαιτούν ιδιαίτερη τεχνογνωσία. Παρατηρούμε ότι η εμπορική ψύξη καταλαμβάνει ποσοστό μεγαλύτερο από το 70% της συνολικής ενέργειας ψύξης στον τριτογενή τομέα.



Σχήμα 1.2: Κατανομή της ενέργειας ψύξης ανά τύπο εξοπλισμού στον τριτογενή τομέα παραγωγής στην ΕΕ για το 2010 [2]

Επομένως η ψύξη έχει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στη μείωση των απωλειών μετά τη συγκομιδή και παρασκευή των προϊόντων, διατηρώντας τα τρόφιμα και τα ποτά σε συντήρηση ή κατάψυξη. Κατά συνέπεια, συμβάλλει σημαντικά στην επισιτιστική ασφάλεια στις αναπτυγμένες οικονομίες, όπως η ΕΕ και όλο και περισσότερο στις αναπτυσσόμενες χώρες. Είναι ζωτικής σημασίας η διατήρηση τόσο της ασφάλειας, όσο και της ποιότητας των τροφίμων. Η αποθήκευση σε ψυγεία είναι επίσης σημαντική για την εξομάλυνση των εποχιακών διακυμάνσεων της γεωργικής παραγωγής, για την περαιτέρω αύξηση της επισιτιστικής ασφάλειας. Οι απώλειες τροφίμων που οφείλονται στην έλλειψη επαρκούς ψύξης, εκτιμήθηκαν στο 9% της παραγωγής στις αναπτυγμένες χώρες, όπως η ΕΕ και κατά κανόνα στο 23% στις αναπτυσσόμενες. Η εμπιστοσύνη στην ασφαλή μεταφορά και στην

αποθήκευση τροφίμων αυξάνεται με την αύξηση της αστικοποίησης, καθώς ο πληθυσμός κατοικεί σε όλο και μεγαλύτερη έκταση από τις πηγές τροφίμων και έτσι αναμένεται σημαντική ανάπτυξη στην τεχνολογία μεταφοράς και αποθήκευσης τροφίμων. Εντούτοις, στην ΕΕ η αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων έχει ήδη μια πολύ ανεπτυγμένη υποδομή ψύξης τροφίμων και η μελλοντική ανάπτυξη θα είναι χαμηλή. Συγκεκριμένα προβλέπεται για την εμπορική ψύξη στο λιανικό εμπόριο τροφίμων ένα ποσοστό αύξησης μόνο 0,24% ετησίως [2].

1.2 Εμπορική ψύξη

Η εμπορική ψύξη περιλαμβάνει όλο τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στους τομείς λιανικής πώλησης τροφίμων (σουπερμάρκετ και καταστήματα πώλησης τροφίμων) και υπηρεσιών τροφίμων για την προετοιμασία, τη διατήρηση και την έκθεση κατεψυγμένων και νωπών τροφίμων και ποτών, με σκοπό να είναι διαθέσιμα για αγορά από τους πελάτες. Καλύπτει τόσο τον εξοπλισμό στον οποίο έχουν πρόσβαση οι πελάτες, όσο και τον εξοπλισμό στον οποίο έχουν πρόσβαση μόνο οι υπάλληλοι ενός οργανισμού (όπως το προσωπικό υπηρεσιών εστίασης). Το μέγεθος ισχύος τέτοιων εγκαταστάσεων ποικίλλει από μικρούς ψύκτες του 1 kW ισχύος, μέχρι μονάδες συμπύκνωσης που παρέχουν ψύξη σε δεκάδες καταψύκτες λιανικής πώλησης ή ψυκτικούς θαλάμους ενός σουπερμάρκετ, συνολικής ισχύος 200 kW. Μεταξύ των κατασκευαστών και των προμηθευτών εξοπλισμού ψυκτικών εγκαταστάσεων, γίνεται η εξής διάκριση: εάν πρόκειται για ψυγεία στα οποία υπάρχει δημόσια πρόσβαση (πελάτες/καταναλωτές), ο εξοπλισμός αναφέρεται ως «εμπορική ψύξη», εάν στα συστήματα ψύξης έχουν πρόσβαση μόνο υπάλληλοι, τότε πρόκειται για «επαγγελματική ψύξη».

Όσον αφορά την εμπορική ψύξη, τα καταστήματα λιανικής πώλησης τροφίμων στο Ηνωμένο Βασίλειο ευθύνονται για περίπου το 3% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και το 1% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα καταστήματα αυτά ταξινομούνται με βάση τη συνολική επιφάνεια του χώρου πωλήσεων προϊόντων ως:

- Μικροκαταστήματα – μικρότερη από 280 m² επιφάνεια χώρου πωλήσεων
- Σουπερμάρκετ (καταστήματα μέσης κατηγορίας) – 280 m² έως 1400 m²
- Υπερκαταστήματα – 1400 m² έως 5000 m²
- Υπεραγορές – 5000 m² έως πάνω από 10000 m² [3]

Τα μικροκαταστήματα (convenience stores) βρίσκονται συνήθως εντός των αστικών κέντρων κοντά σε συγκροτήματα πολυκατοικιών ή μπορούν να αποτελούν και τμήμα πρατηρίων βενζίνης. Το εύρος των προϊόντων τους και συνεπώς ή ανάγκες αποθήκευσης τους εξαρτώνται από την τοπική ζήτηση της αγοράς. Περιέχουν κυρίως μικρά ψυγεία αναψυκτικών και καταψύκτες και είναι ηλεκτρικώς κλιματιζόμενα.

Τα σουπερμάρκετ είναι ο πιο κοινός τύπος καταστημάτων λιανικής πώλησης τροφίμων. Βρίσκονται επίσης εντός των αστικών κέντρων, αποτελούνται από έναν ή δύο ορόφους και περιέχουν μεγάλα ψυγεία έκθεσης προϊόντων και καταψύκτες. Έχουν μεγάλο εύρος και

ποικιλία προϊόντων, όπως θαλασσινά, κρέατα, αλλαντικά και γαλακτοκομικά προϊόντα. Για τη θέρμανση χρησιμοποιείται λέβητας πετρελαίου ή φυσικού αερίου και ο κλιματισμός πραγματοποιείται μέσω μονάδων ανακυκλοφορίας αέρα στην οροφή του καταστήματος.

Τα υπερκαταστήματα (superstores) αποτελούν μεγαλύτερης κλίμακας σουπερμάρκετ και γι' αυτό το λόγο βρίσκονται συνήθως στα όρια του αστικού ιστού ή σε προάστια μεγαλουπόλεων. Εμφανίζουν μεγαλύτερο εύρος και ποικιλία προϊόντων. Τα περισσότερα έχουν και ψυκτικούς θαλάμους για την αποθήκευση και έκθεση προϊόντων μαναβικής και κρεάτων. Οι πλειοψηφία αυτών των σουπερμάρκετ έχουν κεντρική θέρμανση λέβητα πετρελαίου ή φυσικού αερίου, ενώ εμφανίζεται όλο και περισσότερο η χρήση μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP). Ο κλιματισμός του κτιρίου πραγματοποιείται μέσω κεντρικής μονάδας κλιματισμού.

Οι υπεραγορές (hypermarkets) αποτελούν τα μεγαλύτερα καταστήματα λιανικής πώλησης προϊόντων και βρίσκονται, όπως και τα υπερκαταστήματα, εκτός του αστικού ιστού, σε αραιοκατοικημένες περιοχές. Είναι πολυώροφα και έχουν εκτός των άλλων, τομείς πώλησης προϊόντων ένδυσης και ηλεκτρονικών ειδών. Περίπου το 75% όλων των υπεραγορών είναι ανοιχτό 24 ώρες την ημέρα. Η πλειονότητα αυτών των καταστημάτων θερμαίνεται από ένα κεντρικό σύστημα καυτού νερού χαμηλής θερμοκρασίας (Low-Temperature-Hot-Water), το οποίο παράγεται σε λέβητα φυσικού αερίου, ενώ το 15% έχει εγκατεστημένη μονάδα συμπαραγωγής που παράγει ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Ο κλιματισμός του κτιρίου πραγματοποιείται μέσω κεντρικής μονάδας κλιματισμού [4].

Στο Ηνωμένο Βασίλειο, το λιανικό εμπόριο τροφίμων καταναλώνει σημαντικά ποσά ενέργεια, με τα μεγάλα σουπερμάρκετ να αντιπροσωπεύουν το 3-5% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα κατάστημα λιανικής πώλησης τροφίμων, ποικίλει ανάλογα τον τύπο και το μέγεθος του καταστήματος, τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου σε θέρμανση και κλιματισμό, τη δραστηριότητα πωλήσεων και τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου που χρησιμοποιούνται. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά τετραγωνικό επιφάνειας καθαρού χώρου πωλήσεων, ονομάζεται ένταση ηλεκτρικής ενέργειας. Το μέγεθος αυτό υπολογίστηκε για 2570 διαφορετικού τύπου καταστήματα στο Η.Β και παρουσιάζεται στον πίνακα του Σχήματος 1.3 [1].

| Τύπος καταστήματος | # καταστημάτων | Περιοχή πωλήσεων m ² | Ένταση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh/m ²) | |
|--------------------|----------------|---------------------------------|---|-----------|
| | | | Εύρος | Μέση τιμή |
| Μικροκαταστήματα | 640 | 80-280 | 700-2900 | 1540 |
| Σουπερμάρκετ | 1360 | 280-1400 | 500-2600 | 1000 |
| Υπερκαταστήματα | 420 | 1400-5000 | 500-1500 | 920 |
| Υπεραγορές | 150 | 5000-10000 | 500-1180 | 770 |

Σχήμα 1.3: Πίνακας εντάσεως ηλεκτρικής ενέργειας διαφόρων τύπων καταστημάτων λιανικής πώλησης προϊόντων [1]

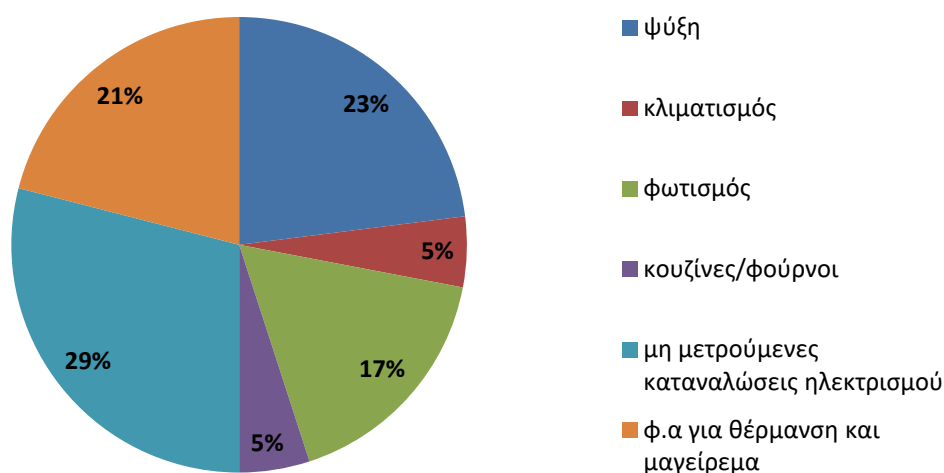
Η ένταση ηλεκτρικής ενέργειας στα καταστήματα λιανικής πώλησης προϊόντων χρησιμοποιείται για τη σύγκριση καταστημάτων τα οποία εμπορεύονται παρόμοιες ποσότητες προϊόντων τροφίμων, που αποθηκεύονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, συντήρησης ή κατάψυξης, αλλά και μη-επισιτιστικά προϊόντα.

1.3 Κατανομή ενεργειακής κατανάλωσης στα σουπερμάρκετ

Με τον όρο σουπερμάρκετ από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται όλα τα μέσης και μεγάλης κλίμακας καταστήματα λιανικής πώλησης προϊόντων. Τα σουπερμάρκετ λοιπόν αποτελούν έναν από τους πιο ενεργοβόρους τύπους εμπορικών κτιρίων. Σημαντικό ποσό ενέργειας χρησιμοποιείται στη διατήρηση νωπών και κατεψυγμένων τροφίμων, τόσο για την έκθεσή τους στους καταναλωτές όσο και για την αποθήκευσή τους στα ψυγεία των αποθηκών. Οι εγκαταστάσεις ψύξης παράγουν επίσης ένα μεγάλο ποσό απορριπτόμενης θερμότητας που μπορεί να εκμεταλλευτεί σε αντλίες θερμότητας ή άλλο εξοπλισμό, για την παροχή θέρμανσης χώρου και νερού χρήσης. Τυπικά σουπερμάρκετ με επιφάνεια πωλήσεων 3700-5600 m² καταναλώνουν περίπου 2-3 GWh ετησίως για τη συνολική κατανάλωση ενέργειας στο κατάστημα [5].

Εκτός από τις ενεργειακές ανάγκες της ψυκτικής εγκατάστασης, ένα κατάστημα λιανικής πώλησης προϊόντων έχει και άλλες ενεργειακές ανάγκες όπως θέρμανση, εξαερισμός, κλιματισμός, φωτισμός κ.α. Για την ικανοποίηση όλων των ενεργειακών αναγκών ενός μεγάλου σουπερμάρκετ χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός ηλεκτρικού ρεύματος και φυσικού αερίου [4].

Η κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης σε ένα τυπικό σουπερμάρκετ που συστεγάζει φούρνο και εστιατόριο εντός του, φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Όπως παρατηρείται, με φυσικό αέριο ικανοποιείται περίπου το 20% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Τη μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο κατάστημα, αποτελούν οι μη μετρούμενες καταναλώσεις, με ποσοστό 29% επί της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, και ακολουθούν οι ανάγκες ψύξης και φωτισμού, με ποσοστά 23% και 17% αντίστοιχα. Τέλος, οι ανάγκες κλιματισμού και οι κατανάλωση ηλεκτρισμού στις κουζίνες και φούρνους του σουπερμάρκετ, αν αυτά υπάρχουν, καταλαμβάνουν περίπου 5%, η καθεμία, επί της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στο σουπερμάρκετ.



Σχήμα 1.4: Κατανομή κατανάλωσης ενέργειας σε σουπερμάρκετ [4]

1.3.1 Ηλεκτρισμός

Η ηλεκτρική ενέργεια αντιπροσωπεύει συνήθως περισσότερο από το 70% της ενέργειας που καταναλώνεται σε ένα σουπερμάρκετ. Ένα μεγάλο σουπερμάρκετ καταναλώνει 4.1 GWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως. Οι κύριες τελικές χρήσεις του ηλεκτρισμού σε ένα σουπερμάρκετ περιλαμβάνουν ψύξη, θέρμανση, εξαερισμό και κλιματισμό, φωτισμό και άλλες χρήσεις, όπως ταμειακές μηχανές, πρίζες και εξειδικευμένες υπηρεσίες καταστήματος, όπως αρτοποιεία ή μεγάλες ηλεκτρικές κουζίνες, οι οποίες εξυπηρετούν εστιατόριο πελατών ή προσωπικού. Η ποσοστιαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε τελική χρήση εξαρτάται από το εύρος και το πλήθος αυτών των τελικών χρήσεων σε ένα κατάστημα. Για παράδειγμα, οι ανάγκες ψύξης σε ένα σύγχρονο σουπερμάρκετ αποτελούν τη μεγαλύτερη τελική χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και αντιπροσωπεύουν συνήθως περισσότερο από το 50% της χρήσης ηλεκτρικού ρεύματος σε αυτό. Ωστόσο το ποσοστό αυτό μειώνεται στο 29% της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, στην περίπτωση υπεραγοράς που συστεγάζει εστιατόριο πελατών και αρτοποιείο [4].

1.3.1.1 Ψύξη

Μία από τις μεγαλύτερες χρήσεις της ηλεκτρικής ενέργειας στα σουπερμάρκετ είναι η ψυκτική εγκατάσταση. Τα ευπαθή προϊόντα τροφίμων πρέπει να φυλάσσονται υπό ψύξη κατά την έκθεση και την αποθήκευσή τους. Τα προϊόντα αυτά διατηρούνται σε συνθήκες συντήρησης, σε μέση θερμοκρασία (+3 έως +5 °C) και σε συνθήκες κατάψυξης, σε χαμηλή θερμοκρασία (-22 έως -18 °C). Η τυπική κατανάλωση ενέργειας για την ψύξη των σουπερμάρκετ είναι της τάξης του μισού του συνόλου του καταστήματος. Οι συμπιεστές και οι συμπυκνωτές αντιπροσωπεύουν το 60-70% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας ψύξης. Το υπόλοιπο ποσοστό καταναλώνεται από τους ανεμιστήρες στα ψυγεία έκθεσης και αποθήκευσης, από το φωτισμό των θυρίδων στα ψυγεία έκθεσης, από την απόψυξη του ατμοποιητή και από τους αντιθαμβωτικούς θερμαντήρες, που χρησιμοποιούνται για

την αποφυγή της δημιουργίας συμπυκνωμάτων στις πόρτες και στις εξωτερικές επιφάνειες των θυρών των ψυγείων [4].

Τα στοιχεία των συμπιεστών και των συμπυκνωτών της ψυκτικής εγκατάστασης βρίσκονται εκτός του χώρου πωλήσεων. Συγκεκριμένα οι συμπιεστές βρίσκονται σε κλειστό χώρο μηχανοστασίου, ενώ οι συμπυκνωτές τοποθετούνται σε ανοικτό χώρο στην οροφή ή έξω από το κατάστημα. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται, ότι η θερμότητα που απομακρύνεται από αυτά τα στοιχεία δεν προσθέτει άσκοπες αυξήσεις θερμοκρασίας στον χώρο των ψυγείων και των καταψυκτών, ενώ ταυτόχρονα οι χώροι πωλήσεων προστατεύονται από το θόρυβο που παράγουν αυτά τα στοιχεία. Αντίθετα, τα στοιχεία του ατμοποιητή βρίσκονται εντός των ψυγείων και καταψυκτών έκθεσης και αποθήκευσης προϊόντων τροφίμων.

Το ψυκτικό φορτίο μιας ψυκτικής εγκατάστασης, τόσο για την περίπτωση της συντήρησης όσο και για αυτή της κατάψυξης εξαρτάται από τις θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν στο τοπικό θερμικό περιβάλλον του ατμοποιητή και του συμπυκνωτή. Των θερμοκρασιών δηλαδή και των μεταβολών τους, που θέλουμε να επιτύχουμε στα ψυγεία και στους καταψύκτες, αλλά και στη θερμοκρασία στην οποία απάγουμε θερμότητα από τον συμπυκνωτή προς το εξωτερικό περιβάλλον. Θερμότητα από την περιοχή πωλήσεων μεταφέρεται προς το εσωτερικό των ψυγείων και των καταψυκτών όταν είναι ανοικτές οι θυρίδες τους, μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Επομένως, το ποσό ψυκτικού φορτίου που χρειάζεται ο ατμοποιητής προκειμένου να διατηρήσει το εσωτερικό των ψυγείων σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, επηρεάζεται από τη χρήση των ψυγείων, του πόσο συχνά δηλαδή οι πελάτες και το προσωπικό του καταστήματος ανοίγουν τα ψυγεία για να αφαιρέσουν ή να τοποθετήσουν προϊόντα. Στο συμπυκνωτή, ο ρυθμός της θερμότητας που απάγεται από το κύκλωμα ψυκτικού είναι συνάρτηση τόσο της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του θερμού ψυκτικού που εισέρχεται στο συμπυκνωτή και της τοπικής θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος, όσο και της παροχής αέρα που διακινούν οι ανεμιστήρες του συμπυκνωτή. Όταν αυξάνεται η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος, η δυνατότητα απαγωγής θερμότητας από το ψυκτικό στον εξωτερικό αέρα μειώνεται, με αποτέλεσμα να απαιτείται αύξηση των ανεμιστήρων του συμπυκνωτή που βρίσκονται σε λειτουργία ή της ταχύτητας περιστροφής τους ή αύξηση του φορτίου του συμπιεστή, ώστε να φτάσουμε σε μεγαλύτερη θερμοκρασία απαγωγής θερμότητας στο εξωτερικό περιβάλλον.

Έχει αποδειχθεί, ότι το ψυκτικό φορτίο εξαρτάται επίσης από τη σχετική υγρασία, η οποία επηρεάζει τόσο τα συνολικά ψυκτικά φορτία συντήρησης και κατάψυξης, όσο και της απαιτήσεις των αντιθαμβωτικών θερμαντήρων μπροστά από τις θυρίδες των ψυγείων και καταψυκτών και των κύκλων απόψυξης. Επειδή τα συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας, για κατεψυγμένα τρόφιμα, καταναλώνουν συνήθως περισσότερο ηλεκτρισμό από τα συστήματα μέσης θερμοκρασίας, για τρόφιμα που αποθηκεύονται σε θερμοκρασίες

συντήρησης, η αναλογία εγκατεστημένης ισχύος μεταξύ ψυκτικών κυκλωμάτων χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας επηρεάζει το συνολικό φορτίο ψύξης ενός καταστήματος.

Συνολικά, η αλληλεξάρτηση μεταξύ κάθε στοιχείου της ψυκτικής εγκατάστασης, σημαίνει ότι αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας αυξάνει τα ψυκτικά φορτία συντήρησης και κατάψυξης και επομένως, την ηλεκτρική κατανάλωση των επιμέρους στοιχείων. Στους ατμοποιητές αυτό οφείλεται στην αύξηση των τοπικών θερμοκρασιών έξω από τα ψυγεία και τους καταψύκτες. Στους συμπυκνωτές, έχουμε αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος καθώς οι ανεμιστήρες χρειάζεται να ανεβάσουν στροφές προκειμένου να παρέχουν μεγαλύτερη παροχή αέρα στους εναλλάκτες θερμότητας του συμπυκνωτή. Στους συμπιεστές, αυτό οφείλεται στην αύξηση της πίεσης εξόδου, ώστε να είναι δυνατή η επιστροφή του ψυκτικού στους ατμοποιητές. Τέλος, τα ψυγεία και οι καταψύκτες περιέχουν λαμπτήρες φωτισμού και ανεμιστήρες κυκλοφορίας αέρα, οι οποίοι αποτελούν ένα μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης στην ψυκτική εγκατάσταση [4].

1.3.1.2 Θέρμανση, εξαερισμός, κλιματισμός

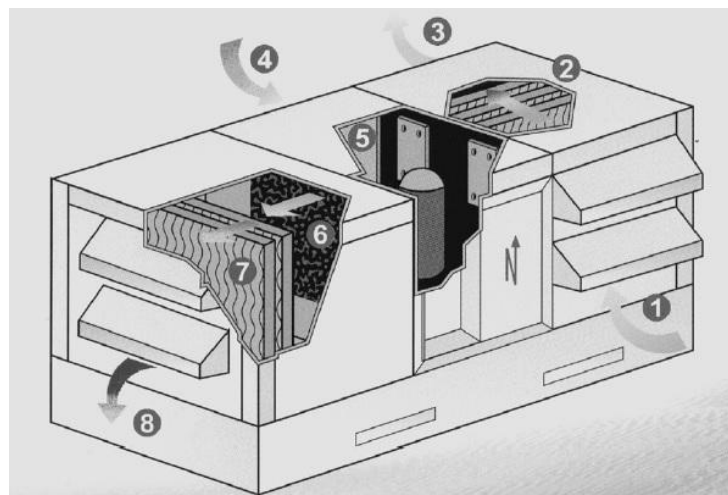
Η θέρμανση, ο εξαερισμός και ο κλιματισμός στα κτίρια λιανικής πώλησης τροφίμων παρέχουν συνθήκες θερμικής άνεσης στους πελάτες και το προσωπικό. Προϊόντα τα οποία είναι ευαίσθητα σε ακραίες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας, διατηρούνται σε ειδικά κλιματιζόμενους χώρους, όπως κρύες αίθουσες και προθήκες ψυγείων. Καθώς τα καταστήματα αποτελούν ουσιαστικά μεγάλα κιβώτια ανοιχτού τύπου, παρέχοντας τη μέγιστη ευελιξία χρήσης του χώρου στον λιανοπωλητή, η θέρμανση και η ψύξη μεγάλης κλίμακας παρέχονται από κεντρικά συστήματα εξαερισμού. Αυτά τα κεντρικά συστήματα αέρα παρέχουν θέρμανση και ψύξη στο χώρο πωλήσεων [4].

Στην πλειονότητα των σουπερμάρκετ, όλες οι ανάγκες θέρμανσης και ψύξης ικανοποιούνται μέσω ειδικά συσκευασμένων, για τις ανάγκες κάθε καταστήματος, μονάδων εξαερισμού (Air-Handling-Units). Αυτές οι μονάδες διαθέτουν έναν ανεμιστήρα και ένα κιβώτιο ανάμειξης, ένα πηνίο θέρμανσης και ένα ψυκτικό πηνίο με ειδικό συμπυκνωτή και συμπιεστές. Ο ανεμιστήρας έχει σταθερή ταχύτητα και το κιβώτιο ανάμειξης έχει ρυθμιστές που ρυθμίζουν την αναλογία του νωπού προς τον ανακυκλώμενο αέρα σταθερή στην τιμή 1:3, προκειμένου να ικανοποιούνται οι οδηγίες εξαερισμού για τα σουπερμάρκετ. Οι μονάδες εξαερισμού διανέμουν τον κλιματιζόμενο αέρα, μέσω αεραγωγών στην οροφή, στις περιοχές δαπέδων πωλήσεων. Τα θερμαντικά πηνία διακινούν καυτό νερό χαμηλής θερμοκρασίας, που παράγεται σε λέβητα καύσης φυσικού αερίου, οπότε αποτελεί συστατικό στοιχείο της συνολικής κατανάλωσης φυσικού αερίου. Σε περίπτωση που στο κατάστημα υπάρχει μονάδα συμπαραγωγής, αυτό το καυτό νερό χαμηλής θερμοκρασίας παράγεται στο λέβητα του συστήματος συμπαραγωγής. Οι μονάδες κλιματισμού αναμιγνύουν τον εισερχόμενο νωπό αέρα με ζεστό στρωματοποιημένο αέρα. Η ποσότητα θερμότητας που προστίθεται στον παρεχόμενο αέρα ρυθμίζεται μέσω του πηνίου θέρμανσης, για να διασφαλιστεί ότι διατηρούνται τα καθορισμένα επίπεδα

θερμοκρασίας της επιφάνειας δαπέδου των πωλήσεων. Τα πηνία ψύξης είναι κυκλώματα άμεσης εκτόνωσης που λειτουργούν σε έναν συμβατικό κύκλο ψύξης με συμπίεση ατμού, γεγονός που αποτελεί συστατικό στοιχείο της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Για την παροχή ψύξης στο χώρο πωλήσεων, το μίγμα νωπού και ανακυκλούμενου αέρα διέρχεται από το ψυκτικό πηνίο, στο οποίο η θερμοκρασία ψυκτικού διαμορφώνεται ως συνάρτηση της απαιτούμενης ποσότητας ψύξης. Για να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ψυκτικής ισχύος στα ψυκτικά πηνία, ο αέρας που διαφεύγει κάτω από τους ψυκτικούς θαλάμους και τα ψυγεία εισέρχεται στους αεραγωγούς και αναμιγνύεται με τον εξωτερικό νωπό αέρα.

Επίσης, σε πολλές σύγχρονες εγκαταστάσεις σουπερμάρκετ, χρησιμοποιείται σύστημα αντλίας θερμότητας για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και κλιματισμού. Τα συστήματα αντλιών θερμότητας, συμμετέχουν στη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Μια τυπική διάταξη αντλίας θερμότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5, στο οποίο απεικονίζονται και οι διάφορες θέσεις του ρεύματος αέρα εντός αυτής. Στα συστήματα αυτά, εξωτερικός αέρας αναρροφάται στη θέση 1 και αναμιγνύεται με τον ανακυκλώμενο αέρα. Το ρεύμα αέρα οδηγείται ακολούθως στη θέση 2, όπου φιλτράρεται, αφυγραίνεται και ψύχεται, αποδίδοντας θερμότητα στο ψυκτικό μέσο εντός του ατμοποιητή, και επομένως είναι σε θέση να εισαχθεί εντός του κλιματιζόμενου χώρου, μέσω της εξόδου στη θέση 3 [6].

Στην περίπτωση παραγωγής θέρμανσης, ο ανακυκλώμενος αέρας αναρροφάται στη θέση 4. Στη θέση 5, βρίσκεται το σύστημα ελέγχου της αντλίας θερμότητας και η διάταξη των συμπιεστών του ψυκτικού μέσου. Στη θέση 6, το ρεύμα αέρα θερμαίνεται στο συμπυκνωτή της αντλίας. Το θερμό ρεύμα αέρα στη συνέχεια, υγραίνεται στη θέση 7, προκειμένου να αυξηθεί το λανθάνον κέρδος θερμότητάς του που μπορεί να αποδώσει στον κλιματιζόμενο χώρο [7]. Τέλος, στη θέση 8 το ρεύμα αέρα αποδίδεται στο θερμαινόμενο χώρο, σε κατάσταση υψηλής υγρασίας και θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.5: Τυπική διάταξη συστήματος αντλίας θερμότητας [6]

Τέλος, συχνά γίνεται χρήση θερμών αεροκουρτίνων, για αποφυγή εισροής κρύου υπαίθριου αέρα, γύρω από τις περιοχές εισόδου, στην κεντρική είσοδο του καταστήματος και στις αποθήκες. Η θέρμανση που απαιτείται για τις αεροκουρτίνες παρέχεται είτε από το κύκλωμα καυτού νερού χαμηλής θερμοκρασίας, οπότε αποτελεί μέρος της συνολικής κατανάλωσης φυσικού αερίου, είτε μέσω ηλεκτρικών θερμαντήρων, γεγονός που αποτελεί μέρος της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίστοιχα, αεροκουρτίνες χρησιμοποιούνται και στους ψυκτικούς θαλάμους, με σκοπό την αποφυγή εισροής ζεστού αέρα από το χώρο πωλήσεων, εντός του ψυκτικού θαλάμου. Τα επίπεδα ρύθμισης θερμοκρασίας για θέρμανση και ψύξη ρυθμίζονται στους 19°C και στους 24°C αντίστοιχα [4].

1.3.1.3 Φωτισμός

Η εγκατάσταση φωτισμού σε ένα σουπερμάρκετ περιλαμβάνει φωτισμό εντός του χώρου πωλήσεων του καταστήματος, φωτισμό των γραφείων, των αποθηκών και των μηχανοστασίων, φωτισμό για τις φωτεινές πινακίδες στην πρόσοψη του καταστήματος, καθώς και για την περίμετρο του καταστήματος και τους χώρους στάθμευσης των αυτοκινήτων. Ο φωτισμός ενός καταστήματος επιλέγεται και ρυθμίζεται, με τρόπο ώστε να ικανοποιούνται ορισμένα επίπεδα LUX (μονάδα μέτρησης εκπομπής φωτεινής εκπομπής) κατά τις ώρες λειτουργίας του σουπερμάρκετ (8:00 – 21:00). Μετά το κλείσιμο του καταστήματος τα επίπεδα LUX ελαττώνονται σημαντικά για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας [4].

Στα σύγχρονης κατασκευής καταστήματα υπάρχει μια τάση, αυτομάτου ελέγχου του φωτισμού συναρτήσει των συνθηκών φυσικού φωτισμού. Σκοπός είναι η εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού, σε εκείνα τα καταστήματα, όπου οι προσόψεις αποτελούνται από μεγάλους υαλοπίνακες, οι οποίοι επιτρέπουν το φως της μέρας να διεισδύσει σε μεγάλο τμήμα του χώρου πωλήσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ένας αριθμός από σειρές με αυτόματα φώτα, κοντά στους υαλοπίνακες, σβήνουν, στις περιπτώσεις όπου πληρούνται τα ελάχιστα επίπεδα φωτισμού μέσω φυσικού φωτισμού. Αυτή η διαμόρφωση της παροχής τεχνητού φωτισμού, μπορεί να αντισταθμίσει σημαντικά τη συνολική κατανάλωση φωτισμού. Παράλληλα σε όλα τα νέα καταστήματα, καθώς και στα προσφάτως ανακαινισμένα, τοποθετούνται λαμπτήρες LED οι οποίοι συμβάλλουν στη δραστική μείωση του ποσοστού των αναγκών φωτισμού στη συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Επίσης, χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο ειδικός φωτισμό έμφασης για τη διαφοροποίηση ορισμένων προϊόντων ή την ενίσχυση του οπτικού χρωματισμού και της ποιότητας των φρούτων και των λαχανικών σε πολλά καταστήματα. Αυτό συνεπάγεται χρήση ειδικών λαμπτήρων LED ή πυρακτώσεως, οι οποίοι λειτουργούν κατά τις ώρες λειτουργίας του καταστήματος και συναθροίζονται στη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, επιπλέον του τυπικού φωτισμού της περιοχής πωλήσεων.

Τέλος, ο συνολικός φωτισμός αποτελεί σημαντικό ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (κατά μέσο όρο το 17%), ωστόσο η αναλογική επίδραση στη συνολική

κατανάλωση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον βιοκλιματικό σχεδιασμό του καταστήματος και τη χρήση λαμπτήρων αυτομάτου ελέγχου, για την εκμετάλλευση του φυσικού φωτισμού [4].

1.3.1.4 Ειδικές υπηρεσίες

Όλων των τύπων τα καταστήματα διαθέτουν διάφορες εξειδικευμένες υπηρεσίες, οι οποίες ορίζονται ως μη τυποποιημένες υπηρεσίες και δεν αφορούν τη λιανική πώληση προϊόντων. Για παράδειγμα, τα μεγάλης κλίμακας σουπερμάρκετ συστεγάζουν εστιατόρια πελατών, ενώ ορισμένα μικρότερα καταστήματα διαθέτουν καφετέριες πελατών. Η παροχή τέτοιων υπηρεσιών έχει αντίκτυπο στη σύγκριση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, σε επίπεδο συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, μεταξύ παρόμοιου τύπου καταστημάτων.

Οι ειδικές υπηρεσίες στα σουπερμάρκετ περιλαμβάνουν:

- εστιατόρια πελατών ή προσωπικού
- πρατήρια βενζίνης
- τμήματα ψηφιακών εκτυπώσεων
- οργανοληπτικοί μετρητές κρεάτων/ψαριών/αλλαντικών [4]

1.3.1.5 Μη μετρούμενες καταναλώσεις

Άλλες χρήσεις του ηλεκτρισμού που είναι κοινές σε όλα τα καταστήματα, είναι εκείνες που απαιτούνται στις διαδικασίες λιανικής πώλησης, συμπεριλαμβανομένων της ολοκλήρωσης της αγοράς προϊόντων στα ταμεία και των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, ασφαλείας και τηλεπικοινωνιών του καταστήματος. Επίσης, οι πρίζες τόσο στο χώρο πωλήσεων, όσο και στα γραφεία συμπεριλαμβάνονται σε αυτή τη κατηγορία [4].

1.3.2 Φυσικό αέριο

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το φυσικό αέριο αντιπροσωπεύει το 20% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται σε ένα κατάστημα, ενώ μια μέση υπεραγορά καταναλώνει 1.8 GWh φυσικού αερίου ετησίως. Οι κύριες τελικές χρήσεις περιλαμβάνουν τη θέρμανση και τις εξειδικευμένες υπηρεσίες αποθήκευσης, όπως τα αρτοποιεία και εγκαταστάσεις μαγειρέματος, αλλά η ποσοστιαία συνεισφορά κάθε τελικής χρήσης δεν είναι σαφής, καθώς η κατανάλωση αερίου δεν είναι εύκολα μετρούμενη [4].

1.3.2.1 Θέρμανση

Η θέρμανση στην πλειονότητα των καταστημάτων λιανικής πώλησης προϊόντων, παρέχεται κατά κύριο λόγο από θερμαντικά στοιχεία με χρήση καυτού νερού χαμηλής θερμοκρασίας (LTHW), όπως αναφέρεται στην ενότητα 1.3.1.2 παραπάνω και επομένως αποτελεί μέρος της συνολικής κατανάλωσης φυσικού αερίου. Επίσης, η θερμότητα που προσδίδουν οι θερμές αεροκουρτίνες πάνω από την κεντρική είσοδο του καταστήματος, παρέχεται με κεντρικά κυκλώματα LTHW, το οποίο παράγεται σε λέβητα φυσικού αερίου. Ενώ η κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης στις αεροκουρτίνες αναμένεται να έχει μεγάλη ευαισθησία στη μεταβολή της θερμοκρασίας εξωτερικού αέρα περιβάλλοντος, αυτό δεν

είναι εύκολα επαληθεύσιμο καθώς το ποσοστό της στη συνολική ετήσια κατανάλωση φυσικού αερίου ενός σουπερμάρκετ είναι εξαιρετικά μικρό [4].

1.3.2.2 Μαγείρεμα

Το μαγείρεμα και το ψήσιμο αποτελούν δευτερεύουσες χρήσεις του φυσικού αερίου στα περισσότερα μεγάλα καταστήματα. Το μαγείρεμα αναφέρεται στην προετοιμασία τροφίμων, για πώληση στην καντίνα των εργαζομένων, στα γεύματα στο εστιατόριο των πελατών, καθώς και στο μαγείρεμα έτοιμων φαγητών προς λιανική πώληση, όπως μαγειρεμένο κοτόπουλο και αρτοποιήματα. Τα προϊόντα αρτοποιίας περιλαμβάνουν φρέσκο ψωμί και άλλα προϊόντα αρτοποιίας και ζαχαροπλαστικής [4].

1.3.2.3 Συμπαγωγή (CHP)

Ορισμένα νέας κατασκευής καταστήματα διαθέτουν εγκατεστημένη μονάδα συμπαγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (Combined-Heat-Power) για χρήση εντός του σουπερμάρκετ. Με την εγκατάσταση αυτή καλύπτεται μέρος της κατανάλωσης θερμότητας του καταστήματος, μέσω καύσης φυσικού αερίου σε λέβητα, ενώ παράγεται παράλληλα ηλεκτρικό ρεύμα μέσω ηλεκτρογεννήτριας, το οποίο παρέχεται στη συνέχεια στο εθνικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Τα καταστήματα με εγκατάσταση συμπαγωγής παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη κατανάλωση φυσικού αερίου, ωστόσο εμφανίζουν μεγάλο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας σε σχέση με τα υπόλοιπα καταστήματα [4].

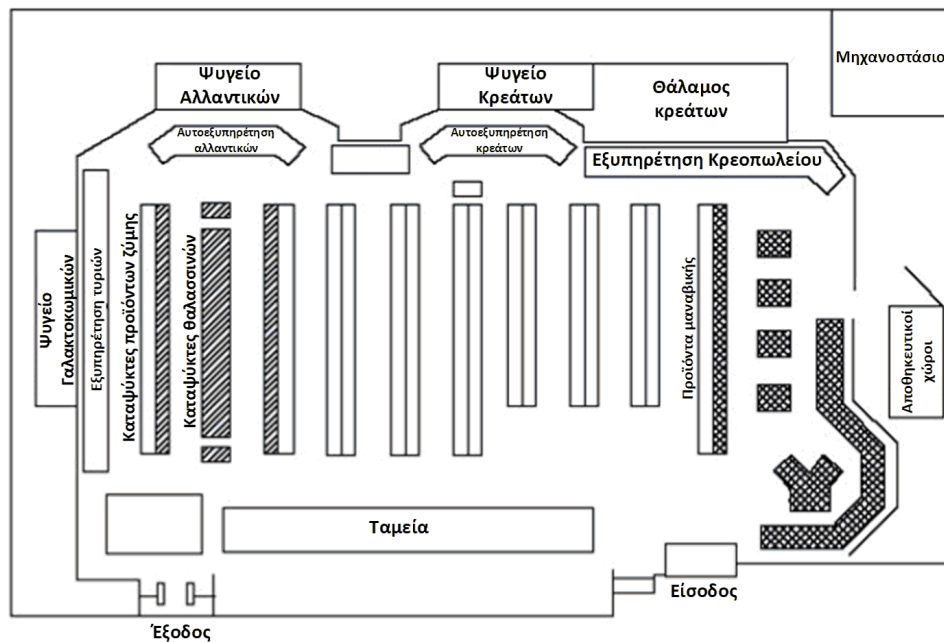
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ψυκτικές εγκαταστάσεις σε σουπερμάρκετ

2.1 Περιγραφή συνήθους ψυκτικής εγκατάστασης

Όπως προαναφέρθηκε η ψυκτική εγκατάσταση καταναλώνει το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης σε ένα σύγχρονο σουπερμάρκετ. Τα προϊόντα τροφίμων διατηρούνται σε περιβάλλον ψύξης τόσο κατά την έκθεσή τους προς τους καταναλωτές στο χώρο πωλήσεων, όσο και κατά την αποθήκευσή τους στους χώρους αποθήκευσης εμπορευμάτων του καταστήματος. Ανάλογα με το είδος τους, τα προϊόντα, διατηρούνται είτε σε συνθήκες συντήρησης (γαλακτοκομικά, αλλαντικά), σε μέση θερμοκρασία (+3 έως +5 °C), είτε σε συνθήκες κατάψυξης, σε χαμηλή θερμοκρασία (-22 έως -18 °C). Για το λόγο αυτό το σύστημα ψύξης διακρίνεται σε δύο ανεξάρτητα, τις περισσότερες φορές, κυκλώματα: το κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας (Medium Temperature Circuit – MT) και το κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας (Low Temperature Circuit – LT). Όπως είναι προφανές, το κύκλωμα MT αφορά την παροχή ψυκτικής ισχύος στους ψύκτες και στους ψυκτικούς θαλάμους, ενώ το κύκλωμα LT εξυπηρετεί τους καταψύκτες και τους θαλάμους κατάψυξης του καταστήματος [4].

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η κάτοψη του χώρου πωλήσεων ενός τυπικού σουπερμάρκετ. Στο σχήμα φαίνονται τα ψυγεία γαλακτοκομικών, κρεάτων και αλλαντικών, στοιχεία του κυκλώματος μέσης θερμοκρασίας (MT), καθώς και οι καταψύκτες προϊόντων ζύμης (πίτσες, πίτες κλπ) και θαλασσινών, που ανήκουν στο κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας (LT). Διακρίνονται επίσης, το μηχανοστάσιο και οι αποθηκευτικοί χώροι, οι οποίοι βρίσκονται στο πίσω μέρος του καταστήματος.

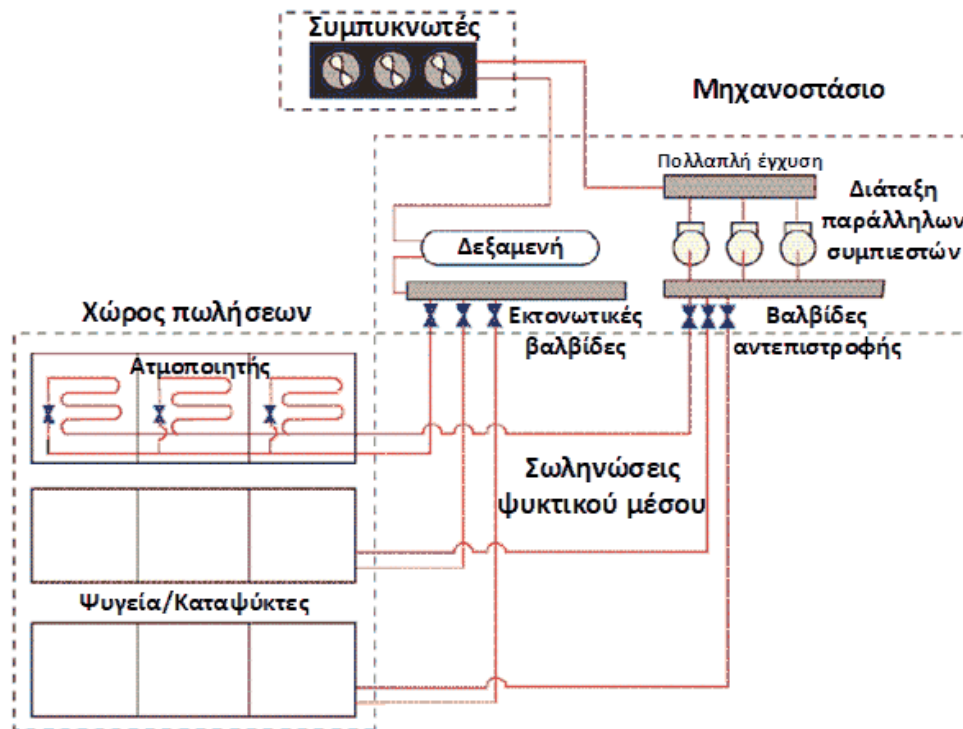


Σχήμα 2.1: Κάτοψη χώρου πωλήσεων τυπικού σουπερμάρκετ [5]

Το πιο διαδεδομένο σύστημα ψύξης για τα σουπερμάρκετ σήμερα είναι το κεντρικό σύστημα άμεσης εκτόνωσης (Centralised Direct Expansion System - DX), στο οποίο πραγματοποιείται μηχανική συμπίεση ατμών σε διάταξη συμπιεστών. Όλοι οι ψύκτες και καταψύκτες έκθεσης και αποθήκευσης και οι ψυκτικοί θάλαμοι χρησιμοποιούν εναλλάκτες ψυκτικού αέρα άμεσης εκτόνωσης (ατμοποιητές) που συνδέονται με τους συμπιεστές των συστημάτων MT και LT, οι οποίοι βρίσκονται μηχανοστάσιο στο πίσω μέρος, στο υπόγειο ή στην οροφή του καταστήματος. Αυτό απαιτεί μεγάλο μήκος σωληνώσεων και πολλαπλές συνδέσεις για την παροχή ψυκτικού υγρού στα ψυγεία και τους καταψύκτες των συστημάτων, με σκοπό την ευκολία και ταχύτητα εξυπηρέτησης. Ωστόσο, μεγάλο μήκος σωληνώσεων συνεπάγεται μεγάλες πιθανότητες διαρροής ψυκτικού, που αποτελεί σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σήμερα, αυτή η πρακτική αλλάζει και ο σχεδιασμός των σύγχρονων σουπερμάρκετ στοχεύει στη μείωση των διαρροών [5].

Η απόρριψη της θερμότητας γίνεται συνήθως με αερόψυκτους συμπυκνωτές επειδή έχουν το μικρότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Οι συμπυκνωτές εξάτμισης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν, μειώνοντας τη θερμοκρασία συμπύκνωσης και την κατανάλωση ενέργειας του συστήματος. Ωστόσο, έχουν αυξημένο κόστος συντήρησης και εγκατάστασης. Σε κάθε περίπτωση, η θερμοκρασία συμπύκνωσης συνήθως ρυθμίζεται στους 10°C μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος, με ελάχιστο όριο περίπου στους 21°C (περίπου η χαμηλότερη θερμοκρασία συμπύκνωσης για παλινδρομικούς συμπιεστές που είναι ο πιο κοινός τύπος που χρησιμοποιείται στα σουπερμάρκετ) [5].

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται ένα τυπικό μονογραμμικό διάγραμμα κεντρικού συστήματος άμεσης εκτόνωσης (DX). Διακρίνονται τα βασικά στοιχεία της ψυκτικής εγκατάστασης. Αρχικά το ψυκτικό μέσο, το οποίο βρίσκεται σε αέρια μορφή, συμπιέζεται σε μια διάταξη παράλληλων συμπιεστών, έως την πίεση, και επομένως θερμοκρασία, στην οποία θα γίνει η συμπύκνωση στη συνέχεια. Οι παροχές ψυκτικού στις εξόδους των συμπιεστών, συγκεντρώνονται στο δοχείο πολλαπλής έγχυσης. Στη συνέχεια η συνολική παροχή ψυκτικού οδηγείται στους συμπυκνωτές. Εκεί αποδίδεται η θερμότητα του ψυκτικού στο περιβάλλον. Ακολούθως το ψυκτικό το οποίο είναι πλέον υγρό, συγκεντρώνεται σε μια δεξαμενή. Αναλόγως το απαιτούμενο φορτίο, η απαιτούμενη παροχή ψυκτικού οδηγείται από τη δεξαμενή συγκέντρωσης προς τις εκτονωτικές βαλβίδες, εντός των ψυγείων ή καταψυκτών. Εκεί το υγρό ψυκτικό εκτονώνεται μέχρι την απαιτούμενη θερμοκρασία ατμοποίησης και οδηγείται στους ατμοποιητές, εντός των ψυγείων ή καταψυκτών. Εντός του ατμοποιητή, το ψυκτικό μέσο απορροφά θερμότητα από τον αέρα του ψυγείου/καταψύκτη, με αποτέλεσμα να προσδίδει ψυκτική ισχύ, ώστε να διατηρείται σταθερή η μέση ή χαμηλή θερμοκρασία. Τέλος, το ψυκτικό μέσο επιστρέφει στους συμπιεστές, προκειμένου να ολοκληρωθεί ο ψυκτικός κύκλος.



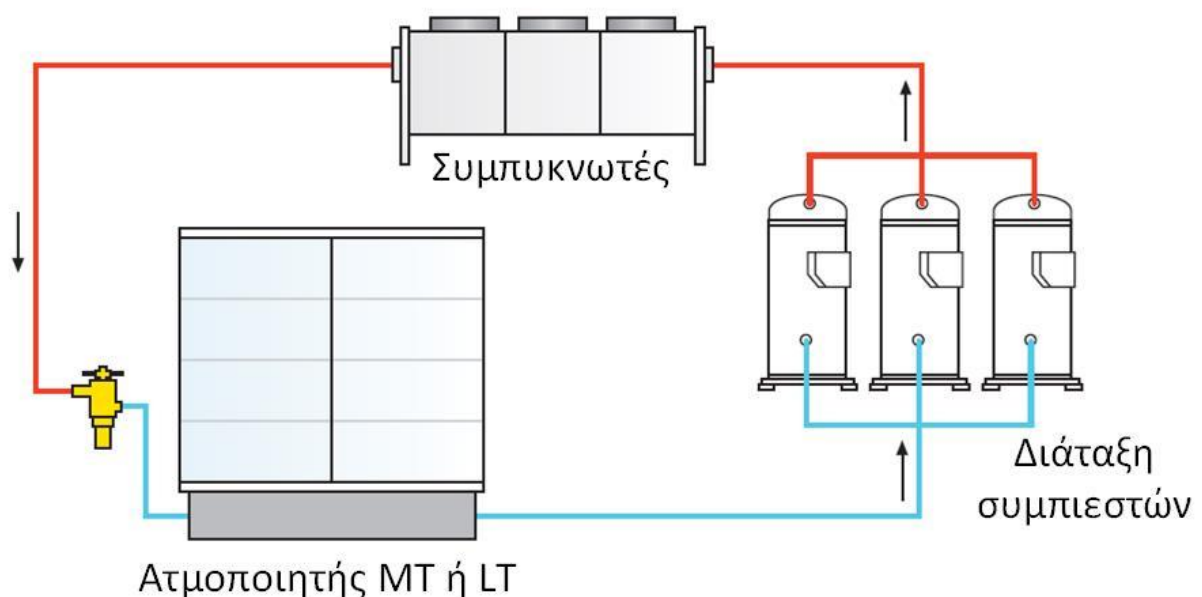
Σχήμα 2.2: Μονογραμμικό διάγραμμα κεντρικού συστήματος άμεσης εκτόνωσης (DX) [5]

2.2 Τύποι ψυκτικών εγκαταστάσεων σε σουπερμάρκετ

2.2.1 Κεντρικό σύστημα άμεσης εκτόνωσης – Centralised Direct Expansion System (DX)

Πρόκειται για ένα σύστημα άμεσης εκτόνωσης που χρησιμοποιείται τόσο για το κύκλωμα ψύξης χαμηλής θερμοκρασίας (LT), όσο και για μέσης θερμοκρασίας (MT). Το σύστημα αυτό αποτελείται από δύο εντελώς ξεχωριστά επιμέρους συστήματα MT και LT και είναι ο πλέον διαδεδομένος τύπος ψυκτικής εγκατάστασης στα σουπερμάρκετ της Ευρώπης σήμερα.

Κάθε επιμέρους σύστημα MT και LT χρησιμοποιεί μία κεντρική διάταξη παράλληλων συμπιεστών που αποτελείται από τρεις έως οκτώ συνήθως παλινδρομικούς ή σπειροειδείς (scroll) συμπιεστές. Η διάταξη των συμπιεστών βρίσκεται στο μηχανοστάσιο και συνδέεται με έναν εξωτερικό αερόψυκτο συμπυκνωτή. Ψυκτικό υγρό υψηλής πίεσης αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή και στη συνέχεια τροφοδοτείται στα ψυγεία/καταψύκτες του καταστήματος. Το ψυκτικό μέσο, αφού ατμοποιηθεί ακολούθως επιστρέφει στη διάταξη των συμπιεστών μέσω της γραμμής αναρρόφησης [8]. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Μονογραμμικό διάγραμμα κεντρικού ψυκτικού συστήματος άμεσης εκτόνωσης [8]

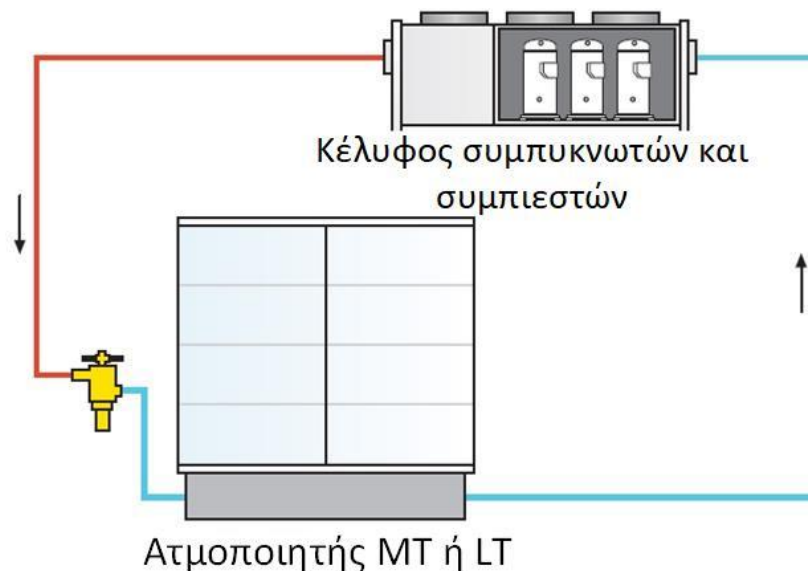
2.2.2 Κατανεμημένο σύστημα άμεσης εκτόνωσης – Distributed Direct Expansion System

Το σύστημα αυτό είναι παρόμοιο με το κεντρικό σύστημα άμεσης εκτόνωσης, με τη διαφορά ότι η διάταξη των συμπιεστών βρίσκεται δίπλα ή εντός του περιβλήματος του συμπυκνωτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 [8].



Σχήμα 2.4: Διάταξη συμπιεστών εντός του κελύφους των συμπυκνωτών [8]

Αντί ενός κεντρικού μηχανοστασίου, η διάταξη των συμπιεστών, οι οποίοι είναι μικρότερου μεγέθους, τοποθετείται μέσα σε κάθε μονάδα συμπυκνωτή. Οι μονάδες των συμπυκνωτών είναι τοποθετημένες στην οροφή του καταστήματος, ακριβώς πάνω από το χώρο των ψυγείων ή καταψυκτών του κυκλώματος MT ή LT αντίστοιχα, προκειμένου να αποφεύγεται το μεγάλο μήκος σωληνώσεων [8]. Ένα τυπικό κατανεμημένο σύστημα ψύξης άμεσης εκτόνωσης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5.

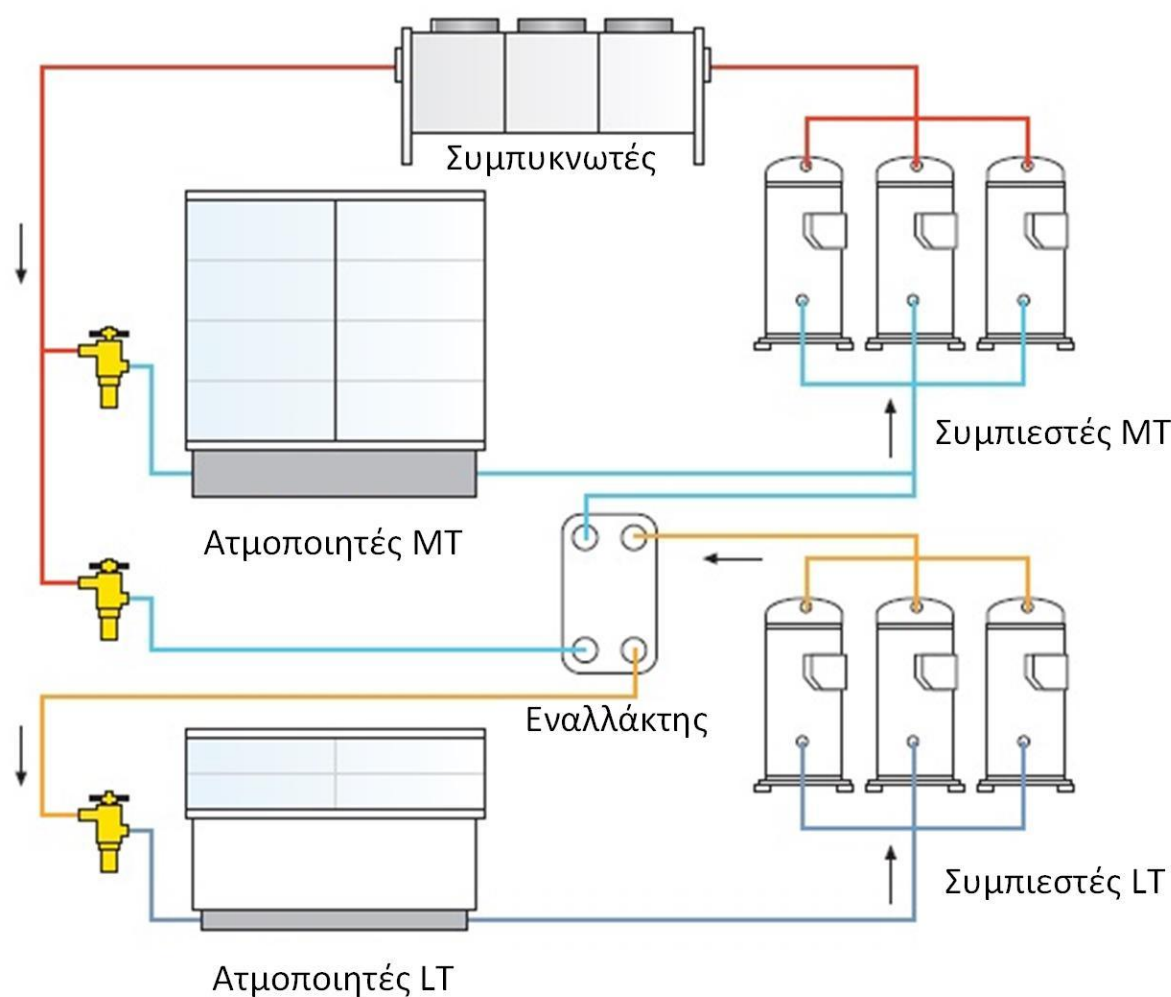


Σχήμα 2.5: Μονογραμμικό διάγραμμα κατανεμημένου ψυκτικού συστήματος κατανεμημένο άμεσης εκτόνωσης [8]

2.2.3 Σύστημα Cascade

Στο σύστημα Cascade (καταρράκτης), χρησιμοποιείται ένα κεντρικό σύστημα άμεσης εκτόνωσης για την κάλυψη των φορτίων του MT κυκλώματος, ενώ το LT σύστημα αποδίδει τη θερμότητα συμπύκνωσης, μέσω εναλλάκτη θερμότητας, στη γραμμή αναρρόφησης του MT κυκλώματος [8].

Το κύκλωμα LT λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες συμπύκνωσης και κατ' επέκταση πιέσεις, με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτό το ψυκτικό R-744 (CO₂). Μια τέτοια ψυκτική εγκατάσταση δεν διαφέρει θεμελιωδώς από εκείνες των συστημάτων που χρησιμοποιούν συμβατικά ψυκτικά μέσα. Η πίεση εκτόνωσης (περίπου 30-35 bar) παραμένει εντός των κανονικών ορίων λειτουργίας των εξαρτημάτων και των σωληνώσεων (τυπικά στα 40 bar). Οι απώλειες θερμότητας εντός του επιπλέον εναλλάκτη, μειώνουν τη συνολική ενεργειακή απόδοση του ψυκτικού κύκλου, σε σχέση με ένα τυπικό σύστημα άμεσης εκτόνωσης. Το μονογραμμικό διάγραμμα του Cascade ψυκτικού συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6.



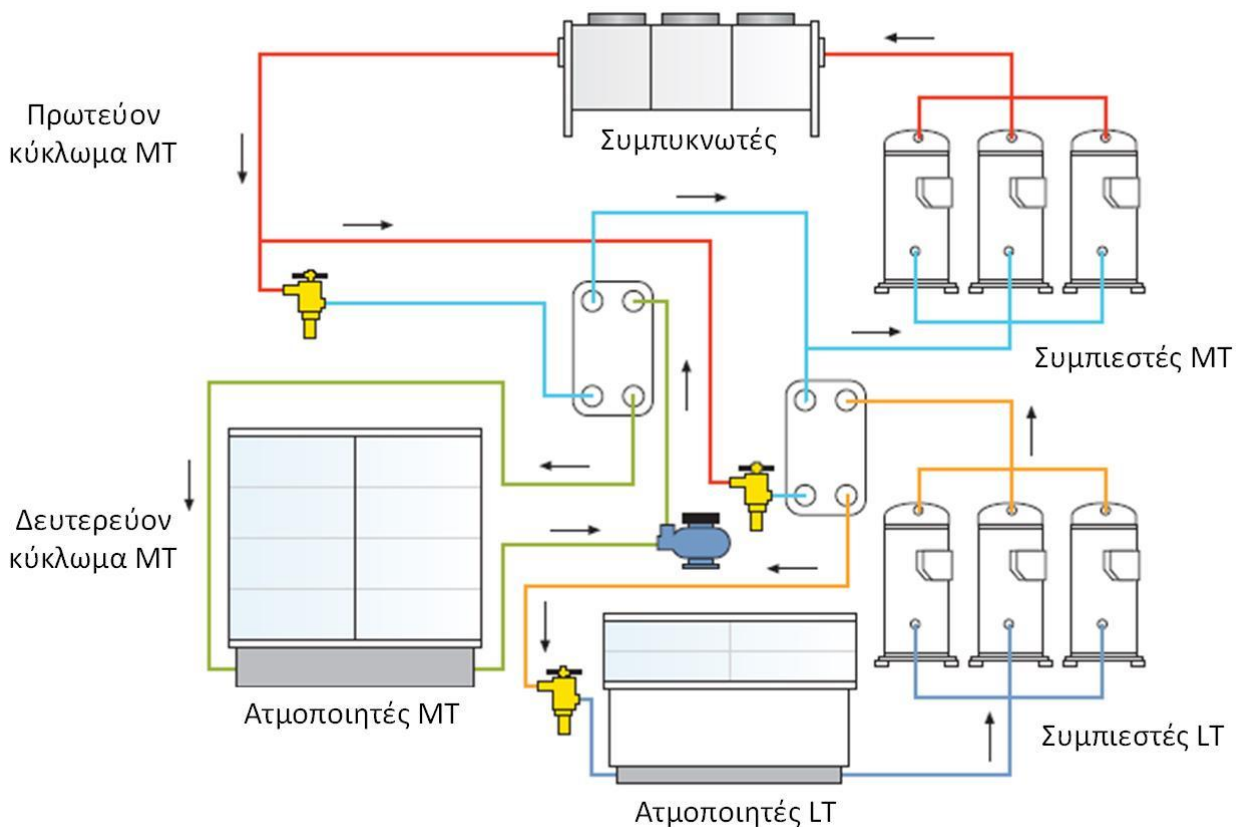
Σχήμα 2.6: Μονογραμμικό διάγραμμα ψυκτικού Cascade συστήματος [8]

2.2.4 Δευτερεύον σύστημα

Ένα δευτερεύον ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται στο κύκλωμα MT του σουπερμάρκετ. Η διάταξη του κυκλώματος LT είναι ίδια με αυτή του Cascade συστήματος, που περιγράφεται στην ενότητα (2.2.3).

Τα ψυγεία και οι ψυκτικοί θάλαμοι του κυκλώματος MT, ψύχονται μέσω της κυκλοφορίας δευτερεύοντος ψυκτικού μέσου, που συνήθως είναι γλυκόλη ή κάποιο άλλο τυπικό υγρό μεταφοράς θερμότητας. Το δευτερεύον ψυκτικό μέσο αφού απορροφήσει θερμότητα από τους ψυχόμενους χώρους, στη συνέχεια αποδίδει τη θερμότητα αυτή στο πρωτεύον ψυκτικό μέσο, μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Τα δευτερογενή συστήματα ψύξης απαιτούν επίσης, την ύπαρξη αντλίας κυκλοφορίας του δευτερεύοντος ψυκτικού μέσου στους χώρους του σουπερμάρκετ [8].

Η λειτουργία ενός δευτερεύοντος συστήματος ψύξης σε σουπερμάρκετ, απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 2.7.

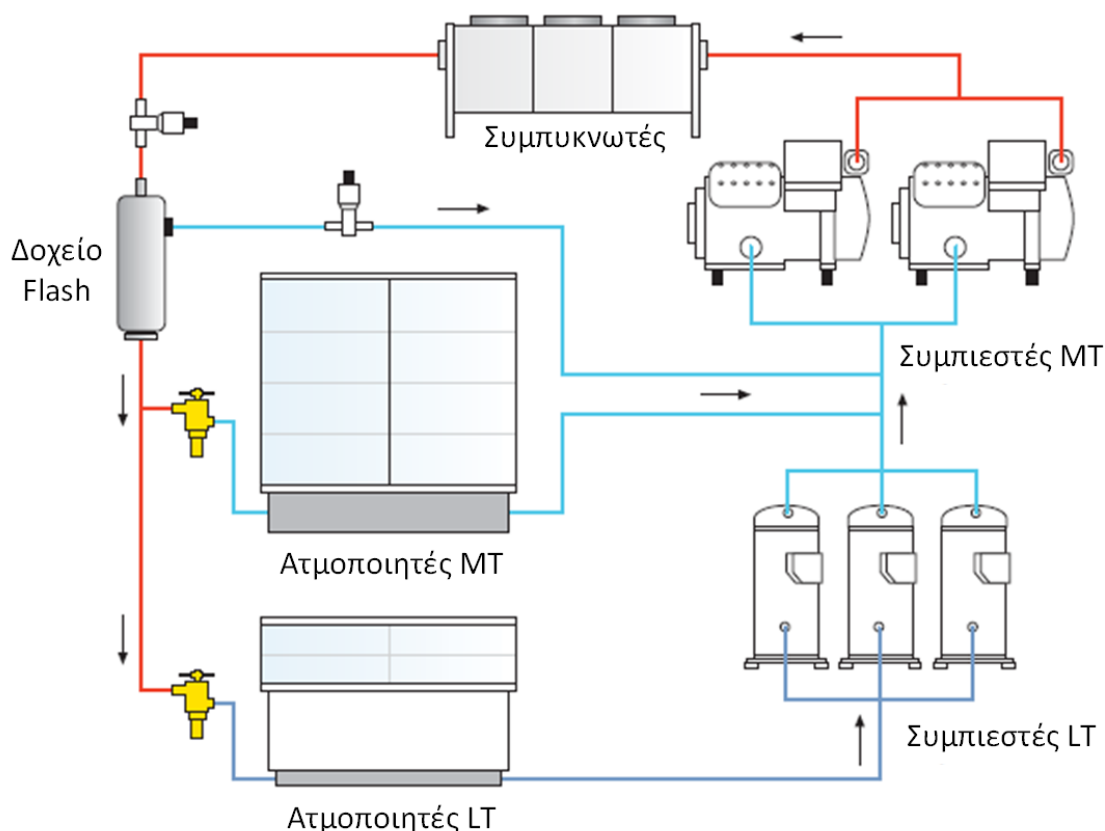


Σχήμα 2.7: Μονογραμμικό διάγραμμα δευτερεύοντος ψυκτικού συστήματος [8]

2.2.5 Booster υπερκρίσιμο σύστημα CO₂

Σε αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται και στα δύο κυκλώματα, MT και LT, ψυκτικό μέσο R-744 (CO₂). Οι συμπιεστές του κυκλώματος LT λειτουργούν ως ενισχυτές, για την αύξηση της πίεσης ατμών στο επίπεδο των ατμοποιητών του MT κυκλώματος.

Για θερμοκρασίες περιβάλλοντος άνω των 23°C οι συμπιεστές εκτονώνουν το αέριο πάνω από την κρίσιμη πίεση του R-744, η οποία είναι στα 74 bar. Ο συμπυκνωτής λειτουργεί στη συνέχεια ως ψύκτης αερίου και μειώνει τη θερμοκρασία του πεπιεσμένου ατμού χωρίς να τον συμπυκνώσει σε υγρό. Το ψυχρό ρευστό διέρχεται μέσω μιας βαλβίδας μείωσης της πίεσης, οπότε ένα τμήμα του συμπυκνώνεται σε υγρό και το υπόλοιπο παραμένει αέριο. Η υγρή και η αέρια μορφή του ψυκτικού διαχωρίζεται σε ένα δοχείο τύπου flash, το οποίο ελέγχεται από τη βαλβίδα εκτόνωσης, ώστε να λειτουργεί μεταξύ πιέσεων 35-40 bar. Το υγρό στη συνέχεια διανέμεται στους ψύκτες και στους καταψύκτες του σουπερμάρκετ σε αυτή την ενδιάμεση πίεση. Το αέριο, που διαχωρίστηκε από το υγρό στο δοχείο τύπου flash, οδηγείται μέσω μιας εκτονωτικής βαλβίδας στην αναρρόφηση των συμπιεστών του MT κυκλώματος [8]. Η παραπάνω ενός τέτοιου ψυκτικού συστήματος, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Μονογραμμικό διάγραμμα Booster υπερκρίσιμου ψυκτικού συστήματος [8]

2.3 Στοιχεία ψυκτικής εγκατάστασης

2.3.1 Συμπιεστής

Ο συμπιεστής, ή γενικότερα οι διατάξεις συμπιεστών, αποτελεί την καρδιά της ψυκτικής εγκατάστασης. Το ψυκτικό μέσο, σε αέρια μορφή, αναρροφάται από τον συμπιεστή και στη συνέχεια συμπιέζεται μέχρι την απαιτούμενη πίεση και θερμοκρασία. Έτσι είναι δυνατή η απόδοση θερμότητας στο συμπυκνωτή, ενώ παράλληλα δημιουργούνται η χαμηλή και η υψηλή πίεση του συστήματος, χωρίς τις οποίες δεν θα ήταν εφικτός ο συνεχής κύκλος ψύξεως.

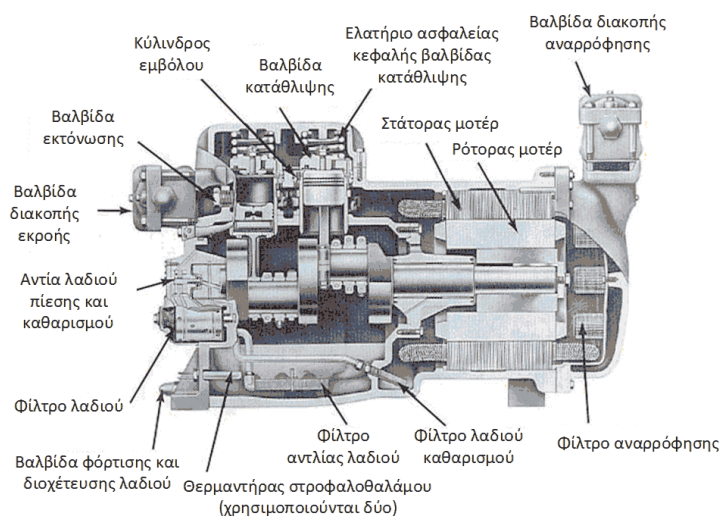
Ανάλογα με τη λειτουργία συμπίεσης, οι κυριότεροι τύποι συμπιεστών σε ψυκτικές εγκαταστάσεις είναι οι εξής:

- i) Παλινδρομικοί συμπιεστές (εμβολοφόροι)
- ii) Περιστροφικοί συμπιεστές
- iii) Φυγοκεντρικοί συμπιεστές
- iv) Σπειροειδείς συμπιεστές – Scroll [9]

2.3.1.1 Παλινδρομικοί (εμβολοφόροι) συμπιεστές

Οι ημίκλειστου τύπου παλινδρομικοί συμπιεστές είναι οι πιο διαδεδομένοι συμπιεστές στις εγκαταστάσεις ψύξης των καταστημάτων λιανικής πώλησης προϊόντων. Η κατασκευή τους είναι σχεδόν παρόμοια με μια μηχανή εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ) αυτοκινήτου. Επομένως αποτελούνται έναν έως δεκαέξι κυλίνδρους, οι οποίοι μπορούν να έχουν διάταξη σειράς, V, W και αστέρα. Οι παλινδρομικοί συμπιεστές είναι κατάλληλοι για μικρό εκτόπισμα αερίου, αλλά είναι αρκετά αποδοτικοί για ψηλές πιέσεις συμπύκνωσης και ψηλούς λόγους συμπίεσης. Επίσης έχουν απλή κατασκευή, η οποία επιτρέπει της εργασίες συντήρησης και χαμηλό κόστος [9].

Τα βασικά στοιχεία ενός εμβολοφόρου συμπιεστή παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.9, το οποίο απεικονίζει τη σχεδιαστική τομή ενός τέτοιου συμπιεστή.



Σχήμα 2.9: Τομή εμβολοφόρου συμπιεστή [10]

Οι διαδοχικές φάσεις ενός κύκλου συμπίεσης σε έναν παλινδρομικό συμπιεστή, εμφανίζουν διαφοροποιήσεις από τα στάδια λειτουργίας μια Μ.Ε.Κ και περιλαμβάνουν:

i) Στάδιο αναρροφήσεως, όπου αρχικά το έμβολο βρίσκεται στο ανώτατο σημείο της διαδρομής του (Ανω Νεκρό Σημείο) και οι βαλβίδες αναρροφήσεως και καταθλίψεως είναι κλειστές. Κατερχόμενο το έμβολο ο χώρος του κυλίνδρου αυξάνει και η επικρατούσα πίεση, μέσα σε αυτόν, μικραίνει συνεχώς. Μόλις η επικρατούσα, μέσα στον κύλινδρο, γίνει μικρότερη από την πίεση αναρροφήσεως, τότε ανοίγει η βαλβίδα εισαγωγής και ο κύλινδρος γεμίζει με ψυκτικό αέριο. Το στάδιο της εισαγωγής ολοκληρώνεται μέχρις ότου το έμβολο φτάσει στο κατώτατο σημείο της διαδρομής του (Κάτω Νεκρό Σημείο).

ii) Στάδιο συμπίεσης, όπου το έμβολο βρίσκεται στο Κ.Ν.Σ με κατεύθυνση κίνησης προς τα πάνω. Μόλις αρχίσει το έμβολο να κινείται προς το Α.Ν.Σ, τότε επειδή η πίεση του ψυκτικού αερίου είναι μεγαλύτερη της πίεσης αναρρόφησης, η βαλβίδα αναρρόφησης κλείνει. Συνεχίζοντας το έμβολο την ανοδική διαδρομή του και εφόσον οι βαλβίδες είναι κλειστές, το ψυκτικό αέριο συμπιέζεται, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία και την πίεσή του. Η συμπίεση του ψυκτικού μέσου μέσα στον κύλινδρο συνεχίζεται έως ότου η επικρατούσα πίεση μέσα στον κύλινδρο να γίνει μεγαλύτερη της πίεσης κατάθλιψης, οπότε και ανοίγει η βαλβίδα κατάθλιψης και ξεκινά η έξοδος του ψυκτικού.

iii) Στάδιο εκροής, το έμβολο κινείται προς το Α.Ν.Σ και έχει διανύσει ήδη περισσότερο από το 1/2 της διαδρομής του από το Κ.Ν.Σ προς το Α.Ν.Σ, ενώ η πίεση του συμπιεσθέντος αερίου έχει γίνει μεγαλύτερη της πίεσης κατάθλιψης με αποτέλεσμα να ανοίξει τη βαλβίδα κατάθλιψης και να αρχίσει η εκροή του ψυκτικού αερίου προς τη γραμμή κατάθλιψης. Η εκροή του ψυκτικού αερίου θα συνεχισθεί έως ότου το έμβολο ανέβει στο Α.Ν.Σ.

iv) Στάδιο της επανεκτόνωσης, όπου το έμβολο βρίσκεται στο Α.Ν.Σ με κατεύθυνση προς το Κ.Ν.Σ. Επειδή μια ποσότητα ψυκτικού αερίου παρέμεινε μέσα στον επιζήμιο χώρο και δεν βγήκε προς τη γραμμή κατάθλιψης, η επικρατούσα πίεση μέσα στον κύλινδρο είναι υψηλή και πιέζει τη βαλβίδα αναρρόφησης από κάτω κρατώντας την κλειστή. Μόλις το έμβολο αρχίσει να κατεβαίνει, ο όγκος του κυλίνδρου αυξάνεται και η επικρατούσα πίεση του παραμένοντος ψυκτικού αερίου μειώνεται με αποτέλεσμα να κλείσει η βαλβίδα κατάθλιψης. Όταν η συνεχώς μειούμενη πίεση του αερίου φθάσει την πίεση αναρρόφησης, τότε αρχίζει να ανοίγει η βαλβίδα αναρρόφησης και ο κύλινδρος ανατροφοδοτείται με ψυκτικό αέριο [9].

2.3.1.2 Σπειροειδείς συμπιεστές - Scroll

Ο σπειροειδής συμπιεστής τύπου Scroll είναι ο σύγχρονος συμπιεστής που χρησιμοποιείται στις μεγάλες ψυκτικές και κλιματιστικές εγκαταστάσεις. Οι συμπιεστές αυτού του τύπου εκτοπίζουν από την αγορά τα τελευταία χρόνια τους παλινδρομικούς συμπιεστές. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του βασικού τους πλεονεκτήματος, της ικανότητάς τους δηλαδή να αντιμετωπίζουν τις περιπτώσεις υγρής συμπίεσης, δηλαδή τις ύπαρξης

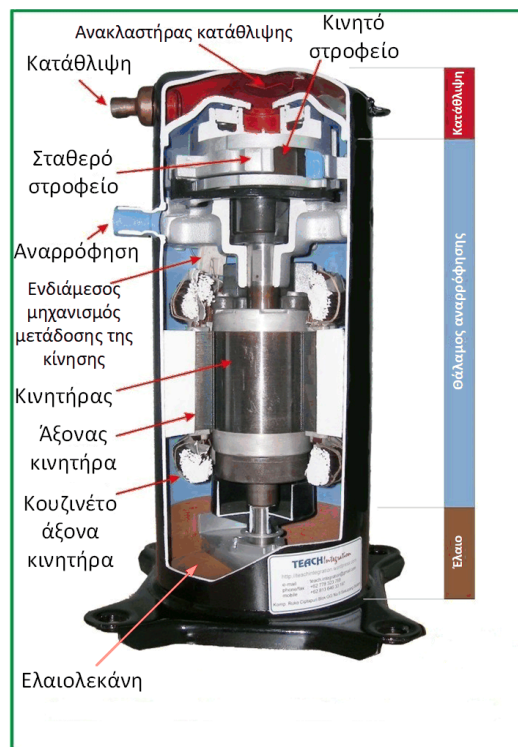
παραμένουν σταγονιδίων ψυκτικού, μέσα στον κύλινδρο τους (στροφεία), χωρίς τις γνωστές καταστροφικές για τους άλλους τύπους συμπιεστών συνέπειες.

Τα φαινόμενα της υγρής συμπίεσης παρουσιάζονται, όταν μέσα στον κύλινδρο του συμπιεστή, εισέλθουν, κατά τη φάση της αναρρόφησης, ψυκτικοί ατμοί και ψυκτικό υγρό, ή ψυκτικοί ατμοί με ψυκτέλαιο σε υγρή φάση.

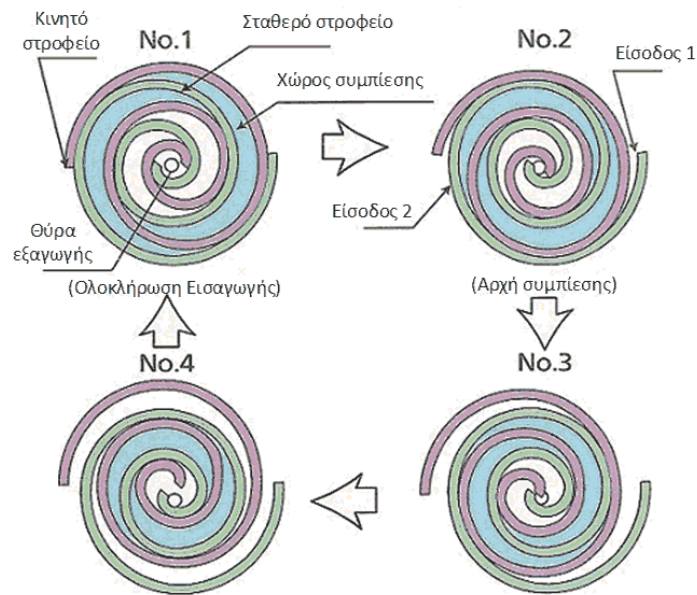
Στις περιπτώσεις αυτές ο κίνδυνος που θα προερχόταν από μια «υδραυλική συμπίεση» εξουδετερώνεται με τη στιγμιαία λειτουργική απομάκρυνση των δύο σπειροειδών στροφείων του συμπιεστή, έτσι ώστε το υγρό μίγμα αντί να συμπιεστεί μέσα στον κύλινδρο του, να παρακαμφθεί προς την αναρρόφηση του συμπιεστή.

Το σύστημα λίπανσης των συμπιεστών Scroll είναι μικτού τύπου, όπου τα κουζινέτα (έδρανα τριβής) του ηλεκτροκινητήρα και τα κουζινέτα του κινητού στροφείου λιπαίνονται με αντλία λαδιού, ενώ οι υπόλοιπες επιφάνειες επαφής, λιπαίνονται από το ψυκτέλαιο, που υπάρχει στη μάζα των ψυκτικών υπό μορφή σταγονιδίων [11].

Ορισμένα από τα βασικά στοιχεία ενός συμπιεστή τύπου Scroll παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα, όπου παρουσιάζεται η τομή ενός τυπικού συμπιεστή τύπου Scroll Σχήμα 2.10 και η κάτοψη της συνεργασίας σταθερού και κινητού στροφείου Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.10: Τομή συμπιεστή τύπου Scroll [12]



Σχήμα 2.11: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας Scroll [13]

Ένας συμπιεστής τύπου Scroll ουσιαστικά αποτελείται από δύο κυλίνδρους ή σπείρες. Η μία σπείρα είναι κινητή (κινητό στροφέιο), όντας συνδεδεμένη με το στρόφαλο του συμπιεστή και η άλλη είναι σταθερή (σταθερό στροφέιο), όντας προσαρτημένη στο σώμα του συμπιεστή. Η περιστροφή του άξονα του κινητήρα δίνει εκκεντρική κίνηση στο κινητό στροφέιο του συμπιεστή. Η πρώτη τροχιά κύλισης του κινητού στροφείου ορίζεται από το ζευγάρι του με το σταθερό στροφέιο. Έτσι δημιουργούνται θύλακες ψυκτικού αερίου στο χώρο ανάμεσα στο κινητό και σταθερό στροφέιο (χώρος συμπίεσης), ο όγκος του οποίου μειώνεται προοδευτικά, όσο συνεχίζεται η κίνηση του άξονα και τελικά οδηγείται στη θύρα εξαγωγής, η οποία βρίσκεται στο μέσο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Καθώς το αέριο μετακινείται στους συνεχώς μικρότερους εσωτερικούς θύλακες, τόσο η θερμοκρασία όσο και η πίεση αυξάνονται. Έτσι επιτυγχάνεται η επιθυμητή πίεση κατάθλιψης από την κίνηση των κυλίνδρων του συμπιεστή [11].

Άλλα πλεονεκτήματα των Scroll:

- Η απουσία των εμβόλων για τη συμπίεση του αερίου επιτρέπει στους συμπιεστές Scroll να επιτυγχάνουν 100% ογκομετρική απόδοση, οδηγώντας σε μειωμένο ενεργειακό κόστος.
- Οι απώλειες επαναδιαστολής, ένα τυπικό χαρακτηριστικό της κάθε διαδρομής εμβόλου που συναντάται στα παλινδρομικά μοντέλα, εξαλείφονται. Επιπλέον, οι απώλειες βαλβίδων εξαλείφονται επίσης, καθώς δεν υπάρχουν βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής.
- Το βάρος και ο όγκος τους είναι σημαντικά μικρότερα σε σύγκριση με τους άλλους ογκώδεις τύπους συμπιεστών που χρησιμοποιούνται σήμερα.
- Οι ταλαντώσεις λόγω συμπίεσης επίσης ελαχιστοποιούνται, έως και εξαλείφονται και συνεπώς μπορεί να λειτουργήσει με λιγότερες δονήσεις και λιγότερο θόρυβο.

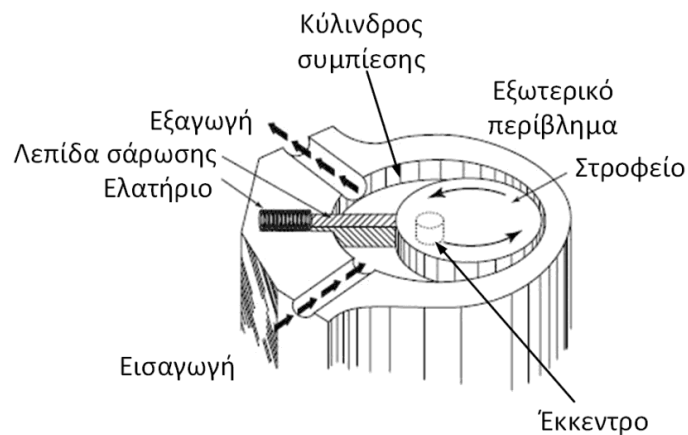
Μειονεκτήματα:

- Είναι ερμητικά κλειστοί με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατόν να αποσυναρμολογηθούν για συντήρηση.
- Οι περισσότεροι παλινδρομικοί συμπιεστές είναι ανθεκτικοί στην περιστροφή τους και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αυτό δεν συμβαίνει για τους Scroll.
- Είναι προβληματικός ο βαθμιαίος έλεγχος της χωρητικότητας, σε συστήματα με πολλούς συμπιεστές Scroll [14].

2.3.1.3 Περιστροφικοί συμπιεστές

Οι περιστροφικοί συμπιεστές διακρίνονται σε συμπιεστές με μια λεπίδα σάρωσης και σε συμπιεστές με δύο ή τέσσερις λεπίδες σάρωσης. Γενικά, οι περιστροφικοί συμπιεστές χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται μεγάλος όγκος συμπίεσης, με μέτριες σχετικά πιέσεις. Ειδικότερα, οι περιστροφικοί συμπιεστές με τις πολλές λεπίδες σάρωσης χρησιμοποιούνται στις μεγάλες ψυκτικές εγκαταστάσεις χαμηλών θερμοκρασιών, ως ενισχυτικοί συμπιεστές στη χαμηλή βαθμίδα συμπίεσης, ενώ στην υψηλή βαθμίδα χρησιμοποιούνται παλινδρομικοί συμπιεστές. Τέλος, οι μικρής υποδύναμης περιστροφικοί συμπιεστές, που έχουν συνήθως μια λεπίδα σάρωσης, χρησιμοποιούνται και σήμερα σε ορισμένα οικιακά ψυγεία Αμερικανικής προελεύσεως, καθώς επίσης και σε ορισμένες μικρές κλιματιστικές συσκευές δωματίου [9].

Τα κύρια μέρη ενός περιστροφικού συμπιεστή παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.12.

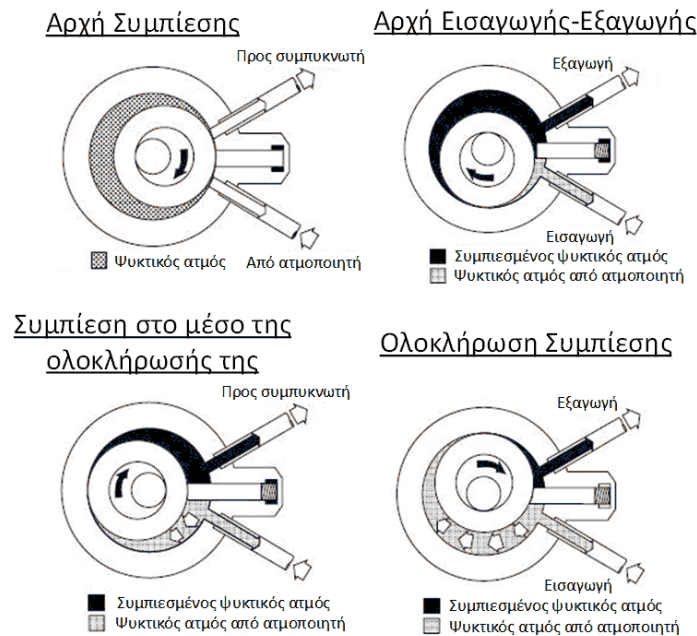


Σχήμα 2.12: Κύρια μέρη περιστροφικού συμπιεστή [15]

Η εισαγωγή του ψυκτικού αερίου μέσα στον κύλινδρο πραγματοποιείται αμέσως μετά την απομάκρυνση του στροφείου από τον κύλινδρο κοντά στην είσοδο του ψυκτικού. Η συμπίεση πραγματοποιείται στο χώρο τον οποίο περικλείουν οι λεπίδες σάρωσης και συγκεκριμένα, όταν το στροφείο βρίσκεται σε επαφή με τον κύλινδρο, στο αντίθετο ακριβώς σημείο από το χώρο μέσα στον οποίο συμπιέζεται το αέριο. Η εκροή του ψυκτικού

αερίου ξεκινάει, όταν το στροφέιο πλησιάζει το τοίχωμα του κυλίνδρου και η επικρατούσα πίεση μέσα στο χώρο συμπίεσης έχει υπερβεί την πίεση κατάθλιψης [9].

Τα στάδια της εισαγωγής και εκροής πραγματοποιούνται ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια της συμπίεσης και παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Στάδια συμπίεσης περιστροφικού συμπιεστή [15]

2.3.1.4 Φυγοκεντρικοί συμπιεστές

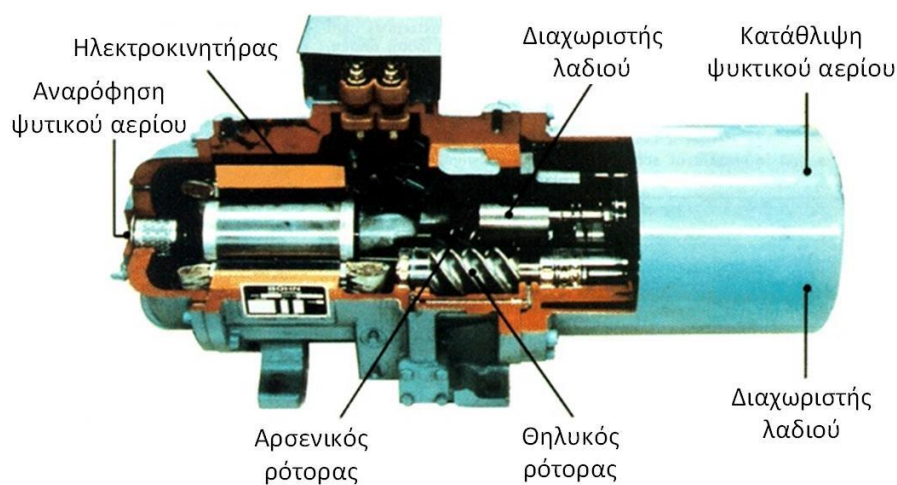
Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές είναι συμπιεστές μεγάλης ψυκτικής ικανότητας και χρησιμοποιούνται κυρίως στις μεγάλες κλιματιστικές εγκαταστάσεις. Έχουν το πλεονέκτημα, ότι μπορούν να λειτουργούν και με το 20% μόνο του ολικού φορτίου, για το οποίο έχουν κατασκευασθεί. Η αυξομείωση της ψυκτικής ικανότητας των φυγοκεντρικών συμπιεστών επιτυγχάνεται με ένα διάφραγμα (τάμπερ), το οποίο είναι τοποθετημένο στην αναρρόφηση του συμπιεστή και αυξομειώνει το μέγεθος της εισόδου του ψυκτικού αερίου μέσα στο συμπιεστή. Η μετάδοση της κίνησης των φυγοκεντρικών συμπιεστών, όταν πρόκειται για μεγάλες κλιματιστικές εγκαταστάσεις, γίνεται με ατμοστροβίλους (τουρμπίνες), ενώ για μικρότερης ιπποδύναμης συμπιεστές η μετάδοση γίνεται από ηλεκτροκινητήρες μέσω κιβωτίου ταχυτήτων (σασμάν).

Η λειτουργία των φυγοκεντρικών συμπιεστών είναι απλή και μοιάζει με την αρχή των φυγοκεντρικών ανεμιστήρων. Δηλαδή, το ψυκτικό αέριο εισέρχεται από το κέντρο του ρότορα και εξέρχεται περιφερειακά, αφού προηγουμένως έχει αποκτήσει την περιφερειακή ταχύτητα του ρότορα. Έτσι η περιφερειακή ταχύτητα του ψυκτικού αερίου μετατρέπεται σε υψηλή πίεση κατάθλιψης. Συνήθως οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές κατασκευάζονται με πολλές βαθμίδες συμπίεσης (μέχρι 16), οπότε εξερχόμενο το ψυκτικό αέριο από την κατάθλιψη της 1^{ης} βαθμίδας εισέρχεται μέσα στην αναρρόφηση της 2^{ης} βαθμίδας κλπ [9].

Ελικοειδής περιστροφικοί συμπιεστές (Screw)

Οι ημιαυτοματικοί συμπιεστές διπλού κοχλίου εφαρμόζονται ευρέως στα συστήματα ψύξης λόγω πλεονεκτημάτων όπως σταθερή λειτουργία, υψηλή απόδοση, αξιόπιστη και συμπαγής κατασκευή. Το λάδι λίπανσης χρησιμοποιείται σκόπιμα σε συμπιεστές ψυκτικού τύπου με διπλό κοχλία για τη λίπανση των εδράνων, τη στεγανοποίηση διαδρομών διαρροής ψυκτικού μέσου και την ψύξη του ψυκτικού. Επηρεάζει ουσιαστικά, τη διαδικασία εργασίας του συμπιεστή διπλού κοχλίου στα συστήματα ψύξης, η οποία έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή στην επιστημονική κοινότητα [16].

Οι κοχλιομορφικοί συμπιεστές αποτελούνται από δύο συνεργαζόμενους ελικοειδείς ρότορες, έναν αρσενικό και ένα θηλυκό, που παγιδεύουν και συμπιέζουν το ψυκτικό αέριο κατά την περιστροφή τους μέσα σε έναν κύλινδρο, που οι διαστάσεις κατασκευής του είναι μεγάλης ακρίβειας. Ο αρσενικός ρότορας παίρνει την κίνηση από τον ηλεκτροκινητήρα και τη μεταδίδει στο θηλυκό ρότορα με σχέση, συνήθως 1:2 μέχρι 2:3, πράγμα που σημαίνει ότι ο αρσενικός ρότορας έχει λιγότερους λοβούς από το θηλυκό ρότορα, όπως δείχνει και το Σχήμα 2.14. Η συμπίεση του αερίου επιτυγχάνεται λόγω της συνεχούς ελάττωσης του όγκου κατά την περιστροφική κίνηση των ελικοειδών λοβών. Η ροή του ψυκτικού αερίου στο ρότορα είναι ακτινική και αξονική. Επειδή οι ρότορες έχουν ελικοειδή μορφή εξασφαλίζουν μία συνεχή αντλητική δράση με πολύ μικρή δόνηση, σε σύγκριση με τους παλινδρομικούς συμπιεστές.



Σχήμα 2.14: Τομή ελικοειδή περιστροφικού συμπιεστή [17]

Η συμπίεση του ψυκτικού αερίου, μέσα στους κοχλιωτούς συμπιεστές, γίνεται σε τέσσερις φάσεις και για την περιγραφή τους θα αναφερθούμε σε ένα αρσενικό και σε ένα θηλυκό ρότορα και στο διάκενο που δημιουργείται μεταξύ των λοβών, όταν αυτοί περιστρέφονται. Οι φάσεις αυτές περιγράφονται ξεχωριστά ακολούθως.

i) Αναρρόφηση:

Ο αρσενικός ρότορας παίρνει την κίνηση από τον ηλεκτροκινητήρα και τη μεταδίδει στο θηλυκό ρότορα. Μόλις ο λοβός του αρσενικού ρότορα αρχίζει να αποσυμπλέκεται από το

θηλυκό ρότορα, δημιουργείται ένα κενό διάστημα, που καταλαμβάνει το αέριο που ρέει από την είσοδο της αναρρόφησης. Με τη συνεχή περιστροφή των λοβών το διάστημα μεγαλώνει και το αέριο που ρέει στο συμπιεστή, το καταλαμβάνει.

ii) Μεταφορά:

Κατά τη φάση αυτή, το παγιδευμένο αέριο προωθείται και καταλαμβάνει (λόγω περιστροφής) τον περιφερειακό χώρο μεταξύ λοβών και κυλίνδρου με σταθερή πίεση (της αναρρόφησης).

iii) Συμπίεση:

Με τη συνέχιση της περιστροφής των λοβών, το αέριο προωθείται σε χώρο μικρότερο, λόγω ελάττωσης του όγκου μεταξύ των λοβών και συμπιέζεται. Η συμπίεση θα συνεχιστεί μέχρις ότου το συμπιεζόμενο αέριο αποκτήσει την υπολογισθείσα, από τον κατασκευαστή, πίεση κατάθλιψη του συστήματος.

iv) Κατάθλιψη – εκροή:

Μόλις η πίεση κατάθλιψης αποκτήσει την τιμή που ανταποκρίνεται στον προκαθορισμένο λόγο συμπίεσης, τότε σταματά η συμπίεση και αρχίζει να εξέρχεται το αέριο υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας από το συμπιεστή [18].

2.3.2 Συμπυκνωτής

Ο συμπυκνωτής είναι ένα από τα βασικότερα εξαρτήματα οποιασδήποτε ψυκτικής εγκατάστασης, όπου εισερχόμενο το υπέρθερμο ψυκτικό αέριο υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης εντός του, αποβάλλει θερμότητα προς το μέσο συμπύκνωσης (νερό, αέρας ή και τα δύο) και συμπυκνώνεται. Μπορούμε να πούμε, ότι ο συμπυκνωτής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας, όπου εναλλάσσεται θερμότητα, μεταξύ ψυκτικού αερίου και μέσου συμπύκνωσης, δηλαδή τη θερμότητα που απορρόφησε το ψυκτικό υγρό εξατμιζόμενο εντός του ατμοποιητή και συμπιεζόμενο εντός του συμπιεστή, την εναλλάσσει με το μέσο συμπύκνωσης, αφού κατά τη φάση της συμπύκνωσης το θερμό ψυκτικό αέριο ψύχεται (και υγροποιείται) και το ψυχρότερο μέσο συμπύκνωσης θερμαίνεται.

Η επιφάνεια του συμπυκνωτή θα πρέπει να είναι κατά 25% μεγαλύτερη από την επιφάνεια του ατμοποιητή της εγκατάστασης, προκειμένου να μπορέσει να αποβληθεί όλη η θερμότητα από το ψυκτικό ρευστό, κατά τον κύκλο ψύξης, διότι το ψυκτικό μέσο κατά τον ψυκτικό κύκλο απορροφά θερμότητα εντός του ατμοποιητή, εντός του συμπιεστή κατά τη συμπίεσή του και εντός της γραμμής αναρρόφησης, όταν το μήκος της είναι σχετικά μεγάλο και δεν είναι μονωμένη.

Οι συμπυκνωτές διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ως προς το χρησιμοποιούμενο μέσο συμπύκνωσης του ψυκτικού αερίου:

i) Στους αερόψυκτους

ii) Στους υδρόψυκτους

iii) Στους ατμοποίησης ή εξατμιζόμενου τύπου [19]

2.3.2.1 Αερόψυκτοι συμπυκνωτές

Αερόψυκτοι λέγονται οι συμπυκνωτές εκείνοι οι οποίοι χρησιμοποιούν σαν μέσο συμπύκνωσης τον ατμοσφαιρικό αέρα του περιβάλλοντος. Η κυκλοφορία του αέρα ψύξης στους αερόψυκτους συμπυκνωτές γίνεται με δύο τρόπους:

- i) Με φυσική κυκλοφορία, όπου ο αέρας κυκλοφορεί ελεύθερα λόγω της βαρύτητάς του. Οι συμπυκνωτές αυτής της κατηγορίας λέγονται συμπυκνωτές ελεύθερης ή φυσικής κυκλοφορίας.
- ii) Με βιασμένη κυκλοφορία, όπου ο αέρας κυκλοφορεί μέσω ανεμιστήρα και η ονομασία τους είναι συμπυκνωτές βιασμένης κυκλοφορίας [19].

Αυτός ο τύπος συμπιεστής είναι και ο πιο διαδεδομένος στις ψυκτικές εγκαταστάσεις των σουπερμάρκετ, καθώς είναι αθόρυβοι και έχουν χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με τους συμπυκνωτές διαφορετικού τύπου. Επιλέγοντας το κατάλληλο μέγεθος του ανεμιστήρα και ρυθμίζοντας τον αριθμό στροφών του, επιτυγχάνουμε την επιθυμητή ποσότητα του αέρα που κυκλοφορεί, χωρίς παράλληλα να χρειάζεται μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής. Η κατώτερη θερμοκρασία αποβολής θερμότητας, για αυτού του τύπου συμπυκνωτές, είναι η θερμοκρασία ξηρής σφαίρας του ατμοσφαιρικού αέρα [10].

2.3.2.2 Υδρόψυκτοι συμπυκνωτές

Υδρόψυκτοι καλούνται οι συμπυκνωτές, οι οποίοι χρησιμοποιούν σαν μέσο συμπύκνωσης του ψυκτικού αερίου το νερό. Το χρησιμοποιούμενο νερό για τη συμπύκνωση του θερμού αερίου μέσα στο συμπυκνωτή, μπορεί να χρησιμοποιείται είτε μια μόνο φορά, και στη συνέχεια να πηγαίνει προς την αποχέτευση, είτε να χρησιμοποιείται και πάλι, αφού προηγουμένως ψυχθεί σε πύργο ψύξης.

Κατηγοριοποιούνται ανάλογα την κατασκευή τους σε:

- i) Συμπυκνωτές με διπλές σωληνώσεις (Double Tube), όπου ο ένας σωλήνας βρίσκεται εντός του άλλου σωλήνα.
- ii) Συμπυκνωτές με κέλυφος και στοιχείο εναλλάκτη θερμότητας (Shell and Coil), όπου ο σπειροειδής σωλήνας που διακινεί το ψυκτικό βρίσκεται εντός του κελύφους.
- iii) Συμπυκνωτές με κέλυφος και σωληνώσεις (Shell and Tube), όπου επιμήκεις σωλήνες τοποθετούνται εντός του κελύφους [19].

2.3.2.3 Συμπυκνωτές εξατμιζόμενου τύπου

Οι συμπυκνωτές αυτού του τύπου χρησιμοποιούν ως μέσο συμπύκνωσης το νερό και τον αέρα ταυτόχρονα. Το μεν νερό αντλείται με τη βοήθεια κυκλοφορητή από δεξαμενή, η οποία βρίσκεται στο κατώτατο μέρος του συμπυκνωτή και τροφοδοτείται από το δίκτυο παροχής.

Η θερμότητα η οποία αποβάλλεται από το ψυκτικό αέριο προς το μέσο συμπύκνωσης (νερό και αέρας) είναι αισθητή και λανθάνουσα. Η μεν αισθητή είναι η θερμότητα την οποία απορροφά ο αέρας από το ψυκτικό αέριο, η δε λανθάνουσα είναι η θερμότητα που απορροφά το νερό εξατμιζόμενο (επίσης από το αέριο). Πρέπει να τονιστεί ότι η

συμπύκνωση του ψυκτικού αερίου προέρχεται κατά μέγα μέρος από τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού και ότι ο αέρας συμβάλλει πολύ λίγο με την αισθητή θερμότητα [19].

Λόγω της εξάτμισης, η θερμοκρασία του νερού προσεγγίζει τη θερμοκρασία υγρής σφαίρας του αέρα, η οποία μπορεί να είναι σημαντικά χαμηλότερη από τα εκείνη της ξηρής σφαίρας, ειδικότερα σε περιοχές με πιο ξηρά κλίματα. Αυτό σημαίνει χαμηλότερη θερμοκρασία συμπύκνωσης σε σχέση με αυτή που θα απαιτούνταν σε ένα αερόψυκτο συμπυκνωτή, γεγονός το οποίο οδηγεί σε εξοικονόμηση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, αφού μειώνεται η απαιτούμενη πίεση συμπίεσης στο συμπιεστή της εγκατάστασης, ή σε βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος τοποθετώντας έναν μικρότερου μεγέθους συμπυκνωτή [10].

Ωστόσο τα μειονεκτήματα των συμπυκνωτών εξάτμισης είναι:

- i) Η ανάγκη ύδρευσης για την αντικατάσταση της ροής εξατμισμένου και αποστραγγισμένου νερού.
- ii) Η ανάγκη χημικής επεξεργασίας. Το νερό πρέπει να αποστραγγιστεί από τον συμπυκνωτή για να αφαιρεθεί το ανόργανο περιεχόμενο του νερού από το δίκτυο ύδρευσης [19].

2.3.3 Εκτονωτική βαλβίδα

Εκτονωτικό μέσο ή εκτονωτική βαλβίδα είναι εκείνο το βασικό εξάρτημα οποιασδήποτε ψυκτικής εγκατάστασης του οποίου σκοπός είναι:

- i) Να ελέγχει την ακριβή ποσότητα του διερχόμενου ψυκτικού ώστε ο ατμοποιητής να μην παρουσιάζει έλλειψη ή υπερχειλίση ψυκτικού, με αποτέλεσμα η μονάδα να εργάζεται με τη μέγιστη απόδοση και χωρίς να υπερφορτίζεται.
- ii) Προκαλώντας την εκτόνωση του υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας ψυκτικού υγρού, να του μειώνει την πίεση και τη θερμοκρασία, στα επίπεδα λειτουργίας του ατμοποιητή. Δηλαδή το ψυκτικό ρευστό, εξερχόμενο από την εκτονωτική βαλβίδα και εισερχόμενο μέσα στον ατμοποιητή να έχει την πίεση και τη θερμοκρασία εξάτμισης του ψυκτικού εντός αυτού [19].

2.3.3.1 Τριχοειδής σωλήνας

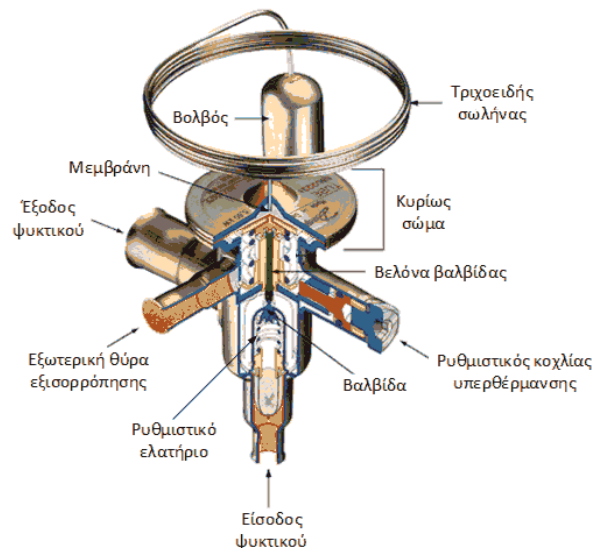
Ο τριχοειδής σωλήνας είναι μία εκτονωτική βαλβίδα η οποία χρησιμοποιείται αποκλειστικά στις μικρές ψυκτικές εγκαταστάσεις, όπως π.χ. στα οικιακά ψυγεία, στις κλιματιστικές συσκευές δωματίου, καθώς επίσης και στις μικρές επαγγελματικές μονάδες. Ωστόσο η αναφορά σε αυτόν γίνεται όχι μόνο για λόγους πληρότητας, αλλά κυρίως διότι ο τριχοειδής σωλήνας αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα της θερμοεκτονωτικής βαλβίδας, η οποία είναι ο πλέον διαδεδομένος τύπος στις ψυκτικές εγκαταστάσεις των καταστημάτων λιανικής πώλησης προϊόντων.

Ο τριχοειδής σωλήνας αποτελείται από ένα σωλήνα πολύ μικρής εσωτερικής διαμέτρου (0.6-2 mm) και εξωτερικής (1.8-3.2 mm). Το μήκος και η εσωτερική διάμετρος εξαρτώνται από το είδος του διερχόμενου ψυκτικού, καθώς και από το θερμικό φορτίο και τη θερμοκρασία του ατμοποιητή. Ειδικότερα η εσωτερική διάμετρος του τριχοειδούς σωλήνα καθορίζει το ποσό του διερχόμενου ψυκτικού προς τον ατμοποιητή και το μήκος του, σε συνδυασμό με την εσωτερική διάμετρο, καθορίζουν την επιθυμητή πτώση πίεσης εντός του τριχοειδούς, η οποία θα εξασφαλίσει την εξίσωση των πιέσεων εξόδου του τριχοειδούς και εισόδου του ατμοποιητή. Συναντάται σε τρεις μορφές, ως επιμήκης σωλήνας, ως σπειροειδής σωλήνας ή ως επιμήκης σωλήνας μεταβλητού μήκους.

Όσο αφορά τη λειτουργία του τριχοειδούς σωλήνα, το ψυκτικό από την αρχή έως και τα 3/4 του μήκους του, δεν υφίσταται καμία αλλαγή, παρά την πτώση πίεσης του λόγω τριβών. Μόλις όμως περάσει τα 3/4 του μήκους του σωλήνα, τότε αρχίζει να ατμοποιείται μέρος του ψυκτικού υγρού, με τρόπο ώστε όταν θα έχει φτάσει προς το τέλος του τριχοειδούς σωλήνα να έχει μετατραπεί σε αέριο το 10-20% του διερχόμενου ψυκτικού υγρού [19].

2.3.3.2 Θερμοστατική εκτονωτική βαλβίδα ή θερμοεκτονωτική βαλβίδα

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η θερμοεκτονωτική βαλβίδα (Thermostatic Expansion Valve – TEV) αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο τύπο εκτονωτικής βαλβίδας στις ψυκτικές εγκαταστάσεις των σουπερμάρκετ. Η χρήση της είναι ευρεία γενικότερα στις μεγάλες ψυκτικές εγκαταστάσεις βιομηχανίας ή εμπορίου, αλλά και στον κλιματισμό, με εξαίρεση τα κλιματιστικά δωματίων, που έχουν τριχοειδή σωλήνα [19]. Τα κύρια στοιχεία μιας θερμοεκτονωτικής βαλβίδας απεικονίζονται στο Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Τομή θερμοεκτονωτικής βαλβίδας [20]

Η αρχή λειτουργίας της θερμοεκτονωτικής βαλβίδας στηρίζεται στη διαφορά των πιέσεων του βολβού της αφενός και των πιέσεων ατμοποιητή και ρυθμιστικού ελατηρίου αφετέρου. Όμως, ο έλεγχος της κανονικής λειτουργίας της θερμοεκτονωτικής βαλβίδας

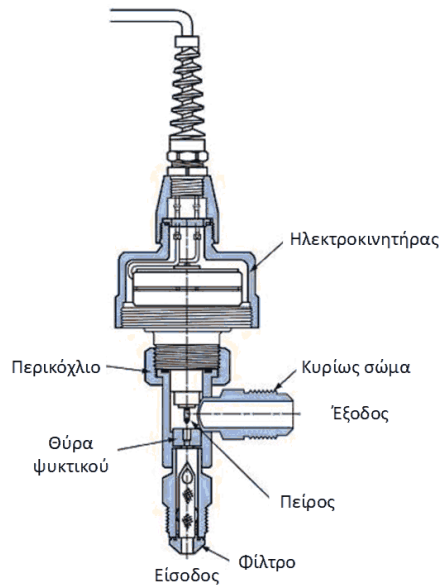
εξασφαλίζεται από τη διαφορά των θερμοκρασιών, ατμοποίησης ψυκτικού υγρού και θερμοκρασίας ψυκτικού αερίου στη θέση τοποθέτησης του βολβού, δηλαδή από την υπερθέρμανση.

Οι πιέσεις οι οποίες ασκούνται επί της μεμβράνης είναι τρεις. Η πίεση του ατμοποιητή, η οποία πάντα κλείνει τη βαλβίδα ωθώντας την εκ των κάτω προς τα άνω. Η πίεση του ρυθμιστικού ελατηρίου εκ των κάτω προς τα άνω, η οποία μαζί με την πίεση ατμοποίησης κλείνουν τη βαλβίδα. Τέλος η πίεση του βολβού εκ των άνω προς τα κάτω, η οποία ανοίγει τη βαλβίδα, εφόσον είναι μεγαλύτερη από τη συνισταμένη των άλλων δύο.

Ας υποθέσουμε ότι ο συμπιεστής εκκινεί, τότε θα αναρροφήσει όλους τους ψυκτικούς ατμούς που βρίσκονται εντός του ατμοποιητή και θα δημιουργήσει πτώση πίεσης και θερμοκρασίας εντός του (κενό). Επομένως, αφού η πίεση του βολβού της θερμοεκτονωτικής βαλβίδας γίνεται μεγαλύτερη των πιέσεων ατμοποιητή και ελατηρίου υπερθερμάνσεως, ωθεί τη βαλβίδα προς τα κάτω και την ανοίγει. Με το άνοιγμα της βελόνας της θερμοεκτονωτικής βαλβίδας, αρχίζει ο κύκλος ψύξεως, διότι το εισερχόμενο εντός του ατμοποιητή ψυκτικό υγρό (σε ατμώδη κατάσταση) εξατμίζεται γρήγορα και προκαλεί αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας αυτού, γεγονός που μειώνει τη διαφορά των πιέσεων βολβού και στοιχείου-ελατηρίου υπερθέρμανσης. Επομένως, η βαλβίδα θα αρχίσει να κινείται προς τα άνω και θα περιορίζει την εισερχόμενη ποσότητα του ψυκτικού μέσα στο στοιχείο, μέχρις ότου η διαφορά θερμοκρασίας ατμοποίησης του ψυκτικού αερίου στη θέση του βολβού να είναι η προκαθορισθείσα από τον κατασκευαστή υπερθέρμανση. Για να φτάσει η υπερθέρμανση στην προκαθορισθείσα από τον κατασκευαστή της εκτονωτικής, τιμή, σημαίνει ότι η εισαχθείσα ποσότητα του ψυκτικού μέσα στον ατμοποιητή, κάλυψε τις απαιτήσεις του ψυκτικού φορτίου και η βελόνα της βαλβίδας βρίσκεται σε θέση ισορροπίας (πλεύση) [19].

2.3.3.3 Ηλεκτρονική εκτονωτική βαλβίδα

Η ηλεκτρονική εκτονωτική βαλβίδα (Electronic Expansion Valve – EEV) λειτουργεί με πολύ πιο εξελιγμένο σχεδιασμό από την θερμοεκτονωτική βαλβίδα. Οι βαλβίδες αυτές ελέγχουν τη ροή ψυκτικού μέσου που εισέρχεται εντός του ατμοποιητή. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της απόκρισης σημάτων που στέλνει ένας ηλεκτρονικός ελεγκτής. Η βαλβίδα ανοίγει και κλείνει ηλεκτρονικά μέσω ενός μικρού ηλεκτροκινητήρα. Ο ηλεκτροκινητήρας αυτός ονομάζεται βηματικός. Οι βηματικοί κινητήρας δεν περιστρέφονται συνεχώς. Ελέγχονται από έναν ηλεκτρονικό ελεγκτή και περιστρέφονται κατά ένα κλάσμα περιστροφής για κάθε σήμα που τους στέλνει ο ελεγκτής. Ο κινητήρας κινεί ένα γρανάζι το οποίο τοποθετεί με τη σειρά του έναν πείρο σε μια θύρα μέσω της οποίας ρέει το ψυκτικό [21]. Τομή μιας ηλεκτρονικής εκτονωτικής βαλβίδας απεικονίζεται στο Σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16: Τομή ηλεκτρονικής εκτονωτικής βαλβίδας [21]

Οι βηματικοί κινητήρες μπορούν να λειτουργούν με 200 βήματα ανά δευτερόλεπτο και μπορούν να επιστρέψουν στην ακριβή θέση τους πολύ γρήγορα. Ο ελεγκτής θυμάται τον αριθμό των σημάτων που στέλνει στον κινητήρα. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στον ελεγκτή να επιστρέψει τη βαλβίδα σε οποιαδήποτε προηγούμενη θέση ανά πάσα στιγμή. Αυτό δίνει στη βαλβίδα πολύ ακριβή έλεγχο του ψυκτικού που ρέει μέσα από αυτό. Οι περισσότερες από τις βαλβίδες EEVs έχουν 1.596 βήματα ελέγχου και κάθε βήμα είναι $7.83 \cdot 10^{-5}$ ίντσες.

Τα ηλεκτρονικά σήματα που στέλνονται από τον ελεγκτή στο EEV, μέσω ενός θερμίστορ, συνδεδεμένο με ροή αέρα εκροής στην περίπτωση ψύξης. Ένα θερμίστορ είναι ένας αντιστάτης που αλλάζει την αντίστασή του καθώς αλλάζει η θερμοκρασία του. Αυτό προστατεύει τον συμπιεστή από τυχόν υγρά ρευστοποίησης υπό συνθήκες χαμηλής υπερθέρμανσης. Ακόμα αισθητήρες πίεσης μπορούν να συνδεθούν στον ελεγκτή για έλεγχο πίεσης, θερμοκρασίας και υπερθέρμανσης. Οι αισθητήρες πίεσης έχουν γενικά τρία καλώδια. Δύο καλώδια τροφοδοσίας και το τρίτο είναι ένα σήμα εξόδου. Καθώς αυξάνεται η πίεση του συστήματος, η τάση που εκπέμπεται από το καλώδιο σήματος θα αυξηθεί. Ο ελεγκτής χρησιμοποιεί αυτή την τάση για να υπολογίσει τη θερμοκρασία του ψυκτικού με τη χρήση πίνακα πίεσης-θερμοκρασίας προγραμματισμένης στον ελεγκτή [21].

Αν και ο πιο διαδεδομένος τύπος εκτονωτικής βαλβίδας στις ψυκτικές εγκαταστάσεις των καταστημάτων λιανικής πώλησης προϊόντων είναι η θερμοεκτονωτική βαλβίδα (TEV), ο συγκεκριμένος τύπος παρουσιάζει ορισμένα χαρακτηριστικά που μπορούν να περιορίσουν την ευελιξία και την απόδοση των εγκαταστάσεων αυτών. Συγκεκριμένα, η βαλβίδα αυτή απαιτεί ελάχιστη πτώση πίεσης μεταξύ συμπύκνωσης και ατμοποίησης. Αυτό αποτρέπει πιθανά πλεονεκτήματα της χαμηλής πίεσης συμπυκνωτή στους αερόψυκτους συμπυκνωτές. Ορισμένες εγκαταστάσεις είναι πιο ευαίσθητες στις αρνητικές πτυχές της TEV, εξαιτίας των ιδιοτήτων των εγκαταστάσεων, του είδους του ψυκτικού φορτίου και της κατανομής του φορτίου κατά τη διάρκεια του έτους. Οι ψυκτικές εγκαταστάσεις των

σουπερμάρκετ είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα. Μια λύση στα προβλήματα που επιφέρει η TEV, είναι η ηλεκτρονική εκτονωτική βαλβίδα (EEV), η οποία ελέγχει τόσο τη θερμοκρασία όσο και την πίεση στην έξοδο του ατμοποιητή. Η χρήση βαλβίδων EEV σε ψυκτικές εγκαταστάσεις μεγάλων σουπερμάρκετ, κατέδειξε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας λόγω των ανωτέρων χαρακτηριστικών ελέγχου της EEV και των ευνοϊκών συνθηκών εφαρμογής (συνθήκες στις οποίες η θερμοκρασία συμπίκνωσης ακολουθεί την πτώση της εξωτερικής θερμοκρασίας). Ένα μοντέλο προσομοίωσης απέδειξε ότι παρόμοια πλεονεκτήματα είναι δυνατά υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Καθώς το απαιτούμενο επενδυτικό κόστος δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό, η εξοικονόμηση ενέργειας επιτρέπει επίσης σημαντική οικονομική εξοικονόμηση και σύντομη περίοδο αποπληρωμής (1.5 έτη και πιθανόν μικρότερη εάν τα EEV εγκαθίστανται απευθείας από τους κατασκευαστές καταψυκτών). Είναι εκπληκτικό το γεγονός ότι ένα τέτοιο μικρό κομμάτι εξοπλισμού, το οποίο μέχρι στιγμής έχει ανεπαρκώς ερευνηθεί επιστημονικώς σε σχέση με τα άλλα στοιχεία της ψυκτικής εγκατάστασης (συμπιεστής και εναλλάκτες θερμότητας) μπορεί να προσφέρει τόσο μεγάλη εξοικονόμηση. Αναμένεται ότι θα υπάρξει ταχεία αντικατάσταση των TEV σε πολλές ψυκτικές και κλιματιστικές εγκαταστάσεις τα επόμενα χρόνια [22].

2.3.3.4 Εκτονωτική βαλβίδα επίπλευσης

Ένας ακόμη τύπος εκτονωτικής βαλβίδας, ο οποίος όμως δεν έχει μεγάλη εφαρμογή στα σύγχρονα σουπερμάρκετ είναι, η εκτονωτική βαλβίδα επίπλευσης. Σκοπός της είναι να διατηρεί σταθερή τη στάθμη του ψυκτικού υγρού εντός του ατμοποιητή, εντός του οποίου και είναι τοποθετημένη.

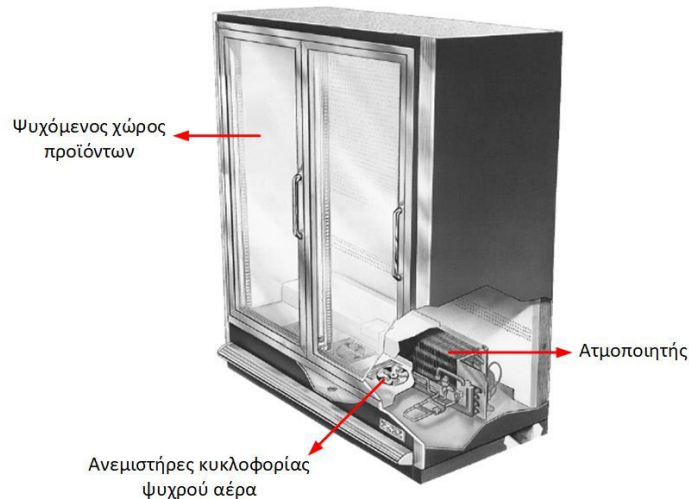
Αποτελείται από ένα μεταλλικό πλωτήρα (χάλκινο), ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το μοχλικό σύστημα κινήσεως μιας βελόνας, η οποία κινείται αντίθετα από τον πλωτήρα. Δηλαδή όταν εισέρχεται ψυκτικό υγρό ανυψώνεται η στάθμη του και ο πλωτήρας ανέρχεται, ενώ την ίδια στιγμή η βελόνα της βαλβίδας κατεβαίνει για να κλείσει την οπή της έδρας της. Ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει όταν η στάθμη του ψυκτικού υγρού κατέρχεται. Έτσι όσο λειτουργεί ο συμπιεστής και απορροφά τους ψυκτικούς ατμούς από τον ατμοποιητή και η στάθμη του υγρού κατέρχεται, τόσο ο πλωτήρας κατέρχεται για να ανέλθει η βελόνα και να επιτρέψει την είσοδο νέας ποσότητας ψυκτικού, διατηρώντας έτσι τη στάθμη του υγρού εντός του ατμοποιητή σταθερή. Η ποσότητα που εισέρχεται κάθε φορά εντός του στοιχείου του ατμοποιητή είναι ίση με την ποσότητα του ατμού που αναρροφά ο συμπιεστής.

Η φόρτιση της μονάδας με ψυκτικό είναι κρίσιμη, διότι όταν πληρωθεί με μεγαλύτερη της δέουσας ποσότητα υγρού, τότε θα υπερχειλίσει το στοιχείο του ατμοποιητή και με αυτό τον τρόπο θα μειωθεί η ψυκτική του ικανότητα.

Τέλος, οι βαλβίδα με πλωτήρα χρησιμοποιείται στις μεγάλες ψυκτικές εγκαταστάσεις αμμωνίας και παλαιότερα στα οικιακά ψυγεία [19].

2.3.4 Ατμοποιητής

Ο ατμοποιητής ή ψυκτικό στοιχείο είναι εκείνο το βασικό εξάρτημα οποιασδήποτε ψυκτικής εγκατάστασης, μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα η ατμοποίηση του ψυκτικού υγρού, το οποίο χρησιμοποιεί η ψυκτική μονάδα ως ψυκτικό μέσο. Τη θερμότητα, η οποία προκαλεί την ατμοποίηση του ψυκτικού υγρού, ο ατμοποιητής τη λαμβάνει τόσο από το χώρο ψύξης, όσο και από τα ίδια τα ψυχόμενα προϊόντα που είναι μέσα του, όπως φαίνεται στη διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.17 [19].



Σχήμα 2.17: Τυπική διάταξη ατμοποιητή εντός καταψύκτη [10]

Λόγω των ποικίλων απαιτήσεων στις εφαρμογές ψύξης, οι ατμοποιητές κατασκευάζονται και λειτουργούν με διάφορους τρόπους ανάλογα του είδους του χώρου και των προϊόντων που απαιτείται να ψυχθούν. Έτσι τους ατμοποιητές που βρίσκουν εφαρμογή στις ψυκτικές εγκαταστάσεις των σουπερμάρκετ, τους κατατάσσουμε στις εξής κατηγορίες:

- i) Κατηγοριοποίηση με βάση το χρησιμοποιούμενο εκτονωτικό μέσο (βαλβίδα).
- ii) Κατηγοριοποίηση με βάση την κατασκευαστική μορφή της εξωτερικής τους επιφάνειας.
- iii) Κατηγοριοποίηση με βάση το είδος της κυκλοφορίας του ψυκτικού αέρα.

2.3.4.1 Κατηγοριοποίηση με βάση το χρησιμοποιούμενο εκτονωτικό μέσο (βαλβίδα)

Στοιχεία ξηρής εκτόνωσης:

Στις εγκαταστάσεις εμπορικής ψύξης, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται ατμοποιητές ξηρής εκτόνωσης. Ατμοποιητές ξηρής εκτόνωσης ονομάζονται εκείνοι που λειτουργούν με τις παρακάτω εκτονωτικές βαλβίδες: θερμοεκτονωτική, ηλεκτρονική και τριχοειδής σωλήνας.

Η εκτονωτική βαλβίδα τοποθετείται συνήθως στο κάτω άκρο της αρχής των σωληνώσεων του στοιχείου, ενώ στο επάνω άκρο του τέλους των σωληνώσεων συνδέεται η γραμμή αναρρόφησης. Ο λόγος είναι ότι αν η ροή του ψυκτικού υγρού πραγματοποιείται

από το κάτω μέρος των σωληνώσεων προς τα πάνω, τότε επειδή η βρεχόμενη επιφάνεια από το ψυκτικό υγρό είναι μεγαλύτερη, αυξάνεται η απόδοση του ατμοποιητή. Η επιτρεπόμενη πτώση πίεσης πρέπει να είναι τέτοιου μεγέθους, ώστε να μην μειώνεται η ταχύτητα του ψυκτικού κάτω του ορίου, κατά το οποίο συσσωρεύεται το ψυκτικό υγρό εντός του ατμοποιητή, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ψυκτική ικανότητα λόγω ατελούς ατμοποίησης του υγρού [19].

Στοιχεία υγρής εκτόνωσης:

Υπάρχουν και οι ατμοποιητές υγρής εκτόνωσης ή αλλιώς υπερχειλιστικοί, οι οποίοι χρησιμοποιούν ως εκτονωτικά μέσα τις βαλβίδες επίπλευσης. Τα στοιχεία αυτά είναι πάντοτε γεμάτα με ψυκτικό υγρό, ανεξάρτητα από το εκάστοτε φορτίο του ψυκτικού θαλάμου και η στάθμη τους ελέγχεται από πλωτήρα. Από πλευρά απόδοσης αυτού του τύπου τα ψυκτικά στοιχεία υπερσιχύνουν των ατμοποιητών ξηρής εκτόνωσης, λόγω του ότι παρουσιάζουν μεγαλύτερη βρεχόμενη επιφάνεια με ψυκτικό υγρό [19].

2.3.4.1 Κατηγοριοποίηση με βάση την κατασκευαστική μορφή της εξωτερικής τους επιφάνειας:

Στοιχεία με γυμνές σωληνώσεις:

Τα στοιχεία με γυμνές σωληνώσεις είναι ένα μεταλλικό συγκρότημα από σωλήνες χάλκινους διαφόρων διαμέτρων εάν πρόκειται να κυκλοφορεί εντός τους φρέον ή από χαλυβδοσωλήνες επίσης διαφόρων διαμέτρων, εάν πρόκειται να κυκλοφορεί εντός τους αμμωνία, προκειμένου να είναι αντιδιαβρωτικοί.

Τα στοιχεία αυτά προτιμούνται σε ψυκτικές εγκαταστάσεις κατάψυξης ή και σε περιπτώσεις ψύξης νερού και άλμης. Η προτίμηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι επειδή στις χαμηλές θερμοκρασίες η υγρασία στερεοποιείται με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η λειτουργία του ατμοποιητή εάν αυτός έχει πτερύγια [19].

Στοιχεία με πτερύγια:

Επειδή οι ατμοποιητές ξηρής εκτόνωσης, η οποίοι σήμερα κυριαρχούν στην εμπορική ψύξη, είχαν μικρή απόδοση με τους γυμνούς σωλήνες, ερευνήθηκε η αύξηση της ενεργούς τους επιφάνειας, χωρίς την ταυτόχρονη αύξηση του μήκους και της διαμέτρου των σωληνώσεων, γεγονός που θα τους καθιστούσε οικονομικά ασύμφορους.

Έτσι, τοποθετώντας επάνω στους γυμνούς σωλήνες του στοιχείου μεταλλικά πτερύγια, τα οποία πρεσάρονται και στη συνέχεια κολλούνται πάνω τους, για να έχουν καλύτερη θερμική αγωγιμότητα, τους αυξάνουν την επιφάνεια με αποτέλεσμα η ψυκτική ικανότητά τους να βελτιώνεται αισθητά.

Η απόσταση (διάκενο) μεταξύ των πτερυγίων κυμαίνεται μεταξύ 2÷25 mm και ο αριθμός τους από 1 έως 14 πτερύγια ανά ίντσα. Ο αριθμός τους είναι ανάλογος της

θερμοκρασίας λειτουργίας του ατμοποιητή, δηλαδή στις υψηλές θερμοκρασίες ο αριθμός των πτερυγίων είναι μεγάλος (μικρό διάκενο), ενώ στις χαμηλές ο αριθμός τους είναι μικρός, συνήθως 2÷4 πτερύγια ανά ίντσα [19].

Ατμοποιητές σωλήνων εντός κελύφους (Chillers):

Οι ατμοποιητές αυτού του τύπου είναι ξηρής ή υγρής εκτόνωσης, με συνέπεια στην πρώτη περίπτωση το προς ψύξη νερό να περνά εκτός των σωλήνων, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η εκτόνωση να γίνεται γύρω από τους σωλήνες και μέσα στο κέλυφος και η κυκλοφορία του νερού μέσα στους σωλήνες. Το κέλυφος των ατμοποιητών αυτού του τύπου είναι χαλύβδινο, διαμέτρου 8÷60 ίντσες και έχει ισχυρή μόνωση αρμοφλέξ. Εντός του κελύφους οι σωλήνες είναι χάλκινοι, αν κυκλοφορούν φρέον, ή χαλύβδινοι, αν κυκλοφορούν αμμωνία. Οι διάμετροι των σωλήνων ποικίλουν από 0.4÷2 ίντσες, ενώ το μήκος τους είναι περίπου 4÷20

Οι ατμοποιητές ξηρής εκτόνωσης χρησιμοποιούνται στις μικρές και μέσες ψυκτικές εγκαταστάσεις, ενώ οι ατμοποιητές υγρής εκτόνωσης χρησιμοποιούνται στις μέσες και μεγάλες ψυκτικές εγκαταστάσεις [19].

2.3.4.1 Κατηγοριοποίηση με βάση το είδος της κυκλοφορίας του ψυκτικού αέρα:

Η κυκλοφορία του αέρα εντός του ψυχόμενου χώρου διακρίνεται σε φυσική κυκλοφορία και βεβιασμένη, με χρήση δηλαδή ανεμιστήρα. Ο αέρας του ψυχόμενου χώρου, είτε πρόκειται για φυσικής κυκλοφορίας είτε για βεβιασμένης, διερχόμενος δια μέσου των πτερυγίων, προσδίδει σε αυτά μέρος της θερμότητάς του, η οποία μεταφέρεται προς την εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων του στοιχείου, με αποτέλεσμα αυτός να ψύχεται. Η θερμότητα αυτή ακολούθως, μεταδίδεται μέσω αγωγής από την εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων του στοιχείου προς το εσωτερικό τους, όπου κυκλοφορεί το ψυκτικό υγρό [19].

Στοιχεία φυσικής κυκλοφορίας αέρα:

Τα στοιχεία φυσικής κυκλοφορίας χρησιμοποιούνται σε ψυκτικές εγκαταστάσεις, όπου δεν απαιτούνται μεγάλη ταχύτητα αέρα και υψηλή αφύγρανση των ψυχόμενων προϊόντων. Τέτοιες εγκαταστάσεις είναι τα κοινά οικιακά ψυγεία, τα διάφορα ψυγεία-βιτρίνες των σουπερμάρκετ, καθώς και οι μεγάλες αποθήκες συντήρησης και αποθήκευσης τροφίμων, τα οποία δε χρειάζονται μεγάλη αφύγρανση.

Η κυκλοφορία του αέρα στα στοιχεία αυτού του τύπου εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ στοιχείου και χώρου ψύξεως, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ποσότητα κυκλοφορούντος αέρα πάνω από το στοιχείο. Όμως η κυκλοφορία του αέρα εξαρτάται και από το μέγεθος, το σχήμα και τη θέση τοποθέτησης του στοιχείου. Σε μικρές ψυκτικές εγκαταστάσεις τα στοιχεία φέρουν και κατευθυντήρες για να εξασφαλίσουν την ομοιόμορφη ροή του αέρα [19].

Στοιχεία βεβιασμένης κυκλοφορίας αέρα:

Τα στοιχεία βεβιασμένης κυκλοφορίας του αέρα εργάζονται με εκτονωτικές βαλβίδες (όχι με πλωτήρες) και αποτελούνται από σειρές χάλκινων σωληνώσεων επί των οποίων είναι τοποθετημένα πτερύγια για την αύξηση της επιφάνειας μεταφοράς της θερμότητας. Τα στοιχεία αυτά φέρουν και έναν ανεμιστήρα ισχύος άνω των 15 Watt στο εμπρόσθιο ή οπίσθιο τμήμα του, ο οποίος εξαναγκάζει τον αέρα να διέλθει δια μέσου των σωληνώσεων με μεγάλη πίεση και ταχύτητα. Όλο το συγκρότημα σωλήνων και πτερυγίων είναι καλυμμένο με μεταλλικό περίβλημα.

Τα στοιχεία βεβιασμένης κυκλοφορίας έχουν την τάση ταχείας αφυγράνσεως των ψυχόμενων προϊόντων, αλλά την αφύγρανση του χώρου την κρατάμε υπό έλεγχο, μειώνοντας τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ στοιχείου και ψυχόμενου χώρου ή την ταχύτητα του διερχόμενου αέρα. Σε ψυκτικές εγκαταστάσεις, όπου η αφύγρανση δεν έχει καμία σημασία τοποθετούνται μικρά στοιχεία με τη μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά, δηλαδή $\Delta T = 7^{\circ}\text{C}$. Παρότι η θερμοκρασία των στοιχείων αυτών είναι συνήθως χαμηλή, εντούτοις δεν σχηματίζεται πάγος στην επιφάνεια τους, λόγω της ταχείας κυκλοφορίας του αέρα, ο οποίος διερχόμενος δια μέσου των πτερυγίων και των σωλήνων του στοιχείου, ψύχεται.

Η τοποθέτηση των στοιχείων βεβιασμένης κυκλοφορίας εντός των ψυκτικών θαλάμων ποικίλει αναλόγως του σχήματός τους. Γενικά, τοποθετούνται επί των οροφών των ψυκτικών θαλάμων ή επί των ανωτάτων σημείων των τοίχων τους. Η μετωπική ταχύτητα του αέρα κυκλοφορίας δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 90-450 m/s, διότι το κόστος λειτουργίας τους αυξάνεται, αλλά και μπορεί να συμπαρασύρει το νερό από τα τοιχώματα του στοιχείου και να το σκορπίζει πάνω στα ψυχόμενα προϊόντα, αντί να οδηγείται στην αποχέτευση [19].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ψυκτικά μέσα

Ως ψυκτικά μέσα χαρακτηρίζονται γενικά τα σώματα, των οποίων η θερμοκρασία ατμοποίησης υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και των οποίων οι υπόλοιπες ιδιότητες είναι τέτοιες, ώστε να είναι δυνατή η πρακτική εκμετάλλευση της χαμηλής αυτής θερμοκρασίας ατμοποίησης με σκοπό την παραγωγή βιομηχανικής ψύξης.

Το πλήθος των εφαρμογών της βιομηχανικής ψύξης και η επιθυμία βελτίωσης της λειτουργίας των ψυκτικών εγκαταστάσεων, σε διαφορετικές κάθε φορά συνθήκες λειτουργίας, αποτελούν την αιτία υπάρξεως των διαφόρων ψυκτικών μέσων, καθένα από τα οποία ενδείκνυται για συγκεκριμένες εφαρμογές και για ορισμένα είδη ψυκτικών εγκαταστάσεων [23].

3.1 Επιθυμητές ιδιότητες ψυκτικών μέσων

Οι απαιτήσεις σε ότι αφορά στις ιδιότητες των ψυκτικών μέσων είναι διαφορετικές για κάθε περίπτωση εφαρμογής, λόγω δε της μη υπάρξεως ιδανικών ψυκτικών μέσων, τα οποία να ικανοποιούν όλες τις απαιτήσεις, επιλέγουμε συνήθως συμβιβαστικές λύσεις. Στα επόμενα δίνονται οι κυριότερες επιθυμητές ιδιότητες και οι απαιτήσεις, τις οποίες οφείλουν να πληρούν τα ψυκτικά μέσα [23].

3.1.1 Χημικές ιδιότητες

Τα ψυκτικά μέσα οφείλουν να παρουσιάζουν χημική ευστάθεια σε ολόκληρη την περιοχή των πιέσεων και των θερμοκρασιών της εφαρμογής τους, χημική αδράνεια έναντι των μεταλλικών ή μη μεταλλικών υλικών κατασκευής των ψυκτικών εγκαταστάσεων, καθώς και έναντι των λιπαντικών ελαίων, των υδρατμών και του οξυγόνου του αέρα και επίσης να είναι μη αναφλέξιμα και να μη σχηματίζουν εκρηκτικά μίγματα με τον ατμοσφαιρικό αέρα [23].

3.1.2 Θερμικές ιδιότητες

Η πίεση συμπυκνώσεως ενός ψυκτικού μέσου, δεν πρέπει να είναι υπερβολικά υψηλή για την αποφυγή βαριών κατασκευών αφενός και διαρροών ψυκτικού μέσου αφετέρου, ενώ η πίεση ατμοποίησης οφείλει να μην είναι υπερβολικά χαμηλή για την αποφυγή δημιουργίας υψηλού κενού εντός του στοιχείου ατμοποίησης, με τις γνωστές επιπτώσεις στεγανότητας της εγκατάστασης (κίνδυνος διεισδύσεως υγρασίας με τον ατμοσφαιρικό

αέρα). Επιπλέον, οι χαμηλές πιέσεις στο στοιχείο ατμοποίησης επιφέρουν την αύξηση του ειδικού όγκου του ψυκτικού μέσου που αναρροφάται από τον συμπυκνωτή. Η αύξηση αυτή οδηγεί σε μεγαλύτερες διαστάσεις συμπιεστή, για να μπορεί να διακινηθεί η ίδια μάζα ψυκτικού μέσου στην ψυκτική εγκατάσταση [23].

Είναι προτιμότερο να υπάρχει διαφυγή ψυκτικού μέσου λόγω υπερπίεσεως (γεγονός το οποίο ελέγχεται εύκολα με τη βοήθεια των διάφορων ανιχνευτών ψυκτικών μέσων), από το να εισέλθει υγρός ατμοσφαιρικός αέρας στην εγκατάσταση, γιατί εκτός των άλλων δυσάρεστων συνεπειών αυτό μπορεί να οδηγήσει και στο σχηματισμό οξέων και βάσεων εντός της ψυκτικής εγκατάστασης.

Η κρίσιμη θερμοκρασία των ψυκτικών μέσων πρέπει να είναι αρκετά υψηλή, ώστε η συμπύκνωση του στο στοιχείο συμπυκνώσεως να είναι δυνατή και κάτω από ακραίες συνθήκες περιβάλλοντος. Αντίθετα, η θερμοκρασία στερεοποίησης πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή και μακριά από την περιοχή λειτουργίας της ψυκτικής εγκατάστασης.

Οι απώλειες εντός των διατάξεων στραγγαλισμού πίεσεως αυξάνουν όπως είναι γνωστό, ανάλογα με την τιμή της σχέσεως $c_{υγρ}/r$, όπου r είναι η θερμότητα ατμοποίησης και $c_{υγρ}$ είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του ψυκτικού μέσου. Για το λόγο αυτό απαιτούνται μεγάλες τιμές για το r , όταν οι τιμές του $c_{υγρ}$ είναι υψηλές (π.χ NH_3 , H_2O). Οι τιμές του r και του $c_{υγρ}$ αυτές καθαυτές δεν αποτελούν αποφασιστικό παράγοντα για την καταλληλότητα ή όχι ενός ψυκτικού μέσου. Τόσο ψυκτικά μέσα με μικρές τιμές του r π.χ τα παράγωγα του μεθανίου και του αιθανίου, όσο και ψυκτικά μέσα με μεγάλες τιμές του r π.χ η αμμωνία και το νερό, χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην πράξη.

Η θερμότητα ατμοποίησης r επιδρά και στην ογκομετρική ψυκτική ικανότητα των ψυκτικών μέσων. Η ογκομετρική ψυκτική ικανότητα ενός ψυκτικού μέσου ορίζεται ως η ανά m^3 αναρροφούμενου ξηρού κεκορεσμένου ατμού ανηγμένη ψυκτική ισχύς αυτού. Η ογκομετρική ψυκτική ικανότητα πρέπει να ανταποκρίνεται στις εκάστοτε απαιτήσεις των ψυκτικών εγκαταστάσεων, που καλούνται να ικανοποιήσουν ορθολογικά τις ποικίλες εφαρμογές της ψύξης στην πράξη [23].

Τέλος, ένα ψυκτικό μέσο πρέπει να έχει υψηλή λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως, δηλαδή εξατμιζόμενο να απορροφάει περισσότερη θερμότητα από το χώρο ψύξεως. Το νερό παρουσιάζει πολύ μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα (970 BTU/LB), αλλά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί λόγω του υψηλού σημείου βρασμού ($100^\circ C$), εκτός αν βρεθεί υπό πίεση [11].

3.1.3 Φυσιολογικές ιδιότητες

Τα ψυκτικά μέσα οφείλουν να είναι μη τοξικά και να μην προσβάλλουν το αναπνευστικό σύστημα και γενικά τον ανθρώπινο οργανισμό. Σε περίπτωση διαρροής ψυκτικού μέσου είναι επιθυμητή η εύκολη αντίληψη της παρουσίας του μέσω της όσφρησης. Απαιτείται όμως ιδιαίτερη προσοχή σε τέτοιες περιπτώσεις και ιδιαίτερα στον κλιματισμό χώρων

συγκεντρώσεως πολλών ατόμων, όπως π.χ θέατρα, αίθουσες διαλέξεων, κτίρια καταστημάτων ή γραφείων κλπ, γιατί η διαφυγή ψυκτικού μέσου διαπεραστικής οσμής είναι δυνατόν να προκαλέσει πανικό, ιδιαίτερα όταν εκτός της οσμής προσβάλλει και τα αναπνευστικά όργανα, όπως π.χ συμβαίνει με την αμμωνία [23].

3.1.4 Οικονομικές απαιτήσεις

Για μικρές ψυκτικές εγκαταστάσεις ο παράγοντας κόστος αγοράς των διάφορων ψυκτικών μέσων είναι άνευ σημασίας. Στην περίπτωση όμως των μεγάλων βιομηχανικών ψυκτικών εγκαταστάσεων με εκτεταμένα δίκτυα και ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται απευθείας ατμοποίηση του ψυκτικού μέσου, η τιμή της αγοράς του ψυκτικού μέσου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ευρεία χρησιμοποίηση ενός ψυκτικού μέσου στην πράξη, είναι η εύκολη εξεύρεσή του στο εμπόριο. Για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας και συγκεκριμένο θεωρητικό ψυκτικό κύκλο όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική ψυκτική ικανότητα ενός ψυκτικού μέσου, τόσο οικονομικότερο είναι. Ως ειδική ψυκτική ικανότητα ενός ψυκτικού μέσου, χαρακτηρίζεται η ανά καταναλωθείσα kWh παραγόμενη ικανότητα αυτού [23].

3.2 Ιστορικό χρήσης ψυκτικών μέσων

Τη δεκαετία του 1980 η επιλογή του ψυκτικού μέσου στις ψυκτικές εγκαταστάσεις ήταν απλή υπόθεση. Ουσίες αδρανείς, μη τοξικές και μη εύφλεκτες, όπως οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs), γνωστοί και με την εμπορική ονομασία «φρέον», κυριαρχούσαν στην αγορά. Ωστόσο, η επιλογή ψυκτικού μέσου έχει γίνει πιο σύνθετη τα τελευταία χρόνια, διότι αποκαλύφθηκε ότι οι ουσίες αυτές καταστρέφουν το προστατευτικό στρώμα του όζοντος. Η βιομηχανία αντέδρασε προσπαθώντας να υποκαταστήσει τα CFCs με άλλες ουσίες, οι οποίες είτε βλάπτουν λιγότερο το όζον, όπως οι υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs), είτε είναι ασφαλείς για τη στοιβάδα του όζοντος, όπως οι υδροφθοράνθρακες (HFCs). Πρόσφατα χρησιμοποιούνται στην αγορά HFCs, αναφερόμενοι ως υδροφθορολεφίνες (HFOs) με χαμηλό GWP και μηδενικό ODP, που ωστόσο είναι ελαφρώς εύφλεκτα [24].

Αν και η κίνηση αυτή έγινε για περιβαλλοντικούς λόγους, η βιομηχανία ψυκτικών εισήλθε σε ένα νέο φαύλο κύκλο, αφού οι νέες ψυκτικές ουσίες (όπως άλλωστε και οι παλαιότερες) συμβάλλουν, και μάλιστα σημαντικά, στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και στην αλλαγή του κλίματος του πλανήτη. Γι' αυτό το λόγο, όλες οι προαναφερθείσες ουσίες τελούν υπό απαγόρευση, περιορισμούς ή ελέγχους από διεθνείς συμβάσεις και συγκεκριμένα από το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ για την προστασία της στιβάδας του όζοντος και το Πρωτόκολλο του Κιότο για την αποτροπή των κλιματικών αλλαγών. Επιπλέον, νομοθετικές ρυθμίσεις σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο βάζουν πλέον φραγμούς στην περαιτέρω ανάπτυξη αυτών των επιβλαβών για το περιβάλλον ουσιών [25].

Τα φυσικά ψυκτικά μέσα, όπως η αμμωνία, το διοξείδιο του άνθρακα, το νερό και ο αέρας, έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλές δεκαετίες και σε ποικίλες ψυκτικές ή κλιματιστικές εφαρμογές. Τα ψυκτικά μέσα αυτά παρόλο που είναι απόλυτα φιλικά προς το περιβάλλον, προσθέτουν άλλα προβλήματα, όπως διάβρωση και τοξικότητα, οι ανάγκες υψηλών πιέσεων για τη λειτουργία τους, η ευφλεκτότητά τους και τέλος η χαμηλή λειτουργική τους απόδοση.

Επιπλέον, η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν οι ψυκτικές εγκαταστάσεις, παράγεται συνήθως από ορυκτά καύσιμα, παράγοντας υψηλές εκπομπές CO₂, που συμβάλλουν στην παγκόσμια αλλαγή του κλίματος. Αυτό το έμμεσο αποτέλεσμα, που συνδέεται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζει συχνά μεγαλύτερο αντίκτυπο στο αποτύπωμα άνθρακα στην ατμόσφαιρα από το άμεσο αποτέλεσμα των εκπομπών του ψυκτικού μέσου.

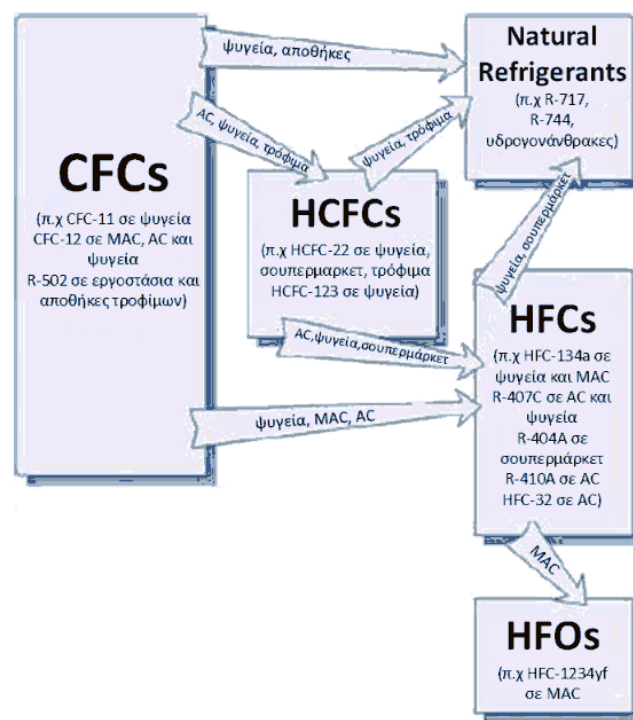
Σύμφωνα με την ASHRAE, η επιλογή των ψυκτικών μέσων και των ψυκτικών εγκαταστάσεων στις οποίες αυτά χρησιμοποιούνται, πρέπει να βασίζεται σε μια ολιστική ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων. Τα κριτήρια πρέπει να περιλαμβάνουν την ενεργειακή απόδοση, την απόδοση του συστήματος, τον δυνητικό αντίκτυπο στην κοινοτική ασφάλεια, τον κίνδυνο για την προσωπική ασφάλεια και την ελαχιστοποίηση των άμεσων και έμμεσων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις κάθε ψυκτικού μέσου. Η ASHRAE ενθαρρύνει και υποστηρίζει τη συνεχιζόμενη προσπάθεια ανάπτυξης νέων ψυκτικών μέσων και τη βελτίωση της χρήσης των υπάρχοντων ψυκτικών μέσων για την ικανοποίηση αυτών των κριτηρίων [24].

Η επιλογή του κατάλληλου ψυκτικού μέσου για μια συγκεκριμένη εφαρμογή ψυκτικής εγκατάστασης έχει γίνει πιο σύνθετη τα τελευταία χρόνια. Οι απαιτήσεις ευφλεκτότητας και τοξικότητας καλύπτονται από τα πρότυπα ασφαλείας της ASHRAE (Πρότυπα 15,34) και τα διεθνή ισοδύναμα (ISO 5149, ISO 817).

Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες έχουν προκαλέσει σημαντικές παραμέτρους για την εκτίμηση του δυναμικού καταστροφής του όζοντος (ODP), του δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη (GWP), της ενεργειακής απόδοσης και της κλιματικής απόδοσης του κύκλου ζωής (Life Cycle Climate Performance -LCCP). Για το λόγο αυτό, ορισμένες χώρες έχουν αναπτύξει ρυθμιστικούς περιορισμούς, διεθνή πρωτόκολλα ή εθελοντικές συμφωνίες. Ωστόσο, είναι πιθανή η εμφάνιση μικρότερων ενεργειακών αποδόσεων, κατά την αντικατάσταση ψυκτικών μέσων. Για παράδειγμα, εάν ένα νέο ψυκτικό με χαμηλό GWP, έχει μικρότερη ψυκτική απόδοση, λόγω των θερμοδυναμικών του χαρακτηριστικών από το υπάρχον ψυκτικό μέσο που αντικαθιστά, τότε οποιοδήποτε άμεσο όφελος από την αποφυγή υπερθέρμανσης του πλανήτη, αντισταθμίζεται εν μέρει ή πλήρως από την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Με την εφαρμογή του πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ του 1987, τα ψυκτικά μέσα που περιέχουν χλώριο (π.χ CFC-11, CFC-12, HCFC-22, R-502, HCFC-123) έχουν

περιοριστεί λόγω του υψηλού ODP τους, με αποτέλεσμα τη μετάβαση σε εναλλακτικές λύσεις, όπως οι υδροφθοράνθρακες (HFCs) και τα φυσικά ψυκτικά μέσα [24].

Το Σχήμα 3.1 παρουσιάζει την εξέλιξη στη χρήση των ψυκτικών μέσων. Διαγράφονται οι διαδρομές που επιλέγονται κατά τη σταδιακή κατάργηση των CFCs και των HCFCs. Η διαδικασία προχωρά με διαφορετικές ταχύτητες σε όλο τον κόσμο. Σε ορισμένες χώρες, τα CFCs έχουν ήδη απαγορευθεί, ενώ σε άλλες η χρήση του παρουσιάζει ελάττωση, καθώς και αυτές κινούνται προς την κατεύθυνση της πλήρους απαγόρευσης. Προς το παρόν, τα ψυκτικά που είναι πιθανόν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον είναι τα φυσικά ψυκτικά, τα HFCs, τα ακόρεστα HFCs (επίσης γνωστά ως HFOs) και ενδεχομένως τα μείγματα αυτών των ψυκτικών μέσων.



Σχήμα 3.1: Εξέλιξη στη χρήση των ψυκτικών μέσων [24]

Η μετάβαση από τους CFCs ήταν σχετικά ταχεία στις ανεπτυγμένες χώρες και εμφανίστηκε περισσότερο στον αναπτυσσόμενο κόσμο. Μεγέθη όπως το LCCP έχουν αναπτυχθεί για να επιτρέψουν συγκρίσεις μεταξύ ψυκτικών μέσων. Το μέγεθος LCCP εκτιμά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την ενέργεια που χρησιμοποιείται από το σύστημα ψύξης/κλιματισμού κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του ίδιου του κύκλου ζωής του ψυκτικού. Ως εκ τούτου, το LCCP μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προσέγγιση περιβαλλοντικής αξιολόγησης για τη σύγκριση εναλλακτικών συστημάτων. Επιπλέον, τα συστήματα ψύξης σχεδιάζονται για να μειώσουν το φορτίο του ψυκτικού μέσου, ενώ ερευνούνται παράλληλα οι διαδικασίες και ο εξοπλισμός που απαιτείται για την παρακολούθηση και την ελαχιστοποίηση των διαρροών ψυκτικού μέσου. Η έμφαση των εταιριών στην ανάγκη βελτίωσης του

κοινωνικού τους προφίλ οδήγησε στην αυξημένη εστίαση στα ζητήματα ενεργειακής απόδοσης και σε ορισμένες περιπτώσεις στην προτίμηση φυσικών ψυκτικών μέσων. Επομένως, τα πρότυπα ασφάλειας έχουν επανεκτιμηθεί και επικαιροποιούνται για να αντικατοπτρίζουν το αυξανόμενο ενδιαφέρον για εύφλεκτα ή ελαφρώς εύφλεκτα ψυκτικά μέσα.

Ενώ κάθε κατηγορία ψυκτικών μέσων έχει ευνοϊκές επιδόσεις ή και περιβαλλοντικές πτυχές, καμία δεν αποτελεί ιδανική λύση. Τα προβλήματα των φυσικών ψυκτικών μέσων περιλαμβάνουν ευφλεκτότητα, τοξικότητα, υψηλές πιέσεις και σε ορισμένες περιπτώσεις, χαμηλότερη απόδοση λειτουργίας. Η ανησυχία για το υψηλό GWP ορισμένων HFCs οδήγησε πρόσφατα στην ανάγκη περιορισμού της χρήσης τους. Αυτό υποκινεί την έρευνα για την επέκταση HFCs με χαμηλό GWP στις νέες εφαρμογές. Η μείωση προτάθηκε ως σταδιακή κατάργηση, ωστόσο καμία χώρα δεν έχει εγκρίνει τυπικά μια πρόταση ούτε περιλαμβάνεται επί του παρόντος ούτε στα πρωτόκολλα του Κιότο ούτε στο πρωτόκολλο του Μόντρεαλ. Προς το παρόν, ορισμένες υδροφθορολεφίνες (HFOs) είναι διαθέσιμες σε περιορισμένες ποσότητες, αλλά δεν έχουν ακόμη δοκιμαστεί πλήρως σε όλες τις εφαρμογές. Επιπλέον, μερικές HFOs και HFCs χαμηλού GWP έχουν ήπια ευφλεκτότητα. Η επιστημονική κοινότητα διερευνά επίσης τα μίγματα σε αυτές τις κατηγορίες ψυκτικού μέσου για τον εντοπισμό συνδυασμών που μπορούν να βελτιστοποιήσουν την απόδοση και να ελαχιστοποιήσουν τις αρνητικές πτυχές τους [24].

3.3 Μεγέθη καταλληλότητας ψυκτικών μέσων

3.3.1 Δυναμικό καταστροφής του όζοντος - Ozone Depletion Potential (ODP)

Η στιβάδα του όζοντος στην ανώτερη ατμόσφαιρα λειτουργεί ως φίλτρο απέναντι στην υπεριώδη ακτινοβολία, η οποία μπορεί να είναι επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία. Έρευνες έχουν διαπιστώσει ότι το στρώμα του όζοντος γίνεται ολοένα και πιο λεπτό, λόγω των εκπομπών στην ατμόσφαιρα χλωροφθορανθράκων (CFC), αλονών (halons) και βρωμιδίων. Σύμφωνα με το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ το 1987, η παραγωγή αυτών των χημικών ουσιών θα καταργηθεί σταδιακά μέχρι το 1995 και θα αναπτυχθούν εναλλακτικά ψυκτικά μέσα [26].

Πρέπει να σημειωθεί, ότι πριν από το 1987, οι συνολικές εκπομπές CFC αποτελούνταν από σπρέι αερολυμάτων, διαλύτες και αφρώδη μόνωση και ότι οι εκπομπές ψυκτικού μέσου ήταν περίπου το 10% του συνόλου. Ωστόσο, σε όλες τις ψυκτικές εγκαταστάσεις έχουν αντικατασταθεί τα CFCs με εναλλακτικές λύσεις.

Το R22 είναι HCFC και θεωρείται πλέον ως μεταβατικό ψυκτικό μέσο, δεδομένου ότι θα καταργηθεί πλήρως από την παραγωγή μέχρι το 2030, όπως συμφωνήθηκε στο πλαίσιο του πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ. Μια ξεχωριστή απόφαση της Ευρωπαϊκής Κοινότητας έχει ορίσει τις ακόλουθες ημερομηνίες:

- 01/01/2001: Απαγόρευση χρήσης CFCs σε υπάρχοντα εξοπλισμό
Τα ανακτώμενα CFCs πρέπει να καταστρέφονται καταλλήλως
- 01/07/2002: Απαγόρευση χρήσης HCFCs σε νέο εξοπλισμό ψυκτικής ικανότητας > 100 kW
- 01/01/2004: Απαγόρευση χρήσης HCFCs σε νέα συστήματα inverter και αντλίες θερμότητας
- 01/01/2010: Απαγόρευση χρήσης παρθένων HCFCs σε υπάρχοντα εξοπλισμό
- 01/01/2015: Απαγόρευση χρήσης όλων των HCFCs σε υπάρχοντα εξοπλισμό [24]

3.3.2 Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη- Global Warming Potential (GWP)

Η υπερθέρμανση του πλανήτη αναφέρεται στην αύξηση των θερμοκρασιών παγκοσμίως, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την τήξη των πολικών πάγων και την αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Προκαλείται από την απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα των, όπως ονομάζονται, αερίων θερμοκηπίου, τα οποία σχηματίζουν ένα στρώμα και αντανακλούν τη θερμότητα πίσω στην επιφάνεια της γης ή συγκρατούν θερμότητα στην ατμόσφαιρα [26].

Το πιο γνωστό αέριο θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το οποίο μόλις απελευθερωθεί, παραμένει στην ατμόσφαιρα για 500 χρόνια, επομένως υπάρχει μια σταθερή δημιουργία στρώματος στο πέρασμα των ετών. Η κύρια αιτία των εκπομπών CO₂ είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Κάθε kWh ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στο Ηνωμένο Βασίλειο παράγει περίπου 0.53 kg CO₂ και εκτιμάται ότι οι ψυκτικοί συμπιεστές στο Ηνωμένο Βασίλειο καταναλώνουν 12.5 TWh ετησίως. Ο πίνακας του Σχήματος 3.2, δείχνει ότι τα νεοεμφανιζόμενα ψυκτικά αέρια έχουν επίσης ένα δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη εάν απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα, το R-134a έχει GWP 1430, πράγμα που σημαίνει ότι η εκπομπή 1 kg R-134a ισοδυναμεί με 1430 kg CO₂.

Η επιλογή του ψυκτικού μέσου επηρεάζει το GWP της μονάδας, αλλά άλλοι παράγοντες συμβάλλουν επίσης στη συνολική GWP και αυτό αντιπροσωπεύεται από τον όρο TEWI, που αντιπροσωπεύει τις συνολικές ισοδύναμες επιπτώσεις θέρμανσης (Total Equivalent Warming Impact). Η βιομηχανία ψύξης ανέπτυξε αυτόν τον όρο, προκειμένου να μετρήσει τις επιπτώσεις διαφόρων δραστηριοτήτων στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Ο όρος αυτός δείχνει τη συνολική επίπτωση στην επίδραση της υπερθέρμανσης του πλανήτη και περιλαμβάνει τη διαρροή ψυκτικού μέσου, τις απώλειες ανάκτησης ψυκτικού μέσου και την κατανάλωση ενέργειας. Είναι ένας όρος που πρέπει να υπολογιστεί για κάθε μονάδα ψυκτικού μέσου. Ένα στοιχείο που είναι βέβαιο είναι ότι χαρακτηρίζει κατά μέγιστο βαθμό το TEWI είναι η κατανάλωση ενέργειας, η οποία συμβάλλει στην εκπομπή CO₂ στην ατμόσφαιρα. Η επιλογή του ψυκτικού μέσου αφορά επομένως την απόδοση του ψυκτικού μέσου και την απόδοση του ψυκτικού συστήματος. Όσο μικρότερη είναι η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή κάθε kWh ψύξης, τόσο μικρότερη είναι η επίδραση στην υπερθέρμανση του πλανήτη [26].

3.3.3 Κλάσεις επικινδυνότητας της ASHRAE - ASHRAE Safety Class

Στις ΗΠΑ, το πρότυπο ASHRAE 34 ορίζει την ταξινόμηση ευφλεκτότητας και τοξικότητας των ψυκτικών μέσων, με τα γράμματα A και B να υποδεικνύουν χαμηλότερη και υψηλότερη τοξικότητα και οι αριθμοί 1, 2 και 3 να υποδηλώνουν το επίπεδο ευφλεκτότητας από την κατώτερη και υψηλότερη ευφλεκτότητα αντίστοιχα [27].

Πιο συγκεκριμένα τα ψυκτικά μέσα, ανάλογα με την τοξικότητά τους, ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- Η κατηγορία A περιλαμβάνει τα ψυκτικά για τα οποία δεν έχει εντοπιστεί τοξικότητα σε συγκεντρώσεις μικρότερες ή ίσες με 400 ppm.
- Η κατηγορία B περιλαμβάνει τα ψυκτικά μέσα για τα οποία υπάρχουν ενδείξεις τοξικότητας σε συγκεντρώσεις κάτω των 400 ppm.

Όσον αφορά την ευφλεκτότητά τους τα ψυκτικά μέσα κατηγοριοποιούνται σε τρεις κατηγορίες:

- Η κατηγορία 1 αφορά τα ψυκτικά μέσα που δεν εμφανίζουν διάδοση φλόγας όταν δοκιμάζονται στον αέρα στους 21 °C και 101 kPa.
- Η κατηγορία 2 αφορά τα ψυκτικά μέσα με χαμηλότερο όριο ευφλεκτότητας πάνω από 0.10 kg/m³ στους 21 °C και 101 kPa και θερμότητα καύσης μικρότερη από 19 kJ/kg.
- Η κατηγορία 3 αφορά τα ψυκτικά μέσα που είναι πολύ εύφλεκτα, όπως ορίζεται από ένα χαμηλότερο όριο ευφλεκτότητας μικρότερο ή ίσο με 0.10 kg/m³ στους 21 °C και 101 kPa ή θερμότητα καύσης μεγαλύτερη ή ίση με 19 kJ/kg.

Για παράδειγμα, το R-290 ταξινομείται ως A3, που σημαίνει ότι έχει χαμηλή τοξικότητα και υψηλή ευφλεκτότητα [27].

3.4 Ψυκτικά μέσα στα σουπερμάρκετ

Η επιλογή και η έγκριση αποδεκτών μακροπρόθεσμων ψυκτικών μέσων είναι πολύπλοκη. Το συνεχώς μεταβαλλόμενο νομοθετικό περιβάλλον, η σταδιακή κατάργηση των CFC και HCFC, η διαθεσιμότητα εναλλακτικών ψυκτικών μέσων και πολλοί άλλοι παράγοντες είναι μόνο μερικά από τα θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Εξαιτίας των νέων νομοθετικών πλαισίων που εισήγαγε το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, υπήρξε μια διαδικασία αντικατάστασης των βλαβερών για το στρώμα του όζοντος ψυκτικών μέσων R22 και R-502, τα οποία χρησιμοποιούνταν κατά κόρον στις εμπορικές ψυκτικές εγκαταστάσεις με ψυκτικά μέσα μηδενικού ODP. Έτσι, τα πλέον διαδεδομένα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται σήμερα στις ψυκτικές εγκαταστάσεις των σουπερμάρκετ είναι οι υδροφθοράνθρακες - HFCs (R-134a, R-404A, R-407A, R-407C, R-407F, R-410A, R-507A) και τα φυσικά ψυκτικά μέσα (R-717 (NH₃), R-744 (CO₂), υδρογονάνθρακες) [28].

3.4.1 Υδροθφοράνθρακες - HFCs

Οι υδροθφοράνθρακες ή HFCs είναι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές κλιματισμού και ψύξης. Είναι μη αναφλέξιμα, ανακυκλώσιμα και ενεργειακά αποδοτικά ψυκτικά που χρησιμοποιούνται με ασφάλεια παγκοσμίως. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ το 1999, τα HFCs αποτελούν την ασφαλή και οικονομικά αποδοτική λύση για την κατάργηση των CFCs και HCFCs. Επίσης, τα HFCs είναι απαραίτητα για την σταδιακή εξάλειψη των HCFCs στις αναπτυσσόμενες χώρες [29].

Τα HFCs χρησιμοποιούνται για αντικατάσταση ψυκτικού σε υπάρχον χαμηλής ενεργειακής απόδοσης εξοπλισμό, αλλά και σε νέες εγκαταστάσεις, με στόχο την ενεργειακή εξοικονόμηση και τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Η αντικατάσταση των CFCs με HFCs έχει μειώσει το αντίκτυπο των ψυκτικών εγκαταστάσεων σε αέρια του θερμοκηπίου. Με τις τρέχουσες τεχνολογίες έχει μειωθεί το ετήσιο σύνολο των αερίων του θερμοκηπίου που απορρίπτεται στο περιβάλλον, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80% από το αντίστοιχο του 1990. Οι προβλέψεις δείχνουν ότι μέχρι το 2050 οι εκπομπές HFC θα ευθύνονται για λιγότερο από το 2% των συνολικών εκπομπών σε αέρια του θερμοκηπίου.

Τα HFCs και ο εξοπλισμός που απαιτούν για την εφαρμογή τους, φαίνονται να λειτουργούν ικανοποιητικά για στις ψυκτικές εγκαταστάσεις. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετοί τομείς στους οποίους διαφέρουν από τα ψυκτικά μέσα που αντικαθιστούν:

- Απαιτούν λάδι πολυεστέρα (POE) και όχι ορυκτέλαιο.
- Τα περισσότερα από τα HFCs είναι μείγματα που ενδέχεται να συμπεριφέρονται διαφορετικά από τις καθαρές ουσίες υπό ορισμένες συνθήκες.
- Τα HFCs έχουν υψηλότερη τάση ατμών από τα ψυκτικά μέσα που αντικαθιστούν, γεγονός που επηρεάζει τις ρυθμίσεις των χειριστηρίων, των βαλβίδων και των διατάξεων ασφαλείας.

Οι κατασκευαστές ψυκτικών μέσων δεν έχουν καταφέρει να αναπτύξουν μονοσυστατικές ουσίες, που να λειτουργούν αποδοτικά σε υψηλές πιέσεις, να έχουν μηδενικό ODP και να έχουν αξιοπιστία και ασφάλεια, προκειμένου να αντικαταστήσουν τα CFCs. Επομένως, χρησιμοποιούνται ευρέως τα μείγματα HFCs [29].

Τα μείγματα έχουν το πλεονέκτημα, ότι οι ιδιότητές τους προσαρμόζονται στα τελικά χαρακτηριστικά του ψυκτικού μέσου, για την επίτευξη υψηλότερης απόδοσης, επιδόσεων και αξιοπιστίας. Ωστόσο τα ζεοτροπικά μείγματα περιλαμβάνουν και τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- Θερμοκρασιακή ολίσθηση: όσον αφορά τα ζεοτροπικά μείγματα, επειδή η σύνθεσή τους μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια των αλλαγών φάσεων, παρατηρείται μικρή αλλαγή στη θερμοκρασία ατμοποίησης και συμπύκνωσης υπό σταθερή πίεση. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως «ολίσθηση». Τα περισσότερα ζεοτροπικά μείγματα παρουσιάζουν μικρή

ολίσθηση, ωστόσο αυτό έχει ως συνέπεια τη συγκριτική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τη χρήση καθαρών ουσιών ως ψυκτικά μέσα, με μικρή επίδραση στην απόδοση του συστήματος.

- Κλασματοποίηση: επίσης στα ζεοτροπικά μείγματα, δεδομένου ότι τα συστατικά τους έχουν διαφορετικές πιέσεις ατμών, υπό ορισμένες συνθήκες, ενδέχεται να διαρρεύσουν από ένα σύστημα με διαφορετικού ρυθμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη μεταβολή της σύνθεσης του ψυκτικού μέσου με την πάροδο του χρόνου, με αντίστοιχη μεταβολή στην απόδοση του ψυκτικού κύκλου.

Τα ζεοτροπικά μείγματα που διατίθενται στην αγορά, εμφανίζουν ολίσθηση μικρότερη των 3°C και προσεγγίζουν σε τόσο μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά ενός αζεοτροπικού μείγματος, με αποτέλεσμα η κλασματοποίηση να μην αποτελεί σοβαρό πρόβλημα [29].

3.4.1.1 R-134a

Το R-134a είναι το πρώτο ψυκτικό υδροφθοράνθρακα που εμπορευματοποιήθηκε και έχει μηδενικό ODP. Αναπτύχθηκε πριν από περισσότερα από 25 χρόνια για να έχει χαρακτηριστικά παρόμοια με το R-12, προκειμένου να το αντικαταστήσει σε εφαρμογές μικρών και μέσων θερμοκρασιών. Το R-134a χρησιμοποιείται στον κλιματισμό αυτοκινήτων λόγω του μικρού ποσοστού διαρροών και της υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας. Το R-134a χρησιμοποιείται και στα κοινά οικιακά ψυγεία και διατίθεται από τους περισσότερους κατασκευαστές ψυκτικών μέσων [29].

Το R-134a έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ψυκτικό μέσο ενός συστατικού και επομένως δεν εμφανίζει θερμοκρασιακή ολίσθηση. Επίσης, η άμεση επίδραση του στην υπερθέρμανση του πλανήτη (GWP), είναι χαμηλή.

Το μειονέκτημα του R-134 έγκειται στην αρκετά χαμηλή του πυκνότητα σε σύγκριση με το R-22. Για την αντικατάσταση του R-22 με R-134a σε μια υπάρχουσα ψυκτική εγκατάσταση, όλες οι σωληνώσεις στους εναλλάκτες θερμότητας και μεταξύ των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται στο σύστημα, πρέπει να έχουν μεγαλύτερες συγκριτικά διατομές προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πτώση πίεσης και να διατηρηθεί μια αποδεκτή λειτουργική απόδοση. Το γεγονός αυτό, οδηγεί σε ένα πιο δαπανηρό από οικονομικής πλευράς σύστημα, σε σχέση με το υπάρχον σύστημα που χρησιμοποιεί R-22. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του R-134a είναι επίσης χαμηλότερος από αυτόν του R-22, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος.

Το παραπάνω μειονέκτημα ωστόσο, ενδέχεται να μην επηρεάζει τις μεγάλης οικονομικής κλίμακας επενδύσεις σε μεγάλες εμπορικές ψυκτικές εγκαταστάσεις, όπως τα σουπερμάρκετ, όπου χρησιμοποιούνται μεγάλες διατάξεις σπειροειδών ή παλινδρομικών συμπιεστών. Σε αυτές τις περιπτώσεις η αντικατάσταση των R-11 και R-22 με το R-134a, ίσως προσφέρει την καλύτερη εναλλακτική λύση, για μια οικονομική μετασκευή του υπάρχοντος συστήματος σε ψυκτικό σύστημα που χρησιμοποιεί HFCs [29].

3.4.1.2 R-404A

Στις σύγχρονες ψυκτικές εγκαταστάσεις στα σουπερμάρκετ χρησιμοποιείται ευρέως το ψυκτικό μέσο R-404A, το οποίο είναι HFC και χρησιμοποιείται προς αντικατάσταση του απαγορευμένου πλέον R-502. Το R-404A αποτελεί ένα εξαιρετικό ψυκτικό μέσο χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας, λόγω της υψηλής ενεργειακής απόδοσης και του χαμηλού ODP. Το R-404a είναι επίσης ένα σχεδόν αζεοτροπικό μείγμα των ψυκτικών μέσων R-125, R-143a και R-134a. Τέλος είναι εμπορικά διαθέσιμο από πολλές πηγές και γίνεται το δημοφιλέστερο ψυκτικό μέσο της κατηγορίας του [29].

Σαν ουσία διαθέτει χημική ευστάθεια και δεν αλλοιώνεται στις πιέσεις και θερμοκρασίες που χρησιμοποιείται, ενώ καθώς ο ειδικός του όγκος στις χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας είναι κάπως μεγαλύτερος του R-502, συνήθως απαιτείται μεγαλύτερη συμπίεση των ατμών του, για να επιτευχθεί παρόμοια ψυκτική ικανότητα, κάτι που αποτελεί ένα μικρό μειονέκτημα του R-404A έναντι του R-502. Εμφανίζει όμως μικρότερη θερμοκρασία εξόδου από το συμπιεστή (hot gas) περίπου κατά 9 °C σε σχέση με το R-502, κάτι που συμβάλει θετικά στην αυξημένη διάρκεια ζωής του συμπιεστή.

Είναι μη διαβρωτικό και δεν οξειδώνει τα συνήθη μέταλλα των ψυκτικών εγκαταστάσεων (χαλκό, χάλυβα, αλουμίνιο), δεν προκαλεί σημαντικές αλλοιώσεις στα πλαστικά και ελαστομερή μέρη τους, ενώ είναι συμβατό με τις κυριότερες ρητινώδεις μονώσεις των τυλιγμάτων των κινητήρων των συμπιεστών. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, πρέπει να ελέγχεται η τυχόν αλληλεπίδραση με τέτοια υλικά και μάλιστα λαμβάνοντας υπόψη και την παρουσία του συγκεκριμένου ψυκτελαίου που χρησιμοποιείται.

Συnergieζεται μόνο με τα νέα πολυεστερικά ψυκτέλαια (και όχι με τα συμβατικά ορυκτέλαια), γιατί τα πρώτα είναι καταλληλότερα για τα νέα οικολογικά ψυκτικά μέσα, καθώς το προκύπτον μίγμα τους με το ψυκτικό μέσο παρουσιάζει πολύ καλή θερμική ευστάθεια, ενώ στις ψυκτικές εγκαταστάσεις που δουλεύουν με το R-404A συνήθως τοποθετείται ειδικό φίλτρο/αφυγραντήρας καθώς όλα τα αφυγραντικά υλικά δεν είναι κατάλληλα γι' αυτό το ψυκτικό μέσο. Τέλος σημειώνουμε ότι η ψυκτική ικανότητα μιας διάταξης που χρησιμοποιεί R-404A είναι σχεδόν ίδια με την ικανότητα αυτής που εργάζεται με το R-502, στις ίδιες βέβαια συνθήκες λειτουργίας. Οι πολύ καλές πάντως θερμοδυναμικές ιδιότητες του R-404A αντισταθμίζουν τη μικρότερη απόδοση του συμπιεστή που παρουσιάζουν εγκαταστάσεις που το χρησιμοποιούν, σε σχέση βέβαια με αυτές που χρησιμοποιούν το R-502 [29].

3.4.1.3 R-407A

Το R-407A αποτελεί ένα μείγμα των R-32, R-125 και R-134a σε αναλογία μαζών, 20-40-40. Το R-407A σχεδιάστηκε για εφαρμογές ψύξης χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας. Με τιμή GWP = 2107, το R-407A έχει 54% χαμηλότερο GWP από το R-404A. Οι κατασκευαστές αυτού του ψυκτικού μέσου υποστηρίζουν ότι το R-407A έχει μια καλή αντιστοιχία ιδιοτήτων και απόδοσης με το R-22, καθιστώντας το κατάλληλο για αντικατάσταση του R-22 σε ψυκτικές εγκαταστάσεις σουπερμάρκετ και αποθήκευσης τροφίμων. Οι

Θερμοκρασίες συμπύκνωσης του R-407A θα είναι χαμηλότερες από εκείνες του R-22, αλλά οι αντίστοιχες πιέσεις, υψηλότερες. Επίσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ψύξη του συμπιεστή, σε περιπτώσεις λειτουργίας υψηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος [29].

3.4.1.4 R-407C

Το R-407C είναι ένα μείγμα R-32, R-125 και R-134a. Αποτελεί επιλογή HFC, που λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες και σχεδιάστηκε ώστε να έχει λειτουργικά χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά του R-22. Τα μεγαλύτερα μειονεκτήματά του σχετίζονται με τη μεγάλη θερμοκρασιακή ολίσθηση (περίπου 12°C) και την υποβάθμιση της απόδοσης σε σύγκριση με το R-22. Ωστόσο, αυτό το ψυκτικό μέσο συνοδεύεται με την απλούστερη μετατροπή ενός υπάρχοντος ψυκτικού συστήματος, σε σύστημα που χρησιμοποιεί HFC. Σε συστήματα, όπου η ολίσθηση είναι αποδεκτή, το R-407C αποτελεί μια δημοφιλή επιλογή για τους κατασκευαστές που θέλουν να μεταβούν γρήγορα σε μια λύση HFC. Μακροπρόθεσμα ωστόσο, η χαμηλή απόδοση του συγκεκριμένου ψυκτικού μέσου, ενδέχεται να το καταστήσει σε λιγότερο συμφέρουσα επιλογή σε σχέση με το R-410A, σε εφαρμογές μέσης και υψηλής θερμοκρασίας.

Τέλος, πρέπει να δίνεται προσοχή κατά την εφαρμογή του R-407C στις εφαρμογές, όπου η θερμοκρασιακή ολίσθηση μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος με κλασματοποίηση. Επίσης, το R-407C δεν μπορεί να αντικαταστήσει το R-22, απευθείας, χωρίς δηλαδή να πραγματοποιηθούν μετατροπές στο σύστημα. Όπως όλοι οι HFCs, το R-407C απαιτεί λιπαντικά POE και ενδεχομένως να απαιτούνται και άλλες τροποποιήσεις στο σχεδιασμό του συστήματος, προκειμένου να λειτουργήσει αποδεκτά το R-407C στο υπάρχον σύστημα, που χρησιμοποιεί R-22 [29].

3.4.1.5 R-407F

Το R-407F είναι και αυτό μείγμα των R-32, R-125 και R-134a και αποτελεί μια ακόμη επιλογή ψυκτικού για αντικατάσταση όχι μόνο του R-22, αλλά και του R-404A. Αυτή η εναλλακτική λύση ψυκτικού, παρουσιάζει χαμηλότερο GWP και εμφανίζεται πιο αποδοτική από το ευρέως διαδεδομένο R-404A, συνδυάζοντας έτσι τα περιβαλλοντικά οφέλη με χαμηλότερο ενεργειακό, και οικονομικό, κόστος. Το R-407F παρουσιάζει μεγάλη συμβατότητα προς τις εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν R-22 ή R-404A, είναι μη εύφλεκτο, έχει μεγάλη διαθεσιμότητα και χαμηλό κόστος, συγκριτικά με το R-404A [30].

Η υψηλότερη ενεργειακή απόδοση του R-407F σε σχέση με το R-404A, επιβεβαιώνεται με εργαστηριακά πειράματα. Τα πειράματα αυτά δείχνουν ότι η χρήση του R-407F, παρότι έχει χαμηλότερη ψυκτική ικανότητα σε σύγκριση με το R-404A, οδήγησε σε μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος κατά 22% στις εγκαταστάσεις που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης, το R-407F είναι συγκρίσιμο με το R-22 από πολλές απόψεις και έχει το πλεονέκτημα ότι απαιτεί λιγότερες τροποποιήσεις εξοπλισμού σε σχέση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές επιλογές HFCs.

Στα μειονεκτήματα του R-407F, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ήδη προαναφερθείσα μειωμένη ψυκτική του ικανότητα. Σημαντικό επίσης μειονέκτημα του ψυκτικού μέσου αυτού είναι η υψηλή τελική θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας, η οποία καθιστά δύσκολη τη χρήση των κλασικών συμπιεστών ψυκτικού αερίου και απαιτεί τη χρήση πρόσθετων ανεμιστήρων και την παράλληλη έγχυση ψυκτικού υγρού στην έξοδο των συμπιεστών [31].

3.4.1.6 R-410A

Το R-410A αποτελεί το πιο διαδεδομένο μέσο επιλογής για χρήση σε οικιακές εφαρμογές κλιματισμού. Οι περισσότεροι μεγάλοι κατασκευαστές οικιακών κλιματιστικών συσκευών, προσφέρουν γραμμές προϊόντων R-410A. Το R-410A προσφέρει υψηλότερη απόδοση και καλύτερες τιμές TEWI από άλλες επιλογές ψυκτικών μέσων, σε εγκαταστάσεις κλιματισμού. Το R-410A έχει επίσης πολλά οφέλη που το καθιστούν ιδανικό ψυκτικό μέσο για χρήση σε εφαρμογές εμπορικής ψύξης.

Το R-410A είναι σχεδόν αζεοτροπικού τύπου μείγμα, αποτελούμενο κατά 50% R-32 και 50% R-125. Το ψυκτικό μέσο αυτό ατμοποιείται με 35% υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και 28% χαμηλότερη πτώση πίεσης σε σύγκριση με το R-22, με αποτέλεσμα να προσφέρει υψηλότερη ενεργειακή απόδοση.

Σε ψυκτικές εφαρμογές, το R-410A αποτελεί ενδεχομένως το πιο αποδοτικό ψυκτικό μέσο σε συνθήκες μέσης θερμοκρασίας. Άλλα πλεονεκτήματά του, περιλαμβάνουν μικρότερου μεγέθους σωληνώσεις και χαμηλότερες πτώσεις πίεσης [29].

3.4.1.7 R-448A

Το R-448A είναι ένα ζεοτροπικό μίγμα, που περιέχει R-32, R-125, R134a, R-1234ze και R-1234yf, το οποίο χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο των R-404A και R-22 σε εφαρμογές ψύξης χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας, έχοντας παρόμοιες επιδόσεις και ιδιότητες. Παρέχει έναν εξαιρετικό συνδυασμό χαμηλού δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) και υψηλής ενεργειακής απόδοσης, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει μειωμένη θερμοκρασία κατάθλιψης του συμπιεστή σε συνθήκες μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε νέες, όσο και σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις, για άμεση αντικατάσταση του R-404A, μέσω απλής ρύθμισης των εκτονωτικών βαλβίδων [32] [33].

3.4.1.8 R-449A

Το R-449A είναι ψυκτικό μέσο νέας γενιάς HFO που συνδυάζει εξαιρετική απόδοση ψύξης με βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση και περιβαλλοντικές ιδιότητες. Με GWP=1397, παρέχει ένα μακροπρόθεσμο ψυκτικό διάλυμα. Το R-449A είναι σχεδιασμένο για χρήση σε εφαρμογές άμεσης εκτόνωσης χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας, σε εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Είναι κατάλληλο τόσο για νέες εγκαταστάσεις, όσο και για απλή αντικατάσταση του R-404A, σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις με απλή ρύθμιση των εκτονωτικών βαλβίδων [34].

3.4.1.9 R-507A

Το R-507A είναι ένα αζεοτροπικό μείγμα των R-143a και R-125, με φυσικές, θερμοδυναμικές και λειτουργικές ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες του R-502, το οποίο και αντικαθιστά, συνοδευόμενο με κατάλληλο εξοπλισμό, σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Έχει μηδενικό ODP και χρησιμοποιείται σε νέες ψυκτικές εγκαταστάσεις μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας. Λειτουργεί σε θερμοκρασίες συμπύκνωσης χαμηλότερες από του R-502, αλλά ελαφρώς υψηλότερες πιέσεις. Σε ορισμένες συνθήκες εργασίας, η ψυκτική ικανότητα είναι ακόμη υψηλότερη από εκείνη του R-502 αλλά ταυτόχρονα με ελαφρώς χαμηλότερο συντελεστή απόδοσης [35].

3.4.1.10 R-32

Η χρήση του R-32 έχει αποδειχθεί εδώ και χρόνια σαν συστατικό του ψυκτικού μέσου R-410, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στις οικιακές εφαρμογές κλιματισμού. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει αποδειχθεί, ότι η χρησιμοποίησή του στην αγνή του μορφή, αντί στο R410 ή σε άλλα μείγματα ψυκτικών μέσων προσφέρει μια σειρά πλεονεκτημάτων. Συγκριμένα, συγκρινόμενο με το σύνηθες R-410, το GWP (Global Warming Potential) του R-32 είναι μόλις στο 1/3, ενώ δίνει την δυνατότητα για μικρότερο όγκο ψυκτικού και μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση. Σαν απλό ψυκτικό το R-32 είναι επίσης πιο εύκολο να ανακυκλωθεί και να ξαναχρησιμοποιηθεί, κάτι που είναι ακόμα ένα περιβαλλοντικό πλεονέκτημα. Το R-32 είναι σχετικά εύφλεκτο ψυκτικό μέσο και επομένως δεν είναι κατάλληλο για απευθείας αντικατάσταση του R-410a σε υπάρχον εξοπλισμό, αλλά ενδείκνυται για νέα συστήματα σε εφαρμογές, που χρησιμοποιούν συνήθως το R-410a [36].

3.4.2 Φυσικά ψυκτικά μέσα

3.4.2.1 R-717 (Αμμωνία – NH₃)

Η αμμωνία χρησιμοποιείται ευρέως ως ψυκτικό μέσο σε μεγάλες ψυκτικές εγκαταστάσεις. Ως ψυκτικό μέσο χωρίς αλογόνα, η αμμωνία έχει τόσο μηδενικό ODP, όσο και μηδενική άμεση επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ωστόσο, λόγω της υψηλής τοξικότητά της, περιορίζεται η εφαρμογή της σε βιομηχανικές εφαρμογές ψύξης. Σε μεγάλες ψυκτικές εγκαταστάσεις αμμωνίας η ενεργειακή απόδοση είναι ίδια με παρόμοια συστήματα μηχανικής συμπίεσης ατμού που χρησιμοποιούν R-22 [29].

Αν και η αμμωνία είναι ευρέως διαθέσιμη και αποτελεί ουσία χαμηλού κόστους, υπάρχουν αρκετές προκλήσεις όσον αφορά την εφαρμογή της ως ψυκτικό μέσο σε εγκαταστάσεις εμπορικής ψύξης. Στα συστήματα αμμωνίας αναπτύσσονται υψηλότερες πιέσεις από εκείνες που αναπτύσσονται σε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί R-22. Επίσης η διαχείριση του λιπαντικού ελαίου στα συστήματα αμμωνίας αποτελεί μείζον ζήτημα, δεδομένου ότι τα χρησιμοποιούμενα έλαια δεν είναι συνήθως διαλυτά στην αμμωνία. Παράλληλα η χαμηλή παροχή μάζας αμμωνίας, σε σύγκριση με το R-22, μπορεί να είναι πλεονέκτημα στις μεγάλες ψυκτικές εγκαταστάσεις, ωστόσο αποτελεί πρόκληση σε

μικρότερα εμπορικά συστήματα. Τέλος, η αμμωνία είναι πολύ διαβρωτική προς τα υλικά που περιέχουν χαλκό, επομένως οι σωληνώσεις πρέπει να είναι χαλύβδινες και ο χαλκός στις περιελίξεις του συμπιεστή πρέπει να είναι μονωμένος από το αέριο.

Το κύριο μειονέκτημα της χρήσης αμμωνίας στις εμπορικές εφαρμογές ψύξης είναι το υψηλό επίπεδο τοξικότητας και ευφλεκτότητάς της. Αυτό και μόνο το γεγονός, απαιτεί μοναδικά μέτρα ασφαλείας που υπερβαίνουν το πεδίο εφαρμογής των περισσότερων εμπορικών εγκαταστάσεων [29].

3.4.2.2 R-744 (Διοξείδιο του άνθρακα - CO₂)

Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με τις άμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, από τη χρήση των HFCs στις ψυκτικές εγκαταστάσεις, οδήγησαν σε νομοθετικές και φορολογικές ρυθμίσεις σε ορισμένες χώρες της Ευρώπης, που ευνοούν τη χρήση διοξειδίου του άνθρακα ως ψυκτικό μέσο. Το CO₂ είναι φιλικό προς το περιβάλλον σε σύγκριση με άλλα ψυκτικά μέσα, δεν είναι εύφλεκτο, έχει χαμηλή τοξικότητα, είναι ευρέως διαθέσιμο και έχει χαμηλό κόστος. Αυτοί είναι άλλωστε και οι λόγοι, για τους οποίους αποτέλεσε ένα από τα αρχικά ψυκτικά μέσα, που χρησιμοποιούνταν έως και εκατό χρόνια πριν. Αν και οι θερμοδυναμικές επιδόσεις ενός απλού ψυκτικού κύκλου με CO₂ είναι σχετικά χαμηλές, 30-50% χειρότερες από τις αντίστοιχες αποδόσεις των HFCs, το CO₂ εμφανίζει πολύ καλά χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας και ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στις τροποποιήσεις του κύκλου [29].

Εξαιτίας του χαμηλού κρίσιμου σημείου του CO₂ (περίπου 31°C), πολλά συστήματα ψύξης CO₂ σχεδιάζονται για υπερκρίσιμη λειτουργία. Τα συστήματα αυτά έχουν χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα ψύξης. Η υπερκρίσιμη λειτουργία σημαίνει, ότι το CO₂ δεν συμπυκνώνεται στην υψηλή πίεση και αντί παραδοσιακού συμπιεστή, χρησιμοποιείται ψύκτης αερίου. Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος έχει μεγάλο αντίκτυπο στο κόστος εγκατάστασης. Λόγω των υψηλότερων πιέσεων απαιτούνται τροποποιήσεις στο κέλυφος του συμπιεστή, στις εκτονωτικές βαλβίδες και στον ατμοποιητή. Απαιτούνται επιπλέον, εξαρτήματα όπως διαχωριστικό δοχείο τύπου flash και επιπλέον ρυθμιστικές βαλβίδες. Το συνολικό κόστος είναι 20-30% υψηλότερο σε σχέση με σύστημα χρήσης HFCs, παρόμοιων επιδόσεων.

Τα συγκριτικά υψηλά επίπεδα πιέσεων και οι θερμοκρασιακές ιδιότητες του CO₂ ως ψυκτικό μέσο, έχουν οδηγήσει του σχεδιαστές ψυκτικών συστημάτων στην εξέταση των υποκρίσιμων συστημάτων CO₂. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν παρόμοια με τα Cascade συστήματα. Σε ένα υποκρίσιμο σύστημα, το CO₂ συμπυκνώνεται κανονικά στο συμπυκνωτή του κυκλώματος χαμηλής θερμοκρασίας, ενώ χρησιμοποιούνται εναλλακτικές επιλογές συστήματος και ψυκτικού μέσου, για το κύκλωμα της μέσης θερμοκρασίας. Με αυτό τον τρόπο οι συμπιεστές στο κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας εκτίθενται μόνο σε επίπεδα πίεσης παρόμοια με τις εφαρμογές κλιματισμού υψηλής πίεσης, όπως με το R-410A. Η υποκριτική λειτουργία ενδέχεται να είναι η καλύτερη εφαρμογή του CO₂ ως ψυκτικό μέσο για ορισμένες εμπορικές εφαρμογές ψύξης.

Συνοπτικά, η χρήση του CO₂ επιφέρει πολλές τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις. Η χαμηλή αποδοτικότητα και η πολυπλοκότητα των συστημάτων στα οποία εφαρμόζεται αποτελούν κύριους περιορισμούς της χρήσης του. Ωστόσο, το CO₂ ενδείκνυται σε συστήματα κλιματισμού στις μεταφορές, σε χαμηλής θερμοκρασίας κυκλώματα Cascade συστημάτων, καθώς και σε ορισμένες εφαρμογές αντλιών θερμότητας. Είτε με υπερκρίσιμο, είτε με υποκρίσιμο σύστημα, το CO₂ δεν αποτελεί σε καμία περίπτωση προς αντικατάσταση ψυκτικό μέσο, σε μια εγκατάσταση με υπάρχον εξοπλισμό, που χρησιμοποιεί συμβατικά ψυκτικά μέσα, καθώς απαιτεί εξολοκλήρου διαφορετικού τύπου εξοπλισμό. Κάθε εφαρμογή CO₂ απαιτεί διεξοδική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος, του συνολικού ισοδύναμου δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη, του κόστους κύκλου ζωής, της τεχνικής σκοπιμότητας, της αξιοπιστίας και της ασφάλειάς του [29].

3.4.2.3 Υδρογονάνθρακες

Η περιβαλλοντική και νομοθετική αναγκαιότητα για περιορισμό της χρήσης αλογονούχων ψυκτικών μέσω στις ψυκτικές εγκαταστάσεις, οδήγησε τη βιομηχανία ψυκτικών στη διερεύνηση των υδρογονανθράκων, ως εναλλακτικά ψυκτικά μέσα για αντικατάσταση του απαγορευμένου πλέον R-22. Το προπάνιο - C₃H₈ (R-290) θεωρείται ένας πιθανός αντικαταστάτης, καθώς αποτελεί μια ουσία χωρίς αλογόνα, με μηδενικό δυναμικό εξάντλησης του όζοντος (ODP) και σχετικά χαμηλό δυναμικό άμεσης υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP). Το προπάνιο είναι επίσης ευρέως διαθέσιμο και αποτελεί ουσία χαμηλού οικονομικού κόστους. Επίσης οι λειτουργικές πιέσεις ενός συστήματος ψύξης με προπάνιο είναι παρόμοιες με εκείνες ενός συστήματος που χρησιμοποιεί R-22 [29].

Ωστόσο, το μεγάλο μειονέκτημα του προπανίου και γενικότερα όλων των υδρογονανθράκων είναι η υψηλή ευφλεκτότητά τους. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται υψηλότερο κόστος εγκατάστασης, προκειμένου να καλυφθούν τα απαιτούμενα μέτρα ασφαλείας. Πρέπει να λαμβάνεται επίσης πρόληψη για τις υπερβολικές πιέσεις που αναπτύσσονται στο σύστημα, τις ηλεκτρικές συνδέσεις και τον αερισμό, προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία εύφλεκτου μίγματος αερίου.

Το προπάνιο θεωρητικά, μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια σε συγκεκριμένες ψυκτικές εφαρμογές, ακολουθώντας συγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές και πρακτικές ασφαλείας που σχετίζονται με τις εύφλεκτες ουσίες, ωστόσο η χρήση του για εμπορική ψύξη στις Η.Π.Α δεν έχει ελεγχθεί και δεν έχει ακόμη εγκριθεί από τον οργανισμό προστασίας του περιβάλλοντος των Η.Π.Α (Environmental Protection Agency). Επομένως οι εμπορικοί φορείς δεν διατίθενται να διακινδυνεύσουν τα ζητήματα του κώδικα ασφαλείας και τους κινδύνους που συνδέονται με τη χρήση προπανίου σε μια ψυκτική εγκατάσταση [29].

3.5. Συγκεντρωτικά στοιχεία ψυκτικών μέσων

Τα βασικά θερμοδυναμικά μεγέθη και τα μεγέθη καταλληλότητας των ψυκτικών μέσων που χρησιμοποιούνται στις ψυκτικές εγκαταστάσεις των σουπερμάρκετ παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.1. Ταυτόχρονα, παρατίθενται, για λόγους σύγκρισης, και τα στοιχεία των R-502 (CFC) και R-22 (HCFC) τα οποία έχουν πλέον αποσυρθεί τις εφαρμογές εμπορικής ψύξης.

| Ψυκτικό μέσο | | Μοριακό βάρος (g/mol) | Σημείο βρασμού (°C) | Κρίσιμη θερμοκρασία (°C) | Θερμοκρασιακή ολίσθηση (°C) | ODP | GWP | ASHRAE safety classification |
|---------------------|--|-----------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------|------|------|------------------------------|
| Κατηγορία | Όνομα | | | | | | | |
| CFC | R-502 | 111.6 | -45.4 | 80.7 | 0 | 0.33 | 4657 | A1 |
| HCFC | R-22 | 86.5 | -40.8 | 96.2 | 0 | 0.05 | 1810 | A1 |
| HFC | R-32 | 52.1 | -52.0 | 78.0 | 0 | 0 | 675 | A2 |
| | R-134a | 102.3 | -26.1 | 101.1 | 0 | 0 | 1430 | A1 |
| | R-404a | 97.6 | -46.5 | 72.5 | 0.7 | 0 | 3922 | A1 |
| | R-407a | 90.1 | -45.5 | 82.8 | 5.6 | 0 | 2107 | A1 |
| | R-407c | 86.2 | -42.0 | 86.1 | 5.6 | 0 | 1770 | A1 |
| | R-407f | 82.1 | -45.5 | 82.7 | 5.6 | 0 | 1825 | A1 |
| | R-410a | 72.6 | -51.7 | 70.2 | 0.1 | 0 | 2088 | A1 |
| | R-448a | 86.3 | -45.9 | 83.7 | 6.1 | 0 | 1387 | A1 |
| | R-449a | 87.2 | -46.0 | 81.5 | 6.2 | 0 | 1282 | A1 |
| | R-507a | 98.9 | -47.1 | 70.6 | 0 | 0 | 3985 | A1 |
| Φυσικά ψυκτικά μέσα | R-717 (NH ₃) | 17.0 | -33.3 | 132.3 | 0 | 0 | 0 | A1 |
| | R-744 (CO ₂) | 44.0 | -78.4 | 30.98 | 0 | 0 | 1 | A1 |
| Υδρογονάνθρακες | R-290 (C ₃ H ₈) | 44.0 | -42.1 | 96.67 | 0 | 0 | 3 | A3 |

Σχήμα 3.2: Πίνακας θερμοδυναμικών μεγεθών και μεγεθών καταλληλότητας ψυκτικών μέσων [37][38][39][40][41]

Τονίζεται ότι στον πίνακα του Σχήματος 3.2 το σημείο βρασμού αναφέρεται σε πίεση 1 atm και το δυναμικό άμεσης υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) αναφέρεται σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών.

Η κρίσιμη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου, υποδηλώνει τη θερμοκρασία εκείνη κάτω από την οποία το ψυκτικό μέσο μπορεί να προσδώσει τη λανθάνουσα θερμότητά του στο συμπυκνωτή της ψυκτικής εγκατάστασης. Παρατηρούμε ότι όλα τα παραπάνω ψυκτικά μέσα εκτός από το R-744 (CO₂), έχουν κρίσιμες θερμοκρασίες αρκετά μεγαλύτερες από τις συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος και επομένως είναι κατάλληλα για χρήση σε συστήματα άμεσης εκτόνωσης. Στην περίπτωση ωστόσο του R-744, η κρίσιμη θερμοκρασία των 30.98°C είναι απαγορευτική για ένα τέτοιο σύστημα και για το λόγο αυτό, για τη χρησιμοποίησή του επιλέγονται υπερκρίσιμα συστήματα τύπου Booster, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 1.4.3.5.

Παρατηρείται επίσης, ότι σε μείγματα όπως το R-407A, R-407C, R-448A και R-449A η θερμοκρασιακή ολίσθηση άνω των 5°C είναι σημαντική και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την ανάλυση των συστημάτων που χρησιμοποιούν τα ψυκτικά μέσα αυτά.

Όσον αφορά τα περιβαλλοντικά μεγέθη καταλληλότητας των ψυκτικών μέσων, ODP και GWP, τα απαγορευμένα πλέον ψυκτικά μέσα (R-502 και R-22) συνεισφέρουν στην επιβάρυνση της στοιβάδας του όζοντος, γεγονός που δικαιολογεί την απαγόρευσή τους από την αγορά. Αντίθετα, τα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται σήμερα στις εγκαταστάσεις εμπορικής ψύξης εμφανίζουν μηδενικό ODP και μόνο τα φυσικά ψυκτικά μέσα δεν επιβαρύνουν, άμεσα τουλάχιστον, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, έχοντας μηδενικά παραγόμενα αέρια του θερμοκηπίου (GWP=0).

Τέλος, παρατηρούμε ότι όλα τα παραπάνω ψυκτικά μέσα, εκτός από το R-32 και το προπάνιο (R-290), ψυκτικά μέσα έχουν τόσο χαμηλή τοξικότητα, όσο και χαμηλή ευφλεκτότητα με αποτέλεσμα να κατατάσσονται στην κλάση A1 της ASHRAE και να θεωρούνται ασφαλή για εφαρμογές εμπορικής ψύξης. Το R-32 και το προπάνιο κατατάσσονται στις κλάση A2 και A3 αντίστοιχα, γεγονός που σημαίνει όπως τονίστηκε και στις ενότητες 3.4.1.10, 3.4.2.3, ότι είναι ιδιαίτερα εύφλεκτα και για το λόγο αυτό απαιτείται επιπλέον έρευνα προκειμένου να διασφαλισθεί η ασφαλής χρησιμοποίησή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

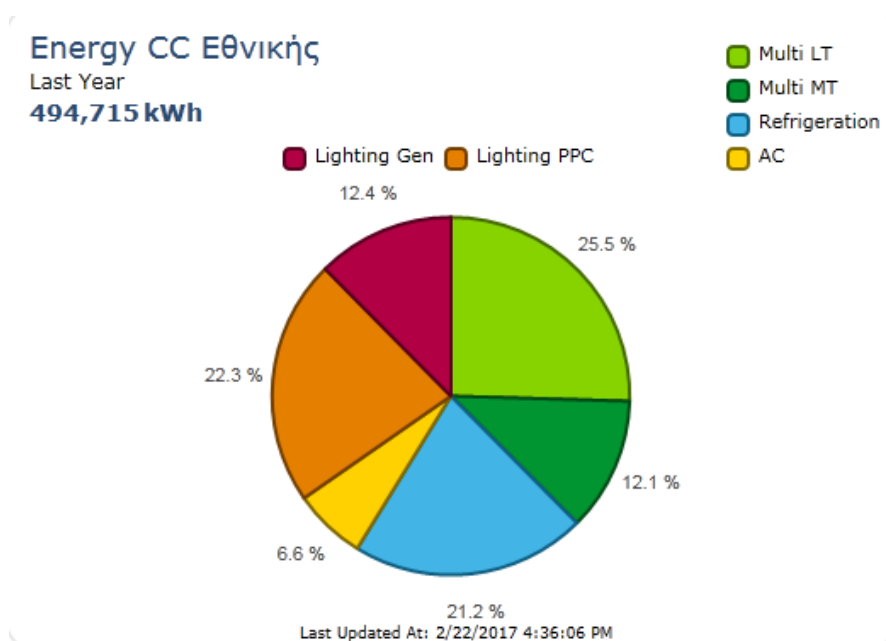
Μελετηθέν σουπερμάρκετ

4.1 Συνοπτικά στοιχεία του σουπερμάρκετ



Σχήμα 4.1: Πρόσοψη μελετηθέντος σουπερμάρκετ

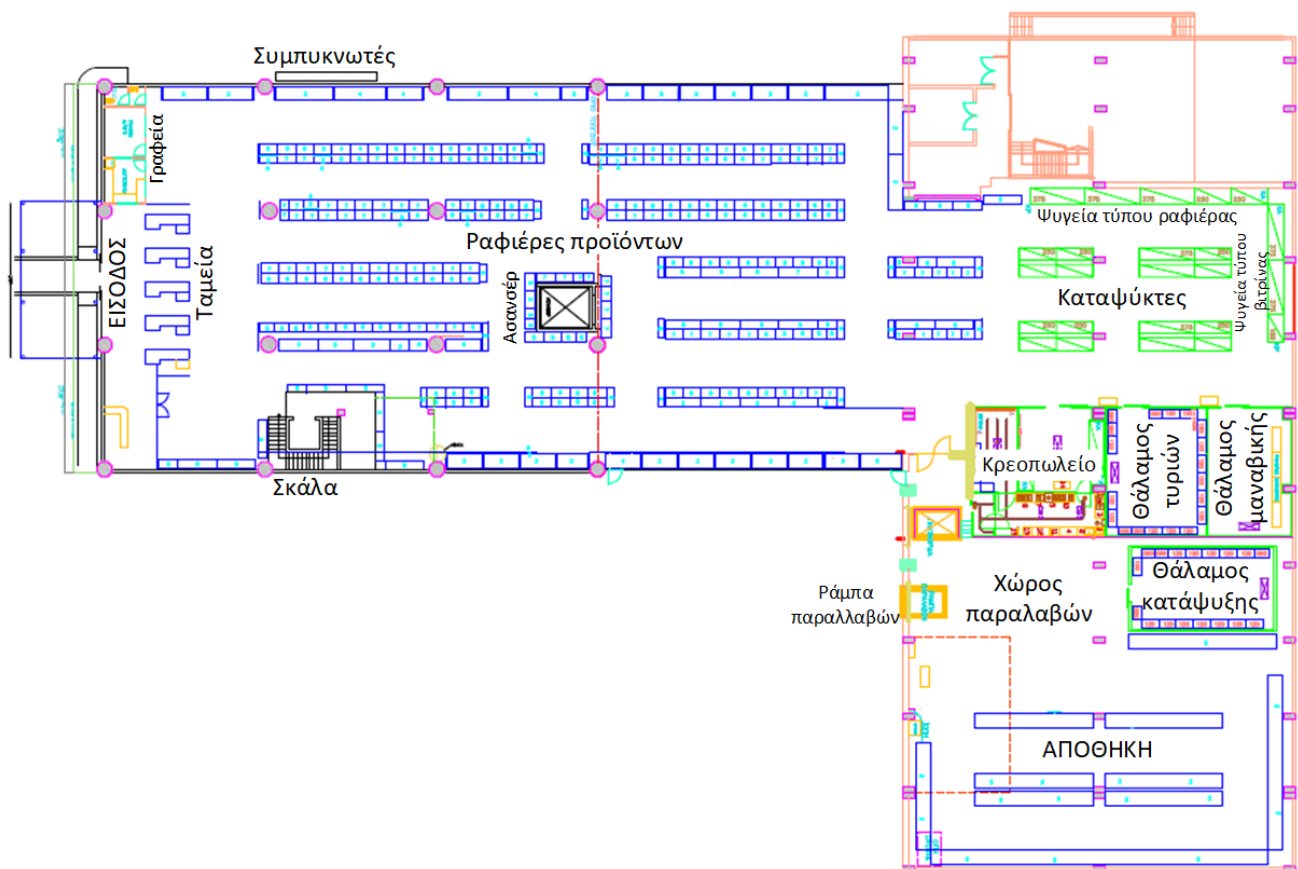
Το μελετηθέν σουπερμάρκετ, το οποίο βρίσκεται στη βιομηχανική ζώνη στην περιοχή της Μεταμόρφωσης, ανήκει στην κατηγορία υπερκαταστήματος, αφού παρέχει μεγάλο εύρος και ποικιλία προϊόντων και συστεγάζει, εκτός των ψυγείων και καταψυκτών, ψυκτικούς θαλάμους προϊόντων κρεάτων και μαναβικής. Οι ανάγκες θέρμανσης και κλιματισμού του σουπερμάρκετ καλύπτονται μέσω της χρήσης κεντρικού συστήματος αντλίας θερμότητας, η οποία καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια. Η κατανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στο σουπερμάρκετ για το έτος 2016 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Κατανομή ηλεκτρικής ενέργειας στο σουπερμάρκετ για το 2016

Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο κατάστημα είναι 494.715 kWh. Οι διατάξεις συμπιεστών του ψυκτικού κυκλώματος συντήρησης (Multi MT), του κυκλώματος κατάψυξης (Multi LT), καθώς και οι υπόλοιπες καταναλώσεις της ψυκτικής εγκατάστασης (ψυγεία, καταψύκτες, ανεμιστήρες κλπ), οι οποίες παρουσιάζονται με γαλάζιο χρώμα στο παραπάνω σχήμα (Refrigeration), αποτελούν αθροιστικά το 58.8% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στο σουπερμάρκετ. Οι ανάγκες κλιματισμού και θέρμανσης του σουπερμάρκετ, η οποίες ικανοποιούνται με τη χρήση αντλίας θερμότητας, αντιστοιχούν στο 6.6% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρισμού. Τέλος, οι ανάγκες φωτισμού στο κατάστημα αντιστοιχούν στο 34.7% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Σχήμα 4.3, δίνεται η κάτοψη του ισογείου του μελετηθέντος σουπερμάρκετ. Διακρίνεται ο χώρος πωλήσεων του σουπερμάρκετ, ο οποίος περιλαμβάνει τα ταμεία, τα γραφεία, τα ράφια προϊόντων, τα ψυγεία και καταψύκτες, τους θαλάμους ψύξης, κατάψυξης, καθώς και το χώρο του κρεοπωλείου. Σε χώρο εξωτερικά, στο πίσω μέρος του σουπερμάρκετ, βρίσκονται οι διατάξεις των συμπυκνωτών. Επίσης, φαίνονται η σκάλα και το ασανσέρ που οδηγούν στο υπόγειο του σουπερμάρκετ, όπου βρίσκονται αποθηκευτικοί χώροι και το μηχανοστάσιο. Τέλος, διακρίνεται ο χώρος παραλαβών και η αποθήκη του καταστήματος.



Σχήμα 4.3: Σχεδιαστική κάτοψη ισογείου μελετηθέντος σουπερμάρκετ

4.2 Περιγραφή ψυκτικής εγκατάστασης

4.2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.1, τα προϊόντα τροφίμων ανάλογα με το είδος τους διατηρούνται είτε σε συνθήκες συντήρησης (γαλακτοκομικά, αλλαντικά), σε μέση θερμοκρασία (+3 έως +5°C), είτε σε συνθήκες κατάψυξης, σε χαμηλή θερμοκρασία (-22 έως -18°C). Επομένως, η ψυκτική εγκατάσταση του σουπερμάρκετ διακρίνεται στα δύο ανεξάρτητα κύκλωμα: το κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας (Medium Temperature Circuit – MT) και το κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας (Low Temperature Circuit – LT). Όπως είναι προφανές, το κύκλωμα MT αφορά την παροχή ψυκτικής ισχύος στους καταψύκτες και στους ψυκτικούς θαλάμους, ενώ το κύκλωμα LT εξυπηρετεί τους καταψύκτες του καταστήματος.

Το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται στην ψυκτική εγκατάσταση, τόσο στο κύκλωμα MT, όσο και στο κύκλωμα LT, είναι το R-404A. Το R-404A, όπως περιγράφηκε και στην ενότητα 3.4.1.2, ανήκει στους υδροφθοράνθρακες ή HFCs και είναι ένα σχεδόν αζεοτροπικό μείγμα των ψυκτικών μέσων R-125, R-143a και R-134a. Αποτελεί το ψυκτικό μέσο, που χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των σύγχρονων ψυκτικών εγκαταστάσεων σε σουπερμάρκετ, λόγω της υψηλής ενεργειακής απόδοσης και του χαμηλού δυναμικού καταστροφής του όζοντος (ODP).

4.2.2 Ψυγεία, καταψύκτες και ψυκτικοί θάλαμοι

Το κύκλωμα MT έχει συνολική εγκατεστημένη ψυκτική ισχύ 103.6 kW και περιλαμβάνει:

- 8 ψυγεία τύπου ραφιάρας (μοντέλο MCL218 της εταιρίας KOXKA), με χρήση θερμοεκτονωτικής βαλβίδας.
- 2 ψυγεία τύπου βιτρίνας (μοντέλα HM25227130-37227130 της εταιρίας FROST-TROL), με χρήση ηλεκτρονικής εκτονωτικής βαλβίδας.
- 4 διπλούς ψύκτες αέρα - 2 για το παρασκευαστήριο κρεάτων, 1 για το θάλαμο αποθήκευσης κρεάτων, 1 για το ψυγείο εξυπηρέτησης του κρεοπωλείου (μοντέλα SHDC-035 της εταιρίας Stefani), με χρήση ηλεκτρονικής εκτονωτικής βαλβίδας.
- 2 ψυκτικούς θαλάμους (τυριών και μαναβικής), που χρησιμοποιούν κυβικούς ψύκτες αέρα (μοντέλο CR-148 της εταιρίας KOBOL), με χρήση ηλεκτρονικής εκτονωτικής βαλβίδας.

Το κύκλωμα LT έχει συνολική εγκατεστημένη ψυκτική ισχύ 48.4 kW και περιλαμβάνει:

- 8 καταψύκτες τύπου πάγκου (μοντέλο GH74 της εταιρίας KOXKA), με χρήση θερμοεκτονωτικής βαλβίδας.
- 1 θάλαμο κατάψυξης, που χρησιμοποιεί κυβικό ψύκτη αέρα (μοντέλο CC-114 της εταιρίας KOBOL), με χρήση ηλεκτρονικής εκτονωτικής βαλβίδας.

Στα Σχήματα 4.4, 4.5, απεικονίζονται ψυγεία, καταψύκτες και ψυκτικού θάλαμοι του σουπερμάρκετ. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.5, απεικονίζεται ο ψυκτικός θάλαμος, προϊόντων μαναβικής.



Σχήμα 4.4: Ψυγεία και καταψύκτες



Σχήμα 4.5: Ψυκτικός θάλαμος προϊόντων μαναβικής

Στο Σχήμα 4.6, δίνονται φωτογραφίες εντός του θαλάμου μαναβικής, όπου φαίνεται η μονάδα ψύξης του θαλάμου, η οποία τοποθετείται στην οροφή του θαλάμου. Επίσης, φαίνεται στο πάνω μέρος της εισόδου του θαλάμου, στοιχείο παραγωγής θερμής αεροκουρτίνας για την αποφυγή εισροής θερμού αέρα, από το χώρο πωλήσεων του καταστήματος, εντός του ψυκτικού θαλάμου.



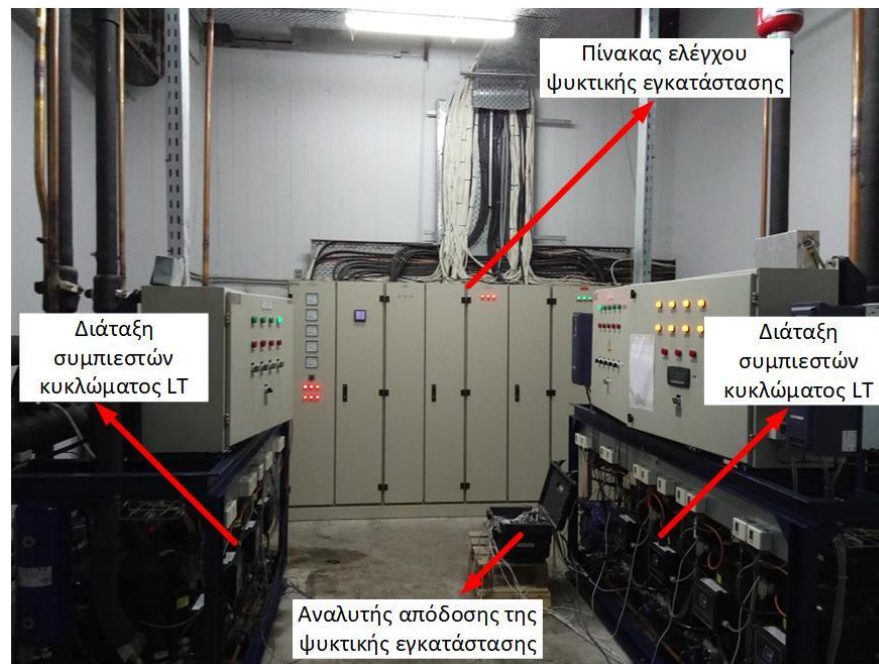
Σχήμα 4.6: Φωτογραφίες από το εσωτερικό του θαλάμου μαναβικής

Οι ατμοποιητές που χρησιμοποιούνται στους παραπάνω ψύκτες είναι στοιχεία ξηρής εκτόνωσης, αφού χρησιμοποιούν είτε θερμοεκτονωτική, είτε ηλεκτρονική εκτονωτική βαλβίδα. Ως προς την κατασκευή τους, αποτελούν ατμοποιητές σωλήνων εντός κελύφους (chillers). Τέλος, η κυκλοφορία του αέρα τόσο στα ψυγεία όσο και στους καταψύκτες είναι βεβιασμένη και γίνεται μέσω ανεμιστήρων. Στους ψυκτικούς θαλάμους, οι ψύκτες είναι τοποθετημένοι στην οροφή του κάθε θαλάμου (βλ. ενότητα 2.3.4).

Η χαμηλή πίεση των κυκλωμάτων MT και LT, έχει ρυθμιστεί από τον υπεύθυνο ψυκτικό, σταθερή στα 3.9 bar, για τη συντήρηση, και στα 0.9 bar για την κατάψυξη αντίστοιχα (μανομετρικές πιέσεις). Η ρύθμιση σε αυτές τις πιέσεις δεν είναι τυχαία, καθώς επιθυμούμε θερμοκρασία εισόδου ψυκτικού στους ατμοποιητές του κυκλώματος MT στους -6°C , ενώ στους ατμοποιητές του κυκλώματος LT στους -31°C . Δεχόμενοι μια θερμοκρασιακή διαφορά περίπου ίση με 10°C μεταξύ ψυκτικού μέσου και ψυχόμενου αέρα, τα οποία συναλλάσσουν θερμότητα εντός του ατμοποιητή, επιτυγχάνεται σταθερή θερμοκρασία ίση με 0°C , εντός των ψυγείων και ψυκτικών θαλάμων συντήρησης και -19°C , εντός των καταψυκτών και των θαλάμων κατάψυξης.

4.2.3 Συμπιεστές

Κάθε ένα από τα κυκλώματα MT και LT αποτελείται από ένα ανεξάρτητο κεντρικό σύστημα άμεσης εκτόνωσης (DX). Στο σύστημα αυτό, το οποίο περιγράφεται στην ενότητα 2.2.1, παράγεται ψύξη μέσω της μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διάταξη συμπιεστών οι οποίοι βρίσκονται εν παραλληλία μεταξύ τους. Οι διατάξεις των συμπιεστών βρίσκονται στο μηχανοστάσιο, στο υπόγειο του καταστήματος, η γενική εικόνα του οποίου δίνεται στο Σχήμα 4.7.

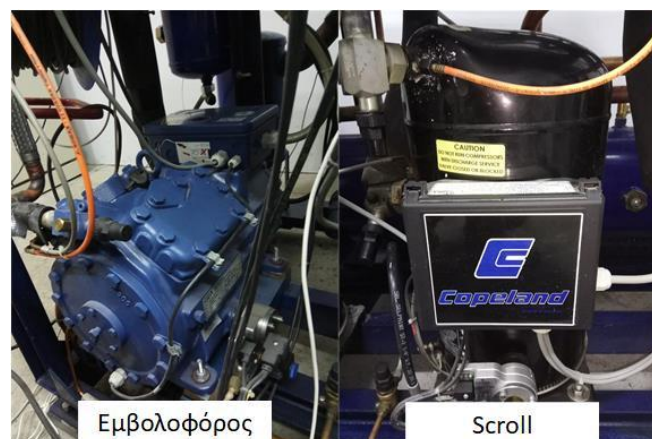


Σχήμα 4.7: Διαρρύθμιση του μηχανοστασίου του σουπερμάρκετ

Το κύκλωμα MT περιλαμβάνει 5 συμπιεστές:

- 1 εμβολοφόρο (μοντέλο HGX34e/255-4 S της εταιρίας GEA Bock). Είναι ημερημητικού τύπου, έχει συχνότητα τροφοδοσίας ισχύος 50 Hz και έχει κινητήρα έκδοσης S με 4 πόλους, ο οποίος είναι ισχυρότερος από τον συμβατικό. Το εύρος λειτουργίας του είναι, για θερμοκρασίες ψυκτικού μέσου στον ατμοποιητή από -30°C έως 25°C .
- 4 τύπου scroll-σπειροειδείς (μοντέλο ZF40K4E-TWD (Copeland) της εταιρίας Emerson. Έχουν και αυτοί συχνότητα τροφοδοσίας ισχύος 50 Hz και εύρος λειτουργίας, για θερμοκρασίες ψυκτικού μέσου στον ατμοποιητή από -20°C έως 7°C .

Φωτογραφίες του εμβολοφόρου και ενός εκ των scroll συμπιεστών, που χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα MT, δίνονται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8: Φωτογραφίες των τύπων συμπιεστή του κυκλώματος MT

Ο εμβολοφόρος συμπιεστής είναι συνδεδεμένος με inverter, ο οποίος μεταβάλλει το σημείο λειτουργίας του, με τρόπο ώστε η θερμοκρασία συμπύκνωσης να είναι 10°C μεγαλύτερη από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ελάχιστη επιτρεπτή θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ψυκτικού ατμού και αέρα περιβάλλοντος, προκειμένου να μεταδοθεί η απαιτούμενη θερμότητα συμπύκνωσης, ενώ ταυτόχρονα εξοικονομείται ηλεκτρική ενέργεια στον εμβολοφόρο, αφού αυτός λειτουργεί στο ελάχιστο επιτρεπτό φορτίο. Αφού ο εμβολοφόρος συμπιεστής είναι συνδεδεμένος με σύστημα inverter, έχει επιλεγθεί να λειτουργεί συνεχώς, για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, όταν απαιτείται παραγωγή ψυκτικής ισχύος στο κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας. Στην περίπτωση αύξησης του ψυκτικού φορτίου, με αποτέλεσμα την αύξηση του φορτίου συμπίεσης σε σημείο εκτός λειτουργίας του χάρτη αποδοτικής λειτουργίας του εμβολοφόρου, ενεργοποιούνται ένας, δύο ή και όλοι οι scroll συμπιεστές, ανάλογα με το μέγεθος του ψυκτικού φορτίου και λειτουργούν παράλληλα με τον εμβολοφόρο. Κατά βάση λειτουργούν ο εμβολοφόρος, ο οποίος λειτουργεί συνέχεια, σε συνδυασμό με έναν από τους scroll, οι οποίοι εναλλάσσονται, για λόγους αποφυγής φθοράς και καταπόνησης από υπερβολική χρήση. Ο εμβολοφόρος λειτουργεί σε μεταβλητό σημείο λειτουργίας λόγω του inverter, ενώ οι scroll συμπιεστές λειτουργούν σταθερά στα 50 Hz.

Το κύκλωμα LT περιλαμβάνει 4 συμπιεστές τύπου scroll-σπειροειδείς (μοντέλο ZF48K4E-TWD (Copeland) της εταιρίας Emerson, παράλληλα συνδεδεμένους. Έχουν και αυτοί συχνότητα τροφοδοσίας ισχύος 50 Hz και εύρος λειτουργίας, για θερμοκρασίες ψυκτικού μέσου στον ατμοποιητή από -40 °C έως -18°C. Ο συμπιεστής που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα LT, απεικονίζεται στη φωτογραφία του Σχήματος 4.9.



Σχήμα 4.9: Φωτογραφία scroll συμπιεστή του κυκλώματος LT

Στη διάταξη αυτή δεν υπάρχει inverter και οι συμπιεστές λειτουργούν σταθερά στα 50 Hz. Κατά τη διάρκεια της μέρας, είναι δυνατόν να λειτουργούν ένας, δύο ή και όλοι ταυτόχρονα, ανάλογα με τη ζήτηση ψυκτικού φορτίου στους καταψύκτες. Κατά βάση, κάθε

στιγμή λειτουργούν δύο συμπιεστές σε συνδυασμό και εναλλάσσονται με τους υπόλοιπους, για λόγους (καταπόνησης).

Τα πεδία λειτουργίας των συμπιεστών τόσο του κυκλώματος ΜΤ, όσο και του κυκλώματος LT, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α [42].

4.2.4 Συμπυκνωτές

Ο παραγόμενος συμπιεσμένος ατμός από τις διατάξεις συμπιεστών των κυκλωμάτων ΜΤ και LT, οδηγείται στους συμπυκνωτές της εγκατάστασης (ΜΤ και LT αντίστοιχα), οι οποίοι βρίσκονται εκτός του καταστήματος, στο πίσω μέρος του. Τόσο στο κύκλωμα ΜΤ, όσο και στο κύκλωμα LT, χρησιμοποιούνται αερόψυκτοι συμπυκνωτές της εταιρίας KOBOL.

Στη συντήρηση χρησιμοποιείται το μοντέλο CHN 0804P. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει 8 ανεμιστήρες, τοποθετημένους σε σειρά ανά δύο, με διάμετρο 63 cm και τροφοδοσία ισχύος στα 60 Hz. Οι ανεμιστήρες δεν λειτουργούν όλοι συνέχεια. Κάθε στιγμή λειτουργεί ένας, δύο ή και οι έξι ανεμιστήρες, σε πλήρες φορτίο όμως, ανάλογα με το απαιτούμενο φορτίο συμπύκνωσης.

Στην κατάψυξη, χρησιμοποιείται το μοντέλο CHN 0604P. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει 6 ανεμιστήρες, τοποθετημένους σε σειρά ανά δύο, με διάμετρο 63 cm και τροφοδοσία ισχύος στα 50 Hz. Οι ανεμιστήρες, σε αντίθεση με την περίπτωση της συντήρησης, είναι ρυθμισμένοι ώστε να λειτουργούν όλοι ταυτόχρονα συνέχεια με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής, ανάλογα με το απαιτούμενο φορτίο συμπύκνωσης, δηλαδή το ποσό απόρριψης θερμότητας στο περιβάλλον. Επίσης, στην κατάψυξη ο αριθμός των ανεμιστήρων είναι μικρότερος σε σχέση με τη συντήρηση, η εγκατεστημένη ισχύ της κατάψυξης, στη συγκεκριμένη εγκατάσταση, είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της συντήρησης και κατά συνέπεια είναι μικρότερο και το φορτίο συμπύκνωσης.

Φωτογραφίες των διατάξεων των συμπυκνωτών των κυκλωμάτων ΜΤ και LT, δίνονται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Συμπυκνωτές κυκλωμάτων ΜΤ και LT

Τέλος, το ψυκτικό μέσο αφού συμπυκνωθεί στις διατάξεις των συμπυκνωτών, οδηγείται πίσω στο μηχανοστάσιο, όπου και αποθηκεύεται σε δεξαμενή (receiver). Οι δύο δεξαμενές αυτές, μία για κάθε κύκλωμα MT και LT, βρίσκεται τοποθετημένη πίσω από τις διατάξεις των συμπιεστών. Στη συνέχεια, αναλόγως του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου, η απαιτούμενη παροχή ψυκτικού οδηγείται από τη δεξαμενή συγκέντρωσης προς τις εκτονωτικές βαλβίδες, εντός των ψυγείων ή καταψυκτών. Φωτογραφία της δεξαμενής ψυκτικού του κυκλώματος MT, δίνεται στο Σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11: Δεξαμενή αποθήκευσης ψυκτικού υγρού κυκλώματος MT

Το σχέδιο διαστασιολόγησης των διατάξεων των συμπυκνωτών για τα κυκλώματα MT και LT, παρατίθεται στο Παράρτημα Β [43].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Θεωρία και εργαλεία μελέτης

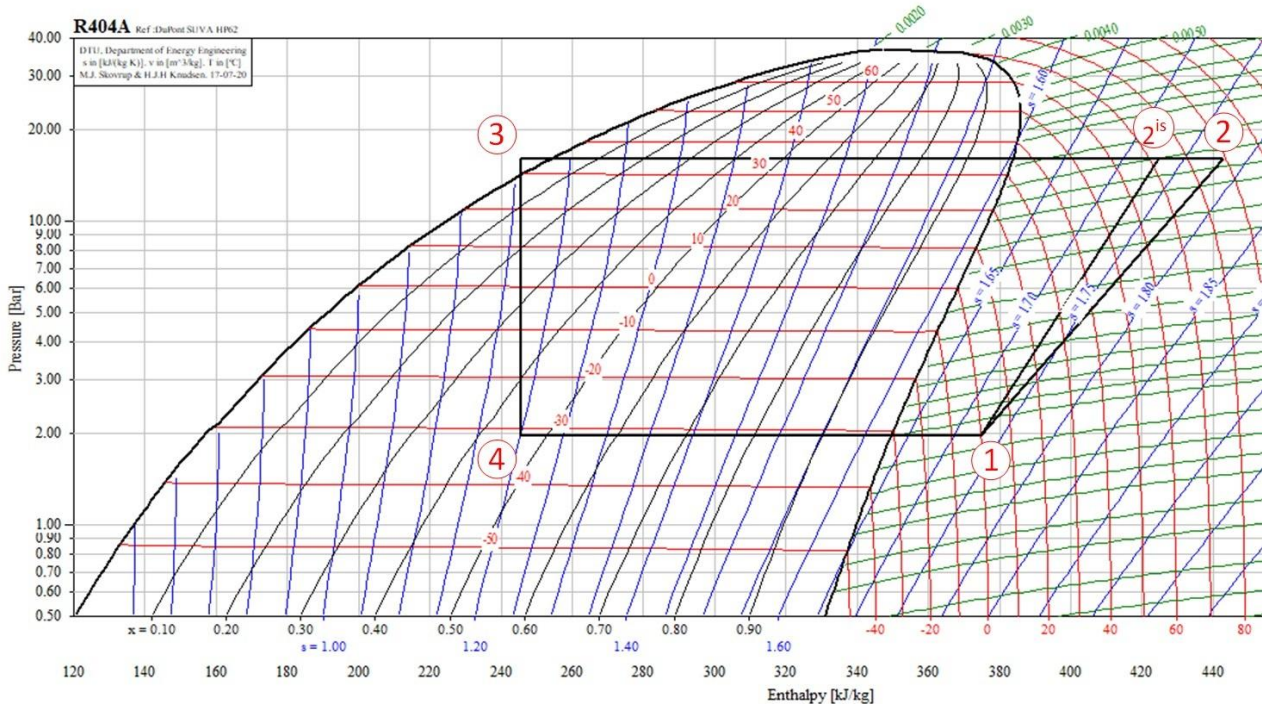
5.1 Θερμοδυναμική ανάλυση ψυκτικού κύκλου

Η μελέτη της λειτουργίας της ψυκτικής εγκατάστασης του σουπερμάρκετ, βασίστηκε στις βασικές αρχές και ιδιότητες της θερμοδυναμικής. Επομένως, στην ενότητα που ακολουθεί, παρουσιάζεται συνοπτικά, η βασική θεωρία της ψύξης και παρατίθενται οι εξισώσεις, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των ψυκτικών κύκλων των ψυκτικών συστημάτων του σουπερμάρκετ.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.1, τα ψυκτικά κυκλώματα συντήρησης (MT) και κατάψυξης (LT) του σουπερμάρκετ, λειτουργούν ανεξάρτητα το ένα με το άλλο και η ψύξη σε αυτά επιτυγχάνεται μέσω μηχανικής συμπίεσης ατμού σε κεντρικό σύστημα άμεσης εκτόνωσης (DX). Επίσης, το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται και στα δύο κυκλώματα, είναι το R-404A.

Στο Σχήμα 5.1, παρουσιάζεται σε διάγραμμα P-h, ένας τυπικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμού, όπου και χαράσσονται διαδοχικά οι μεταβολές:

- 1-2: Συμπιεστής
- 2-3: Συμπυκνωτής
- 3-4: Εκτονωτική βαλβίδα
- 4-1: Ατμοποιητής



Σχήμα 5.1: Τυπικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμού [44]

Στο Σχήμα 5.1, διακρίνονται ακόμη η χαμηλή και η υψηλή πίεση λειτουργίας, P_{evap} και P_{con} αντίστοιχα. Οι πιέσεις αυτές προκύπτουν, μέσω του διαγράμματος P-h του R-404A, από τις θερμοκρασίες ατμοποίησης και συμπύκνωσης. Επίσης θεωρούμε ότι οι πτώσεις πίεσης εντός των στοιχείων του ατμοποιητή και του συμπυκνωτή είναι αμελητέες. Επομένως έχουμε:

$$T_{\text{evap}} \rightarrow P_{\text{evap}}$$

$$T_{\text{con}} \rightarrow P_{\text{con}}$$

$$P_1 = P_4 = P_{\text{evap}}$$

$$P_2 = P_3 = P_{\text{con}}$$

Το κορεσμένο συμπύκνωμα μετά την έξοδο από το στοιχείο συμπύκνωσης και πριν την είσοδο στην εκτονωτική βαλβίδα, ψύχεται ισόθλιπτα μέχρι θερμοκρασίας κατώτερης της θερμοκρασίας συμπύκνωσης T_{con} και φτάνει στην κατάσταση 3. Η μεταβολή αυτή χαρακτηρίζεται ως υπόψυξη (SC – Subcooling) του συμπυκνώματος, γιατί το υγρό βρίσκεται μεν στην πίεση συμπυκνώσεως P_{con} , όχι όμως και σε θερμοκρασία T_{cond} , συνεπώς δεν βρίσκεται πλέον σε κατάσταση κορεσμού. Εφόσον η υπόψυξη δεν γίνεται με τη βοήθεια του ίδιου του ψυκτικού μέσου, με πρόσδοση θερμότητας προς τα σημεία του κύκλου που έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία, αλλά προς το περιβάλλον, τότε έχουμε ως αποτέλεσμα αύξηση της παραγόμενης ψύξης, χωρίς να απαιτείται αύξηση της προσδιδόμενης μηχανικής ενέργειας. Συνεπώς, μέσω της υπόψυξης, έχουμε αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς (COP) του ψυκτικού κύκλου.

Επίσης, πριν την είσοδο του ατμού στο συμπιεστή, πραγματοποιείται συνήθως εντός του αγωγού που συνδέει τον ατμοποιητή με το συμπιεστή, μια υπερθέρμανση (SH – Superheating) του κορεσμένου ατμού, ο οποίος οδηγείται στην κατάσταση 1. Η υπερθέρμανση αυτή δεν μπορεί να αποφευχθεί, καθώς είναι πρακτικά αδύνατο να υπάρξει στην είσοδο του συμπιεστή συνεχώς ξηρός κεκορεσμένος ατμός ψυκτικού μέσου. Άλλωστε, μια υπερθέρμανση του ψυκτικού μέσου στην είσοδο του συμπιεστή δεν συνεπάγεται κανένα σημαντικό μειονέκτημα, πλην της ελαφρώς μικρότερης ογκομετρικής πληρώσεως του συμπιεστή. Αντίθετα, η υπερθέρμανση είναι επιθυμητή για την αποφυγή σταγονιδίων στο ρεύμα του ψυκτικού, τα οποία ενδέχεται να δημιουργήσουν υδραυλικό πλήγμα κατά την αναρρόφηση και συμπίεση υγρού ψυκτικού μέσου. Τέλος, θεωρούμε ότι η υπερθέρμανση έχει αμελητέα επιρροή στα χαρακτηριστικά απόδοσης του ψυκτικού κύκλου και επομένως χρησιμοποιούμε την ενθαλπία του σημείου 1 για τον υπολογισμό του ψυκτικού φορτίου στον ατμοποιητή.

Για κάθε ένα από τα σημεία του Σχήματος 5.1, γνωρίζοντας δύο θερμοδυναμικά μεγέθη, μπορούμε να προσδιορίσουμε τα υπόλοιπα. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τις γνωστές πιέσεις των σημείων και τις θερμοκρασιακές μεταβολές, υπόψυξης και υπερθέρμανσης, έχουμε:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_{\text{evap}} + \Delta t_{\text{SH}} \\ h_1 &= h(P_1, T_1) \\ S_1 &= s(P_1, T_1) \\ T_3 &= T_{\text{con}} - \Delta t_{\text{SC}} \\ h_3 &= h(P_3, T_3) \end{aligned}$$

Το συμπύκνωμα κατάστασης 3 ρέει μέσω της εκτονωτικής βαλβίδας και εξέρχεται από αυτή στην κατάσταση 4, η οποία αντιστοιχεί στη πίεση ατμοποίησης P_{evap} . Η μεταβολή 3-4 είναι μη αναστρέψιμη, λόγω του στραγγαλισμού και ως άεργη, αδιαβατική εκτόνωση, είναι ως γνωστών ισενθαλπική. Επομένως:

$$\begin{aligned} h_4 &= h_3 \\ T_4 &= T(P_4, h_4) \end{aligned}$$

Με την προϋπόθεση αναστρέψιμης ισεντροπικής συμπίεσεως (1-2^{is}), το ψυκτικό μέσο στην έξοδο από το συμπιεστή της ψυκτικής εγκατάστασης έχει πίεση ίση με την πίεση συμπυκνώσεως P_{con} και την ίδια εντροπία με εκείνη της καταστάσεως 1 στην είσοδο του συμπιεστή. Συνεπώς, η κατάσταση στην έξοδο του συμπιεστή δίνεται με το σημείο 2^{is}, που βρίσκεται ως τομή της δια του σημείου 1 ισεντροπικής και της ισόθλιπτης $P_{\text{con}} = \text{σταθ}$.

Άρα:

$$\begin{aligned} S_2^{\text{is}} &= S_1 \\ h_2^{\text{is}} &= h(P_2, S_2^{\text{is}}) \end{aligned}$$

Ωστόσο, στην πραγματικότητα η συμπίεση του ατμού του ψυκτικού μέσου, στο συμπιεστή, δεν πραγματοποιείται ισεντροπικά. Κάθε συμπιεστής έχει ένα συγκεκριμένο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης η_{is} , ο οποίος συνήθως είναι δεδομένος από τον κατασκευαστή του. Επομένως από την σχέση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης έχουμε:

$$\eta_{is} = \frac{h_2^{is} - h_1}{h_2 - h_1} \Leftrightarrow h_2 = h_1 + \frac{h_2^{is} - h_1}{\eta_{is}} \quad (5.1.1)$$

και $T_2 = T(P_2, h_2)$

Σε ένα ψυκτικό σύστημα το ψυκτικό φορτίο, ταυτίζεται με την απαγόμενη θερμότητα στο στοιχείο του ατμοποιητή Q_{evap} . Αντίστοιχα, για την ψύξη του υπέρθερμου ατμού από την κατάσταση 2 μέχρι την ξηρή κεκορεσμένη κατάσταση και στη συνέχεια την πλήρη συμπύκνωσή του, απαιτείται η αποβολή θερμότητας Q_{cond} στο στοιχείο συμπύκνωσης, προς το εξωτερικό περιβάλλον. Οπότε:

$$Q_{evap} = m_{\psi\upsilon\kappa\tau} \cdot (h_1 - h_4) \quad (5.1.2)$$

$$Q_{cond} = m_{\psi\upsilon\kappa\tau} \cdot (h_2 - h_3) \quad (5.1.3)$$

Η παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου $m_{\psi\upsilon\kappa\tau}$, η οποία εμφανίζεται στις παραπάνω εξισώσεις, υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης της ηλεκτρικής ισχύος του συμπιεστή, η οποία συνήθως είναι μετρήσιμη. Στην εξίσωση αυτή ωστόσο, πρέπει να συνυπολογίσουμε το μηχανικό βαθμό απόδοσης η_m του συμπιεστή. Επομένως, έχουμε:

$$P_{el} = \frac{1}{\eta_m} \cdot m_{\psi\upsilon\kappa\tau} \cdot (h_2 - h_1) \Leftrightarrow m_{\psi\upsilon\kappa\tau} = \frac{\eta_m \cdot P_{el}}{h_2 - h_1} \quad (5.1.4)$$

Προκειμένου να υπολογίσουμε την ενεργειακή απόδοση ενός ψυκτικού κύκλου, δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την παροχή ψυκτικού μέσου. Τα μεγέθη που καθορίζουν την απόδοση αυτή, είναι η ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου απαγόμενη θερμότητα στον ατμοποιητή, δηλαδή η ψυκτική ικανότητα q_ψ , καθώς και η ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου αποβολή θερμότητας στο συμπυκνωτή, δηλαδή η ανηγμένη θερμοροή συμπυκνώσεως q_{cond} . Αντιστοίχως, ορίζεται και η ανηγμένη ηλεκτρική ισχύς του συμπιεστή w_{el} . Τα μεγέθη αυτά, υπολογίζονται ως:

$$q_\psi = \frac{Q_{evap}}{m_{\psi\upsilon\kappa\tau}} \quad (5.1.5)$$

$$q_{cond} = \frac{Q_{cond}}{m_{\psi\upsilon\kappa\tau}} \quad (5.1.6)$$

$$w_{el} = \frac{Q_{evap}}{m_{\psi\upsilon\kappa\tau}} \quad (5.1.7)$$

Σύμφωνα με το 1^ο Θερμοδυναμικό Αξίωμα, ισχύει [45]:

$$q_{cond} = q_\psi + w_{el} \quad (5.1.8)$$

Το μέγεθος που αντιπροσωπεύει την ενεργειακή απόδοση των ψυκτικών κύκλων, αποτελώντας συντελεστή ποιότητας τους σύγκρισης, είναι συντελεστής συμπεριφοράς COP, που ορίζεται ως:

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{evap}}}{P_{\text{el}}} = \frac{m_{\text{ψυκτ}} \cdot (h_1 - h_4)}{m_{\text{ψυκτ}} \cdot (h_2 - h_1)} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} = \frac{q_{\psi}}{w_{\text{el}}} \quad (5.1.9)$$

Ο παραπάνω συντελεστής συμπεριφοράς, ονομάζεται ψυκτικός COP, αντίστοιχα για συστήματα αντλίας θερμότητας υπολογίζεται ο θερμικός COP_{heat} ως:

$$\text{COP}_{\text{heat}} = \frac{Q_{\text{cond}}}{P_{\text{el}}} = \frac{m_{\text{ψυκτ}} \cdot (h_2 - h_3)}{m_{\text{ψυκτ}} \cdot (h_2 - h_1)} = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_2 - h_1)} = \frac{q_{\text{cond}}}{w_{\text{el}}} \quad (5.1.10)$$

Μια ιδανική ψυκτική διάταξη θα έπρεπε να εργάζεται με ανάστροφο κύκλο Carnot, ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή εξοικονόμηση μηχανικού έργου συμπίεσεως και μεγαλύτερη ψυκτική απόδοση. Στην πράξη αυτό είναι ανέφικτο και ο κύκλος Carnot παραμένει πάντοτε η ιδανική μορφή ψυκτικού κύκλου, προς την οποία συγκρίνουμε τους διάφορους πραγματικούς ψυκτικούς κύκλους, ώστε να έχουμε μία εικόνα της εκάστοτε επιτευχθείσας προσέγγισης προ το θεωρητικό τέλει και δυνατό. Ο ιδανικός κύκλος Carnot θεωρείται συνήθως ότι εργάζεται μεταξύ των θερμοκρασιών ατμοποίησης T_{evap} και συμπύκνωσης T_{cond} . Έτσι, προκύπτει για το συντελεστή συμπεριφοράς του ιδεατού ψυκτικού κύκλου Carnot:

$$\text{COP}_c = \frac{T_{\text{evap}}}{T_{\text{cond}} - T_{\text{evap}}} \quad (5.1.11)$$

Ο λόγος του πραγματικού συντελεστή συμπεριφοράς COP ενός ψυκτικού κύκλου, προς τον συντελεστή συμπεριφοράς του αντίστοιχου ψυκτικού κύκλου Carnot COP_c , ονομάζεται θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης ως προς κύκλο Carnot E_c και δίνεται από τη σχέση [23]:

$$E_c = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_c} \quad (5.1.12)$$

5.2 Μετρητική διάταξη

5.2.1 Αναλυτής απόδοσης Climacheck

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εφαρμόσει την απαίτηση για την ύπαρξη συστημάτων επιθεώρησης απόδοσης σε εγκαταστάσεις κλιματισμού άνω των 12kW. Καθώς το 15-20% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε, προέρχεται από τις ψυκτικές και κλιματιστικές μονάδες και τις εγκαταστάσεις αντλιών θερμότητας, το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας μέσω της χρήσης τέτοιων συστημάτων, εκτιμάται ιδιαίτερα σημαντικό [46].

Οι ψυκτικές εγκαταστάσεις στα σύγχρονα σουπερμάρκετ, συχνά δεν λειτουργούν με την αναμενόμενη απόδοση και διάρκεια ζωής που αναμένεται. Η χαμηλή ενεργειακή απόδοση μιας ψυκτικής εγκαταστάσεις επιφέρει, όχι μόνο μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας για την εταιρία, αλλά και σημαντικές περιβαλλοντικές συνέπειες. Επομένως, κρίνεται αναγκαία όσο ποτέ η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, των ψυκτικών συστημάτων, η ελαχιστοποίηση του κινδύνου αστοχιών, καθώς και η λήψη κατάλληλων αποφάσεων για επενδύσεις, με στόχο την αναβάθμιση ή την αντικατάσταση του υφιστάμενου εξοπλισμού.

Στην ψυκτική εγκατάσταση του μελετηθέντος σουπερμάρκετ, εγκαταστάθηκε τον Ιανουάριο του 2016, από τη Σουηδική εταιρία Climacheck, το σύστημα ανάλυσης επιδόσεων: Climacheck Performance Analyzer. Ο αναλυτής αυτός αποτελεί στην ουσία μια μετρητική διάταξη, η οποία δίνει τη δυνατότητα στους υπεύθυνους μηχανικούς να γνωρίζουν πόσο καλά και αποτελεσματικά λειτουργεί η ψυκτική εγκατάσταση και να υπολογίζουν τον πραγματικό συντελεστή συμπεριφοράς (COP) των ψυκτικών κύκλων, την ψυκτική ικανότητα της μονάδας, καθώς και άλλες σημαντικές παραμέτρους απόδοσης, αποφεύγοντας εργατώρες μετρήσεων και κουραστικών υπολογισμών. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιούνται αυτόματα από το σύστημα, με χρήση των θεμελιωδών θερμοδυναμικών νόμων και των ιδιοτήτων των θερμοδυναμικών μεγεθών [47].



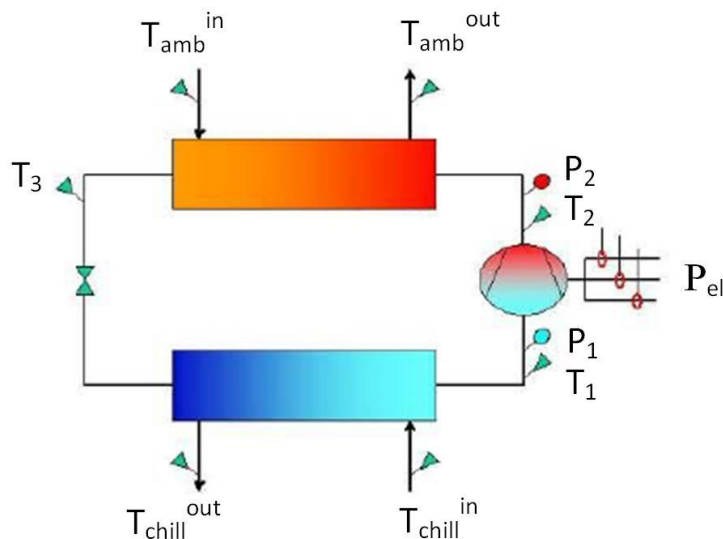
Σχήμα 5.2: Κονσόλα αναλυτή απόδοσης Climacheck Performance Analyzer [48]

Έτσι, ο αναλυτής απόδοσης προσδιορίζει με ακρίβεια, είτε με απευθείας μέτρηση, είτε με υπολογισμούς, στην ψυκτική εγκατάσταση του σουπερμάρκετ:

- Το συντελεστή συμπεριφοράς COP (με ακρίβεια $\pm 5\%$).
- Το ψυκτικό φορτίο Q_{evap} και τη θερμότητα συμπύκνωσης Q_{cond} (με ακρίβεια $\pm 7\%$).
- Την προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ (με ακρίβεια $\pm 2\%$).
- Τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή [46].

5.2.2 Μετρούμενα μεγέθη

Το μετρητικό σύστημα χρησιμοποιεί δέκα αισθητήρες που εφαρμόζονται εύκολα σε καίρια σημεία του συστήματος. Τα σημεία αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 5.3. Πρόκειται για 7 θερμοκρασίες, 2 πιέσεις, καθώς και την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ των συμπιεστών. Μέσω αυτών των πληροφοριών, είναι δυνατόν να υπολογισθούν οι βασικές παράμετροι λειτουργίας που καθορίζουν την πραγματική απόδοση του ψυκτικού κύκλου, δεδομένου φυσικά του χρησιμοποιούμενου ψυκτικού μέσου, ανεξάρτητα από οποιοδήποτε άλλο δεδομένο του κατασκευαστή της εγκατάστασης [47].



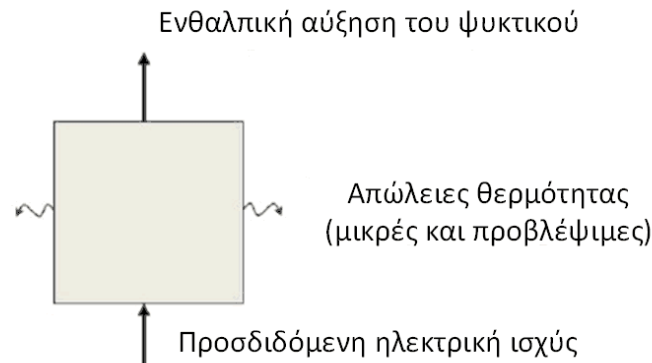
Σχήμα 5.3: Τοποθέτηση αισθητήρων και μετρούμενα μεγέθη σε τυπικό ψυκτικό κύκλο [47]

Συγκεκριμένα, τα σημεία τοποθέτησης των αισθητήρων είναι στην είσοδο και έξοδο του συμπιεστή, στην είσοδο και έξοδο του εξωτερικού αέρα στο συμπυκνωτή και στην είσοδο και έξοδο του ψυχόμενου αέρα στον ατμοποιητή. Συνεπώς, τα απαιτούμενα μετρούμενα μεγέθη σε ένα τυπικό ψυκτικό σύστημα, όπως αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 5.2 είναι:

- Θερμοκρασία και πίεση ψυκτικού ατμού στην είσοδο του συμπιεστή (T_1, P_1).
- Θερμοκρασία και πίεση ψυκτικού ατμού στην έξοδο του συμπιεστή (T_2, P_2).
- Θερμοκρασιακή διαφορά εξωτερικού αέρα στο συμπυκνωτή ($T_{\text{amb}}^{\text{out}} - T_{\text{amb}}^{\text{in}}$).
- Θερμοκρασιακή διαφορά ψυχόμενου αέρα στον ατμοποιητή ($T_{\text{chill}}^{\text{in}} - T_{\text{chill}}^{\text{out}}$).
- Θερμοκρασία ψυκτικού υγρού στην είσοδο της εκτονωτικής βαλβίδας (T_3).
- Ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνει η διάταξη των συμπιεστών (P_{el}) [47].

5.2.3 Υπολογισμός μεγεθών

Για τον υπολογισμό των απαραίτητων μεγεθών του ψυκτικού κύκλου, τα οποία απαιτούνται για τον προσδιορισμό της συνολικής ενεργειακής απόδοσης της εγκατάστασης, εφαρμόζεται το ενεργειακό ισοζύγιο στη λειτουργία του συμπιεστή, με βάση τις θερμοδυναμικές ιδιότητες, όπως αυτές αναπτύχθηκαν στην ενότητα 5.1 και τις χαρακτηριστικές λειτουργίες του ψυκτικού μέσου. Το ενεργειακό ισοζύγιο στο συμπιεστή απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4: Ενεργειακό ισοζύγιο στο συμπιεστή [46]

Οι απώλειες θερμότητας στο συμπιεστή, είναι χαμηλές σε σχέση με τη συνολική προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ, έχοντας αμελητέα επίδραση σε σχέση με τη συνολική μεταβολή. Ωστόσο, συνήθως λαμβάνονται υπόψη, για τον προσδιορισμό της καθαρής ηλεκτρικής ισχύος ως η διαφορά της συνολικής ηλεκτρικής ισχύος μείον τις απώλειες ισχύος θερμότητας αυτές [49]. Επομένως, η παροχή του ψυκτικού μέσου υπολογίζεται από τη σχέση [47]:

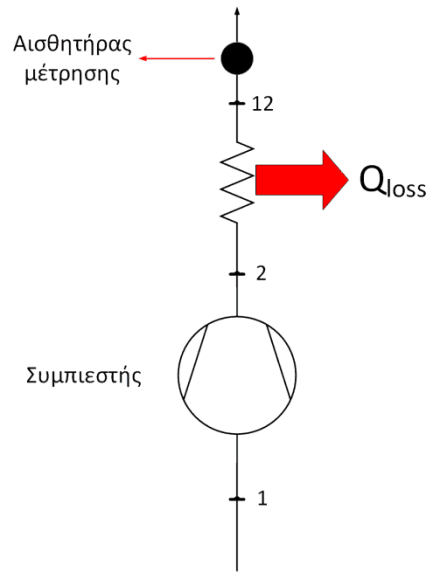
$$m_{\text{ψυκτ}} = \frac{(\text{ηλεκτρική ισχύς} - \text{απώλειες θερμότητας})}{\text{ενθαλπική διαφορά}} \quad (5.2.1)$$

Η σχέση (5.2.1) είναι ανάλογη της σχέσης (5.1.4), με τη διαφορά ότι, στη σχέση (5.1.4), οι απώλειες θερμότητας εντός του συμπιεστή, αντιπροσωπεύονται από το μηχανικό του βαθμό απόδοσης η_m .

Γνωρίζοντας λοιπόν την παροχή ψυκτικού μέσου, ο αναλυτής απόδοσης υπολογίζει όλα τα απαιτούμενα μεγέθη απόδοσης συμπεριλαμβανομένων του COP, των ψυκτικών ικανοτήτων και των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης των συμπιεστών.

Σημειώνεται εδώ, ότι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή eff_{isen} που υπολογίζει ο αναλυτής, διαφέρει από τον πραγματικό ισεντροπικό βαθμό απόδοσης η_{is} . Το γεγονός αυτό, συμβαίνει διότι ο αισθητήρας μέτρησης της θερμοκρασίας συνυπολογίζει τις σχετικές απώλειες θερμότητας του ψυκτικού ατμού, κατά τη διαδρομή του από την έξοδο του συμπιεστή έως τον αισθητήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Επομένως ο αισθητήρας

μετράει μικρότερη θερμοκρασία T_{12} από εκείνη που επικρατεί στην έξοδο του συμπιεστή T_2 και κατ' επέκταση μικρότερη ενθαλπία ($h_{12} < h_2$).



Σχήμα 5.5: Διάταξη αισθητήρα μέτρησης θερμοκρασίας στην έξοδο του συμπιεστή

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.5 και τη σχετική αρίθμηση, οι απώλειες θερμότητας Q_{loss} , μεταξύ συμπιεστή και αισθητήρα μέτρησης της θερμοκρασίας, καθώς και η συνολική προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς στο συμπιεστή P_{el} , δίνονται από τις σχέσεις:

$$Q_{loss} = m_{\psi\upsilon\kappa\tau} \cdot (h_2 - h_{12}) \quad (5.2.2)$$

$$P_{el} = m_{\psi\upsilon\kappa\tau} \cdot (h_2 - h_1) \quad (5.2.3)$$

Επομένως, ορίζονται οι σχετικές θερμικές απώλειες ως:

$$RHL = \frac{Q_{loss}}{P_{el}} \Leftrightarrow RHL = \frac{h_2 - h_{12}}{h_2 - h_1} \quad (5.2.4)$$

Συνεπώς, για να εξάγουμε τον πραγματικό ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή, με χρήση της μετρούμενης θερμοκρασίας στη θέση του αισθητήρα, πρέπει να πολλαπλασιάσουμε τον eff_{isen} , τον οποίο υπολογίζει ο αναλυτής, με κατάλληλο συντελεστή a . Άρα, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \eta_{is} &= eff_{isen} \cdot a \Leftrightarrow \frac{h_2^{is} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{h_2^{is} - h_1}{h_{12} - h_1} \cdot a \Leftrightarrow a = \frac{h_{12} - h_1}{h_2 - h_1} \Leftrightarrow a = \frac{h_2 - h_1}{h_2 - h_1} + \frac{h_{12} - h_2}{h_2 - h_1} \\ &\Leftrightarrow a = 1 + \frac{h_{12} - h_2}{h_2 - h_1} \Leftrightarrow a = 1 - \frac{h_2 - h_{12}}{h_2 - h_1} \Leftrightarrow a = 1 - RHL \end{aligned} \quad (5.2.5)$$

Επομένως, σύμφωνα με την εξίσωση (5.2.5), καταλήγουμε στο ότι

$$\eta_{is} = eff_{isen} \cdot (1 - RHL) \quad (5.2.6)$$

Η εξίσωση (5.2.6), δίνεται από τον κατασκευαστή του αναλυτή απόδοσης [47]. Ωστόσο, η παραπάνω απόδειξή της, κρίνεται αναγκαία για την αποδοχή της και εφαρμογή της στην πράξη. Συνεπώς, από το eff_{isen} που δίνεται στα αποτελέσματα του αναλυτή, μέσω της (5.2.6), υπολογίζεται ο πραγματικός ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή η_{is} .

Όσον αφορά τις σχετικές θερμικές απώλειες, στον αγωγό εξόδου του συμπιεστή, αυτές υπολογίζονται πειραματικά, και προσδιορίζονται στο διάστημα 3-10% [47]. Για τη συνέχεια της μελέτης της ψυκτικής εγκατάστασης, οι σχετικές θερμικές απώλειες, λαμβάνονται σταθερές, στο επίπεδο του 5% για κάθε συμπιεστή.

Τέλος, ο συγκεκριμένος αναλυτής απόδοσης, συνυπολογίζει το μηχανικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή, μέσω ενός ισοδύναμου βαθμού απόδοσης του συμπιεστή eff_{comp} , ο οποίος υπολογίζεται ως:

$$eff_{comp} = eff_{isen} \cdot \eta_m \Leftrightarrow \eta_m = \frac{eff_{comp}}{eff_{isen}} \quad (5.2.7)$$

5.2.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

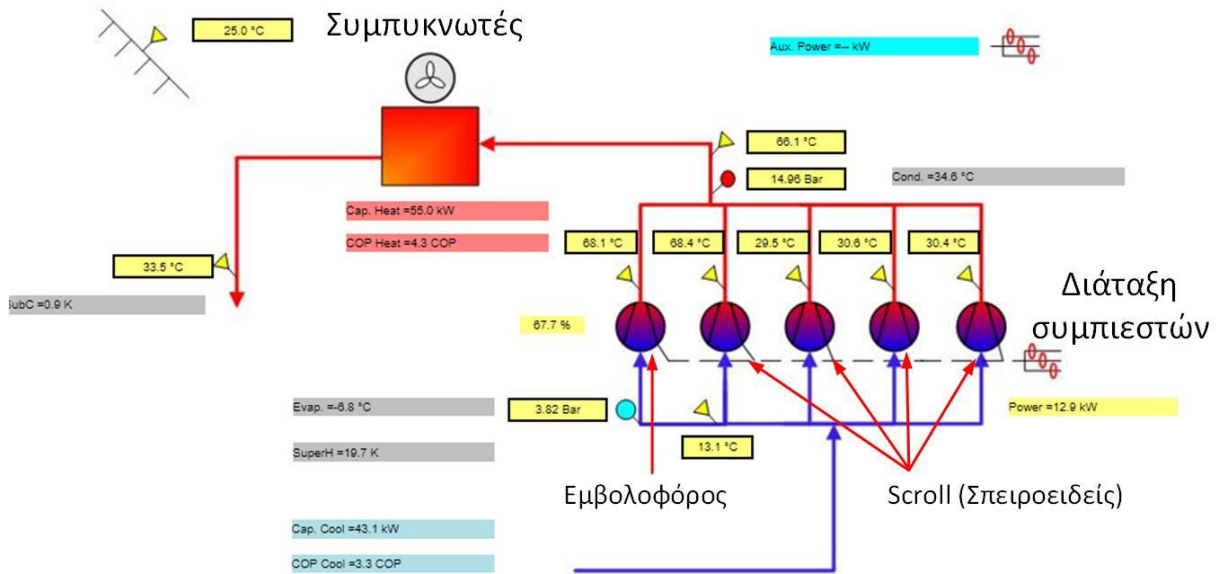
Ο αναλυτής απόδοσης προσφέρει επιλογές για ανάλυση δεδομένων μέσω υπολογιστή ή και παρακολούθηση της ομαλής ψυκτικής λειτουργίας του συστήματος, μέσω κινητού τηλεφώνου. Μέσω του αναλυτή απόδοσης, παρέχονται διαγράμματα ροής, συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων και γραφήματα απόδοσης, τα οποία παρέχουν με τη σειρά τους, μια σαφή εικόνα των συνθηκών λειτουργίας της ψυκτικής εγκατάστασης.

5.2.4.1 Διαγράμματα ροής των ψυκτικών κυκλωμάτων

Ο αναλυτής απόδοσης, παρέχει μέσω διαγραμμάτων ροής πραγματικού χρόνου, μία εποπτική εικόνα της λειτουργίας της ψυκτικής εγκατάστασης. Σε αυτά τα διαγράμματα ροής διακρίνονται οι διατάξεις των συμπιεστών και ο συμπυκνωτής και αναφέρονται:

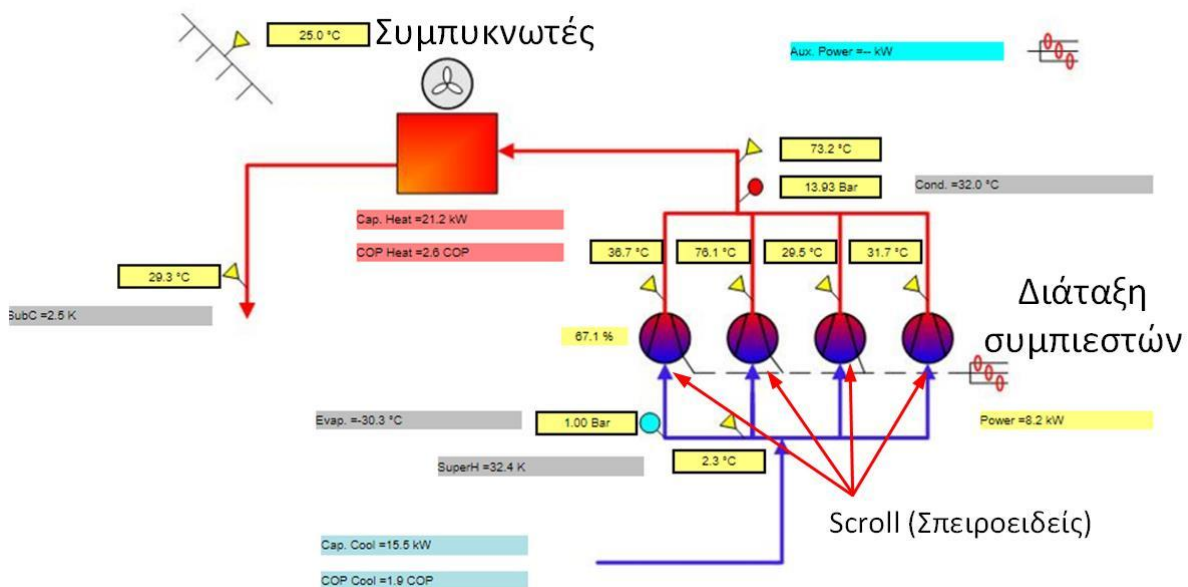
- Χαμηλή και υψηλή πίεση λειτουργίας
- Θερμοκρασίες στην είσοδο της διάταξης συμπιεστών, στην έξοδο κάθε συμπιεστή, συμπύκνωσης, ατμοποίησης και περιβάλλοντος
- Υπερθέρμανση και υπόψυξη (Kelvin)
- Ψυκτικό φορτίο και φορτίο συμπύκνωσης
- Ψυκτικός και θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς COP
- Προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς στο συμπιεστή

Στα Σχήματα 5.6, 5.7 παρατίθενται διαγράμματα ροής των κυκλωμάτων συντήρησης (MT) και κατάψυξης (LT), αντίστοιχα.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα ροής ψυκτικού κυκλώματος MT [50]

Στο διάγραμμα ροής του κυκλώματος MT, του Σχήματος 5.6, διακρίνεται η διάταξη των συμπιεστών. Από τις θερμοκρασίες εξόδου των συμπιεστών, διαπιστώνουμε ποιои συμπιεστές βρίσκονται σε λειτουργία. Συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι ένας συμπιεστής βρίσκεται σε λειτουργία, όταν η θερμοκρασία εξόδου του είναι μεγαλύτερη των 50°C. Επομένως, επιβεβαιώνουμε ότι ο εμβολοφόρος (1^{ος} κατά σειρά από τα αριστερά), λειτουργεί συνέχεια, όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 4.2.3, σε συνδυασμό με έναν εκ των scroll συμπιεστών. Στην περίπτωση του διαγράμματος ροής του Σχήματος 5.6, ο scroll συμπιεστής που λειτουργεί και υποβοηθάει στην κάλυψη του ψυκτικού φορτίου είναι ο 2^{ος} κατά σειρά συμπιεστής από τα αριστερά.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα ροής ψυκτικού κυκλώματος LT [50]

Στην περίπτωση του κυκλώματος χαμηλής θερμοκρασίας (LT), διακρίνουμε στο Σχήμα 5.7, τη διάταξη των τεσσάρων scroll συμπιεστών. Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 4.2.3, κάθε χρονική στιγμή λειτουργούν δύο συμπιεστές σε συνδυασμό. Τη χρονική στιγμή του στιγμιότυπου του Σχήματος 5.7, σε λειτουργία βρίσκεται μόνο ο 2^{ος} εξ' αριστερών συμπιεστής.

5.2.4.2 Πίνακας αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα μετρήσεων και υπολογισμών του αναλυτή απόδοσης, τη ψυκτικής εγκατάστασης, παρουσιάζονται, για κάθε λεπτό της ώρας, σε συγκεντρωτικούς πίνακες. Στον πίνακα του Σχήματος 5.8, ο αναλυτής παρουσιάζει τα σημαντικότερα μεγέθη λειτουργίας και απόδοσης της ψυκτικής εγκατάστασης.

ClimaCheck online
Copyright © ClimaCheck Sweden AB 2010-2017

Home Plants Select circuit/process/plant View Alarm log Download data My settings

Selected Process: Metro Greece/Metro Metamorfois/LT Rack/A/ Metro Portable LT (501564#1)

Refrigerant: R404A.MIX Unconfirmed alarms: Yes

Date to show: 21/07/2017 No of values per page: 20 Max Min Avg calculated on the last Time Search: Search Go To: Export functions

User settings active: 21/07/2017 All data Page to XL All to XL Page to PDF

[older data>](#) [oldest data>>](#)

| Time | Ref Low press. (Bar(g)) | Ref Evap (°C) | Ref Comp in (°C) | Super heat (K) | Ref High press. (Bar(g)) | Ref Cond (°C) | Ref Exp. Valve in (°C) | Sub cool total (K) | Eff 2 Comp. Isen. (%) | Power input Comp. (kW) | COP Cool Ref | Cap. Cool (kW) | COP Heat Ref | Cap. Heat (kW) | Comp 1 out (°C) | Eff 2 Comp. 1 (%) | Comp 2 out (°C) | Eff 2 Comp. 2 (%) | Ref Mass Flow (kg/s) | Eff 1 Cycle (%) | Energy Comp Rack 2 (kWh) |
|---------------------|-------------------------|---------------|------------------|----------------|--------------------------|---------------|------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|----------------------|-----------------|--------------------------|
| Max All data | 1.47 | -25.2 | 6.0 | 38.4 | 16.90 | 39.3 | 36.7 | 4.5 | 120.0 | 25.9 | 2.44 | 51.2 | 3.04 | 69.3 | 85.6 | 119.0 | 86.8 | 118.7 | 0.39 | 72.56 | 214.445 |
| Min All data | 0.77 | -33.2 | -2.9 | 25.2 | 12.76 | 28.8 | 28.9 | -0.7 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 31.5 | 0.0 | 31.6 | -20.0 | 0.00 | 0.00 | 214.168 |
| Avg All data | 1.00 | -30.4 | 1.5 | 31.7 | 14.74 | 34.0 | 31.9 | 1.9 | 63.5 | 10.8 | 1.68 | 19.0 | 2.34 | 26.6 | 58.5 | 78.2 | 58.8 | 77.7 | 0.15 | 66.49 | 214.306 |
| 2017-07-21 22:01:00 | 0.98 | -30.6 | -1.9 | 28.4 | 14.26 | 32.8 | 31.0 | 1.7 | 65.7 | 8.3 | 1.76 | 14.6 | 2.46 | 20.4 | 60.0 | 87.5 | 73.9 | 62.1 | 0.11 | 70.18 | 214.445 |
| 2017-07-21 22:00:00 | 1.00 | -30.4 | -1.9 | 28.2 | 14.37 | 33.1 | 31.0 | 1.9 | 65.3 | 8.3 | 1.75 | 14.6 | 2.45 | 20.4 | 63.6 | 79.2 | 74.0 | 62.0 | 0.11 | 70.30 | 214.445 |
| 2017-07-21 21:59:00 | 0.97 | -30.8 | -1.9 | 28.6 | 14.37 | 33.1 | 30.8 | 2.1 | 65.1 | 8.1 | 1.74 | 14.1 | 2.44 | 19.8 | 67.4 | 72.7 | 74.7 | 61.8 | 0.11 | 70.38 | 214.445 |
| 2017-07-21 21:58:00 | 0.94 | -31.1 | -1.9 | 28.9 | 14.20 | 32.7 | 30.9 | 1.6 | 64.2 | 8.1 | 1.71 | 13.9 | 2.41 | 19.5 | 72.1 | 65.2 | 75.3 | 61.0 | 0.11 | 70.11 | 214.445 |
| 2017-07-21 21:57:00 | 0.92 | -31.3 | -2.0 | 29.1 | 14.19 | 32.7 | 31.3 | 1.2 | 61.5 | 8.1 | 1.62 | 13.1 | 2.32 | 18.8 | 77.0 | 59.3 | 76.1 | 60.4 | 0.10 | 69.66 | 214.444 |
| 2017-07-21 21:56:00 | 0.82 | -32.6 | -1.8 | 30.6 | 14.53 | 33.5 | 31.5 | 1.8 | 64.8 | 16.1 | 1.64 | 26.3 | 2.34 | 37.6 | 77.1 | 62.7 | 76.0 | 64.1 | 0.21 | 69.37 | 214.444 |
| 2017-07-21 21:55:00 | 0.85 | -32.3 | -1.6 | 30.4 | 14.56 | 33.6 | 31.5 | 1.9 | 64.7 | 16.1 | 1.65 | 26.5 | 2.35 | 37.8 | 77.1 | 62.4 | 75.9 | 64.0 | 0.21 | 69.51 | 214.444 |
| 2017-07-21 21:54:00 | 0.88 | -31.9 | -1.4 | 30.2 | 14.55 | 33.6 | 31.5 | 1.9 | 64.4 | 16.4 | 1.65 | 27.1 | 2.35 | 38.6 | 77.0 | 62.1 | 75.6 | 63.9 | 0.21 | 69.64 | 214.444 |
| 2017-07-21 21:53:00 | 0.92 | -31.3 | -1.2 | 29.9 | 14.52 | 33.5 | 31.5 | 1.8 | 63.4 | 16.3 | 1.65 | 26.9 | 2.35 | 38.3 | 77.2 | 61.0 | 75.5 | 63.1 | 0.21 | 69.80 | 214.443 |
| 2017-07-21 21:52:00 | 0.99 | -30.5 | -1.0 | 29.2 | 14.68 | 33.9 | 31.6 | 2.1 | 62.9 | 16.6 | 1.66 | 27.6 | 2.36 | 39.2 | 77.0 | 60.6 | 75.2 | 62.9 | 0.22 | 70.06 | 214.443 |
| 2017-07-21 21:51:00 | 1.03 | -30.0 | -0.8 | 29.0 | 14.64 | 33.8 | 31.6 | 2.0 | 62.0 | 16.7 | 1.66 | 27.7 | 2.36 | 39.4 | 77.3 | 59.7 | 75.7 | 61.6 | 0.22 | 70.18 | 214.443 |
| 2017-07-21 21:50:00 | 0.98 | -30.6 | -0.6 | 29.7 | 14.73 | 34.0 | 31.6 | 2.3 | 63.5 | 16.7 | 1.67 | 27.9 | 2.37 | 39.6 | 77.1 | 61.4 | 76.0 | 62.7 | 0.22 | 70.12 | 214.443 |
| 2017-07-21 21:49:00 | 1.01 | -30.3 | -0.5 | 29.5 | 14.76 | 34.1 | 31.4 | 2.5 | 63.7 | 16.8 | 1.69 | 28.4 | 2.39 | 40.2 | 76.6 | 61.7 | 75.8 | 62.7 | 0.22 | 70.41 | 214.442 |
| 2017-07-21 21:48:00 | 1.04 | -29.8 | -0.4 | 29.2 | 14.64 | 33.8 | 31.4 | 2.2 | 62.4 | 16.9 | 1.68 | 28.4 | 2.38 | 40.3 | 76.6 | 60.7 | 75.8 | 61.6 | 0.22 | 70.47 | 214.442 |
| 2017-07-21 21:47:00 | 1.06 | -29.6 | -0.3 | 29.1 | 14.64 | 33.8 | 31.2 | 2.4 | 61.6 | 16.6 | 1.67 | 27.7 | 2.37 | 39.4 | 76.8 | 60.2 | 76.4 | 60.7 | 0.22 | 70.71 | 214.442 |
| 2017-07-21 21:46:00 | 1.01 | -30.2 | -0.1 | 29.9 | 14.60 | 33.7 | 31.2 | 2.3 | 62.1 | 16.4 | 1.66 | 27.3 | 2.36 | 38.8 | 77.3 | 60.7 | 77.2 | 60.9 | 0.21 | 70.56 | 214.441 |
| 2017-07-21 21:45:00 | 0.95 | -31.0 | 0.0 | 30.7 | 14.61 | 33.8 | 31.2 | 2.4 | 64.2 | 16.6 | 1.69 | 28.1 | 2.39 | 39.7 | 76.9 | 62.7 | 77.2 | 62.3 | 0.22 | 70.38 | 214.441 |

[older data>](#) [oldest data>>](#)

Σχήμα 5.8: Παρουσίαση αποτελεσμάτων αναλυτή δεδομένων σε συγκεντρωτικό πίνακα [50]

Στο σχήμα 5.8 διακρίνεται, ότι τα συγκεκριμένα αποτελέσματα αναφέρονται στην περίπτωση του κυκλώματος χαμηλής θερμοκρασίας LT (κατάψυξη) και επαληθεύεται ότι το χρησιμοποιούμενο ψυκτικό μέσο της εγκατάστασης είναι το R-404A.

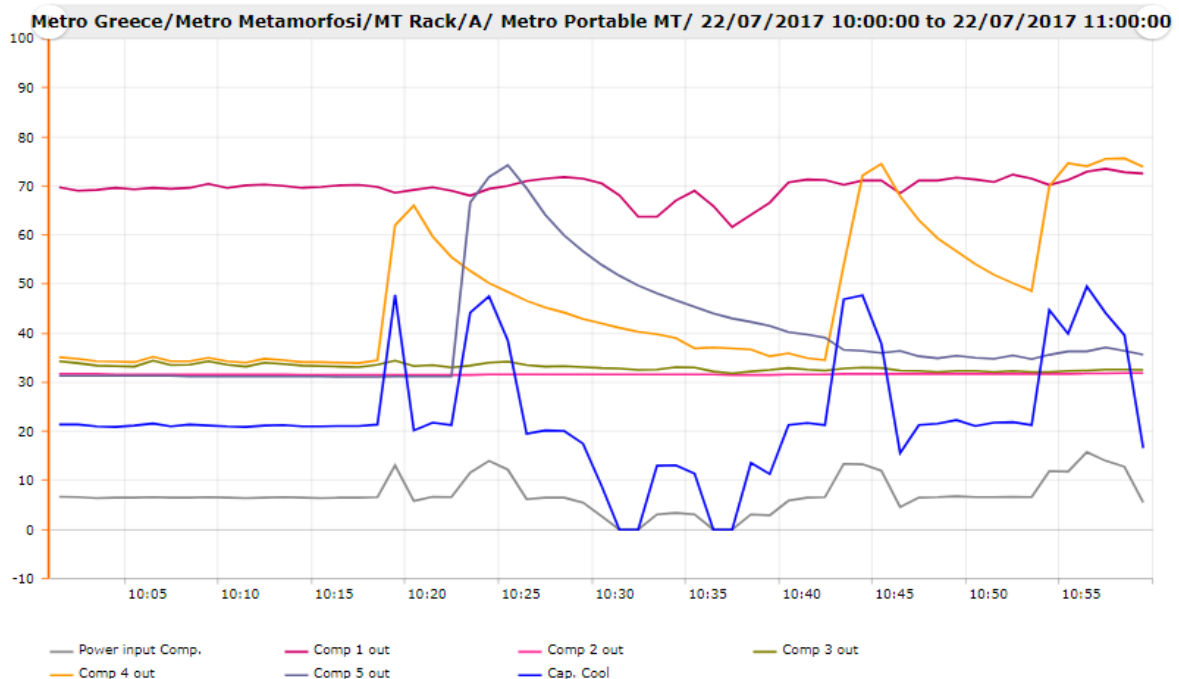
Από τα αριστερά προς τα δεξιά παρουσιάζονται με τη σειρά τα μεγέθη:

- Ref. Low press (Bar) → χαμηλή πίεση λειτουργίας (μανομετρική πίεση)
- Ref. Evap (°C) → θερμοκρασία ατμοποίησης
- Ref. Comp in (°C) → θερμοκρασία εισόδου στη διάταξη συμπιεστών
- Superheat (K) → υπερθέρμανση
- Ref. High press (Bar) → υψηλή πίεση λειτουργίας (μανομετρική πίεση)
- Ref. Cond (°C) → θερμοκρασία συμπύκνωσης

- Ref. Exp. Valve in (°C) → θερμοκρασία εισόδου στην εκτονωτική βαλβίδα
- Sub cool total (K) → υπόψυξη
- Eff. Comp. Isen (%) → η_{is} του συμπιεστή που βρίσκεται σε λειτουργία
- Power in. Comp. (kW) → προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς στο συμπιεστή
- COP Cool Ref. → ψυκτικός COP
- Cap. Cool (kW) → ψυκτικό φορτίο
- COP Heat Ref. → θερμικός COP
- Cap. Heat (kW) → φορτίο συμπύκνωσης
- Comp.1 out (°C) → θερμοκρασία εξόδου 1^{ου} συμπιεστή
- Eff. Comp.1 (%) → ισοδύναμος β.α 1^{ου} συμπιεστή ($\eta_{is} \cdot \eta_m$)
- Comp.2 out (°C) → θερμοκρασία εξόδου 2^{ου} συμπιεστή
- Eff. Comp.2 (%) → ισοδύναμος β.α 2^{ου} συμπιεστή ($\eta_{is} \cdot \eta_m$)
- Ref. Mass Flow (kg/s) → παροχή μάζας ψυκτικού
- Eff. Cycle (%) → θερμοδυναμικός β.α ως προς κύκλο Carnot E_c
- Energy Comp. Rack → αθροιστική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συμπιεστή

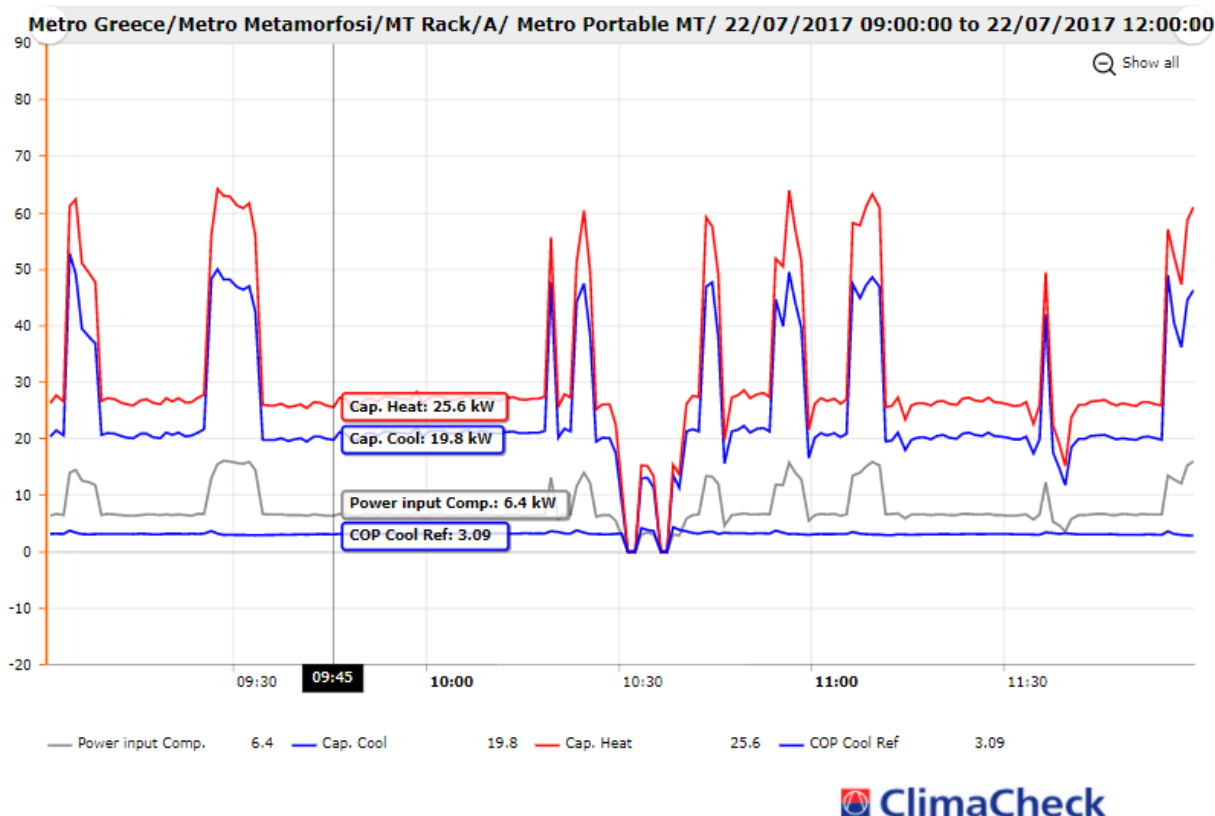
5.2.4.3 Γραφήματα απόδοσης

Στα Σχήματα 5.9, 5.10, 5.11 που ακολουθούν, παρουσιάζονται τυπικά γραφήματα απόδοσης, μέσω των οποίων, ο υπεύθυνος μηχανικός έχει μια καθολική, εποπτική εικόνα της λειτουργικής απόδοσης της ψυκτικής εγκατάστασης. Στα συγκεκριμένα γραφήματα, μέσω διαδικτυακής πλατφόρμας, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει ποια μεγέθη τον ενδιαφέρουν να αναπαρασταθούν γραφικά, σε ποια χρονική στιγμή της ημέρας και για ποιο χρονικό εύρος.



Σχήμα 5.9: Παρουσίαση αποτελεσμάτων αναλυτή δεδομένων σε συγκεντρωτικό πίνακα [50]

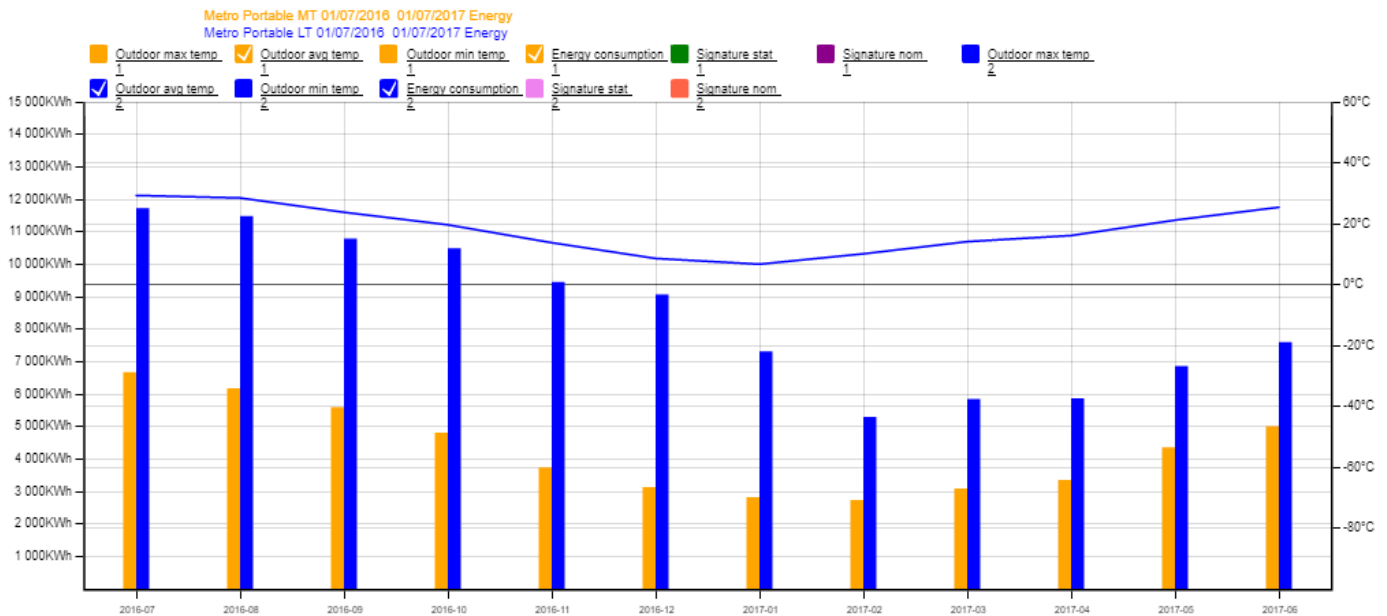
Στο Σχήμα 5.9, παρουσιάζονται για χρονικό διάστημα μιας ώρας (10:00-11:00), μιας τυχαίας μέρας, η διακύμανση των θερμοκρασιών εξόδου του κάθε ενός από τους πέντε συμπιεστές του κυκλώματος MT. Ταυτόχρονα, παρέχεται η διακύμανση του ψυκτικού φορτίου και της προδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος στο συμπιεστή, για το ίδιο χρονικό διάστημα. Επιβεβαιώνουμε ότι ο εμβολοφόρος (Comp.1), λειτουργεί ανελλιπώς, με θερμοκρασία εξόδου περίπου σταθερή στους 70°C. Ωστόσο, κατά τα χρονικά διαστήματα 10:20 και 10:25, όπου όπως παρατηρείται από το γράφημα έχουμε αύξηση της ζήτησης ψυκτικού φορτίου, μπαίνουν σε λειτουργία διαδοχικά δύο scroll συμπιεστές (Comp.4 και Comp.5), για να την κάλυψη των επιπλέον ψυκτικών φορτίων. Αυτό συμβαίνει και τις χρονικές στιγμές 10:45 και 10:55, όπου έχουμε και πάλι αύξηση του ψυκτικού φορτίου, τότε όμως ενεργοποιείται και για στις δύο περιπτώσεις ο Comp.4. Επίσης, τις χρονικές στιγμές 10:32 και 10:37, η ψυκτική εγκατάσταση δεν έχει απαίτηση επιπλέον πρόσδοσης ψυκτικού φορτίου και παρατηρούμε ότι τις δύο αυτές χρονικές στιγμές, λειτουργεί μόνο ο εμβολοφόρος συμπιεστής και μάλιστα σε κατάσταση μειωμένης φόρτισης.



Σχήμα 5.10: Παρουσίαση αποτελεσμάτων αναλυτή δεδομένων σε συγκεντρωτικό πίνακα [50]

Στο Σχήμα 5.10, παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση του ψυκτικού φορτίου, του φορτίου συμπύκνωσης και της προσδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος στους συμπιεστές, με ταυτόχρονη απεικόνιση της διακύμανσης του ψυκτικού COP, για χρονικό διάστημα τριών ωρών (09:00-12:00). Στο γράφημα παρατηρούμε, ότι τόσο το φορτίο συμπύκνωσης, όσο και η ηλεκτρική ισχύς των συμπιεστών, ακολουθούν τη διακύμανση του ψυκτικού φορτίου. Συγκεκριμένα, το φορτίο συμπύκνωσης είναι σταθερά κατά περίπου 6 kW, μεγαλύτερο από

το ψυκτικό φορτίο, από το οποίο η ηλεκτρική ισχύς υπολείπεται περίπου κατά 13kW. Τέλος, ο ψυκτικός COP, διατηρείται περίπου σταθερός στην τιμή COP=3, εκτός από τις χρονικές στιγμές 10:32 και 10:37, όπου όλα τα παραπάνω μεγέθη μηδενίζονται, αφού δεν υπάρχει απαίτηση ψυκτικής ισχύος.



Σχήμα 5.11: Παρουσίαση αποτελεσμάτων αναλυτή δεδομένων σε συγκεντρωτικό πίνακα [50]

Στο Σχήμα 5.11, παρουσιάζονται συγκριτικά σε επίπεδο έτους, για κάθε μήνα, οι συνολικές ηλεκτρικές καταναλώσεις των κυκλωμάτων MT (συντήρησης) και LT (κατάψυξης), σε συνδυασμό με τη διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασίας. Στο παραπάνω γράφημα, επιβεβαιώνεται το γεγονός, ότι στο κύκλωμα LT απαιτείται μεγαλύτερο ενεργειακή κατανάλωση, και κατ' επέκταση ψυκτικό φορτίο, από το κύκλωμα MT. Συγκεκριμένα σε επίπεδο έτους, για τους μήνες που αναπαριστούνται στο γράφημα (Ιούλιος '16 έως και Ιούνιος '17), έχουμε συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της τάξεως των 51.5 MWh για το κύκλωμα MT και 101.9 MWh για το κύκλωμα LT, δηλαδή 97.78% μεγαλύτερη ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση για το κύκλωμα LT σε σχέση με το MT.

Επίσης, επιβεβαιώνουμε ότι το ψυκτικό φορτίο είναι συνάρτηση της εξωτερικής θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, για τους καλοκαιρινούς μήνες το ψυκτικό φορτίο, τόσο για τη συντήρηση, όσο και για την κατάψυξη είναι μεγαλύτερο από το ψυκτικό φορτίο των χειμερινών μηνών.

Σε γραφήματα, όπως αυτό του Σχήματος 5.11, ο υπεύθυνος μηχανικός της ψυκτικής εγκατάστασης, έχει τη δυνατότητα, συγκρίνοντας την ενεργειακή κατανάλωση διαφορετικών μηνών, να υπολογίσει την ενεργειακή εξοικονόμηση που επιφέρουν πιθανές ενέργειες εξοικονόμησης στο κατάστημα.

5.2.5 Πρακτικά οφέλη

Όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για την πλήρη αξιολόγηση του συστήματος είναι διαθέσιμα μόλις συνδεθούν οι αισθητήρες και ενεργοποιηθεί ο αναλυτής δεδομένων, τις περισσότερες φορές χωρίς να απαιτείται η διακοπή του συστήματος. Με τις παρεχόμενες πληροφορίες, οι μηχανικοί μπορούν να εντοπίσουν προβλήματα απόδοσης της ψυκτικής εγκατάστασης, όπως:

- Έλλειψη ψυκτικού μέσου ή υπερβολική φόρτιση
- Εσφαλμένη ρύθμιση υπερθέρμανσης
- Ζημιές ή φθορές του συμπιεστή
- Ρύπανση του εναλλάκτη θερμότητας
- Διαρροή λαδιού στον συμπυκνωτή ή στον ατμοποιητή
- Μειωμένη απόδοση ανεμιστήρων ή αντλιών, προβλήματα ροής σε δευτερεύοντα μέσα (αέρα / νερό / άλμη)
- Δυσλειτουργία στο σύστημα ελέγχου της εγκατάστασης

Ο αναλυτής δεδομένων εντοπίζει τις δυσλειτουργίες στο συμπιεστή και στα υπόλοιπα τμήματα της ψυκτικής εγκατάστασης που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μελλοντική μείωση της απόδοσης ή ακόμη και στην καταστροφή της εγκατάστασης, επιτρέποντας την προληπτική συντήρηση και τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης.

Αξιοποιώντας αυτές τις πληροφορίες οι μηχανικοί μπορούν να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα που εντοπίστηκαν, βελτιστοποιώντας την απόδοση και τη βιωσιμότητα του ψυκτικού συστήματος. Το αποτέλεσμα, τέτοιων ενεργειών, είναι τεράστια δυναμική εξοικονόμηση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

Χωρίς τη χρήση, ενός αναλυτή δεδομένων, τα προβλήματα αυτά συνήθως δεν γίνονται αντιληπτά, με αποτέλεσμα η ψυκτική εγκατάσταση συνεχίζει να λειτουργεί προβληματικά και να αυξάνεται η ενεργειακή κατανάλωση ή να μειώνεται η ψυκτική απόδοση. Κάτι τέτοιο επιφέρει τεράστια οικονομική ζημιά για τη διεύθυνση του σουπερμάρκετ, καθώς θα πρέπει να επισκευάσει ή και να αντικαταστήσει τμήματα της ψυκτικής εγκατάστασης, όπως και επίσης ενδέχεται να υπάρξει καταστροφή αποθέματος τροφίμων λόγω ανεπαρκούς ψύξης [47].

5.3 Λογισμικό επίλυσης – EES (Engineering Equation Solver)

Έχοντας προσδιορίσει τα βασικά δομικά στοιχεία της ψυκτικής εγκατάστασης, προκειμένου να προχωρήσουμε στην μελέτη της και την ενεργειακή της διερεύνηση, είναι απαραίτητο να επιλυθούν οι θερμοδυναμικές εξισώσεις, μέσω των οποίων αναλύονται οι ψυκτικοί κύκλοι των κυκλωμάτων μέσης (MT) και χαμηλής θερμοκρασίας (LT). Αναπτύσσουμε λοιπόν, ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά και τα μεγέθη ισχύος, των κυκλωμάτων MT και LT, μέσω της επίλυσης των θερμοδυναμικών εξισώσεων που διέπουν τους ψυκτικούς τους κύκλους.

Σε πρώτο στάδιο, απαιτείται η επιβεβαίωση της ακρίβειας του υπολογιστικού μοντέλου, μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων του με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα της μετρητικής διάταξης. Σε δεύτερο στάδιο, είμαστε σε θέση να μελετήσουμε ζητήματα που αφορούν τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, μέσω ενεργειών στην υπάρχουσα εγκατάσταση ή προτείνοντας κάποιο διαφορετικό σύστημα ψύξης, το οποίο απαιτεί νέο εξοπλισμό [51].

Το λογισμικό προσομοίωσης της λειτουργίας της ψυκτικής εγκατάστασης, στο οποίο αναπτύσσεται το υπολογιστικό μοντέλο, είναι το Engineering Equation Solver (EES). Το EES αποτελεί ένα προγραμματιστικό περιβάλλον επίλυσης εξισώσεων, το οποίο προσφέρει στο χρήστη τρία πρωτοποριακά στοιχεία σε σχέση με αντίστοιχα λογισμικά.

Πρώτον, αναγνωρίζει αυτόματα και ομαδοποιεί εξισώσεις που πρέπει να επιλυθούν ταυτόχρονα. Αυτό σημαίνει, πως δεν παίζει ρόλο η σειρά ή τρόπος γραφής των εξισώσεων. Δηλαδή, για την ανάλυση του ψυκτικού κύκλου παρέχουμε στο λογισμικό τις βασικές θερμοδυναμικές εξισώσεις, όπως αυτές αναλύονται στην ενότητα 5.1, σε συνδυασμό με αποτελέσματα μετρήσεων του αναλυτή απόδοσης, τα οποία δίνονται ως είσοδοι, και το λογισμικό επιλύει ως προς τις άγνωστες παραμέτρους. Με αυτό τον τρόπο, και χωρίς να απαιτείται να μεταβάλλουμε το κυρίως σώμα του κώδικα, μπορούμε αλλάζοντας κάθε φορά εισόδους και παραμέτρους λειτουργίας, να υπολογίζουμε τα επιθυμητά μεγέθη απόδοσης της ψυκτικής εγκατάστασης.

Δεύτερον, το EES έχει ενσωματωμένες βιβλιοθήκες μαθηματικών και θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, οι οποίες χρησιμοποιούνται για υπολογισμούς προβλημάτων θερμοδυναμικής. Για παράδειγμα

Τρίτον, το EES είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για προβλήματα σχεδιασμού, στα οποία απαιτείται ο προσδιορισμός των επιδράσεων μιας ή περισσότερων παραμέτρων. Το λογισμικό, μας δίνει δηλαδή τη δυνατότητα, να δημιουργούμε παραμετρικούς πίνακες μεταβλητών μεγεθών, προκειμένου να διαπιστώσουμε την αλληλεξάρτησή των μεγεθών απόδοσης της ψυκτικής εγκατάστασης, ενώ ταυτόχρονα μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των ίδιων προδιαγραφών για διαφορετικά ψυκτικά μέσα [51].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

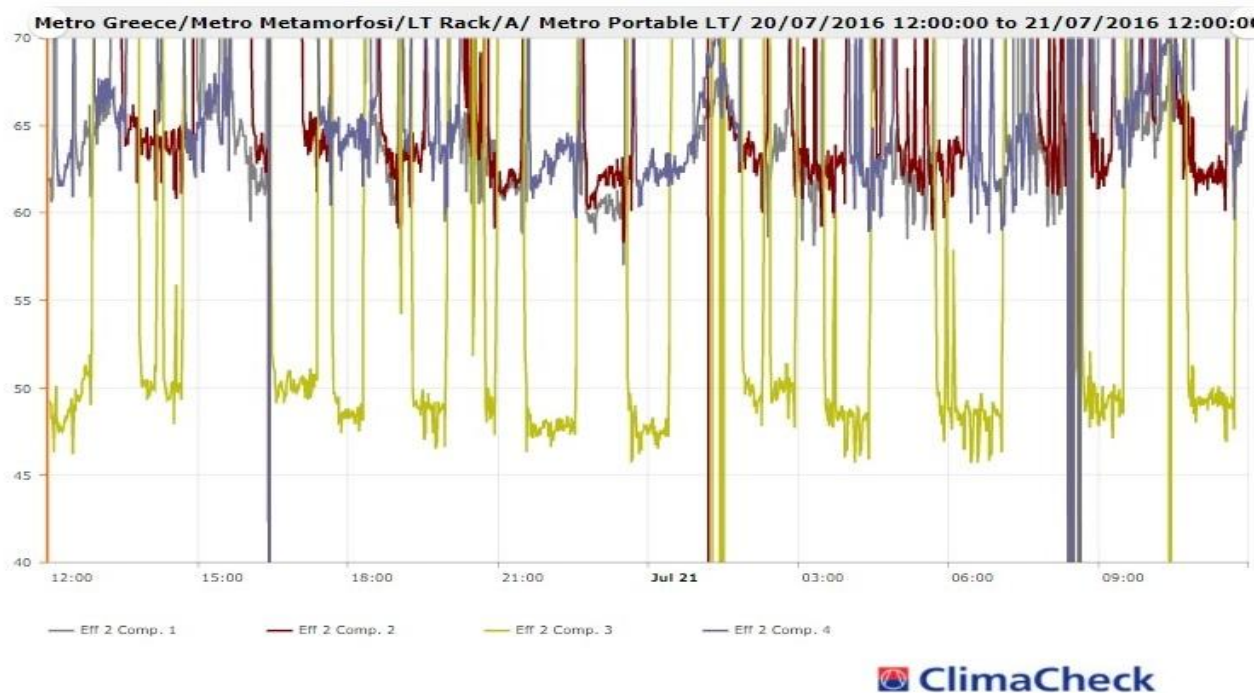
Ενέργειες εξοικονόμησης ενέργειας

Όπως τονίστηκε και στην ενότητα 1.3, τα σουπερμάρκετ αποτελούν έναν από τους πιο ενεργοβόρους τύπους εμπορικών κτιρίων. Συγκεκριμένα, το δεύτερο μεγαλύτερο έξοδο, μετά των μισθοδοσιών του ανθρώπινου δυναμικού, για την εταιρία που διευθύνει την αλυσίδα καταστημάτων, στην οποία ανήκει το μελετηθέν σουπερμάρκετ, αποτελεί η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των σουπερμάρκετ. Συνεπώς, για μια σύγχρονη εταιρία σουπερμάρκετ, η εξοικονόμηση ενέργειας στα καταστήματά της δεν αποτελεί μόνο περιβαλλοντική και νομοθετική υποχρέωση, αλλά αναγκαιότητα για την αειφόρο ανάπτυξή της και τη διασφάλιση της βιωσιμότητάς της.

Για το λόγο αυτό, το τμήμα ανάπτυξης και ενεργειακής εξοικονόμησης της εταιρίας, που διευθύνει το μελετηθέν σουπερμάρκετ, προχώρησε το προηγούμενο διάστημα σε ενέργειες εξοικονόμησης ενεργειακής κατανάλωσης στην ψυκτική εγκατάσταση του σουπερμάρκετ, οι οποίες παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

6.1 Απενεργοποίηση 3^{ου} συμπιεστή στο κύκλωμα LT

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.3, στο κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας LT, της ψυκτικής εγκατάστασης, χρησιμοποιούνται 4 ίδιων χαρακτηριστικών, σπειροειδείς συμπιεστές (scroll). Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι ο 3^{ος} κατά σειρά συμπιεστής, όταν μπαίνει σε λειτουργία είτε μόνος του, αντικαθιστώντας κάποιον άλλο συμπιεστή, είτε σε παράλληλη λειτουργία με κάποιον άλλον, λειτουργεί με μειωμένη απόδοση. Το γεγονός αυτό, αναδεικνύεται στο γράφημα του Σχήματος 6.1.



Σχήμα 6.1: Ισοδύναμοι β.α συμπιεστών κυκλώματος LT [50]

Στο Σχήμα 6.1 διαπιστώνουμε, ότι ο 3^{ος} κατά σειρά συμπιεστής (Comp.3), λειτουργεί με ισοδύναμο βαθμό απόδοσης κάτω του 50%, ενώ οι υπόλοιποι συμπιεστές λειτουργούν αντίστοιχα, σε επίπεδα άνω του 60%.

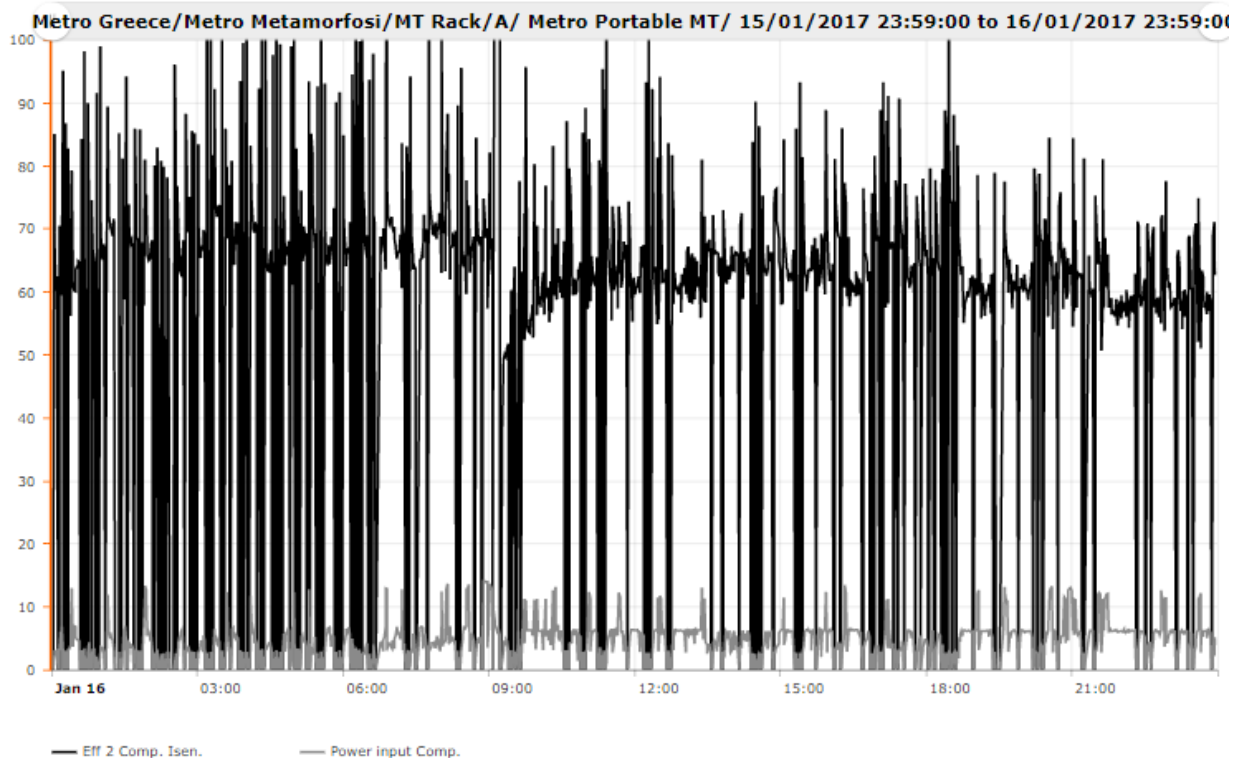
Για το λόγο αυτό, ο 3^{ος} συμπιεστής απενεργοποιήθηκε και τέθηκε σε λειτουργία αποκατάστασης, με αποτέλεσμα στο κύκλωμα LT να λειτουργούν πλέον οι εναπομείναντες τρεις συμπιεστές.

6.2 Ρύθμιση της συχνότητας έναρξης/διακοπής λειτουργίας των scroll συμπιεστών στο κύκλωμα MT

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.3, το κύκλωμα MT της ψυκτικής εγκατάστασης, χρησιμοποιεί 1 εμβολοφόρο συμπιεστή, ο οποίος λειτουργεί ανελλιπώς μεταβάλλοντας το σημείο λειτουργίας του μέσω συστήματος inverter και 4 scroll συμπιεστές, οι οποίοι μπαίνουν σε λειτουργία, λειτουργώντας παράλληλα με τον εμβολοφόρο, όταν υπάρχει απαίτηση μεγαλύτερου ψυκτικού φορτίου.

Διαπιστώθηκε ότι η συχνότητα εναλλαγής της λειτουργίας των scroll συμπιεστών είναι μεγάλη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι ανά τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της μέρας απαιτείται επιπλέον ψυκτικό φορτίο στα ψυγεία και στους ψυκτικούς θαλάμους του καταστήματος. Αμέσως αφότου καλυφθεί το επιπλέον ψυκτικό φορτίο, ο scroll συμπιεστής που ενεργοποιήθηκε διακόπτει τη λειτουργία του. Στην περίπτωση που μετά από λίγα λεπτά απαιτηθεί από την εγκατάσταση επιπλέον ψυκτικό φορτίο, ενεργοποιείται άλλος συμπιεστής scroll. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου το χρονικό διάστημα, που μεσολαβεί μεταξύ δύο χρονικών στιγμών απαίτησης επιπλέον ψυκτικού φορτίου, είναι

σχετικά σύντομο, η ενεργοποίηση νέου συμπιεστή, είναι ασύμφορη, τόσο ενεργειακά, όσο και οικονομικά, σε σχέση με τη διατήρηση του προηγούμενο scroll σε λειτουργία για ορισμένα λεπτά μετά την κάλυψη του επιπλέον φορτίου. Συνεπώς, στις 16/01/2017 και ώρα 09:00, ρυθμίζοντας τη συχνότητα έναρξης και διακοπής λειτουργίας των scroll συμπιεστών, σε μικρότερα επίπεδα, επιτεύχθηκε μείωση της συνολικής καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στη διάταξη των συμπιεστών. Το γεγονός αυτό αναδεικνύεται στο Σχήμα 6.2.



 ClimaCheck

Σχήμα 6.2: Μείωση συχνότητας έναρξης/διακοπής λειτουργίας scroll συμπιεστών του κυκλώματος MT [50]

Στο Σχήμα 6.2, αναπαριστάται ο ισοδύναμος ισεντροπικός βαθμός απόδοσης των συμπιεστών που βρίσκονται σε λειτουργία. Στο γράφημα λοιπόν, όταν αυτός ο βαθμός απόδοσης διατηρείται σταθερός, σημαίνει ότι η διάταξη των συμπιεστών βρίσκεται σε σημείο σταθερής κατάστασης λειτουργίας, δηλαδή δεν διακόπτεται, ούτε ενεργοποιείται η λειτουργία κάποιου εκ των scroll συμπιεστών. Αντίθετα τα τοπικά μέγιστα, παρατηρούνται όταν μεταβάλλεται η διάταξη λειτουργίας των συμπιεστών.

Από τις 09:00 και μετά, αφότου δηλαδή έγινε η ρύθμιση της συχνότητας έναρξης και διακοπής λειτουργίας των scroll συμπιεστών, παρατηρούνται στο γράφημα λιγότερα τοπικά μέγιστα και μεγαλύτερης διάρκειας καταστάσεις σταθερούς λειτουργίας της διάταξης των συμπιεστών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι πλέον οι scroll συμπιεστές παραμένουν για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια ενεργοί, εξοικονομώντας ηλεκτρική

ενέργεια, αποφεύγοντας τις απότομες διακοπές και επανενάρξεις λειτουργίας τους. Η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας επιβεβαιώνεται, μέσω της σύγκρισης, της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος στη διάταξη των συμπιεστών, πριν και μετά την αλλαγή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 6.2.

6.3 Ρύθμιση της υψηλής πίεσης λειτουργίας των κυκλωμάτων MT και LT

Όπως αναφέρεται στην ενότητα 4.2.2, η χαμηλή πίεση των κυκλωμάτων MT και LT, έχει ρυθμιστεί από τον υπεύθυνο ψυκτικό, σταθερή στα 3.9 bar για τη συντήρηση και στα 0.9 bar για την κατάψυξη αντίστοιχα (μανομετρικές πιέσεις). Οι χαμηλές πιέσεις των κυκλωμάτων MT και LT, είναι σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και ανεξάρτητες της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

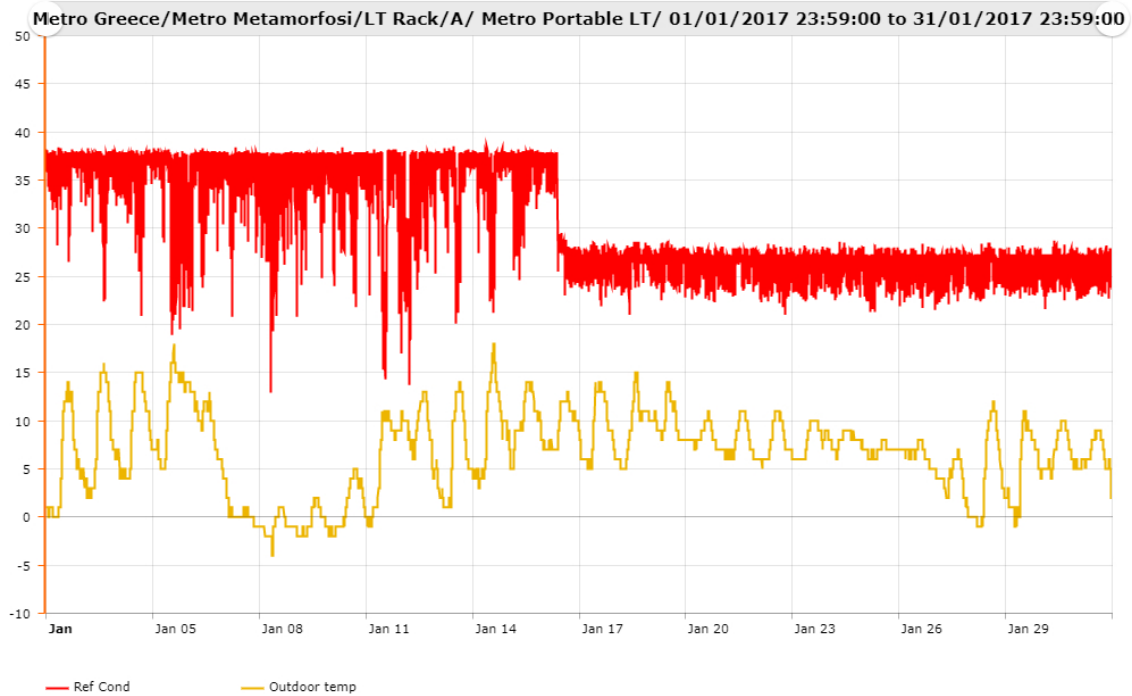
Το ίδιο συνέβαινε και με την υψηλή πίεση λειτουργίας των συμπυκνωτών, η οποία ρυθμιζόταν, κατά το παρελθόν, με τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η απαγωγή θερμότητας συμπύκνωσης στο εξωτερικό περιβάλλον. Είχε επιλεγεί δηλαδή ως θερμοκρασία συμπύκνωσης, η θερμοκρασία των 37°C, με ρύθμιση της υψηλής πίεσης λειτουργίας στα 17 bar.

Η ρύθμιση της υψηλής πίεσης λειτουργίας του ψυκτικού συστήματος, σε μία σταθερή τιμή για όλο το χρόνο, διασφαλίζει την απαραίτητη θερμοκρασιακή διαφορά, προκειμένου να υπάρξει απαγωγή της θερμότητας συμπύκνωσης στο περιβάλλον. Ωστόσο, λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών σε επίπεδο έτους, το χειμώνα, που σημειώνονται χαμηλά επίπεδα θερμοκρασιών, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η συμπύκνωση του ψυκτικού ατμού, σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από αυτή των 37°C, που είχε ρυθμιστεί το σύστημα. Επομένως, η διάταξη των συμπιεστών σπαταλούσε ηλεκτρική ισχύ, για τη συμπίεση του ψυκτικού ατμού, σε πίεση πολύ μεγαλύτερη από αυτή που πραγματικά χρειαζόταν, ώστε να πραγματοποιηθεί η συμπύκνωσή του.

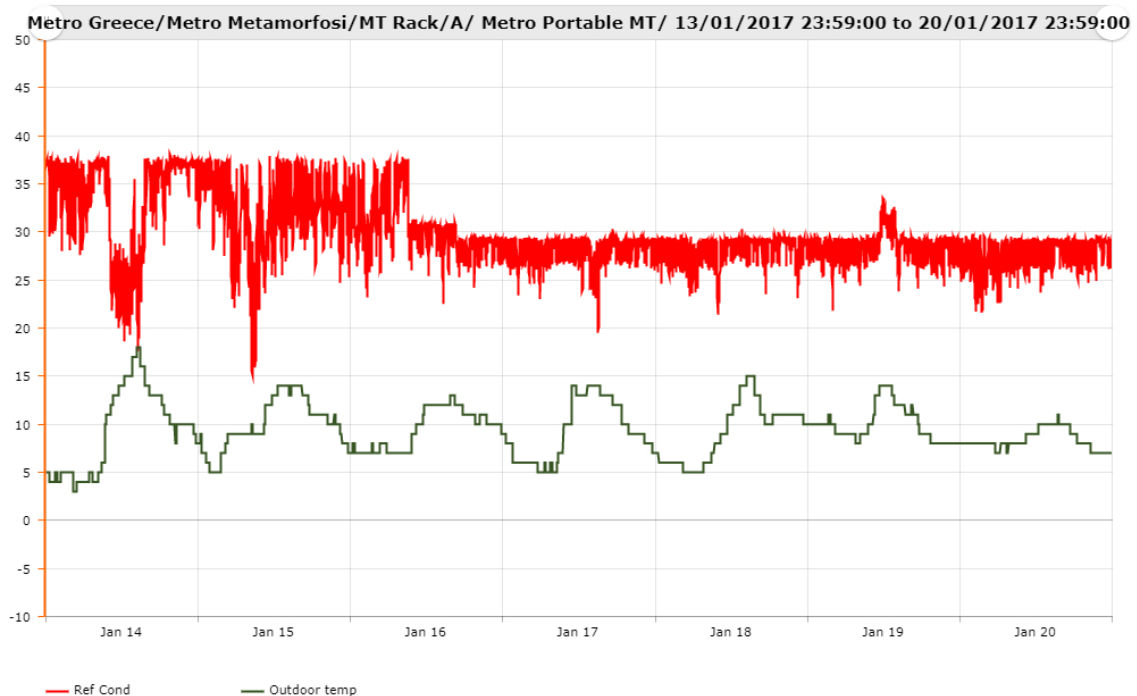
Για το λόγο αυτό, στις 16/01/2017 και ώρα 09:00, ρυθμίστηκε η υψηλή πίεση λειτουργίας των κυκλωμάτων MT και LT στα 12 bar, ώστε να πραγματοποιείται η συμπύκνωση του ψυκτικού ατμού στους 27°C. Με σκοπό να πραγματοποιηθεί, η αντίστροφη διαδικασία, ώστε να ρυθμιστεί η υψηλή πίεση στα 15 bar, γύρω στα μέσα Μαΐου, το έτος χωρίζεται, κατά βάση, σε δύο περιόδους, όσον αφορά τη ρύθμιση της υψηλής πίεσης. Στην πρώτη περίοδο, που περιλαμβάνει τους μήνες από Νοέμβριο μέχρι και Απρίλιο, η υψηλή πίεση ρυθμίζεται στα 12 bar, ενώ για τη δεύτερη περίοδο, που περιλαμβάνει του μήνες από Μάιο έως και Οκτώβριο, η υψηλή πίεση ρυθμίζεται στα 15 bar.

Η αλλαγή της υψηλής πίεσης λειτουργίας στα κυκλώματα MT και LT της ψυκτικής εγκατάστασης, οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης και κατ' επέκταση στη μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ θερμοκρασίας συμπύκνωσης και εξωτερικής

θερμοκρασίας. Γραφήματα των δύο αυτών θερμοκρασιών για τα δύο κυκλώματα MT και LT, παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.3 και 6.4.



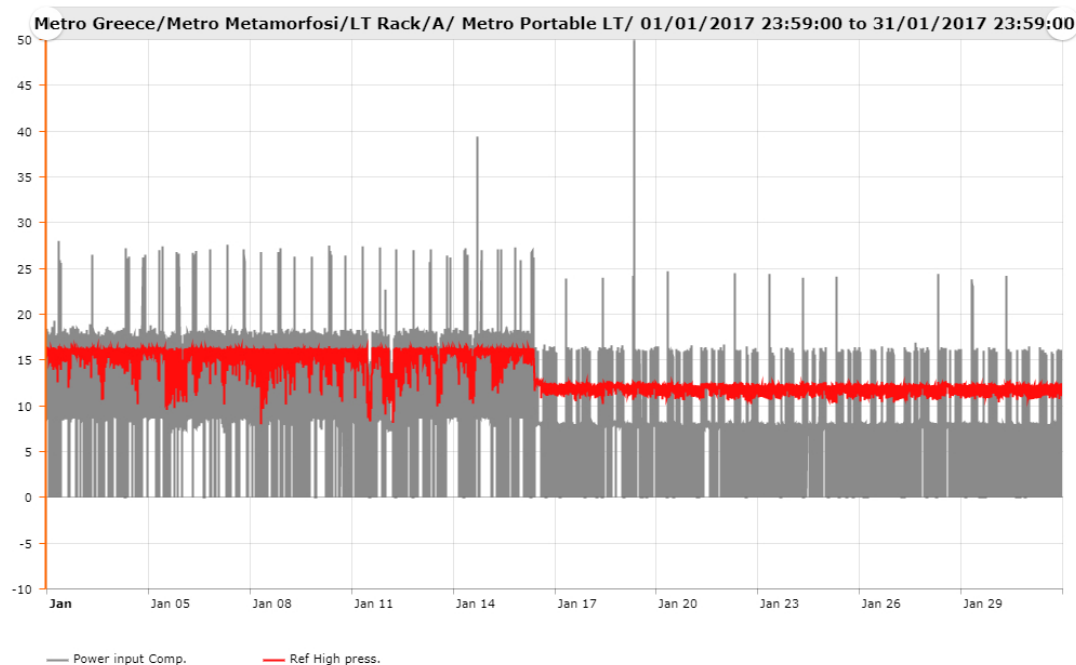
Σχήμα 6.3: Ρύθμιση θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο κύκλωμα LT [50]



Σχήμα 6.4: Ρύθμιση θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο κύκλωμα MT [50]

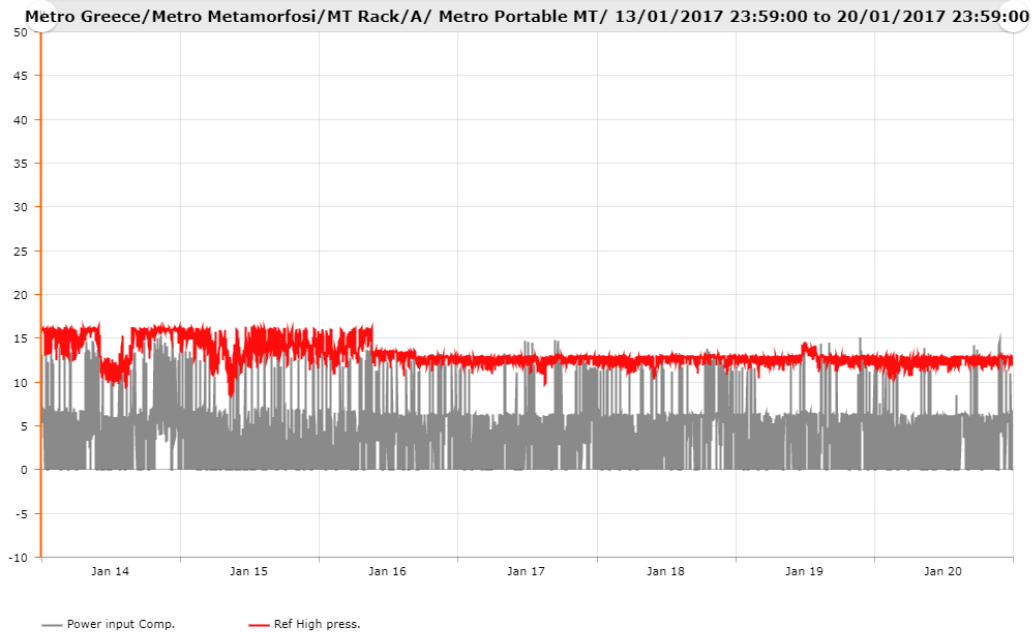
Στο Σχήμα 6.3, είναι εμφανής η μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης σε σταθερή θερμοκρασία, στο κύκλωμα LT. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει απόλυτα για το κύκλωμα MT του Σχήματος 6.4, όπου στο γράφημα παρατηρούνται μεταπτώσεις της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, τόσο πριν, όσο και μετά την αλλαγή, οι οποίες μάλιστα εμφανίζουν εξάρτηση με την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό συμβαίνει διότι, η ρύθμιση της πίεσης και της θερμοκρασίας συμπύκνωσης αφορά, μόνο τους συμπιεστές τύπου scroll και όχι τον εμβολοφόρο. Το σημείο λειτουργίας του εμβολοφόρου, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.3, ρυθμίζεται μέσω συστήματος ελέγχου inverter, ο οποίος μεταβάλλει δυναμικά την πίεση συμπύκνωσης, ανάλογα με την εξωτερική θερμοκρασία. Επομένως, στο κύκλωμα MT, μόνο το σημείο λειτουργίας των scroll συμπιεστών μεταβάλλεται, οι οποίοι όμως λειτουργούν συμπληρωματικά του εμβολοφόρου, ο οποίος λειτουργώντας ανελλιπώς, καθορίζει τη θερμοκρασία συμπύκνωσης. Αντίθετα, στο κύκλωμα LT, όπου δε γίνεται χρήση συστήματος inverter, η μεταβολή του σημείου λειτουργίας των συμπιεστών scroll, επηρεάζει άμεσα τη θερμοκρασία συμπύκνωσης όπως διαπιστώθηκε παραπάνω. Επίσης, η λειτουργία των ψυκτικών συστημάτων σε χαμηλότερες πιέσεις συμπύκνωσης ή μάλλον πιέσεις συμπύκνωσης οι οποίες ενδείκνυνται για τη βέλτιστη οικονομοτεχνικά απαγωγή θερμότητας συμπύκνωσης στο εξωτερικό περιβάλλον, οδηγεί στην εξοικονόμηση ενέργειας, μέσω της μείωσης της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος στους συμπιεστές.

Τα γραφήματα ηλεκτρικής ισχύος των κυκλωμάτων MT και LT, παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.5 και 6.6 αντίστοιχα, σε συνδυασμό με τη μεταβολή της πίεσης υψηλής λειτουργίας των κυκλωμάτων αυτών.



 ClimaCheck

Σχήμα 6.5: Γράφημα υψηλής πίεσης λειτουργίας και ηλεκτρικής ισχύος στη διάταξη συμπιεστών του κυκλώματος LT [50]



Σχήμα 6.6: Γράφημα υψηλής πίεσης λειτουργίας και ηλεκτρικής ισχύος στη διάταξη συμπιεστών του κυκλώματος MT [50]

Στο Σχήμα 6.5, όσον αφορά το κύκλωμα LT, είναι εμφανής η μείωση της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος και η αντίστοιχη εξοικονόμηση ενέργειας, μετά τη μείωση της υψηλής πίεσης λειτουργίας. Ωστόσο, το αντίστοιχο δε συμβαίνει στο γράφημα του Σχήματος 6.6, για το κύκλωμα MT, όπου ναι μεν παρατηρείται μια σχετική μείωση και σταθεροποίηση της πίεσης συμπύκνωσης, λόγω της εξάλειψης των υψηλών πιέσεων στις οποίες ήταν ρυθμισμένοι οι συμπιεστές, ωστόσο δε αυτή η μεταβολή δεν επιδρά σημαντικά στην καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύος, η οποία κυμαίνεται σε σταθερά επίπεδα. Αυτό οφείλεται και πάλι, στην ύπαρξη του inverter, ο οποίος ρυθμίζει και μεταβάλλει το σημείο λειτουργίας του εμβολοφόρου.

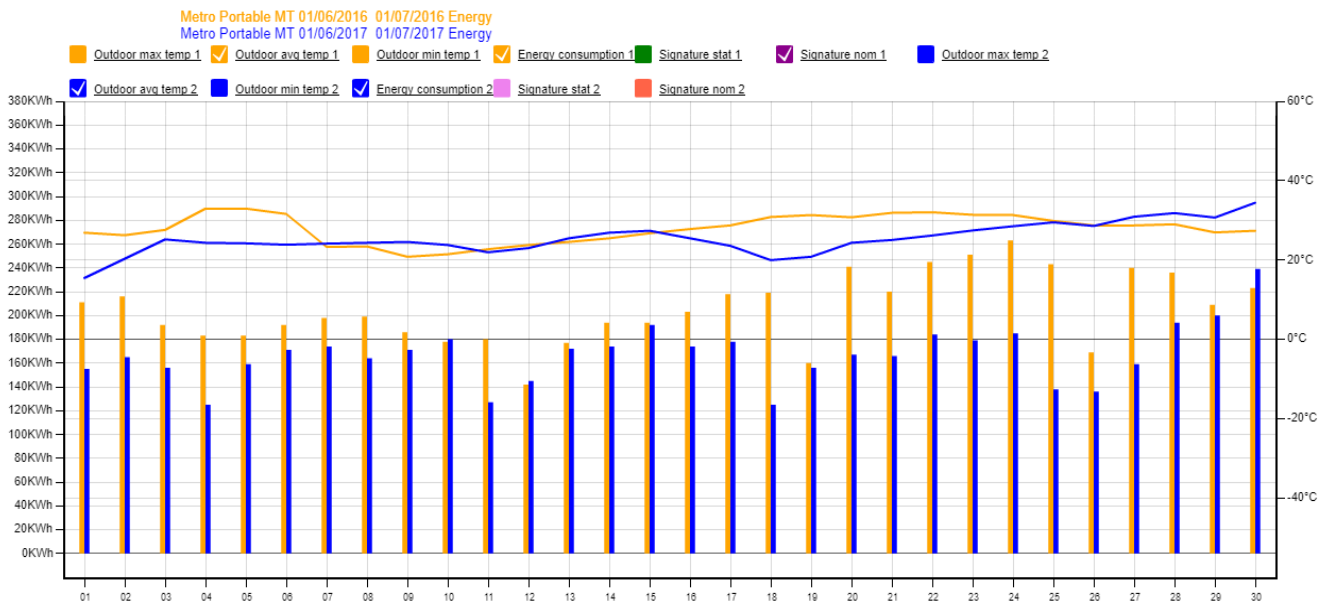
6.4 Αποτελέσματα

Οι παραπάνω ενέργειες εφαρμόστηκαν στην ψυκτική εγκατάσταση του μελετηθέντος σουπερμάρκετ και οδήγησαν, τόσο στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, όσο και στη μείωση του κόστους λειτουργίας της ψυκτικής εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, από τους υπεύθυνους μηχανικούς του τμήματος ανάπτυξης και ενεργειακής εξοικονόμησης της εταιρίας, που διευθύνει το μελετηθέν σουπερμάρκετ, υπολογίστηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

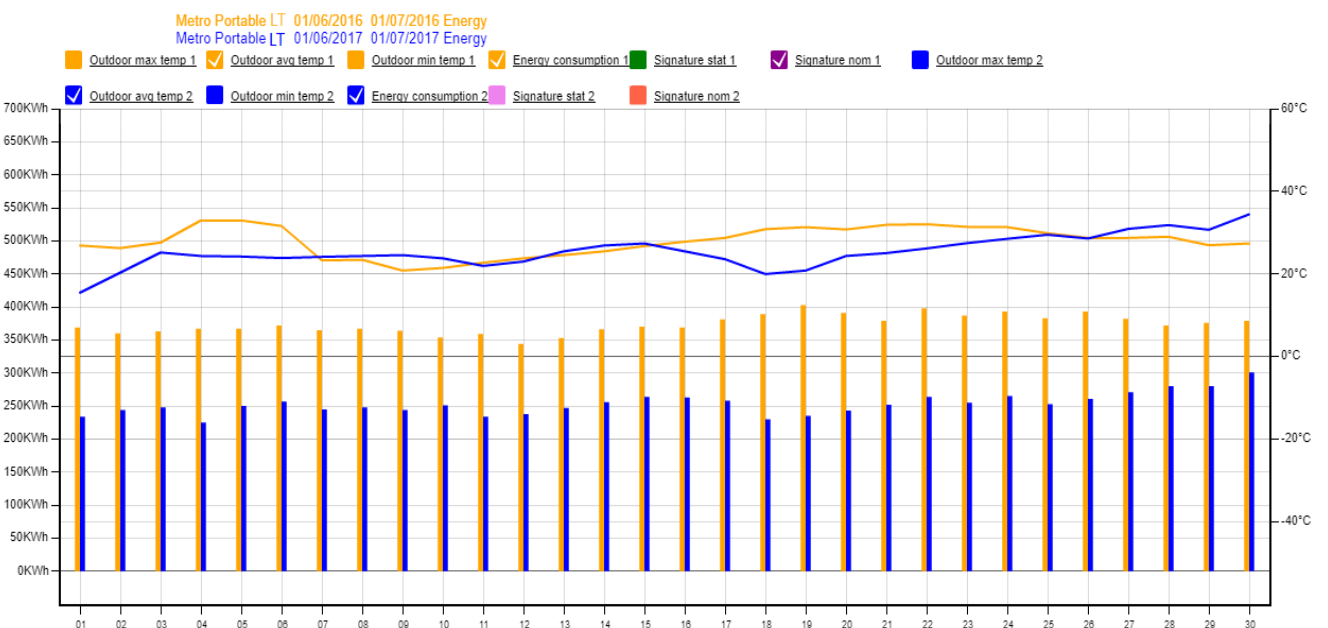
- i) Μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος κατά 12.78%, στο κύκλωμα συντήρησης (MT) και κατά 29.55%, στο κύκλωμα κατάψυξης (LT).
- ii) Αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς COP κατά 16.8%, στο σύστημα μέσης θερμοκρασίας (MT) και κατά 23%, στο σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας (LT).

- iii) Συνολική ετήσια εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας 7644.48 kWh, στο κύκλωμα συντήρησης (MT) και 37214.68 kWh, στο κύκλωμα κατάψυξης (LT).
- iv) Συνολική ετήσια οικονομική εξοικονόμηση 825.6 €, στο κύκλωμα συντήρησης (MT) και 4,019.19 €, στο κύκλωμα κατάψυξης (LT).

Η ενεργειακή εξοικονόμηση γίνεται αντιληπτή, στα Σχήματα 6.7, 6.8, στα οποία παρουσιάζονται τα ημερήσια επίπεδα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, για το μήνα Ιούνιο του 2016 σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρήσεις για τον Ιούνιο του 2017.



Σχήμα 6.7: Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης Ιουνίων 2016 και 2017 στο κύκλωμα MT [50]



Σχήμα 6.8: Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης Ιουνίων 2016 και 2017 στο κύκλωμα LT [50]

Στα γραφήματα, των Σχημάτων 6.7 και 6.8, παρατηρούμε, ότι στο κύκλωμα LT εμφανίζεται μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση, από το κύκλωμα MT. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός, ότι στο κύκλωμα MT, υπάρχει ο εμβολοφόρος συμπιεστής, ο οποίος ρυθμίζεται μέσω inverter και επειδή λειτουργεί ανελλιπώς, αντιπροσωπεύει ουσιαστικά τη λειτουργία ολόκληρης της διάταξης συμπιεστών του κυκλώματος MT. Επομένως, δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό το κύκλωμα MT, από την αλλαγή της υψηλής πίεσης λειτουργίας του συστήματος. Αυτό γίνεται κατανοητό, παρατηρώντας την τελευταία μέρα του γραφήματος στο κύκλωμα MT, όπου παρά της ενέργειες εξοικονόμησης, έχουμε μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση το 2017, λόγω μεγαλύτερης εξωτερικής θερμοκρασίας, η οποία και επηρεάζει το σημείο λειτουργίας του εμβολοφόρου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ανάλυση ψυκτικής εγκατάστασης

7.1 Επιβεβαίωση ακριβούς λειτουργίας υπολογιστικού μοντέλου

Προκειμένου να είμαστε σε θέση να χρησιμοποιήσουμε το υπολογιστικό μοντέλο υπολογισμού των ηλεκτρικών καταναλώσεων της ψυκτικής εγκατάστασης, κρίνεται απαραίτητη προηγουμένως η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του. Το υπολογιστικό μοντέλο ακολουθεί ουσιαστικά τη διαδικασία επίλυσης των θερμοδυναμικών εξισώσεων του ψυκτικού κύκλου, επιλύοντας τις εξισώσεις αυτές στο πρόγραμμα επίλυσης (EES). Επομένως, δεδομένων των μετρήσεων του αναλυτή απόδοσης, υπολογίζονται, μέσω του EES, τα απαιτούμενα θερμοδυναμικά μεγέθη απόδοσης του ψυκτικού κύκλου, και στη συνέχεια συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του αναλυτή απόδοσης. Εφόσον επιβεβαιωθεί η ακριβής λειτουργία του υπολογιστικού μοντέλου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα, που αυτό εξάγει, για την περαιτέρω ανάλυση των ψυκτικών κυκλωμάτων μέσης (MT) και χαμηλής θερμοκρασίας (LT) της ψυκτικής εγκατάστασης.

7.1.1 Διαδικασία επιβεβαίωσης ακρίβειας υπολογιστικού μοντέλου

Για την επιβεβαίωση της ακρίβειας του υπολογιστικού μοντέλου, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά, προκειμένου να επιβεβαιώσουμε τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου, ακολουθείται η θερμοδυναμική ανάλυση του ψυκτικού κύκλου, όπως αυτή παρουσιάζεται στην ενότητα 5.1. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες θερμοδυναμικές εξισώσεις, ισχύουν για σημεία μόνιμης κατάστασης (steady state). Πρακτικά αυτό δεν συμβαίνει στην υπάρχουσα ψυκτική εγκατάσταση, καθώς το ψυκτικό φορτίο είναι συνεχώς μεταβαλλόμενο ανάλογα με τις ανάγκες του καταστήματος. Επιλέγονται επομένως, για τα κυκλώματα μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας, σημεία (χρονικές στιγμές), τα οποία ανήκουν στο κέντρο χρονικών διαστημάτων, κατά τα οποία παρατηρείται μικρή μεταβολή των θερμοδυναμικών μεταβλητών του ψυκτικού κυκλώματος. Τα θερμοδυναμικά μεγέθη, τα οποία λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή των χρονικών διαστημάτων μόνιμης κατάστασης, είναι η θερμοκρασία εξόδου της διάταξης συμπιεστών και ο ισοδύναμος βαθμός απόδοσής της, τα οποία πρέπει να είναι σταθερά. Τα σημεία αυτά, θεωρούνται

αντιπροσωπευτικά σημεία μόνιμων καταστάσεων και είναι δυνατόν να μελετηθούν με χρήση των θερμοδυναμικών εξισώσεων της ενότητας 5.1.

Ακολούθως, για κάθε ένα από τα επιλεγμένα σημεία μόνιμης κατάστασης, λαμβάνονται από τις μετρήσεις του αναλυτή απόδοσης, τα ακόλουθα μεγέθη:

- Eff. Comp. Isen (%): η_{is} του συμπιεστή που βρίσκεται σε λειτουργία
- Eff. Comp.1 (%): ισοδύναμος β.α 1^{ou} συμπιεστή ($\eta_{is} \cdot \eta_m$)
- Ref. Evap ($^{\circ}C$): θερμοκρασία ατμοποίησης
- Ref. Cond ($^{\circ}C$): θερμοκρασία συμπύκνωσης
- Comp.out ($^{\circ}C$): θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή
- Sub cool total (K): υπόψυξη
- Superheat(K): υπερθέρμανση
- Cap. Cool (kW): ψυκτικό φορτίο
- Power in. Comp. (kW): προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς στο συμπιεστή
- COP Cool Ref.: ψυκτικός COP

Η σχετικές θερμικές απώλειες (RHL), όπως αναφέρεται στην ενότητα 5.2.3, λαμβάνονται 5%. Επομένως για τον πραγματικό ισεντροπικό βαθμό απόδοσης έχουμε, (βλ. εξ.(5.2.6)):

$$\eta_{is} = \text{eff}_{isen} \cdot (1 - \text{RHL})$$

Ενώ, για το μηχανικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή, από την εξ.(5.2.7), έχουμε:

$$\eta_m = \frac{\text{eff}_{comp}}{\text{eff}_{isen}}$$

Έχοντας υπολογίσει λοιπόν τον ισεντροπικό και το μηχανικό βαθμό απόδοσης της διάταξης συμπιεστών που βρίσκεται σε λειτουργία και λαμβάνοντας από μετρήσεις τα παραπάνω μεγέθη, είμαστε πλέον σε θέση, να ακολουθήσουμε μέχρι τέλους τη διαδικασία της θερμοδυναμικής ανάλυσης του ψυκτικού κύκλου. Οι απαραίτητοι υπολογισμοί, πραγματοποιούνται στο λογισμικό επίλυσης EES.

Συνεπώς μέσω του EES, υπολογίζουμε τη θεωρητικά προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ στη διάταξη συμπιεστών (P_{el}), καθώς και το θεωρητικό ψυκτικό συντελεστή συμπεριφοράς (COP). Οι υπολογιζόμενες τιμές των P_{el} και COP, συγκρίνονται με τις αντίστοιχες παρεχόμενες τιμές του αναλυτή απόδοσης, Power in. Comp. και COP Cool Ref αντίστοιχα.

Για κάθε ένα σημείο μόνιμης κατάστασης, υπολογίζεται η ποσοστιαία απόκλιση υπολογιζόμενης και μετρούμενης τιμής, τόσο για P_{el} και COP, καθώς και η μέση τιμή των απολύτων τιμών των ποσοστιαίων αποκλίσεων. Εάν αυτή η τιμή είναι μικρότερη του 1.5%, τότε μπορούμε να πούμε με ασφάλεια ότι τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου αντιστοιχούν ικανοποιητικώς στην πραγματικότητα. Επομένως, μπορούμε να χρησιμοποιούμε με ασφάλεια το μοντέλο που αναπτύξαμε στο EES, για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών καταναλώσεων των κυκλωμάτων MT και LT.

7.1.2 Κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας (MT)

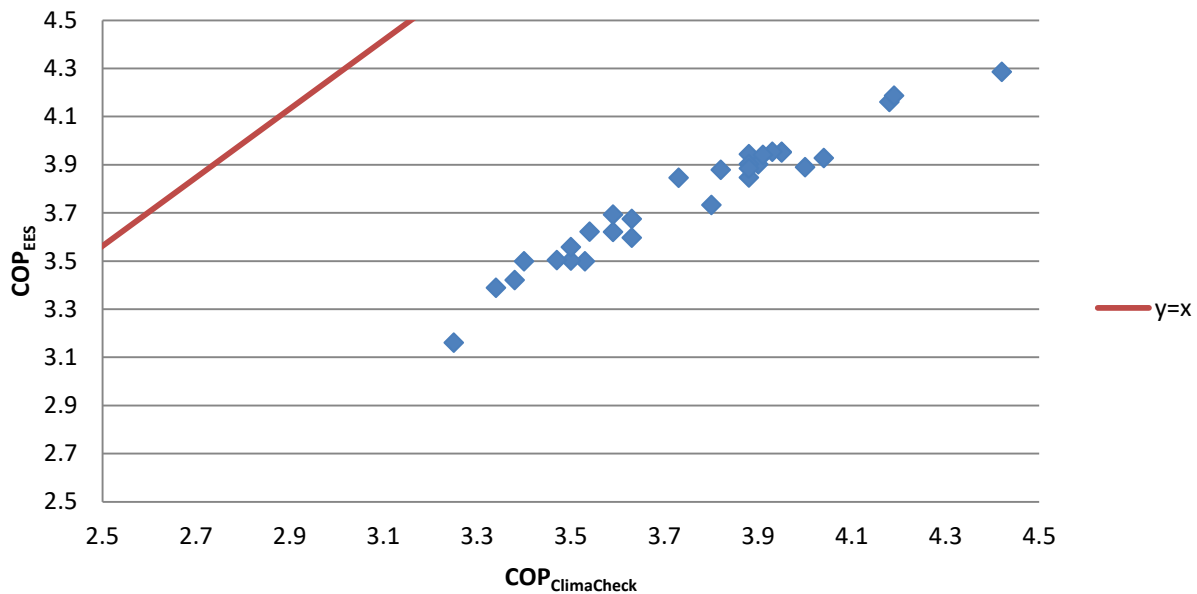
Στο ψυκτικό κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας (MT), όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.3 και επιβεβαιώθηκε στις ενότητες 5.2.4.1 και 5.2.4.3, ο εμβολοφόρος συμπιεστής, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με σύστημα inverter, λειτουργεί ανελλιπώς, όταν απαιτείται παραγωγή ψυκτικού φορτίου στο κύκλωμα MT. Σε χρονικά διαστήματα κατά τα οποία απαιτείται αύξηση της ψυκτικής ισχύος, με αποτέλεσμα την αύξηση του φορτίου συμπίεσης σε σημείο εκτός λειτουργίας του χάρτη αποδοτικής λειτουργίας του εμβολοφόρου (βλ. Παράρτημα Α), ενεργοποιούνται ένας, δύο ή και όλοι οι scroll συμπιεστές, ανάλογα με το μέγεθος του ψυκτικού φορτίου και λειτουργούν παράλληλα με τον εμβολοφόρο.

Από τη μελέτη της ψυκτικής εγκατάστασης παρατηρήθηκε, ότι τα χρονικά διαστήματα, στα οποία οι scroll συμπιεστές λειτουργούν συμπληρωματικά με τον εμβολοφόρο, είναι μικρής διάρκειας (1-2 λεπτά της ώρας) και εμφανίζονται αραιά κατά τη διάρκεια της μέρας. Επομένως, για την ανάλυση του κυκλώματος MT, λαμβάνουμε υπόψη μόνο τη λειτουργία του εμβολοφόρου συμπιεστή, αμελώντας τη λειτουργία των συμπιεστών scroll. Η θεώρηση αυτή, κρίνεται αρκετά αντιπροσωπευτική σε επίπεδο ημερήσιας λειτουργίας και ταυτίζεται σχεδόν με την πραγματική ετήσια λειτουργία του κυκλώματος MT.

Συνεπώς, για την επιβεβαίωση της ακρίβειας του υπολογιστικού μοντέλου στην ανάλυση του κυκλώματος MT, λαμβάνεται υπόψη μόνο η λειτουργία του εμβολοφόρου συμπιεστή, ο οποίος λειτουργεί ανελλιπώς. Ωστόσο, η σύνδεση του εμβολοφόρου με σύστημα ελέγχου inverter, δημιουργεί προβλήματα στην εκλογή χρονικών διαστημάτων μόνιμης κατάστασης και κατ' επέκταση στην επιλογή κατάλληλων σημείων για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της μετρητικής διάταξης. Αυτό συμβαίνει, διότι ο inverter μεταβάλλει το σημείο λειτουργίας του εμβολοφόρου κάθε λεπτό, ανάλογα με τις ανάγκες της ψυκτικής εγκατάστασης. Επομένως, δεν εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της μέρας χρονικά διαστήματα, κατά τα οποία τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του ψυκτικού κύκλου, στο κύκλωμα MT, παραμένουν σταθερά. Για το λόγο αυτό, τα χρονικά διαστήματα μόνιμης κατάστασης, επιλέγονται με πιο ελαστικά όρια. Συγκεκριμένα, ικανοποιητικές θεωρούνται οι διαφορές των ακραίων σημείων των χρονικών διαστημάτων, 0.5°C για τη θερμοκρασία εξόδου της διάταξης συμπιεστών και 1% για τον ισοδύναμο βαθμό απόδοσης του συμπιεστή.

Για την επιβεβαίωση της ακρίβειας του υπολογιστικού μοντέλου, επιλέχθηκαν 30 σημεία μόνιμης κατάστασης, για τα οποία ακολουθήθηκε η διαδικασία που παρουσιάστηκε στην ενότητα 7.1.1. Λόγω της απευθείας συσχέτισης του P_{el} με το COP, μέσω της εξίσωσης (5.1.10), αρκεί η σύγκριση σε διάγραμμα μόνο των τιμών του μοντέλου (EES) και των μετρήσεων (Climacheck) του COP, η οποία πραγματοποιείται στο Σχήμα 7.1.

Κύκλωμα ΜΤ - Εμβολοφόρος



Σχήμα 7.1: Σύγκριση υπολογιζόμενου και μετρούμενου COP στο κύκλωμα ΜΤ

Από το Σχήμα 7.1, παρατηρούμε πως οι θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές για το COP, μέσω της χρήσης των θερμοδυναμικών εξισώσεων, προσεγγίζουν ικανοποιητικά της παρεχόμενες από τη μετρητική διάταξη αντίστοιχες τιμές. Το γεγονός αυτό, επιβεβαιώνεται λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέγιστη απόλυτη διαφορά των παραπάνω τιμών είναι της τάξης του 3% και η μέση τιμή των απολύτων τιμών των ποσοστιαίων αποκλίσεων είναι 1.3%.

Συνεπώς, μπορούμε να θεωρήσουμε με ασφάλεια ότι όσον αφορά το κύκλωμα ΜΤ, τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Λαμβάνουμε λοιπόν ως ισηντροπικό και μηχανικό βαθμό απόδοσης του εμβολοφόρου, τις μέσες τιμές των μεγεθών στα παραπάνω σημεία μόνιμης κατάστασης. Έτσι για τον εμβολοφόρο έχουμε:

$$\eta_{is} = 65\%$$

$$\eta_m = 98\%$$

Οι παραπάνω τιμές θεωρούνται σταθερές και λαμβάνονται δεδομένες για τη μετέπειτα ανάλυση του κυκλώματος ΜΤ

7.1.3 Κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας (LT)

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.3, το κύκλωμα της κατάψυξης, αποτελείται από 4 ίδιων χαρακτηριστικών συμπιεστές τύπου scroll. Μετά τη διακοπή λειτουργίας του 3^{ου} κατά σειρά συμπιεστή, για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας (βλ. ενότητα 6.1), στο κύκλωμα LT, κάθε στιγμή είναι δυνατόν να λειτουργούν μέχρι και τρεις συμπιεστές ταυτόχρονα, ανάλογα με τις ψυκτικές ανάγκες του καταστήματος. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της ημέρας,

το βασικό σχήμα λειτουργίας αφορά έναν ή δύο συμπιεστές, στο οποίο σχήμα εναλλάσσονται και οι τρεις συμπιεστές scroll.

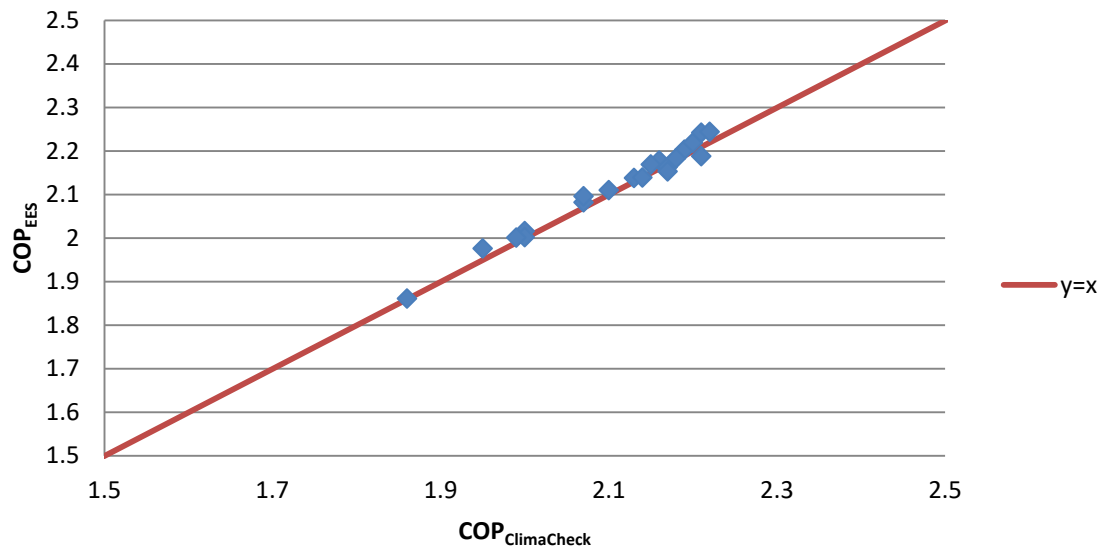
Σε αντίθεση με την περίπτωση του κυκλώματος MT, στο οποίο η παρουσία του inverter δυσκολεύει σε μεγάλο βαθμό την εκλογή χρονικών διαστημάτων μόνιμης κατάστασης, στην περίπτωση του κυκλώματος LT δεν υπάρχει σύστημα inverter και η εκλογή χρονικών διαστημάτων και στη συνέχεια σημείων μόνιμης κατάστασης είναι σχετικά εύκολη και μάλιστα επιλέγονται χρονικά διαστήματα, κατά τα οποία η θερμοκρασία εξόδου των συμπιεστών και ο ισοδύναμός τους βαθμός απόδοσης είναι σχεδόν σταθερά.

Επομένως για τη μελέτη του κυκλώματος LT, είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψη και τους έξι συνδυασμούς λειτουργίας των συμπιεστών, απομονώνοντάς τους ξεχωριστά. Το πρόβλημα όμως που προκύπτει στην ανάλυση αυτή, αφορά το διαχωρισμό των παροχών, όταν λειτουργούν δύο συμπιεστές ταυτόχρονα. Δεδομένου, ότι οι εν λόγω συμπιεστές είναι ίδιου τύπου και έχουν ακριβώς τα ίδια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, κάνουμε τη θεώρηση, πως όταν λειτουργούν δύο εξ αυτών παράλληλα, η παροχή του ψυκτικού μέσου, εισερχόμενη στη διάταξη συμπιεστών, διαχωρίζεται στο μισό της στην είσοδο κάθε συμπιεστή.

Επίσης, στην περίπτωση που λειτουργούν δύο συμπιεστές ταυτόχρονα, το μέγεθος $Eff.Compr.Isen$, που παρέχει ο αναλυτής απόδοσης, εκφράζει τον ισοδύναμο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης των δύο αυτών συμπιεστών. Επομένως, δεν είναι δυνατόν να λάβουμε από εκεί τους ισεντροπικούς βαθμούς απόδοσης των δύο συμπιεστών. Τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται, λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία στην έξοδο κάθε ενός συμπιεστή, μέσω της εξίσωσης (5.1.1). Στη συνέχεια ακολουθείται για κάθε ένα συμπιεστή ξεχωριστά η διαδικασία, που παρουσιάστηκε στην ενότητα 7.1.1. Τέλος, σημειώνεται, ότι για τον υπολογισμό της συνολικής προσδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος στη διάταξη των συμπιεστών, αθροίζονται τα επιμέρους προσδιδόμενα ποσά ισχύος σε κάθε εν λειτουργία συμπιεστή.

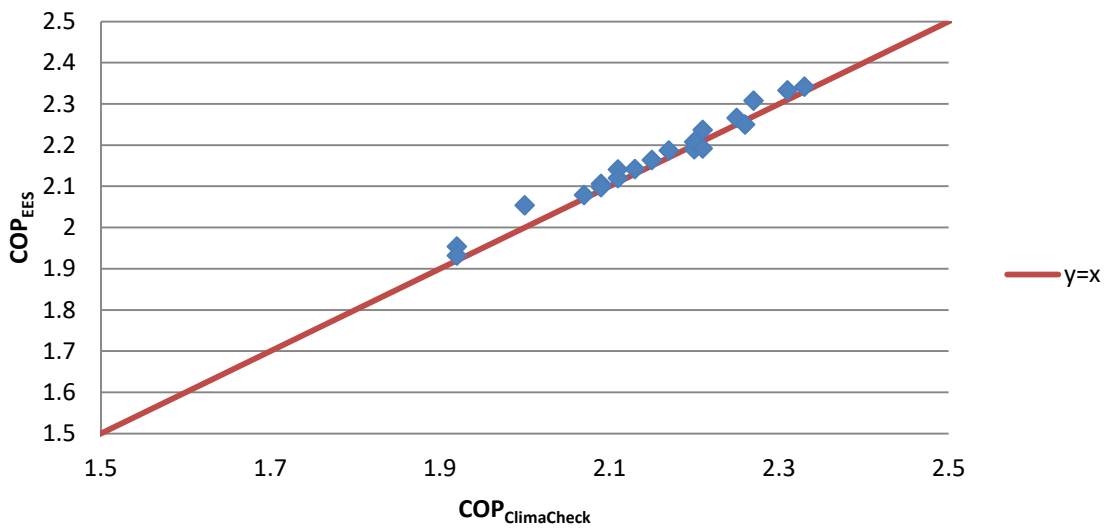
Για την επιβεβαίωση της ακρίβειας του υπολογιστικού μοντέλου, επιλέχθηκαν 20 σημεία μόνιμης κατάστασης, για κάθε ένα από τα έξι βασικά σχήματα λειτουργίας της διάταξης συμπιεστών. Στη συνέχεια, ακολουθήθηκε η διαδικασία που παρουσιάστηκε στην ενότητα 7.1.1. Λόγω της απευθείας συσχέτισης του P_{el} με το COP, μέσω της εξίσωσης (5.1.10), αρκεί η σύγκριση σε διαγράμματα μόνο των υπολογιζόμενων τιμών (EES) και των μετρήσεων (Climacheck) του COP, Σχήματα 7.2-7.7.

Scroll συμπιεστής 1



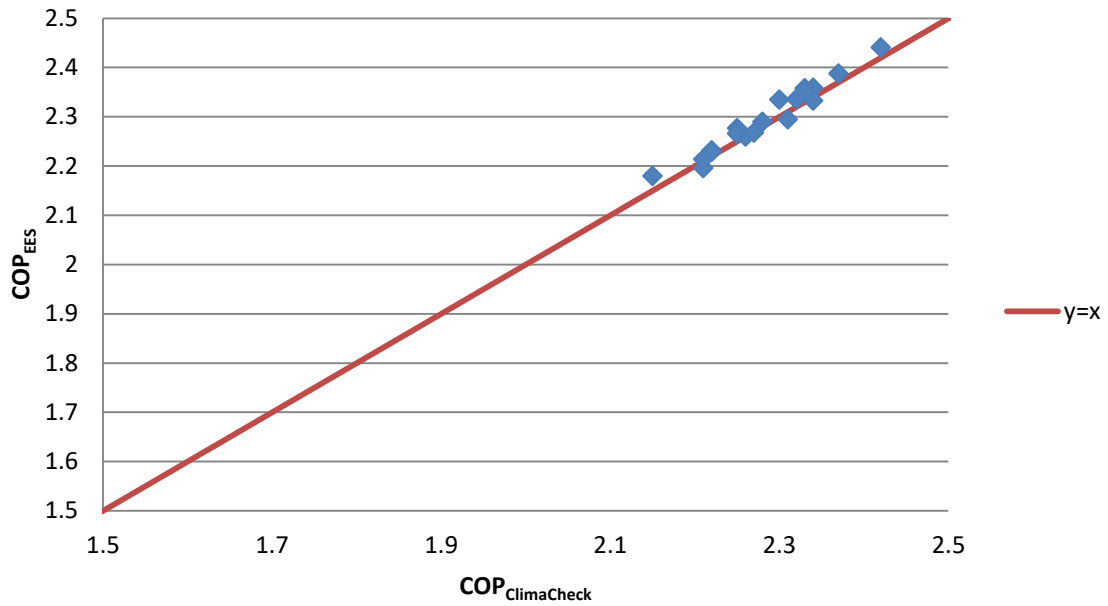
Σχήμα 7.2: Σύγκριση υπολογιζόμενου και μετρούμενου COP στο κύκλωμα LT, για την περίπτωση λειτουργίας μόνο του 1^{ου} συμπιεστή

Scroll συμπιεστής 2



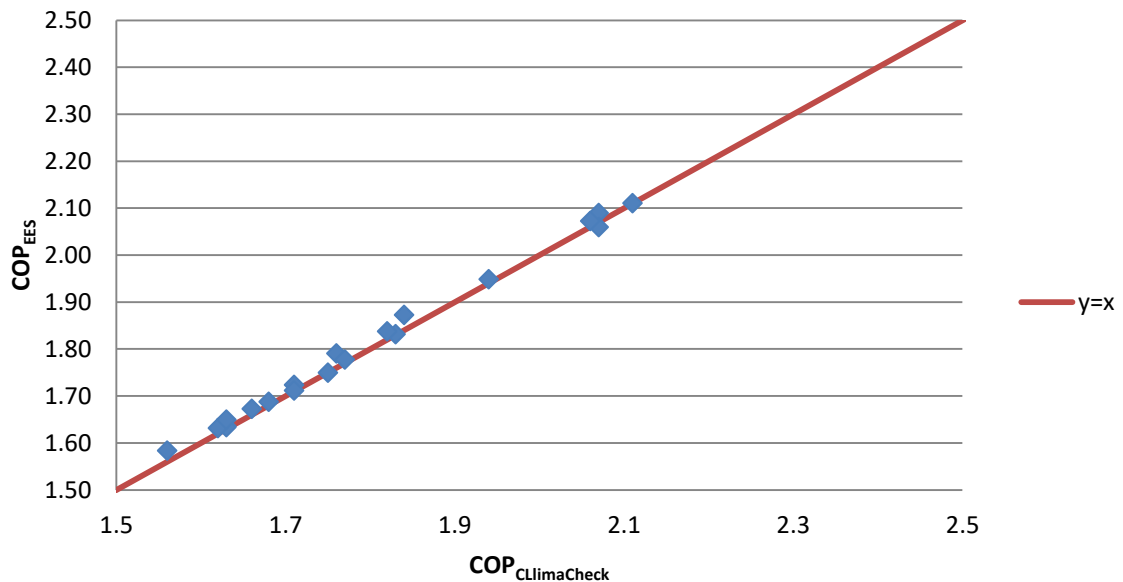
Σχήμα 7.3: Σύγκριση υπολογιζόμενου και μετρούμενου COP στο κύκλωμα LT, για την περίπτωση λειτουργίας μόνο του 2^{ου} συμπιεστή

Scroll συμπιεστής 4



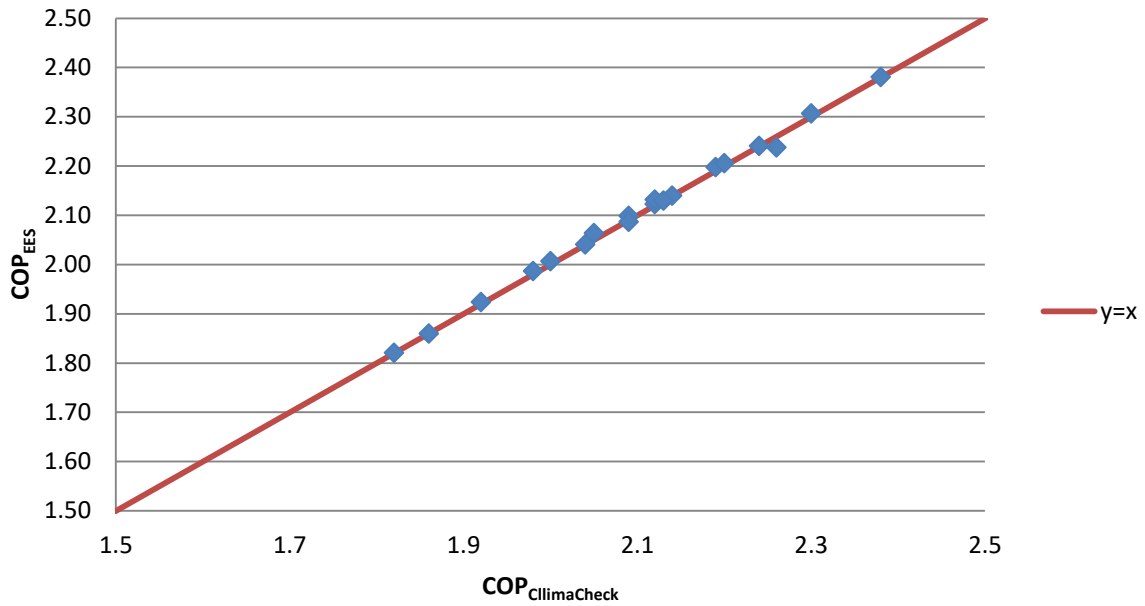
Σχήμα 7.4: Σύγκριση υπολογιζόμενου και μετρούμενου COP στο κύκλωμα LT, για την περίπτωση λειτουργίας μόνο του 4^{ου} συμπιεστή

Scroll συμπιεστές 1-2



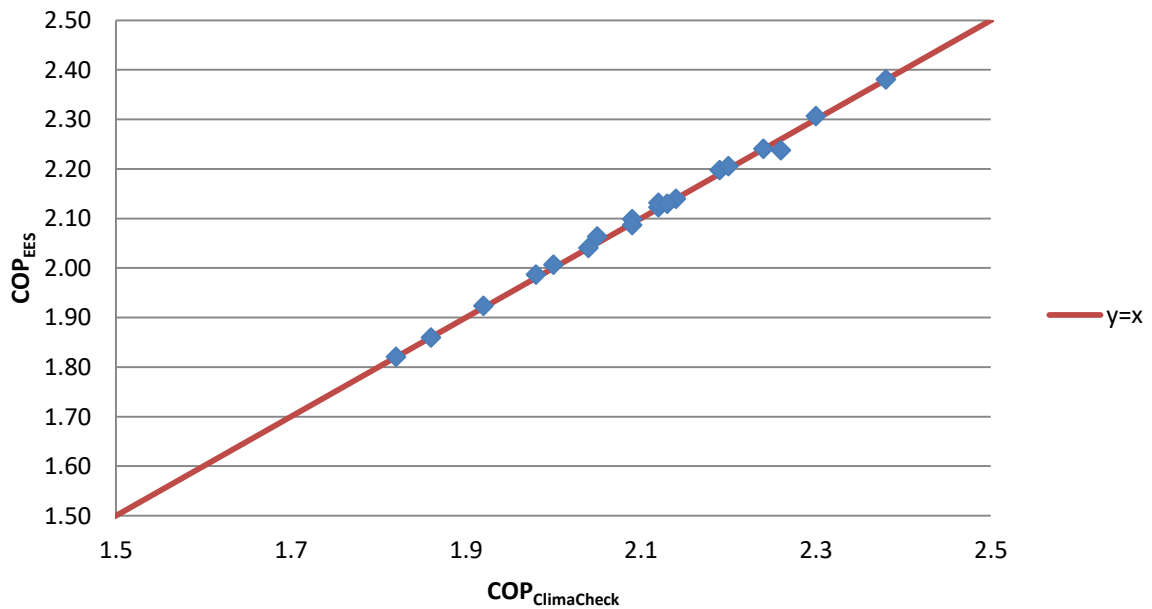
Σχήμα 7.5: Σύγκριση υπολογιζόμενου και μετρούμενου COP στο κύκλωμα LT, για την περίπτωση ταυτόχρονης λειτουργίας συμπιεστών 1 και 2

Scroll συμπιεστές 1-4



Σχήμα 7.6: Σύγκριση υπολογιζόμενου και μετρούμενου COP στο κύκλωμα LT, για την περίπτωση ταυτόχρονης λειτουργίας συμπιεστών 1 και 4

Scroll συμπιεστές 2-4



Σχήμα 7.7: Σύγκριση υπολογιζόμενου και μετρούμενου COP στο κύκλωμα LT, για την περίπτωση ταυτόχρονης λειτουργίας συμπιεστών 2 και 4

Από τα Σχήματα 7.2-7.7, παρατηρούμε πως οι θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές για το COP, μέσω του υπολογιστικού μοντέλου, προσεγγίζουν ικανοποιητικά της παρεχόμενες από τη μετρητική διάταξη αντίστοιχες τιμές. Το γεγονός αυτό, επιβεβαιώνεται λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέγιστη απόλυτη διαφορά των παραπάνω τιμών είναι της τάξης του 3% και η μέγιστη μέση τιμή των απολύτων τιμών των ποσοστιαίων αποκλίσεων των βασικών σχημάτων λειτουργίας είναι 0.9%. Συνεπώς, μπορούμε να θεωρήσουμε με ασφάλεια ότι όσον αφορά το κύκλωμα LT, τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Επιπλέον, από τα Σχήματα 7.2, 7.3 και 7.4, παρατηρώντας τα νέφη τιμών των συντελεστών συμπεριφοράς COP, συμπεραίνουμε ότι όταν λειτουργεί μόνος του ο 4^{ος} κατά σειρά συμπιεστής, εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές COP. Αντίθετα σε χαμηλότερα επίπεδα κινείται το COP όταν λειτουργούν οι συμπιεστές 1 και 2. Το γεγονός αυτό παρατηρείται και στα Σχήματα 7.5, 7.6 και 7.7, όπου το COP λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές όταν ο 4^{ος} συμπιεστής λειτουργεί παράλληλα με έναν εκ των 1 και 2, σε αντίθεση με την περίπτωση που λειτουργούν οι 1 και 2 μαζί. Τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο 4^{ος} συμπιεστής έχει μεγαλύτερο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης από τους συμπιεστές 1 και 2 και γι αυτό εμφανίζει υψηλότερη ψυκτική απόδοση.

Για κάθε ένα από τους τρεις συμπιεστές λαμβάνουμε ως ισεντροπικό και μηχανικό βαθμό απόδοσης, τις μέσες τιμές των μεγεθών στα σημεία μόνιμης κατάστασης, για τις περιπτώσεις που κάθε συμπιεστής λειτουργεί μόνος του. Επίσης, υπολογίζουμε για τα σημεία μόνιμης κατάστασης των παραπάνω περιπτώσεων το ψυκτικό φορτίο, την προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ και το συντελεστή συμπεριφοράς COP, ως τους μέσους όρους των αντίστοιχων μεγεθών. Τα παραπάνω μεγέθη, παρουσιάζονται για κάθε συμπιεστή συγκεντρωτικά στον πίνακα του Σχήματος 7.8.

| | | Q_{evap} (kW) | P_{el} (kW) | COP | n_{is} (%) | n_{m} (%) |
|----------|----------------|------------------------|----------------------|------|---------------------|--------------------|
| 1 | Compr.1 | 15.99 | 7.59 | 2.11 | 69 | 98 |
| 2 | Compr.2 | 16.61 | 7.73 | 2.15 | 73 | 94 |
| 3 | Compr.4 | 17.73 | 7.76 | 2.29 | 78 | 93 |

Σχήμα 7.8: Πίνακας συγκεντρωτικών στοιχείων καταστάσεων λειτουργίας συμπιεστών

Από τον πίνακα του Σχήματος 7.8, παρατηρούμε ότι πράγματι, όταν λειτουργεί μόνος του ο συμπιεστής 4, εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές COP. Το γεγονός αυτό, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οφείλεται στο μεγαλύτερο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του 4^{ου} συμπιεστή. Πράγματι ο 4^{ος} συμπιεστής, όπως φαίνεται στον πίνακα του Σχήματος 7.8, έχει μεγαλύτερο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης από τους συμπιεστές 1 και 2.

Εφόσον, στην περίπτωση του κυκλώματος κατάψυξης, εμφανίζονται έξι συνήθη σχήματα λειτουργίας των τριών συμπιεστών της διάταξης, για την περαιτέρω μελέτη του κυκλώματος, θεωρούμε έναν ισοδύναμο ισεντροπικό και έναν ισοδύναμο μηχανικό βαθμό

απόδοσης, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τους και αντιπροσωπεύουν και τους τρεις συμπιεστές. Οι ισοδύναμοι βαθμοί απόδοσης, προκύπτουν ως οι μέσες τιμές των αντίστοιχων βαθμών απόδοσης του κάθε συμπιεστή ξεχωριστά. Έτσι, έχουμε:

Ισοδύναμος ισεντροπικός βαθμός απόδοσης κυκλώματος LT: $\eta_{is} = 73\%$
 Ισοδύναμος μηχανικός βαθμός απόδοσης κυκλώματος LT: $\eta_m = 95\%$

Συνεπώς, επιλέγουμε να προσομοιώσουμε τη λειτουργία του κυκλώματος χαμηλής θερμοκρασίας LT, μέσω ενός ισοδύναμου συμπιεστή τύπου scroll, ο οποίος έχει ως ισεντροπικό και μηχανικό βαθμό απόδοσης, τους ισοδύναμους βαθμούς απόδοσης που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Επίσης, θεωρούμε ότι ο συγκεκριμένος συμπιεστής λειτουργεί ανελλιπώς, όταν υπάρχει ανάγκη παροχής ψυκτικής ισχύος στο κύκλωμα LT. Οι παραπάνω τιμές των βαθμών απόδοσης θεωρούνται σταθερές και λαμβάνονται δεδομένες για τη μετέπειτα ανάλυση του κυκλώματος LT.

7.2 Παραμετρική θερμοδυναμική ανάλυση της ψυκτικής εγκατάστασης

Μια ψυκτική εγκατάσταση εμπορικής ψύξης, ενδέχεται να λειτουργεί σε διαφορετικές περιβαλλοντικές ή και εσωτερικές συνθήκες. Αυτό σημαίνει, πως ανάλογα με τον τύπο και τις ανάγκες της εφαρμογής, μεταβλητές όπως οι θερμοκρασίες συμπύκνωσης και ατμοποίησης ενδέχεται να διαφοροποιούνται. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία ατμοποίησης είναι διαφορετική για την περίπτωση συντήρησης τροφίμων, από ότι στην περίπτωση κατάψυξης προϊόντων, ωστόσο παραμένει σταθερή κατά τη λειτουργία της ψυκτικής μονάδας. Αντίθετα, η θερμοκρασία συμπύκνωσης των ψυκτικών κύκλων μεταβάλλεται συνήθως, αυτόματα ή χειροκίνητα, κατά τη λειτουργία της ψυκτικής μονάδας, ανάλογα με την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.1, ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP), λειτουργεί ως μέτρο της ενεργειακής απόδοσης των ψυκτικών κύκλων, αποτελώντας συντελεστή ποιοτικής τους σύγκρισης. Επομένως, κρίνεται σκόπιμος ο προσδιορισμός του ψυκτικού συντελεστή συμπεριφοράς των κυκλωμάτων συντήρησης και κατάψυξης, ανάλογα με τη μεταβολή θερμοδυναμικών παραμέτρων, οι οποίες καθορίζουν τον ψυκτικό κύκλο. Οι θερμοδυναμικές μεταβλητές αυτές, είναι:

- θερμοκρασία ατμοποίησης (T_{evap})
- θερμοκρασία συμπύκνωσης (T_{con})
- θερμοκρασιακή διαφορά υπόψυξης (SC)
- θερμοκρασιακή διαφορά υπερθέρμανσης (SH)

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε, ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς COP, εξαρτάται καθαρά από τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του ψυκτικού κύκλου και όχι από το ψυκτικό φορτίο και την προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ στη διάταξη συμπιεστών. Αυτό επιβεβαιώνεται από την εξίσωση (5.1.9) :

$$\text{COP} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)}$$

Όπως τονίστηκε στην ενότητα 7.3, η λειτουργία του κυκλώματος MT αντιπροσωπεύεται ικανοποιητικά μέσω της συνεχούς λειτουργίας του εμβολοφόρου συμπιεστή, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με σύστημα inverter. Αντίστοιχα, η λειτουργία του κυκλώματος LT, προσομοιώνεται μέσω ενός ισοδύναμου συμπιεστή τύπου scroll. Οι δύο αυτοί συμπιεστές, αν και είναι διαφορετικού τύπου, όσον αφορά τη θερμοδυναμική ανάλυση του ψυκτικού κύκλου, αντιπροσωπεύονται ουσιαστικά από τον ισεντροπικό και το μηχανικό βαθμό απόδοσής τους. Επομένως, μεταξύ των δύο κυκλωμάτων, πέρα των διαφορετικών θερμοκρασιών ατμοποίησης φυσικά, η μόνη αλλαγή στο σύστημα των θερμοδυναμικών εξισώσεων, αφορά τις τιμές των δύο αυτών βαθμών απόδοσης. Άρα, μια παραμετρική θερμοδυναμική ανάλυση του ενός κυκλώματος, αντιπροσωπεύει ποιοτικά τη λειτουργία και του δεύτερου κυκλώματος.

Συνεπώς, για την παραμετρική ανάλυση που ακολουθεί, χρησιμοποιούμε τον ισεντροπικό και μηχανικό βαθμό απόδοσης του εμβολοφόρου συμπιεστή ($\eta_{is} = 65\%$, $\eta_m = 98\%$), γνωρίζοντας ωστόσο πως τα αποτελέσματα, αφορούν ποιοτικά τουλάχιστον και τα δύο ψυκτικά κυκλώματα, μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας.

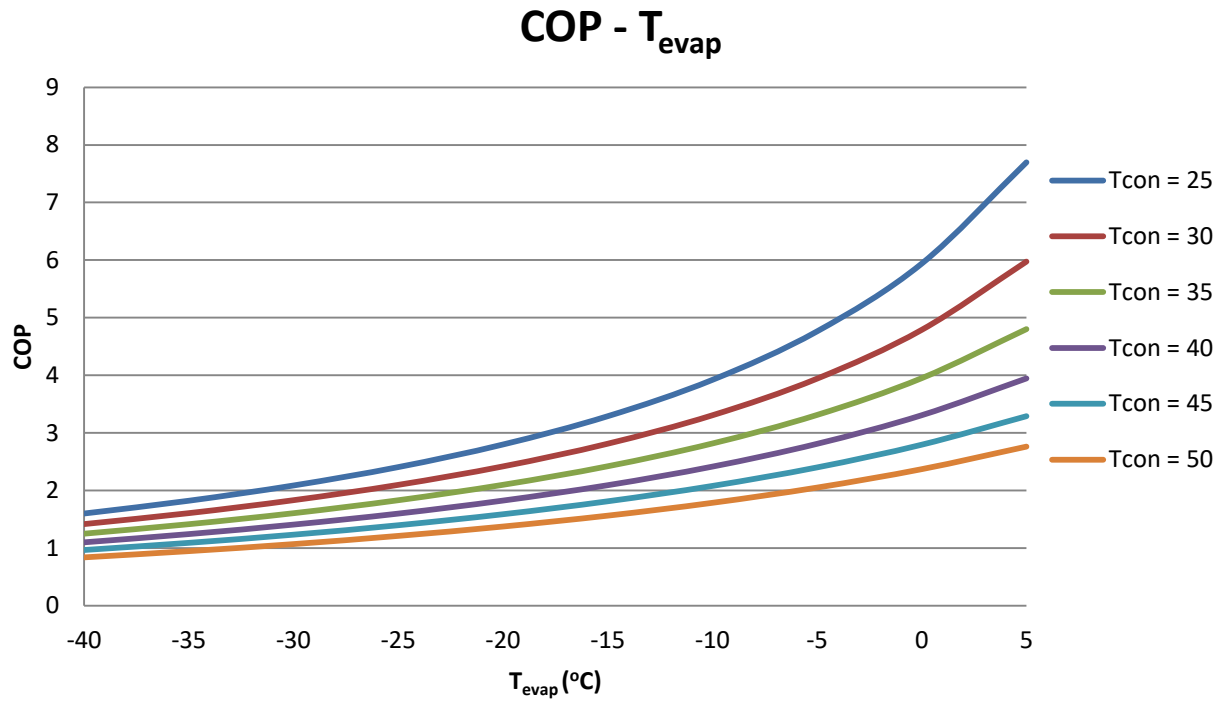
Η θερμοδυναμική ανάλυση του ψυκτικού κύκλου που ακολουθεί, απαιτεί τον προσδιορισμό των επιδράσεων πολλών παραμέτρων, και πραγματοποιήθηκε μέσω της χρήσης του EES. Το λογισμικό, μας δίνει τη δυνατότητα, να δημιουργούμε παραμετρικούς πίνακες των παραπάνω μεταβλητών θερμοδυναμικών μεγεθών, προκειμένου να διαπιστώσουμε την αλληλεξάρτησή τους με το συντελεστή συμπεριφοράς της ψυκτικής εγκατάστασης

Η θερμοκρασία συμπύκνωσης, πρέπει να είναι τουλάχιστον 10°C μεγαλύτερη από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος, προκειμένου να είναι δυνατή η μετάδοση της θερμότητας συμπύκνωσης από τον ψυκτικό ατμό προς το περιβάλλον. Επομένως, στα πλαίσια της παραμετρικής ανάλυσης, η θερμοκρασία συμπύκνωσης επιλέγεται στο διάστημα θερμοκρασιών $25-50^\circ\text{C}$.

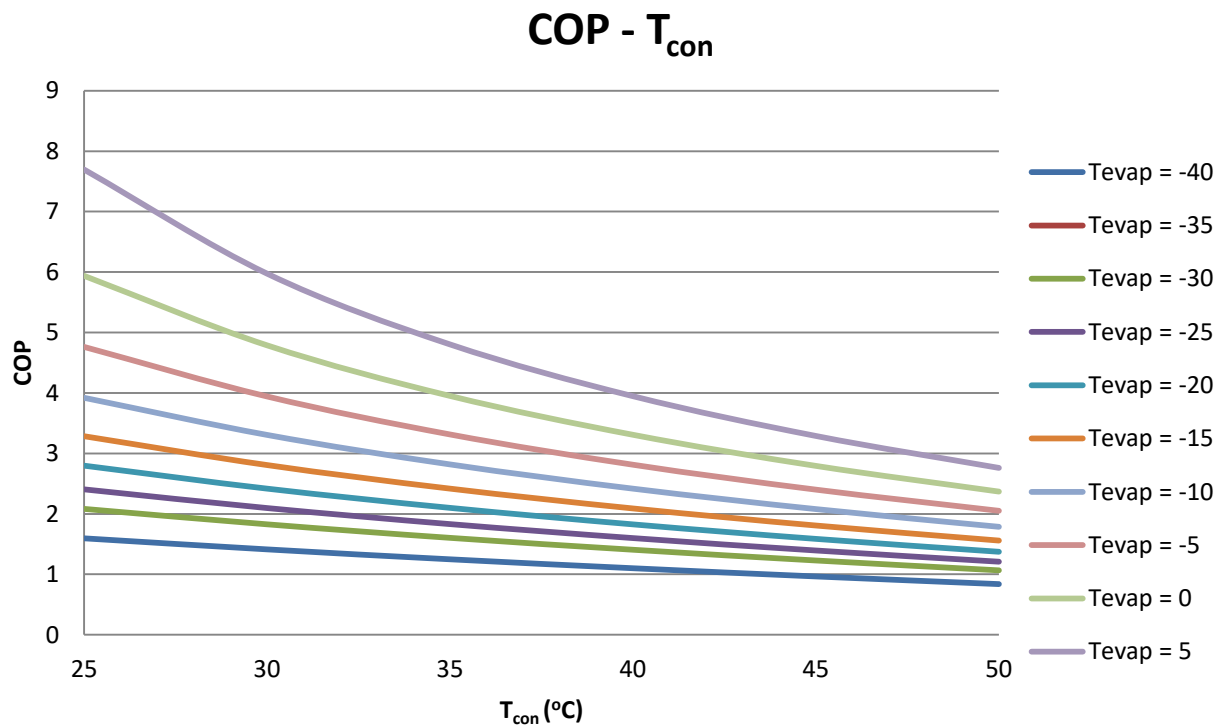
Η θερμοκρασία ατμοποίησης του ψυκτικού μέσου, πρέπει να είναι λίγο μικρότερη από την επιθυμητή θερμοκρασία του αέρα εντός του ψύκτη/καταψύκτη. Επομένως, επιλέγεται στο διάστημα θερμοκρασιών $-40 - 5^\circ\text{C}$.

Για τις θερμοκρασιακές διαφορές υπόψυξης και υπερθέρμανσης, επιλέγονται τυπικά διαστήματα θερμοκρασιών $0-20^\circ\text{C}$ και $5-40^\circ\text{C}$ αντιστοίχως.

Οι επιδράσεις των θερμοδυναμικών μεταβλητών στη μεταβολή του COP, απεικονίζονται στα διαγράμματα των Σχημάτων 7.9, 7.10, 7.12, 7.13, 7.14 και 7.15 που ακολουθούν.



Σχήμα 7.9: Διάγραμμα COP- T_{evap} για διαφορετικές θερμοκρασίες συμπύκνωσης (T_{con})

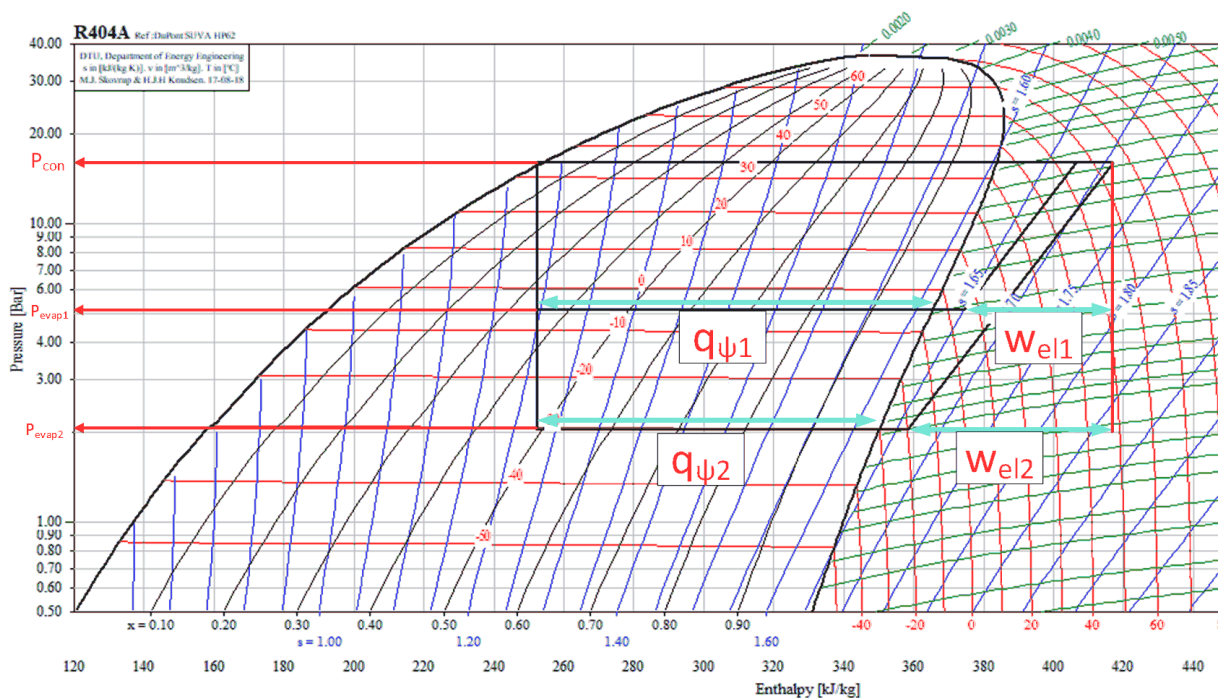


Σχήμα 7.10: Διάγραμμα COP- T_{con} για διαφορετικές θερμοκρασίες ατμοποίησης (T_{evap})

Στα Σχήματα 7.9 και 7.10, παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του COP συναρτήσει των θερμοκρασιών ατμοποίησης και συμπύκνωσης. Επιβεβαιώνουμε αρχικά το γεγονός, ότι για δεδομένη θερμοκρασία ατμοποίησης, αυξανόμενη της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, μειώνεται ο συντελεστής συμπεριφοράς του ψυκτικού κύκλου, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 6.3.

Στα διαγράμματα των Σχημάτων 7.9 και 7.10 παρατηρούμε ακόμη, ότι δεδομένης της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, το COP μειώνεται όσο μικρότερη είναι και η επιθυμητή θερμοκρασία ατμοποίησης του ψυκτικού μέσου. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος, που σε μια ψυκτική εγκατάσταση σουπερμάρκετ, όπως η μελετηθείσα, το κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας LT λειτουργεί με μικρότερες τιμές COP από το κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας. Οι ψυκτικοί κύκλοι των δύο κυκλωμάτων, αν και κάθε στιγμή λειτουργούν σε κοινή θερμοκρασία συμπύκνωσης, η οποία εξαρτάται από τις εξωτερικές συνθήκες, έχουν διαφορετική θερμοκρασία ατμοποίησης. Συγκεκριμένα, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες ατμοποίησης του ψυκτικού μέσου, που απαιτούνται στους καταψύκτες του κυκλώματος LT, οδηγούν σε μικρότερη ψυκτική απόδοση και κατά συνέπεια μικρότερες τιμές COP.

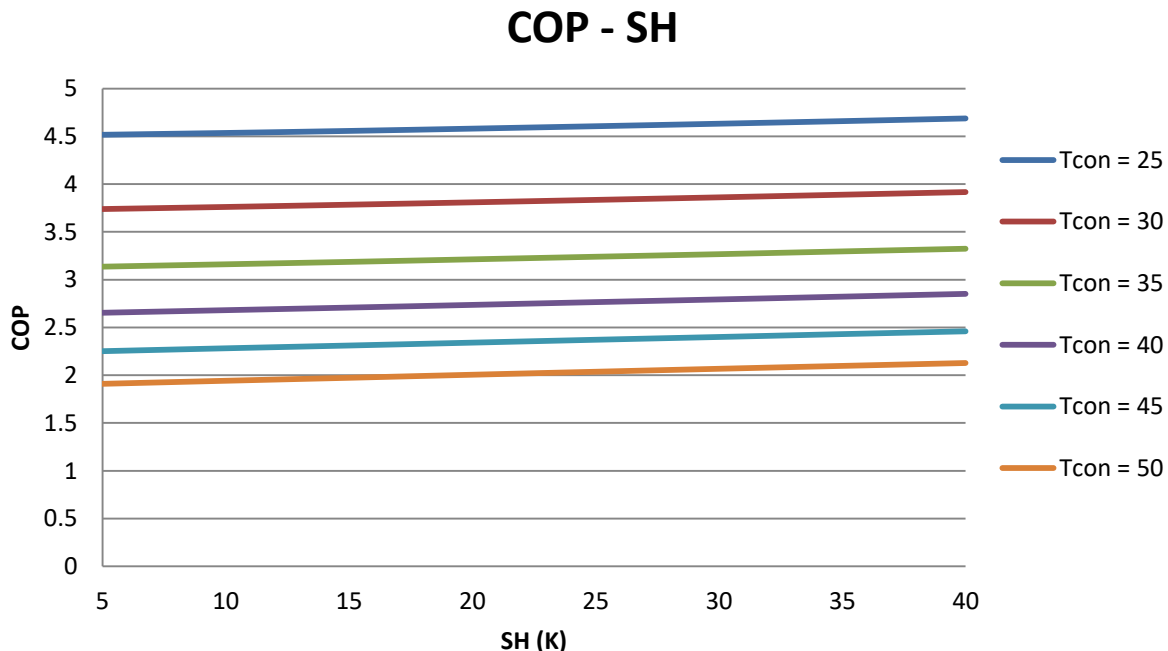
Το παραπάνω πόρισμα επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 7.11 που ακολουθεί. Στο Σχήμα 7.11, παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα, για την ίδια θερμοκρασία συμπύκνωσης, δύο τυπικοί ψυκτικοί κύκλοι, κυκλώματος συντήρησης (κύκλος 1) και κυκλώματος κατάψυξης (κύκλος 2).



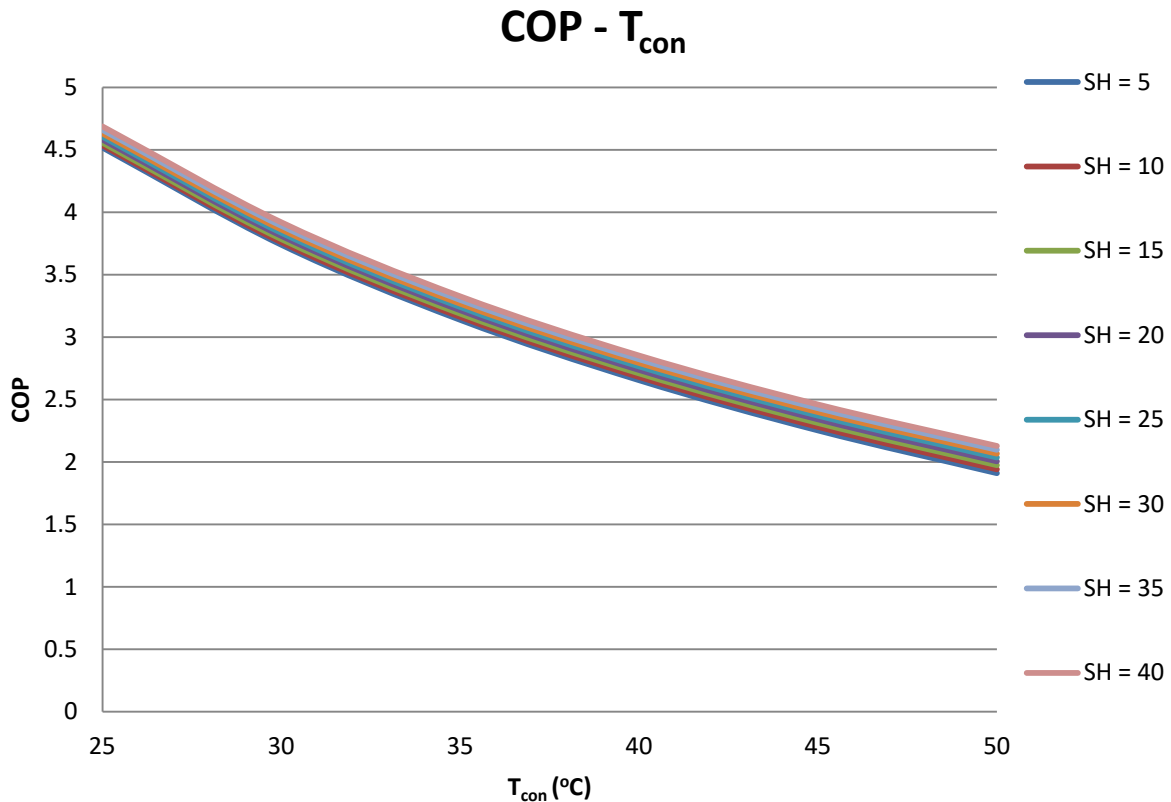
Σχήμα 7.11: Διαγράμματα ψυκτικών κύκλων διαφορετικών θερμοκρασιών ατμοποίησης [44]

Στο Σχήμα 7.11, παρατηρούμε ότι για την περίπτωση της κατάψυξης, η ατμοποίηση πραγματοποιείται σε χαμηλότερη θερμοκρασία και άρα πίεση ($P_{\text{evap}2}$) από την αντίστοιχη θερμοκρασία και πίεση ($P_{\text{evap}1}$) του κύκλου συντήρησης. Το γεγονός αυτό, λόγω της μορφής της καμπύλης κορεσμού του ψυκτικού μέσου (R-404A), οδηγεί στην παραγωγή χαμηλότερου, ανηγμένου ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου, ψυκτικού φορτίου στο κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας από το αντίστοιχο του κυκλώματος μέσης θερμοκρασίας, δηλαδή ισχύει $q_{\psi 1} > q_{\psi 2}$. Επιπλέον, εφόσον και στους δύο ψυκτικούς κύκλους η συμπύκνωση πραγματοποιείται στην ίδια θερμοκρασία, η ανηγμένη ηλεκτρική ισχύς της διάταξης συμπιεστών του κυκλώματος LT είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του κυκλώματος MT, δηλαδή ισχύει $w_{\text{el}1} < w_{\text{el}2}$. Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (5.1.9), σύμφωνα με τα προηγούμενα, επιβεβαιώνεται ότι $\text{COP}_1 > \text{COP}_2$.

Στη συνέχεια παρατίθενται παραμετρικά διαγράμματα καμπυλών του συντελεστή συμπεριφοράς COP του κυκλώματος μέσης θερμοκρασίας MT. Οι καμπύλες του COP για το κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας MT ($T_{\text{evap}} = -6^\circ\text{C}$) είναι όμοιες, ποιοτικά τουλάχιστον, με τις αντίστοιχες καμπύλες του COP για το κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας LT ($T_{\text{evap}} = -31^\circ\text{C}$), μετατοπισμένες ωστόσο προς τα πάνω, δηλαδή προς μεγαλύτερες τιμές COP. Επομένως, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις συσχετίσεις του COP με τα θερμοδυναμικά μεγέθη υπερθέρμανσης SH, υπόψυξης SC και θερμοκρασίας συμπύκνωσης, που ακολουθούν, ισχύουν και για τα δύο ψυκτικά κυκλώματα.

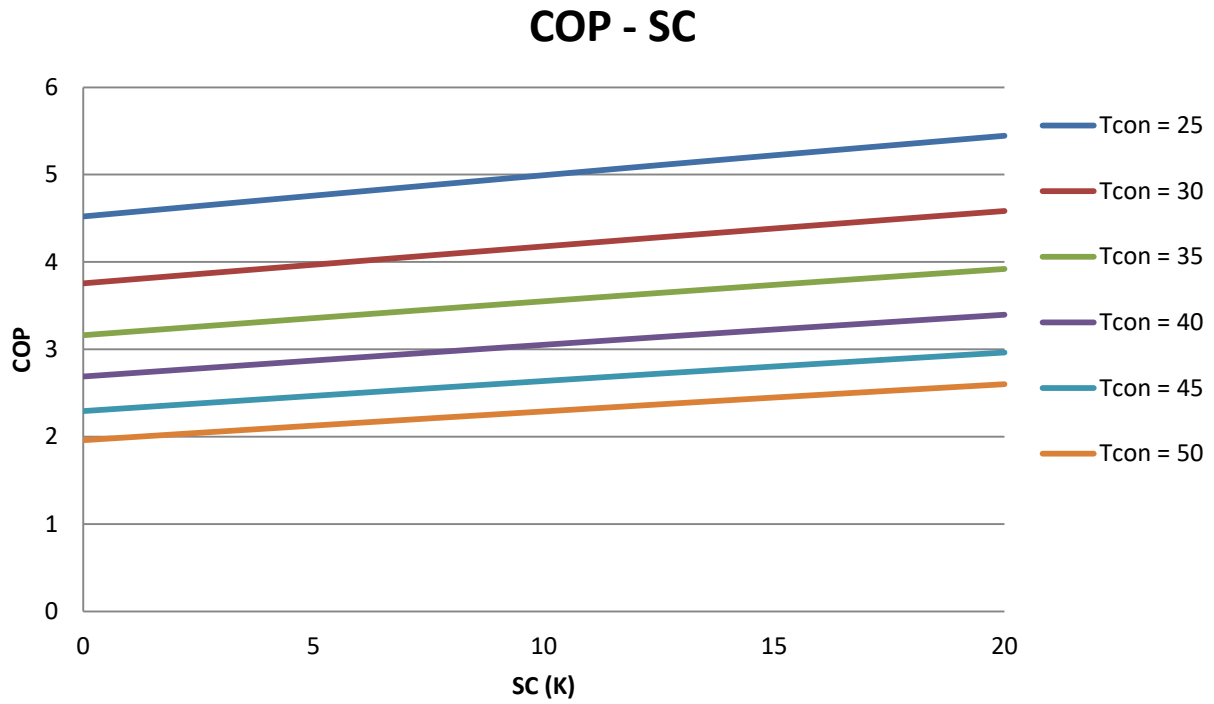


Σχήμα 7.12: Διάγραμμα COP-SH για διαφορετικές θερμοκρασίες συμπύκνωσης (T_{con})

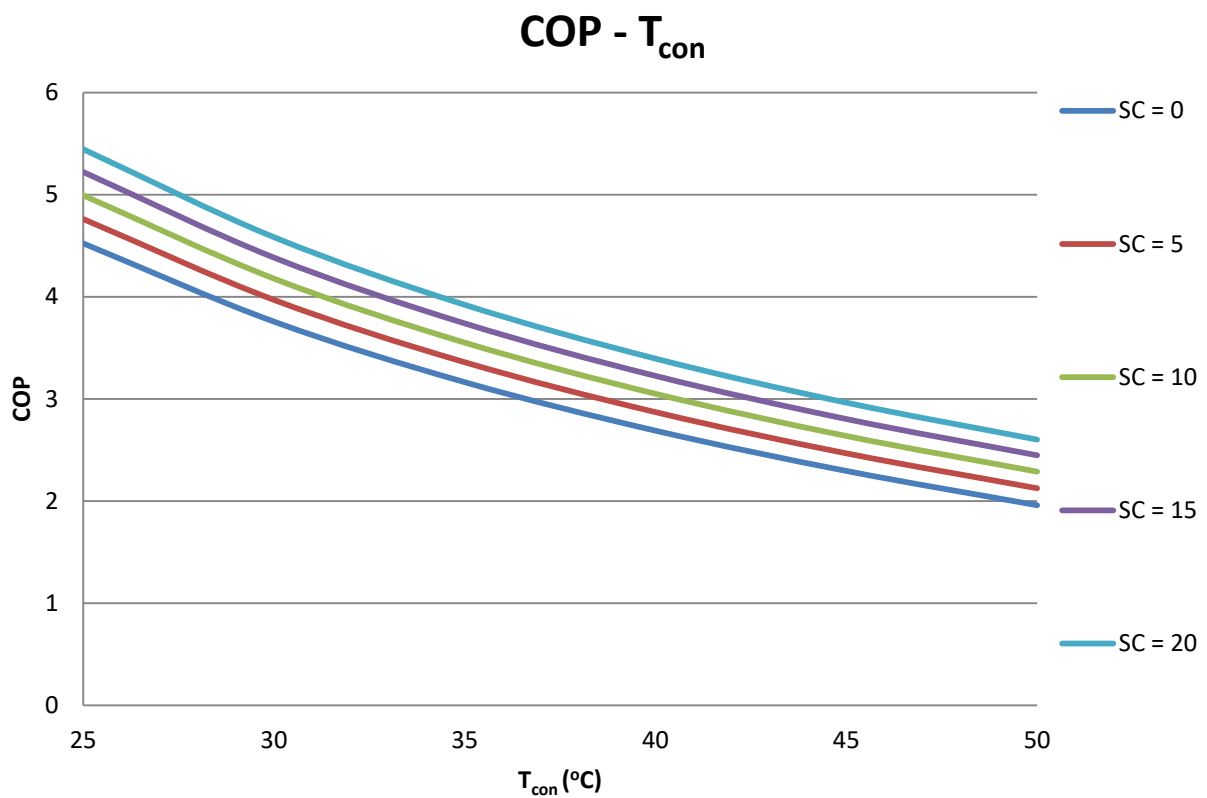


Σχήμα 7.13: Διάγραμμα $COP-T_{con}$ για διαφορετικές υπερθερμάνσεις (SH)

Στα Σχήματα 7.12 και 7.13, παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του COP συναρτήσει της θερμοκρασίας συμπύκνωσης και της θερμοκρασιακής διαφοράς υπερθερμάνσεως. Στην ενότητα 5.1, θεωρήσαμε ότι η υπερθέρμανση έχει αμελητέα επιρροή στα χαρακτηριστικά απόδοσης του ψυκτικού κύκλου και επομένως επιλέξαμε να χρησιμοποιούμε την ενθαλπία του σημείου 1 για τον υπολογισμό του ψυκτικού φορτίου στον ατμοποιητή. Η θεώρηση αυτή επιβεβαιώνεται στα παραπάνω διαγράμματα, καθώς η μεταβολή της υπερθερμάνσεως κατά 35 K έχει αμελητέα επίπτωση στο COP. Τη μικρή αύξηση που προσδίδει στο COP, η αύξηση της υπερθέρμανσης, οφείλεται στη μετακίνηση του σημείου στην είσοδο της διάταξης συμπιεστών, προς μεγαλύτερες θερμοκρασίες και επομένως ενθαλπίες. Το γεγονός αυτό, συνεπάγεται μια μικρή εξοικονόμηση στην απαιτούμενη προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ του συμπιεστή.



Σχήμα 7.14: Διάγραμμα COP-SC για διαφορετικές θερμοκρασίες συμπύκνωσης (T_{con})



Σχήμα 7.15: Διάγραμμα COP- T_{con} για διαφορετικές υποψύξεις (SC)

Στα Σχήματα 7.14 και 7.15, παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του COP συναρτήσει της θερμοκρασίας συμπύκνωσης και της θερμοκρασιακής διαφοράς υπόψυξης. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.1, η υπόψυξη έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της παραγόμενης ψύξης, χωρίς να απαιτείται αύξηση της προσδιδόμενης μηχανικής ενέργειας. Στα κυκλώματα MT και LT της παρούσας ψυκτικής εγκατάστασης, η υπόψυξη δεν ξεπερνά τη θερμοκρασιακή διαφορά των 5K. Ωστόσο, εάν μέσω χρήσης εναλλάκτη θερμότητας αυξήσουμε την υπόψυξη του ψυκτικού μέσου μετά την έξοδό του από το συμπυκνωτή του κυκλώματος, θα επιτύχουμε αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς (COP) του ψυκτικού κύκλου, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται στα παραπάνω διαγράμματα. Συνεπώς, μέσω της υπόψυξης, έχουμε αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς (COP) του ψυκτικού κύκλου, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και στα παραπάνω διαγράμματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Υπολογισμός καταναλώσεων

8.1 Μοντέλο πρόβλεψης ψυκτικού φορτίου

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή ενεργειών εξοικονόμησης ενέργειας σε μια ψυκτική εγκατάσταση, είναι ο προσδιορισμός των διάφορων καταναλώσεων αυτής. Ο υπολογισμός της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των κυκλωμάτων μέσης (MT) και χαμηλής θερμοκρασίας (LT), πραγματοποιείται μέσω των θερμοδυναμικών εξισώσεων που αναλύθηκαν εκτενώς στην ενότητα 5.1. Στο σύστημα αυτών των εξισώσεων, το ψυκτικό φορτίο Q_{ψ} λειτουργεί ως είσοδος, αφού εξαρτάται από εξωγενείς παράγοντες, όπως η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος ή η δραστηριότητα ανοίγματος των θυρίδων των ψυγείων/καταψυκτών από τους πελάτες ή το προσωπικό του καταστήματος, οι οποίοι δηλαδή δεν σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του ψυκτικού κυκλώματος. Επομένως, στην ενότητα αυτή, αναπτύσσονται και παρουσιάζονται μοντέλα πρόβλεψης του ψυκτικού φορτίου, μέσω της ανάλυσης των μετρήσεων του αναλυτή απόδοσης.

8.1.1 Κύκλωμα MT

Το κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας MT, όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 4.2.2, περιλαμβάνει τα ψυγεία και τους ψυκτικούς θαλάμους του σουπερμάρκετ. Επομένως, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.3.1.1, το μέγεθος του ψυκτικού φορτίου που απαιτείται, προκειμένου να διατηρηθεί το εσωτερικό των ψυγείων σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, επηρεάζεται από τη χρήση των ψυγείων, του πόσο συχνά δηλαδή οι πελάτες και το προσωπικό του καταστήματος ανοίγουν τα ψυγεία για να αφαιρέσουν ή να τοποθετήσουν προϊόντα. Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της μελέτης των παραγόντων που επηρεάζουν το ψυκτικό φορτίο του κυκλώματος συντήρησης, γίνεται διάκριση μεταξύ των ημερών, κατά τις οποίες το κατάστημα είναι ανοικτό για τους πελάτες και των ημερών που το κατάστημα παραμένει κλειστό (Κυριακών και αργιών δηλαδή). Είναι προφανές, ότι τις μέρες κατά τις οποίες το κατάστημα δεν είναι ανοικτό για τους πελάτες, δεν υπάρχει σημαντική δραστηριότητα ανοίγματος των θυρίδων των ψυγείων και επομένως το

απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο είναι μικρότερο από το αντίστοιχο των ημερών λειτουργίας του καταστήματος.

Ο δεύτερος και ίσως πιο σημαντικός παράγοντας, που επηρεάζει το μέγεθος του ψυκτικού φορτίου στα ψυγεία και ψυκτικούς θαλάμους, είναι η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα ψυγεία και οι ψυκτικοί θάλαμοι δεν έρχονται άμεσα σε επαφή με την εξωτερική θερμοκρασία, καθώς βρίσκονται εντός του κλιματιζόμενου χώρου πωλήσεων του καταστήματος. Ωστόσο, αν και η εσωτερική θερμοκρασία εντός του καταστήματος ρυθμίζεται μέσω κεντρικού συστήματος κλιματισμού, αυξανόμενης της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος, αυξάνεται και η εσωτερική θερμοκρασία, εντός φυσικά των ορίων θερμικής άνεσης. Επομένως, η αύξηση των τοπικών θερμοκρασιών έξω από τα ψυγεία και τους καταψύκτες, συνεπάγεται μεγαλύτερη απαίτηση ψυκτικού φορτίου, όπως τονίζεται και στην ενότητα 1.3.1.1. Τέλος, η εξωτερική θερμοκρασία επηρεάζει το θερμικό κέρδος που προσδίδουν, τα προϊόντα τα οποία τοποθετούνται εντός του ψυγείου ή ψυκτικού θαλάμου. Για παράδειγμα, μια ζεστή καλοκαιρινή μέρα τα προϊόντα γαλακτοκομικών, που θα παραλάβει ο υπάλληλος του καταστήματος και θα μεταφέρει από τη ράμπα προμηθειών μέχρι το ψυγείο, θα είναι πιο ζεστά απ' ό,τι μια χειμερινή μέρα.

Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος του ψυκτικού φορτίου στο κύκλωμα ΜΤ, επιλέγουμε μία τυπική θερμοκρασιακά μέρα για κάθε μήνα, κατά την οποία το κατάστημα λειτουργεί κανονικά. Η τυπική αυτή μέρα, αποτελεί την ημερομηνιακή διάμεσο του μήνα. Επομένως, για κάθε μήνα επιλέγουμε μία μέρα στο μέσο του, της οποίας η μέση θερμοκρασία αντιπροσωπεύει σε ικανοποιητικό επίπεδο τη μέση θερμοκρασία όλου του μήνα. Προφανώς, η μέση θερμοκρασία της 15^{ης} ή 16^{ης} ημέρας ενός μήνα δεν αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία του μήνα αυτού. Ωστόσο, στα πλαίσια της ανάλυσής μας, ενδιαφερόμαστε στην ουσία για μια τυπική μέρα του μήνα, η οποία ανήκει στο 2^ο δεκαήμερο του μήνα, έτσι ώστε να αποκλείονται ημέρες, οι οποίες βρίσκονται στην αρχή ή στο τέλος του μήνα και των οποίων οι θερμοκρασίες διαφέρουν περισσότερο από τη μέση θερμοκρασία του μήνα. Άρα, επιλέγουμε για λόγους απλότητας την 15^η ή 16^η μέρα, αποφεύγοντας τις Κυριακές, κατά τις οποίες το κατάστημα παραμένει κλειστό, ως μία τυπική θερμοκρασιακά μέρα του μήνα, προκειμένου να συσχετίσουμε τη θερμοκρασία περιβάλλοντος με το συνολικό ψυκτικό φορτίο κάθε μήνα.

Θεωρούμε, ότι τα βασικά θερμοδυναμικά μεγέθη, καθώς και τα μεγέθη ενεργειακής απόδοσης του ψυκτικού κύκλου του κυκλώματος ΜΤ, επηρεάζονται άμεσα από την επικρατούσα εξωτερική θερμοκρασία. Επομένως, οι τυπικές μέρες των μηνών αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά τους μήνες του έτους, όχι μόνο σε ό,τι αφορά τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά και τα μεγέθη αυτά.

Λαμβάνουμε λοιπόν, από τον αναλυτή απόδοσης και συγκεντρώνουμε στον πίνακα του Σχήματος 8.1, τις μέσες τιμές των βασικών μεγεθών λειτουργίας του κυκλώματος ΜΤ, για κάθε τυπική μέρα. Τονίζεται εδώ, ότι για τις μέσες τιμές των φορτίων συμπύκνωσης Q_{con} , ατμοποίησης Q_{evap} , καθώς και της προσδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος στη διάταξη των

συμπεστών P_{el} , παραλείπονται οι μηδενικές τιμές των ωρών, κατά τις οποίες δεν απαιτείται επιπλέον ψυκτικό φορτίο και η διάταξη συμπεστών βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Οι ώρες αυτές, εκφράζονται με το μέγεθος zeros και υπολογίζονται για κάθε τυπική μέρα, μέσω των μετρήσεων που παρέχει ο αναλυτής απόδοσης. Ο συντελεστής φορτίου CF, αποτελεί το ποσοστό του χρόνου της ημέρας, κατά τον οποίο βρίσκεται σε λειτουργία η διάταξη συμπεστών και υπολογίζεται ως:

$$CF = 1 - \frac{\text{zeros}}{24} \quad (8.1)$$

Στα πλαίσια της μελέτης μας, ορίζουμε το μέσο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας Q' , το οποίο αντιστοιχεί στην παραγόμενη ψυκτική ισχύ, που προκύπτει από συνεχή (24ωρη) λειτουργία της διάταξης συμπεστών, προκειμένου να παραχθεί η ίδια ψυκτική ενέργεια (kWh) με αυτή που παράγεται για τις πραγματικές ώρες λειτουργίας της διάταξης συμπεστών, κατά την τυπική ημέρα. Το μέσο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας Q' υπολογίζεται, με χρήση του συντελεστή φορτίου CF, ως:

$$Q' = CF \cdot Q_{\text{evap}} \quad (8.2)$$

| | ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ | ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ | ΜΑΡΤΙΟΣ | ΑΠΡΙΛΙΟΣ | ΜΑΙΟΣ | ΙΟΥΝΙΟΣ | ΙΟΥΛΙΟΣ | ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ | ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ | ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ | ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ | ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ |
|------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|-------------|------------|------------|------------|
| weekdays | 16/01/2017 | 14/02/2017 | 16/03/2017 | 15/04/2017 | 16/05/2017 | 15/06/2016 | 16/7/2016 | 16/08/2016 | 15/09/2016 | 15/10/2016 | 15/11/2016 | 16/12/2016 |
| T_{amb} (°C) | 9.5 | 7.9 | 11.1 | 17.5 | 19.3 | 28.8 | 30.4 | 29.3 | 23.3 | 19.6 | 13.6 | 7.3 |
| $T - T_m$ | -8.6 | -10.3 | -7.1 | -0.6 | 1.2 | 10.7 | 12.2 | 11.1 | 5.2 | 1.5 | -4.5 | -10.8 |
| LP (bar) | 3.9 | 4.0 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 |
| HP (bar) | 13.4 | 12.6 | 12.1 | 13.6 | 13.2 | 16.3 | 16.1 | 16.1 | 15.4 | 14.8 | 13.5 | 12.9 |
| T_{evap} (°C) | -6.4 | -6.0 | -6.5 | -6.3 | -6.5 | -6.5 | -6.5 | -6.4 | -6.3 | -6.3 | -6.1 | -6.2 |
| T_{con} (°C) | 30.4 | 28.3 | 26.9 | 31.0 | 30.0 | 37.8 | 37.5 | 37.4 | 35.6 | 34.2 | 30.7 | 29.2 |
| SC (K) | 1.7 | 1.8 | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 1.0 |
| SH (K) | 16.4 | 16.0 | 18.0 | 17.6 | 17.6 | 20.4 | 20.9 | 20.4 | 20.7 | 19.4 | 17.5 | 16.5 |
| COP | 3.8 | 4.0 | 4.1 | 3.6 | 3.6 | 2.9 | 2.9 | 3.0 | 3.1 | 3.3 | 3.6 | 3.8 |
| P_{el} (kW) | 5.5 | 5.5 | 5.0 | 6.4 | 6.4 | 9.4 | 9.2 | 8.5 | 7.9 | 7.1 | 6.1 | 5.5 |
| Q_{con} (kW) | 24.9 | 26.0 | 24.8 | 28.3 | 28.8 | 35.4 | 35.4 | 32.6 | 31.8 | 29.5 | 27.3 | 25.3 |
| Q_{evap} (kW) | 20.2 | 21.2 | 20.5 | 22.7 | 23.1 | 26.9 | 27.0 | 24.9 | 24.6 | 23.0 | 21.9 | 20.5 |
| zeros (hours) | 5.2 | 4.7 | 4.0 | 3.5 | 2.1 | 0.8 | 0.6 | 0.9 | 1.3 | 1.6 | 3.4 | 4.5 |
| CF | 0.78 | 0.80 | 0.83 | 0.86 | 0.91 | 0.97 | 0.97 | 0.96 | 0.95 | 0.93 | 0.86 | 0.81 |
| Q' (kW) | 15.9 | 17.0 | 17.1 | 19.4 | 21.0 | 26.0 | 26.3 | 23.9 | 23.3 | 21.5 | 18.8 | 16.7 |
| E_{el} (kWh/day) | 102.0 | 103.2 | 98.3 | 119.0 | 138.0 | 218.4 | 213.6 | 194.6 | 179.3 | 161.1 | 128.5 | 106.8 |

Σχήμα 8.1: Συγκεντρωτικός πίνακας μεγεθών λειτουργίας κυκλώματος MT τυπικής ημέρας κάθε μήνα

Από τον πίνακα του Σχήματος 8.1, υπολογίζουμε τη μέση θερμοκρασία του έτους $T_m=18.1^\circ\text{C}$, ως τη μέση τιμή των μέσων θερμοκρασιών των τυπικών ημερών των μηνών του έτους.

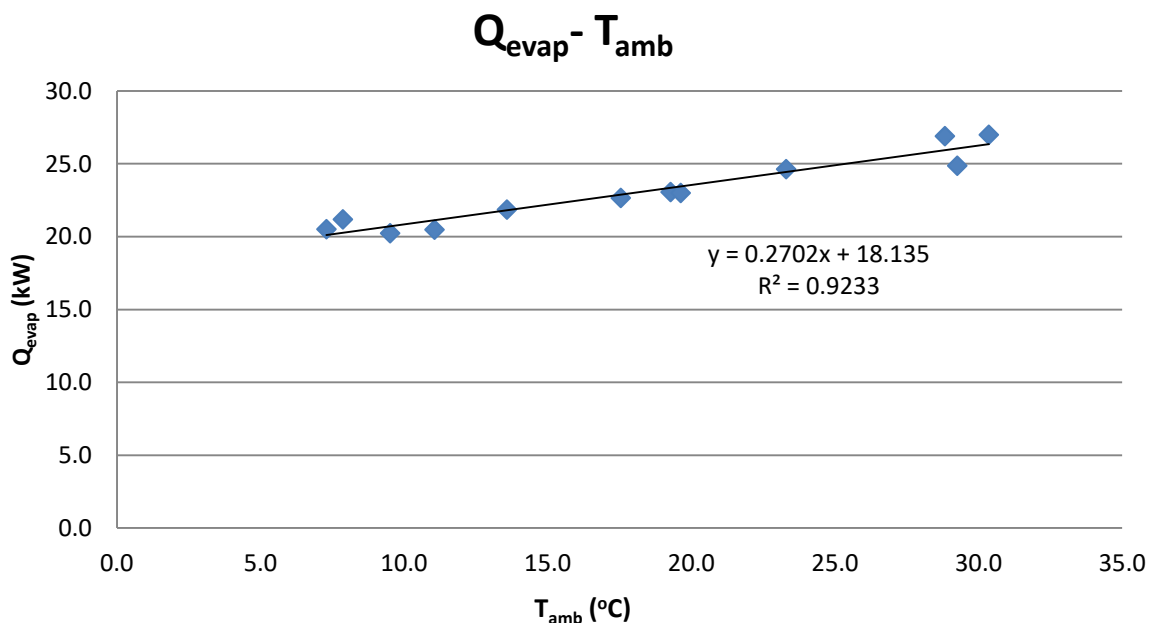
Επίσης, παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία ατμοποίησης T_{evap} και κατ' επέκταση η χαμηλή πίεση λειτουργίας LP του κυκλώματος, είναι σχεδόν σταθερές στις τιμές -6.3°C και 3.9 bar (μανομετρική πίεση) αντίστοιχα. Τα μεγέθη αυτά είναι σταθερά με μικρές αυξομειώσεις, όχι μόνο για τις μέσες τιμές των ημερών, αλλά για όλες τις στιγμιαίες τιμές του έτους, λόγω της ρύθμισης της χαμηλής πίεσης από τον υπεύθυνο ψυκτικό της εγκατάστασης, όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 4.2.2. Αντίθετα, όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 4.2.3, η θερμοκρασία συμπύκνωσης T_{con} και η υψηλή πίεση λειτουργίας HP μεταβάλλονται κατά τη

διάρκεια του έτους, ώστε να υπάρχει μια ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ πάνω από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος.

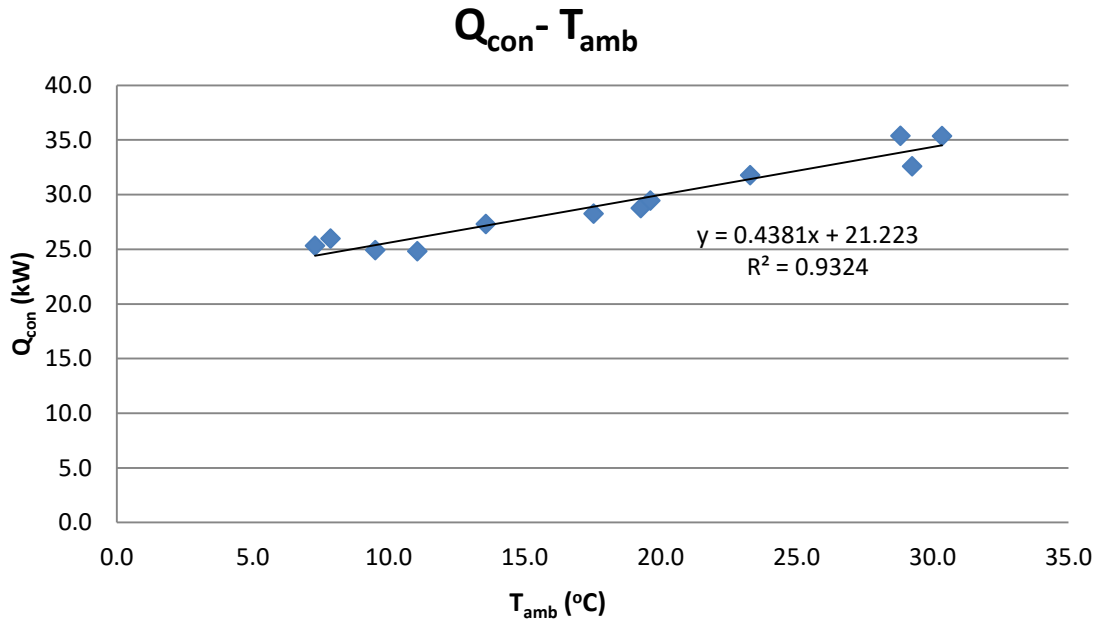
Οι θερμοκρασιακές διαφορές υπόψυξης και υπερθέρμανσης, δεν εμφανίζουν μεγάλες αυξομειώσεις κατά τη διάρκεια του έτους και εφόσον δεν επηρεάζουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά απόδοσης του ψυκτικού κύκλου (βλ. ενότητα 7.2), για τη συνέχεια της μελέτης μας θα τα θεωρούμε σταθερά. Συγκεκριμένα, από παρατήρηση των μετρήσεων στο κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας MT, επιλέγονται τυπικές τιμές $SC = 1\text{K}$ και $SH = 18\text{K}$.

Τέλος, κατά τους θερινούς μήνες εμφανίζεται μεγαλύτερη απαίτηση ψυκτικού φορτίου στην ψυκτική εγκατάσταση, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται από τις μεγαλύτερες τιμές φορτίων συμπύκνωσης Q_{con} , ατμοποίησης Q_{evap} , προσδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος στη διάταξη συμπιεστών P_{el} , ωρών λειτουργίας της διάταξης συμπιεστών, συντελεστών φορτίου CF και φυσικά καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας E_{el} . Αυτό οφείλεται, στα μεγαλύτερα επίπεδα εξωτερικής θερμοκρασίας που σημειώνονται κατά τους θερινούς μήνες σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες.

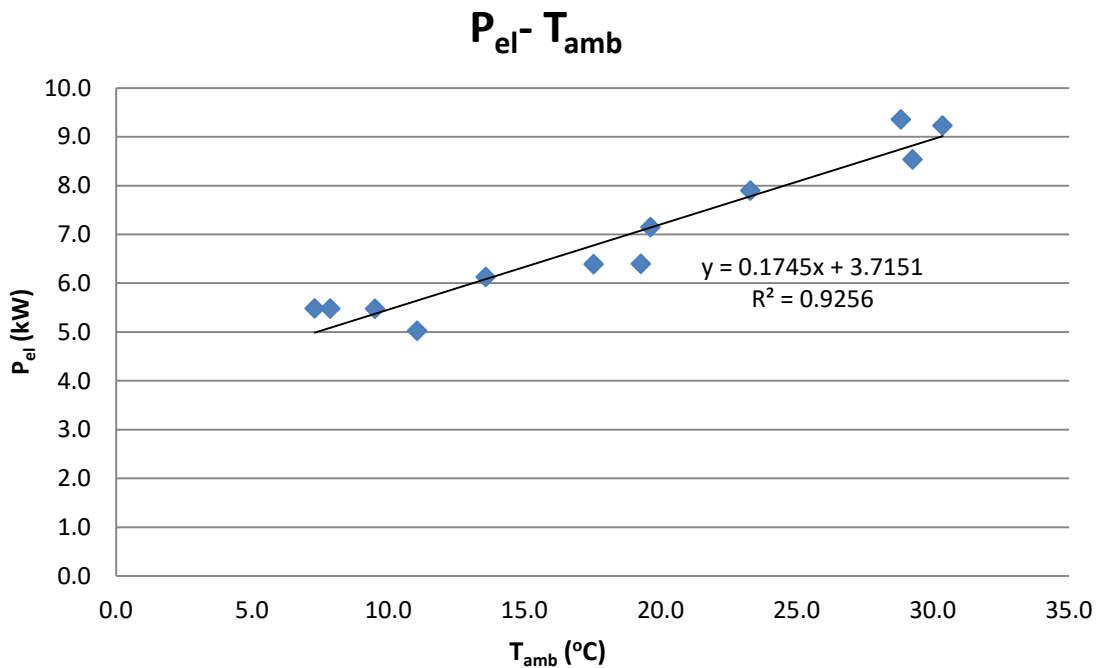
Εν συνεχεία, στα επόμενα σχήματα, παρατίθενται σε επίπεδο έτους, τα διαγράμματα συσχέτισης των βασικών θερμοδυναμικών μεγεθών, καθώς και των μεγεθών ενεργειακής απόδοσης του ψυκτικού κύκλου, σε συνάρτηση με την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος.



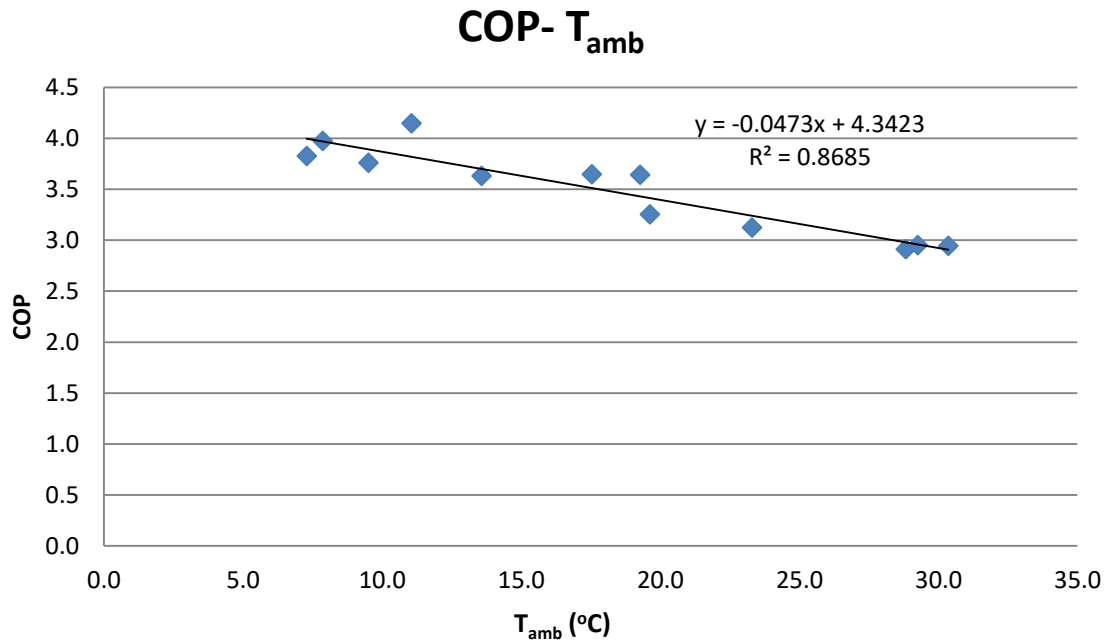
Σχήμα 8.2: Διάγραμμα ψυκτικού φορτίου Q_{evap} – θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} για το κύκλωμα MT



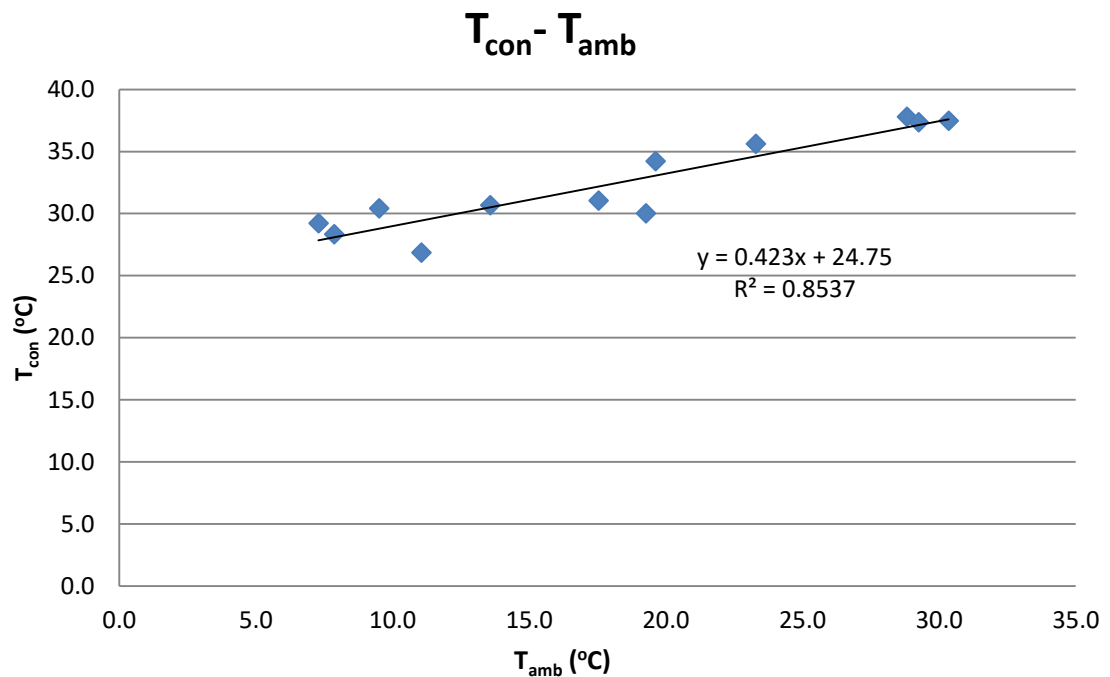
Σχήμα 8.3: Διάγραμμα φορτίου συμπύκνωσης Q_{con} – θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} για το κύκλωμα MT



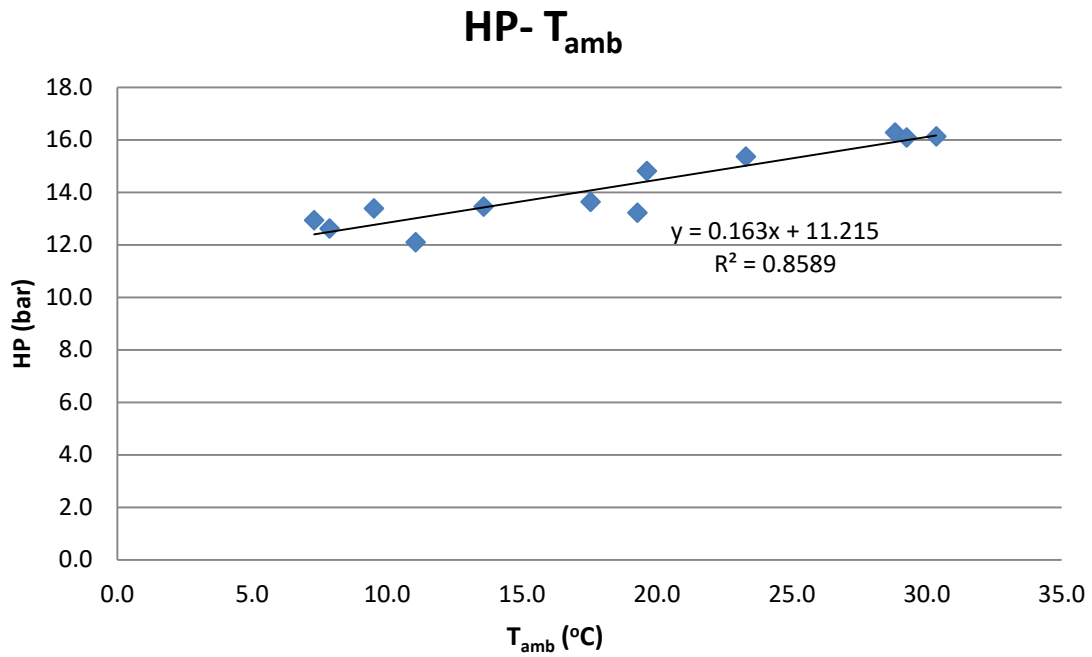
Σχήμα 8.4: Διάγραμμα προσδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος P_{el} – θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} για το κύκλωμα MT



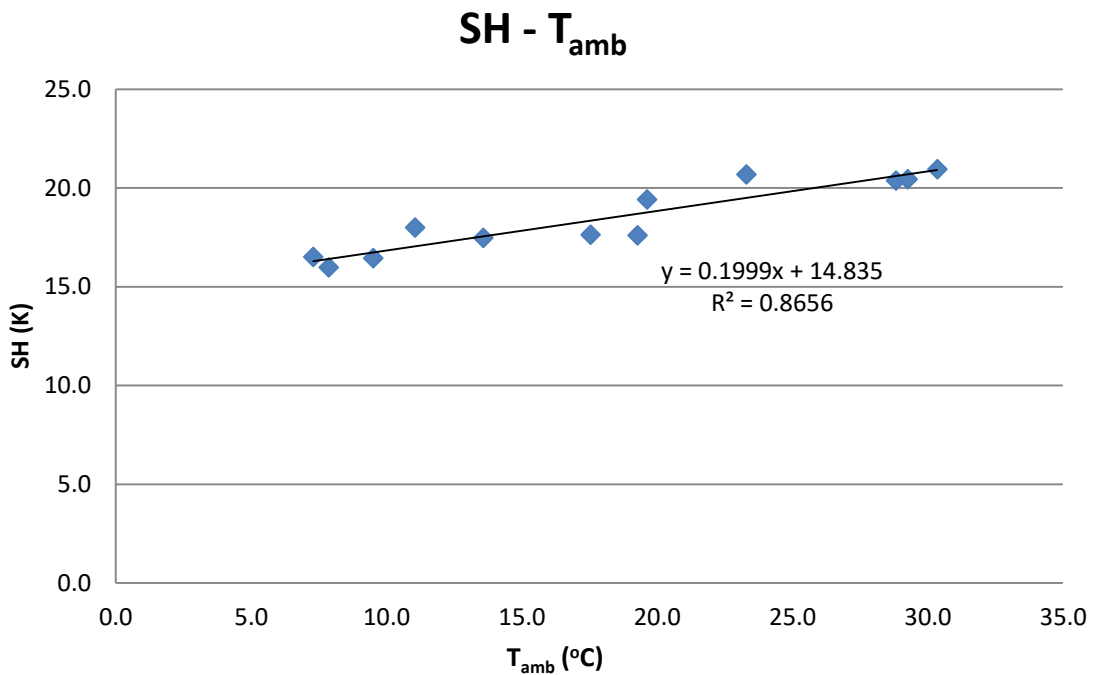
Σχήμα 8.5: Διάγραμμα συντελεστή συμπεριφοράς COP – θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} για το κύκλωμα MT



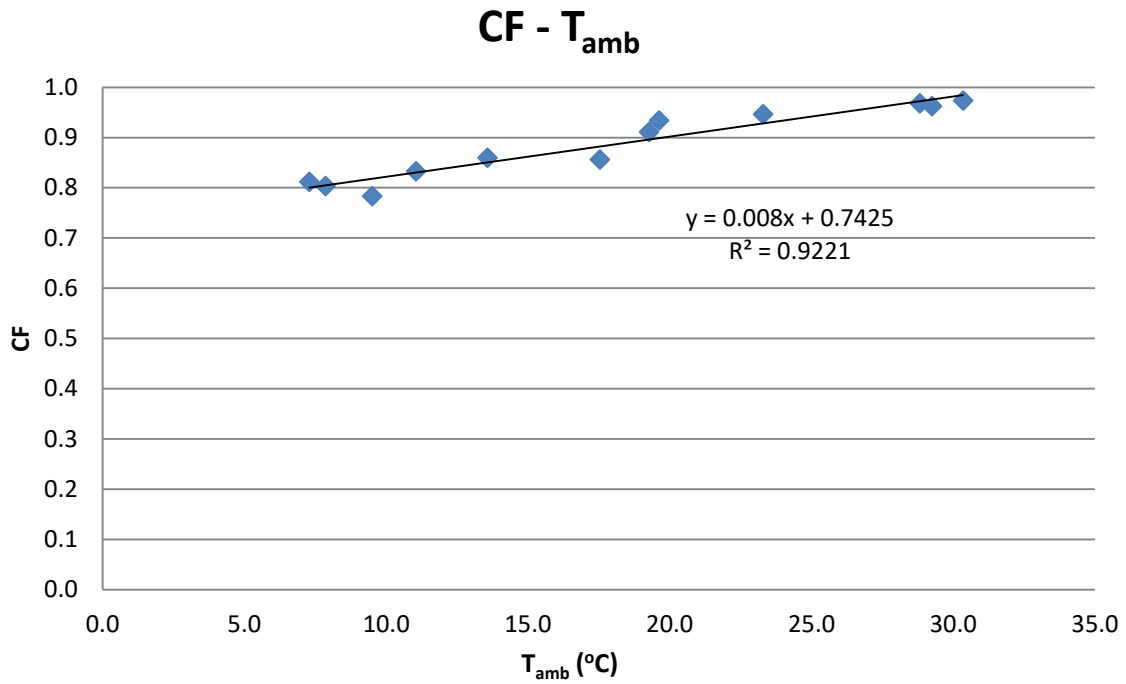
Σχήμα 8.6: Διάγραμμα θερμοκρασίας συμπύκνωσης T_{con} – θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} για το κύκλωμα MT



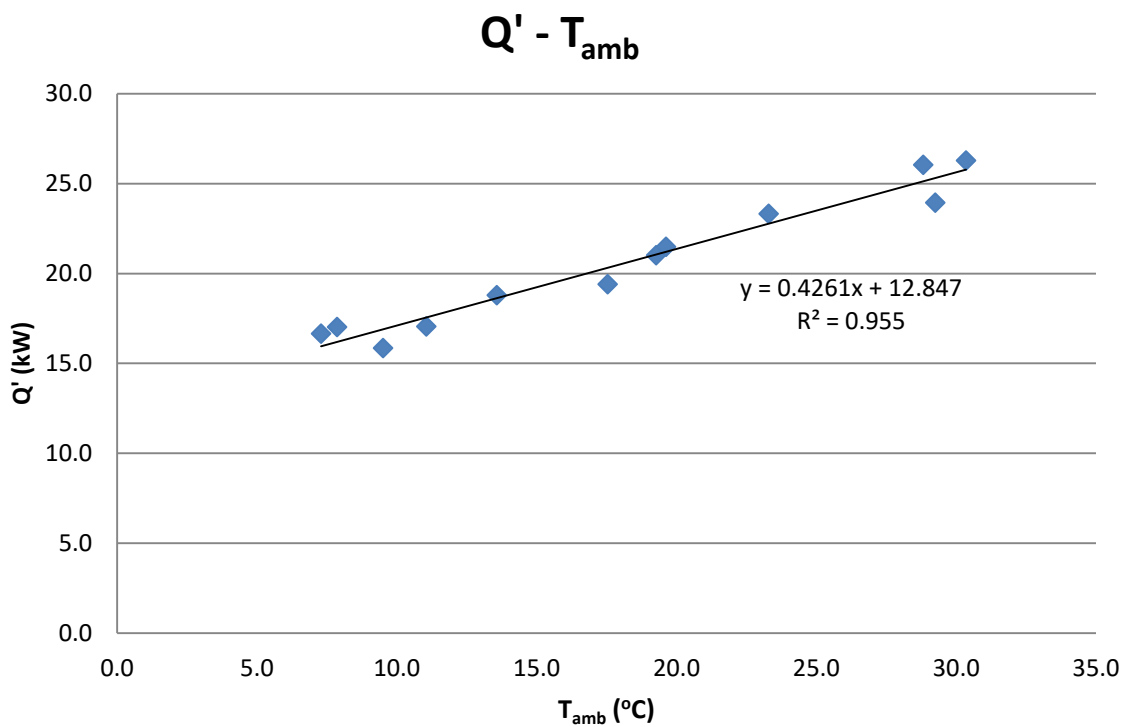
Σχήμα 8.7: Διάγραμμα υψηλής πίεσης λειτουργίας HP – θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} για το κύκλωμα MT



Σχήμα 8.8: Διάγραμμα θερμοκρασιακής διαφοράς υπερθέρμανσης SH – θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} για το κύκλωμα MT



Σχήμα 8.9: Διάγραμμα συντελεστή φορτίου CF – θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} για το κύκλωμα MT



Σχήμα 8.10: Διάγραμμα μέσου ψυκτικού φορτίου συνεχούς λειτουργίας Q' – θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} για το κύκλωμα MT

Στα Σχήματα 8.2-8.10, παρατηρούμε ότι εξαιρουμένης της πίεσης και θερμοκρασίας ατμοποίησης, οι οποίες εξαρτώνται από τη ρύθμιση θερμοκρασίας εντός των ψυγείων και ψυκτικών θαλάμων και συνεπώς είναι περίπου σταθερές, όλα τα υπόλοιπα θερμοδυναμικά μεγέθη, καθώς και τα μεγέθη ενεργειακής απόδοσης και ισχύος του ψυκτικού κυκλώματος MT, εξαρτώνται από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η εξάρτηση αυτή μάλιστα εμφανίζεται σε όλα τα μεγέθη σε μεγάλο βαθμό γραμμική, έχοντας υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού R^2 , οι οποίοι προσεγγίζουν τη μονάδα. Ωστόσο, η βασική αλληλεξάρτηση βρίσκεται μεταξύ της θερμοκρασίας συμπύκνωσης και της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος, όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 4.2.3. Τα υπόλοιπα μεγέθη είναι αλληλοεξαρτώμενα μέσω των θερμοδυναμικών εξισώσεων του ψυκτικού κύκλου, που αναλύονται στην ενότητα 5.1.

Στη συνέχεια, όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παρούσας ενότητας, για τον προσδιορισμό του μέσου μηνιαίου ψυκτικού φορτίου, είναι αναγκαίο να λάβουμε υπόψη και τις μέρες όπου το κατάστημα δεν λειτουργεί. Για το λόγο αυτό, πέραν της τυπικής ημέρας κάθε μήνα, επιλέγουμε και μια τυπική Κυριακή του μήνα, τη δεύτερη ή τρίτη Κυριακή του μήνα δηλαδή, η μέση θερμοκρασία της οποίας προσεγγίζει σε μεγαλύτερο βαθμό, από τις υπόλοιπες Κυριακές, τη μέση θερμοκρασία του μήνα.

Αντίστοιχα με την ανάλυση που έγινε για την τυπική μέρα κάθε μήνα, λαμβάνουμε από τον αναλυτή απόδοσης και συγκεντρώνουμε στον πίνακα του Σχήματος 8.11, τις μέσες τιμές των βασικών μεγεθών λειτουργίας του κυκλώματος MT, για την τυπική Κυριακή κάθε μήνα.

| | ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ | ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ | ΜΑΡΤΙΟΣ | ΑΠΡΙΛΙΟΣ | ΜΑΙΟΣ | ΙΟΥΝΙΟΣ | ΙΟΥΛΙΟΣ | ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ | ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ | ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ | ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ | ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ |
|--------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|-------------|------------|------------|------------|
| <i>sundays</i> | 15/01/2017 | 19/02/2017 | 19/03/2017 | 16/04/2017 | 21/05/2017 | 12/6/2016 | 17/7/2016 | 14/08/2016 | 18/09/2016 | 23/10/2016 | 13/11/2016 | 11/12/2016 |
| T_{amb} (°C) | 10.0 | 11.8 | 15.3 | 16.8 | 22.9 | 24.0 | 28.3 | 24.7 | 27.9 | 19.1 | 17.0 | 10.4 |
| $T - T_m$ | -8.1 | -6.3 | -2.8 | -1.3 | 4.7 | 5.9 | 10.2 | 6.6 | 9.7 | 1.0 | -1.1 | -7.7 |
| LP (bar) | 4.0 | 4.0 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 4.0 |
| HP (bar) | 14.0 | 11.5 | 12.2 | 13.1 | 13.2 | 15.2 | 15.6 | 15.5 | 15.6 | 14.5 | 13.6 | 13.0 |
| T_{evap} (°C) | -6.0 | -6.0 | -6.5 | -6.5 | -6.3 | -6.3 | -6.3 | -6.2 | -6.3 | -6.2 | -6.1 | -6.1 |
| T_{con} (°C) | 32.1 | 25.0 | 27.1 | 29.7 | 30.0 | 35.2 | 36.1 | 36.0 | 36.1 | 33.5 | 31.1 | 29.4 |
| SC (K) | 1.4 | 2.0 | 2.1 | 1.9 | 1.5 | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 0.9 |
| SH (K) | 14.9 | 16.7 | 18.7 | 19.6 | 18.3 | 20.0 | 20.9 | 20.8 | 20.4 | 18.6 | 17.6 | 17.6 |
| COP | 3.6 | 4.6 | 4.2 | 3.9 | 3.8 | 3.2 | 3.1 | 3.1 | 3.1 | 3.4 | 3.6 | 3.9 |
| P_{el} (kW) | 5.0 | 4.4 | 4.4 | 4.9 | 5.1 | 6.8 | 7.3 | 7.1 | 7.3 | 6.0 | 5.6 | 4.8 |
| Q_{con} (kW) | 21.9 | 23.3 | 21.9 | 22.7 | 23.1 | 27.6 | 28.7 | 28.2 | 29.1 | 24.9 | 24.9 | 22.2 |
| Q_{evap} (kW) | 17.6 | 19.5 | 18.2 | 18.6 | 18.7 | 21.6 | 22.2 | 21.9 | 22.5 | 19.6 | 20.0 | 18.1 |
| zeros (hours) | 7.8 | 8.1 | 6.7 | 5.8 | 2.1 | 3.2 | 2.2 | 2.5 | 2.5 | 4.1 | 4.8 | 7.2 |
| CF | 0.67 | 0.66 | 0.72 | 0.76 | 0.91 | 0.87 | 0.91 | 0.89 | 0.90 | 0.83 | 0.80 | 0.70 |
| Q' (kW) | 11.9 | 13.0 | 13.2 | 14.1 | 17.0 | 18.7 | 20.2 | 19.6 | 20.2 | 16.3 | 16.0 | 12.7 |
| E_{el} (kWh/day) | 80.0 | 66.3 | 72.2 | 85.4 | 33.0 | 142.0 | 159.3 | 154.6 | 158.9 | 118.5 | 107.8 | 79.5 |

Σχήμα 8.11: Συγκεντρωτικός πίνακας μεγεθών λειτουργίας κυκλώματος MT τυπικής Κυριακής κάθε μήνα

Στον πίνακα του Σχήματος 8.11, γίνονται οι ίδιες παρατηρήσεις με αυτές του αντίστοιχου πίνακα του Σχήματος 8.1, με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση τα μεγέθη ισχύος του ψυκτικού κύκλου P_{el} , Q_{con} και Q_{evap} εμφανίζονται μικρότερα από τα αντίστοιχα μεγέθη των τυπικών ημερών. Αυτό συμβαίνει, διότι όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παρούσας

ενότητας, τις Κυριακές που το κατάστημα δεν λειτουργεί, οι ανάγκες ψυκτικού φορτίου είναι μικρότερες, γεγονός που φανερώνεται και από τις μικρότερες τιμές του συντελεστή φορτίου CF, αφού η διάταξη συμπιεστών λειτουργεί αθροιστικά για μικρότερο αριθμό ωρών.

Έχοντας υπολογίσει το μέσο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας Q' , τόσο για τις μέρες κατά τις οποίες το κατάστημα λειτουργεί κανονικά, όσο και για τις Κυριακές, κατά τις οποίες το κατάστημα παραμένει κλειστό, καλούμαστε να εισάγουμε ένα μέγεθος, το οποίο θα συμπεριλαμβάνει και τις δύο αυτές περιπτώσεις, ανάλογα με τον αριθμό των Κυριακών κάθε μήνα. Το μέγεθος αυτό, το ονομάζουμε μέσο ισοδύναμο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας μηνός Q^* και υπολογίζεται για κάθε μήνα ως:

$$Q^* = Q'_{\text{sundays}} \cdot \frac{n_{\text{sundays}}}{n} + Q'_{\text{weekday}} \cdot \frac{n - n_{\text{sundays}}}{n} \quad (8.3)$$

Όπου,

Q'_{sundays} : μέσο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας τυπικής Κυριακής του μήνα

Q'_{weekday} : μέσο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας τυπικής ημέρας του μήνα

n_{sundays} : πλήθος Κυριακών του μήνα

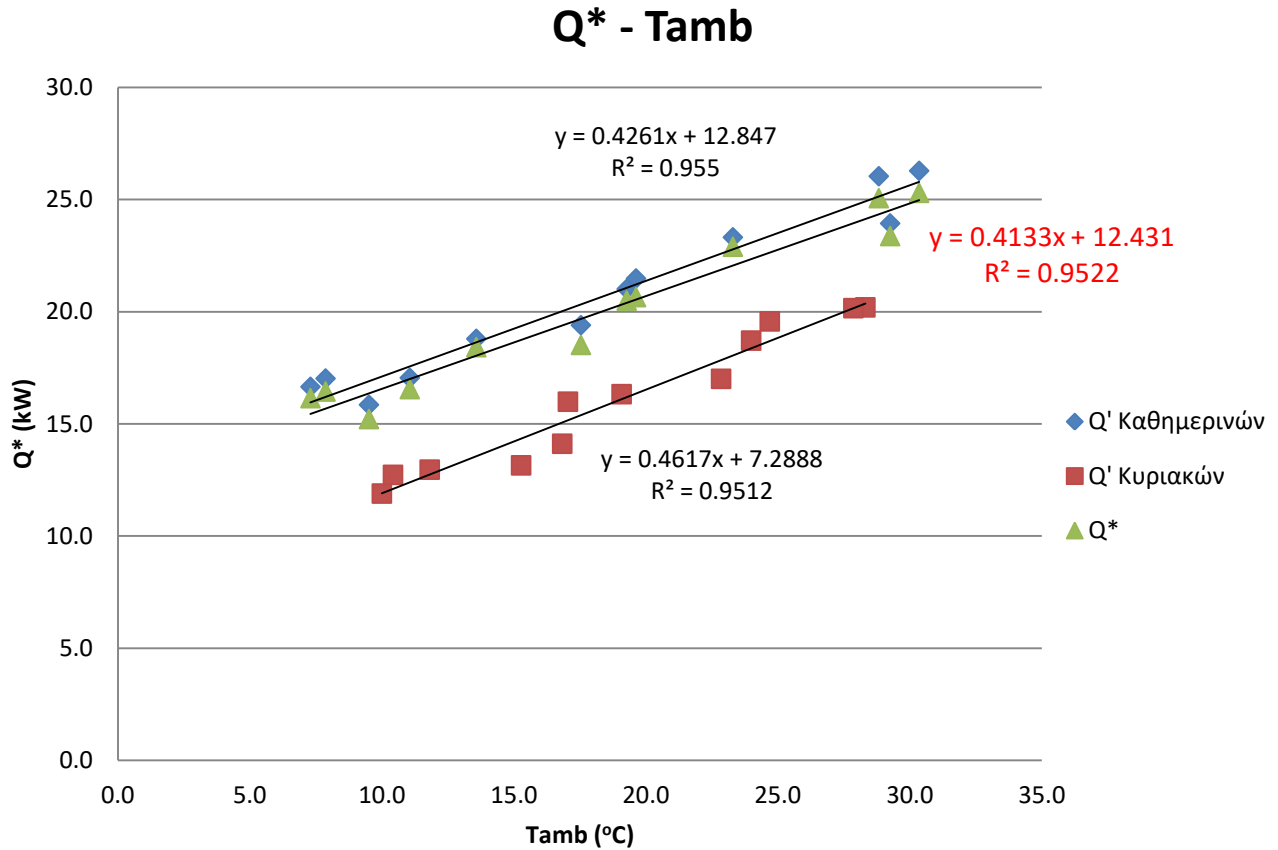
n : πλήθος ημερών του μήνα

Θεωρώντας την μέση θερμοκρασία της τυπικής ημέρας κάθε μήνα, ίση με τη μέση θερμοκρασία του μήνα, κατασκευάζουμε τον πίνακα του Σχήματος 8.12, όπου με χρήση της εξίσωσης (8.3), υπολογίζουμε το μέσο ισοδύναμο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας κάθε μήνα.

| | ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ | ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ | ΜΑΡΤΙΟΣ | ΑΠΡΙΛΙΟΣ | ΜΑΙΟΣ | ΙΟΥΝΙΟΣ | ΙΟΥΛΙΟΣ | ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ | ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ | ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ | ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ | ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ |
|-------------------------------------|------------|-------------|---------|----------|-------|---------|---------|-----------|-------------|-----------|-----------|------------|
| $T_{\text{amb}} (^{\circ}\text{C})$ | 9.5 | 7.9 | 11.1 | 17.5 | 19.3 | 28.8 | 30.4 | 29.3 | 23.3 | 19.6 | 13.6 | 7.3 |
| n | 31 | 28 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 |
| n_{sundays} | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 |
| $Q'_{\text{weekdays}} (\text{kW})$ | 15.9 | 17.0 | 17.1 | 19.4 | 21.0 | 26.0 | 26.3 | 23.9 | 23.3 | 21.5 | 18.8 | 16.7 |
| $Q'_{\text{sundays}} (\text{kW})$ | 11.9 | 13.0 | 13.2 | 14.1 | 17.0 | 18.7 | 20.2 | 19.6 | 20.2 | 16.3 | 16.0 | 12.7 |
| $Q^* (\text{kW})$ | 15.2 | 16.4 | 16.5 | 18.5 | 20.5 | 25.1 | 25.3 | 23.4 | 22.9 | 20.6 | 18.4 | 16.1 |

Σχήμα 8.12: Πίνακας υπολογισμού μέσου ισοδύναμου ψυκτικού φορτίου συνεχής λειτουργίας μηνός

Συνεπώς, το μέσο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας Q' , τόσο μιας τυπικής ημέρας, όσο και μιας τυπικής Κυριακής, καθώς και το μέσο ισοδύναμο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας του μήνα, παρατίθενται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 8.13, συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος.



Σχήμα 8.13: Διάγραμμα μέσου ισοδύναμου ψυκτικού φορτίου μηνός Q^* συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} , για το κύκλωμα MT

Από το διάγραμμα του Σχήματος 8.13, επιβεβαιώνουμε αρχικά, ότι η εξάρτηση του ψυκτικού φορτίου με την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος ισχύει, όχι μόνο για τις καθημερινές, όπου το κατάστημα λειτουργεί κανονικά, αλλά και για τις Κυριακές, τις μέρες δηλαδή που το κατάστημα είναι κλειστό για τους πελάτες. Και για τις δύο περιπτώσεις λειτουργίας, κατάστημα ανοικτό ή κλειστό δηλαδή, η εξάρτηση του ψυκτικού φορτίου με την εξωτερική θερμοκρασία είναι, με αρκετά καλή προσέγγιση ($R^2 > 0.95$), γραμμική, με συντελεστή διεύθυνσης (κλίση) περίπου 0,4, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις γραμμικής προσέγγισης των σημείων του διαγράμματος. Το γεγονός, ότι οι ευθείες των δύο περιπτώσεων λειτουργίας του καταστήματος είναι παράλληλες, έχοντας παραπλήσια κλίση, είναι λογικό, καθώς η μόνη διαφορά ανάμεσα σε μια καθημερινή μέρα και σε μια Κυριακή, είναι η μεγάλη δραστηριότητα στο άνοιγμα των θυρίδων των ψυγείων, λόγω της παρουσίας πελατών στο κατάστημα. Η δραστηριότητα του ανοίγματος των θυρίδων, αποδίδεται στο γράφημα στην κατακόρυφη μετατόπιση της ευθείας $Q^* - T_{amb}$, από την περίπτωση της Κυριακής στην περίπτωση της καθημερινής. Αφαιρώντας λοιπόν, τα σταθερά μέρη των εξισώσεων των ευθειών των καμπυλών $Q^* - T_{amb}$, των δύο περιπτώσεων λειτουργίας του καταστήματος, υπολογίζουμε προσεγγιστικά ότι το άνοιγμα των θυρίδων από τους πελάτες του καταστήματος, μία τυπική ημέρα λειτουργίας αυξάνει την απαίτηση ψυκτικού φορτίου κατά 5.6 kW, περίπου 24% αύξηση δηλαδή. Αυτό το επιπλέον

απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο, που προκύπτει από τη δραστηριότητα ανοίγματος των θυρίδων των ψυγείων, οφείλεται στην εισχώρηση θερμού αέρα εντός του ψυγείου από το χώρο πωλήσεων του καταστήματος και το μεγάλο ποσοστό του προς το ολικό ψυκτικό φορτίο του κύκλωματος MT, οδηγεί στην ανάγκη περιορισμού αυτών των απωλειών ισχύος, στα πλαίσια της ενεργειακής εξοικονόμησης του καταστήματος.

Παρατηρούμε επίσης στο διάγραμμα του Σχήματος 8.13, ότι η ευθεία των σημείων του μέσου ισοδύναμου ψυκτικού φορτίου Q^* , είναι παράλληλη προς τις ευθείες των ψυκτικών φορτίων συνεχούς λειτουργίας Q' και μάλιστα βρίσκεται ανάμεσά τους, πιο κοντά στην ευθεία του ψυκτικού φορτίου της τυπικής καθημερινής. Το γεγονός αυτό, είναι αναμενόμενο καθώς το μέσο ισοδύναμο ψυκτικό φορτίο Q^* , αποτελεί ουσιαστικά τον σταθμικό μέσο των μέσων ψυκτικών φορτίων Q' των δύο περιπτώσεων λειτουργίας του σουπερμάρκετ. Ακόμη, όπως και για τις περιπτώσεις των μέσων ψυκτικών φορτίων Q' , έτσι και το μέσο ισοδύναμο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας Q^* , εξαρτάται γραμμικά από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος, μέσω της εξίσωσης της ευθείας:

$$y = 0.4133 \cdot x + 12.431 \quad (8.4)$$

Συνεπώς, είμαστε σε θέση να προτείνουμε ένα μοντέλο προσδιορισμού του μέσου ισοδύναμου ψυκτικού φορτίου συνεχούς λειτουργίας για κάθε μήνα του έτους, με βάση την επικρατούσα μέση εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος κάθε μήνα. Το μοντέλο αυτό περιγράφεται από την εξίσωση (8.5) και προκύπτει από τη γραμμική εξάρτηση της εξίσωσης (8.4).

$$Q^* = 0.4133 \cdot T_{amb} + 12.431 \quad (8.5)$$

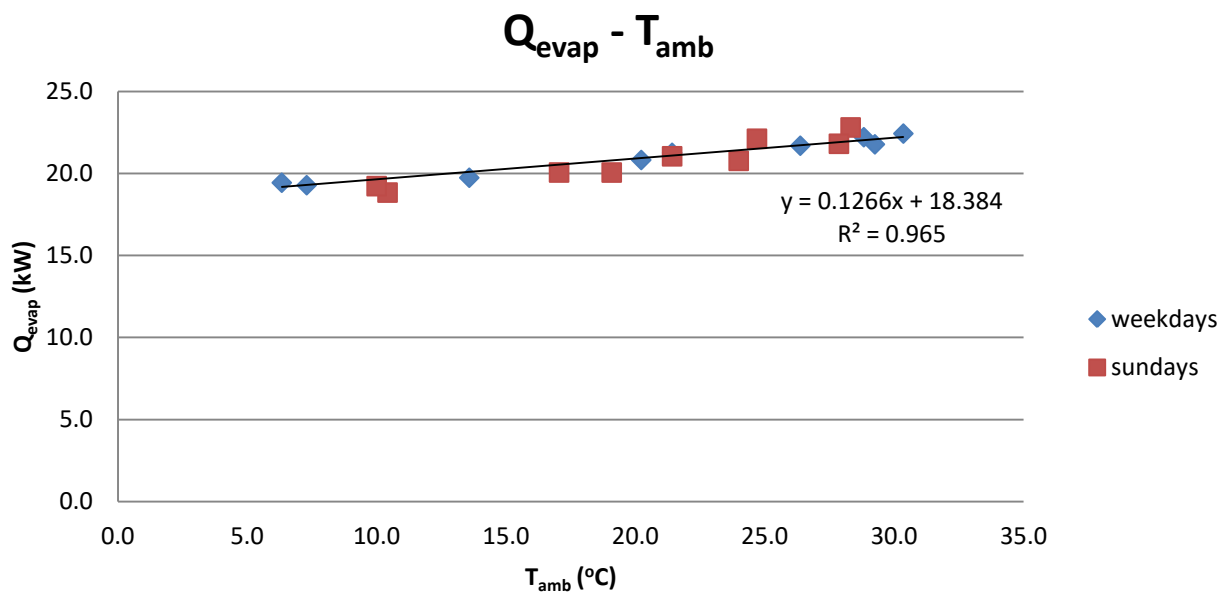
Ουσιαστικά, μέσω της εξίσωσης (8.5), μπορούμε προσεγγιστικά να υπολογίσουμε το ψυκτικό φορτίο Q_{evap} , με μοναδική παράμετρο την επικρατούσα εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος, κάθε χρονική στιγμή.

Τέλος, μέσω της επίλυσης των θερμοδυναμικών εξισώσεων του ψυκτικού κύκλου, προσδιορίζοντας το ψυκτικό φορτίο μέσω της εξίσωσης (8.5), μπορούμε ακολούθως να υπολογίσουμε, για κάθε χρονική στιγμή, την προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ στη διάταξη συμπιεστών P_{el} και το φορτίο συμπίκνωσης Q_{con} . Επίσης, θεωρώντας μια αντιπροσωπευτική μέση θερμοκρασία για κάθε μήνα, μπορούμε πάλι μέσω της εξίσωσης (8.5), να προβλέψουμε το μέσο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας κάθε μήνα, ακολούθως το P_{el} και τη μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και εν τέλει την συνολική ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας (MT) της ψυκτικής εγκατάστασης του σουπερμάρκετ.

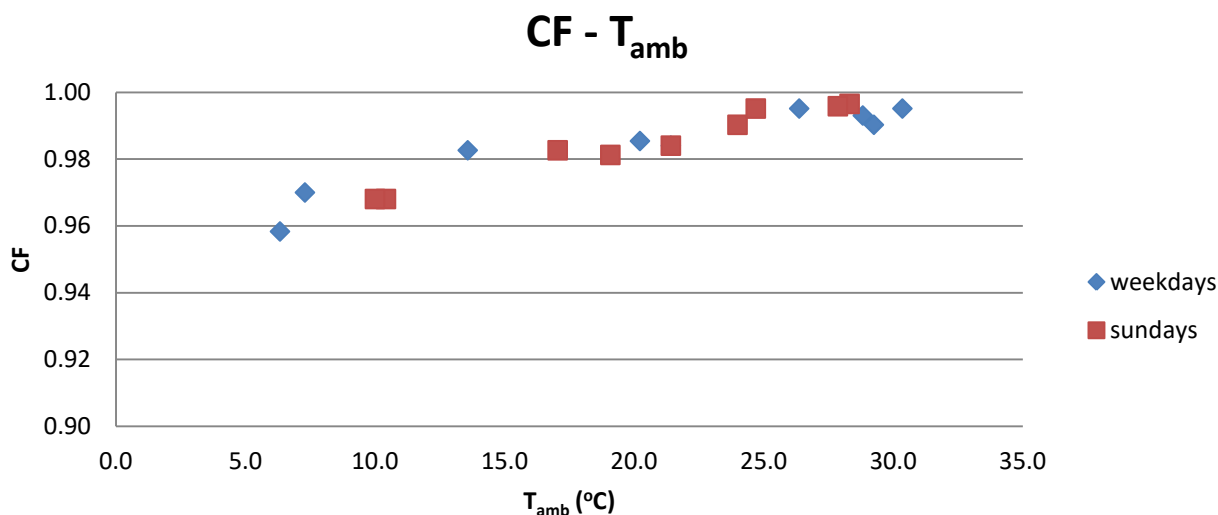
8.1.2 Κύκλωμα LT

Το κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας LT, όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 4.2.2, περιλαμβάνει τους καταψύκτες του σουπερμάρκετ. Όπως και στην περίπτωση του κυκλώματος συντήρησης (MT), έτσι και στην περίπτωση του κυκλώματος κατάψυξης (LT), το ψυκτικό φορτίο εξαρτάται από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος, για τους ίδιους λόγους που αναλύθηκαν και για το κύκλωμα MT στην ενότητα 8.1.

Ωστόσο, στην περίπτωση του κυκλώματος κατάψυξης (LT), δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση του ψυκτικού φορτίου, μεταξύ των ημερών που το κατάστημα είναι ανοικτό για τους πελάτες και των ημερών που το κατάστημα παραμένει κλειστό. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα των Σχημάτων 8.14,8.15, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή του ψυκτικού φορτίου Q_{evap} και του συντελεστή φορτίου CF συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας, για την τυπική καθημερινή και την τυπική Κυριακή κάθε μήνα, από τον Μάιο του 2016 έως τον Ιανουάριο του 2017.



Σχήμα 8.14: Διάγραμμα ψυκτικού φορτίου Q_{evap} συναρτήσει εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος για καθημερινές και Κυριακές, για το κύκλωμα LT

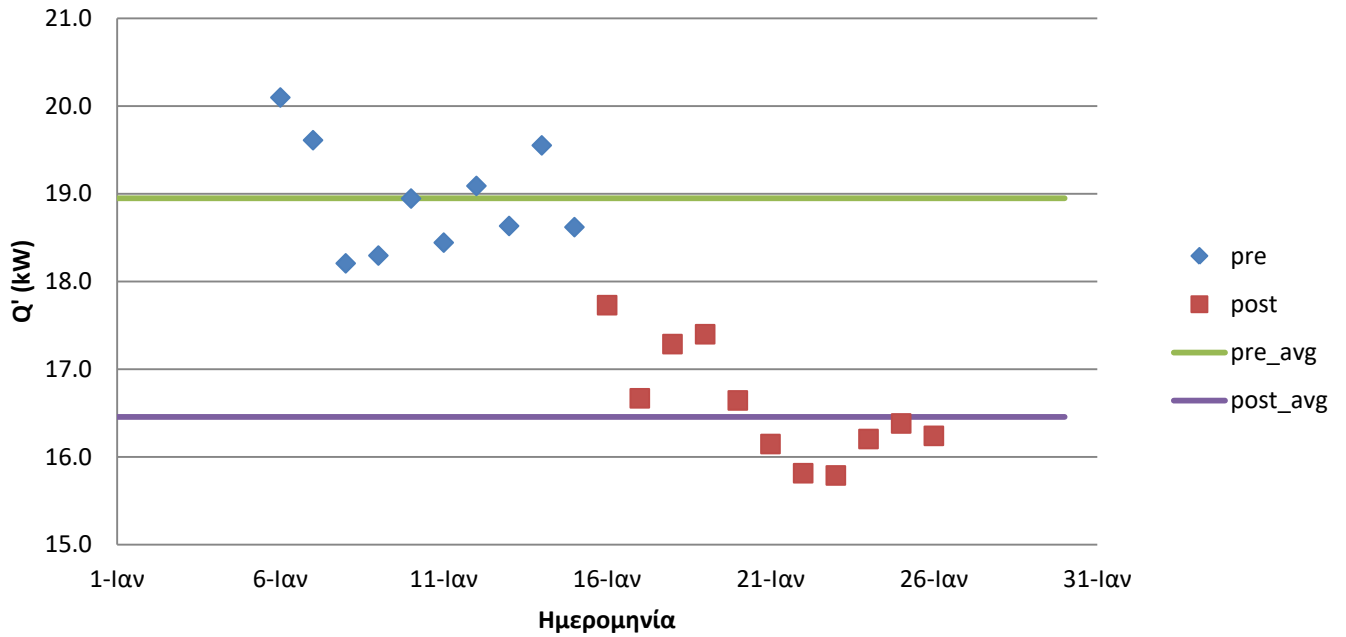


Σχήμα 8.15: Διάγραμμα συντελεστή φορτίου CF συναρτήσει εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος για καθημερινές και Κυριακές, για το κύκλωμα LT

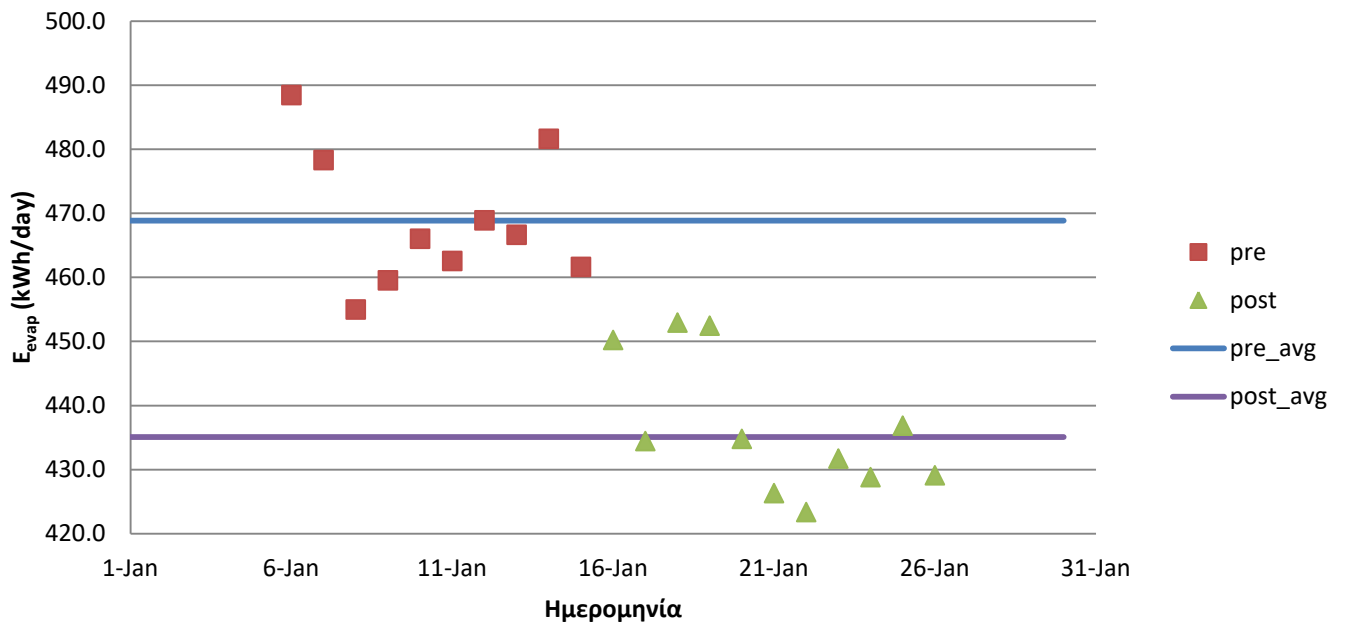
Στο διάγραμμα του Σχήματος 8.14 παρατηρούμε, ότι το απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο Q_{evap} στους καταψύκτες εξαρτάται μόνο από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μάλιστα η εξάρτηση αυτή είναι με πολύ καλή προσέγγιση ($R^2=0.96$) γραμμική, όπως άλλωστε ισχύει και στην περίπτωση του κυκλώματος συντήρησης. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει διαφοροποίηση του ψυκτικού φορτίου μεταξύ των καθημερινών και των Κυριακών. Το γεγονός αυτό οφείλεται, στο ότι για τα συστήματα κατάψυξης οι απώλειες θερμότητας με το εξωτερικό περιβάλλον του καταψύκτη είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των συστημάτων συντήρησης, λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασιακής διαφοράς. Επομένως, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 8.15, και για τις δύο περιπτώσεις λειτουργίας του καταστήματος, παρατηρούνται μεγάλες τιμές του συντελεστή φορτίου CF, οι οποίες εξαρτώνται μόνο από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει, πως ανεξάρτητα από το αν υπάρχει μεγάλη δραστηριότητα ανοίγματος των θυρίδων των καταψυκτών ή όχι, η διάταξη συμπιεστών λειτουργεί με μεγάλους συντελεστές φόρτισης, δηλαδή σχεδόν για όλη τη διάρκεια της ημέρας, προκειμένου να καλύψει τα απαιτούμενα ψυκτικά φορτία.

Κατά την 16^η Ιανουαρίου και μετά, την ημέρα δηλαδή που έλαβε χώρα η αλλαγή της υψηλής πίεσης των κυκλωμάτων MT και LT, παρατηρείται μια ελαφρά μείωση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου στους καταψύκτες του σουπερμάρκετ. Η αλλαγή αυτή γίνεται αντιληπτή στα Σχήματα 8.16 και 8.17, όπου παρουσιάζονται οι τιμές του μέσου ψυκτικού φορτίου συνεχούς λειτουργίας Q' , καθώς και της ημερήσιας ενέργειας ατμοποίησης του ψυκτικού μέσου εντός των καταψυκτών E_{evap} , για 10 μέρες πριν (pre) και 10 μέρες μετά (post) την αλλαγή της υψηλής πίεσης HP στο κύκλωμα. Στα διαγράμματα αυτά, παρουσιάζονται επίσης οι μέσες τιμές των μεγεθών Q' και E_{evap} , πριν και μετά την αλλαγή. Ακόμη στον πίνακα του Σχήματος 8.18, συγκεντρώνονται οι μέσες τιμές των

βασικών μεγεθών ψυκτικής ισχύος και απόδοσης του κυκλώματος LT, για τις δύο περιόδους (pre και post), οι οποίες παρέχονται από τον αναλυτή απόδοσης.



Σχήμα 8.16: Διακύμανση μέσου ψυκτικού φορτίου συνεχούς λειτουργίας Q' για το διάστημα 6-26 Ιανουαρίου 2017, για το κύκλωμα LT

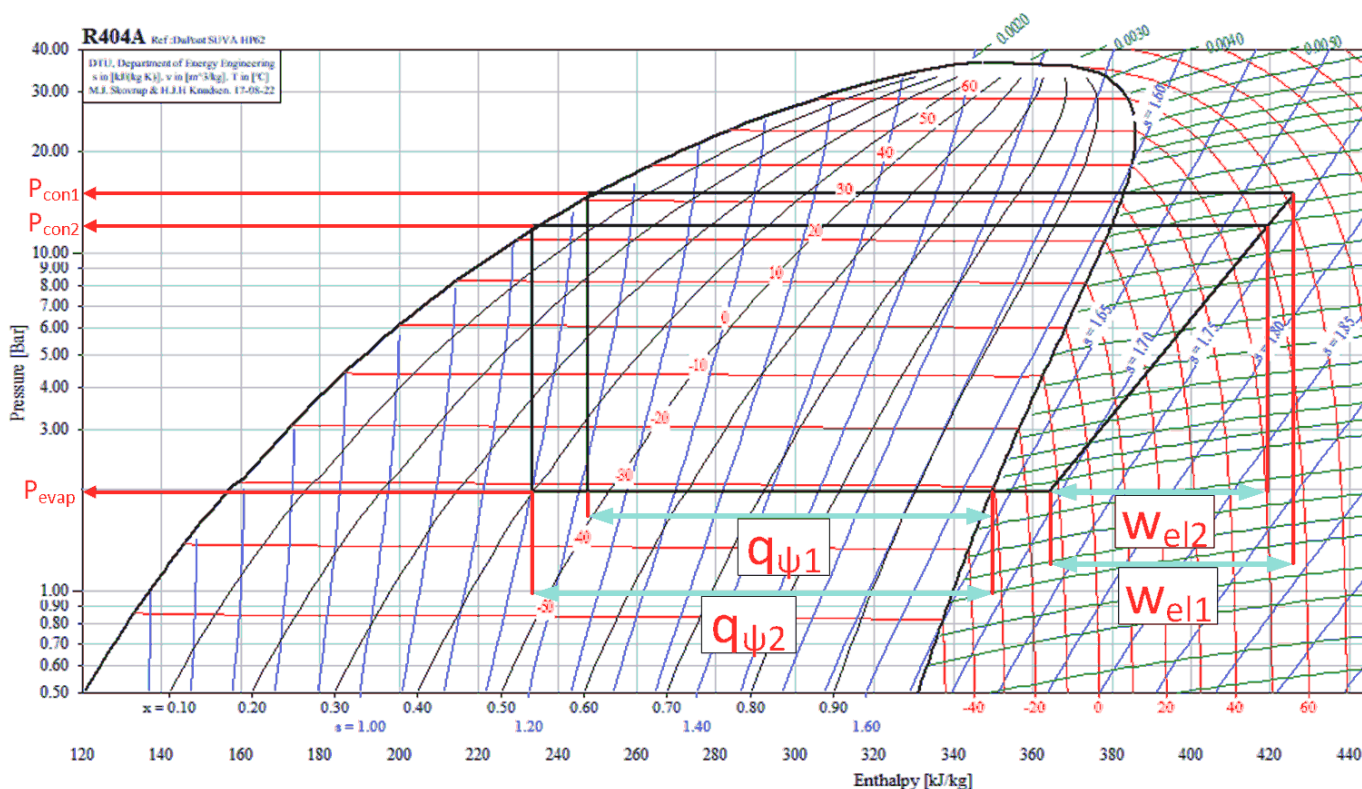


Σχήμα 8.17: Διακύμανση ενέργειας ατμοποίησης του ψυκτικού μέσω E_{evap} για το διάστημα 6-26 Ιανουαρίου 2017, για το κύκλωμα LT

| | pre | post | dev |
|----------------------|-------|-------|--------|
| Q_{evap} (kW) | 19.5 | 18.1 | -7.2% |
| P_{el} (kW) | 12.3 | 8.7 | -29.5% |
| COP | 1.6 | 2.1 | 29.5% |
| CF | 0.97 | 0.91 | -6.4% |
| E_{evap} (kWh/day) | 468.8 | 435.1 | -7.2% |

Σχήμα 8.18: Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων τιμών ψυκτικής ισχύος και απόδοσης για διαστήματα 10 ημερών πριν και μετά την αλλαγή της υψηλής πίεσης λειτουργίας, για το κύκλωμα LT

Στα διαγράμματα του Σχήματος 8.16, παρατηρούμε πράγματι μια ελαφρά μείωση της τάξης των 2kW στο μέσο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας Q' , μετά την αλλαγή της υψηλής πίεσης λειτουργίας του κυκλώματος LT. Το γεγονός, αυτό οφείλεται στο ότι μετά τη μείωση της υψηλής πίεσης λειτουργίας HP, το ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου ψυκτικό φορτίο q_{ψ} είναι μεγαλύτερο ($q_{\psi 2} > q_{\psi 1}$) και επομένως, οι συμπιεστές λειτουργούν λιγότερες ώρες για την κάλυψη του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου στους καταψύκτες του καταστήματος. Από τις τιμές του συντελεστή φορτίου στον πίνακα του Σχήματος 8.18, παρατηρούμε ότι πράγματι μετά την αλλαγή η διάταξη συμπιεστών λειτουργεί με μικρότερες τιμές CF, δηλαδή για λιγότερες ώρες μέσα στην ημέρα. Η διαφοροποίηση του ψυκτικού κύκλου λόγω της μείωσης της υψηλής πίεσης λειτουργίας HP στο κύκλωμα LT, παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.19.



Σχήμα 8.19: Διάγραμμα ψυκτικών κύκλων διαφορετικής θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο κύκλωμα LT [44]

Στα διάγραμμα του Σχήματος 8.19 παρατηρούμε, ότι λόγω της μείωσης τη υψηλής πίεσης λειτουργίας HP, από P_{con1} σε P_{con2} , αφενός μειώνεται η ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς στη διάταξη συμπιεστών ($w_{el2} < w_{el1}$) και αφετέρου αυξάνεται το ανηγμένο ψυκτικό φορτίο στον ατμοποιητή ($q_{\psi2} > q_{\psi1}$).

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτεύχθηκε, κατά την 16^η Ιανουαρίου, μέσω της ρύθμισης της υψηλής πίεσης λειτουργίας HP σε χαμηλότερα επίπεδα, οφείλεται τόσο στην αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς COP του ψυκτικού κύκλου, όσο και στη μείωση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου Q_{evap} . Συγκεκριμένα, μέσω του πίνακα του Σχήματος 8.18, έχουμε:

Λόγω της μείωσης του ψυκτικού φορτίου:

$$\text{Προβλεπόμενο } P_{el1}: \quad P_{el1} = \frac{(Q_{evap})_{post}}{(COP)_{pre}} = 11.4 \text{ kW}$$

$$\text{Βελτίωση του } P_{el} \text{ κατά:} \quad dP_{el1} = \frac{(P_{el})_{pre} - P_{el1}}{(P_{el})_{pre}} = 7.1 \%$$

Λόγω της αύξησης του COP:

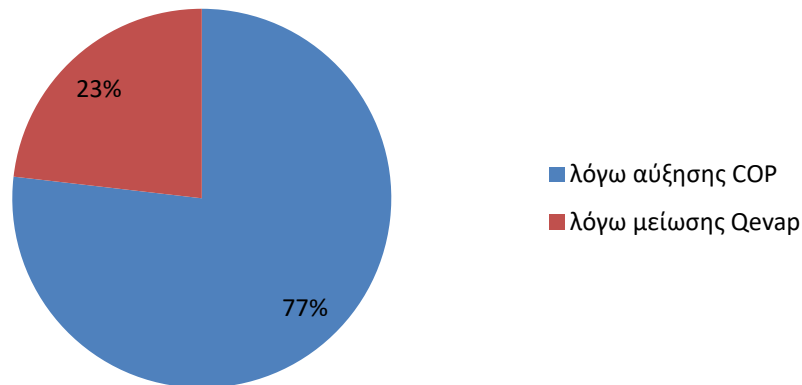
$$\text{Προβλεπόμενο } P_{el2}: \quad P_{el2} = \frac{(Q_{evap})_{pre}}{(COP)_{post}} = 9.37 \text{ kW}$$

$$\text{Βελτίωση του } P_{el} \text{ κατά:} \quad dP_{el2} = \frac{(P_{el})_{pre} - P_{el2}}{(P_{el})_{pre}} = 23.8 \%$$

Επομένως, προσεγγίζουμε ικανοποιητικά τη βελτίωση του P_{el} (29.5%), όπως προκύπτει από τις μετρήσεις του αναλυτή απόδοσης στον πίνακα του Σχήματος 8.18, αθροίζοντας τα επιμέρους ποσοστά βελτίωσης του P_{el} , λόγω της μείωσης του Q_{evap} και της αύξησης του COP αντίστοιχα, από όπου προκύπτει συνολική βελτίωση του P_{el} της τάξεως του 30.9%. Η μικρή διαφορά στα δύο ποσοστά, αποδίδεται σε απόκλιση των μετρούμενων τιμών των μεγεθών από τις πραγματικές τους τιμές στη μετρητική διάταξη.

Επίσης στο διάγραμμα του Σχήματος 8.20 αναπαριστώνται οι ποσοστιαίες αντιστοιχίες της αύξησης του COP και της μείωσης του Q_{evap} στη συνολική εξοικονόμηση ηλεκτρικής ισχύος P_{el} στη διάταξη των συμπιεστών, λόγω της αλλαγής της πίεσης υψηλής λειτουργίας HP, η οποία είναι της τάξης του 29.5%. Συγκεκριμένα, η μείωση του ψυκτικού φορτίου Q_{evap} , η οποία οδηγεί σε $dP_{el1} = 7.1\%$ μείωση του P_{el} , ευθύνεται για το 23% της συνολικής μείωσης του P_{el} , ενώ η αύξηση του COP, η οποία οδηγεί σε $dP_{el2} = 23.8\%$ μείωση του P_{el} , ευθύνεται για το 77% της συνολικής μείωσης του P_{el} .

Εξοικονόμηση ηλεκτρικής ισχύος P_{el}



Σχήμα 8.20: Διάγραμμα ποσοστιαίας αντιστοίχισης της αύξησης του COP και της μείωσης του Q_{evap} στη συνολική μείωση του P_{el} , για το κύκλωμα LT

Ακόμη, στο διάγραμμα του Σχήματος 8.17, παρατηρούμε μια μείωση της ενέργειας ατμοποίησης E_{evap} , η οποία επαληθεύεται από τις τιμές του πίνακα του Σχήματος 8.18 και είναι της τάξης του 7%. Λόγω του μικρού ποσοστού της, η μείωση αυτή μπορεί να αποδοθεί σε καλύτερη ρύθμιση του κυκλώματος χαμηλής θερμοκρασίας LT, η οποία γίνεται συχνά στα πλαίσια ενεργειών συντήρησης, όπως εκείνες που πραγματοποιήθηκαν κατά την 16^η Ιανουαρίου.

Στη συνέχεια, ακολουθούμε τη διαδικασία που ακολουθήθηκε και στην ενότητα 8.1.1, για τον υπολογισμό του μέσου ψυκτικού φορτίου του κυκλώματος LT. Για την επιλογή τυπικών ημερών μηνός, δεν απαιτείται η διάκριση μεταξύ Κυριακών και καθημερινών. Η διάκριση ωστόσο γίνεται, για τους μήνες πριν και μετά τη μείωση του ψυκτικού φορτίου που αναλύθηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Λαμβάνουμε λοιπόν, από τον αναλυτή απόδοσης και συγκεντρώνουμε στους πίνακες των Σχημάτων 8.18, 8.19 τις μέσες τιμές των βασικών μεγεθών λειτουργίας του κυκλώματος LT, για κάθε τυπική μέρα, των μηνών πριν και μετά τη ρύθμιση της υψηλής πίεσης, όπου χρησιμοποιείται η μέση θερμοκρασία του έτους, που υπολογίστηκε στην ενότητα 8.1.1.

| | ΜΑΙΟΣ | ΙΟΥΝΙΟΣ | ΙΟΥΛΙΟΣ | ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ | ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ | ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ | ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ | ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ | ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ |
|--------------------|------------|------------|-----------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| <i>pre</i> | 16/05/2016 | 15/06/2016 | 16/7/2016 | 16/08/2016 | 15/09/2016 | 16/10/2016 | 15/11/2016 | 16/12/2016 | 13/01/2017 |
| T_{amb} (°C) | 21.4 | 28.8 | 30.4 | 29.3 | 26.4 | 20.2 | 13.6 | 7.3 | 6.3 |
| $T - T_m$ | 3.1 | 10.5 | 12.1 | 11.0 | 8.1 | 1.9 | -4.7 | -11.0 | -12.0 |
| LP (bar) | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| HP (bar) | 16.2 | 16.7 | 16.7 | 16.5 | 16.3 | 16.1 | 16.0 | 15.8 | 15.4 |
| T_{evap} (°C) | -31.9 | -31.8 | -31.8 | -31.9 | -31.9 | -31.8 | -31.7 | -31.5 | -31.6 |
| T_{con} (°C) | 37.5 | 38.8 | 38.7 | 38.5 | 38.0 | 37.4 | 37.1 | 36.8 | 35.5 |
| SC (K) | 0.6 | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
| SH (K) | 33.3 | 33.8 | 35.1 | 35.0 | 33.6 | 33.1 | 31.6 | 30.5 | 30.6 |
| COP | 1.5 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.6 |
| P_{el} (kW) | 14.6 | 16.0 | 15.8 | 15.3 | 15.3 | 14.2 | 13.3 | 12.7 | 12.4 |
| Q_{con} (kW) | 31.5 | 33.4 | 33.5 | 32.5 | 32.4 | 30.8 | 29.1 | 28.2 | 28.1 |
| Q_{evap} (kW) | 21.3 | 22.2 | 22.4 | 21.8 | 21.7 | 20.8 | 19.7 | 19.3 | 19.4 |
| zeros (hours) | 0.4 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 1.0 |
| CF | 0.98 | 0.99 | 1.00 | 0.99 | 1.00 | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 0.96 |
| Q' (kW) | 20.9 | 22.1 | 22.3 | 21.6 | 21.6 | 20.5 | 19.4 | 18.8 | 18.6 |
| E_{el} (kWh/day) | 343.1 | 380.7 | 379.3 | 365.1 | 366.5 | 336.1 | 314.7 | 297.0 | 284.3 |

Σχήμα 8.18: Συγκεντρωτικός πίνακας μεγεθών λειτουργίας κυκλώματος LT τυπικής ημέρας κάθε μήνα, πριν τη ρύθμιση

| | ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ | ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ | ΜΑΡΤΙΟΣ | ΑΠΡΙΛΙΟΣ | ΜΑΙΟΣ | ΙΟΥΝΙΟΣ | ΙΟΥΛΙΟΣ |
|--------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <i>post</i> | 20/01/2017 | 14/02/2017 | 16/03/2017 | 15/04/2017 | 16/05/2017 | 15/06/2017 | 16/07/2017 |
| T_{amb} (°C) | 8.4 | 7.9 | 11.1 | 17.5 | 21.9 | 26.6 | 28.5 |
| $T - T_m$ | -9.9 | -10.4 | -7.2 | -0.8 | 3.6 | 8.3 | 10.2 |
| LP (bar) | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| HP (bar) | 12.0 | 12.0 | 12.1 | 12.4 | 13.8 | 14.6 | 15.1 |
| T_{evap} (°C) | -30.2 | -30.4 | -30.3 | -30.2 | -30.3 | -30.1 | -30.3 |
| T_{con} (°C) | 26.6 | 26.5 | 26.8 | 27.9 | 31.7 | 33.7 | 34.8 |
| SC (K) | 2.5 | 2.8 | 2.6 | 2.5 | 2.3 | 2.1 | 2.0 |
| SH (K) | 24.1 | 26.7 | 29.3 | 29.2 | 30.2 | 28.6 | 31.1 |
| COP | 2.1 | 2.1 | 2.2 | 2.1 | 1.9 | 1.7 | 1.7 |
| P_{el} (kW) | 8.7 | 8.5 | 8.4 | 9.0 | 10.3 | 11.3 | 11.8 |
| Q_{con} (kW) | 24.2 | 23.9 | 24.5 | 25.0 | 26.7 | 27.5 | 28.2 |
| Q_{evap} (kW) | 18.1 | 18.0 | 18.6 | 18.7 | 19.4 | 19.6 | 20.0 |
| zeros (hours) | 2.0 | 2.4 | 1.6 | 1.6 | 1.7 | 0.5 | 0.6 |
| CF | 0.92 | 0.90 | 0.94 | 0.94 | 0.93 | 0.98 | 0.98 |
| Q' (kW) | 16.6 | 16.2 | 17.4 | 17.5 | 18.1 | 19.2 | 19.5 |
| E_{el} (kWh/day) | 190.4 | 180.4 | 186.1 | 200.6 | 230.9 | 264.0 | 275.8 |

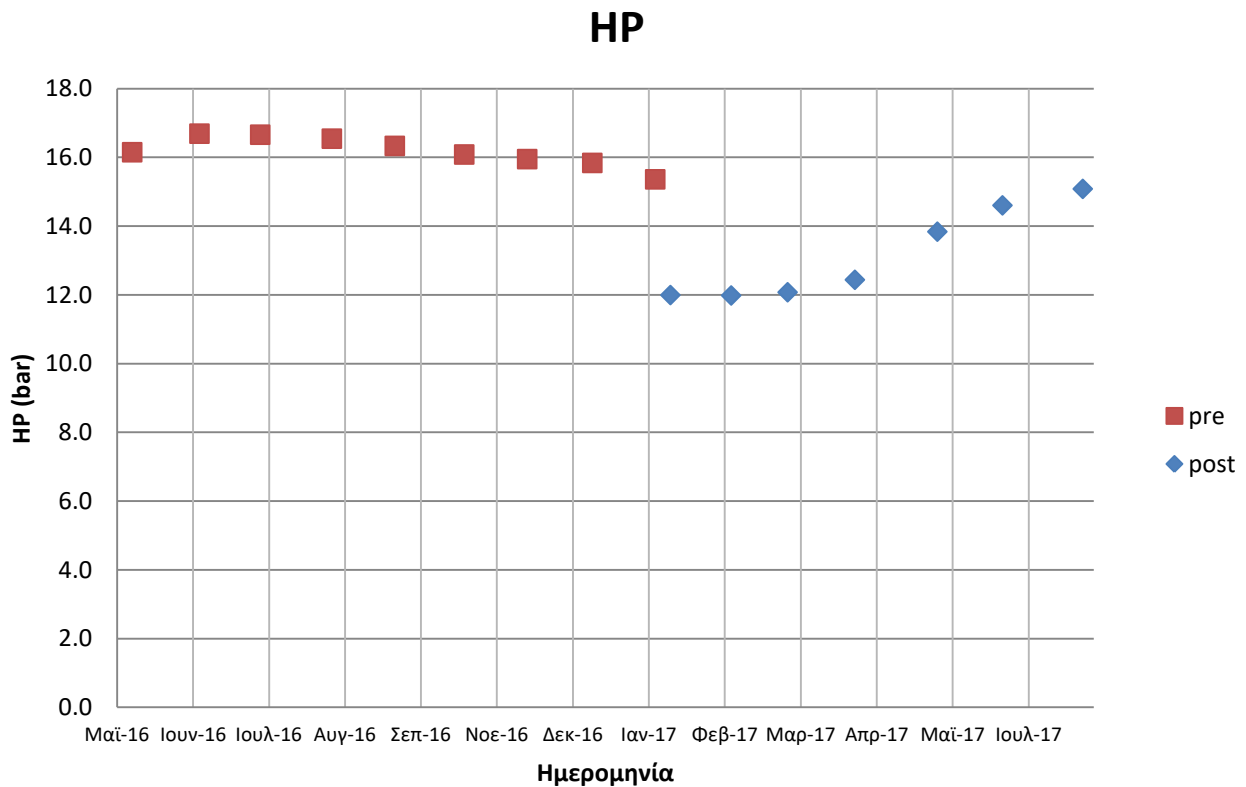
Σχήμα 8.19: Συγκεντρωτικός πίνακας μεγεθών λειτουργίας κυκλώματος LT τυπικής ημέρας κάθε μήνα, μετά τη ρύθμιση

Στους πίνακες των Σχημάτων 8.18, 8.19 παρατηρούμε, ότι η θερμοκρασία ατμοποίησης T_{evap} και κατ' επέκταση η χαμηλή πίεση λειτουργίας του κυκλώματος, είναι σχεδόν σταθερές στις τιμές -31°C και 0.9 bar (μανομετρική πίεση) αντίστοιχα. Τα μεγέθη αυτά είναι σταθερά με μικρές αυξομειώσεις, όχι μόνο για τις μέσες τιμές των ημερών, αλλά για όλες τις στιγμιαίες τιμές του έτους, λόγω της ρύθμισης της χαμηλής πίεσης από τον υπεύθυνο ψυκτικό της εγκατάστασης, όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 4.2.2.

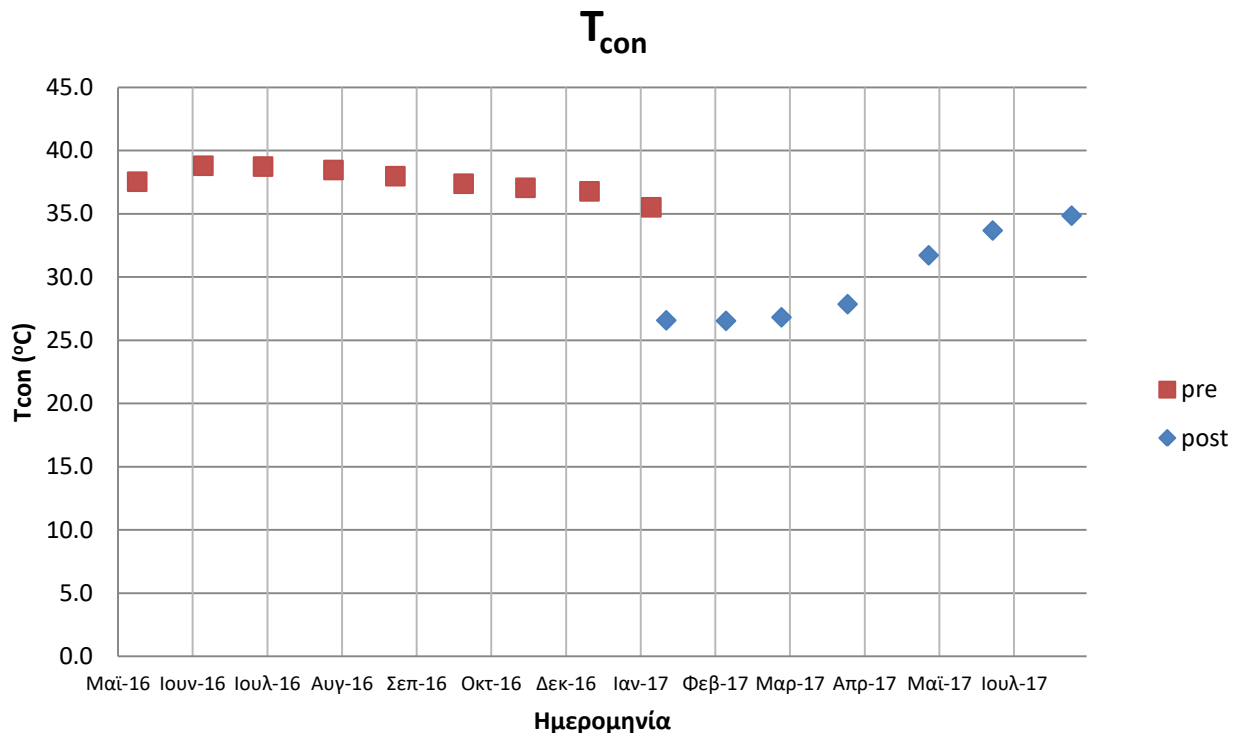
Επίσης, όπως και στο κύκλωμα MT, οι θερμοκρασιακές διαφορές υπόψυξης και υπερθέρμανσης, δεν εμφανίζουν μεγάλες αυξομειώσεις κατά τη διάρκεια του έτους και εφόσον δεν επηρεάζουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά απόδοσης του ψυκτικού κύκλου, για τα μεγέθη αυτά επιλέγονται σταθερές τιμές για τη συνέχεια της ανάλυσης. Συγκεκριμένα,

από παρατήρηση των μετρήσεων στο κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας LT, επιλέγονται τυπικές τιμές SC = 1K και SH = 31K.

Σε αντίθεση ωστόσο με το κύκλωμα MT, όπου η θερμοκρασία συμπύκνωσης και η υψηλή πίεση λειτουργίας μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους, μέσω της διάταξης του inverter, ώστε να υπάρχει μια ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά 10 °C πάνω από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος, στο κύκλωμα LT, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 6.3, η ρύθμιση αυτή γίνεται χειροκίνητα από τον υπεύθυνο ψυκτικό της ψυκτικής εγκατάστασης. Το γεγονός αυτό, γίνεται περισσότερο αντιληπτό από τη διακύμανση της υψηλής πίεσης λειτουργίας HP και της θερμοκρασίας συμπύκνωσης T_{con} στα διαγράμματα των Σχημάτων 8.20 και 8.21 αντίστοιχα.



Σχήμα 8.20: Διακύμανση υψηλής πίεσης λειτουργίας HP ψυκτικού κυκλώματος LT

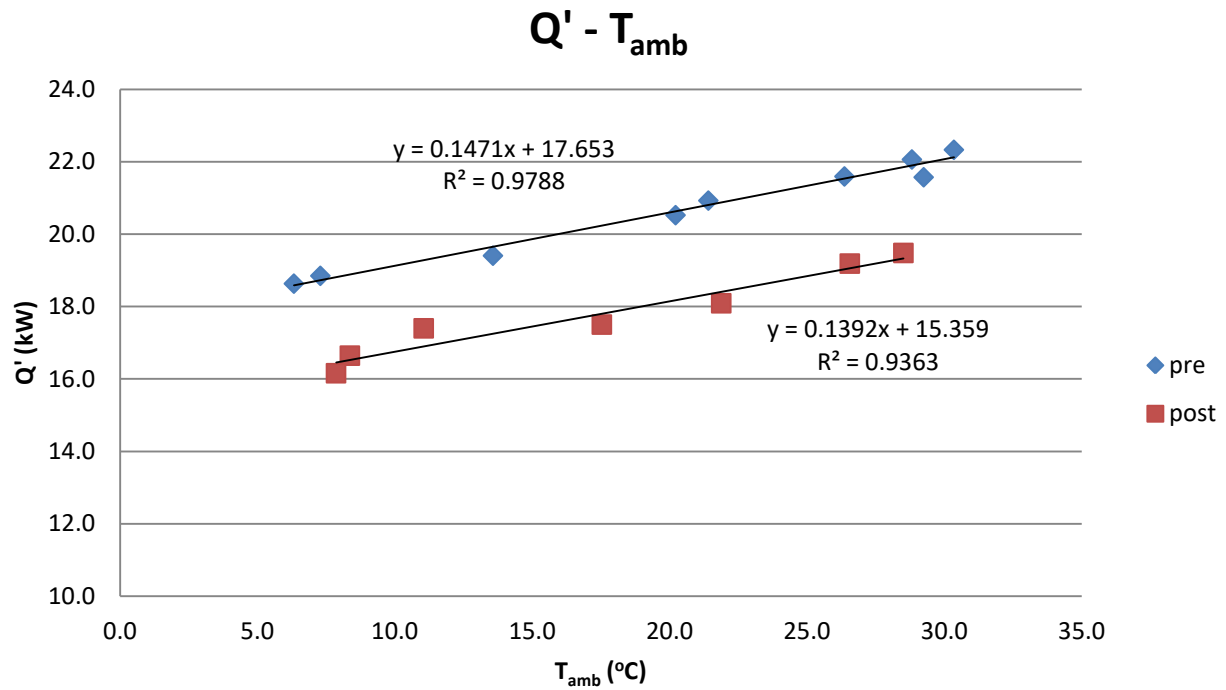


Σχήμα 8.21: Διακύμανση θερμοκρασίας συμπύκνωσης T_{con} ψυκτικού κυκλώματος LT

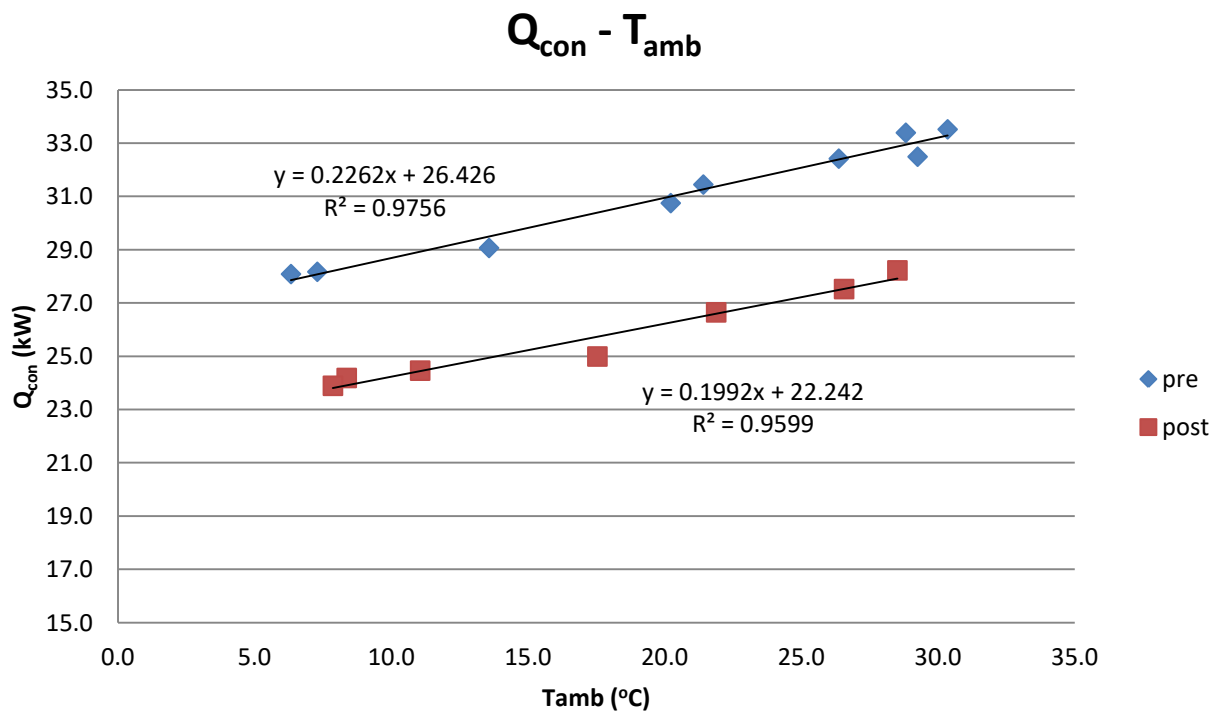
Στα διαγράμματα των Σχημάτων 8.20 και 8.21 παρατηρούμε, ότι πριν τις 16/01, HP και T_{con} είναι ρυθμισμένες στα 17 bar και 37°C αντίστοιχα, ενώ στις 16/01 γίνεται ρύθμιση των HP και T_{con} στα 12 bar και 27°C αντίστοιχα. Ακολούθως, το μήνα Μάιο HP και T_{con} ρυθμίζονται στα 14 bar και 30°C, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες, Ιούνιο και Ιούλιο, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, η ρύθμιση γίνεται στα 15 bar και 35 °C.

Επιβεβαιώνουμε λοιπόν ότι η ρύθμιση των HP και T_{con} γίνεται χειροκίνητα και επομένως τα μεγέθη αυτά δεν εξαρτώνται από την εξωτερική θερμοκρασία. Επομένως, λόγω της αλληλεξάρτησης των θερμοδυναμικών μεγεθών του ψυκτικού κύκλου, η οποία αναλύθηκε στην ενότητα 5.1, και τα υπόλοιπα θερμοδυναμικά μεγέθη, όπως ο συντελεστής συμπεριφοράς του ψυκτικού κύκλου COP, είναι ανεξάρτητα της εξωτερικής θερμοκρασίας.

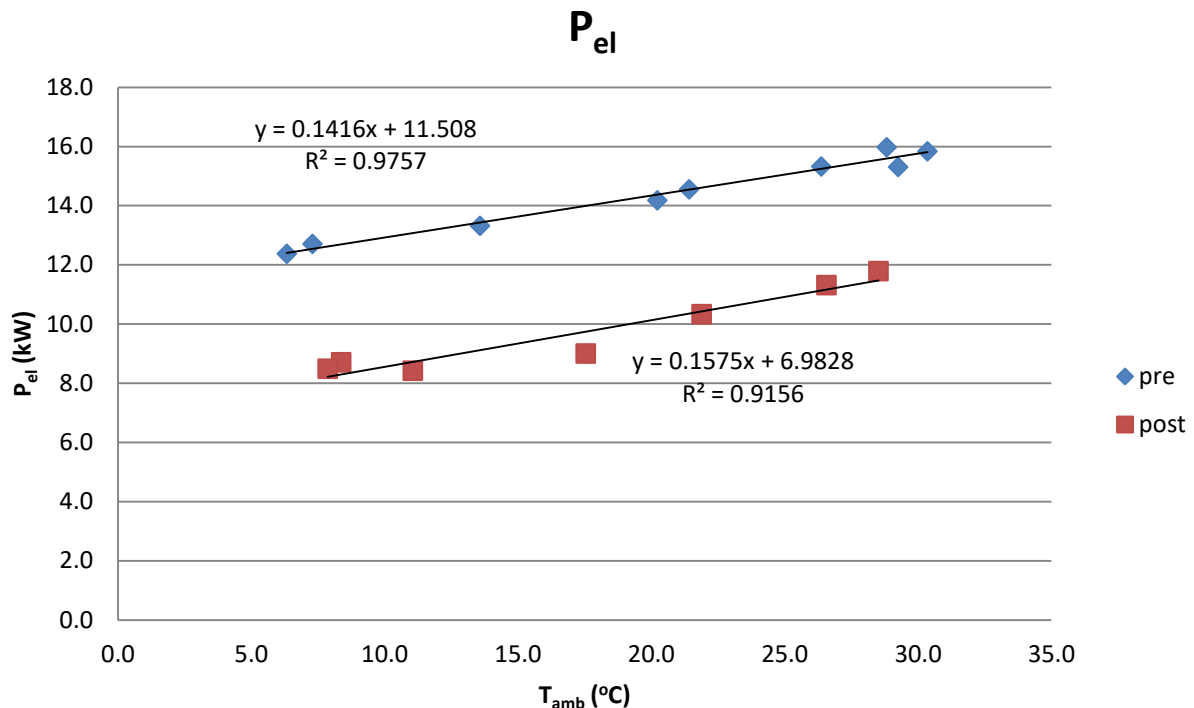
Εν συνεχεία, από τους πίνακες των Σχημάτων 8.18 και 8.19 παρατηρούμε, ότι κατά τους θερινούς μήνες εμφανίζεται μεγαλύτερη απαίτηση ψυκτικού φορτίου στην ψυκτική εγκατάσταση, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται από τις μεγαλύτερες τιμές φορτίων συμπύκνωσης Q_{con} , ατμοποίησης Q_{evap} , προσδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος στη διάταξη συμπιεστών P_{el} , ωρών λειτουργίας της διάταξης συμπιεστών, συντελεστών φορτίου CF και φυσικά καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας E_{el} , όμοια με το κύκλωμα MT. Στα Σχήματα 8.22, 8.23 και 8.24, παρατίθενται τα διαγράμματα συσχέτισης των Q' , Q_{con} και P_{el} με την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 8.22: Διάγραμμα μέσου ψυκτικού φορτίου συνεχούς λειτουργίας μηνός Q' συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} , για το κύκλωμα LT



Σχήμα 8.23: Διάγραμμα φορτίου συμπύκνωσης Q_{con} συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} , για το κύκλωμα LT



Σχήμα 8.24: Διάγραμμα μέσου προσδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος στη διάταξη συμπιεστών συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} , για το κύκλωμα LT

Στα Σχήματα 8.22-8.24 παρατηρούμε, ότι σε αντίθεση με τα θερμοδυναμικά μεγέθη του ψυκτικού κύκλου, τα μεγέθη ισχύος του ψυκτικού κυκλώματος LT, εξαρτώνται από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η εξάρτηση αυτή μάλιστα εμφανίζεται, τόσο για τους μήνες πριν τη ρύθμιση (pre), όσο και για αυτούς μετά τη ρύθμιση (post). Όπως και στα αντίστοιχα μεγέθη του κυκλώματος MT, η εξάρτηση με την εξωτερική θερμοκρασία είναι σε μεγάλο βαθμό γραμμική, έχοντας υψηλούς συντελεστές προσδιορισμού R^2 , οι οποίοι προσεγγίζουν τη μονάδα.

Από το διάγραμμα του Σχήματος 8.22, παρατηρούμε ότι και για τις δύο περιπτώσεις, πριν (pre) και μετά τη ρύθμιση (post), η εξάρτηση του ψυκτικού φορτίου με την εξωτερική θερμοκρασία είναι, με αρκετά καλή προσέγγιση ($R^2 > 0.93$), γραμμική, με συντελεστή διεύθυνσης (κλίση) περίπου 0,14, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις γραμμικής προσέγγισης των σημείων του διαγράμματος. Το γεγονός, ότι οι ευθείες των δύο περιπτώσεων λειτουργίας του καταστήματος είναι παράλληλες, έχοντας παραπλήσια κλίση, είναι λογικό, καθώς η μείωση του ψυκτικού φορτίου μετά τη ρύθμιση είναι οριζόντια και ισχύει για όλους τους μήνες.

Η μείωση του ψυκτικού φορτίου Q_{evap} μετά τη ρύθμιση της υψηλής πίεσης στις 16/01, αποδίδεται στο γράφημα στην κατακόρυφη μετατόπιση της ευθείας $Q'-T_{amb}$, από την περίπτωση των μηνών μετά στους μήνες πριν τη ρύθμιση. Αφαιρώντας λοιπόν, τα σταθερά μέρη των εξισώσεων των ευθειών των καμπυλών $Q'-T_{amb}$, των δύο περιπτώσεων

λειτουργίας του καταστήματος, υπολογίζουμε προσεγγιστικά ότι η μείωση του ψυκτικού φορτίου είναι της τάξης των 2 kW, περίπου 7% μείωση δηλαδή.

Μέσο των εξισώσεων των ευθειών των σημείων $Q'-T_{amb}$, των δύο περιπτώσεων λειτουργίας (pre και post), προκύπτει ότι το μέσο ψυκτικό φορτίο μηνός Q' εξαρτάται γραμμικά από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος, μέσω της εξίσωσης:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q' = 0.1471 \cdot T_{amb} + 17.653 \quad , \text{ pre} \\ Q' = 0.1392 \cdot T_{amb} + 15.359 \quad , \text{ post} \end{array} \right\} \quad (8.6)$$

Συνεπώς, μέσω της δίκλαδης συνάρτησης (8.6), όπου χρησιμοποιείται ο κλάδος pre, αν μιλάμε για ημερομηνίες πριν της 16/01/2017, ενώ ο κλάδος post για τις μεταγενέστερες, μπορούμε προσεγγιστικά να υπολογίσουμε το ψυκτικό φορτίο Q_{evap} , με μοναδική παράμετρο την επικρατούσα εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος, κάθε χρονική στιγμή.

Ακολουθώντας λοιπόν, τη διαδικασία που αναλύθηκε στην ενότητα 8.1.1 για το κύκλωμα MT, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε αυτή τη φορά για το κύκλωμα LT τη μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και εν τέλει την συνολική ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας (LT) της ψυκτικής εγκατάστασης του σουπερμάρκετ.

8.2 Υπολογισμός μηνιαίων καταναλώσεων

8.2.1 Διαδικασία υπολογισμού μηνιαίου ψυκτικού φορτίου

Έχοντας αναπτύξει μοντέλα πρόβλεψης του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου Q_{ψ} , τόσο στο κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας (MT), όσο και στο κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας (LT), είμαστε σε θέση να αναπτύξουμε υπολογιστικό πρόγραμμα στο λογισμικό EES, προκειμένου να υπολογίσουμε τη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κάθε μηνός E_{el} .

Αρχικά για κάθε μήνα, επιλέγεται μία τυπική ημέρα στο μέσο του, η οποία θεωρούμε ότι αντιπροσωπεύει το μήνα. Η επιλογή των τυπικών ημερών αναλύθηκε εκτενώς στην ενότητα 8.1.1. Στη συνέχεια, για την τυπική ημέρα αυτή, υπολογίζουμε τη μέση θερμοκρασίας της, την οποία και θεωρούμε αντιπροσωπευτική θερμοκρασία κάθε μήνα.

Γνωρίζοντας λοιπόν, την αντιπροσωπευτική θερμοκρασία κάθε μήνα, υπολογίζουμε μέσω των μοντέλων πρόβλεψης που αναπτύχθηκαν στην ενότητα 8.1, το μέσο ψυκτικό φορτίο κάθε μήνα. Συγκεκριμένα, για το ψυκτικό κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας MT, γίνεται χρήση της εξίσωσης (8.5), ενώ για το κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας LT, γίνεται χρήση της δίκλαδης συνάρτησης (8.6), επιλέγοντας κλάδο pre ή post ανάλογα με την ημερομηνία στην οποία αναφερόμαστε.

Έχοντας υπολογίσει το μέσο ψυκτικό φορτίο κάθε μήνα Q_{ψ} , είμαστε σε θέση να ακολουθήσουμε τη θερμοδυναμική ανάλυση, όπως αυτή αναπτύχθηκε στην ενότητα 5.1, για τον υπολογισμό της μέσης προσδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος P_{el} στη διάταξη των

συμπιεστών. Η επίλυση των θερμοδυναμικών εξισώσεων πραγματοποιείται στο λογισμικό επίλυσης EES. Απαιτείται ωστόσο, να δοθούν ως είσοδοι για κάθε μήνα ορισμένα βασικά θερμοδυναμικά μεγέθη λειτουργίας των ψυκτικών κυκλωμάτων.

Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 8.1, για το κύκλωμα MT, θέτουμε τιμές υπόψυξης $SC=1K$ και υπερθέρμανσης $SH=18K$, ενώ για το κύκλωμα LT, θέτουμε $SC=1K$ και $SH=31K$. Ακόμη, η θερμοκρασία ατμοποίησης του κυκλώματος MT είναι $T_{evap}=-6^{\circ}C$, ενώ του κυκλώματος LT είναι $T_{evap}=-31^{\circ}C$.

Ακόμη, εισάγουμε στο πρόγραμμα επίλυσης τους ισεντροπικούς και μηχανικούς βαθμούς απόδοσης της διάταξης συμπιεστών των κυκλωμάτων MT και LT, όπως αυτοί υπολογίστηκαν στην ενότητα 7.1.

Όσον αφορά τις θερμοκρασίες συμπύκνωσης, θέτουμε στο πρόγραμμα επίλυσης για κάθε μήνα, τις μέσες τιμές των θερμοκρασιών συμπύκνωσης της τυπικής ημέρας. Η επιλογή αυτή γίνεται, διότι στη συνέχεια οι μηνιαίες καταναλώσεις που θα υπολογιστούν, συγκρίνονται με τις πραγματικές που μετρούνται από τον αναλυτή απόδοσης. Επομένως, είναι απαραίτητο οι ψυκτικοί κύκλοι να έχουν κοινά σημεία λειτουργίας. Σημειώνεται ωστόσο, πως για υπολογισμό των καταναλώσεων σε μελλοντική ημέρα ή μήνα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία συμπύκνωσης είναι $10^{\circ}C$ υπέρ της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η οποία προκύπτει από μετεωρολογικές προβλέψεις.

Τέλος, έχοντας υπολογίσει τη μέση μηνιαία προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ P_{el} στη διάταξη συμπιεστών κάθε κυκλώματος, πολλαπλασιάζοντας τη με τις ώρες του μήνα, υπολογίζουμε για κάθε μήνα την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

8.2.2 Κύκλωμα MT

Ακολουθώντας τη διαδικασία που αναλύθηκε στην ενότητα 8.2.1, υπολογίζουμε για το ψυκτικό κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας (MT), τη μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο έτους.

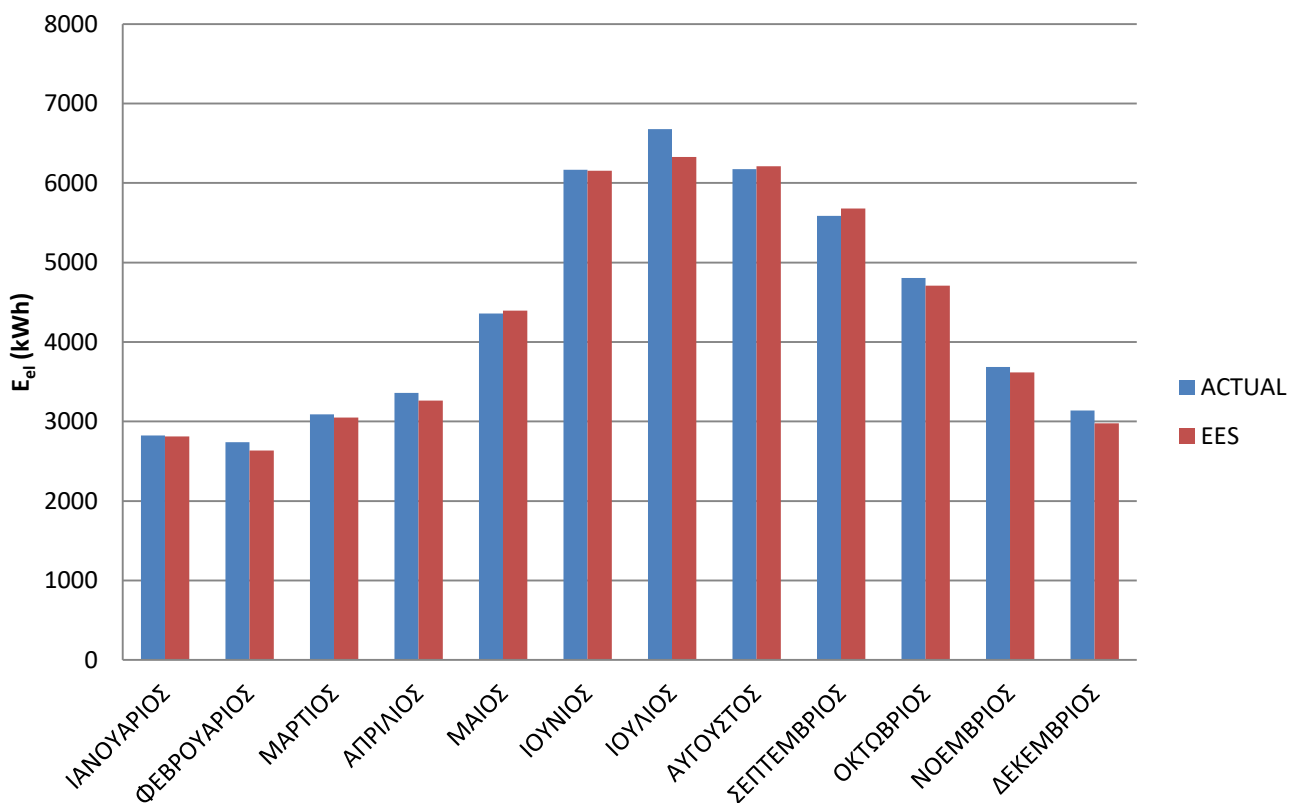
Στον πίνακα του Σχήματος 8.25, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για κάθε μήνα, οι μετρήσεις του αναλυτή απόδοσης και τα αποτελέσματα του EES, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, ως είσοδοι στο πρόγραμμα που υπολογίζει το μέσο μηνιαίο P_{el} συνεχούς λειτουργίας, δίνονται η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος της τυπικής ημέρας του μήνα και η αντίστοιχη θερμοκρασία συμπύκνωση, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 8.2.1. Στο τέλος του πίνακα για κάθε μήνα, γίνεται σύγκριση της ηλεκτρικής κατανάλωσης E_{el}^{EES} , που υπολογίζεται με χρήση του P_{el} συνεχούς λειτουργίας και της μετρούμενης, από τον αναλυτή απόδοσης, πραγματικής μηνιαίας κατανάλωσης E_{el}^{real} .

| τυπική ημέρα | ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ | ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ | ΜΑΡΤΙΟΣ | ΑΠΡΙΛΙΟΣ | ΜΑΙΟΣ | ΙΟΥΝΙΟΣ | ΙΟΥΛΙΟΣ | ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ | ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ | ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ | ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ | ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ |
|--------------------------------------|------------|-------------|---------|----------|--------|---------|---------|-----------|-------------|-----------|-----------|------------|
| Climate check | | | | | | | | | | | | |
| T_{amb} (°C) | 7.9 | 7.9 | 11.1 | 13.8 | 21.3 | 28.8 | 30.4 | 29.3 | 27.9 | 19.6 | 13.6 | 7.3 |
| $T - T_m$ | -10.3 | -10.4 | -7.2 | -4.5 | 3.1 | 10.6 | 12.1 | 11.0 | 9.6 | 1.4 | -4.7 | -10.9 |
| T_{con} (°C) | 27 | 28 | 27 | 28 | 31 | 38 | 37 | 37 | 36 | 34 | 31 | 29 |
| HP (bar) | 13 | 13 | 12 | 14 | 14 | 16 | 16 | 16 | 16 | 15 | 14 | 13 |
| E_{el}^{real} (kWh/month) | 2825.6 | 2740.2 | 3090.5 | 3359.6 | 4359.4 | 6166.1 | 6676.2 | 6175.5 | 5587.6 | 4807.3 | 3687.2 | 3136.8 |
| EES | | | | | | | | | | | | |
| P_{el}^* (kW) | 3.78 | 3.92 | 4.10 | 4.53 | 5.91 | 8.55 | 8.50 | 8.35 | 7.89 | 6.33 | 5.02 | 4.00 |
| # days | 31 | 28 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 |
| E_{el}^{EES} (kWh/month) | 2813.1 | 2636.9 | 3050.4 | 3263.8 | 4394.8 | 6155.3 | 6325.5 | 6210.2 | 5680.1 | 4707.3 | 3615.8 | 2979.0 |
| $E_{el}^{EES} - E_{el}^{real}$ (kWh) | -12.5 | -103.3 | -40.1 | -95.8 | 35.4 | -10.8 | -350.7 | 34.7 | 92.5 | -100.0 | -71.4 | -157.8 |
| Απόκλιση E_{el} | -0.4% | -3.8% | -1.3% | -2.9% | 0.8% | -0.2% | -5.3% | 0.6% | 1.7% | -2.1% | -1.9% | -5.0% |

Σχήμα 8.25: Πίνακας υπολογισμού μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κυκλώματος MT

Για λόγους καλύτερης εποπτείας και επιβεβαίωσης της ορθότητας του μοντέλου που αναπτύξαμε για τον υπολογισμό της μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, αναπαριστούμε τις μηνιαίες καταναλώσεις E_{el}^{real} και E_{el}^{EES} στο διάγραμμα του Σχήματος 8.26, σε επίπεδο έτους.

Μηνιαία κατανάλωση κυκλώματος MT



Σχήμα 8.26: Διάγραμμα σύγκρισης μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στο κύκλωμα MT

Από τον πίνακα του Σχήματος 8.25, σε συνδυασμό με το διάγραμμα του Σχήματος 8.26, παρατηρούμε ότι οι πραγματικές μηνιαίες ηλεκτρικές καταναλώσεις E_{el}^{real} του κυκλώματος

MT, προσεγγίζονται από τις καταναλώσεις E_{el}^{EES} , που υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος υπολογισμού που αναπτύξαμε με πολύ καλή προσέγγιση. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μέγιστη απόκλιση της τάξης του 5.3%. Ακόμη, επιβεβαιώνουμε το γεγονός, ότι τους καλοκαιρινούς μήνες πραγματοποιείται μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο κύκλωμα MT, λόγω των μεγαλύτερων θερμοκρασιών των μηνών αυτών.

Τέλος, εφόσον οι υπολογιζόμενες καταναλώσεις E_{el}^{EES} προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις πραγματικές καταναλώσεις E_{el}^{real} του κυκλώματος MT, επιβεβαιώνουμε τη θεώρηση που κάναμε στην ενότητα 7.1.2, ότι ο εμβολοφόρος συμπιεστής, ο οποίος λειτουργεί ανελλιπώς, αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά την ισοδύναμη λειτουργία της διάταξης συμπιεστών και επομένως ορθά παραλείψαμε τη βοηθητική λειτουργία των scroll συμπιεστών.

8.2.2 Κύκλωμα LT

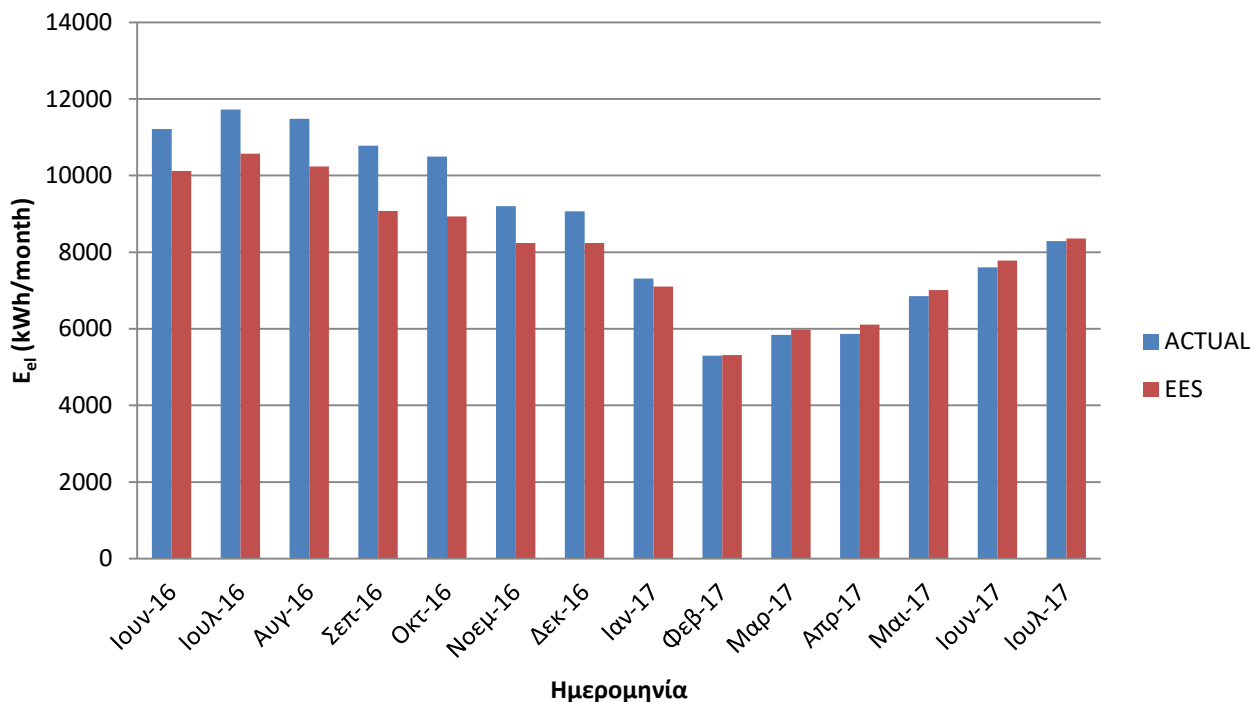
Όμοια με την περίπτωση του κυκλώματος MT, κατασκευάζουμε και για το κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας LT, τον πίνακα του Σχήματος 8.27 και το διάγραμμα του Σχήματος 8.28, όπου παρουσιάζονται οι πραγματικές μηνιαίες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με τις αντίστοιχες καταναλώσεις που υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος που αναπτύξαμε.

Σημειώνεται, ότι για τον Ιανουάριο, το μήνα δηλαδή που πραγματοποιήθηκε η ρύθμιση της υψηλής πίεσης σε χαμηλότερα επίπεδα, υπολογίζονται δύο μέσα προσδιδόμενα P_{el} , ένα πριν και ένα μετά την αλλαγή. Ο υπολογισμός της μηνιαίας ηλεκτρικής κατανάλωσης E_{el} , γίνεται πολλαπλασιάζοντας το κάθε P_{el} με τον αντίστοιχο αριθμό ωρών του μήνα, στις οποίες αντιστοιχεί.

| | τυπική καθημερινή | ΙΟΥΝ-16 | ΙΟΥΛ-16 | ΑΥΓ-16 | ΣΕΠ-16 | ΟΚΤ-16 | ΝΟΕΜ-16 | ΔΕΚ-16 | ΙΑΝ-17 | | ΦΕΒ-17 | ΜΑΡ-17 | ΑΠΡ-17 | ΜΑΙ-17 | ΙΟΥΝ-17 | ΙΟΥΛ-17 |
|-------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | | pre | | | | | | | | post | | | | | | |
| Clima check | T_{amb} (°C) | 28.8 | 30.4 | 29.3 | 26.4 | 20.2 | 13.6 | 7.3 | 6.3 | 8.4 | 7.9 | 11.1 | 17.5 | 21.9 | 26.6 | 28.5 |
| | $T - T_m$ | 10.3 | 11.8 | 10.7 | 7.8 | 1.7 | -5.0 | -11.3 | -12.2 | -10.2 | -10.7 | -7.5 | -1.0 | 3.3 | 8.0 | 10.0 |
| | T_{con} (°C) | 39 | 39 | 38 | 38 | 37 | 37 | 37 | 36 | 27 | 27 | 27 | 28 | 32 | 34 | 35 |
| | HP (bar) | 17 | 17 | 17 | 16 | 16 | 16 | 16 | 15 | 12 | 12 | 12 | 12 | 14 | 15 | 15 |
| | E_{el}^{real} (kWh/month) | 11216.2 | 11722.9 | 11482.2 | 10782.0 | 10493.4 | 9202.7 | 9071.2 | 7310.5 | | 5298.9 | 5841.6 | 5870.5 | 6849.6 | 7604.9 | 8287.7 |
| EES | P_{el}^* (kW) | 14.06 | 14.21 | 13.76 | 12.60 | 12.01 | 11.44 | 11.07 | 11.01 | 7.93 | 7.91 | 8.04 | 8.49 | 9.43 | 10.81 | 11.23 |
| | # days | 30 | 31 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 31 | | 28 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 |
| | E_{el}^{EES} (kWh/month) | 10123.2 | 10572.2 | 10237.4 | 9072.0 | 8935.4 | 8236.8 | 8236.1 | 7106.8 | | 5318.2 | 5978.0 | 6112.8 | 7014.4 | 7783.2 | 8355.1 |
| | $E_{el}^{EES} - E_{el}^{real}$ (kWh) | -1093.0 | -1150.7 | -1244.8 | -1710.0 | -1558.0 | -965.9 | -835.1 | -203.7 | | 19.3 | 136.4 | 242.3 | 164.8 | 178.3 | 67.4 |
| | Απόκλιση E_{el} | -9.7% | -9.8% | -10.8% | -15.9% | -14.8% | -10.5% | -9.2% | -2.8% | | 0.4% | 2.3% | 4.1% | 2.4% | 2.3% | 0.8% |

Σχήμα 8.27: Πίνακας υπολογισμού μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κυκλώματος LT

Μηνιαία κατανάλωση κυκλώματος LT



Σχήμα 8.28: Διάγραμμα σύγκρισης μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στο κύκλωμα LT

Στον πίνακα του Σχήματος 8.27, όπως και στο διάγραμμα του Σχήματος 8.28 παρατηρούμε, ότι για τους μήνες μετά τη ρύθμιση της υψηλής πίεσης λειτουργίας σε χαμηλότερα επίπεδα (post), οι πραγματικές καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας E_{el}^{real} , προσεγγίζονται ικανοποιητικά από τις καταναλώσεις E_{el}^{EES} , που υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος που αναπτύξαμε. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μέγιστη απόκλιση της τάξεως του 4.1%.

Αντίθετα, για τους μήνες πριν τη ρύθμιση της υψηλής πίεσης λειτουργίας του κυκλώματος LT, παρατηρούμε ότι το πρόγραμμα υπολογισμού της μηνιαίας ηλεκτρικής κατανάλωσης E_{el}^{EES} διαφέρει από την πραγματική μετρούμενη από τον αναλυτή απόδοσης τιμή της. Εμφανίζονται μάλιστα, επίπεδα αποκλίσεων άνω του 15%. Αυτό συμβαίνει διότι, στις 16/01/2017, ημέρα ρύθμιση της HP, διακόπηκε η λειτουργία του 3^{ου} κατά σειρά scroll συμπιεστή της διάταξης συμπιεστών όπως αναφέρεται στην ενότητα 6.1. Ο 3^{ος} συμπιεστής απενεργοποιήθηκε για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς υπολειπομένη με χαμηλό ισεντροπικό και μηχανικό βαθμό απόδοσης. Στο πρόγραμμα υπολογισμού ωστόσο της μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας E_{el}^{EES} , χρησιμοποιούνται, ο μεγαλύτερος από πριν, ισοδύναμος ισεντροπικός και μηχανικός βαθμός απόδοσης της διάταξης συμπιεστών, μετά από την απενεργοποίηση του ελαττωματικού συμπιεστή. Επομένως, για τους μήνες πριν την πραγματοποίηση των ενεργειών εξοικονόμησης, το πρόγραμμα υπολογισμού της μηνιαίας ηλεκτρικής κατανάλωσης υποεκτιμά την μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση, θεωρώντας μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης για τη διάταξη συμπιεστών.

Θεωρώντας, ότι εφόσον χρησιμοποιούνταν τα σωστά χαρακτηριστικά της διάταξης συμπιεστών, θα επιτυγχάνονταν καλή προσέγγιση της πραγματικής μηνιαίας ηλεκτρικής κατανάλωσης, λαμβάνοντας μια μέση απόκλιση κοντά στο 10% για τους μήνες πριν τη ρύθμιση, θεωρούμε ότι η απενεργοποίηση του 3^{ου} συμπιεστή επιφέρει 10% εξοικονόμηση ηλεκτρικής κατανάλωσης κάθε μήνα.

8.3 Κατανάλωση ψυκτικών κυκλωμάτων MT και LT για χρήση εναλλακτικών ψυκτικών μέσων

Έχοντας υπολογίσει για κάθε μήνα του έτους, τις μηνιαίες καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο του κυκλώματος μέσης θερμοκρασίας MT, όσο και του κυκλώματος χαμηλής θερμοκρασίας LT, τίθεται το ζήτημα του κατά πόσο γίνεται να μειώσουμε τις καταναλώσεις αυτές, με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας στην ψυκτική εγκατάσταση του καταστήματος και κατ' επέκταση την μείωση του οικονομικού κόστους λειτουργίας της.

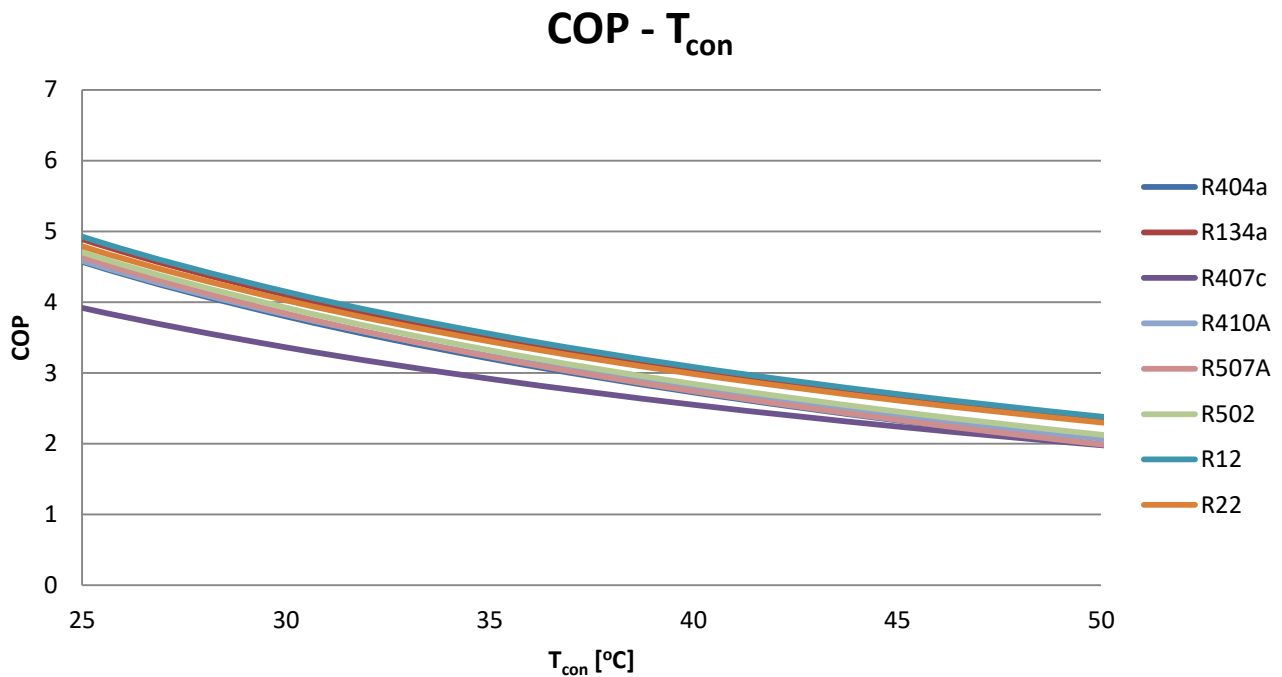
Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.2 υπάρχουν διάφορα συνήθη συστήματα ψυκτικών εγκαταστάσεων, πέραν του κεντρικού συστήματος άμεσης εκτόνωσης, που χρησιμοποιείται στα ψυκτικά κυκλώματα της υπάρχουσας εγκατάστασης, όπως το ψυκτικό σύστημα Cascade, το δευτερεύον σύστημα ή το σύστημα Booster με χρήση CO₂, τα οποία ενδεχομένως να έχουν μεγαλύτερη απόδοση στην υπάρχουσα εγκατάσταση και η μεταπήδηση σε κάποιο από αυτά να είναι άξια μελέτης στο μέλλον. Ωστόσο, λόγω της υπάρχουσας οικονομικής κατάστασης, η εταιρείες σουπερμάρκετ ναι μεν εξετάζουν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας στα ψυκτικά τους συστήματα, αλλά δεν είναι διατεθειμένες να προχωρήσουν στην αγορά εξολοκλήρου νέου ψυκτικού εξοπλισμού, από τη στιγμή που ο υπάρχον λειτουργεί χωρίς προβλήματα. Εξετάζονται επομένως, τρόποι και μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας, που αφορούν παρεμβάσεις στον υπάρχον εξοπλισμό.

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος παρέμβασης σε υπάρχον ψυκτικό εξοπλισμό σουπερμάρκετ, είναι η αλλαγή του υπάρχοντος ψυκτικού μέσου με κάποιο άλλο ψυκτικό μέσο, το οποίο είτε είναι οικονομικότερο, είτε η χρήση του στην υπάρχουσα εγκατάσταση, εμφανίζει καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Απαιτείται επίσης, το νέο ψυκτικό μέσο που θα επιλεγεί να έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με το προς αντικατάσταση ψυκτικό μέσο, ώστε να μην απαιτούνται πολλές και κοστοβόρες μετατροπές στον υπάρχον εξοπλισμό [52].

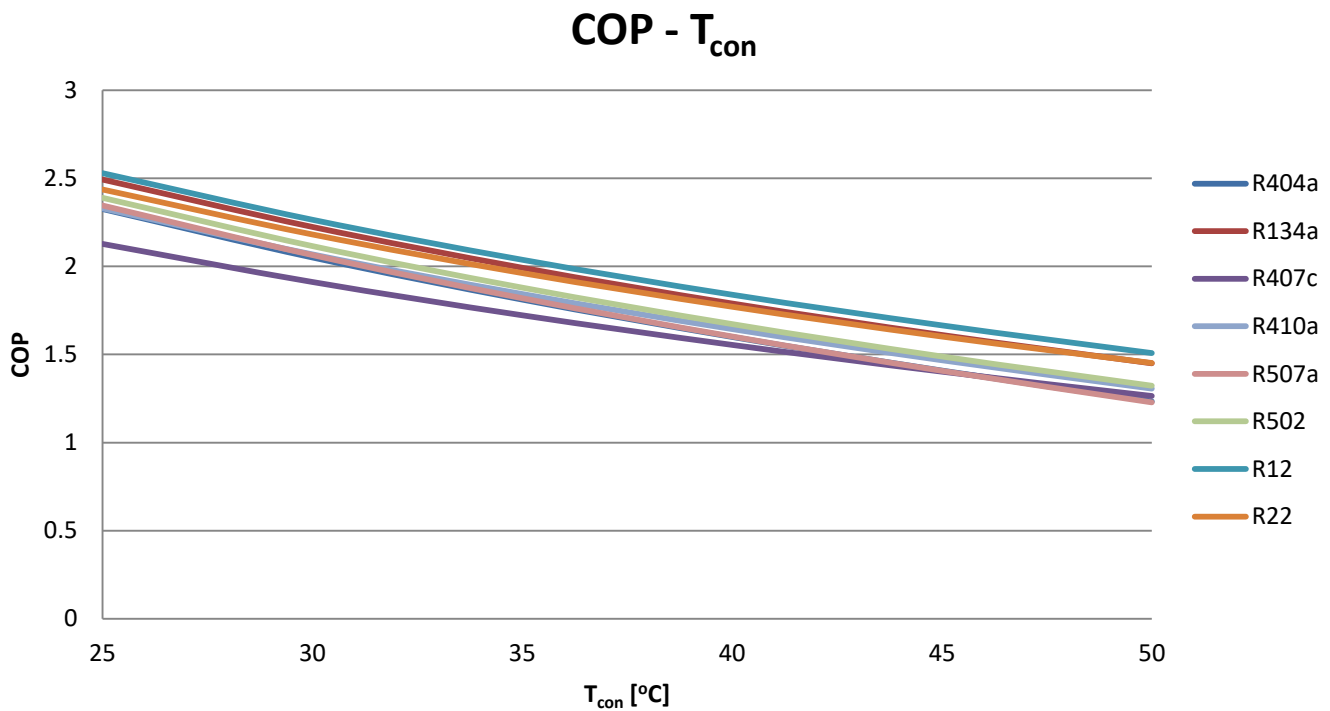
Το χρησιμοποιούμενο ψυκτικό μέσο στα ψυκτικά κυκλώματα MT και LT της μελετηθείσας εγκατάστασης είναι το R-404a, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.1. Επομένως, κρίνεται ωφέλιμη η μελέτη του ψυκτικού μέσου R-134a, αλλά κυρίως των R-407c, R-410a και R-507a, τα οποία απαιτούν μόνο αλλαγές ρύθμισης των εκτονωτικών βαλβίδων για απευθείας χρησιμοποίηση σε υπάρχον ψυκτικό εξοπλισμό που χρησιμοποιεί το R-404a [28].

Στα διαγράμματα των Σημάτων 8.29, 8.30, παρουσιάζεται η διακύμανση του COP συναρτήσει της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, για χρήση στο ψυκτικό κύκλωμα MT ($T_{\text{evap}}=-6^{\circ}\text{C}$) και στο ψυκτικό κύκλωμα LT ($T_{\text{evap}}=-31^{\circ}\text{C}$) αντίστοιχα. Τα ψυκτικά μέσα που

επιλέγονται είναι τα πιθανά αντικατάστατα του R-404a (R-134a, R-407c, R-410a και R-507a), αλλά και τα απαγορευμένα πλέον R-502, R-12 και R-22.



Σχήμα 8.29: Διάγραμμα διακύμανσης COP συναρτήσει θερμοκρασίας συμπύκνωσης για διαφορετικά ψυκτικά μέσα στο κύκλωμα MT



Σχήμα 8.30: Διάγραμμα διακύμανσης COP συναρτήσει θερμοκρασίας συμπύκνωσης για διαφορετικά ψυκτικά μέσα στο κύκλωμα LT

Στα διαγράμματα των Σχημάτων 8.29, 8.30 παρατηρούμε, ότι τόσο στο κύκλωμα MT, όσο και στο κύκλωμα LT, τις μεγαλύτερες τιμές συντελεστή συμπεριφοράς COP, εμφανίζει το απαγορευμένο πλέον ψυκτικό μέσο R-12 και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνταν ευρέως μαζί με το R-22 και R-502, τα οποία όπως φαίνεται στο διάγραμμα εμφανίζουν επίσης μεγάλες τιμές COP, στις ψυκτικές εγκαταστάσεις πριν την απόσυρσή τους για περιβαλλοντικούς λόγους.

Από τα πιθανά ψυκτικά μέσα αντικατάστασης του R-404a, και για τα δύο ψυκτικά κυκλώματα, εκείνο που εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές COP στο μελετηθέν εύρος θερμοκρασιών συμπύκνωσης, είναι το R-134a, ενώ εκείνο που εμφανίζει τα χαμηλότερα επίπεδα COP, είναι το R-407c.

Τέλος, και για τα δύο ψυκτικά κυκλώματα, παρατηρούμε ότι τα ψυκτικά μέσα R-507a και R-410a, εμφανίζουν παρόμοιες, καλύτερες ωστόσο, τιμές COP με το ήδη χρησιμοποιούμενο ψυκτικό μέσο R-404a, γεγονός που οφείλεται στα παρόμοια χαρακτηριστικά τους με εκείνα του R-404a, όπως επισημάνθηκε στην ενότητα 3.4.

Στη συνέχεια της ανάλυσής μας, υπολογίζουμε μέσω προγράμματος επίλυσης στο EES, τη μέση προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ συνεχούς λειτουργίας P_{el} κάθε μηνός και τη μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση E_{el} των κυκλωμάτων MT και LT, εάν αντί του R-404a, χρησιμοποιούνταν κατά σειρά ένα εκ των R-134a, R-407c, R-410a και R-507a. Για κάθε μήνα, χρησιμοποιείται ως είσοδος στο πρόγραμμα η μέση θερμοκρασία της τυπικής του ημέρας, μέσω της οποίας, με χρήση των μοντέλων υπολογισμού των εξισώσεων (8.5) και (8.6), υπολογίζεται το μέσο μηνιαίο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας Q' για το κύκλωμα MT και LT αντίστοιχα. Σημειώνεται, ότι για το κύκλωμα LT, χρησιμοποιείται για κάθε μήνα ο κλάδος *post*, προκειμένου η παραμετρική ανάλυση των διαφορετικών ψυκτικών μέσων να βασίζεται στα τωρινά δεδομένα. Δίνεται επίσης ως είσοδος για κάθε μήνα, η μέση θερμοκρασία συμπύκνωσης, όπως αυτή σημειώθηκε κατά το τελευταίο έτος, προκειμένου οι ψυκτικοί κύκλοι των δύο κυκλωμάτων να έχουν κοινά σημεία λειτουργίας με τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας τους.

Ακόμη, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή πώλησης της κιλοβατώρας στα 0.09518 €/kWh [53], υπολογίζουμε το μηνιαίο κόστος λειτουργίας (Κ.Λ) του κάθε ψυκτικού κυκλώματος για κάθε ψυκτικό μέσο, μόνο όσον αφορά το κόστος κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα παραπάνω μεγέθη, για κάθε ψυκτικό μέσο, υπολογίζονται σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη, για την υπάρχουσα χρήση του R-404a, και συγκεντρώνονται στους πίνακες των Σχημάτων 8.31 και 8.32, για τα ψυκτικά κυκλώματα MT και LT αντίστοιχα.

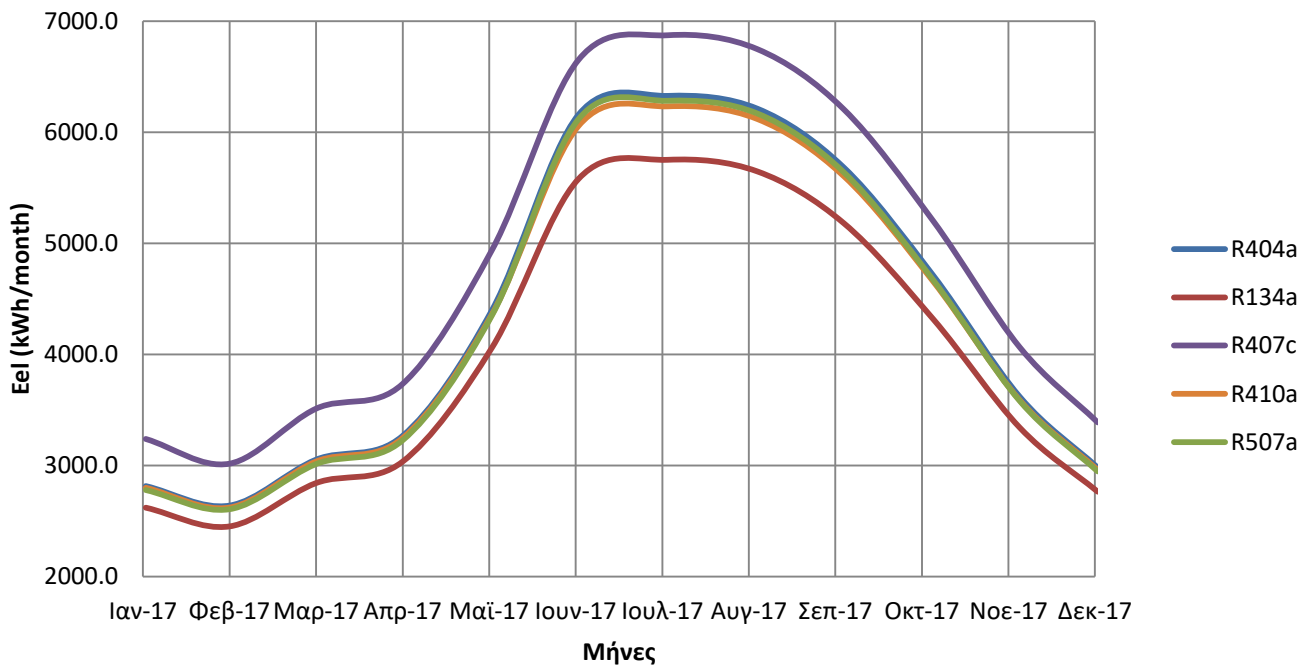
| Ψυκτικό μέσο | | ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ | ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ | ΜΑΡΤΙΟΣ | ΑΠΡΙΛΙΟΣ | ΜΑΙΟΣ | ΙΟΥΝΙΟΣ | ΙΟΥΛΙΟΣ | ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ | ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ | ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ | ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ | ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ | ΣΥΝΟΛΟ |
|--------------------|------------------------|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|
| R404a (υπάρχον) | P _{ei} * (kW) | 3.78 | 3.92 | 4.10 | 4.53 | 5.91 | 8.55 | 8.50 | 8.35 | 7.89 | 6.33 | 5.02 | 4.00 | |
| | E _{ei} (kWh) | 2813.1 | 2636.9 | 3050.4 | 3263.8 | 4394.8 | 6155.3 | 6325.5 | 6210.2 | 5680.1 | 4707.3 | 3615.8 | 2979.0 | 51832.1 |
| | Κ.Λ | 267.75 € | 250.98 € | 290.34 € | 310.64 € | 418.30 € | 585.86 € | 602.06 € | 591.08 € | 540.63 € | 448.04 € | 344.16 € | 283.54 € | 4,933.38 € |
| R134a | P _{ei} * (kW) | 3.52 | 3.65 | 3.82 | 4.21 | 5.46 | 7.75 | 7.73 | 7.59 | 7.19 | 5.80 | 4.64 | 3.71 | |
| | E _{ei} (kWh) | 2619.6 | 2450.8 | 2840.6 | 3033.4 | 4059.3 | 5578.6 | 5751.1 | 5646.2 | 5179.7 | 4315.9 | 3339.4 | 2763.2 | 47577.7 |
| | Κ.Λ | 249.34 € | 233.27 € | 270.37 € | 288.72 € | 386.36 € | 530.97 € | 547.39 € | 537.41 € | 493.00 € | 410.79 € | 317.84 € | 263.00 € | 4,528.45 € |
| | όφελος | 18.41 € | 17.72 € | 19.97 € | 21.93 € | 31.94 € | 54.89 € | 54.67 € | 53.68 € | 47.63 € | 37.25 € | 26.32 € | 20.54 € | 404.93 € |
| R407c | P _{ei} * (kW) | 4.35 | 4.49 | 4.72 | 5.19 | 6.64 | 9.24 | 9.24 | 9.07 | 8.62 | 6.99 | 5.64 | 4.55 | |
| | E _{ei} (kWh) | 3238.6 | 3015.9 | 3510.9 | 3733.2 | 4938.7 | 6651.4 | 6873.1 | 6748.1 | 6205.7 | 5199.8 | 4063.0 | 3387.4 | 57565.8 |
| | Κ.Λ | 308.25 € | 287.06 € | 334.17 € | 355.33 € | 470.06 € | 633.08 € | 654.18 € | 642.28 € | 590.66 € | 494.92 € | 386.71 € | 322.42 € | 5,479.11 € |
| | όφελος | - 40.51 € | - 36.07 € | - 43.83 € | - 44.68 € | - 51.76 € | - 47.22 € | - 52.12 € | - 51.20 € | - 50.03 € | - 46.88 € | - 42.56 € | - 38.88 € | - 545.73 € |
| R410a | P _{ei} * (kW) | 3.76 | 3.90 | 4.08 | 4.51 | 5.86 | 8.41 | 8.38 | 8.22 | 7.78 | 6.26 | 4.98 | 3.98 | |
| | E _{ei} (kWh) | 2799.7 | 2621.5 | 3035.5 | 3245.8 | 4359.1 | 6054.5 | 6231.0 | 6117.2 | 5602.3 | 4654.5 | 3586.3 | 2959.6 | 51266.9 |
| | Κ.Λ | 266.47 € | 249.51 € | 288.92 € | 308.93 € | 414.90 € | 576.27 € | 593.07 € | 582.23 € | 533.23 € | 443.01 € | 341.35 € | 281.70 € | 4,879.58 € |
| | όφελος | 1.27 € | 1.47 € | 1.42 € | 1.71 € | 3.40 € | 9.59 € | 8.99 € | 8.85 € | 7.40 € | 5.03 € | 2.81 € | 1.84 € | 53.79 € |
| R507a | P _{ei} * (kW) | 3.74 | 3.88 | 4.05 | 4.48 | 5.85 | 8.50 | 8.45 | 8.29 | 7.83 | 6.27 | 4.97 | 3.96 | |
| | E _{ei} (kWh) | 2778.8 | 2606.0 | 3012.5 | 3225.6 | 4350.9 | 6117.1 | 6283.1 | 6168.5 | 5639.0 | 4667.9 | 3579.8 | 2946.2 | 51375.5 |
| | Κ.Λ | 264.49 € | 248.04 € | 286.73 € | 307.01 € | 414.12 € | 582.23 € | 598.02 € | 587.12 € | 536.72 € | 444.29 € | 340.73 € | 280.42 € | 4,889.92 € |
| | όφελος | 3.26 € | 2.94 € | 3.61 € | 3.63 € | 4.18 € | 3.63 € | 4.04 € | 3.97 € | 3.91 € | 3.75 € | 3.43 € | 3.12 € | 43.46 € |

Σχήμα 8.31: Συγκεντρωτικός πίνακας καταναλώσεων και κόστους λειτουργίας κυκλώματος ΜΤ, για χρήση εναλλακτικών ψυκτικών μέσων

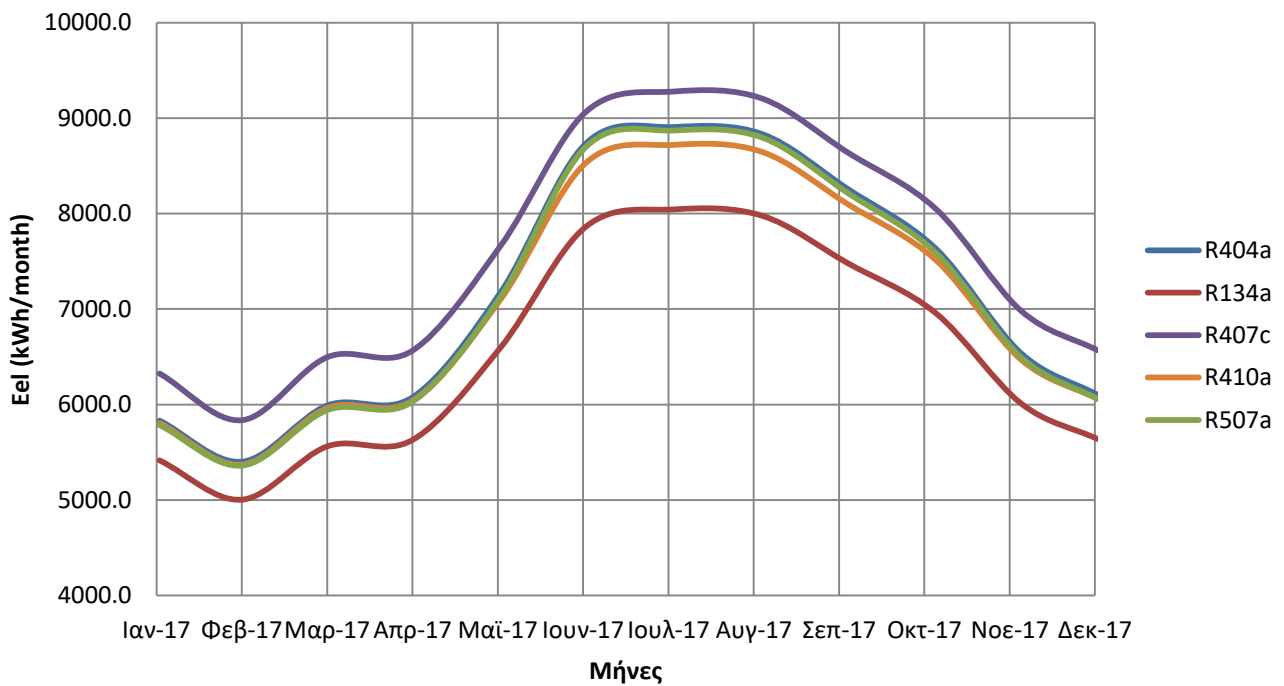
| Ψυκτικό μέσο | | ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ | ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ | ΜΑΡΤΙΟΣ | ΑΠΡΙΛΙΟΣ | ΜΑΙΟΣ | ΙΟΥΝΙΟΣ | ΙΟΥΛΙΟΣ | ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ | ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ | ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ | ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ | ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ | ΣΥΝΟΛΟ |
|--------------------|------------------------|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|
| R404a (υπάρχον) | P _{el} ' (kW) | 7.84 | 8.04 | 8.05 | 8.44 | 9.65 | 12.13 | 11.97 | 11.87 | 11.47 | 10.26 | 9.08 | 8.20 | |
| | E _{el} (kWh) | 5831.5 | 5400.9 | 5989.2 | 6075.4 | 7175.9 | 8733.6 | 8905.7 | 8831.3 | 8258.4 | 7633.4 | 6537.6 | 6100.1 | 85472.8 |
| | Κ.Λ | 555.04 € | 514.05 € | 570.05 € | 578.25 € | 683.00 € | 831.26 € | 847.64 € | 840.56 € | 786.03 € | 726.55 € | 622.25 € | 580.60 € | 8,135.30 € |
| R134a | P _{el} ' (kW) | 7.28 | 7.45 | 7.48 | 7.82 | 8.87 | 10.92 | 10.81 | 10.72 | 10.39 | 9.35 | 8.35 | 7.58 | |
| | E _{el} (kWh) | 5415.6 | 5004.4 | 5562.1 | 5629.7 | 6598.5 | 7862.4 | 8042.6 | 7975.7 | 7480.8 | 6957.9 | 6012.0 | 5638.8 | 78180.5 |
| | Κ.Λ | 515.45 € | 476.32 € | 529.40 € | 535.83 € | 628.05 € | 748.34 € | 765.50 € | 759.13 € | 712.02 € | 662.25 € | 572.22 € | 536.70 € | 7,441.22 € |
| | όφελος | 39.58 € | 37.74 € | 40.65 € | 42.42 € | 54.95 € | 82.92 € | 82.14 € | 81.44 € | 74.01 € | 64.30 € | 50.03 € | 43.90 € | 694.08 € |
| R407c | P _{el} ' (kW) | 8.50 | 8.68 | 8.73 | 9.12 | 10.30 | 12.59 | 12.47 | 12.37 | 12.00 | 10.82 | 9.70 | 8.83 | |
| | E _{el} (kWh) | 6324.0 | 5835.0 | 6495.1 | 6564.2 | 7663.2 | 9064.8 | 9277.7 | 9203.3 | 8640.0 | 8050.1 | 6981.8 | 6565.8 | 90665.0 |
| | Κ.Λ | 601.92 € | 555.37 € | 618.21 € | 624.78 € | 729.38 € | 862.79 € | 883.05 € | 875.97 € | 822.36 € | 766.21 € | 664.53 € | 624.93 € | 8,629.50 € |
| | όφελος | - 46.88 € | - 41.32 € | - 48.15 € | - 46.53 € | - 46.38 € | - 31.52 € | - 35.41 € | - 35.41 € | - 36.32 € | - 39.66 € | - 42.28 € | - 44.33 € | - 494.19 € |
| R410a | P _{el} ' (kW) | 7.80 | 7.99 | 8.02 | 8.39 | 9.55 | 11.85 | 11.72 | 11.62 | 11.25 | 10.10 | 8.99 | 8.14 | |
| | E _{el} (kWh) | 5806.2 | 5370.6 | 5963.2 | 6040.8 | 7102.2 | 8532.0 | 8719.7 | 8645.3 | 8100.0 | 7514.4 | 6470.6 | 6056.9 | 84321.9 |
| | Κ.Λ | 552.63 € | 511.18 € | 567.57 € | 574.96 € | 675.99 € | 812.08 € | 829.94 € | 822.86 € | 770.96 € | 715.22 € | 615.88 € | 576.50 € | 8,025.76 € |
| | όφελος | 2.41 € | 2.88 € | 2.48 € | 3.29 € | 7.01 € | 19.19 € | 17.70 € | 17.70 € | 15.08 € | 11.33 € | 6.37 € | 4.11 € | 109.55 € |
| R507a | P _{el} ' (kW) | 7.77 | 7.98 | 7.98 | 8.37 | 9.58 | 12.08 | 11.92 | 11.82 | 11.41 | 10.20 | 9.02 | 8.14 | |
| | E _{el} (kWh) | 5783.9 | 5359.2 | 5940.1 | 6028.6 | 7127.5 | 8697.6 | 8868.5 | 8794.1 | 8215.2 | 7588.8 | 6494.4 | 6055.4 | 84953.2 |
| | Κ.Λ | 550.51 € | 510.09 € | 565.38 € | 573.80 € | 678.40 € | 827.84 € | 844.10 € | 837.02 € | 781.92 € | 722.30 € | 618.14 € | 576.35 € | 8,085.85 € |
| | όφελος | 4.53 € | 3.97 € | 4.67 € | 4.45 € | 4.60 € | 3.43 € | 3.54 € | 3.54 € | 4.11 € | 4.25 € | 4.11 € | 4.25 € | 49.46 € |

Σχήμα 8.32: Συγκεντρωτικός πίνακας καταναλώσεων και κόστους λειτουργίας κυκλώματος LT, για χρήση εναλλακτικών ψυκτικών μέσων

Στα σχήματα 8.33, 8.34, δίνονται επίσης τα διαγράμματα συγκρίσεως των μηνιαίων καταναλώσεων των κυκλωμάτων MT και LT αντίστοιχα, όπως αυτές προκύπτουν από τους πίνακες των Σχημάτων 8.31, 8.32.



Σχήμα 8.33: Διάγραμμα συγκρίσεως μηνιαίων καταναλώσεων του κυκλώματος MT για χρήση εναλλακτικών ψυκτικών μέσων



Σχήμα 8.34: Διάγραμμα συγκρίσεως μηνιαίων καταναλώσεων του κυκλώματος MT για χρήση εναλλακτικών ψυκτικών μέσων

Στους πίνακες των Σχημάτων 8.31, 8.32, αλλά και στα διαγράμματα συγκρίσεως των μηνιαίων καταναλώσεων των Σχημάτων 8.33, 8.34 παρατηρούμε, ότι και για τα δύο κύκλωμα, από τα ψυκτικά μέσα που μελετήθηκαν, μόνο η χρήση του R-407C εμφανίζει μεγαλύτερες ηλεκτρικές καταναλώσεις από το υπάρχον R-404a. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο χαμηλό συντελεστή συμπεριφοράς που εμφανίζει το συγκεκριμένο ψυκτικό μέσο, όπως προέκυψε από τα συγκριτικά διαγράμματα των Σχημάτων 8.29,8.30. Αντίθετα, η χρήση των ψυκτικών μέσων R-134a, R-410A, και R-507A, σημειώνει μικρότερες μηνιαίες ηλεκτρικές καταναλώσεις στο ψυκτικό κύκλωμα MT και κατ' επέκταση μικρότερο κόστος λειτουργίας.

Μπορούμε λοιπόν να πούμε, ότι ειδικά για τα ψυκτικά μέσα R-410a και R-507a, τα οποία έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά και ιδιότητες με το R-404a, η μεταπήδηση από το R-404a σε αυτά, τόσο στο κύκλωμα MT, όσο και στο κύκλωμα LT, θα προσφέρει χωρίς μεγάλο κόστος μετατροπής, άμεσα ενεργειακό και οικονομικό όφελος για την εταιρεία διεύθυνσης του σουπερμάρκετ. Συγκεκριμένα για το κύκλωμα MT, υπολογίζεται ότι απευθείας αντικατάσταση του R-404a με το R-410a ή το R-507a, θα επιφέρει 1.1% και 0.6% ενεργειακή και οικονομική εξοικονόμηση αντίστοιχα. Για το κύκλωμα LT, οι αντίστοιχη εξοικονόμηση υπολογίζεται στο 1.3%, για τη χρήση του R-410a και στο 0.9%, για τη χρήση του R-507a. Αν και ένα ετήσιο όφελος της τάξης των 50-100€, που προκύπτει από τη χρήση των R-410a και R-507a στους πίνακες των Σχημάτων 8.31,8.32, δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό, αν η συγκεκριμένη μετατροπή πραγματοποιηθεί για το σύνολο των καταστημάτων, ενός μεγάλου ομίλου διεύθυνσης σουπερμάρκετ, τότε το συνολικό ποσό εξοικονόμησης, από μία τέτοια επένδυση, ενδέχεται να γίνει ιδιαίτερα ελκυστικό.

Επιπλέον, η ενεργειακή απόδοση του R-407c, που παρουσιάστηκε μέσω των χαμηλών τιμών COP, στα διαγράμματα των Σχημάτων 8.29, 8.30, καθώς και το αυξημένο κόστος λειτουργίας που θα επιφέρει αν αντικαταστήσει το υπάρχον R-404a, όπως αναδείχθηκε στους πίνακες των Σχημάτων 8.31, 8.32, το οποίο αυξάνεται κατά 11.1% στο κύκλωμα MT και κατά 6.1% στο κύκλωμα LT, κρίνουν μη συμφέρουσα τη χρησιμοποίησή του σε υπάρχον ή νέο εξοπλισμό.

Τέλος, το υψηλό ενεργειακό και οικονομικό όφελος από τη χρησιμοποίηση του R-134a, το οποίο είναι της τάξης του 8.2% για το κύκλωμα MT και 8.5% για το κύκλωμα LT, όπως αυτά αναδείχθηκαν στους πίνακες των Σχημάτων 8.31, 8.32, καθιστούν συμφέρουσα τη χρήση του εν λόγω ψυκτικού μέσου στα κύκλωμα αυτά, όσον αφορά νέο ψυκτικό εξοπλισμό. Ωστόσο, το γεγονός ότι για την αντικατάσταση του R-404a με R-134a σε υπάρχουσα ψυκτική εγκατάσταση απαιτούνται αρκετές μετατροπές του εξοπλισμού, οι οποίες ενδέχεται να επιφέρουν μεγάλο οικονομικό κόστος, απαιτεί την περαιτέρω οικονομικοτεχνική μελέτη μιας τέτοιας αλλαγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Συμπεράσματα

Για το μελετηθέν σουπερμάρκετ, το σύνολο των καταναλώσεων της ψυκτικής εγκατάστασης αποτελεί το 58.8% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε επίπεδο έτους (Ιούλιος '16 έως και Ιούνιος '17), έχουμε συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της τάξεως των 51.5 MWh για το κύκλωμα συντήρησης MT και 101.9 MWh για το κύκλωμα κατάψυξης LT, δηλαδή 97.78% μεγαλύτερη ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση για το κύκλωμα LT σε σχέση με το MT.

Στις 16/01/2017 εφαρμόστηκαν στο κατάστημα οι παρακάτω ενέργειες:

- Απενεργοποίηση του 3^{ου} κατά σειρά scroll συμπιεστή στο κύκλωμα LT, ο οποίος λειτουργεί με ισοδύναμο βαθμό απόδοσης κάτω του 50%, ενώ οι υπόλοιποι συμπιεστές λειτουργούν αντίστοιχα σε επίπεδα άνω του 60%.
- Ρύθμιση της συχνότητας έναρξης και διακοπής λειτουργίας των scroll συμπιεστών του κυκλώματος MT, προκειμένου οι scroll συμπιεστές να παραμένουν για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια ενεργοί, εξοικονομώντας ηλεκτρική ενέργεια από τις απότομες διακοπές και επανενάρξεις λειτουργίας τους.
- Ρύθμιση της υψηλής πίεσης λειτουργίας HP και κατ' επέκταση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης των κυκλωμάτων MT και LT, σε χαμηλότερα επίπεδα, τα οποία ενδείκνυνται για τη βέλτιστη οικονομοτεχνικά απαγωγή θερμότητας συμπύκνωσης στο εξωτερικό περιβάλλον, οδηγώντας στην εξοικονόμηση ενέργειας, μέσω της μείωσης της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος στις διατάξεις των συμπιεστών.

Ωστόσο στο κύκλωμα MT, μόνο το σημείο λειτουργίας των βοηθητικών scroll συμπιεστών μεταβάλλεται, καθώς η λειτουργία του εμβολοφόρου, ο οποίος λειτουργεί ανελλιπώς, καθορίζεται από σύστημα inverter, με αποτέλεσμα η ρύθμιση της υψηλής πίεσης να μην επιδρά σημαντικά στη καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ. Αντίθετα, στο κύκλωμα LT, όπου δε γίνεται χρήση συστήματος inverter, η μεταβολή του σημείου

λειτουργίας των συμπιεστών scroll, οδηγεί στη μείωση της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

Οι παραπάνω ενέργειες οδήγησαν, τόσο στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, όσο και στη μείωση του κόστους λειτουργίας της ψυκτικής εγκατάστασης. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε:

- i) Μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος κατά 12.78%, στο κύκλωμα συντήρησης (MT) και κατά 29.55%, στο κύκλωμα κατάψυξης (LT).
- ii) Αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς COP κατά 16.8%, στο σύστημα μέσης θερμοκρασίας (MT) και κατά 23%, στο σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας (LT).
- iii) Συνολική ετήσια εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας 7644.48 kWh, στο κύκλωμα συντήρησης (MT) και 37214.68 kWh, στο κύκλωμα κατάψυξης (LT).
- iv) Συνολική ετήσια οικονομική εξοικονόμηση 825.6 €, στο κύκλωμα συντήρησης (MT) και 4,019.19 €, στο κύκλωμα κατάψυξης (LT).

Στο κύκλωμα LT εμφανίζεται μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση, από το κύκλωμα MT. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός, ότι στο κύκλωμα MT, υπάρχει ο εμβολοφόρος συμπιεστής, ο οποίος ρυθμίζεται μέσω inverter και επειδή λειτουργεί ανελλιπώς, αντιπροσωπεύει ουσιαστικά τη λειτουργία ολόκληρης της διάταξης συμπιεστών του κυκλώματος MT. Επομένως, δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό το κύκλωμα MT, από την αλλαγή της υψηλής πίεσης λειτουργίας του συστήματος.

Οι θεωρητικά υπολογιζόμενες στο EES τιμές για το COP στα κυκλώματα MT και LT, προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις μετρούμενες από τον αναλυτή απόδοσης τιμές, σημειώνοντας μέγιστη απόκλιση της τάξης του 3% και μέση τιμή των απολύτων τιμών των ποσοστιαίων αποκλίσεων της τάξης του 1.3%, για το κύκλωμα MT, ενώ για το κύκλωμα LT, τα αντίστοιχα μεγέθη υπολογίστηκαν στο 3% και στο 0.9% αντίστοιχα. Επομένως, επιβεβαιώνουμε την ορθότητα και την ακρίβεια του υπολογιστικού μοντέλου, που αναπτύχθηκε στο EES.

Το κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας MT, αντιπροσωπεύεται ικανοποιητικά μόνο από τον εμβολοφόρο συμπιεστή, για τον οποίο υπολογίστηκε ισεντροπικός και μηχανικός βαθμός απόδοσης, $\eta_{is} = 65\%$ και $\eta_m = 98\%$ αντίστοιχα.

Στο κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας LT, εμφανίζονται έξι συνήθη σχήματα λειτουργίας των τριών συμπιεστών της διάταξης. Επομένως, θεωρούμε έναν ισοδύναμο ισεντροπικό και έναν ισοδύναμο μηχανικό βαθμό απόδοσης της διάταξης συμπιεστών, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τους και αντιπροσωπεύουν και τους τρεις συμπιεστές και οι τιμές τους υπολογίστηκαν $\eta_{is} = 73\%$ και $\eta_m = 95\%$ αντίστοιχα.

Εφαρμόστηκε παραμετρική ανάλυση των θερμοδυναμικών μεγεθών και των μεγεθών ενεργειακής ισχύος των ψυκτικών κυκλωμάτων, μέσω της οποίας προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Δεδομένης της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, το COP μειώνεται όσο μικρότερη είναι και η επιθυμητή θερμοκρασία ατμοποίησης του ψυκτικού μέσου. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος, που σε μια ψυκτική εγκατάσταση σουπερμάρκετ, όπως η μελετηθείσα, το κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας LT λειτουργεί με μικρότερες τιμές COP από το κύκλωμα μέσης θερμοκρασίας.
- Δεδομένης της θερμοκρασίας ατμοποίησης, το COP μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία συμπύκνωσης, διότι απαιτείται μεγαλύτερη προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς στη διάταξη συμπιεστών.
- Η υπερθέρμανση SH, έχει αμελητέα επιρροή στα χαρακτηριστικά απόδοσης του ψυκτικού κύκλου και επομένως ορθώς χρησιμοποιείται η ενθαλπία του σημείου στην είσοδο του συμπιεστή, για τον υπολογισμό του ψυκτικού φορτίου στον ατμοποιητή. Η μικρή αύξηση που προσδίδει στο COP, η αύξηση της υπερθέρμανσης, οφείλεται στη μετακίνηση του σημείου στην είσοδο της διάταξης συμπιεστών, προς μεγαλύτερες θερμοκρασίες και επομένως ενθαλπίες. Το γεγονός αυτό, συνεπάγεται μια μικρή εξοικονόμηση στην απαιτούμενη προσδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ του συμπιεστή.
- Στα κυκλώματα MT και LT της παρούσας ψυκτικής εγκατάστασης, η υπόψυξη SC δεν ξεπερνά τη θερμοκρασιακή διαφορά των 5K. Ωστόσο, εάν μέσω χρήσης εναλλάκτη θερμότητας αυξήσουμε την υπόψυξη του ψυκτικού μέσου μετά την έξοδό του από το συμπυκνωτή του κυκλώματος, θα επιτύχουμε αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς (COP) του ψυκτικού κύκλου.

Κατά τους θερινούς μήνες εμφανίζεται μεγαλύτερη απαίτηση ψυκτικού φορτίου στην ψυκτική εγκατάσταση, λόγω των μεγαλύτερων επιπέδων εξωτερικής θερμοκρασίας, που παρατηρείται κατά τους μήνες αυτούς, οι οποίες συνεπάγονται μεγαλύτερες θερμικές απώλειες στα ψυκτικά κυκλώματα MT και LT.

Στο κύκλωμα MT, το άνοιγμα των θυρίδων των ψυγείων από τους πελάτες του καταστήματος, μία τυπική ημέρα λειτουργίας αυξάνει την απαίτηση ψυκτικού φορτίου κατά 5.6 kW σε σχέση με μία Κυριακή, όπου το κατάστημα παραμένει κλειστό. Αυτό το επιπλέον απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο (24% αύξηση), οφείλεται στην εισχώρηση θερμού αέρα εντός του ψυγείου από το χώρο πωλήσεων του καταστήματος και το μεγάλο ποσοστό του προς το ολικό ψυκτικό φορτίο του κυκλώματος MT, οδηγεί στην ανάγκη περιορισμού αυτών των απωλειών ισχύος, στα πλαίσια της ενεργειακής εξοικονόμησης του καταστήματος.

Το ψυκτικό φορτίο στο κύκλωμα MT, εξαρτάται από την εξωτερική θερμοκρασία και υπολογίζεται προσεγγιστικά μέσω της εξίσωσης (8.5):

$$Q_{\psi} = 0.4133 \cdot T_{amb} + 12.431$$

Στο κύκλωμα LT το ψυκτικό φορτίο δεν διαφοροποιείται μεταξύ καθημερινών και Κυριακών. Το γεγονός αυτό οφείλεται, στο ότι για τα συστήματα κατάψυξης οι απώλειες θερμότητας με το εξωτερικό περιβάλλον του καταψύκτη είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των συστημάτων συντήρησης, λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασιακής διαφοράς. Επομένως, και για τις δύο περιπτώσεις λειτουργίας του καταστήματος, παρατηρούνται μεγάλες τιμές του συντελεστή φορτίου CF, οι οποίες εξαρτώνται μόνο από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει, πως ανεξάρτητα από το αν υπάρχει μεγάλη δραστηριότητα ανοίγματος των θυρίδων των καταψυκτών ή όχι, η διάταξη συμπιεστών λειτουργεί με μεγάλους συντελεστές φόρτισης, δηλαδή σχεδόν για όλη τη διάρκεια της ημέρας, προκειμένου να καλύψει τα απαιτούμενα ψυκτικά φορτία.

Κατά την 16^η Ιανουαρίου και μετά, την ημέρα δηλαδή που έλαβε χώρα η αλλαγή της υψηλής πίεσης των κυκλωμάτων MT και LT, παρατηρείται μια ελαφρά μείωση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου στους καταψύκτες του σουπερμάρκετ της τάξης των 2kW (-7%) στο μέσο ψυκτικό φορτίο συνεχούς λειτουργίας Q', μετά την αλλαγή της υψηλής πίεσης λειτουργίας του κυκλώματος LT. Το γεγονός, αυτό οφείλεται στο ότι μετά τη μείωση της υψηλής πίεσης λειτουργίας HP, το ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου ψυκτικό φορτίο q_{ψ} είναι μεγαλύτερο ($q_{\psi 2} > q_{\psi 1}$) και επομένως, οι συμπιεστές λειτουργούν λιγότερες ώρες για την κάλυψη του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου στους καταψύκτες του καταστήματος.

Επομένως, η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτεύχθηκε στο κύκλωμα LT, κατά την 16^η Ιανουαρίου, μέσω της ρύθμισης της υψηλής πίεσης λειτουργίας HP σε χαμηλότερα επίπεδα, οφείλεται τόσο στην αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς COP του ψυκτικού κύκλου, όσο και στη μείωση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου Q_{evap} . Συγκεκριμένα, η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ισχύος P_{el} στη διάταξη των συμπιεστών, οφείλεται κατά 23% στην αύξηση του COP και κατά 77% στη μείωση του Q_{evap} .

Το ψυκτικό φορτίο, όπως αντίστοιχα και στο κύκλωμα MT, εξαρτάται από την εξωτερική θερμοκρασία και υπολογίζεται προσεγγιστικά, για της ημερομηνίες πριν τις 16/01/2017 (pre) και για τις ημερομηνίες μετά (post), μέσω της δίκλαδης συνάρτησης (8.6):

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{\psi} = 0.1471 \cdot T_{\text{amb}} + 17.653 \quad , \quad \text{pre} \\ Q_{\psi} = 0.1392 \cdot T_{\text{amb}} + 15.359 \quad , \quad \text{post} \end{array} \right\}$$

Με χρήση των εξισώσεων των μοντέλων προσδιορισμού του ψυκτικού φορτίου (8.5) και (8.6), αναπτύσσεται πρόγραμμα στο EES, το οποίο προσεγγίζει ικανοποιητικά τις πραγματικές μηνιαίες ηλεκτρικές καταναλώσεις $E_{\text{el}}^{\text{real}}$ του κυκλώματος MT και LT (μετά τη ρύθμιση της HP), με μέγιστες αποκλίσεις 5.3% και 4.1% αντίστοιχα.

Επιπλέον, για το κύκλωμα MT εξετάστηκαν τα R-134a, R-407c, R-410a και R-507a, ως εναλλακτικά ψυκτικά μέσα, για αντικατάσταση του υπάρχοντος R-404a. Εκείνο που εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές COP στο μελετηθέν εύρος θερμοκρασιών συμπύκνωσης,

είναι το R-134a. Αντίθετα, εκείνο που εμφανίζει τα χαμηλότερα επίπεδα COP, είναι το R-407c, σημειώνοντας αύξηση της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και κόστους λειτουργίας στα δύο ψυκτικά κυκλώματα. Επίσης, τα ψυκτικά μέσα R-507A και R-410A, εμφανίζουν παρόμοιες τιμές COP με το υπάρχον ψυκτικό μέσο, γεγονός που οφείλεται στα παρόμοια χαρακτηριστικά τους με εκείνα του R-404a

Παράλληλα, ο υπολογισμός των μηνιαίων καταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας και του μηνιαίου κόστους λειτουργίας στα κυκλώματα MT και LT, κατέδειξε, ότι το R-407C σημειώνει αύξηση των δύο αυτών μεγεθών κατά 11.1% στο κύκλωμα MT και 6.1% στο κύκλωμα LT και συνεπώς κρίνεται μη συμφέρουσα η χρησιμοποίησή του σε υπάρχον ή νέο εξοπλισμό.

Ακόμη, το υψηλό ενεργειακό και οικονομικό όφελος από τη χρησιμοποίηση του R-134a, το οποίο είναι της τάξης του 8.2% για το κύκλωμα MT και 8.5% για το κύκλωμα LT, καθιστούν συμφέρουσα τη χρήση του εν λόγω ψυκτικού μέσου στα κυκλώματα αυτά, όσον αφορά νέο ψυκτικό εξοπλισμό. Ωστόσο, το γεγονός ότι για την αντικατάσταση του R-404a με R-134a σε υπάρχουσα ψυκτική εγκατάσταση απαιτούνται αρκετές μετατροπές του εξοπλισμού, οι οποίες ενδέχεται να επιφέρουν μεγάλο οικονομικό κόστος, απαιτεί την περαιτέρω οικονομικοτεχνική μελέτη μιας τέτοιας αλλαγής.

Τέλος, για τα ψυκτικά μέσα R-410a και R-507a, τα οποία έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά και ιδιότητες με το R-404a, η μεταπήδηση από το R-404a σε αυτά, τόσο στο κύκλωμα MT, όσο και στο κύκλωμα LT, θα προσφέρει χωρίς μεγάλο κόστος μετατροπής, άμεσα ενεργειακό και οικονομικό όφελος για την εταιρεία διεύθυνσης του σουπερμάρκετ. Συγκεκριμένα για το κύκλωμα MT, υπολογίζεται ότι απευθείας αντικατάσταση του R-404a με το R-410a ή το R-507a, θα επιφέρει 1.1% και 0.6% ενεργειακή και οικονομική εξοικονόμηση αντίστοιχα. Για το κύκλωμα LT, η αντίστοιχη εξοικονόμηση υπολογίζεται στο 1.3%, για τη χρήση του R-410a και στο 0.9%, για τη χρήση του R-507a. Αν και ένα ετήσιο όφελος της τάξης των 50-100€, που προκύπτει από τη χρήση των R-410a και R-507a σε κάθε κύκλωμα, δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό, αν η συγκεκριμένη μετατροπή πραγματοποιηθεί για το σύνολο των καταστημάτων, ενός μεγάλου ομίλου διεύθυνσης σουπερμάρκετ, τότε το συνολικό ποσό εξοικονόμησης ενδέχεται να γίνει ιδιαίτερα ελκυστικό.

Βιβλιογραφία

- [1] I. Suamir, *Integration of Trigeration and Co2 Based Refrigeration Systems for Energy Conservation in the Food Retail Industry*. 2012.
- [2] E. Economic and S. Committee, "COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT: EU Strategy for Heating and Cooling," 2016.
- [3] S. A. Tassou, Y. Ge, A. Hadawey, and D. Marriott, "Energy consumption and conservation in food retailing," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 2–3, pp. 147–156, 2011.
- [4] M. S. Spyrou, K. Shanks, M. J. Cook, J. Pitcher, and R. Lee, "An empirical study of electricity and gas demand drivers in large food retail buildings of a national organisation," *Energy Build.*, vol. 68, no. PARTA, pp. 172–182, 2014.
- [5] V. Baxter, "Advances in supermarket refrigeration systems," *Oak ridge Natl. Lab. Oak ridge, TN*, pp. 1–12, 2002.
- [6] R. M. Lazzarin and F. Castellotti, "A new heat pump desiccant dehumidifier for supermarket application," *Energy Build.*, vol. 39, no. 1, pp. 59–65, 2007.
- [7] Κ. Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ, *ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ*. ΑΘΗΝΑ: ΕΜΠ, 2015.
- [8] Emerson Climate Technologies, "Refrigerant Choices for Commercial Refrigeration," p. 32, 2010.
- [9] Σ. Αναστασιάδης, *ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ ΨΥΞΗΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ*. ΑΘΗΝΑ, 1989.
- [10] D. Westphalen, R. A. Zogg, A. F. Varone, and M. A. Foran, "Energy Savings Potential for Commercial Refrigeration Equipment," 1996.
- [11] Σ. Αναστασιάδης, *ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ ΨΥΞΗΣ*. ΑΘΗΝΑ, 2001.
- [12] "No Title." [Online]. Available: <http://allthingshvac.com/a-guide-to-copeland-compressors>.
- [13] S. Jain and C. W. Bullard, "Capacity and Efficiency in Variable Speed , Vapor Injection and Multi-Compressor Systems," *Air Cond. Refrig. Cent.*, vol. 61801, no. 217, pp. 226–230, 2004.
- [14] "No Title." [Online]. Available: <http://www.enggcyclopedia.com/2012/03/scroll-compressors/>.
- [15] "No Title." [Online]. Available: <http://www.refrigeratordiagrams.com/tag/rotary-compressors>.
- [16] X. Wu, Z. Xing, Z. He, X. Wang, and W. Chen, "Effects of lubricating oil on the performance of a semi-hermetic twin screw refrigeration compressor," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 112, pp. 340–351, 2017.
- [17] "No Title." [Online]. Available: <http://hec-r.s3.amazonaws.com/Site/prod/contentplayer/templates/ces/images/c00087.jpg>.
- [18] Σ. Αναστασιάδης, *ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ - ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΨΥΞΗ -*

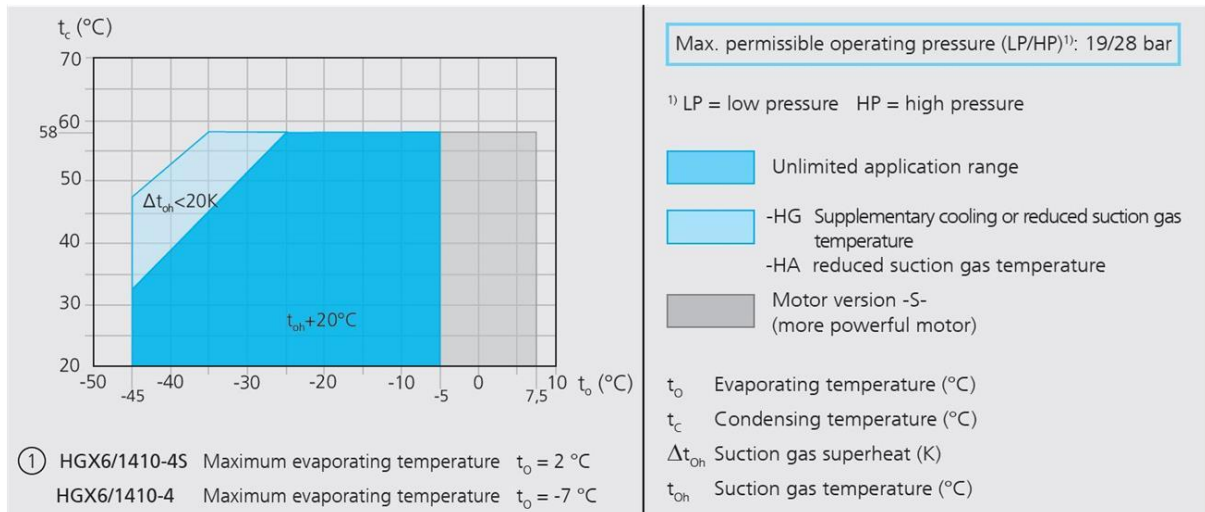
ΚΡΥΟΓΕΝΝΕΤΙΚΗ. ΑΘΗΝΑ, 1984.

- [19] Σ. Αναστασιάδης, *ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΨΥΞΗΣ: ΒΛΑΒΕΣ - ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ*. ΑΘΗΝΑ, 1992.
- [20] “No Title.” [Online]. Available: <http://www.achrnews.com/articles/85048-tech-tips-for-thermostatic-expansion-valves>.
- [21] “No Title.” [Online]. Available: <http://www.achrnews.com/articles/95056-electronic-expansion-valves-the-basics>.
- [22] R. Lazzarin, D. Nardotto, and M. Noro, “Electronic expansion valves vs. thermal expansion valves,” *ASHRAE J.*, vol. 51, no. 2, pp. 34–38, 2009.
- [23] Σ. Χατζηδάκης, *Σημειώσεις Ψύξης Α και Β Μέρος*. Αθήνα: ΕΜΠ, 2003.
- [24] ASHRAE, “ASHRAE Position Document on Refrigerants and their Responsible Use,” p. 17, 2012.
- [25] “No Title.” [Online]. Available: <http://www.greenpeace.org/greece/Global/greece/report/2006/10/326232.pdf>.
- [26] T. C. Welch and A. R. Trott, *Refrigeration and Air-Conditioning*, 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [27] D. P. Wilson *et al.*, “Designation and Safety Classification of Refrigerants,” *ANSI/ASHRAE Stand. 34-2010*, vol. 4723, p. 9, 2010.
- [28] M. D. Bovea, R. Cabello, and D. Querol, “Comparative life cycle assessment of commonly used refrigerants in commercial refrigeration systems,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 12, no. 5, pp. 299–307, 2007.
- [29] Emerson Climate Technologies, “Refrigerants for Commercial Refrigeration Applications,” no. June, pp. 3–20, 2011.
- [30] M. Bortolini, M. Gamberi, R. Gamberini, A. Graziani, F. Lolli, and A. Regattieri, “Retrofitting of R404a commercial refrigeration systems using R410a and R407f refrigerants,” *Int. J. Refrig.*, vol. 55, pp. 142–152, 2015.
- [31] G. E. A. R. Technologies, “More than an alternative - GEA Bock Compressors for the new refrigerant R407F.”
- [32] “No Title.” [Online]. Available: <https://www.agas.co.uk/products-services/refrigerants/products/low-gwp-alternatives/r448a-n40/>.
- [33] A. Mota-Babiloni, J. Navarro-Esbr??, B. Peris, F. Mol??s, and G. Verd??, “Experimental evaluation of R448A as R404A lower-GWP alternative in refrigeration systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 105, pp. 756–762, 2015.
- [34] “No Title.”
- [35] “No Title.” [Online]. Available: <http://www.gas-servei.com/en/componentes/sustitutos-indirectos-del-r-22/r-507>.
- [36] A. It, “R32 for Air Conditioning - a low GWP , low flammable solution,” no. November, 2012.
- [37] Linde, “Refrigerants Environmental Data. Ozone Depletion and Global Warming Potential,” *Ozone Deplet. Potential*, vol. 1, no. 2006, p. 2, 2006.

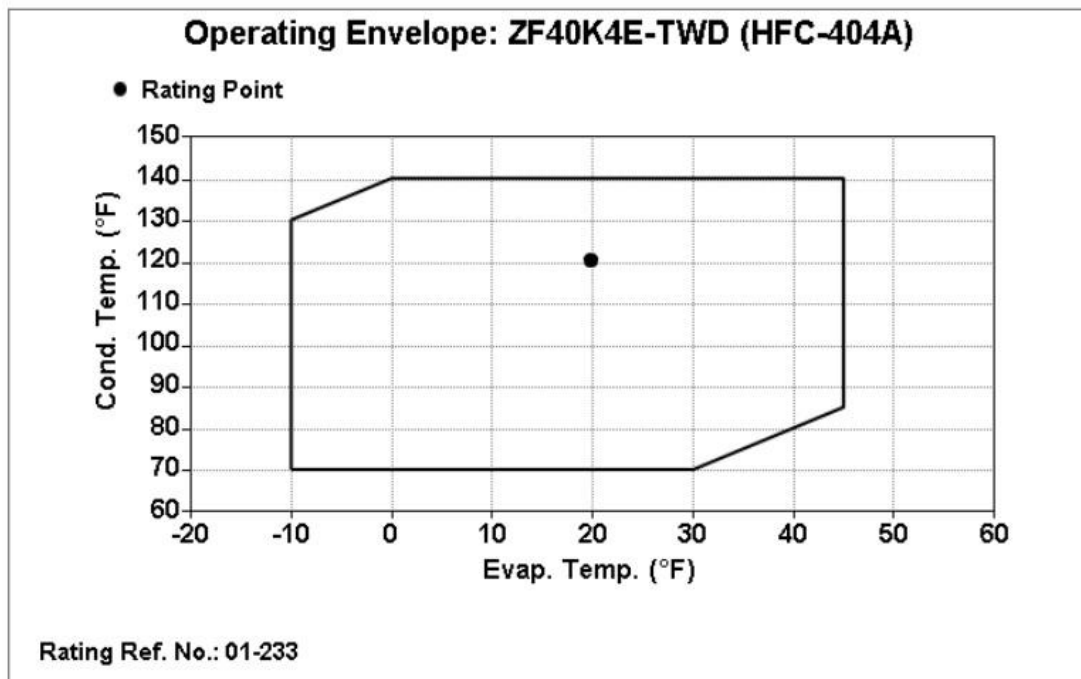
- [38] NRI, "Refrigerant Reference Guide," *Natl. Refrig. Inc.*, p. 149, 2016.
- [39] International Institute of Refrigeration, "Classification of Refrigerants," Paris, 2001.
- [40] ASHRAE, "Designation and Safety Classifications of Refrigerants," pp. 1–15, 2000.
- [41] P. U. Description, M. Plains, E. Overview, and S. Asphyxiant, "Genetron® 245fa Genetron® 245fa," pp. 1–15, 2017.
- [42] T. R. Compressors and H. G. Ha, "Semi-hermetic Bock Compressors GEA Refrigeration Technologies : Your partner for low temperatures."
- [43] F. I. N. M. Kühlrippenmaterial and A. Fin, "Luftgekühlte Axialkondensatoren – CHN- und CHS-Serien Model Key Example / Beispiel für Modellbezeichnung Example : Required Heat of Rejection : Altitude : 1000 m Beispiel : MODEL FANS CAPACITY LEVEL POLES AND CONNECTIONS VOLUME," no. example 1264.
- [44] DTU: Department of Mechanical Engineering, "Coolpack." Kgs. Lyngby, 2000.
- [45] W. Z. Black and J. G. Hartley, *ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ*, 1st ed. 2010.
- [46] K. Berglöf, "Innovative Method for Performance Inspections Used to Optimise Existing Refrigeration and Air- Conditioning Plants," *Refrig. Air Cond.*, 2010.
- [47] K. Berglöf, "Performance Inspections With Innovative Analysing Equipment Results in Significant Energy Savings in Air- the Internal Method for Performance Analysis , Field Measurement Method for Refrigeration and Air- Conditioning Systems .," 2011.
- [48] AB Climacheck Sweden, "CLIMACHECK PERFORMANCE ANALYZER." .
- [49] ASERCOM, "Refrigerant Glide and Effect on Performances Declaration," no. September, pp. 1–11, 2015.
- [50] "ClimaCheck online." [Online]. Available: <http://www.online.climacheck.com/default.aspx?ReturnUrl=%2F>.
- [51] S. Klein and F. Alvarado, "Engineering equation solver," *F-Chart Software, Box*, pp. 1–2, 2002.
- [52] A. Mota-Babiloni, J. Navarro-Esbrí, Á. Barragán, F. Molés, and B. Peris, "Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline," *Int. J. Refrig.*, vol. 44, pp. 81–90, 2014.
- [53] ΔΕΗ, "Τιμες πωλησεως ηλεκτρικης ενεργειας," pp. 4–10.

Παραρτήματα

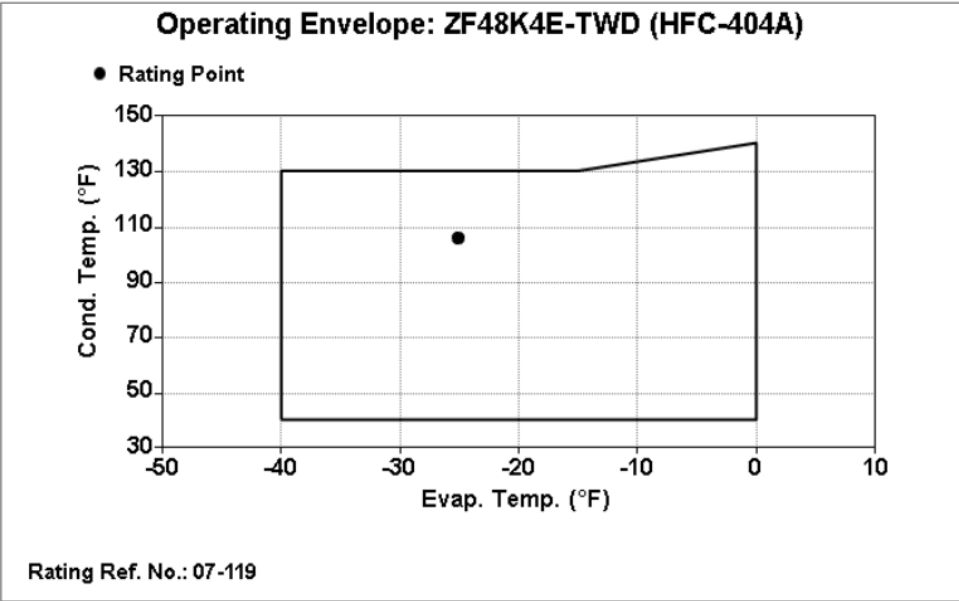
A. Πεδία λειτουργίας συμπιεστών των κυκλωμάτων MT και LT



Σχήμα A.1: Πεδίο λειτουργίας εμβολοφόρου συμπιεστή κυκλώματος MT

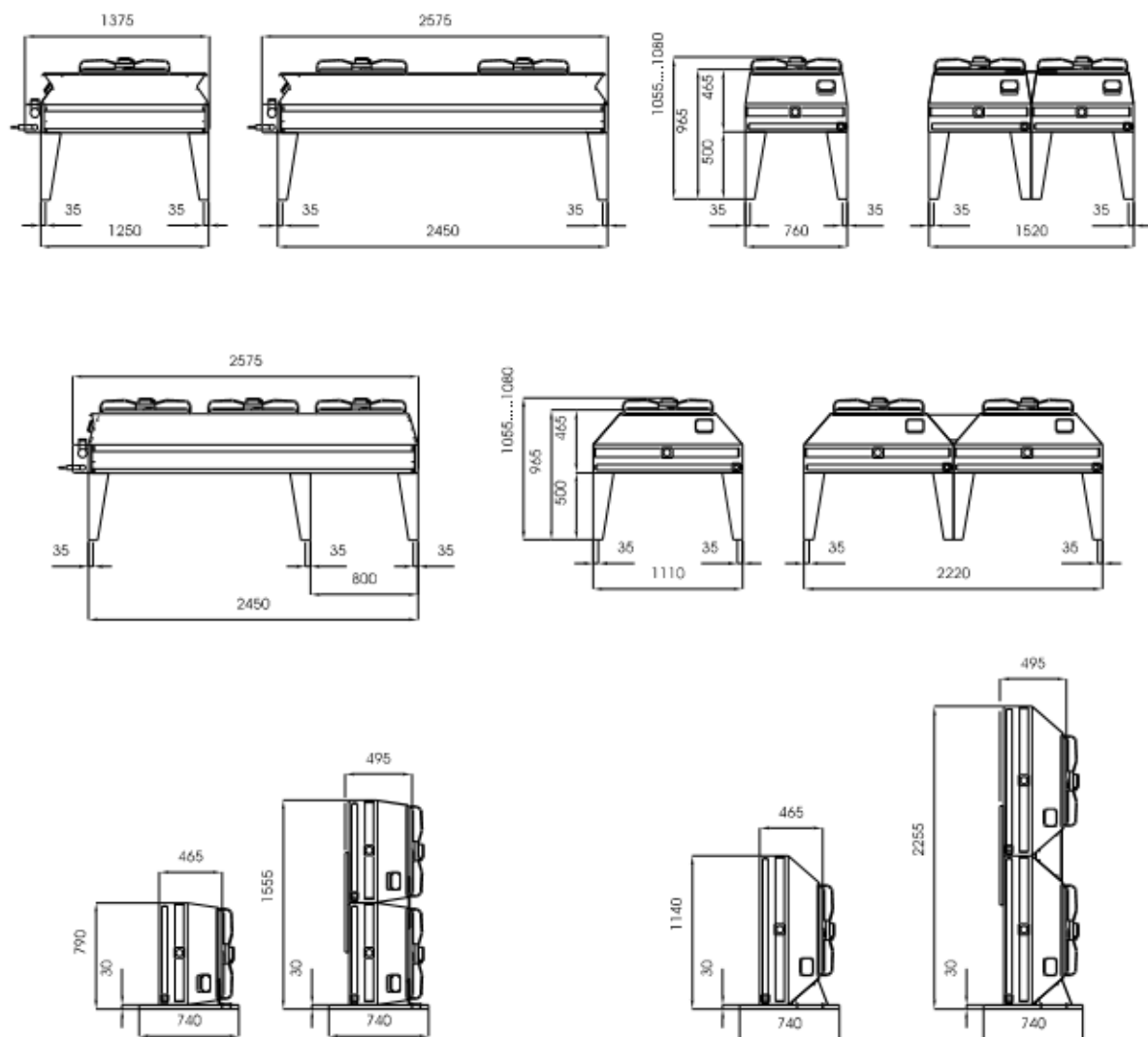


Σχήμα A.2: Πεδίο λειτουργίας scroll συμπιεστών κυκλώματος MT



Σχήμα Α.3: Πεδίο λειτουργίας scroll συμπιεστών κυκλώματος LT

B. Διαστασιολόγηση συμπυκνωτών κυκλωμάτων MT και LT



Σχήμα Β.1: Διαστασιολόγηση συμπυκνωτών κυκλωμάτων MT και LT