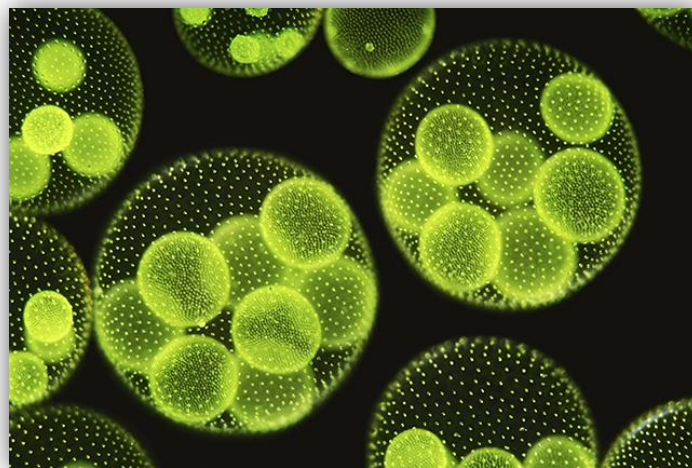




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

## Διαχωρισμός συνεχούς ροής μαγνητικά τροποποιημένων κυττάρων άλγης



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΛΥΜΠΕΤΗ ΑΙΜΙΛΙΑ**

Διπλωματούχος Μεταλλειολόγος- Μεταλλουργός Ε.Μ.Π.

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**Ε.ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2017**





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**Διαχωρισμός συνεχούς ροής μαγνητικά  
τροποποιημένων κυττάρων άλγης**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΛΥΜΠΕΤΗ ΑΙΜΙΛΙΑ**

Διπλωματούχος Μεταλλειολόγος- Μεταλλουργός Ε.Μ.Π.

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 27/10/2017

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

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

.....  
Τσετσέκου Αθηνά  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....  
Δημήτριος Μανωλάκος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2017

Copyright © Αιμιλία Λυμπέτη, 2017  
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

## Πρόλογος

Για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, καταλυτική ήταν η παρουσία και η βοήθεια ορισμένων ανθρώπων.

Γι' αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για την ανάθεση του θέματος, την συνεργασία μας αλλά και παρουσία του και την βοήθεια του όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τον κ. Γιώργο Μπάνη για την τόσο πολύτιμη βοήθεια καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Μεταξύ των άλλων θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους τους καθηγητές του Διεπιστημονικού Διατμηματικού Προγράμματος «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών».

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια και κυρίως την μητέρα μου για την αγάπη της και την πίστη στις δυνατότητες μου.

Στην μητέρα μου...

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1.Θεωρητικό μέρος.....	1
1.1 Φύκη – Μικροφύκη (Άλγες - Μικροάλγες).....	2
1.1.1 Γενικά .....	2
1.1.2 Δομή κυττάρου φυκών .....	7
1.1.3 Είδη μεταβολισμού.....	11
1.1.4 Συστήματα καλλιέργειας .....	12
1.1.4.1 Γενικά .....	12
1.1.4.2 Ανοιχτά συστήματα.....	13
1.1.4.3 Κλειστά συστήματα .....	15
1.1.5 Συνθήκες καλλιέργειας.....	18
1.1.6 Συγκομιδή .....	19
1.1.7 Υπεροχή της βίο-ενέργειας από φύκη .....	20
1.2 Μαγνητισμός – Ηλεκτρομαγνητισμό.....	22
1.2.1 Μαγνήτες και ηλεκτρομαγνήτες.....	22
1.2.1.1 Μαγνητικά κυκλώματα.....	23
1.2.1.2 Νόμος Biot – Savart .....	25
1.2.1.3 Εξισώσεις Maxwell.....	26
1.2.2 Μαγνητισμός.....	29
1.2.2.1 Ταξινόμηση μαγνητικών υλικών .....	30
1.2.2.2 Ιδιότητες των σιδηρομαγνητών.....	35
1.2.2.3 Μαγνητική ανισοτροπία .....	39
1.2.2.4 Θεμελιώδη μαγνητικά μήκη.....	39
1.2.3 Μαγνητικά νανοσωματίδια .....	40
1.2.3.1 Εισαγωγή στα νανοσωματίδια .....	40
1.2.3.2 Μαγνητικά νανοσωματίδια .....	41
1.2.3.3 Μέγεθος μαγνητικών νανοσωματιδίων .....	43
1.2.3.4 Σύνθεση μαγνητικών νανοσωματιδίων .....	44

1.2.3.5	Υλικά μαγνητικού πυρήνα .....	45
1.2.3.6	Δυνάμεις στα μαγνητικά νανοσωματίδια .....	47
1.3	Ηλεκτροδιάτρηση- Ηλεκτροπόρωση.....	48
1.3.1	Γενικά .....	48
1.3.2	Ηλεκτροπόρωση σε κύτταρα άλγης .....	50
1.4	Ρευστά .....	51
1.4.1	Ιδιότητες ρευστών .....	51
1.4.2	Νόμος Stokes.....	53
	Κεφάλαιο 2.Πειραματικό μέρος.....	54
2.1	Γενικά.....	55
2.2	Περιγραφή προτεινόμενου συστήματος λειτουργίας.....	55
2.3	Στρατηγική πειραματικής διαδικασίας.....	61
2.4	Προσομοιώσεις.....	62
2.4.1	Γεωμετρία σωλήνα .....	63
2.4.2	Δημιουργία πλέγματος και προσομοιώσεων δυνάμεων στο σωλήνα .	64
2.4.3	Προσομοιώσεις μαγνητικού πεδίου. ....	71
2.5	Πείραμα.....	77
2.5.1	Προετοιμασία πειράματος .....	77
2.5.2	Υλικά πειράματος .....	80
2.6	Αποτελέσματα πειράματος .....	86
	Κεφάλαιο 3. Συμπεράσματα και μελλοντικοί στόχοι.....	88
3.1	Συμπεράσματα και μελλοντικοί στόχοι .....	89



## **Κατάλογος Πινάκων**

**Πίνακας 1.1:** Σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών ανοικτών και κλειστών συστημάτων καλλιέργειας φυκών.

**Πίνακας 1.2:** Μαγνητικές ποσότητες και αντιστοίχιση με ηλεκτρικές.

**Πίνακας 2.1:** Μεγέθη και δυνάμεις κύτταρων και μαγνητικών νανοσωματιδίων

**Πίνακας 2.2:** Τα χαρακτηριστικά του meshing

**Πίνακας 2.3:** Χαρακτηριστικά πλέγματος

**Πίνακας 2.4:** Υπολογισμός παροχής περισταλτικής αντλίας και ταχύτητας διαλύματος συναρτήσει της τάσης της γεννήτριας.

## **Κατάλογος Σχημάτων**

**Σχήμα 1.1:** Σύγκριση μικροφυκών με άλλες πηγές παραγωγής βιοκαυσίμων

**Σχήμα 1.2:** Μαγνητικό κύκλωμα και παραλληλισμός του με αντίστοιχο ηλεκτρικό

**Σχήμα 1.3:** Υπερκαλυπτόμενη καμπύλη μαγνήτισης υπερπαραμαγνητικού υλικού σε χαμηλή θερμοκρασία

**Σχήμα 1.4:** Καμπύλη βρόχου υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού

**Σχήμα 1.5:** Διαφορά του βρόγχου μεταξύ σκληρών και μαλακών μαγνητικών υλικών

**Σχήμα 1.6:** Μέγεθος νανοσωματιδίων και μαγνητικές ιδιότητες

**Σχήμα 2.1:** Γραφική παράσταση παροχής αντλίας συναρτήσει της τάσης της γεννήτριας

**Σχήμα 2.2:** Διάγραμμα ζ-δυναμικού για  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  συναρτήσει pH [32]

**Σχήμα 2.3:** Διάγραμμα ζ-δυναμικού ολεϊκού οξέος συναρτήσει pH [32]

**Σχήμα 3.1:** Διάγραμμα ροής πληροφοριών μέσω των προσομοιώσεων

## Κατάλογος Εικόνων

**Εικόνα 1.1:** Αξιοποίηση Βιομάζας Μικροφυκών

**Εικόνα 1.2:** Κυριότερες κατηγορίες μικροφυκών

**Εικόνα 1.3:** Δομή κύτταρου φυκών

**Εικόνα 1.4:** Η κυτταρική δομή του *Chlamydomonas reinhardtii*

**Εικόνα 1.5:** Κυκλική δεξαμενή ανοιχτού τύπου (α), raceway open ponds(β)

**Εικόνα 1.6:** Φωτοβιοαντιδραστήρας κεκλιμένος

**Εικόνα 1.7:** Φωτοβιοαντιδραστήρες

**Εικόνα 1.8:** Μαγνητικές γραμμές

**Εικόνα 1.9:** Κανόνας δεξιού χεριού

**Εικόνα 1.10:** Διάγραμμα του περιοδικού πίνακα όπου φαίνονται τα στοιχεία χρωματισμένα ανάλογα με το είδος το μαγνητισμού που παρουσιάζουν σε θερμοκρασία δωματίου

**Εικόνα 1.11:** Οι μαγνητικές ροπές σε: σιδηρομαγνήτες(α), αντισιδηρομαγνήτες(β) και σιδηριμαγνήτες(γ)

**Εικόνα 1.12:** Τα μεγέθη των μαγνητικών νανοσωματιδίων

**Εικόνα 1.13:** Τυπικός σχεδιασμός ενός μαγνητικού νανοσωματιδίου

**Εικόνα 2.1:** (1) ελεύθερα κύτταρα άλγης και ελεύθερα μαγνητικά σωματίδια, (2) φάση ηλεκτροπόρωσης, (3) κύτταρα άλγης με μαγνητικές ιδιότητες

**Εικόνα 2.2:** Σύστημα λειτουργίας με συνεχή ροή για τη δημιουργία κυττάρων άλγης με μαγνητικές ιδιότητες

**Εικόνα 2.3:** Αρχή λειτουργίας mPBR για καλλιέργεια άλγης

**Εικόνα 2.4:** Στάδια προτεινόμενου συστήματος παραγωγής άλγης

**Εικόνα 2.5:** Απεικόνιση σωλήνα σιλικόνης 5mm

**Εικόνα 2.6:** Απεικόνιση meshing στο σωληνάκι

**Εικόνα 2.7:** Μέθοδοι επίλυσης

**Εικόνα 2.8:** Γραφικό περιβάλλον στο Fluent

**Εικόνα 2.9:** Απεικόνιση των ροϊκών γραμμών και των ταχυτήτων

**Εικόνα 2.10:** Απεικόνιση ταχύτητας ρευστού

**Εικόνα 2.11:** Απεικόνιση της πίεσης του ρευστού

- Εικόνα 2.12:** Απεικόνιση των διανυσμάτων της ταχύτητας του ρευστού
- Εικόνα 2.13:** Απεικόνιση κατανομής σωματιδίων
- Εικόνα 2.14:** Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρομαγνήτη
- Εικόνα 2.15:** Πλέγμα εξαέδρων γύρω από τον ηλεκτρομαγνήτη
- Εικόνα 2.16:** Σχεδιάγραμμα του ηλεκτρομαγνήτη
- Εικόνα 2.17:** Απεικόνιση διανυσμάτων της έντασης του μαγνητικού πεδίου
- Εικόνα 2.18:** Απεικόνιση βάθμωσης του μαγνητικού πεδίου
- Εικόνα 2.19:** Διανυσματική απεικόνιση μαγνητικής ροής
- Εικόνα 2.20:** Ένταση μαγνητικού πεδίου
- Εικόνα 2.21:** Ένταση μαγνητικού πεδίου
- Εικόνα 2.22:** (1),(2)Σύνδεσμοι σχήματος "Υ", (2)Περισταλτική αντλία 12V
- Εικόνα 2.23:** (4) Σύριγγα για την παροχέτευση των μαγνητικών νανοσωματιδίων, (5) Ηλεκτρομαγνήτης
- Εικόνα 2.24:** Σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης
- Εικόνα 2.25:** Πειραματική διάταξη
- Εικόνα 2.26:** Φιάλες με διάλυμα μετά την ολοκλήρωση του πειράματος
- Εικόνα 3.1:** Προσομοίωση συνδέσμου για κατασκευή σε 3D printer

## Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες, η εφαρμογή νανοσωματιδίων οξειδίου του σιδήρου έχει καθιερωθεί σε διάφορους τεχνολογικούς τομείς, όπως ο μαγνητικός διαχωρισμός των βιομορίων, οι βιοαισθητήρες, η παραγωγή βιοκαυσίμων, η νανοπροσρόφηση και άλλοι.

Ταυτόχρονα τα τελευταία χρόνια τα μικροφύκη έχουν συγκεντρώσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς οι χρήσεις τους και τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν είναι πολλά. Μέχρι στιγμής η βιομηχανική τους παραγωγή είναι περιορισμένη λόγω της μη συνεχούς ροής στην παραγωγή ενώ διάφορα άλλα μειονεκτήματα όπως η απαιτούμενη ενέργεια, η συγκέντρωση της παραγόμενης άλγης άλλα και ο όγκος νερού αυξάνουν σημαντικά τα κόστη. Ωστόσο οι πάρα πολλές εφαρμογές της μικροάλγης που κυμαίνονται από λιπάσματα, φάρμακα, καθαριστικά υδάτων έως και βιοκαύσιμα αποτελούν αφετηρία για περαιτέρω έρευνα και αναζήτηση τρόπων παραγωγής που να ξεπερνούν τους τεχνοοικονομικούς περιορισμούς.

Σε αυτή την εργασία, εισάγεται μια καινοτόμος εφαρμογή της μαγνητικής νανοτεχνολογίας, που βασίζεται στην εισαγωγή νανοσωματιδίων υπερπαραμαγνητικού οξειδίου του σιδήρου στο κυτταρόπλασμα μικροφυκών, προκειμένου να τους προσδώσει μαγνητικές ιδιότητες. Με βάση αυτές τις ιδιότητες τα μαγνητικά κύτταρα μέσα από ένα σύστημα συνεχούς ροής θα διαχωρίζονται σε πρώτο στάδιο με την βοήθεια ηλεκτρομαγνητών και σε δεύτερο στάδιο θα εναποτίθενται σε κατάλληλες επιφάνειες όπου θα αναπαράγονται και θα περισυλλέγονται. Αυτή η εργασία εστιάζει στο πρώτο κομμάτι, αυτό του διαχωρισμού των μαγνητικών κυττάρων και μελετά μέσω προσομοιώσεων και πειράματος τον τρόπο που τα μαγνητικά κύτταρα άλγης μπορούν να διαχωριστούν από τα κύτταρα που δεν έχουν προσλάβει νανοσωματίδια και από τα ελεύθερα μαγνητικά νανοσωματίδια αλλά και πως αυτά μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν. Πιο συγκεκριμένα μελετάται το κατά πόσο οι προσομοιώσεις είναι αξιόπιστες και αν με την χρήση αυτών μπορεί να λειτουργήσει ένα σύστημα διαχωρισμού μαγνητικών νανοσωματιδίων από ένα υγρό διάλυμα με την χρήση ηλεκτρομαγνητών, με στόχο την κλιμάκωση της διαδικασίας σε κύτταρα

άλγης. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι πολλά και σημαντικά για την μείωση του κόστους παραγωγής.

Τα μαγνητικά μικροφύκη θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια λύση αιχμής για την παραγωγή / καλλιέργεια και τη συγκομιδή μικροφυκών, καθώς και την κλιμάκωση των συστημάτων μετασχηματισμού της βιομάζας, προκειμένου να αναπτυχθούν νέες τεχνολογίες για ολοκληρωμένα βιο-διυλιστήρια βιομάζας από υδάτινη ή θαλάσσια βιομάζα.

## Abstract

In the last decades, iron oxide nanoparticle application has been established in several technological fields, such as magnetic separation of biomolecules, biosensors, bio-fuel production, nano-adsorption and others. At the same time, in the last few years, microalgae have gained special interest because they offer great uses and advantages. So far, their industrial production is limited due to non-continuous production flow. Moreover, other disadvantages such as, the required energy, the concentration of the produced algae and the volume of water, increase significantly their costs. However, the wide applications of microalgae, ranging from fertilizers, drugs, water purifiers to biofuels, are the starting point for further research and exploration of ways of production that go beyond techno-economic constraints.

In this paper, an innovative application of magnetic nanotechnology, based on the introduction of superparamagnetic iron oxide nanoparticles into the microprojectile protoplasm, in order to confer their magnetic properties is introduced. Based on these properties, the magnetic cells through a continuous flow system will be, at first, separated by electromagnets, and secondly, they will be deposited on appropriate magnetic surfaces where they will be reproduced and collected.

This work focuses on the first part of magnetic cell separation and studies simulations and experiments how algae magnetic cells can be separated from nanoparticle-free cells and magnetic nanoparticles that hadn't introduced inside cells and how those two can be recycled and reused. More specifically, it is examined whether the simulations are reliable, and if with their use, magnetic nanoparticles can be separated from a liquid solution using electromagnets, aiming at the escalation of the process into algae cells.

This method has multiple major advantages on how to reduce production costs. Magnetic micro-algae could be a cutting-edge solution for the production / cultivation and harvesting of micro-algae, as well as the scaling up of biomass transformation systems, in order to develop new technologies for integrated biomass bio-refineries from aquatic or marine biomass.

## Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εξετάζονται μέθοδοι και συστήματα παραγωγής άλγης με μαγνητικές τεχνικές. Η μελέτη επικεντρώνεται στο σύστημα διαχωρισμού των μαγνητικών σωματιδίων άλγης, τα οποία έχουν προκύψει από εφαρμογή ηλεκτροπόρωσης (εισαγωγή μαγνητικών σωματιδίων στο κυτταρόπλασμα του κυττάρου). Τα κύτταρα αυτά βρίσκονται διεσπαρμένα σε υδατικό περιβάλλον μαζί με κύτταρα άλγης χωρίς μαγνητικά νανοσωματίδια άλλα και με ελεύθερα μαγνητικά νανοσωματίδια.

**Στόχος** της εργασίας είναι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των πειραμάτων που πραγματοποιούνται να οδηγήσουν στην κλιμάκωση της διαδικασίας και με την χρήση ηλεκτρομαγνητών και την εφαρμογή κατάλληλου μαγνητικού πεδίου σε δύο σημεία του συστήματος αρχικά, στο πρώτο σημείο, να διαχωριστούν τα ελεύθερα μαγνητικά νανοσωματίδια από τα υπόλοιπα συστατικά και να οδηγηθούν σε δεξαμενή για επαναχρησιμοποίηση και στο δεύτερο σημείο, να διαχωριστούν τα κύτταρα άλγης από τα μαγνητικά κύτταρα άλγης ώστε να οδηγηθούν τα πρώτα σε δεξαμενή για επαναχρησιμοποίηση και τα δεύτερα σε κατάλληλες μαγνητικές επιφάνειες όπου θα αναπαραχθούν και τα περισυλλεχθούν.

**Αντικείμενο** της εργασίας είναι η αναλυτική προσομοίωση του συστήματος του μαγνητικού διαχωρισμού και στη συνέχεια η χρήση των αποτελεσμάτων για το σχεδιασμό του πειράματος. Το πείραμα περιλαμβάνει τον διαχωρισμό μαγνητικών νανοσωματιδίων μέσα σε ένα υγρό διάλυμα με την βοήθεια ηλεκτρομαγνήτη και την οδήγηση αυτών μέσω της δύναμης του ροής προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση.

**Σκοπός** της έρευνας είναι η εκτίμηση της αξιοπιστίας των τιμών των προσομοιώσεων καθώς και το να παρέχει πρωτοποριακές λύσεις για την παραγωγή, τη συγκομιδή άλγης και την κλιμάκωση των συστημάτων αναπαραγωγής προκειμένου να παραχθούν νέες τεχνολογίες που θα οδηγήσουν σε μαζική βιομηχανική παραγωγή ή ακόμα και σε ολοκληρωμένα βιοδιυλιστήρια (Integrated Biorefineries) θαλάσσιας βιομάζας.



Τα **αποτελέσματα** από την έκθεση της παραπάνω διάταξης στο ηλιακό φως, μέσω ενός κλειστού συστήματος θερμοκηπίου όπου επιτυγχάνεται ο έλεγχος των βέλτιστων συνθηκών καλλιέργειας είναι η δραματική μείωση της αναγκαίας ποσότητας νερού, καθώς και η γρήγορη και φθηνή συγκομιδή της βιομάζας. Οι παραπάνω καινοτομίες επιτρέπουν τη βέλτιστη καλλιέργεια, την αύξηση της παραγωγικότητας της βιομάζας καθώς και τη δραματική μείωση του κόστους παραγωγής της.

Η παρούσα διπλωματική έχει την ακόλουθη **δομή**:

### **Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό Μέρος**

Στο κεφάλαιο αυτό, συνοψίζεται η επισκόπηση της βιβλιογραφίας που σχετίζεται με τις άλγες, τον μαγνητισμό, την ηλεκτροπόρωση και την δυναμική των ρευστών.

### **Κεφάλαιο 2 : Πειραματικό Μέρος**

Το Δεύτερο Κεφάλαιο περιλαμβάνει:

- 1) τις προσομοιώσεις που σχεδιάστηκαν στο ANSYS,
- 2) το πείραμα που πραγματοποιήθηκε μέσω στοιχείων που αντλήθηκαν από την μελέτη των προσομοιώσεων και
- 3) την παρουσίαση και συζήτηση των αποτελεσμάτων.

### **Κεφάλαιο 3 : Συμπεράσματα και μελλοντικοί στόχοι**

Σε αυτό το κεφάλαιο συζητούνται τα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας και παρουσιάζονται κάποιοι μελλοντικοί στόχοι.

### **Βιβλιογραφικές Αναφορές**

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται οι βιβλιογραφικές αναφορές που συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα διπλωματική.

# Κεφάλαιο 1.

## Θεωρητικό μέρος

## 1.1 Φύκη – Μικροφύκη (Άλγες - Μικροάλγες)

### 1.1.1 Γενικά

Τα φύκη είναι φωτοσυνθετικοί φυτικοί οργανισμοί που δεν έχουν βλαστούς, φύλλα, ρίζες, δεν σχηματίζουν σπέρματα, άνθη ή καρπούς, όπως τα ανώτερα φυτά. Αντίθετα, έχουν πρωτόγονη οργάνωση, πολύ απλή στις κατώτερες ταξινομικά ομάδες, πιο πολύπλοκη στις ανώτερες. Σχηματίζουν σπόρια αντί σπέρματα και ορισμένα έχουν πολύπλοκους βιολογικούς κύκλους.

Από πλευράς μορφολογίας υπάρχει εξαιρετική ποικιλία. Υπάρχουν απλές μονοκύτταρες μορφές, αποικιακές, μικροσκοπικές, νηματοειδής έως πολύπλοκες διακλαδισμένες ή όχι. Ορισμένα μοιάζουν με μικροσκοπικούς θάμνους, με τσαμπιά σταφυλιού άλλα μοιάζουν με δίκτυο, με φύλλα με σωλήνες κ.α. Υπάρχουν φύκη μικροσκοπικά αόρατα με γυμνό μάτι όπως για παράδειγμα αυτά που συμμετέχουν στο φυτοπλαγκτόν και αποκαλούνται μικροφύκη και άλλα ορατά με γυμνό μάτι τα οποία μπορεί να φτάνουν αρκετά μέτρα μήκος όπως τα μεγάλα φαιοφύκη και τα οποία αποκαλούνται μακροφύκη.

Τα φύκη κυρίως τα μικροσκοπικά, συναντώνται παντού. Ιδιαίτερα στα νερά, γλυκά και αλμυρά (ακόμα και σε μολυσμένα), θάλασσες, λίμνες, ποταμιά και λιμνοθάλασσες. Ορισμένα μικροσκοπικά έχουν προσαρμοστεί και ζουν στο έδαφος σε βράχους, πέτρες, ξύλα ακόμα και σε ψυχρές ή θερμές ερημικές περιοχές. Τα μεγάλων διαστάσεων φύκη βρίσκονται στην θάλασσα.

Τα φύκη είναι λοιπόν μια πολυποίκιλη ομάδα υδρόβιων, φωτοσυνθετικών οργανισμών, που γενικά κατηγοριοποιούνται είτε ως μικροφύκη, τα οποία τυπικά είναι μονοκύτταροι οργανισμοί με μέγεθος 0,2 μm-2000μm, συμπεριλαμβανομένων των διατόμων και των κυανοβακτηρίων, είτε ως μακροφύκη, πολυπλοκότεροι οργανισμοί και μεγαλύτεροι σε μέγεθος, όπως τα φύκια. Μπορούν να βρεθούν σε μονήρη κύτταρα ή σε ομάδες μεμονωμένων κυττάρων που συνδέονται μεταξύ τους. Ως υδρόβιοι συγγενείς των φυτών, τα μικροφύκη ευδοκιμούν σε αεριζόμενες, υγρές καλλιέργειες όπου τα κύτταρα έχουν επαρκή πρόσβαση στο φως, το διοξείδιο του άνθρακα και άλλα θρεπτικά συστατικά. Το φυσικό τους περιβάλλον είναι συνήθως το γλυκό νερό και τα θαλάσσια συστήματα. Τα

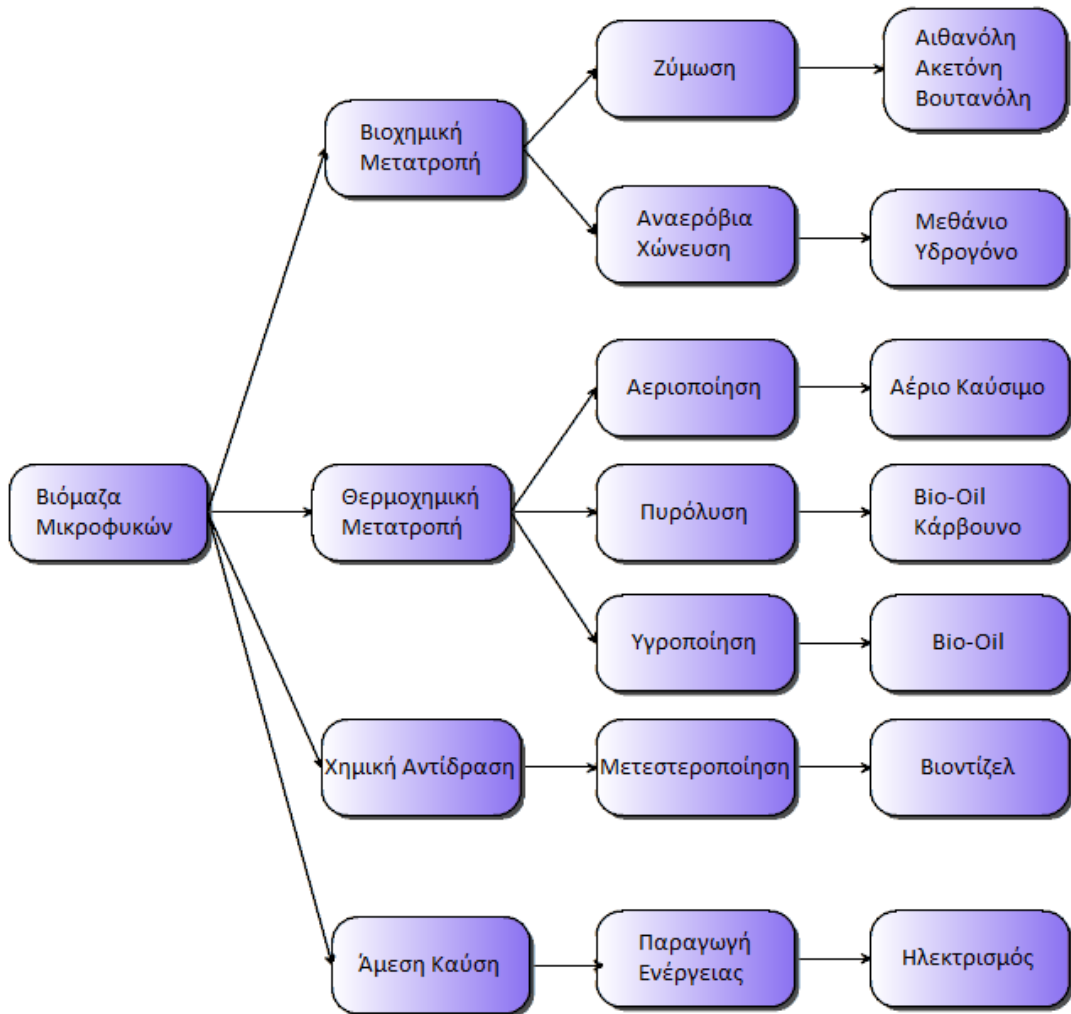
μικροφύκη παράγουν περίπου το ήμισυ του οξυγόνου που παράγεται στη γη ενώ ταυτόχρονα καταναλώνουν διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης. Τα φύκια αναπτύσσονται κυρίως φωτοαυτοτροφικά. Ωστόσο, ορισμένα είδη είναι σε θέση να επιβιώσουν ετερότροφα με υποβαθμισμένες οργανικές ουσίες όπως τα σάκχαρα [1].

### **Χρήσεις μικροφυκών**

Οι χρήσεις των μικροφυκών [2] είναι πάρα πολλές και ποικίλουν λόγω των συστατικών που περιέχουν (πρωτεΐνες, λιπαρά οξέα):

1. Χρήση ως λιπάσματα ή ως βελτιωτικά εδάφους (αποικίες ασβεστούχων θαλάσσιων φυκιών).
2. Στην διατροφή, λόγω των πολυακόρεστων λιπαρών οξέων (ωμέγα-3 λιπαρά οξέα) των βιταμινών και των ιχνοστοιχείων που περιέχουν.
3. Μετά την εξαγωγή ελαίου απ' τα φύκη αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ζωοτροφή διότι περιέχουν πολλές πρωτεΐνες.
4. Δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα από τα καυσαέρια μονάδων παραγωγής ενέργειας.
5. Καθαρισμός υγρών αποβλήτων σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (δεσμεύουν άζωτο και φώσφορο) όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μετατροπή, την απομάκρυνση ή την απομόνωση ρύπων.
6. Δέσμευση του λιπάσματος σε απορροές εκμεταλλεύσεων(απόνερα).
7. Λόγο της χρωστικής τους ουσίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτική λύση για τις χημικές βαφές.
8. Στην φαρμακοβιομηχανία (αντιβιοτικά, εμβόλια).
9. Στην κοσμετολογία (σύσταση των καλλυντικών).
10. Με την επεξεργασία τους, ως υποπροϊόντα, δημιουργούνται αιθέρεις και οξέα που με κατάλληλη επεξεργασία παρασκευάζονται βιοδιασπώμενα πολυμερή και λιπαντικά.

11. Πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοκαυσίμων (Εικόνα 1.1)(βιοντίζελ, βιοιθανόλης, βιοβουτανόλης, αέριο υδρογόνο και σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να παραχθεί από αυτά φυτικό λάδι). Επίσης όταν καίγονται παράγουν ηλεκτρισμό.



**Εικόνα 1.1:** Αξιοποίηση Βιομάζας Μικροφυκών

12 . Κάποια φύκη χρησιμοποιούνται και ως βιοδείκτες, δηλαδή δείκτες της ποιότητας των νερών.

Τα τελευταία χρόνια, τα μικροφύκη έχουν συγκεντρώσει ενδιαφέρον για την παραγωγή πολύτιμων μορίων που κυμαίνονται από θεραπευτικές πρωτεΐνες έως και βιοκαύσιμα. Οι διατροφικές και ιατρικές εφαρμογές είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για αυτούς τους οργανισμούς επειδή πολλά βιομόρια που προέρχονται από τα μικροφύκη θεωρούνται γενικά ασφαλή (GRAS) για ανθρώπινη κατανάλωση [3, 4]. Αν και πολυάριθμα είδη, παράγουν χρήσιμες ενώσεις με φυσικό τρόπο, αυτοί οι μονοκύτταροι οργανισμοί είναι επίσης κατάλληλοι για γενετικό χειρισμό. Επιπλέον, τα μικροφύκη είναι μοναδικά, επειδή συνδυάζουν την ικανότητα συλλογής ανανεώσιμης ενέργειας (φωτοσύνθεση) με τις υψηλές αποδόσεις ελεγχόμενης καλλιέργειας, καθιστώντας τους δυνητικά πολύτιμους οργανισμούς για διαδικασίες βιομηχανικής παραγωγής στον 21ο αιώνα. Ωστόσο, αν και που οι δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα του βιοντίζελ με βάση τα μικροφύκη έναντι του συμβατικού βιοντίζελ έχουν αναγνωριστεί, η ευρεία εμπορευματοποίηση του βιοντίζελ μικροφυκών δεν έχει ακόμη πραγματοποιηθεί, κυρίως λόγω των τεχνοοικονομικών περιορισμών, ιδίως στους τομείς της μαζικής καλλιέργειας και της μεταγενέστερης επεξεργασίας [5].

### **Κατηγορίες μικροφυκών**

Τα μικροφύκη μπορούν να ταξινομηθούν σε κατηγορίες που βασίζονται σε κάποιες ιδιότητες όπως ο τύπος του κυτταρικού τοιχώματος, η χημεία και η σύνθεση του, το είδος μεταβολισμού και τα προϊόντα αποθήκευσης, το είδος των μορίων χλωροφύλλης και των βοηθητικών χρωστικών ουσιών, η παρουσία ή απουσία μαστιγίων (κινητικότητα), η κυτταρική ή σωματιδιακή μορφολογία και οι αναπαραγωγικές δομές.

Οι κυριότερες κατηγορίες είναι [6]:

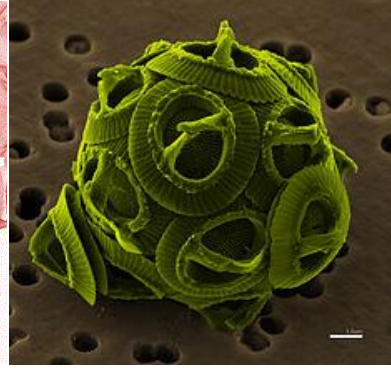
- Chlorophyta
- Rhodophyta
- Haptophyta
- Stramenopiles (Eustigmatophyceae, Bacillariophyceae, Labyrinthulomycetes)
- Dinophyta



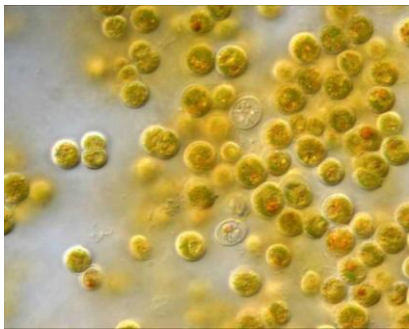
*Chlorophyta*



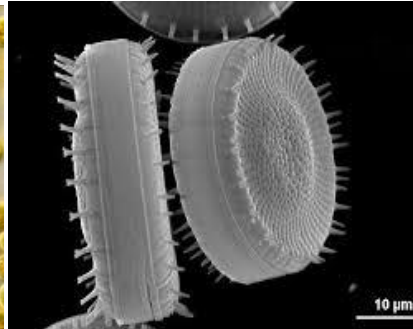
*Rhodophyta*



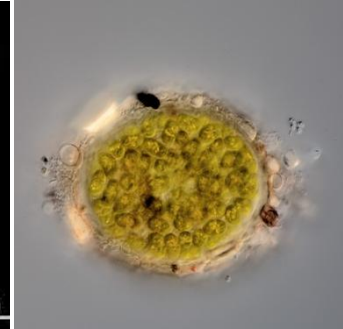
*Haptophyta*



*Eustigmatophyceae*



*Bacillariophyceae*



*Labyrinthulomycetes*



*Dinophyta*

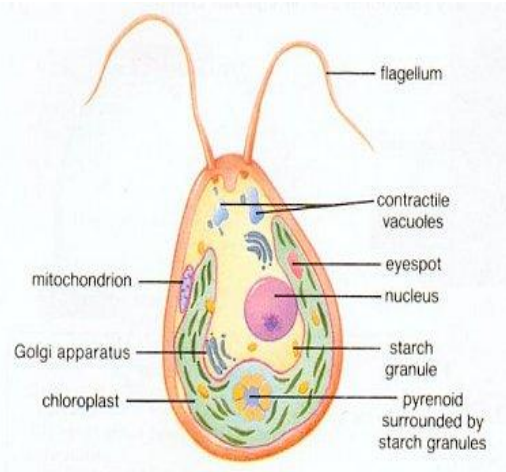
**Εικόνα1.2:** Κυριότερες κατηγορίες μικροφυκών

Μεταξύ των ευκαρυωτικών, πράσινων μικροφυκών της κατηγορίας Chlorophyta, οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες για τρέχουσες εμπορικές εφαρμογές ανήκουν στα γένη *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Haematococcus*, *Arthrospira* και *Dunaliella*. Αυτά χρησιμοποιούνται για την περιεκτικότητά τους σε πρωτεΐνες και τα πολυακόρεστα λιπαρά οξέα που είναι τυπικά προϊόντα υψηλής αξίας. Όσον αφορά τη γενετική μηχανική, αυτά τα είδη είναι επιδεκτικά, πρώτον, του πυρηνικού μετασχηματισμού, απαραίτητου για μεταβολικό έλεγχο, δεύτερον, του χλωροπλαστικού μετασχηματισμού, για υψηλά επίπεδα πρωτεϊνικής έκφρασης, και τρίτον για πιο

απλές προσεγγίσεις στη γενετική τροποποίηση σε σύγκριση με τα ανώτερα φυτά [7].

### 1.1.2 Δομή κυττάρου φυκών

Τα φύκη είναι μονοκύτταροι οργανισμοί, των οποίων ο κύκλος ανάπτυξης γίνεται μέσα σε λίγες μέρες. Υπάρχουν διάφοροι τύποι καθώς και διαφορετικές συνθήκες για την ανάπτυξη τους. Όλα τα ευκαρυωτικά φύκη μοιράζονται μερικές βασικές δομές και κυτταρικά συστατικά.



**Εικόνα 1.3:** Δομή κύτταρου φυκών

**α. Κυτταρικό τοίχωμα:** Το κυτταρικό τοίχωμα των περισσότερων φυκών είναι κυτταρινικό. Περιέχει επίσης ημικυτταρίνη, βλεννώδη, πηκτίνη και άλλες ουσίες όπως το αλγινικό οξύ, η φουκοϊδίνη, η φουκίνη, το ανθρακικό ασβέστιο, το διοξείδιο του πυριτίου κ.α., σε διαφορετικούς συνδυασμούς και σε διαφορετικές ομάδες φυκών. Μελέτες με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο αποκαλύπτουν ότι το κυτταρικό τοίχωμα αποτελείται από μικροϊνίδια κυτταρίνης ποικίλου πάχους που παραμένουν διαφορετικά προσανατολισμένα σε μία κοκκώδη μήτρα.

**β. Μαστίγια:** Τα κινητά φυτικά ή αναπαραγωγικά κύτταρα είναι παρόντα σε όλες τις ομάδες φυκών, εκτός από Cyanophyceae και Rhodophyceae. Η κίνηση επιτυγχάνεται με τη δράση χτυπήματος μικρών νηματοειδών που ονομάζονται μαστίγια. Διαφέρουν σε αριθμό, μήκος και θέση. Ο αριθμός ποικίλει από ένα έως τέσσερα ή και περισσότερα.

**γ. Πρωτοπλάστης:** Το πρωτοπλασμικό περιεχόμενο ενός κυττάρου ονομάζεται πρωτοπλάστης. Ο πρωτοπλάστης των ευκαρυωτικών φυκών περιβάλλεται από ένα εξωτερικό λιποπρωτεϊνικό όριο, που ονομάζεται κυτταρική μεμβράνη και αποτελείται από έναν ή περισσότερους συνήθως σφαιρικούς ή ελλειψοειδείς πυρήνες και το κυτταρόπλασμα.

Η **κυτταρική μεμβράνη** αποτελείται από λιπίδια και πρωτεΐνες. Είναι πολύ λεπτή και ελαστική και επιλεκτικά διαπερατή. Ελέγχει τη διέλευση των υλικών μέσα και έξω από τα κύτταρα.



Το **κυτταρόπλασμα** αποτελεί όλο το μέρος του κυττάρου από την εσωτερική επιφάνεια της κυτταρικής μεμβράνης μέχρι την εξωτερική επιφάνεια της μεμβράνη του πυρήνα, του ίδιου του κυττάρου. Χαρακτηρίζεται ως παχύρρευστο υλικό ( σαν ζελέ) το οποίο συγκρατεί τα υπόλοιπα οργανίδια, τα προστατεύει και αναπληρώνει τον κενό χώρο του κυττάρου.

Στα ευκαρυωτικά κύτταρα των φυκών υπάρχουν οργανίδια που συνδέονται με τη μεμβράνη όπως:

- **Πυρήνας:** Σε όλα τα ευκαρυωτικά φύκη (Chlorophyceae κλπ.), ο πυρήνας είναι ένα καλά οργανωμένο σφαιρικό ή ελλειπτικό σώμα. Παραμένει περικυκλωμένο από μια ξεχωριστή μεμβράνη την **πυρηνική μεμβράνη**. Η πυρηνική μεμβράνη έχει διπλή στρώση. Η εξωτερική μεμβράνη αποτελεί συνέχεια της μεμβράνης του ενδοπλασματικού δικτύου και η επικοινωνία μεταξύ του πυρήνα και του κυτταροπλάσματος επιτυγχάνεται με την βοήθεια των πυρηνικών πόρων, που διαθέτει η πυρηνική μεμβράνη. Η πυρηνική μεμβράνη περιβάλλεται από δύο δίκτυα πρωτεϊνικών ινιδίων. Τα δίκτυα αυτά βοηθούν στην στήριξη του πυρήνα. Το εσωτερικό δίκτυο ινιδίων ονομάζεται πυρηνικός υμένας και αποτελείται από μια πρωτεΐνη, την λαμίνη. Το εξωτερικό δίκτυο είναι λιγότερο οργανωμένο.

Κάθε πυρήνας περιέχει έναν ή περισσότερους **πυρηνίσκους**. Ο αριθμός των πυρηνίσκων ποικίλει σε διαφορετικά φύκη, μπορεί να είναι ένας, δύο ή περισσότεροι. Ο αριθμός των χρωμοσωμάτων διαφέρει από είδος σε είδος, ο μικρότερος αριθμός είναι  $n = 2$ (π.χ. *Porphyra linearis*), ενώ ο υψηλότερος είναι  $n=592$  (*Netrium digitali*).

- **Χλωροπλάστες:** Οι χλωροπλάστες είναι το κυρίαρχο χαρακτηριστικό των κυττάρων των φυκών και περιέχουν όλα τα ένζυμα που απαιτούνται για τις διεργασίες της φωτοσύνθεσης. Πρόκειται για δομή διπλής μεμβράνης και οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από 3 έως 6  $\mu\text{m}$ . Διάφορες μορφές χλωροπλάστων είναι γνωστό ότι εμφανίζονται σε διαφορετικούς τύπους φυκών, από τους οποίους κυριότερη είναι η μορφή σε σχήμα κυπέλλου.

Η βασική δομή του χλωροπλάστη είναι σχεδόν παρόμοια σε όλο το φυτικό βασίλειο.

Υπάρχουν τρεις κύριες δομικές περιοχές στον χλωροπλάστη:

1. Μια διπέταλη μεμβράνη με εγκλεισμένο κενό χώρο ανάμεσα στα δυο πέταλα.  
2. Το κινητό στρώμα που περιέχει τα διαλυτά ένζυμα για το μεταβολισμό, τη σύνθεση των πρωτεϊνών και την αποθήκευση αμύλου.

3. Οι εξαιρετικά οργανωμένες εσωτερικές ελασματοειδείς μεμβράνες που περιέχουν χρωστικές και εμπλέκονται στην δέσμευση ενέργειας και τη μεταγωγή. Το εσωτερικό ελασματοειδές σύστημα σχηματίζει δίσκους οι οποίοι στοιβάζονται μαζί σαν σωρούς για να σχηματίσουν κόκκους. Κάθε δίσκος ονομάζεται θυλακοειδές. Κάθε θυλακοειδές περικλείει ένα χώρο που ονομάζεται έλασμα θυλακοειδών.

Το θυλακοειδές σύστημα αποτελεί μια ενιαία, πολύπλοκη κοιλότητα, που διαχωρίζεται από το στρώμα από την θυλακοειδή μεμβράνη. Ενσωματωμένα στις θυλακοειδείς μεμβράνες είναι συστήματα χρωματισμού και φορείς ηλεκτρονίων, τα οποία εκτελούν την ελαφριά φάση της φωτοσύνθεσης.

Στα *Cyanophyceae*, τα θυλακοειδή δεν περικλείονται σε δεσμευμένες στη μεμβράνη ομάδες αλλά βρίσκονται ελεύθερα στο κυτταρόπλασμα, για να σχηματίσουν χλωροπλάστες. Τα θυλακοειδή αποτελούν τη θέση της χλωροφύλλης-*a* και οι βοηθητικές χρωστικές εμφανίζονται στην επιφάνειά τους με τη μορφή μικρών κυστιδίων που ονομάζονται *Phycobilinsomes*.

• **Πυρηνοειδές σωματίο:** Τα πυρηνοειδή είναι πρωτεϊνούχα σώματα που υπάρχουν σε χλωροπλάστες (πολύ χαρακτηριστικό των χλωροπλάστων των φυκών). Συσχετίζονται συνήθως με τη σύνθεση και την αποθήκευση του αμύλου. Στα *Bacillariophyceae* συσσωρεύουν λιπίδια. Ο αριθμός των πυρηνοειδών μπορεί να είναι ένας (π.χ. *Chlamydomonas*, εικόνα.1.4) ή περισσότεροι από έναν (π.χ. *Oedogonium*) ανά χλωροπλάστη.

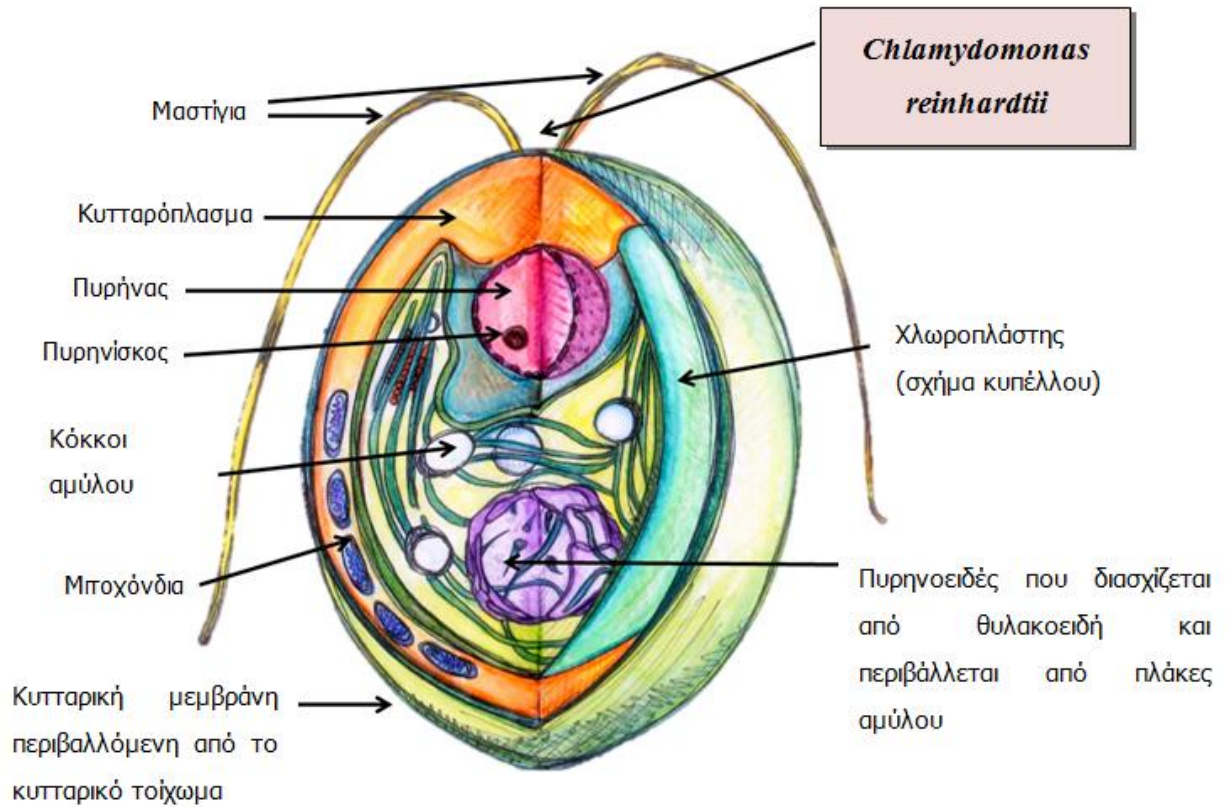
• **Μιτοχόνδρια:** Τα μιτοχόνδρια βρίσκονται σε όλα τα φυτά των φυκών εκτός από τα *Cyanophyceae*. Κάθε μιτοχόνδριο περιβάλλεται από μια διπλή μεμβράνη. Τα μιτοχόνδρια είναι επιμήκη, σφαιρικά ή με ωοειδές σχήμα. Συνήθως υπάρχουν περισσότερα από ένα μιτοχόνδρια ανά κύτταρο, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις (*Chlorophyceae*) κάθε κύτταρο περιέχει ένα μόνο μιτοχόνδριο. Τα κύτταρα των μπλε πράσινων φυκών στερούνται μιτοχονδρίων.

• **Ενδοπλασματικό δίκτυο (Ε/Δ):** Ηλεκτρονικές μικροσκοπικές μελέτες υποδεικνύουν ότι τα κύτταρα των φυκών περιέχουν ένα εκτεταμένο δίκτυο μεμβρανών από αλληλοσυνδεδεμένα σωληνάρια και δεξαμενές (πεπλατυσμένος σάκος), που ονομάζεται ενδοπλασματικό δίκτυο. Οι μεμβράνες του Ε/Δ διασχίζουν ολόκληρο το κυτταρόπλασμα. Το Ε/Δ αποτελείται από διασυνδεδεμένες παράλληλες δεξαμενές που συνδέονται με ριβόσωμα, προσκολλημένες στην κυτταροπλασματική επιφάνεια της μεμβράνης. Αυτή η μορφή Ε/Δ είναι γνωστή ως αδρό ενδοπλασματικό δίκτυο (RER) το οποίο είναι ένα σημαντικό κομμάτι της πρωτεϊνικής σύνθεσης. Αντίθετα, οι μεμβράνες ER που δεν φέρουν ριβόσωμα ονομάζονται λείο ενδοπλασματικό δίκτυο (SER).

• **Δικτυόσωμα ή συσκευή ή σωμάτια Golgi:** Τα σωμάτια Golgi βρίσκονται σε όλα τα κύτταρα των φυκών εκτός από τα μπλε-πράσινα φύκια και μπορούν να παρατηρηθούν με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η συσκευή Golgi είναι ένα συστατικό του ενδομεμβρανικού συστήματος του κυττάρου και φαίνεται να χρησιμεύει ως ένα ενδιάμεσο μεταξύ του ενδοπλασματικού δικτυώματος και της κυτταρικής μεμβράνης. Τα σωμάτια Golgi μπορούν να βρεθούν στην περιοχή του πυρήνα (π.χ. *Chlamydomonas*), κοντά σε πλαστίδια (π.χ. διάτομο και *Bulbochaete*) ή μπορεί να βρεθούν οπουδήποτε στο κύτταρο. Τα σωμάτια Golgi αποτελούνται από 2-20 επίπεδα κυστίδια που είναι διατεταγμένα σε στοίβες. Κάθε στοίβα ονομάζεται δικτυόσωμα. Όλα τα δικτυοσώματα σχηματίζουν συλλογικά τη συσκευή Golgi. Η πρωταρχική λειτουργία του σωματίου είναι να επεξεργάζεται και να πακετάρει μακρομόρια που συντίθενται στο κύτταρο ιδιαίτερα πρωτεΐνες και λιπίδια. Είναι επίσης υπεύθυνα για το σχηματισμό νέας κυτταρικής μεμβράνης.

• **Eye Spot ή Στίγμα:** Τα κινητήρια φυτικά και αναπαραγωγικά κύτταρα των φυκών έχουν χρωστικές κηλίδες στο πρόσθιο, μεσαίο ή οπίσθιο τμήμα του κυττάρου, γνωστά ως σημεία οφθαλμού ή στίγματα. Μετέχουν άμεσα ή έμμεσα στην αντίληψη του φωτός.

• **Κενοτόπια:** Σχεδόν όλα τα κύτταρα των φυκών, εκτός από τα μέλη των *Cyanophyceae*, διαθέτουν ένα ή περισσότερα κενοτόπια. Κάθε κενοτόπιο περιορίζεται από μια διακριτή μεμβράνη που ονομάζεται τονοπλάστης.



**Εικόνα 1.4:** Η κυτταρική δομή του *Chlamydomonas reinhardtii*

### 1.1.3 Είδη μεταβολισμού

Η πλειοψηφία των μικροφυκών είναι φωτοσυνθέτοντες μικροοργανισμοί που σημαίνει ότι η πηγή ενέργειας είναι ο ήλιος και η πηγή άνθρακα το CO<sub>2</sub>. Παρόλα αυτά, ορισμένα μικροφύκη έχουν την ικανότητα να ακολουθούν διάφορους τύπους μεταβολισμού και να εναλλάσσουν τον μεταβολισμό τους ανάλογα της μορφής της διαθέσιμης ενέργειας και του διαθέσιμου άνθρακα.

Οι μεταβολικοί τύποι με τους οποίους μπορούν να αναπτυχθούν ορισμένα μικροφύκη είναι:

- 1) Φωτοαυτότροφος: στον τύπο αυτό τα μικροφύκη αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας ως πηγή ενέργειας τον ήλιο και ως πηγή άνθρακα το CO<sub>2</sub> ή άλλες ανόργανες μορφές,
- 2) Ετερότροφος: Στον τύπο αυτό τα μικροφύκη χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας και πηγή άνθρακα διάφορες οργανικές ουσίες όπως γλυκόζη, οξικό οξύ, γλυκερίνη κλπ,

3) Μιξότροφος: τα μικροφύκη στον τύπο αυτό είναι σε θέση να αυξάνονται/πολλαπλασιάζονται είτε αξιοποιώντας τον ήλιο ως πηγή ενέργειας είτε αξιοποιώντας διάφορες οργανικές ουσίες και ως πηγή άνθρακα είτε το CO<sub>2</sub> είτε τις οργανικές ουσίες και

4) Φωτοετερότροφος: στον τύπο αυτό τα μικροφύκη χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας τον ήλιο και σαν πηγή άνθρακα τις οργανικές ενώσεις.

Ο ετερότροφος και μιξότροφος μεταβολισμός μπορούν να αποτελέσουν ιδανική καλλιεργητική τεχνική για την παραγωγή μικροφυκών, γιατί έτσι αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της αξιοποίησης του φωτός σε καλλιέργειες με μεγάλη πυκνότητα ή σε καλλιέργειες με φωτοπαρεμπόδιση (κατά τους καλοκαιρινούς μήνες). Στις ετερότροφες ή/και μιξότροφες καλλιέργειες η προσθήκη οργανικού άνθρακα στο υπόστρωμα καλλιέργειας δίνει μεγαλύτερη συγκέντρωση βιομάζας σε σχέση με τις φωτοαυτότροφες καλλιέργειες. Γενικά όμως ο μιξότροφος μεταβολισμός έχει μεγαλύτερους ρυθμούς ανάπτυξης και μεγαλύτερη τελική παραγωγή σε βιομάζα σε σχέση με τους άλλους τρεις μεταβολισμούς [8]. Η προσθήκη όμως οργανικού άνθρακα προϋποθέτει την ύπαρξη αφιλόξενων συνθηκών καλλιέργειας λόγω του κινδύνου της υπέρμετρης ανάπτυξης βακτηρίων και την τελική τους επικράτηση στις καλλιέργειες. Ειδικά για την παραγωγή μικροφυκών για ενεργειακούς σκοπούς, όπου το ζήτημα της μείωσης του κόστους των χρησιμοποιούμενων θρεπτικών υλικών είναι πολύ σημαντικό, για την πραγματοποίηση ετερότροφων ή μιξότροφων καλλιεργειών είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οργανικά απόβλητα του παραγωγικού τομέα[9].

#### **1.1.4 Συστήματα καλλιέργειας**

##### **1.1.4.1 Γενικά**

Προκειμένου να επιτευχθεί η μαζική παραγωγή βιομάζας από μικροφύκη, ένα οικονομικά αποδοτικό σύστημα καλλιέργειας έχει μεγάλη σημασία. Η καλλιέργεια μικροφυκών απαιτεί συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως το εύρος των θερμοκρασιών, η ένταση του φωτός, οι συνθήκες ανάμειξης, τα θρεπτικά συστατικά νερού και η ανταλλαγή αερίων. Τα συστήματα καλλιέργειας μικροφυκών διαφέρουν σημαντικά αναλόγως του είδους των μικροφυκών (μικροφύκη και μακροφύκη) που χρησιμοποιούνται. Εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους (μm) τα

μικροφύκη θα πρέπει να καλλιεργούνται σε συστήματα που έχουν σχεδιαστεί αποκλειστικά για το σκοπό αυτό.

Τα συστήματα αυτά εγκαθίστανται στην ξηρά ή ως επιπλέοντα στο νερό.

Σε ότι αφορά τα μικροφύκη, η ανάπτυξη των συστημάτων καλλιέργειάς τους άρχισε μόλις το 1950 στο πλαίσιο ερευνών για την αξιοποίηση τους ως εναλλακτική πηγή πρωτεΐνης, η οποία δύναται να υποστηρίξει διατροφικά τη συνεχή αύξηση του πληθυσμού. Η ενεργειακή κρίση στη δεκαετία του 1970 έδωσε το έναυσμα για την έναρξη της ερευνητικής δραστηριότητας της ενεργειακής αξιοποίησης μικροφύκης.

Η φωτοτροπική καλλιέργεια των φυκών διεξάγεται σε διάφορα συστήματα καλλιέργειας που κυμαίνονται από υπαίθριους ανοικτούς αγωγούς χρησιμοποιώντας το φυσικό φως του ήλιου έως εσωτερικούς φωτοβιοαντιδραστήρες με φυσικό ή τεχνητό φωτισμό.

#### **1.1.4.2 Ανοιχτά συστήματα**

Τα ανοιχτά συστήματα, αποτελούνται από ανοιχτές λίμνες φυσικών υδάτων (λίμνες, λιμνοθάλασσες) ή τεχνητές δεξαμενές, που προσομοιώνουν το περιβάλλον ανάπτυξης των φυσικών λιμνών. Οι ανοιχτές δεξαμενές χαρακτηρίζονται από απλή και χαμηλού κόστους δομή και λειτουργία, χαμηλή συγκέντρωση βιομάζας (μεταξύ  $0,1-1,5 \text{ g} * \text{L}^{-1}$ ) και κακή σταθερότητα του συστήματος.

Τα ανοιχτά συστήματα καλλιέργειας χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Ελλειψοειδείς δεξαμενές, με συνεχόμενη ανάδευση, προκαλούμενη από μετακινούμενα μηχανικά συστήματα στη βάση αυτών.
- Κυκλικές δεξαμενές, με συνεχόμενη ανάδευση, προκαλούμενη από μια νοητή κινούμενη ακτίνα.
- Επικλινείς δεξαμενές, στις οποίες η ανάδευση επιτυγχάνεται μέσω της άντλησης και στη συνέχεια της βαρύτητας.

Οι ανοικτές δεξαμενές είναι το παλαιότερο σύστημα μαζικής καλλιέργειας μικροφυκών. Πρόκειται για δεξαμενές μικρού βάθους, λόγω της εξασθένησης του φωτός σε υγρά μέσα, και μήκους αρκετές φορές μεγαλύτερου από του πλάτους. Τα πιο συνηθισμένα συστήματα καλλιέργειας τύπου ανοιχτών δεξαμενών είναι δεξαμενές με τη μορφή διαδρόμων (raceway ponds, εικόνα 1.5) με το υγρό να

κυκλοφορεί στη λίμνη μέσω μηχανικών συστημάτων “κωπηλασίας” και οι κυκλικές δεξαμενές που αναδεύονται με κινούμενο βραχίονα. Οι δεξαμενές τύπου διαδρόμων είναι συνήθως κατασκευασμένες από σκυρόδεμα επενδεδυμένο με πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) με διαστάσεις που κυμαίνονται από 10-100 μέτρα μήκος, 1-10 μέτρα πλάτος και 10-50 cm βάθος.



**Εικόνα 1.5:** Κυκλική δεξαμενή ανοιχτού τύπου (α) , raceway open ponds (β)

Πρόσφατες εξελίξεις στους ανοικτούς υπαίθριους σχεδιασμούς φωτοβιοαντιδραστήρων έχουν λάβει χώρα στην παροχή διοξειδίου του άνθρακα στα κύτταρα, στην ανάμιξη κυττάρων και στον έλεγχο των μολυσματικών ουσιών. Εφόσον το μέσο βάθος της καλλιέργειας είναι περιορισμένο (περίπου 30-50 cm), σημαντική ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα θα διαφύγει στην ατμόσφαιρα εκτός εάν σχεδιαστεί και χρησιμοποιηθεί ένα κατάλληλο σύστημα παροχής, όπως πχ. ένας πλωτός εγχυτήρας CO<sub>2</sub>. Τέλος το σύστημα ανάδευσης των ανοικτών καλλιιεργειών είναι μεγάλης σημασίας και στην ουσία αντικατοπτρίζει την εξέλιξη των διαφόρων τύπων δεξαμενών. Η ανάδευση είναι αναγκαία γιατί εμποδίζει την συσσωμάτωση και καθίζηση των μικροφυκών, αυξάνει την αξιοποίηση του φωτός, ομογενοποιεί το υπόστρωμα καθιστώντας τα διαλυτά ανόργανα ή/και οργανικά στοιχεία πιο προσπελάσιμα για την πρόσληψή τους από τα μικροφύκη. Συνοπτικά, τα κύρια μειονεκτήματα των ανοικτών συστημάτων αποτελούν η απαίτηση μεγάλων εκτάσεων γης, οι επιμολύνσεις από άλλους μικροοργανισμούς, η ανάγκη για μεγάλες ποσότητες νερού (λόγω εξάτμισης), η αδυναμία ελέγχου της



θερμοκρασίας, η σπατάλη ενέργειας για τη συνεχή ανάμειξη των καλλιεργειών, λόγω της επίπλευσης των νεκρών φυκών και καθίζησης των ζωντανών φυκών με αποτέλεσμα μικρή αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας αλλά και το ότι η παραγωγή ανά μονάδα επιφάνειας είναι μικρότερη σε σχέση με τις κλειστού τύπου καλλιέργειες με αποτέλεσμα η συγκέντρωση της βιομάζας να είναι σχετικά μικρή ανεβάζοντας πολύ το κόστος συγκομιδής.

#### **1.1.4.3 Κλειστά συστήματα**

Στις καλλιέργειες κλειστού τύπου, οι συνθήκες είναι περισσότερο ή λιγότερο ελεγχόμενες, αναλόγως αν πρόκειται για καλλιέργειες στεγασμένες ή υπαίθριες. Στις υπαίθριες καλλιέργειες οι συνθήκες δεν ελέγχονται πλήρως (ηλιακή ένταση και θερμοκρασία). Αντίθετα στις στεγασμένες καλλιέργειες οι συνθήκες με τον ένα ή άλλο τρόπο είναι πιο ελεγχόμενες. Οι κλειστού τύπου καλλιέργειες πραγματοποιούνται σε κλειστούς περιέκτες, τους φωτοβιοαντιδραστήρες (photobioreactors-PBR). Τα υλικά κατασκευής και τα σχήματα των φωτοβιοαντιδραστήρων ποικίλουν. Υπάρχουν φωτοβιοαντιδραστήρες επίπεδοι σαν ηλιακοί συλλέκτες κατακόρυφοι ή κεκλιμένοι, κυλινδρικοί με επιμήκεις αγωγούς κατασκευασμένοι από διάφορα διάφανα υλικά (γυαλί ή πλαστικό), ή ελικοειδούς μορφής. Επίσης απλής κατασκευής φωτοβιοαντιδραστήρες θεωρούνται αυτοί του τύπου σάκων πολυαιθυλενίου .



**Εικόνα 1.6:** Φωτοβιοαντιδραστήρας κεκλιμένος





**Εικόνα 1.7:** Φωτοβιοαντιδραστήρες

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των φωτοβιοαντιδραστήρων είναι:

- 1) καλύτερος έλεγχος των συνθηκών καλλιέργειας,
- 2) μεγαλύτερος λόγος επιφάνειας/όγκο,
- 3) σε ορισμένους τύπους φωτοβιοαντιδραστήρων, καλύτερος έλεγχος της παροχέτευσης και της κίνησης των αερίων (πχ CO<sub>2</sub>),
- 4) περιορισμός της εξάτμισης νερού από το υπόστρωμα καλλιέργειας,
- 5) καλύτερη θερμική κατανομή στο υπόστρωμα καλλιέργειας,
- 6) σχετικά εύκολη εγκατάσταση σε ανοιχτό χώρο,
- 7) προστασία από επιμολύνσεις από διάφορους μικροοργανισμούς
- 8) σχετικά υψηλές αποδόσεις σε σχέση με τις ανοικτές δεξαμενές και
- 9) η δυνατότητα καλλιέργειας σε τύπο μιξοτροφίας ή ετεροτροφίας χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα επιμόλυνσης.

Παρόλα τα πλεονεκτήματα των φωτοβιοαντιδραστήρων σε σχέση με τις ανοικτές δεξαμενές, οι καλλιέργειες αυτού του τύπου έχουν αυξημένα κόστη κατασκευής και λειτουργίας όπως και περιορισμένη δυνατότητα να κατασκευαστούν σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις (scaled-up). Ένας από τους κυριότερους λόγους για την περιορισμένη δυνατότητα να κατασκευαστούν σε μεγάλης κλίμακα εγκαταστάσεις είναι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο υγρό υπόστρωμα ανάπτυξης. Κατά την φωτοσύνθεση των μικροφυκών παράγεται μοριακό οξυγόνο το οποίο λόγω των συνθηκών εντός του φωτοβιοαντιδραστήρα

διαλύεται στο υγρό υπόστρωμα ανάπτυξης. Το διαλυμένο οξυγόνο θα πρέπει να απομακρύνεται με κάποιο τρόπο γιατί μεγάλες συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου είναι ανασταλτικές για την ανάπτυξη και μερικές φορές σε συνδυασμό με υψηλές εντάσεις φωτός προκαλείται φωτοοξειδωση. Αυτό το γεγονός περιορίζει αρκετά το μήκος των αγωγών το οποίο δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 80m [13]. Βέβαια παράγοντες όπως η ηλιακή ένταση, η συγκέντρωση της βιομάζας, ο ρυθμός ροής του υγρού κλπ. επηρεάζουν σημαντικά τις διαστάσεις των αγωγών .

Ο σχεδιασμός των φωτοβιοαντιδραστήρων είναι μια πολύπλοκη υπόθεση και προϋποθέτει την καλή γνώση διαφόρων φυσικών και βιολογικών φαινομένων για τον επιτυχή σχεδιασμό των διαφόρων υποσυστημάτων.

Τα κυριότερα υποσυστήματα των φωτοβιοαντιδραστήρων είναι:

- 1) το σύστημα φωτισμού,
- 2) το σύστημα εμπλουτισμού με CO<sub>2</sub>,
- 3) το σύστημα ανάδευσης,
- 4) το σύστημα απομάκρυνση CO<sub>2</sub> και διαχωρισμού αερίων,
- 5) το σύστημα θέρμανσης/ψύξης και
- 6) το σύστημα θρέψης [13,14].

Χαρακτηριστικό	Ανοιχτά συστήματα	Κλειστά συστήματα
Κίνδυνος μόλυνσεων	Πολύ υψηλός	Χαμηλός
Απαιτούμενος χώρος	Μεγάλος	Μικρός
Απώλεια νερού (π.χ. εξάτμιση)	Πολύ υψηλή	Δεν υπάρχει
Απώλεια CO <sub>2</sub>	Υψηλή	Δεν υπάρχει
Καλλιεργούμενα είδη μικροφυκών	Λίγα είδη	Σχεδόν όλα τα είδη μπορούν να καλλιεργηθούν
Έλεγχος συνθηκών ανάπτυξης καλλιέργειας	Δεν υπάρχει	Υπάρχει
Επίδραση καιρικών συνθηκών	Σημαντική, η παραγωγή είναι αδύνατη κατά τη διάρκεια ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων	Μη σημαντική
Λανθάνουσα φάση της καλλιέργειας	Μεγάλη, περίπου 6-8 εβδομάδες	Σχετικά μικρή, περίπου 2-4 εβδομάδες
Συγκέντρωση βιομάζας κατά την περίοδο της παραγωγής	Χαμηλή, περίπου 0.1-0.2 gL <sup>-1</sup>	Υψηλή, περίπου 2-8 gL <sup>-1</sup>

**Πίνακας 1.1:** Σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών ανοικτών και κλειστών συστημάτων καλλιέργειας φυκών

### 1.1.5 Συνθήκες καλλιέργειας

Οι καλλιέργειες των μικροφυκών είναι αρκετά πολύπλοκα συστήματα και η ανάπτυξή τους επηρεάζεται από διαφορετικούς βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των μικροφυκών είναι: ο φωτισμός, η θερμοκρασία, τα θρεπτικά συστατικά (C, N, K και μικροστοιχείων), το pH, η αλατότητα, ο αερισμός, η ανάδευση, η παρουσία ή μη άλλων ειδών μικροοργανισμών στην καλλιέργεια και οι διάφορες παρεμποδιστικές και ανασταλτικές ουσίες που παράγονται από τα ίδια τα μικροφύκη ή που μπορεί να υπάρχουν στο θρεπτικό υπόστρωμα. Επομένως, κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας, οι συνθήκες διεργασίας πρέπει να παρακολουθούνται στενά και / ή να προσαρμόζονται κατάλληλα για την βέλτιστη παραγωγικότητα λιπιδίων.

Πιο συγκεκριμένα:

#### **ΦΩΣ**

Η διάρκεια, η ένταση και η ποιότητα του φωτισμού είναι καθοριστικοί παράγοντες για την ανάπτυξη των μικροφυκών. Η ποιότητα του φάσματος του φωτός και η έντασή του πρέπει να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπουν την μέγιστη ανάπτυξη των μικροφυκών. Το φάσμα του φωτός που αξιοποιείται από τα μικροφύκη είναι μεταξύ 400-700 nm (ενεργή φωτοσυνθετική ακτινοβολία). Τα διάφορα είδη μικροφυκών περιέχουν σε διαφορετικές αναλογίες τις διάφορες φωτοσυνθετικές χρωστικές ουσίες και ως εκ τούτου αξιοποιούν λιγότερο ή περισσότερο διαφορετικά μήκη κύματος. Ο φωτισμός είναι σε γενικές γραμμές ο καθοριστικότερος παράγοντας για την ανάπτυξη των μικροφυκών και ειδικά στις ανοικτού τύπου καλλιέργειες συνήθως είναι και ο περιοριστικός παράγοντας [10]. Γενικά ο ρυθμός ανάπτυξης των μικροφυκών αυξάνεται με την αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας μέχρι ένα όριο. Τα περισσότερα μικροφύκη αναπτύσσονται με μεγάλο ρυθμό σε ένταση φωτισμού μεταξύ 200 και 400  $\mu\text{Em}^{-1}\text{s}^{-1}$ , αλλά αυτό εξαρτάται από την πυκνότητα της καλλιέργειας. Μετά το όριο αυτό ο ρυθμός ανάπτυξης παραμένει σταθερός και από ένα σημείο και έπειτα μειώνεται λόγω της βλάβης που υφίστανται τα κύτταρα λόγω φωτοοξειδωσης [11].

Η πηγή του φωτός μπορεί να είναι είτε φυσική (ήλιος), είτε τεχνητή (λαμπτήρες). Ειδικά σε περιπτώσεις μικροφυκών που καλλιεργούνται για υψηλής αξίας προϊόντα,

ο τεχνητός φωτισμός παρέχει πιο σταθερές ελεγχόμενες συνθήκες και έτσι προτιμάται. Νέες τεχνολογίες λαμπτήρων όπως τα LED (light emitting diode) τα οποία έχουν σχετικά μικρή κατανάλωση ενέργειας ή οι οπτικές ίνες ή και υβριδικά συστήματα φυσικού και τεχνητού φωτισμού θεωρούνται ότι θα συμβάλουν αρκετά στην βελτιστοποίηση της παραγωγής μικροφυκών [12].

## **ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ**

Η θερμοκρασία ποικίλει ανάλογα με το είδος της άλγης. Η κατάλληλη θερμοκρασία για την καλλιέργεια φυτοπλαγκτόν κυμαίνεται στους 20-30 °C. Ο ρυθμός ανάπτυξης των μικροφυκών αυξάνεται γενικά εκθετικά με τις αυξανόμενες θερμοκρασίες μέχρι να φτάσει στο βέλτιστο επίπεδο. Μόλις επιτευχθεί αυτό το επίπεδο, ο ρυθμός ανάπτυξης μειώνεται με περαιτέρω αυξήσεις της θερμοκρασίας.

Πολλά φύκη μπορούν να αντέξουν θερμοκρασίες μέχρι και 15°C χαμηλότερες από τη βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξής τους, αλλά υπάρχει πιθανότητα με μια μεταβολή της τάξης των 2-4°C πάνω από το βέλτιστο σημείο να υπάρξει πλήρης απώλεια της καλλιέργειας. Γενικά, οι θερμοκρασίες κάτω από το βέλτιστο εύρος δεν θα σκοτώσουν τα φύκια μέχρι να παγώσει το νερό. Ωστόσο, οι θερμοκρασίες πάνω από το βέλτιστο μπορούν να σκοτώσουν τα κύτταρα των μικροφυκών. Επιπλέον, η μεταφοράς μάζας αερίου-υγρού είναι ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τη χρήση του CO<sub>2</sub> και συνεπώς την φωτοτροπική ανάπτυξη.

Η εύρεση της βέλτιστης θερμοκρασίας για ένα είδος ή στέλεχος είναι πολύ σημαντική καθώς μόνο σε αυτή υπάρχει και βέλτιστη αύξηση. Στους φωτοβιοαντιδραστήρες υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης (ειδικά κατά τους θερινούς μήνες σε χώρες όπως η Ελλάδα, όπου η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει μέχρι 55°C κάτω από τον ήλιο), και ως εκ τούτου συνήθως υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα ψύξης της καλλιέργειας.

### **1.1.6 Συγκομιδή**

Η συγκομιδή των μικροφυκών είναι ένα πεδίο με μεγάλα περιθώρια έρευνας, δεδομένου ότι οι μέθοδοι συγκομιδής που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα είναι είτε αναποτελεσματικές είτε ενεργοβόρες. Το κόστος της συγκομιδής μπορεί να ανέλθει στο 20-30% του συνολικού κόστους παραγωγής της βιομάζας [15].

Οι μέθοδοι συγκομιδής που έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής βασίζονται σε χημικές, φυσικές, βιολογικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των μικροφυκών.

Για την συγκομιδή της βιομάζας χρησιμοποιούνται οι εξής σημαντικότερες μέθοδοι: α) φιλτράρισμα, β) φυγοκέντριση, γ) συσσωμάτωση-κροκίδωση και δ) επίπλευση (flocculation).

Το φιλτράρισμα σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους είναι η πιο ανταγωνιστική μέθοδος συγκομιδής μικροφυκών. Το κυριότερο μειονέκτημα του φιλτραρίσματος για την συγκομιδή της βιομάζας είναι η έμφραξη των πόρων του μέσου φιλτραρίσματος, το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί με ανάποδες πλύσεις των φίλτρων [16].

Η φυγοκέντριση σαν μέθοδος συγκομιδής έχει εξεταστεί αρκετά και έχει αποδειχθεί ότι έχει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. Προτιμάται σαν μέθοδος όταν είναι να συγκομιστεί βιομάζα μικροφυκών με μεγάλη προστιθέμενη αξία γιατί σαν μέθοδος είναι ενεργοβόρος και προσθέτει μεγάλα κόστη στο τελικό προϊόν [16].

Η μέθοδος συγκομιδής με συσσωμάτωση βασίζεται στο γεγονός ότι τα κύτταρα των μικροφυκών είναι ηλεκτρικά αρνητικώς φορτισμένα εμποδίζοντας έτσι την συνάθροιση τους και την δημιουργία συσσωματωμάτων. Ουδετεροποιώντας το ηλεκτρικό φορτίο είναι δυνατό να δημιουργηθεί συσσωμάτωμα που καθιζάνει στο κάτω μέρος του περιέκτη τους.

Η μέθοδος της επίπλευσης χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την κροκίδωση σε λύματα, είναι μια απλή μέθοδος κατά την οποία τα φύκη μπορούν να επιπλέουν και έτσι απομακρύνονται εύκολα.

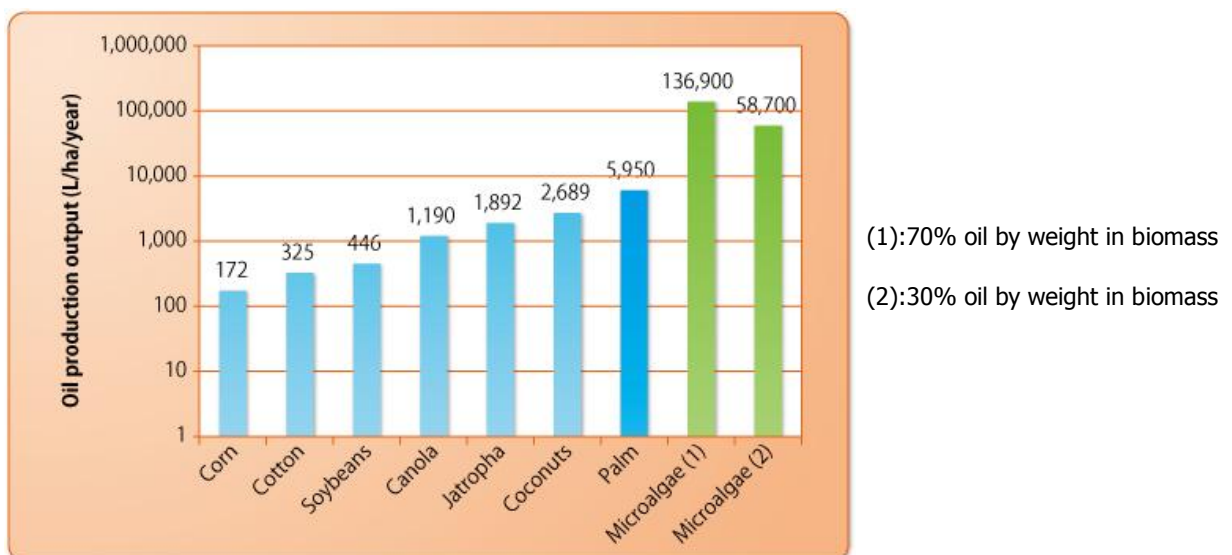
### **1.1.7 Υπεροχή της βίο-ενέργειας από φύκη**

Ως εναλλακτική πρώτη ύλη για την παραγωγή ενέργειας, τα μικροφύκη έχουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών καλλιεργειών:

1. Τα μικροφύκη έχουν απλές δομές, αλλά υψηλή φωτοσυνθετική απόδοση με χρόνο διπλασιασμού της ανάπτυξης τόσο μικρό όσο 24 ώρες. Επιπρόσθετα τα μικροφύκη μπορούν να αναπαράγονται καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Μερικά στοιχεία στο σχήμα 1.1 δείχνουν ότι τα μικροφύκη είναι η μόνη πηγή ενέργειας που έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα.

2. Η αφθονία των ειδών και η βιοποικιλότητα των μικροφυκών σε ένα ευρύ φάσμα κλίματος και γεωγραφικών περιοχών, καθιστούν τους γεωγραφικούς και εποχιακούς περιορισμούς πολύ λιγότερο ανησυχητικούς σε σύγκριση με άλλες λιπιδικές πρώτες ύλες.
3. Τα μικροφύκη μπορούν να καλλιεργηθούν σε λίμνες γλυκού νερού και αλμυρού νερού με ευτροφισμό, ωκεανούς, περιθωριακά εδάφη, ερήμους.
4. Τα μικροφύκη μπορούν να αφαιρέσουν αποτελεσματικά θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο, ο φώσφορος και βαρέα μέταλλα από τα λύματα.
5. Τα μικροφύκη έχουν τη δυνατότητα να απομονώνουν μεγάλες ποσότητες άνθρακα μέσω της φωτοσύνθεσης.
6. Η αξιοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με εγκαταστάσεις παραγωγής μικροφυκών μεγάλης κλίμακας μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που ευθύνονται για την υπερθέρμανση του πλανήτη.
7. Η παραγωγή και χρήση βιοντίζελ από μικροφύκη έχει σχεδόν μηδενικούς ρύπους όσον αφορά το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και το θείο (S).
8. Τα μικροφύκη μπορούν να παράγουν μια σειρά από πολύτιμα προϊόντα, όπως πρωτεΐνες, πολυσακχαρίτες, χρωστικές, ζωοτροφές, λιπάσματα, καλλυντικά, φαρμακευτικά προϊόντα κ.α.

Εν ολίγοις, τα μικροφύκη αποτελούν μια αναξιποίητη πηγή βιομάζας για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας.



**Σχήμα1.1:** Σύγκριση μικροφυκών με άλλες πηγές παραγωγής βιοκαυσίμων

## 1.2 Μαγνητισμός – Ηλεκτρομαγνητισμό

### 1.2.1 Μαγνήτες και ηλεκτρομαγνήτες

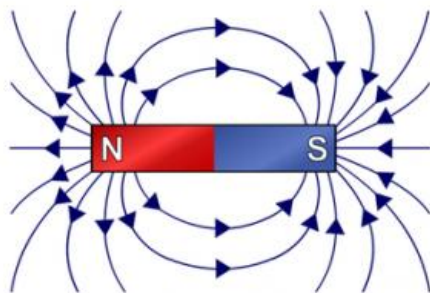
Ως μαγνήτης ορίζεται ένα αντικείμενο κατασκευασμένο από συγκεκριμένα υλικά, το οποίο μπορεί να δημιουργήσει μαγνητικό πεδίο στο χώρο γύρω του.

Οι μαγνήτες μπορεί να είναι φυσικοί ή τεχνητοί. Οι τεχνητοί διακρίνονται με τη σειρά τους σε μόνιμους και παροδικούς. Οι φυσικοί μαγνήτες είναι τεμάχια του ορυκτού μαγνητίτη. Αντίθετα, οι τεχνητοί είναι κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα, που αποκτούν μαγνητικές ιδιότητες εξαιτίας της επιβολής εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

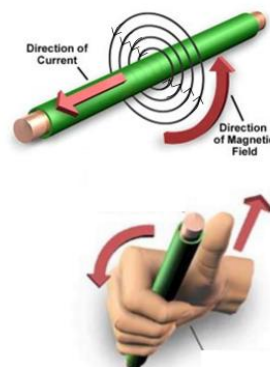
Στην περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο παράγεται από τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από πηνίο τότε οι μαγνήτες αυτοί ονομάζονται **ηλεκτρομαγνήτες**. Συνήθως στο εσωτερικό του πηνίου τοποθετείται σιδερένιος πυρήνας για να ενισχυθεί το πεδίο.

Οι μαγνήτες αποτελούνται από δυο πόλους - το βόρειο και το νότιο - μεταξύ των οποίων δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Αυτό το πεδίο προσδιορίζεται διανυσματικά στο χώρο, με βάση την ένταση και την κατεύθυνση του και απεικονίζεται μέσω των λεγόμενων μαγνητικών γραμμών (εικόνα. 1.8). Μαγνητική (δυναμική) γραμμή είναι η νοητή γραμμή σε κάθε σημείο της οποίας η ένταση του μαγνητικού πεδίου εφάπτεται σε αυτή. Οι μαγνητικές γραμμές είναι προσανατολισμένες και απεικονίζουν τη φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου, ξεκινώντας από το βόρειο και καταλήγοντας στο νότιο πόλο του μαγνήτη. Η πυκνότητα των μαγνητικών γραμμών είναι ανάλογη της έντασης του πεδίου.

Η φορά του μαγνητικού πεδίου ορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού όπως (εικ. 1.9).



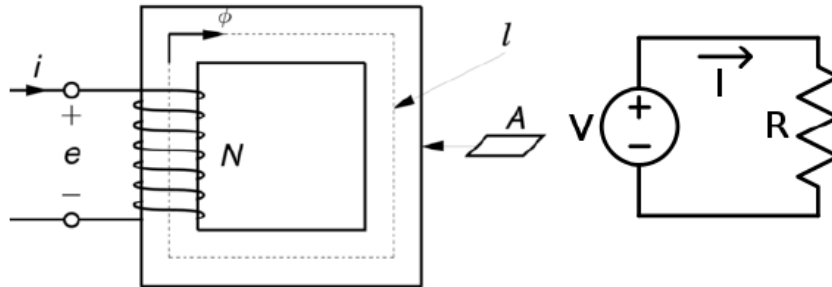
**Εικόνα 1.8:** Μαγνητικές γραμμές



**Εικόνα 1.9:** Κανόνας δεξιού χεριού

### 1.2.1.1 Μαγνητικά κυκλώματα

Ως μαγνητικό κύκλωμα ορίζεται ένα σύνολο σιδηρομαγνητικών υλικών που οδηγούν τη μαγνητική ροή σε κλειστές διαδρομές[17]. Για τον υπολογισμό των μαγνητικών μεγεθών γίνεται αντιστοίχιση με τα ηλεκτρικά κυκλώματα όπως φαίνεται στον πίνακα 1.2:



**Σχήμα 1.2:** Μαγνητικό κύκλωμα και παραλληλισμός του με αντίστοιχο ηλεκτρικό

Μαγνητική ποσότητα	Σύμβολο	Μονάδα	Ηλεκτρικό ανάλογο
Μαγνητική Ροή	$\Phi$	Wb	Ρεύμα
ΜΕΔ	$F_m$	At	Τάση
Μαγνητική Αντίσταση	$R_m$	At/Wb	Αντίσταση
Μαγνητική Διαπερατότητα	$\mu$	Wb/Atm	Συντελεστής Αγωγιμότητας
Μαγνητική Επαγωγή	B	T	Πυκνότητα Ρεύματος
Ένταση Μαγνητικού πεδίου	H	At/m	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

**Πίνακας 1.2:** Μαγνητικές ποσότητες και αντιστοίχιση με ηλεκτρικές.



## **Βασικές έννοιες**

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

**Μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) ( $F_m$ )** είναι το γινόμενο της έντασης του ρεύματος ( $I$ ) επί τον αριθμό των σπειρών ( $N$ ), καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα είναι η αιτία για τη δημιουργία μαγνητικής ροής γύρω από έναν αγωγό, η ΜΕΔ είναι η αιτία για τη δημιουργία μαγνητικής ροής σε ένα πηνίο.

Δίνεται από τον τύπο  $F_m = N \cdot I$  και η μονάδα μέτρησης είναι οι αμπεροστροφές (At).

**Μαγνητική Ροή ( $\Phi$ )** είναι το σύνολο των μαγνητικών γραμμών που περνούν μέσα από μια επιφάνεια  $S$  τοποθετημένη κάθετα προς αυτές.

Δίνεται από τον τύπο :  $\Phi = B \cdot S$  και η μονάδα μέτρησης είναι το *Weber* (W).

**Μαγνητική διαπερατότητα ( $\mu_0$ )** είναι μια σταθερά που μας καθορίζει πόσο εύκολα οι μαγνητικές γραμμές περνούν από κάποιο υλικό. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού συμβολίζεται με το  $\mu_0$ .

**Μαγνητική αντίσταση ( $R_m$ )** είναι η ιδιότητα ενός σώματος να προβάλλει αντίσταση στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου σ' αυτό. Είναι ανάλογη με το μήκος της διαδρομής των γραμμών  $\ell$  μέσα στο σώμα και αντιστρόφως ανάλογη με τη μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  του σώματος και του εμβαδού της διατομής  $S$ .

Δίνεται από τον τύπο  $R_m = \ell / \mu \cdot S$  και η μονάδα μέτρησης είναι (At/Wb).

**Ένταση του μαγνητικού πεδίου ( $H$ )** σε κάποιο σημείο ορίζεται η μαγνητεγερτική δύναμη ανά μονάδα μήκους της μαγνητικής γραμμής που περνά από αυτό το σημείο.

Δίνεται από τον τύπο:  $H=F_m/\ell$  και η μονάδα μέτρησης είναι η αμπεροστροφή ανά μέτρο (At/m).

Για κάθε σημείο στο εσωτερικό του πηνίου η ένταση έχει την ίδια τιμή.

**Μαγνητική επαγωγή ( $B$ ):** Όταν παράγεται ένα μαγνητικό πεδίο  $H$  (με τους τρόπους που περιγράψαμε παραπάνω) μέσα σε ένα μέσο, τότε η απόκριση αυτού είναι η μαγνητική του επαγωγή  $B$ . Κάθε μέσο έχει τη μαγνητική του επαγωγή  $B$ , όταν εκτεθεί σε πεδίο  $H$  και αυτά τα δύο αυτά μεγέθη ( $B, H$ ) συνδέονται μεταξύ τους με την ιδιότητα του υλικού, που λέγεται διαπερατότητα. Το κενό θεωρείται ότι είναι και αυτό μέσο, αφού για πεδίο έντασης  $H$  παράγει μαγνητική επαγωγή  $B$ .

Δίνεται από τον τύπο  $B=\mu.H$  και οι μονάδες μέτρησης είναι (T).

Η μαγνητική επαγωγή ή αλλιώς πυκνότητα μαγνητικής ροής εκφράζει πόσο ισχυρό είναι το μαγνητικό πεδίο σε ένα σημείο, έτσι, όσο πιο πυκνές είναι οι μαγνητικές γραμμές τόσο πιο ισχυρό είναι το πεδίο στο σημείο αυτό. Στο εσωτερικό του πηνίου ή μαγνητική επαγωγή είναι παντού ίδια.

### 1.2.1.2 Νόμος Biot – Savart

Ο νόμος Biot – Savart είναι ένας από τους θεμελιώδεις νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού και μας επιτρέπει να υπολογίζουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από έναν ρευματοφόρο αγωγό.

Πρόκειται για μία σχέση που έχει προκύψει από πειραματικά αποτελέσματα και όχι από θεωρητική ανάλυση. Στη μορφή του νόμου που παρατίθεται παρακάτω δίνεται η συνεισφορά στην ένταση του πεδίου  $\delta H$  που παράγεται από ένα στοιχειώδες μήκος του αγωγού.

Όπου  $i$  είναι το ρεύμα που διαρρέει ένα στοιχειώδες μήκος  $\delta l$  του αγωγού,  $r$  είναι η ακτινική απόσταση,  $\mu$  είναι το στοιχειώδες διάνυσμα κατά την ακτινική απόσταση και  $\delta H$  είναι η συμβολή στην ένταση του πεδίου στην απόσταση  $r$  εξαιτίας του στοιχειώδους ρεύματος  $i\delta l$ .

Επίσης ισχύει και ο παρακάτω τύπος:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

$d\mathbf{l}$ : αγωγός απειροστού μήκους

$\hat{\mathbf{r}}$  : το διάνυσμα από ένα στοιχείο του αγωγού απειροστού μήκους σε κάποιο σημείο

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

Για την εύρεση, λοιπόν, του ολικού μαγνητικού πεδίου αρκεί να ολοκληρωθεί η προηγούμενη σχέση σε όλα τα τμήματα  $d\mathbf{l}$  που διαρρέονται από ρεύμα:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Id\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^2}$$

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

$$B_x = \frac{\mu_0 N I}{2a}$$

$a$ : ακτίνα πηνίου

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

### 1.2.1.3 Εξισώσεις Maxwell

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

**Εξίσωση 1<sup>η</sup>** : Πρόκειται για το νόμο του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο, σύμφωνα με τον οποίο η ηλεκτρική ροή μέσα από μια κλειστή επιφάνεια είναι ανάλογη με το συνολικό φορτίο  $Q_{in}$  που περικλείει η επιφάνεια.

$$\Phi = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0}$$

Η διαφορική μορφή του νόμου του Gauss είναι:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0}$$

και η φυσική σημασία της παραπάνω μορφής είναι ότι συνδέει το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  σε κάποιο σημείο του χώρου με την κατανομή φορτίου, που εκφράζεται με την πυκνότητα  $\rho$ , στο ίδιο σημείο του χώρου. Εκφράζει δηλαδή, μια τοπική σχέση μεταξύ των δυο αυτών φυσικών ποσοτήτων. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι τα ηλεκτρικά φορτία είναι οι πηγές του ηλεκτρικού πεδίου και ότι η κατανομή και το μέγεθός τους ορίζουν το ηλεκτρικό πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου.

**Εξίσωση 2<sup>η</sup>** : Είναι ο νόμος του Gauss για το μαγνητικό πεδίο

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Η μαγνητική ροή που διέρχεται μέσα από μια κλειστή επιφάνεια είναι πάντοτε μηδέν. Και αυτό είναι συνέπεια του γεγονότος ότι οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι κλειστές (αφού δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα).

Η διαφορική μορφή θα είναι:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

**Εξίσωση 3<sup>η</sup>** : Είναι ο νόμος του Faraday-Henry ή νόμος της επαγωγής σύμφωνα με τον οποίο, ένα μαγνητικό πεδίο που μεταβάλλεται με τον χρόνο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο, τέτοιο ώστε η κυκλοφορία του (αλλιώς, η ηλεκτρεγερτική δύναμη) κατά μήκος ενός αυθαίρετου κλειστού δρόμου, να ισούται με τον

(αρνητικό) ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής μέσα από μια επιφάνεια που ορίζεται από τον δρόμο.

$$\oint_c \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\left(\int_s \vec{B} d\vec{S}\right)}{dt} = \int_s \left(-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) d\vec{S}$$

Σε διαφορική μορφή γράφεται

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Η 3<sup>η</sup> εξίσωση μας λέει ότι μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

**Εξίσωση 4<sup>η</sup> :** Πρόκειται για το νόμο Ampere-Maxwell. Ο νόμος του Ampere συσχετίζει ένα ηλεκτρικό ρεύμα με το μαγνητικό πεδίο που παράγει. Ο νόμος Ampere-Maxwell πηγαίνει ένα βήμα μακρύτερα και υποδεικνύει ότι στο μαγνητικό πεδίο συνεισφέρει επίσης και ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

$$\oint_c \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I_{in} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\left(\int_s \vec{E} d\vec{S}\right)}{dt}$$

Η διαφορική της μορφή:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Η 4<sup>η</sup> εξίσωση συσχετίζει το μαγνητικό πεδίο  $B$ , το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  και την πυκνότητα ρεύματος  $j$  στο ίδιο σημείο του χώρου. Ο δεύτερος όρος στην 4<sup>η</sup> εξίσωση είναι η συνεισφορά του Maxwell και αποτελεί το περίφημο ρεύμα μετατόπισης. Μας λέει ότι το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο με τη σειρά του (λόγω της 3<sup>ης</sup> εξίσωσης) δημιουργεί μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο κ.ο.κ.

Δηλαδή, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να «αυτοσυντηρηθεί» χωρίς να χρειάζεται την ύπαρξη της αρχικής πηγής του, του φορτίου και του ρεύματος.

Συμπερασματικά, από την 1<sup>η</sup> εξίσωση προκύπτει ότι η πηγή του ηλεκτρικού πεδίου είναι τα ηλεκτρικά φορτία. Η 2<sup>η</sup> εξίσωση δείχνει ότι δεν υπάρχουν ισοδύναμα μαγνητικά φορτία με τα ηλεκτρικά. Από την 3<sup>η</sup> εξίσωση φαίνεται ότι όταν ένα μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται χρονικά, τότε συνοδεύεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο έντασης  $E$  και η 4<sup>η</sup> εξίσωση είναι το συμπλήρωμα της δεύτερης. Δηλαδή ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο συνεπάγεται την ταυτόχρονη ύπαρξη μαγνητικού πεδίου.

### 1.2.2 Μαγνητισμός

Ο μαγνητισμός των υλικών οφείλεται στην κίνηση των ηλεκτρονίων τα οποία είναι ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια και γι' αυτό δημιουργούν μαγνητικά πεδία γύρω τους. Κάθε ηλεκτρόνιο έχει μαγνητική ροπή η οποία είναι το διανυσματικό μέγεθος της έντασης του μαγνητικού πεδίου λόγω της κίνησης του ηλεκτρονίου. Οφείλεται στην περιστροφή γύρω από τον πυρήνα και στην περιστροφή γύρω από τον άξονά του. Η συνισταμένη μαγνητική ροπή μπορεί να είναι μηδέν ή διάφορη του μηδενός. Από την ενεργειακή κατανομή των ηλεκτρονίων στα άτομα (Pauli) στο τροχιακό κάθε ενεργειακού επιπέδου υπάρχουν μέχρι 2 ηλεκτρόνια που περιστρέφονται με αντίθετη φορά γύρω από τον άξονά τους, δηλαδή έχουν αντίθετους κβαντικούς αριθμούς spin και άρα η μαγνητική τους ροπή είναι αντίθετη. Επομένως, όταν τα τροχιακά είναι πλήρη, η συνολική μαγνητική ροπή στο άτομο είναι μηδέν. Αν ο αριθμός των ηλεκτρονίων σε ένα άτομο είναι περιττός, τότε και πάλι η συνισταμένη των μαγνητικών ροπών είναι μηδέν, γιατί το μονήρες ηλεκτρόνιο είναι ηλεκτρόνιο σθένους και αλληλεπιδρά με ηλεκτρόνια σθένους άλλων ατόμων, σχηματίζοντας χημικούς δεσμούς. Υπάρχουν όμως και τα μεταβατικά στοιχεία τα οποία έχουν τα τροχιακά 3d μερικώς συμπληρωμένα και παράλληλα διαθέτουν ηλεκτρόνια και στην 4<sup>η</sup> στιβάδα, επομένως παρουσιάζουν μαγνητική ροπή [18].

Η απόκριση στην επιβολή μαγνητικού πεδίου  $H$  σε υλικό ονομάζεται μαγνητική επαγωγή  $B$ . Η σχέση που συνδέει το  $H$  και το  $B$  είναι η εξής:

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

όπου  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ( $=4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ ) και  $M$  η μαγνήτιση του μέσου. Ως μαγνήτιση ορίζεται το πεδίο ενός υλικού παρουσία εξωτερικού πεδίου και ισούται με τη μαγνητική ροπή  $m$  ανά μονάδα όγκου  $V$ :

$$M=m/V$$

Μαγνήτιση είναι η πυκνότητα των προσανατολισμένων μαγνητικών διπολικών ροπών στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και προκύπτει από την ηλεκτρονική δομή του στερεού. Εξαρτάται από τις επιμέρους μαγνητικές ροπές των ιόντων, ατόμων ή μορίων και από τον τρόπο που αυτές αλληλεπιδρούν. Επομένως είναι ιδιότητα του υλικού.

Η απόκριση των υλικών εξαρτάται από την ατομική τους δομή, την θερμοκρασία και το πεδίο. Με επιβολή μαγνητικού πεδίου οι μαγνητικές ροπές των ατόμων τείνουν να προσανατολιστούν παράλληλα με το πεδίο, αλλά οι θερμικές κινήσεις αντιτίθενται σε αυτή τη μεταβολή.

Για τον προσδιορισμό του βαθμού απόκρισης ενός υλικού σε μαγνητικό πεδίο εισάγεται ο όρος μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi$  που εκφράζεται από το νόμο Curie-Weiss [19]:

$$\chi=M/H$$

### **1.2.2.1 Ταξινόμηση μαγνητικών υλικών**

Ανάλογα με τη συμπεριφορά του υλικού στην επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, δηλαδή με βάση την επιδεκτικότητα που παρουσιάζουν [20], αυτά χωρίζονται σε έξι κατηγορίες: τα διαμαγνητικά υλικά (1), τα παραμαγνητικά υλικά (2), τα σιδηρομαγνητικά υλικά (3), τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά (4), τα σιδηριμαγνητικά υλικά (5) και τα υπερπαραμαγνητικά υλικά (6).

**Εικόνα 1.10:** Διάγραμμα του περιοδικού πίνακα όπου φαίνονται τα στοιχεία χρωματισμένα ανάλογα με το είδος το μαγνητισμού που παρουσιάζουν σε θερμοκρασία δωματίου

### 1. ΔΙΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα διαμαγνητικά υλικά αποτελούν υλικά των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αρνητική και μικρή, της τάξης  $\chi = -10^{-5}$ . Το γεγονός ότι η επιδεκτικότητα είναι αρνητική αποδίδεται στην αντίθεση της μαγνητικής τους απόκρισης στο εφαρμοζόμενο πεδίο, δηλαδή όταν μια διαμαγνητική ουσία τοποθετηθεί εντός ενός μαγνητικού πεδίου, τότε το διάνυσμα μαγνήτισης  $M$  εντός του υλικού είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση. Επίσης, μια ουσία είναι διαμαγνητική όταν τα άτομα που την αποτελούν έχουν συμπληρωμένες στιβάδες και υποστιβάδες. Αυτό σημαίνει ότι απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου, κανένα άτομο δεν έχει μόνιμη μαγνητική ροπή. Παραδείγματα αυτής της κατηγορίας αποτελούν οι ομοιοπολικοί κρύσταλλοι και πολλοί ιοντικοί κρύσταλλοι, αφού τα άτομα τους έχουν συμπληρωμένες υποστιβάδες. Επίσης ο χαλκός, ο άργυρος, ο χρυσός και οι υπεραγωγοί με  $\chi = -1$ .

### 2. ΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει υλικά των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι μικρή και θετική και κυμαίνεται από  $10^{-3}$  έως  $10^{-5}$ . Απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου, και λόγω των τυχαιών συγκρούσεων μεταξύ των μορίων, οι ροπές των μορίων έχουν τυχαιούς προσανατολισμούς. Παρουσία μαγνητικού πεδίου η



μαγνήτιση των παραμαγνητικών υλικών είναι ασθενής αλλά προσανατολισμένη παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο. Η μαγνήτιση  $M$  συνήθως μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτό εξηγείται με βάση το ότι στις υψηλότερες θερμοκρασίες, λαμβάνουν χώρα περισσότερες μοριακές συγκρούσεις, και η ευθυγράμμιση των μοριακών μαγνητικών ροπών με το πεδίο καταστρέφεται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το αλουμίνιο.

### **3. ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ**

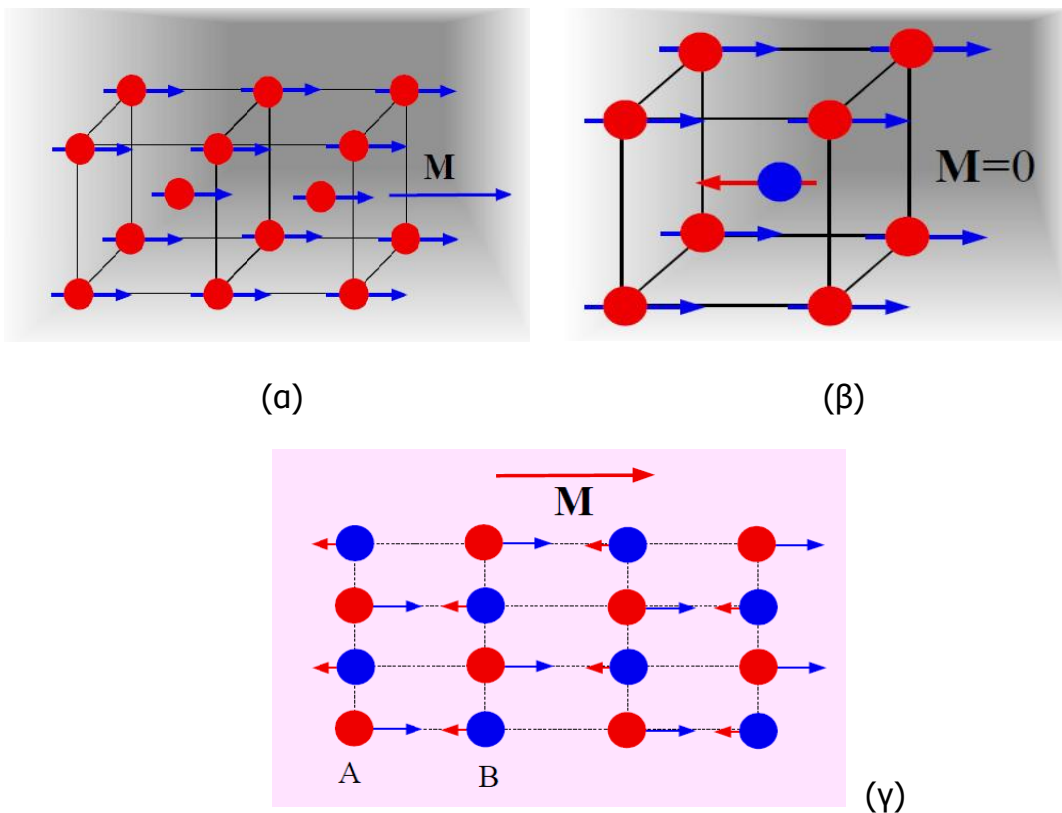
Η σημαντικότερη κατηγορία μαγνητικών υλικών είναι τα σιδηρομαγνητικά υλικά των οποίων η επιδεκτικότητα είναι θετική, πολύ μεγαλύτερη της μονάδας (τυπικά μπορεί να λάβει τιμές από 50 έως 10000) και εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση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

### **4. ΑΝΤΙΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ**

Τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από μικρή αλλά θετική μαγνητική επιδεκτικότητα. Σε αντίθεση με τα σιδηρομαγνητικά υλικά, δεν έχουν παραμένουσα μαγνήτιση απουσία μαγνητικού πεδίου. Όμως, εμφανίζουν μαγνητική τάξη με τέτοιο τρόπο ώστε οι μαγνητικές ροπές των ατόμων που βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις να έχουν αντίθετη φορά και να αλληλοαναιρούνται. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι, απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου, δεν υπάρχει μαγνήτιση. Η αντισιδηρομαγνητική συμπεριφορά των υλικών εμφανίζεται κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Neel  $T_N$ . Σε θερμοκρασίες πάνω από την  $T_N$ , τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά.

## 5. ΣΙΔΗΡΙΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα σιδηριμαγνητικά υλικά παρουσιάζουν κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie ( $T_C$ ), παρόμοια μαγνητική συμπεριφορά με τους σιδηρομαγνήτες. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της  $T_C$  τα σιδηριμαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Αντίθετα από ότι συμβαίνει στην περίπτωση των αντισιδηρομαγνητικών υλικών, οι μαγνητικές ροπές, μολονότι έχουν αντίθετη φορά, έχουν διαφορετικό μέτρο, και έτσι δεν αλληλοαναιρούνται. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι ότι ο κρύσταλλος είναι μαγνητισμένος ακόμα και απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι οι φερρίτες ( $Fe_3O_4$ ).



**Εικόνα 1.11:** Οι μαγνητικές ροπές σε: σιδηρομαγνήτες( $\alpha$ ), αντισιδηρομαγνήτες( $\beta$ ) και σιδηριμαγνήτες( $\gamma$ )

## 6. ΥΠΕΡΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

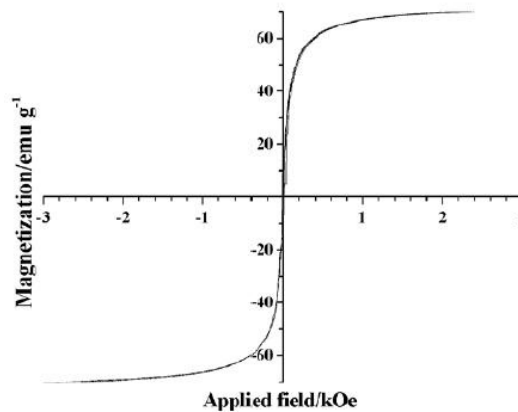
Σε ένα υλικό, ένα σύνολο ιδιοπεριστροφών με ίδια κατεύθυνση μαγνητικών ροπών που αντιδρούν με τον ίδιο τρόπο σε μαγνήτιση, καλείται τομέας. Οι τομείς χωρίζονται μεταξύ τους από τοιχώματα συγκεκριμένου πάχους και ενέργειας που είναι χαρακτηριστικά του κάθε υλικού. Αυτά τα τοιχώματα αποτελούν εμπόδιο στη

μαγνήτιση. Σε ένα μεγάλο σωματίδιο η δομή αποτελείται από πολλά τοιχώματα και άρα πολλούς τομείς. Όσο μειώνεται όμως το μέγεθος των σωματιδίων και τείνει προς μια κρίσιμη διάμετρο  $D_c$ , τα τοιχώματα από ενεργειακή άποψη είναι δυσμενή ως προς την ύπαρξη τους. Δομές που αποτελούνται από μόνο έναν τομέα καλούνται σωματίδια μονού τομέα. Τέτοια σωματίδια έχουν μεγάλο συνεκτικό πεδίο.

Ενδεικτικά, για τον σίδηρο (Fe) η κρίσιμη διάμετρος είναι 14nm για το  $Fe_3O_4$  128nm και για το  $\gamma-Fe_2O_3$  166nm.

Σε διαμέτρους ακόμα πιο μικρές από την κρίσιμη, οι θερμικές διακυμάνσεις επηρεάζουν τα spin και παρουσιάζουν υπερπαραμαγνητισμό. Συγκεκριμένα, όταν το μέγεθος του σωματιδίου γίνεται πολύ μικρό, το  $H_c$  τείνει να μηδενιστεί γιατί οι θερμικές διακυμάνσεις δεν επιτρέπουν τη σταθεροποίηση της μαγνήτισης.

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



**Σχήμα 1.3:** Υπερκαλυπτόμενη καμπύλη μαγνήτισης υπερπαραμαγνητικού υλικού σε χαμηλή θερμοκρασία

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

$$\tau = \tau_0 \exp(\Delta E / k_B T)$$

$\Delta E$ : ο ενεργειακός φραγμός στη μεταβολή της μαγνητικής ροπής

$k_B T$ : η θερμική ενέργεια

$\tau_0$ : 10-12s

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

Ανάλογα με το είδος της μαγνήτισης, μεταβάλλεται και ο χρόνος κατά τον οποίο υφίστανται οι υπερπαραμαγνητικές ιδιότητες [21].

### 1.2.2.2 Ιδιότητες των σιδηρομαγνητών

#### i. ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η σημαντικότερη ίσως ιδιότητα των σιδηρομαγνητών είναι η υψηλή τους μαγνητική διαπερατότητα. Η διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή σαν συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, όπως στα παραμαγνητικά υλικά. Αντιθέτως, για να περιγραφούν οι ιδιότητες κάποιου σιδηρομαγνητικού υλικού ως προς τις μαγνητικές του ιδιότητες θα πρέπει να μετρήσουμε την μαγνητική του επαγωγή  $B$  ως συνάρτηση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου  $H$  σε ένα συνεχές διάστημα τιμών του  $H$  (παραγωγή της καμπύλης του βρόχου υστέρησης).

Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών κυμαίνεται στο εύρος από 10 έως 100000. Οι υψηλότερες τιμές, απαντώνται σε ειδικά κράματα, όπως το permalloy και το supermalloy, τα οποία είναι κράματα σιδήρου-νικελίου.

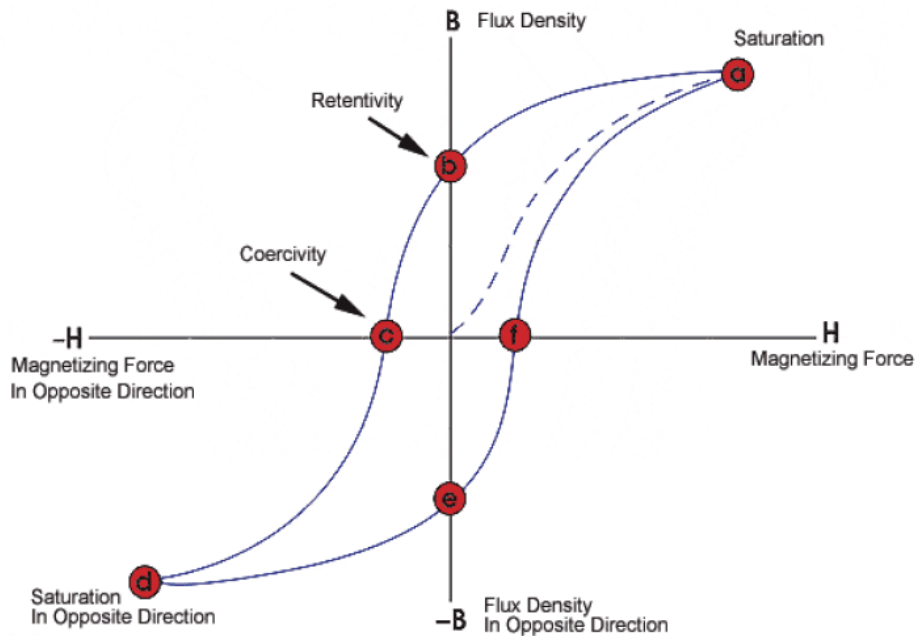
#### ii. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

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

#### iii. ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ

Οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν με την χάραξη του διαγράμματος της μαγνητικής επαγωγής  $B$  συναρτήσει του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου  $H$  που αποτελεί την καμπύλη του

βρόχου υστέρησης. Εναλλακτικά είναι δυνατή η χάραξη του αντίστοιχου διαγράμματος μαγνήτισης, από το οποίο όμως λαμβάνονται οι ίδιες πληροφορίες. Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης φαίνεται στο σχήμα 1.4. Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες μπορούν να καθορίσουν αν κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό είναι κατάλληλο για μια δεδομένη εφαρμογή ή όχι.



**Σχήμα 1.4 :** Καμπύλη βρόχου υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού

Ένα σιδηρομαγνητικό υλικό το οποίο δεν έχει ποτέ πριν μαγνητιστεί, ή που έχει απομαγνητιστεί πλήρως, ακολουθεί αρχικά την διακεκομμένη γραμμή του σχήματος 1.5 καθώς το εξωτερικό πεδίο αρχίζει να αυξάνεται. Είναι προφανές, ότι για ένα μεγάλο σχετικά εύρος τιμών του  $H$ , το  $B$  συνεχίζει διαρκώς να αυξάνεται. Φτάνοντας στο σημείο  $a$  περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου επηρεάζει ανεπαίσθητα την επαγωγή. Σε αυτό το σημείο λέμε ότι το υλικό έχει φτάσει τη μαγνήτιση κορεσμού. Στη συνέχεια, καθώς το  $H$  αρχίζει σταδιακά να ελαττώνεται η καμπύλη μετακινείται από το σημείο  $a$  στο  $b$ . Σε αυτό το σημείο, αν και το εξωτερικό πεδίο έχει μηδενιστεί, η πυκνότητα μαγνητικής ροής δεν είναι μηδέν. Το σημείο  $b$  παριστάνει την αντίσταση απομαγνήτισης (retentivity) του υλικού. Στη συνέχεια, καθώς το πεδίο αρχίζει να λαμβάνει αρνητικές τιμές, δηλαδή να αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται, και στο

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

#### iv. ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

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

$$M_0 = n \cdot M$$

Το  $M_0$  εξαρτάται μόνο από το υλικό και από τη μικροδομή του.

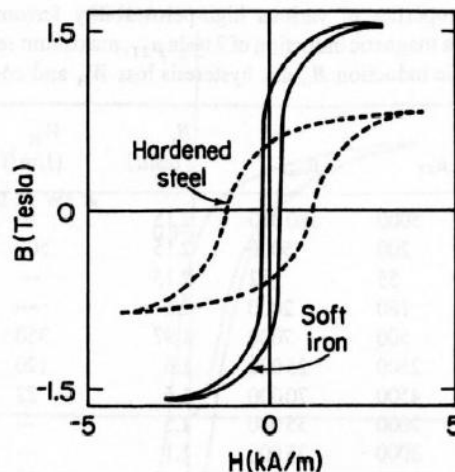
#### v. ΣΥΝΕΚΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

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

Με βάση το συνεκτικό πεδίο, μπορούμε να χωρίσουμε τα σιδηρομαγνητικά υλικά στα **σκληρά** και στα **μαλακά** μαγνητικά υλικά. Όπως είπαμε παραπάνω η ιδιότητα αυτή αλλάζει για το ίδιο υλικό με διαφορετική κατεργασία. Έχει παρατηρηθεί λοιπόν ότι υλικά από σίδηρο ή χάλυβα με μεγάλη σκληρότητα εμφανίζουν υψηλό συνεκτικό πεδίο και σχετικά χαμηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_r$  και

ονομάζονται σκληρά μαγνητικά υλικά. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα και για αυτό απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μεγάλων μαγνητικών πεδίων. Οι καμπύλες των βρόχων υστέρησης είναι ευρείες και σχεδόν ορθογώνιες και για τον απομαγνητισμό τους απαιτείται η εφαρμογή μεγάλων πεδίων. Λόγω των χαρακτηριστικών τους, τα σκληρά μαγνητικά πεδία είναι κατάλληλα ως μόνιμοι μαγνήτες σε πολλές εφαρμογές.

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



**Σχήμα 1.5:** Διάφορα του βρόγχου μεταξύ σκληρών και μαλακών μαγνητικών υλικών

## vi. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ CURIE

Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, η προστιθέμενη θερμική ενέργεια αυξάνει την κινητικότητα των μαγνητικών περιοχών. Αυτό διευκολύνει τις μαγνητικές περιοχές να ευθυγραμμιστούν αλλά τις αποτρέπει επίσης από το να παραμείνουν ευθυγραμμισμένες μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, σε υψηλές θερμοκρασίες,

η μαγνητική διαπερατότητα, η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο μειώνονται. Αν η θερμοκρασία υπερβεί την κρίσιμη θερμοκρασία Curie τότε παύει να παρατηρείται η σιδηρομαγνητική συμπεριφορά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία Curie εξαρτάται από το υλικό και μεταβάλλεται με προσθήκη κραμάτων.

### 1.2.2.3 Μαγνητική ανισοτροπία

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

$$E = K V \sin^2 \theta$$

$K$ : η ενέργεια της συνολικής μονοαξονικής ανισοτροπίας ανά μονάδα όγκου

$\theta$ : η γωνία μεταξύ της μαγνητικής ροπής και του εύκολου άξονα

$V$ : ο όγκος των σωματιδίων

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

### 1.2.2.4 Θεμελιώδη μαγνητικά μήκη

Οι μαγνητικές ιδιότητες των νανοϋλικών είναι διαφορετικές από αυτές που υπάρχουν σε μεγαλύτερη κλίμακα. Αυτό γιατί όταν το κρίσιμο μήκος στο οποίο πραγματοποιούνται κάποια φαινόμενα είναι παρόμοιο με το μέγεθος των νανοσωματιδίων, ξεπερνιέται ένα ενεργειακό φράγμα και έτσι υπάρχουν αλλαγές στη μαγνήτιση του υλικού. Για τα μαγνητικά υλικά, τα θεμελιώδη μαγνητικά μήκη είναι το μήκος κρυσταλλικής ανισοτροπίας  $I_k$ , το μήκος εφαρμοζόμενου πεδίου  $I_H$  και το μαγνητοστατικό μήκος  $I_s$ .



$$I_K = \sqrt{\frac{J}{K}}$$

$$I_H = \sqrt{\frac{2J}{HM_S}}$$

$$I_S = \sqrt{\frac{J}{2\pi M_S^2}}$$

$K$ : η σταθερά ανισοτροπίας του υλικού που οφείλεται στην κυρίαρχη ανισοτροπία  
 $J$ : η ανταλλαγή πληροφοριών εντός κόκκου του υλικού

Αν υπάρχουν παραπάνω από ένα είδος φραγμού, το μικρότερο χαρακτηριστικό μήκος είναι αυτό που καθορίζει τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού [22].

### 1.2.3 Μαγνητικά νανοσωματίδια

#### 1.2.3.1 Εισαγωγή στα νανοσωματίδια

Από την αρχή του 21ου αιώνα, παρατηρείται ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για υλικά με δομικές μονάδες στη νανοκλίμακα. Τα νανοϋλικά είναι ιδιαίτερα ελκυστικά λόγω των διαμορφούμενων φυσικών, ηλεκτρονικών, και μαγνητικών ιδιοτήτων ως συνέπεια της μείωσης του μεγέθους τους. Τα νανοϋλικά ήδη έχουν βρει εφαρμογές στους τομείς της ηλεκτρονικής, των βιοϊατρικών συσκευών, των ενεργειακών εφαρμογών, των στρατιωτικών χρήσεων και της διαχείρισης αποβλήτων. Ταξινομούνται σε συμπαγή υλικά και σε υλικά νανοδιασποράς. Ο πρώτος τύπος περιλαμβάνει τα λεγόμενα νανοδομημένα υλικά, δηλαδή ισότροπα υλικά στην μακροσκοπική σύνθεση και συνίσταται από την επαφή μονάδων (μεγέθους νανομέτρου) ως επαναλαμβανόμενων δομικών στοιχείων. Σε αντίθεση με τα νανοδομημένα υλικά, τα υλικά νανοδιασποράς αποτελούνται από ένα ομοιογενές μέσο διασποράς (κενό, αέριο, υγρό ή στερεό) και εγκλεισμένα σε αυτό το μέσο διασπαρμένα και απομονωμένα το ένα από το άλλο νανοσωματίδια. Η απόσταση μεταξύ των νανοσωματιδίων σε αυτές τις διασπορές μπορεί να ποικίλει από δεκάδες νανόμετρα έως κλάσματα ενός νανομέτρου.

Ως νανοσωματίδια ορίζονται τα στερεά που όλες τους οι διαστάσεις βρίσκονται στην νανοκλίμακα δηλαδή κάτω από τα 100 nm [23]. Συνήθως είναι σφαιρικά σωματίδια που έχουν διάμετρο 20 nm ή λιγότερο. Σε αυτές τις διαστάσεις, ένα μεγάλο μέρος των ατόμων του σωματιδίου είναι κοντά στην επιφάνεια γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μοναδικών ιδιοτήτων που δεν συναντώνται από το ίδιο υλικό στην συμπαγή (bulk) μορφή του. Υπολογίζεται ότι για νανοσωματίδια 3 nm, το 60% των ατόμων τους βρίσκονται στην επιφάνεια τους, έτσι με την αύξηση της ειδικής επιφάνειας τα άτομα της επιφάνειας του σωματιδίου αποτελούν ένα σημαντικό μέρος του συνόλου και καθορίζουν σε μεγάλο ποσοστό τις ιδιότητες των νανοσωματιδίων.

Στα νανοσωματίδια συναντώνται διαφορετικές ιδιότητες (οπτικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές, χημικές και μηχανικές) από το αντίστοιχο συμπαγές (bulk) υλικό διότι σε αυτές τις διαστάσεις αρχίζουν να επικρατούν κβαντικά φαινόμενα καθώς ο λόγος της επιφάνειας προς τον όγκο αυξάνεται.

### **1.2.3.2 Μαγνητικά νανοσωματίδια**

Σημαντική κατηγορία από άποψη ερευνητική αλλά και εμπορικού ενδιαφέροντος αποτελούν τα μαγνητικά νανοσωματίδια δηλαδή εκείνα στα οποία το ένα τουλάχιστον συστατικό είναι μέταλλο με μαγνητικές ιδιότητες όπως Fe, Co και Ni. Τα μεταβατικά αυτά στοιχεία παρουσιάζουν μία μεγάλη ποικιλία οξειδίων και κραμάτων με άλλα μέταλλα. Συγκεκριμένα, τα μαγνητικά νανοσωματίδια βρίσκουν αυξανόμενη χρήση στη βιο-ιατρική και σε βιο-τεχνολογικές εφαρμογές, ειδικά ως σωματίδια φορείς για τη μεταφορά βιοϋλικών όπως πρωτεΐνες, ένζυμα, νουκλεϊνικά οξέα και ολόκληρα κύτταρα. Τα μαγνητικά νανοσωματίδια προσφέρουν ελκυστικές δυνατότητες διότι έχουν ελεγχόμενα μεγέθη τα οποία κυμαίνονται από μερικά έως δεκάδες νανόμετρα, τα οποία είναι συγκρίσιμα με εκείνα των κυττάρων (10-100 μm), των ιών (20-450 nm), των πρωτεϊνών (5-50 nm) ή των γονιδίων (πλάτος 2 nm και μήκος 10-100 nm) [24].

Υπό την επίδραση ενός εξωτερικού ομογενούς μαγνητικού πεδίου τα σωματίδια περιστρέφονται, για να κινηθούν θα πρέπει να εφαρμοστεί ένα ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο. Η μαγνητική δύναμη που ενεργεί πάνω στα σωματίδια είναι

ανάλογη της μαγνήτισης του σωματιδίου, της πυκνότητας της μαγνητικής ροής και της κλίσης του μαγνητικού πεδίου.

Τα μαγνητικά νανοσωματίδια παρέχουν τη δυνατότητα επικάλυψης από βιολογικά μόρια, καθιστώντας έτσι, δυνατή την αλληλεπίδραση και την προσκόλληση σε κάποια βιολογική οντότητα. Επίσης, επειδή υπακούν στο νόμο του Coulomb, μπορούν να οδηγηθούν από εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο (εάν τα σωματίδια είναι σιδηρομαγνητικά ή υπερπαραμαγνητικά) το οποίο μπορεί να τα οδηγήσει στα όργανα του στόχου για μεταφορά γονιδίων [25] ή μεταφορά φαρμάκου [26]. Αυτή η “δράση από απόσταση” συνδυασμένη με την εγγενή διαπερατότητα των μαγνητικών πεδίων σε βιολογικούς ιστούς, ανοίγει πολλές εφαρμογές που συνεπάγονται τη μεταφορά ή και την ακινητοποίηση των μαγνητικών νανοσωματιδίων. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να καταστούν ικανά για να παραδώσουν ένα σύμπλοκο-φάρμακο, σε μια στοχευμένη περιοχή του σώματος, ή να ακινητοποιηθούν βιολογικά κύτταρα σε συγκεκριμένες επιθυμητές διατάξεις πάνω σε μαγνητικές επιφάνειες, ανάλογα με το μαγνητικό πεδίο που θα εφαρμοστεί. Επιπρόσθετα, τα μαγνητικά νανοσωματίδια μπορούν να κατασκευαστούν ώστε να ανταποκρίνονται συντονισμένα σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, με αποτελέσματα να σχετίζονται με τη μεταφορά ενέργειας από μαγνητικό πεδίο στο νανοσωματίδιο [27], ιδιότητα η οποία καθιστά δυνατή την καταστροφή καρκινικών κυττάρων χάρη στη μαγνητικά επαγόμενη υπερθερμία. Επομένως, με τη χρήση αντισωμάτων ή μαγνητικού πεδίου, τα μαγνητικά νανοσωματίδια προσδένονται στα καρκινικά κύτταρα και με την εφαρμογή εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου αυξάνεται η θερμοκρασία των καρκινικών κυττάρων στους 50°C περίπου, με αποτέλεσμα αυτά να καταστρέφονται, ενώ τα υγιή κύτταρα να μην επηρεάζονται. Τέλος, με κατάλληλη επεξεργασία χορήγησής τους, τα νανοσωματίδια μπορούν να βελτιώσουν τα αποτελέσματα της μαγνητικής τομογραφίας όσον αφορά την αντίθεση στην εικόνα εξόδου, καθώς είναι δυνατή η εκμετάλλευση της μαγνητικής ροπής τους.

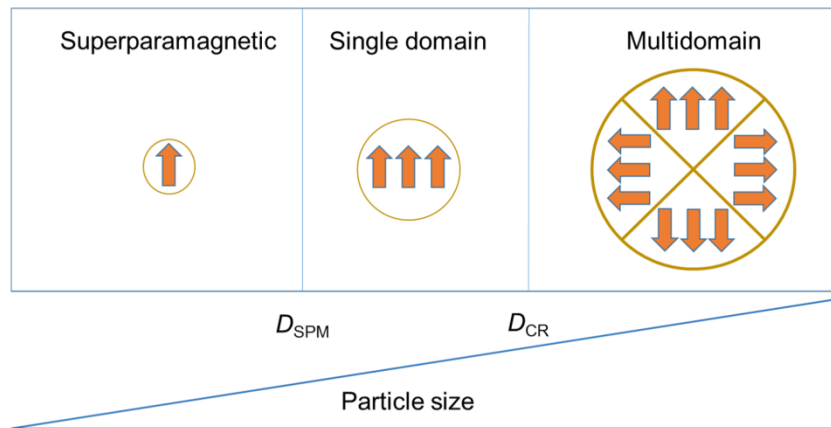
Οι βασικές παράμετροι που κάνουν τα μαγνητικά νανοσωματίδια ευρέως χρησιμοποιούμενα στη βιοϊατρική και τη βιοτεχνολογία (κυρίως τα νανοσωματίδια “νέας γενιάς”) είναι το μικρό μέγεθος τους, το ότι είναι βιοδιασπώμενα, η συμβατότητα τους με τον εκάστοτε ζωντανό οργανισμό (μη τοξικά), το ότι

μπορούν να συνδυάζουν διάφορα χαρακτηριστικά, όπως ευαισθησία στο pH και στη θερμοκρασία καθώς και η ικανότητά τους να προσανατολίζονται εύκολα χρησιμοποιώντας εξωτερικά μαγνητικά πεδία χάρη στην υπερπαραμαγνητική συμπεριφορά τους. Αυτό επιτρέπει στα σωματίδια να ενεργοποιούνται με μαγνητικό τρόπο μέσω εξωτερικών μαγνητικών πεδίων και μετά το πέρας της επίδρασης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου να μην παρουσιάζεται καμία μαγνητική ροπή, αποφεύγοντας έτσι τα ανεπιθύμητα μειονεκτήματα που προκύπτουν από την συσσώματωση.

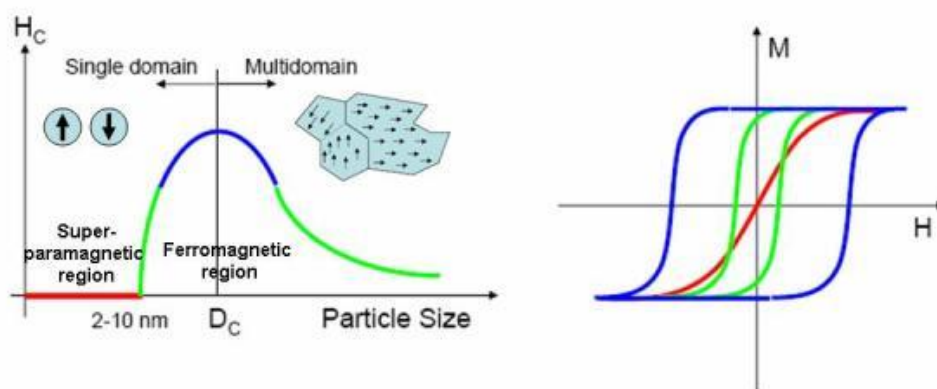
### 1.2.3.3 Μέγεθος μαγνητικών νανοσωματιδίων

Στα μαγνητικά νανοσωματίδια μία ιδιότητα με μεγάλο ενδιαφέρον είναι το συνεκτικό πεδίο. Καθώς το μέγεθος των νανοσωματιδίων μειώνεται, το συνεκτικό πεδίο τυπικά αυξάνεται, περνάει από ένα μέγιστο και έπειτα τείνει στο μηδέν. Ως αποτέλεσμα μπορούμε να τα ταξινομήσουμε ανάλογα με το μέγεθος τους και κατά συνέπεια με τις ιδιότητες τους σε τρεις κατηγορίες:

1. Multidomain: Η συγκεκριμένη κατηγορία είναι εκείνη με το μεγαλύτερο μέγεθος όπου η μαγνήτιση αλλάζει μέσω της κίνησης των τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών. Για κάποια υλικά η συνεκτικότητα πειραματικά έχει βρεθεί να ακολουθεί κατά προσέγγιση, τη σχέση  $H_{ci} = a + b/D$  όπου  $a$  και  $b$  σταθερές.
2. Single domain: Σε αυτή την κατηγορία τα σωματίδια βρίσκονται κάτω από μια κρίσιμη διάμετρο  $D_c$  και η συνεκτικότητα φτάνει στη μέγιστη τιμή της. Η μαγνήτιση αλλάζει με περιστροφή των spin και πιο συγκεκριμένα καθώς το μέγεθος του σωματιδίου μειώνεται κάτω από τη  $D_c$  το συνεκτικό πεδίο μειώνεται λόγω θερμικών φαινομένων σύμφωνα με τη σχέση  $H_{ci} = g - h/D \cdot 3/2$  όπου  $g$  και  $h$  σταθερές.
3. Υπερπαραμαγνητικά (Superparamagnetic): Τέλος σε αυτή την κατηγορία τα σωματίδια βρίσκονται κάτω από μια κρίσιμη διάμετρο  $D_{spm}$  όπου η επιδεκτικότητα μηδενίζεται λόγω ισχυρών θερμικών φαινομένων με αποτέλεσμα να απομαγνητίζονται.



**Εικόνα 1.12:** Τα μεγέθη των μαγνητικών νανοσωματιδίων



**Σχήμα 1.6:** Μέγεθος νανοσωματιδίων και μαγνητικές ιδιότητες

#### 1.2.3.4 Σύνθεση μαγνητικών νανοσωματιδίων

Διάφορες φυσικές και χημικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την σύνθεση νανοσωματιδίων. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η εξάχνωση μετάλλων, η άλεση σε σφαιρόμυλο και η ηλεκτραπόθεση, που αποδίδουν νανοσωματίδια υψηλής καθαρότητας και εφαρμόζονται ήδη στην παραγωγή βιομηχανικής κλίμακας. Τα μειονεκτήματα των φυσικών μεθόδων είναι ο μέτριος έλεγχος του μεγέθους και η αδυναμία σύνθεσης μονοδιασπαρμένων νανοσωματιδίων.

Τα νανοσωματίδια μπορούν να παραχθούν βάσει δυο προσεγγίσεων της “top-down” και της “bottom-up”.

Στην “bottom-up” προσέγγιση τα νανοσωματίδια δημιουργούνται άτομο-άτομο. Διάφορες στρατηγικές είναι δυνατές να παραγάγουν τέτοια υλικά, κυρίως χημική σύνθεση, αυτό-οργάνωση, και τοποθέτηση μεμονωμένων νανοσωματιδίων σε

μήτρες. Οι χημικές μέθοδοι βασίζονται κυρίως στην χημεία κολλοειδών συστημάτων και οργανομεταλλικών ενώσεων. Η αξιοποίηση τους τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην σύνθεση μεγάλη ποικιλίας μονοδιεσπαρμένων νανοσωματιδίων διαφόρων μεγεθών, σχημάτων και διαμορφώσεων. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι η συγκαταβύθιση αλάτων, η αναγωγή ιόντων και η αποσύνθεση οργανομεταλλικών ενώσεων. Το μέσο αντίδρασης μπορεί να είναι υδατικό ή οργανικό διάλυμα σε μία φάση, μικρογαλακτώματα δύο φάσεων ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις αντιδράσεων σε αερολύματα.

Στην "top-down" προσέγγιση, μια μεγάλων διαστάσεων δομή μειώνεται βαθμιαία έως ότου η δομική μονάδα βρεθεί στην νανοκλίμακα. Σε αυτού του είδους την προσέγγιση, τα νανοσωματίδια προκύπτουν από τον διαδοχικό τεμαχισμό υλικών μεγάλων διαστάσεων προς μικρότερες σταθερές δομές. Οι τεχνικές στερεάς φάσης περιλαμβάνουν κυρίως μεθόδους μηχανικής άλεσης και χημικο-μηχανικής σύνθεσης.

Ωστόσο, οι περισσότερες από τις μεθόδους που αναφέρονται έχουν κυρίως ερευνητικό χαρακτήρα και σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε βιομηχανική κλίμακα παρά μόνο σε εφαρμογές υψηλής προστιθέμενης αξίας. Σε αυτό το γεγονός συμβάλλει το μεγάλο κόστος πρώτων υλών (αντιδραστηρίων), το λειτουργικό κόστος (υψηλές θερμοκρασίες) και οι ειδικές συνθήκες που συχνά απαιτούνται. Σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη ποσότητα υλικού χωρίς να είναι απαραίτητη μεγάλη ακρίβεια στα ποιοτικά χαρακτηριστικά (κατάλυση) συνήθως προτιμώνται μέθοδοι υψηλής απόδοσης που βασίζονται σε υπάρχουσες τεχνολογίες και διαθέσιμες πρώτες ύλες.

### **1.2.3.5 Υλικά μαγνητικού πυρήνα**

Τα πιο γνωστά μαγνητικά νανοσωματίδια αποτελούνται από καθαρό σίδηρο Fe, κοβάλτιο Co, νικέλιο Ni, μέταλλα σπάνιων γαιών, μαγνητικά κράματα (κράματα Fe–Co, Fe–Ni, Fe–Pt, Co–Pt) και μαγνητικά οξειδία. Τα μαγνητικά οξειδία αποτελούνται από οξειδία σιδήρου (FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), οξειδία κοβαλτίου (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) και οξειδία νικελίου (NiO).

Πολλά από αυτά τα υλικά, όπως το κοβάλτιο και το χρώμιο, έχουν υψηλή τοξικότητα και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βιοϊατρικοί παράγοντες in vivo

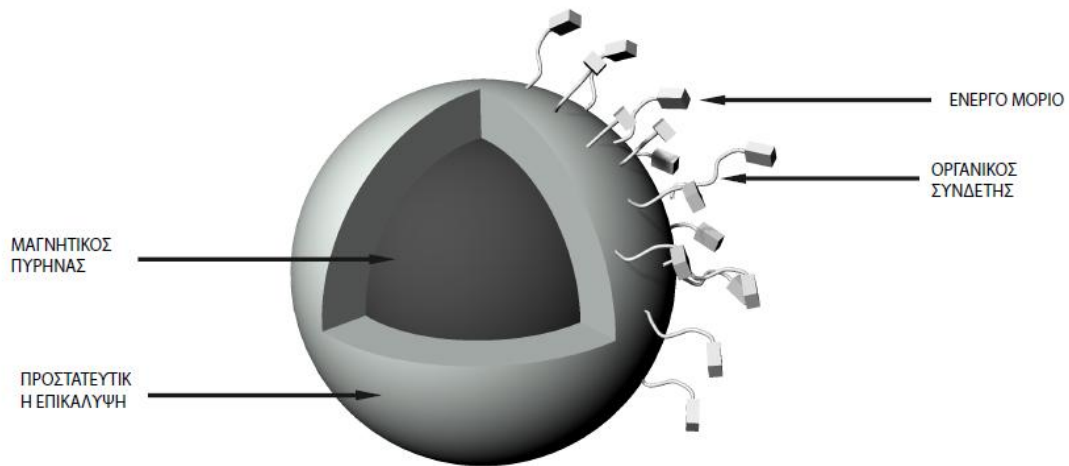
χωρίς μία μη-τοξική, προστατευτική επικάλυψη υψηλής μηχανικής αντοχής. Ωστόσο, υλικά με βάση το οξείδιο του σιδήρου όπως ο μαγνητίτης και ο μαγκεμίτης, είναι σχετικά ασφαλή και χρησιμοποιούνται σε αρκετές βιοϊατρικές εφαρμογές.

Ο μαγνητίτης ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), είναι ένα από τα τρία σημαντικότερα οξείδια του σιδήρου μαζί με τον αιματίτη ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) και τον βουσίτη ( $\text{FeO}$ ), ανήκει στη σημαντική κατηγορία των κεραμικών οξειδίων που ονομάζονται φερρίτες και εμφανίζει τις εντονότερες μαγνητικές ιδιότητες από οποιοδήποτε άλλο οξείδιο του σιδήρου. Ο μαγνητίτης αποτελεί ένα από τα κυριότερα μεταλλεύματα του σιδήρου. Η σημαντικότερη ιδιότητα του μαγνητίτη είναι ότι διαθέτει ιόντα σιδήρου σε δισθενή και τρισθενή οξειδωτική βαθμίδα με αποτέλεσμα να μπορεί να λειτουργήσει και ως οξειδωτικό και ως αναγωγικό μέσο. Το ορυκτό αυτό είναι μέλος της ομάδας των σπινελίων  $\text{AB}_2\text{O}_4$  (  $A$ = δισθενές άτομο και  $B$ = τρισθενές άτομο) και περιέχει περίπου 72,4% σίδηρο ( $\text{Fe}$ ) και 27,6% οξυγόνο ( $\text{O}_2$ ). Εμφανίζει μεταλλική λάμψη, σκληρότητα 5,5 (Mosh) και πυκνότητα  $5,2\text{g/cm}^3$ .

Ο μαγνητίτης κρυσταλλώνεται σε ολοεδρία κατά το κυβικό σύστημα, έχει χρώμα σιδηρόμαυρο έως μαύρο. Βρίσκεται σε κοκκώδη και φλοιώδη συσσωματώματα σε μορφή κόκκων με το όνομα «μαγνητίτης άμμος».

Τα σωματίδια υπερπαραμαγνητικού οξειδίου του σιδήρου ταξινομούνται γενικά σε σχέση με το μέγεθός τους σε δύο κατηγορίες:

- α) Σε νανοσωματίδια υπερπαραμαγνητικού οξειδίου του σιδήρου (SPIO), που εμφανίζουν υδροδυναμικές διαμέτρους μεγαλύτερες από 30 nm.
- β) Σε υπερβολικά μικρά νανοσωματίδια υπερπαραμαγνητικού οξειδίου του σιδήρου (USPIO) με υδροδυναμικές διαμέτρους μικρότερες από 30 nm.



**Εικόνα 1.13:** Τυπικός σχεδιασμός ενός μαγνητικού νανοσωματιδίου

### 1.2.3.6 Δυνάμεις στα μαγνητικά νανοσωματίδια

Για την οδήγηση των μαγνητικών νανοσωματιδίων το μαγνητικό πεδίο που απαιτείται, πρέπει να πληροί ορισμένες προδιαγραφές. Το πεδίο δεν πρέπει να είναι ομοιόμορφο γιατί δημιουργεί μεν μια ροπή, αλλά δεν είναι ικανό να προκαλέσει κίνηση. Επομένως, απαιτείται βάθμωση του πεδίου.

Η μαγνητική δύναμη που δρα σε ένα σημείο του πεδίου είναι :

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

και αποδίδει γεωμετρική διαφύση στη διεύθυνση του  $m$ .

Δηλαδή  $m=(m_x, m_y, m_z)$  και άρα  $m \nabla = \frac{\partial m_x}{\partial x} + \frac{\partial m_y}{\partial y} + \frac{\partial m_z}{\partial z}$ .

Όταν το μαγνητικό νανοσωματίδιο είναι διαλυμένο σε ασθενές διαμαγνητικό μέσο όπως το νερό και το αίμα, η μαγνητική ροπή είναι  $m=V_m M$  (όπου  $V_m$  ο όγκος του σωματιδίου και  $M$  η ογκομετρική μαγνήτιση του, η οποία ισούται με  $M=\chi H$ ,  $\chi=\chi_m - \chi_w/b$  η ενεργός επιδεκτικότητα του σωματιδίου σε σχέση με το νερό ή το αίμα).

Όταν τα νανοσωματίδια είναι διαλυμένα στο νερό, η συνολική ανταπόκριση του συστήματος μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση  $B=\mu_0 H$  και άρα:

$$\vec{F}_m = \frac{V_m}{\mu_0} \Delta \chi (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B}$$

Αν το ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι χρονικά μεταβαλλόμενο εφαρμόζεται η εξίσωση του Maxwell και προκύπτει ότι:



$$\vec{F}_m = V_m \Delta \chi \nabla \left( \frac{B^2}{2\mu_0} \right)$$

$$\vec{F}_m = V_m \Delta \chi \nabla \left( \frac{1}{2} \vec{B} \vec{H} \right)$$

όπου η μαγνητική δύναμη σχετίζεται με το διαφορισμό της πυκνότητας ενέργειας του μαγνητοστατικού πεδίου, . Αν  $\Delta \chi > 0$ , η μαγνητική δύναμη θα δράσει προς την κατεύθυνση της πιο έντονης αύξησης του βαθμωτού πεδίου πυκνότητας ενέργειας. Αυτή, λοιπόν, είναι η μαγνητική δύναμη που απαιτείται να εφαρμοστεί σε ένα σωματίδιο συγκεκριμένου όγκου και συγκεκριμένης μαγνήτισης και μαγνητικής επιδεκτικότητας, προκειμένου αυτό να τεθεί σε κίνηση. Σε αυτή την εφαρμογή βασίζονται και οι βιοϊατρικές εφαρμογές [28,29].

## 1.3 Ηλεκτροδιάτρηση- Ηλεκτροπόρωση

### 1.3.1 Γενικά

Η ηλεκτροπόρωση είναι μια τεχνική κατά την οποία ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται σε ζωντανά κύτταρα, για μια σύντομη χρονική περίοδο, παλμικά, προκειμένου να αυξηθεί η διαπερατότητα της κυτταρικής τους μεμβράνης, επιτρέποντας έτσι την εισαγωγή χημικών ουσιών, φαρμάκων ή DNA στο κύτταρο. Η ηλεκτροπόρωση ως μέθοδος γονιδιακής μεταφοράς έχει έναν αριθμό πλεονεκτημάτων έναντι των συμβατικών μεθόδων κυτταρικής διαπερατότητας. Είναι μια μη επεμβατική, μη χημική μέθοδος και δεν μεταβάλλει τη δομή ή τη λειτουργία των κυττάρων-στόχων. Αυτή η μέθοδος είναι γρήγορη και εύκολη στην εκτέλεση και σε αντίθεση με άλλες χημικές ή βιολογικές μεθόδους είναι σχετικά μη τοξική. Η τεχνική ηλεκτροδιάτρησης μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα κυτταρικών τύπων επειδή είναι φυσική μέθοδος.

Το φαινόμενο της ηλεκτροδιάτρησης μπορεί να περιγραφεί ως μια δραματική αύξηση της διαπερατότητας της μεμβράνης που προκαλείται από εξωτερικά εφαρμοζόμενους βραχείς και έντονους ηλεκτρικούς παλμούς. Υπάρχουν διάφορα θεωρητικά μοντέλα για να περιγράψουν την ηλεκτροδιάτρηση, από αυτά, το μοντέλο υδατικών πόρων είναι το ευρύτερα αποδεκτό. Σύμφωνα με αυτό το

μοντέλο, όταν εκτίθεται το κύτταρο σε εξωτερικούς ηλεκτρικούς παλμούς, στη λιπιδική διπλοστιβάδα της κυτταρικής μεμβράνης του σχηματίζονται υδρόφιλοι πόροι. Στην κυτταρική μεμβράνη, οι υδρόφοβοι πόροι σχηματίζονται από αυθόρμητες θερμικές διακυμάνσεις των μεμβρανικών λιπιδίων. Σε ένα κύτταρο εκτεθειμένο σε ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, η παρουσία ενός επαγόμενου διαμεμβρανικού δυναμικού παρέχει την ελεύθερη ενέργεια που είναι απαραίτητη για δομικές αναδιατάξεις των μεμβρανικών φωσφολιπιδίων και έτσι επιτρέπει τον σχηματισμό υδρόφιλου πόρου. Οι υδρόφιλοι πόροι σχηματίζονται μόνο σε ένα μικρό ποσοστό της μεμβράνης που εκτίθεται σε ηλεκτρικό πεδίο.

Η θεωρητική περιγραφή του διαμεμβρανικού δυναμικού που επάγεται σε ένα σφαιρικό κύτταρο που εκτίθεται σε ηλεκτρικό πεδίο είναι γνωστή ως εξίσωση του Schwan. Το επαγόμενο διαμεμβρανικό δυναμικό για ένα σφαιρικό κύτταρο μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$U_{π} = -1.5 r E \cos \varphi , \text{ όπου}$$

$r$ : είναι η ακτίνα του κυττάρου

$E$ : είναι η ισχύς του εφαρμοσμένου ηλεκτρικού πεδίου

$\varphi$ : είναι η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του ηλεκτρικού πεδίου και του επιλεγμένου σημείου επί της κυτταρικής επιφάνειας

Το επαγόμενο διαμεμβρανικό δυναμικό και συνεπώς η μέγιστη ηλεκτροδιάτρηση εμφανίζονται στους πόλους του κυττάρου που είναι εκτεθειμένοι στο ηλεκτρικό πεδίο κάθετα στα ηλεκτρόδια.

Η διαδικασία της ηλεκτροπόρωσης περιλαμβάνει πολλές μεταβλητές. Αρχικά, μπορεί να ελεγχθεί από την ισχύ του πεδίου και το μήκος των παλμών. Η ισχύς πεδίου είναι η μετρούμενη τάση που εφαρμόζεται στο διάκενο των ηλεκτροδίων και είναι εκείνη που απαιτείται για την πρόκληση βλάβης της μεμβράνης, η οποία μπορεί να ρυθμιστεί μεταβάλλοντας την εφαρμοζόμενη τάση ή μεταβάλλοντας την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων (εκφράζεται σε  $kV/cm$ ). Το μήκος παλμού, είναι η διάρκεια του χρόνου που το δείγμα εκτίθεται στο ηλεκτρικό πεδίο και σχετίζεται με το μέγεθος και τη διάρκεια που οι πόροι θα παραμείνουν ανοιχτοί. Σημαντικό ρόλο παίζει και το σχήμα του παλμού. Το σχήμα των κυμάτων μπορεί να είναι δύο μορφών, είτε εκθετικά είτε τετραγωνικά κύματα, τα οποία παράγονται

με μερική ή πλήρη εκφόρτιση ενός πυκνωτή. Τα εκθετικά κύματα αποσύνθεσης χρησιμοποιούνται για ηλεκτροδιάτρηση κυττάρων θηλαστικών και βακτηριδίων. Παρέχουν υψηλή απόδοση μετασχηματισμού, αλλά μειώνουν τη βιωσιμότητα των κυττάρων (~ 50% κυτταρικό θάνατο). Ο παλμός τετραγωνικού κύματος παρέχει υψηλή αποτελεσματικότητα σε κύτταρα θηλαστικών και χρησιμοποιείται ευρέως για εφαρμογές *in vivo* και *in ovo*. Το τετραγωνικό κύμα παράγει έναν πιο ήπιο παλμό δόσεων και συνήθως δεν είναι τόσο αποτελεσματικός για βακτηριακούς μετασχηματισμούς όπως το εκθετικό σύστημα αποσύνθεσης.

Η ηλεκτροδιάτρηση μπορεί να είναι διαδικασία είτε αντιστρέψιμη είτε μη αναστρέψιμη, ανάλογα με τις παραμέτρους των ηλεκτρικών παλμών. Η επαγόμενη διαμεμβρανική τάση που επιβάλλεται από το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή για να ενεργοποιήσει το σχηματισμό παροδικών πόρων στην κυτταρική μεμβράνη. Τα όρια του δυναμικού που πρέπει να επιτευχθούν στη μεμβράνη είναι μεταξύ  $0.2V-1V$ . Για την αναστρεψιμότητα της ηλεκτροδιάτρησης, το δυναμικό της μεμβράνης πρέπει να διατηρείται κάτω από αυτή την κρίσιμη τιμή. Στις παραπάνω συνθήκες, η κυτταρική μεμβράνη ανακτάται μετά από την εφαρμογή ηλεκτρικού παλμού. Αντίθετα, όταν ξεπεραστεί η κρίσιμη τιμή, λαμβάνει χώρα μη αναστρέψιμη ηλεκτροδιάτρηση, με αποτέλεσμα την αποσύνθεση της κυτταρικής μεμβράνης και την απώλεια της κυτταρικής βιωσιμότητας. Η ηλεκτροδιάτρηση είναι μια χρήσιμη τεχνική στη βιοτεχνολογία και την ιατρική για την εισαγωγή διαφορετικών μορίων στα κύτταρα, την ηλεκτροσύνθεση ή την αποστείρωση με νερό και τη διατήρηση των τροφίμων [30].

### **1.3.2 Ηλεκτροπόρωση σε κύτταρα άλγης**

Η εισαγωγή μαγνητικών νανοσωματιδίων σε κύτταρα άλγης μέσω της μεθόδου της ηλεκτροπόρωσης αξιοποιεί την σχετικά ασθενή φύση των υδρόφοβων /υδρόφιλων αλληλεπιδράσεων της διπλής στιβάδας φωσφολιπιδίου και την ικανότητά της να επανέλθει αυθόρμητα μετά από διαταραχή. Έτσι, ένα γρήγορο σοκ τάσης μπορεί να διακόψει προσωρινά τις περιοχές της μεμβράνης, επιτρέποντας τη διέλευση των πολικών μορίων, αλλά στη συνέχεια η μεμβράνη μπορεί να επανασφραγιστεί γρήγορα και να αφήσει το κύτταρο ανέπαφο. Η ηλεκτροδιάτρηση είναι μια φυσική μέθοδος με εξαιρετική αναπαραγωγικότητα, χαμηλό κόστος και μπορεί να

κλιμακωθεί για εφαρμογές υψηλής απόδοσης. Επιπλέον, προσφέρει ανώτερη απόδοση μετασχηματισμού σε σχέση με άλλες χημικές και φυσικές μεθόδους. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η φύση των πόρων της κυτταρικής μεμβράνης που παράγονται με τη μέθοδο της ηλεκτροπόρωσης εξαρτάται μόνο από την παροδική διαταραχή της κυτταρικής μεμβράνης. Η διπλοστιβάδα φωσφολιπιδίων της μεμβράνης έχει ένα υδρόφοβο εξωτερικό και ένα υδρόφοβο εσωτερικό, οπότε οποιαδήποτε πολικά μόρια όπως τα νανοσωματίδια, δεν είναι σε θέση να διέλθουν ελεύθερα μέσω της μεμβράνης. Συνεπώς, όταν δημιουργηθούν πόροι, θα επιτραπεί η διέλευση μέσω κυτταρικής μεμβράνης κάθε είδους μορίου, συμπεριλαμβανομένων και των μαγνητικών νανοσωματιδίων. Επομένως θα πρέπει να εξεταστεί η επικάλυψη των νανοσωματιδίων ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός μεταξύ της εισαγωγής των μαγνητικών νανοσωματιδίων μέσα στα κύτταρα της άλγης και της βιωσιμότητας τους αντίστοιχα. Η λειτουργική επικάλυψη των μαγνητικών νανοσωματιδίων θα βοηθήσει επιπλέον στο να μην σχηματιστούν συσσωματώματα τόσο στο υγρό μέσο που χρησιμοποιείται για την διαδικασία της ηλεκτροπόρωσης όσο και εσωτερικά των κυττάρων. Τα όρια του δυναμικού που πρέπει να επιτευχθούν στη μεμβράνη των κυττάρων άλγης είναι της τάξης των KV λόγω των πολλαπλών επιστρώσεων του κυτταρικού τοιχώματος και πολλές φορές χρειάζεται να αφαιρεθεί και μέρος αυτού με την βοήθεια ενζύμων.

## 1.4 Ρευστά

### 1.4.1 Ιδιότητες ρευστών

Ρευστά είναι τα υλικά που δεν έχουν καθορισμένο σχήμα (ρέουν), αλλά παίρνουν εκείνο του «δοχείου» μέσα στο οποίο βρίσκονται.

Δύο βασικές ιδιότητες που καθορίζουν τη ρεολογική συμπεριφορά του ρευστού είναι η πυκνότητα και το ιξώδες.

Το ιξώδες αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα ενός ρευστού και αντιπροσωπεύει την αντίσταση του στη ροή.

Πυκνότητα  $\rho$  ορίζεται ο λόγος της μάζας προς τον όγκο που αυτή καταλαμβάνει.

Η μεταβολή στη μορφή ενός ρευστού προκαλείται από διατμητικές τάσεις.

Τα ρευστά διακρίνονται σε τρεις ακόλουθες κατηγορίες:

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

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}, \text{ όπου}$$

$\dot{\gamma}$ : Ο ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης του υλικού  $\dot{\gamma} = dy/dt$

$\tau$ : Η ασκούμενη διατμητική τάση

$\mu$ : Ο συντελεστής νευτωνικού ιξώδους

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

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

Η ροή ως προς τη γεωμετρία της μπορεί να είναι στρωτή ή τυρβώδης. Στη στρωτή τα σωματίδια κινούνται με σταθερή ταχύτητα κατά στρώματα και έτσι δεν υπάρχει μακροσκοπική ανάμειξη των γειτονικών στρωμάτων του ρευστού. Από την άλλη, στην τυρβώδη ροή τα σωματίδια κινούνται ακανόνιστα και τυχαία προς όλες τις κατευθύνσεις. Άρα υπάρχει και ακανόνιστη και τυχαία μεταφορά ορμής μεταξύ των σωματιδίων και για αυτό σε κάθε σημείο οι ιδιότητες του ρευστού μεταβάλλονται. Επομένως, η περιγραφή των ιδιοτήτων πραγματοποιείται στατιστικά με μέσες τιμές. Η ροή που είναι ενδιάμεση της στρωτής και της τυρβώδους καλείται μεταβατική.

Η τιμή Reynolds καθορίζει το είδος της ροής και δίνεται από τον τύπο:

$$Re = \rho \cdot u \cdot d / \mu \text{ όπου}$$

$\rho$ : η πυκνότητα του ρευστού

$u$ : η ταχύτητα

$d$ : η εσωτερική διάμετρος του αγωγού

$\mu$ : το ιξώδες του υγρού

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

### 1.4.2 Νόμος Stokes

Ο νόμος Stokes, είναι μια μαθηματική εξίσωση που εκφράζει τις ταχύτητες μικρών σφαιρικών σωματιδίων σε ένα υγρό μέσο. Στην περίπτωση που το σωματίδιο βρίσκεται σε ένα μέσο όπου υπάρχει ροή, η δύναμη του μαγνητικού πεδίου προκειμένου να συγκρατήσει το σωματίδιο, πρέπει να υπερνικήσει τη δύναμη της ροής. Η δύναμη αυτή για σωματίδιο που δεν κινείται κοντά στα τοιχώματα εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_d = 6\pi\rho R_m \Delta u, \text{ όπου}$$

$\mu$ : το ιξώδες του μέσου

$R_m$ : η ακτίνα του σωματιδίου

$\Delta u$ : η διαφορά ταχύτητας του σωματιδίου από το υγρό

Ο νόμος του Stokes βρίσκει εφαρμογή σε αρκετούς τομείς, ιδιαίτερα όσον αφορά την καθίζηση σε γλυκά νερά και τις μετρήσεις του ιξώδους των υγρών. Η εγκυρότητά του περιορίζεται σε συνθήκες στις οποίες η κίνηση του σωματιδίου δεν προκαλεί στροβιλισμό στο ρευστό.

## **Κεφάλαιο 2. Πειραματικό μέρος**

## 2.1 Γενικά

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η προσομοίωση και ο σχεδιασμός ενός μαγνητικού συστήματος κατά το οποίο κύτταρα άλγης θα αποκτούν μαγνητικές ιδιότητες και στην συνέχεια θα αναπαράγονται και θα περισυλλέγονται με την χρήση μαγνητικών φωτοβιοαντιδραστήρων (mPBR). Η παρούσα εργασία ασχολείται τον τρόπο διαχωρισμού των κυττάρων άλγης, των κυττάρων άλγης με μαγνητικές ιδιότητες (επιτυχής ηλεκτροπόρωση) και των ελεύθερων μαγνητικών νανοσωματιδίων με στόχο μόνο τα μαγνητικά κύτταρα άλγης να εναποτίθενται σε κατάλληλες μαγνητικές επιφάνειες ενώ όλα τα υπόλοιπα υλικά να ανακυκλώνονται και να επαναχρησιμοποιούνται. Επικεντρώνεται κυρίως στο κατά πόσο μέσω προσομοιώσεων μπορούν να ληφθούν αξιόπιστες πληροφορίες για την πραγματοποίηση πειράματος και κατά πόσο το πείραμα ακολουθεί τις προσομοιώσεις. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έγινε διαχωρισμός μαγνητικών νανοσωματιδίων τα οποία βρίσκονται ένα υγρό διάλυμα και δεν χρησιμοποιήθηκαν κύτταρα άλγης.

## 2.2 Περιγραφή προτεινόμενου συστήματος λειτουργίας

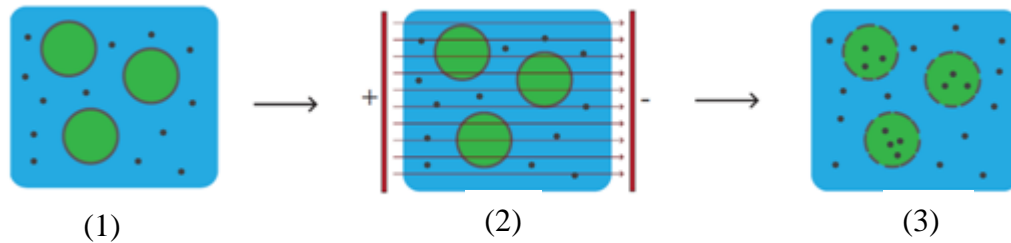
Το πρόβλημα λοιπόν στο οποίο εστιάζει η παρούσα διπλωματική είναι ο διαχωρισμός των κυττάρων που έχουν τροποποιηθεί μαγνητικά από τα κύτταρα που δεν έχουν τροποποιηθεί καταλλήλως και τα μαγνητικά σωματίδια που δεν έχουν εισαχθεί σε κύτταρα. Τα μαγνητικά κύτταρα οδηγούνται στον μαγνητικό φωτοβιοαντιδραστήρα (mPBR) προκειμένου να πραγματοποιηθεί η καλλιέργεια τους. Τα κύτταρα που δεν απορρόφησαν μαγνητικά σωματίδια επιστρέφουν στο κύκλωμα ώστε να περάσουν ξανά από το στάδιο της ηλεκτροπόρωσης και τα μαγνητικά σωματίδια επιστρέφουν στη δεξαμενή ώστε να εισαχθούν σε νέα κύτταρα.

Για να πραγματοποιηθεί αυτός ο διαχωρισμός με συνεχή τρόπο απαιτείται εφαρμογή κατάλληλου μαγνητικού πεδίου σε δύο στάδια όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής (εικόνα 2.2).

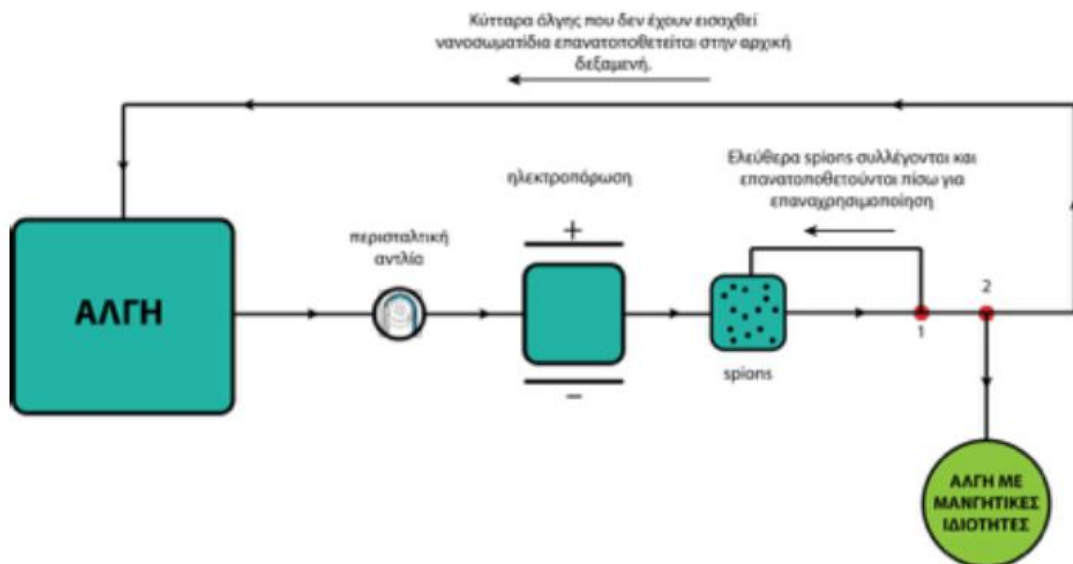
Η προτεινόμενη διαδικασία για παραγωγή άλγης χωρίζεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση τα κύτταρα άλγης βρίσκονται διασκορπισμένα σε νερό μέσα σε μία δεξαμενή. Μέσω μιας περισταλτικής αντλίας αυτά μεταφέρονται στο σημείο όπου



πραγματοποιείται η ηλεκτροπόρωση (εικόνα2.1) Η επαγόμενη διαμεμβρανική τάση που επιβάλλεται από το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να είναι κάτω από μια κρίσιμη τιμή ώστε να ενεργοποιήσει το σχηματισμό παροδικών πόρων και η διαδικασία να είναι αναστρέψιμη. Όταν ολοκληρώνεται αυτή η διαδικασία τα κύτταρα άλγης μεταφέρονται σε επόμενη δεξαμενή, όπου τα διεσπαρμένα μαγνητικά σωματίδια είναι έτοιμα να εισαχθούν στο εσωτερικό των κυττάρων.



**Εικόνα 2.1:** (1) ελεύθερα κύτταρα άλγης και ελεύθερα μαγνητικά σωματίδια, (2) φάση ηλεκτροπόρωσης, (3) κύτταρα άλγης με μαγνητικές ιδιότητες



**Εικόνα 2.2:** Σύστημα λειτουργίας με συνεχή ροή για τη δημιουργία κυττάρων άλγης με μαγνητικές ιδιότητες

Στη συνέχεια στο σημείο 1 του διαγράμματος (εικόνα 2.2) γίνεται διαχωρισμός των ελεύθερων νανοσωματιδίων από τα κύτταρα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση ειδικών ηλεκτρομαγνητών όπου το πεδίο τους έχει τέτοια ένταση ώστε να έλκει τα ελεύθερα μαγνητικά νανοσωματίδια, αλλά όχι τα κύτταρα με μαγνητικές ιδιότητες.

Τα μεγέθη ενδιαφέροντος εκφράζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\vec{F}_M = \frac{4\pi\alpha^3}{3} \frac{\mu_o\chi}{(1+\chi/3)} \vec{H} \frac{d\vec{H}}{d\vec{x}} = \frac{2\pi\alpha^3}{3} \frac{\mu_o}{(1+\chi/3)} \nabla (|\vec{H}|^2)$$

$$F_d = 6\pi\mu R u$$

$\alpha$  = ακτίνα μαγνητικού σωματιδίου

$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$  , μαγνητική διαπερατότητα

$\chi$  =μαγνητική επιδεκτικότητα (για τα μαγνητικά νανοσωματίδια ~20)

$H$  = ένταση μαγνητικού πεδίου

$\mu$  = ιξώδες (για το νερό~0,001)

$R$  = ακτίνα κυττάρων άλγης

$u$  = ταχύτητα ρευστού

Θα πρέπει συνεπώς να εφαρμοστεί πεδίο το οποίο να ασκεί δύναμη μεγαλύτερη από την δύναμη που ασκεί το νερό, όχι όμως πολύ μεγαλύτερη για να μην κολλήσουν τα σωματίδια στο σημείο που είναι το τοποθετημένος ο μαγνήτης.

$$F_{m1} > F_{d1}$$

Σύμφωνα με τα προηγούμενα η δύναμη λόγω ροής για σφαιρικά σωματίδια εκφράζεται από τον τύπο  $F_d = 6\pi\mu R u$  . Το ιξώδες  $\mu$  και η ταχύτητα του ρευστού  $u$  είναι ίδια και για τα μαγνητικά νανοσωματίδια και για τα κύτταρα. Συνεπώς η  $F_d$  εξαρτάται άμεσα από την ακτίνα του κάθε σώματος και επειδή  $R_{SPIONS} \ll R_{KUT}$  είναι προφανές ότι:

$$F_{d2} \gg F_{d1}$$

Από προηγούμενα πειράματα του εργαστηρίου διαπιστώθηκε ότι το κάθε κύτταρο μπορεί να περιέχει μέσα του μερικά μαγνητικά νανοσωματίδια, της τάξης των 10, επομένως προσεγγιστικά η μαγνητική δύναμη που ασκείται στο κύτταρο είναι:

$$F_{m2} = 10F_{m1}$$

Και πρέπει ταυτόχρονα να ισχύει και

$$F_{m2} > F_{d2}$$

Πιο συγκεκριμένα:

	Size	#Μαγνητικά νανοσωματίδια	F <sub>d</sub>	F <sub>m</sub>
<b>Magnetic nanoparticles</b>	10nm	1	F <sub>d1</sub>	F <sub>m1</sub>
<b>Magnetic cells</b>	10μm	~10	F <sub>d2</sub> =1000F <sub>d1</sub>	F <sub>m2</sub> =10F <sub>m1</sub>
<b>Non magnetic cells</b>	10μm	0	F <sub>d3</sub> =F <sub>d2</sub> =1000F <sub>d1</sub>	0

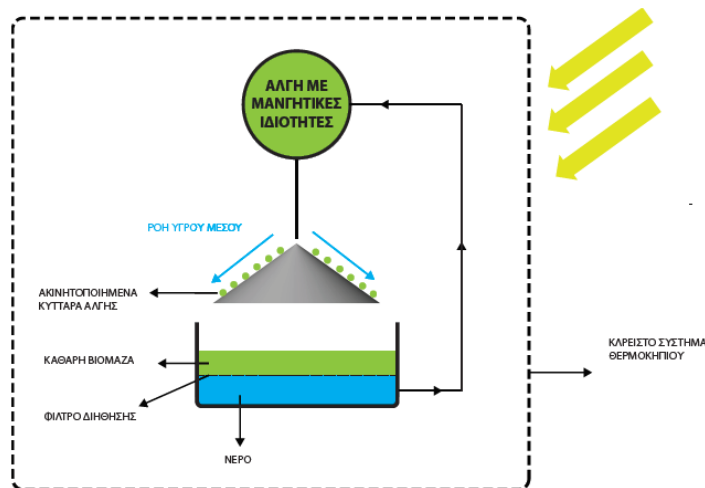
**Πίνακας 2.1:** Μεγέθη και δυνάμεις κύτταρων και μαγνητικών νανοσωματιδίων

Στο σημείο 1 τα ελεύθερα μαγνητικά νανοσωματίδια συλλέγονται και μεταφέρονται στην αρχική τους δεξαμενή έτοιμα για επαναχρησιμοποίηση. Στη συνέχεια, στο σημείο 2 του διαγράμματος (εικόνα 2.2) γίνεται διαχωρισμός των απλών κυττάρων από αυτά που έχουν μαγνητικά σωματίδια. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ πιο εύκολη αφού τα πρώτα δεν έχουν καθόλου μαγνητικές ιδιότητες και κατά συνέπεια με τη χρήση ενός δεύτερου ηλεκτρομαγνήτη μπορεί να γίνει εύκολα ο διαχωρισμός. Τα μαγνητικά κύτταρα συλλέγονται για την καλλιέργεια στον mPBR και τα καθαρά επανατοποθετούνται στην αρχική τους δεξαμενή για επαναχρησιμοποίηση.

Είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι στον mPBR δε θα καταλήξουν "γυμνά" μαγνητικά σωματίδια ή κύτταρα τα οποία δεν έχουν απορροφήσει μαγνητικά σωματίδια. Επίσης, όσα κύτταρα έχουν απορροφήσει μαγνητικά σωματίδια αλλά όχι αρκετά ώστε η δύναμη του μαγνητικού πεδίου που ασκείται από την επιφάνεια του mPBR να μην είναι ικανή να τα συγκρατήσει, μπορούν να προκαλέσουν πρόβλημα στην παραγωγική διαδικασία.

Με την ολοκλήρωση του πρώτης φάσης τα κύτταρα άλγης με μαγνητικές ιδιότητες περνούν στην δεύτερη φάση της διαδικασίας και είναι έτοιμα να διασπαρθούν μέσω του νερού στις μαγνητικές επιφάνειες για αναπαραγωγή. Η μαγνητική επιφάνεια που χρησιμοποιείται είναι σε σχήμα κώνου. Η επιλογή του συγκεκριμένου σχήματος δικαιολογείται από το γεγονός ότι αποτελεί μια επιφάνεια με καλό προσανατολισμό στο φως αλλά και με την μεγαλύτερη επιφάνεια ανά όγκο. Η αποτελεσματικότερη διείσδυση του φωτός σημαίνει μεγάλη αναλογία

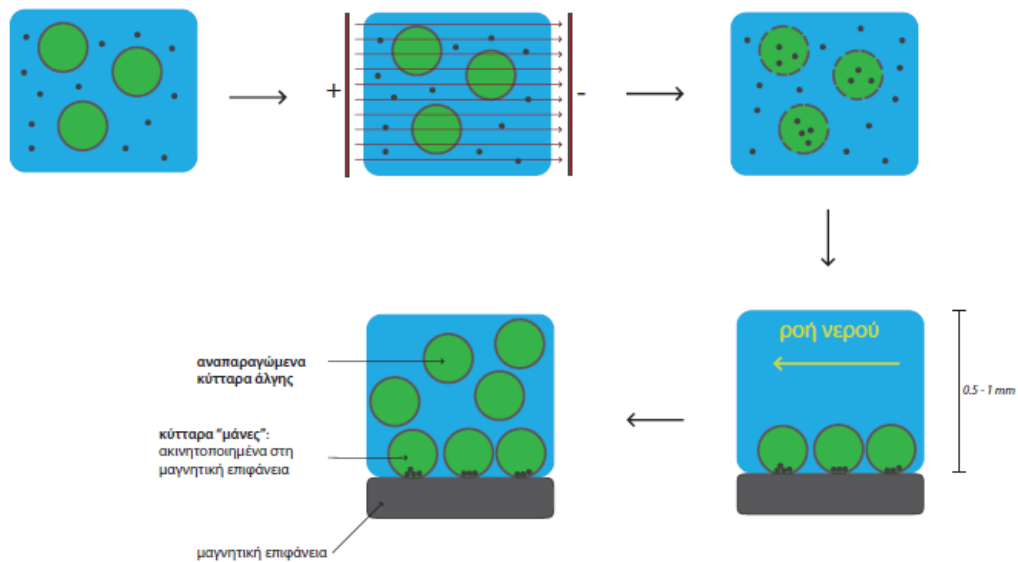
επιφάνειας προς όγκο ( $S/V$ ) και βελτιώνει τη φωτοσυνθετική αποτελεσματικότητα, η οποία με τη σειρά της έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή παραγωγικότητα του προϊόντος-βιομάζας. Τα διασπαρμένα κύτταρα θα αρχίσουν τον πολλαπλασιασμό τους και έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα θα φτάσουν σε ένα σημείο όπου δεν θα είναι δυνατή η διαίρεση τους. Αυτό οφείλεται στο ότι μετά από συγκεκριμένο αριθμό κυτταρικής διαίρεσης συσσωρεύονται μη αναστρέψιμες βλάβες στο γονιδίωμα τους, ενώ υπάρχουν και κυτταρικοί θάνατοι. Για να διασφαλιστεί η βέλτιστη παραγωγικότητα της βιομάζας θα πρέπει τα “νεκρά” πλέον κύτταρα να αφαιρεθούν από τις μαγνητικές επιφάνειες και να αντικατασταθούν με νέα “μαγνητικά κύτταρα”. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με μηχανικές μεθόδους. Έπειτα μπορούν να διαχωριστούν τα μαγνητικά νανοσωματίδια από την υπόλοιπη οργανική βιομάζα και να ξαναχρησιμοποιηθούν, να ανακυκλωθούν δηλαδή και να εισαχθούν σε νέα κύτταρα.



**Εικόνα 2.3:** Αρχή λειτουργίας mPBR για καλλιέργεια άλγης

Έτσι λοιπόν, πιο συγκεκριμένα, έπειτα από την εισαγωγή των μαγνητικών νανοσωματιδίων στο εσωτερικό των κυττάρων, τα μαγνητικά πλέον κύτταρα άλγης διοχετεύονται στη κορυφή ενός μαγνητικού κώνου και ακινητοποιούνται στην επιφάνεια του ανάλογα με τη βάθμωση του μαγνητικού πεδίου, η οποία μεγαλώνει όσο πιο ανομοιογενές είναι το πεδίο με αποτέλεσμα στα σημεία αυτά η μαγνητική δύναμη να είναι και μεγαλύτερη. Τα μαγνητικά κύτταρα σε αυτή την φάση είναι καλυμμένα πάντα από ένα λεπτό στρώμα νερού (περίπου 1mm) συνεχούς ροής. Τα νέα αναπαραγόμενα κύτταρα συλλέγονται με τη βοήθεια της

ροής, με τη μέθοδο της διήθησης και το περισσευούμενο νερό διοχετεύεται και πάλι στην αρχική δεξαμενή. Η συνολική αυτή κυκλική διαδικασία βρίσκεται εντός ενός κλειστού συστήματος θερμοκηπίου για τον έλεγχο των βέλτιστων συνθηκών καλλιέργειας. Από τα παραπάνω ένα πολύ σημαντικότερο πλεονέκτημα του mPBR είναι η ελαχιστοποίηση της ανάγκης της απαιτούμενης ποσότητας νερού αφού στον mPBR η ποσότητα που χρησιμοποιείται είναι  $1 \text{ lt/m}^2$  (υποθέτοντας ένα στρώμα νερού πάχους  $1 \text{ mm}$ ) σε σχέση με την πραγματική μέση ποσότητα των  $20\text{-}30 \text{ lt/m}^2$  που χρησιμοποιείται στις ανοιχτού τύπου δεξαμενές, το οποίο ευνοεί την κατασκευή mPBR σε περιοχές με χαμηλή διαθεσιμότητα ύδατος (π.χ. κοντά σε ερήμους). Επιπλέον, μετά την αφαίρεση της βιομάζας, το νερό μπορεί να εισαχθεί εκ νέου στο σύστημα επειδή είναι καθαρό και δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί καμία πρόσθετη επεξεργασία (εκτός από την έκθεση σε  $\text{CO}_2$ ). Η παραπάνω διαδικασία προσφέρει μια πολύ εύκολη και φθηνή λύση στη συγκομιδή των κυττάρων με μια παραδοχή μόνο, ότι κατά την αναπαραγωγή της άλγης τα μαγνητικά σωματίδια τα οποία βρίσκονται εντός του κυττάρου “μάνας” της άλγης δεν θα μεταφέρονται στα “παιδιά” της. Αυτή η παραδοχή γίνεται λόγω του ότι καθώς τα μαγνητικά νανοσωματίδια εισάγονται εντός του πρωτοπλάσματος της άλγης, μέσω της ηλεκτροπόρωσης, βρίσκονται διεσπαρμένα εντός του κυττάρου. Στην συνέχεια όταν έρχονται σε επαφή με τη μαγνητική επιφάνεια, τους ασκούνται δυνάμεις οι οποίες τα μεταφέρουν στο κατώτατο στρώμα εντός του πρωτοπλάσματος του κυττάρου, εκεί που το μαγνητικό πεδίο είναι πιο έντονο και κατά συνέπεια όσο το δυνατόν πιο κοντά στη επιφάνεια (η ένταση του πεδίου δεν πρέπει να είναι πολύ έντονη γιατί μπορεί να προκαλέσει τραυματισμό των κυττάρων αλλά ταυτόχρονα πρέπει να είναι ικανή ώστε να τα έλξει). Κατά συνέπεια κατά το πολλαπλασιασμό της άλγης τα κύτταρα-παιδιά δεν θα περιέχουν νανοσωματίδια αφού τα τελευταία θα βρίσκονται ακινητοποιημένα εντός του αρχικού κυττάρου-μάνας.



**Εικόνα 2.4:** Στάδια προτεινόμενου συστήματος παραγωγής άλγης

Με την παραπάνω μέθοδο η συγκομιδή της άλγης γίνεται πολύ πιο εύκολα και σε ένα μόνο στάδιο αφού τα νέα κύτταρα δεν έχουν μαγνητικές ιδιότητες και κατά συνέπεια μεταφέρονται παράλληλα με τη ροή του νερού (εικόνα 2.4) όπου μπορούν να συλλεχθούν με απλές μηχανικές μεθόδους, όπως π.χ. με διήθηση, αποκτώντας έτσι καθαρή βιομάζα χωρίς την ανάγκη ειδικών τεχνικών με εμφανές όφελος για το κόστος λειτουργίας.

### 2.3 Στρατηγική πειραματικής διαδικασίας

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

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

Με βάση το διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.2 σχεδιάστηκε το κύκλωμα που θεωρήθηκε ως πιο κατάλληλο, βασισμένο σε υλικά που ήταν εμπορικά διαθέσιμα. Οι προσομοιώσεις επικεντρώθηκαν στο σημείο 1 της εικόνας 2.2 καθώς δεν χρησιμοποιήθηκαν κύτταρα.

Χρησιμοποιήθηκαν σωληνάκια σιλικόνης διαμέτρου 5mm και σύνδεσμοι σχήματος "Υ" .

Η βασική συνθήκη για την πραγματοποίηση του διαχωρισμού στα δύο βήματα είναι πως εφαρμόζεται στα σημεία 1 και 2 μαγνητικό πεδίο ικανό να αλλάξει την πορεία μόνο ενός εκ των συστατικών.

## 2.4 Προσομοιώσεις

Πραγματοποιήθηκαν ρευστοδυναμικές και μαγνητικές προσομοιώσεις με στόχο την ελαχιστοποίηση των αναγκαίων πειραμάτων.

Για την πραγματοποίηση των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ANSYS. Το **ANSYS** δημιουργήθηκε το 1970 στην Pennsylvania των ΗΠΑ, είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά CAE (Computer Aided Engineering) και περιέχει ενσωματωμένα εργαλεία σχεδίασης CAD και προσομοίωσης με χρήση FEM. Διαθέτει μια πληθώρα εφαρμογών και ένα σύγχρονο γραφικό περιβάλλον διεπαφής, όπου διαφορετικές αναλύσεις μπορούν να ανταλλάξουν δεδομένα σχεδόν αυτόματα.

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

Η διαδικασία επίλυσης έχει τα ακόλουθα βήματα:

- 1) Μια περίπλοκη περιοχή, που ορίζει ένα συνεχές, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements).

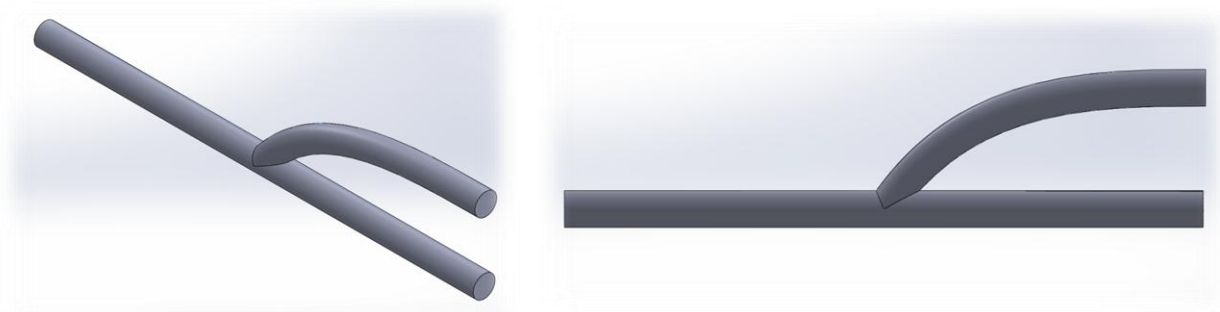
- 2) Οι ιδιότητες των υλικών, οι διέπουσες σχέσεις και οι συνοριακές συνθήκες, θεωρούνται στα στοιχεία και εκφράζονται με όρους αγνώστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων.
- 3) Με την κατάλληλη θεώρηση φορτίων, δημιουργείται ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων, που η επίλυση τους δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς.

Για σωληνάκι διαμέτρου 5mm με διαχωρισμό ρευστού σχήματος "Y" πραγματοποιήθηκε προσομοίωση CFD(Computational fluid dynamics) στο πρόγραμμα ANSYS fluent για τη μέγιστη παροχή ρευστού που μπορεί να παρέχει η αντλία. Στόχος ήταν η εύρεση και ανάλυση του ροϊκού πεδίου στην περιοχή πριν τη διακλάδωση ώστε να βρεθεί η ένταση και η μορφή του μαγνητικού πεδίου που απαιτείται να εφαρμοστεί ώστε να αλλάξει κατεύθυνση μόνο στα μαγνητικά σωματίδια και όχι στα μαγνητικά κύτταρα. Σε δεύτερο στάδιο πρέπει να εφαρμοστεί ένα μεγαλύτερο μαγνητικό πεδίο το οποίο θα είναι ικανό να διαχωρίσει τα μαγνητικά από τα μη μαγνητικά κύτταρα. Στην παρούσα διπλωματική στόχος είναι η αλλαγή της κατεύθυνσης των μαγνητικών σωματιδίων ανεξαρτήτως κυττάρων στο σημείο 1(εικόνα 2.2).

Βασική προϋπόθεση για την επίτευξη του συνεχούς μαγνητικού διαχωρισμού είναι να εξασφαλιστεί πως οι μαγνήτες δε θα ακινητοποιούν τα μαγνητικά σωματίδια ή/και τα μαγνητικά κύτταρα ώστε να μην προκαλούνται εμφράξεις.

#### 2.4.1 Γεωμετρία σωλήνα

Αρχικά σχεδιάστηκε το σωληνάκι που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα στο πρόγραμμα Solidworks Dassault με βάση την ακριβή γεωμετρία του όπως φαίνεται στο σχήμα. Ο μαγνήτης θα τοποθετηθεί εξωτερικά της διακλάδωσης.



**Εικόνα 2.5:** Απεικόνιση σωλήνα σιλικόνης διαμέτρου 5mm



Το σημείο που έχει ενδιαφέρον προς μελέτη είναι η περιοχή πριν τη διακλάδωση όπου πρέπει να μελετηθεί το πεδίο ροής ώστε να προσαρμοστεί στη συνέχεια το μαγνητικό πεδίο.

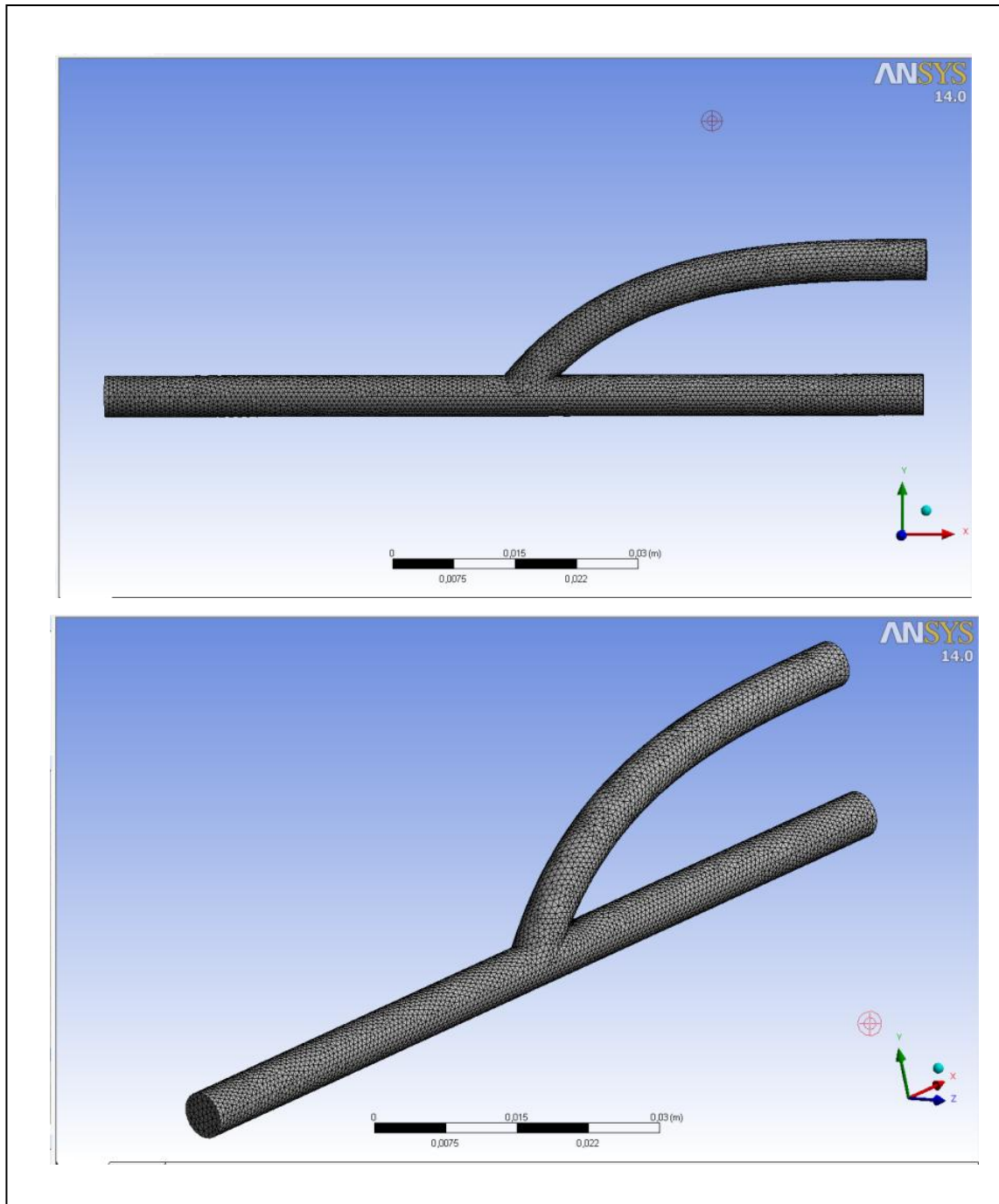
Μετά την σχεδίαση, το σωληνάκι μεταφορτώθηκε στο ANSYS για περαιτέρω επεξεργασία.

## 2.4.2 Δημιουργία πλέγματος και προσομοιώσεων δυνάμεων στο σωλήνα

Αρχικά δημιουργήθηκε πλέγμα (mesh), όπως φαίνεται στη εικόνα 2.6, με βάση τα παρακάτω χαρακτηριστικά (πίνακας 2.2):

Details of "Mesh"	
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	40
<b>Sizing</b>	
Use Advanced Size Fun...	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal A...	Default (14,160 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (1,2675e-005 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (1,2675e-003 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (2,535e-003 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,1720 )
Minimum Edge Length	7,8537e-003 m
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0,272
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Assembly Meshing</b>	
Method	None
<b>Patch Conforming Options</b>	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
<b>Advanced</b>	
Shape Checking	CFD
Element Midside Nodes	Dropped
Straight Sided Elements	
Number of Retries	0
Extra Retries For Assem...	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
<b>Defeaturing</b>	
<b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	18739
<input type="checkbox"/> Elements	88113

**Πίνακας 2.2:** Τα χαρακτηριστικά του meshing



**Εικόνα 2.6:** Απεικόνιση *meshing* στο σωληνάκι

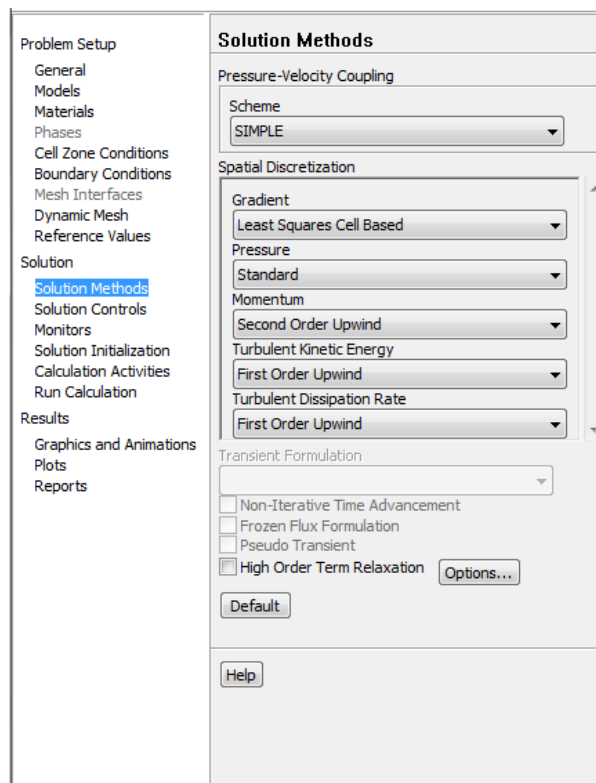
Στη συνέχεια, επιλέχθηκε μοντέλο ανάλυσης k-ε.

Το μοντέλο k-ε βασίζεται στη μοντελοποίηση εξισώσεων μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και το ρυθμό καταστροφής της (dissipation rate). Επίσης είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο τύρβης για βιομηχανικές εφαρμογές. Είναι σταθερό, οικονομικό όσον αφορά το υπολογιστικό κόστος και παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια για πολλά είδη τυρβωδών ροών. Ένα από τα

αρνητικά του είναι ότι δεν αποδίδει καλά σε ροές με μεγάλες μεταβολές στην πίεση, ισχυρή αποκόλληση, μεγάλη ελικότητα και μεγάλες κλίσεις των ροϊκών γραμμών.

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

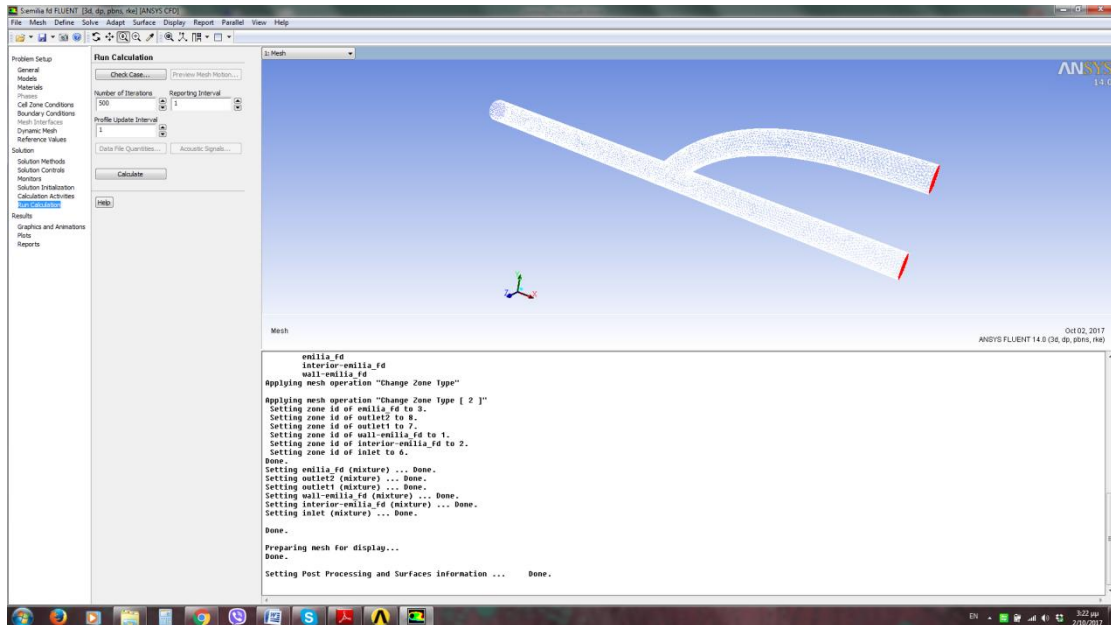
Έπειτα, ορίστηκαν οι μέθοδοι επίλυσης όπως φαίνονται στον εικόνα 2.7:



**Εικόνα 2.7:** Μέθοδοι επίλυσης

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση.

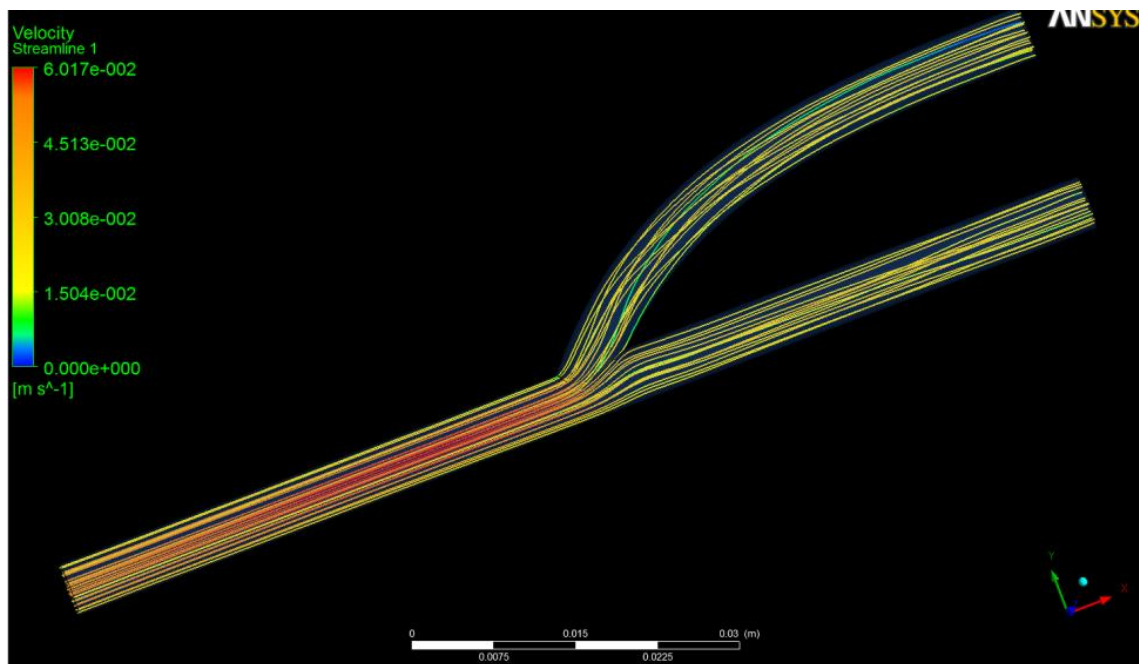
Το γραφικό περιβάλλον παρουσιάζεται στο σχήμα:



**Εικόνα 2.8:** Γραφικό περιβάλλον στο Fluent

Αφού ολοκληρώθηκε η ανάλυση, στο γραφικό περιβάλλον του fluent απεικονίστηκαν τα απαραίτητα φυσικά μεγέθη ώστε να αναλυθούν οι δυνάμεις του ρευστού στα σωματίδια μαγνητίτη.

Στην πρώτη ανάλυση (εικόνα 2.9) απεικονίζονται οι ροϊκές γραμμές και οι ταχύτητες στην έγχρωμη κλίμακα.

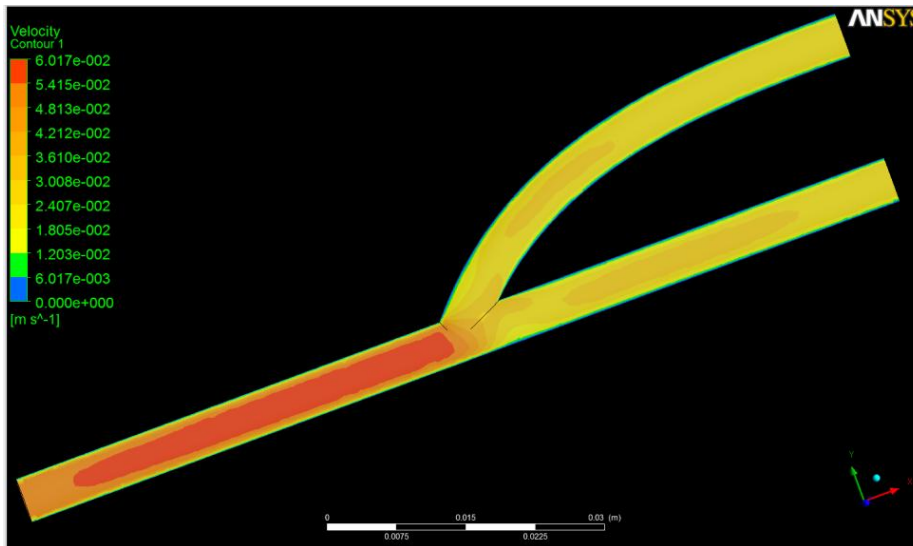


**Εικόνα 2.9:** Απεικόνιση των ροϊκών γραμμών και των ταχυτήτων

Οι γραμμές ροής είναι μια οικογένεια καμπυλών που είναι στιγμιαία εφαπτόμενες στο διάνυσμα ταχύτητας της ροής. Αυτές δείχνουν την κατεύθυνση στην οποία ένα ρευστό θα κινηθεί σε οποιοδήποτε σημείο μέσα στον χρόνο.

Παρατηρείται ότι οι γραμμές ισομοιράζονται στους δύο κλάδους.

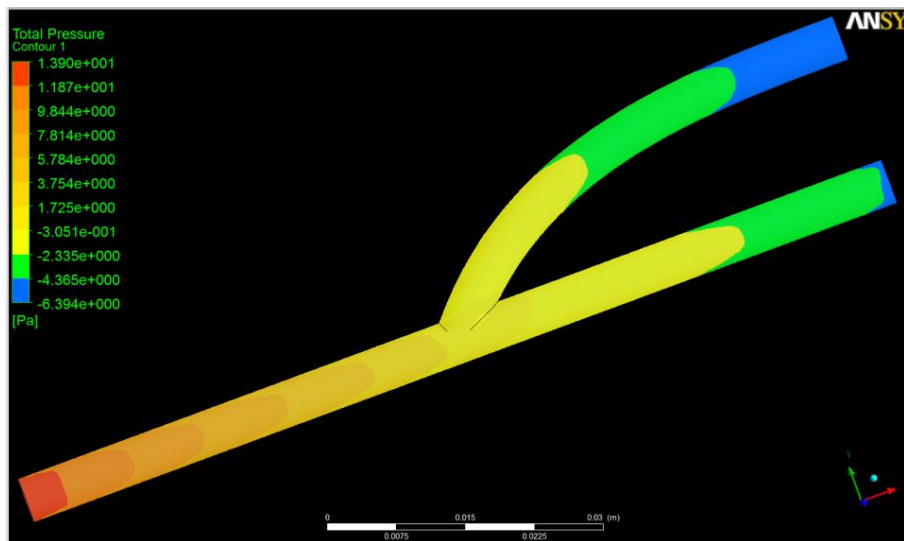
Στη συνέχεια στην εικόνα 2.10 απεικονίζεται μια κάθετη τομή στο κέντρο του σωλήνα όπου απεικονίζεται η ταχύτητα του ρευστού.



**Εικόνα 2.10:** Απεικόνιση ταχύτητας ρευστού

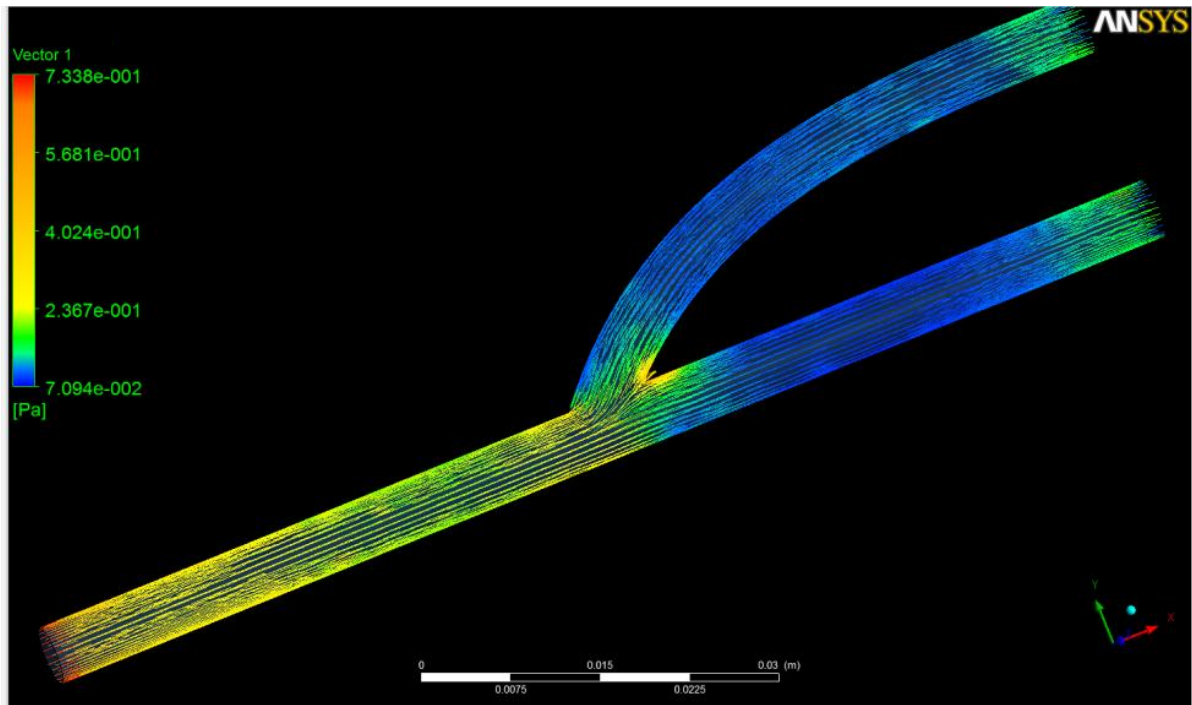
Παρατηρείται ότι η ταχύτητα του ρευστού υποδιπλασιάζεται στο σημείο όπου ξεκινάει η διακλάδωση, εκεί δηλαδή που πρόκειται να επικεντρωθεί το μαγνητικό πεδίο που απαιτείται για να αλλάξει κατεύθυνση στα μαγνητικά σωματίδια.

Για την ίδια τομή απεικονίζεται η πίεση του ρευστού.



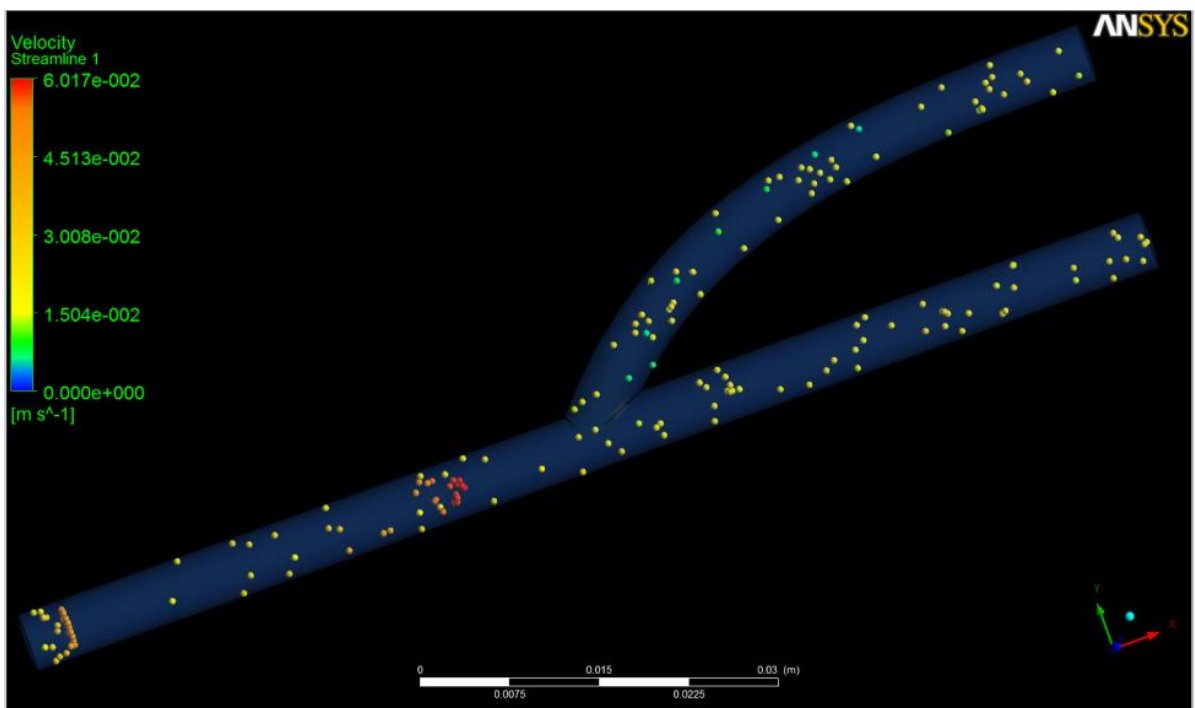
**Εικόνα 2.11:** Απεικόνιση της πίεσης του ρευστού

Τα διανύσματα της ταχύτητας του ρευστού απεικονίζονται στην εικόνα 2.12:



**Εικόνα 2.12:** Απεικόνιση των διανυσμάτων της ταχύτητας του ρευστού

Στην εικόνα 2.13 απεικονίζεται η κατανομή των σωματιδίων στους δύο κλάδους χωρίς την επιβολή του μαγνητικού πεδίου.



**Εικόνα 2.13:** Απεικόνιση κατανομής σωματιδίων

Από τις προσομοιώσεις του πεδίου ροής για τη μέγιστη δυνατή παροχή της αντλίας, λήφθηκαν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά της ροής. Η ταχύτητα του ρευστού στην περιοχή πριν τη διακλάδωση είναι απαραίτητη προκειμένου να υπολογιστεί η δύναμη που ασκεί το ρευστό στα μαγνητικά νανοσωματίδια.

Για τον υπολογισμό της δύναμης, χρησιμοποιείται ο νόμος του Stokes:

$$F_d = 6\pi\mu R u$$

Στην περιοχή ενδιαφέροντος η ελάχιστη δύναμη του ρευστού πάνω στα σωματίδια είναι  $6,8 \cdot 10^{-10}$  N και η μέγιστη δύναμη είναι  $10,2 \cdot 10^{-10}$  N.

Επομένως, προκειμένου να επιτευχθεί αλλαγή κατεύθυνσης στα σωματίδια απαιτείται η δύναμη του μαγνητικού πεδίου να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη σε εκείνη την περιοχή. Παράλληλα, θα πρέπει να μην προκαλείται συσσώρευση σωματιδίων μετά τη διακλάδωση για να αποφευχθεί έμφραξη.

Για την εύρεση της απαιτούμενης δύναμης χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$\bar{F}_M = \frac{4\pi\alpha^3}{3} \frac{\mu_0\chi}{1+\frac{\chi}{3}} \bar{H} \frac{d\bar{H}}{dx} = \frac{2\pi\alpha^3}{3} \frac{\mu_0\chi}{1+\frac{\chi}{3}} \nabla(|\bar{H}^2|)$$

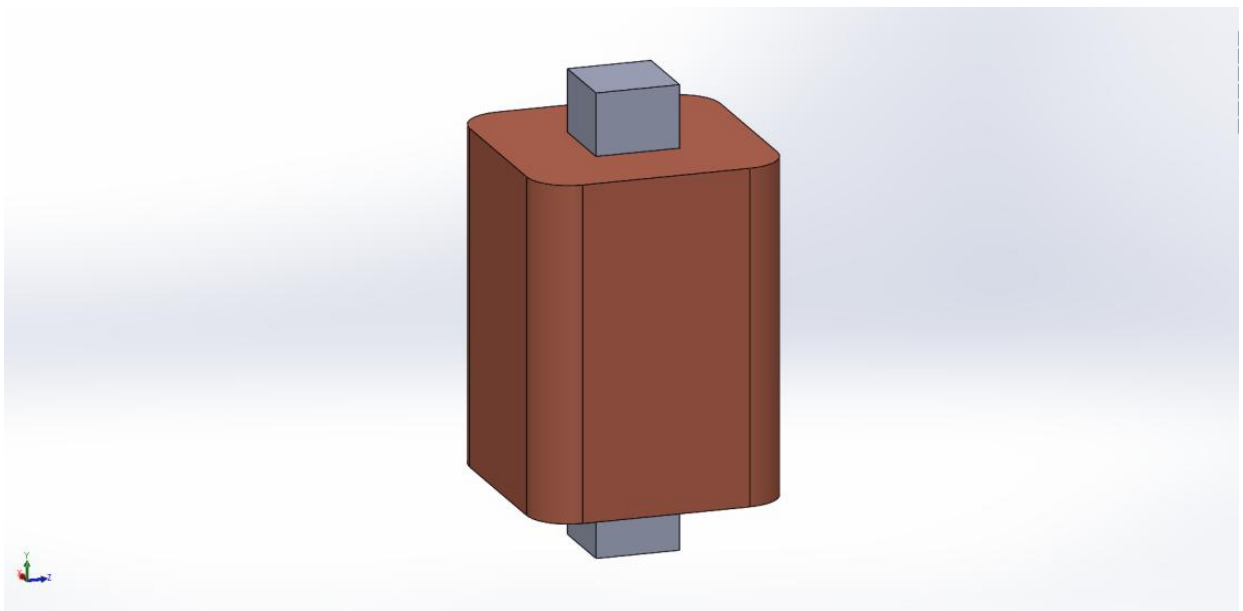
Από τον παραπάνω τύπο, θεωρώντας ότι  $F_M \geq F_d$ , υπολογίζεται το γινόμενο  $H \cdot dH/dx$ , το οποίο χρειάζεται για να βρεθεί το απαιτούμενο ρεύμα.



### 2.4.3 Προσομοιώσεις μαγνητικού πεδίου.

Σχεδιάστηκε στο Solidworks ηλεκτρομαγνήτης με τα εξής χαρακτηριστικά:

$N=860$  σπείρες  
 $d$  σύρματος =  $0,8mm$   
 $R= 3\Omega$   
Αυτεπαγωγή  $L = 55mH$



**Εικόνα 2.14:** Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρομαγνήτη

Στη συνέχεια μεταφορτώθηκε στο ANSYS magnetostatic προκειμένου να απεικονιστεί το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο ηλεκτρομαγνήτης για διάφορες τιμές ρεύματος που διαρρέει το πηνίο.

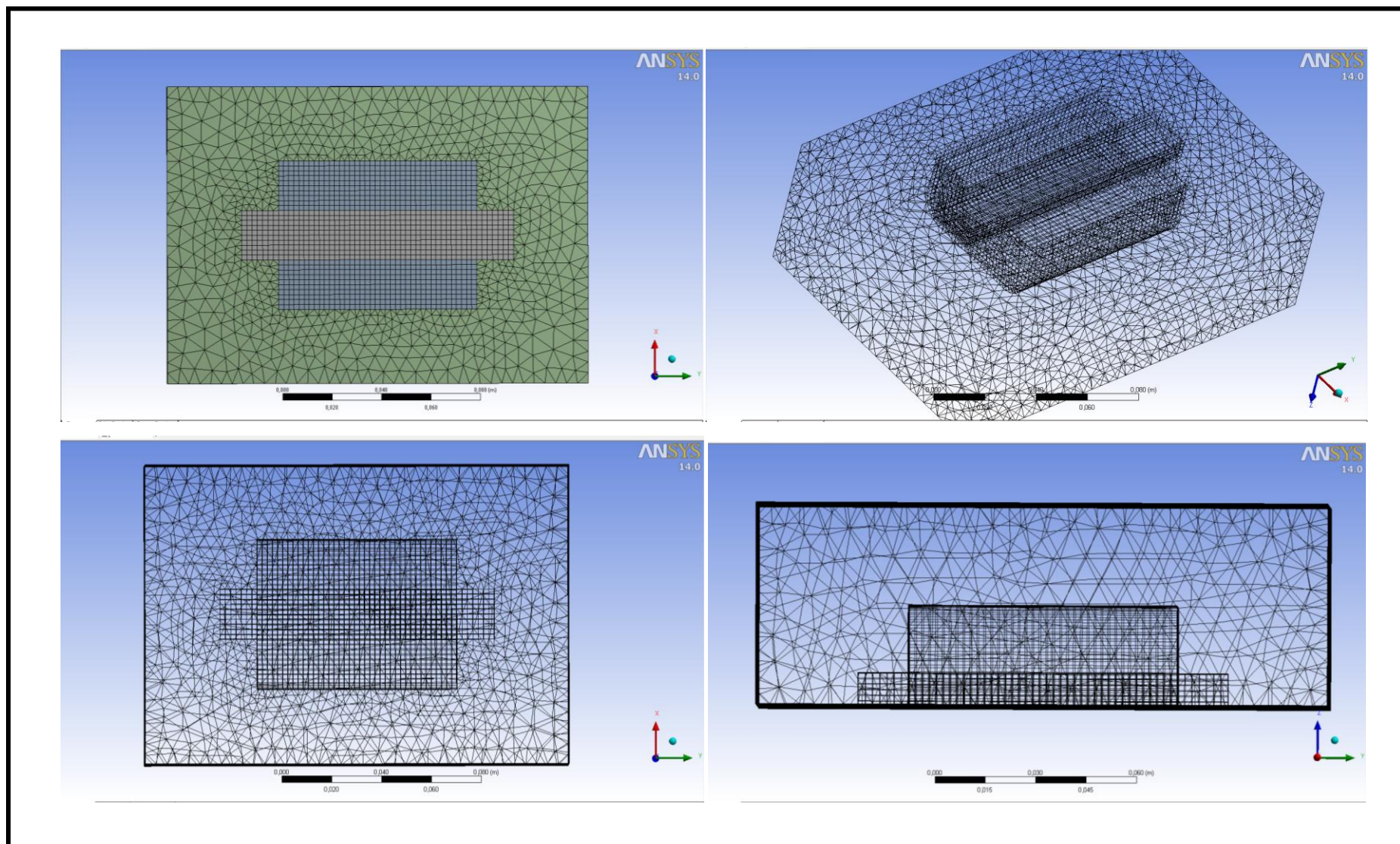
Αρχικά, δημιουργήθηκε ένας χώρος γύρω από τον ηλεκτρομαγνήτη (enclosure) όπου πραγματοποιείται η ανάλυση και στη συνέχεια αναπτύχθηκε κατάλληλο πλέγμα όπως φαίνεται στην εικόνα 2.15 με τα εξής χαρακτηριστικά.



Details of "Mesh"	
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Electromagnetics
<input type="checkbox"/> Relevance	40
<b>Sizing</b>	
Use Advanced Size Fun...	Off
Relevance Center	Medium
<input type="checkbox"/> Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1,e-002 m
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0,272
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Patch Conforming Options</b>	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
<b>Advanced</b>	
Shape Checking	Electromagnetics
Element Midside Nodes	Kept
Straight Sided Elements	Yes
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assem...	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
<b>Defeaturing</b>	
<b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	135143
<input type="checkbox"/> Elements	54950
Mesh Metric	None

**Πίνακας 2.3:** Χαρακτηριστικά πλέγματος

Το πλέγμα που επιλέχθηκε είναι το εξαέδρο. Το εξαέδρο, ένας τοπολογικός κύβος, έχει 8 κορυφές, 12 ακμές, που οριοθετούνται από 6 έδρες. Ο λόγος που επιλέγεται το εξαέδρο είναι ότι για την ίδια επιφάνεια, η ακρίβεια των λύσεων είναι η υψηλότερη.



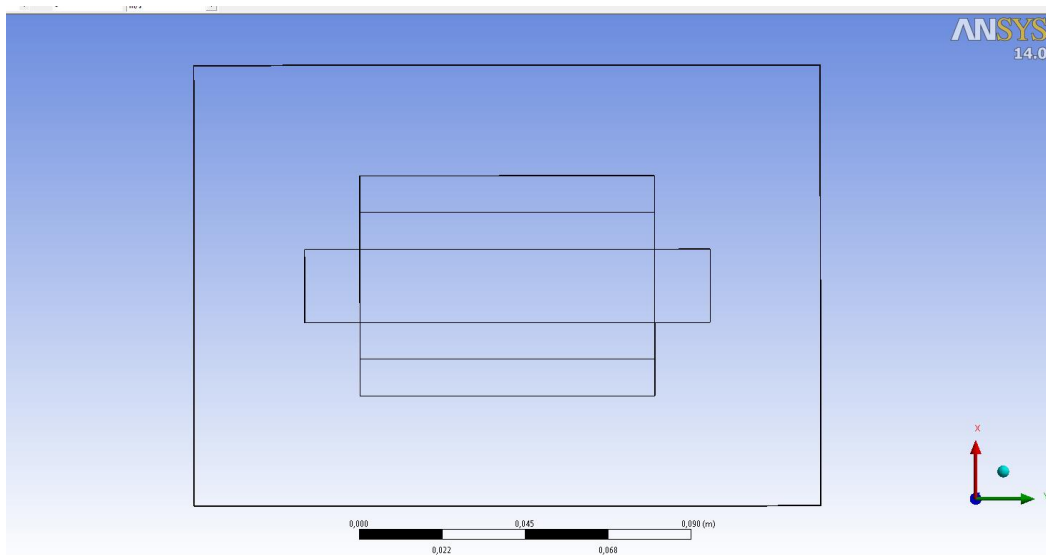
**Εικόνα 2.15:** Πλέγμα εξάεδρων γύρω από τον ηλεκτρομαγνήτη

Στη συνέχεια, ορίστηκαν διάφορες τιμές έντασης ρεύματος στο πηνίο προκειμένου να ευρεθεί η κατάλληλη, η οποία θα δώσει το επιθυμητό γινόμενο  $H \cdot dH/dx$ .

Έπειτα από δοκιμές, ρεύμα έντασης 1,7A έδωσε το γινόμενο, που με βάση τις προσομοιώσεις, απαιτείται για να προκαλέσει αλλαγή στην πορεία των νανοσωματιδίων.

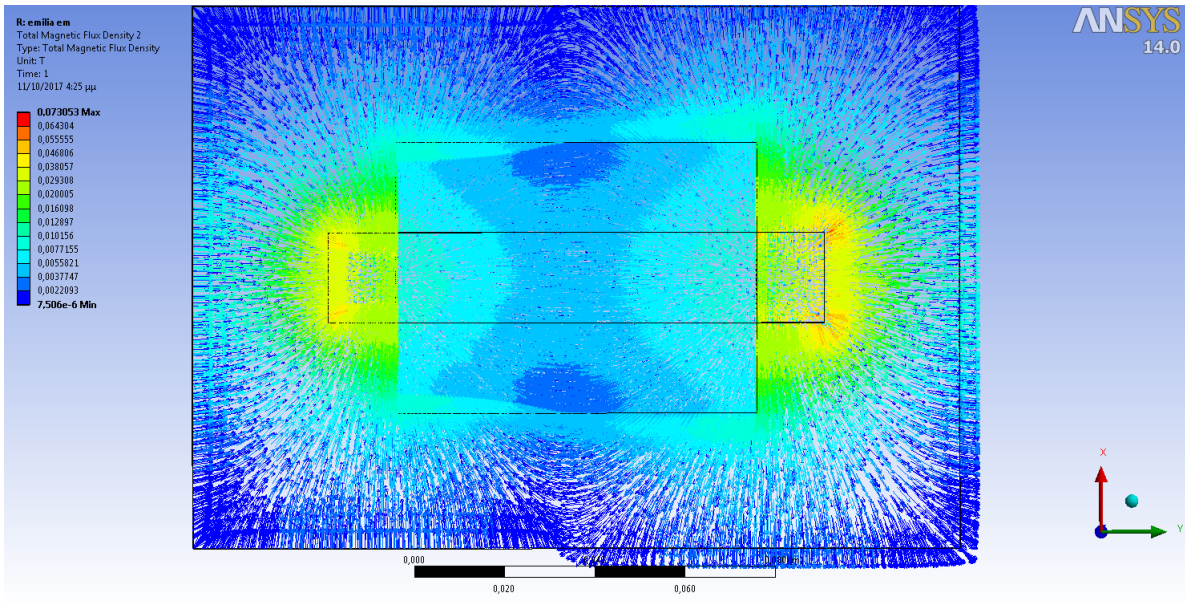
Μέσω του ANSYS Magnetostatic δίνονται και άλλες πληροφορίες που αφορούν το μαγνητικό πεδίο γύρω από τον ηλεκτρομαγνήτη.

Στην εικόνα 2.16 φαίνεται το σχεδιάγραμμα του ηλεκτρομαγνήτη που χρησιμοποιήθηκε και ο περιβάλλοντας χώρος μέσα στον οποίο περιορίζεται η λύση.



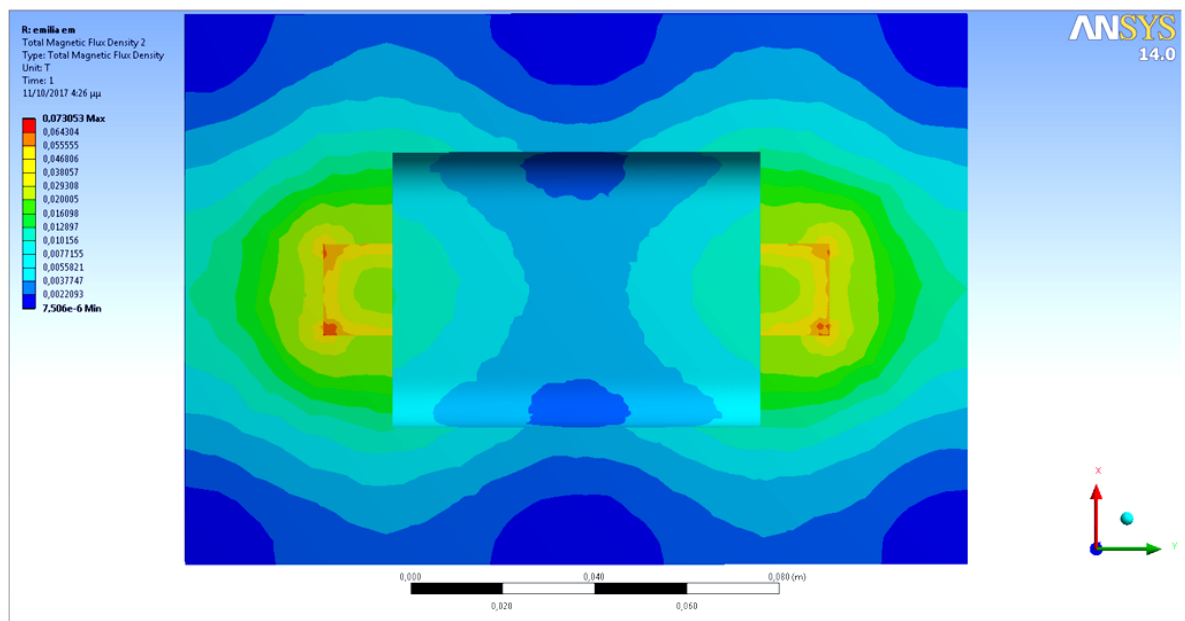
**Εικόνα 2.16:** Σχεδιάγραμμα του ηλεκτρομαγνήτη

Στην εικόνα 2.17 απεικονίζονται τα διανύσματα της έντασης του μαγνητικού πεδίου.



**Εικόνα 2.17:** Απεικόνιση διανυσμάτων της έντασης του μαγνητικού πεδίου

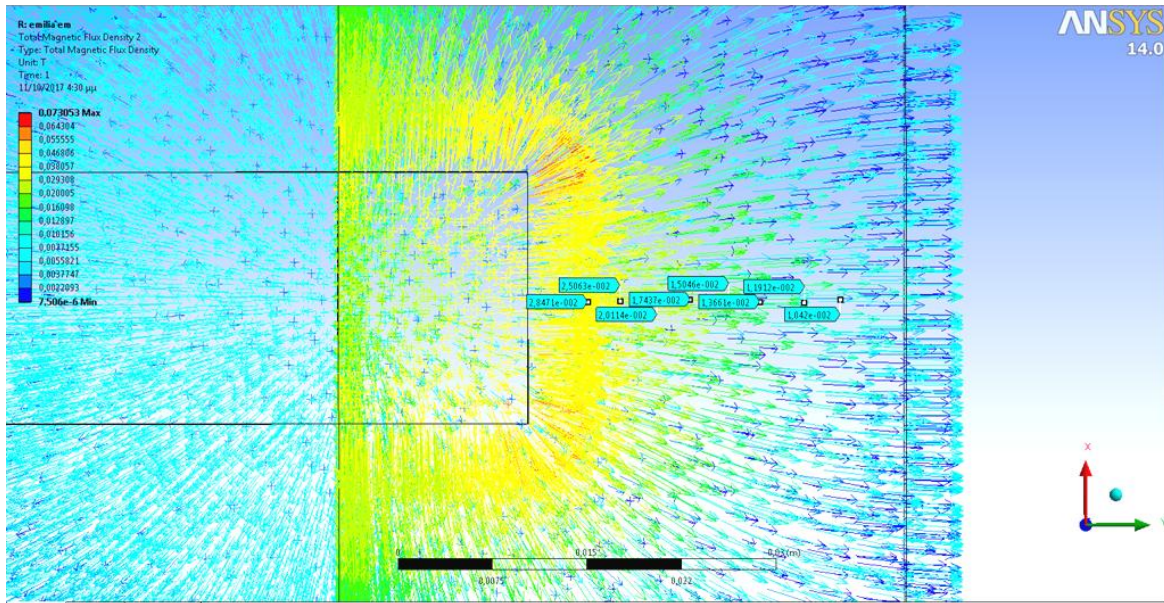
Στην εικόνα 2.18 φαίνεται η βάρθρωση του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή πόσο ομοιογενές είναι το μαγνητικό πεδίο. Όσο μεγαλύτερη ανομοιογένεια παρουσιάζει τόσο μεγαλύτερη βάρθρωση και τόσο μεγαλύτερη μαγνητική δύναμη.



**Εικόνα 2.18:** Απεικόνιση βάρθρωσης του μαγνητικού πεδίου

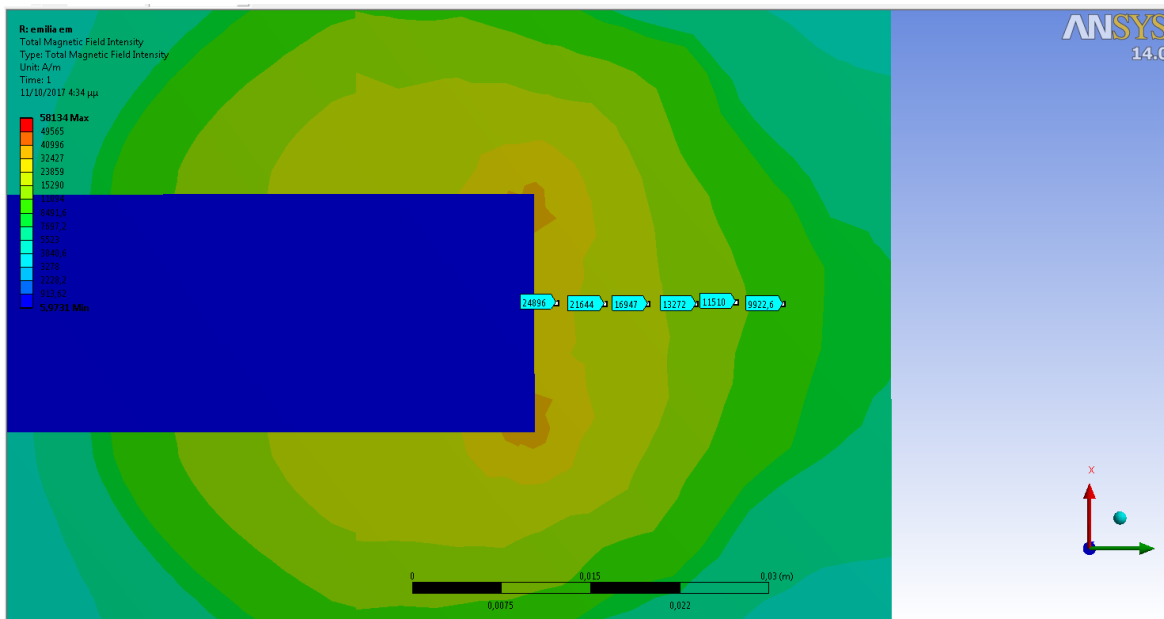


Στην εικόνα 2.19 απεικονίζονται οι μαγνητικές ροές καθώς και τα διανύσματα αυτών.

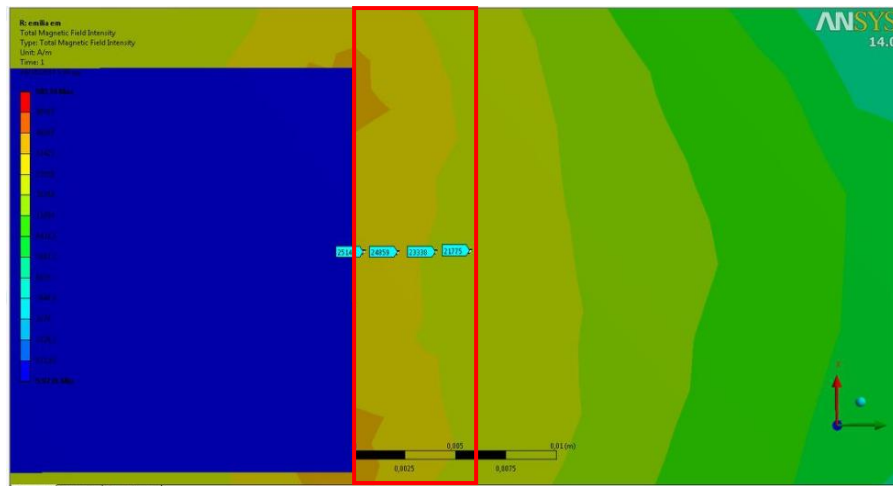


**Εικόνα 2.19:** Διανυσματική απεικόνιση μαγνητικής ροής

Τέλος, από την εικόνα 2.20 και 2.21 μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες για την ένταση του μαγνητικού πεδίου, καθώς και για την βάρθρωση που αυτό παρουσιάζει.



**Εικόνα 2.20:** Ένταση μαγνητικού πεδίου



**Εικόνα 2.21:** Ένταση μαγνητικού πεδίου

Μέσα στο κόκκινο κουτί περιορίζονται οι τιμές  $H \cdot dH/dx$  που αντιστοιχούν στην διάμετρο που έχει το σωληνάκι.

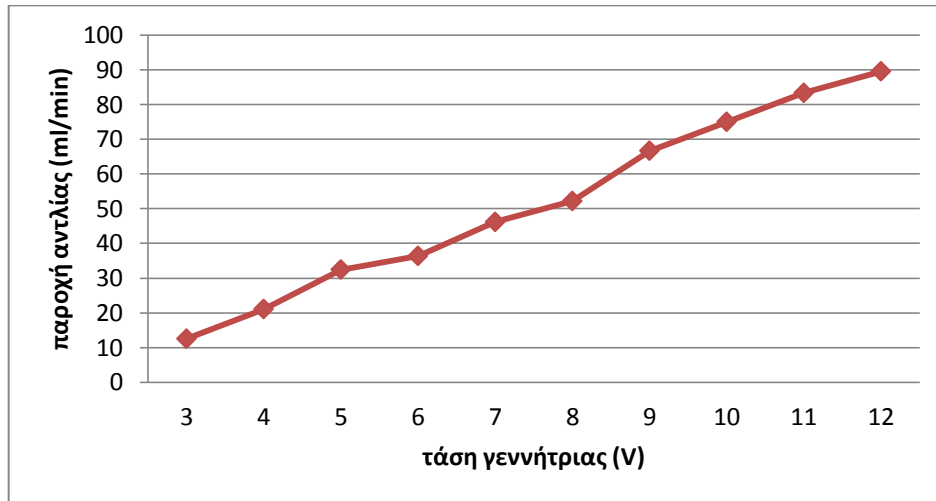
## 2.5 Πείραμα

### 2.5.1 Προετοιμασία πειράματος

Πριν την δημιουργία των προσομοιώσεων και πριν την υλοποίηση των πειραματικών διατάξεων για την στρέψη των μαγνητικών νανοσωματιδίων προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση είναι απαραίτητη μία πρώτη διερεύνηση της συμπεριφοράς των νανοσωματιδίων σε υγρό περιβάλλον καθώς και ο υπολογισμός διαφόρων μεγεθών που είναι απαραίτητα για τη διεκπεραίωση των πειραμάτων. Αρχικά, για τον υπολογισμό της παροχής ανάλογα με την τάση του τροφοδοτικού χρησιμοποιήθηκαν δύο ογκομετρικές φιάλες, ένα σωληνάκι σιλικόνης με διατομή 5mm εσωτερικά και μια περισταλτική αντλία. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν να μετρηθεί ο χρόνος που χρειάζεται ώστε να αδειάσουν 100ml νερού από τη μια ογκομετρική φιάλη στην άλλη σε διαφορετικές τιμές τάσης του τροφοδοτικού. Η τάση λειτουργίας ρυθμίστηκε από 3V μέχρι και 12V που είναι η μέγιστη τιμή για την περισταλτική αντλία. Έπειτα, υπολογίστηκαν οι διάφορες ταχύτητες ροής του διαλύματος σε σχέση με τη τάση ( $Q=U \cdot A$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4 καθώς και στο σχήμα 2.1 όπου παρουσιάζεται η γραμμική σχέση της τάσης της γεννήτριας και της παροχής της αντλίας.

ΤΑΣΗ V	ΧΡΟΝΟΣ t (sec)	ΧΡΟΝΟΣ t (min)	ΠΑΡΟΧΗ ml/min	ΠΑΡΟΧΗ m <sup>3</sup> /sec	ΤΑΧΥΤΗΤΑ u (m/sec)
3	480	8,000	12,500	2083E-07	0,0106
4	285	4,750	21,053	3509 E-07	0,0179
5	185	3,083	32,432	5405 E-07	0,0275
6	165	2,750	36,364	6061 E-07	0,0309
7	130	2,167	46,154	7692 E-07	0,0392
8	112	1,917	52,174	8696 E-07	0,00443
9	90	1,500	66,667	1111 E-06	0,0566
10	80	1,333	75,000	1250 E-06	0,0637
11	72	1,200	83,333	1389 E-06	0,0708
12	67	1,117	89,552	1493 E-06	0,0761

**Πίνακας 2.4:** Υπολογισμός παροχής περισταλτικής αντλίας και ταχύτητας διαλύματος συναρτήσει της τάσης της γεννήτριας



**Σχήμα 2.1:** Γραφική παράσταση παροχής αντλίας συναρτήσει της τάσης της γεννήτριας

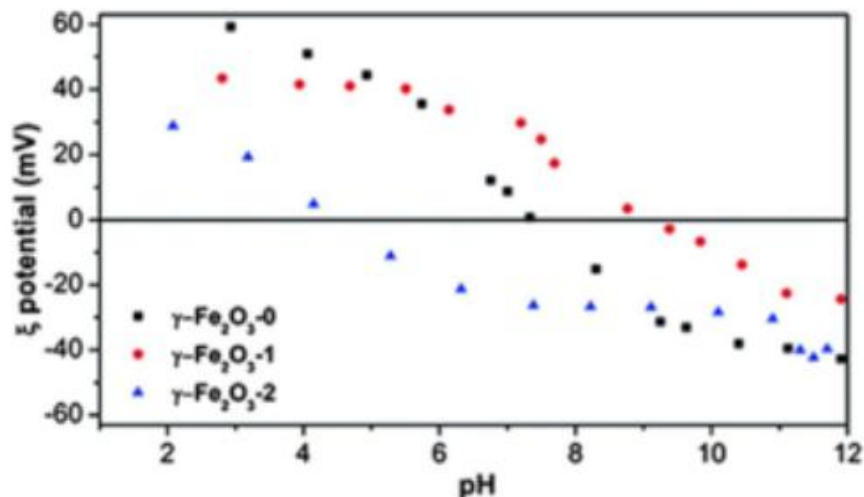
Έπειτα από μερικά πειράματα, παρατηρήθηκε ότι το νερό σαν μέσο κυκλοφορίας δεν ήταν κατάλληλο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, διότι τα νανοσωματίδια δημιουργούσαν μικρά συσσωματώματα ή προσκολλούνταν στα εσωτερικά τοιχώματα του σωλήνα σιλικόνης λόγω επιφανειακών τάσεων (κυρίως στα σημεία

απότομης αλλαγής της καμπυλότητας του σωλήνα) γεγονός που εμπόδιζε στην εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων.

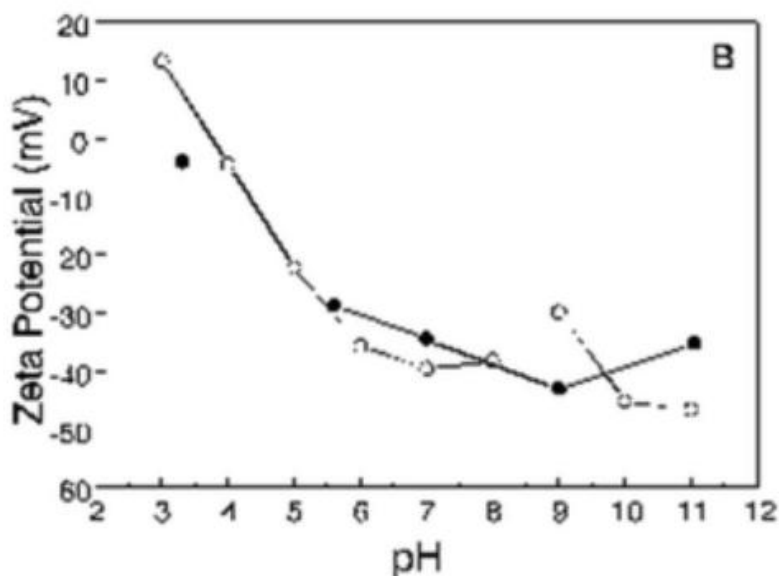
Για τους παραπάνω λόγους αντικαταστάθηκε το νερό με διάλυμα ολεϊκού οξέος και αιθανόλης. Οι αναλογίες με τις οποίες προστέθηκαν είναι 40ml αιθανόλη, 0,93gr ολεϊκό οξύ και 0,05gr μαγνητικά νανοσωματίδια. Το ολεϊκό οξύ είναι μια τασιενεργή ουσία η οποία διαλύεται στην αιθανόλη. Τα επιφανειοδραστικά-τασιενεργά είναι ενώσεις που μειώνουν την επιφανειακή τάση μεταξύ δύο υγρών ή μεταξύ ενός υγρού και ενός στερεού αποτρέπουν τη συσσωμάτωση και σταθεροποιούν τα σταγονίδια σε μίγματα μη αναμείξιμων υγρών. Τα επιφανειοδραστικά είναι συνήθως οργανικές ενώσεις που είναι αμφίφιλες, δηλαδή περιέχουν τόσο υδρόφοβες ομάδες (ουρές) όσο και υδρόφιλες ομάδες (κεφάλια)[31]. Συνεπώς, ένα επιφανειοδραστικό περιέχει τόσο μη υδατοδιαλυτά όσο και υδατοδιαλυτά συστατικά. Παρόλα αυτά όμως, για να εξασφαλιστεί ότι το ολεϊκό οξύ θα προσκολληθεί στα μαγνητικά νανοσωματίδια πρέπει το ζ-δυναμικό του καθενός να έχει αντίθετο πρόσημο σε συγκεκριμένο pH, διαφορετικά θα πρέπει να ρυθμιστεί το pH του διαλύματος.

Από τα διαγράμματα ζ-δυναμικού για τα μαγνητικά νανοσωματίδια (σχήμα 2.2) και για το ολεϊκό οξύ (σχήμα 2.3) για τη τιμή  $pH=7,33$  της αιθανόλης φαίνεται ότι τα μαγνητικά νανοσωματίδια οξειδίου σιδήρου έχουν θετικό ζ-δυναμικό ενώ το ολεϊκό οξύ αρνητικό. Συνεπώς, τα μαγνητικά νανοσωματίδια θα προσκολληθούν στο ολεϊκό οξύ με αποτέλεσμα την αποφυγή δημιουργίας συσσωματωμάτων, την αποφυγή προσκόλλησης στα τοιχώματα των σωλήνων σιλικόνης καθώς και στην καλύτερη ροή του διαλύματος εντός των σωλήνων σιλικόνης, λόγω του ότι το ιζώδες της αιθανόλης είναι παρόμοιο με του νερού.





**Σχήμα 2.2:** Διάγραμμα ζ-δυναμικού για  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  συναρτήσει pH [32]



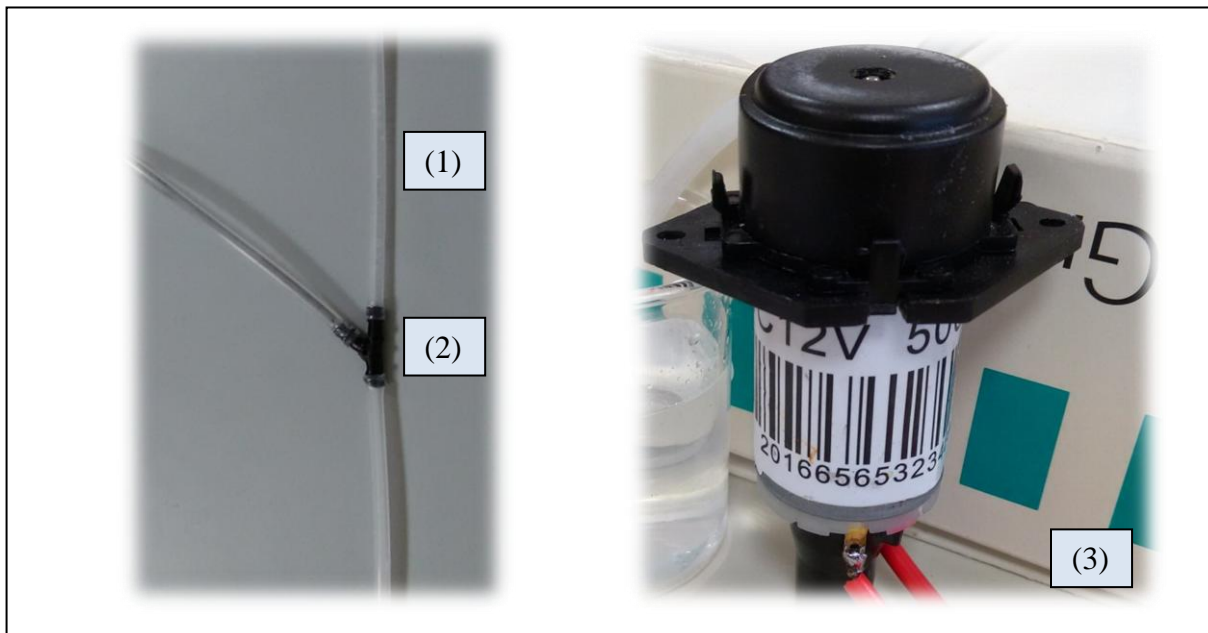
**Σχήμα 2.3:** Διάγραμμα ζ-δυναμικού ολεϊκού οξέος συναρτήσει pH [32]

### 2.5.2 Υλικά πειράματος

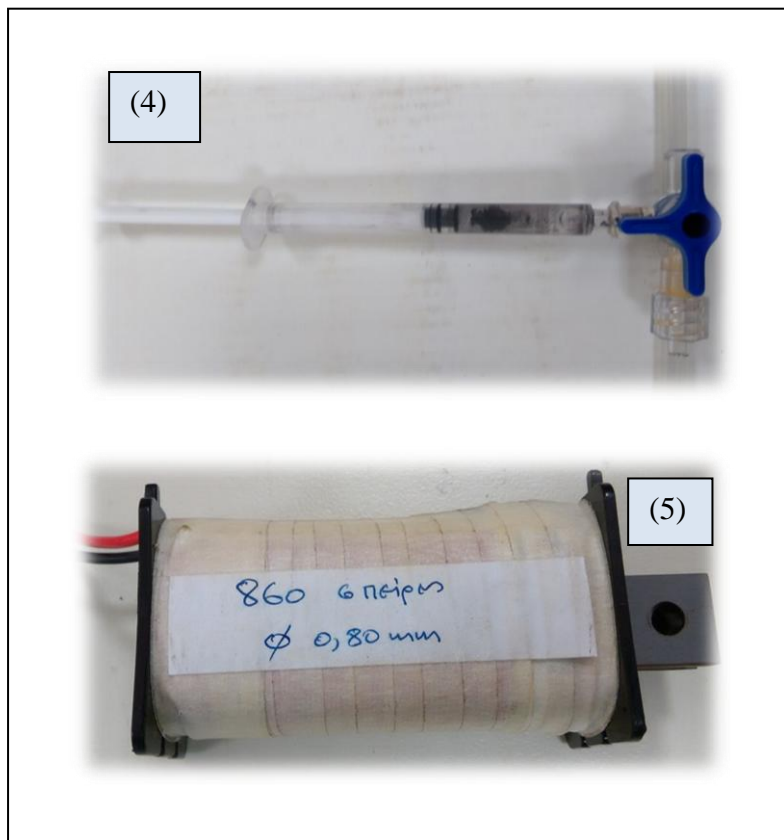
Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής μελετήθηκε το κατά πόσο μαγνητικά νανοσωματίδια (SPIONs μαγνητίτη) διαλυμένα σε διάλυμα αιθανόλης με ολεϊκό οξύ είναι δυνατό να διαχωριστούν και να στραφούν προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση με την εφαρμογή συγκεκριμένου μαγνητικού πεδίου που επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ενός ηλεκτρομαγνήτη. Η επιτυχία του πειράματος ανοίγει τον δρόμο για περαιτέρω μελέτη του συστήματος που προτείνεται παραπάνω.

Για την διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν:

1. Σωληνάκια σιλικόνης εσωτερικής διαμέτρου 5mm
2. Σύνδεσμοι σχήματος "Y"
3. Περισταλτική αντλία 12V
4. Σύριγγα για την παροχέτευση των μαγνητικών νανοσωματιδίων
5. Ηλεκτρομαγνήτης διαστάσεων 10cm x 4cm, 860σπειρών με  $d=0,8\text{mm}$
6. Τροφοδοτικό
7. Γυάλινη ογκομετρική φιάλη 50mL



**Εικόνα 2.22 :** (1),(2)Σωληνάκια και σύνδεσμοι σχήματος "Y",(3) Περισταλτική αντλία 12V



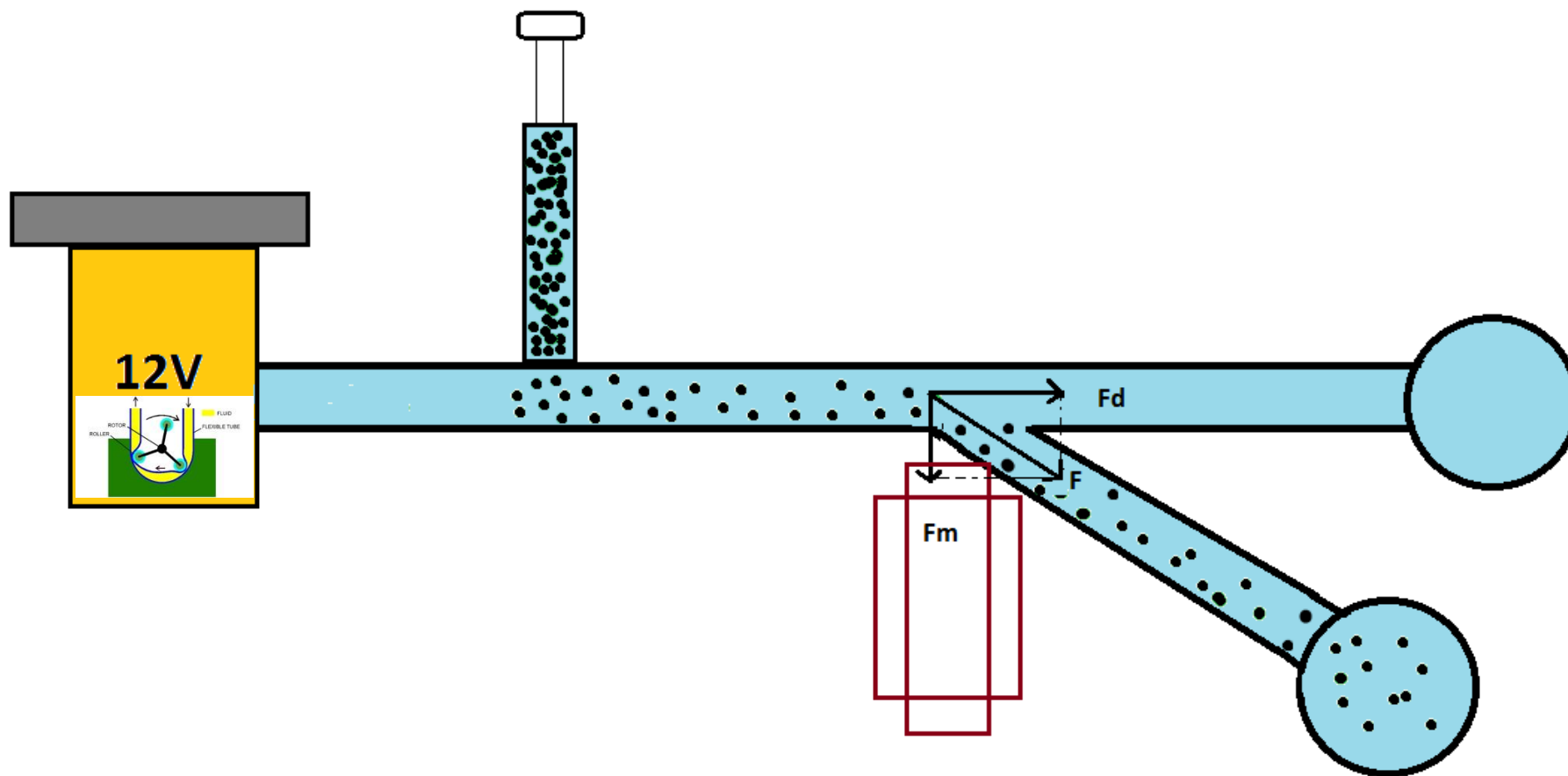
**Εικόνα 2.23:** (4) Σύριγγα για την παροχέτευση των μαγνητικών νανοσωματιδίων, (5) Ηλεκτρομαγνήτης

### **Διαδικασία του πειράματος**

Αρχικά παρασκευάζεται διάλυμα 40mL το οποίο αποτελείται από αιθανόλη, και ολεϊκό οξύ. Η αναλογία όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι 40ml αιθανόλης, και 0,93gr ολεϊκού οξέος.

Μέρος του παραπάνω διαλύματος αντλήθηκε με σύριγγα και σε αυτό προστέθηκαν ~0,05gr μαγνητικά νανοσωματίδια. Η σύριγγα τοποθετήθηκε στο σωληνάκι σιλικόνης μετά την αντλία όπως φαίνεται στο σχήμα. Η επιλογή της σύριγγας για την τροφοδοσία των μαγνητικών νανοσωματιδίων εξυπηρετεί, καθώς τα μαγνητικά νανοσωματίδια αν ήταν διασκορπισμένα στην αρχική δεξαμενή(φιάλη) θα καθίζαναν γιατί δεν υπάρχει η απαιτούμενη ανάδευση. Συνεπώς η χειροκίνητη τροφοδοσία στα πλαίσια της συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης βοήθα στην καλύτερη διάχυση των σωματιδίων στο διάλυμα.

Στο παρακάτω σκαρίφημα αναπαριστάται η πειραματική διάταξη.



*Εικόνα 2.24: Σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης*

Τροφοδοτικό συνδέεται με την αντλία και αυτή με την σειρά της, με σωληνάκι σιλικόνης, συνδέεται με έναν αυτοσχέδιο σύνδεσμο σχήματος "Υ" από φαρμακευτικό καθετήρα.

Οι δύο έξοδοι από τον σύνδεσμο σχήματος "Υ" συνδέονται και αυτοί με σωληνάκια, τα οποία καταλήγουν το καθένα σε μία φιάλη. Στις φιάλες αυτές, θα καταλήγουν στη μία το διάλυμα της αιθανόλης και του ολεϊκού οξέος καθαρό από νανοσωματίδια, ενώ στην άλλη θα είναι διαλυμένα τα νανοσωματίδια. Στο σημείο που βρίσκεται ο σύνδεσμος "Υ" τοποθετείται εξωτερικά και εφραπτομενικά ο ηλεκτρομαγνήτης ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τροφοδοτικό.

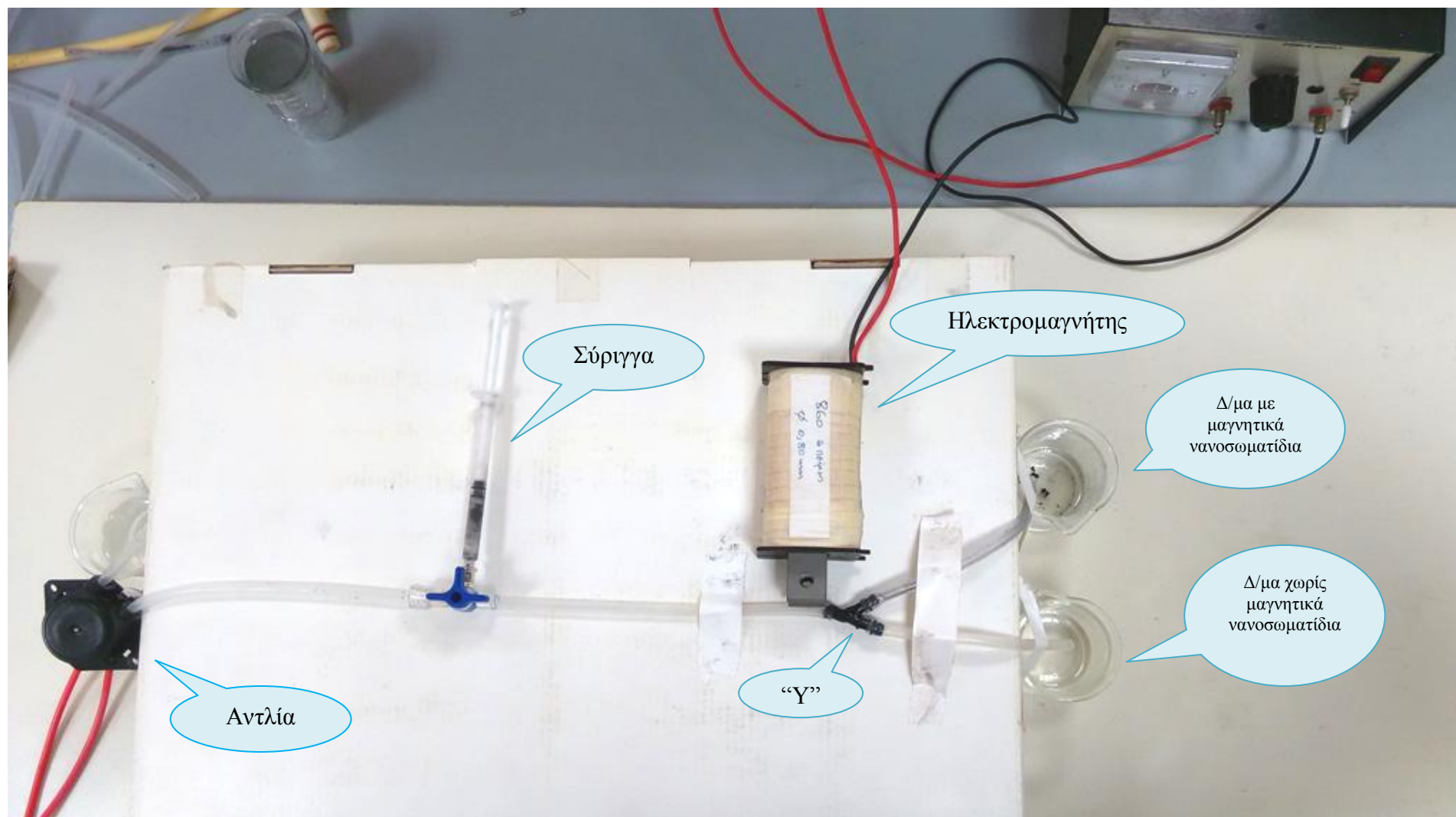
Ανάμεσα στην αντλία και το "Υ" βρίσκεται η σύριγγα που τροφοδοτεί τα νανοσωματίδια όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Σκοπός του πειράματος είναι μόλις η διάταξη τροφοδοτηθεί με το διάλυμα να εισαχθούν τα νανοσωματίδια και αυτά με την δύναμη που τους ασκεί ο ηλεκτρομαγνήτης να κατευθυνθούν προς αυτόν χωρίς όμως να ακινητοποιηθούν και με την δύναμη του ρευστού να οδηγηθούν στο ένα σωληνάκι και να βρεθούν στο ένα φιαλίδιο.

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα παραπάνω.

Μόλις τεθεί σε λειτουργία το τροφοδοτικό η αντλία αρχίζει να αντλεί το διάλυμα από το δοχείο που είναι συνδεδεμένη και να το παροχετεύει εντός του σωλήνα. Χειροκίνητα τα νανοσωματίδια εισέρχονται στο διάλυμα που κινείται προς τον σχηματισμό "Υ" . Στο σημείο που βρίσκεται ο ηλεκτρομαγνήτης τα σωματίδια αρχίζουν και κινούνται προς αυτόν με αποτέλεσμα να εισέρχονται λόγω του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου στο σωληνάκι πλησίον του ηλεκτρομαγνήτη και να καταλήγουν στο ένα φιαλίδιο.

Το σύστημα στήθηκε και λειτούργησε σύμφωνα με τα παραπάνω και η πειραματική διάταξη φαίνεται στην εικόνα 2.25.



**Εικόνα 2.25:** Πειραματική διάταξη

## 2.6 Αποτελέσματα πειράματος

Η παρούσα διπλωματική είχε βασικό στόχο μέσω αυτού του πειράματος να δείξει κατά πόσο οι προσομοιώσεις που σχεδιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω είναι αξιόπιστες και αν μπορούν σε μελλοντικό στάδιο να χρησιμοποιούνται για διαφορετικές τιμές, με σκοπό να διευκολύνουν τους υπολογισμούς και να ελαχιστοποιούν τα αναγκαία πειράματα.

Επιπλέον, μελετήθηκε κατά πόσο το σύστημα διαχωρισμού που προτάθηκε παραπάνω είναι αποτελεσματικό, δηλαδή κατά πόσο μέσω του μαγνητικού πεδίου που εφαρμόστηκε ο διαχωρισμός ήταν ικανοποιητικός ούτως ώστε αυτό το σύστημα να μελετηθεί εκτενώς με σκοπό την κλιμάκωση σε βιομηχανική εφαρμογή.

Εφαρμόζοντας ρεύμα 1,7 A, που με βάση τις προσομοιώσεις ήταν το κατάλληλο για το σύστημα διαπιστώθηκε ότι πολλά νανοσωματίδια κολλούσαν στα σωληνάκια. Κάνοντας αρκετές δοκιμές και χαμηλώνοντας σταδιακά την τιμή της έντασης του ρεύματος πρόκυψε η βέλτιστη τιμή για την πειραματική διάταξη που ήταν 1,3 A. Το σφάλμα αποδόθηκε στην περισταλτική αντλία.

Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος και αφού τα 40mL διαλύματος μέσω της περισταλτικής αντλίας συγκεντρώθηκαν στα δύο φιαλίδια ακολούθησε οπτική παρατήρηση των αποτελεσμάτων. Στην παρακάτω εικόνα διακρίνεται ότι πράγματι διαχωρίζονται τα σωματίδια σε ικανοποιητικό βαθμό.



**Εικόνα 2.26:** Φιάλες με δ/μα μετά την ολοκλήρωση του πειράματος

Στην αριστερή φιάλη όπως φαίνεται στην εικόνα 2.26, το διάλυμα της αιθανόλης και του ολεϊκού οξέος είναι απαλλαγμένο κατά μεγάλο βαθμό από μαγνητικά νανοσωματίδια ενώ στην δεξιά φιάλη βρίσκεται το μεγαλύτερο ποσοστό των μαγνητικών νανοσωματιδίων. Από τα αρχικά μαγνητικά νανοσωματίδια που εισήχθησαν στο αρχικό διάλυμα ένα πολύ μικρό μέρος, πέρασε στην λάθος φιάλη ενώ ένα άλλο μικρό ποσοστό κατακρατήθηκε πάνω στα σωληνάκια σιλικόνης και στο σύνδεσμο "Υ".



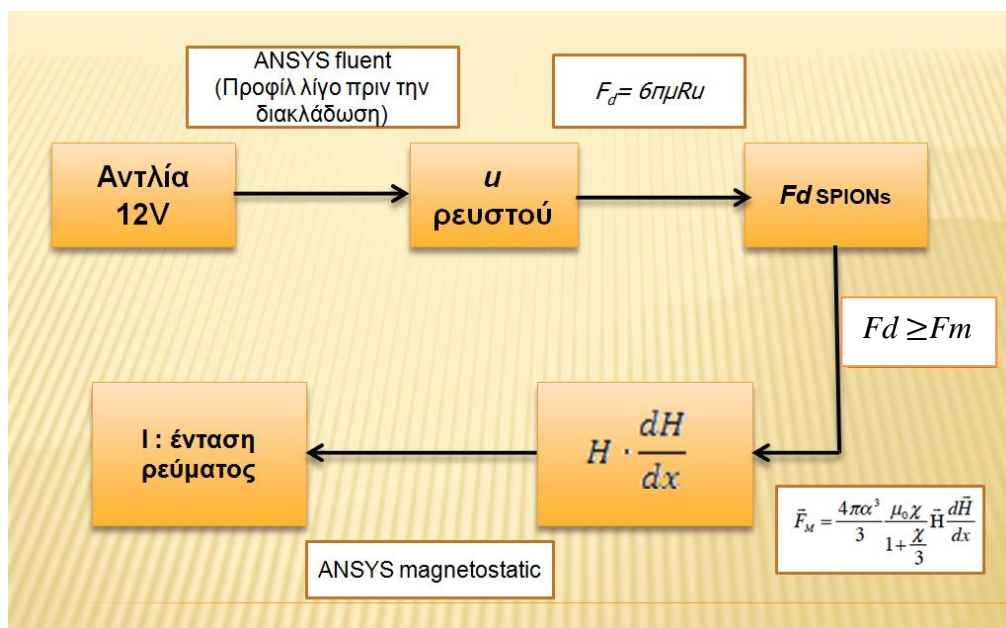
## **Κεφάλαιο 3. Συμπεράσματα και μελλοντικοί στόχοι**

### 3.1 Συμπεράσματα και μελλοντικοί στόχοι

Σκοπός του πειράματος ήταν η διερεύνηση ενός αποτελεσματικού τρόπου διαχωρισμού των μαγνητικών νανοσωματιδίων που βρίσκονται εντός κυττάρων άλγης και των κυττάρων που στερούνται αυτών σε περιβάλλον συνεχούς ροής, ώστε να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτο στάδιο στην κατασκευή ενός μαγνητικού mPBR και να τον τροφοδοτεί προκειμένου να βελτιωθεί σημαντικά η παραγωγικότητα της βιομάζας καθώς ταυτόχρονα να μειωθεί και το κόστος της παραγωγής. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν μαγνητικά νανοσωματίδια και όχι κύτταρα άλγης, καθώς ο βασικός στόχος της εργασίας ήταν να διερευνήσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που προσφέρουν προσομοιώσεις του συστήματος μαγνητικού διαχωρισμού οι οποίες έγιναν στο ANSYS Fluent και στο ANSYS Magnetostatic. Με βάση τις πληροφορίες που παρείχαν πραγματοποιήθηκε πείραμα, τα αποτελέσματα του οποίου αναλύονται σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Η έρευνα επικεντρώθηκε στην εύρεση του κατάλληλου μαγνητικού πεδίου και της κατάλληλης έντασης ρεύματος μέσω των οποίων επιτυγχάνεται διαχωρισμός μαγνητικών νανοσωματιδίων σε ένα υγρό διάλυμα με τη χρήση ενός ηλεκτρομαγνήτη.

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής παρουσιάζεται μία σχηματική αναπαράσταση της “ανάγνωσης” των προσομοιώσεων και των στοιχείων που λήφθηκαν από αυτές.



**Σχήμα 3.1:** Διάγραμμα ροής πληροφοριών μέσω των προσομοιώσεων

Μέσω των προσομοιώσεων πάρθηκαν πληροφορίες για τις τιμές της δύναμης που προκαλείται από τη ροή και με βάση αυτό εφαρμόστηκε κατάλληλο μαγνητικό πεδίο που να έλκει άλλα ταυτόχρονα να επιτρέπει στα μαγνητικά νανোসωματίδια να κινηθούν παρασυρόμενα από το ρευστό προς μία κατεύθυνση. Με βάση τα παραπάνω πραγματοποιήθηκε πείραμα το οποίο και επαλήθευσε τις αρχικές εικασίες αλλά και τις προσομοιώσεις με μία μικρή απόκλιση όσον αφορά το ρεύμα που έπρεπε να εφαρμοστεί. Η απόκλιση αυτή αποδόθηκε σε σφάλμα της αντλίας καθώς η συγκεκριμένη αντλία δεν δίνει αρκετά ομαλή ροή με αποτέλεσμα ένα μέρος των σωματιδίων να προσκολλάται στα σωληνάκια. Μειώνοντας σταδιακά την ένταση του ρεύματος βρέθηκε η κατάλληλη τιμή για την αποφυγή αυτού του φαινομένου σε αρκετά μεγάλο βαθμό. Μετά την μεταβολή της έντασης του ρεύματος το πείραμα πραγματοποιήθηκε επιτυχώς, με μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό να ακολουθεί λανθασμένη πορεία ή να προσκολλάται στα τοιχώματα από τα σωληνάκια σιλικόνης και στον σύνδεσμο σχήματος "Y". Μία άλλη λύση για την διόρθωση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση μίας καλύτερης αντλίας, με περισσότερους κυλίνδρους, όπου η πραγματική ροή της αντλίας θα είναι πιο κοντά σε αυτήν των προσομοιώσεων.

Τέλος, αναλύοντας τους τύπους που χρησιμοποιήθηκαν γίνεται αντιληπτό ότι σημαντική παράμετρος για την σωστή λειτουργία του παρόντος συστήματος είναι το μέγεθος των μαγνητικών σωματιδίων και των κυττάρων αντίστοιχα (σε περίπτωση που αυτά χρησιμοποιούνται), καθώς οι δυνάμεις είναι ανάλογες του μεγέθους των σωματιδίων και κυττάρων. Κατά συνέπεια μεταβάλλουν την τιμές των δυνάμεων και τελικά την ένταση του ρεύματος που πρέπει να εφαρμοστεί.

Η εργασία αυτή αποτελεί το πρώτο βήμα μίας μεγάλης έρευνας που πρέπει να πραγματοποιηθεί προκειμένου να υπάρξει μετάβαση από πειραματική σε βιομηχανική κλίμακα.

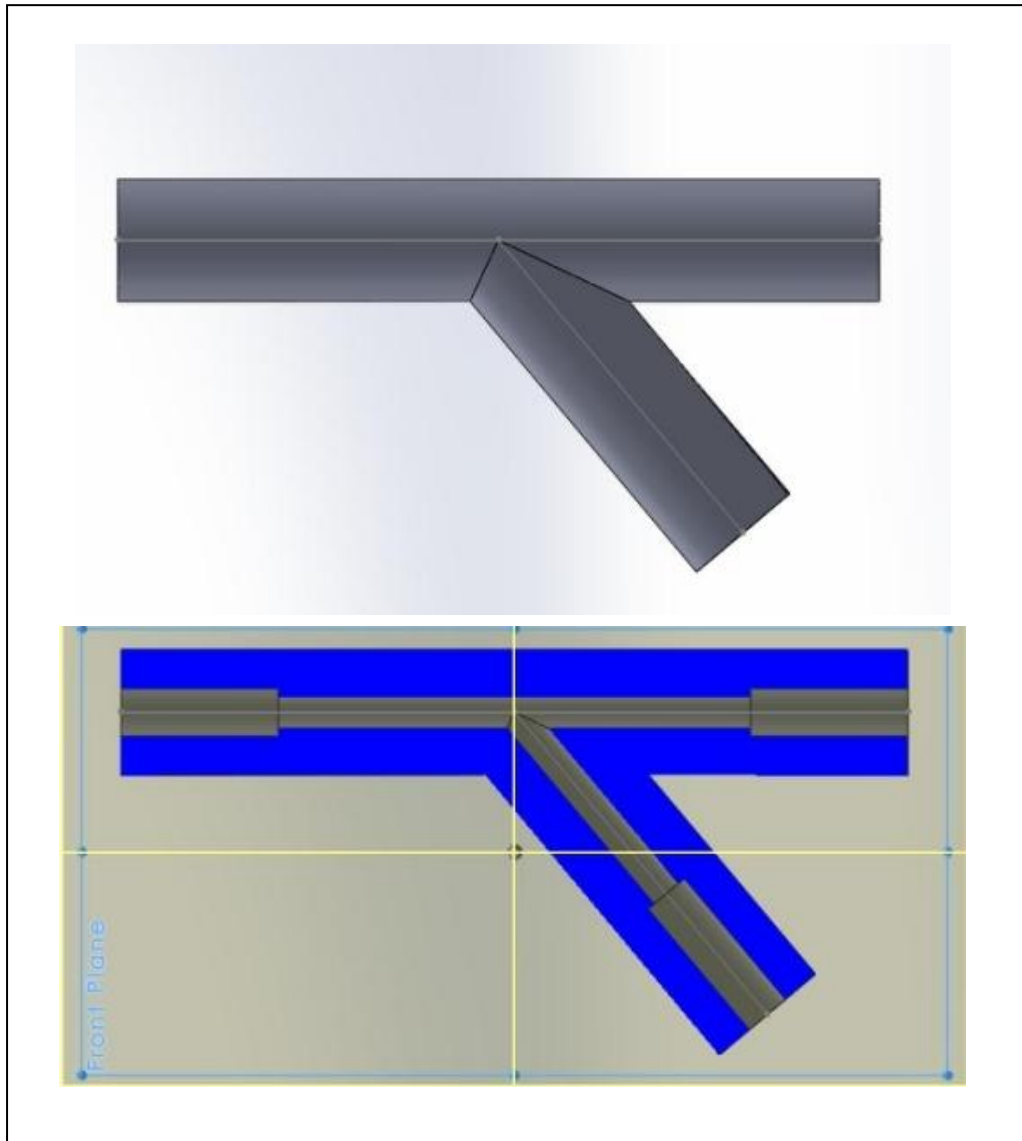
Η παρούσα έρευνα που γενικό στόχο έχει την δημιουργία ενός συστήματος συνεχούς ροής για την αποδοτική και οικονομική καλλιέργεια μικροάλγης έχει πολλές παραμέτρους, σε αυτή την κατεύθυνση παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω μελέτη:

1. Σε πρώτο στάδιο είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση των παραπάνω προσομοιώσεων και πειραμάτων με κύτταρα άλγης. Σε αυτήν την μελέτη θα πρέπει να γίνουν προσομοιώσεις και για τα δύο σημεία διαχωρισμού δηλαδή και για τις δύο διακλαδώσεις. Στην πρώτη θα διαχωρίζονται και θα απομακρύνονται τα ελεύθερα μαγνητικά νανοσωματίδια από τα ελεύθερα κύτταρα άλγης και από τα μαγνητικά τροποποιημένα κύτταρα άλγης και σε δεύτερο στάδιο θα διαχωρίζονται τα ελεύθερα κύτταρα από τα μαγνητικά τροποποιημένα κύτταρα άλγης. Σε αυτή την περίπτωση θα χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρομαγνήτες οι οποίοι θα εφαρμόζουν διαφορετικό πεδίο ο καθένας σε κάθε μία από τις διακλαδώσεις ανάλογα με τα στοιχεία που εξάγονται από τις προσομοιώσεις.
2. Τοποθέτηση φίλτρου στο σημείο της διακλάδωσης από εκεί που περνούν τα μαγνητικά νανοσωματίδια. Με αυτή την προσθήκη τα κύτταρα άλγης που μπορεί να παρασύρονται από την ροή δεν θα καταλήγουν στην λάθος δεξαμενή. Το φίλτρο αυτό θα λειτουργεί ως "δίχτυ προστασίας" καθώς δεν θα περνούν τα κύτταρα ενώ τα νανοσωματίδια θα διέρχονται κανονικά. Γνωρίζοντας την διάσταση των κυττάρων η οποία είναι περίπου 10μm, το φίλτρο θα πρέπει να έχει οπές μικρότερες από αυτήν , αλλά όχι πολύ μικρότερες για να μην δημιουργεί πρόβλημα στην διέλευση των μαγνητικών νανοσωματιδίων.
3. Η χρήση αντλιών με μεγαλύτερες τάσεις. Η μεγαλύτερη τάση θα αυξήσει την ταχύτητα του ρευστού με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται ο χρόνος που απαιτείται για την διαδικασία, παράγοντας πολύ σημαντικός για την αύξηση της παραγωγής. Ωστόσο πρέπει να μελετηθεί μέχρι ποια τιμή τάσης το σύστημα λειτουργεί σωστά και ισχύουν οι σχέσεις των δυνάμεων που είναι απαραίτητες για τον διαχωρισμό, ποιά είναι η βέλτιστη παροχή σε σχέση με τα σωληνάκια που χρησιμοποιούνται αλλά και σε σχέση με την βιωσιμότητα των κυττάρων.  
Τέλος θα μπορούσαν να δοκιμαστούν καλύτερες αντλίες και με περισσότερους κυλίνδρους για να αποφευχθούν αποκλίσεις μεταξύ της ροής των προσομοιώσεων και την πραγματικής ροής. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αντλία τριών κυλίνδρων και παρουσίαζε απόκλιση

καθώς η ροή δεν ήταν στρωτή, με την χρήσης αντλίας 12 κυλίνδρων η ροή θα είναι πιο κοντά σε αυτή των προσομοιώσεων.

4. Μία άλλη ιδέα που θα μπορούσε να μελετηθεί είναι η εφαρμογή παλμικού πεδίου. Με χρήση παλμικού πεδίου υπάρχει πιθανότητα να αποφεύγονται και να απομακρύνονται οι προσκολλήσεις των σωματιδίων ή/και κυττάρων στα τοιχώματα και στους συνδέσμους.
5. Ένα άλλο ιδιαίτερα ενδιαφέρον πείραμα προς την κατεύθυνση της βελτιστοποίησης της διαδικασίας είναι η κατασκευή συνδέσμων σε 3D printer οι οποίοι θα εφαρμόζουν τέλεια στις διαστάσεις που έχουν τα σωληνάκια και με αυτόν τον τρόπο θα αποφεύγεται η προσκόλληση σε αυτά μαγνητικών νανοσωματιδίων και κυττάρων καθώς επίσης θα μειώνεται η αλλαγή στην πίεση του ρευστού που πραγματοποιείται στα σημεία των συνδέσμων δημιουργώντας έτσι μία πιο ομαλή ροή.  
Στην εικόνα 3.1 απεικονίζεται η όψη και η τομή ενός τέτοιου είδους συνδέσμου, το οποίο θα έχει θέση για να εισάγεται το σωληνάκι.
6. Επόμενη παράμετρος που θα μπορούσε να μελετηθεί είναι η γωνία που σχηματίζεται μετά την διακλάδωση καθώς δημιουργεί μεταβολές στην ροή του ρευστού ενώ η επιλογή της σωστής γωνίας μπορεί να διευκολύνει και την κίνηση των σωματιδίων.
7. Τέλος ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δοθεί στην επιλογή του κατάλληλου μεγέθους νανοσωματιδίων και κυττάρων ώστε να καταστεί πιο αποδοτική η λειτουργία του συστήματος.

Σε μελλοντικές μελέτες θα έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να γίνει εμβάθυνση σε διάφορες παραμέτρους που μπορεί να επηρεάζουν το σύστημα. Τέτοιες μπορεί να είναι η συγκέντρωση – πλήθος των κυττάρων και να νανοσωματιδίων, η ταχύτητα του ρευστού, η βιωσιμότητα των κυττάρων σε διάφορες συνθήκες, ο ρυθμός ηλεκτροπόρωσης κ.α.



**Εικόνα 3.1:** Προσομοίωση συνδέσμου για κατασκευή σε 3D printers

Η παραπάνω μελέτη δίνει λύσεις όσον αφορά στη κλιμάκωση του συστήματος διαχωρισμού με στόχο την βελτιστοποίηση των συστημάτων αναπαραγωγής βιομάζας, καθώς και στη μείωση του κόστους της καλλιέργειας και των υποδομών της με σκοπό την εμπορευματοποίηση της βιομάζας από άλη. Η προτεινόμενη μέθοδος παραγωγής βιομάζας αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη πηγή πρωτογενών και δευτερογενών προϊόντων με σημαντική χρήση στην υδατοκαλλιέργεια, στα βιοκαύσιμα, στα φαρμακευτικά και καλλυντικά καθώς και στη βιοαποικοδόμηση οργανικών ρύπων (μείωση της ρύπανσης από αέρια θερμοκηπίου όπως το διοξείδιο του άνθρακα  $\text{CO}_2$  και τα οξείδια του αζώτου  $\text{NO}_x$ ) και επεξεργασία λυμάτων.

## **Βιβλιογραφικές Αναφορές**

1. Rosenberg, J.N., et al., A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution. *Current opinion in Biotechnology*, 2008. 19(5): p. 430-436.
2. L. Gouveia, *Microalgae as a feedstock for biofuels*. Springer, 2011.
3. Franklin, S.E. and S.P. Mayfield, Prospects for molecular farming in the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Current opinion in plant biology*, 2004. 7(2): p. 159-165.
4. Gantar, M. and Z. Svirčev, Microalgae and cyanobacteria: food for thought1. *Journal of phycology*, 2008. 44(2): p. 260-268.
5. Gimpel, J.A., et al., Advances in microalgae engineering and synthetic biology applications for biofuel production. *Current opinion in chemical biology*, 2013. 17(3): p.489-495.
6. Kirsten Heimann, Roger Huerlimann, *Microalgal Classification:Major Classes and Genera of Commercial Microalgal Species*.
7. Rosenberg, J.N., et al., A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution. *Current opinion in Biotechnology*, 2008. 19(5): p. 430-436.
8. Chojnacka K. and Marquez-Rocha F. J. (2004) "Kinetic and stoichiometric relationships of the energy and carbon metabolism in the culture of microalgae". *Biotechnology Advances*, 3): 21-34.
9. Abreu A. P., Fernandes B., Vicente A. A., Teixeira J. and Dragone G. (2012) "Mixotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* using industrial dairy waste as organic carbon source". *Bioresource Technology*, 118): 61-66.
10. Suh I. and Lee C.-G. (2003) "Photobioreactor engineering: Design and performance". *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 8(6): 313-321.
11. Carvalho A., Silva S., Baptista J. and Malcata F. (2011) "Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects". *Applied Microbiology and Biotechnology*, 89(5): 1275-1288.

12. Chen C.-Y., Yeh K.-L., Aisyah R., Lee D.-J. and Chang J.-S. (2011) "Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review". *Bioresource Technology*, 102(1): 71-81.
13. Molina E., Fernández J., Ación F. G. and Chisti Y. (2001) "Tubular photobioreactor design for algal cultures". *Journal of Biotechnology*, 92(2): 113-131.
14. Chisti Y. and Moo-Young M. (2002) "Bioreactors". In: R. A. Meyers eds. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, San Diego, p. 247-271.
15. Molina Grima E., Belarbi E. H., Ación Fernández F. G., Robles Medina A. and Chisti Y. (2003) "Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics". *Biotechnology Advances*, 20(7-8): 491-515.
16. Christenson L. and Sims R. (2011) "Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts". *Biotechnology Advances*, 29(6): 686–702.
17. <http://www.eecs.ucf.edu/~tomwu/course/eel4205/notes/02%20Magnetic%20Materials.pdf>.
18. Παπαϊωάννου, Δημήτρης (2010-2011), Σχεδίαση διάταξης τύπου Halbach για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου, Θεσσαλονίκη, Α.Π.Θ. Πολυτεχνική σχολή Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ.
19. Frank S. Barnes Ben Greenebaum (2006), *Bioengineering and Biophysical Aspects of Electromagnetic Fields*.
20. <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/jk1/lectures/node45.html> Magnetization.
21. Sergey S. Shevkoplyas, Adam C. Siegel, Robert M. Westervelt, bc Mara G. Prentiss and George M. Whitesides (2007), The force acting on a superparamagnetic bead due to an applied magnetic field.



22. Σαμοθρακίτης, Σταύρος (2014), Προσομοίωση και σχεδιασμός μαγνητικού συστήματος για τη μαγνητική οδήγηση νανοσωματιδίων.
23. ASTM E 2456-06, Terminology for Nanotechnology, ASTM International (2006).
24. Moghimi, S.M., A.C. Hunter, and J.C. Murray, Long-circulating and target-specific nanoparticles: theory to practice. *Pharmacological reviews*, 2001. 53(2): p. 283-318.
25. Plank, C., et al., The magnetofection method: using magnetic force to enhance gene delivery. *Biological chemistry*, 2003. 384(5): p. 737-747.
26. Lazaro, F., et al., Magnetic characterisation of rat muscle tissues after subcutaneous iron dextran injection. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Basis of Disease*, 2005. 1740(3): p. 434-445.
27. Pankhurst, Q.A., et al., Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. *Journal of physics D: Applied physics*, 2003. 36(13): p. R167.
28. Sibnath Kayal, Dipankar Bandyopadhyay, Tapas Kumar Mandalb and Raju V. Ramanujan April (2011), *The flow of magnetic nanoparticles in magnetic drug targeting*.
29. Yuh 'Adam', Tak-Sing Wong, Urvashi Bhardwaj, Jia-Ming Chen, Edward McCabe, and Chih-Ming Ho (2007), *Formation of high electromagnetic gradients through a particle-based microfluidic approach* .
30. Kandušer, M. and D. Miklavčič, Electroporation in biological cell and tissue: an overview, in *Electrotechnologies for extraction from food plants and biomaterials*. 2009, Springer. p. 1-37.
31. <http://www.samuelfurse.com/2011/11/bubbles-bubbles-everywhere-but-not-a-drop-todrink/>.
32. [https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/oleic\\_acid#section=Top](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/oleic_acid#section=Top).

## Βιογραφικό σημείωμα

**Λυμπέτη Αιμιλία**  
Μηχανικός Μεταλλείων-Μεταλλουργός Ε.Μ.Π.

### Προσωπικά Στοιχεία

Διεύθυνση	Πάρνηθος 14, Χαλάνδρι Αττικής
Τηλέφωνο	6949543185 2106848349
Ημερ/νία γέννησης	28/05/1990
Εθνικότητα	Ελληνική
Email	limpetiaimilia@gmail.com
Skype	aimilia_limpeti
LinkedIn	Aimilia Limpeti

### Σπουδές

10/2015-10/2017	Μεταπτυχιακό δίπλωμα, Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, ΔΠΜΣ Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου
09/2009-03/2015	Δίπλωμα, Μηχανικού Μεταλλείων - Μεταλλουργού, Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Βαθμός 7.86/10 (λίαν καλώς)  Κατεύθυνση: Μεταλλουργικές διεργασίες  - Διπλωματική Εργασία: «Ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων από εξοφλημένους καταλυτικούς μετατροπείς αυτοκινήτων με χλωριωτικές μεθόδους»
09/2005-05/2008	Απολυτήριο Λυκείου, Λεόντειο Λύκειο Πατησίων, Βαθμός 18.4/20

### Επαγγελματική Δραστηριότητα

07/2013-08/2013	Εκπόνηση πρακτικής άσκησης στην εταιρία «Αλουμίνιον Α.Ε.», στο εργοστάσιο Αγίου Νικολάου στην παραλία Διστόμου Βοιωτίας, με θέματα εργασιών: <ol style="list-style-type: none"><li>Εκμοντερνισμός της διαδικασίας ζύγισης και καταχώρησης του βάρους του παραγόμενου ρευστού μετάλλου.</li><li>Ανάλυση λειτουργίας λεκανών ηλεκτρόλυσης που πραγματοποιούνται διπλές μετρήσεις θερμοκρασίας.</li></ol>
09/2012-08/2013	Μέλος ερευνητικής ομάδας του εργαστηρίου «Τεχνολογία καυσίμων και λιπαντικών», του τμήματος Χημικών Μηχανικών, που εκτελεί το Ερευνητικό Πρόγραμμα του Ε.Μ.Π. «Ανάπτυξη και εφαρμογή ποιοτικού ελέγχου σε πρατήρια υγρών καυσίμων». Πραγματοποίηση επί τόπου δειγματοληψιών και μεταφορά των δειγμάτων στο εργαστήριο.

### Σεμινάρια-Συνέδρια

05/03/2015	Συμμετοχή ως ομιλήτρια σε ημερίδα με θέμα: «Αποτίμηση και παρουσίαση αποτελεσμάτων πρακτικής άσκησης Ε.Μ.Π.», Αθήνα
20/06/2014	Συνέδριο « <i>Raw Materials High Level Conference – Maximizing Value: The Importance of the Extractive Industry to Growth in the EU Economy and its Regions</i> », Αθήνα
19/06/2014	Ημερίδα με θέμα « <i>Raw Materials University Day (RMUD): Future, Needs, Opportunities</i> », Αθήνα
27/03/2013	Συμμετοχή σε διάλεξη με θέμα « <i>Basin and Petroleum Systems Modelling: Technology and applications for Petroleum Exploration Risk and Resource Assessments</i> », Αθήνα
22-23/02/2007	Διημερίδα με θέμα: « <i>Τα δικαιώματα του παιδιού</i> » με την συνεργασία του Υπουργείου Παιδείας, του κολλεγίου Αθηνών και της UNESCO

### Ξένες Γλώσσες

Αγγλικά	Άριστη Γνώση (Certificate of Proficiency in English, University of Michigan, 2011)
Γαλλικά	Πολύ καλή γνώση (Sorbonne C1, 2006)
Ισπανικά	Καλή γνώση (Diploma de español como lengua extranjera (Nivel B2, Instituto Cervantes, 2013 )

### Γνώσεις Η/Υ

AutoCAD, Surfer 11, EnviroPro Designer, MS Office

### Καλλιτεχνικές δεξιότητες

Γνώσεις κιθάρας (τρία χρόνια μαθημάτων σε ωδείο)

Γνώσεις γραμμικού και ελεύθερου σχεδίου (δύο χρόνια μαθημάτων σε αρχιτεκτονικό γραφείο)

### Ενδιαφέροντα

Κολύμβηση, ποδηλασία, κινηματογράφος, μουσική, μαγειρική, τεχνολογία

### Άδεια οδήγησης

A2, B