



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη Διάταξης Συνεχούς Μαγνητικού Διαχωρισμού

Αλέξανδρος Κυριαζής

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη Διάταξης Συνεχούς Μαγνητικού Διαχωρισμού

Αλέξανδρος Κυριαζής

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 6 / 11 / 2019

.....
Ε. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Τσαραμπάρης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2019

.....

Αλέξανδρος Κυριαζής

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αλέξανδρος Κ. Κυριαζής.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο βιοδιαχωρισμός φυσικών μορίων, καθώς και κλινικών ενώσεων, έχει αναπτυχθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Αρκετές τεχνικές είναι διαθέσιμες, αλλά η πλειοψηφία τους παρουσιάζει μειονεκτήματα, όπως η μη δυνατότητα εφαρμογής για βιομηχανικούς σκοπούς. Οι κύριοι περιορισμοί για την εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα είναι το υψηλό κόστος και το γεγονός ότι οι συσκευές λειτουργούν με δυναμική μικρορευστών. Παρ' όλα αυτά, ο μαγνητικός βιοδιαχωρισμός θεωρείται ο πλέον κατάλληλος για χρήση σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια απλή μέθοδος μαγνητικού διαχωρισμού, που δεν βασίζεται στη δυναμική των μικρορευστών, μπορεί να λειτουργεί με ρυθμό συνεχούς και υψηλής ροής και μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί για να χρησιμοποιηθεί για απλούς σκοπούς διαχωρισμού. Βασίζεται στη χρήση μιας ανισοτροπικής εύκαμπτης μαγνητικής ταινίας νεοδυμίου, εύκαμπτων σωλήνων Tygon και μιας συσκευής άντλησης. Παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της διαδικασίας διαχωρισμού μαζί με πειραματικές δοκιμές σε μαγνητικά σωματίδια οξειδίου του σιδήρου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είναι δυνατή η απομάκρυνση και η συλλογή περισσότερο από το 92% των μαγνητικών σωματιδίων από ένα υγρό διάλυμα 100 ml, σε περίπου 15 λεπτά.

Λέξεις κλειδιά

Βιοδιαχωρισμός, μαγνητικός διαχωρισμός, μαγνητικά σωματίδια, συνεχής ροή

Abstract

Bio-separation of natural molecules as well as clinical compounds has been constantly developed in last decades. Several techniques are available but the majority of them presents drawbacks such us impossibility to be applied for industrial purposes. The main limitations for the scaling up are high costs and the fact that the devices work with microfluid dynamics. Nevertheless, magnetic bio-separation is considered the most prone to be used for large scale applications. Herein, we propose a simple magnetic separation method that is not based on microfluid dynamics, can work in a continuous- and high-flow rate and can be easily automated in order to be used for standard separation purposes. It is based on the use of an anisotropic flexible neodymium magnetic strip, Tygon hoses and a pumping device. We show the modelling of the separation process along with an experimental test on iron oxide magnetic particles. The results showed that it is possible to remove, and separately collect, more than 92% of magnetic particles from a liquid solution of 100 ml in roughly 15 minutes.

Key words

Bio-separation, magnetic separation, magnetic particles, continuous-flow

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, Καθηγητή Ε.Μ.Π., επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την πολύτιμη συμβολή του, καθώς και την καθοδήγησή του στην εκπόνησή της.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κ. Γεώργιο Μπάνη, Υποψήφιο Διδάκτορα στο Εργαστήριο, για τη βοήθεια που μου παρείχε στη μακρόχρονη συνεργασία μας, καθώς και για τις καίριες επισημάνσεις του, που συνέβαλαν καταλυτικά στην ολοκλήρωσή της.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ επίσης την οικογένειά μου και τους φίλους μου, που μου στάθηκαν και με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	i
Περιεχόμενα	vii
1 Θεωρητικό μέρος	1
1.1 Εισαγωγή στο Μαγνητικό διαχωρισμό.....	1
1.1.1 Σκοπός της εργασίας	3
1.2 Θεωρία μαγνητισμού και ηλεκτρομαγνητισμού	4
1.2.1 Μαγνήτες και ηλεκτρομαγνήτες	4
1.2.2 Μαγνητικά κυκλώματα.....	10
1.2.3 Οι νόμοι του Kirchhoff στα μαγνητικά κυκλώματα.....	12
1.2.4 Εξισώσεις Maxwell.....	13
1.2.5 Μαγνητισμός.....	16
1.2.6 Βασικές έννοιες μαγνητισμού.....	18
1.2.7 Κατηγορίες μαγνητικών υλικών.....	19
1.2.8 Βρόχος υστέρησης	24
1.2.9 Υπερπαραμαγνητισμός	26
1.2.10 Ιδιότητες των σιδηρομαγνητών.....	29
1.2.11 Μαγνητική υστέρηση	29
1.2.12 Μαγνητική ανισοτροπία.....	33
1.2.13 Θεμελιώδη μαγνητικά μήκη	34
1.3 Ρευστά	35
1.3.1 Βασικές θεωρητικές γνώσεις.....	35
1.3.2 Ιδιότητες ρευστών.....	35
1.3.3 Είδη ροής - Εσωτερική τριβή	37
2 Πειραματικό μέρος.....	41

2.1	Γενικά.....	41
2.2	Περιγραφή προτεινόμενου συστήματος λειτουργίας.....	42
2.3	Υλικά και χαρακτηριστικά τους.....	44
2.3.1	Εύκαμπτος σωλήνας Tygon.....	46
2.3.2	Ανισοτροπική εύκαμπτη μαγνητική ταινία νεοδυμίου.....	47
2.3.3	Περισταλτική αντλία.....	49
2.3.4	Υγρό διάλυμα.....	53
2.4	Στρατηγική πειραματικής διαδικασίας.....	54
2.5	Προσομοιώσεις.....	54
2.5.1	Σχεδιασμός ενός σπειροειδούς μαγνητικού διαχωριστή.....	54
2.5.2	Παγίδευση, διαχωρισμός και συγκέντρωση μαγνητικών σωματιδίων με σπειροειδή μαγνητικό διαχωριστή.....	61
2.6	Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	70
3	Συμπεράσματα.....	73
	Βιβλιογραφία.....	77

1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟ

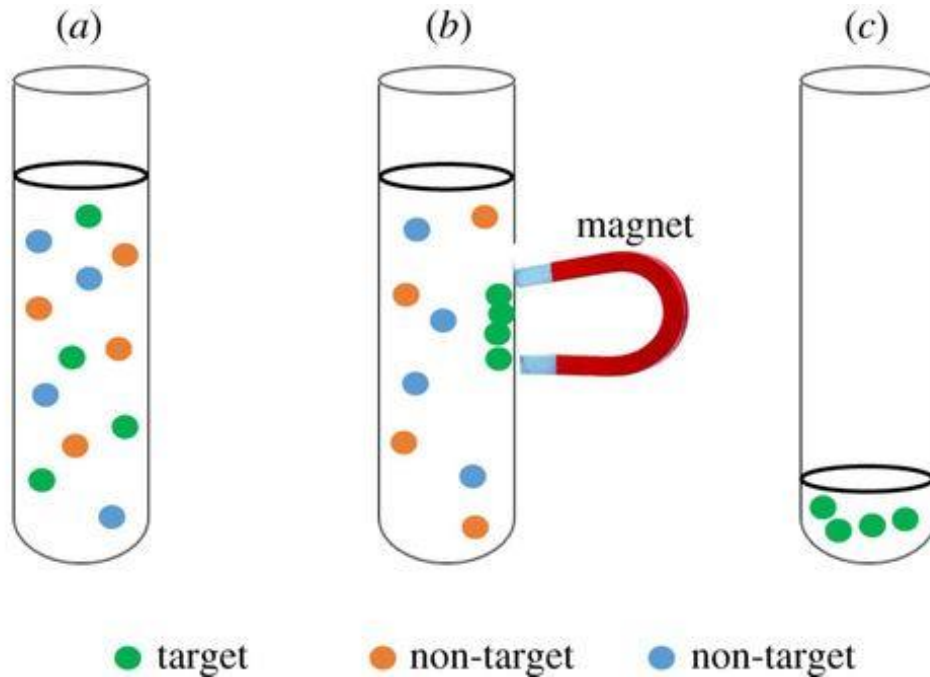
Η γρήγορη, επιλεκτική και ακριβής ανίχνευση βιολογικών δεικτών είναι κρίσιμη στην κλινική διάγνωση, καθώς επιτρέπει την παροχή ακριβέστερων εκτιμήσεων. Ωστόσο, τα βιολογικά δείγματα είναι συνήθως εξαιρετικά περίπλοκα, λόγω της παρουσίας πολλαπλών συστατικών. Σε πολλές εφαρμογές της βιοτεχνολογίας είναι απαραίτητο να απομονωθεί μια συγκεκριμένη οντότητα-στόχος. Το στάδιο προετοιμασίας του δείγματος είναι απαραίτητο πριν από την ανάλυση, προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία συλλογής [1], καθώς και να ενισχυθεί το όριο ανίχνευσης [2].

Ο διαχωρισμός της οντότητας-στόχου είναι εφικτός με τη χρήση μαγνητικών δυνάμεων. Η μαγνητική απομόνωση των επιθυμητών σωματιδίων, είτε αυτά διαθέτουν είτε όχι, εγγενείς μαγνητικές ιδιότητες, υλοποιείται με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (Σχήμα 1). Στην περίπτωση, που είναι επιθυμητή η συλλογή ή η ανίχνευση μιας οντότητας που δεν έχει μαγνητικές ιδιότητες, γίνεται επισήμανση αυτής της οντότητας με μαγνητικά σωματίδια [3].

Λόγω της παρουσίας μαγνητικού πεδίου, τα μαγνητικά υλικά ευθυγραμμίζονται μαγνητικά και οδηγούνται στην περιοχή με την υψηλότερη ισχύ μαγνητικού πεδίου [4]. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως μαγνητοφόρηση και συνεπάγεται την κίνηση μαγνητικών σωματιδίων σε σχέση με το μη μαγνητικό περιβάλλον τους υπό ένα μη ομοιογενές μαγνητικό πεδίο [5]. Αυτή η τεχνική, κοινώς γνωστή ως «μαγνητικός διαχωρισμός» (MS), είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στη βιοτεχνολογία και η χρήση της προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα.

Πρώτα απ' όλα, η φυσική επαφή μεταξύ της μαγνητικής πηγής και των βιολογικών δειγμάτων μπορεί να παραλειφθεί καθ' όλη τη διαδικασία διαχωρισμού, η οποία με τη σειρά της καθιστά την MS μη βιοδιαθετική και δεν επιδρά αρνητικά στα βιολογικά συστατικά [6]. Επιπλέον, η τεχνική MS είναι επίσης γνωστή για την υψηλή απόδοση, το

χαμηλό κόστος [7] και για το ότι είναι λιγότερο παρεμβατική, όταν ένας μαγνήτης χρησιμοποιείται ως μαγνητική πηγή [8].



Σχήμα 1: α) Δείγμα με μείγμα διαφόρων συστατικών, που περιέχουν τόσο οντότητες στόχους όσο και μη στόχους, β) απομόνωση οντοτήτων στόχων με χρήση μαγνητικού πεδίου, γ) συγκεντρωμένος στόχος μετά την αφαίρεση των μη στόχων. Οι στόχοι πρέπει να έχουν εγγενή μαγνητική απόκριση ή έχουν προ-επισημανθεί με σωματίδια μαγνητικής απόκρισης

(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5071813/figure/RSFS20160048F1/>)

Λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η τεχνική MS, έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια στο σχεδιασμό διαφόρων τύπων μαγνητικών διαχωριστών, οι οποίοι επιτρέπουν την εφαρμογή της τεχνικής MS να εμφανίζεται είτε ασυνεχώς είτε κατά τρόπο συνεχή [9]. Επιπλέον, η τεχνική MS είναι ιδιαίτερα υποσχόμενη και σε επεξεργασία μεγάλων όγκων, αλλά επίσης παρουσιάζει εξαιρετική απόδοση σε μικροσκοπικές συσκευές [10,11].

Για παράδειγμα, οι Nam et al [12] χρησιμοποίησαν συσκευή μικρορευστού με δύο εξόδους, για να διαχωρίσουν τα μολυσμένα ερυθρά αιμοσφαίρια (RBCs), που είχαν σχετικά υψηλότερη μαγνητική ευαισθησία σε σύγκριση με τα υγιή ερυθρά αιμοσφαίρια. Οι Pamme & Wilhelm [13] έδειξαν ότι η τεχνική MS σε συνεχή λειτουργία, μπορεί να

εφαρμοστεί σε μαγνητικά επισημασμένα καρκινικά κύτταρα, σε μικροφυσιολογικό διαχωριστή με πολλαπλές εξόδους. Επιπλέον, οι Chen et al [14], συμπλήρωσαν το θάλαμο μαγνητικού διαχωρισμού τους με σωματίδια σιδήρου ακανόνιστου σχήματος με διάμετρο που κυμαίνεται από 25 έως 75 μm , προκειμένου να παράγουν τοπικά, ισχυρό μαγνητικό πεδίο κατά την έκθεση σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, ώστε να γίνει αποτελεσματικός διαχωρισμός των ιόντων HIV, που είχαν επισημανθεί με μαγνητικά σωματίδια [14].

1.1.1 Σκοπός της εργασίας

Παρ' όλες τις εξελιγμένες εφαρμογές, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, η ίδια η τεχνική μαγνητικού διαχωρισμού είναι αντικείμενο έρευνας με πολλά ανοικτά ερωτήματα, που δεν έχουν ακόμη απαντηθεί. Ιδιαίτερα, η τεχνική MS μπορεί να ταξινομηθεί περαιτέρω σε μαγνητικό διαχωρισμό μεγάλης βάρθρωσης (HGMS) και μαγνητικό διαχωρισμό με χαμηλή βάρθρωση (LGMS), σύμφωνα με την ένταση του μαγνητικού πεδίου που χρησιμοποιείται στη διαδικασία διαχωρισμού. Η έρευνα σχετικά με τις εφαρμογές μαγνητικού διαχωρισμού σε ήπια μαγνητικά πεδία είναι περιορισμένη και ελλιπής [15] και, ως εκ τούτου, χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για την ανάπτυξη της τεχνικής LGMS στη βιοτεχνολογία, καθώς και σε άλλες εφαρμογές. Επιπλέον, ο υποκείμενος μηχανισμός μαγνητοφόρησης καθορίζει επίσης το ρυθμό διαχωρισμού και συλλογής και την αποτελεσματικότητα της μεθόδου διαχωρισμού [4]. Παράλληλα, ο χρόνος, που καταναλώνεται για να διαχωριστεί η οντότητα-στόχος από ένα πολύπλοκο διάλυμα, είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που καθορίζει τη διάρκεια της διαδικασίας. Ως εκ τούτου, σε συνδυασμό με τη διεξοδική κατανόηση του θεωρητικού υπόβαθρου της διαδικασίας μαγνητικού διαχωρισμού, η οποία είναι επιτακτική για το σχεδιασμό του μαγνητικού διαχωριστή, που χρησιμοποιείται σε βιοϊατρικές εφαρμογές, είναι σημαντική και η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας τέτοιων διατάξεων σε μεγάλη κλίμακα και πραγματικές συνθήκες. Παράγοντες, όπως το μέγεθος των μαγνητικών σωματιδίων, η συγκέντρωση των μαγνητικών σωματιδίων και ο μαγνητισμός, παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας του μαγνητικού διαχωρισμού.

Συνεπώς, ο στόχος της παρούσης εργασίας είναι η εξέταση των παραγόντων, οι οποίοι σχετίζονται με το μαγνητικό πεδίο και το υλικό του μαγνήτη, που διαμορφώνει τη διάταξη του διαχωριστή, καθώς και η παρουσίαση μιας απλής μεθόδου μαγνητικού διαχωρισμού, που δεν βασίζεται στη δυναμική των μικρορευστών, μπορεί να λειτουργεί με ρυθμό συνεχούς και υψηλής ροής και έχει τη δυνατότητα να αυτοματοποιηθεί εύκολα, ώστε να χρησιμοποιηθεί για απλούς σκοπούς διαχωρισμού. Τέλος, παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας και ζητήματα, που αξίζει να εξεταστούν για μελλοντική εφαρμογή της τεχνικής μαγνητικού διαχωρισμού φυσικών μορίων, καθώς και ενώσεων για χρήση τους στη βιοϊατρική.

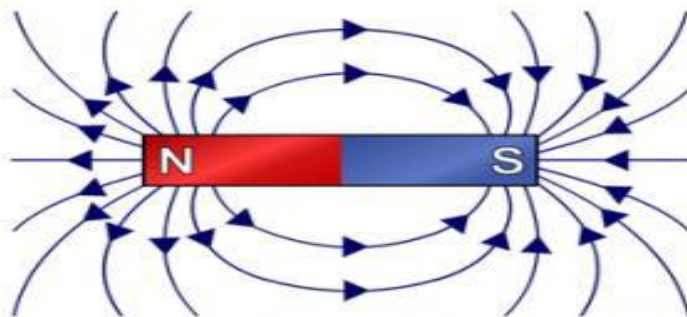
1.2 ΘΕΩΡΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

1.2.1 Μαγνήτες και ηλεκτρομαγνήτες

Ως μαγνήτης ορίζεται ένα αντικείμενο κατασκευασμένο από συγκεκριμένα υλικά, το οποίο μπορεί να δημιουργήσει μαγνητικό πεδίο στο χώρο γύρω του. Οι μαγνήτες μπορεί να είναι φυσικοί ή τεχνητοί. Οι τεχνητοί μαγνήτες διακρίνονται με τη σειρά τους σε μόνιμους και παροδικούς. Οι φυσικοί μαγνήτες είναι τεμάχια του ορυκτού μαγνητίτη. Αντίθετα, οι τεχνητοί είναι κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα, που αποκτούν μαγνητικές ιδιότητες λόγω της επιβολής εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

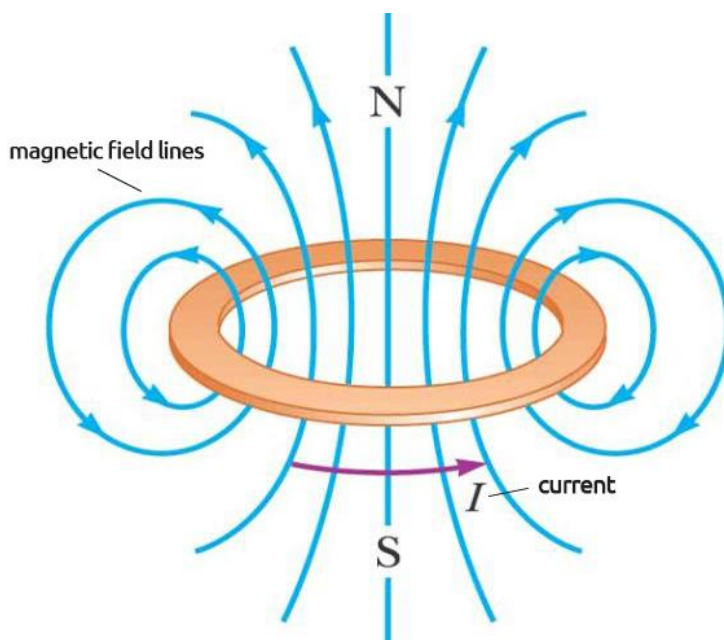
Επίσης, υπάρχει η περίπτωση το μαγνητικό πεδίο να παράγεται από τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από πηνίο. Τότε, οι μαγνήτες ονομάζονται ηλεκτρομαγνήτες, και στο εσωτερικό του πηνίου τοποθετείται σιδερένιος πυρήνας για να ενισχυθεί το πεδίο.

Οι μαγνήτες αποτελούνται από δύο πόλους - το βόρειο και το νότιο -, μεταξύ των οποίων δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Αυτό το πεδίο προσδιορίζεται διανυσματικά στο χώρο, με βάση την ένταση και την κατεύθυνσή του και απεικονίζεται μέσω των λεγόμενων μαγνητικών γραμμών.

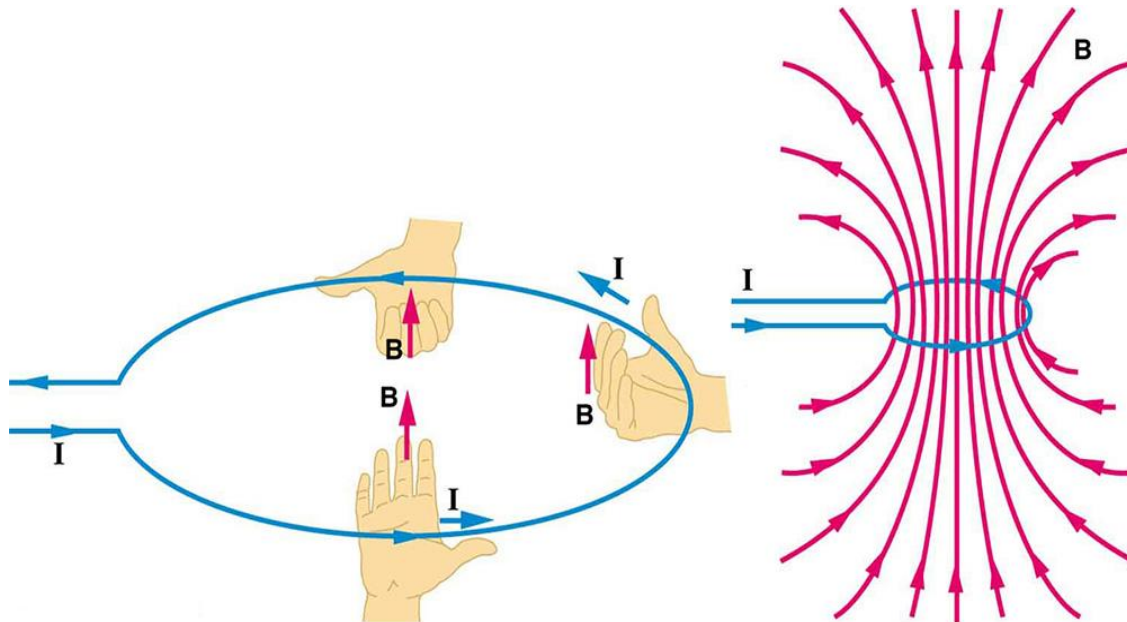


Σχήμα 2: Μαγνητικές γραμμές διανυσματικά στο χώρο, που αναπτύσσονται με βάση την ένταση και την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου
(<https://brilliant.org/wiki/magnetic-field-lines/>)

Μαγνητική (δυναμική) γραμμή είναι η νοητή γραμμή σε κάθε σημείο της οποίας η ένταση του μαγνητικού πεδίου εφάπτεται σε αυτή. Οι μαγνητικές γραμμές είναι προσανατολισμένες και απεικονίζουν τη φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου, ξεκινώντας από το βόρειο και καταλήγοντας στο νότιο πόλο του μαγνήτη. Η πυκνότητα των μαγνητικών γραμμών είναι ανάλογη της έντασης του πεδίου.



Σχήμα 3: Απεικόνιση μαγνητικού πεδίου, που προκύπτει από τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ένα βρόχο
(<http://www.ipodphysics.com/resources/Loop.JPG>)



Σχήμα 4: Κανόνας του δεξιού χεριού και κάθετη τομή αγωγού και μαγνητικών γραμμών

(<https://opentextbc.ca/physicstestbook2/chapter/magnetic-fields-produced-by-currents-ampere-law/>)

Στην περίπτωση του ηλεκτρομαγνήτη, το μαγνητικό πεδίο παράγεται με τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από πηνίο (Σχήμα 3). Η φορά του μαγνητικού πεδίου ορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού (Σχήμα 4), όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα [16,17,18].

Στην αριστερή πλευρά του Σχήματος 3 απεικονίζεται ρεύμα, που διαρρέει έναν αγωγό σε μορφή δακτυλίου, ενώ στη δεξιά απεικονίζονται οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου. Οι γραμμές είναι συμμετρικές στον άξονα του βρόχου.

Σε αποστάσεις πολύ κοντινές στο βρόχο, το πεδίο θα είναι ίδιο με το πεδίο που θα σχηματιζόταν από έναν ευθύγραμμο αγωγό (Σχήμα 5), λόγω των σχετικών αποστάσεων των σημείων του βρόχου [19].

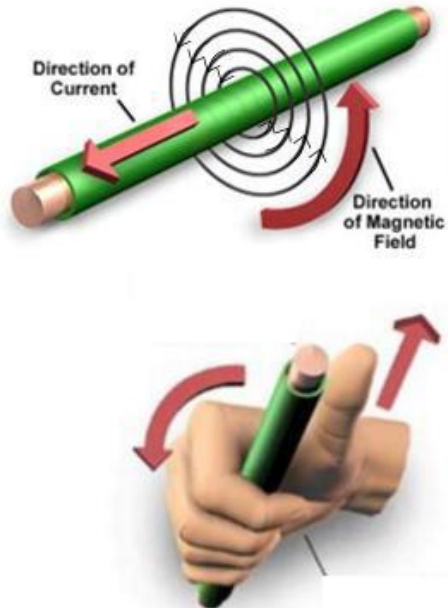
Το διανυσματικό άθροισμα των επιμέρους κινούμενων φορτίων δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο που δημιουργείται δίνεται από τον τύπο του Biot-Savart:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \times \hat{r}}{r^2} \quad (\text{Εξ. 1})$$

όπου:

- dl : αγωγός απειροστού μήκους
- \hat{r} : το διάνυσμα από ένα στοιχείο του αγωγού απειροστού μήκους σε κάποιο σημείο

Για να λυθεί αριθμητικά αυτή η εξίσωση για οποιοδήποτε σχήμα αγωγού, αρκεί να ληφθούν απειροστά μήκη αγωγού και κατόπιν να συναθροιστούν οι συνεισφορές του καθενός.



Σχήμα 5: Μαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται από τη διέλευση ρεύματος σε έναν ευθύγραμμο αγωγό και ο κανόνας του δεξιού χεριού

<https://micro.magnet.fsu.edu/electromag/electricity/generators/index.html>

Για την εύρεση, λοιπόν, του ολικού μαγνητικού πεδίου, αρκεί να ολοκληρωθεί η προηγούμενη σχέση σε όλα τα τμήματα dl που διαρρέονται από ρεύμα:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I dl \times r}{r^2} \quad (\text{Εξ. 2})$$

Όταν το σύρμα που διαρρέεται από ρεύμα σχηματίζει σπείρες τοποθετημένες συνεκτικά, δημιουργείται ένα πηνίο που παράγει μαγνητικό πεδίο. Ο αριθμός σπειρών N καθορίζει την ένταση του πεδίου και δίνεται από τον τύπο:

$$B_x = \frac{\mu_0 NI}{2a} \quad (\text{Εξ. 3})$$

Όπου a : ακτίνα πηνίου

Αυτός ο τύπος δίνει τη μέγιστη τιμή πεδίου, η οποία συναντάται στο κέντρο του βρόχου του πηνίου. Σε οποιοδήποτε άλλο σημείο, η ένταση του πεδίου είναι μικρότερη.

Ένα σωληνοειδές αποτελείται από μια ελικοειδή περιέλιξη σύρματος γύρω από έναν κύλινδρο. Ο αριθμός των σπειρών και οι στρώσεις ποικίλουν ανάλογα με το απαιτούμενο μαγνητικό πεδίο και κάθε σπείρα μπορεί να θεωρηθεί ως τέλειος κυκλικός βρόχος. Το μαγνητικό πεδίο, που προκύπτει σε κάθε σημείο, είναι το διανυσματικό άθροισμα των πεδίων, που δημιουργούνται από τις επί μέρους σπείρες. Οι μισές δυναμικές γραμμές εξέρχονται από τα άκρα του σωληνοειδούς και οι άλλες μισές διαφεύγουν μέσα από τις σπείρες μεταξύ του μέσου και των άκρων. Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς, οι δυναμικές γραμμές είναι παράλληλες, άρα και το πεδίο είναι ομογενές, ενώ έξω από το σωληνοειδές οι γραμμές είναι πιο αραιές και το πεδίο γίνεται πιο ασθενές.

Προκειμένου να αυξηθεί το μαγνητικό πεδίο και να περιοριστεί γεωμετρικά, χρησιμοποιούνται πυρήνες σιδήρου εσωτερικά των πηνίων. Το ρεύμα, που δημιουργείται από το πηνίο, εξαναγκάζει τα μαγνητικά δίπολα του πυρήνα να προσανατολιστούν σε τέτοια κατεύθυνση, ώστε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται να ενισχύεται. Έτσι, το υλικό μαγνητίζεται.

Στους ηλεκτρομαγνήτες σε πυρήνες μετασχηματιστών, σε κινητήρες και γεννήτριες, απαιτείται δημιουργία ισχυρού μαγνητικού πεδίου για δεδομένο ρεύμα και γι' αυτό ο πυρήνας, που χρησιμοποιείται, προτιμάται να είναι από σιδηρομαγνητικό υλικό. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν στενό βρόχο υστέρησης και, επομένως, απαιτείται λιγότερη ενέργεια για τη μαγνήτισή τους. Συγκεκριμένα, ο μαλακός σίδηρος είναι ο

καταλληλότερος γι' αυτές τις εφαρμογές, μιας που έχει μεγάλη διαπερατότητα, χωρίς σημαντική υστέρηση. Αντίθετα, οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν πιο πλατύ βρόχο υστέρησης και για την απομαγνήτισή τους απαιτείται μεγάλο ανάστροφο πεδίο.

Το πεδίο, που παράγεται από ένα πηνίο, είναι ευθέως ανάλογο του αριθμού στροφών του σύρματος χαλκού και του ρεύματος, που διαρρέει το πηνίο.

Αριθμός στροφών N

Με αύξηση του αριθμού στροφών N αυξάνεται και η ωμική αντίσταση του πηνίου. Αυτή η αντίσταση μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο στο ρεύμα, που διέρχεται από το πηνίο και, επομένως, να αυξήσει τη θερμοκρασία του πηνίου, εξαιτίας του φαινομένου Joule. Για την αποφυγή ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών πρέπει να επιλεγθεί κατάλληλη διατομή σύρματος, ανάλογα με το επιθυμητό πεδίο.

Με δεδομένες τις διαστάσεις του πηνίου και του σύρματος, μπορεί να υπολογιστεί η ωμική αντίσταση, που θα προκύψει από τον τύπο [19]:

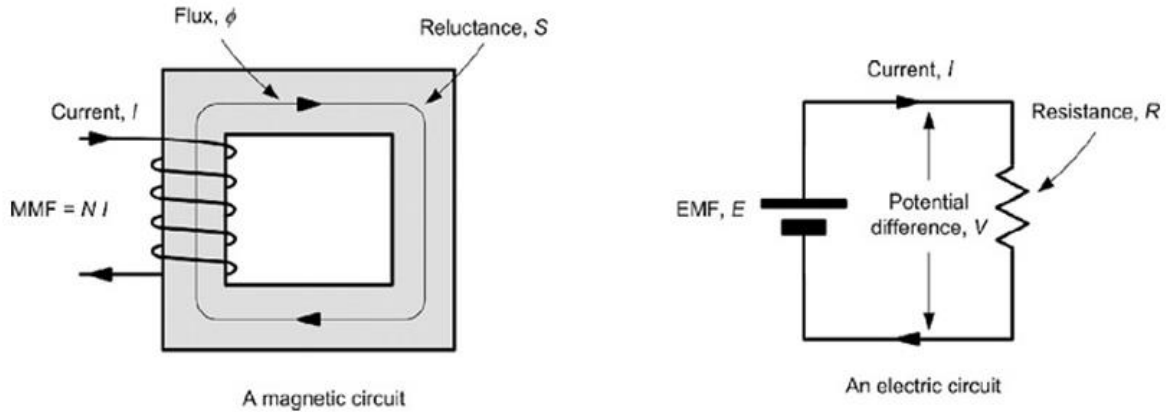
$$R = \frac{(4DLl\omega)}{d^3} \quad (\text{Εξ. 4})$$

όπου:

- R : αντίσταση (ohm)
- $\omega=2\pi f$: κυκλική συχνότητα για εναλλασσόμενο ρεύμα
- L : μήκος πηνίου (cm)
- D : διάμετρος πηνίου (cm)
- d : διάμετρος σύρματος (cm)
- l = αριθμός στρώσεων

1.2.2 Μαγνητικά κυκλώματα

Ως μαγνητικό κύκλωμα ορίζεται ένα σύνολο σιδηρομαγνητικών υλικών, που οδηγούν τη μαγνητική ροή σε κλειστές διαδρομές. Για τον υπολογισμό των μαγνητικών μεγεθών γίνεται αντιστοίχιση με τα ηλεκτρικά κυκλώματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6 [20] και στον Πίνακα 1 [21]:



Σχήμα 6: Μαγνητικό κύκλωμα και παραλληλισμός του με αντίστοιχο ηλεκτρικό (<https://www.globalspec.com/reference/81215/203279/1-22-magnetic-circuits>)

Πίνακας 1: Μαγνητικές ποσότητες και αντιστοίχιση με ηλεκτρικές

Μαγνητική ποσότητα	Σύμβολο	Μονάδα	Ηλεκτρικό ανάλογο
Ροή	Φ	Wb	Ρεύμα
ΜΕΔ	$F_m=NI$	At	Τάση
Μαγνητική Αντίσταση	R	At/Wb	Αντίσταση
Διαπερατότητα	μ	Wb/Atm	Συντελεστής Αγωγιμότητας
Μαγνητική Επαγωγή	B	T	Πυκνότητα Ρεύματος
Ένταση Μαγνητικού πεδίου	H	At/m	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

1.2.2.1 Βασικές έννοιες μαγνητικών κυκλωμάτων

Μαγνητικό πεδίο είναι ο χώρος γύρω από ένα μαγνήτη, όπου μπορούν να εξασκηθούν μαγνητικές δυνάμεις. Το μαγνητικό πεδίο παράγεται σε κάθε περίπτωση που υπάρχει κίνηση ηλεκτρικού φορτίου. Η κίνηση αυτή μπορεί να οφείλεται στο ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό, όπως ανακαλύφθηκε από τον Oersted το 1819. Ακόμα, το μαγνητικό πεδίο παράγεται από έναν μόνιμο μαγνήτη. Στην περίπτωση αυτή, το πεδίο δεν δημιουργείται από συμβατικό ηλεκτρικό ρεύμα, αλλά από τις τροχιακές κινήσεις και τα spin των ηλεκτρονίων, τα καλούμενα και Αμπεριανά ρεύματα, μέσα στο μόνιμο μαγνήτη. Οι κινήσεις αυτές των ηλεκτρονίων έχουν ως αποτέλεσμα την μαγνήτιση στο εσωτερικό του υλικού αυτού και τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου έξω απ' αυτό. Το πεδίο αυτό ασκεί δυνάμεις τόσο στους ρευματοφόρους αγωγούς, όσο και στους άλλους μόνιμους μαγνήτες.

Μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) (F_m) είναι το γινόμενο της έντασης του ρεύματος (i) με τον αριθμό των σπειρών (N), καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα είναι η αιτία για τη δημιουργία μαγνητικής ροής γύρω από έναν αγωγό και, άρα, η ΜΕΔ είναι η αιτία για τη δημιουργία μαγνητικής ροής σε ένα πηνίο. Δίνεται από τον τύπο: $F_m = Ni$ και οι μονάδες μέτρησης είναι οι αμπεροστροφές At [22].

Ένταση του μαγνητικού πεδίου: Ως ένταση του μαγνητικού πεδίου σε κάποιο σημείο ορίζεται η μαγνητεγερτική δύναμη ανά μονάδα μήκους της μαγνητικής γραμμής, που περνά από αυτό το σημείο. Δίνεται από τον τύπο:

$$H = \frac{F_m}{l} \quad (\text{Εξ. 5})$$

Για κάθε σημείο στο εσωτερικό του πηνίου, η ένταση έχει την ίδια τιμή. Μονάδα μέτρησης είναι η αμπεροστροφή ανά μέτρο At/m .

Μαγνητεγερτική διαπερατότητα: Είναι μια σταθερά που καθορίζει πόσο εύκολα περνούν οι μαγνητικές γραμμές από κάποιο υλικό. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού συμβολίζεται με μ_0 και ισούται με $4\pi \cdot 10^{-7} \text{Wb/Atm}$.

Μαγνητική αντίσταση: Είναι η ιδιότητα ενός σώματος να προβάλλει αντίσταση στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου σε αυτό και είναι ανάλογη με το μήκος της διαδρομής

των γραμμών l μέσα στο σώμα και αντιστρόφως ανάλογη με τη μαγνητική διαπερατότητα μ του σώματος και του εμβαδού της διατομής S . Δίνεται από τον τύπο:

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (\text{Εξ. 6})$$

με μονάδες μέτρησης At/Wb .

Η αντίστροφη ποσότητα ονομάζεται **μαγνητική αγωγιμότητα**:

$$P_m = \frac{1}{R_m} \quad (\text{Εξ. 7})$$

Μαγνητική ροή: Τέλος, η μαγνητική ροή αντιστοιχίζεται με την ένταση ενός ηλεκτρικού κυκλώματος και δίνεται από τον τύπο:

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} \quad (\text{Εξ. 8})$$

Η θετική φορά της μαγνητικής ροής καθορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Επειδή η αγωγιμότητα των μαγνητικών υλικών δεν είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του αέρα (10^4 φορές μικρότερη), μερικές μαγνητικές γραμμές, αντί να κλείσουν διαμέσου του μαγνητικού υλικού, κλείνουν μέσω του αέρα [23]:

$$\Phi = \Phi_m + \Phi_L \quad (\text{Εξ. 9})$$

1.2.3 Οι νόμοι του Kirchhoff στα μαγνητικά κυκλώματα

Οι σχέσεις για τη σύνδεση ηλεκτρικών αντιστάσεων εν παραλλήλω και σε σειρά ισχύουν και για τα μαγνητικά κυκλώματα, όπως και οι μαθηματικές διατυπώσεις για τους νόμους του Kirchhoff:

Νόμος ρευμάτων Kirchhoff:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (\text{Εξ. 10})$$

Νόμος τάσεων Kirchhoff:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = E \quad (\text{Εξ. 11})$$

σε αντιστοιχία με τους:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0 \quad (\text{Εξ. 12})$$

καθώς

$$\nabla B = 0$$

και το νόμο διαρρεύματος:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i R_m = F \quad (\text{Εξ. 13})$$

Αντίθετα με τα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα σιδηρομαγνητικά υλικά η μαγνητική αντίσταση δεν είναι σταθερή, επειδή μεταβάλλεται η μαγνητική διαπερατότητα, που είναι εξαρτώμενη από την ένταση του μαγνητικού πεδίου (μη γραμμικά κυκλώματα) [24].

1.2.4 Εξισώσεις Maxwell

Οι εξισώσεις του Maxwell συνοψίζουν τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού και περιγράφουν την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, που διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός.

1.2.4.1 Νόμος του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο

Σύμφωνα με αυτό το νόμο, η ηλεκτρική ροή μέσα από κλειστή επιφάνεια είναι ανάλογη με το συνολικό φορτίο Q_{in} , που περικλείει η επιφάνεια:

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0} \quad (\text{Εξ. 14})$$

Η διαφορική μορφή του νόμου του Gauss είναι:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0} \quad (\text{Εξ. 15})$$

Η φυσική σημασία της εξίσωσης αυτής είναι ότι συνδέει το ηλεκτρικό πεδίο E σε κάποιο σημείο του χώρου με την κατανομή του φορτίου, που εκφράζεται με την πυκνότητα ρ , στο ίδιο σημείο του χώρου. Πιο συγκεκριμένα, εκφράζει μια τοπική σχέση μεταξύ των δύο αυτών φυσικών ποσοτήτων. Επομένως, τα ηλεκτρικά φορτία είναι οι πηγές του ηλεκτρικού πεδίου και η κατανομή και το μέγεθός τους ορίζουν το ηλεκτρικό πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου.

1.2.4.2 *Νόμος του Gauss για το μαγνητικό πεδίο*

Σύμφωνα με αυτόν το νόμο, η μαγνητική ροή, που διέρχεται μέσα από μια κλειστή επιφάνεια, είναι πάντα μηδέν. Αυτό συμβαίνει, επειδή οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι κλειστές (επειδή δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα). Η κανονική μορφή του νόμου είναι:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (\text{Εξ. 16})$$

ενώ η διαφορική μορφή [25]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Εξ. 17})$$

1.2.4.3 *Νόμος του Faraday-Henry ή νόμος της επαγωγής*

Σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής, ένα μαγνητικό πεδίο, που μεταβάλλεται με το χρόνο, δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο τέτοιο, ώστε η ηλεκτρεγερτική του δύναμη κατά μήκος μιας

αυθαίρετης κλειστής διαδρομής να ισούται με τον αρνητικό ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής μέσα από μια επιφάνεια, που ορίζει η διαδρομή αυτή.

$$\oint_C \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d(\int_S \vec{B} d\vec{S})}{dt} = \int_S \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) d\vec{S} \quad (\text{Εξ. 18})$$

Σε διαφορική μορφή είναι:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Εξ. 19})$$

Η φυσική ερμηνεία αυτής της εξίσωσης είναι ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο [26,27].

1.2.4.4 Νόμος Ampere-Maxwell

Αυτός ο νόμος συσχετίζει ένα ηλεκτρικό ρεύμα με το μαγνητικό πεδίο που παράγει και επιπλέον υποδεικνύει ότι στο μαγνητικό πεδίο συνεισφέρει και ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I_{in} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d(\int_S \vec{E} d\vec{S})}{dt} \quad (\text{Εξ. 20})$$

και σε διαφορική μορφή:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{Εξ. 21})$$

Αυτός ο νόμος συσχετίζει το μαγνητικό πεδίο B , το ηλεκτρικό πεδίο E και την πυκνότητα ρεύματος J σε ένα σημείο του χώρου. Ο δεύτερος όρος στις εξισώσεις είναι η συνεισφορά του Maxwell και αντιπροσωπεύει το ρεύμα μετατόπισης, το οποίο εξηγεί γιατί το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό με τη σειρά του, λόγω της 3ης εξίσωσης, δημιουργεί μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο [28].

1.2.5 Μαγνητισμός

1.2.5.1 Εισαγωγή

Η στοιχειώδης ποσότητα στον μαγνητισμό είναι η μαγνητική ροπή. Σε ατομικό επίπεδο, οι εσωτερικές μαγνητικές ροπές σχετίζονται με την περιστροφή των ηλεκτρονίων γύρω από τον άξονά τους (spin), καθώς και με την τροχιακή κίνησή τους γύρω από τον πυρήνα. Αυτές οι ατομικές μαγνητικές ροπές αλληλοεξουδετερώνονται όταν το σώμα δε βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο [29].

Στον κλασσικό ηλεκτρομαγνητισμό, η μαγνητική ροπή (m) μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Υποθέτοντας ένα ρεύμα I σε ένα στοιχειώδη βρόχο γύρω από μια περιοχή dA , η μαγνητική ροπή, που εμφανίζεται στην περιοχή, ισούται με:

$$dm = I dA \quad (\text{Εξ. 22})$$

Η κατεύθυνση μαγνητικής ροπής δίνεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Η άθροιση όλων των μαγνητικών ροπών των στοιχειωδών βρόχων δίνει ως αποτέλεσμα τη συνολική μαγνητική ροπή m για βρόχο πεπερασμένου μεγέθους ως εξής [30]:

$$m = \int dm = I \int dA \quad (\text{Εξ. 23})$$

Σύμφωνα με τον Ampère, ένας μαγνήτης ισοδυναμεί με ένα ρεύμα βρόχου, ενώ η στοιχειώδης μαγνητική ροπή μπορεί να παρασταθεί ως ένας στοιχειώδης βρόχος ρεύματος επιφάνειας A , σύμφωνα με τη σχέση [31]:

$$m = IA \quad (\text{Εξ. 24})$$

Για την κατανόηση της προέλευσης του μαγνητισμού, πρέπει να μελετηθεί η μαγνητική ροπή των ατόμων, που σχετίζεται με την κίνηση των ηλεκτρονίων. Κάθε ηλεκτρόνιο έχει στροφορμή (L), που σχετίζεται με την κυκλική του κίνηση γύρω από τον πυρήνα του ατόμου, καθώς και εσωτερική στροφορμή (S), που σχετίζεται με την περιστροφική του κίνηση (spin). Για ένα άτομο με n ηλεκτρόνια προστίθενται οι στροφορμές, με

αποτέλεσμα L και S να είναι οι συνολικές στροφορμές, που επιδρούν στο άτομο. Οι αντίστοιχες μαγνητικές ροπές που αναπτύσσονται είναι οι εξής [32]:

$$\mu_L = -\beta L \quad (\text{Εξ. 25})$$

$$\mu_S = -2\beta S \quad (\text{Εξ. 26})$$

Ο πυρήνας του ατόμου δημιουργεί μαγνητικές ροπές, που είναι 3 τάξεις πιο αδύνατες από τη ροπή του κάθε ηλεκτρονίου. Ενδεικτικά, η πυρηνική μαγνητόνη και η μαγνητόνη του Bohr είναι αντίστοιχα: $\mu_n = 5,501 \times 10^{-27} \text{ Am}^2$ και $\mu_B = 9,274 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$.

Υπάρχουν δύο θεωρίες που εξηγούν τον μαγνητισμό στα στερεά, που η κάθε μια αναπαριστά συγκεκριμένες ακραίες ή οριακές καταστάσεις. Αυτές οι δύο θεωρίες είναι η ατομική θεωρία και η θεωρία ζωνών.

Στην ατομική θεωρία, οι μαγνητικές ροπές των ηλεκτρονίων εξετάζονται δεσμευμένες τοπικά στους ιοντικούς πυρήνες του πλέγματος του στερεού. Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται στα μαγνητικά υλικά, που χρησιμοποιούν κυρίως τα στοιχεία των σπανίων γαιών ή λανθανιδών, στα οποία τα "μαγνητικά" ηλεκτρόνια, δηλαδή τα ηλεκτρόνια που προσδίδουν μαγνητικές ιδιότητες στο υλικό, είναι τα ηλεκτρόνια 4f της προτελευταίας στιβάδας, τα οποία είναι συζευγμένα με τον πυρήνα.

Στο μοντέλο ζωνών, οι μαγνητικές ροπές θεωρούνται ότι οφείλονται στα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας, που είναι τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας στο απομονωμένο άτομο, εξαιτίας της έλλειψης αντιστάθμισης μαγνητικών ροπών. Όταν τα άτομα έρχονται κοντά το ένα στο άλλο για να δημιουργήσουν το στερεό, τα ηλεκτρόνια αυτά κινούνται ελεύθερα μέσα στο υλικό. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται σε μερικές περιπτώσεις για να εξηγήσει τη μαγνητική συμπεριφορά των 3d στοιχείων, που είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο και το χρώμιο. Στην πραγματικότητα, ακόμη και με τη θεωρία ζωνών, θεωρείται ότι τα μαγνητικά ηλεκτρόνια σπαταλούν πιο πολύ χρόνο κοντά στον πυρήνα και πιστεύεται ότι η πραγματικότητα βρίσκεται κάπου ενδιάμεσα [32].

1.2.6 Βασικές έννοιες μαγνητισμού

Η πιο εμφανής εκδήλωση του μαγνητισμού σε στερεά σώματα είναι η αυθόρμητη μαγνήτιση υλικών, όπως ο σίδηρος ή ο μαγνητίτης, όταν τους ασκείται ένα μαγνητικό πεδίο. Το χαρακτηριστικό τέτοιων υλικών είναι η μη αντιστρέψιμη αντίδραση σε ένα ασκούμενο μαγνητικό πεδίο (H) [29].

Μαγνητικό πεδίο δημιουργείται όταν υπάρχει κίνηση ηλεκτρικού φορτίου. Το μαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται σε ένα σημείο του χώρου από ένα στοιχειώδες μήκος ενός αγωγού που μεταφέρει ρεύμα I , δίνεται από τον νόμο των Biot-Savart:

$$dH = \frac{1}{4\pi r^2} I dl \times u \quad (\text{Εξ. 27})$$

όπου r είναι η ακτινική απόσταση από τον αγωγό, dH η στοιχειώδης συνεισφορά στο μαγνητικό πεδίο, u το μοναδιαίο διάνυσμα στην ακτινική διεύθυνση, dl το στοιχειώδες μήκος του αγωγού στο σημείο r .

Η απόκριση του υλικού στο μαγνητικό πεδίο λέγεται μαγνητική επαγωγή (B). Το μαγνητικό πεδίο και η μαγνητική επαγωγή στο κενό συνδέονται με τη σχέση:

$$B = \mu_0 H \quad (\text{Εξ. 28})$$

όπου $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, ενώ σε ένα υλικό ισχύει η σχέση:

$$B = \mu H \quad (\text{Εξ. 29})$$

όπου μ είναι η διαπερατότητα του υλικού, η οποία δεν είναι κατ' ανάγκη σταθερά του υλικού, διότι σε αρκετές περιπτώσεις και, κυρίως, στα φερρομαγνητικά υλικά μεταβάλλεται και μάλιστα μη γραμμικά, συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων.

Μαγνήτιση (M) ονομάζεται το φαινόμενο της σύνδεσης των διακριτών μαγνητικών ροπών των ατόμων, όταν αυτά συνδέονται επιλεκτικά σε ένα στερεό, πιθανώς υπό την

επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και ισούται με τη μαγνητική ροπή του υλικού ανά μονάδα όγκου:

$$M = \frac{m}{V} \quad (\text{Εξ. 30})$$

Η μαγνήτιση αυξάνει συναρτήσει του αριθμού των παραλληλιζόμενων ηλεκτρονικών μαγνητικών ροπών σε μια κατεύθυνση. Όταν οι μαγνητικές ροπές σε ένα στερεό παραλληλιζούνται σε μια διεύθυνση, η μαγνήτιση δεν μπορεί να αυξηθεί περισσότερο και ονομάζεται μαγνήτιση κόρου.

Η μαγνήτιση M συνεισφέρει, μαζί με το μαγνητικό πεδίο H , στη μαγνητική επαγωγή B . Η σχέση μεταξύ M , H και B έχει ως εξής:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (\text{Εξ. 31})$$

όπου $\mu_0 H$ είναι η μαγνητική επαγωγή, που θα είχε δημιουργηθεί στο κενό, και $\mu_0 M$ η πρόσθετη επαγωγή, που συνεισφέρεται από την παρουσία του μαγνητικού υλικού, και συγκεκριμένα από τον προσανατολισμό των ηλεκτρονικών μαγνητικών δίπολων στην κατεύθυνση του H . Η μαγνήτιση μετράται σε A/m .

Η μαγνητική επιδεκτικότητα ορίζεται ως εξής:

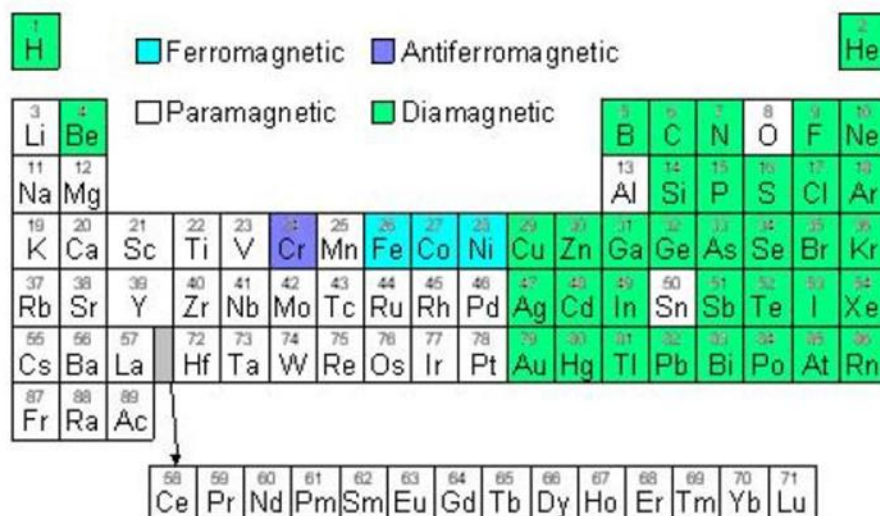
$$\chi = \frac{M}{H} \quad (\text{Εξ. 32})$$

και ισχύει ότι $\mu = \mu_0(1 + \chi)$ [32].

1.2.7 Κατηγορίες μαγνητικών υλικών

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος κατηγοριοποίησης των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών αφορά την απόκρισή τους στην παρουσία μαγνητικού πεδίου. Η διαπερατότητα και η επιδεκτικότητα χρησιμοποιούνται για την κατάταξη των υλικών σε κατηγορίες. Τα υλικά, τα οποία παρουσιάζουν κάποιας μορφής μαγνήτιση, ονομάζονται μαγνητικά.

Ανάλογα με τη συμπεριφορά του υλικού στην επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, δηλαδή με βάση την επιδεκτικότητα που παρουσιάζουν [33], αυτά χωρίζονται σε έξι κατηγορίες: τα διαμαγνητικά, τα παραμαγνητικά, τα σιδηρομαγνητικά, τα αντισιδηρομαγνητικά, τα σιδηριμαγνητικά και τα υπερπαραμαγνητικά υλικά.



Σχήμα 7: Διάγραμμα του περιοδικού πίνακα, όπου φαίνονται τα στοιχεία χρωματισμένα, ανάλογα με το είδος το μαγνητισμού που παρουσιάζουν σε θερμοκρασία δωματίου (<http://farside.ph.utexas.edu/teaching/jk1/lectures/node45.html>)

1.2.7.1 Διαμαγνητικά υλικά

Ο διαμαγνητισμός είναι μια αδύναμη μορφή μαγνητισμού, που αποδίδεται κυρίως στην τροχιακή κίνηση των ηλεκτρονίων, η οποία δημιουργεί μαγνητικές ροπές που αλληλοαναιρούνται. Έτσι, τα διαμαγνητικά υλικά αποτελούν υλικά, των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αρνητική και μικρή, της τάξης $\chi = -10^{-5}$. Το γεγονός ότι η επιδεκτικότητα είναι αρνητική αποδίδεται στην αντίθεση της μαγνητικής τους απόκρισης στο εφαρμοζόμενο πεδίο, δηλαδή όταν μια διαμαγνητική ουσία τοποθετηθεί εντός ενός μαγνητικού πεδίου, τότε το διάνυσμα μαγνήτισης M εντός του υλικού είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση. Όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο, τα τροχιακά των ηλεκτρονίων αλλάζουν προσανατολισμό σύμφωνα με τον νόμο του Lenz, με τέτοιο τρόπο, ώστε το τροχιακό δυναμικό να προσπαθεί να αναιρέσει το εξωτερικό αίτιο. Τα διαμαγνητικά

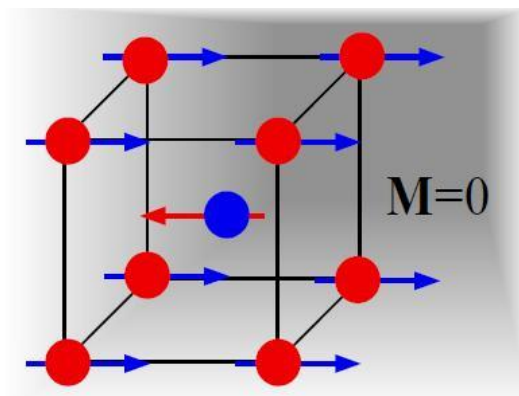
υλικά, λοιπόν, εμφανίζουν μαγνήτιση σε αντίθεση κατεύθυνση από αυτή του μαγνητικού πεδίου. Επίσης, μια ουσία είναι διαμαγνητική, όταν τα άτομα που την αποτελούν έχουν συμπληρωμένες στιβάδες και υποστιβάδες. Αυτό σημαίνει ότι απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου, κανένα άτομο δεν έχει μόνιμη μαγνητική ροπή. Παραδείγματα αυτής της κατηγορίας αποτελούν οι ομοιοπολικοί κρύσταλλοι και πολλοί ιοντικοί κρύσταλλοι, αφού τα άτομά τους έχουν συμπληρωμένες υποστιβάδες. Επίσης, ο χαλκός, ο άργυρος, ο χρυσός και οι υπεραγωγοί με $\chi=-1$.

1.2.7.2 Παραμαγνητικά υλικά

Στα παραμαγνητικά υλικά η μαγνητική διαπερατότητα είναι λίγο μεγαλύτερη της μονάδας, ανεξάρτητη από την ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, και μειώνεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται. Πολλά μέταλλα ανήκουν σε αυτή την κατηγορία και οι φερρομαγνήτες συμπεριφέρονται ως παραμαγνητικά υλικά σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τη θερμοκρασία Curie (T_c). Όταν επιβάλλεται εξωτερικό πεδίο σε ένα παραμαγνητικό υλικό, εμφανίζεται στο υλικό θετική μικρή μαγνήτιση, ανάλογη του εξωτερικού πεδίου, σε αντίθεση με τα διαμαγνητικά υλικά. Ωστόσο, η μαγνητική επιδεκτικότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας (T) (νόμος Curie – Weiss), και θετική της τάξης 10^{-3} - 10^{-5} .

1.2.7.3 Αντιφερρομαγνητικά ή αντισιδηρομαγνητικά υλικά

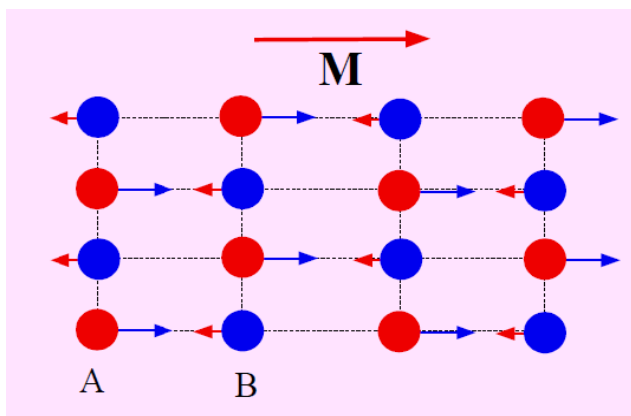
Τα αντιφερρομαγνητικά υλικά έχουν χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα και γι' αυτό χαρακτηρίζονται συχνά ως παραμαγνητικά. Η επιδεκτικότητά τους είναι θετική και παίρνει χαμηλές τιμές, όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία Néel (Θ_N). Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τη θερμοκρασία Néel, η διεύθετηση ατόμων και ιόντων γίνεται με τρόπο αντιπαράλληλο, με αποτέλεσμα οι μαγνητικές ροπές να αλληλοεξουδετερώνονται. Οι μαγνητικές ροπές των αντισιδηρομαγνητικών υλικών φαίνονται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Οι μαγνητικές ροπές σε αντισιδηρομαγνήτες
[\(https://eclass.uowm.gr/modules/document/\)](https://eclass.uowm.gr/modules/document/)

1.2.7.4 Φερριμαγνητικά ή σιδηριμαγνητικά υλικά

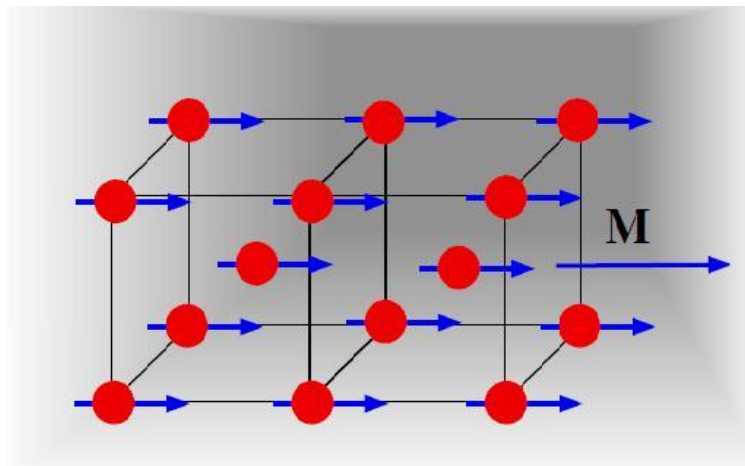
Τα φερριμαγνητικά υλικά παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που τα κάνουν να έχουν ομοιότητες τόσο με τα φερρομαγνητικά, όσο και με τα αντιφερρομαγνητικά υλικά. Ο φερριμαγνητισμός είναι τύπος μόνιμου μαγνητισμού, που οφείλεται στην αυθόρμητη διευθέτηση ατόμων ή ιόντων. Σε κάποιες περιπτώσεις αυτή η διευθέτηση γίνεται κατά τρόπο παράλληλο, όπως συμβαίνει στο φερρομαγνητισμό και σε άλλες περιπτώσεις κατά τρόπο αντιπαράλληλο, όπως συμβαίνει στον αντιφερρομαγνητισμό. Τα φερριμαγνητικά υλικά, όπως και τα φερρομαγνητικά, χάνουν τη μαγνήτισή τους και συμπεριφέρονται ως παραμαγνητικά σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τη θερμοκρασία Curie [31,32]. Οι μαγνητικές ροπές των σιδηριμαγνητικών υλικών φαίνονται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Οι μαγνητικές ροπές σε σιδηριμαγνήτες
[\(https://eclass.uowm.gr/modules/document/\)](https://eclass.uowm.gr/modules/document/)

1.2.7.5 Φερρομαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά υλικά

Πρόκειται για την πιο σημαντική κατηγορία μαγνητικών υλικών, των οποίων η επιδεκτικότητα είναι θετική, πολύ μεγαλύτερη της μονάδας (τυπικά μπορεί να λάβει τιμές από 50 έως 10000) και εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση, ακόμα και απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η σχέση ανάμεσα στη μαγνήτιση M και το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι μη γραμμική. Το φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού εμφανίζεται κάτω από μία κρίσιμη θερμοκρασία, που ονομάζεται θερμοκρασία Curie (T_c). Για θερμοκρασία πάνω από την T_c , ο σιδηρομαγνητισμός χάνεται και το υλικό γίνεται παραμαγνητικό. Παραδείγματα παραμαγνητικών υλικών είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο, καθώς και κάποιες σπάνιες μεταλλικές γαίες και τα κράματά τους. Οι μαγνητικές ροπές των σιδηρομαγνητικών υλικών φαίνονται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Οι μαγνητικές ροπές σε σιδηρομαγνήτες

(<https://eclass.uowm.gr/modules/document/>)

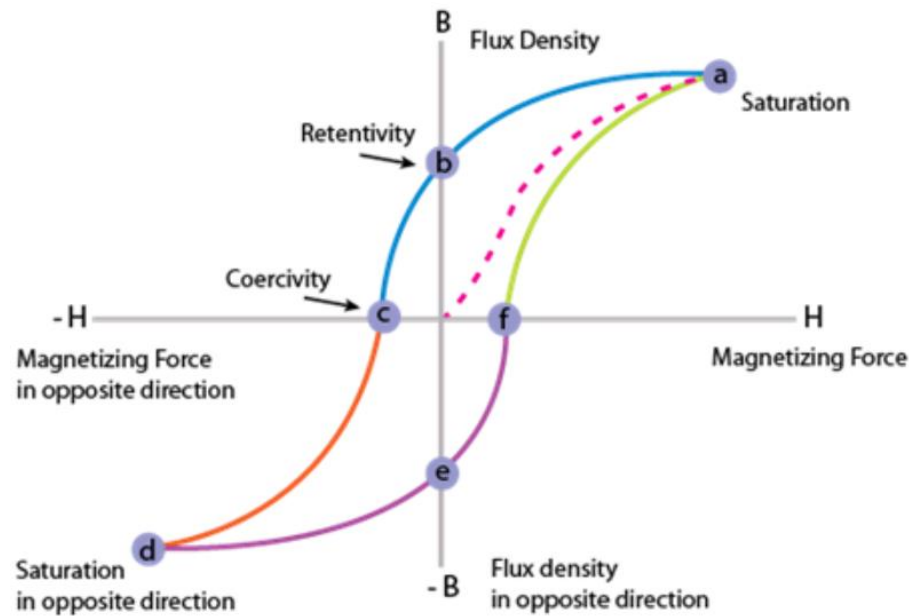
Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, τα άτομα, υπό κανονικές συνθήκες, έχουν ισχυρές μαγνητικές ροπές, λόγω ασύζευκτων ηλεκτρονιακών spin στα 3d τροχιακά. Αυτές οι ροπές συνδυάζονται και σχηματίζουν μαγνητικές περιοχές με ομόρροπα spin. Τα όρια αυτών των περιοχών, που καλούνται Weiss, ονομάζονται τοιχώματα Bloch, όπου πραγματοποιείται σταδιακή μεταβολή στη διεύθυνση των μαγνητικών ροπών. Σε μεγαλύτερη κλίμακα, επειδή οι περιοχές Weiss είναι τυχαία προσανατολισμένες και οι

μαγνητικές τους ροπές αλληλοαναιρούνται, η συνολική μαγνήτιση M είναι μηδέν, λόγω της συνθήκης ελάχιστης ενέργειας. Με εφαρμογή μαγνητικού πεδίου όμως, οι περιοχές Weiss προσανατολίζονται παράλληλα με τη διεύθυνση του πεδίου, με αποτέλεσμα να προκύπτουν υψηλές επιδεκτικότητες χ . Σε αντίθεση με τις προηγούμενες κατηγορίες, που το φαινόμενο διαρκούσε για όση ώρα ασκείται μαγνητικό πεδίο, εδώ, μετά την αφαίρεση του πεδίου, ο προσανατολισμός των περιοχών Weiss δεν έχει λόγο να μεταβληθεί. Το μαγνητικό πεδίο σε συνάρτηση με τη μαγνήτιση M σχηματίζουν ένα βρόχο υστέρησης.

1.2.8 Βρόχος υστέρησης

Σε ένα φερρομαγνητικό υλικό που μαγνητίζεται για πρώτη φορά, με εφαρμογή εξωτερικού πεδίου H , αυξάνεται η μαγνητική επαγωγή B προς τη διεύθυνση του πεδίου. Με αύξηση του πεδίου H , τα σύνορα των περιοχών μετατοπίζονται και η μαγνήτιση μεγαλώνει. Στο Σχήμα 11 φτάνοντας στο σημείο a , με επιπλέον αύξηση του μαγνητικού πεδίου, η επαγωγή B επηρεάζεται ελάχιστα. Στο σημείο a η επαγωγή είναι B_s (επαγωγή κόρου), η μαγνήτιση είναι M_s (μαγνήτιση κόρου) και οι μαγνητικές ροπές έχουν ευθυγραμμιστεί παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο H και, επομένως, με αύξηση του πεδίου δεν επηρεάζεται η μαγνήτιση M , όπως και η μαγνητική επαγωγή. Η M_s εξαρτάται από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου. Στη συνέχεια, όσο το H ελαττώνεται, η καμπύλη μετακινείται προς το b , όπου το εξωτερικό πεδίο είναι μηδέν, αλλά η επαγωγή έχει τιμή B_r . Το υλικό σε αυτό το σημείο θεωρείται μόνιμος μαγνήτης, γιατί υπάρχει παραμένουσα μαγνήτιση M_r χωρίς εξωτερικό πεδίο H . Η μαγνητική επαγωγή είναι κι αυτή παραμένουσα B_r . Με επιβολή πεδίου που αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται μέχρι το σημείο c , όπου μηδενίζεται ($B=0$), και, άρα, το υλικό απομαγνητίζεται. Το πεδίο είναι $-H_c$ και ονομάζεται συνεκτικό. Με αρνητική αύξηση του πεδίου, το υλικό φτάνει σε μαγνήτιση κόρου προς την αντίθετη φορά, στο σημείο d . Στη συνέχεια, με ελάττωση του εξωτερικού πεδίου, η καμπύλη διέρχεται απ' το σημείο e , όπου η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή είναι $-B_r$. Τέλος, με αύξηση του H , η καμπύλη του βρόχου περνάει από το f , όπου έχουμε συνεκτικό πεδίο H_c . Το εμβαδόν, που περικλείεται απ' τις γραμμές

του βρόχου υστέρησης, ισούται με την ενέργεια που αποθηκεύεται ανά μονάδα όγκου στο υλικό.



Σχήμα 11: Βρόχος υστέρησης

(<https://www.coolmagnetman.com/magfund07.htm>)

Στα μαγνητικά υλικά υπάρχουν κενές θέσεις, ακαθαρσίες, όρια κόκκων, αλλά και η μαγνητο-κρυσταλλική ανισοτροπία, το σχήμα και το μέγεθος του κάθε σωματιδίου, παράγοντες που προκαλούν τον αναπροσανατολισμό και την ανάπτυξη αυθόρμητων μαγνητικών περιοχών στο υλικό.

Με βάση το συνεκτικό πεδίο, τα φερρομαγνητικά υλικά χωρίζονται σε μαλακά και σκληρά. Στα σκληρά μαγνητικά υλικά οι βρόχοι είναι ευρείς και, άρα, το συνεκτικό πεδίο μεγάλο. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μαγνητίζονται και να απομαγνητίζονται δύσκολα και επομένως χρειάζεται να εφαρμοστούν μεγάλα πεδία. Χρησιμοποιούνται ως μόνιμοι μαγνήτες.

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά έχουν στενούς βρόχους υστέρησης και έτσι το συνεκτικό τους πεδίο είναι μικρό. Συνεπώς, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα και χρειάζεται να εφαρμοστεί μικρότερο πεδίο.

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, υπό την επίδραση πεδίου, τα ιόντα έχουν μαγνητικές ροπές που προσανατολίζονται αντιπαράλληλα μεταξύ τους, αλλά επειδή τα μεγέθη των ιόντων διαφέρουν, προκύπτει κάποια συνισταμένη μαγνητική ροπή. Τέτοια υλικά είναι οι φερρίτες, δηλαδή οξειδία του σιδήρου με άλλα μέταλλα.

Αυτά ισχύουν σε θερμοκρασίες κατώτερες μιας κρίσιμης τιμής (της θερμοκρασίας Curie). Πάνω από αυτή τη θερμοκρασία, το υλικό γίνεται παραμαγνητικό. Στον αντισιδηρομαγνητισμό, με επιβολή μαγνητικού πεδίου, πραγματοποιείται αντιπαράλληλος προσανατολισμός των μαγνητικών ατομικών ροπών και έτσι η μαγνητική ροπή αθροιστικά είναι μηδέν. Η διαφορά είναι ότι εδώ τα γειτονικά άτομα αντιτίθενται μεταξύ τους, ενώ στο σιδηρομαγνητισμό ενισχύονται.

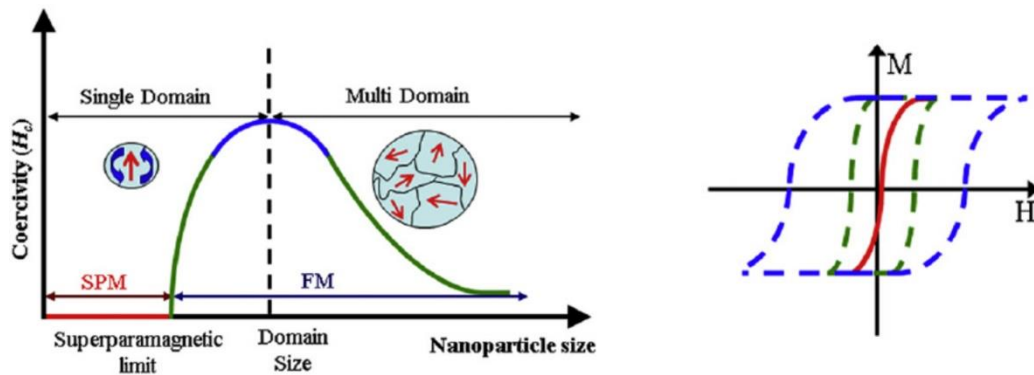
Ο μαγνητίτης (Fe_3O_4), ο αιματίτης (Fe_2O_3) και ο βουσίτης (FeO) απαρτίζουν τους φερρίτες οι οποίοι είναι κεραμικά οξειδία. Ο μαγνητίτης διαθέτει ιόντα σιδήρου σε δισθενή και τρισθενή οξειδωτική βαθμίδα και επομένως μπορεί να έχει οξειδωτικό ή αναγωγικό χαρακτήρα. Κρυσταλλώνεται σε ολοεδρία στο κυβικό σύστημα.

Ο μαγκεμίτης ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) έχει παρόμοια δομή, με τη διαφορά ότι τα 5/6 των τετραεδρικών και οκταεδρικών θέσεων καταλαμβάνονται από άτομα σιδήρου. Η βασική τους διαφορά είναι ότι τα κατιόντα σιδήρου του μαγκεμίτη βρίσκονται όλα στην τρισθενή κατάσταση (Fe^{+3}).

1.2.9 Υπερπαραμαγνητισμός

Σε ένα υλικό, ένα σύνολο ιδιοπεριστροφών με ίδια κατεύθυνση μαγνητικών ροπών, που αντιδρούν με τον ίδιο τρόπο σε μαγνήτιση, καλείται τομέας. Οι τομείς χωρίζονται μεταξύ τους από τοιχώματα συγκεκριμένου πάχους και ενέργειας, που είναι χαρακτηριστικά του κάθε υλικού. Αυτά τα τοιχώματα αποτελούν εμπόδιο στη μαγνήτιση (Σχήμα 12). Σε ένα μεγάλο σωματίδιο, η δομή αποτελείται από πολλά τοιχώματα άρα και πολλούς τομείς.

Όσο μειώνεται όμως το μέγεθος των σωματιδίων και τείνει προς μια κρίσιμη διάμετρο D_c , τα τοιχώματα από ενεργειακή άποψη είναι δυσμενή ως προς την ύπαρξή τους. Δομές, που αποτελούνται από μόνο έναν τομέα, καλούνται σωματίδια μονού τομέα. Τέτοια σωματίδια έχουν μεγάλο συνεκτικό πεδίο.

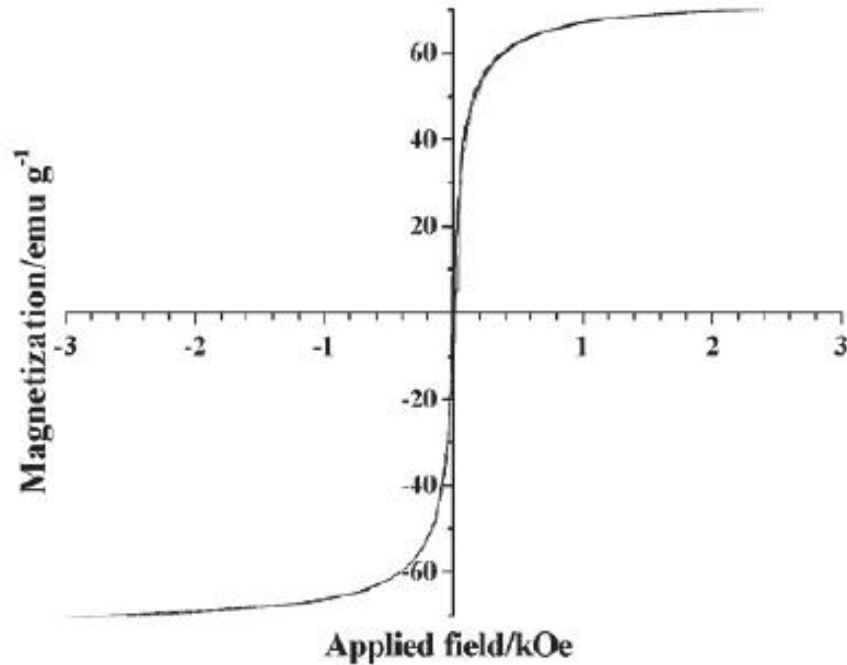


Σχήμα 12: Μεταβολή βρόχου υστέρησης συναρτήσει πολυπλοκότητας δομής

(https://www.researchgate.net/figure/The-qualitative-behavior-of-the-size-dependent-coercivity-of-magnetic-particles-The_fig1_49682386)

Ενδεικτικά, για το Σίδηρο (Fe), η κρίσιμη διάμετρος είναι 14 nm για το Fe_3O_4 128 nm και για το $\gamma-Fe_2O_3$ 166 nm. Σε διαμέτρους ακόμα πιο μικρές από την κρίσιμη, οι θερμικές διακυμάνσεις επηρεάζουν τα spin και παρουσιάζουν υπερπαραμαγνητισμό. Συγκεκριμένα, όταν το μέγεθος του σωματιδίου γίνεται πολύ μικρό, το H_c τείνει να μηδενιστεί, γιατί οι θερμικές διακυμάνσεις δεν επιτρέπουν τη σταθεροποίηση της μαγνήτισης.

Οι πειραματικές ενδείξεις του υπερπαραμαγνητισμού είναι ότι δεν υπάρχει υστέρηση στην καμπύλη μαγνήτισης και ότι σε διάφορες θερμοκρασίες οι καμπύλες μαγνήτισης υπερκαλύπτονται σε γραφήματα M συναρτήσει του H/T .



Σχήμα 13: Υπερκαλυπτόμενη καμπύλη μαγνήτισης υπερπαραμαγνητικού υλικού σε χαμηλή θερμοκρασία (https://www.researchgate.net/figure/Magnetization-curve-for-NMPs-with-the-applied-magnetic-field-This-hysteresis-loop_fig1_221914364)

Ο χρόνος ηρεμίας της μαγνήτισης τ ενός μαγνητικού σωματιδίου δίνεται από τον τύπο:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (\text{Εξ. 33})$$

όπου

- ΔE : ο ενεργειακός φραγμός στη μεταβολή της μαγνητικής ροπής
- $k_B T$: η θερμική ενέργεια
- τ_0 : 10^{-10} - 10^{-12} s

Συνήθως ισχύει ότι $\Delta E = KV$ με K την πυκνότητα της ενέργειας ανισοτροπίας του σχήματος και V τον όγκο του σωματιδίου. Για μικρά σωματίδια το ΔE είναι παρόμοιο με το $K_B T$.

Ανάλογα με το είδος της μαγνήτισης, μεταβάλλεται και ο χρόνος κατά τον οποίο υφίστανται οι υπερπαραμαγνητικές ιδιότητες [34].

1.2.10 Ιδιότητες των σιδηρομαγνητών

1.2.10.1 Μαγνητική διαπερατότητα

Η σημαντικότερη, ίσως, ιδιότητα των σιδηρομαγνητών είναι η υψηλή τους μαγνητική διαπερατότητα. Η διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή σαν συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, όπως στα παραμαγνητικά υλικά. Αντιθέτως, για να περιγραφούν οι ιδιότητες κάποιου σιδηρομαγνητικού υλικού, ως προς τις μαγνητικές του ιδιότητες, θα πρέπει να μετρήσουμε τη μαγνητική του επαγωγή B , ως συνάρτηση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου H , σε ένα συνεχές διάστημα τιμών του H (παραγωγή της καμπύλης του βρόχου υστέρησης). Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών κυμαίνεται στο εύρος από 10 έως 100000. Οι υψηλότερες τιμές απαντώνται σε ειδικά κράματα, όπως το permalloy και το supermalloy, τα οποία είναι κράματα σιδήρου-νικελίου.

1.2.10.2 Αντίσταση απομαγνήτισης

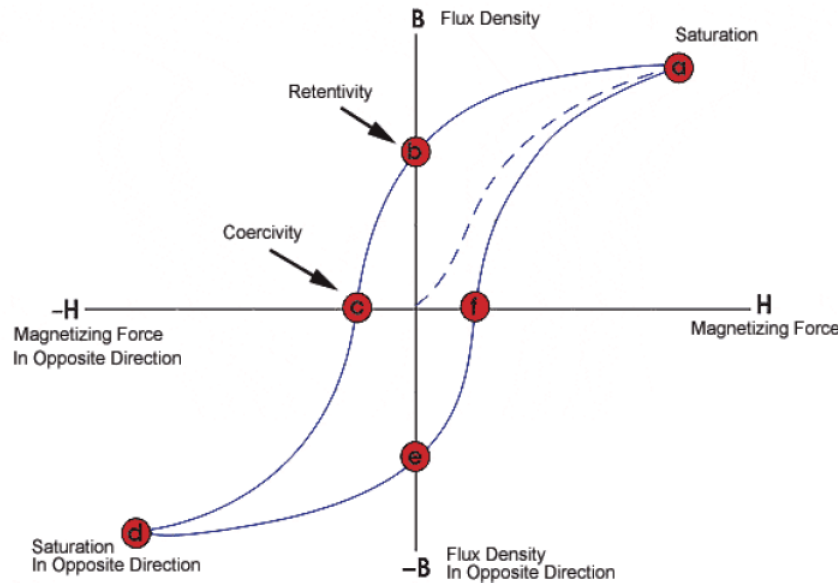
Οι σιδηρομαγνήτες έχουν την ικανότητα να μαγνητίζονται όταν βρεθούν σε μαγνητικό πεδίο και να διατηρούν τη μαγνήτισή τους και μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Η ικανότητά τους αυτή αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό, που τους διαχωρίζει από τα παραμαγνητικά υλικά, τα οποία εμφανίζουν μαγνητική ροπή παρουσία ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου, όμως παύουν να είναι μαγνητισμένα μετά την απομάκρυνσή του.

1.2.11 Μαγνητική υστέρηση

Οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν με την χάραξη του διαγράμματος της μαγνητικής επαγωγής B , συναρτήσεως του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου H , που αποτελεί την καμπύλη του βρόχου υστέρησης.

Εναλλακτικά, είναι δυνατή η χάραξη του αντίστοιχου διαγράμματος μαγνήτισης, από το οποίο όμως λαμβάνονται οι ίδιες πληροφορίες. Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης φαίνεται

στο Σχήμα 14. Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες, οι οποίες μπορούν να καθορίσουν αν κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό είναι κατάλληλο για μια δεδομένη εφαρμογή ή όχι.



Σχήμα 14: Καμπύλη βρόχου υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού
[\(https://www.motioncontroltips.com/hysteresis-loss/\)](https://www.motioncontroltips.com/hysteresis-loss/)

Ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο δεν έχει ποτέ πριν μαγνητιστεί, ή που έχει απομαγνητιστεί πλήρως, ακολουθεί αρχικά τη διακεκομμένη γραμμή του Σχήματος 14, καθώς το εξωτερικό πεδίο αρχίζει να αυξάνεται. Είναι προφανές, ότι για ένα μεγάλο σχετικά εύρος τιμών του H , το B συνεχίζει διαρκώς να αυξάνεται. Φτάνοντας στο σημείο a , περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου επηρεάζει ανεπαίσθητα την επαγωγή. Σε αυτό το σημείο, λέμε ότι το υλικό έχει φτάσει τη μαγνήτιση κορεσμού. Στη συνέχεια, καθώς το H αρχίζει σταδιακά να ελαττώνεται, η καμπύλη μετακινείται από το σημείο a στο b . Σε αυτό το σημείο, αν και το εξωτερικό πεδίο έχει μηδενιστεί, η πυκνότητα μαγνητικής ροής δεν είναι μηδέν. Το σημείο b παριστάνει την αντίσταση απομαγνήτισης (retentivity) του υλικού. Στη συνέχεια, καθώς το πεδίο αρχίζει να λαμβάνει αρνητικές τιμές, δηλαδή να αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται, και στο σημείο c μηδενίζεται. Το σημείο αυτό δίνει πληροφορίες για το

συνεκτικό πεδίο του υλικού, (coercivity). Καθώς το πεδίο εξακολουθεί να αυξάνεται αρνητικά, το υλικό θα φτάσει σε μαγνήτιση κορεσμού προς την αντίθετη φορά (σημείο d). Στη συνέχεια, το εξωτερικό πεδίο ελαττώνεται και η καμπύλη περνάει από το σημείο e, όπου αντιστοιχεί στην αντίσταση απομαγνήτισης της αντίστροφης φοράς. Παρατηρούμε ότι καθώς συνεχίζουμε να αυξάνουμε το H, η καμπύλη δεν θα περάσει ξανά από την αρχή των αξόνων, αλλά από το σημείο f, λόγω της παραμένουσας μαγνήτισης (remanence).

1.2.11.1 Μαγνήτιση κορεσμού

Από το βρόχο υστέρησης φαίνεται ότι το σιδηρομαγνητικό υλικό είναι αρχικά αμαγνήτιστο. Με εφαρμογή ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου H, προκαλείται η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B προς τη διεύθυνση του πεδίου. Καθώς αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο H, η μαγνήτιση θα φτάσει τελικά σε μια τιμή M_0 . Η τιμή αυτή απεικονίζει την κατάσταση, στην οποία όλες οι μαγνητικές ροπές μέσα στον όγκο του υλικού είναι ευθυγραμμισμένες παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο H, και ονομάζεται μαγνήτιση κορεσμού. Η μαγνήτιση κορεσμού εξαρτάται από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου, με βάση την επόμενη σχέση $M_0 = nM$. Το M_0 εξαρτάται μόνον από το υλικό και από τη μικροδομή του.

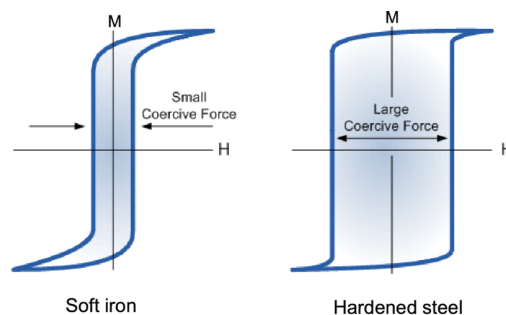
1.2.11.2 Συνεκτικό πεδίο

Για την επαναφορά ενός μαγνητισμένου σιδηρομαγνήτη σε κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης είναι απαραίτητη η εφαρμογή ενός αντίστροφου εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικά πεδίου έντασης H_c . Το πεδίο αυτό ονομάζεται συνεκτικό πεδίο (coercive field) και αντιστοιχεί στις τιμές του H στα σημεία c και f της καμπύλης υστέρησης.

Με βάση το συνεκτικό πεδίο, μπορούμε να χωρίσουμε τα σιδηρομαγνητικά υλικά στα σκληρά και στα μαλακά μαγνητικά υλικά. Όπως ειπώθηκε παραπάνω, η ιδιότητα αυτή αλλάζει για το ίδιο υλικό με διαφορετική κατεργασία. Έχει παρατηρηθεί λοιπόν ότι

υλικά από σίδηρο ή χάλυβα με μεγάλη σκληρότητα εμφανίζουν υψηλό συνεκτικό πεδίο και σχετικά χαμηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r , και ονομάζονται σκληρά μαγνητικά υλικά. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα και γι' αυτό απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μεγάλων μαγνητικών πεδίων. Οι καμπύλες των βρόχων υστέρησης είναι ευρείες και σχεδόν ορθογώνιες και για τον απομαγνητισμό τους απαιτείται η εφαρμογή μεγάλων πεδίων. Λόγω των χαρακτηριστικών τους, τα σκληρά μαγνητικά πεδία είναι κατάλληλα ως μόνιμοι μαγνήτες σε πολλές εφαρμογές.

Αντίθετα, τα μαλακά υλικά εμφανίζουν μικρό συνεκτικό πεδίο και σχετικά μεγάλη σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r και ονομάζονται μαλακά μαγνητικά υλικά. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα και, επομένως, απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μικρών μαγνητικών πεδίων. Το εμβαδόν της επιφάνειας των βρόχων υστέρησης των μαλακών μαγνητικών υλικών είναι μικρό και, ως εκ τούτου, οι απώλειες ισχύος ανά κύκλο είναι μικρές. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούνται πολλοί κύκλοι μαγνήτισης και απομαγνήτισης, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικές μηχανές, μετασχηματιστές και επαγωγείς, όπου το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται κυκλικά.



Σχήμα 15: Διάφορα του βρόχου μεταξύ σκληρών και μαλακών μαγνητικών υλικών

https://www.researchgate.net/figure/Dependence-of-the-hysteresis-loop-of-iron-or-steel-on-hardness-caused-by-the-addition_fig16_318487306

1.2.11.3 Θερμοκρασία Curie

Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, η προστιθέμενη θερμική ενέργεια αυξάνει την κινητικότητα των μαγνητικών περιοχών. Αυτό διευκολύνει τις μαγνητικές περιοχές να ευθυγραμμιστούν, αλλά τις αποτρέπει, επίσης, από το να παραμείνουν ευθυγραμμισμένες μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, σε υψηλές θερμοκρασίες, η μαγνητική διαπερατότητα, η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο μειώνονται. Αν η θερμοκρασία υπερβεί την κρίσιμη θερμοκρασία Curie, τότε παύει να παρατηρείται η σιδηρομαγνητική συμπεριφορά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία Curie εξαρτάται από το υλικό και μεταβάλλεται με προσθήκη κραμάτων.

1.2.12 Μαγνητική ανισοτροπία

Η μαγνητική ανισοτροπία αναφέρεται στη σχέση εσωτερικής ενέργειας με την κατεύθυνση της αυθόρμητης μαγνήτισης. Πιο συγκεκριμένα, στο υλικό υπάρχει η αλληλεπίδραση spin-τροχιάς, που προκαλεί την εγγενή ανισοτροπία, την επιφανειακή ανισοτροπία, την ανισοτροπία μαγνητικής στένωσης και τη διπολική σύζευξη των μαγνητικών ροπών, που προκαλεί ανισοτροπία σχήματος. Όσο χαμηλότερη είναι η συμμετρία, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια ανισοτροπίας και αντίστροφα. Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$E = KV \sin^2 \vartheta \quad (\text{Εξ. 34})$$

όπου

- K : η ενέργεια της συνολικής μονοαξονικής ανισοτροπίας ανά μονάδα όγκου
- θ : η γωνία μεταξύ της μαγνητικής ροπής και του εύκολου άξονα,
- V : ο όγκος των σωματιδίων

Αυτές οι δυο αλληλεπιδράσεις δημιουργούν τον εύκολο και το δύσκολο άξονα μαγνήτισης και προτιμάται ο εύκολος.

1.2.13 Θεμελιώδη μαγνητικά μήκη

Οι μαγνητικές ιδιότητες των νανοϋλικών είναι διαφορετικές απ' αυτές που υπάρχουν σε μεγαλύτερη κλίμακα. Όταν το κρίσιμο μήκος στο οποίο πραγματοποιούνται κάποια φαινόμενα είναι παρόμοιο με το μέγεθος των νανοσωματιδίων, ξεπερνιέται ένα ενεργειακό φράγμα και, έτσι, υπάρχουν αλλαγές στη μαγνήτιση του υλικού. Για τα μαγνητικά υλικά, τα θεμελιώδη μαγνητικά μήκη είναι το μήκος κρυσταλλικής ανισοτροπίας I_K , το μήκος εφαρμοζόμενου πεδίου I_H και το μαγνητοστατικό μήκος I_S :

$$I_K = \sqrt{\frac{J}{K}} \quad (\text{Εξ. 35})$$

$$I_H = \sqrt{\frac{2J}{HM_S}} \quad (\text{Εξ. 36})$$

$$I_S = \sqrt{\frac{J}{2\pi M_S}} \quad (\text{Εξ. 37})$$

όπου

- K : η σταθερά ανισοτροπίας του υλικού, που οφείλεται στην κυρίαρχη ανισοτροπία
- J : η ανταλλαγή πληροφοριών ενός κόκκου του υλικού

Αν υπάρχουν παραπάνω από ένα είδος φραγμού, το μικρότερο χαρακτηριστικό μήκος είναι αυτό που καθορίζει τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού [35].

1.3 ΡΕΥΣΤΑ

1.3.1 Βασικές θεωρητικές γνώσεις

Η ύλη στη στερεά της κατάσταση παρουσιάζει εν γένει σημαντική αντίσταση σε όλες τις μεταβολές του σχήματός της. Αντίθετα, στην υγρή και στην αέρια μορφή της δεν έχει σταθερή δομή ή σχήμα. Αυτές οι καταστάσεις της ύλης, που αλλάζουν εύκολα σχήμα, ονομάζονται ρευστά.

Τα υγρά παρουσιάζουν μικρή συμπιεστότητα, με αποτέλεσμα να παραμορφώνεται το σχήμα τους χωρίς σημαντική μεταβολή του όγκου τους. Η μικρή συμπιεστότητα των υγρών έχει ως συνέπεια η πυκνότητά τους να είναι σχεδόν σταθερή σε όλη την έκτασή τους. Αντίθετα, τα αέρια αλλάζουν εύκολα τον όγκο τους και διαστέλλονται αυθόρμητα.

Το γεγονός ότι τα ρευστά δεν ανθίστανται σε μεταβολές του σχήματός τους σημαίνει ότι στο εσωτερικό τους, στην επιφάνεια συνεπαφής μεταξύ γειτονικών στρωμάτων του ρευστού, δεν αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής.

Οι παραπάνω ιδιότητες ισχύουν απολύτως μόνον στα ονομαζόμενα ιδανικά ρευστά, δηλαδή, τα ιδανικά ρευστά έχουν τις εξής ιδιότητες: α) είναι ασυμπίεστα (η πυκνότητά του είναι σταθερή σε όλη την έκτασή τους) και β) δεν έχουν εσωτερικές τριβές (ιξώδες).

1.3.2 Ιδιότητες ρευστών

Ρευστά είναι τα υλικά που δεν έχουν καθορισμένο σχήμα (ρέουν), αλλά παίρνουν εκείνο του «δοχείου» μέσα στο οποίο βρίσκονται. Δύο βασικές ιδιότητες, που καθορίζουν τη ρεολογική συμπεριφορά του ρευστού, είναι η πυκνότητα και το ιξώδες:

- Το ιξώδες αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα ενός ρευστού και αντιπροσωπεύει την αντίστασή του στη ροή.
- Πυκνότητα ρ ορίζεται ο λόγος της μάζας προς τον όγκο που αυτή καταλαμβάνει.

Η μεταβολή στη μορφή ενός ρευστού προκαλείται από διατμητικές τάσεις. Τα ρευστά διακρίνονται σε τρεις ακόλουθες κατηγορίες:

- Τα Ιδανικά ρευστά, τα οποία αποτελούν υποθετική θεωρητική κατάσταση, είναι τελείως ασυμπίεστα και χωρίς εσωτερικές τριβές μεταξύ των μορίων κατά τη ροή. Το ιξώδες αυτών των ρευστών είναι μηδέν.
- Τα Νευτώνεια ρευστά, στα οποία η διατμητική τάση και ο ρυθμός παραμόρφωσης συνδέονται με μια γραμμική σχέση

$$\tau = \mu * \gamma \quad (\text{Εξ. 38})$$

όπου

- γ : Ο ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης του υλικού $\gamma = d\gamma/dt$
- τ : Η ασκούμενη διατμητική τάση
- μ : Ο συντελεστής νευτωνικού ιξώδους

Στα νευτώνεια υγρά, το ιξώδες αποτελεί σταθερά (ανεξάρτητη από το ρυθμό διάτμησης), η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη μοριακή φύση και την κατάσταση του ρευστού (θερμοκρασία και πίεση). Μονάδα μέτρησης στο S.I. είναι το Pascal·sec (Pa·s), αλλά χρησιμοποιείται ευρέως και το poise (1 poise=0,1 Pa·s). Σε αυτή την κατηγορία υπάγονται ρευστά όπως το νερό, υδατικά διαλύματα, ορισμένοι υδατικοί διαλύτες, τα αραιά αιωρήματα και γαλακτώματα, καθώς και όλα τα αέρια.

Τα μη νευτώνεια ρευστά, είναι εκείνα στα οποία η διατμητική τάση και ο ρυθμός παραμόρφωσης δεν συνδέονται με γραμμική σχέση. Υπάρχει όμως σχέση του φαινομενικού ιξώδους η_{ϕ} , οι τιμές του οποίου μπορεί να είναι συνάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης ή/και της τάσης ή/και του χρόνου.

Η ροή ως προς τη γεωμετρία της μπορεί να είναι στρωτή ή τυρβώδης. Στη στρωτή τα σωματίδια κινούνται με σταθερή ταχύτητα κατά στρώματα και, έτσι, δεν υπάρχει μακροσκοπική ανάμειξη των γειτονικών στρωμάτων του ρευστού. Από την άλλη, στην τυρβώδη ροή τα σωματίδια κινούνται ακανόνιστα και τυχαία προς όλες τις κατευθύνσεις. Άρα υπάρχει και ακανόνιστη και τυχαία μεταφορά ορμής μεταξύ των σωματιδίων και γι' αυτό, σε κάθε σημείο, οι ιδιότητες του ρευστού μεταβάλλονται.

Επομένως, η περιγραφή των ιδιοτήτων πραγματοποιείται στατιστικά με μέσες τιμές. Η ροή, που είναι ενδιάμεση της στρωτής και της τυρβώδους, καλείται μεταβατική. Η τιμή Reynolds καθορίζει το είδος της ροής και δίνεται από τον τύπο:

$$R_e = \rho u d / \mu \quad (\text{Εξ. 39})$$

όπου

- ρ : η πυκνότητα του ρευστού
- u : η ταχύτητα
- d : η εσωτερική διάμετρος του αγωγού
- μ : το ιξώδες του υγρού

Ανάλογα με τη μεταβολή της ταχύτητας στο χώρο, η ροή μπορεί να είναι ομοιόμορφη ή ανομοιόμορφη. Στην ομοιόμορφη, το μέτρο και η διεύθυνση του ανύσματος της ταχύτητας είναι σταθερά κατά μήκος οποιασδήποτε ροϊκής γραμμής του πεδίου ροής. Στην ανομοιόμορφη, οι ροϊκές γραμμές είναι καμπύλες ή μη παράλληλες ευθείες. Ανάλογα με τον αριθμό των χωρικών συντεταγμένων στις οποίες μεταβάλλεται η ταχύτητα, η ροή μπορεί να χαρακτηριστεί ως μονοδιάστατη, διδιάστατη ή τρισδιάστατη. Τέλος, με βάση τη χρονική μεταβολή του μέτρου και της διεύθυνσης του ανύσματος της ταχύτητας σε κάθε σημείο του πεδίου, η ροή μπορεί να είναι μόνιμη ή μη μόνιμη.

1.3.3 Είδη ροής - Εσωτερική τριβή

Η κίνηση ενός ρευστού (ροή) διακρίνεται σε δύο είδη, αναλόγως με το εάν η ταχύτητα σε δεδομένο σημείο της ροής παραμένει σταθερή με το χρόνο ή όχι. Έτσι, η ροή κατά την οποία σε δεδομένο σημείο της η ταχύτητα του ρευστού είναι χρονικά σταθερή, ονομάζεται στρωτή ροή, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, ονομάζεται τυρβώδης. Έχει παρατηρηθεί ότι μια στρωτή ροή μπορεί να μεταπέσει σε τυρβώδη όταν μεγαλώσει αρκετά η ταχύτητα. Η ταχύτητα, στην οποία συμβαίνει αυτή η μετάβαση, ονομάζεται κρίσιμη ταχύτητα.

Θεωρείται στη συνέχεια ένα σώμα σφαιρικού σχήματος το οποίο κινείται μέσα σε ένα ρευστό.

1.3.3.1 Στρωτή ροή

Στην περίπτωση στρωτής ροής, η δύναμη αντίστασης (F_D), που δέχεται το σφαιρικό σώμα κατά την κίνησή του μέσα στο ρευστό, δίνεται από τον νόμο του Stokes:

$$F_D = 6\pi\eta r v \quad (\text{Εξ. 40})$$

όπου r είναι η ακτίνα και v είναι η ταχύτητα του σφαιρικού σώματος.

Στην παραπάνω σχέση, ο συντελεστής η ονομάζεται συντελεστής εσωτερικής τριβής (ή ιξώδες) του υγρού. Παρατηρείται ότι, σύμφωνα με το νόμο του Stokes, η δύναμη αντίστασης που υφίσταται το σώμα κατά την κίνησή του μέσα στο υγρό, αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του σώματος.

Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής η αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα του ρευστού και εξαρτάται μόνον από τις μοριακές ιδιότητες του ρευστού και από τη θερμοκρασία. Στα υγρά, ο συντελεστής ιξώδους μειώνεται με τη θερμοκρασία εν αντιθέσει με τα αέρια.

1.3.3.2 Τυρβώδης ροή

Στην περίπτωση τυρβώδους ροής, η δύναμη αντίστασης (F_D) που υφίσταται ένα σώμα που κινείται μέσα σε ρευστό, δίνεται από τη σχέση:

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot r^2 \quad (\text{Εξ. 41})$$

όπου

- ρ είναι η πυκνότητα του υγρού
- v είναι η ταχύτητα του σώματος
- ο όρος r^2 παριστά την εκτεθειμένη στη ροή μετωπική επιφάνεια του σώματος
- Η σταθερά C_D ονομάζεται συντελεστής αντίστασης.

Παρατηρείται στην παραπάνω σχέση ότι η δύναμη τριβής (F_D), που υφίσταται ένα σώμα μέσα σε τυρβώδη ροή, είναι ανάλογη της μετωπικής του επιφάνειας (r^2), της ταχύτητας (v) του ρευστού, της πυκνότητας του ρευστού και του συντελεστή αντίστασης (C_D). Ο συντελεστής αντίστασης (C_D) εξαρτάται από το ιξώδες, αλλά και από το σχήμα του σώματος. Όσον αφορά στην εξάρτηση του συντελεστή αντίστασης από το σχήμα του σώματος, μεγάλο ρόλο παίζει η μορφή του πίσω τμήματος του σώματος. Με κατάλληλη διαμόρφωση αυτού του σχήματος, μειώνεται ο συντελεστής αντίστασης (αεροδυναμικό σχήμα) [36].

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τις τελευταίες δεκαετίες, η εφαρμογή μαγνητικών μικρο- και νανο-σωματιδίων οξειδίου του σιδήρου έχει καθιερωθεί σε διάφορους τεχνολογικούς τομείς, όπως ο μαγνητικός διαχωρισμός βιομορίων και ιόντων, οι βιοαισθητήρες, η παραγωγή βιοκαυσίμων και άλλοι [37,38,39,40]. Η χρήση των σωματιδίων οξειδίου του σιδήρου γίνεται όλο και πιο καθιερωμένη, λόγω της δυνατότητας αυτού του είδους των υλικών να μπορούν να τροποποιηθούν από μια ποικιλία χημικών ομάδων, που τους προσδίδουν ειδικές επιλεκτικές ή καταλυτικές ιδιότητες [41]. Επιπλέον, τα νανοσωματίδια του οξειδίου του σιδήρου παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες, που επιτρέπει τον έλεγχο από απόσταση, καθιστώντας το χειρισμό τους εύκολο και οικονομικό [42]. Επιπλέον, έχει προταθεί πρόσφατα μια νέα μέθοδος σύνθεσης, η οποία μπορεί να εγγυηθεί μια οικονομικά αποδοτική παραγωγή μαγνητικών σωματιδίων, ώστε να μειωθεί περαιτέρω το κόστος λειτουργίας των μεθόδων διαχωρισμού με βάση το μαγνητισμό [43]. Παρ' όλα αυτά, οι βιοτεχνολογικές εφαρμογές σωματιδίων οξειδίου του σιδήρου εξακολουθούν να περιορίζονται στο ερευνητικό επίπεδο (συσκευές εργαστηριακής κλίμακας) ή για κλινικές εφαρμογές χαμηλής απόδοσης [44,45].

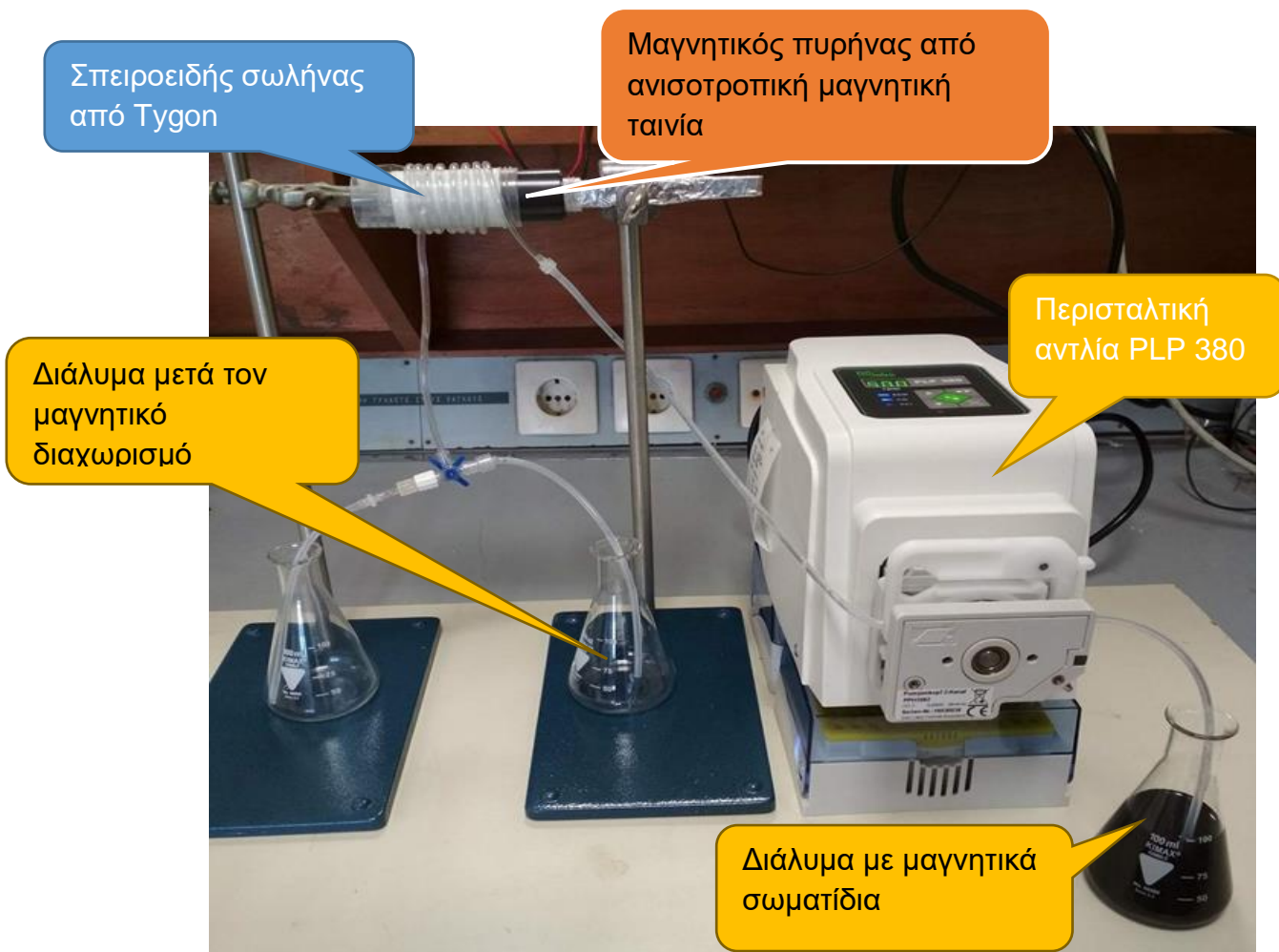
Πράγματι, τα περισσότερα συστήματα που βασίζονται στη χρήση μαγνητικών στοιχείων, σχεδιάζονται για να λειτουργούν με δυναμική μικρορευστών ή είναι σε θέση να επεξεργάζονται δείγματα σε μορφή διαλύματος, επομένως ασυνεχώς. Η ανάγκη για αξιόπιστες και υψηλής παραγωγικότητας μεθόδους είναι μεγαλύτερη, ιδιαίτερα στη βιοεπιστήμη, όπου, ανεξάρτητα από την αντίδραση ή τη διεργασία που περιλαμβάνει μαγνητικά σωματίδια, μόλις αυτά τα σύνθετα υλικά αναμειχθούν ή προστεθούν σε ένα διάλυμα, αναπόφευκτα στο τέλος της διαδικασίας πρέπει να διαχωριστούν/συλλεχθούν από το δοχείο αντίδρασης. Ως εκ τούτου, είναι ζωτικής σημασίας για την καλή παραγωγικότητα και τη διεργασιμότητα των αντιδράσεων, που περιλαμβάνουν μαγνητικά σωματίδια, να διασφαλιστεί ότι μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία

μεγάλοι όγκοι διαλύματος και ότι τα μαγνητικά σωματίδια αποσύρονται με τον πιο γρήγορο και ακριβή τρόπο.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, σε αυτή την εργασία, διερευνάται κατά πόσο είναι δυνατόν να λειτουργήσει ένα σύστημα παγίδευσης και διαχωρισμού μαγνητικών σωματιδίων, χρησιμοποιώντας μία εύκαμπτη μαγνητική επιφάνεια και έναν ελαστικό σωλήνα σε σπειροειδή διάταξη, για να διαχωρίζονται τα σωματίδια από ένα υγρό διάλυμα με όγκο της τάξης των 100 ml. Παρουσιάζεται παρακάτω η πειραματική δοκιμή του συστήματος μαγνητικού διαχωρισμού, μαζί με το σχεδιασμό της διεργασίας διαχωρισμού. Το προτεινόμενο σύστημα έχει την δυνατότητα να είναι πλήρως αυτοματοποιημένο και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για τη συγκέντρωση μαγνητικών σωματιδίων διασκορπισμένων σε μεγάλο όγκο διαλύτη με ρυθμό της τάξης του ml ανά δευτερόλεπτο.

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Το πρόβλημα, λοιπόν, στο οποίο εστιάζει η παρούσα διπλωματική, είναι η μαγνητική παγίδευση και ο διαχωρισμός μεγάλου όγκου διαλύματος, στο οποίο έχουν εισαχθεί μαγνητικά σωματίδια οξειδίου του σιδήρου. Στοχεύει στη διερεύνηση της απόδοσης της διάταξης μαγνητικού διαχωρισμού των εν λόγω σωματιδίων από το διάλυμα. Για το σκοπό αυτό, δημιουργείται ένα σύστημα (Σχήμα 16), που περιλαμβάνει έναν κυλινδρικό μαγνητικό πυρήνα από εύκαμπτη ανισοτροπική μαγνητική ταινία NdFeB, η οποία τοποθετείται εσωτερικά ενός σπειροειδούς σωλήνα από Tygon. Στο πείραμα χρησιμοποιείται διάλυμα με μαγνητικά σωματίδια οξειδίου του σιδήρου, το οποίο παρέχεται στο σύστημα συλλογής και διαχωρισμού μέσω μίας περισταλτικής αντλίας Dullabo PLP 380.



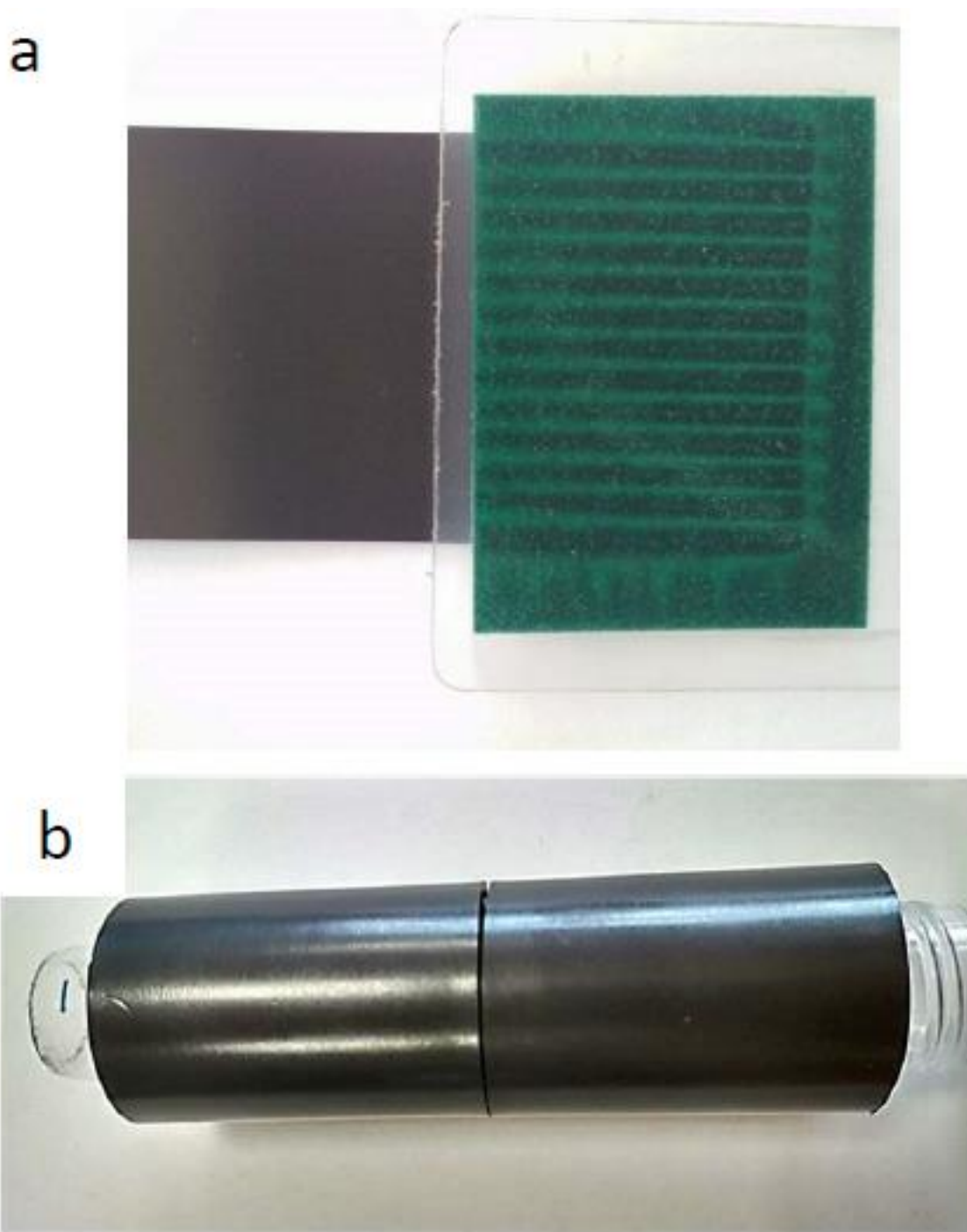
Σχήμα 16: Πειραματική διάταξη (στιγμιότυπο πριν την παγίδευση των σωματιδίων)

Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται η πλήρης διάταξη, με όλα τα επιμέρους συστήματα. Για την εκτέλεση του πειράματος, αρχικά προετοιμάζεται το διάλυμα με εισαγωγή των κατάλληλων ενώσεων για την αποτελεσματική διάλυση των μαγνητικών σωματιδίων, με αποτέλεσμα ένα ομοιόμορφο υγρό σε σκούρο χρώμα. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της περισταλτικής αντλίας, το υγρό αυτό διοχετεύεται στο σπειροειδή σωλήνα από Tygon. Σε αυτό το σημείο ενεργεί το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον πυρήνα της ανισοτροπικής μαγνητικής ταινίας NdFeB, με αποτέλεσμα τα μαγνητικά σωματίδια οξειδίου του σιδήρου να παραμένουν στον σπειροειδή σωλήνα, ενώ το υπόλοιπο διάλυμα καταλήγει στο τελικό δοχείο, μετά το μαγνητικό διαχωρισμό.

2.3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένας εύκαμπτος σωλήνας Tygon μήκους 100 cm με εξωτερική διάμετρο 4 mm και εσωτερική διάμετρο 3 mm. Ένα τμήμα μήκους 80 cm του σωλήνα Tygon περιτυλίχθηκε σε 8 στροφές γύρω από ένα σωλήνα των 50 ml. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργήθηκε με ριγωτές μαγνητικές γραμμές Βορρά - Νότου (Σχήμα 17α). Η ανισοτροπική εύκαμπτη μαγνητική ταινία ήταν πλάτους 40 mm με συγκολλητική επιφάνεια και αγοράστηκε από τη Magnitech, Ελλάδα. Ο μαγνητικός πυρήνας του Σχήματος 17b μπορεί εύκολα να εισαχθεί μέσα στον κυλινδρικό σωλήνα με τον περιτυλιγμένο σωλήνα Tygon.

Χρησιμοποιήθηκε μια περισταλτική αντλία PLP 380 Dullabo μαζί με μια κεφαλή αντλίας 10 κυλίνδρων κύλισης, ένας ειδικός εύκαμπτος σωλήνας με διάμετρο 4 mm και ένας διαχωριστής 3 δρόμων με χειροκίνητη βαλβίδα. Για το υγρό διάλυμα χρησιμοποιήθηκε αιθανόλη ≥ 98 (Honeywell, Γερμανία), ελαϊκό οξύ 90% (Alfa Aesar, Γερμανία) και μαγνητικά σωματίδια οξειδίου του σιδήρου (Fe_3O_4) με καθαρότητα 99% που αγοράστηκαν από την Chemical Store, USA.



Σχήμα 17: α) Ανισοτροπική μαγνητική ταινία νεοδυμίου με φιλμ μαγνητικού πεδίου β) μαγνητικός πυρήνας συναρμολογημένος με τη μαγνητική ταινία

2.3.1 Εύκαμπτος σωλήνας Tygon

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένας εύκαμπτος σωλήνας Tygon μήκους 100 cm με εξωτερική διάμετρο 4 mm και εσωτερική διάμετρο 3 mm. Η επιλογή του Tygon έγινε λόγω της χημικής του αντοχής και των λοιπών χαρακτηριστικών του, όπως η ελαστικότητά του, η μη κολλητική ικανότητα και η χαμηλή τριβή.

Το Tygon είναι σήμα κατατεθέν των θερμοπλαστικών σωλήνων που κατασκευάζονται από την Saint-Gobain Performance Plastics Corporation [46]. Υπάρχουν πολλά σκευάσματα (ενώσεις) των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των σωλήνων, τα οποία περιλαμβάνουν: σιλικόνη, PVC, πολυουρεθάνη, φθοροπολυμερή, θερμοπλαστικά ελαστομερή και άλλα υλικά.

Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες αυτών των υλικών που προστέθηκαν είχαν ως αποτέλεσμα ένα μοναδικό προϊόν τελευταίας τεχνολογίας.

Τα διακριτικά χαρακτηριστικά των εύκαμπτων αυτών σωλήνων περιλαμβάνουν: διαφάνεια, ευκαμψία, ανθεκτικότητα, διαπερατότητα αερίου, χημική αντοχή, καθώς και ομαλότητα επιφάνειας. Είναι μη αιμολυτικά, μη τοξικά και βιοσυμβατά.

Οι πιο εξελιγμένες συνθέσεις των ενώσεων, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σωλήνων Tygon, επιτρέπουν τη χρήση τους σε διάφορες εφαρμογές σε: βιομηχανία τροφίμων, χημικών και πετροχημικών, φαρμακολογία, ιατρική, βιοτεχνολογία, περισταλτικές αντλίες και εργαστήρια.

Βασικές εφαρμογές εύκαμπτων σωλήνων TYGON:

- χημικές διεργασίες
- μεταφορά ποτών, γαλακτοκομικών προϊόντων και προϊόντων διατροφής
- επιστημονικά και βιομηχανικά εργαστήρια
- φάρμακα (νοσοκομεία και εργαστήρια)
- βιοτεχνολογία και φαρμακευτική βιομηχανία
- ημιαγωγοί, ηλεκτρονικά
- περισταλτικές αντλίες

2.3.2 Ανισοτροπική εύκαμπτη μαγνητική ταινία νεοδυμίου

Η ανισοτροπική εύκαμπτη μαγνητική ταινία (κράμα νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου, NdFeB), η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του μαγνητικού πυρήνα του Σχήματος 17b και παρουσιάζεται στο Σχήμα 17a, ήταν πλάτους 40 mm με συγκολλητική επιφάνεια.

Ο σιδηρομαγνητισμός είναι ο βασικός μηχανισμός με τον οποίο ορισμένα υλικά (όπως ο σίδηρος) σχηματίζουν μόνιμους μαγνήτες ή έλκονται από μαγνήτες. Στη φυσική, διακρίνονται διάφοροι τύποι μαγνητισμού. Ο σιδηρομαγνητισμός (μαζί με το παρόμοιο φερρομαγνητισμό) είναι ο ισχυρότερος τύπος και είναι υπεύθυνος για το κοινό φαινόμενο μαγνητισμού σε μαγνήτες που συναντώνται στην καθημερινή ζωή. Η μαγνητική ανισοτροπία περιγράφει τον τρόπο, με τον οποίο οι μαγνητικές ιδιότητες ενός αντικειμένου μπορούν να διαφέρουν, ανάλογα με την κατεύθυνση. Στην απλούστερη περίπτωση, δεν υπάρχει βέλτιστη κατεύθυνση για τις μαγνητικές ιδιότητες ενός αντικειμένου. Το αντικείμενο θα αποκριθεί σε ένα εφαρμοσμένο μαγνητικό πεδίο με τον ίδιο τρόπο, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση στην οποία εφαρμόζεται το πεδίο. Αυτό είναι γνωστό ως μαγνητική ισοτροπία. Αντίθετα, τα μαγνητικά ανισότροπα υλικά θα είναι ευκολότερο ή πιο δύσκολο να μαγνητιστούν ανάλογα με τον τρόπο που το αντικείμενο περιστρέφεται. Για τα περισσότερα μαγνητικά ανισότροπα υλικά υπάρχουν δύο βέλτιστες κατευθύνσεις για το μαγνητισμό του υλικού, οι οποίες διαφέρουν κατά 180°. Η παράλληλη γραμμή προς αυτές τις κατευθύνσεις ονομάζεται εύκολος άξονας. Με άλλα λόγια, ο εύκολος άξονας είναι μια ενεργητικά ευνοϊκή κατεύθυνση αυθόρμητου μαγνητισμού. Καθώς οι δύο αντίθετες κατευθύνσεις κατά μήκος του βέλτιστου άξονα μαγνήτισης είναι συνήθως εξίσου εύκολο να μαγνητιστούν κατά μήκος, η πραγματική κατεύθυνση της μαγνήτισης μπορεί, ομοίως, να εγκατασταθεί εύκολα προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η μαγνητική ανισοτροπία αποτελεί προϋπόθεση για την υστέρηση σε σιδηρομαγνήτες, καθώς χωρίς αυτήν ένας σιδηρομαγνήτης είναι υπερπαραμαγνητικός [47].

Η παρατηρούμενη μαγνητική ανισοτροπία σε ένα αντικείμενο μπορεί να συμβεί για διάφορους λόγους. Η συνολική μαγνητική ανισοτροπία ενός δεδομένου αντικειμένου εξηγείται συχνά από ένα συνδυασμό διαφορετικών παραγόντων: [48]

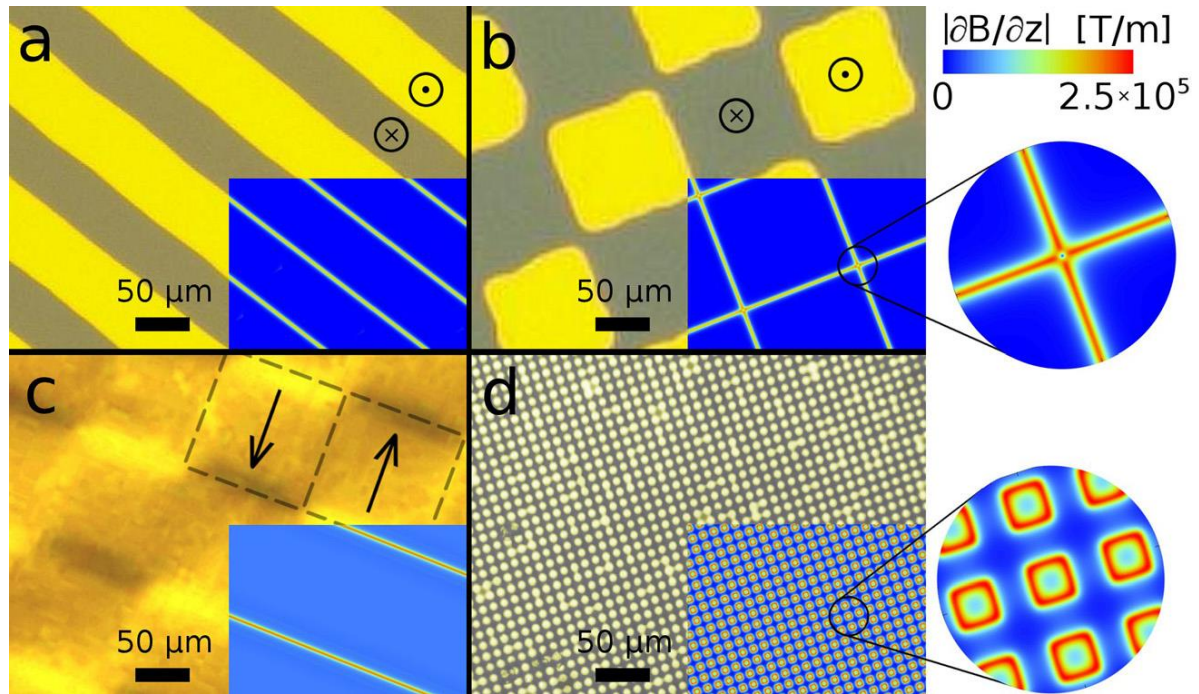
- Μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία, που οφείλεται στην ατομική δομή ενός κρυστάλλου.

- **Ανισοτροπία σχήματος:** Όταν ένα σωματίδιο δεν είναι απόλυτα σφαιρικό, το πεδίο απομαγνητισμού δεν θα είναι ίσο για όλες τις κατευθύνσεις, δημιουργώντας έναν ή περισσότερους εύκολους άξονες.
- **Μαγνητοελαστική ανισοτροπία:** Η ένταση μπορεί να μεταβάλει τη μαγνητική συμπεριφορά, οδηγώντας σε μαγνητική ανισοτροπία.
- **Ανισοτροπία ανταλλαγής:** Εμφανίζεται όταν αλληλεπιδρούν αντισφαιρομαγνητικά και σιδηρομαγνητικά υλικά [49].

Τα μαγνητικά μικρο- και νανο-σωματίδια χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στο βιοϊατρικό πεδίο για τον χειρισμό βιολογικών στοιχείων (κυττάρων, μορίων κ.λπ.) με τη χρήση μαγνητικών πεδίων. Η διαχείριση και η τοποθέτηση τέτοιων σωματιδίων και στοιχείων, που λειτουργούν με αυτά τα σωματίδια, έχει επωφεληθεί σε μεγάλο βαθμό από τις προόδους της μικροπαραγωγής. Οι μαγνητικές συσκευές, που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα, απαιτούν είτε μια εξωτερική πηγή μαγνητικού πεδίου για την πολικότητα των μαλακών μαγνητικών μικροστοιχείων, είτε μια τροφοδοσία ισχύος για τον έλεγχο των μικροηλεκτρομαγνητών.

Παρόλα αυτά, η επιλογή του υλικού NdFeB για τη μαγνητική ταινία στην εν λόγω συσκευή έχει προοπτική αυτόνομης λειτουργίας, όπως παρουσιάζεται από τους Zanini et al. [50]. Στη μελέτη τους σχεδίασαν μαγνητικές ταινίες υψηλής απόδοσης σε μικροκλίμακα, χρησιμοποιώντας τη θερμομαγνητική διαμόρφωση, επίπεδες και μη επίπεδες δομές. Αυτές οι σειρές μικρομαγνητών χρησιμοποιήθηκαν για την ακριβή τοποθέτηση και ευθυγράμμιση των υπερπαραμαγνητικών νανο- και μικροσωματιδίων. Η συγκεκριμένη χωρική διάταξη που επιτεύχθηκε φαίνεται ότι εξαρτάται τόσο από το μέγεθος των σωματιδίων, όσο και από το μέγεθος και τον προσανατολισμό των μικρομαγνητών. Αυτές οι μικρομαγνητικές συστοιχίες χρησιμοποιήθηκαν για την παγίδευση μαγνητικά τροποποιημένων κυττάρων με υπερπαραμαγνητικά σωματίδια διαμέτρου 100 nm. Φαίνεται, λοιπόν, ότι αυτές οι απλές, συμπαγείς και αυτόνομες δομές, οι οποίες δεν απαιτούν ούτε εξωτερική πηγή μαγνητικού πεδίου, ούτε παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, έχουν πολλές δυνατότητες για χρήση σε ένα ευρύ φάσμα βιολογικών εφαρμογών. Συγκεκριμένα, τα μοτίβα λωρίδας και σκακιάρας, που παράγονται σε ταινίες NdFeB, αποκαλύπτονται με μαγνητο-οπτική (ΜΟ) απεικόνιση υπερκείμενου U-MOIF (Σχήμα 18a και 18b). Αυτές οι δυαδικές εικόνες (χρωματική

αντίθεση) επιβεβαιώνουν ότι η κατεύθυνση της μαγνήτισης αντιστρέφεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας θερμομαγνητικής επεξεργασίας. Πολλά μικρότερα μαγνητισμένα σημεία παράγονται σε μια μεμβράνη NdFeB, χρησιμοποιώντας ένα πλέγμα με οπές μεγέθους $7 \times 7 \mu\text{m}^2$, που απέχουν κατά $5 \mu\text{m}$ και αποκαλύπτονται, χρησιμοποιώντας ένα U-MOIF (Σχήμα 18d) [50].

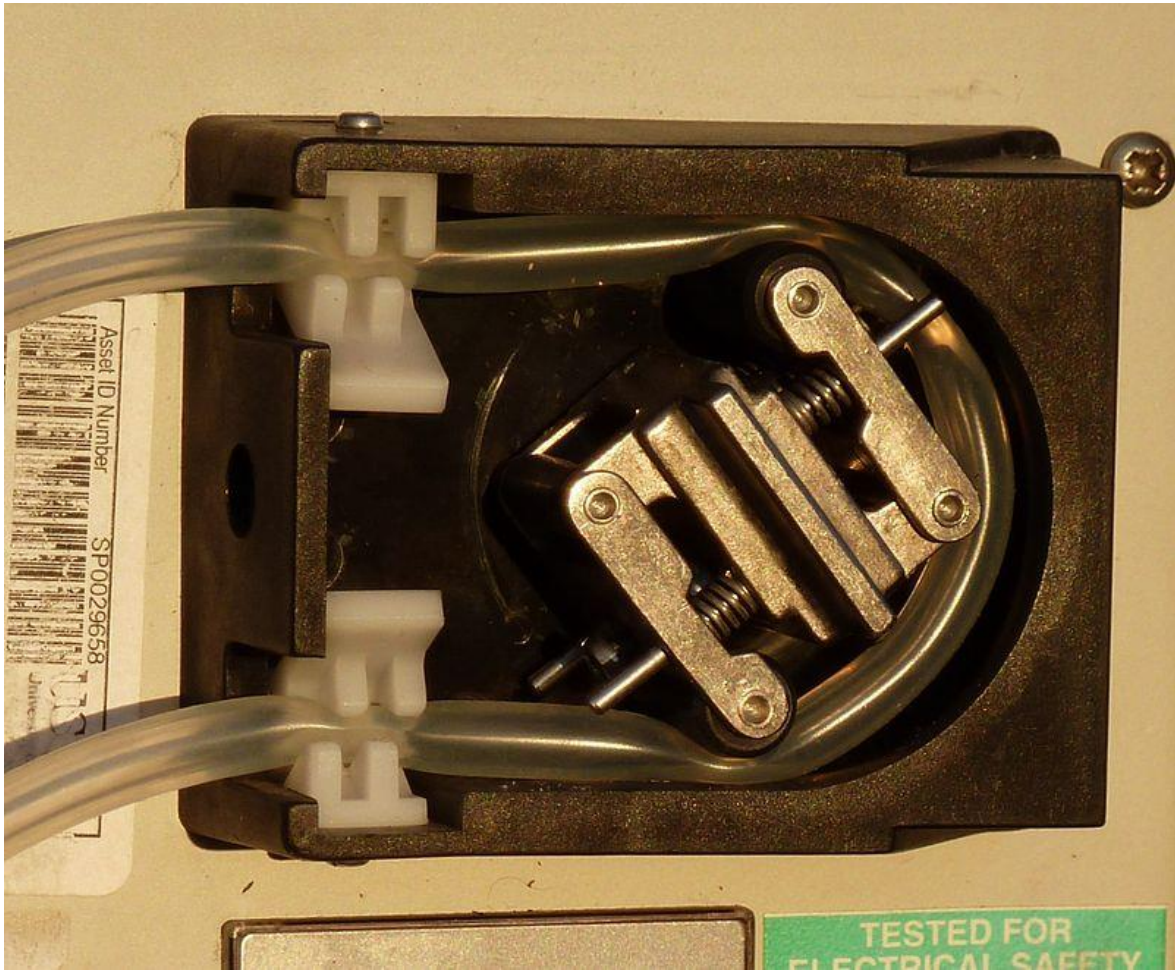


Σχήμα 18: Απεικόνιση των μοτίβων μαγνήτισης σε ταινία NdFeB, που παράγονται μέσω της θερμομαγνητικής μεθόδου επεξεργασίας

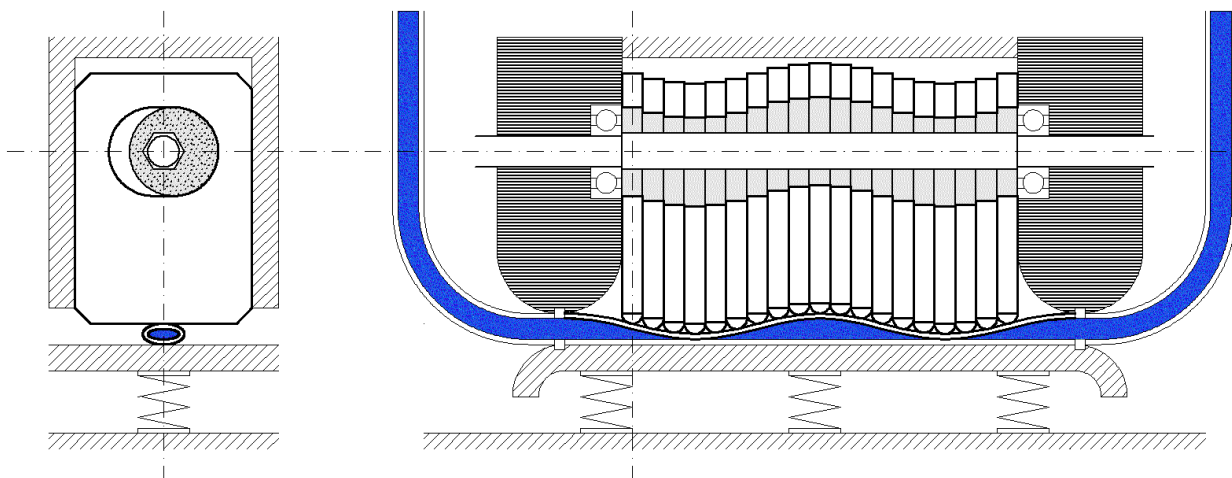
(https://www.researchgate.net/figure/Color-online-U-MOIF-images-of-a-stripe-and-b-chessboard-oop-patterns-in-NdFeB-c_fig1_257971848)

2.3.3 Περισταλτική αντλία

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μια περισταλτική αντλία PLP 380 Dullabo. Περισταλτική αντλία είναι ένας τύπος αντλίας θετικής εκτόπισης, που χρησιμοποιείται για την άντληση μιας ποικιλίας υγρών, η οποία είναι κοινώς γνωστή ως αντλία κυλίνδρων (Σχήμα 19). Το ρευστό περιέχεται μέσα σε ένα εύκαμπτο σωλήνα τοποθετημένο μέσα σε ένα κυκλικό περίβλημα της αντλίας (αν και υπάρχουν και γραμμικές περισταλτικές αντλίες Σχήμα 20).



Σχήμα 19: Περισταλτική αντλία σωλήνα με δύο κυλίνδρους
(https://en.wikipedia.org/wiki/Peristaltic_pump#/media/File:Peristaltic_pump_head.jpg)



Σχήμα 20: Γραμμική περισταλτική αντλία

(https://en.wikipedia.org/wiki/Peristaltic_pump#/media/File:Schlauchpumpe-lineare-Verdraengung.png)

Ένας ρότορας, με έναν αριθμό "κύλινδρων" ή "λοβών" προσαρτημένων στην εξωτερική περιφέρεια του δρομέα, συμπιέζει τον εύκαμπτο σωλήνα. Καθώς περιστρέφεται ο ρότορας, το τμήμα του σωλήνα υπό συμπίεση πιέζεται και κλείνει, εξαναγκάζοντας έτσι το ρευστό, που πρόκειται να αντληθεί, να κινηθεί διαμέσου του σωλήνα. Επιπλέον, καθώς ο σωλήνας ανοίγει στη φυσική του κατάσταση μετά τη διέλευση του έκκεντρου ("αποκατάσταση" ή "ελαστικότητα"), προκαλείται ροή του ρευστού στην αντλία. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται περισταλτική και χρησιμοποιείται σε πολλά βιολογικά συστήματα, όπως είναι η γαστρεντερική οδός. Τυπικά, υπάρχουν δύο ή περισσότεροι κύλινδροι που θα φράσουν το σωλήνα, εγκλωβίζοντας μεταξύ τους ένα σώμα υγρού. Στη συνέχεια, το σώμα του υγρού μεταφέρεται, σε πίεση περιβάλλοντος, προς την έξοδο της αντλίας. Οι περισταλτικές αντλίες μπορούν να λειτουργούν συνεχώς ή διακοπτόμενα για να παρέχουν μικρότερες ποσότητες υγρού.

Στο πείραμα, που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε περισταλτική αντλία PLP 380 με ρυθμούς ροής από 0,0002 έως 380 ml / min (Σχήμα 21). Η ταχύτητα μπορεί να ρυθμιστεί χειροκίνητα ή αυτόματα, μέσω του προαιρετικού εξωτερικού χειριστηρίου. Η περισταλτική αντλία είναι εύκολη στη λειτουργία και περιλαμβάνει διάφορες κεφαλές, διαθέτει βασικό κλειδί για γρήγορη πλήρωση και εκκένωση και δίνει τη

δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας χειροκίνητα ή αυτόματα, μέσω του εξωτερικού χειριστηρίου. Διαθέτει λειτουργία μνήμης, η οποία αποθηκεύει αυτόματα τις τρέχουσες παραμέτρους, πληκτρολόγιο με μεμβράνη, εύκολο στη λειτουργία, καλές επιδόσεις και χαμηλή τιμή.



Σχήμα 21: Περισταλτική αντλία PLP 380

<https://www.labunlimited.com/s/ALL/4AJ-9700430/Behr-Peristaltic-Pump-PLP-380-B00454739>

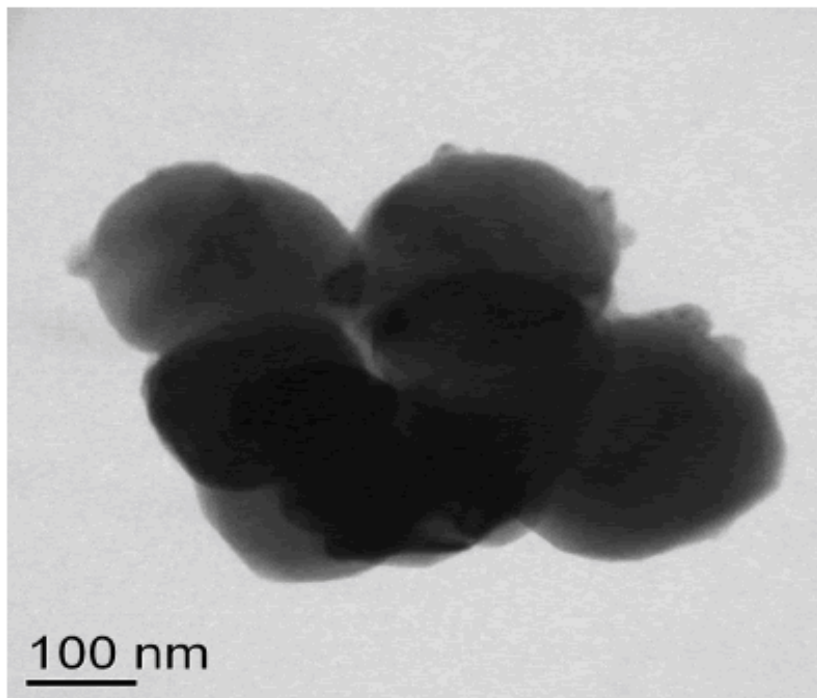
Οι προδιαγραφές είναι οι εξής [51]:

- Ταχύτητα: 0,1 έως 100 rpm, αναστρέψιμη
- Ακρίβεια ταχύτητας: 0.1 rpm
- Έλεγχος ταχύτητας: Πληκτρολόγιο μεμβράνης
- Οθόνη: Η τρισδιάστατη λυχνία LED εμφανίζει τρέχουσες στροφές
- Διεπαφή επικοινωνίας: RS485
- Τροφοδοσία ρεύματος: 90 έως 260 Vac 50/60 Hz
- Κατανάλωση ρεύματος: <30 W

- Συνθήκες λειτουργίας: 0 έως 40 ° C
- Σχετική υγρασία: <80%
- Διαστάσεις (Π x Υ x Β): 232 x 142 x 149 mm
- Βάρος μετάδοσης κίνησης (χωρίς κεφαλή αντλίας): 2,3 kg
- Αξιολόγηση IP: IP 31
- Ρυθμός ροής ml / min. 0,00025 – 380

2.3.4 Υγρό διάλυμα

Για το υγρό διάλυμα χρησιμοποιήθηκε αιθανόλη ≥ 98 , ελαϊκό οξύ 90% και μαγνητικά σωματίδια οξειδίου του σιδήρου (Fe_3O_4) με καθαρότητα 99%. Τα μαγνητικά σωματίδια οξειδίου του σιδήρου (Fe_3O_4) περιέχουν μεγάλα πολυ-σωματίδια με μέσο μέγεθος 200-400 nm (Σχήμα 22). Για την καλύτερη διάλυση των σωματιδίων Fe_3O_4 και τη λήψη ενός κολλοειδούς διαλύματος χρησιμοποιήθηκε διαλύτης αλκοολο-ελαϊκού οξέος.



Σχήμα 22: Εικόνα ηλεκτρονίου μικροσκοπίου μετάδοσης (TEM) μαγνητικών νανοσωματιδίων οξειδίου του σιδήρου (Fe_3O_4). Το σύμπλεγμα σχηματίστηκε ως αποτέλεσμα της προετοιμασίας του δείγματος, λόγω ξηρού περιβάλλοντος.

2.4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η στρατηγική, που ακολουθήθηκε για την έρευνα της πρώτης φάσης της διαδικασίας, βασίζεται στην αναλυτική προσομοίωση του συστήματος του μαγνητικού διαχωρισμού και στη χρήση των αποτελεσμάτων για το σχεδιασμό του πειράματος.

Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση του ANSYS fluent προσδιορίστηκαν οι συνθήκες ροής στο σπειροειδή σωλήνα για τη μέγιστη τιμή παροχής της αντλίας. Στη συνέχεια, με βάση αυτές τις τιμές, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στο ANSYS Magnetostatic, ώστε να προσδιοριστεί η κατάλληλη μορφή του απαιτούμενου μαγνητικού πεδίου, που θα είναι ικανό να διαχωρίσει τα μαγνητικά σωματίδια και να τα παγιδεύσει. Τέλος, πραγματοποιήθηκε πείραμα βασισμένο στις τιμές, που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.

Οι προσομοιώσεις επικεντρώθηκαν στο σύστημα συλλογής και διαχωρισμού των μαγνητικών σωματιδίων, που περιλαμβάνει το μαγνητικό πεδίο του πυρήνα ανισοτροπικής ταινίας και τον σπειροειδή σωλήνα Tygon. Η βασική συνθήκη για την πραγματοποίηση του διαχωρισμού είναι πως εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο ικανό να συγκρατήσει τα μαγνητικά σωματίδια μέσα στον σπειροειδή σωλήνα, ανάλογα με τη δύναμη που παράγεται από τη ροή του υγρού.

Με βάση τις αρχές λειτουργίας της προτεινόμενης διάταξης, που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 16, και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, σχεδιάστηκε το σύστημα που θεωρήθηκε ως πιο κατάλληλο, βασισμένο σε υλικά που ήταν εμπορικά διαθέσιμα, και με βάση τα χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν πιο πάνω.

2.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

2.5.1 Σχεδιασμός ενός σπειροειδούς μαγνητικού διαχωριστή

Με στόχο την ελαχιστοποίηση των αναγκαίων μετρήσεων, πραγματοποιήθηκαν ρευστοδυναμικές και μαγνητικές προσομοιώσεις. Για την πραγματοποίηση των παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ANSYS. Το ANSYS δημιουργήθηκε το 1970 στην Pennsylvania των ΗΠΑ, είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά CAE (Computer Aided

Engineering) και περιέχει ενσωματωμένα εργαλεία σχεδίασης CAD και προσομοίωσης με χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων, FEM. Διαθέτει μια πληθώρα εφαρμογών και ένα σύγχρονο γραφικό περιβάλλον διεπαφής, όπου διαφορετικές αναλύσεις μπορούν να ανταλλάξουν δεδομένα σχεδόν αυτόματα.

Η FEM είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση προβλημάτων με ευρύτατο φάσμα εφαρμογών σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς (αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, ηλεκτρονικά κ.α.) Η FEM είναι μια αριθμητική επίλυση προβλημάτων, όπου με προσεγγιστικό τρόπο δίνεται απάντηση σε προβλήματα που η αναλυτική επίλυση είναι είτε πολύ δύσκολη, είτε αδύνατη. Βασίζεται στη μέθοδο των δικτυωμάτων (1941, Hrenikoff) και οι μαθηματικές βάσεις τέθηκαν το 1970 με την ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων.

Η διαδικασία επίλυσης έχει τα ακόλουθα βήματα:

- 1) Μια περίπλοκη περιοχή, που ορίζει ένα συνεχές, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements).
- 2) Οι ιδιότητες των υλικών, οι διέπουσες σχέσεις και οι συνοριακές συνθήκες, θεωρούνται στα στοιχεία και εκφράζονται με όρους αγνώστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων.
- 3) Με την κατάλληλη θεώρηση φορτίων δημιουργείται ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων, που η επίλυσή τους δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς.

Για την προσομοίωση της ροής ρευστού μέσα στον σπειροειδή σωλήνα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS fluent. Αρχικά δημιουργήθηκε πλέγμα (mesh), με βάση τα χαρακτηριστικά της διάταξης. Συγκεκριμένα, ένα τμήμα μήκους 80 cm του σωλήνα Tygon περιτυλίχθηκε σε 8 στροφές γύρω από ένα σωλήνα των 50 ml. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργήθηκε με ριγωτές μαγνητικές γραμμές Βορρά - Νότου (Σχήμα 17a). Η ανισοτροπική εύκαμπτη μαγνητική ταινία ήταν πλάτους 40 mm με συγκολλητική επιφάνεια και αγοράστηκε από την Magnitech, Ελλάδα. Ο μαγνητικός πυρήνας του Σχήματος 17b μπορεί εύκολα να εισαχθεί μέσα στο σωλήνα με τον περιτυλιγμένο σωλήνα Tygon.

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε μοντέλο ανάλυσης k-ε. Το μοντέλο k-ε βασίζεται στη μοντελοποίηση εξισώσεων μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και το ρυθμό καταστροφής της (dissipation rate). Επίσης είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο

τύρβης για βιομηχανικές εφαρμογές. Είναι σταθερό, οικονομικό όσον αφορά το υπολογιστικό κόστος και παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια για πολλά είδη τυρβωδών ροών. Ένα από τα αρνητικά του είναι ότι δεν αποδίδει καλά σε ροές με μεγάλες μεταβολές στην πίεση, ισχυρή αποκόλληση και μεγάλες κλίσεις των ροϊκών γραμμών.

Στα υλικά προστέθηκε ο μαγνητίτης με διάμετρο 10 nm και πυκνότητα 5000kg/m^3 . Τα νανοσωματίδια αυτά αποτελούν οξειδία του σιδήρου και συγκεκριμένα $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ και επιλέχθηκαν λόγω του μεγάλου πλεονεκτήματος που προσφέρουν, σε σχέση με τα υπόλοιπα μαγνητικά σωματίδια, να μην σχηματίζουν συσσωματώματα σε απουσία μαγνητικού πεδίου, ιδιότητα που τα καθιστά πολύ ελκυστικά για βιοϊατρικές και βιοτεχνολογικές εφαρμογές. Επίσης τα νανοσωματίδια οξειδίων του σιδήρου προτιμήθηκαν σε σχέση με άλλα μαγνητικά νανοσωματίδια που παρουσιάζουν υπερπαραμαγνητισμό, λόγω της απλής, φθηνής και, ανάλογα με το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται, αρκετά γρήγορης σύνθεσής τους (π.χ. τα καθαρά μεταλλικά νανοσωματίδια σιδήρου σε κλίμακα μεγέθους κάτω των 20 nm είναι υπερπαραμαγνητικά, αλλά η παρασκευή τους είναι πολύπλοκη διαδικασία, επειδή συχνά περιέχουν οξειδία, καρβίδια και άλλες ακαθαρσίες).

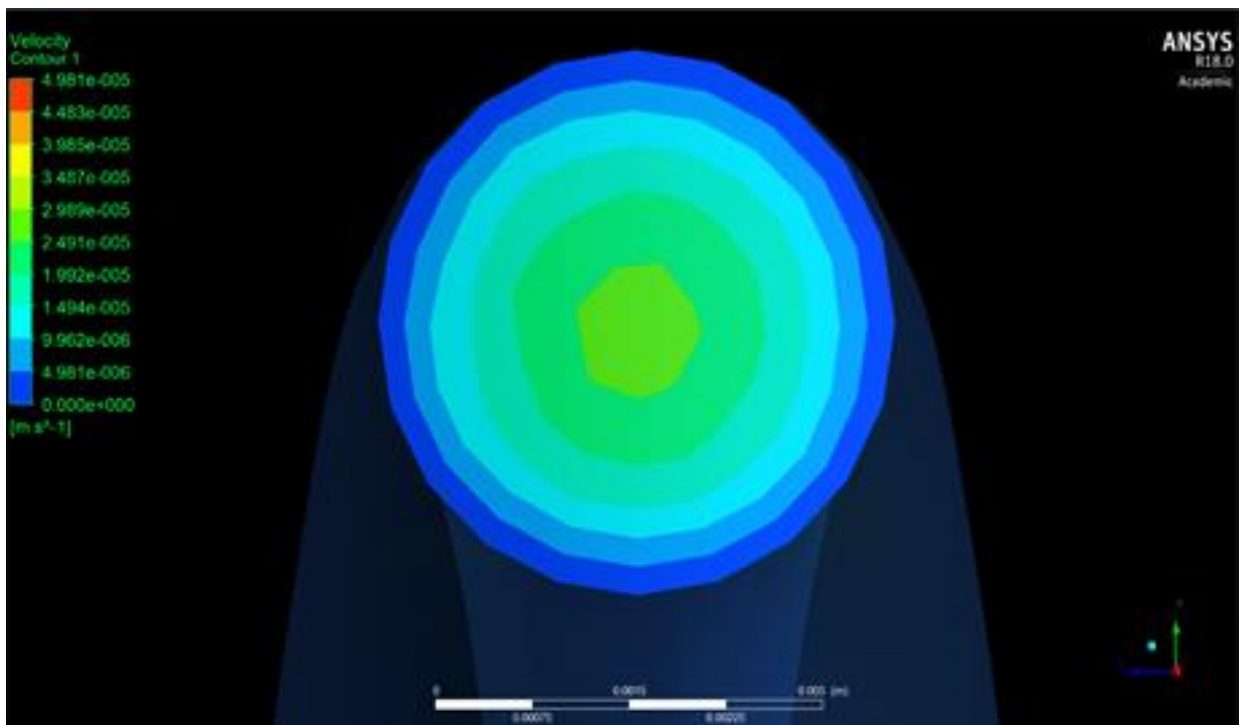
Έπειτα, ορίστηκαν οι μέθοδοι επίλυσης Least squares cell based gradient, standard pressure, second order upwind momentum, first order upwind turbulent kinetic energy, first order upwind turbulent dissipation rate.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση. Για τον σπειροειδή σωλήνα μήκους 100 cm με εξωτερική διάμετρο 4 mm και εσωτερική διάμετρο 3 mm πραγματοποιήθηκε προσομοίωση CFD (Computational fluid dynamics) στο πρόγραμμα ANSYS fluent για τη μέγιστη παροχή ρευστού που μπορεί να παρέχει η αντλία.

Αφού ολοκληρώθηκε η ανάλυση, στο γραφικό περιβάλλον του fluent απεικονίστηκαν τα απαραίτητα φυσικά μεγέθη, ώστε να αναλυθούν οι δυνάμεις του ρευστού στα σωματίδια μαγνητίτη. Στόχος ήταν η εύρεση και ανάλυση του ροϊκού πεδίου σε όλη τη περιοχή του σπειροειδούς σωλήνα και η ανίχνευση τύρβης στην πορεία του υγρού μέσα στη διάταξη. Αρχικά βρέθηκε η ροϊκή δύναμη του υγρού που εφαρμόζεται πάνω στα μαγνητικά σωματίδια. Σε δεύτερο στάδιο υπολογίστηκε η δύναμη του μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται στα μαγνητικά σωματίδια. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η δύναμη που δέχονται τα σωματίδια λόγω της ροής του υγρού δεν πρέπει να ξεπερνά τη δύναμη που εφαρμόζεται από

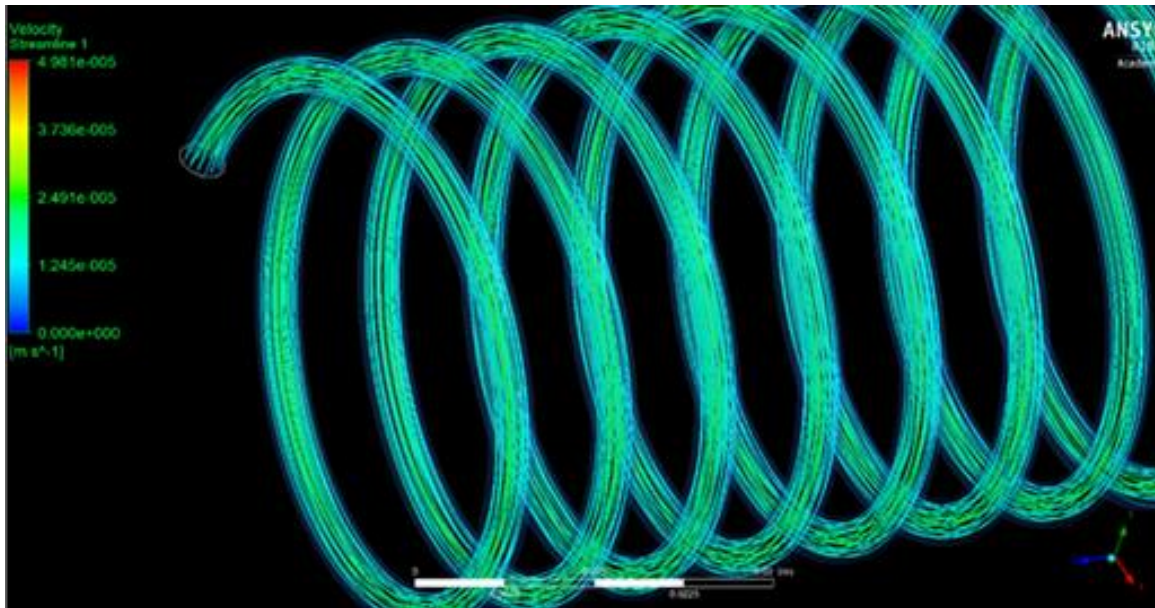
το μαγνητικό πεδίο, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη μέγιστη ταχύτητα συγκράτησης των σωματιδίων στον σπειροειδή σωλήνα που έχει τοποθετηθεί γύρω από τον μαγνητικό πυρήνα.

Στο Σχήμα 23 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με τη διατομή των περιγραμμάτων ταχύτητας της ροής του ρευστού στον σπειροειδή σωλήνα. Παρατηρούμε ότι σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το κέντρο του σπειροειδούς σωλήνα η ροή του ρευστού παρουσιάζει μικρότερες ταχύτητες.

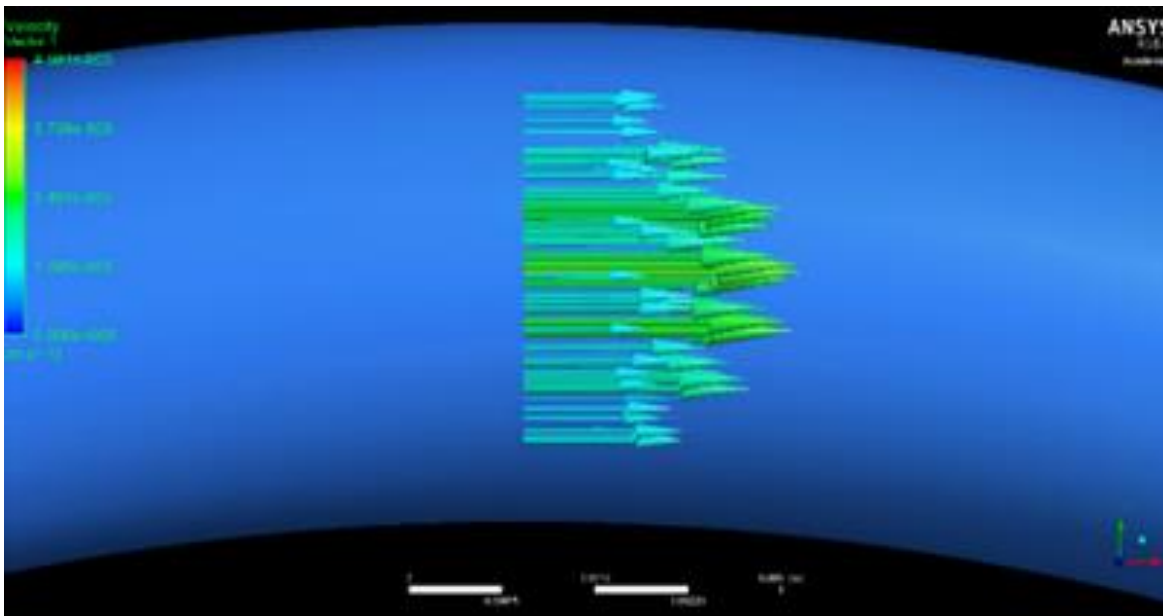


Σχήμα 23: Απεικόνιση διατομής των περιγραμμάτων ταχύτητας της ροής του ρευστού μέσα στον σπειροειδή σωλήνα

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 24 και 25, υπάρχει ελασματοειδής ροή κατά μήκος του σωλήνα χωρίς στροβιλισμούς στη δυναμική του ρευστού.



Σχήμα 24: Η κατανομή της ροής στον σπειροειδή ελαστικό σωλήνα



Σχήμα 25: Πλάγια όψη - διανύσματα ταχύτητας της ροής του ρευστού στο σπειροειδή σωλήνα

Με βάση αυτή την προσομοίωση, τα μαγνητικά σωματίδια, που βρίσκονται κοντά στα τοιχώματα του σωλήνα, κινούνται πιο αργά απ' αυτά του κέντρου και, έτσι, μπορούν να συγκρατούνται ευκολότερα από το μαγνητικό πεδίο.

Ωστόσο, λόγω του γεγονότος ότι χρησιμοποιήθηκε σπειροειδής γεωμετρία, επιτρέπεται η ανάμιξη των σωματιδίων, και στατιστικά, η πλειονότητα των σωματιδίων θα μπορούσε να παγιδευτεί. Έτσι, μπορεί να εκτιμηθεί ότι η καθαρότητα του διαλύματος εξαρτάται όχι μόνον από την ταχύτητα του ρευστού, αλλά και από τον αριθμό των στροφών του ελικοειδούς πηνίου και τη συγκέντρωση των σωματιδίων στο διάλυμα.

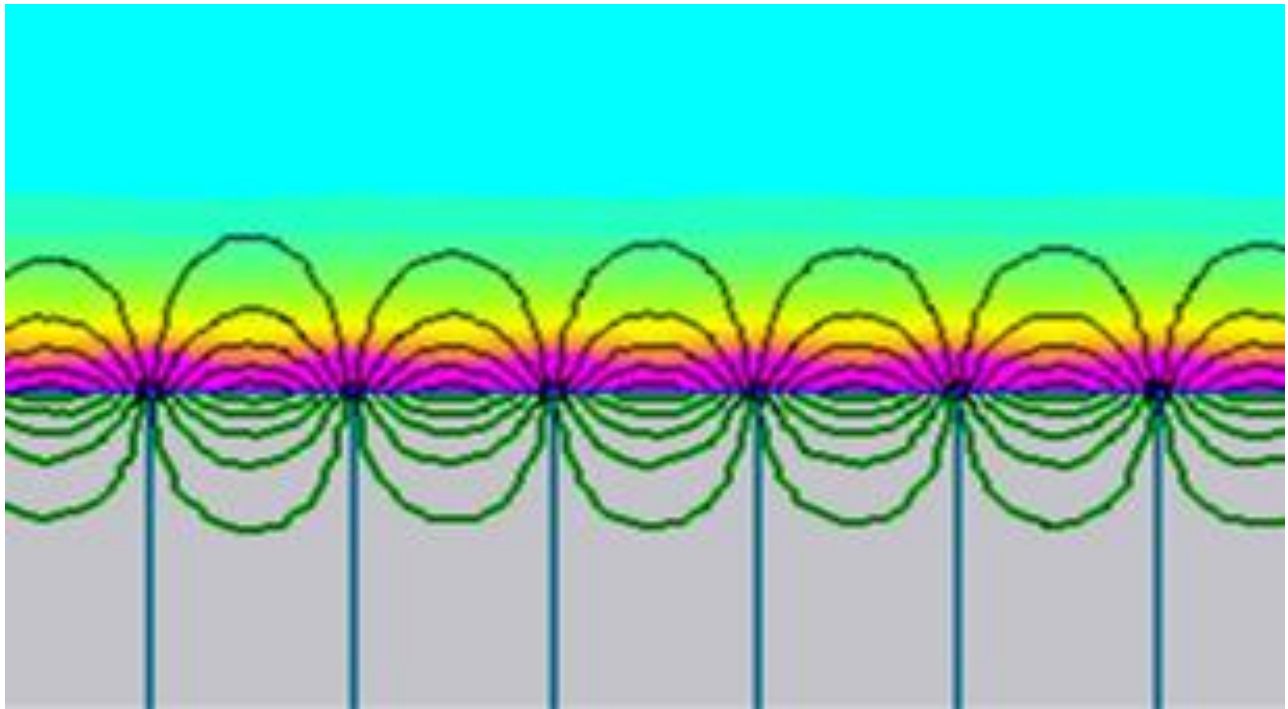
Καθορίζοντας την ταχύτητα του υγρού, είναι επίσης δυνατό να ορίσουμε τη δύναμη του υγρού που εφαρμόζεται στα μαγνητικά σωματίδια, χρησιμοποιώντας το νόμο του Stokes:

$$\vec{F}_d = 6\pi\mu R\vec{u} \quad (\text{Εξ. 42})$$

όπου:

- μ : είναι το ιξώδες του διαλύματος
- R : είναι η ακτίνα του σωματιδίου
- u : είναι η ταχύτητα του ρευστού

Η μαγνητική ταινία εναλλασσόμενης πολικότητας (Σχήμα 26) διαδίδει ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο μόνον από μία πλευρά κοντά στην επιφάνειά του, που επιτρέπει τη συγκράτηση των σωματιδίων ομοιόμορφα στο εσωτερικό τμήμα του σπειροειδούς σωλήνα.



Σχήμα 26: Σχηματική αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου, που παράγεται από την ανισοτροπική μαγνητική ταινία νεοδυμίου. Μόνον μια πλευρά της ταινίας είναι πολύ μαγνητισμένη.

Η εξίσωση της δύναμης, που εφαρμόζεται σε σφαιρικό σωματίδιο, δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{F}_M = \frac{4\pi\alpha^3}{3} \frac{\mu_0\chi}{(1+\frac{\chi}{3})} \vec{H} \frac{d\vec{H}}{d\vec{x}} = \frac{2\pi\alpha^3}{3} \frac{\mu_0\chi}{(1+\frac{\chi}{3})} \nabla(|\vec{H}|^2) \quad (\text{Εξ. 43})$$

όπου:

- α είναι η ακτίνα του σωματιδίου
- μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού
- \vec{H} είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου
- $\frac{d\vec{H}}{d\vec{x}}$ είναι η κλίση του μαγνητικού πεδίου

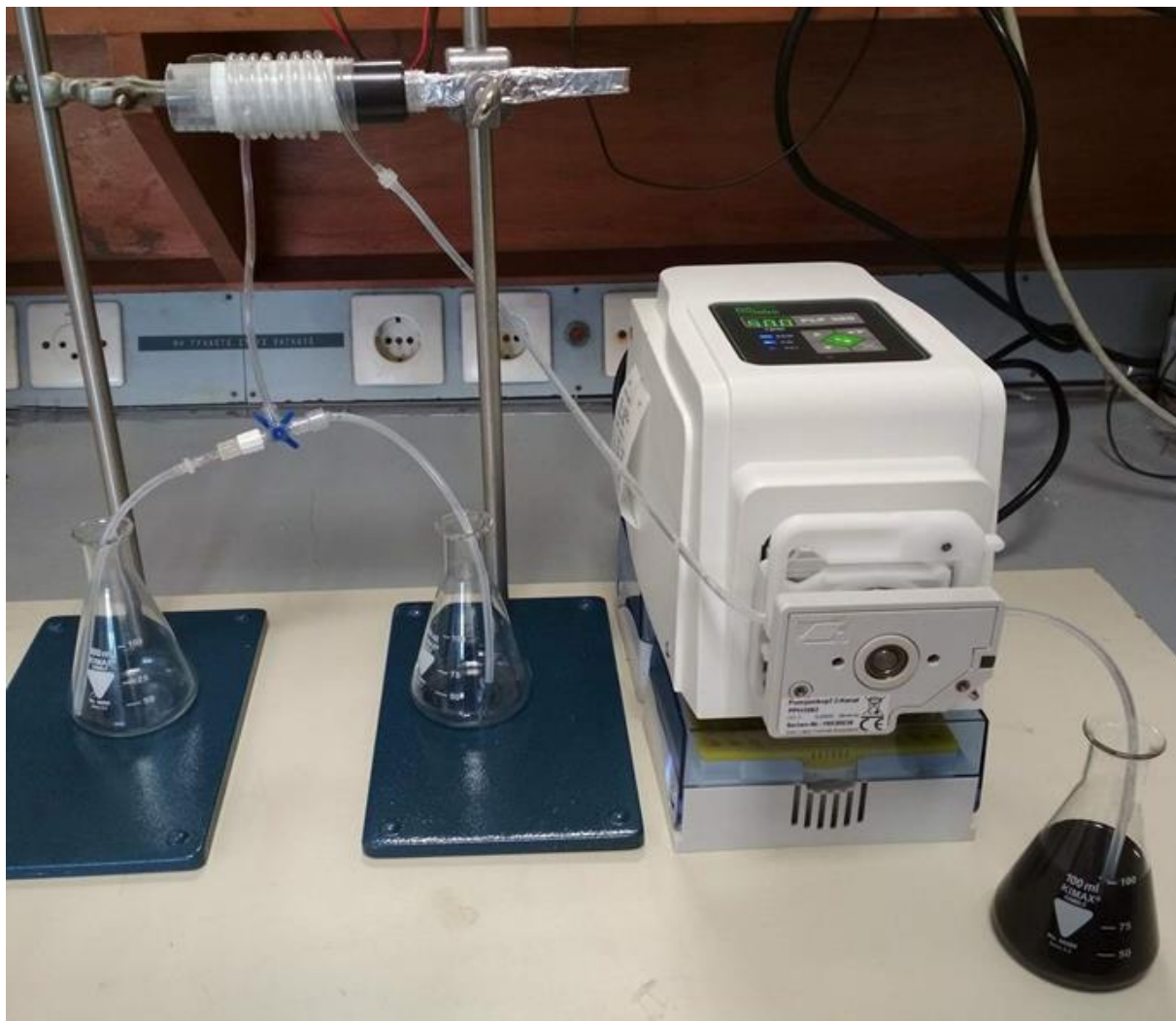
Έτσι, επιβεβαιώνοντας την ισορροπία μεταξύ των μαγνητικών και των ρευστολογικών δυνάμεων, είναι δυνατόν να ορίσουμε την υψηλότερη ταχύτητα πάνω από την οποία τα σωματίδια δεν μπορούν να συγκρατηθούν στο σπειροειδή σωλήνα, που έχει τοποθετηθεί γύρω από το μαγνητικό πυρήνα.

2.5.2 Παγίδευση, διαχωρισμός και συγκέντρωση μαγνητικών σωματιδίων με σπειροειδή μαγνητικό διαχωριστή.

Για να δοκιμαστεί το σύστημα, χρησιμοποιήθηκαν μαγνητικά σωματίδια διαλυμένα σε αιθανόλη που περιείχε 5% ελαϊκό οξύ. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ελαϊκό οξύ, για να ληφθεί ένα κολλοειδές διάλυμα διασκορπισμένων μαγνητικών σωματιδίων, ενώ 0,1 γραμμάρια μαγνητίτη (Fe_3O_4) είχε διαλυθεί σε 100 ml αλκοολικού διαλύτη με σχολαστική ανακίνηση της φιάλης (Σχήμα 27 και Σχήμα 28).

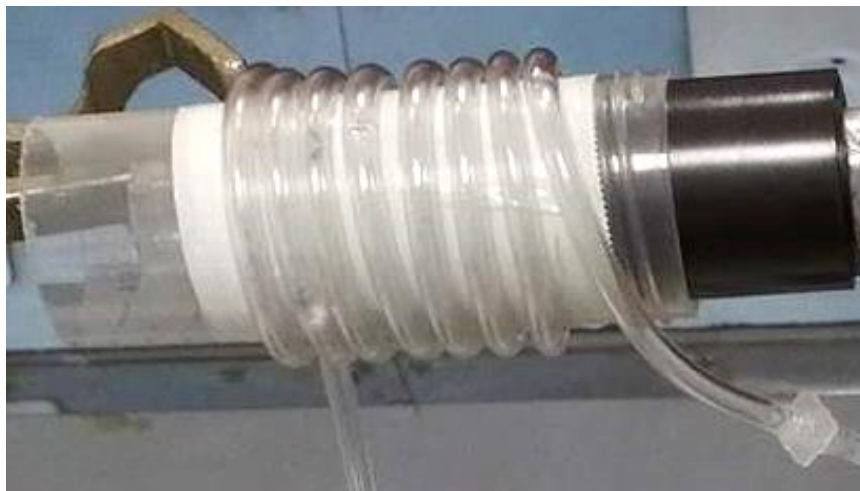


Σχήμα 27: Αλκοολικό διάλυμα με μαγνητικά σωματίδια

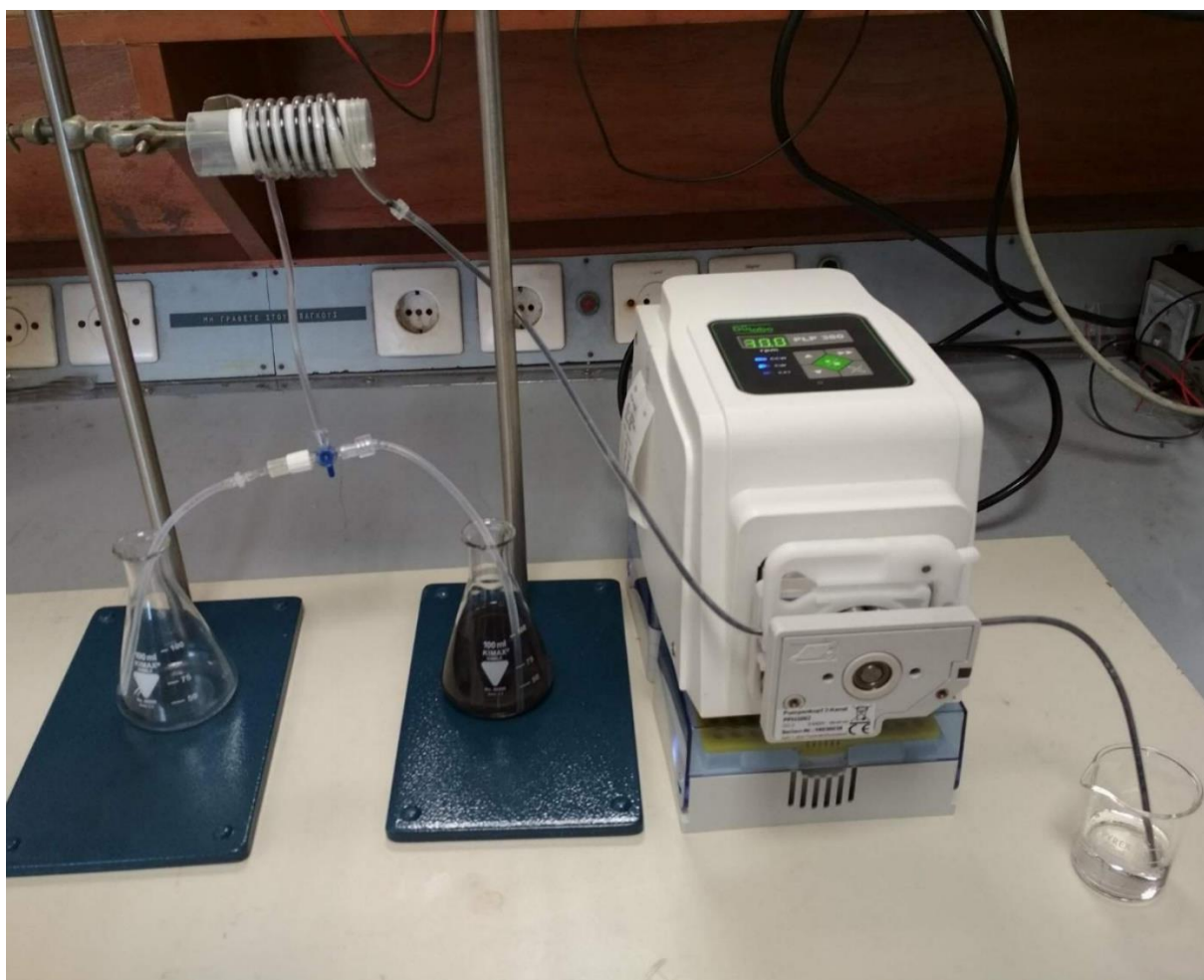


Σχήμα 28: Εικόνα ολόκληρης της συσκευής πριν από το διαχωρισμό

Το διάλυμα που προέκυψε ήταν ομοιογενές, σκουρόχρωμο, με καλά διεσπαρμένα σωματίδια μαγνητίτη. Η περισταλτική αντλία ρυθμίστηκε σε ρυθμό άντλησης περίπου $0,1 \text{ ml / sec}$ και η μια πλευρά του εύκαμπτου σωλήνα βυθίστηκε σε αλκοολικό διάλυμα που περιείχε σωματίδια, ενώ η άλλη πλευρά συνδέθηκε με το σωλήνα εισόδου του διαχωριστή σπειρώματος (Σχήμα 29 και Σχήμα 30).



Σχήμα 29: Σπειροειδής σωλήνας από Tygon, που περιτυλίγεται πάνω από τον πυρήνα του μαγνήτη



Σχήμα 30: Εικόνα ολόκληρης της συσκευής πριν από τη συλλογή μαγνητικών σωματιδίων

Στη συνέχεια, το σύστημα ενεργοποιήθηκε και, καθώς το διάλυμα άρχισε να φτάνει στον σωλήνα τυλιγμένο γύρω από τη μαγνητική επιφάνεια, τα μαγνητικά σωματίδια άρχισαν να παγιδεύονται από τη μαγνητική δύναμη κατά μήκος ολόκληρης της σπείρας (Σχήμα 31).



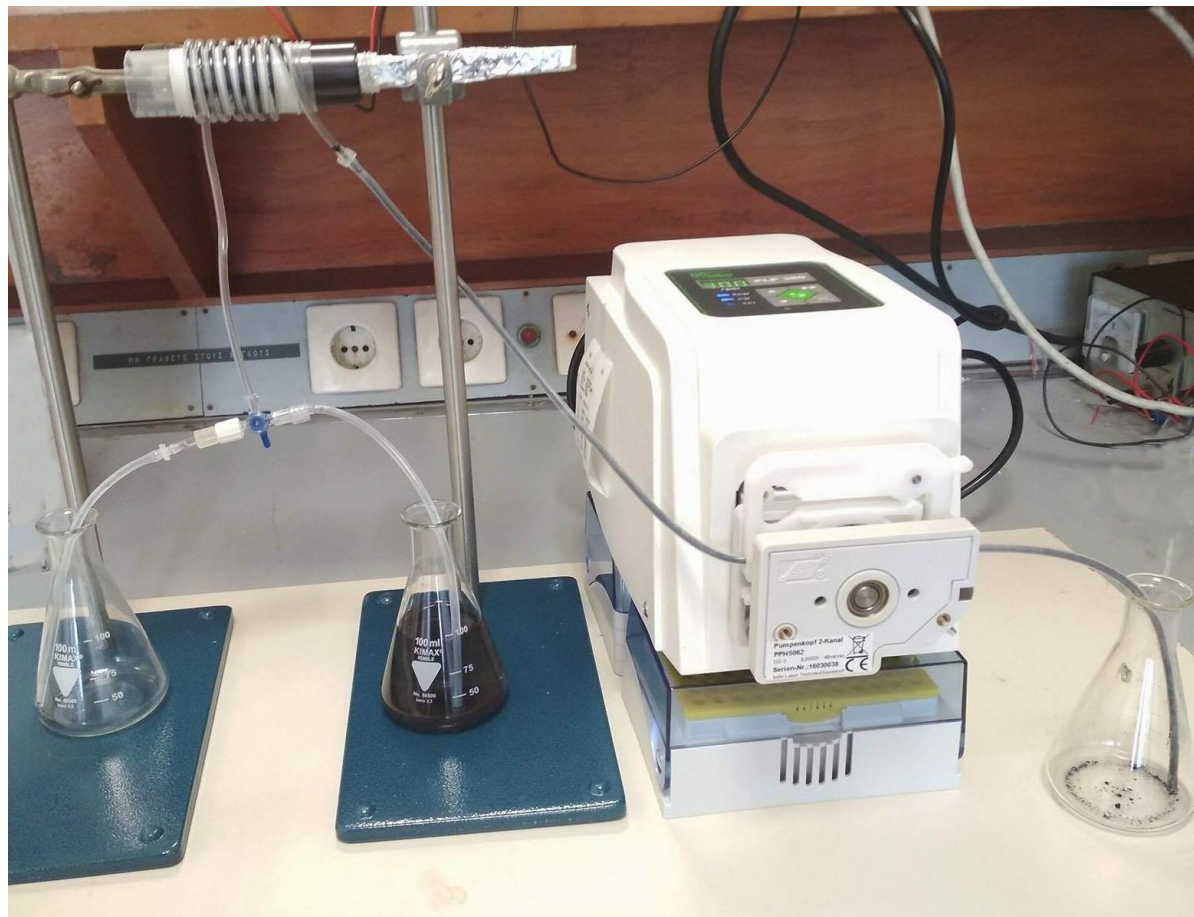
Σχήμα 31: Σταδιακή συσσώρευση μαγνητικών σωματιδίων

Στο Σχήμα 32 φαίνεται πώς τα μαγνητικά σωματίδια συσσωρεύονται σταδιακά, με την πλειονότητα αυτών στην πλευρά εισόδου, καθώς το διάλυμα κινείται από την είσοδο προς την πλευρά εξόδου. Τελικά, στο τέλος της διαδικασίας, η πλειονότητα των μαγνητικών σωματιδίων παγιδεύτηκαν κοντά στην πλευρά εισόδου.



Σχήμα 32: Τελική συσσώρευση μαγνητικών σωματιδίων

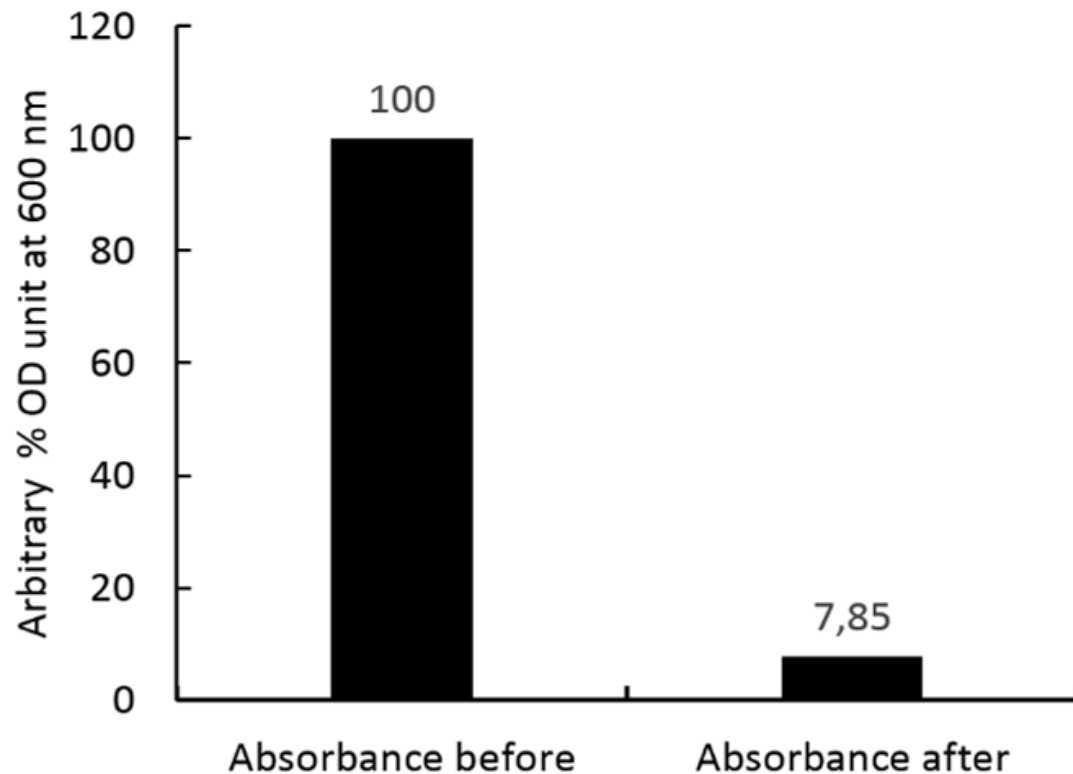
Το διάλυμα, καθαρό από μαγνητικά σωματίδια, συλλέχθηκε σε μια καθαρή φιάλη και, όπως φαίνεται από το χρώμα της, σχεδόν όλα τα μαγνητικά σωματίδια έχουν παγιδευτεί στο σπειροειδή σωλήνα (Σχήμα 33). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, ακόμη και χωρίς οποιαδήποτε υγρή φάση να καλύπτει τα μαγνητικά σωματίδια, παρέμειναν σταθερά συνδεδεμένα στο σπειροειδή σωλήνα.



Σχήμα 33: Πλήρης συσκευή μετά από μαγνητικό διαχωρισμό. Μαγνητικά σωματίδια παγιδευμένα στο σπειροειδή σωλήνα χωρίς υγρό να τα καλύπτει

Για να αξιολογηθεί η ικανότητα παγίδευσης της μεθόδου, χρησιμοποιήθηκε μια χημική δοκιμή με φασματοφωτόμετρο. Επιλέχθηκε αυθαίρετα να μετρηθεί η απορρόφηση του αλκοολικού διαλύματος στα 600 nm πριν και μετά τη διοχέτευσή του στο σπειροειδές

σύστημα. Το αποτέλεσμα έδειξε ότι περισσότερο από το 90% του μαγνητίτη διατηρήθηκε στον εύκαμπτο σωλήνα, που βρισκόταν μπροστά από την μαγνητική ταινία (Σχήμα 34)

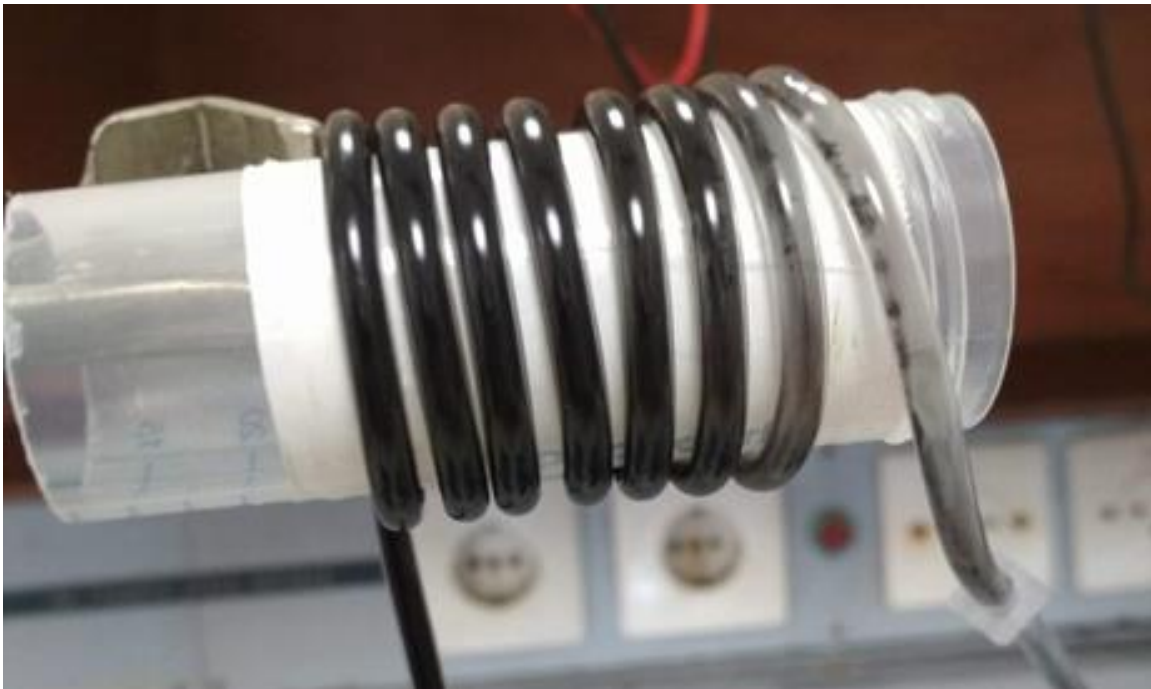


Σχήμα 34: Ανάλυση φασματοφωτομέτρου της οπτικής πυκνότητας (OD) των αλκοολικών διαλυμάτων πριν και μετά από μαγνητικό διαχωρισμό που μετρήθηκε στα 600 nm

Τέλος, για να εκλυθούν τα μαγνητικά σωματίδια από το σύστημα, διαχωρίστηκε αρχικά ο μαγνητικός πυρήνας από το σπειροειδή σωλήνα (Σχήμα 35) και, στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν 20 ml αλκοολικού διαλύματος (Σχήμα 36) για την απομάκρυνση και τη συλλογή μαγνητικών σωματιδίων σε ξεχωριστή φιάλη (Σχήμα 37). Με το πέρασμα 20 ml φρέσκου αλκοολικού διαλύματος, τα μαγνητικά σωματίδια απομακρύνθηκαν εντελώς από το σπειροειδή σωλήνα (Σχήμα 38).



Σχήμα 35: Αφαίρεση μαγνητικού πυρήνα



Σχήμα 36: Συγκέντρωση μαγνητικών σωματιδίων από σπειροειδή σωλήνα



Σχήμα 37: Συλλογή μαγνητικών σωματιδίων σε ξεχωριστές φιάλες



Σχήμα 38: Σπειροειδής σωλήνας τελείως καθαρός μετά από συλλογή μαγνητικών σωματιδίων

2.6 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ακόμα και η πιο σύγχρονη τεχνολογία των μαγνητικών διαχωριστών, που διατίθενται σήμερα στην αγορά, δεν προσφέρει λύσεις για το διαχωρισμό μαγνητικών υλικών από μεγάλες ποσότητες υγρού μείγματος. Έχει ήδη βρεθεί ότι χρησιμοποιώντας σωστά διαμορφωμένα μαγνητικά νανοσωματίδια είναι δυνατόν να απομακρυνθούν πολλά ιόντα από το θαλασσινό νερό [38]. Πράγματι, όλα τα συστήματα βασίζονται σε συσκευές μικρο-ρευστών, καθώς και στη χρήση κάποιου μόνιμου μαγνήτη ή ηλεκτρομαγνήτη, που μπορεί να προσελκύσει μαγνητικά υλικά προς μια συγκεκριμένη πλευρά του δοχείου αντίδρασης.

Σε αυτή την εργασία, προτάθηκε μια απλή και αξιόπιστη λύση για την απομάκρυνση των μαγνητικών σωματιδίων από ένα δεδομένο υγρό μείγμα, με ρυθμό 0,1 ml /sec και με μέθοδο συνεχούς ροής. Η μέθοδος βασίζεται στη χρήση ενός ανισοτροπικού εύκαμπτου σιδηρομαγνήτη αναδιπλωμένου, σε κυλινδρικό σχήμα (μαγνητικός πυρήνας), γύρω από τον οποίο τυλίγεται ένας σωλήνας από Tygon, ώστε να σχηματιστεί μια σπειροειδής δομή, που περιβάλλει τον ίδιο τον μαγνητικό κύλινδρο. Αυτά τα δύο κύρια εξαρτήματα βρίσκονται σε κλειστή επαφή, παρόλα αυτά μπορούν να διαχωριστούν εύκολα μεταξύ τους, καθώς ο μαγνητικός πυρήνας μπορεί να βγει από τον σπειροειδή σωλήνα.

Αυτή η διάταξη διασφαλίζει μια μεγάλη επιφάνεια παγίδευσης σε μικρό όγκο. Μια τέτοια μέθοδος μπορεί να είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και με την υλοποίηση του σχεδιασμού της θα μπορούσε να είναι δυνατή όχι μόνον η παγίδευση και ο διαχωρισμός μαγνητικών σωματιδίων σε μικρό όγκο, αλλά και η εκτέλεση διαδοχικών διαχωρισμών, που χρησιμοποιούνται συνήθως όταν υπάρχουν απομονωμένα βιομόρια, μέσω μιας μαγνητικής διαδικασίας. Πράγματι, με την προσθήκη αυτοματοποιημένων πολύοδων βαλβίδων, θα ήταν δυνατόν να περάσουν μέσα από τον σπειροειδή σωλήνα παγίδευσης μαγνητικών σωματιδίων επιπρόσθετοι διαλύτες ή ρυθμιστικά, τα οποία θα μπορούσαν να απομακρύνουν ακαθαρσίες και μη δεσμευμένα μόρια.

Είναι, επίσης, σημαντικό να αναφερθεί ότι η ικανότητα παγίδευσης θα μπορούσε να αυξηθεί σχεδόν στο 100% με λίγες τεχνικές βελτιώσεις. Όπως έχει αποδειχθεί από τις προσομοιώσεις ροής ρευστού, η ταχύτητα του διαλύματος εντός της διατομής του εύκαμπτου σωλήνα δεν είναι σταθερή. Πράγματι, αυξάνεται η κίνηση από τα τοιχώματα του σωλήνα προς το κέντρο.

Αυτό το φαινόμενο περιορίζει το δυναμικό παγίδευσης της μαγνητικής επιφάνειας. Τα σωματίδια, που κινούνται στο κέντρο, δέχονται μια διαφορετική δύναμη ρευστού απ' αυτά που βρίσκονται κοντά στα τοιχώματα. Για να ξεπεραστεί αυτό το φαινόμενο, θα μπορούσε να μεταβάλλεται η σταθερή ροή του υγρού, προκειμένου να αυξηθεί η ανάμιξη του διαλύματος. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με την εισαγωγή αέρα στο σπειροειδή σωλήνα, ώστε να δημιουργηθούν φυσαλίδες, που με τη σειρά τους θα μεταβάλλουν τη ροή του ρευστού.

3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τις τελευταίες δεκαετίες, τεράστιες προσπάθειες έχουν γίνει για την ανάπτυξη της τεχνικής μαγνητικού διαχωρισμού, με εφαρμογή σε βιολογικά και φυσικά διαλύματα. Επομένως, η μελέτη των υποκείμενων αρχών, που διέπουν τη δυναμική συμπεριφορά των διατάξεων μαγνητικού διαχωρισμού, είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας του διαχωρισμού. Παράλληλα με την ραγδαία ανάπτυξη της βιβλιογραφίας που σχετίζεται με τη μαγνητοφόρηση, παρουσιάζονται συνεχώς νέα ευρήματα, τα οποία σχετίζονται άμεσα με την αρχή λειτουργίας του μαγνητικού διαχωρισμού. Στο εγγύς μέλλον, αυτά τα ευρήματα θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν για κάθε σχεδιασμό τεχνικής μαγνητικού διαχωρισμού για βιοϊατρικές εφαρμογές.

Σε αυτή την εργασία, έγινε παρουσίαση μιας απλής μεθόδου για το διαχωρισμό μαγνητικών σωματιδίων από ένα υγρό διάλυμα με συνεχή και υψηλή ροή. Ο εξοπλισμός είναι απλός και μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί για να δημιουργηθεί ένα σύστημα, που μπορεί να εκτελέσει δραστηριότητες απομόνωσης ή/και καθαρισμού με βάση τα μαγνητικά σωματίδια. Το μειονέκτημα της διάταξης είναι ότι, καθώς η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται προς το κέντρο του σωλήνα, εμποδίζεται η συλλογή των μαγνητικών σωματιδίων που ρέουν σε απόσταση από τα τοιχώματα. Αυτό θα μπορούσε να βελτιωθεί μελλοντικά με την προσθήκη αέρα στο μείγμα ή τη μεταβολή της ροής, ώστε να γίνεται ανάμειξη του διαλύματος μέσα στη διάταξη διαχωρισμού.

Ένα σημαντικό κριτήριο για την απόδοση του μαγνητικού διαχωρισμού είναι το μέγεθος των σωματιδίων, αλλά και η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκε διάλυμα με μαγνητικά σωματίδια οξειδίου του σιδήρου (Fe_3O_4) και περιείχε μεγάλα πολυ-σωματίδια με μέσο μέγεθος 200-400 nm. Έχει βρεθεί [52] ότι το προφίλ μαγνητοφόρησης ενός ηλεκτρικώς σταθεροποιημένου μαγνητικού εναιωρήματος νανοσωματιδίων επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων. Η προετοιμασία ενός συστήματος μονοδιασπαρμένων μαγνητικών σωματιδίων

είναι απαραίτητη, προκειμένου να υπάρξει ποιοτικός έλεγχος της διαδικασίας μαγνητικού διαχωρισμού [16,52]. Ωστόσο, η σύνθεση μονοδιασπαρμένων μαγνητικών σωματιδίων είναι τεχνικά δύσκολη, καθώς είναι δυνατή η συσσωμάτωση των μονοδιασπαρμένων σωματιδίων, που έχει ως αποτέλεσμα πολυδιασκορπισμένα μαγνητικά σωματίδια, όπως παρατηρήθηκε και στο πείραμα της παρούσης εργασίας. Επιπλέον, η συσσωμάτωση μαγνητικών σωματιδίων προωθείται περαιτέρω από τη μαγνητική έλξη, λόγω της επαγόμενης μαγνητικής διπολικής ροπής που κατέχει κάθε μαγνητικό σωματίδιο, παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Ειδικότερα, στα σιδηρομαγνητικά και φερρι-μαγνητικά σωματίδια υπάρχει μαγνητική διπολική ροπή, ακόμη και χωρίς το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο [52,53]. Το ζήτημα αυτό προτείνεται να ληφθεί υπόψη σε μελλοντική έρευνα, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το μέγεθος των σωματιδίων είναι εξαιρετικά ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό της βιοσυμβατότητας του συστήματος μαγνητικών σωματιδίων και είναι απαραίτητος ο αυστηρός έλεγχος της αυτοσυσχέτισης σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας [16,54,55].

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα μαγνητικά σωματίδια, που χρησιμοποιούνται για τη σήμανση με μαγνητικό προσδιορισμό της καθορισμένης οντότητας στόχου, πρέπει να έχουν καλή κολλοειδή σταθερότητα. Στην παρούσα εργασία, για την καλύτερη διάλυση των σωματιδίων Fe_3O_4 και τη λήψη ενός κολλοειδούς διαλύματος, χρησιμοποιήθηκε διαλύτης αλκοολοελαϊκού οξέος. Αυτή η προϋπόθεση είναι σημαντική για να εξασφαλιστεί ότι τα σωματίδια είναι παρόντα σε καλά διασκορπισμένες συνθήκες έτσι, ώστε να προωθηθεί η αποτελεσματικότερη ανάμιξη και σήμανση με την οντότητα-στόχου. Γενικά, η σταθερότητα των μαγνητικών σωματιδίων μπορεί να ενισχυθεί παρέχοντας ηλεκτροστατική απόθεση και στερεοχημική παρεμπόδιση στα δοθέντα σωματίδια. Ωστόσο, η αυξημένη κολλοειδής σταθερότητα μπορεί να μειώσει την ταχύτητα διαχωρισμού των μαγνητικών σωματιδίων σε λιγότερο ισχυρά μαγνητικά πεδία [52]. Συνεπώς, η αρνητική επίδραση μεταξύ της κολλοειδούς σταθερότητας και της αποτελεσματικότητας του μαγνητικού διαχωρισμού πρέπει να αξιολογηθεί προσεκτικά.

Για να εκτελεστεί επιτυχώς ο μαγνητικός διαχωρισμός, η δύναμη που ασκείται από το μαγνητικό πεδίο στα μαγνητικά σωματίδια πρέπει να είναι αρκετά έντονη, ώστε να ξεπεράσει την ιξώδη οπισθέλκουσα, τη θερμική κίνηση και την βαρυτική έλξη. Στην

παρούσα εργασία, δεν συμπεριλήφθηκε η ανάλυση αυτών των δυνάμεων και χρησιμοποιήθηκαν απλοί κανόνες, που παρείχαν μια γρήγορη και απλή μέθοδο επιλογής της καταλληλότητας του επιλεγμένου συστήματος. Σε μελλοντική έρευνα προτείνεται να ληφθούν υπόψιν και υπόλοιπες δυνάμεις που ασκούνται στα μαγνητικά σωματίδια, για τον ακριβή προσδιορισμό του απαιτούμενου μαγνητικού πεδίου κατά το διαχωρισμό σε διάλυμα μεγαλύτερου όγκου [53].

Είναι σαφές ότι η βελτιστοποίηση του ρυθμού διαχωρισμού των μαγνητικών σωματιδίων σε οποιαδήποτε βιοϊατρική εφαρμογή είναι υψίστης σημασίας. Συγκεκριμένα, η αυτοσυσσωμάτωση μαγνητικών σωματιδίων, όπου τα μαγνητικά σωματίδια κινούνται συλλογικά προς μαγνητική πηγή, είναι ικανή να επιταχύνει το ρυθμό διαχωρισμού. Τα αποτελέσματα του πειράματος της παρούσης εργασίας έδειξαν ότι είναι δυνατή η απομάκρυνση και η συλλογή περισσότερο από το 92% των μαγνητικών σωματιδίων από ένα υγρό διάλυμα 100 ml σε λιγότερο από 15 λεπτά.

Επίσης, η υδροδυναμική επίδραση διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στην εξέλιξη και την απόδοση της διαδικασίας του μαγνητικού διαχωρισμού [16,54]. Λόγω της μεταφοράς της ορμής μεταξύ των κινούμενων μαγνητικών σωματιδίων και του περιβάλλοντος υγρού, δημιουργείται συνεχής ροή, η οποία κατευθύνεται προς την περιοχή όπου η κλίση του μαγνητικού πεδίου είναι χαμηλότερη. Ταυτόχρονα, αυτή η ροή οδηγεί τα μαγνητικά σωματίδια της ίδιας περιοχής προς τον μαγνήτη μέσα σε ένα σχετικά μικρότερο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με την κίνηση, που οφείλεται καθαρά σε μαγνητοφορητική δύναμη [16,54]. Με αυτόν τον τρόπο, η υδροδυναμική δημιουργεί ταχεία συλλογή των μαγνητικών σωματιδίων από το εναιώρημά τους και καθιστά το μαγνητικό διαχωρισμό πιο εφαρμόσιμο σε βιοϊατρικές εφαρμογές, στις οποίες απαιτείται ταχεία επεξεργασία. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εξετάσει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας, με αξιοποίηση της υδροδυναμικής αλληλεπίδρασης, σε συνεχή λειτουργία, εστιάζοντας στη διαταραχή της μαγνητοφορητικής οδού των σωματιδίων από την κυκλοφοριακή ροή, που προκαλείται από την υδροδυναμική επίδραση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Lin J, Li M, Li Y, Chen Q. 2015 A high gradient and strength bioseparator with nano-sized immunomagnetic particles for specific separation and efficient concentration of *E. coli* O157:H7. *J. Magn. Magn. Mater.* **378**, 206–213.
2. He J, Huang M, Wang D, Zhang Z, Li G. 2014 Magnetic separation techniques in sample preparation for biological analysis: a review. *J. Pharmaceut. Biomed. Anal.* **101**, 84–101.
3. Gijss MAM, Lacharme F, Lehmann U. 2010 Microfluidic applications of magnetic particles for biological analysis and catalysis. *Chem. Rev.* **110**, 1518–1563.
4. Lim J, Yeap SP, Leow CH, Toh PY, Low SC. 2014 Magnetophoresis of iron oxide nanoparticles at low field gradient: the role of shape anisotropy. *J. Colloid Interface Sci.* **421**, 170–177.
5. Andreu JS, Camacho J, Faraudo J, Benelmekki M, Rebollo C, Martínez LM. 2011 Simple analytical model for the magnetophoretic separation of superparamagnetic dispersions in a uniform magnetic gradient. *Phys. Rev. E* **84**, 021402.
6. Pamme N. 2007 Continuous flow separations in microfluidic devices. *Lab Chip* **7**, 1644–1659.
7. Probst CE, Zrazhevskiy P, Gao X. 2011 Rapid multitarget immunomagnetic separation through programmable DNA linker displacement. *J. Am. Chem. Soc.* **133**, 17 126–17 129.
8. Yavuz CT, Prakash A, Mayo JT, Colvin VL. 2009 Magnetic separations: from steel plants to biotechnology. *Chem. Eng. Sci.* **64**, 2510–2521.
9. Kaminski MD, Chen H, Liu X, Rempfer D, Rosengart AJ. 2012 Removal of blood-borne toxin in the body using magnetic nanospheres. In *Magnetic nanoparticles: from fabrication to clinical applications* (ed. Thanh NT), pp. 195–214. Boca Raton, FL: CRC press.
10. Xia N, Hunt TP, Mayers BT, Alsberg E, Whitesides GM, Westervelt RM, Ingber DE. 2006 Combined microfluidic-micromagnetic separation of living cells in continuous flow. *Biomed. Microdevices* **8**, 299–308.

11. Zborowski M, Williams PS, Moore LR, Chalmers JJ, Zimmerman PA. 2007 New challenges and opportunities. In *Laboratory techniques in biochemistry and molecular biology* (eds Zborowski M, Chalmers JJ), pp. 331–412. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
12. Nam J, Huang H, Lim H, Lim C, Shin S. 2013 Magnetic separation of malaria-infected red blood cells in various developmental stages. *Anal. Chem.* **85**, 7316–7323.
13. Pamme N, Wilhelm C. 2006 Continuous sorting of magnetic cells via on-chip free-flow magnetophoresis. *Lab Chip* **6**, 974–980.
14. Chen GD, Alberts CJ, Rodriguez W, Toner M. 2010 Concentration and purification of human immunodeficiency virus type 1 virions by microfluidic separation of superparamagnetic nanoparticles. *Anal. Chem.* **82**, 723–728.
15. Lim J, Yeap SP, Low SC. 2014 Challenges associated to magnetic separation of nanomaterials at low field gradient. *Sep. Purif. Technol.* **123**, 171–174. (doi:10.1016/j.seppur.2013.12.038) Crossref, Google Scholar
16. Leong Sim Siong, Yeap Swee Pin and Lim JitKang Working principle and application of magnetic separation for biomedical diagnostic at high- and low-field gradients Interface Focus
17. <https://opentextbc.ca/physicstestbook2/chapter/magnetic-fields-produced-by-currents-amperes-law/>
18. <https://micro.magnet.fsu.edu/electromag/electricity/generators/index.html>
19. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/solenoid.html>.
20. <https://www.globalspec.com/reference/81215/203279/1-22-magnetic-circuits>
21. <http://www.eecs.ucf.edu/~tomwu/course/eel4205/notes/02%20Magnetic%20Materials.pdf>.
22. <http://www.nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Basic%20Electrical%20Technology/pdf/L-21%28TB%29%28ET%29%20%28%28EE%29NPTEL%29.pdf>.
23. <https://www.staff.ncl.ac.uk/j.p.goss/Teaching/EEE1001PHY1002/Mag4.pdf>.
24. <http://physics.info/inductance/>.
25. http://www.eng.ucy.ac.cy/ece331/notes/notes_04_sv.pdf.
26. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/farlaw2.html>.

27. http://www.physics.ntua.gr/~dris/FYS_B_LYK.PDF/C_FYBL171-.pdf.
28. http://www.eng.ucy.ac.cy/ece331/notes/notes_04_sv.pdf.
29. J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*, New York: Cambridge University Press, 2009.
30. M. Getzlaff, *Fundamentals of Magnetism*, New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
31. C.-G. Stefanita, *Magnetism - Basics and Applications*, New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
32. Ε. Χριστοφόρου, *Ηλεκτρονικά Υλικά*, Αθήνα, 2015.
33. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/jk1/lectures/node45.html>
34. S. S. Shevkoplyas, A. C. Siegel, R. M. Westervelt, M. G. Prentiss και G. M. Whitesides, «The force acting on a superparamagnetic bead due to an applied magnetic,» *Lab on a Chip*, 2007.
35. Σ. Σαμοθρακίτης, *Προσομοίωση και σχεδιασμός μαγνητικού συστήματος για τη μαγνητική οδήγηση νανοσωματιδίων*, 2014.
36. http://ikaros.teipir.gr/phyche/Subjects/Varsamis/ergastiria/askisi_9.pdf.
37. Neuberger, T.; Schöpf, B.; Hofmann, H.; Hofmann, M.; von Rechenberg, B. Superparamagnetic nanoparticles for biomedical applications: Possibilities and limitations of a new drug delivery system. *J. Magn. Magn. Mater.* **2005**, 293, 483–496, doi:10.1016/J.JMMM.2005.01.064.
38. Kouli, M.-E.; Banis, G.; Tsarabaris, P.; Ferraro, A.; Hristoforou, E. A study on magnetic removal of sodium, calcium and potassium ions from seawater using magnetite/clinoptilolite–Na composite nanoparticles. *J. Magn. Magn. Mater.* **2018**, 465, 692–699, doi:10.1016/j.jmmm.2018.06.064.
39. Rocha-Santos, T. A. P. Sensors and biosensors based on magnetic nanoparticles. *TrACTrendsAnal. Chem.* **2014**, 62, 28–36, doi:10.1016/J.TRAC.2014.06.016.
40. Kim, K. H.; Lee, O. K.; Lee, E. Y. Nano-Immobilized Biocatalysts for Biodiesel Production from Renewable and Sustainable Resources. *Catalysts* **2018**, 8.
41. An-Hui, L.; E. L., S.; Ferdi, S. Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Protection, Functionalization, and Application. *Angew. ChemieInt. Ed.* **2007**, 46, 1222–1244, doi:10.1002/anie.200602866.

42. Adamaki, B.; Karatza, D.; Chianese, S.; Musmarra, D.; Metaxa, E.; Hristoforou, E. *Super-paramagnetic nanoparticles: Manufacturing, structure, properties, simulation, applications*; 2016; Vol. 47; ISBN 9788895608389.
43. Aivazoglou, E.; Metaxa, E.; Hristoforou, E. Microwave-assisted synthesis of iron oxide nanoparticles in biocompatible organic environment. *AIP Adv.***2017**, 8, 48201, doi:10.1063/1.4994057.
44. Wegener, C.; Heber, C.; Min, K. Novel cell washing device using spinning membrane filtration. *Cytotherapy***2013**, 15, S27, doi:10.1016/j.jcyt.2013.01.102.
45. Zborowski, M. Commercial magnetic cell separation instruments and reagents. *Lab. Tech. Biochem. Mol. Biol.***2007**, 32, 265–292, doi:10.1016/S0075-7535(06)32010-4.
46. http://www.laboquimia.es/pdf_catalogo/SAINT-GOBAIN_PERFORMANCE_PLASTICS_Tubos_Tygon.pdf.
47. Aharoni, Amikam (1996). *Introduction to the Theory of Ferromagnetism*. ClarendonPress. ISBN 978-0-19-851791-7.
48. McCaig, Malcolm (1977). *Permanent magnets in theory and practice*. Pentechpress. ISBN 978-0-7273-1604-2.
49. Meiklejohn, W.H.; Bean, C.P. (1957-02-03). "New Magnetic Anisotropy". *Physical Review*. 105 (3): 904–913. Bibcode:1957PhRv..105..904M. doi:10.1103/PhysRev.105.904.
50. L. F. Zanini, O. Osman, M. Frenea-Robin, N. Haddour, N. M. Dempsey et al. Micromagnet structures for magnetic positioning and alignment. *J. Appl. Phys.* 111, 07B312 (2012); doi: 10.1063/1.3675067
51. <https://www.labunlimited.com/s/ALL/4AJ-9700430/Behr-Peristaltic-Pump-PLP-380-B00454739>
52. Yeap SP, Toh PY, Ahmad AL, Low SC, Majetich SA, Lim J. 2012 Colloidal stability and magnetophoresis of gold-coated iron oxide nanorods in biological media. *J. Phys. Chem. C* **116**, 22 561–22 569.
53. Lim J, Yeap SP, Low SC. 2014 Challenges associated to magnetic separation of nanomaterials at low field gradient. *Sep. Purif. Technol.* **123**, 171–174.
54. Leong SS, Ahmad Z, Lim J. 2015 Magnetophoresis of superparamagnetic nanoparticles at low field gradient: hydrodynamic effect. *SoftMatter* **11**, 6968–6980.

