



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θερμοδυναμική Συμπεριφορά Αναγεννητή AMR
Μαγνητικού Ψύκτη

ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Δ. ΘΕΟΔΩΡΟΣ

Επιβλέπων: ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΡΟΓΔΑΚΗΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1 Ιστορική Αναδρομή	9
1.2 Λόγοι που μας ώθησαν στη Μαγνητική Ψύξη	12
1.3 Τι είναι η Μαγνητική Ψύξη	13
1.4 Ψυκτικοί Κύκλοι της Μαγνητικής Ψύξης	15
1.4.1 Μαγνητικός Κύκλος του Ericsson	15
1.4.2 Μαγνητικός Κύκλος του Brayton	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΨΥΞΗ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ	19
2.1 1 ^η Γενιά Μαγνητικών Ψυγείων σε Θερμοκρασίες Δωματίου	21
2.2 2 ^η Γενιά Μαγνητικών Ψυγείων σε Θερμοκρασίες Δωματίου	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Η ΜΑΓΝΗΤΟΘΕΡΜΙΔΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ	59
3.1 Βασικές Αρχές και η Ανακάλυψη του Φαινομένου	59
3.2 Μετρήσεις Σχετικά με τη Μαγνητοθερμιδική Επίδραση	62
3.3 Η Μαγνητοθερμιδική Επίδραση σε Παραμαγνήτες	66
3.4 Η Μαγνητοθερμιδική Επίδραση και η Μαγνητική Μεταβατική Φάση ..	67
3.4.1 Η Μαγνητοθερμιδική Επίδραση σε Χαμηλές Θερμοκρασίες	68
3.4.2 Η Μαγνητοθερμιδική Επίδραση σε Ενδιάμεσες Θερμοκρασίες	69
3.4.3 Η Μαγνητοθερμιδική Επίδραση σε Θερμοκρασίες Δωματίου	70
3.4.3.1 Επιλογή Υλικού σε Θερμοκρασίες Δωματίου	71
3.5 Η Γιγάντια Μαγνητοθερμιδική Επίδραση	72
3.6 Πιθανά Προβλήματα από τη χρήση των Υλικών που Εμφανίζουν τη Γιγάντια Μαγνητοθερμιδική Επίδραση στους Μαγνητικούς Ψύκτες	73
3.7 Το Γαδολίνιο και τα Κράματά του	75
3.8 Κόστος των Μαγνητοθερμιδικών Υλικών	77
3.9 Χρήσιμα Συμπεράσματα για το Μέλλον	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΕΣ	81
4.1 Λόγοι Χρησιμοποίησης των Αναγεννητών	81

4.2 Είδη Αναγεννητών	81
4.3 Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά των Αναγεννητών	82
4.4 Ο Ενεργός Μαγνητικός Αναγεννητής	84
4.4.1 Ο Κύκλος του Ενεργού Μαγνητικού Αναγεννητή	86
4.4.2 Βασικοί Παράμετροι Λειτουργίας	89
4.4.3 Θερμοκρασιακό Προφίλ και Ψυκτική Ισχύς	90
4.4.4 Διαστρωμάτωση	90
4.4.5 Βασικές Εξισώσεις Ενεργειακού Ισοζυγίου	93
4.4.6 Αναλυτικές Εξισώσεις Ενεργού Μαγνητικού Αναγεννητή	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ	
ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ AMR	101
5.1 Περιγραφή, Ανάλυση και Υλοποίηση του Μοντέλου	102
5.2 Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	107
5.3 Συμπεράσματα	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΜΑΓΝΗΤΕΣ	
6.1 Χαρακτηριστικά-Απαιτήσεις Μαγνητών	117
6.2 Δημιουργία Μαγνητικού Πεδίου	118
6.2.1 Ιδιότητες των Μαγνητικών Υλικών	114
6.2.2 Μόνιμοι Μαγνήτες	119
6.2.2.1 Μαλακά Μαγνητικά Υλικά	122
6.3 Σχεδιασμός ενός Μαγνήτη	126
6.4 Δημοσιευμένα Μαγνητικά Μοντέλα	131
6.4.1 Απλά Μαγνητικά Κυκλώματα	132
6.4.1.1 Ο Μαγνήτης του Zheng	132
6.4.1.2 Ο Μαγνήτης του Vasilie και του Muller	133
6.4.1.3 Ο Μαγνήτης του Bohiga	134
6.4.1.4 Ο Μαγνήτης του Tagliafico	135
6.4.1.5 Ο Μαγνήτης του Tusek	135
6.4.2 Μαγνητικές Συνδεσμολογίες τύπου Halbach	137
6.4.2.1 Ο Μαγνήτης του Lee	137
6.4.2.2 Ο Μαγνήτης του Engelbrecht	138

6.4.2.3 Ο Μαγνήτης του Lu	139
6.4.2.4 Ο Μαγνήτης των Kim και Jeong	140
6.4.2.5 Ο Μαγνήτης των Tura και Rowe.....	140
6.4.3 Σύνθετες Μαγνητικές Δομές.....	142
6.4.3.1 Ο Μαγνήτης του Zimm.....	142
6.4.3.2 Ο Μαγνήτης του Okamura	143
6.5 Σύγκριση και Σχολιασμός.....	144
6.5.1 Σχεδιασμός του Βέλτιστου Μαγνήτη.....	146
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	147
7.1 Υβριδικά Υλικά	142
7.2 Υγρά Μέταλλα.....	151
7.3 Αναγεννητική Συσκευή Με Ρευστό Υψηλής Διαπερατότητας	153
7.4 Χρήση Μαγνητοθερμικού Ρευστού.....	156
7.5 Αυτόνομα Συστήματα Ψύξης	158
7.6 Υβριδικές Μαγνητοθερμικές Κλιματιστικές Συσκευές.....	160
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	165
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	179
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	185
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	187

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ένας κύκλος σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ρογδάκη Εμμανουήλ για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για την καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω τη διπλωματική μου παράλληλα με ένα internship το οποίο πραγματοποίησα στο European Space Agency στην Ολλανδία, όπου χωρίς τη συγκατάθεσή του δεν θα μπορούσα να το υλοποιήσω.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για τη συμπαράστασή τους, την υπομονή τους και τη στήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την υλοποίηση ενός μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του αναγεννητή AMR ενός μαγνητικού ψύκτη. Η υλοποίηση του παραπάνω μοντέλου πραγματοποιείται με τη χρησιμοποίηση του λογισμικού πακέτου Matlab. Επίσης, πέραν από τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του αναγεννητή επιτυγχάνεται μια προσπάθεια βελτιστοποίησης ορισμένων παραμέτρων λειτουργίας του όπως είναι η συχνότητα λειτουργίας της μαγνητικής συσκευής, το ψυκτικό φορτίο του αναγεννητή, η παροχή μάζας καθώς και του συντελεστή ψυκτικής απόδοσης (COP).

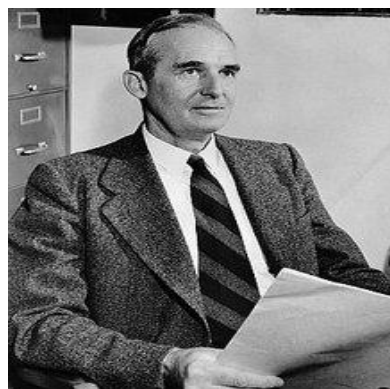
Προτού, όμως ξεκινήσει η υλοποίηση κρίνεται απαραίτητο να δοθεί η σωστή ερμηνεία και η περιγραφή του φαινομένου της μαγνητικής ψύξης. Γίνεται λοιπόν, μια ιστορική αναδρομή στην ανακάλυψη αυτού του φαινομένου και κατόπιν παρουσιάζονται οι σημαντικότερες μαγνητικές ψυκτικές συσκευές που έχουν κατασκευαστεί όλα αυτά τα χρόνια. Επίσης, περιγράφεται αναλυτικά η μαγνητοθερμιδική επίδραση, πάνω στην οποία στηρίζεται η λειτουργία όλων των μαγνητικών ψυκτικών συσκευών. Παρουσιάζονται διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου, ενώ παράλληλα αναλύονται και οι εξισώσεις που τη διέπουν. Στη συνέχεια δίνεται μια πλήρης περιγραφή του κύκλου του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή, καθώς και των θερμοδυναμικών εξισώσεων που διέπουν τον AMR. Έπειτα και από την υλοποίηση του υπολογιστικού μοντέλου ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των μαγνητών που χρησιμοποιούνται στις ψυκτικές συσκευές και διάφοροι τρόποι υπολογισμού του βέλτιστου μαγνητικού σχεδιασμού. Τέλος, γίνεται μια αναφορά σε μελλοντικές εφαρμογές που μπορεί να επιτύχουμε με την μαγνητική ψύξη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η μελέτη της μαγνητικής ψύξης ξεκίνησε με την ανακάλυψη της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης (Magnetocaloric effect ,MCE) πριν από περίπου 120 χρόνια και συγκεκριμένα το 1881 από τον Γερμανό φυσικό Emil Warburg[1]. Η μαγνητοθερμιδική επίδραση εφαρμόστηκε αρχικά στην κρυογεννητική ψύξη μέχρι το 1930, χρονική περίοδο κατά την οποία χρησιμοποιήθηκε ευρέως για την υδροποίηση του υδρογόνου και του ηλίου. Ωστόσο, οι βασικές αρχές για την εφαρμογή του φαινομένου αυτού στη ψύξη προτάθηκαν από τους Debye και Giaque [2] το 1933. Αυτοί οι δύο επιστήμονες ανακάλυψαν ότι η μαγνητοθερμιδική επίδραση μπορούσε να μας οδηγήσει σε θερμοκρασίες πολύ κοντά στο απόλυτο μηδέν όταν απομαγνητίζουμε αδιαβατικά ένα άλας μαγνήτη. Από εκείνη την περίοδο και μετέπειτα άρχισαν να κατασκευάζονται οι πρώτοι μαγνητικοί ψύκτες.



Σχήμα 1.1: Οι πρωτοπόροι της μαγνητικής ψύξης. Emil Warburg(1846-1931)[3] στα αριστερά και William Giaque(1895-1982)[4] στα δεξιά.

Ένας από τους πρωτοπόρους ήταν ο Heer [5] ο οποίος το 1954 ύστερα από σκληρές έρευνες κατάφερε να φτιάξει τον πρώτο μαγνητικό ψύκτη που παρείχε συνεχόμενη χαμηλή θερμοκρασία ψύξης(<1 K) και η οποία χρειαζόταν σε ερευνητικό επίπεδο για την επίλυση φυσικών προβλημάτων. Συνεχιστής των προσπαθειών του Heer ήταν ο Van Geuns [6], ο οποίος το 1966 έκανε μια λεπτομερή ανάλυση για το σχεδιασμό μαγνητικών ψυγείων σε θερμοκρασίες 4-15 K. Δυστυχώς όμως, οποιαδήποτε εξέλιξη

υπήρξε πάνω σε αυτή την ανακάλυψη του Geuns δεν γνωστοποιήθηκε αλλά ούτε και παρουσιάστηκε στο ευρύ κοινό.

Η μεγάλη εξέλιξη της μαγνητικής ψύξης έγινε το 1976 στο Lewis Research Center of American National Aeronautics and Space Administration, όταν ο Brown [7] κατάφερε και κατασκεύασε την πρώτη πειραματική συσκευή μαγνητικής ψύξης που λειτουργούσε σε θερμοκρασίες δωματίου, στηριζόμενη στο μαγνητοθερμιδικό φαινόμενο. Αυτή η συσκευή χρησιμοποιούσε έναν υπεραγώγιμο μαγνήτη που είχε σαν συνέπεια τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου εντάσεως 7 Tesla, ενώ παράλληλα πετύχαινε μέγιστο εύρος θερμοκρασίας 47 K με τη χρησιμοποίηση του γαδολινίου(Gd) ως ψυκτικού μέσου. Εκείνη την περίοδο ο ψυκτικός κύκλος του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή (AMR cycle) δεν είχε ακόμα ανακαλυφθεί, ωστόσο ο Brown διερεύνησε διάφορους ψυκτικούς κύκλους οι οποίοι εφαρμόζονταν στη συσκευή του και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο κύκλος της ‘Σταθερής Μαγνήτισης’ έδινε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

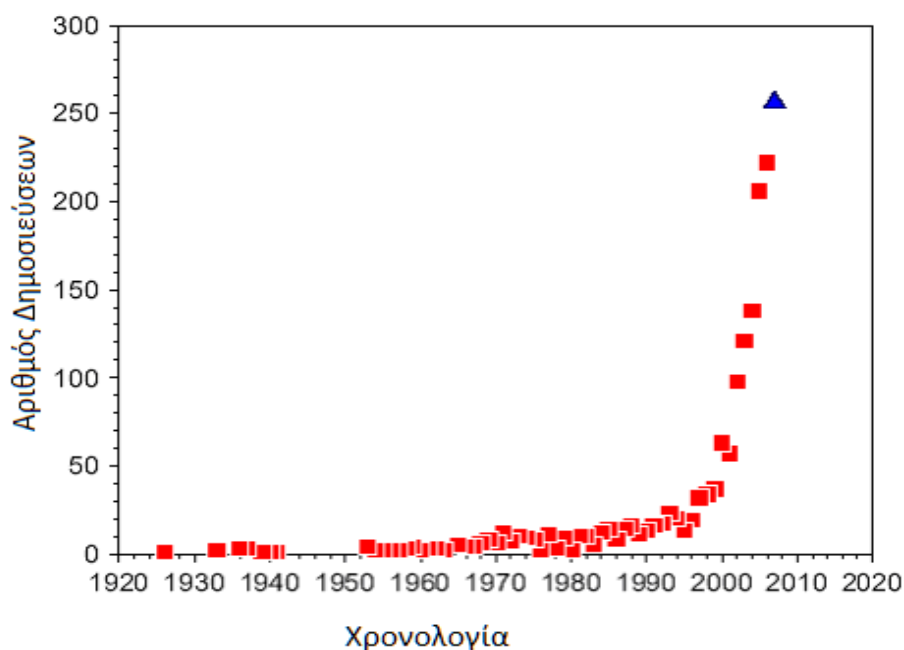
Δύο χρόνια αργότερα στο Εθνικό εργαστήριο του Los Alamos ο Steyart [8] σε συνεργασία με μια αεροπορική εταιρεία και με ερευνητές από το πανεπιστήμιο Grenoble της Γαλλίας διαμόρφωσαν μια περιστροφική συσκευή μαγνητικής ψύξης. Σε αυτή τη συσκευή μια μάζα μαγνητικού υλικού περιστρεφόταν διαδοχικά διαμέσου μιας ψυχρής θερμικής δεξαμενής, ενός αδιαβατικού μαγνητικού πεδίου, ενός θερμού θερμοδοχείου και μιας αδιαβατικής περιοχής όπου δεν εμφανίζονται μαγνητικά πεδία. Όλη αυτή η σύντομη διαδικασία που περιγράφηκε προσεγγίζει τον κύκλο Carnot.

Επίσης, στο ίδιο ερευνητικό κέντρο κατασκευάστηκαν το 1979 παλινδρομικές συσκευές μαγνητικής ψύξης από τον Barclay [9]. Παλινδρομικές συσκευές δημιουργήθηκαν ακόμα από το Johnson [10] το 1984, καθώς επίσης και από τον David Taylor [11] στο Naval Research Center Patton το 1986 και από άλλους ερευνητές στο πανεπιστήμιο Grenoble της Γαλλίας το 1986. Όσο αναφορά τη λειτουργία αυτών των συστημάτων το υλικό μετακινείται γραμμικά εντός και εκτός ενός μαγνητικού πεδίου και (εντός και εκτός) ενός θερμοδοχείου.

Μια από τις σημαντικότερες ανακαλύψεις έγινε το 1983 από τον Barclay [12] όπου προτάθηκε για πρώτη φορά ο ψυκτικός κύκλος του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή(AMR cycle). Αυτός ο ψυκτικός κύκλος είναι ουσιαστικά ένας συνδυασμός του κλασσικού αναγεννητικού κύκλου και του μαγνητοθερμιδικού φαινομένου. Έτσι λοιπόν, πετυχαίνοντας ουσιαστικά την αναγέννηση ενός η περισσότερων μαγνητοθερμιδικών υλικών αποδείχθηκε ότι μπορούμε να επιτύχουμε μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές. Βασισμένος σε αυτό το μοντέλο του AMR ο Zimm [13] στο American Astronautics Technology center εξέλιξε τον μαγνητικό ψύκτη το 1998 χρησιμοποιώντας περίπου 3 kg γαδολινίου(Gd)

ως εργαζόμενο μέσο και πέτυχε ψυκτική ισχύς της τάξεως των 500-600 W, μέσα σε μαγνητικό πεδίο εντάσεως 5 T.

Τα επόμενα χρόνια που ακολούθησαν πραγματοποιήθηκαν σημαντικές εξελίξεις πάνω στην μαγνητική ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι από το 1970 έως σήμερα έχουν κατασκευαστεί πάνω από 40 πρωτότυπες συσκευές μαγνητικής ψύξης. Πολλές από αυτές τις μηχανές θα παρουσιαστούν αναλυτικά σε παρακάτω κεφάλαιο αυτής της διπλωματικής εργασίας. Αξίζει ακόμη να σημειωθεί ότι μεταξύ των χρονολογιών 1881 και 1976 ένας σημαντικός αριθμός δημοσιεύσεων με θέμα τη μαγνητική ψύξη γνωστοποιήθηκε στο ευρύ επιστημονικό κοινό. Αυτή η διαπίστωση απεικονίζεται και στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Παρουσιάζεται ο αριθμός των ερευνητικών εργασιών που δημοσιεύτηκαν ετησίως τα τελευταία 80 χρόνια με θέμα τη Μαγνητική Ψύξη.

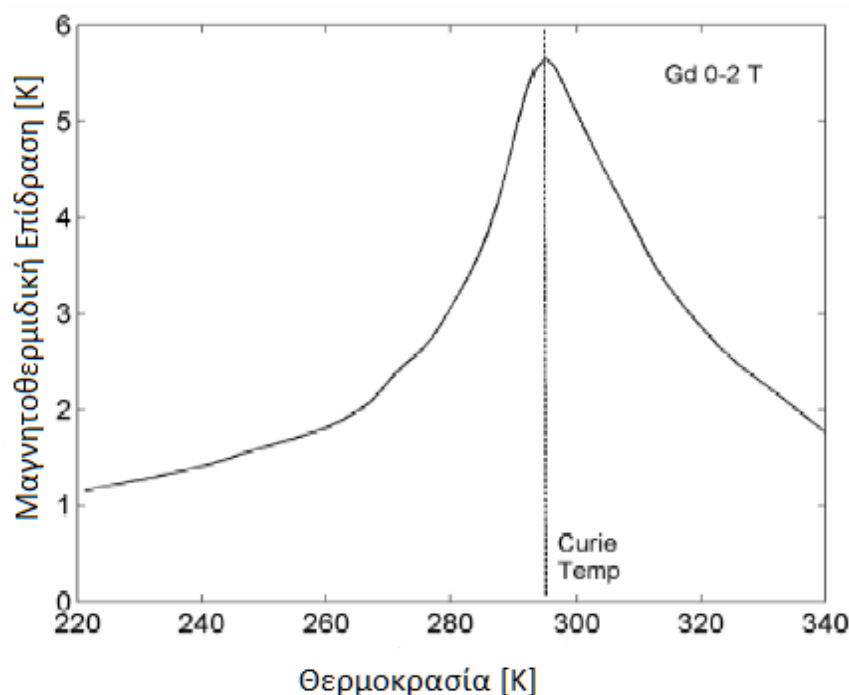
1.2 Λόγοι που μας ώθησαν στη Μαγνητική Ψύξη

Η ψύξη είναι μια κυρίαρχη τεχνολογία που έχει συντελέσει στη δημιουργία των βιομηχανικών κοινωνιών σε όλο τον κόσμο. Ουσιαστικά η ψύξη αποτελεί μια διαδικασία μεταφοράς θερμότητας από την ύλη, η οποία μπορεί να είναι σε στερεή, υγρή ή αέρια μορφή. Ο σύγχρονος εξοπλισμός ψύξης είναι αξιόπιστος και ανέξοδος. Επίσης, υπάρχουν πολλές συσκευές ψύξης ακόμα και σήμερα δεν έχουν αναπτυχθεί και βελτιωθεί πλήρως για ψύξη σε θερμοκρασίες δωματίου. Ωστόσο, ένα από τα μεγάλα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε με τους συμβατικούς ψυκτικούς κύκλους με συμπίεση ατμού είναι ότι ακόμα και οι καλύτεροι ψύκτες εκπέμπουν ουσίες όπως χλωριοφθοράνθρακες που ευθύνονται για την καταστροφή του ατμοσφαιρικού όζον.

Για αυτό το λόγο είναι σημαντικό να ανακαλυφθούν εναλλακτικές τεχνολογίες ψύξης. Η μαγνητική ψύξη αποτελεί μια τέτοια τεχνολογία λόγω της καλής απόδοσης του ψυκτικού της κύκλου, της αξιοπιστίας της, της έλλειψης θορύβου καθώς επίσης και της φιλικότητας προς το περιβάλλον. Ο κύριος λόγος που αυτή η τεχνολογία ψύξης είναι φιλική προς το περιβάλλον είναι ότι χρησιμοποιεί ως ψυκτικό μέσο ένα μαγνητικό υλικό. Λόγω αυτής της καινοτομίας όταν η θερμοκρασία ψύξης μειώνεται, η μαγνητική ψύξη έχει την ικανότητα να προσφέρει υψηλότερη απόδοση συγκριτικά με τους συμβατικούς αέριους ψυκτικούς κύκλους (gas cycles). Μάλιστα είναι αξιοσημείωτο το ότι η μαγνητική ψύξη μπορεί να επιτύχει βαθμό απόδοση 30-60% της απόδοσης ενός κύκλου Carnot, τη στιγμή που οι συμβατικές μέθοδοι ψύξης έχουν μόλις 5-10% [14] το βαθμό απόδοσης του κύκλου Carnot. Αυτός είναι και ο λόγος που εκτιμάται ότι στο μέλλον η μαγνητική ψύξη θα έχει πολύ σημαντικές εφαρμογές. Αυτή τη στιγμή η έρευνα πάνω στη μαγνητική ψύξη βρίσκεται σε ένα στάδιο όπου με τη χρησιμοποίηση χαμηλών μαγνητικών πεδίων κοντά σε θερμοκρασίες δωματίου επιδιώκεται να αναπτυχθούν συσκευές που να χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες ως πηγή μαγνητικού πεδίου.

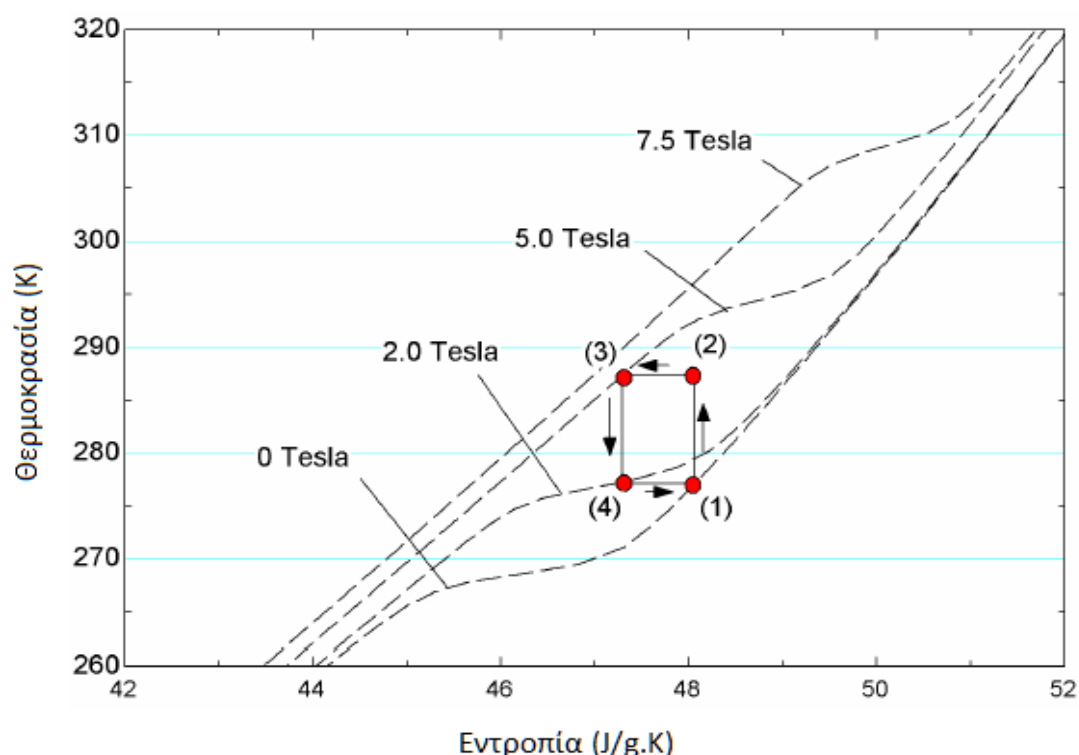
1.3 Τι είναι η Μαγνητική Ψύξη

Η μαγνητική ψύξη είναι μια μέθοδος ψύξης, η οποία εκμεταλλεύεται μια ιδιότητα των μαγνητικών υλικών που ονομάζεται μαγνητοθερμιδική επίδραση(MCE). Η θερμοκρασία των παραμαγνητικών υλικών παρατηρήθηκε να αυξάνεται όταν αυτά τα υλικά τοποθετούνταν μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Όταν ένα υλικό μαγνητίζεται οι μαγνητικές του ροπές ευθυγραμμίζονται και οδηγούν σε μια μείωση της μαγνητικής εντροπίας. Αν, αυτή η διαδικασία πραγματοποιηθεί αδιαβατικά και αναστρέψιμα τότε η ολική εντροπία παραμένει σταθερή. Για αυτό μια μείωση της μαγνητικής εντροπίας αντισταθμίζεται από μια αύξηση της εντροπίας διατάξεως(lattice entropy) και έχει ως αποτέλεσμα μια αύξηση της θερμοκρασίας. Η μαγνητοθερμιδική επίδραση μπορεί να οριστεί ως μια αδιαβατική θερμοκρασιακή μεταβολή εξαιτίας της μαγνήτισης ή εναλλακτικά ως μια ισοθερμοκρασιακή μαγνητική μεταβολή της εντροπίας. Αυτή η ιδιότητα είναι μια ισχυρή συνάρτηση εντάσεως μαγνητικού πεδίου και θερμοκρασίας, και μεγιστοποιείται όταν τα μαγνητικά υλικά φτάσουν μια θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μαγνητοθερμιδική επίδραση για το γαδολίνιο(Gd) σε πεδίο εντάσεως 2 Tesla.



Σχήμα 1.3: Μαγνητοθερμιδική επίδραση του Gd για μαγνητικό πεδίο εντάσεως 0-2T [15].

Στη συνέχεια μπορεί κανείς εύκολα να σκεφτεί πως ακριβώς δουλεύει ο μαγνητισμός για να δημιουργήσει θερμικούς κύκλους, ακριβώς όπως χρησιμοποιείται το έργο συμπίεσης στους αέριους ψυκτικούς κύκλους. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει ένα τέτοιο μαγνητικό ψυκτικό κύκλο και πιο συγκεκριμένα την απευθείας ("one-shot") ψυκτική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα στάδια της μαγνητικής ψύξης



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα Θερμοκρασίας –Εντροπίας για ψυκτικό κύκλο[16].

Στο παραπάνω διάγραμμα η μεταβολή (1) → (2) είναι μια αδιαβατική μαγνήτιση, η οποία ακολουθείται από την ισοθερμοκρασιακή μαγνήτιση (2) → (3), όπου η θερμότητα αποβάλλεται στο θερμοδοχείο. Η μεταβολή (3) → (4) είναι μια μερική αδιαβατική μαγνήτιση η οποία μειώνει τη θερμοκρασία του υλικού σε αυτή της ψυχρής δεξαμενής (cold reservoir). Τελικά ένα ψυχρό φορτίο λαμβάνεται εξαιτίας του μαγνητοθερμιδικού φαινομένου από το ψυχοδοχείο κατά τη διάρκεια της ισοθερμοκρασιακής απομαγνήτισης (4) → (1).

1.4 Ψυκτικοί Κύκλοι της Μαγνητικής Ψύξης

Ο μαγνητικός ψύκτης επιτελεί ψύξη μέσω ενός μαγνητικού υλικού δια μέσου του μαγνητικού ψυκτικού κύκλου. Σε γενικές γραμμές ένας μαγνητικός ψυκτικός κύκλος εκτελεί μαγνήτιση και απομαγνήτιση στις οποίες η θερμότητα αποβάλλεται και απορροφάται αντίστοιχα, καθώς επίσης και άλλες δύο καλοήθειες μέσες μεταβολές.

Οι βασικοί κύκλοι για την μαγνητική ψύξη είναι ο μαγνητικός κύκλος του Carnot, ο μαγνητικός κύκλος του Stirling, ο μαγνητικός κύκλος του Ericsson και ο μαγνητικός κύκλος του Brayton. Μεταξύ όλων αυτών οι 2 τελευταίοι μαγνητικοί ψυκτικοί κύκλοι έχουν εφαρμογές για μαγνητική ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου. Οι κύκλοι του Ericsson και του Brayton χρησιμοποιούν έναν αναγεννητή για να επιτύχουν μια μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά και έτσι είναι εύκολο να λειτουργήσουν. Στα σχήματα 1.5 και 1.6 φαίνεται ο μαγνητικός κύκλος του Ericsson και ο μαγνητικός κύκλος του Brayton αντίστοιχα.

1.4.1 Μαγνητικός Κύκλος του Ericsson

Ο κύκλος του Ericsson αποτελείται από ισοθερμοκρασιακές διεργασίες και 2 ισοεντατικές διεργασίες όπως φαίνονται στο σχήμα 1.7 [17].

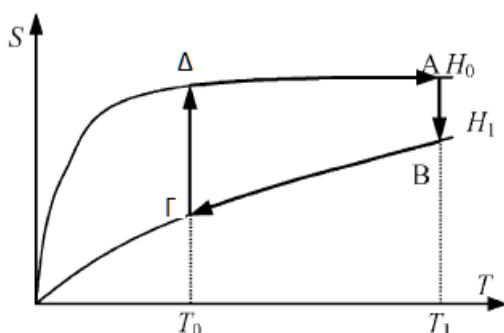
1.Ισοθερμοκρασιακή διαδικασία μαγνήτισης I[A→B σύμφωνα με το σχήμα 1.5] . Όταν το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται από H_0 σε H_1 τότε η θερμότητα μεταφέρεται από το μαγνητικό ψυκτικό μέσο στο ρευστό του αναγεννητή, δηλαδή $Q_{ab}=T_1(S_a-S_b)$

2.Ισοεντατική ψυκτική διεργασία II [B→Γ σύμφωνα με το σχήμα 1.5] Σε αντίθεση στο μαγνητικό πεδίο του H_1 , το μαγνητικό ψυκτικό και ο ηλεκτρομαγνήτης κινούνται προς τα κάτω και ως εκ τούτου η θερμότητα $Q_{bc} = \int_{S_c}^{S_b} TdS$ μεταφέρεται από τον μαγνητικό ψύκτη στο ρευστό του αναγεννητή. Τότε μια θερμοκρασιακή κλίση δημιουργείται στον αναγεννητή.

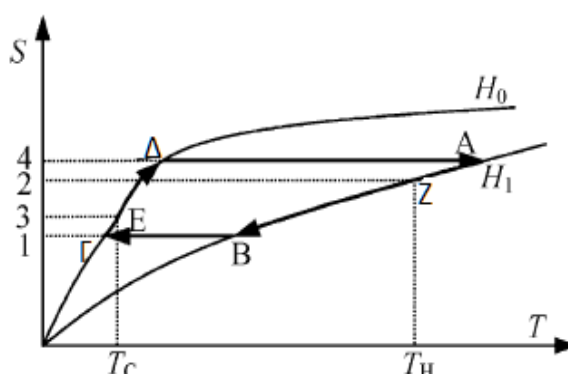
3.Ισοθερμοκρασιακή διαδικασία απομαγνήτισης III [Γ→Δ σύμφωνα με το σχήμα 1.5]. Όταν το μαγνητικό πεδίο μειώνεται από H_1 σε H_0 τότε ο μαγνητικός ψύκτης απορροφά θερμότητα $Q_{cd}=T_0(S_d-S_c)$ από το χαμηλότερο ρευστό του αναγεννητή. Μετά από αυτό η θερμοκρασία του ρευστού μειώνεται.

4.Ισοεντατική διεργασία θέρμανσης IV [$\Delta \rightarrow A$, βλέπε σχήμα1.5].Στο πεδίο του H_0 , το μαγνητικό ψυκτικό μέσο και ο ηλεκτρομαγνήτης μετακινούνται προς τα πάνω ως την κορυφή και το ρευστό του αναγεννητή απορροφά θερμότητα $Q_{da} = \int_{S_c}^{S_a} TdS$.

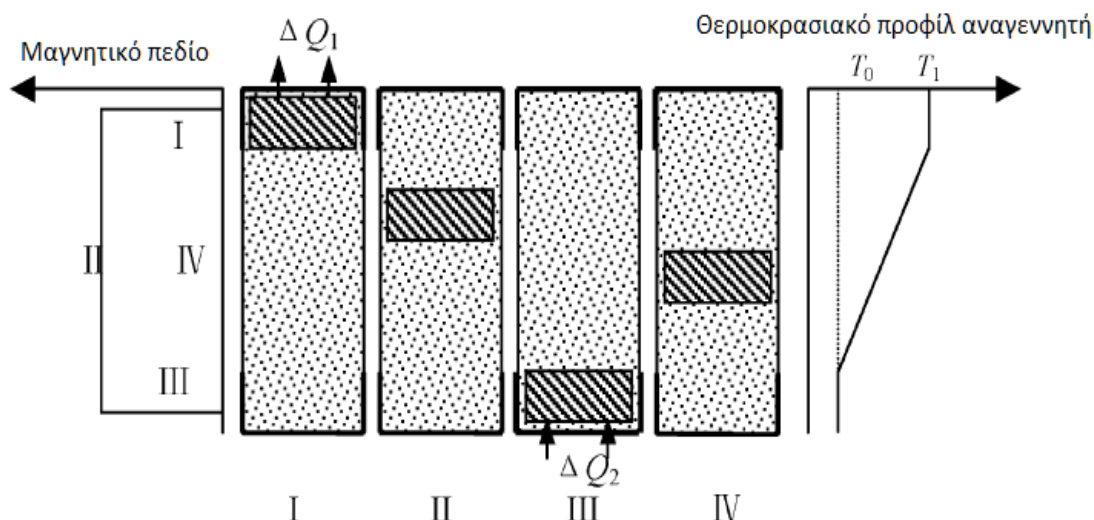
Για να επιτύχουμε ο κύκλος του Ericsson να έχει την αποτελεσματικότητα του μαγνητικού ψυκτικού κύκλου του Carnot απαιτείται η μεταφερόμενη θερμότητα στις 2 ισοεντατικές διεργασίες Q_{bc} και Q_{da} να είναι ίσες μεταξύ τους. Σε έναν ιδανικό κύκλο του Ericsson οι παράλληλες καμπύλες T-S είναι βέλτιστες, δηλαδή, η Δ_{SM} διατηρείται σταθερή στο ψυχρό εύρος θερμοκρασιών. Ωστόσο, τα σημερινά διαθέσιμα ενιαία μαγνητικά υλικά δεν μπορούν να ικανοποιήσουν την απαίτηση αυτή. Άρα η ιδανική αναγέννηση σε έναν κύκλο του Ericsson μπορεί μόνο να επιτευχθεί μόνο με συνθετικά υλικά [18,19].



Σχήμα 1.5: Μαγνητικός ψυκτικός κύκλος του Ericsson



Σχήμα 1.6: Μαγνητικός ψυκτικός κύκλος του Brayton .



Σχήμα 1.7: Αρχή Λειτουργίας του Ψυκτικού Κύκλου του Ericsson

1.4.2 Μαγνητικός Κύκλος του Brayton

Ο μαγνητικός κύκλος του Brayton αποτελείται από δύο αδιαβατικές και δύο ισοεντατικές διεργασίες όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.6, όπου παρουσιάζονται οι μαγνητικοί ψυκτικοί κύκλοι ανάμεσα στα μαγνητικά πεδία H_0 και H_1 και της θερμοκρασία υψηλής και χαμηλής πηγής θερμότητας T_H και T_C αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια της ισοεντατικής ψυκτικής διεργασίας $A \rightarrow B$ (το μαγνητικό πεδίο H_1 κατά τη μεταβολή αυτή είναι σταθερό), το μαγνητικό ψυκτικό αποβάλλει θερμότητα στην περιοχή AB14 όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Κατά τη διάρκεια της ισοεντατικής θερμικής διεργασίας $\Gamma \rightarrow \Delta$ (το μαγνητικό πεδίο H_0 κατά τη μεταβολή αυτή μένει σταθερό), το μαγνητικό ψυκτικό απορροφά θερμότητα από την περιοχή DC14. Καθόλου θερμότητα δεν χάνεται κατά την αδιαβατική μαγνητική διεργασία $\Delta \rightarrow A$, καθώς επίσης και κατά την αδιαβατική απομαγνήτιση $B \rightarrow \Gamma$. Ο κύκλος του Brayton που περιγράφηκε μπορεί να εμφανίσει βέλτιστη απόδοση καθώς και με μαγνητικά ψυκτικά που έχουν παράλληλες γραμμές T-S [18].

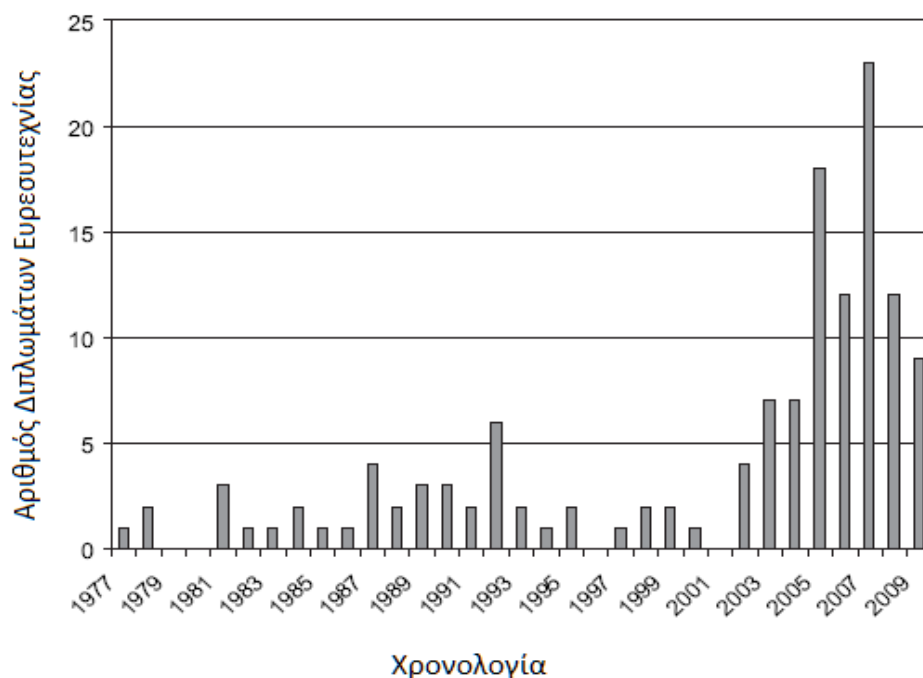
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΨΥΞΗ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΔΩΜΑΤΙΟΥ

Η μαγνητική ψύξη εφαρμόστηκε αρχικά σε χαμηλές θερμοκρασίες και κυρίως για πειράματα φυσικής. Η μέθοδος αυτή συνήθως λειτουργούσε με παραμαγνητικά άλατα για την απόκτηση επιμέρους υπό θερμοκρασιών Kelvin(sub Kelvin). Μέχρι το 1970, η μαγνητική ψύξη παρέμενε μια έννοια ψύξης μόνο χαμηλών θερμοκρασιών. Για ένα υλικό το οποίο δέχεται σημαντική επίδραση από το μαγνητοθερμιδικό φαινόμενο, η αλλαγή της μαγνητική εντροπίας πρέπει να είναι μεγάλη σε σχέση με τη συνολική εντροπία του υλικού. Στις χαμηλές θερμοκρασίες το πλέγμα και η συνεισφορά των ηλεκτρονίων στην εντροπία είναι σχετικά πολύ μικρές. Για αυτό το λόγο με μέτριες αλλαγές του πεδίου, είχε τεκμηριωθεί ότι η μαγνητική ψύξη ήταν αποδοτική μόνο σε χαμηλές θερμοκρασίες όπου οι μικρές αλλαγές στη μαγνητική εντροπία είναι σχετικά μεγάλες σε σύγκριση με τη συνολική εντροπία.

Όλα αυτά ανατράπηκαν το 1976 όταν ο G. V. Brown [7,20] κατασκεύασε τον πρώτο μαγνητικό ψύκτη που λειτουργούσε σε θερμοκρασίες δωματίου. Ερευνητές απ'όλο τον κόσμο άρχισαν να αναπτύσσουν τους δικούς τους πρωτότυπους μαγνητικούς ψύκτες, από τους οποίους μπορούμε να ξεχωρίσουμε τη μηχανή του Steyert [21,22] και του Zimm [23].

Δέκα χρόνια αργότερα και ενώ είχε ανακαλυφθεί το γιγάντιο μαγνητοθερμιδικό φαινόμενο (GMCE), έρευνες στα υλικά από τους Gschneidner [24] , Gschneidner και Pecharsky [25] και αρκετούς άλλους επιστήμονες επιτάγχυναν την ανάπτυξη της μαγνητικής ψύξης σε θερμοκρασίες δωματίου (θερμοκρασία περίπου ίση με 20°C). Όλη αυτή η εκθετική αύξηση των δραστηριοτήτων της μαγνητικής ψύξης σε θερμοκρασίες δωματίου μετά την ανακάλυψη του Brown παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Αριθμός διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας ανά χρόνο στη Μαγνητική Ψύξη σε θερμοκρασίες δωματίου(περίοδος 1976-2009)

Το 2004 ο Egolf και ο Kitanovski [26] μέσω του Διεθνούς Ινστιτούτου Ψύξης (IIF/IIR) ξεκίνησαν εργασιακά συνέδρια που αφορούσαν τη μαγνητική ψύξη σε θερμοκρασίες δωματίου και κατάφεραν με αυτό τον τρόπο να φέρουν σε επαφή επιστήμονες των υλικών, επιστήμονες που ασχολούνται με τον μαγνητισμό, μηχανολόγους, κατασκευαστές μηχανικών, επιστήμονες που έχουν ως αντικείμενο έρευνας τα ρευστά και τη θερμοδυναμική και όλα αυτά με σκοπό να ανταλλάξουν απόψεις και να συντονίσουν τις ερευνητικές τους δραστηριότητες. Για αυτό το λόγο διοργανώθηκαν τρία συνέδρια τα οποία κατά χρονολογική σειρά ήταν τα ακόλουθα:

- 1)Thermag I [27] : Πραγματοποιήθηκε το 2005 στο Μόντρεχ της Ελβετίας
- 2)Thermag II [28]: Πραγματοποιήθηκε το 2007 στο Πορτορόζ της Σλοβενίας
- 3)Thermag III [29]:Πραγματοποιήθηκε το 2009 στην Ιώβα των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής.

Τα πρακτικά αυτών των τριών συνεδρίων δίνουν μια γενική εικόνα των σημερινών εξελίξεων πάνω στα μαγνητοθερμιδικά υλικά καθώς και στη μαγνητική ψύξη κοντά σε θερμοκρασία δωματίου. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού παρατίθεται και συνοπτικός πίνακας με όλες τις συσκευές μαγνητικής ψύξης που κατασκευάστηκαν και λειτουργούσαν σε θερμοκρασίες δωματίου.

2.1 1^η Γενιά Μαγνητικών Ψυγείων σε Θερμοκρασίες Δωματίου

Το 1970 όταν πραγματοποιήθηκαν σημαντικές εξελίξεις σχετικά με την μαγνητική ψύξη, ξεκίνησε ουσιαστικά και η πρώτη γενιά μαγνητικών ψυγείων σε θερμοκρασίες δωματίου. Δύο είναι τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της γενιάς: 1)Χρησιμοποίηση υπεραγώγιμων μαγνητών 2)Λειτουργία σε χαμηλές συχνότητες. Εκείνη την περίοδο υπήρξαν μόνο μερικά πρωτότυπα που είχαν κατασκευαστεί με απλούς –μόνιμους μαγνήτες. Η ένταση του μαγνητικού τους πεδίου ήταν μάλλον χαμηλή και έτσι δεν επιτεύχθηκαν ικανοποιητικές αποδόσεις.

Η μεγάλη επανάσταση έγινε από τον Brown το 1976 [7] , ο οποίος ανέπτυξε ένα μαγνητικό ψύκτη που λειτουργούσε σε θερμοκρασίες δωματίου χρησιμοποιώντας μια παλινδρομική συσκευή που η λειτουργίας της βασιζόταν στον κύκλο του Ericsson. Η μηχανή που κατασκεύασε απεικονίζεται στο σχήμα 2.2 και αποτελούνταν από έναν υπεραγώγιο μαγνήτη,ο οποίος ψύχονταν από υγρό ήλιο(He) και παρήγαγε ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 7 T. Η συσκευή αυτή λειτουργούσε μεταξύ μιας πηγής θερμότητας και μιας ψύχτρας σε θερμοκρασίες 273 K και 320K, η οποία αντιστοιχούσε σε μια διαφορά θερμοκρασίας της τάξεως των 47 K. Αυτή η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά επιτυγχανόταν ύστερα από 50 κύκλους λειτουργίας, οι οποίοι είναι πανομοιότυποι με τον αριθμό των μαγνητικών/απομαγνητικών κύκλων. Η βασική αρχή πάνω στην οποία στηριζόταν η λειτουργία της μηχανής του Brown ήταν ο μαγνητικός κύκλος του Stirling [30], που παρουσιάζει μια παλινδρομική, αντίστοιχα γραμμική κίνηση του μαγνητοθερμιδικού υλικού σε στοίβα μέσα στο μαγνητικό πεδίο. Το φέρον υγρό της συσκευής αποτελούνταν κατά 20% από αιθυλική αλκοόλη, αναμιγμένη με νερό. Αξίζει να σημειωθεί ότι το 1978 ο Brown [20] κατάφερε και πέτυχε μια θερμοκρασιακή διαφορά της τάξεως των 80 K από τους 248 στους 328 K. Παρόλα αυτά , η ψυκτική ισχύς και η απόδοση της συσκευής παρέμειναν χαμηλές. Ο κύριος λόγος που συνέβαινε αυτό ήταν:α) η μικρή συχνότητα λειτουργίας της μηχανής, β)η μη-αναστρέψιμη χαμένη μεταφορά θερμότητας,γ) οι απώλειες θερμότητας από το βοηθητικό υπεραγώγιο σύστημα, δ) θερμικά κέρδη και απώλειες από αγωγιμότητα και συναγωγή ,ε) τριβή της ροής του υγρού μέσω των επιπέδων εναλλακτών θερμότητας.

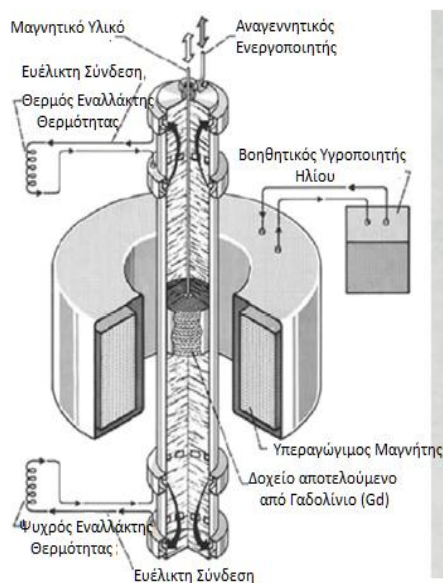
Δύο χρόνια περίπου μετά την κατασκευή της μηχανής του Brown ο Steyert [21,22] το 1978 καθιέρωσε τις βασικές αρχές του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή (AMR). Παρουσίασε λοιπόν, μια συσκευή όπου σύμφωνα με το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας είναι παρόμοια με αυτή του Brown. Σε αυτή τη συσκευή οι συνδέσεις των εργαζόμενων ρευστών εκτελούνταν μέσω διαχωριστικών υγρών αναγεννητών , οι οποίοι είναι

ουσιαστικά παθητικοί αναγεννητές. Σε αντίθεση με τον Brown, ο Steyert με την εισαγωγή του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή (E.M.A.) πρότεινε μια μέθοδο όπου το μαγνητοθερμιδικό υλικό είχε δύο διεργασίες, δηλαδή την εκτέλεση του μαγνητοθερμιδικού φαινομένου και να λειτουργήσει και ως αναγεννητής. Έπειτα, το ρευστό μετακινείται μπρος και πίσω μέσω της μαγνητοθερμιδικής κλίνης, το οποίο δημιουργεί μια θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο άκρων της κλίνης του αναγεννητή. Σε αυτή τη μέθοδο η τεχνική των πολυεπίπεδων κλινών μπορεί να εφαρμοστεί ιδανικά. Η τεχνική αυτή βελτιστοποιεί τη διαδικασία και αυξάνει σημαντικά την αποδοτικότητα της μηχανής. Σύμφωνα με το σχήμα 2.3 η μηχανή του Steyert λειτουργεί με βάση τον μαγνητικό ψυκτικό κύκλο του Brayton ο οποίος αποτελείται από δύο μαγνητικές ισοεντατικές μεταβολές και δύο αδιαβατικές μεταβολές. Επίσης, σε αυτή τη μηχανή το εργαζόμενο μέσο ρέει διαμέσω της μήτρας του μαγνητοθερμιδικού δακτυλιδιού και οι είσοδοι για το ρευστό είναι ειδικά διαμορφωμένοι αγωγοί. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασιακή διαφορά που δίνεται από τη θερμοκρασιακή παράγωγο ενσωματώνεται σε τροχιά γύρω από το υγρό και μπορεί να οδηγήσει σε πολύ υψηλές θερμοκρασιακές διαφορές συγκριτικά με την αδιαβατική θερμοκρασιακή διαφορά εξαιτίας της μαγνήτισης ή της απομαγνήτισης. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα, επειδή στις περισσότερες ψυκτικές εφαρμογές απαιτούνται υψηλές θερμοκρασιακές διαφορές.

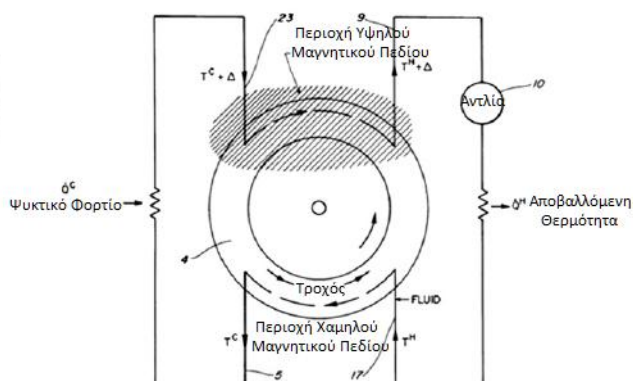
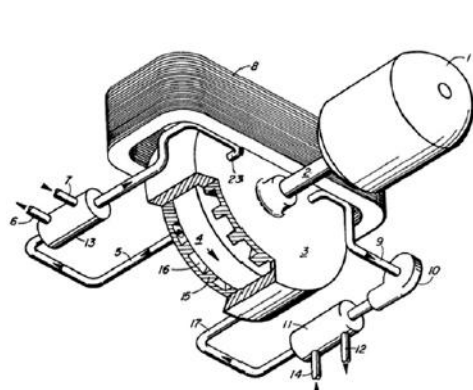
Συνεχιστής των προσπαθειών των δύο προηγούμενων επιστημόνων ήταν ο Barclay [31,32], ο οποίος το 1982 σε συνεργασία με τον Steyert [33] πρότεινε πολλούς διαφορετικούς τροποποιημένους σχεδιασμούς. Ίσως η πιο ενδιαφέρουσα ιδέα από όλες αυτές ήταν αυτή της περιστροφής ενός μαγνητοθερμιδικού υλικού, μέσω ενός μαγνητικού πεδίου συμπεριλαμβάνοντας και την ενεργή μαγνητική αναγέννηση. Πέρα από αυτές τις ενδιαφέρουσες ιδέες την ίδια χρονική περίοδο, μια νέα λύση που εμφανίστηκε ήταν η εφαρμογή των φερορευστών (ferrofluids) που λειτουργούσαν ως ρευστά μεταφοράς της θερμότητας μέσα στους μαγνητικούς ψύκτες και αντίστοιχα υπήρχαν αντλίες θερμότητας ώστε να ενισχύσουν το βαθμό μεταφοράς της θερμότητας. Σε αυτό το στάδιο της ανάπτυξης πρέπει να επισημανθεί η πρωτοποριακή δουλειά του Rosenweig [34], ο οποίος πρότεινε την εφαρμογή μαγνητοθερμιδικών ρευστών σε μηχανές μετατροπής της θερμότητας σε ενέργεια.

Το 1980 ένας πολύ μεγάλος αριθμός διαφορετικών πατεντών και δημοσιεύσεων πάνω στη μαγνητική ψύξη πραγματοποιήθηκαν από πάρα πολλούς επιστήμονες. Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες συνεισφορές εκείνης της περιόδου, είναι αυτή του Kirol [35], όπου το 1987 σε συνεργασία με τον Dacus [35] ανακοίνωσαν την κατασκευή μιας μαγνητικής αντλίας θερμότητας και η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4. Η αντλία θερμότητας περιείχε 125 ομοαξονικούς δίσκους που είχαν

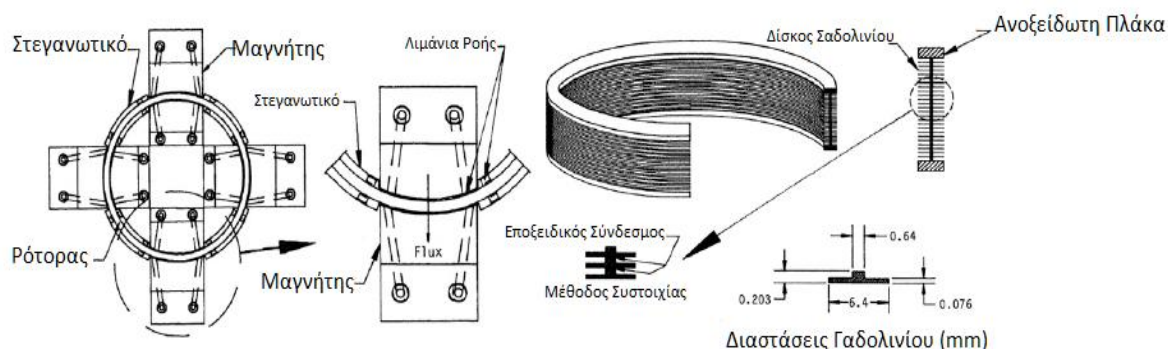
συνολικό ύψος 25,4 mm, συνολική μάζα 270 g και ήταν κατασκευασμένοι από γαδολίνιο (Gd). Το μαγνητικό πεδίο παραγόταν από ένα παραμαγνητικό υλικό (NdFeB), το οποίο δημιουργούσε μαγνητικό πεδίο εντάσεως 0.9 T στο κενό. Η αναφερόμενη μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά ήταν 11 K. Η συσκευή αυτή πραγματοποιούσε ένα είδος μαγνητικού ψυκτικού κύκλου σαν αυτό του Ericsson, και λειτουργούσε παρόμοια με την μηχανή που 'χε κατασκευάσει ο Steyert.



Σχήμα 2.2: Η πρώτη μαγνητική ψυκτική συσκευή που κατασκευάστηκε από τον Brown [7].



Σχήμα 2.3: Περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο που προτάθηκε από τον Steyert [21,22].

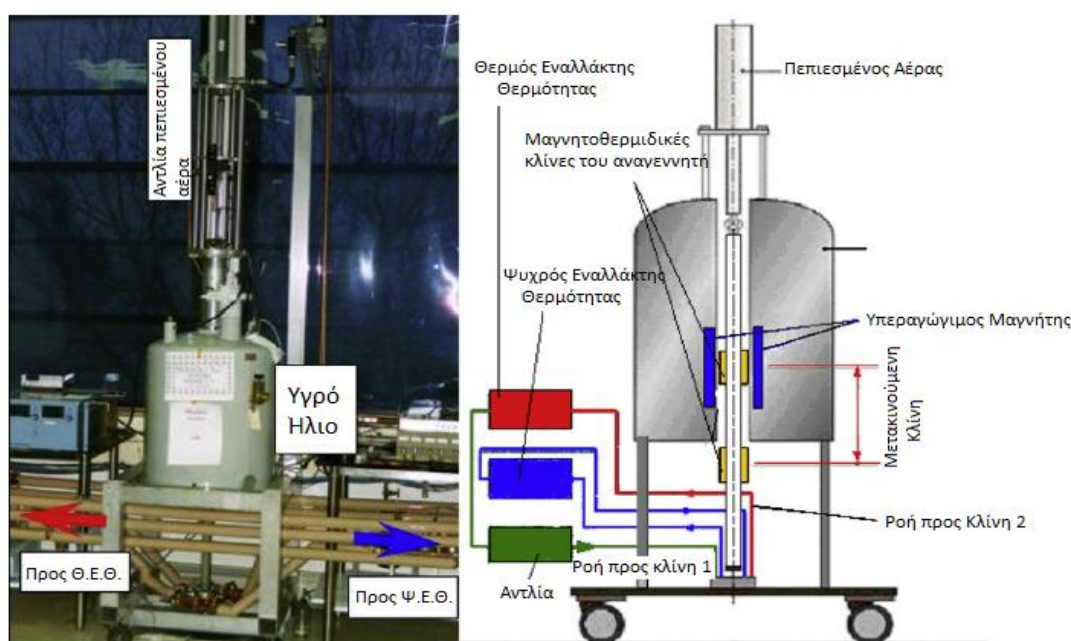


Σχήμα 2.4: Μαγνητική περιστροφική αντλία του Kiroi, όπου αποτελείται από ένα δίσκο γαδολινίου (Gd) και παρουσιάστηκε το 1987 [35].

Έπειτα από το 1980 και για μια περίοδο περίπου 10 χρόνων, καμία σημαντική έρευνα δεν είχε πραγματοποιηθεί στον τομέα της μαγνητικής ψύξης και των θερμικών αντλιών. Τελικά το 1990 ο Green [36], κατασκεύασε και δοκίμασε έναν παλινδρομικό μαγνητικό ψύκτη που είχε έναν ενεργό μαγνητικό αναγεννητή εξοπλισμένο με ένα πολυεπίπεδο κρεβάτι. Ο αναγεννητής είχε σφραγίσματα από Gd και Tb, τα οποία είναι αγνά μαγνητοθερμικά υλικά. Ένας δεύτερος παθητικός χάλκινος (Cu) αναγεννητής ήταν τοποθετημένος στο κύκλωμα και λειτουργούσε σαν ψυχρός εναλλάκτης θερμότητας και ένας διαχωριστής χρησιμοποιούνταν για να απομακρύνει τα αέρια του αζώτου. Παράλληλα ένας υπεραγώγιμος μαγνήτης παρήγαγε μαγνητικό πεδίο εντάσεως 7 T. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συχνότητα λειτουργίας της μηχανής αυτής ήταν πολύ χαμηλή, ενώ η συσκευή χρειαζόταν περίπου 70 sec για να ολοκληρώσει έναν ψυκτικό κύκλο. Η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά που επιτεύχθηκε ήταν 24 K, ύστερα από μερικούς εκατοντάδες ψυκτικούς κύκλους.

Ένα αξιοσημείωτο επίτευγμα στον τομέα της μαγνητικής ψύξης έγινε το 1997 από τους Percharsky και Gschneidet [37,38] και ήταν η ανακάλυψη του γιγάντιου μαγνητοθερμικού φαινομένου. Αυτή η ανακάλυψη οδήγησε σε μια κατά προσέγγιση εκθετική αύξηση του αριθμού των άρθρων που δημοσιεύθηκαν από επιστήμονες των υλικών πάνω σε αυτό το θέμα. Επίσης, ο αριθμός των εφευρέσεων, των καινοτόμων σχεδιασμών και των εξελίξεων όσο αναφορά τις μηχανές μαγνητικής ψύξης αυξήθηκε, αλλά με μια σχετική καθυστέρηση. Σημαντικό ορόσημο αποτέλεσε ένα πρόγραμμα που πραγματοποιήθηκε το 1997 στο AMES Laboratory και στο Astronautics Corporation of America. Το αποτέλεσμα αυτού του προγράμματος που διήρκεσε τρία χρόνια ήταν ένας μαγνητικός ψύκτης που λειτουργούσε με υπεραγώγιμους μαγνήτες και παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5. Το σημαντικό σε αυτήν την συσκευή ήταν ότι μπορούσε να λειτουργήσει για

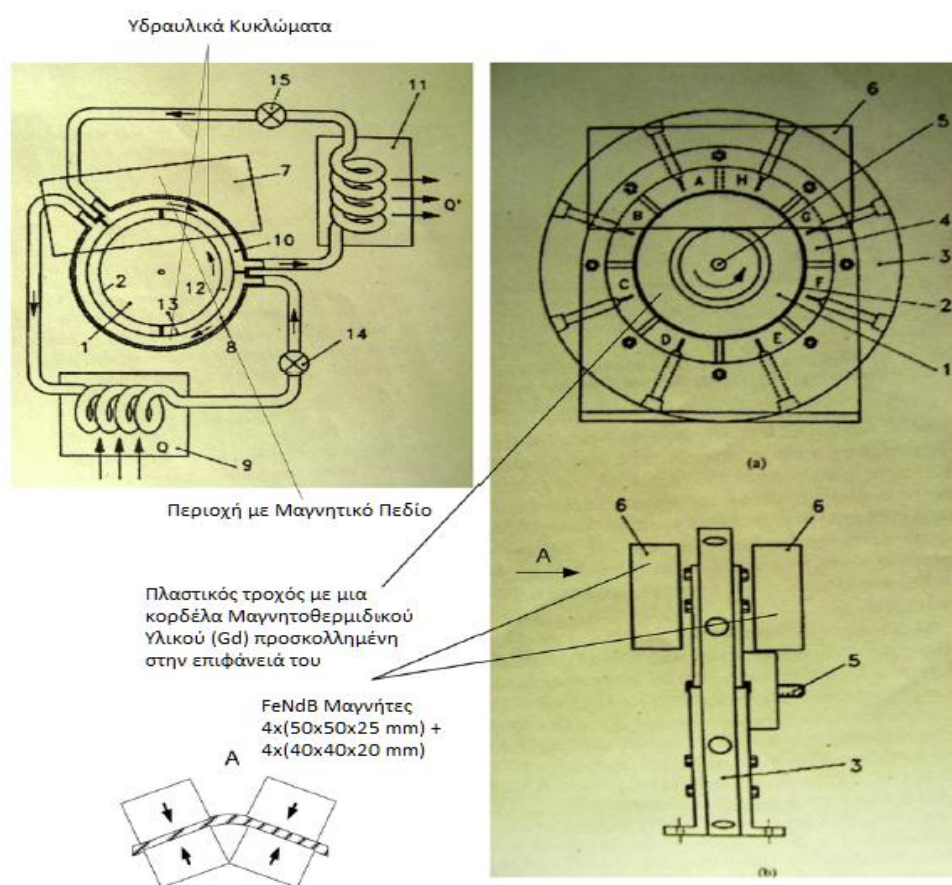
πάνω από 5000 ώρες σε ένα διάστημα 18 μηνών, χωρίς σημαντικά προβλήματα και με ελάχιστες απαιτήσεις μηχανολογικής συντήρησης. Αυτό αποτέλεσε μια σημαντική εξέλιξη καθώς όλοι οι προηγούμενοι μαγνητικοί ψύκτες λειτουργούσαν μόνο για μερικές μέρες. Όσο αναφορά το μαγνητικό της πεδίο, ήταν εντάσεως 5 T, ενώ το μαγνητοθερμιδικό υλικό που χρησιμοποιούνταν ήταν το γαδολίνιο(Gd) και το οποίο ήταν τοποθετημένο μέσα στη συσκευή. Η μέγιστη ψυκτική ισχύς ήταν 600 W και ο μέγιστος COP ήταν 60% της απόδοσης ενός κύκλου Carnot. Τέλος η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά ήταν 38 K και πιο συγκεκριμένα μεταξύ των 274 K και 312 K.



Σχήμα 2.5: Ένας μαγνητικός ψύκτης που παρουσιάστηκε από το ερευνητικό κέντρο AMES της Αϊόβα σε συνεργασία με την εταιρία Astronautics Corporation of America το 1997 [25,39].

Το 2000 ο Bohigas [40] παρουσίασε ένα μαγνητικό ψυγείο με μόνιμους μαγνήτες. Ωστόσο, το άρθρο του δεν περιείχε φωτογραφίες ή πειραματικά δεδομένα και έτσι η μηχανή αναπαρίσταται μόνο σε μερικά σχεδιαστικά σχήματα όπως στο σχήμα 2.6 που παραθέτουμε παρακάτω. Ο ψύκτης που κατασκεύασε λειτουργούσε με οκτώ μόνιμους μαγνήτες, σχηματίζοντας δύο μαγνητικές συνελεύσεις. Αρχικά, στα πρώτα πειράματα αυτοί οι μαγνήτες δημιούργησαν ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 0.3 T, ενώ μετέπειτα το πεδίο ενισχύθηκε και η έντασή του

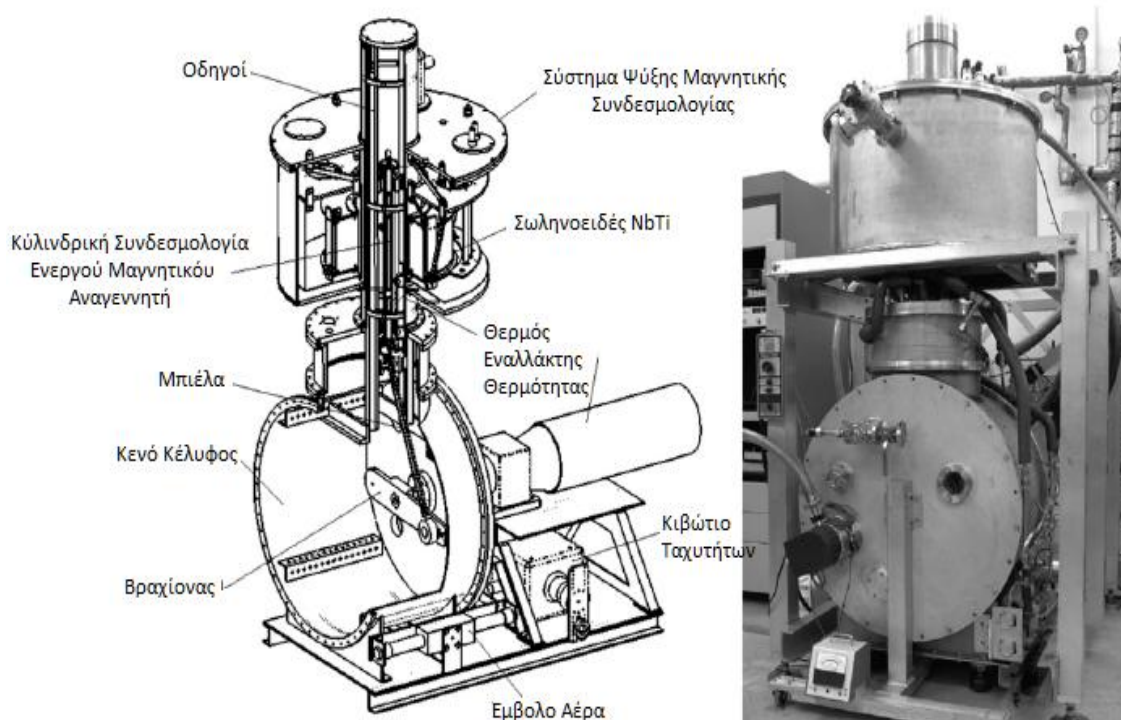
ανήλθε στα 1.6 T. Η θερμοκρασιακή διαφορά στο μαγνητικό πεδίο έφτανε ένα μέγιστο της τάξεως των 5 K. Το μαγνητοθερμιδικό υλικό ήταν το γαδολίνιο(Gd) σε μορφή κορδέλας, οι οποίες κορδέλες τοποθετούνταν σε 2 πλαστικούς δίσκους που είχαν διάμετρο 11 cm /7cm και πάχος 8 mm/88 mm αντίστοιχα η κάθε μία. Οι δύο κορδέλες τοποθετούνταν μέσα στη μηχανή, η μία μετά την άλλη για μερικά δοκιμαστικά τεστ. Ακόμα, η συχνότητα περιστροφής του τροχού ήταν πολύ χαμηλή της τάξεως των 0.06-0.8 Hz.



Σχήμα 2.6: Περιστροφικός Μαγνητικός Ψύκτης με μόνιμους μαγνήτες, Bohigas [40].

Την ίδια χρονική περίοδο η ενεργειακή εταιρία Chubu Electric [25,39,41] ολοκλήρωσε την κατασκευή ενός παλινδρομικού μαγνητικού ψύκτη. Το μαγνητικό του πεδίο μετρήθηκε και βρέθηκε πως ήταν εντάσεως 4T, αρκετά ικανό ώστε να παράξει ψυκτική ισχύς έως 100 W και μια μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά περίπου 21 K. Δυστυχώς και σε αυτή την περίπτωση πιο εκτεταμένες πληροφορίες για την συσκευή δεν είναι διαθέσιμες.

Ένα χρόνο αργότερα και πιο συγκεκριμένα το 2001 οι Rowe και Barclay [42,43] ανέπτυξαν στο πανεπιστήμιο της Victoria στον Καναδά μια δοκιμαστική συσκευή ενός ενεργού μαγνητικού αναγεννητή, ο οποίος λειτουργούσε σαν μια παλινδρομική μηχανή και χρησιμοποιούσε έναν υπεραγώγιμο σωλήνα αποδίδοντας ένα μέγιστο μαγνητικό πεδίο εντάσεως 2 Tesla. Η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά που επιτύγχανε αυτή η μηχανή ήταν 14 K. Στο παρακάτω σχήμα 2.7 φαίνεται λεπτομερώς πως ακριβώς ήταν η συγκεκριμένη συσκευή.



Σχήμα 2.7: Συσκευή Ενεργού Μαγνητικού Αναγεννητή που κατασκευάστηκε στο πανεπιστήμιο της Victoria στον Καναδά [42,43].

2.2 2^η Γενιά Μαγνητικών Ψυγείων σε Θερμοκρασίες Δωματίου

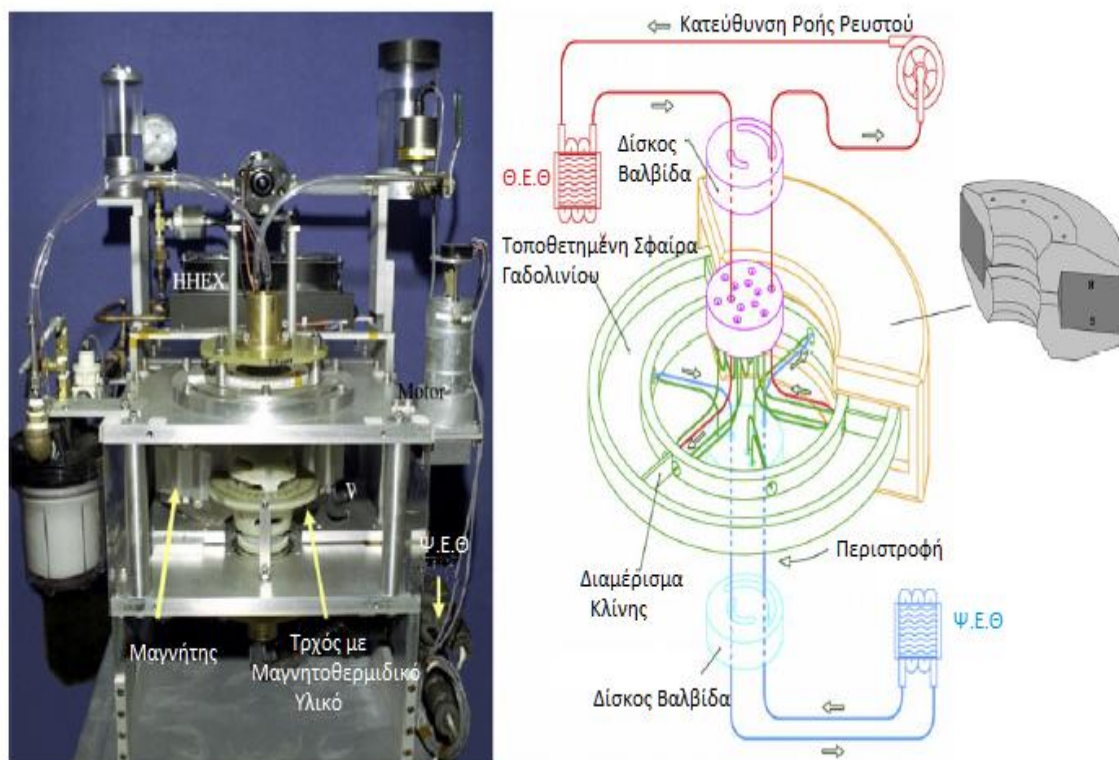
Η δεύτερη γενιά μαγνητικών ψυκτών και θερμικών αντλιών προσδιορίζεται από δύο κριτήρια: 1) Το πρώτο είναι η απότομη αύξηση του αριθμού των πρωτότυπων μηχανών που παρουσιάστηκαν 2) και το δεύτερο αποτελεί ένα πιο τεχνικό κριτήριο και αφορά ορισμένες ουσιαστικές κατασκευαστικές αλλαγές και βελτιώσεις. Τέτοιες μετατροπές είναι για παράδειγμα η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας των μηχανών, η εφαρμογή ισχυρότερων μαγνητών καθώς και η εφαρμογή του περιστρεφόμενου μαγνητικού αναγεννητή. Επιπλέον, διαφορετικά μαγνητοθερμιδικά υλικά σχεδιάστηκαν ώστε να προσαρμόζονται μέσα σε ειδικές μηχανές. Η μετάβαση από τη πρώτη στη δεύτερη γενιά μαγνητικών ψυγείων σε συνθήκες δωματίου σηματοδοτείται από την παρουσίαση μιας ιδιαίτερης μηχανής από το Astronautics Corporation of America το 2001 [25,39,44,45]. Η μηχανή αυτή αποτέλεσε την πρώτη μαγνητικό ψύκτη σε θερμοκρασίες δωματίου που περιείχε μόνιμους μαγνήτες.

Η συσκευή αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8 και η λειτουργία της βασίζεται στη περιστροφή ενός μαγνητοθερμιδικού δίσκου μέσω ενός στατικού μαγνητικού πεδίου, το οποίο και παράγεται από ένα $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ μόνιμο μαγνήτη συνδεδεσμένο με ατσάλι. Το όλο σύστημα δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 1.5 T στο κενό. Επίσης, η συσκευή περιέχει και μια ειδική περιστροφική βαλβίδα για την αποφυγή των νεκρών όγκων και για την εισαγωγή και διανομή του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας. Το εργαζόμενο μέσο στο ψύκτη ήταν νερό που περιείχε μερικούς αναστολείς. Ο δίσκος ήταν φτιαγμένος από ένα μεταβαλλόμενο αριθμό κλινών κατά τη διάρκεια του χρόνου όπου είχαν τοποθετηθεί μαγνητοθερμιδικές σφαίρες διαμέτρου από 0.25 έως 0.5 mm. Έχοντας αυτή τη διαμόρφωση ο περιστροφικός τροχός είχε διαιρεθεί σε τρεις τομείς και περιστρεφόταν με σταθερή ταχύτητα περιστροφής δια μέσου μιας περιοχής χαμηλού και υψηλού μαγνητικού πεδίου. Σημαντικό κατασκευαστικό επίτευγμα είναι ότι η μηχανή λειτουργούσε σχεδόν αθόρυβα και με ταχύτητα περιστροφής από 0.5 έως 4 Hz. Ύστερα από μερικά πειράματα που έγιναν, τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι η ψυκτική ικανότητα μειωνόταν με την αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς. Έτσι η μηχανή μπορούσε να επιτύχει μια μέγιστη ψυκτική ισχύς, της τάξεως των 50 W, ισχύς αρκετά ικανή για την λειτουργία ενός μοντέρνου οικιακού ψυγείου. Η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά που μετρήθηκε σε κατάσταση χωρίς φορτίο ήταν 25 K.

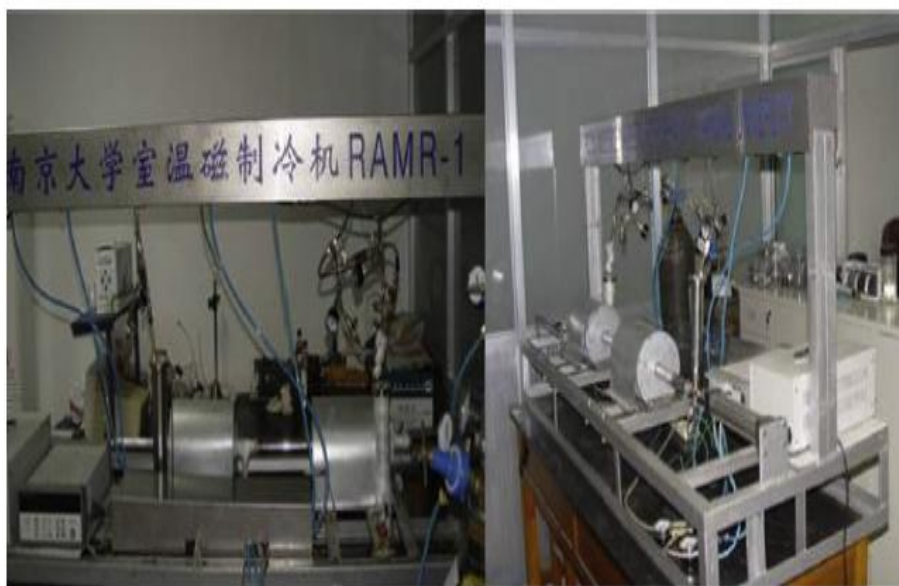
Το 2002 ο Blumenfeld [46] είχε αναφερθεί στον σχεδιασμό ενός υπεραγωγίμου μαγνητικού ψυγείου χωρίς μετακινούμενα μέρη. Θα περιείχε στατικά πηνία φόρτισης και εκφόρτισης, ενώ το εφαρμοσμένο

μαγνητικό φορτίο σε αυτό το πρωτότυπο θα ήταν 1.7 T και η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά της τάξεως των 15 K.

Την ίδια χρονολογία μια ομάδα επιστημόνων στο πανεπιστήμιο Nanjing της Κίνας [47] κατασκεύασαν έναν μαγνητικό ψύκτη αποτελούμενο από 2 συστοιχίες μόνιμων μαγνητών όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9. Αυτοί οι μαγνήτες μπορούσαν να δημιουργήσουν ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 1.4 T στο κενό μεταξύ των μαγνητικών πόλων και του μαγνητοθερμιδικού υλικού. Το μαγνητικό πεδίο σε αυτό το σημείο ονομαζόταν εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιούνταν το νερό, ενώ η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά για την συσκευή αυτή ήταν 23 K.



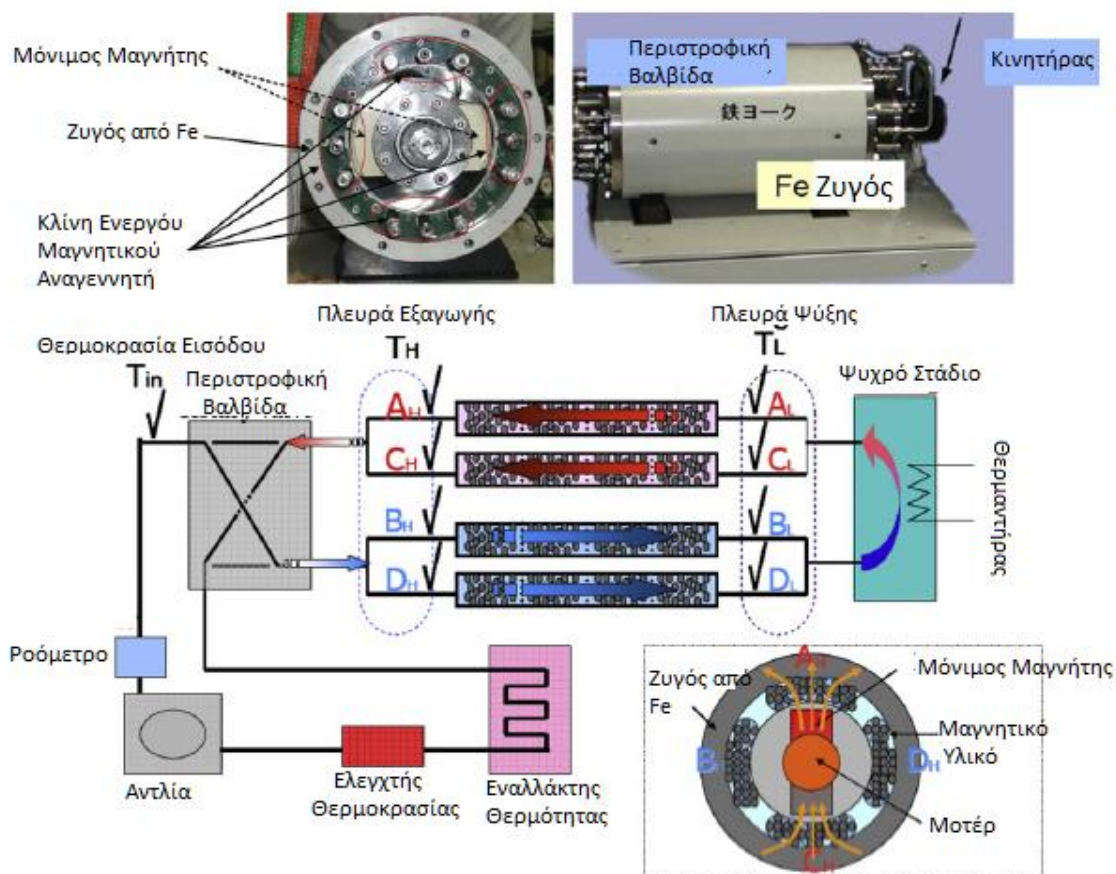
Σχήμα 2.8: Ο πρώτος περιστροφικός μαγνητικός ψύκτης παγκοσμίως, αποτελούμενος από μόνιμους μαγνήτες. Κατασκευάστηκε από τον Zimm και τους συνεργάτες του στο Astronautics Corporation of America [44,45].



Σχήμα 2.9: Παλινδρομικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε στο Nanjing University [47] .

Ένα χρόνο αργότερα το Ινστιτούτο Τεχνολογίας στο Τόκιο σε συνεργασία με την εταιρεία Chubu Electric Power [48] ανέπτυξαν έναν πολύ συμπαγή περιστρεφόμενο μαγνητικό ψύκτη ,που είχε εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες. Αυτός ο ψύκτης απεικονίζεται στο σχήμα 2.10 . Η νέα τεχνική που εφαρμόστηκε για την κατασκευή αυτής της συσκευής ήταν ότι οι μαγνήτες περιστρέφονταν γύρω από μια σταθερή μαγνητοθερμιδική κλίση και διένεμαν την μαγνητική πυκνότητα ροής στον καθετήρα του υλικού. Αυτοί οι μόνιμοι μαγνήτες ήταν κατασκευασμένοι από νεοδίμιο και δημιουργούσαν μαγνητικό πεδίο εντάσεως 0.77 T. Η μέγιστη μαγνητική ροπή που έπρεπε να ασκηθεί για να γυρίσει η συστοιχία των μαγνητών ήταν 52 Nm. Ο συγκεκριμένος μαγνητικός ψύκτης αποτελούνταν από τέσσερα μαγνητοθερμιδικά στρώματα, καθένα από τα οποία αποτελείτο από τέσσερα είδη κραμάτων Gd, συνολικής μάζας 1 κιλού. Η τεχνική των πολυεπίπεδων στρωμάτων εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε αυτή τη μηχανή. Η καινοτομία ήταν ότι χρησιμοποιώντας υλικά τα οποία έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες Curie σε διαφορετικές θέσεις, μπορούσε να επιτευχθεί μια συνολική αύξηση της απόδοσης του μαγνητοθερμιδικού φαινομένου. Οι θερμοκρασίες Curie αυτών των κραμάτων ήταν 4,5,7 και 10⁰C αντίστοιχα. Το νερό όπως και σε πολλές άλλες συσκευές αποτελεί το εργαζόμενο μέσο. Τα πειραματικά αποτελέσματα που έγιναν επιβεβαίωσαν ότι είχε επιλεγθεί

ένας βέλτιστος χρονικά ψυκτικός κύκλος για τη λειτουργία της μηχανής. Η συχνότητα λειτουργίας της ήταν περίπου 0.4 Hz και η μέγιστη παραγόμενη ψυκτική ισχύς ήταν 60 W, ενώ η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά ήταν περίπου 8 K.



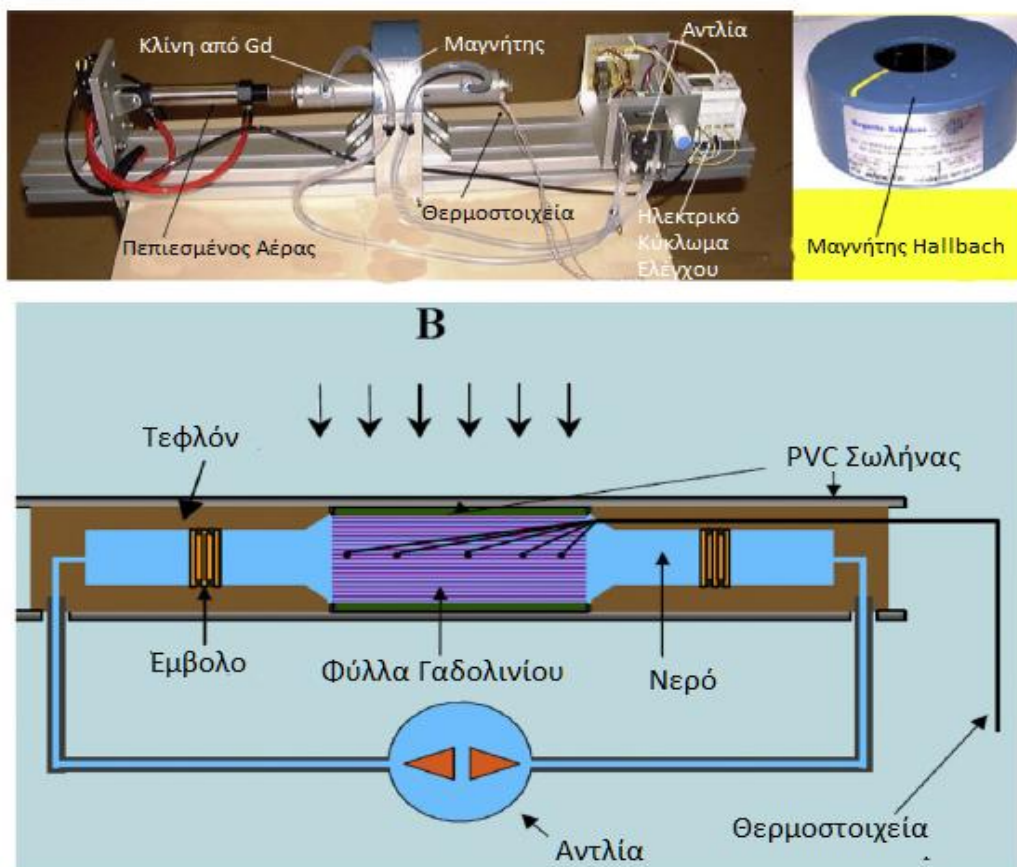
Σχήμα 2.10: Περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο που σχεδιάστηκε, υπολογίστηκε και υλοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας στο Τόκυο σε συνεργασία με την Chubu Electric Power Incorporation [48].

Φτάνοντας στο 2003 διάφοροι ερευνητές στο Grenoble της Γαλλίας [49,50] κατασκεύασαν έναν παλινδρομικό πρωτότυπο μαγνητικό ψυγείο, το οποίο και απεικονίζεται στο σχήμα 2.11. Αυτή η συσκευή αποτελούνταν από μόνιμο μαγνήτη τύπου Halbach ο οποίος δημιουργούσε μαγνητικό πεδίο 0.8 T. Το υλικό που χρησιμοποιούνταν ήταν το Gd σε φύλλα ενός χιλιοστού, συνολικής μάζας 230 g. Αυτά τα φύλλα συγκεντρώνονταν με τέτοιο τρόπο ώστε να παραχθεί μια

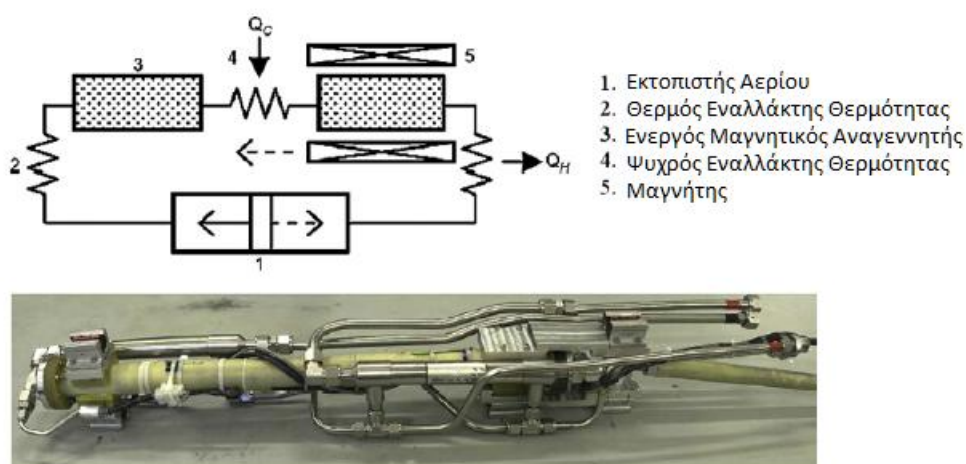
παράλληλη πλάκα. Το στρώμα του νερού που και εδώ χρησιμοποιούνταν ως ψυκτικό μέσο είχε πάχος 0.1 mm. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη ψυκτική ισχύς της συσκευής ήταν 8.8 W και η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά ήταν 4 K. Η συχνότητα λειτουργίας της μηχανής ήταν αρκετά χαμηλή, για παράδειγμα περίπου ίση με 0.5 Hz.

Το 2004 μια ομάδα επιστημόνων από το πανεπιστήμιο της Victoria στον Καναδά [51,52,53] παρουσίασε έναν παλινδρομικό μαγνητικό ψύκτη που είχε έναν ξεχωριστό σχεδιασμό όπως παρατηρούμε και στο σχήμα 2.12. Οι μαγνήτες της μηχανής αυτής απέδωσαν καλή ένταση του πεδίου για μόνιμους μαγνήτες, και πιο συγκεκριμένα ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 2 T. Η συχνότητα λειτουργίας ήταν μεταξύ 0.65 και 1 Hz, ενώ η αποβαλλόμενη θερμότητα ποίκιλε μεταξύ των τιμών 285 και 310 Kelvin. Το σύστημα που περιγράφουμε διαθέτει 2 κλίνες αναγεννητή, του οποίου το μήκος και η διάμετρος ήταν ίδιες και ίσες με 25mm. Κάθε αναγεννητής περιείχε 135 g ψυκτικού, το οποίο αποτελούνταν από 3 διαφορετικά μαγνητοθερμιδικά υλικά, τα οποία ήταν τα εξής: Gd, $Gd_{0.74}$, $Tb_{0.26}$ και $Gd_{0.85}Er_{0.15}$. Το αέριο ήλιο (He) χρησιμοποιήθηκε ως υγρό μεταφοράς της θερμότητας και η κύρια πίεση ήταν ορισμένη για 3, 6 και 9.5 bar. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα πέτυχε σε λειτουργία αιχμής χωρίς φορτίο μια θερμοκρασιακή διαφορά ίση με 37 K και σε συχνότητα λειτουργίας 0.65 Hz, με αποβαλλόμενη θερμότητα της τάξεως των 301 K και μαγνητικό πεδίο εντάσεως 1.5 T. Παράλληλα η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά χωρίς φορτίο που μετρήθηκε ήταν 50 K σε συχνότητα λειτουργίας 0.8 Hz, με αποβαλλόμενη θερμότητα 301.5 K, σε ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 2 T.

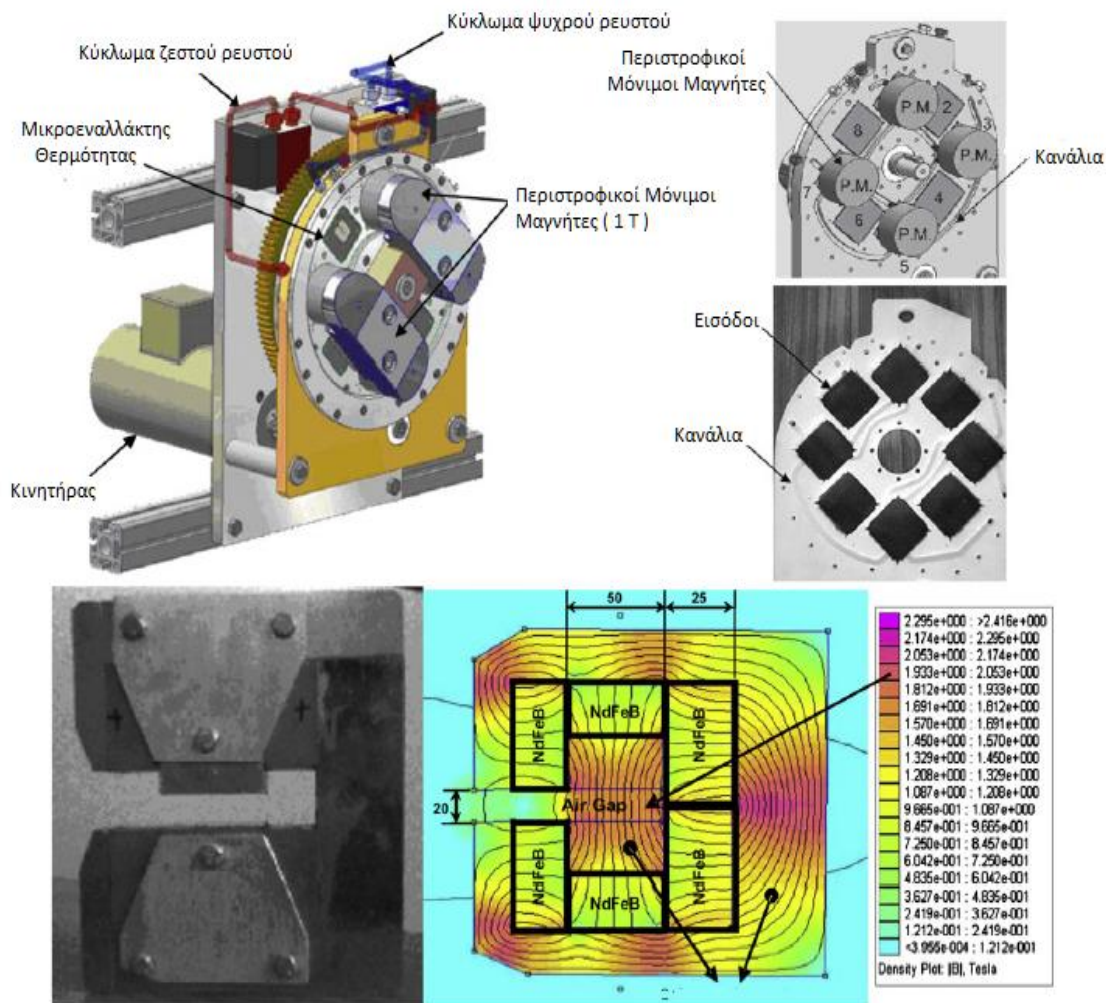
Το 2005 χρονιά κατά την οποία πραγματοποιήθηκε το πρώτο Διεθνές Συνέδριο με θέμα τη Μαγνητική Ψύξη σε θερμοκρασίες δωματίου στο Μόντρεαλ της Ελβετίας, μια Γαλλική εταιρεία με την επωνυμία Cooltech Applications παρουσίασε τον δικό της περιστροφικό μαγνητικό ψύκτη [54,55]. Αυτός ο ψύκτης αποτελούνταν από οκτώ κομμάτια από υποστηρικτικούς δίσκους τοποθετημένους σε ένα συνθετικό υλικό, και οι οποίοι ήταν μηχανικά σταθεροί και θερμικά μονωμένοι. Στο σχήμα 2.13 φαίνεται πως ακριβώς ήταν σχεδιασμένος. Μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά χαρακτηριστικά της συσκευής αυτής είναι τα ακόλουθα : Μαγνητικό πεδίο εντάσεως από 1 έως 2.4 T, Ψυκτική ικανότητα από 100 W έως 360 W.



Σχήμα 2.11: Η παλινδρομική μαγνητική συσκευή που κατασκευάστηκε στο Laboratoire d'Electrotechnique Grenoble της Γαλλίας [49,50] .



Σχήμα 2.12: Παλινδρομικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε στο πανεπιστήμιο της Βικτόριας στο Καναδά [51,52,53].



Σχήμα 2.13: Μια τρισδιάστατη δομή του μαγνητικού ψυγείου της εταιρίας Cooltech, υπάρχει μια φωτογραφία της συνδεσμολογίας και ο ανοιχτός μαγνήτης τύπου Halbach [54,55].

Το 2005 ο Yu [56] και ο Gao [57] στο πανεπιστήμιο Xi'an Jiatong της Κίνας κατασκεύασαν ένα πειραματικό σύστημα μαγνητικής ψύξης σε θερμοκρασία δωματίου με τη χρήση του γαδολινίου (Gd) και του κράματος $Gd_5Si_2Ge_2$ όπως φαίνεται στο σχήμα 2.14. Η όλη διάταξη αποτελούνταν από ένα μαγνητικό πεδίο, το σύστημα ροής και μεταφοράς της θερμότητας, το μηχανολογικό οδηγικό υποσύστημα και το υποσύστημα ελέγχου και καταγραφής των δεδομένων. Ένας υδρόψυκτος ηλεκτρομαγνήτης χρησιμοποιούνταν για την αναγέννηση του μεγίστου μαγνητικού πεδίου εντάσεως 2.18 T. Ο ενεργός μαγνητικός αναγεννητής ήταν σχεδιασμένος σαν μια ορθογωνική μηχανή με διαστάσεις $140 \times 76 \times 36$ mm. Τα πειραματικά αποτελέσματα που δημοσιεύτηκαν αφορούν την απόδοση του συστήματος υπό την επίδραση διαφόρων θερμοκρασιών, εκτεινόμενων θερμοκρασιών, ποσοστών ροής

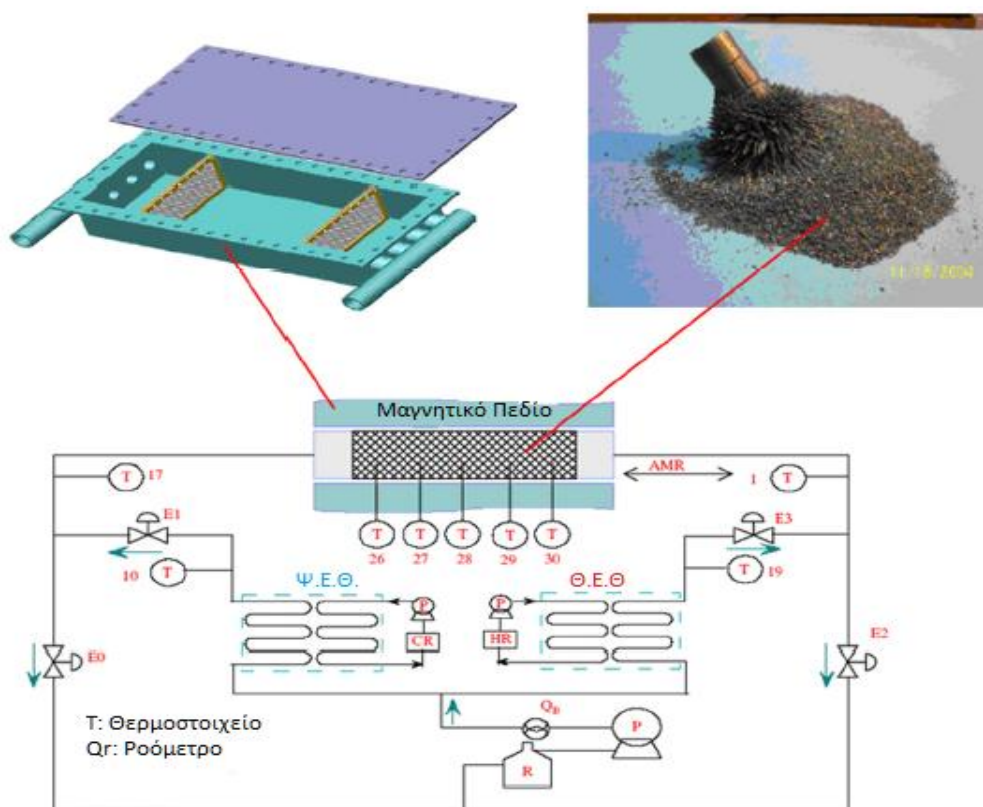
και συνθήκες της περιόδου ροής. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μια μέγιστη ψυκτική ισχύς ίση με 18.7 W όταν χρησιμοποιούνται σωματίδια γαδολινίου μέσης διαμέτρου ίση με 0.3 mm. Αξίζει επίσης, να σημειωθεί ότι η ψυκτική ισχύς μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων αυτών.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15, ένα ακόμα μαγνητικό παλινδρομικό ψυγείο κατασκευάστηκε το 2005 στο Graduate School of Engineering στο πανεπιστήμιο του Χοκάιντο [58]. Αποσταγμένο νερό επιλέχτηκε ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας. Η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά ήταν περίπου ίση με 10 K και επιτεύχθηκε σε πειράματα με συσκευασμένη βάση από γαδολίνιο. Η συχνότητα λειτουργίας ήταν μάλλον χαμηλή (περίπου 0.2 Hz), ενώ ο χρόνος που χρειαζόταν για μια διεργασία μαγνήτισης ή απομαγνήτισης ήταν ίσος με 1 sec και παράλληλα ο χρόνος που χρειαζόταν για τη ροή του ρευστού κυμαινόταν από 0.5 έως 4.0 sec. Πηγή του μαγνητικού πεδίου ήταν ένας μόνιμος μαγνήτης ο οποίος δημιουργούσε μαγνητικό πεδίο εντάσεως 1 T.

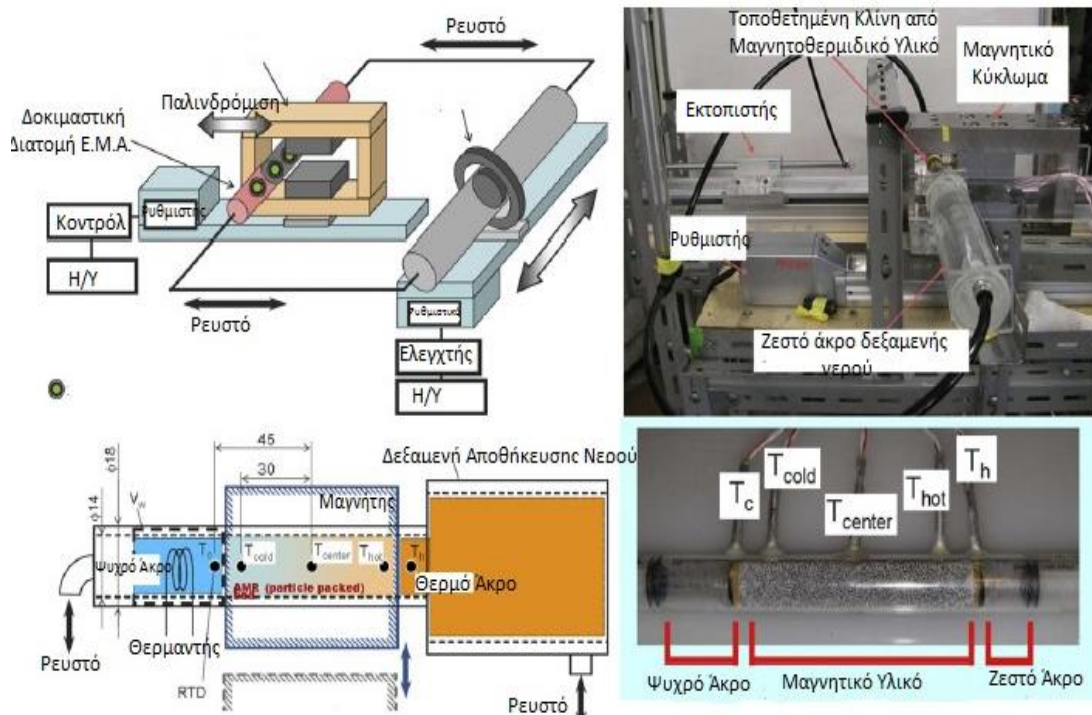
Το 2006 ο Yao [59] στην Ακαδημία Επιστημών στην Κίνα κατασκεύασε ένα πειραματικό μαγνητικό ψυγείο το οποίο φαίνεται στο σχήμα 2.16. Το ήλιο χρησιμοποιήθηκε ως εργαζόμενο μέσο και δύο μόνιμοι μαγνήτες με κυλινδρικές τρύπες διαμέτρου 40 mm σχεδιάστηκαν προκειμένου να υποστηρίξουν τη δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου εντάσεως 1.5 T. Επίσης, δύο περιστροφικά αναγεννητικά πορώδη στρώματα από γαδολίνιο ήταν στερεωμένα πάνω στη συσκευή με συνολική μάζα 1167.4 g. Η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος κυμαινόταν από 0.4 έως 1.0 Hz. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη ψυκτική ισχύς ήταν της τάξεως των 51.3 W με θερμοκρασιακή διαφορά 18.2 K, ενώ η μέση ψυκτική ισχύς για ίση με 25.2 W και για θερμοκρασιακό εύρος 11.0 K. Εκτός από αυτό οι επιστήμονες πρότειναν ότι θα έπρεπε να γινόταν χρήση μια μίξης από μαγνητικά υλικά σε διαφορετικές θερμοκρασίες Curie και όχι η χρήση ενός και μόνου μαγνητικού υλικού με σκοπό να επιτευχθούν ακόμα μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές.

Από το 2003 έως το 2006 μια ερευνητική Ιαπωνική ομάδα στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας στο Τόκυο [48,60,61] εξέλιξε ουσιαστικά την πρωτότυπη περιστροφική μαγνητική συσκευή που είχε κατασκευαστεί το 2003. Το πρώτο βήμα που έγινε ήταν η μείωση των δινορευμάτων και η αύξηση της ψυκτικής ισχύος κατά 30% (δηλαδή στα 110 W). Προκειμένου να μειωθούν τα δινορεύματα ο ζυγός σιδήρου διαιρέθηκε σε 20 επιμέρους δαχτυλίδια και στοιβάχθηκε μαζί με ένα ηλεκτρικό μονωτή ανάμεσα στα δαχτυλίδια όπως ακριβώς φαίνεται και στο σχήμα 2.17, με συνέπεια τη μείωση της παραγόμενης θερμότητας και την αύξηση της θερμοκρασίας στον ζυγό η οποία προκαλούνταν από την περιστροφή των μαγνητών. Το δεύτερο βήμα που έγινε αφορούσε την εκ

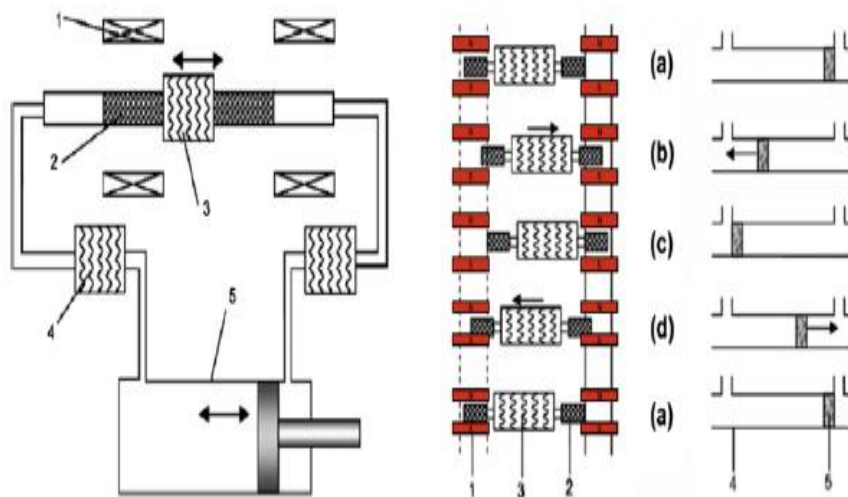
νέου διαστασολόγηση της συσκευής. Οι προηγούμενες διαστάσεις που ήταν: $h=270\text{ mm}$, $w=270\text{ mm}$ και $d=430\text{ mm}$ μετατράπηκαν στις εξής: $h=410\text{ mm}$, $w=400\text{ mm}$ και $d=390\text{ mm}$. Επιπλέον, οι απώλειες πίεσης μειώθηκαν σημαντικά μέσω της αλλαγής του μαγνητοθερμιδικού υλικού. Επίσης, η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξήθηκε από τα 0.77 T στα 1.1 T μέσω της χρήσης ενός μονίμου μαγνήτη σχήματος "V" και ταυτόχρονα αυξήθηκε και η διάμετρος του σωλήνα μεταφοράς του ρευστού. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι υπήρξε μια σημαντική βελτίωση καθώς για μέγιστη ψυκτική ισχύς 560 W είχαμε έναν συντελεστή ψυκτική συμπεριφοράς ίσο με 1.8 , ενώ ο μέγιστος $\text{COP}=2.4$ επιτυγχάθηκε όταν η ψυκτική ισχύς ήταν 244 W .



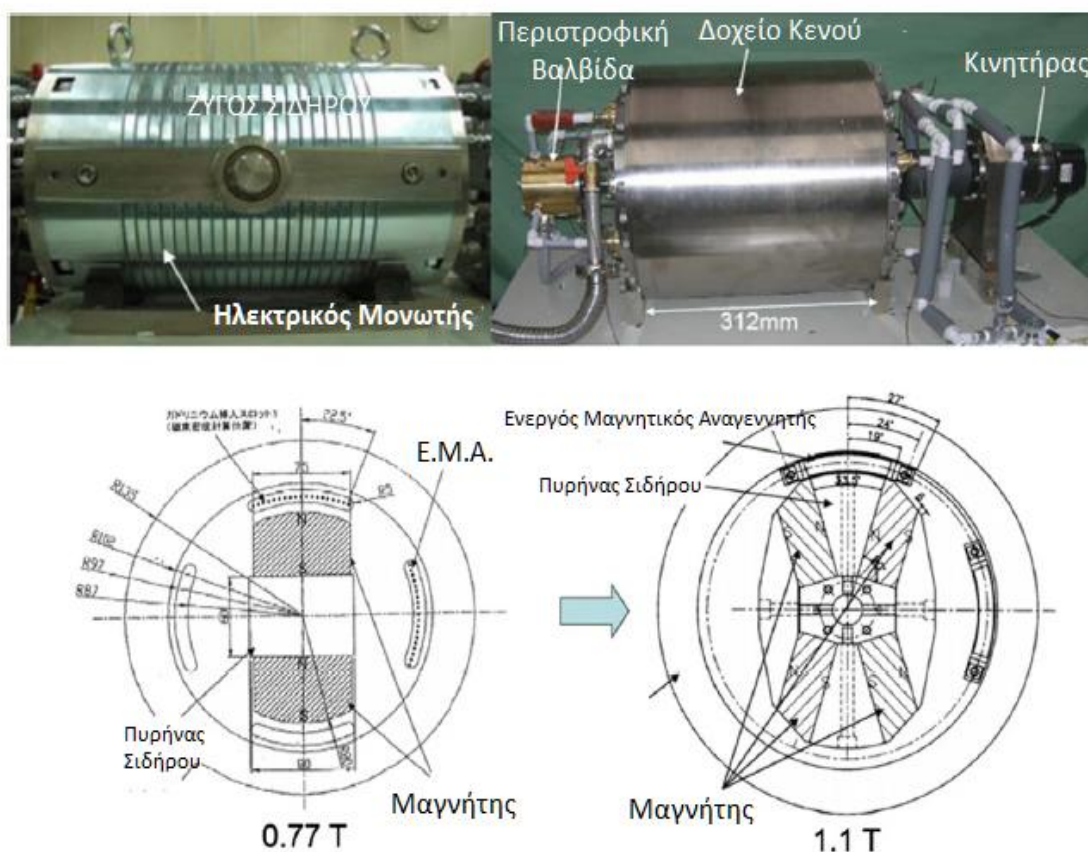
Σχήμα 2.14: Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας ροής στο μαγνητικό ψυκτικό σύστημα που κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο Xi'an Jiatong [56,57].



Σχήμα 2.15: Το παλινδρομικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο Χοκάιντο της Ιαπωνίας [58].



Σχήμα 2.16: Σχηματική αναπαράσταση του μαγνητικού ψυκτικού συστήματος που έφτιαξε ο Υαο [59]. Υπάρχουν σύμβολα 1-5 που τα καθένα περιγράφει ένα εξάρτημα. 1: Μόνιμοι μαγνήτες, 2: Οι κλίνες 3: Το ψυχρό άκρο του εναλλάκτη θερμότητας, 4: Το θερμό άκρο του εναλλάκτη θερμότητας, 5: Το κυλινδρικό έμβολο.



Σχήμα 2.17: Περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε από μια Ιαπωνική ομάδα επιστημόνων στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας στο Τόκυο [48,60,61].

Το 2006 μια ομάδα από Σουηδούς επιστήμονες στο Πανεπιστήμιο Εφαρμοσμένων Επιστημών της Δυτικής Ελβετίας παρουσίασαν στο μεγαλύτερο παγκοσμίως εμπορικό πανηγύρι που έγινε στο Ανόβερο έναν περιστροφικό μαγνητικό διαμορφωτή κλιματισμού, συσκευή η οποία το 2006 είχε κερδίσει το πρώτο βραβείο στα Ελβετικά Τεχνολογικά Βραβεία[62,63,64,65]. Σε αυτή τη συσκευή το εργαζόμενο μέσο ήταν αέρας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18 η εισαγωγή της ροής του αέρα γίνεται αξονικά. Οι εσωτερικές συνδέσεις των ρευστών ενεργοποιούν μια αναγεννητική διεργασία με σκοπό την ενίσχυση της θερμοκρασιακής διαφοράς. Οι στατικοί μόνιμοι μαγνήτες δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 0.8 T σε περιοχή που αντιστοιχεί σε πάνω από το μισό του περιστροφικού ομοαξονικού δαχτυλιδιού, το οποίο αποτελείται από

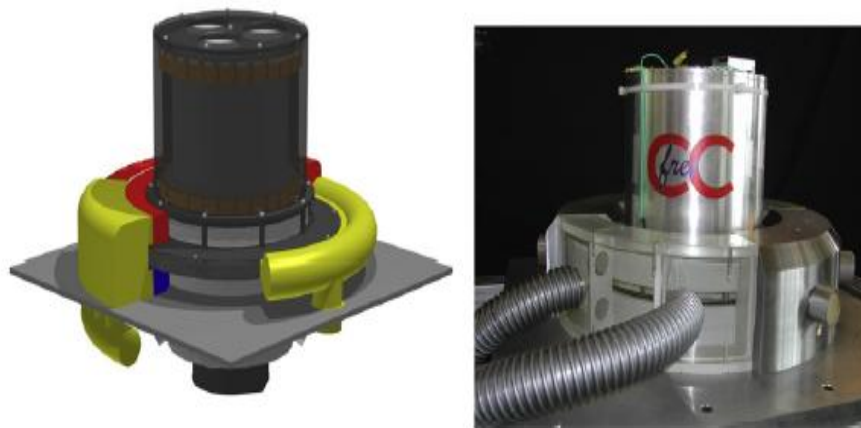
σωματίδια γαδολινίου. Ο διαμορφωτής αυτός δεν είχε βελτιστοποιηθεί και αποτελείτο από μια μεγάλη μάζα από μαγνήτες και ο σχεδιασμός ήταν τέτοιος ώστε να επιτυγχάνονται μικρές απώλειες πίεσης. Επίσης, η μόνιμη συστοιχία μαγνητών δεν ήταν πλήρως βελτιστοποιημένη με σκοπό να υπάρξει η δυνατότητα για την επίτευξη υψηλού μαγνητικού πεδίου.

Ένα ακόμη μαγνητικό παλινδρομικό ψυγείο που λειτουργούσε σε θερμοκρασίες δωματίου παρουσιάστηκε το 2006 στο Ερευνητικό Ινστιτούτο Μπαστού της Κίνας [66,67]. Η μηχανή αυτή αποτελούνταν από ένα μόνιμο μαγνήτη, έναν ενεργό μαγνητικό αναγεννητή, ένα ψυχρό συσσωρευτή, έναν εναλλάκτη θερμότητας και μια κινητήρια αντλία. Ως μαγνητικό ψυκτικό χρησιμοποιήθηκαν 750 g γαδολινίου(Gd) και 200 g $\text{LaFe}_{10.97}\text{Co}_{0.78}\text{Si}_{1.05}\text{B}_{0.2}$, ενώ η διάμετρος των σωματιδίων των μαγνητοθερμιδικών υλικών κυμαινόταν από 0.5 έως 2 mm. Ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιήθηκε νερό με Ph 10. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.19 η μαγνητική συσκευή είχε έναν αεραγωγό διαμέτρου 34 mm και μήκους 200 mm και εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο εντάσεως 1.5 T. Το σύστημα μπορούσε να επιτύχει μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά 18°C σε συχνότητα 0.18 Hz. Η μέγιστη ψυκτική ισχύς ήταν 20 W με θερμοκρασιακή διαφορά 5°C. Αυτή η λειτουργία επιτυγχανόταν ύστερα από λειτουργικό χρόνο 45 min. Επίσης, η θερμοκρασιακή διαφορά μπορούσε να αυξηθεί με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας.

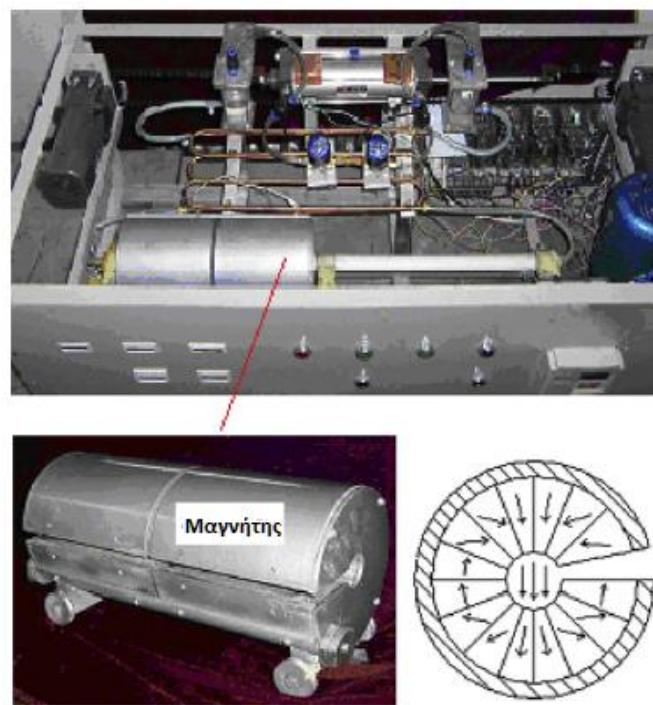
Το 2007 στο κέντρο ερευνών Astronautics Corporation of America [68] παρουσιάστηκε ένας καινούργιος περιστροφικός μαγνητικός ψύκτης, που είχε έναν ειδικά διαμορφωμένο περιστροφικό μόνιμο μαγνήτη για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου εντάσεως 1.5 T. Το μαγνητοθερμιδικό υλικό που σε αυτή τη συσκευή ήταν το γαδολίνιο(Gd) τοποθετήθηκε σε 12 στατικά στρώματα που αποτελούνταν από πολλές παράλληλες πλάκες(βλέπε σχήμα 2.20), όπου η μέση απορροφητικότητα του κάθε στρώματος ήταν 52% (η συνολική τους μάζα ήταν 916 g). Ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας είχε χρησιμοποιηθεί νερό με αναστολείς. Επίσης, η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά ήταν 12 K και η μέγιστη ψυκτική ισχύς 220W. Τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα δεν ικανοποίησαν τις προσδοκίες(αριθμητικά προσωμοιοτικά αποτελέσματα) που είχαν εκφραστεί αρχικώς. Η πτώση πίεσης(πάνω από 0.35 bar σε κάθε στρώμα) κατά μήκος των κλινών από παράλληλες πλάκες ήταν διπλάσια σε σχέση με αυτή που είχε υπολογιστεί αριθμητικά. Ο λόγος που συνέβη αυτό ήταν πιθανότατα ότι δεν είχε επιτευχθεί ο ιδανικός γεωμετρικός σχεδιασμός. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μετρήθηκε και η συχνότητα λειτουργίας και βρέθηκε ότι η μέγιστη τιμή της ήταν 120 περιστροφές ανά λεπτό. Αυτό μεταφράζεται σε 4 Hz, επειδή η διαδικασία μαγνήτισης/απομαγνήτισης συνέβαινε η κάθε μία σε 2 ζώνες

μαγνήτισης και απομαγνήτισης κατά τη διάρκεια μιας μοναδιαίας περιστροφής του τροχού.

Στο πανεπιστήμιο της Βικτόρια στον Καναδά οι Tura και Rowe [69] κατασκεύασαν ένα μαγνητικό ψυγείο που περιείχε μόνιμους μαγνήτες με σκοπό να κάνουν δοκιμές σε όλα τα είδη των μαγνητικών ψυγείων σε διαφορετικές διαμορφώσεις. Αυτή η μηχανή παρουσιάζεται στο σχήμα 2.21. Μια συστοιχία από μόνιμους μαγνήτες κατασκευασμένους από NbFeB εφαρμόστηκαν και κατάφεραν να δημιουργήσουν ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 0.1-1.47 T. Το νερό χρησιμοποιήθηκε ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας με ένα εύρος θερμοκρασιακής απόρριψης της τάξεως των 255-311 K, και η συχνότητα λειτουργίας ήταν 0-4 Hz. Το παραπάνω πρωτότυπο αποτελούνταν από κυλινδρικούς μαγνητοθερμιδικούς αναγεννητές των οποίων ο όγκος, η διάμετρος και το μήκος ήταν 20 cm³, 16 mm και 110 mm αντίστοιχα. Το κενό στον αναγεννητή εξαιτίας του θερμού εναλλάκτη θερμότητας και του ψυχρού ήταν 0.88 cm³ και 0.4 cm³ αντίστοιχως και τα μονοπάτια της παράλληλης ροής στους εναλλάκτες βελτιστοποιήθηκαν μέσω της χρήσης μιας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής προσέγγισης(CFD). Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε προκειμένου να είναι ευέλικτο και παρουσίασε πολλά πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, ο απλός σχεδιασμός του έδινε την δυνατότητα της εύκολης πρόσβασης σε όλα τα εξαρτήματα της συσκευής και οι διαρροές θερμότητας ήταν πάρα πολύ χαμηλές. Τα μαγνητοθερμιδικά κρεβάτια μαγνητίζονταν/απομαγνητίζονταν εναλλασσόμενα από μια συστοιχία μαγνητών Halbach και ο εσωτερικός μαγνήτης περιστρεφόταν σε σχέση με έναν άλλο εξωτερικό. Οι ερευνητές εξέτασαν την θερμοκρασία της απορριπτόμενης θερμότητας και τη συχνότητα λειτουργίας για το εύρος της θερμοκρασίας όταν 'νιφάδες' γαδολινίου μεγέθους 600μm τοποθετούνταν μέσα στη συσκευή. Οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι το εύρος της θερμοκρασίας του συστήματος αυξήθηκε με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας και της θερμοκρασίας της αποβαλλόμενης θερμότητας. Το μέγιστο θερμοκρασιακό εύρος που επιτεύχθηκε ήταν 13.2 K. Επιπλέον εξετάστηκαν, η απώλεια πίεσης και η κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικές τιμές της συχνότητας λειτουργίας. Η πτώση πίεσης ήταν σχετικά μεγάλη και πιο συγκεκριμένα πήρε τιμές 0.15 bar για συχνότητα λειτουργίας στα 0.5 Hz και 1 bar στα 3 Hz.



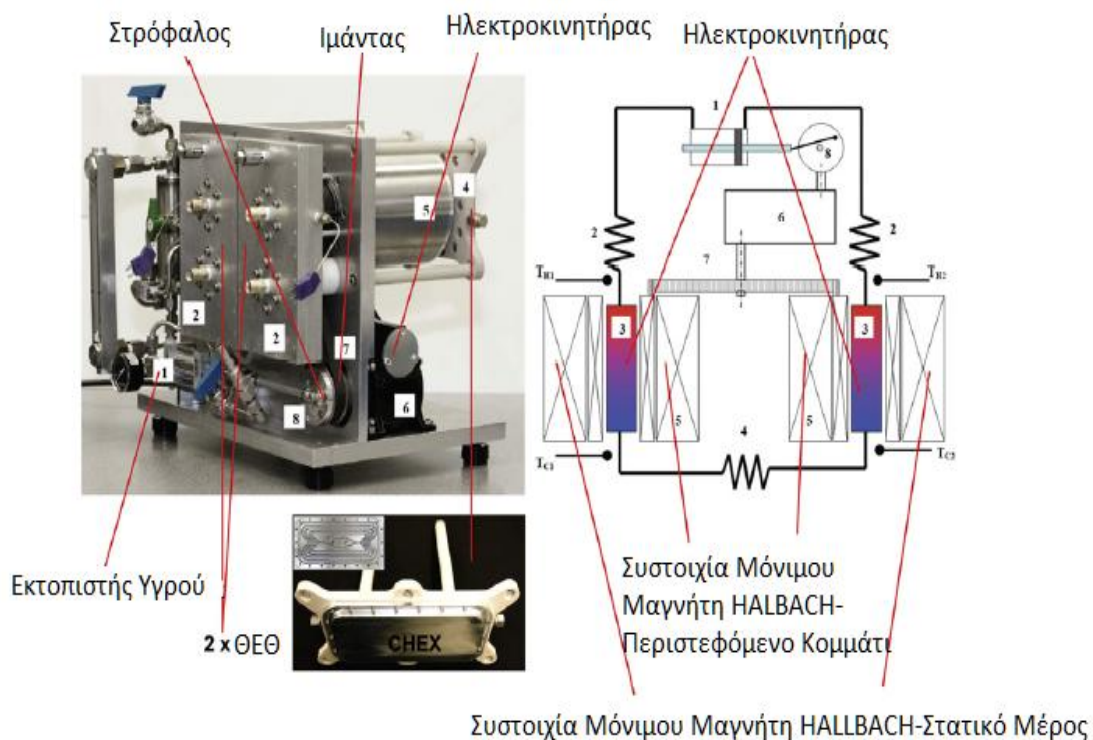
Σχήμα 2.18: Περιστροφικός μαγνητικός διαμορφωτής κλιματισμού που κατασκευάστηκε στο πανεπιστήμιο Εφαρμοσμένων Επιστημών της Δυτικής Ελβετίας. Τα κομμάτια που έχουν χρώμα μπλε και κόκκινο (αριστερό σχήμα) αναπαριστούν τους μαγνητικούς πόλους και η φωτογραφία της μηχανής φαίνεται στο δεξιό σχήμα [62,63,64,65].



Σχήμα 2.19: Παλινδρομικός μαγνητικός ψύκτης που λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου και κατασκευάστηκε στο Ερευνητικό Ινστιτούτο Μπατοού της Κίνας [66,67].



Σχήμα 2.20: Το μαγνητικό ψυγείο που δημιουργήθηκε στο Astronautics Corporation of America [68].



Σχήμα 2.21: Περιστροφικό Μαγνητικό Ψυγείο αποτελούμενο από μόνιμους μαγνήτες. Παρουσιάστηκε από τους ερευνητές του Πανεπιστημίου της Βικτόριας στον Καναδά [69].

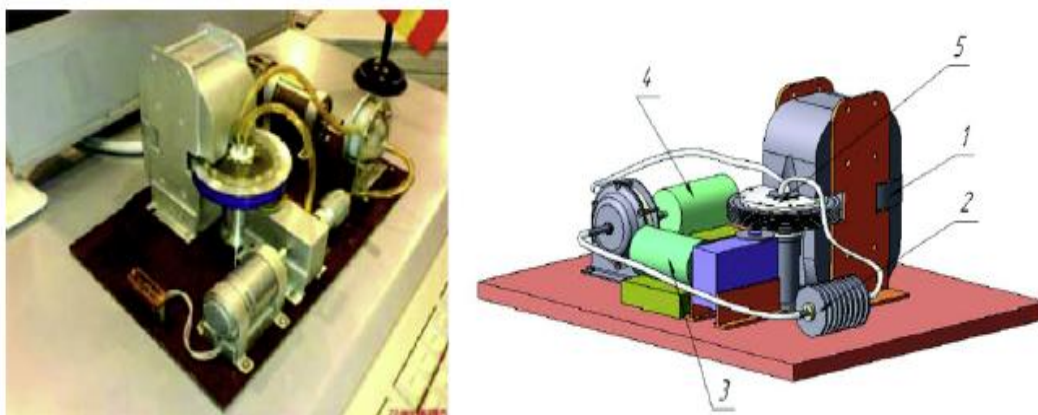
Ο Buchelnikov [70] παρουσίασε το 2007 στο πανεπιστήμιο Τσέλιαμπινσκ Στέιτ μια μαγνητική συσκευή περιστροφικού τύπου διαστάσεων $15 \times 20 \times 20$ cm, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.22. Αυτή η συσκευή αποτελείται από ένα ηλεκτρικό μέρος, ένα μηχανολογικό μέρος, ένα μαγνητικό σύστημα, ένα διπλό περιφερειακό κύκλωμα και επίσης από ένα περιστροφικό μέρος. Γαδολίνιο(Gd) καθώς και βασικά κράματα Ni-Mn-Ga επιλέχθηκαν ως μαγνητικό ψυκτικό μέσο. Ακόμα ένας μόνιμος μαγνήτης δημιουργούσε μαγνητικό πεδίο εντάσεως 1 T. Η παροχή του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας ήταν 0.6-1.5 L/min, η διάμετρος του περιστρεφόμενου τροχού ήταν 8 mm και η συχνότητα λειτουργίας κυμαινόταν από 1 έως 10 Hz. Η προβλεπόμενη ψυκτική ισχύς της μηχανής αυτής ήταν περίπου ίση με 40 W.

Το 2007 μια ομάδα από το τμήμα επιστημών των υλικών και μηχανολογίας του πανεπιστημίου Σεκουάν στην περιοχή Τσενγκντού της Κίνας [71] σχεδίασαν, κατασκεύασαν και δοκίμασαν ένα περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο αποτελούμενο από ένα μόνιμο μαγνήτη(βλέπε σχήμα 2.23).Ο εργαζόμενος τροχός (με εξωτερική διάμετρο 232 mm, εσωτερική διάμετρο 168 mm και ύψος 16 mm) ήταν χωρισμένος σε τριάντα έξι τμήματα και κάθε τμήμα ήταν τοποθετημένο μαζί με το εργαζόμενο υλικό σε μια πορώδη μορφή, η οποία αποτελούνταν από σωματίδια γαδολινίου(Gd) μεγέθους 0.5 mm(η συνολική μάζα ήταν 1 kg). Ο τροχός περιστρεφόταν με συχνότητα μεταξύ των τιμών 0.1 και 0.7 Hz. Οι μαγνήτες ήταν κατασκευασμένοι από ελαφρά μαγνητικά υλικά τα οποία ήταν : NdFeB και FeCoV. Το ύψος του αεραγωγού ήταν στα 20 mm και η πυκνότητα της μαγνητικής ροής ήταν 1.5 T. Το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας όπως και σε πολλές άλλες παρόμοιες συσκευές ήταν και εδώ το νερό. Η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά που επιτεύχθηκε ήταν 11.5 K , ενώ η μέγιστη ψυκτική ισχύς ήταν 40 W και παραγόταν για θερμοκρασιακό εύρος 6.7 K και συχνότητα λειτουργίας περίπου ίση με 0.15 Hz.

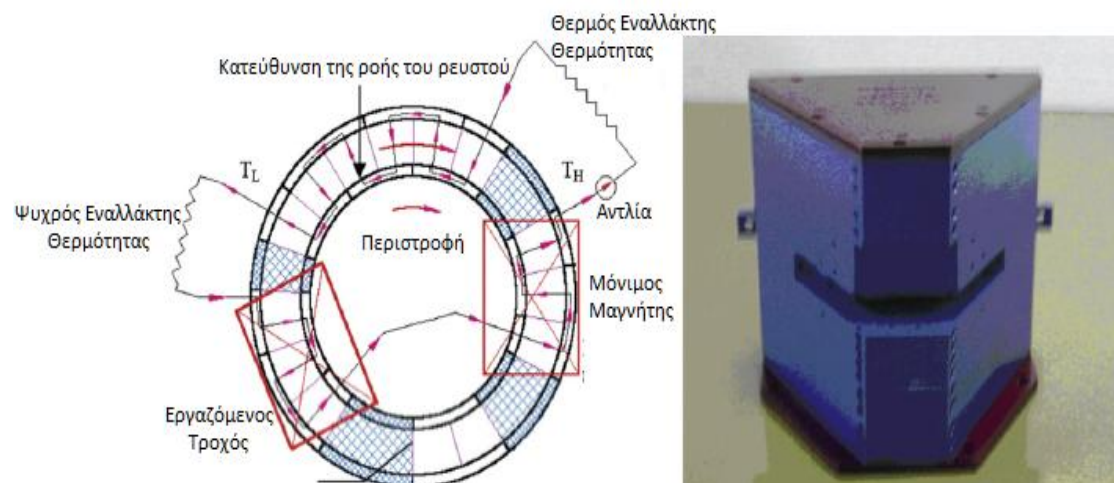
Το 2007 κατασκευάστηκε ένα ακόμα παλινδρομικό μαγνητικό ψυγείο στο Εθνικό Εργαστήριο Riso στη Δανία [72]. Αυτό το πρωτότυπο αποτελούνταν από έναν μαγνήτη σε σχήμα δαχτυλιδιού ο οποίος παρήγαγε 1.2 T. Η θερμοκρασία μπορούσε να ποικίλει από τους σχεδόν 9⁰C (στο σχήμα 2.24 φαίνονται 8.7⁰C-αυτό σημαίνει ότι το εσωτερικό μέρος του αναγεννητή όταν βρισκόταν σε θερμοκρασία δωματίου (20⁰C) θα μπορούσε να ψυχθεί στους 11⁰C).Το μαγνητοθερμιδικό υλικό(γαδολίνιο) τοποθετήθηκε σε παράλληλες πλάκες. Επειδή δεν δημοσιεύθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα, έχουμε μόνο τις αναφορές από τους αριθμητικούς προσωμοιοτικούς υπολογισμούς. Οι 2 εναλλάκτες ήταν κατασκευασμένοι από χαλκό, ενώ οι πλάκες που αποτελούνταν από το ψυκτικό γαδολίνιο είχαν μήκος 5 cm και πάχος 1 mm. Η συχνότητα

λειτουργίας εκτιμάται να είναι στα 1 Hz, λόγω του γεγονότος ότι αναφερόμαστε σε παλινδρομικό μαγνητικό ψυγείο.

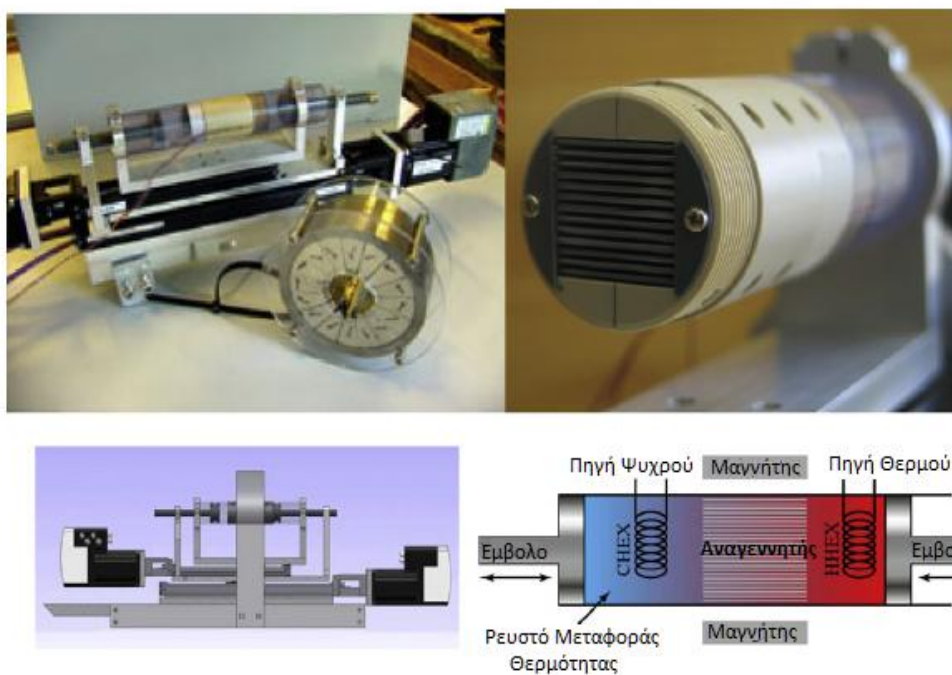
Ένα περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο αναπτύχθηκε επίσης το 2007 ύστερα από συνεργασία του ινστιτούτου INSA και της εταιρίας Cooltech Applications στη Γαλλία [73]. Το σύστημα αυτό είχε μια περιστροφική μαγνητική συνδεσμολογία και τέσσερα στατικά μπλοκ από μαγνητοθερμιδικό υλικό το οποίο ήταν το γαδολίνιο(Gd). Το μέγιστο μαγνητικό πεδίο ήταν 1.3 T και ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιήθηκε το νερό. Δυστυχώς δεν υπάρχουν περισσότερες διαθέσιμες πληροφορίες. Ωστόσο από το σχήμα 2.25 μπορεί κανείς εύκολα να καταλάβει πως δημιουργούνται το μαγνητικό πεδίο στο μαγνητοθερμιδικό υλικό. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στη συσκευή που κατασκεύασε το Ινστιτούτο Τεχνολογίας του Τόκιο σε συνεργασία με την Chubu Electric Power (βλέπε σχήμα 2.9 και 2.16).



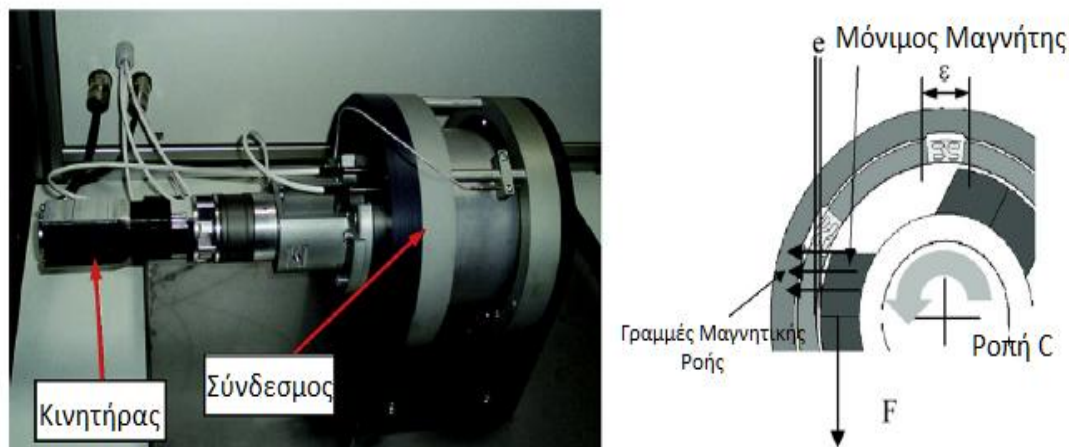
Σχήμα 2.22: Το μαγνητικό ψυγείο του Buchelnikov: 1)Το μαγνητικό σύστημα(αποτελείται από μαγνήτη NdFeB και ένα ζυγό από σίδηρο. 2)Θερμοπομπός από Al-Mg 3) και 4)οι κινητήριες συσκευές του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας και ο κινητήριος μειωτήρας 5)Το περιστροφικό σύστημα [70].



Σχήμα 2.23: Περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε και παρουσιάστηκε στο Πανεπιστήμιο Σεκουάν της Κίνας [71].



Σχήμα 2.24: Παλινδρομικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε στο Εθνικό Εργαστήριο Riso της Δανίας [72].



Σχήμα 2.25: Περιστροφικός μαγνητικός ψύκτης που κατασκευάστηκε στη Γαλλία ύστερα από συνεργασία μεταξύ της Cooltech Applications και της INSA [73]

Το 2009 όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα πραγματοποιήθηκε το τρίτο διεθνές συνέδριο με θέμα τη Μαγνητική Ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου, το οποίο έγινε στο Des Moines, Iowa στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Κατά την χρονική περίοδο 2008-2009 υπήρξαν περίπου 12 μαγνητικές ψυκτικές συσκευές για ψύξη σε θερμοκρασίες δωματίου. Μερικές από αυτές είναι απλώς εξελιγμένα μοντέλα κάποιων συσκευών των προηγούμενων ετών, ενώ άλλες αποτελούν μηχανές που δημιουργήθηκαν εξολοκλήρου από το μηδέν.

Ο Nakamura [74] στο Πανεπιστήμιο Χοκάιντο της Ιαπωνίας έκτισε μια πειραματική συσκευή, αποτελούμενη από ένα μέρος για καταγραφή των δοκιμών, ένα μόνιμο μαγνητικό κύκλωμα, όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας και συσκευές ελέγχου. Η συσκευή αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 2.26. Το μαγνητικό κύκλωμα είναι ένα κλειστό κύκλωμα που περιλαμβάνει 2 μόνιμους μαγνήτες οι οποίοι αναγεννούν μια μέγιστη μαγνητική ροή ίση με 2.0 T στο διάκενο. Επίσης, σφαιρικά σωματίδια από γαδολίνιο τοποθετήθηκαν στο τμήμα των δοκιμών. Η συνολική μάζα του γαδολινίου που χρησιμοποιήθηκε ήταν 33.4 g. Οι Ιάπωνες επιστήμονες καθόρισαν τόσο υπολογιστικά όσο και πειραματικά το θερμοκρασιακό προφίλ κάτω από διάφορες λειτουργικές συνθήκες τόσο για τον αέριο-ενεργό μαγνητικό αναγεννητή όσο και για τον υδρό-ενεργό μαγνητικό αναγεννητή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ένας μεγαλύτερος όγκος ροής και μια υψηλότερη ταχύτητα ροής απαιτούνται για να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του αέριου-ενεργού μαγνητικού αναγεννητή συγκριτικά με τον υδρό-ενεργό μαγνητικό αναγεννητή.

Έχοντας ως σκοπό την πειραματική μελέτη των ψυκτικών χαρακτηριστικών ενός ενεργού μαγνητικού αναγεννητή ο οποίος

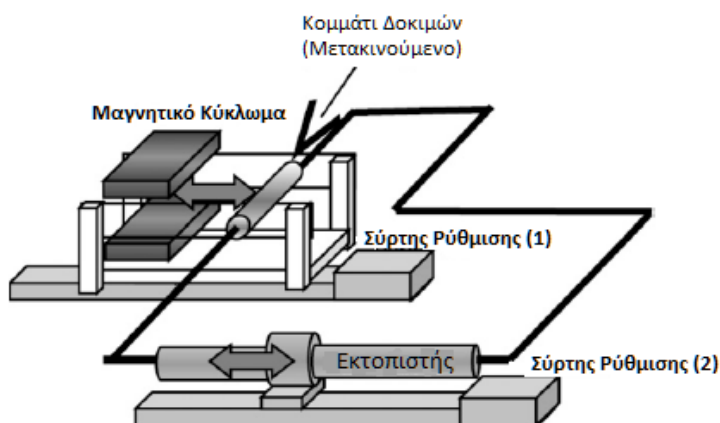
χρησιμοποιεί τριών ειδών σφαιρικά επιχρισμένα σωματίδια από LaFeSi, ο Hiranno [75] κατασκεύασε μια συσκευή δοκιμών η οποία φαίνεται στο σχήμα 2.27. Τα μέρη αυτής της μηχανής είναι παρόμοια με αυτά του σχήματος 2.25. Η κλίνη είχε εσωτερική διάμετρο 12 mm και μήκος 60 mm και το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας ήταν αέρας. Το μαγνητικό κύκλωμα, τύπου Halbach είναι αυτό που φαίνεται αριστερά στο σχήμα 2.27 και αποτελείται από δύο αντιτιθέμενους σταθερούς μαγνήτες. Το πλάτος, το μήκος και το ύψος τους ήταν 204 mm, 160 mm και 186 mm, ενώ το διάκενο του αέρα στο μαγνητικό κύκλωμα ήταν 20 mm. Η συνολική μάζα του κυκλώματος μετρήθηκε στα ~83 kg και το μέγιστο μαγνητικό πεδίο ήταν εντάσεως 2.3 T. Η συσκευή κατάφερε να επιτύχει με το μαγνητοθερμιδικό υλικό LaFeSi ένα θερμοκρασιακό εύρος της τάξεως των 2 K, το οποίο ήταν χαμηλότερο από αυτό που επιτεύχθηκε με τη χρήση του γαδολινίου.

Ο Zheng [76] στο Νότιο Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας της Κίνας κατασκεύασε ένα μαγνητικό ψυκτικό σύστημα που λειτουργούσε σε θερμοκρασία δωματίου, στο οποίο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.28 υπάρχει ένας διπλός ενεργός μαγνητικός αναγεννητικός κύκλος με την ονομασία AMR2RC. Το σύστημα αποτελούνταν από ένα μόνιμο μαγνήτη, έναν ενεργό μαγνητικό αναγεννητή, ένα υδραυλικό κύκλωμα με αντλίες, από τον πυρήνα του AMRSRC και ένα υπο-βοηθητικό σύστημα ελέγχου. Εφαρμόζοντας μια μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, οι επιστήμονες πρόβλεψαν τη δημιουργία ενός μεγίστου μαγνητικού πεδίου εντάσεως 1.5 T. Επίσης με τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της δομής του μόνιμου μαγνήτη το βάρος μειώθηκε κατά περίπου 40%. Το ορθογωνικό ενεργό μαγνητικό αναγεννητικό κρεβάτι είχε διαστάσεις 150×40×20 mm. Οι ερευνητές στην Κίνα με τη βοήθεια υπολογιστικών μεθόδων διερεύνησαν την επίδραση των θερμοκρασιών στους δύο εναλλάκτες θερμότητας πάνω στην ψυκτική απόδοση. Παρόλα αυτά μέχρι σήμερα δεν έχουν δοθεί στη δημοσιότητα πειραματικά αποτελέσματα που να αφορούν αυτούς τους υπολογισμούς.

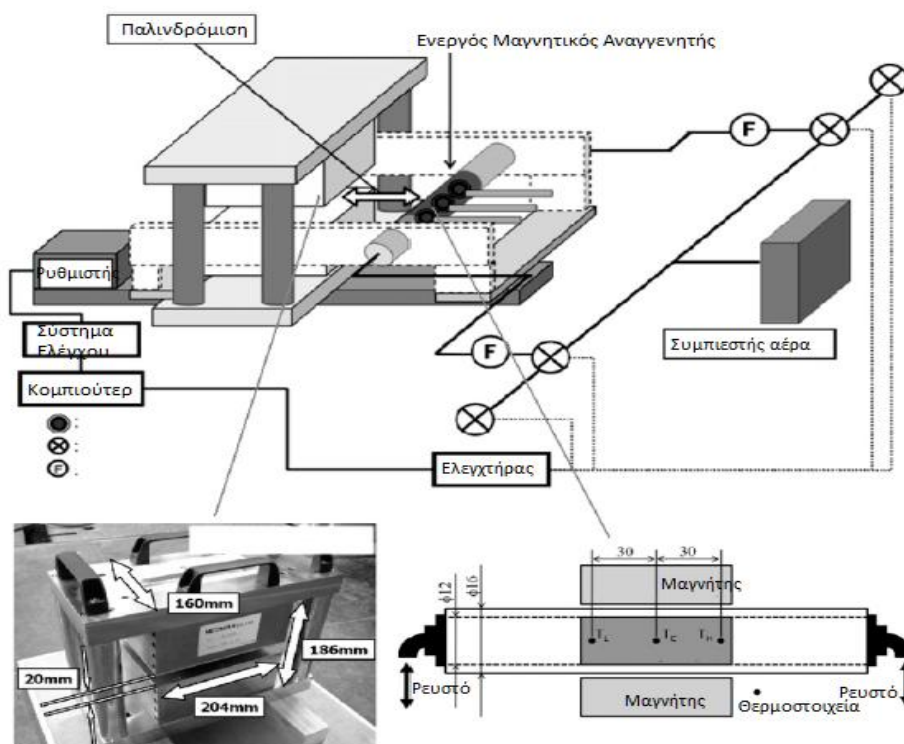
Στη Γαλλία στο Cooltech Applications [77] δημιουργήθηκε ένα παλινδρομικό πρωτότυπο όπως ακριβώς φαίνεται και στο σχήμα 2.29. Το στρώμα του αναγεννητή αποτελούνταν από 37 παράλληλες πλάκες γαδολινίου, πάχους 0.6 mm. Η συστοιχία των μαγνητών Halbach, η οποία δημιουργούσε ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 0.8 T έως 1.1 T στο διάκενο αποτελούνταν από μια συνδεσμολογία τριών μαγνητών από NdFeB, πάχους 50 mm. Οι Γάλλοι ερευνητές έλαβαν πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με τις εξελίξεις των μέσων θερμοκρασιών στα άκρα του θερμού και του ψυχρού εναλλάκτη για διάφορες θερμοκρασίες και συχνότητες λειτουργίας. Η συσκευή κατάφερε να λειτουργήσει για ένα μέγιστο θερμοκρασιακό εύρος ίσο με 16.1 K σε συνθήκες

λειτουργίας όπου η συχνότητα ροής του ρευστού ήταν 0.3 Hz, η ταχύτητα του ρευστού ίση με 30 mm/s και η εσωτερική θερμοκρασία 19.6°C.

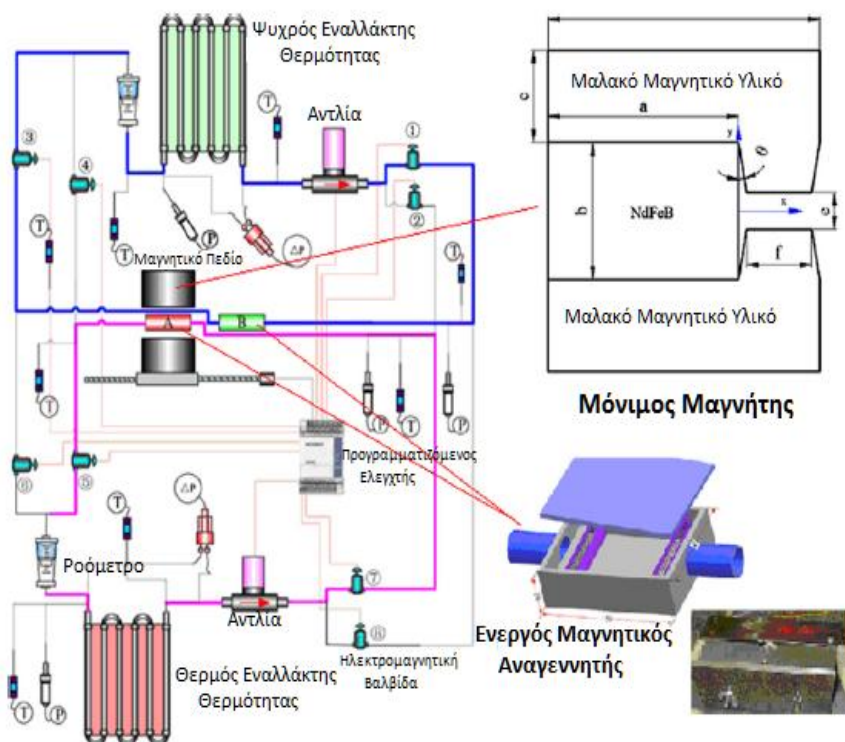
Ένα πρωτότυπο κατάλληλο για μαγνητική ψύξη, με έναν ενεργό μαγνητικό αναγεννητή με τη μορφή τροχού κατασκευάστηκε από τον Coelho [78] στο Universidade Estadual de Campinas στη Βραζιλία. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.30 ο τροχός είχε διάμετρο 250 mm και πάχος 20 mm και είχε κατασκευαστεί από PVC. Υπήρχαν έξι κοιλότητες οι οποίες περιείχαν γαδολίνιο και επέτρεπαν στο ρευστό μεταφοράς της θερμότητας (αλκοόλη) να περνά μέσα από αυτές. Το μαγνητικό πεδίο της συσκευής αυτής κυμαινόταν από 0.24T-2.30T. Επίσης, αυτή η μηχανή χρησιμοποιήθηκε κυρίως για δοκιμές που αφορούσαν αδιαβατικά μοντέλα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι η συσκευή σταθεροποιούνταν ύστερα από 20 min και επιτύγγανε μια μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά της τάξεως των 11°C όταν λειτουργούσε στη βέλτιστη συχνότητά της (0.4 Hz έως 0.5 Hz).



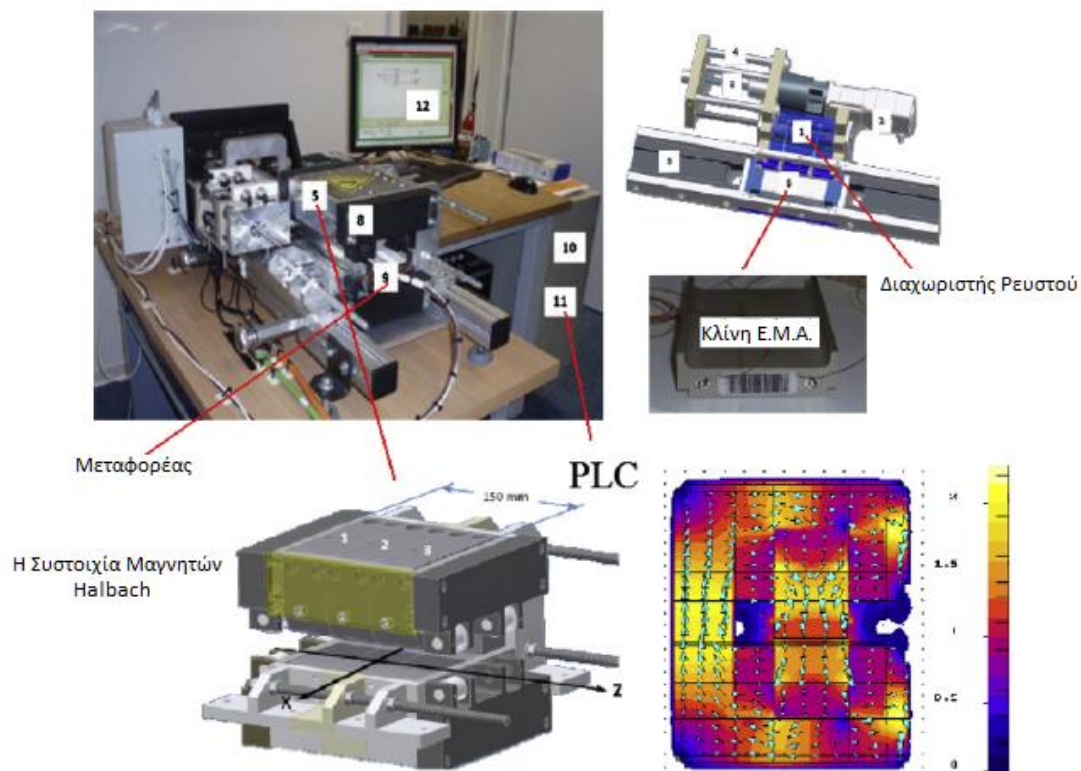
Σχήμα 2.26: Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής συσκευής που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο Χοκάιντο της Ιαπωνίας [74].



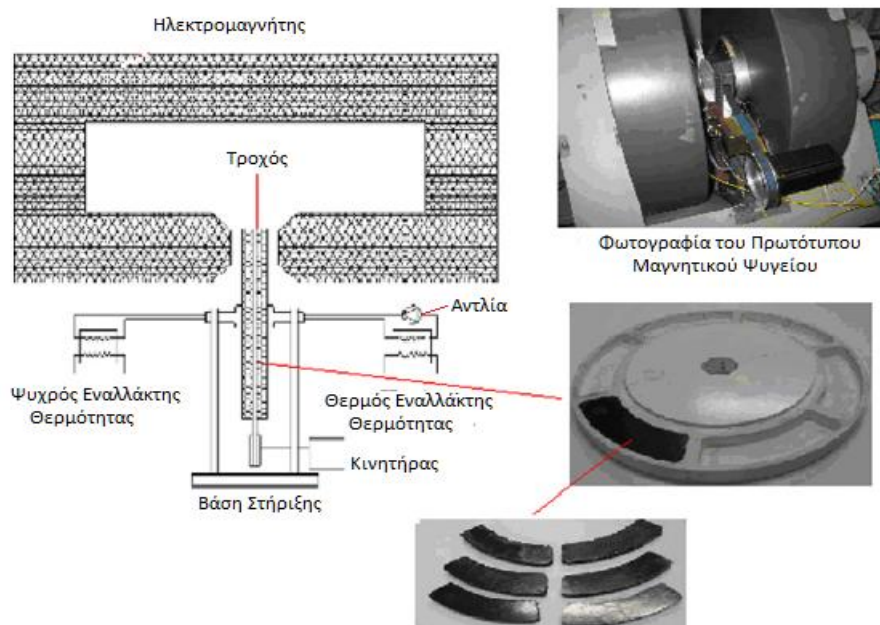
Σχήμα 2.27: Η ενεργή μαγνητική αναγεννητική συσκευή που κατασκευάστηκε στο Βιομηχανικό Ερευνητικό Ίδρυμα της Ιαπωνίας [75].



Σχήμα 2.28: Το αναγεννητικό σύστημα που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας της Νότιας Κίνας [76]



Σχήμα 2.29: Το παλινδρομικό πρωτότυπο που κατασκευάστηκε από τη Cooltech Application στη Γαλλία [77].



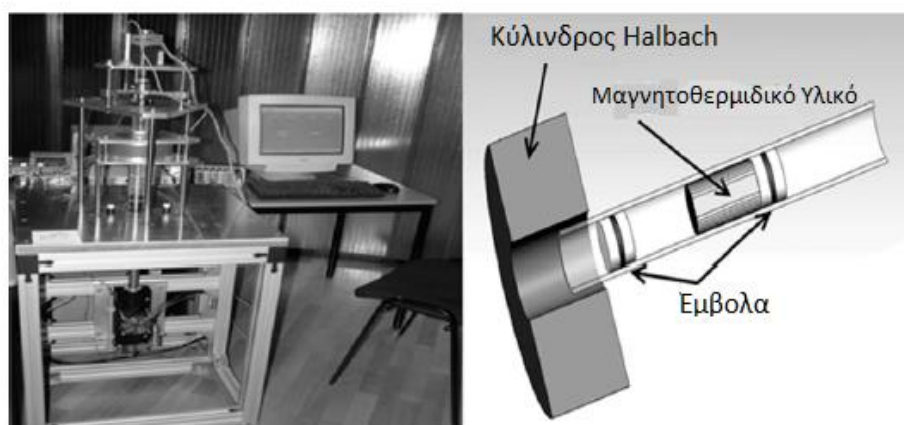
Σχήμα 2.30: Μαγνητικό ψυγείο με ηλεκτρομαγνήτες που δημιουργήθηκε στη Βραζιλία [78].

Την ίδια χρονολογία μια νέα αναγεννητική συσκευή κατασκευάστηκε με σκοπό την μελέτη της επίδρασης του παράγοντα απομαγνήτισης, της συχνότητας λειτουργίας, της ταχύτητας ροής και το συγχρονισμό της μαγνήτισης. Επιπλέον, διερευνήθηκε και η επίδραση των διαφόρων φάσεων του υγρού στη συμπεριφορά του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή [79]. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.31, ο κυλινδρικός μαγνήτης τύπου Halbach που χρησιμοποιήθηκε δημιουργούσε μαγνητικό πεδίο εντάσεως 0.8 T. Φύλλα 1 mm από γαδολίνιο τοποθετήθηκαν στον κύλινδρο, του οποίου η συνολική διάμετρος και το μήκος ήταν αντίστοιχα 30 mm και 50 mm. Οι χρόνοι μαγνήτισης και απομαγνήτισης ποίκιλαν και η συσκευή είχε τη δυνατότητα λειτουργίας πάνω από τα 1 Hz. Οι ταχύτητες ροής έπαιρναν διάφορες τιμές λίγο πιο κάτω από 0.5 ml/s έως 23ml/s. Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το μέγιστο θερμοκρασιακό εύρος των 7.8⁰C επιτεύχθηκε για ταχύτητα ροής ίση με 3 ml/s. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασιακή διαφορά αυξανόταν αρχικώς με την αύξηση της ταχύτητας ροής, στη συνέχεια μειωνόταν και τελικά παρουσίαζε ξανά μια μικρή αύξηση.

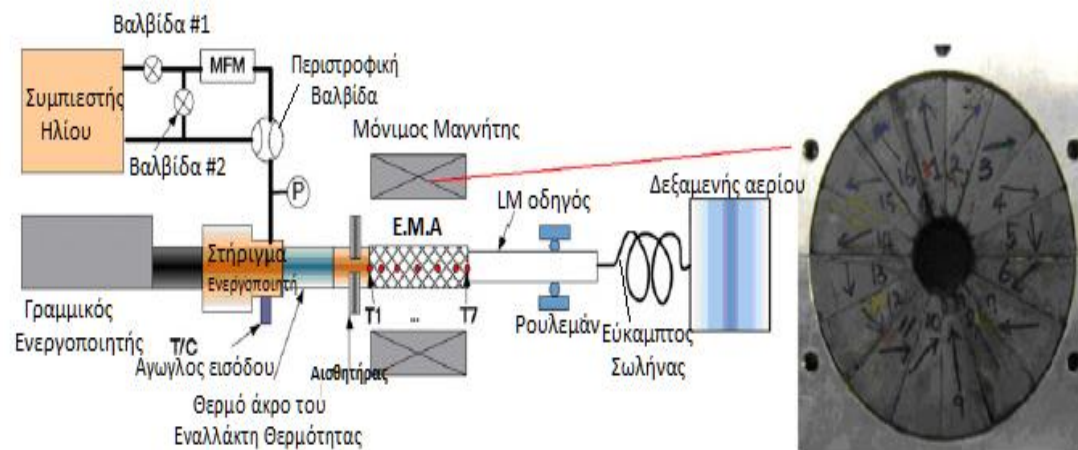
Ο Kim και ο Jeong [80] στην Κορέα στο Advanced Institute of Science and Technology ανέπτυξαν ένα παλινδρομικό μαγνητικό ψυγείο έχοντας ως βάση για τη λειτουργία μια πηγή από μόνιμους μαγνήτες. Το γαδολίνιο χρησιμοποιήθηκε ως μαγνητικό ψυκτικό μέσο και το ήλιο ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας. Μια σχηματική απεικόνιση αυτού του παλινδρομικού μαγνητικού ψυγείου δίνεται στο σχήμα 2.32. Η συχνότητα λειτουργίας της συσκευής μπορούσε να φτάσει τα 1 Hz. Η διάμετρος του ακανόνιστου διαμορφωμένου γαδολινίου ποίκιλε από 325 έως 500 μm. Η συστοιχία του μαγνητικού πεδίου περιελάμβανε 16 τμήματα μόνιμου μαγνήτη εξωτερικής διαμέτρου 76 mm, εσωτερικής διαμέτρου 16 mm και μήκους 47 mm. Έτσι λοιπόν, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 1.58 T στο κέντρο της οπής και 1 T στα άκρα. Εκτός από αυτές τις μετρήσεις που αφορούσαν το μαγνητικό πεδίο οι επιστήμονες έκαναν μετρήσεις για τις μέσες θερμοκρασίες και για τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στον αναγεννητή σε λειτουργία ψυχρής ροής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παραβολική κατανομή του μαγνητικού πεδίου είχε μια αρνητική επίδραση στην ψυκτική λειτουργία και παρατηρήθηκε ένα μέγιστο θερμοκρασιακό εύρος ίσο με 16⁰C. Στη συνέχεια αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα υπολογιστικά και διαπιστώθηκε ότι το αριθμητικό μοντέλο θα μπορούσε να βελτιωθεί μέσω της χρησιμοποίησης ενός μαγνητικού πεδίου που να είναι περισσότερο ακριβές καθώς και μέσω της βελτίωσης του συντελεστή μεταφοράς της θερμότητας.

Μια άλλη μαγνητική συσκευή κατασκευάστηκε στη Δανία το 2009 [81]. Αυτή η μηχανή φαίνεται στο σχήμα 2.33 και είναι παρόμοια σε κάποιο βαθμό με τη συσκευή που φαίνεται στο σχήμα 2.23. Μια διαφορά

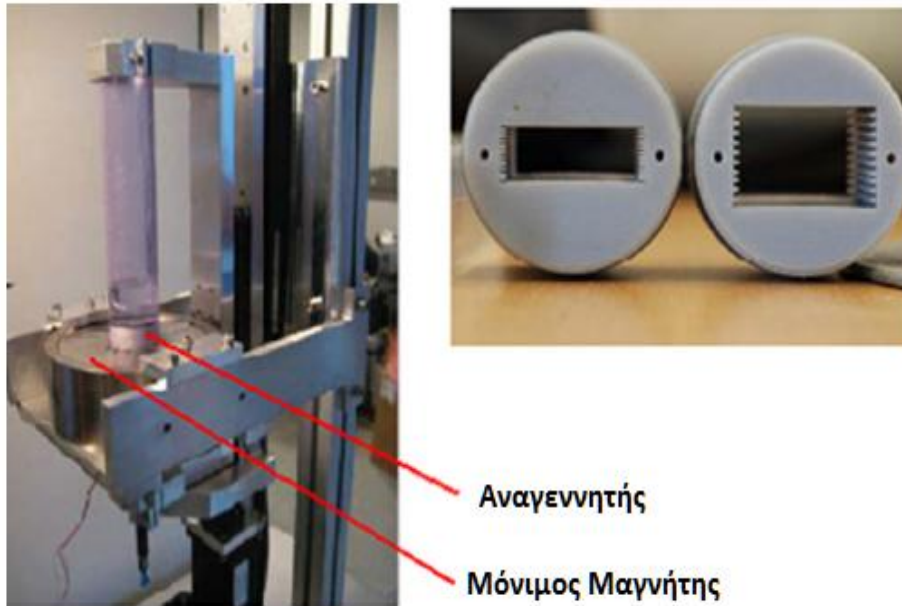
είναι ότι στην μηχανή που θα περιγραφεί εδώ ο ενεργός μαγνητικός αναγεννητής ήταν γεμάτος από παράλληλες πλάκες φτιαγμένες από ένα μαγνητοθερμιδικό υλικό το οποίο ήταν το $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.33$). Επίσης, το γεωμετρικό μέγεθος του μέρους που τοποθετείται ο αναγεννητής μπορεί να αναδιαμορφωθεί και να τοποθετηθεί αναγεννητής ακόμη μεγαλύτερου μεγέθους. Το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας σε αυτή τη συσκευή ήταν νερό μαζί με ένα μίγμα αιθανόλης. Ωστόσο, δεν έχουμε στη διάθεσή μας κανένα πειραματικό αποτέλεσμα. Οι Δανοί ερευνητές θεωρούν μεγάλη πρόκληση το εγχείρημά τους για τη χρησιμοποίηση ενός μεγάλου σε μέγεθος αναγεννητή και ευελπιστούν στο μέλλον να είναι σε θέση να μειώσουν ακόμα περισσότερο τις διαρροές θερμότητας που εντοπίστηκαν καθώς και να δημιουργήσουν το βέλτιστο μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 2.31: Η συσκευή που κατασκευάστηκε στο Ηλεκτρολογικό-Μηχανολογικό Εργαστήριο στη περιοχή Γκρενόμπλ της Γαλλίας [79].



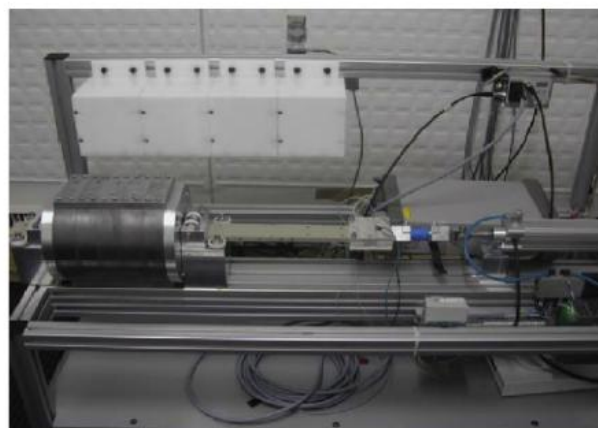
Σχήμα 2.32: Παλινδρομική μηχανή και ο μόνιμος μαγνήτης που διερευνήθηκαν στην Κορέα στο Advanced Institute of Science and Technology [80].



Σχήμα 2.33: Η μηχανή που κατασκευάστηκε στο Riso DTU της Δανίας [81].

Για τα περισσότερα μαγνητικά ψυκτικά συστήματα που έχουν περιγραφεί μέχρι τώρα, τα μαγνητοθερμιδικά υλικά μαγνητίζονταν και απομαγνητίζονταν σε συνθήκες μη αδιαβατικές. Ωστόσο, κανένας δεν είχε δώσει σημασία στην αλλαγή της θερμοκρασίας ενός μαγνητοθερμιδικού υλικού σε πραγματικές συνθήκες. Έτσι λοιπόν, ο Sarri [82] στο "Institut Genie Thermique (IGT)" στο πανεπιστήμιο Εφαρμοσμένων Επιστημών της Δυτικής Ελβετίας (UASWS) ανέπτυξε μια παλινδρομική συσκευή για τον χαρακτηρισμό των μαγνητοθερμιδικών υλικών σε πραγματικές συνθήκες δοκιμών. Όπως φαίνεται και στη δεξιά πλευρά του σχήματος 2.34 το μαγνητοθερμιδικό υλικό ήταν τοποθετημένο και στερεωμένο σε έναν 'υποδοχέα υλικών', ο οποίος μέσω ενός πνευματικού εμβόλου είχε τη δυνατότητα να εισέρχεται και να εξέρχεται από το μαγνητικό πεδίο. Ο μόνιμος μαγνήτης κατασκευής από NdFeB, δημιουργούσε μαγνητικό πεδίο εντάσεως 2 T στο διάκενο το οποίο είχε διατομή 10 mm×59 mm και μήκος ίσο με 200 mm. Οι επιστήμονες δημοσίευσαν τις μετρήσεις που αφορούσαν τις θερμοκρασιακές αλλαγές για τα υλικά $\text{LaFe}_{11}\text{Co}_{0.9}\text{Si}_{1.1}$ και Gd σε αδιαβατικές και μη-αδιαβατικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτή η συσκευή μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της θερμοκρασίας Curie καθώς και της θερμοκρασιακής αλλαγής των μαγνητοθερμιδικών υλικών σε θερμοκρασίες δωματίου για ένα συγκεκριμένο μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Επίσης, η συσκευή μπορούσε να υπολογίσει τις μαγνητικές δυνάμεις που εφαρμόζονταν στα μαγνητοθερμιδικά υλικά.

Ο Tagliafico [83] στο Πανεπιστήμιο της Τζένοας στην Ιταλία κατασκεύασε ένα γραμμικό παλινδρομικό μαγνητικό ψύκτη ο οποίος δίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.35. Η συσκευή αποτελούνταν από εμπορικά μέρη και ειδικά διαμορφωμένα εξαρτήματα. Τα εμπορικά εξαρτήματα ήταν διαθέσιμα στην τεχνική αγορά, ενώ τα υπόλοιπα που κατασκευάστηκαν στα εργαστήρια ήταν δύο εναλλάκτες θερμότητας, και η πηγή του μαγνητικού πεδίου. Οι εναλλάκτες κατασκευάστηκαν από ανοξείδωτο χάλυβα και ορείχαλκο και ειδικά επικαλυμένοι για την αποφυγή της διάβρωσης. Δέκα μαγνήτες από NdFeB συνολικού βάρους 5 kg ήταν περιτριγυρισμένοι από ένα μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό (κράμα σιδήρου) για την δημιουργία μαγνητικού πεδίου εντάσεως 1.55 T. Έτσι το συνολικό βάρος της μαγνητικής δομής έφτανε τα 30 kg. Κάθε αναγεννητής αποτελούνταν από πέντε παράλληλους σωλήνες άνθρακα και τρεις 'ψεύτικες' σωλήνες, γεμισμένες με 300 μm γαδολινίου. Η συνολική μάζα του γαδολινίου σε κάθε αναγεννητή ήταν 400 g. Επίσης, η συχνότητα λειτουργίας της συσκευής ήταν λιγότερο από 0.2 Hz και το νερό λειτουργούσε ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας. Μέχρι το 2010 δεν είχαν πραγματοποιηθεί πειραματικές μετρήσεις επειδή η ολοκλήρωση της μηχανής αυτής δεν είχε ακόμα επιτευχθεί.



Η Πειραματική Συσκευή

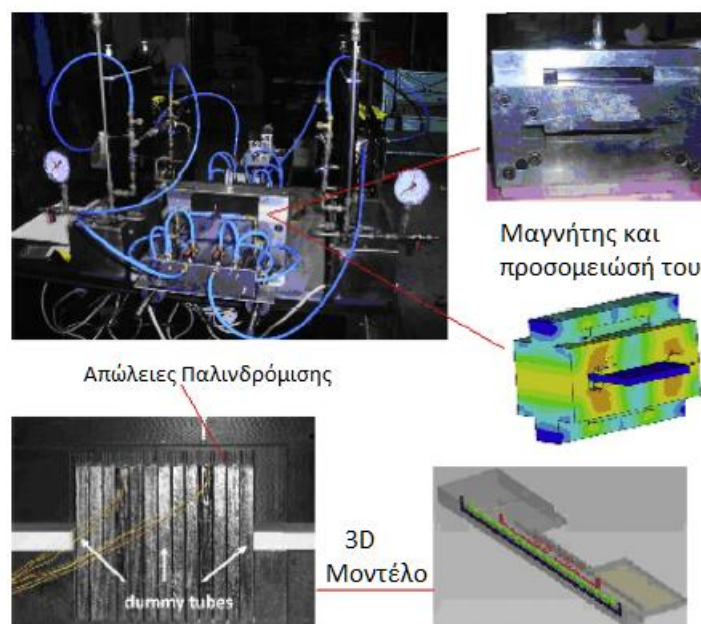


Μικροί Μόνιμοι Μαγνήτες
(2*10*20 mm)



Δίσκος από Γαδολίνιο(Gd)

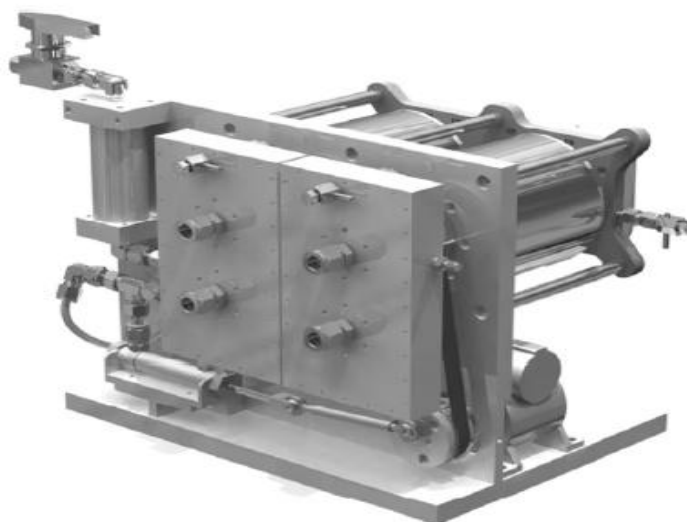
Σχήμα 2.34: Η παλινδρομική συσκευή που αναπτύχθηκε στο UASWS/IGT στην Ελβετία [82].



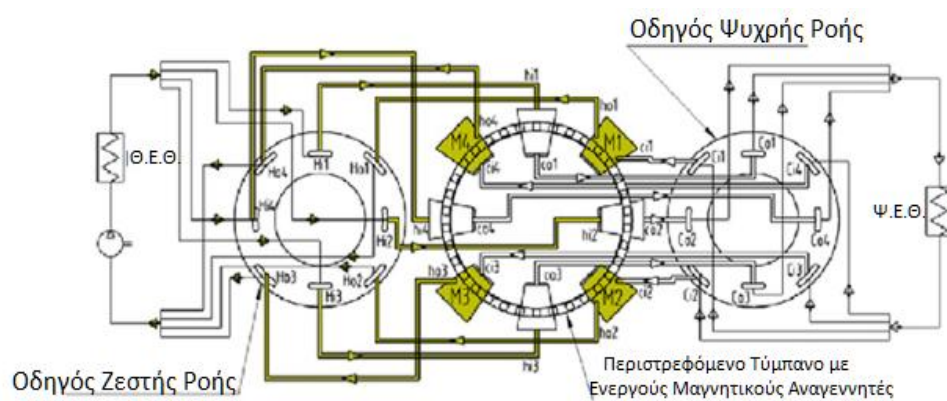
Σχήμα 2.35: Γραμμική παλινδρομική μαγνητική συσκευή. Κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο της Τζένοας στην Ιταλία [83].

Το 2009 οι Tura και Rowe[84] παρουσίασαν το βελτιωμένο σύστημά τους (είχαν κατασκευάσει αρχικά ένα μαγνητικό ψυγείο με μόνιμο μαγνήτη, σχήμα 20), το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στα τηρούμενα αρχεία του τρίτου διεθνές συνεδρίου (Thermag III Conference). Η συσκευή αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 2.36. Οι επιστήμονες αντικατέστησαν τα 43 g από νιφάδες γαδολινίου που περιείχε ο αναγεννητής και τοποθέτησαν στη θέση τους σφαίρες βάρους 55 g και διαμέτρου 300 μm , των οποίων το μήκος και ο όγκος ήταν 55 mm και 10.8 cm^3 αντίστοιχα. Οι ερευνητές κατάφεραν να μειώσουν το ποσοστό του αέρα που παγιδευόταν στις υδραυλικές γραμμές με ορισμένες μεθόδους που παρουσιάζονται αναλυτικά στις αναφορές (Tura και Rowe ,2009)[66]. Σχεδίασαν ένα νέο ψυχρό και θερμό εναλλάκτη, ο οποίος ήταν πιο αποδοτικός και είχε μικρότερο νεκρό όγκο και μεγαλύτερη βρεχόμενη επιφάνεια. Επιπλέον, προστέθηκε ένα νέο ηλεκτρικό θερμοστοιχείο, το οποίο παρείχε ψυκτικό φορτίο μέχρι και 50 W. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτή η τροποποίηση αύξησε το θερμοκρασιακό εύρος καθώς και την ψυκτική ισχύ σε όλες τις συχνότητες λειτουργίας, οι οποίες φτάναν μέχρι τα 4 Hz. Η ψυκτική ισχύς ήταν πάνω από τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή που είχε παρατηρηθεί σε προηγούμενες δοκιμές και η πτώση πίεσης είχε γίνει μισή εξαιτίας της εξελιγμένης γεωμετρίας του μαγνητικού ψυκτικού. Στη συχνότητα των 1.4 Hz, το σύστημα πετύχαινε COP ίσο με 1.6 και ψυκτική ισχύ 50 W και θερμοκρασιακή διαφορά 2°C.

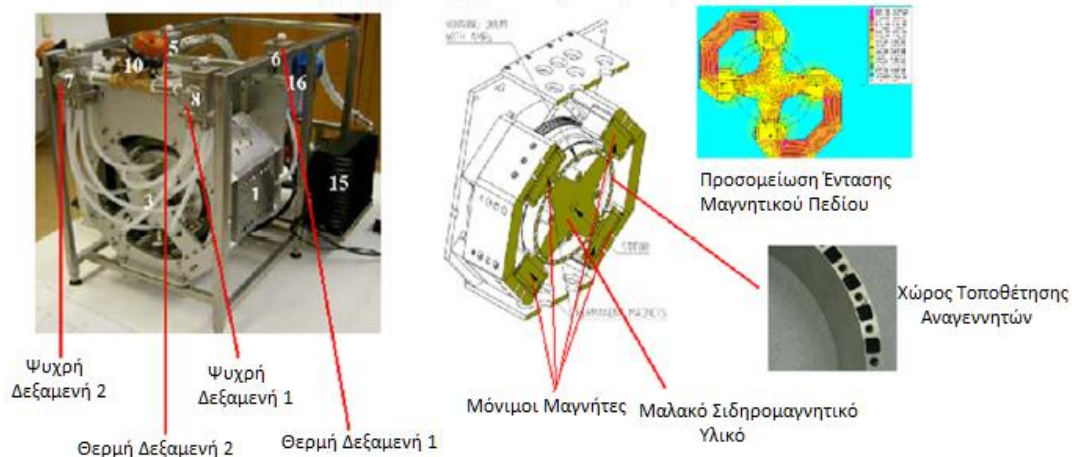
Μία αρκετά ενδιαφέρουσα συσκευή ενός περιστροφικού μαγνητικού ψυγείου [85] έχει κατασκευαστεί αποτελούμενη από μόνιμους μαγνήτες στο Πανεπιστήμιο Λιουμπλιάνα στη Σλοβενία. Αυτό το περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο αποτελείται από έναν περιστροφικό κύλινδρο ο οποίος περιστρέφεται γύρω από έναν εσωτερικά τοποθετημένο στάτη ,μαλακού σιδήρου και γύρω από έναν εξωτερικά τοποθετημένο στάτη από μόνιμους μαγνήτες. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.37, η μαγνητική δομή αποτελείται από τέσσερις μόνιμους μαγνήτες NdFeB και από χάλυβα 1010 χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ο οποίος χρησιμοποιείται ως μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό, ενώ δύο μαγνητικά κυκλώματα επιτρέπουν την περιστροφική κίνηση του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή. Ύστερα από βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της μαγνητικής δομής επιτεύχθηκε μαγνητικό πεδίο εντάσεως από 0.05 T έως 0.98 T. Υπήρχαν 34 αναγεννητές στο περιστροφικό τύμπανο και κάθε αναγεννητής είχε διαστάσεις 10 mm×10 mm×50 mm. Πλάκες γαδολινίου (Gd), πάχους 0.3 mm τοποθετήθηκαν στους αναγεννητές και η συνολική μάζα του γαδολινίου ήταν περίπου ίση μ 600 g. Η συσκευή αυτή μπορούσε να λειτουργήσει ως τα 4 Hz.



Σχήμα 2.36: Το βελτιωμένο πρωτότυπο που κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο της Βικτόρια στον Καναδά [84].



Διαγραμμά Ροής για τους Αναγεννητές



Σχήμα 2.37: Περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο Λιουμπλιάνα της Σλοβενίας [85].

A/A	Κατασκευαστής	Χρονολογία Κατασκευής	Τύπος Μηχανής	Μέγιστο $\Delta T(K)$	Ένταση Μεγίστου Μαγνητικού Πεδίου(T)	Μαγνητοθερμιδικό Υλικό
1	Brown	1976	Παλινδρομική	47(80)	7	1 mm πλάκες Gd, 20% αιθυλική αλκοόλη-νερό
2	Kirol και Dacus	1987	Περιστροφική	11	0.9	125 πλάκες Gd των 76 μm
3	Green	1990	Παλινδρομική	24	7	Gd-Tb, αέριο του αζώτου
4	Zimm	1997	Παλινδρομική	38	5	Σφαίρες Γαδολινίου(Gd)
5	Bohigas	2000	Περιστροφική	5	0.9	Γαδολίνιο, ελαιόλαδο
6	Okamura	2000	Παλινδρομική	21	4	Σφαίρες Γαδολινίου(Gd)
7	Rowe και Barclay	2001	Παλινδρομική	14	2	Gd&Gd ₁ , Ήλιο
8	Zimm	2001	Περιστροφική	25	1.5	Gd, σφαίρες από GdEr(0.25-0.5 mm) και νερό με αναστολείς
9	Blumenfeld	2002	Παλινδρομική	15	1.7	Σκόνη από Γαδολίνιο
10	Lu	2002	Παλινδρομική	23	1.4	Σφαίρες Gd, 0.22 mm. Gd ₅ Si
11	Okamura	2003	Περιστροφική	8	0.77	Κράματα Gd _{1-x} Dy _x , νερό
12	Clot	2003	Παλινδρομική	4	0.8	Ταινίες Gd, με κενά 1 mm για την είσοδο του νερού
13	Richard	2004	Παλινδρομική	14	2	Κράματα Gd-R
14	Rowe	2004	Παλινδρομική	50	2	Πολυεπίπεδα Κράματα Gd-R, Ήλιο
15	Shir	2005	Παλινδρομική	5	2	Σκόνη Γαδολινίου
16	Okamura	2005	Περιστροφική	10	0.77	Κράματα από Gd και MnAsSb
17	Vasile και Muller	2005	Περιστροφική	14	2.4	Πλάκες γαδολινίου, νερό
18	Yu	2005	Παλινδρομική	3	2.18	Gd, Gd ₅ Si ₂ Ge ₂ και νερό
19	Kawanami	2005	Παλινδρομική	10	1.0	Gd, αποσταγμένο νερό
20	Yao	2006	Παλινδρομική	42	1.5	Σωματίδια Gd, ήλιο
21	Egolf	2006	Περιστροφική	-	0.8	Σωματίδια Gd, αέρας
22	Okamura	2006	Περιστροφική	8	1.1	Ταινίες γαδολινίου, νερό
23	Huang	2006	Παλινδρομική	18	1.5	750 g Gd και 200g LaFe _{10.97} Si _{1.05} B _{0.2}
24	Zimm	2007	Περιστροφική	12	1.5	Πλάκες γαδολινίου, νερό
25	Tura και Rowe	2007	Περιστροφική	13.2	1.47	Νιφάδες Gd 0.6 mm, νερό
26	Buchelnikov	2007	Περιστροφική	13.2	1	Gd, κράματα από NiMnGa
27	Petersen	2007	Παλινδρομική	8.7	1.2	Πλάκες γαδολινίου 1 mm
28	Muller	2007	Περιστροφική	8.7	1.3	Γαδολίνιο, νερό
29	Chen	2007	Περιστροφική	11.5	1.5	Σωματίδια Gd, 0.5 mm, 1 kg, νερό
30	Nakamura	2008	Παλινδρομική	11.5	2.0	33.4 g από Gd, νερό ή αέρας
31	Hirano	2009	Παλινδρομική	~2	2.3	LaFeSi, αέρας
32	Zheng	2009	Παλινδρομική	~2	1.5	Gd
33	Bour	2009	Παλινδρομική	16.1	1.1	Πλάκες Gd των 0.6 mm, νερό
34	Coelho	2009	Περιστροφική	11	2.3	Gd, αιθυλική αλκοόλη
35	Dupuis	2009	Παλινδρομική	7.8	0.8	Φύλλα 1 mm από γαδολίνιο
36	Kim και Jeong	2009	Παλινδρομική	16	1.58	Σωματίδια Gd 325-500 μm , ήλιο
37	Pryds	2009	Παλινδρομική	16	-	Πλάκες από La _{0.67} Ca _{0.33-x} Sr _x MnO ₃ , νερό και μίγμα αιθανόλης
38	Sari	2009	Παλινδρομική	16	2.0	LaFe ₁₁ Ca _{0.9} Si _{1.1} και Gd, αέρας
39	Tagliafico	2009	Παλινδρομική	16	1.5	300 μm Gd, νερό
40	Tura και Rowe	2009	Περιστροφική	29	1.4	Σφαίρες Gd των 300 μm
41	Tusek	2009	Περιστροφική	~7	0.98	Πλάκες Gd, αποσταγμένο νερό

Πίνακας 2.1: Συνοπτική Παρουσίαση των σημαντικότερων μαγνητικών ψυκτικών συσκευών που κατασκευάστηκαν από το 1976 έως το 2009 και λειτουργούν σε θερμοκρασίες δωματίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΜΑΓΝΗΤΟΘΕΡΜΙΔΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ

3.1 Βασικές Αρχές και η Ανακάλυψη του Φαινομένου

Η μαγνητοθερμιδική επίδραση (MCE), ή αλλιώς αδιαβατική μεταβολή της θερμοκρασίας (ΔT_{ad}), στην οποία οφείλεται η θέρμανση ή η ψύξη των μαγνητικών υλικών εξαιτίας μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, ανακαλύφθηκε ουσιαστικά από τον Warburg[1] το 1881 όταν εφάρμοσε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στο μέταλλο του σιδήρου. Η φύση της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης εξηγήθηκε, αλλά η πρακτική της χρήση για την επίτευξη εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών που είναι μια διαδικασία γνωστή ως αδιαβατική απομαγνήτιση, προτάθηκε ανεξάρτητα από τους Deybe[86] και Giauque [87].

Η μαγνητοθερμιδική επίδραση είναι εγγενής σε όλα τα μαγνητικά υλικά και οφείλεται στη σύζευξη της μαγνητικής υποδιάταξης(sublattice) με το μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλλάζει το μαγνητικό κομμάτι της εντροπίας ενός στερεού. Όπως ακριβώς η συμπίεση ενός αερίου, η ισοθερμοκρασιακή μαγνήτιση ενός παραμαγνήτη ή ενός μαλακού σιδηρομαγνήτη μειώνει την εντροπία και σε μια αναστρέψιμη διεργασία που λέγεται απομαγνήτιση και αποθηκεύει το μηδενικό-πεδίο μαγνητικής εντροπίας του συστήματος. Τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης σε έναν φερομαγνήτη κόντα στη θερμοκρασία Curie (T_C) παρουσιάζονται σχηματικά στο σχήμα 3.1.

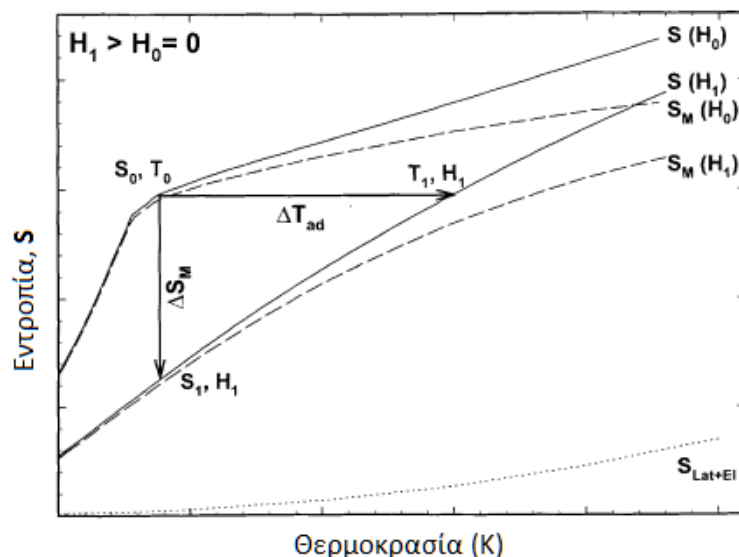
Σε συνθήκες σταθερής πίεσης η εντροπία ενός μαγνητικού στερεού, $S(T,H)$, η οποία είναι μια συνάρτηση που εξαρτάται τόσο από την ένταση (H) του μαγνητικού πεδίου, όσο και από την απόλυτη θερμοκρασία(T) ισούται με το άθροισμα της μαγνητικής εντροπίας (S_M), της εντροπίας διατάξεως(lattice) (S_{lat}) και αυτής των ηλεκτρονίων(S_{EL}). Δηλαδή έχουμε ότι:

$$S(T,H)= S_M(T,H) + S_{lat}(T,H) + S_{EL}(T,H) \quad (3.1)$$

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό που βρίσκεται σε 2 σταθερά μαγνητικά πεδία(μηδενικό μαγνητικό πεδίο H_0 και ένα μη μηδενικό μαγνητικό πεδίο H_1) , μαζί με τις αντίστοιχες μαγνητικές και μη-μαγνητικές συνθήκες. Όταν το μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται αδιαβατικά (δηλαδή ,όταν η συνολική εντροπία του συστήματος παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της αλλαγής του μαγνητικού πεδίου) σε μια αναστρέψιμη διεργασία , τότε η μαγνητοθερμιδική επίδραση(δηλαδή, η αδιαβατική αύξηση της

θερμοκρασίας, $\Delta T_{ad}=T_1-T_0$), μπορεί απεικονιστεί σαν μια ισεντροπική διαφορά μεταξύ των αντίστοιχων εξισώσεων $S(T)_H$ όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1 κατά τον οριζόντιο άξονα. Η μαγνητοθερμιδική επίδραση μπορεί επίσης να εκφραστεί κατά μια έννοια ως μια ισόθερμη αλλαγή της μαγνητικής εντροπίας (ή πιο απλά αλλαγή της μαγνητικής εντροπίας), $\Delta S_M=S_1-S_0$, όταν το μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται ισοθερμοκρασιακά. Η τελευταία περίπτωση είναι ίση με την ισοθερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των αντίστοιχων συναρτήσεων $S(T)_H$ όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1 κατά τον κάθετο άξονα. Για αυτό οι ΔT_{ad} και ΔS_M αναπαριστούν τις δύο ποσοτικές χαρακτηριστικές της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης, και είναι φανερό ότι και οι δύο ΔT_{ad} και ΔS_M εξαρτώνται από την αρχική θερμοκρασία T_0 (δηλαδή, η θερμοκρασία που υπήρχε πριν την εισαγωγή του μαγνητικού πεδίου μεταβλήθηκε), και την αλλαγή του μαγνητικού πεδίου ($\Delta H=H_1-H_0$).

Από το σχήμα 3.1 μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει ότι αν αυξηθεί το μαγνητικό πεδίο (δηλ. με το να μειώσουμε τη μαγνητική εντροπία, πράγμα το οποίο συμβαίνει στην περίπτωση των απλών παραμαγνητικών και σιδηρομαγνητικών υλικών), τότε η $\Delta T_{ad}(T, \Delta H)$ είναι θετική και η μαγνητική στερεά θερμαίνεται, ενώ η $\Delta S_M(T, \Delta H)$ είναι αρνητική. Τα πρόσημα των $\Delta T_{ad}(T, -\Delta H)$ και $\Delta S_M(T, -\Delta H)$ αντίστοιχα αντιστρέφονται όταν το μαγνητικό πεδίο μειώνεται.



Σχήμα 3.1: Στο διάγραμμα S-T απεικονίζεται η ύπαρξη του μαγνητοθερμιδικού φαινομένου. Οι συμπαγείς γραμμές αναπαριστούν την ολική εντροπία σε δύο διαφορετικά μαγνητικά πεδία: H_0 και $H_1 > 0$. Το οριζόντιο βέλος δείχνει τη διαβατική μεταβολή ΔT_{ad} , ενώ το κατακόρυφο βέλος δείχνει τη ΔS_M όταν το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται από H_0 σε H_1 . Η διακεκομμένη λεπτή γραμμή δείχνει την εντροπία S_{Lat+El} , ενώ οι διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζουν τη μαγνητική εντροπία στα δύο μαγνητικά πεδία. Με S_0 και T_0 συμβολίζονται οι τιμές της εντροπίας και της ενθαλπίας στο μηδενικό μαγνητικό πεδίο και αντίστοιχα με S_1 και T_1 οι τιμές για το μαγνητικό πεδίο 1.

Οι ΔT_{ad} και ΔS_M συσχετίζονται με τη μαγνήτιση (M), την ένταση του μαγνητικού πεδίου, την θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση (C), και την απόλυτη θερμοκρασία σύμφωνα με μια από τις θεμελιώδεις σχέσεις του Maxwell [88]:

$$\left(\frac{\partial S(T, H)}{\partial H} \right)_T = \left(\frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H \quad (3.2)$$

Η παραπάνω σχέση μετατρέπεται σε μια ισόθερμη-ισόβαρη μεταβολή μετά από ορισμένα επίπεδα ολοκληρώσεων.

$$\Delta S_M(T, \Delta H) = \int_{H_1}^{H_2} \left(\frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H dH. \quad (3.3)$$

Η εξίσωση (3.3) υποδεικνύει ότι η αλλαγή της μαγνητικής εντροπίας είναι ανάλογη με την παράγωγο της μαγνήτισης σε σχέση με τη θερμοκρασία σε σταθερά πεδία και τις αλλαγές του μαγνητικού πεδίου. Συνδυάζοντας την εξίσωση (3.2) με την αντίστοιχη $T dS$ εξίσωση είναι εύκολα να αποδείξουμε [88] ότι η απειροελάχιστη αδιαβατική αύξηση της θερμοκρασίας για μια αναστρέψιμη ισοθερμοκρασιακή-ισοβαρή διεργασία ισούται με:

$$dT = - \left(\frac{T}{C(T, H)} \right)_H \left(\frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H dH. \quad (3.4)$$

Ως εκ τούτου, η αύξηση της αδιαβατικής θερμοκρασίας είναι ακριβώς ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία, για την παράγωγο της μαγνήτισης σε σχέση με τη θερμοκρασία σε σταθερή περιοχή και την αλλαγή του μαγνητικού πεδίου, καθώς και αντιστρόφως ανάλογη με τη θερμοχωρητικότητα. Μετά την ενσωμάτωση της εξίσωσης (3.4) μπορούμε να ορίσουμε την τιμή του μαγνητοθερμιδικής επίδρασης ως εξής:

$$\Delta T_{ad}(T, \Delta H) = - \int_{H_1}^{H_2} \left(\frac{T}{C(T, H)} \right)_H \left(\frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H dH. \quad (3.5)$$

Οι εξισώσεις (3.2)-(3.5) έχουν μία θεμελιώδη σημασία για την κατανόηση της συμπεριφοράς της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης σε στερεά, και αποτελούν τη βάση για την έρευνα σε νέα υλικά που να έχουν μεγάλη μαγνητοθερμιδική επίδραση. Καταρχάς, όταν η μαγνήτιση παραμαγνητών ή απλών σιδηρομαγνητών σε σταθερό πεδίο μειώνεται με

ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας (δηλ $(\partial M / \partial T)_H < 0$), τότε η $\Delta S_M(T)_{\Delta H}$ θα έπρεπε να είναι αρνητική (προκύπτει από (3.2) & (3.3)), ενώ η $\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H}$ θα έπρεπε να'ναι θετική (εξισώσεις (3.4) & (3.5)). Όλα τα παραπάνω που αποδεικνύονται από τις εξισώσεις φαίνονται και στο διάγραμμα 3.1 . Δεύτερον, στους σιδηρομαγνήτες το $|(\partial M / \partial T)_H|$ είναι μέγιστο στη θερμοκρασία T_C , και για αυτό το $|\Delta S_M(T)_{\Delta H}|$ θα έπρεπε να είναι μέγιστο σε αυτή τη θερμοκρασία T_C (Εξισώσεις (3.2) και (3.3)).

Τρίτον ,παρόλο που δεν αποδεικνύεται ευθέως από τις εξισώσεις (3.4) &(3.5) επειδή η θερμοχωρητικότητα σε σταθερό πεδίο παρουσιάζει ανωμαλίες κοντά στη θερμοκρασία T_C , έχει αποδειχθεί ότι η $\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H}$ σε σιδηρομαγνήτες έχει μέγιστο στη θερμοκρασία Curie όταν $\Delta H \rightarrow 0$.

Τέταρτον , για ίδιο $|\Delta S_M(T)_{\Delta H}|$, η $\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H}$ θα είναι μεγαλύτερη για μια υψηλότερη απόλυτη θερμοκρασία, καθώς επίσης και όταν η συνολική θερμοχωρητικότητα είναι μικρότερη (Εξίσωση (3.5)). Αυτό το τελευταίο που αναφέραμε, είναι πολύ σημαντικό στην κατανόηση του γεγονότος ότι οι παραμαγνήτες εμφανίζουν σημαντική $\Delta T_{ad}(T, \Delta H)$ μόνο σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν, όπου και η ελάχιστη τιμή του $|(\partial M / \partial T)_H|$ εύκολα αντισταθμίζεται από την αμελητέα λανθάνουσα θερμοχωρητικότητα. Επιπλέον, σε υψηλές θερμοκρασίες η μετρήσιμη αδιαβατική θέρμανση (ή ψύξη) αναμένεται μόνο όταν το στερεό συμπεριφέρεται αυθόρμητα, δηλαδή όταν η τιμή της $|(\partial M / \partial T)_H|$ γίνεται σημαντική.

3.2 Μετρήσεις Σχετικά με τη Μαγνητοθερμιδική Επίδραση

Η μαγνητοθερμιδική επίδραση μπορεί να μετρηθεί άμεσα ή μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα από την μετρούμενη μαγνήτιση ή από την εξάρτηση του πεδίου από την θερμοχωρητικότητα. Οι άμεσες τεχνικές μετρήσεις πάντα περιλαμβάνουν μετρήσεις των θερμοκρασιών του δείγματος (T_0 και T_F) στα μαγνητικά πεδία H_0 και H_F , όπου τα σύμβολα 'O' και 'F' δηλώνουν το αρχικό και το τελικό μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα. Η $\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H}$ ορίζεται τότε ως η διαφορά μεταξύ των T_F και T_0 για ένα δοσμένο T_0 και το $\Delta H = H_F - H_0$.

Οι άμεσες μετρήσεις της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης μπορούν να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας γνωστές (π.χ όταν ο αισθητήρας θερμότητας είναι σε άμεση θερμική επαφή με το δείγμα) και άγνωστες τεχνικές (π.χ όταν η θερμοκρασία του δείγματος μετριέται χωρίς αισθητήρα που να ναι άμεσα συνδεδεμένος με το δείγμα μας) [89-97]. Επειδή κατά τις άμεσες μετρήσεις του φαινομένου απαιτείται μια ραγδαία αλλαγή του μαγνητικού πεδίου, οι μετρήσεις μπορεί να πραγματοποιηθούν σε ακινητοποιημένα δείγματα όπου και η αλλαγή του

μαγνητικού τους πεδίου θα πραγματοποιείται είτε με φόρτιση/αποφόρτιση του μαγνήτη ή με μετακίνηση του δείγματος μέσα και έξω από ένα ομοιόμορφο σε ένταση μαγνητικό πεδίο. Χρησιμοποιώντας ακινητοποιημένα δείγματα και παλλόμενα μαγνητικά πεδία, οι άμεσες μετρήσεις της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης που έχουν γίνει κυμαίνονται για μαγνητικά πεδία εντάσεως 1 έως 40 T. Η χρήση ηλεκτρομαγνητών συνήθως ελαττώνει την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε τιμές πιο κάτω από 2 T. Στις πειραματικές μετρήσεις όπου το δείγμα ή ο μαγνήτης μετακινούνται για τη δημιουργία ποικίλων μαγνητικών πεδίων, χρησιμοποιούνται υπεραγώγιμοι ή μόνιμοι μαγνήτες, στους οποίους το όριο του μαγνητικού τους πεδίου κυμαίνεται από 0.1-10 T. Η ακρίβεια των άμεσων πειραματικών μεθόδων εξαρτάται από τα σφάλματα στη μέτρηση της θερμοκρασίας, τα σφάλματα στις ρυθμίσεις του μαγνητικού πεδίου, την ποιότητα της θερμομόνωσης του δείγματος (αυτό αποτελεί σημαντική πηγή λάθους όταν η μαγνητοθερμιδική επίδραση είναι μεγάλη και για αυτό διαταράσσονται οι αδιαβατικές συνθήκες), την ποιότητα του συστήματος απόσβεσης που ελαττώνει την επίδραση της αλλαγής του μαγνητικού πεδίου στην ένδειξη του αισθητήρα θερμότητας. Λαμβάνοντας υπόψη όλες αυτές τις επιδράσεις, η ακρίβεια είναι της τάξεως του 5-10% [89-97].

Σε αντίθεση με την άμεση μέθοδο μέτρησης της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης, η οποία υπολογίζει μόνο την αδιαβατική αλλαγή της θερμοκρασίας, τα έμμεσα πειράματα επιτρέπουν τον υπολογισμό του $\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H}$ καθώς και του $\Delta S_M(T)_{\Delta H}$ – μετρήσεις της θερμοχωρητικότητας, ή μόνο του $\Delta S_M(T)_{\Delta H}$ – μετρήσεις της μαγνήτισης. Η πειραματική μέτρηση της μαγνήτισης συναρτήσει της θερμοκρασίας και του μαγνητικού πεδίου μας δίνει το $\Delta S_M(T)_{\Delta H}$ ύστερα από αριθμητική ολοκλήρωση της εξίσωσης (3.3) και έχει ορθώς προταθεί ως μια πολύ χρήσιμη τεχνική για τον γρήγορο έλεγχο των υποψηφίων ψυκτικών μαγνητικών υλικών [15]. Η ακρίβεια υπολογισμού του $\Delta S_M(T)_{\Delta H}$ από τα δεδομένα της μαγνήτισης εξαρτάται από την ακρίβεια της μαγνητικής ροπής, της θερμοκρασίας και των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου. Επειδή εμπλέκεται η αριθμητική ολοκλήρωση και επειδή οι ακριβείς διαφορές (dM , dT και dH) αντικαθίστανται αντίστοιχα από τις μετρούμενες ΔM , ΔT και ΔH , η τυπική ακρίβεια του $\Delta S_M(T)_{\Delta H}$ από τις μετρήσεις της μαγνήτισης υποστηρίζεται να έχει εύρος 3-10% [98]. Το σχετικό σφάλμα ίσως γίνεται σημαντικά μεγαλύτερο κυρίως για μικρές τιμές του $|\Delta S_M(T)_{\Delta H}|$.

Η μέτρηση της θερμοχωρητικότητας σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας σε σταθερά μαγνητικά πεδία, $C(T)_H$, μας δίνει τον πιο πολύπλοκο χαρακτηρισμό των μαγνητικών υλικών σε σχέση με τη μαγνητοθερμιδική τους επίδραση, δεδομένου ότι η εντροπία ενός

μαγνητικού στερεού μπορεί να υπολογιστεί από την θερμοχωρητικότητα ως εξής:

$$S(T)_{H=0} = \int_0^T \frac{C(T)_0}{T} dT + S_0$$

και

(3.6)

$$S(T)_{H \neq 0} = \int_0^T \frac{C(T)_0}{T} dT + S_{0,H} ,$$

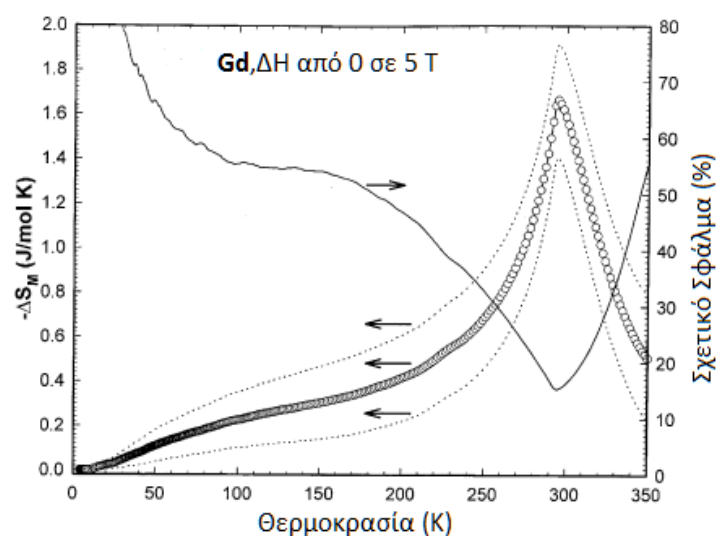
όπου S_0 και $S_{0,H}$ είναι οι μηδενικές θερμοκρασίες εντροπίας. Σε ένα σύστημα συμπυκνώσεως αυτές οι δυο μεταβλητές είναι ίσες μεταξύ τους ($S_0 = S_{0,H}$) [99], και για αυτό, ο υπολογισμός τόσο του $\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H}$ όσο και του $\Delta S_M(T)_{\Delta H}$ είναι αρκετά απλός [100], επίσης δείτε σχήμα 3.1. Η ακρίβεια των υπολογισμών της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από τις μετρήσεις της θερμοχωρητικότητας εξαρτάται σημαντικά από την ακρίβεια των μετρήσεων της θερμοχωρητικότητας και της επεξεργασίας των δεδομένων αυτών (εξίσωση 3.6) επειδή τόσο η $\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H}$ όσο και η $\Delta S_M(T)_{\Delta H}$ είναι οι μικρές διαφορές μεταξύ δύο μεγάλων ποσοτήτων (θερμοκρασία και συνολική εντροπία). Το σφάλμα της $\Delta S_M(T)_{\Delta H}$ από την θερμοχωρητικότητα δίνεται από την σχέση [100] :

$$\sigma \Delta S_M(T)_{\Delta H} = \sigma S(T)_H + S(T)_{H \neq 0}, \quad (3.7)$$

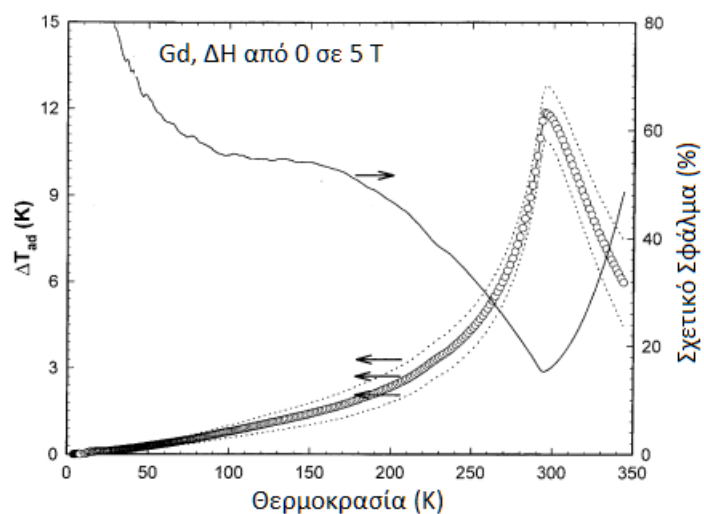
όπου $\sigma S(T)_{H=0}$ και $\sigma S(T)_{H \neq 0}$ είναι τα σφάλματα στο μηδενικό μαγνητικό πεδίο εντροπίας και στο μη-μηδενικό πεδίο εντροπίας αντίστοιχα. Το σφάλμα της $\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H}$ είναι επίσης αντιστρόφως ανάλογο της παραγώγου της εντροπίας συναρτήσει της θερμοκρασίας [100]

$$\sigma \Delta T_{ad}(T)_{\Delta H} = \sigma S(T)_{H=0} / (dS(T)_{H=0} / dT) + \sigma S(T)_{H \neq 0} / (dS(T)_{H \neq 0} / dT). \quad (3.8)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εξισώσεις (3.7) και (3.8) αποδίδουν την απόλυτη αβεβαιότητα στην υπολογιζόμενη μαγνητοθερμιδική επίδραση και για αυτό τα σχετικά σφάλματα αυξάνονται σημαντικά για σχετικά μικρές τιμές της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης (σχήματα 3.2 και 3.3). Ως εκ τούτου, υποθέτοντας ότι η ακρίβεια των μετρήσεων της θερμοχωρητικότητας δεν εξαρτώνται από το μαγνητικό πεδίο, το σχετικό σφάλμα τόσο της $\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H}$ όσο και της $\Delta S_M(T)_{\Delta H}$ θα μειωθεί για μεγαλύτερα ΔH .



Σχήμα 3.2: Η μεταβολή της μαγνητικής εντροπίας(ΔS_M) για μια μεταβολή του μαγνητικού πεδίου από τα 0 στα 5 T. Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν το σχετικό σφάλμα.



Σχήμα 3.3: Η μεταβολή της αδιαβατικής θερμοκρασίας(ΔT_{ad}) για μια μεταβολή του μαγνητικού πεδίου από τα 0 στα 5 T. Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν το σχετικό σφάλμα.

3.3 Η Μαγνητοθερμιδική Επίδραση σε Παραμαγνήτες

Όπως αναφέρεται πιο πάνω, η μαγνητοθερμιδική επίδραση σε παραμαγνήτες εκτιμάται να είναι μετρήσιμη σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν, όπου η ενισχυμένη, αλλά ακόμα περιορισμένη $|\partial M / \partial T|_H$ εύκολα αντισταθμίζεται από την αμελητέα λανθάνουσα θερμοχωρητικότητα ενός στερεού. Πρώιμες έρευνες σχετικά με την μαγνητοθερμιδική επίδραση στα παραμαγνητικά υλικά πραγματοποιήθηκαν λόγω της προσπάθειας για την επίτευξη εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών μέσω της αδιαβατικής ψυκτικής μαγνήτισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πρωτοποριακή δουλειά των Giaugue και MacDougall, οι οποίοι μελέτησαν για χαμηλές θερμοκρασίες της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης τις ιδιότητες των παραμαγνητών $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$, και απέδειξαν ότι μπορούσε να επιτευχθεί θερμοκρασία μικρότερη του 1 K [87,101]. Αυτή η δουλειά και άλλες σημαντικές συνεισφορές στη μελέτη της συμπεριφοράς των στερεών σε χαμηλές θερμοκρασίες απέφεραν στον Giaugue το βραβείο νόμπελ Χημείας το 1949. Πολλά χρόνια μετά η μαγνητοθερμιδική επίδραση σε χαμηλές θερμοκρασίες μελετήθηκε και σε μια μεγάλη ποικιλία από παραμαγνητικά άλατα συμπεριλαμβάνοντας μέσα σε αυτά στυπτηρία σιδήρου-αμμωνίου [102], ένωση χρωμίου-καλίου [103] και άλας νιτρικού μαγνησίου [104].

Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα των παραμαγνητικών αλάτων είναι επιζήμια σε εφαρμογές αδιαβατικής απομαγνήτισης, και για αυτό το λόγο οι παραμαγνητικές διμεταλλικές ενώσεις έχουν συγκεντρώσει κάποια προσοχή σε σχέση με τις μαγνητοθερμιδικές τους ιδιότητες. Ένα από τα υλικά που είχε μελετηθεί πάρα πολύ ήταν το $PrNi_5$ [105], το οποίο χρησιμοποιείται ακόμα με μεγάλη επιτυχία στις πυρηνικές συσκευές αδιαβατικής απομαγνήτισης. Ο συνδιασμός του Cu ως ένα στάδιο πυρηνικής μαγνητικής απομαγνήτισης σε χαμηλή θερμοκρασία και του $PrNi_5$ ως ένα ανώτερο στάδιο, είχε ως αποτέλεσμα να οριστεί μια καταγραφή για την χαμηλότερη θερμοκρασία εργασίας (27 μK) στην οποία μπορούσαν να γίνουν χρήσιμα πειράματα πάνω σε υλικά [106]. Πρόσφατα πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα [107] έδειξαν ότι σε υψηλότερες θερμοκρασίες ($\sim 3 K < T < \sim 13 K$) η μαγνητοθερμιδική επίδραση στο $PrNi_5$ παρουσιάζει ανωμαλίες εξαιτίας των επιδράσεων των κρυσταλλικών ηλεκτρικών πεδίων, τα οποία ωθούν το παραμαγνητικό σύστημα να ψύχεται όταν μαγνητίζεται και αντιστοίχως να θερμαίνεται όταν απομαγνητίζεται.

Μια σημαντική προσπάθεια έχει γίνει για τη μελέτη της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης στους παραμαγνητικούς γρανίτες, επειδή παρουσιάζουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλή λανθάνουσα θερμοχωρητικότητα και απαιτείται πολύ χαμηλή θερμοκρασία (γενικά

κάτω από 1 K). Με μια θερμοκρασία αναφοράς πολύ κοντά στο απόλυτο μηδέν είναι πολύ πιθανόν να αποκτήσουμε ένα μεγάλο ΔS_M για να διατηρηθεί η μαγνητοθερμιδική επίδραση σημαντικά πάνω από τους 20K. Οι Clark και Albern [108] κατέγραψαν την ΔT_{ad} να πλησιάζει τιμές 6-10 K για $\Delta H=11$ T στο υτέρβιο και στο γαδολίνιο (γαρνητικά μέταλλα) για θερμοκρασίες μεταξύ των 10 και 30 K. Αξιοσημείωτες μαγνητοθερμιδικές επιδράσεις καταγράφηκαν επίσης για το νεοδίμιο γάλλιο γαρνάτης ($Nd_3Ga_5O_{12}$) στους 4.2 K [109] και για το γαδολίνιο γάλλιο γαρνάτης ($Gd_3Ga_5O_{12}$) κάτω από τους 15 K [110,111]. Επίσης, μια σημαντική ενίσχυση της ΔS_M στα μαγνητικά νανοσυνθετικά που έχουν ως βάση υποκατάστατα του σιδήρου όπως το $Gd_3Ga_{5-x}Fe_xO_{12}$ ($x \leq 2.5$) παρατηρήθηκαν σχετικά πρόσφατα από τον Shull και τους συναδέλφους του [110,112,113].

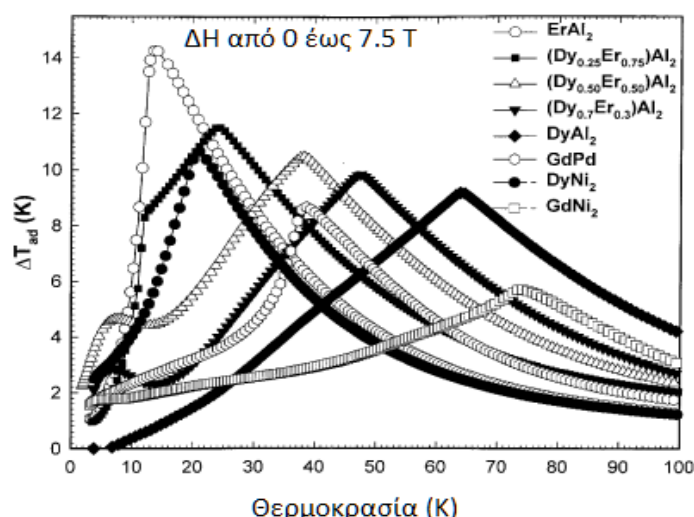
3.4 Η Μαγνητοθερμιδική Επίδραση και η Μαγνητική Μεταβατική Φάση

Η αυθόρμητη μαγνήτιση (magnetic ordering) των παραμαγνητικών στερεών μετά τη μείωση της θερμοκρασίας είναι ένα συνεργαζόμενο φαινόμενο, το οποίο εμφανίζεται σε διάφορες θερμοκρασίες και εξαρτάται τόσο από τη φύση της μαγνητικής υποδιάταξης, όσο και από τη δύναμη των αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής. Όταν συμβαίνει αυτή η αυθόρμητη μαγνήτιση (magnetic ordering), η μαγνητική παράμετρος καθώς επίσης και το μεγαλύτερο μέρος μαγνήτισης ενός στερεού υφίσταται μεγάλες αλλαγές σε σχετικά κοντινές θερμοκρασίες με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες Curie ή Neel και συμβάλλουν σε ένα μεγάλο $|\partial M / \partial T|_H$. Έτσι καθίσταται δυνατόν μια πρακτική εφαρμογή της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης (βλέπε εξισώσεις 3.2-3.5). Ακόμη και αν δεν αποτελεί απόλυτη μαγνήτιση, αλλά την παράγωγο της μαγνήτισης ως προς τη θερμοκρασία η οποία πρέπει να είναι μεγάλη για να οδηγεί σε μεγάλη μαγνητοθερμιδική επίδραση, τα μέταλλα 4f (λανθανίτες) και τα κράματά τους έχουν μελετηθεί εκτενέστερα σε σχέση με 3d μέταλλα και τα κράματά τους. Ο λόγος είναι το ότι η διαθέσιμη θεωρητική μαγνητική εντροπία στα πρώτα είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με τα τελευταία. Οι περισσότερες από τις έρευνες πάνω στη μαγνητοθερμιδική επίδραση αφορούν είτε τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά που λειτουργούν από ~4 K έως ~77 K για εφαρμογές όπως υδροποίηση ηλίου και υδρογόνου είτε υλικά που λειτουργούν σε θερμοκρασίες δωματίου για εφαρμογές όπως συμβατικού κλιματισμού και ψύξης. Παρακάτω θα αναφερθούμε μόνο στα πιο σημαντικά αποτελέσματα από τις έρευνες που έχουν γίνει.

3.4.1 Η Μαγνητοθερμιδική Επίδραση σε Χαμηλές Θερμοκρασίες(10-80 K)

Μια από τις πιο φυσικές επιλογές για μαγνητικά ψυκτικά υλικά σε χαμηλές θερμοκρασίες αποτελούν τα καθαρά λανθανιτικά μέταλλα όπως είναι το Pr, Nd, Er και το Tm. Από τα τέσσερα παραπάνω η μαγνητοθερμιδική επίδραση έχει μελετηθεί σε όλα, αλλά οι προσδοκίες για μεγάλες τιμές της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης στο Pr δεν πραγματοποιήθηκαν. Ο Zimm [114] αναφέρει χαρακτηριστικά και υποστηρίζει ότι η μαγνητοθερμιδική επίδραση στο Nd έφτασε μια ΔT_{ad} περίπου ίση με 2.5 K στους $T=10$ K και για $\Delta H=7$ T. Η παρουσία πολλών μαγνητικών μεταβατικών φάσεων, που συμβαίνουν στο Er μεταξύ των ~20 και ~80 K προκαλούν μία σχεδόν σταθερή αλλά σχετικά μικρή μαγνητοθερμιδική επίδραση(με μέσο όρο μεταξύ 4 και 5 K για ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εντάσεως 7 T) σε εύρος θερμοκρασιών 20-90 K [115]. Το καθαρό Tm συμπεριφέρεται μαγνητικά σε μια ημιτονοειδώς διαμορφωμένη σιδηρομαγνητική δομή στους ~56 K και μετατρέπεται σε σιδηρομαγνήτη στους ~56 K. Αυτά τα χαρακτηριστικά της μαγνητικής δομής του Tm περιορίζουν τη μαγνητοθερμιδική του επίδραση, η οποία έχει μέγιστο $\Delta T_{ad} \sim 3$ K στους ~56 K για $\Delta H=7$ T [116]. Έχει ακόμα παρατηρηθεί ότι η μαγνητοθερμιδική επίδραση του Tm γίνεται αρνητική μεταξύ των ~32 και ~56 K σε ένα αδύναμο μαγνητικό πεδίο εντάσεως 1 T. Ο κύριος λόγος για αυτές τις χαμηλές τιμές της ΔT_{ad} είναι ότι οι περισσότερες από τις μαγνητικές φάσεις στο Nd, Er, και στο Tm είναι αντισιδηρομαγνητικές και φερομαγνητικές, και μεγάλο μέρος της εντροπίας εμπλέκεται σε περιστροφές που οδηγούν σε σιδηρομαγνητική ευθυγράμμιση.

Τα υλικά που εμφανίζουν τη μέγιστη μαγνητοθερμιδική επίδραση μεταξύ των ~10 και ~80 K είναι διμεταλλικές ενώσεις που περιέχουν λανθανιτικά μέταλλα. Μεταξύ αυτών τα καλύτερα είναι τα RAI_2 , όπου το $R=Er, Ho, Dy$ και $Dy_{0.5}Ho_{0.5}$ [117-119], $R=Dy_xEr_{1-x}$, $0 < x < 1$ [120,121], $GdPd$ [122] και RNi_2 , όπου $R=Gd$ [123,124], Dy [49,50] και Ho [124,125]. Η ΔT_{ad} για ορισμένα επιλεγμένα υλικά φαίνεται στο σχήμα 3.4. Είναι εύκολο να παρατηρήσουμε ότι η μέγιστη μαγνητοθερμιδική επίδραση μειώνεται σημαντικά καθώς η θερμοκρασία αυξάνει από τους ~10 στους ~80 K, η οποία συνδέεται με την απότομη αύξηση της λανθάνουσας θερμοχωρητικότητας σε αυτά τα κράματα. Η εξάρτηση του πεδίου από την μαγνητοθερμιδική επίδραση σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών κυμαίνεται από ~1 έως ~2 K/T.

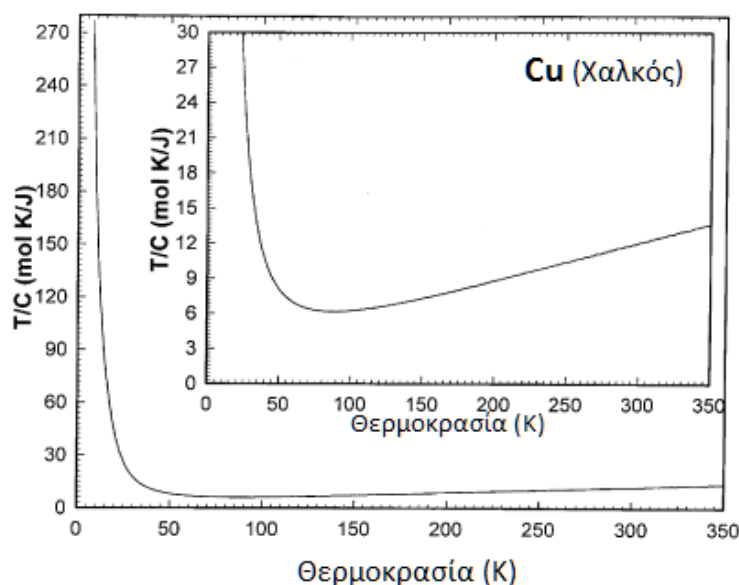


Σχήμα 3.4: Η ΔT_{ad} στα καλύτερα μαγνητικά ψυκτικά διμεταλλικά υλικά σε εύρος θερμοκρασιών από ~ 10 έως ~ 80 K για μαγνητικό πεδίο εντάσεως από 0 έως 7.5 T [117-125].

3.4.2 Η Μαγνητοθερμιδική Επίδραση σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες (~ 80 - ~ 250 K)

Αυτό το θερμοκρασιακό εύρος δεν έχει λάβει την απαραίτητη προσοχή συγκριτικά με τα άλλα δύο εύρη θερμοκρασιών (10-80 K και >250 K). Καταρχάς, υπάρχει η έλλειψη της κινητήριας δύναμης για μαγνητοθερμιδική ψύξη σε αυτές τις θερμοκρασίες. Ο δεύτερος λόγος είναι το ελάχιστο του λόγου T/C (όπου C είναι μόνο η λανθάνουσα και ηλεκτρονιακή θερμοχωρητικότητα) όπως και φαίνεται στο διάγραμμα 3.5 για ένα τυπικό μέταλλο (Cu) γεγονός που υποδηλώνει ότι η αδιαβατική θέρμανση και ψύξη θα μπορούσε να είναι ελάχιστη για αυτό το εύρος θερμοκρασιών (εξισώσεις 3.4 και 3.5). Ένα από τα καλύτερα ψυκτικά υλικά για ενδιάμεσες θερμοκρασίες είναι το καθαρό Dy [94,126-129], με μια ΔT_{ad} η οποία λαμβάνει τη τιμή των ~ 12 K στους ~ 180 K για $\Delta H=7$ T. Ομοίως όπως συζητήθηκε και προηγουμένως για τη μαγνητοθερμιδική επίδραση στο T_m , η πολυπλοκότητα της μαγνητικής δομής του Dy επιφέρει μια αρνητική μαγνητοθερμιδική επίδραση για μικρές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου ($\Delta H < 2$ T). Πρόσφατες μελέτες για άμορφα κράματα $R_x(T1,T1)_{1-x}$, όπου το R αποτελεί ένα λανθανιδικό μέταλλο και οι T1, T2 είναι 3d μεταβατικά μέταλλα [130-133] υποδεικνύουν ότι αυτά τα υλικά ίσως είναι χρήσιμα ως μαγνητικά ψυκτικά υλικά μεταξύ των 100 και 200 K. Η εξάρτηση του πεδίου από τη μαγνητοθερμιδική επίδραση είναι λίγο πιο κάτω από 2 K/T για το Dy, αλλά σπάνια παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 1 K/T για όλα τα υπόλοιπα μαγνητοθερμιδικά

υλικά που έχουν μελετηθεί, συμπεριλαμβάνοντας σε αυτά και άμορφα κράματα. Ωστόσο, μια πρόσφατη έρευνα [134,125] έδειξε ότι τα κράματα του $\text{Gd}_5(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_4$ για $0.08 \leq x \leq 0.43$ παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγάλες τιμές της ΔS_M και της ΔT_{ad} , 2-10 φορές μεγαλύτερες συγκριτικά με όλα τα παραπάνω αναφερόμενα υλικά.



Σχήμα 3.5: Η T/C συναρτήσει της θερμοκρασίας T σε ένα τυπικό μεταλλικό υλικό.

3.4.3 Η Μαγνητοθερμιδική Επίδραση σε Θερμοκρασίες Δωματίου

Το πρωτότυπο υλικό για το εύρος θερμοκρασιών δωματίου είναι το λανθανιδικό μέταλλο του γαδολίνιου (Gd) το οποίο συμπεριφέρεται σιδηρομαγνητικά στους 294 K. Η μαγνητοθερμιδική του επίδραση έχει μελετηθεί ανεξαρτήτως από πολλούς επιστήμονες [91,97,136,137] και οι τιμές της ΔT_{ad} στην θερμοκρασία Curie (T_C) είναι ~6,12,16 και 20 K για $\Delta H=2,5,7.5$ και 10 T αντίστοιχα, φτάνοντας μια εντυπωσιακή τιμή εξάρτησης του πεδίου από τη μαγνητοθερμιδική επίδραση της τάξεως των ~ 3 K/T σε χαμηλά μαγνητικά πεδία και αυτή η τιμή πέφτει σε 2 K/T για υψηλότερα σε ένταση μαγνητικά πεδία. Μια ποικιλία κραμάτων από Gd-R, όπου το R είναι ένα άλλο λανθανιδικό μέταλλο (όπως Tb,Dy,Ho ή Er) και/ή Y τα οποία παρασκευάστηκαν με σκοπό να βελτιώσουν τη μαγνητοθερμιδική επίδραση στο γαδολίνιο[138]. Ωστόσο,

όλες οι προσθήκες κραμάτων μόλις μετατοπίζονται από τη θερμοκρασία Curie του Gd σε χαμηλότερες θερμοκρασίες δεν σημειώνουν καμία σημαντική βελτίωση της μαγνητοθερμιδικής τους επίδρασης. Η μοναδική προσδοκία όλων είναι η πιθανή βελτίωση της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης για χαμηλά μαγνητικά πεδία ($\Delta H=1$ T) σε νανοκρυστάλλους από κράματα Gd-Y [139-141].

Οι πιο πολλές διαμεταλλικές ενώσεις που συμπεριφέρονται μαγνητικά κοντά σε θερμοκρασίες δωματίου αλλά πάνω από τους 290 K παρουσιάζουν μια σημαντικά χαμηλή μαγνητοθερμιδική επίδραση σε σχέση με αυτή του Gd. Υπάρχει μια θεωρητική εκτίμηση [142] σύμφωνα με την οποία η μαγνητοθερμιδική επίδραση στο $\text{Nd}_2\text{Fe}_{17}$ ($T_C \sim 310$ K) θα μπορούσε να ισούται περίπου με το 50% της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης του Gd. Αυτή η εκτίμηση επαληθεύτηκε πρόσφατα και πειραματικά [143]. Περίπου, το ίδιο μέγεθος της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης μετρήθηκε επίσης πειραματικά στο $\text{Nd}_2\text{Fe}_{17}$ με $T_C \sim 324$ K [143]. Έχει προταθεί από ορισμένους φυσικούς [80] ότι ίσως υπάρχει μια ενίσχυση της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης στο $(\text{Pr}_{1.5}\text{Ce}_{0.5})\text{Fe}_{17}$, αλλά δεν έχει ακόμα επαληθευτεί πειραματικά. Τα μόνα διμεταλλικά υλικά των οποίων η μαγνητοθερμιδική επίδραση πλησιάζει τις τιμές αυτές των Gd και Gd_5Si_4 [135] με θερμοκρασία $T_C \sim 335$ K είναι τα κράματα $\text{Gd}_5(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_4$, όπου $0.5 \leq x \leq 1$ [134] με $\sim 290 < T_C \leq \sim 335$ K.

3.4.3.1 Επιλογή Υλικού σε Θερμοκρασίες Δωματίου

Από τις προηγούμενες αναλύσεις που έγιναν σχετικά με την εντροπία των μαγνητικών υλικών, συμπεράναμε ότι μόνο η μαγνητική εντροπία S_M αλλάζει με τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου. Στο εύρος των θερμοκρασιών δωματίου, η επίδραση της εντροπίας διατάξεως S_L είναι αρκετά σημαντική ώστε να την αγνοήσουμε. Για αυτό λοιπόν το λόγο, μέρος της ψυκτικής ικανότητας του μαγνητικού συστήματος καταναλώνεται για τη ψύξη του συστήματος αν και η θερμοκρασία μειώνεται σε κάποιο βαθμό κατά της διάρκεια της αδιαβατικής απομαγνήτισης. Έτσι η ακαθάριστη ψυκτική ικανότητα είναι μικρότερη από εκείνη της κατάστασης των $(S_L + S_E) \approx 0$ [144].

Καθώς το μαγνητοθερμιδικό υλικό αποτελεί πυρήνα της μαγνητικής ψύξης πρέπει να πληρεί ορισμένα χαρακτηριστικά ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την εφαρμογή μερικά από αυτά δίνονται παρακάτω [145]:

- Μεγάλο συνολικό αριθμό J γωνιακής ορμής και μεγάλη τιμή του παράγοντα g για σιδηρομαγνητικό υλικό, χαρακτηριστικά τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη μαγνητοθερμιδική επίδραση.
- Μέτρια τιμή της θερμοκρασίας Debye.
- Μέτρια τιμή της θερμοκρασίας Curie στην περιοχή της εργαζόμενης θερμοκρασίας ώστε να εγγυηθεί ότι η μεγάλη αλλαγή της μαγνητικής εντροπίας μπορεί να επιτευχθεί στο θερμοκρασιακό φάσμα όλου του κύκλου.
- Ουσιαστικά μηδενική μαγνητική υστέρηση
- Μικρή ειδική θερμότητα και μεγάλη θερμική αγωγιμότητα ώστε να εξασφαλισθούν αξιόλογες θερμοκρασιακές αλλαγές και ταχεία ανταλλαγή θερμότητας.
- Μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση προκειμένου να αποφευχθούν οι τρέχουσες απώλειες.
- Σωστή χύτευση και επεξεργασία ώστε να κατασκευαστούν υλικά που ικανοποιούν τις απαιτήσεις της μαγνητικής ψύξης

3.5 Η Γιγάντια Μαγνητοθερμιδική Επίδραση

Σε μία μαγνητική μεταβατική φάση, η ύπαρξη μικρών μεταβολών του πεδίου και οι διακυμάνσεις περιστροφής πολύ πάνω από την T_C συχνά μειώνει το μέγιστο πιθανό $|\partial M / \partial T)_H|$ και έτσι μειώνεται αρκετά αποτελεσματικά η μέγιστη μαγνητοθερμιδική επίδραση. Μια πρώτης τάξεως θεωρητική φάση μετασχηματισμού θα πρέπει να συμβαίνει σε σταθερή θερμοκρασία και για αυτό ο λόγος $|\partial M / \partial T)_H|$ μπορεί να είναι πάρα πολύ μεγάλος, και κατά συνέπεια να δίνει αφορμή για τη δημιουργία της γιγάντιας μαγνητοθερμιδικής επίδρασης. Το FeRh ήταν το πρώτο διαμεταλλικό στο οποίο η μέγιστη αλλά επίσης και η *αρνητική* μαγνητοθερμιδική επίδραση παρατηρήθηκαν πειραματικά. Δυστυχώς όμως η μέγιστη μαγνητοθερμιδική επίδραση στο FeRh είναι μη αναστρέψιμη και παρατηρήθηκε μόνο μετά την εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου σε ένα παρθένο δείγμα.

Μια σειρά κραμάτων από $Gd_5(Si_xGe_{1-x})_4$, όπου $0 \leq x \leq 0.5$ έχει αναφερθεί [134,146-149] ότι εμφανίζουν μια ΔS_M τουλάχιστον 2 φορές μεγαλύτερη από αυτή που εμφανίζει το Gd σε θερμοκρασία δωματίου και 2 με 10 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με το καλύτερο μαγνητοθερμιδικό υλικό σε χαμηλές και μέσες θερμοκρασιακές περιοχές. Εκτός από την εξαιρετικά μεγάλη ΔS_M , δύο επιπλέον στοιχεία κάνουν αυτά τα κράματα μοναδικά και πιθανά υποψήφια μαγνητικά ψυκτικά υλικά για χρήση σε υψηλής απόδοσης μαγνητικά ψυγεία. Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι το

γεγονός ότι η θερμοκρασία Curie αυτών των κραμάτων μπορεί να συντονιστεί μεταξύ των ~ 20 και ~ 286 K με τη μεταβολή του δείκτη Si σε αυτόν του Gd και με την εισαγωγή από μικρές προσθήκες κραμάτων του Ga στο $\text{Gd}_5(\text{Si}_2\text{Ge}_2)$ [149]. Αυτό επιτρέπει σε κάποιον να έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει τη γιγάντια μαγνητοθερμιδική επίδραση μεταξύ των ~ 20 και ~ 305 K. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι ότι σε αντίθεση με το FeRh η γιγάντια μαγνητοθερμιδική επίδραση στα κράματα του $\text{Gd}_5(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_4$, όπου $0 \leq x \leq 0.5$ είναι αναστρέψιμη, δηλαδή δεν εξαφανίζεται μετά την πρώτη εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου. Η διαφορά στη συμπεριφορά της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης μεταξύ του FeRh και του $\text{Gd}_5(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_4$ οφείλεται στη φύση της μεταβατικής φάσης πρώτης τάξεως η οποία για το πρώτο μέταλλο είναι ένας μαγνητικός μετασχηματισμός, ενώ στην άλλη περίπτωση αποτελεί μια μαγνητική προσομοίωση και κρυσταλλογραφική μεταβατική φάση [148,150].

Λίγα χρόνια μετά την ανακάλυψη της γιγάντιας μαγνητοθερμιδικής επίδρασης στα διμεταλλικά $\text{Gd}_5(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_4$, πολλές άλλες οικογένειες υλικών έχουν βρεθεί να εμφανίζουν τη μεγάλη μαγνητοθερμιδική επίδραση σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Σε αυτά περιλαμβάνονται το $\text{Tb}_5\text{Si}_2\text{Ge}_2$, ενώσεις MnAs και $\text{MnAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, κράματα $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Si}_x)_{13}\text{H}_y$, $\text{MnFeP}_{0.45}\text{As}_{0.55}$, κράματα που σχετίζονται με το $\text{MnFeP}_x\text{As}_{1-x}$ και σιδηρομαγνητικά κράματα του $\text{Ni}_{2\pm x}\text{Mn}_{1\pm x}\text{Ga}$.

Η Τρίτη τάξη υλικών παρουσιάζουν επίσης, μια μεγάλη μαγνητοθερμιδική επίδραση (συγκριτικά με το Gd) και βασίζεται σε διαφορετικά αντικατάστατα του περοβσκίτη όπως υλικά από LaMnO_3 με Y, Ca, Li και/ή Na υποκαθιστώντας το La, και Ti αντί για Mn [151,152]. Η αναστρεψιμότητα της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης καθώς επίσης και οι δυνατοί μηχανισμοί της δημιουργίας της σε αυτές τις ενώσεις δεν έχουν ακόμα επισημοποιηθεί.

3.6 Πιθανά Προβλήματα από τη χρήση των Υλικών που Εμφανίζουν τη Γιγάντια Μαγνητοθερμιδική Επίδραση στους Μαγνητικούς Ψύκτες

Τα τρία κύρια προβλήματα με τα υλικά που παρουσιάζουν τη γιγάντια μαγνητοθερμιδική επίδραση οφείλονται στο γεγονός ότι 1) υφίστανται μια μεγάλη μεταβολή του όγκου τους 2) υφίστανται υστέρηση και 3) χρειάζονται ένα πεπερασμένο χρόνο ώστε η ΔT_{ad} να φτάσει τη μέγιστη τιμή ισορροπίας της.

Η μεγάλη μεταβολή του όγκου αποτελεί ένα πρόβλημα δεδομένου ότι όλα αυτά τα υλικά που παρουσιάζουν αυτή την επίδραση αποτελούν διμεταλλικές ενώσεις και είναι αρκετά εύθραυστα. Υποθέτοντας ένα χρόνο ζωής ίσο με 15 χρόνια και 10% runtime για μια εμπορική συσκευή ψύξης, το μαγνητικό ψυκτικό υλικό θα υποβληθεί σε 50(στο 1 Hz) – 500(στα 10 Hz) εκατομμύρια ψυκτικούς κύκλους. Συνεπώς, είναι πολύ πιθανό ότι αυτά τα εύθραυστα υλικά θα υποστούν κάποια κατάγματα(ρωγμές). Έτσι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα με τον καιρό μερικά σωματίδια του ψυκτικού υλικού να χωριστούν (εύθραυστα) και ως συνέπεια ίσως φράξουν την κλίνη του αναγεννητή, μειώνοντας τη ροή του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας και ελαττώνοντας την ψυκτική ισχύς και τελικά το ψυγείο θα σταματήσει την ψύξη εντελώς. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με τη χρήση κραμάτων(χρειάζεται όμως προσοχή, για να μην μειωθούν οι ευνοϊκές μαγνητοθερμιδικές ιδιότητες), ή ίσως με επικάλυψη των σωματιδίων με ένα όλκιμο υλικό το οποίο όμως θα μείωνε την αναγεννητική ικανότητα. Η πρώτη μέθοδος έχει εφαρμοστεί για το υλικό RFe_2 , το οποίο είναι γνωστό και ως Τέρφενολη-D. Σε αυτό το υλικό προστέθηκαν λανθανίδες(Tb,Dy) με στοιχειομετρική αναλογία 1:2 και προέκυψε το παρακάτω μαγνητικό ψυκτικό υλικό: $(Tb_{0.27}Dy_{0.73})Fe_{1.9}$ [153]. Στην δεύτερη περίπτωση οι Merida και Barclay [154] το 1998 δημιούργησαν έναν μονολιθικό αναγεννητή, συνδέοντας με ακανόνιστο σχήμα διάφορα κομμάτια, χρησιμοποιώντας μια εποξειδική επίστρωση και η οποία εμποδίζει την κίνηση των σωματιδίων μεταξύ τους κατά της λειτουργία του αναγεννητή.

Οι τιμές της θερμοκρασιακής υστέρησης για διάφορες πρώτες ύλες κυμαίνονται από 2 έως 14 K και οι τιμές της μαγνητικής υστέρησης λαμβάνουν τιμές από 2 έως 11 kOe [155]. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί οριζοντιώνοντας την κλίνη του αναγεννητή έτσι ώστε η ταλάντευση της θερμοκρασίας σε έναν δεδομένο στοιχειώδη όγκο του αναγεννητή να είναι τέτοια ώστε η T_{hot} να είναι υψηλότερη από την ανώτερη θερμοκρασία του βρόχου υστέρησης κατά το στάδιο της μαγνήτισης του μαγνητοθερμιδικού υλικού και ακόμα η T_{cold} να είναι μικρότερη από την χαμηλότερη θερμοκρασία υστέρησης κατά τη διαδικασία της απομαγνήτισης.

Μια άλλη λύση για την επίλυση του προβλήματος της υστέρησης προτάθηκε από τον Provenzano[156] το 2004. Πρόσθεσε Fe στο $Gd_5(Si_2Ge_2)$ το οποίο κατέστρεψε τη γιγάντια μαγνητοθερμιδική επίδραση του υλικού αυτού, αλλά η συνισταμένη μεταβολή της εντροπίας ήταν σημαντικά μικρότερη σε σχέση με αυτή του $Gd_5(Si_2Ge_2)$ και λίγο μεγαλύτερη από αυτή του καθαρού μετάλλου του γαδολινίου(Gd). Η ίδια επίδραση είχε καταγραφεί και 7 χρόνια νωρίτερα από τον Pecharsky και τον Gschneidner [157] (1997) και η μετρούμενη μαγνητοθερμιδική επίδραση ήταν περίπου 30% μεγαλύτερη για τις

προσθήκες σιδήρου(Fe) σε σχέση με τα αποτελέσματα της έρευνας του Provenzano[156]. Επιπλέον, το 1997 μια μελέτη έδειξε ότι : Οι προσθήκες χαλκού (Cu) και νικελίου (Ni) είναι πιο αποδοτικές από αυτές του σιδήρου(Fe) , ενώ και οι μεταβολές της μαγνητικής εντροπίας ήταν αντίστοιχα ~10% και ~20% μεγαλύτερες.

Το τρίτο πρόβλημα είναι και αυτό που προκαλεί και την μεγαλύτερη ανησυχία καθώς αφορά την χρόνο που χρειάζεται η ΔT_{ad} ώστε να αυξηθεί και να φτάσει τη μέγιστη τιμή της σε έναν ψυκτικό κύκλο. Για το $Gd_5(Si_2Ge_2)$ και το $La(Fe_{11.44}Si_{1.56})$ οι άμεσες μετρούμενες θερμοκρασιακές αλλαγές ίσως να είναι 30-50% μικρότερες συγκριτικά με τις τιμές ισορροπίας λόγω της κινητικής της φάσης μετασχηματισμού όταν τα μαγνητικά πεδία είναι κρίσιμα. Αυτό αποτελεί ένα πρόβλημα γιατί οι μαγνητικοί ψύκτες λειτουργούν συνήθως μεταξύ 0.5 και 10 Hz και ένα μεγάλο μέρος της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης ίσως να μην αξιοποιηθεί κατά τη διάρκεια της απότομης αύξησης και μείωσης του μαγνητικού πεδίου.

Αυτές οι δύο τελευταίες επιδράσεις πιθανώς αντιπροσωπεύουν το γεγονός ότι η ψυκτική ικανότητα των δύο μαγνητικών ψυγείων στα οποία έγιναν τα πειράματα για τη γιγάντια μαγνητοθερμιδική επίδραση των υλικών $Gd_5(Si_xGe_{1-x})_4$ [158] και $La(Fe_{1-x}Si_x)_{13}H_y$ [45] ήταν περίπου η ίδια με αυτή του Gd και των κραμάτων του Gd-Er που χρησιμοποιήθηκαν ως μαγνητικά ψυκτικά στα ίδια ψυγεία. Με περισσότερη επιστημονική έρευνα και μηχανολογικές καινοτομίες , ίσως να καταφέρουμε στο μέλλον να ξεπεράσουμε αυτά τα δύο προβλήματα.

3.7 Το Γαδολίνιο και τα Κράματά του

Στην παράγραφο 3.4.3 έγινε μια μικρή αναφορά για το γαδολίνιο, το οποίο είναι το πλέον κατάλληλο μαγνητικό υλικό για ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου. Η γιγάντια μαγνητοθερμιδική επίδραση [159-162] και η θερμοχωρητικότητα [163-166] έχουν μελετηθεί σε πάρα πολλές ερευνητικές δραστηριότητες. Το γαδολίνιο (Gd) είναι ένα μεταλλικό υλικό του οποίου η θερμική αγωγιμότητα και η εύκολη απόκτηση θερμικού κέρδους είναι αποτελούν δύο ευνοϊκά χαρακτηριστικά. Μάλιστα θα αποτελούσε την πρώτη επιλογή για την έρευνα πάνω στη μαγνητική ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου αν δεν υφίστατο το πρόβλημα της εύκολης οξείδωσής του.

Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί ορισμένες διαμεταλλικές ενώσεις έχει αποδειχθεί ότι κατέχουν μεγάλη μαγνητοθερμιδική επίδραση. Τόσο το $Gd_{0.74}Tb_{0.26}$ [167] όσο και το $Gd_{0.5}Dy_{0.5}$ [168] παρουσιάζουν μαγνητοθερμιδική επίδραση ισοδύναμη με αυτή του Gd ~280 K και ~265 K

αντίστοιχα. Ένα άλλο κράμα του γαδολινίου το ευτηκτικό $Gd_{76}Pd_{24}$ βρέθηκε να έχει δύο κορυφές ΔT_{ad} , η μία στους 8.4 K και η άλλη στους 9.4 K για θερμοκρασίες 294 K και 323 K αντίστοιχα. Αυτό το κράμα χρησιμοποιείται στο μαγνητικό κύκλο του Ericsson επειδή η αδιαβατική θερμοκρασιακή του μεταβολή είναι σχεδόν σταθερή σε θερμοκρασίες δωματίου [169]. Ένα άλλο κράμα είναι το $Gd_4(Bi_xSb_{1-x})_3$, όπου αν και η μέγιστη μαγνητοθερμιδική επίδρασή του αγγίζει το 50% του καθαρού γαδολινίου για μαγνητική πεδίο εντάσεως 10 T, το πλάτος των κορυφών του φτάνει τους 60-100 K, τιμές αρκετά συγκρίσιμες με αυτές του Gd. Συνεπώς αυτά τα κράματα μπορούν να μας δώσουν σημαντική ψυκτική ισχύς πάνω από μια ευρεία μεταβολή της θερμοκρασίας από ~240 έως ~360 K [170].

Η έρευνα που έγινε στο Ames Laboratory [146-149] πάνω σε μια σειρά από κράματα $GdSiGe$, όπου και παρατηρήθηκε η επίδραση της γιγάντιας μαγνητοθερμιδικής επίδρασης σε αυτά αποτέλεσε ορόσημο για την έρευνα πάνω στα μαγνητικά υλικά. Μεταγενέστερα, ανακαλύφθηκαν πολλές άλλες επιδράσεις πάνω σε αυτή τη σειρά κραμάτων. Αυτά τα κράματα παρουσιάζουν μια μαγνητική μεταβολή της εντροπίας 2-10 φορές μεγαλύτερη από αυτήν των πρωτότυπων μαγνητικών ψυκτικών υλικών. Αποδείχτηκε ότι οι τιμές της ΔS_M για τις σειρές κραμάτων του $Gd_5(Si_xGe_{1-x})_4$ $0 \leq x \leq 0.5$, είναι τουλάχιστον διπλάσιες από αυτές του γαδολινίου (Gd). Επιπλέον με τη προσθήκη του Ga, η θερμοκρασία της γιγάντιας μαγνητοθερμιδικής επίδρασης αυξάνεται στους 290 K [146,147].

Στο παρακάτω πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η μαγνητική εντροπία ορισμένων μαγνητικών υλικών σε ένα εύρος θερμοκρασιών για τιμές κοντά σε θερμοκρασία δωματίου, από τις οποίες μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι ΔS_M των κραμάτων του $GdSiGe$ είναι όλες σημαντικά μεγάλες με την παρουσία μαγνητικού πεδίου εντάσεως 5 T και οι περισσότερες από τις θερμοκρασίες Curie τους βρίσκονται στο εύρος αυτών των θερμοκρασιών δωματίου. Αυτός είναι και ο βασικότερος λόγος που αυτές οι σειρές κραμάτων καλύπτουν τις απαιτήσεις για μαγνητική ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου. Ωστόσο, πολλά επείγοντα προβλήματα όπως η γρήγορη και εύκολη οξείδωση, το ακριβό κόστος τους και ορισμένα άλλα χρειάζονται να λυθούν προτού εφαρμοστούν στην πράξη.

Μαγνητικό Υλικό		T_C (K)	ΔH (T)	ΔS_M (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
Gd		294	5.0	~10.2 ($\Delta T_{ad} = \sim 12$ K)
Gd _{0.5} Dy _{0.5}		230	5.0	~10.2
Gd _{0.74} Tb _{0.26}		280	5.0	~11.5
Gd ₇ Pd ₃		323	5.0	$\Delta T_{ad} = 8.5$ K
Gd ₅ (Si _x Ge _{1-x}) ₄	$x = 0.43$	247	5.0	~39.0
	$x = 0.5$	276	5.0	~18.4
	$x = 0.505$	280	5.0	~11.7
Gd ₅ (Si _{1.985} Ge _{1.985} Ga _{0.03}) ₂		290	5.0	$\Delta T_{ad} = 15$ K
Ni _{52.6} Mn _{23.1} Ga _{24.3}		300	5.0	~18.0
MnAs		318	5.0	30.0
MnAs _{0.9} Sb _{0.1}		~286	5.0	~30.0
MnFeP _{0.45} As _{0.55}		300	5.0	18.0
Gd			1.5	~3.8
		294	3.0	~7.1
			6.0	~11.4
La _{1-x} Ca _x MnO ₃	$x = 0.2$	230	1.5	5.5
	$x = 0.33$	267	3.0	6.4
		~259	3.0	~2.6
	$x = 0.35$	~255	3.0	~5.2
	$x = 0.4$	263	3.0	5.0
La _{0.9} K _{0.1} MnO ₃		283	1.5	1.5
La _{0.75} Ca _{0.15} Sr _{0.10} MnO ₃		327	1.5	~2.8
La _{2/3} (Ca,Pb) _{1/3} MnO ₃		296	7.0	7.5

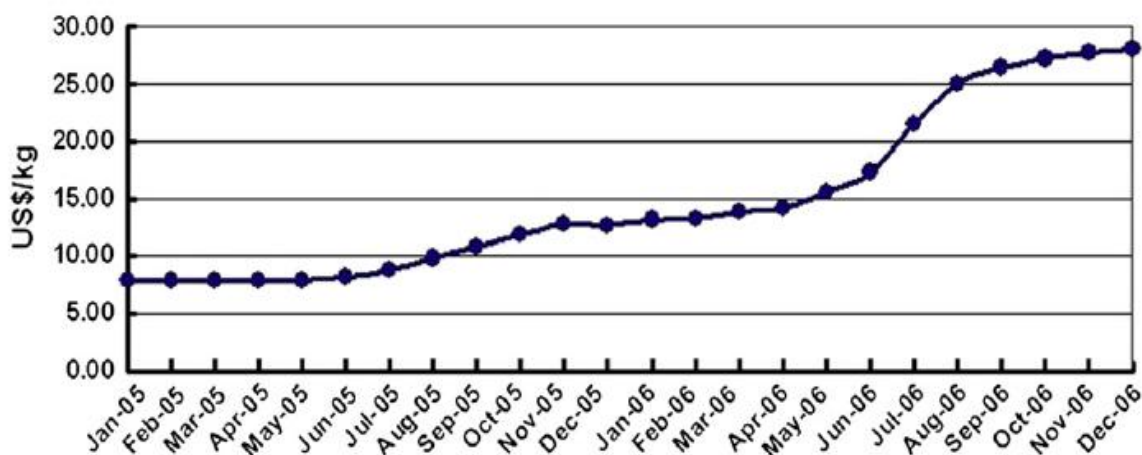
Πίνακας 3.1: Μαγνητική μεταβολή της εντροπίας για ορισμένα μαγνητικά υλικά σε θερμοκρασίες δωματίου.

3.8 Κόστος των Μαγνητοθερμιδικών Υλικών

Τα τελευταία χρόνια μια από τις μεγαλύτερες ανησυχίες των επιστημόνων είναι το αυξανόμενο κόστος των σπανίων γήινων υλικών ακόμα και αν στη μαγνητική ψύξη δεν χρησιμοποιείται ακόμη κάποιο τέτοιο υλικό. Τη παρούσα χρονική στιγμή οι περισσότερες έρευνες επικεντρώνονται στις οικιακές (κλιματιστικά, ψυγεία κ.λ.π) ή σε μικρής κλίμακας εμπορικές (π.χ μηχανήματα αυτόματης πώλησης) εφαρμογές. Σε όλες αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούνται μόνιμοι μαγνήτες τύπου Nd-Fe-B και καθώς χρησιμοποιούνται περίπου 0.5-10 kg Nd ανά μονάδα ψύξης το κόστος της κάθε συσκευής συνδέεται άμεσα με το κόστος του Nd. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και στο παρακάτω σχήμα 3.6 το κόστος του νεοδυμίου για τη χρονική περίοδο 2 ετών από το Γενάρη του 2005 έως το Δεκέμβρη του 2006 αυξήθηκε κατά 300%. Ωστόσο στις μέρες μας η τιμή του Nd έχει πλέον σταθεροποιηθεί και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πλέον ο κύριος παγκόσμιος προμηθευτής αυτού του μετάλλου προέρχεται από τη Κίνα, η οποία έχει τεράστιο πλεόνασμα σε σπάνια μέταλλα και ταυτόχρονα φθηνό εργατικό δυναμικό. Ωστόσο, στο μέλλον υπολογίζεται πως αυτή η τιμή του Nd θα πέσει και άλλο καθώς ήδη έχουν αρχίσει να κατασκευάζονται

εργοστάσια παραγωγής του και σε άλλες χώρες εκτός της Κίνας. Επιπλέον, όταν η μαγνητική ψύξη αρχίσει και αυτή να χρησιμοποιείται ευρέως και περάσει από το πειραματικό στάδιο στο εμπορικό τότε εκτιμάται πως το κόστος του νεοδυμίου θα πέσει και άλλο λόγω της μεγάλης ζήτησης που θα έχει προκειμένου να παραχθούν μαγνήτες που χρησιμοποιούνται στις μαγνητικές ψυκτικές συσκευές.

Όσο αναφορά τις τιμές για τις μαγνητικές ψυκτικές ενώσεις του La και του Gd οι αναλυτές εκτιμούν ότι θα μείνουν σχετικά σταθερές, επειδή αυτές οι σπάνιες γαίες είναι υποπροϊόντα του Nd που χρησιμοποιείται στους μόνιμους μαγνήτες και συνεπώς εκτιμάται πως το συνολικό βάρος των σπανίων μετάλλων στις μαγνητικές ψυκτικές συσκευές θα είναι μικρότερο συγκριτικά με αυτό του μόνιμου μαγνήτη. Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως το κόστος του γαδολινίου που είναι και το κύριο μαγνητοθερμιδικό υλικό ανέρχεται στα 400 € ανά 100 gr.



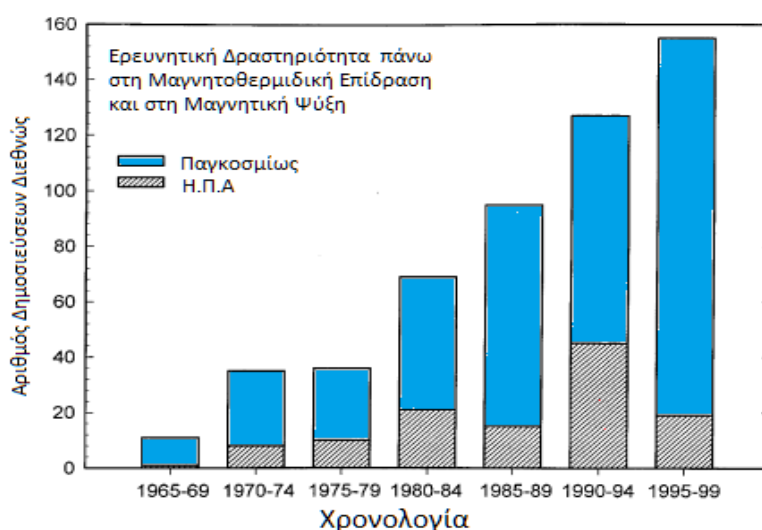
Σχήμα 3.6: Η μεγάλη άνοδος της τιμής του Nd(νεοδυμίου) που παρατηρήθηκε από τον Ιανουάριο του 2005 έως το Δεκέμβριο του 2006 [171].

3.9 Χρήσιμα Συμπεράσματα για το Μέλλον

Το τελευταίο τέταρτο του 20^{ου} αιώνα είχε παρατηρηθεί μια συνεχόμενη αύξηση του ενδιαφέροντος σχετικά με τη μελέτη της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης και γενικότερα της μαγνητικής ψύξης. Ο αριθμός των δημοσιεύσεων, παγκοσμίως έχει αρχίσει να αυξάνεται συνεχώς τα τελευταία 50 χρόνια. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι την περίοδο 1965-1969 είχαμε μόνο 11 δημοσιεύσεις, ενώ από το 1990-1999 ο αριθμός αυτός αυξήθηκε σε 282 συνολικά δημοσιεύσεις. Μια αύξηση της τάξεως του 8% περίπου κάθε χρόνο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7. Κρίνοντας από τον αριθμό των δημοσιεύσεων, οι ερευνητικές δραστηριότητες στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής υστερούν σε σχέση με τις υπόλοιπες παγκοσμίως, αν και τα σημαντικότερα επιτεύγματα (η ανακάλυψη της γιγάντιας μαγνητοθερμιδικής επίδρασης στο $Gd_5(Si_xGe_{1-x})_4$ και ο σχεδιασμός και δοκιμές για την αξιοπιστία της λειτουργίας των μαγνητικών ψυγείων κοντά σε θερμοκρασία δωματίου) ολοκληρώθηκαν τα περασμένα χρόνια στις Ηνωμένες Πολιτείες [134,146-149,172,173]. Η μείωση που παρατηρήθηκε στον αριθμό των δημοσιεύσεων στις Η.Π.Α. εκείνη την περίοδο οφειλόταν στις περικοπές των κονδυλίων στον αμυντικό τομέα, καθώς επίσης και στη μείωση των δαπανών από πλευράς NASA και NIST στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και στις αρχές του 1990. Οι έρευνες στην Ιαπωνία έχουν επίσης αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια αλλά έχει αντισταθμιστεί από τις πολλές έρευνες πάνω στη μαγνητοθερμιδική επίδραση που γίνονται στη Κίνα, στον Καναδά και στην Ευρώπη. Επίσης, πολλές από τις ανακαλύψεις που έχουν γίνει (κυρίως αυτές στην Κίνα) δημοσιεύονται σε περιοδικά με τη μορφή επιστολών και έτσι αυξάνεται ο αριθμός των δημοσιεύσεων που δεν ανήκουν στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ωστόσο, από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα αυτή η κατάσταση έχει ανατραπεί καθώς σε πολλά πανεπιστήμια των Η.Π.Α. πραγματοποιούνται σημαντικές έρευνες πάνω στη μαγνητική ψύξη.

Περιμένουμε οι μελλοντικές εξελίξεις σε όλους τους τομείς της μαγνητικής ψύξης να πραγματοποιηθούν γρήγορα, επειδή η παραδοσιακή τεχνολογία συμπίεσης ατμού πλησιάζει ασυμπτωτικά τους τεχνικούς περιορισμούς για την πρόσθετη αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, και επειδή υπάρχουν και περιβαλλοντικές ανησυχίες. Η μαγνητική ψύξη υπόσχεται σημαντικές βελτιώσεις και στους 2 αυτούς τομείς. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως μαγνητικά ψυκτικά καθώς και ο σχεδιασμός των μαγνητικών ψυγείων παρουσιάζουν τις δύο πλευρές του ίδιου επιστημονικού και τεχνολογικού προβλήματος-της ανάπτυξης νέας μαγνητικής τεχνολογίας ψύξης ως μια τεχνολογία που θα είναι ενεργειακά αποδοτικά και συνάμα φιλική και ασφαλή ως προς το περιβάλλον, σε αντίθεση με τις ως τώρα γνωστές μεθόδους ψύξης.

Καταρχάς, είναι χωρίς αμφιβολία βέβαιο ότι καινούργια και σαφώς βελτιωμένα ψυκτικά μαγνητικά υλικά θα ανακαλυφθούν καθώς όλο και περισσότερες έρευνες γίνονται για τον εντοπισμό και τον χαρακτηρισμό νέων μεταλλικών και μη-μεταλλικών υλικών για μελλοντικές εφαρμογές σε διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών, που να κυμαίνονται από θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν έως αρκετά πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου. Επίσης, λογικά θα γίνουν και μελέτες πάνω στις θεμελιώδεις αρχές της μαγνήτισης και πως αυτή επηρεάζει τις μαγνητοθερμιδικές ιδιότητες. Εκτεταμένες έρευνες πρέπει να πραγματοποιηθούν όχι μόνο για την εξερεύνηση και τον χαρακτηρισμό νέων μαγνητικών ψυκτικών υλικών, αλλά και για την εξεύρεση πιο οικονομικών μεθόδων παραγωγής και επεξεργασίας αυτών σε πορώδη σχήματα (συμπεριλαμβανομένων παράλληλες πλάκες, σφαίρες, τροχούς κτλ) κατάλληλα για τη δημιουργία των μαγνητικών μηχανών. Δεύτερον, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι ο σχεδιασμός μαγνητικών ψυγείων που χρησιμοποιούν υπεραγώγιμους και μόνιμους μαγνήτες θα αναπτυχθεί για μια ποικιλία μικρών και μεγάλων εφαρμογών για ψύξη από πολύ πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου σε θερμοκρασίες λιγότερο από 1 K. Εκτεταμένη βασική και εφαρμοσμένη έρευνα απαιτείται όχι μόνο όσον αφορά εξελίξεις στη θερμοδυναμική συμπεριφορά και στη μηχανολογική διαμόρφωση των νέων μαγνητικών ψυκτικών συσκευών, αλλά και όσο αφορά τη δημιουργία ποικίλων μαγνητικών πεδίων με σκοπό τη συνολική βελτίωση της λειτουργίας των μαγνητικών ψυγείων.



Σχήμα 3.7: Αριθμός των δημοσιεύσεων που αφορούν τη μαγνητοθερμιδική επίδραση και την μαγνητική ψύξη από το 1965-1999. Το διάγραμμα παρουσιάζει επίσης και τον αριθμό των δημοσιεύσεων στις Η.Π.Α συγκριτικά με αυτές που έγιναν Παγκοσμίως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΕΣ

4.1 Λόγοι Χρησιμοποίησης των Αναγεννητών

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στα προηγούμενα κεφάλαια, επειδή η λανθάνουσα εντροπία είναι αρκετά μεγάλη για να αμεληθεί σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου, ένα μέρος της ψυκτικής ικανότητας του μαγνητικού ψυγείου καταναλώνεται για την ψύξη του θερμικού φορτίου του λανθάνων συστήματος, μειώνοντας κατ'αυτόν τον τρόπο την ακαθάριστη ψυκτική ικανότητα του μαγνητικού ψυγείου [144]. Με τη προσθήκη όμως ενός αναγεννητή στο μαγνητικό ψυκτικό σύστημα, η θερμότητα που αποβάλλεται από το σύστημα σε ένα στάδιο του κύκλου αποθηκεύεται και επιστρέφεται στο σύστημα σε κάποιο άλλο στάδιο. Έτσι λοιπόν, η ικανότητα που χρησιμοποιήθηκε για να ψυχθεί το λανθάνων φορτίο του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποδοτικά για την αύξηση της εντροπίας και του θερμοκρασιακού εύρους. Έχει μάλιστα προταθεί και μια νέα ιδέα για την απευθείας σύνδεση των δύο ισοεντατικών αλλαγών μέσω της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δύο ισοεντατικών φάσεων χρησιμοποιώντας μονοπάτια θερμότητας. Αυτή η ιδέα καθιστά δυνατό την χρησιμοποίηση του κύκλου του Ericsson χωρίς τη χρήση αναγεννητών. Ωστόσο, όλα αυτά βρίσκονται ακόμα σε θεωρητική βάση και δεν είναι ακόμα εφικτό να γίνουν [174].

4.2 Είδη Αναγεννητών

Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη αναγεννητών τα οποία χρησιμοποιούνται στη μαγνητική ψύξη και είναι τα ακόλουθα:

- Εξωτερικός Αναγεννητής
- Εσωτερικός Αναγεννητής
- Ενεργός Μαγνητικός Αναγεννητής

Η μεταφορά της θερμότητας στον εξωτερικό αναγεννητή μεταξύ του αναγεννητικού υλικού (συνήθως είναι κάποιο στερεό υλικό) και του μαγνητικού ψυκτικού γίνεται ολοκληρωτικά μέσω του ενδιάμεσου υγρού μεταφοράς της θερμότητας.

Στον εσωτερικό αναγεννητή, το μαγνητικό ψυκτικό τοποθετείται στον αναγεννητή όπως ακριβώς και το αναγεννητικό υλικό και η θερμότητα μεταφέρεται απευθείας μεταξύ αυτών των δύο και έτσι ο αναγεννητής θα πρέπει να βρίσκεται εντός του μαγνητικού πεδίου. Στον κύκλο του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή το μαγνητικό υλικό δεν λειτουργεί μόνο ως μαγνητικό ψυκτικό μέσο αλλά και ως αναγεννητικό υλικό. Έτσι η μη αναστρέψιμη απώλεια που αποδίδεται από τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο στον εξωτερικό αναγεννητή ή από την ανάμιξη του αναγεννητικού υγρού με διαφορετική θερμοκρασία στον εσωτερικό αναγεννητή μπορεί να μειωθεί. Ύστερα από τις πρόσφατες εξελίξεις [31,33,175], ο ενεργός μαγνητικός αναγεννητής σταδιακά έχει γίνει το κύριο αντικείμενο έρευνας για μαγνητική αναγεννητική ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου [176-182].

Σύμφωνα με τη σχετική θερμοχωρητικότητα, υπάρχουν δύο όρια εφαρμογής μεταξύ του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας και του μαγνητικού υλικού. Στο πρώτο όριο, η θερμοχωρητικότητα του ρευστού που διοχετεύεται μέσω του αναγεννητή είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του μαγνητικού υλικού. Ο αναγεννητής που χρησιμοποιείται σε αυτήν την περίπτωση είναι εσωτερικός αναγεννητής, όπου η κλίση της θερμοκρασίας στον αναγεννητή επηρεάζεται αρκετά εύκολα από την ανάμιξη του ρευστού. Σύμφωνα με το άλλο αναγεννητικό όριο που αναφέρθηκε παραπάνω, η θερμοχωρητικότητα του ρευστού που διοχετεύεται μέσω του αναγεννητή είναι πολύ λιγότερη από αυτή του μαγνητικού υλικού. Ο τύπος του αναγεννητή στον οποίο εφαρμόζεται συνήθως το παραπάνω όριο είναι ο ενεργός μαγνητικός αναγεννητής, στον οποίο η θερμοκρασιακή κλίση μπορεί να διατηρηθεί σταθερή και πολύ μικρότερα ποσοστά ρευστής μάζας απαιτούνται για μια συγκεκριμένη ψυκτική ισχύς συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση[183].

4.3 Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά των Αναγεννητών

Υπάρχουν αρκετά επιθυμητά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ο τέλειος αναγεννητής [184]. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Άπειρη θερμική μάζα σε σχέση με το εργαζόμενο μέσο που ψύχεται ή θερμαίνεται
- Άπειρη μεταφορά θερμότητας (ένα προϊόν της θερμικής αγωγιμότητας πολλαπλασιασμένο με την επιφάνεια επαφής) μεταξύ του εργαζόμενου μέσου και της μάζας του αναγεννητή.

- Μηδενικό όγκο στο κενό
- Μηδενική πτώση πίεσης για τη συναγωγή του ρευστού μέσω του αναγεννητή
- Μηδενική διαμήκη αγωγιμότητα κατά μήκος του αναγεννητή
- Ομοιόμορφη , γραμμική θερμοκρασιακή κλίση από το θερμό άκρο έως το ψυχρό άκρο της μονάδας.

Η μη αναστρέψιμη απώλεια θερμότητας του αναγεννητή έχει μια μεγάλη επίδραση στη συμπεριφορά ολόκληρου του μαγνητικού ψυκτικού συστήματος. Ο Chen ανέλυσε την επίδραση των θερμικών αντιστάσεων και των αναγεννητικών απωλειών στη συμπεριφορά του μαγνητικού κύκλου του Ericsson ποιοτικά [185]. Οι πιο σημαντικές μη αναστρέψιμες θερμικές απώλειες είναι οι εξής:

- Απώλεια της πεπερασμένης μεταφερόμενης θερμότητας μεταξύ του αναγεννητικού υλικού και του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας.
- Απώλεια της πτώσης πίεσης που προκύπτει από την αντίσταση ροής.
- Θερμική αγωγιμότητα κατά μήκος του μαγνητικού υλικού. Αυτός είναι ένας σημαντικός μηχανισμός απωλειών [179].
- Απώλειες ανάμιξης του αναγεννητικού ρευστού στον εσωτερικό αναγεννητή.
- Απώλεια θερμικής διαρροής.
- Απώλειες μαγνητικής υστέρησης και δινορευσμάτων.
- Απώλειες που οφείλονται από απαγωγή στο ρευστό του αναγεννητή.
- Απώλεια εξαιτίας του ‘νεκρού όγκου’.

Όσον αναφορά τώρα έναν παλινδρομικό ενεργό μαγνητικό αναγεννητή, κάποιο ποσό από το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας συνδέεται σχεδόν πάντα μεταξύ κλινών και των εναλλακτών θερμότητας. Αυτό το παγιδευμένο ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, συνήθως αναφέρεται ως ‘νεκρός όγκος’ και αποτελεί μια σημαντική πηγή αναποτελεσματικότητας στους ενεργούς μαγνητικούς αναγεννητές [186].

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά της ροής και μεταφοράς θερμότητας σε έναν ενεργό μαγνητικό αναγεννητή:

- ο Πορώδη ροή. Το μαγνητικό ψυκτικό τοποθετείται συνήθως μέσα στη κλίνη ως ένα πορώδες σωματίδιο.
- ο Ταλάντωση της ροής. Το ρευστό ρέει περιοδικά αντιστρέφοντας κατεύθυνση κατά τη λειτουργία του μαγνητικού ψυγείου και έτσι ο

συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας και η αντίσταση ροής εξαρτώνται από το είδους του εργαζόμενου μέσου, τη συχνότητα ροής, τη ταχύτητα ροής και από άλλους παράγοντες.

- Μεταφορά Θερμότητας με εσωτερική θερμική πηγή. Υπάρχουν θερμοκρασιακές και θερμικές περιοδικές μεταβολές σε έναν ενεργό μαγνητικό αναγεννητή.
- Θερμική αναγέννηση. Η θερμότητα αναγεννάται μέσω της μίξης του μαγνητικού υλικού και του ρευστού ως ένα αναγεννητικό υλικό που αποτελεί επίσης και μαγνητικό ψυκτικό μέσο. Η αναγεννητική διαδικασία επηρεάζει τον μετασχηματισμό μεταξύ της μαγνητικής και της θερμικής ενέργειας.
- Δυναμική διεργασία. Η ροή και η μεταφερόμενη θερμότητα σε έναν ενεργό μαγνητικό αναγεννητή αποτελούν μια δυναμική διεργασία, στην οποία η τοπική θερμοδυναμική ισορροπία δεν μπορεί να διατηρηθεί.

4.4 Ο Ενεργός Μαγνητικός Αναγεννητής

Για πολλές δεκαετίες ο ενεργός μαγνητικός αναγεννητής έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας σε όλη την επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με την μαγνητική ψύξη, καθώς αποτελεί μια δυνητική εναλλακτική τεχνολογία συμπίεσης ατμού σε θερμοκρασίες δωματίου. Η λειτουργία του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή (AMR) είναι βασισμένη πάνω στη μαγνητοθερμιδική επίδραση (MCE), η οποία εκδηλώνεται ως μια θερμοκρασιακή αλλαγή του μαγνητοθερμιδικού υλικού κατά την αδιαβατική μεταβολή του μαγνητικού πεδίου του υλικού. Δεδομένου ότι η μέγιστη αδιαβατική θερμοκρασιακή αλλαγή πολλών γνωστών μαγνητοθερμιδικών υλικών δεν είναι περισσότερο από μερικούς βαθμούς σε ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 1 T [187], πρέπει να χρησιμοποιείται ένας αναγεννητικός κύκλος με σκοπό τη δημιουργία συγκρίσιμων θερμοκρασιακών διαφορών με, πχ τα εμπορικά συστήματα ψύξης (ατμοσυμπιεστές) [12]. Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί ο αριθμός των πειραματικών ενεργητικών μαγνητικών αναγεννητών και κυρίως από το 2000 και μετέπειτα. Αν και έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές βελτιώσεις όσο αφορά την αποδοτικότητα του ενεργού αναγεννητή, δεν υπάρχουν ακόμα στη διάθεσή μας εμπορικές συσκευές και συνεπώς η επιπλέον ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας κρίνεται απαραίτητη. Για αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντικό να καταλάβουμε τους θεμελιώδεις μηχανισμούς απωλειών, τα

όρια λειτουργίας ,και τον βέλτιστο σχεδιασμό των συστημάτων αναγέννησης μέσω της χρήσης λεπτομερών μοντέλων.

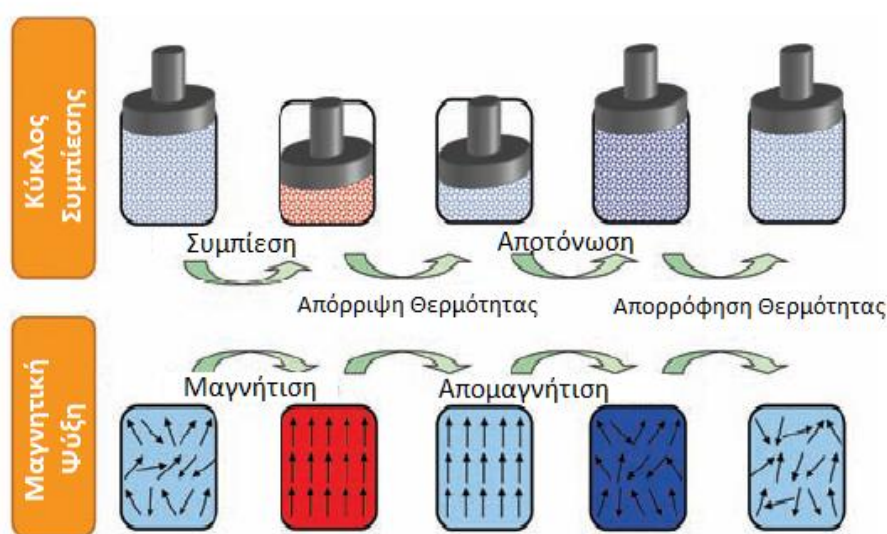
Δεδομένου ότι η λειτουργία του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή συνδέεται με τη μελέτη στερεών φυσικής κατάστασης, θερμοδυναμικής, μηχανικής των ρευστών και του μαγνητισμού, είναι φυσικό επακόλουθο ένα ευρύ φάσμα από φυσικές επιδράσεις να επηρεάζουν τη λειτουργία αυτού του συστήματος. Είναι απαραίτητο λοιπόν να αναπτύξουμε ορισμένα αριθμητικά μοντέλα για την κατανόηση της λειτουργίας του αναγεννητή αυτού, καθώς και η περεταίρω ανάλυση του κύκλου λειτουργίας του.

Για τα περισσότερα σύγχρονα υλικά η μαγνητοθερμιδική επίδραση είναι περιορισμένη ακόμα και όταν βρίσκονται κοντά σε μεταβατική θερμοκρασία και για αυτό το λόγο ένα υλικό το οποίο παρουσιάζει αδιαβατική μεταβολή θερμοκρασίας μεγαλύτερης από 2 K/T αποτελεί ένα ασυνήθιστο φαινόμενο. Για παράδειγμα ένα δείγμα γαδολίνιου σε θερμοκρασία δωματίου θα παρουσιάσει μια θερμοκρασιακή αλλαγή της τάξεως των 10 K με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου εντάσεως 5 T. Το γαδολίνιο όπως έχουμε προαναφέρει θεωρείται ως ένα από τα καλύτερα μαγνητοθερμιδικά υλικά. Συνεπώς γίνεται εύκολα κατανοητό ότι είναι αρκετά δύσκολο εγχείρημα η δημιουργία ενός κατάλληλου θερμοκρασιακού εύρους βασισμένη σε ένα κύκλο Carnot όταν η ισεντροπική μεταβολή της θερμοκρασίας είναι μικρή. Ο παραπάνω περιορισμός θα μας βοηθήσει να καταλάβουμε καλύτερα τον κύκλο του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή που θα αναλυθεί παρακάτω. Ο παθητικός αναγεννητής είναι ένας αρκετά αποτελεσματικός εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος λειτουργεί σε συνδιασμό με μια ενιαία παλλόμενη ροή ρευστού. Εάν το υλικό που χρησιμοποιεί ο παθητικός αναγεννητής και το οποίο παρουσιάζει υψηλή θερμοχωρητικότητα αντικατασταθεί με ένα ενεργό μαγνητικό υλικό (π.χ γαδολίνιο) τότε ο παθητικός αναγεννητής μας έχει μετατραπεί σε έναν ενεργό μαγνητικό αναγεννητή (AMR). Έτσι λοιπόν, λειτουργώντας ως αναγεννητής και με τον σωστό συγχρονισμό ενός υγρού και του παλλόμενου μαγνητικού πεδίου, ο ενεργός μαγνητικός αναγεννητής αυξάνει το θερμοκρασιακό εύρος της αδιαβατικής θερμοκρασιακής αλλαγής πολλές φορές.

Αξίζει ακόμα να αναφερθεί ότι η έννοια του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή απεδόθηκε από τον Steyert [21,22] και αναπτύχθηκε από τον Barclay [31-33] και στη συνέχεια εφαρμόστηκε σε μαγνητικά ψυγεία τα οποία λειτουργούσαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Τα τελευταία χρόνια η έρευνα πάνω στους ενεργούς μαγνητικούς αναγεννητές έχει σημειώσει αλματώδη πρόοδο καθώς έχει γίνει πλέον κατανοητό από την επιστημονική κοινότητα ότι αποτελούν σημαντικό κομμάτι για τη λειτουργία ενός μαγνητικού ψυγείου.

4.4.1 Ο Κύκλος του Ενεργού Μαγνητικού Αναγεννητή

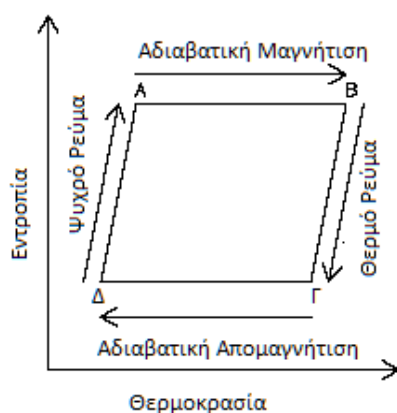
Ο θερμοδυναμικός κύκλος που αξιοποιείται στις περισσότερες μαγνητικές ψυκτικές συσκευές αναπαριστά τον κύκλο του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή. Πιο συγκεκριμένα, αυτός ο ψυκτικός κύκλος είναι ένας σύνθετος θερμοδυναμικός κύκλος που αποτελείται από τέσσερις ανεξάρτητες θερμοδυναμικές διεργασίες. Αυτές οι διεργασίες είναι δύο ισοεντατικές και δύο αδιαβατικές μεταβολές. Χρειάζεται μεγάλη προσοχή κατά την εξέταση του κύκλου αυτού γιατί δεν μπορεί να περιγραφεί όπως περιγράφεται ένας συμβατικός θερμοδυναμικός κύκλος, αλλά αντιθέτως θα ήταν προτιμότερο να λαμβάνεται υπόψη ως μια άπειρη σειρά από απειροελάχιστες θερμοδυναμικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον αναγεννητή [42]. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η αναλογία μεταξύ ενός συμβατικού ψυκτικού κύκλου ατμού-συμπύεσης και του κύκλου του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή.



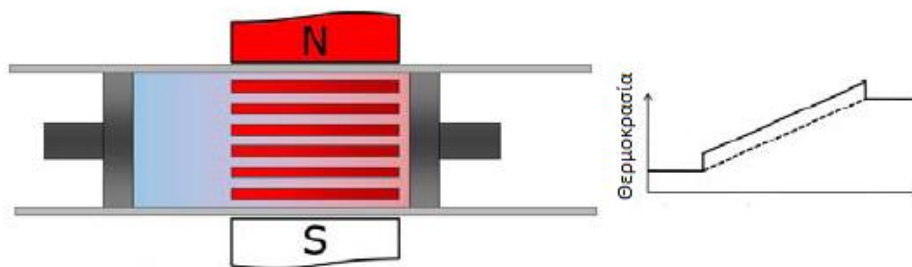
Σχήμα 4.1: Εικόνα της αναλογίας μεταξύ ενός εμπορικού ψυκτικού κύκλου και αυτού του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή [188].

Το σχήμα 4.2 αναπαριστά το διάγραμμα T-S του κύκλου του ενεργού αναγεννητή σε ένα δοσμένο σημείο στον αναγεννητή. Η εντροπία πρέπει κατά συνέπεια να θεωρηθεί ως η συνολική εντροπία μιας τέτοιας 'μονάδας κυψελίδων' συμπεριλαμβάνοντας τόσο τη στερεά όσο και την υγρή τους κατάσταση. Ξεκινώντας από το σημείο Α και κινούμενοι ωρολογιακά στο διάγραμμα T-S ο ψυκτικός κύκλος περιγράφεται ως

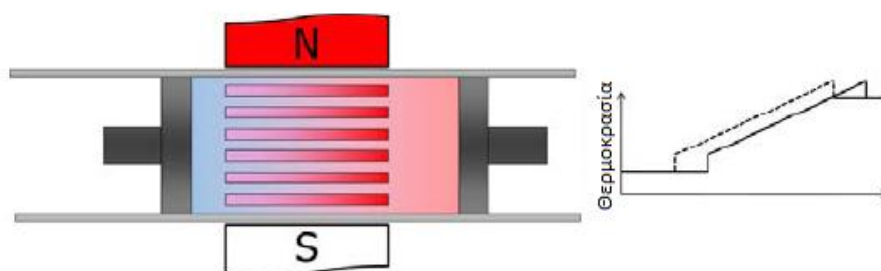
εξής: Καταρχάς το μαγνητοθερμιδικό υλικό εκτίθεται σε μια θετική αδιαβατική μαγνήτιση μέσα στο μαγνητικό πεδίο και γι'αυτό αυξάνεται η θερμοκρασία του (σχήμα 4.3 (α)). Δεύτερον (από το σημείο Β στο Γ στο διάγραμμα (σχήμα 4.2 σχήμα 4.3(β))το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας μετακινείται από το ψυχρό στο θερμό άκρο και για αυτό απορροφάται θερμότητα από τον αναγεννητή και αποβάλλεται στο περιβάλλον μέσω του θερμού εναλλάκτη θερμότητας. Τρίτον (από το σημείο Γ στο Δ στο σχήμα 4.2 καθώς και στο σχήμα 4.3(γ)) το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται το μαγνητοθερμιδικό υλικό ψύχεται αδιαβατικά. Τέλος το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας μετακινείται από το θερμό στο ψυχρό άκρο και έτσι απορροφά θερμότητα από τον ψυχρό εναλλάκτη θερμότητας (μεταβολή Δ στο Α ,σχήμα 4.2 & σχήμα 4.3(δ)).Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω αποτελεί το φυσικό πρόβλημα του ψυκτικού κύκλου του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή που περιλαμβάνει μια αλληλεπίδραση ανάμεσα σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, μια αναγεννητική μήτρα που είναι φτιαγμένη από ένα ή περισσότερα μαγνητοθερμιδικά υλικά και της ταλαντούμενης ροής του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας



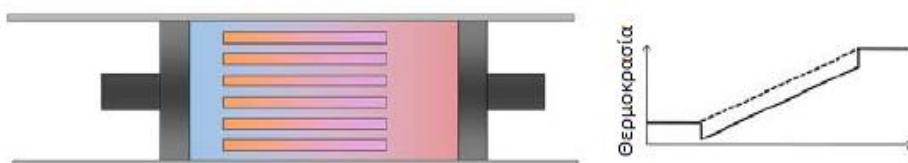
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα T-S του κύκλου του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή.Ο κύκλος χωρίζεται σε 4 επιμέρους διεργασίες, συμπεριλαμβάνοντας δύο ισοεντατικές και δύο αδιαβατικές.



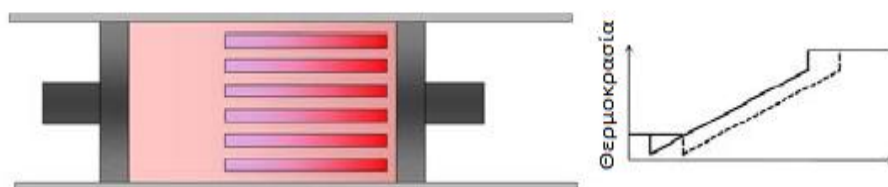
(α) Μαγνήτιση (αύξηση της θερμοκρασίας)



(β) Θερμή Προσβολή (απόρριψη θερμότητας στο περιβάλλον)



(γ) Απομαγνήτιση (Μείωση της θερμοκρασίας)



(δ) Ψυχρή Προσβολή (Απορρόφηση θερμικού φορτίου)

Σχήμα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση των τεσσάρων διεργασιών που συμβαίνουν στον ενεργό μαγνητικό αναγεννητή [188].

4.4.2 Βασικοί Παράμετροι Λειτουργίας

Ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων επηρεάζει την συμπεριφορά και την απόδοση ενός ενεργού μαγνητικού αναγεννητή όπως αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 4.1). Αυτοί οι παράμετροι μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής : *α)* γεωμετρικές *β)* μαγνητικές *γ)* θερμοδυναμικές και λειτουργικές. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι τα έως σήμερα αναπτυχθέντα μαθηματικά μοντέλα υπολογίζουν κάποια οριακά αποτελέσματα κυρίως λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας και της μη-γραμμικότητας του προβλήματος, αλλά και λόγω αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις ιδιότητες του υλικού.

ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ		
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ	ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ	ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ/ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ
Σχήμα Αναγεννητή	Ένταση πεδίου	Ρευστό μεταφοράς θερμότητας
Συντελεστής αναλογίας αναγεννητή	Υλικό κατασκευής αναγεννητή	Παράγοντας ,Φ
Μέγεθος σωματιδίου	Πεδίο διανομής	Συχνότητα λειτουργίας
Πορώτητα	Ροή πεδίου	Πίεση
		Θερμοκρασία θερμοδοχείου
		Ψυκτική ικανότητα

Πίνακας 4.1: Βασικοί Παράμετροι Λειτουργίας Ενεργού Μαγνητικού Αναγεννητή

4.4.3 Θερμοκρασιακό Προφίλ και Ψυκτική Ισχύς

Έχοντας ένα μαγνητικό αναγεννητή και ένα σετ παραμέτρων όπως αυτά του παραπάνω πίνακα το ενδιαφέρον έγκειται στη συμπεριφορά και στην φυσική κατανόηση του φαινομένου. Η απόδοση του αναγεννητή μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με τον υπολογισμό της ψυκτικής ισχύος και της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του θερμού και ψυχρού του άκρου και της ευαισθησίας στο θερμικό φορτίο. Επιπλέον, η κατανόηση της συμπεριφοράς του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή απαιτεί γνώση των θερμοδυναμικών του ιδιοτήτων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του και οι οποίες μπορεί να προέρχονται από την κατανομή της θερμοκρασίας στον αναγεννητή. Για αυτό το λόγο, η γνώση της κατανομής της θερμοκρασίας μας επιτρέπει τον υπολογισμό της ψυκτικής ισχύος, του θερμοκρασιακού εύρους, του θερμικού φορτίου καθώς και των θερμομαγνητικών ιδιοτήτων του συστήματος.

4.4.4 Διαστρωμάτωση

Μια γενική κλιμακωτή σχέση, η οποία υπολογίζει την βέλτιστη μαγνητοθερμιδική επίδραση ως συνάρτηση της θερμοκρασίας είναι η ακόλουθη [189] :

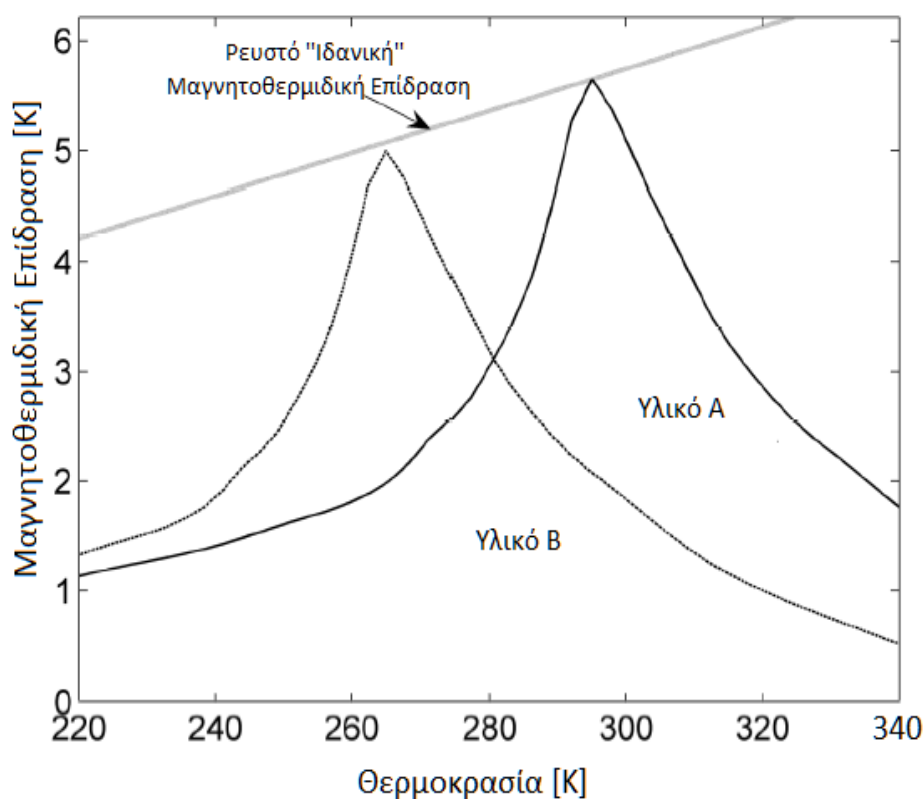
$$\Delta T^{\text{ideal}}(T) = (\Delta T_{\text{ref}} + T_{\text{ref}}) \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{\beta} - T \quad (4.1)$$

όπου η ΔT_{ref} αποτελεί την μαγνητοθερμιδική επίδραση σε μια καθορισμένη θερμοκρασία αναφοράς, T_{ref} και ο β αποτελεί μια παράμετρο που περιγράφει τον λόγο ικανότητας ροής του ρευστού για χαμηλές και υψηλές ροές. Για τον βασικό κύκλο του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή ο παράγων β ισούται με τη μονάδα. Σε αυτή την περίπτωση η παραπάνω εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$\Delta T^{\text{ideal}}(T) = \left(\frac{\Delta T_{\text{ref}}}{T_{\text{ref}}} \right) T \quad (4.2)$$

Αν ορίσουμε ως θερμοκρασία αναφοράς την απορριπτόμενη θερμότητα T_H τότε η ΔT_{ref} θα είναι η μαγνητοθερμιδική επίδραση του ψυγείου στην θερμοκρασία T_H . Αν υποθέσουμε ότι το ψυκτικό μας μέσο είναι το γαδολίνιο και η θερμοκρασία αναφοράς είναι ίση με τη θερμοκρασία Curie, τότε η ιδανική μαγνητοθερμιδική επίδραση παίρνει τη μορφή της

παρακάτω γραφικής παράστασης του σχήματος 4.4. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ξεκάθαρα ότι καθώς η θερμοκρασία απομακρύνεται από το σημείο Curie, η πραγματική μαγνητοθερμιδική επίδραση είναι σημαντικά μικρότερη από την ιδανική. Για αυτό η θερμοκρασιακή διαφορά που παράγεται από ένα υλικό είναι στην πραγματικότητα μικρότερη από την τιμή που υπολογίζουμε με τα θεωρητικά μοντέλα που χρησιμοποιούμε.



Σχήμα 4.4: Η ιδανική μαγνητοθερμιδική επίδραση συγκρίνοντας το γαδολίνιο σε ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 0-2 Tα (Υλικό Α), και ένα άλλο υλικό με θερμοκρασία Curie κοντά στους 265 K (υλικό Β) [190].

Προκειμένου να αντισταθμιστούν οι μη ιδανικές ιδιότητες των μαγνητοθερμιδικών υλικών έχει προταθεί η δημιουργία ενεργών μαγνητικών αναγεννητών οι οποίοι θα αποτελούνται από περισσότερα μαγνητικά υλικά. Δημιουργώντας λοιπόν έναν αναγεννητή που θα αποτελείται από διάφορα ψυκτικά μαγνητικά υλικά τα οποία έχουν υψηλή θερμοκρασία Curie, ίσως καταφέρουμε να πλησιάσουμε πιο πολύ την ιδανική μαγνητοθερμιδική επίδραση για διάφορες θέσεις μέσα στον ενεργό μαγνητικό αναγεννητή. Ωστόσο ακόμα και αν κάτι τέτοιο επιτευχθεί θέτονται τα εξής ερωτήματα από τους επιστήμονες :

- Ποια η απαιτούμενη ποσότητα που θα χρειάζεται από κάθε υλικό σε κάθε επίπεδο του αναγεννητή?
- Πως θα διαμορφώνεται το προφίλ των θερμοκρασιών?
- Πόσα επίπεδα χρειάζονται για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του αναγεννητή?
- Ποια είναι η ευαισθησία των επιδόσεων σε θερμικό φορτίο και T_H ?
- Πως ο παράγων χρησιμοποίησης (Φ) επηρεάζει την απόδοση του αναγεννητή?
- Πως διαμορφώνονται οι αρχικές συνθήκες και κατά πόσο αυτές επηρεάζουν τις συνθήκες σταθερής λειτουργίας της συσκευής?

Η αντιμετώπιση μερικών από αυτών των προβλημάτων και ορισμένων άλλων έχει αποτελέσει στόχο πολλών υπολογιστικών και πειραματικών μοντέλων. Η σχετικά αργή πρόοδος που παρατηρείται στην απάντηση όλων αυτών των ερωτημάτων μέσω των οποίων θα αναπτυχθούν μαγνητικά ψυγεία με πολύ υψηλότερες αποδόσεις μπορεί να αποδοθεί στην πολυπλοκότητα του προβλήματος σε πολλά διαφορετικά επίπεδα. Συνεπώς ακόμη και η ιδέα για τη δημιουργία ενός πολυεπίπεδου αναγεννητή ο οποίος αποτελείται από ένα μόνο υλικό αποτελεί από μόνη της ένα δύσκολο υλοποιήσιμο έργο, που όμως στο μέλλον ίσως το δούμε να εφαρμόζεται με επιτυχία.

4.4.5 Βασικές Εξισώσεις Ενεργειακού Ισοζυγίου

Όλα τα αριθμητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για τον ενεργό μαγνητικό αναγεννητή είναι βασισμένα σε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας σε μια σταθερή πινακωτή δομή, τη μαγνητοθερμιδική επίδραση σε ένα στερεό εξαιτίας της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου και το σύνδεσμο της μεταφερόμενης θερμότητας μέσω συναγωγής ενός ρευστού. Έτσι η πιο γενική ενεργειακή εξίσωση για τον αναγεννητή είναι η ακόλουθη:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + \dot{Q}_{MCE} + \dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{HT} \quad (4.3)$$

Η παραπάνω εξίσωση περιγράφει την μεταφερόμενη θερμότητα στη συνεχές κλίμακα και έτσι λαμβάνει υπόψη την εγγενή θερμική αγωγιμότητα του στερεού. Ο δείκτης (s) αναφέρεται στο στερεό, η πυκνότητα της μάζας συμβολίζεται με ρ_s , η ειδική θερμότητα με c_s , η θερμοκρασία με T_s , ο χρόνος με t , το k_s αντιπροσωπεύει την θερμική αγωγιμότητα, ο όρος της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης συμβολίζεται με $\dot{Q}_{MCE}$, οι μη-αναστρέψιμες απώλειες δηλώνονται ως $\dot{Q}_{loss}$ και τέλος η μεταφερόμενη θερμότητα μεταξύ του στερεού και του υγρού είναι η $\dot{Q}_{HT}$. Στην περίπτωση του μονοδιάστατου μοντέλου (1D model) αυτή η εξίσωση θα δίνεται μέσω μιας συσχέτισης Nusselt-Reynolds ενώ στην περίπτωση των 2D και 3D μοντέλων το όριο διεπαφής μεταξύ στερεού και υγρού συνήθως επιλύεται χωρικά και ο όρος έτσι εκφράζεται ως μια εσωτερική οριακή συνθήκη. Ωστόσο, στα διδιάστατα και τριδιάστατα μοντέλα ίσως χρειαστεί να εφαρμόσουμε κάποιες φορές τις συσχετίσεις Nusselt-Reynolds. Η ενεργειακή εξίσωση για το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας γράφεται ως εξής:

$$\rho_f c_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T_f \right) = \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{HT} \quad (4.4)$$

Σε αυτήν την εξίσωση το σύμβολο f αντιπροσωπεύει το ρευστό (fluid) και $\mathbf{u}=(u_x, u_y, u_z)$ την ταχύτητα του ρευστού. Οι εξισώσεις ενεργειακού ισοζυγίου θεωρούνται έγκυρες κατά μήκος του αναγεννητή.

Αυτό το πρόβλημα περιλαμβάνει και δυναμική των ρευστών και έτσι απαιτείται η επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = \frac{\mu_f}{\rho_f} \nabla^2 u - \frac{1}{\rho_f} \nabla p \quad (4.5)$$

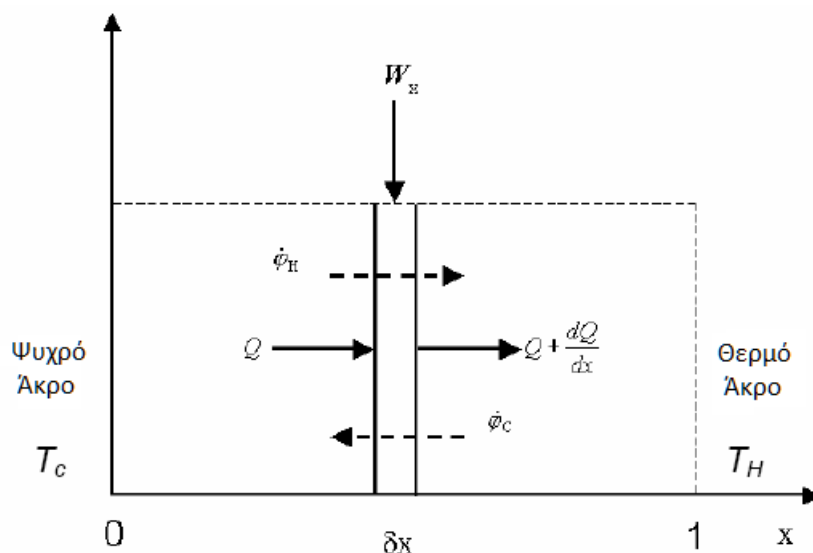
$$\nabla \cdot u = 0 \quad (4.6)$$

όπου μ_f είναι το δυναμικό ιξώδες και p η πίεση. Οι εξισώσεις (4.5)-(4.6) παρουσιάζουν μια ασυμπίεστη ροή. Αν ένα αέριο χρησιμοποιηθεί ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας (HTF), τότε οι εξισώσεις Navier-Stokes ίσως χρησιμοποιηθούν. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, οι εξισώσεις (4.5)-(4.6) απλοποιούνται σε αναλυτικές εκφράσεις, όπως στις περιπτώσεις των μονοδιάστατων και δισδιάστατων μοντέλων [191] ή επιλύονται αριθμητικά [192]. Γενικά, τα μαθηματικά μοντέλα του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή περιλαμβάνουν τις παρακάτω παραδοχές, που επίσης χρησιμοποιούνται για την παθητική ανάλυση ενός εναλλάκτη θερμότητας [193].

- Δεν εμφανίζεται καμιά αλλαγή φάσης στο υγρό. Αυτή αποτελεί μια έγκυρη παραδοχή για έναν ενεργό μαγνητικό αναγεννητή που λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου, όπου πχ νερό με αντιψυκτικό χρησιμοποιείται ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας.
- Το ρευστό είναι ασυμπίεστο και έτσι δεν παρατηρούνται διακυμάνσεις πίεσης κατά τη διάρκεια της ροής. Και αυτή η συνθήκη είναι έγκυρη για τα περισσότερα ρευστά που χρησιμοποιούνται από τον αναγεννητή σε θερμοκρασία δωματίου.
- Διαρροές ροής ή παράκαμψη ροής δεν υφίστανται. Η παραπάνω παραδοχή αποτελεί μια απλοποίηση. Πειραματικά είναι πολύ δύσκολο να ελέγξουμε την παράκαμψη της ροής.
- Η μεταφορά της θερμότητας που προκαλείται από την ακτινοβολία μέσα στον αναγεννητή είναι αμελητέα σε σχέση με τη μεταφορά θερμότητας που έχουμε από αγωγή και συναγωγή.
- Το στερεό μέσα στον αναγεννητή κατανέμεται ομοιόμορφα χωρίς ακραίες επιπτώσεις. Αυτό αποτελεί μια απλοϊκή παραδοχή που είναι εμφανώς δύσκολη να την ελέγξουμε στα πειράματα.

4.4.6 Αναλυτικές Εξισώσεις Ενεργού Μαγνητικού Αναγεννητή

Η σχηματική απεικόνιση ενός ενεργού μαγνητικού αναγεννητή παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 4.5. Η κλίνη του αναγεννητή αναπαριστάται με μια διακεκομμένη γραμμή, ενώ ένα τμήμα απειροελάχιστου πάχους είναι ζωγραφισμένο με μια σταθερή γραμμή. Η κλίνη αποτελείται από ένα πορώδες στερεό υλικό που αποτελεί το μαγνητικό ψυκτικό μέσο και από ένα ρευστό το οποίο ενεργεί ως ρευστό μεταφορά της θερμότητας. Το ρευστό μεταφέρει θερμότητα μεταξύ ενός ψυχρού εναλλάκτη θερμότητας, του ψυγείου και ενός θερμού εναλλάκτη θερμότητας. Σε χρονικό διάστημα άνω του ενός πλήρους κύκλου, θερμότητα απορροφάται στο ψυχρό άκρο και αποβάλλεται στο θερμό.



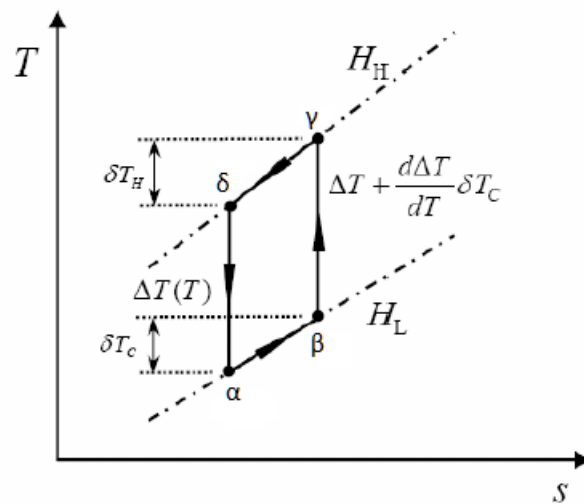
Σχήμα 4.5: Μια σχηματική αναπαράσταση ενός ενεργού μαγνητικού αναγεννητή [189].

Οι περισσότερες ενεργές μαγνητικές αναγεννητικές συσκευές μιμούνται έναν αντίστροφο μαγνητικό κύκλο του Brayton. Πιο συγκεκριμένα όπως προαναφέραμε και στην παράγραφο 4.4.1 πραγματοποιούνται 4 μεταβολές οι οποίες ξαναπεριγράφονται και είναι οι ακόλουθες:

1. Η κλίνη του αναγεννητή είναι απομαγνητισμένη. Ρευστό ρέει μέσω του αναγεννητή οδηγώντας τη κλίνη σε μια θερμοκρασία T_H . Καθώς το ρευστό ρέει μέσω του της κλίνης αυτό ανταλλάσει θερμότητα με το στερεό μαγνητικό ψυκτικό μέσο και εξέρχεται από τη κλίνη σε θερμοκρασία T_C .

2. Η κλίνη εκτίθεται σε ένα υψηλό μαγνητικό πεδίο και η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου αυξάνεται εξαιτίας της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης $\Delta T(T)$.
3. Μετά την απορρόφηση θερμικού φορτίου και την αύξηση της θερμοκρασίας του κατά ΔT_C , το ρευστό εισέρχεται στο κρύο άκρο του αναγεννητή, απορροφά θερμότητα από το στερεό και εξέρχεται από τον αναγεννητή έχοντας μια θερμοκρασία $T + \Delta T_H$.
4. Ο αναγεννητής απομαγνητίζεται, η θερμοκρασία μειώνεται λόγω της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης, και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Το σχήμα 4.6 αναπαριστά τον υποτιθέμενο μαγνητικό ψυκτικό κύκλο που συμβαίνει σε κάποια θέση μέσα στον αναγεννητή. Ο κύκλος ακολουθεί τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω (που είναι η ίδια με αυτή της υποενότητας 4.4.1) ξεκινώντας από το σημείο α και επιστρέφοντας σε αυτό μετά την ολοκλήρωση του ψυκτικού κύκλου.



Σχήμα 4.6: Ο ψυκτικός κύκλος για ένα μαγνητικό ψυγείο σε κάποια διατομή του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή [189].

Υποθέτουμε ότι το μέγεθος της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης για την διεργασία β-γ περιγράφεται κατά προσέγγιση από μια πρώτης τάξεως σειρά Taylor, έχοντας ως αναφορά το σημείο α. Στην αναστρέψιμη περίπτωση, η περιοχή μέσα στο διάγραμμα T-S είναι ισοδύναμη με το μαγνητικό έργο που δίνουμε για κάθε μονάδα μάζας για έναν τέλειο κύκλο. Εάν οι λεπτομέρειες που αφορούν τον ενεργό μαγνητικό αναγεννητή δεν ληφθούν υπόψη και επικεντρωθούμε μόνο στην απορρόφηση της θερμότητας από το ρευστό μέσω της ψυχρής δεξαμενής, τότε η ψυκτική ισχύς ορίζεται ως εξής:

$$\dot{Q}_c = \oint \dot{m}_f(t) c_p T_f(t) dt \quad (4.7)$$

όπου $\dot{m}_f(t)$ είναι η παροχή μάζας του ρευστού ως συνάρτηση του χρόνου, c_p είναι η θερμοχωρητικότητα του υγρού, και T_f είναι η θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο του αναγεννητή. Για έναν πλήρη κύκλο το ολοκλήρωμα μπορεί να γραφτεί ως:

$$\dot{Q}_c = (\dot{m}_f c_p) \Delta T_f \quad (4.8)$$

όπου ΔT_f είναι η πραγματική θερμοκρασιακή αλλαγή του ρευστού καθώς αυτό ρέει μέσω του ψυχρού εναλλάκτη θερμότητας, και $\dot{m}_f$ είναι η μάζα του ρευστού το οποίο ρέει μέσω του αναγεννητή όταν αυτός είναι απομαγνητισμένος. Σε περίπτωση που ο αναγεννητής παρουσιάζει έναν πολύ υψηλό αριθμό θερμικών μονάδων μεταφοράς (NTU), τότε η θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή θα ταιριάζει με τη θερμοκρασία του στερεού μαγνητικού ψυκτικού που βρίσκεται στο ψυχρό άκρο. Επιπλέον, αν η θερμική μάζα του ψυκτικού είναι πολύ μεγαλύτερη από τη θερμοχωρητικότητα του συνόλου της ροής του ρευστού δια μέσου του αναγεννητή, τότε η θερμοκρασία του στερεού δεν θα μεταβληθεί πάρα πολύ. Ο λόγος της θερμοχωρητικότητας του ρευστού προς τη θερμική μάζα του αναγεννητή ονομάζεται "λόγος χρησιμοποίησης" (utilization) και ορίζεται ως:

$$\Phi = \frac{m_f c_p}{M c_B} \quad (4.9)$$

όπου με M συμβολίζεται η μάζα του ψυκτικού στον αναγεννητή και C_B είναι η μέση ειδική θερμοχωρητικότητα του ψυκτικού. Στα όρια πολύ μικρών τιμών του "λόγου χρησιμοποίησης" και μεγάλων τιμών του NTU, η θερμοκρασιακή αλλαγή του ρευστού καθώς αυτό απορροφά θερμότητα μέσω του ψυχρού εναλλάκτη είναι ισοδύναμη με τη μαγνητοθερμιδική επίδραση του ψυκτικού στο ψυχρό άκρο του αναγεννητή, δηλαδή $\Delta T_f = \Delta T_C$. Για έναν ενεργό μαγνητικό αναγεννητή, ο τοπικός "λόγος χρησιμοποίησης" είναι μια συνάρτηση πεδίου και θερμοκρασίας και γενικά εξαρτάται από τη θέση.

Εάν ο κύκλος του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή είναι μια αναστρέψιμη διεργασία, τότε δεν παράγεται εντροπία στον αναγεννητή και για αυτό το ίδιο ποσό εντροπίας ρέει μέσα και έξω. Επιπλέον, αν υποθέσουμε πως ο αναγεννητής συμπεριφέρεται ως ένα κλιμακωτό

σύστημα από άπειρο αριθμό μαγνητικών ψυγείων τότε η παρακάτω σχέση ισχύει καθ'όλο το μήκος του αναγεννητή [194]:

$$\dot{S}(x) = \frac{\dot{Q}(x)}{T(x)} = \text{const} \quad (4.10)$$

όπου $\dot{S}$ και $\dot{Q}$ είναι ο ρυθμός ροής θερμότητας και εντροπίας και με T συμβολίζεται η απόλυτη θερμοκρασία, όλα τα παραπάνω στην ίδια αξονική κατεύθυνση x . Ακόμη, για το θερμό και ψυχρό άκρο ισχύουν οι ακόλουθες δύο σχέσεις:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_f C_p \Delta T_{ad_c} \quad (4.11)$$

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_f C_p \Delta T_{ad_h} \quad (4.12)$$

Αντικαθιστώντας τις (4.11) και (4.12) στην (4.10) έχουμε ότι:

$$\frac{\Delta T_{ad_c}}{T_c} = \frac{\Delta T_{ad_h}}{T_h} \quad (4.13)$$

Τελικά, αν λάβουμε υπόψη την θερμοκρασία του θερμού άκρου και τη θερμοκρασία αναφοράς, τότε η παραπάνω έκφραση υποδηλώνει ότι η μαγνητοθερμιδική επίδραση πρέπει να κλιμακώνεται με τη θερμοκρασία σύμφωνα με τη σχέση (4.2) που παρουσιάσαμε στην ενότητα 4.4.4 :

$$\Delta T^{ideal}(T) = \left(\frac{\Delta T_{ref}}{T_{ref}} \right) T \quad (4.2)$$

Οι εξισώσεις που διέπουν έναν ενεργό μαγνητικό αναγεννητή έχουν αναπτυχθεί όλα αυτά τα χρόνια με στόχο την αναλυτική ή αριθμητική περιγραφή της θερμο-μαγνητικής του κατάστασης σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή για ένα δεδομένο σύνολο οριακών συνθηκών. Αυτές οι εξισώσεις του αναγεννητή αποτελούν ένα σύστημα δύο εξισώσεων, μία για το ρευστό και μία για το στερεό. Ουσιαστικά προέρχονται από το ενεργειακό ισοζύγιο (υποενότητα 4.4.5) της κάθε φάσης και η επίλυσή τους πρέπει να είναι ταυτόχρονη.

Το ενεργειακό ισοζύγιο για ένα ρευστό μεταφοράς της θερμότητας διαμέσου του αναγεννητή μπορεί να συνοψιστεί ως εξής [195]:

$$\rho_f C_p A_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\dot{m}_f C_p \frac{\partial T_f}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f A_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + h P_w (T_s - T_f) + \left| \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\dot{m}}{\rho_f} \right| \quad (4.14)$$

όπου ρ_f είναι η πυκνότητα, A_f είναι η περιοχή ροής του ρευστού, k_f είναι η θερμική αγωγιμότητα, h είναι ο συντελεστής συναγωγής μεταφοράς θερμότητας, P_w είναι η βρεχόμενη περίμετρος και p είναι η πίεση του ρευστού. Όλες οι παράμετροι με το δείκτη f αναφέρονται στο ρευστό. Οι απώλειες λόγω του ιξώδους είναι συνάρτηση της πτώσης πίεσης $\frac{\partial p}{\partial x}$, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συχνότητα λειτουργίας και τη πίεση του συστήματος. Η πτώση πίεσης θέτει ένα σημαντικό περιορισμό στην αποτελεσματικότητα του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή, και για αυτό το λόγο οι προσπάθειες επικεντρώνονται στην ελαχιστοποίησή της μέσω της επιλογής του κατάλληλου ρευστού μεταφοράς θερμότητας, της αναγεννητικής μήτρας και άλλων παραγόντων.

Ομοίως το ενεργειακό ισοζύγιο για το στερεό μπορεί να εκφραστεί ως εξής [195]:

$$\rho_s A_s \left(\frac{\partial u_s}{\partial t} - B \frac{\partial m}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s A_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + h P_w (T_f - T_s) \quad (4.15)$$

όπου ο όρος που αφορά τη μαγνήτιση είναι συγκεντρωμένος στην αριστερή πλευρά της εξίσωσης. Ο δείκτης s αναφέρεται στο στερεό, ενώ εδώ εισάγεται και το σύμβολο B που δηλώνει το μαγνητικό πεδίο.

Αδιαστατοποίηση της εξίσωσης (4.14) μας δίνει την παρακάτω πιο απλοποιημένη μορφή της:

$$k \frac{\partial T_f}{\partial t^*} = -\Phi \frac{\partial T_f}{\partial x^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\varphi}{Pe_f} \frac{\partial T_s}{\partial x^*} \right) + NTU \Phi (T_s - T_f) \quad (4.16)$$

όπου χρησιμοποιούνται οι παρακάτω αδιάστατες παράμετροι:

$$\Phi = \frac{\dot{m}_f c_p \tau}{M_s c_B} \quad (4.17)$$

$$NTU = \frac{hA_W}{\dot{m}_f c_p} \quad (4.18)$$

$$k = \frac{M_f c_p}{M_s c_B} \quad (4.19)$$

$$Pe_f = \frac{\dot{m} c_f L}{k_{eff} A_f} \quad (4.20)$$

$$t^* = \frac{t}{\tau}; \quad x^* = \frac{x}{L} \quad (4.21)$$

όπου με A_W συμβολίζεται η βρεχόμενη περιοχή, M_f είναι η μάζα του αερίου εντός του αναγεννητή, L είναι το μήκος του αναγεννητή και k_{eff} είναι η αγωγιμότητα του αναγεννητή και του ρευστού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ AMR

Σε αυτό εδώ το κεφάλαιο της διπλωματικής μου εργασίας παρουσιάζεται η υλοποίηση ενός μονοδιάστατου μοντέλου μαγνητικής ψύξης και η αριθμητική επίλυση του εν λόγω προβλήματος με προσεγγιστικές μεθόδους με χρήση του λογισμικού Matlab με σκοπό τον υπολογισμό της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του αναγεννητή. Ειδικότερα, αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές υποθέσεις και παραδοχές της υλοποίησης (π.χ. ιδιότητες υλικών, κ.λπ.), οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται και περιγράφουν τον ενεργό μαγνητικό αναγεννητή και οι οποίες είναι παρόμοιες με τις αναλυτικές εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4, εν συνεχεία περιγράφεται ο αλγόριθμος που έχει χρησιμοποιηθεί και τέλος παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα εκτέλεσης του υλοποιηθέντος προγράμματος με γραφικό και σχηματικό τρόπο, επεξηγώντας τον τρόπο υπολογισμού των διαφόρων μεγεθών και δεικτών του προβλήματος.

Το μοντέλο που υλοποιείται έχει ως βάση το στερεό (solid) μαγνητοθερμιδικό υλικό του γαδολινίου (Gd) και το νερό ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας (fluid). Ο σχεδιασμός και οι υπολογισμοί έχουν γίνει με διαστάσεις αναγεννητή: 100 mm μήκος (length), 50 mm πλάτος (width) και 10 mm ύψος (height). Επιπλέον, το μοντέλο είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου (20° Κελσίου ή 293 βαθμούς Kelvin). Οι ιδιότητες των εν λόγω υλικών αντλήθηκαν από τη σχετική βιβλιογραφία και οι επιλεγθείσες τιμές αναφέρονται σε σχόλια εντός του προγράμματος που έχει αναπτυχθεί και παρατίθεται στο σχετικό παράρτημα στο τέλος αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, τα οι βασικοί παράμετροι λειτουργίας του αναγεννητή παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1. Το εν λόγω πρόγραμμα υπολογίζει τις θερμοκρασίες του ρευστού και του μαγνητοθερμιδικού υλικού που προκύπτουν στα επιμέρους βήματα του αλγορίθμου και τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα. Χρησιμοποιώντας τους υπολογισμούς αυτούς σε συνδυασμό με μια σειρά άλλων απαιτούμενων παραμέτρων και αξιοποιώντας τις δυνατότητες γραφικής αναπαράστασης του Matlab, έχουμε εν συνεχεία δημιουργήσει γραφήματα που επιδεικνύουν τη συμπεριφορά του μοντέλου, του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή.

5.1 Περιγραφή, Ανάλυση και Υλοποίηση του Μοντέλου

Το αριθμητικό μοντέλο του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή είναι βασισμένο πάνω σε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας σε μια πορώδη δομή ενός παθητικού αναγεννητή. Οι εξισώσεις που περιγράφουν το συγκεκριμένο μοντέλο που υλοποιούμε, προτάθηκαν από τον Tusek [196] και παρουσιάζονται παρακάτω. Αυτές οι εξισώσεις του αναγεννητή αποτελούν ένα σύστημα δύο εξισώσεων, μία για το ρευστό(νερό) και μια για το μαγνητοθερμιδικό υλικό μας (στερεό-γαδολίνιο). Ουσιαστικά προέρχονται από το ενεργειακό ισοζύγιο της κάθε φάσης και η επίλυσή τους πρέπει να είναι ταυτόχρονη. Έτσι λοιπόν έχουμε τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + v_x \frac{\partial T_f}{\partial x} = \left| f_0 \frac{2v_x^3}{d_h c_f} \right| + \frac{a_{eff} A_{ht}}{c_f \dot{m}_f \tau} (T_s - T_f) \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\lambda_{eff}}{\rho_s c_s (T, B)(1 - \varepsilon)} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{a_{eff} A_{ht}}{c_s (T, B) \dot{m}_s} (T_f - T_s) \quad (5.2)$$

όπου, η ταχύτητα u_x ορίζεται ως εξής:

$$v_x = \frac{\dot{m}}{A_0 \varepsilon \rho_f} \quad (5.3)$$

Προτού προχωρήσουμε περαιτέρω κρίνεται απαραίτητο να δοθεί η επεξήγηση όλων των μεταβλητών, οι οποίες εμφανίζονται στις παραπάνω τρεις εξισώσεις. Έτσι λοιπόν έχουμε ότι:

- T_f : Είναι η θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας σε [K].
- T_s : Είναι η θερμοκρασία του στερεού που χρησιμοποιεί ο αναγεννητής (γαδολίνιο) και η τιμή της είναι σε κέλβιν [K].
- f_0 : Συντελεστής τριβής (δίνεται από τη σχέση 5.4)
- d_h : Υδραυλική διάμετρος [m]
- c_f : Ειδική θερμότητα του ρευστού [$J.Kg^{-1}.K^{-1}$]
- a_{eff} : Ενεργός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας [$W.m^{-2}.K^{-1}$]
- A_{ht} : Περιοχή μεταφοράς της θερμότητας [m^2]
- $\dot{m}_f$: Παροχή μάζας του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας
- τ : Χρόνος διάρκειας των μετρήσεων (dwell time) [s]

λ_{eff} : Ενεργός θερμική αγωγιμότητα [$\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$]

ρ_s : Πυκνότητα του στερεού [Kg/m^3]

$c_s(T,B)$: Ειδική θερμότητα του στερεού(εξαρτάται από τη θερμοκρασία και από το μαγνητικό πεδίο) [$\text{J.Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]

m_s : Μάζα του στερεού μαγνητοθερμιδικού υλικού

A_0 : Μετωπική επιφάνεια του αναγεννητή [m^2]

ε : Πορότητα (είναι μια μονάδα μέτρησης του κενού χώρου σε ένα υλικό και παίρνει τιμές από 0-1)

ρ_f : Πυκνότητα του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας

Η θερμική αγωγιμότητα μεταξύ του στερεού και του ρευστού συνδυάζεται και συμπεριλαμβάνεται υπό τη μορφή μιας εξίσωσης για το στερεό και ορίζεται ως λ_{eff} [197]. Μια τέτοια προσέγγιση απλοποιεί κατά πολύ την τις εξισώσεις του ρευστού και του στερεού καθώς επίσης και την αριθμητική τους επίλυση. Επίσης όπως αναφέραμε πιο πάνω ο συντελεστής τριβής δίνεται από την ακόλουθη σχέση [198]:

$$f_0 = 23.462 \text{Re}^{-0.6716} \quad (5.4\alpha)$$

$$Nu = 2 + 1.1 \text{Re}^{0.6} \text{Pr}^{1/3} \quad (5.4\beta)$$

Επίσης, προκειμένου να έχουμε ένα πλήρως καθορισμένο σύστημα εξισώσεων, πρέπει να οριστούν οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες. Οι απαιτούμενες αυτές συνθήκες είναι: Η εσωτερική θερμοκρασία του ρευστού να έχει καθοριστεί από πριν (π.χ 20^0C), οι θερμοκρασίες του στερεού και του ρευστού στο τέλος της κάθε φάσης της διεργασίας είναι οι ίδιες με αυτές της έναρξης της επόμενης φάσης και τέλος υποθέτεται μια συνοριακή αδιαβατική συνθήκη στα δύο άκρα του αναγεννητή. Όλες αυτές οι παραπάνω συνθήκες που αναφέραμε περιγράφονται με μαθηματικές σχέσεις ως εξής:

$$T_f(x=0, t) = T_{f, in} \quad (5.5)$$

$$T_{s, f}(x, t = P) = T_{s, f}(x, t = 0) \quad (5.6)$$

$$\left. \frac{\partial T_{s, f}}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T_{s, f}}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (5.7)$$

Ακόμη οι παρακάτω υποθέσεις λήφθηκαν υπόψη για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου: Το ρευστό είναι ασυμπίεστο, δεν υπάρχουν διακυμάνσεις της πίεσης, οι απώλειες πίεσης από και προς το περιβάλλον είναι αμελητέες, η ταχύτητα και η θερμοκρασία του ρευστού στην είσοδο

είναι σταθερές ως προς το χρόνο, ο συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας είναι σταθερός καθ' όλο το μήκος του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή, το μαγνητοθερμιδικό στερεό του αναγεννητή είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο, η μεταφορά θερμότητας εξαιτίας της ακτινοβολίας είναι αμελητέα και δεν συμβαίνουν απώλειες μεταφοράς του ρευστού. Ωστόσο, το αριθμητικό μοντέλο περιλαμβάνει και τρεις ακόμα υποθέσεις:

- Χρησιμοποιείται ένα διακριτό μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και οι διεργασίες της μαγνήτισης και της απομαγνήτισης γίνονται ακαριαία.
- Θεωρούμε πως έχουμε ένα ιδανικό σύστημα βαλβίδων και έτσι η αλλαγή στην είσοδο της παροχής μάζας είναι μια διακριτή συνάρτηση.
- Οι εξωτερικοί εναλλάκτες θερμότητας θεωρούνται ιδανικοί.

Η ακριβής λύση του παραπάνω προβλήματος είναι δύσκολο να υπολογιστεί, πράγμα που γενικά ισχύει στη συντριπτική πλειοψηφία των προβλημάτων αυτού του τύπου. Για το λόγο αυτό, γίνεται χρήση αριθμητικών μεθόδων, οι οποίες στηρίζονται στη διακριτοποίηση (discretization) του πεδίου τιμών ως προς τις μεταβλητές χώρου (x) και χρόνου (t) και την επίλυση των συστημάτων γραμμικών εξισώσεων που προκύπτουν. Μάλιστα, δεδομένου ότι τα συστήματα αυτά έχουν μορφή που διευκολύνει τη χρήση έξυπνων αλγορίθμων, με τη χρήση του Matlab μπορεί να επιτυγχάνεται η ταχεία και αποτελεσματική επίλυσή τους.

Το υλοποιηθέν μοντέλο είναι μονοδιάστατο (1-D) και για τη διακριτοποίησή του χρησιμοποιείται η πολύ γνωστή και απλή μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite differences) ως προς το χώρο (μεταβλητή x) σε συνδυασμό με την έμμεση μέθοδο του Euler για τη χρονικά εξαρτώμενη μεταβλητή (μεταβλητή t). Ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί για την προσεγγιστική επίλυση του παραπάνω μοντέλου μέσω του υπολογιστικού πακέτου της Matlab παρουσιάζεται παρακάτω:

Βήμα 0: Επιλογή παραμέτρων εισόδου

Εκχώρησε τις τιμές των παραμέτρων εισόδου: Ιδιότητες ρευστού, Ιδιότητες στερεού, Μαγνητοθερμιδικές ιδιότητες, Γεωμετρικές ιδιότητες, Παράμετροι λειτουργίας και διακριτοποίησης.

Βήμα 1: Αρχικοποίηση μεταβλητών και εισαγωγή αρχικών συνθηκών

Αρχικοποίηση μεταβλητών χρονικών βημάτων (j) και κύκλων επαναλήψεων ($k = 1$). Εισαγωγή αρχικών συνθηκών.

Βήμα 2: Μαγνητισμός (Magnetization)

Υπολογισμός διακριτών εξισώσεων μαγνητισμού.

Βήμα 3: Ροή ρευστού (Fluid flow)

Υπολογισμός διακριτών εξισώσεων ροής ρευστού και επίλυση προκύπτοντος γραμμικού συστήματος.

Βήμα 4: Απομαγνητισμός (Demagnetization)

Υπολογισμός διακριτών εξισώσεων απομαγνητισμού.

Βήμα 5: Ροή ρευστού (Fluid flow)

Υπολογισμός διακριτών εξισώσεων ροής ρευστού και επίλυση προκύπτοντος γραμμικού συστήματος.

Βήμα 6: Έλεγχος σταθερής κατάστασης (steady state)

Εάν δεν έχει επιτευχθεί σταθερή κατάσταση, αύξησε το k κατά 1, υπολόγισε εκ νέου αρχικές συνθήκες (T_f , T_s) και επέστρεψε στο Βήμα 2.

Βήμα 7: Υπολογισμός παραμέτρων εξόδου και τερματισμός

Υπολόγισε τις παραμέτρους εξόδου και σχεδιασμός γραφιδμάτων: Q_c , COP , κ.λπ. Ολοκλήρωση προγράμματος.

Ο παραπάνω αλγόριθμος, επιτυγχάνει μέσω της επίλυσης ενός γραμμικού συστήματος που διακριτοποιεί και μοντελοποιεί ταυτόχρονα τις εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του στερεού και του ρευστού, να παράξει τις προκύπτουσες θερμοκρασίες σε κάθε στάδιο της διαδικασίας που ακολουθεί ο Ενεργός Μαγνητικός Αναγεννητής (AMR - Active Magnetic Regenerator). Ύστερα από τη διακριτοποίηση οι σχέσεις (5.1) και (5.2) μπορούν να γραφτούν στην παρακάτω μορφή:

$$-K_2 \cdot T_f(i-1, j+1) + (1+K_1) \cdot T_f(i, j+1) + K_2 \cdot T_f(i+1, j+1) - K_1 \cdot T_s(i, j+1) = T_f(i, j) + |K_p| \quad (5.8)$$

$$-K_4 \cdot T_s(i-1, j+1) + (1+2 \cdot K_4 + K_3) \cdot T_s(i, j+1) - K_4 \cdot T_s(i+1, j+1) - K_3 \cdot T_f(i, j+1) = T_s(i, j) \quad (5.9)$$

Όπου οι συντελεστές K ορίζονται ως εξής:

$$K_1 = \frac{a_{eff} A_{ht} \Delta t}{m_f c_f \tau}, \quad K_2 = \frac{L \cdot \Delta t}{2 \cdot \Delta x \cdot \tau}, \quad K_3 = \frac{\alpha_{eff} \cdot A_{ht} \cdot \Delta t}{m_s \cdot c_s(T_s, B)}, \quad K_4 = \frac{\lambda_{eff} \cdot \Delta t}{\rho_s \cdot c_s(T_s, B) \cdot (1 - \varepsilon) \Delta x^2}$$

και ο συντελεστής $K_p = f \cdot \frac{2 \cdot \left(\frac{L}{\tau}\right)^3 \cdot \Delta t}{d_h \cdot c_f}$

Οι διακριτοποιημένες συνοριακές συνθήκες παίρνουν την παρακάτω μορφή:

$$T_f(i=1, j) = T_{f,in} \quad (5.10\alpha)$$

$$T_f(i=n-2, j+1) - 4 \cdot T_f(i=n-1, j+1) + 3 \cdot T_f(i=n, j+1) = 0 \quad (5.10\beta)$$

$$T_s(i=n-2, j+1) - 4 \cdot T_s(i=n-1, j+1) + 3 \cdot T_s(i=n, j+1) = 0 \quad (5.10\gamma)$$

$$-T_s(i=3, j+1) + 4 \cdot T_s(i=2, j+1) - 3 \cdot T_s(i=1, j+1) = 0 \quad (5.10\delta)$$

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τα βασικά χαρακτηριστικά που αφορούν το υπολογιστικό μοντέλο του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή το οποίο επιλύσαμε.

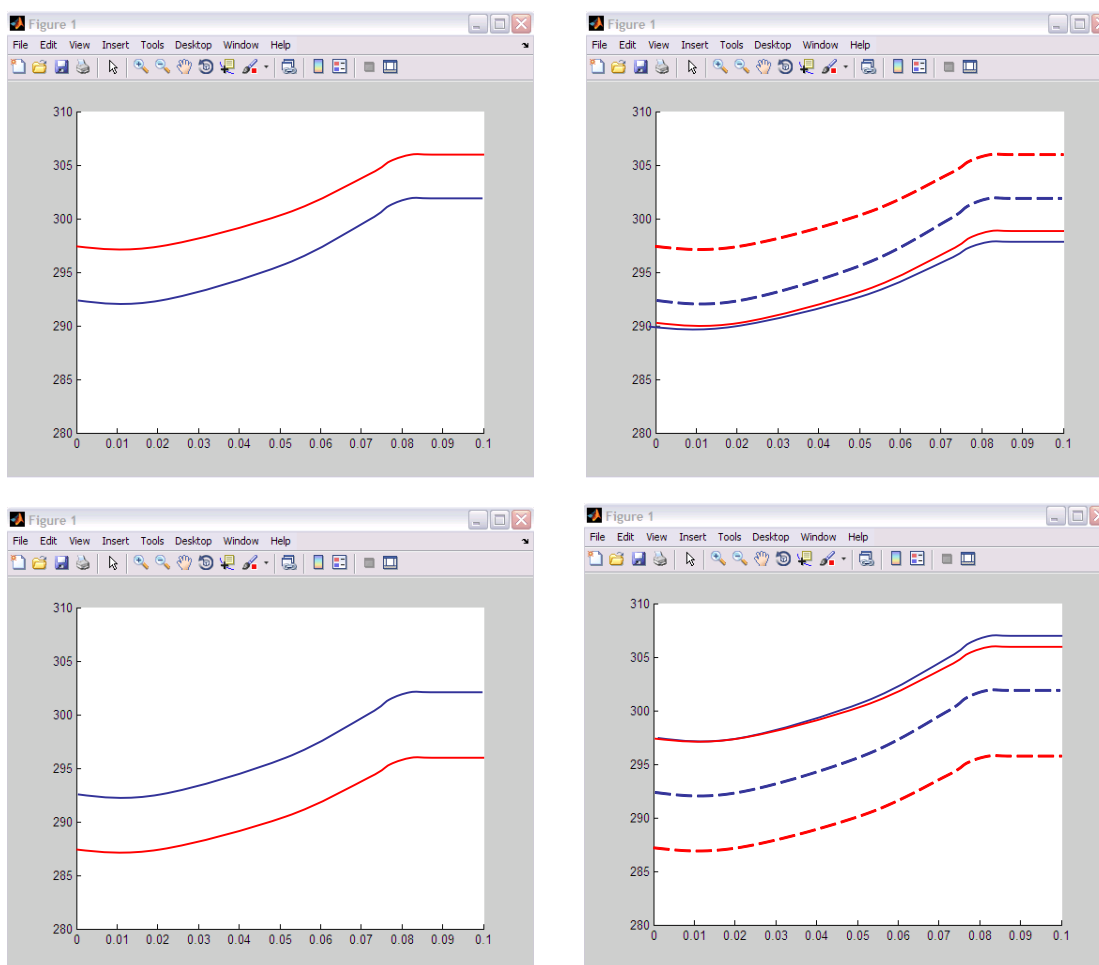
Μεταβαλλόμενο Μαγνητικό Πεδίο	0.0001-1 T
Μαγνητοθερμιδικό Υλικό	Γαδολίνιο (Gd)
Μάζα του μαγνητοθερμιδικού υλικού	0.18 kg
Διαστάσεις Αναγεννητή	0.01×0.05×0.001 m
Πορότητα	0.15
Ρευστό μεταφοράς θερμότητας	Νερό
Θερμοκρασία εισόδου	20 ⁰ C

Πίνακας 5.1: Βασικές παράμετροι λειτουργίας του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του κώδικα

5.2 Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε σημαντικά ευρήματα που έχουν προκύψει από την υλοποίηση του αλγορίθμου που πραγματοποιήθηκε, όπως αυτός παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.1 και με βάση τις υποθέσεις που έχουν αναφερθεί στην αρχή του κεφαλαίου.

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που περιγράφεται στο σχήμα 5.1 είναι το προφίλ θερμοκρασιών των υλικών (ρευστού και στερεού) κατά τη διάρκεια της ευσταθούς λειτουργίας του AMR συστήματος. Το μαγνητικό πεδίο που έχει εφαρμοστεί είναι 1 Tesla και στους δύο άξονες των γραφημάτων απεικονίζονται το μήκος του στερεού (L) στον οριζόντιο άξονα (0.1 m) και η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin στον κάθετο άξονα. Το πρώτο από τα τέσσερα γραφήματα παρουσιάζει το εύρος θερμοκρασιών του γαδολινίου (κόκκινη γραμμή) και του νερού (μπλε γραμμή) κατά την πρώτη φάση της διαδικασίας του AMR, δηλαδή κατά τη φάση του μαγνητισμού. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του στερεού(γαδολινίου) αυξάνεται εξαιτίας της μαγνητοθερμικής επίδρασης και είναι της τάξεως των 4 K περίπου. Ακολουθεί η δεύτερη φάση, κατά την οποία το νερό που διοχετεύεται από την ψυχρή προς τη θερμή πηγή απορροφά μέρος της αυξημένης θερμοκρασίας του γαδολινίου, ψύχοντάς το. Το δεύτερο γράφημα παρουσιάζει το εύρος θερμοκρασιών του γαδολινίου και του νερού κατά τη φάση αυτή της διαδικασίας. Είναι χαρακτηριστικό ότι τόσο η θερμοκρασία του νερού όσο και του γαδολινίου μειώνονται, και λαμβάνουν τιμές πολύ κοντά στις αρχικές του τιμές που ήταν τα 293 K. Στην τρίτη φάση, υλοποιείται η διαδικασία του απομαγνητισμού κατά την οποία πέφτει ξανά η θερμοκρασία του γαδολινίου για να ακολουθήσει η ροή του νερού από τη θερμή προς την ψυχρή πηγή (τέταρτη φάση), η οποία θερμαίνει εκ νέου το γαδολίνιο, για να ολοκληρώσει έτσι τον κύκλο του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή. Το τρίτο και τέταρτο γράφημα παρουσιάζουν αντίστοιχα το εύρος θερμοκρασιών του γαδολινίου και του νερού για τις δύο αυτές φάσεις. Τα διαγράμματα αυτά που αφορούν το θερμοκρασιακό προφίλ του αναγεννητή παρουσιάζονται στην επόμενη σελίδα.



Σχήμα 5.1: Παρουσιάζονται τα προφίλ θερμοκρασιών του ρευστού(μπλε γραμμή) και του γαδολινίου(κόκκινη γραμμή) κατά τις 4 διεργασίες του κύκλου του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή. Οι διακεκομμένες γραμμές αναπαριστούν τα προφίλ των θερμοκρασιών στην αρχή της κάθε φάσης, ενώ οι συμπαγείς τα αντίστοιχα προφίλ στο τέλος της κάθε φάσης.

Η λειτουργία ενός ενεργού μαγνητικού αναγεννητή επηρεάζεται από ποικίλους και ανεξάρτητους παράγοντες, όπως είναι η παροχή μάζας, η συχνότητα λειτουργίας της ψυκτικής μηχανής, η αλλαγή του μαγνητικού πεδίου, οι ιδιότητες του μαγνητοθερμιδικού υλικού και του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας, οι διαστάσεις και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αναγεννητή, η θερμοκρασία του θερμού εναλλάκτη θερμότητας και από πολλούς άλλους παράγοντες. Προκειμένου να αποφύγουμε μια πολυπαραμετρική ανάλυση και η οποία ίσως να ήταν και αδύνατο να υλοποιηθεί η ανάλυση επικεντρώθηκε αρχικά στη βελτιστοποίηση της παροχής μάζας και της συχνότητας λειτουργίας ενός ενεργού μαγνητικού αναγεννητή.

Το ψυκτικό φορτίο και ο συντελεστής ψυκτικής ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [196]:

$$\dot{Q}_c = \frac{1}{2P} \int_p^{2P} \dot{m}_f \cdot c_f \cdot (T_{CHEX} - T_f)(x=0, t) \cdot dt \quad (5.11)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{(\dot{Q}_h - \dot{Q}_c) + W_{pump}} \quad (5.12)$$

όπου, η διαφορά μεταξύ του θερμικού φορτίου ($\dot{Q}_h$) και του ψυκτικού φορτίου ($\dot{Q}_c$) αναπαριστά το εφαρμοζόμενο μαγνητικό έργο και τις απώλειες τριβής της ροής του ρευστού. Το ψυκτικό φορτίο που υπολογίζεται μέσω της σχέσης (5.11) ορίζεται ουσιαστικά κατά τη διάρκεια της ισοεντατικής διεργασίας μεταφοράς της θερμότητας και επιπλέον ενσωματώνεται καθ' όλο το κύκλο του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή. Το έργο που απαιτείται για την άντληση του ρευστού διαμέσου του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή ορίζεται ως εξής:

$$W_{pump} = \frac{\dot{m}_f \Delta p}{\rho_f \eta} \quad (5.13)$$

,όπου Δp είναι η πτώση πίεσης της αντλίας σε [Pa] και με η συμβολίζουμε το βαθμό απόδοσης της αντλίας.

Κρίνεται απαραίτητο ακόμα να ορίσουμε και το θερμικό φορτίο το οποίο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

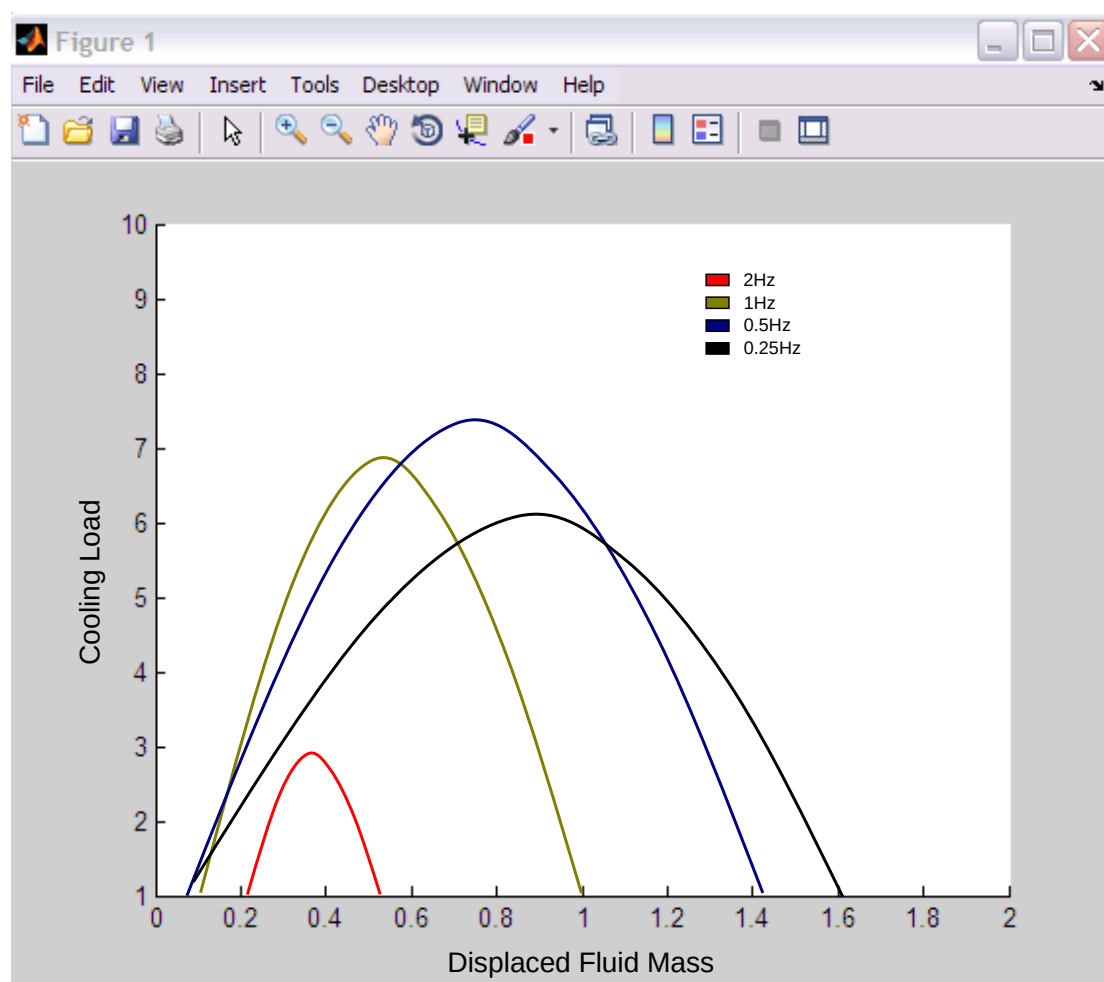
$$\dot{Q}_h = \frac{1}{2P} \int_0^P \dot{m}_f \cdot c_f \cdot (T_f(x=L, t) - T_{HHEX}) \cdot dt \quad (5.14)$$

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε τόσο για το ψυκτικό φορτίο όσο και για το συντελεστή ψυκτικής ισχύος έγιναν για δύο διαφορετικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία, εντάσεως 4 και 6 [T] αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για διάφορες συχνότητες λειτουργίας σε σχέση με την αναλογία του εκτοπισμένου ρευστού V^* και η οποία ορίζεται ως εξής [199]:

$$V^* = \frac{\dot{m}_f \cdot P}{\rho_f \cdot V_{AMR} \cdot \varepsilon} \quad (5.15)$$

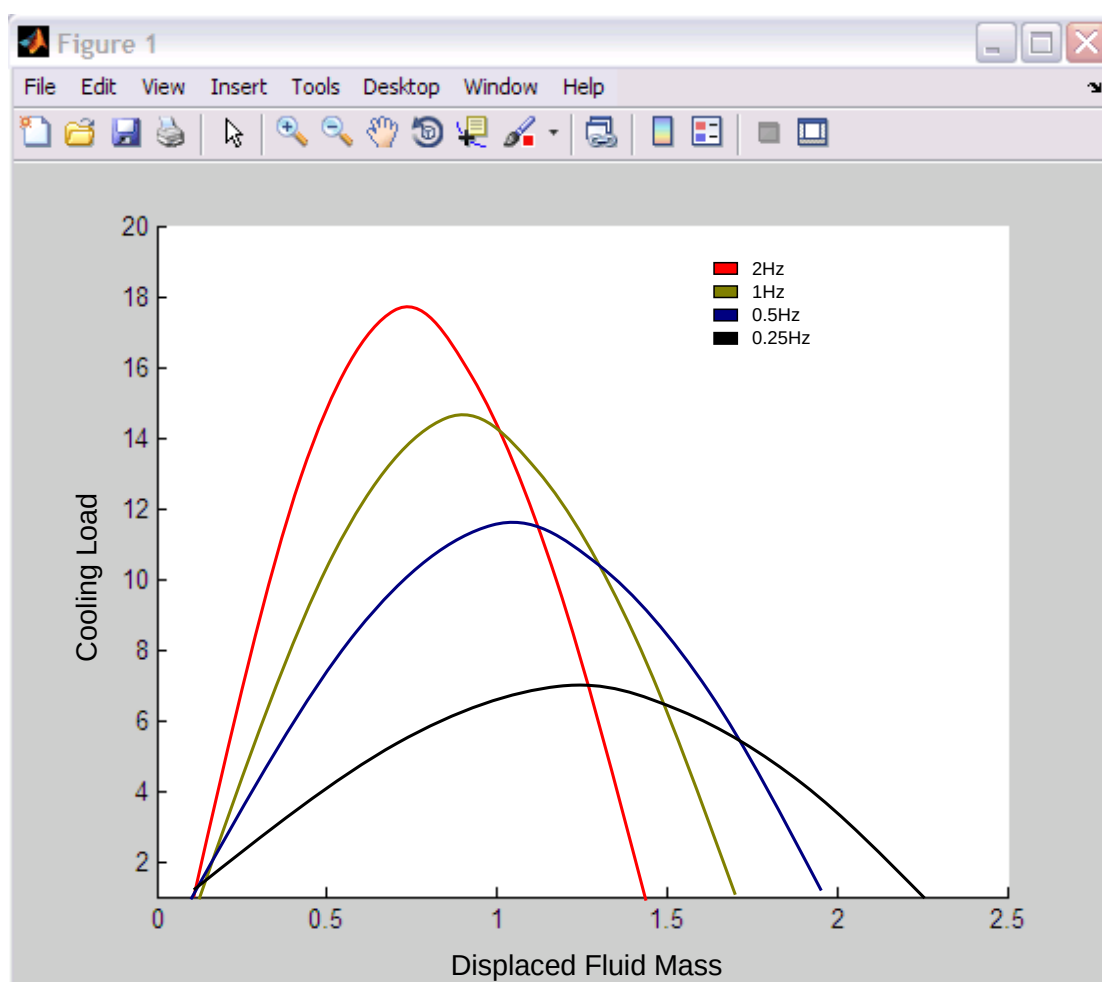
,όπου με P συμβολίζεται ο χρόνος του κύκλου μιας περιόδου του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας σε [s] και με V_{AMR} συμβολίζουμε τον όγκο του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή σε [m³].

Έτσι λοιπόν παρακάτω παρουσιάζονται αυτές οι γραφικές παραστάσεις του ψυκτικού φορτίου και του COP συναρτήσει της αδιάστατης ποσότητας V^* για διάφορες συχνότητες λειτουργίας (από 0.25-2 Hz) για μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εντάσεως 4 και 6 Tesla.



Σχήμα 5.2: Παραγόμενο φορτίο ψύξης (cooling load) ως συνάρτηση του αδιάστατου αριθμού απόρριψης μάζας του ρευστού (displaced fluid mass), V^* για εφαρμοζόμενο πεδίο 6 Tesla σε τέσσερις διαφορετικές συχνότητες 0.25 – 2 Hz.

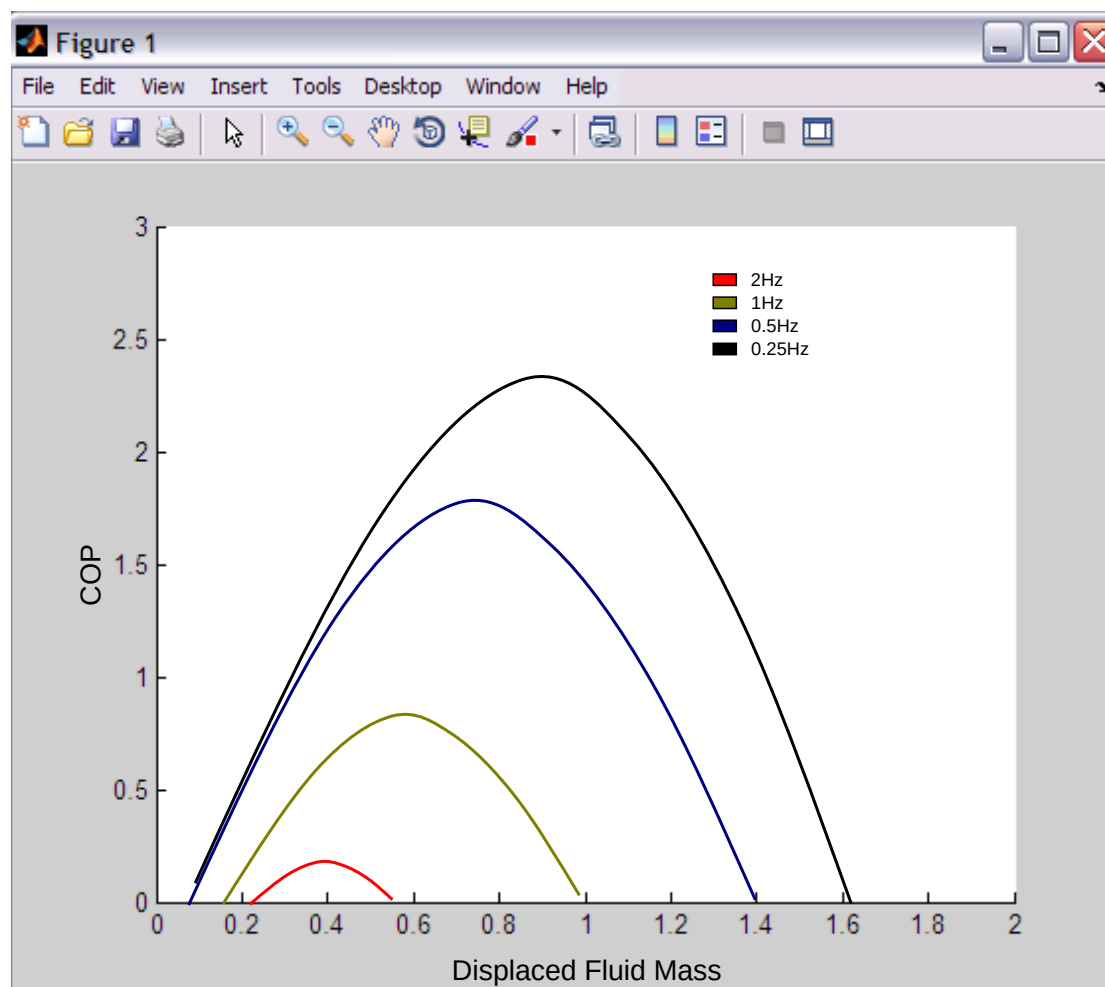
Εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως το παραγόμενο φορτίο είναι ανάλογο της συχνότητας, καθώς όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο αυξάνεται και η τιμή του ψυκτικού φορτίου και για συχνότητα 0.5 Hz λαμβάνει μια μέγιστη τιμή που ισούται περίπου με 7.4 W. Ο λόγος για τον οποίο μετά τα 0.5 Hz δεν παρατηρούμε αύξηση, αλλά έχουμε μια μείωση του $\dot{Q}_c$ οφείλεται στο γεγονός ότι εφαρμόζουμε μαγνητικό πεδίο 6 T, ενώ όπως θα παρατηρούμε στο επόμενο σχήμα 5.3, όταν εφαρμόσουμε μαγνητικό πεδίο εντάσεως 4 T τότε δεν υφίσταται αυτό το πρόβλημα. Επιπλέον, παρατηρούμε πως υφίσταται πάντα μία βέλτιστη τιμή του αδιάστατου αριθμού απ' απόρριψης μάζας του ρευστού (V^*) για την οποία επιτυγχάνεται το μέγιστο φορτίο ψύξης και η οποία για παράδειγμα για συχνότητα 0.5 Hz είναι περίπου 0.8.



Σχήμα 5.3: Παραγόμενο ψυκτικό φορτίο $\dot{Q}_c$ (cooling load) ως συνάρτηση του αδιάστατου αριθμού απόρριψης μάζας του ρευστού V^* για εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο εντάσεως 4 Tesla σε τέσσερις διαφορετικές συχνότητες 0.25 – 2 Hz.

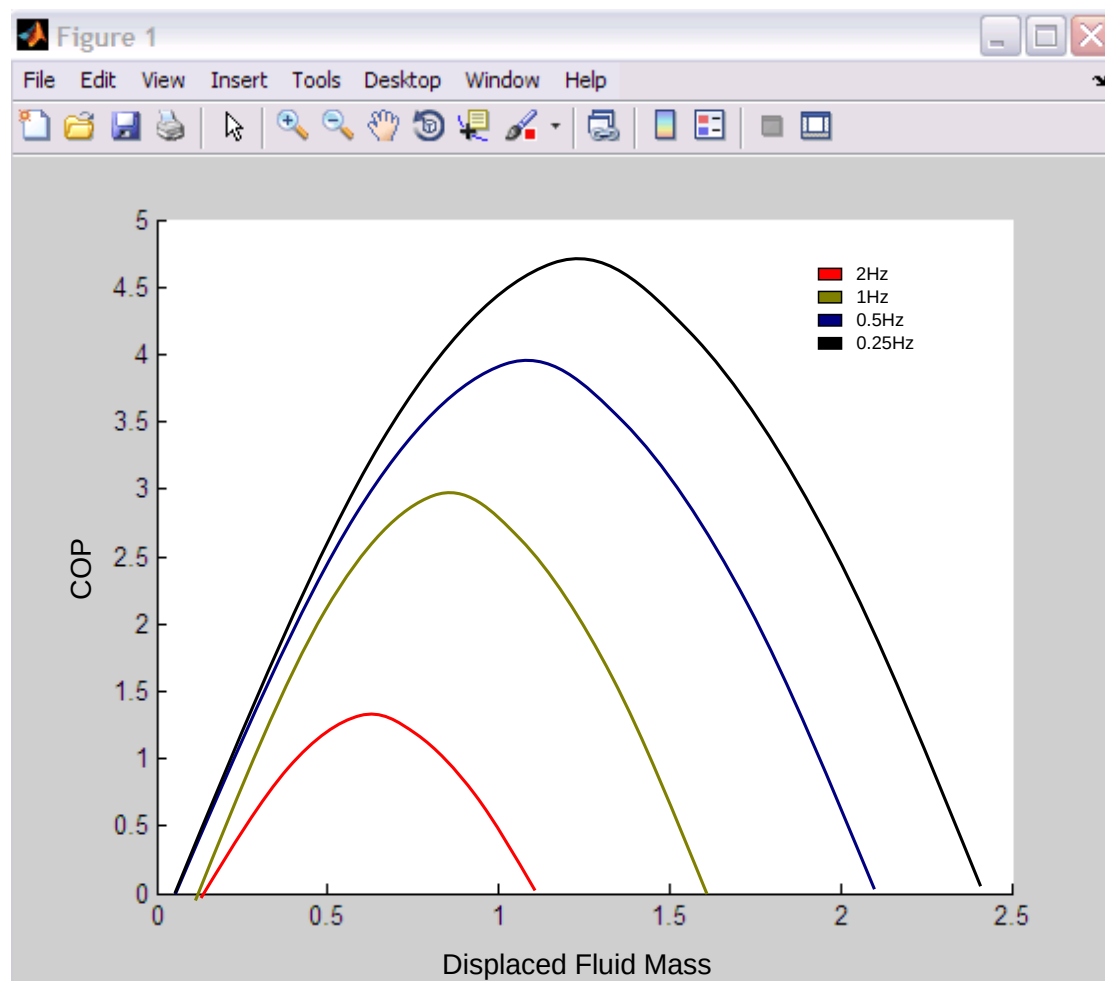
Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται και πάλι το φορτίο ψύξης συναρτήσει του αδιάστατου αριθμού απόρριψης μάζας του ρευστού και της συχνότητας για εφαρμοζόμενο πεδίο 4 Tesla. Μπορεί να παρατηρήσει κανείς εύκολα ότι το παραγόμενο φορτίο είναι ανάλογο της συχνότητας λειτουργίας της συσκευής και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του για συχνότητα 2 Hz περίπου. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ψυκτικό φορτίο 18W. Αξίζει να αναφερθεί πως σε σχέση με το προηγούμενο διάγραμμα στα 6 T παρατηρείται μια αύξηση του μεγίστου φορτίου ψύξης που παρατηρήθηκε κατά 140%. Επίσης, η βέλτιστη τιμή του λόγου απόρριψης μάζας του ρευστού για την οποία επιτυγχάνεται το μέγιστο φορτίο ψύξης στην εν λόγω συχνότητα είναι περίπου ίσο με 0.7, τιμή συγκρίσιμη με αυτή του προηγούμενου διαγράμματος που ήταν 0.8 .

Το τελευταίο μέγεθος που υπολογίζεται και απεικονίζεται στο σχήμα 5.4, είναι ο Συντελεστής Ψυκτικής Απόδοσης (Coefficient Of Performance - COP) και πάλι ως συνάρτηση του αδιάστατου αριθμού απόρριψης μάζας του ρευστού (displaced fluid mass) για εφαρμοζόμενο πεδίο 6 Tesla σε τέσσερις διαφορετικές συχνότητες 0.25 – 2 Hz. Η εν λόγω μέτρηση καταδεικνύει ότι, η αυξημένη συχνότητα περιορίζει την αποτελεσματικότητα της ψύξης, καθώς για παράδειγμα ο COP που επιτυγχάνεται για συχνότητα 1Hz, έχει μέγιστη τιμή της τάξεως του 0.85, όταν ο εν λόγω συντελεστής για συχνότητα 2 Hz έχει μέγιστη τιμή κάτω από 0.2. Επίσης, παρατηρούμε πως ο συντελεστής ψυκτικής απόδοσης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του για συχνότητα 0.25 Hz και ισούται περίπου με 2.5. Όσο αναφορά τώρα τη βέλτιστη τιμή του αδιάστατου αριθμού V^* , είναι εμφανές ότι και αυτός λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του για τη συχνότητα των 0.25 Hz και είναι ίσος με 0.9 . Μια ακόμα βασική παρατήρηση είναι ότι το εύρος του V^* μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας , καθώς για 0.25 Hz έχουμε ένα εύρος τιμών από 0.1-1.6, ενώ για τα 2 Hz αυτό το εύρος περιορίζεται μεταξύ των τιμών 0.2-0.55. Τέλος αξίζει να αναφερθεί πως ο λόγος για τον οποίο ο COP είναι αντιστρόφως ανάλογος με τη συχνότητα είναι το γεγονός ότι η βέλτιστη παροχή μάζας στην οποία παρατηρείται ο μέγιστος συντελεστής ψυκτικής ισχύος αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας, παρά το γεγονός ότι ο βέλτιστος αριθμός απορριπτόμενης μάζας ρευστού μειώνεται. Με άλλα λόγια υψηλές συχνότητες και παροχές μάζας μειώνουν τον μέγιστο COP .



Σχήμα 5.4: Γραφική παράσταση του Συντελεστής Ψυκτικής Απόδοσης (Coefficient Of Performance - COP) ως συνάρτηση του V^* (displaced fluid mass) για εφαρμοζόμενο πεδίο 6 Tesla σε τέσσερις διαφορετικές συχνότητες 0.25 – 2 Hz.

Η εν λόγω μέτρηση του COP επαναλαμβάνεται και απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5 και πάλι ως συνάρτηση του αριθμού απόρριψης μάζας του ρευστού και για τέσσερις διαφορετικές συχνότητες, για εφαρμοζόμενο όμως πεδίο αυτή τη φορά ίσο προς 4 Tesla. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μικρότερο μαγνητικό πεδίο παρέχει βελτιωμένο COP (για παράδειγμα μέγιστο COP ίσο με 4 W περίπου για συχνότητα 0.5 Hz, υπερδιπλάσιο σε σύγκριση με το μέγιστο COP που επιτυγχάνεται στην ίδια συχνότητα με εφαρμογή μαγνητικού πεδίου 6 Tesla όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4). Μέγιστη τιμή του COP επιτυγχάνεται για συχνότητα 0.25 Hz και ισούται με 4.7, αυξημένη κατά 88% σε σχέση με τον αντίστοιχο COP του σχήματος 5.4 στα 6 Tesla.



Σχήμα 5.5: Γραφική παράσταση του Συντελεστή Ψυκτικής Απόδοσης (COP) ως συνάρτηση του V^* (displaced fluid mass) για εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο εντάσεως 4 Tesla σε τέσσερις διαφορετικές συχνότητες 0.25 – 2 Hz.

5.3 Συμπεράσματα

Σε αυτό εδώ το κεφάλαιο παρουσιάστηκε η υλοποίηση του μονοδιάστατου μοντέλου μαγνητικής ψύξης που προτάθηκε από τον Tusek [196] και η αριθμητική επίλυση του προβλήματος της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς αναγεννητή AMR ενός μαγνητικού ψύκτη με χρήση του εν λόγω μοντέλου και των κατάλληλων προσεγγιστικών μεθόδων. Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού Matlab. Ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε χρησιμοποιεί τις απαιτούμενες παραμέτρους όπως είναι οι ιδιότητες ρευστού και του στερεού, οι μαγνητοθερμικές και γεωμετρικές ιδιότητες και οι κατάλληλες παράμετροι λειτουργίας και διακριτοποίησης. Για τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν οι διακριτές

εξισώσεις ροής του ρευστού οι οποίες οδήγησαν στην επαναληπτική επίλυση του προκύπτοντος γραμμικού συστήματος, έως ότου το σύστημα εισέλθει σε ευσταθή κατάσταση.

Ένα από τα σημαντικότερα ευρήματα της παρούσας υλοποίησης είναι το προφίλ θερμοκρασιών των υλικών (ρευστού και στερεού) κατά τη διάρκεια της ευσταθούς λειτουργίας του AMR συστήματος για προκαθορισμένες τιμές μαγνητικού πεδίου στην περίπτωση που το στερεό είναι γαδολίνιο και το ρευστό είναι νερό σε αρχική θερμοκρασία δωματίου. Ένα αρκετά υψηλό εύρος θερμοκρασιών έχει επιτευχθεί με χρήση του εν λόγω μοντέλου για τον ενεργό μαγνητικό αναγεννητή (AMR), πράγμα ιδιαίτερα ενθαρρυντικό αν συνυπολογίσει κανείς ότι χρησιμοποιήθηκαν ρεαλιστικά μαγνητικά πεδία και υποθέσεις που δεν είναι δύσκολο να ισχύσουν στην πράξη.

Εξετάστηκε ακόμη το φορτίο ψύξης που επιτυγχάνεται από το συγκεκριμένο μοντέλο, ως συνάρτηση του αδιάστατου αριθμού απόρριψης μάζας του ρευστού (displaced fluid mass) και της συχνότητας, για ενδεικτικά προεπιλεγμένα μαγνητικά πεδία. Προκύπτει από την εν λόγω εξέταση ότι, το παραγόμενο φορτίο λαμβάνει μέγιστη τιμή για μία συγκεκριμένη βέλτιστη τιμή του αριθμού απόρριψης μάζας του ρευστού.

Τέλος υπολογίστηκε ο Συντελεστής Αποδοτικότητας (Coefficient Of Performance - COP), ως συνάρτηση του αριθμού απόρριψης μάζας του ρευστού, για προεπιλεγμένα εφαρμοζόμενα πεδία και συχνότητες. Η εν λόγω μέτρηση κατέδειξε ότι η αυξημένη συχνότητα και η παροχή μάζας του ρευστού μεταφοράς της θερμότητας περιορίζουν την αποτελεσματικότητα της ψύξης, ενώ επιπλέον παρατηρήθηκε ότι μικρότερα μαγνητικά πεδία παρέχουν βελτιωμένο COP όταν οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές.

Συμπερασματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η συγκεκριμένη εργασία συνεισφέρει στο πεδίο της υλοποίησης δυναμικών AMR προβλημάτων, επιβεβαιώνει χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα των εν λόγω μοντέλων και καταδεικνύει τις δυνατότητες που έχει η συγκεκριμένη τεχνολογία να χρησιμοποιηθεί στην πράξη, δεδομένης της συνεχιζόμενης ερευνητικής δραστηριότητας και των ενθαρρυντικών αποτελεσμάτων για δυνατότητα ψύξης σε θερμοκρασίες κοντά στις οποίες λειτουργούν οι οικιακές και επαγγελματικές συσκευές ψύξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΜΑΓΝΗΤΕΣ

Ο μαγνήτης αποτελεί τη βασική συνιστώσα για τη λειτουργία κάθε μαγνητικού συστήματος ψύξης. Ωστόσο, μέχρι στιγμής ο σχεδιασμός του μαγνήτη δεν φαίνεται να αποτελεί προτεραιότητα στις περισσότερες συσκευές μαγνητικής ψύξης και λίγες έρευνες έχουν διεξαχθεί για τον καθορισμό των απαιτήσεων και την βελτιστοποίηση στο σχεδιασμό μαγνητών που σχετίζονται με τη μαγνητική ψύξη. Ο μαγνήτης αποτελεί επίσης ένα από τα πιο ακριβά μέρη ενός μαγνητικού ψυγείου και επηρεάζει το συνολικό βάρος και μέγεθος της συσκευής.

6.1 Χαρακτηριστικά-Απαιτήσεις Μαγνητών

Υπάρχουν ορισμένες απαιτήσεις που κάθε μαγνήτης ο οποίος χρησιμοποιείται σε μια συσκευή μαγνητικής ψύξης πρέπει να τις ικανοποιεί. Το ιδανικό θα είναι ο σχεδιασμός ενός μαγνήτη να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε θέση να δημιουργεί ένα αρκετά ισχυρό μαγνητικό πεδίο χρησιμοποιώντας όσο το δυνατό μικρότερη ποσότητα μαγνητικού υλικού, μειώνοντας έτσι και το κόστος της συσκευής καθώς και το συνολικό της μέγεθος και βάρος.

Δυστυχώς όμως αυτές οι δύο απαιτήσεις που προαναφέραμε είναι αρκετά αντιφατικές, αφού προκειμένου να δημιουργήσουμε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο πάνω στη συσκευή απαιτείται μεγάλη ποσότητα μαγνητικού υλικού.

Μια άλλη απαίτηση και η οποία επηρεάζει το μαγνητικό σχεδιασμό είναι το ότι πρέπει να υπάρχει συνεχής αξιοποίηση από το μαγνητικό ψυγείο του μαγνητικού πεδίου που παράγεται μιας και ο μαγνήτης είναι από μόνος του πάρα πολύ ακριβός. Αυτό αποτελεί τόσο θέμα σχεδιασμού του αναγεννητή όσο και του μαγνήτη. Αξίζει σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι υπάρχουν ορισμένοι μαγνήτες που επιτρέπουν μεγαλύτερο χρόνο αξιοποίησης του πεδίου που δημιουργούν συγκριτικά με ορισμένους άλλους.

6.2 Δημιουργία Μαγνητικού Πεδίου

Μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα μαγνητικό πεδίο είτε χρησιμοποιώντας ένα μόνιμο μαγνήτη είτε με τη βοήθεια ενός ηλεκτρομαγνήτη. Η δεύτερη μέθοδος μπορεί να υποδιαιρεθεί σε 2 κατηγορίες: την υπεραγώγιμη και την μη-υπεραγώγιμη ηλεκτρομαγνήτιση. Οι τρεις παραπάνω τύποι μαγνητών έχουν χρησιμοποιηθεί σε μαγνητικές ψυκτικές συσκευές. Η πρώτη μαγνητική ψυκτική συσκευή που κατασκευάστηκε χρησιμοποιούσε έναν υπεραγώγιμο μαγνήτη [7], ενώ στη συνέχεια κατασκευάστηκαν και άλλες συσκευές που χρησιμοποίησαν μαγνήτη τέτοιου τύπου [23,51]. Έχουν επίσης κατασκευαστεί και συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούσαν μη-υπεραγώγιμους μαγνήτες [78,] αλλά η μεγαλύτερη πλειοψηφία των μαγνητικών ψυγείων που κατασκευάστηκαν τα τελευταία χρόνια χρησιμοποίησαν μόνιμους μαγνήτες για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου [45,55,61,68,69,70,71,76,78,79,82,200,201,202].

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι αυτοί οι οποίοι προτιμώνται περισσότερο στις μαγνητικές ψυκτικές συσκευές επειδή δεν απαιτείται πρόσδοση ισχύος για να δημιουργήσουν μαγνητικό πεδίο, είναι μικροί σε μέγεθος και επιτρέπουν έναν συμπαγή σχεδιασμό για το μαγνητικό ψυγείο. Όσο αφορά την απαίτηση ισχύος ενός μόνιμου μαγνήτη πρέπει να συγκριθεί με έναν ηλεκτρομαγνήτη στον οποίο χρειάζεται η πρόσδοση μιας μεγάλης ποσότητας ισχύος για τη δημιουργία π.χ ενός μαγνητικού πεδίου εντάσεως 1T. Αυτό μπορεί να φανεί και από την σχέση που συνδέει την ένταση του ρεύματος I με το μαγνητικό πεδίο B που δημιουργείται από έναν σωληνοειδή ηλεκτρομαγνήτη σε ένα ενιαίο μαγνητικό κύκλωμα αποτελούμενο από έναν πυρήνα μαλακών μαγνητικών υλικών.

$$NI = B \frac{L_{core}}{\mu_r \mu_0} + \frac{L_{gap}}{\mu_0} \quad (6.1),$$

όπου N είναι ο αριθμός των ελικοειδών στροφών, μ_r η σχετική διαπερατότητα, L_{core} είναι το μήκος του μαλακού μαγνητικού υλικού, μ_0 είναι η διαπερατότητα του κενού και L_{gap} το μήκος του διακένου.

Ας πάρουμε το ακόλουθο παράδειγμα για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου εντάσεως 1T. Υποθέτουμε μήκος διακένου 30 mm το οποίο είναι σύνηθες για μια μαγνητική ψυκτική συσκευή, έναν σιδερένιο σωληνοειδή πυρήνα με $\mu_r=4000$ και ο οποίος έχει $N=24000$. Το μήκος του μαλακού μαγνητικού υλικού είναι ασήμαντο καθώς η σχέση εξαρτάται από τον

δεύτερο όρο. Ένας τέτοιος λοιπόν ηλεκτρομαγνήτης με 24000 περιτυλίγματα χρειάζεται μια μαζική τροφοδοσία και ένα εξίσου μεγάλο ψυγείο για να αποτρέψει την υπερθέρμανση του πηνίου. Βασισμένοι σε αυτό το απλό παράδειγμα μπορούμε να καταλάβουμε γιατί οι ηλεκτρομαγνήτες αποφεύγονται στις περισσότερες μαγνητικές ψυκτικές συσκευές.

Ο υπεραγώγιμος ηλεκτρομαγνήτης αποτελεί όμως μια καλύτερη επιλογή συγκριτικά με τον απλό ηλεκτρομαγνήτη καθώς απαιτείται λιγότερη ισχύ για την λειτουργία του. Μπορεί να παράγει μαγνητικό πεδίο εντάσεως μεγαλύτερο από 10 T αλλά αυτό αποτελεί και ένα μειονέκτημα διότι για τη λειτουργία του απαιτείται συνεχής ψύξη. Αυτό μπορεί να είναι μια πολύ δαπανηρή διαδικασία καθώς η συσκευή ψύξης γύρω από τον υπεραγώγιμο μαγνήτη κρίνεται απαραίτητη. Ωστόσο για εφαρμογές μεγάλης εκτάσεως όπως μεγάλα ψυγεία για αποθήκες κ.λ.π. ένας υπεραγώγιμος ηλεκτρομαγνήτης μπορεί να αποτελέσει μια πολύ καλή λύση. Για κοινές οικιακές εφαρμογές ο υπεραγώγιμος ηλεκτρομαγνήτης δεν αποτελεί ακόμα μια αξιόπιστη λύση.

Βασισμένοι στη προηγούμενη ανάλυση γίνεται εύκολα κατανοητός ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται οι μόνιμοι μαγνήτες για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου στις περισσότερες μαγνητικές ψυκτικές συσκευές.

6.2.1. Ιδιότητες των Μαγνητικών Υλικών

Ένα μαγνητικό υλικό είναι ένα υλικό το οποίο έχει μια μαγνήτιση, M , η οποία είναι η μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου και είναι διάφορη του μηδενός. Αυτή η μαγνήτιση μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα υλικό όταν αυτό υποβάλλεται σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο ή μπορεί να αφορά μια μόνιμη ιδιότητα του υλικού. Η βασική ποσότητα που χρησιμοποιούμε για να χαρακτηρίζουμε το μαγνητισμό είναι το διάνυσμα B , όπου εδώ αποκαλείται "μαγνητική πυκνότητα ροής" και συμβολίζεται με το γράμμα B . Αυτή είναι και η ποσότητα που εμφανίζεται στις εξισώσεις του Maxwell για τον ηλεκτρομαγνητισμό. Ωστόσο, μέσα στα μαγνητικά υλικά μπορεί κανείς να ορίσει ένα νέο διάνυσμα που αποτελεί την τροποποίηση του B λόγω της μαγνήτισης του ίδιου του υλικού. Αυτό το νέο διάνυσμα αποκαλείται "μαγνητικό πεδίο" και συμβολίζεται με το γράμμα H . Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής και το μαγνητικό πεδίο μέσα σε ένα μαγνητικό υλικό σχετίζονται με τη μαγνήτιση μέσω της ακόλουθης σχέσεως:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (6.2)$$

Αυτή η εξίσωση είναι ο ορισμός του H . Στο κενό οι ποσότητες B και H είναι ανάλογες καθώς δεν υπάρχει η επίδραση της μαγνήτισης. Η σταθερά της αναλογίας αυτής ονομάζεται διαπερατότητα του κενού, συμβολίζεται με μ_0 , και παίρνει τιμή ίση $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^2$. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής μετράται σε τέσλα [T], ενώ το μαγνητικό πεδίο μετράται σε αμπέρ ανά μέτρο [A/m].

Η σχέση που δίνεται στην παραπάνω εξίσωση μεταξύ της ροϊκής μαγνητικής πυκνότητας και του μαγνητικού πεδίου συνήθως εμφανίζεται σαν μια καμπύλη $B(H)$ δηλαδή η πυκνότητα μαγνητικής ροής ενός υλικού σαν συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου. Σε ορισμένα μαγνητικά υλικά η σχέση μεταξύ των B και H δεν θα αποτελεί μια συνάρτηση, αλλά ακόμη και σε αυτή την περίπτωση θα εξαρτάται από το υλικό. Σε μια τέτοια περίπτωση το μαγνητικό υλικό λέμε ότι παθαίνει υστέρηση. Αν το μαγνητικό υλικό διατηρεί τη μαγνήτισή του όταν το μαγνητικό πεδίο απομακρύνεται τότε το υλικό αυτό αποκαλείται ως "σκληρό" μαγνητικό υλικό, ενώ όταν λίγη ή καθόλου μαγνήτιση παραμένει τότε αποκαλείται ως "μαλακό" μαγνητικό υλικό. Ένα σκληρό μαγνητικό υλικό είναι ουσιαστικά ένας μόνιμος μαγνήτης. Η διαφορά που έγκειται μεταξύ των δύο αυτών τύπων μαγνητικών υλικών μπορεί να φανεί ξεκάθαρα στην καμπύλη $B(H)$. Η τομή της καμπύλης με τον Β-άξονα, δηλαδή εκεί που $H=0$ αποκαλείται ως παραμένουσα μαγνήτιση του υλικού, B_{rem} , και είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής την οποία παράγει το υλικό ακόμα και αν δεν υποκινείται από εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Το σημείο στο οποίο η καμπύλη τέμνει τον άξονα- H , δηλαδή εκεί όπου $B=0$ καλείται συνεκτικό, H_c , και σε αυτό το σημείο δεν υπάρχει πυκνότητα μαγνητικής ροής μέσα στο μαγνήτη. Ωστόσο ένα ακόμα μεγαλύτερο μαγνητικό πεδίο ίσως απαιτείται για να αντιστρέψει την κατεύθυνση της μαγνήτισης. Αυτό αντιπροσωπεύει το σημείο πάνω στην καμπύλη $M(H)$ όπου $M=0$ και ονομάζεται εγγενή συνεκτικό σημείο, $H_{c,i}$, και αυτή η ιδιότητα είναι πολύ σημαντική για έναν μόνιμο μαγνήτη. Οι ιδιότητες του μαγνήτη καλούνται επίσης και ως σημείο εργασίας του μαγνήτη, το οποίο θα βρίσκεται κάπου κατά μήκος της καμπύλης $B(H)$. Η περιοχή στο δεύτερο τεταρτημόριο της καμπύλης $B(H)$ ονομάζεται περιοχή μεγίστης ενεργειακής πυκνότητας και είναι το ιδανικό σημείο λειτουργίας για το μαγνήτη καθώς εκεί η ενεργειακή πυκνότητα παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Οι ιδιότητες ενός σκληρού μαγνητικού υλικού παρουσιάζονται στο σχήμα 6.1

Η διαπερατότητα που συμβολίζεται με " μ " είναι το μέγεθος που συνδέει το B με το H , δηλαδή $B=\mu \cdot H$, όπου ο " μ " είναι ένας τανιστής και μια συνάρτηση του H και με αυτό τον τρόπο η μαγνήτιση του υλικού συμπεριλαμβάνεται στο μ . Η διαπερατότητα δίνεται συνήθως ως σχετική διαπερατότητα, η οποία είναι μια αδιάστατη ποσότητα και ορίζεται ως $\mu_r=\mu/\mu_0$. Αυτή η σχέση μεταξύ του B και του H είναι ισοδύναμη με τον

ορισμό που έχουμε μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και μαγνήτισης και δίνεται από την ακόλουθη σχέση: $M = \chi_m H$, όπου με χ_m ορίζουμε έναν τανιστή που τον ονομάζουμε τανιστή ευαισθησίας. Έτσι λοιπόν, έχουμε ότι $\mu = \mu_0(1 + \chi_m)$. Γράφοντας τώρα την παραπάνω σχέση σαν εξίσωση τανιστών προκύπτει ότι $M_i = \chi_{i,j} H_j$, όπου τα i και j αναφέρονται στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου και στη μαγνήτιση αντίστοιχα. Ο συντελεστής ευαισθησίας όπως και η διαπερατότητα είναι επομένως τανυστής δευτέρου βαθμού με διαστάσεις 3×3 που περιγράφει το στοιχείο της μαγνήτισης και της πυκνότητας της μαγνητικής ροής, αντίστοιχα, στην κατεύθυνση i από το εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο προς την κατεύθυνση j . Οι δύο παραπάνω συντελεστές θεωρούνται σχεδόν πάντα ισотροπικοί. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ορισμός της διαπερατότητας και της ευαισθησίας είναι απαραίτητος για υλικά τα οποία εμφανίζουν υστέρηση.

Εάν ένα υλικό εμφανίζει μόνιμη μαγνήτιση, M_0 , και ευαισθησία, χ_m , τότε η καθαρή μαγνήτιση δίνεται από τον τύπο:

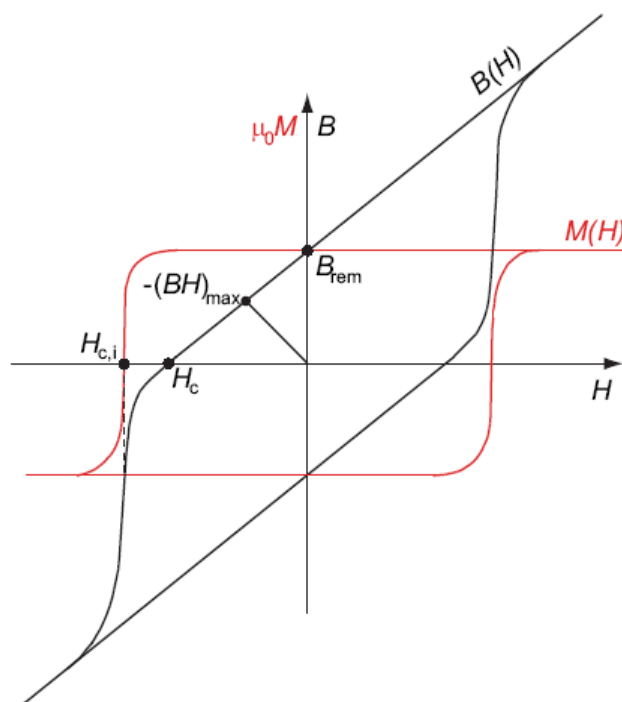
$$M = \chi_m H + M_0 \quad (6.3)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση της εξίσωσης (6.2) μαζί με τον ορισμό της διαπερατότητας και τον ορισμό του παραμένοντα μαγνητισμού ως $B_{rem} = \mu_0 M_0$, προκύπτει η παρακάτω σχέση για το μαγνητισμό:

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_{rem} \quad (6.4)$$

Οι οριακές συνθήκες για το $\mathbf{B}$, για κάθε επιφάνεια είναι ότι η κάθετη συνιστώσα του $\mathbf{B}$ πρέπει να είναι συνεχής πέρα των ορίων, ενώ για το $\mathbf{H}$ η παράλληλη συνιστώσα πρέπει να είναι συνεχής.

Τέλος πρέπει να επισημάνουμε ότι ένα μαγνητοστατικό πρόβλημα είναι κλιμακωτά αμετάβλητο, δηλαδή αν όλες οι διαστάσεις κλιμακώνονται με τον ίδιο συντελεστή το μαγνητικό πεδίο σε ένα δεδομένο σημείο θα είναι το ίδιο (σταθερό) καθώς αυτό το σημείο κλιμακώνεται.



Σχήμα 6.1: Μια απεικόνιση των ιδιοτήτων ενός σκληρού μαγνητικού υλικού. Αναπαρίστανται σε αυτό το σχήμα οι καμπύλες $B(H)$ και $M(H)$ [212].

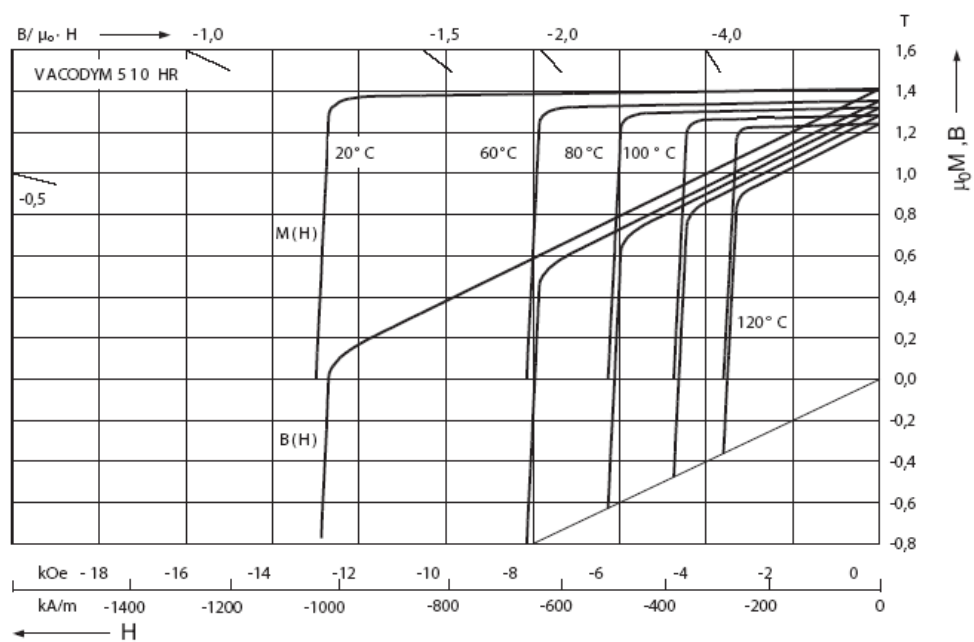
6.2.2 Μόνιμοι Μαγνήτες

Όπως ήδη αναφέραμε ένας μόνιμος μαγνήτης είναι απλώς ένα σκληρό μαγνητικό υλικό, δηλαδή ένα υλικό το οποίο έχει παραμένοντα μαγνητισμό και ο οποίος είναι διάφορος του μηδενός. Ωστόσο, συγκεκριμένες μαγνητικές ιδιότητες είναι ευνοϊκές για την παραγωγή αρκετά μεγάλου παραμένοντα μαγνητισμού. Εάν ένα υλικό παρουσιάζει ανισοτροπία ως προς τη κρυσταλλική του δομή αυτό μπορεί να προκαλέσει ευθυγράμμιση των περιστροφών, μια επίδραση ως προς έναν άξονα που ονομάζεται "εύκολος άξονας" και το φαινόμενο αυτό θα είναι ενεργειακά ευνοϊκό μιας και θα οδηγήσει την αυθόρμητη μαγνήτιση σε ευθυγράμμιση. Αυτό αυξάνει την παραμένουσα μαγνήτιση εάν το υλικό είναι μαγνητισμένο κατά μήκος του άξονά του. Η δύναμη της ανισοτροπίας χαρακτηρίζεται από το ανισοτροπικό πεδίο, το οποίο είναι το απαιτούμενο μαγνητικό πεδίο προκειμένου να ευθυγραμμιστεί πλήρως η μαγνήτιση. Η κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου ως προς τον "εύκολο άξονα" δίνεται από τη σχέση $K\sin^2(\varphi)$, όπου το K συμβολίζει την ανισοτροπική σταθερά και το φ είναι η γωνία μεταξύ του "εύκολου άξονα" και της κατεύθυνσης της μαγνήτισης.

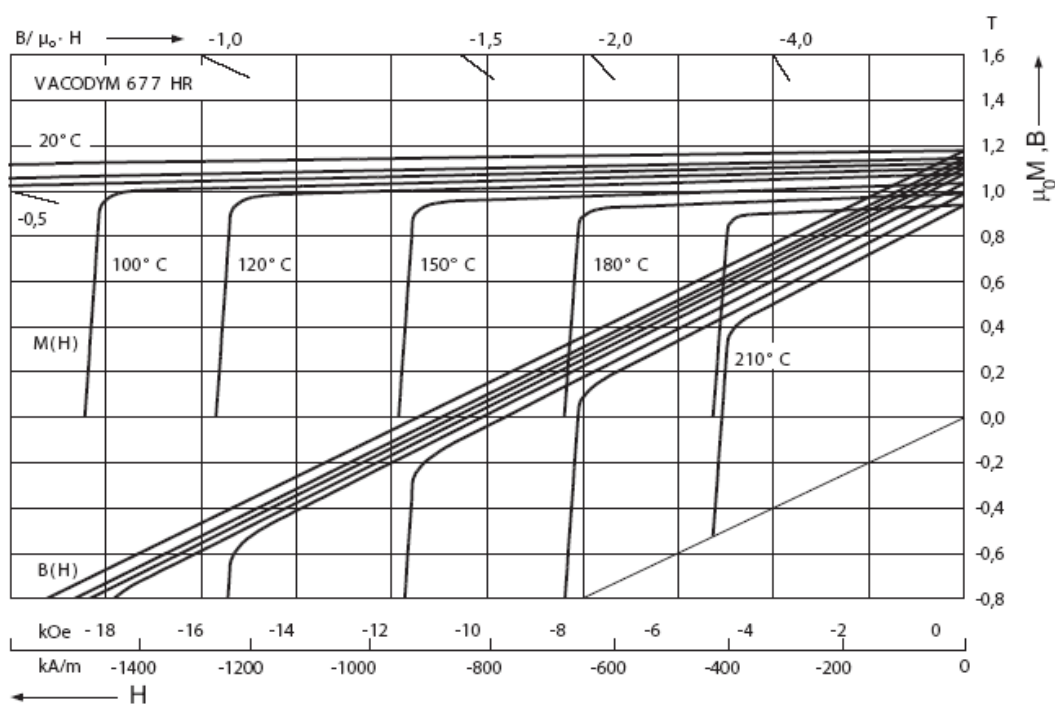
Αν ένα ανισοτροπικό υλικό υποβάλλεται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο που είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό συνεκτικό πεδίο τότε η μαγνήτιση θα αντιστραφεί και θα δείχνει προς την αντίθετη κατεύθυνση, κατά μήκος του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.1.

Για τα σκληρά μαγνητικά υλικά ο ορισμός του μ_r ως B/H μπορεί να είναι προβληματικός. Και αυτό γιατί για μικρές τιμές του H στο υλικό αντιστοιχεί μια μεγάλη τιμή του B , λόγω της παραμένουσας μαγνήτισης, το οποίο ουσιαστικά σημαίνει ότι το μ_r είναι πολύ μεγάλο. Επίσης για $H=0$ το μ_r δεν ορίζεται. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνεται με το να ορίσουμε τη σχετική διαπερατότητα ως $\mu_r = \frac{\partial B}{\partial H}$, η οποία ονομάζεται ως διαφορική διαπερατότητα για τα σκληρά μαγνητικά υλικά.

Ο πιο ισχυρός μόνιμος μαγνήτης που είναι διαθέσιμος στις μέρες μας είναι κατασκευασμένος από ένα κράμα νεοδυμίου, σιδήρου και βορίου και φέρει την ονομασία μαγνήτης NdFeB από τα αρχικά των συστατικών από τα οποία αποτελείται. Όλες οι συστοιχίες μόνιμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται στα μαγνητικά ψυγεία χρησιμοποιούν αυτό τον τύπο μαγνήτη. Αυτός ο μόνιμος μαγνήτης ο οποίος έχει τη χημική σύσταση $Nd_2Fe_{14}B$, έχει μια τετραγωνική κρυσταλλική δομή η οποία παρουσιάζει ένα πολύ υψηλό ανισοτροπικό πεδίο εντάσεως 8 T [203]. Άλλες ιδιότητες των NdFeB μαγνητών είναι η υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση εντάσεως από 1.2-1.4 T και η σχετική διαπερατότητα που παίρνει τη τιμή $\mu_r=1.05$ [204]. Το δεύτερο και ένα μέρος του τρίτου τεταρτημορίου των καμπυλών $B(H)$ και $M(H)$ για δύο διαφορετικούς NdFeB μόνιμους μαγνήτες φαίνονται στα σχήματα 6.2 και 6.3. Σε γενικές γραμμές οι ιδιότητες των μαγνητικών υλικών εξαρτώνται από την θερμοκρασία και για αυτό το λόγο στα παρακάτω σχήματα οι καμπύλες $B(H)$ και $M(H)$ παρουσιάζονται για διάφορες θερμοκρασίες. Φαίνεται ότι η απομαγνήτιση είναι μια ισχυρή συνάρτηση της θερμοκρασίας. Αυτό συνεπάγεται ότι θα πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή για να μην προκύψει υπερθέρμανση του μαγνήτη, καθώς κάτι τέτοιο είναι πολύ πιθανό να προκαλέσει αναστροφή της κατεύθυνσης της μαγνήτισης και έτσι να δείχνει προς την αντίθετη πλευρά.



Σχήμα 6.2 : Οι καμπύλες $B(H)$ και $M(H)$ του Βακοδιμίου 510 HR, ενός μόνιμου μαγνήτη με υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση [205].

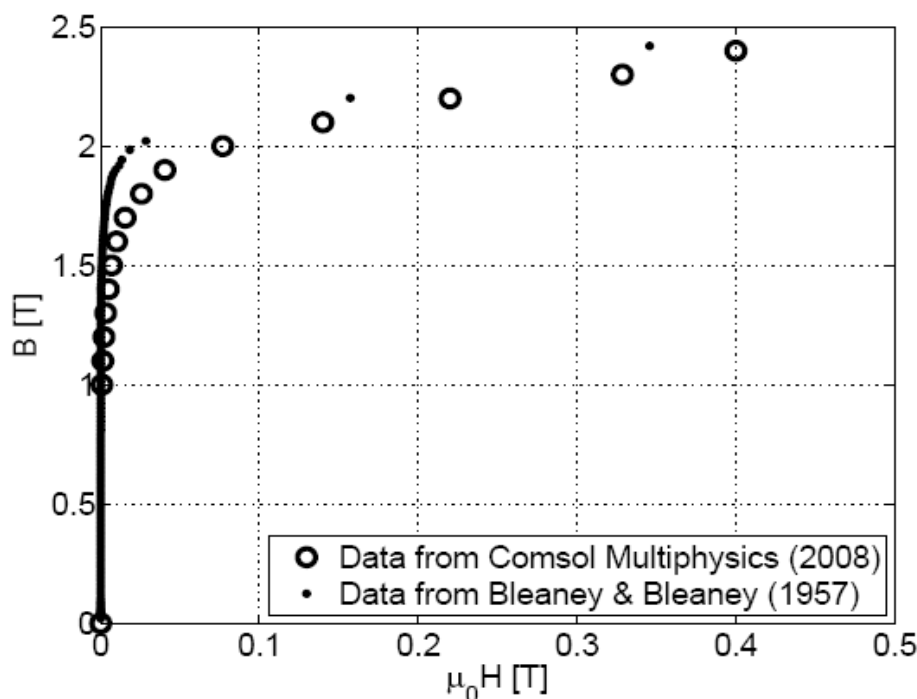


Σχήμα 6.3 : Οι καμπύλες $B(H)$ και $M(H)$ για το Βακοδίμιο 677 HR, ένας μόνιμος μαγνήτης με χαμηλότερη παραμένουσα μαγνήτιση από αυτή του σχήματος 5.2 [205].

6.2.2.1 Μαλακά Μαγνητικά Υλικά

Ένα μαλακό μαγνητικό υλικό υψηλής διαπερατότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια μαγνητική συστοιχία για την καθοδήγηση της μαγνητικής ροής μέσω της μαγνητικής συστοιχίας καθώς και να προστατέψει μέρος της συστοιχίας και/ή τους τριγύρω από την παραγόμενη πυκνότητα ροής. Για αυτό το λόγο ένα μαλακό μαγνητικό υλικό υψηλής διαπερατότητας αποτελεί μέρος σχεδόν όλων των μαγνητικών συστοιχιών που χρησιμοποιούνται στα μαγνητικά ψυγεία. Επίσης ένα μαλακό μαγνητικό υλικό με υψηλή διαπερατότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλους σκοπούς σε έναν μαγνητικό σχεδιασμό.

Ένα φτηνό και με υψηλή διαπερατότητα μαλακό μαγνητικό υλικό είναι προφανώς προτιμότερο. Το πιο συνηθισμένο μαγνητικό υλικό που πληρεί τα παραπάνω κριτήρια είναι ο σίδηρος(Fe). Η καμπύλη $B(H)$ για το σίδηρο φαίνεται στο σχήμα 6.4 και παρατηρήθηκε από τους Bleaney και Bleaney [206] και Comsol Multiphysics [207]. Όπως μπορεί να φανεί και από το σχήμα ο σίδηρος ανταποκρίνεται πολύ έντονα ακόμα και σε ένα πολύ μικρό μαγνητικό πεδίο. Η σχετική διαπερατότητα του σιδήρου είναι πάνω από 8000 στη μέγιστη τιμή της. Για αυτό ο σίδηρος χρησιμοποιείται σαν μαλακό μαγνητικό υλικό σε όλες σχεδόν τις μαγνητικές συστοιχίες που χρησιμοποιούνται στις μαγνητικές ψυκτικές συσκευές.



Σχήμα 6.4: Η πυκνότητα μαγνητικής ροής ως συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου για το σίδηρο.

6.3 Σχεδιασμός ενός Μαγνήτη

Προκείμενου να σχεδιάσουμε έναν αποδοτικό μαγνήτη κατάλληλο για χρήση σε εφαρμογές μαγνητικής ψύξης κρίνεται απαραίτητο να γίνει μια μελέτη όλων των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι έως τώρα κατασκευασμένοι μαγνήτες καθώς και να συγκριθούν και να μελετηθούν οι ιδιότητες του καλύτερου μαγνητικού σχεδιασμού. Αυτό μπορεί να γίνει ευκολότερα χρησιμοποιώντας μια παράμετρο αξίας η οποία χαρακτηρίζει την απόδοση του μαγνητικού σχεδιασμού. Η προηγούμενη πρόταση για μια παράμετρο σύγκρισης έγινε από τους Nikly και Muller [208] οι οποίοι όρισαν την παράμετρο ξ :

$$\xi = \frac{M_{magnet}}{M_{magnet} + M_{MCM}} \quad (6.5)$$

όπου,

M_{magnet} : Μάζα του μαγνήτη

M_{MCM} : Μάζα του μαγνητοθερμιδικού υλικού που χρησιμοποιείται στη συσκευή

Ωστόσο, η παραπάνω παράμετρος δεν είναι αρκετά χρήσιμη για δύο κυρίως λόγους. Καταρχάς δεν μας δίνει καμία πληροφορία σχετικά με τη πυκνότητα της μαγνητικής ροής που παράγεται από το μαγνήτη και δεύτερον χρησιμοποιώντας την ίδια μαγνητική δομή με δύο διαφορετικά μαγνητοθερμιδικά υλικά διαφορετικών πυκνοτήτων θα προκύψουν δύο διαφορετικά αποτελέσματα ως προς το χαρακτηρισμό του μαγνητικού σχεδιασμού.

Μια άλλη παράμετρος που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό ενός μαγνητικού σχεδιασμού είναι ο συντελεστής M , ο οποίος ορίστηκε από τους Jensen και Abele [209] και δίνεται από τη σχέση:

$$M = \frac{\int_{V_{field}} B^2 dV}{\int_{V_{mag}} B_{rem}^2 dV} \quad (6.6)$$

όπου V_{field} είναι ο όγκος της περιοχής που δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο και V_{mag} είναι ο όγκος των μαγνητών. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η μέγιστη τιμή του M είναι 0.25, και η δομή η οποία θεωρείται αρκετά αποτελεσματική είναι αυτή που έχει $M \sim 0.1$.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου μπορεί επίσης να ποσοτικοποιηθεί με τον αδιάστατο αριθμό [210] :

$$K = \frac{B}{B_{rem}} \quad (6.7)$$

Για δισδιάστατη δομή με εντελώς ομοιόμορφη παραμένουσα μαγνήτιση και πυκνότητα μαγνητικής ροής οι αριθμοί K και M συνδέονται με την εξής σχέση:

$$M = K^2 \frac{A_{field}}{A_{mag}} \quad (6.8)$$

Ο συντελεστής κέρδους M , συχνά εμφανίζεται ως συνάρτηση του K και είναι αρκετά ωφέλιμος για το χαρακτηρισμό του μαγνητικού σχεδιασμού, αλλά για τους μαγνήτες που χρησιμοποιούνται στα μαγνητικά ψυγεία αυτή η παράμετρος δεν είναι τόσο χρήσιμη καθώς δεν λαμβάνει υπόψη την πυκνότητα ροής στη περιοχή χαμηλού μαγνητικού πεδίου του μαγνητικού συστήματος, εκεί δηλαδή που τα μαγνητικά υλικά τοποθετείται όταν απομαγνητίζεται. Επίσης η κλιμάκωση της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης η οποία δεν είναι γραμμική δεν λαμβάνεται υπόψη με αυτή τη σχέση.

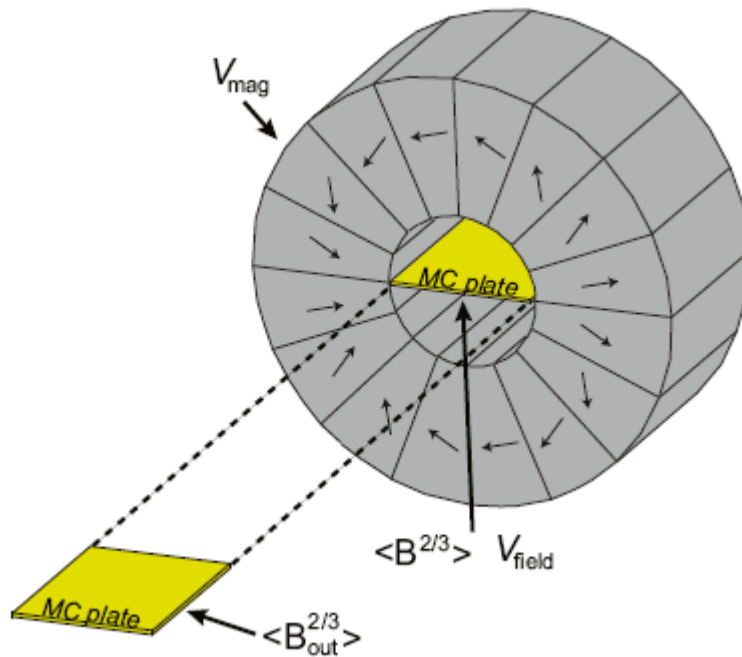
Τελικά μια γενική σχέση για τη μέτρηση των επιδόσεων των μαγνητών στα μαγνητικά ψυγεία προτάθηκε από το Rowe [211]. Το κόστος και η αποτελεσματικότητα του μαγνητικού σχεδιασμού περιλαμβάνεται σε αυτή τη σχέση σαν μια γραμμική συνάρτηση του όγκου του μαγνήτη. Ακόμα, λαμβάνεται υπόψη και η παραγόμενη πυκνότητα ροής. Ωστόσο, η σχέση αυτή δεν καθιστά δυνατό τον αυτόνομο υπολογισμό της αποδοτικότητας του μαγνητικού σχεδιασμού.

Η παράμετρος όμως η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για τον χαρακτηρισμό του μαγνητικού σχεδιασμού στις μαγνητικές ψυκτικές συσκευές είναι αυτή που προτάθηκε από τον Bjork [212] και συμβολίζεται με Λ_{cool} . Η παράμετρος αυτή ορίζεται ως εξής:

$$\Lambda_{cool} = \left(\langle B^{2/3} \rangle - \langle B_{out}^{2/3} \rangle \right) \frac{V_{field}}{V_{mag}} P_{field} \quad (6.9)$$

όπου V_{mag} είναι ο συνολικός όγκος του μαγνήτη ή των μαγνητών που χρησιμοποιούνται, V_{field} είναι ο όγκος όπου παράγεται η υψηλή πυκνότητα

ροής, P_{field} είναι το κλάσμα του χρόνου όπου ένα μαγνητοθερμιδικό υλικό είναι τοποθετημένο στην περιοχή υψηλού μαγνητικού πεδίου, $\langle B^{2/3} \rangle$ είναι η μέση τιμή του πεδίου στην υψηλή περιοχή υψηλής μαγνητικής ροής υψωμένος εις τα $2/3$ και ο όρος $\langle B_{\text{out}}^{2/3} \rangle$ εκφράζει τη μέση τιμή του πεδίου υψωμένο εις τα $2/3$ στην περιοχή όπου τοποθετείται το μαγνητοθερμιδικό υλικό όταν απομαγνητίζεται. Μερικές από αυτές τις μεταβλητές παρουσιάζονται και στο παρακάτω σχήμα 6.5 .



Σχήμα 6.5: Μια απεικόνιση μερικών από τις διάφορες μεταβλητές της παραμέτρου Λ_{cool} για την περίπτωση ενός κυλινδρικού μαγνήτη τύπου Halbach. Μια πλάκα από μαγνητοθερμιδικό υλικό εμφανίζεται τόσο εντός όσο και εκτός του μαγνητικού πεδίου [212].

Επισημαίνουμε ότι η πυκνότητα της μαγνητικής ροής δημιουργείται σε όγκο κενού και για αυτό $B = \mu_0 H$ και συνεπώς είναι ισοδύναμο το να αναφερόμαστε είτε στη πυκνότητα μαγνητικής ροής είτε στο μαγνητικό πεδίο. Επίσης, η παράμετρος Λ_{cool} εξαρτάται από τη πυκνότητα ροής. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η Λ_{cool} ορίζεται να είναι ανάλογη της μεταβολής της θερμοκρασίας του μαγνητοθερμιδικού υλικού και όχι του μαγνητικού πεδίου επειδή το μαγνητοθερμιδικό υλικό είναι αυτό που χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει το θερμοκρασιακό εύρος και την ψυκτική ισχύ σε μια ψυκτική συσκευή. Αυτή η θερμοκρασιακή αλλαγή δεν μεταβάλλεται γραμμικά με την πυκνότητα της μαγνητικής ροής

Όπως έχουμε προαναφέρει η μαγνητοθερμιδική επίδραση δεν εξαρτάται μόνο από το πεδίο στις περιοχές υψηλού μαγνητικού πεδίου. Εξίσου σημαντικό είναι το πεδίο που δημιουργείται στο χώρο που τοποθετείται το μαγνητοθερμιδικό υλικό όταν αυτό απομαγνητίζεται. Προκειμένου να μεγιστοποιήσουμε τη μαγνητοθερμιδική επίδραση το μαγνητικό πεδίο σε αυτήν την περιοχή πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Σε μια περιστροφική συσκευή αυτό μπορεί φυσικά να επιτευχθεί πολύ απλά μέσω της μετακίνησης του μαγνητοθερμιδικού υλικού μακριά από το μαγνήτη, αλλά αυτό θα έχει ως συνέπεια την αύξηση του μεγέθους και του χρονικού κύκλου της συσκευής. Σε μια περιστροφική συσκευή οι περιοχές υψηλής και χαμηλής μαγνήτισης θα είναι συνεχόμενες και θα πρέπει να δοθεί προσοχή προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η "διαρροή" του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή χαμηλού πεδίου. Επίσης λόγω της $2/3$ κλιμάκωσης της ΔT_{ad} με το μαγνητικό πεδίο ακόμα και ένα μικρό μαγνητικό πεδίο στην περιοχή χαμηλού πεδίου μπορεί να μειώσει σημαντικά την μεταβολή της αδιαβατικής θερμοκρασίας.

Για να ληφθεί υπόψιν η ποσότητα του μαγνητοθερμιδικού υλικού που μπορεί να προκαλέσει μια θερμοκρασιακή αλλαγή, η παράμετρος Λ_{cool} είναι ανάλογη με τον όγκο της περιοχής του υψηλού μαγνητικού πεδίου. Επισημαίνεται ότι η παράμετρος Λ_{cool} είναι ανάλογη με τον συνολικό όγκο της περιοχής και όχι μόνο με τον όγκο που θα καταλάμβανε το μαγνητοθερμιδικό υλικό. Για αυτό το λόγο η Λ_{cool} δεν εξαρτάται από την πορότητα του μαγνητοθερμιδικού υλικού ούτε και από την ποσότητα π.χ. του πλαστικού περιβλήματος που χρησιμοποιείται για την συγκράτησή του μαγνητοθερμιδικού υλικού. Επίσης η Λ_{cool} είναι αντιστρόφως ανάλογη του όγκου του μαγνητικού υλικού που χρησιμοποιείται, καθώς όσο περισσότερο μαγνητικό υλικό χρησιμοποιείται τόσο πιο ακριβός θα είναι ο σχεδιασμός.

Τελικά η παράμετρος Λ_{cool} είναι ανάλογη του λόγου του κλάσματος του χρόνου στον οποίο το μαγνητοθερμιδικό υλικό τοποθετείται στο τομέα υψηλού πεδίου. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό οφείλεται στο ότι αν π.χ. ο κύκλος ενός ενεργού μαγνητικού αναγεννητή διαρκεί 6 δευτερόλεπτα και το μαγνητοθερμιδικό υλικό είναι τοποθετημένο στην περιοχή υψηλού μαγνητικού πεδίου μόνο για 3 δευτερόλεπτα, τότε ο (ακριβός) μαγνήτης δεν χρησιμοποιείται για το υπόλοιπο μισό του κύκλου και είναι ουσιαστικά μια μεγάλη σπατάλη κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Το κλάσμα του χρόνου στο οποίο το μαγνητικό πεδίο παράγεται από το μαγνήτη που χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει μια μαγνητοθερμιδική επίδραση πρέπει να μεγιστοποιηθεί.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η παράμετρος Λ_{cool} θα ευνοεί το σχεδιασμό όταν υπάρχει μικρό μαγνητικό πεδίο και μεγάλος όγκος στη

περιοχή υψηλού πεδίου. Αυτό συνήθως οφείλεται στο γεγονός ότι το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από ένα μαγνήτη κλιμακώνεται με μια ισχύ μικρότερη από τα $2/3$ μαζί με τον όγκο του μαγνήτη. Σε μια πραγματική συσκευή, οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας και οι θερμικές απώλειες θα θέσουν ένα κατώτατο όριο στο πεδίο που απαιτείται για να παραχθεί ένα δοσμένο θερμοκρασιακό εύρος και μια δοσμένη ψυκτική ικανότητα. Ως εκ τούτου σε συγκεκριμένες εφαρμογές, θα πρέπει να επιλέγεται η μεγιστοποίηση της Λ_{cool} υπό την προϋπόθεση να έχουμε ένα χαμηλό μαγνητικό πεδίο στην περιοχή υψηλού πεδίου.

Η παραμένουσα μαγνήτιση των μαγνητών δεν λαμβάνεται υπ'όψιν στην παράμετρο Λ_{cool} . Υπάρχουν δύο λόγοι που συμβαίνει αυτό. Καταρχάς, η πληροφορία αυτή δεν είναι διαθέσιμη στα περισσότερα δημοσιευμένα μαγνητικά μοντέλα και δεύτερον η παραμένουσα μαγνήτιση των μαγνητών NdFeB που χρησιμοποιούνται σε όλες τις μαγνητικές συνδεσμολογίες ποικίλει μόνο μεταξύ 1.2-1.4 T και έτσι η ακριβής τιμή δεν είναι κρίσιμη για σύγκριση διαφορετικών μαγνητικών σχεδιασμών. Ως εκ τούτου η γεωμετρία παίζει ρόλο σε όλες τις διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των διαφόρων μαγνητικών μοντέλων. Κάθε μαλακό μαγνητικό υλικό που χρησιμοποιείται στη συνδεσμολογία των μαγνητών αγνοείται, καθώς η τιμή αυτού του υλικού είναι γενικά πολύ χαμηλότερη συγκριτικά με αυτή των μόνιμων μαγνητών.

Παράδειγμα Υπολογισμού της παραμέτρου Λ_{cool}

Προκειμένου να δώσουμε ένα παράδειγμα για το πώς υπολογίζεται η παράμετρος Λ_{cool} σε ένα μαγνητικό σχεδιασμό θα λάβουμε υπ'όψιν μας το σχέδιο του μαγνήτη που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.5. Έτσι λοιπόν, αν υποθέσουμε ότι ο μαγνήτης αυτός έχει μια εσωτερική ακτίνα 20 mm, εξωτερική ακτίνα 50 mm και μήκος 30 mm τότε ο συνολικός όγκος του μαγνήτη ισούται με $V_{mag}=0.198$ L. Η περιοχή υψηλού μαγνητικού πεδίου είναι η κυλινδρική οπή και αυτή έχει όγκο $V_{fel}=0.038$ L. Το μαγνητικό πεδίο στην οπή πρέπει να μετρηθεί, αλλά εμείς τώρα υποθέτουμε πως ισούται με $(\mu_0 H)_{high}^{2/3} = 0.6 T$. Το μαγνητοθερμιδικό υλικό μετακινείται αρκετά μακριά από τον κύλινδρο ώστε το μαγνητικό του πεδίο να είναι ουσιαστικά μηδενικό, έτσι $(\mu_0 H)_{low}^{2/3} = 0 T$. Τελικά υποθέτουμε ότι το μαγνητοθερμιδικό υλικό παραμένει 5 sec στην περιοχή υψηλού πεδίου και τότε μετακινείται για 1 sec οπότε ξοδεύει άλλα 5 sec στη περιοχή μηδενικού μαγνητικού πεδίου και μετά μετακινείται ξανά πίσω για 1 sec. Συνεπώς $P_{field} = \frac{5}{5+1+5+1} = 0.42$ αν ο μαγνήτης θεωρηθεί πως δεν είναι σε χρήση κατά τη διάρκεια των χρόνων μετακίνησης. Τελικά προκύπτει ότι: $\Lambda_{cool} = 0.048 T^{2/3}$. Τώρα για να καταλάβουμε αν αυτή η τιμή είναι μια υψηλή τιμή για την παράμετρο Λ_{cool} πρέπει να γίνει σύγκριση με άλλους μαγνητικούς σχεδιασμούς.

6.4 Δημοσιευμένα Μαγνητικά Μοντέλα

Είναι πολύ σημαντικό να μελετήσουμε ορισμένα δημοσιοποιημένα μαγνητικά μοντέλα προκειμένου να μάθουμε ποιοι σχεδιασμοί λειτουργούν αποδοτικά και κυρίως γιατί η λειτουργία τους είναι καλή. Η παράμετρος Λ_{cool} είναι η πλέον κατάλληλη για αυτό το σκοπό. Αυτοί οι μαγνητικοί σχεδιασμοί αποτελούν ακόμη τη βάση με την οποία θα μπορούμε να συγκρίνουμε τα νέα μοντέλα.

Θα πρέπει φυσικά να τονιστεί ότι όλες οι υπάρχουσες μαγνητικές ψυκτικές συσκευές είναι ουσιαστικά δοκιμαστικές επιστημονικές συσκευές και αυτό πρέπει να το λαμβάνουμε υπ'όψιν μας όταν χαρακτηρίζουμε τα σχέδια μαγνητών που σχετίζονται με αυτές. Ωστόσο, επειδή πλέον βρισκόμαστε σε μια φάση όπου πρόκειται να προταθούν σημαντικές βελτιώσεις στο σχεδιασμό των μαγνητικών συσκευών, αυτός ο συσχετισμός θα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις τόσο στα υπάρχοντα όσο και στα μελλοντικά μαγνητικά μοντέλα.

Υπάρχει ένας αρκετά μεγάλος αριθμός δημοσιευμένων μαγνητικών σχεδιασμών που χρησιμοποιούνται στις συσκευές μαγνητικής ψύξης, αλλά δυστυχώς οι περισσότερες από αυτές στερούνται άμεσων πληροφοριών που μπορούν να μας οδηγήσουν στον υπολογισμό της παραμέτρου Λ_{cool} . Τα μαγνητικά μοντέλα που θα παρουσιάσουμε παρακάτω είναι δημοσιευμένοι μαγνητικοί σχεδιασμοί όπου δίνουν πληροφορίες για τις βασικές διαμορφώσεις του μαγνήτη, ενώ όπου υπάρχουν οι κατάλληλες πληροφορίες υπολογίζεται και η παράμετρος Λ_{cool} .

Για όλους τους μαγνητικούς σχεδιασμούς με τα οποίους θα ασχοληθούμε ο υπολογισμός της παράμετρου P_{field} γίνεται θεωρώντας πως έχουμε μια ιδανική συσκευή. Σε μια τέτοια ιδανική συσκευή ο χρόνος που απαιτείται για την μετακίνηση είτε του μαγνήτη είτε του μαγνητοθερμιδικού υλικού ελαχιστοποιείται. Αυτή η επιλογή έχει γίνει ώστε η παράμετρος Λ_{cool} να μην εξαρτάται π.χ. από την ισχύ του κινητήρα της συσκευής. Ένα παράδειγμα αποτελεί ο περιστροφικός μαγνήτης που κατασκευάστηκε από τον Okamura [61], και τον οποίο θα αναλύσουμε παρακάτω. Χρησιμοποιώντας την πραγματική περιστροφική ταχύτητα του μαγνήτη παίρνουμε ένα $P_{\text{field}}=0.9$. Για τους υπολογισμούς της Λ_{cool} σε αυτόν το μαγνήτη η παραπάνω τιμή λαμβάνεται υπ'όψιν. Ο κύκλος του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή υποτίθεται συμμετρικός, δηλαδή θεωρούμε πως η διεργασία μαγνήτισης και απομαγνήτισης έχουν την ίδια χρονική διάρκεια.

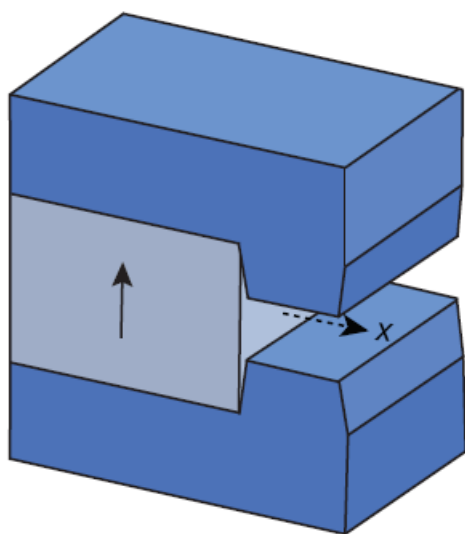
Η ανάλυση που ακολουθεί σχετικά με τα διάφορα είδη μαγνητικών σχεδιασμών έχει χωριστεί σε τρεις κατηγορίες με βάση την πολυπλοκότητα του κάθε σχεδιασμού. Όλα τα είδη μαγνητών που θα παρουσιάσουμε συνοψίζονται στον πίνακα 6.1.

6.4.1 Απλά Μαγνητικά Κυκλώματα

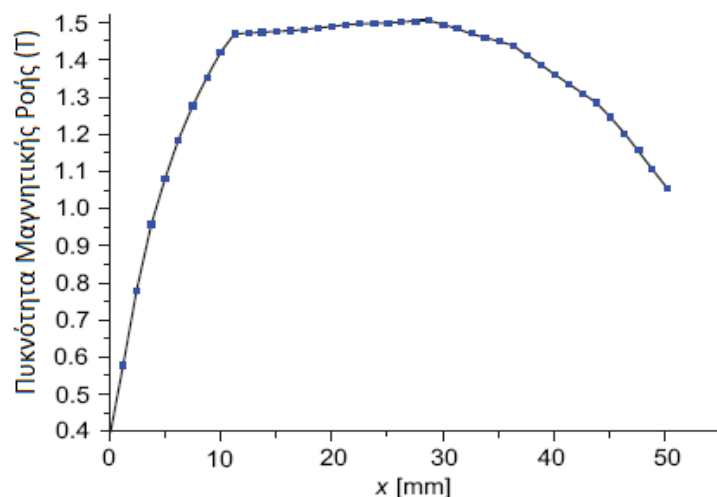
Οι μαγνήτες που θα παρουσιαστούν σε αυτή την ενότητα διακρίνονται για την απλή γεωμετρική δομή τους και αποτελούνται από ορθογώνια τεμάχια μαγνητών τα οποία είναι ενωμένα μεταξύ τους.

6.4.1.1 Ο Μαγνήτης του Zheng [76]

Ο Zheng το 2009 κατασκεύασε ένα παλινδρομικό μαγνητικό ψυγείο όπως έχουμε προαναφέρει και στο κεφάλαιο 2. Ο μαγνήτης που χρησιμοποίησε σε αυτή τη μαγνητική ψυκτική συσκευή που κατασκεύασε είναι μετακινούμενος ενώ υπάρχουν τοποθετημένες στη συσκευή και δύο σφαιρικές κλίνες από μαγνητοθερμιδικό υλικό οι οποίες παραμένουν σταθερές. Όταν η μια κλίνη βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου τότε η άλλη βρίσκεται εκτός. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από ένα μονό απλό μαγνήτη και οι γραμμές του πεδίου οδηγούνται από ένα μαλακό μαγνητικό υλικό μέσα από ένα μικρό κενό αέρος(διάκενο) όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.6. Σύμφωνα με το Zheng ο όγκος του μαγνήτη είναι 0.5 L και ο όγκος της περιοχής όπου δημιουργείται το υψηλό μαγνητικό πεδίο είναι 0.09 L. Η μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι 0.93 T. Η πυκνότητα ροής ως συνάρτηση της απόστασης έξω από το διάκενο φαίνεται στο σχήμα 6.7. Η παράμετρος P_{field} υπολογίζεται να ισούται με 0.60. Ωστόσο, άμα χρησιμοποιήσουμε έναν πιο γρήγορο και πιο ισχυρό κινητήρα για την κίνηση του μαγνήτη, λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο μαγνήτης πρέπει να μετακινηθεί σε μια πεπερασμένη απόσταση μεταξύ των δύο κλινών τότε μπορούμε να υπολογίσουμε εκ νέου τη τιμή της παραμέτρου P_{field} η οποία μπορεί να ισούται με 0.90.



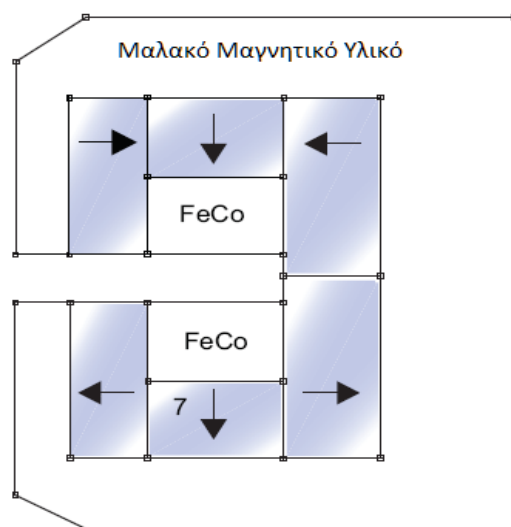
Σχήμα 6.6: Ο μαγνήτης του Zheng [76]. Το πλήρως βέλος δείχνει τη κατεύθυνση της μαγνήτισης του μαγνήτη. Η μπλε δομή αποτελείται από μαλακό μαγνητικό υλικό. Το μαγνητοθερμιδικό υλικό είναι τοποθετημένο στο διάκενο το οποίο υποδεικνύεται από το διακεκομμένο βέλος.



Σχήμα 6.7: Μια αριθμητική προσομοίωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής κατά μήκος του άξονα x όπως αυτός φαίνεται στο σχήμα 5.6. Αυτός είναι και ο λόγος της μεγάλης διαφοράς μεταξύ της πλοταρισμένης τιμής της μαγνητικής ροής και της τιμής 0.93 T που δίνει ο Zheng [76] στις αναφορές του.

6.4.1.2 Ο Μαγνήτης του Vassile και Muller [55]

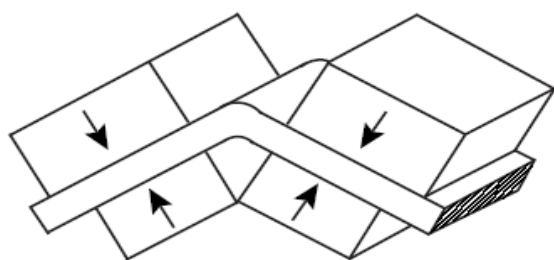
Ο μαγνήτης που σχεδιάστηκε από τους Vassile και Muller είναι μια συνδεσμολογία μαγνητών που αποτελείται από ορθογωνικούς μαγνήτες οι οποίοι σχηματίζουν το αγγλικό γράμμα "C", ενώ περιέχει και μαλακό μαγνητικό υλικό μέσα και έξω από το "C", όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.8. Σε αυτό το σχεδιασμό οι μαγνήτες περιστρέφονται γύρω από έναν κύκλο μαζί με τα ένθετα που γεμίζουν με μαγνητοθερμιδικό υλικό. Οι πληροφορίες που έχουμε αφορούν το εμβαδό της εγκάρσιας διατομή των μαγνητών που υπολογίζεται να είναι 9.2 L/m και την εγκάρσια διατομή του διακένου στη περιοχή υψηλού μαγνητικού πεδίου που ισούται με 0.75 L/m. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής δίνεται 1.9 T στην περιοχή υψηλού πεδίου, αλλά αυτή η τιμή έχει προκύψει με τη βοήθεια προσομοίωσης και συνεπώς η πραγματική της τιμή θα είναι σαφώς μικρότερη. Τέλος η παράμετρος P_{field} υπολογίζεται περίπου ίση με 0.90.



Σχήμα 6.8: Ο μαγνήτης των Vasile και Muller [55]. Τα βέλη δηλώνουν τη κατεύθυνση της μαγνήτισης των μαγνητών.

6.4.1.3 Ο Μαγνήτης του Bohigas [40]

Ο Bohigas έφτιαξε μια περιστροφική μαγνητική συσκευή στην οποία οι μαγνήτες είναι σταθεροί και το μαγνητοθερμιδικό υλικό περιστρέφεται μέσα και έξω στη περιοχή υψηλού μαγνητικού πεδίου. Ένα σύνολο από 8 ορθογωνικούς μαγνήτες χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη συνδεσμολογία μαγνητών, οι τέσσερις εκ των οποίων τοποθετήθηκαν στη εσωτερική πλευρά του περιστρεφόμενου τροχού και οι υπόλοιποι στην εξωτερική πλευρά. Ο μαγνήτης αυτός φαίνεται στο σχήμα 6.9. Οι διαστάσεις του ενός από τους εσωτερικούς μαγνήτες είναι $40 \times 40 \times 20 \text{ mm}^3$, ενώ οι διαστάσεις για κάθε έναν από τους εξωτερικούς μαγνήτες είναι $50 \times 50 \times 25 \text{ mm}^3$. Το μέγεθος του διακένου είναι 7 mm και συνολικά υπάρχουν 4 διάκενα. Από το παρακάτω σχήμα υπολογίζονται οι διαστάσεις του ενός διακένου να είναι $40 \times 7 \times 20 \text{ mm}^3$. Έτσι βρίσκουμε ότι ο όγκος του μαγνήτη και της περιοχής υψηλού πεδίου ισούται αντίστοιχα με 0.38 L και 0.02 L. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής είναι γνωστή και ισούται με 0.9 T. Το μαγνητοθερμιδικό υλικό συνεχώς εισέρχεται στην περιοχή υψηλού πεδίου και για αυτό η παράμετρος P_{field} είναι ίση με 1.



Σχήμα 6.9: Ο μαγνήτης του Bohigas [40].

6.4.1.4 Ο Μαγνήτης του Tagliafico [83]

Ο μαγνήτης του Tagliafico είναι ουσιαστικά μια ορθογωνική κατασκευή, η οποία χρησιμοποιεί ένα μαλακό μαγνητικό υλικό για να καθοδηγήσει το μαγνητικό πεδίο γύρω από το γραμμές μέσω του μαγνητικού κυκλώματος. Ο μαγνήτης έχει μια υποδοχή διαστάσεων $50 \times 9.5 \times 100 \text{ mm}^3$ όπως φαίνεται και από το σχήμα 6.10, μέσω της οποίας κινείται το μαγνητοθερμιδικό υλικό. Ο όγκος της περιοχής υψηλού πεδίου είναι ίσος με 0.07 L. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στο κέντρο της υποδοχής ισούται με 1.55 T. Ο μαγνήτης αυτός έχει βάρος 5 kg το οποίο αντιστοιχεί σε όγκο $V_{\text{mag}} = 0.68 \text{ L}$. Επίσης, η παράμετρος P_{field} εκτιμάται περίπου ίση με 0.95.

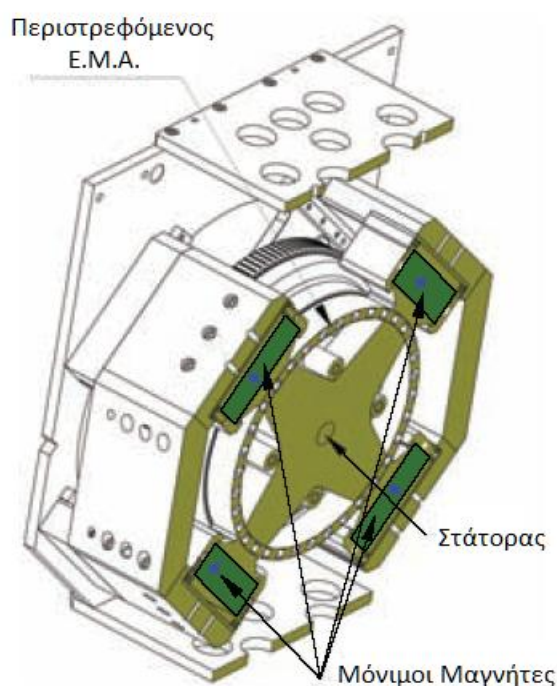


Σχήμα 6.10: Ο μαγνήτης που κατασκεύασε ο Tagliafico [83]. Το μαγνητοθερμιδικό υλικό περνά μέσω του διακένου που υπάρχει σε αυτή τη δομή και φαίνεται στο σχήμα

6.4.1.5 Ο Μαγνήτης του Tusek [85]

Η μαγνητική ψυκτική συσκευή που παρουσιάστηκε το 2009 από το Tusek χρησιμοποιεί έναν περιστροφικό ενεργό μαγνητικό αναγεννητή και ένα ακίνητο(σταθερό) μαγνητικό σύστημα. Το μαγνητικό σύστημα αποτελείται από ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό μαγνητικό κύκλωμα

με το μαγνητοθερμιδικό υλικό να είναι τοποθετημένο μεταξύ των δύο αυτών δομών. Υπάρχουν 4 περιοχές υψηλού μαγνητικού πεδίου και αντίστοιχα άλλες 4 χαμηλού μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της περιφέρειας μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής δομής. Ένα σκίτσο του μαγνήτη φαίνεται στο σχήμα 6.11. Ο όγκος των περιοχών υψηλού πεδίου είναι τέσσερις φορές επί $48 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$ ή αλλιώς 0.11 L. Το ποσό του μαγνητικού υλικού που χρησιμοποιείται είναι ίσο με 0.65 L. Η μέση πυκνότητα ροής στην περιοχή υψηλού πεδίου δίνεται πως είναι 0.97 T, ενώ στην περιοχή χαμηλού πεδίου είναι 0.1 T. Η παραμένουσα μαγνήτιση των μαγνητών είναι 1.27 T. Καθώς το μαγνητοθερμιδικό υλικό περιστρέφεται συνεχόμενα στην περιοχή υψηλού μαγνητικού πεδίου, οι μαγνήτες χρησιμοποιούνται συνεχώς και για αυτό $P_{\text{field}}=1$.



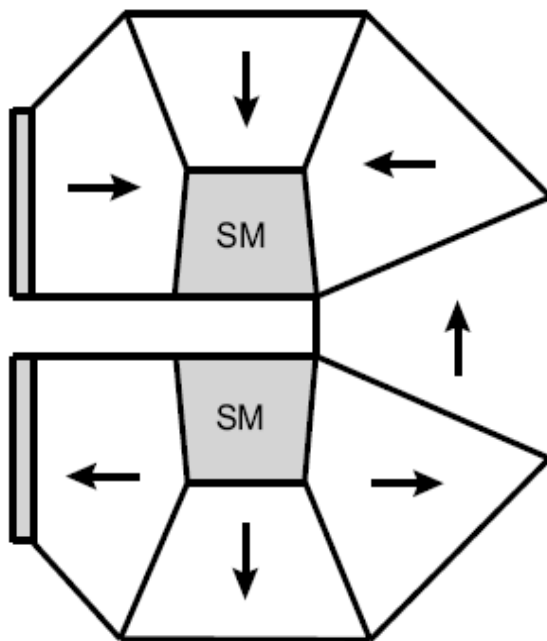
Σχήμα 6.11: Ο μαγνήτης που σχεδίασε ο Tusek [85]. Τα μέρη με ανοιχτό πράσινο χρώμα αποτελούνται από μαλακό μαγνητικό υλικό ενώ με σκούρο πράσινο αναπαρίστανται οι μαγνήτες. Τα μικρά μπλε βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της μαγνήτισης [34].

6.4.2 Μαγνητικές Συνδεσμολογίες Τύπου Halbach

Οι μαγνητικές δομές που παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα είναι όλες βασισμένες στο σχεδιασμό του κυλίνδρου Halbach. Ο κύλινδρος Halbach είναι μια κυλινδρική μαγνητική δομή με μια οπή κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου και μια κατεύθυνση παραμένοντα μαγνητισμού η οποία σε κάθε σημείο δίνεται από τη σχέση: $B_{rem,r}=B_{rem}\cos(\varphi)$ και $B_{rem,\varphi}=B_{rem}\sin(\varphi)$, όπου B_{rem} είναι το μέγεθος της απομένουσας πυκνότητας ροής, ο δείκτης r συμβολίζει την ακτινική συνιστώσα του παραμένοντα μαγνητισμού και ο δείκτης φ συμβολίζει την εφαπτομενική συνιστώσα [213,214]. Ο κύλινδρος Halbach χαρακτηρίζεται από τρεις παραμέτρους: την εσωτερική και εξωτερική ακτίνα που συμβολίζονται R_i και R_o αντίστοιχα και το μήκος, L . Επίσης, χωρίζεται συνήθως σε τμήματα καθένα από τα οποία έχει τη δική του κατεύθυνση μαγνήτισης προκειμένου να διευκολυνθεί η κατασκευή του κυλίνδρου. Ένα τέτοιο τμήμα κυλίνδρου παρουσιάστηκε στο σχήμα 6.5.

6.4.2.1 Ο Μαγνήτης του Lee [215]

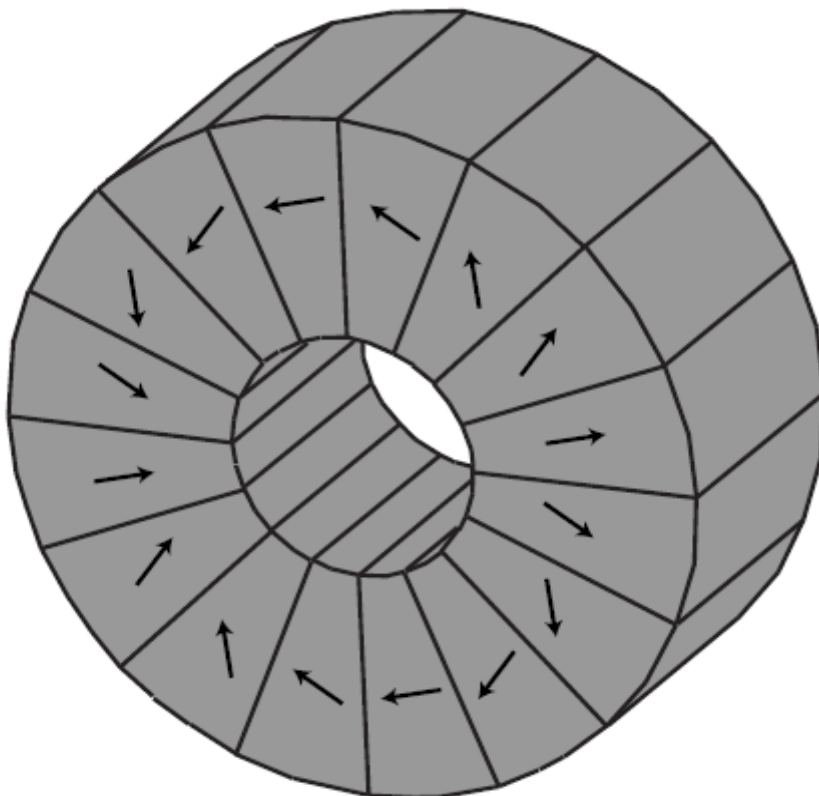
Ο μαγνητικός σχεδιασμός του Lee είναι κατάλληλος για μια παλινδρομική μαγνητική συσκευή, η οποία θα χρησιμοποιεί ένα μόνιμο μαγνήτη και μια μετακινούμενη κλίνη από μαγνητοθερμιδικό υλικό. Ωστόσο, καμία τέτοια συσκευή δεν έχει ακόμα κατασκευαστεί για να τοποθετηθεί σε αυτήν ο μαγνήτης που κατασκευάστηκε. Ο μαγνήτης αυτός έχει σχήμα "C" και δημιουργεί ένα ισχυρό ομοιογενές πεδίο στο κέντρο του. Το σχέδιο του μοιάζει με έναν κατακερματισμένο σε 8 τμήματα κύλινδρο Halbach, όπου ένα από τα οριζόντια τμήματα έχει αφαιρεθεί. Η πυκνότητα ροής στο κέντρο ενισχύεται από "μπλοκς" μαλακού μαγνητικού υλικού που είναι τοποθετημένα στο κέντρο του μαγνήτη. Μια εικόνα του παραπάνω μαγνητικού σχεδίου δίνεται στο σχήμα 6.12. Οι διαστάσεις της εγκάρσιας διατομής της παραπάνω συστοιχίας είναι: $114 \times 128 \text{ mm}^2$, δηλαδή 14.6 L/m . Το εμβαδό της εγκάρσιας διατομής στη περιοχή που εμφανίζεται το ισχυρό μαγνητικό πεδίο ισούται με: $25 \times 12.7 \text{ mm}^2$, δηλαδή με 0.32 L/m και η πυκνότητα μαγνητικής ροής δίνεται ίση με 1.9 T στην περιοχή υψηλού μαγνητικού πεδίου, αλλά αυτό το αποτέλεσμα έχει προκύψει ύστερα από προσομοίωση σε πεπερασμένο μήκος. Συνεπώς, αφού αυτό το μέγεθος εξαρτάται από το μήκος, σε μια πραγματική συσκευή θα παίρνει σημαντικά μικρότερες τιμές. Το P_{field} λαμβάνεται ίσο με 0.90 καθώς δεν έχουμε μια πραγματική μαγνητική συσκευή ώστε να το υπολογίσουμε.



Σχήμα 6.12: Ο μαγνήτης που δημιούργησε ο Lee [215]. Τα τετράγωνα με το σύμβολο "SM" περιέχουν μαλακό μαγνητικό υλικό.

6.4.2.2 Ο Μαγνήτης του Engelbrecht [201]

Η μαγνητική ψυκτική συσκευή που κατασκευάστηκε στο DTU (Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Delft) είναι μια παλινδρομική συσκευή στην οποία οι πλάκες του μαγνητοθερμιδικού υλικού μετακινούνται εντός και εκτός του σταθερού μαγνήτη που κατασκεύασε ο Engelbrecht. Ο μαγνήτης αυτός είναι ένας κύλινδρος Halbach, ο οποίος αποτελείται από 16 μόνιμους μαγνήτες. Ο κύλινδρος έχει εσωτερική διάμετρο διαστάσεων 21 mm, εξωτερική διάμετρο ίση με 60 mm, ενώ το μήκος του ισούται με 50 mm. Στο παρακάτω σχήμα 6.13 μπορούμε να δούμε τον μαγνήτη που κατασκεύασε ο Engelbrecht. Επίσης, η μέση πυκνότητα της μαγνητικής ροής στην κυλινδρική οπή ισούται με 1.03 T. Ο όγκος του μαγνήτη είναι 0.50 L και ο όγκος της περιοχής που εμφανίζεται το ισχυρό πεδίο, δηλαδή στην κυλινδρική οπή ισούται με 0.07 L. Η παραμένουσα μαγνήτιση των μαγνητών που χρησιμοποιούνται στον κύλινδρο Halbach ισούται με 1.4 T, ενώ η παράμετρος P_{field} για αυτό το μαγνητικό σχεδιασμό υπολογίσθηκε ίση με 0.50. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά το ήμισυ του χρόνου του κύκλου ο αναγεννητής βρίσκεται εκτός της περιοχής υψηλού μαγνητικού πεδίου. Η πραγματική όμως τιμή αυτής της παραμέτρου είναι μικρότερη από 0.5 λόγω της πεπερασμένης ταχύτητας του αναγεννητή.



Σχήμα 6.13: Ο μαγνήτης που κατασκεύασε ο Engelbrecht [202]. Ο κύλινδρος Halbach έχει μια εσωτερική διάμετρο 21 mm, εξωτερική διάμετρο 60 mm και μήκος 50 mm.

6.4.2.3 Ο Μαγνήτης του Lu [199]

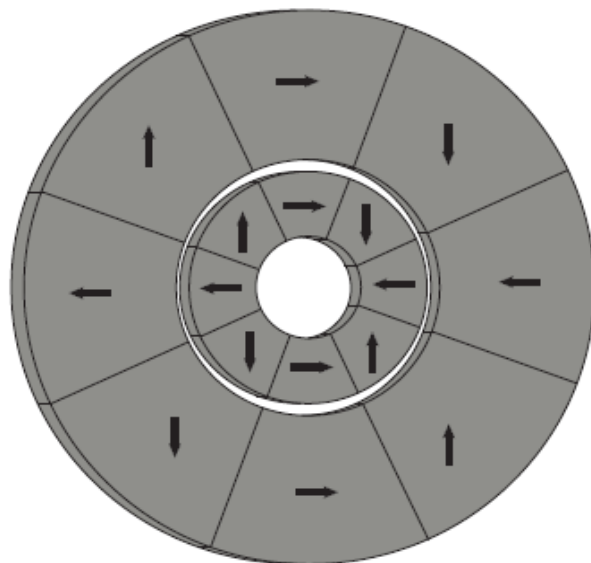
Η μαγνητική ψυκτική συσκευή που κατασκευάστηκε από τον Lu το 2005 είναι μια παλινδρομική συσκευή που αποτελείται από δύο σφαιρικές κλίνες από μαγνητοθερμιδικό υλικό, οι οποίες μετακινούνται εντός και εκτός 2 σταθερών μαγνητικών συνδεσμολογιών. Και οι δύο αυτοί μαγνήτες έχουν ίδια κατασκευή και αποτελούνται από 16 τμήματα κυλίνδρου Halbach, εσωτερικής και εξωτερικής διαμέτρου 15 και 70 mm αντίστοιχα. Επίσης, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής που παράγεται είναι ίση με 1.4 T και το μήκος του κυλίνδρου ισούται με 200 mm. Έχοντας γνωστά τα παραπάνω μεγέθη μπορούμε να υπολογίσουμε τον όγκο του κάθε μαγνήτη και τον όγκο της κάθε περιοχής υψηλής μαγνήτισης. Οι τιμές που λαμβάνουν αυτοί οι δύο όγκοι είναι 2.94 και 0.14 L αντίστοιχα. Τέλος η παράμετρος P_{field} λαμβάνει την τιμή 0.5 .

6.4.2.4 Ο Μαγνήτης των Kim και Jeong [216]

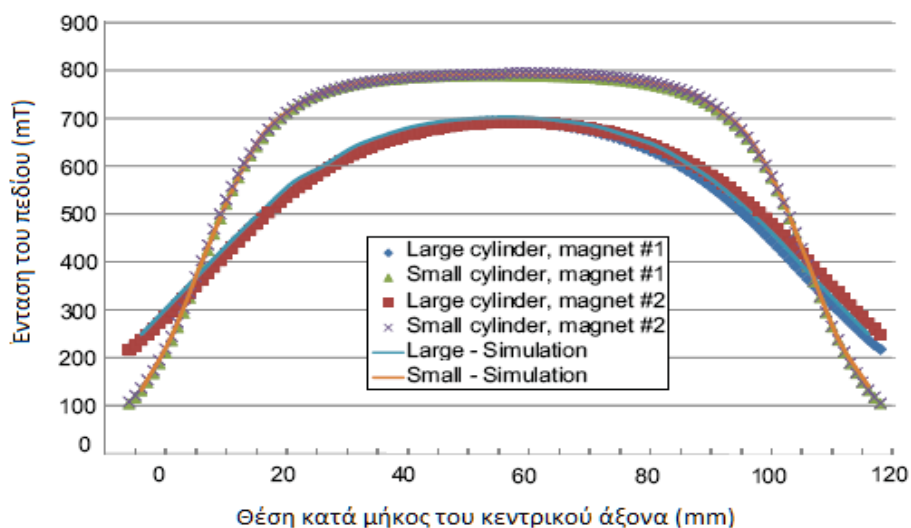
Ο μαγνήτης που σχεδιάστηκε από τους Kim και Jeong αποτελείται από 16 τεμάχια κυλίνδρου Halbach. Μια μονή κλίνη από μαγνητοθερμιδικό υλικό κάνει μια παλινδρομική κίνηση μέσω της κυλινδρικής οπής που έχει αυτή η συνδεσμολογία. Η ακτίνα της κυλινδρικής οπής είναι 8 mm, ενώ η εξωτερική ακτίνα του κυλίνδρου είναι 38 mm και το μήκος του ίσο με 47 mm. Αυτό συνεπάγεται πως ο όγκος της περιοχής υψηλού πεδίου θα είναι 0.01 L και ο όγκος του μαγνήτη υπολογίζεται ίσος με 0.20 L. Επίσης, η πυκνότητα ροής είναι ίση με 1.58 T στο κέντρο της οπής και παίρνει τη τιμή 1 T στην άκρη, έχοντας μια μέση τιμή ίση με 1.4 T. Επειδή χρησιμοποιείται μόνο μια κλίνη από μαγνητοθερμιδικό υλικό η παράμετρος P_{field} ισούται με 0.5 .

6.4.2.5 Ο Μαγνήτης των Tura και Rowe [69]

Το μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε από τους Tura και Rowe το 2007 είναι ένα περιστροφικό σύστημα στο οποίο το μαγνητοθερμιδικό υλικό παραμένει ακίνητο και ένας μαγνήτης περιστρέφεται προκειμένου να αλλάξει το μαγνητικό πεδίο. Ο μαγνητικός σχεδιασμός που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη συσκευή απαρτίζεται από δύο ξεχωριστούς ομοκεντρικούς κυλινδρικούς μαγνήτες τύπου Halbach. Ο λόγος που χρησιμοποιούνται αυτοί οι δύο μαγνήτες είναι το ότι το σύστημα λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι μαγνητικές δυνάμεις να είναι ισορροπημένες. Στον ομοκεντρικό αυτό σχεδιασμό του κυλίνδρου Halbach το πεδίο στο εσωτερικό του κυλίνδρου μπορεί να ελεγχθεί περιστρέφοντας είτε τον εσωτερικό είτε τον εξωτερικό μαγνήτη. Μια εικόνα του σχεδιασμού μπορεί να φανεί στο σχήμα 6.14. Παρατηρείται ακόμη ότι όταν ο εσωτερικός μαγνήτης περιστρέφεται τότε η μέση πυκνότητα ροής μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς από 0.1 T έως 1.4 T. Επίσης, το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από κάθε μαγνήτη ξεχωριστά φαίνεται στο σχήμα 6.15. Ο συνολικός όγκος του μαγνητικού υλικού είναι 1.03 L, ενώ ο όγκος της περιοχής που εμφανίζεται το ισχυρό μαγνητικό πεδίο ισούται με 0.05 L (αυτές οι τιμές αφορούν μόνο τον ένα μαγνήτη και είναι ίδιες και για τον άλλο). Αξίζει ακόμα να σημειωθεί ότι η παραμένουσα μαγνήτιση στον εσωτερικό κύλινδρο είναι 1.15 T ενώ στον εξωτερικό μαγνήτη παίρνει την τιμή των 1.25 T. Η τιμή της παραμέτρου P_{field} λαμβάνει την τιμή 0.5 καθώς σε χρονικό διάστημα μισής περιόδου ο εσωτερικός μαγνήτης θα στρέφεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ακυρώνει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον εξωτερικό μαγνήτη.



Σχήμα 6.14: Ένα σχεδιάγραμμα του ομόκεντρου μαγνήτη Halbach που σχεδιάστηκε από τους Tura και Rowe [69] (μπροστινή όψη). Η εσωτερική και εξωτερική διάμετρος του εσωτερικού κυλίνδρου είναι 12.5 mm και 27 mm αντίστοιχα, ενώ για τον εξωτερικό κύλινδρο τα αντίστοιχα μεγέθη λαμβάνουν τις τιμές 30 mm και 60 mm. Το μήκος του πραγματικού ομόκεντρου κυλίνδρου είναι 100 mm. Η διαμόρφωση που παρουσιάζεται εδώ είναι η διαμόρφωση υψηλού πεδίου.



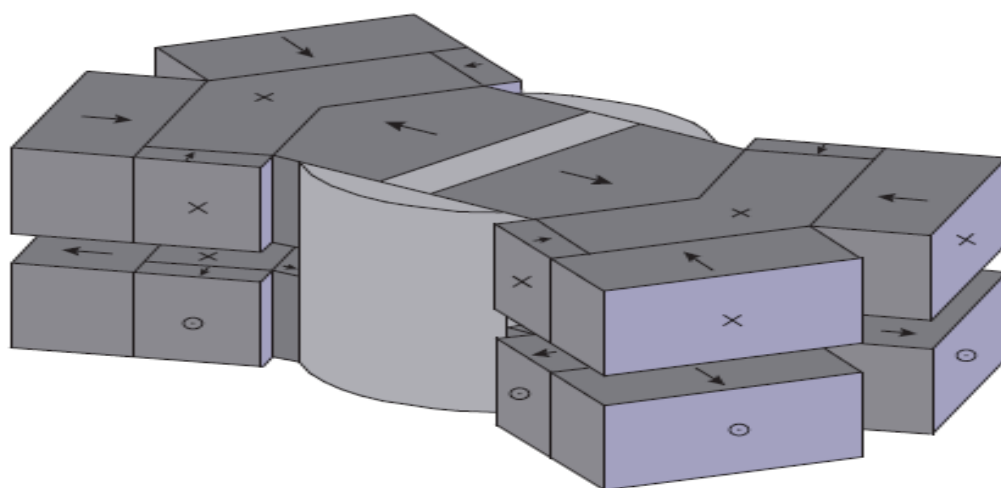
Σχήμα 6.15: Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται σε καθέναν από τους δύο κυλίνδρους Halbach [69].

6.4.3 Σύνθετες Μαγνητικές Δομές

Τα μαγνητικά συστήματα που παρουσιάζονται σε αυτήν την ενότητα έχουν μια πολύπλοκη δομή και αποτελούνται από ακανόνιστους σε σχήμα μαγνήτες.

6.4.3.1 Ο Μαγνήτης του Zimm [68]

Η μαγνητική ψυκτική συσκευή που παρουσίασε ο Zimm το 2007 και στην οποία έχουμε αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2 είναι μια περιστροφική μηχανή στην οποία το μαγνητοθερμιδικό υλικό είναι σταθερό και ο μαγνήτης περιστρέφεται. Αυτό το μαγνητικό σύστημα είναι αρκετά πολύπλοκο και αυτό μπορεί να φανεί και στο σχήμα 6.16. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο μαγνήτης αυτός αποτελείται από δύο μαγνήτες και από μαλακά μαγνητικά υλικά, αλλά ουσιαστικά αποτελείται από δύο διπλές μαγνητικές δομές σχήματος "Y" που χωρίζονται από ένα κενό αέρος. Ο συνολικός όγκος της μαγνητικής συνδεσμολογίας ισούται με 4.70 L, ο όγκος της περιοχής υψηλού μαγνητικού πεδίου είναι 0.15 L και η μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής λαμβάνει τη τιμή 1.5 T. Η τιμή της παραμέτρου P_{field} υπολογίζεται από την ταχύτητα με την οποία ο μαγνήτης περιστρέφεται από τη μια κλίση μαγνητοθερμιδικού υλικού στην επόμενη. Αυτές διαχωρίζονται μεταξύ τους υπό μια γωνία 30 μοιρών. Έτσι λοιπόν, αν ο μαγνήτης περιστρέφεται πολύ γρήγορα τότε η παράμετρος P_{field} μπορεί να πάρει τη τιμή 0.90.



Σχήμα 6.16: Ο μαγνήτης του Zimm [68]. Το μαγνητοθερμιδικό υλικό περνά μέσα από το κενό μεταξύ της άνω και της κάτω δομής σχήματος "Y". Τα τετράγωνα με σκούρο γκρι χρώμα είναι ατομικοί μαγνήτες, ενώ η δομή με απαλό γκρι χρώμα είναι κατασκευασμένη από μαλακό μαγνητικό υλικό.

6.4.3.2 Ο Μαγνήτης του Okamura [61]

Ο μαγνήτης που κατασκεύασε ο Okamura τοποθετήθηκε στην περιστροφική μαγνητική συσκευή που ο ίδιος κατασκεύασε και περιστρέφεται γύρω από πακτωμένους αγωγούς με μαγνητοθερμιδικό υλικό. Η μαγνητική αυτή κατασκευή αποτελείται από μια πολύπλοκη συνδεσμολογία από μόνιμους μαγνήτες και μαλακά μαγνητικά υλικά, τα οποία συναρμολογούνται σε σχήμα εσωτερικού στροφείου και το οποίο αποτελείται τόσο από μαγνήτες όσο και από μαλακά μαγνητικά υλικά, ενώ περιβάλλεται και από έναν εξωτερικό ζυγό που αποτελείται μόνο από μαλακό μαγνητικό υλικό. Το μαγνητοθερμιδικό υλικό είναι τοποθετημένο σε τέσσερις αγωγούς στο διάκενο μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής δομής. Το εσωτερικό στροφείο(ρότορας) έχει κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι μαγνήτες με πολλούς πόλους να κοιτούν ο ένας τον άλλον και να διαχωρίζονται από ένα μαλακό μαγνητικό υλικό. Αυτή η δομή επιτυγχάνει την αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου και "σπρώχνει" τις μαγνητικές γραμμές από το εσωτερικό στροφείο στον εξωτερικό ζυγό. Μια φωτογραφία του μαγνήτη αυτού φαίνεται στο σχήμα 6.17. Η μέση πυκνότητα της μαγνητικής ροής είναι 1 T, ενώ η μαγνητική αυτή κατασκευή περιέχει 3.38 L μαγνήτη και 0.80 L μαγνήτη στην περιοχή υψηλού πεδίου. Επίσης, η τιμή της παραμέτρου P_{field} υπολογίζεται με βάση την ταχύτητα με την οποία ο μαγνήτης περιστρέφεται από τον ένα αγωγό στον άλλον και τελικά προκύπτει μια τιμή ίση με 0.66. Ωστόσο, εκτιμάται ότι ο μαγνήτης μπορεί να περιστραφεί ακόμα πιο γρήγορα και η παράμετρος αυτή μπορεί να φτάσει τη τιμή 0.90 .



Σχήμα 6.17: Η εσωτερική δομή του μαγνήτη που κατασκεύασε ο Okamura [61]. Η εξωτερική δομή αποτελείται από έναν κύλινδρο από μαλακό μαγνητικό υλικό. Τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση της μαγνήτισης των μαγνητών, οι οποίοι φαίνονται στο σχήμα με άσπρο χρώμα.

6.5 Σύγκριση και Σχολιασμός

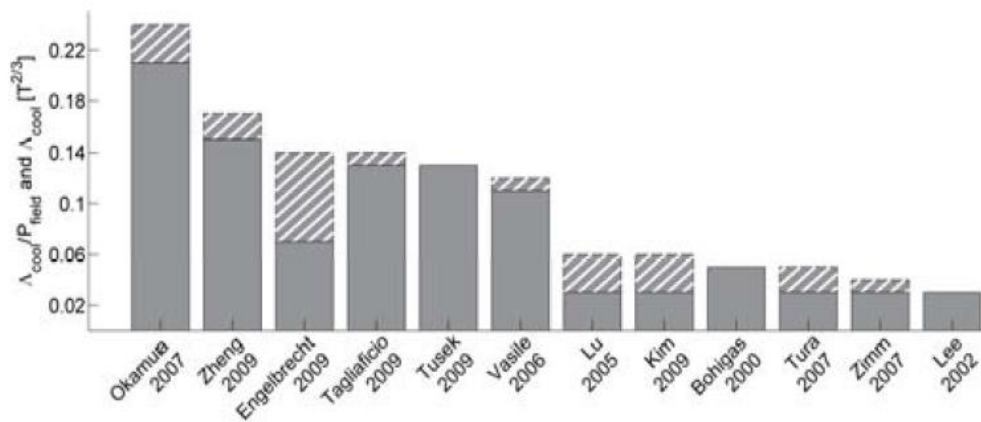
Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα διάφορα είδη των μαγνητών που σχεδιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν σε μαγνητικές ψυκτικές συσκευές. Στον πίνακα αυτό έχει επίσης υπολογιστεί η παράμετρος Λ_{cool} για καθένα μαγνήτη, πράγμα που μας επιτρέπει να κάνουμε μια άμεση σύγκριση των διαφόρων μαγνητικών σχεδιασμών.

Επίσης, δίνεται και το σχήμα 6.18 στο οποίο φαίνεται η παράμετρος $\Lambda_{\text{cool}}/P_{\text{field}}$, η οποία λαμβάνει υπόψη της μόνο τη μαγνητική συνδεσμολογία και όχι το σχεδιασμό της μαγνητικής ψυκτικής συσκευής, ενώ παρουσιάζεται και η παράμετρος Λ_{cool} . Από αυτό το σχήμα γίνεται εμφανές ότι ο μαγνητικός σχεδιασμός του Okamura [61] υπερτερεί συγκριτικά με όλους τους υπόλοιπους μαγνήτες. Συγκρίνοντάς τον για παράδειγμα με το μαγνήτη που κατασκεύασε ο Lu [199], ο μαγνήτης του Okamura [61] χρησιμοποιεί σχεδόν τον ίδιο αριθμό μαγνητών αλλά δημιουργεί μια περιοχή υψηλού μαγνητικού πεδίου η οποία είναι πάνω από 3 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν του μαγνήτη του Lu [199]. Ενδιαφέρον είναι ακόμη το γεγονός ότι αν και η μαγνητική συνδεσμολογία του Zimm [68] δημιουργεί μια πολύ ισχυρή περιοχή μαγνητικού πεδίου η παράμετρος Λ_{cool} είναι αρκετά χαμηλή και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κλιμάκωση της αδιαβατικής μεταβολής της θερμοκρασίας δεν ευνοείται σε πάρα πολύ δυνατά μαγνητικά πεδία. Επίσης, γίνεται εμφανές ότι πολλές από τις παλινδρομικές συσκευές χρησιμοποιούν το μαγνήτη μόνο κατά το ήμισυ του κύκλου τους, δηλαδή η παράμετρος P_{field} λαμβάνει τη τιμή 0.5, η οποία είναι ανεπαρκής. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι οι διαφορετικοί κύλινδροι Halbach δεν αποδίδουν εξίσου καλά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αποδοτικότητα του μαγνήτη Halbach εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις διαστάσεις του κυλίνδρου.

Επισημαίνεται ότι οι μαγνητικές ψυκτικές συσκευές που έχουν κατασκευαστεί και χρησιμοποιούν τους παραπάνω μαγνήτες, κατατάσσονται σύμφωνα με το θερμοκρασιακό τους εύρος και τη ψυκτική τους ικανότητα και συνεπώς δεν ακολουθούν τη μορφή του σχήματος 6.18 [39,211,217].

Κατασκευαστής	V_{mag} [L]	V_{field} [L]	H_{high} [T]	H_{low} [T]	P_{field}	Τύπος Μαγνήτη	$\frac{\Lambda_{\text{cool}}}{P_{\text{field}}}$ [T ^{2/3}]	Λ_{cool} [T ^{2/3}]
Bohigas (2005)	0.38	0.02	0.9 ^H	0	1	Ορθογώνιοι μαγνήτες πάνω σε στρογγυλή επιφάνεια	0.05	0.05
Engelbrecht (2009)	0.50	0.07	1.03	0	0.5	Κύλινδρος Halbach	0.14	0.07
Kim και Jeong (2009)	0.20	0.01	1.40	0	0.5	Κύλινδρος Halbach	0.06	0.03
Lee (2002)	14.6/m	0.32/m	1.90 ^{H,2D}	0	0.9	Κύλινδρος Halbach σχήματος "C"	0.03	0.03
Lu (2005)	2.94	0.14	1.40 ^H	0	0.5	Κύλινδρος Halbach	0.06	0.03
Okamura (2007)	3.38	0.80	1.00	0	0.9	Εσωτερικό μαγνητικό στροφέιο, μαλακός μαγνητικός ζυγός	0.24	0.21
Tagliafico (2009)	0.68	0.07	1.55 ^H	0	0.95	Ορθογώνιο μαγνητικό κύκλωμα με υποδοχή	0.14	0.13
Tura και Rowe (2007)	1.03	0.05	1.40	0.1	0.5	Ομόκεντροι κύλινδροι Halbach	0.05	0.03
Tusek (2009)	0.11	0.65	0.97	0.1	1.0	Σταθερός Μαγνήτης, περιστρεφόμενο Μ.Θ.Υ.	0.13	0.13
Vasile και Muller (2006)	9.2/m	0.75/m	1.90 ^{H,2D}	0	0.9	Κύκλωμα σχήματος "C"	0.12	0.11
Zheng (2009)	0.50	0.09	0.93	0	0.9	Μονός Μαγνήτης Μαγνητικού Κυκλώματος	0.17	0.15
Zimm (2007)	4.70	0.15	1.50	0.1	0.9	Μαγνητική δομή σχήματος "Y"	0.04	0.03

Πίνακας 6.1: Τα χαρακτηριστικά των διαφόρων μαγνητικών μοντέλων που εξετάσαμε. Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρείται ότι $\langle H^{2/3} \rangle = \langle H \rangle^{2/3}$ το οποίο ισχύει μόνο εάν το πεδίο είναι τελείως ομοιογενές. Το σύμβολο "H" δηλώνει ότι η αναφερόμενη τιμή του πεδίου είναι η μέγιστη που μπορεί να υπάρξει στο κέντρο του μαγνήτη και για αυτό δεν είναι πλήρως αντιπροσωπευτική της τιμής του πεδίου στην περιοχή υψηλής μαγνήτισης. Το σύμβολο "2D" επισημαίνει ότι οι μετρήσεις μας για το πεδίο έχουν προκύψει ύστερα από διδιάστατη προσομοίωση.



Σχήμα 6.18: Η παράμετρος $\Lambda_{\text{cool}}/P_{\text{field}}$ είναι η γραμμοσκιασμένη, ενώ η παράμετρος Λ_{cool} αναπαρίσταται με γκρι χρώμα. Παρατηρούμε ότι η παράμετρος Λ_{cool} είναι πάντα μικρότερη από την $\Lambda_{\text{cool}}/P_{\text{field}}$.

6.5.1 Σχεδιασμός του Βέλτιστου Μαγνήτη

Έχοντας ως βάση τις παραπάνω πληροφορίες σχετικά με τους μαγνήτες και τα χαρακτηριστικά που έχουν αυτοί μπορούν να επισημανθούν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να διακρίνουν μια μαγνητική συνδεσμολογία. Καταρχάς απαιτείται να παράγεται μια περιοχή στην οποία να υπάρχει ένα υψηλό μαγνητικό πεδίο με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ομοιογένεια. Επίσης ο μαγνήτης πρέπει να είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε το ποσό της διαρροής του πεδίου και το απομακρυσμένο πεδίο να είναι όσο το δυνατό μικρότερο. Επιπλέον, η μεγιστοποίηση της παραμέτρου Λ_{cool} μπορεί να επιτευχθεί με μερικούς από τους παρακάτω τρόπους:

- Χρησιμοποίηση όσο το δυνατόν λιγότερων μαγνητών σε μια μαγνητική συνδεσμολογία.
- Μεγιστοποίηση του όγκου του αναγεννητή.
- Συνεχής χρήση του μαγνήτη.
- Επιβεβαίωση ότι το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή χαμηλού πεδίου είναι όντως χαμηλό.
- Ελαχιστοποίηση απωλειών του πεδίου μέσω της χρήσης μαλακών μαγνητικών υλικών.
- Χρησιμοποίηση του χαμηλότερου δυνατού πεδίου για την επίτευξη των επιλεγμένων παραμέτρων λειτουργίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η μαγνητική θέρμανση, ψύξη καθώς και η μετατροπή της ενέργειας από τη μια μορφή στην άλλη έχουν προκαλέσει την ευαισθητοποίηση των επιστημόνων παγκοσμίως καθώς είναι μελλοντικά υποσχόμενες τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον και μάλιστα πολλές από αυτές έχουν καλές προοπτικές για εμπορική τους αξιοποίηση. Η αυξημένη ερευνητική δραστηριότητα που παρατηρήθηκε τα τελευταία χρόνια αντικατοπτρίζεται στο γεγονός ότι μέχρι το τέλος του 2010 είχαν κατασκευαστεί περίπου 42 πρωτότυπες συσκευές μαγνητικής ψύξης. Δεδομένου ότι οι περισσότερες από αυτές τις μηχανές αποτελούνται από σταθερές ή περιστρεφόμενες κλίνες που περιέχουν μαγνητοθερμιδικό υλικό, καθώς και μόνιμους ή κινούμενους μαγνήτες οι οποίοι δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο πάνω από την κλίνη γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι περισσότεροι ερευνητές αντιμετωπίζουν σε γενικές γραμμές τα ίδια προβλήματα. Σε αυτό λοιπόν εδώ το κεφάλαιο θα αναφέρουμε και θα αναπτύξουμε ορισμένες από τις ιδέες που έχουν προταθεί από την ερευνητική κοινότητα πάνω στην επίλυση αυτών των προβλημάτων καθώς και βελτιστοποιημένες και καινοτόμες εφαρμογές που μπορεί να έχει η μαγνητική ψύξη.

7.1 Υβριδικά Υλικά

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζει μια μαγνητική ψυκτική συσκευή είναι ο μεγάλος όγκος που καταλαμβάνει η μαγνητική συνδεσμολογία. Αυτό είναι άμεσα συνδεδεμένο με το κόστος του. Όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του μόνιμου μαγνήτη τόσο πιο πολύ αυξάνεται η πυκνότητα της μαγνητικής ροής που έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης και συνεπώς αυξάνεται και η αποδοτικότητα της συσκευής. Για αυτό το λόγο ένας από τους κύριους στόχους των επιστημόνων είναι η ανάπτυξη μαγνητικών ψυκτικών συσκευών με υψηλή απόδοση και μικρή μάζα μαγνήτη.

Στις υπάρχοντες συσκευές η μαγνητική συνδεσμολογία λειτουργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε η πυκνότητα της μαγνητικής ροής να κατανέμεται σχεδόν ομοιογενώς σε όλη την περιοχή της μαγνήτισης. Αυτός ο μαγνητιζόμενος χώρος αποτελείται συνήθως από δύο υποχώρους, εκ των οποίων ο ένας περιέχει το μαγνητοθερμιδικό υλικό

και ο άλλος το εργαζόμενο μέσο. Σημειώνεται ότι δεν απαιτείται να γίνεται μαγνήτιση του υποχώρου που υπάρχει το εργαζόμενο μέσο και στη βέλτιστη περίπτωση η πυκνότητα της μαγνητικής ροής θα κατανεμιμόταν μόνο μέσω του υποχώρου στον οποίο βρίσκεται το μαγνητοθερμιδικό υλικό. Επίσης, στο σιδηρομαγνητικό στάδιο τα περισσότερα μαγνητοθερμιδικά υλικά παρουσιάζουν μια χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα και στο παραμαγνητικό στάδιο προσεγγίζουν τις τιμές της διαπερατότητας του κενού. Οι ερευνητές λοιπόν πιστεύουν πως απαιτείται να υπάρξει μια ορισμένη τιμή της διαπερατότητας του μαγνητισμένου χώρου. Για αυτό το λόγο το μαγνητοθερμιδικό υλικό θα έπρεπε να παρουσιάζει παρόμοιες ιδιότητες με αυτές ενός μαλακού μαγνητικού διαπερατού υλικού. Σε μερικές περιπτώσεις αυτή η ιδιότητα ίσως απαιτηθεί για το ρευστό μεταφοράς θερμότητας.

Μέχρι σήμερα δεν έχουμε καμία γνώση για το πώς μπορούμε να επιτύχουμε αύξηση της διαπερατότητας ενός μαγνητοθερμιδικού υλικού. Ένα καλό παράδειγμα για το πώς θα μπορούσαμε να αυξήσουμε τη (σχετική) διαπερατότητα ενός μαγνητισμένου χώρου είναι η ανάμιξη μαγνητοθερμιδικού υλικού με άλλο υλικό το οποίο παρουσιάζει υψηλή διαπερατότητα. Αυτό φυσικά μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύ μικρές κλίμακες, δηλαδή νάνο, μικρο, μακρο. Επίσης, η μαγνητοθερμιδική επίδραση δεν είναι αποτελεσματική όταν τα κομμάτια που απαρτίζουν το μαγνητοθερμιδικό υλικό είναι πάρα πολύ μικρά (πχ μέγεθος ατόμου). Για αυτό λοιπόν το λόγο θεωρούμε πως το μικρότερο μέγεθος που μπορεί να έχει ένα μαγνητοθερμιδικό υλικό ή ένα υλικό με υψηλή μαγνητική διαπερατότητα θα ισούται με 50 nm. Τέτοιου είδους ανομοιογενή υλικά τα ονομάζουμε υβριδικά υλικά [218]. Επίσης, έχει προταθεί και η ιδέα μιας δομής σάντουιτς η οποία να δημιουργείται από εναλλαγή μαγνητοθερμιδικού υλικού και υλικών υψηλής διαπερατότητας σε διάφορα στρώματα [219]. Η μαγνητική διαδικασία που ξεκίνησε από τις εν λόγω δομές ονομάστηκε ροδέλα ροής.

Μερικά παραδείγματα αυτών των υβριδικών υλικών παρουσιάζονται στο σχήμα 7.1α-δ. Επιπλέον, τρισδιάστατες αριθμητικές προσομοιώσεις της μαγνητικής συμπεριφοράς έδειξαν ότι η εφαρμογή υβριδικών υλικών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη πυκνότητα της μαγνητικής ροής σε ένα μαγνήτη όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.2. Και στις 2 περιπτώσεις του σχήματος χρησιμοποιείται η ίδια μαγνητική συνδεσμολογία. Πιο συγκεκριμένα στην πρώτη περίπτωση θεωρούμε ότι το διάκενο αποτελείται από μαγνητοθερμιδικό υλικό στην παραμαγνητική του κατάσταση, η οποία εμφανίζεται πάνω από τη θερμοκρασία Curie. Σε αυτή την περίπτωση η σχετική μαγνητική διαπερατότητα προσεγγίζει τις τιμές της διαπερατότητας του αέρα. Στην δεύτερη περίπτωση το διάκενο υποτίθεται ότι περιέχει υβριδικό υλικό με μια αποτελεσματική σχετική διαπερατότητα που λαμβάνει τη τιμή $\mu_r=15$.

Η εφαρμογή υβριδικών υλικών όχι μόνο οδηγεί σε μείωση της μάζας του μαγνήτη ή σε υψηλότερες τιμές της πυκνότητας της μαγνητικής ροής, αλλά ακόμη και σε μια μικρότερη διαρροή της μαγνητικής ροής προς το περιβάλλον. Επίσης, σε αυτά τα υλικά οι μαγνητικές γραμμές είναι περισσότερο συγκεντρωμένες στο μαγνητοθερμιδικό υλικό σε σχέση με την περιοχή του ρευστού. Έχοντας ως βάση την ιδέα των υβριδικών υλικών, οι επιστήμονες που ασχολούνται με αυτά τα θέματα θα πρέπει εκτός από τη προσπάθεια που καταβάλουν για την αύξηση της μαγνητοθερμιδικής επίδρασης να κάνουν προσπάθειες για τη βελτίωση της διαπερατότητας των υλικών.

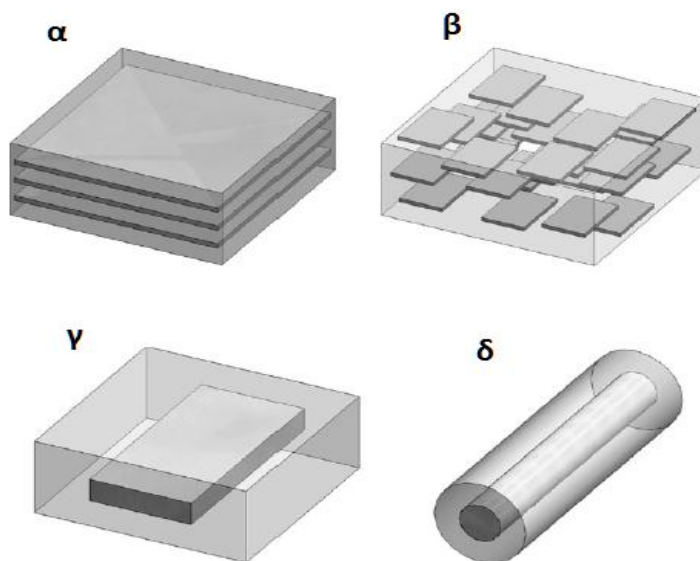
Συνοπτικά λοιπόν, τα υβριδικά υλικά παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

Πλεονεκτήματα:

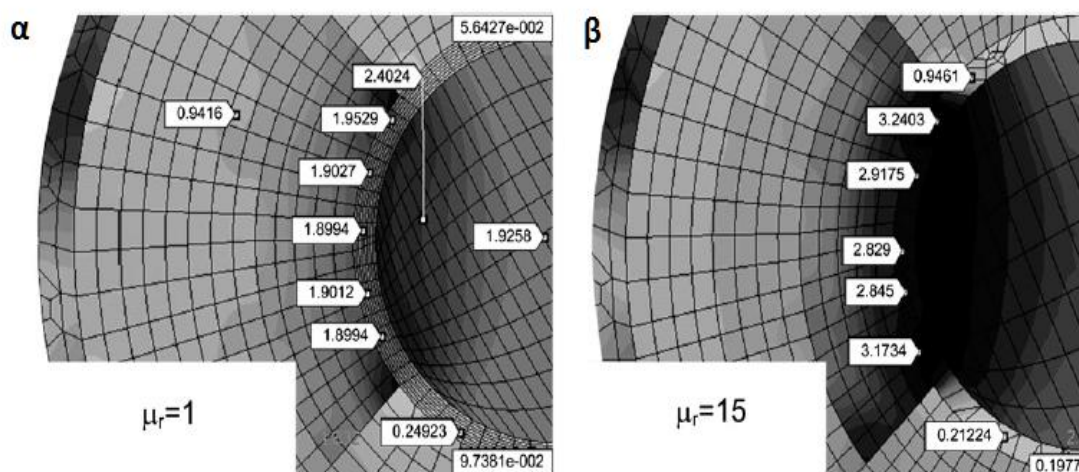
- Υψηλότερη μαγνητική πυκνότητα ροής
- Μικρή μάζα μαγνητών
- Υψηλότερη απόδοση μαγνητικών συσκευών
- Χαμηλότερο συνολικό ειδικό κόστος ανά μονάδα ενέργειας

Μειονεκτήματα:

- Το διαπερατό υλικό μειώνει το κλάσμα όγκου του μαγνητοθερμιδικού υλικού(πρόβλημα βελτιστοποίησης)
- Δυσκολία κατασκευής του υβριδικού υλικού
- Ύπαρξη μεγάλης πιθανότητας για επιδράσεις της υστέρησης όταν χρησιμοποιούνται διαπερατά υλικά
- Μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης δινορευμάτων
- Μεγαλύτερες μαγνητικές δυνάμεις
- Υψηλότερο κόστος για την αγορά ενός υβριδικού υλικού.



Σχήμα 7.1: Τέσσερα παραδείγματα υβριδικών υλικών [218,219]:(α)Λεπτές πλάκες που παράγονται από μαγνητοθερμιδικό υλικό είναι εναλλακτικά τοποθετημένες μαζί με στρώματα από μαλακό διαπερατό υλικό, (β)Μια μικρή πλάκα από μαγνητοθερμιδικό υλικό με τυχαία διασπορά νιφάδων από διαπερατό μαλακό υλικό, (γ)Μια μικρή πλάκα κατασκευασμένη από μαγνητοθερμιδικό υλικό με έναν πυρήνα αποτελούμενο από μαλακό διαπερατό υλικό, (δ)Ένα μικρό σύρμα που παράγεται από μαγνητοθερμιδικό υλικό με έναν κεντρικό πυρήνα από μαλακό διαπερατό υλικό.

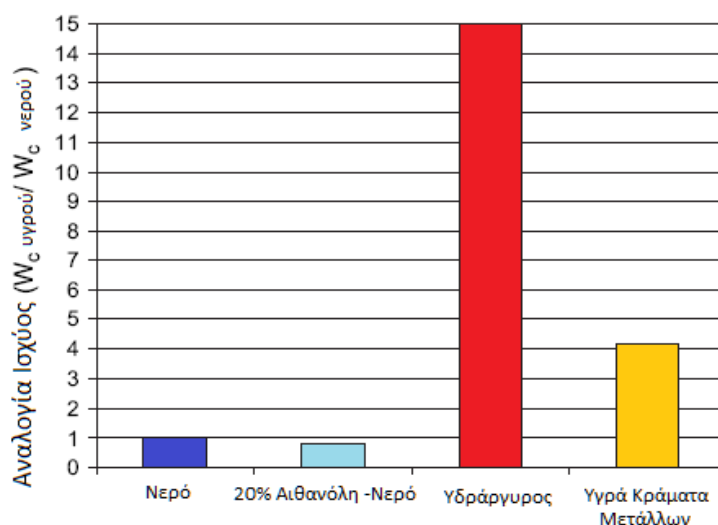


Σχήμα 7.2: Αποτελέσματα προσομοιώσεων όπου το μαγνητοθερμιδικό δαχτυλίδι θεωρείται πως έχει τιμή μαγνητικής διαπερατότητας ίσης με αυτήν του αέρα (α) και με μια βελτιωμένη μαγνητική διαπερατότητα όπως θα συνέβαινε σε ένα υβριδικό υλικό (β). Σε αυτή την περίπτωση η ενίσχυση του μαγνητικού πεδίου είναι περίπου ίση με 50% όπως φαίνεται από τις τιμές που δίνονται σε Tesla.

7.2 Υγρά Μέταλλα

Η ενέργεια που καταναλώνει μια συσκευή εξαρτάται αναλογικά από τη συχνότητα λειτουργίας της. Η συχνότητα αυξάνει την πυκνότητα ισχύος του μαγνητοθερμιδικού υλικού. Για αυτό λοιπόν το λόγο, μια μαγνητοθερμιδική συσκευή, η οποία λειτουργεί σε μια υψηλή συχνότητα πρέπει να έχει πολύ καλές δυνατότητες μεταφοράς της θερμότητας. Τέτοιες ικανότητες ειδικά απαιτούνται για αποδοτική διάχυση και συναγωγή θερμότητας μεταξύ του μαγνητοθερμιδικού υλικού και του εργαζόμενου μέσου. Η μεταφορά θερμότητας εξαρτάται από τη γεωμετρία της μαγνητοθερμιδικής δομής και τις θερμικές της ιδιότητες, οι οποίες είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα και η ειδική αγωγιμότητα. Αν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε μια πορώδη δομή τότε αυτή θα πρέπει να έχει μεγάλη επιφάνεια και μικρό πάχος. Επιπλέον, ένα κατάλληλο ρευστό μεταφοράς θερμότητας που να έχει καλή θερμική αγωγιμότητα και ειδική θερμοχωρητικότητα είναι απαραίτητο, ενώ και οι ιδιότητες ροής του πρέπει να λαμβάνονται υπ'όψιν. Αυτές οι ιδιότητες είναι το κινηματικό ιξώδες, η ταχύτητα του ρευστού, οι απώλειες εισόδου και εξόδου κ.λ.π. Επίσης, η υδραυλική διάμετρος πρέπει να επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην παρατηρούνται πολύ υψηλές πτώσεις πίεσης. Η στρωτή ροή προτιμάται να πληρεί αυτή την προϋπόθεση και δομές που σχηματίζουν μικρά κανάλια, όπως π.χ. σχήμα "ζιγ-ζακ" ή "κηρήθρα". Η σωστή εφαρμογή αυτών των δομών εμποδίζει την ταραχώδη κίνηση της ροής του ρευστού. Σύμφωνα με τους επιστήμονες που ασχολούνται με τα υλικά απαιτείται ιδιαίτερη προσπάθεια προκειμένου να κατασκευαστούν μαγνητοθερμιδικά υλικά σε τέτοιες δομές με απλές και χαμηλού κόστους μεθόδους. Σε πυκνότητες υψηλής ισχύος πάρα πολλά υγρά είναι αναποτελεσματικά λόγω της αδυναμίας τους να μεταφέρουν υψηλά ποσά θερμότητας αποτελεσματικά και ταχέως. Στο παρακάτω σχήμα 7.3 παρουσιάζεται μια σύγκριση της ικανότητας μεταφοράς θερμότητας μεταξύ ορισμένων υγρών.

Από αυτό το διάγραμμα παρατηρούμε ότι ο υδράργυρος λόγω της ρευστοδυναμικής του και των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του αποτελεί ένα πάρα πολύ καλό ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, αλλά δυστυχώς είναι εξαιρετικά τοξικό για το περιβάλλον. Αντιθέτως τα υγρά κράματα μετάλλων γαδολινίου (Gd) και ινδίου (In) είναι πιο φιλικά ως προς το περιβάλλον. Επίσης, επειδή η αγωγιμότητά τους είναι πολύ μεγάλη εν σύγκριση με άλλα ρευστά, η ικανότητά τους για μεταφορά θερμότητας σε μικροδομές είναι εξαιρετική. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο τα υγρά αυτά θα αποτελούν την πλέον κατάλληλη επιλογή για την κατασκευή συμπαγών και αποτελεσματικών μαγνητοθερμιδικών συσκευών στο μέλλον, ειδικά αν απαιτείται ένα υψηλό θερμοκρασιακό εύρος.



Σχήμα 7.3: Η θερμότητα που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου για διαφορετικά ρευστά μεταφοράς της θερμότητας σε μαγνητοθερμιδικές συσκευές σε σχέση με αυτή του νερού [222].

Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι η ομάδα των υγρών μετάλλων και οι μαγνητικοί αναστολείς επιτρέπουν την εφαρμογή μιας ειδικής μεθόδου άντλησης, η οποία φέρει την ονομασία μαγνητό-υδροδυναμική οδήγηση (ΜΥΟ). Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των μαγνητικών πεδίων και υγρών αγωγών ηλεκτρισμού [220]. Οι πιο γνωστές έως σήμερα εφαρμογές σχετίζονται με τη ροή πλάσματος [221]. Ακόμη για άντληση του ρευστού υπάρχουν και άλλες δυνατοί μεθόδοι όπως είναι για παράδειγμα η σιδηρό-υδροδυναμική οδήγηση (ΣΥΟ). Αυτή η μέθοδος ασχολείται με τη μηχανική της κίνησης των υγρών που επηρεάζονται από ισχυρές δυνάμεις μαγνητική πόλωσης, ενώ σε αυτή την μέθοδο δεν υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα που να ρέει στο υγρό. Σύμφωνα με τον Rosensweig [220] η επίδραση της ΣΥΟ είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με αυτή της ΜΥΟ.

Οι πυκνότητες της μαγνητικής ροής στις ζώνες μαγνήτισης μπορούν να βελτιωθούν με την εφαρμογή και την χρησιμοποίηση ρευστών υψηλής διαπερατότητας. Καθώς αυτά ρέουν μέσα από το πορώδες μαγνητοθερμιδικό υλικό, προσελκύουν γραμμές ροής, οι οποίες πρέπει επίσης να διασχίσουν τις περιοχές του μαγνητοθερμιδικού υλικού. Συνοπτικά μπορούμε να παρουσιάσουμε τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τα υγρά μέταλλα σε σύγκριση με το νερό.

Πλεονεκτήματα:

- Μείωση της μάζας των μαγνητών
- Υψηλότερη πυκνότητα μαγνητικής ροής
- Μεγαλύτερη Ειδική Ισχύς
- Καλύτερη απόδοση
- Μεγαλύτερα θερμοκρασιακά εύρη μεταξύ της πηγής θερμότητας και της ψύκτρας
- Σημαντικά χαμηλότερο συνολικό ειδικό κόστος ανά μονάδα ενέργειας
- Πιθανή εφαρμογή των μεθόδων ΣΥΟ και ΜΥΟ.

Μειονεκτήματα:

- Τοξικότητα ορισμένων ρευστών
- Υψηλότερες απώλειες πίεσης
- Διαμήκης διάχυτη μεταφορά θερμότητας
- Πιθανή επαγωγή των δινορρευσμάτων
- Υψηλότερη τιμή(κόστος) αυτών των ρευστών

7.3 Αναγεννητική Συσκευή Με Ρευστό Υψηλής Διαπερατότητας

Η βασική ιδέα της αναγεννητικής αυτής συσκευής είναι η χρησιμοποίηση ενός ρευστού μεταφοράς θερμότητας το οποίο να παρουσιάζει πολύ υψηλή μαγνητική διαπερατότητα [222]. Στα σχήματα 7.4 και 7.5 απεικονίζεται μια τεχνική υλοποίησης της πιο πάνω ιδέας. Τα μαγνητικά διαπερατά υγρά είναι υγρά κράματα, αναστολείς ή νανορευστά. Τέτοια ρευστά έχουν την ικανότητα να ρέουν σε τοροειδή δομή. Η ροή του ρευστού μπορεί να προκαλείται από μια περιοδική κίνηση του μαγνητικού πεδίου, το οποίο μαγνητίζει 2 τμήματα του στερεού. Επίσης, η πηγή δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου θα μπορεί να αποτελείται από περιοδικά κινούμενους μόνιμους μαγνήτες. Οι μαγνητισμένες περιοχές είναι τμήματα 90° πλάτους στην κατεύθυνση του αζιμουθίου. Το μισό από αυτά τα τμήματα είναι γεμάτο από μια πορώδες μαγνητοθερμιδική δομή. Για αυτό το λόγο το μαγνητοθερμιδικό υλικό θα πρέπει να τοποθετείται σε τέσσερα τμήματα 45° , όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.4 (4 μαύρα τμήματα). Τα υπόλοιπα 4 τμήματα περιέχουν μικρούς εναλλάκτες θερμότητας, οι οποίοι μαζί με τις εξωτερικές τους συνδέσεις είναι επίσης σταθεροί. Αυτοί συνδέονται με ένα εξωτερικό δευτερεύον κύκλωμα ρευστού όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 7.5. Το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας ρέει μέσω της δομής του μαγνητοθερμιδικού υλικού και των εναλλακτών θερμότητας. Εκεί εναλλακτικά θα μπορεί να

αλλάζει κατεύθυνση μεταξύ δεξιόστροφης και αριστερόστροφης διεύθυνσης.

Προκειμένου να καταλάβει κανείς αυτήν την καινοτόμα ιδέα αρκεί να κοιτάξει πιο προσεχτικά το σχήμα 7.4. Μόνο δύο από τις τέσσερις περιοχές σε αντίθετες θέσεις είναι μαγνητισμένες. Επιπλέον, δύο περιοχές που έχουν θερμούς μικροεναλλάκτες θερμότητας θα είναι τοποθετημένες στο τομέα μαγνητικού πεδίου, ενώ την ίδια χρονική στιγμή δύο άλλοι ψυχροί εναλλάκτες θερμότητας θα βρίσκονται έξω από τη περιοχή της μαγνήτισης. Το μαγνητικό πεδίο θα αρχίζει να κινείται σε μια δεξιόστροφη κατεύθυνση 45^0 . Επειδή το διαπερατό ρευστό μεταφοράς της θερμότητας μεταφέρεται από το μαγνητικό πεδίο, αυτό θα κινείται συγχρόνως προς την ίδια κατεύθυνση. Στη συνέχεια το διαπερατό ρευστό το οποίο βρισκόταν στο μαγνητισμένο μαγνητοθερμιδικό υλικό θα μετακινηθεί στο θερμό εναλλάκτη θερμότητας. Ταυτόχρονα το διαπερατό υγρό που περιέχεται στον ψυχρό εναλλάκτη θερμότητας θα μετακινείται στο τμήμα του απομαγνητισμένου μαγνητοθερμιδικού υλικού. Αυτές οι περιοδικές κινήσεις του ρευστού απεικονίζονται στα σχήματα 7.4α και 7.4β. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι θα επιτρέπει την επίστρωση του σταθερού μαγνητοθερμιδικού υλικού στην κατεύθυνση του αζιμουθίου. Αυτό οδηγεί στην εξασφάλιση μιας αρκετά υψηλής θερμοκρασιακής διαφοράς.

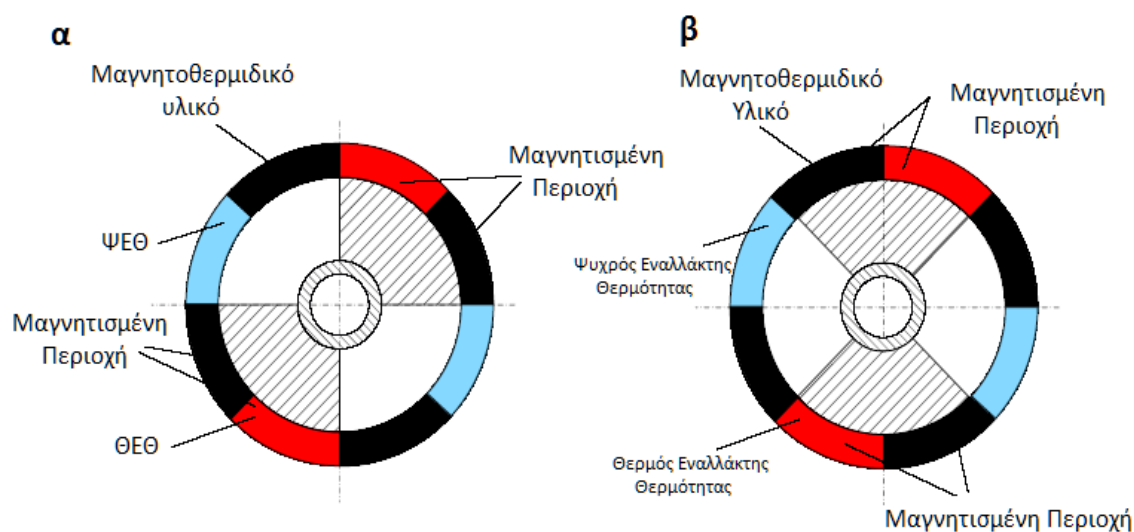
Η κατασκευή μιας συσκευής μαγνητικής ψύξης σαν αυτήν που περιγράφηκε παραπάνω συνοπτικά παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συγκριτικά με τις ήδη υπάρχουσες :

Πλεονεκτήματα:

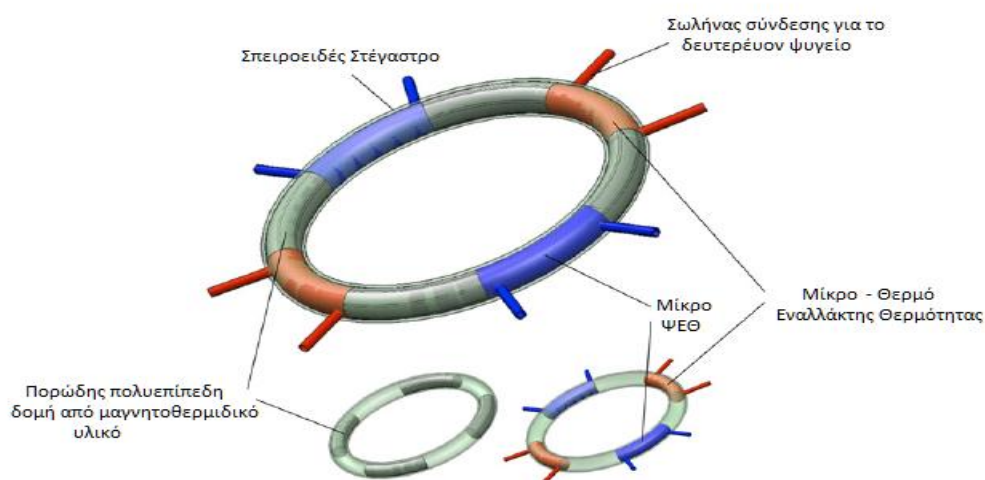
- Μικρός ή μηδενικός αριθμός κινητών τμημάτων
- Οι βαλβίδες δεν χρειάζεται να αντικαθίστανται
- Όλες οι συνδέσεις των ρευστών είναι στατικές
- Δεν υπάρχουν απώλειες ρευστού
- Δεν απαιτούνται αντλίες για τη λειτουργία του πρωτεύοντος κυκλώματος
- Ιδανική μεταφορά θερμότητας
- Πιθανή μείωση των δινορρευσμάτων
- Πολύ υψηλή ειδική πυκνότητα μαγνητικής ροής
- Υψηλή συχνότητα λειτουργίας(υψηλή ειδική ισχύς)
- Συμπαγής κατασκευή της μαγνητικής μηχανής
- Καλύτερη απόδοση
- Μεγάλα εύρη θερμοκρασίας
- Δυνατότητα εφαρμογής των μεθόδων ΣΥΟ και ΜΥΟ

Μειονεκτήματα:

- Η συχνότητα περιορίζεται από την ταχύτητα της μεταφοράς θερμότητας του ρευστού(απώλειες πίεσης)
- Η συχνότητα ίσως να περιορίζεται από την αδράνεια του διαπερατού ρευστού
- Πιθανή επαγωγή των δινορρευσμάτων
- Το μαγνητικό πεδίο καταλαμβάνει περιοχές όπου δεν υπάρχει μαγνητοθερμιδικό υλικό
- Υψηλότερες απώλειες πίεσης σε σχέση με τα συστήματα νερού
- Υψηλότερο κόστος για την αγορά του ρευστού



Σχήμα 7.4: Αναγεννητική συσκευή όπου με μια περιοδική κίνηση ένα υψηλά διαπερατό ρευστό μεταφοράς θερμότητας, μεταφέρει θερμότητα από και προς τους εναλλάκτες θερμότητας μέσω των στατικών μαγνητοθερμιδικών δομών [222].



Σχήμα 7.5: Ένα σταθερό σπειροειδές στέγαστρο με δομές από μαγνητοθερμιδικό υλικό και εναλλάκτες θερμότητας [222].

7.4 Χρήση Μαγνητοθερμιδικού Ρευστού

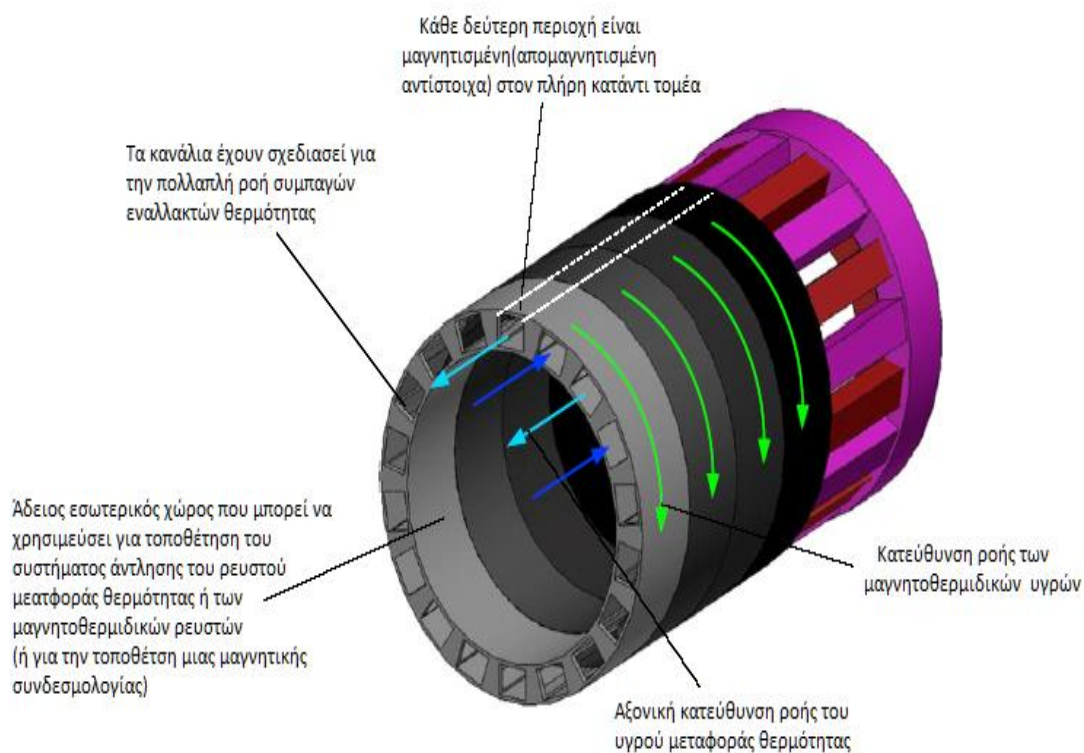
Μια εξίσου καινοτόμα ιδέα η οποία έχει μελετηθεί θεωρητικά και απομένει μόνο η πειραματική της υλοποίηση είναι αυτή της αντικατάστασης του μαγνητοθερμιδικού υλικού στερεάς κατάστασης από μαγνητοθερμιδικούς αναστολείς ή από υγρά μαγνητοθερμιδικά κράματα [222]. Στο σχήμα 7.6 απεικονίζεται η μορφή που θα μπορούσε να έχει το τμήμα όπου θα τοποθετείται το μαγνητοθερμιδικό υγρό σε μια τέτοια συσκευή μαγνητικής ψύξης. Η συσκευή αυτή θα αποτελείται από τέσσερα δαχτυλίδια που θα συνδέονται ομοαξονικά σε σειρά, στα οποία τέσσερα διαφορετικά μαγνητοθερμιδικά υγρά θα περιστρέφονται. Φυσικά ίσως να μπορεί να επιλεγεί και άλλος αριθμός δαχτυλιδιών, ενώ αξίζει να σημειωθεί πως το κάθε ρευστό που θα χρησιμοποιηθεί θα επιλέγεται με βάση τη θερμοκρασία Curie του. Ακόμη, η μαγνήτιση θα προκαλείται σε όλα τα ρευστά που περιέχονται στα τέσσερα ομοαξονικά δαχτυλίδια. Ο λόγος που θα συμβαίνει αυτό είναι ο μεγάλος αριθμός των πιθανών διαμορφώσεων των μόνιμων μαγνητικών συνδεσμολογιών. Ωστόσο, στην κατεύθυνση του αζιμουθίου θα καλύπτεται μόνο κάθε δεύτερη περιοχή, οδηγώντας σε συμμετρικά κατανεμημένες περιοχές και οι οποίες δεν θα είναι μαγνητισμένες. Δεδομένου λοιπόν, ότι δεν θα υπάρχει καμία μετακίνηση κινητού μέρους μπορεί το μέγεθος του διακένου να μειωθεί σημαντικά. Επιπλέον, ένας προσεχτικός σχεδιασμός της συσκευής συμπεριλαμβανομένως και των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για τους εναλλάκτες θερμότητας ίσως να μπορούν να μας οδηγήσουν σε ένα ακόμη πλεονέκτημα το οποίο θα είναι η προσέλευση του μαγνητικού πεδίου. Αυτά τα δύο πλεονεκτήματα που αναφέραμε άμα συνδιαστούν μεταξύ τους θα μπορούν να οδηγήσουν σε μια μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής ή σε μια μικρότερη μάζα μαγνητών για την κάθε απαιτούμενη ψυκτική ισχύς. Συνοπτικά λοιπόν, η συσκευή αυτή έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

Πλεονεκτήματα:

- Μικρό μέγεθος μαγνητών(μικρότερη μάζα)
- Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη
- Δεν υπάρχουν διαρροές του ρευστού
- Μη ύπαρξη κινητήρων(εξαίρεση αποτελούν οι αντλίες)
- Ουσιαστική μείωση των δινορρευματών
- Χαμηλό συνολικό κόστος ανά μονάδα ισχύος
- Υψηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής
- Υψηλή πυκνότητα ισχύος(ισχύς ανά μονάδα μάζας ή όγκου)
- Μικρότερες απώλειες μεταφοράς θερμότητας

Μειονεκτήματα:

- Το μαγνητοθερμιδικό υγρό δεν μπορεί να έχει στρώματα. Έτσι λοιπόν διαφορετικά μαγνητοθερμιδικά υγρά θα εφαρμόζονται σε διαφορετικά τμήματα της συσκευής.
- Πιθανή επαγωγή των δινορρευμάτων όταν χρησιμοποιούνται ως μαγνητοθερμιδικά ρευστά υγρά μέταλλα.
- Οι απώλειες λόγω του ιξώδους του μαγνητοθερμιδικού υγρού περιορίζουν την πολύ υψηλή συχνότητα λειτουργίας.



Σχήμα 7.6: Σταθερή συσκευή τοποθέτησης του μαγνητοθερμιδικού ρευστού [222].

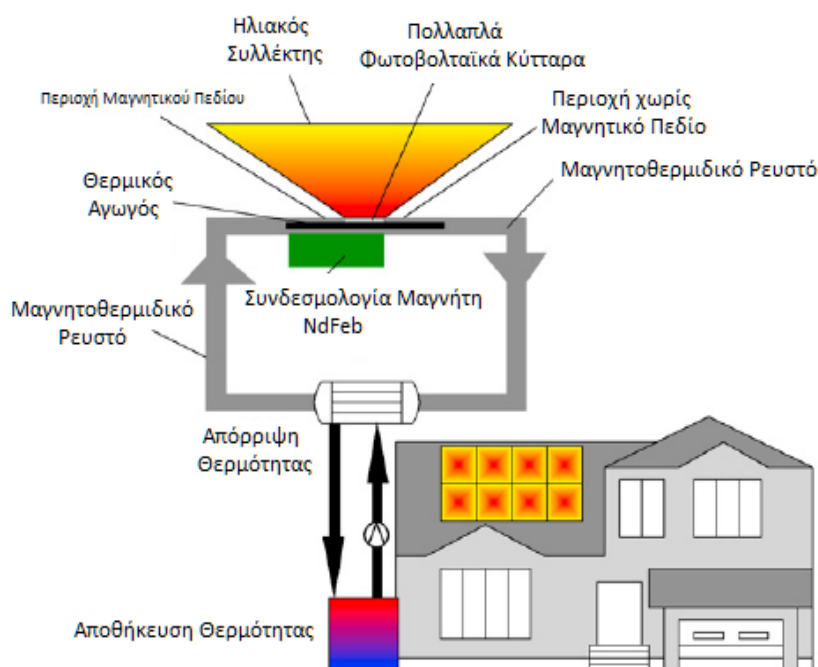
7.5 Αυτόνομα Συστήματα Ψύξης

Πολλές διαφορετικές νέες συσκευές που κατασκευάζονται μπορούν να επιτύχουν μια υψηλή θερμική ισχύς. Ωστόσο, απαιτείται μια κύρια πηγή ισχύος για τη διαδικασία άντλησης του ρευστού. Ένα αυτόνομο σύστημα χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι καμία εξωτερική τροφοδοσία ρεύματος δεν απαιτείται προκειμένου να μεταφέρει το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας. Εδώ θα περιγράψουμε ένα απλό παράδειγμα αυτής της εφαρμογής μέσω ενός καινοτόμου φωτοβολταϊκού συστήματος.

Το επίπεδο θερμοκρασίας της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών κυττάρων καθορίζει την αποτελεσματικότητά τους. Σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μια πολύ υψηλή θερμοκρασία μπορεί ίσως ακόμη και να καταστρέψει τα κύτταρα. Για αυτό το λόγο πρέπει να προβλεφθεί η χρησιμοποίηση ενός συστήματος ψύξης. Προκαλεί αίσθηση ότι η θερμότητα που εξάγεται από ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περεταίρω χρήση και όχι απλώς να απορροφηθεί στο περιβάλλον. Ένας αρκετά μεγάλος αριθμός ψυκτικών συστημάτων χρησιμοποιούνται ήδη για τέτοιες εφαρμογές [223,224]. Σε αυτά τα συστήματα χρησιμοποιείται κυρίως αέρα από το περιβάλλον ή ανακυκλοφορία θερμού αέρα, νερού και σε ορισμένες σπάνιες περιπτώσεις μερικά άλλα υγρά. Επιπλέον, η τεχνολογία των σωλήνων θέρμανσης αναφέρεται πολύ συχνά, αλλά στην πραγματικότητα πολύ σπάνια εφαρμόζεται. Ένα μειονέκτημα όλων αυτών των συστημάτων είναι το ότι δεν επιτρέπουν πολύ υψηλές πυκνότητες ισχύος. Μερικές πρόσφατες εξελίξεις της IBM [225] μας επιτρέπουν πλέον την εφαρμογή ενός ειδικού υγρού μετάλλου το οποίο θα επιτρέπει αρκετά υψηλές πυκνότητες ισχύος. Με αυτά τα υγρά η θερμότητα μπορεί να αφαιρεθεί από τα κύτταρα με έναν πολύ αποδοτικό τρόπο με συνήθως ένταση της τάξεως των 200-300 W/cm².

Ως μια εναλλακτική λύση σε αυτή τη μέθοδο προτείνονται [222] μαγνητικές ψυκτικές μηχανές στις οποίες θα χρησιμοποιούνται μαγνητοθερμιδικοί αναστολείς. Μια τέτοια λύση παρουσιάζεται και στο σχήμα 7.7. Βασική απαίτηση είναι τα σωματίδια που θα χρησιμοποιηθούν να έχουν πολύ μικρό μέγεθος διότι τότε υψηλότερα κλάσματα του όγκου των στερεών υλικών μπορούν να υλοποιηθούν. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί για ψύξη, θέρμανση ή ακόμα και για μετατροπή της ενέργειας από μια μορφή σε άλλη. Η χρήση της μεθόδου αυτής για την μετατροπή της ενέργειας μπορεί να εφαρμοστεί στο ψυκτικό σύστημα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Δημιουργείται λοιπόν, μια θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της πηγής θερμότητας και της ψύκτρας και αν αυτή η διαφορά είναι επίσης παρούσα στις περιοχές όπου υπάρχει μαγνητοθερμιδικό υλικό και παρατηρούνται αλλαγές του μαγνητικού πεδίου τότε εμφανίζονται οι αντίστοιχες δυνάμεις ροπών.

Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας και η αλλαγή του μαγνητικού πεδίου τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η επίδραση της ροπής [226]. Αυτό οδηγεί σε μια υψηλότερη διαφορά πίεσης, η οποία προκαλεί μεγαλύτερη ροή μάζας του μαγνητοθερμιδικού ρευστού. Επειδή τα μαγνητοθερμιδικά υλικά είναι μέταλλα, η θερμική τους αγωγιμότητα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Το αποτέλεσμα είναι ένας υψηλός συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας, ο οποίος απαιτείται για την αποδοτική μεταφορά θερμότητας από μια θερμή πηγή.



Σχήμα 7.7: Παρουσίαση της βασική ιδέας του προτεινόμενου νέου συστήματος CPV με μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας.

7.6 Υβριδικές Μαγνητοθερμιδικές Κλιματιστικές Συσκευές

Στον κλιματισμό, το επίπεδο θερμοκρασίας της ψυκτικής διεργασίας δεν απέχει συνήθως πολύ από εκείνο του περιβάλλοντος γύρω από την συσκευή. Για αυτό το λόγο η θερμοκρασία του υγρού που χρησιμοποιείται για τη ψύξη μπορεί να είναι ελαφρώς υψηλότερη συγκριτικά με τις συμβατικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στα θερμαντικά σώματα (fan coils). Επιπρόσθετα εκτός από τα συμβατικά ψυκτικά συστήματα, υπάρχουν και άλλες εναλλακτικές τεχνολογίες ψύξης όπως για παράδειγμα τα εξατμιστικά συστήματα ψύξης κ.λ.π. Οι εξατμιστικές ψυκτικές συσκευές (evaporative cooling devices) δεν μπορούν να φτάσουν μεγάλα εύρη θερμοκρασιών και υψηλή ψυκτική ισχύς, επειδή η λειτουργία τους περιορίζεται από την υγρασία του αέρα. Μια άλλη εναλλακτική μελλοντική ψυκτική τεχνολογία είναι φυσικά η μαγνητική ψύξη. Το μόνο μειονέκτημα που παρουσιάζει αυτή η τεχνολογία και πρέπει να λυθεί είναι η λειτουργία της σε περιορισμένο θερμοκρασιακό εύρος και οι απαιτήσεις για λειτουργία σε σταθερές θερμοκρασίες. Ως αποτέλεσμα όλων αυτών, ένας συνδυασμός των τεχνολογιών της αδιαβατικής και της μαγνητικής ψύξης μπορούν μελλοντικά να οδηγήσουν σε μια πολλά υποσχόμενη λύση [222].

Όταν η αρχή της εξατμιστικής ψύξης συνδυάζεται με τη μαγνητοθερμιδική τότε το συγκεκριμένο κόστος ανά μονάδα ενέργειας για μια δεδομένη θερμοκρασιακή διαφορά μπορεί να μειωθεί σημαντικά εν συγκρίσει με τα ενιαία συμβατικά μαγνητικά ή αδιαβατικά συστήματα ψύξης. Εξαιτίας της υποστήριξης από την διεργασία της εξατμιστικής ψύξης ο μαγνητοθερμιδικός κύκλος θα μπορεί να λειτουργεί με ένα μάλλον μικρό εύρος της θερμοκρασίας και αυτό έχει αρκετά οφέλη. Η δήλωση αυτή αποτελεί ένα άμεσο αποτέλεσμα της εφαρμογής χαμηλότερων σε ένταση μαγνητικών πεδίων και μικρότερου αριθμού αναγεννητικών διεργασιών μεταφοράς της θερμότητας. Δύο τέτοια συστήματα παρουσιάζονται σχηματικά στα σχήματα 7.8 και 7.9, ενώ στα σχήματα 7.10 και 7.11 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα θερμοδυναμικά τους διαγράμματα (θερμοκρασίας-απόλυτης υγρασίας) [227]. Σύμφωνα με τα σχήματα 7.8 και 7.10 ο φρέσκος αέρας περνά μέσα από τον τροχό ανάκτησης θερμότητας και η θερμοκρασία που φαίνεται στο διάγραμμα 7.10 πέφτει από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2. Από το σημείο 2 φρέσκος αέρας περνάει μέσα από το ψυχρό τμήμα του μαγνητικού ψυγείου, όπου η θερμοκρασία μειώνεται περαιτέρω για να φτάσει στο σημείο 3. Ένα μαγνητικό ψυγείο μπορεί να σχεδιαστεί με τέτοιον τρόπο ώστε να λειτουργεί σε άμεση επαφή με τον αέρα που ενεργεί επίσης ως ρευστό μεταφοράς της θερμότητας και που σε αυτήν την περίπτωση ένας τέτοιος σχεδιασμός θα ήταν ιδιαίτερα ευνοϊκός. Επιπλέον, κατάντι δροσερότερος αέρας ρέει μέσα στο δωμάτιο. Από την άλλη πλευρά αέρας

από το δωμάτιο(κατάσταση 4) ρέει σε ένα θάλαμο ψεκασμού, όπου εμφανίζεται η αδιαβατική ψύξη(κατάσταση 5). Στη συνέχεια ο αέρας ρέει μέσω ενός τροχού ανάκτησης θερμότητας, που τον ψύχει και αυτός εξέρχεται στο περιβάλλον(κατάσταση 6). Εάν η σχετική υγρασία του φρέσκου αέρα είναι πολύ υψηλή μετά τη ψύξη του από το μαγνητικό ψυγείο(κατάσταση 3) τότε ο αέρας θα μπορεί να θερμανθεί επιπρόσθετα μέσω του θερμού τμήματος της μαγνητικής συσκευής.

Φυσικά και άλλες λύσεις είναι εφικτές. Μία από αυτές παρουσιάζεται στο σχήμα 7.9 όπου η συσκευή ανάκτησης θερμότητας και το μαγνητικό ψυγείο βρίσκονται σε μια ενιαία μονάδα. Αν το μαγνητοθερμιδικό υλικό επιτρέπει μια εναπόθεση του ατμού, τότε ο ψεκασμός του νερού μπορεί να συμβεί απευθείας στο μαγνητοθερμιδικό τροχό. Τέτοιου είδους απλουστεύσεις και τροποποιήσεις μπορούν να μειώσουν σημαντικά το κόστος της επένδυσης του εξεταζόμενου υβριδικού συστήματος.

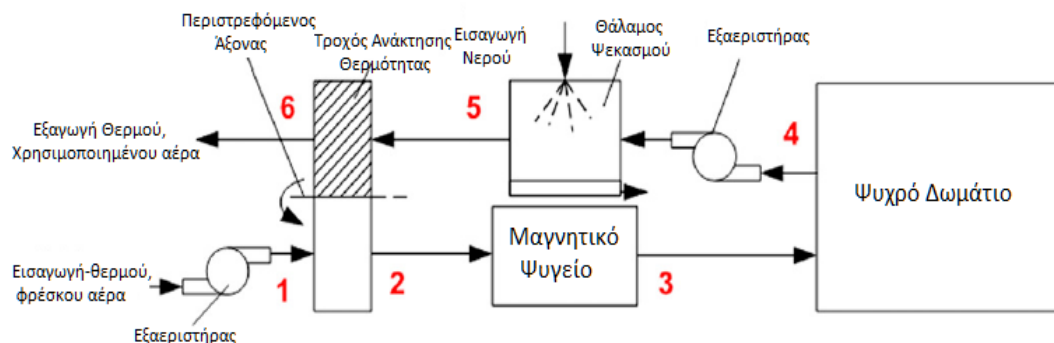
Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών των συνδυαστικών συστημάτων ψύξης είναι τα ακόλουθα:

Πλεονεκτήματα:

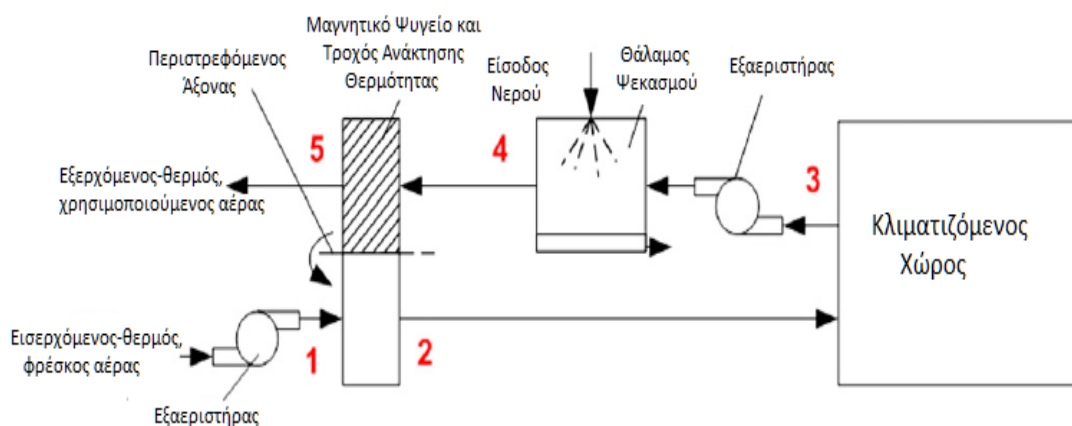
- Υψηλή Απόδοση.
- Χαμηλό συνολικό ειδικό κόστος ανά ισχύ σε σύγκριση με άλλες εναλλακτικές λύσεις.
- Μικρότερος αριθμός των διαφορετικών μαγνητοθερμιδικών υλικών.
- Μεγάλος αριθμός από δυνατούς σχεδιαστικούς συνδυασμούς.
- Μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά.

Μειονεκτήματα:

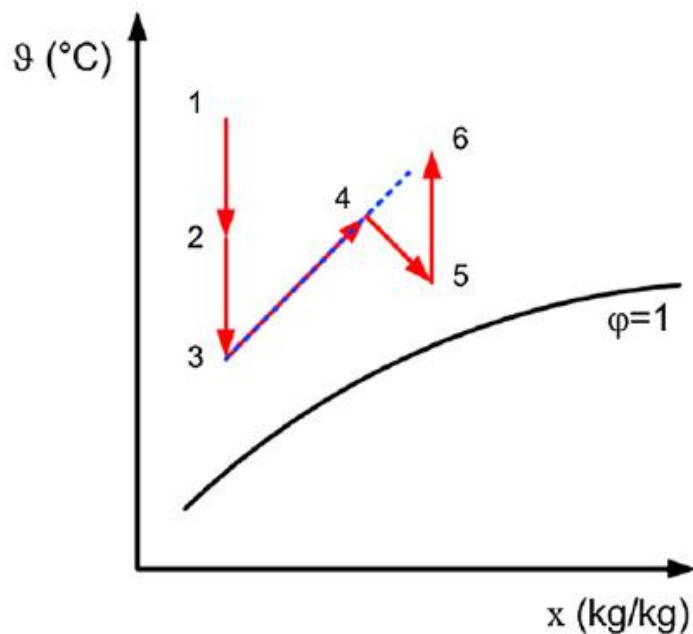
- Το μαγνητικό ψυγείο με εργαζόμενο μέσο τον αέρα απαιτεί μεγάλες επιφάνειες μεταφοράς της θερμότητας.
- Η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος.
- Χαμηλή συχνότητα λειτουργίας του μαγνητοθερμιδικού ψυγείου που έχει ως εργαζόμενο μέσο τον αέρα(τουλάχιστον και η συχνότητα του τροχού ανάκτησης θερμότητας είναι επίσης μικρή).



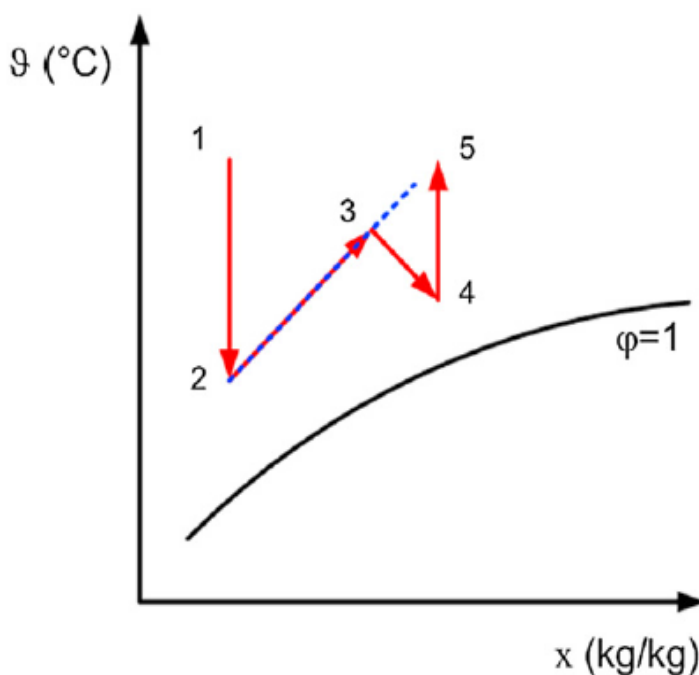
Σχήμα 7.8: Ένα υβριδικό εξατμιστικό-μαγνητικό ψυκτικό σύστημα [222]. Η μονάδα μαγνητικής ψύξης είναι ανεξάρτητη από το εξατμιστικό ψυκτικό σύστημα.



Σχήμα 7.9: Ένα υβριδικό εξατμιστικό-μαγνητικό ψυκτικό σύστημα [222], όπου η μαγνητική ψυκτική συσκευή και ο τροχός ανάκτησης θερμότητας βρίσκονται σε μια ενιαία μονάδα.



Σχήμα 7.10: Διάγραμμα θερμοκρασίας-απόλυτης υγρασίας(αναφέρεται στο σύστημα του σχήματος 6.9). Οι διεργασίες 1-3 ανήκουν στο μαγνητικό ψυκτικό σύστημα, ενώ οι διεργασίες 4-6 ορίζονται από το ατμοποιητικό σύστημα ψύξης.



Σχήμα 7.11: Διάγραμμα θερμοκρασίας-απόλυτης υγρασίας(αναφέρεται στο σύστημα του σχήματος 6.10). Οι διεργασίες 1-2 αναφέρονται στη μαγνητικό ψυκτικό μέρος του συστήματος, ενώ οι διεργασίες 3-5 ορίζονται από το εξατμιστικό ψυκτικό σύστημα. Σε αυτή την περίπτωση το μαγνητικό ψυγείο ενσωματώνεται μέσα στον τροχό ανάκτησης θερμότητας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Warburg E. G., 1881, Magnetische Untersuchungen über einige Wirkungen der Coerzitivkraft, *Ann. Phys.* 13, p. 141-164.
- [2] Giauque, W. F. and MacDougall, D. P. (1933). Attainment of Temperatures Below 1 K Absolute by Demagnetization of $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$. *Physical Review*, 43:768.
- [3] Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Emil_Warburg, 2007
- [4] Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/William_Giauque, 2007
- [5] C.V. Heer, C.B. Barnes, J.C. Daunt, *Rev. Sci. Instr.* 25 (1954) 1088
- [6] J. R. van Geuns, A Study of a New Magnetic Refrigerating Cycle, N. V. Philips Research Report, Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Netherlands (Jun. 1966)
- [7] Brown, G. V. (1976). Magnetic heat pumping near room temperature. *Journal of Applied Physics*, 47(8):3673-3680.
- [8] W. A. Steyart, "Rotating Carnot-cycle magnetic refrigerators for use near 2 K", *Journal of Applied Physics*, 49:1227, 1978.
- [9] J. A. Barclay et al., A Reciprocating Magnetic Refrigerator for 2-4 K Operation: Initial Results, *J. Appl. Phys.* 50, No. 9, 5870-5877, (1979)
- [10] D.L. Johnson, Magnetic refrigeration for master amplifier cooling, in the Telecommunications and Data Acquisition, Progress report 42-67, pp 29-38 , Naval Research Center Patton Feb 1984
- [11] David Taylor Naval Ship Research and Development Center. (1986).
- [12] Barclay, J. A. (1983). Theory of an active magnetic regenerative refrigerator. NASA Conference Publication, pages 375-387
- [13] Zimm, C., Jastrab, A., Sternberg, A., Pecharsky, V., Gschneidner, K., Osborne, M., Anderson, I., "Description and Performance of a Near-Room Temperature Magnetic Refrigerator" in *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 43, pp. 1759,1998
- [14] Yu, B., Gao, Q., Zhang, B., Meng, X., Chen, Z., 2003. Review on research of room temperature magnetic refrigeration. *Int. J. Refrigeration* 26, 622-636
- [15] Tura, A., "Active Magnetic Regenerator Experimental Optimization", MaSc Thesis, University of Victoria, Victoria 2005.
- [16] Kurt Engelbrecht., "A Numerical Model of an Active Magnetic Regenerator Refrigeration System", Master of science Thesis, University of Wisconsin-Madison, 2004
- [17] Chen GB, et al. New technologies of cryogenic refrigeration. Beijing: China Machine Press; 1994 [in Chinese].
- [18] Cross CR, Barclay JA, Degregoria AJ, Jaeger SR, Johnson JW. Optimal temperature–entropy curves for magneticrefrigeration. *Adv Cryo Eng* 1988;33:767–75.

- [19] Chen JC, Yan ZJ. The effect of field-dependent heatcapacity on regeneration in magnetic Ericsson cycles. *J Appl Phys* 1991;69(9):6245–7.
- [20] Brown, G.V., 1978. Practical and efficient magnetic heat pump. *NASA Tech. Brief* 3, 190-191.
- [21] Steyert, W.A., 1978a. Stirling-cycle rotating magnetic refrigerators and heat engines for use near room temperature. *Journal of Applied Physics* 49, 1216-1226.
- [22] Steyert, W.A., 1978b. High temperature refrigerator, US patent No. 4107935.
- [23] Zimm, C., Jastrab, A., Sternberg, A., Pecharsky, V.K., Gschneidner Jr., K.A., Osborne, M., Anderson, I., 1998. Description and performance of a near-room temperature magnetic refrigerator. *Advances in Cryogenic Engineering* 43, 1759-1766.
- [24] Gschneidner Jr., K.A., Pecharsky, V.K., Tsokol, A.O., 2005. Recent developments in magnetocaloric materials. *Institute of Physics Publishing. Reports on Progress in Physics* 68, 1479-1539.
- [25] Gschneidner Jr., K.A., Pecharsky, V.K., 2007. 30 Years of near room temperature magnetic cooling. In: Paper and oral presentation, 2nd International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 11-13, April. *International Institute of Refrigeration, Paris*, pp. 9-21.
- [26] Egolf, P.W., Diebold, M. <http://www.mcwp.ch/> (October 2008).
- [27] Egolf, P.W., Sari, O., Kitanovski, A., Gendre, F. (Eds.), 2005. *Proceedings of the First International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Montreux, Switzerland, 27-30 September. International Institute of Refrigeration, Paris.*
- [28] Poredos, A., Sarlah, A. (Eds.), 2007. *Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 11-13, April. International Institute of Refrigeration, Paris.*
- [29] Pecharsky, V.K., Gschneidner Jr., K.A. (Eds.), 2009. *Proceedings of the Third International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 11-15 May. International Institute of Refrigeration IIR/IIR, Paris.*
- [30] Organ, A.J., 2007. *The Air Engine e Stirling Cycle Power for a Sustainable Future. CRC Press, Woodhead Publishing in Mechanical Engineering.*
- [31] Barclay, J.A., 1983. Wheel-type magnetic refrigerator, US patent No. 4408463.
- [32] Barclay, J.A., Overton W.C., Stewart W.F., 1984. Magnetic refrigeration apparatus and method, US patent No. 4459811.
- [33] Barclay, J.A., Steyert, W.A., 1982. Active magnetic regenerator, US patent No. 4332135.
- [34] Rosensweig, R.E., 1985. *Ferrohydrodynamics. Cambridge University Press.*
- [35] Kirol, L.D., Dacus, M.W., 1987. Rotary recuperative magnetic heat pump. In: *Cryogenic Engineering Conference, St. Charles, IL, USA*, pp. 757-765.
- [36] Green, G., Chafe, J., Stevens, J., Humphrey, J., 1990. A gadolinium-terbium active magnetic regenerator. *Advances in Cryogenic Engineering* 35, 1165.

- [37] Pecharsky, V.K., Gschneidner Jr., K.A., 1997a. Giant magnetocaloric effect in $\text{Gd}_5(\text{Si}_2\text{Ge}_2)$. *Physical Review Letters* 78 (23), 4494-4497.
- [38] Pecharsky, V.K., Gschneidner, K.A., 1997b. Effect of alloying on the giant magnetocaloric effect of $\text{Gd}_5(\text{Si}_2\text{Ge}_2)$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 167 (3), 179-184.
- [39] Gschneidner Jr., K.A., Pecharsky, V.K., 2008. Thirty years of near room temperature magnetic cooling: where we are today and future prospects. *International Journal of Refrigeration* 31, 945-961.
- [40] Bohigas, X., Molins, E., Roig, A., Tejada, J., Zhang, X.X., 2000. Room-temperature magnetic refrigerator using permanent magnets. *IEEE Transactions on Magnetics* 36 (3), 538-544.
- [41] Hirano, N., Nagaya, S., Takahashi, M., Kuriyama, T., Ito, K., Nomura, S., 2002. Development of magnetic refrigerator for room temperature application. *Advance in Cryogenic Engineering* 47, 1027-1034.
- [42] Rowe, A.M., Barclay, J.A., 2002. Design of an active magnetic regenerator test apparatus. *Advances in Cryogenic Engineering* 47 (8), 995-1002.
- [43] Tura, A., 2005. Active Magnetic regenerator experimental optimization, Master's degree dissertation, University of Victoria, Canada.
- [44] Zimm, C., Boeder, A., Chell, J., Sternberg, A., Fujita, A., Fujieda, S., Fukamichi, K., 2005. Design and performance of a permanent magnet rotary refrigerator. In: *Proceedings of the First International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*, Montreux, Switzerland, 27-30 September. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 367-376.
- [45] Zimm, C., Boeder, A., Chell, J., Sternberg, A., Fujita, A., Fujieda, S., Fukamichi, K., 2006. Design and performance of a permanent magnet rotary refrigerator. *International Journal of Refrigeration* 29 (8), 1302-1306.
- [46] Blumenfeld, P.E., Prenger, F.C., Sternberg, A., Zimm, C.B., 2002. High temperature superconducting magnetic refrigeration. *Advances in Cryogenic Engineering* 47, 1019-1026.
- [47] Lu, D.W., Xu, X.N., Wu, H.B., Jin, X., 2005. A permanent magnet magneto-refrigerator study using $\text{Gd/Gd}_5\text{SiGe/Gd}_5\text{SiGeGa}$ alloys. In: *Proceedings of First International Conference on Magnetic Refrigeration of Room Temperature*, Montreux, Switzerland, 27-30 September. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 291-296.
- [48] Okamura, T., Yamada, K., Hirano, N., Nagay, N., 2005. In: Egolf, P.W., Sari, O., Kitanovski, A., Gendre, F. (Eds.), *Proceedings of the First International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*, Montreux, Switzerland, 27-30 September. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 319-324.
- [49] Clot, P., Viallet, D., Allab, F., Kedous-Leboc, A., Fournier, J.M., Yonnet, J.P., 2003. A magnet-based device for active magnetic regenerative refrigeration. *IEEE Transactions on Magnetics* 39, 3349-3351.

- [50] Allab, F., Kedous-LeBouc, A., Yonnet, J.P., Fournier, J.M., 2005. Amagnetic field source system for magnetic refrigeration. In: Proceedings of the First International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Montreux, Switzerland, 27-30 September, International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 309-318.
- [51] Richard, M.A., Rowe, A.M., Chahine, R., 2004. Magnetic refrigeration: single and multimaterial active magnetic regenerator experiments. *Journal of Applied Physics* 95, 2146-2150.
- [52] Rowe, A., Dikeos, J., Tura, A., 2005. Experimental studies of near room-temperature magnetic refrigeration. In: Proceedings of the First International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Montreux, Switzerland, 27e30 September. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 325-333.
- [53] Rowe, A., Tura, A., 2006. Experimental investigation of a threematerial layered active magnetic regenerator. *International Journal of Refrigeration* 29, 1286-1293.
- [54] Vasile, C., Mu"ller, C., 2005. A new system for a magnetocaloric refrigerator. In: Egolf, P.W., et al. (Eds.), *Proceedings of First International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Montreux, Switzerland, 27-30 September*. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 357-366.
- [55] Vasile, C., Mu"ller, C., 2006. Innovative design of a magnetocaloric system. *International Journal of Refrigeration* 29 (8), 1318-1326.
- [56] Yu, B.F., Gao, Q., Wang, C.F., Zhang, B., Yang, D.X., Zhang, Y., 2005. Experimental investigation on refrigeration performance of a reciprocating active magnetic regenerator of room temperature magnetic refrigeration. In: Egolf, P.W., et al. (Eds.), *Proceedings of First International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Montreux, Switzerland, 27-30 September*. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 375-391.
- [57] Gao, Q., Yu, B.F., Wang, C.F., Zhang, B., Yang, D.X., Zhang, Y., 2006. Experimental investigation on refrigeration performance of a reciprocating active magnetic regenerator of room temperature magnetic refrigeration. *International Journal of Refrigeration* 29, 1274-1285.
- [58] Kawanami, T., Chiba, K., Ikegawa, M., Sakurai, K., 2005. Optimization of magnetic refrigerator at room temperature. In: *Proceedings and Presentation of First International Conference on Magnetic Refrigeration of Room Temperature, Montreux, Switzerland, 27e30 September*. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 275-283.
- [59] Yao, G.H., Gong, M.Q., Wu, J.F., 2006. Experimental study on the performance of a room temperature magnetic refrigerator using permanent magnets. *International Journal of Refrigeration* 29, 1267-1273.
- [60] Hirano, N., Nagaya, S., Okamura, T., Kawanami, T., Wada, H., 2007. Development of room temperature magnetic refrigerator-overall plan. In: *Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at*

Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 11-13 April. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 281-287.

[61] Okamura, T., Rachi, R., Hirano, N., Nagaya, S., 2007. Improvement of 100 W class room temperature magnetic refrigerator. In: Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 11-13 April. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 377-382.

[62] Egolf, P.W., Gendre, F., Kitanovski, A., Sari, O., 2006a. Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz. Final Report for the Swiss Federal Office of Energy, project No. 100873/151017: 1-67 (in German).

[63] Egolf, P.W., Sari, O., Kitanovski, A., Gendre, F., Erbeau, N. 2006b. Presentation of the Swiss Technology Award Demonstrator at the Hannover industrial fair, 24-28 April, Germany (see for example in: Bernhart, Ch., Swiss Technology Award: Kälte mittels Magnet und Magnetisierung, Swiss Engineering 1-2, pp. 10-11 (in German)).

[64] Egolf, P.W., Kitanovski, A., Ata-Ceasar, D., Gendre, F., Sari, O., 2006c. Magnetic refrigerator and heat pump using magnetocaloric fluid and process for magnetic heating and cooling with such refrigerator or heat pump, WO 2006136041.

[65] Sari, O., Hu, J., Alber, N., 2007. Magnetic refrigeration from Warburg to modern technology. In: Proceedings of the 5th International Conference on Rare Earth Development and Application, Baotou, China, 7-11, August.

[66] Huang, J.H., Liu, J.R., Jin, P.Y., Yan, H.W., Qiu, J.F., Xu, L.Z., Zhang, J.X., 2006. Development of permanent magnetic refrigerator at room temperature. Rare Metals 25 (6), 641-644.

[67] Huang, J.H., Song, L., Jin, P.Y., Yan, H.W., Wang, Y., Tegus, O., Zhang, J.X., 2007. Research on the magneto-caloric effect in $\text{LaFe}_{11.17}\text{XCo}_{0.78}\text{Si}_{1.05}\text{BX}$ alloys. In: Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 11-13 April. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 155-168.

[68] Zimm, C., Auringer, J., Boeder, A., Chells, J., Russek, S., Sternberg, A., 2007. Design and initial performance of a magnetic refrigerator with a rotating permanent magnet. In: Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 11-13 April. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 341-347.

[69] Tura, A., Rowe, A., 2007. Design and testing of a permanent magnet magnetic refrigerator. In: Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 11-13 April. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 363-371.

[70] Buchelnikov, V.D., Taskaev, S.V., Bychkov, I.V., Chernets, I.A., Denisovskiy, A.N., 2007. The Prototype of effective device for magnetic refrigeration. In: Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 11-13, April. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 371-376.

- [71] Chen, Y.G., Tang, Y.B., Wang, B.M., Xue, Q.X., Tu, M.J., 2007. A permanent magnet rotary magnetic refrigerator. In: Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 11-13, April. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 309-315.
- [72] Petersen, T.F., Pryds, N., Smith, A., Bahl, C.R.H., 2007. A numerical analysis of a reciprocating active magnetic regenerator with a parallel-plate regenerator geometry. In: Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 11-13 April. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 271-281.
- [73] Muller, C., Bour, L., Vasile, C., 2007. Study of the efficiency of a magnetothermal system according to the permeability of the magnetocaloric material around its Curie temperature. In: Proceedings of the Second International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 11-13 April. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 323-330.
- [74] Nakamura, K., Kawanami, T., Hirano, S., Ikegawa, M., Fumoto, K., 2008. Improvement of room temperature magnetic refrigeration using air as heat transfer fluid. In: Thermal Issues in Emerging Technologies, ThETA 2, Cairo, Egypt, 17-20 December, pp. 381-390.
- [75] Hirano, S., Kawanami, T., Nakamura, K., Fumoto, K., Ikegawa, M., Hirasawa, S., 2009. A development of spherical-shaped magnetocaloric materials using power coating method. In: Proceedings of the Third International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 11-15 May. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 457-464.
- [76] Zheng, Z.G., Yu, H.Y., Zhong, X.C., Zeng, D.C., Liu, Z.W., 2009. Design and performance study of the active magnetic refrigerator for room-temperature application. International Journal of Refrigeration 32, 78-86.
- [77] Bour, S., Hamm, J.L., Michot, H., Muller, C., 2009. Experimental and numerical analysis of a reciprocating room temperature active magnetic regenerator. In: Proceedings of the Third International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 11-15, May. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 415-424.
- [78] Coelho, A.A., Gama, S., Magnus, A., Carvalho, G., 2009. Prototype of a Gd-based rotating magnetic refrigerator for work around room temperature. In: Proceedings of the Third International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 11-15, May. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 381-386.
- [79] Dupuis, C., Vialle, A.J., Legait, U., Kedous-Lebouc, A., Ronchetto, D., 2009. New investigations in magnetic refrigeration device, AMR cycle and refrigerant bed performance evaluation. In: Proceedings of the Third International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 11-15 May. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 437-442.

- [80] Kim, Y., Jeong, S., 2009. Investigation on the room temperature active magnetic regenerative refrigerator with permanent magnetic array. Proceedings of the Third International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 11-15 May. International Institute of Refrigeration, Paris. 393-400.
- [81] Pryds, N., Bahl, C.R.H., Smith, A., 2009. Do simple magnetic refrigeration test devices lead to more successful prototypes. In: Proceedings of the Third International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 11-15 May. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 363-370.
- [82] Sari, O., Balli, M., Trottet, G., Bonhote, Ph., Egolf, P.W., Muller, C., Heitzler, J.C., Bour, S., 2009. Initial results of a test-bed magnetic refrigeration machine with practical running conditions. In: Proceedings of the Third International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 11-15 May. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 371-379.
- [83] Tagliafico, L.A., Scarpa, F., Tagliafico, G., Valsuani, F., Canepa, F., Cirafici, S., Napoletano, M., Belfortini, C., 2009. Design and assembly of a linear reciprocating magnetic refrigerator. In: Proceedings of the Third International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 11-15 May. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 425-430.
- [84] Tura, A., Rowe, A., 2009. Progress in the characterization and optimization of a permanent magnet magnetic refrigerator. In: Proceedings of the Third International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 11-15 May. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 387-392.
- [85] Tusek, J., Zupan, S., _Sarlah, A., Prebil, I., Poredos, A., 2009. Development of a rotary magnetic refrigerator. In: Proceedings of the Third International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 11-15 May. International Institute of Refrigeration, Paris, pp. 409-414.
- [86] P. Debye, Ann. Phys. 81 (1926) 1154.
- [87] W.F. GIAUQUE, J. Amer. Chem. Soc. 49 (1927) 1864.
- [88] A.H. Morrish, The Physical Principles of Magnetism, Wiley, New York, 1965 (Chapter 3).
- [89] V.M. Belova, V.I. Nikolaev, V.M. Stuchebnikov, Prib. Tekh. Eksp. 1 (1974) 209.
- [90] B.K. Ponomarev, Prib. Tekh. Eksp. 3 (1983) 153.
- [91] G. Green, J. Chafe, J. Stevens, J. Humphrey, Adv. Cryog. Eng. 35B (1990) 1165.
- [92] H. Kato, K. Nara, M. Okaji, Cryogenics 31 (1991) 425.
- [93] W. Otowski, C. Glorieux, R. Hofman, J. Thoen, Thermochim. Acta 218 (1993) 123.
- [94] B.R. Gopal, R. Chahine, M. Foeldeaki, T.K. Bose, Rev. Sci. Instrum. 66 (1995) 232.
- [95] R.Z. Levitin, V.V. Snegirev, A.V. Kopylov, A.S. Lagutin, A. Gerber, J. Magn. Magn. Mater. 170 (1997) 223.
- [96] B.R. Gopal, R. Chahine, T.K. Bose, Rev. Sci. Instr. 68 (1997) 1818.

- [97] S.Yu. Dan'kov, A.M. Tishin, V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., *Rev. Sci. Instrum.* 68 (1997) 2432.
- [98] M. Foldeaki, R. Chahine, T.K. Bose, *J. Appl. Phys.* 77 (1995) 3528.
- [99] M.W. Zemansky, *Heat and Thermodynamics*, 5th edition, McGraw-Hill, NY, 1968.
- [100] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., *Adv. Cryog. Eng.* 42A (1997) 423.
- [101] W.F. Giauque, I.D.P. MacDougall, *Phys. Rev.* 43 (1933) 768.
- [102] A.H. Cooke, *Proc. Roy. Soc. A* 62 (1949) 269.
- [103] B. Bleaney, *Proc. Roy. Soc. A* 204 (1950) 203.
- [104] A.H. Cooke, H.J. Dulus, W.P. Wolf, *Philos. Mag.* 44 (1953) 623.
- [105] R.S. Craig, S.G. Sankar, N. Marzouk, V.U.S. Rao, W.E. Wallace, E. Segal, *J. Phys. Chem. Solids* 33 (1972) 2267.
- [106] H. Ishimoto, N. Nishida, T. Furubayashi, M. Shinohara, Y. Takano, Y. Miura, K. Ono, *J. Low Temp. Phys.* 55 (1984) 17.
- [107] P.J. von Ranke, V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner, B.J. Korte, *Phys. Rev. B* 58 (1998) 14436.
- [108] A.E. Clark, R.S. Alben, *J. Appl. Phys.* 41 (1970) 1195.
- [109] V. Nekvasil, V. Roskovec, F. Zounova, P. Novotny, *Czech. J. Phys.* 24 (1974) 810.
- [110] R.D. McMichael, J.J. Ritter, R.D. Shull, *J. Appl. Phys.* 73 (1993) 6946.
- [111] R.Z. Levitin, V.V. Snegirev, A.V. Kopylov, A.S. Lagutin, A. Gerber, *J. Magn. Magn. Mater.* 170 (1997) 223.
- [112] R.D. Shull, R.D. McMichael, J.J. Ritter, *Nanostruct. Mater.* 2 (1993) 205.
- [113] R.D. Shull, *IEEE Trans. Magn.* 29 (1993) 2614.
- [114] C.B. Zimm, P.M. Ratzmann, J.A. Barclay, G.F. Green, J.N. Chafe, *Adv. Cryog. Eng.* 36 (1990) 763.
- [115] C.B. Zimm, P.L. Kral, J.A. Barclay, G.F. Green, W.G. Patton, *Proceedings of the 5th International Cryocooler Conference*, Wright Research and Development Center, Wright Patterson Air Force Base, Ohio, 1988, p. 49.
- [116] C.B. Zimm, J.A. Barclay, H.H. Harkness, G.F. Green, W.G. Patton, *Cryogenics* 29 (1989) 937.
- [117] T. Hashimoto, K. Matsumoto, T. Kurihara, T. Numuzawa, A. Tomokiyo, H. Yayama, T. Goto, S. Todo, M. Sahashi, *Adv. Cryog. Eng.* 32 (1986) 279.
- [118] T. Hashimoto, T. Kuzuhara, K. Matsumoto, M. Sahashi, K. Inomata, A. Tomokiyo, H. Yayama, *Jpn. J. Appl. Phys.* 26 (1987) 1673.
- [119] T. Hashimoto, T. Kuzuhara, M. Sahashi, K. Inomata, A. Tomokiyo, A. Yayama, *J. Appl. Phys.* 62 (1987) 3873.
- [120] H. Takeya, V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., J.O. Moorman, *Appl. Phys. Lett.* 64 (1994) 2739.

- [121] K.A. Gschneidner Jr., H. Takeya, J.O. Moorman, V.K. Pecharsky, S.K. Malik, C.B. Zimm, *Adv. Cryogen. Eng.* 39 (1994) 1457.
- [122] J.A. Barclay, W.C. Overton Jr., C.B. Zimm, in: U. Ekren, A. Schmid, W. Weber, H. Wuhl (Eds.), *LT-17 Contributed Papers*, Elsevier Science, Amsterdam, 1984, p. 157.
- [123] C.B. Zimm, E.M. Ludeman, M.C. Severson, T.A. Henning, *Adv. Cryog. Eng.* 37B (1992) 883.
- [124] Tiezhong Ma, V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., *J. Appl. Phys.*
- [125] A. Tomokiyo, H. Yayama, H. Wakabayashi, T. Kuzuhara, T. Hashimoto, M. Sahashi, K. Inomata, *Adv. Cryog. Eng.* 32 (1986) 295.
- [126] K.P. Belov, L.A. Chernikova, E.V. Talalaeva, R.Z. Levitin, T.V. Kudryavtseva, S. Amadezzi, V.I. Ivanovski, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 58 (1970) 1923.
- [127] B.K. Ponomarev, V.G. Tissen, S.P. Zapasskii, N.I. Moreva, *Fiz. Met. Metalloved.* 44 (1977) 257.
- [128] S.M. Benford, *J. Appl. Phys.* 50 (1979) 1868.
- [129] S.A. Nikitin, A.S. Andreenko, A.M. Tishin, A.M. Arkharov, A.A. Zherdev, *Fiz. Met. Metalloved.* 60 (1985) 689.
- [130] X.Y. Liu, J.A. Barclay, B.R. Gopal, M. Foldeaki, R. Chahine, T.K. Bose, P.J. Schurer, J.L. LaCombe, *J. Appl. Phys.* 79 (1996) 1630.
- [131] X.Y. Liu, J.A. Barclay, M. Foldeaki, B.R. Gopal, R. Chahine, T.K. Bose, *Adv. Cryog. Eng.* 42A (1997) 431.
- [132] M. Foldeaki, A. Giguere, B.R. Gopal, R. Chahine, T.K. Bose, X.Y. Liu, J.A. Barclay, *J. Magn. Magn. Mater.* 174 (1997) 295.
- [133] M. Foldeaki, R. Chahine, B.R. Gopal, T.K. Bose, X.Y. Liu, J.A. Barclay, *J. Appl. Phys.* 83 (1998) 2727.
- [134] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., *Appl. Phys. Lett.* 70 (1997) 3299.
- [135] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., unpublished.
- [136] S.A. Nikitin, E.V. Talalaeva, L.A. Chernikova, G.E. Chuprikov, T.I. Ivanova, G.V. Kazakov, G.A. Yarkho, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 74 (1978) 205.
- [137] S.Yu. Dan'kov, A.M. Tishin, V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., *Phys. Rev. B* 57 (1998) 3478.
- [138] M. Foldeaki, W. Schnelle, E. Gmelin, P. Benard, B. Koszegi, A. Giguere, R. Chahine, T.K. Bose, *J. Appl. Phys.* 82 (1997) 309.
- [139] Y.Z. Shao, J. Zhang, J.K.L. Lai, C.H. Shek, *J. Appl. Phys.* 80 (1996) 76.
- [140] Y.Z. Shao, J.K.L. Lai, C.H. Shek, *J. Magn. Magn. Mater.* 163 (1996) 103.
- [141] Y.Z. Shao, Z. Xiong, J. Zhang, J. Zhang, *Sci. China, Ser. A* 39 (1996) 748.
- [142] H. Oesterreicher, F.T. Parker, *J. Appl. Phys.* 55 (1984) 4334.
- [143] S.Yu. Dankov, V.V. Ivchenko, A.M. Tishin, V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., *J. Appl. Phys.*

- [144] Chen GB, et al. New technologies of cryogenic refrigeration. Beijing: China Machine Press; 1994 [in Chinese].
- [145] Chang SN, Yan XG. Thermodynamic norm for selecting refrigerant of magnetic refrigeration near room temperature. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 1997;23(5):639–42 [in Chinese].
- [146] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 4494.
- [147] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., J. Magn. Magn. Mater. 167 (1997) L179.
- [148] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., J. Alloys Compounds 260 (1997) 98.
- [149] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., Adv. Cryo. Eng. 43 (1998) 1729
- [150] L. Morellon, P.A. Algarabel, M.R. Ibarra, J. Blasco, B. Garcia-Landa, Z. Arnold, F. Albertini, Phys. Rev. B 58 (1998) R14721.
- [151] X.X. Zhang, J. Tajada, Y. Xin, G.F. Sunm, K.W. Wong, X. Bohigas, Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 3596.
- [152] X. Bohigas, J. Tejada, E. Del Barco, X.X. Zhang, M. Sales, Appl. Phys. Lett. 73 (1998) 390.
- [153] Verhoeven, J.D. Gibson, E.D. McMasters, O.D., Baker, H.H., 1987. The growth of single crystal Terfenol-D crystals. Metall. Trans. 18A, 223–231.
- [154] Merida, W.R., Barclay, J.A., 1998. Monolithic regenerator technology for low temperature (4 K) Gifford-McMahon cryocoolers. Adv. Cryog. Eng. 43, 1597–1604.
- [155] Gschneidner Jr., K.A. Pecharsky, V.K., Tsokol, A.O., 2005. Recent developments in magnetocaloric materials. Rep. Prog. Phys. 68, 1479–1539.
- [156] Provenzano, V. Shapiro, A.J., Shull, R.D., 2004. Reduction of hysteresis losses in the magnetic refrigerant Gd₅Ge₂Si₂ by the addition of iron. Nature 429, 853–857. 430 (2004) 810.
- [157] Pecharsky, V.K., Gschneidner Jr., K.A., 1997c. Effect of alloying on the giant magnetocaloric effect of Gd₅(Si₂Ge₂). J. Magn. Magn. Mater. 167, L-179–L-184.
- [158] Wu, W., 2003. Development of a magnetic refrigeration prototype for operation at ambient temperature. Paper No. K7.004, presented at the American Physical Society Meeting, 2003 March 4, Austin, TX, <http://www.aps.org/meet/MAR03/baps/tock.html>.
- [159] Ponomarev BK. Magnetic properties of gadolinium in the region of paraprocess. J Magn Magn Mater 1986;61: 129–38.
- [160] Gopal BR, Chahine R, Bose TK. A sample translatory type insert for automated magnetocaloric effect measurements. Rev Sci Instrum 1997;68(4):1818–22.
- [161] Gopal BR, Chahine R, Fo` Idea` ki M, Bose TK. Noncontact thermoacoustic method to measure the magnetocaloric effect. Rev Sci Instrum 1995;66(1):232–8.
- [162] Fo` Ideaki M, Schnelle W, Gmelin E, Benard P, Koszegi B, Gigue`re A, Chahine R, Bose TK. Comparison of magnetocaloric properties from magnetic and thermal measurements. J Appl Phys 1997;82(1):309–16.

- [163] Tishin AM, Gschneidner Jr KA, Pecharsky VK. Magnetocaloric effect and heat capacity in the phase-transition region. *Phys Rev B* 1999;59(1):503–11.
- [164] Griffel M, Skochdopole RE, Spedding FH. The heat capacity of gadolinium from 15 to 355 K. *Phys Rev* 1954;93(4):657–61.
- [165] Glorieux C, Thoen J, Bednarz G, White MA, Geldart DJW. Photoacoustic investigation of the temperature and magnetic-field dependence of the specific-heat capacity and thermal conductivity near the Curie point of gadolinium. *Phys Rev B* 1995;52(17):12770–8.
- [166] Pecharsky VK, Moorman JO, Gschneidner Jr KA. 3–350 K fast automatic small sample calorimeter. *Rev Sci Instrum* 1997;68(11):4196–207.
- [167] Gschneidner Jr KA, Pecharsky VK. The influence of magnetic field on the thermal properties of solids. *Mater Sci Eng* 2000;287:301–10.
- [168] Dai W, Shen BG, Li DX, Gao ZX. New magnetic refrigeration materials for temperature range from 165 K to 235 K. *J Alloys Compounds* 2000;311:22–5.
- [169] Canepa F, Cirafici S, Napoletano M, Merlo F. Magnetocaloric properties of Gd₇Pd₃ and related intermetallic compounds. *IEEE Trans Magn* 2002;38(5):3249–51.
- [170] Niu XJ, Gschneidner Jr KA, Pecharsky AO, Pecharsky VK. Crystallography, magnetic properties and magnetocaloric effect in Gd₄(BixSb_{1-x})₃ alloys. *J Magn Mater* 2001;234:193–206.
- [171] K.A. Gschneidner, Jr.*, V.K. Pecharsky, "Thirty years of near room temperature magnetic cooling: Where we are today and future prospects". Materials and Engineering Physics Program, Ames Laboratory, and Department of Materials Science and Engineering, Iowa State University, Ames, IA 50011-3020, United States.
- [172] C. Zimm, A. Jastrab, A. Sternberg, V. Pecharsky, K. Gschneidner Jr., M. Osborne, I. Anderson, *Adv. Cryog. Eng.* 43 (1998) 1759.
- [173] K.A. Gschneidner, V.K. Pecharsky, C.B. Zimm, *Mater. Technol.* 12 (1997) 145.
- [174] Hakuraku Y. Thermodynamic simulation of a rotating Ericsson-cycle magnetic refrigerator without a regenerator. *J Appl Phys* 1987;62(5):1560–3.
- [175] Steyert WA. Stirling-cycle rotating magnetic refrigerators and heat engines for use near room temperature. *J Appl Phys* 1978;49(3):1216–26.
- [176] Matsumoto K, Hashimoto T. Thermodynamic analysis of magnetically active regenerator from 30 to 70 K with a Brayton-like cycle. *Cryogenics* 1990;30:840–5.
- [177] Degregoria AJ. Modeling the active magnetic regenerator. *Adv Cryo Eng* 1992;37B:867–73.
- [178] DeGregoria AJ, Zimm CB, Janda DJ, Lubasz RA, Jastrab AG, Johnson JW, Ludeman EM. Active magnetic regenerator method and apparatus. U.S. Patent No.5,249,424, 5 October, 1993.
- [179] Drost MK, White MD. Local entropy generation analysis of a rotary magnetic pump heat pump regenerator. *ASME Trans J Energy Resour Technol* 1994; 116:140–7.

- [180] Reid CE, Barclay JA, Hall JL, Sarangi S. Selection of magnetic materials for an active magnetic regenerative refrigerator. *J Alloys Compounds* 1994;207/208:366–71
- [181] Smaï'li A, Chahine R. Thermodynamic investigations of optimum active magnetic regenerators. *Cryogenics* 1998; 38(2):247–52.
- [182] Schroeder E, Green G, Chafe J. Performance predictions of a magnetocaloric refrigerator using a finite element model. *Adv Cryo Eng* 1990;35:1149–55.
- [183] Zimm C, Jastrab A, Sternberg A, Pecharsky VK, Gschneidner Jr KA, Osborne M, Anderson I. Description and performance of a near-room temperature magnetic refrigerator. *Adv Cryog Eng* 1998,43:1759–66.
- [184] Barclay JA. Active and passive magnetic regenerators in gas/magnetic refrigerators. *J Alloys Compounds* 1994; 207/208:355–61.
- [185] Chen JC, Yan ZJ. The effect of thermal resistances and regenerative losses on the performance characteristics of a magnetic Ericsson refrigeration cycle. *J Appl Phys* 1998;84(4):1791–5.
- [186] Lawton, Jr LM, Zimm CB, Jastrab AG. Reciprocating active magnetic regenerator refrigeration apparatus. U.S. Patent No. 5,934,078, 10 August, 1999.
- [187] Pecharsky, V.K., Gschneidner, K., 2006. Advanced magnetocaloric materials: what does the future hold? *Int. J. Refrigeration* 29, 1239-1249.
- [188] Nilson PhD Thesis, August 2010. Numerical modeling and analysis of the active magnetic regenerator. DTU Mechanical Engineering , Department of Mechanical Engineering.
- [189] Rowe, A., “Active Magnetic Regenerators: Performance in the Vicinity of Para-Ferromagnetic Second Order Phase Transition” Ph.D. Thesis, University ofVictoria, Victoria 2002.
- [190] Armando Tura, Master thesis ,September 2005. " Active Magnetic Regenerator Experimental Optimization".
- [191] Nielsen, K.K., Bahl, C.R.H., Smith, A., Bjørk, R., Pryds, N., Hattel, J., 2009a. Detailed numerical modeling of a linear parallel-plate active magnetic regenerator. *Int. J. Refrigeration* 32 (6), 1478-1486.
- [192] Petersen, T.F., Pryds, N., Smith, A., Hattel, J., Schmidt, H., Knudsen, H., 2008b. Two-dimensional mathematical model of a reciprocating room-temperature active magnetic regenerator. *Int. J. Refrigeration* 31, 432-443.
- [193] Shah, R.K., Sekulic, D.P., 2003. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [194] Hall, J.L., Reid, C.E., Spearing, I.G., and Barclay, J.A., “Thermodynamic Considerations for the Design of Active Magnetic Regenerative Refrigerators”, in *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 41, pp. 1653, 1996.
- [195] Dikeos, J., “Development and Validation of an Active Magnetic Regenerator Cycle Simulation”, MaSc Thesis, University of Victoria, Victoria 2006.

- [196] Jaka Tusek, Andrej Kitanovski, Ivan Prebil, Alojz Poredos, 2011. Dynamic operation of an active magnetic regenerator (AMR): Numerical optimization of a packed-bed AMR
- [197] Engelbrecht, K., Nellis, G., Klein, S., 2005. A Numerical Model of an Active Magnetic Regenerator Refrigeration System. Final Report. Univ. Wisconsin-Madison.
- [198] Kays, W.M., London, A.L., 1984. Compact Heat Exchangers. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [199] Oliviera, P.A., Trevizioli, P.V., Barbosa, J.R., Prata, A.T., 2009. Numerical analysis of a reciprocative active magnetic regenerator. In: Proc. 3rd Int. Conf. Magn. Refrigeration Room Temp., IIF/IIR, 283-294.
- [200] Shir, F., Bennett, L. H., Della Torre, E., Mavriplis, C., Shull, R. D., 2005a. Transient response in magnetocaloric regeneration. IEEE Transactions on Magnetics 41 (6), 2129-2133.
- [201] Vuarnoz, D., Kitanovski, A., Diebold, M., Gendre, F., Egolf, P. W., 2007. A magnetic heat pump with porous magneto caloric material. Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics 4 (12), 4552-4555.
- [202] Engelbrecht, K., Jensen, J. B., Bahl, C. R. H., Pryds, N., 2009. Experiments on a modular magnetic refrigeration device. Proceedings of the 3rd International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 431-436.
- [203] Zimmermann, G., 1993. Determination of magnetic anisotropy by transverse susceptibility measurement-an application to NdFeB. Journal of Applied Physics 73 (12), 8436-8440.
- [204] MMPA Standard, 2000. Standard specifications for permanent magnet materials, the International Magnetics Association, 8 South Michigan Avenue, Suite 1000, Chicago, Illinois 60603, www.intl-magnetics.org.
- [205] Vacuumschmelze GMBH & Co, KG, 2007. PD 002 - Vacodym/Vacomax - Edition 2007, www.vacuumschmelze.de.
- [206] Bleaney, B., Bleaney, B., 1957. Electricity and Magnetism. Oxford Press.
- [207] Comsol Multiphysics, 2005. Comsol Multiphysics Model Library, third ed. COMSOL AB, Chalmers Teknikpark 412 88 G.
- [208] Nikly, G., Muller, C., 2007. Technical and economical criteria to design and realize a magnetocaloric heat pump. Proceedings of the 2nd International Conference of Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, 59-70.
- [209] Jensen, J. H., Abele, M. G., 1996. Maximally efficient permanent magnet structures. Journal of Applied Physics 79 (2), 1157-1163.
- [210] Coey, J. M. D., Ni Mhiochain, T. R., 2003. High Magnetic Fields (Permanent magnets). World Scientific, Ch. 2, pp. 25-47.

- [211] Rowe, A., 2009a. Performance metrics for active magnetic refrigerators. Proceedings of the 3rd International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 195-206.
- [212] Bjørk, R., Bahl, C.R.H., Smith, A., Pryds, N., 2008. Optimization and improvement of Halbach cylinder design. Journal of Applied Physics 104 (1), 13910.
- [213] Mallinson, J. C., 1973. One-sided uxes - a magnetic curiosity? IEEE Transactions on magnetics 9 (4), 678 - 682.
- [214] Halbach, K., 1980. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. Nuclear instruments and methods 169.
- [215] Lee, S. J., Kenkel, J. M., Pecharsky, V. K., Jiles, D. C., 2002. Permanent magnet array for the magnetic refrigerator. Journal of Applied Physics 91 (10), 8894-8896.
- [216] Kim, Y., Jeong, S., 2009. Investigation on the room temperature active magnetic regenerative refrigerator with permanent magnet array. Proceedings of the 3rd International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, 393-400.
- [217] Engelbrecht, K., Nellis, G., Klein, S., Zimm, C., 2007. Recent developments in room temperature active magnetic regenerative refrigeration. HVAC and R Research 13 (4), 525-542.
- [218] Kitanovski, A., Egolf, P.W., Vuarnoz, D., 2008a. A permeable-magnetocaloric material for a magnetocaloric device, WO2009124408 (A1).
- [219] Rowe, A., Tura, A., 2007. Active magnetic regenerator performance enhancement using passive magnetic materials, In: Second IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoroz, Slovenia, pp.289–299.
- [220] Rosensweig, R.E., 1985. Ferrohydrodynamics. Cambridge University Press.
- [221] Sutton, G.W., Sherman, A., 2006. Engineering Magnetohydrodynamics. Dover Publications.
- [222] Andrej Kitanovski, Peter W. Egolf, 2009. Innovative ideas for future research on magnetocaloric technologies.
- [223] Martinelli, G., Stefancich, M., 2007. Solar cell cooling, concentrator photovoltaics. Chapter 7. Springer Series in Optical Science 130, 133–151.
- [224] Royne, A., Dey, C.J., Mills, D.R., 2005. Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review. Solar Energy Materials and Solar Cells 86 (4), 451–483.
- [225] IBM, 2008. www.ibm.com/news/us/en/2008/05/16/b333998s28700j78.html.
- [226] Diebold, M., Kitanovski, A., Vuarnoz D., Egolf, P.W., 2007. Force, torque and energy of machines with porous magnetisable wheels. In: Second Workshop on Magnetostrictive Materials and Magnetic Refrigeration, 13–15 August, Vienna, Austria, pp. 15–16.
- [227] Egolf, P.W., Frei, B., Furter, R., 2000. Thermodynamics of moist air: contribution to error estimates. Applied Thermal Engineering 20, 1–19.

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.1: Οι πρωτοπόροι της μαγνητικής ψύξης. Emil Warbug (1846-1931)[3] στα αριστερά και William Giauque(1895-1982)[4] στα δεξιά.....	9
1.2: Ερευνητικών εργασιών που δημοσιεύτηκαν ετησίως τα τελευταία 80 χρόνια με θέμα τη Μαγνητική Ψύξη.....	11
1.3: Μαγνητοθερμιδική επίδραση του Gd για μαγνητικό πεδίο εντάσεως 0-2T [15].....	13
1.4: Διάγραμμα Θερμοκρασίας –Εντροπίας για ψυκτικό κύκλο[16].....	14
1.5: Μαγνητικός ψυκτικός κύκλος του Ericsson.....	16
1.6: Μαγνητικός ψυκτικός κύκλος του Brayton.....	16
1.7: Αρχή Λειτουργίας του Ψυκτικού Κύκλου του Ericsson.....	17
2.1: Αριθμός διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας ανά χρόνο στη Μαγνητική Ψύξη σε θερμοκρασίες δωματίου(περίοδος 1976-2009).....	20
2.2: Η πρώτη μαγνητική ψυκτική συσκευή που κατασκευάστηκε από τον Brown [7].....	23
2.3: Περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο που προτάθηκε από τον Steyert [21,22].....	23
2.4: Μαγνητική περιστροφική αντλία του Kirol [35].....	24
2.5: Ένας μαγνητικός ψύκτης που παρουσιάστηκε από το ερευνητικό κέντρο AMES της Ιόβα σε συνεργασία με την εταιρία Astronautics Corporation of America το 1997 [25,39]	25
2.6: Περιστροφικός Μαγνητικός Ψύκτης με μόνιμους μαγνήτες,Bohigas [40].....	26
2.7: Συσκευή Ενεργού Μαγνητικού Αναγεννητή που κατασκευάστηκε στο πανεπιστήμιο της Victoria στον Καναδά [42,43].....	27
2.8: Ο πρώτος περιστροφικός μαγνητικός ψύκτης παγκοσμίως [44,45].....	29
2.9: Παλινδρομικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε στο Nanjing University [47]....	30
2.10: Περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο που σχεδιάστηκε, υπολογίστηκε και υλοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας στο Τόκυο σε συνεργασία με την Chubu Electric Power Incorporation [48]	31
2.11: Η παλινδρομική μαγνητική συσκευή που κατασκευάστηκε στο Laboratoire d'Electrotechnique Grenoble της Γαλλίας [49,50].....	33
2.12: Παλινδρομικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε στο πανεπιστήμιο της Βικτόριας στο Καναδά [51,52,53].....	33
2.13: Μια τρισδιάστατη δομή του μαγνητικού ψυγείου της εταιρίας Cooltech και του ανοιχτός μαγνήτης τύπου Halbach [54,55]	34
2.14: Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας ροής στο μαγνητικό ψυκτικό σύστημα που κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο Xi'an Jiatong [56,57].....	36

2.15: Παλινδρομικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο Χοκάιντο της Ιαπωνίας [58].....	37
2.16: Σχηματική αναπαράσταση του μαγνητικού ψυκτικού συστήματος που έφτιαξε ο Yao [59].....	37
2.17: Περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε από μια Ιαπωνική ομάδα επιστημόνων στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας στο Τόκυο [48,60,61].....	38
2.18: Περιστροφικός μαγνητικός διαμορφωτής κλιματισμού που κατασκευάστηκε στο πανεπιστήμιο Εφαρμοσμένων Επιστημών της Δυτικής Ελβετίας [62,63,64,65].....	41
2.19: Παλινδρομικός μαγνητικός ψύκτης που λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου και κατασκευάστηκε στο Ερευνητικό Ινστιτούτο Μπατοού της Κίνας [66,67].....	41
2.20: Το μαγνητικό ψυγείο που δημιουργήθηκε στο Austronautics Corporation of America [68].....	42
2.21: Περιστροφικό Μαγνητικό Ψυγείο αποτελούμενο από μόνιμους μαγνήτες. Παρουσιάστηκε από τους ερευνητές του Πανεπιστημίου της Βικτόριας [69].....	42
2.22: Το μαγνητικό ψυγείο του Buchelnikov [70].....	44
2.23: Περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε και παρουσιάστηκε στο Πανεπιστήμιο Σικουάν της Κίνας [71].....	45
2.24: Παλινδρομικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε στο Εθνικό Εργαστήριο Riso της Δανίας [72].....	45
2.25: Περιστροφικός μαγνητικός ψύκτης που κατασκευάστηκε στη Γαλλία ύστερα από συνεργασία μεταξύ της Cooltech Applications και της INSA[73].....	46
2.26: Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής συσκευής που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο Χοκκάιντο της Ιαπωνίας [74].....	48
2.27: Η ενεργή μαγνητική αναγεννητική συσκευή που κατασκευάστηκε στο Βιομηχανικό Ερευνητικό Ίδρυμα της Ιαπωνίας [75].....	49
2.28: Το αναγεννητικό σύστημα που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Τεχνολογίας της Νότιας Κίνας [76].....	49
2.29: Το παλινδρομικό πρωτότυπο που κατασκευάστηκε από τη Cooltech Application στη Γαλλία [77].....	50
2.30: Μαγνητικό ψυγείο με ηλεκτρομαγνήτες που δημιουργήθηκε στη Βραζιλία [78].....	50
2.31: Η συσκευή που κατασκευάστηκε στο Ηλεκτρολογικό-Μηχανολογικό Εργαστήριο στη περιοχή Γκρενόμπλ της Γαλλίας [79].....	52
2.32: Παλινδρομική μηχανή και ο μόνιμος μαγνήτης που διερευνήθηκαν στην Κορέα στο Advanced Institute of Science and Technology [80].....	53
2.33: Η μηχανή που κατασκευάστηκε στο Riso DTU της Δανίας [81].....	53
2.34: Η παλινδρομική συσκευή που αναπτύχθηκε στο UASWS/IGT [82].....	55

2.35: Γραμμική παλινδρομική μαγνητική συσκευή. Κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο της Τζένοας στην Ιταλία [83].....	55
2.36: Το βελτιωμένο πρωτότυπο που κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο της Βικτόρια στον Καναδά [84].....	57
2.37: Περιστροφικό μαγνητικό ψυγείο που κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο Λιουμπιανά της Σλοβενίας [85].....	57
3.1: Διάγραμμα S-T όπου απεικονίζεται η ύπαρξη του μαγνητοθερμιδικού φαινομένου.....	60
3.2: Η μεταβολή της μαγνητικής εντροπίας(ΔS_M) για μια μεταβολή του μαγνητικού πεδίου από τα 0 στα 5 T.....	65
3.3: Η μεταβολή της αδιαβατικής θερμοκρασίας(ΔT_{ad}) για μια μεταβολή του μαγνητικού πεδίου από τα 0 στα 5 T.....	65
3.4: Η ΔT_{ad} στα καλύτερα μαγνητικά ψυκτικά διαμεταλλικά υλικά σε εύρος θερμοκρασιών από ~10 έως ~80 K για μαγνητικό πεδίο εντάσεως από 0 έως 7.5 T [117-125].....	69
3.5: Η T/C συναρτήσει της θερμοκρασίας T σε ένα τυπικό μεταλλικό υλικό.....	70
3.6: Η μεγάλη άνοδος της τιμής του Nd(νεοδιμίου) που παρατηρήθηκε από τον Ιανουάριο του 2005 έως το Δεκέμβριο του 2006 [171].....	78
3.7: Αριθμός των δημοσιεύσεων που αφορούν τη μαγνητοθερμιδική επίδραση και την μαγνητική ψύξη από το 1965-1999. Το διάγραμμα παρουσιάζει επίσης και τον αριθμό των δημοσιεύσεων στις Η.Π.Α συγκριτικά με αυτές που έγιναν Παγκοσμίως.....	80
4.1: Εικόνα της αναλογίας μεταξύ ενός εμπορικού ψυκτικού κύκλου και αυτού του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή [188].....	86
4.2: Διάγραμμα T-S του κύκλου του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή. Ο κύκλος χωρίζεται σε 4 επιμέρους διεργασίες, συμπεριλαμβάνοντας δύο ισοεντατικές και δύο αδιαβατικές.....	87
4.3: Σχηματική αναπαράσταση των τεσσάρων διεργασιών που συμβαίνουν στον ενεργό μαγνητικό αναγεννητή [188].....	88
4.4: Η ιδανική μαγνητοθερμιδική επίδραση συγκρίνοντας το γαδολίνιο σε ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως 0-2 Tα (Υλικό A), και ένα άλλο υλικό με θερμοκρασία Curie κοντά στους 265 K (υλικό B) [190].....	91
4.5: Μια σχηματική αναπαράσταση ενός ενεργού μαγνητικού αναγεννητή [189].....	95
4.6: Ο ψυκτικός κύκλος για ένα μαγνητικό ψυγείο σε κάποια διατομή του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή [189].....	96
5.1: Παρουσιάζονται τα προφίλ θερμοκρασιών του ρευστού(μπλε γραμμή) και του γαδολινίου(κόκκινη γραμμή) κατά τις 4 διεργασίες του κύκλου του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή.....	108
5.2: Παραγόμενο φορτίο ψύξης (cooling load) ως συνάρτηση του αδιάστατου αριθμού απόρριψης μάζας του ρευστού (displaced fluid mass), V^* για εφαρμοζόμενο πεδίο 6 Tesla σε τέσσερις διαφορετικές συχνότητες 0.25 – 2 Hz.....	110

5.3: Παραγόμενο ψυκτικό φορτίο $\dot{Q}_c$ (cooling load) ως συνάρτηση του αδιάστατου αριθμού απόρριψης μάζας του ρευστού V^* για εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο εντάσεως 4 Tesla σε τέσσερις διαφορετικές συχνότητες 0.25 – 2 Hz.....	111
5.4: Γραφική παράσταση του Συντελεστής Ψυκτικής Απόδοσης (Coefficient Of Performance - COP) ως συνάρτηση του V^* (displaced fluid mass) για εφαρμοζόμενο πεδίο 6 Tesla σε τέσσερις διαφορετικές συχνότητες 0.25 – 2 Hz.....	113
5.5: Γραφική παράσταση του Συντελεστής Ψυκτικής Απόδοσης (COP) ως συνάρτηση του V^* (displaced fluid mass) για εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο εντάσεως 4 Tesla σε τέσσερις διαφορετικές συχνότητες 0.25 – 2 Hz.....	114
6.1: Μια απεικόνιση των ιδιοτήτων ενός σκληρού μαγνητικού υλικού. Αναπαρίστανται σε αυτό το σχήμα οι καμπύλες B(H) και M(H) [212].....	122
6.2 : Οι καμπύλες B(H) και M(H) του Βακοδιμίου 510 HR, ενός μόνιμου μαγνήτη με υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση [205].....	124
6.3 : Οι καμπύλες B(H) και M(H) για το Βακοδιμίο 677 HR, ένας μόνιμος μαγνήτης με χαμηλότερη παραμένουσα μαγνήτιση από αυτή του σχήματος 5.2 [205].....	124
6.4: Η πυκνότητα μαγνητικής ροής ως συνάρτηση του μαγνητικού πεδίου για το σίδηρο.....	125
6.5: Απεικόνιση μερικών από τις διάφορες μεταβλητές της παραμέτρου Λ_{cool} για την περίπτωση ενός κυλινδρικού μαγνήτη τύπου Halbach [212].....	128
6.6: Ο μαγνήτης του Zheng [76].....	132
6.7: Μια αριθμητική προσομοίωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής κατά μήκος του άξονα χ [76].....	133
6.8: Ο μαγνήτης των Vasile και Muller [55]. Τα βέλη δηλώνουν τη κατεύθυνση της μαγνήτισης των μαγνητών.....	134
6.9: Ο μαγνήτης του Bohigas [40].....	134
6.10: Ο μαγνήτης που κατασκεύασε ο Tagliafico [83].....	135
6.11: Ο μαγνήτης που σχεδίασε ο Tusek [85].....	136
6.12: Ο μαγνήτης που δημιούργησε ο Lee [215].....	138
6.13: Ο μαγνήτης που κατασκεύασε ο Engelbrecht [202].....	139
6.14: Ένα σχεδιάγραμμα του ομόκεντρου μαγνήτη Halbach που σχεδιάστηκε από τους Tura και Rowe [69] (μπροστινή όψη).....	141
6.15: Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται σε καθέναν από τους δύο κυλίνδρους Halbach [69].....	141
6.16: Ο μαγνήτης του Zimm [68].....	142
6.17: Η εσωτερική δομή του μαγνήτη που κατασκεύασε ο Okamura [61].....	143
6.18: Η παράμετρος Λ_{cool}/P_{field} είναι η γραμμοσκιασμένη, ενώ η παράμετρος Λ_{cool} αναπαρίσταται με γκρι χρώμα. Παρατηρούμε ότι η παράμετρος Λ_{cool} είναι πάντα μικρότερη από την Λ_{cool}/P_{field}	145
7.1: Τέσσερα παραδείγματα υβριδικών υλικών [218,219].....	150
7.2: Αποτελέσματα προσομοιώσεων όπου το μαγνητοθερμικό δαχτυλίδι θεωρείται πως έχει τιμή μαγνητικής διαπερατότητας ίσης με αυτήν του αέρα (α) και με μια βελτιωμένη μαγνητική διαπερατότητα όπως θα συνέβαινε σε ένα υβριδικό υλικό (β).....	150

7.3: Η θερμότητα που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου για διαφορετικά ρευστά μεταφοράς της θερμότητας σε μαγνητοθερμιδικές συσκευές σε σχέση με αυτή του νερού [222].....	152
7.4: Αναγεννητική συσκευή όπου με μια περιοδική κίνηση ένα υψηλά διαπερατό ρευστό μεταφοράς θερμότητας, μεταφέρει θερμότητα από και προς τους εναλλάκτες θερμότητας μέσω των στατικών μαγνητοθερμιδικών δομών [222].....	155
7.5: Ένα σταθερό σπειροειδές στέγαστρο με δομές από μαγνητοθερμιδικό υλικό και εναλλάκτες θερμότητας [222].....	155
7.6: Συσκευή τοποθέτησης του μαγνητοθερμιδικού ρευστού [222].....	157
7.7: Παρουσίαση της βασική ιδέας του προτεινόμενου νέου συστήματος CPV με μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας.....	159
7.8: Ένα υβριδικό εξατμιστικό-μαγνητικό ψυκτικό σύστημα [222]. Η μονάδα μαγνητικής ψύξης είναι ανεξάρτητη από το εξατμιστικό ψυκτικό σύστημα.....	162
7.9: Ένα υβριδικό εξαεριστικό-μαγνητικό ψυκτικό σύστημα [222], όπου η μαγνητική ψυκτική συσκευή και ο τροχός ανάκτησης θερμότητας βρίσκονται σε μια ενιαία μονάδα.....	162
7.10: Διάγραμμα θερμοκρασίας-απόλυτης υγρασίας(αναφέρεται στο σύστημα του σχήματος 7.9).	163
7.11: Διάγραμμα θερμοκρασίας-απόλυτης υγρασίας(αναφέρεται στο σύστημα του σχήματος 7.10).....	163

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Συνοπτική Παρουσίαση των σημαντικότερων μαγνητικών ψυκτικών συσκευών που κατασκευάστηκαν από το 1976 έως το 2009 και λειτουργούν σε θερμοκρασίες δωματίου.....	58
Πίνακας 3.1: Μαγνητική μεταβολή της εντροπίας για ορισμένα μαγνητικά υλικά σε θερμοκρασίες δωματίου.....	77
Πίνακας 4.1: Βασικοί Παράμετροι Λειτουργίας Ενεργού Μαγνητικού Αναγεννητή.....	89
Πίνακας 5.1: Βασικές παράμετροι λειτουργίας του ενεργού μαγνητικού αναγεννητή που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του κώδικα.....	106
Πίνακας 6.1: Τα χαρακτηριστικά των διαφόρων μαγνητικών μοντέλων που εξετάσαμε στο κεφάλαιο 6.....	145

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

```

%Regenerator Model
%Parameter definition

%Fluid properties
rho_f=998.3; % water at 20 degrees Celcius
cp_f=4183; % water specific heat
lamda_f=0.6; % water at 20 degrees Celcius
%v_f=0.05; % water velocity
mcap_f=0.010; % mass flow rate

%Solid properties
rho_s=7900; %gadolinium density
lamda_s=10.6; % gadolinium thermal conductivity

%Magnetocaloric properties
DT_adiab=4.8; %Initial value at room temperature - this is not
constant, it depends on temperature and magnetic field
c_s=240; %Initial value - this is not constant, it depends on
temperature and magnetic field

%Geometrical properties
% 100 mm (length), 50 mm (width), 10 mm (height)
% 0.25 mm (plate thickness) and 0.25 mm (plate spacing)

A0=0.10; %frontal area
L=0.1; %plate length
epsilon=0.15; %porosity
%d=0.01 % sphere diameter
dh=0.001; %hydraulic diameter
Aht=0.5; %heat transfer area
m_s=0.18; %solid mass

%Operational parameters
m_f=0.1; %(-->alpha) fluid mass
P=1; %Fluid flow period

%ux=mcap_f/(A0*epsilon*rho_f); % test calculation for fluid
velocity ux
%ux_alt=L/P; % test calculation for fluid velocity ux

%Discretization parameters
nx=40; %number of x points
nt=100; %number of time steps

%Other parameters
a_eff=0.1; %effective heat transfer coefficient
taf=0.0118; %dwell time
Dt=1/nt; %time step
Dx=L/nx; %spatial step
%lamda_eff=0.5; %effective thermal conductivity
Re=1000; %Reynolds number
%f0=23.462*Re^(-0.6716); %friction factor

```

```

kmax=10; %max number of iterations per cycle

tmp1=0; %initialization of help variable for steady state
check

T_f(1:nt+1,1:nx)=0; %initialization of T_f
T_s(1:nt+1,1:nx)=0; %initialization of T_s
T_total(1:nt+1,1:2*nx)=0; %initialization of T_total
A(1:2*nx,1:2*nx)=0; %initialization of coefficient matrix A
B(1:2*nx)=0; %initialization of right hand side B

%calculation of f0 and lamda_effective based on Engelbrecht
(2005)
%alpha=(1-epsilon)^2/epsilon^3;
%beta=(1-epsilon)/epsilon^3;
%Nu=cNu*(2+1.1*Re.^0.6).*Pr.^(1/3)); %Wakao 1982
%if epsilon<0.0827
%a0=10^(-4.898*epsilon);
%elseif epsilon<0.298
a0=10^(-.405-3.154*(epsilon-0.827));
%elseif epsilon<0.58
%a0=10^(-1.084-6.778*(epsilon-0.298));
%end
f0=0.8+0.1*epsilon;
lamda_cond=lamda_f*((1-a0)*(epsilon*f0+lamda_s./lamda_f*(1-
epsilon*f0))./(1-epsilon*(1-f0)+lamda_s./lamda_f*epsilon*(1-
f0))+a0*(2*(lamda_s./lamda_f).^2*(1-
epsilon)+(1+2*epsilon)*lamda_s./lamda_f)./((2+epsilon)*lamda_s
./lamda_f+1-epsilon)); %Hadley (1986) from Kaviany
%lamda_disp=.75*epsilon*lamda_f.*Pr.*Re;
%lamda_eff=cnk*(lamda_cond+lamda_disp);
lamda_eff=lamda_cond;

% k is number of cycles
% j is the current time step
% i is the spatial step

for k=1:kmax %repeat until steady state is reached

%Definition of initial conditions (j==1)
T_f(1,1:nx)=293; % 20 degrees Celcius are assumed for water at
zero time step
T_s(1,1:nx)=293; % 20 degrees Celcius are assumed for
gadolinium at zero time step
T_total(1,1:2*nx)=[T_f(1,1:nx),T_s(1,1:nx)]; % Consolidated
temperature vector at zero time step

%Magnetization cycle (application of magnetic field) and fluid
flow from cold to hot

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

DT_adiab=4.8; %this is not constant, it depends on temperature and magnetic field -apply function here and changes

```
for i=nx+1:2*nx
```

```
T_total(1,i)=T_total(1,i)+DT_adiab; %adiabatic temperature change across the solid
```

```
end
```

```
for j=1:nt
```

```
%Definition of K coefficients
```

```
c_s=240; %parameter depends on temperature and magnetic field - value range 170-300
```

```
K1=(a_eff*Aht*Dt)/(mcap_f*cp_f*taf);
```

```
K2=L*Dt/(2*Dx*taf);
```

```
K3=10000*(a_eff*Aht*Dt)/(m_s*c_s);
```

```
K4=(lamda_eff*Dt)/(rho_s*c_s*(1-epsilon)*(Dx)^2);
```

```
Kp=f0*2*((L/taf)^3)*Dt/(dh*cp_f);
```

```
K1_1=1+K1;
```

```
K2_1=1+2*K4+K3;
```

```
%override Kis for testing reasons
```

```
%K1=0.01; % does not seem to create problem
```

```
%K2=.2; % K2 mainly influences T_fluid
```

```
%K3=1; % does not seem to create problem - K3 mainly influences T_solid
```

```
%K4=0.5; % does not seem to create problem
```

```
%Kp=0.5; % Kp mainly influences T_fluid
```

```
%K1_1=1+K1;
```

```
%K2_1=1+2*K4+K3;
```

```
%coefficient matrix A and right hand side B
```

```
A(1,1)=1; B(1)=T_total(j,1);
```

```
for i=2:nx-1
```

```
    A(i,i-1)=-K2;
```

```
    A(i,i)=K1_1;
```

```
    A(i,i+1)=K2;
```

```
    B(i)=T_total(j,i)+abs(Kp);
```

```
end
```

```
A(nx,nx-2)=1;
```

```
A(nx,nx-1)=-4;
```

```
A(nx,nx)=3;
```

```
B(nx)=0;
```

```
A(nx+1,nx+1)=-3;
```

```
A(nx+1,nx+2)=4;
```

```
A(nx+1,nx+3)=-1;
```

```
B(nx+1)=0;
```

```
for i=nx+2:2*nx-1
```

```
    A(i,i-nx)=-K3;
```

```
end
```

```
for i=2:nx
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

```

    A(i,nx+i)=-K1;
end

for i=nx+2:2*nx-1
    A(i,i-1)=-K4;
    A(i,i)=K2_1;
    A(i,i+1)=-K4;
    B(i)=T_total(j,i);
end

A(2*nx,2*nx-2)=1;
A(2*nx,2*nx-1)=-4;
A(2*nx,2*nx)=3;
B(2*nx)=0;

T_total(j+1,:)=linsolve(A,B'); %solution of linear system

%T_total(j+1,1:2*nx)=T_total(j,1:2*nx);
%T_f(j+1,1:nx)=T_total(j,1:nx);
%T_s(j+1,1:nx)=T_total(j,nx+1:2*nx);

end

%plot(T_total(nt+1,1:nx),'--rs');
%plot(T_total(nt+1,nx+1:2*nx),'--bd');

%Demagnetization cycle (removal of magnetic field) and fluid
flow from hot to cold

T_total(1:nt,:)=0;

DT_adiab=4.5; %this is not constant, it depends on temperature
and magnetic field -apply function here

for i=1:nx
    T_total(1,i)=T_total(nt+1,nx-i+1);
    T_total(1,nx+i)=T_total(nt+1,2*nx-i+1);
end

%T_total(1,:)=T_total(nt+1,:);
T_total(1,nx+1:2*nx)=T_total(1,nx+1:2*nx)-DT_adiab; %adiabatic
temperature change across the solid

T_total(nt+1,:)=0;

for j=1:nt

%Definition of K coefficients
taf=0.2;
c_s=280; %parameter depends on temperature and magnetic field
- value range 170-300
K1=(a_eff*Aht*Dt)/(mcap_f*cp_f*taf);
K2=L*Dt/(2*Dx*taf);
K3=100000*(a_eff*Aht*Dt)/(m_s*c_s);

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

```

K4=(lamda_eff*Dt)/(rho_s*c_s*(1-epsilon)*(Dx)^2);
Kp=f0*2*((L/taf)^3)*Dt/(dh*cp_f);
K1_1=1+K1;
K2_1=1+2*K4+K3;

%override Kis for testing reasons

%K1=0.000001; % does not seem to create problem
%K2=.0001; % K2 mainly influences T_fluid
%K3=1; % does not seem to create problem - K3 mainly influences
T_solid
%K4=0.5; % does not seem to create problem
%Kp=0.5; % Kp mainly influences T_fluid
%K1_1=1+K1;
%K2_1=1+2*K4+K3;

%coefficient matrix A and right hand side B
%rebuild linear system due to reverse fluid flow
A(1,1)=1; B(1)=T_total(j,1);
for i=2:nx-1
    A(i,i-1)=-K2;
    A(i,i)=K1_1;
    A(i,i+1)=K2;
    B(i)=T_total(j,i)+abs(Kp);
end
A(nx,nx-2)=1;
A(nx,nx-1)=-4;
A(nx,nx)=3;
B(nx)=0;

A(nx+1,nx+1)=-3;
A(nx+1,nx+2)=4;
A(nx+1,nx+3)=-1;
B(nx+1)=0;

for i=nx+2:2*nx-1
    A(i,i-nx)=-K3;
end

for i=2:nx
    A(i,nx+i)=-K1;
end

for i=nx+2:2*nx-1
    A(i,i-1)=-K4;
    A(i,i)=K2_1;
    A(i,i+1)=-K4;
    B(i)=T_total(j,i);
end

A(2*nx,2*nx-2)=1;
A(2*nx,2*nx-1)=-4;
A(2*nx,2*nx)=3;
B(2*nx)=0;

```

```

T_total(j+1,:)=linsolve(A,B'); %solution of linear system

%T_total(j+1,1:2*nx)=T_total(j,1:2*nx);
%T_f(j+1,1:nx)=T_total(j,1:nx);
%T_s(j+1,1:nx)=T_total(j,nx+1:2*nx);

end

%Steady state check

error=T_total(:,nx)-tmp1;
if error<0.00005
    break;
else
    tmp1=T_total(:,nx);
end

end

```