



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΣΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

***Συγκριτική Ανάλυση Ομοιομορφίας Θερμοκρασίας και
Απόδοσης σε Συστήματα Ψύξης Χαμηλών Θερμοκρασιών
Ερμητικού Συμπιεστή, Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και
Πολυσυμπιεστών***

Ονοματεπώνυμο Καθηγητή: Βαρζάκας Θεόδωρος

Ονοματεπώνυμο Φοιτητή: Χρήστος Κυπραίου (160636)

Πάτρα, 2025

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

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	iii
Περιεχόμενα Πινάκων.....	v
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων	vi
Περιεχόμενα Γραφημάτων	vi
Περιεχόμενα Εικόνων	vi
Περιεχόμενα Εξισώσεων	vi
Περίληψη.....	vii
Abstract	viii
Πρόλογος	ix
1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Γενικό Πλαίσιο	1
1.2. Σκοπός και Συνεισφορά της Εργασίας.....	4
1.3. Δομή της εργασίας	6
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	8
2.1. Ιστορία.....	8
2.2. Ψυκτικοί Παράγοντες.....	12
2.2.1. Υδροφθοράνθρακες (HFC).....	14
2.2.2. Υδρογονάνθρακες	15
2.2.3. Αμμωνία (R-717).....	16
2.2.4. Διοξείδιο του άνθρακα (R-744)	16
2.2.5. Υδροφθορολεφίνες (HFOs)	17
2.2.6. Φυσικοί Ψυκτικοί Στρόφιγγες - Βουτάνιο (R-600).....	17
2.2.7. Ειδικά Ψυκτικά	18
2.2.8. Συμπεράσματα.....	19
2.3. Κριτήρια και Παράγοντες Επιλογής Καταψυκτών ULT	20
2.4. Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις των ULT Καταψυκτών	23
2.4.1. Πλεονεκτήματα.....	23
2.4.2. Προκλήσεις.....	25
2.4.3. Στρατηγικές Ελαχιστοποίησης Προκλήσεων.....	28
2.5. Εφαρμογές Καταψυκτών ULT	30
2.5.1. Σημαντικότητα των Καταψυκτών ULT στη Σύγχρονη Ιατρική και Έρευνα	30
2.5.2. Μικροβιολογία και Βιολογία Σύνθεσης	33
2.5.3. Φαρμακογενετική και Γενετική Έρευνα	33
2.5.4. Ανάλυση Απαιτήσεων Αποθήκευσης ULT για Διάφορους Τύπους Προϊόντων.....	34
2.6. Πιστοποίηση Συστημάτων ULT	38
2.6.1. Κρίσιμοι παράγοντες απόδοσης κατά την Πιστοποίηση	38
2.6.2. Κανονισμοί και Πρότυπα Πιστοποίησης	40

2.6.2.1. Κανονιστικό πλαίσιο της ΕΕ.....	41
2.6.2.2. Ρυθμιστικό Πλαίσιο των ΗΠΑ	42
2.6.2.3. Βιομηχανικά πρότυπα και κατευθυντήριες γραμμές	43
2.6.3. Διαδικασία Πιστοποίησης Καταψυκτών ULT	45
2.6.3.1. Πιστοποίηση εγκατάστασης (IQ)	46
2.6.4.2. Λειτουργική πιστοποίηση (OQ)	47
2.6.4.3. Πιστοποίηση απόδοσης (PQ)	49
3. Εμπειρική Στρατηγική.....	53
3.1. Συστήματα Ψύξης Χαμηλών Θερμοκρασιών	53
3.1.2. Συγκριτική Ανάλυση.....	54
3.2. Στρατηγική Ανάλυσης.....	57
3.2.1. Συλλογή δεδομένων	57
3.2.1.1. Δοκιμές σε Κενό Θάλαμο	58
3.2.1.2. Δοκιμές σε Θάλαμο με Πλήρες Φορτίο	59
3.2.2. Επεξεργασία Δεδομένων	62
3.2.3. Στατιστικά Μέτρα, Ανάλυση Ομοιομορφίας και Μετρήσεις απόδοσης.....	62
3.2.3.1. Στατιστικά Μέτρα	62
3.2.3.2. Ανάλυση Ομοιομορφίας	62
3.2.3.3. Μετρήσεις Απόδοσης	63
3.2.3.4. Ανάλυση Επηρεασμού από εξωτερικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες	63
4. Εμπειρική Ανάλυση και Συμπεράσματα	71
4.1. Συγκριτική ανάλυση Δοκιμής 24ωρης Συνεχής Μέτρησης Θερμοκρασίας.....	71
4.2. Συγκριτική Ανάλυση Δοκιμασίας Ανοίγματος Πόρτας.....	79
4.3. Συγκριτική Ανάλυση Δοκιμής Διακοπής Ρεύματος	90
4.4. Συγκριτική Ανάλυση Δοκιμής Πήξης	99
4.5. Συγκριτική Ανάλυση Επηρεασμού από εξωτερικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες.....	106
5. Συμπεράσματα και Συζήτηση	112
5.1. Συμπεράσματα	112
5.1.1. Συμπεράσματα – Δοκιμής 24ωρών	112
5.1.2. Σύναψη από Δοκιμή Ανοίγματος Πόρτας	114
5.1.3. Συμπέρασμα από Δοκιμή Διακοπής Ρεύματος	115
5.1.4. Συμπέρασμα από Δοκιμή Ψύξης.....	117
5.1.5. Συμπεράσματα Παλινδρόμηση.....	118
5.2. Συζήτηση	121
5.2.1. Εισαγωγή.....	121
5.2.2. Επιλογή Καταψύκτη	122
5.2.3. Ομοιομορφία θερμοκρασίας.....	123
5.2.4. Απόδοση κατά άνοιγμα των θυρών.....	124

5.2.5. Απόδοση υπό συνθήκες διακοπής ρεύματος	124
5.2.6. Ζητήματα περιβάλλοντος και βιωσιμότητας	124
5.2.7. Πρακτικές επιπτώσεις και βιομηχανικές εφαρμογές	125
5.2.8. Περιορισμοί και μελλοντική έρευνα.....	125
5.2.9. Συμπέρασμα	126
6. Βιβλιογραφία	127
Παραρτήματα.....	141
Ανάλυση Δεδομένων	141
Δεδομένα 24ωρης μέτρησης.....	142
Δεδομένα: Στατιστικά μέτρα από 24ωρης μέτρησης.....	145
Δεδομένα Δοκιμής Ανοίγματος Πόρτας και Διακοπής Ρεύματος	148
Δεδομένα Δοκιμής Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό	150

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1 Είδη Ψυκτικών.....	20
Πίνακας 2 Είδη Προϊόντων και Αποθήκευση	38
Πίνακας 3 Κανονιστικές απαιτήσεις	45
Πίνακας 4 Συγκριτική Ανάλυση Συστημάτων Ψύξης Χαμηλών Θερμοκρασιών	56
Πίνακας 5 Συλλογή Δεδομένων	57
Πίνακας 6 Μακροπρόθεσμα Δεδομένα.....	65
Πίνακας 7 Δοκιμή 24ωρης Συνεχούς Μέτρησης Θερμοκρασίας (-40°C)	73
Πίνακας 8 Δοκιμή 24ωρης Συνεχούς Μέτρησης Θερμοκρασίας σε επίπεδο θέσης αισθητήρα (-40°C)	74
Πίνακας 9 Δοκιμή 24ωρης Συνεχούς Μέτρησης Θερμοκρασίας (-70°C).....	76
Πίνακας 10 Δοκιμή 24ωρης Συνεχούς Μέτρησης Θερμοκρασίας σε επίπεδο θέσης αισθητήρα (-70°C)	77
Πίνακας 11 Δοκιμασία Ανοίγματος Πόρτας (-40°C).....	84
Πίνακας 12 Δοκιμασία Ανοίγματος Πόρτας σε επίπεδο θέσης αισθητήρα (-40°C)	84
Πίνακας 13 Δοκιμασία Ανοίγματος Πόρτας (-70°C).....	87
Πίνακας 14 Δοκιμασία Ανοίγματος Πόρτας σε επίπεδο θέσης αισθητήρα (-70°C).....	88
Πίνακας 15 Δοκιμή Διακοπής Ρεύματος (-40°C)	93
Πίνακας 16 Δοκιμή Διακοπής Ρεύματος σε επίπεδο θέσης αισθητήρα (-40°C)	94
Πίνακας 17 Δοκιμή Διακοπής Ρεύματος	97
Πίνακας 18 Δοκιμή Διακοπής Ρεύματος σε επίπεδο θέσης αισθητήρα (-70°C)	97
Πίνακας 19 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό	102
Πίνακας 20 Βέλτιστη Επιλογή ανά Φάση.....	102
Πίνακας 21 Δεδομένα Ανάλυσης Επηρεασμού από εξωτερικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες (Χωρίς Ομαδοποίηση ανά τύπο καταψύκτη).....	110
Πίνακας 22 Δεδομένα Ανάλυσης Επηρεασμού από εξωτερικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες (ανά τύπο καταψύκτη)	111

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Συμπιεστές με Έμβολα.....	2
Διάγραμμα 2 Κύκλος Ψύξης	9

Περιεχόμενα Γραφημάτων

Γράφημα 1 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό - Ερμητικός Συμπιεστής.....	103
Γράφημα 2 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό - Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	104
Γράφημα 3 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό - Πολυσυμπιεστές.....	105

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1 Ερμητικός Συμπιεστής και Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	61
Εικόνα 2 Πολυσυμπιεστές	61
Εικόνα 3 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό - Ερμητικός Συμπιεστής	103
Εικόνα 4 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό - Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου.....	104
Εικόνα 5 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό – Πολυσυμπιεστές	105

Περιεχόμενα Εξισώσεων

Εξίσωση 1 Basic Panel Model	64
Εξίσωση 2 Fixed Effects Model	65
Εξίσωση 3 Random Effects Model	65
Εξίσωση 4 Μοντέλο Μηνιαίας Τυπικής Απόκλισης Διακύμανσης	65
Εξίσωση 5 Μοντέλο Μηνιαίας Μέσης Θερμοκρασίας	65
Εξίσωση 6 Μοντέλο Μηνιαίας Διακύμανσης.....	65



**Συγκριτική Ανάλυση Ομοιομορφίας Θερμοκρασίας και Απόδοσης σε Συστήματα
Ψύξης Χαμηλών Θερμοκρασιών Ερμητικού Συμπιεστή, Μηχανή Ελεύθερου
Εμβόλου και Πολυσυμπιεστών**

ΤΟΥ

Χρήστος Κυπραίου (160636) , BSc, MSc

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια συγκριτική ανάλυση της ομοιομορφίας θερμοκρασίας και της απόδοσης σε συστήματα ψύξης χαμηλής θερμοκρασίας, εξετάζοντας συγκεκριμένα ερμητικούς συμπιεστές, κινητήρες ελεύθερων εμβόλων και μηχανές πολυσυμπιεστών. Μέσω ενός συνδυασμού πειραματικών δοκιμών – συμπεριλαμβανομένης της 24ωρης παρακολούθησης θερμοκρασίας, προσομοιώσεων ανοίγματος θυρών, εκτιμήσεων διακοπής ρεύματος και δοκιμών πήξης – και οικονομετρικής μοντελοποίησης χρησιμοποιώντας παλινδρόμηση δεδομένων πίνακα, αυτή η έρευνα διερευνά τους κρίσιμους παράγοντες απόδοσης κάθε συστήματος. Τα βασικά ζητήματα περιλαμβάνουν τη σταθερότητα της θερμοκρασίας, την απόδοση και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, στο πλαίσιο των σχετικών κανονιστικών πλαισίων και των βιομηχανικών προτύπων. Η μελέτη αποκαλύπτει σημαντικές διαφοροποιήσεις στην απόδοση και τη θερμοκρασία μεταξύ των διαφορετικών τύπων καταψυκτών. Ο ερμητικός συμπιεστής παρουσίασε τη μεγαλύτερη σταθερότητα και την καλύτερη ικανότητα να διατηρεί χαμηλές θερμοκρασίες σε συνθήκες διακοπής ρεύματος και κατά τη διάρκεια της πήξης, ενώ οι πολυσυμπιεστές, παρά την ανωτερότητά τους σε κάποιες παραμέτρους, εμφάνισαν μεγαλύτερους χρόνους διακοπής εκτός προδιαγραφών. Η μηχανή ελεύθερου εμβόλου είχε ταχεία απόδοση σε διαδικασίες πήξης αλλά και πρόσβαση σε θερμοκρασίες που απαιτούν προσοχή. Αυτή η έρευνα ενημερώνει τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων για την επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών ψύξης σε βιοϊατρικές, φαρμακευτικές και άλλες ευαίσθητες εφαρμογές αποθήκευσης, τονίζοντας την ανάγκη εξισορρόπησης των χαρακτηριστικών απόδοσης με τους στόχους βιωσιμότητας και τους περιορισμούς κόστους. Τα αποτελέσματα συμβάλλουν στη βαθύτερη κατανόηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας του συστήματος ψύξης, υποστηρίζοντας τελικά βελτιωμένες πρακτικές για τη διατήρηση πολύτιμων υλικών.

Λέξεις-Κλειδιά: Ομοιομορφία θερμοκρασίας, Συστήματα ψύξης, Ερμητικοί συμπιεστές, Κινητήρες ελεύθερων εμβόλων, Μηχανές πολυσυμπιεστών, Σταθερότητα θερμοκρασίας, Κανονιστικά πλαίσια, Βιομηχανικά πρότυπα, Βιοϊατρικές εφαρμογές, Φαρμακευτικές εφαρμογές, Διατήρηση υλικών



***Comparative Analysis of Temperature Uniformity and Efficiency in Low
Temperature Refrigeration Systems of Hermetic Compressor, Free Piston Engine
and Multicompressors***

By

Christos Kypraiou (160636), BSc, MSc

Abstract

This thesis presents a comparative analysis of temperature uniformity and performance in low-temperature refrigeration systems, specifically examining hermetic compressors, free-piston motors, and multi-compressor machines. Through a combination of experimental testing – including 24-hour temperature monitoring, door opening simulations, power failure assessments, and freeze tests – and econometric modeling using panel data regression, this research investigates the critical performance factors of each system. Key issues include temperature stability, performance, and environmental impacts, within the context of relevant regulatory frameworks and industry standards. The study reveals significant variations in performance and temperature between different types of freezers. The hermetic compressor exhibited the greatest stability and ability to maintain low temperatures under power outage conditions and during freezing, while the multicompressors, despite their superiority in some parameters, exhibited longer out-of-specification outage times. The free-piston machine had rapid performance in freezing processes but also access to temperatures requiring attention. This research informs strategic decision-making for the selection of appropriate refrigeration technologies in biomedical, pharmaceutical, and other sensitive storage applications, highlighting the need to balance performance characteristics with sustainability goals and cost constraints. The results contribute to a deeper understanding of refrigeration system design and operation, ultimately supporting improved practices for preserving valuable materials.

Keywords: *Temperature uniformity, Refrigeration systems, Hermetic compressors, Free piston engines, Multi-compressor engines, Temperature stability, Regulatory frameworks, Industrial standards, Biomedical applications, Pharmaceutical applications, Material preservation*

Πρόλογος

Η έρευνα που παρουσιάζεται σε αυτή τη διατριβή εξετάζει τη σημαντική περιοχή της ψύξης σε χαμηλές θερμοκρασίες, ένα πεδίο που αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στη σύγχρονη επιστήμη και τεχνολογία. Το ενδιαφέρον μου για το συγκεκριμένο τομέα προήλθε από την αυξανόμενη συνείδηση της σημασίας της αξιόπιστης ψύξης για τη βιοϊατρική έρευνα, καθώς εργάζομαι στον τομέα αυτό. Το ταξίδι μου στην εξερεύνηση και σύγκριση διαφορετικών συστημάτων ψύξης υπήρξε ταυτόχρονα προκλητικό και ικανοποιητικό, απαιτώντας τη σύνθεση θεωρητικής γνώσης με πρακτικό πειραματισμό.

Αυτή η εργασία στοχεύει να προσφέρει μια ολοκληρωμένη ανάλυση των τεχνολογιών ψύξης όπως οι ερμητικοί συμπιεστές, οι κινητήρες ελεύθερου εμβόλου και οι πολυσυμπιεστές, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά απόδοσης, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους. Ελπίζω ότι τα ευρήματα αυτής της έρευνας θα είναι χρήσιμα για μηχανικούς, ερευνητές και επαγγελματίες του κλάδου που ασχολούνται με το σχεδιασμό, την επιλογή και τη λειτουργία συστημάτων ψύξης χαμηλής θερμοκρασίας, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση των πρακτικών για τη διατήρηση πολύτιμων υλικών και την προώθηση της επιστημονικής ανακάλυψης.

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον καθηγητή Βαρζάκα Θεόδωρο για την καθοδήγηση και την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια αυτού του έργου. Η τεχνογνωσία και η ενθάρρυνσή του υπήρξαν ανεκτίμητες για την ολοκλήρωση αυτής της έρευνας.

1. Εισαγωγή

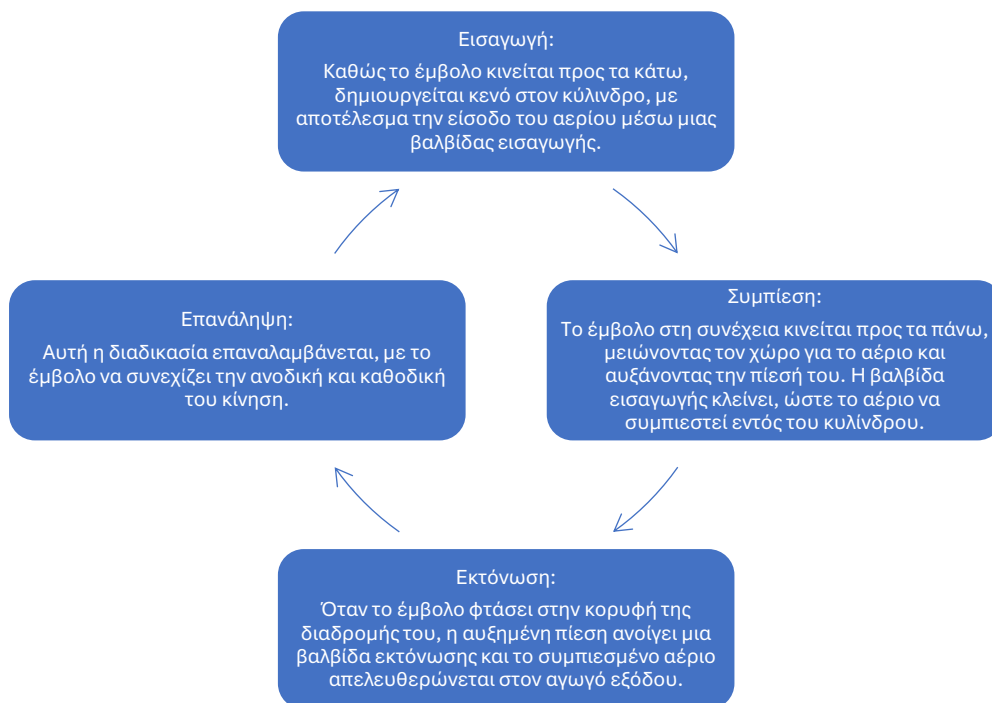
1.1. Γενικό Πλαίσιο

Τα συστήματα ψύξης είναι θεμελιώδη για τον σύγχρονο τρόπο ζωής και διαβίωσης, διαδραματίζοντας εξαιρετικά σημαντικό ρόλο σε διάφορες βιομηχανίες με την αποτελεσματική διαχείριση του ελέγχου θερμοκρασίας (Lim et al., 2016; Xu et al., 2023). Αξίζει να σημειωθεί ότι η σημασία της ψύξης σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες έχει καταστεί περισσότερο ιδιαίτερα επιτακτική από το 2020, με την έλευση της πανδημίας COVID-19, η οποία έθεσε νέες και περίπλοκες προκλήσεις και απαιτήσεις για την αποθήκευση εμβολίων σε θερμοκρασίες έως και -70°C ($\pm 10^{\circ}\text{C}$) (Xu et al., 2023). Τα πρώτα εγκεκριμένα εμβόλια, βασισμένα στην πρωτοπόρα τεχνολογία mRNA, όπως το εμβόλιο της Moderna (αποθήκευση στους -40°C) και της Pfizer (αποθήκευση στους -70°C), απαιτούν συνθήκες φύλαξης και μεταφοράς σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες (Phcbi, 2021). Αυτές οι απαιτήσεις κατέστησαν αναγκαία την υιοθέτηση πιο εξειδικευμένων λύσεων στην τεχνολογία της ψύξης (Phcbi, 2021). Ένας μεγάλος αριθμός τεχνολογιών είναι διαθέσιμες για τη διαχείριση των σύγχρονων απαιτήσεων, με την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας να είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την επιδιωκόμενη απόδοση θερμοκρασιών και τις ειδικές λειτουργικές απαιτήσεις (Ahamed et al. 2011; Barbosa et al., 2011). Έτσι, η ζήτηση έχει οδηγήσει σε σημαντικές προόδους στις τεχνολογίες ψύξης με στόχο την επίτευξη μεγαλύτερης ενεργειακής και θερμοκρασιακής απόδοσης και χαμηλότερων θερμοκρασιών ψύξης (Phcbi, 2021).

Τα παραδοσιακά συστήματα ψύξης, όπως τα συστήματα ψύξης με συμπίεση ατμού (Vapor Compression Refrigeration - VCR), έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως, αλλά αντιμετωπίζουν σημαντικούς περιορισμούς στην επίτευξη του εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών (Ultra Low Temperatures - ULT) λόγω των υψηλών αναλογιών πίεσης συμπιεστή (Ahamed et al. 2011; Barbosa et al., 2011). Ωστόσο, όταν απαιτείται υψηλή ψυκτική ισχύς για μεγάλου όγκου εφαρμογές, οι στροβιλομηχανές (Turbo Air Refrigerator - TIR) αποδεικνύονται συχνά η προτιμώμενη επιλογή λόγω της δυνατότητάς τους να επιτυγχάνουν υψηλή αποτελεσματικότητα (Zhao et al., 2009). Οι μηχανές αυτές λειτουργούν με τη βασική αρχή της μετατροπής ενέργειας με την χρήση ενός στροβίλου για να μετατρέψουν ενέργεια από ένα ρευστό, όπως ο αέρας ή ο ατμός, σε μηχανική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, όπως η παραγωγή ηλεκτρισμού ή η ψύξη (Zhao et al., 2009; Gondrand et al., 2014).

Αντίθετα, για εφαρμογές μικρότερης κλίμακας, τα συστήματα που βασίζονται σε συμπιεστές με έμβολο γίνονται ιδιαίτερα δημοφιλή λόγω της αξιοπιστίας και της οικονομικής απόδοσής τους (Park et al., 2020; Saravacos & Kostaropoulos, 2016). Οι συμπιεστές με έμβολο είναι ιδιαίτερα αξιόπιστοι και αποδοτικοί, χάρη στη σχετικά απλή κατασκευή τους και τη δυνατότητά τους να παρέχουν υψηλή πίεση με μικρό κόστος (Saravacos & Kostaropoulos, 2016). Επιπλέον, προσφέρουν καλή απόδοση σε ποικιλία συνθηκών λειτουργίας, γεγονός που τους καθιστά δημοφιλείς σε πολλές οικιακές και εμπορικές

εφαρμογές (Park et al., 2020). Αποτελούνται κυρίως από έναν κύλινδρο και ένα έμβολο που κινείται μπρος-πίσω μέσα στον κύλινδρο για να συμπιέσει το αέριο (Park et al., 2020; Saravacos & Kostaropoulos, 2016). Η βασική περιγραφή της λειτουργίας τους περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 1 Συμπιεστές με Έμβολα

Πηγή: Park et al., (2020), Saravacos & Kostaropoulos, (2016)

Μεταξύ αυτών των συστημάτων, οι καταψύκτες Ultra-Low Temperature (ULT) έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να αφαιρούν τη θερμότητα από μια ψυχρή δεξαμενή με τη μικρότερη δυνατή ενεργειακή δαπάνη, μεγιστοποιώντας έτσι την απόδοση ισχύος για συγκεκριμένες απαιτήσεις ψύξης (ASHRAE, 2014; Mota-Babiloni et συν., 2020; Getie et al., 2020). Οι καταψύκτες ULT είναι απαραίτητοι σε τομείς που απαιτούν σχολαστικά ελεγχόμενα περιβάλλοντα χαμηλής θερμοκρασίας, όπως η βιοϊατρική και επιστημονική έρευνα, η ηλεκτρονική, η χημεία, η μηχανική, η αλιευτική βιομηχανία και πολλές ακόμα (Lim et al., 2016; Xu et al., 2023). Σε αυτά τα πεδία, όπου η ακριβής ρύθμιση της θερμοκρασίας είναι κρίσιμης σημασίας, οι καταψύκτες ULT διασφαλίζουν τη σταθερότητα και την ακεραιότητα των ευαίσθητων υλικών και δειγμάτων (Getie et al., 2020).

Η σημασία τους εκτείνεται πέρα από την απλή ψύξη (Getie et al., 2020). Οι καταψύκτες ULT επιτρέπουν πρωτοποριακές ανακαλύψεις διατηρώντας τη βιωσιμότητα των υλικών που είναι απαραίτητα για την έρευνα στη γενετική, τη φαρμακολογία και τη βιοτεχνολογία (Evans, 2022; Dhiman & Kumar, 2023). Διατηρώντας τις βέλτιστες συνθήκες αποθήκευσης, αυτοί οι καταψύκτες βοηθούν στο ξεκλείδωμα των εξελίξεων που μπορούν να μεταμορφώσουν θεμελιωδώς τις βιομηχανίες και να βελτιώσουν τα παγκόσμια τοπία υγείας και τεχνολογίας (Evans, 2022; Dhiman & Kumar, 2023). Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι καθώς η έρευνα συνεχίζει να προοδεύει στην ανάπτυξη νέων βιολογικών και χημικών

προϊόντων, ο ρόλος των καταψυκτών ULT γίνεται ακόμη πιο καθοριστικός, παρέχοντας βασική υποδομή για την υποστήριξη της πειραματικής ακρίβειας και αξιοπιστίας (Xu et al., 2023; Getie et al., 2020).

Για να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες των καταψυκτών ULT, η σωστή συντήρηση και λειτουργία είναι ζωτικής σημασίας (Evans, 2022; Lim et al., 2016). Η τήρηση των βέλτιστων πρακτικών διασφαλίζει τη μακροζωία και την αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων, ενισχύοντας τα ερευνητικά αποτελέσματα και συμβάλλοντας στην δημιουργία και συσσώρευση πολύτιμων δεδομένων που οδηγούν την επιστημονική πρόοδο (Lim et al., 2016). Οι ULT έχουν την δυνατότητα να υποστηρίξουν καινοτομίες που ωφελούν την κοινωνία τόσο άμεσα όσο και έμμεσα, ενισχύοντας έναν κύκλο συνεχούς βελτίωσης και ανακάλυψης (Dhiman & Kumar, 2023). Η διασφάλιση της ποιότητας και ακεραιότητας των αποθηκευμένων δειγμάτων είναι καθοριστική για την αξιοπιστία της έρευνας και της κλινικής πρακτικής και η ποιότητα των βιολογικών δειγμάτων εξαρτάται άμεσα από τη σωστή θερμοκρασία αποθήκευσης και τη διαχείριση των καταψυκτών (Lim et al., 2016; Xu et al., 2023; Getie et al., 2020).

Κατά συνέπεια, οι εναλλακτικοί κύκλοι ψύξης έχουν κερδίσει την προσοχή για την ικανότητά τους να φτάνουν σε αυτές τις χαμηλές θερμοκρασίες (Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Για την επίτευξη των χαμηλών θερμοκρασιών που απαιτεί η τεχνολογία ULT στους καταψύκτες, υπάρχουν δύο κύριες τεχνολογίες: το σύστημα ψύξης Cascade δύο σταδίων (CRS) και το ψυγείο Stirling (ελεύθερο έμβολο-free piston engine) (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021). Το CRS είναι μια αποτελεσματική λύση που χρησιμοποιεί δύο κύκλους συμπίεσης για την επίτευξη των επιθυμητών θερμοκρασιών, συνδυάζοντας διαφορετικά ψυκτικά μέσα για να πετύχει άριστη θερμοδυναμική απόδοση (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021). Από την άλλη, το ψυγείο Stirling προσφέρει εξειδικευμένα πλεονεκτήματα όπως η σχετικά ήσυχη λειτουργία και η δυνατότητα επίτευξης εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών με υψηλή απόδοση και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που το καθιστά ελκυστική επιλογή σε εφαρμογές όπου η ενεργειακή αποδοτικότητα και η αξιοπιστία είναι κρίσιμες (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021).

Και τα δύο συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να επιτυγχάνουν χαμηλές θερμοκρασίες αλλά μέσω διαφορετικών μηχανισμών και εφαρμογών (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021). Το σύστημα Cascade δύο σταδίων είναι συχνά πιο κατάλληλο για βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν μεγάλες δυνατότητες ψύξης (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021). Αντίθετα, το ψυγείο Stirling προτιμάται για εφαρμογές όπου ο θόρυβος και οι κραδασμοί προκαλούν ανησυχία ή όπου απαιτείται εξαιρετική απόδοση σε περιβάλλοντα χαμηλής θερμοκρασίας (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021). Αυτές οι καινοτομίες στην τεχνολογία ψύξης όχι μόνο υποστηρίζουν την παγκόσμια προσπάθεια για αποτελεσματική διαχείριση της εμβολιαστικής αλυσίδας, αλλά και καθορίζουν νέες προδιαγραφές για το μέλλον της ψυκτικής τεχνολογίας σε διάφορους τομείς βιομηχανίας και επιστημονικής έρευνας (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021).

Συνολικά, η επιστημονική κοινότητα έχει αναγνωρίσει τη σημασία των καταψυκτών εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας, όχι μόνο ως μηχανισμός αποθήκευσης, αλλά και ως εργαλείο που ενισχύει την έρευνα και την καινοτομία (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023; Xu et al., 2023; Getie et al., 2020). Με τις σωστές στρατηγικές, τεχνολογίες και διαδικασίες, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα βιώσιμο μέλλον για την αποθήκευση των ευαίσθητων δειγμάτων που υποστηρίζουν την πρόοδό μας στο πεδίο της υγειονομικής περίθαλψης και της επιστήμης (Berchowitz & Kwon, 2012; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023; Getie et al., 2020). Στο σύνολό τους, οι καταψύκτες ULT συνδυάζουν την επιστήμη με την υγειονομική και κοινωνική ευθύνη, ανοίγοντας τον δρόμο για μια καλύτερη και υγιέστερη κοινωνία (Berchowitz & Kwon, 2012; Getie et al., 2020). Η δέσμευση στην καινοτομία και η διαρκής απόδοση στην υγειονομική περίθαλψη καθιστούν απαραίτητη τη συνεχιζόμενη επένδυση στην τεχνολογία αποθήκευσης (Hajagos, 2021; Saeed et al., 2023; Xu et al., 2023; Getie et al., 2020). Η συνεργασία, η κανονιστική συμμόρφωση και η υπεύθυνη διαχείριση θα υποστηρίξουν την πρόοδο προς μια υγιέστερη ανθρωπότητα και μια πιο βιώσιμη επιστημονική έρευνα (Berchowitz & Kwon, 2012; Hajagos, 2021; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023; Xu et al., 2023; Getie et al., 2020).

1.2. Σκοπός και Συνεισφορά της Εργασίας

Η ομοιομορφία της θερμοκρασίας και η απόδοση στα συστήματα ψύξης αποτελούν σημαντικές παραμέτρους για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών σε διάφορους τομείς (Xu et al., 2023; Getie et al., 2020). Η παρούσα πτυχιακή διατριβή στοχεύει να διερευνήσει αυτές τις παραμέτρους σε τρία διαφορετικά μοντέλα κινητήρων ψύξης χαμηλών θερμοκρασιών: τον Ερμητικό Συμπιεστή, τη Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και το Σύστημα Πολυσυμπιεστών. Κάθε μοντέλο προσφέρει μοναδικά χαρακτηριστικά, ωστόσο ο βαθμός στον οποίο επιτυγχάνουν ομοιομορφία θερμοκρασίας και αποτελεσματική απόδοση δεν έχει εξεταστεί πλήρως σε συγκριτικό πλαίσιο έως σήμερα. Κάθε ένα από αυτά τα συστήματα προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα και προκλήσεις για την επίτευξη και τη διατήρηση εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών. Οι ερμητικοί συμπιεστές είναι γνωστοί για τον συμπαγή σχεδιασμό και την αξιοπιστία τους, ενώ οι κινητήρες με ελεύθερο έμβολο προσφέρουν υψηλή απόδοση και χαμηλούς κραδασμούς. Τα συστήματα πολλαπλών συμπιεστών, από την άλλη πλευρά, παρέχουν ευελιξία και πλεονασμό, που μπορεί να είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση σταθερών θερμοκρασιών σε κρίσιμες εφαρμογές.

Η κύρια μέριμνα της μελέτης αφορά την κατανόηση και διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να διατηρήσουν σταθερές θερμικές συνθήκες σε περιβάλλοντα που απαιτούν ακριβή θερμική διαχείριση. Η αύξηση της ανάγκης για εξοικονόμηση ενέργειας και η ανάπτυξη τεχνολογιών αιχμής κάνει απαραίτητη τη μελέτη του πώς διάφορες διαμορφώσεις μηχανών ψύξης μπορούν να επιτύχουν τη βέλτιστη απόδοση και ομοιομορφία θερμοκρασίας (Hajagos, 2021; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023; Getie et al., 2020). Η επικέντρωση σε μοντέλα ψύξης που προσφέρουν διαφορετικά επίπεδα ελέγχου και σταθερότητας αποτελεί μέρος της ευρύτερης προσπάθειας για μείωση

της κατανάλωσης ενέργειας και βελτίωση της βιωσιμότητας σε εφαρμογές που βασίζονται στη ψύξη (Evans, 2022; Dhiman & Kumar, 2023). Με τη βελτίωση της τεχνικής κατανόησης των συστημάτων αυτών, μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων και να ελαχιστοποιηθεί η περιβαλλοντική επίπτωση (Evans, 2022; Dhiman & Kumar, 2023; Liu et al., 2023; Getie et al., 2020).

Αυτή η πτυχιακή εργασία παρέχει μια οργανωμένη και δομημένη προσέγγιση, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα των τεχνολογιών και των μεθόδων που εμπλέκονται στις εφαρμογές συστημάτων ψύξης. Κάθε ενότητα αυτής λειτουργεί ως ένα κρίσιμο στοιχείο για την επίτευξη μιας βαθύτερης κατανόησης των διαφορετικών τύπων καταψυκτών και των τεχνολογικών τους πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων. Ειδικότερα, η προσέγγιση που υιοθετείτε είναι σημαντική διότι συνδυάζει τη θεωρητική γνώση με την πρακτική/πειραματική αξιολόγηση. Αυτή η συστηματική διαδικασία επιτρέπει την εξαγωγή παρατηρήσεων που είναι άμεσα εφαρμόσιμες στις τρέχουσες επιστημονικές και βιομηχανικές ανάγκες.

Η μελέτη των συστημάτων ψύξης στο πλαίσιο της αποτελεσματικότητας και της απόδοσης προωθεί επίσης τη βιωσιμότητα και την περιβαλλοντική συνείδηση, θέματα που κερδίζουν συνεχώς έδαφος στις σημερινές συζητήσεις. Επιπλέον, η σύγκριση των διαφορετικών τεχνολογιών - ερμητικός συμπιεστής, μηχανή ελεύθερου εμβόλου και πολυσυμπιεστών - προσφέρει κρίσιμες γνώσεις που μπορούν να καθοδηγήσουν μελλοντικές επιλογές εξοπλισμού και αναβαθμίσεις σε εργαστήρια και βιομηχανίες παγκοσμίως.

Η λεπτομερής ανάλυση των μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης επιτρέπει την ανάδειξη κατευθυντήριων γραμμών βέλτιστης πρακτικής που είναι εξαιρετικά αναγκαίες για τη διατήρηση της ακεραιότητας των συστημάτων ψύξης στο πλαίσιο της διαχείρισης και διατήρησης δειγμάτων. Αυτή η εργασία, επομένως, όχι μόνο παρέχει δεδομένα που μπορεί να συνδράμουν ενεργά στις λύσεις των τρεχουσών προκλήσεων αλλά θέτει και τη βάση για μακροπρόθεσμες στρατηγικές βελτίωσης στον τομέα.

Καθώς οι τεχνολογίες συνεχίζουν να εξελίσσονται και οι απαιτήσεις για ασφαλή και αποτελεσματική αποθήκευση αυξάνονται, τέτοιες λεπτομερείς και συστηματικές μελέτες γίνονται όλο και πιο σημαντικές. Η πτυχιακή αυτή εργασία είναι ένα εργαλείο για ερευνητές και βιομηχανικούς επαγγελματίες που επιδιώκουν να κατανοήσουν καλύτερα τους μηχανισμούς λειτουργίας και τις αναδυόμενες τεχνολογίες, υποστηρίζοντας έτσι την προσπάθεια για καινοτομία και βελτίωση σε επιστημονικούς και ιατρικούς τομείς. Η εκτενής ανάλυση παραμέτρων όπως η απόδοση, η ομοιομορφία και η σταθερότητα των συστημάτων ψύξης συμβάλλει στον καθορισμό νέων προτύπων για τον έλεγχο της ποιότητας και την απόδοση αυτών των κρίσιμων συσκευών (Liu et al., 2023; Getie et al., 2020). Ως εκ τούτου, η πτυχιακή διατριβή καθίσταται ένα αναπόσπαστο εργαλείο που προωθεί την κατανόηση και την αριστεία στον τομέα των συστημάτων ψύξης, με απώτερο σκοπό τη βελτίωση των διαδικασιών και των αποτελεσμάτων στην επιστήμη και την τεχνολογία.

Συνολικά, αυτή η ανάλυση αναμένεται να προσφέρει βασικές ενδείξεις για τη κατανόηση της τεχνολογίας ψύξης, παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες για τη βιομηχανική και επιστημονική κοινότητα σχετικά με τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις των διαφορετικών συστημάτων ψύξης. Μέσω της συνδυασμένης μελέτης της τεχνολογικής απόδοσης και της πρακτικής εφαρμογής, στόχος είναι να αναδειχθεί η αποτελεσματικότητα και η βιωσιμότητα αυτών των συστημάτων στο σύγχρονο περιβάλλον. Επομένως, η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει να παρέχει μια συγκριτική ανάλυση αυτών των ψυκτικών συστημάτων, εστιάζοντας στην ομοιομορφία θερμοκρασίας και τη συνολική τους απόδοση.

1.3. Δομή της εργασίας

Η πτυχιακή εργασία αποτελεί μια σημαντική μελέτη στον τομέα της διαχείρισης και τεχνολογίας ποιότητας. Μέσω αυτής της εργασίας, η μελέτη στοχεύει στην εμβάθυνση της κατανόησης σχετικά με την απόδοση διαφόρων συστημάτων ψύξης που χρησιμοποιούνται σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, όπως οι ερμητικοί συμπιεστές, η μηχανή ελεύθερου εμβόλου και συστήματα Πολυσυμπιεστών. Η δομή της μελέτης στοχεύει σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση του θέματος. Η ανάλυση της δομής αυτής της πτυχιακής εργασίας περιλαμβάνει τα εξής τμήματα: Εισαγωγή, Βιβλιογραφική Ανασκόπηση, Εμπειρική Στρατηγική, Εμπειρική Ανάλυση, Συζήτηση και Συμπεράσματα, και Παραρτήματα.

Η εισαγωγή της πτυχιακής εργασίας θέτει το γενικό πλαίσιο της μελέτης και εξηγεί τη σημασία των συστημάτων ψύξης σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτά τα συστήματα είναι καίρια για πολλούς τομείς, όπως η βιοϊατρική, τα φαρμακευτικά προϊόντα και η έρευνα, καθώς προσφέρουν την ικανότητα διατήρησης ευαίσθητων δειγμάτων υπό ιδανικές συνθήκες. Τονίζετε η ανάγκη για ομοιομορφία στη θερμοκρασία και την απόδοση αυτών των συστημάτων, καθώς αυτά τα χαρακτηριστικά επηρεάζουν τη χρηστικότητα και την αξιοπιστία των συστημάτων ψύξης. Επιπλέον, τίθενται οι στόχοι της εργασίας, ενώ δίνεται μια γενική περιγραφή της προσέγγισης που ακολουθείται για την επίτευξη αυτών των στόχων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, η βιβλιογραφική ανασκόπηση προσφέρει μια εμπεριστατωμένη ανάλυση των υφιστάμενων γνώσεων και της έρευνας που έχει γίνει στον τομέα των συστημάτων ψύξης. Εξετάζεται η ιστορία και η εξέλιξη των καταψυκτών, με έμφαση στη χρήση τους σε βιοϊατρικές και φαρμακευτικές εφαρμογές. Επιπλέον, αναλύονται τα διάφορα είδη ψυκτικών μέσων και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα συστήματα ψύξης, καθώς και οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι κατασκευαστές και οι χρήστες τους. Ένα σημαντικό μέρος αυτού του κεφαλαίου είναι η τεκμηρίωση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των διαφορετικών τύπων καταψυκτών και η αξιολόγηση της σημασίας τους για τη σύγχρονη επιστήμη και ιατρική έρευνα.

Η εμπειρική στρατηγική είναι ένα ουσιαστικό στοιχείο της πτυχιακής εργασίας, καθώς περιγράφει τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων. Παρουσιάζονται τα πειραματικά σχέδια και τις τεχνικές που θα εφαρμοστούν για να αξιολογηθεί η απόδοση των συστημάτων ψύξης. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση αισθητήρων θερμοκρασίας και συστημάτων παρακολούθησης για τη

συλλογή ακριβών μετρήσεων θερμοκρασίας από διάφορες μονάδες. Επιπλέον, περιγράφονται οι δοκιμές που θα διεξαχθούν για να ελεγχθεί η ομοιομορφία και η σταθερότητα της θερμοκρασίας και ο τρόπος με τον οποίο αυτά τα δεδομένα πρόκειται να αναλυθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Η εμπειρική ανάλυση αποτελεί το σημείο στο οποίο συγκεντρώνονται και αξιολογούνται τα συλλεχθέντα δεδομένα. Παρουσιάζεται μια λεπτομερή ανάλυση των αποτελεσμάτων που αποκτήθηκαν από τις πειραματικές μετρήσεις των συστημάτων ψύξης, συνεκτιμώντας παραμέτρους όπως η απόδοση, η ομοιομορφία της θερμοκρασίας και η αξιοπιστία της απόδοσης. Συγκρίνονται τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες κάθε συστήματος ψύξης με στόχο να διαπιστωθεί ποιο σύστημα προσφέρει την καλύτερη συνολική απόδοση. Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει συγκρίσεις μεταξύ των ερμητικών συμπιεστών, της μηχανής ελεύθερου εμβόλου και των πολυσυμπιεστών, με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Στο τμήμα της συζήτησης και των συμπερασμάτων, τα ευρήματα της εμπειρικής ανάλυσης συζητούνται και ερμηνεύονται στο πλαίσιο των στόχων της μελέτης. Πραγματοποιείτε μια εξέταση της σημασίας των αποτελεσμάτων, αναλύει τις πιθανές εφαρμογές αυτών των πορισμάτων και προτείνονται προσαρμογές ή μελλοντικές έρευνες για την περαιτέρω βελτιστοποίηση των συστημάτων ψύξης. Συμπεραίνεται ότι η επιλογή του κατάλληλου συστήματος ψύξης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης δειγμάτων, τονίζοντας τη σημασία της προσεκτικής εξέτασης κατά τη διαδικασία επιλογής εξοπλισμού.

Συνοψίζοντας, η πτυχιακή εργασία που αναλύεται εδώ διαθέτει μια δομημένη προσέγγιση που υποστηρίζει την εις βάθος ανάλυση των συστημάτων ψύξης εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών. Με αρθρωτή προσέγγιση που περιλαμβάνει τα βασικά επιστημονικά στοιχεία - από τη θεωρητική κατανόηση μέχρι την πρακτική εφαρμογή και ανάλυση - παρέχει πολύτιμη κατανόηση όσον αφορά την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα των διαφορετικών δομών ψύξης. Μελέτες αυτού του είδους συμβάλλουν σημαντικά στην επιστημονική γνώση, ενισχύοντας τη δυνατότητα για την καλύτερη διατήρηση βιολογικών δειγμάτων που είναι κρίσιμα για την έρευνα και την ιατρική. Επομένως, η δομή της πτυχιακής εργασίας στοχεύει στην παροχή βαθιάς κατανόησης του αναγνώστη σχετικά με τις πρακτικές και τις θεωρητικές όψεις που περιλαμβάνονται στην αξιολόγηση συστημάτων ψύξης. Μέσω της εστίασης στη συνολική απόδοση, την ενεργειακή απόδοση, την ασφάλεια και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η εργασία παρέχει πολύτιμες γνώσεις που είναι κρίσιμες για την πρόοδο της έρευνας και της τεχνολογίας στον τομέα των συστημάτων ψύξης.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1. Ιστορία

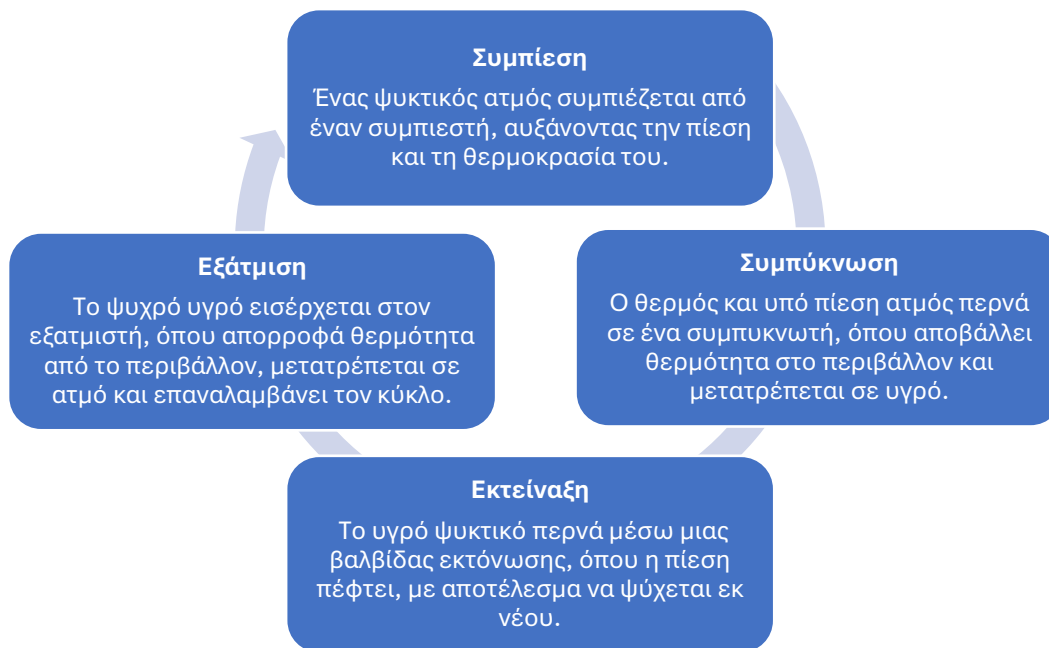
Οι εργαστηριακοί καταψύκτες είναι εξειδικευμένες μονάδες που έχουν σχεδιαστεί για να ανταποκρίνονται στις αυστηρές απαιτήσεις των επιστημονικών και ιατρικών εφαρμογών (Sun et al., 2022; Authelin et al., 2020). Ενώ μοιράζονται τις βασικές αρχές λειτουργίας με τους οικιακούς καταψύκτες, χρησιμοποιώντας ατμοποιημένα ψυκτικά, είναι προσαρμοσμένα για να επιτυγχάνουν πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες και προσφέρουν προηγμένες λειτουργίες για ακριβή έλεγχο θερμοκρασίας (Owusu-Aparenten & Vieira, 2023).

Καθώς η ανάγκη για διατήρηση σε χαμηλή θερμοκρασία στις βιολογικές επιστήμες αυξανόταν, ιδιαίτερα με την εμφάνιση της κρυοβιολογίας στις δεκαετίες του 1940 και του 1950, οι ερευνητές αναζήτησαν τρόπους για να παγώσουν και να αποθηκεύσουν βιολογικά δείγματα χωρίς να διακυβεύεται η ακεραιότητά τους (Owusu-Aparenten & Vieira, 2023; Rees, 2013). Το βιολογικό πεδίο απαιτούσε όχι μόνο κατάψυξη, αλλά διατήρηση σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες για τη διατήρηση της βιωσιμότητας και της δομής των κυττάρων (Gavroglu, 2014; Owusu-Aparenten & Vieira, 2023). Στα μέσα του 20ου αιώνα, εμφανίστηκε η εισαγωγή των πρώτων καταψυκτών εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας (Robinson, 1997; Owusu-Aparenten & Vieira, 2023). Αυτές οι παραλλαγές των τυπικών καταψυκτών χρησιμοποίησαν πιο προηγμένα μονωτικά υλικά και ισχυρά συστήματα ψύξης (Owusu-Aparenten & Vieira, 2023). Οι πρώτοι εμπορικά διαθέσιμοι καταψύκτες -86°C παρουσιάστηκαν τη δεκαετία του 1960, κυρίως από εταιρείες όπως η Thermo Fisher Scientific και η Revco (Gavroglu, 2014; Owusu-Aparenten & Vieira, 2023).

Πιο συγκεκριμένα, οι ρίζες της ψύξης χρονολογούνται από τον 18ο αιώνα, όταν ο William Cullen, ένας Σκωτσέζος γιατρός, έδειξε την ικανότητα να δημιουργεί κενό σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Gavroglu, 2014; Owusu-Aparenten & Vieira, 2023). Το κενό σχετίζεται με την πίεση των αερίων όπου υποδηλώνει την ύπαρξη χώρου όπου η ατμοσφαιρική πίεση είναι μειωμένη ή σχεδόν ανύπαρκτη (Mallett, 1993). Όταν δημιουργείται κενό, οι θερμοκρασίες μπορούν να μειωθούν, καθώς τα αέρια επεκτείνονται και απορροφούν θερμότητα από τον περιβάλλοντα χώρο (Mallett, 1993). Αυτή η αρχή είναι θεμελιώδης για την κατανόηση της ψύξης και των ψυκτικών διαδικασιών (Mallett, 1993).

Ωστόσο, η πρακτική χρήση της ψύξης ξεκίνησε τον 19ο αιώνα με προόδους όπως ο κύκλος ψύξης συμπίεσης ατμών, που αναπτύχθηκε από τον Jacob Perkins το 1834, ο οποίος έθεσε τις βάσεις για τα σύγχρονα ψυγεία και καταψύκτες (Gavroglu, 2014; Owusu-Aparenten & Vieira, 2023). Ο Jacob Perkins, το 1834, ανέπτυξε τον κύκλο ψύξης συμπίεσης ατμών, μια τεχνολογία που επιτρέπει την απομάκρυνση θερμότητας από έναν χώρο ή μια ουσία, χρησιμοποιώντας ατμούς (Gavroglu, 2014; Owusu-Aparenten & Vieira, 2023). Ο κύκλος ψύξης παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2. Αυτή η διαδικασία δημιούργησε τις βάσεις για τα σύγχρονα ψυγεία και καταψύκτες, επιτρέποντας τη συντήρηση τροφίμων και άλλων προϊόντων σε χαμηλές θερμοκρασίες (Lim et al., 2016; Cerci, 2003). Η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας είχε σημαντικό

αντίκτυπο στη βιομηχανία τροφίμων, τη μεταφορά και την αποθήκευση προϊόντων (Lim et al., 2016; Cerci, 2003). Τέλος, στις αρχές του 20ου αιώνα, οι εξελίξεις στην τεχνολογία ψύξης συνεχίστηκαν, οδηγώντας στη δημιουργία μηχανικών συστημάτων ψύξης ικανών να φτάσουν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Lim et al., 2016; Cerci, 2003). Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε εμπορικά περιβάλλοντα, όπως ζυθοποιεία και εγκαταστάσεις συσκευασίας κρέατος (Lim et al., 2016; Cerci, 2003).



Διάγραμμα 2 Κύκλος Ψύξης

Πηγή: Gavroglu, 2014; Owusu-Apenten & Vieira, 2023

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες του 20ού και τις αρχές του 21ου αιώνα, παρατηρήθηκαν σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις που βελτίωσαν την απόδοση, την αξιοπιστία και τη χρηστικότητα των καταψυκτών εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας (Sun et al., 2022; Owusu-Apenten & Vieira, 2023; Graham et al., 2024). Αυτές οι καινοτομίες συνέβαλαν στην αποτελεσματική και ασφαλή αποθήκευση πολύτιμων υλικών και βιολογικών δειγμάτων (Sun et al., 2022; Graham et al., 2024). Μία από τις σημαντικές βελτιώσεις ήταν αυτή της μόνωσης (James et al., 2015; Evans 2008). Με την πάροδο των χρόνων, τα υλικά μόνωσης όπως η πολυουρεθάνη υιοθετήθηκαν ως το νέο πρότυπο, ενισχύοντας την ενεργειακή απόδοση και τη σταθερότητα της θερμοκρασίας (James et al., 2015; Evans 2008). Η έλλειψη συσσώρευσης παγετού αποτέλεσε επίσης ένα υπολογίσιμο πλεονέκτημα αυτών των κατασκευών, μειώνοντας την ανάγκη για συχνή συντήρηση (James et al., 2015; Evans 2008).

Επιπλέον, η ενσωμάτωση των μικροεπεξεργαστών στα συστήματα των καταψυκτών κατά τη δεκαετία του 1980 έφερε μια νέα εποχή στον έλεγχο και την παρακολούθηση της θερμοκρασίας (Rees, 2013; Zheng & Sun, 2006; Owusu-Apenten & Vieira, 2023). Αυτά τα εξελιγμένα συστήματα διασφάλισαν ότι τα δείγματα παρέμεναν εντός των προβλεπόμενων θερμοκρασιακών ορίων, ενσωματώνοντας επίσης συναγερμούς για αποκλίσεις, προσφέροντας ζωτικής σημασίας προστασία για ανεκτίμητα υλικά (Rees,

2013; Zheng & Sun, 2006; Owusu-Aparenten & Vieira, 2023). Στον τομέα της ενεργειακής απόδοσης, η επιτακτική ανάγκη για πιο οικολογικές τεχνολογίες οδήγησε στην ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών καταψυκτών ULT (Rees, 2013; Zheng & Sun, 2006; Owusu-Aparenten & Vieira, 2023). Έρευνες πάνω σε εναλλακτικά ψυκτικά μέσα και βελτιωμένες τεχνολογίες συμπιεστών συνέβαλαν σημαντικά στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτών των απαραίτητων συσκευών (Rees, 2013; Zheng & Sun, 2006; Owusu-Aparenten & Vieira, 2023). Επιπλέον, οι σύγχρονοι καταψύκτες ULT είναι εξοπλισμένοι με ψηφιακά συστήματα παρακολούθησης που επιτρέπουν την παρακολούθηση της θερμοκρασίας σε πραγματικό χρόνο, καθώς και την απομακρυσμένη πρόσβαση μέσω διαδικτύου (Zheng & Sun, 2006; Robertson et al., 2017). Αυτή η τεχνολογική πρόοδος διασφαλίζει μέγιστη ασφάλεια για τα αναντικατάστατα βιολογικά δείγματα, επιτρέποντας άμεση ανταπόκριση σε τυχόν προβλήματα (Zheng & Sun, 2006; Robertson et al., 2017). Οι κατασκευαστές έχουν επικεντρωθεί στην προσβασιμότητα και την εργονομία, καθιστώντας τους καταψύκτες ευκολότερους στη χρήση, τον καθαρισμό και τη συντήρηση (Zheng & Sun, 2006; Robertson et al., 2017; Legett, 2014). Χαρακτηριστικά όπως τα ρυθμιζόμενα ράφια και οι ευανάγνωστες οθόνες προσδίδουν απόλυτη ευχρηστία στους χρήστες, ενισχύοντας την καθημερινή πρακτικότητα και αποτελεσματικότητα αυτών των συσκευών (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016).

Οι εργαστηριακοί καταψύκτες διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στην επιστημονική έρευνα και την ιατρική αποθήκευση, διατηρώντας κρίσιμα βιολογικά δείγματα, αντιδραστήρια και άλλα ευαίσθητα στη θερμοκρασία υλικά (Powell, 2002; Keri, 2019; Tica & Grubic, 2019; Robertson et al., 2017; Legett, 2014). Με τα χρόνια, τα ψυκτικά που χρησιμοποιούνται σε αυτούς τους καταψύκτες έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές λόγω περιβαλλοντικών ανησυχιών και ρυθμιστικών μέτρων (Robertson et al., 2017; Legett, 2014). Μεταξύ των πιο σημαντικών μεταβάσεων είναι η μετατόπιση από τους χλωροφθοράνθρακες (CFC) στους υδροφθοράνθρακες (HFCs) ως τα κύρια ψυκτικά μέσα (Powell, 2002; Keri, 2019; Tica & Grubic, 2019). Αυτή η αλλαγή αντανάκλασε ευρύτερες τάσεις στην περιβαλλοντική πολιτική και την τεχνολογική προσαρμογή με στόχο τη μείωση της βλάβης στον πλανήτη (Powell, 2002; Keri, 2019; Tica & Grubic, 2019).

Οι χλωροφθοράνθρακες (CFC) αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά στις αρχές του 20ου αιώνα και γρήγορα κέρδισαν δημοτικότητα ως ψυκτικά μέσα λόγω της σταθερότητας, της μη αναφλεξιμότητας και της αποτελεσματικότητάς τους (Muir, 1990; Benhadid-Dib & Benzaoui, 2012). Τα εργαστήρια, μαζί με ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, υιοθέτησαν CFC για ψύξη και κλιματισμό (Muir, 1990; Benhadid-Dib & Benzaoui, 2012). Ωστόσο, στα μέσα του 20ου αιώνα, η επιστημονική έρευνα εντόπισε ένα σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα, οι CFC ήταν εξαιρετικά καταστροφικοί για το στρώμα του όζοντος της στρατόσφαιρας (Powell, 2002). Το στρώμα του όζοντος διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην προστασία της ζωής στη Γη απορροφώντας το μεγαλύτερο μέρος της επιβλαβούς υπεριώδους ακτινοβολίας του ήλιου (Muir, 1990; Benhadid-Dib & Benzaoui, 2012). Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και του 1980, η έρευνα έδειξε ότι οι CFC, όταν απελευθερώνονταν στην ατμόσφαιρα, θα διασπώνταν και θα απελευθέρωναν

άτομα χλωρίου (Powell, 2002; Keri, 2019; Tica & Grubic, 2019). Αυτά τα άτομα χλωρίου στη συνέχεια συνέβαλαν στην εξάντληση της στιβάδας του όζοντος, με αποτέλεσμα κυρίως την ετήσια τρύπα του όζοντος της Ανταρκτικής (Powell, 2002; Keri, 2019; Tica & Grubic, 2019).

Ως απάντηση στην αυξανόμενη περιβαλλοντική απειλή που δημιουργούν οι CFC, η διεθνής κοινότητα συνήλθε για να θεσπίσει το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ το 1987 (Muir, 1990). Αυτή η ορόσημο περιβαλλοντική συμφωνία είχε στόχο να καταργήσει σταδιακά την παραγωγή και τη χρήση ουσιών που καταστρέφουν το όζον, συμπεριλαμβανομένων των CFC (Muir, 1990; Powell, 2002; Keri, 2019). Το πρωτόκολλο έθεσε δεσμευτικούς στόχους για τη μείωση της κατανάλωσης και παραγωγής CFC, ενθαρρύνοντας τη βιομηχανία και τους ερευνητές να βρουν ασφαλέστερες εναλλακτικές λύσεις (Muir, 1990; Powell, 2002; Keri, 2019).

Με τη σταδιακή κατάργηση των CFC, οι υδροφθοράνθρακες εμφανίστηκαν ως η κύρια εναλλακτική λύση (Muir, 1990; Powell, 2002; Keri, 2019). Οι HFC δεν περιέχουν χλώριο και επομένως δεν συμβάλλουν στην καταστροφή του όζοντος, καθιστώντας τους ένα ελκυστικό υποκατάστατο (Muir, 1990; Powell, 2002; Keri, 2019). Οι χημικές τους ιδιότητες επέτρεψαν την αποτελεσματική θερμική διαχείριση, καθιστώντας τα κατάλληλα για εργαστηριακούς καταψύκτες που απαιτούν ακριβείς ελέγχους θερμοκρασίας για τη διατήρηση ευαίσθητων δειγμάτων (Muir, 1990; Powell, 2002; Keri, 2019).

Ενώ οι HFC εξαλείφουν το πρόβλημα της καταστροφής του όζοντος, εισήγαγαν νέες περιβαλλοντικές προκλήσεις (Powell, 2002; Keri, 2019). Οι HFC είναι ισχυρά αέρια θερμοκηπίου με υψηλό δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global warming potential - GWP) (Powell, 2002; Keri, 2019). Καθώς οι ανησυχίες για την κλιματική αλλαγή έχουν ενταθεί, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των HFC έχουν τεθεί υπό έλεγχο (Powell, 2002; Keri, 2019). Σε απάντηση, οι βιομηχανίες και οι κυβερνήσεις εργάζονται για την ανάπτυξη και εφαρμογή περισσότερων βιώσιμων ψυκτικών με χαμηλότερο GWP, διατηρώντας παράλληλα τη λειτουργικότητα που απαιτείται για βασικές εργαστηριακές και βιομηχανικές εφαρμογές (Muir, 1990; Keri, 2019; Tica & Grubic, 2019).

Η μετάβαση από τους CFC προς τους HFC αντιπροσωπεύει ένα κρίσιμο βήμα για την προσαρμογή της τεχνολογίας ψύξης ώστε να πληροί τα περιβαλλοντικά πρότυπα (Keri, 2019; Tica & Grubic, 2019). Προσβλέποντας στο μέλλον, η συνεχιζόμενη έρευνα στοχεύει στην ανάπτυξη ψυκτικών που είναι φιλικά προς το περιβάλλον και αποτελεσματικά (Tica & Grubic, 2019). Εναλλακτικές λύσεις όπως οι υδροφθορολεφίνες (HFOs), τα φυσικά ψυκτικά όπως η αμμωνία ή το CO₂ και οι προηγμένες τεχνολογίες συνεχίζουν να διερευνώνται ως βιώσιμα, βιώσιμα υποκατάστατα των HFC (Keri, 2019; Tica & Grubic, 2019).

Η ιστορία των καταψυκτών εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών είναι απόδειξη για τις προόδους στην επιστήμη και τη μηχανική (Tica & Grubic, 2019; Gavroglu, 2014; Owusu-Apenten & Vieira, 2023). Από τις πρώιμες μεθόδους ψύξης έως τις σύγχρονες καινοτομίες στην τεχνολογία ULT, αυτοί οι καταψύκτες έχουν

γίνει απαραίτητα εργαλεία για τη διατήρηση της βιολογικής ακεραιότητας και τη διασφάλιση της επιτυχίας της επιστημονικής έρευνας (Gavroglu, 2014; Owusu-Aparenten & Vieira, 2023). Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, το μέλλον της κατάψυξης ULT υπόσχεται ακόμη πιο αποτελεσματικά, βιώσιμα και προσβάσιμα συστήματα, ενισχύοντας τον ρόλο τους τόσο στην έρευνα όσο και στη βιομηχανία (Owusu-Aparenten & Vieira, 2023). Συμπερασματικά, η εξέλιξη των ψυκτικών που χρησιμοποιούνται σε εργαστηριακούς καταψύκτες αποτελεί παράδειγμα των ευρύτερων προκλήσεων και προόδου στην εξισορρόπηση των τεχνολογικών αναγκών με την περιβαλλοντική διαχείριση (Gavroglu, 2014;). Καθώς οι παγκόσμιες προτεραιότητες μετατοπίζονται προς τη βιωσιμότητα, η βιομηχανία ψύξης θα συνεχίσει να καινοτομεί, αναζητώντας ψυκτικά μέσα που ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενώ υποστηρίζουν το ζωτικό έργο της επιστημονικής έρευνας και της υγειονομικής περίθαλψης (Gavroglu, 2014; Owusu-Aparenten & Vieira, 2023).

2.2. Ψυκτικοί Παράγοντες

Οι εργαστηριακοί καταψύκτες είναι ικανοί να διατηρούν θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες από αυτές των οικιακών μονάδων. Ταξινομούνται με βάση τις θερμοκρασίες τους: μέτρια (-20°C), εξαιρετικά χαμηλή (-86°C) και κρυογενή (κάτω από -150°C) (Finberg & Shiflett, 2021; Chen et al., 2018). Πιο συγκεκριμένα, η αποθήκευση σε εύρος θερμοκρασιών μεταξύ -20°C και -150°C χρησιμοποιείται συνήθως για ειδικές εφαρμογές, κυρίως σε ερευνητικά εργαστήρια και βιομηχανικές χρήσεις (Calleja-Anta et al., 2024; Yang & Yeh, 2022). Παρακάτω ακολουθεί μια ανάλυση των καταψυκτών και εφαρμογών για αυτό το εύρος θερμοκρασίας:

- **Καταψύκτες Βαθιάς Κατάψυξης (-20°C έως -50°C):** Αυτοί οι καταψύκτες είναι χρήσιμοι για την αποθήκευση ευαίσθητων βιολογικών υλικών, όπως δείγματα αίματος και εμβόλια, τα οποία απαιτούν σταθερά χαμηλές θερμοκρασίες για να διατηρήσουν τη σταθερότητα και την αποτελεσματικότητά τους (Ha & Lee, 2024; Zhang et al., 2023; Lee et al., 2021).
- **Καταψύκτες Εξαιρετικών Χαμηλών Θερμοκρασιών (-50°C έως -86°C):** Χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση βιολογικών δειγμάτων, κυττάρων, πρωτεϊνών και άλλων υλικών που χρειάζονται πολύ χαμηλές θερμοκρασίες για να διατηρηθούν αναλλοίωτα για μεγάλα χρονικά διαστήματα (Cho et al., 2000; Llopis et al., 2019; Fabris et al., 2024). Συχνά χρησιμοποιούνται στην έρευνα στη βιοτεχνολογία και τη φαρμακευτική (Cho et al., 2000; Llopis et al., 2019; Fabris et al., 2024).
- **Καταψύκτες Κρυογονικής Κατάψυξης ($<-100^{\circ}\text{C}$):** Σε αυτό το εύρος θερμοκρασίας, η αποθήκευση περιλαμβάνει ειδικές κρυογονικές εφαρμογές. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη διατήρηση ανθρώπινων κυττάρων (όπως βλαστοκύτταρα), DNA, RNA, καθώς και άλλων σημαντικών δειγμάτων που απαιτούν εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες για να παραμείνουν βιώσιμα και ανέπαφα (Arshad et al., 2021; McLinden & Huber, 2020).

Αυτοί οι καταψύκτες παίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαχείριση υλικών που είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και απαιτούν αυστηρή σταθερότητα για ερευνητικούς και άλλους επιστημονικούς σκοπούς

(Arshad et al., 2021; Finberg & Shiflett, 2021; Chen et al., 2018). Η σωστή διαχείριση και χρησιμοποίηση τέτοιων καταψυκτών είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία πολλών βιολογικών και ιατρικών ερευνών (Arshad et al., 2021; McLinden & Huber, 2020; Chen et al., 2018). Επομένως, αυτό το ευρύ φάσμα επιτρέπει την αποθήκευση μιας ποικιλίας ευαίσθητων υλικών, συμπεριλαμβανομένων βιολογικών δειγμάτων, αντιδραστηρίων και φαρμακευτικών προϊόντων (McLinden & Huber, 2020; Finberg & Shiflett, 2021; Chen et al., 2018). Οι χρήστες μπορούν να ορίσουν συγκεκριμένες θερμοκρασίες, διασφαλίζοντας ότι αυτά τα κρίσιμα στοιχεία διατηρούνται εντός ακριβών παραμέτρων (Finberg & Shiflett, 2021; Chen et al., 2018).

Για προστασία από απροσδόκητες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που προκαλούνται από διακοπές ρεύματος ή δυσλειτουργίες εξοπλισμού, πολλοί εργαστηριακοί καταψύκτες περιλαμβάνουν ενσωματωμένα συστήματα συναγερμού και εφεδρικά συστήματα ψύξης που χρησιμοποιούν CO₂ ή N₂ (Calderazzi et al., 1997; Finberg & Shiflett, 2021; Zhang et al., 2023). Αυτά τα χαρακτηριστικά εξασφαλίζουν συνεχή παρακολούθηση και αυτόματη παρέμβαση για την προστασία του αποθηκευμένου περιεχομένου (Calderazzi et al., 1997; Finberg & Shiflett, 2021; Zhang et al., 2023). Οι μηχανισμοί κλειδώματος και τα αντιακρηκτικά σχέδια λόγω χρήσης εύφλεκτων υλικών μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω την ασφάλεια και την ασφάλεια (Calderazzi et al., 1997; Finberg & Shiflett, 2021; Zhang et al., 2023; Llopis et al., 2019; Zhang et al., 2023; Llopis et al., 2017). Συνοπτικά, οι εργαστηριακοί καταψύκτες είναι απαραίτητα εργαλεία στην επιστημονική κοινότητα, παρέχοντας κρίσιμη υποστήριξη στη διατήρηση ευαίσθητων υλικών (Llopis et al., 2019; Zhang et al., 2023; Llopis et al., 2017; Lemmon, 2003; Komarov & Stankus, 2011; Reddy et al., 2012). Τα προηγμένα τεχνολογικά τους χαρακτηριστικά, η ικανότητα διατήρησης ακραίων θερμοκρασιών και οι μηχανισμοί ασφαλείας τα καθιστούν πολύ ανώτερα και πιο εξειδικευμένα σε σύγκριση με τα οικιακά τους αντίστοιχα (Llopis et al., 2019; Zhang et al., 2023; Llopis et al., 2017). Η επιλογή του σωστού μοντέλου και χαρακτηριστικών εξαρτάται από τις συγκεκριμένες ανάγκες και περιορισμούς του εργαστηριακού περιβάλλοντος (Finberg & Shiflett, 2021; Chen et al., 2018).

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι βιομηχανίες ψύξης και κλιματισμού έχουν αντιμετωπίσει μια σημαντική πρόκληση η οποία είναι η ανάγκη εξισορρόπησης της απόδοσης και της απόδοσης με την περιβαλλοντική ευθύνη (Calderazzi et al., 1997; Finberg & Shiflett, 2021; Zhang et al., 2023). Αυτή η πρόκληση οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη ρύθμιση των ψυκτικών ουσιών που παρουσιάζουν υψηλό δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP), γεγονός που έχει προκαλέσει την αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων (Calderazzi et al., 1997; Finberg & Shiflett, 2021; Zhang et al., 2023). Με τις αυξανόμενες ανησυχίες για την κλιματική αλλαγή και την καταστροφή του στρώματος του όζοντος, υπάρχει επιτακτική ανάγκη να διερευνηθούν διάφορα ψυκτικά μέσα, τα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους (Llopis et al., 2019; Zhang et al., 2023; Llopis et al., 2017; Lemmon, 2003; Komarov & Stankus, 2011; Reddy et al., 2012). Αυτή ενότητα στοχεύει να παρέχει μια επισκόπηση των βασικών κατηγοριών ψυκτικών, συμπεριλαμβανομένων των υδροφθορανθράκων (HFCs), των υδρογονανθράκων, της

αμμωνίας, του διοξειδίου του άνθρακα, των υδροφθοριολεφινών (HFOs) και άλλων εξειδικευμένων ψυκτικών, ενώ παράλληλα εξετάζει τις επιπτώσεις τους στη βιωσιμότητα και την περιβαλλοντική ασφάλεια και μια περιληπτική παρουσίαση αυτών παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 (Calderazzi et al., 1997; Finberg & Shiflett, 2021; Zhang et al., 2023).

Όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας των ψυκτικών, επιγραμματικά το ψυκτικό εισέρχεται στον συμπιεστή ως ατμός, όπου συμπιέζεται σε ζεστό υγρό (Llopis et al., 2017; Lemmon, 2003; Komarov & Stankus, 2011). Αυτό το υγρό στη συνέχεια ταξιδεύει μέσω του συμπυκνωτή, χάνοντας κάποια θερμότητα ενώ παραμένει στην υγρή του κατάσταση. Στη συνέχεια, εισέρχεται στα πηνία του εξατμιστή, όπου μια μείωση της πίεσης το αναγκάζει να επανέλθει σε αέρια μορφή (Llopis et al., 2019; Llopis et al., 2017; Lemmon, 2003). Αυτή η αλλαγή απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον, δροσίζοντας αποτελεσματικά το εσωτερικό του καταψύκτη (Llopis et al., 2019; Zhang et al., 2023; Llopis et al., 2017; Lemmon, 2003; Komarov & Stankus, 2011; Reddy et al., 2012).

2.2.1. Υδροφθοράνθρακες (HFC)

Οι HFC χρησιμοποιούνται ευρέως από τα τέλη του 20ου αιώνα ως υποκατάστατο ουσιών που καταστρέφουν το όζον, όπως οι χλωροφθοράνθρακες (CFC) και οι υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs) (Calderazzi et al., 1997; Finberg & Shiflett, 2021; Zhang et al., 2023). Προσφέρουν εξαιρετικές θερμοδυναμικές ιδιότητες και είναι αποτελεσματικά σε διάφορες εφαρμογές που κυμαίνονται από την εμπορική ψύξη μέχρι τον κλιματισμό (Calderazzi et al., 1997; Finberg & Shiflett, 2021; Finberg & Shiflett, 2021; Zhang et al., 2023; Llopis et al., 2017). Το σημαντικό τους μειονέκτημα είναι το υψηλό GWP τους, το οποίο συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή (Zhang et al., 2023; Llopis et al., 2017). Η μετάβαση από τους HFC είναι αναπόσπαστο κομμάτι της προσπάθειας για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, οδηγώντας στην εξερεύνηση πιο φιλικών προς το περιβάλλον επιλογών ψυκτικού μέσου (Calderazzi et al., 1997; Finberg & Shiflett, 2021; Finberg & Shiflett, 2021; Zhang et al., 2023; Llopis et al., 2017).

Το R-134a (τετραφθοροαιθάνιο) είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους HFC που χρησιμοποιούνται στην ψύξη (Ong & Haider-E-Alahi, 2003; Choi et al., 2000; Akasaka et al., 2015; Calderazzi et al., 1997; Reddy et al., 2012). Γνωστό για την καλή ενεργειακή του απόδοση και διαθεσιμότητα, το R-134a είναι αποτελεσματικό τόσο σε εφαρμογές χαμηλής όσο και σε μεσαίες θερμοκρασίες (Choi et al., 2000; Akasaka et al., 2015; Reddy et al., 2012). Ωστόσο, το υψηλό GWP του το καθιστά μια μη βιώσιμη επιλογή για να προχωρήσουμε (Ong & Haider-E-Alahi, 2003; Choi et al., 2000; Akasaka et al., 2015; Calderazzi et al., 1997; Reddy et al., 2012). Παρομοίως, το R-404A είναι ένα μείγμα HFC-125, HFC-143a και HFC-134a. Αυτό το μείγμα θεωρείται καλό για την ψυκτική του ικανότητα και παρά το γεγονός ότι είναι αποτελεσματικό σε χαμηλές θερμοκρασίες, φέρει επίσης υψηλό GWP (Llopis et al., 2019; Finberg & Shiflett, 2021; Lee et al., 2021; Kim & Kim, 2021; Reddy et al., 2012). Ο κλάδος σταδιακά απομακρύνεται από το R-404A καθώς καταβάλλονται προσπάθειες για τη σταδιακή κατάργηση των ψυκτικών υγρών

υψηλής GWP (Llopis et al., 2019; Finberg & Shiflett, 2021; Lee et al., 2021; Kim & Kim, 2021; Reddy et al., 2012).

Επιπλέον, το R-407C, το οποίο περιλαμβάνει HFC-32, HFC-125 και HFC-134a, χρησιμεύει ως αντικατάσταση του R-22 (Finberg & Shiflett, 2021; Lee et al., 2002; Cho & Tae, 2000; Cho & Tae, 2001). Διαθέτει χαμηλότερο GWP από ορισμένους παραδοσιακούς HFC, αλλά εξακολουθεί να μην είναι η καλύτερη περιβαλλοντική επιλογή δεδομένου του υψηλότερου GWP του σε σύγκριση με τις αναδυόμενες εναλλακτικές λύσεις (Finberg & Shiflett, 2021; Lee et al., 2002; Cho & Tae, 2000; Cho & Tae, 2001). Δεύτερον, το R-410A είναι ένα άλλο μείγμα (HFC-32 και HFC-125), που ευνοείται για την υψηλή ψυκτική του ικανότητα και τη λειτουργία χαμηλού θορύβου (Finberg & Shiflett, 2021; Lee et al., 2002; Cho & Tae, 2000; Cho & Tae, 2001). Παρόμοια με άλλους HFC, αντιμετωπίζει έλεγχο βάσει περιβαλλοντικών κανονισμών λόγω του υψηλού GWP του (Finberg & Shiflett 2021; Guilherme et al., 2022; Ribeiro et al., 2023; Kim & Bullard, 2001; Lemmon, 2003; Komarov & Stankus, 2011). Τέλος, το R-507A, ένα μείγμα HFC-125 και HFC-143a, διατηρεί σταθερή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά μοιράζεται τις ίδιες περιβαλλοντικές ανησυχίες που σχετίζονται με το υψηλό GWP (Llopis et al., 2019; Zhang et al., 2023; Llopis et al., 2017; Lemmon, 2003; Komarov & Stankus, 2011; Reddy et al., 2012).

2.2.2.Υδρογονάνθρακες

Οι υδρογονάνθρακες, συμπεριλαμβανομένου του προπανίου (R-290), του ισοβουτανίου (R-600a) και του αιθανίου (R-170), έχουν κερδίσει την έλξη ως εναλλακτικές λύσεις για τους HFC λόγω του χαμηλού GWP και της υψηλής ενεργειακής τους απόδοσης (Calleja-Anta et al., 2024; Butt et al., 2024; Mota-Babiloni, et al., 2023). Ωστόσο, η ευφλεκτότητα των υδρογονανθράκων απαιτεί αυστηρές προφυλάξεις ασφαλείας κατά την αποθήκευση και τη χρήση (Calleja-Anta et al., 2024; Butt et al., 2024; Mota-Babiloni, et al., 2023). Ενώ οι υδρογονάνθρακες αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη οδό για βιώσιμη τεχνολογία ψύξης, οι εγγενείς κίνδυνοι υπογραμμίζουν την ανάγκη για ολοκληρωμένα μέτρα ασφαλείας (Wen & Ho, 2005; Calleja-Anta et al., 2024; Butt et al., 2024; Mota-Babiloni, et al., 2023; Udriou et al., 2022).

Το R-290 (προπάνιο) επαινείται για το σημαντικά χαμηλότερο GWP του από τα HFC, καθιστώντας το μια αποτελεσματική λύση για εφαρμογές ψύξης (Chen et al., 2018; Wen & Ho, 2005; Wen et al., 2006; Kim et al., 1994; Jones et al., 2022; Pilla et al., 2017). Η ενεργειακή του απόδοση είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα, αν και η ευφλεκτότά του θέτει προκλήσεις που απαιτούν προσεκτικό χειρισμό (Chen et al., 2018; Wen & Ho, 2005; Wen et al., 2006; Kim et al., 1994; Jones et al., 2022; Pilla et al., 2017). Από την άλλη, το R-600a (ισοβουτάνιο) είναι μια άλλη φιλική προς το περιβάλλον επιλογή με χαμηλό GWP. Επιδεικνύει καλή απόδοση και αποτελεσματικότητα, αλλά όπως το R-290, απαιτεί συγκεκριμένα μέτρα ασφαλείας λόγω της εύφλεκτης φύσης του (Wen et al., 2006; Calleja-Anta et al., 2023; Yang et al., 2024; Calleja-Anta et al., 2022; Jeon et al., 2025; Calleja-Anta et al., 2024). Επιπλέον, το R-170 (αιθάνιο) χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλό GWP και υψηλή απόδοση, αλλά το περιορισμένο εύρος εφαρμογών και

η ευφλεκτότητά του το καθιστούν λιγότερο κοινό στην πράξη (Butt et al., 2024; Mota-Babiloni, et al., 2023; Udriou et al., 2022; Wang et al., 2023)

2.2.3. Αμμωνία (R-717)

Η αμμωνία (R-717) είναι ένα υψηλής απόδοσης ψυκτικό με μακρά ιστορία χρήσης σε μεγάλα βιομηχανικά συστήματα ψύξης (Yang et al., 2022; Midzic Kurtagic et al., 2022). Ένα από τα πιο αξιοσημείωτα πλεονεκτήματά του είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αποτελεσματικότητά του (Yang et al., 2022; Midzic Kurtagic et al., 2022). Είναι ιδιαίτερα αποδοτική στη διαδικασία ψύξης και μπορεί να παρέχει πολύ μεγαλύτερη ικανότητα ψύξης από πολλές άλλες συναγωνίστριες επιλογές (Yang & Yeh, 2022; Mohapatra et al., 2021; Midzic Kurtagic, et al., 2022). Ωστόσο, η τοξικότητα της αμμωνίας απαιτεί αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας (Yang et al., 2022; Mohapatra et al., 2021; Midzic Kurtagic et al., 2022). Η αμμωνία έχει πολύ μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο από τους HFC, γεγονός που την καθιστά δημοφιλή επιλογή για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας όπως η ψύξη στην επεξεργασία τροφίμων και στις εγκαταστάσεις ψύξης (Yang et al., 2022; Mohapatra et al., 2021; Midzic Kurtagic et al., 2022). Ωστόσο, λόγω της τοξικής φύσης της, τα συστήματα αμμωνίας απαιτούν προσεκτική εξέταση στο σχεδιασμό και τη λειτουργία για την πρόληψη πιθανών κινδύνων για την υγεία (Yang et al., 2022; Mohapatra et al., 2021; Midzic Kurtagic et al., 2022). Η τοξικότητά της επιβάλλει αυστηρές προφυλάξεις ασφαλείας κατά τη χρήση, κάτι που σημαίνει ότι οι εργαζόμενοι πρέπει να είναι κατάλληλα εκπαιδευμένοι και ότι οι εγκαταστάσεις πρέπει να διαθέτουν συστήματα ανίχνευσης και κλειδώματα ασφάλειας για την πρόληψη ατυχημάτων (Yang & Yeh, 2022; Mohapatra et al., 2021; Midzic Kurtagic, et al., 2022).

2.2.4. Διοξείδιο του άνθρακα (R-744)

Το διοξείδιο του άνθρακα (R-744) αντιπροσωπεύει μια μοναδική επιλογή ψυκτικού μέσου, προσφέροντας χαμηλό GWP, μη τοξικές, και μη εύφλεκτες ιδιότητες και αποτελεί επίσης και ένα φυσικό ψυκτικό (Kanbur et al., 2025; Zhang et al., 2024; Macrì et al., 2024 Söylemez, 2024; Lee et al., 2024; Fabris et al., 2024). Τα φυσικά χαρακτηριστικά του, συμπεριλαμβανομένης της υψηλής πίεσης λειτουργίας, απαιτούν ειδικό εξοπλισμό για ασφαλή χειρισμό και αποτελεσματική απόδοση (Kanbur et al., 2025; Zhang et al., 2024; Macrì et al., 2024). Το CO₂ υιοθετείται όλο και περισσότερο σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ψύξης σούπερ μάρκετ, λόγω του ευνοϊκού περιβαλλοντικού του προφίλ (Kanbur et al., 2025; Zhang et al., 2024; Macrì et al., 2024). Ωστόσο, τα συστήματα CO₂ αντιμετωπίζουν επίσης προκλήσεις όπως η ανάγκη για προηγμένη τεχνολογία και υψηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης λόγω του εξειδικευμένου εξοπλισμού που απαιτείται για την αντιμετώπιση των υψηλών πιέσεων (Kanbur et al., 2025; Zhang et al., 2024; Macrì et al., 2024). Το διοξείδιο του άνθρακα είναι μια ελκυστική επιλογή καθώς η βιομηχανία κινείται προς πιο βιώσιμες πρακτικές (Kanbur et al., 2025; Zhang et al., 2024; Macrì et al., 2024; Tsimploukis et al., 2024).

2.2.5. Υδροφθοροολεφίνες (HFOs)

Οι Υδροφθοροολεφίνες (HFOs) που αναπτύχθηκαν ως απάντηση στις ρυθμιστικές πιέσεις σε ουσίες υψηλής GWP, αντιπροσωπεύουν μια νέα γενιά ψυκτικών που στοχεύουν να συνδυάσουν τις ευνοϊκές θερμοδυναμικές ιδιότητες των HFC με σημαντικά χαμηλότερες τιμές GWP (Miyawaki & Shikazono, 2024; Babushok & Linteris, 2024; Leehey et al., 2024). Τα HFO επιδεικνύουν μια πολλά υποσχόμενη εξέλιξη προς τα φιλικά προς το περιβάλλον ψυκτικά μέσα, ωστόσο η υιοθέτησή τους παρεμποδίζεται από την ετοιμότητα των υποδομών και την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σχετικά με τις μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους (Miyawaki & Shikazono, 2024; Babushok & Linteris, 2024; Leehey et al., 2024).

Το R-1234yf (2,3,3,3-τετραφθοροπροπένιο) είναι ένα από τα πιο ευρέως αναγνωρισμένα HFO, εγκεκριμένα για χρήση σε συστήματα κλιματισμού αυτοκινήτων και σε ορισμένες εμπορικές εφαρμογές (Ha & Lee, 2024; Ye et al., 2024; Maqbool & Maddali, 2024; Babushok & Linteris, 2024; Butt et al., 2024; Miyawaki & Shikazono, 2024). Διαθέτει GWP που είναι περίπου 75% χαμηλότερο από αυτό του R-134a, καθιστώντας το μια πιο φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση (Ha & Lee, 2024; Ye et al., 2024; Maqbool & Maddali, 2024; Babushok & Linteris, 2024; Butt et al., 2024; Miyawaki & Shikazono, 2024). Ωστόσο, ορισμένες προκλήσεις συνοδεύουν αυτό το ψυκτικό μέσο, συμπεριλαμβανομένης της σχετικής καινοτομίας του, η οποία έχει ως αποτέλεσμα περιορισμένη διαθεσιμότητα και ανάγκη για νέα υποδομή και εκπαίδευση (Ha & Lee, 2024; Ye et al., 2024; Maqbool & Maddali, 2024; Babushok & Linteris, 2024; Butt et al., 2024; Miyawaki & Shikazono, 2024).

Το R-1234ze (Trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene) είναι άλλο ένα HFO με χαμηλό GWP και υιοθετείται σε διάφορα συστήματα ψύξης και κλιματισμού (Babushok & Linteris, 2024; Robaczewski et al., 2024; Kumar et al., 2024; Six et al., 2024; Leehey et al., 2024). Παρόμοια με το R-1234yf, έχει υποβληθεί σε ρυθμιστικό έλεγχο και συχνά θεωρείται ως εναλλακτική λύση για ψυκτικά υψηλότερης GWP (Babushok & Linteris, 2024; Robaczewski et al., 2024; Kumar et al., 2024; Six et al., 2024; Leehey et al., 2024). Οι περιορισμοί όσον αφορά την προμήθεια και την τεχνολογική υποδομή τόσο για το R-1234yf όσο και για το R-1234ze αποτελούν σημαντικά ζητήματα καθώς οι εταιρείες μεταβαίνουν σε αυτές τις νεότερες ενώσεις (Babushok & Linteris, 2024; Robaczewski et al., 2024; Kumar et al., 2024; Six et al., 2024; Leehey et al., 2024).

2.2.6. Φυσικοί Ψυκτικοί Στρόφιγγες - Βουτάνιο (R-600)

Η ανάγκη για φιλικές προς το περιβάλλον και ενεργειακά αποδοτικές λύσεις ψύξης οδηγεί στην αυξανόμενη χρήση φυσικών ψυκτικών (Caramaschi, et al., 2024; Midzic Kurtagic, et al., 2022). Στο πλαίσιο αυτού του δοκιμίου, θα εξετάσουμε τρεις σημαντικούς φυσικούς ψυκτικούς στρόφιγγες: το βουτάνιο (R-600), το διοξείδιο του άνθρακα (R-744) και την αμμωνία (R-717), προσδιορίζοντας τα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους (Prasad et al., 2024; Söylemez, 2024).

Το R-600, γνωστό και ως βουτάνιο, είναι ένα φυσικό ψυκτικό που έχει προσελκύσει την προσοχή λόγω του χαμηλού του δυναμικού παγκόσμιας θέρμανσης (GWP) (Caramaschi, et al., 2024; Bychkov et al., 2024; Calleja-Anta et al., 2024). Οι καλές ψυκτικές του ιδιότητες το καθιστούν κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων οικιακών ψυγείων και καταψυκτών (Caramaschi, et al., 2024; Bychkov et al., 2024; Calleja-Anta et al., 2024; Prasad et al., 2024). Ωστόσο, η εύφλεκτη φύση του απαιτεί αυξημένες προφυλάξεις κατά τη χρήση και την αποθήκευσή του (Caramaschi, et al., 2024; Bychkov et al., 2024; Calleja-Anta et al., 2024). Αυτό σημαίνει ότι οι εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν βουτάνιο θα πρέπει να πληρούν ειδικές προδιαγραφές ασφαλείας για να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος ατυχημάτων (Caramaschi, et al., 2024; Bychkov et al., 2024; Calleja-Anta et al., 2024; Prasad et al., 2024).

Συνολικά, οι φυσικοί ψυκτικοί στρόφιγγες R-600, R-744 και R-717 προσφέρουν μια σειρά πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή του κατάλληλου ψυκτικού για συγκεκριμένες εφαρμογές (Caramaschi, et al., 2024; Prasad et al., 2024; Söylemez, 2024; Midzic Kurtagic, et al., 2022). Ενώ το βουτάνιο προτείνει μια οικονομικά αποδοτική και υψηλής απόδοσης επιλογή, το διοξείδιο του άνθρακα και η αμμωνία προσφέρουν καινοτόμες λύσεις σχετικές με την προστασία του περιβάλλοντος και την ενεργειακή αποδοτικότητα, εφόσον τηρούνται απαραίτητες προφυλάξεις ασφαλείας (Caramaschi, et al., 2024; Prasad et al., 2024; Söylemez, 2024; Midzic Kurtagic, et al., 2022). Η επιλογή του κατάλληλου ψυκτικού καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα του συστήματος ψύξης, καθιστώντας τη διαδικασία επιλογής κρίσιμη για τις σύγχρονες βιομηχανίες και εφαρμογές ψύξης (Caramaschi, et al., 2024; Prasad et al., 2024; Söylemez, 2024; Midzic Kurtagic, et al., 2022).

2.2.7. Ειδικά Ψυκτικά

Πέρα από τις πρωτεύουσες κατηγορίες ψυκτικών, αρκετά ειδικά μείγματα και λιγότερο κοινά ψυκτικά έχουν εμφανιστεί σε διάφορες εφαρμογές (Prasad et al., 2024; Mickoleit et al., 2021; Cavallini, 2020; Narute et al., 2021). Αυτά τα μείγματα συχνά στοχεύουν σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά απόδοσης ή συγκεκριμένες εφαρμογές (Prasad et al., 2024; Mickoleit et al., 2021; Cavallini, 2020). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η συνεχής αναζήτηση αποτελεσματικών ψυκτικών δεν αφορά μόνο την εύρεση εναλλακτικών λύσεων με χαμηλό GWP αλλά και τη διασφάλιση ότι παρέχουν τις απαραίτητες επιδόσεις ψύξης και τα πρότυπα ασφαλείας που απαιτούνται για διάφορες εφαρμογές (Prasad et al., 2024; Mickoleit et al., 2021; Cavallini, 2020; Narute et al., 2021).

Το R-401A είναι ένα μείγμα HFC-125, HFC-143a και HCFC-22, που χρησιμοποιείται κυρίως ως αντικατάσταση του R-22 σε ορισμένα συστήματα (Prasad et al., 2024). Παρόλο που παρέχει ικανοποιητικές επιδόσεις, το υψηλό GWP του σημαίνει ότι γενικά θεωρείται ως μέτρο διακοπής και όχι ως μακροπρόθεσμη λύση (Prasad et al., 2024). Το R-421A είναι ένα αζεοτροπικό μείγμα σχεδιασμένο να αντικαθιστά το R-22 ενώ προσφέρει χαμηλότερο GWP (Mickoleit et al., 2021; Prasad et al., 2024). Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν προβλήματα διαθεσιμότητας, γεγονός που περιπλέκει την ευρεία

αποδοχή και χρήση του στα υπάρχοντα συστήματα (Mickoleit et al., 2021). Τα R-40 (Αιθυλένιο) και R-12 (Διχλωροδιφθορομεθάνιο) είναι παραδείγματα ψυκτικών που έχουν καταργηθεί σταδιακά λόγω των επιβλαβών περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων, όπως η καταστροφή του όζοντος και το υψηλό GWP (Cavallini, 2020; Narute et al., 2021). Ωστόσο, σε εξειδικευμένες εφαρμογές, το R-40 αναγνωρίζεται για το χαμηλό GWP και τη μη τοξική του φύση, αν και οι εφαρμογές του είναι περιορισμένες (Cavallini, 2020; Narute et al., 2021).

2.2.8. Συμπεράσματα

Η στροφή από τους HFC σε πιο περιβαλλοντικά βιώσιμα ψυκτικά είναι καθοριστικής σημασίας για την αντιμετώπιση των επειγόντων ζητημάτων της κλιματικής αλλαγής και της καταστροφής του στρώματος του όζοντος (Choi et al., 2000; Lee et al., 2021; Finberg & Shiflett, 2021). Ενώ οι HFC έχουν χρησιμεύσει ως αποτελεσματικά ψυκτικά μέσα, το υψηλό GWP τους απαιτεί μια αναπόφευκτη μετάβαση σε εναλλακτικές λύσεις με χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Chen et al., 2018; Wen & Ho, 2005; Jones et al., 2022; Pilla et al., 2017). Οι υδρογονάνθρακες, η αμμωνία, το διοξείδιο του άνθρακα και τα HFO είναι από τους πρωτοπόρους σε αυτήν την εξέλιξη, με το καθένα να έχει μοναδικά πλεονεκτήματα και προκλήσεις (Söylemez, 2024; Butt et al., 2024; Robaczewski et al., 2024; Prasad et al., 2024).

Οι υδρογονάνθρακες επαινούνται για τα οικολογικά τους οφέλη, αλλά μετριάζονται από ανησυχίες για την ασφάλεια που σχετίζονται με την ευφλεκτότητα (Yang et al., 2022; Midzic Kurtagic et al., 2022). Η αμμωνία ξεχωρίζει για την αποτελεσματικότητά της και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας σε βιομηχανικές εφαρμογές (Chen et al., 2018; Wen & Ho, 2005; Wen et al., 2006; Kim et al., 1994; Jones et al., 2022; Pilla et al., 2017). Ωστόσο, η τοξικότητά του εγκυμονεί κινδύνους που απαιτούν σχολαστικό χειρισμό και πρωτόκολλα ασφαλείας (Söylemez, 2024; Butt et al., 2024; Robaczewski et al., 2024; Prasad et al., 2024). Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί μια θαυμάσια εναλλακτική λύση με αστρικό περιβαλλοντικό προφίλ, αν και η πρακτική εφαρμογή απαιτεί προηγμένη τεχνολογία (Yang et al., 2022; Midzic Kurtagic et al., 2022). Τα HFO αναδεικνύονται ως η τελευταία καινοτομία, συνδυάζοντας βελτιωμένα περιβαλλοντικά διαπιστευτήρια με υπάρχουσες εφαρμογές, αλλά η υιοθέτησή τους μπορεί να καθυστερήσει από περιορισμούς υποδομής και ρυθμιστικές αβεβαιότητες (Yang & Yeh, 2022; Mohapatra et al., 2021; Midzic Kurtagic, et al., 2022).

Συνολικά, η συνεχής πρόοδος και η αποδοχή εναλλακτικών ψυκτικών δεν εξαρτάται μόνο από τις περιβαλλοντικές τους ιδιότητες αλλά και από τις βελτιώσεις στην τεχνολογία, τα ρυθμιστικά πλαίσια και την ετοιμότητα της αγοράς (Yang et al., 2022; Midzic Kurtagic et al., 2022). Η επιτυχής μετάβαση σε αυτές τις βιώσιμες λύσεις είναι κρίσιμη για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα των βιομηχανιών ψύξης και κλιματισμού, συμβάλλοντας τελικά σε ευρύτερους περιβαλλοντικούς στόχους (Söylemez, 2024; Butt et al., 2024; Robaczewski et al., 2024; Prasad et al., 2024). Κάθε βήμα σε αυτή τη μετάβαση πρέπει να συνοδεύεται από προσεκτικό σχεδιασμό, επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες και έμφαση στην ασφάλεια για να διασφαλιστεί ότι τα οφέλη από την υιοθέτηση νέων ψυκτικών θα πραγματοποιηθούν χωρίς

ανεπιθύμητες συνέπειες (Caramaschi, et al., 2024; Prasad et al., 2024; Söylemez, 2024; Midzic Kurtagic, et al., 2022). Ο τομέας της ψύξης βρίσκεται σε μια κομβική στιγμή της ιστορίας του και οι αποφάσεις που λαμβάνονται σήμερα θα έχουν μόνιμες επιπτώσεις για τις μελλοντικές γενιές και την υγεία του πλανήτη μας (Söylemez, 2024; Butt et al., 2024; Robaczewski et al., 2024; Prasad et al., 2024).

Πίνακας 1 Είδη Ψυκτικών				
Ομάδα	Τύπος	Χαρακτηριστικό	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Υδροφθοράνθρακες (HFCs)	R-134a	Τετραφθοροαιθάνιο	Καλή ενεργειακή απόδοση, Ευρέως διαθέσιμο	Υψηλό GWP, συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή
	R-404A	Μίγμα HFC-125, HFC-143a και HFC-134a	Ικανότητα ψύξης, Καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες	Υψηλό GWP, υπό φάση αποδοχής
	R-407C	Μίγμα HFC-32, HFC-125 και HFC-134a	Αντικατάσταση του R-22, Χαμηλότερο GWP	Υψηλότερο GWP από άλλες λύσεις
	R-410A	Μίγμα HFC-32 και HFC-125	Υψηλή ικανότητα ψύξης, Χαμηλός θόρυβος	Υψηλό GWP, φάση σταδιακής αποδοχής
	R-507A	Μίγμα HFC-125 και HFC-143a	Σταθερή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες	Υψηλό GWP
Υδρογονάνθρακες	R-290	Προπάνιο	Σημαντικά χαμηλότερο GWP, Ενεργειακά αποδοτικό	Εύφλεκτο, απαιτεί προφυλάξεις
	R-600a	Ισοβουτάνιο	Χαμηλό GWP, Καλή απόδοση	Εύφλεκτο, απαιτεί προφυλάξεις
	R-170	Αιθάνιο	Πολύ χαμηλό GWP, Υψηλή αποδοτικότητα	Εύφλεκτο, περιορισμένες εφαρμογές
Αμμωνία	R-717	Αμμωνία	Υψηλή αποτελεσματικότητα, Χαμηλό κόστος	Τοξική, απαιτεί προφυλάξεις ασφαλείας
Διοξείδιο του Άνθρακα	R-744	Διοξείδιο του Άνθρακα	Χαμηλό GWP, μη τοξικό και μη εύφλεκτο	Υψηλή πίεση λειτουργίας, απαιτεί ειδικό εξοπλισμό
Υδροφθοροολεφίνες (HFOs)	R-1234yf	2,3,3,3-Τετραφθοροπροπένιο	Χαμηλό GWP	Νέος, περιορισμένη διαθεσιμότητα και υποδομή
	R-1234ze	Δια-1,3,3,3-Τετραφθοροπροπένιο	Χαμηλό GWP	Νέος, περιορισμένη διαθεσιμότητα και υποδομή
Φυσικοί Ψυκτικοί Στρόφιγγες	R-600	Βουτάνιο	- Χαμηλό GWP, καλές ψυκτικές ιδιότητες	Εύφλεκτο, απαιτεί προφυλάξεις
	R-744	Διοξείδιο του Άνθρακα	Χαμηλό GWP, μη τοξικό και μη εύφλεκτο	Υψηλή πίεση λειτουργίας, απαιτεί ειδικό εξοπλισμό
	R-717	Αμμωνία	Υψηλή αποτελεσματικότητα, Χαμηλό κόστος	Τοξική, απαιτεί προφυλάξεις ασφαλείας
Ειδικοί Ψυκτικοί Στρόφιγγες	R-401A	Μίγμα HFC-125, HFC-143a και HCFC-22	Χρησιμοποιείται ως αντικατάσταση του R-22	Υψηλό GWP, όχι βιώσιμη λύση μακροπρόθεσμα
	R-421A	Αζεοτροπικό μίγμα για αντικατάσταση του R-22	Χαμηλότερο GWP από τον R-22	Περιορισμένη διαθεσιμότητα
Ψυκτικοί Στρόφιγγες Αδρανών Αερίων	R-40	Εθυλένιο	Χαμηλό GWP, μη τοξικό	Περιορισμένες εφαρμογές
Άλλοι Ψυκτικοί Στρόφιγγες	R-12	Διχλωροδιφθορομεθάνιο - έχει αποσυρθεί λόγω αποδόμησης του όζοντος	Ικανότητα ψύξης σε χαμηλές θερμοκρασίες	Υψηλό GWP, προκαλεί αποδόμηση του όζοντος
	R-22	Χλωροδιφθορομεθάνιο - αποσύρεται λόγω κανονισμών HFC	Καλή απόδοση και ευρεία χρήση	Υψηλό GWP, αποσύρεται λόγω κανονισμών HFC

2.3. Κριτήρια και Παράγοντες Επιλογής Καταψυκτών ULT

Η επιλογή του κατάλληλου καταψύκτη ULT μπορεί να κάνει τη διαφορά στη διαχείριση βιολογικών δειγμάτων (Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016). Οι καταψύκτες ULT είναι θεμελιώδους σημασίας σε εργαστήρια και κλινικές που ασχολούνται με την αποθήκευση σπάνιων και ευαίσθητων

βιολογικών δειγμάτων, όπως βλαστοκύτταρα, ιστούς και βιολογικά προϊόντα που απαιτούν ακραίες συνθήκες αποθήκευσης για να διατηρήσουν τη βιωσιμότητά τους (Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016). Η επιλογή του σωστού μοντέλου μπορεί να διασφαλίσει την ποιότητα και την αξιοπιστία των πειραμάτων και των αναλύσεων (PHcbi, 2024; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016).

Είναι απαραίτητο ο καταψύκτης να καλύπτει το απαιτούμενο εύρος θερμοκρασίας για την αποθήκευση συγκεκριμένων δειγμάτων (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024; 360o MEDICAL, 2024). Κάθε κατηγορία δειγμάτων έχει τις δικές της απαιτήσεις θερμοκρασίας για να διατηρήσει την ακεραιότητά τους (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024; 360o MEDICAL, 2024). Για παράδειγμα, τα κρυοσυντηρημένα δείγματα βλαστοκυττάρων απαιτούν θερμοκρασίες τουλάχιστον -196°C (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024; 360o MEDICAL, 2024). Μια άγνωστη ή εσφαλμένη ρύθμιση θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε δυσλειτουργίες και απώλειες που θα έχουν σοβαρές συνέπειες. Εξίσου σημαντική είναι η ενεργειακή απόδοση του καταψύκτη, καθώς οι μακροχρόνιας χρήσης συσκευές μπορεί να προκύψουν σε υψηλά ενεργειακά κόστη (Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016). Επιλέγοντας έναν καταψύκτη με υψηλή ενεργειακή απόδοση, οι οργανισμοί μπορούν να μειώσουν τα λειτουργικά τους έξοδα, κάτι που είναι κρίσιμο για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις που χρειάζονται τρεις ή περισσότερους καταψύκτες για τις ανάγκες τους (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016). Η ενεργειακή αποδοτικότητα θα πρέπει να υπολογίζεται και σε όρους περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας συμβάλλει στη βιωσιμότητα (Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016).

Η ευκολία συντήρησης και η διαθεσιμότητα ανταλλακτικών είναι επίσης κρίσιμα σημεία που πρέπει να εξεταστούν κατά την επιλογή συσκευών (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024). Ένας καταψύκτης που απαιτεί περίπλοκες διαδικασίες συντήρησης μπορεί να προκαλέσει παρατεταμένη διακοπή λειτουργίας και ζημιές στα δείγματα (PHcbi, 2024; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023). Επιπλέον, η εύκολη πρόσβαση σε ανταλλακτικά και τεχνική υποστήριξη είναι καίρια για την ελαχιστοποίηση του χρόνου που οι συσκευές μένουν εκτός λειτουργίας (PHcbi, 2024; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023).

Είναι σημαντικό να αξιολογηθούν οι ειδικές ανάγκες του εργαστηρίου ή της κλινικής, οι οποίες μπορεί να απαιτούν μοναδικές λύσεις αποθήκευσης (PHcbi, 2024; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016). Τέτοιες ανάγκες μπορεί να περιλαμβάνουν τη χωρητικότητα του καταψύκτη, την απαιτούμενη ευελιξία για την αποθήκευση διαφόρων τύπων δειγμάτων και την ανάγκη για προσαρμοσμένα ράφια ή διαμερίσματα (PHcbi, 2024; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016). Για παράδειγμα, εάν μια κλινική αντιμετωπίζει διαφορετικές κατηγορίες δειγμάτων που απαιτούν διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας, μπορεί να χρειαστεί έναν καταψύκτη που να προσφέρει ευέλικτους διαχωρισμούς για την αποθήκευση αυτών των υλικών (PHcbi, 2024; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016). Η εξατομικευμένη προσέγγιση στην επιλογή καταψύκτη μπορεί να βελτιώσει τη

λειτουργικότητα του εργαστηρίου και την αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης (Thermo scientific, 2024; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016).

Για να διασφαλιστεί η βέλτιστη διαχείριση των καταψυκτών ULT, οι οργανισμοί θα πρέπει να υιοθετήσουν στρατηγικές που περιλαμβάνουν σταθερή εκπαίδευση και ανάπτυξη του προσωπικού (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024; 360o MEDICAL, 2024). Η συνεχής εκπαίδευση του προσωπικού σχετικά με τη λειτουργία και τη συντήρηση των καταψυκτών είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ποιότητας των δειγμάτων και την αποφυγή ανθρώπινων σφαλμάτων (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024; 360o MEDICAL, 2024). Ενδελεχείς εκπαιδεύσεις σε θέματα ασφαλείας και διαδικασιών μπορεί να συμβάλουν στη βελτίωση της συνολικής διαχείρισης των βιολογικών δειγμάτων (PHcbi, 2024; 360o MEDICAL, 2024; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024).

Προηγμένα συστήματα μπορεί να προσφέρουν αυτοματοποιημένες αναφορές και δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στους υπεύθυνους να παρακολουθούν την απόδοση των καταψυκτών και να εντοπίζουν προβλήματα προτού εξελιχθούν σε κρίσιμα θέματα (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024; Xu et al., 2023). Οι τεχνολογίες IoT και οι ψηφιακές πλατφόρμες παρακολούθησης προσφέρουν ακόμα περισσότερες δυνατότητες, όπως η συνδυαστική ανάλυση δεδομένων για την πρόβλεψη αναγκαίων συντηρήσεων (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024).

Η ύπαρξη προχωρημένων συστημάτων ελέγχου και παρακολούθησης μπορεί να ενισχύσει την αξιοπιστία λειτουργίας του καταψύκτη (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024). Συσκευές που διαθέτουν αυτόματους συναγερμούς και δυνατότητες απομακρυσμένης παρακολούθησης διασφαλίζουν ότι τυχόν αποκλίσεις από τους κανονικούς όρους λειτουργίας εντοπίζονται άμεσα και διορθώνονται προτού προκαλέσουν προβλήματα στα αποθηκευμένα δείγματα (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024). Αυτές οι τεχνολογίες όχι μόνο προστατεύουν τα δείγματα, αλλά προσφέρουν και ανάλυση δεδομένων για την παρακολούθηση της απόδοσης του καταψύκτη με την πάροδο του χρόνου (Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024). Πιο συγκεκριμένα, ένα αποτελεσματικό σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης που ενημερώνει τους διαχειριστές για πιθανές απώλειες θερμοκρασίας ή άλλο είδος δυσλειτουργίας μπορεί να αποτρέψει σοβαρές ζημιές (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024). Τέτοια συστήματα alert σε πραγματικό χρόνο μπορούν να προγραμματιστούν ώστε να αποστέλλουν ειδοποιήσεις μέσω SMS ή email, διασφαλίζοντας ότι οι υπεύθυνοι επιβεβαίωσης και οι τεχνικοί συντήρησης ενημερώνονται άμεσα και κατάλληλα για οποιαδήποτε ξαφνική αύξηση ή μείωση θερμοκρασίας, αυξάνοντας έτσι την ασφάλεια των δειγμάτων (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024; 360o MEDICAL, 2024).

Η συμμόρφωση με τα θεσπισμένα πρότυπα και κανονισμούς για την αποθήκευση και την ασφάλεια των βιολογικών δειγμάτων είναι υψίστης σημασίας (Moerman & Fikiin, 2016). Οι οργανισμοί που τηρούν τις κανονιστικές απαιτήσεις όχι μόνο διασφαλίζουν την ασφάλεια των δειγμάτων τους, αλλά και προγραμματίζουν μελλοντικές στρατηγικές ανάπτυξης (Moerman & Fikiin, 2016). Η τήρηση των

κανονισμών αποδεικνύει την δέσμευση του οργανισμού στην ποιότητα και την ασφάλεια, κάτι που αυξάνει την αξιοπιστία του εργαστηρίου και ενισχύει τη θέση του στην αγορά (PHcbi, 2024; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016). Επιπλέον, η συμμόρφωση σχετίζεται με τις ευθύνες που φέρουν οι οργανισμοί προς τους πελάτες και τους ερευνητές που εμπιστεύονται τα δείγματα τους για κρίσιμες αναλύσεις (PHcbi, 2024; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016).

Η εξελικτική φύση της επιστημονικής έρευνας και της ιατρικής τεχνολογίας απαιτεί από τους οργανισμούς να είναι πάντα σε εγρήγορση και προσαρμοστικοί (360o MEDICAL, 2024; Dhiman & Kumar, 2023). Η συνεχής αξιολόγηση της απόδοσης των καταψυκτών ULT, η ανασκόπηση των διαδικασιών συντήρησης και η ανανέωση των τεχνολογιών παρακολούθησης πρέπει να είναι τακτική (360o MEDICAL, 2024; Dhiman & Kumar, 2023). Αυτό θα βοηθήσει τους οργανισμούς να προσαρμοστούν σε νέες απαιτήσεις και κανονισμούς, καθώς και να αξιοποιήσουν τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις για την περαιτέρω βελτίωση των πρακτικών αποθήκευσης (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024).

Στο σύνολό τους, η επιλογή του κατάλληλου καταψυκτή ULT και η στρατηγική διαχείρισή του δεν είναι απλώς ζητήματα λειτουργικότητας, αλλά κεντρικά ζητήματα που επηρεάζουν την ακεραιότητα της έρευνας και την ασφάλεια των βιολογικών δειγμάτων (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024; 360o MEDICAL, 2024). Η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλάνου που συνδυάζει επιλογές διαχείρισης, εκπαίδευσης, τεχνολογίας και συμμόρφωσης μπορεί να διασφαλίσει ότι οι οργανισμοί θα είναι σε θέση να προσφέρουν την καλύτερη δυνατή φροντίδα για τα βιολογικά δείγματα τους, προάγοντας έτσι την επιστημονική πρόοδο και την καινοτομία (Thermo scientific, 2024). Με την κατάλληλη προσοχή στις λεπτομέρειες και την δέσμευση για συνεχή εκπαίδευση και βελτίωση, οι οργανισμοί μπορούν να βελτιώσουν όχι μόνο την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα των εργαστηρίων τους, αλλά και την ποιότητα των ερευνών και των αποτελεσμάτων τους (Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016). Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι οι καταψυκτές ULT δεν είναι απλώς εργαλεία αποθήκευσης, αλλά κρίσιμα στοιχεία που συμβάλλουν στη διασφάλιση της ακεραιότητας και της ποιότητας των επιστημονικών και ιατρικών δεδομένων (Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016). Στην εποχή της συνεχούς εξελικτικής διαδικασίας, η σωστή επιλογή και διαχείριση των ψυκτικών συστημάτων είναι μια επένδυση στην επιστήμη και την υγειονομική περίθαλψη, προάγοντας μια κουλτούρα ασφάλειας και υπευθυνότητας (PHcbi, 2024; Thermo scientific, 2024; 360o MEDICAL, 2024; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Ye et al., 2024; Moerman & Fikiin, 2016).

2.4. Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις των ULT Καταψυκτών

2.4.1. Πλεονεκτήματα

Η χρήση των καταψυκτών εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών (ULT) ενσωματώνει μια σειρά πλεονεκτημάτων που τους καθιστούν αναπόσπαστο κομμάτι σε πολλές επιστημονικές, βιομηχανικές και ιατρικές εφαρμογές (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016; Robertson et al., 2017; Bychkov et al., 2017;

Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015). Παράλληλα, η καθολική τους χρήση δεν έρχεται χωρίς προκλήσεις. Στην παρακάτω ανάλυση θα εξετάσουμε λεπτομερώς τα πλεονεκτήματα που συνοδεύουν τους ULT καταψύκτες (Farley et al., 2015; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023).

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των ULT καταψυκτών είναι η ικανότητά τους να εξασφαλίζουν την ασφαλή και μακροπρόθεσμη αποθήκευση ευαίσθητων υλικών (Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023). Οι ULT καταψύκτες παρέχουν θερμοκρασίες που κυμαίνονται συνήθως από -40°C έως -86°C , οι οποίες είναι απαραίτητες για την αποφυγή βιολογικής αλλοίωσης και την πρόληψη οποιασδήποτε χημικής αντίδρασης που θα μπορούσε να μειώσει τη δραστηριότητα των αποθηκευμένων υλικών (Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Η σημασία αυτής της αποτελεσματικής διατήρησης ενισχύεται από την αυξανόμενη ανάγκη για τη διαχείριση ευαίσθητων βιολογικών προϊόντων, όπως εμβόλια, γενετικά δείγματα και βιολογικά φάρμακα, που απαιτούν συγκεκριμένες συνθήκες αποθήκευσης για να διατηρήσουν την ποιότητά τους (Lloyd et al., 2015; Dhiman & Kumar, 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Οι ULT καταψύκτες προστατεύουν αυτές τις ουσίες από θερμικές κανονικότητες που θα μπορούσαν να επιφέρουν απώλεια της ακεραιότητας (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016; Robertson et al., 2017; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023).

Οι ULT καταψύκτες προσφέρουν αυστηρή και σταθερή θερμοκρασία, κάτι που είναι καθοριστικής σημασίας για τη διατήρηση της ποιότητας και της ασφάλειας των προϊόντων (Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Cabra et al., 2017; Liu et al., 2023). Η σταθερότητα της θερμοκρασίας διασφαλίζει ότι τα δείγματα και τα φάρμακα παραμένουν σε ιδανικές συνθήκες, μειώνοντας τη πιθανότητα θερμικών διακυμάνσεων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αποτυχία ή αλλοίωση των προϊόντων (Farley et al., 2015; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Η συνεχής παρακολούθηση της θερμοκρασίας μέσω ενσωματωμένων συστημάτων παρακολούθησης διασφαλίζει ότι οποιαδήποτε απόκλιση ανιχνεύεται άμεσα, επιτρέποντας στους χρήστες να αντιδράσουν εγκαίρως (Faugeron, 2016; Robertson et al., 2017; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Αυτή η λειτουργία συμβάλλει στη μείωση του κινδύνου και της ευθύνης που σχετίζεται με την αποθήκευση ευαίσθητων υλικών, ειδικά σε βιοϊατρικά εργαστήρια και κλινικές που εξαρτώνται από την ποιότητα των δειγμάτων τους (Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023).

Η παρακολούθηση και η καταγραφή της θερμοκρασίας στους ULT καταψύκτες μπορεί να προσφέρει σημαντικά δεδομένα για την ποιότητα και την ασφάλεια των προϊόντων (Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017). Αυτή η ικανότητα επιτρέπει τη συστηματική ανάλυση των συνθηκών αποθήκευσης και την πραγματοποίηση βελτιώσεων στη διαδικασία διαχείρισης (Robertson et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Saeed et al.,

2023; Liu et al., 2023). Τα δεδομένα αυτά μπορούν να είναι καθοριστικά για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ποιότητα των αποθηκευμένων προϊόντων και την ανάπτυξη διαρκών βελτιώσεων στις διαδικασίες αποθήκευσης (Faugeroux, 2016; Robertson et al., 2017; Powell et al., 2019; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Επιπλέον, η δυνατότητα καταγραφής δεδομένων με τη μορφή ψηφιακών αρχείων επιτρέπει την ευκολότερη ανάλυση και αξιολόγηση, συμβάλλοντας στην αποφυγή προβλημάτων που θα μπορούσαν να προκληθούν από λάθη ανθρώπινης παρέμβασης (Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023;). Αυτή η πτυχή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε τομείς όπου η συμμόρφωση προς τους κανονισμούς και οι διαδικασίες έγκρισης είναι αυστηρές, όπως στη φαρμακευτική βιομηχανία και στη βιολογική έρευνα (Robertson et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Liu et al., 2023).

Οι ULT καταψύκτες προάγουν την έρευνα και την καινοτομία σε τομείς όπως η φαρμακολογία και η αναπαραγωγική ιατρική (Farley et al., 2015; Lloyd et al., 2015; Dhiman & Kumar, 2023; Saeed et al., 2023). Με την ικανότητά τους να διατηρούν ευαίσθητα δείγματα και βιολογικά παρασκευάσματα, διευκολύνουν την ανάπτυξη νέων θεραπειών, εμβολίων και βιολογικών προϊόντων (Farley et al., 2015; Robertson et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Dhiman & Kumar, 2023; Saeed et al., 2023). Η διατήρηση της ακεραιότητας των δειγμάτων επιτρέπει στους ερευνητές να εκτελούν πειράματα με υψηλή ακρίβεια, ενισχύοντας τη δυνατότητά τους να ανακαλύψουν και να επαληθεύσουν νέες θεραπευτικές προσεγγίσεις (Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023). Σε τομείς όπως η κρυοσυντήρηση των ωαρίων και του σπέρματος, οι ULT καταψύκτες είναι κρίσιμοι για την υποστήριξη διαδικασιών που επιτρέπουν την οικογένεια να επιτύχει τα δυνητικά τους αποτελέσματα, προσφέροντας περισσότερες επιλογές στους ασθενείς που αντιμετωπίζουν υπογονιμότητα (Faugeroux, 2016; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023).

2.4.2. Προκλήσεις

Αν και οι ULT καταψύκτες προσφέρουν πολυάριθμα πλεονεκτήματα, έρχονται και με **προκλήσεις** που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διάρκεια της επιλογής και της λειτουργίας τους (Lloyd et al., 2015; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023;). Οι κυριότερες προκλήσεις που αναλύονται παρακάτω είναι η Ενεργειακή Κατανάλωση, Συντήρηση και Αξιοπιστία, και Προβλήματα Εξαίρεσης Θερμοκρασίας (Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023).

Η λειτουργία των ULT καταψυκτών απαιτεί σημαντική ενέργεια, γεγονός που μπορεί να έχει επιπτώσεις στο κόστος και στο περιβάλλον (Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Αυτοί οι καταψύκτες λειτουργούν σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες για παρατεταμένες χρονικές περιόδους, γεγονός που συμβάλλει σε αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (Farley et al., 2015; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Οι

αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις θέτουν ακόμα ένα ζήτημα σχετικά με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ULT καταψυκτών, καθώς η αυξανόμενη ενεργειακή κατανάλωση συνδέεται με τις εκπομπές CO₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Επομένως, υπάρχει υψηλή ανάγκη για την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών μοντέλων και, γενικότερα, αειφόρων εναλλακτικών λύσεων που θα μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας, χωρίς να θίγεται η απόδοση (Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023).

Οι ULT καταψύκτες απαιτούν τακτική συντήρηση για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία τους (Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Οι χρήστες πρέπει να ακολουθούν συγκεκριμένα προγράμματα συντήρησης και να διενεργούν περιοδικούς ελέγχους για να διασφαλίσουν ότι τα συστήματα ψύξης λειτουργούν κανονικά (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Τυχόν βλάβες ή παραλείψεις στη συντήρηση μπορούν να οδηγήσουν σε σοβαρές συνέπειες, όπως η απώλεια πολύτιμων δειγμάτων και προϊόντων, γεγονός που θα μπορούσε να έχει σημαντικό αντίκτυπο σε ερευνητικούς προϋπολογισμούς και προθεσμίες (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Η αξιοπιστία των ULT καταψυκτών έχει επίσης ιδιαίτερη σημασία, καθώς οι διακοπές στη λειτουργία ψύξης μπορεί να υπονομεύσουν την ασφάλεια των αποθηκευμένων προϊόντων (Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Γι' αυτό τον λόγο, οι χρήστες χρειάζεται να επενδύσουν σε προληπτικές στρατηγικές και συστήματα παρακολούθησης που θα διασφαλίζουν άμεσες ειδοποιήσεις σε περίπτωση τυχόν προβλημάτων (Farley et al., 2015; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023).

Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι ULT καταψύκτες είναι τα προβλήματα που προκύπτουν από τις εξαιρέσεις θερμοκρασίας (Farley et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023). Όταν η θερμοκρασία διαταράσσεται, έστω και για σύντομο διάστημα, μπορεί να προκληθεί σοβαρή ζημιά στα αποθηκευμένα προϊόντα (Farley et al., 2015; Dhiman & Kumar, 2023). Αυτή η διαταραχή μπορεί να προέλθει από διάφορους παράγοντες, όπως μηχανικές βλάβες, ανθρώπινα λάθη, διακοπές ρεύματος ή ακόμα και απροσδόκητα κλιματολογικά φαινόμενα (Farley et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023). Η ζημιά που προκαλείται από τις θερμικές διακυμάνσεις είναι συχνά μη αναστρέψιμη για ευαίσθητα βιολογικά υλικά, όπως εμβόλια, βιολογικά δείγματα ή φαρμακευτικά προϊόντα (Robertson et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Liu et al., 2023). Αυτό σημαίνει ότι η αποσύνθεση ή η απώλεια δραστηρότητας μπορεί να επιφέρει σοβαρές συνέπειες, τόσο για τους ασθενείς όσο και για τους ερευνητές (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016; Robertson et al., 2017; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Liu et al., 2023). Η αποσύνθεση των παρασκευασμάτων μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχίες στα πειράματα και απώλειες χρημάτων και χρόνου (Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Cabra et al., 2017). Γι' αυτό το λόγο, η ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης θερμοκρασίας σε πραγματικό χρόνο και η εγκατάσταση συστημάτων προειδοποίησης είναι απαραίτητη (Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Cabra et al., 2017). Οι χρήστες πρέπει να είναι

σε θέση να αντιδρούν άμεσα σε τυχόν διαταραχές, προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν τη ζημιά (Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017). Αυτή η προληπτική προσέγγιση είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της ακεραιότητας των εκατοντάδων ή και χιλιάδων δειγμάτων που μπορούν να αποθηκευτούν σε έναν ULT καταψύκτη (Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023).

Η πρόκληση για το μέλλον των καταψυκτών ULT θα είναι να επενδύσουν στη βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα τους, προσαρμοζόμενοι στις νέες απαιτήσεις και τις συνεχώς εξελισσόμενες επιστημονικές ανάγκες (Farley et al., 2015; Liu et al., 2023). Οι κατασκευαστές πρέπει να βρίσκονται σε συνεχή αναζήτηση καινοτομίας και να ενσωματώνουν νέα υλικά και τεχνολογίες που θα διασφαλίσουν ότι αυτοί οι καταψύκτες όχι μόνο θα ανταγωνίζονται ως προς την απόδοση αλλά και ως προς την ενεργειακή τους αποδοτικότητα (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Η ανάπτυξη ανανεώσιμων στρατηγικών και η καλή διαχείριση ενεργειακών πόρων θα είναι κρίσιμες στην επίτευξη υψηλών επιδόσεων χωρίς να αναγκάιος ο υπερβολικός κόστος (Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Xu et al., 2023; Liu et al., 2023). Επιπλέον, οι κατασκευαστές θα πρέπει να συνεργαστούν με τους χρήστες για την κατανόηση των αναγκών τους, προκειμένου να σχεδιάσουν και να αναπτύξουν καταψύκτες που να ανταγωνίζονται τις προσδοκίες της σύγχρονης βιομηχανίας υγειονομικής περίθαλψης (Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Xu et al., 2023; Liu et al., 2023).

Οι ULT καταψύκτες αποτελούν αναπόσπαστο εργαλείο στις σύγχρονες επιστημονικές και βιομηχανικές διαδικασίες, με σημαντικά πλεονεκτήματα που διευκολύνουν την αποθήκευση και τη διαχείριση ευαίσθητων υλικών (Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Liu et al., 2023). Η ικανότητά τους να εξασφαλίζουν την ασφαλή και μακροπρόθεσμη αποθήκευση, καθώς και η διασφάλιση σταθερών θερμοκρασιών, υποστηρίζει πολλές κρίσιμες διαδικασίες στην έρευνα και τη φαρμακευτική (Farley et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Η βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων και η υποστήριξη της καινοτομίας στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης καθιστούν τους ULT καταψύκτες απαραίτητους για την επιστημονική πρόοδο (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016; Robertson et al., 2017; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023).

Από την άλλη πλευρά, οι προκλήσεις που σχετίζονται με την ενεργειακή κατανάλωση, τη συντήρηση και την ανάγκη για σταθερές θερμοκρασίες απαιτούν προσοχή και στρατηγικές διαχείρισης (Robertson et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Οι χρήστες πρέπει να είναι ενήμεροι για τις απαιτήσεις συντήρησης και τις πιθανές επιπτώσεις των διαταραχών της θερμοκρασίας (Robertson et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Δεδομένων των παρόντων και μελλοντικών προκλήσεων που υπάρχουν στους τομείς της επιστήμης, της υγειονομικής περίθαλψης και της βιομηχανίας, οι ULT καταψύκτες θα χρειαστεί να εξελιχθούν συνεχώς (Powell et al.,

2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017). Οι κατευθύνσεις τους στην κατεύθυνση της ενεργειακής αποδοτικότητας και της βελτιωμένης αξιοπιστίας θα είναι καθοριστικού σημασίας για τη διασφάλιση ότι θα παραμένουν χρήσιμοι και βιώσιμοι στη διάρκεια του χρόνου (Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023).

2.4.3. Στρατηγικές Ελαχιστοποίησης Προκλήσεων

Προκειμένου να αξιοποιηθούν πλήρως τα πλεονεκτήματα των ULT καταψυκτών, είναι απαραίτητο να εξεταστούν κάποιες στρατηγικές για την ελαχιστοποίηση των προκλήσεων και την ενίσχυση των πλεονεκτημάτων (Farley et al., 2015; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Αυτές περιλαμβάνουν Επένδυση σε Ενεργειακά Αποδοτικές Τεχνολογίες, Καθιέρωση Τακτικών Σχεδίων Συντήρησης, Ανάπτυξη Συστημάτων Ασφαλείας και Ειδοποίησης, Εκπαίδευση και Ευαισθητοποίηση και Έρευνα για Φιλικότερα προς το Περιβάλλον Ψυκτικά (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016; Robertson et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023).

Όσον αφορά την επένδυση σε ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες, οι παραγωγοί ULT καταψυκτών θα πρέπει να εξετάσουν την ένταξη πιο αποδοτικών ενεργειακά ψυκτικών μονάδων και θερμομονωτικών υλικών που θα μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα την απόδοση του εξοπλισμού (Farley et al., 2015; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Από την άλλη, η καθιέρωση τακτικών σχεδίων συντήρησης είναι υψίστης σημασίας (Farley et al., 2015; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Η ανάπτυξη τυποποιημένων διαδικασιών για τη συντήρηση και την επιθεώρηση των ULT καταψυκτών θα μπορούσε να βοηθήσει στην πρόληψη προβλημάτων και στην επιμήκυνση της διάρκειας ζωής των συσκευών (Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Οι ερευνητές και οι διαχειριστές πρέπει να παρέχουν εκπαίδευση στο προσωπικό για τις βέλτιστες πρακτικές που πρέπει να τηρούνται (Farley et al., 2015; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023).

Επιπλέον, η εγκατάσταση προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης θερμοκρασίας σε συνδυασμό με ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο θα επιτρέψει στους χρήστες να ανταποκριθούν άμεσα σε τυχόν διακυμάνσεις θερμοκρασίας (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016; Robertson et al., 2017; Xu et al., 2023). Αυτά τα συστήματα μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη μέγιστη προστασία των αποθηκευμένων δειγμάτων (Farley et al., 2015; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Ως συνέχεια αυτού, η εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση κατέχουν σημαντικό ρόλο (Robertson et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Η εκπαίδευση του προσωπικού σχετικά με τη σημασία της διατήρησης σταθερών θερμοκρασιών και των

διαδικασιών συντήρησης είναι τόσο κρίσιμη όσο και η τεχνολογία που χρησιμοποιείται (Robertson et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Cabra et al., 2017; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Η ενίσχυση της ευαισθητοποίησης σχετικά με τους κινδύνους που συνδέονται με την κακή αποθήκευση μπορεί να συμβάλει στην αποτροπή λαθών (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016; Robertson et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023).

Η έρευνα για φιλικότερα προς το περιβάλλον ψυκτικά αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της σημερινής εποχής (Yang & Yeh, 2022; Prasad et al., 2024). Η μετάβαση σε λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον ψυκτικά μέσα θα μπορούσε να μειώσει περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να συμβάλει στη βιωσιμότητα της βιομηχανίας (Yang & Yeh, 2022; Prasad et al., 2024). Οι ULT καταψύκτες πρέπει να προσαρμοστούν σε κανονιστικά πλαίσια που επιβάλλουν την ελαχιστοποίηση των εκπομπών και τη χρήση φιλικότερων προς το περιβάλλον υλικών (Powell et al., 2019; Cabra et al., 2017; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023).

Η στρατηγική εστίαση στη βελτίωση της τεχνολογίας των ULT καταψυκτών μπορεί να προσφέρει προοπτικές που διευρύνουν την εφαρμογή τους και μπορούν να ενισχύσουν την επιστημονική και βιομηχανική έρευνα και ανάπτυξη (Lloyd et al., 2015; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Με την κατάλληλη υποστήριξη και συντήρηση, οι ULT καταψύκτες θα συνεχίσουν να παίζουν κομβικό ρόλο στην πρόοδο της επιστήμης και της ιατρικής, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια και την ακεραιότητα των ευαίσθητων υλικών που διατηρούν (Farley et al., 2015; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Αυτό σημαίνει ότι η επένδυση στην τεχνολογία και τα συστήματα που διεξάγουν τη λειτουργία και την παρακολούθηση των ULT καταψυκτών είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των στόχων και τη διασφάλιση της επιτυχίας στους τομείς των βιοεπιστημών, της φαρμακολογίας, και άλλων κρίσιμων εφαρμογών (Faugeron, 2016; Robertson et al., 2017; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023).

Η χρήση των ULT είναι κρίσιμη για την επιτυχία και την πρόοδο ζωτικών τομέων όπως η φαρμακευτική, η βιολογία και η ηλεκτρονική υγεία (Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Η ικανότητά τους να παρέχουν ασφαλή και σταθερή αποθήκευση για ευαίσθητα υλικά αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την ανάπτυξη και τη διασφάλιση της ποιότητας προϊόντων που μπορεί να σώσουν ζωές ή να συμβάλουν σημαντικά στη γνώση μας για τον κόσμο γύρω μας (Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι ULT καταψύκτες είναι πολλά, αλλά δεν πρέπει να παραβλέπουμε τις προκλήσεις που συνεπάγεται η λειτουργία τους (Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Xu et al., 2023; Saeed et al., 2023). Η ενεργειακή κατανάλωση, η ανάγκη για τακτική συντήρηση, οι κίνδυνοι από τις διαταραχές θερμοκρασίας και η ανάγκη για διαρκή εκπαίδευση του προσωπικού είναι θεμελιώδεις παράγοντες που απαιτούν προσοχή και στρατηγική διαχείριση (Farley et

al., 2015; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023; Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023).

Συνοψίζοντας, οι ULT καταψύκτες συνιστούν ένα πολύπλοκο εργαλείο που αν χρησιμοποιηθεί σωστά μπορεί να αποφέρει αναρίθμητα οφέλη, ενώ ταυτόχρονα οι προκλήσεις τους μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη σωστή προετοιμασία και τη στρατηγική σκέψη (Faugeroux, 2016; Robertson et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017). Τα επόμενα χρόνια, η τεχνολογία θα συνεχίσει να εξελίσσεται, και θα είναι σημαντικό να συνεχίσουμε να βελτιώνουμε τις υποδομές και τις διαδικασίες που σχετίζονται με την αποθήκευση και την αποκατάσταση προϊόντων σε ULT καταψύκτες (Farley et al., 2015; Faugeroux, 2016; Robertson et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Powell et al., 2019; Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017). Οι ULT καταψύκτες προσφέρουν πολύτιμες δυνατότητες για την αποθήκευση υλικών που απαιτούν αυστηρές θερμοκρασιακές συνθήκες (Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023). Η χρήση τους συμβάλλει σημαντικά στην επιστημονική έρευνα και στην ιατρική, ενώ ταυτόχρονα απαιτεί προσεκτική διαχείριση για την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων τους (Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023). Μόνο με τη σωστή διαχείριση και στρατηγική προσαρμογή στις αναδυόμενες προκλήσεις μπορούμε να διασφαλίσουμε ότι οι ULT καταψύκτες θα συνεχίσουν να διευκολύνουν την πρόοδο της επιστήμης και της ανθρωπότητας στο σύνολό της (Lloyd et al., 2015; Cabra et al., 2017; Dhiman & Kumar, 2023).

2.5. Εφαρμογές Καταψυκτών ULT

2.5.1. Σημαντικότητα των Καταψυκτών ULT στη Σύγχρονη Ιατρική και Έρευνα

Εξετάζοντας το μέλλον, η τεχνολογία των καταψυκτών ULT υπόσχεται πολλές εξελίξεις (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017). Η συνδυασμένη τεχνολογία ισχυρού ελέγχου της θερμοκρασίας με την ενσωμάτωσή της σε μεγάλο βαθμό στη βιομηχανία ιατρικής έρευνας θα έχει σημαντικές αποδόσεις (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017). Καθώς οι υγειονομικές κρίσεις συνεχίζουν να είναι μια πραγματικότητα παγκοσμίως, η έρευνα και η ανάπτυξη θα είναι αναγκαίες για να διασφαλιστεί η ετοιμότητα και η αποτελεσματικότητα της ιατρικής κοινότητας (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Ajmani, 2020). Το μέλλον θα απαιτήσει ολοένα και περισσότερο τις ψηφιακές δυνατότητες παρακολούθησης, τη δυνατότητα αυτοματισμού και την ανάπτυξη ευφυών συστημάτων ψύξης, ώστε να εξασφαλίσουμε τις καλύτερες δυνατές συνθήκες αποθήκευσης και συντήρησης (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017; Bychkov et al., 2017; Ajmani, 2020). Στις προκλήσεις της σημερινής εποχής, οι καταψύκτες ULT θα πρέπει να είναι έτοιμοι να ανταγωνιστούν τους πιο αυστηρούς κανονισμούς και να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις της ιατροφαρμακευτικής και επιστημονικής κοινότητας (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017; Ajmani, 2020; Bychkov et al., 2017). Η εστίαση στην έρευνα και στις επενδύσεις στην ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών και η κατανόηση της σπουδαιότητας της συντήρησης των ευαίσθητων δειγμάτων θα διασφαλίσουν ότι οι καταψύκτες ULT θα παραμείνουν

στην πρώτη γραμμή της επιστημονικής και ιατρικής εξέλιξης (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017; Ajmani, 2020; Bychkov et al., 2017).

Η επιτυχία της σύγχρονης ιατρικής και έρευνας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δυνατότητα διατήρησης ευαίσθητων δειγμάτων σε ακραίες συνθήκες (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017).. Οι καταψύκτες ULT όχι μόνο παρέχουν τη δυνατότητα για ασφαλή και μακροχρόνια αποθήκευση, αλλά υποστηρίζουν επίσης την ανάπτυξη νέων φαρμάκων, εμβολίων, και θεραπευτικών διαδικασιών (Bychkov et al., 2017; Ajmani, 2020; Tang et al., 2012). Η εξέλιξη της ιατρικής έρευνας, όπως η γονιδιακή θεραπεία και η ανοσοθεραπεία, απαιτεί την σταθερή και αξιόπιστη αποθήκευση ιστολογικών δειγμάτων και βιολογικών υλικών που να διατηρούν τη λειτουργία τους (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017).

Επιπλέον, η επέκταση της διαθεσιμότητας εμβολίων και φαρμάκων, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια παγκόσμιων υγειονομικών κρίσεων, υπογραμμίζει τη ζωτική σημασία των καταψυκτών ULT (Li et al., 2019; Shabihkhani et al., 2014; Xu et al., 2023) . Ο έλεγχος της θερμοκρασίας και οι συνθήκες αποθήκευσης ενδέχεται να καθορίσουν την αποτελεσματικότητα των εμβολίων, κάτι που έχει γίνει απολύτως εμφανές στην πρόσφατη πανδημία του COVID-19 (Kaushal & Molinolo, 2021; Xu et al., 2023). Οι κλινικές δοκιμές και οι διαδικασίες καταγραφής των ευρημάτων απαιτούν λεπτομερείς και αυστηρές διαδικασίες αποθήκευσης, οι οποίες υποστηρίζονται από την σωστή χρήση καταψυκτών ULT (Li et al., 2019; Shabihkhani et al., 2014) .

Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, η βιομηχανία των καταψυκτών ULT επιδιώκει να ενσωματώσει καινοτομίες που μειώνουν την ενεργειακή κατανάλωση και βελτιώνουν τη χρηστικότητα και την ασφάλεια (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017). Οι εξελίξεις στην τεχνολογία ψύξης, όπως η χρήση πιο αποδοτικών ψυκτικών, οι ολοκληρωμένες λύσεις παρακολούθησης με IoT (Internet of Things), και οι εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης για την πρόβλεψη απαιτήσεων και τη διαχείριση θερμοκρασίας, αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά τη διαχείριση των ερευνητικών και ιατρικών δειγμάτων (Cabra et al., 2017). Επιπλέον, σε ένα ολοένα και πιο παγκοσμιοποιημένο κόσμο, η αποτελεσματικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας στη μεταφορά βιολογικών και φαρμακευτικών δειγμάτων σε μεγάλες αποστάσεις απαιτεί αξιόπιστους και ασφαλείς μηχανισμούς ψύξης (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017; Cabra et al., 2017). Οι καταψύκτες ULT πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμόζονται γρήγορα σε διαφορετικές ανθρωπογενείς και περιβαλλοντικές συνθήκες, παρέχοντας ένα σταθερό και αξιόπιστο περιβάλλον αποθήκευσης, οπουδήποτε και αν ταξιδεύουν αυτά τα ευαίσθητα υλικά (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017).

Η συνεργασία μεταξύ κρατικών και διεθνών οργανισμών μπορεί επίσης να είναι καθοριστική για την εξέλιξη των κανονισμών που σχετίζονται με τη χρήση των καταψυκτών ULT (Farley et al., 2015; Faugeron, 2016). Συνεργασίες αυτές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν την ανάπτυξη κοινών κανονισμών ή προτύπων για την αποθήκευση και τη μεταφορά βιολογικών δειγμάτων. Οι διεθνείς οργανισμοί, όπως ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγειονομικής Πρωτοβουλίας και ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας , μπορούν

να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στην ενίσχυση της διαδικασίας θέσπισης κανονισμών που θα διασφαλίσουν τη συνεχή ακεραιότητα και ασφάλεια των δειγμάτων παγκοσμίως (Berchowicz & Kwon, 2012; Samuel & Sims, 2023).

Η συλλογή και η ανάλυση δεδομένων σχετικά με την αποδοτικότητα και τη σταθερότητα των δειγμάτων που έχουν αποθηκευτεί σε καταψύκτες ULT είναι ίσως μία από τις πιο σημαντικές πτυχές που επηρεάζουν την όλη διαδικασία εξέλιξης νέων θεραπευτικών προσεγγίσεων (Faugeroux, 2016; Ye et al., 2024). Η διάθεση ακριβών και έγκαιρων στοιχείων σχετικά με τη συμπεριφορά των δειγμάτων κατά την αποθήκευση θα μπορούσε να προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για την ξαφνική ανάγκη ποιοτικής και ποσοτικής αναβάθμισης των διαδικασιών αποθήκευσης (Guilherme et al., 2022; Faugeroux, 2016; Ye et al., 2024).

Οι καταψύκτες ULT τελούν υπό την επήρεια των εθνικών και διεθνών πολιτικών υγείας (Guilherme et al., 2022). Η ισχυρή υποστήριξη από κυβερνητικούς οργανισμούς για την υγειονομική περίθαλψη και την έρευνα μπορεί να ενισχύσει την ασφάλεια των βιολογικών δειγμάτων και την ετοιμότητα του τομέα της υγειονομικής φροντίδας για την αντιμετώπιση εξαιρετικών περιστατικών (Guilherme et al., 2022; Faugeroux, 2016; Ye et al., 2024). Η ανάπτυξη πολιτικών που προάγουν την έρευνα και τον έλεγχο των καταψυκτών ULT είναι αναγκαία για τη διασφάλιση της απόκρισης σε τυχόν υγειονομικές κρίσεις (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017; Cabra et al., 2017). Επίσης, στο πλαίσιο της υγειονομικής περίθαλψης, οι καταψύκτες ULT αναδεικνύονται ως το θεμέλιο μιας ευρύτερης διασύνδεσης ανάμεσα στην υγεία και την τεχνολογία (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017; Cabra et al., 2017). Αυτές οι συσκευές δεν εξυπηρετούν απλώς λειτουργικές ανάγκες, αλλά αποτελούν και κλειδί για καινοτόμες θεραπείες και τη διατήρηση της δημόσιας υγείας (Berchowicz & Kwon, 2012; Samuel & Sims, 2023). Οι οργανισμοί καλούνται να αναγνωρίσουν την αξία αυτής της δύσης, τόσο σε επίπεδο πόρων όσο και σε επίπεδο έρευνας και ανάπτυξης, προκειμένου να ενισχύσουν την ικανότητα τους να ανταγωνίζονται σε ένα ταχέως εξελισσόμενο τοπίο (Berchowicz & Kwon, 2012; Samuel & Sims, 2023; Guilherme et al., 2022; Faugeroux, 2016; Ye et al., 2024).

Εν κατακλείδι, πέρα από την τεχνική τους λειτουργία, η επιτυχία που σχετίζεται με την ασφάλεια και την ακεραιότητα των δειγμάτων αποθηκεύεται σε αυτούς τους καταψύκτες έχει ευρύτερες επιπτώσεις (Berchowicz & Kwon, 2012; Samuel & Sims, 2023; Guilherme et al., 2022; Faugeroux, 2016; Ye et al., 2024). Οι καταψύκτες ULT όχι μόνο συμβάλλουν στη διατήρηση πολύτιμων δειγμάτων, αλλά προωθούν και την πρόοδο στη ιατρική έρευνα, παρέχοντας μια νοητική γέφυρα μεταξύ της σύγχρονης ιατρικής και των επερχόμενων ανακαλύψεων που μπορεί να αλλάξουν τη ροή της ανθρώπινης ιατρικής. Η επένδυση σε καταψύκτες ULT είναι, επομένως, μια στρατηγική επιλογή που επηρεάζει άμεσα την ικανότητα της επιστημονικής κοινότητας να προχωρά σε αποφάσεις και καινοτομίες που θα βελτιώσουν την ποιότητα ζωής και την υγεία του πληθυσμού (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017; Cabra et al., 2017). Η διαρκής πρόοδος και εξέλιξη στον τομέα αυτών των βιομηχανιών και ερευνητικών εργασιών ενδέχεται να

καθορίσει την επόμενη γενιά θεραπειών και λύσεων που θα αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις της υγειονομικής περίθαλψης του αύριο (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017; Cabra et al., 2017; Berchowitz & Kwon, 2012; Faugeron, 2016; Ye et al., 2024). Οι καταψύκτες ULT δεν είναι απλώς εργαλεία αποθήκευσης. Είναι φάροι καινοτομίας, που φωτίζουν το δρόμο προς προόδους που θα μπορούσαν να σώσουν ζωές και να μεταμορφώσουν τη ζωή εκατομμυρίων ανθρώπων σε ολόκληρο τον πλανήτη (Bao & Zhao, 2016; Berchowitz & Kwon, 2012; Samuel & Sims, 2023; Guilherme et al., 2022; Faugeron, 2016; Ye et al., 2024). Η σημασία που αποδίδεται στην τεχνολογία της χαμηλής θερμοκρασίας αναδεικνύει τη στενή σύνδεση μεταξύ της επιστήμης και της κοινωνίας, καθώς οι επιστημονικές ανακαλύψεις και εξελίξεις συνεχίζουν να επηρεάζουν θετικά τη δημόσια υγεία και την ευημερία (Bao & Zhao, 2016; Bychkov et al., 2017; Cabra et al., 2017; Berchowitz & Kwon, 2012; Samuel & Sims, 2023; Guilherme et al., 2022; Faugeron, 2016; Ye et al., 2024).

2.5.2. Μικροβιολογία και Βιολογία Σύνθεσης

Στον τομέα της μικροβιολογίας, οι ULT καταψύκτες χρησιμοποιούνται ευρέως για την αποθήκευση μικροβιακών καλλιεργειών και άλλων βιολογικών παρασκευών (Isaacs et al., 2017; Karim & Jewett, 2018; Landor et al., 2024). Η σωστή αποθήκευση των καλλιεργειών σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της βιωσιμότητάς τους και τη δυνατότητα πραγματοποίησης μελλοντικών πειραμάτων (Isaacs et al., 2017; She & Petti, 2015; Hutchison et al., 2019). Οι βιολόγοι και οι μικροβιολόγοι χρειάζονται ασφαλή αποθήκευση για τα δείγματα τους, προκειμένου να διασφαλίσουν ότι οι καλλιέργειες διατηρούν τις αναγκαίες βιολογικές τους ιδιότητες και τη δυνατότητα ανάπτυξης (She & Petti, 2015; Hutchison et al., 2019).

Η χρήση ULT καταψυκτών καθιστά δυνατή την αποθήκευση των μικροβιακών καλλιεργειών για εκτεταμένες χρονικές περιόδους χωρίς την απώλεια της βιολογικής τους δραστηριότητας (Isaacs et al., 2017; She & Petti, 2015; Hutchison et al., 2019). Η ικανότητα διατήρησης των καλλιεργειών σε θερμοκρασίες σημαντικά κάτω από το μηδέν παρέχει τη δυνατότητα διεξαγωγής πειραμάτων με αξιόπιστα αποτελέσματα, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για την ανακάλυψη νέων φαρμάκων, εμβολίων και βιοτεχνολογικών προϊόντων (Landor et al., 2024; She & Petti, 2015; Hutchison et al., 2019).

Επιπλέον, οι ULT καταψύκτες επιτρέπουν στους ερευνητές να διατηρούν τη γενετική πολυμορφία των μικροβιακών και φυτικών ειδών, βοηθώντας έτσι στη μελέτη της εξελικτικής βιολογίας και της οικολογίας (Karim & Jewett, 2018; Landor et al., 2024). Αυτές οι εφαρμογές όχι μόνο συμβάλλουν στην κατανόηση των βιολογικών διαδικασιών, αλλά και παρέχουν κρίσιμα στοιχεία για τη βιοποικιλότητα και τη διαχείριση των φυσικών πόρων (Isaacs et al., 2017; Karim & Jewett, 2018; Hutchison et al., 2019).

2.5.3. Φαρμακογενετική και Γενετική Έρευνα

Η φαρμακογενετική και η γενετική έρευνα αποτελούν άλλους βασικούς τομείς όπου οι ULT καταψύκτες έχουν αναδειχθεί σε ζωτική σημασία (Chen et al., 2018; Bruinenberg et al., 2014; Kamenski

et al., 2020; Wang et al., 2018; Nasarabadi et al., 2018). Η αποθήκευση και η μελέτη γενετικού υλικού αποτελούν θεμέλιο για την ανακάλυψη νέων θεραπειών και την κατανόηση των γενετικών παραγόντων που επηρεάζουν τη νόσο και την υγεία (Chen et al., 2018; Wang et al., 2018; Nasarabadi et al., 2018). Οι ULT καταψύκτες είναι κρίσιμοι για τη διατήρηση DNA, RNA και άλλων γενετικών δειγμάτων, που απαιτούν αυστηρούς ελέγχους θερμοκρασίας για την αποφυγή αλλοίωσης (Kamenski et al., 2020; Wang et al., 2018; Nasarabadi et al., 2018).

Η σωστή αποθήκευση των γενετικών δειγμάτων είναι απαραίτητη για την εγκυρότητα των πειραμάτων και των αποτελεσμάτων. Αυτά τα δείγματα μπορεί να προέρχονται από κλινικές μελέτες, βιοτράπεζες ή ερευνητικά έργα και συχνά απαιτούν συνθήκες αποθήκευσης που διασφαλίζουν την απόλυτη ακεραιότητά τους (Wang et al., 2018; Nasarabadi et al., 2018). Ωστόσο, εκτός από την αποθήκευση, οι ULT καταψύκτες συμβάλλουν και στην ανάλυση αυτών των δειγμάτων, επιτρέποντας στους επιστήμονες να εκτελούν πολύπλοκες πειραματικές διαδικασίες, όπως η PCR (αλυσιδωτή αντίδραση πολυμεράσης), η αλληλούχιση DNA και η ανάλυση μεταγραφωμάτων (Chen et al., 2018; Wang et al., 2018; Nasarabadi et al., 2018). Αυτές οι αναλύσεις συμβάλλουν στην κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τις γενετικές ασθένειες και την αντίσταση σε φαρμακευτικές θεραπείες, διευκολύνοντας έτσι την ανάπτυξη υποστηρικτικών στρατηγικών για την επιτυχία της ιατρικής και της φαρμακευτικής (Chen et al., 2018; Wang et al., 2018; Nasarabadi et al., 2018).

Η φαρμακογενετική είναι περισσότερο σχετική από ποτέ, καθώς εξελίσσεται συνεχώς η μέθοδος προσαρμογής θεραπειών βασισμένων στα ατομικά γενετικά προφίλ των ασθενών (Chen et al., 2018; Bruinenberg et al., 2014; Kamenski et al., 2020; Wang et al., 2018; Nasarabadi et al., 2018). Οι ULT καταψύκτες διασφαλίζουν τη διαρκή συντήρηση του γενετικού υλικού, γεγονός που δημιουργεί προϋποθέσεις για την προσωπική ιατρική, εξασφαλίζοντας ότι οι ασθενείς λαμβάνουν θεραπείες που είναι περισσότερο αποτελεσματικές και ασφαλείς για αυτούς (Chen et al., 2018; Bruinenberg et al., 2014; Kamenski et al., 2020; Wang et al., 2018; Nasarabadi et al., 2018).

2.5.4. Ανάλυση Απαιτήσεων Αποθήκευσης ULT για Διάφορους Τύπους Προϊόντων

Η αποθήκευση σε υπερβολικά χαμηλές θερμοκρασίες αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στους τομείς των φαρμάκων, της βιοιατρικής, της διατήρησης τροφίμων και της έρευνας, προστατεύοντας την ακεραιότητα και την αποτελεσματικότητα διάφορων προϊόντων (Kamenski et al., 2020; Wang et al., 2018; Nasarabadi et al., 2018; She & Petti, 2015). Με τη ταχεία πρόοδο της τεχνολογίας, η ζήτηση για αποτελεσματικές λύσεις αποθήκευσης έχει αυξηθεί, ιδιαίτερα για ευαίσθητα υλικά όπως φαρμακευτικά προϊόντα, βιολογικά δείγματα και προϊόντα τροφίμων (Kamenski et al., 2020; Nasarabadi et al., 2018; Karim & Jewett, 2018; Landor et al., 2024). Ο Πίνακας 2 κατηγοριοποιεί αυτά τα προϊόντα και περιγράφει τις βέλτιστες θερμοκρασίες αποθήκευσης τους, αντανakλώντας τις μοναδικές απαιτήσεις τους για διατήρηση (Nasarabadi et al., 2018; Karim & Jewett, 2018; Landor et al., 2024; She & Petti, 2015).

Τα φαρμακευτικά προϊόντα περιλαμβάνουν μια ευρεία γκάμα φαρμάκων που μπορούν να ταξινομηθούν ως μικροί μοριακοί παράγοντες ή βιολογικά (Kamenski et al., 2020; Wang et al., 2018; Nasarabadi et al., 2018). Οι μικροί μοριακοί παράγοντες συχνά απαιτούν αποθήκευση σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από -20°C έως -80°C (Wang et al., 2018; Nasarabadi et al., 2018). Η διατήρηση αυτών των θερμοκρασιών είναι απαραίτητη για την αποφυγή αποσύνθεσης και τη διατήρηση της αποτελεσματικότητας των φαρμάκων (Bruinenberg et al., 2014; Wang et al., 2018; Nasarabadi et al., 2018). Τα βιολογικά προϊόντα, όπως τα πεπτίδια και οι πρωτεΐνες, απαιτούν συχνά ακόμα αυστηρότερες συνθήκες αποθήκευσης, που κυμαίνονται από -80°C έως -20°C , ανάλογα με τη φόρμουλα τους (Nasarabadi et al., 2018). Οι διακυμάνσεις θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσουν σε αποδόμηση ή απώλεια βιολογικής δραστηριότητας, τονίζοντας τη σημασία των ελεγχόμενων περιβαλλόντων (Chen et al., 2018; Bruinenberg et al., 2014; Nasarabadi et al., 2018).

Η κατηγορία των μεγάλων μορίων περιλαμβάνει κυρίως βιολογικά προϊόντα, όπως τα μονοκλωνικά αντισώματα, οι ανασυνδυασμένες πρωτεΐνες και οι ιογενείς φορείς (Isaacs et al., 2017; Karim & Jewett, 2018; Hutchison et al., 2019). Τα μονοκλωνικά αντισώματα αποτελούν ακρογωνιαίο λίθο στις θεραπευτικές εφαρμογές, όπως η θεραπεία του καρκίνου. Απαιτούν αποθήκευση σε -20°C έως -80°C για να διατηρήσουν την δομική ακεραιότητα και τη λειτουργικότητά τους (Karim & Jewett, 2018; Landor et al., 2024; She & Petti, 2015). Οι ανασυνδυασμένες πρωτεΐνες εμπίπτουν επίσης σε αυτή την κατηγορία με παρόμοιες απαιτήσεις θερμοκρασίας (Landor et al., 2024; Hutchison et al., 2019). Οι περίπλοκες δομές τους είναι ευαίσθητες σε αλλαγές θερμοκρασίας και η εσφαλμένη αποθήκευση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική απώλεια λειτουργίας (Isaacs et al., 2017; Karim & Jewett, 2018; Landor et al., 2024; She & Petti, 2015). Οι ιογενείς φορείς που χρησιμοποιούνται στη γονιδιακή θεραπεία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι και απαιτούν αποθήκευση σε -80°C ή -196°C (υγρού αζώτου) για να διατηρούν την ικανότητα τους να παραδίδουν γενετικό υλικό αποτελεσματικά (Karim & Jewett, 2018; Landor et al., 2024; Hutchison et al., 2019).

Η αποθήκευση βιολογικών δειγμάτων είναι ουσιώδης για την έρευνα, τη διάγνωση και τις κλινικές εφαρμογές. Δείγματα όπως το DNA και το RNA απαιτούν θερμοκρασίες -80°C έως -196°C για να αποτραπεί η αποσύνθεση (Graham et al., 2024; Shehu et al., 2024; Lou et al., 2014). Η ακεραιότητα των νουκλεϊνικών οξέων είναι πρωταρχικής σημασίας για αξιόπιστα αποτελέσματα στη γενετική ανάλυση (Davis et al., 2001; Kaushal & Molinolo, 2021; Graham et al., 2024). Οι πρωτεΐνες, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε διάφορες ερευνητικές εφαρμογές, θα πρέπει να αποθηκεύονται σε θερμοκρασίες -20°C έως $-80^{\circ}\C$ προκειμένου να παραταθεί η διάρκεια ζωής τους και να διατηρηθούν οι λειτουργικές τους ποιότητες (Davis et al., 2001; Kaushal & Molinolo, 2021; Graham et al., 2024; Shehu et al., 2024; Lou et al., 2014).

Τα εμβόλια και ειδικότερα αυτά που χρησιμοποιούν τεχνολογία mRNA, αποτελούν μια κρίσιμη περιοχή στη δημόσια υγεία (Shaw, 2021; Sun et al., 2022; Kasi & Cheralathan, 2021). Τα περισσότερα

εμβόλια απαιτούν αποθήκευση σε θερμοκρασίες -20°C έως -80°C , ενώ τα εμβόλια mRNA απαιτούν συγκεκριμένα θερμοκρασίες όσο το δυνατόν χαμηλότερες από -80°C έως -60°C , αντανakλώντας τη λεπτή τους φύση και την ευαισθησία τους στη θερμότητα (Shaw, 2021; Sun et al., 2022; Kasi & Cheralathan, 2021). Αυτές οι απαιτήσεις αποθήκευσης είναι καθοριστικές για την αποτελεσματικότητα των εμβολίων και την πρόληψη πιθανών παρενεργειών (Shaw, 2021; Sun et al., 2022; Kasi & Cheralathan, 2021).

Τα προϊόντα αίματος είναι ζωτικής σημασίας για μεταγγίσεις και ιατρικές διαδικασίες (Greening et al., 2010; Middelburg et al., 2011; Sperling et al., 2019; Bakaltcheva & Reid, 2003; Hess, 2010). Το ολόκληρο αίμα μπορεί να αποθηκευτεί σε -80°C ή χαμηλότερα, ενώ τα αιμοπετάλια αποθηκεύονται στους 4°C για βραχυχρόνια ανάγκη, αλλά απαιτούν -80°C για μακροχρόνια αποθήκευση (Greening et al., 2010; Middelburg et al., 2011; Sperling et al., 2019; Bakaltcheva & Reid, 2003; Hess, 2010). Αυτή η παραλλακτικότητα υπογραμμίζει τη σημασία ακριβών συνθηκών αποθήκευσης για να διασφαλιστεί η διαθεσιμότητα ασφαλών και αποτελεσματικών προϊόντων αίματος, αναγνωρίζοντας την ανάγκη διασφάλισης της ποιότητας και της ασφάλειας κατά τη διάρκεια της σύνθετης διαδικασίας αποθήκευσης και διαχείρισης (Greening et al., 2010; Middelburg et al., 2011; Sperling et al., 2019; Bakaltcheva & Reid, 2003; Hess, 2010).

Ο τομέας της καλλιέργειας κυττάρων είναι εκτενής και περιλαμβάνει διάφορους τύπους κυττάρων, καθένας με συγκεκριμένες απαιτήσεις αποθήκευσης (Du et al., 2019; Hunt, 2019; Kao et al., 2011; Sugrue et al., 2009). Κυτταρικές σειρές, κύτταρα αναστολής και βλαστοκύτταρα απαιτούν γενικά υπερβολικά χαμηλές συνθήκες αποθήκευσης που κυμαίνονται από -80°C έως -196°C (Du et al., 2019; Hunt, 2019; Kao et al., 2011; Sugrue et al., 2009). Αυτό αποδεικνύει τη ευαισθησία των ζωντανών κυττάρων, όπου η εσφαλμένη αποθήκευση θα μπορούσε να οδηγήσει σε θάνατο των κυττάρων ή στην απώλεια της βιωσιμότητάς τους (Du et al., 2019; Hunt, 2019; Kao et al., 2011; Sugrue et al., 2009).

Η διατήρηση δειγμάτων ιστού είναι κρίσιμη για ιστολογικές μελέτες, παθολογία και ιατρική έρευνα (Troyer, 2008; Mage et al., 2007). Τα φρέσκα κατεψυγμένα δείγματα ιστού και άλλα δείγματα ιστού είναι καλύτερα αποθηκευμένα σε θερμοκρασίες -80°C έως -196°C , που βοηθούν στη διατήρηση της κυτταρικής αρχιτεκτονικής και της βιολογικής λειτουργίας για μελλοντικές αναλύσεις (Troyer, 2008; Mage et al., 2007). Αυτή η διαδικασία αποθήκευσης επιτρέπει στους ερευνητές και τους ιατρούς να λάβουν ακριβείς διαγνώσεις και να μελετήσουν παθολογικές καταστάσεις (Troyer, 2008; Mage et al., 2007).

Το γενετικό υλικό περιλαμβάνει πλασμίδια DNA και ολιγοπαλινδρομικά, που χρησιμοποιούνται ευρέως στη μοριακή βιολογία (Wolf et al., 2010; Zimkus & Ford, 2014; ISBER, 2008). Αυτά τα υλικά απαιτούν συνεπή αποθήκευση σε θερμοκρασίες -80°C έως -196°C για να αποτραπεί η αποσύνθεση και να διευκολυνθούν αξιόπιστα πειραματικά αποτελέσματα (Wolf et al., 2010; Zimkus & Ford, 2014; ISBER, 2008). Ο έλεγχος της ποιότητας αυτού του γενετικού υλικού είναι κρίσιμος για την ακρίβεια και την αξιοπιστία των ερευνητικών αποτελεσμάτων (Wolf et al., 2010; Zimkus & Ford, 2014; ISBER, 2008).

Η αποθήκευση δειγμάτων έρευνας είναι θεμελιώδης για τη διασφάλιση της ακεραιότητας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων (Harada et al., 2016; Elliott & Halbert, 2005; Li et al., 2012). Για τα δείγματα περιβάλλοντος, συνιστάται αποθήκευση σε θερμοκρασία -80°C , προκειμένου να διατηρηθούν οι φυσικές τους ιδιότητες και να αποτραπεί η βιολογική ή χημική τους αλλοίωση (Harada et al., 2016; Elliott & Halbert, 2005; Li et al., 2012). Παρόμοιες συνθήκες ισχύουν και για τα κλινικά δείγματα, όπου η αποθήκευση στους -80°C εξασφαλίζει τη σταθερότητα και την ποιότητα των βιολογικών αναλύσεων (Harada et al., 2016; Elliott & Halbert, 2005; Li et al., 2012). Αντίθετα, οι πειραματικές παρατηρήσεις απαιτούν μεγαλύτερη ευελιξία στην αποθήκευση, με θερμοκρασίες που κυμαίνονται από -80°C έως -196°C , ανάλογα με τη φύση των δειγμάτων και τις ειδικές απαιτήσεις των πειραμάτων (Harada et al., 2016; Elliott & Halbert, 2005; Li et al., 2012). Αυτές οι συνθήκες αποθήκευσης επιτρέπουν τη διατήρηση των δειγμάτων σε βέλτιστες συνθήκες για μελλοντική ανάλυση και επεξεργασία (Harada et al., 2016; Elliott & Halbert, 2005; Li et al., 2012).

Συμπερασματικά, ο Πίνακας 2 παρέχει μια συνοπτική επισκόπηση των ποικίλων τύπων προϊόντων που απαιτούν αποθήκευση σε υπερβολικά χαμηλές θερμοκρασίες (ULT) και τις συγκεκριμένες απαιτήσεις θερμοκρασίας τους (Harada et al., 2016; Elliott & Halbert, 2005; Li et al., 2012). Η ανάλυση υπογραμμίζει τη ευαίσθητη φύση κάθε τύπου προϊόντος, τονίζοντας τον καθοριστικό ρόλο που διαδραματίζει η αποθήκευση ULT στη διατήρηση της ακεραιότητας και της αποτελεσματικότητας των προϊόντων (Harada et al., 2016; Elliott & Halbert, 2005; Li et al., 2012). Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, η βελτίωση των λύσεων αποθήκευσης και των συστημάτων παρακολούθησης θα καταστεί ολοένα και πιο ζωτικής σημασίας σε διάφορες βιομηχανίες, ιδίως στη φαρμακευτική και στη βιοτεχνολογία, όπου οι απαιτήσεις απόδοσης των προϊόντων είναι υψηλές (Harada et al., 2016; Elliott & Halbert, 2005; Li et al., 2012; Elliott & Halbert, 2005; Li et al., 2012).

Πίνακας 2 Είδη Προϊόντων και Αποθήκευση		
Κατηγορία	Τύπος προϊόντος	Τυπική θερμοκρασία αποθήκευσης σε υπερβολικά χαμηλές θερμοκρασίες (ULT)
Φαρμακευτικά προϊόντα	- Μικροί μοριακοί φάρμακα	-20°C έως -80°C
	- Βιολογικά (π.χ., πεπτίδια)	-80°C έως -20°C ανάλογα με τη σταθερότητα
Μεγάλοι Μοριακοί / Βιολογικά	- Μονοκλωνικά αντισώματα	-20°C έως -80°C
	- Ανασυνδυασμένες πρωτεΐνες	-20°C έως -80°C
	- Θεραπευτικές πρωτεΐνες	-80°C
	- Ενζυμα	-20°C έως -80°C
	- Ιοί	-80°C ή -196°C
	- Αντισώματα κατά των σειρών RNA	-20°C έως -80°C
Βιολογικά δείγματα	- DNA/RNA	-80°C έως -196°C
	- Πρωτεΐνες	-20°C έως -80°C
Εμβόλια	- Εμβόλια mRNA	-80°C έως -60°C
Προϊόντα αίματος	- Ολόκληρο αίμα	-80°C ή ψύξη (<4°C)
	- Αιμοπετάλια	4°C για βραχυχρόνια αποθήκευση; -80°C για μακροχρόνια αποθήκευση
Καλλιέργεια κυττάρων	- Κυτταρικές σειρές	-80°C έως -196°C
	- Εμβρυϊκά/βλαστοκύτταρα	-80°C έως -196°C
Δείγματα ιστού	- Φρέσκα κατεψυγμένα δείγματα	-80°C έως -196°C
	- Δείγματα παραφίνης (φορμαλίνη)	-20°C έως -80°C (για μακροχρόνια αποθήκευση)
Γενετικό υλικό	- DNA πλασμίδιο	-80°C
	- Ολιγοπαλινδρομικά	-20°C έως -80°C
Δείγματα έρευνας	- Δείγματα περιβάλλοντος	-80°C
	- Κλινικά δείγματα	-80°C
	- Πειραματικές παρατηρήσεις	-80°C έως -196°C

2.6. Πιστοποίηση Συστημάτων ULT

2.6.1. Κρίσιμοι παράγοντες απόδοσης κατά την Πιστοποίηση

Η αξιολόγηση της ομοιομορφίας θερμοκρασίας και της απόδοσης συστημάτων ψύξης είναι ένα καίριο στοιχείο στην εγγύηση ποιότητας για πολλούς τομείς, όπως η φαρμακευτική, η βιολογική και η βιομηχανία τροφίμων (ISPE 2016; ISPE 2019). Τα συστήματα ψύξης, ιδίως αυτά που λειτουργούν σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, απαιτούν αυστηρές διαδικασίες επικύρωσης για να διασφαλιστεί ότι πληρούν τις κανονιστικές απαιτήσεις και τις προδιαγραφές που συνδέονται με την αποθήκευση ευπαθών υλικών (WHO, 2025). Η διαχείριση των λειτουργιών και των εγκαταστάσεων σε πολυάσχολες βιομηχανίες, όπως η φαρμακευτική και η βιολογική, είναι καθοριστική για την αποτελεσματικότητα και τη συμμόρφωση των διαδικασιών σύμφωνα με τις κανονιστικές απαιτήσεις (ISPE 2016; ISPE 2019; WHO 2014). Επομένως, η αποθήκευση κρίσιμων προϊόντων και δειγμάτων είναι απαραίτητη σε πολλές βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της βιοϊατρικής έρευνας, της υγειονομικής περίθαλψης, της συντήρησης τροφίμων και της κατασκευής (ISPE 2016; ISPE 2019). Η απόδοση των καταψυκτών Ultra-Low Temperature (ULT) είναι καθοριστικής σημασίας για τη διατήρηση της ακεραιότητας και της μακροζωίας αυτών των προϊόντων, τα οποία απαιτούν σταθερές εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες για την πρόληψη της υποβάθμισης και τη διατήρηση της βιωσιμότητάς τους (ISPE 2016; ISPE 2019). Κατά την αξιολόγηση των καταψυκτών ULT, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφορες βασικές μετρήσεις απόδοσης, όπως σταθερότητα θερμοκρασίας, ομοιομορφία θερμοκρασίας, διακύμανση αιχμής, χρόνος ανάκτησης, ενεργειακή απόδοση, θόρυβος λειτουργίας και συνολική αντοχή και αξιοπιστία (ISPE 2016; ISPE 2019).

Η σταθερότητα θερμοκρασίας αναφέρεται στην ικανότητα ενός καταψύκτη ULT να διατηρεί σταθερή θερμοκρασία με την πάροδο του χρόνου με ελάχιστες διακυμάνσεις (ISPE 2016; ISPE 2019). Αυτή η σταθερότητα είναι ζωτικής σημασίας για την πρόληψη ζημιών σε ευαίσθητα προϊόντα. Για παράδειγμα, στη φαρμακευτική βιομηχανία, η αστάθεια της θερμοκρασίας μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα εμβόλια και τα βιολογικά προϊόντα, οδηγώντας σε αναποτελεσματικές θεραπείες (WHO 2014; WHO 2015). Οι καταψύκτες ULT υψηλής ποιότητας πρέπει να είναι κατασκευασμένοι για να παρέχουν σταθερές χαμηλές θερμοκρασίες, προστατεύοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα ευαίσθητων υλικών από την υποβάθμιση που προκαλείται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας (ISPE 2016; ISPE 2019; WHO 2014; WHO 2015).

Η ομοιομορφία θερμοκρασίας διασφαλίζει ότι ολόκληρος ο χώρος αποθήκευσης στον καταψύκτη ULT διατηρεί σταθερή θερμοκρασία (Gumapas et al., 2013; Ye et al., 2024). Η αποτελεσματική μόνωση και τα καλά σχεδιασμένα συστήματα ροής αέρα βοηθούν στην εξάλειψη των ζεστών και κρύων σημείων μέσα στον θάλαμο του καταψύκτη, επιτρέποντας την ασφαλή αποθήκευση των προϊόντων σε οποιαδήποτε τοποθεσία (Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μεγαλύτερους καταψύκτες, όπου μπορεί να προκύψουν σημαντικές διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του κέντρου και της περιφέρειας (Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023). Η διατήρηση εξαιρετικής ομοιομορφίας θερμοκρασίας είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση ότι όλα τα δείγματα και τα προϊόντα λαμβάνουν τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες, μειώνοντας τον κίνδυνο τοπικής υποβάθμισης (Saeed et al., 2023; Liu et al., 2023).

Η διακύμανση αιχμής είναι ένας κρίσιμος παράγοντας απόδοσης, που αντιπροσωπεύει τη μέγιστη απόκλιση από την καθορισμένη θερμοκρασία σε κάθε δεδομένη στιγμή, συμπεριλαμβανομένων των ακραίων, αν και σύντομων, διακυμάνσεων (Liu et al., 2023; Tan et al., 2022). Ένας καταψύκτης ULT είναι απαραίτητος για βιομηχανίες που χειρίζονται εξαιρετικά ευαίσθητα προϊόντα, όπως βιοτεχνολογία και φαρμακευτικά προϊόντα, όπου ακόμη και μικρές αλλαγές θερμοκρασίας μπορούν να οδηγήσουν σε μειωμένη αποτελεσματικότητα ή αλλοίωση (Liu et al., 2023; Tan et al., 2022). Οι εγκαταστάσεις που απαιτούν αυστηρή επικύρωση του εξοπλισμού τους πρέπει να δώσουν προτεραιότητα στους καταψύκτες ULT με αυστηρές προδιαγραφές για να διασφαλιστεί η βέλτιστη διατήρηση του κρίσιμου αποθέματός τους (Liu et al., 2023; Tan et al., 2022).

Ο χρόνος ανάκτησης ανοίγματος πόρτας είναι μια σημαντική μέτρηση, η οποία μετράει πόσο γρήγορα ένας καταψύκτης μπορεί να επιστρέψει στην καθορισμένη θερμοκρασία μετά το άνοιγμα (ISPE 2016; ISPE 2019). Οι γρήγοροι χρόνοι ανάκτησης είναι ζωτικής σημασίας σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται συχνή πρόσβαση, όπως ερευνητικά εργαστήρια και εγκαταστάσεις αποθήκευσης φαρμακευτικών προϊόντων (ISPE, 2016; ISPE, 2019). Η ελαχιστοποίηση της έκθεσης ευαίσθητων προϊόντων σε θερμότερο αέρα κατά το άνοιγμα των θυρών βοηθά στην αποφυγή της απόψυξης και της υποβάθμισης (ISPE, 2016; ISPE, 2019). Οι καταψύκτες ULT που έχουν σχεδιαστεί για γρήγορη ανάκτηση είναι ιδιαίτερα πλεονεκτικοί σε ρυθμίσεις υψηλής απόδοσης (ISPE 2016; ISPE 2019).

Η ενεργειακή απόδοση είναι ολοένα και πιο σημαντική δεδομένου του σημαντικού ενεργειακού κόστους που σχετίζεται με τη λειτουργία πολλαπλών καταψυκτών ULT (Li et al., 2024; Legett, 2014). Η επιλογή ενεργειακά αποδοτικών μοντέλων μπορεί να μειώσει σημαντικά τα λειτουργικά έξοδα και να υποστηρίξει πρωτοβουλίες βιωσιμότητας εντός των οργανισμών (Li et al., 2024; Faugeron, 2016). Οι καταψύκτες ULT που χρησιμοποιούν φυσικά ψυκτικά μέσα και συμπιεστές μεταβλητής ταχύτητας μπορούν να βελτιστοποιήσουν την απόδοση ψύξης ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση ενέργειας (Faugeron, 2016). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα παλαιότερα μοντέλα που μπορεί να βασίζονται σε συμβατικά ψυκτικά μέσα και συμπιεστές σταθερής ταχύτητας, οδηγώντας σε υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας και υψηλότερο κόστος (Faugeron, 2016; Butt et al., 2024).

Η ποιότητα κατασκευής και η ανθεκτικότητα των καταψυκτών ULT είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση μακροπρόθεσμης απόδοσης και αξιοπιστίας (Legett, 2014; Farley et al., 2015). Αυτοί οι καταψύκτες πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από υλικά υψηλής ποιότητας ικανά να αντέχουν στις ακαμψίες της συνεχούς χρήσης (Legett, 2014; Farley et al., 2015). Οι στιβαρές εξωτερικές δομές και τα ενισχυμένα εσωτερικά εξαρτήματα συμβάλλουν στη μακροζωία των μονάδων ενώ ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο βλαβών (Legett, 2014; Farley et al., 2015). Τα προηγμένα συστήματα παρακολούθησης και συναγερμού που παρέχουν δεδομένα απόδοσης σε πραγματικό χρόνο είναι επίσης βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία επιτρέπουν στους χρήστες να αντιμετωπίζουν γρήγορα τυχόν ζητήματα που ενδέχεται να απειλήσουν την ακεραιότητα των αποθηκευμένων προϊόντων τους (Legett, 2014; Farley et al., 2015).

Συμπερασματικά, η απόδοση των καταψυκτών εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας είναι κρίσιμη για την ασφαλή αποθήκευση μιας ποικιλίας προϊόντων σε πολλούς κλάδους (Legett, 2014; Farley et al., 2015; Faugeron, 2016; Butt et al., 2024). Παράγοντες όπως σταθερότητα θερμοκρασίας, ομοιομορφία, διακύμανση αιχμής, χρόνος ανάκτησης ανοίγματος πόρτας, ενεργειακή απόδοση, θόρυβος λειτουργίας και ανθεκτικότητα πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά κατά την επιλογή ενός καταψύκτη ULT (Legett, 2014; Farley et al., 2015; Faugeron, 2016). Δίνοντας προτεραιότητα σε αυτές τις μετρήσεις απόδοσης, οι οργανισμοί μπορούν να εξασφαλίσουν την ακεραιότητα των κρίσιμων δειγμάτων και προϊόντων τους, ενισχύοντας τελικά τη λειτουργική επιτυχία και προστατεύοντας τη δημόσια υγεία (Farley et al., 2015; Butt et al., 2024).

2.6.2. Κανονισμοί και Πρότυπα Πιστοποίησης

Η ανάπτυξη κρατικών και διεθνών πολιτικών (βλ. Πίνακα 3) μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση της ασφάλειας των βιολογικών δειγμάτων και στην τόνωση της καινοτομίας στον τομέα των καταψυκτών ULT (Hess, 2010; Human Tissue Authority, 2023). Οι ρυθμιστικές αρχές πρέπει να συνεργάζονται με βιομηχανίες και ερευνητικά κέντρα για τη θέσπιση κανονισμών που θα διασφαλίζουν ότι οι καταψύκτες πληρούν τις αυστηρές απαιτήσεις θερμοκρασίας και απόδοσης (ISPE, 2019). Επιπλέον, η υποστήριξη ερευνητικών επιχορηγήσεων και προγραμμάτων μπορεί να προωθήσει την έρευνα για νέα

και βελτιωμένα συστήματα ψύξης, ενισχύοντας έτσι την ανάπτυξη και την εφαρμογή καινοτόμων λύσεων αποθήκευσης (Hess, 2010; Human Tissue Authority, 2023; ISPE, 2019).

Οι καταψύκτες εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας (ULT) είναι κρίσιμα πλεονεκτήματα στη φαρμακοβιομηχανία, ιδιαίτερα για την αποθήκευση ευαίσθητων βιολογικών προϊόντων, εμβολίων και γενετικών υλικών (ISPE, 2019). Αυτοί οι καταψύκτες λειτουργούν σε θερμοκρασίες πολύ κάτω από τους -70°C, διατηρώντας την ακεραιότητα των προϊόντων που διαφορετικά θα μπορούσαν να υποβαθμιστούν γρήγορα (Hess, 2010; Human Tissue Authority, 2023; ISPE, 2019). Δεδομένης της ύψιστης σημασίας των καταψυκτών ULT, ρυθμιστικοί φορείς όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και ο Οργανισμός Τροφίμων και Φαρμάκων των Ηνωμένων Πολιτειών (FDA) έχουν θεσπίσει ολοκληρωμένες οδηγίες για να διασφαλίσουν ότι αυτές οι λύσεις αποθήκευσης πληρούν αυστηρά πρότυπα ασφάλειας, ποιότητας και αποτελεσματικότητας (European Commission, 2011; U.S. Food and Drug Administration, 2024a). Αυτό το δοκίμιο διερευνά αυτά τα ρυθμιστικά πλαίσια, τις περίπλοκες διαδικασίες που εμπλέκονται στην επικύρωση των καταψυκτών ULT και παρέχει πληροφορίες για το πώς η φαρμακευτική βιομηχανία ενσωματώνει αυτά τα πρότυπα σε καθημερινές πρακτικές για την προστασία της παγκόσμιας υγείας (European Commission, 2011; European Parliament & Council, 2000; U.S. Food and Drug Administration, 2024a).

2.6.2.1. Κανονιστικό πλαίσιο της ΕΕ

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέσω των εκτεταμένων κανονιστικών κατευθυντήριων γραμμών της, διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην υπαγόρευση του τρόπου αποθήκευσης των φαρμακευτικών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που απαιτούν συνθήκες ULT.

Ο τόμος 4 του Eudralex περιγράφει τις κατευθυντήριες γραμμές για την ορθή παρασκευαστική πρακτική (GMP) για την παρασκευή και την αποθήκευση φαρμακευτικών προϊόντων (European Commission, 2011). Αυτές οι κατευθυντήριες οδηγίες τονίζουν τη σημασία της διατήρησης ελεγχόμενων περιβαλλόντων αποθήκευσης και επιβάλλουν στον εξοπλισμό όπως οι καταψύκτες ULT να υποβάλλονται σε πιστοποίηση για να διασφαλίζεται ότι λειτουργούν εντός των απαραίτητων παραμέτρων (European Commission, 2011). Οι κατευθυντήριες γραμμές GMP απαιτούν μια αυστηρή αξιολόγηση των συνθηκών αποθήκευσης για την αποφυγή οποιουδήποτε συμβιβασμού στην ποιότητα του προϊόντος (European Commission, 2011).

Οι κατευθυντήριες γραμμές για το GDP (2015/C 95/01) επικεντρώνονται στο στοιχείο της εφοδιαστικής αλυσίδας, τονίζοντας ότι τόσο η αποθήκευση όσο και η μεταφορά διατηρούν την ακεραιότητα του προϊόντος από την κατασκευή έως την παράδοση (European Commission, 2015). Για τους καταψύκτες ULT, αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο διανομής από άκρο σε άκρο μπορεί να διατηρήσει εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες χωρίς απόκλιση, αποφεύγοντας πιθανή αλλοίωση των ευαίσθητων στη θερμοκρασία φαρμακευτικών προϊόντων (European Commission, 2015). Αυτές οι κατευθυντήριες

γραμμές απαιτούν συνεχείς διαδικασίες παρακολούθησης και επικύρωσης για τη διασφάλιση της συμμόρφωσης (European Commission, 2015).

Η οδηγία 2000/54/EK αφορά την προστασία των εργαζομένων από κινδύνους που συνδέονται με την έκθεση σε βιολογικούς παράγοντες, οι οποίοι θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν χειρισμό και αποθήκευση σε καταψύκτες ULT (European Parliament & Council, 2000). Απαιτεί κατάλληλα μέτρα ασφαλείας, διασφαλίζοντας ότι όλο το προσωπικό που χειρίζεται αυτούς τους καταψύκτες είναι επαρκώς εκπαιδευμένο και εξοπλισμένο (European Parliament & Council, 2000). Εν τω μεταξύ, η Οδηγία 2009/41/EK διέπει τη χρήση γενετικά τροποποιημένων οργανισμών (GMO), ορίζοντας επίπεδα περιορισμού που ευθυγραμμίζονται με τις πρακτικές ασφαλούς αποθήκευσης, υπογραμμίζοντας περαιτέρω την ανάγκη για ακριβή έλεγχο θερμοκρασίας που παρέχουν οι καταψύκτες ULT (European Parliament & Council, 2009).

Τέλος, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Φαρμάκων (EMA) προσφέρει επιστημονική καθοδήγηση που συμπληρώνει αυτές τις οδηγίες εστιάζοντας στην ποιότητα των βιολογικών φαρμακευτικών ουσιών που αποθηκεύονται υπό συνθήκες ULT (European Parliament & Council, 2009; WHO, 2014; WHO, 2015). Αν και δεν είναι νομικά δεσμευτικές, αυτές οι συστάσεις επηρεάζουν τις εθνικές απαιτήσεις σε όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ, προωθώντας μια εναρμονισμένη προσέγγιση για την επικύρωση αποθήκευσης ULT (WHO, 2014; WHO, 2015).

2.6.2.2. Ρυθμιστικό Πλαίσιο των ΗΠΑ

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, ο FDA παρέχει ένα ισχυρό ρυθμιστικό πλαίσιο που επιβλέπει τα πρότυπα αποθήκευσης για φαρμακευτικά προϊόντα, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που απαιτούν συνθήκες ULT.

Το Μέρος 11 του Τίτλου 21 CFR είναι κρίσιμο για τη διαχείριση ηλεκτρονικών αρχείων και υπογραφών, τη διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων και την ιχνηλασιμότητα των αρχείων καταγραφής θερμοκρασίας από καταψύκτες ULT (U.S. Food and Drug Administration, 2024a). Αυτό το μέρος απαιτεί αυστηρή εφαρμογή ηλεκτρονικών συστημάτων παρακολούθησης, διασφαλίζοντας ότι όλα τα δεδομένα είναι ασφαλή και αξιόπιστα. Τα μέρη 210 και 211 περιλαμβάνουν κανονισμούς cGMP για φαρμακευτικά προϊόντα, απαιτώντας οι συνθήκες αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένου του εξοπλισμού όπως οι καταψύκτες ULT, να πληρούν αυστηρά λειτουργικά πρότυπα (U.S. Food and Drug Administration, 2024b). Αυτά τα πρότυπα διασφαλίζουν συνεχείς συνθήκες παραγωγής και αποθήκευσης, διασφαλίζοντας την αποτελεσματικότητα του προϊόντος και την ασφάλεια των ασθενών (U.S. Food and Drug Administration, 2024b).

Ο Οδηγός Επιθεώρησης Βιοτεχνολογίας του FDA παρέχει συμπληρωματικά υλικά και αναφορές που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της πολυπλοκότητας της αποθήκευσης βιολογικών προϊόντων (U.S. Food and Drug Administration, 2024a; U.S. Food and Drug Administration, 2024b). Υπογραμμίζει τους απαραίτητους ελέγχους και επιθεωρήσεις στις οποίες πρέπει να υποβληθούν οι εγκαταστάσεις

αποθήκευσης ULT προκειμένου να συμμορφωθούν με τις ρυθμιστικές προσδοκίες (U.S. Food and Drug Administration, 2024a; U.S. Food and Drug Administration, 2024b).

2.6.2.3. Βιομηχανικά πρότυπα και κατευθυντήριες γραμμές

Πέρα από τις κανονιστικές απαιτήσεις, διάφορα βιομηχανικά πρότυπα παρέχουν πρόσθετη καθοδήγηση, διασφαλίζοντας ολοκληρωμένες βέλτιστες πρακτικές στην επικύρωση των καταψυκτών ULT.

Η Αμερικανική Εταιρεία Μηχανολόγων Μηχανικών (ASME) BPE-2014 περιγράφει πρότυπα για τον εξοπλισμό βιοεπεξεργασίας, επηρεάζοντας τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται και επικυρώνονται οι καταψύκτες ULT (The American Society of Mechanical Engineers, 2024). Αυτά τα πρότυπα υποστηρίζουν ένα πλαίσιο για τη διασφάλιση της απόδοσης και της αξιοπιστίας του εξοπλισμού σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Το Πρόγραμμα Συνεργασίας Φαρμακευτικής Επιθεώρησης (PIC/S) προσφέρει κατευθυντήριες γραμμές (PE-009-9 και PE-009-11) που είναι διεθνώς αναγνωρισμένες και διασφαλίζουν ότι τα κράτη μέλη, συμπεριλαμβανομένων των εγκαταστάσεων παραγωγής και εγκαταστάσεις αποθήκευσης, τηρούν πρακτικές υψηλής ποιότητας (Pharmaceutical Inspection Co-operation Scheme, 2023; The American Society of Mechanical Engineers, 2024).

Η International Society for Pharmaceutical Engineering (ISPE) παρέχει βασικούς οδηγούς, όπως τον Οδηγό Βασικής γραμμής για Ενεργά Φαρμακευτικά Συστατικά και τον Οδηγό Καλής Πρακτικής για τη Διαχείριση Ψυχρής Αλυσίδας, που υπογραμμίζουν τις βιομηχανικές τυποποιημένες μεθόδους για την επικύρωση μηχανισμών ελέγχου θερμοκρασίας σε καταψύκτες ULT (ISPE 2016; ISPE 2019; The American Society of Mechanical Engineers, 2024). Αυτά τα έγγραφα τονίζουν τη σημασία της χαρτογράφησης και της παρακολούθησης του θαλάμου, προωθώντας μια συστηματική προσέγγιση για την επιβεβαίωση της ομοιομορφίας της θερμοκρασίας σε όλους τους θαλάμους αποθήκευσης (The American Society of Mechanical Engineers, 2024).

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναθεώρησε τις κατευθυντήριες γραμμές για Good Distribution Practices (GDP), στις 5 Νοεμβρίου 2013 (PIC/S), αντικατοπτρίζοντας τις σημερινές πιο πολύπλοκες αλυσίδες εφοδιασμού (European Commission, 2015). Οι απαιτούμενες συνθήκες αποθήκευσης των φαρμάκων θα πρέπει να διατηρούνται κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης και της μεταφοράς εντός των καθορισμένων ορίων που περιγράφονται από τους παρασκευαστές ή στην εξωτερική συσκευασία (European Commission, 2015). Το GDP τονίζει την κρίσιμη σημασία της διατήρησης της ακεραιότητας της εφοδιαστικής αλυσίδας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διασφάλιση της διατήρησης της ποιότητας των φαρμάκων από την παραγωγή έως την τελική αποθήκευση, διανομή και πώληση, φτάνοντας τελικά στον τελικό χρήστη ή ασθενή (European Commission, 2015). Η αποθήκευση και η μεταφορά φαρμακευτικών και βιολογικών υλικών πρέπει να παρακολουθούνται με συνέπεια χρησιμοποιώντας βαθμονομημένα συστήματα για συνεχή επαλήθευση ή εγκεκριμένα συστήματα αποστολής που βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα διεργασιών (European Commission, 2015, ISPE, 2016). Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση της

παρακολούθησης ως μεθόδου συνεχούς επαλήθευσης και επικύρωσης της διαδικασίας, ενώ παράλληλα χαρακτηρίζει τις εγκαταστάσεις και τον εξοπλισμό, ως μέρος των βασικών πρακτικών καθημερινής επιθεώρησης (European Commission, 2015; ISPE, 2016; ISPE 2019). Επιπλέον, η διατήρηση αυστηρού ελέγχου της θερμοκρασίας σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού αποτελεί πρόκληση και ουσιαστικό καθήκον για τη διατήρηση της ποιότητας των φαρμάκων, ιδίως όταν η ακριβής ρύθμιση της θερμοκρασίας είναι ζωτικής σημασίας (European Commission, 2015; ISPE, 2016; ISPE 2019). Επομένως, η πιστοποίηση χρησιμεύει ως κρίσιμο εργαλείο διασφάλισης ποιότητας στη φαρμακευτική βιομηχανία, αποδεικνύοντας ότι όλες οι εγκαταστάσεις, τα συστήματα και ο εξοπλισμός λειτουργούν σωστά και παρέχουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα (European Commission, 2015; ISPE, 2016; ISPE 2019). Ο χαρακτηρισμός των εγκαταστάσεων αποθήκευσης αποτελεί θεμελιώδη και ευρέως αναγνωρισμένη απαίτηση στις διεθνείς κατευθυντήριες γραμμές (European Commission, 2015; ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Η ανάπτυξη κρατικών και διεθνών πολιτικών είναι καίριας σημασίας για τη διασφάλιση της ασφάλειας των βιολογικών δειγμάτων και την ενίσχυση της καινοτομίας στον τομέα των καταψυκτών ULT (ISPE, 2016; ISPE 2019). Καθώς η αποθήκευση ευαίσθητων βιολογικών προϊόντων, εμβολίων και γενετικών υλικών στη φαρμακοβιομηχανία απαιτεί αυστηρές κανονιστικές ρυθμίσεις, οι συνεργασίες μεταξύ ρυθμιστικών αρχών, βιομηχανιών και ερευνητικών κέντρων είναι απαραίτητες για την καθοδήγηση της εφαρμογής κανόνων που να πληρούν τις σύγχρονες απαιτήσεις (European Commission, 2015). Συγκεκριμένα, ο ρόλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης και του FDA είναι κρίσιμος στην εγκαθίδρυση και την εφαρμογή κανονιστικών πλαισίων που διασφαλίζουν την ποιότητα και την ασφάλεια των προϊόντων σε όλα τα στάδια – από την παραγωγή μέχρι τη διανομή και την τελική αποθήκευση (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).. Η τήρηση των κατευθυντήριων γραμμών που παρέχονται από τους οργανισμούς αυτούς, καθώς και η εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών στη διαχείριση των καταψυκτών ULT, εξασφαλίζουν τη συνέπεια και την ακεραιότητα των δειγμάτων (European Commission, 2015; ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Επιπλέον, η υποστήριξη ερευνητικών επιχορηγήσεων και η προώθηση καινοτόμων λύσεων ψύξης οδηγούν σε συνεχή βελτίωση των συστημάτων αποθήκευσης, γεγονός που είναι απαραίτητο για την πρόοδο της ιατρικής και της επιστήμης (European Commission, 2015; ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Συνολικά, η ενορχηστρωμένη δράση των ρυθμιστικών αρχών και των βιομηχανικών φορέων, σε συνδυασμό με την υποστήριξη της έρευνας, είναι ασυγκρίτως χρήσιμη για την ανάπτυξη και την εφαρμογή αποδοτικών και ασφαλών λύσεων αποθήκευσης (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτό διασφαλίζει ότι οι καταψύκτες ULT διαδραματίζουν έναν δακτυλιοειδή ρόλο στην προστασία της παγκόσμιας υγειονομικής περίθαλψης, προάγοντας τη διατήρηση της ποιότητας των βιολογικών προϊόντων και συμβάλλοντας στη δημόσια υγεία (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Εξετάζοντας τις ρυθμιστικές διαδικασίες και τη συμμόρφωση, ενισχύεται η εκτίμηση της ανάγκης για

συνεχή εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση στον τομέα της φαρμακευτικής και βιολογικής αποθήκευσης, διασφαλίζοντας έτσι ένα πιο ασφαλές και αποτελεσματικό μέλλον στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Πίνακας 3 Κανονιστικές απαιτήσεις		
Πηγή	Τίτλος Κανονισμού	Άρθρο
EU Commission	Eudralex; Volume 4 GMP Guidelines	Volume 4
EU Commission	Good Distribution Practice of active substances for medicinal products for human use (2015/C 95/01)	2015/C 95/01
Directive EU	Directive 2000/54/EC Protection of Workers From Risks Related to Exposure to Biologic Agents at Work	2000/54/EC Annex V&VI
	Directive 2009/41/EC on the contained use of genetically modified micro-organisms	2009/41/EC
EU EMA	European Medicines Agency scientific guidance documents on biological drug substances	N/A
US FDA	Title 21 Code of Federal Regulations, Electronic Records & Electronic Signatures	Part 11
	Title 21 Code of Federal Regulations, Current Good Manufacturing Practice, Processing, Packing or Holding of Drugs; General	Part 210
	Title 21 Code of Federal Regulations, Current Good Manufacturing Practice for Finished Pharmaceuticals	Part 211
	Biotechnology Inspection Guide Reference Materials and Training Aids	N/A
ASME	Bioprocessing Equipment	ASME BPE-2014
PIC/S	Guide to Good Manufacturing Practice for Medicinal Products, Part I	PE-009-9
	Guide to Good Manufacturing Practice for Medicinal Products, Part II	PE-009-11
ISPE	Baseline Guide: Active Pharmaceutical Ingredients Revision to Bulk Pharmaceutical Chemicals	Volume 1, 2 nd
ISPE	Baseline Guide: Biopharmaceuticals	Volume 6, 2 nd
	Baseline Guide: Commissioning and Qualification	Volume 5, 2 nd
	Good Practice Guide -Cold Chain Management	2011
	Good Practice Guide – Controlled Temperature Chamber Mapping and Monitoring	2016

2.6.3. Διαδικασία Πιστοποίησης Καταψυκτών ULT

Η διαδικασία πιστοποίησης για τους καταψύκτες ULT είναι πολύπλευρη, διασφαλίζοντας ότι ο εξοπλισμός όχι μόνο πληροί τα αρχικά κριτήρια απόδοσης αλλά συνεχίζει να λειτουργεί αποτελεσματικά υπό συνθήκες λειτουργίας. Η επικύρωση κρίσιμου εξοπλισμού, όπως οι καταψύκτες Ultra-Low Temperature (ULT) είναι αναπόσπαστο στοιχείο για τη διασφάλιση της ακεραιότητας και της ασφάλειας των βιολογικών δειγμάτων, των φαρμακευτικών προϊόντων και άλλων υλικών που είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Η διαδικασία επικύρωσης αποτελείται κυρίως από τρία βασικά στάδια, (i) Πιστοποίηση εγκατάστασης (Installation Qualification-IQ), (ii) Πιστοποίηση

λειτουργίας (Operational Qualification -OQ) και (iii) Πιστοποίηση απόδοσης (Performance Qualification – PQ) (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Κάθε μία από αυτές τις φάσεις εξυπηρετεί έναν ξεχωριστό σκοπό στον κύκλο ζωής της επικύρωσης, βοηθώντας τους οργανισμούς να διατηρήσουν τη συμμόρφωση με τα κανονιστικά πρότυπα και τις βέλτιστες πρακτικές σε εργαστηριακά και φαρμακευτικά περιβάλλοντα (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτή η ενότητα παρέχει μια λεπτομερή περιγραφή των δραστηριοτήτων IQ, OQ και PQ κατά την επικύρωση ενός καταψύκτη ULT. Πριν εμβαθύνουμε στις ιδιαιτερότητες του IQ, του OQ και του PQ, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε τον ρόλο των καταψυκτών ULT σε εργαστηριακά και κλινικά περιβάλλοντα (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Η θερμοκρασία αποθήκευσης πρέπει να ελέγχεται επακριβώς για να αποφευχθεί η υποβάθμιση ή η απώλεια της αποτελεσματικότητας αυτών των υλικών (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Επομένως, η αποτελεσματική επικύρωση του συστήματος καταψύκτη ULT είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση ότι η απόδοση πληροί τις προδιαγραφές που απαιτούνται για τη συμμόρφωση με ρυθμιστικούς φορείς, όπως ο FDA, ο EMA και άλλοι (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

2.6.3.1. Πιστοποίηση εγκατάστασης (IQ)

Η φάση Installation Qualification (IQ) είναι το πρώτο βήμα στη διαδικασία επικύρωσης και περιλαμβάνει την επαλήθευση ότι ο καταψύκτης ULT έχει εγκατασταθεί σωστά, πληροί τις προδιαγραφές σχεδιασμού και ότι λειτουργεί εντός καθορισμένων παραμέτρων με βάση τις οδηγίες του κατασκευαστή (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτό το στάδιο διασφαλίζει ότι ο εξοπλισμός έχει ρυθμιστεί σωστά και ότι όλα τα απαιτούμενα έγγραφα είναι διαθέσιμα (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Η επιτυχής ολοκλήρωση της φάσης IQ διασφαλίζει τη σωστή εγκατάσταση του καταψύκτη ULT, γεγονός που θέτει τις βάσεις για τις επόμενες φάσεις της διαδικασίας επικύρωσης (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Κατά τη διάρκεια του IQ, όλη η τεκμηρίωση που σχετίζεται με την εγκατάσταση πρέπει να ελέγχεται διεξοδικά (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτό περιλαμβάνει (i) πρωτόκολλα εγκατάστασης που παρέχονται από τον κατασκευαστή, (ii) προδιαγραφές που περιγράφουν λεπτομερώς τις τεχνικές απαιτήσεις για το χώρο εγκατάστασης, συμπεριλαμβανομένης της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, των απαιτήσεων χώρου, του ελέγχου θερμοκρασίας και του εξαερισμού και (iii) εγχειρίδια χρήστη και συντήρησης που περιγράφουν τις σωστές διαδικασίες λειτουργίας (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Τα διάφορα εξαρτήματα του καταψύκτη ULT, όπως συμπιεστές, συστήματα ψυκτικού υγρού, μόνωση και συσκευές παρακολούθησης θερμοκρασίας, θα πρέπει να επαληθεύονται για να διασφαλιστεί ότι ευθυγραμμίζονται με τις καθορισμένες λεπτομέρειες από τον κατασκευαστή (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτή η επαλήθευση περιλαμβάνει (i) φυσική επιθεώρηση του εξοπλισμού για να διασφαλιστεί ότι ταιριάζει με τις προδιαγραφές παραγγελίας, (ii) σύγκριση σειριακών αριθμών και

αριθμών μοντέλου στη συσκευή με τις προδιαγραφές και (iii) επιβεβαίωση της παρουσίας βασικών στοιχείων, όπως εφεδρικά συστήματα και συναγερμοί (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Μια άλλη βασική πτυχή του IQ είναι η επαλήθευση του περιβάλλοντος εγκατάστασης όπου βρίσκεται ο καταψύκτης ULT. Η ομάδα επικύρωσης θα πρέπει να αξιολογήσει την θερμοκρασία, η υγρασία και η ποιότητα του αέρα του δωματίου, την προσβασιμότητα για συντήρηση και συμμόρφωση με την ασφάλεια, και την επαρκή γείωση για την αποφυγή ηλεκτρολογικών κινδύνων (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Ο εγκατεστημένος καταψύκτης ULT θα πρέπει να βαθμονομηθεί και ο εξοπλισμός όπως οι αισθητήρες θερμοκρασίας θα πρέπει να ρυθμιστούν και να διαμορφωθούν σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Κρίνεται απαραίτητη η διασφάλιση ότι οι αισθητήρες θερμοκρασίας είναι σωστά τοποθετημένοι μέσα στον καταψύκτη για ακριβείς μετρήσεις θερμοκρασίας, και τα πιστοποιητικά βαθμονόμησης για αισθητήρες θερμοκρασίας και άλλες σχετικές συσκευές πρέπει να τεκμηριώνονται (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

2.7.4.2. Λειτουργική πιστοποίηση (OQ)

Το Operational Qualification (OQ) ακολουθεί το IQ και στοχεύει να επαληθεύσει ότι ο καταψύκτης ULT λειτουργεί σύμφωνα με την προβλεπόμενη λειτουργία του με συνέπεια (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Το OQ επιβεβαιώνει ότι ο εξοπλισμός μπορεί να λειτουργήσει όπως καθορίζεται υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Το OQ διασφαλίζει ότι ο καταψύκτης λειτουργεί σωστά σε διάφορα λειτουργικά σενάρια, δοκιμάζοντας όλες τις ρυθμίσεις και τους συναγερμούς για να επιβεβαιώσει την ευρωστία και την αξιοπιστία (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Σε αυτό το στάδιο, οι δοκιμαστές ξεκινούν την αξιολόγηση της απόδοσης του καταψύκτη ULT μέσω διαφόρων λειτουργιών του (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Μια από τις βασικές δραστηριότητες περιλαμβάνει τη δοκιμή των δυνατοτήτων ψύξης, όπου η μονάδα λειτουργεί στο χαμηλότερο σημείο ρύθμισης. Οι δοκιμαστές παρακολουθούν τον χρόνο που απαιτείται για να επιτευχθεί αυτή η θερμοκρασία και διασφαλίζουν ότι η απόδοση συμμορφώνεται με τις καθορισμένες προδιαγραφές (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Επιπλέον, πραγματοποιούνται δοκιμές για αυτόματες λειτουργίες του καταψύκτη, όπως οι σήμανση συναγερμών για τις πόρτες, συστήματα παρακολούθησης και μηχανισμοί απόψυξης, για να διασφαλιστεί ότι όλα τα στοιχεία του συστήματος λειτουργούν αξιόπιστα και αποτελεσματικά (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Η ολοκληρωμένη χαρτογράφηση θερμοκρασίας αποτελεί κρίσιμη δραστηριότητα κατά τη διάρκεια της φάσης Operational Qualification (OQ) (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη συστηματική παρακολούθηση του εσωτερικού περιβάλλοντος του καταψύκτη σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, με σκοπό τη διασφάλιση ότι δεν υπάρχουν θερμά ή ψυχρά

σημεία που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ακεραιότητα των αποθηκευμένων δειγμάτων (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Η διαδικασία χαρτογράφησης συνήθως περιλαμβάνει την τοποθέτηση αισθητήρων θερμοκρασίας σε πολλαπλά σημεία εντός του καταψύκτη, συμπεριλαμβανομένων των περιοχών όπου είναι πιθανό να φιλοξενούνται προϊόντα (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Παράλληλα, γίνεται συνεχής συλλογή δεδομένων για εκτεταμένο χρονικό διάστημα, προκειμένου να αξιολογηθεί ακριβώς η σταθερότητα της θερμοκρασίας και να διασφαλιστεί η ακριβής λειτουργία του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Η Μελέτη Στατικού Κενού Θαλάμου θα παρέχει τεκμηριωμένες αποδείξεις ότι ο εξοπλισμός αποθήκευσης εκτελεί επαρκώς τη δηλωμένη λειτουργία του με αξιόπιστο και αναπαραγώγιμο τρόπο (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Η επιτυχής ολοκλήρωση της χαρτογράφησης θερμοκρασίας θα παράσχει τεκμηριωμένα αποδεικτικά στοιχεία, με υψηλό βαθμό βεβαιότητας ότι ο εξοπλισμός αποθήκευσης θα λειτουργεί με συνέπεια εντός των προκαθορισμένων προδιαγραφών του. Απαιτείται χαρτογράφηση θερμοκρασίας τουλάχιστον 24 ωρών για να έχει η στατική μελέτη κενού θαλάμου έναν πλήρη κύκλο (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Η 24ωρη μελέτη κενού θαλάμου θεωρείται ως το χειρότερο σενάριο διότι:

- Έλλειψη θερμικής μάζας: Κατά τη διάρκεια μιας 24ωρης μελέτης κενού φορτίου, η απουσία αποθηκευμένων αντικειμένων σημαίνει ότι δεν υπάρχει θερμική μάζα για τη σταθεροποίηση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας για μεγάλο χρονικό διάστημα (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Η ικανότητα του θαλάμου να διατηρεί σταθερά επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας εξαρτάται πλήρως από το σύστημα HVAC, τονίζοντας την απόδοσή του υπό ελάχιστες συνθήκες προσωρινής αποθήκευσης (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).
- **Εξαιρετική ευαισθησία:** Χωρίς τίποτα να μετριάξει τον αντίκτυπο των εξωτερικών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας, τυχόν ανεπάρκειες στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τα σημεία ρύθμισης μεγεθύνονται (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Η φάση Operational Qualification (OQ) περιλαμβάνει επίσης τον κρίσιμο έλεγχο των συστημάτων συναγερμού που είναι απαραίτητα για τη διασφάλιση της ασφάλειας των αποθηκευμένων δειγμάτων στον καταψύκτη ULT (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτό περιλαμβάνει τη δοκιμή των λειτουργιών των συναγερμών σε σενάρια υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι συναγερμοί ενεργοποιούνται όπως απαιτείται και παρέχουν έγκαιρες ειδοποιήσεις για οποιεσδήποτε ανωμαλίες (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Επιπλέον, είναι ζωτικής σημασίας να αξιολογηθεί η ευρωστία των εφεδρικών συστημάτων, όπως οι δευτερεύουσες μέθοδοι ψύξης, οι οποίες τίθενται σε εφαρμογή σε περιπτώσεις διακοπής ρεύματος ή άλλων σοβαρών λειτουργικών δυσλειτουργιών (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτή η αξιολόγηση

διασφαλίζει ότι, ακόμη και σε περιπτώσεις κρίσεων, οι αποθηκευμένες βιολογικές ουσίες προστατεύονται και παραμένουν σε ασφαλείς θερμοκρασίες, αποτρέποντας την αλλοίωση ή την απώλεια δείγματος (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Όλες οι δραστηριότητες της φάσης Operational Qualification (OQ) πρέπει να τεκμηριώνονται με σαφή και αναλυτικά αποτελέσματα, και κάθε περίπτωση μη συμμορφώσεων ή αποκλίσεων από τις προδιαγραφές πρέπει να αναφέρεται λεπτομερώς (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Η τεκμηρίωση θα πρέπει να περιλαμβάνει λεπτομερή αρχεία όλων των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά τη διαδικασία χαρτογράφησης θερμοκρασίας (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Επίσης, πρέπει να υπάρχει καταγραφή των βαθμονομήσεων για τους αισθητήρες θερμοκρασίας και για οποιονδήποτε άλλο εξοπλισμό χρησιμοποιήθηκε κατά την πιστοποίηση (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Τέλος, πρέπει να συνταχθεί μια συνολική ενοποιημένη έκθεση που θα συνοψίζει τα ευρήματα της φάσης OQ, περιλαμβάνοντας τα αποτελέσματα των επιχειρησιακών δοκιμών, τους συναγερμούς που δοκιμάστηκαν και τυχόν διορθωτικές ενέργειες που ελήφθησαν, διασφαλίζοντας έτσι ότι όλα τα δεδομένα είναι διαθέσιμα για μελλοντική αναφορά και αξιολόγηση (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Ολοκληρώνοντας τη φάση OQ, οι οργανισμοί επιβεβαιώνουν ότι ο καταψύκτης ULT λειτουργεί όπως προβλέπεται και πληροί όλα τα καθορισμένα κριτήρια απόδοσης υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας (ISPE, 2016; ISPE 2019). Το OQ επαληθεύει ότι ο εξοπλισμός αποθήκευσης λειτουργεί όπως καθορίζεται και πληροί τις προκαθορισμένες απαιτήσεις για τον έλεγχο των παραμέτρων λειτουργίας σχεδιασμού. Οι μέθοδοι δοκιμών θα πρέπει να αιτιολογούνται επιστημονικά, τα αποτελέσματα να είναι έγκυρα και αναπαραγώγιμα (ISPE, 2016; WHO, 2014; WHO, 2015). Μόνιμα κλιματικά συστήματα που μπορούν να ελεγχθούν από τη θερμοκρασία, όπως ο εξοπλισμός αποθήκευσης για εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, προσφέρουν εναλλακτικές δυνατότητες ελέγχου της θερμοκρασίας και έχουν το κατάλληλο μέγεθος (ISPE, 2016; WHO, 2015). Πρέπει να αποδεικνύεται η ικανότητα του εξοπλισμού αποθήκευσης να διατηρεί και να ελέγχει τη θερμοκρασία ή/και τη σχετική υγρασία και αυτό είναι το βασικό κίνητρο για τον χαρακτηρισμό του εξοπλισμού. Αυτό φαίνεται από μελέτες χαρτογράφησης θερμοκρασίας. Μετράτε η κατανομή της θερμοκρασίας του εξοπλισμού αποθήκευσης. Εντοπίζονται περιοχές ακραίων θερμοκρασιών, ψυχρά και θερμά σημεία. Αυτές είναι οι ιδανικές τοποθεσίες για τις συσκευές παρακολούθησης θερμοκρασίας (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

2.6.4.3. Πιστοποίηση απόδοσης (PQ)

Η τελική φάση της διαδικασίας επικύρωσης είναι το Performance Qualification (PQ), το οποίο στοχεύει στην επαλήθευση ότι ο καταψύκτης ULT λειτουργεί με συνέπεια σύμφωνα με την προβλεπόμενη χρήση του και πληροί τις λειτουργικές απαιτήσεις με την πάροδο του χρόνου (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτή η φάση διασφαλίζει ότι το σύστημα μπορεί να διατηρήσει τις απαιτούμενες συνθήκες όταν υπόκειται σε πραγματικά επιχειρησιακά σενάρια (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Το PQ περιλαμβάνει αυστηρή μακροπρόθεσμη παρακολούθηση για την επίδειξη σταθερής απόδοσης υπό πραγματικές συνθήκες αποθήκευσης, διασφαλίζοντας ότι τα προϊόντα διατηρούνται στις απαιτούμενες θερμοκρασίες (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Κατά τη διάρκεια της φάσης Performance Qualification (PQ), η μακροπρόθεσμη παρακολούθηση είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της απόδοσης του καταψύκτη ULT (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτή η διαδικασία συνήθως περιλαμβάνει την εκτέλεση εκτεταμένης παρακολούθησης, η οποία μπορεί να διαρκέσει 24 ώρες έως εβδομάδες. Σκοπός είναι να διασφαλιστεί ότι ο καταψύκτης διατηρεί τις εσωτερικές θερμοκρασίες εντός καθορισμένων ορίων κατά τη διάρκεια αυτής της παρατεταμένης περιόδου (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Καθ' όλη τη διάρκεια της παρακολούθησης, οι εσωτερικές θερμοκρασίες παρακολουθούνται συνεχώς, διασφαλίζοντας ότι ο καταψύκτης λειτουργεί αξιόπιστα και ότι μπορούν να διασφαλιστούν οι ιδανικές συνθήκες αποθήκευσης για τα ευαίσθητα δείγματα (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτή η διαδικασία όχι μόνο επαληθεύει τη σταθερότητα αλλά και επιτρέπει την ανίχνευση τυχόν ανωμαλιών ή διακυμάνσεων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα των αποθηκευμένων προϊόντων (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Για την προσομοίωση της χρήσης του καταψύκτη ULT σε πραγματικές συνθήκες, η φάση Performance Qualification (PQ) μπορεί να περιλαμβάνει τη φόρτωση του καταψύκτη με βιολογικά δείγματα, όπως εμβόλια ή κυτταροκαλλιέργειες, τα οποία απαιτούν ακριβείς συνθήκες θερμοκρασίας για τη διατήρηση της ποιότητάς τους (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Οι δραστηριότητες κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της απόδοσης του καταψύκτη με πραγματικά προϊόντα αποθηκευμένα μέσα, επιβεβαιώνοντας ότι τα δείγματα διατηρούν την ακεραιότητά τους και δεν παρουσιάζουν διακυμάνσεις θερμοκρασίας που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητά τους (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Επιπλέον, αξιολογείται πόσο γρήγορα σταθεροποιείται ο καταψύκτης στις καθορισμένες συνθήκες μετά το άνοιγμα της πόρτας ή κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε επιπέδου φόρτωσης του προϊόντος, διασφαλίζοντας ότι όποιες αλλαγές στη θερμοκρασία αποκαθίστανται γρήγορα και ότι ο καταψύκτης συνεχίζει να λειτουργεί εντός των απαιτούμενων προδιαγραφών (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη για την επιβεβαίωση ότι ο εξοπλισμός μπορεί να προστατεύσει αποτελεσματικά ευαίσθητα βιολογικά δείγματα σε φυσιολογικές συνθήκες χρήσης (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Η απόδοση του καταψύκτη ULT υπό συνθήκες φορτίου είναι θεμελιώδης για την αξιολόγηση της ικανότητας του εξοπλισμού να διατηρεί τις απαιτούμενες θερμοκρασίες σε ρεαλιστικά σενάρια χρήσης, όπου ο καταψύκτης είναι πλήρως εφοδιασμένος (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτή η αξιολόγηση είναι κρίσιμη για τον προσδιορισμό εάν ο καταψύκτης μπορεί να διατηρήσει το καθορισμένο εύρος θερμοκρασίας, ακόμη και με μέγιστη φόρτιση. Η μελέτη στατικού φορτίου θα παρέχει τεκμηριωμένες αποδείξεις ότι ο εξοπλισμός αποθήκευσης εκτελεί επαρκώς τη δηλωμένη λειτουργία του

με αξιόπιστο και αναπαραγώγιμο τρόπο (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Η επιτυχής ολοκλήρωση της χαρτογράφησης της θερμοκρασίας θα παρέχει τεκμηριωμένα στοιχεία, με υψηλό βαθμό βεβαιότητας ότι ο Εξοπλισμός Αποθήκευσης θα λειτουργεί με συνέπεια εντός των προκαθορισμένων προδιαγραφών του όταν είναι πλήρως φορτωμένος με μέγιστο φορτίο στη χειρότερη περίπτωση. Τα μέγιστα φορτία επιλέγονται ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά των τυπικών χρησιμοποιημένων υλικών αποθήκευσης και μεγεθών (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Η δοκιμή πλήρους φορτίου εκτελείται για να επαληθευτεί εάν η διακοπή της ροής αέρα θα έχει αντίκτυπο στη σταθερή θέση θερμοκρασίας. Μόνο με πλήρες φορτίο μπορεί να δοκιμαστεί η διακοπή της ροής του αέρα. Αυτό είναι ένα κρίσιμο στοιχείο για τη ρύθμιση και τη διατήρηση της θερμοκρασίας (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Απαιτείται χαρτογράφηση θερμοκρασίας τουλάχιστον 24 ωρών για να έχει η μελέτη στατικού φορτωμένου θαλάμου έναν πλήρη κύκλο ημέρας. Καθώς οι συνθήκες των περιβαλλοντικών δωματίων ελέγχονται από το τμήμα τεχνικής εξυπηρέτησης, θεωρείται ότι δεν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των περιόδων 24 ωρών (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Επιπλέον, η διαδικασία περιλαμβάνει την αξιολόγηση των χρόνων αποκατάστασης της θερμοκρασίας, εάν η πόρτα του καταψύκτη ανοίγει συχνά ή παραμένει ανοιχτή για παρατεταμένες περιόδους (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτές οι πληροφορίες είναι ζωτικής σημασίας για να διασφαλιστεί ότι οι αποθηκευμένες βιολογικές ουσίες παραμένουν ανέπαφες και ασφαλείς, αποτρέποντας την υποβάθμιση ή την απώλεια των δειγμάτων λόγω θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Η χαρτογράφηση θα εκτελείται σε δυναμική κατάσταση (οι εξωτερικές και εσωτερικές θύρες ανοίγουν κατά περίπτωση) για την προσομοίωση της κατάστασης λειτουργίας του εξοπλισμού αποθήκευσης. Για αυτή τη δοκιμή είναι σημαντικό να βρίσκονται επίσης αισθητήρες κοντά στο άνοιγμα της πόρτας (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Η τεκμηρίωση των προϋποθέσεων και των αποτελεσμάτων από τη φάση Performance Qualification (PQ) είναι ύψιστης σημασίας και πρέπει να διεξάγεται με πλήρη και λεπτομερή τρόπο (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Τα αποτελέσματα θα πρέπει να περιλαμβάνουν αποδεικτικά στοιχεία συμμόρφωσης με τα καθιερωμένα κριτήρια απόδοσης, αποδεικνύοντας ότι ο καταψύκτης ULT είναι ικανός να προστατεύει και να διατηρεί την ακεραιότητα των αποθηκευμένων προϊόντων σε πραγματικές συνθήκες. Επιπλέον, θα πρέπει να υπάρχει τεκμηρίωση για τυχόν διακυμάνσεις ή ανωμαλίες που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης της απόδοσης, μαζί με τις αντίστοιχες μετρήσεις αξιολόγησης (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Οποιοσδήποτε αποκλίσεις θα πρέπει να συνοδεύονται από αναφορά των διορθωτικών ενεργειών που ελήφθησαν για την αποκατάσταση της κανονικότητας και την αποφυγή επαναλαμβανόμενων προβλημάτων στο μέλλον. Αυτή η εκτενής τεκμηρίωση όχι μόνο διασφαλίζει τη συμμόρφωση με τις κανονιστικές απαιτήσεις, αλλά και δυναμώνει την εμπιστοσύνη στη διαδικασία διαχείρισης και αποθήκευσης κρίσιμων βιολογικών δειγμάτων (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Η καθιέρωση μετρήσεων απόδοσης κατά τη διάρκεια της φάσης Performance Qualification (PQ) είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση ότι οι επιχειρησιακοί στόχοι ευθυγραμμίζονται με τα αποδεκτά πρότυπα απόδοσης του καταψύκτη ULT (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτή η διαδικασία μπορεί να περιλαμβάνει την καθιέρωση κρίσιμων σημείων ελέγχου και την καθορισμένη περιοχή θερμοκρασίας κατά την αποθήκευση συγκεκριμένων προϊόντων. Ανάλογα με το είδος των βιολογικών δειγμάτων που αποθηκεύονται, οργανισμοί μπορούν να προσδιορίσουν τις κατάλληλες θερμοκρασίες που διασφαλίζουν την ακεραιότητα και σταθερότητά τους (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Επιπλέον, είναι απαραίτητο να τεκμηριώνονται οι αναμενόμενοι χρόνοι ανάκτησης του καταψύκτη μετά από διακοπές ή αλλαγές στις συνθήκες φορτίου (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτό διασφαλίζει ότι οι διαδικασίες και οι χρόνοι αποκατάστασης είναι αξιόπιστοι και ότι ο εξοπλισμός μπορεί να επιστρέψει γρήγορα στις προκαθορισμένες θερμοκρασίες, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα των αποθηκευμένων προϊόντων. Με τον τρόπο αυτό, οι οργανισμοί μπορούν να εξασφαλίσουν την αξιοπιστία του συστήματος και να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα της διαχείρισης των βιολογικών τους δειγμάτων (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

Με την ολοκλήρωση των δραστηριοτήτων Performance Qualification (PQ), ετοιμάζεται μια τελική έκθεση που ενοποιεί τα ευρήματα από τις φάσεις Installation Qualification (IQ), Operational Qualification (OQ) και Performance Qualification (PQ) (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Αυτή η έκθεση πρέπει να περιλαμβάνει μια λεπτομερή περίληψη όλων των δραστηριοτήτων επικύρωσης, εξασφαλίζοντας ότι οι διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν τεκμηριώνονται αποτελεσματικά (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015). Επιπλέον, θα περιλαμβάνει τελικά συμπεράσματα σχετικά με τις δυνατότητες του καταψύκτη ULT, βασισμένα σε σενάρια πραγματικών δοκιμών που εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επικύρωσης. Η αναφορά πρέπει επίσης να περιέχει συστάσεις για τα χρονοδιαγράμματα παρακολούθησης και συντήρησης ρουτίνας, με στόχο τη διασφάλιση της συνεχούς συμμόρφωσης με τα καθιερωμένα πρότυπα. Αυτή η έκθεση είναι καθοριστική, καθώς προσφέρει πλήρη διαφάνεια και αναλυτική εικόνα της διαδικασίας επικύρωσης, διασφαλίζοντας ότι ο καταψύκτης λειτουργεί αποδοτικά και αξιόπιστα για την προστασία ευαίσθητων βιολογικών δειγμάτων (ISPE, 2016; ISPE 2019; WHO, 2014; WHO, 2015).

3. Εμπειρική Στρατηγική

3.1. Συστήματα Ψύξης Χαμηλών Θερμοκρασιών

Η τεχνολογία ψύξης έχει προοδεύσει σημαντικά τα τελευταία χρόνια, προσφέροντας ποικιλία συστημάτων με διαφορετικές δυνατότητες και χαρακτηριστικά, ώστε να καλύπτουν τις εξειδικευμένες ανάγκες της βιομηχανίας και της επιστήμης. Τρία εξέχοντα συστήματα στην τεχνολογία ψύξης είναι το Σύστημα Ψύξης Ερμητικού Συμπιεστή, η Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου, και το Σύστημα Ψύξης Πολυσυμπιεστών.

Αρχικά, το **Σύστημα Ψύξης Ερμητικού Συμπιεστή** χρησιμοποιεί ερμητικούς συμπιεστές διαταγμένους σε κατακόρυφη διάταξη. Οι ερμητικοί συμπιεστές, πλήρως κλειστοί, αποτρέπουν τις διαρροές υγρών, γεγονός που καθιστά αυτό το σύστημα ιδανικό για τη διατήρηση υψηλής απόδοσης και αξιοπιστίας με την πάροδο του χρόνου. Η κατακόρυφη διάταξη είναι συνήθως προτιμότερη σε εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη μείωση της θερμοκρασίας ή εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, καθώς επιτρέπει μεγαλύτερο έλεγχο και απόδοση. Επίσης, η παρουσία ενός αναγνωριστικού Miniature Circuit Breaker (MCB) για προστασία εξασφαλίζει ασφάλεια έναντι ηλεκτρικών υπερφορτώσεων, ενισχύοντας την ασφάλεια και την αξιοπιστία λειτουργίας. Το μανόμετρο για την παρακολούθηση της πίεσης συμπίκνωσης (MR) βοηθά στη διάγνωση της απόδοσης του συστήματος και διασφαλίζει βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας. Αυτό το σύστημα ψύξης είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται ακριβής έλεγχος θερμοκρασίας, όπως σε επιστημονικά ή βιομηχανικά περιβάλλοντα όπου η περιβαλλοντική σταθερότητα είναι ζωτικής σημασίας.

Από την άλλη πλευρά, η **Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου** χρησιμοποιεί μια τεχνολογία που εκμεταλλεύεται το ήλιο ως ρευστό εργασίας. Αυτές οι μηχανές είναι γνωστές για την υψηλή τους απόδοση και τη δυνατότητά τους να παρέχουν συνεχή διαμόρφωση της θερμοκρασίας, κυκλικής ενεργοποίησης και απενεργοποίησης, κάτι που προσφέρει ακριβή και ομαλό έλεγχο της θερμοκρασίας. Το ήλιο, ως ρευστό εργασίας, είναι αποδοτικό στη μεταφορά θερμότητας και επιτρέπει τη λειτουργία σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι δυνατότητες συνεχούς διαμόρφωσης επιτρέπουν στο σύστημα να προσαρμόζεται γρήγορα σε αλλαγές της ζήτησης ή στο θερμικό φορτίο, διατηρώντας σταθερές θερμοκρασίες. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά τη μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου ιδιαίτερα χρήσιμη σε ρυθμίσεις όπου οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μπορούν να επηρεάσουν κρίσιμα τις διαδικασίες ή τα αποθηκευμένα υλικά. Είναι ιδανικό για περιβάλλοντα που απαιτούν σταθερές συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και θόρυβο, όπως ιατρικές ή εργαστηριακές εφαρμογές.

Τέλος, το **Σύστημα Ψύξης Πολυσυμπιεστών** διαθέτει τρεις διαφορετικούς συμπιεστές, δυο για το σύστημα υψηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιεί το ψυκτικό R134a και έναν για το σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιεί το ψυκτικό R23. Αυτή η εγκατάσταση διπλού συστήματος προσφέρει ευέλικτη διαχείριση της θερμοκρασίας σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών. Χρησιμοποιώντας το R134a για τις

λειτουργίες υψηλής θερμοκρασίας και το R23 για λειτουργίες χαμηλής θερμοκρασίας, το σύστημα είναι ικανό να χειριστεί αποτελεσματικά ποικίλων ψύξης. Ο σχεδιασμός του πολυσυμπιεστή βελτιστοποιεί την απόδοση σε διαφορετικές ζώνες θερμοκρασίας, επιτρέποντας την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα σε πολύπλοκες εφαρμογές ψύξης. Αυτό το ευέλικτο σύστημα είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για βιομηχανικές εφαρμογές, όπου διάφορα τμήματα μπορεί να απαιτούν διαφορετικές ρυθμίσεις θερμοκρασίας ή όπου χρειάζονται δυνατότητες βαθιάς κατάψυξης.

Συνοπτικά, κάθε σύστημα ψύξης προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα που είναι προσαρμοσμένα σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Το Σύστημα Ψύξης Ερμητικού Συμπιεστή είναι βέλτιστο για περιβάλλοντα που απαιτούν χαμηλές θερμοκρασίες και αυξημένο έλεγχο, η μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου υπερέρχει σε ρυθμίσεις που απαιτούν ενεργειακή απόδοση με συνεχή λειτουργία, ενώ το Σύστημα Ψύξης Πολυσυμπιεστών παρέχει προσαρμοστικές λύσεις ψύξης που καλύπτουν ποικίλες θερμοκρασιακές απαιτήσεις. Αυτές οι τεχνολογίες παρέχουν αξιόπιστες και αποτελεσματικές λύσεις, συμβάλλοντας σημαντικά στην προώθηση της επιστήμης και της βιομηχανικής παραγωγής, καθώς και στην προστασία ευαίσθητων υλικών που απαιτούν ειδικές συνθήκες αποθήκευσης. Τέλος, στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα χρησιμοποιηθούν τρία εξαιρετικά συστήματα ψύξης ωστόσο για λόγους εμπιστευτικότητας δεν θα γίνει αναφορά στα ονόματα των κατασκευαστών.

3.1.2. Συγκριτική Ανάλυση

Η ανάγκη για αξιόπιστους και αποδοτικούς καταψύκτες εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών (ULT) είναι επιτακτική στους τομείς της επιστήμης και της έρευνας, όπου η διατήρηση ευαίσθητων δειγμάτων αποτελεί προτεραιότητα. Αυτή η ανάλυση θα εξετάσει τρία διαφορετικά συστήματα κατάψυξης: τον ερμητικό συμπιεστή, τη μηχανή ελεύθερου εμβόλου, και το πολυσυμπιεστή. Κάθε σύστημα θα αξιολογηθεί με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, την ενεργειακή του απόδοση, την ασφάλεια κατά τη χρήση και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Και τα τρία συστήματα προσφέρουν εξαιρετικές επιδόσεις ψύξης, με τη μηχανή ελεύθερου εμβόλου να αναγνωρίζεται για το ευρύτερο εύρος θερμοκρασιών του (-20 °C έως -86 °C), δίνοντάς του πλεονέκτημα στην αποθήκευση διαφόρων βιολογικών δειγμάτων. Ο ερμητικός συμπιεστής προσφέρει αξιοπιστία μέσω του στεγανωμένου συστήματος ψύξης, καθώς και εξαιρετική θερμική μόνωση, ενώ ο το σύστημα πολυσυμπιεστών εξασφαλίζει αξιόπιστη ψύξη με το διπλό σύστημα και την ικανότητά του να λειτουργεί σε ακραίες συνθήκες.

Η ενεργειακή απόδοση είναι κρίσιμη για τη βιωσιμότητα. Η μηχανή ελεύθερου εμβόλου καταναλώνει σημαντικά λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με παραδοσιακές μονάδες και προσφέρει έως 40% εξοικονόμηση ενέργειας. Ο ερμητικός συμπιεστής διαθέτει επίσης προγράμματα εξοικονόμησης ενέργειας, αλλά δεν έχει την ίδια κλίμακα με την μηχανή ελεύθερου εμβόλου. Το σύστημα

πολυσυμπιεστών, αν και ενσωματώνει διπλό σύστημα, απαιτεί επίσης συντήρηση που μπορεί να επηρεάσει την αποδοτικότητα.

Το σύστημα ελέγχου του ερμητικού συμπιεστή είναι εξαιρετικά προηγμένο, με δυνατότητες απομακρυσμένης παρακολούθησης και διαχείρισης δεδομένων, ωστόσο, η μηχανή ελεύθερου εμβόλου προσφέρει ομοίως εξαιρετική καταγραφή και παρακολούθηση της θερμοκρασίας μέσω των ενοριακών του διεπαφών. Το σύστημα πολυσυμπιεστών επικεντρώνεται περισσότερο στην ακεραιότητα της ψύξης σε ακραία περιβάλλοντα και λιγότερο σε προηγμένα χαρακτηριστικά διαχείρισης.

Όλα τα συστήματα είτε χρησιμοποιούν φυσικά ψυκτικά μέσα είτε περιέχουν χαρακτηριστικά που μειώνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η μηχανή ελεύθερου εμβόλου υπερέχει για την εξαιρετικά χαμηλή ενεργειακή του κατανάλωση και τη χρήση φιλικών προς το περιβάλλον ψυκτικών, ενώ ο ερμητικός συμπιεστής προσφέρει ενεργειακά προγράμματα και προηγμένες διαδικασίες μόνωσης. Το σύστημα πολυσυμπιεστών χρησιμοποιεί ψυκτικά με ελάχιστο δυναμικό καταστροφής του όζοντος του περιβάλλοντος.

Η ασφάλεια είναι πρωταρχικής σημασίας για τα συστήματα ULT, καθώς η ελαχιστοποίηση των κινδύνων είναι επιτακτική κατά την αποθήκευση πολύτιμων βιολογικών δειγμάτων. Ο ερμητικός συμπιεστής διαθέτει θερμοστάτες ασφαλείας και προαιρετικούς σταθεροποιητές τάσης, προστατεύοντας την επένδυση από διακυμάνσεις τάσης. Αντίστοιχα, η μηχανή ελεύθερου εμβόλου περιλαμβάνει προηγμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας, παρέχοντας κλειδαριές και PIN για την πρόσβαση στο GUI, διασφαλίζοντας ότι μόνο εξουσιοδοτημένο προσωπικό μπορεί να προβαίνει σε αλλαγές. Το σύστημα πολυσυμπιεστών επίσης περιλαμβάνει δυνατότητες ασφαλείας μέσω του ελέγχου δεδομένων και της παρακολούθησης θερμοκρασίας, μειώνοντας την πιθανότητα αλλοίωσης του φορτίου.

Οι υποστηρικτικές λειτουργίες είναι κρίσιμες για τη λήψη αποφάσεων στις σύγχρονες ερευνητικές εγκαταστάσεις. Και τα τρία συστήματα προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες, αλλά με διαφορετικό εστιασμένο αντίκτυπο. Ο ερμητικός συμπιεστής παρέχει τις πιο εξελιγμένες επιλογές συνδεσιμότητας, διευκολύνοντας την ολοκλήρωση με εργαστηριακά δίκτυα και επιτρέποντας παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Η μηχανή ελεύθερου εμβόλου προσφέρει εφαρμογές για παρακολούθηση σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, εδώ και 40% εξοικονόμηση ενέργειας. Το σύστημα πολυσυμπιεστών, αν και λιγότερο επικεντρωμένος στην συνδεσιμότητα, προσφέρει εξαιρετική ευελιξία κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση, με τη δυνατότητα αυτόματης αντίστροφης λειτουργίας που περιέχει χαρακτηριστικά ασφαλείας για την προστασία του φορτίου.

Σε μια εποχή όπου η έρευνα και η επιστήμη απαιτούν αυστηρές προδιαγραφές αποθήκευσης, τα τρία παρακάτω συστήματα ULT που αναλύθηκαν αντιπροσωπεύουν κορυφαίες επιλογές στην αγορά. Κάθε μοντέλο έχει τα δικά του ιδιαίτερα πλεονεκτήματα:

- Ερμητικός Συμπιεστής: Κατατάσσεται ως ο ηγέτης των καινοτόμων χαρακτηριστικών, της αντοχής και της ενεργειακής αποδοτικότητας. Προσφέρει προηγμένα χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας που τον καθιστούν ιδανικό για εργαστηριακά περιβάλλοντα που χρειάζονται ακριβή παρακολούθηση και διαχείριση δεδομένων.
- Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου: Σημαντική επιλογή για εργαστηριακές απαιτήσεις με αυστηρές απαιτήσεις θερμοκρασίας. Η τεχνολογία της μηχανής ελεύθερου εμβόλου παρέχει μείωση ενέργειας και εγγυάται υψηλή αξιοπιστία με ελάχιστη συντήρηση.
- Σύστημα Πολυσυμπιεστών: Στόχος του είναι η προστασία και η μεταφορά ευαίσθητων προϊόντων σε ακραίες θερμοκρασίες. Το σύστημα διπλού ψύκτη διασφαλίζει τη συνεχή ψύξη και ευελιξία στον τομέα της μεταφοράς.

Κάθε επιλογή φαίνεται κατάλληλη για διαφορετικές συνθήκες εργασίας και προϋποθέσεις χρηστών. Η τελική επιλογή θα πρέπει να βασιστεί στις συγκεκριμένες ανάγκες των ερευνητικών ιδρυμάτων, συμπεριλαμβανομένων των εξωτερικών παραγόντων, της υποδομής και των διαθέσιμων πόρων, προκειμένου να διασφαλιστεί η ακεραιότητα και η βιωσιμότητα των αποθηκευμένων δειγμάτων.

Πίνακας 4 Συγκριτική Ανάλυση Συστημάτων Ψύξης Χαμηλών Θερμοκρασιών			
Χαρακτηριστικά	Ερμητικός Συμπιεστής	Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Πολυσυμπιεστές
Χωρητικότητα	706 λίτρα	780 λίτρα	59,720 λίτρα
Εύρος Θερμοκρασίας	-40°C έως -85°C	-20°C έως -86°C	0°C έως -60°C
Υλικό Κατασκευής	Ανοξείδωτος χάλυβας AISI 304	Κενά πάνελ μόνωσης	Ειδική σχεδίαση με δύο συστήματα
Τεχνολογία Ψύξης	Ερμητικοί συμπιεστές	Ελεύθερου Εμβόλου Stirling	Διπλό ψυκτικό σύστημα
Ενεργειακή Κατανάλωση	Στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας	~6.67 kWh/d, έως 40% λιγότερη ενέργεια	Απαιτεί συντήρηση για σταθερή λειτουργία
Συνδεσιμότητα	USB, SIM, Wi-Fi, Ethernet	Απομακρυσμένη παρακολούθηση	Περιορισμένες επιλογές
Θερμοκρασιακή Σταθερότητα	Ανώτερη θερμική απόδοση	± 1 °C	Σταθερός έλεγχος θερμοκρασίας
Ασφάλεια Λειτουργίας	Θερμοστάτες ασφαλείας	Κλειδαριά και PIN για πρόσβαση	Διαγνωστικά και προειδοποιήσεις
Διαδικασίες Συντήρησης	Τακτικά προγράμματα αναγκαία	Συντήρηση με GUI και αυτοματοποιημένη παρακολούθηση	Τακτική συντήρηση και έλεγχοι με αυτοματοποιημένα διαγνωστικά
Ωφέλιμη Ζωή	10-12 χρόνια	12 χρόνια	10-12 χρόνια
Ασφαλεία Ψυκτικών	Χωρίς HCFC ή CFC	Χρησιμοποιεί R-170 (Ethane), eco-friendly	Χρησιμοποιεί HFCs, απαιτεί προσοχή λόγω ευφλεκτότητας
Θόρυβος Λειτουργίας	Θόρυβος κατά τη λειτουργία	<48 dB(A)	Θόρυβος κατά τη λειτουργία
Περιβαλλοντική Πολιτική	Φιλικά προς το περιβάλλον ψυκτικά	Χρησιμοποιεί φυσικά ψυκτικά	Χαμηλό δυναμικό καταστροφής όζοντος
Αντοχή σε Διακυμάνσεις Θερμοκρασίας	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή μέσω διπλών συμπιεστών
Τιμή Αξιοπιστίας	Υψηλή αξιοπιστία	Μεταβαλλόμενη λειτουργία με ελάχιστη συντήρηση	Εξαιρετική λόγω πλεονάζουσας λειτουργίας
Διαστάσεις	1990x1060x1000 mm	1994x870x915 mm	10945x2154x2896 mm

3.2. Στρατηγική Ανάλυσης

Στην πτυχιακή μου εργασία, θα αναλύσω δύο βασικά μέρη στην εμπειρική ανάλυση. Το πρώτο μέρος θα επικεντρωθεί σε πειραματικές διαδικασίες, όπου θα σχεδιάσω και θα εκτελέσω μια σειρά δοκιμασιών με στόχο να κατανοήσω διαδικασίες ή φαινόμενα που σχετίζονται με το θεματικό αντικείμενο της έρευνας. Ενώ το δεύτερο μέρος θα εστιάσει στην ανάλυση ιστορικών δεδομένων χρησιμοποιώντας τεχνικές παλινδρόμησης. Πιο συγκεκριμένα, θα συλλέξω και θα επεξεργαστώ ιστορικά δεδομένα που θα μπορέσουν να αναδείξουν τάσεις ή σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών.

3.2.1. Συλλογή δεδομένων

Η συλλογή δεδομένων αποτελεί έναν κρίσιμο πυλώνα στην αξιολόγηση της αποδοτικότητας και της ομοιομορφίας των συστημάτων ψύξης εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών (ULT). Αυτή η διαδικασία παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την κατανόηση της δυναμικής θερμοκρασίας εντός των θαλάμων και επιτρέπει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των συστημάτων. Παρακάτω αναλύεται κάθε στάδιο της διαδικασίας συλλογής δεδομένων και η σημαντικότητά του στη συνολική στρατηγική αξιολόγησης.

Αρχικά, η χρήση βαθμονομημένων αισθητήρων υψηλής ακρίβειας είναι θεμελιώδης για τη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων θερμοκρασίας. Κάθε αισθητήρας τοποθετείται στρατηγικά σε διαφορετικές θέσεις εντός του θαλάμου ψύξης για να καταγράψει την ακριβή θερμοκρασία σε ποικιλία σημείων όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 01 και 02. Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι οι μετρήσεις καλύπτουν ολόκληρο τον όγκο του θαλάμου, δίνοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα των θερμοκρασιακών συνθηκών. Οι αισθητήρες παρακολουθούν συνεχώς τις θερμοκρασιακές αλλαγές, επιτρέποντας τη σύλληψη δεδομένων με υψηλή συχνότητα, όπως ανά λεπτό, κάτι που είναι κρίσιμο για την κατανόηση των δυναμικών αλλαγών σε πραγματικό χρόνο.

Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιείται σε διάφορα φάσεις που αντιστοιχούν σε διαφορετικές λειτουργικές καταστάσεις του συστήματος. Η ανάλυση των δοκιμών για τους ερμητικούς συμπιεστές, Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και Πολυσυμπιεστών προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης αυτών των συστημάτων ψύξης σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Κάθε δοκιμή έχει ως στόχο να αξιολογήσει συγκεκριμένες πτυχές της λειτουργικότητας και της αξιοπιστίας τους και θα πραγματοποιηθεί σε διαφορετικές θερμοκρασίες σύμφωνα με τον πίνακα 5.

Πίνακας 5 Συλλογή Δεδομένων		
	Εύρος Θερμοκρασίας	Θερμοκρασίες προς έλεγχο
Ερμητικός Συμπιεστής	-40°C έως -85°C	-40°C και -70°C
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	-20°C έως -86°C	-40°C και -70°C
Πολυσυμπιεστές	0°C έως -60°C	-40°C

Η επιλογή των θερμοκρασιών προς έλεγχο για τα συστήματα ψύξης, συγκεκριμένα οι -40°C και -70°C, είναι στρατηγική και αναγκαία για την αποτελεσματική αποθήκευση και διαχείριση ευαίσθητων προϊόντων. Στην ανάλυση αυτή, εστιάζουμε στον Ερμητικό Συμπιεστή, τη Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου

και του συστήματος πολυσυμπιεστών, οι οποίοι αξιολογούνται με βάση τις απαιτήσεις τους για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Η επιλογή των -40°C και -70°C για τον Ερμητικό Συμπιεστή και τη Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και των -40°C για τους Πολυσυμπιεστές αντανakλά τις ειδικές απαιτήσεις λειτουργίας αυτών των συστημάτων. Αυτές οι θερμοκρασίες είναι καθοριστικές για τη διατήρηση της σταθερότητας και της αποτελεσματικότητας βιολογικών δειγμάτων, εμβολίων και φαρμακευτικών προϊόντων. Η σωστή ρύθμιση της θερμοκρασίας διασφαλίζει τη θετική απόκριση των προϊόντων, αποτρέποντας παράλληλα τη βιολογική αλλοίωση και την χημική διάσπαση.

Διαφορετικά βιολογικά και χημικά δείγματα απαιτούν αυστηρές θερμοκρασίες για τη διατήρηση της ποιότητάς τους. Η επιλογή των θερμοκρασιών αυτών εγγυάται ότι τα προϊόντα παραμένουν σταθερά και αναλλοίωτα, γεγονός που είναι κρίσιμο σε διάφορες φάσεις πειραμάτων ή εφαρμογών. Η επιλογή των καθορισμένων θερμοκρασιών επιτρέπει τη συγκριτική ανάλυση των τριών συστημάτων ψύξης και την εκτίμηση της αποδοτικότητάς τους. Εξετάζοντας την απόδοση, τα συστήματα μπορούν να αξιολογηθούν όσον αφορά την οικονομική τους συνέπεια και την ικανότητά τους να διατηρούν σταθερές θερμοκρασίες σε προγραμματισμένα επίπεδα. Η αναγνώριση των πλεονεκτημάτων των θερμοκρασιών αυτών επιτρέπει στους ερευνητές και τους επιστήμονες να αξιολογήσουν την αξία τους για μελλοντικές εφαρμογές.

Συνολικά, η επιλογή των θερμοκρασιών -40°C και -70°C είναι εξαιρετικά στρατηγική και ενισχύει την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα των συστημάτων ψύξης στον τομέα της αποθήκευσης ευαίσθητων προϊόντων. Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι τα συστήματα μπορούν να ανταποκριθούν στις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις της επιστημονικής κοινότητας και να συμβάλουν στη διατήρηση της ποιότητας και της ασφάλειας των αποθηκευμένων δειγμάτων, προάγοντας παράλληλα την καινοτομία και τις νέες εφαρμογές στην ιατρική και τεχνολογία.

3.2.1.1. Δοκιμές σε Κενό Θάλαμο

Κατά την αρχική φάση της περιόδου κενού θαλάμου, οι αισθητήρες καταγράφουν τις θερμοκρασίες χωρίς να υπάρχουν φορτία, κάτι που βοηθά στην αξιολόγηση της βασικής θερμικής σταθερότητας και απόδοσης του συστήματος σε καθαρή κατάσταση. Ακολουθούν οι δοκιμές ανοιχτής πόρτας, όπου οι αισθητήρες καταγράφουν τις επιπτώσεις στο θερμικό περιβάλλον κατά τις περιπτώσεις εισόδου ή εξόδου δειγμάτων. Αυτές οι δοκιμές αποκαλύπτουν τον χρόνο ανάκτησης του συστήματος και τη σταθερότητα της θερμοκρασίας κατά την έκθεση σε συχνές αλλαγές.

- **Τουλάχιστον 24 ώρες συλλογής δεδομένων:** Και τα δύο συστήματα είναι εφαρμόσιμα σε αυτή τη δοκιμή, η οποία αξιολογεί τη βασική σταθερότητα θερμοκρασίας χωρίς το φορτίο, προσδιορίζοντας το θερμικό τους προφίλ.
- **Τουλάχιστον 1 λεπτό δοκιμή ανοιχτής πόρτας:** Και πάλι, και τα δύο συστήματα είναι εφαρμόσιμα. Αυτή η δοκιμή ελέγχει τις ικανότητες ανάκτησης μετά από πρόσβαση στο θάλαμο, επισημαίνοντας την ταχύτητα και την αποδοτικότητα της επαναφοράς θερμοκρασίας.

- **Δοκιμή διακοπής ρεύματος:** Αυτή η δοκιμή αναδεικνύει την ανθεκτικότητα των συστημάτων σε συνθήκες απώλειας ισχύος, αξιολογώντας την ικανότητά τους να διατηρούν τις θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια και μετά από διακοπή ρεύματος.
- **Δείγμα:** Οι παραπάνω 3 δοκιμές θα πραγματοποιηθούν σε 35 καταψύκτες (15 καταψύκτες πολυσυμπιεστών και από 10 καταψύκτες Ερμητικού Συμπιεστή και Ελεύθερου Έμβολου)

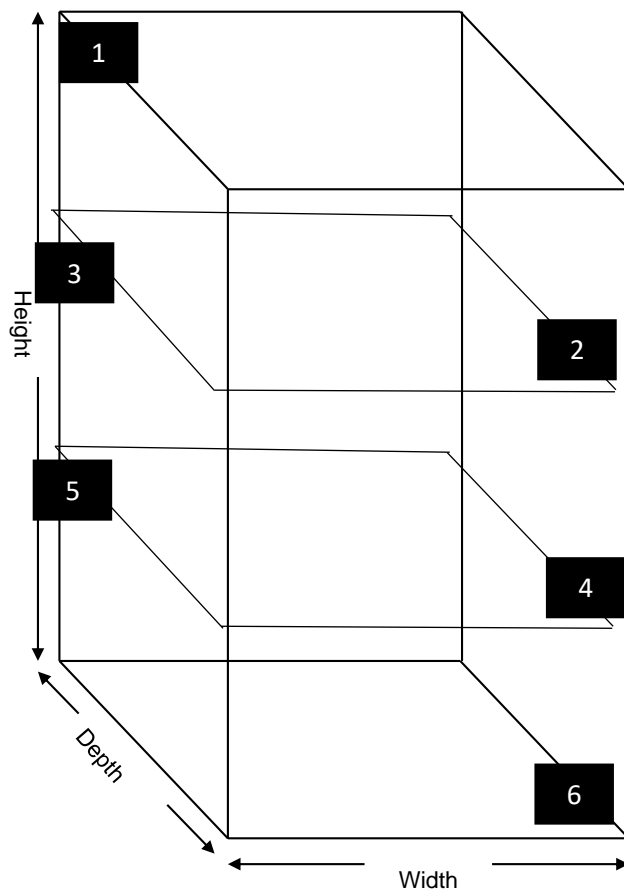
3.2.1.2. Δοκιμές σε Θάλαμο με Πλήρες Φορτίο

Η τελική περίοδος συλλογής δεδομένων πραγματοποιείται υπό πλήρες και διάφορο φορτίο, όπου η ανάλυση των αποτελεσμάτων επικεντρώνεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί σταθερές θερμοκρασίες παρά την προσθήκη προϊόντων διαφορετικής θερμικής μάζας. Αυτή η φάση προσομοιώνει πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για την απόδοση του εξοπλισμού υπό κανονικές συνθήκες χρήσης.

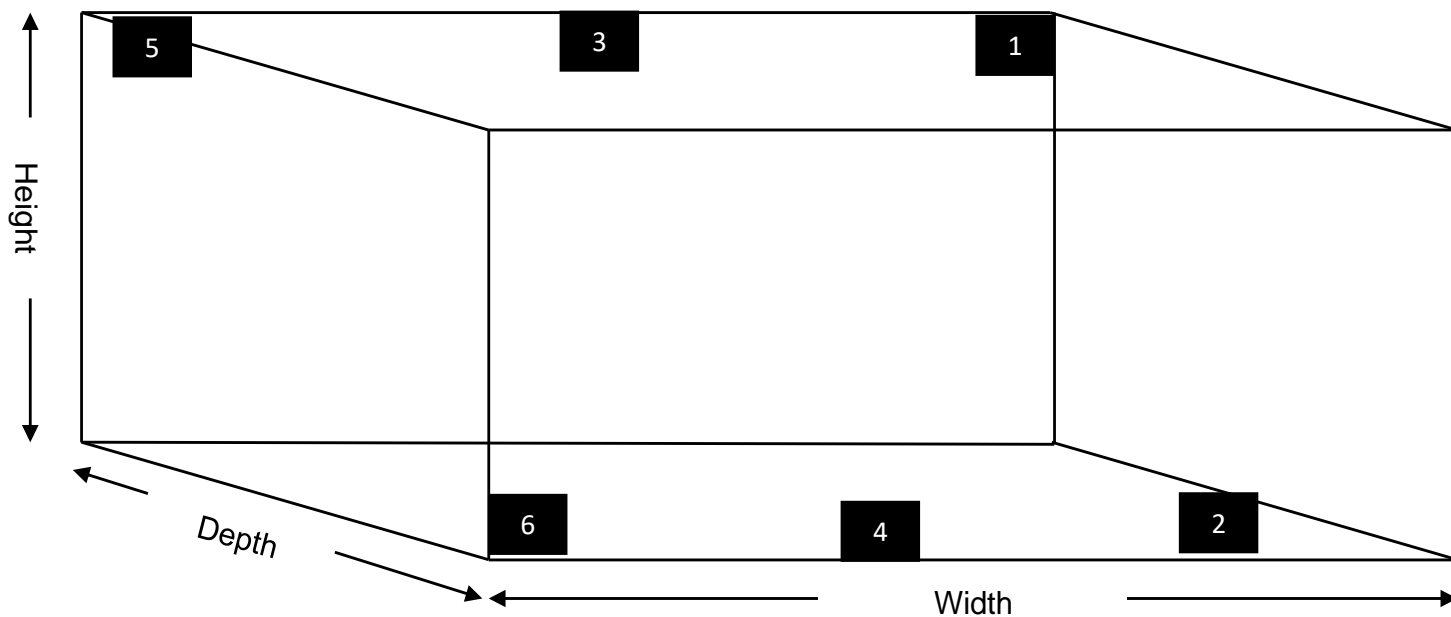
- **Τουλάχιστον 24 ώρες συλλογής δεδομένων:** Εξετάζει την ενεργειακή απόδοση και τη θερμοκρασιακή σταθερότητα όταν ο θάλαμος είναι γεμάτος, προσομοιώνοντας μια ρεαλιστική συνθήκη χρήσης και διασφαλίζοντας διάχυση της θερμοκρασίας.
- **Τουλάχιστον 1 λεπτό δοκιμή ανοιχτής πόρτας:** Αυτή η δοκιμή σε πλήρες φορτίο παρέχει πληροφορίες για το πώς το σύστημα διαχειρίζεται τις αλλαγές στο περιβάλλον του θαλάμου υπό πραγματικές συνθήκες.
- **Δοκιμή διακοπής ρεύματος:** Αυτή η δοκιμή αξιολογεί αν οι συσκευές μπορούν να διατηρήσουν την ακεραιότητα των αποθηκευμένων δειγμάτων σε περίπτωση διακοπής και παρέχει πολύτιμη εικόνα για την αξιοπιστία τους σε πραγματικές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.
- **Δείγμα:** Οι παραπάνω 3 δοκιμές θα πραγματοποιηθούν σε 35 καταψύκτες (15 καταψύκτες πολυσυμπιεστών και από 10 καταψύκτες Ερμητικού Συμπιεστή και Ελεύθερου Έμβολου)
- **Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό:** Αυτή η δοκιμή εξετάζει την ικανότητα ψύξης των συστημάτων με σαφή θερμικό φορτίο, παρέχοντας πληροφορίες για την απόδοσή τους στην ψύξη όγκου υγρού σε ακραίες συνθήκες στους -40°C . Όταν τοποθετούνται μπουκάλια με νερό στους -40°C , ξεκινά μια διαδικασία κατάψυξης και λαμβάνει χώρα σε διάφορες φάσεις οι οποίες αναλύονται παρακάτω. Η κατανόηση αυτών των φάσεων είναι ζωτικής σημασίας, ειδικά κατά την κατάψυξη μεγάλων όγκων, καθώς μπορεί να χρειαστεί χρόνος για να στερεοποιηθεί ολόκληρος ο όγκος. Η συγκριτική ανάλυση της παρούσας δοκιμασίας θα επικεντρωθεί κυρίως στους καταψύκτες ερμητικού συμπιεστή και ελεύθερου εμβόλου, ενώ θα συμπεριληφθούν επικουρικά δεδομένα και από τον καταψύκτη πολυσυμπιεστών. Αυτή η διάκριση είναι αναγκαία, διότι οι πολυσυμπιεστές χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης και παρουσιάζουν περιορισμούς στην ανάλυση εξαιτίας της έλλειψης επαρκούς αριθμού αισθητήρων. Τέλος, τα δεδομένα θα συλλεχθούν από έναν καταψύκτη ανά κατηγορία.

- **Ψύξη έως το σημείο πήξης:** Το νερό μέσα στα μπουκάλια αρχίζει με την ψύξη στους 0°C , που είναι το σημείο πήξης του νερού. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, η θερμοκρασία του νερού πέφτει γρήγορα καθώς χάνει θερμότητα στο περιβάλλον.
- **Πυρήνωση και σχηματισμός κρυστάλλων:** Καθώς η θερμοκρασία φθάνει περίπου τους 0°C , εμφανίζεται πυρήνωση. Αυτή είναι η διαδικασία όπου μικροί κρύσταλλοι πάγου αρχίζουν να σχηματίζονται στο νερό. Αυτοί οι αρχικοί κρύσταλλοι χρησιμεύουν ως θέσεις για περαιτέρω ανάπτυξη κρυστάλλων.
- **Πλατώ κατάψυξης:** Μόλις ξεκινήσει η πυρήνωση, η θερμοκρασία σταθεροποιείται στο σημείο πήξης παρά τη συνεχιζόμενη απώλεια θερμότητας. Αυτή η φάση χαρακτηρίζεται από τη λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης, όπου απελευθερώνεται η ενέργεια που απαιτείται για την αλλαγή της κατάστασης από υγρή σε στερεή. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, το νερό παραμένει στους 0°C μέχρι να στερεοποιηθεί πλήρως.
- **Στερεοποίηση:** Η ανάπτυξη των κρυστάλλων συνεχίζεται σε όλο τον όγκο του νερού, μετατρέποντας σταδιακά ολόκληρο το υγρό σε στερεό πάγο και καθώς σχηματίζεται πάγος, διαστέλλεται.
- **Ψύξη κάτω από το σημείο πήξης:** Αφού όλο το νερό έχει μετατραπεί σε πάγο, η θερμοκρασία του πάγου αρχίζει τώρα να πέφτει κάτω από τους 0°C , μέχρι τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατάψυξης (-40°C). Ο ρυθμός ψύξης εξαρτάται από τις μονωτικές ιδιότητες του δοχείου και την απόδοση του καταψύκτη.

Αυτές οι δοκιμές συνολικά παρέχουν μια ολοκληρωμένη κατανόηση της επίδοσης και της αξιοπιστίας των τριών συστημάτων ανάλυσης. Η δυνατότητα εκτέλεσης της πλήρους σειράς αυτών των δοκιμών υπογραμμίζει την καταλληλότητα και ευελιξία αυτών των μονάδων σταθερότητας και απόδοσης, καθιστώντας τις ιδανικές για κρίσιμες εφαρμογές αποθήκευσης και επιστημονικών ερευνών. Συνολικά, η διαδικασία συλλογής δεδομένων θερμοκρασίας είναι αναπόσπαστο μέρος της αξιολόγησης και της βελτίωσης της απόδοσης των συστημάτων ULT. Μέσω της προσεκτικής σχεδίασης και υλοποίησης αυτής της διαδικασίας, οι οργανισμοί μπορούν να εντοπίσουν περιοχές για βελτίωση, να διασφαλίσουν την αξιοπιστία του εξοπλισμού και να ενισχύσουν την ποιότητα και ασφάλεια των αποθηκευμένων δειγμάτων.



Εικόνα 1 Ερμητικός Συμπιεστής και Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου



Εικόνα 2 Πολυσυμπιεστές

3.2.2. Επεξεργασία Δεδομένων

Η επεξεργασία δεδομένων είναι μια πολύτιμη διαδικασία στη διπλωματική εργασία, ειδικά όταν πρόκειται για τη συγκριτική ανάλυση της ομοιομορφίας θερμοκρασίας και απόδοσης σε συστήματα ψύξης χαμηλών θερμοκρασιών. Η ακεραιότητα και η συνέπεια των δεδομένων θερμοκρασίας είναι κρίσιμη καθώς αυτά καθορίζουν την αξιοπιστία των συγκρίσεων μεταξύ των διαφόρων συστημάτων ψύξης. Κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας στα συστήματα ψύξης, είναι πιθανό να εμφανιστούν ανωμαλίες και ελλειπείς τιμές λόγω φυσικών διακυμάνσεων ή τεχνικών ζητημάτων με αισθητήρες και εξοπλισμό μέτρησης. Ο καθαρισμός των δεδομένων είναι απαραίτητος για τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση αυτών των αποκλίσεων, που μπορεί να αλλοιώσουν τις ουσιαστικές τάσεις και μοτίβα. Επομένως έπειτα της προ επεξεργασίας, θα μπορούμε να προχωρήσουμε σε μια αξιολόγηση που να βασίζεται σε αξιόπιστα δεδομένα, στην οποία οι επιδόσεις των συστημάτων ψύξης θα συγκριθούν με σκοπό την ανάδειξη των σχετικών πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους σε εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας.

3.2.3. Στατιστικά Μέτρα, Ανάλυση Ομοιομορφίας και Μετρήσεις απόδοσης

Η ανάλυση των στατιστικών μέτρων και της ομοιομορφίας των θερμοκρασιών είναι ένα ζωτικό κομμάτι της εργασίας που ενσωματώνει συνδυασμό ποσοτικών μεθόδων για την εκτίμηση της απόδοσης των συστημάτων ψύξης χαμηλών θερμοκρασιών. Η ενότητα αυτή επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της θερμοκρασιακής σταθερότητας και ομοιομορφίας εντός των θαλάμων ψύξης με στόχο να εντοπίσουμε τη συνολική συνέπεια και αποτελεσματικότητα των συστημάτων.

3.2.3.1. Στατιστικά Μέτρα

- **Περιγραφική Στατιστική:** Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει τον υπολογισμό βασικών στατιστικών μέτρων, όπως η μέση τιμή, η διάμεσος, η τυπική απόκλιση και το εύρος. Η μέση τιμή και η διάμεσος παρέχουν πληροφορίες για τις κεντρικές τάσεις των δεδομένων θερμοκρασίας, ενώ η τυπική απόκλιση και το εύρος χαρακτηρίζουν τη μεταβλητότητα και την κατανομή των τιμών θερμοκρασίας. Αυτές οι μετρήσεις είναι ουσιαστικές για την κατανόηση της απόδοσης του συστήματος ψύξης, βοηθώντας να αξιοποιηθούν περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τη σταθερότητα της θερμοκρασίας και την εμπιστοσύνη στη λειτουργία.
- **Διακύμανση και Τυπική Απόκλιση:** Η διακύμανση και η τυπική απόκλιση είναι κρίσιμα για την αξιολόγηση της κατανομής των θερμοκρασιακών τιμών. Αυτά τα μαθήματα παρέχουν μια εικόνα για το πόσο διάσπαρτες είναι οι τιμές από τον μέσο όρο, καταδεικνύοντας τη συνεκτικότητα των θερμοκρασιών εντός του θαλάμου. Μια χαμηλή διακύμανση υποδεικνύει ότι οι θερμοκρασίες είναι σχετικά κοντά η μία της άλλης και συνεπώς δείχνουν μια σταθερή ομοιομορφία, καταδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα του συστήματος ψύξης.

3.2.3.2. Ανάλυση Ομοιομορφίας

- **Συντελεστής Μεταβλητότητας (CV):** Ο συντελεστής μεταβλητότητας χρησιμοποιείται για τη σύγκριση του εύρους της μεταβλητότητας σε σχέση με τη μέση θερμοκρασία. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τη σύγκριση της σχετικής μεταβλητότητας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων ή

καταστάσεων, ανεξαρτήτως των μέσων θερμοκρασιών τους. Ένας χαμηλός συντελεστής μεταβλητότητας υποδεικνύει υψηλή συνέπεια, ενώ ένας υψηλός δείχνει σημαντική μεταβλητότητα στις καταγραφές θερμοκρασίας. Η μέτρηση αυτή είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας στις επιδόσεις των μονάδων ψύξης.

3.2.3.3. Μετρήσεις Απόδοσης

- **Ανάλυση Χρόνου Απόκρισης:** Υπολογίζοντας τον χρόνο απαιτούμενο για την επιστροφή στις αρχικές θερμοκρασίες μετά τη δοκιμή ανοιχτής πόρτας και δοκιμή διακοπής ρεύματος, θα αξιολογηθεί η απόδοση ανάκτησης των συστημάτων. Αυτή η μέτρηση είναι σημαντική για την κατανόηση της ταχύτητας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος ψύξης.

3.2.3.4. Ανάλυση Επηρεασμού από εξωτερικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες

Στον τομέα της οικονομετρικής έρευνας, η αποτελεσματική ανάλυση των δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για την απόκτηση ουσιαστικών γνώσεων και την ενημέρωση των διαδικασιών λήψης αποφάσεων. Μεταξύ των διαφόρων διαθέσιμων μεθοδολογιών, ξεχωρίζουν τρεις κυρίαρχες προσεγγίσεις: δεδομένα χρονοσειρών, δεδομένα διατομής και δεδομένα πίνακα/πάνελ. Κάθε μία από αυτές τις μεθοδολογίες προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα και εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς, επιτρέποντας στους ερευνητές να εξερευνήσουν και να κατανοήσουν πολύπλοκες σχέσεις μέσα σε σύνολα δεδομένων.

Τα δεδομένα χρονοσειρών περιλαμβάνουν παρατηρήσεις που συλλέγονται διαδοχικά με την πάροδο του χρόνου, επιτρέποντας στους αναλυτές να μελετήσουν τις τάσεις, τις εποχιακές διακυμάνσεις και τα κυκλικά μοτίβα. Αυτή η μεθοδολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε τομείς όπου η κατανόηση της χρονικής δυναμικής είναι ζωτικής σημασίας, όπως τα οικονομικά, τα οικονομικά και η περιβαλλοντική επιστήμη. Εξετάζοντας πώς μια μεταβλητή αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, οι ερευνητές μπορούν να εντοπίσουν τα υποκείμενα μοτίβα και να προβλέψουν μελλοντικές συμπεριφορές.

Αντίθετα, τα δεδομένα διατομής παρέχουν ένα στιγμιότυπο πολλαπλών οντοτήτων σε ένα μόνο χρονικό σημείο, διευκολύνοντας τις συγκρίσεις μεταξύ υποκειμένων ή ομάδων. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται συνήθως σε κοινωνικές επιστήμες, μελέτες υγείας και έρευνα αγοράς, όπου η κατανόηση των διαφορών μεταξύ διαφορετικών πληθυσμών ή τομέων μπορεί να αποφέρει πολύτιμες γνώσεις. Η διατομεακή ανάλυση βοηθά στον εντοπισμό συσχετίσεων και συσχετίσεων μεταξύ μεταβλητών χωρίς τις πολυπλοκότητες που εισάγονται από παράγοντες που σχετίζονται με το χρόνο.

Τα δεδομένα πίνακα, ένα υβρίδιο των δύο προηγούμενων μεθοδολογιών, συνδυάζουν στοιχεία τόσο χρονοσειρών όσο και δεδομένων διατομής. Παρατηρώντας πολλά θέματα με την πάροδο του χρόνου, τα δεδομένα πάνελ επιτρέπουν μια πιο πλούσια ανάλυση που καταγράφει τόσο την ατομική ετερογένεια όσο και τη χρονική δυναμική. Αυτή η μεθοδολογία δίνει τη δυνατότητα στους ερευνητές να εξετάσουν πώς οι αλλαγές στις μεταβλητές επηρεάζουν τα αποτελέσματα σε διαφορετικά πλαίσια και περιόδους, καθιστώντας την ένα ανεκτίμητο εργαλείο για διαχρονικές μελέτες.

Σε αυτή την έρευνα, θα χρησιμοποιήσουμε την ανάλυση παλινδρόμησης ως μια ισχυρή στατιστική τεχνική για να διερευνήσουμε τις σχέσεις μεταξύ ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών εντός της επιλεγμένης μεθοδολογίας μας. Αξιοποιώντας τα δυνατά σημεία αυτών των οικονομετρικών πλαισίων, στοχεύουμε να αποκαλύψουμε σημαντικά πρότυπα και οδηγούς συμπεριφοράς, συμβάλλοντας έτσι στη βαθύτερη κατανόηση των υπό διερεύνηση φαινομένων. Αυτή η εξερεύνηση θα αποτελέσει τελικά τη βάση για τη διατύπωση τεκμηριωμένων συστάσεων στον τομέα της απόδοσης του καταψύκτη και της διαχείρισης θερμοκρασίας.

Επομένως, η παρούσα διατριβή εφαρμόζει μια μεθοδολογία πάνελ δεδομένων επειδή παρουσιάζει συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις προσεγγίσεις της διατομής και της χρονοσειράς. Σύμφωνα με τον Cheng Hsiao (2007), τα δεδομένα πάνελ συνδυάζουν τόσο τις διατομές όσο και τις διαστάσεις χρονοσειράς για να διευρύνουν το σύνολο δεδομένων και ως εκ τούτου να αυξήσουν την πολυπλοκότητα και τη διακύμανση που οι στατιστικές αναλύσεις μπορούν να αποτυπώσουν αξιόπιστα. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο ενισχύει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των εκτιμήσεων επειδή ελέγχει την ατομική ετερογένεια, αλλά επίσης μειώνει το πρόβλημα της πολυσυγγραμμικότητας μεταξύ των επεξηγηματικών μεταβλητών, πράγμα που σημαίνει πιο συνεπείς και αξιόπιστες εκτιμήσεις. Η βασική μορφή του μοντέλου δεδομένων πίνακα είναι η εξής:

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{it,1} + \beta_2 X_{it,2} + \dots + \beta_k X_{it,k} + a_i + u_{it}$$

Εξίσωση 1 Basic Panel Model

Όπου ο όρος Y_{it} είναι η παρατήρηση της i -εξαρτώμενης μεταβλητής Y για $i = 1, 2, \dots, n$ και $t = 1, 2, \dots, t$. Ο όρος $X_{i,j}$ είναι η παρατήρηση της μονάδας i της ανεξάρτητης μεταβλητής X_j για $i = 1, 2, \dots, n$; $t = 1, 2, \dots, t$; και $j = 1, 2, \dots, k$. Επιπλέον, το a_i είναι οι μη παρατηρούμενοι παράγοντες που επηρεάζουν την εξαρτημένη μεταβλητή και η μονάδα είναι το σφάλμα που εκφράζει μη παρατηρηθέντες παράγοντες που επηρεάζουν την εξαρτημένη μεταβλητή με την πάροδο του χρόνου.

Επιπλέον, υπάρχουν δύο κύριες μεθοδολογίες για την επεξεργασία δεδομένων πάνελ: σταθερά εφέ και τυχαία εφέ. Η προσέγγιση σταθερών επιδράσεων προϋποθέτει ότι οι μη παρατηρούμενοι παράγοντες a_i συσχετίζονται με τις ανεξάρτητες μεταβλητές, επιτρέποντας τον έλεγχο των αμετάβλητων στο χρόνο χαρακτηριστικών εντός του συνόλου δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, η προσέγγιση των τυχαίων επιδράσεων υποθέτει ότι οι μη παρατηρούμενοι παράγοντες a_i δεν συσχετίζονται με τις ανεξάρτητες μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν πιο αποτελεσματικές εκτιμήσεις σύμφωνα με αυτήν την υπόθεση. Η επιλογή μεταξύ αυτών των μεθοδολογιών συνήθως εξαρτάται από διαγνωστικές δοκιμές όπως η δοκιμή Hausman, η οποία αξιολογεί την καταλληλότητα οποιουδήποτε μοντέλου με βάση τη συσχέτιση μεταξύ a_i και των ανεξάρτητων μεταβλητών.

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{it,1} + \beta_2 X_{it,2} + \dots + \beta_k X_{it,k} + a_1 + u_{it}, \text{Cov}(a_i, X_{it}) \neq 0$$

Εξίσωση 2 Fixed Effects Model

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{it,1} + \beta_2 X_{it,2} + \dots + \beta_k X_{it,k} + a_1 + u_{it}, \text{Cov}(a_i, X_{it}) = 0$$

Εξίσωση 3 Random Effects Model

Η χρήση ανάλυσης χρονοσειρών παρέχει μια σημαντική εικόνα για το πώς η ομοιομορφία και απόδοση των 3 τύπων καταψυκτών μπορεί να επηρεάζονται από εξωτερικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Αυτή η ανάλυση επιτρέπει την παρατήρηση της σταθερότητας και των πιθανοτήτων διακύμανσης θερμοκρασίας. Η διαθεσιμότητα δεδομένων παρουσιάζεται στο Πίνακα 6.

Πίνακας 6 Μακροπρόθεσμα Δεδομένα			
	Ερμητικός Συμπιεστής	Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Πολυσυμπιεστές
-40°C	Μη Διαθέσιμα	Διαθέσιμα	Μη Διαθέσιμα
-70°C	Διαθέσιμα	Διαθέσιμα	Διαθέσιμα
Δείγμα	9 καταψύκτες	10 Καταψύκτες	4 Καταψύκτες

Στο πλαίσιο της ανάλυσης της απόδοσης και της ομοιομορφίας του καταψύκτη, η επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών είναι κρίσιμη. Αυτή η μελέτη εστιάζει σε τρία μοντέλα πάνελ παλινδρόμησης που στοχεύουν στην πρόβλεψη της τυπικής απόκλισης (StD), της μέσης θερμοκρασίας (AvG) και του συντελεστή διακύμανσης (CV) των θερμοκρασιών στους τρεις τύπους καταψυκτών που αναλύονται. Κάθε μεταβλητή που επιλέγεται για αυτήν την ανάλυση παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανόηση της δυναμικής της απόδοσης του καταψύκτη, ιδιαίτερα όσον αφορά τη διατήρηση της ομοιομορφίας της θερμοκρασίας - μια κρίσιμη πτυχή για τη διασφάλιση της ποιότητας, της ασφάλειας και της απόδοσης του προϊόντος. Έτσι, έχουμε τα παρακάτω τρία μοντέλα:

$$StD_{i,t} = a + \beta_1 StD_{i,t-1} + \beta_2 RT_{i,t} + \beta_3 RRH_{i,t} + \beta_4 OD_{i,t} + \beta_5 OT_{i,t} + \varepsilon_{i,t}$$

Εξίσωση 4 Μοντέλο Μηνιαίας Τυπικής Απόκλισης Διακύμανσης

$$AvG_{i,t} = a + \beta_1 AvG_{i,t-1} + \beta_2 RT_{i,t} + \beta_3 RRH_{i,t} + \beta_4 OD_{i,t} + \beta_5 OT_{i,t} + \varepsilon_{i,t}$$

Εξίσωση 5 Μοντέλο Μηνιαίας Μέσης Θερμοκρασίας

$$CV_{i,t} = a + \beta_1 CV_{i,t-1} + \beta_2 RT_{i,t} + \beta_3 RRH_{i,t} + \beta_4 OD_{i,t} + \beta_5 OT_{i,t} + \varepsilon_{i,t}$$

Εξίσωση 6 Μοντέλο Μηνιαίας Διακύμανσης

Τα τρία μοντέλα που σχεδιάστηκαν - με στόχο την πρόβλεψη των StD, AvG και CV - εξυπηρετούν συμπληρωματικές λειτουργίες για την αξιολόγηση της απόδοσης του καταψύκτη λαμβάνοντας υπόψη εξωτερικούς παράγοντες. Η μεταβλητότητα της θερμοκρασίας είναι ένα βασικό μέλημα στη διαχείριση καταψύκτη. Μια χαμηλότερη τυπική απόκλιση υποδηλώνει μεγαλύτερη ομοιομορφία στη θερμοκρασία, η οποία είναι σημαντική για τη διατήρηση των ευπαθών αγαθών. Η μέση θερμοκρασία αντανakλά περαιτέρω τη συνολική απόδοση ψύξης του καταψύκτη. Αυτές οι δύο μετρήσεις συνδέονται θεμελιωδώς, καθώς οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσουν σε μη ασφαλείς συνθήκες αποθήκευσης.

- **Μοντέλο 1 - StD:** Αυτό το μοντέλο επιδιώκει να κατανοήσει πώς η προηγούμενη απόδοση ($StD_{i,t-1}$) και διάφοροι λειτουργικοί παράγοντες (RT, RRH, OD, OT) επηρεάζουν την τρέχουσα μεταβλητότητα της θερμοκρασίας. Εντοπίζοντας σημαντικούς προγνωστικούς παράγοντες, στοχεύω να παρέχω πληροφορίες για τη διατήρηση της βέλτιστης ομοιομορφίας θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου, βελτιώνοντας έτσι την ασφάλεια και την ποιότητα των προϊόντων.
- **Μοντέλο 2 - AvG:** Αυτό το μοντέλο εστιάζει στον εντοπισμό τάσεων στη μέση θερμοκρασία, ενσωματώνοντας ιστορικά δεδομένα καθώς και τις επιδράσεις των λειτουργικών μεταβλητών. Με την ανάλυση αυτού του μοντέλου, ελπίζω να δημιουργήσω σημεία αναφοράς για τις μέσες θερμοκρασίες λειτουργίας που διασφαλίζουν μακροπρόθεσμη απόδοση και ασφάλεια στους καταψύκτες.
- **Μοντέλο 3 - CV:** Διερευνώντας τον συντελεστή διακύμανσης, το μοντέλο αξιολογεί τη συνέπεια της θερμοκρασίας σε σχέση με τις μέσες συνθήκες. Ένα χαμηλό CV υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία παραμένει σταθερή σε σχέση με τον μέσο όρο με την πάροδο του χρόνου. Η κατανόηση της παραλλαγής επιτρέπει στοχευμένες παρεμβάσεις για την προώθηση πιο συνεπούς απόδοσης.

Στην προσπάθεια ανάλυσης της απόδοσης και της ομοιομορφίας του καταψύκτη, η επιλογή ανεξάρτητων μεταβλητών είναι αναπόσπαστο κομμάτι της ανάπτυξης ενός ισχυρού μοντέλου. Η επιλογή ανεξάρτητων μεταβλητών στα μοντέλα παλινδρόμησης - μέση μηνιαία θερμοκρασία ανά εποχή (RT), μηνιαία μέση σχετική υγρασία ανά εποχή (RRH), μηνιαία ποσότητα ανοιγόμενων θυρών (OD) και χρόνος λειτουργίας (OT). Η κατανόηση της λογικής πίσω από κάθε επιλογή ανεξάρτητης μεταβλητής υπογραμμίζει περαιτέρω τη συνάφεια και τη συμβολή τους στον απώτερο στόχο της βελτίωσης της λειτουργικής απόδοσης του καταψύκτη.

RT (Μηνιαία Μέση θερμοκρασία ανά εποχή)

Αυτή η μεταβλητή αντιπροσωπεύει τις συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος που επηρεάζουν τη λειτουργία του καταψύκτη. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι εξωτερικές θερμοκρασίες επηρεάζουν τις εσωτερικές συνθήκες είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης και λειτουργικότητας των μονάδων κατάψυξης. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος που περιβάλλει έναν καταψύκτη είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει την εσωτερική του ρύθμιση

θερμοκρασίας. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος απαιτούν περισσότερη ενέργεια ώστε ο συμπιεστής να διατηρήσει τις βέλτιστες εσωτερικές συνθήκες, οδηγώντας δυνητικά σε μεταβλητότητα στην απόδοση. Συμπεριλαμβάνοντας το RT, το μοντέλο μπορεί να εξηγήσει τις διακυμάνσεις στην απόδοση του καταψύκτη που σχετίζονται με αλλαγές στο εξωτερικό περιβάλλον. Αυτή η μεταβλητή επιτρέπει μια σαφέστερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι εξωτερικές συνθήκες συσχετίζονται με τις εσωτερικές μετρήσεις θερμοκρασίας, διευκολύνοντας έτσι την καλύτερη πρόβλεψη και την αποτελεσματική διαχείριση της θερμοκρασίας.

RRH (Μηνιαία Μέση Σχετική Υγρασία ανά εποχή)

Η υγρασία μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη διαδικασία ψύξης. Τα υψηλά επίπεδα υγρασίας μπορούν να οδηγήσουν σε συσσώρευση παγετού, επηρεάζοντας τόσο την κατανάλωση ενέργειας όσο και την απόδοση ψύξης. Είναι σημαντικό να ενσωματωθεί αυτή η μεταβλητή για να προβλέψουμε πώς οι εξωτερικοί παράγοντες αλλάζουν την απόδοση του καταψύκτη. Η υγρασία παίζει σημαντικό ρόλο στη θερμική δυναμική των συστημάτων κατάψυξης. Τα υψηλά επίπεδα υγρασίας μπορούν να οδηγήσουν σε υπερβολική συσσώρευση παγετού, η οποία όχι μόνο επηρεάζει τη σταθερότητα της θερμοκρασίας αλλά και αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας καθώς το σύστημα εργάζεται σκληρότερα για να διατηρήσει τις επιθυμητές συνθήκες. Η συμπερίληψη του RRH επιτρέπει την εξέταση της σχέσης μεταξύ της απόδοσης υγρασίας και θερμοκρασίας. Κατανοώντας πώς η σχετική υγρασία επηρεάζει τις θερμικές διακυμάνσεις, η μελέτη μπορεί να επισημάνει τις λειτουργικές προσαρμογές που ελαχιστοποιούν τον αρνητικό αντίκτυπο της, όπως βελτιωμένο σχεδιασμό της πόρτας ή αλλαγές στις πρακτικές συντήρησης.

OD (Μηνιαίος αριθμός φορών ανοίγματος θυρών)

Αυτός ο παράγοντας ποσοτικοποιεί τη συχνότητα των ανοιγμάτων της πόρτας, μια κρίσιμη πτυχή που επηρεάζει άμεσα τη σταθερότητα της θερμοκρασίας. Το συχνό άνοιγμα μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, δυνητικά θέτοντας σε κίνδυνο την ακεραιότητα των αποθηκευμένων προϊόντων. Η παρακολούθηση αυτής της μεταβλητής βοηθά στην ανάλυση λειτουργικών πρακτικών που βελτιώνουν ή εμποδίζουν την απόδοση του καταψύκτη. Η συχνότητα των ανοιγμάτων της πόρτας είναι μια λειτουργική μεταβλητή που παίζει άμεσο ρόλο στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Κάθε άνοιγμα μπορεί να εισάγει θερμότερο αέρα στον καταψύκτη, οδηγώντας σε προσωρινές αυξήσεις της θερμοκρασίας που μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ακεραιότητα του προϊόντος εάν δεν ελεγχθεί. Το OD καταγράφει αυτό το φαινόμενο ποσοτικά, επιτρέποντας την ανάλυση του τρόπου με τον οποίο οι πρακτικές διαχείρισης θυρών επηρεάζουν τη μεταβλητότητα της θερμοκρασίας. Η κατανόηση αυτής της σχέσης μπορεί να οδηγήσει σε συστάσεις για επιχειρησιακές στρατηγικές που μειώνουν τη συχνότητα ανοίγματος θυρών, όπως η καλύτερη διαχείριση αποθεμάτων και η εκπαίδευση των εργαζομένων.

Χρόνος Λειτουργίας (OT)

Ο χρόνος λειτουργίας, ή η διάρκεια χρήσης ενός καταψύκτη, είναι μια κρίσιμη ανεξάρτητη μεταβλητή για την ανάλυση της απόδοσης και της ομοιομορφίας του καταψύκτη. Αυτή η μεταβλητή καταγράφει τις αθροιστικούς μήνες που μια μονάδα λειτουργεί ενεργά στον καθορισμένο ρόλο της. Η λογική πίσω από

τη συμπερίληψη του χρόνου λειτουργίας στα μοντέλα παλινδρόμησης βασίζεται στην κατανόηση ότι καθώς οι καταψύκτες γερνούν και υφίστανται φθορά, η απόδοση και η αποτελεσματικότητά τους μπορεί να μειωθούν. Με την πάροδο του χρόνου, παράγοντες όπως η υποβάθμιση του ψυκτικού μέσου, η κόπωση του συμπιεστή και η συσσώρευση πάγου ή βρωμιάς μπορεί να εμποδίσουν τον μηχανισμό ψύξης, οδηγώντας ενδεχομένως σε αυξημένες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και μεταβλητότητα. Η παρακολούθηση του χρόνου λειτουργίας επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασής του στις μετρήσεις απόδοσης, όπως η τυπική απόκλιση θερμοκρασίας (StD), η μέση θερμοκρασία (AvG) και ο συντελεστής διακύμανσης (CV). Μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό τάσεων στην υποβάθμιση της απόδοσης και να επιτρέψει τον προληπτικό προγραμματισμό συντήρησης. Επιπλέον, ο χρόνος λειτουργίας παρέχει πληροφορίες για τη σχέση μεταξύ της ηλικίας του εξοπλισμού και της λειτουργικής αποτελεσματικότητας, καθοδηγώντας έτσι τις στρατηγικές αποφάσεις σχετικά με την αντικατάσταση ή την αναβάθμιση του εξοπλισμού. Κατανοώντας πώς ο λειτουργικός χρόνος επηρεάζει τη διαχείριση της θερμοκρασίας, οι ερευνητές και οι επαγγελματίες μπορούν να εφαρμόσουν έγκαιρες παρεμβάσεις για να ενισχύσουν την αξιοπιστία και τη συνέπεια των συστημάτων ψυγείων.

Η επιλογή αυτών των ανεξάρτητων μεταβλητών δεν είναι αυθαίρετη. Κάθε μεταβλητή συνδέεται σαφώς με τους πρωταρχικούς ερευνητικούς στόχους της κατανόησης των επιρροών της ομοιομορφίας θερμοκρασίας και της απόδοσης στους καταψύκτες. Με την ακριβή μοντελοποίηση της δυναμικής μεταξύ αυτών των προγνωστικών παραγόντων και των εξαρτημένων μεταβλητών (StD, AvG, CV), η ανάλυση μπορεί να δώσει πρακτικές γνώσεις για το πώς οι λειτουργικές πρακτικές, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και οι τεχνολογικές επιλογές επηρεάζουν την απόδοση του καταψύκτη. Οι καταψύκτες είναι εξοπλισμένοι με διαφορετικές τεχνολογίες συμπιεστών, οι οποίες μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ως προς την απόδοση, την ικανότητα ψύξης και τη λειτουργική συμπεριφορά. Κάθε τύπος συμπιεστή μπορεί να ανταποκρίνεται διαφορετικά σε εξωτερικές συνθήκες και λειτουργικούς παράγοντες. Επομένως, η παραπάνω ανάλυση πραγματοποιείται ξεχωριστά για κάθε τύπο μοντέλου για να μπορέσουμε να προχωρήσουμε σε σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Υποθέσεις για τα μοντέλα

Μοντέλο 1: Τυπική απόκλιση θερμοκρασίας (StD)

- Υπόθεση 1 (H1): Επίδραση Ιστορικής Διακύμανσης Θερμοκρασίας. Η τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας τη χρονική στιγμή (t) ($StD_{i,t}$) σχετίζεται θετικά με την τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας τη στιγμή ($t-1$) ($StD_{i,t-1}$). Εάν η μεταβλητότητα του προηγούμενου μήνα είναι υψηλή, είναι πιθανό να συνεχιστεί λόγω επίμονων χειρισμών ή λειτουργικών πρακτικών.
- Υπόθεση 2 (H2): Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η υψηλότερη μηνιαία μέση θερμοκρασία ($RT_{i,t}$) επηρεάζει αρνητικά την τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας ($StD_{i,t}$) εντός του καταψύκτη. Οι αυξημένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορεί να οδηγήσουν σε μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην εσωτερική θερμοκρασία του καταψύκτη.

- Υπόθεση 3 (H3): Ο ρόλος της υγρασίας στη μεταβλητότητα. Η υψηλότερη μέση σχετική υγρασία ($RRH_{i,t}$) αναμένεται να αυξήσει την τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας ($StD_{i,t}$). Η υγρασία μπορεί να επηρεάσει την απόδοση ψύξης και τη συσσώρευση παγετού, οδηγώντας σε λιγότερο σταθερές θερμοκρασίες.
- Υπόθεση 4 (H4): Επίδραση χρήσης πόρτας. Μια αύξηση στη μηνιαία ποσότητα των ανοιγμάτων της πόρτας ($AOD_{i,t}$) συσχετίζεται θετικά με την τυπική απόκλιση θερμοκρασίας ($StD_{i,t}$). Τα πιο συχνά ανοίγματα θυρών μπορεί να διαταράξουν το σταθερό περιβάλλον ψύξης, προκαλώντας μεγαλύτερη διακύμανση της θερμοκρασίας.
- Υπόθεση 5 (H5): Επίπτωση του Λειτουργικού Χρόνου στη Μεταβλητότητα. Ο αυξημένος χρόνος λειτουργίας (OT_t) σχετίζεται θετικά με την τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας (StD_t) εντός του καταψύκτη. Καθώς ο καταψύκτης γερνά, η φθορά μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας λόγω της μειωμένης απόδοσης ψύξης.

Μοντέλο 2: Μέση θερμοκρασία ($AvG_{i,t}$)

- Υπόθεση 6 (H6): Ιστορική Μέση Επίδραση Θερμοκρασίας. Η μέση θερμοκρασία τη στιγμή (t) ($AvG_{i,t}$) επηρεάζεται θετικά από τη μέση θερμοκρασία τη στιγμή ($t-1$) ($AvG_{i,t-1}$). Ένας σταθερός ιστορικός μέσος όρος μπορεί να υποδηλώνει συνεχή συνέπεια απόδοσης.
- Υπόθεση 7 (H7): Επίπτωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η μέση θερμοκρασία ($AvG_{i,t}$) μέσα στον καταψύκτη αυξάνεται με την αύξηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας ($RT_{i,t}$). Ο καταψύκτης πρέπει να εργάζεται σκληρότερα για να διατηρεί τις επιθυμητές δροσερές θερμοκρασίες κατά τους θερμότερους μήνες.
- Υπόθεση 8 (H8): Επιρροή υγρασίας. Η μέση σχετική υγρασία ($RRH_{i,t}$) επηρεάζει αρνητικά τη μέση θερμοκρασία ($AvG_{i,t}$) εντός του καταψύκτη. Τα υψηλά επίπεδα υγρασίας μπορεί να οδηγήσουν σε κατακράτηση υγρασίας, επηρεάζοντας έτσι τις συνθήκες μέσης θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου.
- Υπόθεση 9 (H9): Συχνότητα ανοίγματος πόρτας. Η μέση θερμοκρασία ($AvG_{i,t}$) αυξάνεται με υψηλότερες συχνότητες ανοιγμάτων θυρών ($AOD_{i,t}$). Κάθε άνοιγμα πόρτας μπορεί να ανεβάσει την εσωτερική θερμοκρασία λόγω της ανταλλαγής θερμού αέρα.
- Υπόθεση 10 (H10): Σχέση μέσης θερμοκρασίας με την ηλικία. Η μέση θερμοκρασία ($AvG_{i,t}$) στον καταψύκτη αυξάνεται με μεγαλύτερο χρόνο λειτουργίας ($OT_{i,t}$). Με την πάροδο του χρόνου, οι παλαιότερες μονάδες μπορεί να δυσκολεύονται να διατηρήσουν χαμηλές θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα μια ανοδική τάση στις μέσες θερμοκρασίες λειτουργίας.

Μοντέλο 3: Συντελεστής Διακύμανσης ($CV_{i,t}$)

- Υπόθεση 11 (H11): Συνέπεια ιστορικής παραλλαγής. Ο συντελεστής διακύμανσης τη χρονική στιγμή (t) ($CV_{i,t}$) σχετίζεται θετικά με τον συντελεστή διακύμανσης τη στιγμή ($t-1$) ($CV_{i,t-1}$).

Εάν οι θερμοκρασίες ήταν προηγουμένως ασυνεπείς, είναι πιθανό ότι αυτή η μεταβλητότητα θα παραμείνει.

- Υπόθεση 12 (H12): Διακύμανση θερμοκρασίας από εξωτερικούς παράγοντες. Το $CV_{i,t}$ αυξάνεται με υψηλότερη μηνιαία μέση θερμοκρασία ($RT_{i,t}$). Οι αυξημένες εξωτερικές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη μεταβλητότητα στις λειτουργίες και τις εσωτερικές συνθήκες.
- Υπόθεση 13 (H13): Υγρασία και Διακύμανση. Η υψηλότερη μηνιαία μέση σχετική υγρασία ($RRH_{i,t}$) αναμένεται να οδηγήσει σε υψηλότερο συντελεστή διακύμανσης ($CV_{i,t}$). Η υγρασία μπορεί να επιδεινώσει τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, οδηγώντας σε μεγαλύτερη σχετική μεταβλητότητα.
- Υπόθεση 14 (H14): Ανοίγματα θυρών και συνέπεια. Μια αύξηση στο μηνιαίο ποσό των ανοιγμάτων της πόρτας ($AOD_{i,t}$) συσχετίζεται θετικά με τον συντελεστή διακύμανσης ($CV_{i,t}$). Τα συχνά ανοίγματα μπορεί να προκαλέσουν αστάθεια στη θερμοκρασία, οδηγώντας σε μεγαλύτερη μεταβλητότητα σε σχέση με τον μέσο όρο.
- Υπόθεση 15 (H15): Συνοχή χρόνου λειτουργίας και θερμοκρασίας. Ο συντελεστής διακύμανσης ($CV_{i,t}$) συσχετίζεται θετικά με το χρόνο λειτουργίας ($OT_{i,t}$). Καθώς ο καταψύκτης γερνά και η απόδοση μειώνεται, μπορεί να παρουσιάζει μεγαλύτερη σχετική μεταβλητότητα στη θερμοκρασία, υποδηλώνοντας χαμηλότερη συνέπεια απόδοσης.

Συμπερασματικά, οι επιλεγμένες μεταβλητές και τα μοντέλα αποτελούν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την ανάλυση της απόδοσης και της ομοιομορφίας του καταψύκτη. Εστιάζοντας σε συγκεκριμένους λειτουργικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη δυναμική της θερμοκρασίας, αυτή η έρευνα στοχεύει να παρέχει πολύτιμες γνώσεις για τη βιομηχανία. Τα ευρήματα θα συμβάλουν σε βελτιωμένες πρακτικές αποθήκευσης, θα ενισχύσουν την ενεργειακή απόδοση και θα διασφαλίσουν την ασφάλεια και την ποιότητα των ευπαθών αγαθών, εκπληρώνοντας τόσο ακαδημαϊκούς στόχους όσο και πρακτικές εφαρμογές στη διαχείριση καταψύκτη. Μέσω αυστηρής ανάλυσης και στοχαστικής ερμηνείας των αποτελεσμάτων, αυτή η μελέτη προσπαθεί να θέσει τα θεμέλια για συνεχείς βελτιώσεις στην απόδοση του καταψύκτη. Τέλος, οι υποθέσεις παρέχουν ένα πλαίσιο για τον έλεγχο των σχέσεων μεταξύ των ανεξάρτητων και των εξαρτημένων μεταβλητών στη μελέτη σας για την απόδοση και την ομοιομορφία του καταψύκτη. Αξιολογώντας αυτές τις υποθέσεις, μπορείτε να αποκτήσετε γνώσεις σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο διάφοροι λειτουργικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν τις μετρήσεις θερμοκρασίας, καθοδηγώντας τελικά τις βελτιώσεις στις πρακτικές διαχείρισης καταψύκτη.

4. Εμπειρική Ανάλυση

4.1. Συγκριτική ανάλυση Δοκιμής 24ωρης Συνεχής Μέτρησης Θερμοκρασίας

Οι καταψύκτες εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας (ULT) είναι κρίσιμοι σε διάφορες επιστημονικές και ιατρικές εφαρμογές όπου η διατήρηση βιολογικών δειγμάτων, φαρμακευτικών προϊόντων και άλλων ευαίσθητων υλικών σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες είναι απαραίτητη όπως αναλύθηκε παραπάνω. Αυτό το κεφάλαιο συγκρίνει τρεις τύπους καταψυκτών ULT—ερμητικό συμπιεστή, μηχανή ελεύθερου εμβόλου και πολυσυμπιεστές—αναλύοντας την απόδοσή τους τόσο σε συνθήκες κενού θαλάμου όσο και σε συνθήκες θαλάμου με φορτίο σε θερμοκρασίες -40°C και -70°C . Η ανάλυση επικεντρώνεται αρχικά στις μέσες θερμοκρασίες, την ομοιομορφία, όπως υποδεικνύεται από την τυπική απόκλιση και τον συντελεστή διακύμανσης, και τις διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των δύο διαφορετικών συνθηκών. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα των καταψυκτών Ultra-Low Temperature (ULT) μπορεί να ποικίλλει όχι μόνο με βάση τον τύπο τεχνολογίας αλλά και σε επίπεδο διαμόρφωσης. Έτσι, παρακάτω αναλύονται τα δεδομένα και σε επίπεδο τοποθέτησης του αισθητήρα μέσα στο θάλαμο. Αυτή η ανάλυση όπως και παραπάνω εστιάζει στην απόδοση θερμοκρασίας των διαφορετικών τύπων καταψύκτη στους -40°C και -70°C σε διάφορες θέσεις και επίπεδα ραφιών κατά τη διάρκεια μελετών τόσο με άδειο όσο και με φορτωμένο θάλαμο.

Απόδοση στους -40°C

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 7, ο Ερμητικός Συμπιεστής σε κατάσταση κενού θαλάμου κατέγραψε μέση θερμοκρασία $-42,28^{\circ}\text{C}$. Ωστόσο, με μέση τυπική απόκλιση $1,54^{\circ}\text{C}$, ο καταψύκτης εμφάνισε μεγάλες διακυμάνσεις θερμοκρασίας, γεγονός που τονίζει την έλλειψη ομοιομορφίας. Ο συντελεστής διακύμανσης στο 3,6% υπογραμμίζει περαιτέρω αυτή τη μεταβλητότητα. Αντίστοιχα, σε κατάσταση φόρτισης, η μέση θερμοκρασία βελτιώθηκε ελαφρώς στους $-42,31^{\circ}\text{C}$, επιδεικνύοντας ελαφρά αντίσταση στο θερμικό φορτίο. Η τυπική απόκλιση μειώθηκε στο $1,40^{\circ}\text{C}$, υποδηλώνοντας οριακά καλύτερη ομοιομορφία σε σύγκριση με την κενή κατάσταση, ωστόσο παραμένει σχετικά υψηλός αριθμός.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 8, στη μελέτη του Ερμητικού Συμπιεστή, ήταν εμφανής μια αξιοσημείωτη διαφορά στις διάφορες θέσεις. Οι μέσες θερμοκρασίες στο επάνω ράφι κυμαίνονταν από $-44,30^{\circ}\text{C}$ στην αριστερή ψηλή πίσω θέση έως $-43,63^{\circ}\text{C}$ στη δεξιά κάτω μπροστινή θέση κατά τη διάρκεια της άδειας κατάστασης, υποδεικνύοντας σχετικά σταθερή απόδοση ψύξης. Η μεταβλητότητα αποτυπώνεται με τυπικές αποκλίσεις $2,08^{\circ}\text{C}$ και $1,81^{\circ}\text{C}$, αντίστοιχα. Στο μεσαίο ράφι οι μέσες θερμοκρασίες παρέμειναν ελαφρώς υψηλότερες από το πάνω ράφι, κυμαινόμενες από $-43,07^{\circ}\text{C}$ έως $-42,42^{\circ}\text{C}$. Οι θερμοκρασίες υποδεικνύουν μια σταδιακή θέρμανση καθώς μετακινείται από το επάνω μέρος στο μεσαίο ράφι. Το κάτω ράφι παρουσίασε τη θερμότερη μέση θερμοκρασία στους $-41,16^{\circ}\text{C}$, υποδεικνύοντας ότι αυτό το ράφι μπορεί να είναι λιγότερο αποτελεσματικό στην ψύξη. Η

χαμηλότερη τυπική απόκλιση ($0,95^{\circ}\text{C}$) εδώ υποδηλώνει ότι, αν και λειτουργεί σε υψηλότερη θερμοκρασία, το κάνει με λιγότερη απόκλιση. Υπό συνθήκες φόρτωσης, η τάση παραμένει, με το επάνω ράφι να είναι σταθερά πιο κρύο από τα μεσαία και τα κάτω ράφια. Αυτό δείχνει ότι οι επάνω περιοχές του καταψύκτη επωφελούνται από τα πλεονεκτήματα άμεσης ψύξης, ενώ η φόρτωση δειγμάτων μπορεί να επηρεάσει ελαφρώς την απόδοση ψύξης, ιδιαίτερα αισθητή στο κάτω ράφι.

Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου ξεπέρασε τους αντίστοιχους με μέση θερμοκρασία $-44,03^{\circ}\text{C}$ κατά την μελέτη με άδειο θάλαμο (βλ. Πίνακα 7). Η χαμηλή τυπική του απόκλιση $0,32^{\circ}\text{C}$ σημαίνει εξαιρετική ομοιομορφία και δείχνει ότι η θερμοκρασία είναι σταθερή σε όλο τον θάλαμο, καθιστώντας το ιδανικό για ευαίσθητα υλικά. Η μέση θερμοκρασία στην κατάσταση φόρτωσης ήταν $-43,75^{\circ}\text{C}$. Ενώ υπήρξε μια ελαφρά αύξηση της θερμοκρασίας, η συντήρηση σε κοντινή απόσταση από την κενή κατάστασή του δείχνει τη στιβαρότητα του κινητήρα ελεύθερου εμβόλου υπό φορτίο. Η πολύ χαμηλή τυπική του απόκλιση υπογραμμίζει την εξαιρετική σταθερότητα της θερμοκρασίας. Ένα άλλο κρίσιμο στοιχείο είναι ο τρόπος με τον οποίο διαφορετικοί τύποι καταψύκτη ανταποκρίνονται στις συνθήκες φορτίου, καθώς η παρουσία δειγμάτων μπορεί να επηρεάσει τη διατήρηση της θερμοκρασίας.

Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου παρουσίασε παρόμοιες τάσεις με τον κινητήρα Ερμητικού Συμπιεστή σε επίπεδο ραφίου (βλ. Πίνακα 8). Στο επάνω ράφι, οι μέσες θερμοκρασίες κυμαίνονταν από $-44,20^{\circ}\text{C}$ έως $-43,45^{\circ}\text{C}$, με πολύ χαμηλή τυπική απόκλιση ($0,33^{\circ}\text{C}$ και $0,32^{\circ}\text{C}$), υπογραμμίζοντας μια εξαιρετικά ομοιόμορφη θερμοκρασία σε αυτές τις θέσεις. Στο μεσαίο ράφι οι μέσες θερμοκρασίες κυμαίνονταν μεταξύ $-44,35^{\circ}\text{C}$ και $-43,97^{\circ}\text{C}$, διατηρώντας χαμηλές τιμές ενδεικτικές αξιόπιστης απόδοσης ψύξης. Στο κάτω ράφι, αν και παραμένει χαμηλό στους $-44,86^{\circ}\text{C}$, παρουσιάζει ελαφρώς μικρότερη ικανότητα ψύξης σε σύγκριση με το επάνω ράφι. Ωστόσο, η τυπική απόκλιση παραμένει χαμηλή, εξασφαλίζοντας σταθερότητα στη θερμοκρασία ακόμη και υπό φορτίο. Τέλος, η απόδοση του κινητήρα ελεύθερου εμβόλου υποδηλώνει ότι διατηρεί εξαιρετική ομοιομορφία σε όλες τις θέσεις, ιδιαίτερα αξιοσημείωτη σε συνθήκες φόρτισης—με μέσο όρο μόνο μικρές αλλαγές στη θερμοκρασία κατά τη μετάβαση από κενή σε φορτισμένη κατάσταση.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 7, ο Πολυσυμπιεστής κατέγραψε μέση θερμοκρασία $-42,20^{\circ}\text{C}$, δείχνοντας ικανή απόδοση παρόμοια με τον Ερμητικό Συμπιεστή αλλά με ελαφρώς βελτιωμένη ομοιομορφία (τυπική απόκλιση $1,28^{\circ}\text{C}$). Στη μελέτη με φόρτωση, ο καταψύκτης διατήρησε μια μέση θερμοκρασία $-42,26^{\circ}\text{C}$, παρουσιάζοντας ελάχιστη διακύμανση, με μέση τυπική απόκλιση $1,24^{\circ}\text{C}$. Αυτό τονίζει την αξιοπιστία του καθώς προσαρμόζεται στις παραλλαγές που εισάγει το φορτίο. Για Πολυσυμπιεστές, η απόδοση ψύξης κυμαινόταν επίσης με τη θέση σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 8. Στη πίσω αριστερή κορυφή, η μέση θερμοκρασία ήταν $-43,11^{\circ}\text{C}$ με σχετικά υψηλότερη τυπική απόκλιση $1,58^{\circ}\text{C}$, δείχνοντας ότι ενώ είναι αποτελεσματικό στην ψύξη, εξακολουθεί να έχει αξιοσημείωτη μεταβλητότητα. Στις μέσες θέσεις, οι μέσες θερμοκρασίες κυμαίνονταν γύρω στους -42°C , υποδηλώνοντας ότι παρά το γεγονός ότι είναι λιγότερο αποτελεσματικές

στην ψύξη σε σύγκριση με τους προηγούμενους τύπους, εξακολουθούν να παρέχουν επαρκή σταθερότητα θερμοκρασίας για λιγότερο ευαίσθητα υλικά. Τέλος, στις κάτω θέσεις οι θερμοκρασίες ήταν σταθερά υψηλότερες γύρω στους $-41,33^{\circ}\text{C}$, με σημαντική μεταβλητότητα που φαίνεται από τυπικές αποκλίσεις που κυμαίνονται από $1,14^{\circ}\text{C}$ έως $1,25^{\circ}\text{C}$.

Η ομοιομορφία είναι ουσιαστικός παράγοντας για την αποτελεσματικότητα των καταψυκτών ULT, καθώς οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα των αποθηκευμένων δειγμάτων. Στους -40°C , η χαμηλή τυπική απόκλιση του κινητήρα ελεύθερου εμβόλου $0,32^{\circ}\text{C}$ δείχνει μια εξαιρετικά ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας, διασφαλίζοντας ότι τα δείγματα διατηρούνται σταθερά σε χαμηλές θερμοκρασίες (βλ. Πίνακα 7). Εν τω μεταξύ, η υψηλότερη τυπική απόκλιση του Ερμητικού Συμπιεστή $1,54^{\circ}\text{C}$ υποδηλώνει μεγαλύτερη μεταβλητότητα, η οποία μπορεί να είναι μη αποδεκτή για ορισμένα ευαίσθητα υλικά.

Πίνακας 7 Δοκιμή 24ωρης Συνεχής Μέτρησης Θερμοκρασίας (-40°C)							
Σημείο ρύθμισης	Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Μέσος Όρος Θερμοκρασιών	Μέσος Όρος Μέγιστων Θερμοκρασιών	Μέσος Όρος Ελάχιστων Θερμοκρασιών	Μέση Τυπική Απόκλιση	Μέσος Συντελεστής Διακύμανσης
-40°C	Ερμητικός Συμπιεστής	24 ώρες Μελέτη Κενού Θαλάμου (A)	$-42,28^{\circ}\text{C}$	$-39,49^{\circ}\text{C}$	$-45,26^{\circ}\text{C}$	$1,54^{\circ}\text{C}$	3,6%
		24 ώρες Μελέτη Φορτωμένου Θαλάμου (B)	$-42,31^{\circ}\text{C}$	$-39,43^{\circ}\text{C}$	$-44,95^{\circ}\text{C}$	$1,40^{\circ}\text{C}$	3,3%
		Διαφορά (A) –(B)	$0,03^{\circ}\text{C}$	$-0,06^{\circ}\text{C}$	$-0,31^{\circ}\text{C}$	$0,14^{\circ}\text{C}$	0,3%
	Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	24 ώρες Μελέτη Κενού Θαλάμου (A)	$-44,03^{\circ}\text{C}$	$-42,52^{\circ}\text{C}$	$-44,49^{\circ}\text{C}$	$0,32^{\circ}\text{C}$	0,7%
		24 ώρες Μελέτη Φορτωμένου Θαλάμου (B)	$-43,75^{\circ}\text{C}$	$-43,60^{\circ}\text{C}$	$-43,89^{\circ}\text{C}$	$0,08^{\circ}\text{C}$	0,2%
		Διαφορά (A) –(B)	$-0,29^{\circ}\text{C}$	$1,08^{\circ}\text{C}$	$-0,60^{\circ}\text{C}$	$0,25^{\circ}\text{C}$	0,6%
	Μηχανή Πολυσυμπιεστών	24 ώρες Μελέτη Κενού Θαλάμου (A)	$-42,20^{\circ}\text{C}$	$-38,31^{\circ}\text{C}$	$-45,27^{\circ}\text{C}$	$1,28^{\circ}\text{C}$	3,0%
		24 ώρες Μελέτη Φορτωμένου Θαλάμου (B)	$-42,26^{\circ}\text{C}$	$-38,25^{\circ}\text{C}$	$-45,33^{\circ}\text{C}$	$1,24^{\circ}\text{C}$	2,9%
		Διαφορά (A) –(B)	$0,05^{\circ}\text{C}$	$-0,06^{\circ}\text{C}$	$0,06^{\circ}\text{C}$	$0,04^{\circ}\text{C}$	0,1%

Πίνακας 8 Δοκιμή 24ωρης Συνεχής Μέτρησης Θερμοκρασίας σε επίπεδο θέσης αισθητήρα (-40°C)									
Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Θέση	Ράφι	Τοποθεσία	Μέση Θερμοκρασία	Μέση Μέγιστη Θερμοκρασία	Μέση Ελάχιστη Θερμοκρασία	Μέση Τυπική Απόκλιση	Μέσος Συντελεστής Διακύμανσης
Ερμητικός Συμπιεστής	24 ώρες Μελέτη Κενού Θαλάμου (A)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-44,30°C	-40,78°C	-48,28°C	2,08°C	4,70%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-43,63°C	-40,58°C	-47,11°C	1,81°C	4,14%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-43,07°C	-39,93°C	-46,38°C	1,75°C	4,06%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-42,42°C	-38,89°C	-46,33°C	2,00°C	4,72%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-41,16°C	-39,26°C	-43,01°C	0,95°C	2,29%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-39,11°C	-37,49°C	-40,44°C	0,65°C	1,65%
	24 ώρες Μελέτη Φορτωμένου	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-44,23°C	-40,60°C	-47,86°C	2,02°C	4,56%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-43,58°C	-40,87°C	-46,02°C	1,34°C	3,08%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-42,97°C	-39,79°C	-46,38°C	1,64°C	3,83%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-42,28°C	-38,66°C	-45,76°C	1,85°C	4,36%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-41,23°C	-38,84°C	-43,14°C	1,02°C	2,46%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-39,60°C	-37,81°C	-40,55°C	0,53°C	1,34%
	Διαφορά (A) – (B) Study	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-0,08°C	-0,18°C	-0,42°C	0,07°C	0,14%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,06°C	0,29°C	-1,09°C	0,47°C	1,06%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-0,10°C	-0,14°C	0,00°C	0,10°C	0,23%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,13°C	-0,23°C	-0,57°C	0,16°C	0,36%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	0,07°C	-0,42°C	0,13°C	-0,07°C	-0,17%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	0,49°C	0,32°C	0,11°C	0,11°C	0,31%
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	24 ώρες Μελέτη Κενού Θαλάμου (A)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-44,20°C	-42,62°C	-44,64°C	0,33°C	0,74%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-43,45°C	-42,00°C	-43,93°C	0,32°C	0,74%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-44,35°C	-42,92°C	-44,83°C	0,32°C	0,73%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-43,97°C	-42,56°C	-44,46°C	0,30°C	0,69%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-44,86°C	-43,16°C	-45,31°C	0,36°C	0,82%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-43,38°C	-41,87°C	-43,79°C	0,30°C	0,70%
	24 ώρες Μελέτη Φορτωμένου	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-44,07°C	-43,97°C	-44,18°C	0,04°C	0,10%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-43,11°C	-43,00°C	-43,27°C	0,07°C	0,17%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-44,20°C	-44,09°C	-44,32°C	0,06°C	0,13%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-43,62°C	-43,40°C	-43,83°C	0,12°C	0,27%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-44,49°C	-44,30°C	-44,67°C	0,10°C	0,22%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-42,99°C	-42,86°C	-43,09°C	0,06°C	0,14%
	Διαφορά (A) – (B) Study	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-0,13°C	1,35°C	-0,46°C	0,28°C	0,64%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,35°C	1,00°C	-0,66°C	0,25°C	0,57%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-0,15°C	1,17°C	-0,51°C	0,26°C	0,59%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,34°C	0,84°C	-0,63°C	0,18°C	0,42%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-0,37°C	1,14°C	-0,64°C	0,26°C	0,60%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,39°C	0,99°C	-0,70°C	0,24°C	0,57%
Μηχανή Πολυσυμπιεστών	24 ώρες Μελέτη Κενού Θαλάμου (A)	1	N/A	Πίσω Αριστερά Πάνω	-43,11°C	-39,30°C	-47,07°C	1,58°C	3,66%
		2	N/A	Πίσω δεξιά κάτω	-42,67°C	-39,11°C	-45,83°C	1,30°C	3,04%
		3	N/A	Μέση αριστερή κορυφή	-42,41°C	-38,63°C	-45,40°C	1,20°C	2,83%
		4	N/A	Μέση δεξιά κάτω	-42,04°C	-38,44°C	-45,08°C	1,21°C	2,89%
		5	N/A	Μπροστινό Αριστερό Πάνω	-41,68°C	-37,13°C	-44,44°C	1,25°C	2,99%
		6	N/A	Μπροστά δεξιά κάτω	-41,33°C	-37,24°C	-43,81°C	1,14°C	2,77%
	24 ώρες Μελέτη Φορτωμένου	1	N/A	Πίσω Αριστερά Πάνω	-43,00°C	-38,34°C	-46,40°C	1,40°C	3,24%
		2	N/A	Πίσω δεξιά κάτω	-42,73°C	-38,21°C	-45,98°C	1,29°C	3,03%
		3	N/A	Μέση αριστερή κορυφή	-42,53°C	-38,68°C	-45,95°C	1,27°C	2,98%
		4	N/A	Μέση δεξιά κάτω	-42,30°C	-36,71°C	-45,47°C	1,35°C	3,19%
		5	N/A	Μπροστινό Αριστερό Πάνω	-41,82°C	-39,14°C	-44,52°C	1,09°C	2,60%
		6	N/A	Μπροστά δεξιά κάτω	-41,17°C	-38,43°C	-43,69°C	1,06°C	2,57%
	Διαφορά (A) – (B)	1	N/A	Πίσω Αριστερά Πάνω	-0,11°C	-0,96°C	-0,67°C	0,18°C	0,41%
		2	N/A	Πίσω δεξιά κάτω	0,06°C	-0,90°C	0,15°C	0,00°C	0,01%
		3	N/A	Μέση αριστερή κορυφή	0,12°C	0,05°C	0,55°C	-0,07°C	-0,15%
		4	N/A	Μέση δεξιά κάτω	0,26°C	-1,73°C	0,39°C	-0,13°C	-0,30%
		5	N/A	Μπροστινό Αριστερό Πάνω	0,14°C	2,01°C	0,08°C	0,16°C	0,39%
		6	N/A	Μπροστά δεξιά κάτω	-0,16°C	1,19°C	-0,13°C	0,09°C	0,20%

Απόδοση στους -70°C

Παρομοίως με παραπάνω, η ανάλυση συνεχίζει με την θερμοκρασία -70°C και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 9 και 10. Ο καταψύκτης Ερμητικού Συμπιεστή έφτασε σε μέση θερμοκρασία $-70,57^{\circ}\text{C}$ στον κενό θάλαμο, με σταθερή απόδοση όπως υποδεικνύεται από μια χαμηλή τυπική απόκλιση $0,98^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 9). Αυτό υποδηλώνει ότι είναι αποτελεσματικό στην επίτευξη και τη διατήρηση πολύ χαμηλών θερμοκρασιών. Όταν φορτώθηκε, διατηρούσε μέση θερμοκρασία $-70,80^{\circ}\text{C}$, δείχνοντας ανθεκτικότητα σε αυξημένο θερμικό φορτίο, με την ίδια τυπική απόκλιση $0,98^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 9). Αυτή η συνέπεια σημαίνει ότι αυτός ο τύπος καταψύκτη είναι αξιόπιστος, απαραίτητος για ευαίσθητα βιολογικά δείγματα που συχνά αποθηκεύονται σε αυτό το εύρος θερμοκρασίας. Στην ανάλυση Ερμητικού Συμπιεστή, η απόδοση ποικίλλει ανάλογα με την τοποθεσία και το επίπεδο ραφίου, υποδεικνύοντας σημαντικές διαφορές στη σταθερότητα της θερμοκρασίας (βλ. Πίνακα 10). Στις επάνω ράφι οι μέσες θερμοκρασίες κυμαίνονταν από $-72,67^{\circ}\text{C}$ στο αριστερό ψηλό πίσω μέρος έως $-70,39^{\circ}\text{C}$ στο δεξιό κάτω μπροστινό μέρος κατά τη διάρκεια της μελέτης του άδειου θαλάμου, επιδεικνύοντας ισχυρή ικανότητα ψύξης. Οι τυπικές αποκλίσεις ήταν χαμηλές, υποδηλώνοντας σταθερή απόδοση ($1,02^{\circ}\text{C}$ και $0,99^{\circ}\text{C}$). Οι μέσες θερμοκρασίες ήταν ελαφρώς υψηλότερες, με το αριστερό ψηλό πίσω μέσο όρο στις μέσο ράφι στους $-71,39^{\circ}\text{C}$ και το δεξιό κάτω μπροστά στους $-66,31^{\circ}\text{C}$. Η διακύμανση της θερμοκρασίας ήταν αισθητή, όπως φαίνεται από μια τυπική απόκλιση $0,93^{\circ}\text{C}$ για το αριστερό ψηλό πίσω μέρος και μόνο $0,58$ για την κάτω μεσαία θέση. Το κάτω ράφι παρουσίασε μεγαλύτερη μεταβλητότητα, με τις μέσες θερμοκρασίες να κυμαίνονται στους $-71,27^{\circ}\text{C}$ στο αριστερό ψηλό πίσω μέρος και στους $-71,42^{\circ}\text{C}$ στο κάτω δεξιό μπροστινό μέρος. Η τυπική απόκλιση αυξήθηκε στο $1,61^{\circ}\text{C}$, υποδηλώνοντας υψηλότερο βαθμό διακύμανσης θερμοκρασίας σε χαμηλότερες συνθήκες λειτουργίας. Υπό συνθήκες φόρτωσης, η τάση συνεχίστηκε, με τις κορυφαίες θέσεις ραφιών να καταγράφουν την καλύτερη απόδοση. Οι μέσες θερμοκρασίες σε αυτές τις θέσεις μειώθηκαν μεταξύ $-70,78^{\circ}\text{C}$ και $-69,36^{\circ}\text{C}$. Συγκεκριμένα, το κάτω ράφι έδειξε μέση θερμοκρασία $-73,94^{\circ}\text{C}$ στην αριστερή ψηλή πίσω θέση, υπογραμμίζοντας τη σημασία της συγκεκριμένης τοποθέτησης του ραφίου σε σχέση με την απόδοση ψύξης και τη ροή αέρα.

Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου υπερέρχει με μέση θερμοκρασία $-72,23^{\circ}\text{C}$ όταν είναι άδειος, ξεπερνώντας τις επιδόσεις του Ερμητικού Συμπιεστή (βλ. Πίνακα 9). Η ομοιομορφία του είναι σημαντική, με τυπική απόκλιση $0,63^{\circ}\text{C}$ δημιουργώντας μια ατμόσφαιρα σταθερότητας. Η απόδοση του καταψύκτη συνέχισε να λάμπει, επιτυγχάνοντας μέση θερμοκρασία $-73,46^{\circ}\text{C}$ όταν φορτώθηκε (βλ. Πίνακα 9). Η τυπική απόκλιση μειώθηκε στο $0,23^{\circ}\text{C}$, υποδεικνύοντας εξαιρετική ομοιομορφία ακόμη και υπό λειτουργική πίεση, η οποία είναι κρίσιμη για τις προβλεπόμενες εφαρμογές του (βλ. Πίνακα 9). Αντίστοιχα, στους -70°C , η απόδοση του Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου παρέμεινε σταθερή, καθώς κατέγραψε αύξηση μόλις $1,23^{\circ}\text{C}$ υπό φορτίο (βλ. Πίνακα 9). Ο Ερμητικός Συμπιεστής ανταποκρίθηκε επίσης καλά, με μέτρια αύξηση $0,22^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 9). Αυτά τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι και οι δύο τύποι καταψύκτη μπορούν να χειριστούν τα φορτία αποτελεσματικά χωρίς να διακυβεύεται η διατήρηση της

θερμοκρασίας. Για τους καταψύκτες ελεύθερου εμβόλου, η απόδοση παρέμεινε ισχυρή σε όλα τα επίπεδα ραφιών (βλ. Πίνακα 10). Πιο συγκεκριμένα, οι θέσεις επάνω ραφιού και η αριστερή ψηλή πίσω θέση πέτυχε μέση θερμοκρασία $-72,27^{\circ}\text{C}$, ακολουθούμενη από $-71,34^{\circ}\text{C}$ στη δεξιά κάτω μπροστινή θέση. Και οι δύο θέσεις είχαν χαμηλές τυπικές αποκλίσεις ($0,39^{\circ}\text{C}$ και $0,77^{\circ}\text{C}$), δίνοντας έμφαση στον ισχυρό έλεγχο της θερμοκρασίας. Η μέση θερμοκρασία για το αριστερό ψηλό πίσω μέρος του μεσαίου ραφιού ήταν σημαντικά χαμηλότερη στους $-75,27^{\circ}\text{C}$, επιδεικνύοντας εξαιρετική απόδοση ψύξης. Το δεξί κάτω μπροστινό μέρος του μεσαίου ραφιού διατηρήθηκε στους $-70,94^{\circ}\text{C}$, ενδεικτικό ενός πιο σταθερού περιβάλλοντος για ευαίσθητα δείγματα. Οι μέσες θερμοκρασίες στο κάτω ράφι παρέμειναν αποδεκτές παρά το γεγονός ότι ήταν ελαφρώς υψηλότερες από τα πάνω ράφια, που καταγράφηκαν στους $-73,49^{\circ}\text{C}$ και $-70,07^{\circ}\text{C}$. Οι τυπικές αποκλίσεις παρέμειναν χαμηλές, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του κινητήρα ελεύθερου εμβόλου σε χαμηλότερες θέσεις. Σε συνθήκες φορτίου, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου επέδειξε σταθερή απόδοση, με ελάχιστες αποκλίσεις από τη μελέτη κενού θαλάμου. Οι θέσεις στο επάνω ράφι κατέγραψαν $-73,45^{\circ}\text{C}$ έως $-74,76^{\circ}\text{C}$, αντιπροσωπεύοντας πολύ αποτελεσματική ψύξη. Οι θέσεις κάτω ραφιών διατήρησαν θερμοκρασίες $-77,06^{\circ}\text{C}$, αντανakλώντας ανώτερη απόδοση και σταθερότητα ακόμη και υπό φορτίο.

Στους -70°C , η ανάγκη για ομοιομορφία γίνεται ακόμα πιο έντονη. Τόσο ο ερμητικός συμπιεστής όσο και ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου παρουσιάζουν χαμηλές τυπικές αποκλίσεις, υποδηλώνοντας ότι είναι σε θέση να διατηρήσουν ένα σταθερό περιβάλλον ακόμα και σε αυτές τις ακραίες θερμοκρασίες. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου, με τυπική απόκλιση $0,63^{\circ}\text{C}$, παραμένει η καλύτερη επιλογή, ιδιαίτερα για πρωτόκολλα που απαιτούν αυστηρό έλεγχο θερμοκρασίας.

Πίνακας 9 Δοκιμή 24ωρης Συνεχής Μέτρησης Θερμοκρασίας (-70°C)							
Σημείο ρύθμισης	Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Μέσος Όρος Θερμοκρασιών	Μέσος Όρος Μέγιστων Θερμοκρασιών	Μέσος Όρος Ελάχιστων Θερμοκρασιών	Μέση Τυπική Απόκλιση	Μέσος Συντελεστής Διακύμανσης
-70°C	Ερμητικός Συμπιεστής	24 ώρες Μελέτη Κενού Θαλάμου (A)	$-70,57^{\circ}\text{C}$	$-68,14^{\circ}\text{C}$	$-71,36^{\circ}\text{C}$	$0,98^{\circ}\text{C}$	1,4%
		24 ώρες Μελέτη Φορτωμένου Θαλάμου (B)	$-70,80^{\circ}\text{C}$	$-69,02^{\circ}\text{C}$	$-72,52^{\circ}\text{C}$	$0,97^{\circ}\text{C}$	1,4%
		Διαφορά (A) – (B)	$0,22^{\circ}\text{C}$	$0,88^{\circ}\text{C}$	$1,16^{\circ}\text{C}$	$0,00^{\circ}\text{C}$	0,0%
	Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	24 ώρες Μελέτη Κενού Θαλάμου (A)	$-72,23^{\circ}\text{C}$	$-70,68^{\circ}\text{C}$	$-73,58^{\circ}\text{C}$	$0,63^{\circ}\text{C}$	0,9%
		24 ώρες Μελέτη Φορτωμένου Θαλάμου (B)	$-73,46^{\circ}\text{C}$	$-73,09^{\circ}\text{C}$	$-74,19^{\circ}\text{C}$	$0,23^{\circ}\text{C}$	0,3%
		Διαφορά (A) – (B)	$1,23^{\circ}\text{C}$	$2,41^{\circ}\text{C}$	$0,61^{\circ}\text{C}$	$0,40^{\circ}\text{C}$	0,5%

Πίνακας 10 Δοκιμή 24ωρης Συνεχής Μέτρησης Θερμοκρασίας σε επίπεδο θέσης αισθητήρα (-70°C)									
Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Θέση	Ράφι	Τοποθεσία	Μέση Θερμοκρασία	Μέση Μέγιστη Θερμοκρασία	Μέση Ελάχιστη Θερμοκρασία	Μέση Τυπική Απόκλιση	Μέσος Συντελεστής Διακύμανσης
Ερμητικός Συμπιεστής	24 ώρες Μελέτη Κενού Θαλάμου (Α)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-72,67°C	-71,85°C	-75,16°C	1,02°C	1,42%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-70,39°C	-67,58°C	-70,97°C	0,99°C	1,42%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-71,39°C	-68,84°C	-71,81°C	0,93°C	1,32%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-66,31°C	-62,92°C	-65,01°C	0,58°C	0,87%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-71,27°C	-67,58°C	-72,82°C	1,61°C	2,26%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-71,42°C	-70,07°C	-72,39°C	0,72°C	1,01%
	24 ώρες Μελέτη Φορτωμένου Θαλάμου (Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-70,78°C	-69,20°C	-72,02°C	0,72°C	1,01%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-69,36°C	-67,18°C	-71,33°C	1,20°C	1,67%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-71,05°C	-69,45°C	-72,27°C	0,78°C	1,12%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-69,00°C	-68,15°C	-71,08°C	0,82°C	1,16%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-73,94°C	-71,21°C	-76,58°C	1,61°C	2,16%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-70,65°C	-68,92°C	-71,83°C	0,70°C	1,00%
	Διαφορά (Α) – (Β) Study	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-1,89°C	-2,65°C	-3,13°C	0,30°C	0,41%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-1,03°C	-0,40°C	0,36°C	-0,20°C	0,25%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-0,34°C	0,61°C	0,47°C	0,15°C	0,21%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	2,69°C	5,23°C	6,07°C	-0,24°C	0,29%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	2,67°C	3,63°C	3,75°C	0,00°C	0,11%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,77°C	-1,15°C	-0,56°C	0,02°C	0,02%
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	24 ώρες Μελέτη Κενού Θαλάμου (Α)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-72,27°C	-71,75°C	-73,72°C	0,39°C	0,54%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-71,34°C	-69,24°C	-72,60°C	0,77°C	1,09%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-75,27°C	-73,33°C	-76,84°C	0,84°C	1,09%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-70,94°C	-69,58°C	-71,93°C	0,41°C	0,57%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-73,49°C	-71,13°C	-75,28°C	0,97°C	1,27%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-70,07°C	-69,08°C	-71,09°C	0,39°C	0,56%
	24 ώρες Μελέτη Φορτωμένου Θαλάμου (Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-73,45°C	-73,20°C	-73,96°C	0,14°C	0,20%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-74,76°C	-74,37°C	-75,36°C	0,22°C	0,29%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-73,45°C	-72,97°C	-74,23°C	0,28°C	0,39%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-71,42°C	-71,13°C	-72,15°C	0,18°C	0,26%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-77,06°C	-76,50°C	-78,24°C	0,37°C	0,47%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-70,62°C	-70,38°C	-71,21°C	0,18°C	0,26%
	Διαφορά (Α) – (Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	1,18°C	1,46°C	0,24°C	0,25°C	0,34%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	3,42°C	5,13°C	2,76°C	0,55°C	0,80%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-1,82°C	-0,36°C	-2,61°C	0,56°C	0,70%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	0,48°C	1,55°C	0,22°C	0,23°C	0,31%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	3,56°C	5,37°C	2,96°C	0,60°C	0,80%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	0,56°C	1,30°C	0,12°C	0,21°C	0,29%

Απόδοση θερμοκρασίας: -40°C έναντι -70°C ανά καταψύκτη

Η παρακάτω ανάλυση βασίζεται στα αποτελέσματα των Πινάκων 7, 8, 9, και 10. Οι μέσες θερμοκρασίες για καταψύκτες που έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν στους -40°C (ειδικά ο κινητήρας με ελεύθερο έμβολο) έφταναν σταθερά κάτω από τους -40°C, με τις επάνω θέσεις ραφιών να επιδεικνύουν ανώτερη σταθερότητα. Για παράδειγμα, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου παρουσίασε μέση θερμοκρασία -44,03°C με ελάχιστη διακύμανση (με μέση τυπική απόκλιση 0,32°C) ακόμη και υπό φορτίο, υποδεικνύοντας αξιόπιστη διατήρηση της θερμοκρασίας. Αντίθετα, οι καταψύκτες ULT που λειτουργούσαν στους -70°C διατήρησαν συνολικά χαμηλότερες μέσες θερμοκρασίες, αλλά η ομοιόμορφη απόδοση ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του καταψύκτη. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου και πάλι προηγήθηκε με χαμηλότερες μέσες θερμοκρασίες (π.χ. -72,27°C κενό, -73,45°C φορτωμένο) και πολύ χαμηλές τυπικές αποκλίσεις (0,39°C) σε όλες τις θέσεις, αποδεικνύοντας την απόδοσή του ακόμη και κάτω από αυστηρές συνθήκες. Οι καταψύκτες στους -70°C γενικά παρέχουν καλύτερες συνθήκες συντήρησης για εξαιρετικά ευαίσθητα υλικά σε σύγκριση με τους -40°C. Ωστόσο, απαιτούν ακόμη πιο στιβαρά χαρακτηριστικά απόδοσης για την εξουδετέρωση της αυξημένης θερμικής καταπόνησης.

Οι καταψύκτες εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας (ULT) είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση ευαίσθητων υλικών σε επιστημονικές, ιατρικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτή η ανάλυση διεξάγει μια σύγκριση παραπομπής μεταξύ καταψυκτών ULT που λειτουργούν στους -40°C και -70°C, παράλληλα με μια συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών τύπων καταψύκτη (Ερμητικός Συμπιεστής, Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και Πολυσυμπιεστές). Η εστίαση είναι σε δύο βασικά κριτήρια: απόδοση διατήρησης θερμοκρασίας και ομοιομορφία.

Στους -40°C, ο Ερμητικός Συμπιεστής παρουσίασε μέσες θερμοκρασίες γύρω από -42°C έως -44°C, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με το επίπεδο ραφίου. Οι τυπικές αποκλίσεις έδειξαν σημαντική μεταβλητότητα, ειδικά σε χαμηλότερες θέσεις ραφιών, υποδεικνύοντας μια λιγότερη σταθερή απόδοση κατά την ψύξη σε αυτές τις θέσεις. Όταν η θερμοκρασία έφτασε στους -70°C, ο Ερμητικός Συμπιεστής διατήρησε μέσες θερμοκρασίες από -70°C έως -72°C, αλλά με μεγαλύτερη μεταβλητότητα που αποτυπώθηκε σε μέση τυπική απόκλιση περίπου 1,02°C. Αυτό υποδεικνύει μικρότερη ομοιομορφία σε σύγκριση με τις επιδόσεις του σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Στους -40°C, ο Ελεύθερος Εμβολοφόρος Κινητήρας παρουσίασε στιβαρή απόδοση, με μέσες θερμοκρασίες που φτάνουν τους -44,03°C και πολύ χαμηλή τυπική απόκλιση (0,32°C). Αυτό σημειώνει τον κινητήρα ως εξαιρετικά συνεπή σε όλα τα επίπεδα ραφιών, προσφέροντας αξιόπιστη ψύξη ανεξαρτήτως θέσης. Στην αυξημένη θερμοκρασία των -70°C, ο κινητήρας απέδωσε εκθετικά καλύτερα, επιτυγχάνοντας θερμοκρασίες έως και -75,27°C. Ταυτόχρονα, διατήρησε τυπική απόκλιση 0,39°C, τονίζοντας την εξαιρετική ομοιομορφία του και την ικανότητά του να διαχειρίζεται θερμοκρασίες σε ακραίες συνθήκες.

Στους -40°C , οι πολυσυμπιεστές εμφανίζουν μέσες θερμοκρασίες γύρω από $-41,6^{\circ}\text{C}$ έως $-42,20^{\circ}\text{C}$, με μέτρια μεταβλητότητα. Ωστόσο, η τυπική απόκλιση ήταν υψηλότερη τόσο από τον Ελεύθερο Εμβολοφόρο Κινητήρα όσο και από τον Ερμητικό Συμπιεστή, υποδεικνύοντας λιγότερο αξιόπιστη απόδοση. Οι πολυσυμπιεστές προσφέρουν μια εναλλακτική λύση, αλλά η επίδοσή τους σε σύγκριση με τους άλλους τύπους καταψυκτών δεν είναι το ίδιο ικανοποιητική, ειδικά στην κατηγορία της σταθερότητας και της ομοιογένειας ανά θέση ραφίου.

Η σύγκριση των επιδόσεων ανά τύπο καταψύκτη σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες αποκαλύπτει σημαντικές διαφορές στους μηχανισμούς ψύξης και την ικανότητα διατήρησης σταθερής θερμοκρασίας. Οι Ελεύθεροι Εμβολοφόροι Κινητήρες ξεχωρίζουν για την ανώτερη απόδοσή τους και την ομοιομορφία τους, κάνοντάς τους την καλύτερη επιλογή για εφαρμογές που απαιτούν αυστηρό έλεγχο θερμοκρασίας. Και στις δύο ρυθμίσεις θερμοκρασίας, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου ξεπέρασε σταθερά τα άλλα μοντέλα όσον αφορά τη διατήρηση της μέσης θερμοκρασίας και την ομοιομορφία, με πολύ χαμηλές τυπικές αποκλίσεις που υποδεικνύουν αποτελεσματικό έλεγχο θερμοκρασίας υπό διάφορες συνθήκες.

Η διασταυρούμενη ανάλυση αποκαλύπτει σημαντικά στοιχεία για την συνοχή της θερμοκρασίας, την ομοιομορφία, και λειτουργικά απόδοση. Οι καταψύκτες ULT που λειτουργούν στους -70°C παρέχουν ανώτερες συνθήκες για εξαιρετικά ευαίσθητα υλικά, καθιστώντας τα απαραίτητα για μακροχρόνια αποθήκευση σε ευαίσθητες επιστημονικές εφαρμογές. Ωστόσο, απαιτούν εξίσου ισχυρά χαρακτηριστικά απόδοσης. Μεταξύ των τριών τύπων καταψύκτη που αναλύθηκαν, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου αναδεικνύεται ως η πιο αξιόπιστη επιλογή, επιδεικνύοντας εξαιρετική συντήρηση θερμοκρασίας και εξαιρετικά χαμηλή μεταβλητότητα και στις ρυθμίσεις -40°C και -70°C . Η αποτελεσματικότητα του κινητήρα ελεύθερου εμβόλου στην επίτευξη χαμηλότερων μέσων θερμοκρασιών με ελάχιστες διακυμάνσεις τον καθιστά την καλύτερη επιλογή για τα εργαστήρια που χρειάζονται να συντηρούν τα ευαίσθητα δείγματα με συνέπεια. Συμπερασματικά, κατά την επιλογή ενός καταψύκτη εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών, θα πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στον κινητήρα ελεύθερου εμβόλου για τη στιβαρή του απόδοση και ομοιομορφία σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, διασφαλίζοντας τελικά το υψηλότερο επίπεδο ακεραιότητας και αξιοπιστίας δείγματος στους -40°C και στους -70°C περιβάλλοντα.

4.2. Συγκριτική Ανάλυση Δοκιμασίας Ανοίγματος Πόρτας

Στον τομέα της ψύξης, ειδικά όσον αφορά την αποθήκευση ευαίσθητων υλικών, η αποτελεσματικότητα των καταψυκτών είναι πρωταρχικής σημασίας. Αυτή η ανάλυση συγκρίνει τρεις διαφορετικούς τύπους καταψύκτη — Ερμητικό Συμπιεστή, Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και Πολυσυμπιεστή — με βάση την απόδοσή τους κατά τη διάρκεια μιας ελεγχόμενης δοκιμής ανοιχτής πόρτας σε δύο διακριτές ρυθμίσεις θερμοκρασίας, -40°C και -70°C . Η μελέτη εξετάζει πόσο αποτελεσματικά επιστρέφει κάθε τύπος καταψύκτη στην καθορισμένη θερμοκρασία μετά το άνοιγμα για πέντε λεπτά, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις μέγιστες παρατηρούμενες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν σε αυτό το διάστημα.

Απόδοση στους -40°C

Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές -40°C που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11 δείχνουν μια αξιοσημείωτη διαφορά στην απόδοση των τριών τύπων καταψύκτη. Ο καταψύκτης πολλαπλών συμπιεστών επέδειξε αξιοσημείωτη απόδοση, με μέσο χρόνο επιστροφής στην καθορισμένη θερμοκρασία μόνο 5,67 λεπτά για τον κενό θάλαμο και 5,60 λεπτά για τον φορτωμένο θάλαμο. Αυτός ο γρήγορος χρόνος ανάκτησης υποστηρίζεται περαιτέρω από μια χαμηλότερη τυπική απόκλιση (1,14 λεπτά για τον κενό θάλαμο και 1,36 λεπτά για τον φορτωμένο θάλαμο), υποδηλώνοντας σταθερή απόδοση σε όλες τις δοκιμές. Οι αντίστοιχες μέγιστες παρατηρούμενες θερμοκρασίες -26,97°C και -27,12°C επιδεικνύουν την ανώτερη ικανότητα του καταψύκτη Πολυσυμπιεστών να διατηρεί χαμηλές θερμοκρασίες παρά τα ανοίγματα των θυρών, που υποδεικνύονται από συντελεστές διακύμανσης 20,0% και 24,2%, αντίστοιχα. Συγκριτικά, τα μοντέλα Ερμητικός Συμπιεστής και Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου εμφάνισαν μεγαλύτερους χρόνους ανάκτησης. Ο Ερμητικός Συμπιεστής χρειάστηκε 13,00 λεπτά για τον κενό θάλαμο και 13,80 λεπτά για τον φορτωμένο θάλαμο, ενώ ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου χρειάστηκε 11,00 λεπτά και 12,00 λεπτά, αντίστοιχα. Αυτές οι μεγαλύτερες διάρκειες ανάκτησης υπογραμμίζουν την απόδοση του Πολλαπλού συμπιεστή, η οποία είναι περίπου οι μισές φορές που αναφέρθηκαν τόσο για τα μοντέλα Ερμητικού Συμπιεστή όσο και για τα μοντέλα Ελεύθερου Εμβόλου.

Η παρακάτω ανάλυση εξετάζει την απόδοση τριών τεχνολογιών κατάψυξης κάτω από μια ελεγχόμενη δοκιμή ανοιχτής πόρτας στους -40°C, εστιάζοντας στις μέγιστες θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται σε συγκεκριμένες θέσεις ραφιών εντός του θαλάμου σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 12. Η μελέτη αξιολογεί τον τρόπο με τον οποίο κάθε τύπος καταψύκτη διατηρεί τη θερμοκρασία υπό δύο συνθήκες: κενούς και φορτισμένους θαλάμους. Οι βασικές μετρήσεις περιλαμβάνουν τη μέση μέγιστη θερμοκρασία, την τυπική απόκλιση και τον συντελεστή διακύμανσης.

Ο Ερμητικός Συμπιεστής παρουσίασε ποικίλες επιδόσεις σε διαφορετικές θέσεις κατά τη διάρκεια της δοκιμής με ανοιχτή πόρτα. Στην επάνω αριστερή θέση, η μέση μέγιστη θερμοκρασία καταγράφηκε στους -24,75°C, με τυπική απόκλιση 1,34 και χαμηλό συντελεστή διακύμανσης (-5,41%) (βλ. Πίνακα 12). Στην επάνω δεξιά θέση, η θερμοκρασία ήταν καλύτερη, φθάνοντας στους -27,04°C, υποδεικνύοντας μεγαλύτερη απόδοση ψύξης σε αυτήν την περίπτωση. Ωστόσο, οι κάτω θέσεις κατέγραψαν σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες. Ειδικότερα, η κάτω αριστερή θέση υψηλού πίσω είχε μέγιστη θερμοκρασία -13,95°C, υποδεικνύοντας μειωμένη αποτελεσματικότητα ψύξης σε αυτές τις χαμηλότερες θέσεις (βλ. Πίνακα 12). Συνολικά, οι παρατηρούμενες μέγιστες θερμοκρασίες κυμαίνονταν από -20,73°C έως -27,04°C, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στις επάνω θέσεις σε σύγκριση με τις κάτω (βλ. Πίνακα 12). Κατά την ίδια δοκιμή με φορτωμένο θάλαμο, οι ανώτερες τοποθεσίες διατηρούσαν και πάλι καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις χαμηλότερες. Στην επάνω δεξιά θέση, καταγράφηκε μέγιστη θερμοκρασία -26,39°C, ενώ η χαμηλότερη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε ήταν -15,13°C στην κάτω αριστερή θέση ψηλά πίσω (βλ. Πίνακα 12). Αυτά τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τη τάση ότι οι ανώτερες

θέσεις παρέχουν καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά τη διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών, ενδυναμώνοντας την ανάγκη για στρατηγικό προγραμματισμό στην τοποθέτηση των ευαίσθητων καταψυκτικών προϊόντων. Οι βελτιωμένες μέσες μέγιστες θερμοκρασίες υποδηλώνουν ότι η φόρτωση του θαλάμου δεν υποβάθμισε σοβαρά την απόδοση, αν και η χαμηλότερη απόκλιση θερμοκρασίας παραμένει αξιοσημείωτη, ειδικά σε λιγότερο βέλτιστες θέσεις. Οι διαφορές θερμοκρασίας ήταν οριακές, αλλά τα δεδομένα δείχνουν ότι η θέση Επάνω Αριστερά Ψηλά Πίσω παρουσίασε τη μικρότερη διακύμανση ($-1,11^{\circ}\text{C}$), ενώ το Κάτω Αριστερά Ψηλά Πίσω παρουσίασε ανησυχητική αύξηση $1,18^{\circ}\text{C}$, ενισχύοντας περαιτέρω τις διαφορές απόδοσης θέσης.

Ο Κινητήρας Ελεύθερου Εμβόλου παρουσίασε εξαιρετική θερμική ρύθμιση σε όλες τις θέσεις, ξεπερνώντας την απόδοση του Ερμητικού Συμπιεστή (βλ. Πίνακα 12). Στην επάνω αριστερή θέση, η μέγιστη θερμοκρασία καταγράφηκε στους $-26,37^{\circ}\text{C}$, η οποία είναι σημαντικά χαμηλότερη από την αντίστοιχη θερμοκρασία του Ερμητικού Συμπιεστή. Στην κάτω θέση, στην κατώτερη δεξιά θέση εμπρός, η θερμοκρασία διατηρήθηκε στα $-25,38^{\circ}\text{C}$, ενδεικτικό της αποτελεσματικής ψύξης σε όλο το θάλαμο (βλ. Πίνακα 12). Το εύρος θερμοκρασίας κυμαίνεται μεταξύ $-21,91^{\circ}\text{C}$ και $-26,56^{\circ}\text{C}$, υποδηλώνοντας μια πιο σταθερή απόδοση σε όλες τις θέσεις. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής με φορτωμένο θάλαμο, ο Κινητήρας Ελεύθερου Εμβόλου διατήρησε τις βέλτιστες θερμοκρασίες τόσο στις ανώτερες όσο και στις κατώτερες θέσεις. Στην επάνω δεξιά θέση, η θερμοκρασία καταγράφηκε στους $-23,41^{\circ}\text{C}$, υποδεικνύοντας αποτελεσματική κατακράτηση ψύχους (βλ. Πίνακα 12). Η απόκλιση θερμοκρασίας ήταν επίσης λιγότερο έντονη σε σύγκριση με τον Ερμητικό Συμπιεστή, επιδεικνύοντας ισχυρή απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Σε αντίθεση με τον Ερμητικό Συμπιεστή, οι αλλαγές θερμοκρασίας στον Κινητήρα Ελεύθερου Εμβόλου ήταν ελάχιστες. Η θέση με τη μεγαλύτερη διακύμανση ήταν η Μέση Αριστερά Ψηλή Πίσω, όπου καταγράφηκε διαφορά $0,13^{\circ}\text{C}$, υποδεικνύοντας μικρότερη επίδραση θερμοκρασίας λόγω φόρτισης (βλ. Πίνακα 12). Αυτά τα αποτελέσματα ενισχύουν τη θέση του Κινητήρα Ελεύθερου Εμβόλου ως μια εξαιρετική επιλογή για εφαρμογές που απαιτούν σταθερή και αξιόπιστη ψύξη, ανεξαρτήτως του φορτίου που ενδέχεται να υπάρχει στην καταψύκτη.

Ο Πολλαπλός Συμπιεστής παρουσίασε συνολικά την καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τους δύο προηγούμενους τύπους. Στη μελέτη με τον κενό θάλαμο, οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες καταγράφηκαν στους $-39,16^{\circ}\text{C}$ στην επάνω θέση, ενώ οι θερμοκρασίες σε όλο τον θάλαμο κυμάνθηκαν από $-16,34^{\circ}\text{C}$ έως $-39,16^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 12). Αυτές οι τιμές υποδηλώνουν ανώτερη ψύξη και ικανότητα διατήρησης χαμηλών θερμοκρασιών, καθιστώντας τον Πολλαπλό Συμπιεστή μια εξαιρετική επιλογή για εφαρμογές που απαιτούν αυστηρό έλεγχο θερμοκρασίας. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής με φορτωμένο θάλαμο, η απόδοση του Πολλαπλού Συμπιεστή παρέμεινε συνεπής. Οι θερμοκρασίες που διατηρήθηκαν περιλάμβαναν $-38,51^{\circ}\text{C}$ στην πίσω αριστερή επάνω θέση. Αυτή η τάση επιβεβαίωσε την αποτελεσματικότητα της μονάδας, που λειτουργούσε εξίσου καλά ανεξάρτητα από τις συνθήκες φόρτωσης του θαλάμου. Η ικανότητα του να διατηρεί χαμηλές θερμοκρασίες και με το φορτίο δείχνει την

εξαιρετική του σχεδίαση και λειτουργία. Οι μέγιστες διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των δύο καταστάσεων ήταν αμελητέες, γεγονός που υποδηλώνει εξαιρετική θερμική διαχείριση από τον Πολλαπλό Συμπιεστή. Αξιοσημείωτο είναι ότι στην πίσω δεξιά κάτω θέση παρατηρείται μια μικρή άνοδος 0.56°C (βλ. Πίνακα 12). Αυτή η ελάχιστη διακύμανση επιβεβαιώνει τη σταθερότητα και την αξιοπιστία της θερμοκρασίας, ενισχύοντας τη θέση του Πολλαπλού Συμπιεστή ως προτιμώμενη λύση για απαιτητικές εφαρμογές κρυογονίας.

Οι θέσεις επάνω αριστερά ψηλά πίσω και επάνω δεξιά κάτω εμπρός έδειξαν σταθερά χαμηλές μέγιστες θερμοκρασίες, με τον κινητήρα ελεύθερου εμβόλου να ξεπερνάει τον Ερμητικό Συμπιεστή με αξιοσημείωτη διαφορά. Στους $-44,83^{\circ}\text{C}$, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου διατήρησε ανώτερη θερμική ακεραιότητα, αποδεικνύοντας την ικανότητά του για αυστηρή εφαρμογή (βλ. Πίνακα 12). Ο Ερμητικός Συμπιεστής, ενώ λειτουργούσε ικανοποιητικά, κατέγραψε θερμοκρασίες που ήταν αρκετοί βαθμούς υψηλότερες στις ίδιες θέσεις ραφιών, υποδεικνύοντας τη μειωμένη απόδοση του κάτω από αυτές τις ακραίες συνθήκες (βλ. Πίνακα 12).

Οι μεσαίες θέσεις αντανakλούσαν μια πτώση και στους δύο τύπους καταψύκτη, αλλά ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου εξακολουθούσε να έχει ένα πλεονέκτημα θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τον Πίνακα 12, ο Ερμητικός Συμπιεστής έφτασε σε μέγιστη θερμοκρασία $-35,20^{\circ}\text{C}$, ενώ ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου ήταν ελαφρώς καλύτερος στους $-37,86^{\circ}\text{C}$. Η απόκλιση που παρατηρείται στις μεσαίες θέσεις και για τα δύο μοντέλα υποδεικνύει πιθανά προβλήματα με τη διατήρηση σταθερών θερμοκρασιών, ιδιαίτερα όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο η θερμική κατανομή εντός του θαλάμου επηρεάζεται από τη θέση και το φορτίο του ραφίου.

Όπως ήταν αναμενόμενο, τα κάτω ράφια του Ερμητικού Συμπιεστής συνέχισαν να δυσκολεύονται, με τις μέγιστες θερμοκρασίες να φτάνουν τους $-28,52^{\circ}\text{C}$ στην κενή δοκιμή και να μειώνονται περαιτέρω στη δοκιμασία με φορτίο (βλ. Πίνακα 12). Αυτή η αναποτελεσματικότητα ενέχει σημαντικό κίνδυνο σε εφαρμογές που βασίζονται σε αυστηρούς ελέγχους θερμοκρασίας. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου είχε καλύτερη απόδοση, αλλά παρόλα αυτά παρουσίαζε αδυναμίες, καθώς οι θερμοκρασίες στα χαμηλότερα ράφια ήταν κατά μέσο όρο $-29,69^{\circ}\text{C}$ σε άδειες δοκιμές (βλ. Πίνακα 12). Παρόλα αυτά, εξακολουθούσε να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον τύπο Ερμητικού Συμπιεστή, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη ικανότητα διατήρησης χαμηλότερων θερμοκρασιών.

Ο καταψύκτης πολλαπλών συμπιεστών ξεπερνούσε σταθερά τόσο τον Ερμητικό Συμπιεστή όσο και τον Κινητήρα Ελεύθερου Εμβόλου τόσο σε άδειες όσο και σε συνθήκες φορτίου. Διατήρησε ανώτερα επίπεδα θερμοκρασίας σε όλο τον θάλαμο, επιδεικνύοντας αξιοσημείωτη θερμική σταθερότητα. Η απόδοση θερμοκρασίας επιδεινώθηκε σημαντικά σε χαμηλότερες θέσεις τόσο στον Ερμητικό Συμπιεστή όσο και στον κινητήρα ελεύθερου εμβόλου, με τον Πολυσυμπιεστή να παρουσιάζει λιγότερες διακυμάνσεις με το βάθος, διατηρώντας ψυχρότερες θερμοκρασίες ακόμη και στο κάτω μέρος. Ο

κινητήρας ελεύθερου εμβόλου έδειξε τον χαμηλότερο συντελεστή διακύμανσης στις περισσότερες περιπτώσεις, υποδηλώνοντας μια πιο σταθερή απόδοση σε όλες τις θέσεις του θαλάμου σε σύγκριση με τον Ερμητικό Συμπιεστή, ο οποίος είχε μεγαλύτερη μεταβλητότητα - ειδικά σε χαμηλότερες θέσεις ραφιού. Συνολικά, η ανάλυση δείχνει ότι για εφαρμογές που απαιτούν ψύξη υψηλής απόδοσης στους -40°C, ιδιαίτερα όσον αφορά τη θέση της μονάδας, ο Πολυσυμπιεστής ξεχωρίζει ως η ανώτερη επιλογή, ακολουθούμενος από τον κινητήρα ελεύθερου εμβόλου. Ο Ερμητικός Συμπιεστής παρουσίασε αξιοσημείωτους περιορισμούς απόδοσης, ιδιαίτερα στις θέσεις του κάτω ραφιού, καθιστώντας τον λιγότερο αξιόπιστο για εφαρμογές όπου η ακεραιότητα θερμοκρασίας είναι κρίσιμη.

Και στις δύο κατηγορίες Ερμητικός Συμπιεστής και Κινητήρας Ελεύθερου Εμβόλου, οι επάνω θέσεις πέτυχαν σταθερά τις χαμηλότερες μέσες μέγιστες θερμοκρασίες (βλ. Πίνακα 12). Ο Πολυσυμπιεστής εξακολουθούσε να υπερέχει σε αυτό το τμήμα, υποδεικνύοντας ότι ο σχεδιασμός του διαχειρίζεται αποτελεσματικά τη θερμική ροή σε διάφορες τοποθετήσεις ραφιών. Η επάνω δεξιά κάτω μπροστινή θέση του Ερμητικός Συμπιεστής απέδωσε καλύτερα αποτελέσματα από ορισμένες μεσαίες και κάτω θέσεις, αλλά και πάλι δεν μπορούσε να ταιριάξει με την απόδοση του ελεύθερου εμβόλου κινητήρα και πολυσυμπιεστή σε αυτό το επίπεδο ραφιού (βλ. Πίνακα 12).

Οι θέσεις των μεσαίων ραφιών παρουσίασαν σημαντική πτώση στην αποτελεσματικότητα της θερμοκρασίας, ιδιαίτερα για τον Ερμητικό Συμπιεστή. Σε άδειες δοκιμές, οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες κυμαίνονταν από -20,73°C έως -24,47°C, υπογραμμίζοντας την ευπάθεια στη διατήρηση των βέλτιστων θερμοκρασιών (βλ. Πίνακα 12). Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου, αν και καλύτερος από τον ερμητικό συμπιεστή, εξακολουθούσε να δυσκολεύεται ελαφρώς με τις μεσαίες θέσεις, αλλά ήταν πιο συνεπής από τον τύπο Ερμητικού Συμπιεστή.

Τα κάτω ράφια παρουσίασαν τη μεγαλύτερη πρόκληση, ιδιαίτερα για τον Ερμητικός Συμπιεστής. Οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες έφθασαν πάνω από τους -13,95°C στις δοκιμές κενού και τους -15,13°C κατά τη φόρτωση, υποδηλώνοντας έντονη απώλεια της ικανότητας ψύξης και αναποτελεσματική θερμική ρύθμιση (βλ. Πίνακα 12). Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου απέδωσε καλύτερα από τον Hermetic σε αυτόν τον τομέα, αλλά οι θερμοκρασίες ήταν ακόμα υψηλότερες από τα αποδεκτά όρια για πολλές εφαρμογές ευαίσθητες στη θερμοκρασία. Ο Πολυσυμπιεστής, ο οποίος δεν είχε αναφερθεί αποτελέσματα για τις κάτω θέσεις κάτω από τη δομή δοκιμής ανοιχτής πόρτας, έδειξε προηγουμένως ανώτερη απόδοση σε όλες τις δοκιμές του, υποδηλώνοντας ότι μπορεί να διαχειρίζεται ακόμη και τις κάτω θέσεις πιο αποτελεσματικά σε παρόμοιες συνθήκες (βλ. Πίνακα 12).

Πίνακας 11 Δοκιμασία Ανοίγματος Πόρτας (-40°C)							
Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Χρόνος επιστροφής εντός των προδιαγραφών			Μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία κατά τη δοκιμή ανοιχτής πόρτας		
		Μέσος Χρόνος	Τυπική Διακύμανση	Συντελεστής Μεταβλητότητας	Μέσος Χρόνος	Τυπική Διακύμανση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Ερμητικός Συμπιεστής	Άδειος Θάλαμος (Α)	13,00	3,13	24,1%	-21,97°C	4,50°C	-20,46%
	Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	13,80	2,25	16,3%	-22,38°C	3,81°C	-17,02%
	Διαφορά (Α)-(Β)	-0,80	0,88	0,08	0,41°C	0,68°C	-3,44%
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Άδειος Θάλαμος (Α)	11,00	2,45	22,3%	-23,73°C	3,20°C	-13,48%
	Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	12,00	2,61	21,7%	-23,58°C	3,09°C	-13,10%
	Διαφορά (Α)-(Β)	-1,00	-0,16	0,01	-0,15°C	0,11°C	-0,38%
Μηχανή Πολυσυμπιεστών	Άδειος Θάλαμος (Α)	5,67	1,14	20,0%	-26,97°C	8,02°C	-29,75%
	Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	5,60	1,36	24,2%	-27,12°C	7,97°C	-29,38%
	Διαφορά (Α)-(Β)	0,07	-0,22	-0,04	0,15°C	0,05°C	-0,36%

Πίνακας 12 Δοκιμασία Ανοίγματος Πόρτας σε επίπεδο θέσης αισθητήρα (-40°C)							
Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Θέση	Ράφι	Τοποθεσία	Μέση Μέγιστη Θερμοκρασία	Τυπική Διακύμανση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Ερμητικός Συμπιεστής	Άδειος Θάλαμος (Α)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-24,75°C	1,34°C	-5,41%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-27,04°C	0,80°C	-2,97%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-20,73°C	1,60°C	-7,72%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-24,47°C	1,83°C	-7,47%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-13,95°C	2,39°C	-17,16%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-20,88°C	1,43°C	-6,84%
	Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-23,65°C	1,26°C	-5,32%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-26,39°C	1,12°C	-4,24%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-22,18°C	1,13°C	-5,09%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-24,29°C	1,61°C	-6,61%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-15,13°C	2,59°C	-17,09%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-22,42°C	2,02°C	-9,00%
	Διαφορά (Α)-(Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-1,11°C	0,08°C	-0,09%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,65°C	-0,32°C	1,27%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	1,45°C	0,47°C	-2,63%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,18°C	0,22°C	-0,85%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	1,18°C	-0,19°C	-0,07%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	1,53°C	-0,59°C	2,16%
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Άδειος Θάλαμος (Α)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-26,37°C	1,73°C	-6,57%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-23,94°C	1,41°C	-5,90%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-21,91°C	1,10°C	-5,02%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-26,56°C	1,64°C	-6,17%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-18,22°C	1,12°C	-6,17%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-25,38°C	0,97°C	-3,83%
	Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-26,16°C	1,37°C	-5,25%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-23,41°C	1,36°C	-5,81%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-22,04°C	1,99°C	-9,02%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-26,22°C	1,89°C	-7,22%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-18,59°C	1,36°C	-7,33%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-25,06°C	1,63°C	-6,49%
	Διαφορά (Α)-(Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-0,21°C	0,36°C	-1,31%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,53°C	0,05°C	-0,09%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	0,13°C	-0,89°C	3,99%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,34°C	-0,25°C	1,04%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	0,38°C	-0,24°C	1,15%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,33°C	-0,65°C	2,66%
Μηχανή Πολυσυμπιεστών	Άδειος Θάλαμος (Α)	1	N/A	Πίσω Αριστερά Πάνω	-39,16°C	1,21°C	-3,10%
		2	N/A	Πίσω δεξιά κάτω	-34,08°C	1,43°C	-4,20%
		3	N/A	Μέση αριστερή κορυφή	-29,03°C	1,29°C	-4,44%
		4	N/A	Μέση δεξιά κάτω	-22,88°C	1,34°C	-5,85%
		5	N/A	Μπροστινό Αριστερό Πάνω	-20,32°C	1,10°C	-5,41%
		6	N/A	Μπροστά δεξιά κάτω	-16,34°C	1,12°C	-6,84%
	Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	1	N/A	Πίσω Αριστερά Πάνω	-38,51°C	1,37°C	-3,57%
		2	N/A	Πίσω δεξιά κάτω	-34,64°C	1,44°C	-4,14%
		3	N/A	Μέση αριστερή κορυφή	-29,56°C	1,22°C	-4,14%
		4	N/A	Μέση δεξιά κάτω	-23,56°C	0,97°C	-4,10%
		5	N/A	Μπροστινό Αριστερό Πάνω	-20,42°C	0,97°C	-4,73%
		6	N/A	Μπροστά δεξιά κάτω	-16,02°C	1,16°C	-7,23%
	Διαφορά (Α)-(Β)	1	N/A	Πίσω Αριστερά Πάνω	-0,65°C	-0,16°C	0,46%
		2	N/A	Πίσω δεξιά κάτω	0,56°C	0,00°C	-0,06%
		3	N/A	Μέση αριστερή κορυφή	0,53°C	0,07°C	-0,30%
		4	N/A	Μέση δεξιά κάτω	0,68°C	0,37°C	-1,74%
		5	N/A	Μπροστινό Αριστερό Πάνω	0,10°C	0,13°C	-0,68%
		6	N/A	Μπροστά δεξιά κάτω	-0,32°C	-0,04°C	0,39%

Απόδοση στους -70°C

Κατά την ανάλυση της απόδοσης στη χαμηλότερη θερμοκρασία των -70°C , οι τάσεις που παρατηρήθηκαν στους -40°C παρέμειναν σε μεγάλο βαθμό σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 13 και 14. Τα δύο μοντέλα παρουσίασαν αύξηση στους μέσους χρόνους ανάκτησης. Ο Ερμητικός Συμπιεστής και ο Κινητήρας Ελεύθερου Εμβόλου κατέγραψαν ελαφρώς βελτιωμένα αποτελέσματα σε σύγκριση με την απόδοσή τους στους -40°C , με μέσους χρόνους 12,60 λεπτά και 11,50 λεπτά, αντίστοιχα, για τον κενό θάλαμο (βλ. Πίνακα 13). Ωστόσο, οι αυξημένοι χρόνοι τους σημαίνουν χαμηλότερη απόδοση. Οι συντελεστές διακύμανσης υποδηλώνουν ότι η απόδοση του Ερμητικού Συμπιεστή είναι λιγότερο προβλέψιμη, ειδικά υποδεικνύεται από το 29,5% του για τον κενό θάλαμο σε σύγκριση με το 24,4% του Κινητήρα Ελεύθερου Εμβόλου (βλ. Πίνακα 13).

Ο Ερμητικός Συμπιεστής παρουσίασε λογικές επιδόσεις σε όλες τις θέσεις δοκιμής του, αν και οι κατανομές της θερμοκρασίας παρουσίασαν κάποιες διαφοροποιήσεις σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 14. Στην κορυφή, στην αριστερή πίσω θέση, η μέση μέγιστη θερμοκρασία καταγράφηκε στους $-43,06^{\circ}\text{C}$, με σχετικά υψηλή τυπική απόκλιση 2,77, γεγονός που αντικατοπτρίζει σημαντική διακύμανση εντός αυτής της θέσης, όπως φαίνεται και από τον συντελεστή διακύμανσης (6,4%). Στην επάνω δεξιά κάτω μπροστά θέση, η θερμοκρασία ήταν υψηλότερη, με μέγιστη θερμοκρασία $-37,59^{\circ}\text{C}$, υποδεικνύοντας μικρότερη ικανότητα διατήρησης εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών σε αυτή τη συγκεκριμένη θέση. Στις χαμηλότερες θέσεις ραφιών, οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες ήταν επίσης θερμότερες, με το κάτω αριστερό υψηλό πίσω να φτάνει τους $-28,52^{\circ}\text{C}$, υπογραμμίζοντας τις ανεπάρκειες ψύξης σε χαμηλότερα υψόμετρα. Αυτή η μείωση της απόδοσης υποδηλώνει ότι ο Ερμητικός Συμπιεστής μπορεί να αντιμετωπίσει προκλήσεις στην αποτελεσματική διαχείριση θερμοκρασίας κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Κατά τη διάρκεια της φόρτωσης, η απόδοση του Ερμητικού Συμπιεστή παρέμεινε σταθερή, αλλά ήταν μικρότερη σε όλες τις θέσεις σε σύγκριση με τη δοκιμή του κενού θαλάμου (βλ. Πίνακα 14). Στην επάνω αριστερή θέση, η μέγιστη θερμοκρασία παρουσίασε $-41,94^{\circ}\text{C}$, ενώ η επάνω δεξιά κατέγραψε λιγότερο ευνοϊκά αποτελέσματα, με θερμοκρασία $-38,21^{\circ}\text{C}$. Επιπλέον, οι κάτω θέσεις συνέχισαν να υστερούν, με το κάτω αριστερό υψηλό πίσω να φτάνει κατά μέσο όρο $-30,37^{\circ}\text{C}$, παρουσιάζοντας σημαντική απόκλιση από τις επιθυμητές χαμηλές θερμοκρασίες (βλ. Πίνακα 13). Οι παρατηρούμενες αλλαγές θερμοκρασίας ήταν ελάχιστες, με την πιο σημαντική διαφορά να εμφανίζεται στο κάτω αριστερό υψηλό πίσω, με 1.85°C (βλ. Πίνακα 13). Αυτό υποδηλώνει ότι οι θερμοκρασίες αυξάνονται ελαφρώς κατά τη διάρκεια της φόρτωσης, ωστόσο η απόδοση του Ερμητικού Συμπιεστή παρέμεινε υποτονική στις χαμηλότερες θέσεις. Συνολικά, ο Ερμητικός Συμπιεστής αντανάκλα μεταβλητότητα και λιγότερο βέλτιστη απόδοση, ειδικά όταν προέρχεται από τις πιο χαμηλές θέσεις, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για προσεκτική παρακολούθηση και στρατηγική τοποθέτηση των αποθηκευμένων υλικών.

Ο Κινητήρας Ελεύθερου Εμβόλου παρουσίασε ανώτερα αποτελέσματα σε όλες τις θέσεις, υποδεικνύοντας την ικανότητά του να διατηρεί αποτελεσματικά χαμηλές θερμοκρασίες (βλ. Πίνακα 14). Στην περιοχή του επάνω αριστερού υψηλού πίσω, η μέση μέγιστη θερμοκρασία καταγράφηκε στους $-43,92^{\circ}\text{C}$, προσφέροντας καλύτερη ψυκτική ικανότητα σε σχέση με την αντίστοιχη θέση του Ερμητικού Συμπιεστή (βλ. Πίνακα 14). Στην κάτω αριστερή θέση, η θερμοκρασία πέτυχε $-29,69^{\circ}\text{C}$. Αν και αυτή η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από την ιδανική, προβάλλει μια βελτίωση σε σύγκριση με το κάτω ράφι του Ερμητικού Συμπιεστή, υποδεικνύοντας τη συνέπεια του κινητήρα ακόμα και σε κατώτερες θέσεις. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής με φορτωμένο θάλαμο, σημειώθηκε σταθερή απόδοση με βελτιωμένες θερμοκρασίες. Στην επάνω δεξιά κάτω πρόσοψη, η μέγιστη θερμοκρασία έφτασε στους $-44,83^{\circ}\text{C}$, αντικατοπτρίζοντας τη δυνατότητα του μοντέλου να αντέχει σε συνθήκες φόρτωσης χωρίς να διακυβεύει σημαντικά τις χαρακτηριστικές του θερμικής ρύθμισης (βλ. Πίνακα 14). Επιπλέον, το κάτω αριστερό υψηλό πίσω διατήρησε θερμοκρασία $-30,26^{\circ}\text{C}$, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα του Κινητήρα Ελεύθερου Εμβόλου ακόμα και σε λιγότερο βέλτιστες διαμορφώσεις (βλ. Πίνακα 14). Οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των δύο καταστάσεων ήταν γενικά μικρές, δείχνοντας την ικανότητα αυτού του μοντέλου να διαχειρίζεται αποτελεσματικά τις συνθήκες φόρτωσης, ιδιαίτερα στα πάνω ράφια. Η μεγαλύτερη μετατόπιση καταγράφηκε στο επάνω δεξιά κάτω εμπρός με άνοδο $2,63^{\circ}\text{C}$, ενδεικτική ελάχιστης αύξησης λόγω του φορτίου (βλ. Πίνακα 14). Οι υπόλοιπες θέσεις παρουσίασαν περιορισμένες διαφορές, επιβεβαιώνοντας την ικανότητα του κινητήρα να διατηρεί σταθερές θερμοκρασίες ανεξαρτήτως συνθηκών.

Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου αναδείχθηκε ως ο πρωτοπόρος για τη διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών αποτελεσματικά στους -70°C , ιδιαίτερα σε δοκιμές με άδεια και με φορτίο, ξεπερνώντας σημαντικά τον Ερμητικό Συμπιεστή στις περισσότερες θέσεις (βλ. Πίνακα 13). Οι θερμοκρασίες στο επάνω ράφι γενικά διατηρήθηκαν καλύτερα και στους δύο τύπους καταψύκτη, ωστόσο ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου συγκέντρωνε σταθερά χαμηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες. Ο Ερμητικός Συμπιεστής παρουσίασε πτωτική απόδοση στις θέσεις του μεσαίου και του κάτω ραφίου, όπου τα θεμέλια για τη βέλτιστη διατήρηση της θερμοκρασίας ήταν πιο αδύναμα (βλ. Πίνακα 13). Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου εμφάνισε χαμηλότερους συντελεστές διακύμανσης και τυπικές αποκλίσεις σε σύγκριση με τον Ερμητικό Συμπιεστή, υποδεικνύοντας πιο σταθερή και αξιόπιστη απόδοση σε διάφορες συνθήκες και τοποθετήσεις ραφιών (βλ. Πίνακα 13).

Η συγκριτική ανάλυση στους -70°C δείχνει έντονες διαφορές στην απόδοση μεταξύ των τύπων καταψύκτη, ενισχύοντας τη σημασία της επιλογής του σωστού εξοπλισμού για συγκεκριμένες εφαρμογές ευαίσθητες στη θερμοκρασία (βλ. Πίνακα 14). Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου ξεπέρασε σταθερά τον Ερμητικό Συμπιεστή στη διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών σε όλες τις θέσεις, με αξιοσημείωτη ικανότητα χειρισμού φόρτωσης χωρίς σημαντικές αυξήσεις στις μέγιστες θερμοκρασίες (βλ. Πίνακα 14). Για περιβάλλοντα που βασίζονται σε αυστηρή ρύθμιση θερμοκρασίας —όπως τα εργαστήρια, τα

φαρμακεία και οι τομείς συντήρησης τροφίμων— η Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου αντιπροσωπεύει μια αξιόπιστη επιλογή που μπορεί να διατηρήσει την ακεραιότητα των ευαίσθητων υλικών κάτω από διαφορετικές συνθήκες ραφίου. Αντίθετα, ο Ερμητικός Συμπιεστής, με τους περιορισμούς που παρατηρούνται - ειδικά σε χαμηλότερες θέσεις όπου η διαχείριση θερμοκρασίας είναι κρίσιμη - θα πρέπει να ελέγχεται εξονυχιστικά πριν από τη χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν αυστηρή τήρηση θερμοκρασίας. Συνιστάται να εξετάζετε προσεκτικά τα σενάρια χρήσης και τις τοποθετήσεις θέσης για τον μετριασμό των κινδύνων που σχετίζονται με την έκθεση σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Ο κινητήρας με ελεύθερο έμβολο θα πρέπει να επιλέγεται λόγω της αποδεδειγμένης αποτελεσματικότητάς του στη διατήρηση βέλτιστων χαμηλών θερμοκρασιών, ειδικά σε ευαίσθητα περιβάλλοντα όπως τα ερευνητικά εργαστήρια ή η αποθήκευση φαρμάκων. Ο Ερμητικός Συμπιεστής πρέπει να προσεγγίζεται με προσοχή σε ρυθμίσεις όπου απαιτούνται εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, ιδιαίτερα σε χαμηλότερα επίπεδα ραφιών, καθώς δεν πληρούσε σταθερά τα απαιτούμενα σημεία αναφοράς θερμοκρασίας. Αυτή η ανάλυση θέσης στους -70°C υπογραμμίζει την υπεροχή του κινητήρα ελεύθερου εμβόλου στη διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών σε διάφορες θέσεις ραφιών, ενώ ο Ερμητικός Συμπιεστής παρουσίασε σημαντικούς περιορισμούς, ιδιαίτερα στην ικανότητά του να διατηρεί εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, ειδικά σε χαμηλότερες θέσεις.

Πίνακας 13 Δοκιμασία Ανοίγματος Πόρτας (-70°C)							
Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Χρόνος επιστροφής εντός των προδιαγραφών			Μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία κατά τη δοκιμή ανοιχτής πόρτας		
		Μέσος Χρόνος	Τυπική Διακύμανση	Συντελεστής Μεταβλητότητας	Μέσος Χρόνος	Τυπική Διακύμανση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Ερμητικός Συμπιεστής	Άδειος Θάλαμος (Α)	12,60	3,72	29,5%	$-37,38^{\circ}\text{C}$	$5,51^{\circ}\text{C}$	14,75%
	Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	12,10	3,18	26,3%	$-37,72^{\circ}\text{C}$	$5,34^{\circ}\text{C}$	14,16%
	Διαφορά (Α)-(Β)	0,50	0,54	0,03	$0,34^{\circ}\text{C}$	$0,17^{\circ}\text{C}$	-0,59%
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Άδειος Θάλαμος (Α)	11,50	2,80	24,4%	$-39,15^{\circ}\text{C}$	$5,72^{\circ}\text{C}$	14,61%
	Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	12,80	2,52	19,7%	$-39,73^{\circ}\text{C}$	$6,11^{\circ}\text{C}$	15,38%
	Διαφορά (Α)-(Β)	-1,30	0,28	0,05	$0,57^{\circ}\text{C}$	$-0,39^{\circ}\text{C}$	0,77%

Πίνακας 14 Δοκιμασία Ανοίγματος Πόρτας σε επίπεδο θέσης αισθητήρα (-70°C)							
Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Θέση	Ράφι	Περιοχή	Μέση Μέγιστη Θερμοκρασία	Τυπική Διακύμανση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Ερμητικός Συμπιεστής	Άδειος Θάλαμος (Α)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-43,06°C	2,77°C	6,4%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-37,59°C	3,89°C	10,4%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-35,20°C	3,40°C	9,7%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-39,98°C	3,68°C	9,2%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-28,52°C	2,53°C	8,9%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-39,93°C	2,32°C	5,8%
	Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-41,94°C	2,72°C	6,5%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-38,21°C	5,16°C	13,5%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-33,59°C	2,21°C	6,6%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-41,48°C	3,55°C	8,6%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-30,37°C	2,76°C	9,1%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-40,70°C	2,54°C	6,2%
	Διαφορά (Α)-(Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-1,12°C	0,05°C	0,1%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	0,62°C	-1,27°C	3,1%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-1,61°C	1,18°C	-3,1%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	1,50°C	0,12°C	-0,6%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	1,85°C	-0,23°C	0,2%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	0,77°C	-0,22°C	0,4%
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Άδειος Θάλαμος (Α)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-43,92°C	2,98°C	6,8%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-42,20°C	2,85°C	6,7%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-37,86°C	4,36°C	11,5%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-43,15°C	3,06°C	7,1%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-29,69°C	2,90°C	9,8%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-38,10°C	2,91°C	7,6%
	Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-44,81°C	1,60°C	3,6%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-44,83°C	4,20°C	9,4%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-36,47°C	2,32°C	6,4%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-43,21°C	4,26°C	9,9%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-30,26°C	4,05°C	13,4%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-38,78°C	2,28°C	5,9%
	Διαφορά (Α)-(Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	0,89°C	1,37°C	-3,2%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	2,63°C	-1,36°C	2,6%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-1,39°C	2,04°C	-5,2%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	0,06°C	-1,21°C	2,8%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	0,57°C	-1,15°C	3,6%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	0,68°C	0,63°C	-1,7%

Απόδοση θερμοκρασίας: -40°C έναντι -70°C

Αυτή η ανάλυση συγκρίνει την απόδοση τριών τύπων καταψύκτη—Ερμητικό Συμπιεστή, Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και Πολυσυμπιεστή—σε δύο διαφορετικές ρυθμίσεις θερμοκρασίας: -40°C και -70°C σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Πινάκων 11, 12, 13, και 14. Η σύγκριση επικεντρώνεται στην ικανότητα κάθε τύπου καταψύκτη να διατηρεί χαμηλές θερμοκρασίες σε διάφορες θέσεις ραφιών, λαμβάνοντας υπόψη τις μέγιστες παρατηρούμενες θερμοκρασίες, τις τυπικές αποκλίσεις και τους συντελεστές διακύμανσης τόσο για συνθήκες άδειας όσο και για συνθήκες φόρτωσης.

Στην ανάλυση των επιδόσεων των καταψυκτών, αρχικά εξετάζουμε την απόδοση στους -40°C. Ο Ερμητικός Συμπιεστής εμφάνισε μεταβλητότητα στους χρόνους ανάκτησης, οι οποίοι κυμάνθηκαν από 5.67 έως 13.80 λεπτά. Οι μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν ανήλθαν έως -21.97°C σε κενό θάλαμο και -22.38°C σε φορτωμένο, δείχνοντας ότι η απόδοσή του δυσκολεύτηκε ιδιαίτερα στις κατώτερες θέσεις ραφιών. Αντίθετα, ο Κινητήρας Ελεύθερου Εμβόλου απέδωσε καλύτερα, με τις

μέγιστες θερμοκρασίες να παραμένουν γύρω στους -23.73°C σε κενό θάλαμο και -23.58°C σε φορτωμένο θάλαμο. Παρά τις αυξήσεις θερμοκρασίας που παρατηρήθηκαν στις μεσαίες και κάτω θέσεις, ο Κινητήρας διατήρησε πιο ψυχρές μέσες μέγιστες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τον Ερμητικό Συμπιεστή. Ο Πολυσυμπιεστής, από την πλευρά του, επέδειξε ανώτερη απόδοση, με χρόνους ανάκτησης που κυμαίνονταν από 5,60 έως 5,67 λεπτά και μέγιστες θερμοκρασίες μόνο -27.12°C σε φορτωμένη κατάσταση, υποδεικνύοντας εξαιρετική απόδοση.

Στην ανάλυση των επιδόσεων στους -70°C , ο Ερμητικός Συμπιεστής κατέγραψε υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες, φτάνοντας τους -28.52°C στις κάτω θέσεις, τόσο με φορτίο όσο και άδειο. Αυτό υποδεικνύει κακή συγκράτηση στην απόδοση του ραφιού σε σύγκριση με την απόδοσή του στους -40°C . Αντίθετα, ο Κινητήρας Ελεύθερου Εμβόλου παρουσίασε βελτιωμένες μέγιστες θερμοκρασίες, φτάνοντας στους -29.69°C σε άδειο θάλαμο και -30.26°C σε φορτωμένο θάλαμο στις κάτω θέσεις. Αυτή η απόδοση δείχνει ότι ο Κινητήρας εξακολουθεί να υπερέχει του Ερμητικού, καθώς διατήρησε θερμοκρασίες γύρω στους -43.92°C στην επάνω αριστερή θέση ψηλά πίσω, υποδεικνύοντας καλύτερη ικανότητα συγκράτησης στο κρύο σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους καταψυκτών. Αυτή η σύγκριση αναδεικνύει τη σημασία της επιλογής του κατάλληλου τύπου καταψύκτη ανάλογα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις θερμοκρασίας και τις συνθήκες φορτίου, προσδιορίζοντας τον Κινητήρα Ελεύθερου Εμβόλου ως ιδιαίτερα αξιόπιστη λύση σε ακραίες θερμοκρασίες.

Στους -40°C , οι καταψύκτες είχαν σχετικά καλύτερη απόδοση στη διατήρηση χαμηλότερων μέγιστων θερμοκρασιών, με τον Multi-compressor να επιτυγχάνει -27.12°C ενώ ο Ερμητικός Συμπιεστής έφτασε τους -21.97°C (άδειος). Στους -70°C , οι θερμοκρασίες που παρατηρήθηκαν ήταν γενικά υψηλότερες στις διάφορες θέσεις του Ερμητικού Συμπιεστή, κορυφώνοντας στους -28.52°C στις κάτω θέσεις. Εν τω μεταξύ, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου έδειξε μεγαλύτερη σταθερότητα σε μέγιστη θερμοκρασία -44.81°C στην επάνω θέση.

Ο Ερμητικός Συμπιεστής παρουσίασε μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις και στις δύο ρυθμίσεις θερμοκρασίας, υποδεικνύοντας λιγότερη προβλεψιμότητα στη διατήρηση σταθερών χαμηλών θερμοκρασιών. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου επέδειξε καλύτερη σταθερότητα με χαμηλότερους συντελεστές διακύμανσης στους -70°C σε σύγκριση με τους -40°C , υποδηλώνοντας βελτιωμένη αξιοπιστία ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες.

Με συνθήκες φόρτωσης, και οι δύο ρυθμίσεις θερμοκρασίας έδειξαν ότι όλα τα μοντέλα παρουσίασαν κάποια αύξηση στις μέσες μέγιστες θερμοκρασίες. Η διαφορά που προκλήθηκε από τη φόρτωση ήταν πιο έντονη στους -70°C . Για παράδειγμα, στον Ερμητικό Συμπιεστή, σημειώθηκε αύξηση 1.85°C στην κάτω θέση και ομοίως για τον κινητήρα ελεύθερου εμβόλου, ενώ στους -40°C η διαφορά ήταν γενικά λιγότερο επιδραστική. Στους -40°C , η επάνω και η μεσαία θέση απέδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα σε όλους τους τύπους, με σημαντική ψύξη που παρέχεται από τον Πολυσυμπιεστή.

4.3. Συγκριτική Ανάλυση Δοκιμής Διακοπής Ρεύματος

Σε ρυθμίσεις που απαιτούν αυστηρό έλεγχο θερμοκρασίας, όπως βιοϊατρικά περιβάλλοντα και περιβάλλοντα αποθήκευσης τροφίμων, η ικανότητα των καταψυκτών να διατηρούν τις εσωτερικές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια διακοπής ρεύματος είναι ζωτικής σημασίας. Αυτή η ανάλυση συγκρίνει την απόδοση τριών τύπων καταψύκτη—του Ερμητικού Συμπιεστή, του Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και του Πολυσυμπιεστή—σε δοκιμές διακοπής ρεύματος που πραγματοποιήθηκαν σε δύο κρίσιμες θερμοκρασίες: -40°C και -70°C . Η αξιολόγηση επικεντρώνεται σε τρεις βασικές μετρήσεις: το χρόνο που απαιτείται για να βγει από τις προδιαγραφές μετά από μια διακοπή ρεύματος, ο χρόνος που απαιτείται για να επιστρέψετε στις προδιαγραφές μόλις αποκατασταθεί το ρεύμα και οι μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Επιπλέον, η αξιολόγηση επικεντρώνεται στις μέσες μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν κατά τη διακοπή ρεύματος, μαζί με τις τυπικές αποκλίσεις και τους συντελεστές διακύμανσης σε διάφορες θέσεις ραφιών.

Επισκόπηση απόδοσης στους -40°C

Στη δοκιμή κενού θαλάμου, ο Ερμητικός Συμπιεστής έδειξε μέσο χρόνο για να φτάσει εκτός των προδιαγραφών των 106,00 λεπτών με χαμηλή τυπική απόκλιση 4,20, υποδεικνύοντας μια σχετικά σταθερή απόδοση (βλ. Πίνακα 15). Ωστόσο, ο χρόνος που χρειάστηκε για την επιστροφή στις προδιαγραφές κατά την εκ νέου ενεργοποίηση της τροφοδοσίας ήταν ιδιαίτερα υψηλός, κατά μέσο όρο 32,10 λεπτά. Οι δοκιμές φορτωμένου θαλάμου απέδωσαν παρόμοια αποτελέσματα, με τη μονάδα να χρειάζεται 107,90 λεπτά για να βγει εκτός προδιαγραφών και 30,10 λεπτά για να επιστρέψει στα λειτουργικά πρότυπα (βλ. Πίνακα 15). Οι μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής ήταν σχετικά κοντινές, στους $-30,63^{\circ}\text{C}$ και $-30,42^{\circ}\text{C}$, αντανakλώντας ελαφρά απώλεια απόδοσης με συνθήκες φορτίου (βλ. Πίνακα 15).

Ο Ερμητικός Συμπιεστής, όταν δοκιμάστηκε σε κενό θάλαμο, εμφάνισε ποικίλες μέγιστες θερμοκρασίες σε διαφορετικές θέσεις (βλ. Πίνακα 16). Στην επάνω αριστερή ψηλά πίσω θέση, κατέγραψε μέση μέγιστη θερμοκρασία $-37,73^{\circ}\text{C}$, ενώ η επάνω δεξιά κάτω μπροστινή θέση ήταν ελαφρώς πιο ζεστή στους $-32,14^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 16). Προχωρώντας προς τα κάτω στις μεσαίες θέσεις, οι μέγιστες θερμοκρασίες μειώθηκαν περαιτέρω, με το αριστερό ψηλό πίσω μέρος να κυμαίνεται κατά μέσο όρο στους $-31,73^{\circ}\text{C}$ και το δεξί κάτω μπροστά στους $-30,68^{\circ}\text{C}$. Οι κάτω θέσεις κατέγραψαν τις πιο θερμές θερμοκρασίες, αποκαλύπτοντας την ευπάθεια της μονάδας σε αυτές τις περιοχές, με το κάτω αριστερό ψηλό πίσω μέρος να καταγράφει $-26,34^{\circ}\text{C}$ και το κάτω δεξιά κάτω εμπρός ελαφρώς θερμότερο στους $-25,13^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 16). Σημειωτέων, οι συντελεστές διακύμανσης τόσο σε άδειες όσο και σε φορτισμένες δοκιμές υποδηλώνουν σταθερή απόδοση, αν και με χαμηλότερες θερμοκρασίες στις ανώτερες θέσεις.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 15, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου εμφάνισε μεγαλύτερες διάρκειες πριν ξεπεράσει τα όρια προδιαγραφών, με 119,70 λεπτά (κενό) και 118,80 λεπτά (φορτωμένο). Οι χρόνοι ανάκτησης ήταν μικρότεροι από τον Ερμητικός Συμπιεστής, με μέσο όρο 26,90 και 27,80 λεπτά, αντίστοιχα. Οι μέγιστες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν ήταν ελαφρώς χαμηλότερες, στους $-31,59^{\circ}\text{C}$ και στους $-31,55^{\circ}\text{C}$, υποδηλώνοντας καλύτερη διαχείριση της θερμοκρασίας κατά τη διακοπή ρεύματος.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 16, στις δοκιμές κενού θαλάμου, διατήρησε μέγιστη θερμοκρασία $-37,69^{\circ}\text{C}$ στην επάνω αριστερή ψηλή πίσω θέση, οριακά χαμηλότερη από αυτή του Ερμητικός Συμπιεστής. Οι ενδείξεις θερμοκρασίας στις επόμενες θέσεις ήταν γενικά χαμηλότερες, με το πάνω δεξιά κάτω εμπρός μέρος στους $-31,79^{\circ}\text{C}$ και το μεσαίο αριστερό ψηλό πίσω στους $-32,54^{\circ}\text{C}$, υποδεικνύοντας καλύτερες δυνατότητες διατήρησης της θερμότητας. Η μεταβλητότητα των θερμοκρασιών στον κινητήρα ελεύθερου εμβόλου ήταν σχεδόν συγκρίσιμη με αυτή του Ερμητικός Συμπιεστής, αλλά η ικανότητά του να διατηρεί ψυχρότερες θερμοκρασίες στις χαμηλότερες τοποθετήσεις ραφιών ανέδειξε την ανώτερη απόδοσή του σε κρίσιμες εφαρμογές. Οι δοκιμές φορτωμένου θαλάμου υπογράμμισαν περαιτέρω αυτή την τάση, με την επάνω αριστερή ψηλή πίσω θέση να επιτυγχάνει μέση μέγιστη θερμοκρασία $-38,59^{\circ}\text{C}$, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα της μονάδας ακόμη και όταν είναι πλήρως φορτωμένη.

Είναι αξιοσημείωτο ότι ο Πολυσυμπιεστής χρειάστηκε πολύ περισσότερο χρόνο για να ξεφύγει από τις προδιαγραφές, κατά μέσο όρο 307,27 λεπτά (κενό) και 305,80 λεπτά (φορτωμένο) (βλ. Πίνακα 15). Οι χρόνοι ανάκτησης ήταν περίπου σε κοντινή απόσταση από τους άλλους, αλλά σημαντικά μεγαλύτεροι στα 31,33 λεπτά (κενό) και 33,47 λεπτά (φορτωμένο). Οι μέγιστες θερμοκρασίες που μετρήθηκαν στους $-30,33^{\circ}\text{C}$ και στους $-30,54^{\circ}\text{C}$ υποδεικνύουν εξαιρετική διατήρηση της θερμότητας κατά τη δοκιμή διακοπής ρεύματος (βλ. Πίνακα 15). Ο Πολυσυμπιεστής ξεπέρασε σταθερά και τους δύο αντίστοιχους, ειδικά στα επάνω ράφια όπου διατηρούσε τις πιο κρύες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια διακοπής ρεύματος. Στην αξιολόγηση του άδειου θαλάμου, ο Πολλαπλός συμπιεστής κατέγραψε μέγιστη θερμοκρασία $-36,57^{\circ}\text{C}$ στην πίσω αριστερή πάνω θέση, η οποία ήταν σημαντικά χαμηλότερη από τις θερμοκρασίες που παρατηρήθηκαν τόσο στον Ερμητικό Συμπιεστή όσο και στον Κινητήρα Ελεύθερου Εμβόλου (βλ. Πίνακα 16). Η επιτυχής διατήρηση των χαμηλών θερμοκρασιών ήταν εμφανής σε όλες τις δοκιμασμένες θέσεις, με τις μέσες μέγιστες θερμοκρασίες στις δοκιμές του φορτωμένου θαλάμου να παραμένουν αξιόπαινες στους $-36,67^{\circ}\text{C}$, επιδεικνύοντας περαιτέρω τις αξιόπιστες δυνατότητες διαχείρισης θερμότητας (βλ. Πίνακα 16).

Καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών, κάθε τύπος καταψύκτη εμφάνισε μια τάση στην οποία οι μέγιστες θερμοκρασίες αυξάνονταν καθώς οι θέσεις μετακινούνταν από πάνω προς τα κάτω. Αυτή η τάση τονίζει την κρίσιμη φύση της τοποθέτησης εντός των μονάδων κατάψυξης και τις αντίστοιχες αποδόσεις ψύξης τους. Τόσο ο Ερμητικός Συμπιεστής όσο και ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου παρουσίασαν αισθητά υψηλότερες θερμοκρασίες σε χαμηλότερες τοποθετήσεις ραφιών, υπογραμμίζοντας τη σημασία του σχεδιασμού της ψύξης και της δυναμικής ροής αέρα για τη διατήρηση της βέλτιστης θερμοκρασίας ακόμη

και κατά τη διάρκεια διαταραχών ρεύματος. Η εξαιρετική απόδοση του Πολυσυμπιεστή σε όλα τα ύψη επιβεβαίωσε τη θέση του ως μια αξιόπιστη επιλογή, ικανή να διατηρήσει τη θερμική ακεραιότητα ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες.

Κατά την εξέταση της μεταβλητότητας της απόδοσης, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου έδειξε ελαφρώς υψηλότερες τυπικές αποκλίσεις για τις μέγιστες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τους ανταγωνιστές του, υποδεικνύοντας έναν βαθμό μεταβλητότητας. Ωστόσο, κατάφερε να προσφέρει σταθερά αποτελέσματα που είναι απαραίτητα σε εφαρμογές όπου η ακρίβεια θερμοκρασίας είναι πρωταρχικής σημασίας. Από την άλλη πλευρά, ο Πολυσυμπιεστής παρουσίασε χαμηλούς συντελεστές διακύμανσης, αντανakλώντας μια ζήτηση σταθερότητας σε περιβάλλοντα που απαιτούν αυστηρό έλεγχο θερμοκρασίας.

Αυτή η ανάλυση της απόδοσης του καταψύκτη στους -40°C υπογραμμίζει τη σημασία της επιλογής του κατάλληλου τύπου καταψύκτη για συγκεκριμένες εφαρμογές. Ο κινητήρας με ελεύθερο έμβολο και ο Πολυσυμπιεστής αναδεικνύονται ως ανώτερες επιλογές, διατηρώντας αποτελεσματικά χαμηλές θερμοκρασίες σε διάφορες θέσεις ραφιών κατά τη διάρκεια δοκιμών διακοπής ρεύματος. Αντίθετα, ο Ερμητικός Συμπιεστής, ενώ ήταν λειτουργικός, παρουσίαζε περιορισμούς, ιδιαίτερα όσον αφορά την ικανότητά του να διατηρεί βέλτιστες θερμοκρασίες σε χαμηλότερες θέσεις. Η κατανόηση αυτών των μετρήσεων απόδοσης και των συνεπειών τους μπορεί να επηρεάσει ή λήψη στρατηγικών αποφάσεων κατά την επιλογή συστημάτων καταψύκτη για να διασφαλιστεί η ασφάλεια και η ποιότητα των πολύτιμων αποθηκευμένων υλικών κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος.

Οι συνέπειες αυτής της ανάλυσης εκτείνονται πέρα από τις απλές μετρήσεις θερμοκρασίας. υπογραμμίζουν τις κρίσιμες ευθύνες των διαχειριστών εγκαταστάσεων και των ειδικών προμηθειών για την επιλογή συστημάτων ψύξης συμβατά με τις λειτουργικές τους ανάγκες. Σε περιβάλλοντα όπως τα εργαστήρια, όπου μπορούν να αποθηκευτούν βιολογικά δείγματα ή σε φαρμακευτικές εφαρμογές όπου η αποτελεσματικότητα του φαρμάκου εξαρτάται από συγκεκριμένα εύρη θερμοκρασίας, οι συνέπειες της απώλειας ισχύος μπορεί να είναι σημαντικές. Η ανάλυση υπογραμμίζει την ανάγκη για ενδελεχή κατανόηση των χαρακτηριστικών απόδοσης του καταψύκτη, καθοδηγώντας τους ενδιαφερόμενους προς ενημερωμένες επιλογές που δίνουν προτεραιότητα στην ασφάλεια και την αξιοπιστία.

Τα ευρήματα υποδηλώνουν επίσης ότι όπου ο κίνδυνος διακοπής ρεύματος είναι ανησυχητικός, η επένδυση σε μονάδες πολλαπλών συμπιεστών θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Αυτές οι μονάδες όχι μόνο παρέχουν ανώτερη διατήρηση της θερμοκρασίας αλλά επιδεικνύουν επίσης ανθεκτικότητα σε συνθήκες καταπόνησης – ιδιότητες απαραίτητες για τη διατήρηση της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς και τις βέλτιστες πρακτικές σε ευαίσθητα περιβάλλοντα αποθήκευσης. Ομοίως, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου ξεχωρίζει ως μια ισχυρή εναλλακτική λύση, προσφέροντας μια αξιόπαινη

ισορροπία μεταξύ απόδοσης και κόστους, ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές όπου ο ελαφρώς λιγότερο αυστηρός έλεγχος θερμοκρασίας μπορεί να γίνει ανεκτός χωρίς συμβιβασμούς.

Συμπερασματικά, η συγκριτική ανάλυση απόδοσης του Ερμητικού Συμπιεστή, του Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και του Πολυσυμπιεστή υπό συνθήκες διακοπής ρεύματος στους -40°C αποκαλύπτει σημαντικές πληροφορίες για το πώς ο σχεδιασμός και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν τη διατήρηση της θερμοκρασίας. Όπως δείχνουν τα αποτελέσματα, η σωστή επιλογή στην τεχνολογία καταψύκτη μπορεί να προσφέρει ηρεμία, απαραίτητη για την προστασία του πολύτιμου περιεχομένου από το απρόβλεπτο των διακοπών τροφοδοσίας. Τελικά, αυτές οι αξιολογήσεις απόδοσης χρησιμεύουν ως ζωτικά εργαλεία για την καθοδήγηση αποφάσεων που ευθυγραμμίζονται τόσο με τις λειτουργικές απαιτήσεις όσο και με την επιτακτική ανάγκη να τηρούνται τα υψηλότερα πρότυπα ελέγχου θερμοκρασίας σε ευαίσθητες εφαρμογές.

Πίνακας 15 Δοκιμή Διακοπής Ρεύματος (-40°C)										
Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Χρόνος για βγει εκτός προδιαγραφών μετά την απενεργοποίηση της παροχής ρεύματος			Χρόνος επιστροφής εντός των προδιαγραφών κατά την ενεργοποίηση της παροχής ρεύματος			Μέγιστη θερμοκρασία κατά τη δοκιμή διακοπής ρεύματος		
		Μέσος Χρόνος	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας	Μέσος Χρόνος	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας	Μέσος Χρόνος	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Ερμητικός Συμπιεστής	Άδειος Θάλαμος (A)	106,00	4,20	4,0%	32,10	2,39	7,43%	-30,63°C	0,45°C	1,5%
	Φορτωμένος Θάλαμος (B)	107,90	7,48	6,9%	30,10	3,24	10,76%	-30,42°C	0,65°C	2,1%
	Διαφορά (A)-(B)	-1,90	-3,28	-3,0%	2,00	-0,85	-3,33%	-0,20°C	-0,20°C	0,67%
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Άδειος Θάλαμος (A)	119,70	4,69	3,92%	26,90	3,42	0,13	-31,59°C	0,93°C	0,03
	Φορτωμένος Θάλαμος (B)	118,80	6,46	5,44%	27,80	2,48	0,09	-31,55°C	1,18°C	0,04
	Διαφορά (A)-(B)	0,90	-1,77	-0,02	-0,90	0,94	0,04	-0,04°C	-0,25°C	0,01
Μηχανή Πολυσυμπιεστών	Άδειος Θάλαμος (A)	307,27	7,65	2,49%	31,33	3,28	10,47%	-30,33°C	0,57°C	1,88%
	Φορτωμένος Θάλαμος (B)	305,80	10,87	3,55%	33,47	3,18	9,50%	-30,54°C	0,46°C	1,51%
	Διαφορά (A)-(B)	1,47	-3,22	-1,1%	-2,13	0,10	1,0%	0,21°C	0,11°C	-0,4%

Πίνακας 16 Δοκιμή Διακοπής Ρεύματος σε επίπεδο θέσης αισθητήρα (-40°C)							
Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Θέση	Ράφι	Τοποθεσία	Μέση Μέγιστη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της δοκιμής διακοπής ρεύματος	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Ερμητικός Συμπιεστής	Άδειος Θάλαμος (A)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-37,73°C	1,13°C	2,99%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-32,14°C	1,06°C	3,29%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-31,73°C	1,41°C	4,45%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-30,68°C	1,34°C	4,36%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-26,34°C	1,14°C	4,32%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-25,13°C	1,16°C	4,60%
	Φορτωμένος Θάλαμος (B)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-37,39°C	0,92°C	2,47%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-32,63°C	1,14°C	3,48%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-30,95°C	1,31°C	4,23%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-29,92°C	1,34°C	4,48%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-26,65°C	1,22°C	4,58%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-24,99°C	1,21°C	4,83%
	Διαφορά (A)-(B)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-0,34°C	0,20°C	-0,52%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	0,49°C	-0,08°C	0,19%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-0,78°C	0,10°C	-0,22%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,76°C	0,00°C	0,12%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	0,30°C	-0,09°C	0,27%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,14°C	-0,05°C	0,24%
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Άδειος Θάλαμος (A)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-37,69°C	1,58°C	4,19%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-31,79°C	1,18°C	3,71%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-32,54°C	1,53°C	4,69%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-30,81°C	1,39°C	4,53%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-29,08°C	1,31°C	4,51%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-27,64°C	1,38°C	5,00%
	Φορτωμένος Θάλαμος (B)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-38,59°C	1,68°C	4,35%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-32,46°C	1,58°C	4,87%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-31,61°C	1,94°C	6,15%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-30,87°C	2,10°C	6,79%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-28,90°C	1,25°C	4,34%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-26,89°C	1,50°C	5,57%
	Διαφορά (A)-(B)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	0,90°C	-0,10°C	0,16%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	0,66°C	-0,40°C	1,16%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-0,93°C	-0,42°C	1,46%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	0,06°C	-0,70°C	2,27%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-0,18°C	0,06°C	-0,17%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,75°C	-0,12°C	0,57%
Μηχανή Πολυσυμπιεστών	Άδειος Θάλαμος (A)	1	N/A	Πίσω Αριστερά Πάνω	-36,57°C	0,88°C	2,42%
		2	N/A	Πίσω δεξιά κάτω	-31,59°C	1,22°C	3,85%
		3	N/A	Μέση αριστερή κορυφή	-30,85°C	1,12°C	3,63%
		4	N/A	Μέση δεξιά κάτω	-30,01°C	1,26°C	4,21%
		5	N/A	Μπροστινό Αριστερό Πάνω	-26,50°C	1,06°C	4,00%
		6	N/A	Μπροστά δεξιά κάτω	-26,48°C	1,22°C	4,62%
	Φορτωμένος Θάλαμος (B)	1	N/A	Πίσω Αριστερά Πάνω	-36,67°C	1,38°C	3,75%
		2	N/A	Πίσω δεξιά κάτω	-31,99°C	1,31°C	4,11%
		3	N/A	Μέση αριστερή κορυφή	-30,87°C	1,09°C	3,53%
		4	N/A	Μέση δεξιά κάτω	-30,37°C	1,08°C	3,57%
		5	N/A	Μπροστινό Αριστερό Πάνω	-26,86°C	0,87°C	3,23%
		6	N/A	Μπροστά δεξιά κάτω	-26,49°C	1,10°C	4,15%
	Διαφορά (A)-(B)	1	N/A	Πίσω Αριστερά Πάνω	0,10°C	-0,49°C	1,33%
		2	N/A	Πίσω δεξιά κάτω	0,40°C	-0,10°C	0,26%
		3	N/A	Μέση αριστερή κορυφή	0,02°C	0,03°C	-0,10%
		4	N/A	Μέση δεξιά κάτω	0,36°C	0,18°C	-0,64%
		5	N/A	Μπροστινό Αριστερό Πάνω	0,36°C	0,19°C	-0,77%
		6	N/A	Μπροστά δεξιά κάτω	0,01°C	0,13°C	-0,48%

Επισκόπηση απόδοσης στους -70°C

Στις δοκιμές -70°C , ο Ερμητικός Συμπιεστής εξακολουθούσε να έδειξε αξιόπαινη απόδοση, απαιτώντας κατά μέσο όρο 109,90 λεπτά (άδειο) και 104,00 λεπτά (φορτωμένο) πριν βγει εκτός προδιαγραφών (βλ. Πίνακα 17). Η ανάκτηση παρέμεινε σταθερή στα περίπου 30,60 και 31,70 λεπτά, αντίστοιχα, αλλά οι μέγιστες καταγεγραμμένες θερμοκρασίες έπεσαν περαιτέρω στους $-50,37^{\circ}\text{C}$ και $-51,04^{\circ}\text{C}$, δείχνοντας την πρόκληση της διατήρησης εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια διακοπών (βλ. Πίνακα 17). Ο Ερμητικός Συμπιεστής δοκιμάστηκε πρώτα σε άδειο θάλαμο, αποκαλύπτοντας σημαντικές διακυμάνσεις θερμοκρασίας σε διαφορετικές θέσεις σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 18. Η επάνω αριστερή ψηλά πίσω θέση πέτυχε τη χαμηλότερη μέση μέγιστη θερμοκρασία $-62,24^{\circ}\text{C}$, υποδεικνύοντας αποτελεσματική θερμική διαχείριση σε αυτή τη θέση. Ωστόσο, οι θερμοκρασίες αυξήθηκαν σημαντικά στις χαμηλότερες θέσεις, με το κάτω αριστερό ψηλό πίσω μέρος να καταγράφει $-45,27^{\circ}\text{C}$ και το κάτω δεξιά κάτω μπροστά στους $-45,19^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 18). Αυτό το μοτίβο υποδηλώνει μείωση της απόδοσης ψύξης καθώς η θέση μετακινήθηκε προς τα κάτω εντός της μονάδας. Οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε θέση έδειξαν μέτρια μεταβλητότητα, ιδιαίτερα στις κορυφαίες θέσεις όπου διατηρήθηκαν ψυχρότερες θερμοκρασίες αλλά με ελαφρώς υψηλότερη μεταβλητότητα, όπως υποδεικνύεται από τους συντελεστές διακύμανσης. Στις δοκιμές με φορτωμένο θάλαμο, ο Ερμητικός Συμπιεστής διατήρησε παρόμοια στιβαρή απόδοση, με την επάνω αριστερή ψηλή πίσω θέση να φτάνει τους $-59,68^{\circ}\text{C}$ και την επάνω δεξιά κάτω εμπρός στους $-51,84^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 18). Ωστόσο, εδώ, οι κάτω θέσεις παρουσίασαν πιο αξιοσημείωτες αυξήσεις στις μέγιστες θερμοκρασίες, με το κάτω αριστερό ψηλό πίσω μέρος να καταγράφει $-47,66^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 18). Η συνολική συνοχή που διατηρεί ο Ερμητικός Συμπιεστής στις επάνω θέσεις, σε συνδυασμό με τους σχετικά χαμηλούς συντελεστές διακύμανσης, αντικατοπτρίζει μια αξιόπιστη απόδοση, αν και οι αυξημένες θερμοκρασίες στις χαμηλότερες θέσεις εγείρουν ανησυχίες για αποθηκευμένα υλικά ευαίσθητα στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου διατήρησε την τάση του με υψηλή απόδοση. Χρειάστηκαν 119,30 λεπτά (άδειο) και 116,80 λεπτά (φορτωμένο) για να βγει εκτός προδιαγραφών, αντανakλώντας μια ελαφρά βελτίωση στη θερμική συγκράτηση (βλ. Πίνακα 17). Οι χρόνοι ανάκτησης ήταν οριακά καλύτεροι στα 27,30 και 27,20 λεπτά, αντίστοιχα, και οι μέγιστες θερμοκρασίες που παρατηρήθηκαν ήταν $-52,39^{\circ}\text{C}$ και $-53,24^{\circ}\text{C}$, υποδεικνύοντας εξαιρετικές δυνατότητες διαχείρισης θερμοκρασίας σε αυτή τη χαμηλότερη ρύθμιση. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών κενού θαλάμου, οι μέσες μέγιστες θερμοκρασίες που επιτεύχθηκαν ήταν $-61,61^{\circ}\text{C}$ στην επάνω αριστερή ψηλά πίσω θέση και $-53,57^{\circ}\text{C}$ στην επάνω δεξιά κάτω μπροστινή θέση (βλ. Πίνακα 18). Παρόμοια με τον Ερμητικό Συμπιεστή, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου παρουσίασε υψηλότερες θερμοκρασίες στις χαμηλότερες θέσεις, με το κάτω αριστερό ψηλό πίσω μέρος να καταγράφει $-47,37^{\circ}\text{C}$ και το κάτω δεξιά κάτω μπροστά στους $-45,34^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 18). Αυτή η μονάδα παρουσίασε ελαφρώς μεγαλύτερη μεταβλητότητα, όπως υποδεικνύεται από υψηλότερες τυπικές

αποκλίσεις, υποδηλώνοντας λιγότερο σταθερή απόδοση σε σύγκριση με το μοντέλο Ερμητικού Συμπιεστή, ιδιαίτερα σε χαμηλότερες θέσεις. Υπό συνθήκες φόρτισης, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου διατήρησε την απόδοσή του, με την επάνω αριστερή ψηλή πίσω θέση να φτάνει τους $-62,45^{\circ}\text{C}$ και την επάνω δεξιά κάτω εμπρός στους $-56,01^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 18). Οι χαμηλότερες θέσεις συνέχισαν να παρουσιάζουν ζεστασιά, με τις μέγιστες θερμοκρασίες στο κάτω αριστερό ψηλό πίσω μέρος να φτάνουν τους $-50,21^{\circ}\text{C}$ (βλ. Πίνακα 18). Οι διαφορές στις μέγιστες θερμοκρασίες μεταξύ κενών και φορτισμένων συνθηκών παρέμειναν σχετικά χαμηλές, υπογραμμίζοντας την ικανότητα του Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου να διατηρεί κρίες θερμοκρασίες ανεξάρτητα από το φορτίο. Ωστόσο, σύμφωνα με την προηγούμενη δοκιμή, οι μετρήσεις μεταβλητότητας έδειξαν αύξηση στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σε χαμηλότερες θέσεις.

Συνοπτικά, τόσο ο Ερμητικός Συμπιεστής όσο και ο Κινητήρας Ελεύθερου Εμβόλου επιδεικνύουν αποτελεσματικές δυνατότητες συγκράτησης στο κρύο στους -70°C , αλλά το καθένα παρουσιάζει μοναδικά πλεονεκτήματα και αδυναμίες. Ο Ερμητικός Συμπιεστής επιδεικνύει πιο σταθερή απόδοση στις επάνω θέσεις ενώ αντιμετωπίζει αυξανόμενες θερμοκρασίες στα χαμηλότερα τμήματα. Αντίθετα, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου διαχειρίζεται αξιόπαινες θερμοκρασίες στις περισσότερες θέσεις, αν και με αυξημένη μεταβλητότητα, ιδιαίτερα στα κάτω διαμερίσματα.

Όπως και στην ανάλυση των -40°C , τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη σημασία της εξέτασης τόσο του σχεδιασμού του μοντέλου όσο και της τοποθέτησης κατά την αξιολόγηση της απόδοσης του καταψύκτη σε σενάρια κρίσιμης θερμοκρασίας. Δεδομένης της σημαντικής ευαισθησίας στη θερμοκρασία πολλών αποθηκευμένων υλικών, η επιλογή μεταξύ αυτών των τύπων καταψύκτη θα πρέπει να ευθυγραμμίζεται με συγκεκριμένες λειτουργικές ανάγκες, εστιάζοντας στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου κατά τις διακοπές ρεύματος. Συνολικά, αυτή η λεπτομερής ανάλυση της απόδοσης -70°C ενισχύει την κατανόησή μας για το πώς ο τύπος και η θέση του καταψύκτη μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη σταθερότητα της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια κρίσιμων γεγονότων, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για ενημερωμένη λήψη αποφάσεων για την προμήθεια λύσεων ψύξης. Ενώ η συγκριτική ανάλυση παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του Ερμητικού Συμπιεστή και του Ελεύθερου Εμβόλου κινητήρα κατά τη διάρκεια διακοπής ρεύματος στους -70°C , φέρνει επίσης στο φως κρίσιμες σκέψεις για λειτουργικές πρακτικές σε περιβάλλοντα που εξαρτώνται από αποθήκευση σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

Πίνακας 17 Δοκιμή Διακοπής Ρεύματος											
Σημείο Ρύθμισης	Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Χρόνος για βγει εκτός προδιαγραφών μετά την απενεργοποίηση της παροχής ρεύματος			Χρόνος επιστροφής εντός των προδιαγραφών κατά την ενεργοποίηση της παροχής ρεύματος			Μέγιστη θερμοκρασία κατά τη δοκιμή διακοπής ρεύματος		
			Μέσος Χρόνος	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας	Μέσος Χρόνος	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας	Μέσος Χρόνος	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
-70°C	Ερμητικός Συμπιεστής	Άδειος Θάλαμος (Α)	109,90	5,66	5,15%	30,60	2,42	7,90%	-50,37°C	1,98°C	-3,94%
		Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	104,00	2,93	2,82%	31,70	3,72	11,72%	-51,04°C	2,61°C	-5,12%
		Διαφορά (Α)-(Β)	5,90	2,73	2,33%	-1,10	-1,30	-3,83%	0,67°C	-0,63°C	1,18%
	Μηχανή Ελεύθερου	Άδειος Θάλαμος (Α)	119,30	8,50	7,12%	27,30	2,41	8,83%	-52,39°C	1,76°C	-3,36%
		Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	116,80	5,46	4,67%	27,20	1,94	7,13%	-53,24°C	2,11°C	-3,97%
		Διαφορά (Α)-(Β)	2,50	3,04	2,45%	0,10	0,47	1,70%	0,85°C	-0,35°C	0,60%

Πίνακας 18 Δοκιμή Διακοπής Ρεύματος σε επίπεδο θέσης αισθητήρα (-70°C)							
Τύπος Καταψύκτη	Δοκιμή	Θέση	Ράφι	Τοποθεσία	Μέση Μέγιστη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της δοκιμής διακοπής ρεύματος	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής Μεταβλητότητας
Ερμητικός Συμπιεστής	Άδειος Θάλαμος (Α)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-62,24°C	3,24°C	5,21%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-52,52°C	5,56°C	10,58%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-49,99°C	3,47°C	6,94%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-47,03°C	3,18°C	6,75%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-45,27°C	2,75°C	6,08%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-45,19°C	1,58°C	3,50%
	Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-59,68°C	2,82°C	4,73%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-51,84°C	6,06°C	11,68%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-51,80°C	3,60°C	6,95%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-49,45°C	4,54°C	9,18%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-47,66°C	4,02°C	8,43%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-45,82°C	3,06°C	6,69%
	Διαφορά (Α)-(Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-2,57°C	0,42°C	0,48%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,67°C	-0,50°C	1,10%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	1,81°C	-0,13°C	0,01%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	2,42°C	-1,36°C	2,43%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	2,39°C	-1,27°C	2,35%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	0,63°C	-1,48°C	3,19%
Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου	Άδειος Θάλαμος (Α)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-61,61°C	2,78°C	4,51%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-53,57°C	3,16°C	5,90%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-55,67°C	3,38°C	6,08%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-50,78°C	3,06°C	6,03%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-47,37°C	5,17°C	10,90%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-45,34°C	1,62°C	3,58%
	Φορτωμένος Θάλαμος (Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-62,45°C	3,19°C	5,10%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-56,01°C	5,98°C	10,68%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-54,00°C	1,80°C	3,33%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-51,54°C	4,45°C	8,64%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-50,21°C	5,44°C	10,84%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-45,26°C	2,37°C	5,25%
	Διαφορά (Α)-(Β)	1	Επάνω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	0,83°C	-0,41°C	0,59%
		2	Επάνω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	2,44°C	-2,82°C	4,78%
		3	Μεσαίο	Αριστερά Ψηλά Πίσω	-1,67°C	1,58°C	2,75%
		4	Μεσαίο	Κάτω Δεξιά Μπροστά	0,76°C	-1,39°C	2,61%
		5	Κάτω	Αριστερά Ψηλά Πίσω	2,84°C	-0,28°C	0,06%
		6	Κάτω	Κάτω Δεξιά Μπροστά	-0,09°C	-0,75°C	1,67%

Απόδοση θερμοκρασίας: -40°C έναντι -70°C

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που αναλύθηκαν παραπάνω με βάση τα δεδομένα των Πινάκων 15, 16, 17, και 18, αυτή η ανάλυση αντιπαραβάλλει την απόδοση και την ομοιομορφία τριών τύπων καταψύκτη—του Ερμητικού Συμπιεστή, του Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και του Πολυσυμπιεστή—σε δύο κρίσιμες θερμοκρασίες: -40°C και -70°C. Τα ευρήματα φωτίζουν τον τρόπο με τον οποίο κάθε μοντέλο διαχειρίζεται τη σταθερότητα και την ομοιομορφία της θερμοκρασίας, επιτρέποντάς μας να εντοπίσουμε τελικά τον καταψύκτη με τις καλύτερες επιδόσεις για εφαρμογές εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών.

Στους -40°C, και οι τρεις τύποι καταψύκτη απέδωσαν θαυμάσια, αν και με διαφορετικά επίπεδα απόδοσης και ομοιομορφίας.

Ο Ερμητικός Συμπιεστής επέδειξε αξιοπρεπή απόδοση, με τις επάνω θέσεις να διατηρούν χαμηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες (π.χ. -37,73°C στο επάνω αριστερό ψηλό πίσω μέρος). Ωστόσο, οι θερμοκρασίες αυξήθηκαν στο ράφι, με τις κάτω θέσεις να φτάνουν τους -26,34°C, υποδηλώνοντας μια αξιοσημείωτη μείωση στην απόδοση ψύξης καθώς μειώθηκε το ύψος του ραφίου. Οι τυπικές αποκλίσεις μεταξύ των θέσεων ήταν μέτριες, υποδηλώνοντας κάποια μεταβλητότητα στην απόδοση.

Ο Κινητήρας ελεύθερου εμβόλου γενικά πέτυχε χαμηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τον Ερμητικό Συμπιεστή, με τις κορυφαίες θέσεις να κυμαίνονται κατά μέσο όρο γύρω στους -37,69°C. Ωστόσο, όπως και το μοντέλο Hermetic, έδειξε επίσης αυξανόμενες θερμοκρασίες στις κάτω θέσεις, φτάνοντας περίπου τους -29,08°C. Συνολικά, η απόδοσή του ήταν σταθερή, ωστόσο παρουσίασε ελαφρώς μεγαλύτερη μεταβλητότητα, ιδιαίτερα σε χαμηλότερες θέσεις.

Τέλος ο Πολυσυμπιεστής επέδειξε εξαιρετική ομοιομορφία θερμοκρασίας στις θέσεις του στους -40°C. Η μέση μέγιστη θερμοκρασία στην επάνω θέση ήταν χαμηλότερη από τις δύο αντίστοιχες, ενώ οι κάτω θέσεις διαχειρίστηκαν επίσης σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Η συνέπεια και οι χαμηλοί συντελεστές διακύμανσης σε όλες τις θέσεις δείχνουν την ανώτερη μηχανική και σχεδίασή του.

Κατά τη σύγκριση των ίδιων τύπων καταψύκτη σε χαμηλότερη θερμοκρασία -70°C, οι διαφορές απόδοσης έγιναν πιο έντονες. Σε δοκιμές κενού θαλάμου, ο Ερμητικός Συμπιεστής πέτυχε μέγιστη θερμοκρασία -62,24°C στην επάνω θέση, αλλά αυτός ο αριθμός μειώθηκε αισθητά στις χαμηλότερες θέσεις, με την κάτω δεξιά να καταγράφεται στους -45,19°C. Οι τυπικές αποκλίσεις έδειξαν μέτρια μεταβλητότητα και οι μέγιστες θερμοκρασίες εμφάνισαν ανησυχητική έλλειψη ομοιομορφίας, ειδικά σε χαμηλότερες τοποθετήσεις ραφιών. Ελαφρώς θερμότερος από τον ερμητικό συμπιεστή, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου κατέγραψε -61,61°C στο επάνω αριστερό ψηλό πίσω μέρος κατά τη διάρκεια των κενών δοκιμών, αλλά η μετάβαση μεταξύ επάνω και κάτω θέσεων παρουσίασε μια αξιοσημείωτη απόκλιση θερμοκρασίας, με τις κάτω θέσεις να κυμαίνονται κατά μέσο όρο περίπου -47,37°C. Οι μετρήσεις μεταβλητότητας ήταν ελαφρώς υψηλότερες από αυτές του Ερμητικού Συμπιεστή, με τους συντελεστές διακύμανσης να υποδηλώνουν λιγότερο σταθερό προφίλ θερμοκρασίας.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων απόδοσης στους -40°C σε σύγκριση με τους -70°C υπογραμμίζει αρκετούς σημαντικούς παράγοντες σχετικά με την αποτελεσματικότητα κάθε καταψύκτη. Αναφορικά με την Σταθερότητα θερμοκρασίας, ο Πολλαπλός συμπιεστής ξεπέρασε σταθερά τόσο τον Ερμητικό Συμπιεστή όσο και τον κινητήρα ελεύθερου εμβόλου και στις δύο ρυθμίσεις θερμοκρασίας. Ενώ όλες οι μονάδες κατάφεραν να διατηρούν χαμηλότερες θερμοκρασίες στις πάνω θέσεις του ραφίου, ο πρωτοποριακός σχεδιασμός του Multi-compressor του επέτρεψε να διατηρεί μεγαλύτερη συγκράτηση στο κρύο ακόμα και στις κάτω θέσεις, ελαχιστοποιώντας τελικά την επίδραση του βάθους του ραφίου στη συνολική θερμοκρασία. Σχετικά με την Ομοιομορφία, στους -70°C , οι διαφορές μεταξύ των τύπων καταψύκτη έγιναν πιο έντονες. Ο ερμητικός συμπιεστής και ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου αντιμετώπισαν προκλήσεις στη διατήρηση ομοιόμορφων θερμοκρασιών σε διαφορετικές θέσεις, με σημαντικές αυξήσεις θερμοκρασίας σε χαμηλότερες θέσεις. Αντίθετα, ο Multi-compressor παρουσίασε τη μεγαλύτερη ομοιομορφία, επιτυγχάνοντας σταθερά προφίλ θερμοκρασίας σε όλο το μήκος.

4.4. Συγκριτική Ανάλυση Δοκιμής Πήξης

Η διαδικασία της κατάψυξης είναι κρίσιμη για πολλές βιομηχανικές και οικιακές εφαρμογές, καθιστώντας την αποδοτικότητα των συστημάτων ψύξης ιδιαίτερα σημαντική. Στη συγκεκριμένη ανάλυση, εξετάζουμε τις επιδόσεις τριών τύπων συστημάτων ψύξης - ερμητικός συμπιεστής, ελεύθερο έμβολο, και Πολυσυμπιεστές - μέσω των δεδομένων τους σε διαφορετικές φάσεις κατάψυξης. Η ανάλυσή μας εστιάζει στη μέση τιμή θερμοκρασίας, τη σταθερότητα (όπως εκτιμάται από την τυπική απόκλιση και τον συντελεστή διακύμανσης) και τη διάρκεια της κάθε φάσης. Η αποδοτικότητα και η σταθερότητα των διαφόρων συστημάτων ψύξης είναι αποφασιστικής σημασίας σε μια πληθώρα εφαρμογών που απαιτούν ακριβή συνθήκες συντήρησης και αποθήκευσης. Στην παρούσα ανάλυση, θα εξετάσουμε με λεπτομέρεια τις επιδόσεις των συστημάτων σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 19.

Φάση 1: Ψύξη μέχρι το Σημείο πήξης

Στο Κατώτερο Ράφι, ο ερμητικός συμπιεστής διατηρεί μια ελαφρώς χαμηλότερη μέση θερμοκρασία από το Ελεύθερο έμβολο ($14,12^{\circ}\text{C}$ έναντι $14,50^{\circ}\text{C}$). Αυτό μπορεί να υποδηλώνει καλύτερη αρχική απόδοση ψύξης. Αναφορικά με την τυπική απόκλιση, οι τιμές δείχνουν παρόμοιο επίπεδο σταθερότητας μεταξύ των δύο διαφορετικών μηχανών ($6,30^{\circ}\text{C}$ έναντι $6,55^{\circ}\text{C}$), υποδεικνύοντας κάποια ομοιογένεια στις επιδόσεις τους. Οι διακυμάνσεις είναι κοντινές, με τον ελεύθερο έμβολο να δείχνει ελαφρώς πιο μεγάλο ποσοστό (45,2%). Τέλος, ο ερμητικός συμπιεστής ολοκληρώνει ελαφρώς πιο γρήγορα (225 λεπτά έναντι 231), γεγονός που αποτελεί θετικό σημάδι για την αποτελεσματικότητά του.

Στο Επάνω Ράφι, ο καταψύκτης με ελεύθερο έμβολο υπερτερεί με χαμηλότερη μέση τιμή ($12,6^{\circ}\text{C}$), κάτι που μπορεί να υποδηλώνει καλύτερη απόδοση στο ανώτερο τμήμα. Ο συντελεστής διακύμανσης φτάνει το 62,4% για το ελεύθερο έμβολο, κάτι που αποκαλύπτει μεγαλύτερη αστάθεια σε σχέση με τον

ερμητικό συμπιεστή (38,1%). Τέλος, σημειώνεται μεγαλύτερη διάρκεια για τον ελεύθερο έμβολο, δείχνοντας ενδεχομένως χαμηλότερη συνολική αποδοτικότητα.

Συνολική Ανάλυση Φάσης 1: Οι ερμητικοί συμπιεστές δείχνουν πιο ομοιογενείς στις αποδόσεις και αποδοτικότεροι σε όλες τις θέσεις του ραφιού, με καλύτερο συνδυασμό απόδοσης και σταθερότητας, ενώ η Μηχανή Ελεύθερου εμβόλου παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις και διαφορές στην αποτελεσματικότητα. Πιο συγκεκριμένα, κατά μέσο όρο, ο Ερμητικός Συμπιεστής ξεκινά με ελαφρώς υψηλότερη θερμοκρασία (14,36°C έναντι 13,54°C), αλλά η διαφορά είναι μικρή και είναι πιο σταθερός (χαμηλότερη τυπική απόκλιση). Ο καταψύκτης με Ελεύθερο Έμβολο χρειάζεται περισσότερη ώρα για την αρχική ψύξη (233 λεπτά έναντι 211 λεπτά). Επομένως, ο Ερμητικός Συμπιεστής είναι πιο σταθερός και γρηγορότερος στη φάση 1.

Φάση 3: Πλατώ πήξης

Στο Κατώτερο Ράφι, η απόδοση των ερμητικών συμπιεστών είναι ελαφρώς καλύτερη με μια μέση τιμή στους -0,40°C, έναντι των -0,31°C του ελεύθερου εμβόλου. Η τυπική απόκλιση είναι μερικώς χαμηλότερη για τον ερμητικό συμπιεστή (0,04), κάτι που υποδεικνύει μεγαλύτερη αξιοπιστία ωστόσο η διαφορά είναι μικρή (0,07 για το ελεύθερο έμβολο). Οι ερμητικοί συμπιεστές διατηρούν τη φάση για 698 λεπτά, το οποίο ενδεχομένως παρέχει πιο ελεγχόμενη και σταθερή διαδικασία ψύξης, ωστόσο το ελεύθερο έμβολο είναι γρηγορότερο (364 λεπτά).

Στο επάνω Ράφι, ο ερμητικός συμπιεστής καταφέρνει πιο χαμηλή μέση τιμή θέρμανσης στους -0,73°C, υποδεικνύοντας ικανότητα διατήρησης χαμηλών θερμοκρασιών. Η μηχανή με ελεύθερο έμβολο παρουσιάζει αυξημένο συντελεστή διακύμανσης (44,5%) διότι ο ρυθμός μεταβολής της πτώσης θερμοκρασίας είναι ταχύτερος. Ο ερμητικός συμπιεστής επιδεικνύει μεγαλύτερη διάρκεια στην παρούσα φάση από το ελεύθερο έμβολο (587 λεπτά έναντι 329) όπου μπορεί να θεωρηθεί σημάδι καλύτερης αποδοτικότητας των καταψυκτών με ελεύθερο έμβολο κατά την διαδικασία ψύξης.

Συνολική Ανάλυση Φάσης 3: Σε αυτή τη φάση, οι ερμητικοί συμπιεστές αποδεικνύουν τη συνέπειά τους στη διατήρηση σταθερών θερμοκρασιών, ωστόσο εκτείνονται σε μεγαλύτερες διάρκειες πράγμα αρνητικό αναφορικά με την απόδοσή τους. Ο Ερμητικός Συμπιεστής επιτυγχάνει χαμηλότερη θερμοκρασία (-0,57°C έναντι -0,28°C), κάτι που δείχνει καλύτερη απόδοση και έχει πολύ μεγαλύτερη σταθερότητα (τυπική απόκλιση 0,06°C έναντι 0,09°C και συντελεστή διακύμανσης 11% έναντι 33,7%). Ωστόσο, χρειάζεται σχεδόν διπλάσιο χρόνο για να φτάσει σε αυτές τις θερμοκρασίες (642,5 λεπτά έναντι 346,5 λεπτά). Η μηχανή με το Ελεύθερο Έμβολο είναι πιο γρήγορος, αλλά ο Ερμητικός Συμπιεστής ψύχει καλύτερα και πιο σταθερά.

Φάση 5: Ψύξη Κάτω από το Σημείο πήξης

Στο Κατώτερο Ράφι, Το σύστημα ερμητικού συμπιεστή διατηρεί χαμηλότερες θερμοκρασίες (-27,88°C) από το ελεύθερο έμβολο, που φτάνει στους -26,85°C. Σχεδόν συγκρίσιμες τιμές αποκλίσεων μεταξύ των συστημάτων δείχνουν πως και τα δύο προσφέρουν παρόμοια επίπεδα αξιοπιστίας. Εδώ ο ελεύθερο έμβολο απαιτεί πολύ περισσότερο χρόνο (1833 λεπτά), γεγονός που μπορεί να υποδηλώνει μειωμένη απόδοση.

Στο Επάνω Ράφι, οι ερμητικοί διατηρούν την καλύτερη απόδοση με χαμηλότερη μέση θερμοκρασία (-33,24°C), ενώ το σύστημα ελεύθερου εμβόλου διατηρεί πιο υψηλή τιμή (-26,46°C). Παρά την εξαιρετική απόδοση, ο ερμητικός συμπιεστής δείχνει μειωμένη ποικιλομορφία σε σχέση με το σύστημα ελεύθερου εμβόλου. Το ελεύθερο έμβολο ολοκληρώνει τη φάση ταχύτερα (1087 λεπτά), αν και με χαμηλότερη συνολική απόδοση και αυξημένες διακυμάνσεις.

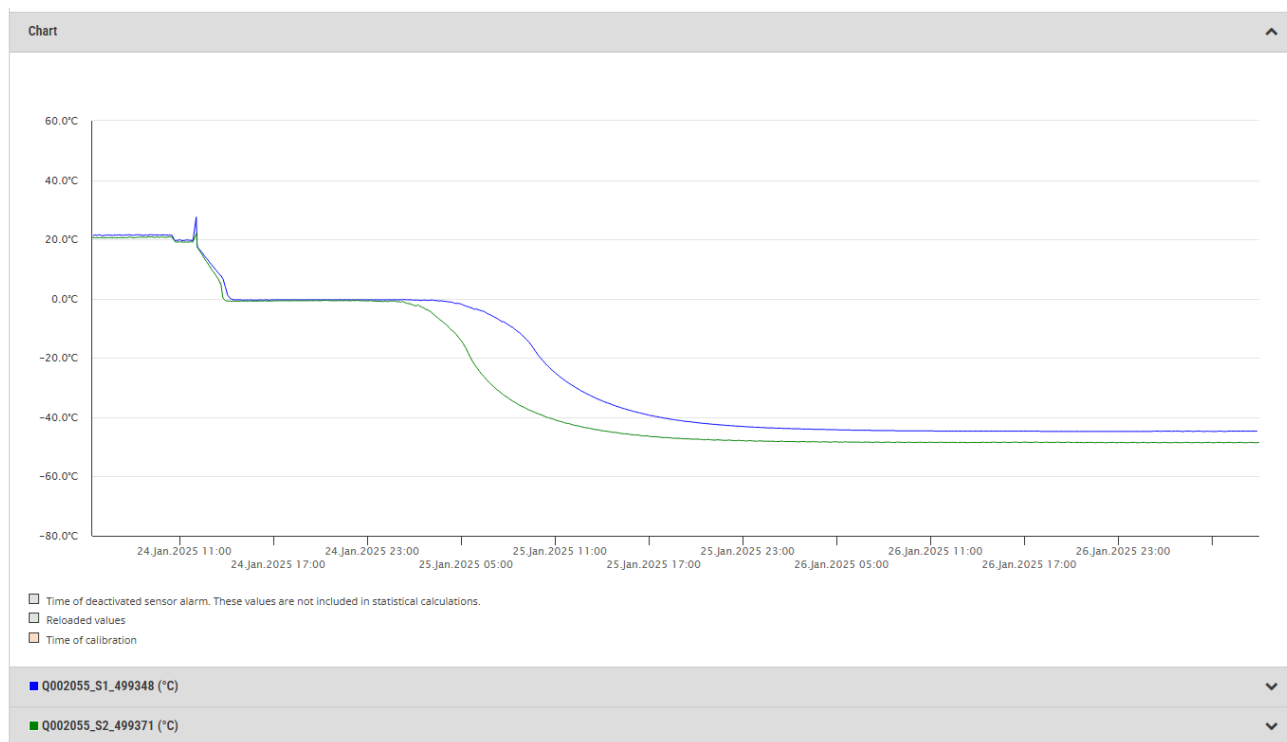
Συνολική Ανάλυση Φάσης 5: Οι ερμητικοί συμπιεστές αποδεικνύονται ικανότεροι στη διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών, αν και με κάποιες διακυμάνσεις. Ωστόσο, το ελεύθερο έμβολο ολοκληρώνει πιο γρήγορα πράγμα που σημαίνει καλύτερη απόδοση στην διαδικασία ψύξης και για αυτό το λόγο παρατηρείται μεγαλύτερη αστάθεια λόγω του ρυθμού μεταβολής. Επιπλέον, ο Ερμητικός Συμπιεστής πετυχαίνει πιο χαμηλή τελική θερμοκρασία (-30,56°C έναντι -26,66°C). Και οι δύο είναι ασταθείς σε αυτή τη φάση, αλλά το Ελεύθερο Έμβολο έχει λίγο μεγαλύτερη μεταβλητότητα (16,00 έναντι 16,72 και διακύμανση 60% έναντι 55%). Η διάρκεια ψύξης είναι παρόμοια (1498 λεπτά έναντι 1460 λεπτά). Επομένως, ο Ερμητικός Συμπιεστής ψύχει βαθύτερα, αλλά και οι δύο έχουν παρόμοια διάρκεια και αστάθεια.

Εν κατακλείδι, ο Πίνακας 20 παρέχει μια συγκριτική ανάλυση της βέλτιστης επιλογής ανά φάση για διαφορετικά χαρακτηριστικά σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση και τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 21. Σε κάθε φάση (1, 3 και 5), αξιολογούνται τρεις παράμετροι: η χαμηλότερη θερμοκρασία, η ταχύτητα και η σταθερότητα. Στην πρώτη φάση, και τα 3 είδη καταψυκτών είναι οι παρόμοιοι για τη χαμηλότερη θερμοκρασία, με την επιτυχία να αποδίδεται κυρίως στους ερμητικούς συμπιεστές στην φάση 3 και 5. Στη φάση 3, ο ερμητικός συμπιεστής παραμένει η πιο αποδοτική επιλογή για τη χαμηλότερη θερμοκρασία και τη σταθερότητα, ενώ η ταχύτερη επιλογή ανήκει σε έναν ελεύθερο έμβολο. Τέλος, στην πέμπτη φάση, οι ερμητικοί συμπιεστές συνεχίζουν να είναι η κορυφαία επιλογή για τη χαμηλότερη θερμοκρασία και την ταχύτητα, με την σταθερότητα να είναι παρόμοια. Αυτή η ανάλυση υποδηλώνει την προτίμηση των ερμητικών συμπιεστών στις περισσότερες φάσεις για την επιτυχία στην απόδοση.

Πίνακας 19 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό					
Φάση	Ράφι	Μεταβλητές Ανάλυσης	Ερμητικός Συμπιεστής	Ελεύθερο Έμβολο	Πολυσυμπιεστές
1	Κάτω	Μέση Τιμή	14,12	14,50	14,82
		Τυπική Απόκλιση	6,30	6,55	6,57
		Συντελεστής Διακύμανσης	44,6%	45,2%	44,3%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	225	231	154
	Επάνω	Μέση Τιμή	14,6	12,6	13,5
		Τυπική Απόκλιση	5,6	7,9	7,6
		Συντελεστής Διακύμανσης	38,1%	62,4%	56,8%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	197	235	168
	Μέσος Όρος	Μέση Τιμή	14,36	13,54	14,14
		Τυπική Απόκλιση	5,93	7,20	7,11
		Συντελεστής Διακύμανσης	41,3%	53,8%	50,6%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	211,00	233,00	161,00
3	Κάτω	Μέση Τιμή	-0,40	-0,31	-0,45
		Τυπική Απόκλιση	0,04	0,07	0,08
		Συντελεστής Διακύμανσης	10,3%	22,9%	16,8%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	698	364	207
	Επάνω	Μέση Τιμή	-0,73	-0,26	-0,27
		Τυπική Απόκλιση	0,08	0,12	0,11
		Συντελεστής Διακύμανσης	11,7%	44,5%	41,3%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	587	329	114
	Μέσος Όρος	Μέση Τιμή	-0,57	-0,28	-0,36
		Τυπική Απόκλιση	0,06	0,09	0,09
		Συντελεστής Διακύμανσης	11,0%	33,7%	29,0%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	642,50	346,50	160,50
5	Κάτω	Μέση Τιμή	-27,88	-26,85	-22,83
		Τυπική Απόκλιση	16,39	15,54	15,92
		Συντελεστής Διακύμανσης	58,8%	57,9%	69,7%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	1528	1833	1356
	Επάνω	Μέση Τιμή	-33,24	-26,46	-23,75
		Τυπική Απόκλιση	17,05	16,46	14,88
		Συντελεστής Διακύμανσης	51,3%	62,2%	62,7%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	1468	1087	1435
	Μέσος Όρος	Μέση Τιμή	-30,56	-26,66	-23,29
		Τυπική Απόκλιση	16,72	16,00	15,40
		Συντελεστής Διακύμανσης	55,0%	60,0%	66,2%
		Διάρκεια (σε λεπτά)	1498,00	1460,00	1395,50

Πίνακας 20 Βέλτιστη Επιλογή ανά Φάση			
	Φάση 1	Φάση 3	Φάση 5
Χαμηλότερη Θερμοκρασία	Παρόμοιοι	Ερμητικός Συμπιεστής	Ερμητικός Συμπιεστής
Ταχύτερος	Ερμητικός Συμπιεστής	Ελεύθερο Έμβολο	Παρόμοιοι
Πιο σταθερός	Ερμητικός Συμπιεστής	Ερμητικός Συμπιεστής	Παρόμοιοι

Ερμητικός Συμπιεστής

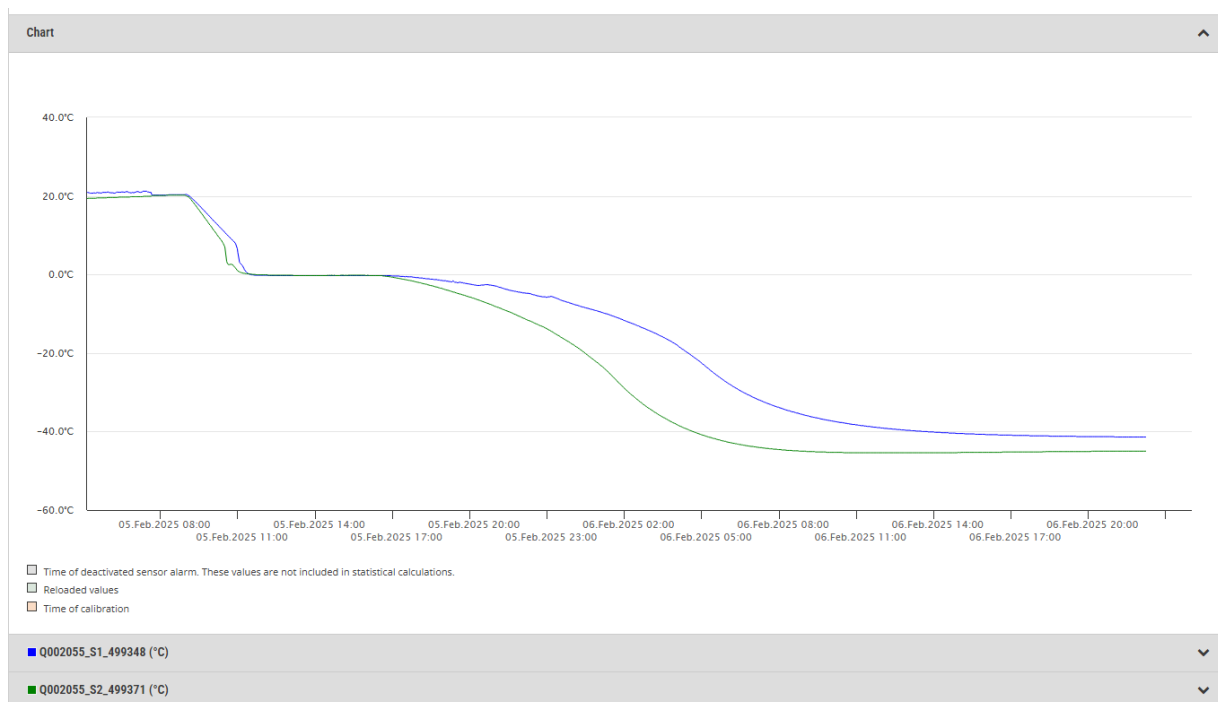


Γράφημα 1 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό - Ερμητικός Συμπιεστής



Εικόνα 3 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό - Ερμητικός Συμπιεστής

Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου

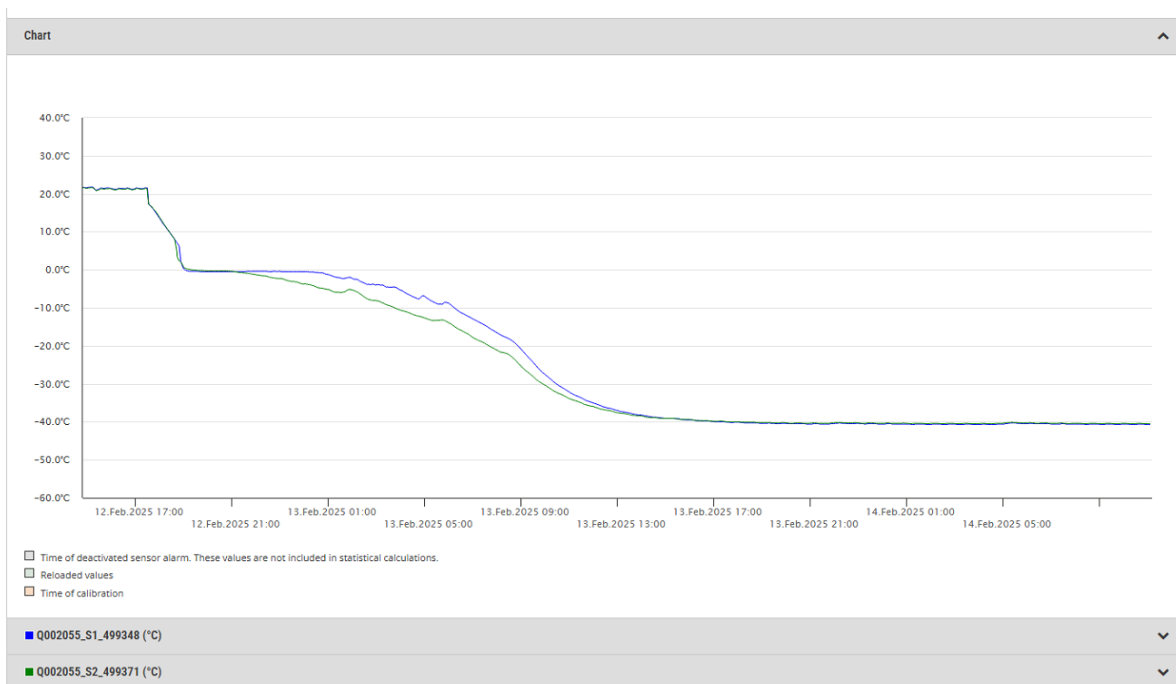


Γράφημα 2 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό - Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου



Εικόνα 4 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό - Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου

Πολυσυμπιεστές



Γράφημα 3 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό - Πολυσυμπιεστές



Εικόνα 5 Δοκιμή Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό – Πολυσυμπιεστές

4.5. Συγκριτική Ανάλυση Επηρεασμού από εξωτερικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες

Σε αυτήν την τελευταία ενότητα, θα αναλύσω και θα συζητήσω τα εμπειρικά αποτελέσματα της παλινδρόμησης. Όπως ανέφερα παραπάνω, η εμπειρική μου ανάλυση είναι η οικονομετρική αξιολόγηση τριών μοντέλων (**Εξίσωση 4 έως 6**). Αρχικά, εκτελώ δύο τύπους μοντέλων πάνελ, ένα μοντέλο σταθερού και τυχαίου εφέ. Επιπλέον, οι συντελεστές είναι διαφορετικοί από το μηδέν με βάση το F-test στο μοντέλο σταθερής επίδρασης και το Wald- χ^2 σε ένα μοντέλο τυχαίας επίδρασης. Στη συνέχεια, η δοκιμή Hausman υποδεικνύει ότι πρέπει να χρησιμοποιήσω το μοντέλο πάνελ σταθερού εφέ. Επιπλέον, εντόπισα ετεροσκεδαστικότητα και αυτοσυσχέτιση σύμφωνα με τη δοκιμή Modified Wald για ετεροσκεδαστικότητα GroupWise και τη δοκιμή Wooldridge για αυτοσυσχέτιση, αντίστοιχα. Προκειμένου να εξαλειφθούν τα δύο παραπάνω προβλήματα, χρησιμοποίησα την παλινδρόμηση ισχυρών τυπικών σφαλμάτων Driscoll-Kraay και στη συνέχεια, σύμφωνα με το Hausman Test, το μοντέλο σταθερού αποτελέσματος ήταν πιο εφαρμόσιμο. Επιπλέον, σύμφωνα με τον Hum Myoung Park (2011), έχοντας επιλέξει το μοντέλο σταθερού εφέ, το μεμονωμένο αποτέλεσμα είναι μέρος της τομής, και έτσι η συσχέτιση μεταξύ της τομής και των παλινδρομικών δεν παραβιάζει την υπόθεση του Gauss-Markov και με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο σταθερού εφέ είναι η Best Linear Unbiased Estimate (BLUE).

Η τεχνολογία των καταψυκτών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την απόδοση και την ενεργειακή τους αποδοτικότητα. Στην παρούσα ανάλυση, τα δεδομένα των πάνελ παλινδρομήσεων επιτρέπουν τη συγκριτική εξέταση των τριών διαφορετικών κατηγοριών -ερμητικός συμπιεστής, ελεύθερο έμβολο και πολυσυμπιεστές- και επιπλέον εξάχθηκαν αποτελέσματα και χωρίς ομαδοποίηση ανά τύπο (βλ. Πίνακα 20 και 21). Χρησιμοποιούνται δείκτες όπως η Χρονική Υστέρηση, ο Χρόνος Λειτουργίας, ο Μηνιαίος Αριθμός Φορών Ανοιγμάτων Θύρας, η Μηνιαία Μέση Θερμοκρασία και η Σχετική Υγρασία όπως αναλύθηκαν παραπάνω. Αυτοί οι δείκτες εξετάζονται για να καθορίσουμε οι ποιες μεταβλητές ασκούν τη μεγαλύτερη επίδραση στη λειτουργικότητα των καταψυκτών. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζετε από μια ανάλυση πάνελ παλινδρόμησης δείχνουν τη σχέση μεταξύ διαφόρων ανεξάρτητων μεταβλητών και της εξαρτημένης μεταβλητής για διαφορετικούς τύπους καταψυκτών. Επομένως, η επίδραση εξωτερικών παραγόντων στην απόδοση καταψυκτών είναι ένα κρίσιμο ζήτημα, καθώς αυτοί οι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ενεργειακή αποδοτικότητα, τη διάρκεια ζωής και την αποτελεσματικότητα ψύξης. Ας αναλύσουμε μερικούς από τους βασικούς εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση καταψυκτών.

Οι **χρονικές υστερήσεις** αντανακλούν πόσο η μέση τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής εξαρτάται από τις τιμές προηγούμενων περιόδων. Αν και οι περισσότερες χρονικές υστερήσεις δεν είναι στατιστικά σημαντικές, εκείνες που είναι, όπως στον ερμητικό συμπιεστή και τον πολυσυμπιεστή, παρέχουν στοιχεία για τους μηχανισμούς αντίδρασης των καταψυκτών έναντι προηγούμενων ενεργειών (βλ. Πίνακα 20 και 21). Πιο συγκεκριμένα, βλέπουμε περισσότερους στατιστικά σημαντικούς δείκτες, που

υπογραμμίζουν προσαρμογές και αλληλεπιδράσεις με το παρελθόν τους σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες. Επιπλέον, ο δείκτης «Χρόνος Λειτουργίας» είναι στατιστικά σημαντικός και αρνητικός μόνο στην ομάδα "Χωρίς Ομαδοποίηση ανά τύπο καταψύκτη" (βλ. Πίνακα 20). Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του καταψύκτη στην πάροδο του χρόνου έχει θετικές επιπτώσεις στην απόδοση του καταψύκτη, διότι μειώνεται η τυπική απόκλιση του και ο συντελεστής μεταβολής της θερμοκρασίας.

Η συχνότητα ανοίγματος των θυρών επηρεάζει άμεσα την απόδοση των καταψυκτών, λόγω της εισροής θερμού αέρα που αυξάνει την ανάγκη για ψύξη. Ο **Μηνιαίος Αριθμός Φορών Ανοίγματος Θυρών εμφανίζει** θετικούς και στατιστικά σημαντικούς συντελεστές για σχεδόν όλους τους τύπους καταψυκτών, κάτι που υποδηλώνει ότι η συχνότητα ανοίγματος των θυρών σχετίζεται θετικά με την αύξηση της εξαρτημένης μεταβλητής πράγμα που είναι αρνητικό διότι σημαίνει ότι αυξάνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας και επομένως έχει επιπτώσεις στην απόδοση του καταψύκτη και την ομοιομορφία της θερμοκρασίας (βλ. Πίνακα 20 και 21). Αυτό μπορεί να συνδέεται με την κατανάλωση ενέργειας καθώς οι καταψύκτες πρέπει να δουλέψουν επιπλέον για να διατηρήσουν τη θερμοκρασία σταθερή μετά από κάθε άνοιγμα. Είναι σημαντική για όλες τις κατηγορίες εκτός από τους Πολυσυμπιεστές. Ιδιαίτερα για τους ερμητικούς συμπιεστές, οι επεμβάσεις οδηγούν σε μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Ο λόγος μη εμφάνισης στατιστικά σημαντικών σχέσεων με τους Πολυσυμπιεστές μπορεί να οφείλεται σε καλύτερη κυκλοφορία του ψυχρού αέρα (βλ. Πίνακα 20 και 21).

Η εξωτερική θερμοκρασία είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των καταψυκτών. Σε υψηλές περιβαλλοντικές θερμοκρασίες, οι καταψύκτες χρειάζονται περισσότερη ενέργεια για να διατηρήσουν την εσωτερική θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα. Αυτό αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας και μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την αποδοτικότητα. Η **Μηνιαία Μέση Θερμοκρασία** του περιβάλλοντος παρουσιάζει θετικούς και μερικούς σημαντικούς συντελεστές, ιδιαίτερα στην εποχή του χειμώνα και της άνοιξης για τους καταψύκτες με Ελεύθερο Έμβολο (βλ. Πίνακα 20 και 21). Πιο συγκεκριμένα, η μέση θερμοκρασία σε διαφορετικούς μήνες (χειμώνας, άνοιξη κ.λπ.) παρουσιάζει θετικούς συντελεστές, ειδικά κατά τη διάρκεια του χειμώνα, κάτι που υποδηλώνει ότι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να ωθούν την εξαρτημένη μεταβλητή προς τα πάνω, δηλαδή αύξηση της διακύμανσης και μείωσης της ομοιομορφίας. Αυτό πιθανόν να συνδέεται με την ενέργεια που απαιτείται για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας σε εξωτερικά περιβάλλοντα που μεταβάλλονται έντονα (βλ. Πίνακα 20 και 21).

Η σχετική υγρασία μπορεί επίσης να επηρεάσει την απόδοση των καταψυκτών, ιδίως όταν αυτή είναι υψηλή, καθώς μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση ενέργειας λόγω της συμπύκνωσης και του σχηματισμού παγετού. Η **Μηνιαία Μέση Σχετική Υγρασία ανά μήνα** εμφανίζει μικτές επιδράσεις. Ορισμένες εποχές και τύποι καταψυκτών δείχνουν θετική σχέση, ενώ άλλοι αρνητική, με λίγες να είναι στατιστικά σημαντικές (βλ. Πίνακα 20 και 21). Αυτή η διακύμανση πιθανόν να συνδέεται με τα διαφορετικά

υλικά ή τους μηχανισμούς διαχείρισης της υγρασίας κάθε τύπου καταψύκτη. Πιο συγκεκριμένα, ο καταψύκτης με Ελεύθερο Έμβολο φαίνεται να επωφελείται περισσότερο από τις αλλαγές στη σχετική υγρασία, διότι μια αύξηση αυτής μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της τυπικής απόκλισης, δηλαδή στην αύξηση της ομοιομορφίας (βλ. Πίνακα 21 και 22).

Η ανάλυση αυτή προσφέρει μια πολύ-επίπεδη κατανόηση της απόδοσης και της αποδοτικότητας των καταψυκτών, με βάση είτε τον τύπο της τεχνολογίας είτε άλλους εξωτερικούς παράγοντες. Παράγοντες όπως ο αριθμός των φορών που ανοίγουν οι θύρες και οι περιβαλλοντικές συνθήκες παίζουν κρίσιμο ρόλο στην κατανάλωση ενέργειας και στην απόδοση της ψύξης. Οι υπογραμμιζόμενες σημαντικές παρατηρήσεις μπορούν να καθοδηγήσουν βελτιώσεις σχετικών στρατηγικών και αποφάσεων που σχετίζονται με τη σχεδίαση και ανάπτυξη νέων συστημάτων ψύξης. Η συγκριτική ανάλυση αποκαλύπτει ότι κάθε τύπος καταψύκτη εμφανίζει μοναδικά και στατιστικά σημαντικά μοτίβα ευαισθησίας ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες και τις εσωτερικές λειτουργικές μεταβλητές. Οι ερμητικοί συμπιεστές και οι Πολυσυμπιεστές είναι λιγότερο ευαίσθητοι σε περιβαλλοντικές αλλαγές, ενώ οι ελεύθεροι έμβολοι μπορεί να επηρεαστούν. Επομένως σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, μπορούμε να αναλύσουμε κάθε υπόθεση που θέσαμε.

Μοντέλο 1 (βλ. Εξίσωση 4): Τυπική απόκλιση θερμοκρασίας (StD) (βλ. Πίνακα 21 και 22)

- Υπόθεση 1 (H1) - Επίδραση ιστορικής διακύμανσης θερμοκρασίας: Ενώ οι περισσότεροι δείκτες χρονικής υστέρησης δεν έδειξαν στατιστική σημασία, ορισμένοι, ιδιαίτερα για ερμητικούς συμπιεστές και Πολυσυμπιεστές, παρείχαν στοιχεία για μια σχέση. Αυτό υποδηλώνει ότι οι ιστορικές παραλλαγές επηρεάζουν την τρέχουσα απόδοση, αλλά το αποτέλεσμα ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο καταψύκτη.
- Υπόθεση 2 (H2) - Επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος: Η μηνιαία μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος ($RT_{i,t}$) είχε θετικούς και σημαντικούς συντελεστές, υποδεικνύοντας ότι οι υψηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος επηρεάζουν αρνητικά την τυπική απόκλιση της θερμοκρασίας εντός του καταψύκτη. Έτσι, υποστηρίζεται το H2.
- Υπόθεση 3 (H3) - Ο ρόλος της υγρασίας στη μεταβλητότητα: Η ανάλυση έδειξε ότι η υψηλότερη μέση σχετική υγρασία ($RRH_{i,t}$) μπορεί να αυξήσει τη μεταβλητότητα της θερμοκρασίας σε ορισμένες συνθήκες, όπως φαίνεται σε μικτά αποτελέσματα μεταξύ των εποχών και των τύπων καταψύκτη, επομένως το H3 υποστηρίζεται μερικώς.
- Υπόθεση 4 (H4) - Επίδραση χρήσης πόρτας: Ο Μηνιαίος Αριθμός Ανοιγμάτων Πόρτας ($OD_{i,t}$) έδειξε θετικούς και στατιστικά σημαντικούς συντελεστές για όλους σχεδόν τους τύπους καταψύκτη, επιβεβαιώνοντας ότι τα αυξημένα ανοίγματα θυρών οδηγούν σε μεγαλύτερες διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Το H4 υποστηρίζεται.

- Υπόθεση 5 (H5) - Επίδραση του Χρόνου Λειτουργίας στη Μεταβλητότητα: Ο χρόνος λειτουργίας (OT_t) ήταν στατιστικά σημαντικός και συσχετίστηκε αρνητικά με τη μεταβλητότητα της θερμοκρασίας μόνο στην κατηγορία "Χωρίς ομαδοποίηση κατά τύπο καταψύκτη", γεγονός που υποδεικνύει ότι ο μεγαλύτερος χρόνος λειτουργίας λειτουργεί για τη σταθεροποίηση των θερμοκρασιών, επομένως υποστηρίζεται το H5.

Μοντέλο 2 (βλ. Εξίσωση 5): Μέση θερμοκρασία (AvG) (βλ. Πίνακα 21 και 22)

- Υπόθεση 6 (H6) - Ιστορική μέση επίδραση θερμοκρασίας: Η ανάλυση έδειξε ότι η μέση θερμοκρασία τη στιγμή (t) επηρεάζεται θετικά από την ιστορική μέση θερμοκρασία στο ($i, t-1$). Έτσι, υποστηρίζεται το H6.
- Υπόθεση 7 (H7) - Επίπτωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος: Η μέση θερμοκρασία ($AvG_{i,t}$) μέσα στον καταψύκτη αυξήθηκε σημαντικά με υψηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος ($RT_{i,t}$). Το H7 υποστηρίζεται.
- Υπόθεση 8 (H8) - Επίδραση υγρασίας: Η σχέση μεταξύ της μέσης σχετικής υγρασίας (RRH_t) και της μέσης θερμοκρασίας ($AvG_{i,t}$) διέφερε ανάλογα με το περιβάλλον, αλλά γενικά έδειξε ότι η υψηλότερη υγρασία μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις συνθήκες. Το H8 υποστηρίζεται μερικώς.
- Υπόθεση 9 (H9): Συχνότητα ανοίγματος πόρτας. Οι υψηλότερες συχνότητες ανοιγμάτων θυρών ($OD_{i,t}$) συνέβαλαν στην αύξηση της μέσης εσωτερικής θερμοκρασίας ($AvG_{i,t}$). Επομένως, το H9 υποστηρίζεται.
- Υπόθεση 10 (H10) - Σχέση μέσης θερμοκρασίας με ηλικία: Ο χρόνος λειτουργίας ($OT_{i,t}$) έδειξε μια θετική σχέση με τη μέση θερμοκρασία, υποδεικνύοντας ότι οι παλαιότεροι καταψύκτες μπορεί να δυσκολεύονται να διατηρήσουν την απόδοση, υποστηρίζοντας έτσι το H10.

Μοντέλο 3 (βλ. Εξίσωση 6): Συντελεστής Διακύμανσης (CV) (βλ. Πίνακα 20 και 21)

- Υπόθεση 11 (H11) - Συνέπεια ιστορικής παραλλαγής: Ο συντελεστής διακύμανσης τη στιγμή (t) (CV_t) συσχετίστηκε θετικά με τον συντελεστή διακύμανσης τη στιγμή ($t-1$) ($CV_{\{i,t-1\}}$), υποστηρίζοντας έτσι το H11.
- Υπόθεση 12 (H12) - Διακύμανση θερμοκρασίας από εξωτερικούς παράγοντες: Η ανάλυση επιβεβαίωσε ότι το $CV_{i,t}$ αυξήθηκε με υψηλότερες μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες ($RT_{i,t}$), υποστηρίζοντας το H12.
- Υπόθεση 13 (H13) - Υγρασία και Διακύμανση: Οι επιδράσεις της σχετικής υγρασίας ($RRH_{i,t}$) στο CV_t έδειξαν μικτά αποτελέσματα, υποδεικνύοντας ότι η αυξημένη υγρασία μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη διακύμανση αλλά όχι ομοιόμορφα σε όλες τις συνθήκες. Το H13 υποστηρίζεται μερικώς.

- Υπόθεση 14 (H14) - Ανοίγματα θυρών και συνέπεια: Τα αυξημένα ανοίγματα θυρών ($OD_{i,t}$) συσχετίστηκαν θετικά με τον συντελεστή διακύμανσης ($CV_{i,t}$), επιβεβαιώνοντας το H14.
- Υπόθεση 15 (H15) - Συνέπεια χρόνου λειτουργίας και θερμοκρασίας: Ο συντελεστής διακύμανσης (CV_t) συσχετίστηκε θετικά με τον χρόνο λειτουργίας (OT_t), υποδεικνύοντας μεγαλύτερη σχετική μεταβλητότητα σε παλαιότερους καταψύκτες. Ως εκ τούτου, το H15 υποστηρίζεται.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι αρκετές ανεξάρτητες μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένων εξωτερικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η χρήση της πόρτας, επηρεάζουν σημαντικά τις μετρήσεις απόδοσης του καταψύκτη όπως η τυπική απόκλιση θερμοκρασίας, η μέση θερμοκρασία και ο συντελεστής διακύμανσης. Η ανάλυση παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο αυτοί οι παράγοντες αλληλοεπιδρούν με διαφορετικούς τύπους τεχνολογιών καταψύκτη, πληροφορώντας στρατηγικές για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και απόδοσης.

Πίνακας 21 Δεδομένα Ανάλυσης Επηρεασμού από εξωτερικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες (Χωρίς Ομαδοποίηση ανά τύπο καταψύκτη)			
	Χωρίς Ομαδοποίηση ανά τύπο καταψύκτη		
VARIABLES	Mean Εξίσωση 4	StDev Εξίσωση 5	CoefVar Εξίσωση 6
<i>Constant</i>	-58.67*** (11.32)	-38.30*** (12.15)	-0.782*** (0.242)
<i>Χρονική Υστέρηση Μέσης Τιμής</i>	0.0885 (0.125)		
<i>Χρονική Υστέρηση Τυπικής Απόκλισης</i>		-0.0481* (0.0253)	
<i>Χρονική Υστέρηση Συντελεστή Διακύμανσης</i>			-0.0461* (0.0225)
<i>Χρόνος Λειτουργίας</i>	-0.0153 (0.268)	-0.407** (0.174)	-0.00750* (0.00374)
<i>Μηνιαίος αριθμός φορών ανοίγματος θυρών</i>	0.125** (0.0459)	0.234*** (0.0788)	0.00504*** (0.00156)
<i>Μηνιαία Μέση θερμοκρασία -Χειμώνας</i>	0.337 (0.300)	1.727*** (0.511)	0.0351*** (0.0101)
<i>Μηνιαία Μέση θερμοκρασία -Άνοιξη</i>	0.366 (0.284)	1.463*** (0.456)	0.0298*** (0.00911)
<i>Μηνιαία Μέση θερμοκρασία -Καλοκαίρι</i>	0.368 (0.338)	1.645** (0.584)	0.0332*** (0.0114)
<i>Μηνιαία Μέση θερμοκρασία -Φθινόπωρο</i>	0.207 (0.416)	1.873*** (0.486)	0.0381*** (0.00984)
<i>Μηνιαία Μέση Σχετική Υγρασία - Χειμώνας</i>	0.100* (0.0579)	0.110* (0.0565)	0.00226* (0.00118)
<i>Μηνιαία Μέση Σχετική Υγρασία - Άνοιξη</i>	0.0669 (0.0499)	0.212*** (0.0645)	0.00423*** (0.00128)
<i>Μηνιαία Μέση Σχετική Υγρασία - Καλοκαίρι</i>	0.0580 (0.0559)	0.143*** (0.0458)	0.00292*** (0.000906)
<i>Μηνιαία Μέση Σχετική Υγρασία - Φθινόπωρο</i>	0.166 (0.102)	0.158 (0.144)	0.00307 (0.00306)
Observations	543	543	543
Number of groups	23	23	23
Standard errors in parentheses *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1			

Πίνακας 22 Δεδομένα Ανάλυσης Επιρρασμού από εξωτερικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες (ανά τύπο καταψύκτη)									
VARIABLES	Ερμητικός Συμπιεστής			Ελεύθερο Έμβολο			Πολυσυμπιεστές		
	Mean Εξίσωση 4	StDev Εξίσωση 5	CoefVar Εξίσωση 6	Mean Εξίσωση 4	StDev Εξίσωση 5	CoefVar Εξίσωση 6	Mean Εξίσωση 4	StDev Εξίσωση 5	CoefVar Εξίσωση 6
Constant	-91.30*** (22.59)	-62.74 (40.73)	-1.281 (0.837)	-22.86** (7.111)	-4.741* (2.303)	-0.0952* (0.0513)	-44.45*** (4.187)	-10.86 (6.665)	-0.325 (0.223)
Χρονική Υστέρηση Μέσης Τιμής	-0.0500 (0.0634)			0.531*** (0.117)			0.0311* (0.0128)		
Χρονική Υστέρηση Τυπικής Απόκλισης		-0.110 (0.0667)			-0.0277 (0.0342)			-0.0501 (0.0410)	
Χρονική Υστέρηση Συντελεστή Διακύμανσης			-0.102 (0.0647)			-0.0197 (0.0287)			-0.0384 (0.0378)
Χρόνος Λειτουργίας	-0.551 (0.369)	-1068 (0.714)	-0.0205 (0.0148)	0.410 (0.330)	0.0530 (0.0721)	0.000354 (0.00151)	0.251 (0.117)	0.0980 (0.159)	0.00422 (0.00503)
Μηνιαίος αριθμός φορών ανοίγματος θυρών	0.187*** (0.0397)	0.337*** (0.0732)	0.00688*** (0.00152)	0.0779*** (0.0147)	0.213*** (0.0135)	0.00556*** (0.000310)	0.0164 (0.0127)	0.0400 (0.0209)	0.00123 (0.000685)
Μηνιαία Μέση θερμοκρασία -Χειμώνας	0.707 (0.843)	2738 (1778)	0.0555 (0.0365)	0.0659 (0.266)	0.345** (0.120)	0.00696** (0.00259)	0.381 (0.184)	0.455 (0.342)	0.0138 (0.0112)
Μηνιαία Μέση θερμοκρασία -Ανοιξη	0.650 (0.761)	2430 (1618)	0.0495 (0.0332)	0.161 (0.222)	0.216** (0.0842)	0.00443** (0.00189)	0.172 (0.156)	0.429 (0.247)	0.0124 (0.00824)
Μηνιαία Μέση θερμοκρασία -Καλοκαίρι	0.482 (0.745)	2739 (1612)	0.0561 (0.0330)	0.218 (0.299)	0.205 (0.117)	0.00385 (0.00254)	0.154 (0.190)	0.575 (0.281)	0.0168 (0.00938)
Μηνιαία Μέση θερμοκρασία -Φθινόπωρο	0.574 (0.833)	3262 (1909)	0.0647 (0.0386)	-0.113 (0.233)	0.187* (0.0873)	0.00427* (0.00207)	0.198 (0.279)	0.751 (0.511)	0.0221 (0.0169)
Μηνιαία Μέση Σχετική Υγρασία - Χειμώνας	0.132 (0.0778)	0.248 (0.165)	0.00507 (0.00342)	0.0192 (0.0587)	-0.0666** (0.0287)	-0.00131** (0.000564)	-0.0982** (0.0236)	0.0679 (0.0551)	0.00169 (0.00166)
Μηνιαία Μέση Σχετική Υγρασία - Άνοιξη	0.162 (0.114)	0.393 (0.233)	0.00784 (0.00476)	-0.0445 (0.0271)	-0.00392 (0.00791)	-6.90e-05 (0.000197)	-0.00311 (0.0239)	0.0403 (0.0408)	0.00113 (0.00135)
Μηνιαία Μέση Σχετική Υγρασία - Καλοκαίρι	0.210 (0.124)	0.269 (0.248)	0.00517 (0.00514)	-0.0716 (0.0634)	0.00222 (0.0155)	0.000234 (0.000326)	-0.00132 (0.0245)	-0.0132 (0.0363)	-0.000501 (0.00116)
Μηνιαία Μέση Σχετική Υγρασία - Φθινόπωρο	0.320 (0.243)	0.310 (0.341)	0.00681 (0.00725)	0.0303 (0.0324)	0.00837 (0.0120)	8.94e-05 (0.000276)	-0.0347 (0.0441)	-0.0932 (0.0903)	-0.00306 (0.00290)
Observations	216	216	216	239	239	239	88	88	88
Number of groups	9	9	9	10	10	10	4	4	4

Standard errors in parentheses | *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

5. Συμπεράσματα και Συζήτηση

5.1. Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα που προέκυψαν από μια σειρά δοκιμών που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της μελέτης τριών διαφορετικών καταψυκτών ULT. Η ανάλυση περιλαμβάνει μια συγκριτική ανάλυση της ομοιομορφίας θερμοκρασίας και απόδοσης μέσα από δοκιμές 24ωρης διάρκειας, διερεύνηση απόδοσης κατά το άνοιγμα πόρτας, ανάλυση συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος, ψύξης μπουκαλιών με νερό και ανάλυση επηρεασμού της απόδοσης από εξωτερικούς/εξωγενείς παράγοντες. Τα δεδομένα από αυτές τις δοκιμές παρέχουν ουσιώδεις πληροφορίες για την επίδραση των τεχνολογικών παραμέτρων στη θερμοκρασιακή ομοιομορφία και αξιοπιστία. Οι επισημάνσεις αυτές όχι μόνο ενημερώνουν για τις βέλτιστες πρακτικές στη χρήση καταψυκτών ULT, αλλά προσφέρουν επίσης χρήσιμες συστάσεις για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα αυτό, καταδεικνύοντας τη σημασία τεχνολογικών και λειτουργικών βελτιώσεων για την εξασφάλιση της ακεραιότητας των ευαίσθητων αποθηκευμένων υλικών.

5.1.1. Συμπεράσματα – Δοκιμής 24ωρών

Η ομοιομορφία, καθοριστική για τη διατήρηση της ποιότητας των αποθηκευμένων υλικών, αξιολογείται μέσω της τυπικής απόκλισης και του συντελεστή διακύμανσης. Αυτή η ανάλυση απόδοσης υπογραμμίζει τη σημασία της επιλογής του κατάλληλου τύπου καταψύκτη ULT με βάση τις λειτουργικές ανάγκες και τις ειδικές απαιτήσεις των υλικών που αποθηκεύονται. Τα βασικά χαρακτηριστικά της διατήρησης της θερμοκρασίας, της ομοιομορφίας και της προσαρμοστικότητας στις συνθήκες φορτίου παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του βέλτιστου καταψύκτη για διάφορες εφαρμογές.

Η συγκριτική ανάλυση των τριών τύπων καταψυκτών ULT αποκαλύπτει ευδιάκριτες διαφορές στην απόδοση και την ομοιομορφία τους τόσο στις ρυθμίσεις -40°C όσο και στους -70°C . Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου ξεχωρίζει από αυτή την άποψη και στις δύο ρυθμίσεις θερμοκρασίας τόσο σε άδειες όσο και σε συνθήκες φορτίου. Στους -40°C , παρουσιάζει τη χαμηλότερη τυπική απόκλιση και συντελεστή διακύμανσης, αντικατοπτρίζοντας την εξαιρετική συνέπεια απόδοσης. Σημειωτέων, στους -70°C , τόσο ο Ερμητικός Συμπιεστής όσο και ο Κινητήρας Ελεύθερου Εμβόλου υπερέχουν με ελάχιστες τυπικές αποκλίσεις, υποδηλώνοντας αποτελεσματική κατανομή θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν επίσης την επίδραση των συνθηκών φόρτωσης στη διατήρηση της θερμοκρασίας κάθε τύπου καταψύκτη. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου παρουσίασε την πιο σημαντική πτώση θερμοκρασίας (-0.29°C) μετακινούμενος από κενή σε φορτισμένη κατάσταση στους -40°C αλλά παρέμεινε ελαστικός. Επέδειξε περαιτέρω την ικανότητά του να διατηρεί χαμηλές θερμοκρασίες υπό φορτίο με πτώση 1.23°C στους -70°C . Συγκριτικά, οι τύποι καταψύκτη εμφάνισαν μικρές διακυμάνσεις που δείχνουν τις ποικίλες ευαισθησίες τους στις συνθήκες φορτίου.

Σε όλους τους τύπους καταψύκτη, είναι σαφές ότι τα επάνω ράφια παρουσιάζουν συχνά ανώτερη διατήρηση θερμοκρασίας λόγω της θέσης τους σε σχέση με τις πηγές ψύξης, επωφελούμενοι από καλύτερη ροή αέρα και χαμηλότερο θερμικό φορτίο σε σύγκριση με τα χαμηλότερα ράφια. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου εμφανίζει σταθερά τις χαμηλότερες θερμοκρασίες και τη μικρότερη μεταβλητότητα τόσο σε κενή όσο και σε κατάσταση φορτίου σε σύγκριση με τους άλλους τύπους. Ο Κινητήρας Ελεύθερου Εμβόλου ξεχωρίζει για την εξαιρετική του ομοιομορφία θερμοκρασίας σε όλα τα επίπεδα ραφιών, καθιστώντας το την προτιμώμενη επιλογή για ευαίσθητα δείγματα που απαιτούν αυστηρές προδιαγραφές συντήρησης. Ο Ερμητικός Συμπιεστής έχει καλή απόδοση, αλλά παρουσιάζει μεγαλύτερη διαφοροποίηση, ιδιαίτερα στις χαμηλότερες θέσεις, ενώ οι Πολυσυμπιεστές υστερούν σε σταθερότητα. Οι συνθήκες φόρτωσης προκάλεσαν μικρές αλλαγές στη θερμοκρασία σε όλα τα επίπεδα θέσης σε διαφορετικούς τύπους καταψύκτη. Ωστόσο, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου παρουσίασε ελάχιστη θερμική μετατόπιση, ενώ ο Ερμητικός Συμπιεστής και οι Πολυσυμπιεστές παρουσίασαν πιο σημαντικές αλλαγές, ιδιαίτερα σε χαμηλότερα σημεία όπου η πρόσκρουση του φορτίου ήταν πιο έντονη.

Συμπερασματικά, η ανάλυση της απόδοσης του καταψύκτη ULT ανά τοποθεσία, θέση και επίπεδο ραφίου στους -40°C υπογραμμίζει τις διακυμάνσεις στη σταθερότητα της θερμοκρασίας και την ομοιομορφία μεταξύ διαφορετικών τύπων καταψύκτη. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου υπερέχει στη διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών με σταθερή σταθερότητα, ανεξάρτητα από το αν ο θάλαμος είναι άδειος ή φορτισμένος. Αντίθετα, τα μοντέλα Ερμητικός Συμπιεστής και Multi-compressor παρουσιάζουν μεταβλητή απόδοση, τονίζοντας τη σημασία του επιπέδου και της θέσης του ραφίου στη διατήρηση της θερμοκρασίας.

Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα για τους χρήστες που απαιτούν αξιόπιστες λύσεις συντήρησης για ευαίσθητα υλικά. Η κατανόηση αυτών των μετρήσεων απόδοσης επιτρέπει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων κατά την επιλογή καταψυκτών ULT για συγκεκριμένες επιστημονικές και ιατρικές εφαρμογές, διασφαλίζοντας βέλτιστες συνθήκες αποθήκευσης για κρίσιμα δείγματα. Τα εργαστήρια και οι ερευνητικές εγκαταστάσεις πρέπει να λαμβάνουν υπόψη πληθώρα παραγόντων όταν σχεδιάζουν στρατηγικές αποθήκευσης για ευαίσθητα υλικά, διασφαλίζοντας ότι επιλέγονται οι βέλτιστες θέσεις και τεχνολογίες για τη διατήρηση της ακεραιότητας του δείγματος. Η κατανόηση της απόδοσης αυτών των καταψυκτών σε διάφορα επίπεδα ραφιών και θέσεις εντός της μονάδας είναι ζωτικής σημασίας για την επιλογή του σωστού εξοπλισμού για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Τελικά, η επιλογή μεταξύ -40°C και -70°C καταψύκτες ULT εξαρτάται από συγκεκριμένες απαιτήσεις εφαρμογής. Όσοι χρειάζονται αυστηρά πρότυπα συντήρησης για εξαιρετικά ευαίσθητα υλικά, θα βρουν καταψύκτες -70°C , ιδιαίτερα μοντέλα όπως ο κινητήρας Ελεύθερου Εμβόλου, προσφέρουν ανώτερα πλεονεκτήματα στη διατήρηση της ακεραιότητας του δείγματος για μεγαλύτερες περιόδους. Αντίθετα, οι καταψύκτες -40°C μπορεί να επαρκούν για λιγότερο ευαίσθητες εφαρμογές και μπορούν να παρέχουν μια πιο οικονομική επιλογή τόσο όσον αφορά το αρχικό κόστος επένδυσης όσο και το λειτουργικό κόστος.

5.1.2. Σύναψη από Δοκιμή Ανοίγματος Πόρτας

Η ανάλυση δείχνει ότι και οι τρεις τύποι καταψύκτη δυσκολεύονται περισσότερο στους -70°C σε σύγκριση με τους -40°C , με τον Ερμητικό Συμπιεστή να παρουσιάζει τη σημαντικότερη μείωση στην απόδοση. Η ανάγκη για ακριβή διαχείριση της θερμοκρασίας γίνεται ακόμη πιο κρίσιμη καθώς η θερμοκρασία μειώνεται. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου παραμένει ανώτερος και στα δύο άκρα, αλλά ακόμη περισσότερο στους -70°C , επιδεικνύοντας την ικανότητά του να διαχειρίζεται αποτελεσματικά τις εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες τόσο σε συνθήκες φορτίου όσο και σε άδειες συνθήκες. Ο Πολλαπλός συμπιεστής, με την καθιερωμένη αξιοπιστία του σε υψηλότερες θερμοκρασίες, είναι πιθανό να είναι η καλύτερη συνολική επιλογή για εφαρμογές που χρειάζονται σταθερή αποθήκευση σε χαμηλή θερμοκρασία, ιδιαίτερα σε κρίσιμες ρυθμίσεις. Όταν λειτουργούν στους -70°C , οι οργανισμοί πρέπει να εξετάσουν το ενδεχόμενο βελτιωμένης θερμικής διαχείρισης για να αντισταθμίσουν τις υψηλότερες θερμοκρασίες που παρατηρούνται σε ορισμένους τύπους καταψύκτη, ιδιαίτερα τις αντίστροφες σχέσεις όπου η συγκράτηση στο κρύο μειώνεται σημαντικά σε χαμηλότερες θέσεις. Η σωστή τοποθέτηση και η πιθανή επιλογή καταψυκτών με καλύτερη θερμική απόδοση είναι πρωταρχικής σημασίας υπό αυστηρότερες απαιτήσεις θερμοκρασίας. Συμπερασματικά, ενώ και οι δύο ρυθμίσεις θερμοκρασίας παρουσιάζουν ξεχωριστές προκλήσεις, η απόδοση των τύπων καταψύκτη ποικίλλει σημαντικά βάσει του σχεδιασμού και των λειτουργικών δυνατοτήτων τους, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για προσαρμοσμένες λύσεις για την κάλυψη συγκεκριμένων αναγκών ελέγχου θερμοκρασίας.

Δεδομένης της σταθερής απόδοσής τους τόσο σε άδειες όσο και σε συνθήκες φορτίου σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, οι Μηχανές Ελεύθερου Εμβολοφόρου θα πρέπει να προτιμώνται ιδιαίτερα για εφαρμογές που απαιτούν αυστηρή διαχείριση χαμηλής θερμοκρασίας, ιδιαίτερα σε κρίσιμους τομείς. Όταν χρησιμοποιείτε καταψύκτες όπως ο Ερμητικός Συμπιεστής, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη διάταξη των ραφιών, διασφαλίζοντας ότι τα ευαίσθητα αντικείμενα τοποθετούνται σε περιοχές που έχουν στατιστικά αποδειχθεί ότι διατηρούν χαμηλότερες θερμοκρασίες (δηλαδή, επάνω ράφια) όποτε είναι εφικτό. Συμπερασματικά, η διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης σε ακραία ψυχρή αποθήκευση απαιτεί όχι μόνο τον σωστό τύπο καταψύκτη αλλά και μια στρατηγική προσέγγιση για τον τρόπο οργάνωσης του περιεχομένου σε αυτές τις μονάδες. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου ξεχωρίζει ως μια ισχυρή επιλογή για αυτές τις συγκεκριμένες λειτουργικές ανάγκες.

Με βάση τη συνολική ανάλυση, ο πολλαπλός συμπιεστής θα πρέπει να είναι η πρώτη επιλογή λόγω της απaráμιλλης ικανότητάς του να διατηρεί χαμηλές θερμοκρασίες σε όλες τις θέσεις, παρέχοντας ηρεμία για ευαίσθητες ανάγκες αποθήκευσης. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα αξιόπιστο εφεδρικό αντίγραφο όπου ο Πολυσυμπιεστής δεν είναι διαθέσιμος. Η απόδοσή του στους -40°C είναι αξιέπαινη, ειδικά όταν απαιτείται σταθερή θερμοκρασία σε διάφορες συνθήκες φορτίου. Ο Ερμητικός Συμπιεστής, με τη σημαντική μεταβλητότητα απόδοσης και τη μειωμένη αποτελεσματικότητά του σε χαμηλότερες θέσεις ραφιών, θα πρέπει να επιλέγεται με προσοχή για

εφαρμογές που απαιτούν αυστηρό έλεγχο θερμοκρασίας—ειδικά σε περιβάλλοντα όπου το περιεχόμενο είναι ευαίσθητο στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Όσον αφορά η λειτουργική αποτελεσματικότητα, η ικανότητα γρήγορης ανάκαμψης από μια κατάσταση ανοιχτής πόρτας είναι ζωτικής σημασίας σε εξειδικευμένες ρυθμίσεις όπου η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας είναι πρωταρχικής σημασίας. Εδώ, το μοντέλο του Multi-compressor παρουσιάζει ξεχωριστά πλεονεκτήματα, καθιστώντας τον βέλτιστη επιλογή για εφαρμογές όπως η έρευνα, τα φαρμακευτικά προϊόντα ή η αποθήκευση υλικών όπου η έκθεση σε διακυμάνσεις θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση. Επιπλέον, η αξιοπιστία και προβλεψιμότητα αποτελούν σημαντικοί παράγοντες. Η συνέπεια που επιδεικνύεται από τον πολυσυμπιεστή, που αντικατοπτρίζεται τόσο στους ταχύτερους χρόνους ανάκτησης όσο και στις χαμηλότερες αποκλίσεις, υποδηλώνει στιβαρό σχεδιασμό. Από την άλλη πλευρά, η μεταβλητότητα απόδοσης του Ερμητικού Συμπιεστής εγείρει ανησυχίες σχετικά με την αξιοπιστία, ιδιαίτερα σε κρίσιμες εφαρμογές.

Αυτή η λεπτομερής ανάλυση θέσης δείχνει ξεκάθαρα ότι, ενώ και οι τρεις τύποι καταψύκτη έχουν τα πλεονεκτήματά τους, ο Πολυσυμπιεστής είναι ο πιο ικανός στη διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών σε διαφορετικά επίπεδα ραφιών σε ένα σενάριο ανοιχτής πόρτας στους -40°C , ακολουθούμενο από τον κινητήρα ελεύθερου εμβόλου. Οι διαφορές που επισημαίνονται τονίζουν την κρίσιμη φύση της επιλογής του κατάλληλου τύπου καταψύκτη με βάση συγκεκριμένες απαιτήσεις λειτουργίας και αποθήκευσης, διασφαλίζοντας ότι τα περιεχόμενα υλικά διατηρούνται υπό βέλτιστες συνθήκες. Αυτή η προσεκτική διαδικασία επιλογής είναι αναπόσπαστη σε τομείς όπως τα φαρμακευτικά προϊόντα, η βιολογική έρευνα και η συντήρηση τροφίμων, όπου η ακεραιότητα της θερμοκρασίας είναι αδιαπραγμάτευτη. Συμπερασματικά, για εφαρμογές που απαιτούν κατάψυξη υψηλών επιδόσεων, ιδιαίτερα ευαίσθητα υλικά ή διεργασίες, η επιλογή του τύπου καταψύκτη θα πρέπει να ευνοεί συστήματα όπως ο Πολυσυμπιεστής προκειμένου να διασφαλιστεί η βέλτιστη διατήρηση της θερμοκρασίας και η λειτουργική αξιοπιστία. Τέλος, οι δυνατότητες θερμικής διαχείρισης είναι ένας παράγοντας που λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στην αποθήκευση ευαίσθητων προϊόντων. Τα δεδομένα υποδεικνύουν ότι τόσο ο κινητήρας πολλαπλών συμπιεστών όσο και ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου υπερτερούν του ερμητικού συμπιεστή στη διαχείριση θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια διαταραχών.

5.1.3. Συμπέρασμα από Δοκιμή Διακοπής Ρεύματος

Η ανάλυση των δοκιμών διακοπής ρεύματος στους τρεις τύπους καταψυκτών παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την ομοιομορφία και την απόδοση της θερμοκρασίας, ειδικά σε περιβάλλοντα όπου ο αυστηρός έλεγχος θερμοκρασίας είναι κρίσιμος. Αυτή η μελέτη τονίζει τη σημασία της επιλογής της κατάλληλης τεχνολογίας καταψύκτη για τη διατήρηση της ακεραιότητας των αποθηκευμένων υλικών κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος.

Στους -40°C , ο καταψύκτης πολυσυμπιεστών παρουσίασε την καλύτερη απόδοση όσον αφορά την ομοιομορφία και τη διατήρηση της θερμοκρασίας. Διατήρησε ομοιόμορφα χαμηλές θερμοκρασίες σε διάφορες θέσεις ραφιών, επιδεικνύοντας έναν ανώτερο σχεδιασμό ψύξης που ελαχιστοποιούσε τη διακύμανση της θερμοκρασίας ακόμη και σε διαφορετικές θέσεις εντός του καταψύκτη. Με τις μέσες μέγιστες θερμοκρασίες σταθερά χαμηλές, ο Πολυσυμπιεστής έδειξε ανθεκτικότητα και σταθερότητα, σημαντικά χαρακτηριστικά για ευαίσθητες εφαρμογές που απαιτούν αξιόπιστη συγκράτηση στο κρύο. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου απέδωσε επίσης αποτελεσματικά, επιδεικνύοντας χαμηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες από τον Ερμητικό Συμπιεστή, ειδικά σε θέσεις στο επάνω ράφι. Ωστόσο, εμφάνισε έναν βαθμό μεταβλητότητας, ιδιαίτερα στα χαμηλότερα τμήματα, σηματοδοτώντας πιθανές προκλήσεις στη διατήρηση ομοιόμορφων θερμοκρασιών. Παρόλα αυτά, η ισορροπία μεταξύ απόδοσης και κόστους το καθιστά ελκυστική επιλογή για εφαρμογές όπου ορισμένες αποκλίσεις θερμοκρασίας μπορεί να είναι αποδεκτές. Αντίθετα, ο Ερμητικός Συμπιεστής αν και λειτουργικά επαρκής, δυσκολεύτηκε να διατηρήσει σταθερές θερμοκρασίες σε διάφορες θέσεις ραφιών. Οι χαμηλότερες θέσεις ραφιών κατέγραψαν υψηλότερες θερμοκρασίες, υποδεικνύοντας την ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης ψύξης, ειδικά σε μεγαλύτερα βάθη μέσα στη μονάδα. Αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της στρατηγικής τοποθέτησης του υλικού εντός του καταψύκτη για τη διασφάλιση βέλτιστων συνθηκών συντήρησης.

Όταν δοκιμάστηκε στους -70°C , οι διαφορές στην απόδοση έγιναν όλο και πιο εμφανείς. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου επέδειξε λογικές επιδόσεις στους -70°C , διατηρώντας αποτελεσματικά τη διατήρηση του κρύου στις πάνω θέσεις του ραφίου. Ωστόσο, έδειξε αυξημένη μεταβλητότητα και τάσεις θέρμανσης καθώς μετακινήθηκε κανείς στα χαμηλότερα τμήματα της μονάδας. Αυτό αντικατοπτρίζει πιθανούς σχεδιαστικούς περιορισμούς στην ομοιόμορφη διαχείριση των υπερκρύων περιβαλλόντων, κάτι που μπορεί να είναι κρίσιμο σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Ο Ερμητικός Συμπιεστής αντιμετώπισε προκλήσεις στη διατήρηση ομοιόμορφων προφίλ θερμοκρασίας σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Σημαντικές αυξήσεις θερμοκρασίας σε χαμηλότερες θέσεις υποδηλώνουν ότι, ενώ τα πάνω τμήματα επωφελήθηκαν από τη στιβαρή ψύξη, η συνολική σχεδίαση δυσκολεύτηκε να προσφέρει σταθερά αποτελέσματα σε ολόκληρη τη μονάδα. Αυτή η μεταβλητότητα απόδοσης παρουσιάζει πιθανούς κινδύνους σε περιβάλλοντα όπου ακόμη και μικρές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα του υλικού.

Αυτή η ολοκληρωμένη ανάλυση υπογραμμίζει τον κρίσιμο ρόλο της τεχνολογίας καταψύκτη σε περιβάλλοντα που απαιτούν σχολαστικό έλεγχο της θερμοκρασίας. Ο Πολυσυμπιεστής ξεχωρίζει ως η προτιμώμενη επιλογή σε σενάρια όπου η ομοιομορφία και η σταθερότητα είναι πρωταρχικής σημασίας, ειδικά λαμβάνοντας υπόψη την υποδειγματική του απόδοση. Η ικανότητά του να διατηρεί σταθερές θερμοκρασίες ακόμη και σε συνθήκες διακοπής ρεύματος το σηματοδοτεί ως ανώτερη επιλογή για εγκαταστάσεις που απαιτούν αυστηρές συνθήκες αποθήκευσης, όπως βιοϊατρικά ή φαρμακευτικά περιβάλλοντα.

Ο κινητήρας με ελεύθερο έμβολο αποτελεί μια βιώσιμη εναλλακτική λύση, ειδικά όταν λαμβάνονται υπόψη οι εκτιμήσεις του προϋπολογισμού στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Ενώ παρουσιάζει κάποια μεταβλητότητα, η συνολική του απόδοση είναι αξιόπαινη, προσφέροντας μια πρακτική λύση σε καταστάσεις όπου η απόλυτη ακρίβεια θερμοκρασίας δεν είναι τόσο κρίσιμη. Αντίθετα, ενώ ο Ερμητικός Συμπιεστής λειτουργεί ικανοποιητικά κάτω από λιγότερο απαιτητικές συνθήκες, οι περιορισμοί στην ομοιομορφία θερμοκρασίας σε διάφορα βάθη εντός της μονάδας τον καθιστούν λιγότερο ιδανικό για εξαιρετικά ευαίσθητες εφαρμογές. Οι πληροφορίες απόδοσης που αποκτώνται εδώ μπορούν να καθοδηγήσουν τους ενδιαφερόμενους στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τη βελτίωση των λύσεων αποθήκευσης, προστατεύοντας την αξία και την αποτελεσματικότητα των υλικών κατά τη διάρκεια απρόβλεπτων διακοπών ρεύματος.

Συμπερασματικά, η κατανόηση των μοναδικών χαρακτηριστικών απόδοσης των διαφορετικών τεχνολογιών καταψύκτη επιτρέπει τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων, ευθυγραμμίζοντας τις ανάγκες των εγκαταστάσεων με τις τεχνολογικές δυνατότητες που διασφαλίζουν καλύτερα την ασφάλεια και την αξιοπιστία του αποθηκευμένου περιεχομένου. Το αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης μιλά για την πρόοδο στον σχεδιασμό του καταψύκτη, δίνοντας έμφαση σε καινοτόμες λύσεις για την κάλυψη των συνεχώς εξελισσόμενων απαιτήσεων για ακριβή και αξιόπιστη αποθήκευση ψύξης σε κρίσιμες εφαρμογές.

5.1.4. Συμπέρασμα από Δοκιμή Ψύξης

Το συμπέρασμα της ανάλυσης των συστημάτων ψύξης, εστιάζοντας στους καταψύκτες ερμητικού συμπιεστή και ελεύθερου εμβόλου, αναδεικνύει ένα σημαντικό στοιχείο το οποίο είναι η ταχύτητα η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα και την εφαρμοσιμότητα των συστημάτων. Συγκεκριμένα, τα συστήματα ελεύθερου εμβόλου εμφανίζουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία, οι οποίες μπορεί να θεωρηθούν αποτέλεσμα του ταχύτερου ρυθμού μεταβολής προς την επιθυμητή θερμοκρασία. Αυτό υποδηλώνει ότι, ενώ τα συστήματα ελεύθερου εμβόλου μπορεί να μην διατηρούν σταθερές θερμοκρασίες τόσο αποτελεσματικά όσο οι ερμητικοί συμπιεστές, καταφέρνουν να φτάσουν στους στόχους τους πιο γρήγορα. Οι ερμητικοί συμπιεστές, από την άλλη πλευρά, εκτελούν τις ίδιες φάσεις με περισσότερο χρόνο, παρέχοντας μεγαλύτερη σταθερότητα και αξιοπιστία στις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ωστόσο, αυτή η σταθερότητα συνοδεύεται από αυξημένο χρόνο ολοκλήρωσης κάθε φάσης, κάτι που μπορεί να είναι μειονέκτημα σε περιπτώσεις όπου η ταχύτητα είναι κρίσιμη. Εν κατακλείδι, για εφαρμογές όπου η ταχύτητα είναι πιο σημαντική από την απόλυτη σταθερότητα, οι καταψύκτες ελεύθερου εμβόλου παρουσιάζουν μία ελκυστική επιλογή. Όπου οι παραλλαγές θερμοκρασίας πρέπει να ελαχιστοποιηθούν υπέρ της αξιοπιστίας, οι ερμητικοί συμπιεστές προσφέρουν μία σταθερή, αν και πιο αργή, λύση. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος εξαρτάται άμεσα από τις ιδιαίτερες ανάγκες κάθε εφαρμογής, με βάση την προτεραιότητα που δίνεται στην ταχύτητα έναντι της σταθερότητας.

5.1.5. Συμπεράσματα Παλινδρόμηση

Σε αυτή την τελευταία ενότητα, θα αναλύσω και θα συζητήσω τις εμπειρικές επιδράσεις της ανάλυσης παλινδρόμησης που πραγματοποιήθηκε στα δεδομένα σχετικά με την απόδοση. Η οικονομετρική αξιολόγηση περιστράφηκε γύρω από τρία διαφορετικά μοντέλα, επιτρέποντας μια πολύπλευρη κατανόηση των επιδράσεων στην τυπική απόκλιση θερμοκρασίας, τη μέση θερμοκρασία και τον συντελεστή διακύμανσης σε διαφορετικούς τύπους καταψυκτών, όπως ερμητικούς συμπιεστές, ελεύθερο έμβολο και πολυσυμπιεστές. Η ανάλυση εφάρμοσε τόσο σταθερά όσο και τυχαία μοντέλα πάνελ επίδρασης και μέσω στατιστικών δοκιμών, διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο σταθερού αποτελέσματος ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα λόγω της ικανότητάς του να εξαλείφει την απαραίτητη ετερογένεια μεταξύ μεμονωμένων καταψυκτών.

Μέσω της ανάλυσης, κατέστη προφανές ότι οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στους καταψύκτες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της απόδοσής τους. Το μοντέλο σταθερού μοντέλου τόνισε τη σημασία της συνεκτίμησης των ατομικών ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, επικυρώνοντας έτσι τη χρήση αυτής της μεθόδου για την απόκτηση των καλύτερων γραμμικών αμερόληπτων εκτιμήσεων (BLUE). Επιπλέον, η επιλογή αυτή υποστηρίχθηκε από τη δοκιμή Hausman, η οποία έδειξε ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου σταθερού αποτελέσματος ήταν πιο αξιόπιστα από εκείνα που προέκυψαν από το μοντέλο τυχαίων επιδράσεων.

Κατά την εφαρμογή τεχνικών δεδομένων πάνελ, αναλύθηκαν δείκτες όπως η χρονική υστέρηση, ο χρόνος λειτουργίας, η συχνότητα των ανοιγμάτων των θυρών, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η σχετική υγρασία για να κατανοηθούν πλήρως οι επιπτώσεις τους. Αυτές οι μεταβλητές ήταν κρίσιμες όχι μόνο για τον καθορισμό συσχετισμών απόδοσης αλλά και για την εξέταση του τρόπου με τον οποίο οι προηγούμενες τιμές και οι εξωτερικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρέασαν την τρέχουσα λειτουργική αποδοτικότητα.

Η ανάλυση αποκάλυψε ότι ενώ πολλές επιδράσεις χρονικής υστέρησης δεν ήταν στατιστικά σημαντικές, οι περιπτώσεις όπου ήταν σημαντικές - ειδικά μεταξύ ερμητικών συμπιεστών και πολυσυμπιεστών - υπογράμμισαν βασικούς μηχανισμούς ανάδρασης όπου οι προηγούμενες ενέργειες ενημερώνουν την τρέχουσα απόδοση. Οι πληροφορίες αυτές είναι ζωτικής σημασίας, καθώς υποδηλώνουν ότι η διατήρηση σταθερών επιχειρησιακών πρακτικών μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερες επιδόσεις με την πάροδο του χρόνου.

Η λειτουργική χρονική μεταβλητή έδειξε ένα μοναδικό μοτίβο. Στο πλαίσιο της «Μη ομαδοποίησης ανά τύπο», αυτή η μεταβλητή παρουσίασε στατιστικά σημαντική και αρνητική συσχέτιση, υποστηρίζοντας την ιδέα ότι η παρατεταμένη χρήση καταψυκτών θα μπορούσε να βελτιώσει τη συνολική απόδοσή τους μειώνοντας τόσο την τυπική απόκλιση όσο και τον συντελεστή διακύμανσης της θερμοκρασίας. Αυτό το

αποτέλεσμα συνεπάγεται ότι οι διαδικασίες βελτιστοποίησης εντός των καταψυκτών βελτιώνονται με την πάροδο του χρόνου, σε αντίθεση με τις κοινές υποθέσεις σταδιακής επιδείνωσης με την ηλικία.

Αντίθετα, η συχνότητα ανοίγματος των θυρών αναδείχθηκε ως κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά την απόδοση του καταψύκτη. Όπως αναμενόταν, τα αυξημένα ανοίγματα των θυρών εισάγουν θερμότερο αέρα στο σύστημα, απαιτώντας πρόσθετες προσπάθειες ψύξης και συμβάλλοντας έτσι σε αυξημένες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Οι παρατηρούμενοι θετικοί συντελεστές για αυτή τη μεταβλητή σε όλους σχεδόν τους τύπους καταψυκτών (με εξαίρεση τους Πολυσυμπιεστές) αντανακλούσαν μια ισχυρή σχέση μεταξύ του αριθμού των ανοιγμάτων και της αστάθειας της θερμοκρασίας. Αυτό το αποτέλεσμα υπογραμμίζει τη σημασία των αποτελεσματικών λειτουργικών ελέγχων, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα όπου η χρήση θυρών είναι συχνή.

Η επίδραση εξωτερικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η σχετική υγρασία, στην απόδοση του καταψύκτη δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί. Η ανάλυση αποκάλυψε ότι οι υψηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες απαιτούν περισσότερη ενέργεια για τους καταψύκτες για να διατηρήσουν τις εσωτερικές συνθήκες, αυξάνοντας σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Η θετική και σημαντική σχέση μεταξύ της μέσης θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της τυπικής απόκλισης της θερμοκρασίας υποστηρίζει την υπόθεση ότι οι υψηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες οδηγούν σε μεγαλύτερη εσωτερική αστάθεια.

Οι εποχιακές διακυμάνσεις περιπλέκουν περαιτέρω αυτή τη σχέση. Κατά τους χειμερινούς μήνες, για παράδειγμα, οι μετρήσεις απόδοσης των ελεύθερων εμβολοφόρων καταψυκτών φάνηκε να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στις εξωτερικές αλλαγές θερμοκρασίας. Αυτά τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι οι παράμετροι σχεδιασμού και λειτουργίας των συστημάτων κατάψυξης πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις περιβαλλοντικές επιδράσεις για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και της απόδοσης ψύξης.

Η σχετική υγρασία, αν και λιγότερο σταθερά επιδραστική σε διαφορετικούς τύπους καταψυκτών, εμφάνισε ωστόσο μια λεπτή αλληλεπίδραση με τις μετρήσεις θερμοκρασίας. Οι ελεύθεροι εμβολοφόροι καταψύκτες φαίνεται να είναι ειδικά σχεδιασμένοι ή κατάλληλοι για να χειρίζονται τις διακυμάνσεις της υγρασίας, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία των προσαρμοσμένων τεχνολογιών. Τα μικτά αποτελέσματα που συνδέονται με τα επίπεδα υγρασίας δείχνουν ότι οι κατασκευαστές πρέπει να εξετάσουν πιο προσεκτικά τις στρατηγικές διαχείρισης της υγρασίας κατά το σχεδιασμό συστημάτων κατάψυξης.

Από τη σκοπιά των επιμέρους μοντέλων, προέκυψαν διακριτά μοτίβα που σχετίζονται με τις μετρήσεις θερμοκρασίας που εξετάστηκαν.

- Μοντέλο 1 (βλ. Εξίσωση 4): Τυπική απόκλιση θερμοκρασίας (StD): Τα ευρήματα έδειξαν ότι οι ιστορικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και τα ανοίγματα των θυρών είναι σημαντικοί προγνωστικοί παράγοντες της τρέχουσας μεταβλητότητας της θερμοκρασίας. Ειδικότερα, η

υποστήριξη της υπόθεσης σχετικά με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατέδειξε την κρίσιμη ισορροπία που απαιτείται για τη διατήρηση της λειτουργικής σταθερότητας.

- Μοντέλο 2 (βλ. Εξίσωση 5): Μέση θερμοκρασία (μέσος όρος): Η εξέταση της μέσης θερμοκρασίας αποκάλυψε πώς οι εξωτερικοί παράγοντες επηρεάζουν άμεσα τις εσωτερικές συνθήκες. Τα σημαντικά αποτελέσματα που συνδέονται με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τις λειτουργικές πρακτικές υπογραμμίζουν την ανάγκη για βελτιωμένες πρακτικές διαχείρισης ενέργειας.
- Μοντέλο 3 (βλ. Εξίσωση 6): Συντελεστής διακύμανσης (CV): Η ανάλυση επιβεβαίωσε ότι ο αυξημένος χρόνος λειτουργίας αντιστοιχεί σε υψηλότερο συντελεστή διακύμανσης. Αυτή η γνώση θα μπορούσε να ενημερώσει τις στρατηγικές συντήρησης, υποδηλώνοντας ότι τα παλαιότερα συστήματα ενδέχεται να χρειάζονται πιο συνεπή παρακολούθηση και ενδεχομένως μετασκευή για να διατηρήσουν ομοιόμορφη απόδοση.

Τα εμπειρικά αποτελέσματα αυτής της μελέτης παρουσιάζουν διάφορες επιπτώσεις στο σχεδιασμό, τη διαχείριση και τη λειτουργία των τεχνολογιών κατάψυξης. Πρώτον, η κατανόηση ότι η λειτουργική μακροζωία και οι συνεπείς πρακτικές οδηγούν σε βελτιωμένη απόδοση αξίζει προσοχής τόσο σε κατασκευαστικό όσο και σε λειτουργικό πλαίσιο. Οι εταιρείες θα πρέπει να υποστηρίξουν τις συνήθειες αξιολογήσεις των λειτουργικών πρακτικών των καταψυκτών για την προώθηση της αποτελεσματικότητας.

Επιπλέον, η σημαντική σχέση μεταξύ περιβαλλοντικών παραγόντων και απόδοσης καταψυκτών υπογραμμίζει την ανάγκη για προσαρμοστικές στρατηγικές σχεδιασμού που λαμβάνουν υπόψη τις εξωτερικές συνθήκες. Υπό το φως των στοιχείων που δείχνουν πώς οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα ψύξης, οι κατασκευαστές μπορούν να επικεντρωθούν σε τεχνολογίες που ενισχύουν τη μόνωση, την αποδοτική χρήση συμπιεστών και τον αποτελεσματικό έλεγχο της υγρασίας. Για παράδειγμα, η ενσωμάτωση ενεργών συστημάτων διαχείρισης υγρασίας θα μπορούσε να συμβάλει στον μετριασμό των δυσμενών επιπτώσεων της υψηλής υγρασίας, μεγιστοποιώντας παράλληλα την ενεργειακή απόδοση.

Οι γνώσεις που αποκτήθηκαν σχετικά με τη συχνότητα ανοίγματος των θυρών υποδηλώνουν ότι πρέπει να ενισχυθούν οι επιχειρησιακές διαδικασίες και η κατάρτιση του προσωπικού και των χρηστών. Η εφαρμογή στρατηγικών για την ελαχιστοποίηση των ανοιγμάτων των θυρών, όπως οι βελτιωμένες τεχνικές διαχείρισης αποθεμάτων ή η εγκατάσταση συστημάτων πόρτας κατά της παραβίασης, μπορεί να βοηθήσει στην αποτελεσματικότερη διατήρηση των εσωτερικών συνθηκών. Τέτοιες λειτουργικές βελτιώσεις όχι μόνο διατηρούν την ακεραιότητα των αποθηκευμένων προϊόντων, αλλά και αποτρέπουν την υπερβολική κατανάλωση ενέργειας, ωφελώντας τελικά την κατώτατη γραμμή.

Η συγκριτική εξέταση των κατηγοριών τεχνολογίας - ερμητικοί συμπιεστές, ελεύθεροι εμβολοφόροι καταψύκτες και πολυσυμπιεστές - ανέδειξε διακριτά πρότυπα ευαισθησίας με βάση τις εξωτερικές συνθήκες. Οι ερμητικοί συμπιεστές ήταν γνωστοί για τις αντιδράσεις τους στα ανοίγματα των θυρών, με αποτέλεσμα σχετικά υψηλότερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, ενώ οι πολυσυμπιεστές παρουσίασαν χαμηλότερη ευαισθησία στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Αυτό απαιτεί βαθύτερη διερεύνηση των χαρακτηριστικών απόδοσης που σχετίζονται με την τεχνολογία και της προσαρμοστικότητάς τους σε περιβαλλοντικούς στρεσογόνους παράγοντες. Η ανάλυση καταδεικνύει ότι δεν αντιδρούν όλες οι τεχνολογίες ψυγείων ομοιόμορφα στις εξωτερικές πιέσεις, γεγονός που ενισχύει το επιχείρημα για επενδύσεις στην έρευνα και την ανάπτυξη που επικεντρώνεται σε προσαρμοστικές τεχνολογίες και ανθεκτικά σχέδια.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εμπειρική ανάλυση χρησιμοποιώντας μοντέλα παλινδρόμησης πάνελ παρέχουν μια ολοκληρωμένη κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση του καταψύκτη. Οι σημαντικές σχέσεις που δημιουργούνται μεταξύ διαφόρων λειτουργικών και περιβαλλοντικών μεταβλητών σκιαγραφούν κρίσιμους τομείς όπου μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση. Εστιάζοντας σε πτυχές όπως ο τύπος τεχνολογίας, οι επιχειρησιακές πρακτικές και οι εξωτερικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες, οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να αναπτύξουν στρατηγικές για τη βελτίωση της απόδοσης και της απόδοσης ψύξης.

Με τις επιπτώσεις που επισημαίνονται σε αυτήν την ανάλυση, τα ενδιαφερόμενα μέρη στη βιομηχανία ψύξης, συμπεριλαμβανομένων των κατασκευαστών, των χειριστών και των ερευνητών, ενθαρρύνονται να υιοθετήσουν μια πιο ενημερωμένη και ολιστική προσέγγιση στη διαχείριση και το σχεδιασμό των καταψυκτών. Κάτι τέτοιο όχι μόνο θα βελτιώσει τη λειτουργική απόδοση και θα μειώσει την κατανάλωση ενέργειας, αλλά θα συμβάλει επίσης στις προσπάθειες βιωσιμότητας για την αντιμετώπιση της αυξανόμενης ζήτησης της αγοράς για ενεργειακά αποδοτικές λύσεις ψύξης. Μέσω της συνεχούς έρευνας, της συνεργασίας και της τεχνολογικής προόδου, η βιομηχανία μπορεί να προχωρήσει περαιτέρω προς τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των καταψυκτών και τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας των ψυκτικών συστημάτων αποθήκευσης στο πλαίσιο των μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών.

5.2. Συζήτηση

5.2.1. Εισαγωγή

Η συζήτηση αυτής της μελέτης συνθέτει τα ευρήματα από εμπειρικές αναλύσεις με ιδέες από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Ο πρωταρχικός στόχος είναι η κριτική αξιολόγηση της συγκριτικής απόδοσης των ερμητικών συμπιεστών, των ελεύθερων εμβολοφόρων κινητήρων και των συστημάτων πολλαπλών συμπιεστών σε καταψύκτες εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας (ULT), ιδιαίτερα όσον αφορά την ομοιομορφία θερμοκρασίας, την απόδοση και την αξιοπιστία. Τα ευρήματα εντάσσονται στο πλαίσιο της

υπάρχουσας έρευνας για την εξαγωγή ουσιαστικών συμπερασμάτων σχετικά με τη βέλτιστη τεχνολογία ψύξης για συγκεκριμένες εφαρμογές.

5.2.2. Επιλογή Καταψύκτη

Η επιλογή του κατάλληλου καταψύκτη ULT αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για ερευνητικά εργαστήρια και βιομηχανίες που απαιτούν αξιόπιστες λύσεις αποθήκευσης για ευαίσθητα υλικά. Η απόδοση, η ομοιομορφία και η προσαρμοστικότητα στις συνθήκες φόρτωσης είναι οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αυτοί οι παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του καταλληλότερου καταψύκτη για κάθε εφαρμογή.

Ο καταψύκτης με κινητήρα ελεύθερου εμβόλου αναδεικνύεται ως η καλύτερη επιλογή για περιβάλλοντα που απαιτούν σταθερό έλεγχο θερμοκρασίας. Με τη χαμηλότερη τυπική απόκλιση και συντελεστή διακύμανσης στη δοκιμή 24 ωρών, προσφέρει αξιοσημείωτη συνέπεια στη διατήρηση θερμοκρασιών. Στα -40°C , σημειώνει την πιο χαμηλή θερμική μεταβολή όταν περνά από άδεια σε φορτισμένη κατάσταση, γεγονός που υποδηλώνει την ελαστικότητά του στις εναλλαγές φορτίου. Επιπλέον, στα -70°C , καταφέρνει να διατηρήσει εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για αποθήκευση ευαίσθητων δειγμάτων που απαιτούν αυστηρό θερμικό έλεγχο.

Η απόδοση του Ελεύθερου Εμβόλου είναι εκ των πραγμάτων αξιοσημείωτη. Χάρη στη σταθερή ομοιομορφία θερμοκρασίας, εξασφαλίζει την ακεραιότητα των αποθηκευμένων υλικών, ακόμη και κάτω από συνθήκες μεταβλητού φορτίου. Αυτή η συνέπεια καθιστά τον καταψύκτη ελεύθερου εμβόλου την προτιμώμενη επιλογή για περιπτώσεις όπου τα δείγματα είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και απαιτούν επαγγελματική συντήρηση.

Στην ανάλυση απόδοσης, οι άλλοι τύποι καταψυκτών παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διαφορές. Ο Ερμητικός Συμπιεστής, αν και αποτελεσματικός, εμφανίζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις στις χαμηλότερες θέσεις των ραφιών. Επίσης, παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβλητότητα στις αλλαγές θερμοκρασίας όταν ο καταψύκτης είναι φορτισμένος, ιδιαίτερα στις κάτω περιοχές των ραφιών. Παρότι μπορεί να διατηρεί αποτελεσματικά τις θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής ανοιχτής πόρτας, υστερεί σε σχέση με τον κινητήρα ελεύθερου εμβόλου στην ανάκαμψη. Ο Πολυσυμπιεστής, από την άλλη, καταφέρνει να διατηρήσει σταθερές θερμοκρασίες σε όλα τα επίπεδα των ραφιών κατά τη διάρκεια των διακοπών ρεύματος. Ωστόσο, ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου τον υπερβαίνει όσον αφορά την ταχύτητα ανάκαμψης και την τήρηση χαμηλότερων μέγιστων θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αξιολόγηση των καταψυκτών είναι η αντίδρασή τους σε εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η υγρασία. Οι υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες μπορούν να αυξήσουν την κατανάλωση ενέργειας και να μειώσουν τη λειτουργική απόδοση των καταψυκτών. Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου αποδεικνύεται λιγότερο επηρεασμένος από αυτές τις εξωτερικές επιρροές. Οι δοκιμές αναδεικνύουν ότι διατηρεί την απόδοση

του ακόμη και σε περιόδους θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στο εξωτερικό περιβάλλον, προσφέροντας έτσι ασφάλεια στις εφαρμογές που απαιτούν σταθερές εσωτερικές συνθήκες.

Η λειτουργική του σταθερότητα, απόρροια της τεχνολογίας και του σχεδιασμού του, του επιτρέπει να διαχειρίζεται εσωτερικές και εξωτερικές αλλαγές πιο αποτελεσματικά από άλλες επιλογές στην αγορά. Οι αποδεκτές επιδόσεις στις δοκιμές ανοιχτής πόρτας, όπου ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου διατηρεί τη χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία, ενισχύουν περαιτέρω την αποτελεσματικότητα αυτής της κατηγορίας καταψυκτών. Επιπλέον, η αναλυτική επισκόπηση των καταψυκτών ULT καθιστά σαφή την ανωτερότητα του κινητήρα ελεύθερου εμβόλου στην απόδοση θερμοκρασίας και στην ομοιομορφία. Είτε πρόκειται για συνθήκες σταθερής φόρτωσης είτε για συνθήκες αλλαγών θερμοκρασίας, αυτός ο τύπος καταψύκτη διατηρεί σταθερές και αξιόπιστες επιδόσεις. Τα πλεονεκτήματα του κινητήρα ελεύθερου εμβόλου φαίνεται να υπερισχύουν, κυρίως λόγω της ικανότητάς του να ανταποκρίνεται αποτελεσματικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και να προσφέρει σταθερή απόδοση. Το αποτέλεσμα είναι ότι αποτελεί την ιδανική επιλογή για επιστημονικές και ιατρικές εφαρμογές όπου η σταθερότητα θερμοκρασίας είναι κρίσιμης σημασίας.

Για το μέλλον της τεχνολογίας στο χώρο των καταψυκτών, η αποτελεσματική διαχείριση θερμοκρασίας κάτω από μηχανικό και ενεργειακό άξονα αναδεικνύεται ως προτεραιότητα. Επιπλέον, η ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών, όπως η μηχανική μάθηση για αυτοματοποιημένη διαχείριση, αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω τις υπάρχουσες δυνατότητες, προσφέροντας νέες προοπτικές στον έλεγχο και τη συντήρηση των συνθηκών αποθήκευσης.

5.2.3. Ομοιομορφία θερμοκρασίας

Η ομοιομορφία της θερμοκρασίας είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τους καταψύκτες ULT, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα και την ακεραιότητα των αποθηκευμένων βιολογικών και φαρμακευτικών δειγμάτων (Xu et al., 2023). Τα εμπειρικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύστημα πολλαπλών συμπιεστών επέδειξε την υψηλότερη συνέπεια στην κατανομή της θερμοκρασίας, ιδιαίτερα σε 24ωρες δοκιμές συνεχούς μέτρησης. Αυτό το εύρημα ευθυγραμμίζεται με προηγούμενες έρευνες που υπογραμμίζουν το πλεονέκτημα των συστημάτων συμπίεσης πολλαπλών σταδίων στη διατήρηση συνθηκών σταθερής κατάστασης υπό ποικίλα φορτία (Getie et al., 2020).

Αντίθετα, ο ερμητικός συμπιεστής παρουσίασε τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, ιδιαίτερα κατά το άνοιγμα της πόρτας και τα σενάρια διακοπής ρεύματος. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην εξάρτησή του από ένα μόνο στάδιο συμπίεσης, το οποίο στερείται πλεονασμού και προσαρμοστικότητας των διαμορφώσεων πολλαπλών συμπιεστών (Berchowitz & Kwon, 2012). Οι κινητήρες ελεύθερου εμβόλου με βάση το Stirling παρουσίασαν ενδιάμεση απόδοση, επωφελούμενοι από μειωμένη μηχανική φθορά, αλλά εξακολουθούσαν να παρουσιάζουν διακυμάνσεις θερμοκρασίας λόγω της εξάρτησής τους από αναγεννητικούς κύκλους ψύξης (Hajagos, 2021).

5.2.4. Απόδοση κατά άνοιγμα των θυρών

Η απόδοση αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο σχεδιασμό καταψυκτών ULT λόγω του υψηλού λειτουργικού κόστους και των ανησυχιών για τη βιωσιμότητα (Mota-Babiloni et al., 2020). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου καταναλώνει σημαντικά λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με τους ερμητικούς συμπιεστές και τα συστήματα πολλαπλών συμπιεστών, επιβεβαιώνοντας προηγούμενες μελέτες σχετικά με την απόδοση του κύκλου Stirling (Berchowicz & Kwon, 2012). Αυτή η απόδοση οφείλεται στην απουσία απωλειών βάσει τριβής και στην ικανότητα δυναμικής ρύθμισης της ισχύος ως απόκριση στη ζήτηση ψύξης (Dhiman & Kumar, 2023). Ο κινητήρας ερμητικού συμπιεστή παρουσίασε βραδύτερους χρόνους ανάκτησης μετά από ανοίγματα θυρών και διακοπές ρεύματος. Αυτή η καθυστέρηση θα μπορούσε να αποτελέσει κίνδυνο σε εφαρμογές φαρμακευτικής και βιολογικής αποθήκευσης, όπου η ταχεία ανάκτηση θερμοκρασίας είναι κρίσιμη (Xu et al., 2023). Το σύστημα πολλαπλών συμπιεστών, ενώ καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, επέδειξε την καλύτερη απόδοση ανάκτησης, επιβεβαιώνοντας προηγούμενες έρευνες που υποδηλώνουν ότι τα παράλληλα συστήματα συμπιεστών παρέχουν ανθεκτικότητα έναντι αποκλίσεων θερμοκρασίας (Gondrand et al., 2014).

5.2.5. Απόδοση υπό συνθήκες διακοπής ρεύματος

Η ανθεκτικότητα σε διακοπή ρεύματος είναι μια κρίσιμη παράμετρος για τους καταψύκτες ULT, ιδιαίτερα σε περιοχές με ασταθή τροφοδοσία. Τα εμπειρικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου διατήρησε χαμηλότερες αποκλίσεις θερμοκρασίας σε σύγκριση με τον ερμητικό συμπιεστή, αλλά και οι δύο ξεπεράστηκαν από το σύστημα πολλαπλών συμπιεστών. Αυτό το εύρημα ευθυγραμμίζεται με μελέτες που δείχνουν ότι ο πλεονασμός στα κυκλώματα ψύξης μετριάζει τις αιχμές θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια σεναρίων απώλειας ισχύος (Saeed et al., 2023). Είναι ενδιαφέρον ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών πήξης αποκάλυψαν ότι οι κινητήρες ελεύθερου εμβόλου εμπόδισαν τον υπερβολικό σχηματισμό κρυστάλλων πάγου πιο αποτελεσματικά από τον ερμητικό συμπιεστή, αλλά λιγότερο αποτελεσματικά από το σύστημα πολλαπλών συμπιεστών. Αυτό υποδηλώνει ότι ενώ οι κινητήρες Stirling παρέχουν σταθερότητα, η απόδοσή τους εξακολουθεί να περιορίζεται από τη θερμική αδράνεια (Getie et al., 2020). Δεδομένων αυτών των παρατηρήσεων, οι εγκαταστάσεις που δίνουν προτεραιότητα στην ακεραιότητα του δείγματος κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος μπορεί να επωφεληθούν περισσότερο από τις διαμορφώσεις πολλαπλών συμπιεστών παρά την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

5.2.6. Ζητήματα περιβάλλοντος και βιωσιμότητας

Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες διαδραματίζουν αυξανόμενο ρόλο στην επιλογή των τεχνολογιών ψύξης. Τα ψυκτικά μέσα με βάση το HFC που χρησιμοποιούνται σε ερμητικά και πολυσυμπιεστικά συστήματα καταργούνται σταδιακά λόγω του υψηλού δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη (Muir, 1990; Powell, 2002). Ο κινητήρας ελεύθερου εμβόλου προσφέρει μια βιώσιμη εναλλακτική λύση επιτρέποντας τη χρήση

φυσικών ψυκτικών μέσων όπως το ήλιο και το άζωτο, τα οποία ευθυγραμμίζονται με τις τρέχουσες ρυθμιστικές τάσεις που ευνοούν λύσεις χαμηλού GWP (Keri, 2019; Tica & Grubic, 2019).

Ωστόσο, παρά τα περιβαλλοντικά τους οφέλη, οι κινητήρες ελεύθερου εμβόλου απαιτούν εξειδικευμένη συντήρηση και τεχνογνωσία, περιορίζοντας την ευρεία υιοθέτησή τους σε εμπορικές εφαρμογές ULT (Owusu-Aparenten & Vieira, 2023). Τα συστήματα πολλαπλών συμπιεστών, ενώ εξακολουθούν να βασίζονται σε συμβατικά ψυκτικά μέσα, μπορούν να βελτιστοποιηθούν με εναλλακτικά ψυκτικά μέσα χαμηλού GWP, όπως υδροφθοροολεφίνες (HFOs) ή CO₂ για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Kanbur et al., 2025; Zhang κ.ά., 2024).

5.2.7. Πρακτικές επιπτώσεις και βιομηχανικές εφαρμογές

Τα ευρήματα της μελέτης παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τις βιομηχανίες που βασίζονται σε καταψύκτες ULT, συμπεριλαμβανομένης της βιοϊατρικής έρευνας, των φαρμακευτικών προϊόντων και της βιοτεχνολογίας (Evans, 2022). Η ανώτερη θερμοκρασιακή ομοιομορφία των συστημάτων πολλαπλών συμπιεστών τα καθιστά ιδανικά για βιοαποθήκες μεγάλης κλίμακας και αποθήκευση κλινικών δειγμάτων. Ωστόσο, η υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας απαιτεί ισχυρές στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας για την αντιστάθμιση του λειτουργικού κόστους (Dhiman & Kumar, 2023). Οι κινητήρες ελεύθερου εμβόλου, με την ενεργειακή τους απόδοση και τα περιβαλλοντικά τους πλεονεκτήματα, είναι κατάλληλοι για εφαρμογές όπου η βιωσιμότητα και η μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση κόστους έχουν προτεραιότητα. Ωστόσο, οι βραδύτεροι χρόνοι ανάκαμψής τους περιορίζουν την καταλληλότητά τους για εφαρμογές που απαιτούν συχνή πρόσβαση ή υψηλή θερμική ανθεκτικότητα (Xu et al., 2023). Οι ερμητικοί συμπιεστές, παρά τη χαμηλότερη απόδοσή τους, παραμένουν βιώσιμοι για εφαρμογές με γνώμονα τον προϋπολογισμό, όπου οι μέτριες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είναι αποδεκτές (Graham et al., 2024).

5.2.8. Περιορισμοί και μελλοντική έρευνα

Ενώ αυτή η μελέτη παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση ψύξης ULT, πρέπει να αναγνωριστούν αρκετοί περιορισμοί. Το πεδίο εφαρμογής της εμπειρικής ανάλυσης περιορίστηκε σε συγκεκριμένες συνθήκες δοκιμής και οι πραγματικές διακυμάνσεις στην κατανομή φορτίου και στις συνθήκες περιβάλλοντος ενδέχεται να επηρεάσουν διαφορετικά τις επιδόσεις. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να διερευνήσει τη μακροπρόθεσμη λειτουργική σταθερότητα, το κόστος συντήρησης και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής σε διαφορετικά συστήματα ψύξης (Robertson et al., 2017).

Επιπλέον, οι εξελίξεις στα εναλλακτικά ψυκτικά μέσα και τις υβριδικές τεχνολογίες ψύξης θα μπορούσαν να παρέχουν καινοτόμες λύσεις εξισορρόπησης της ενεργειακής απόδοσης, της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και της αξιοπιστίας των επιδόσεων (Lemmon, 2003). Μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να διερευνήσουν την ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) και προσαρμοστικού ελέγχου ψύξης με γνώμονα την τεχνητή νοημοσύνη για την ενίσχυση της σταθερότητας της θερμοκρασίας ελαχιστοποιώντας παράλληλα την κατανάλωση ενέργειας (Zheng & Sun, 2006).

Ενώ η εμπειρική ανάλυση που παρουσιάζεται παρέχει πολύτιμες πληροφορίες, ανοίγει επίσης δρόμους για μελλοντική έρευνα. Περαιτέρω μελέτες θα μπορούσαν να εμβαθύνουν σε διαχρονικές αναλύσεις της απόδοσης των καταψυκτών για παρατεταμένες περιόδους, εξετάζοντας πώς οι εξελίξεις στην τεχνολογία επηρεάζουν την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα. Επιπλέον, η διερεύνηση των συμπεριφορών των καταναλωτών σχετικά με τη χρήση και τις πρακτικές συντήρησης των καταψυκτών μπορεί να αποφέρει αξιοποιήσιμες πληροφορίες που ευθυγραμμίζουν τις λειτουργικές πρακτικές με τις τεχνολογικές δυνατότητες.

Επιπλέον, η επέκταση αυτής της έρευνας ώστε να συμπεριλάβει μια ευρύτερη ποικιλία περιβαλλόντων και περιπτώσεων χρήσης μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό βέλτιστων πρακτικών σε ολόκληρο τον κλάδο που προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, διασφαλίζοντας παράλληλα την ασφάλεια των προϊόντων και τη διάρκεια ζωής. Οι ερευνητές μπορούν επίσης να εξετάσουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης έξυπνης τεχνολογίας σε συστήματα κατάψυξης για την παροχή παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, προγνωστικών ειδοποιήσεων συντήρησης και αυτοματοποιημένων λειτουργικών προσαρμογών με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η διερεύνηση των πιθανών οφελών των στρατηγικών απόκρισης ζήτησης στις λειτουργίες κατάψυξης θα μπορούσε να αποφέρει πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο διαχείρισης της κατανάλωσης ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής, διατηρώντας παράλληλα την απόδοση. Ο συνδυασμός αυτών των στρατηγικών με τις εξελισσόμενες τεχνολογίες μηχανικής μάθησης μπορεί να ενημερώσει τις πρακτικές που δημιουργούνται από τους χρήστες και οδηγούν σε βελτιωμένες εμπειρίες χρήστη και λειτουργική αποτελεσματικότητα.

5.2.9. Συμπέρασμα

Αυτή η συζήτηση υπογραμμίζει τους συμβιβασμούς μεταξύ ομοιομορφίας θερμοκρασίας, ενεργειακής απόδοσης και ανθεκτικότητας ισχύος μεταξύ διαφορετικών συστημάτων ψύξης ULT. Το σύστημα πολλαπλών συμπιεστών αναδεικνύεται ως η πιο σταθερή και ανθεκτική επιλογή, ιδιαίτερα σε εφαρμογές αποθήκευσης υψηλής ασφάλειας. Ωστόσο, η υψηλότερη ζήτηση ενέργειας απαιτεί βιώσιμες επιλογές ψυκτικού μέσου για ευθυγράμμιση με τα ρυθμιστικά πλαίσια. Οι κινητήρες ελεύθερου εμβόλου παρουσιάζουν μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για εφαρμογές με γνώμονα την ενέργεια, αλλά απαιτούν περαιτέρω βελτιστοποίηση στην απόδοση ανάκτησης.

Τελικά, η επιλογή της τεχνολογίας ψύξης ULT εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής, την εξισορρόπηση του κόστους, της αποδοτικότητας και των περιβαλλοντικών ζητημάτων. Η συνεχής καινοτομία στο σχεδιασμό συμπιεστών, στην επιλογή ψυκτικού μέσου και στις έξυπνες τεχνολογίες παρακολούθησης θα διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος των λύσεων αποθήκευσης ULT, διασφαλίζοντας τόσο την επιχειρησιακή αριστεία όσο και τη βιωσιμότητα στις βιοαποθετήριες και φαρμακευτικές βιομηχανίες.

6. Βιβλιογραφία

- [1] 360o MEDICAL (2024). Essential Considerations for Purchasing an Ultra-Low Temperature Freezer. Retrieved from: https://www.360medical.ca/blogs/news/essential-considerations-for-purchasing-an-ultra-low-temperature-freezer?srltid=AfmBOooMqlo_hnjnxS2lr0QYMdOXuyTKMhljQlBrperpviQNj4jo91dD [Accessed on 07DEC2024]
- [2] Ahamed, J. U., Saidur, R., & Masjuki, H. H. (2011). A review on exergy analysis of vapor compression refrigeration system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1593-1600. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.039>
- [3] Ajmani, P. S. (2020). Storage of blood. In *Immunohematology and blood banking* (pp. 1-15). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8435-0_4
- [4] Akasaka, R., Higashi, Y., Yamada, Y., & Shibamura, T. (2015). Thermodynamic properties of 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R-134a) + 2,3,3,3-tetrafluoropropene (R-1234yf) mixtures: Measurements of the critical parameters and a mixture model based on the multi-fluid approximation. *International Journal of Refrigeration*, 58, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.06.011>
- [5] Allen, N., Sudlow, C., Downey, P., Peakman, T., Danesh, J., Elliott, P., et al. (2012). UK Biobank: Current status and what it means for epidemiology. *Health Policy and Technology*, 1(3), 123-126.
- [6] Annaratone, L., De Palma, G., Bonizzi, G., Sapino, A., Botti, G., Berrino, E., et al. (2021). Basic principles of biobanking: From biological samples to precision medicine for patients. *Virchows Archiv*, 479(2), 233-246.
- [7] APEL. (2023). LIN10 liquid nitrogen generator-Triton|Noblegen. APEL LASER. <https://apellaser.ro/en/product/lin10-liquid-nitrogen-generator-triton-noblegen>
- [8] Arshad, M. O., Azam, Q., Ahmad, S. T. I., Khan, F., & Wahid, M. A. (2021). Analysis of vapour compression refrigeration system with R-12, R-134a and R-22: An exergy approach. *Materials Today: Proceedings*, 46(Part 15), 6748-6752. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.278>
- [9] Authelin, J.-R., Rodrigues, M. A., Tchessalov, S., Singh, S. K., McCoy, T., Wang, S., & Shalae, E. (2020). Freezing of biologicals revisited: Scale, stability, excipients, and degradation stresses. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 109(1), 44-61. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2019.10.062>
- [10] Babushok, V. I., & Linteris, G. T. (2024). Air humidity influence on combustion of R-1234yf (CF₃CFCH₂), R-1234ze(E) (trans-CF₃CHCHF), and R-134a (CH₂FCF₃) refrigerants. *Combustion and Flame*, 262, 113352. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113352>
- [11] Bakaltcheva, I., & Reid, T. (2003). Effects of blood product storage protectants on blood coagulation. *Transfusion Medicine Reviews*, 17(4), 263-271. [https://doi.org/10.1016/S0887-7963\(03\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0887-7963(03)00040-3)
- [12] Bao, J., & Zhao, L. (2016). Experimental research on the influence of system parameters on the composition shift for zeotropic mixture (isobutane/pentane) in a system occurring phase change. *Energy Conversion and Management*, 113, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.005>
- [13] Barbosa, J. R., Ribeiro, G. B., & de Oliveira, P. A. (2011). A State-of-the-Art Review of Compact Vapor Compression Refrigeration Systems and Their Applications. *Heat Transfer Engineering*, 33(4-5), 356-374. <https://doi.org/10.1080/01457632.2012.613275>
- [14] Benhadid-Dib, S., & Benzaoui, A. (2012). Refrigerants and their environmental impact: Substitution of hydrochlorofluorocarbon (HCFC) and hydrofluorocarbon (HFC). Search for an adequate refrigerant. *Energy Procedia*, 18, 807-816. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.096>
- [15] Berchowitz, D., & Kwon, Y. (2012). Environmental profiles of stirling-cooled and cascade-cooled ultra-low temperature freezers. *Sustainability*, 4(11), 2838-2851.
- [16] Blackham, I., & Jim, C. (1994). The culture of cryopreservation: Supercooling, seeding and subzero safety. *Biotechnology*, 12, 82.
- [17] Bousema, T. (2020). -70 is the new -80. Radboud UMC. https://www.freezerchallenge.org/uploads/2/1/9/4/21945752/minus_70_is_the_new_minus_80_updated_may_2022_v2.pdf
- [18] Bruinenberg, M., Frey, M., Napier, M., & Summers, A. (2014). Comparing the hub-and-spoke model practices of the LifeLines study in the Netherlands and the H3Africa initiative. *Biopreservation and Biobanking*, 12(1). <https://doi.org/10.1089/bio.2013.0057>

- [19] Bryce PH (1912) The conservation of food products by refrigeration. *Am J Public Health* 2(5):325–328. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18008662>
- [20] Butt, S. S., Perera, U. A., Miyazaki, T., Thu, K., & Higashi, Y. (2024). Energy, exergy, and environmental (3E) analysis of low GWP refrigerants in cascade refrigeration system for low temperature applications. *International Journal of Refrigeration*, 160, 373-389. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.12.020>
- [21] Bychkov, E. G., Samokhvalov, Y. V., Makarov, B. A., & Yakovlev, V. I. (2017). Experimental research of low-temperature throttling refrigerator for cryoconservation of medical and biological objects. *Journal of Physics: Conference Series*, 891, 012109. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012109>
- [22] Bychkov, E., Yakovlev, V., & Saakyan, N. (2024). Experimental investigation and regression analysis on the characteristics of the JT refrigerator operating with natural refrigerant mixtures. *Thermal Science and Engineering Progress*, 48, 102410. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102410>
- [23] Cabra, J., Castro, D., Colorado, J., Mendez, D., & Trujillo, L. (2017). An IoT approach for wireless sensor networks applied to e-health environmental monitoring. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings), IEEE Green Computing and Communications (GreenCom), IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom), and IEEE Smart Data (SmartData)* (pp. 578-583). IEEE. <https://doi.org/10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2017.91>
- [24] Cadigan, R. J., Juengst, E., Davis, A., & Henderson, G. (2014). Underutilization of specimens in biobanks: An ethical as well as a practical concern? *Genetic Medicine*, 16(10), 738–740.
- [25] Calderazzi, L., & Colonna di Paliano, P. (1997). Thermal stability of R-134a, R-141b, R-131i, R-7146, R-125 associated with stainless steel as a containing material. *International Journal of Refrigeration*, 20(6), 381-389. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(97\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(97)00043-1)
- [26] Calleja-Anta, D., Martínez-Ángeles, M., Nebot-Andres, L., Sánchez, D., & Llopis, R. (2024). Optimizing R152a/R600 and R290/R600 mixtures for superior energy performance in vapor compression systems: Promising alternatives to Isobutane (R600a). *Applied Thermal Engineering*, 247, 123070. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123070>
- [27] Calleja-Anta, D., Nebot-Andres, L., Sánchez, D., Cabello, R., & Llopis, R. (2022). Drop-in substitutes for R-600a: Experimental evaluation and optimization of a commercial fridge. *Applied Thermal Engineering*, 211, 118490. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118490>
- [28] Calleja-Anta, D., Sánchez, D., Nebot-Andrés, L., Cabello, R., & Llopis, R. (2023). Alternative mixtures to R-600a: Theoretical assessment and experimental energy evaluation of binary mixtures in a commercial cooler. *International Journal of Refrigeration*, 152, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.05.009>
- [29] Caramaschi, M., Jensen, J. K., Poppi, S., Østergaard, K. K., Ommen, T. S., Kærn, M. R., Madani, H., & Elmegaard, B. (2024). Natural refrigerant mixtures in low-charge heat pumps: An analysis of the potential for performance enhancements. *International Journal of Refrigeration*, 165, 70-83. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.04.016>
- [30] Carbon Footprint. (2019). [carbonfootprint.com](https://www.carbonfootprint.com)—household energy consumption. [Carbonfootprint.com](https://www.carbonfootprint.com/energyconsumption.html). <https://www.carbonfootprint.com/energyconsumption.html>
- [31] Cavallini, A. (2020). The state-of-the-art on refrigerants. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1599, p. 012001). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1599/1/012001>
- [32] Cerci, Y. (2003). A new ideal evaporative freezing cycle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(16), 2967-2974. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00072-3)
- [33] Chalmers, D., Nicol, D., Kaye, J., Bell, J., Campbell, A. V., Ho, C. W. L., et al. (2016). Has the biobank bubble burst? Withstanding the challenges for sustainable biobanking in the digital era. *BMC Medical Ethics*, 17(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s12910-016-0124-2>
- [34] Chatterton, T. J., Anable, J., Barnes, J., & Yeboah, G. (2016). Mapping household direct energy consumption in the United Kingdom to provide a new perspective on energy justice. *Energy Research & Social Science*, 18, 71–87.
- [35] Chen, L.-S., Zawertailo, L., Piasecki, T. M., Kaprio, J., Foreman, M., Elliott, H. R., David, S. P., Bergen, A. W., Baurley, J. W., & Tyndale, R. F. (2018). Leveraging genomic data in smoking cessation trials in the era of precision medicine: Why and how. *Nicotine & Tobacco Research*, 20(4), 414–424. <https://doi.org/10.1093/ntr/ntx097>
- [36] Chen, X., Liu, C., Yang, J., & Chen, J. (2018). Experimental study on R-22, R-427A, R-161, and R-290 in air-source heat pump for space heating at low ambient temperatures. *International Journal of Refrigeration*, 96, 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.08.021>

- [37] Cho, K., & Tae, S.-J. (2000). Evaporation heat transfer for R-22 and R-407C refrigerant–oil mixture in a microfin tube with a U-bend. *International Journal of Refrigeration*, 23(3), 219-231. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00051-1)
- [38] Cho, K., & Tae, S.-J. (2001). Condensation heat transfer for R-22 and R-407C refrigerant–oil mixtures in a microfin tube with a U-bend. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(11), 2043-2051. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00253-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00253-2)
- [39] Choi, T. Y., Kim, Y. J., Kim, M. S., & Ro, S. T. (2000). Evaporation heat transfer of R-32, R-134a, R-32/134a, and R-32/125/134a inside a horizontal smooth tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19), 3651-3660. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00005-3](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00005-3)
- [40] Chu, T. Y., Hwang, K. S., Yu, M. H., Lee, H. S., Lai, H. C., & Liu, J. Y. (2002). A research-based tumor tissue bank of gynecologic oncology: characteristics of nucleic acids extracted from normal and tumor tissues from different sites. *International journal of gynecological cancer: official journal of the International Gynecological Cancer Society*, 12(2), 171-176. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1438.2002.01085.x>
- [41] Coriell, L. L., Greene, A. E., & Silver, R. K. (1964). Historical development of cell and tissue culture freezing. *Cryobiology*, 1(1), 72-79.
- [42] Davis, A., Graves, S., & Murray, T. (2001). The Biophile sample process management system — Automated sample access at ultra low temperatures. *SLAS TECHNOLOGY: Translating Life Sciences Innovation*, 6(6). <https://doi.org/10.1016/S1535-5535-04-00161>
- [43] Day, J. G., & Stacey, G. N. (2008). Biobanking. *Molecular Biotechnology*, 40(2), 202-213. <https://doi.org/10.1007/s12033-008-9099-7>
- [44] Deng, Y., Dewil, R., Appels, L., Ansart, R., Baeyens, J., & Kang, Q. (2021). Reviewing the thermo-chemical recycling of waste polyurethane foam. *Journal of Environmental Management*, 278(1), 111527.
- [45] Dhiman, P., & Kumar, A. (2023). A situational based reliability indices estimation of ULT freezer using preventive maintenance under fuzzy environment. *International Journal of Mathematical Engineering and Management Sciences*. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2023.8.3.0xx>
- [46] Dhiman, P., & Kumar, A. (2023). A situational-based reliability indices estimation of ULT freezer using preventive maintenance under fuzzy environment. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 8(3), xxx-xxx. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2023.8.3.0xx>
- [47] Du, C., Xu, J., Song, H., Tao, L., Lewandowski, A., Ghose, S., Borys, M. C., & Li, Z. J. (2019). Mechanisms of color formation in drug substance and mitigation strategies for the manufacture and storage of therapeutic proteins produced using mammalian cell culture. *Process Biochemistry*, 86, 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.08.013>
- [48] Elliott, M. A., & Halbert, G. W. (2005). Maintaining the cold chain shipping environment for Phase I clinical trial distribution. *International Journal of Pharmaceutics*, 299(1-2), 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2005.04.032>
- [49] Eppendorf. (2023). CryoCube® F570 Series—ULT Freezer—Eppendorf United Kingdom. <https://www.eppendorf.com/gb-en/eShop-Products/Cold-Storage/ULT-Freezers/CryoCube-F570-Series-p-PF-908034>
- [50] European Commission. (2011). Eudralex - volume 4: Good manufacturing practice (GMP) guidelines. Retrieved from URL https://health.ec.europa.eu/medicinal-products/eudralex/eudralex-volume-4_en
- [51] European Commission. (2015). Guidelines of 19 March 2015 on principles of good distribution practice of active substances for medicinal products for human use (Text with EEA relevance) (2015/C 95/01). Retrieved from URL [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015XC0321\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52015XC0321(01))
- [52] European Industrial Gases Association. (2010). Position Paper - Indirect CO2 emissions compensation: Benchmark proposal for Air Separation Plants. European Industrial Gases Association. <https://puritygas.ca/wp-content/uploads/2023/04/EIGA-PP33.pdf>
- [53] European Medicines Agency. (2016). Guideline on process validation for finished products - information and data to be provided in regulatory submissions (EMA/CHMP/CVMP/QWP/BWP/70278/2012-Rev1,Corr.1). Retrieved from https://www.ema.europa.eu/en/documents/scientific-guideline/guideline-process-validation-finished-products-information-data-be-provided-regulatory-submissions_en.pdf
- [54] European Parliament & Council. (2000). Directive 2000/54/EC of 18 September 2000 on the protection of workers from risks related to exposure to biological agents at work (seventh individual directive within the meaning of Article

- 16(1) of Directive 89/391/EEC). OJ L 262, 17.10.2000, pp. 21–45. Retrieved from <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/54/oj>
- [55] European Parliament & Council. (2009). Directive 2009/41/EC of 6 May 2009 on the contained use of genetically modified micro-organisms (Recast) (Text with EEA relevance). OJ L 125, 21.5.2009, pp. 75–97. Retrieved from <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/41/oj>
- [56] Evans JA (2008) Frozen food science and technology. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9781444302325>
- [57] Evans, A. (2022). ULT Freezer Best Practice: Impacts. Green Light Labs. <https://www.scientificlabs.co.uk/file/1991/Defrost%20the%20Freezer%20Regularly%20to%20Prevent%20a%20Build-up%20of%20Frost>
- [58] Evans, J. A. (Ed.). (2008). Frozen food science and technology. Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9781444302325>
- [59] Fabris, F., Fabrizio, M., Marinetti, S., Rossetti, A., & Minetto, S. (2024). Evaluation of the carbon footprint of HFC and natural refrigerant transport refrigeration units from a life-cycle perspective. *International Journal of Refrigeration*, 159, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.12.018>
- [60] Fairley, J. A., Gilmour, K., & Walsh, K. (2012). Making the most of pathological specimens: molecular diagnosis in formalin-fixed, paraffin-embedded tissue. *Current drug targets*, 13(12), 1475–1487. <https://doi.org/10.2174/138945012803530125>
- [61] Farley M, McTier B, Arnott A, Evans A. Efficient ULT freezer storage. *Social Responsibility & Sustainability: University of Edinburgh*; 2015. Available from: https://www.ed.ac.uk/files/atoms/files/efficient_ult_freezer_storage.pdf
- [62] Farley, M., McTier, B., Arnott, A., & Evans, A. (2015). Efficient ULT freezer storage. *Social Responsibility & Sustainability: University of Edinburgh*. https://www.ed.ac.uk/files/atoms/files/efficient_ult_freezer_storage.pdf
- [63] Faugeron, D. (2016). Ultra-low temperature freezer performance and energy use tests. Office of Sustainability: University of California, Riverside. https://sustainability.ucsc.edu/engage/green-certified/green-labs/resources/Green%20Procurement/ucr2016_tempfreezertest.pdf
- [64] Finberg, E. A., & Shiflett, M. B. (2021). Process designs for separating R-410A, R-404A, and R-407C using extractive distillation and ionic liquid entrainers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(44). <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c02653>
- [65] Fischer, S. Technology alternatives to CFC/HCFC vapor compression. United States. <https://www.osti.gov/servlets/purl/270661>.
- [66] Freidberg, S. 2009. *Fresh. A perishable history*. Cambridge, MA: Belknap Press.
- [67] Gavroglu, K. (2014). Historiographical Issues in the History of Cold. In: Gavroglu, K. (eds) *History of Artificial Cold, Scientific, Technological and Cultural Issues*. Boston Studies in the Philosophy and History of Science, vol 299. Springer, Dordrecht. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-7199-4_1
- [68] Ginsburg, G. S., Burke, T. W., & Febbo, P. (2008). Centralized biorepositories for genetic and genomic research. *JAMA*, 299(11), 1359.
- [69] Gondrand, C., Durand, F., Delcayre, F., Crispel, S., & Gistau Baguer, G. M. (2014). Overview of Air Liquide refrigeration systems between 1.8 K and 200 K. *AIP Conference Proceedings*, 1573(1), 949–956. <https://doi.org/10.1063/1.4860807>
- [70] Graham, M., Samuel, G. & Farley, M. Roadmap for low-carbon ultra-low temperature storage in biobanking. *J Transl Med* 22, 747 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12967-024-05383-5>
- [71] Graham, M., Samuel, G., & Farley, M. (2024). Roadmap for low-carbon ultra-low temperature storage in biobanking. *Journal of Translational Medicine*, 22, 747. <https://doi.org/10.1186/s12967-024-05383-5>
- [72] Grasedieck, S., Schöler, N., Bommer, M., Niess, J. H., Tumani, H., Rouhi, A., Bloehdorn, J., Liebisch, P., Mertens, D., Döhner, H., Buske, C., Langer, C., & Kuchenbauer, F. (2012). Impact of serum storage conditions on microRNA stability. *Leukemia*, 26(11), 2414–2416. <https://doi.org/10.1038/leu.2012.106>
- [73] Greening, D. W., Glenister, K. M., Sparrow, R. L., & Simpson, R. J. (2010). International blood collection and storage: Clinical use of blood products. *Journal of Proteomics*, 73(3), 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2009.07.011>

- [74] Groelz, D., Sobin, L., Branton, P., Compton, C., Wyrich, R., & Rainen, L. (2013). Non-formalin fixative versus formalin-fixed tissue: a comparison of histology and RNA quality. *Experimental and molecular pathology*, 94(1), 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.yexmp.2012.07.002>
- [75] Groover, K., Kulina, L., & Franke, J. (2009). Effect of increasing thermal mass on chamber temperature stability within ultra-low freezers in bio-repository operations. <https://biospecimens.cancer.gov/meeting/brnsymposium/2009/docs/posters/poster%2015%20groover.pdf>
- [76] Guilherme, Í. F., Pico, D. F. M., Santos, D. D. O., & Bandarra Filho, E. P. (2022). A review on the performance and environmental assessment of R-410A alternative refrigerants. *Journal of Building Engineering*, 47, 103847. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103847>
- [77] Gumapas, L. A. M., & Simons, G. (2013). Factors affecting the performance, energy consumption, and carbon footprint for ultra low temperature freezers: Case study at the National Institutes of Health. *World Review of Science, Technology and Sustainable Development*, 10(123), 129.
- [78] Ha, S.-J., & Lee, J.-H. (2024). Heat transfer characteristics of R-1234yf, an eco-friendly alternative refrigerant, in condenser for semiconductor chiller. *Applied Thermal Engineering*, 239, 122106. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122106>
- [79] Hajagos, B. (2021). Life cycle assessment and emission reduction of cascade and Stirling ultra-low temperature freezers [Master's thesis, Eindhoven University of Technology]. https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/183343183/1492306_MasterThesisBenceHajagos.pdf
- [80] Hammond, G., & Jones, C. (2019). Inventory of Carbon and Energy-Version 3.0. University of Bath.
- [81] Harada, L. M., Rodrigues, E. F., Ferreira, W. de P., Maniçoba da Silva, A., & Kawamoto Júnior, L. T. (2016). Storage management of clinical research supplies of a phase IIB/III, national, multi-centre, double-blind and randomized study. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 13, 430-441.
- [82] Hard, M. 1994. Machines are a frozen spirit, the scientific ciation of refrigeration and brewing in the 19th century – A Weberian interpretations . Frankfurt am Main: Campus Verlag.
- [83] Heldman DR, Nesvadba P (2003) Food freezing history. *Encyclopedia of agricultural, food, and biological engineering* (Print), p 350. Retrieved from <https://books.google.co.uk/books?id=fCRpUZzT2hMC>
- [84] Hess, J. R. (2010). Conventional blood banking and blood component storage regulation: Opportunities for improvement. *Blood Transfusion*, 8(Suppl 3), s9-15. <https://doi.org/10.2450/2010.003S>
- [85] Holland, N. T., Smith, M. T., Eskenazi, B., & Bastaki, M. (2003). Biological sample collection and processing for molecular epidemiological studies. *Mutation research*, 543(3), 217–234. [https://doi.org/10.1016/s13835742\(02\)00090-x](https://doi.org/10.1016/s13835742(02)00090-x)
- [86] Huang, T., Nøstvik, S., Bacher, P., Jensen, J. K., Markussen, W. B., & Møller, J. K. (2023). Labelled dataset for Ultra-Low temperature Freezer to aid dynamic modelling & fault detection and diagnostics. *Scientific Data*. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.6805332.v1>
- [87] Hubel, A., Spindler, R., & Skubitz, A. P. (2014). Storage of human biospecimens: selection of the optimal storage temperature. *Biopreservation and biobanking*, 12(3), 165–175. <https://doi.org/10.1089/bio.2013.0084>
- [88] Human Tissue Authority. (2023). How licensing works under the Human Tissue Quality and Safety Regulations. Human Tissue Authority. <https://www.hta.gov.uk/guidance-professionals/licences-roles-and-fees/licensing/how-licensing-works-under-human-tissue>
- [89] Hummel, M., & Specht, C. (2019). Biobanks for future medicine. *Journal of Laboratory Medicine*, 43(6), 383–388. <https://doi.org/10.1515/labmed-2019-0106>
- [90] Hunt, C. J. (2019). Technical considerations in the freezing, low-temperature storage and thawing of stem cells for cellular therapies. *Transfusion Medicine and Hemotherapy*, 46(3), 134–150. <https://doi.org/10.1159/000497289>
- [91] Hutchison, J. R., Brooks, S. M., Kennedy, Z. C., Pope, T. R., Deatherage Kaiser, B. L., Victry, K. D., Warner, C. L., Oxford, K. L., Omberg, K. M., & Warner, M. G. (2019). Polysaccharide-based liquid storage and transport media for non-refrigerated preservation of bacterial pathogens. *PLOS ONE*, 14(9), Article e0221831. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221831>
- [92] International Freezer Challenge. Cold Storage Best Practices. International Laboratory Freezer Challenge. <https://www.freezerchallenge.org/best-practices-overview.html>

- [93] International Organization for Standardisation. (2018). ISO 14067:2018 - Greenhouse Gases-Carbon Footprint of Products—Requirements and Guidelines for Quantification. International Organization for Standardisation.
- [94] International Society for Biological and Environmental Repositories (ISBER). (2008). Collection, storage, retrieval, and distribution of biological materials for research. Cell Preservation Technology, 6(1). <https://doi.org/10.1089/cpt.2008.9997>
- [95] IPCC. (2021). The Physical Science Basis Climate Change 2021 Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf
- [96] Isaacs, E., & Schmelz, M. (2017). Come in out of the cold: Alternatives to freezing for microbial biorepositories. Clinical Microbiology Newsletter, 39(4), 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.clinmicnews.2017.01.005>
- [97] ISPE. (2016). Good practice guide: Controlled temperature chamber mapping and monitoring. International Society for Pharmaceutical Engineering.
- [98] ISPE. (2019). Commissioning and Qualification. Volume 5, 2nd Edition. International Society for Pharmaceutical Engineering.
- [99] James, C., Purnell, G. & James, S.J. A Review of Novel and Innovative Food Freezing Technologies. Food Bioprocess Technol 8, 1616–1634 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1542-8>
- [100] Jeon, S., Ko, J., Lee, H., & Jeong, J. H. (2025). Advanced model for a non-adiabatic capillary tube considering both subcooled liquid and non-equilibrium two-phase states of R-600a. International Journal of Refrigeration, 169, 140-151. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.10.031>
- [101] Jewell, S. D., Srinivasan, M., McCart, L. M., Williams, N., Grizzle, W. H., LiVolsi, V., MacLennan, G., & Sedmak, D. D. (2002). Analysis of the molecular quality of human tissues: an experience from the Cooperative Human Tissue Network. American journal of clinical pathology, 118(5), 733–741. <https://doi.org/10.1309/VPQL-RT21-X7YH-XDXK>
- [102] Johnson, R. W. (2004). The effect of blowing agent choice on energy use and global warming impact of a refrigerator. International Journal of Refrigeration, 27(7), 794–799.
- [103] Jones, A., Wolf, A., & Kwark, S. M. (2022). Refrigeration system development with limited charge of flammable refrigerant, R-290. Thermal Science and Engineering Progress, 34, 101392. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101392>
- [104] Kamenski, G., Ayazseven, S., Berndt, A., & et al. (2020). Clinical relevance of CYP2D6 polymorphisms in patients of an Austrian medical practice: A family practice-based observational study. Drugs - Real World Outcomes, 7, 63–73. <https://doi.org/10.1007/s40801-019-00177-4>
- [105] Kanbur, B. B., Kriezi, E. E., Markussen, W. B., Kærn, M. R., Busch, A., & Kristófersson, J. (2025). Framework for prediction of two-phase R-744 ejector performance based on integration of thermodynamic models with multiphase mixture CFD simulations. Applied Thermal Engineering, 258(Part C), 124888. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124888>
- [106] Kao, G. S., Kim, H. T., Daley, H., Ritz, J., Burger, S. R., Kelley, L., Vierra-Green, C., Flesch, S., Spellman, S., Miller, J., & Confer, D. (2011). Validation of short-term handling and storage conditions for marrow and peripheral blood stem cell products. Transfusion, 51(5), 1129-1138. <https://doi.org/10.1111/j.1537-2995.2010.02758.x>
- [107] Karim, A. S., & Jewett, M. C. (2018). Cell-free synthetic biology for pathway prototyping. In Methods in enzymology (Vol. 608, pp. 31-57). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2018.04.029>
- [108] Kasi, P., & Cheralathan, M. (2021). Review of cascade refrigeration systems for vaccine storage. Journal of Physics: Conference Series, 2054, Article 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2054/1/012041>
- [109] Kaushal, S., & Molinolo, A. (2021). Potential use of College of American Pathologists accredited biorepositories to bridge unmet need for medical refrigeration using ultralow temperature storage for COVID-19 vaccine or drug storage. Biopreservation and Biobanking, 19(3). <https://doi.org/10.1089/bio.2020.016>
- [110] Kaushal, S., & Molinolo, A. (2021). Potential use of College of American Pathologists accredited biorepositories to bridge unmet need for medical refrigeration using ultralow temperature storage for COVID-19 vaccine or drug storage. Biopreservation and Biobanking, 19(3). <https://doi.org/10.1089/bio.2020.0163>
- [111] Keri, C. (2019). Chapter 13 - Recycling cooling and freezing appliances. In V. Goodship, A. Stevels, & J. Huisman (Eds.), Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook (2nd ed., pp. 357-370). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102158-3.00013-6>

- [112] Kim, C.-H., & Kim, N.-H. (2021). Condensation heat transfer and pressure drop of low GWP R-404A-alternative refrigerants (R-448A, R-449A, R-455A, R-454C) in a 7.0-mm outer-diameter horizontal microfin tube. *International Journal of Refrigeration*, 126, 181-194. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.01.025>
- [113] Kim, M. S., Mulroy, W. J., & Didion, D. A. (1994). Performance evaluation of two azeotropic refrigerant mixtures of HFC-134a with R-290 (propane) and R-600a (isobutane). *ASME Journal of Energy Resources Technology*, 116(2), 148-154. <https://doi.org/10.1115/1.2906020>
- [114] Kim, M.-H., & Bullard, C. W. (2001). Dynamic characteristics of a R-410A split air-conditioning system. *International Journal of Refrigeration*, 24(7), 652-659. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(00\)00088-8](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(00)00088-8)
- [115] Komarov, S. G., & Stankus, S. V. (2011). Experimental study of speed of sound in gaseous refrigerant R-507A. *High Temperature*, 49, 150-153. <https://doi.org/10.1134/S0018151X1101010X>
- [116] Koritsoglou, K., Christou, V., Ntritsos, G., Tsoumanis, G., Tsiouras, M. G., Giannakeas, N., & Tzallas, A. T. (2020). Improving the Accuracy of Low-Cost Sensor Measurements for Freezer Automation. *Sensors*, 20(21), 6389. <https://doi.org/10.3390/s20216389>
- [117] Kumar, A., Lakshmi, B. J., Yang, S.-Y., & Wang, C.-C. (2024). Effect of viscosity grade (POE) on the smooth-tube pool boiling performance with R-1234ze(E) refrigerant. *Applied Thermal Engineering*, 241, 122328. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122328>
- [118] Labmode. (2023). Nordic Modular ULT Freezer System. Labmode. <https://labmode.co.uk/product/nordic-modular-ult-freezer-system/>
- [119] Landor, L. A. I., Stevenson, T., Mayers, K. M. J., & et al. (2024). DNA, RNA, and prokaryote community sample stability at different ultra-low temperature storage conditions. *Environmental Sustainability*, 7, 77-83. <https://doi.org/10.1007/s42398-023-00297-2>
- [120] Lee, B.-M., Gook, H.-H., Lee, S.-B., Lee, Y.-W., Park, D.-H., & Kim, N.-H. (2021). Condensation heat transfer and pressure drop of low GWP R-404A alternative refrigerants (R-448A, R-449A, R-455A, R-454C) in a 5.6 mm inner diameter horizontal smooth tube. *International Journal of Refrigeration*, 128, 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.12.025>
- [121] Lee, J. H., Bae, S. W., Bang, K. H., & Kim, M. H. (2002). Experimental and numerical research on condenser performance for R-22 and R-407C refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, 25(3), 372-382. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00012-3)
- [122] Lee, J.-H., Kim, J.-H., Heo, I.-Y., Yoon, J.-I., Son, C.-H., Nam, J.-W., Kim, H. J., Cha, S.-Y., & Seol, S.-H. (2024). Optimal charge amount for semiconductor chiller applying eco-friendly refrigerant R-744. *Case Studies in Thermal Engineering*, 59, 104461. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104461>
- [123] Leehey, M. H., Kujak, S., & Collins, C. (2024). Chemical stability of HFO and HCO refrigerants. In *International Refrigeration and Air Conditioning Conference (Paper 2555)*. Purdue University. <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/2555>
- [124] Legett R. Field demonstration of high-efficiency ultra-low-temperature laboratory freezers. *Energy Efficiency & Renewable Energy: US Department of Energy*; 2014. Available from: https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/11/f19/ult_demo_report.pdf
- [125] Legett, R. (2014). Field demonstration of high-efficiency ultra-low-temperature laboratory freezers. *Energy Efficiency & Renewable Energy: US Department of Energy*. https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/11/f19/ult_demo_report.pdf
- [126] Lemmon, E. W. (2003). Pseudo-pure fluid equations of state for the refrigerant blends R-410A, R-404A, R-507A, and R-407C. *International Journal of Thermophysics*, 24, 991-1006. <https://doi.org/10.1023/A:1025048800563>
- [127] Li, Q. C., Qiu, F., Cohen, K., & et al. (2012). Best practices for drug substance stress and stability studies during early-stage development Part I—Conducting drug substance solid stress to support phase Ia clinical trials. *Journal of Pharmaceutical Innovation*, 7, 214-224. <https://doi.org/10.1007/s12247-012-9136-8>
- [128] Li, R., Johnson, R., Yu, G., McKenna, D. H., & Hubel, A. (2019). Preservation of cell-based immunotherapies for clinical trials. *Cytotherapy*, 21(9), 943-957. <https://doi.org/10.1016/j.jcyt.2019.06.010>
- [129] Li, Y., Pan, X., Liao, X., & Xing, Z. (2022). A data-driven energy management strategy based on performance prediction for cascade refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*, 136, 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.01.012>

- [130] Lim, J.Y., Kim, N.A., Lim, D.G. et al. Process cycle development of freeze drying for therapeutic proteins with stability evaluation. *Journal of Pharmaceutical Investigation* 46, 519–536 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40005-016-0275-7>
- [131] Liu, J., Yu, J., & Yan, G. (2024). Experimental study on Joule-Thomson refrigeration system with R1150/R290/R601a for ultra-low temperature medical freezer. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124015>
- [132] Liu, Z., Bai, M., Tan, H., Ling, Y., & Cao, Z. (2023). Experimental test on the performance of a -80 °C cascade refrigeration unit using refrigerants R290-R170 for COVID-19 vaccines storage. *Journal of Building Engineering*, 63(A), 105537. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105537>
- [133] Liu, Z., Ji, S., Tan, H., Yang, D., & Cao, Z. (2023). An ultralow-temperature cascade refrigeration unit with natural refrigerant pair R290-R170: Performance evaluation under different ambient and freezing temperatures. *Thermal Science and Engineering Progress*. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102202>
- [134] Llopis, R., Calleja-Anta, D., Sánchez, D., Nebot-Andrés, L., Catalán-Gil, J., & Cabello, R. (2019). R-454C, R-459B, R-457A and R-455A as low-GWP replacements of R-404A: Experimental evaluation and optimization. *International Journal of Refrigeration*, 106, 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.06.013>
- [135] Llopis, R., Calleja-Anta, D., Sánchez, D., Nebot-Andrés, L., Catalán-Gil, J., & Cabello, R. (2019). R-454C, R-459B, R-457A, and R-455A as low-GWP replacements of R-404A: Experimental evaluation and optimization. *International Journal of Refrigeration*, 106, 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.06.013>
- [136] Llopis, R., Sánchez, D., Cabello, R., Catalán-Gil, J., & Nebot-Andrés, L. (2017). Experimental analysis of R-450A and R-513A as replacements of R-134a and R-507A in a medium temperature commercial refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 84, 52-66. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.08.022>
- [137] Lloyd, J., Lydon, P., Ouhichi, R., & Zaffran, M. (2015). Reducing the loss of vaccines from accidental freezing in the cold chain: the experience of continuous temperature monitoring in Tunisia. *Vaccine*, 33(7), 902–907. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2014.10.080>
- [138] Long, N. V. D., Lee, D. Y., Han, T. H., & et al. (2020). Purification of R-12 for refrigerant reclamation using existing industrial-scale batch distillation: Design, optimization, simulation, and experimental studies. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 37, 1823–1828. <https://doi.org/10.1007/s11814-020-0631-1>
- [139] Lou, J. J., Mirsadraei, L., Sanchez, D. E., Wilson, R. W., Shabihkhani, M., Lucey, G. M., Wei, B., Singer, E. J., Mareninov, S., & Yong, W. H. (2014). A review of room temperature storage of biospecimen tissue and nucleic acids for anatomic pathology laboratories and biorepositories. *Clinical Biochemistry*, 47(4–5), 267-273. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2013.12.011>
- [140] Lucas, P., Pries, J., Wei, S., & Wuttig, M. (2022). The glass transition of water, insight from phase change materials. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1(14), 100084.
- [141] Macri, C., De León, Á., & Flohr, F. (2024). Comparison of performance and efficiency of different refrigerants at high load conditions and their impact on CO₂e emissions. In *CO₂ Reduction for Transportation Systems Conference* (pp. 1-7). Daikin Chemical Europe GmbH. <https://doi.org/10.4271/2024-37-0029>
- [142] Mager, S. R., Oomen, M. H. A., Morente, M. M., Ratcliffe, C., Knox, K., Kerr, D. J., Pezzella, F., & Riegman, P. H. J. (2007). Standard operating procedure for the collection of fresh frozen tissue samples. *European Journal of Cancer*, 43(5), 828-834. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2007.01.002>
- [143] Mallett, C. P. (1993). *Frozen food technology*. Springer. Retrieved from https://books.google.nl/books?hl=en&lr=&id=rzk9b3NpUzWC&oi=fnd&pg=PA20&dq=+William+Cullen+and+freezing&ots=1fbQor9ixv&sig=AhoQszLuugb-DMAjXxQjGfj8g&redir_esc=y#v=onepage&q=William%20Cullen%20and%20freezing&f=false
- [144] Maqbool, S., & Maddali, R. (2024). Effect of system configuration on the performance of a hybrid air conditioning system based on R-1234yf. *Applied Thermal Engineering*, 236(Part B), 121624. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121624>
- [145] McColloster, P. J., & Martin-de-Nicolas, A. (2014). Vaccine refrigeration: thinking outside of the box. *Human vaccines & immunotherapeutics*, 10(4), 1126–1128. <https://doi.org/10.4161/hv.27660>
- [146] McLinden, M. O., & Huber, M. L. (2020). (R)Evolution of refrigerants. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 65(9), 4176–4193. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00338>
- [147] McLintock AH (2015) Refrigeration. In: *An encyclopedia of New Zealand 1966*

- [148] Medical Research Council. (2019). Research and the Human Tissue Act 2004: Disposal. Medical Research Council Support Centre. <https://www.ukri.org/wp-content/uploads/2021/11/MRC-301121-ResearchHumanTissueAct2004-DisposalSummary.pdf>
- [149] Medical University of Graz. (2024). Biobank Graz. Medical University of Graz. <https://biobank.medunigraz.at/en/>
- [150] Meir, K., Cohen, Y., Mee, B., & Gafney, E. (2014). Biobank networking for dissemination of data and resources: An overview. *J Bioreposit Sci Appl Med*, 2, 29.
- [151] Mickoleit, E., Breitkopf, C., & Jäger, A. (2021). Influence of equations of state and mixture models on the design of a refrigeration process. *International Journal of Refrigeration*, 121, 193-205. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.10.017>
- [152] Middelburg, R. A., Borkent, B., Jansen, M., van de Watering, L. M. G., Wiersum-Osselton, J. C., Schipperus, M. R., Beckers, E. A. M., & Briët, E. (2011). Storage time of blood products and transfusion-related acute lung injury. *Transfusion*. <https://doi.org/10.1111/j.1537-2995.2011.03352.x>
- [153] Midzic Kurtagic, S., Kadric, D., Alispahic, M., Blazevic, R., & Hadziahmetovic, H. (2022). Inventory of refrigerants in use for commercial purposes in BiH. In B. Katalinic (Ed.), *Proceedings of the 33rd DAAAM International Symposium* (pp. 143-150). DAAAM International. <https://doi.org/10.2507/33rd.daaam.proceedings.020>
- [154] Ministry of Culture & Heritage (2015) First shipment of frozen meat leaves NZ 15 February 1882. Retrieved from <http://www.nzhistory.net.nz/frst-shipment-offrozen-meat-leaves-nz>
- [155] Miyawaki, K., & Shikazono, N. (2024). Experimental evaluation of NIR spectroscopic characteristics of liquid R32, R1234yf, and R454C refrigerants. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 156, 107633. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107633>
- [156] Moerman, F., & Fikiin, K. (2016). Hygienic design of air-blast freezing systems. In *Handbook of hygiene control in the food industry* (2nd ed., pp. 271-316). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100155-4.00020-0>
- [157] Mohapatra, A., Prusty, A. K., Nanda, J., Das, S. N., & Pandey, H. (2021). Potential refrigerants and their effect on the environment—a review. In S. K. Acharya & D. P. Mishra (Eds.), *Current advances in mechanical engineering* (Lecture Notes in Mechanical Engineering). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4795-3_23
- [158] Mota-Babiloni, A., Fernández-Moreno, A., Giménez-Prades, P., Udriou, C.-M., & Navarro-Esbrí, J. (2023). Ternary refrigerant blends for ultra-low temperature refrigeration. *International Journal of Refrigeration*, 148, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.01.006>
- [159] Mota-Babiloni, A., Mastani Joybari, M., Navarro-Esbrí, J., Mateu-Royo, C., Barragán-Cervera, Á., Amat-Albuixech, M., & Molés, F. (2020). Ultralow-temperature refrigeration systems: Configurations and refrigerants to reduce the environmental impact. *International Journal of Refrigeration*, 111, 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.11.016>
- [160] Muenz, R. (2021). How to operate and maintain an ultralow temperature freezer. *Lab Manager*. <https://www.labmanager.com/big-picture/lab-ultralow-cold-storage/how-to-operate-and-maintain-an-ultralow-temperature-freezer-24970>
- [161] Muir, E. B. (1990). Commercial refrigeration and CFCs. *International Journal of Refrigeration*, 13(2), 106-111. [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(90\)90009-L](https://doi.org/10.1016/0140-7007(90)90009-L)
- [162] Naber S. P. (1996). Continuing role of a frozen-tissue bank in molecular pathology. *Diagnostic molecular pathology : the American journal of surgical pathology, part B*, 5(4), 253-259. <https://doi.org/10.1097/00019606-199612000-00005>
- [163] Narute, S., Joshi, K., Rane, V., & Kokate, P. (2021). A brief review on development of refrigerants and their applications. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(7), 4885. <http://www.irjet.net>
- [164] Nasarabadi, S., Hogan, M., & Nelson, J. (2018). Biobanking in precision medicine. *Current Pharmacology Reports*, 4, 91-101. <https://doi.org/10.1007/s40495-018-0123-8>
- [165] Naskar, R., & Mandal, R. (2023). A competitive study of all natural refrigerants implementation on 1.5-ton domestic air conditioners using Cool Pack software. *Industrial Engineering Journal*, 52(9), No. 1. ISSN: 0970-2555.
- [166] National Institutes of Health. (2019). National Institutes of Health (NIH)—all of us. National Institutes of Health. <https://allofus.nih.gov/>

- [167] Nederhand, R. J., Droog, S., Kluft, C., Simoons, M. L., de Maat, M. P., & Investigators of the EUROPA trial (2003). Logistics and quality control for DNA sampling in large multicenter studies. *Journal of thrombosis and hemostasis*: JTH, 1(5), 987–991. <https://doi.org/10.1046/j.1538-7836.2003.00216.x>
- [168] Ong, K. S., & Haider-E-Alahi, M. (2003). Performance of a R-134a-filled thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 23(18), 2373–2381. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00207-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00207-2)
- [169] Owusu-Apenten, R. & Vieira, E.R. (2023). Chapter 13 Low-Temperature Preservation. In: *Book elementary Food Science*. Food Science Text Series. Springer, 5th edition, pp. 289–316. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-65433-7_13
- [170] Pan, M., Zhao, H., Liang, D., Zhu, Y., Liang, Y., & Bao, G. (2020). A review of the cascade refrigeration system. *Energies*, 13(9), 2254. <https://doi.org/10.3390/en13092254>
- [171] Paradiso, A. V., Daidone, M. G., Canzonieri, V., & Zito, A. (2018). Biobanks and scientists: Supply and demand. *Journal of Translational Medicine*, 16(1), 136. <https://doi.org/10.1186/s12967-018-1505-8>
- [172] Pennington ME (1912) The hygienic and economic results of refrigeration in the conservation of poultry and eggs. *Am J Public Health* 2(11):840–848. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18008742>
- [173] Petrick, G.M. 2006. The arbiters of taste: producers, consumers, and the industrialization of taste in America, 1900–1960. Doctoral dissertation, University of Delaware.
- [174] Pharmaceutical Inspection Co-operation Scheme. (2023). Guide to good manufacturing practice for medicinal products part I (PE 009-17). PIC/S Secretariat. <https://www.picscheme.org>
- [175] PHcbi (2024). Choosing a reliable ULT freezer: What you need to know. Retrieved from: https://www.phchd.com/us/biomedical/blog/choosing-a-reliable-ult-freezer-what-you-need-to-know?mtm_source=google&mtm_medium=cpc&mtm_campaign=21676150519&mtm_cid=21676150519&mtm_kwd=&mtm_content=&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAgdC6BhCgARIsAPWNWH3HWD6O4q4oY7PaoZsPUYSWoxC7salpyCivuOlz51WkYJ86su5nsRAaAgMxEALw_wcB [Accessed on 07DEC2024]
- [176] Pilla, T. S., Sunkari, P. K. G., Padmanabhuni, S. L., Nair, S. S., & Dondapati, R. S. (2017). Experimental evaluation of mechanical performance of the compressor with mixed refrigerants R-290 and R-600a. *Energy Procedia*, 109, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.065>
- [177] Powell, R. L. (2002). CFC phase-out: Have we met the challenge? *Journal of Fluorine Chemistry*, 114(2), 237–250. [https://doi.org/10.1016/S0022-1139\(02\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1139(02)00030-1)
- [178] Powell, S., Molinolo, A., Masmila, E., & Kaushal, S. (2019). Real-Time Temperature Mapping in Ultra-Low Freezers as a Standard Quality Assessment. *Biopreservation and biobanking*, 17(2), 139–142. <https://doi.org/10.1089/bio.2018.0108>
- [179] Prasad, U. S., Mishra, R. S., & Das, R. K. (2024). Study of vapor compression refrigeration system with suspended nanoparticles in the low GWP refrigerant. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 1–26. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30596-4>
- [180] Radin, J. (2017). *Life on ice: A history of new uses for cold blood*. Chicago: The University of Chicago Press.
- [181] Reddy, V. S., Panwar, N. L., & Kaushik, S. C. (2012). Exergetic analysis of a vapour compression refrigeration system with R134a, R143a, R152a, R404A, R407C, R410A, R502, and R507A. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14, 47–53. <https://doi.org/10.1007/s10098-011-0374-0>
- [182] Rees J (2013) *Refrigeration nation: a history of ice, appliances, and enterprise in America*. Retrieved from <https://books.google.co.uk/books?id=JeoEAQAAQBAJ>
- [183] Ribeiro, R. P. P. L., Sosa, J. E., Araújo, J. M. M., Pereiro, A. B., & Mota, J. P. B. (2023). Vacuum swing adsorption for R-32 recovery from R-410A refrigerant blend. *International Journal of Refrigeration*, 150, 253–264. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.01.020>
- [184] Richmond Scientific. (2022). Reducing the energy used by ULT freezers in the lab. Richmond Scientific. <https://www.richmondscientific.com/reduce-energy-used-by-ult-freezers-in-the-lab>
- [185] Robaczewski, C., Leehey, M. H., & DeDeker, Z. (2024). Material compatibility of seal materials with low GWP refrigerants and lubricant. In *International Compressor Engineering Conference (Paper 2826)*. Purdue University. <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2826>
- [186] Robertson, J., Franzel, L., & Maire, D. (2017). Innovations in cold chain equipment for immunization supply chains. *Vaccine*, 35(17), 2252–2259. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2016.11.094>

- [187] Robinson, L.M. 1997. Safeguarded by your refrigerator: Mary Engle Pennington's Struggle with the National Association of Ice Industries. In *Rethinking home economics: Women and the history of a profession*, ed. Sarah Stage and Virginia B. Vincenti, 253–270. Ithaca: Cornell University Press.
- [188] Rogers, J., Carolin, T., Vaught, J., & Compton, C. (2011). Biobankonomics: A taxonomy for evaluating the economic benefits of standardized centralized human biobanking for translational research. *JNCI Monographs*, 2011(42), 32–38.
- [189] Saeed, M. Z., Contiero, L., Blust, S., Allouche, Y., Hafner, A., & Eikevik, T. M. (2023). Ultra-low-temperature refrigeration systems: A review and performance comparison of refrigerants and configurations. *Energies*, 16(21), 7274. <https://doi.org/10.3390/en16217274>
- [190] Saeed, M. Z., Contiero, L., Blust, S., Allouche, Y., Hafner, A., & Eikevik, T. M. (2023). Ultra-Low-Temperature Refrigeration Systems: A Review and Performance Comparison of Refrigerants and Configurations. *Energies*, 16(21), 7274. <https://doi.org/10.3390/en16217274>
- [191] Samuel, G., & Lucivero, F., & Lucassen, A. M. (2022). Sustainable biobanks: A case study for a green global bioethics. *Global Bioethics*, 33(1), 50–64.
- [192] Samuel, G., & Sims, J. M. (2023). Drivers and constraints to environmental sustainability in UK-based biobanking: Balancing resource efficiency and future value. *BMC Medical Ethics*, 24(1).
- [193] Saravacos, G., & Kostaropoulos, A. E. (2016). Refrigeration and freezing equipment. In *Handbook of food processing equipment (Food Engineering Series)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25020-5_9
- [194] Sato, K., Tamaki, K., Okajima, H., & Katsumata, Y. (1988). Long-term storage of blood samples as whole blood at extremely low temperatures for methemoglobin determination. *Forensic science international*, 37(2), 99–104. [https://doi.org/10.1016/0379-0738\(88\)90098-9](https://doi.org/10.1016/0379-0738(88)90098-9)
- [195] Scientific Laboratory Supplies. (2023). ULT Freezer best practice: Ambient air temperature. <https://www.scientificlabs.co.uk/news/article/1181>
- [196] Scudellari, M. (2013). Biobank managers bemoan underuse of collected samples. *Nature Medicine*, 19(3), 253–263.
- [197] Shabihkhani, M., Lucey, G. M., Wei, B., Mareninov, S., Lou, J. J., Vinters, H. V., Singer, E. J., Cloughesy, T. F., & Yong, W. H. (2014). The procurement, storage, and quality assurance of frozen blood and tissue biospecimens in pathology, biorepository, and biobank settings. *Clinical biochemistry*, 47(4-5), 258–266. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2014.01.002>
- [198] Shaw, G. F. (2021). The Low Down on Ultralow Temperature Freezers. *Endocrine News*, 40+. <https://link.gale.com/apps/doc/A688004802/AONE?u=anon~103b3ad0&sid=googleScholar&xid=d263f033>
- [199] She, R. C., & Petti, C. A. (2015). Procedures for the storage of microorganisms. In J. H. Jorgensen, K. C. Carroll, G. Funke, M. A. Pfaller, M. L. Landry, S. S. Richter, & D. W. Warnock (Eds.), *Manual of clinical microbiology* (11th ed.). American Society for Microbiology Press. <https://doi.org/10.1128/9781555817381.ch11>
- [200] Shehu, D., Kim, M.-O., Rosendo, J., Krogan, N., Morgan, D. O., & Guglielmo, B. J. (2024). Institutional conversion to energy-efficient ultra-low freezers decreases carbon footprint and reduces energy costs. *Biopreservation and Biobanking*. <https://doi.org/10.1089/bio.2024.007>
- [201] Six, P., Valtz, A., Zhou, Y., Yang, Z., & Coquelet, C. (2024). Experimental measurements and correlation of vapor–liquid equilibrium data for the difluoromethane (R32) + 1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)) binary system from 254 to 348 K. *Fluid Phase Equilibria*, 581, 114072. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2024.114072>
- [202] Söylemez, E. (2024). Energy and Conventional Exergy Analysis of an Integrated Transcritical CO₂ (R-744) Refrigeration System. *Energies*, 17(2), 479. <https://doi.org/10.3390/en17020479>
- [203] Sperling, S., Vinholt, P. J., Sprogø, U., Yazer, M. H., Frederiksen, H., & Nielsen, C. (2019). The effects of storage on platelet function in different blood products. *Hematology*, 24(1), 89-96. <https://doi.org/10.1080/10245332.2018.1516599>
- [204] Sugrue, M. W., Hutcheson, C. E., Fisk, D. D., Roberts, C. G., Mageed, A., Wingard, J. R., & Moreb, J. S. (2009). The effect of overnight storage of leukapheresis stem cell products on cell viability, recovery, and cost. *Journal of Hematotherapy*, 7(5). <https://doi.org/10.1089/scd.1.1998.7.431>
- [205] Sun, J., Zhang, M., Gehl, A., & et al. (2022). Dataset of ultralow temperature refrigeration for COVID-19 vaccine distribution solution. *Scientific Data*, 9, 67. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01167-y>

- [206] Sun, J., Zhang, M., Gehl, A., Fricke, B., Nawaz, K., Gluesenkamp, K., Shen, B., Munk, J., Hagerman, J., & Lapsa, M. (2022). COVID-19 vaccine distribution solution to the last mile challenge: Experimental and simulation studies of ultra-low temperature refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 133, 313-325. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.11.005>
- [207] Tan, H., Xu, L., Yang, L., Bai, M., & Liu, Z. (2022). Operation performance of an ultralow temperature cascade refrigeration freezer with environmentally friendly refrigerants R290-R170. *University of Electronic Science and Technology of China Zhongshan Institute*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2004580/v1>
- [208] Tang, W., Hu, Z., Muallem, H., & Gulley, M. L. (2012). Quality assurance of RNA expression profiling in clinical laboratories. *The Journal of molecular diagnostics: JMD*, 14(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jmoldx.2011.09.003>
- [209] Thermo scientific (2024). Top considerations for selecting a ULT Freezer – application. Retrieved from: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LPD/Product-Information/Top-Considerations-ULT-Space-Constraints-TNTPCONSPACE-EN.pdf> [Accessed on 07DEC2024]
- [210] Thevenot, R. 1979. A history of refrigeration throughout the world. Trans. from French J.C. Fidler. Paris: International Institute of Refrigeration.
- [211] Tica, G., & Grubic, A. R. (2019). Mitigation of climate change from the aspect of controlling F-gases in the field of cooling technology. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 477, 012056. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/477/1/012056>
- [212] Troyer, D. (2008). Biorepository Standards and Protocols for Collecting, Processing, and Storing Human Tissues. In: Liu, B.CS., Ehrlich, J.R. (eds) *Tissue Proteomics. Methods in Molecular Biology™*, vol 441. Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-047-2_13
- [213] Tsimpoukis, D., Syngounas, E., Bellos, E., Koukou, M., Tzivanidis, C., Anagnostatos, S., & Vrachopoulos, M. G. (2024). Data-driven energy efficiency comparison between operating R744 and R448A supermarket refrigeration systems based on hybrid experimental-simulation analysis. *Thermal Science and Engineering Progress*, 53, 102776. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102776>
- [214] U.S. Food and Drug Administration. (2024a). Title 21--Food and drugs, Chapter I--Food and Drug Administration, Department of Health and Human Services, Subchapter A - General, Part 11 Electronic records; electronic signatures. Retrieved from <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?CFRPart=11>
- [215] U.S. Food and Drug Administration. (2024b). Title 21--Food and drugs, Chapter I--Food and Drug Administration, Department of Health and Human Services, Subchapter C - Drugs: General, Part 210 Current good manufacturing practice in manufacturing, processing, packing, or holding of drugs; general. Retrieved from URL The American Society of Mechanical Engineers (2024). Bioprocessing Equipment. Retrieved from <https://files.asme.org/Catalog/Codes/PrintBook/35606.pdf>
- [216] Udroui, C.-M., Mota-Babiloni, A., & Navarro-Esbrí, J. (2022). Advanced two-stage cascade configurations for energy-efficient -80 °C refrigeration. *Energy Conversion and Management*, 267, 115907. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115907>
- [217] UK Biocentre. (2023). The Centre for Biomedical Services. UK Biocentre. <https://www.ukbiocentre.com/pdf/UKBiocentre.pdf>
- [218] UK Brain Banks Network. (2024). Brain Banks. UK Brain Banks Network. <https://brainbanknetwork.ac.uk/BrainBank/BrainBanks>
- [219] UK Government. (2023). Greenhouse Gas Reporting: Conversion Factors 2023. Department for Energy Security and Net Zero.
- [220] UKCRC Tissue Directory and Coordination Centre. (2021). State of Biobanking in the UK: Future Directions for Coordination. https://www.biobankinguk.org/wp-content/uploads/UKCRCTDCC_2030VisionDraftConsultation.pdf
- [221] UKCRC Tissue Directory and Coordination Centre. (2024). About Us. UKCRC Tissue Directory and Coordination Centre. <https://www.biobankinguk.org/about-us/>
- [222] UKRI. (2011). UK Funders' Vision for Human Tissue Resources. UKRI. <https://www.ukcrc.org/wp-content/uploads/2014/03/Vision+for+human+tissue+resources.pdf>
- [223] University of Colorado Boulder. (2023). Freezer Energy Efforts. Environmental Center. University of Colorado, Boulder. <https://www.colorado.edu/center/greenlabs/lab-energy-efforts/freezers/70-oc-efforts>

- [224] University of Edinburgh—School of Chemistry. (2014). Standard Operating Procedure—Liquid Nitrogen - Storage, Use & Transportation Guidance & Code of Practice. University of Edinburgh. <https://www.chem.ed.ac.uk/sites/default/files/safety/documents/cryogenic.pdf>
- [225] University of Exeter. ULT freezers. Sustainable Labs. University of Exeter. <https://www.exeter.ac.uk/about/sustainability/whatweareng/sustainablelabs/energy/ultfreezers/>
- [226] van der Stijl, R., Manders, P., & Eijdens, E. W. H. M. (2021). Recommendations for a Dutch sustainable biobanking environment. *Biopreservation and Biobanking*, 19(3), 228–240. <https://doi.org/10.1089/bio.2021.0011>
- [227] Wang, L. Y., Cui, J. J., Liu, J. Y., & et al. (2018). Gene-gene and gene-environment interaction data for platinum-based chemotherapy in non-small cell lung cancer. *Scientific Data*, 5, Article 180284. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.284>
- [228] Wang, N., Carlozo, M. N., Marin-Rimoldi, E., Befort, B. J., Dowling, A. W., & Maginn, E. J. (2023). Machine learning-enabled development of accurate force fields for refrigerants. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 19(14). <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.3c00057>
- [229] Wen, M.-Y., & Ho, C.-Y. (2005). Evaporation heat transfer and pressure drop characteristics of R-290 (propane), R-600 (butane), and a mixture of R-290/R-600 in the three-lines serpentine small-tube bank. *Applied Thermal Engineering*, 25(17-18), 2921-2936. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.02.013>
- [230] Wen, M.-Y., Ho, C.-Y., & Hsieh, J.-M. (2006). Condensation heat transfer and pressure drop characteristics of R-290 (propane), R-600 (butane), and a mixture of R-290/R-600 in the serpentine small-tube bank. *Applied Thermal Engineering*, 26(16), 2045-2053. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.10.001>
- [231] WHO. (2014). Temperature mapping of storage areas. World Health Organization, Technical Report Series, No. 961, 2011 Annex 9.
- [232] WHO. (2015). Temperature mapping of storage areas. World Health Organization, Technical Report Series, No. 961, 2011, Supplement 8.
- [233] Wolf, L. E., Bouley, T. A., & McCulloch, C. E. (2010). Genetic research with stored biological materials: Ethics and practice. *IRB*, 32(2), 7-18. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3052851/>
- [234] Xiao, R., Zhang, Y., Liu, X., & Yuan, Z. (2015). A life-cycle assessment of household refrigerators in China. *Journal of Cleaner Production*, 15(95), 301–310.
- [235] Xu, Q., Deng, B., Wang, Y., Liu, W., & Chen, G. (2023). Small, affordable, ultra-low-temperature vapor-compression and thermoelectric hybrid freezer for clinical applications. *Cell Reports Physical Science*, 4(101735). <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101735>
- [236] Xu, Q., Deng, B., Wang, Y., Liu, W., & Chen, G. (2023). Small, affordable, ultra-low-temperature vapor-compression and thermoelectric hybrid freezer for clinical applications. *Cell Reports Physical Science*, 4(12), Article 12101735. <https://doi.org/10.1016/j.xprst.2023.12101735>
- [237] Yang, Cheng-Min; Shen, Bo; Muneeshwaran, M; Nawaz, Kashif; Pickles, Ernest Calvin; and Hartnett, Christopher, "Performance Evaluation Of Various Configurations For Domestic Refrigerators With R-600a" (2024). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 2656. <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/2656>
- [238] Yang, M.-H., & Yeh, R.-H. (2022). Investigation of the potential of R717 blends as working fluids in the organic Rankine cycle (ORC) for ocean thermal energy conversion (OTEC). *Energy*, 245, 123317. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123317>
- [239] Ye, G., Ye, M., Yang, J., Wu, X., Yan, Y., Guo, Z., & Han, X. (2024). Investigation on absorption and separation performance of R-32, R-125, R-134a, and R-1234yf refrigerants using EMIM-based ionic liquids. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(5). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c04730>
- [240] Ye, W., Yan, Y., Zhou, Z., & Yang, P. (2024). Parametric analysis and performance prediction of an ultra-low temperature cascade refrigeration freezer based on an artificial neural network. *Case Studies in Thermal Engineering*, 55, 104162. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104162>
- [241] Zhang, W., Li, W., Cernicin, V., & Hrnjak, P. (2024). Theoretical and experimental investigation on the effects of internal heat exchangers on a reversible automobile R744 air-conditioning system under various operating conditions. *Applied Thermal Engineering*, 236(Part B), 121569. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121569>
- [242] Zhang, Y., Yang, Z., Zhang, C. et al. Thermodynamic analysis of a lower-GWP and nonflammable alternative to R507A. *J Therm Anal Calorim* 148, 5613–5623 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12121-4>

- [243] Zhao, H., Hou, Y., & Chen, L. (2009). Experimental study on a small Brayton air refrigerator under -120°C . *Applied Thermal Engineering*, 29(8–9), 1702–1706. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.07.028>
- [244] Zheng, L., & Sun, D.-W. (2006). Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes—a review. *Trends in Food Science & Technology*, 17(1), 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.08.010>
- [245] Zimkus, B. M., & Ford, L. S. (2014). Best practices for genetic resources associated with natural history collections: Recommendations for practical implementation. *Collection Forum*, 28(1-2), 77–112. <https://doi.org/10.14351/0831-0005-28.1.77>

Παραρτήματα

Ανάλυση Δεδομένων

Λεζάντα	Περιγραφή
Freezer ID	Ονομασία Καταψύκτη
Freezer Type	Είδος Καταψύκτη
Test	Δοκιμασία
Temperature	Θερμοκρασία
Avrg_P.#	Μέση Θερμοκρασία θέσης #
Avrg_Avrg	Μέση Θερμοκρασία μέσων θερμοκρασιών ανά θέση
Mx_P.#	Μέγιστη Θερμοκρασία Θέσης #
Mx_Avrg	Μέση Θερμοκρασία Μέγιστων Θερμοκρασιών ανά θέση
Mn_P.#	Ελάχιστη Θερμοκρασία Θέσης #
Mn_Avrg	Μέση Θερμοκρασία Ελάχιστων Θερμοκρασιών ανά θέση
StD_P.#	Τυπική Απόκλιση Θερμοκρασίας στην θέση #
StD_Avrg	Μέση Τυπική Απόκλιση των Τυπικών Αποκλίσεων Θερμοκρασίας ανά θέση
CV_P#	Συντελεστής Διακύμανσης Θέσης #
CV_Avrg	Μέσος Συντελεστής Διακύμανσης των Συντελεστών Διακύμανσης ανά θέση
R_P#	Διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης παρατηρούμενης θερμοκρασίας θέσης #
R_Avrg	Μέση Διαφορά των διαφορών μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης παρατηρούμενης θερμοκρασίας ανά θέση
OD_RT	Δοκιμασία Ανοίγματος Πόρτας-Χρόνος επιστροφής εντός προδιαγραφών
OD_Mx_P#	Δοκιμασία Ανοίγματος Πόρτας - Μέγιστη Παρατηρούμενη θερμοκρασία Θέσης #
OD_Mx_Avrg	Δοκιμασία Ανοίγματος Πόρτας-Μέση τιμή των μέγιστων παρατηρούμενων θερμοκρασιών ανά θέση
PF_TTGOOS	Δοκιμασία Διακοπής Ρεύματος - Χρόνος Απόκλισης από τις προδιαγραφές
PF_RT	Δοκιμασία Διακοπής Ρεύματος - Χρόνος Επιστροφής εντός προδιαγραφών
PF_Mx_P#	Δοκιμασία Διακοπής Ρεύματος - Μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία Θέσης #
PF_Mx_Avrg	Δοκιμασία Διακοπής Ρεύματος - Μέση τιμή των μέγιστων παρατηρούμενων θερμοκρασιών ανά θέση

Δεδομένα 24ωρης μέτρησης

Freezer ID	Freezer Type	Test	Temperature	Avg_P.1	Avg_P.2	Avg_P.3	Avg_P.4	Avg_P.5	Avg_P.6	Avg_Avg	Mx_P.1	Mx_P.2	Mx_P.3	Mx_P.4	Mx_P.5	Mx_P.6	Mx_Avg	Mn_P.1	Mn_P.2	Mn_P.3	Mn_P.4	Mn_P.5	Mn_P.6	Mn_Avg
TE.21	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-44.0	-42.8	-42.5	-42.3	-41.6	-41.3	-42.4	-37.9	-39.2	-39.2	-39.1	-35.9	-35.5	-37.8	-49.5	-46.2	-47.1	-46.5	-43.9	-43.7	-46.2
TE.22	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-43.7	-42.7	-42.5	-43.3	-41.6	-41.2	-42.5	-40.4	-40.7	-40.6	-39.1	-39.4	-39.3	-39.9	-48.0	-45.5	-45.4	-46.6	-44.8	-44.6	-45.8
TE.23	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-43.6	-42.7	-42.5	-42.3	-41.6	-41.2	-42.3	-40.2	-40.8	-40.7	-37.8	-36.0	-38.2	-39.0	-48.1	-46.5	-45.3	-45.2	-44.1	-44.1	-45.6
TE.24	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-43.6	-43.6	-42.4	-42.2	-42.5	-41.1	-42.6	-40.4	-36.4	-38.6	-40.4	-37.3	-39.2	-38.7	-47.4	-46.4	-45.1	-44.9	-45.1	-44.3	-45.5
TE.25	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-43.4	-42.6	-42.4	-42.2	-41.5	-41.1	-42.2	-40.6	-40.3	-38.6	-38.2	-36.8	-34.2	-38.1	-46.8	-45.9	-45.1	-45.3	-45.0	-42.8	-45.2
TE.26	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-42.4	-42.6	-42.4	-42.1	-41.5	-41.0	-42.0	-40.2	-40.8	-34.6	-38.9	-35.4	-39.2	-38.2	-47.9	-45.2	-46.3	-46.3	-43.8	-43.8	-45.6
TE.27	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-43.3	-42.6	-42.4	-42.0	-41.5	-41.0	-42.1	-40.2	-40.9	-39.1	-38.2	-38.1	-39.1	-39.3	-47.6	-44.8	-45.3	-44.2	-44.6	-43.9	-45.1
TE.28	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-44.1	-42.6	-42.4	-41.3	-42.4	-41.7	-42.4	-40.7	-38.1	-39.3	-37.1	-35.8	-36.4	-37.9	-46.6	-47.2	-45.1	-45.1	-43.9	-43.5	-45.2
TE.29	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-43.1	-42.6	-42.3	-40.2	-41.4	-40.7	-41.7	-40.2	-40.6	-37.8	-38.4	-38.1	-36.4	-38.6	-46.9	-46.4	-45.4	-44.3	-44.8	-43.5	-45.2
TE.30	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-43.0	-42.6	-42.3	-41.9	-41.4	-42.7	-42.3	-39.5	-36.3	-38.2	-37.3	-37.4	-36.1	-37.5	-46.3	-45.7	-45.4	-45.1	-44.2	-43.2	-45.0
TE.31	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-42.9	-42.5	-42.3	-41.9	-41.4	-41.6	-42.1	-40.1	-38.6	-38.8	-39.5	-37.5	-36.1	-38.4	-46.8	-45.9	-45.2	-44.8	-44.7	-43.3	-45.1
TE.32	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-42.7	-42.6	-42.5	-42.4	-42.0	-41.4	-42.2	-36.6	-38.1	-38.2	-36.8	-38.3	-36.7	-37.5	-46.6	-46.0	-45.4	-45.4	-44.1	-44.3	-45.3
TE.33	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-42.7	-42.5	-42.4	-42.3	-41.5	-41.3	-42.1	-37.6	-38.3	-37.6	-39.2	-36.8	-37.0	-37.8	-45.7	-45.1	-45.1	-44.8	-44.7	-44.3	-45.0
TE.34	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-42.6	-42.5	-42.4	-42.2	-41.4	-41.3	-42.1	-38.4	-38.6	-38.3	-37.9	-37.3	-37.7	-38.0	-45.5	-45.4	-44.9	-43.8	-44.7	-44.1	-44.7
TE.35	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	-41.6	-42.5	-42.4	-42.1	-41.9	-41.1	-41.9	-36.5	-39.0	-39.3	-38.7	-36.9	-37.5	-38.0	-46.4	-45.2	-44.9	-43.9	-44.2	-43.8	-44.7
TE.21	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-43.2	-42.9	-42.7	-42.5	-42.7	-41.6	-42.6	-29.9	-40.4	-39.9	-40.8	-40.2	-39.2	-38.4	-49.7	-46.3	-45.8	-45.3	-43.8	-44.8	-46.0
TE.22	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-43.1	-42.8	-42.7	-42.4	-41.5	-41.4	-42.3	-38.8	-37.7	-39.7	-40.0	-38.5	-38.2	-38.8	-46.1	-46.6	-45.4	-45.7	-44.6	-44.3	-45.5
TE.23	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-43.0	-42.8	-42.6	-42.3	-41.5	-41.3	-42.3	-40.8	-38.9	-30.9	-40.1	-39.9	-38.0	-38.1	-46.1	-46.1	-46.8	-45.4	-43.9	-44.1	-45.4
TE.24	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-43.0	-42.8	-42.6	-43.1	-41.5	-41.2	-42.4	-36.1	-39.7	-39.4	-39.7	-38.9	-39.3	-38.9	-47.2	-45.9	-45.3	-44.9	-44.3	-42.8	-45.1
TE.25	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-44.0	-42.8	-43.6	-42.0	-42.7	-41.2	-42.7	-39.4	-39.0	-40.2	-31.9	-38.9	-39.4	-38.1	-46.3	-46.1	-45.6	-46.4	-44.8	-43.7	-45.5
TE.26	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-43.0	-42.7	-42.6	-42.0	-41.8	-41.1	-42.2	-40.8	-39.2	-40.1	-32.8	-39.2	-39.1	-38.5	-46.0	-46.3	-45.1	-46.1	-45.0	-42.7	-45.2
TE.27	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-42.9	-42.7	-42.6	-42.0	-41.5	-41.1	-42.1	-34.6	-40.1	-36.2	-29.7	-39.8	-39.3	-36.6	-47.6	-44.9	-46.6	-46.7	-43.7	-43.7	-45.5
TE.28	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-42.9	-42.7	-41.6	-41.9	-41.3	-40.8	-41.9	-39.2	-41.3	-38.4	-31.0	-38.8	-38.7	-37.9	-46.4	-44.9	-47.1	-46.4	-44.4	-43.2	-45.4
TE.29	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-42.9	-42.7	-42.5	-41.9	-42.5	-40.7	-42.2	-33.2	-39.9	-40.1	-32.4	-39.7	-39.0	-37.4	-47.1	-45.5	-45.4	-46.3	-43.6	-43.1	-45.2
TE.30	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-42.9	-42.7	-42.5	-42.7	-41.8	-40.7	-42.2	-40.1	-32.1	-39.2	-39.9	-39.3	-38.8	-38.2	-45.8	-47.3	-46.7	-43.6	-44.4	-43.0	-45.1
TE.31	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-42.9	-42.9	-42.5	-41.7	-41.4	-40.7	-42.0	-39.7	-31.0	-39.0	-38.3	-38.8	-38.4	-37.5	-45.6	-46.8	-46.7	-44.9	-43.9	-43.2	-45.2
TE.32	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-42.9	-42.7	-42.1	-42.3	-42.2	-41.4	-42.3	-40.8	-38.7	-38.8	-38.8	-37.2	-36.6	-38.5	-45.3	-46.4	-46.3	-45.2	-46.7	-44.8	-45.8
TE.33	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-42.9	-42.6	-42.9	-43.3	-41.7	-41.7	-42.5	-41.3	-35.1	-40.6	-38.7	-39.3	-37.9	-38.8	-44.6	-46.7	-44.7	-45.3	-45.1	-43.8	-45.0
TE.34	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-42.7	-42.5	-41.6	-42.3	-41.6	-41.3	-42.0	-39.7	-39.5	-37.5	-38.5	-39.5	-36.9	-38.6	-47.3	-45.1	-46.6	-44.8	-44.6	-44.3	-45.5
TE.35	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	-42.7	-42.5	-42.8	-42.2	-41.5	-41.3	-42.2	-40.7	-40.6	-40.2	-38.0	-39.1	-37.6	-39.4	-44.9	-44.8	-45.1	-45.0	-45.0	-43.8	-44.8
TE.01	Ερμητικός	OQ	-40°C	-44.6	-44.0	-43.3	-42.8	-41.8	-39.8	-42.7	-40.8	-40.6	-41.6	-38.5	-40.2	-38.0	-40.0	-48.6	-47.8	-44.7	-47.9	-43.3	-41.5	-45.6
TE.02	Ερμητικός	OQ	-40°C	-44.6	-43.8	-43.2	-42.7	-41.7	-39.5	-42.6	-40.2	-39.2	-39.4	-38.4	-40.2	-37.3	-39.1	-49.6	-49.7	-47.6	-46.8	-43.1	-40.9	-46.3
TE.03	Ερμητικός	OQ	-40°C	-44.4	-43.8	-43.2	-42.7	-41.4	-39.4	-42.5	-41.0	-41.4	-40.8	-40.7	-39.8	-36.8	-40.1	-49.1	-45.6	-45.4	-44.3	-42.6	-40.8	-44.6
TE.04	Ερμητικός	OQ	-40°C	-44.3	-43.7	-43.2	-42.6	-41.3	-39.1	-42.4	-41.0	-42.2	-41.4	-37.8	-37.8	-37.6	-39.6	-47.9	-44.9	-44.7	-48.0	-44.7	-40.8	-45.2
TE.05	Ερμητικός	OQ	-40°C	-44.3	-43.7	-43.1	-42.5	-41.2	-39.1	-42.3	-40.3	-39.6	-38.6	-38.2	-39.7	-38.1	-39.1	-48.3	-48.4	-48.3	-47.0	-42.6	-40.0	-45.8
TE.06	Ερμητικός	OQ	-40°C	-44.3	-43.6	-43.1	-42.5	-41.1	-39.0	-42.3	-41.0	-41.4	-39.3	-39.9	-39.7	-38.4	-40.0	-48.5	-45.4	-47.4	-45.5	-42.7	-39.4	-44.8
TE.07	Ερμητικός	OQ	-40°C	-44.2	-43.5	-43.0	-42.5	-41.1	-39.0	-42.2	-41.6	-39.7	-41.0	-37.9	-37.1	-37.9	-39.2	-46.6	-48.1	-44.8	-47.6	-45.3	-39.9	-45.4
TE.08	Ερμητικός	OQ	-40°C	-44.1	-43.5	-42.9	-42.0	-41.1	-38.9	-42.1	-40.2	-42.0	-38.6	-38.8	-39.0	-37.7	-39.4	-48.1	-44.8	-47.6	-46.2	-42.8	-39.7	-44.9
TE.09	Ερμητικός	OQ	-40°C	-44.1	-43.4	-42.9	-42.0	-40.9	-38.7	-42.0	-41.4	-39.7	-40.0	-40.1	-39.7	-36.7	-39.6	-48.0	-48.7	-46.4	-43.6	-42.1	-40.7	-44.9
TE.10	Ερμητικός	OQ	-40°C	-44.1	-43.3	-42.8	-41.9	-40.1	-38.6	-41.8	-40.3	-40.0	-38.6	-38.6	-39.4	-36.4	-38.9	-48.1	-47.7	-46.9	-46.4	-40.9	-40.7	-45.1
TE.01	Ερμητικός	OQ	-70°C	-69.4	-67.5	-69.4	-67.0	-69.6	-68.7	-68.6	-67.2	-66.2	-67.1	-65.9	-67.0	-67.2	-66.8	-71.7	-68.2	-71.6	-67.7	-72.1	-69.9	-70.2
TE.02	Ερμητικός	OQ	-70°C	-74.5	-72.2	-73.3	-67.9	-73.9	-74.0	-72.6	-73.4	-69.8	-72.4	-66.5	-71.0	-73.1	-71.0	-75.6	-74.7	-74.1	-69.1	-76.8	-75.1	-74.2
TE.03	Ερμητικός	OQ	-70°C	-66.4	-66.4	-75.6	-63.6	-72.4	-68.7	-68.8	-64.2	-65.1	-73.1	-62.6	-69.7	-67.2	-67.0	-68.5	-67.1	-78.0	-64.3	-75.0	-69.9	-70.5
TE.04	Ερμητικός	OQ	-70°C	-74.9	-79.0	-80.0	-64.5	-72.5	-74.0	-74.1	-73.8	-76.4	-79.0	-63.2	-69.6	-67.1	-72.5	-76.0	-81.7	-80.9	-65.7	-75.3	-75.1	-75.8
TE.05	Ερμητικός	OQ	-70°C	-72.0	-74.0	-62.6	-63.3	-69.0	-68.7	-68.3	-69.7	-72.6	-60.5	-62.3	-66.4	-67.2	-66.4	-74.4	-74.8	-64.6	-64.0	-71.4	-69.9	-69.8
TE.06	Ερμητικός	OQ	-70°C	-75.6	-66.9	-73.0	-61.4	-69.8	-74.0	-70.1	-74.5	-64.7	-72.1	-60.2	-67.1	-73.1	-68.6	-76.8	-69.2	-73.8	-62.5	-72.5	-75.1	-71.7
TE.07	Ερμητικός	OQ	-70°C	-69.3	-75.9	-67.1	-65.8	-71.1	-68.7	-69.6	-67.0	-74.5	-64.8	-64.8	-68.4	-67.2	-67.8	-71.5	-76.7	-69.2	-66.5	-73.7	-69.9	-71.3
TE.08	Ερμητικός	OQ	-70°C	-76.6	-66.5	-71.5	-66.2	-69.4	-74.0	-70.7	-79.7	-64.3	-70.7	-59.1	-66.6	-73.1	-68.9	-82.1	-68.8	-72.3	-61.4	-72.1	-75.1	-72.0
TE.09	Ερμητικός	OQ	-70°C	-76.4	-71.8	-70.7	-71.2	-73.0	-69.7	-72.1	-74.3	-60.7	-59.0	-60.3	-61.0	-66.4	-63.6	-78.2	-62.5	-62.3	-61.8	-64.7	-68.8	-66.4

Συγκριτική Ανάλυση Ομοιομορφίας Θερμοκρασίας και Απόδοσης σε Συστήματα Ψύξης Χαμηλών Θερμοκρασιών
Ερμητικού Συμπιεστή, Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και Πολυσυμπιεστών

Freezer ID	Freezer Type	Test	Temperature	Avg_P.1	Avg_P.2	Avg_P.3	Avg_P.4	Avg_P.5	Avg_P.6	Avg_Avg	Mix_P.1	Mix_P.2	Mix_P.3	Mix_P.4	Mix_P.5	Mix_P.6	Mix_Avg	Mix_P.1	Mix_P.2	Mix_P.3	Mix_P.4	Mix_P.5	Mix_P.6	Mix_Avg
TE.10	Ερμητικός	OQ	-70°C	-71.6	-63.8	-70.6	-72.2	-71.8	-74.0	-70.7	-74.6	-61.7	-69.7	-64.5	-68.9	-73.1	-68.7	-76.8	-66.0	-71.4	-67.0	-74.6	-75.1	-71.8
TE.01	Ερμητικός	PQ	-40°C	-44.6	-43.9	-43.2	-42.7	-41.8	-40.3	-42.7	-41.7	-40.1	-39.4	-38.4	-38.5	-38.4	-39.4	-47.2	-47.8	-48.1	-46.6	-45.5	-41.8	-46.2
TE.02	Ερμητικός	PQ	-40°C	-44.5	-43.8	-43.2	-42.7	-41.7	-40.2	-42.7	-40.2	-41.3	-40.8	-38.2	-37.4	-37.9	-39.3	-49.0	-45.5	-47.1	-47.4	-46.1	-41.4	-46.1
TE.03	Ερμητικός	PQ	-40°C	-44.4	-43.8	-43.2	-42.6	-41.6	-40.1	-42.6	-41.4	-41.8	-39.2	-38.0	-40.2	-38.4	-39.8	-47.1	-45.6	-47.5	-47.7	-42.4	-40.8	-45.2
TE.04	Ερμητικός	PQ	-40°C	-44.4	-43.8	-43.1	-42.5	-41.6	-39.7	-42.5	-40.9	-41.3	-41.5	-38.4	-39.2	-37.3	-39.8	-48.7	-45.7	-44.2	-46.7	-43.6	-40.9	-45.0
TE.05	Ερμητικός	PQ	-40°C	-44.2	-43.7	-43.0	-42.2	-41.2	-39.6	-42.3	-40.8	-42.3	-40.2	-40.2	-40.2	-37.4	-40.2	-48.1	-44.7	-45.7	-43.3	-41.9	-41.0	-44.1
TE.06	Ερμητικός	PQ	-40°C	-44.1	-43.6	-42.9	-42.2	-41.2	-39.5	-42.2	-41.2	-40.7	-38.5	-38.1	-38.7	-38.4	-39.3	-47.4	-46.1	-47.5	-46.0	-42.4	-40.0	-44.9
TE.07	Ερμητικός	PQ	-40°C	-44.1	-43.6	-42.9	-42.1	-41.2	-39.3	-42.2	-40.0	-41.2	-39.4	-37.2	-37.3	-36.8	-38.7	-47.9	-45.1	-46.3	-47.6	-44.3	-40.4	-45.3
TE.08	Ερμητικός	PQ	-40°C	-44.0	-43.3	-42.8	-42.0	-41.0	-39.2	-42.1	-39.9	-39.6	-40.7	-39.8	-39.3	-38.3	-39.6	-47.9	-47.6	-44.3	-43.4	-41.9	-39.7	-44.1
TE.09	Ερμητικός	PQ	-40°C	-44.0	-43.2	-42.8	-41.9	-40.7	-39.1	-42.0	-40.1	-38.9	-38.3	-39.6	-39.7	-37.1	-39.0	-47.6	-47.8	-47.4	-43.8	-41.6	-40.2	-44.7
TE.10	Ερμητικός	PQ	-40°C	-43.9	-43.2	-42.8	-41.9	-40.4	-38.9	-41.8	-39.8	-41.5	-39.9	-38.7	-37.9	-38.1	-39.3	-47.7	-44.3	-45.7	-45.1	-41.7	-39.3	-44.0
TE.01	Ερμητικός	PQ	-70°C	-69.6	-66.6	-69.0	-65.9	-70.2	-67.7	-68.2	-67.7	-65.4	-67.0	-64.9	-68.0	-66.4	-66.6	-71.2	-67.4	-70.7	-66.6	-72.1	-68.8	-69.5
TE.02	Ερμητικός	PQ	-70°C	-72.4	-72.7	-72.8	-69.3	-73.8	-72.4	-72.2	-70.8	-69.8	-71.3	-67.2	-70.8	-70.1	-70.0	-73.2	-75.5	-73.7	-70.9	-76.8	-73.6	-74.0
TE.03	Ερμητικός	PQ	-70°C	-71.1	-60.5	-67.4	-61.1	-64.5	-67.7	-65.4	-69.1	-59.5	-65.4	-60.2	-62.5	-66.4	-63.8	-72.7	-61.3	-69.1	-61.8	-66.3	-68.8	-66.6
TE.04	Ερμητικός	PQ	-70°C	-76.0	-67.1	-68.3	-74.2	-77.1	-72.4	-72.5	-74.3	-64.4	-66.9	-72.0	-74.0	-70.1	-70.3	-76.8	-69.6	-69.2	-76.0	-80.3	-73.6	-74.2
TE.05	Ερμητικός	PQ	-70°C	-74.7	-61.2	-65.8	-64.5	-68.2	-67.7	-67.0	-72.7	-60.2	-63.9	-63.6	-66.1	-66.4	-65.5	-76.4	-62.0	-67.4	-65.2	-70.1	-68.8	-68.3
TE.06	Ερμητικός	PQ	-70°C	-66.3	-76.1	-72.6	-72.2	-79.6	-72.4	-73.2	-64.8	-73.0	-71.1	-70.0	-76.4	-70.1	-70.9	-67.0	-79.0	-73.5	-73.9	-82.9	-73.6	-75.0
TE.07	Ερμητικός	PQ	-70°C	-74.4	-59.9	-68.8	-64.7	-70.1	-67.7	-67.6	-73.3	-58.8	-66.8	-63.7	-67.9	-66.4	-66.2	-77.1	-60.6	-70.5	-65.4	-72.0	-68.8	-69.1
TE.08	Ερμητικός	PQ	-70°C	-63.6	-73.1	-68.2	-79.2	-78.2	-72.4	-72.4	-62.1	-70.1	-66.8	-76.8	-75.1	-70.1	-70.2	-64.2	-75.8	-69.0	-81.0	-81.4	-73.6	-74.2
TE.09	Ερμητικός	PQ	-70°C	-73.7	-80.6	-85.1	-64.8	-79.4	-74.0	-76.2	-72.6	-77.9	-84.0	-60.6	-76.2	-73.1	-74.1	-74.8	-83.4	-86.0	-63.0	-82.5	-75.1	-77.5
TE.10	Ερμητικός	PQ	-70°C	-66.0	-75.8	-72.6	-74.3	-78.3	-72.4	-73.2	-64.6	-72.8	-71.2	-82.5	-75.1	-70.1	-72.7	-66.7	-78.7	-73.6	-87.0	-81.5	-73.6	-76.9
TE.11	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	-43.2	-43.0	-43.7	-43.0	-43.6	-42.7	-43.2	-42.9	-42.8	-43.6	-42.8	-43.3	-42.5	-43.0	-43.4	-43.2	-43.9	-43.3	-43.9	-42.8	-43.4
TE.12	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	-44.2	-43.8	-44.1	-44.1	-44.4	-43.8	-44.1	-44.2	-43.7	-44.1	-44.0	-44.3	-43.7	-44.0	-44.3	-44.2	-44.3	-44.3	-44.7	-43.8	-44.3
TE.13	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	-46.7	-45.2	-46.6	-47.3	-47.6	-46.6	-46.7	-44.9	-43.4	-44.8	-45.4	-45.7	-44.8	-44.8	-46.9	-45.5	-46.8	-47.6	-47.8	-46.9	-46.9
TE.14	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	-43.6	-43.5	-43.9	-43.6	-44.1	-42.8	-43.6	-41.3	-40.9	-41.6	-41.0	-40.9	-40.2	-41.0	-45.1	-44.7	-45.7	-45.3	-45.8	-44.0	-45.1
TE.15	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	-42.2	-41.2	-41.5	-41.4	-42.0	-41.3	-41.6	-38.3	-38.4	-38.4	-38.4	-38.8	-37.6	-38.3	-42.8	-41.6	-41.9	-41.8	-42.3	-41.9	-42.1
TE.16	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	-45.2	-44.3	-44.7	-44.1	-45.1	-44.5	-44.6	-41.6	-41.1	-41.6	-41.3	-41.3	-40.9	-41.3	-46.1	-45.4	-45.7	-45.4	-45.4	-45.7	-45.6
TE.17	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	-44.8	-43.6	-44.0	-43.8	-44.5	-43.2	-44.0	-44.3	-42.4	-43.7	-43.4	-43.7	-42.8	-43.4	-45.1	-44.3	-44.2	-44.0	-45.1	-43.4	-44.4
TE.18	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	-44.0	-43.5	-46.0	-44.6	-46.6	-43.1	-44.6	-43.8	-43.3	-45.8	-44.3	-46.4	-42.9	-44.4	-44.2	-43.7	-46.2	-44.9	-46.9	-43.3	-44.9
TE.19	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	-44.1	-42.8	-44.4	-44.1	-45.8	-42.7	-44.0	-44.0	-42.7	-44.3	-44.1	-45.6	-42.6	-43.9	-44.2	-42.9	-44.6	-44.2	-45.9	-42.8	-44.1
TE.20	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	-44.0	-43.5	-44.7	-43.6	-44.9	-43.1	-44.0	-40.9	-41.3	-41.3	-40.9	-41.6	-40.7	-41.1	-44.3	-43.8	-45.0	-43.8	-45.3	-43.3	-44.3
TE.11	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	-70.2	-70.5	-74.9	-68.4	-73.6	-69.3	-71.1	-69.2	-68.2	-72.5	-67.6	-70.7	-68.4	-69.4	-70.8	-72.7	-77.6	-69.2	-76.7	-69.8	-72.8
TE.12	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	-76.9	-69.2	-82.2	-65.9	-78.8	-69.3	-73.7	-75.8	-67.0	-79.6	-65.1	-75.7	-68.4	-71.9	-77.6	-71.4	-85.2	-66.6	-82.2	-69.8	-75.5
TE.13	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	-71.5	-72.0	-77.4	-71.3	-66.7	-69.0	-71.3	-71.3	-71.7	-77.0	-70.9	-66.4	-68.8	-71.0	-72.0	-72.2	-77.7	-71.5	-66.8	-69.8	-71.7
TE.14	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	-74.1	-73.7	-74.6	-73.6	-73.8	-72.4	-73.7	-73.7	-73.3	-74.2	-73.2	-73.3	-72.1	-73.3	-75.1	-74.7	-76.0	-75.9	-76.2	-73.4	-75.2
TE.15	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	-72.2	-71.5	-72.4	-71.8	-72.7	-70.2	-71.8	-69.6	-66.3	-68.4	-66.7	-67.9	-67.7	-67.8	-73.3	-71.9	-73.0	-72.2	-73.1	-71.7	-72.5
TE.16	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	-75.0	-74.8	-75.1	-74.1	-75.8	-72.6	-74.6	-74.5	-74.3	-74.6	-73.6	-75.2	-72.1	-74.1	-77.4	-76.4	-76.4	-75.3	-77.2	-75.3	-76.3
TE.17	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	-70.3	-74.2	-83.5	-72.4	-83.3	-69.3	-75.5	-69.3	-71.8	-80.9	-71.5	-80.1	-68.4	-73.7	-70.9	-76.5	-86.5	-73.2	-86.9	-69.8	-77.3
TE.18	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	-67.8	-70.0	-71.5	-69.8	-61.1	-69.0	-68.2	-67.6	-69.8	-71.1	-69.4	-60.8	-68.8	-67.9	-68.2	-70.3	-71.7	-70.0	-61.2	-69.8	-68.5
TE.19	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	-74.4	-64.6	-75.8	-65.7	-71.6	-69.3	-70.2	-78.5	-62.5	-73.4	-64.9	-68.8	-68.4	-69.4	-80.3	-66.6	-78.5	-66.4	-74.6	-69.8	-72.7
TE.20	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	-70.4	-72.9	-65.2	-76.3	-77.5	-70.2	-72.1	-67.9	-67.6	-61.6	-72.9	-72.4	-67.7	-68.4	-71.5	-73.3	-65.8	-79.0	-77.9	-71.7	-73.2
TE.11	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	-43.3	-43.2	-43.8	-43.0	-43.4	-42.8	-43.2	-43.1	-43.1	-43.6	-42.4	-43.1	-42.7	-43.0	-43.4	-43.3	-43.9	-43.2	-43.7	-42.8	-43.4
TE.12	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	-42.4	-41.6	-42.3	-42.3	-42.3	-41.7	-42.1	-42.3	-41.4	-42.3	-42.2	-42.1	-41.7	-42.0	-42.5	-42.0	-42.4	-42.3	-42.6	-41.8	-42.3
TE.13	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	-47.2	-45.0	-46.9	-47.1	-47.5	-46.9	-46.8	-46.9	-44.9	-46.6	-46.0	-46.9	-46.6	-46.3	-47.4	-45.3	-47.2	-47.8	-47.9	-47.1	-47.1
TE.14	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	-44.1	-44.1	-44.4	-43.8	-44.4	-42.8	-43.9	-44.1	-44.0	-44.3	-43.7	-44.3	-42.7	-43.9	-44.2	-44.2	-44.4	-43.9	-44.6	-42.8	-44.0
TE.15	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	-42.8	-41.4	-42.0	-41.8	-42.2	-41.5	-42.0	-42.7	-41.3	-41.9	-41.8	-42.2	-41.3	-41.9	-42.9	-41.6	-42.1	-41.9	-42.3	-41.7	-42.1
TE.16	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	-45.4	-44.7	-45.3	-44.3	-45.6	-44.6	-45.0	-45.4	-44.6	-45.2	-44.2	-45.5	-44.4	-44.9	-45.6	-44.8	-45.3	-44.3	-45.6	-44.6	-45.0
TE.17	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	-42.8	-41.3	-42.1	-41.8	-42.3	-41.2	-41.9	-42.7	-41.3	-41.9	-41.8	-42.3	-41.2	-41.9	-42.8	-41.4	-42.1	-41.9	-42.4	-41.3	-42.0
TE.18	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	-43.8	-43.6	-46.0	-44.2	-46.1	-42.9	-44.4	-43.8	-43.4	-45.9	-44.1	-45.9	-42.8	-44.3	-44.0	-43.7	-46.2	-44.7	-46.3	-43.1	-44.7
TE.19	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	-44.1	-42.7	-44.4	-44.4	-45.7	-42.5	-44.0	-44.0	-42.6	-44.3	-44.3	-45.5	-42.4	-43.9	-44.2	-42.8	-44.6	-44.6	-45.9	-42.7	-44.1
TE.20	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	-44.7	-43.5	-44.9	-43.6	-45.3	-42.9	-44.2	-44.7	-43.4	-44.9	-43.5	-45.2	-42.8	-44.1	-44.8	-43.6	-45.0	-43.7	-45.4	-43.0	-44.3
TE.11	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	-66.1	-69.0	-72.8	-64.6	-73.3	-64.4	-68.4	-65.6	-67.3	-70.3	-64.0	-70.4	-63.5	-66.9	-66.6	-70.7	-75.6	-65.2	-76.5	-65.2	-70.0

Freezer ID	Freezer Type	Test	Temperature	Avg_P.1	Avg_P.2	Avg_P.3	Avg_P.4	Avg_P.5	Avg_P.6	Avg_Avg	Mx_P.1	Mx_P.2	Mx_P.3	Mx_P.4	Mx_P.5	Mx_P.6	Mx_Avg	Mn_P.1	Mn_P.2	Mn_P.3	Mn_P.4	Mn_P.5	Mn_P.6	Mn_Avg
TE.12	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	-72.7	-79.8	-76.4	-68.4	-81.0	-72.4	-75.1	-72.4	-79.4	-76.0	-68.0	-80.5	-72.1	-74.7	-73.7	-80.9	-77.8	-70.6	-83.7	-73.4	-76.7
TE.13	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	-77.5	-69.3	-71.9	-79.7	-79.6	-71.4	-74.9	-77.4	-69.2	-71.8	-79.6	-79.5	-71.4	-74.8	-77.7	-69.4	-72.0	-79.8	-79.6	-71.6	-75.0
TE.14	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	-73.8	-73.3	-74.4	-72.5	-73.0	-72.3	-73.2	-73.7	-73.3	-74.4	-72.4	-72.9	-72.2	-73.2	-73.8	-73.4	-74.5	-72.6	-73.1	-72.3	-73.3
TE.15	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	-71.4	-71.0	-72.1	-72.2	-72.3	-69.0	-71.3	-71.2	-70.8	-71.7	-71.8	-71.9	-68.8	-71.0	-71.9	-71.3	-72.3	-72.4	-72.4	-69.8	-71.7
TE.16	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	-74.4	-74.4	-75.1	-74.3	-75.9	-71.4	-74.2	-74.3	-74.3	-75.0	-74.2	-75.8	-71.4	-74.2	-74.6	-74.5	-75.2	-74.3	-75.9	-71.6	-74.4
TE.17	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	-71.4	-86.4	-78.3	-63.6	-89.0	-72.4	-76.9	-71.1	-86.0	-77.8	-63.3	-88.4	-72.1	-76.4	-72.4	-87.6	-79.7	-65.6	-91.9	-73.4	-78.4
TE.18	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	-79.6	-66.3	-72.2	-81.1	-83.5	-71.4	-75.7	-79.5	-66.3	-72.1	-81.0	-83.5	-71.4	-75.6	-79.8	-66.4	-72.3	-81.1	-83.6	-71.6	-75.8
TE.19	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	-73.3	-69.7	-70.3	-72.6	-60.8	-69.0	-69.3	-73.1	-69.5	-69.9	-72.2	-60.5	-68.8	-69.0	-73.9	-70.0	-70.5	-72.8	-60.9	-69.8	-69.6
TE.20	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	-74.1	-88.2	-71.0	-65.2	-82.1	-72.4	-75.5	-73.8	-87.7	-70.6	-64.8	-81.5	-72.1	-75.1	-75.2	-89.4	-72.3	-67.2	-84.8	-73.4	-77.1

Δεδομένα: Στατιστικά μέτρα από 24ωρης μέτρησης

Freezer ID	Freezer Type	Test	Temperature	STD_P.1	STD_P.2	STD_P.3	STD_P.4	STD_P.5	STD_P.6	STD_Avg	CV_P1	CV_P2	CV_P3	CV_P4	CV_P5	CV_P6	CV_Avg	R_P1	R_P2	R_P3	R_P4	R_P5	R_P6	R_Avg
TE.21	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	2.1	1.4	1.8	1.7	1.1	1.1	1.5	4.8%	3.2%	4.3%	3.9%	2.6%	2.6%	3.6%	11.60	7.00	7.90	7.40	8.00	8.20	8.35
TE.22	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.8	1.2	1.1	1.7	1.3	1.2	1.4	4.0%	2.7%	2.5%	4.0%	3.2%	2.9%	3.2%	7.60	4.80	4.80	7.50	5.40	5.30	5.90
TE.23	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.8	1.4	1.0	1.0	1.1	1.2	1.3	4.1%	3.3%	2.4%	2.3%	2.7%	2.9%	3.0%	7.90	5.70	4.60	7.40	8.10	5.90	6.60
TE.24	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.6	1.6	1.1	1.0	1.5	1.1	1.3	3.7%	3.6%	2.6%	2.3%	3.5%	2.7%	3.1%	7.00	10.00	6.50	4.50	7.80	5.10	6.82
TE.25	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.4	1.2	1.1	1.2	1.4	0.9	1.2	3.3%	2.8%	2.7%	2.9%	3.5%	2.3%	2.9%	6.20	5.60	6.50	7.10	8.20	8.60	7.03
TE.26	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.8	1.1	1.7	1.7	1.1	1.0	1.4	4.2%	2.5%	3.9%	4.0%	2.6%	2.4%	3.3%	7.70	4.40	11.70	7.40	8.40	4.60	7.37
TE.27	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.7	1.0	1.2	0.9	1.3	1.0	1.2	3.9%	2.2%	2.7%	2.2%	3.1%	2.6%	2.8%	7.40	3.90	6.20	6.00	6.50	4.80	5.80
TE.28	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.4	1.8	1.1	1.4	1.1	1.2	1.3	3.1%	4.3%	2.7%	3.4%	2.6%	3.0%	3.2%	5.90	9.10	5.80	8.00	8.10	7.10	7.33
TE.29	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.5	1.4	1.0	1.0	1.3	1.3	1.2	3.5%	3.2%	2.4%	2.4%	3.2%	3.1%	3.0%	6.70	5.80	7.60	5.90	6.70	7.10	6.63
TE.30	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.4	1.3	1.3	1.4	1.2	1.1	1.3	3.2%	3.2%	3.0%	3.4%	3.0%	2.7%	3.1%	6.80	9.40	7.20	7.80	6.80	7.10	7.52
TE.31	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.5	1.3	1.2	1.3	1.4	1.2	1.3	3.6%	3.1%	2.8%	3.1%	3.3%	2.8%	3.1%	6.70	7.30	6.40	5.30	7.20	7.20	6.68
TE.32	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.6	1.4	1.2	1.3	0.9	1.2	1.3	3.7%	3.4%	2.8%	3.1%	2.2%	2.9%	3.0%	10.00	7.90	6.70	8.60	5.80	7.60	7.77
TE.33	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.3	1.0	1.2	1.1	1.4	1.2	1.2	3.1%	2.5%	2.8%	2.5%	3.3%	3.0%	2.8%	8.10	6.80	7.50	5.60	7.90	7.30	7.20
TE.34	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.2	1.2	1.1	0.8	1.4	1.2	1.1	2.9%	2.9%	2.5%	1.9%	3.3%	2.8%	2.7%	7.10	6.80	6.60	5.90	7.40	6.40	6.70
TE.35	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	1.6	1.1	1.0	0.8	1.2	1.1	1.2	3.9%	2.7%	2.5%	2.0%	2.8%	2.8%	2.8%	9.90	6.20	5.60	5.20	7.30	6.30	6.75
TE.21	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	2.7	1.4	1.2	1.1	0.9	1.3	1.4	6.2%	3.2%	2.9%	2.6%	2.0%	3.1%	3.3%	19.80	5.90	5.90	4.50	3.60	5.60	7.55
TE.22	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	1.2	1.5	1.1	1.2	1.2	1.1	1.2	2.8%	3.6%	2.7%	2.8%	2.9%	2.7%	2.9%	7.30	8.90	5.70	5.70	6.10	6.10	6.63
TE.23	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	1.2	1.3	1.9	1.2	1.0	1.2	1.3	2.9%	3.1%	4.4%	2.8%	2.4%	2.8%	3.1%	5.30	7.20	15.90	5.30	4.00	6.10	7.30
TE.24	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	1.7	1.2	1.0	1.1	1.1	0.6	1.1	4.0%	2.9%	2.4%	2.5%	2.7%	1.6%	2.7%	11.10	6.20	5.90	5.20	5.40	3.50	6.22
TE.25	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	1.4	1.3	1.1	1.9	1.3	1.0	1.3	3.1%	3.1%	2.5%	4.6%	3.0%	2.5%	3.1%	6.90	7.10	5.40	14.50	5.90	4.30	7.35
TE.26	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	1.2	1.4	1.0	1.8	1.3	0.6	1.2	2.9%	3.3%	2.3%	4.3%	3.2%	1.6%	2.9%	5.20	7.10	5.00	13.30	5.80	3.60	6.67
TE.27	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	1.8	0.9	1.7	2.1	0.9	1.0	1.4	4.3%	2.1%	3.9%	5.1%	2.3%	2.5%	3.4%	13.00	4.80	10.40	17.00	3.90	4.40	8.92
TE.28	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	1.4	0.9	1.4	2.0	1.2	1.1	1.3	3.3%	2.0%	3.3%	4.8%	2.8%	2.6%	3.1%	7.20	3.60	8.70	15.40	5.60	4.50	7.50
TE.29	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	1.7	1.1	1.1	1.9	0.8	1.0	1.3	4.0%	2.6%	2.6%	4.5%	2.0%	2.5%	3.0%	13.90	5.60	5.30	13.90	3.90	4.10	7.78
TE.30	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	1.2	1.8	1.6	0.8	1.0	1.0	1.2	2.7%	4.3%	3.8%	1.9%	2.4%	2.5%	2.9%	5.70	15.20	7.50	3.70	5.10	4.20	6.90
TE.31	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	1.1	1.9	1.6	1.3	1.0	1.1	1.3	2.6%	4.3%	3.8%	3.1%	2.5%	2.7%	3.2%	5.90	15.80	7.70	6.60	5.10	4.80	7.65
TE.32	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	1.0	1.2	1.2	0.9	0.8	1.4	1.1	2.3%	2.7%	2.8%	2.0%	2.0%	3.4%	2.5%	4.50	7.70	7.50	6.40	9.50	8.20	7.30
TE.33	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	0.7	1.7	0.9	0.9	1.3	1.0	1.1	1.7%	3.9%	2.0%	2.0%	3.1%	2.5%	2.5%	3.30	11.60	4.10	6.60	5.80	5.90	6.22
TE.34	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	1.6	0.8	1.1	1.0	1.1	1.3	1.1	3.7%	1.9%	2.7%	2.3%	2.7%	3.1%	2.7%	7.60	5.60	9.10	6.30	5.10	7.40	6.85
TE.35	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	0.9	0.9	1.1	1.1	1.3	1.1	1.1	2.2%	2.2%	2.5%	2.5%	3.2%	2.6%	2.5%	4.20	4.20	4.90	7.00	5.90	6.20	5.40
TE.01	Ερμητικός	OQ	-40°C	2.3	2.1	0.8	2.7	0.9	0.8	1.6	5.2%	4.9%	1.9%	6.3%	2.1%	2.0%	3.7%	7.80	7.20	3.10	9.40	3.10	3.50	5.68
TE.02	Ερμητικός	OQ	-40°C	2.6	3.0	2.2	2.3	0.7	0.8	1.9	5.9%	7.0%	5.1%	5.4%	1.6%	1.9%	4.5%	9.40	10.50	8.20	8.40	2.90	3.60	7.17
TE.03	Ερμητικός	OQ	-40°C	2.1	1.0	1.1	1.0	0.7	0.7	1.1	4.8%	2.4%	2.6%	2.3%	1.6%	1.8%	2.6%	8.10	4.20	4.60	3.60	2.80	4.00	4.55
TE.04	Ερμητικός	OQ	-40°C	2.1	0.7	0.7	2.8	1.9	0.8	1.5	4.8%	1.7%	1.7%	6.6%	4.5%	2.1%	3.6%	6.90	2.70	3.30	10.20	6.90	3.20	5.53
TE.05	Ερμητικός	OQ	-40°C	2.2	2.5	2.8	2.4	0.7	0.5	1.8	5.0%	5.7%	6.4%	5.6%	1.8%	1.3%	4.3%	8.00	8.80	9.70	8.80	2.90	1.90	6.68
TE.06	Ερμητικός	OQ	-40°C	2.0	1.0	2.2	1.2	0.7	0.2	1.2	4.5%	2.3%	5.1%	2.9%	1.6%	0.5%	2.8%	7.50	4.00	8.10	5.60	3.00	1.00	4.87
TE.07	Ερμητικός	OQ	-40°C	1.4	2.4	1.1	2.6	2.2	0.5	1.7	3.2%	5.6%	2.5%	6.1%	5.4%	1.2%	4.0%	5.00	8.40	3.80	9.70	8.20	2.00	6.18
TE.08	Ερμητικός	OQ	-40°C	2.2	0.6	2.5	2.0	0.9	0.4	1.4	5.0%	1.5%	5.7%	4.7%	2.2%	1.0%	3.3%	7.90	2.80	9.00	7.40	3.80	2.00	5.48
TE.09	Ερμητικός	OQ	-40°C	1.5	2.4	1.7	1.0	0.6	0.7	1.3	3.5%	5.6%	4.1%	2.3%	1.5%	1.9%	3.1%	6.60	9.00	6.40	3.50	2.40	4.00	5.32
TE.10	Ερμητικός	OQ	-40°C	2.3	2.1	2.3	2.0	0.3	1.1	1.7	5.2%	4.9%	5.3%	4.9%	0.7%	2.8%	4.0%	7.80	7.70	8.30	7.80	1.50	4.30	6.23
TE.01	Ερμητικός	OQ	-70°C	1.4	0.6	1.4	0.5	1.6	0.8	1.0	2.0%	0.8%	2.0%	0.7%	2.3%	1.2%	1.5%	4.50	2.00	4.50	1.80	5.10	2.70	3.43
TE.02	Ερμητικός	OQ	-70°C	0.7	1.5	0.6	0.8	1.7	0.7	1.0	0.9%	2.0%	0.8%	1.1%	2.3%	0.9%	1.3%	2.20	4.90	1.70	2.60	5.80	2.00	3.20
TE.03	Ερμητικός	OQ	-70°C	1.3	0.5	1.5	0.4	1.7	0.8	1.1	2.0%	0.8%	2.0%	0.7%	2.3%	1.2%	1.5%	4.30	1.97	4.90	1.71	5.31	2.70	3.48
TE.04	Ερμητικός	OQ	-70°C	0.7	1.6	0.6	0.7	1.7	0.7	1.0	0.9%	2.0%	0.8%	1.1%	2.3%	0.9%	1.3%	2.21	5.36	1.86	2.47	5.69	2.00	3.27
TE.05	Ερμητικός	OQ	-70°C	1.4	0.6	1.3	0.4	1.6	0.8	1.0	2.0%	0.8%	2.0%	0.7%	2.3%	1.2%	1.5%	4.67	2.19	4.06	1.70	5.05	2.70	3.40
TE.06	Ερμητικός	OQ	-70°C	0.7	1.4	0.6	0.7	1.6	0.7	0.9	0.9%	2.0%	0.8%	1.1%	2.3%	0.9%	1.3%	2.23	4.54	1.69	2.35	5.48	2.00	3.05
TE.07	Ερμητικός	OQ	-70°C	1.4	0.6	1.4	0.5	1.7	0.8	1.0	2.0%	0.8%	2.0%	0.7%	2.3%	1.2%	1.5%	4.49	2.25	4.35	1.77	5.21	2.70	3.46
TE.08	Ερμητικός	OQ	-70°C	0.8	1.4	0.5	0.7	1.6	0.7	0.9	1.0%	2.0%	0.8%	1.0%	2.3%	0.9%	1.3%	2.39	4.51	1.66	2.31	5.44	2.00	3.05
TE.09	Ερμητικός	OQ	-70°C	1.1	0.5	1.0	0.4	1.2	0.7	0.8	1.5%	0.8%	1.4%	0.5%	1.6%	1.0%	1.1%	3.84	1.86	3.26	1.58	3.68	2.40	2.77
TE.10	Ερμητικός	OQ	-70°C	0.7	1.3	0.5	0.7	1.7	0.7	0.9	1.0%	2.0%	0.8%	1.0%	2.3%	0.9%	1.3%	2.24	4.33	1.64	2.52	5.63	2.00	3.06

Συγκριτική Ανάλυση Ομοιομορφίας Θερμοκρασίας και Απόδοσης σε Συστήματα Ψύξης Χαμηλών Θερμοκρασιών
Ερμητικού Συμπιεστή, Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και Πολυσυμπιεστών

Freezer ID	Freezer Type	Test	Temperature	Std_P.1	Std_P.2	Std_P.3	Std_P.4	Std_P.5	Std_P.6	Std_Avg	CV_P1	CV_P2	CV_P3	CV_P4	CV_P5	CV_P6	CV_Avg	R_P1	R_P2	R_P3	R_P4	R_P5	R_P6	R_Avg
TE.01	Ερμητικός	PQ	-40°C	1.7	2.1	2.3	2.0	1.9	0.8	1.8	3.8%	4.8%	5.3%	4.6%	4.6%	2.0%	4.2%	5.50	7.70	8.70	8.20	7.00	3.40	6.75
TE.02	Ερμητικός	PQ	-40°C	2.4	0.9	1.3	2.4	2.3	0.7	1.7	5.4%	2.0%	3.0%	5.5%	5.4%	1.7%	3.9%	8.80	4.20	6.30	9.20	8.70	3.50	6.78
TE.03	Ερμητικός	PQ	-40°C	1.7	1.1	2.1	2.6	0.5	0.4	1.4	3.9%	2.5%	4.8%	6.1%	1.2%	1.1%	3.3%	5.70	3.80	8.30	9.70	2.20	2.40	5.35
TE.04	Ερμητικός	PQ	-40°C	2.0	1.2	0.6	2.2	0.8	0.7	1.2	4.5%	2.6%	1.4%	5.3%	2.0%	1.7%	2.9%	7.80	4.40	2.70	8.30	4.40	3.60	5.20
TE.05	Ερμητικός	PQ	-40°C	1.9	0.6	1.5	0.7	0.3	0.7	1.0	4.2%	1.4%	3.6%	1.7%	0.8%	1.8%	2.2%	7.30	2.40	5.50	3.10	1.70	3.60	3.93
TE.06	Ερμητικός	PQ	-40°C	1.9	1.2	2.5	2.2	0.7	0.3	1.5	4.3%	2.8%	5.8%	5.3%	1.8%	0.7%	3.5%	6.20	5.40	9.00	7.90	3.70	1.60	5.63
TE.07	Ερμητικός	PQ	-40°C	2.2	0.9	1.8	2.8	1.8	0.7	1.7	4.9%	2.0%	4.3%	6.7%	4.4%	1.8%	4.0%	7.90	3.90	6.90	10.40	7.00	3.60	6.62
TE.08	Ερμητικός	PQ	-40°C	2.2	2.3	0.9	0.8	0.6	0.2	1.2	5.0%	5.3%	2.0%	2.0%	1.4%	0.6%	2.7%	8.00	8.00	3.60	3.60	2.60	1.40	4.53
TE.09	Ερμητικός	PQ	-40°C	2.1	2.5	2.3	1.0	0.5	0.6	1.5	4.8%	5.8%	5.5%	2.5%	1.2%	1.6%	3.6%	7.50	8.90	9.10	4.20	1.90	3.10	5.78
TE.10	Ερμητικός	PQ	-40°C	2.1	0.7	1.1	1.7	0.7	0.2	1.1	4.8%	1.6%	2.6%	4.0%	1.8%	0.5%	2.6%	7.90	2.80	5.80	6.40	3.80	1.20	4.65
TE.01	Ερμητικός	PQ	-70°C	1.0	0.6	1.1	0.4	1.3	0.7	0.9	1.5%	0.9%	1.6%	0.6%	1.8%	1.0%	1.2%	3.50	2.00	3.70	1.70	4.10	2.40	2.90
TE.02	Ερμητικός	PQ	-70°C	0.5	1.6	0.6	1.1	1.8	0.7	1.0	0.6%	2.2%	0.8%	1.6%	2.4%	1.0%	1.4%	2.40	5.70	2.40	3.70	6.00	3.50	3.95
TE.03	Ερμητικός	PQ	-70°C	1.0	0.5	1.1	0.4	1.2	0.7	0.8	1.5%	0.9%	1.6%	0.6%	1.8%	1.0%	1.2%	3.57	1.82	3.61	1.58	3.77	2.40	2.79
TE.04	Ερμητικός	PQ	-70°C	0.5	1.5	0.5	1.2	1.8	0.7	1.0	0.6%	2.2%	0.8%	1.6%	2.4%	1.0%	1.4%	2.52	5.26	2.25	3.96	6.27	3.50	3.96
TE.05	Ερμητικός	PQ	-70°C	1.1	0.5	1.1	0.4	1.3	0.7	0.8	1.5%	0.9%	1.6%	0.6%	1.8%	1.0%	1.2%	3.76	1.84	3.53	1.66	3.99	2.40	2.86
TE.06	Ερμητικός	PQ	-70°C	0.4	1.7	0.6	1.1	1.9	0.7	1.1	0.6%	2.2%	0.8%	1.6%	2.4%	1.0%	1.4%	2.20	5.96	2.39	3.85	6.47	3.50	4.06
TE.07	Ερμητικός	PQ	-70°C	1.1	0.5	1.1	0.4	1.3	0.7	0.9	1.5%	0.9%	1.6%	0.6%	1.8%	1.0%	1.2%	3.79	1.80	3.69	1.67	4.09	2.40	2.91
TE.08	Ερμητικός	PQ	-70°C	0.4	1.6	0.5	1.2	1.9	0.7	1.1	0.6%	2.2%	0.8%	1.6%	2.4%	1.0%	1.4%	2.11	5.72	2.25	4.23	6.36	3.50	4.03
TE.09	Ερμητικός	PQ	-70°C	0.7	1.6	0.6	0.7	1.9	0.7	1.0	0.9%	2.0%	0.8%	1.1%	2.3%	0.9%	1.3%	2.18	5.47	1.97	2.37	6.23	2.00	3.37
TE.10	Ερμητικός	PQ	-70°C	0.4	1.7	0.6	1.3	1.9	0.7	1.1	0.6%	2.2%	0.8%	1.8%	2.4%	1.0%	1.5%	2.19	5.94	2.40	4.54	6.37	3.50	4.16
TE.11	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2%	0.3%	0.1%	0.2%	0.2%	0.1%	0.2%	0.50	0.40	0.30	0.50	0.60	0.30	0.43
TE.12	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.10	0.50	0.20	0.30	0.40	0.10	0.27
TE.13	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5%	0.6%	0.6%	0.5%	0.5%	0.5%	0.6%	2.00	2.10	2.00	2.20	2.10	2.10	2.08
TE.14	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.6	0.6	1.3%	1.4%	1.3%	1.6%	1.7%	1.3%	1.4%	3.80	3.80	4.10	4.30	4.90	3.80	4.12
TE.15	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	0.8	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	0.7	1.8%	1.5%	1.6%	1.5%	1.5%	1.9%	1.6%	4.50	3.20	3.50	3.40	3.50	4.30	3.73
TE.16	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	0.7	0.7	0.6	0.6	0.8	0.7	0.7	1.6%	1.5%	1.5%	1.3%	1.7%	1.7%	1.5%	4.50	4.30	4.10	4.10	4.10	4.80	4.32
TE.17	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	0.1	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2%	0.7%	0.2%	0.1%	0.5%	0.2%	0.3%	0.80	1.90	0.50	0.60	1.40	0.60	0.97
TE.18	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.1%	0.2%	0.40	0.40	0.40	0.60	0.50	0.40	0.45
TE.19	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.2%	0.1%	0.20	0.20	0.30	0.10	0.30	0.20	0.22
TE.20	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-40°C	0.6	0.4	0.7	0.5	0.7	0.4	0.5	1.4%	1.0%	1.5%	1.1%	1.5%	1.0%	1.2%	3.40	2.50	3.70	2.90	3.70	2.60	3.13
TE.11	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	0.4	1.4	1.6	0.5	1.9	0.4	1.0	0.6%	2.0%	2.2%	0.7%	2.5%	0.5%	1.4%	1.60	4.50	5.10	1.60	6.00	1.40	3.37
TE.12	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	0.5	1.4	1.8	0.5	2.0	0.4	1.1	0.6%	2.0%	2.2%	0.7%	2.5%	0.5%	1.4%	1.75	4.42	5.60	1.54	6.43	1.40	3.52
TE.13	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.4%	0.2%	0.70	0.51	0.64	0.59	0.46	1.00	0.65
TE.14	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3%	0.3%	0.4%	0.6%	0.6%	0.3%	0.4%	1.40	1.40	1.80	2.70	2.90	1.30	1.92
TE.15	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	0.5	0.6	0.4	0.6	0.5	0.5	0.5	0.7%	0.9%	0.6%	0.8%	0.7%	0.7%	0.7%	3.70	5.60	4.60	5.50	5.20	4.00	4.77
TE.16	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.7	0.4	0.8%	0.5%	0.4%	0.4%	0.4%	0.9%	0.5%	2.90	2.10	1.80	1.70	2.00	3.20	2.28
TE.17	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	0.4	1.5	1.8	0.5	2.1	0.4	1.1	0.6%	2.0%	2.2%	0.7%	2.5%	0.5%	1.4%	1.60	4.73	5.69	1.69	6.80	1.40	3.65
TE.18	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.3	0.1	0.2%	0.6%	0.1%	0.1%	0.1%	0.4%	0.2%	0.66	0.49	0.59	0.58	0.42	1.00	0.63
TE.19	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	0.5	1.3	1.7	0.5	1.8	0.4	1.0	0.6%	2.0%	2.2%	0.7%	2.5%	0.5%	1.4%	1.81	4.12	5.16	1.54	5.84	1.40	3.31
TE.20	Ελεύθερο Έμβολο	OQ	-70°C	0.5	0.6	0.4	0.6	0.5	0.5	0.5	0.7%	0.9%	0.6%	0.8%	0.7%	0.7%	0.7%	3.61	5.71	4.14	6.01	5.54	4.00	4.84
TE.11	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1%	0.1%	0.1%	0.4%	0.2%	0.1%	0.2%	0.30	0.20	0.30	0.80	0.60	0.10	0.38
TE.12	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.1%	0.5%	0.1%	0.1%	0.4%	0.1%	0.2%	0.20	0.60	0.10	0.10	0.50	0.10	0.27
TE.13	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	0.1	0.1	0.2	0.7	0.3	0.1	0.2	0.2%	0.2%	0.3%	1.4%	0.7%	0.1%	0.5%	0.50	0.40	0.60	1.80	1.00	0.50	0.80
TE.14	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.10	0.20	0.10	0.20	0.30	0.10	0.17
TE.15	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1%	0.2%	0.2%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.20	0.30	0.20	0.10	0.10	0.40	0.22
TE.16	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	0.20	0.15
TE.17	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.12
TE.18	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1%	0.2%	0.2%	0.2%	0.1%	0.1%	0.2%	0.20	0.30	0.30	0.60	0.40	0.30	0.35
TE.19	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.1%	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.30	0.28
TE.20	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-40°C	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.10	0.20	0.10	0.20	0.20	0.20	0.17
TE.11	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	0.2	1.1	1.7	0.3	1.9	0.4	0.9	0.3%	1.6%	2.4%	0.5%	2.6%	0.7%	1.3%	1.00	3.40	5.30	1.20	6.10	1.70	3.12
TE.12	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.3	0.3	0.3%	0.3%	0.4%	0.6%	0.6%	0.3%	0.4%	1.37	1.52	1.84	2.51	3.19	1.30	1.95

Freezer ID	Freezer Type	Test	Temperature	Std_P.1	Std_P.2	Std_P.3	Std_P.4	Std_P.5	Std_P.6	Std_Avg	CV_P1	CV_P2	CV_P3	CV_P4	CV_P5	CV_P6	CV_Avg	R_P1	R_P2	R_P3	R_P4	R_P5	R_P6	R_Avg
TE.13	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.31	0.19	0.19	0.11	0.10	0.20	0.18
TE.14	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.10	0.13
TE.15	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.4%	0.2%	0.70	0.50	0.60	0.60	0.50	1.00	0.65
TE.16	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.30	0.20	0.20	0.10	0.10	0.20	0.18
TE.17	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.3	0.3	0.3%	0.3%	0.4%	0.6%	0.6%	0.3%	0.4%	1.35	1.64	1.89	2.33	3.50	1.30	2.00
TE.18	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.32	0.18	0.19	0.11	0.11	0.20	0.19
TE.19	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.3	0.1	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.4%	0.2%	0.72	0.49	0.59	0.60	0.42	1.00	0.64
TE.20	Ελεύθερο Έμβολο	PQ	-70°C	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.3	0.3	0.3%	0.3%	0.4%	0.6%	0.6%	0.3%	0.4%	1.40	1.68	1.71	2.39	3.23	1.30	1.95

Δεδομένα Δοκιμής Ανοίγματος Πόρτας και Διακοπής Ρεύματος

Freezer ID	Freezer Type	Test	Temperature	OD_RT	OD_Mx_P1	OD_Mx_P2	OD_Mx_P3	OD_Mx_P4	OD_Mx_P5	OD_Mx_P6	OD_Mx_Avg	PF_TG00S	PF_RT	PF_Mx_P1	PF_Mx_P2	PF_Mx_P3	PF_Mx_P4	PF_Mx_P5	PF_Mx_P6	PF_Mx_Avg
TE.21	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	5	-39.6	-35.7	-29.7	-21.5	-19.5	-18.6	-27.4	315.0	33	-35.6	-32.0	-30.8	-28.5	-26.1	-28.1	-30.2
TE.22	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	5	-39.6	-34.5	-30.6	-21.4	-21.1	-17.2	-27.4	320.0	26	-38.3	-32.8	-32.4	-29.4	-25.4	-27.9	-31.0
TE.23	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	5	-38.3	-36.1	-28.0	-23.6	-18.7	-16.5	-26.9	310.0	29	-35.5	-33.9	-30.2	-31.9	-27.1	-26.3	-30.8
TE.24	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	5	-37.9	-32.6	-28.4	-24.9	-21.5	-15.8	-26.8	310.0	33	-36.9	-30.3	-30.4	-31.8	-25.3	-27.0	-30.3
TE.25	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	5	-40.4	-36.0	-29.9	-22.5	-20.0	-16.4	-27.6	308.0	33	-37.2	-31.6	-30.1	-28.2	-25.4	-25.4	-29.7
TE.26	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	6	-38.5	-34.5	-27.8	-21.0	-18.9	-16.7	-26.2	311.0	28	-37.0	-33.5	-33.1	-30.9	-27.8	-26.9	-31.5
TE.27	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	4	-39.3	-35.2	-28.5	-21.4	-20.1	-15.2	-26.6	303.0	28	-36.8	-31.2	-29.6	-29.9	-27.2	-28.2	-30.5
TE.28	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	7	-39.1	-34.6	-28.0	-22.2	-18.8	-17.4	-26.7	320.0	36	-35.6	-31.2	-30.4	-28.9	-26.9	-26.1	-29.8
TE.29	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	4	-39.3	-34.8	-28.3	-22.0	-22.0	-16.2	-27.1	307.0	30	-38.0	-30.5	-28.8	-28.9	-27.6	-24.4	-29.7
TE.30	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	7	-40.6	-32.2	-28.5	-24.5	-20.6	-18.0	-27.4	303.0	35	-37.3	-30.3	-31.9	-30.3	-25.2	-26.7	-30.3
TE.31	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	5	-36.9	-34.6	-31.6	-24.0	-21.2	-14.5	-27.1	309.0	27	-36.5	-30.1	-31.6	-29.4	-25.7	-24.3	-29.6
TE.32	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	8	-41.2	-32.7	-27.7	-24.7	-19.4	-15.4	-26.8	290.0	29	-35.7	-33.2	-31.2	-32.2	-28.5	-26.2	-31.2
TE.33	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	7	-38.1	-32.2	-31.4	-24.1	-20.0	-16.2	-27.0	301.0	32	-35.6	-31.8	-32.0	-31.2	-26.6	-25.1	-30.4
TE.34	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	6	-38.0	-33.5	-28.7	-21.9	-21.5	-15.3	-26.5	299.0	35	-35.9	-30.7	-30.3	-29.3	-25.2	-26.9	-29.7
TE.35	Πολυσυμπιεστές	OQ	-40°C	6	-40.6	-32.1	-28.4	-23.2	-21.4	-15.4	-26.9	303.0	36	-36.8	-30.7	-30.0	-29.2	-27.5	-27.9	-30.3
TE.21	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	4	-39.5	-36.0	-29.1	-22.1	-19.6	-15.4	-27.0	318.0	36	-37.7	-30.1	-30.4	-31.2	-26.2	-27.4	-30.5
TE.22	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	4	-38.9	-36.0	-28.1	-24.5	-21.7	-15.2	-27.4	316.0	31	-37.6	-33.8	-29.5	-30.1	-28.2	-27.4	-31.1
TE.23	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	4	-39.9	-32.3	-30.5	-21.3	-19.6	-16.9	-26.8	318.0	29	-34.5	-30.9	-31.5	-29.6	-26.3	-27.1	-30.0
TE.24	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	6	-40.8	-36.1	-29.5	-24.7	-20.1	-18.3	-28.2	312.0	37	-38.1	-32.1	-31.1	-32.2	-25.3	-27.8	-31.1
TE.25	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	4	-36.8	-35.3	-31.7	-23.9	-20.5	-14.6	-27.1	300.0	36	-34.6	-30.2	-30.8	-29.5	-27.0	-28.1	-30.0
TE.26	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	5	-40.6	-35.7	-30.4	-24.0	-19.3	-16.6	-27.8	302.0	39	-38.5	-31.1	-32.3	-31.4	-26.9	-25.5	-30.9
TE.27	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	5	-37.4	-36.0	-28.9	-22.5	-21.1	-16.5	-27.0	303.0	32	-36.6	-33.6	-30.8	-30.7	-26.4	-27.0	-30.8
TE.28	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	5	-39.2	-33.0	-27.8	-23.5	-19.0	-17.1	-26.6	319.0	36	-37.6	-32.6	-32.5	-29.4	-28.9	-25.9	-31.2
TE.29	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	5	-36.7	-36.2	-29.1	-23.6	-22.6	-15.8	-27.3	314.0	35	-38.5	-33.9	-32.2	-30.0	-26.9	-24.7	-31.0
TE.30	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	6	-38.0	-33.8	-31.1	-24.4	-20.7	-14.6	-27.1	311.0	30	-35.9	-31.6	-29.5	-28.1	-26.9	-27.0	-29.8
TE.31	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	7	-37.7	-34.1	-28.4	-24.1	-20.3	-16.7	-26.9	308.0	35	-36.1	-31.5	-32.5	-29.7	-26.3	-27.6	-30.6
TE.32	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	8	-37.6	-33.4	-27.9	-22.8	-20.2	-15.0	-26.1	281.0	29	-38.0	-32.1	-30.2	-29.6	-26.5	-26.2	-30.4
TE.33	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	8	-38.7	-33.9	-30.9	-24.2	-20.6	-17.5	-27.6	298.0	30	-35.5	-30.2	-29.1	-31.7	-27.9	-24.7	-29.8
TE.34	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	7	-39.2	-32.3	-29.8	-24.2	-21.3	-14.7	-26.9	290.0	31	-34.8	-32.1	-30.9	-30.6	-26.8	-26.0	-30.2
TE.35	Πολυσυμπιεστές	PQ	-40°C	6	-36.7	-35.4	-30.3	-23.8	-19.9	-15.5	-26.9	297.0	36	-36.0	-34.0	-30.0	-31.9	-26.4	-25.0	-30.6
TE.01	Ερμητικός	OQ	-40°C	17	-25.6	-25.7	-23.4	-21.7	-12.6	-19.7	-21.5	111.0	29	-39.5	-34.3	-30.8	-31.7	-27.1	-25.0	-31.4
TE.02	Ερμητικός	OQ	-40°C	11	-24.4	-28.0	-19.8	-26.2	-12.0	-23.5	-22.3	100.0	32	-36.2	-32.4	-33.3	-29.1	-26.5	-23.4	-30.2
TE.03	Ερμητικός	OQ	-40°C	13	-25.2	-27.1	-19.6	-24.5	-12.3	-23.1	-22.0	103.0	32	-37.6	-33.2	-33.2	-28.9	-25.5	-25.9	-30.7
TE.04	Ερμητικός	OQ	-40°C	12	-25.7	-26.6	-23.7	-23.9	-16.3	-19.8	-22.7	106.0	29	-39.4	-32.5	-30.0	-28.4	-26.2	-26.3	-30.5
TE.05	Ερμητικός	OQ	-40°C	11	-25.2	-26.3	-21.2	-24.0	-16.8	-20.4	-22.3	108.0	31	-36.5	-31.9	-32.4	-30.7	-26.0	-23.8	-30.2
TE.06	Ερμητικός	OQ	-40°C	16	-23.3	-27.5	-19.6	-21.5	-16.9	-20.9	-21.6	100.0	35	-36.7	-32.5	-30.3	-32.5	-24.8	-25.9	-30.4
TE.07	Ερμητικός	OQ	-40°C	16	-26.5	-27.5	-19.4	-25.4	-12.9	-19.9	-21.9	109.0	30	-37.9	-31.1	-32.2	-31.3	-28.3	-26.3	-31.2
TE.08	Ερμητικός	OQ	-40°C	12	-23.1	-26.2	-20.0	-24.4	-12.9	-21.1	-21.3	110.0	36	-38.8	-30.7	-32.5	-31.8	-27.5	-23.2	-30.7
TE.09	Ερμητικός	OQ	-40°C	12	-22.6	-27.9	-19.9	-27.1	-10.4	-19.3	-21.2	111.0	35	-37.6	-30.7	-33.3	-31.8	-27.1	-25.2	-31.0
TE.10	Ερμητικός	OQ	-40°C	14	-25.9	-27.7	-20.6	-25.9	-16.4	-21.4	-23.0	102.0	32	-37.0	-32.0	-29.3	-30.5	-24.4	-26.2	-29.9
TE.01	Ερμητικός	OQ	-70°C	10	-44.8	-38.2	-31.8	-42.3	-24.9	-42.6	-37.4	105.0	29	-61.3	-51.5	-48.8	-47.1	-47.4	-44.0	-50.0
TE.02	Ερμητικός	OQ	-70°C	16	-45.5	-41.2	-38.2	-41.5	-33.0	-42.1	-40.2	108.0	28	-63.0	-55.0	-53.0	-51.0	-48.3	-47.0	-52.9
TE.03	Ερμητικός	OQ	-70°C	9	-37.6	-34.5	-41.1	-35.8	-25.6	-36.9	-35.2	110.0	29	-54.8	-51.1	-52.5	-45.5	-44.5	-44.1	-48.7
TE.04	Ερμητικός	OQ	-70°C	15	-43.6	-43.5	-36.1	-41.7	-29.0	-40.2	-39.0	115.0	31	-64.1	-62.5	-55.8	-49.1	-46.4	-48.3	-54.4
TE.05	Ερμητικός	OQ	-70°C	14	-43.6	-42.4	-33.9	-36.1	-31.0	-39.4	-37.7	120.0	33	-60.7	-57.0	-48.7	-46.9	-42.3	-45.5	-50.2
TE.06	Ερμητικός	OQ	-70°C	5	-43.2	-35.6	-37.6	-35.5	-28.9	-39.5	-36.7	118.0	31	-65.1	-48.2	-49.8	-42.9	-47.6	-43.7	-49.6
TE.07	Ερμητικός	OQ	-70°C	17	-38.9	-38.7	-32.5	-42.2	-27.5	-38.5	-36.4	108.0	29	-59.5	-59.1	-47.1	-44.7	-46.7	-43.3	-50.1
TE.08	Ερμητικός	OQ	-70°C	11	-43.1	-35.5	-36.8	-42.0	-27.5	-42.6	-37.9	103.0	32	-62.7	-51.0	-52.0	-50.3	-44.7	-44.0	-50.8
TE.09	Ερμητικός	OQ	-70°C	12	-44.0	-31.3	-29.7	-36.5	-27.0	-36.0	-34.1	109.0	28	-67.0	-44.8	-42.5	-41.7	-38.7	-45.6	-46.7
TE.10	Ερμητικός	OQ	-70°C	17	-46.3	-35.2	-34.3	-46.1	-30.8	-41.4	-39.0	103.0	36	-64.4	-45.0	-49.8	-51.2	-46.0	-46.4	-50.5
TE.01	Ερμητικός	PQ	-40°C	14	-23.9	-25.0	-22.8	-21.8	-12.3	-22.2	-21.3	99.0	37	-37.7	-33.8	-30.4	-30.9	-25.9	-25.1	-30.6
TE.02	Ερμητικός	PQ	-40°C	13	-23.5	-27.4	-23.6	-24.0	-14.2	-24.4	-22.9	110.0	26	-37.4	-33.6	-29.4	-32.2	-28.3	-24.7	-30.9
TE.03	Ερμητικός	PQ	-40°C	15	-22.9	-26.9	-23.2	-26.2	-17.9	-21.7	-23.1	121.0	28	-38.3	-33.3	-32.0	-29.5	-27.5	-26.5	-31.2
TE.04	Ερμητικός	PQ	-40°C	10	-23.6	-27.5	-21.8	-22.2	-16.0	-24.0	-22.5	103.0	29	-35.6	-31.4	-32.4	-28.9	-27.6	-25.8	-30.3

Συγκριτική Ανάλυση Ομοιομορφίας Θερμοκρασίας και Απόδοσης σε Συστήματα Ψύξης Χαμηλών Θερμοκρασιών Ερμητικού Συμπιεστή, Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου και Πολυσυμπιεστών

Freezer ID	Freezer Type	Test	Temperature	OD_RT	OD_Mx_P1	OD_Mx_P2	OD_Mx_P3	OD_Mx_P4	OD_Mx_P5	OD_Mx_P6	OD_Mx_Avg	PF_TTGOOS	PF_RT	PF_Mx_P1	PF_Mx_P2	PF_Mx_P3	PF_Mx_P4	PF_Mx_P5	PF_Mx_P6	PF_Mx_Avg
TE.05	Ερμητικός	PQ	-40°C	14	-22.7	-27.4	-21.6	-26.2	-14.5	-24.3	-22.8	105.0	31	-36.9	-30.8	-31.4	-30.4	-26.7	-23.5	-29.9
TE.06	Ερμητικός	PQ	-40°C	13	-26.1	-27.3	-20.8	-25.1	-16.4	-24.4	-23.4	100.0	28	-37.0	-32.2	-32.6	-28.2	-25.1	-23.4	-29.7
TE.07	Ερμητικός	PQ	-40°C	17	-22.4	-26.8	-20.0	-22.9	-17.9	-19.3	-21.5	103.0	26	-36.4	-33.0	-29.4	-29.6	-24.8	-24.8	-29.7
TE.08	Ερμητικός	PQ	-40°C	11	-22.2	-24.8	-22.3	-25.0	-18.3	-23.8	-22.7	106.0	31	-37.8	-31.0	-29.7	-29.8	-25.3	-23.5	-29.5
TE.09	Ερμητικός	PQ	-40°C	14	-25.3	-25.3	-22.5	-23.8	-10.7	-19.8	-21.2	111.0	33	-37.7	-32.9	-32.6	-27.9	-27.2	-27.0	-30.9
TE.10	Ερμητικός	PQ	-40°C	17	-23.8	-25.5	-23.2	-25.6	-13.1	-20.4	-21.9	121.0	32	-39.0	-34.2	-29.6	-31.7	-28.1	-25.8	-31.4
TE.01	Ερμητικός	PQ	-70°C	11	-38.5	-37.7	-35.4	-36.3	-27.2	-40.9	-36.0	110.0	38	-60.6	-48.1	-47.5	-49.1	-44.9	-44.9	-49.2
TE.02	Ερμητικός	PQ	-70°C	17	-44.3	-37.6	-33.7	-45.0	-31.2	-39.3	-38.5	103.0	39	-58.0	-51.0	-55.9	-49.8	-46.2	-47.4	-51.4
TE.03	Ερμητικός	PQ	-70°C	14	-45.1	-33.9	-32.4	-38.7	-24.8	-39.6	-35.7	105.0	31	-60.5	-44.0	-49.4	-43.5	-41.2	-40.1	-46.4
TE.04	Ερμητικός	PQ	-70°C	16	-42.1	-36.6	-32.6	-41.7	-30.4	-45.0	-38.1	103.0	29	-61.2	-49.3	-51.5	-56.2	-48.2	-43.2	-51.6
TE.05	Ερμητικός	PQ	-70°C	7	-42.1	-33.4	-32.3	-36.0	-30.2	-36.6	-35.1	103.0	31	-65.7	-46.6	-48.9	-43.8	-46.8	-43.4	-49.2
TE.06	Ερμητικός	PQ	-70°C	9	-41.3	-43.4	-33.2	-44.6	-29.1	-41.1	-38.8	106.0	33	-55.5	-58.7	-53.2	-51.7	-48.6	-49.7	-52.9
TE.07	Ερμητικός	PQ	-70°C	10	-44.2	-30.0	-31.5	-41.1	-31.5	-37.8	-36.0	102.0	30	-61.6	-44.4	-48.3	-46.4	-42.9	-44.2	-48.0
TE.08	Ερμητικός	PQ	-70°C	14	-40.5	-39.3	-31.3	-45.0	-32.0	-40.8	-38.2	107.0	29	-56.0	-58.0	-49.1	-57.1	-50.1	-47.3	-52.9
TE.09	Ερμητικός	PQ	-70°C	9	-44.4	-46.7	-38.7	-41.4	-33.9	-42.6	-41.3	99.0	30	-59.0	-60.8	-58.0	-45.3	-55.1	-50.4	-54.8
TE.10	Ερμητικός	PQ	-70°C	14	-36.9	-43.5	-34.7	-45.1	-33.3	-43.4	-39.5	102.0	27	-58.7	-57.8	-56.2	-51.5	-52.6	-47.7	-54.1
TE.11	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-40°C	13	-24.0	-23.8	-20.3	-25.2	-19.0	-25.2	-22.9	120	24	-37.7	-30.7	-32.5	-30.5	-30.3	-25.9	-31.3
TE.12	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-40°C	12	-27.2	-24.2	-23.4	-28.1	-17.8	-25.5	-24.4	121	23	-39.5	-31.3	-31.9	-30.5	-27.6	-30.0	-31.8
TE.13	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-40°C	7	-29.6	-25.8	-22.2	-29.5	-17.8	-27.0	-25.3	120	28	-40.8	-33.6	-33.9	-34.0	-29.7	-28.8	-33.5
TE.14	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-40°C	12	-25.3	-25.5	-21.6	-25.6	-18.6	-24.1	-23.4	119	21	-35.5	-31.2	-33.2	-30.2	-28.0	-25.7	-30.6
TE.15	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-40°C	9	-24.9	-22.4	-22.8	-26.2	-17.8	-23.7	-23.0	110	25	-35.7	-31.6	-28.4	-27.9	-28.6	-27.0	-29.8
TE.16	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-40°C	11	-28.7	-24.4	-20.8	-25.6	-18.2	-25.4	-23.8	121	30	-38.1	-34.1	-32.2	-31.1	-27.5	-27.0	-31.7
TE.17	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-40°C	15	-25.8	-22.0	-22.2	-25.4	-19.5	-26.0	-23.5	125	28	-37.7	-31.1	-33.1	-30.7	-29.7	-28.6	-31.8
TE.18	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-40°C	13	-25.3	-23.5	-23.2	-28.6	-17.1	-25.4	-23.8	115	28	-38.4	-31.1	-33.2	-30.8	-28.5	-26.3	-31.4
TE.19	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-40°C	9	-26.2	-22.2	-20.4	-24.6	-20.1	-25.2	-23.1	128	29	-37.1	-32.8	-34.0	-31.4	-32.0	-28.0	-32.5
TE.20	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-40°C	9	-26.7	-25.6	-22.3	-26.9	-16.3	-26.3	-24.0	118	33	-36.3	-30.6	-32.9	-30.9	-28.9	-29.1	-31.4
TE.11	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-70°C	14	-40.3	-40.8	-33.7	-39.2	-32.4	-35.4	-37.0	125	28	-63.0	-56.0	-56.7	-48.5	-51.3	-46.8	-53.7
TE.12	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-70°C	12	-46.9	-42.0	-44.8	-41.0	-32.8	-36.6	-40.7	129	31	-63.9	-49.2	-59.0	-46.1	-51.8	-44.3	-52.4
TE.13	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-70°C	8	-46.3	-40.5	-38.2	-46.3	-25.2	-35.8	-38.7	114	26	-61.6	-55.9	-58.6	-51.0	-44.8	-44.5	-52.7
TE.14	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-70°C	13	-45.8	-42.5	-38.7	-43.1	-27.2	-42.5	-40.0	124	30	-60.3	-56.2	-57.9	-52.6	-45.2	-48.4	-53.4
TE.15	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-70°C	9	-41.8	-44.9	-36.2	-45.5	-31.8	-40.2	-40.1	122	28	-63.7	-50.6	-53.8	-51.3	-47.4	-46.4	-52.2
TE.16	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-70°C	11	-48.4	-42.9	-36.1	-46.2	-31.3	-39.5	-40.7	132	22	-61.9	-58.1	-52.6	-54.0	-45.9	-45.9	-53.0
TE.17	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-70°C	16	-40.6	-48.1	-43.7	-44.1	-30.0	-38.7	-40.9	110	26	-61.0	-52.3	-61.3	-54.5	-57.6	-45.4	-55.3
TE.18	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-70°C	15	-40.5	-41.6	-32.3	-39.1	-27.3	-34.9	-36.0	104	27	-54.4	-55.7	-54.4	-47.2	-36.9	-43.4	-48.7
TE.19	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-70°C	9	-45.0	-37.3	-41.5	-40.2	-26.4	-35.1	-37.6	112	29	-64.9	-48.3	-52.0	-47.6	-45.4	-42.5	-50.1
TE.20	Ελεύθερο Εμβολο	OQ	-70°C	8	-43.6	-41.3	-33.3	-46.9	-32.6	-42.1	-40.0	121	26	-61.4	-53.5	-50.3	-54.9	-47.4	-45.6	-52.2
TE.11	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-40°C	13	-26.2	-21.7	-20.4	-23.9	-17.2	-24.9	-22.4	120	29	-36.2	-34.4	-30.7	-30.6	-27.0	-25.7	-30.8
TE.12	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-40°C	7	-23.7	-22.2	-19.9	-23.9	-17.2	-24.4	-21.9	102	26	-37.8	-32.5	-29.4	-28.3	-27.9	-28.2	-30.7
TE.13	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-40°C	11	-27.7	-25.0	-25.6	-28.3	-20.3	-28.8	-25.9	120	33	-42.4	-34.4	-35.7	-34.4	-29.5	-30.1	-34.4
TE.14	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-40°C	13	-27.4	-24.2	-23.2	-24.7	-19.9	-24.4	-24.0	119	27	-37.6	-31.4	-31.4	-33.3	-30.4	-26.8	-31.8
TE.15	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-40°C	16	-25.4	-22.0	-20.4	-25.6	-18.5	-23.9	-22.6	115	31	-37.1	-32.2	-31.2	-28.9	-27.0	-27.8	-30.7
TE.16	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-40°C	14	-26.4	-25.5	-23.9	-24.8	-20.0	-26.0	-24.4	119	28	-40.4	-35.2	-31.2	-32.1	-29.5	-28.0	-32.7
TE.17	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-40°C	9	-26.0	-22.4	-20.8	-26.4	-16.6	-25.9	-23.0	120	24	-38.3	-31.8	-29.0	-28.2	-28.2	-25.7	-30.2
TE.18	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-40°C	15	-24.5	-22.8	-24.0	-28.5	-19.4	-23.3	-23.7	124	27	-38.4	-31.9	-31.5	-29.5	-30.7	-26.0	-31.3
TE.19	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-40°C	11	-26.1	-24.4	-21.9	-28.3	-19.3	-25.3	-24.2	121	26	-38.5	-30.5	-34.4	-33.0	-29.3	-25.1	-31.8
TE.20	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-40°C	11	-28.1	-24.1	-20.4	-28.0	-17.6	-23.5	-23.6	128	27	-39.3	-30.4	-31.4	-30.4	-29.7	-25.5	-31.1
TE.11	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-70°C	13	-42.6	-41.0	-39.3	-39.7	-29.2	-36.4	-38.0	117	25	-59.3	-50.9	-54.7	-47.0	-47.5	-43.4	-50.4
TE.12	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-70°C	8	-43.8	-44.9	-37.3	-41.9	-35.7	-40.4	-40.7	117	28	-58.3	-59.6	-53.4	-50.7	-52.6	-44.9	-53.3
TE.13	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-70°C	13	-44.5	-40.1	-37.8	-46.0	-35.1	-42.7	-41.0	112	29	-62.1	-50.1	-52.2	-59.3	-51.7	-44.5	-53.3
TE.14	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-70°C	14	-45.3	-43.0	-37.1	-42.5	-30.8	-38.3	-39.5	119	30	-63.9	-54.9	-52.8	-52.6	-45.6	-43.5	-52.2
TE.15	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-70°C	16	-45.4	-44.9	-34.2	-46.4	-25.3	-38.2	-39.1	120	28	-57.1	-52.6	-52.3	-54.1	-50.3	-43.7	-51.7
TE.16	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-70°C	14	-47.8	-44.7	-38.3	-44.0	-27.7	-37.4	-40.0	112	26	-63.6	-58.8	-55.1	-53.7	-47.1	-46.9	-54.2
TE.17	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-70°C	9	-43.9	-49.5	-39.2	-40.5	-33.1	-39.7	-41.0	128	27	-61.8	-68.9	-58.5	-45.4	-60.7	-49.3	-57.4
TE.18	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-70°C	15	-45.7	-42.6	-34.4	-52.4	-30.0	-39.5	-40.8	122	23	-66.9	-51.9	-54.8	-56.6	-56.4	-45.8	-55.4
TE.19	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-70°C	11	-46.3	-43.3	-34.1	-41.4	-23.2	-34.8	-37.2	112	28	-65.9	-49.8	-52.9	-51.0	-40.1	-41.6	-50.2
TE.20	Ελεύθερο Εμβολο	PQ	-70°C	15	-42.8	-54.2	-33.0	-37.3	-32.3	-40.4	-40.0	109	28	-65.6	-62.5	-53.4	-45.2	-49.9	-49.0	-54.3

Δεδομένα Δοκιμής Πήξης 10 λίτρων μπουκαλιών γεμισμένα με νερό

Ερμητικός Συμπιεστής								
Date/Time	Q002055_S1_499348	Q002055_S2_499371	Q002055_S1_499348			Q002055_S2_499371		
			Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης	Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης
24.Jan.2025 10:30:00	21,5	20,8	1			1		
24.Jan.2025 10:31:00	21,5	20,8	1			1		
24.Jan.2025 10:32:00	21,5	20,7	1			1		
24.Jan.2025 10:33:00	21,3	20,7	1			1		
24.Jan.2025 10:34:00	20,5	20,0	1			1		
24.Jan.2025 10:35:00	20,2	19,8	1			1		
24.Jan.2025 10:36:00	20,0	19,6	1			1		
24.Jan.2025 10:37:00	19,9	19,4	1			1		
24.Jan.2025 10:38:00	19,8	19,3	1			1		
...
24.Jan.2025 13:20:00	9,3	7,4	1			1		
24.Jan.2025 13:21:00	9,2	7,2	1			1		
24.Jan.2025 13:22:00	9,1	7,1	1			1		
24.Jan.2025 13:23:00	9,0	6,9	1			1		
24.Jan.2025 13:24:00	8,9	6,8	1			1		
24.Jan.2025 13:25:00	8,7	6,7	1			1		
24.Jan.2025 13:26:00	8,6	6,6	1			1		
24.Jan.2025 13:27:00	8,5	6,4	1			1		
...
24.Jan.2025 13:40:00	7,2	1,5	1			1		
24.Jan.2025 13:41:00	7,1	1,1	1			1		
24.Jan.2025 13:42:00	6,9	0,7	1			1		
24.Jan.2025 13:43:00	6,7	0,4	1			1		
24.Jan.2025 13:44:00	6,6	0,2	1			1		
24.Jan.2025 13:45:00	6,4	0,0	1			1		
24.Jan.2025 13:46:00	6,1	-0,1	1				1	
24.Jan.2025 13:47:00	6,0	-0,3	1				1	
24.Jan.2025 13:48:00	5,7	-0,3	1				1	
24.Jan.2025 13:49:00	5,5	-0,4	1				1	
24.Jan.2025 13:50:00	5,1	-0,5	1				1	
24.Jan.2025 13:51:00	4,7	-0,6	1				1	
24.Jan.2025 13:52:00	4,1	-0,6	1				1	
24.Jan.2025 13:53:00	3,9	-0,6	1				1	
24.Jan.2025 13:54:00	3,5	-0,7	1				1	
...
24.Jan.2025 14:08:00	0,4	-0,8	1				1	
24.Jan.2025 14:09:00	0,3	-0,8	1				1	
24.Jan.2025 14:10:00	0,2	-0,8	1				1	
24.Jan.2025 14:11:00	0,1	-0,8	1				1	
24.Jan.2025 14:12:00	0,1	-0,8	1				1	
24.Jan.2025 14:13:00	0,0	-0,8	1				1	
24.Jan.2025 14:14:00	-0,1	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 14:15:00	-0,1	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 14:16:00	-0,1	-0,9		1			1	
24.Jan.2025 14:17:00	-0,2	-0,9		1			1	
24.Jan.2025 14:18:00	-0,2	-0,9		1			1	
24.Jan.2025 14:19:00	-0,2	-0,9		1			1	
24.Jan.2025 14:20:00	-0,3	-0,9		1			1	
24.Jan.2025 14:21:00	-0,3	-0,9		1			1	
24.Jan.2025 14:22:00	-0,3	-0,9		1			1	
24.Jan.2025 14:23:00	-0,3	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 14:24:00	-0,3	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 14:25:00	-0,3	-0,9		1			1	
24.Jan.2025 14:26:00	-0,3	-0,9		1			1	
24.Jan.2025 14:27:00	-0,4	-0,8		1			1	
...
24.Jan.2025 22:44:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 22:45:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 22:46:00	-0,4	-0,7		1			1	
24.Jan.2025 22:47:00	-0,4	-0,7		1			1	
24.Jan.2025 22:48:00	-0,4	-0,7		1			1	
24.Jan.2025 22:49:00	-0,4	-0,7		1			1	

Ερμητικός Συμπιεστής								
Date/Time	Q002055_S1_499348	Q002055_S2_499371	Q002055_S1_499348			Q002055_S2_499371		
			Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης	Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης
24.Jan.2025 22:50:00	-0,4	-0,7		1			1	
24.Jan.2025 22:51:00	-0,4	-0,7		1			1	
24.Jan.2025 22:52:00	-0,4	-0,7		1			1	
24.Jan.2025 22:53:00	-0,4	-0,7		1			1	
24.Jan.2025 22:54:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 22:55:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 22:56:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 22:57:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 22:58:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 22:59:00	-0,4	-0,8		1			1	
...
24.Jan.2025 23:22:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 23:23:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 23:24:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 23:25:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 23:26:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 23:27:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 23:28:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 23:29:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 23:30:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 23:31:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 23:32:00	-0,4	-0,8		1			1	
24.Jan.2025 23:33:00	-0,4	-0,9		1				1
24.Jan.2025 23:34:00	-0,4	-0,9		1				1
24.Jan.2025 23:35:00	-0,4	-0,9		1				1
24.Jan.2025 23:36:00	-0,4	-0,9		1				1
24.Jan.2025 23:37:00	-0,4	-0,9		1				1
24.Jan.2025 23:38:00	-0,4	-0,9		1				1
24.Jan.2025 23:39:00	-0,4	-0,9		1				1
24.Jan.2025 23:40:00	-0,4	-0,9		1				1
...
25.Jan.2025 01:32:00	-0,4	-1,6		1				1
25.Jan.2025 01:33:00	-0,4	-1,6		1				1
25.Jan.2025 01:34:00	-0,4	-1,6		1				1
25.Jan.2025 01:35:00	-0,4	-1,6		1				1
25.Jan.2025 01:36:00	-0,4	-1,7		1				1
25.Jan.2025 01:37:00	-0,4	-1,7		1				1
25.Jan.2025 01:38:00	-0,4	-1,7		1				1
25.Jan.2025 01:39:00	-0,4	-1,7		1				1
25.Jan.2025 01:40:00	-0,4	-1,7		1				1
25.Jan.2025 01:41:00	-0,4	-1,7		1				1
25.Jan.2025 01:42:00	-0,4	-1,7		1				1
25.Jan.2025 01:43:00	-0,4	-1,8		1				1
25.Jan.2025 01:44:00	-0,4	-1,8		1				1
25.Jan.2025 01:45:00	-0,4	-1,9		1				1
25.Jan.2025 01:46:00	-0,4	-1,9		1				1
25.Jan.2025 01:47:00	-0,4	-2,0		1				1
25.Jan.2025 01:48:00	-0,4	-2,0		1				1
25.Jan.2025 01:49:00	-0,4	-2,0		1				1
25.Jan.2025 01:50:00	-0,4	-2,0		1				1
25.Jan.2025 01:51:00	-0,4	-2,1		1				1
25.Jan.2025 01:52:00	-0,4	-2,1		1				1
25.Jan.2025 01:53:00	-0,5	-2,1			1			1
25.Jan.2025 01:54:00	-0,5	-2,2			1			1
25.Jan.2025 01:55:00	-0,5	-2,2			1			1
25.Jan.2025 01:56:00	-0,5	-2,2			1			1
25.Jan.2025 01:57:00	-0,5	-2,3			1			1
25.Jan.2025 01:58:00	-0,5	-2,3			1			1
25.Jan.2025 01:59:00	-0,5	-2,4			1			1
25.Jan.2025 02:00:00	-0,5	-2,4			1			1
25.Jan.2025 02:01:00	-0,5	-2,4			1			1
25.Jan.2025 02:02:00	-0,5	-2,4			1			1
25.Jan.2025 02:03:00	-0,5	-2,4			1			1
25.Jan.2025 02:04:00	-0,5	-2,5			1			1

Ερμητικός Συμπιεστής								
Date/Time	Q002055_S1_499348	Q002055_S2_499371	Q002055_S1_499348			Q002055_S2_499371		
			Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης	Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης
25.Jan.2025 02:05:00	-0,5	-2,4			1			1
25.Jan.2025 02:06:00	-0,5	-2,3			1			1
25.Jan.2025 02:07:00	-0,5	-2,2			1			1
...
25.Jan.2025 22:57:00	-43,1	-47,9			1			1
25.Jan.2025 22:58:00	-43,1	-47,9			1			1
25.Jan.2025 22:59:00	-43,1	-47,9			1			1
25.Jan.2025 23:00:00	-43,1	-47,9			1			1
25.Jan.2025 23:01:00	-43,1	-47,9			1			1
25.Jan.2025 23:02:00	-43,2	-48,0			1			1
25.Jan.2025 23:03:00	-43,2	-48,0			1			1
25.Jan.2025 23:04:00	-43,2	-48,0			1			1
25.Jan.2025 23:05:00	-43,2	-48,0			1			1
25.Jan.2025 23:06:00	-43,2	-48,0			1			1
...
25.Jan.2025 23:45:00	-43,4	-48,1			1			1
25.Jan.2025 23:46:00	-43,4	-48,1			1			1
25.Jan.2025 23:47:00	-43,4	-48,1			1			1
25.Jan.2025 23:48:00	-43,4	-48,1			1			1
25.Jan.2025 23:49:00	-43,4	-48,1			1			1
25.Jan.2025 23:50:00	-43,4	-48,1			1			1
25.Jan.2025 23:51:00	-43,4	-48,1			1			1
25.Jan.2025 23:52:00	-43,4	-48,1			1			1
25.Jan.2025 23:53:00	-43,4	-48,1			1			1
25.Jan.2025 23:54:00	-43,4	-48,1			1			1
25.Jan.2025 23:55:00	-43,4	-48,1			1			1
25.Jan.2025 23:56:00	-43,4	-48,0			1			1
25.Jan.2025 23:57:00	-43,4	-48,0			1			1
25.Jan.2025 23:58:00	-43,4	-48,0			1			1
25.Jan.2025 23:59:00	-43,4	-48,0			1			1
26.Jan.2025 00:00:00	-43,4	-48,0			1			1
26.Jan.2025 00:01:00	-43,4	-48,0			1			
26.Jan.2025 00:02:00	-43,4	-48,0			1			
26.Jan.2025 00:03:00	-43,5	-48,0			1			
26.Jan.2025 00:04:00	-43,5	-48,0			1			
26.Jan.2025 00:05:00	-43,5	-48,0			1			
26.Jan.2025 00:06:00	-43,5	-48,0			1			
...
26.Jan.2025 03:01:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:02:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:03:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:04:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:05:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:06:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:07:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:08:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:09:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:10:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:11:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:12:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:13:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:14:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:15:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:16:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:17:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:18:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:19:00	-44,0	-48,3			1			
26.Jan.2025 03:20:00	-44,0	-48,3			1			

Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου								
Sensor Name:	Q002055_S1_499348	Q002055_S2_499371	Q002055_S1_499348			Q002055_S2_499371		
			Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης	Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης
05.Feb.2025 07:40:00	20,2	20,1	1			1		
05.Feb.2025 07:41:00	20,2	20,1	1			1		
05.Feb.2025 07:42:00	20,2	20,1	1			1		
05.Feb.2025 07:43:00	20,2	20,1	1			1		
...
05.Feb.2025 11:18:00	0,7	0,2	1			1		
05.Feb.2025 11:19:00	0,6	0,2	1			1		
05.Feb.2025 11:20:00	0,5	0,2	1			1		
05.Feb.2025 11:21:00	0,4	0,2	1			1		
05.Feb.2025 11:22:00	0,3	0,2	1			1		
05.Feb.2025 11:23:00	0,2	0,2	1			1		
05.Feb.2025 11:24:00	0,2	0,2	1			1		
05.Feb.2025 11:25:00	0,1	0,2	1			1		
05.Feb.2025 11:26:00	0,1	0,1	1			1		
05.Feb.2025 11:27:00	0,0	0,1	1			1		
05.Feb.2025 11:28:00	0,0	0,1	1			1		
05.Feb.2025 11:29:00	0,0	0,1	1			1		
05.Feb.2025 11:30:00	0,0	0,1	1			1		
05.Feb.2025 11:31:00	-0,1	0,1		1		1		
05.Feb.2025 11:32:00	-0,1	0,1		1		1		
05.Feb.2025 11:33:00	-0,1	0,1		1		1		
05.Feb.2025 11:34:00	-0,1	0,0		1		1		
05.Feb.2025 11:35:00	-0,1	0,0		1			1	
05.Feb.2025 11:36:00	-0,1	0,0		1			1	
05.Feb.2025 11:37:00	-0,1	0,0		1			1	
05.Feb.2025 11:38:00	-0,1	0,0		1			1	
05.Feb.2025 11:39:00	-0,2	0,0		1			1	
05.Feb.2025 11:40:00	-0,2	0,0		1			1	
05.Feb.2025 11:41:00	-0,2	0,0		1			1	
05.Feb.2025 11:42:00	-0,2	0,0		1			1	
05.Feb.2025 11:43:00	-0,2	-0,1		1			1	
05.Feb.2025 11:44:00	-0,2	-0,1		1			1	
05.Feb.2025 11:45:00	-0,2	-0,1		1			1	
05.Feb.2025 11:46:00	-0,2	-0,1		1			1	
05.Feb.2025 11:47:00	-0,2	-0,1		1			1	
05.Feb.2025 11:48:00	-0,2	-0,1		1			1	
05.Feb.2025 11:49:00	-0,2	-0,1		1			1	
05.Feb.2025 11:50:00	-0,2	-0,1		1			1	
05.Feb.2025 11:51:00	-0,2	-0,1		1			1	
05.Feb.2025 11:52:00	-0,2	-0,1		1			1	
05.Feb.2025 11:53:00	-0,2	-0,1		1			1	
05.Feb.2025 11:54:00	-0,2	-0,1		1			1	
...
05.Feb.2025 14:40:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:41:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:42:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:43:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:44:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 14:45:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:46:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:47:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:48:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:49:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:50:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:51:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:52:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:53:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:54:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:55:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:56:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:57:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:58:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 14:59:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 15:00:00	-0,3	-0,2		1			1	

Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου								
Sensor Name:	Q002055_S1_499348	Q002055_S2_499371	Q002055_S1_499348			Q002055_S2_499371		
			Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης	Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης
05.Feb.2025 15:01:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 15:02:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 15:03:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 15:04:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 15:05:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 15:06:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 15:07:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 15:08:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 15:09:00	-0,3	-0,3		1			1	
05.Feb.2025 15:10:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 15:11:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 15:12:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 15:13:00	-0,3	-0,2		1			1	
05.Feb.2025 15:14:00	-0,3	-0,3		1			1	
...
05.Feb.2025 16:51:00	-0,3	-0,5		1			1	
05.Feb.2025 16:52:00	-0,3	-0,6		1			1	
05.Feb.2025 16:53:00	-0,3	-0,6		1			1	
05.Feb.2025 16:54:00	-0,3	-0,6		1			1	
05.Feb.2025 16:55:00	-0,3	-0,6		1			1	
05.Feb.2025 16:56:00	-0,3	-0,6		1			1	
05.Feb.2025 16:57:00	-0,3	-0,7		1			1	
05.Feb.2025 16:58:00	-0,4	-0,7		1			1	
05.Feb.2025 16:59:00	-0,4	-0,7		1			1	
05.Feb.2025 17:00:00	-0,4	-0,7		1			1	
05.Feb.2025 17:01:00	-0,4	-0,7		1			1	
05.Feb.2025 17:02:00	-0,4	-0,7		1			1	
05.Feb.2025 17:02:25	-0,4	-0,7		1			1	
05.Feb.2025 17:03:00	-0,4	-0,8		1				1
05.Feb.2025 17:04:00	-0,4	-0,8		1				1
05.Feb.2025 17:05:00	-0,4	-0,8		1				1
05.Feb.2025 17:06:00	-0,4	-0,8		1				1
05.Feb.2025 17:07:00	-0,4	-0,8		1				1
05.Feb.2025 17:08:00	-0,4	-0,9		1				1
05.Feb.2025 17:09:00	-0,4	-0,9		1				1
05.Feb.2025 17:10:00	-0,4	-0,9		1				1
05.Feb.2025 17:11:00	-0,4	-0,9		1				1
05.Feb.2025 17:12:00	-0,4	-0,9		1				1
...
05.Feb.2025 17:22:00	-0,5	-1,1		1				1
05.Feb.2025 17:23:00	-0,5	-1,2		1				1
05.Feb.2025 17:24:00	-0,5	-1,2		1				1
05.Feb.2025 17:25:00	-0,5	-1,2		1				1
05.Feb.2025 17:26:00	-0,5	-1,2		1				1
05.Feb.2025 17:27:00	-0,5	-1,2		1				1
05.Feb.2025 17:28:00	-0,5	-1,3		1				1
05.Feb.2025 17:29:00	-0,6	-1,3		1				1
05.Feb.2025 17:30:00	-0,5	-1,3		1				1
05.Feb.2025 17:31:00	-0,5	-1,3		1				1
05.Feb.2025 17:32:00	-0,5	-1,3		1				1
05.Feb.2025 17:33:00	-0,6	-1,4		1				1
05.Feb.2025 17:34:00	-0,6	-1,4			1			1
05.Feb.2025 17:35:00	-0,6	-1,4			1			1
05.Feb.2025 17:36:00	-0,6	-1,4			1			1
05.Feb.2025 17:37:00	-0,6	-1,5			1			1
05.Feb.2025 17:38:00	-0,6	-1,5			1			1
05.Feb.2025 17:39:00	-0,6	-1,5			1			1
05.Feb.2025 17:40:00	-0,6	-1,5			1			1
05.Feb.2025 17:41:00	-0,6	-1,5			1			1
05.Feb.2025 17:42:00	-0,6	-1,6			1			1
05.Feb.2025 17:43:00	-0,6	-1,6			1			1
05.Feb.2025 17:44:00	-0,6	-1,6			1			1
05.Feb.2025 17:45:00	-0,6	-1,6			1			1
...

Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου								
Sensor Name:	Q002055_S1_499348	Q002055_S2_499371	Q002055_S1_499348			Q002055_S2_499371		
			Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης	Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης
06.Feb.2025 01:34:00	-10,7	-26,3			1			1
06.Feb.2025 01:35:00	-10,7	-26,4			1			1
06.Feb.2025 01:36:00	-10,7	-26,5			1			1
06.Feb.2025 01:37:00	-10,8	-26,6			1			1
06.Feb.2025 01:38:00	-10,8	-26,7			1			1
06.Feb.2025 01:39:00	-10,9	-26,8			1			1
06.Feb.2025 01:40:00	-10,9	-26,9			1			1
06.Feb.2025 01:41:00	-10,9	-27,0			1			1
06.Feb.2025 01:42:00	-11,0	-27,1			1			1
06.Feb.2025 01:43:00	-11,0	-27,3			1			1
06.Feb.2025 01:44:00	-11,1	-27,4			1			1
06.Feb.2025 01:45:00	-11,1	-27,5			1			1
06.Feb.2025 01:46:00	-11,1	-27,6			1			1
06.Feb.2025 01:47:00	-11,2	-27,7			1			1
06.Feb.2025 01:48:00	-11,2	-27,8			1			1
06.Feb.2025 01:49:00	-11,3	-27,9			1			1
...
06.Feb.2025 02:07:00	-12,0	-29,8			1			1
06.Feb.2025 02:08:00	-12,1	-29,9			1			1
06.Feb.2025 02:09:00	-12,1	-30,0			1			1
06.Feb.2025 02:10:00	-12,2	-30,1			1			1
06.Feb.2025 02:11:00	-12,2	-30,2			1			1
06.Feb.2025 02:12:00	-12,2	-30,3			1			1
06.Feb.2025 02:13:00	-12,3	-30,4			1			1
...
06.Feb.2025 02:21:00	-12,6	-31,1			1			1
06.Feb.2025 02:22:00	-12,7	-31,2			1			1
06.Feb.2025 02:23:00	-12,7	-31,3			1			1
06.Feb.2025 02:24:00	-12,8	-31,4			1			1
06.Feb.2025 02:25:00	-12,8	-31,5			1			1
06.Feb.2025 02:26:00	-12,9	-31,6			1			1
06.Feb.2025 02:27:00	-12,9	-31,7			1			1
06.Feb.2025 02:28:00	-13,0	-31,8			1			1
06.Feb.2025 02:29:00	-13,0	-31,8			1			1
06.Feb.2025 02:30:00	-13,1	-31,9			1			1
...
06.Feb.2025 09:31:00	-36,6	-45,2			1			1
06.Feb.2025 09:32:00	-36,6	-45,2			1			1
06.Feb.2025 09:33:00	-36,7	-45,2			1			1
06.Feb.2025 09:34:00	-36,7	-45,2			1			1
06.Feb.2025 09:35:00	-36,7	-45,2			1			1
06.Feb.2025 09:36:00	-36,7	-45,2			1			1
06.Feb.2025 09:37:00	-36,8	-45,2			1			1
06.Feb.2025 09:38:00	-36,8	-45,2			1			1
06.Feb.2025 09:39:00	-36,8	-45,2			1			1
06.Feb.2025 09:40:00	-36,8	-45,2			1			1
...
06.Feb.2025 09:58:00	-37,2	-45,3			1			1
06.Feb.2025 09:59:00	-37,2	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:00:00	-37,2	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:01:00	-37,3	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:02:00	-37,3	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:03:00	-37,3	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:04:00	-37,3	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:05:00	-37,3	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:06:00	-37,4	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:07:00	-37,4	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:08:00	-37,4	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:09:00	-37,4	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:10:00	-37,4	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:11:00	-37,5	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:12:00	-37,5	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:13:00	-37,5	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:14:00	-37,5	-45,3			1			1

Μηχανή Ελεύθερου Εμβόλου								
Sensor Name:	Q002055_S1_499348	Q002055_S2_499371	Q002055_S1_499348			Q002055_S2_499371		
			Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης	Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης
06.Feb.2025 10:15:00	-37,5	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:16:00	-37,6	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:17:00	-37,6	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:18:00	-37,6	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:19:00	-37,6	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:20:00	-37,6	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:21:00	-37,7	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:22:00	-37,7	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:23:00	-37,7	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:24:00	-37,7	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:25:00	-37,7	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:26:00	-37,7	-45,3			1			1
06.Feb.2025 10:27:00	-37,8	-45,3			1			1
...
06.Feb.2025 11:03:00	-38,3	-45,4			1			1
06.Feb.2025 11:04:00	-38,4	-45,4			1			1
06.Feb.2025 11:05:00	-38,4	-45,4			1			1
06.Feb.2025 11:06:00	-38,4	-45,4			1			1
06.Feb.2025 11:07:00	-38,4	-45,4			1			1
06.Feb.2025 11:08:00	-38,4	-45,4			1			1
06.Feb.2025 11:09:00	-38,4	-45,4			1			1
06.Feb.2025 11:10:00	-38,5	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:11:00	-38,5	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:12:00	-38,5	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:13:00	-38,5	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:14:00	-38,5	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:15:00	-38,5	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:16:00	-38,5	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:17:00	-38,6	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:18:00	-38,6	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:19:00	-38,6	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:20:00	-38,6	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:21:00	-38,6	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:22:00	-38,6	-45,4			1			
06.Feb.2025 11:23:00	-38,6	-45,4			1			
...
06.Feb.2025 23:46:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:47:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:48:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:49:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:50:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:51:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:52:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:53:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:54:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:55:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:56:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:57:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:58:00	-41,5	-44,9			1			
06.Feb.2025 23:59:00	-41,5	-44,9			1			
07.Feb.2025 00:00:00	-41,5	-44,9			1			
07.Feb.2025 00:01:00	-41,5	-44,9			1			
07.Feb.2025 00:02:00	-41,5	-44,9			1			
07.Feb.2025 00:03:00	-41,5	-44,9			1			
07.Feb.2025 00:04:00	-41,5	-44,9			1			
07.Feb.2025 00:05:00	-41,5	-44,9			1			
07.Feb.2025 00:06:00	-41,5	-44,9			1			

Πολυσυμπιεστές								
Date/Time	Q002055_S1_499348	Q002055_S2_499371	Q002055_S1_499348			Q002055_S2_499371		
			Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης	Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης
12.Feb.2025 16:30:00	21,4	21,2	1			1		
12.Feb.2025 16:31:00	21,3	21,2	1			1		
12.Feb.2025 16:32:00	21,3	21,2	1			1		
12.Feb.2025 16:33:00	21,3	21,2	1			1		
12.Feb.2025 16:34:00	21,3	21,2	1			1		
12.Feb.2025 16:35:00	21,3	21,2	1			1		
12.Feb.2025 16:36:00	21,3	21,2	1			1		
12.Feb.2025 16:37:00	21,3	21,2	1			1		
...
12.Feb.2025 18:54:00	1,9	1,9	1			1		
12.Feb.2025 18:55:00	1,4	1,7	1			1		
12.Feb.2025 18:56:00	1,1	1,5	1			1		
12.Feb.2025 18:57:00	0,9	1,3	1			1		
12.Feb.2025 18:58:00	0,6	1,1	1			1		
12.Feb.2025 18:59:00	0,5	1,0	1			1		
12.Feb.2025 19:00:00	0,3	0,8	1			1		
12.Feb.2025 19:01:00	0,2	0,6	1			1		
12.Feb.2025 19:02:00	0,1	0,5	1			1		
12.Feb.2025 19:03:00	0,0	0,4	1			1		
12.Feb.2025 19:04:00	0,0	0,4		1		1		
12.Feb.2025 19:05:00	-0,1	0,4		1		1		
12.Feb.2025 19:06:00	-0,1	0,3		1		1		
12.Feb.2025 19:07:00	-0,2	0,3		1		1		
12.Feb.2025 19:08:00	-0,2	0,2		1		1		
12.Feb.2025 19:09:00	-0,3	0,2		1		1		
12.Feb.2025 19:10:00	-0,3	0,2		1		1		
12.Feb.2025 19:11:00	-0,3	0,2		1		1		
12.Feb.2025 19:12:00	-0,3	0,1		1		1		
12.Feb.2025 19:13:00	-0,3	0,1		1		1		
12.Feb.2025 19:14:00	-0,4	0,1		1		1		
12.Feb.2025 19:15:00	-0,4	0,1		1		1		
12.Feb.2025 19:16:00	-0,4	0,1		1		1		
12.Feb.2025 19:17:00	-0,4	0,0		1		1		
12.Feb.2025 19:18:00	-0,4	0,0		1			1	
12.Feb.2025 19:19:00	-0,4	0,0		1			1	
12.Feb.2025 19:20:00	-0,4	0,0		1			1	
12.Feb.2025 19:21:00	-0,4	0,0		1			1	
12.Feb.2025 19:22:00	-0,4	0,0		1			1	
12.Feb.2025 19:23:00	-0,4	0,0		1			1	
12.Feb.2025 19:24:00	-0,4	-0,1		1			1	
12.Feb.2025 19:25:00	-0,4	-0,1		1			1	
12.Feb.2025 19:26:00	-0,4	-0,1		1			1	
12.Feb.2025 19:27:00	-0,4	-0,1		1			1	
...
12.Feb.2025 20:29:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:30:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:31:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:32:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:33:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:34:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:35:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:36:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:37:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:38:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:39:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:40:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:41:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:42:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:43:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:44:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:45:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:46:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:47:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:48:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:49:00	-0,5	-0,3		1			1	

Πολυσυμπιεστές								
Date/Time	Q002055_S1_499348	Q002055_S2_499371	Q002055_S1_499348			Q002055_S2_499371		
			Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης	Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης
12.Feb.2025 20:50:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:51:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:52:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:53:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:54:00	-0,5	-0,3		1			1	
12.Feb.2025 20:55:00	-0,5	-0,4		1			1	
12.Feb.2025 20:56:00	-0,5	-0,4		1			1	
12.Feb.2025 20:57:00	-0,5	-0,4		1			1	
12.Feb.2025 20:58:00	-0,5	-0,4		1			1	
12.Feb.2025 20:59:00	-0,5	-0,4		1			1	
12.Feb.2025 21:00:00	-0,5	-0,4		1			1	
12.Feb.2025 21:01:00	-0,5	-0,4		1			1	
12.Feb.2025 21:02:00	-0,5	-0,4		1			1	
12.Feb.2025 21:03:00	-0,5	-0,4		1			1	
12.Feb.2025 21:04:00	-0,5	-0,4		1			1	
12.Feb.2025 21:05:00	-0,5	-0,5		1			1	
12.Feb.2025 21:06:00	-0,5	-0,5		1			1	
12.Feb.2025 21:07:00	-0,5	-0,5		1			1	
12.Feb.2025 21:08:00	-0,5	-0,5		1			1	
12.Feb.2025 21:09:00	-0,5	-0,5		1			1	
12.Feb.2025 21:10:00	-0,5	-0,5		1			1	
12.Feb.2025 21:11:00	-0,5	-0,5		1			1	
12.Feb.2025 21:12:00	-0,5	-0,6		1				1
12.Feb.2025 21:13:00	-0,5	-0,6		1				1
12.Feb.2025 21:14:00	-0,5	-0,6		1				1
12.Feb.2025 21:15:00	-0,5	-0,6		1				1
12.Feb.2025 21:16:00	-0,5	-0,6		1				1
12.Feb.2025 21:17:00	-0,5	-0,6		1				1
12.Feb.2025 21:18:00	-0,5	-0,7		1				1
12.Feb.2025 21:19:00	-0,5	-0,7		1				1
12.Feb.2025 21:20:00	-0,5	-0,7		1				1
12.Feb.2025 21:21:00	-0,5	-0,7		1				1
12.Feb.2025 21:22:00	-0,5	-0,7		1				1
12.Feb.2025 21:23:00	-0,5	-0,7		1				1
12.Feb.2025 21:24:00	-0,5	-0,7		1				1
12.Feb.2025 21:25:00	-0,5	-0,7		1				1
12.Feb.2025 21:26:00	-0,5	-0,8		1				1
...
12.Feb.2025 22:07:00	-0,4	-1,4		1				1
12.Feb.2025 22:08:00	-0,4	-1,4		1				1
12.Feb.2025 22:09:00	-0,4	-1,4		1				1
12.Feb.2025 22:10:00	-0,4	-1,5		1				1
12.Feb.2025 22:11:00	-0,4	-1,5		1				1
12.Feb.2025 22:12:00	-0,4	-1,5		1				1
12.Feb.2025 22:13:00	-0,4	-1,5		1				1
12.Feb.2025 22:14:00	-0,4	-1,5		1				1
12.Feb.2025 22:15:00	-0,4	-1,5		1				1
12.Feb.2025 22:16:00	-0,4	-1,5		1				1
12.Feb.2025 22:17:00	-0,4	-1,6		1				1
12.Feb.2025 22:18:00	-0,4	-1,6		1				1
12.Feb.2025 22:19:00	-0,4	-1,6		1				1
12.Feb.2025 22:20:00	-0,4	-1,6		1				1
12.Feb.2025 22:21:00	-0,4	-1,6		1				1
12.Feb.2025 22:22:00	-0,4	-1,6		1				1
12.Feb.2025 22:23:00	-0,4	-1,6		1				1
12.Feb.2025 22:24:00	-0,4	-1,6		1				1
12.Feb.2025 22:25:00	-0,4	-1,7		1				1
12.Feb.2025 22:26:00	-0,4	-1,7		1				1
12.Feb.2025 22:27:00	-0,4	-1,7		1				1
12.Feb.2025 22:28:00	-0,4	-1,8		1				1
12.Feb.2025 22:29:00	-0,4	-1,8		1				1
12.Feb.2025 22:30:00	-0,4	-1,8		1				1
12.Feb.2025 22:31:00	-0,5	-1,8			1			1
12.Feb.2025 22:32:00	-0,5	-1,9			1			1
12.Feb.2025 22:33:00	-0,5	-1,9			1			1

Πολυσυμπιεστές								
Date/Time	Q002055_S1_499348	Q002055_S2_499371	Q002055_S1_499348			Q002055_S2_499371		
			Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης	Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης
12.Feb.2025 22:34:00	-0,5	-1,9			1			1
12.Feb.2025 22:35:00	-0,5	-2,0			1			1
12.Feb.2025 22:36:00	-0,5	-2,0			1			1
12.Feb.2025 22:37:00	-0,5	-2,0			1			1
12.Feb.2025 22:38:00	-0,5	-2,0			1			1
12.Feb.2025 22:39:00	-0,5	-2,1			1			1
12.Feb.2025 22:40:00	-0,5	-2,1			1			1
12.Feb.2025 22:41:00	-0,5	-2,1			1			1
12.Feb.2025 22:42:00	-0,5	-2,1			1			1
12.Feb.2025 22:43:00	-0,4	-2,1			1			1
12.Feb.2025 22:44:00	-0,4	-2,1			1			1
12.Feb.2025 22:45:00	-0,4	-2,1			1			1
12.Feb.2025 22:46:00	-0,4	-2,2			1			1
...
13.Feb.2025 01:20:00	-2,0	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:21:00	-2,0	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:22:00	-2,0	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:23:00	-2,0	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:24:00	-2,0	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:25:00	-2,0	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:26:00	-2,0	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:27:00	-2,0	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:28:00	-2,1	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:29:00	-2,1	-6,0			1			1
13.Feb.2025 01:30:00	-2,1	-6,0			1			1
13.Feb.2025 01:31:00	-2,2	-6,0			1			1
13.Feb.2025 01:32:00	-2,1	-6,0			1			1
13.Feb.2025 01:33:00	-2,2	-6,0			1			1
13.Feb.2025 01:34:00	-2,3	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:35:00	-2,3	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:36:00	-2,3	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:37:00	-2,3	-5,8			1			1
13.Feb.2025 01:38:00	-2,3	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:39:00	-2,3	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:40:00	-2,3	-5,9			1			1
13.Feb.2025 01:41:00	-2,3	-5,8			1			1
13.Feb.2025 01:42:00	-2,3	-5,8			1			1
13.Feb.2025 01:43:00	-2,3	-5,7			1			1
13.Feb.2025 01:44:00	-2,2	-5,6			1			1
13.Feb.2025 01:45:00	-2,2	-5,5			1			1
13.Feb.2025 01:46:00	-2,2	-5,4			1			1
13.Feb.2025 01:47:00	-2,1	-5,4			1			1
13.Feb.2025 01:48:00	-2,1	-5,3			1			1
13.Feb.2025 01:49:00	-2,1	-5,3			1			1
13.Feb.2025 01:50:00	-2,0	-5,3			1			1
13.Feb.2025 01:51:00	-2,0	-5,2			1			1
13.Feb.2025 01:52:00	-2,0	-5,2			1			1
13.Feb.2025 01:53:00	-2,0	-5,2			1			1
13.Feb.2025 01:54:00	-2,0	-5,2			1			1
13.Feb.2025 01:55:00	-2,0	-5,2			1			1
13.Feb.2025 01:56:00	-2,0	-5,2			1			1
13.Feb.2025 01:57:00	-2,1	-5,2			1			1
13.Feb.2025 01:58:00	-2,1	-5,2			1			1
13.Feb.2025 01:59:00	-2,0	-5,2			1			1
13.Feb.2025 02:00:00	-2,3	-5,3			1			1
13.Feb.2025 02:01:00	-2,3	-5,3			1			1
13.Feb.2025 02:02:00	-2,4	-5,4			1			1
13.Feb.2025 02:03:00	-2,4	-5,4			1			1
13.Feb.2025 02:04:00	-2,5	-5,5			1			1
13.Feb.2025 02:05:00	-2,5	-5,5			1			1
13.Feb.2025 02:06:00	-2,5	-5,6			1			1
13.Feb.2025 02:07:00	-2,5	-5,6			1			1
13.Feb.2025 02:08:00	-2,5	-5,6			1			1
13.Feb.2025 02:09:00	-2,5	-5,7			1			1
13.Feb.2025 02:10:00	-2,5	-5,7			1			1

Πολυσυμπιεστές								
Date/Time	Q002055_S1_499348	Q002055_S2_499371	Q002055_S1_499348			Q002055_S2_499371		
			Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης	Χρόνος 1ης Φάσης	Χρόνος 3ης Φάσης	Χρόνος 5ης Φάσης
13.Feb.2025 02:11:00	-2,5	-5,8			1			1
13.Feb.2025 02:12:00	-2,5	-5,8			1			1
13.Feb.2025 02:13:00	-2,6	-5,9			1			1
13.Feb.2025 02:14:00	-2,6	-5,9			1			1
13.Feb.2025 02:15:00	-2,7	-6,0			1			1
13.Feb.2025 02:16:00	-2,8	-6,1			1			1
13.Feb.2025 02:17:00	-2,8	-6,1			1			1
13.Feb.2025 02:18:00	-2,9	-6,2			1			1
13.Feb.2025 02:19:00	-3,0	-6,3			1			1
13.Feb.2025 02:20:00	-3,1	-6,4			1			1
13.Feb.2025 02:21:00	-3,1	-6,4			1			1
13.Feb.2025 02:22:00	-3,1	-6,5			1			1
13.Feb.2025 02:23:00	-3,2	-6,6			1			1
13.Feb.2025 02:24:00	-3,2	-6,7			1			1
13.Feb.2025 02:25:00	-3,3	-6,8			1			1
13.Feb.2025 02:26:00	-3,3	-6,9			1			1
13.Feb.2025 02:27:00	-3,4	-6,9			1			1
...
13.Feb.2025 20:48:00	-40,5	-40,4			1			1
13.Feb.2025 20:49:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 20:50:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 20:51:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 20:52:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 20:53:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 20:54:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 20:55:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 20:56:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 20:57:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 20:58:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 20:59:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 21:00:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 21:01:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 21:02:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 21:03:00	-40,6	-40,4			1			1
13.Feb.2025 21:04:00	-40,6	-40,3			1			1
13.Feb.2025 21:05:00	-40,6	-40,3			1			1
13.Feb.2025 21:06:00	-40,6	-40,3			1			1

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.