



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής
Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητήρων

Ανάπτυξη διάταξης μαγνητικού διαχωρισμού
συνεχούς ροής

Διπλωματική Εργασία

του

Χατζηγεωργίου Θεόδωρου

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2023



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής
Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητήρων

Ανάπτυξη διάταξης μαγνητικού διαχωρισμού συνεχούς ροής

Διπλωματική Εργασία

του

Χατζηγεωργίου Θεόδωρου

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14^η Ιουλίου 2023:

.....
Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Γιώργος Ματσόπουλος
Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Πολιτόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2023

.....

Χατζηγεωργίου Θεόδωρος

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

Copyright © Χατζηγεωργίου Θεόδωρος, 2023.

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.

Περίληψη

Από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, ο μαγνητισμός αποτελεί φυσικό φαινόμενο το οποίο μελετάται ευρέως και η κατανόηση του έχει εξελιχθεί μέσω της επιστημονικής έρευνας. Η ανάπτυξη του οφείλεται εν μέρει στην παράλληλη πρόοδο επιστημών όπως η χημεία, η γεωλογία και η βιολογία. Εφαρμόζεται σε τομείς όπως η ηλεκτρονική, η μηχανική, η ιατρική, η ενέργεια και το περιβάλλον.

Μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές της θεωρίας μαγνητισμού είναι ο μαγνητικός διαχωρισμός. Αποτελεί τεχνική που χρησιμοποιεί μαγνήτες για τον διαχωρισμό μαγνητικών υλικών από άλλα μη-μαγνητικά υλικά. Απέκτησε μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον διότι αξιοποιεί τις βελτιωμένες μαγνητικές ιδιότητες των σωματιδίων σε μικρο και νανοκλίμακα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την ανάπτυξη ενός συστήματος μαγνητικού διαχωρισμού συνεχούς ροής. Χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνήτες για τον επιλεκτικό διαχωρισμό νανοσωματιδίων μαγνητίτη από νερό. Η προτεινόμενη πειραματική διάταξη στοχεύει στο να διαφοροποιηθεί από τα ήδη υπάρχοντα συστήματα και να συνεισφέρει περαιτέρω στον τομέα.

Οι άξονες της εργασίας είναι μία εισαγωγή και τρία κύρια μέρη, ακολουθούμενα από την βιβλιογραφία και ένα παράρτημα. Στην εισαγωγή αναφέρονται το αντικείμενο, ο σκοπός και η δομή της εργασίας. Στο πρώτο μέρος αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση ολόκληρης της εργασίας. Στο δεύτερο μέρος περιγράφονται η πειραματική διάταξη και οι προσομοιώσεις. Το τρίτο μέρος αποτελεί τον επίλογο της εργασίας ο οποίος περιλαμβάνει τα συμπεράσματα και την μελλοντική εργασία.

Όπως θα αναλυθεί και στην συνέχεια, τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά αφού οι μετρήσεις οπτικής πυκνότητας νανοσωματιδίων στο καθαρό διάλυμα ξεπέρασαν το 97%, με μέγιστο ποσοστό καθαρότητας το 98.6%.

Λέξεις κλειδιά: μαγνητισμός, μαγνητικός διαχωρισμός, συνεχής ροή, ηλεκτρομαγνήτες, μαγνητίτης, μαγνητικά νανοσωματίδια

Abstract

From ancient times to the present day, magnetism has been a widely studied natural phenomenon and its understanding has evolved through scientific research. Its development is partly due to the simultaneous progress of sciences such as chemistry, geology and biology. It is applied in fields such as electronics, engineering, medicine, energy and environment.

One of the most important applications of magnetism theory is magnetic separation. It is a technique that uses magnets to separate magnetic materials from other non-magnetic materials. It has gained great scientific interest because it utilizes the improved magnetic properties of particles at micro and nanoscale.

This thesis aims to develop a continuous flow magnetic separation system. It uses electromagnets to selectively separate magnetite nanoparticles from water. The proposed experimental setup aims to differentiate itself from existing systems and offer additional innovation in the field.

The axes of the work are an introduction and three main parts, followed by the bibliography and an appendix. The subject, purpose and structure of the paper are mentioned in the introduction. The first part analyzes the theoretical background needed to understand the entire work. In the second part, the experimental setup and simulations are described. The third part is the epilogue of the paper which includes conclusions and future work.

As will be analyzed later, the results were quite encouraging since the optical density measurements of nanoparticles in clean solution exceeded 97%, with a maximum purity of 98.6%.

Keywords: magnetism, magnetic separation, continuous flow, electromagnets, magnetite, magnetic nanoparticles

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου, καθηγητή Ε.Μ.Π, ο οποίος μου ανέθεσε το θέμα της διπλωματικής, μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το αντικείμενο και μου επέτρεψε να χρησιμοποιήσω το εργαστήριο για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά τον διδάκτορα Γιώργο Μπάνη για την πολύτιμη βοήθεια του καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής, υπήρξε σημαντική η συμβολή του στην δημιουργία της διάταξης και στην συγγραφή της εργασίας. Επίσης να ευχαριστήσω τους Σπύρο Αγγελόπουλο, διδάκτορα στο Εργαστήριο Αισθητήρων, και Angelo Ferraro, μεταδιδακτορικό ερευνητή του εργαστηρίου, για την βοήθεια στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων και για τις γνώσεις που μοιράστηκαν μαζί μου.

Τέλος, ευχαριστώ απεριόριστα την οικογένεια μου, τους γονείς και την αδερφή μου, τους φίλους και τους συγγενείς μου, που ήταν πάντα δίπλα μου σε όλο αυτό το ταξίδι, να με στηρίζουν, να με αγαπούν, να με φροντίζουν, να αγωνιούν και να ανυπομονούν στον ίδιο βαθμό με εμένα και πάνω απ' όλα να με ωθούν να προχωράω μπροστά και να είμαι η καλύτερη εκδοχή του εαυτού μου. Πάνω απ' όλους ευχαριστώ την αγαπημένη μου γιαγιά, τον φύλακα άγγελο μου, της οποίας νιώθω έντονα την αγάπη και την στήριξη έστω και από μακριά.

Θεόδωρος Χατζηγεωργίου

Αθήνα, Ιούλιος 2023

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vii
Ευχαριστίες	ix
Ευρετήριο Εικόνων	xv
Ευρετήριο Πινάκων	xvi
Εισαγωγή	17
Αντικείμενο εργασίας	17
Σκοπός εργασίας	17
Δομή εργασίας	18
I Θεωρητικό Μέρος	19
1 Θεωρία μαγνητισμού	21
1.1 Μαγνητοστατική	21
1.1.1 Μαγνητική διπολική ροπή	21
1.1.2 Νόμος Biot-Savart	22
1.1.3 Μαγνητικό πεδίο	23
1.1.4 Βρόχος υστέρησης	26
1.1.5 Εξισώσεις Maxwell	27
1.2 Μαγνητικά Υλικά	29
1.2.1 Γενικά	29
1.2.2 Μαγνητική διαπερατότητα	30
1.2.3 Μαγνητική επιδεκτικότητα	31
1.2.4 Μαγνητική τάξη	31
1.2.5 Υπερπαραμαγνητισμός	38
1.2.6 Θερμοκρασίες Curie και Neel	39
1.3 Μαγνητικά Κυκλώματα	40

1.3.1	Μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ)	40
1.3.2	Πεδίο H	41
1.3.3	Μαγνητική αντίσταση	41
1.3.4	Μαγνητική ροή	41
1.3.5	Νόμοι του Kirchoff	42
2	Μαγνητικός διαχωρισμός	43
2.1	Εισαγωγή	43
2.2	Κατηγορίες	44
2.3	Δυνάμεις	44
2.3.1	Εξωτερικές	45
2.3.2	Διαμοριακές	45
2.3.3	Κίνηση Brown	47
2.4	Μαγνητική κροκίδωση	49
2.5	Συνεργατική Μαγνητοφόρηση	49
2.6	Έρευνα	50
3	Θεωρία ρευστών	57
3.1	Εισαγωγή	57
3.2	Βασικές ιδιότητες ρευστών	57
3.2.1	Πίεση - Διατμητική τάση	57
3.2.2	Πυκνότητα	58
3.2.3	Ιξώδες	58
3.2.4	Επιφανειακή τάση	59
3.2.5	Τάση ατμών	60
3.2.6	Συμπιεστότητα	61
3.3	Είδη ροής	61
3.3.1	Γενικά	61
3.3.2	Στρωτή ροή	62
3.3.3	Τυρβώδης ροή	62
3.3.4	Αριθμός Reynolds	62
II	Πειραματικό Μέρος	65
4	Πειραματική διάταξη	67
4.1	Γενικά	67
4.2	Στόχος και πορεία πειράματος	67
4.3	Υλικά και εξοπλισμός	70
4.4	Περιγραφή διατάξεων	76

4.5	Περιγραφή διαδικασίας	81
4.6	Αποτελέσματα	83
4.6.1	Αρχική διάταξη	83
4.6.2	Τελική διάταξη	83
4.7	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	87
5	Προσομοίωση ηλεκτρομαγνήτη	91
5.1	1 ^η προσομοίωση	92
5.2	2 ^η προσομοίωση	94
5.3	3 ^η προσομοίωση	96
5.4	4 ^η προσομοίωση	96
5.5	Αποτελέσματα	98
5.6	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	111
III	Επίλογος	113
6	Επίλογος	115
6.1	Συμπεράσματα	115
6.2	Μελλοντική εργασία και βελτιώσεις	116
	Βιβλιογραφία	119
	Παράρτημα	125

Ευρετήριο Εικόνων

1.1.1	Κανόνας δεξιόστροφου κοχλία	21
1.1.2	Μαγνητικό δίπολο ισοδύναμο με βρόχο ρεύματος	22
1.1.3	Δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου	24
1.1.4	Μόνιμος μαγνήτης με διατεταγμένα ρινίσματα σιδήρου στη θέση των μαγνητικών δυναμικών γραμμών	25
1.1.5	Σύγκριση μαγνητικών γραμμών πεδίων B, H και M σε έναν κυλινδρικό μόνιμο μαγνήτη	25
1.1.6	Βρόχος υστέρησης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού	26
1.2.1	Βρόχος υστέρησης για μαλακά και σκληρά μαγνητικά υλικά	30
1.2.2	Κατηγορίες μαγνητισμού στον περιοδικό πίνακα	32
1.2.3	Παραδείγματα διαμαγνητικών στοιχείων	33
1.2.4	Εξάρτηση υλικών από θερμοκρασία και σχέση θερμοκρασίας-μαγνήτισης	33
1.2.5	Παραδείγματα παραμαγνητικών στοιχείων	34
1.2.6	Παραδείγματα σιδηρομαγνητικών στοιχείων	35
1.2.7	Συμπεριφορά μαγνητικών γραμμών για υλικά διαφορετικής μαγνητικής τάξης	35
1.2.8	Παραδείγματα αντισιδηρομαγνητικών στοιχείων	36
1.2.9	Παραδείγματα σιδηριμαγνητικών στοιχείων	37
1.2.10	Μαγνητική συμπεριφορά μαγνητικών τάξεων	37
1.2.11	Σύνοψη των πιθανών μαγνητικών δομών υπό μορφή λογικού διαγράμματος	38
1.3.1	Μαγνητικό κύκλωμα και το ηλεκτρικό ανάλογό του	40
2.6.1	Μαγνητικός διαχωριστής κυττάρων LGMS - Inglis et al	50
2.6.2	Μαγνητικός διαχωριστής πολλαπλών κυττάρων LGMS - Adams et al	51
2.6.3	Συσκευή διαχωρισμού LGMS μαγνητικών σωματιδίων από άλλα μαγνητικά και μη σωματίδια - Pamme et al	51
2.6.4	Συσκευή διαχωρισμού LGMS μαγνητικών σωματιδίων σύμφωνα με το μέγεθος τους - Afshar et al	52
2.6.5	Συσκευή διαχωρισμού LGMS με χρήση διαδοχικών πηνίων κάτω από το μικροροϊκό κανάλι - Fulcrand et al	52
2.6.6	Σύστημα διαχωρισμού HGMS για αφαίρεση φερρουδρίτη από βιομηχανικά απόβλητα - Karapinar et al	53

2.6.7	Σύστημα διαχωρισμού HGMS για αιμοσφαίρια - Han et al	53
2.6.8	Συσκευή διαχωρισμού HGMS για αφαίρεση φωσφόρου από λύματα - Ishiwata et al	54
2.6.9	Εφαρμογή HGMS για καθαρισμό θολών λυμάτων ενός μετατροπέα (converter) - Li et al	54
2.6.10	Σύστημα διαχωρισμού HGMS για αφαίρεση ασθενώς μαγνητισμένων σωματιδίων - Okada et al	55
2.6.11	Σύστημα διαχωρισμού HGMS για αφαίρεση αρσενικού από γεωθερμικό νερό - Okada et al	55
3.2.1	Σχηματικό διάγραμμα επιφανειακής τάσης	60
3.3.1	Είδη ροής	62
4.1.1	Πρώτη πειραματική διάταξη LGMS	68
4.1.2	Δεύτερη πειραματική διάταξη LGMS	68
4.3.1	Βρόχος υστέρησης μαγνητίτη	70
4.3.3	Περισταλτική αντλία - Shenchen LabM6	71
4.3.4	Τροφοδοτικό - Extech Quad Output DC Power Supply 382270	72
4.3.5	Πλακέτα Arduino SainSmart UNO R3	72
4.3.6	Μονάδα ρελέ 2 καναλιών	73
4.3.7	Μονάδα ρελέ 8 καναλιών	73
4.3.8	Ηλεκτρομαγνήτες (α) ασθενούς πεδίου (β) ισχυρού πεδίου	74
4.3.9	Σωληνοειδής βαλβίδα pinch 2 οδών	75
4.3.10	Φασματοφωτόμετρο	76
4.3.11	Ζυγαριά ακριβείας OHAUS Adventurer™ Analytical	76
4.4.1	Σχηματικό διάγραμμα αρχικής προτεινόμενης διάταξης LGMS	77
4.4.2	Σχηματικό διάγραμμα διαφορετικών διατάξεων ηλεκτρομαγνητών	77
4.4.3	Σχηματικό διάγραμμα συνολικής πειραματικής διάταξης HGMS	78
4.4.4	Συνδεσμολογία διόδου ελευθέρως ροής (flyback diode)	78
4.4.5	Συνολική πειραματική διάταξη	79
4.4.6	Πρώτο μέρος: έλεγχος και τροφοδοσία	80
4.4.8	Λεπτομέρειες σωληνώσεων πειράματος	81
4.5.1	3D εκτυπωμένο προσθετικό για κεφαλή βαλβίδας	82
4.5.2	Βαλβίδα με προσθετικό	83
4.6.1	Αρχικά και τελικά διαλύματα ενός πειράματος	86
4.7.1	Διάρκειας φάσης συναρτήσει της οπτικής πυκνότητας για καθαρό και ακάθαρτο διάλυμα	87
4.7.2	Ταχύτητα ροής συναρτήσει της οπτικής πυκνότητας για καθαρό και ακάθαρτο διάλυμα	88

4.7.3	Τάση ηλεκτρομαγνήτη συναρτήσει της οπτικής πυκνότητας για καθαρό και ακάθαρτο διάλυμα	88
5.0.1	Γεωμετρικό μοντέλο ηλεκτρομαγνήτη	91
5.0.2	Όψεις ηλεκτρομαγνήτη	92
5.1.1	1 ^η προσομοίωση - Γραμμή που προσομοιώνει τον σωλήνα ροής των νανοσωματιδίων	93
5.1.2	1 ^η προσομοίωση - Γραφική παράσταση τιμών πεδίου στην περιοχή του σωλήνα	93
5.2.1	2 ^η προσομοίωση - Άνω όψη ηλεκτρομαγνήτη	95
5.4.1	4 ^η προσομοίωση - Μπροστινή όψη ηλεκτρομαγνήτη	97
5.5.1	1 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (I=3A)	98
5.5.2	1 ^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος	99
5.5.3	2 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (πλάτος, I=5A)	99
5.5.4	2 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (δυναμικές γραμμές, I=5A) .	100
5.5.5	2 ^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος	100
5.5.6	3 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (πλάτος, XSize = 14 mm, I=5A)	101
5.5.7	3 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (δυναμικές γραμμές, XSize = 14 mm, I=5A)	102
5.5.8	3 ^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος (XSize = 14 mm)	103
5.5.9	3 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (πλάτος, XSize = 16 mm, I=5A)	104
5.5.10	3 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (δυναμικές γραμμές, XSize = 16 mm, I=5A)	105
5.5.11	3 ^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος (XSize = 16 mm)	106
5.5.12	3 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (πλάτος, XSize = 18 mm, I=5A)	106
5.5.13	3 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (δυναμικές γραμμές, XSize = 18 mm, I=5A)	107
5.5.14	3 ^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος (XSize = 18 mm)	107
5.5.15	3 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (πλάτος, XSize = 20 mm, I=5A)	108
5.5.16	3 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (δυναμικές γραμμές, XSize = 20 mm, I=5A)	108
5.5.17	3 ^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος (XSize = 20 mm)	108
5.5.18	4 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (πλάτος, I=5A)	109
5.5.19	4 ^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (δυναμικές γραμμές, I=5A) .	110
5.5.20	4 ^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος	110
6.2.1	Σχηματικό διάγραμμα προτεινόμενης διάταξης για LGMS (2)	117
6.2.2	Σχηματικό διάγραμμα προτεινόμενης διάταξης για LGMS (3)	117

Ευρετήριο Πινάκων

1.1	Μεγέθη M_s , M_r , H_C σε διάφορα μαγνητικά στοιχεία	27
1.2	Μαγνητική διαπερατότητα για διάφορα υλικά	30
1.3	Μαγνητική επιδεκτικότητα για διάφορα υλικά	31
1.4	Θερμοκρασίες Curie σε διάφορους σιδηρομαγνήτες	39
1.5	Θερμοκρασίες Curie σε διάφορους σιδηριμαγνήτες	39
1.6	Θερμοκρασίες Neel σε διάφορους αντισιδηρομαγνήτες	39
1.7	Μαγνητικά μεγέθη και τα αντίστοιχα ηλεκτρικά	40
3.1	Ιξώδες ορισμένων ρευστών	59
3.2	Παραδείγματα επιφανειακής τάσης ρευστών	60
3.3	Τάση ατμών νερού για διάφορες θερμοκρασίες	61
4.1	Φάσεις λειτουργίας πειραματικής διάταξης	82
4.2	Διάφορες μετρήσεις για αρχική διάταξη LGMS	83
4.3	Μετρήσεις για μεταβλητή διάρκεια φάσης	84
4.4	Μετρήσεις για μεταβλητή ταχύτητα ροής	84
4.5	Μετρήσεις για μεταβλητό μαγνητικό πεδίο	85
4.6	Μετρήσεις για πειράματα με ανατροφοδότηση καθαρού διαλύματος	85
4.7	Μετρήσεις για πειράματα με βέλτιστες παραμέτρους	86
5.1	Παράμετροι 1 ^{ης} προσομοίωσης	92
5.2	1 ^η προσομοίωση - Τιμές μαγνητικού πεδίου	94
5.3	Παράμετροι 2 ^{ης} προσομοίωσης	94
5.4	3 ^η προσομοίωση - Τιμές <i>pros_offset</i>	96
5.5	Παράμετροι 4 ^{ης} προσομοίωσης	96

Εισαγωγή

Αντικείμενο εργασίας

Ο μαγνητισμός αποτελεί φυσικό φαινόμενο το οποίο έχει απασχολήσει την ανθρωπότητα εδώ και αιώνες. Οι αρχαιότερες αναφορές στον μαγνητισμό προέρχονται από την αρχαία Ελλάδα και την αρχαία Κίνα, όπου παρατηρήθηκαν φυσικά φαινόμενα που σχετίζονταν με τους μαγνήτες. Στην σύγχρονη τεχνολογία, ο μαγνητισμός έχει μελετηθεί εκτενώς και η κατανόηση του έχει εξελιχθεί μέσω της επιστημονικής έρευνας και της ανάπτυξης θεωρητικών μοντέλων. Σε αυτό συνέβαλε και η ταυτόχρονη ανάπτυξη άλλων επιστημονικών πεδίων, όπως χημεία, γεωλογία και βιολογία. Παρουσιάζει πληθώρα εφαρμογών σε σημαντικούς τομείς, όπως ηλεκτρονική, μηχανική, ιατρική, ενέργεια και περιβάλλον.

Το φαινόμενο αναφέρεται στην ιδιότητα ορισμένων υλικών να παράγουν μαγνητικά πεδία και να αλληλεπιδρούν με άλλα μαγνητικά υλικά. Τις τελευταίες δεκαετίες, παρατηρήθηκε ευρύ επιστημονικό ενδιαφέρον για σωματίδια μαγνητικών υλικών σε μικρο και νανοκλίμακα, αφού σε αυτές τις διαστάσεις εμφανίζουν βελτιωμένες μαγνητικές ιδιότητες.

Μια από τις εφαρμογές που αξιοποιούν αυτές τις ιδιότητες είναι ο μαγνητικός διαχωρισμός. Αποτελεί τεχνική που χρησιμοποιεί μαγνήτες, μόνιμους ή ηλεκτρομαγνήτες, για τον επιλεκτικό διαχωρισμό μαγνητικών υλικών από μη-μαγνητικά υλικά. Κατηγοριοποιείται σύμφωνα με την βάρθρωση του μαγνητικού πεδίου, σε μαγνητικό διαχωρισμό υψηλής (High-Gradient Magnetic Separation - HGMS) και χαμηλής βάρθρωσης (Low-Gradient Magnetic Separation - LGMS). Εφαρμόζεται σε διάφορα ερευνητικά πεδία, όπως καθαρισμός υδάτων, αφαίρεση επικίνδυνων ρύπων, διαχωρισμός κυττάρων και στοχευμένη παράδοση φαρμάκων, τα οποία θα αναλυθούν στην συνέχεια.

Σκοπός εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την ανάπτυξη και μελέτη ενός συστήματος μαγνητικού διαχωρισμού συνεχούς ροής το οποίο χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνήτες ελεγχόμενης έντασης μαγνητικού πεδίου. Το σύστημα διαχωρίζει οποιοδήποτε σωματίδιο μπορεί να συλληφθεί μαγνητικά. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε διάλυμα με νερό και σωματίδια μαγνητίτη.

Στα πλαίσια μεταπτυχιακών και διδακτορικών εργασιών του εργαστηρίου διεξήχθησαν ορι-

σμένες μελέτες που ασχολήθηκαν με το εν λόγω αντικείμενο, . Αναπτύχθηκαν δύο συστήματα LGMS, το πρώτο διαχωρίζει μαγνητικά τροποποιημένα μικροφύκη και το δεύτερο διαχωρίζει σωματίδια μαγνητίτη σε συνεχή ροή. Και τα δύο θα αναλυθούν στην συνέχεια.

Μετά από βιβλιογραφική έρευνα, παρατηρήθηκε ότι τα ήδη υπάρχοντα συστήματα επιδεικνύουν αξιολογικά αποτελέσματα. Στόχος, λοιπόν, είναι η νέα διάταξη να διαφοροποιηθεί και να συνεισφέρει περαιτέρω στον τομέα.

Δομή εργασίας

Η εργασία αποτελείται από την εισαγωγή και τρία βασικά μέρη, ακολουθούμενα από τη βιβλιογραφία και το παράρτημα. Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή στην οποία αναφέρονται το αντικείμενο με το οποίο πραγματεύεται η εργασία, ο σκοπός και οι στόχοι της, καθώς και μία συνοπτική αναφορά στην δομή που ακολουθήθηκε.

Το 1^ο Μέρος περιέχει το αναγκαίο θεωρητικό υπόβαθρο για την πλήρη κατανόηση ολόκληρης της εργασίας. Αρχικά, αναλύονται οι βασικές έννοιες που αφορούν την θεωρία μαγνητισμού: η μαγνητοστατική, τα μαγνητικά υλικά και τα μαγνητικά κυκλώματα. Στη συνέχεια, αναλύεται το φαινόμενο του μαγνητικού διαχωρισμού: οι κατηγορίες, οι δυνάμεις που ασκούνται και τα φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την διαδικασία και μια βιβλιογραφική έρευνα για τα υπάρχοντα συστήματα. Τέλος, δίνονται κάποιοι χρήσιμοι ορισμοί από την θεωρία ρευστών: βασικές ιδιότητες των ρευστών και τα είδη ροής.

Το 2^ο Μέρος αποτελεί το πειραματικό μέρος, το οποίο χωρίζεται στην πειραματική διάταξη και στην προσομοίωση του ηλεκτρομαγνήτη. Για το πείραμα, εξηγείται η πορεία που ακολουθήθηκε, αναφέρονται τα υλικά που επιλέχθηκαν και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, περιγράφονται οι προτεινόμενες διατάξεις και δίνονται τα αποτελέσματα και ο σχολιασμός τους. Όσον αφορά την προσομοίωση, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τέσσερις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν και δίνονται τα αποτελέσματα και ο σχολιασμός τους.

Το 3^ο Μέρος περιλαμβάνει τον επίλογο, στον οποίο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την διεξαγωγή των πειραμάτων και προτείνονται πιθανές μελλοντικές εργασίες και βελτιώσεις.

Τέλος, ακολουθεί η βιβλιογραφία με όλες τις πηγές που αναφέρονται στην εργασία και το παράρτημα με τους κώδικες προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν.

Μέρος Ι

Θεωρητικό Μέρος

Κεφάλαιο 1

Θεωρία μαγνητισμού

1.1 Μαγνητοστατική

1.1.1 Μαγνητική διπολική ροπή

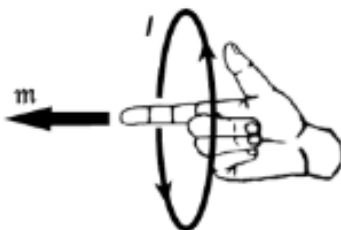
Η στοιχειώδης ποσότητα στο μαγνητισμό είναι η μαγνητική διπολική ροπή (m). Σε ατομικό επίπεδο, οι εγγενείς μαγνητικές ροπές σχετίζονται με το σπιν των ηλεκτρονίων και με την περιστροφή τους γύρω από τον πυρήνα. Αυτές οι ροπές προστίθενται με μεθόδους που καθορίζονται από τους νόμους της κβαντικής φυσικής. Ωστόσο τείνουν να αλληλοαναιρευθούν όταν δεν επιβάλλεται μαγνητικό πεδίο στο υλικό, όπως θα δούμε στην συνέχεια για τα παραμαγνητικά υλικά.

Στον κλασικό ηλεκτρομαγνητισμό, η μαγνητική ροπή μπορεί να υπολογισθεί έχοντας υπόψη μας ένα στοιχειώδη βρόχο ηλεκτρικού ρεύματος. Αν ο βρόχος έχει εμβαδόν dA και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I τότε:

$$dm = IdA \quad (1.1.1)$$

Η κατεύθυνση της μαγνητικής ροπής δίνεται από τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία (Σχήμα 1.1.1). Η συνολική μαγνητική ροπή για βρόχο πεπερασμένου μεγέθους δίνεται από τη σχέση:

$$m = \int dm = I \int dA \quad (1.1.2)$$

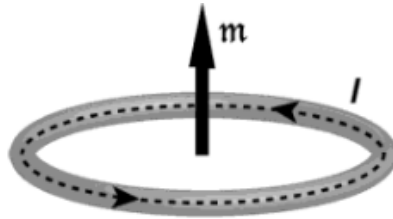


Σχήμα 1.1.1: Κανόνας δεξιόστροφου κοχλία [1]

Σύμφωνα με τον Ampere, ένας μαγνήτης ισοδυναμεί με κυκλικά κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο. Η στοιχειώδης μαγνητική ροπή m μπορεί να υπολογισθεί έχοντας υπόψη ένα στοιχειώδη βρόχο ηλεκτρικού ρεύματος. Αν ο βρόχος έχει εμβαδόν A και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I τότε:

$$m = IA \quad (1.1.3)$$

Βασική προϋπόθεση είναι το ρεύμα να ρέει στο ίδιο επίπεδο με τον βρόχο, ανεξαρτήτως σχήματος βρόχου. Η μονάδα μέτρησης είναι τα $A \cdot m^2$ και οι διευθύνσεις ροπής και ρεύματος καθορίζονται από τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλίου. [1]



Σχήμα 1.1.2: Μαγνητικό δίπολο ισοδύναμο με βρόχο ρεύματος [1]

1.1.2 Νόμος Biot-Savart

Ένα στοιχειώδες τμήμα ενός αγωγού, ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα I , παράγει μαγνητικό πεδίο σε σημείο A του χώρου που απέχει απόσταση r από τον αγωγό, και δίνεται από τον νόμο Biot-Savart [1] [2] :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} I d\vec{l} \times \hat{r} \quad (1.1.4)$$

όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, r η ακτινική απόσταση από τον αγωγό, \hat{r} το μοναδιαίο διάνυσμα στην ακτινική διεύθυνση, I η ένταση του ρεύματος, l το μήκος του στοιχειώδους τμήματος. Ο νόμος των Biot-Savart αποτελεί θεμελιώδη νόμο της μαγνητοστατικής και διαδραματίζει ρόλο ανάλογο του νόμου του Coulomb για την ηλεκτροστατική.

Με ολοκλήρωση της εξίσωσης 1.1.4 σε όλα τα τμήματα dl που διαρρέονται από ρεύμα, προκύπτει το συνολικό μαγνητικό πεδίο \vec{B} :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (1.1.5)$$

Το μαγνητικό πεδίο ενός βρόχου ρεύματος ακτίνας α δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\alpha} \quad (1.1.6)$$

Για πηνίο N σπειρών, η εξίσωση 1.1.6 γίνεται:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 IN}{2\alpha} \quad (1.1.7)$$

Όπως φαίνεται από την προηγούμενη εξίσωση, το πεδίο που παράγεται από ένα πηνίο είναι ευθέως ανάλογο του αριθμού στροφών N του σύρματος και του ρεύματος I που το διαρρέει. Το πηνίο παρουσιάζει ωμική αντίσταση η οποία αποτελεί εμπόδιο στη διέλευση του ρεύματος και κατά συνέπεια αυξάνεται η θερμοκρασία του εξαιτίας του φαινομένου Joule. Για την αποφυγή ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών στο πηνίο, πρέπει να γίνει επιλογή κατάλληλης διατομής σύρματος ανάλογα και με το επιθυμητό πεδίο. Ο υπολογισμός της ωμικής αντίστασης γίνεται μέσω της σχέσης:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1.1.8)$$

όπου R η αντίσταση σε Ohm, N ο συνολικός αριθμός περιελίξεων, L το συνολικό μήκος σε m, A η επιφάνεια διατομής και s η διατομή του σύρματος σε m.

Από τις εξισώσεις:

$$N = nl; \quad L = 2\pi RN = 2\pi nlR; \quad A = \pi \frac{d^2}{4} \quad (1.1.9)$$

προκύπτει τελικά η σχέση:

$$R = \frac{8NR\rho}{d^2} \quad (1.1.10)$$

Στις εξισώσεις 1.1.6 και 1.1.7, η τιμή του πεδίου υπολογίζεται στο κέντρο του βρόχου. Για οποιοδήποτε σημείο του χώρου προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις, σε πολικές συντεταγμένες [1]:

$$B_r = 2 \left(\frac{\mu_0 m}{4\pi r^2} \right) \cos \theta; \quad B_\theta = \left(\frac{\mu_0 m}{4\pi r^2} \right) \sin \theta; \quad B_\phi = 0 \quad (1.1.11)$$

όπου το μαγνητικό δίπολο m υπολογίζεται από την εξίσωση 1.1.3.

1.1.3 Μαγνητικό πεδίο

Μαγνήτιση καλείται η πυκνότητα των προσανατολισμένων μαγνητικών διπολικών ροπών στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Εξαρτάται από τις επιμέρους μαγνητικές ροπές των ιόντων, ατόμων ή μορίων και από τον τρόπο που αυτές αλληλεπιδρούν. Όταν οι διευθύνσεις τους είναι τυχαία κατανεμημένες στο υλικό αλληλοαναιρούνται και δίνουν μηδενική μαγνήτιση. Όταν όλες παραλληλίζονται σε μια διεύθυνση, η μαγνήτιση δεν μπορεί να μεγαλώσει περισσότερο και ονομάζεται μαγνήτιση κόρου M_S . [1] [2] [3]

Η μαγνήτιση \vec{M} υπολογίζεται ως η μαγνητική ροπή \vec{m} ανά μονάδα όγκου V , από την σχέση:

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \quad (1.1.12)$$

και έχει μονάδα μέτρησης το A/m.

Η μαγνητική επαγωγή B ορίζεται ως η απόκριση ενός υλικού στην επιβολή εξωτερικού μα-

γνητικού πεδίου. Δίνεται από την σχέση:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.1.13)$$

όπου μ_0 η διαπερατότητα του κενού και \vec{H} η ένταση μαγνητικού πεδίου.

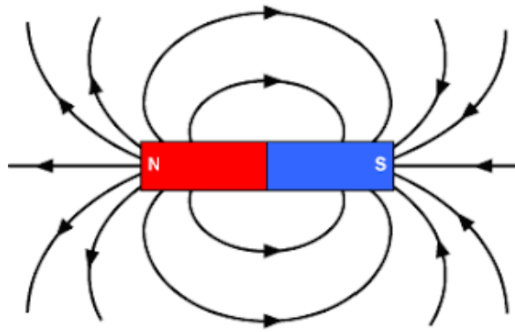
Μονάδα μέτρησης του \vec{B} είναι το Tesla (T) ή Wb/m^2 . Ο όρος $\mu_0\vec{H}$ εκφράζει την μαγνητική επαγωγή που δημιουργείται στο κενό και ο όρος $\mu_0\vec{M}$ την πρόσθετη επαγωγή που συνεισφέρεται από την παρουσία του μαγνητικού υλικού. Εκτός του υλικού όπου $\vec{M} = 0$ ισχύει η σχέση:

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H} \quad (1.1.14)$$

δηλαδή τα πεδία \vec{B} και \vec{H} ταυτίζονται αλλά έχουν διαφορετική μονάδα μέτρησης. [3]

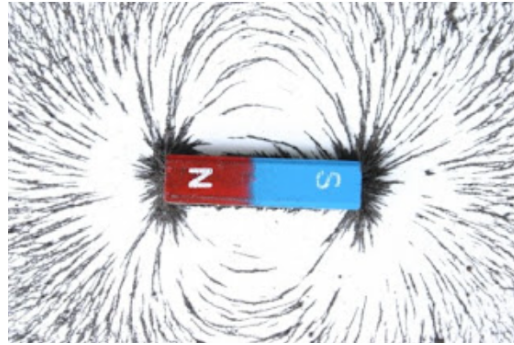
Εναλλακτικό όνομα για το πεδίο B είναι *πυκνότητα μαγνητικής ροής*. Πηγές του πεδίου B είναι ηλεκτρικά ρεύματα που ρέουν σε αγωγούς, κινούμενα φορτία και μαγνητικές ροπές ισοδύναμες με βρόχους ρεύματος. [1]

Η μορφή του πεδίου εκφράζεται μέσω νοητών μαγνητικών γραμμών. Οι γραμμές αυτές σχηματίζουν κλειστές διαδρομές εντός και εκτός του υλικού, δεν τέμνονται και ακολουθούν την κατεύθυνση της συνολικής μαγνήτισης. Ξεκινούν πάντα από τον βόρειο μαγνητικό πόλο (N) και καταλήγουν στον νότιο μαγνητικό πόλο (S). Όσο περισσότερες είναι οι γραμμές που διέρχονται από ένα σημείο, δηλαδή όσο πιο πυκνές, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ένταση του πεδίου (Εικόνα 1.1.3).



Σχήμα 1.1.3: Δυναμικές γραμμές μαγνητικού πεδίου [4]

Για παράδειγμα, στο σχήμα 1.1.4 φαίνεται ένας μόνιμος μαγνήτης γύρω από τον οποίο έχουν σχηματιστεί γραμμές από ρινίσματα σιδήρου. Αυτό συνέβη διότι τα ρινίσματα μαγνητίστηκαν και διατάχθηκαν γραμμικά διαγράφοντας έτσι την πορεία των μαγνητικών δυναμικών γραμμών που δημιουργεί ο μαγνήτης. [4]



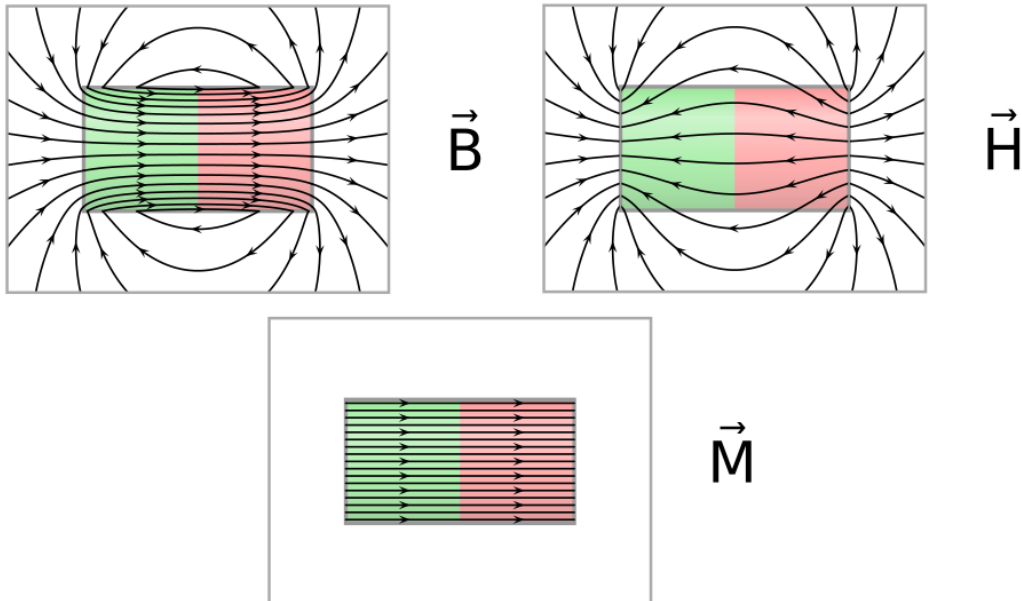
Σχήμα 1.1.4: Μόνιμος μαγνήτης με διατεταγμένα ριζίσματα σιδήρου στη θέση των μαγνητικών δυναμικών γραμμών [4]

Σε μηδενικό εξωτερικό πεδίο, ένα μαγνητισμένο σώμα παράγει πεδίο που μπορεί να υπολογιστεί ως $\nabla \vec{H} = -\nabla \vec{M}$. Παράδειγμα τέτοιου πεδίου είναι το απομαγνητίζον πεδίο H_d που αναπτύσσεται μέσα σε κάθε μαγνητισμένο σώμα και δίνεται από την σχέση [3]:

$$H_d = -N \cdot M \quad (1.1.15)$$

όπου N ένας αδιάστατος παράγοντας απομαγνήτισης ($0 \leq N \leq 1$), ο οποίος εξαρτάται από τη γεωμετρία του υλικού.

Στο σχήμα 1.1.5 φαίνονται συγκριτικά οι μαγνητικές γραμμές των \vec{B} , \vec{H} και \vec{M} , μέσα και έξω από έναν κυλινδρικό μόνιμο μαγνήτη.



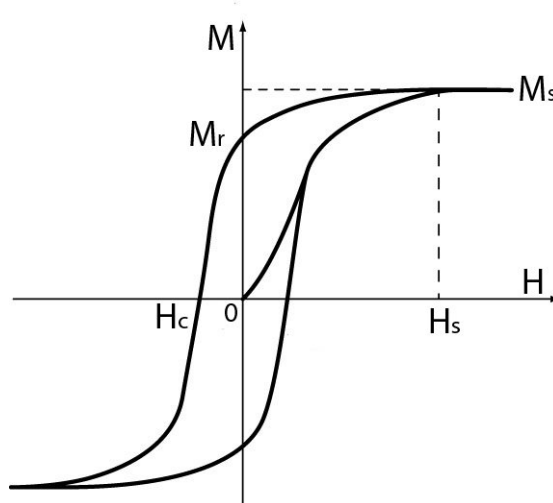
Σχήμα 1.1.5: Σύγκριση μαγνητικών γραμμών πεδίων B , H και M σε έναν κυλινδρικό μόνιμο μαγνήτη (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFpt_magnets_BHM.svg)

1.1.4 Βρόχος υστέρησης

Ο βρόχος υστέρησης αποτελεί θεμελιώδη χαρακτηριστικό των μαγνητικών υλικών. Συγκεκριμένα των σιδηρομαγνητικών και των σιδηριμαγνητικών, τα οποία αναφέρονται στην ενότητα 1.2.4. Παριστάνει την συνάρτηση $M(H)$ και εκφράζει την μη γραμμική, μη αντιστρεπτή και μη μονότιμη σχέση μεταξύ των ποσοτήτων M και H , η οποία εξαρτάται και από το ιστορικό μαγνήτισης του δείγματος.

Έστω ένα θερμικά απομαγνητισμένο δείγμα, δηλαδή χωρίς ιστορικό μαγνήτισης ($M=0$, $H=0$). Εφαρμόζοντας εξωτερικό μαγνητικό πεδίο σχηματίζεται η λεγόμενη *καμπύλη αρχικής μαγνήτισης*. Στο τελικό σημείο αυτής της καμπύλης, το δείγμα είναι πλήρως μαγνητισμένο, δηλαδή παρατηρείται η *μαγνήτιση κόρου ή αυτόματη μαγνήτιση* M_s (saturation magnetization). Με μείωση του πεδίου έως την τιμή μηδέν, παρατηρείται μη μηδενική μαγνήτιση η οποία ονομάζεται *παρामीνουσα μαγνήτιση* M_r (remanent magnetization). Με αντιστροφή του πεδίου, η μαγνήτιση μειώνεται σταδιακά και το σημείο στο οποίο μηδενίζεται ονομάζεται *συνεκτικό πεδίο* H_c (coercive field).

Στο σχήμα 1.1.6 φαίνεται η καμπύλη βρόχου υστέρησης για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, στην οποία σημειώνονται τα μεγέθη που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 1.1.6: Βρόχος υστέρησης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού (https://www.researchgate.net/figure/Schematic-showing-magnetic-hysteresis-loop-of-a-ferromagnetic-material_fig1_330210801)

Συνήθως σε μόνιμους μαγνήτες χρησιμοποιείται η καμπύλη $B(H)$ ως βρόχος υστέρησης γιατί σχετίζεται πιο άμεσα με την ενέργεια του μαγνητικού πεδίου που μπορεί να παράγει ο μόνιμος μαγνήτης. Ωστόσο δεν φτάνει στον κορεσμό, αφού σύμφωνα με την εξίσωση 1.1.13 υπάρχει πάντοτε η συνεισφορά του όρου $\mu_0 H$. [3]

Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες μπορούν να καθορίσουν αν κάποιο σιδηρομαγνητικό (ή σιδηριμαγνητικό) υλικό είναι κατάλληλο για μια

δεδομένη εφαρμογή ή όχι. Για να χαραχθεί η καμπύλη, τα M και H πρέπει να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται παραδείγματα τιμών για τα μεγέθη M_s , M_r , H_C διαφόρων μαγνητικών στοιχείων. [1] [5] [6] [7]

Πίνακας 1.1: Μεγέθη M_s , M_r , H_C σε διάφορα μαγνητικά στοιχεία

Στοιχείο	Χημικό σύμβολο	M_s (kA/m)	M_r (kA/m)	H_C (kA/m)
σίδηρος	Fe	1720	-	-
κοβάλτιο	Co	1370	-	0.8-72
νικέλιο	Ni	485	-	0.056-23
μαγνητίτης	Fe ₃ O ₄	239	-	-
κράμα κοβαλτίου-σιδήρου	Co-Fe	1910	-	-
μαγνήτης νεοδυμίου	NdFeB	-	796-1194	800-950
μαγνήτης σμαμπίου-κοβαλτίου	SmCo	-	637-923	3200

1.1.5 Εξισώσεις Maxwell

Σε αυτή την υποενότητα θα αναλυθούν οι τέσσερις εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες συνοψίζουν τις βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού. [8]

1.1.5.1 Νόμος Gauss για ηλεκτρικό πεδίο

Σύμφωνα με αυτό το νόμο, η ηλεκτρική ροή που εξέρχεται μέσω κλειστής επιφάνειας ισούται με το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που περικλείει αυτή η επιφάνεια. Δίνεται σε ολοκληρωτική μορφή από την σχέση:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV \quad (1.1.16)$$

όπου S μία κλειστή επιφάνεια, \vec{D} η πυκνότητα ηλεκτρικής ροής και ρ το ηλεκτρικό φορτίο στην περιοχή του χώρου V .

Δίνεται σε διαφορική μορφή από την σχέση:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.1.17)$$

Για την πυκνότητα ηλεκτρικής ροής D ισχύει η σχέση:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.1.18)$$

όπου ϵ_0 η ηλεκτρική επιτρεπτότητα του κενού και \vec{E} η ένταση ηλεκτρικού πεδίου.

1.1.5.2 Νόμος Gauss για μαγνητικό πεδίο

Σύμφωνα με αυτό το νόμο, η μαγνητική ροή που εξέρχεται μέσω κλειστής επιφάνειας είναι μηδέν. Δίνεται σε ολοκληρωτική μορφή από τη σχέση:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (1.1.19)$$

όπου S μία κλειστή επιφάνεια και Φ η μαγνητική ροή. Αυτό συμφωνεί με προηγούμενη αναφορά ότι οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι κλειστές.

Δίνεται σε διαφορική μορφή από την σχέση:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.1.20)$$

1.1.5.3 Νόμος Maxwell-Faraday ή Νόμος της επαγωγής

Σύμφωνα με αυτό το νόμο, η ηλεκτρεγερτική δύναμη κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής, που περνά μέσα από μια επιφάνεια που ορίζει η διαδρομή αυτή. Δηλαδή η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής παράγει ηλεκτρικό πεδίο. Δίνεται σε ολοκληρωτική μορφή από τη σχέση:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \Phi_B \quad (1.1.21)$$

όπου C κλειστή διαδρομή που ορίζει την επιφάνεια S και Φ_B υπολογίζεται από την εξίσωση 1.1.19.

Δίνεται σε διαφορική μορφή από την σχέση:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1.22)$$

Η φυσική ερμηνεία του νόμου επαγωγής είναι ότι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ένα χωρικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

1.1.5.4 Νόμος Ampere-Maxwell

Σύμφωνα με αυτό το νόμο, η μαγνητεγερτική δύναμη κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής C που ορίζει μία ανοικτή επιφάνεια S ισούται με το άθροισμα του ρεύματος που περνά την S και του ρυθμού μεταβολής της ηλεκτρικής ροής μέσω της S . Δίνεται σε ολοκληρωτική μορφή από τη σχέση:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \int_S \vec{D} d\vec{S} \quad (1.1.23)$$

όπου ο δεύτερος όρος ονομάζεται *ρεύμα μετατόπισης*.

Δίνεται σε διαφορική μορφή από την σχέση:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.1.24)$$

όπου ο δεύτερος όρος ονομάζεται *πυκνότητα του ρεύματος μετατόπισης*.

Επομένως, ο νόμος Ampere-Maxwell συνδέει το μαγνητικό πεδίο με το ηλεκτρικό πεδίο και την πυκνότητα ρεύματος.

1.2 Μαγνητικά Υλικά

1.2.1 Γενικά

Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 1.1.4, ο βρόχος υστέρησης αποτελεί βασικό γνώρισμα των μαγνητικών υλικών. Επομένως, με βάση το συνεκτικό πεδίο μπορούμε να διαχωρίσουμε τα υλικά σε “μαλακά” και “σκληρά” μαγνητικά υλικά. Αυτή η διάκριση εξετάζεται στην συνέχεια και δεν αναφέρεται στην μηχανική σκληρότητα. [3]

Μαλακά μαγνητικά υλικά

Αυτά τα υλικά έχουν συνεκτικό πεδίο μικρότερο από 1kA/m και χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή μαγνητική επιδεκτικότητα. Έχουν δηλαδή πολύ στενούς βρόχους υστέρησης. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να παράξουν πεδία πολλαπλάσια ενός ασθενούς εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Όταν το πεδίο αφαιρεθεί, απομαγνητίζονται πολύ εύκολα.

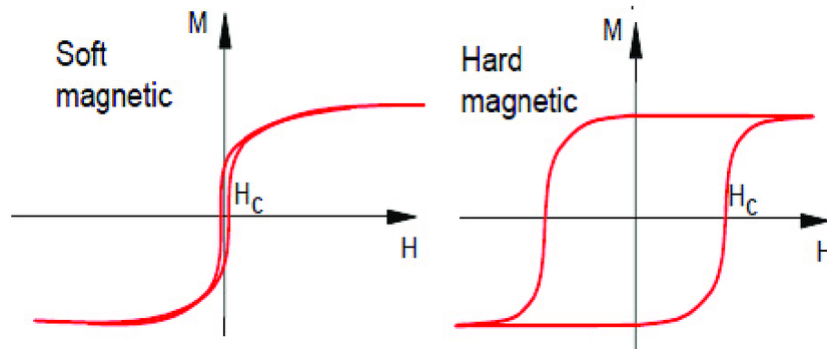
Επίσης, λόγω υψηλής επιδεκτικότητας, είναι ικανά να οδηγήσουν μαγνητική ροή κατά μήκος τους. Έτσι χρησιμοποιούνται ως πυρήνες μετασχηματιστών, σε ηλεκτρομαγνήτες, ως αισθητήρες σε κεφαλές ανάγνωσης/εγγραφής και σε συγκεντρωτές ροής. Σε συγκεκριμένες εφαρμογές είναι σημαντικό να υπάρχουν χαμηλές απώλειες λόγω επαγωγικών ρευμάτων και υστέρησης και χαμηλές ακουστικές απώλειες λόγω του μαγνητοσυστολικού φαινομένου.

Μερικά παραδείγματα είναι οι πυριτικοί χάλυβες (Fe-Si), τα κράματα νικελίου-σιδήρου (Ni-Fe) και τα κράματα σιδήρου-κοβαλτίου (Fe-Co).

Σκληρά μαγνητικά υλικά

Αυτά τα υλικά έχουν συνεκτικό πεδίο μεγαλύτερο από 200kA/m και χαρακτηρίζονται από υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση. Αποτελούν μόνιμους μαγνήτες, δηλαδή όταν μαγνητιστούν για πρώτη φορά φτάνουν στον κόρο και όταν αφαιρεθεί το εξωτερικό πεδίο παραμένουν στην μαγνητισμένη κατάσταση. Ο βρόχος υστέρησης είναι πολύ φαρδύς και τετραγωνικός. Χρησιμοποιούνται για να παράξουν μαγνητικό πεδίο σε συγκεκριμένες διατάξεις όπως κινητήρες, γεννήτριες και ηχεία.

Μερικά παραδείγματα είναι ο χάλυβας, το Alnico (κράμα Al-Ni-Co) και τα κράματα σπάνιων γαιών (NdFeB, SmCo⁵).



Σχήμα 1.2.1: Βρόχος υστέρησης για μαλακά και σκληρά μαγνητικά υλικά (https://www.researchgate.net/figure/Hysteresis-curve-of-soft-hard-magnetic-materials-1_fig1_282536413)

Στην συνέχεια εισάγονται οι έννοιες της μαγνητικής διαπερατότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Επίσης, παρουσιάζεται μία διαφορετική κατηγοριοποίηση των μαγνητικών υλικών βασισμένη στην απόκριση που έχουν σε εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Τέλος, εξετάζονται οι θερμοκρασίες Curie και Neel.

1.2.2 Μαγνητική διαπερατότητα

Η *μαγνητική διαπερατότητα* μ ορίζεται ως ο λόγος της μαγνητικής επαγωγής προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο του χώρου:

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} \quad (1.2.1)$$

Μονάδα μέτρησης είναι τα H/m (Henries/meter). Είναι διαφορετική για κάθε υλικό και καθορίζει πόσο εύκολα ή δύσκολα οι μαγνητικές γραμμές διαπερνούν ένα υλικό. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ισούται με $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ H/m}$.

Στον πίνακα 1.2 δίνονται οι τιμές διαπερατότητας για διάφορα μαγνητικά υλικά. [9]

Πίνακας 1.2: Μαγνητική διαπερατότητα για διάφορα υλικά

Υλικό	Χημικό σύμβολο	μ (H/m)
σίδηρος (καθαρότητας 99.8%)	Fe	6.3×10^{-3}
νικέλιο	Ni	$1.26 \times 10^{-4} - 7.54 \times 10^{-4}$
χαλκός	Cu	1.256629×10^{-6}
λευκόχρυσος	Pt	1.256970×10^{-6}
αλουμίνιο	Al	1.256665×10^{-6}
μαγνήτης νεοδυμίου	Nd	1.32×10^{-6}
νερό	H ₂ O	1.256627×10^{-6}

1.2.3 Μαγνητική επιδεκτικότητα

Η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αδιάστατο μέγεθος και ορίζεται ως:

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (1.2.2)$$

Αποκλίνει καθώς η θερμοκρασία τείνει να λάβει την τιμή T_C - θερμοκρασία Curie. Για θερμοκρασίες πάνω από την T_C , το υλικό περνάει σε παραμαγνητική φάση και έτσι οι μαγνητικές ροπές υπόκεινται σε τυχαίες θερμικές διακυμάνσεις. Ένα εφαρμοζόμενο πεδίο μπορεί να επάγει κάποια ευθυγράμμιση των ροπών, παρ' όλο που η μαγνήτιση κόρου είναι μηδέν. Επομένως, υπάρχει μικρή μαγνήτιση M η οποία μεταβάλλεται γραμμικά με το H , εκτός από πολύ μεγάλα πεδία ή πολύ κοντά στο σημείο Curie.

Για $T > T_C$, η επιδεκτικότητα ακολουθεί τον νόμο Curie-Weiss:

$$\chi = \frac{C}{T - \theta} \quad (1.2.3)$$

όπου C η σταθερά Curie (της τάξης του 1 Kelvin) και η σταθερά $\theta \approx T_C$.

Για τα παραμαγνητικά υλικά, η επιδεκτικότητα ακολουθεί τον νόμο Curie:

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (1.2.4)$$

Στον πίνακα 1.3 δίνονται οι τιμές επιδεκτικότητας για διάφορα μαγνητικά υλικά. [10]

Πίνακας 1.3: Μαγνητική επιδεκτικότητα για διάφορα υλικά

Υλικό	Χημικό σύμβολο	χ
σίδηρος	Fe	200000
νικέλιο	Ni	600
χαλκός	Cu	-9.63×10^{-6}
άργυρος	Ag	-2.31×10^{-5}
αλουμίνιο	Al	2.2×10^{-5}
νερό	H ₂ O	-9.035×10^{-6}

Η επιδεκτικότητα συνδέεται με την διαπερατότητα μέσω της σχέσης:

$$\mu = \mu_0(1 + \chi) \quad (1.2.5)$$

1.2.4 Μαγνητική τάξη

Η βασική κατηγοριοποίηση των μαγνητικών υλικών γίνεται σύμφωνα με την απόκριση που έχουν σε εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Δηλαδή προκύπτουν διαφορετικά είδη μαγνητικής τάξης. Οι κατηγορίες είναι οι εξής: [1] [2] [3] [11] [12]

1. διαμαγνητικά
2. παραμαγνητικά
3. σιδηρομαγνητικά (ή φερρομαγνητικά)
4. αντισιδηρομαγνητικά (ή αντιφερρομαγνητικά)
5. σιδηριμαγνητικά (ή φερριμαγνητικά)

Τα διαμαγνητικά και παραμαγνητικά αποτελούν μαλακά μαγνητικά υλικά. Ενώ τα σιδηρομαγνητικά, αντισιδηρομαγνητικά και σιδηριμαγνητικά αποτελούν σκληρά μαγνητικά υλικά.

Στο σχήμα 1.2.2 παρουσιάζεται ο περιοδικός πίνακας και η ταξινόμηση των στοιχείων του στις προηγούμενες κατηγορίες (εξαιρούνται τα σιδηρομαγνητικά):

1 H																	2 He						
		Ferromagnetic		Antiferromagnetic				Paramagnetic		Diamagnetic													
3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr	88 Ra	89 Ac																					
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu							

Σχήμα 1.2.2: Περιοδικός πίνακας, τα χημικά στοιχεία είναι χρωματισμένα ανάλογα με την κατηγορία μαγνητισμού στην οποία εμπίπτουν σε θερμοκρασία δωματίου (https://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/magnetic-materials-background-4-classification-of-magnetic-materials_2.pdf)

1.2.4.1 Διαμαγνητισμός

Ο διαμαγνητισμός αποτελεί ασθενή μορφή μαγνήτισης η οποία αποδίδεται στην τροχιακή κίνηση των ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια εντοπίζονται σε ζεύγη και έτσι οι μαγνητικές ροπές αλληλοαναιρούνται. Δηλαδή τα υλικά αυτά δεν παρουσιάζουν μόνιμη μαγνητική ροπή. Με εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, τα τροχιακά των ηλεκτρονίων αλλάζουν προσανατολισμό σύμφωνα με τον Νόμο του Lenz ώστε η συνολική ροπή τους να έχει αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του επιβαλλόμενου πεδίου. Τα διαμαγνητικά υλικά παρουσιάζουν αρνητική ($\chi < 0$) και

πολύ ασθενή επιδεικτικότητα μεταξύ -10^{-6} και -10^{-5} και διαπερατότητα θετική και ελάχιστα μικρότερη της μονάδας ($\mu < 1$).



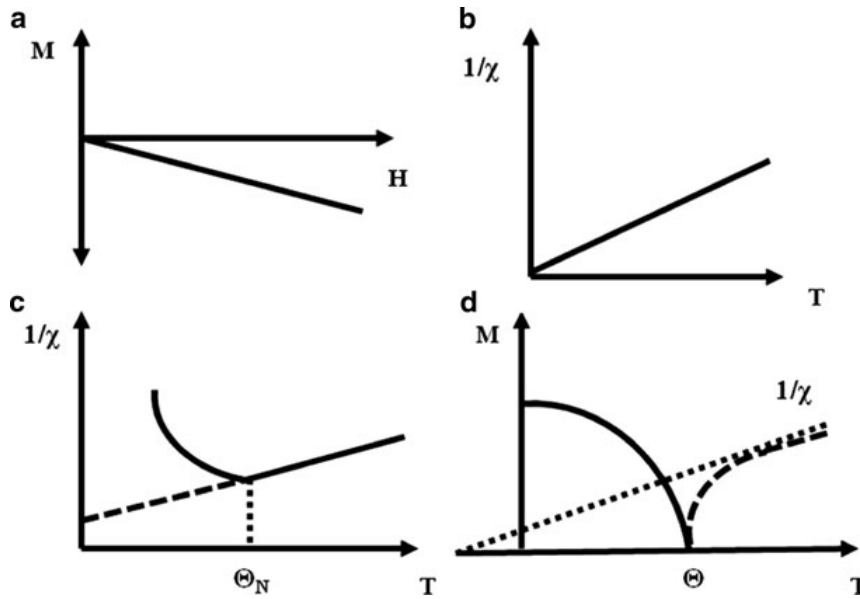
(α') χρυσός (Au)



(β') χαλκός (Cu)

Σχήμα 1.2.3: Παραδείγματα διαμαγνητικών στοιχείων (<https://en.wikipedia.org/wiki/Gold>, <https://en.wikipedia.org/wiki/Copper>)

Στο σχήμα 1.2.4(a) φαίνεται η σχέση μεταξύ μαγνήτισης και εξωτερικού μαγνητικού πεδίου σε ένα διαμαγνητικό υλικό.



Σχήμα 1.2.4: Εξάρτηση υλικών από θερμοκρασία και σχέση θερμοκρασίας-μαγνήτισης (a) Γραμμική σχέση μεταξύ μαγνήτισης και εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου, (b) Εξάρτηση παραμαγνητικών υλικών από θερμοκρασία, (c) Εξάρτηση αντισιδηρομαγνητικών υλικών από θερμοκρασία, (d) Σχέση μαγνήτισης και θερμοκρασίας σε σιδηρομαγνητικά υλικά

1.2.4.2 Παραμαγνητισμός

Τα παραμαγνητικά υλικά αποτελούνται από άτομα με διπολικές μαγνητικές ροπές οι οποίες δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, είναι τυχαία προσανατολισμένες στον χώρο, ανεξάρτητα η μία

από την άλλη. Δηλαδή τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μόνιμη μαγνητική ροπή. Με εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, εμφανίζεται μαγνήτιση παράλληλη στο πεδίο και παραμένει θετική, σε αντίθεση με τον διαμαγνητισμό.

Τα παραμαγνητικά υλικά παρουσιάζουν θετική επιδεκτικότητα ($\chi > 0$), πολύ μικρή μεταξύ $10^{-5} - 10^{-3}$ και αντιστρόφως ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας T , σύμφωνα με τον Νόμο Curie (βλ. εξίσωση 1.2.4). Η διαπερατότητα είναι ελάχιστα μεγαλύτερη της μονάδας ($\mu > 1$). Επομένως, τα παραμαγνητικά υλικά χρειάζονται πολύ μεγάλα πεδία για τον προσανατολισμό των ροπών και εξαρτώνται από την θερμοκρασία. Αυτή η εξάρτηση φαίνεται στο σχήμα 1.2.4(b).



(α') λευκόχρυσος (Pt)



(β') μαγνήσιο (Mg)

Σχήμα 1.2.5: Παραδείγματα παραμαγνητικών στοιχείων
(<https://en.wikipedia.org/wiki/Platinum>, <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnesium>)

1.2.4.3 Σιδηρομαγνητισμός

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, τα γειτονικά άτομα αλληλεπιδρούν με θετικές αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής που ευνοούν τον παράλληλο προσανατολισμό των μαγνητικών ροπών και έτσι προκύπτει αυθόρμητη μαγνήτιση χωρίς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Τα υλικά αυτά πλησιάζουν τον μαγνητικό κορεσμό όσο αυξάνεται το πεδίο που σημαίνει ότι η μαγνήτιση τους έχει πεπερασμένο όριο. Συγκεκριμένα διατηρείται μέχρι μια κρίσιμη θερμοκρασία T_C , πάνω από την οποία το υλικό περνάει σε παραμαγνητική φάση που χαρακτηρίζεται από το Νόμο Curie-Weiss (βλ. εξίσωση 1.2.3). Η διαφορά από τον απλό Νόμο Curie είναι ότι πάνω από την θερμοκρασία Curie οι αλληλεπιδράσεις δεν σταματούν να υπάρχουν, απλά υπερσχύει η θερμική ενέργεια.

Ισχυρά σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν επιδεκτικότητα της τάξης των 10^6 . Η διαπερατότητα ωστόσο εξαρτάται από την δύναμη του πεδίου και από το ιστορικό μαγνήτισης, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα (βλ.1.1.4) και είναι πολύ μεγαλύτερη της μονάδας ($\mu \gg 1$).

Στο σχήμα 1.2.7 φαίνεται η συμπεριφορά των μαγνητικών γραμμών όταν υλικά διαφορετικής μαγνητικής τάξης τοποθετούνται σε ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο. Οι μαγνητικές γραμμές αλλάζουν σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν πιο πάνω.



(α') σίδηρος (Fe)



(β') κοβάλτιο (Cb)



(γ') νικέλιο (Ni)



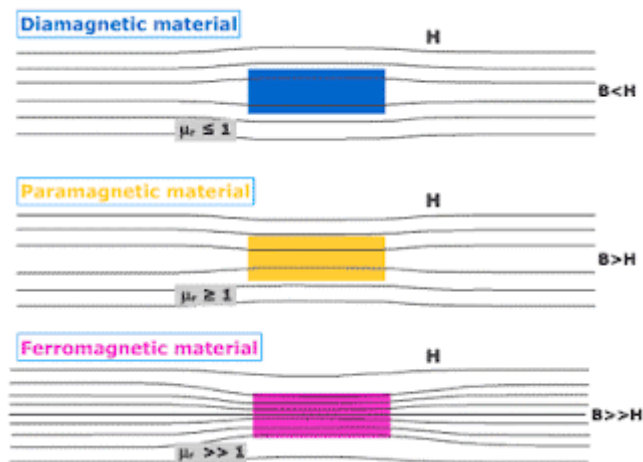
(δ') γαδολίνιο (Gd)

Σχήμα 1.2.6: Παραδείγματα σιδηρομαγνητικών στοιχείων

(<https://en.wikipedia.org/wiki/Iron>,

<https://en.wikipedia.org/wiki/Cobalt>,

<https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel>, <https://en.wikipedia.org/wiki/Gadolinium>)



Σχήμα 1.2.7: Συμπεριφορά μαγνητικών γραμμών για υλικά διαφορετικής μαγνητικής τάξης (<http://poozacreations.blogspot.com/2012/04/magnetic-materials.html>)

1.2.4.4 Αντισιδηρομαγνητικά

Στα αντισιδηρομαγνητικά υλικά, τα γειτονικά άτομα συνδέονται με αρνητικές αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής που ευνοούν ενεργειακά μια κατάσταση στην οποία το κάθε σπιν έχει γύρω του αντιπαράλληλα διατεταγμένα σπιν και έτσι δεν προκύπτει αυθόρμητη μαγνήτιση. Με άλλα λόγια, οι μαγνητικές ροπές σχηματίζουν δύο ισοδύναμα μαγνητικά υποπλέγματα με αντίθετο

προσανατολισμό. Αυτή η κατάσταση διατηρείται μέχρι μια κρίσιμη θερμοκρασία T_N (θερμοκρασία Neel), πάνω από την οποία το υλικό περνάει σε παραμαγνητική φάση που χαρακτηρίζεται από το Νόμο Curie-Weiss (βλ. 1.2.3). Τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν θετική επιδεκτικότητα ($\chi > 0$), πολύ μικρή μεταξύ $10^{-5} - 10^{-3}$ και εξαρτώμενη από την θερμοκρασία, όπως και στον παραμαγνητισμό. Όμως εδώ η εξάρτηση είναι διαφορετική, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2.4(c).



(α') χρώμιο (Cr)



(β') μαγγάνιο (Mg)

Σχήμα 1.2.8: Παραδείγματα αντισιδηρομαγνητικών στοιχείων (<https://en.wikipedia.org/wiki/Chromium>, <https://en.wikipedia.org/wiki/Manganese>)

1.2.4.5 Σιδηριμαγνητισμός

Στα σιδηριμαγνητικά υλικά, οι μαγνητικές ροπές σχηματίζουν δύο διαφορετικά υποπλέγματα με αντιπαράλληλες ροπές, ομοίως με αντισιδηρομαγνητισμό. Το ένα υπόπλεγμα είναι ισχυρότερο από το άλλο με αποτέλεσμα να υπάρχει μη μηδενική αυθόρμητη μαγνήτιση. Η κατάσταση αυτή διατηρείται για θερμοκρασίες χαμηλότερες της Curie και επιδεκτικότητας τους είναι της τάξης των 10^6 , (ομοίως με σιδηρομαγνητισμό). Επομένως, κατά κάποιο τρόπο παρουσιάζουν ομοιότητες με σιδηρο- και αντισιδηρομαγνητικά υλικά ταυτόχρονα. Η συνολική μαγνήτιση υπολογίζεται από την διαφορά των μαγνητίσεων των δύο υποπλεγμάτων. Αν υπάρχει θερμοκρασία για την οποία τα δύο υποπλέγματα έχουν ίση μαγνήτιση τότε σε αυτό το σημείο η συνολική μαγνήτιση είναι μηδέν και η θερμοκρασία ονομάζεται σημείο αντιστάθμισης. Η εξάρτηση της μαγνήτισης από την θερμοκρασία φαίνεται στο σχήμα 1.2.4(d), όπου έχουμε ένα υλικό στο οποίο υπάρχει σημείο αντιστάθμισης (σημείο Θ).

Σημειώνεται ότι τα σιδηρομαγνητικά, τα αντισιδηρομαγνητικά και τα σιδηριμαγνητικά υλικά μπορούν να θεωρηθούν ως υποκατηγορίες μιας ευρύτερης κατηγορίας, τα διατεταγμένα μαγνητικά υλικά. [2] Στο σχήμα 1.2.10 φαίνεται η μαγνητική συμπεριφορά κάθε μαγνητικής τάξης που αναφέραμε, δηλαδή τα πλέγματα μαζί με τις μαγνητικές ροπές. [12]

Τονίζεται ότι στην παρούσα εργασία δεν αναφέρονται όλα τα πιθανά είδη μαγνητικής τάξης. Ενδεικτικά επισημαίνονται η *ελικοειδή μαγνητική* και η *κεκαμμένη αντισιδηρομαγνητική*, οι οποίες αποτελούν μη συγγραμμικές διατάξεις των σπιν και προκύπτουν ως αποτέλεσμα ανταγωνιστικών ή ανισοτροπικών αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής και μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας. [3]

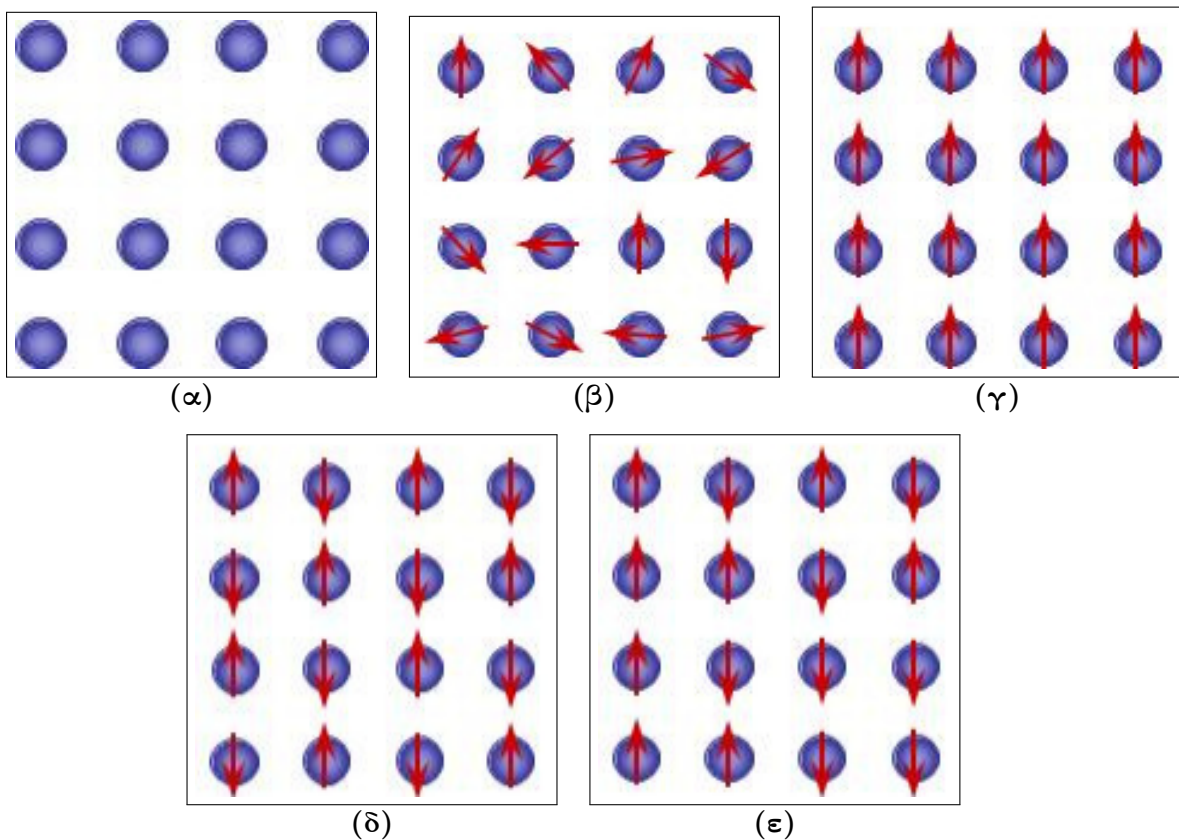


(α') μαγνητίτης (Fe_3O_4)



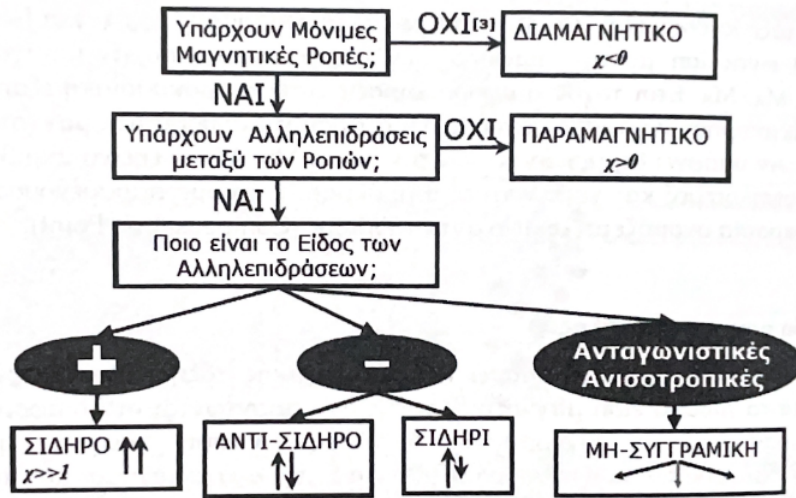
(β') μαγγεμίτης (Fe_2O_3)

Σχήμα 1.2.9: Παραδείγματα σιδηριμαγνητικών στοιχείων
 (<https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetite>, <https://en.wikipedia.org/wiki/Maghemite>)



Σχήμα 1.2.10: Μαγνητική συμπεριφορά κάθε μαγνητικής τάξης (α) διαμαγνητισμός (β) παραμαγνητισμός (γ) σιδηρομαγνητισμός (δ) αντισιδηρομαγνητισμός (ε) σιδηριμαγνητισμός

Τα είδη μαγνητικής τάξης που αναφέραμε συνοψίζονται στο σχήμα 1.2.11 σε ένα απλουστευμένο λογικό διάγραμμα.



Σχήμα 1.2.11: Σύνοψη των πιθανών μαγνητικών δομών υπό μορφή λογικού διαγράμματος [3]

1.2.5 Υπερπαραμαγνητισμός

Σε ένα υλικό, τομέας ονομάζεται ένα σύνολο ιδιοπεριστροφών με ίδια κατεύθυνση μαγνητικών ροπών που αντιδρούν με τον ίδιο τρόπο σε μαγνήτιση. Οι τομείς του υλικού χωρίζονται μεταξύ τους από τοιχώματα συγκεκριμένου πάχους και ενέργειας, τα οποία είναι χαρακτηριστικά του κάθε υλικού. Τα τοιχώματα αυτά αποτελούν εμπόδιο στη μαγνήτιση. Σε ένα μεγάλο σωματίδιο η δομή αποτελείται από πολλούς τομείς και πολλά τοιχώματα. Καθώς μειώνεται το μέγεθος ενός σωματιδίου και τείνει προς μία κρίσιμη τιμή διαμέτρου D_c τα τοιχώματα καθίστανται δυσμενή από ενεργειακή άποψη ως προς την ύπαρξή τους. Οι δομές που αποτελούνται από έναν μόνο τομέα καλούνται σωματίδια μονού τομέα. Ενδεικτικά, για το σίδηρο η κρίσιμη διάμετρος είναι 14 nm, για το μαγνητίτη 128nm και για το μαγγεμίτη 166 nm.

Για τιμές της διαμέτρου μικρότερες της κρίσιμης, τα σπιν επηρεάζονται από τις θερμικές διακυμάνσεις και τα σωματίδια παρουσιάζουν υπερπαραμαγνητισμό. Σ' αυτές τις περιπτώσεις οι θερμικές διακυμάνσεις δεν επιτρέπουν τη σταθεροποίηση της μαγνήτισης και κατά συνέπεια το H_c τείνει να μηδενιστεί.

Στον υπερπαραμαγνητισμό έχειδειχθεί πειραματικά ότι δεν υπάρχει υστέρηση στην καμπύλη μαγνήτισης και ότι σε διάφορες θερμοκρασίες οι καμπύλες μαγνήτισης υπερκαλύπτονται σε γραφήματα M συναρτήσει του H .

Ο χρόνος ηρεμίας της μαγνήτισης ενός μαγνητικού σωματιδίου δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{\Delta E}{k_B T}} \tag{1.2.6}$$

όπου ΔE ο ενεργειακός φραγμός στη μεταβολή της μαγνητικής ροπής, $k_B T$ η θερμική ενέργεια και τ_0 μεταξύ 10^{-12} - 10^{-10} s.

Για τον ενεργειακό φραγμό συνήθως ισχύει:

$$\Delta E = KV \quad (1.2.7)$$

όπου K η πυκνότητα ενέργειας της ανισοτροπίας του σχήματος και V ο όγκος του σωματιδίου

Για σωματίδια μικρού μεγέθους το ΔE είναι παραπλήσιο του $K_B T$. Ο χρόνος κατά τον οποίο το σωματίδιο παραμένει υπερπαραμαγνητικό μεταβάλλεται συναρτήσει της μαγνήτισης. [13]

1.2.6 Θερμοκρασίες Curie και Neel

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, όταν η θερμοκρασία περάσει το κρίσιμο σημείο τα σιδηρομαγνητικά υλικά χάνουν την ιδιότητα τους και περνάνε σε παραμαγνητική φάση. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται *θερμοκρασία Curie* και στον πίνακα 1.4 δίνονται κάποιες τιμές για διάφορους σιδηρομαγνήτες. [14]

Πίνακας 1.4: Θερμοκρασίες Curie σε διάφορους σιδηρομαγνήτες

Υλικό	Χημικό σύμβολο	T_C (°C)
σίδηρος	Fe	770
κοβάλτιο	Co	1130
νικέλιο	Ni	354
γαδολίνιο	Gd	19

Στον πίνακα 1.5 δίνονται κάποιες θερμοκρασίες Curie για σιδηρομαγνητικά υλικά. [14]

Πίνακας 1.5: Θερμοκρασίες Curie σε διάφορους σιδηρομαγνήτες

Υλικό	Χημικό σύμβολο	T_C (°C)
μαγνητίτης	Fe_3O_4	585
μαγγεμίτης	Fe_2O_3	675
γρανάτης υτρίου - σιδήρου	$Y_3Fe_5O_{12}$	287

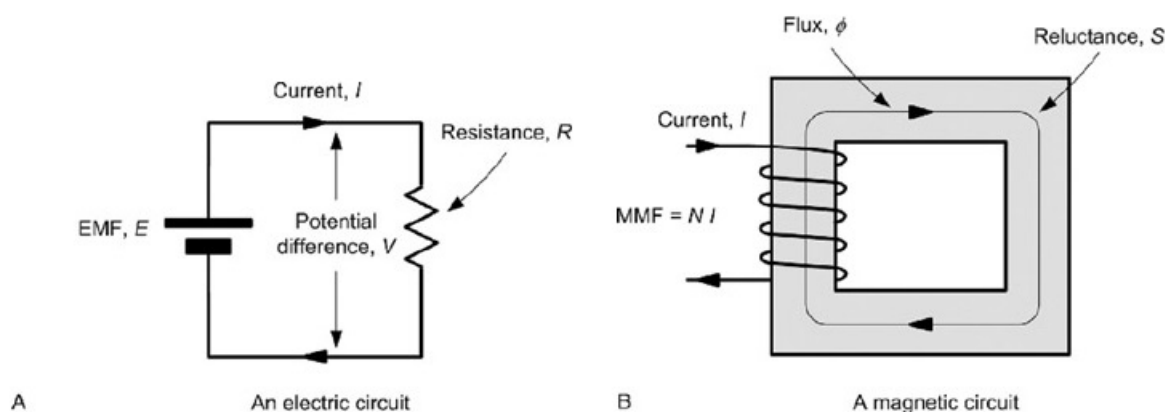
Η αντίστοιχη θερμοκρασία για τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά ονομάζεται *θερμοκρασία Neel* και στον πίνακα 1.6 δίνονται κάποιες τιμές της για διάφορους αντισιδηρομαγνήτες. [2]

Πίνακας 1.6: Θερμοκρασίες Neel σε διάφορους αντισιδηρομαγνήτες

Υλικό	Χημικό σύμβολο	T_N (°C)
χρώμιο	Cr	35
μαγγάνιο	Mn	-173
οξείδιο νικελίου	NiO	250

1.3 Μαγνητικά Κυκλώματα

Ως μαγνητικό κύκλωμα ορίζεται το σύνολο σιδηρομαγνητικών υλικών που καθοδηγούν τη μαγνητική ροή μέσα από κλειστές διαδρομές. Στο σχήμα 1.3.1 φαίνεται ένα τέτοιο μαγνητικό κύκλωμα καθώς και ένα ηλεκτρικό ανάλογο του. [15] [3]



Σχήμα 1.3.1: Μαγνητικό κύκλωμα και το ηλεκτρικό ανάλογο του [16]

Στον πίνακα 1.7 δίνονται τα μαγνητικά μεγέθη και η αντιστοίχιση τους με αυτά του ηλεκτρικού κυκλώματος.

Πίνακας 1.7: Μαγνητικά μεγέθη και τα αντίστοιχα ηλεκτρικά

Μαγνητικά μεγέθη	Σύμβολο	Μονάδες	Ηλεκτρικό ανάλογο
ροή	Φ	Wb	ρεύμα
ΜΕΔ	F_m	At	τάση
μαγνητική αντίσταση	R_m	At/Wb	αντίσταση
διαπερατοτητα	μ	Wb/Atm	συντελεστής αγωγιμότητας
μαγνητική επαγωγή	B	T	πυκνότητα ρεύματος
ένταση μαγνητικού πεδίου	H	At/m	ένταση ηλεκτρικού πεδίου

1.3.1 Μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ)

Η *μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ)* ή *διάρρευση* ορίζεται ως το γινόμενο της έντασης του ρεύματος i με τον αριθμό των σπειρών N . Το ηλεκτρικό ρεύμα αποτελεί την αιτία δημιουργίας μαγνητικής ροής γύρω από έναν αγωγό. Κατ' επέκταση, η μαγνητική ροή σ' ένα πηνίο οφείλεται στη ΜΕΔ. Δίνεται από τη σχέση:

$$F_m = Ni \quad (1.3.1)$$

και έχει μονάδα μέτρησης τις αμπεροστροφές (At).

1.3.2 Πεδίο H

Ως ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο ορίζεται η μαγνητεγερτική δύναμη ανά μονάδα μήκους της μαγνητικής γραμμής που περνά από αυτό το σημείο. Δίνεται από τη σχέση:

$$H = \frac{F_m}{l} \quad (1.3.2)$$

Στο εσωτερικό του πηνίου, κοντά στο κέντρο του, η ένταση έχει την ίδια τιμή σε κάθε σημείο και έχει μονάδα μέτρησης την αμπεροστροφή ανά μέτρο (At/m).

1.3.3 Μαγνητική αντίσταση

Η μαγνητική αντίσταση συνιστά την ιδιότητα ενός υλικού να παρουσιάζει αντίσταση στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του. Είναι ανάλογη του μήκους διαδρομής των γραμμών l , αντιστρόφως ανάλογη της μαγνητικής διαπερατότητας μ και του εμβαδού της διατομής του υλικού S . Δίνεται από τη σχέση:

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (1.3.3)$$

Οι μονάδες μέτρησης της μαγνητικής αντίστασης είναι At/Wb, ενώ η αντίστροφη ποσότητα ονομάζεται μαγνητική αγωγιμότητα και ορίζεται ως:

$$P_m = \frac{1}{R_m} \quad (1.3.4)$$

1.3.4 Μαγνητική ροή

Η μαγνητική ροή είναι ανάλογη της ΜΕΔ και αντιστρόφως ανάλογη της αντίστασης. Δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} \quad (1.3.5)$$

και μονάδες μέτρησής της είναι το Wb. Η θετική φορά της μαγνητικής ροής καθορίζεται από τον κανόνα δεξιόστροφου κοχλίου.

Η μαγνητική αγωγιμότητα του αέρα είναι 10^4 φορές μικρότερη από αυτήν των μαγνητικών υλικών και γι' αυτό το λόγο μερικές μαγνητικές γραμμές κλείνουν μέσω του αέρα και όχι μέσω του μαγνητικού υλικού.

$$\Phi = \Phi_m + \Phi_{air} \quad (1.3.6)$$

1.3.5 Νόμοι του Kirchoff

Οι νόμοι του Kirchoff ισχύουν και για τα μαγνητικά κυκλώματα σε πλήρη αντιστοιχία με τα ηλεκτρικά, δηλαδή:

$$\sum_{n=1}^N \Phi_n = 0 \text{ (αφού } \nabla B = 0) \quad (1.3.7)$$

$$\sum_{n=1}^N \Phi_n R_m = F_m \text{ (νόμος διαρρέυματος)} \quad (1.3.8)$$

που αντιστοιχούν σε:

$$\sum_{n=1}^N I_n = 0 \text{ (νόμος ρευμάτων)} \quad (1.3.9)$$

$$\sum_{n=1}^N I_n R_n = E \text{ (νόμος τάσεων)} \quad (1.3.10)$$

Σημειώνεται ότι το επιφανειακό ολοκλήρωμα χωρίζεται σε N περιοχές κάθε μία από τις οποίες συμβολίζεται με n . Εν αντιθέσει με τα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα σιδηρομαγνητικά υλικά η μαγνητική αντίσταση δεν είναι σταθερή, διότι μεταβάλλεται η μαγνητική διαπερατότητα η οποία είναι εξαρτώμενη της έντασης του πεδίου (μη γραμμικά κυκλώματα). Σημειώνεται πως οι εξισώσεις αυτές αποτελούν απλοποίηση των εξισώσεων του Maxwell.

Κεφάλαιο 2

Μαγνητικός διαχωρισμός

2.1 Εισαγωγή

Οι διαδικασίες διαχωρισμού που βασίζονται στην θεωρία μαγνητισμού παρουσιάζουν ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Αποτελούν τεχνικές που χρησιμοποιούν μαγνήτες, μόνιμους ή ηλεκτρομαγνήτες, για τον επιλεκτικό διαχωρισμό μαγνητικών υλικών από μη-μαγνητικά υλικά. Εφαρμόζονται σε πληθώρα ερευνητικών πεδίων και διάφορες βιομηχανίες, όπως καθαρισμός υδάτων, αφαίρεση επικίνδυνων ρύπων, διαχωρισμός κυττάρων, στοχευμένη παράδοση φαρμάκων, καθαρισμός νουκλεϊκού οξέος και πρωτεϊνών, παραγωγή βιομάζας από μικροφύκη. [17]

Επιδεικνύει πολλαπλά πλεονεκτήματα όπως υψηλή απόδοση και επιλεκτικότητα, γρήγορο, αποτελεσματικό και μη επεμβατικό διαχωρισμό και χαμηλότερο κόστος, συγκριτικά με συμβατικές μεθόδους όπως η καθίζηση και η φυγοκέντρωση. Οι περισσότερες μελέτες όμως γίνονται για διαχωρισμό σε δύοσεις. Γι' αυτό καθίσταται αναγκαία η υλοποίηση και μελέτη συνεχούς διαχωρισμού, θέμα που απασχολεί την παρούσα εργασία. [18]

Τα μαγνητικά νανοσωματίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεταφορείς ή ως συλλέκτες συγκεκριμένων στοιχείων και συνήθως κινούνται σε ένα ρευστό. Το εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, είτε ελέγχει την κίνηση των νανοσωματιδίων, αν λειτουργούν ως μεταφορείς, είτε τα διαχωρίζει από το ρευστό, αν λειτουργούν ως συλλέκτες. Τα σωματίδια συνθέτονται από μαγνητικά στοιχεία όπως ο σίδηρος, το νικέλιο και το κοβάλτιο και τα οξειδία τους όπως μαγνητίτης, μαγγειμίτης, φερρίτης κοβαλτίου και διοξείδιο του χρωμίου. Γίνονται υπερπαραμαγνητικά όταν αφαιρείται το πεδίο και επομένως αντιδρούν πολύ στο μαγνητικό πεδίο επιτρέποντας καλύτερο χειρισμό κατά τον διαχωρισμό. [19]

Στην συνέχεια θα εξεταστούν οι κατηγορίες μαγνητικού διαχωρισμού, οι δυνάμεις που ασκούνται στα σωματίδια κατά την διαδικασία, φαινόμενα όπως η μαγνητική κροκιδώση και συνεργατική μαγνητοφόρηση και τέλος θα γίνει βιβλιογραφική ανασκόπηση για ήδη υπάρχοντα συστήματα.

2.2 Κατηγορίες

Η κατηγοριοποίηση των μαγνητικών διαχωριστών βασίζεται στην βάρθρωση του μαγνητικού πεδίου. Υπάρχουν δύο κατηγορίες: μαγνητικός διαχωρισμός υψηλής βάρθρωσης (High-Gradient Magnetic Separation - HGMS) και μαγνητικός διαχωρισμός χαμηλής βάρθρωσης (Low-Gradient Magnetic Separation - LGMS). [18] [20]

HGMS

Ο μαγνητικός διαχωρισμός υψηλής βάρθρωσης χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν μαγνητικό πεδίο μεγαλύτερο των 1000 T/m ($\nabla B > 1000T/m$). Τέτοιο υψηλό πεδίο μπορεί να παραχθεί από ισχυρούς ηλεκτρομαγνήτες ή μόνιμους μαγνήτες, καθώς και από υπεραγωγίσιμους μαγνήτες.

Η μέθοδος μπορεί να διαχωρίσει σωματίδια μεγέθους από μερικά μm έως μερικά nm και έχει υψηλή αποδοτικότητα και επιλεκτικότητα. Παρουσιάζει όμως υψηλό κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης και το ισχυρό πεδίο περιορίζει την μέγιστη μαγνητική επιδεκτικότητα των σωματιδίων που μπορεί να διαχωρίσει αποτελεσματικά.

LGMS

Για την αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων που παρουσιάζει η προηγούμενη μέθοδος, μελετάται πλέον ευρέως ο μαγνητικός διαχωρισμός χαμηλής βάρθρωσης. Απαιτεί μαγνητικό πεδίο μικρότερο των 100 T/m ($\nabla B < 100T/m$) και δημιουργείται με την χρήση ασθενών μαγνητών, μόνιμων ή ηλεκτρομαγνητών.

Με αυτή την μέθοδο επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους. Αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μεγάλο όγκο μαγνητικών νανοσωματιδίων λόγω της συνεργατικής μαγνητοφόρησης που θα εξηγηθεί σε επόμενη ενότητα. Ωστόσο, το ασθενές πεδίο περιορίζει το μέγεθος των νανοσωματιδίων, αφού πολύ μικρά σωματίδια μπορεί να έχουν ασθενείς μαγνητικές ιδιότητες και να μην μπορούν να διαχωριστούν με επιτυχία. Επίσης, σε κολλοειδή διαλύματα στα οποία τα νανοσωματίδια είναι ομοιόμορφα διασκορπισμένα μειώνεται η αναμενόμενη απόδοση λόγω ηλεκτροστατικών δυνάμεων που αναπτύσσονται.

2.3 Δυνάμεις

Το φαινόμενο του μαγνητικού διαχωρισμού ανάγεται σε ένα πρόβλημα ισορροπίας δυνάμεων, οι οποίες ασκούνται στα σωματίδια κατά την κίνηση τους στο ρευστό. Χωρίζονται σε εξωτερικές, διαμοριακές και Brown. Κάποιες από αυτές θεωρούνται αμελητέες ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα του προβλήματος. Θα εξεταστεί επίσης και το φαινόμενο της μαγνητικής κροκίδωσης.

2.3.1 Εξωτερικές

2.3.1.1 Μαγνητική δύναμη

Η μαγνητική δύναμη (magnetic force) που ασκείται στο σωματίδιο είναι ανάλογη της βάρθρωσης και του μέτρου του μαγνητικού πεδίου H και δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{F}_m = V\mu_0\kappa H\nabla\vec{H} \quad (2.3.1)$$

όπου: V ο όγκος του σωματιδίου, μ_0 η διαπερατότητα του κενού, κ η επιτρεπτότητα του σωματιδίου, H και ∇H το μέτρο και η βάρθρωση μαγνητικού πεδίου, αντίστοιχα. [21]

Ο όγκος του σωματιδίου V δίνεται από την σχέση:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (2.3.2)$$

όπου: R η ακτίνα του σωματιδίου.

2.3.1.2 Βαρύτητα

Η βαρυτική δύναμη (gravitational force) που ασκείται σε ένα παραμαγνητικό υλικό δίνεται από την σχέση:

$$\vec{F}_g = V\rho_p\vec{g} \quad (2.3.3)$$

όπου: V ο όγκος του σωματιδίου, ρ_p η πυκνότητα του σωματιδίου και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

2.3.1.3 Άνωση

Η άνωση (buoyancy) αποτελεί δύναμη που ασκείται σε ένα σωματίδιο το οποίο βρίσκεται μέσα σε ένα ρευστό. Έχει ίδια διεύθυνση με την βαρυτική δύναμη και αντίθετη φορά. Δίνεται από την σχέση:

$$\vec{F}_b = V\rho_l\vec{g} \quad (2.3.4)$$

όπου: V ο όγκος του σωματιδίου, ρ_l η πυκνότητα του ρευστού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. [22]

2.3.2 Διαμοριακές

2.3.2.1 Υδροδυναμική αντίσταση

Η υδροδυναμική αντίσταση (hydrodynamic drag force) αποτελεί την κύρια ανταγωνιστική δύναμη κατά τον διαχωρισμό και δίνεται από την σχέση:

$$\vec{F}_d = 6\pi\eta R(\vec{V}_p - \vec{V}_l) \quad (2.3.5)$$

όπου: η το δυναμικό ιξώδες του ρευστού, V_p η ταχύτητα του σωματιδίου και V_l η ταχύτητα του ρευστού. [21]

2.3.2.2 Δυνάμεις Van der Waals

Οι δυνάμεις Van der Waals αποτελούν σημαντικό παράγοντα σε διαδικασίες όπως η συσσώματωση νανοσωματιδίων και η σύσταση εναιωρήματος σε υγρό μέσο. Αυτή η αλληλεπίδραση δύο σφαιρικών σωματιδίων που έχουν απόσταση l μεταξύ τους υπολογίζεται από την φόρμουλα του Hamaker, η οποία δίνεται από τη σχέση [23]:

$$\vec{F}_w = -\frac{A(16\lambda^3)}{3(\alpha_1 + \alpha_2)} \times \left[\frac{s}{(1 + \lambda)^2 (s^2 - 4)^2 (s^2(1 + \lambda)^2 - 4(1 - \lambda)^2)^2} \right] \vec{e}_r \quad (2.3.6)$$

όπου: l η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων, α_1, α_2 οι ακτίνες των σωματιδίων, A η σταθερά Hamaker, $\lambda = \alpha_2/\alpha_1$ και $s = \frac{2(l+\alpha_1+\alpha_2)}{\alpha_1+\alpha_2}$. Το α_1 αφορά το μεγαλύτερο σωματίδιο και το α_2 το μικρότερο.

Για σωματίδια που αλληλεπιδρούν σε μακροσκοπική φάση (νερό), η σταθερά Hamaker υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A \approx \frac{3}{4}kT \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3} \right) \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3} \right) + \frac{2h\nu_e}{8\sqrt{2}} \times \frac{(n_1^2 - n_3^2)(n_2^2 - n_3^2)}{((n_1^2 + n_3^2)(n_2^2 + n_3^2))^{0.5} \left[(n_1^2 + n_3^2)^{0.5} + (n_2^2 + n_3^2)^{0.5} \right]} \quad (2.3.7)$$

όπου: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ η διηλεκτρική σταθερά των σωματιδίων και του νερού, αντίστοιχα, n_1, n_2, n_3 ο δείκτης διάθλασης των σωματιδίων και του νερού, αντίστοιχα, h η σταθερά Planck και ν_e η συχνότητα απορρόφησης ηλεκτρονίων στη UV περιοχή, τυπικά γύρω στο $3 \times 10^{15} \text{s}^{-1}$.

Για νανοσωματίδια μαγνητίτη, που απασχολούν την παρούσα εργασία, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ και η σχέση 2.3.7 γίνεται:

$$A \approx \frac{3}{4}kT \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3} \right)^2 + \frac{2h\nu_e}{8\sqrt{2}} \times \frac{(n_1^2 - n_3^2)^2}{(n_1^2 + n_3^2) \cdot (2\sqrt{n_1^2 + n_3^2})} \quad (2.3.8)$$

Γενικά όμως οι δυνάμεις Van der Waals είναι ασθενείς και κυριαρχούν μόνο σε πολύ μικρά σωματίδια που έχουν έρθει πολύ κοντά. Επομένως στην παρούσα εργασία θα θεωρηθούν αμελητέες αφού οι μαγνητικές δυνάμεις του εξωτερικώς επιβαλλόμενου πεδίου είναι πολύ μεγαλύτερες και τα σωματίδια είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος από τα συνηθισμένα νανοσωματίδια [24].

2.3.2.3 Ηλεκτροστατικές δυνάμεις

Οι ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ φορτισμένων επιφανειών σε διαλύματα ηλεκτρολυτών καθορίζουν πολλά δυναμικά φαινόμενα κατά τον διαχωρισμό. Υποθέτοντας σταθερή επι-

φανερακή πυκνότητα φορτίου, η ηλεκτροστατική δύναμη δίνεται από την σχέση [23]:

$$\vec{F}_e = 4\pi\epsilon_r\epsilon_0\kappa G_{12} \frac{e^{-h\kappa}}{1 - e^{-2h\kappa}} \times \left((\psi_2^2 + \psi_1^2) e^{-h\kappa} + 2\psi_1\psi_2 \right) \vec{e}_r \quad (2.3.9)$$

όπου:

$$G_{12} = \frac{a_1 a_2}{2(a_1 + a_2)} \quad (2.3.10)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{2Ie^2}{\epsilon_r\epsilon_0 kT}} \quad (2.3.11)$$

και

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_i} z_i^2 n_i^b \quad (2.3.12)$$

Αναλυτικά, I είναι η ιοντική ισχύς του διαλύματος ηλεκτρολύτη, n^b είναι η μαζική συγκέντρωση (bulk concentration) του ηλεκτρολύτη, ϵ_r , ϵ_0 είναι η σχετική επιτρεπτότητα του ενδιάμεσου και του κενού χώρου, αντίστοιχα, και ψ_1 , ψ_2 είναι το ηλεκτρικό δυναμικό για κάθε σωματίδιο, το οποίο υπολογίζεται από την εξίσωση Poisson-Boltzmann για απλή σφαίρα υπό οριακή συνθήκη σταθερού επιφανειακού φορτίου (σ_d). Η τιμή σ_d αντιπροσωπεύει την επιφανειακή πυκνότητα φορτίου και συνήθως είναι μικρότερη του $0.5C/m^2$.

Για τους ίδιους λόγους με τις δυνάμεις Van der Waals, οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις θεωρούνται αμελητέες στην παρούσα εργασία.

2.3.2.4 Δύναμη μαγνητικού δίπολου

Η δύναμη μαγνητικού δίπολου αναφέρεται στην άμεση αλληλεπίδραση μεταξύ δύο μαγνητικών διπόλων. Ομοίως με τις προηγούμενες δύο δυνάμεις, θεωρείται αμελητέα στην παρούσα εργασία. Ωστόσο επιδρά θετικά στο τελικό αποτέλεσμα αφού προκαλεί συσσωμάτωση, άρα ταχύτερη συντονισμένη κίνηση των νανοσωματιδίων και κατ' επέκταση καλύτερη απόδοση του συστήματος διαχωρισμού. Κυριαρχεί για μεγάλες αποστάσεις έναντι των δυνάμεων Van der Waals και των ηλεκτροστατικών δυνάμεων. Όμως σε αντίθεση με αυτές, σταθεροποιείται σε ένα μέγιστο σημείο [23].

Συνοπτικά, όλες οι διαμοριακές δυνάμεις θα θεωρηθούν αμελητέες στην παρούσα εργασία. Η απλοποίηση αυτή αποδεικνύεται στην δημοσίευση των Ezzaiar H. και λοιπών [25]. Αναφέρεται ότι για πεδία έντασης μεταξύ 4.8 και 13.5 kA/m οι διαμοριακές δυνάμεις μπορούν να αγνοηθούν.

2.3.3 Κίνηση Brown

Η τυχαία κίνηση σωματιδίων μέσα σε ένα ρευστό ονομάζεται κίνηση Brown. Προκαλείται λόγω τυχαίων συγκρούσεων των σωματιδίων με τα μόρια του ρευστού, και συγκεκριμένα λόγω τυχαίων διακυμάνσεων της πυκνότητας των μορίων του ρευστού. Εξαρτάται από την απόλυτη θερμοκρασία και από το μέγεθος των σωματιδίων.

Λόγω της τυχειότητας, η κίνηση Brown δεν μπορεί να υπολογιστεί ξεχωριστά για κάθε σωματίδιο. Επομένως, η θέση ενός σωματιδίου κινούμενο σε ένα ρευστό υπολογίζεται με στατιστικό τρόπο και έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που ακολουθεί την κατανομή Boltzmann. [26]

Μία απλή εξήγηση της κίνησης Brown είναι ότι με τη σύγκρουση των μορίων πάνω στα σωματίδια γίνεται μία “μεταφορά” ορμής από τα μόρια στο σωματίδιο αναγκάζοντάς το να κινηθεί. Όταν το σωματίδιο είναι πολύ μεγαλύτερο από τα μόρια, τότε συγκρούεται ταυτόχρονα με τα μόρια του ρευστού σε όλες τις πλευρές του, δίνοντας ένα άθροισμα δυνάμεων ίσο με το μηδέν, με αποτέλεσμα φαινομενικά να μην κινείται και να φαίνεται σαν να μην επηρεάζεται από την κίνηση Brown. Όταν το σωματίδιο έχει συγκρίσιμο μέγεθος με τα μόρια του ρευστού, τότε δεν είναι αρκετά μεγάλο ώστε να πέσουν πάνω του αρκετά μόρια ταυτόχρονα, ώστε να προκληθεί ένας στατιστικός μηδενισμός της δύναμης που θα δεχθεί, με αποτέλεσμα το σωματίδιο να κάνει τυχαίες κινήσεις στο χώρο.

Στην παρούσα εργασία, το μέγεθος των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται δεν μπορεί να επηρεαστεί από την κίνηση Brown. Γι’ αυτό το λόγο, ο μαγνητικός διαχωρισμός έχει ένα κατώτατο όριο για το μέγεθος των σωματιδίων που μπορεί να διαχωρίσει.

Με βάση την εξίσωση Stokes–Einstein, η διάχυση λόγω κίνησης Brown δίνεται από την σχέση:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r_{pt}} \quad (2.3.13)$$

όπου: k_B η σταθερά Boltzmann ίση με $1.380649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, T η απόλυτη θερμοκρασία, η το δυναμικό ιξώδες και r_{pt} η ακτίνα του σωματιδίου. [26]

2.3.3.1 Αριθμός Péclet

Η εξάρτηση της κίνησης των σωματιδίων από την διάχυση λόγω κίνησης Brown ερμηνεύεται από τον αδιάστατο αριθμό Péclet. Δίνεται από την σχέση [17]:

$$Pe = \frac{u_{mag} l}{D} \quad (2.3.14)$$

όπου:

$$u_{mag} = \frac{2r_{pt}^2}{9\eta} (M \cdot \nabla) B \quad (2.3.15)$$

η ταχύτητα του σωματιδίου λόγω μαγνητικής δύναμης (ή ταχύτητα μαγνητοφόρησης), l η διάμετρος του σωματιδίου και D ο συντελεστής διάχυσης λόγω κίνησης Brown.

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 2.3.13 και 2.3.15 στην εξίσωση 2.3.14 προκύπτει:

$$Pe = \frac{6\pi\eta r_{pt}^2 u_{mag}}{k_b T} \quad (2.3.16)$$

Για $Pe \gg 1$, επικρατεί η μαγνητική δύναμη έναντι της διάχυσης λόγω κίνησης Brown. Για

$Pe \ll 1$, συμβαίνει το αντίθετο, κυριαρχεί η τυχαία θερμική κίνηση Brown. Ενώ για αριθμούς κοντά στο 1 οι δύο δυνάμεις συνυπάρχουν με αποτέλεσμα να πρέπει να υπολογιστεί ακριβώς η επίδραση τους στο σωματίδιο. [17]

2.4 Μαγνητική κροκίδωση

Κροκίδωση καλείται η διαδικασία κατά την οποία γίνεται συμπύκνωση των σωματιδίων σε συσσωματώματα, τις λεγόμενες κροκίδες, οι οποίες είναι πολύ μεγαλύτερες από τα μεμονωμένα σωματίδια. Με αυτή την μέθοδο επιτυγχάνεται αυξημένο ειδικό βάρος ή αυξημένη μαγνήτιση, με αποτέλεσμα να διευκολύνεται ο διαχωρισμός των σωματιδίων από το διάλυμα.

Η κροκίδωση προκαλείται αυτόματα λόγω ισχυρών δυνάμεων μεταξύ μορίων, όπως σε μη επικαλυμμένα νανοσωματίδια, ή λόγω εξωτερικών παραγόντων, όπως μαγνητικό πεδίο στην περίπτωση της μαγνητικής κροκίδωσης και χημικών ενώσεων, στην περίπτωση της χημικής κροκίδωσης.

Κατά την *μαγνητική κροκίδωση*, οι κολλοειδείς διαμοριακές δυνάμεις του ρευστού επιδρούν στα ισχυρά μαγνητικά ή υπερπαραμαγνητικά σωματίδια με αποτέλεσμα να τα μετατρέψουν σε κροκίδα. Η δημιουργία της κροκίδας εμποδίζεται από ένα φράγμα δυναμικού το οποίο επιβάλλεται στα σωματίδια είτε λόγω απωστικών δυνάμεων είτε μέσω κάποιου αντιδραστηρίου διασποράς, όπως το ελαϊκό οξύ. Επομένως, χρειάζεται να επιβληθεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο ώστε να αναγκάσει τα σωματίδια να ξεπεράσουν το φράγμα δυναμικού και να έρθουν σε επαφή.

Στην *χημική κροκίδωση* γίνεται χρήση κάποιου χημικού παράγοντα ώστε να επιτευχθεί η δημιουργία κροκίδων. Για παράδειγμα, στον διαχωρισμό μαγνητικών κυττάρων η κροκίδωση των μαγνητικών νανοσωματιδίων δεν είναι εφικτή αφού βρίσκονται στο εσωτερικό και έτσι έχουν μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους. Ως εκ τούτου, χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί κάποιο χημικό συστατικό που θα προκαλέσει την κροκίδωση των ίδιων των κυττάρων. Αυτά τα συστατικά ονομάζονται κροκιδωτικά. [15] [23]

2.5 Συνεργατική Μαγνητοφόρηση

Παρουσία εξωτερικώς επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, τα σωματίδια δέχονται μαγνητική δύναμη η οποία τα οδηγεί προς περιοχές μεγαλύτερης βάρθρωσης πεδίου ώστε να διαχωριστούν από το ρευστό. Αυτός ο μηχανισμός καλείται *μαγνητοφόρηση*. Σε χαμηλές τιμές πεδίου, ο διαχωρισμός είναι εφικτός μέσω αναστρέψιμης συσσωμάτωσης σωματιδίων. Τα παραγόμενα συσσωματώματα έρχονται σε επαφή με άλλα γειτονικά και συνθέτουν μεγαλύτερα συσσωματώματα με μεγαλύτερη συνολική ταχύτητα. Αυτός ο μηχανισμός καλείται *συνεργατική μαγνητοφόρηση* και παίζει σημαντικό ρόλο στον μαγνητικό διαχωρισμό χαμηλής βάρθρωσης (LGMS). Λόγω της αναστρέψιμης συσσωμάτωσης, μετά την αφαίρεση του μαγνητικού πεδίου τα σωματίδια μπορούν να διασκορπιστούν ξανά στο ρευστό και να ανακτηθεί το αρχικό εναιώρημα. [17] [27]

Η βασική διαφορά με την κροκίδωση είναι ότι οι συστάδες σωματιδίων που δημιουργούνται συνήθως δεν είναι σφαιρικά συσσωματώματα αλλά βελονοειδείς μορφολογίες. Προκειμένου να δημιουργηθεί ένας πυρήνας νανοσωματιδίων ικανός να μεγαλώσει μέσω μαγνητοφορητικής κίνησης θα πρέπει αρχικά να υπάρχει μεγάλη βύθμωση πεδίου ώστε να συμπυκνωθούν τα πρώτα νανοσωματίδια. Ένας παράγοντας που επηρεάζει αυτό το φαινόμενο είναι η κολλοειδής συμπεριφορά του διαλύματος, δηλαδή τα σωματίδια έχουν ισχυρές απωστικές δυνάμεις μεταξύ τους. Επομένως, η συνεργατική μαγνητοφόρηση συνδυάζεται πολύ καλά με τη χρήση κροκιδωτικών ή με την χρήση διαλύματος με μεγαλύτερη συγκέντρωση σωματιδίων. [15]

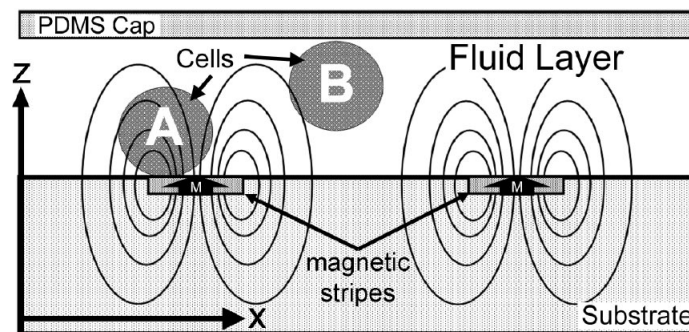
Στην δημοσίευση [28], αποδεικνύεται η σημαντικότητα της συνεργατικής μαγνητοφόρησης κατά τον διαχωρισμό ασθενούς πεδίου. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η εξάρτηση του μηχανισμού από τις ιδιότητες των σωματιδίων και δόθηκε μία συνθήκη κατά την οποία μπορεί να προβλεφθεί το ελάχιστο μέγεθος για σωματίδιο συγκεκριμένου υλικού το οποίο να επιτρέπει τον μαγνητικό διαχωρισμό του με χαμηλή βύθμωση πεδίου. Επίσης, αποδείχθηκε πειραματικά ότι ο χρόνος διαχωρισμού εξαρτάται από την συγκέντρωση των σωματιδίων μέσα στο διάλυμα.

2.6 Έρευνα

Σε αυτή την ενότητα γίνεται ανασκόπηση των ήδη υπάρχοντων συστημάτων, και για τις δύο κατηγορίες μαγνητικού διαχωρισμού. Περιγράφονται μερικά ενδιαφέροντα επιστημονικά άρθρα που έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία χρόνια.

LGMS

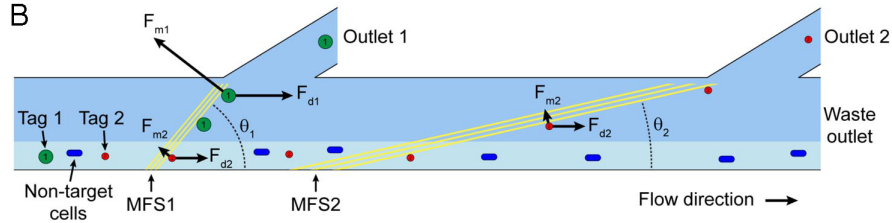
Οι Inglis και λοιποί [29] ανέπτυξαν μαγνητικό διαχωριστή κυττάρων τα οποία επικαλύπτονται με υπερπαραμαγνητικό υλικό. Μόνιμος μαγνήτης ασκεί πεδίο σε σιδηρομαγνητικές λωρίδες που βρίσκονται εντός του καναλιού ροής, αναγκάζοντας έτσι τα κύτταρα να ακολουθήσουν το μονοπάτι που ορίζουν, δηλαδή να διαχωριστούν από την ροή του ρευστού (Σχήμα 2.6.1).



Σχήμα 2.6.1: Μαγνητικός διαχωριστής κυττάρων LGMS - Inglis et al [29]

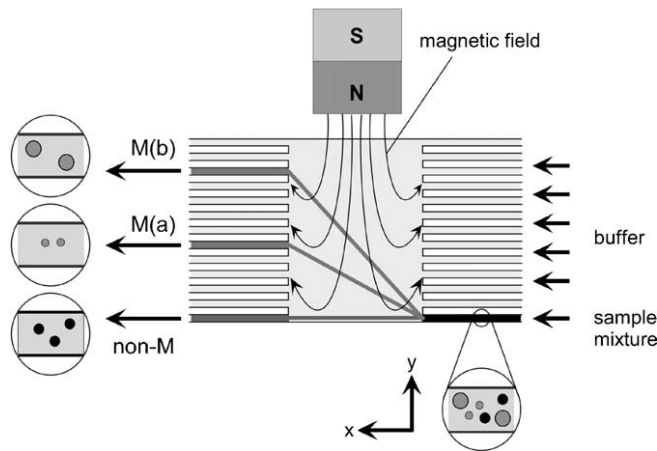
Βασισμένοι στην προηγούμενη ιδέα, οι Adams [30] και λοιποί πρότειναν ένα μικροροϊκό σύστημα ταυτόχρονου μαγνητικού διαχωρισμού πολλαπλών κυττάρων. Διαφορετικά μοτίβα σιδηρομαγνητικών λωριδών εντός του μικροροϊκού καναλιού οδηγούν τα κύτταρα σε ξεχωριστές

εξόδους ανάλογα με την μαγνητική επιδεκτικότητα τους. Η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να διαχωρίσει έως τρεις τύπους κυττάρων (Σχήμα 2.6.2).



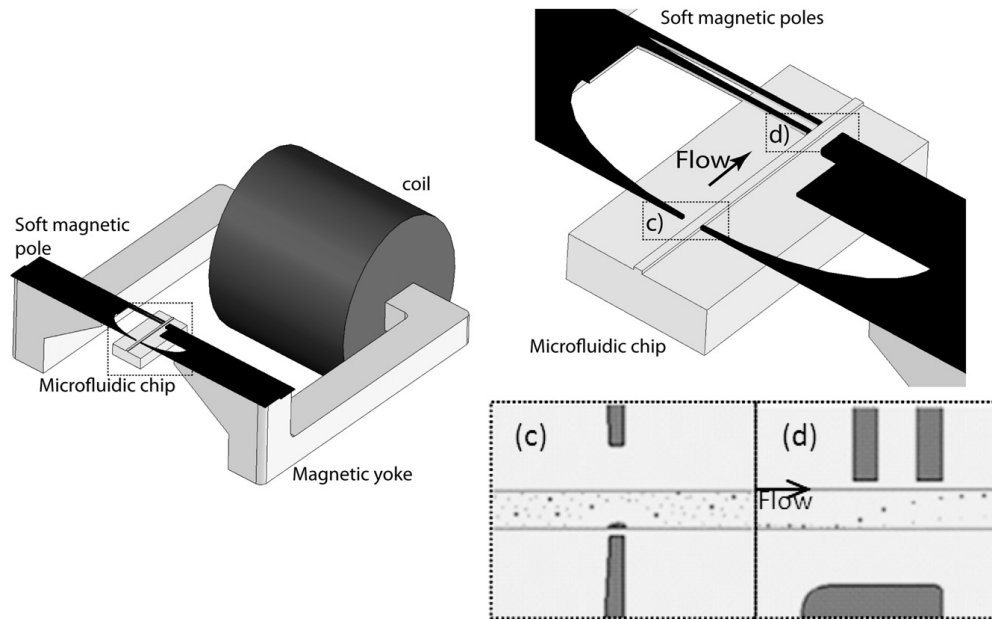
Σχήμα 2.6.2: Μαγνητικός διαχωριστής πολλαπλών κυττάρων LGMS - Adams et al [30]

Οι Pamme και λοιποί [31] σχεδίασαν μικρορροική συσκευή διαχωρισμού μαγνητικών σωματιδίων τα οποία αναμειγνύονται με άλλα μαγνητικά και μη σωματίδια. Μόνιμοι μαγνήτες παράγουν ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο κάθετο στην ροή του διαλύματος, το οποίο εκτρέπει τα μαγνητικά σωματίδια από την ευθεία ροή και τα οδηγεί σε διαφορετικές εξόδους ανάλογα με την μαγνητική επιδεκτικότητά τους. Οποιαδήποτε μη μαγνητικά σωματίδια που εισέρχονται στο σύστημα ρέουν προς στην ευθεία κατεύθυνση του υγρού και εξέρχονται από αυτό. Η μέτρηση των διαχωρισμένων σωματιδίων έγινε αρχικά με καταγραφή βίντεο και στην συνέχεια με χρήση της μεθόδου laser light scattering για μεγαλύτερη ακρίβεια (Σχήμα 2.6.3).



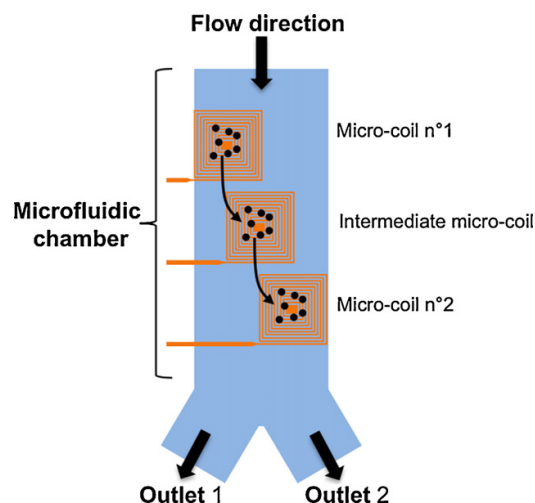
Σχήμα 2.6.3: Συσκευή διαχωρισμού LGMS μαγνητικών σωματιδίων από άλλα μαγνητικά και μη σωματίδια - Pamme et al [31]

Οι Afshar και λοιποί [32] κατασκεύασαν μικρορροική συσκευή, η οποία διαχωρίζει τα μαγνητικά σωματίδια ανάλογα με το μέγεθος τους. Δύο μαγνητικά μαλακές μικροκεφαλές χρησιμοποιούνται ως μαγνητικοί πόλοι και τοποθετούνται κοντά στο μικρορροϊκό κανάλι ώστε να παρέχουν ισχυρό μαγνητικό πεδίο κάθετα στην ροή. Οι μικροκεφαλές έχουν διαφορετικό σχήμα, εξυπηρετούν διαφορετικό σκοπό και μαγνητίζονται από εξωτερικό ηλεκτρομαγνήτη. Η συσκευή συνδυάζει στατική και συνεχής διαδικασία και μπορεί να ενσωματωθεί σε lab-on-a-chip πλατφόρμα για βιοϊατρικούς σκοπούς (Σχήμα 2.6.4).



Σχήμα 2.6.4: Συσκευή διαχωρισμού LGMS μαγνητικών σωματιδίων σύμφωνα με το μέγεθος τους - Afshar et al [32]

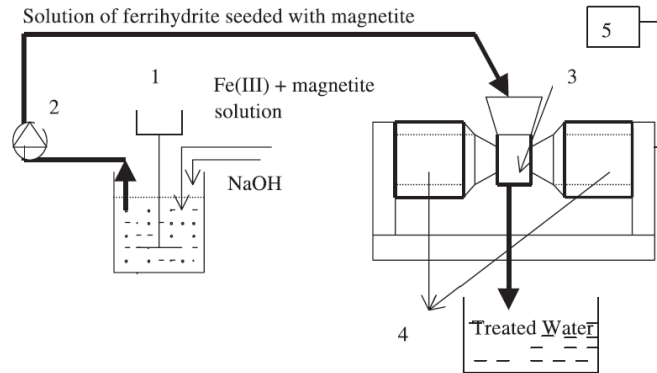
Οι Fulcrand και λοιποί [33] ανέπτυξαν μικροροϊκή συσκευή η οποία χρησιμοποιεί πηνία μικρο διαστάσεων ενσωματωμένα κάτω από το μικροροϊκό κανάλι. Η διαδοχική ενεργοποίηση των πηνίων οδηγεί τα μαγνητικά σωματίδια προς την μία από τις δύο εξόδους της συσκευής, επιτυγχάνοντας τον διαχωρισμό τους (Σχήμα 2.6.5).



Σχήμα 2.6.5: Συσκευή διαχωρισμού LGMS με χρήση διαδοχικών πηνίων κάτω από το μικροροϊκό κανάλι - Fulcrand et al [33]

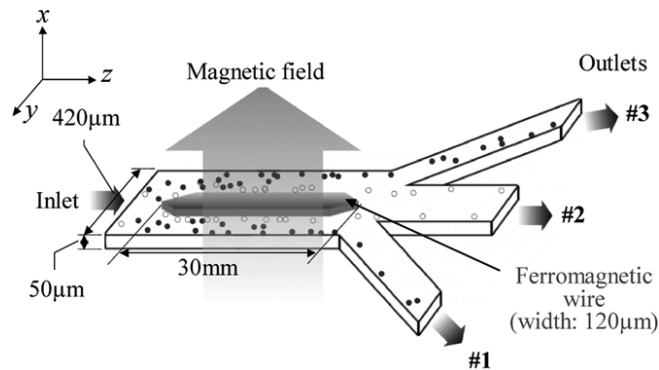
HGMS

Ο Karapinar [34] σχεδίασε σύστημα HGMS για τον διαχωρισμό φερρουδρίτη από βιομηχανικά απόβλητα, ο οποίος χρησιμοποιείται ως προσροφητής για βαρέα μέταλλα. Συγκεκριμένα εφάρμοσε την τεχνική της μαγνητικής σποράς (magnetic seeding), η οποία χρησιμοποιεί ένα ορυκτό ως μαγνητικό σπόρο (εδώ μαγνητίτης) ώστε να προσκολληθεί σε αυτόν το σωματίδιο (εδώ φερρουδρίτης) και να γίνει εφικτός ο διαχωρισμός του (Σχήμα 2.6.6).



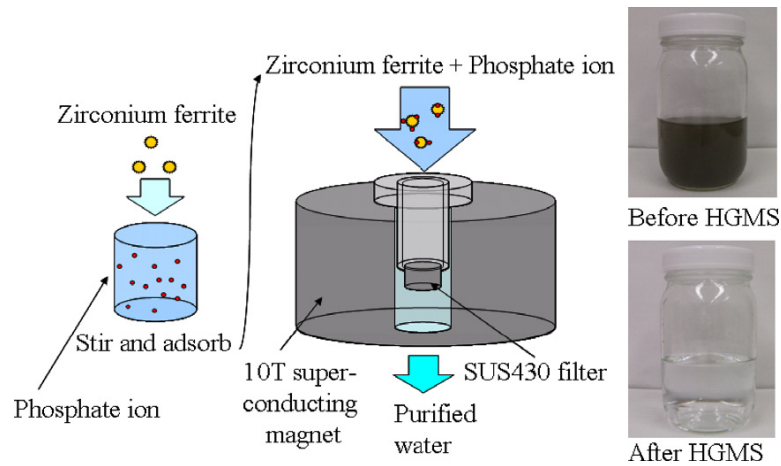
Σχήμα 2.6.6: Σύστημα διαχωρισμού HGMS για αφαίρεση φερρουδρίτη από βιομηχανικά απόβλητα - Karapinar et al [34]

Οι Han και λοιποί [35] [36] ανέπτυξαν μικροδιαχωριστή ερυθρών και λευκών αιμοσφαιρίων βασισμένο στις εγγενείς μαγνητικές ιδιότητες των κυττάρων. Στο μικρορροϊκό κανάλι υπάρχει σιδηρομαγνητικό σύρμα κατά μήκος της κατεύθυνσης ροής και με μόνιμο μαγνήτη εφαρμόζεται εξωτερικό πεδίο κάθετα στην ροή το οποίο κοντά στο σύρμα παράγει μαγνητικό πεδίο υψηλής βάρθρωσης (HGMS). Όταν εφαρμόζεται το πεδίο, τα ερυθρά αιμοσφαίρια (παραμαγνητικά) απωθούνται από το σύρμα και οδηγούνται προς τις εξόδους #1 και #3, ενώ τα λευκά (διαμαγνητικά) έλκονται προς το σύρμα και οδηγούνται προς την έξοδο #2. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπως η προετοιμασία γενετικού δείγματος και η ανίχνευση ασθενειών μεταδιδόμενες μέσω του αίματος (Σχήμα 2.6.7).



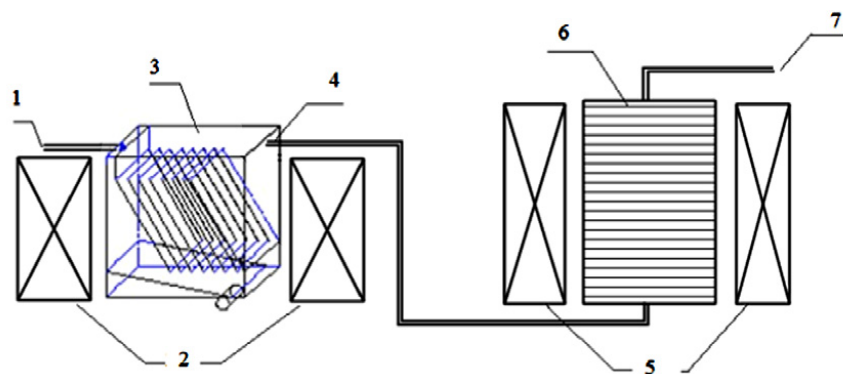
Σχήμα 2.6.7: Σύστημα διαχωρισμού HGMS για αιμοσφαίρια - Han et al [35]

Οι Ishiwata και λοιποί [37] κατασκεύασαν διάταξη μαγνητικού διαχωρισμού φωσφόρου από λύματα και ταυτόχρονη ανάκτηση και ανακύκλωση του. Για τον HGMS χρησιμοποιήθηκε σιδηρομαγνητικός φερρίτης ζιρκονίου ως προσροφητής. Για την αφαίρεση του φωσφόρου χρησιμοποιήθηκε αλκαλικό διάλυμα και τελικά ανέκτησαν το υλικό ως φωσφορικό τρινάτριο υψηλής καθαρότητας. Ωστόσο η συσκευή περιορίζεται σε εφαρμογές μικρής κλίμακας (Σχήμα 2.6.8).



Σχήμα 2.6.8: Συσκευή διαχωρισμού HGMS για αφαίρεση φωσφόρου από λύματα - Ishiwata et al [37]

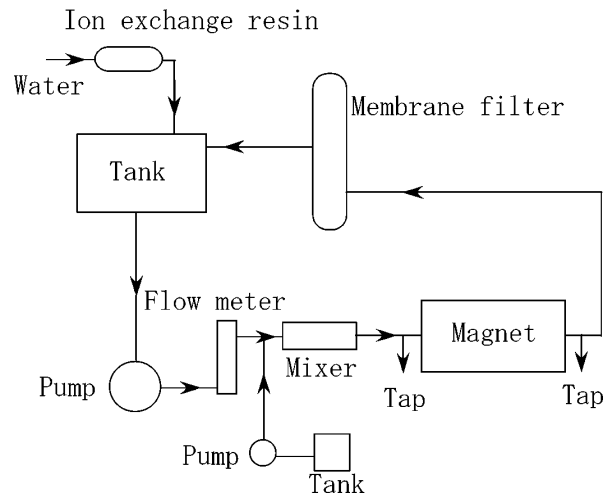
Οι Li και λοιποί [38] μελέτησαν την εφαρμογή μαγνητικού διαχωρισμού υψηλής βάρθρωσης (HGMS) για τον καθαρισμό θολών λυμάτων ενός μετατροπέα (converter). Στην διάταξη τους χρησιμοποίησαν υπεραγωγίσιμους μαγνήτες σε δύο διαφορετικά στάδια. Κατάφεραν τον καθαρισμό ρύπων όπως οξείδιο του σιδήρου και ασθενέστερα σωματίδια όπως οξείδιο του ασβεστίου. Κατέστησαν επομένως εφικτή και την επαναχρησιμοποίηση του νερού (Σχήμα 2.6.9).



**1 the first water inlet; 2 superconducting magnets;
3 sloping plate settling tank; 4 the first water outlet;
5 superconducting magnets; 6 high gradient reactor with steel wool; 7 the second water outlet**

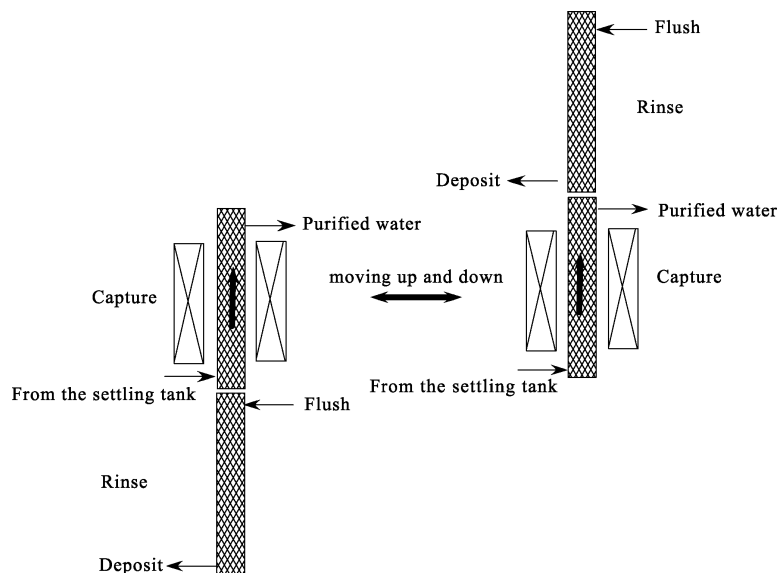
Σχήμα 2.6.9: Εφαρμογή HGMS για καθαρισμό θολών λυμάτων ενός μετατροπέα (converter) - Li et al [38]

Καθαρισμό νερού με τη χρήση HGMS πέτυχαν και οι Okada και λοιποί [39]. Κατασκεύασαν σύστημα το οποίο διαχωρίζει σωματίδια ασθενώς μαγνητιζόμενα, όπως είναι ο αιματίτης και το υδροξείδιο του σιδήρου. Η χρήση του HGMS επέτρεψε την μείωση του χρόνου λειτουργίας και του μεγέθους της διάταξης (Σχήμα 2.6.10).



Σχήμα 2.6.10: Σύστημα διαχωρισμού HGMS για αφαίρεση ασθενώς μαγνητιζμένων σωματιδίων - Okada et al [39]

Επιπλέον, οι Okada και λοιποί [40] ανέπτυξαν σύστημα διαχωρισμού αρσενικού από γεωθερμικό νερό με την χρήση φίλτρου HGMS. Αρχικά, με χημικές αντιδράσεις ενισχύεται η μαγνήτιση του αρσενικού και στην συνέχεια, περνά από το φίλτρο που χρησιμοποιεί υπεραγώγιμο μαγνήτη ώστε να διαχωριστεί από το νερό (Σχήμα 2.6.11).



Σχήμα 2.6.11: Σύστημα διαχωρισμού HGMS για αφαίρεση αρσενικού από γεωθερμικό νερό - Okada et al [40]

Κεφάλαιο 3

Θεωρία ρευστών

3.1 Εισαγωγή

Η θεωρία των ρευστών αποτελεί βασική ενότητα των φυσικών επιστημών και συνδέεται με άλλους επιστημονικούς τομείς όπως υδρολογία, ναυπηγία, θερμοδυναμική, μετάδοση θερμότητας, μετεωρολογία, ιατρική. Ερμηνεύει φαινόμενα που αφορούν ρευστά υλικά όταν ισορροπούν μακροσκοπικά (στατική των ρευστών) και όταν ρέουν (δυναμική των ρευστών). Η στατική δίνει πληροφορία για σημαντικές ιδιότητες και φαινόμενα, ενώ η δυναμική σχετίζεται με την μεταφορά μάζας και διευκολύνει την κατανόηση της συμπεριφοράς των ρευστών μέσα σε αγωγούς και οποιοδήποτε άλλο μέσο ροής.

Τα ρευστά είναι σώματα χωρίς σταθερό σχήμα που μπορούν να ρέουν κατά μήκος ενός άλλου σώματος και διακρίνονται σε υγρά και αέρια. Όταν εφαρμόζεται σε αυτά διατμητική δύναμη, χάνουν την στατική ισορροπία τους και τα μόρια τους κινούνται ανομοιόμορφα προς την διεύθυνση της δύναμης. Το ρευστό θεωρείται ομοιογενές, συνεχώς κατανεμημένο ώστε να μελετηθεί δυναμικά.

Στην συνέχεια θα εξεταστούν οι βασικές ιδιότητες των ρευστών και τα είδη ροής τους.

3.2 Βασικές ιδιότητες ρευστών

3.2.1 Πίεση - Διατμητική τάση

Σε μία ροή ασκούνται κάθετες και διατμητικές δυνάμεις στις επιφάνειες, με τις οποίες έρχεται σε επαφή το ρευστό. Για στατικά υγρά έχουμε μόνο κάθετες δυνάμεις σε μια επιφάνεια. Η πίεση ορίζεται ως το μέτρο της κάθετης δύναμης F ανά μονάδα επιφάνειας A , [41]:

$$P = \frac{dF}{dA} \quad (3.2.1)$$

Μονάδα μέτρησης είναι το Pascal(Pa) ή N/m^2 .

Η *διατμητική τάση* τ αποτελεί αίτιο της ροής. Ορίζεται ως το μέτρο της οριζόντιας δύναμης F ανά μονάδα επιφάνειας A , [41]:

$$\tau = \frac{dF}{dA} (\text{PaN/m}^2) \quad (3.2.2)$$

Έχει μονάδα μέτρησης επίσης το Pascal(Pa) ή N/m^2 .

3.2.2 Πυκνότητα

Η *πυκνότητα* αποτελεί βασική ιδιότητα ενός σώματος. Ορίζεται ως ο λόγος της μάζας m προς τον όγκο V του σώματος:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2.3)$$

Μονάδα μέτρησης είναι τα kg/m^3 . Είναι σταθερή σε όλα τα σημεία ενός ρευστού για συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία. Στα υγρά είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τα αέρια. Αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την πυκνότητα, με εξαίρεση το νερό στο οποίο για μεταβολή από 0°C σε 4°C αυξάνεται η πυκνότητα. Αύξηση της πίεσης επηρεάζει ελάχιστα την πυκνότητα, κυρίως των αερίων (συμπιεστά) και είναι αμελητέα για υγρά (ασυμπιεστά). [42]

3.2.3 Ιξώδες

Κατά την ροή, ένα ρευστό δέχεται σταδιακή παραμόρφωση λόγω διατμητικής τάσης, δηλαδή τείνει να επιταχυνθεί. Προβάλλει αντίσταση σε αυτή την δύναμη, δηλαδή τείνει να επιβραδυνθεί, εξαιτίας των διαμοριακών δυνάμεων συνοχής και της ανταλλαγής μορίων με την επιφάνεια ροής. Αυτή η εσωτερική αντίσταση ονομάζεται *δυναμικό ιξώδες* (ή *συνεκτικότητα ρευστού*) μ :

$$\mu = -\frac{\tau}{dv/dy} \quad (3.2.4)$$

όπου ο λόγος dv/dy ονομάζεται ρυθμός διάτμησης.

Μονάδα μέτρησης του ιξώδους είναι το $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ ή $\text{Pa}\cdot\text{s}$. Η πίεση επηρεάζει ελάχιστα το ιξώδες των υγρών και περισσότερο των αερίων. Με αύξηση της θερμοκρασίας, το ιξώδες των υγρών μειώνεται σημαντικά λόγω χαλάρωσης των διαμοριακών δυνάμεων συνοχής. Για παράδειγμα, το ιξώδες του νερού εξαπλασιάζεται από 0°C στους 100°C , $1.788\cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ και $0.284\cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ αντίστοιχα. Αντίθετα, το ιξώδες των αερίων αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει διότι αυξάνονται οι μοριακές συγκρούσεις κατά την ανταλλαγή μορίων.[42]

Τα ρευστά στα οποία υπάρχουν οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των μορίων ονομάζονται *πραγματικά*. Ενώ τα ρευστά που έχουν εξ ορισμού μηδενικό ιξώδες ($\mu = 0$) ονομάζονται *ιδανικά*. Τα ρευστά που διατηρούν σταθερό ιξώδες για αμετάβλητη θερμοκρασία και πίεση ονομάζονται *νευτώνεια*.

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τιμές ιξώδους ορισμένων ρευστών. Συνήθως το ιξώδες των αερίων είναι δύο τάξεις μεγέθους μικρότερο από αυτό των υγρών.

Πίνακας 3.1: Ιξώδες ορισμένων ρευστών [42]

Ρευστό	μ (10^{-3} Pa·s)	Θερμοκρασία ($^{\circ}$ C)
αέρας	0.018	20
αμμωνία	0.22	20
νερό	1.0016	20
οινόπνευμα	1.2	20
βενζίνη	0.65	20
γάλα [43]	2.12	20
ελαιόλαδο [43]	56.2	26
μέλι [44]	περίπου 2000-10000	20
κέτσαπ [45]	περίπου 5000-20000	25

Σημειώνεται ότι σε κάποια άρθρα το δυναμικό ιξώδες αναφέρεται με το σύμβολο η ώστε να ξεχωρίζει από την διαπερατότητα.

Κινηματικό ιξώδες ν καλείται ο λόγος του δυναμικού ιξώδες προς την πυκνότητα του ρευστού:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.2.5)$$

και έχει μονάδα μέτρησης το m^2/s ή $N \cdot m \cdot s/kg$. [42]

3.2.4 Επιφανειακή τάση

Ένα μόριο υγρού που βρίσκεται εντός της μάζας του δέχεται δυνάμεις από όλα τα μόρια που το περιβάλλουν, άρα η συνισταμένη των δυνάμεων είναι $\Sigma F = 0$. Αντίθετα, ένα μόριο που βρίσκεται στην διεπιφάνεια, δηλαδή στη διαχωριστική επιφάνεια του υγρού με αέριο ή άλλο υγρό μη αναμειξιμο και μικρότερης πυκνότητας, δέχεται δυνάμεις μόνο από τα γειτονικά μόρια του υγρού, δηλαδή αυτά στο κάτω ημισφαίριο.

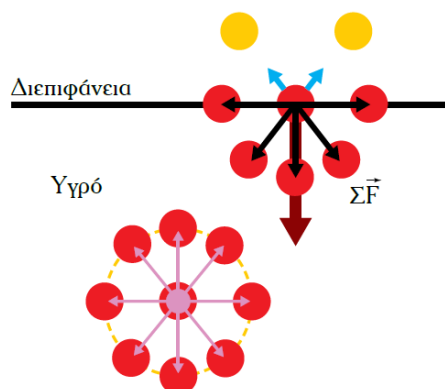
Λόγω αυτής της αλληλεπίδρασης των μορίων, τα επιφανειακά μόρια έχουν μεγαλύτερη δυναμική ενέργεια από τα εσωτερικά μόρια και τείνουν να μετακινηθούν προς το εσωτερικό της υγρής μάζας ώστε να μειώσουν την ενέργειά τους. Η τάση αυτή των επιφανειακών μορίων έχει ως αποτέλεσμα τα υγρά να τείνουν να μειώσουν όσο το δυνατόν την εξωτερική επιφάνειά τους. Επομένως, η συνισταμένη δύναμη είναι $\Sigma F \neq 0$ με φορά προς το εσωτερικό του υγρού (Σχήμα 3.2.1). Έτσι δημιουργείται επιφανειακά μία μεμβράνη με δυναμική ενέργεια που περιορίζει τα μόρια του υγρού.

Επιφανειακή τάση σ καλείται η δύναμη ανά μονάδα μήκους, που ασκεί η επιφανειακή μεμβράνη σε νοητή γραμμή τυχαίας διευθύνσεως:

$$\sigma = \frac{F}{L} \quad (3.2.6)$$

Μονάδα μέτρησης είναι το N/m . Η επιφανειακή τάση μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Γενικά, το σφαιρικό σχήμα της σταγόνας οφείλεται στην επιφανειακή τάση, διότι έτσι έχει τη

μικρότερη δυνατή ελεύθερη επιφάνεια και κατά συνέπεια μικρότερο επιφανειακό δυναμικό. [41]



Σχήμα 3.2.1: Σχηματικό διάγραμμα επιφανειακής τάσης [42]

Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τιμές επιφανειακής τάσης ορισμένων ρευστών σε επαφή με αέρα και τοποθετημένα σε γυαλί.

Πίνακας 3.2: Παραδείγματα επιφανειακής τάσης ρευστών [41]

Ρευστό	σ (N/m)
νερό	0.073
αιθυλική αλκοόλη	0.023
λάδι ελιάς	0.035
γλυκερίνη	0.063
υδράργυρος	0.480
βενζίνη	0.029

3.2.5 Τάση ατμών

Σε μια διεπιφάνεια υγρού και αερίου, τα μόρια ανταλλάσσονται συνεχώς δια μέσω της διεπιφάνειας. Μπορεί να υπάρξει εξάτμιση των μορίων, δηλαδή διαφεύγουν και σχηματίζουν υδρατμούς στον αέρα, ή συμπύκνωση, δηλαδή μόρια υδρατμού στον αέρα επικαθόνται στην επιφάνεια του υγρού. Στην πρώτη περίπτωση, ο ρυθμός των μορίων που διαφεύγουν είναι μεγαλύτερος από αυτόν των επικαθήμενων μορίων, ενώ στην δεύτερη περίπτωση έχουμε το αντίστροφο.

Για ίσους ρυθμούς, υπάρχει ισορροπία όπου υγρό και υδρατμοί συνυπάρχουν στην ίδια θερμοκρασία. Σε αυτή την περίπτωση, η πίεση ονομάζεται *πίεση κορεσμένων ατμών* ή *τάση ατμών*. Εξαρτάται από την θερμοκρασία και στον πίνακα 3.3 φαίνεται αυτή η εξάρτηση για το νερό. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερη πίεση πρέπει να ασκηθεί, ώστε να μην έχουμε εξάτμιση. [41]

Πίνακας 3.3: Τάση ατμών νερού για διάφορες θερμοκρασίες [41]

Τάση ατμών (Pa)	Θερμοκρασία (°C)
1.24	10
3.32	25
12.48	50
41.0	75
101.3	100

3.2.6 Συμπιεστότητα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πυκνότητα εξαρτάται από την πίεση και την θερμοκρασία, με διαφορετικό τρόπο σε διάφορα ρευστά. Η εξάρτηση της πυκνότητας από την πίεση καλείται *συντελεστής συμπιεστότητας* β , [42]:

$$\beta = - \frac{dP}{dv/V} \quad (3.2.7)$$

όπου dP η μεταβολή της πίεσης και dv/V η σχετική μεταβολή του όγκου. Κάνοντας χρήση της 3.2.3, προκύπτει ότι:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dp} \quad (3.2.8)$$

3.3 Είδη ροής

3.3.1 Γενικά

Σε αυτή την υποενότητα θα μελετηθεί η ροή ενός ρευστού εντός ευθύγραμμου αγωγού κυκλικής και σταθερής διατομής. Η ταξινόμηση της ροής μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια. Συνηθέστερος διαχωρισμός είναι με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά του ρευστού.

Ένα κριτήριο είναι η ύπαρξη ή όχι ιξώδους. Έστω ένα ρευστό που βρίσκεται σε επαφή με μια σταθερή επιφάνεια. Όταν η επιφάνεια είναι άτριβη, το στρώμα ρευστού ολισθαίνει με ταχύτητα σταθερή με το ύψος, σε όλη την ροή και χωρίς να αλλάξει κατεύθυνση ή μέτρο. Αυτή καλείται *ατριβής ή απξωδική ροή*. Αντίθετα, όταν υπάρχει ιξώδες στην επιφάνεια, δεν υπάρχει ολίσθηση και η ταχύτητα μεταβάλλεται με το ύψος και κατά μήκος της ροής. Αυτή καλείται *ιξωδική ροή*. Δημιουργείται ένα *οριακό στρώμα*, έξω από το οποίο η ροή είναι ατριβής. Επομένως, το ρευστό χωρίζεται σε δύο τμήματα: το οριακό στρώμα και το τμήμα έξω από αυτό. Στην περίπτωση ενός σωλήνα, το οριακό στρώμα καλύπτει ολόκληρο τον αγωγό. [41]

Η σημαντικότερη όμως ταξινόμηση σχετίζεται με τον ίδιο τον μηχανισμό της ροής. Έτσι προκύπτουν η στρωτή και η τυρβώδης ροή.

3.3.2 Στρωτή ροή

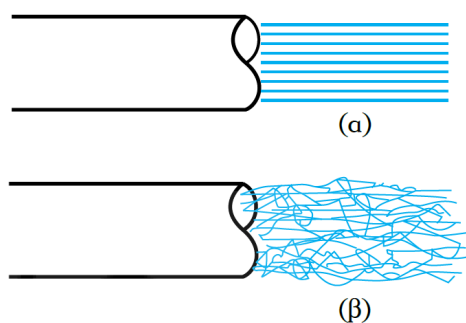
Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η ταχύτητα ροής μεταβάλλεται εντός του οριακού στρώματος. Αν η ταχύτητα είναι ασθενής, τότε η ροή είναι ομαλή και η τροχιά κάθε στοιχειώδους ποσότητας ρευστού είναι γραμμική. Δηλαδή τα μόρια κινούνται σε λεπτές στοιβάδες οι οποίες ολισθαίνουν η μία στην άλλη, χωρίς εγκάρσια ρεύματα και δίνες. Αυτή η ροή καλείται *στρωτή* (ή *γραμμική*) (Σχήμα 3.3.1(α)). [42]

Το συνηθέστερο παράδειγμα στρωτής ροής είναι η ροή του νερού από την βρύση. [46] Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο καπνός του τσιγάρου όταν ανεβαίνει ήρεμα και κατακόρυφα. [47]

3.3.3 Τυρβώδης ροή

Όταν η ταχύτητα ροής γίνει εντονότερη, η ευθύγραμμη τροχιά των στοιχειωδών μαζών διαταράσσεται και δημιουργούνται στροβιλισμοί που οδηγούν σε πλευρική ανάμειξη. Δηλαδή τα μόρια κινούνται ακανόνιστα και τυχαία προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτή η ροή καλείται *τυρβώδης* (ή *στροβιλώδης*) (Σχήμα 3.3.1(β)). [42]

Στην φύση σχεδόν όλες οι ροές είναι τυρβώδεις. Μερικά παραδείγματα είναι οι ποταμοί όταν παρουσιάζουν στροβίλους, οι αεροστρόβιλοι που μπορεί να προκαλέσουν αναταραχές σε αεροπλάνα και μέσω της κίνησης ενός πλοίου που κινείται ενάντια στο ρεύμα. [46] Στο παράδειγμα του καπνού, παρατηρείται τυρβώδης ροή όταν αρχίζει να κινείται ακανόνιστα μετά την ήρεμη φάση του. [47]



Σχήμα 3.3.1: Είδη ροής: (α) στρωτή (β) τυρβώδης [42]

3.3.4 Αριθμός Reynolds

Το 1883, ο Osborne Reynolds μελέτησε πειραματικά την μετάβαση από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή. Μέσα από το πείραμα απέδειξε ότι υπάρχει μία κρίσιμη ταχύτητα στην οποία ξεκινά να εμφανίζεται η τυρβώδης ροή. Παράλληλα συμπέρανε ότι το σημείο μεταβάσεως εξαρτάται από το ιξώδες του ρευστού και από την διατομή του αγωγού ροής. Έτσι κατέληξε σε ένα αδιάστατο αριθμό που συσχετίζει αυτές τις παραμέτρους και καθορίζει το είδος της ροής, τον

αριθμό *Reynolds*. Δίνεται από την σχέση:

$$Re = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\mu} = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (3.3.1)$$

όπου: v η μέση ταχύτητα ροής, l το χαρακτηριστικό μήκος τους αγωγού, ρ η πυκνότητα, μ το δυναμικό ιξώδες και ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού.

Στους κυλινδρικούς αγωγούς (σωλήνες), ως χαρακτηριστικό μήκος επιλέγεται η εσωτερική διάμετρος d , αφού η κάθετη στην ροή διατομή είναι κυκλική. Επομένως η σχέση 3.3.1 γίνεται:

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (3.3.2)$$

Οι τιμές του αριθμού *Reynolds* είναι:

- Στρωτή ροή: $Re < 2100$
- Μεταβατική φάση: $2100 < Re < 4000$
- Τυρβώδης ροή: $Re > 4000$

Η τιμή 2100 θεωρείται ο κρίσιμος αριθμός *Reynolds*. [42]

Μέρος II

Πειραματικό Μέρος

Κεφάλαιο 4

Πειραματική διάταξη

4.1 Γενικά

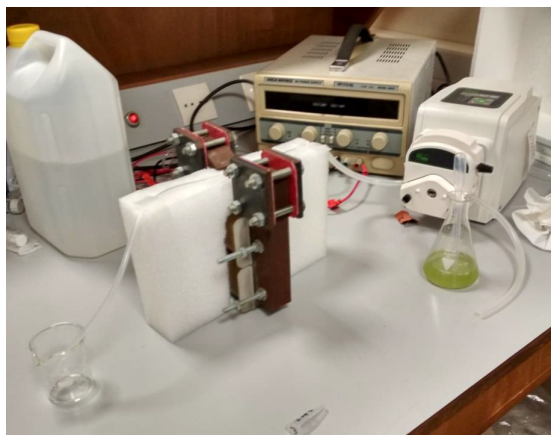
Στα πλαίσια μεταπτυχιακών και διδακτορικών εργασιών του εργαστηρίου αναπτύχθηκαν δύο συστήματα μαγνητικού διαχωρισμού χαμηλής βάρθρωσης, τα οποία χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνήτες για την δέσμευση σωματιδίων. [15] [48]

Η πρώτη διάταξη αποτελεί διάταξη LGMS με χρήση ισχυρού ηλεκτρομαγνήτη και φαίνεται στο σχήμα 4.1.1(α'). Το διάλυμα προς διαχωρισμό αποτελείται από 90 ml απιονισμένου νερού και 10 ml μαγνητικά τροποποιημένων μικροφυκών. Τα πειράματα εκτελέστηκαν μεταβάλλοντας τον ρυθμό ροής της περισταλτικής αντλίας και την ένταση ρεύματος, δηλαδή το μαγνητικό πεδίο του ηλεκτρομαγνήτη. Στο σχήμα 4.1.1(β') φαίνεται η συσσώρευση των αλγών κοντά στον ηλεκτρομαγνήτη. Με αυτό το σύστημα επιτεύχθηκε διαχωρισμός 100% των μαγνητικά τροποποιημένων κυττάρων, καθώς αυτά που συγκεντρώθηκαν στο καθαρό διάλυμα δεν έδειξαν να ανταποκρίνονται σε οποιοδήποτε μαγνητικό πεδίο.

Η δεύτερη διάταξη αποτελεί διάταξη LGMS χρησιμοποιώντας βαλβίδες και ηλεκτρομαγνήτες και φαίνεται στο σχήμα 4.1.2(α'). Στοχεύει στο διαχωρισμό μαγνητικών σωματιδίων από μη μαγνητικά σκορπισμένα σε ένα υγρό μείγμα. Το διάλυμα προς διαχωρισμό αποτελείται από 100 ml αιθανόλης, 0.25 ml ελαϊκού οξέος και 0.03 g νανοσωματίδια μαγνητίτη. Στο σχήμα 4.1.2(β') φαίνεται το αποτέλεσμα του διαχωρισμού, αριστερά το ακάθαρτο διάλυμα, δηλαδή τα μαζεμένα σωματίδια, και δεξιά το καθαρό διάλυμα. Το σύστημα κατάφερε σε μεγάλο ποσοστό να διαχωρίσει μαγνητικό υλικό από μεγάλους αρχικούς όγκους με συνεχή τρόπο, όμως επιδέχεται περαιτέρω βελτίωσης.

4.2 Στόχος και πορεία πειράματος

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη και μελέτη ενός μαγνητικού διαχωριστή σε λειτουργία συνεχούς ροής ο οποίος χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνήτες. Χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρομαγνήτες γιατί, σε σύγκριση με τους μόνιμους μαγνήτες, προσφέρουν

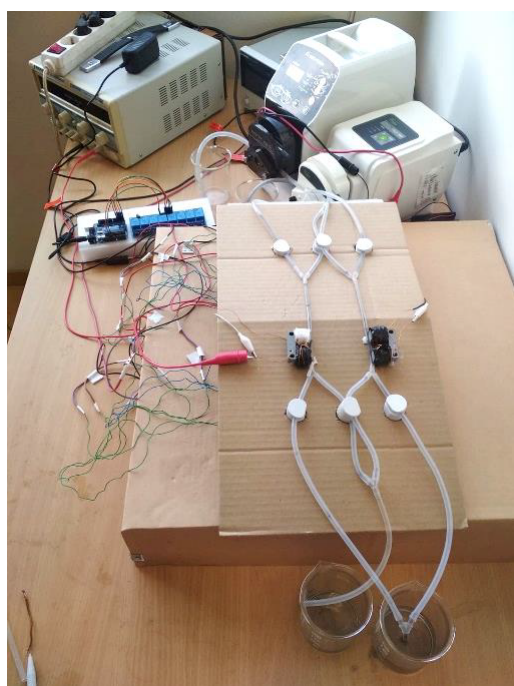


(α')



(β')

Σχήμα 4.1.1: Πρώτη πειραματική διάταξη LGMS [48]



(α')



(β')

Σχήμα 4.1.2: Δεύτερη πειραματική διάταξη LGMS [15]

μαγνητικό πεδίο ρυθμιζόμενης έντασης και μεγάλου εύρους τιμών. Η διαδικασία είναι φαινομενικά συνεχής δηλαδή μεγάλες ποσότητες μαγνητικών σωματιδίων μπορούν να συλλεχθούν από διάλυμα χωρίς διακοπή, καθιστώντας τη συσκευή κατάλληλη για χρήση σε περιβαλλοντικές ή βιοϊατρικές εφαρμογές. Το σύστημα διαχωρίζει οποιοδήποτε σωματίδιο μπορεί να συλλεχθεί μαγνητικά. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε διάλυμα με νερό και σωματίδια μαγνητίτη.

Επίσης, δεν εφαρμόστηκε κάποια μέθοδος ώστε οι κόκκοι σκόνης μαγνητίτη να περιβληθούν από κάποιο άλλο υλικό διότι ο στόχος ήταν η μελέτη συμπεριφοράς σωματιδίων σε απλό νερό βρύσης.

Αρχικά, σχεδιάστηκε διάταξη μαγνητικού διαχωριστή χαμηλής βάρθρωσης με χρήση ηλεκτρομαγνητών μικρού μεγέθους. Υλοποιήθηκε η διάταξη και ξεκίνησαν τα πειράματα. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων διαπιστώθηκε ότι οι ηλεκτρομαγνήτες ορθώς συγκρατούσαν τα σωματίδια στον σωλήνα όμως κατά την απελευθέρωση τους αυτά δεν προχωρούσαν με την ροή ώστε να οδηγηθούν στην ακάθαρτη δεξαμενή. Η απλή παρατήρηση με το μάτι επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα που θα δοθούν στην συνέχεια. Πιθανές αιτίες είναι η αργή απομαγνήτιση των ηλεκτρομαγνητών που δεν επέτρεπε στα σωματίδια να αποδεσμευτούν και η απουσία διαλύτη ο οποίος θα έκανε ομοιόμορφο το διάλυμα. Επομένως, κρίθηκε αναγκαίο να μεταβληθεί η διάταξη.

Ενδεχόμενη λύση ήταν η μετατροπή της διάταξης από οριζόντια σε κάθετη ώστε να αξιοποιηθεί η βαρύτητα. Όμως, για κάθετη ροή διαλύματος χρειάζεται να ασκηθεί μεγαλύτερη ελκτική δύναμη ώστε να ακινητοποιηθούν τα σωματίδια στον σωλήνα διαχωρισμού. Σε αυτό θα βοηθούσε η χρήση ηλεκτρομαγνήτη μεγαλύτερου μεγέθους και κατ' επέκταση μεγαλύτερης βάρθρωσης πεδίου. Παρόλο που ο μαγνήτης είναι πολύ μεγαλύτερος, το μαγνητικό πεδίο που παράγει παραμένει στα όρια της χαμηλής βάρθρωσης [48]. Επομένως, η τελική διάταξη είναι ένα νέο σύστημα LGMS.

Η πειραματική μελέτη της τελικής διάταξης πραγματοποιήθηκε με μεταβολή διαφορετικής παραμέτρου κάθε φορά. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν είναι οι εξής:

- *διάρκεια φάσης*: χρονική διάρκεια που έχει η κάθε φάση (φάση καθαρισμού και φάση συλλογής νανοσωματιδίων), γράφεται στην εξής μορφή: *χρόνος_καθαρισμού/χρόνος_συλλογής* (ή απλά on/off ηλεκτρομαγνήτη) π.χ. 16/7 sec.
- *ταχύτητα ροής*: ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, η οποία μετρείται σε RPM (Revolutions Per Minute) ή min^{-1} .
- *μαγνητικό πεδίο ηλεκτρομαγνήτη*: μαγνητικό πεδίο που επιβάλλει ο ηλεκτρομαγνήτης, η αλλαγή της τιμής του γίνεται με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας του ηλεκτρομαγνήτη μέσω του καναλιού 1 του τροφοδοτικού.

Η μεταβολή της ποσότητας των νανοσωματιδίων μαγνητίτη κρίθηκε περιττή αφού τα νανοσωματίδια δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στο διάλυμα και επομένως απλά θα περάσει μεγαλύτερη ποσότητα νανοσωματιδίων. Όλες οι διατάξεις, τα υλικά, ο εξοπλισμός, η διαδικασία και τα αποτελέσματα περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

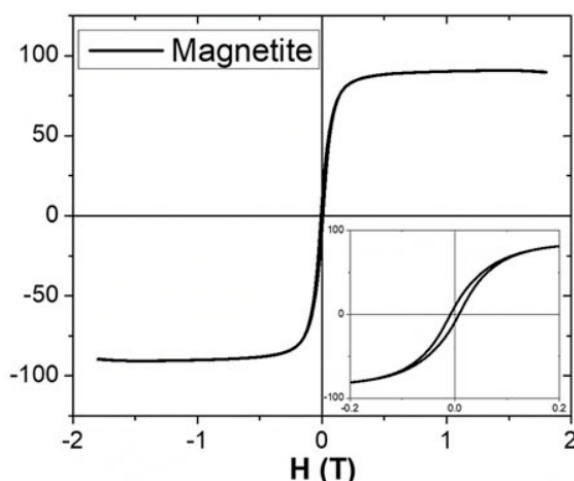
Επιπλέον, εξετάστηκε το ενδεχόμενο η ανατροφοδότηση του καθαρού διαλύματος να επιφέρει μεγαλύτερο ποσοστό καθαρότητας, δηλαδή ο μαγνητικός διαχωρισμός να γίνεται σε δύο στάδια. Τέλος, εκτελέστηκαν κάποια πειράματα με τις βέλτιστες παραμέτρους.

4.3 Υλικά και εξοπλισμός

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται ο εξοπλισμός και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την υλοποίηση των διατάξεων και την πειραματική διαδικασία.

Νανοσωματίδια μαγνητίτη

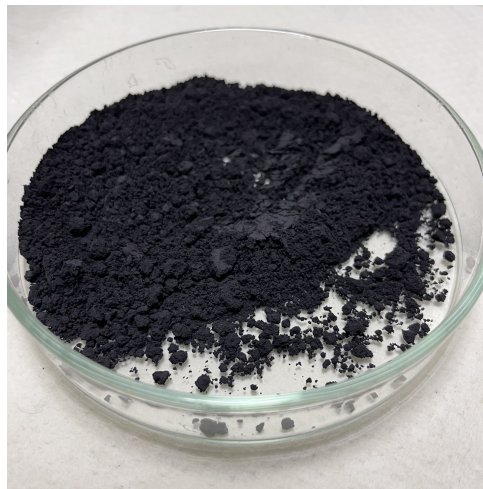
Ο μαγνητίτης (Fe_3O_4) αποτελεί μέταλλευμα σιδήρου και όπως φαίνεται από τον χημικό του τύπο περιέχει περίπου 72.4% σίδηρο (Fe) και 27.6% οξυγόνο (O). Ο ακριβής χημικός τύπος του είναι $Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4$. Έχει μελανότερρο χρώμα και βρίσκεται σε κοκκώδη, φλοιώδη και στιφρά συσσωματώματα. Είναι σιδηρομαγνητικό υλικό και χρησιμεύει ως μόνιμος μαγνήτης όταν εφαρμοστεί σε αυτόν εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Ωστόσο, δεν εμφανίζει υστέρηση στην μαγνήτιση του, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.1. Αυτό συμβαίνει διότι τα σωματίδια του έχουν πολύ μικρή διάμετρο ώστε να εμφανίζουν υπερπαραμαγνητική συμπεριφορά. Το υλικό φτάνει σε κορεσμό γύρω στα 0.5 T, ενώ η μέγιστη μαγνήτιση του είναι περίπου στα 90 Am²/kg.



Σχήμα 4.3.1: Βρόχος υστέρησης μαγνητίτη [49]

Μεγάλα κοιτάσματα μαγνητίτη υπάρχουν ανά τον κόσμο σε αρκετά σημεία, όπως Χιλή, Ουρουγουάη, Σουηδία, Αυστραλία, Νέα Ζηλανδία, ΗΠΑ, ενώ μικρότερα κοιτάσματα υπάρχουν και σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης, της Αφρικής, της Λατινικής Αμερικής, στην Ινδία, στην Ινδονησία. Στην Ελλάδα, το μεγαλύτερο κοιτάσμα μαγνητίτη βρίσκεται στην Σέριφο, στα Χάλαρα. Επίσης, συναντάται στην Τήνο, στην Ερμιόνη, στη Σκύρο και στο Πήλιο. Τέλος, αποτελεί ένα από τα κύρια συστατικά της σμυρίδας Νάξου. Εκτός από σιδηρομέταλλευμα, μπορεί να παρασκευαστεί και χημικά αλλά με μεγαλύτερο κόστος.

Τα *νανοσωματίδια μαγνητίτη* παρουσιάζουν σημαντικές μαγνητικές ιδιότητες λόγω του μεγέθους τους. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές, περιβαλλοντικές και βιοϊατρικές εφαρμογές [50]. Στο σχήμα 4.3.2 φαίνονται τα σωματίδια που διαθέτει το εργαστήριο. Το μέγεθος τους κυμαίνεται από 2000nm έως 4000nm. [51]



Σχήμα 4.3.2

Περισταλτική αντλία

Για την κίνηση του διαλύματος μέσα στους σωλήνες χρησιμοποιήθηκε η περισταλτική αντλία Shenchen LabM6 (Εικόνα 4.3.3). Η αντλία παρέχει ρυθμούς ροής μεταξύ 0.0002 και 2280 ml/min και η ταχύτητα μπορεί να ρυθμιστεί χειροκίνητα από το πληκτρολόγιο μεμβράνης που βρίσκεται στην πάνω όψη ή αυτόματα μέσω προαιρετικού εξωτερικού ελέγχου. [52]



Σχήμα 4.3.3: Περισταλτική αντλία - Shenchen LabM6 [52]

Τροφοδοτικό

Για την τροφοδοσία του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε το τροφοδοτικό Extech Quad Output DC Power Supply 382270 της Extech Instruments. Διαθέτει 4 κανάλια, 2 ρυθμιζόμενα (0-30V/0-5A) και 2 ημι-ρυθμιζόμενα με σταθερό ρεύμα (3-6.5V/3A και 8-15V/1A) και προστασία υπερφόρτωσης και βραχυκυκλώματος. Τα δύο κανάλια των 30V μπορούν να συνδυαστούν παράλληλα για 10A ή σε σειρά για 60V (Εικόνα 4.3.4). [53]

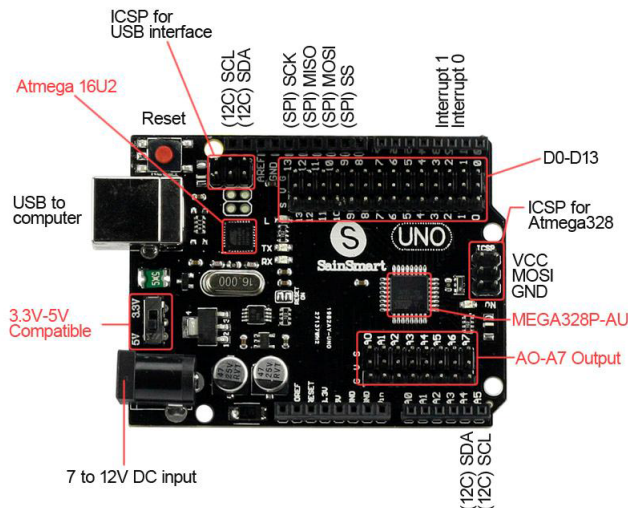


Σχήμα 4.3.4: Τροφοδοτικό - Extech Quad Output DC Power Supply 382270 [53]

Arduino UNO

Το Arduino αποτελεί υλικό και λογισμικό ανοικτού κώδικα για τον σχεδιασμό και την παραγωγή μικροελεγκτή μονής πλακέτας (single-board microcontroller). Οποιαδήποτε εταιρία ή άτομο μπορεί να αξιοποιήσει τον βασικό σχεδιασμό ώστε να κατασκευάσει δικές του μοναδικές παραλλαγές.

Οι πλακέτες Arduino χρησιμοποιούν πληθώρα μικροεπεξεργαστών και ελεγκτών. Διαθέτουν πινάκια ψηφιακών και αναλογικών εξόδων/εισόδων για τον χειρισμό διαφόρων εξαρτημάτων και εξωτερικών κυκλωμάτων. Συνδέεται σε υπολογιστή μέσω θύρας USB ώστε να προγραμματιστεί και τροφοδοτείται είτε μέσω υποδοχής ρεύματος είτε μέσω της θύρας USB. Τα προγράμματα γράφονται στην γλώσσα προγραμματισμού C/C++ χρησιμοποιώντας ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (Integrated Development Environment - IDE). [54]



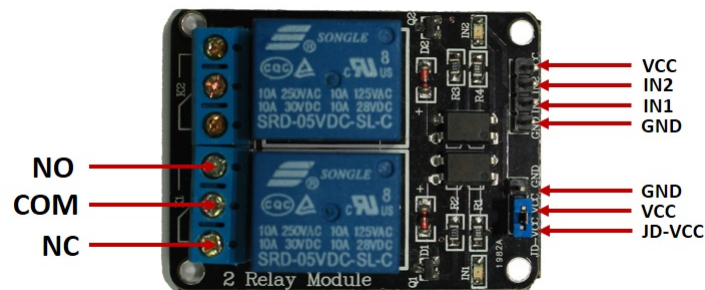
Σχήμα 4.3.5: Πλακέτα Arduino SainSmart UNO R3 [55]

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το Arduino UNO R3 της SainSmart. Βασίζεται στον μικροελεγκτή Atmel ATmega328. Διαθέτει 14 πινάκια για ψηφιακές εισόδους/εξόδους, εκ των οποίων τα 6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξόδους PWM (Pulse Width Modulation), 6

αναλογικές εισόδους, 16MHz ceramic resonator, θύρα USB, υποδοχή ρεύματος, ICSP header και κουμπί επανεκκίνησης. Συγκεκριμένα, η έκδοση της SainSmart μπορεί να λειτουργήσει στα 5V ή 3.3V με την βοήθεια ενός διακόπτη που βρίσκεται πάνω στην πλακέτα. Επίσης, διαθέτει επιπλέον αρσενικούς ακροδέκτες (male pins) για τις θύρες ψηφιακών και αναλογικών εισόδων/εξόδων. Δίπλα σε αυτές υπάρχουν πινάκια τάσης (working voltage level) και γείωσης. [55]

Μονάδα ρελέ (Relay module)

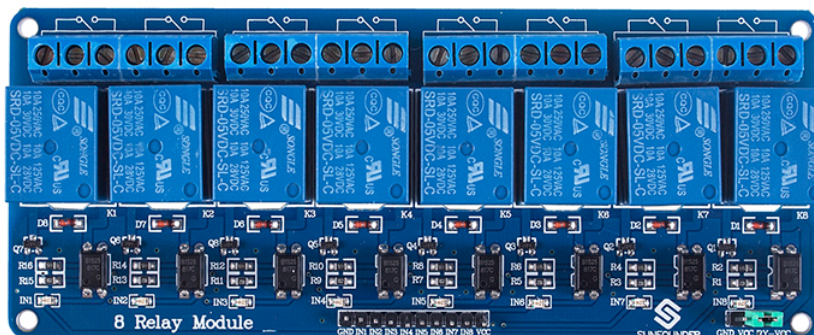
Μονάδα ρελέ ονομάζουμε μια πλακέτα διεπαφής η οποία μπορεί να ελέγχει διάφορες συσκευές και άλλο εξοπλισμό που απαιτούν υψηλή τροφοδοσία, δηλαδή λειτουργεί ως διακόπτης. Μπορεί να ελεγχθεί από ένα μικροελεγκτή ως αναλογική έξοδος και τροφοδοτείται συνήθως με 5V. Τα ρελέ τροφοδοτούνται με μέγιστες τιμές AC 250V/10A και DC 30V/10A. Στο σχήμα 4.3.6 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μονάδας ρελέ 2 καναλιών.



Σχήμα 4.3.6: Μονάδα ρελέ 2 καναλιών [56]

Στο σχήμα σημειώνονται όλες οι συνδέσεις και τα πινάκια. Αριστερά είναι η πλευρά υψηλής τάσης και δεξιά η πλευρά χαμηλής τάσης. Στην αριστερή πλευρά υπάρχουν 3 συνδέσεις για κάθε ρελέ: common (COM), normally closed (NC), και normally open (NO), στις οποίες συνδέονται τα φορτία. Στην δεξιά πλευρά υπάρχουν 7 πινάκια τα οποία συνδέονται με τον μικροελεγκτή. [56]

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μονάδα ρελέ 8 καναλιών που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3.7. [57]



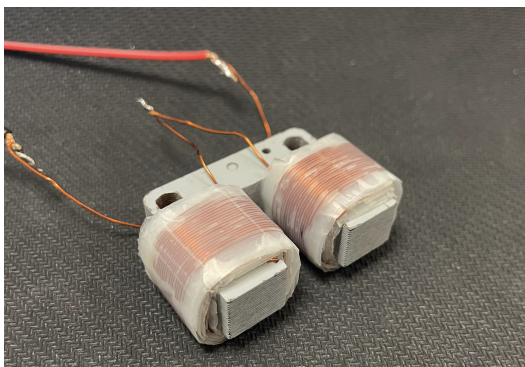
Σχήμα 4.3.7: Μονάδα ρελέ 8 καναλιών (<http://wiki.sunfounder.cc/images/7/72/Chad1.jpg>)

Ηλεκτρομαγνήτες

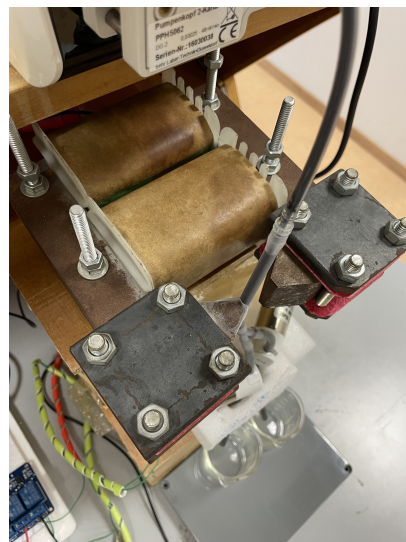
Ο ηλεκτρομαγνήτης είναι τύπος μαγνήτη στον οποίο το μαγνητικό πεδίο οφείλεται σε ηλεκτρικό ρεύμα. Αποτελείται από πυρήνα στον οποίο τυλίγεται σύρμα δημιουργώντας ένα πηνίο [58]. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας κατασκευάστηκαν 4 πανομοιότυποι ηλεκτρομαγνήτες και χρησιμοποιήθηκε ένας 5ος ηλεκτρομαγνήτης που υπήρχε στο εργαστήριο. Στο εξής οι πρώτοι 4 ηλεκτρομαγνήτες θα αναφέρονται ως “ηλεκτρομαγνήτης 1” και ο 5ος ως “ηλεκτρομαγνήτης 2”.

Ο *ηλεκτρομαγνήτης 1* κατασκευάστηκε τυλίγοντας σύρμα χαλκού διατομής 0.5 mm γύρω από πυρήνα ηλεκτρικού χάλυβα σε σχήμα Π, δημιουργώντας δύο πηνία 140 περιελίξεων, ένα σε κάθε “πόδι” (Σχήμα 5.0.1(α)). Τα πηνία συνδέονται μεταξύ τους συνθέτοντας ένα μεγαλύτερο πηνίο 280 περιελίξεων. Οι μαγνητικές γραμμές κατευθύνονται μέσα από τον χάλυβα και θα τείνουν να κλείσουν το κύκλωμα στο ανοικτό σημείο του πυρήνα. Άρα, σε αυτό το σημείο θα υπάρχει μεγάλη πυκνότητα μαγνητικών γραμμών, αυξάνοντας το πεδίο και την βύθμωση του. Στο πειραματικό μέρος, πραγματοποιείται προσομοίωση του ηλεκτρομαγνήτη στο Ansys Electronics Desktop για επαλήθευση του παραγόμενου πεδίου.

Ο *ηλεκτρομαγνήτης 2* είναι πολύ μεγαλύτερος σε μέγεθος. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από φύλλα ηλεκτρικού χάλυβα τα οποία συγκρατούνται με βίδες ώστε να μην μετακινούνται λόγω μαγνητικού πεδίου. Γύρω από τον πυρήνα τυλίχθηκαν δύο πηνία 850 περιελίξεων σύρματος χαλκού διατομής 1 mm το καθένα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους (Σχήμα 5.0.1(β)). Έχει μέγεθος 15cm x 15cm x 3cm και λόγω του μεγέθους του υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια για απαγωγή θερμότητας επιτρέποντας του να διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως 5A για τουλάχιστον 25 λεπτά χωρίς να θερμαίνεται αισθητά. Επομένως το φαινόμενο Joule θεωρείται αμελητέο.



(α')



(β')

Σχήμα 4.3.8: Ηλεκτρομαγνήτες (α) ασθενούς πεδίου (β) ισχυρού πεδίου

Σωληνοειδής βαλβίδα pinch 2 οδών (2-way Solenoid Pinch Valve)

Η σωληνοειδής βαλβίδα pinch 2 οδών χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής των σωληνώσεων, χωρίς να έρχεται σε άμεση επαφή με το ρευστό. Η βαλβίδα “τσιμπά” (pinch) τον σωλήνα ώστε να αποτρέψει την ροή του ρευστού. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η Solenoid-Operated 2-Way Pinch Valve της Cole-Parmer (Σχήμα 4.3.9). [59] [60]



Σχήμα 4.3.9: Σωληνοειδής βαλβίδα pinch 2 οδών

Σωλήνες σιλικόνης

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες διαφορετικής διατομής διότι για κάθε σημείο της διάταξης υπήρχε διαφορετική ανάγκη. Στην κεφαλή της περισταλτικής αντλίας χρησιμοποιήθηκε σωλήνας εσωτερικής διαμέτρου 3.17 mm και εξωτερικής διαμέτρου 4.07 mm, ο οποίος λόγω της μικρής διατομής του εξυπηρετεί τις προδιαγραφές μεγέθους της κεφαλής. Στις βαλβίδες χρησιμοποιήθηκε σωλήνας εσωτερικής διαμέτρου 4 mm και εξωτερικής διαμέτρου 6 mm, ο οποίος καλύπτει την ανάγκη για πλήρη διακοπή της ροής του ρευστού. Ο ίδιος σωλήνας χρησιμοποιήθηκε και για τον σωλήνα διαχωρισμού.

Φασματοφωτόμετρο (Spectrophotometer)

Το φασματοφωτόμετρο είναι ένα όργανο το οποίο μετρά την ποσότητα φωτονίων (ένταση του φωτός) που απορροφούνται μετά την διέλευση τους μέσω ενός δείγματος (διάλυμα). Με αυτή την μέτρηση καθορίζεται η συγκέντρωση κάποιας γνωστής χημικής ουσίας στο δείγμα, εν προκειμένω των νανοσωματιδίων μαγνητίτη στο νερό. Δηλαδή καταγράφεται η οπτική πυκνότητα του δείγματος, μέγεθος το οποίο, στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται ως κριτήριο καθαρότητας του διαλύματος μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Ως τιμή αναφοράς θεωρείται η οπτική πυκνότητα του καθαρού νερού.

Ανάλογα με το μήκος κύματος (λ) της πηγής φωτός, μπορεί να χωριστεί σε δύο τύπους: UV-visible spectrophotometer ($185 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$) και IR spectrophotometer ($700 \text{ nm} < \lambda < 15000 \text{ nm}$). Το εργαστήριο διαθέτει το X-ma 1000 Spectrophotometer της Human

Corporation (Σχήμα 4.3.10), το οποίο εμπίπτει στην πρώτη κατηγορία. Για την παρούσα εργασία ορίστηκε $\lambda = 600 \text{ nm}$, μήκος κύματος στο οποίο τα νανοσωματίδια μαγνητίτη έχουν την μέγιστη απορροφητικότητα. [61]



Σχήμα 4.3.10: Φασματοφωτόμετρο - X-ma 1000 Spectrophotometer, Human Corporation [62]

Ζυγαριά ακριβείας

Το εργαστήριο διαθέτει την ζυγαριά ακριβείας OHAUS Adventurer™ Analytical (Σχήμα 4.3.11), η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον ακριβή υπολογισμό της ποσότητας νανοσωματιδίων κάθε πειράματος. [63]

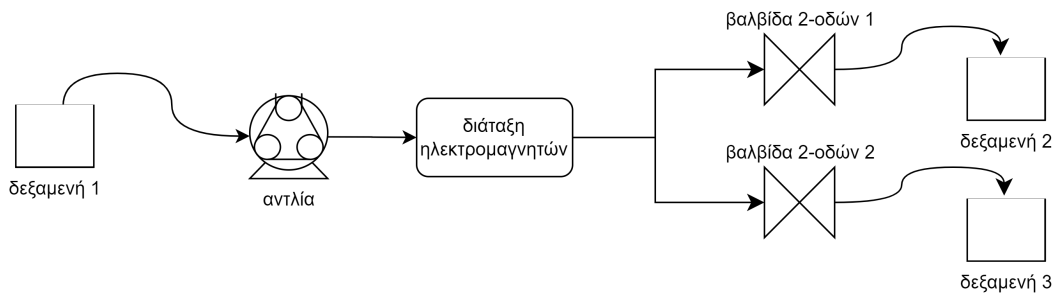


Σχήμα 4.3.11: Ζυγαριά ακριβείας OHAUS Adventurer™ Analytical [63]

4.4 Περιγραφή διατάξεων

Η αρχική προτεινόμενη διάταξη για μαγνητικό διαχωρισμό χαμηλής βάρυμωσης (LGMS) φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 4.4.1, σχεδιασμένο στην ιστοσελίδα www.diagram.net. Παρουσιάζεται μόνο το μέρος που αφορά το κομμάτι του μαγνητικού διαχωρισμού. Τα υπόλοιπα

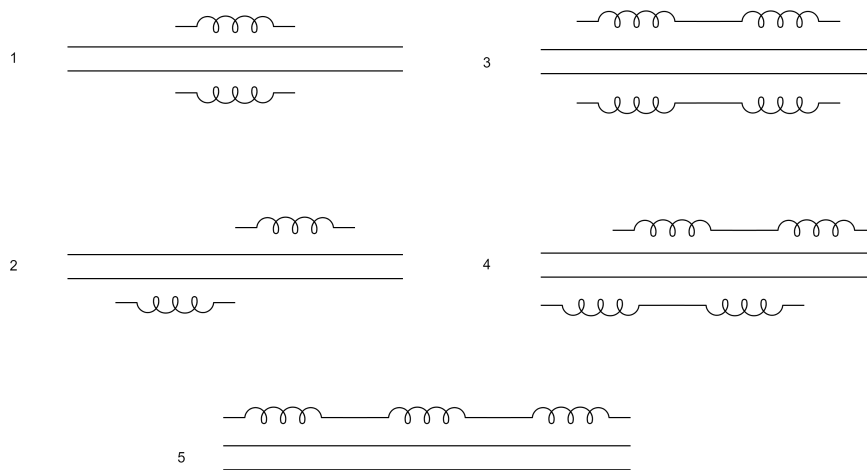
μέρη της συνολικής διάταξης αναλύονται στην συνέχεια για την τελική πειραματική διάταξη.



Σχήμα 4.4.1: Σχηματικό διάγραμμα αρχικής προτεινόμενης διάταξης LGMS

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής βασίζεται στην χρήση των ηλεκτρομαγνητών για την συγκράτηση των σωματιδίων στα τοιχώματα του σωλήνα. Το αρχικό διάλυμα αντλείται από την δεξαμενή 1 και με εναλλαγές στην χρήση των βαλβιδών οδηγείται σε διαφορετική έξοδο-δεξαμενή κάθε φορά. Στην δεξαμενή 2 συλλέγεται το καθαρό διάλυμα κατά την διάρκεια που συγκρατούνται τα σωματίδια και στην δεξαμενή 3 συλλέγεται το ακάθαρτο διάλυμα, δηλαδή τα μαζεμένα σωματίδια μαγνητίτη αφού έχουν αφεθεί ελεύθερα μετά την συγκράτηση.

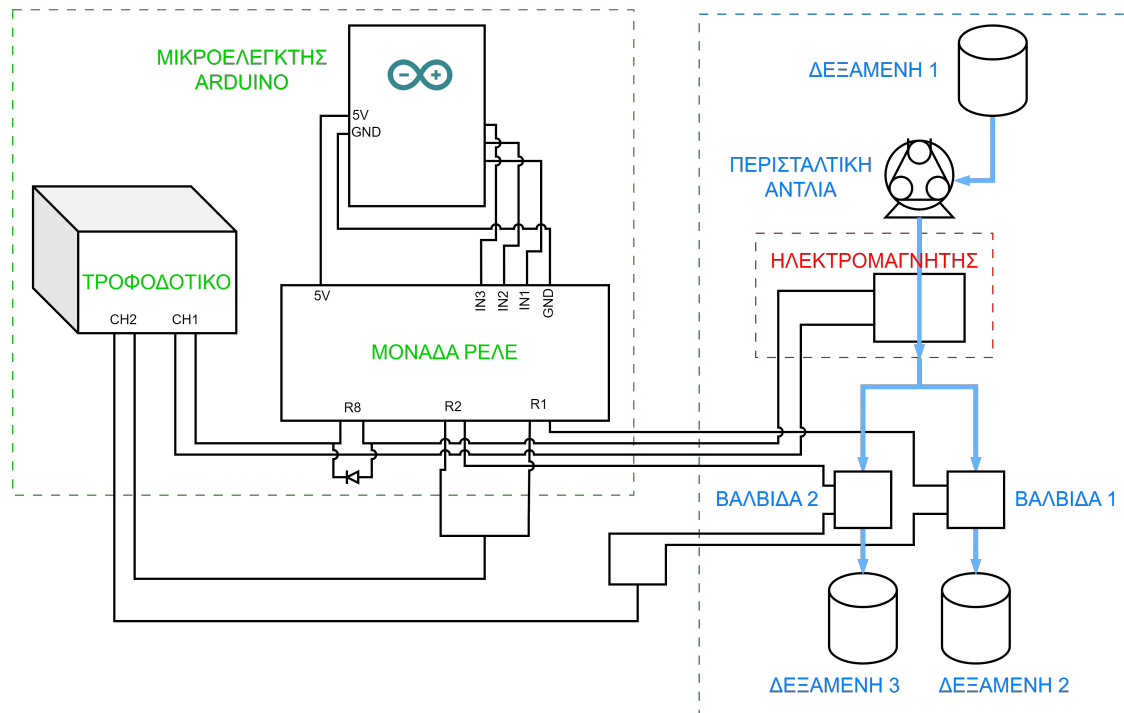
Ως διάταξη ηλεκτρομαγνητών θεωρείται μία εκ των διατάξεων που δίνονται στο σχήμα 4.4.2.



Σχήμα 4.4.2: Σχηματικό διάγραμμα διαφορετικών διατάξεων ηλεκτρομαγνητών

Η τελική πειραματική διάταξη LGMS φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 4.4.3, σχεδιασμένο στην ιστοσελίδα www.diagram.net. Χωρίζεται σε τρία μέρη τα οποία αναλύονται στην συνέχεια.

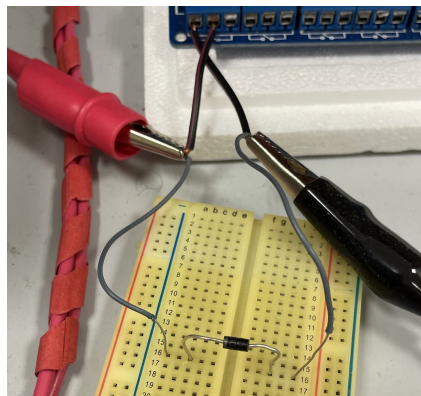
Το πρώτο μέρος αφορά το κομμάτι ελέγχου και τροφοδοσίας της διάταξης (βλ. Σχήμα 4.4.3, πράσινο χρώμα). Περιλαμβάνει το τροφοδοτικό, την πλακέτα Arduino, την μονάδα ρελέ και μία δίοδο. Το τροφοδοτικό προσφέρει την απαιτούμενη τάση στον ηλεκτρομαγνήτη και στις βαλβίδες



Σχήμα 4.4.3: Σχηματικό διάγραμμα συνολικής πειραματικής διάταξης HGMS

μέσω των καναλιών 1 και 2, αντίστοιχα. Η μονάδα ρελέ ελέγχεται από την πλακέτα Arduino μέσω του κώδικα ο οποίος δίνεται στο παράρτημα.

Η διάοδος τοποθετείται παράλληλα στο ρελέ που λειτουργεί ως διακόπτης για τον ηλεκτρομαγνήτη και με αντίθετη πολικότητα από την τροφοδοσία. Προστέθηκε για να προστατεύει το ρελέ, και συγκεκριμένα το πηνίο, από μεγάλες τιμές τάσης (voltage spikes) που προκύπτουν κάθε φορά μετά από διακοπή της τροφοδοσίας. Αυτά τα στιγμιαία spikes είναι πολύ μεγαλύτερα σε τιμή από την τάση τροφοδοσίας με αποτέλεσμα το ρελέ να καταστρέφεται μετά από παρατεταμένη χρήση. Η διάοδος ονομάζεται *διάοδος ελευθέρως ροής (flyback diode)* (Σχήμα 4.4.4). [64]

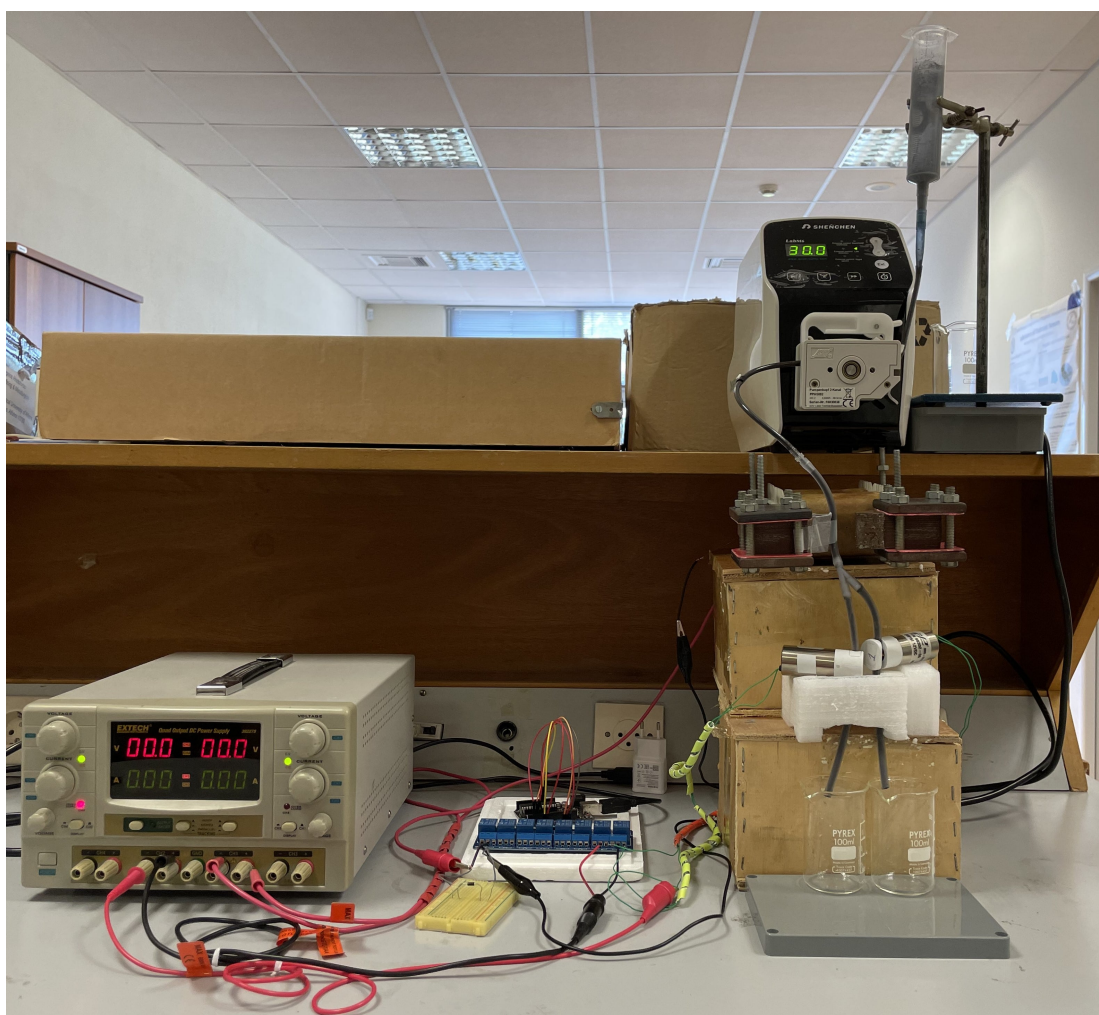


Σχήμα 4.4.4: Συνδεσμολογία διάοδου ελευθέρως ροής (flyback diode)

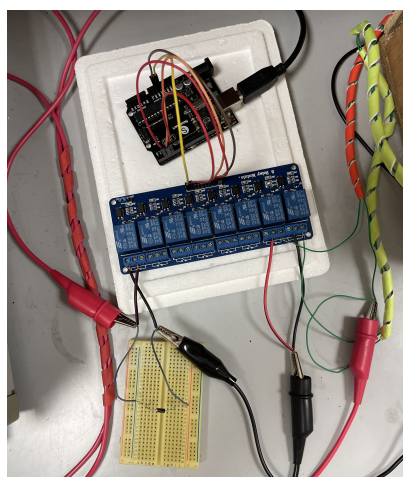
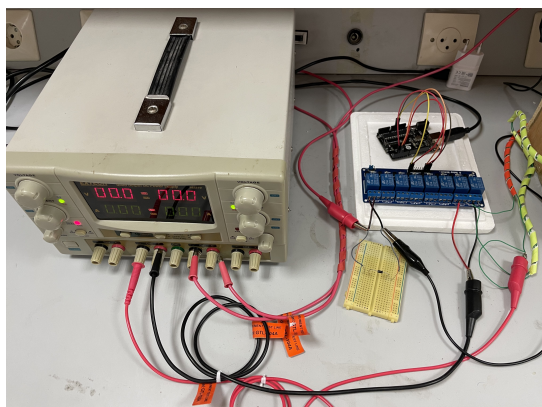
Το δεύτερο μέρος αφορά την ροή του διαλύματος (βλ. Σχήμα 4.4.3, μπλε χρώμα). Περιλαμβάνει την περισταλτική αντλία, τις βαλβίδες, τις δεξαμενές και τις σωληνώσεις. Η περισταλτική αντλία μεταφέρει το διάλυμα από την δεξαμενή 1 προς την υπόλοιπη διάταξη. Οι βαλβίδες ελέγχονται από το Arduino του πρώτου μέρους και επιτρέπουν ή αποτρέπουν την ροή του ρευστού προς τον κλάδο τους ανάλογα με τις εντολές που δίνει ο μικροελεγκτής. Η δεξαμενή 1 περιέχει το αρχικό διάλυμα, δηλαδή νερό και νανοσωματίδια, η δεξαμενή 2 το καθαρό διάλυμα, δηλαδή νερό που έχει διαχωριστεί από νανοσωματίδια, και η δεξαμενή 3 το ακάθαρτο διάλυμα, δηλαδή νερό με συλλεγμένα νανοσωματίδια μαγνητίτη.

Το τρίτο μέρος αφορά το εξωτερικώς επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο παράγεται από τον ηλεκτρομαγνήτη (βλ. Σχήμα 4.4.3, κόκκινο χρώμα). Η λειτουργία του ηλεκτρομαγνήτη ελέγχεται από το Arduino του πρώτου μέρους.

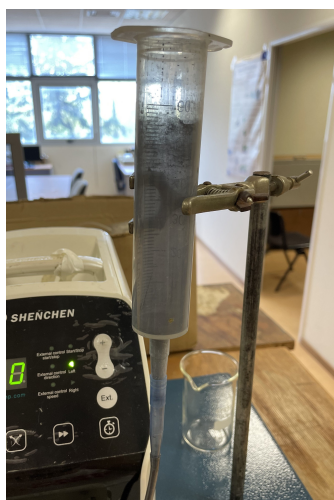
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται λεπτομερείς φωτογραφίες της διάταξης.



Σχήμα 4.4.5: Συνολική πειραματική διάταξη



Σχήμα 4.4.6: Πρώτο μέρος: έλεγχος και τροφοδοσία



(α')



(β')



(γ')



(δ')

Σχήμα 4.4.7: Λεπτομέρειες δεύτερου μέρους: ροή διαλύματος (α) αρχική δεξαμενή (β) περισταλτική αντλία (γ) βαλβίδες (δ) τελικές δεξαμενές (ακάθαρτη αριστερά, καθαρή δεξιά)



Σχήμα 4.4.8: Λεπτομέρειες σωληνώσεων πειράματος (α) σωλήνας διαχωρισμού (β) διακλάδωση

Στο σχήμα 4.4.8(α) φαίνεται ο σωλήνας διαχωρισμού, δηλαδή ο σωλήνας στον οποίο συγκατατούνται τα μαγνητικά νανοσωματίδια ώστε να διαχωριστούν από το διάλυμα. Τοποθετήθηκε στο αριστερό άκρο του ηλεκτρομαγνήτη ώστε τα σωματίδια να μαζευτούν στην αριστερή πλευρά του σωλήνα. Όταν αφεθούν ελεύθερα θα τείνουν να οδηγηθούν προς τα αριστερά, όπου βρίσκεται η δεξαμενή του ακάθαρτου διαλύματος μειώνοντας την πιθανότητα να “λερώσουν” το καθαρό διάλυμα. Για τον ίδιο λόγο επιλέχθηκε και η διακλάδωση μετά τον σωλήνα διαχωρισμού (Σχήμα 4.4.8(β)), ώστε τα ελεύθερα σωματίδια να ακολουθήσουν την κάθετη πορεία που επιβάλλει η βαρυτική έλξη προς το ακάθαρτο διάλυμα.

4.5 Περιγραφή διαδικασίας

Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή των βημάτων που ακολουθήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία: Πρώτα απ’ όλα ετοιμάζεται το διάλυμα προς διαχωρισμό, το αρχικό διάλυμα. Μέσω της ζυγαριάς ακριβείας υπολογίζεται το βάρος των νανοσωματιδίων μαγνητίτη για το εκάστοτε πείραμα και τοποθετούνται μαζί με 50 ml νερού βρύσης στην δεξαμενή. Το αρχικό διάλυμα είναι έτοιμο και ανακατεύεται καλά ώστε τα σωματίδια να κατανεμηθούν όσο γίνεται πιο ομοιόμορφα στο υγρό. Μικρή ποσότητα διαλύματος τοποθετείται στο φασματοφωτόμετρο και μετριέται η οπτική πυκνότητα. Στη συνέχεια, το πρώτο μέρος τίθεται σε λειτουργία και ξεκινά η διαδικασία διαχωρισμού. Όταν όλο το διάλυμα φτάσει στις δεξαμενές 2 και 3, απενεργοποιείται το κανάλι τροφοδοσίας 1, δηλαδή ο ηλεκτρομαγνήτης. Μικρή ποσότητα καθαρού νερού περνάει από την διάταξη ώστε να μαζέψει τυχόντα υπολείμματα μαγνητίτη και να καθαρίσει την διάταξη για το επόμενο πείραμα. Τέλος, επαναλαμβάνεται η προαναφερθείσα διαδικασία για την μέτρηση της οπτικής πυκνότητας των διαλυμάτων των δεξαμενών 2 και 3, δηλαδή του καθαρού και του ακάθαρτου διαλύματος, αντίστοιχα. Η διαδικασία ολοκληρώθηκε.

Στον πίνακα 4.1 φαίνονται οι φάσεις λειτουργίας της πειραματικής διαδικασίας. Κατάσταση OFF σημαίνει ότι η βαλβίδα δεν διαρρέεται από ρεύμα, άρα δεν κλείνει τον σωλήνα. Αντίθετα, κα-

τάσταση ON σημαίνει ότι η βαλβίδα λειτουργεί, άρα κλείνει τον σωλήνα. Για τον ηλεκτρομαγνήτη σημαίνει ότι είναι, είτε ενεργοποιημένος-ON, είτε απενεργοποιημένος-OFF.

Πίνακας 4.1: Φάσεις λειτουργίας πειραματικής διάταξης

Εξάρτημα	1 ^η φάση	2 ^η φάση	3 ^η φάση
Βαλβίδα 1	OFF	ON	ON
Βαλβίδα 2	ON	OFF	OFF
Ηλεκτρομαγνήτης	ON	ON	OFF

Στη *πρώτη φάση*, η βαλβίδα 1 και ο ηλεκτρομαγνήτης ενεργοποιούνται και η ροή περνάει στον δεξί κλάδο, τον “καθαρό” κλάδο, ώστε το υγρό να καταλήξει στην δεξαμενή 2. Η βαλβίδα 2 παραμένει απενεργοποιημένη. Στην *δεύτερη φάση*, οι βαλβίδες εναλλάσσουν την λειτουργία τους, ώστε η ροή να περάσει στον αριστερό κλάδο, τον “ακάθαρτο” κλάδο και ο ηλεκτρομαγνήτης παραμένει ενεργοποιημένος. Αυτή η φάση διαρκεί πολύ λίγο (1.5 δευτερόλεπτο) και χρειάζεται ώστε τα σωματίδια που συγκρατούνται από τον ηλεκτρομαγνήτη να μην αφεθούν ελεύθερα κατευθείαν με ενδεχόμενο να περάσουν στον καθαρό κλάδο. Θεωρείται δηλαδή μια μεταβατική φάση. Στην *τρίτη φάση*, οι βαλβίδες παραμένουν στην ίδια κατάσταση και ο ηλεκτρομαγνήτης απενεργοποιείται. Τα μαγνητικά νανοσωματίδια απελευθερώνονται και περνάνε στον ακάθαρτο κλάδο ώστε να συλλεχθούν στην δεξαμενή 3. Οι φάσεις επαναλαμβάνονται έως ότου το αρχικό διάλυμα διασχίσει όλη την διάταξη και φτάσει στις δεξαμενές 2 και 3.

Σημειώνεται ότι στο πρώιμο στάδιο ανάπτυξης της διάταξης οι βαλβίδες δεν διέκοπταν την ροή στον σωλήνα. Μετά από μελέτη ώστε να εξακριβωθεί ο λόγος δυσλειτουργίας τους, εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι ξεπέρασαν τον κύκλο ζωής τους λόγω εκτεταμένης χρήσης και έτσι η δύναμη που ασκούσε η βαλβίδα δεν ήταν ικανή να αποτρέψει την ροή. Επομένως, χρειάστηκε να τυπωθεί ένα μικρό προσθετικό με 3D εκτυπωτή το οποίο τοποθετήθηκε στην κεφαλή της βαλβίδας και λειτουργεί ως επέκταση (Σχήματα 4.5.1 και 4.5.2).



Σχήμα 4.5.1: 3D εκτυπωμένο προσθετικό για κεφαλή βαλβίδας



Σχήμα 4.5.2: Βαλβίδα με προσθετικό

4.6 Αποτελέσματα

4.6.1 Αρχική διάταξη

Δίνονται τα αποτελέσματα της αρχικής διάταξης LGMS (Πίνακας 4.2). Το διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείτο από 50 ml νερό και 0.05 gr νανοσωματίδια μαγνητίτη. Η τάση του τροφοδοτικού ρυθμίστηκε στα 4 V για το κανάλι 1 και στα 12 V για το κανάλι 2.

Πίνακας 4.2: Διάφορες μετρήσεις για αρχική διάταξη LGMS

Διάρκεια φάσης (sec)	Ο.Π. Αρχικού (%)	Ο.Π. Καθαρού (%)	Ο.Π. Ακάθαρτου (%)
16/12	48.5	74.7	72.4
16/12	50.9	70.8	50.2
16/12	51.7	63.5	58.4
10/6	52.1	87.0	91.6
12/12	50.3	88.1	91.6
16/12	48.0	87.2	88.0

Στην συνέχεια παρατίθενται οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων χρησιμοποιώντας την τελική διάταξη LGMS. Κάθε φορά μεταβαλλόταν μόνο μία παράμετρος και οι υπόλοιπες έμεναν σταθερές.

4.6.2 Τελική διάταξη

Διάρκεια φάσης

Οι σταθερές παράμετροι έχουν τις εξής τιμές:

- ποσότητα νερού: 50 ml
- ποσότητα νανοσωματιδίων Fe_3O_4 : 0.05 gr
- ταχύτητα ροής: 30 RPM

- τάση ηλεκτρομαγνήτη: 20 V
- τάση βαλβίδων: 12 V

Στον πίνακα 4.3 δίνονται οι μετρήσεις των πειραμάτων.

Πίνακας 4.3: Μετρήσεις για μεταβλητή διάρκεια φάσης

Ακριβής ποσότητα Fe ₃ O ₄ (gr)	Διάρκεια φάσης (sec)	Ο.Π. Αρχικού (%)	Ο.Π. Καθαρού (%)	Ο.Π. Ακάθαρτου (%)
0.0507	6/5	43.8	87.2	71.8
0.0505	8/5	48.2	94.1	78
0.0509	10/5	46.2	92.5	77.8
0.05	12/5	47.3	91.4	70.6
0.0506	14/5	41.7	91.2	66.1
0.0506	16/5	47.5	91	73.8
0.0502	10/7	43.5	89.9	69
0.0503	12/7	43.9	89	68.4
0.0504	14/7	43.6	89.3	67.4

Ταχύτητα ροής

Οι σταθερές παράμετροι έχουν τις εξής τιμές:

- ποσότητα νερού: 50 ml
- ποσότητα νανοσωματιδίων Fe₃O₄: 0.05 gr
- διάρκεια φάσης: 10/5 sec
- τάση ηλεκτρομαγνήτη: 20 V
- τάση βαλβίδων: 12 V

Στον πίνακα 4.4 δίνονται οι μετρήσεις των πειραμάτων.

Πίνακας 4.4: Μετρήσεις για μεταβλητή ταχύτητα ροής

Ακριβής ποσότητα Fe ₃ O ₄ (gr)	Ταχύτητα ροής (RPM)	Ο.Π. Αρχικού (%)	Ο.Π. Καθαρού (%)	Ο.Π. Ακάθαρτου (%)
0.0506	26	49.4	94.4	69.1
0.0506	28	54.2	92.1	76.5
0.0502	30	48.2	94	76.5
0.0504	32	50.3	96.7	72.4
0.0504	34	52.6	95.9	76.8

Μαγνητικό πεδίο ηλεκτρομαγνήτη

Οι σταθερές παράμετροι έχουν τις εξής τιμές:

- ποσότητα νερού: 50 ml
- ποσότητα νανοσωματιδίων Fe_3O_4 : 0.05gr
- ταχύτητα ροής: 30 RPM
- διάρκεια φάσης: 10/5 sec
- τάση βαλβίδων: 12 V

Στον πίνακα 4.5 δίνονται οι μετρήσεις των πειραμάτων.

Πίνακας 4.5: Μετρήσεις για μεταβλητό μαγνητικό πεδίο

Ακριβής ποσότητα Fe_3O_4 (gr)	Τάση η/μ (V)	Ο.Π. Αρχικού (%)	Ο.Π. Καθαρού (%)	Ο.Π. Ακάθαρτου (%)
0.0504	16	50.8	94.3	71.7
0.0504	18	47.3	96	69.5
0.0503	20	51.7	96.6	76.1
0.0509	22	49	95.5	70.5
0.0507	24	51.1	95	69.6
0.0502	26	49.7	94.3	71.8

Ανατροφοδότηση

Για αυτά τα πειράματα, αρχικά διαλύματα θεωρήθηκαν τα καθαρά διαλύματα προηγούμενων πειραμάτων, κρατώντας σταθερές τις παραμέτρους τους.

Στον πίνακα 4.6 δίνονται οι μετρήσεις των πειραμάτων.

Πίνακας 4.6: Μετρήσεις για πειράματα με ανατροφοδότηση καθαρού διαλύματος

1 ^ο στάδιο			2 ^ο στάδιο		
Ο.Π. Αρχικού (%)	Ο.Π. Καθαρού (%)	Ο.Π. Ακάθαρτου (%)	Ο.Π. Αρχικού (%)	Ο.Π. Καθαρού (%)	Ο.Π. Ακάθαρτου (%)
46.2	92.5	77.8	92.5	94.2	81.2
47.3	91.4	70.6	91.4	92.9	73.5
54.2	92.1	76.5	92.1	94.7	77.8
48.2	94	76.5	94	95.8	75.3
51.1	95	69.6	95	96.3	73.4
49.7	94.3	71.8	94.3	95.4	74

Βέλτιστες παράμετροι

Τέλος, εκτελέστηκαν πειράματα με τις βέλτιστες παραμέτρους των τριών αρχικών πειραμάτων. Οι τιμές αυτών, καθώς και των υπολοίπων παραμέτρων είναι οι εξής:

- ποσότητα νερού: 50 ml
- ποσότητα νανοσωματιδίων Fe_3O_4 : 0.05gr

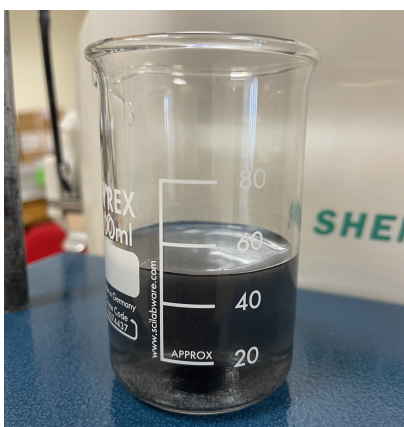
- ταχύτητα ροής: 32 RPM
- διάρκεια φάσης: 8/5 sec
- τάση ηλεκτρομαγνήτη: 20V
- τάση βαλβίδων: 12 V

Οι μετρήσεις φαίνονται στον πίνακα 4.7.

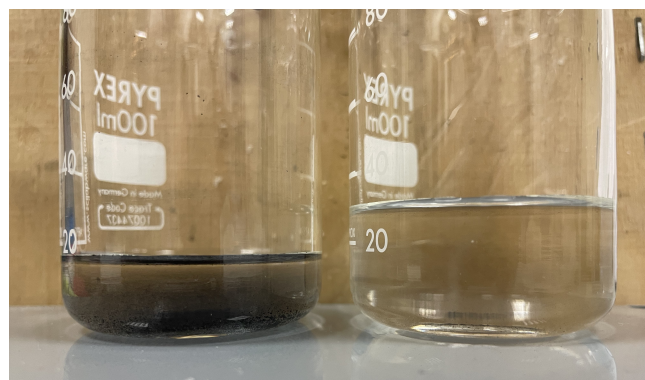
Πίνακας 4.7: Μετρήσεις για πειράματα με βέλτιστες παραμέτρους

Ακριβής ποσότητα Fe ₃ O ₄ (gr)	Ο.Π. Αρχικού (%)	Ο.Π. Καθαρού (%)	Ο.Π. Ακάθαρτου (%)
0.0509	50.7	98.6	54.5
0.0508	51.2	97.1	64.1
0.0503	52.9	97.7	57.9

Στο σχήμα 4.6.1 δίνονται εικόνες από τα τελικά προϊόντα διαχωρισμού.



(α')



(β')

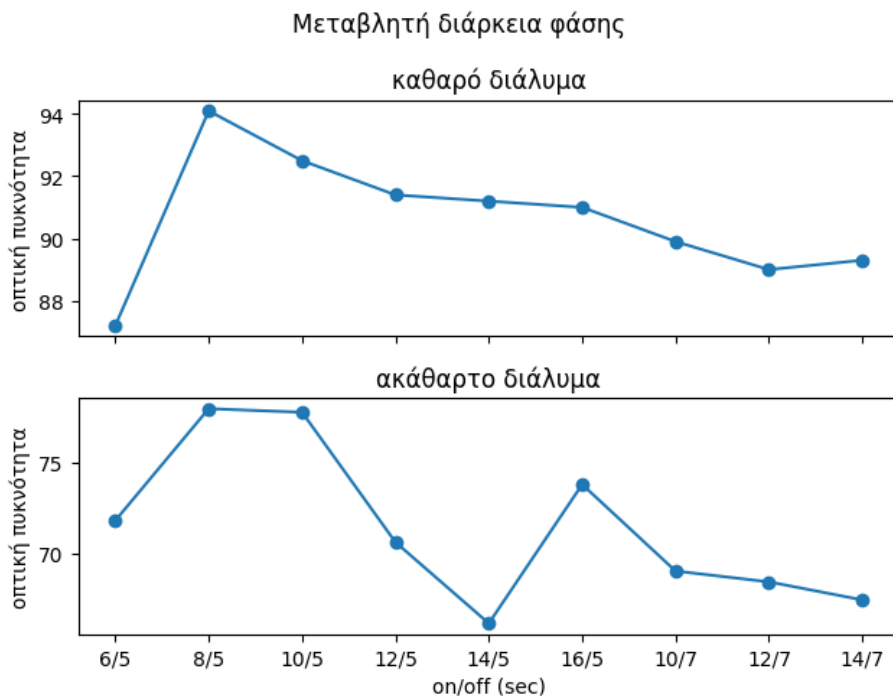
Σχήμα 4.6.1: Αρχικά και τελικά διαλύματα ενός πειράματος: (α) αρχικό διάλυμα (β) τελικά προϊόντα διαχωρισμού, ακάθαρτο (αριστερά) και καθαρό (δεξιά)

4.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

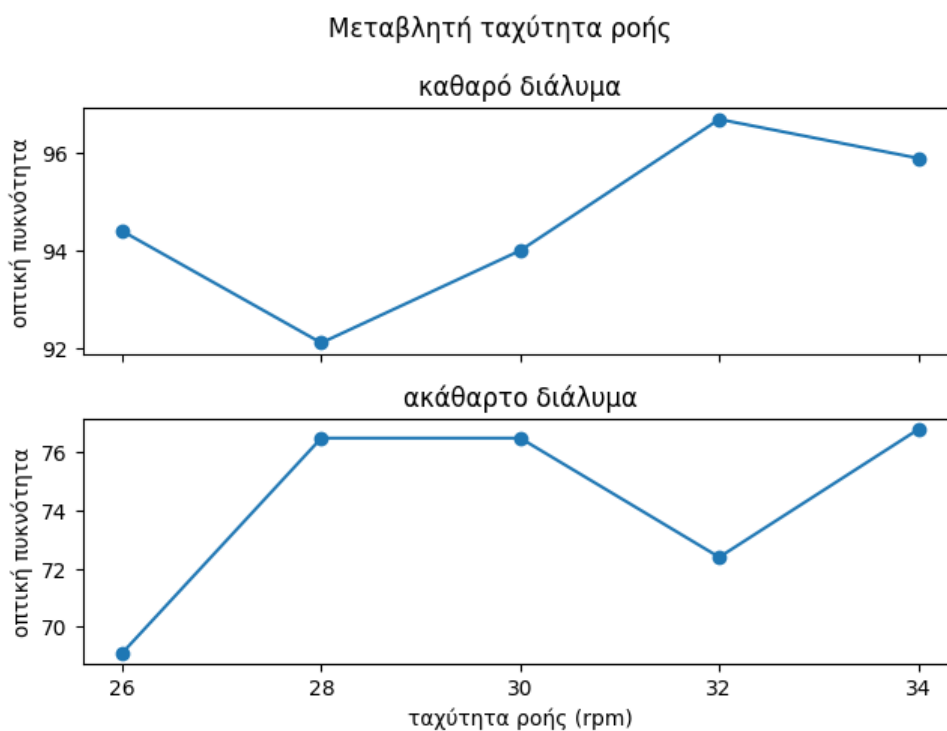
Πρώτα απ' όλα, από τα αποτελέσματα των πειραμάτων για την αρχική διάταξη LGMS, παρατηρείται οπτική πυκνότητα χαμηλότερη του 90% για το καθαρό διάλυμα και στις πλείστες των περιπτώσεων η καθαρότητα του ακάθαρτου διαλύματος ήταν μεγαλύτερη από το καθαρό. Επίσης, οι τιμές για ίδια διάρκεια φάσης δείχνουν μεγάλη τυχαιότητα γεγονός που δείχνει ότι το σύστημα δεν είναι αξιόπιστο. Για αυτούς του λόγους επιβεβαιώνεται η ανάγκη για αλλαγή της διάταξης.

Σημειώνεται ότι η βελτίωση των τιμών στα 3 τελευταία πειράματα οφείλεται στο γεγονός ότι έγινε αλλαγή του σωλήνα διαχωρισμού, σε σωλήνα μικρότερης εσωτερικής διατομής. Αυτό έγινε διότι η ροή του διαλύματος φάνηκε να δημιουργεί ένα ρυάκι στον σωλήνα αφού ήταν μεγαλύτερης διατομής από τον σωλήνα του προηγούμενου σταδίου και ενδεχομένως υπήρχε διαφορά στην πίεση.

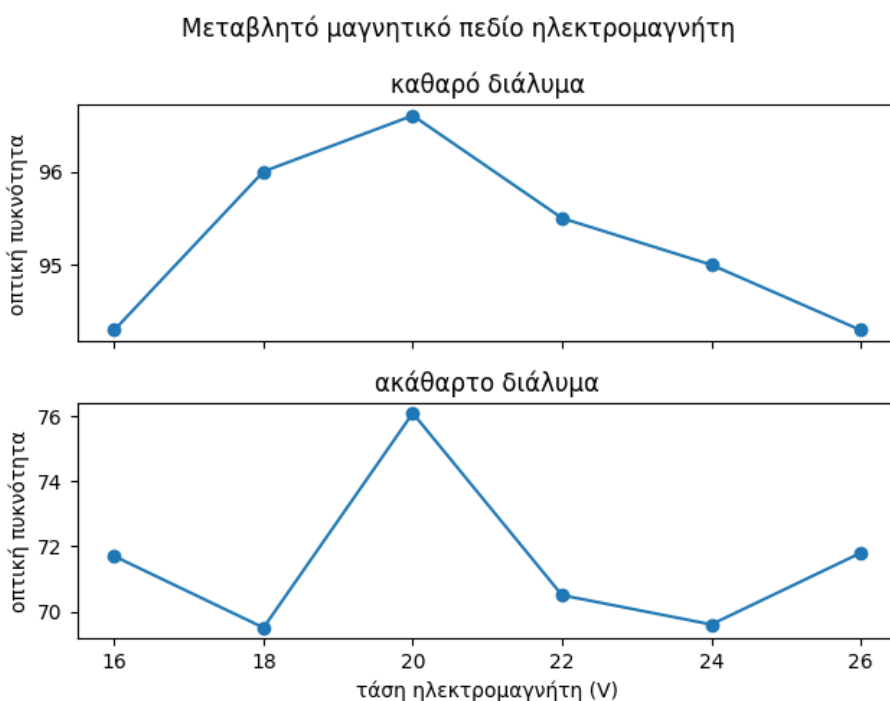
Με βάση τα αποτελέσματα για την τελική διάταξη σχεδιάστηκαν γραφικές παραστάσεις χρησιμοποιώντας κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Python, ο οποίος δίνεται σε παράρτημα στο τέλος της εργασίας. Στα ακόλουθα σχήματα δίνονται τα διαγράμματα για διάρκεια φάσης (4.7.1), ταχύτητα ροής (4.7.2) και μαγνητικό πεδίο(τάση) ηλεκτρομαγνήτη (4.7.3) συναρτήσει της οπτικής πυκνότητας, για καθαρό και ακάθαρτο διάλυμα.



Σχήμα 4.7.1: Διάρκειας φάσης συναρτήσει της οπτικής πυκνότητας για καθαρό και ακάθαρτο διάλυμα



Σχήμα 4.7.2: Ταχύτητα ροής συναρτήσει της οπτικής πυκνότητας για καθαρό και ακάθαρο διάλυμα



Σχήμα 4.7.3: Τάση ηλεκτρομαγνήτη συναρτήσει της οπτικής πυκνότητας για καθαρό και ακάθαρο διάλυμα

Στα πειράματα με μεταβλητή διάρκεια φάσης, η καλύτερη απόδοση βρέθηκε για 8/5 sec. Με μείωση του χρόνου καθαρισμού, ο ηλεκτρομαγνήτης δεν προλαβαίνει να δεσμεύσει όλα τα σωματίδια που περιέχονται στο διάλυμα το οποίο ρέει στον σωλήνα διαχωρισμού και έτσι ορισμένα σωματίδια οδηγούνται στο καθαρό διάλυμα, μειώνοντας την απόδοση του συστήματος. Με αύξηση του χρόνου καθαρισμού, ο ηλεκτρομαγνήτης φτάνει σε σημείο που δεν μπορεί να συγκρατήσει άλλα σωματίδια, άρα ορισμένα σωματίδια περνάνε στο καθαρό διάλυμα, μειώνοντας και πάλι την απόδοση του συστήματος. Επίσης, πιθανώς ο σωλήνας να φράσσεται από τον όγκο των σωματιδίων που συγκρατούνται, να αυξάνεται η πίεση και η ροή να παρασύρει σωματίδια προς το καθαρό διάλυμα. Με αύξηση του χρόνου συλλογής, οδηγείται περισσότερο διάλυμα απ' όσο χρειάζεται στην ακάθαρτη δεξαμενή, με αποτέλεσμα να χάνεται νερό. Με μείωση του χρόνου συλλογής, τα σωματίδια που έχουν συλλεχθεί δεν προλαβαίνουν να αποδεσμευθούν από το πεδίο και να οδηγηθούν στο ακάθαρτο διάλυμα, με αποτέλεσμα, όταν αλλάζει η φάση λειτουργίας, όσα σωματίδια έμειναν πίσω να οδηγούνται στην καθαρή δεξαμενή, μειώνοντας την απόδοση του συστήματος.

Στα πειράματα με μεταβλητή ταχύτητα ροής, η καλύτερη απόδοση βρέθηκε για 32 RPM. Με μείωση της ταχύτητας ροής του ρευστού, αυξάνεται ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος. Όμως, δίνεται η δυνατότητα σε έναν ασθενέστερο ηλεκτρομαγνήτη να δεσμεύσει περισσότερα σωματίδια στον σωλήνα διαχωρισμού, αυξάνοντας την απόδοση. Με αύξηση της ταχύτητας, η ελκτική δύναμη του ηλεκτρομαγνήτη δεν θα είναι αρκετή ώστε να αντισταθεί στην δύναμη που επιβάλλει η κάθετη ροή μαζί με τη βαρύτητα και κάποια σωματίδια θα καταφέρουν να περάσουν στο καθαρό διάλυμα, μειώνοντας την απόδοση του συστήματος. Επίσης, κατά την φάση συλλογής θα περνάει περισσότερο διάλυμα στην ακάθαρτη δεξαμενή, με αποτέλεσμα να χάνεται και πάλι νερό.

Στα πειράματα με μεταβλητή τάση ηλεκτρομαγνήτη, η καλύτερη απόδοση βρέθηκε για 20 V. Με μείωση της τάσης και κατ' επέκταση μείωση του μαγνητικού πεδίου, δεσμεύονται λιγότερα σωματίδια στον σωλήνα διαχωρισμού, μειώνοντας την απόδοση του συστήματος. Με αύξηση της τάσης και κατ' επέκταση αύξηση του μαγνητικού πεδίου, συμβαίνει το ίδιο που αναφέρθηκε πριν για την αύξηση του χρόνου καθαρισμού, δηλαδή ο ηλεκτρομαγνήτης φτάνει σε σημείο που δεν μπορεί να συγκρατήσει άλλα σωματίδια, άρα ορισμένα σωματίδια περνάνε στο καθαρό διάλυμα, μειώνοντας και πάλι την απόδοση του συστήματος. Επιπλέον, περνάει περισσότερο ρεύμα από τα πηνία με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία τους γρηγορότερα λόγω φαινομένου Joule και εν τέλει να καίγονται.

Από τα πειράματα της ανατροφοδότησης παρατηρείται ότι ένα δεύτερο στάδιο καθαρισμού όντως βελτιώνει τα αποτελέσματα οπτικής μέτρησης του πρώτου σταδίου. Όσον αφορά τα πειράματα με τις βέλτιστες τιμές, η οπτική πυκνότητα του καθαρού διαλύματος ξεπέρασε το 97% γεγονός που δείχνει ότι η διάταξη δουλεύει σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το διάλυμα δεν ήταν ομοιόμορφο κατά την εκτέλεση των μετρήσεων. Η ομοιομορφία στηριζόταν ξεκάθαρα στο πόσο καλό ανακάτεμα γινόταν πριν την

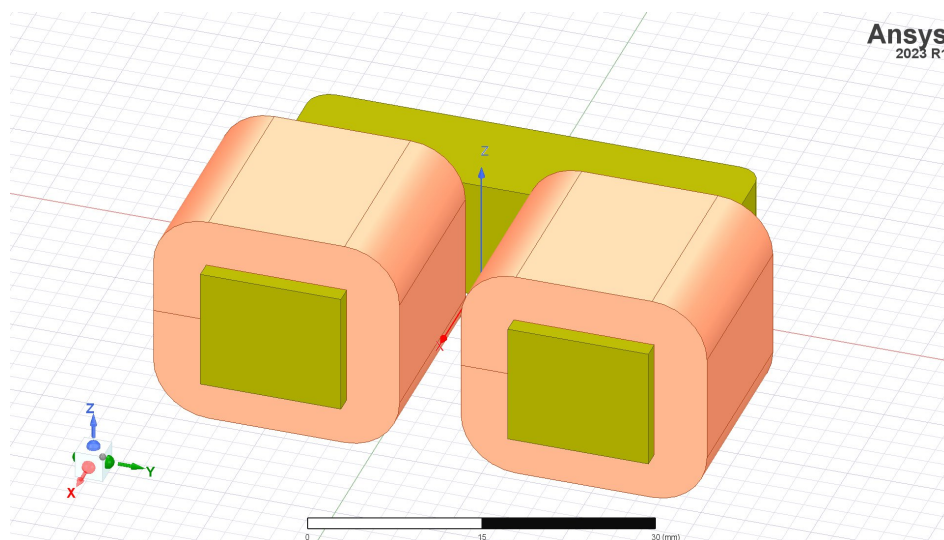
μέτρηση, άρα εισάγεται ένα ποσοστό τυχαιότητας το οποίο δίνει μία απόκλιση μεταξύ πειραματικών και πραγματικών τιμών. Αυτό αποτυπώνεται στις μετρήσεις οπτικής πυκνότητας για αρχικό και ακάθαρτο διάλυμα, δηλαδή στα ακάθαρτα μείγματα που η συγκέντρωση των σωματιδίων ήταν πολύ μεγάλη. Οι τιμές παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις, ακόμα και για ίδιο βάρος σωματιδίων. Ωστόσο, ήταν εμφανές με το μάτι αν το διάλυμα ήταν καθαρό ή όχι.

Κεφάλαιο 5

Προσομοίωση ηλεκτρομαγνήτη

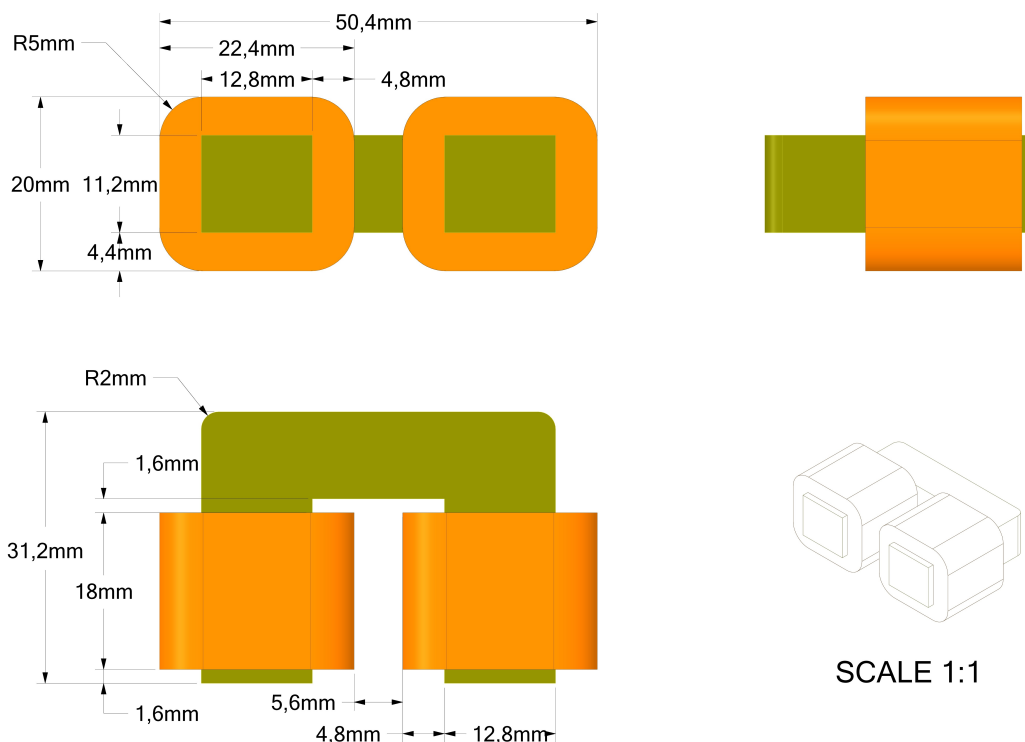
Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται προσομοίωση του ηλεκτρομαγνήτη η οποία έχει σκοπό την μελέτη του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή γύρω από τον σωλήνα που θα μεταφέρει το ρεύστο. Εξετάζονται οι περιπτώσεις στις οποίες τροποποιούνται τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνήτη, δηλαδή οι περιελίξεις, οι στρώσεις, η τοποθεσία και το μέγεθος των πηνίων. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Ansys Electronics® της Ansys Inc. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή *Maxwell 3D* και η *μαγνητοστατική επίλυση*.

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις προσομοιώσεις οι οποίες αναλύονται στην συνέχεια. Στο σχήμα 5.0.1 φαίνεται το γεωμετρικό μοντέλο του ηλεκτρομαγνήτη το οποίο σχεδιάστηκε κατευθείαν στο Ansys Electronics.



Σχήμα 5.0.1: Γεωμετρικό μοντέλο ηλεκτρομαγνήτη

και στο σχήμα 5.0.2 παρουσιάζονται οι όψεις του μοντέλου με σημειωμένες τις διαστάσεις του, οι οποίες σχεδιάστηκαν με την βοήθεια του λογισμικού SpaceClaim® της Ansys Inc.



Σχήμα 5.0.2: Όψεις ηλεκτρομαγνήτη

5.1 1^η προσομοίωση

Η πρώτη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για να επαληθευτεί η ορθότητα του μοντέλου. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Παράμετροι 1^{ης} προσομοίωσης

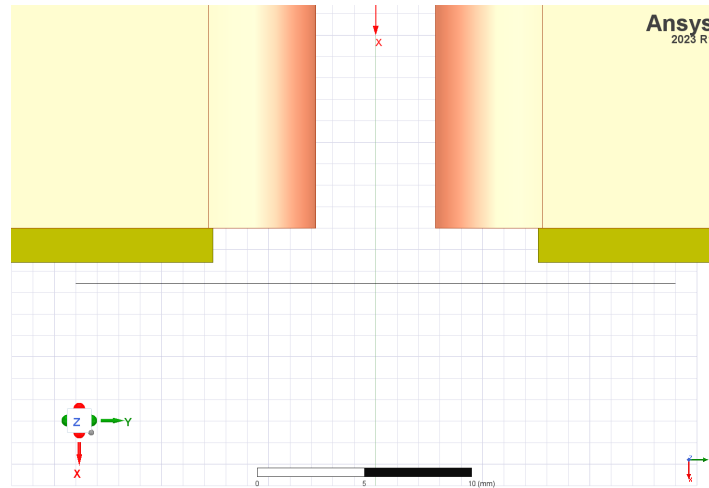
Μεταβλητή	Τιμή
turns	150
current	3 A
I	450 A

όπου *turns* ο αριθμός των σπειρών κάθε πηνίου, *current* το ρεύμα που προσφέρει το τροφοδοτικό και *I* το συνολικό ρεύμα το οποίο περνάει το πηνίο και υπολογίζεται από την σχέση $I = turns * current$.

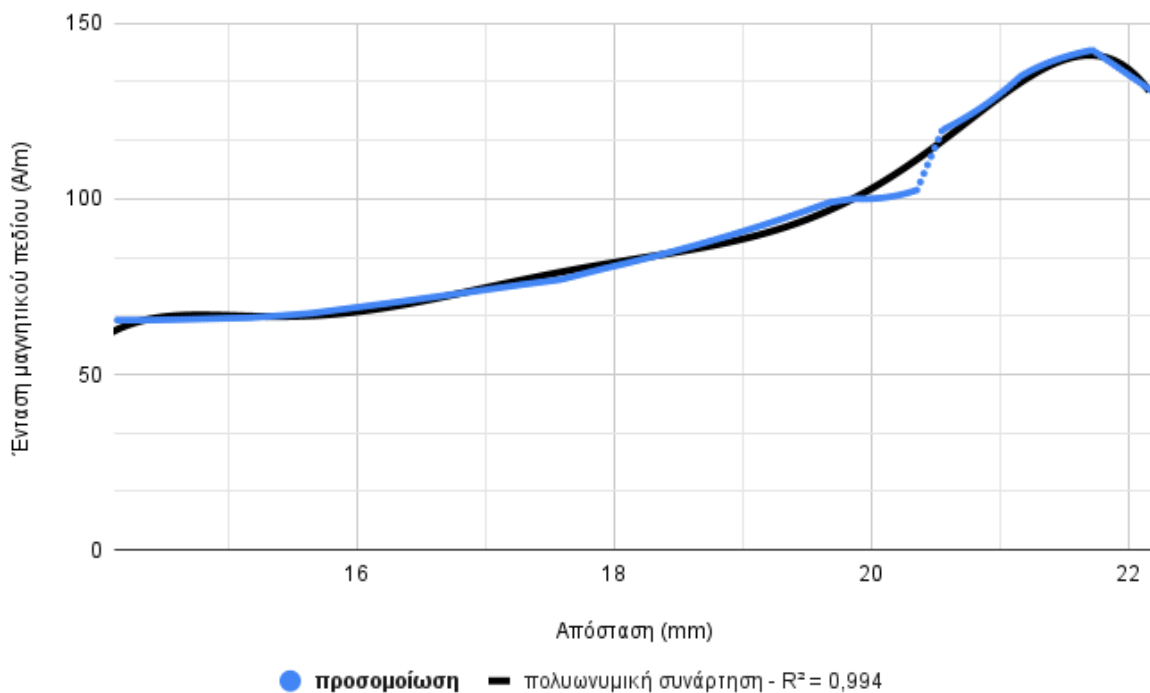
Επιπλέον, μετρήθηκαν οι τιμές του μαγνητικού πεδίου στα σημεία από τα οποία θα περνάνε τα νανοσωματίδια. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε μια γραμμή, ως προσομοίωση του σωλήνα (Σχήμα 5.1.1), πάνω στην οποία έγιναν οι μετρήσεις του πεδίου. Με την βοήθεια της Excel, σχεδιάστηκε η γραφική παράσταση του σχήματος 5.1.2 και βρέθηκε η πολυωνυμική εξίσωση που εκφράζει την

τιμή του πεδίου στον χώρο:

$$y = -0,024x^6 + 2,55x^5 - 113x^4 + 2648x^3 - 34792x^2 + 242680x - 702105$$



Σχήμα 5.1.1: 1^η προσομοίωση - Γραμμή που προσομοιώνει τον σωλήνα ροής των ναυοσωματιδίων



Σχήμα 5.1.2: 1^η προσομοίωση - Γραφική παράσταση τιμών πεδίου στην περιοχή του σωλήνα

Για τον υπολογισμό της βάρθρωσης του πεδίου, υπολογίστηκε η πρώτη παράγωγος της προη-

γούμενης εξίσωσης. Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες τιμές.

Πίνακας 5.2: 1^η προσομοίωση - Τιμές μαγνητικού πεδίου

Απόσταση (mm)	Ένταση πεδίου (kA/m)	Βάθμωση πεδίου (kA/m ²)
14.14	65.45	3.60E+7
14.50	65.57	3.64E+7
15.01	66.02	3.82E+7
15.51	67.03	4.23E+7
16.52	71.64	6.61E+7
17.02	74.23	8.34E+7
17.50	76.60	1.02E+8
18.00	80.84	1.45E+8
18.51	85.50	2.07E+8
19.01	90.82	3.01E+8
19.52	96.88	4.49E+8
20.02	100.08	5.47E+8
20.52	116.92	1.39E+9
21.00	129.81	2.55E+9
21.50	140.36	4.00E+9
22.01	135.18	3.22E+9

5.2 2^η προσομοίωση

Η δεύτερη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με μεταβολή του μήκους των πηνίων κατά μήκος των “ποδιών” του πυρήνα. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Παράμετροι 2^{ης} προσομοίωσης

Μεταβλητή	Τιμή
turns	[110, 130, 150, 170]
current	3 A
I	[330, 390, 450, 510] A
x_offset	[0, 2, 4, 6] mm
pos_offset	[3.6, 2.6, 1.6, 0.6] mm

όπου x_offset η αύξηση του μήκους του πηνίου και pos_offset η μετακίνηση που χρειάζεται το πηνίο ώστε να βρίσκεται στο κέντρο του “ποδιού” του πυρήνα, που υπολογίζεται από την σχέση:

$$pos_offset = (21.2mm - 14mm - x_offset)/2mm$$

Για να γίνει η αλλαγή στο μήκος χρειάζεται να αλλάξει η τιμή του $Xsize$ στα *Properties* του

πηνίου. Το $Xsize$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$XSize = 14mm + x_offset$$

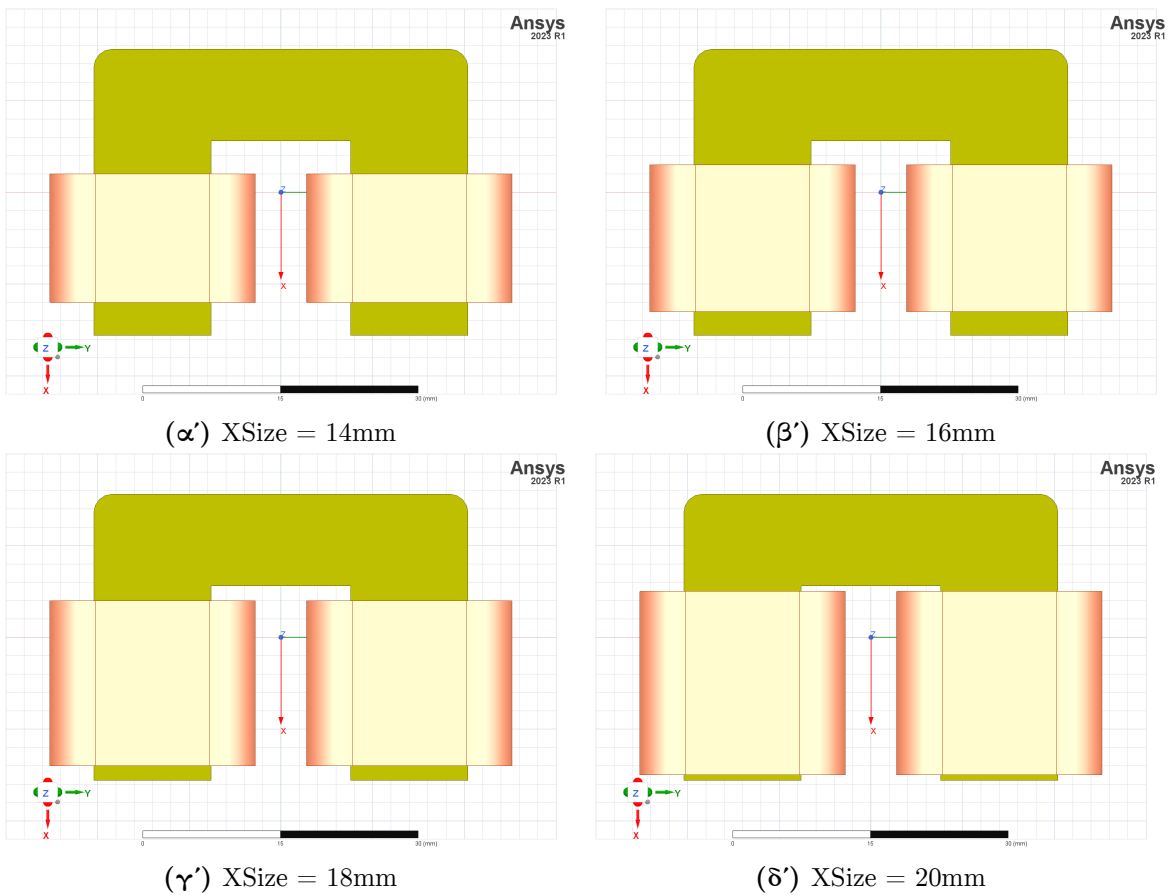
Άρα προκύπτει $Xsize = [14, 16, 18, 20]$ mm. Ο αριθμός των σπειρών υπολογίζεται από την σχέση:

$$turns = 110 + 10 * x_offset/1mm$$

Η συνολική μετακίνηση στον άξονα x υπολογίζεται από την σχέση:

$$Position_x = 10mm + pos_offset$$

Το γεωμετρικό μοντέλο για αυτές τις τιμές παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2.1.



Σχήμα 5.2.1: 2^η προσομοίωση - Άνω όψη ηλεκτρομαγνήτη

5.3 3^η προσομοίωση

Η τρίτη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας την ίδια λογική με την προηγούμενη όμως το πηνίο μετακινείται κατά μήκος του “ποδιού” του πυρήνα. Χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι με την προηγούμενη προσομοίωση (Βλ. πίνακα 5.3) με την διαφορά ότι στην θέση της παραμέτρου *pos_offset* έχουμε την *xpos_offset*, η οποία αποτελεί την μετακίνηση του πηνίου από την αρχική θέση και παίρνει τιμές σύμφωνα με τον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: 3^η προσομοίωση - Τιμές *xpos_offset*

XSize (mm)	xpos_offset (mm)
14	[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]
16	[0, 1, 2, 3, 4, 5]
18	[0, 1, 2, 3]
20	[0, 1]

5.4 4^η προσομοίωση

Η τέταρτη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με μεταβολή των στρώσεων του πηνίου, οι οποίες δημιουργήθηκαν με την περιστροφή του σύρματος χαλκού γύρω από το “πόδι” του πυρήνα. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5,

Πίνακας 5.5: Παράμετροι 4^{ης} προσομοίωσης

Μεταβλητή	Τιμή
turns	[100, 150, 200, 250]
current	3 A
I	450 A
offset	[4, 6, 8, 10]
y_offset	ίση με offset
z_offset	ίση με offset

όπου *offset* ο αριθμός των στρώσεων, *y_offset* η επέκταση του πηνίου προς τον άξονα y και *z_offset* η επέκταση του πηνίου προς τον άξονα z.

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση ο αριθμός των σπειρών υπολογίζεται από την σχέση: $turns = 25 * offset / 1mm$, όπου 25 είναι ο αριθμός των σπειρών κάθε στρώσης. Επίσης, τα *y_offset* και *z_offset* συμπίπτουν με την μεταβλητή *offset*.

Για να γίνει η αλλαγή στο πηνίο χρειάζεται να αλλάξει η τιμή των *YSize* και *ZSize* στα *Properties* του πηνίου. Το *YSize* υπολογίζεται από την σχέση:

$$YSize = 16.4mm + y_offset$$

και το $ZSize$ από την σχέση:

$$ZSize = 14mm + z_offset$$

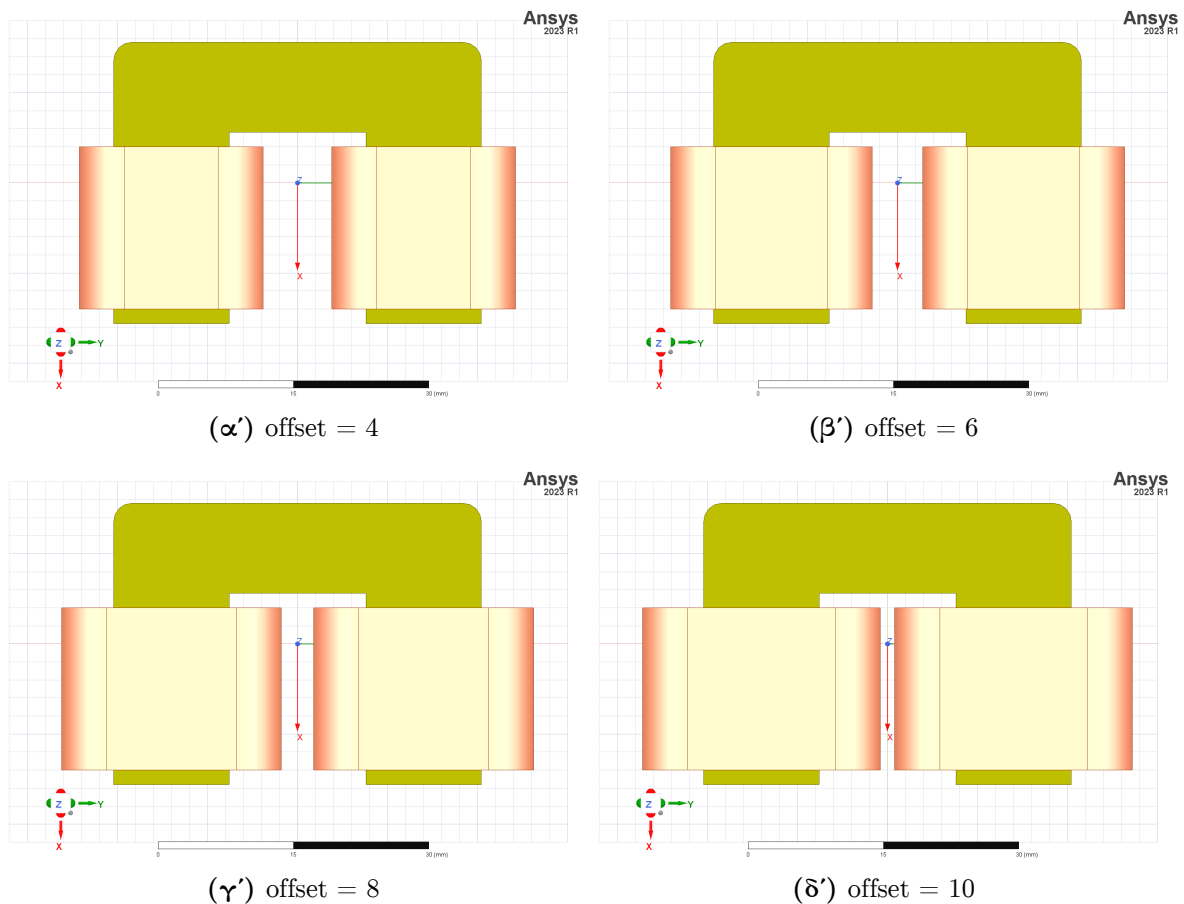
Άρα προκύπτουν $YSize = [20.4, 22.4, 24.4, 26.4]$ mm και $ZSize = [18, 20, 22, 24]$ mm. Η συνολική μετακίνηση στους άξονες y και z υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$Position_y = -1.8mm - y_offset/2$$

και

$$Position_z = -1.4mm - z_offset/2$$

Το γεωμετρικό μοντέλο για αυτές τις τιμές παρουσιάζεται στο σχήμα 5.4.1.



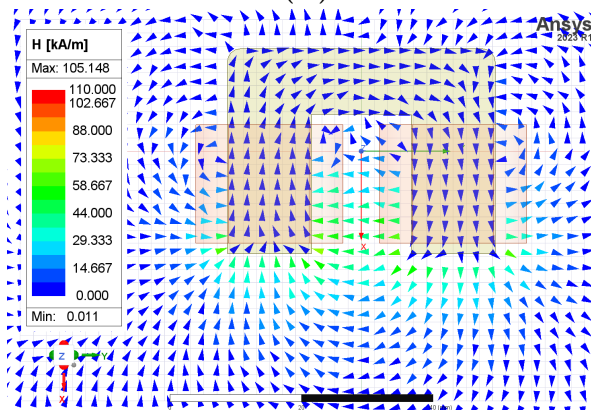
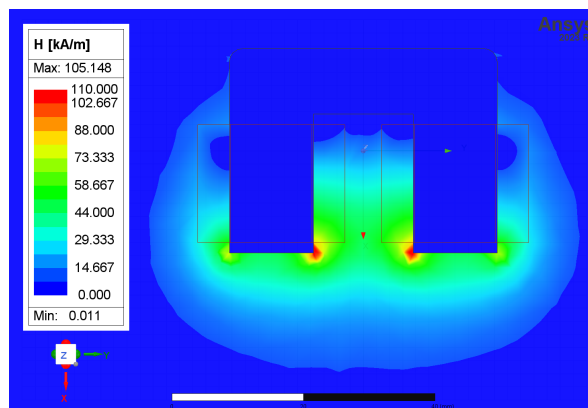
Σχήμα 5.4.1: 4^η προσομοίωση - Μπροστινή όψη ηλεκτρομαγνήτη

Επίσης, για κάθε προαναφερθείσα προσομοίωση πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση μεταβάλλοντας το ρεύμα που διαπερνά τα πηνία ώστε να υπολογιστεί η ελκτική δύναμη που αναπτύσσεται από τον ηλεκτρομαγνήτη. Η μεταβλητή ρεύματος current παίρνει τιμές από 0.5A

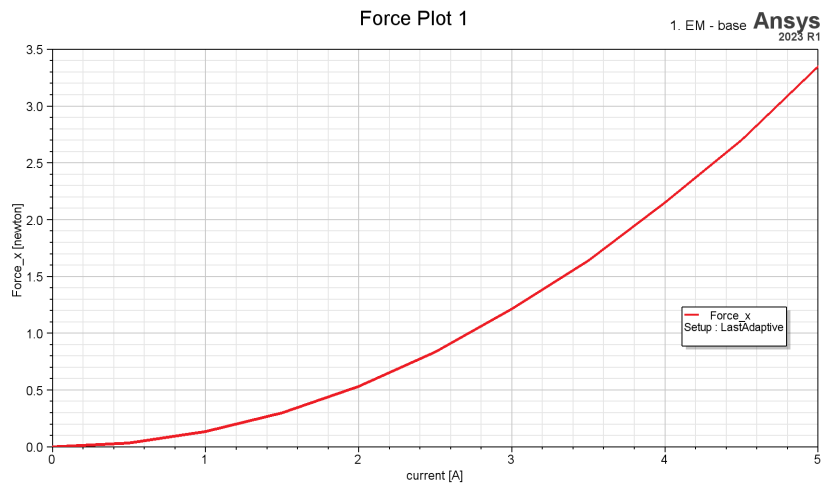
έως 5A με βήμα 0.5A.

5.5 Αποτελέσματα

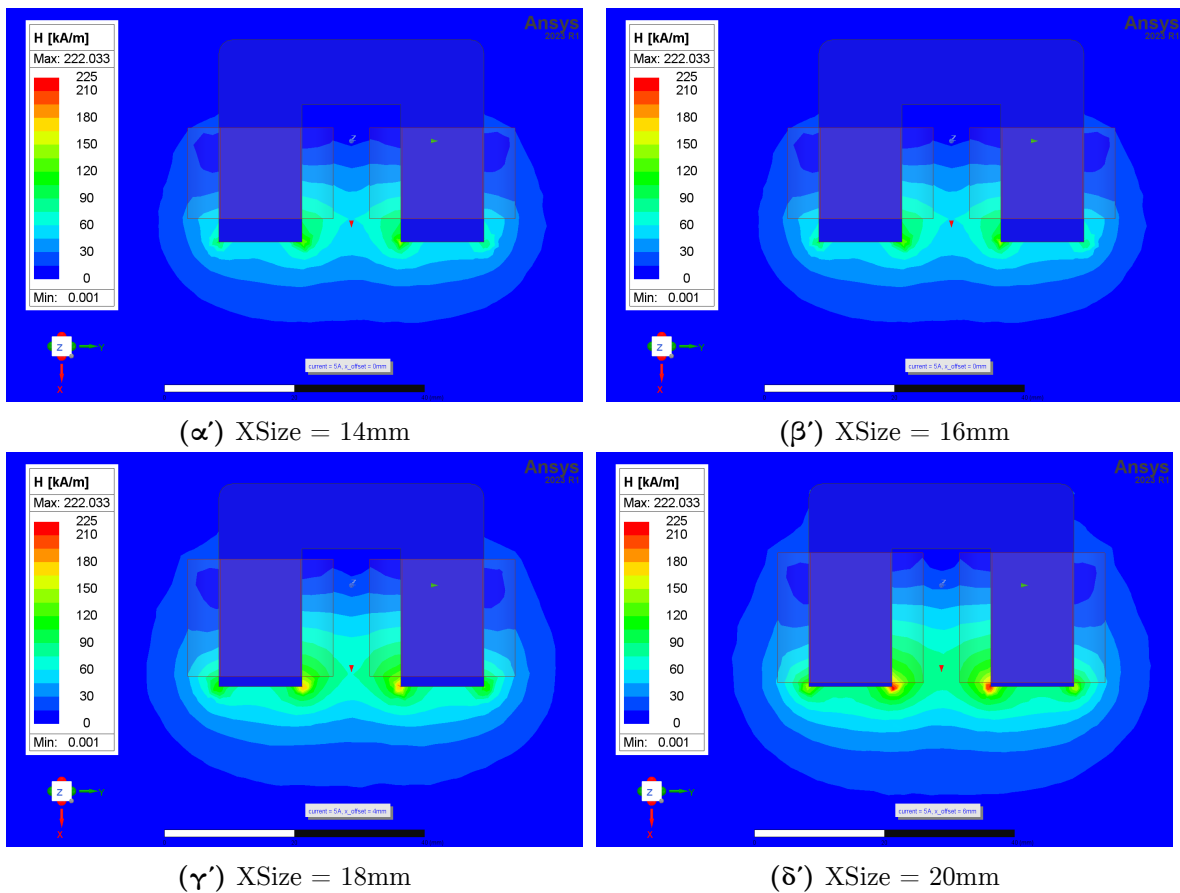
Για κάθε προσομοίωση δίνονται τα σχήματα που παριστάνουν την ένταση μαγνητικού πεδίου H , το πλάτος και οι δυναμικές γραμμές σε τομή στο επίπεδο xy, καθώς και η γραφική παράσταση της ελκτικής δύναμης συναρτήσει της έντασης ρεύματος, ως προς τον άξονα x ο οποίος διέρχεται από το κέντρο του ηλεκτρομαγνήτη.



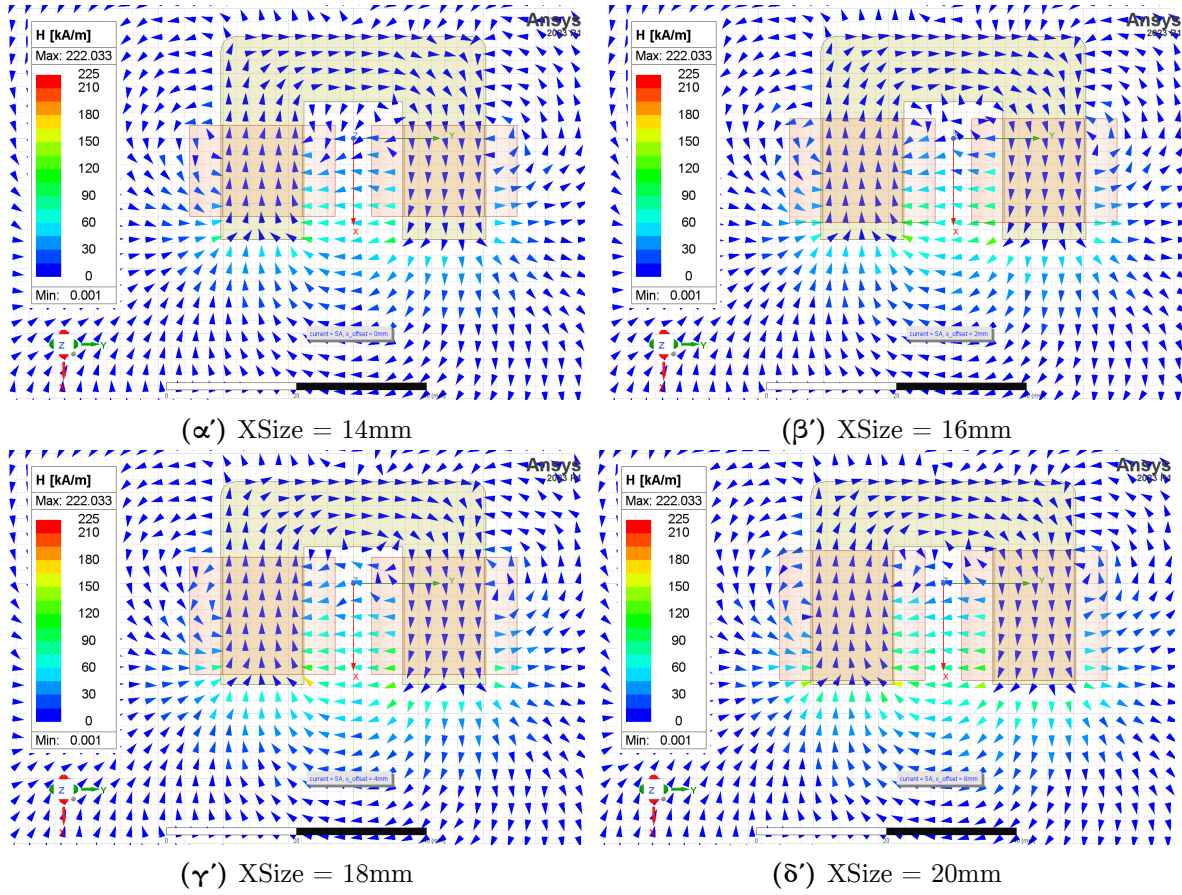
Σχήμα 5.5.1: 1^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H ($I=3A$)



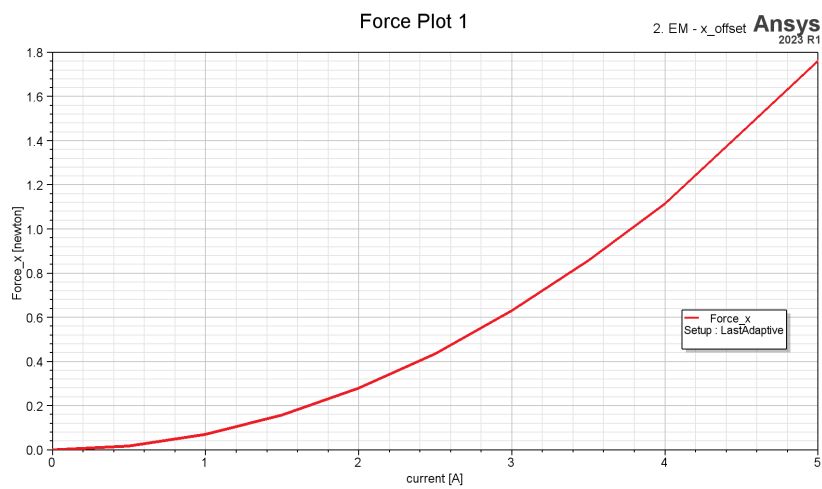
Σχήμα 5.5.2: 1^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος



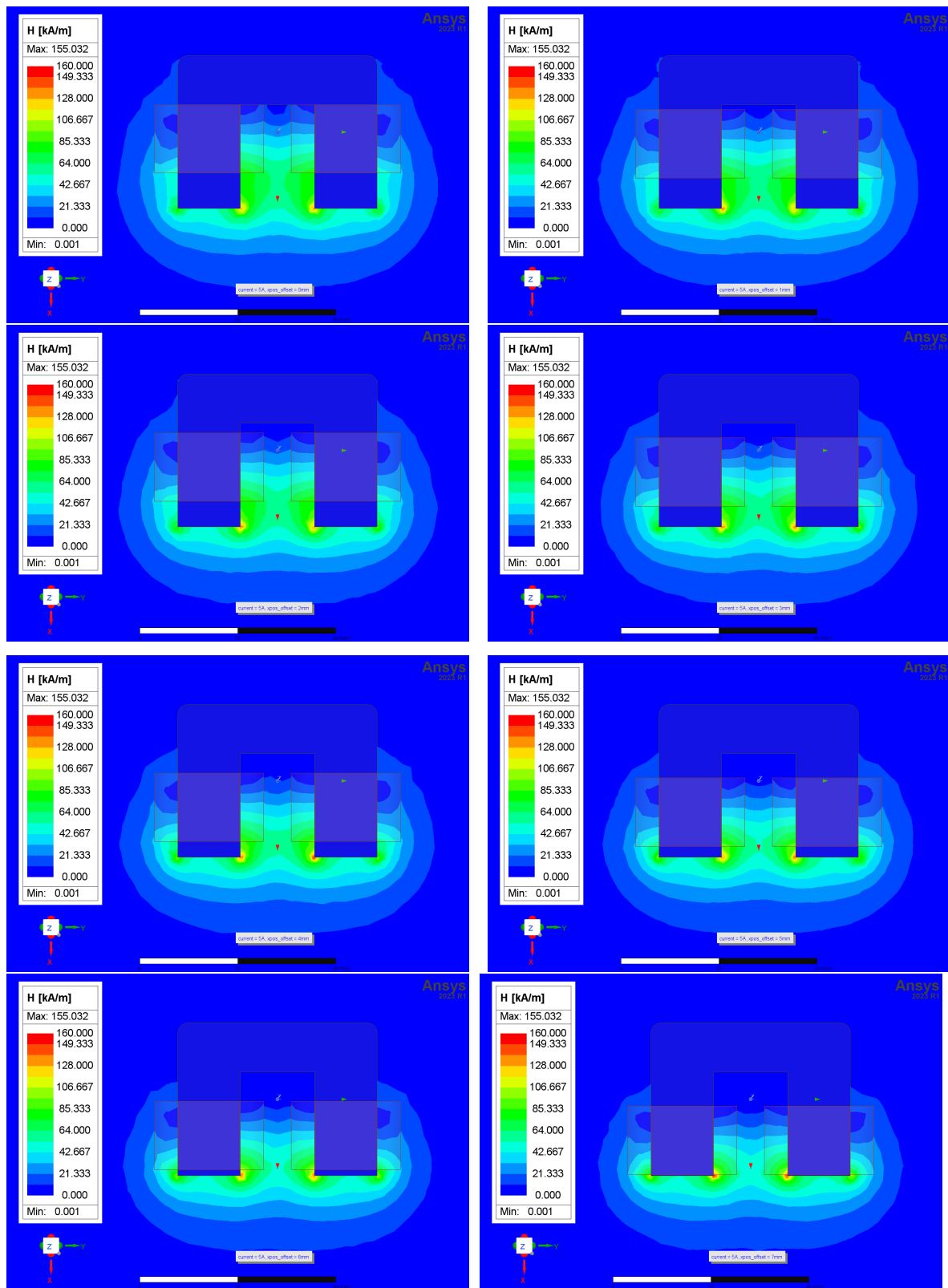
Σχήμα 5.5.3: 2^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (πλάτος, I=5A)



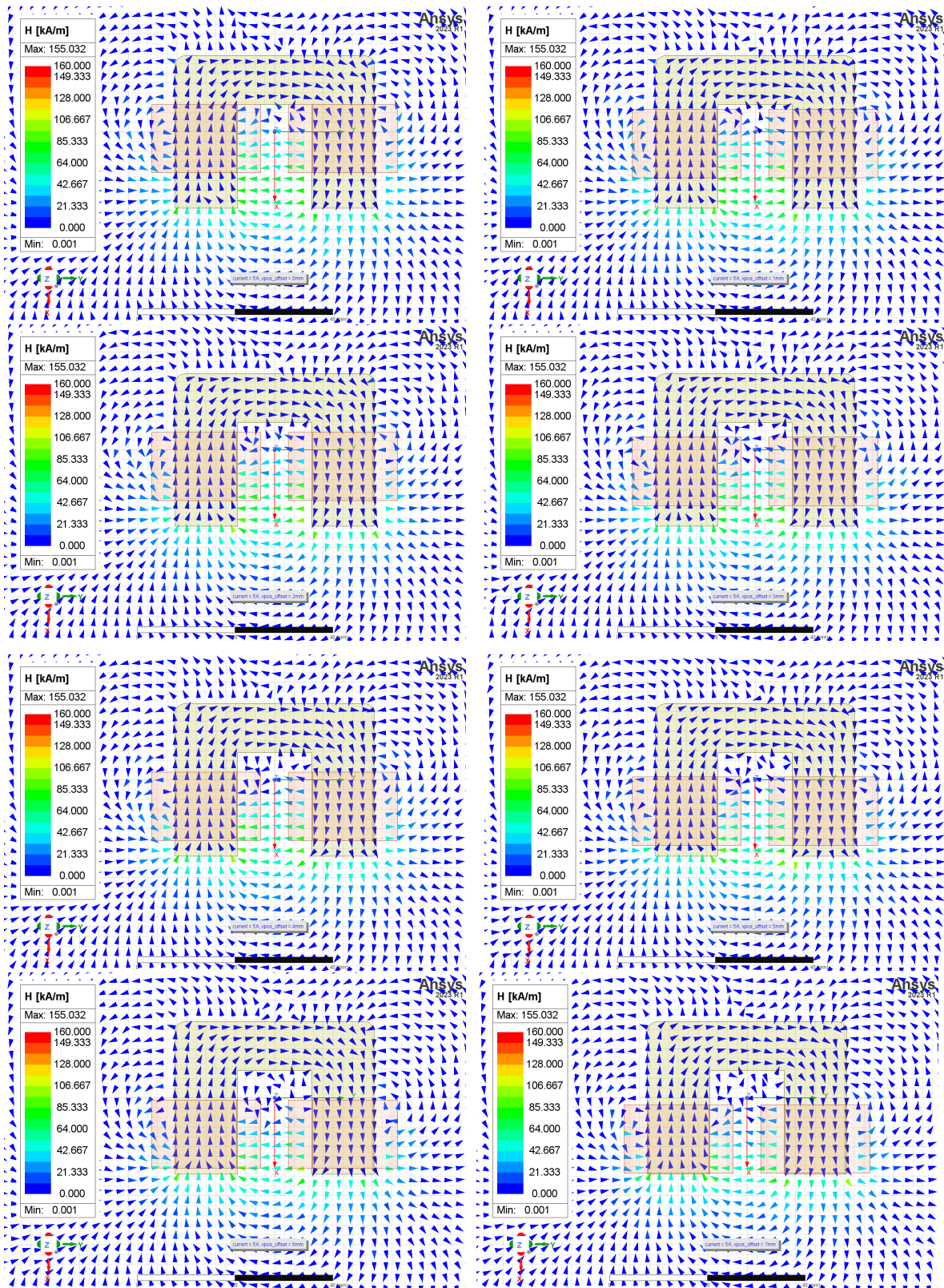
Σχήμα 5.5.4: 2^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (δυναμικές γραμμές, I=5A)



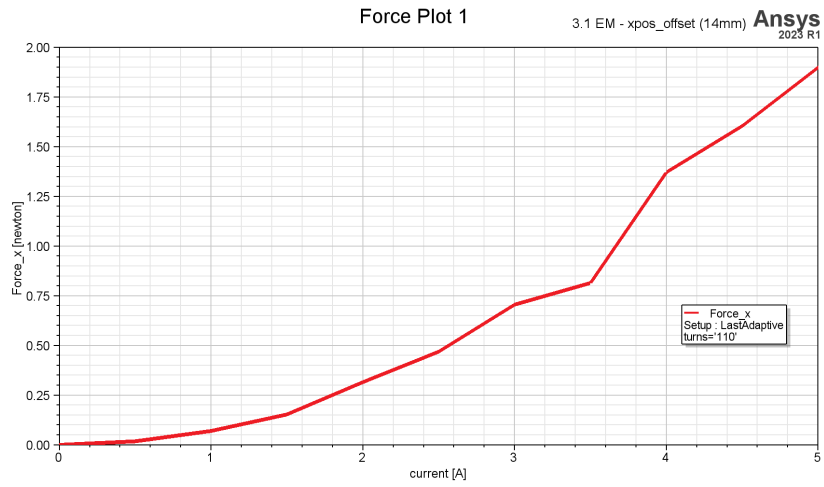
Σχήμα 5.5.5: 2^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος



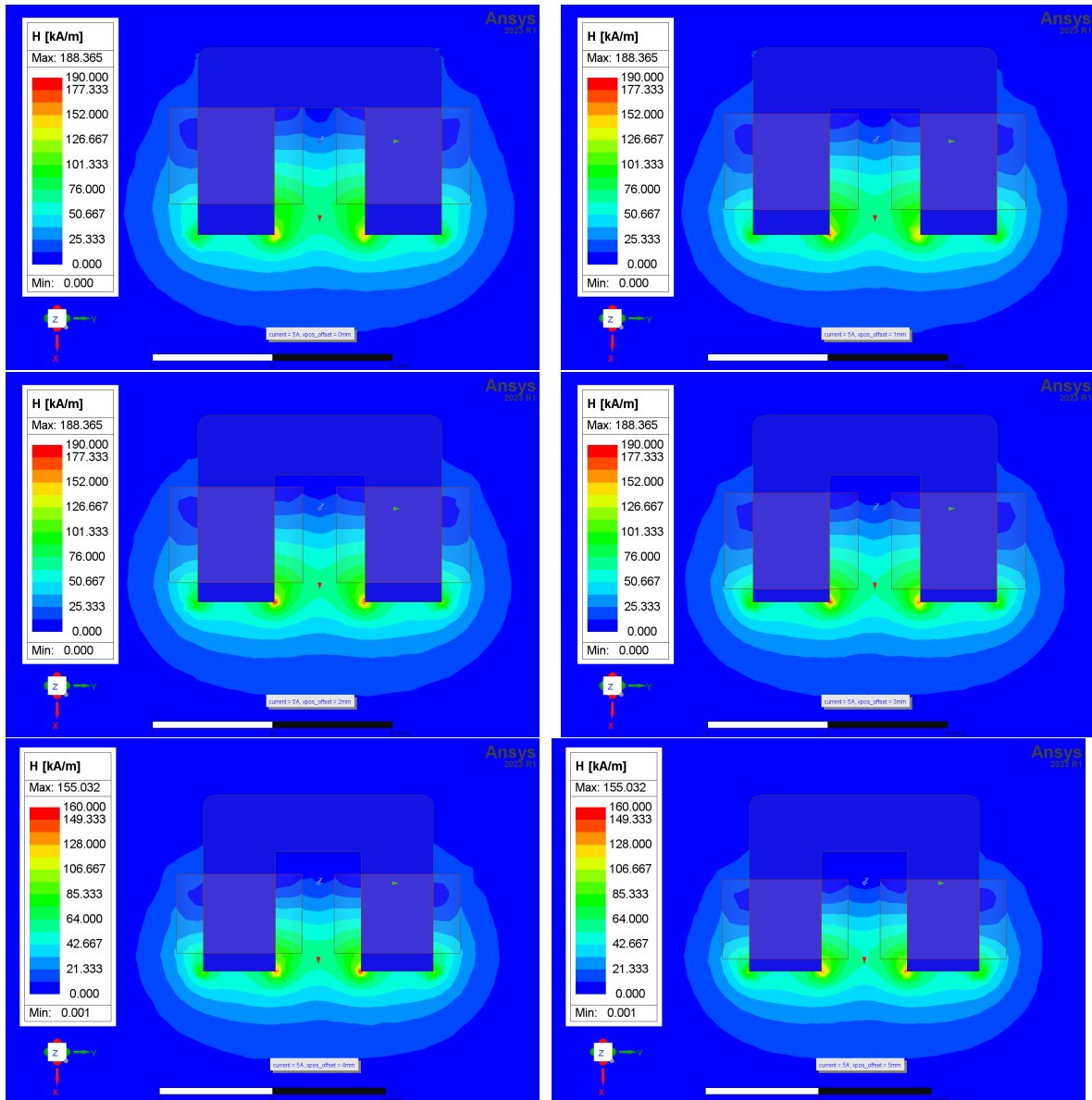
Σχήμα 5.5.6: 3^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (πλάτος, $XSize = 14$ mm, $I=5A$)



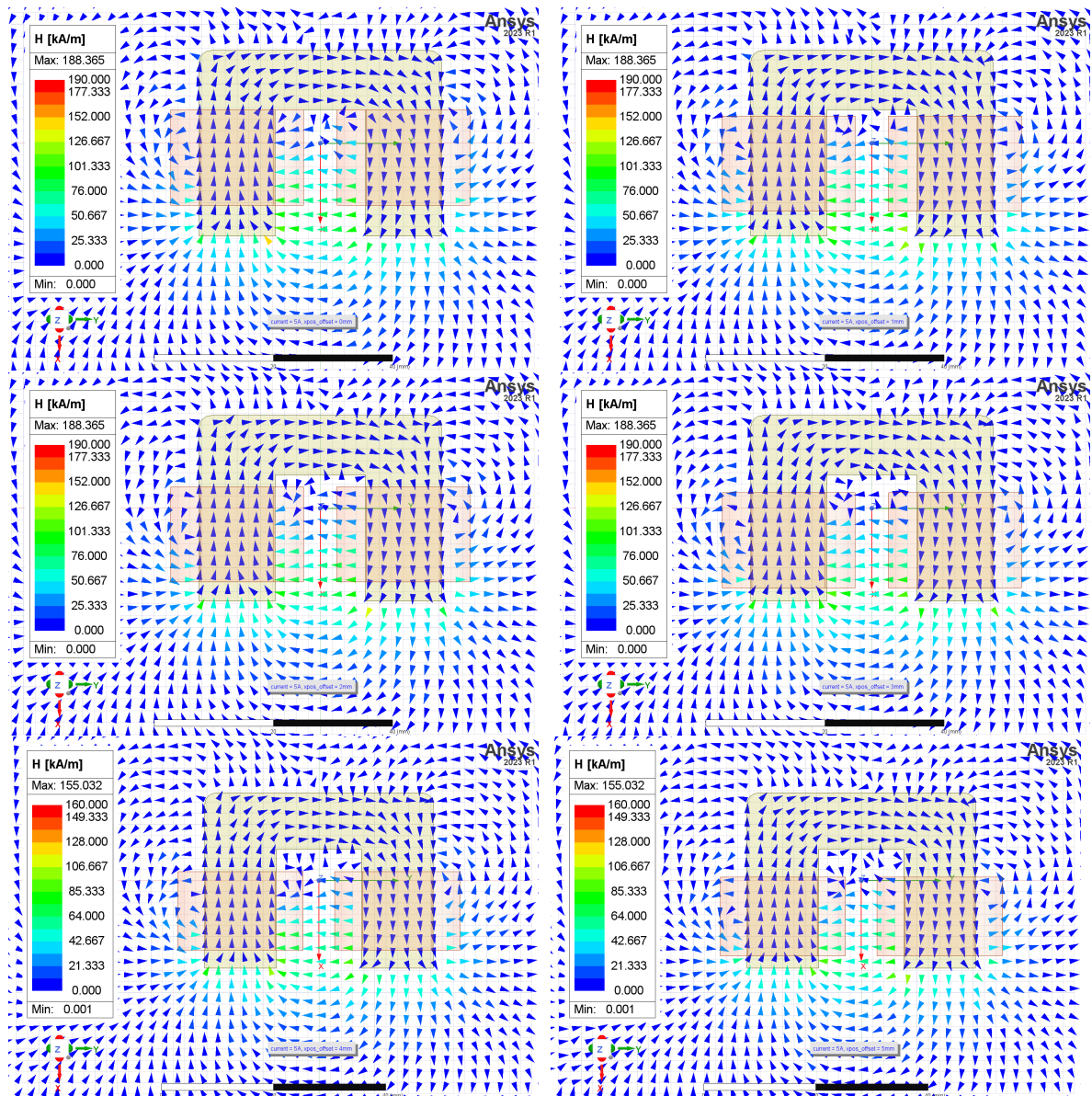
Σχήμα 5.5.7: 3^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (δυναμικές γραμμές, XSize = 14 mm, I=5A)



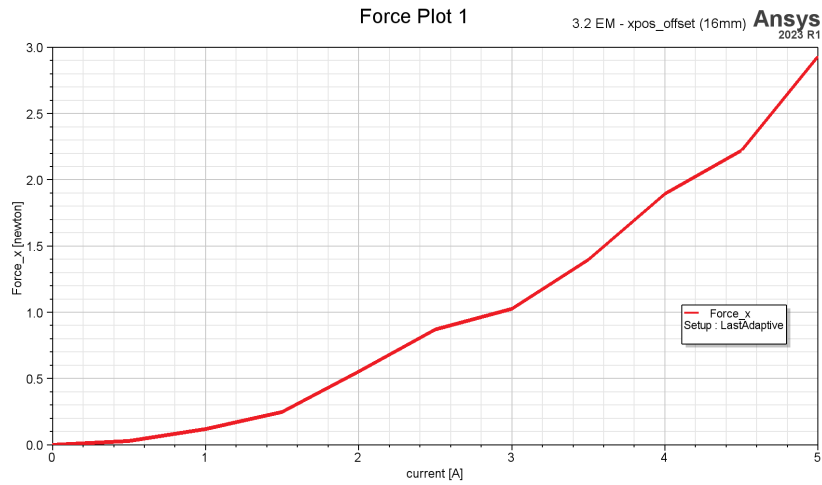
Σχήμα 5.5.8: 3^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος (XSize = 14 mm)



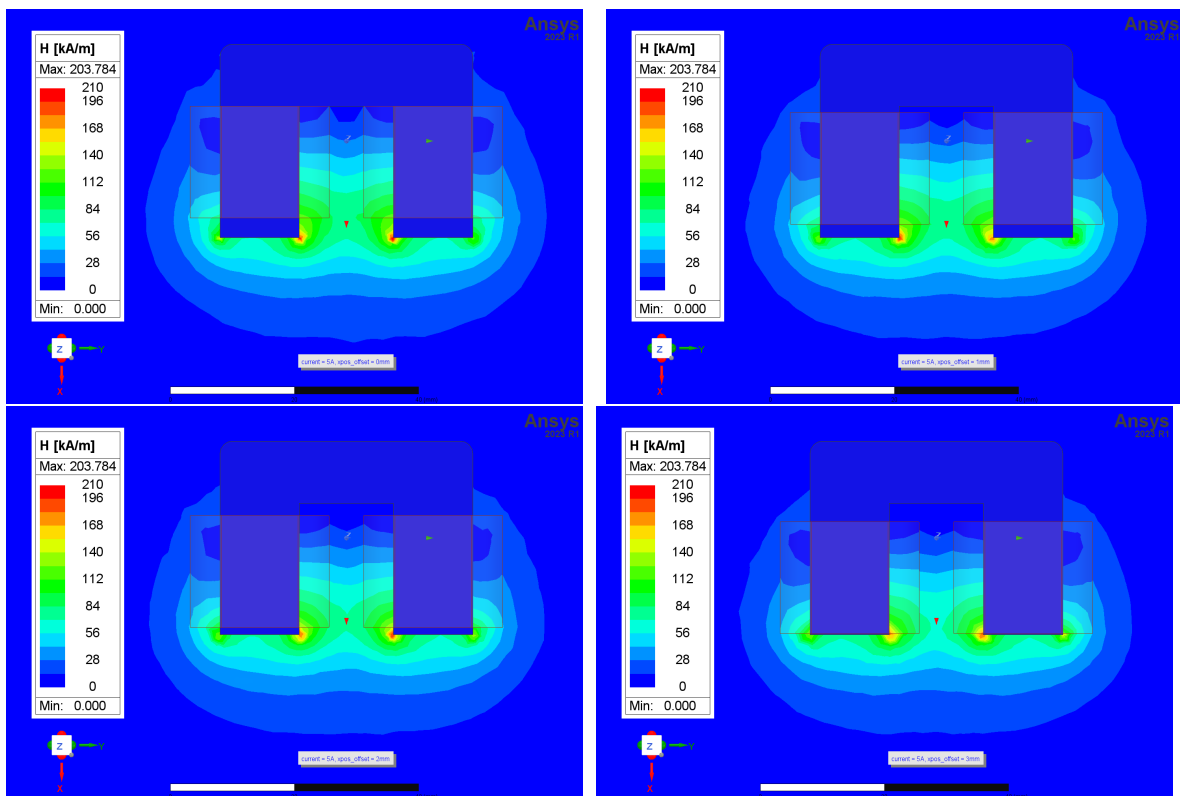
Σχήμα 5.5.9: 3^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (πλάτος, $XSize = 16$ mm, $I=5A$)



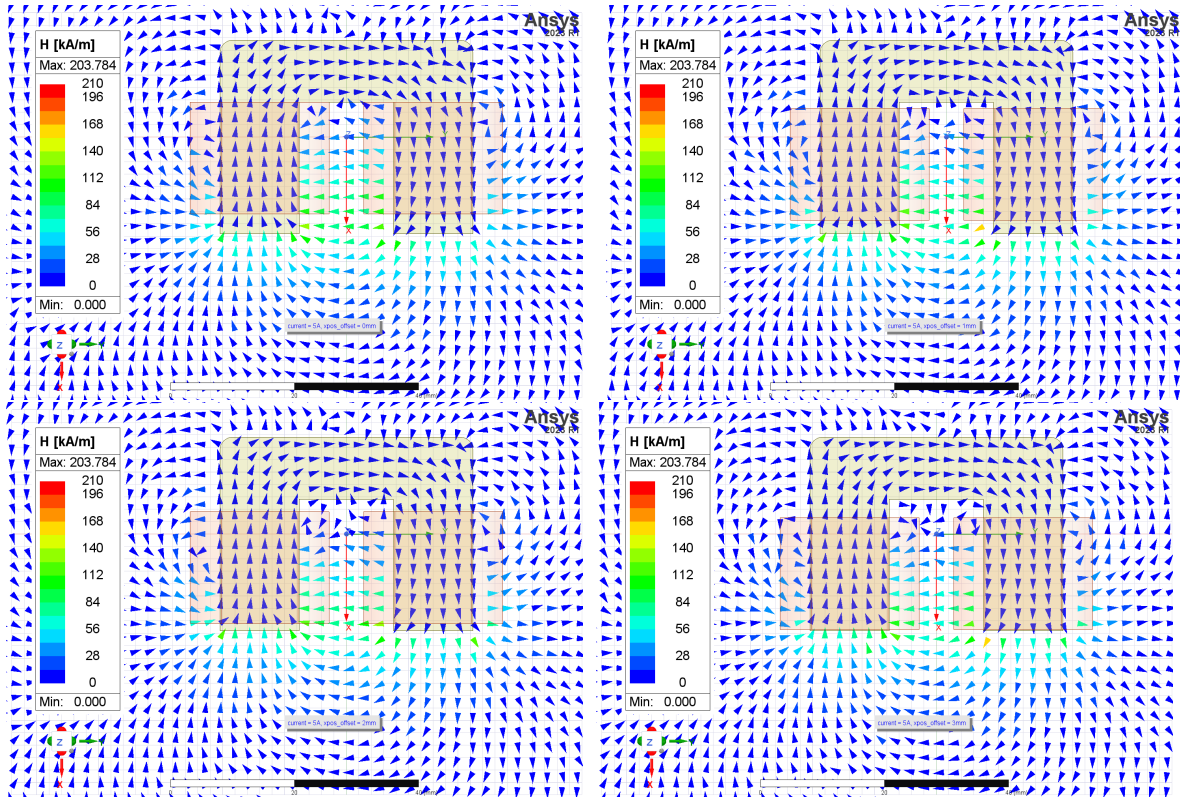
Σχήμα 5.5.10: 3^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (δυναμικές γραμμές, XSize = 16 mm, I=5A)



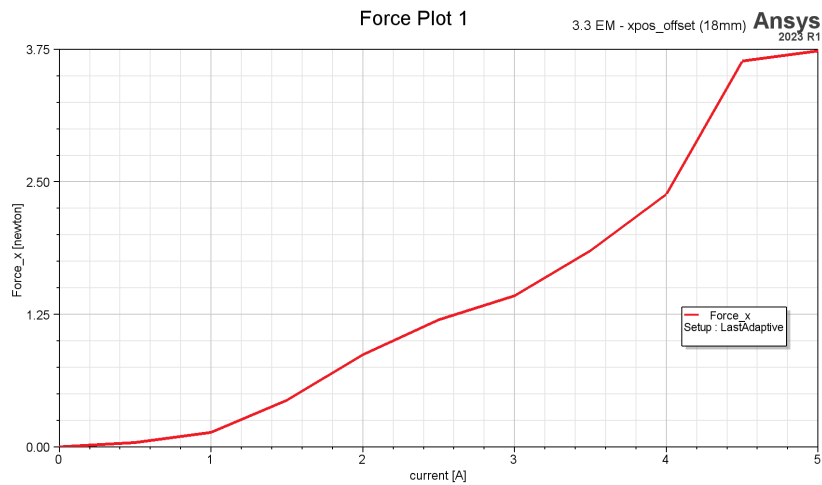
Σχήμα 5.5.11: 3^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος (XSize = 16 mm)



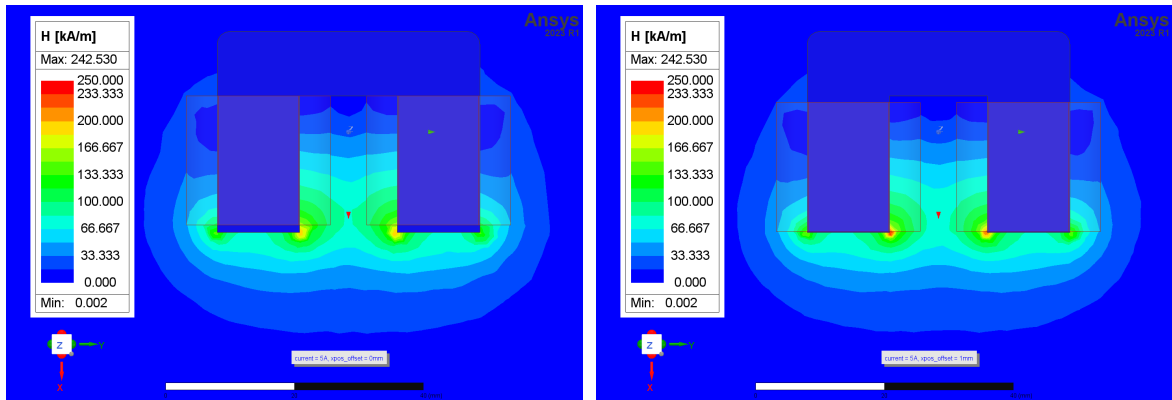
Σχήμα 5.5.12: 3^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (πλάτος, XSize = 18 mm, I=5A)



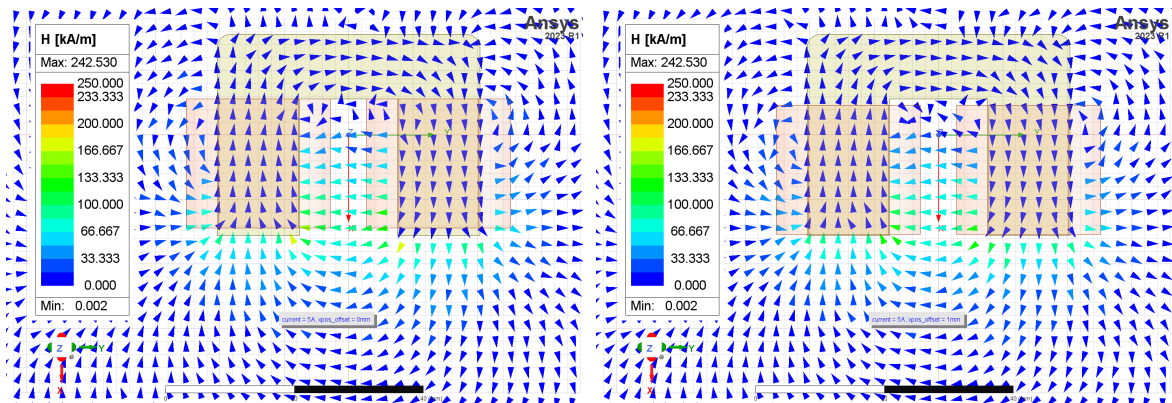
Σχήμα 5.5.13: 3^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (δυναμικές γραμμές, XSize = 18 mm, I=5A)



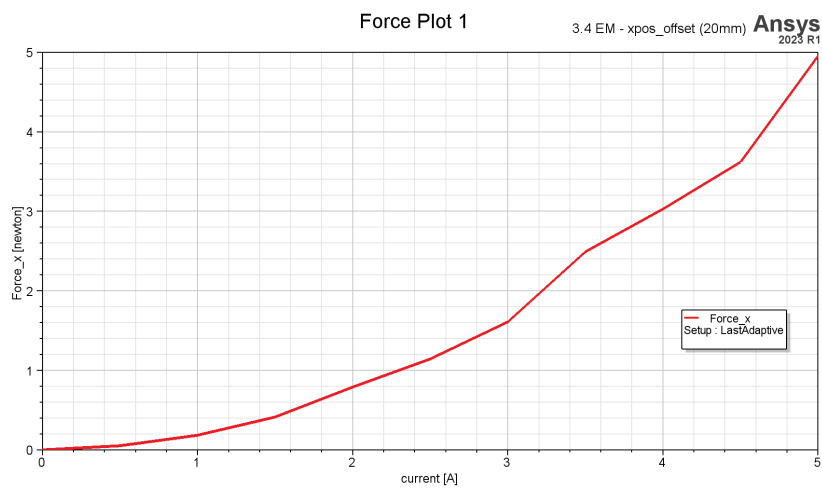
Σχήμα 5.5.14: 3^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος (XSize = 18 mm)



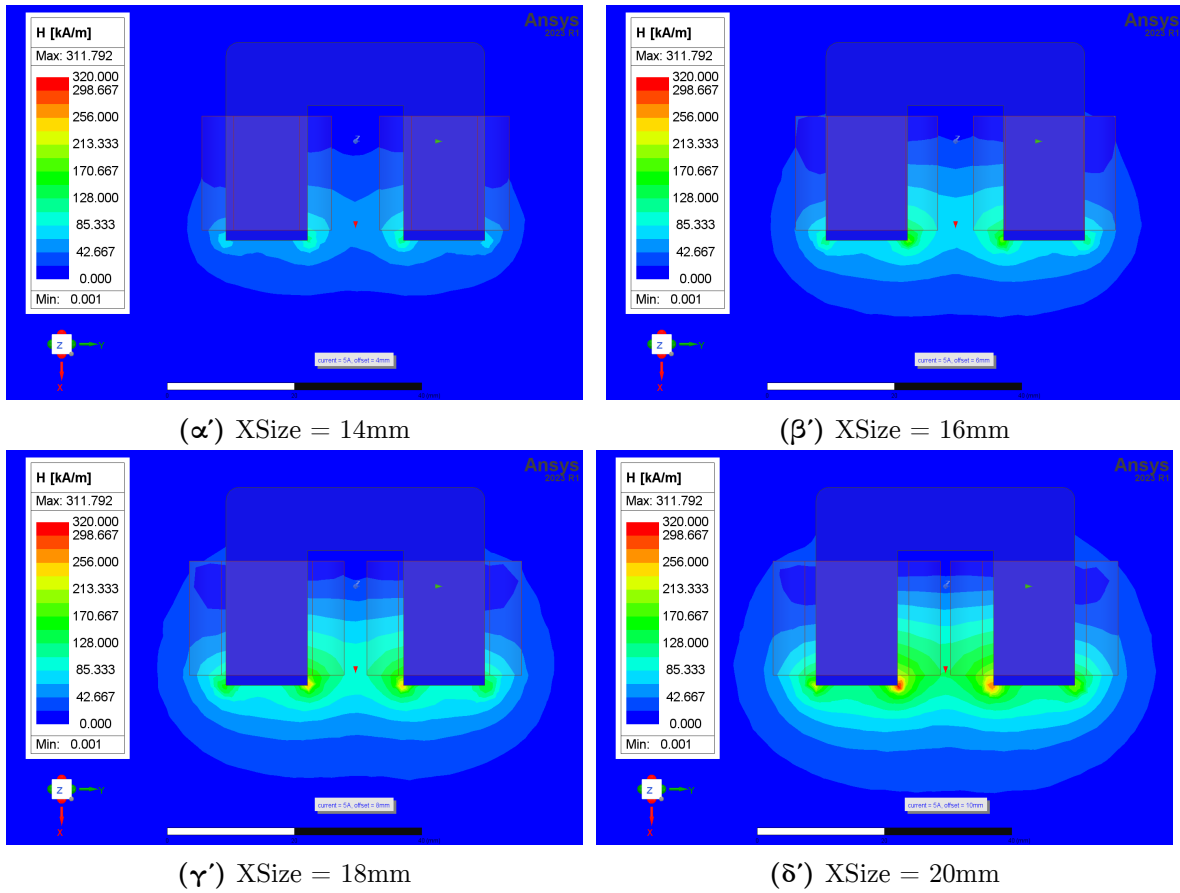
Σχήμα 5.5.15: 3^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (πλάτος, XSize = 20 mm, I=5A)



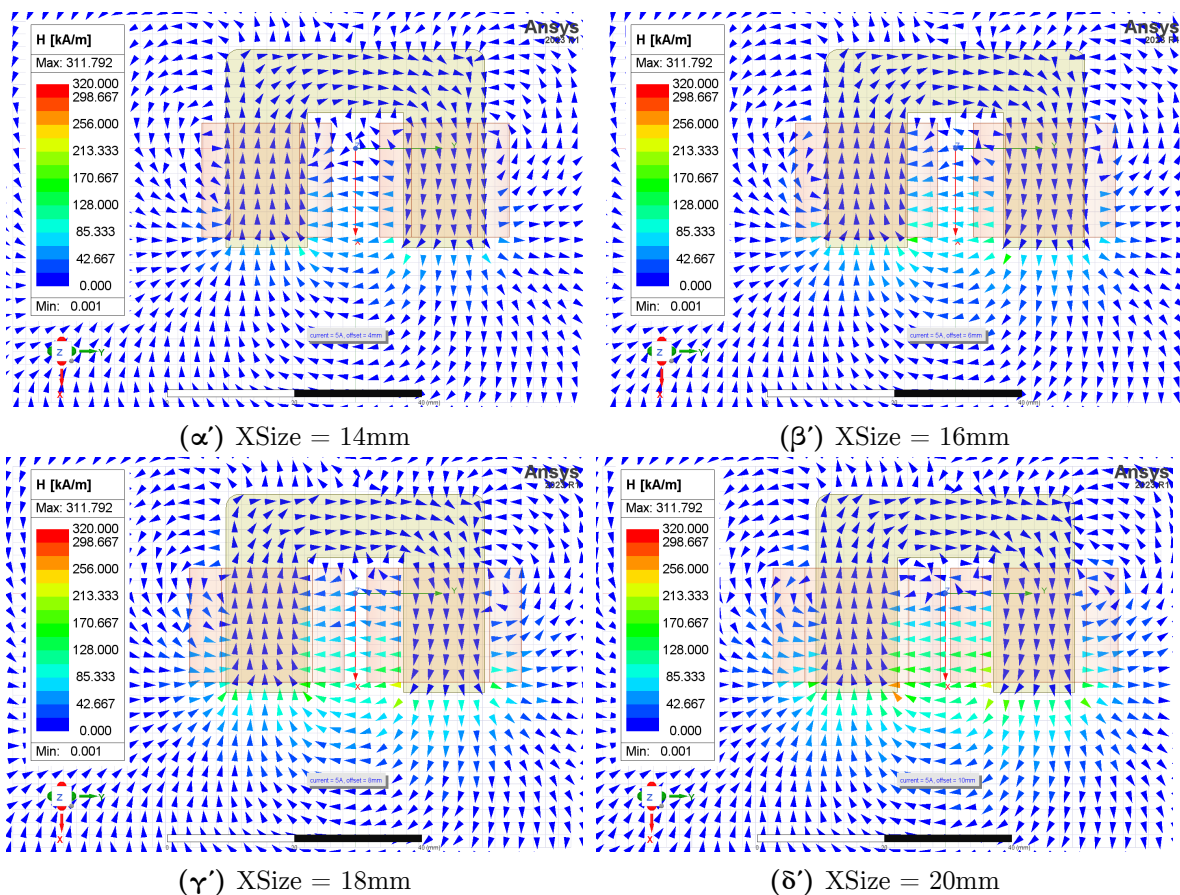
Σχήμα 5.5.16: 3^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (δυναμικές γραμμές, XSize = 20 mm, I=5A)



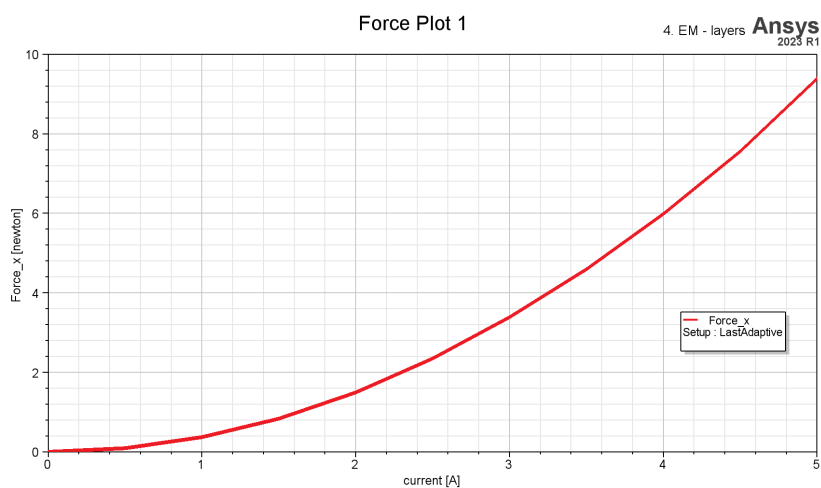
Σχήμα 5.5.17: 3^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσει του ρεύματος (XSize = 20 mm)



Σχήμα 5.5.18: 4^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (πλάτος, $I=5A$)



Σχήμα 5.5.19: 4^η προσομοίωση - Ένταση μαγνητικού πεδίου H (δυναμικές γραμμές, I=5A)



Σχήμα 5.5.20: 4^η προσομοίωση - Ελκτική δύναμη συναρτήσεϊ του ρεύματος

5.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Αρχικά, τα αποτελέσματα της 1^{ης} προσομοίωσης επιβεβαιώνουν την λειτουργία του μοντέλου του ηλεκτρομαγνήτη. Σε δεύτερο χρόνο, γίνεται άμεσα αντιληπτό από τις γραφικές παραστάσεις της μαγνητικής δύναμης που ασκεί ο ηλεκτρομαγνήτης κάθετα στην ροή του υγρού συναρτήσει της έντασης ρεύματος που διαπερνά τα πηνία. Παρατηρείται άμεση αναλογία μεταξύ μαγνητικής δύναμης και έντασης ρεύματος.

Στα σχήματα που παριστάνουν την ένταση μαγνητικού πεδίου σχεδιασμένη πάνω στον ηλεκτρομαγνήτη, φαίνονται η κατανομή των τιμών του πλάτους και η κλειστή διαδρομή δυναμικών γραμμών που δημιουργείται μέσα και έξω από τον πυρήνα.

Από τις υπόλοιπες τρεις προσομοιώσεις παρατηρείται αύξηση της έντασης μαγνητικού πεδίου όταν αυξάνεται το μήκος των πηνίων, δηλαδή ο αριθμός των σπειρών, όταν το πηνίο βρίσκεται στο άκρο των “ποδιών” και όταν έχει τις περισσότερες δυνατές στρώσεις.

Οι προσομοιώσεις αυτές αποτελούν εργαλείο για μελλοντική ανάπτυξη του συστήματος. Τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για να γίνει τροποποίηση στα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνήτη.

Μέρος ΙΙΙ
Επίλογος

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

6.1 Συμπεράσματα

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα, προέκυψε ένα σύστημα το οποίο μπορεί να διαχωρίσει οποιοδήποτε μαγνητικό υλικό βρίσκεται διαλυμένο σε μορφή σκόνης σε κάποιο διάλυμα, εάν ισχύουν οι κατάλληλες συνθήκες. Μπορεί να λειτουργήσει σε συνεχή ροή για περίπου 10-15 λεπτά χωρίς να θερμαίνονται σημαντικά τα στοιχεία της διάταξης.

Τα μέγιστα ποσοστά καθαρότητας βρέθηκαν για τις εξής παραμέτρους:

- Ταχύτητα ροής: 32 RPM
- Διάρκεια φάσης: 8/5 sec
- Τάση ηλεκτρομαγνήτη: 20 V

Η απόδοση για αυτές τις τιμές ήταν πάνω από 97% και είχε μέγιστο το 98.6%. Επομένως, η συσκευή φαίνεται να λειτουργεί με ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

Μειονέκτημα της διάταξης είναι ότι οποιαδήποτε χρονική μεταβολή κάποιας παραμέτρου επηρεάζει χρονικά ολόκληρη την λειτουργία του συστήματος. Τότε το φαινόμενο Joule κάνει την εμφάνιση του και έτσι τα εξαρτήματα της διάταξης ζεσταίνονται. Ως εκ τούτου απαιτείται ένα χρονικό διάστημα παύσης ανάμεσα στα πειράματα ώστε να επιστρέψουν σε φυσιολογικές θερμοκρασίες.

Επίσης, στις τιμές των μετρήσεων εισέρχεται ένας παράγοντας σφάλματος λόγω των βαλβιδών. Όπως αναφέρθηκε, οι βαλβίδες δυσλειτουργούν λόγω εκτεταμένης χρήσης και για να λειτουργήσουν ορθά χρειάζεται η τοποθέτηση ενός προσθετικού. Επομένως, ενδέχεται να μην ασκούν την σωστή δύναμη ώστε να κλείνει εντελώς ο σωλήνας, κάτι το οποίο επηρεάζει την απόδοση του συστήματος.

Επιπρόσθετα, οποιαδήποτε μεταβολή παραμέτρου ίσως επιβάλλει και κάποια άλλη ρύθμιση, ώστε να προκύψει το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, ανάλογα με τον ρυθμό ροής πρέπει να αλλάζει και η διάρκεια συλλογής, αφού όσο πιο αργή ροή, τόσο περισσότερο χρόνο χρειάζεται το διάλυμα μαζί με τα μαζεμένα νανοσωματίδια να οδηγηθεί στον ακάθαρτο

κλάδο, και το αντίστροφο. Βέβαια, η ταυτόχρονη μεταβολή πολλών παραμέτρων εξαρτάται από την εφαρμογή, την διάταξη και τα χαρακτηριστικά των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν.

6.2 Μελλοντική εργασία και βελτιώσεις

Στη συνέχεια δίνονται πιθανές αλλαγές ή προσθήκες ως μελλοντική εργασία και αναλύονται κάποιες τεχνικές βελτιώσεις ώστε να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος.

Αρχικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποιος διαλύτης στο διάλυμα για να γίνει κολλοειδές και τα σωματίδια να κατανομούνται ομοιόμορφα και να έχουν καλή κολλοειδή σταθερότητα. Η ουσία του διαλύτη θα πρέπει να είναι μη τοξική, biofriendly και να μπορεί να αφαιρεθεί μετά τον διαχωρισμό, ούτως ώστε το νερό να είναι χρησιμοποιήσιμο. Επίσης, αν το διάλυμα γίνει ομοιόμορφο, είναι χρήσιμο να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος για διαφορετικές ποσότητες νανοσωματιδίων στο διάλυμα.

Στην παρούσα εργασία τα νανοσωματίδια μαγνητίτη δεν επιτελούσαν κάποιο ρόλο πέρα από το ότι έπρεπε να αφαιρεθούν από το νερό. Ωστόσο, θα μπορούσαν να δεσμεύουν και να αφαιρούν οποιαδήποτε άλλη ουσία που περιέχεται στο νερό, αφού υποστούν κάποια επεξεργασία. Για παράδειγμα, οι Συμεωνίδης και λοιποί έφτιαξαν νανοσωματίδια μαγνητίτη επικαλυμμένα με αιματίτη τα οποία κατάφεραν να αφαιρέσουν αποτελεσματικά αρσενικό από νερό [65]. Επίσης, ο μαγνητίτης μπορεί να αντικατασταθεί από κάποιο άλλο μαγνητικό υλικό, με διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, οι Chen και λοιποί χρησιμοποίησαν προεπεξεργασμένα νανοσωματίδια μαγγεμίτη για τον διαχωρισμό DNA από βιολογικά δείγματα [66].

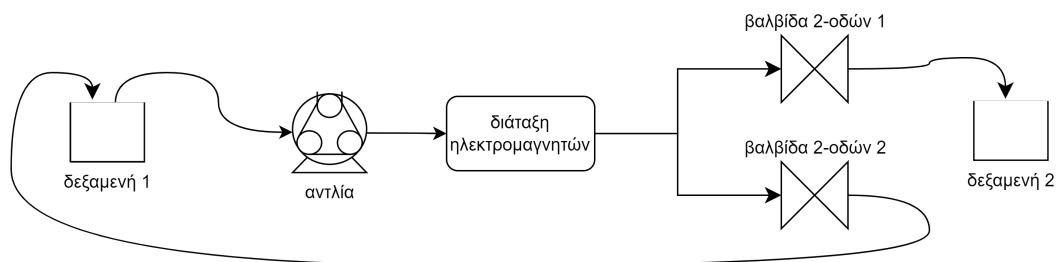
Η διάταξη μπορεί να διαφοροποιηθεί με την προσθήκη δεύτερου κλάδου διαχωρισμού ώστε το πεδίο που παράγει ο ηλεκτρομαγνήτης να εκμεταλλεύεται στο μέγιστο. Δηλαδή να τοποθετηθεί ένας ακόμα σωλήνας διαχωρισμού στο άλλο άκρο του μαγνήτη, επιτρέποντας τον ταυτόχρονο καθαρισμό μεγάλων ποσοτήτων νερού με συνεχή τρόπο. Ακόμη, προτείνεται η χρήση νέων βαλβιδών για να είναι βέβαιο ότι λειτουργούν ορθά και δεν επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος. Θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί εξωτερικός έλεγχος στην περισταλτική αντλία για να μελετηθεί η αλλαγή της ταχύτητας ροής κατά την διάρκεια του πειράματος, εάν και εφόσον κριθεί αναγκαίο. Τέλος, θα μπορούσε να μελετηθεί περισσότερο και η ανατροφοδότηση του διαλύματος εφόσον τα αποτελέσματα παρουσίασαν προοπτική. Για όλες αυτές τις αλλαγές στη διάταξη φυσικά θα πρέπει να γίνουν δοκιμές για διαφορετικές ταχύτητες ροής, διαφορετικούς χρόνους καθαρισμού και συλλογής και διαφορετικές τιμές πεδίου προκειμένου να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα και να προσδιοριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων.

Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμο να αυτοματοποιηθούν ορισμένα σημεία της διαδικασίας με την χρήση αισθητήρων. Για παράδειγμα ένας οπτικός αισθητήρας θα μπορούσε να μετράει την οπτική πυκνότητα κατά την διάρκεια του διαχωρισμού. Προτείνεται επίσης η μελέτη των δυνάμεων που ασκούνται στα σωματίδια κατά την διάρκεια του διαχωρισμού και η σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών τιμών. Όσον αφορά την προσομοίωση, προτείνεται να γίνει μελέτη για την συμπε-

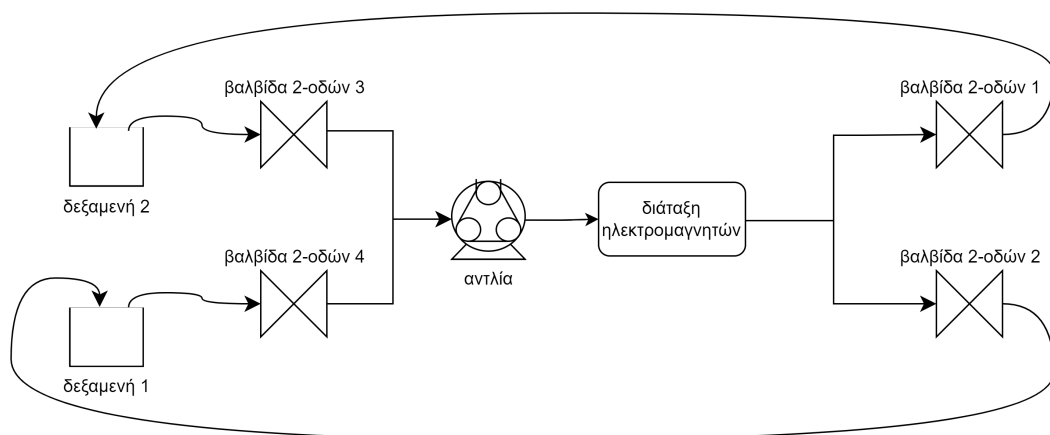
ριφορά του μεγάλου ηλεκτρομαγνήτη.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι πριν αποφασιστεί η αλλαγή της διάταξης είχαν σχεδιαστεί επιπλέον διατάξεις LGMS, κάποιες παραλλαγές οι οποίες δίνονται στα σχήματα 6.2.1 και 6.2.2. Παρόλο που δεν ολοκληρώθηκαν τα πειράματα για αυτή την ιδέα, δίνονται τα σχήματα για να υπάρχει ολοκληρωμένη εικόνα αυτής. Τονίζεται ότι η διάταξη δεν δούλεψε για την παρούσα εργασία, όμως μπορεί να φανεί χρήσιμη για διαφορετικό σκοπό και διαφορετικό διάλυμα προς διαχωρισμό.

Η πρώτη διάταξη είναι πανομοιότυπη με την αρχική διάταξη LGMS του σχήματος 4.4.1, με την διαφορά ότι αφαιρέθηκε η δεξαμενή 3 και το ακάθαρτο διάλυμα επιστρέφει στην δεξαμενή 1, ώστε ο διαχωρισμός να ολοκληρωθεί όταν όλο το διάλυμα καταλήξει στην δεξαμενή 2. Η δεύτερη διάταξη ακολουθεί την ίδια λογική, αλλά έχει προστεθεί ένας επιπλέον κλάδος ο οποίος ενεργοποιείται αφού αδειάσει η δεξαμενή 1, δηλαδή όταν τελειώσει ο διαχωρισμός. Αυτός ο κλάδος επιτρέπει στο καθαρό διάλυμα της δεξαμενής 2 να πραγματοποιηθεί ένα τελευταίο πέρασμα για καθαρισμό.



Σχήμα 6.2.1: Σχηματικό διάγραμμα προτεινόμενης διάταξης για LGMS (2)



Σχήμα 6.2.2: Σχηματικό διάγραμμα προτεινόμενης διάταξης για LGMS (3)

Βιβλιογραφία

- [1] J. M. Coey, *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge university press, 2010.
- [2] Ε. Χριστοφόρου, *Ηλεκτρονικά υλικά*. Κάλλιπος, Ανοιχτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015.
- [3] Ι. Παναγιωτόπουλος, *Μαγνητικά υλικά*. Α.Γ.Πνευματικός, 2010.
- [4] S. Pellis, “Μαγνητικό Πεδίο.” , 2013. [Online; accessed 19-April-2023].
- [5] M. questions, “Magnetic saturation.” , 2023. [Online; accessed 23-April-2023].
- [6] Wikipedia, “Remanence.” , 2023. [Online; accessed 23-April-2023].
- [7] Wikipedia, “Coercivity.” , 2023. [Online; accessed 23-April-2023].
- [8] Ι. Τσαλαμέγκας and Ι. Ρουμελιώτης, *Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία, Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Κύματα, Τόμος Α΄*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2017.
- [9] Wikipedia, “Permeability.” , 2023. [Online; accessed 23-April-2023].
- [10] Wikipedia, “Susceptibility.” , 2023. [Online; accessed 23-April-2023].
- [11] C.-G. Stefanita, *Basics and applications*. Springer, 2012.
- [12] Unknown, “Classification of magnetic materials.” . [Online; accessed 1-March-2023].
- [13] S. S. Shevkoplyas, A. C. Siegel, R. M. Westervelt, M. G. Prentiss, and G. M. Whitesides, “The force acting on a superparamagnetic bead due to an applied magnetic field,” *Lab Chip*, vol. 7, pp. 1294–1302, Oct. 2007.
- [14] Wikipedia, “Curie temperature.” , 2023. [Online; accessed 1-March-2023].
- [15] G. Banis, *Ανάπτυξη τεχνικών τροποποίησης, χαρακτηρισμού, οδήγησης και καλλιέργειας μαγνητικών κυττάρων*. PhD thesis, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (ΣΗΜΜΥ), 2021.
- [16] D. Ashby, “Circuit design: Know it all.” , 2008. [Online; accessed 23-April-2023].

-
- [17] J. Lim, S. P. Yeap, and S. C. Low, “Challenges associated to magnetic separation of nanomaterials at low field gradient,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 123, pp. 171–174, Feb. 2014.
- [18] Y. W. Tan, S. S. Leong, J. Lim, W. M. Yeoh, and P. Y. Toh, “Low-gradient magnetic separation of magnetic nanoparticles under continuous flow: Experimental study, transport mechanism and mathematical modelling,” *Electrophoresis*, vol. 43, pp. 2234–2249, Nov. 2022.
- [19] Z. Wang, C. Liu, and W. Wei, “Industry applications of magnetic separation based on nanoparticles: A review,” *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 60, pp. 281–297, May 2019.
- [20] P. F. García, M. Brammen, M. Wolf, S. Reinlein, M. F. Von Roman, and S. Berensmeier, “High-gradient magnetic separation for technical scale protein recovery using low cost magnetic nanoparticles,” *Separation and purification technology*, vol. 150, pp. 29–36, 2015.
- [21] X. Zheng, Z. Xue, Y. Wang, G. Zhu, D. Lu, and X. Li, “Modeling of particle capture in high gradient magnetic separation: A review,” *Powder Technol.*, vol. 352, pp. 159–169, June 2019.
- [22] C. K. Batchelor and G. K. Batchelor, *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge university press, 1967.
- [23] L. Luo and A. V. Nguyen, “A review of principles and applications of magnetic flocculation to separate ultrafine magnetic particles,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 172, pp. 85–99, Jan. 2017.
- [24] Wikipedia, “Van der waals force.”, 2023. [Online; accessed 14-April-2023].
- [25] H. Ezzaier, J. Alves Marins, S. Schaub, B. H. Amara, and P. Kuzhir, “Capture of magnetic nanoparticles on ordered magnetizable arrays: A parametric study,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 459, pp. 350–355, Aug. 2018.
- [26] S. H. Chen, “Brownian diffusion in a dilute dispersion of droplets,” *Journal of colloid and interface science*, vol. 209, no. 1, pp. 31–43, 1999.
- [27] J. Faraudo and J. Camacho, “Cooperative magnetophoresis of superparamagnetic colloids: theoretical aspects,” *Colloid Polym. Sci.*, vol. 288, pp. 207–215, Jan. 2010.
- [28] G. De Las Cuevas, J. Faraudo, and J. Camacho, “Low-gradient magnetophoresis through field-induced reversible aggregation,” *J. Phys. Chem. C Nanomater. Interfaces*, vol. 112, pp. 945–950, Jan. 2008.

- [29] D. W. Inglis, R. Riehn, R. H. Austin, and J. C. Sturm, "Continuous microfluidic immunomagnetic cell separation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, pp. 5093–5095, Nov. 2004.
- [30] J. D. Adams, U. Kim, and H. T. Soh, "Multitarget magnetic activated cell sorter," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 105, pp. 18165–18170, Nov. 2008.
- [31] N. Pamme, J. C. T. Eijkel, and A. Manz, "On-chip free-flow magnetophoresis: Separation and detection of mixtures of magnetic particles in continuous flow," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 307, pp. 237–244, Dec. 2006.
- [32] R. Afshar, Y. Moser, T. Lehnert, and M. A. M. Gijs, "Magnetic particle dosing and size separation in a microfluidic channel," *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 154, pp. 73–80, May 2011.
- [33] R. Fulcrand, A. Bancaud, C. Escriba, Q. He, S. Charlot, A. Boukabache, and A.-M. Gué, "On chip magnetic actuator for batch-mode dynamic manipulation of magnetic particles in compact lab-on-chip," *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 160, pp. 1520–1528, Dec. 2011.
- [34] N. Karapinar, "Magnetic separation of ferrihydrite from wastewater by magnetic seeding and high-gradient magnetic separation," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 71, pp. 45–54, Sept. 2003.
- [35] K.-H. Han and A. Bruno Frazier, "Continuous magnetophoretic separation of blood cells in microdevice format," *J. Appl. Phys.*, vol. 96, pp. 5797–5802, Nov. 2004.
- [36] K.-H. Han and A. B. Frazier, "Diamagnetic capture mode magnetophoretic microseparator for blood cells," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 14, pp. 1422–1431, Dec. 2005.
- [37] T. Ishiwata, O. Miura, K. Hosomi, K. Shimizu, D. Ito, and Y. Yoda, "Removal and recovery of phosphorus in wastewater by superconducting high gradient magnetic separation with ferromagnetic adsorbent," *Physica C Supercond.*, vol. 470, pp. 1818–1821, Nov. 2010.
- [38] S. Q. Li, M. F. Wang, Z. A. Zhu, Q. Wang, X. Zhang, H. Q. Song, and D. Q. Cang, "Application of superconducting hgms technology on turbid wastewater treatment from converter," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 84, pp. 56–62, Jan. 2012.
- [39] H. Okada, T. Tada, A. Chiba, K. Mitsuhashi, T. Ohara, and H. Wada, "High gradient magnetic separation for weakly magnetized fine particles," *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 12, no. 1, pp. 967–970, 2002.
- [40] H. Okada, Y. Kudo, H. Nakazawa, A. Chiba, K. Mitsuhashi, T. Ohara, and H. Wada, "Removal system of arsenic from geothermal water by high gradient magnetic separation-hgms reciprocal filter," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 14, pp. 1576–1579, June 2004.

- [41] Ν. Φλυτζάνης, *Εισαγωγή στην Μηχανική των Ρευστών*. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, 2015.
- [42] Ν. Πάντζαλης, *Μηχανική των Ρευστών*. Ίδρυμα Ευγενίδου, 2008.
- [43] P. J. Fellows, *Food Processing Technology: Principles and Practice (3rd ed.)*. Woodhead, 2009.
- [44] S. Yanniotis, S. Skaltsi, and S. Karaburnioti, “Effect of moisture content on the viscosity of honey at different temperatures,” *Journal of Food Engineering*, vol. 72, no. 4, pp. 372–377, 2006.
- [45] A. Koocheki, A. Ghandi, S. M. A. Razavi, S. A. Mortazavi, and T. Vasiljevic, “The rheological properties of ketchup as a function of different hydrocolloids and temperature,” *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 596–602, 2009.
- [46] Wikipedia, “Ροή των ρευστών.”, 2023. [Online; accessed 12-April-2023].
- [47] G. Papaevangelou, “Υδροδυναμική.”, 2019. [Online; accessed 12-April-2023].
- [48] Β. Μανούρας, “Μελέτη παραμέτρων επιλεκτικού μαγνητικού διαχωρισμού και εφαρμογές,” Master’s thesis, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών “Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις”, 2019.
- [49] M. Ahmadzadeh, C. Romero, and J. McCloy, “Magnetic analysis of commercial hematite, magnetite, and their mixtures,” *AIP Advances*, vol. 8, 12 2017. 056807.
- [50] Wikipedia, “Magnetite.”, 2023. [Online; accessed 3-April-2023].
- [51] ChemicalStore.com, “Magnetite, fe3o4 (black iron oxide 99%).” . [Online; accessed 3-April-2023].
- [52] Vikoscience, “[shenchen] labm6 - basic peristaltic pump.”, 2023. [Online; accessed 3-April-2023].
- [53] T. Flir, “Quad output dc power supply extech 382270.”, 2023. [Online; accessed 3-April-2023].
- [54] Wikipedia, “Arduino.”, 2023. [Online; accessed 6-April-2023].
- [55] SainSmart, “Sainsmart uno starter kits manual.”, 2023. [Online; accessed 6-April-2023].
- [56] R. N. Tutorials, “Guide for relay module with arduino.”, 2019. [Online; accessed 6-April-2023].

- [57] M. Electronics, “8-channel 5v relay module.” , 2023. [Online; accessed 6-April-2023].
- [58] Wikipedia, “Electromagnet.” , 2023. [Online; accessed 6-April-2023].
- [59] Cole-Parmer, “Valves; solenoid, pinch.” , 2023. [Online; accessed 6-April-2023].
- [60] Preci-Genome, “Switchez™solenoid-operated electric pinch valves.” , 2023. [Online; accessed 6-April-2023].
- [61] L. Chemistry, “Spectrophotometry.” , 2023. [Online; accessed 9-April-2023].
- [62] H. Corporation, “Uv/vis spectrophotometer; x-ma 1000/1200.” , 2023. [Online; accessed 9-April-2023].
- [63] OHAUS, “Adventurer™analytical.” , 2023. [Online; accessed 9-April-2023].
- [64] DevXplained, “Flyback diodes.” , 2022. [Online; accessed 19-May-2023].
- [65] K. Simeonidis, T. Gkinis, S. Tresintsi, C. Martinez-Boubeta, G. Vourlias, I. Tsiaoussis, G. Stavropoulos, M. Mitrakas, and M. Angelakeris, “Magnetic separation of hematite-coated fe₃o₄ particles used as arsenic adsorbents,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 168, no. 3, pp. 1008–1015, 2011.
- [66] F. Chen, R. Shi, Y. Xue, L. Chen, and Q.-H. Wan, “Templated synthesis of monodisperse mesoporous maghemite/silica microspheres for magnetic separation of genomic dna,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 322, no. 16, pp. 2439–2445, 2010.

Παράρτημα

Κώδικας προγραμματισμού Arduino

Δίνεται ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή Arduino.

```
int t1 = 10000; // cleaning duration
int t2 = 1500; // transition duration
int t3 = 5000; // nanoparticles gathering duration

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(2, OUTPUT); // 2-way valve 1
    pinMode(3, OUTPUT); // 2-way valve 2
    pinMode(4, OUTPUT); // electromagnet
}

void loop() {
    // cleaning
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(3, HIGH);
    digitalWrite(4, HIGH);
    delay(t1);

    // nanoparticles gathering
    digitalWrite(2, HIGH);
    digitalWrite(3, LOW);
    delay(t2);
    digitalWrite(4, LOW);
    delay(t3);
}
```

Κώδικας Python

Δίνεται ο κώδικας σε γλώσσα Python που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των γραφικών παραστάσεων.

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd

# ----- phase duration -----
data = pd.read_excel(io='drive/MyDrive/experiments.xlsx',
                    sheet_name='final', names=['initialOD', 'cleanOD', 'dirtyOD'],
                    usecols='C:E', skiprows=0, nrows=9)
print(data)

cleanOD = [data.loc[i]['cleanOD'] for i in range(0,9)]
dirtyOD = [data.loc[i]['dirtyOD'] for i in range(0,9)]
print(cleanOD)
print(dirtyOD)

x_axis =
    ['6/5', '8/5', '10/5', '12/5', '14/5', '16/5', '10/7', '12/7', '14/7',]
figs, axs = plt.subplots(2, sharex=True)
figs.suptitle('Μεταβλητή_διάρκεια_φάσης')
axs[0].plot(x_axis, cleanOD, marker='o')
axs[0].set_title('καθαρό_διάλυμα')
axs[1].plot(x_axis, dirtyOD, marker='o')
axs[1].set_title('ακάθαρτο_διάλυμα')
figs.tight_layout()
for ax in axs.flat:
    ax.set(xlabel='on/off_(sec)', ylabel='οπτική_πυκνότητα')
for ax in axs.flat:
    ax.label_outer()

# ----- flow velocity -----
data = pd.read_excel(io='drive/MyDrive/experiments.xlsx',
                    sheet_name='final', names=['initialOD', 'cleanOD', 'dirtyOD'],
                    usecols='C:E', skiprows=10, nrows=6)

```

```

print(data)

cleanOD = [data.loc[i]['cleanOD'] for i in range(0,5)]
dirtyOD = [data.loc[i]['dirtyOD'] for i in range(0,5)]
print(cleanOD)
print(dirtyOD)

x_axis = ['26', '28', '30', '32', '34',]
figs, axs = plt.subplots(2, sharex=True)
figs.suptitle('Μεταβλητή_ταχύτητα_ροής')
axs[0].plot(x_axis, cleanOD, marker = 'o')
axs[0].set_title('καθαρό_διάλυμα')
axs[1].plot(x_axis, dirtyOD, marker = 'o')
axs[1].set_title('ακάθαρτο_διάλυμα')
figs.tight_layout()
for ax in axs.flat:
    ax.set(xlabel='ταχύτητα_ροής (rpm)', ylabel='οπτική_πυκνότητα')
for ax in axs.flat:
    ax.label_outer()

# ———— electromagnet voltage - magnetic field ————
data = pd.read_excel(io='drive/MyDrive/experiments.xlsx',
    sheet_name='final', names=['initialOD', 'cleanOD', 'dirtyOD'],
    usecols='C:E', skiprows=16, nrows=7)
print(data)

cleanOD = [data.loc[i]['cleanOD'] for i in range(0,6)]
dirtyOD = [data.loc[i]['dirtyOD'] for i in range(0,6)]
print(cleanOD)
print(dirtyOD)

x_axis = ['16', '18', '20', '22', '24', '26']
figs, axs = plt.subplots(2, sharex=True)
figs.suptitle('Μεταβλητό_μαγνητικό_πεδίο_ηλεκτρομαγνήτη')
axs[0].plot(x_axis, cleanOD, marker = 'o')
axs[0].set_title('καθαρό_διάλυμα')
axs[1].plot(x_axis, dirtyOD, marker = 'o')
axs[1].set_title('ακάθαρτο_διάλυμα')

```

```
figs.tight_layout()
for ax in axs.flat:
    ax.set(xlabel='τάση_ηλεκτρομαγνητή_(V)', ylabel='οπτική_
           πυκνότητα')
for ax in axs.flat:
    ax.label_outer()
```