



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***“Ανάπτυξη διάταξης μαγνητικού διαχωρισμού με χρήση
μόνιμων μαγνητών”***

Σπάθη Δανάη

**Επιβλέπων καθηγητής:
Χριστοφόρου Ευάγγελος
Καθηγητής ΕΜΠ**

Αθήνα, Νοέμβριος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***“Ανάπτυξη διάταξης μαγνητικού διαχωρισμού με χρήση
μόνιμων μαγνητών”***

Σπάθη Δανάη

**Επιβλέπων καθηγητής:
Χριστοφόρου Ευάγγελος
Καθηγητής ΕΜΠ**

Εγκρίθηκε την 1 Νοεμβρίου 2022 από τα μέλη της τριμελούς επιτροπής:

Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής ΗΜΜΥ του ΕΜΠ,

Αφροδίτη Κτενά, Καθηγήτρια ΕΚΠΑ,

Ιωάννης Γκόνος, Καθηγητής ΗΜΜΥ του ΕΜΠ,

Αθήνα, Νοέμβριος 2022

Δανάη Σπάθη

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

Copyright © Δανάη Σπάθη, 2022

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

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την κατασκευή και τη μελέτη ενός συστήματος μαγνητικού διαχωρισμού σε συνεχή ροή ρευστού. Στα πρώτα κεφάλαια παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την πλήρη κατανόηση του φαινομένου και τη βέλτιστη ανάλυση όλων των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψιν. Παρατίθενται οι βασικοί άξονες της θεωρίας μαγνητισμού, ένα σημαντικό μέρος της θεωρίας ρευστομηχανικής και μία συνολική ανάλυση των δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε μαγνητικό σωματίδιο. Επιπλέον, γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική έρευνα πάνω στο μαγνητικό διαχωρισμό και τα state-of-the-art συστήματα που έχουν δημιουργηθεί για εφαρμογές του φαινομένου στη προστασία του περιβάλλοντος, στην ιατρική και σε άλλους τομείς. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος της εργασίας, στο οποίο περιγράφεται η πειραματική διάταξη, τα όργανα και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Γίνεται καταγραφή των πειραμάτων σε αντιστοιχία με την παράμετρο που διαφοροποιούνταν κάθε φορά, καθώς και προσδιορισμός του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων, για την καλύτερη απόδοση του συστήματος, από άποψη χρόνου και από άποψη ακρίβειας. Τέλος, καταγράφονται τα συμπεράσματα για τη λειτουργία του συστήματος, πιθανοί τρόποι βελτίωσης, καθώς επίσης και εφαρμογές που θα μπορούσε να έχει στην παρούσα ή σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Λέξεις κλειδιά

Μαγνητικός διαχωρισμός, μόνιμοι μαγνήτες, μαγνητικά σωματίδια, ροή, μαγνητίτης, εξισώσεις Navier-Stokes, μαγνητική δύναμη, αντίσταση ρευστού

Abstract

The present thesis deals with the construction and evaluation of a magnetic separation system on a continuous fluid flow. In the first chapters, the theoretical background is elaborated in order to fully understand the phenomenon and analyze all the parameters that are taken under consideration. The basics of magnetism theory, an important part of fluid dynamics and an analysis of forces on each magnetic particle are laid out. A brief bibliographical research on the subject as well as on the state-of-the-art magnetic separation systems for applications on environment, medicine and other fields is performed. The experimental part of the thesis follows, in which the system layout, the instrumentation and the materials used are described. The experiments are recorded depending on the parameter changed at the time, and, in the end, the best combination of parameters for the best system performance, in terms of time as well as accuracy, is kept. Lastly, conclusions, observations, and possible improvements on the system's operation, as well as potential applications in its current or larger scale, are laid out.

Key words

Magnetic separation, permanent magnets, magnetic particles, flow, magnetite, Navier-Stokes equations, magnetic force, flow resistance

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ε.Μ.Π. κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου που μου ανέθεσε αυτή την εργασία και με καθοδήγησε μέχρι την ολοκλήρωσή της, καθώς επίσης και που με ώθησε να βρω ένα αντικείμενο μέσα στα χρόνια των σπουδών μου που να με ενθουσιάζει και να μου κινεί την επιστημονική περιέργεια να το ανακαλύψω σε όλες του τις πτυχές.

Ευχαριστώ επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα Κωνσταντίνο Τυροβολά, για τη συνεργασία και την πολύτιμη βοήθεια του, τόσο στο στήσιμο της διάταξης και το πειραματικό μέρος, όσο και στη συγγραφή της εργασίας.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και στους φίλους μου που με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια και με βοήθησαν να φτάσω μέχρι εδώ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ.....	6
ABSTRACT.....	7
KEY WORDS.....	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	8
Εισαγωγή.....	13
Α) Αντικείμενο.....	13
Β) Στόχος.....	13
Γ) Δομή και μεθοδολογία.....	14
Κεφάλαιο 1 : Μαγνητισμός	
1.1 Μαγνητικά Υλικά.....	15
1.1.1 Διαμαγνητικά.....	15
1.1.2 Παραμαγνητικά.....	16
1.1.3 Σιδηρομαγνητικά /Αντισιδηρομαγνητικά.....	16
1.1.4 Σιδηριμαγνητικά.....	17
1.1.5 Υπερπαραμαγνητικά.....	17
1.1.6 Ferrofluids.....	18
1.2 Μαγνητικό πεδίο.....	18
1.2.1 Ένταση μαγνητικού πεδίου.....	19
1.2.2 Μαγνητική διαπερατότητα.....	19
1.2.3 Βρόχος υστέρησης.....	20
1.3 Εξισώσεις.....	21
1.3.1 Νόμος Biot Savart.....	21
1.3.2 Νόμος Gauss για ηλεκτρικό πεδίο.....	22
1.3.3 Νόμος Gauss για μαγνητικό πεδίο.....	22
1.3.4 Νόμος Ampere Maxwell.....	23
1.3.5 Νόμος Faraday.....	23
Κεφάλαιο 2 : Θεωρία ρευστών	
2.1 Παράμετροι ροής.....	24
2.2 Εξισώσεις ροής.....	25
Κεφάλαιο 3: Δυνάμεις	
3.1 Κάθετες στη ροή.....	27
3.1.1 Βαρυτική έλξη.....	27
3.1.2 Άνωση.....	27
3.2 Δυνάμεις κατά μήκος της ροής.....	27
3.2.1 Αντίσταση ρευστού.....	27
3.2.2 Μαγνητική δύναμη.....	28
3.3 Αμελητέες δυνάμεις.....	28

3.3.1 Δυνάμεις Van der Waals.....	28
3.3.2 Αλληλεπίδραση μαγνητικών διπόλων.....	29
3.3.3 Brownian Motion.....	30
3.4 Μαγνητική Κροκίδωση.....	31
Κεφάλαιο 4 : Μαγνητικός Διαχωρισμός	
4.1 Φαινόμενο και Εφαρμογές.....	32
4.2 Έρευνα.....	33
4.3 Μαγνητίτης.....	36
Κεφάλαιο 5: Διάταξη και πειράματα	
5.1 Ροή πειράματος και στόχοι.....	39
5.2 Εξοπλισμός και πειραματική διάταξη.....	39
5.3 Πειράματα.....	43
5.3.1 Ταχύτητα ροής.....	43
5.3.2 Χρόνος “on”/”off” πεδίου.....	44
5.3.3 Συγκέντρωση σκόνης στο ferrofluid.....	44
5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	46
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα, Εφαρμογές και Προοπτικές Εξέλιξης	
6.1 Συμπεράσματα και βελτιώσεις.....	49
6.2 Εφαρμογές και προοπτικές εξέλιξης.....	50
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	52
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	54
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	58

Εισαγωγή

A. Αντικείμενο

Τα μαγνητικά υλικά έχουν κερδίσει μία σημαντική θέση στην σύγχρονη τεχνολογία. Αποτελούν στοιχειώδη υλικά στην κατασκευή ηλεκτροκινητήρων, άνοιξαν τον δρόμο για τη δημιουργία του τομέα του magnetic recording και την κατασκευή λεπτών μαγνητικών υμενίων με πολλές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται σε ιατρικές τεχνικές απεικόνισης, όπως η μαγνητική τομογραφία και εκτελείται πλέον ένα μεγάλο πλήθος επιστημονικών ερευνών πάνω στην αξιοποίησή τους. Οι ιδιότητες των μαγνητικών υλικών είναι αυτές που τα καθιστούν ενδιαφέροντα, καθώς είναι ικανά να δημιουργούν μαγνητικό πεδίο ελεγχόμενης έντασης -μικρής ή μεγάλης- με μικρή ή μηδαμινή σπατάλη ενέργειας.

Στα πιο πρόσφατα χρόνια, δημιουργήθηκε ένα επιστημονικό ενδιαφέρον στην κατασκευή μικρο και νάνο-σωματιδίων μαγνητικών υλικών και μελετήθηκε η συμπεριφορά τους, φτάνοντας στο συμπέρασμα ότι αυτή μεταβάλλεται σημαντικά. Εμφανίζεται πλέον, το φαινόμενο του υπερπαραμαγνητισμού, καθιστώντας τα σωματίδια εξαιρετικά επιρρεπή σε εξωτερικά επιβαλλόμενα μαγνητικά πεδία. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει τον έλεγχο της κίνησης των σωματιδίων, ρυθμίζοντας τις εξωτερικές μαγνητικές δυνάμεις που τους ασκούνται, και ανοίγει τον δρόμο για πολλές εφαρμογές.

Μία από αυτές τις εφαρμογές αποτελεί το αντικείμενο του μαγνητικού διαχωρισμού. Πρόκειται για την χρήση μαγνητών -ηλεκτρομαγνητών ή μόνιμων- σε ένα σύστημα, με στόχο τον διαχωρισμό των μαγνητικών υλικών από τα μη μαγνητικά. Πολλές έρευνες έχουν εκτελεστεί την τελευταία εικοσαετία, καθιστώντας τον μαγνητικό διαχωρισμό ως μία ολοένα και περισσότερο εξελισσόμενη μέθοδο για επεξεργασία υδάτων, βιοϊατρικές εφαρμογές, τεχνολογίες ανακύκλωσης, επεξεργασίας προϊόντων και τροφίμων, και πολλά άλλα αντικείμενα. Πρόκειται για μια φυσική, μη επιβλαβή και οικονομική τεχνική, και γι' αυτούς τους λόγους η εξέλιξή της δημιουργεί μεγάλο ενδιαφέρον στην επιστημονική κοινότητα. Όπως θα αναλυθεί και σε επόμενα κεφάλαια τα συστήματα μαγνητικού διαχωρισμού που έχουν δημιουργηθεί μέχρι τώρα ποικίλουν και εφαρμόζονται σε πολλούς διαφορετικούς τομείς.

B. Στόχος

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία και μελέτη ενός συστήματος μαγνητικού διαχωρισμού, με χρήση μόνιμων μαγνητών σε μία συνεχόμενη ροή διαλύματος νερού και ferrofluid μαγνητικών σωματιδίων. Το ενδιαφέρον για την δημιουργία αυτού του συστήματος προέκυψε από τις ήδη υπάρχουσες έρευνες που εκτελούνται πάνω στον διαχωρισμό μαγνητικών υλικών, μέσα σε μία ροή. Η βιβλιογραφία έδειξε αρκετά ενθαρρυντικά αποτελέσματα όσον αφορά την απόδοση των ήδη υπαρχόντων συστημάτων. Φυσικά, στόχος ήταν το παρόν σύστημα να διαφοροποιηθεί και να προσφέρει μία επιπλέον καινοτομία στον τομέα.

Γ. Δομή και μεθοδολογία

Επιλέχθηκε να γίνει χρήση μόνιμων μαγνητών, οι οποίοι θα βρίσκονται κάθετα σε μία ροή μαγνητικών σωματιδίων με νερό, και θα πλησιάζουν και θα απομακρύνονται «ενεργοποιώντας» και «απενεργοποιώντας» το πεδίο μεταξύ τους. Σε πρώτο στάδιο μελετήθηκε η κατασκευή της διάταξης, από άποψη γεωμετρίας και λειτουργικότητας. Επιλέχθηκαν δύο μαγνήτες προκειμένου τα σωματίδια να συγκρατηθούν στο κέντρο του σωλήνα και να μην συσσωρευτούν στα τοιχώματα. Συγκεντρώθηκαν όλα τα υπόλοιπα απαραίτητα εξαρτήματα, οι σερβοκινητήρες για την κίνηση των μαγνητών, βαλβίδα για την ανακατεύθυνση του ρευστού σε ξεχωριστούς σωλήνες και πλακέτες Arduino για τον ηλεκτρονικό έλεγχο των εξαρτημάτων.

Στο επόμενο στάδιο επιλέχθηκαν τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν. Συγκεκριμένα έγινε έρευνα πάνω στη γεωμετρία και το υλικό των μαγνητών και στο τέλος επιλέχθηκαν μαγνήτες νεοδυμίου σε κυβική και ορθογώνια παραλληλεπίπεδη μορφή, ώστε να παράγουν επαρκώς ισχυρό μαγνητικό πεδίο με μεγάλη βάρθρωση. Οι λόγοι που μία μεγάλη βάρθρωση είναι επιθυμητή θα εξηγηθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Επιλέχθηκε μαγνητική σκόνη μαγνητίτη, όσο το δυνατόν μικρότερης διαμέτρου ώστε να πλησιάζει στις διαστάσεις νανοσωματιδίων.

Όταν η κατασκευή της διάταξης ολοκληρώθηκε, ξεκίνησε το πειραματικό μέρος της εργασίας. Απομονώθηκαν όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν το σύστημα και είναι δυνατόν να μεταβληθούν. Αυτές οι παράμετροι ήταν η ταχύτητα της ροής του υγρού, η συγκέντρωση μαγνητικής σκόνης μέσα στο αρχικό διάλυμα που επρόκειτο να “καθαριστεί” και η αναλογία χρόνων κατά τους οποίους οι μαγνήτες πλησίαζαν και απομακρύνονταν, αυξάνοντας και μειώνοντας το πεδίο ανάμεσά τους. Με βάση αυτούς τους παράγοντες εκτελέστηκαν πειράματα για διάφορες τιμές τους και τελικά βρέθηκε ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων που έδινε την καλύτερη τελική απόδοση.

Τελευταίο βήμα ήταν η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων και η λήψη συμπερασμάτων για τη λειτουργία του συστήματος. Πραγματοποιήθηκε μία διερεύνηση αναφορικά με τις παραμέτρους που μπορούν να αλλάξουν σε μελλοντική έρευνα, και αν αυτό θα βελτίωνε την συνολική απόδοση. Επιπλέον μελετήθηκε η βιβλιογραφία πάνω στο αντικείμενο, τα πιθανά πλεονεκτήματα της παρούσας εργασίας, καθώς επίσης και οι εφαρμογές που μπορεί να έχει στην επιστήμη και στη βιομηχανία.

Κεφάλαιο 1 : Μαγνητισμός

1.1 Μαγνητικά Υλικά

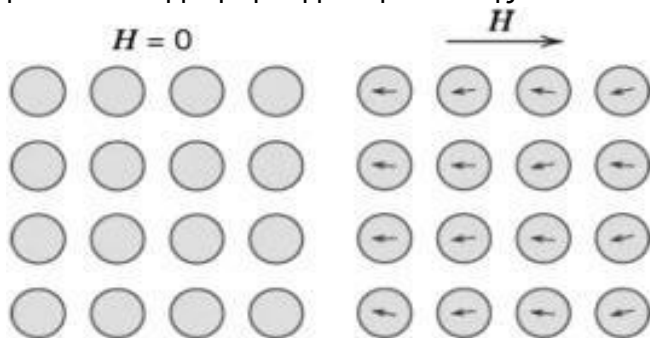
Ορισμένα υλικά έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια σε εξωτερικές στοιβάδες των ατόμων τους. Τα ηλεκτρόνια είναι ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια και επομένως δημιουργούν μαγνητικό πεδίο γύρω τους. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αυτά τείνουν να συζευχτούν με άλλα γειτονικά τους και ως αποτέλεσμα να ευθυγραμμιστούν με αυτά. Επομένως το spin τους αλλάζει διεύθυνση και επηρεάζεται από γειτονικά spins, δημιουργώντας έτσι μαγνητικές περιοχές που αποτελούνται από μαγνητικά δίπολα ίδιου προσανατολισμού. Οι μαγνητικές περιοχές χωρίζονται από μαγνητικά τοιχώματα, τα οποία αποτελούνται από δίπολα διεύθυνσης ενδιάμεσης των δύο περιοχών στις οποίες βρίσκονται ανάμεσα. Όλες οι περιοχές δημιουργούν μία συνολική μαγνήτιση στο υλικό, η οποία μπορεί να είναι μικρή ή μεγάλη, και να επηρεάζεται από κάποιο εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο ή όχι.

Τα μαγνητικά υλικά χωρίζονται σε σκληρά και μαλακά, ή αντίστοιχα σε μόνιμους μαγνήτες ή ηλεκτρομαγνήτες, ανάλογα με το πως συμπεριφέρονται με τη παρουσία εξωτερικού πεδίου. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά δεν εμφανίζουν μαγνήτιση όταν το εξωτερικό πεδίο είναι μηδενικό, ενώ αρχίζουν να μαγνητίζονται όταν το πεδίο αυξάνεται σύμφωνα με τον χαρακτηριστικό τους βρόχο υστέρησης. Αντίστοιχα, όταν το πεδίο αφαιρεθεί, τα υλικά αυτά απομαγνητίζονται εύκολα. Μαλακά μαγνητικά υλικά είναι τα διαμαγνητικά και τα παραμαγνητικά.

Τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι μόνιμοι μαγνήτες, το οποίο σημαίνει ότι δεν απαιτούν εξωτερικό πεδίο για να εμφανίσουν μαγνήτιση, άλλα έχουν ήδη μία αρχική μαγνήτιση στη φυσική τους μορφή. Σκληρά μαγνητικά υλικά είναι τα σιδηρομαγνητικά, αντισιδηρομαγνητικά και σιδηριμαγνητικά.

1.1.1 Διαμαγνητικά Υλικά

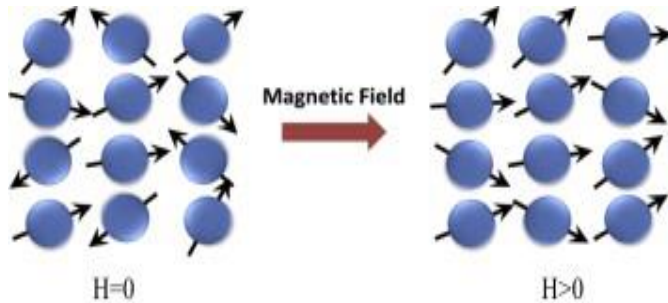
Τα μαγνητικά υλικά κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με την μαγνητική τους διαπερατότητα. Στα διαμαγνητικά υλικά η μαγνητική διαπερατότητα είναι μικρότερη από αυτή του κενού, γεγονός που σημαίνει πρακτικά ότι οι μαγνητικές γραμμές ενός εξωτερικού πεδίου αδυνατούν να διαπεράσουν το υλικό σε πολύ μεγάλο βαθμό. Εσωτερικά, όταν δεν εφαρμόζεται εξωτερικό πεδίο, τα spins των ηλεκτρονίων αλληλοαναιρούνται και ως αποτέλεσμα δεν υπάρχει μόνιμη μαγνητική ροπή. Αν όμως εφαρμοστεί εξωτερικό πεδίο, το spin των ηλεκτρονίων αρχίζει να αλλάζει, παράγοντας μία συνολική μαγνητική ροπή αντίθετης κατεύθυνσης από το εξωτερικό πεδίο.



Εικόνα 1.1: Μαγνητικές ροπές σε διαμαγνητικό υλικό πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου [1]

1.1.2 Παραμαγνητικά Υλικά

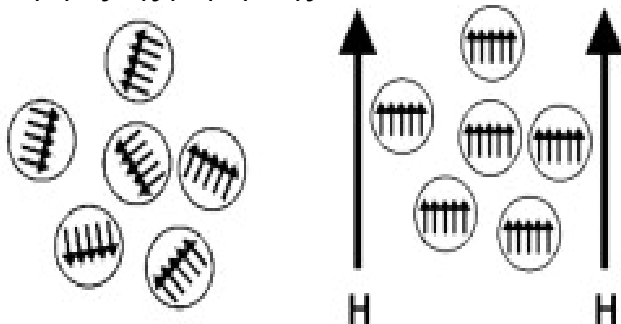
Τα παραμαγνητικά υλικά έχουν μαγνητική διαπερατότητα λίγο μεγαλύτερη της μονάδας. Διαθέτουν μία μόνιμη μαγνητική ροπή, λόγω της ανεπαρκούς ακύρωσης ζευγών spin ηλεκτρονίων. Τα spins των ηλεκτρονίων, σε απουσία εξωτερικού πεδίου, είναι τυχαία προσανατολισμένα. Παρόλα αυτά σε μακροσκοπικό επίπεδο, η συνολική μαγνητική ροπή φαίνεται μηδενική. Με παρουσία εξωτερικού πεδίου τα spins των ηλεκτρονίων αρχίζουν να προσανατολίζονται στην κατεύθυνση του πεδίου και επομένως δημιουργείται μία μαγνήτιση, η οποία είναι εμφανής και σε μακροσκοπικό επίπεδο.



Εικόνα 1.2: Μαγνητικές ροπές σε παραμαγνητικό υλικό πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου [2]

1.1.3 Σιδηρομαγνητικά /Αντισιδηρομαγνητικά

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα, πολύ μεγαλύτερη της μονάδας (τάξης του 10^6). Διαθέτουν μία μόνιμη μαγνητική ροπή που, ακόμα και σε απουσία εξωτερικού πεδίου, προκαλεί μία εξαιρετικά μεγάλη μαγνήτιση. Σε απουσία εξωτερικού πεδίου, ορισμένες μαγνητικές περιοχές μπορεί να είναι διαφορετικά προσανατολισμένες. Όταν εφαρμοστεί εξωτερικό πεδίο οι περιοχές αυτές θα προσανατολιστούν παράλληλα με τις υπόλοιπες και με το πεδίο, και ως αποτέλεσμα θα δημιουργήσουν μία αυθόρμητη μαγνήτιση, πολύ μεγαλύτερη της τάξης του εξωτερικού πεδίου. Όταν το εξωτερικό πεδίο αφαιρεθεί, μπορεί να εξακολουθεί να διατηρείται ο προσανατολισμός μερικών μαγνητικών περιοχών και άρα να διατηρείται ένα μέρος της μαγνήτισης.



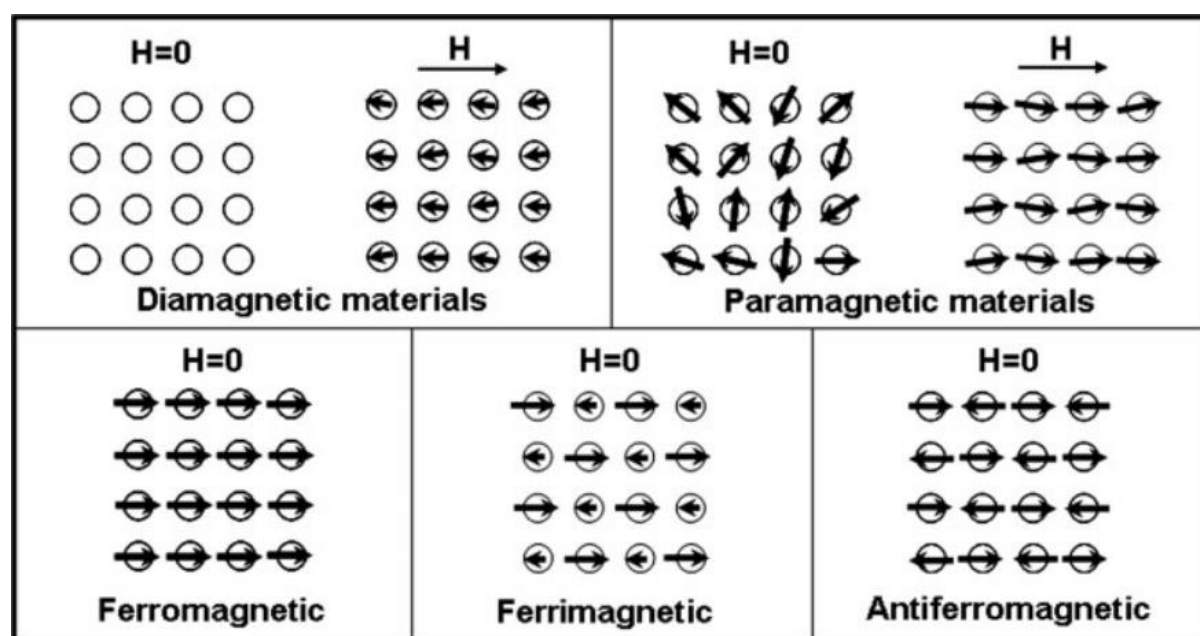
Εικόνα 1.3: Μαγνητικές ροπές μέσα σε μαγνητικές περιοχές σιδηρομαγνητικού υλικού πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου [3]

Τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούνται από ζεύγη ηλεκτρονίων με αντίθετα spins, έτσι ώστε να αλληλοαναιρούνται και ως αποτέλεσμα η συνολική μαγνήτιση να είναι

μηδενική. Αν όμως ξεπεράσουμε μία θερμοκρασία γνωστή και ως σημείο Néel, τα ζεύγη spins “σπάνε” και το υλικό γίνεται παραμαγνητικό.

1.1.4 Σιδηριμαγνητικά

Τα σιδηριμαγνητικά υλικά έχουν μαγνητικά δίπολα κατανεμημένα παρόμοια με τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά. Έχουν, δηλαδή, ζεύγη αντίρροπων διπόλων, αλλά η διαφορά τους είναι ότι στα σιδηριμαγνητικά οι αντίρροπες ροπές δεν είναι ίσες, και επομένως δεν αλληλοαναιρούνται πλήρως. Ως αποτέλεσμα, η μαγνήτιση στο εσωτερικό του υλικού είναι σχετικά μικρή, αλλά υπάρχει, και αυξάνεται με τη παρουσία εξωτερικού πεδίου.



Εικόνα 1.4: Πίνακας με όλα τα βασικά είδη μαγνητικών υλικών και τη μορφή των μαγνητικών ροπών τους [4]

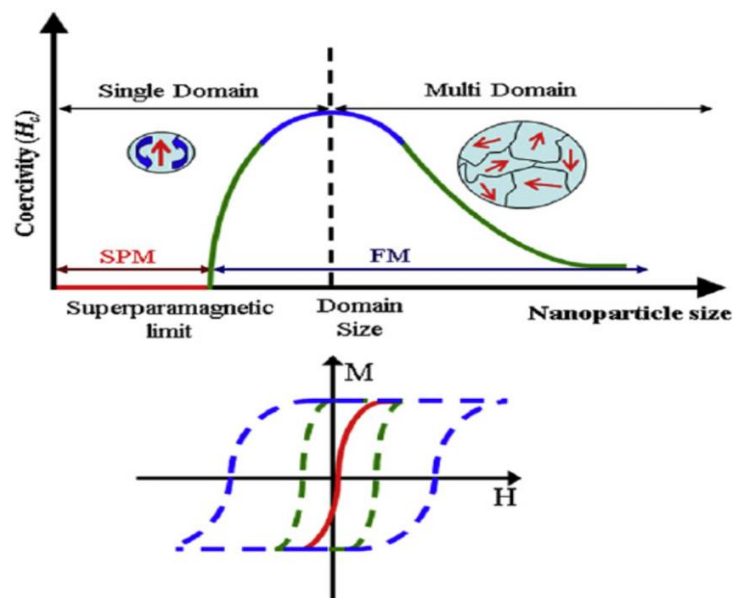
1.1.5 Υπερπαραμαγνητικά

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένα μαγνητικό υλικό αποτελείται από μαγνητικές περιοχές και τοιχώματα. Τα μαγνητικά υλικά μπορεί να έχουν και την μορφή σωματιδίων, όπως για παράδειγμα στις μαγνητικές σκόνες, στις οποίες η διάμετρος ενός κόκκου υλικού μπορεί να είναι της τάξης μικρόμετρων ή νανόμετρων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αν η διάμετρος πέσει κάτω από μία συγκεκριμένη τιμή, θα πάψουν να υπάρχουν μαγνητικά τοιχώματα, που θα χωρίζουν τις περιοχές του υλικού, και θα δημιουργηθεί μία μονομαγνητική περιοχή ορισμένης μαγνητικής ροπής. Η διεύθυνση της μαγνήτισης ενός τέτοιου υλικού, υπό την επήρεια της θερμοκρασίας, μπορεί να αρχίσει να κάνει τυχαίες περιστροφές ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος χαλάρωσης Neel. Απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, και αν ο χρόνος μέτρησης της μαγνήτισης των νανοσωματιδίων είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον χρόνο Neel, τότε θα βρεθεί μία μέση μαγνήτιση ίση με μηδέν, λόγω της τυχαιότητας των περιστροφών.

Συνήθως τα σιδηρο και σιδηρι-μαγνητικά σωματίδια φτάνουν σε αυτή τη κατάσταση υπερπαραμαγνητισμού, όταν ξεπερνούν τη θερμοκρασία Curie τους. Σε

αυτή τη φάση, και με παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, συμπεριφέρονται σαν παραμαγνητικά, αλλά με πολύ μεγαλύτερη μαγνητική επιδεκτικότητα, καθιστώντας τα πολύ επιρρεπή στα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Οι τιμές διαμέτρου σωματιδίων, κάτω από τις οποίες μπορεί να εμφανίσουν υπερπαραμαγνητική συμπεριφορά είναι περίπου στα 3-50 nm, ανάλογα με το υλικό [5].



Εικόνα 1.5: Συνεκτικό πεδίο συναρτήσει διαμέτρου κόκκου (κόκκινο: υπερπαραμαγνητικό, πράσινο/μπλε: σιδηρομαγνητικά) [6]

1.1.6 Ferrofluids

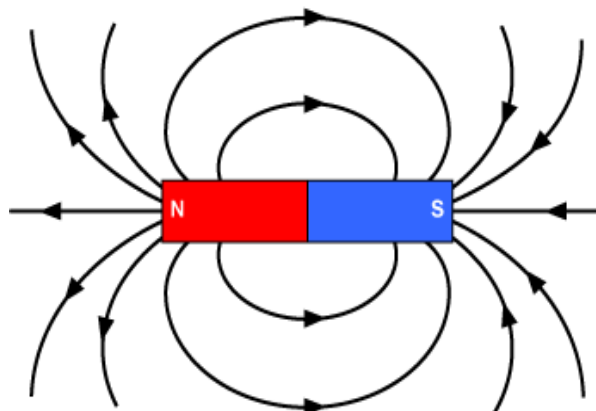
Τα ferrofluids αποτελούν διαλύματα μαγνητικής σκόνης μέσα σε έναν ρευστό διαλύτη-φορέα, συνήθως οργανικό ή νερό. Η μαγνητική σκόνη αποτελείται από μικρο ή νάνο-σωματίδια συνήθως σιδηρομαγνητικού ή σιδηριμαγνητικού υλικού. Τα σωματίδια περιβάλλονται από τον διαλύτη-φορέα με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποφεύγεται η μαγνητική κροκίδωση, δηλαδή η σύσταση μαγνητικών συσσωματωμάτων. Συγκεκριμένα, αν γίνεται χρήση διαλύτη με μεγάλη πυκνότητα, όπως το ολεϊκό οξύ, τότε διατηρείται μία απόσταση ανάμεσα στα μαγνητικά σωματίδια και οι ελκτικές δυνάμεις Van der Waals, καθώς επίσης και οι δυνάμεις μεταξύ μαγνητικών διπόλων, εξασθενούνται. Θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο γιατί η συμπεριφορά αυτή είναι επιθυμητή.

Με απουσία εξωτερικού πεδίου τα ferrofluids δεν διατηρούν την εσωτερική τους μαγνήτιση, αλλά ταυτόχρονα δεν διαλύονται όταν βρίσκονται μέσα σε υδατικά διαλύματα. Αυτό σημαίνει ότι διατηρούν τη σύστασή τους και είναι εύκολο να κατευθυνθούν και να συγκρατηθούν από εξωτερικούς μαγνήτες.

1.2 Μαγνητικό Πεδίο

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στα μαγνητικά υλικά υπάρχουν περιοχές με ομόρροπα προσανατολισμένα δίπολα, τα οποία δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο γύρω τους με συγκεκριμένη κατεύθυνση, συνιστώντας έτσι μία συνολική εσωτερική μαγνήτιση \mathbf{M} . Η μαγνήτιση αυτή, προσθετικά με το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο που

μπορεί να υπάρχει, αποτελούν ένα συνολικό μαγνητικό πεδίο στον χώρο γύρω από το υλικό. Η μορφή του πεδίου αυτού εκφράζεται νοητά μέσω των μαγνητικών γραμμών. Οι γραμμές αυτές σχηματίζουν κλειστές διαδρομές, γύρω και μέσα από το υλικό, οι οποίες ακολουθούν την κατεύθυνση της συνολικής μαγνήτισης.



Εικόνα 1.6: Μορφή μαγνητικών γραμμών σε μόνιμο μαγνήτη [7]

Χαρακτηριστικό μέγεθος του μαγνητικού πεδίου είναι το \mathbf{B} , το οποίο όπως θα δούμε και παρακάτω εμφανίζεται στις εξισώσεις Maxwell και στον νόμο Biot-Savart. Ονομάζεται μαγνητική επαγωγή και σχετίζεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου και τη μαγνήτιση του υλικού μέσω της σχέσης

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (1.1)$$

όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Η μαγνητική επαγωγή εκφράζει την πυκνότητα των μαγνητικών γραμμών, οι οποίες διέρχονται από μία συγκεκριμένη επιφάνεια εντός ενός μαγνητικού πεδίου.

1.2.1 Ένταση μαγνητικού πεδίου

Εκτός από τη μαγνητική επαγωγή, ένα άλλο μέγεθος που μπορεί να εκφράσει το μαγνητικό πεδίο είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} , η οποία μετριέται σε Ampere/m. Όπως θα δούμε και παρακάτω στον νόμο Biot-Savart, η παρουσία ροής ρεύματος μέσα από ένα σύρμα, όπως για παράδειγμα σε ένα πηνίο, δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στον χώρο γύρω από αυτό. Το πεδίο αυτό αναπαρίσταται από το \mathbf{H} και είναι ανεξάρτητο της εσωτερικής, από φυσικού μαγνήτισης του μαγνητικού υλικού \mathbf{M} .

1.2.2 Μαγνητική διαπερατότητα

Η μαγνητική διαπερατότητα ορίζεται ως ο λόγος της μαγνητικής επαγωγής προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Εκφράζει το πόσο εύκολα ή δύσκολα οι μαγνητικές γραμμές διαπερνούν ένα υλικό. Όπως είδαμε και παραπάνω, αποτελεί έναν παράγοντα διαχωρισμού των υλικών σε παραμαγνητικά, διαμαγνητικά, σιδηρομαγνητικά, σιδηριμαγνητικά και αντισιδηρομαγνητικά. Για παράδειγμα τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν πολύ μεγάλο μ και επομένως “τραβάνε” τις μαγνητικές γραμμές πιο εύκολα, ενώ τα διαμαγνητικά υλικά έχουν μ μικρότερο του κενού και επομένως οι μαγνητικές γραμμές δυσκολεύονται να εισέρθουν στο εσωτερικό τους. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού είναι $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$.

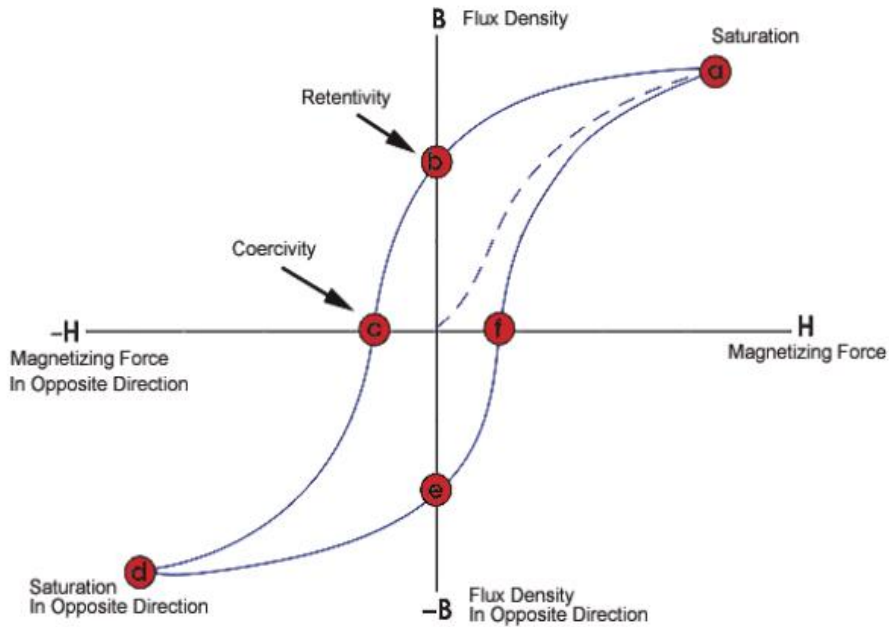
1.2.3 Βρόχος υστέρησης

Ο βρόχος υστέρησης αποτελεί μία απεικόνιση, χαρακτηριστική για κάθε υλικό, της σχέσης μεταξύ μαγνήτισης του υλικού M ή μαγνητικής επαγωγής B και εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου H . Είτε ο κάθετος άξονας αφορά την μαγνήτιση είτε την μαγνητική επαγωγή, το σχήμα του βρόχου είναι αντίστοιχο λόγω της σχέσης (1.1) Από την απεικόνιση αυτή μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα όπως:

- το πως μεταβάλλεται η εσωτερική μαγνήτιση, όταν μεταβάλλεται και το εξωτερικό πεδίο
- πόσο μαγνητικά σκληρό ή μαλακό είναι το υλικό
- πόση ενέργεια έχει αποθηκευμένη στο εσωτερικό του
- αν έχει ατέλειες στην εσωτερική του δομή (πλέγμα)

Συγκεκριμένα, παίρνοντας ως αναφορά την εικόνα 1.7 μπορούμε να περιγράψουμε τι εκφράζει κάθε περιοχή του βρόχου. Ξεκινώντας από το σημείο (e), θεωρώντας ότι έχουμε μία αρχική εσωτερική μαγνήτιση, όσο το πεδίο αυξάνεται, η μαγνητική επαγωγή κατευθύνεται προς το μηδέν, ώστε να αλλάξει κατεύθυνση και να προσανατολιστεί ομόρροπα με το εξωτερικό πεδίο. Το B μηδενίζεται στο σημείο (f), όπου έχουμε εξωτερικό συνεκτικό πεδίο Hc . Αφού περάσει το μηδέν αυξάνεται μέχρι να φτάσει στο σημείο (a). Από το σημείο αυτό και πέρα η περαιτέρω αύξηση του εξωτερικού πεδίου δεν θα επηρεάσει σημαντικά το B , καθώς έχουμε φτάσει στο σημείο κορεσμού, όπου υπάρχει μαγνήτιση κορεσμού Ms , λόγω της επιτυχούς ευθυγράμμισης όλων των μαγνητικών ροπών μέσα στο υλικό. Μετά το σημείο (a) το πεδίο αρχίζει να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί και η μαγνητική επαγωγή φτάνει στο σημείο (b) (μαγνητικής επαγωγής Br) όπου έχει παραμένουσα μαγνήτιση Mr . Έπειτα, εφαρμόζεται εξωτερικό πεδίο αντίθετης κατεύθυνσης και το B αρχίζει να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί στο σημείο (c) σε συνεκτικό πεδίο $-Hc$. Πέρα από το Hc , όταν το πεδίο αυξηθεί παραπάνω σε μέτρο, το B αλλάζει κατεύθυνση, γίνεται ομόρροπο του πεδίου και αυξάνεται σε μέτρο μέχρι να φτάσει στο σημείο (d), όπου βρίσκεται πάλι σε κορεσμό. Αν τώρα το εξωτερικό πεδίο μειωθεί παραπάνω, μειώνεται και το B μέχρι το σημείο (e) όπου επιστρέφει πάλι στην (αρνητική) παραμένουσα μαγνήτιση $-Mr$ και σε μαγνητική επαγωγή $-Br$.

Το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης αντιστοιχεί στην συνολική ενέργεια ανά μονάδα όγκου, η οποία είναι αποθηκευμένη μέσα στο υλικό.



Εικόνα 1.7: Βρόχος υστέρησης ενός μαγνητικού υλικού και κρίσιμα σημεία στην γραφική του παράσταση [8]

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το πόσο μαγνητικά σκληρό ή μαλακό είναι το υλικό μπορεί να απεικονιστεί στο βρόχο υστέρησης του. Τα σκληρά υλικά αποτελούν μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι έχουν μία αρχική μαγνήτιση χωρίς τη παρουσία εξωτερικού πεδίου, ως αποτέλεσμα υπάρχει κάποια αποθηκευμένη ενέργεια στο εσωτερικό τους. Επομένως αν ο βρόχος είναι φαρδύς και έχει μεγάλο συνεκτικό πεδίο -και επομένως και μεγάλο εμβαδόν (ενέργεια)- σημαίνει ότι το αναφερόμενο υλικό είναι σκληρό μαγνητικά. Αντίθετα, αν ο βρόχος είναι στενός και έχει μικρό συνεκτικό πεδίο -και επομένως μικρό εμβαδόν- τότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το υλικό μαγνητίζεται και απομαγνητίζεται εύκολα, άρα πρόκειται για μαγνητικά μαλακό υλικό.

Από τη μορφή του βρόχου υστέρησης μπορούμε επίσης να βγάλουμε συμπεράσματα για την εσωτερική δομή του υλικού και τη πιθανότητα να υπάρχουν ατέλειες στο πλέγμα. Αν υπάρχουν ατέλειες, όπως διαταραχές, απουσίες ατόμων κ.α., τότε το συνεκτικό πεδίο που απαιτείται είναι πιθανό να είναι μεγαλύτερο και επομένως να υπάρχει μεγαλύτερη υστέρηση στο βρόχο.

1.3 Εξισώσεις

Παρακάτω παρατίθενται και ερμηνεύονται οι εξισώσεις που αφορούν τα μαγνητικά πεδία, οι εξισώσεις Maxwell καθώς επίσης και ο νόμος Biot Savart.

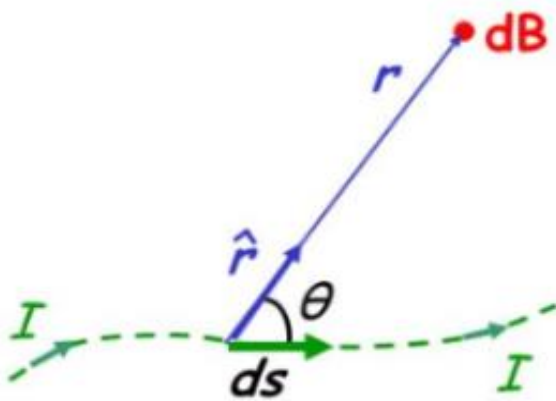
1.3.1 Νόμος Biot Savart

Ο νόμος Biot-Savart εκφράζει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται λόγω της παρουσίας ενός ηλεκτρικού ρεύματος. Εφαρμόζει στη μέτρηση του πεδίου στο εσωτερικό πηνίων και στην ελεγχόμενη λειτουργία ηλεκτρομαγνητών.

Ο νόμος τίθεται υπό τη μορφή:

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \frac{I dl \times \hat{r}}{|r|^2} \quad (1.2)$$

Όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, $d\mathbf{l}$ ένα κομμάτι μήκους του μονοπατιού C , $\hat{\mathbf{r}}$ το μοναδιαίο διάνυσμα θέσης μεταξύ του $d\mathbf{l}$ του αγωγίμου μονοπατιού και του σημείου μέτρησης του πεδίου.



Εικόνα 1.8: Απεικόνιση νόμου Biot Savart πάνω σε έναν ρευματοφόρο αγωγό [9]

1.3.2 Νόμος Gauss για ηλεκτρικό πεδίο

Σύμφωνα με το νόμο Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο, η ηλεκτρική ροή μέσα από μία κλειστή επιφάνεια είναι ανάλογη με το συνολικό φορτίο ρ που περικλείει η επιφάνεια αυτή.

Ο νόμος εκφράζεται σε ολοκληρωτική μορφή ως εξής:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho \, dV \quad (1.3)$$

Όπου S μία κλειστή επιφάνεια, D η πυκνότητα ηλεκτρικής ροής, ρ το φορτίο στον χώρο.

Η διαφορική μορφή του νόμου εκφράζεται ως εξής:

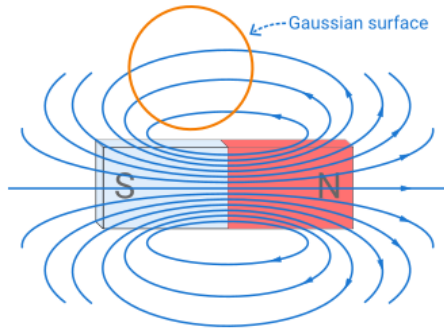
$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.4)$$

1.3.3 Νόμος Gauss για μαγνητικό πεδίο

Ο νόμος του Gauss για το μαγνητικό πεδίο εκφράζεται ως εξής:

$$\int_A \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (1.5)$$

Σύμφωνα με αυτόν, η μαγνητική ροή η οποία εξέρχεται από μία περιοχή ενός χώρου V , με σύνορο την κλειστή επιφάνεια A , δια μέσου της A , ισούνται με μηδέν [10]. Ο νόμος αυτός αποδεικνύει ότι οι μαγνητικές γραμμές είναι κλειστές και ότι δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα.



Εικόνα 1.9 Γκαουσιανή επιφάνεια που σχηματίζεται από τις μαγνητικές γραμμές ενός μαγνήτη [11]

Η διαφορική μορφή του νόμου είναι η εξής:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.6)$$

1.3.4 Νόμος Ampere-Maxwell

Ο νόμος Ampere-Maxwell έχει παρόμοια ερμηνεία με το νόμο Biot-Savart. Εκφράζει δηλαδή το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει από μία ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Συγκεκριμένα, ένα ηλεκτρικό ρεύμα ή μία μεταβαλλόμενη ηλεκτρική ροή, που διέρχεται από μία επιφάνεια παράγει ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από κάθε μονοπάτι που περιβάλλει την επιφάνεια αυτή.

Εκφράζεται ως εξής:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0(I_{enclosed} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S (\vec{E} \cdot \hat{n}) ds) \quad (1.7)$$

Όπου $I_{enclosed}$ το ηλεκτρικό ρεύμα που διέρχεται από μία περιοχή, Φ_E η ηλεκτρική ροή.

Η διαφορική μορφή του νόμου είναι η εξής:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \quad (1.8)$$

1.3.5 Νόμος επαγωγής του Faraday

Ο νόμος επαγωγής του Faraday δείχνει ότι ο αρνητικός ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από μία επιφάνεια, παράγει μία ηλεκτρεγερτική δύναμη κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής που περικλείει την επιφάνεια αυτή. Η χρονική μεταβολή, δηλαδή, της μαγνητικής ροής, παράγει ηλεκτρικό πεδίο.

Ο νόμος εκφράζεται ως εξής:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S (\vec{B} \cdot \hat{n}) ds \quad (1.9)$$

Η διαφορική μορφή του νόμου είναι η εξής:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.10)$$

Κεφάλαιο 2: Θεωρία ρευστών

Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας βασίζεται στην κίνηση μαγνητικών σωματιδίων μέσα σε μία ροή ρευστού. Η κίνηση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση μία περισταλτικής αντλίας, η οποία εξασφαλίζει την σταθερή ταχύτητα του διαλύματος. Απαιτείται βέβαια, να ικανοποιούνται ορισμένες προϋποθέσεις όσων αφορά τη ροή, ώστε να υπάρχει μία ικανοποιητική σχέση ανάμεσα στη μαγνητική δύναμη και τις δυνάμεις που ασκούνται στα σωματίδια από το ρευστό.

Συγκεκριμένα, όταν οι μαγνήτες πλησιάζουν μεταξύ τους και δημιουργείται ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο στον χώρο όπου διέρχεται ο σωλήνας, στόχος είναι τα μαγνητικά σωματίδια να συγκρατούνται στο κέντρο του σωλήνα. Επομένως απαιτείται μία ισορροπία μεταξύ της οριζόντιας συνιστώσας της μαγνητικής δύναμης και της οριζόντιας δύναμης του ρευστού προς τα σωματίδια.

2.1 Παράμετροι ροής

Για να μπορέσουν να μελετηθούν οι συνθήκες υπό τις οποίες κινούνται τα μαγνητικά σωματίδια στο ρευστό και να αναλυθούν οι δυνάμεις που τους ασκούνται, απαιτείται να μελετηθεί και η φύση της ροής του ίδιου του ρευστού. Θα γίνει χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes, οι οποίες, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις που θα αναλυθούν παρακάτω, εκφράζουν μαθηματικά την συσχέτιση μεταξύ ταχύτητας, πίεσης, θερμοκρασίας και πυκνότητας ενός κινούμενου νευτώνειου ρευστού. Οι εξισώσεις αυτές βασίζονται στις αρχές διατήρησης της ορμής, της ενέργειας και της μάζας [12].

Συγκεκριμένα θα γίνει χρήση του νόμου του Stokes, ο οποίος αποτελεί μία λύση των εξισώσεων Navier-Stokes για πολύ μικρούς αριθμούς Reynolds, και εκφράζει την δύναμη τριβής που ασκείται σε ένα σφαιρικό αντικείμενο, μέσα σε ένα παχύρρευστο κινούμενο ρευστό. Οι υποθέσεις που γίνονται για τη λύση αυτή είναι οι εξής:

- στρωτή ροή
- σφαιρικά σωματίδια
- ομογενές υλικό
- λείες επιφάνειες
- απουσία αλληλεπίδρασης μεταξύ των σωματιδίων

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται σωματίδια μαγνητίτη, τα οποία θεωρούμε ότι πληρούν τις παραπάνω υποθέσεις. Αποτελούνται από ένα ομογενές υλικό, βρίσκονται σε μορφή μαγνητικής σκόνης, άρα είναι σφαιρικά, με σχετικά λεία εξωτερική επιφάνεια, και τέλος οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους είναι σημαντικά μικρότερες συγκριτικά με τις αλληλεπιδράσεις τους με τους εξωτερικούς μαγνήτες. Επιπλέον, στα πειράματα που εκτελέστηκαν, η σκόνη χρησιμοποιείται σε μορφή ferrofluid και επομένως τα σωματίδια εμποδίζονται από το να συσσωρευτούν σε συσσωματώματα, άρα η μεταξύ τους αλληλεπίδραση θεωρείται αμελητέα.

Για να πληρούνται γενικά οι προϋποθέσεις για τη χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes πρέπει, αρχικά, η ροή του υγρού να είναι στρωτή, καθώς η δημιουργία δυνάμεων επηρεάζει τις δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο σωματίδιο. Πλεονέκτημα επίσης της στρωτής ροής, είναι επιτρέπει το να υπολογισθεί η ταχύτητα του ρευστού κάθε φορά. Ένα μέγεθος το οποίο εξασφαλίζει ότι η ροή ενός υγρού είναι στρωτή, είναι

ο αριθμός Reynolds. Πρόκειται για ένα αδιάστατο μέγεθος το οποίο ορίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$R = VD \frac{\rho}{\mu} \quad (2.1)$$

όπου V η μέση ταχύτητα του ρευστού, D η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα, ρ η πυκνότητα του υγρού και μ το ιξώδες [13]. Ο αριθμός R πρέπει να είναι μικρότερος του 2000 προκειμένου η ροή να είναι στρωτή. Επομένως υπολογίζουμε ότι με

$$\rho = 0.895 \text{ g/mL}, \mu = 26.7 \text{ cP} = 26.7 \frac{\text{g}}{\text{m}\cdot\text{s}}, D = 3 \text{ mm},$$

η μέση ταχύτητα του υγρού πρέπει να είναι $V \leq 19,89 \text{ m/sec}$, γεγονός που σίγουρα ισχύει στην περίπτωση της παρούσας εργασίας [14].

Η ροή πρέπει επίσης να είναι ασυμπίεστη, δηλαδή να διατηρεί σταθερή πυκνότητα ανεξάρτητα από την πίεση που μπορεί να ασκείται στο ρευστό. Τόσο το νερό, όσο και το ολεϊκό οξύ που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία, είναι ασυμπίεστα ρευστά [15].

Τέλος, το ρευστό πρέπει να είναι νευτώνειο. Το ιξώδες των νευτώνειων ρευστών είναι σταθερό και ανεξάρτητο του ρυθμού διάτμησής τους, δηλαδή του ρυθμού παραμόρφωσής τους, υπό σταθερή θερμοκρασία. Αυτό ισχύει για το νερό και το λάδι, όπως το ολεϊκό οξύ [16].

2.2 Εξισώσεις ροής

Για να παρατεθούν με πληρότητα οι εξισώσεις Navier-Stokes εκφράζονται παρακάτω οι βασικές αρχές που τις διέπουν:

- Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας, “η συνολική μάζα ενός κλειστού συστήματος διατηρείται σταθερή”.
- Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής, “η συνολική ορμή ενός μονωμένου συστήματος σωμάτων διατηρείται σταθερή”.
- Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, “το αλγεβρικό άθροισμα όλων των μορφών ενέργειας σε ένα μονωμένο σύστημα διατηρείται σταθερό”.

Εφόσον οι προϋποθέσεις ικανοποιούνται, και με βάση τις παραπάνω αρχές, μπορούν να εκφραστούν οι εξισώσεις Navier-Stokes:

$$\text{momentum equation: } \rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g \quad (2.2)$$

$$\text{continuity equation: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (2.3)$$

Όπου $\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla$, ρ η πυκνότητα του ρευστού, \mathbf{u} η ταχύτητα της ροής, p η πίεση, τ ο εκτρεπόμενος τανυστής τάσης 2ης τάξης και \mathbf{g} η επιτάχυνση σώματος όπως η επιτάχυνση της βαρύτητας, ηλεκτροστατική επιτάχυνση κ.α.

Η εξίσωση της συνέχειας (continuity equation) ανάγεται στην αρχή διατήρησης της μάζας και εκφράζει πρακτικά ότι η συνολική μεταβολή του όγκου του ρευστού θα είναι μηδέν. Η εξίσωση της ορμής (momentum equation) ανάγεται στην αρχή διατήρησης της ορμής και μπορεί να αναλυθεί σε τρεις διαστάσεις x , y , z . Όλες οι εξισώσεις είναι χρονοεξαρτώμενες.

Εφόσον ικανοποιούνται οι συνθήκες για τη χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes και επιπλέον οι υποθέσεις της λύσης του Stokes, παρατίθεται η δύναμη ιξώδους που θα ασκείται σε ένα σφαιρικό σωματίδιο εντός της ροής:

$$\vec{F}_d = 6\pi\mu R\vec{v} \quad (2.4)$$

Όπου F_d η δύναμη ιξώδους ή δύναμη τριβής του Stokes (Stoke's drag), μ το ιξώδες του ρευστού, R η ακτίνα του σωματιδίου και v η σχετική ταχύτητα του ρευστού ως προς το σωματίδιο.

Κεφάλαιο 3 : Δυνάμεις

Για να μελετηθεί αν ο μαγνητικός διαχωρισμός είναι εφικτός, πρέπει να γίνει μία θεωρητική ανάλυση των δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε μαγνητικό σωματίδιο που κινείται μέσα στο ρευστό.

3.1 Δυνάμεις κάθετες στη ροή

Οι δυνάμεις αυτές παρατίθενται για λόγους πληρότητας αλλά θα αγνοηθούν στην παρούσα εργασία καθώς η διεύθυνσή τους είναι κάθετη στη ροή και επομένως δεν επηρεάζουν την οριζόντια κίνηση του σωματιδίου. Και οι κάθετες δυνάμεις βέβαια είναι επιθυμητό να “εξουδετερωθούν” προκειμένου το σωματίδιο να ακινητοποιηθεί στον κάθετο άξονα, όταν το μαγνητικό πεδίο είναι ενεργό.

3.1.1 Βαρυτική Έλξη

Η βαρυτική έλξη εκφράζεται ως το γινόμενο της μάζας του σωματιδίου επί την επιτάχυνση της βαρύτητας, σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, όπου η μάζα γράφεται και ως πυκνότητα επί όγκο [17]:

$$\vec{F}_g = m_{particle} \cdot \vec{g} = \rho_{particle} \cdot V \cdot \vec{g} \quad (3.1)$$

όπου $\rho_{particle}$ η πυκνότητα του σωματιδίου, V ο όγκος του και \vec{g} η επιτάχυνση της βαρύτητας.

3.1.2 Άνωση

Η άνωση είναι μία δύναμη που ασκείται από το ρευστό στο σωματίδιο και έχει και αυτή διεύθυνση κάθετη στη ροή. Εκφράζεται με βάση τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα ως εξής:

$$\vec{F}_b = -\rho_l \cdot V \cdot \vec{g} \quad (3.2)$$

όπου ρ_l η πυκνότητα του ρευστού και τα υπόλοιπα μεγέθη παραμένουν ίδια με παραπάνω [18].

3.2 Δυνάμεις κατά μήκος της ροής

Σε αυτή την ενότητα θα ληφθούν υπόψη οι δυνάμεις που ασκούνται στο σωματίδιο και επηρεάζουν την οριζόντια κίνησή του.

3.2.1 Αντίσταση ρευστού

Η δύναμη που ασκεί η ροή του ρευστού στο σωματίδιο αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.2. Πρόκειται για τον νόμο του Stokes, ο οποίος χρησιμοποιείται για μικρούς αριθμούς Reynolds -όπως στη παρούσα εργασία- και εκφράζεται ως εξής:

$$\vec{F}_d = 6\pi\mu R\vec{v} \quad (3.3)$$

όπου F_d η δύναμη ιξώδους ή δύναμη τριβής (Stoke's drag), μ το ιξώδες του ρευστού, R η ακτίνα του σωματιδίου και \vec{v} η σχετική ταχύτητα του ρευστού ως προς το σωματίδιο.

3.2.2 Μαγνητική Δύναμη

Η ελκτική δύναμη η οποία ασκείται σε ένα μαγνητικό σωματίδιο, το οποίο βρίσκεται εντός ενός μαγνητικού πεδίου εκφράζεται ως εξής:

$$\vec{F}_m = (\vec{m} \cdot \nabla) \cdot \vec{B} \quad (3.4)$$

όπου \vec{m} η μαγνητική ροπή του σωματιδίου και \vec{B} η μαγνητική επαγωγή ή πυκνότητα μαγνητικής ροής [19]. Η μαγνητική ροπή μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\vec{m} = V \vec{M} \quad (3.5)$$

όπου \vec{M} η μαγνήτιση του σωματιδίου και V ο όγκος του σωματιδίου. Για τη μαγνήτιση ενός υλικού ισχύει:

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H} \quad (3.6)$$

όπου \vec{H} η ένταση του μαγνητικού πεδίου και χ η μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού. Επιπλέον η μαγνητική επαγωγή εκφράζεται ως:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \vec{H} \quad (3.7)$$

διότι θεωρούμε ως \vec{H} το πεδίο που παράγεται από τους εξωτερικούς μόνιμους μαγνήτες.

Επομένως, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.5) – (3.7), και αντικαθιστώντας τον όγκο του σωματιδίου με τον τύπο του όγκου της σφαίρας, η εξίσωση (3.4) καταλήγει στην εξής σχέση:

$$\vec{F}_m = \frac{4}{3} \pi \alpha^3 \mu_0 \chi \vec{H} \nabla \vec{H} \quad (3.8)$$

Να αναφερθεί επίσης ότι το μέγεθος της μαγνητικής επιδεκτικότητας ενός υλικού εκφράζει το πόσο επιρρεπές είναι το υλικό αυτό στο να μαγνητιστεί από ένα εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο.

Στην παρούσα εργασία θα θεωρηθεί ότι το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο \mathbf{H} θα έχει δύο συνιστώσες x και y στο οριζόντιο επίπεδο, όπου x παράλληλη με την κίνηση της ροής και y κάθετη σε αυτή. Η μαγνητική δύναμη που θα προκαλείται από το διανυσματικό άθροισμα των συνιστωσών αυτών του μαγνητικού πεδίου, θα αντισταθμίζει την δύναμη Stokes, που ασκεί το ρευστό στα σωματίδια, ώστε αυτά να ακινητοποιούνται. Συγκεκριμένα, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, για τη δημιουργία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου γίνεται χρήση δύο ζευγών μαγνητών. Στο κέντρο μεταξύ τους, θα ασκούνται δύο μαγνητικές δυνάμεις στα σωματίδια. Οι συνιστώσες των δυνάμεων που θα είναι κάθετες στη ροή θα αλληλοαναιρούνται ακινητοποιώντας τα σωματίδια στον έναν άξονα, ενώ οι συνιστώσες παράλληλες στη ροή θα προστίθενται και θα αντισταθμίζουν στο σύνολό τους την δύναμη Stokes, ακινητοποιώντας τα σωματίδια και στον άλλον άξονα.

3.3 Αμελητέες δυνάμεις

Οι δυνάμεις που θα αναφερθούν παρακάτω αποτελούν αμελητέες δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε μαγνητικό σωματίδιο και θα αναλυθούν οι λόγοι που αμελούνται στην παρούσα εργασία.

3.3.1 Δυνάμεις Van der Waals

Οι δυνάμεις Van der Waals αποτελούν ασθενείς ηλεκτρικές δυνάμεις, οι οποίες έλκουν ουδέτερα μόρια μεταξύ τους, στα περισσότερα οργανικά διαλύματα. Μπορούν να προκληθούν με τρεις τρόπους. Πρώτον, σε ορισμένα υλικά, παρόλο που τα μόρια

είναι ουδέτερα, δηλαδή ο αριθμός των ηλεκτρονίων τους ταυτίζεται με τον αριθμό πρωτονίων, μπορεί να έχουν τη μορφή ηλεκτρικών διπόλων. Τα δίπολα έχουν την τάση να ευθυγραμμίζονται μεταξύ τους και επομένως έτσι δημιουργούνται οι αναφερόμενες δυνάμεις. Δεύτερον, η παρουσία ηλεκτρικών διπόλων σε ένα υλικό μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση του ηλεκτρικού φορτίου γειτονικών μορίων, πολικών και μη, δημιουργώντας επιπλέον δίπολα και άρα επιπλέον ελκτικές δυνάμεις. Τέλος, ακόμα και αν δεν έχουν δημιουργηθεί ηλεκτρικά δίπολα σε ένα ρευστό, υπάρχει μία ελκτική δύναμη μεταξύ μορίων, η οποία είναι υπεύθυνη για τη συμπίκνωση του ρευστού όταν βρίσκεται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες [20].

Παρακάτω δίνεται ο τύπος του Hamaker για τη δύναμη αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο σφαιρών σε απόσταση l (επιφάνεια σε επιφάνεια) μεταξύ τους [21]:

$$\vec{F}_w = \frac{A(16\lambda^3)}{3(\alpha_1 + \alpha_2)} \times \left[\frac{s}{((1+\lambda)^2(s^2-4))^2(s^2(1+\lambda)^2-4(1-\lambda)^2)^2} \right] \vec{e}_r \quad (3.9)$$

όπου α_1 και α_2 οι ακτίνες των δύο σωματιδίων, $\lambda = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$,

$s = 2(l + \alpha_1 + \alpha_2)/(\alpha_1 + \alpha_2)$ και A η σταθερά Hamaker που ορίζεται ως:

$$A \approx \frac{3}{4} kT \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{\epsilon_1 + \epsilon_3} \right)^2 + \frac{2h\nu_e}{8\sqrt{2}} \times \frac{(n_1^2 - n_3^2)^2}{(n_1^2 + n_3^2) (2\sqrt{n_1^2 + n_3^2})} \quad (3.10)$$

όπου ϵ_1 η διηλεκτρική σταθερά του μαγνητίτη, ϵ_3 η διηλεκτρική σταθερά του νερού, n_1 ο δείκτης διάθλασης του μαγνητίτη, n_3 ο δείκτης διάθλασης του νερού, h η σταθερά του Planck και ν_e η συχνότητα απορρόφησης ηλεκτρονίων στη UV περιοχή.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι δυνάμεις Van der Waals αποτελούν αμελητέες δυνάμεις στην περίπτωση της παρούσας εργασίας. Αρχικά, αυτή η παραδοχή γίνεται, διότι σε σύγκριση με τις δυνάμεις του εξωτερικού πεδίου, οι δυνάμεις Van der Waals είναι σημαντικά ασθενέστερες. Επιπλέον, τα μαγνητικά σωματίδια θα βρίσκονται σε μορφή ferrofluid για να αποφευχθεί η δημιουργία συσσωματωμάτων. Το ολεϊκό οξύ, που χρησιμοποιείται για τη σύσταση του ferrofluid, έχει την ιδιότητα να διατηρεί μια απόσταση μεταξύ σωματιδίων, ώστε να αποφεύγονται τέτοιου είδους δυνάμεις. Για τους ίδιους λόγους θα αγνοηθούν και οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ σωματιδίων.

3.3.2 Αλληλεπίδραση μαγνητικών διπόλων

Κάθε μαγνητικό σωματίδιο αποτελείται από μαγνητικά δίπολα, τα οποία καθορίζουν την κατεύθυνση της συνολικής μαγνήτισης του υλικού. Μεταξύ διπόλων υπάρχει μία αλληλεπίδραση, και μάλιστα μία τάση ευθυγράμμισης. Τα μαγνητικά σωματίδια πολύ μικρών διαστάσεων, τείνουν να διαμορφώνονται από μία μόνο μαγνητική περιοχή, αποτελούμενη από ομόρροπα δίπολα. Τέτοιας μορφής σωματίδια δέχονται, στο σύνολό τους, δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των δικών τους διπόλων και των διπόλων γειτονικών σωματιδίων.

Η αλληλεπίδραση αυτή εκφράζεται από τις διασωματιδιακές δυνάμεις μαγνητικού δυναμικού μεταξύ των κέντρων των σωματιδίων σε πολικές συντεταγμένες [22]

$$F_r^{mag} = \frac{2\pi B^2 a_1^3 \chi_1 a_2^3 \chi_2}{3\mu_0 s^4 \left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right)^4} \left\{ \frac{1}{3} + \cos[2(a - \theta)] \right\} \quad (3.11)$$

$$F_{\theta}^{mag} = \frac{2\pi B^2 a_1^3 \chi_1 \alpha_2^3 \chi_2}{3\mu_0 s^4 \left(\frac{a_1+a_2}{2}\right)^4} \sin[2(a-\theta)] \quad (3.12)$$

όπου α η γωνία μεταξύ του κάθετου άξονα και του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, $\varphi=(\alpha-\theta)$, a_1 , a_2 οι ακτίνες των σωματιδίων, χ_1 , χ_2 οι μαγνητικές επιδεκτικότητες. Οι εξισώσεις αυτές προκύπτουν από τις εξισώσεις του κεφαλαίου 3.2.2 αλλά θεωρώντας μαγνητικές δυνάμεις μεταξύ μαγνητικών σωματιδίων, και όχι μεταξύ σωματιδίου και εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Παρόλα αυτά, οι δυνάμεις αυτές είναι μικρές συγκριτικά με το πεδίο που θα προκληθεί από τους εξωτερικούς μόνιμους μαγνήτες. Επομένως μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι η κίνηση των σωματιδίων θα προκληθεί μόνο από το πεδίο. Επιπλέον, ακόμα και αν ληφθεί υπόψιν η αλληλεπίδραση μεταξύ μαγνητικών διπόλων, το φαινόμενο αυτό θα δρα ενισχυτικά στην δύναμη του εξωτερικού πεδίου. Συγκεκριμένα, εφόσον τα δίπολα τείνουν να ευθυγραμμιστούν, όταν ένα από αυτά συγκρατείται από το εξωτερικό πεδίο τότε θα έλκει τα γειτονικά του, θα συγκρατούνται και αυτά και ούτω καθεξής.

3.3.3 Brownian motion

Η κίνηση Brown είναι η τυχαία κίνηση ενός σωματιδίου σε ένα ρευστό ή αέριο μέσο, ως αποτέλεσμα των συγκρούσεων του με γειτονικά μόρια. Η κίνηση αυτή έχει την τάση να ταξιδεύει στο υλικό εφαρμόζοντας τον νόμο διατήρησης της ορμής.

Για ένα σφαιρικό σωματίδιο διαμέτρου d_p , ο συντελεστής διάχυσης Brown εκφράζεται από τη σχέση Stokes-Einstein ως εξής:

$$D = \frac{k \cdot T \cdot C_u(d_p)}{3\pi \cdot \eta \cdot d_p} \quad (3.13)$$

όπου k η σταθερά του Boltzmann, η το ιξώδες, T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin και C_u μία σταθερά που εξαρτάται από τη διάμετρο του σωματιδίου [23]. Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, η κίνηση Brown εξαρτάται από τη διάμετρο του σωματιδίου, καθώς επίσης και από την θερμοκρασία.

Ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την επίδραση της κίνησης Brown στο υλικό είναι ο αριθμός Peclet, ο οποίος εκφράζεται ως εξής:

$$Pe = \frac{U_{mag} d_{pt}}{D_n} \quad (3.14)$$

όπου U_{mag} η ταχύτητα του σωματιδίου λόγω μαγνητικής δύναμης, d_{pt} η διάμετρος του σωματιδίου και D_n ο συντελεστής διάχυσης Brown. Το μέγεθος αυτό είναι ανάλογο της ταχύτητας του σωματιδίου, λόγω μαγνητικής δύναμης, και αντιστρόφως ανάλογο του συντελεστή Brown. Άρα όταν είναι πολύ μεγαλύτερο της μονάδας, σημαίνει ότι η μαγνητική δύναμη, και άρα η ταχύτητα του σωματιδίου λόγω μαγνητικής δύναμης, είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη Brown και το αντίστροφο.

Οι κινήσεις Brown μπορεί να επηρεάζονται από το εξωτερικό περιβάλλον, όπως δονήσεις στο έδαφος, μεταπτώσεις της θερμοκρασίας, ρεύματα αέρα κ.ο.κ. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, μία δύναμη από κρούση σωματιδίων, που προκαλείται από τυχαίους, απροσδιόριστους ή ασθενείς εξωτερικούς παράγοντες είναι ασφαλές να θεωρηθεί αμελητέα, για χάρη απλότητας. Εναλλακτικά, μία υπόθεση που θα μπορούσε να γίνει είναι ότι λόγω της τυχειότητας των κινήσεων, οι συνολικές δυνάμεις που δέχεται ένα σωματίδιο από όλα τα γειτονικά του, θα έχουν άθροισμα ίσο με το μηδέν, πόσο μάλλον όταν το σωματίδιο αυτό έχει πολύ μεγαλύτερη διάμετρο από τα μόρια του ρευστού που το περιβάλλουν, όπως ισχύει στη συγκεκριμένη περίπτωση.

3.4 Μαγνητική κροκίδωση

Η μαγνητική κροκίδωση είναι ένα φαινόμενο που δημιουργείται από τις κολλοειδείς δυνάμεις του δρουν πάνω σε σωματίδια με ισχυρή μαγνήτιση, όταν αυτά βρίσκονται σε μία ροή ρευστού και εντός ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Τα σωματίδια τείνουν να πλησιάζουν μεταξύ τους και να δημιουργούν συσσωματώματα, τα οποία θα έχουν τελικά διαφορετικές ιδιότητες, γεωμετρία, και συνολική μαγνήτιση.

Αυτό το φαινόμενο είναι πολύ πιο έντονο στην περίπτωση που η μαγνητική σκόνη είναι διαλυμένη κατευθείαν μέσα στο νερό, χωρίς να περιβάλλεται από κάποιο οργανικό διαλύτη μεγαλύτερης πυκνότητας, καθώς τα σωματίδια έχουν την ελευθερία να πλησιάζουν περισσότερο μεταξύ τους, και επομένως οι ελκτικές δυνάμεις θα είναι μεγαλύτερες, και άρα θα δημιουργούνται κροκίδες με πολύ μεγαλύτερη ευκολία.

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας, η δημιουργία μεγάλων κροκίδων, από τη μία πλευρά αυξάνει την συνολική μαγνήτιση των συσσωματωμάτων και τα καθιστά περισσότερο επιρρεπή στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Ως αποτέλεσμα τα σωματίδια συγκρατούνται από τους εξωτερικούς μαγνήτες σε μεγαλύτερο βαθμό. Από την άλλη πλευρά, τα σώματα αυτά όσο μεγαλύτερα γίνονται, τόσο περισσότερο θα επηρεάζουν τη ροή του ρευστού και θα καθιστούν μεταβλητές, με το χρόνο, τις δυνάμεις που τους ασκούνται, καθιστώντας την θεωρητική ανάλυση πολύ πιο περίπλοκη. Οι συνθήκες για την ροή, που ορίσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο δεν θα ικανοποιούνται, διότι είναι πολύ πιθανό να δημιουργούνται “στρόβιλοι” και η ροή να πάψει να είναι στρωτή. Επιπλέον, ακόμα και αν η ροή θεωρηθεί στρωτή και εφαρμόζονται οι εξισώσεις Navier-Stokes, με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων, η δύναμη που ασκείται από το ρευστό στο σωματίδιο-συσσωμάτωμα θα είναι μικρότερη αναλογικά με το μέγεθός του. Επομένως, όταν το εξωτερικό πεδίο είναι ασθενές, θα είναι δυσκολότερη η οδήγηση του συσσωματώματος μέσα στο σωλήνα ώστε να απομακρυνθεί από το ρευστό.

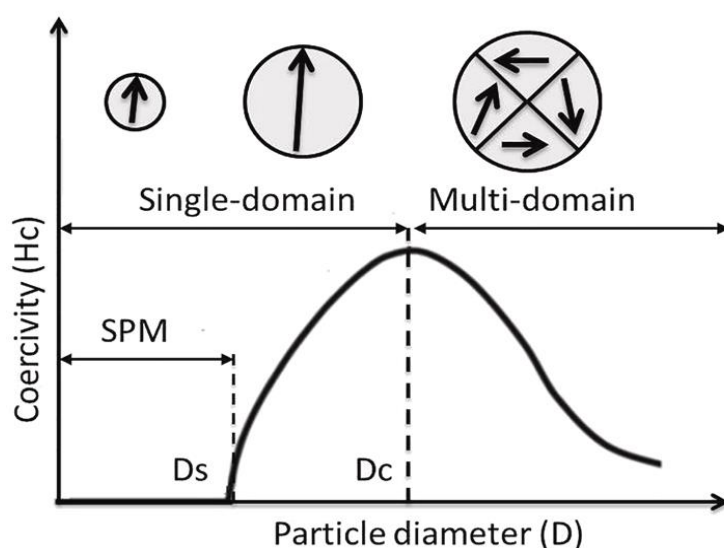
Για αυτούς τους λόγους η μαγνητική κροκίδωση αποφεύγεται σαν φαινόμενο, με τη χρήση ferrofluid μαγνητίτη μέσα σε ολεϊκό οξύ.

Κεφάλαιο 4: Μαγνητικός Διαχωρισμός

4.1 Φαινόμενο και εφαρμογές

Ως μαγνητικός διαχωρισμός, εκφράζεται το φαινόμενο κατά το οποίο μαγνητικά υλικά διαχωρίζονται από μη μαγνητικά με την χρήση ενός εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου. Η ιδιότητα των μαγνητών να μπορούν να κατευθυνθούν και να απομακρυνθούν από ένα, για παράδειγμα, ρευστό μέσο, δημιουργεί ενδιαφέρον για την πιθανή τους χρήση στην οδήγηση ή απομάκρυνση υλικών από το μέσο αυτό.

Συγκεκριμένα, οι μαγνητικές σκόνες αποτελούν μαγνητικά υλικά πολύ μικρής διαμέτρου. Η μαγνητική τους συμπεριφορά εξαρτάται από τη διάμετρο των σωματιδίων τους, σύμφωνα με την εικόνα 4.1. Για διαμέτρους κάτω από την D_c τα σωματίδια θα αποτελούνται από μία μόνο μαγνητική περιοχή και θα συμπεριφέρονται σαν δίπολα, ενώ για διαμέτρους κάτω από την D_s θα εμφανίζουν υπερπαραμαγνητική συμπεριφορά.



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα συνεκτικού πεδίου προς διάμετρο κόκκου και διαμόρφωση μαγνητικών περιοχών [24].

Όταν η μαγνητική σκόνη βρίσκεται εντός μίας συνεχούς ροής ρευστού, και εντός ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, ασκούνται στα σωματίδια όλες οι δυνάμεις που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3. Εκτελώντας αυτή την ανάλυση δυνάμεων, μπορεί να υπολογισθεί αν το εξωτερικό πεδίο θα είναι αρκετό για να ακινητοποιήσει τα σωματίδια, διαχωρίζοντάς τα επιτυχώς από το υπόλοιπο ρευστό.

Επιπλέον, έχουν δημιουργηθεί μέθοδοι με τις οποίες είναι δυνατόν οι κόκκοι σκόνης να περιβληθούν από κάποιο άλλο υλικό. Εκτός από τις συγκεκριμένες εφαρμογές που μπορεί να έχει αυτή η διαδικασία, επιπλέον συμβάλλει στην αποφυγή του φαινομένου της κροκιδώσης, στην μόνωση των σωματιδίων από το νερό, στην αποφυγή οξειδωσης ή διάβρωσης των σωματιδίων. Τα πιο συνήθη υλικά με τα οποία επικαλύπτονται μαγνητικά νανοσωματίδια είναι οργανικά υλικά όπως:

- καρβοξυλικά οξέα, φωσφορικά άλατα ή φωσφονικά οξέα, τα οποία χρησιμοποιούνται για να σταθεροποιούν τα σωματίδια και να αποφεύγεται η οξειδωση ή η δημιουργία συσσωματωμάτων,

- αμινοξέα όπως η φαινυλαλανίνη, η τυροσίνη, η αργινίνη, η λυσίνη ή η κυστεΐνη, τα οποία αποτελούν βιοσυμβατά υλικά που αντιδρούν με διάφορα βιομόρια και σύμπλοκα,
- πολυμερή, είτε φυσικά όπως η δεξτράνη, είτε συνθετικά όπως το PEG, τα οποία χρησιμοποιούνται και αυτά για να αποφευχθεί η οξειδωση, για να ξεπεραστούν βιολογικά φράγματα και να διευκολυνθεί η σύζευξη των επιθυμητών χημικών συμπλόκων,
- συμπολυμερή, που συνδυάζουν τις ιδιότητες πολυμερών,
- οργανικές επιφανειοδραστικές ουσίες όπως το ολεϊκό, το στεατικό ή το λαυρικό οξύ, οι οποίες έχουν υδρόφιλη συμπεριφορά και αυξάνουν την σταθερότητα των κολλοειδών δυνάμεων,
- οξειδία όπως το πυρίτιο, τα οποία εισάγουν νέες χρήσεις και παρέχουν θερμική αντίσταση, σταθερότητα μέσα σε υδατικά διαλύματα, μηχανική δύναμη και υδροφιλικότητα,
- μέταλλα, όπως ο χρυσός, ο οποίος είναι μη τοξικό υλικό και αρκετά λειτουργικό σε συνδυασμό με μόρια, πρωτεΐνες ή DNA [25].

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας, πραγματοποιήθηκε η παρασκευή ενός ferrofluid, στο οποίο τα μαγνητικά σωματίδια περιβάλλονταν από ολεϊκό οξύ, προκειμένου να αξιοποιηθούν οι δυνατότητες που προσφέρει το συγκεκριμένο υλικό.

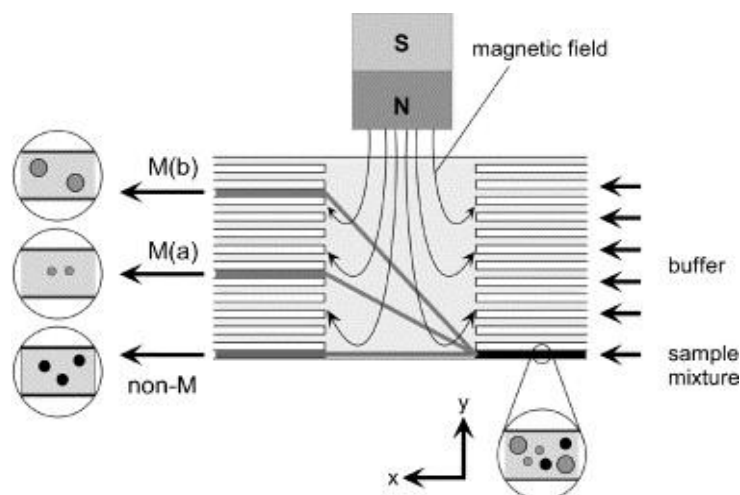
Γενικά οι ουσίες με τις οποίες “ντύνεται” η μαγνητική σκόνη μπορεί να έχουν επιθυμητές φυσικές ή χημικές ιδιότητες, δηλαδή να αντιδρούν με κάποια άλλη ουσία-στόχο μέσα σε ένα διάλυμα. Επιπλέον ο διαχωρισμός είναι δυνατόν να γίνει είτε με χρήση μόνιμων μαγνητών, είτε με τη χρήση ηλεκτρομαγνητών, και γενικότερα τα συστήματα ποικίλουν ως προς τη λειτουργικότητά τους.

4.2 Έρευνα

Την τελευταία εικοσαετία έχουν βγει στην επιφάνεια πολλές έρευνες στο πεδίο του μαγνητικού διαχωρισμού, με εφαρμογές στους τομείς της βιοϊατρικής, του καθαρισμού υδάτων, την ανακύκλωσης υλικών και πολλές άλλες, ακόμα αναδυόμενες. Τα συστήματα μαγνητικού διαχωρισμού αρχίζουν να αποτελούν μία οικονομική και μη επιβλαβή λύση για προβλήματα απόσπασης ή οδήγησης υλικών σε κάποιο ρευστό μέσο, είτε αυτό πρόκειται για χημικό διάλυμα, όπως το περιεχόμενο μιας μπαταρίας είτε για υδατικό διάλυμα μεγάλης κλίμακας, όπως λίμνες και θάλασσες, είτε για τον ανθρώπινο οργανισμό, όπως σε περιπτώσεις στοχευμένης χορήγησης φαρμάκου (targeted drug delivery) ή διαχωρισμού κυττάρων υποβοηθούμενη από μαγνητικά σωματίδια (magnetic cell separation). Θα παρατεθούν παρακάτω ορισμένες έρευνες ανά τομέα ενδιαφέροντος.

Οι N. Pamme et al. δημιούργησαν ένα σύστημα με χρήση μόνιμου μαγνήτη για τον διαχωρισμό μαγνητικών σωματιδίων με διαφορετικές τιμές μαγνητικής επιδεκτικότητας [26]. Συγκεκριμένα, σε ένα διάλυμα υπήρχαν μαγνητικά σωματίδια δυο τιμών επιδεκτικότητας και επιπλέον μη μαγνητικά σωματίδια. Μόνιμος μαγνήτης τοποθετήθηκε κάθετα στη ροή ώστε να έλκει τα σωματίδια στον άξονα των z. Η πορεία των σωματιδίων, ανάλογα με το πόσο και αν έλκονταν από τον μαγνήτη, άλλαζε και αυτά κατευθύνονταν σε διαφορετικά σημεία του σωλήνα, ώστε να διαχωριστούν. Η έρευνα αυτή έχει μία ομοιότητα με την μέθοδο που ακολουθήθηκε στην παρούσα

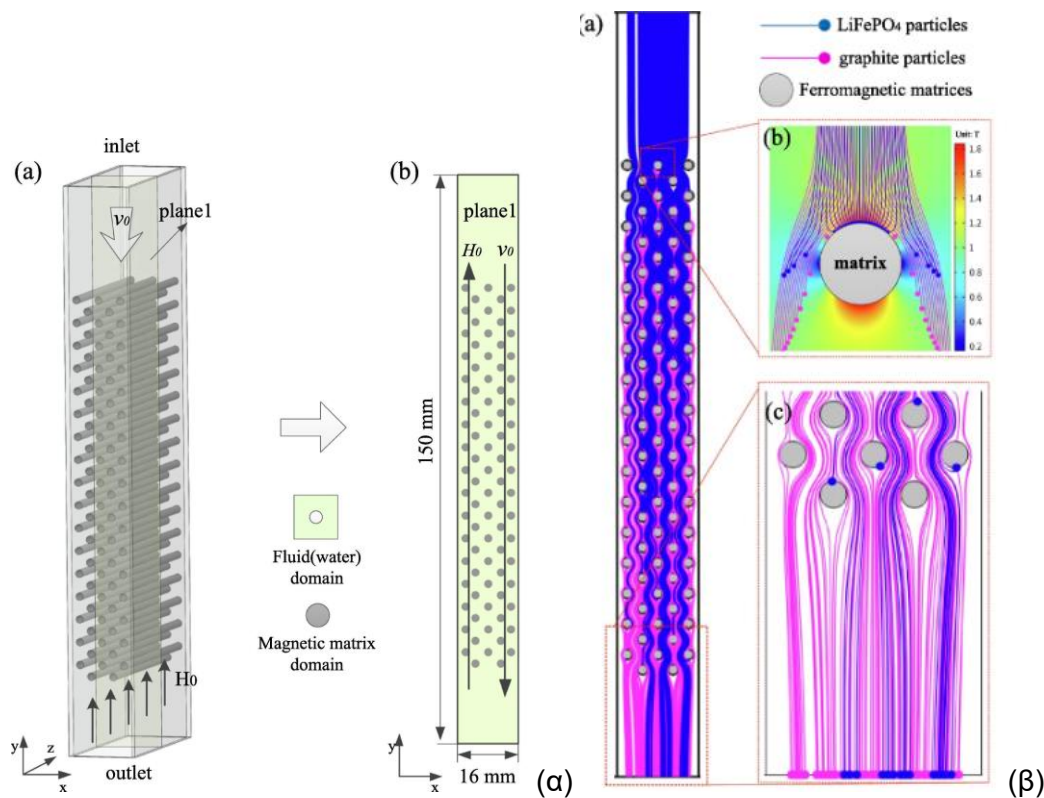
εργασία, και έχει διάφορες εφαρμογές όπως για παράδειγμα στον τομέα του magnetic cell separation.



Εικόνα 4.2: Διάταξη N. Pamme et al. Αριστερά εισέρχεται το διάλυμα του buffer και δεξιά εξέρχονται από διαφορετικά ύψη τα μαγνητικά, λιγότερο μαγνητικά και μη μαγνητικά σωματίδια [26]

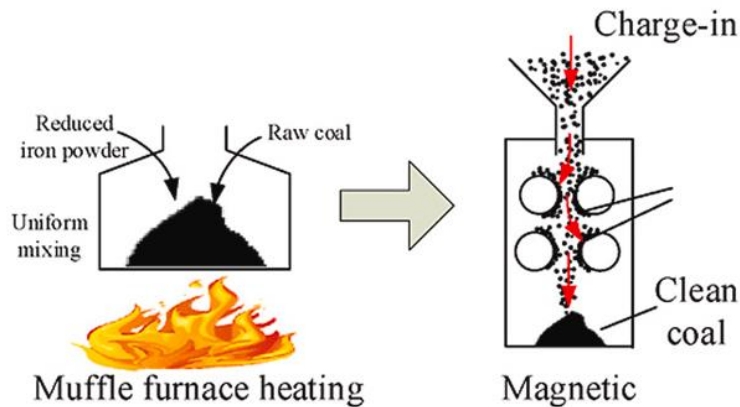
Στα πλαίσια της βιοιατρικής οι K.-H. Han et al. δημιούργησαν ένα σύστημα κατάταξης κυττάρων του αίματος ανάλογα πάλι με τις μαγνητικές ιδιότητες που εμφάνιζαν [27]. Γινόταν χρήση ενός σιδηρομαγνητικού σύρματος, το οποίο μαγνητιζόταν εξωτερικά και ανακατεύθυνε τα αιμοσφαίρια, ώστε να διαχωριστούν σε λευκά και ερυθρά, ανάλογα με την μαγνητική τους επιδεκτικότητα. Τα λευκά αιμοσφαίρια εμφανίζουν γενικά διαμαγνητική συμπεριφορά, ενώ τα ερυθρά διαμαγνητική ή παραμαγνητική ανάλογα από το αν είναι οξυγονωμένα ή όχι αντίστοιχα [28].

Οι Zhicheng Hu et al. δημιούργησαν μία μέθοδο μαγνητικού διαχωρισμού υλικών από χρησιμοποιημένες μπαταρίες ιόντων λιθίου [29]. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε μέθοδος μαγνητικού διαχωρισμού υψηλής έντασης (High Intensity Magnetic Separation) και μεγάλης βάρμωσης (High Gradient Magnetic Separation) για την ανάκτηση LiFePO_4 και μέθοδος Induced Roll Magnetic Separation για την ανάκτηση γραφίτη από τις καθόδους των μπαταριών. Για τη μέθοδο HGMS για παράδειγμα δημιουργήθηκε ένας τρισδιάστατος πίνακας από μαγνήτες, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3, τον οποίο διέσχιζε το δείγμα και ως αποτέλεσμα το LiFePO_4 , το οποίο είναι παραμαγνητικό υλικό, συγκρατούνταν από τους μαγνήτες, ενώ ο γραφίτης απομακρυνόταν. Το ποσοστό ανάκτησης του LiFePO_4 που επετεύχθη ήταν στα 96.6%, ενώ για τον γραφίτη 98.69%.



Εικόνα 4.3: Διάταξη HGMS Zhicheng Hu et al. α) σχήμα διάταξης β) προσομοίωση λειτουργίας όπου τα σωματίδια LiFePO_4 τείνουν να συκκρατούνται από το array μαγνητών και τα σωματίδια γραφίτη καταλήγουν στην έξοδο [29]

Στα πλαίσια της προστασίας του περιβάλλοντος, οι Jin Liu et al. έδωσαν μία λύση στο πρόβλημα που δημιουργήθηκε όταν ο υψηλής ποιότητας άνθρακας άρχισε να εξαντλείται λόγω ενεργειακής ζήτησης, και ξεκίνησε να χρησιμοποιείται άνθρακας υψηλός σε περιεκτικότητα σε θείο [30]. Στα πλαίσια της χρήσης αυτού, ο υψηλής περιεκτικότητας σε θείο άνθρακας έχει την τάση να παράγει πολλές θειούχες ουσίες οι οποίες προκαλούν όξινη βροχή, ομίχλη, και άλλα περιβαλλοντικά προβλήματα [31]. Η μέθοδος που ακολούθησαν αξιοποίησε αρχικά τις διαμαγνητικές ιδιότητες του άνθρακα αυτού κάθε αυτού, και τις παραμαγνητικές ιδιότητες του σιδηροπυρίτη και ορισμένων άλλων ash minerals που περιέχονται στον άνθρακα. Σαν προεπεξεργασία, η σκόνη άνθρακα μαζί με σκόνη σιδήρου αναγωγής θερμαίνονται, ώστε να βελτιωθούν οι μαγνητικές ιδιότητες των υλικών που περιέχονται. Η σκόνη σιδήρου χρησιμοποιήθηκε διότι ενίσχυε την διαδικασία της αποθείωσης. Έπειτα το υλικό εγγεόταν μέσα σε ένα array από μαγνήτες, οι οποίοι συκκρατούσαν τα μαγνητικά υλικά, ενώ ο καθαρός άνθρακας διαχωριζόταν.

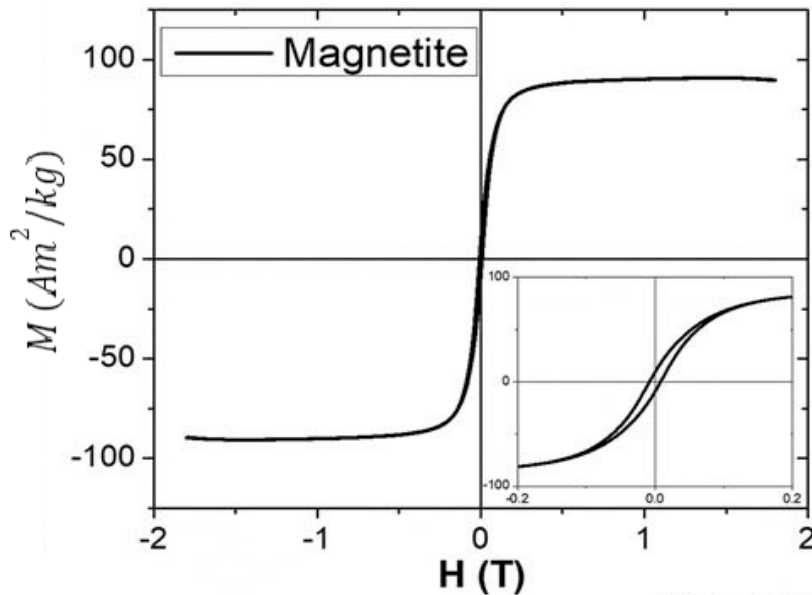


Coal purification system

Εικόνα 4.4: Διαδικασία αποθείωσης των Jin Liu et al. με χρήση τεχνικής μαγνητικού διαχωρισμού [30]. Αριστερά φαίνεται η προεπεξεργασία της σκόνης και δεξιά ο διαχωρισμού του καθαρού άνθρακα από τα μαγνητικά υλικά που περιέχουν τις θειούχες ενώσεις.

4.3 Μαγνητίτης

Ο μαγνητίτης αποτελεί σιδηριμαγνητικό υλικό και είναι ένα από τα οξειδία του σιδήρου (χημικός τύπος $Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4$). Αντιδρώντας με οξυγόνο παράγει μάλιστα τον αιματίτη, ένα αντισιδηρομαγνητικό υλικό με ασθενέστερες μαγνητικές ιδιότητες, αλλά επίσης κοινό σε μορφή σκόνης σε εφαρμογές μαγνητικού διαχωρισμού [32]. Στην εικόνα 4.5 απεικονίζεται ο βρόχος υστέρησης νανοσωματιδίων μαγνητίτη. Παρόλο που, ως σιδηριμαγνητικό υλικό, ανήκει στην κατηγορία των σκληρών μαγνητικών υλικών, δεν εμφανίζει υστέρηση στη μαγνήτισή του, διότι η διάμετρος των σωματιδίων είναι τόσο μικρή, ώστε να εμφανίζουν υπερπαραμαγνητική συμπεριφορά. Το υλικό φτάνει σε κορεσμό γύρω στα 0.5 T, ενώ η μέγιστη μαγνήτισή του είναι περίπου στα $90 Am^2/kg$.



Εικόνα 4.5: Βρόχος υστέρησης μαγνητίτη [33]

Γενικότερα, τα οξειδία του σιδήρου αποτελούν αντικείμενο έρευνας για πολλά χρόνια. Είναι οικονομικά υλικά, μη τοξικά και χρησιμοποιούνται σε ένα εύρος εφαρμογών, εκτός του μαγνητικού διαχωρισμού, όπως μαγνητικής μνήμης, ως σκιαγραφικές ουσίες σε απεικονιστικές τεχνικές κα. [34, 35]. Μία μέθοδος παρασκευής σωματιδίων οξειδίων του σιδήρου, προτεινόμενη από τους Sun et al., είναι η συγκαθίζηση, κατά την οποία ιόντα σιδήρου (II+ και III+) διαλύονται σε νερό και προκαλούν ιζηματοποίηση χρησιμοποιώντας αμμωνία ή υδροξείδιο του νατρίου [36]. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ανομοιομορφία και το ακανόνιστο σχήμα των σωματιδίων που παράγονται. Άλλη μέθοδος παραγωγής νανοκρυστάλλων μαγνητίτη υψηλής ποιότητας, προτεινόμενη από τους Sun et al., είναι η θερμική αποσύνθεση ακετυλακετονικού σιδήρου(III) σε φαινυλ-αιθέρα [37]. Οι Park et al. ακολούθησαν μία παρόμοια λογική χρησιμοποιώντας ολεϊκό σίδηρο σαν πρόδρομο υλικό και ολεϊκό οξύ σαν παράγοντα επικάλυψης, δημιουργώντας νανοσωματίδια με υδρόφοβη επικάλυψη [38]. Παρόλα αυτά, για βιοϊατρικές εφαρμογές σε υδατικά διαλύματα απαιτούνται υδρόφιλες επιφάνειες, επομένως μπορεί να αξιοποιηθεί ο μηχανισμός ανταλλαγής υποκατάστατων μεταξύ συμπλόκων (ligand exchange) προκειμένου να αλλάξουν οι ιδιότητες της επικαλυπτόμενης ουσίας. Η χρήση μορίων σιλάνης ανοίγει την προοπτική να δημιουργείται μία μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών ομάδων στην επιφάνεια των μαγνητικών νανοσωματιδίων. Ορισμένες έρευνες έχουν γίνει πάνω σε αυτή τη τεχνική, όπως των De Palma et al. όπου χρησιμοποιήθηκαν εξάνιο ως διαλύτης και οξικό οξύ ως καταλύτης για να σχηματίσουν αντιδραστικά μόρια σιλανόλης [39]. Οι Kohler et al. ακολούθησαν την μέθοδο των σιλάνων, αλλά επεξεργάστηκαν εκ των προτέρων την επικάλυψη ολεϊκού οξέος με ένα μείγμα υδροξειδίου αμμωνίας και βουτανόλης [40]. Σε σύγκριση με αυτές τις τεχνικές, οι οποίες απαιτούν μεγάλους χρόνους παρασκευής της τάξης των 1-2 ημερών, η έρευνα των Maarten Bloemen et al. προτείνει μηχανισμό ανταλλαγής της αρχικής επικάλυψης ολεϊκού οξέος με σιλάνες, όπως το τριαλκοξυσιλάνιο, σε λουτρό υπερήχων ώστε η διαδικασία να επιταχυνθεί, καταλλήγοντας σε νανοσωματίδια μεγέθους περίπου 10nm.

Επαληθεύτηκε επίσης η σταθερότητα τους σε διάφορα διαλύματα, μέχρι και σε ανθρώπινο πλάσμα ώστε να είναι συμβατό για βιοϊατρικές εφαρμογές [41].

Κεφάλαιο 5 : Διάταξη και Πειράματα

5.1 Ροή πειράματος και στόχοι

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο πλήρης καθαρισμός ενός διαλύματος νερού με ferrofluid μαγνητίτη. Το αρχικό διάλυμα περιέχει 20ml νερού και 20 ml ferrofluid. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων πραγματοποιούνται «πλύσεις» στο αρχικό διάλυμα, ώστε το καθαρό νερό να διαχωριστεί από τα μαγνητικά σωματίδια και να καταλήξουν σε δύο διαφορετικά δοχεία. Οι «πλύσεις» επιτυγχάνονται πλησιάζοντας τους μαγνήτες –δημιουργώντας ισχυρό μαγνητικό πεδίο- , όσο το διάλυμα ξεκινάει και καταλήγει στο ίδιο αρχικό δοχείο, και απομακρύνοντας τους μαγνήτες –εξασθενώντας το πεδίο- , ενώ το διάλυμα κατευθύνεται σε ένα καινούργιο δοχείο, όπου θα καταλήξουν τελικά μόνο τα μαγνητικά υλικά.

Τα πειράματα που εκτελέστηκαν είχαν ως μεταβλητή την ταχύτητα της ροής του διαλύματος, την ποσότητα μαγνητικής σκόνης στο ferrofluid, και τους χρόνους κατά τους οποίους ήταν ισχυρό ή ασθενές το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η παράμετρος που καθόριζε την απόδοση του συστήματος ήταν η ποσότητα ferrofluid (σε ml) που είχε μείνει στο αρχικό διάλυμα και η ποσότητα νερού (σε ml) που είχε μεταφερθεί στο δεύτερο δοχείο μαζί με τα μαγνητικά υλικά, μετά το πέρας 6-10 λεπτών. Το επιθυμητό αποτέλεσμα ήταν το αρχικό δοχείο να έχει 20ml νερό και το δεύτερο δοχείο να έχει 20ml ferrofluid.

Τέλος έγινε και μία μέτρηση του μαγνητικού πεδίου που παράγαν τέσσερις συνολικά μαγνήτες στο κέντρο της μεταξύ τους απόστασης, με χρήση ενός αισθητήρα Hall.

5.2 Εξοπλισμός και πειραματική διάταξη

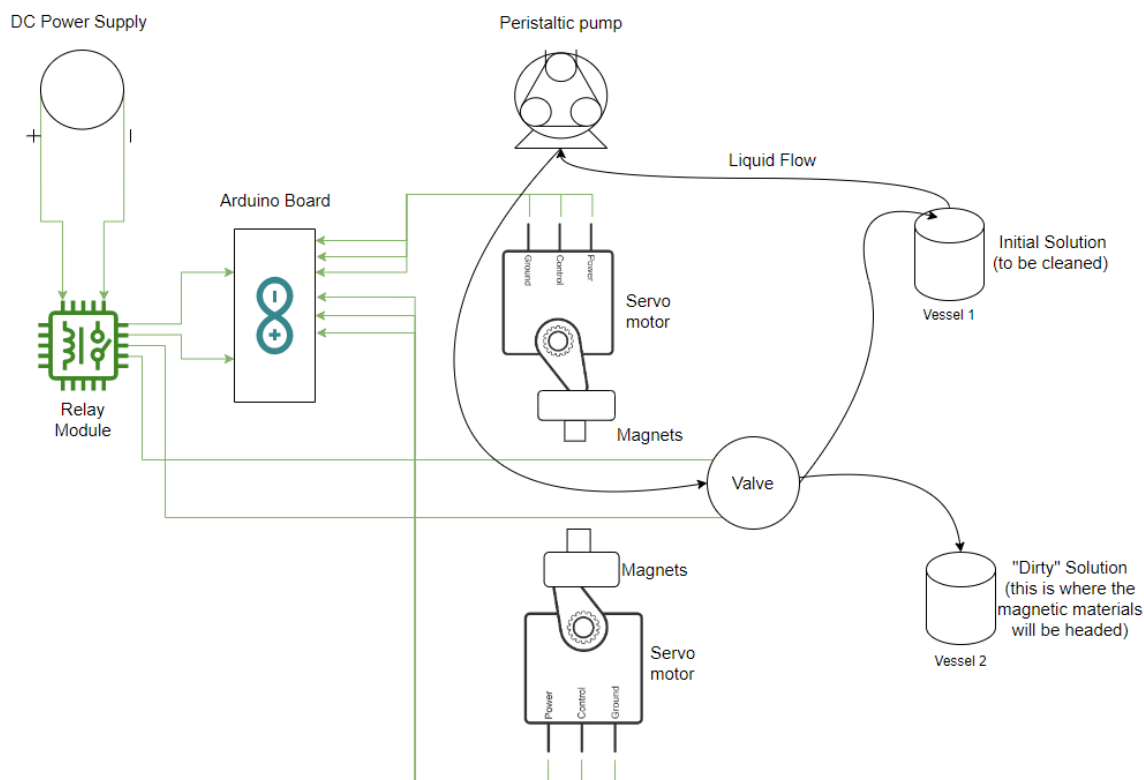
Για χάρη απλότητας, το δοχείο με το αρχικό διάλυμα που επρόκειτο να καθαριστεί θα ονομαστεί «Δοχείο 1» και το δοχείο στο οποίο καταλήγουν μόνο τα μαγνητικά υλικά κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος θα ονομαστεί «Δοχείο 2».

Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται σε μορφή σχηματικού στο διάγραμμα 5.1 και αποτελείται από τρία μέρη. Το ένα αφορά την ροή του διαλύματος και περιλαμβάνει μία περισταλτική αντλία DUlabo PLP 380, έναν σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 3mm και εξωτερικής 5mm, και δύο γυάλινα δοχεία, το Δοχείο 1 με το αρχικό διάλυμα που θα καθαριστεί και ένα δεύτερο, κενό, το Δοχείο 2 στο οποίο θα κατευθυνθεί το ferrofluid.

Το δεύτερο μέρος της διάταξης αφορά το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο. Αποτελείται από δύο σερβοκινητήρες Micro Servo 9g FS90, στους οποίους είναι κολλημένοι με σιλικόνη δύο μαγνήτες νεοδυμίου. Πάνω στους μαγνήτες αυτούς συγκρατούνται και άλλοι δύο μικρότεροι κυβικοί μαγνήτες, οι οποίοι εξασφαλίζουν τη μεγάλη βάθμωση του πεδίου. Οι τέσσερις συνολικά μαγνήτες μετακινούνται, αυτόματα, από τους σερβοκινητήρες, ώστε όταν πλησιάζουν να δημιουργούν μεγάλο πεδίο μεταξύ τους, συγκρατώντας τα μαγνητικά σωματίδια του ferrofluid και όταν απομακρύνονται να αποδεδμεύουν τα σωματίδια, λόγω της εξασθένισης του πεδίου.

Τέλος, το τρίτο μέρος αφορά το ηλεκτρονικό κομμάτι του συστήματος. Μία βαλβίδα είναι απαραίτητη για τον έλεγχο της ροής, ώστε, όταν οι μαγνήτες είναι στη

θέση “on” –δηλαδή πλησιάζουν-, το διάλυμα να ρέει προς τον ένα σωλήνα που καταλήγει στο Δοχείο 1, ενώ όταν οι μαγνήτες είναι “off” –δηλαδή απομακρύνονται-, το διάλυμα να ρέει μέσω ενός δεύτερου σωλήνα στο Δοχείο 2, όπου καταλήγουν τα μαγνητικά υλικά. Για τον έλεγχο, τόσο της βαλβίδας, όσο και των σερβοκινητήρων, απαιτείται μία πλακέτα Arduino, της οποίας ο κώδικας παρατίθεται στην εικόνα 5.1. Επιπλέον, η βαλβίδα για να λειτουργήσει χρειάζεται ένα Relay Module, το οποίο συμπεριφέρεται σαν διακόπτης, ελέγχεται με τη σειρά του και αυτό από το Arduino, και τροφοδοτείται από ένα DC power supply CW INSTEK GPD-2303S. Χρησιμοποιήθηκε επίσης ένα βοηθητικό breadboard για τη σύνδεση των καλωδίων.



Διάγραμμα 5.1: Σχεδιάγραμμα της διάταξης σε πρόγραμμα draw.io

Για τη σύσταση του ferrofluid χρησιμοποιήθηκαν 20ml ολεϊκού οξέος ($C_{18}H_{34}O_2$ 90% καθαρότητας) σαν διαλύτης και σωματίδια μαγνητίτη (Fe_3O_4 >99% καθαρότητας) σε μορφή σκόνης διαμέτρου 2-4 μm . Η ανάδευση του διαλύματος πριν την εκτέλεση κάθε πειράματος ήταν απαραίτητη για να αποκτήσει το διάλυμα μία σχετική ομοιογένεια.

Για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου μεταξύ των μαγνητών, χρησιμοποιήθηκε ένας Hall sensor SS49, ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με έναν μικροελεγκτή ESP32, για τη μετατροπή του σήματος σε τιμή. Η μέτρηση του πεδίου πραγματοποιήθηκε στη θέση που οι μαγνήτες βρίσκονταν στην κοντινότερη απόσταση μεταξύ τους (θέση “on”). Στο κέντρο ανάμεσά τους, το πεδίο βρέθηκε ίσο με 70mT.


```

int IN2 = 2;
int IN3 = 3;

void setup() {

  pinMode(IN2, OUTPUT); //magnet
  pinMode(IN3, OUTPUT); //valve

  digitalWrite(IN2, HIGH);
  digitalWrite(IN3, LOW);

  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  digitalWrite(IN2, LOW);
  digitalWrite(IN3, HIGH);

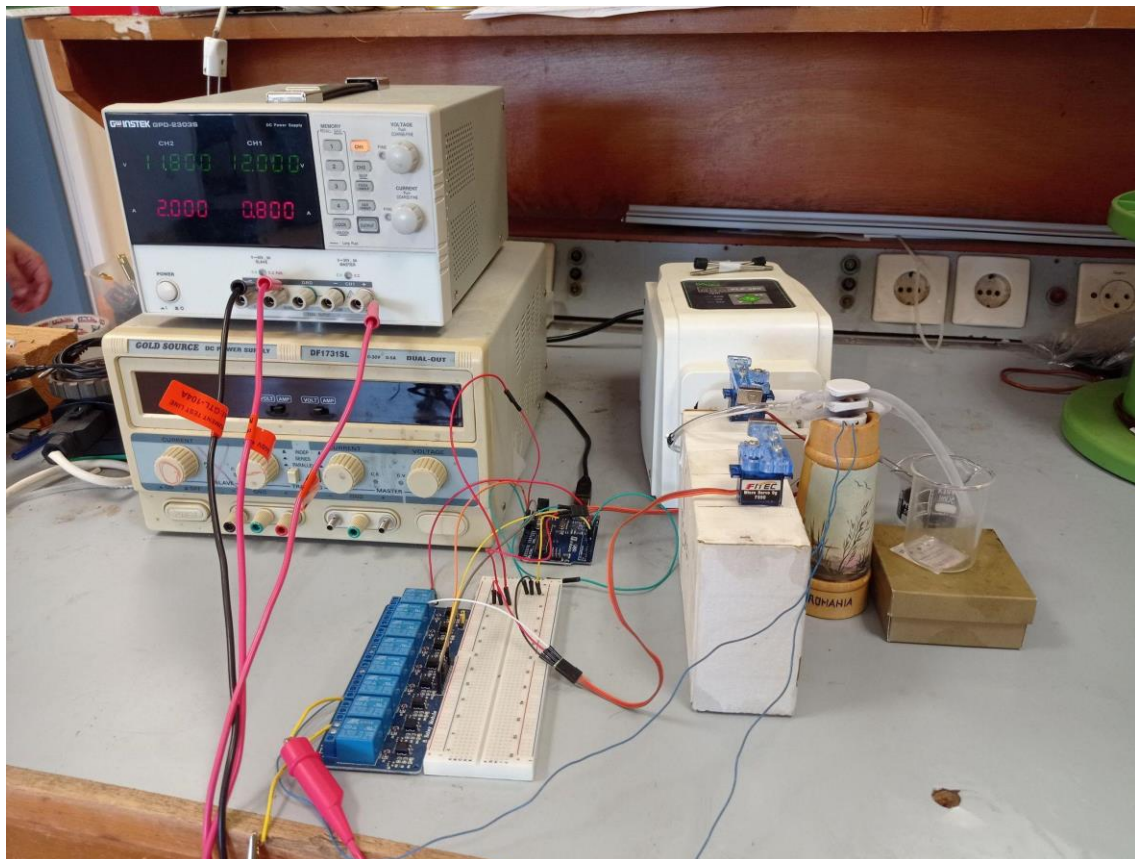
  delay(2000);

  digitalWrite(IN2, HIGH);
  digitalWrite(IN3, LOW);

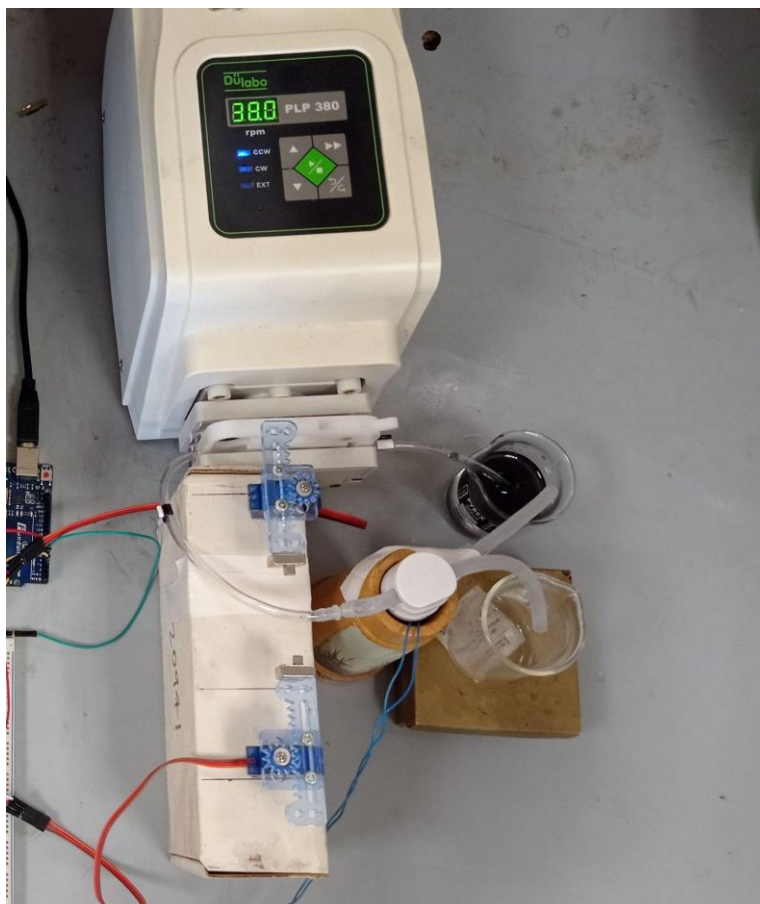
  delay(1000);
}

```

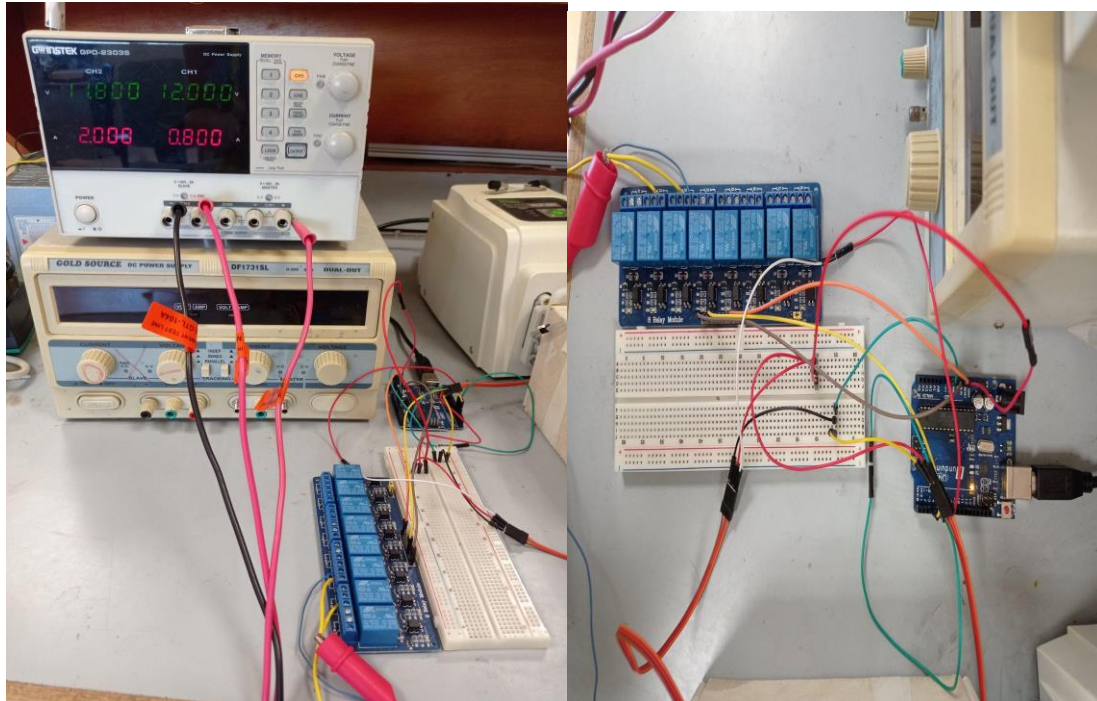
Εικόνα 5.1: Κώδικας Arduino για τον έλεγχο της βαλβίδας και των σερβοκινητήρων.



Εικόνα 5.2: Συνολική διάταξη



Εικόνα 5.3: Η περισταλτική αντλία κινεί το διάλυμα μέσα στον σωλήνα. Οι σερβοκινητήρες πλησιάζουν και απομακρύνουν τους μαγνήτες κάθετα στη ροή. Η βαλβίδα δεξιά από τους μαγνήτες ανακατευθύνει τη ροή σε δύο σωλήνες εναλλάξ και το ρευστό είτε επιστρέφει στο αρχικό Δοχείο 1 (πάνω) ή στο Δοχείο 2 (κάτω) όπου θα καταλήξει τελικά το ferrofluid.



Εικόνα 5.4: α) Στην αριστερή εικόνα φαίνεται το τροφοδοτικό συνδεδεμένο με το relay module (μπλε πλακέτα κάτω αριστερά). β) Στην δεξιά εικόνα φαίνεται η συνδεσμολογία μεταξύ relay module, πλακέτας Arduino (μπλε πλακέτα δεξιά) και βοηθητικού breadboard.

5.3 Πειράματα

5.3.1 Ταχύτητα ροής

Πρώτη παράμετρος με βάση την οποία έγιναν πειράματα, είναι η ταχύτητα ροής του διαλύματος. Ο έλεγχός της γινόταν μέσω της περισταλτικής αντλίας. Έγινε το ίδιο πείραμα με σταθερή ποσότητα σκόνης στο ferrofluid ίση με 0.051g και σταθερούς χρόνους “on”/“off” του μαγνητικού πεδίου ίσους με 4 sec on/ 1 sec off. Το σύστημα λειτούργησε για 10 λεπτά και τα αποτελέσματά του παρατίθενται στον πίνακα 5.1.

Ταχύτητα ροής (RPM)	Όγκος ferrofluid στο Δοχείο 1 (ml)	Όγκος νερού στο Δοχείο 1 (ml)	Όγκος ferrofluid στο Δοχείο 2 (ml)	Όγκος νερού στο Δοχείο 2 (ml)
36	2	19.5	18	0.5
38	0.5	19.5	19.5	0.5
40	1.5	18	18.5	2

Πίνακας 5.1: Μετρήσεις για διαφορετικές ταχύτητες ροής.

Εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ταχύτητα με την καλύτερη απόδοση για τις συγκεκριμένες σταθερές ήταν τα 38 RPM, διότι σε αυτή τη τιμή αντιστοιχεί η μικρότερη ποσότητα ferrofluid στο Δοχείο 1. Να αναφερθεί επίσης ότι σε ενδιάμεσες τιμές της ταχύτητας δεν υπήρχε αισθητή διαφορά στην απόδοση και για αυτό τον λόγο δεν καταγράφηκαν.

5.3.2 Χρόνος “on”/“off” πεδίου

Δεύτερη παράμετρος που διερευνήθηκε είναι οι χρόνοι on/off του μαγνητικού πεδίου. Οι σταθερές που διατηρήθηκαν ήταν η ποσότητα μαγνητικής σκόνης ίση με 0.049 g και η ταχύτητα ροής ίση με 38 RPM. Και σε αυτή τη περίπτωση το σύστημα ήταν σε λειτουργία για 10 λεπτά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2.

Χρόνος “on”/“off” πεδίου (sec)	Όγκος ferrofluid στο Δοχείο 1 (ml)	Όγκος νερού στο Δοχείο 1 (ml)	Όγκος ferrofluid στο Δοχείο 2 (ml)	Όγκος νερού στο Δοχείο 2 (ml)
2-0.5	4	19.5	16	0.5
2-1	0.4	19	19.6	1
4-1	3	19.5	17	0.5
6-1	7	19.5	13	0.5
8-1	10	19.5	10	0.5
10-1	11	19.5	9	0.5

Πίνακας 5.2: Μετρήσεις για διαφορετικούς χρόνους on/off του μαγνητικού πεδίου.

Η βέλτιστη αναλογία χρόνου που προκύπτει είναι τα 2 sec on/ 1 sec off, καθώς αντιστοιχεί στη μικρότερη ποσότητα ferrofluid στο Δοχείο 1.

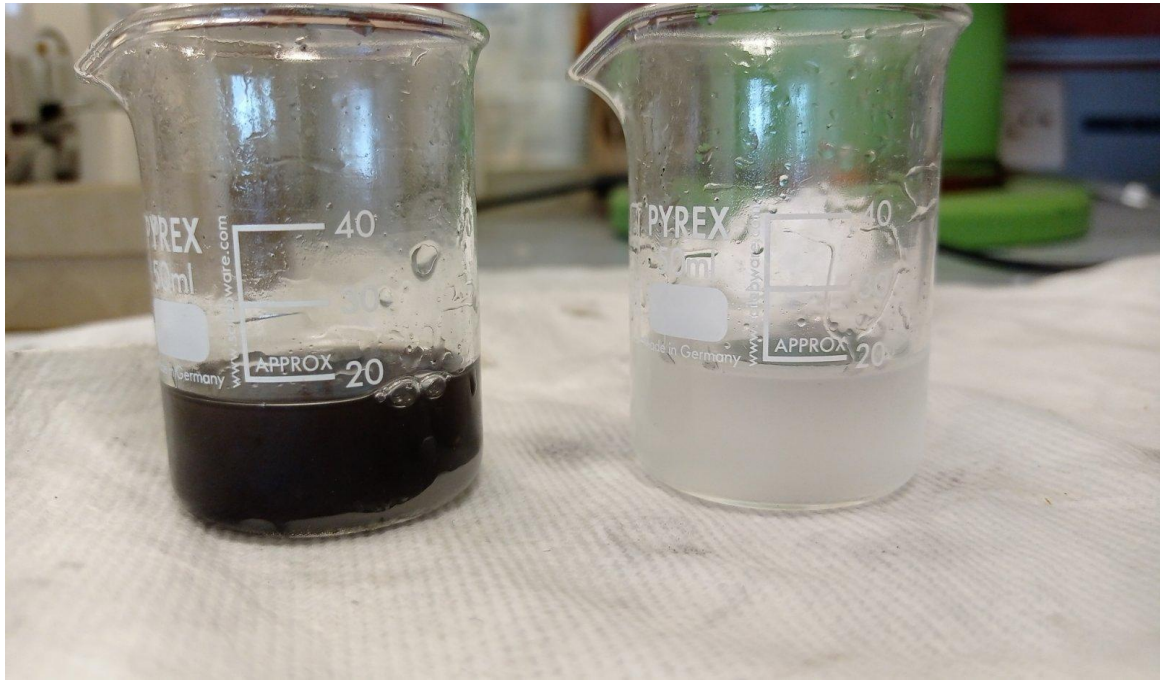
5.3.3 Συγκέντρωση σκόνης στο ferrofluid

Τρίτη παράμετρος που δοκιμάστηκε ήταν τα γραμμάρια μαγνητικής σκόνης κατά την παρασκευή του ferrofluid. Διατηρήθηκαν σταθερές η ταχύτητα ροής, ίση με 38 RPM, και οι χρόνοι on/off στα 2 sec/ 1 sec. Η διάρκεια του πειράματος ήταν 6 λεπτά και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 5.3.

Ποσότητα μαγνητικής σκόνης (g)	Όγκος ferrofluid στο Δοχείο 1 (ml)	Όγκος νερού στο Δοχείο 1 (ml)	Όγκος ferrofluid στο Δοχείο 2 (ml)	Όγκος νερού στο Δοχείο 2 (ml)
0.0109	2	15	18	5
0.0229	0.5	17	19.5	3
0.0370	0.5	17	19.5	3
0.0488	1	19	19	1
0.0653	1.5	18	18.5	2
0.11	10	19.5	10	0.5

Πίνακας 5.3: Μετρήσεις για διαφορετική ποσότητα μαγνητικής σκόνης στο διάλυμα.

Ως βέλτιστη ποσότητα μαγνητικής σκόνης βρέθηκαν τα 0.0488g, διότι σε αυτή την τιμή αντιστοιχεί η μεγαλύτερη ποσότητα νερού στο Δοχείο 1 και αρκετά μικρή ποσότητα ferrofluid.



Εικόνα 5.5: Αποτέλεσμα για βέλτιστες παραμέτρους (πάνω αριστερά Δοχείο 2 με ferrofluid, πάνω δεξιά Δοχείο 1 με καθαρό νερό, κάτω η κάτοψη του Δοχείου 1).

5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα έγιναν γραφικές παραστάσεις σε γλώσσα Python με τον κώδικα που φαίνεται στην εικόνα 5.6. Στις γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.2 απεικονίζεται η ποσότητα ferrofluid στο “καθαρό” διάλυμα του Δοχείου 1 συναρτήσει της ταχύτητας ροής, του χρόνου on/off του μαγνητικού πεδίου και της ποσότητας μαγνητικής σκόνης στη σύσταση του ferrofluid.

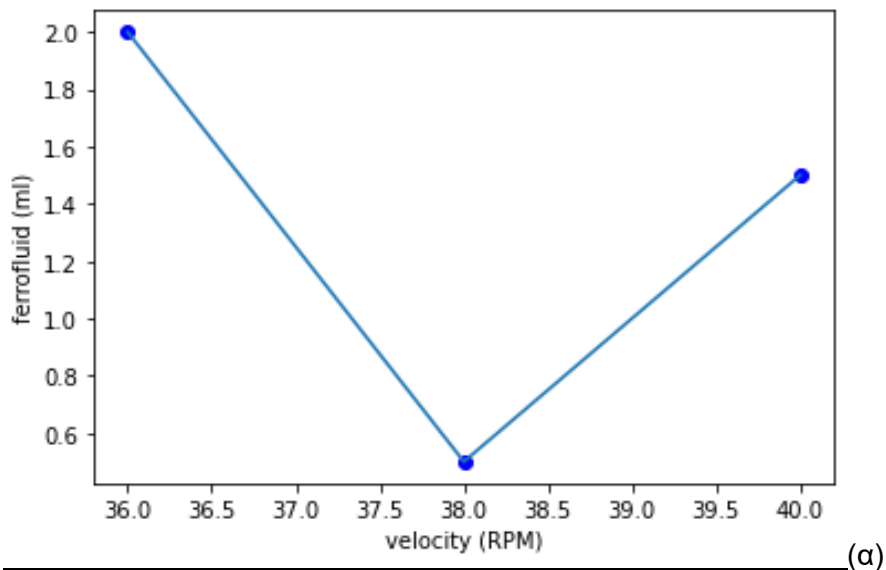
```
import matplotlib.pyplot as plt

#variable=on/off time
on_off_mag=[4, 0.4, 3, 7, 10, 11]
on_off_wat=[19.5, 19, 19.5, 19.5, 19.5, 19.5]
x_axis=['2-0.5', '2-1', '4-1', '6-1', '8-1', '10-1']
plt.plot(x_axis, on_off_mag, 'bo', x_axis, on_off_mag)
plt.xlabel('on/off time (sec)')
plt.ylabel('ferrofluid (ml)')

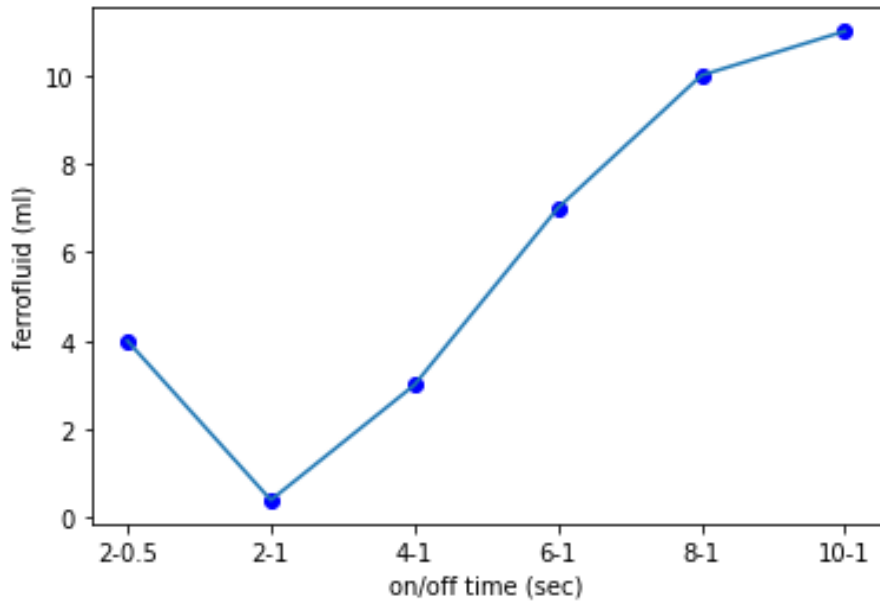
#variable=velocity
vel_mag=[2, 0.5, 1.5]
vel_wat=[19.5, 19.5, 18]
x_axis=[36, 38, 40]
plt.plot(x_axis, vel_mag, 'bo', x_axis, vel_mag)
plt.xlabel('velocity (RPM)')
plt.ylabel('ferrofluid (ml)')

#variable=g of magnetic powder
magn_mag=[2, 0.5, 0.5, 1, 1.5]
magn_wat=[15, 17, 17, 19, 18]
x_axis=[0.0109, 0.0229, 0.037, 0.0488, 0.0653]
plt.plot(x_axis, magn_mag, 'bo', x_axis, magn_mag)
plt.xlabel('magnetic powder (g)')
plt.ylabel('ferrofluid (ml)')
```

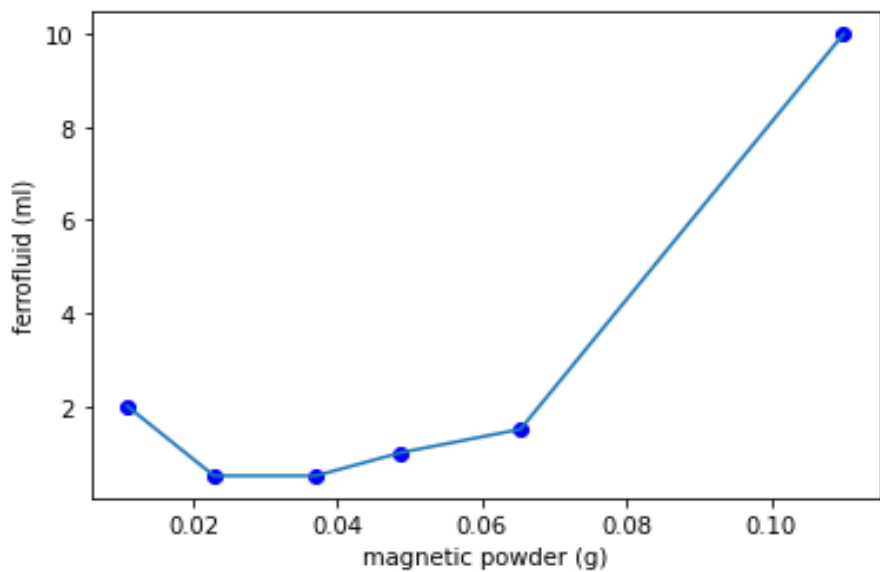
Εικόνα 5.6: Κώδικας γραφικών παραστάσεων σε Python.



Διάγραμμα 5.2: (Περιγραφή στην επόμενη σελίδα)



(β)



(γ)

Διάγραμμα 5.2: α) Ποσότητα ferrofluid στο Δοχείο 1 ως προς την ταχύτητα της ροής β) ποσότητα ferrofluid στο Δοχείο 1 ως προς τους χρόνους on/off του μαγνητικού πεδίου γ) ποσότητα ferrofluid στο Δοχείο 1 ως προς την ποσότητα μαγνητικής σκόνης στο ferrofluid.

Η καλύτερη απόδοση στα πειράματα που είχαν ως μεταβλητή την ταχύτητα του ρευστού βρέθηκε στα 38 RPM. Αν η ταχύτητα αυτή αυξηθεί, τότε στο διάστημα που η βαλβίδα κατευθύνει το ρευστό στο Δοχείο 2, το διάλυμα θα ρέει πιο γρήγορα και ως αποτέλεσμα θα υπάρχει μεγαλύτερη απώλεια νερού από το Δοχείο 1. Στόχος είναι το νερό του Δοχείο 1 να διατηρηθεί στον αρχικό του όγκο χωρίς απώλειες. Εναλλακτικά, αν η ταχύτητα μειωθεί, τότε αυξάνεται ο χρόνος λειτουργίας της διάταξης.

Μετά την εκτέλεση των πειραμάτων που είχαν ως μεταβλητή την αναλογία χρόνων on/off του πεδίου, βρέθηκε ως βέλτιστη η αναλογία 2-1 sec. Σε κάθε άλλη περίπτωση:

- αν μειωθεί ο χρόνος που οι μαγνήτες είναι απομακρυσμένοι –και επομένως το πεδίο είναι ασθενές- τα μαγνητικά σωματίδια δεν προλαβαίνουν να αποδεσμευτούν από το πεδίο και να προχωρήσουν

στον σωλήνα, ώστε να κατευθυνθούν προς το Δοχείο 2. Αυτό επαληθεύτηκε και οπτικά, παρατηρώντας ότι για αναλογία on/off χρόνων 2/0.5 sec, τα σωματίδια μαγνητικής σκόνης απομακρύνονταν στιγμιαία, ταυτόχρονα με την εξασθένιση του πεδίου, και αμέσως επέστρεφαν στο σημείο που είχαν συγκρατηθεί όταν το πεδίο ξαναγινόταν ισχυρό.

- αν ο χρόνος που το μαγνητικό πεδίο είναι ισχυρό μειωθεί, τότε τα μαγνητικά σωματίδια δεν θα προλάβουν να δεσμευτούν από το πεδίο και θα επιστρέψουν στο Δοχείο 1, μειώνοντας την απόδοση του συστήματος και αυξάνοντας τον χρόνο λειτουργίας.
- αν ο χρόνος που το πεδίο είναι ασθενές αυξηθεί, τότε όλο και περισσότερα μαγνητικά σωματίδια θα επιστρέφουν στο Δοχείο 1. Ως αποτέλεσμα θα αυξηθεί ο απαιτούμενος χρόνος λειτουργίας.
- αν αυξηθεί ο χρόνος που το πεδίο είναι ισχυρό, ορισμένα μαγνητικά σωματίδια που δεν θα καταφέρνουν να δεσμευτούν από το πεδίο, θα επιστρέψουν στο Δοχείο 1 με αποτέλεσμα αυτό να μη καθαρίζεται επιτυχώς, και να αυξάνεται και ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος. Επιπλέον, με αυτή τη μεταβολή αυξάνεται και η πιθανότητα σχηματισμού μεγάλων συσσωματωμάτων μαγνητικών σωματιδίων στο κέντρο του πεδίου, που πιθανόν να επηρεάζουν την ροή, αλλάζοντας τις συνθήκες που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3.

Με βάση τα πειράματα που είχαν ως παράμετρο την ποσότητα μαγνητικής σκόνης στο ferrofluid, παρατηρήθηκε βέλτιστη απόδοση για 0.0488g. Σε αυτή τη τιμή δεν αντιστοιχεί η μικρότερη ποσότητα ferrofluid στο Δοχείο 1. Αντιθέτως με μικρότερη ποσότητα σκόνης στα 0.0229 και 0.037 g προκύπτουν ακόμα λιγότερα ml ferrofluid στο Δοχείο 1 και επομένως γίνεται πιο επιτυχής “καθαρισμός” του διαλύματος. Παρόλα αυτά, σε αυτές τις ποσότητες προκύπτει και μεγαλύτερη απώλεια καθαρού νερού από το Δοχείο 1, φαινόμενο το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Επομένως τα 0.0488g επιλέγονται ως καλύτερη τιμή της παραμέτρου της ποσότητας μαγνητικών σωματιδίων στο ferrofluid.

Εν κατακλείδι, για την επιλογή των συνολικά βέλτιστων παραμέτρων λήφθηκαν υπόψιν τρεις παράγοντες. Πρώτος παράγοντας ήταν η ελαχιστοποίηση απωλειών ποσότητας νερού από το Δοχείο 1. Δεύτερος παράγοντας ήταν η επιτυχημένη συγκράτηση όσο το δυνατόν περισσότερων σωματιδίων, αποτρέποντας ταυτόχρονα τη δημιουργία μεγάλων συσσωματωμάτων μαγνητίτη, όταν το μαγνητικό πεδίο είναι ισχυρό. Ο τελευταίος –και εξίσου βασικός με τους υπόλοιπους- παράγοντας ήταν η ελαχιστοποίηση του χρόνου λειτουργίας της διάταξης.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα, Εφαρμογές και Προοπτικές Εξέλιξης

6.1 Συμπεράσματα και Βελτιώσεις

Με βάση τα αποτελέσματα από τα πειράματα του προηγούμενου κεφαλαίου μπορούν να βγουν ορισμένα συμπεράσματα για την τελική απόδοση του συστήματος. Με χρήση των βέλτιστων παραμέτρων, ο οποίος είναι

1. ταχύτητα ίση με 38 RPM
2. συγκέντρωση σκόνης στο ferrofluid ίση με 0.0488g
3. χρόνους on/off ίσους με 2 και 1 sec αντίστοιχα

το τελικό διάλυμα θα διαθέτει το 95% του νερού και το 5% του ferrofluid που περιείχε αρχικά και αυτά θα επιτυγχάνονται σε χρονικό διάστημα 6 λεπτών. Φυσικά υπάρχουν προοπτικές εξέλιξης για το παρόν σύστημα.

Για αρχή, μπορούν να εκτελεστούν πειράματα με μαγνήτες διαφορετικού υλικού. Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο του μαγνητισμού, κάθε μόνιμος μαγνήτης έχει μία εσωτερική μαγνήτιση, η οποία παράγει το πεδίο γύρω του. Θα μπορούσε επομένως να δοκιμασθεί κάποιος μαγνήτης μικρότερης εσωτερικής μαγνήτισης από το νεοδύμιο, σε μικρότερη όμως απόσταση από τη ροή σωματιδίων. Επίσης, θα μπορούσαν να γίνουν πειράματα με χρήση ηλεκτρομαγνήτη αντί για μόνιμου. Παρόλα αυτά, μία σύντομη δοκιμή στο εργαστήριο έδειξε ότι ο ηλεκτρομαγνήτης έχει την τάση να θερμαίνεται σχετικά γρήγορα, και ως αποτέλεσμα απαιτείται ένα χρονικό διάστημα παύσης ανάμεσα σε πειράματα ώστε να ψυχθεί. Μία άλλη παράμετρος είναι η γεωμετρία του μαγνήτη, η οποία αν διαφοροποιηθεί θα αλλάξει την ένταση και τη βάρθρωση του πεδίου. Αν χρησιμοποιηθούν μεγαλύτεροι μαγνήτες, η ένταση του πεδίου θα είναι μεγαλύτερη, όπως και η μαγνητική δύναμη που θα ασκείται στα σωματίδια. Αν αλλάξει το σχήμα των μαγνητών αλλάζει η γεωμετρία του πεδίου και επομένως και η συνολική βάρθρωσή του, η οποία σύμφωνα με την εξίσωση 3.4 είναι επιθυμητό να είναι μεγάλη.

Όσων αφορά τη μαγνητική σκόνη, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε σκόνη μαγνητίτη, αλλά θα μπορούσε να διαφοροποιηθεί σε σκόνη αιματίτη (Fe_2O_3), ο οποίος είναι κοινός, στην χρήση του, σε μορφή σκόνης και εμφανίζεται σε πολλές έρευνες μαγνητικού διαχωρισμού. Ο αιματίτης αποτελεί παραμαγνητικό υλικό και απαιτεί μεγαλύτερη ένταση εξωτερικού πεδίου από τον μαγνητίτη για να συγκρατηθεί, επομένως ίσως χρειαστεί μεγαλύτερους μαγνήτες ή μικρότερη απόσταση μεταξύ τους [42].

Η σύσταση του ferrofluid μπορεί να διαφοροποιηθεί, χρησιμοποιώντας άλλον διαλύτη αντί για το ολεϊκό οξύ. Με αυτή τη μεταβολή θα αλλάξει η δύναμη που θα ασκείται σε κάθε σωματίδιο από το ρευστό, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (3.3), καθώς θα αλλάξει το ιξώδες του διαλύματος και πιθανόν και η ταχύτητα με την οποία ρέει. Επιπρόσθετα, θα επηρεαστεί και το φαινόμενο της μαγνητικής κροκίδωσης και γενικά οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ μαγνητικών σωματιδίων, καθώς, μέσα σε διαφορετικό μέσο, οι αποστάσεις μεταξύ σωματιδίων είναι πιθανόν να διαφοροποιηθούν και επομένως οι αλληλεπιδράσεις να είναι μικρότερες (για μεγαλύτερες αποστάσεις) ή μεγαλύτερες (για μικρότερες αποστάσεις).

Για όλες αυτές τις αλλαγές στη διάταξη και το πείραμα φυσικά θα πρέπει να γίνουν ξανά δοκιμές για διαφορετικές ποσότητες μαγνητικής σκόνης, διαφορετικές ταχύτητες ρευστού και διαφορετικούς χρόνους on/off του πεδίου προκειμένου να

μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα και να προσδιοριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων.

6.2 Εφαρμογές και προοπτικές εξέλιξης

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, το αντικείμενο του μαγνητικού διαχωρισμού έχει ήδη αρχίσει να εμφανίζει πολλές προοπτικές και πολλές εφαρμογές σε διαφορετικούς επιστημονικούς τομείς. Αναφέρθηκαν μάλιστα ορισμένες έρευνες, αντιπροσωπευτικά, ώστε να παρουσιαστεί το υπάρχον ερευνητικό επίπεδο μέχρι τώρα. Μία παρατήρηση που μπορεί να γίνει, είναι ότι η πλειονότητα των συστημάτων αυτών αφορούν ρευστά ποσότητας μικρότερης της τάξης των ml. Ένα πλεονέκτημα της παρούσας εργασίας είναι ότι πιθανόν να έχει την προοπτική να εξελιχθεί σε μεγαλύτερη κλίμακα, ώστε να καταφέρει, σε τελικό επίπεδο και μετά από περαιτέρω έρευνα, να διαχειρίζεται ποσότητες της τάξης των λίτρων ρευστού. Ένας πετυχημένος διαχωρισμός αυτής της τάξης, θα είχε πληθώρα εφαρμογών, για παράδειγμα σε ένα σύστημα καθαρισμού υδάτων. Σε αυτή τη περίπτωση, θα μπορούσε να παρασκευαστεί ένα ferrofluid, στο οποίο θα περιέχεται μαγνητική σκόνη, επικαλυμμένη με ένα μη τοξικό υλικό, ικανό να λειτουργεί ως προσδέτης, δεσμεύοντας τους ρύπους μιας μεγάλης μάζας νερού. Με την λογική του συστήματος της παρούσας εργασίας, αφού το ferrofluid εγχυθεί μέσα στο νερό, σε επόμενο βήμα θα απομακρυνθεί μέσω “πλύσεων” με χρήση ισχυρών μαγνητών. Οι μαγνήτες θα δεσμεύουν τα μαγνητικά υλικά και θα τα ανακατευθύνουν, μέσα σε σωλήνες, καθαρίζοντας την μάζα νερού από το ferrofluid και μαζι και τους δεσμευμένους ρύπους.

Άλλη εφαρμογή του παρόντος συστήματος αφορά τον διαχωρισμό υλικών από μπαταρίες με στόχο την ανακύκλωσή τους. Μπαταρίες κινητών τηλεφώνων, υπολογιστών ή ηλεκτρικών αυτοκινήτων αποτελούν μία μεγάλη και ολοένα αυξανόμενη πηγή ενέργειας, η οποία έχει πεπερασμένη διάρκεια ζωής. Επιπλέον, αν δεν γίνει σωστή διαχείριση των χρησιμοποιημένων μπαταριών, μπορεί να προκληθεί σοβαρή μόλυνση του περιβάλλοντος, καθώς αυτές περιέχουν βαρέα μέταλλα, τοξικούς ηλεκτρολύτες και άλλα οργανικά διαλύματα. Οι ουσίες που περιέχονται στις περισσότερες μπαταρίες, και μπορούν να ανακυκλωθούν, είναι κυρίως μέταλλα όπως το νικέλιο, το κοβάλτιο, το λίθιο, ο γραφίτης κ.α. Το νικέλιο και το κοβάλτιο για παράδειγμα αποτελούν σιδηρομαγνητικά υλικά τα οποία θα μπορούσαν, ίσως με την λογική της παρούσας εργασίας, να αφαιρεθούν και να ανακυκλωθούν. Το παρόν σύστημα θα μπορούσε να αποτελέσει μία οικονομική και σύντομη λύση, και να ενισχύσει την ήδη υπάρχουσα προσπάθεια που γίνεται για τη δημιουργία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και οικονομίας περιβαλλοντικών πόρων.

Τέλος, ο μαγνητικός διαχωρισμός έχει ήδη βρει εφαρμογές στη βιοϊατρική, όπως για παράδειγμα σε έρευνες ανάλυσης βιολογικών δειγμάτων με χρήση μαγνητών. Ένα σύστημα, όπως αυτό της παρούσας εργασίας, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μία τέτοια περίπτωση, ρυθμίζοντας το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο σε συγκεκριμένη ένταση και περνώντας το δείγμα σε ροή από το εσωτερικό του πεδίου, προκαλώντας, για παράδειγμα, την συγκράτηση συγκεκριμένων συστατικών στο αίμα. Τα μαγνητικά αυτά συστατικά θα διαχωρίζονταν από το υπόλοιπο δείγμα και θα μπορούσαν να αναλυθούν ξεχωριστά, οδηγούμενα σε ένα άλλο σύστημα, όπως ένα lab-on-a-chip. Μπορεί λοιπόν, το παρόν σύστημα, να λειτουργήσει είτε αυτόνομα είτε συνεργατικά με κάποιο άλλο, προκειμένου να μπορέσουν να ληφθούν συμπεράσματα για κάποιο βιολογικό δείγμα. Με την ίδια λογική, αντί να συγκρατηθούν

μόνο τα καθαρά μαγνητικά συστατικά του δείγματος, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μαγνητική σκόνη, επικαλυμμένη με κάποια ουσία-προσδέτη, η οποία θα εγχεόταν στο δείγμα, αντιδρώντας με κάποια μόρια-στόχους. Οι στόχοι, πλέον, θα μπορούν να συγκρατηθούν από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο σε κάποιο σημείο της ροής, ενώ το υπόλοιπο δείγμα θα επιστρέφει στο αρχικό του δοχείο. Θα επιτυγχάνεται έτσι διαχωρισμός μίας επιθυμητής ουσίας, η οποία θα μπορεί σε μεταγενέστερο στάδιο να αναλυθεί ξεχωριστά.

Επίλογος

Το σύστημα μαγνητικού διαχωρισμού που δημιουργήθηκε στην παρούσα εργασία εμφανίζει επαρκή ακρίβεια, μικρό κόστος κατασκευής και μικρό χρόνο λειτουργίας. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει μία ικανοποιητική συνολική απόδοση στον διαχωρισμό μαγνητικών υλικών από ένα μη μαγνητικό διάλυμα σε συνεχή ροή, υπό εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο μόνιμων μαγνητών. Ένα τέτοιο σύστημα από μόνο του, μπορεί να έχει διάφορες εφαρμογές σε διάφορους τομείς, δημιουργώντας καινούργιες δυνατότητες ή βελτιώνοντας ήδη υπάρχοντα συστήματα. Την ίδια στιγμή, η δυνατότητα, πλέον, επικάλυψης των μαγνητικών σωματιδίων από άλλα υλικά, ανοίγει πάρα πολλούς δρόμους για τον μαγνητικό διαχωρισμό. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, ένα μαγνητικό σωματίδιο παίρνει τη μορφή του “προσδέτη”, διατηρώντας όμως τη μαγνητική του ιδιότητα. Έτσι όταν ο στόχος προσκολληθεί στον προσδέτη, καθίσταται δυνατός ο έλεγχός του από το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και, κατ’ επέκταση, η οδήγηση και η απομάκρυνσή του από ένα διάλυμα. Αυτή η μέθοδος καθιστά το παρόν σύστημα ακόμα περισσότερο χρήσιμο και πολλά υποσχόμενο για μία πληθώρα εφαρμογών.

Το επίπεδο είναι βέβαια ακόμα ερευνητικό, και ιδίως σε εφαρμογές βιοϊατρικής η ακρίβεια είναι υψίστης σημασίας. Παρόλα αυτά η παρούσα διάταξη επιδέχεται βελτιώσεων και περαιτέρω έρευνας, δεδομένου ότι σε πρώτη φάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων ήταν ενθαρρυντικά.

Υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα το σύστημα να δράσει συνεργατικά με άλλα συστήματα, λειτουργώντας σαν πρώτο στάδιο, στο οποίο μία επιθυμητή ουσία θα διαχωρίζεται από ένα διάλυμα και θα οδηγείται προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Στο επόμενο βήμα, που όπως ήδη αναφέρθηκε αυτό θα μπορούσε να είναι ένα lab-on-a-chip, η ουσία θα αναλύεται και θα λαμβάνεται το επιθυμητό συμπέρασμα. Μπορεί επομένως η παρούσα διάταξη να παρουσιαστεί όχι μόνο ως αυτόνομο σύστημα, αλλά και ως κομμάτι ενός μεγαλύτερου πειράματος και χρήσιμο εργαλείο.

Σε κάθε περίπτωση, δεν παύει να είναι ένα καινούριο σύστημα μαγνητικού διαχωρισμού με ικανοποιητική λειτουργία, περιθώρια βελτίωσης, θετικές μελλοντικές επεκτάσεις και πολλές εφαρμογές.

Βιβλιογραφία

- [1] Ling Bing Kong, Lie Liu, Zhihong Yang, Sean Li, Tianshu Zhang, Chuanhu Wang. (2018). *15 - Theory of ferrimagnetism and ferrimagnetic metal oxides*. Editor(s): Biljana D. Stojanovic. In *Metal Oxides, Magnetic, Ferroelectric, and Multiferroic Metal Oxides*. Elsevier. Pages 287-311. ISBN 9780128111802. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811180-2.00015-3>.
- [2] R.K. Kotnala, Jyoti Shah. (2015). *Chapter 4 - Ferrite Materials: Nano to Spintronics Regime*. Editor(s): K.H.J. Buschow, *Handbook of Magnetic Materials*. Elsevier. Volume 2. Pages 291-379. ISSN 1567-2719. ISBN 9780444635280, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63528-0.00004-8>.
- [3] Rajendra C. Pawar, Caroline Sunyong Lee. (2015). *Chapter 2 - Nanomaterial-Based Photocatalysis*. Editor(s): Rajendra C. Pawar, Caroline Sunyong Lee. *Heterogeneous Nanocomposite-Photocatalysis for Water Purification*. William Andrew Publishing. Pages 25-41. ISBN 9780323393102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39310-2.00002-3>.
- [4] Tan, Li. (2018). *Synthesis, assembly and thermo-responsivity of polymer-functionalized magnetic cobalt nanoparticles*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/328433756_Synthesis_assembly_and_thermo-responsivity_of_polymer-functionalized_magnetic_cobalt_nanoparticles
- [5] Vahak Marghussian. (2015). *4 - Magnetic Properties of Nano-Glass Ceramics*. Editor(s): Vahak Marghussian. *Nano-Glass Ceramics*. William Andrew Publishing. Pages 181-223. ISBN 9780323353861. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35386-1.00004-9>.
- [6] Mehrmohammadi, Mohammad & Yoon, Ki youl & Qu, Min & Johnston, Keith & Emelianov, SY. (2011). *Enhanced pulsed magneto-motive ultrasound imaging using superparamagnetic nanoclusters*. *Nanotechnology*. 22. 045502. 10.1088/0957-4484/22/4/045502.
- [7] Accessed 21.10.2022. *Magnetism Basics*. Magic of magnetism. Retrieved from <https://ece.northeastern.edu/fac-ece/nian/mom/work.html>
- [8] Accessed 21.10.2022. *The hysteresis loop*. Iowa State University. Retrieved from <https://www.nde-ed.org/Physics/Magnetism/HysteresisLoop.xhtml>
- [9] Accessed 21.10.2022. *What is the Biot Savart Law? Example*. Share education ideas. Retrieved from <https://shareeducationideas.com/biot-savart-law/>
- [10] Ι. Τσαλαμέγκας, Ι. Ρουμेलιώτης. (2011). *Ηλεκτρομαγνητικά πεδία τόμος Α*. Εκδόσεις Τζιόλα, κεφάλαιο 2.1.4.Δ σελίδα 196

- [11] Accessed 21.10.2022. *Gauss's law in magnetism*. Retrieved from <https://www.physicskey.com/gauss-law-magnetism>
- [12] McLean, Doug (2012). *Continuum Fluid Mechanics and the Navier-Stokes Equations. Understanding Aerodynamics: Arguing from the Real Physics*. John Wiley & Sons. pp. 13–78.
- [13] E. Shashi Menon. (2015). *Chapter Five - Fluid Flow in Pipes*. Editor(s): E. Shashi Meno., *Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual*. Gulf Professional Publishing. Pages 149-234 ISBN 9781856178303, <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-830-3.00005-5>.
- [14] Freitas, Adriana & Rahkila, Jani & Hemming, Jarl & Nurmi, Maristiina & Torres, Gaetan & Razat, Theophile & Tolvanen, Pasi & Eränen, Kari & Leveneur, Sebastien & Salmi, Tapio. (2020). *Epoxidation of Tall Oil Catalyzed by an Ion Exchange Resin under Conventional Heating and Microwave Irradiation*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. XXXX. 10.1021/acs.iecr.0c01288.
- [15] Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. November 14, 2019. "Mach number." *Encyclopedia Britannica*. Retrieved from <https://www.britannica.com/science/Mach-number>.
- [16] A. Yahia, S. Mantellato, R.J. Flatt. (2016). *7 - Concrete rheology: A basis for understanding chemical admixtures*. Editor(s): Pierre-Claude Aïtcin, Robert J Flatt, *Science and Technology of Concrete Admixtures*, Woodhead Publishing. Pages 97-127. ISBN 9780081006931. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00007-2>.
- [17] Bekir S. Yilbas, Ghassan Hassan, Abdullah Al-Sharafi. (2018). *Dust Repellent Materials*. Editor(s): Ibrahim Dincer. *Comprehensive Energy Systems*, Elsevier. Chapter 2.26. Pages 832-880. ISBN 9780128149256. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00254-6>.
- [18] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. (26 Jun. 2019). *What is the formula for buoyant force?* *Encyclopedia Britannica*. Retrieved from <https://www.britannica.com/question/What-is-the-formula-for-buoyant-force>.
- [19] Rogers HB, Anani T, Choi YS, Beyers RJ, David AE. (2015 Aug 21). *Exploiting Size-Dependent Drag and Magnetic Forces for Size-Specific Separation of Magnetic Nanoparticles*. *Int J Mol Sci.*;16(8):20001-19. doi: 10.3390/ijms160820001. PMID: 26307980; PMCID: PMC4581337.
- [20] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. (16 Mar. 2016). *Van der Waals forces*. *Encyclopedia Britannica*. Retrieved from <https://www.britannica.com/science/van-der-Waals-forces>
- [21] Liqun Luo, Anh V. Nguyen. (2017). *A review of principles and applications of magnetic flocculation to separate ultrafine magnetic particles*. *Separation and*

Purification Technology. Volume 172. Pages 85-99. ISSN 1383-5866.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.021>.

[22] Z. G. Forbes, B. B. Yellen, K. A. Barbee and G. Friedman. (Sept. 2003) *An approach to targeted drug delivery based on uniform magnetic fields*. in IEEE Transactions on Magnetics. vol. 39. no. 5. pp. 3372-3377. doi: 10.1109/TMAG.2003.816260.

[23] François Gensdarmes. (2015). *Methods of Detection and Characterization*. Editor(s): Patricia I. Dolez. Nanoengineering. Elsevier. Chapter 1.3. Pages 55-84. ISBN 9780444627476. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62747-6.00003-8>.

[24] García-Merino, Belén, Bringas, Eugenio and Ortiz, Inmaculada. (2021). *Synthesis and applications of surface-modified magnetic nanoparticles: progress and future prospects* Reviews in Chemical Engineering. pp. 000010151520200072. <https://doi.org/10.1515/revce-2020-0072>

[25] García-Merino, Belén, Bringas, Eugenio and Ortiz, Inmaculada. (2022). *Synthesis and applications of surface-modified magnetic nanoparticles: progress and future prospects*. Reviews in Chemical Engineering. vol. 38. no. 7. pp. 821-842. <https://doi.org/10.1515/revce-2020-0072>

[26] Nicole Pamme, Jan C.T. Eijkel, Andreas Manz. (2006). *On-chip free-flow magnetophoresis: Separation and detection of mixtures of magnetic particles in continuous flow*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Volume 307. Issue 2. Pages 237-244. ISSN 0304-8853. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.04.008>.

[27] K.-H. Han et al. (2005). *Diamagnetic capture mode magnetophoretic microseparator for blood cells*. Journal of Microelectromechanical Systems. vol. 14. no. 6. pp. 1422–1431.

[28] E.P.Furlani. *Magnetophoretic separation of blood cells at the microscale*. Institute for Lasers, Photonics and Biophotonics. University of Buffalo (SUNY). Buffalo. NY. 14260. Retrieved from <https://arxiv.org/ftp/physics/papers/0612/0612005.pdf>

[29] Zhicheng Hu, Jianguo Liu, Tao Gan, Dongfang Lu, Yuhua Wang, Xiayu Zheng. (2022). *High-intensity magnetic separation for recovery of LiFePO₄ and graphite from spent lithium-ion batteries*. Separation and Purification Technology. Volume 297. 121486. ISSN 1383-5866. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121486>.

[30] Jin Liu, Jin Jiang, Chaoshun Jiang, Zhi Wang, Pu Chen. (2022). *Desulfurization mechanism of high-sulfur coal by heating reduced iron powder and magnetic separation*. Journal of Cleaner Production. Volume 370. 133254. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133254>.

[31] Chen Y, Cao M, Ma C. (2019). Review of Coal-Fired Electrification and Magnetic Separation Desulfurization Technology. *Applied Sciences*. 9(6):1158. <https://doi.org/10.3390/app9061158>

- [32] S Song, S Lu, A Lopez-Valdivieso. (2002) *Magnetic separation of hematite and limonite fines as hydrophobic flocs from iron ores*. Minerals Engineering. Volume 15. Issue 6. Pages 415-422. ISSN 0892-6875. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00054-7](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00054-7).
- [33] Mostafa Ahmadzadeh, Camila Romero, and John McCloy. (2018). *Magnetic analysis of commercial hematite, magnetite, and their mixtures*. AIP Advances 8. 056807. <https://doi.org/10.1063/1.5006474>
- [34] Laurent S, Forge D, Port M, Roch A, Robic C, Vander Elst L, Muller RN (2008) *Magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications*. Chem Rev 108:2064–2110. doi:10.1021/cr900197g
- [35] Speliotis D (1999) *Magnetic recording beyond the first 100 years*. J Magn Magn Mater 193:29–35. doi:10.1016/S0304-8853(98)00399-0
- [36] Sun J, Zhou S, Hou P, Yang Y (2006) *Synthesis and characterization of biocompatible Fe₃O₄ nanoparticles*. J Biomed Mater Res, pp 333–341. doi: 10.1002/jbm.a
- [37] Sun S, Zeng H, Robinson DB, Raoux S, Rice PM, Wang SX, Li G (2004) *Monodisperse MFe₂O₄ (M=Fe, Co., Mn) nanoparticles*. J Am Chem Soc 126:273–279. doi:10.1021/ja0380852
- [38] Park J, An K, Hwang Y, Park JG, Noh HJ, Kim JY, Park JH, Hwang NM, Hyeon T (2004) *Ultra-large-scale syntheses of monodisperse nanocrystals*. Nat Mater 3:891–895. doi:10.1038/nmat1251
- [39] De Palma R, Peeters S, Van Bael MJ, Van den Rul H, Bonroy K, Laureyn W, Mullens J, Borghs G, Maes G (2007) *Silane ligand exchange to make hydrophobic superparamagnetic nanoparticles water-dispersible*. Chem Mater 19:1821–1831
- [40] Kohler N, Fryxell GE, Zhang M (2004) *A bifunctional poly (ethylene glycol) silane immobilized on metallic oxide-based nanoparticles for conjugation with cell targeting agents*. J Am Chem Soc 126:7206–7211. doi:10.1021/ja049195r
- [41] Bloemen, M., Brullot, W., Luong, T.T. et al. (2012). *Improved functionalization of oleic acid-coated iron oxide nanoparticles for biomedical applications*. J Nanopart Res 14, 1100. <https://doi.org/10.1007/s11051-012-1100-5>
- [42] Bronkala, William J. (2000-06-15). *Magnetic Separation*. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi:10.1002/14356007.b02_19. ISBN 3527306730

Παράρτημα

Εικόνες

- Εικόνα 1.1 Μαγνητικές ροπές σε διαμαγνητικό υλικό πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.....15
- Εικόνα 1.2 Μαγνητικές ροπές σε παραμαγνητικό υλικό πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.....16
- Εικόνα 1.3 Μαγνητικές ροπές μέσα σε μαγνητικές περιοχές σιδηρομαγνητικού υλικού πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την εφαρμογή εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.....16
- Εικόνα 1.4 Πίνακας με όλα τα βασικά είδη μαγνητικών υλικών και τη μορφή των μαγνητικών ροπών τους.....17
- Εικόνα 1.5 Συνεκτικό πεδίο συναρτήσει διαμέτρου κόκκου (κόκκινο: υπερπαραμαγνητικό, πράσινο/μπλε: σιδηρομαγνητικά)18
- Εικόνα 1.6 Μορφή μαγνητικών γραμμών σε μόνιμο μαγνήτη19
- Εικόνα 1.7 Βρόχος υστέρησης ενός μαγνητικού υλικού και κρίσιμα σημεία στην γραφική του παράσταση.....21
- Εικόνα 1.8 Απεικόνιση νόμου Biot Savart πάνω σε έναν ρευματοφόρο αγωγό.....22
- Εικόνα 1.9 Γκαουσιανή επιφάνεια που σχηματίζεται από τις μαγνητικές γραμμές ενός μαγνήτη.....23
- Εικόνα 4.1 Διάγραμμα συνεκτικού πεδίου προς διάμετρο κόκκου και διαμόρφωση μαγνητικών περιοχών.....32
- Εικόνα 4.2 Διάταξη N. Pamme et al. Αριστερά εισέρχεται το διάλυμα του buffer και δεξιά εξέρχονται από διαφορετικά ύψη τα μαγνητικά, λιγότερο μαγνητικά και μη μαγνητικά σωματίδια34
- Εικόνα 4.3 Διάταξη HGMS Zhicheng Hu et al. α) σχήμα διάταξης β) προσομοίωση λειτουργίας όπου τα σωματίδια LiFePO_4 τείνουν να συγκρατούνται από το array μαγνητών και τα σωματίδια γραφίτη καταλήγουν στην έξοδο.....35
- Εικόνα 4.4 Διαδικασία αποθείωσης των Jin Liu et al. με χρήση τεχνικής μαγνητικού διαχωρισμού. Αριστερά φαίνεται η προεπεξεργασία της σκόνης και δεξιά ο διαχωρισμός του καθαρού άνθρακα από τα μαγνητικά υλικά που περιέχουν τις θειούχες ενώσεις.....36
- Εικόνα 4.5 Βρόχος υστέρησης μαγνητίτη37

Εικόνα 5.1 Κώδικας Arduino για τον έλεγχο της βαλβίδας και των σερβοκινητήρων...41

Εικόνα 5.2 Συνολική διάταξη.....41

Εικόνα 5.3 Η περισταλτική αντλία κινεί το διάλυμα μέσα στον σωλήνα. Οι σερβοκινητήρες πλησιάζουν και απομακρύνουν τους μαγνήτες κάθετα στη ροή. Η βαλβίδα δεξιά από τους μαγνήτες ανακατευθύνει τη ροή σε δύο σωλήνες εναλλάξ και το ρευστό είτε επιστρέφει στο αρχικό Δοχείο 1 (πάνω) ή στο Δοχείο 2 (κάτω) όπου θα καταλήξει τελικά το ferrofluid42

Εικόνα 5.4 α) Στην αριστερή εικόνα φαίνεται το τροφοδοτικό συνδεδεμένο με το relay module (μπλε πλακέτα κάτω αριστερά). β) Στην δεξιά εικόνα φαίνεται η συνδεσμολογία μεταξύ relay module, πλακέτας Arduino (μπλε πλακέτα δεξιά) και βοηθητικού breadboard43

Εικόνα 5.5 Αποτέλεσμα για βέλτιστες παραμέτρους (πάνω αριστερά Δοχείο 2 με ferrofluid, πάνω δεξιά Δοχείο 1 με καθαρό νερό, κάτω η κάτοψη του Δοχείου 1).....45

Εικόνα 5.6 Κώδικας γραφικών παραστάσεων σε python.....46

Διαγράμματα

Διάγραμμα 5.1 Σχεδιάγραμμα της διάταξης σε πρόγραμμα draw.io.....40

Διάγραμμα 5.2 α) Ποσότητα ferrofluid στο Δοχείο 1 ως προς την ταχύτητα της ροής β) ποσότητα ferrofluid στο Δοχείο 1 ως προς τους χρόνους on/off του μαγνητικού πεδίου γ) ποσότητα ferrofluid στο Δοχείο 1 ως προς την ποσότητα μαγνητικής σκόνης στο ferrofluid.....46

Πίνακες

Πίνακας 5.1 Μετρήσεις για διαφορετικές ταχύτητες ροής.....43

Πίνακας 5.2 Μετρήσεις για διαφορετικούς χρόνους on/off του μαγνητικού πεδίου.....44

Πίνακας 5.3 Μετρήσεις για διαφορετική ποσότητα μαγνητικής σκόνης στο διάλυμα..44