



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## Μελέτη και σχεδιασμός επαγωγικών στοιχείων για εφαρμογές μαγνητικής υπερθερμίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μπαρούτα Γ. Ελπίδα**

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2020





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## Μελέτη και σχεδιασμός επαγωγικών στοιχείων για εφαρμογές μαγνητικής υπερθερμίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μπαρούτα Γ. Ελπίδα**

**Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου**  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18<sup>η</sup> Μαρτίου 2020.

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

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

.....  
Παύλος-Πέτρος Σωτηριάδης  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2020

.....

Μπαρούτα Τ. Ελπίδα

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © ΜΠΑΡΟΥΤΑ ΕΛΠΙΔΑ, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Μετά από πολλές δεκαετίες εντατικών μελετών και πολυάριθμων κλινικών προσπαθειών, οι περισσότεροι τύποι ανθρώπινου καρκίνου παραμένουν ανίατοι. Η αντιμετώπιση του καρκίνου αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα θέματα που καλείται να αντιμετωπίσει η σύγχρονη επιστήμη δεδομένου ότι η ασθένεια αυξάνεται με ανησυχητικούς ρυθμούς τα τελευταία χρόνια. Σε αυτήν την προσπάθεια έρχεται ο τομέας της επιστήμης των υλικών κατασκευάζοντας μαγνητικά νανοσωματίδια επικαλυμμένα με βιοσυμβατά υλικά τα οποία εισέρχονται στον οργανισμό με διάφορες μεθόδους και με τη βοήθεια ενός εξωτερικού εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου οδηγούνται σε μαγνητική υπερθερμία. Ουσιαστικά με αυτόν τον τρόπο αξιοποιείται η θερμότητα που ελευθερώνεται από τα νανοσωματίδια όταν αυτά εξαναγκάζονται σε κίνηση μαγνήτισης λόγω του μαγνητικού πεδίου.

Στην ουσία, η υπερθερμία εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι μία μέτρια αύξηση της θερμοκρασίας (42-46°C) είναι ικανή να μεταβάλλει τη λειτουργικότητα των πρωτεϊνών με αποτέλεσμα την κυτταρική αποδόμηση προκαλώντας έτσι την απόπτωση, δηλαδή το θάνατο του κυττάρου.

Οι κύριες προκλήσεις αυτής της νέας θεραπείας του καρκίνου είναι η ενίσχυση της ισχύος θέρμανσης τέτοιων νανοσωματιδίων και ο έλεγχος της τοπικής θερμοκρασίας όγκου. Αυτοί οι παράγοντες υπερθερμίας εξαρτώνται από τις φυσικές ιδιότητες των μαγνητικών νανοσωματιδίων καθώς και από το μαγνητικό πεδίο. Επομένως, η αποτελεσματικότητα της μαγνητικής υπερθερμίας εξαρτάται κυρίως από τον σωστό προσδιορισμό των χαρακτηριστικών τους. Η μελέτη αυτή προσπάθησε να παράσχει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της θεραπείας της μαγνητικής υπερθερμίας μέσω του προσδιορισμού των χαρακτηριστικών του μαγνητικού πεδίου και προτείνοντας σχεδιαστικές λύσεις πηνίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

**Λέξεις κλειδιά:** Μαγνητική υπερθερμία, μαγνητικά νανοσωματίδια, λογισμικό ANSYS, θεραπεία καρκίνου, σχεδιασμός πηνίου



## Abstract

After many decades of intensive studies and numerous clinical trials, most types of human cancer remain incurable. Cancer treatment is one of the most important issues that modern science has to address as the disease has grown at an alarming rate in recent years. In this endeavor, the field of material science contributes by making magnetic nanoparticles coated with biocompatible materials. Once they enter the body by various methods- they are being activated by an external alternating magnetic field, leading them to magnetic hyperthermia.

In essence, the phenomenon of magnetic hyperthermia takes advantage of the fact that a moderate increase in temperature (42-46 ° C) is capable of altering the functionality of proteins. This results in cellular degradation, thereby causing apoptosis, meaning cell death.

The main challenges of this novel cancer therapy are the enhancement of heating power of such nanoparticles and the control of the local tumoral temperature. Those hyperthermia factors basically derived from magnetic nanoparticles as well as magnetic field. Thereby, the efficiency of magnetic hyperthermia is principally dependent on the proper determination of their features. This study tried to provide a comprehensive evaluation on the magnetic hyperthermia therapy through the determination of the features of the magnetic field suggesting design solutions concerning eligible coils used in such clinical applications.

**Keywords:** Magnetic hyperthermia, magnetic nanoparticles, ANSYS software, cancer treatment, coil design





## Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το Ακαδημαϊκό Έτος 2019-2020 στον Τομέα Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων.

Υπεύθυνος για την διπλωματική εργασία ήταν ο Καθηγητής κ. Ευάγγελος Χριστοφόρου, τον οποίο οφείλω να ευχαριστήσω θερμά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εν λόγω εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους καθηγητές κ. Π. Τσαραμπάρη και κ. Π. Σωτηριάδη, θεωρώντας ιδιαίτερη τιμή μου την συμμετοχή τους στην επιτροπή εξέτασης της παρούσας διπλωματικής. Φυσικά, η διεκπεραίωση της εργασίας αυτής θα ήταν αδύνατον να ολοκληρωθεί χωρίς την καθοριστική συμβολή του υποψήφιου διδάκτορα Μπάνη Γεώργιου τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την άψογη συνεργασία και τη συνεχή επικοινωνία που είχαμε, όπως επίσης και για τον χρόνο που αφιέρωσε ο ίδιος ώστε να επιτευχθεί το παρόν άρτιο αποτέλεσμα.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, Τηλέμαχο, Βαλεντίνα, Βικτωρία και Θωμαΐδα διότι χωρίς εκείνους δε θα είχα καταφέρει να φοιτήσω στο Πολυτεχνείο και να ξεκινήσει το ταξίδι αυτό, τον Γιάννη που με την παρουσία του με φώτιζε στα φοιτητικά έτη και την Αγγελική για τις ατελείωτες ώρες μελέτης και όμορφες στιγμές που μοιραστήκαμε κατά τη διάρκεια των χρόνων αυτών.

Αθήνα, Μάρτιος 2020, Ελπίδα Μπαρούτα



# Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Αντικείμενο της διπλωματικής.....	2
1.2	Δομή εργασίας.....	2
2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	3
2.1	Μαγνήτες και Ηλεκρομαγνήτες.....	3
2.2	Μαγνητικά κυκλώματα.....	7
2.2.1	ΜΕΔ ή διάρρευμα.....	7
2.2.2	Ένταση του μαγνητικού πεδίου.....	8
2.2.3	Μαγνητεγερτική διαπερατότητα.....	8
2.2.4	Μαγνητική αντίσταση.....	8
2.2.5	Μαγνητική ροή.....	9
2.3	Εξισώσεις Maxwell.....	10
2.3.1	Νόμος του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο.....	10
2.3.2	Νόμος του Gauss για το μαγνητικό πεδίο.....	11
2.3.3	Νόμος του Faraday-Henry ή νόμος της επαγωγής.....	11
2.3.4	Νόμος Ampere-Maxwell.....	12
2.4	Μαγνητισμός.....	13
2.4.1	Εισαγωγή.....	13
2.4.2	Βασικές έννοιες.....	14
2.5	Κατηγορίες μαγνητικών υλικών.....	16
2.5.1	Διαμαγνητικά υλικά.....	17
2.5.2	Παραμαγνητικά υλικά.....	17
2.5.3	Φερριμαγνητικά υλικά.....	18
2.5.4	Φερρομαγνητικά υλικά.....	18
2.5.5	Αντιφερρομαγνητικά υλικά.....	19
2.6	Βρόχος υστέρησης.....	20
2.7	Υπερπαραμαγνητισμός.....	23
2.8	Μαγνητική ανισοτροπία.....	24
2.9	Θεμελιώδη μαγνητικά μήκη.....	24
2.10	Μαγνητική Υπερθερμία.....	24
2.10.1	Εφαρμογές στη θεραπεία του καρκίνου.....	24
2.10.2	Θεραπευτικός Δείκτης ( Therapeutic Index, TI ).....	26
2.10.3	Η υπερθερμία ως υποβοήθημα της χημειοθεραπείας και ακτινοβολίας.....	28
2.10.4	Μαγνητικά Νανοσωματίδια.....	29
2.10.5	Μαγνητική Υπερθερμία με θερμικά συστήματα.....	36
2.10.6	Φαινόμενο αυξημένης διαπερατότητας και κατακράτησης.....	37
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	39
3.1	Εισαγωγή.....	39
3.1.1	Συντελεστής απομαγνήτισης σφαιρικών σωματιδίων.....	40
3.2	Σχεδιασμός πηνίου.....	41
3.3	Πλήρης παραμετροποίηση διάταξης μαγνητικής υπερθερμίας.....	45
3.3.1	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου.....	45
3.3.2	Ψύξη του πηνίου.....	52
3.4	Μελέτη εναλλακτικών πηνίων.....	62
3.5	Μελέτη νέας γεωμετρίας.....	69
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ.....	77
	Βιβλιογραφία.....	79



# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Οι βασικές αρχές και πολλές πρακτικές εφαρμογές της επαγωγικής θέρμανσης είναι καθιερωμένες από τις αρχές του 20ού αιώνα. Όπως για αρκετές ακόμα εφαρμογές του μαγνητισμού, η ραγδαία ανάπτυξη της επαγωγικής θέρμανσης συνέβη κατά τη διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου και μερικών μεταπολεμικών χρόνων.

Αυτή η τεχνολογία μεταφέρθηκε σταδιακά στην κοινωνία τα επόμενα χρόνια σε εφαρμογές στην καθημερινότητα της ανθρωπότητας, όπως οι επαγωγικές εστίες, ωστόσο η μετάφρασή τους στην ιατρική αποτελεί αναμφισβήτητη τη σπουδαιότερη χρήση της επαγωγικής θέρμανσης. Πρόκειται, λοιπόν, για την περίπτωση της μαγνητικής υπερθερμίας, μία θεραπεία κατά του καρκίνου η οποία βασίζεται στην θέρμανση των όγκων χρησιμοποιώντας μαγνητικά νανοσωματίδια υπό την παρουσία εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου.

Τα μαγνητικά νανοσωματίδια βασίζονται σε οξείδια του σιδήρου, όπως ο μαγνητίτης ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), παρουσιάζουν ποικιλομορφία στη σύσταση και τη λειτουργικότητά τους και λόγω των μαγνητικών ιδιοτήτων τους χρησιμοποιούνται ως διανομείς θερμότητας στην υπερθερμία. Η θερμική απόκριση των νανοσωματιδίων εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως είναι οι εγγενείς φυσικές και μαγνητικές ιδιότητές τους, οι ιδιότητες του μέσου και τις παραμέτρους του εφαρμοζόμενου πεδίου.

Η μαγνητική υπερθερμία είναι μια υποσχόμενη μέθοδος θεραπείας του καρκίνου, η οποία προς το παρόν εφαρμόζεται σε συνδυασμό με άλλες θεραπείες, όπως η χημειοθεραπεία και η ραδιοθεραπεία. Είναι μια μέθοδος υπερθέρμανσης των καρκινικών κυττάρων, όπου προκαλείται ένα έντονο τοπικό θερμικό σοκ ( $42\text{-}46^\circ\text{C}$ ) που οδηγεί ένα σημαντικό ποσοστό τους στον θάνατο.

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί αρχικά σε βάθος το φαινόμενο της μαγνητικής υπερθερμίας σε επίπεδο νανοσωματιδίων, εστιάζοντας σε μαθηματική ανάλυση του φαινομένου αυτού εντός των σωματιδίων, και έπειτα σε μακροσκοπικό επίπεδο με τη βοήθεια του λογισμικού ANSYS θα προσομοιωθούν διάφορα είδη πηνίου αφήνοντας έτσι παρακαταθήκη μία ολοκληρωμένη παρουσίαση και ανοιχτές προτάσεις στους επόμενους ερευνητές.

## 1.2 Δομή εργασίας

Το επιστημονικού περιεχομένου κείμενο που συντάχθηκε αποτελείται από τέσσερις ενότητες καταλήγοντας στη βιβλιογραφική αναφορά. Το Κεφάλαιο 1 αποτελεί μια εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας. Ο αναγνώστης μπορεί να λάβει μία μικρή γεύση για το τι θα ακολουθήσει,

μία σύντομη περιγραφή του φαινομένου που θα μελετηθεί και την σκοπιά από την οποία προσεγγίστηκε το πρόβλημα.

Το 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιέχει τις απαραίτητες θεωρητικές γνώσεις για την πλήρη κατανόηση ολόκληρης της εργασίας. Γίνεται εκτενής ανάλυση της μαθηματικής θεωρίας πίσω από το φαινόμενο της υπερθερμίας, όπως επίσης παρουσιάζεται η μέχρι τώρα χρήση της στην επιστήμη της ιατρικής.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται με τη μορφή εικόνων οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό ANSYS, με γνώμονα σχεδιαστικές δυσκολίες ή/και διευκολύνσεις που θα παρουσιάσουν σε μία πρακτική εφαρμογή, καθώς ο αναγνώστης ανάλογα με τις ανάγκες του θα επιλέξει το μοντέλο πηνίου που τον ευνοεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Εκτός αυτού, αναπτύσσονται οι μαθηματικές σχέσεις που εφαρμόζονται απευθείας στις προσομοιώσεις αυτές προκειμένου να είναι σαφής η ερμηνεία του φυσικού φαινομένου που εκτυλίσσεται μέσω των εικόνων.

Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 4 επισημαίνονται και συνοψίζονται τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις που προέκυψαν από την εκπόνηση της μελέτης καθώς επίσης και προτάσεις για μελλοντική εργασία σχετικά με την μαγνητική υπερθερμία, μία πολλά υποσχόμενη θεραπεία ενάντια στην ασθένεια της εποχής μας, τον καρκίνο.

Τέλος, στο Κεφάλαιο της βιβλιογραφίας αναφέρονται όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκμάτευση επιστημονικού έγκυρου υλικού, στις οποίες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει σε περίπτωση που επιθυμεί να εμβαθύνει σε κάποιο σημείο της εργασίας και διαθέτει άνεση στη χρήση της αγγλικής γλώσσας. Η πλειονότητα των πηγών αφορά περιοδικά και συνέδρια δημοσιευμένα στα αγγλικά.

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 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.

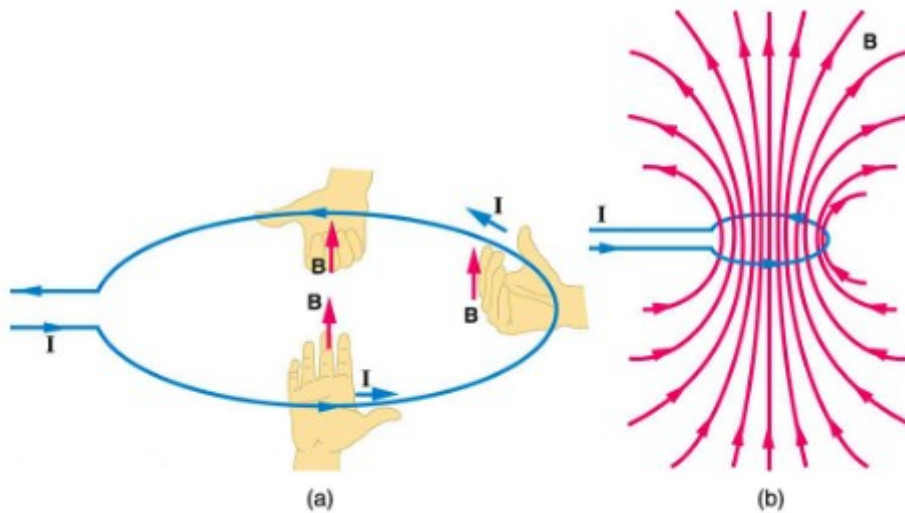
Η χρήση του μαγνήτη ως συσκευή πλοήγησης χρονολογείται πίσω στον όγδοο αιώνα στην Κίνα. Όμως, οι φυσικοί μαγνήτες χρησιμοποιούνταν από τους μάντεις το 200 π.Χ.. Φυσικοί μικροοργανισμοί, γνωστοί ως μαγνητοτακτικά βακτήρια, χρησιμοποιούν μαγνητικά νανοσωματίδια για να προσανατολιστούν και να μεταναστεύσουν κατά μήκος των γεωμαγνητικών πεδίων προς ευνοϊκά περιβάλλοντα. Τα μαγνητικά αυτά νανοσωματίδια αποτελούνται από μαγνητίτη,  $Fe_3O_4$ , ορολογία που προέρχεται από την περιοχή της Μαγνησίας στη Μικρά Ασία, καθότι ανακαλύφθηκαν εκεί μεγάλες ποσότητες μαγνητίτη[1].

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

Υπάρχουν φυσικοί και τεχνητοί μαγνήτες. 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.

Μαγνητικό πεδίο παράγεται επίσης και με τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από πηνίο. Τέτοιοι μαγνήτες ονομάζονται ηλεκτρομαγνήτες. Συνήθως στο εσωτερικό του πηνίου τοποθετείται σιδερένιος πυρήνας για την ενίσχυση του πεδίου.

Η φορά του μαγνητικού πεδίου ορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπως φαίνεται στις εικόνες:



**Σχήμα 1:** Κανόνας δεξιού χεριού: κατεύθυνση μαγνητικού πεδίου εντός και εκτός βρόχου που διαρρέεται από ρεύμα[2].

Σε αποστάσεις πολύ κοντινές στο βρόχο, το πεδίο θα είναι ίδιο με το πεδίο που θα σχηματιζόταν από έναν ευθύγραμμο αγωγό, λόγω των σχετικών αποστάσεων των σημείων του βρόχου.

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

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (2.1)$$

όπου  $d\mathbf{l}$ : αγωγός απειροστού μήκους,  $r^2$ : 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:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^2} \quad (2.2)$$



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:

$$B_x = \frac{\mu_0 N I}{2a} \quad (2.3)$$

όπου  $a$ : ακτίνα πηνίου.

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

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

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

Στους ηλεκτρομαγνήτες σε πυρήνες μετασχηματιστών, σε κινητήρες και γεννήτριες, απαιτείται δημιουργία ισχυρού μαγνητικού πεδίου για δεδομένο ρεύμα και γι' αυτό ο πυρήνας που χρησιμοποιείται προτιμάται να είναι από σιδηρομαγνητικό υλικό. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν στενό βρόχο υστέρησης και άρα απαιτείται λιγότερη ενέργεια για τη μαγνήτισή τους. Συγκεκριμένα, ο μαλακός σίδηρος είναι ο καταλληλότερος για αυτές τις εφαρμογές, μιας που έχει μεγάλη διαπερατότητα, χωρίς σημαντική υστέρηση. Αντίθετα, οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν πιο πλατύ βρόχο υστέρησης και για την απομαγνήτισή τους απαιτείται μεγάλο ανάστροφο πεδίο.

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

## Αριθμός στροφών $N$

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

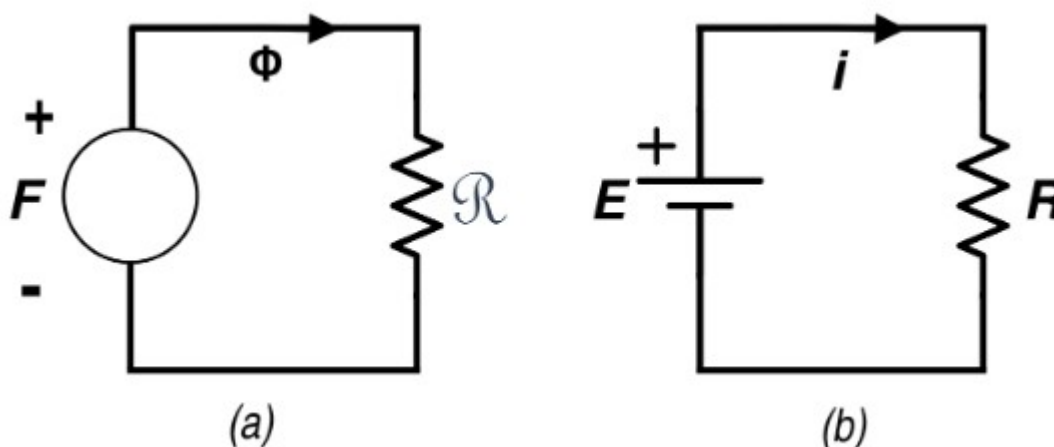
Με δεδομένες τις διαστάσεις του πηνίου και του σύρματος, μπορεί να υπολογιστεί η ωμική αντίσταση που θα προκύψει από τον τύπο:

$$R = \frac{(4DLl\omega)}{d^3} \quad (2.4)$$

όπου  $R$ : αντίσταση (ohm),  $\omega$ : κυκλική συχνότητα για εναλλασσόμενο ρεύμα,  $L$ : μήκος πηνίου (cm),  $D$ : διάμετρος πηνίου (cm),  $d$ : διάμετρος σύρματος (cm),  $l$ = αριθμός στρώσεων.

## 2.2 Μαγνητικά κυκλώματα

Ως μαγνητικό κύκλωμα ορίζεται ένα σύνολο σιδηρομαγνητικών υλικών που οδηγούν τη μαγνητική ροή σε κλειστές διαδρομές. Για τον υπολογισμό των μαγνητικών μεγεθών γίνεται αντιστοίχιση με τα ηλεκτρικά κυκλώματα όπως φαίνονται στο Σχήμα 2 και στον Πίνακα 1 που ακολουθούν:



**Σχήμα 2:** (a) Μαγνητικό κύκλωμα τοροειδούς πηνίου (b) Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα[3].

**Πίνακας 1:** Μαγνητικές ποσότητες και αντιστοίχιση με ηλεκτρικές.

Μαγνητική ποσότητα	Σύμβολο	Μονάδα	Ηλεκτρικό ανάλογο
Ροή	$\Phi$	Wb	Ρεύμα
ΜΕΔ	$F_m = Ni$	At	Τάση
Μαγνητική Αντίσταση	R	At/Wb	Αντίσταση
Διαπερατότητα	M	Wm/Atm	Συντελεστής Αγωγιμότητας
Μαγνητική Επαγωγή	B	T	Πυκνότητα Ρεύματος
Ένταση Μαγνητικού πεδίου	H	At/m	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου

### 2.2.1 ΜΕΔ ή διάρρευμα

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

### 2.2.2 Ένταση του μαγνητικού πεδίου

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

$$H = \frac{F_m}{l} \quad (2.5)$$

όπου  $l$  το μήκος ( $m$ ) του μαγνητικού κυκλώματος.

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

### 2.2.3 Μαγνητεγερτική διαπερατότητα

Είναι μια σταθερά που καθορίζει πόσο εύκολα περνούν οι μαγνητικές γραμμές από κάποιο υλικό. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού συμβολίζεται με  $\mu_0$  και ισούται με  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb/Atm}$ .

### 2.2.4 Μαγνητική αντίσταση

Είναι η ιδιότητα ενός σώματος να προβάλλει αντίσταση στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου σε αυτό και είναι ανάλογη με το μήκος της διαδρομής των γραμμών  $l$  μέσα στο σώμα και αντιστρόφως ανάλογη με τη μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  του σώματος και του εμβαδού της διατομής  $S$ . Δίνεται από τον τύπο:

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (2.6)$$

με μονάδες μέτρησης  $\text{At/Wb}$ .

Η αντίστροφη ποσότητα ονομάζεται μαγνητική αγωγιμότητα:

$$P_m = \frac{1}{R_m} \quad (2.7)$$

### 2.2.5 Μαγνητική ροή

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

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} \quad (2.8)$$

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

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

$$\Phi = \Phi_m + \Phi_l \quad (2.9)$$

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

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (\text{νόμος ρευμάτων}) \quad \text{και} \quad \sum_{i=1}^n I_i R_i = E \quad (\text{νόμος τάσεων})$$

σε αντιστοιχία με τους:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0 \quad (\text{αφού } \nabla B = 0) \quad \text{και} \quad \sum_{i=1}^n \Phi_i R_m = F \quad (\text{νόμος διαρρέυματος})$$

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

## 2.3 Εξισώσεις Maxwell

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

### 2.3.1 Νόμος του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο

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

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0} \quad (2.10)$$

Η διαφορική μορφή του νόμου του Gauss είναι:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0} \quad (2.11)$$

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

### 2.3.2 Νόμος του Gauss για το μαγνητικό πεδίο

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

Η κανονική μορφή του νόμου είναι:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.12)$$

ενώ η διαφορική μορφή:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.13)$$

### 2.3.3 Νόμος του Faraday-Henry ή νόμος της επαγωγής

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

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

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = \frac{-d(\int \vec{B} d\vec{S})}{dt} = \int_s \left( \frac{-\partial \vec{B}}{\partial t} \right) d\vec{S} \quad (2.14)$$

Σε διαφορική μορφή είναι:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{-\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.15)$$

Η φυσική ερμηνεία αυτής της εξίσωσης είναι ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

### 2.3.4 Νόμος Ampere-Maxwell

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

$$\oint_c \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I_i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{(d \int \vec{E} d\vec{S})}{dt} \quad (2.16)$$

και σε διαφορική μορφή:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.17)$$

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

## 2.4 Μαγνητισμός

### 2.4.1 Εισαγωγή

Η στοιχειώδης ποσότητα στον μαγνητισμό είναι η μαγνητική ροπή. Σε ατομικό επίπεδο, οι εσωτερικές μαγνητικές ροπές σχετίζονται με την περιστροφή των ηλεκτρονίων γύρω από τον άξονά τους (spin) καθώς και με την τροχιακή κίνησή τους γύρω από τον πυρήνα. Αυτές οι ατομικές μαγνητικές ροπές αλληλοεξουδετερώνονται όταν το σώμα δεν βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Στον κλασσικό ηλεκτρομαγνητισμό η μαγνητική ροπή ( $m$ ) μπορεί να εξηγηθεί ως εξής. Υποθέτοντας ένα ρεύμα  $I$  σε ένα στοιχειώδη βρόχο γύρω από μια περιοχή  $dA$ , η μαγνητική ροπή που εμφανίζεται στην περιοχή ισούται με:

$$dm = IdA \quad (2.18)$$

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

$$m = \int dm = I \int dA \quad (2.19)$$

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

$$m = IA \quad (2.20)$$

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



ηλεκτρόνια προστίθενται οι στροφορμές με αποτέλεσμα  $L$  και  $S$  να είναι οι συνολικές στροφορμές που επιδρούν στο άτομο. Οι αντίστοιχες μαγνητικές ροπές που αναπτύσσονται είναι οι εξής:

$$\mu_L = -\beta L \quad (2.20)$$

$$\mu_S = -2\beta S \quad (2.21)$$

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

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

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

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

## 2.4.2 Βασικές έννοιες

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

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

$$dH = \frac{1}{4\pi r^2} Idl \times u \quad (2.22)$$

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

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

$$B = \mu_0 H \quad (2.23)$$

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

$$B = \mu H \quad (2.24)$$

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

Μαγνήτιση ( $M$ ) ονομάζεται το φαινόμενο της επιλεκτικής σύνδεσης των διακριτών μαγνητικών ροπών των ατόμων, όταν αυτά συνδέονται επιλεκτικά σε ένα στερεό, πιθανά με την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και ισούται με τη μαγνητική ροπή του υλικού ανά μονάδα όγκου:

$$M = \frac{m}{V} \quad (2.25)$$

Η μαγνήτιση αυξάνει συναρτήσει του αριθμού των παραλληλιζομένων ηλεκτρονικών μαγνητικών ροπών σε μια κατεύθυνση. Όταν οι μαγνητικές ροπές σε ένα στερεό παραλληλίζονται σε μια διεύθυνση, η μαγνήτιση δεν μπορεί να μεγαλώσει περισσότερο και ονομάζεται μαγνήτιση κόρου. Η μαγνήτιση  $M$  συνεισφέρει μαζί με το μαγνητικό πεδίο  $H$ , στην μαγνητική επαγωγή  $B$ . Η σχέση μεταξύ  $M$ ,  $H$  και  $B$  έχει ως εξής:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.26)$$

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

Η μαγνητική επιδεκτικότητα ορίζεται ως εξής:

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2.27)$$

και ισχύει ότι:

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi) \quad (2.28)$$

## 2.5 Κατηγορίες μαγνητικών υλικών

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος κατηγοριοποίησης των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών αφορά την απόκρισή τους στην παρουσία μαγνητικού πεδίου. Διακρίνουμε λοιπόν πέντε κατηγορίες υλικών, διαμαγνητικά, παραμαγνητικά, φερριμαγνητικά, φερρομαγνητικά και αντιφερρομαγνητικά[1]. Η διαπερατότητα και η επιδεκτικότητα χρησιμοποιούνται για την κατάταξη των υλικών σε κατηγορίες. Τα υλικά τα οποία παρουσιάζουν κάποιας μορφής μαγνήτιση ονομάζονται μαγνητικά.

### 2.5.1 Διαμαγνητικά υλικά

Ο διαμαγνητισμός αποτελεί μια θεμελιώδη ιδιότητα όλων των στοιχείων της ύλης, όμως για τα υλικά που επιδεικνύουν μια άλλη μορφή μαγνητισμού (π.χ. παραμαγνητισμό), η διαμαγνητική συνεισφορά γίνεται αμελητέα[4]. Άτομα ή μόρια με συμπληρωμένες στιβάδες είναι διαμαγνητικά. Ο διαμαγνητισμός είναι μια αδύναμη μορφή μαγνητισμού που αποδίδεται κυρίως στην τροχιακή

κίνηση των ηλεκτρονίων, η οποία δημιουργεί μαγνητικές ροπές που αλληλοαναιρούνται. Όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο τα τροχιακά των ηλεκτρονίων αλλάζουν προσανατολισμό σύμφωνα με τον νόμο του Lenz με τέτοιο τρόπο ώστε το τροχιακό δυναμικό να προσπαθεί να αναιρέσει το εξωτερικό αίτιο. Τα διαμαγνητικά υλικά, λοιπόν, εμφανίζουν μαγνήτιση αντίθετης κατεύθυνση από αυτή του μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα να απωθούνται ελαφρώς από το μαγνητικό πεδίο. Η μαγνητική επιδεκτικότητα των υλικών αυτών είναι αρνητική, της τάξης του  $10^{-5}$ , και η μαγνητική διαπερατότητά τους λίγο μεγαλύτερη από τη μονάδα. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως η μαγνητική επιδεκτικότητα των υλικών αυτών είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας. Επιπλέον, με την απομάκρυνση του μαγνητικού πεδίου η μαγνήτιση επιστρέφει στο μηδέν. Κάποια μέταλλα καθώς και τα περισσότερα αμέταλλα είναι διαμαγνητικά, π.χ. ο ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ ), το νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ) και ο χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ ).

### 2.5.2 Παραμαγνητικά υλικά

Κάθε ουσία που έχει ασύζευκτα ηλεκτρόνια παρουσιάζει μια μόνιμη μαγνητική ροπή (λόγω της ιδιοπεριστροφής των ηλεκτρονίων και της περιστροφής τους γύρω από τον πυρήνα) και συμπεριφέρονται τα άτομά της σαν μικροί μαγνήτες. Όταν δεν υπάρχει ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αυτοί οι σωματιδιακοί μαγνήτες έχουν διάφορες στατιστικά κατανομημένες κατευθύνσεις και δεν παρατηρείται μαγνητική ροπή. Όταν εφαρμοσθεί όμως ένα μαγνητικό πεδίο προκύπτει προσανατολισμός των μαγνητικών ροπών των ατόμων και αύξηση της μαγνητικής ροής, επομένως το υλικό έλκεται από το πεδίο αυτό. Στα παραμαγνητικά υλικά η μαγνητική διαπερατότητα είναι λίγο μεγαλύτερη της μονάδας, ανεξάρτητη από την ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και μειώνεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, διότι με την αύξηση της θερμοκρασίας δυσχεραίνεται ο προσανατολισμός των μαγνητικών ροπών. Η δομή των ορυκτών αυτών χαρακτηρίζεται από τυχαία διεύθυνση των μαγνητικών διπόλων και στην ουσία τμήμα των διπόλων αυτών ευθυγραμμίζεται με το μαγνητικό πεδίο και έτσι καθίστανται μαγνητικά. Μετά, όμως, την απομάκρυνση του μαγνητικού πεδίου χάνουν τον μαγνητισμό τους. Επιπροσθέτως, η μαγνητική επιδεκτικότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας ( $T$ ) (νόμος Curie – Weiss), και θετική της τάξης από  $10^{-3}$  έως  $10^{-5}$ [4].

### 2.5.3 Φερριμαγνητικά υλικά

Ο φερριμαγνητισμός παρατηρείται σε ενώσεις με περίπλοκες δομές, π.χ. οξειδία του σιδήρου. Η διαφορά του με το φερρομαγνητισμό οφείλεται σε μικροσκοπικό επίπεδο. Πριν από χίλιετίες οι άνθρωποι ανακάλυψαν πως όταν ένα οξείδιο του σιδήρου, ο μαγνητίτης  $Fe_3O_4$ , επέπλεε στο νερό προσανατολίζονταν πάντα βόρεια. Ο μαγνητίτης αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα φερριμαγνήτη[5].

Οι διαφορές του φερρομαγνήτη από τον φερριμαγνήτη οφείλονται σε μικρές διαφορές στη δομή. Αρχικά, οι σιδηρομαγνήτες παρουσιάζουν ίδιο προσανατολισμό σε όλους τους μαγνητικούς τομείς ενώ στον φερριμαγνητισμό κατά κανόνα οι γειτονικοί μαγνητικοί τομείς προσανατολίζονται αντίθετα[2]. Επιπλέον, τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν υψηλότερη θερμοκρασία Curie, π.χ. το κοβάλτιο έχει θερμοκρασία Curie  $1.131^\circ C$  ενώ ο μαγνητίτης μόλις  $580^\circ C$ [4]. Τα φερριμαγνητικά υλικά όπως και τα φερρομαγνητικά χάνουν τη μαγνήτισή τους και συμπεριφέρονται ως παραμαγνητικά σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τη θερμοκρασία Curie[4].

### 2.5.4 Φερρομαγνητικά υλικά

Πρόκειται για την πιο σημαντική κατηγορία μαγνητικών υλικών που ονομάζονται ευρέως και σιδηρομαγνητικά. Ο σιδηρομαγνητισμός αποτελεί μία εγγενή ιδιότητα που καθιστά κάποια υλικά φυσικούς μαγνήτες. Ο σίδηρος (Fe), το νικέλιο (Ni), το κοβάλτιο (Co) και πολλά κράματά τους αποτελούν τυπικά φερρομαγνητικά υλικά.

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά τα άτομα υπό κανονικές συνθήκες έχουν ισχυρές μαγνητικές ροπές λόγω ασύζευκτων ηλεκτρονιακών spin στα 3d τροχιακά. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι ισοδύναμες με ένα πεδίο της τάξης των 1000 Tesla, δηλαδή 100 εκατομμύρια φορές μεγαλύτερο από το μαγνητικό πεδίο της γης[4]. Αυτές οι ροπές συνδυάζονται και σχηματίζουν μαγνητικές περιοχές με ομότροπα spin, που ονομάζονται περιοχές Weiss. Όταν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο τότε τα μαγνητικά δίπολα προσανατολίζονται και έτσι οι περιοχές Weiss ξεκινούν να διαμορφώνονται[6].

Σε μεγαλύτερη κλίμακα, επειδή οι περιοχές Weiss είναι τυχαία προσανατολισμένες και οι μαγνητικές τους ροπές αλληλοαναιρούνται, η συνολική μαγνήτιση  $M$  είναι μηδέν, λόγω της συνθήκης ελάχιστης ενέργειας. Με εφαρμογή μαγνητικού πεδίου όμως, οι περιοχές Weiss

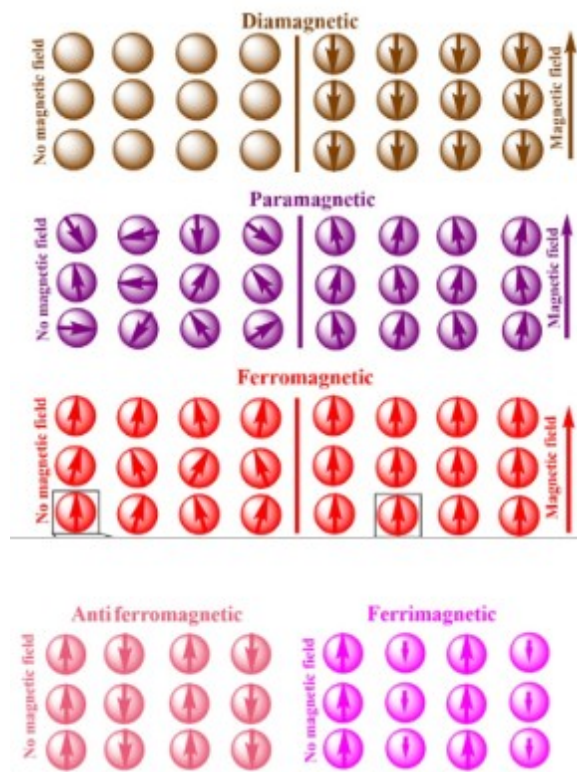
προσανατολίζονται παράλληλα με τη διεύθυνση του πεδίου με αποτέλεσμα να προκύπτουν υψηλές επιδεκτικότητες  $\chi$ . Σε αντίθεση με τις προηγούμενες κατηγορίες που το φαινόμενο διαρκούσε για όση ώρα ασκείται μαγνητικό πεδίο, εδώ, μετά την αφαίρεση του πεδίου, ο προσανατολισμός των περιοχών Weiss δεν έχει λόγο να μεταβληθεί. Το μαγνητικό πεδίο σε συνάρτηση με τη μαγνήτιση  $M$  σχηματίζουν ένα βρόχο υστέρησης, όπως θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

Ωστόσο, παρά τις μεγάλες δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των ηλεκτρονίων όταν φτάσουμε τη θερμοκρασία Curie η θερμική ενέργεια προσδίδει μία παράμετρο τυχαιότητας στο σύστημα[2]. Συγκεκριμένα, για τιμές θερμοκρασίας πάνω από τη θερμοκρασία Curie οι σιδηρομαγνητικές ιδιότητες εξαφανίζονται και πλέον κάνουμε λόγο για παραμαγνητισμό, δηλαδή με την απομάκρυνση του μαγνητικού πεδίου θα χαθούν και οι μαγνητικές ιδιότητες του υλικού[7].

Η μαγνητική επιδεκτικότητα των φερρομαγνητικών υλικών κυμαίνεται από 1 έως  $10^5$  ανάλογα με τη δομή του ατόμου[7].

### **2.5.5 Αντιφερρομαγνητικά υλικά**

Τα αντιφερρομαγνητικά υλικά έχουν χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα και γι' αυτό χαρακτηρίζονται συχνά ως παραμαγνητικά. Η επιδεκτικότητά τους είναι θετική και παίρνει χαμηλές τιμές όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία Néel ( $T_N$ ). Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τη θερμοκρασία Néel η διευθέτηση ατόμων και ιόντων γίνεται με τρόπο αντιπαράλληλο κάτι που έχει ως αποτέλεσμα οι μαγνητικές ροπές να αλληλοεξουδετερώνονται. Παράδειγμα τέτοιου υλικού αποτελεί ο αιματίτης ( $Fe_2O_3$ )[4].



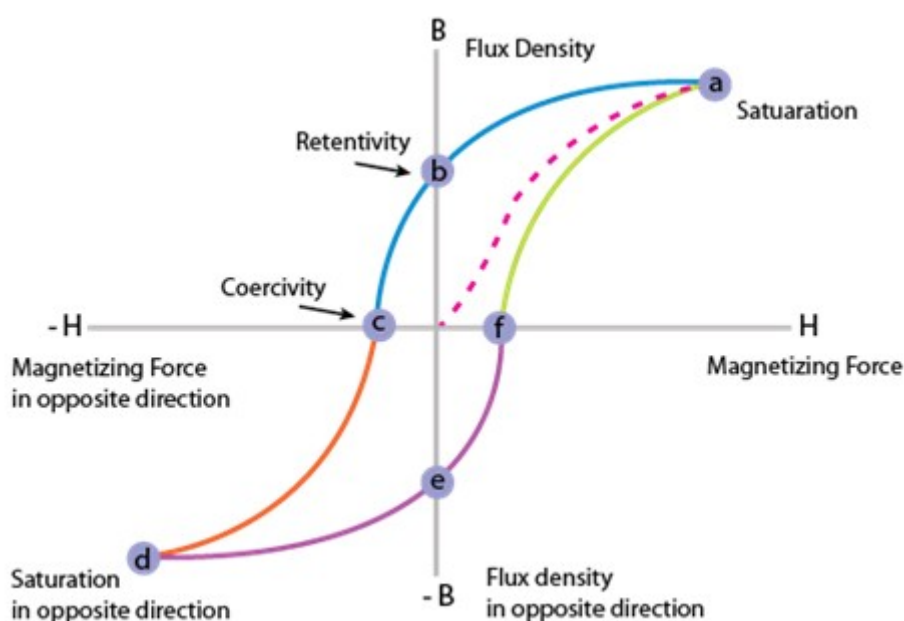
**Εικόνα 1:** Σχηματική απεικόνιση των μαγνητικών διπόλων διαφόρων τύπων μαγνητίσεων και η συμπεριφορά τους παρουσία μαγνητικού πεδίου[6].

## 2.6 Βρόχος υστέρησης

Όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, όπως ο σίδηρος, το νικέλιο και το κοβάλτιο, τοποθετείται σε ένα μαγνητικό πεδίο δύναμης  $H$ , τα άτομα αποκτούν μια προκαλούμενη μαγνητική στιγμή  $m$  τυχαία προσανατολισμένη. Οι μαγνητικές στιγμές που έχουν την ίδια κατεύθυνση ανά όγκο ατόμων ονομάζονται μαγνήτιση  $M$ . Η μαγνητική επαγωγή  $B$  δίνεται από την εξίσωση του Maxwell, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.26) .

Οι μικρές περιοχές της μαγνήτισης ονομάζονται μαγνητικοί τομείς, και τα όρια μεταξύ των τομέων καλούνται τοίχοι Weiss, όπως αναφέρθηκε. Ελλείψει ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το σιδηρομαγνητικό υλικό δεν παρουσιάζει καμία μαγνήτιση λόγω του τυχαίου προσανατολισμού των επιμέρους μαγνητίσεων στους μαγνητικούς τομείς (αρχή των αξόνων, Εικ.2).

Εντούτοις, όταν ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται, οι μαγνητικές στιγμές ευθυγραμμίζονται στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, έτσι οι τοίχοι εξαφανίζονται και η μαγνήτιση αυξάνεται. Στην εικόνα 2 φτάνοντας στο σημείο *a*, με επιπλέον αύξηση του μαγνητικού πεδίου η επαγωγή *B* επηρεάζεται ελάχιστα, φτάνει λοιπόν η μαγνήτιση σε κορεσμό (saturation)[8]. Στο σημείο *a* η επαγωγή είναι  $B_s$  (επαγωγή κόρου), η μαγνήτιση είναι  $M_s$  (μαγνήτιση κόρου) και οι μαγνητικές ροπές έχουν ευθυγραμμιστεί παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο *H*. Η  $M_s$  εξαρτάται από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου[9].



**Εικόνα 2:** Βρόχος υστέρησης φερρομαγνητικού υλικού[10].

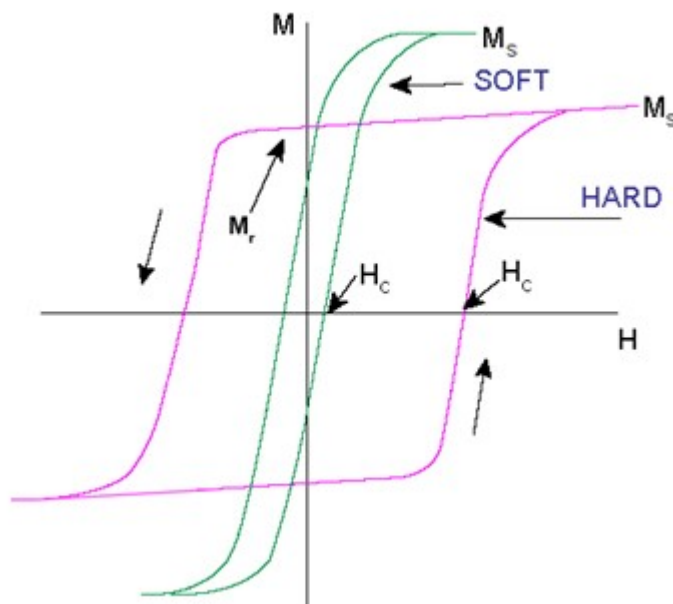
Στη συνέχεια, όσο το *H* ελαττώνεται, η καμπύλη μετακινείται προς το *b* όπου το εξωτερικό πεδίο είναι μηδέν, αλλά η επαγωγή έχει τιμή  $B_r$ . Τα σιδηρομαγνητικά υλικά λοιπόν κρατούν κάποια μνήμη του πεδίου αυτού (σημείο *b*, Εικ. 2)[8][9]. Το υλικό σε αυτό το σημείο θεωρείται μόνιμος μαγνήτης αφού χωρίς την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (παρατηρείται πως το *H* είναι μηδέν) υπάρχει η εναπομείνουσα μαγνήτιση  $M_r$  (remainanpce). Η μαγνητική επαγωγή καλείται και αυτή εναπομείνουσα  $B_r$ . Προκειμένου να μηδενιστεί η εναπομείνουσα μαγνήτιση και να κλείσει ο βρόχος υστέρησης πρέπει να εφαρμοστεί μία δύναμη καταναγκασμού (coercive force)[8]. Η τιμή της μαγνητικής διέγερσης  $H_c$ , για την οποία μηδενίζεται η μαγνήτιση ονομάζεται συνεκτικό πεδίο (coercivity).



Καθώς το συνεκτικό πεδίο αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται μέχρι το σημείο  $c$  όπου μηδενίζεται ( $B=0$ ) και άρα το υλικό απομαγνητίζεται[9]. Με αρνητική αύξηση του πεδίου το υλικό φτάνει σε μαγνήτιση κόρου ( $-M_s$ ) προς την αντίθετη φορά στο σημείο  $d$ . Στη συνέχεια, με ελάττωση του εξωτερικού πεδίου η καμπύλη διέρχεται απ' το σημείο  $e$  όπου η εναπομείνουσα μαγνητική επαγωγή είναι  $-B_r$ . Τέλος, με αύξηση του  $H$ , η καμπύλη του βρόχου περνάει από το  $f$  όπου έχουμε συνεκτικό πεδίο  $H_c$ .

Το εμβαδόν που περικλείεται απ' τις γραμμές του βρόχου υστέρησης ισούται με την ενέργεια που αποθηκεύεται ανά μονάδα όγκου στο υλικό.

Το συνεκτικό πεδίο (coercivity  $H_c$ ) είναι ένα μέτρο της ικανότητας των σιδηρομαγνητικών υλικών να αντιστέκονται σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο χωρίς να απομαγνητίζονται. Με βάση αυτήν την ιδιότητα τα σιδηρομαγνητικά υλικά μπορούν να ταξινομηθούν στους μαλακούς (soft) και σκληρούς (hard) μαγνήτες. Οι μαλακοί μαγνήτες χαρακτηρίζονται από χαμηλή τιμή μαγνητικής αντίστασης οπότε και απομαγνητίζονται από χαμηλό μαγνητικό πεδίο. Εντούτοις, οι σκληροί μαγνήτες διαθέτουν υψηλή μαγνητική αντίσταση με αποτέλεσμα να απομαγνητίζονται δύσκολα[8]. Στο Εικόνα 3 φαίνονται συγκριτικά οι βρόχοι υστέρησης ενός μαλακού και ενός σκληρού μαγνήτη.



**Εικόνα 3:** Βρόχοι υστέρησης μαλακών και σκληρών φερρομαγνητικών υλικών[10].

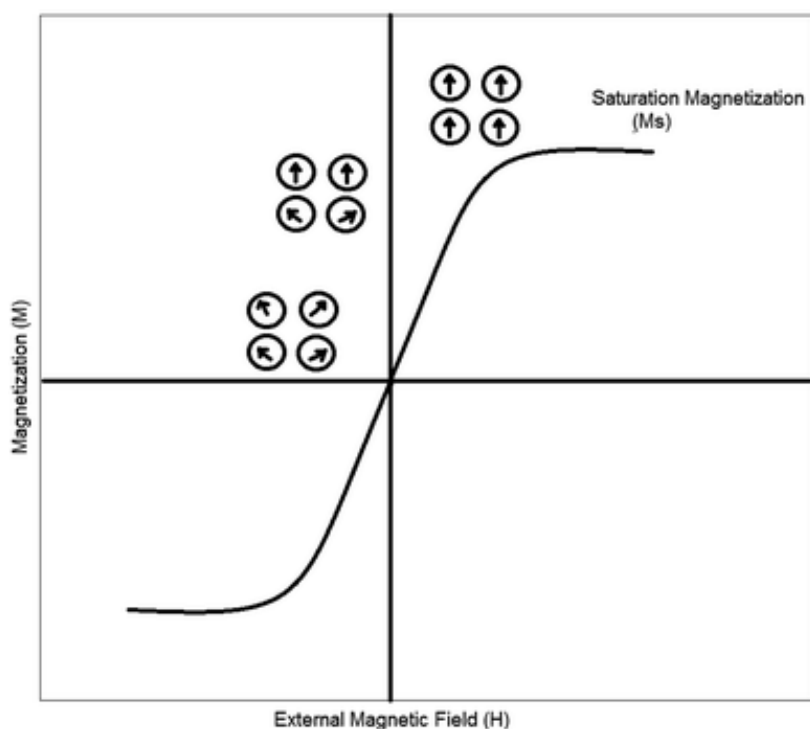
## 2.7 Υπερπαραμαγνητισμός

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, επομένως παύουμε να κάνουμε λόγο για σωματίδια αποτελούμενα από πολλούς τομείς (multi domain) αλλά πλέον αναφερόμαστε σε σωματίδια μονού τομέα (single domain)[8].

Φτάνοντας λοιπόν σε τιμές χαμηλότερες από την  $D_c$ , αναφερόμαστε σε μεγέθη μερικών νανομέτρων έως μερικών δεκάδων νανομέτρων, 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[7].

Οι πειραματικές ενδείξεις του υπερπαραμαγνητισμού είναι ότι δεν υπάρχει υστέρηση στην καμπύλη μαγνήτισης, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.

Τα τελευταία χρόνια το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει εστιάσει στα μικρότερα παραμαγνητικά σωματίδια μονού τομέα καθώς απορροφούν μεγαλύτερο ποσό ενέργειας συγκριτικά με τα σωματίδια πολλαπλών τομέων για τις βιοϊατρικές εφαρμογές που απαιτούν ένα όριο στο πλάτος και στη συχνότητα του μαγνητικού πεδίου[11].



**Εικόνα 4:** Απόκριση υπερπαραμαγνητικού υλικού σε μαγνητικό πεδίο. Παρατηρούμε πως δεν υπάρχει βρόχοςυστέρησης[12].

## 2.8 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[8]. Όσο χαμηλότερη είναι η συμμετρία, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια ανισοτροπίας και αντίστροφα. Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$E = KV \sin^2 \theta \quad (2.29)$$

όπου  $K$ : 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 το δύσκολο άξονα μαγνήτισης και προτιμάται ο εύκολος.

## 2.9 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  $I_S$ :

$$I_K = \sqrt{\frac{J}{K}} \quad (2.30)$$

$$I_H = \sqrt{\frac{2J}{HM_s}} \quad (2.31)$$

$$I_S = \sqrt{\frac{J}{2\pi M_s^2}} \quad (2.32)$$

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

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

## 2.10 Μαγνητική Υπερθερμία

### 2.10.1 Εφαρμογές στη θεραπεία του καρκίνου

Μετά από πολλές δεκαετίες εντατικών μελετών και πολυάριθμων κλινικών προσπαθειών, οι περισσότεροι τύποι ανθρώπινου καρκίνου παραμένουν ανίατοι. Ο καρκίνος έχει πολλές αιτιολογίες και εκδηλώσεις. Κάθε μία από αυτές διαφέρει και ανταποκρίνεται διαφορετικά στην εκάστοτε θεραπεία. Ο κυριότερος παράγοντας που εμποδίζει τη θεραπεία του είναι η έλλειψη κατανόησης των μηχανισμών με τους οποίους αναπτύσσεται ο καρκίνος. Ενώ υπάρχει μεγάλη πρόοδος στη

θεραπεία ορισμένων τύπων καρκίνου, πολλές μορφές όγκων παραμένουν ανυπότακτες στη σύγχρονες θεραπείες που διαθέτουμε.

Η υπερθερμία δεν αποτελεί αυτόνομο και τόσο αποτελεσματικό μέσο θεραπείας κατά του καρκίνου, όταν δρα μόνη της. Συχνότερα θεωρείται ως εναλλακτική μέθοδος για τη θεραπεία του καρκίνου, καθώς η αξιοσημείωτη έλλειψη παρενεργειών την καθιστά ελκυστικό υποκατάστατο της χημειοθεραπείας και της ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά, σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ήδη από την ιατρική κοινότητα σε συνδυασμό με τις προαναφερθείσες αποτελεσματικές μεθόδους- θα γίνει εκτενής αναφορά του θέματος αυτού στη συνέχεια. Στην ουσία, η υπερθερμία εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι μία μέτρια αύξηση της θερμοκρασίας (41-46°C) είναι ικανή να μεταβάλλει τη λειτουργικότητα των πρωτεϊνών με αποτέλεσμα την κυτταρική αποδόμηση προκαλώντας έτσι την απόπτωση, δηλαδή το θάνατο του κυττάρου[11].

Οι Roixip-Towle και Pirro το 1991 μελέτησαν την ευαισθησία διαφόρων κυττάρων στην υπερθερμία. Οι επιστήμονες εξέθεσαν υγιή και καρκινικά κύτταρα ανθρώπων και τρωκτικών σε διάφορες θερμοκρασίες *in vitro*[13]. Προφανώς, όλα τα κύτταρα πέθαιναν σε κάποια θερμοκρασία, όμως τα καρκινικά κύτταρα δεν παρουσίαζαν αυξημένη ευαισθησία στις μεταβολές της θερμοκρασίας σε σύγκριση με τα φυσιολογικά. Το γεγονός αυτό είναι πλήρως αντίθετο με την επίδραση που έχουν η χημειοθεραπεία και η ακτινοβολία στα κύτταρα, καθώς τα καρκινικά επηρεάζονται περισσότερο από τα υγιή κύτταρα, για αυτό βεβαίως και χρησιμοποιούνται οι τεχνικές αυτές.. Η δουλειά τους έδειξε πως προκειμένου η υπερθερμία να επιτύχει ως θεραπεία καρκίνου πρέπει να ενεργεί αποκλειστικά και μόνο στα καρκινικά κύτταρα. Αν και οι καρκινικοί ιστοί *in vivo* μπορεί να είναι περισσότερο ευαίσθητοι στη θερμότητα λόγω ανεπαρκούς τροφοδοσίας αίματος, με την υπάρχουσα τεχνολογία (RF, μικροκύματα, υπερήχους) δεν έχει επιτευχθεί η θέρμανση αποκλειστικά και μόνος των επιθυμητών όγκων.

Πλέον όμως, η υπερθερμία μπορεί να στοχοποιήσει κύτταρα με τη χρήση των μαγνητικών νανοσωματιδίων, τα οποία θερμαίνονται μέσω εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου. Έτσι, λοιπόν, μια καινοτόμα μέθοδος θεραπείας του καρκίνου έχει κάνει την εμφάνισή της, η οποία θα μελετηθεί στα επόμενα κεφάλαια.

## 2.10.2 Θεραπευτικός Δείκτης ( Therapeutic Index, TI )

Η πρόκληση όσον αφορά τη θεραπεία του καρκίνου είναι ο έλεγχος του όγκου χωρίς την αύξηση της τοξικότητας των φυσιολογικών ιστών. Ο όρος θεραπευτικός δείκτης, στο εξής TI (Therapeutic Index), χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση του ποσοστού της ενδεχόμενης θεραπείας μίας νόσου σε σχέση με το επίπεδο τοξικότητας των φυσιολογικών κυττάρων. Αυτή η τιμή χρησιμοποιείται ευρύτατα από την επιστήμη της φαρμακολογίας σε πληθυσμούς ατόμων ή κυττάρων προκειμένου να εξεταστεί η σχετική αποτελεσματικότητα μίας θεραπείας. Οι θεραπείες με υψηλό TI υπόσχονται κλινική επιτυχία, ενώ εκείνες με χαμηλό TI χρησιμοποιούνται μόνο σε βαριές περιπτώσεις.

Η ομοιότητα μεταξύ φυσιολογικών και νεοπλασματικών ιστών δυσχεραίνει την ανάπτυξη θεραπειών που πρόκειται να σκοτώσουν αποκλειστικά καρκινικά κύτταρα. Αυτός ο περιορισμός εξηγεί την ύπαρξη των σοβαρών παρενεργειών που παρουσιάζουν οι τυπικές αντικαρκινικές χημειοθεραπείες. Δυστυχώς, πολλές χημειοθεραπείες πρώτης γραμμής δεν έχουν επαρκή επιλεκτικότητα, παραδείγματος χάρι η σισπλατίνη- η πιο κοινή αντινεοπλασματική θεραπεία στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής- μπορεί να προκαλέσουν σημαντική τοξικότητα στο μυελό των οστών, στα γαστρεντερικά και περιφερειακά νευρικά κύτταρα.

Μέχρι στιγμής υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι αντινεοπλασματικής θεραπείας:

- I. Η Χειρουργική Ογκολογία βασίζεται σε τεχνικές απεικόνισης, για να οριοθετήσουν τον πάσχοντα ιστό από τον υγιή, και στη συνέχεια αποτελεί απόφαση του γιατρού και του παθολόγου ποιος ιστός πρέπει να αφαιρεθεί πραγματικά. Η χειρουργική ογκολογία μπορεί να είναι επιτυχής στον έλεγχο της τοπικής νεοπλασματικής νόσου, ωστόσο στο μεταστατικό περιβάλλον είναι υπό αμφισβήτηση τα αποτελέσματά της.
- II. Η χρήση της χημειοθεραπείας βασίζεται στην εκμετάλλευση της ταχύτατης διαίρεσης των κυττάρων προκειμένου να σκοτωθούν τα καρκινικά κύτταρα, καθώς η πλειονότητα των νεοπλασμάτων αναπτύσσονται πολύ γρήγορα. Επιπροσθέτως, η χημειοθεραπεία είναι ικανή να εντοπίσει σχεδόν παντού στο σώμα τους όγκους, όμως όπως έχει ήδη αναφερθεί μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκή TI.
- III. Η ακτινοβολία έχει καταφέρει να μεγιστοποιήσει το TI εκμεταλλεύομενη τους μη αποδοτικούς μηχανισμούς επισκευής του DNA των καρκινικών κυττάρων, οι οποίοι

καθιστούν τους καρκινικούς ιστούς πιο ευάλωτους από τους φυσιολογικούς στην ακτινοβολία.

Καμία από τις παραπάνω θεραπείες δεν έχει οδηγήσει σε αξιόπιστα θεραπεύσιμα αποτελέσματα για την πλειονότητα των νεοπλασμάτων. Παρόλα αυτά, ο συνδυασμός τους μπορεί να αυξήσει το TI, χωρίς την ύπαρξη πρόσθετων παρενεργειών στους υγιείς ιστούς.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι θέρμανσης των σωματιδίων:

- I. Οπτική θέρμανσης με τη χρήση laser
- II. Υπέρηχη θέρμανση μικρών φυσαλίδων.
- III. Θέρμανση των οδείδων του σιδήρου με εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο αξιοποιώντας τις ιδιότητες των σωματιδίων αυτών.

Κάθε μέθοδος έχει ορισμένα πλεονεκτήματα αλλά και περιορισμούς. Οι οπτικές μέθοδοι θερμαίνουν τα σωματίδια επαρκώς αλλά είναι εξαιρετικά περιορισμένες λόγω της εξασθένησης της δέσμης laser καθώς περνάει μέσα από τους ιστούς. Η χρήση υπερήχων παρουσιάζει πολύ καλή επιλεκτικότητα όμως περιορίζεται αρκετά λόγω της ταχύτητας του ήχου εξαιτίας του περιορισμένου ανοίγματος του εφαρμογέα. Τα μαγνητικά σωματίδια μπορούν να θερμανθούν σε μεγάλα βάθη οπουδήποτε υπάρχουν καρκινικά κύτταρα. Επιπροσθέτως, μπορούν πέρα από το μέσο θέρμανσης, να αποτελέσουν μέσο απεικόνισης και εντοπισμού των ιστών αυτών.

### **2.10.3 Η υπερθερμία ως υποβοήθημα της χημειοθεραπείας και ακτινοβολίας**

Είναι ευρέως γνωστό πως η έκθεση των κυττάρων σε υψηλές θερμοκρασίες τα καθιστούν πιο ευαίσθητα στη χημειοθεραπεία και την ακτινοθεραπεία και πιθανότατα μειώνουν τη βιωσιμότητά τους.

Μία από τις πιο επιτυχημένες εφαρμογές της υπερθερμίας ως αντινεοπλασματικό μέσο αποτελεί η θεραπεία των ενδοπεριτοναϊκών μεταστάσεων από όγκους ωοθηκών[13]. Σε αυτή την τεχνολογία, η υπερθερμία χρησιμοποιείται για την αύξηση της αποτελεσματικότητας ορισμένων χημειοθεραπευτών. Ενώ η μη επιλεκτική φύση αυτής της θερμότητας είναι ευεργετική σε αυτήν την περίπτωση, η ανικανότητα να μεταφερθεί μία ομοιόμορφη, επαρκής θερμική δόση σε όλες τις μεταστάσεις έχει περιορίσει την κλινική της απόδοση.

Επιπλέον, πολλή προσπάθεια έχει καταβληθεί για την οδήγηση των χημειοθεραπευτών και έλεγχο του ποσού που απελευθερώνουν στη μεριά του όγκου. Αυτή τη στιγμή είναι υπό κατασκευή νανοσωματιδιακές ενώσεις όπου μεταφέρουν τους χημειοθεραπευτές[13].

Βελτιστοποιώντας τη σύζευξη της χημειοθεραπείας και υπερθερμίας, πρέπει να ληφθεί υπόψιν τον τύπο του όγκου, τη δόση, το κλινικό αντίκτυπο και τη θερμοκρασία. Μελέτες έχουν προτείνει ότι οι αλκυλοαγωγές, όπως η κυκλοφωσφαμίδη, η ιφωσφαμίδη και η μελφαλάνη, μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικές στις 41,5°C, ενώ άλλες θεραπευτικές ουσίες, όπως η σισπλατίνη φαίνεται να είναι αποτελεσματικές σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η χρονική βελτιστοποίηση της υπερθερμίας-χημειοθεραπευτικής χορήγησης δεν έχει ακόμη επιτευχθεί. Θερμοκρασίες 2-3°C πάνω από τη βασική θερμοκρασία έχουν δείξει ότι αυξάνουν τη ροή του αίματος κατά τη διάρκεια, και για κάποιο διάστημα, μετά την απομάκρυνση της πηγής θερμότητας από τους όγκους. Μελέτες υποδεικνύουν ότι αυτή η τοπική αύξηση της ροής αίματος βοηθά στην εναπόθεση χημειοθεραπείας εντός του θερμαινόμενου ιστού[13].

Η ενίσχυση της ακτινοθεραπείας με υπερθερμία βασίζεται σε δύο γεγονότα. Πρώτον, η ιονίζουσα ακτινοβολία βλάπτει το DNA και η υπερθερμία βλάπτει τις πρωτεΐνες που είναι υπεύθυνες για την επισκευή του DNA. Δεύτερον, η υπερθερμία είναι επίσης σε θέση να σκοτώνει κύτταρα σε υποξικές περιοχές όγκων που είναι πιο ανθεκτικά στην ακτινοβολία από τα κύτταρα σε καλά οξυγονωμένα περιοχές. Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας και της υπερθερμίας επηρεάζεται από έναν αριθμό παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας, της διάρκειας της υπερθερμίας και της χρονικής σχέσης μεταξύ της υπερθερμίας και της ακτινοβολίας. Η βελτιστοποίηση του συνδυασμού της υπερθερμίας και της ιονίζουσας ακτινοβολίας δεν έχει ακόμη επιτευχθεί. Η χρήση ραδιοκυκλίων που μεταφέρονται με μαγνητικά νανοσωματίδια σε συνδυασμό με νανοσωματιδιακή υπερθερμία είναι δυνητικά ελκυστική[13].

#### **2.10.4 Μαγνητικά Νανοσωματίδια**

Το 1957 ο Gilchrist απέδειξε πως οι λεμφαδένες μπορούσαν να θερμανθούν επαγωγικά, προκειμένου να σκοτωθούν λεμφαδενικές μεταστάσεις, έπειτα από την τοποθέτηση μαγνητικών σωματιδίων[14]. Σε αυτά τα πειράματα, 5 mg  $Fe_2O_3$  διαμέτρου 20-100 nm μεταφέρθηκαν στους λεμφαδένες (47 mg  $Fe_2O_3$  ανά γραμμάριο ιστού). Παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 14°C μετά την έκθεση σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (στο εξής AMF, alternative magnetic field) των 200-240 Oe (16-19.2 kA/m) στα 1.2 MHz. Καθώς δε σημειώθηκε κάποιο πείραμα



επαλήθευσης, παραμένει ανοιχτό το ενδεχόμενο να αυξήθηκε η θερμοκρασία λόγω του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου και όχι λόγω της θέρμανσης των νανοσωματιδίων (η συχνότητα ήταν πολύ υψηλή και ήταν πιθανό να έχει συμβεί κάτι τέτοιο). Έτσι, παραμερίστηκε για δεκαετίες η χρήση των νανοσωματιδίων στην υπερθερμία ενώ η υπερθερμία εξακολουθούσε να εφαρμόζεται για τη θεραπεία του καρκίνου με διαφορετικά μέσα. Καμία όμως από αυτές τις προσπάθειες δε στέφθηκε με επιτυχία.

Έπρεπε να περιμένουμε μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990 για να επανέλθουν τα νανοσωματίδια ως το μέσο υπερθερμίας των καρκινικών όγκων. Σε αυτό το στάδιο, οι επιστήμονες μετέφεραν ενέσιμα τα νανοσωματίδια απευθείας στους όγκους και στη συνέχεια τα διέγειραν με ένα AMF για να απελευθερωθεί εν τέλει θερμότητα. Επιπλέον, υπάρχει μεγάλη πρόοδος στην καθοδήγηση των νανοσωματιδίων στους όγκους με τη χρήση μέσων στόχευσης όπως τα αντισώματα[14]. Η νανοσωματιδιακή υπερθερμία μπορεί να αποτελέσει αποτελεσματική θεραπεία του καρκίνου υπό τις εξής προϋποθέσεις;

- I. Η συγκέντρωση των σωματιδίων στους όγκους πρέπει να είναι ταυτοχρόνως επαρκώς υψηλή και σημαντικά υψηλότερη από εκείνη των γειτονικών υγιών ιστών.
- II. Τα σωματίδια πρέπει να διαθέτουν έναν αρκετά υψηλό ειδικό ρυθμό απορρόφησης ( Specific Absorption Ratio, στο εξής SAR), που μετράται σε Watt/gram .

$$SAR = c \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (2.32)$$

όπου το  $c$  είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα και  $\Delta T$  η μεταβολή της θερμοκρασίας σε χρονικό διάστημα  $\Delta t$  που απαιτείται για να μεταφερθεί σημαντική δόση θερμότητας μέσα στα καρκινικά κύτταρα με τη χρήση AMFs που προφανώς δεν επηρεάζουν τους φυσιολογικούς ιστούς.

Τα υπερπαραμαγνητικά νανοσωματίδια οξειδίου του σιδηρού  $Fe_3O_4$ , στο εξής SPIONs (Supermagnetic Iron Oxide Nanoparticles), χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιοϊατρικές εφαρμογές λόγω των μαγνητικών ιδιοτήτων τους. Η ικανότητά τους να μετατρέπουν μαγνητική ενέργεια, π.χ. από ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, σε θερμότητα τα καθιστούν ιδανικό εργαλείο για να προκληθεί η απόπτωση του κυττάρου.

Τα μαγνητικά νανοσωματίδια παρουσιάζουν εκπληκτικές ιδιότητες σε πληθώρα πεδίων και μερικές από τις εφαρμογές τους είναι οι εξής[1]:

- I. Υψηλός Βαθμός Μαγνητικού Διαχωρισμού: η περιβαλλοντική μηχανική ασχολείται με την απομάκρυνση σωματιδίων και μολυσματικών παραγόντων από τις πηγές πόσιμου νερού. Τα μαγνητικά νανοσωματίδια δημιουργούν δεσμούς μέσω ηλεκτροχημικών αλληλεπιδράσεων με αιωρούμενα σωματίδια και καθιζάνουν. Επομένως, μέσω μαγνητικού πεδίου μπορεί να ανακυκλωθούν τα μαγνητικά νανοσωματίδια. Επιπλέον, ραδιενεργά χημικά και τοξικά/καρκινογενή μέταλλα μπορούν να αφαιρεθούν με την χρήση των νανοσωματιδίων αυτών.
- II. Τεχνολογία Μαγνητικής Τομογραφίας: καθώς ένας ασθενής υπόκειται σε μαγνητική τομογραφία, ο γιατρός έχει τη δυνατότητα να λάβει εικόνες που τον βοηθούν να εντοπίσει τυχούσες ανωμαλίες σε ιστούς ή/και όργανα. Τα μαγνητικά νανοσωματίδια παρέχουν τη δυνατότητα για καθαρότερη εικόνα των πασχόντων αυτών ιστών ή/και οργάνων.
- III. Χορήγηση Φαρμάκων: η επιστημονική κοινότητα σχεδιάζει και αναπτύσσει μηχανισμούς για μεταφορά φαρμάκων απευθείας στην παθούσα περιοχή του σώματος. Είναι δυνατή η σύναψη του φαρμάκου αυτού σε ένα μαγνητικό νανοσωματίδιο το οποίο είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταφέρει το φάρμακο αυτό στον ιστό της επιλογής μας.

## Μηχανισμοί αύξησης θερμοκρασίας

Τα μαγνητικά πεδία υψηλής συχνότητας προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας με τους εξής τέσσερις ανεξάρτητους μηχανισμούς[11]:

- δινορεύματα
- απώλεια υστέρησης
- Brownian χαλάρωση
- Neel χαλάρωση

Τα δινορεύματα που επάγονται από την ταχέως μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή μπορεί να παράξουν σημαντική ποσότητα θερμότητας καθώς επίσης και η μετατόπιση των τοιχωμάτων Weiss η οποία υπάγεται στο μηχανισμό της απώλεια υστέρησης. Όμως, η επίδραση των δινορευμάτων είναι σημαντική μόνο στα υλικά σε κλίμακα εκατοστών ή μεγαλύτερα και επομένως είναι σαφώς ασήμαντα για την υπερθερμία των μαγνητικών νανοσωματιδίων. Ωστόσο, υπάρχει κάποια συζήτηση σχετικά με τη σημασία της απώλειας υστέρησης σε εφαρμογές υπερθερμίας. Είναι γνωστό ότι η θέρμανση που απελευθερώνεται από τη μετατόπιση των τοιχωμάτων Weiss εμφανίζεται σε μαγνητικά σωματίδια της τάξεως των 100 nm ή μεγαλύτερων.

Σε μικρότερα σωματίδια η θέρμανση επιτυγχάνεται με περιστροφή της μαγνητικής ροπής κάθε σωματιδίου έναντι ενός ενεργειακού κατωφλίου. Εάν οι συνθήκες είναι τέτοιες ώστε η περιστροφή αυτή να έχει ως αποτέλεσμα την περιστροφή του ίδιου του σωματιδίου, τότε το σωματίδιο έχει υποβληθεί σε χαλάρωση Brownian και η θερμική ενέργεια απελευθερώνεται μέσω διατμητικής πίεσης στο περιβάλλον υγρό. Εάν, όμως, η μαγνητική στιγμή περιστρέφεται ενώ το ίδιο το σωματίδιο παραμένει σταθερό, τότε το σωματίδιο έχει υποστεί χαλάρωση Néel και η θερμική ενέργεια διασκορπίζεται από την αναδιάταξη των ατομικών διπολικών στιγμών μέσα στον κρύσταλλο (Σχήμα 3). Στην πράξη, και οι δύο μηχανισμοί μπορούν να συμβούν ταυτόχρονα και οι σχετικές συνεισφορές καθορίζονται από τις χρονικές κλίμακες στις οποίες λαμβάνει χώρα κάθε μηχανισμός.

Καθώς τα υπερπαραμαγνητικά νανοσωματίδια αποτελούνται από έναν τομέα κάθε σωματίδιο θα αποκτήσει μία μαγνητική στιγμή. Απουσία του μαγνητικού πεδίου ο προσανατολισμός αυτής της μαγνητικής στιγμής καθορίζεται από την κρυσταλλική ανισοτροπία του σωματιδίου (ή σε μη σφαιρικά σωματίδια καθορίζεται από την ανισοτροπία του σχήματος του σωματιδίου). Ωστόσο, ένα μαγνητικό πεδίο επαρκούς ενέργειας είναι ικανό να μετατοπίσει τη μαγνητική στιγμή και κατόπιν κατά την επιστροφή της στη θέση ισορροπίας (διαδικασία χαλάρωσης ) απελευθερώνεται θερμική ενέργεια η οποία οδηγεί σε τοπική αύξηση της θερμοκρασίας. Στην περίπτωση της Neel χαλάρωσης, η χρονική σταθερά του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου είναι τόσο μικρή ώστε ο προσανατολισμός του ίδιου του σωματιδίου παραμένει σταθερός όσο η μαγνητική στιγμή εναλλάσσεται ανάμεσα σε παράλληλους και αντιπαράλληλους άξονες. Ο χρόνος χαλάρωσης του Neel μηχανισμού περιγράφηκε αρχικά από τον Neel και έπειτα τροποποιήθηκε από τον Brown για να πάρει την τελική του μορφή:

$$\tau_N = \tau_0 \sqrt{\pi \frac{kT}{KV}} e^{KV/kT} \quad (2.33)$$

όπου  $K$  είναι η σταθερά ανισοτροπίας -η οποία οφείλεται στο σχήμα τού νανοσωματιδίου- και  $V$  είναι ο όγκος του σωματιδίου.

Παρόλα αυτά, στην περίπτωση που η μαγνητική ανισοτροπία του σωματιδίου είναι αρκετά ισχυρή για να ξεπεράσει την αδρανειακή ή ιζώδη αντίσταση, το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο δύναται να προκαλέσει στο σωματίδιο περιστροφή μέσα σε υγρό. Ο μηχανισμός αυτός αποτελεί τον Brownian, στον οποίον η θερμότητα απελευθερώνεται μέσω της διάτμησης (shear ) στο περιβάλλον

υγρό. Ο χρόνος Brownian χαλάρωσης εξαρτάται σημαντικά από το ιξώδες του διαλύματος  $\eta$  και από τον υδροδυναμικό όγκο των σωματιδίων  $V_H$  και δίνεται από τον τύπο:

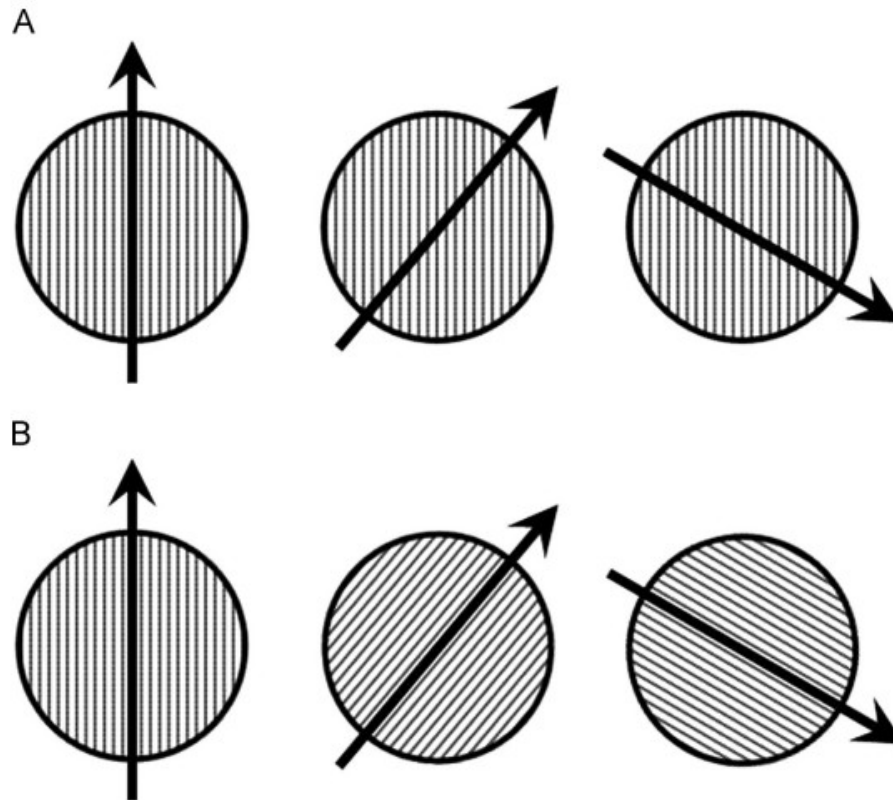
$$\tau_B = \frac{3\eta V_H}{kT} \quad (2.34)$$

Σε γενικό πλαίσιο, ο υδροδυναμικός όγκος  $V_H$  είναι μεγαλύτερος από τον όγκο των σωματιδίων κυρίως λόγω των αλληλεπιδράσεων υγρού. Πειραματικά, το  $V_H$  υπολογίζεται από υδροδυναμικές μετρήσεις όπως η δυναμική σκέδαση φωτός.

Οι Neel και Brownian μηχανισμοί συμβαίνουν παράλληλα, οπότε ο πραγματικός χρόνος χαλάρωσης του συστήματος είναι ο εξής:

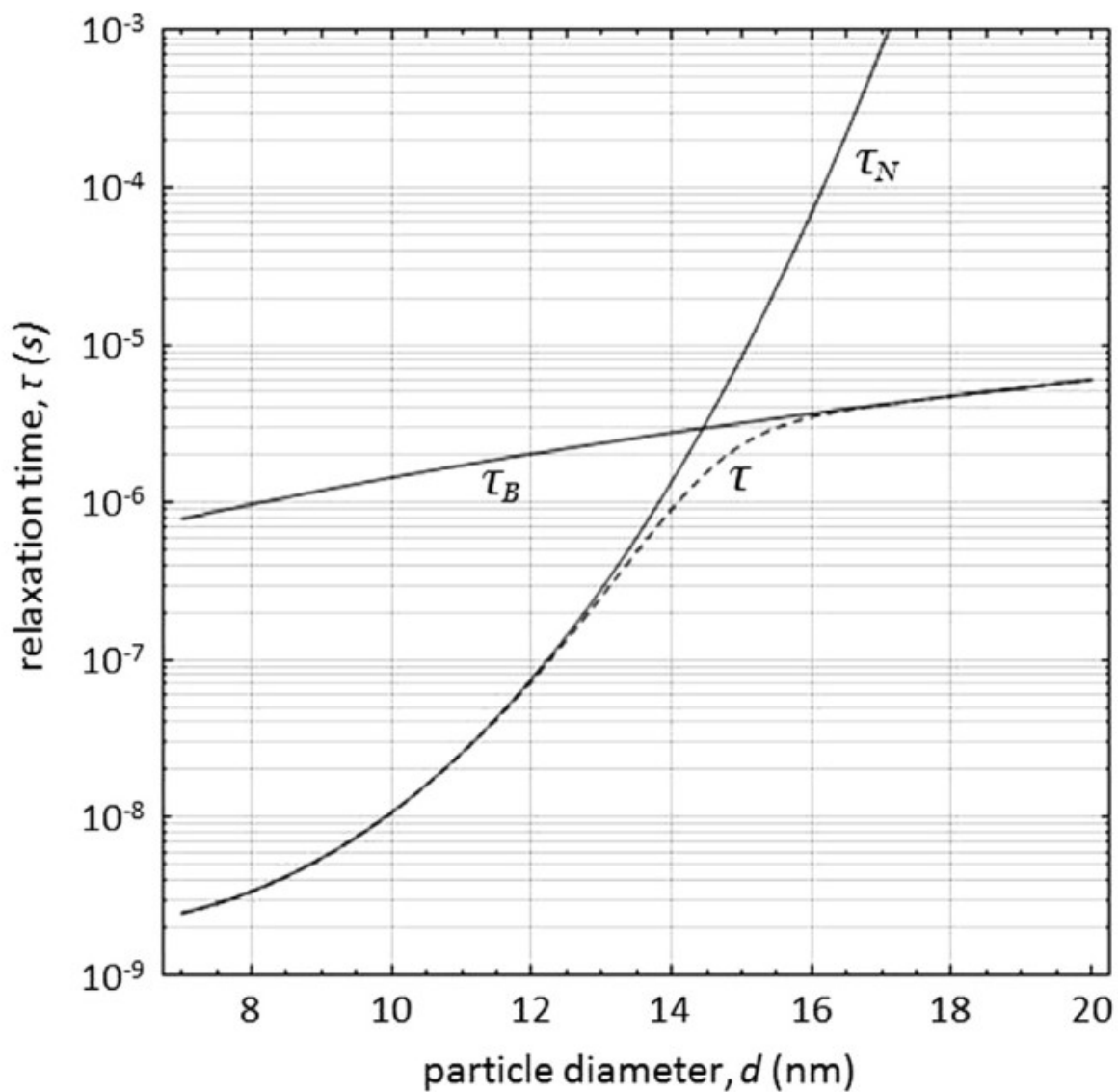
$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_B} + \frac{1}{\tau_N} \quad (2.35)$$

Είναι προφανές πως ο πραγματικός χρόνος καθορίζεται από τον μικρότερο των δύο παραγόντων. Τοιούτοτρόπως, η χαλάρωση Brown κυριαρχεί σε μεγαλύτερα σωματίδια και χαμηλότερα ιξώδη και ο Neel μηχανισμός σε μικρότερα σωματίδια σε υψηλά ιξώδη.



**Σχήμα 3:** A) Χαλάρωση Neel: η μαγνητική στιγμή περιστρέφεται ενώ το σωματίδιο παραμένει σταθερό. B) Χαλάρωση Brownian: η μαγνητική στιγμή παραμένει σταθερή σε σχέση με τους κρυσταλλικούς άξονες όσο το σωματίδιο περιστρέφεται[11].

Κλείνοντας το θέμα της συμβολής των δύο μηχανισμών, παρατίθεται το διάγραμμα που περιέχει ακριβώς αυτήν την πληροφορία. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται ο χρόνος χαλάρωσης ενός σφαιρικού σωματιδίου μαγνητίτη ( $K=25 \text{ kJ/m}^3$ ) σε θερμοκρασία  $T=310\text{K}$ , μέσα σε νερό δηλαδή  $\eta=8,9 \times 10^{-4} \text{ Pa s}$ . Για τον υπολογισμό του  $V_H$  θεωρείται επιφανειοδραστική ουσία πάχους  $3,2\text{nm}$ .



**Σχήμα 4:** Οι χρόνοι χαλάρωσης για *single-domain* σωματίδια μαγνητίτη σε φυσιολογικές συνθήκες συναρτήσει της διαμέτρου του υπό εξέταση νανοσωματιδίου. Με  $\tau_N$  να αποτελεί τον χρόνο χαλάρωσης Neel,  $\tau_B$  το χρόνο χαλάρωσης Brown. Η διακεκομμένη γραμμή αποτελεί το συνολικό χρόνο χαλάρωσης του σωματιδίου[11].

## 2.10.5 Μαγνητική Υπερθερμία με θερμικά συστήματα

Μέχρι σήμερα έχουν εφαρμοσθεί ποικίλες τεχνικές για την ποσοτικοποίηση της θερμικής ενέργειας των SPIONs. Μερικές από αυτές βασίζονται σε θερμοδομετρικές δοκιμές, όπου η θερμοκρασία μετράται άμεσα κατά την εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιώντας διάφορους καθετήρες (π.χ. οπτικές ίνες, υπέρυθρη κάμερα). Πρόσφατα, προτάθηκε μια νέα τεχνική που χρησιμοποιεί τα μαγνητικά νανοσωματίδια ως νανοτερόμετρα για τον ποσοτικό προσδιορισμό της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης των σωματιδίων στους ιστούς. Η τεχνική αυτή βασίζεται στο μέτρο μαγνητισμού και μαγνητικής ευαισθησίας σε πραγματικό χρόνο και επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της θερμότητας χωρίς επαφή αλλά με μεγάλη ακρίβεια. Συνεπώς, μπορεί να αποτελέσει ένα πρώτο βήμα προς την ποσοτικοποίηση της θερμοκρασίας σε πραγματικό χρόνο και με ακρίβεια *in vivo*, πράγμα που αποτελεί ουσιαστικό βήμα προς την εφαρμογή της μαγνητικής υπερθερμίας στην κλινική[15].

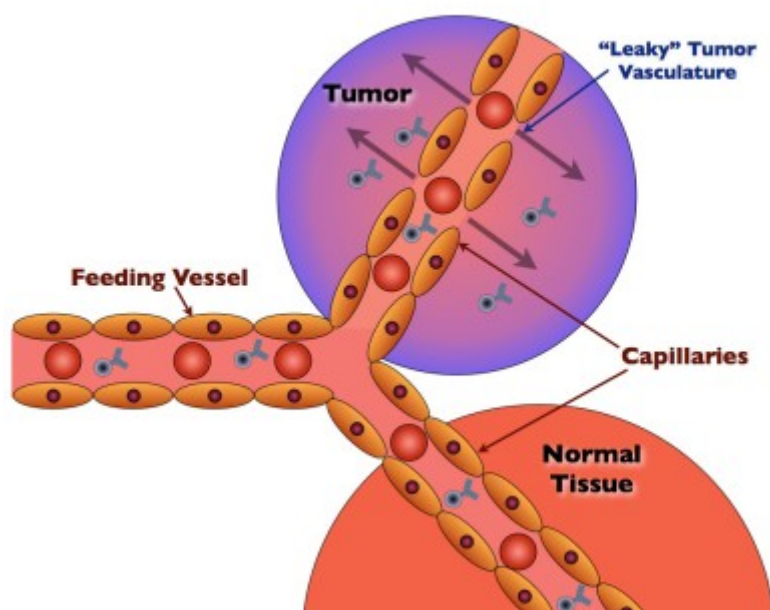
Το πιο αξιόπιστο και ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο για την μέτρηση της θερμοκρασίας των SPIONs είναι οι οπτικές ίνες . Ωστόσο, τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τη θέση του αισθητήρα θερμότητας. Επιπλέον, δεν παρέχεται μία πιο συνολική εικόνα του δείγματος (π.χ. σε μεγάλες επιφάνειες) η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για συγκριτική μελέτη μεγάλης κλίμακας και για γρήγορες διεργασίες[15].

Μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση στα καλώδια οπτικών ινών είναι η εφαρμογή συστημάτων θερμικής απεικόνισης (thermal imaging)[15]. Η θερμική απεικόνιση συνίσταται στη μέτρηση και απεικόνιση της θερμικής εκπομπής κάθε αντικειμένου που βρίσκεται σε θερμοκρασία πάνω από 0 K και διαφορετική από το περιβάλλον. Αυτή η διαδικασία είναι κατάλληλη τόσο για υγρά όσο και για στερεά δείγματα. Εάν οι πειραματικές συνθήκες είναι καλά καθορισμένες, όπως θερμοκρασία περιβάλλοντος, εκπομπή δείγματος ή υγρασία, η θερμική απεικόνιση επιτρέπει τη μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δείγματος – ακόμα και για μεγάλες επιφάνειες- με σημαντική ακρίβεια (17 mK). Επιπλέον, προσιτές υπέρυθρες κάμερες μικροβολομέτρων προσφέρονται σήμερα από διάφορες εταιρίες ως αντικατάσταση αισθητήρων θερμοκρασίας με οπτικές ίνες[15].

## 2.10.6 Φαινόμενο αυξημένης διαπερατότητας και κατακράτησης

Προκειμένου να αναπτυχθεί ένας όγκος πέρα από διάμετρο περίπου δύο χιλιοστών, τα καρκινικά κύτταρα πρέπει να εκκρίνουν μια ποικιλία μοριακών σηματοδοτών για να ξεκινήσουν την ανάπτυξη αιμοφόρων αγγείων και να στρατολογήσουν θρεπτικά συστατικά. Η ανάπτυξη νέων αιμοφόρων αγγείων ονομάζεται «νεοαγγειοποίηση» ή «αγγειογένεση». Η ογκολογική αγγειογένεση τυπικά είναι αποδιοργανωμένη και εμφανίζεται ταχέως. Αυτός ο τύπος αγγείωσης οδηγεί σε μεγάλα (600-800 nm) κενά μεταξύ παρακείμενων ενδοθηλιακών κυττάρων όγκου. Αυτές οι θυρίδες επιτρέπουν σε ουσίες που εγχέονται στο αίμα - για παράδειγμα, η γαδολίνη που χρησιμοποιείται για την αύξηση του σήματος εντός των ιστών του όγκου κατά την απεικόνιση με μαγνητική τομογραφία - να συσσωρεύονται μέσα στους όγκους, ακόμη και χωρίς την εμφάνιση οποιαδήποτε τμήματος στόχευσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο αυξημένης διαπερατότητας και κατακράτησης (Enhanced Permeability and Retention Effect, στο εξής EPR). Με τη συστηματική έγχυση νανοσωματιδίων, ελπίζεται ότι ένα μεγάλο ποσοστό της εγχυόμενης δόσης θα συσσωρευτεί εντός των όγκων λόγω της επίδρασης EPR.

Το φαινόμενο EPR απεικονίζεται στην Εικόνα 5.



**Εικόνα 5:** Το φαινόμενο EPR επιτρέπει την είσοδο ουσιών στα καρκινικά κύτταρα[13].

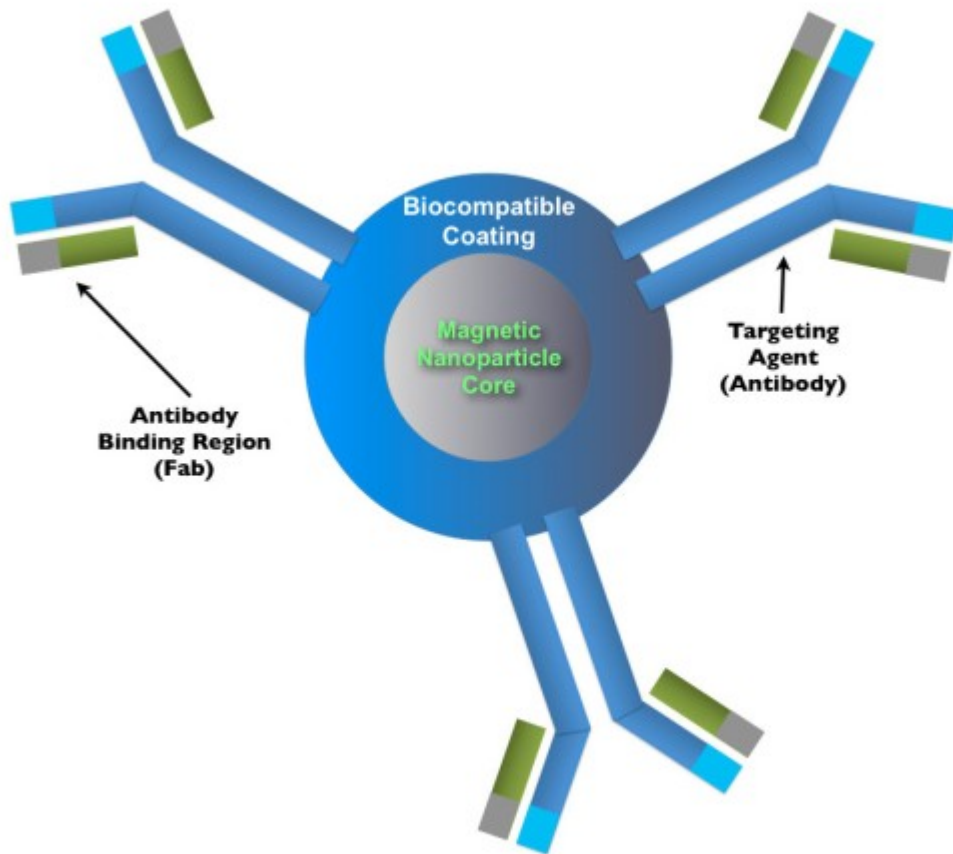


Προκειμένου ένα μόριο που χορηγείται ενδοφλεβίως για να είναι σε θέση να φθάσει στον όγκο, πρέπει να αποφύγει να “καθασιστεί” από (κυρίως) τέσσερα όργανα: νεφρούς, ήπαρ, σπλήνα και μυελό των οστών. Ο βαθμός και ο τρόπος κάθαρσης εξαρτώνται από το μέγεθος των νανοσωματιδίων και την χημεία που υπάρχει στην επιφάνειά τους. Τα νεφρά θα καθαρίσουν γρήγορα τα περισσότερα μόρια μεγέθους λιγότερου από περίπου  $10^4$  άτομα (πολλά νανόμετρα). Το ενδοθηλιακό σύστημα αποτελείται από ανοσοκύτταρα — κυρίως μακροφάγα — που υπάρχουν στο ήπαρ και στη σπλήνα, τα οποία αφαιρούν ορισμένα μακρομόρια από την κυκλοφορία, ειδικά όταν είναι υδροφοβικά, φορτισμένα και μεγάλα (περίπου 100-300 nm υδροδυναμικής διαμέτρου).

Το μέγεθος των νανοσωματιδίων και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειάς τους θα επηρεάσουν τον εντοπισμό των όγκων τους και τη συνολική βιοκατανομή *in vivo*. Όπως σημειώνεται, τα νανοσωματίδια πάνω από 100 nm σε διάμετρο και τα σωματίδια με περισσότερες υδροφοβικές επιστρώσεις θα εξαντληθούν ταχέως από την κυκλοφορία μέσω του φιλτραρίσματος του ενδοθηλιακού δικτύου. Τα μικρότερα σωματίδια είναι συνεπώς περισσότερο επιθυμητά από τη σκοπιά της διανομής, της διείσδυσης και της διάχυσης λόγω του EPR φαινομένου. Τα νανοσωματίδια μειωμένου μεγέθους, ωστόσο, έχουν υψηλότερη αναλογία επιφάνειας-όγκου που ευνοεί την προσκόλληση τους στην πρωτεΐνη πλάσματος[13].

Τα καρκινικά κύτταρα συχνά παράγουν μοναδικούς σηματοδότες (αντιγόνα), οι οποίοι τα ξεχωρίζουν από τα φυσιολογικά κύτταρα. Αυτοί οι σηματοδότες λοιπόν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση τους. Παραδείγματος χάρη, ο σηματοδότης του καρκίνου του μαστού Her2 συχνά υπάρχει σε αφθονία στην επιφάνεια των συγκεκριμένων κυττάρων και χρησιμοποιείται ως υποδοχέας για τις ουσίες που στέλνονται προς αφανισμό του συγκεκριμένου κυττάρου.

Επιπροσθέτως, είναι σαφές πως προκειμένου τα νανοσωματίδια να εισέλθουν στο σώμα και να μη θεωρηθούν αντιγόνα, δηλαδή να θεωρηθούν εχθροί του οργανισμού και να δεχθούν επίθεση από τις ομάδες άμυνας του οργανισμού, πρέπει να ενθυλακωθούν σε ένα βιοσυμβατό περίβλημα. Επομένως, πάνω σε αυτό το περίβλημα θα τοποθετηθούν οι οντότητες που ο σκοπός τους είναι ο εντοπισμός των καρκινικών κυττάρων, η μορφή των οποίων εξαρτάται από τον τύπο του εκάστοτε καρκίνου-στόχου[13].



*Εικόνα 6: Νανοσωματίδιο συζευγμένο με παράγοντες στόχευσης[13].*

## 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 3.1 Εισαγωγή

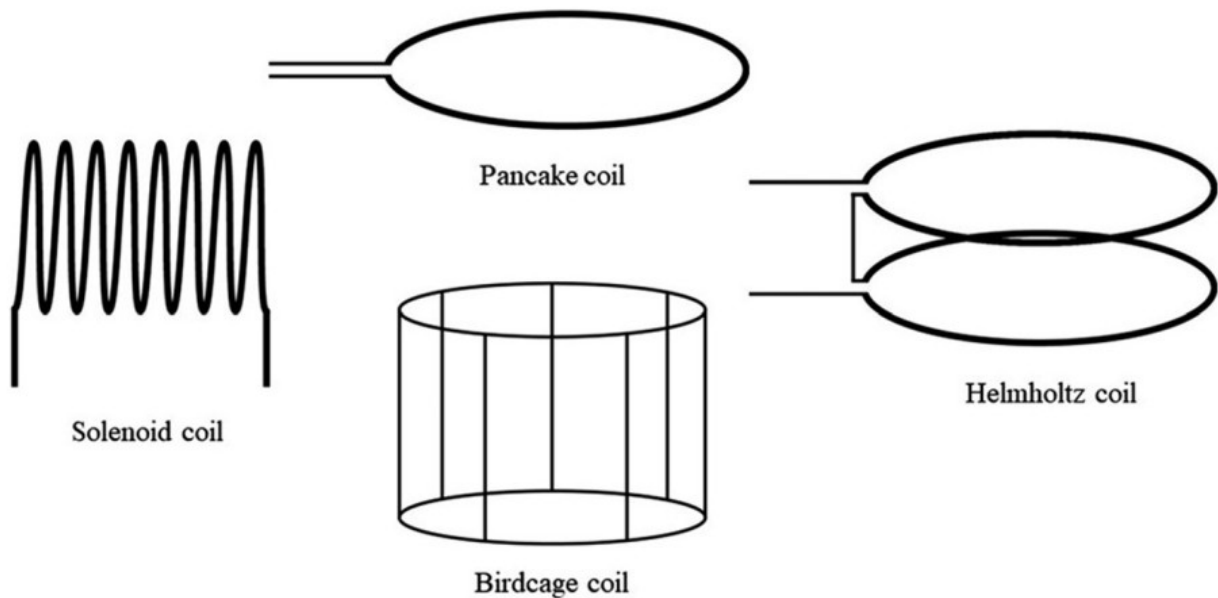
Η μαγνητική υπερθερμία αποτελεί μια πρωτοποριακή μέθοδο θεραπείας κατά του καρκίνου η οποία χρησιμοποιεί μαγνητικά νανοσωματίδια διαφορετικών μεγεθών και φυσικοχημικών ιδιοτήτων ως νανομεσολαβητές για τοπική χορήγηση φαρμάκου και θέρμανση των όγκων[1]. Παρόλο που ήδη από το 1985[1] είναι γνωστή η επιτυχία της υπερθερμίας ( $41^{\circ}\text{C} - 46^{\circ}\text{C}$ ) ενάντια στον καρκίνο, σε κλινικό επίπεδο είχε παρεμποδιστεί λόγω των τεχνικών δυσκολιών της επιλεκτικής μεταφοράς θερμότητας στα νοσούντα κύτταρα χωρίς την υπερθέρμανση των γειτονικών υγιών κυττάρων. Για το λόγο αυτό, η επιστημονική κοινότητα χρειάστηκε να περιμένει έως το 2007 προκειμένου να καταπιαστεί εκ νέου με το θέμα της υπερθερμίας, αυτή τη φορά προσδίδοντάς της τον επιθετικό προσδιορισμό “μαγνητική” υπερθερμία, καθώς η θερμότητα θα εκλυόταν στους ιστούς μέσω μαγνητικών νανοσωματιδίων[16]. Η ποσότητα της θερμότητας που εν τέλει θα μεταφερθεί στα επιθυμητά κύτταρα εξαρτάται από:

- την συγκέντρωση και κατανομή των σωματιδίων στο κύτταρο/ιστό
- την απώλεια ισχύος των σωματιδίων
- τη συχνότητα και το πλάτος του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου

Στην παρούσα εργασία, αναλύεται η τρίτη παράμετρος του προβλήματος αυτού. Είναι πλέον καθιερωμένο από το χώρο της επιστήμης πως η ιδανική συχνότητα του μαγνητικού πεδίου είναι στα 100-200kHz, καθώς ελαχιστοποιείται η θέρμανση γειτονικών ιστών, ενώ ταυτόχρονα παράγεται αξιοσημείωτη ποσότητα θερμότητας από τα νανοσωματίδια[16]. Καθώς οι απώλειες ισχύος των σωματιδίων εξαρτώνται από το πλάτος του πεδίου, συνιστάται μία, όσο γίνεται, ομοιόμορφη μαγνητική ροή που να εξασφαλίζει μία σταθερή αλλά και προβλέψιμη θέρμανση του όγκου ενδιαφέροντος[17].

Αξίζει να σημειωθεί πως πηνία διαφόρων ειδών χρησιμοποιούνται σε πολυάριθμες βιοϊατρικές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων της μαγνητικής υπερθερμίας και της μαγνητικής διακρανιακής διέγερσης του ανθρωπίνου εγκεφάλου[17]. Είναι επόμενο, λοιπόν, να αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα προς επίλυση, η βέλτιστη επιλογή πάχους και σχήματος πηνίου για να επιτευχθεί το αναγκαίο μαγνητικό πεδίο. Απόρροια του προβλήματος αυτού συνιστά η αποφυγή υπερθέρμανσης του πηνίου. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για συστήματα

ψύξης των περιελίξεων του πηνίου. Μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους αποτελεί η ψύξη των περιελιγμάτων χρησιμοποιώντας σωλήνα χαλκού που παράλληλα άγει το ρεύμα το ρεύμα και στο εσωτερικό κυκλοφορεί νερό για την ψύξη, η οποία θα αναλυθεί παρακάτω[1].



**Εικόνα 7:** Διάφορα είδη πηνίου που χρησιμοποιούνται στη μαγνητική υπερθερμία[18].

### 3.1.1 Συντελεστής απομαγνήτισης σφαιρικών σωματιδίων

Στην περίπτωση ενός δείγματος σκόνης, κάθε κόκκος περιβάλλεται από όμοιους του κόκκους. Επιβάλλοντας ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έντασης  $H_{app}$ , οι κόκκοι αλληλεπιδρούν με αυτό αποκτώντας ο κάθε ένας μία μαγνήτιση  $M$ . Κάθε κόκκος λειτουργεί πλέον ως ένα μαγνητικό δίπολο δημιουργώντας γύρω του ένα δευτερεύον μαγνητικό πεδίο. Αντίθετα με την περίπτωση ενός μεμονωμένου κόκκου, λόγω της πυκνής του διάταξης, το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο κάθε κόκκου αλληλεπιδρά με τα γειτονικά του. Κατ' αυτόν τον τρόπο η ένταση  $H$  του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό των κόκκων δεν ταυτίζεται με την ένταση του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου αλλά μεταβάλλεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$H = H_{app} - N * M \quad (3.1)$$

όπου  $N$  ο συντελεστής απομαγνήτισης του υλικού σωματιδίου.

Ο συντελεστής απομαγνήτισης ενός υλικού σωματιδίου αφορά την αλληλεπίδρασή του με ένα εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Εξαρτάται από τη γεωμετρία του ίδιου του σωματιδίου

καθώς και από τη γεωμετρία των γειτονικών του σωματιδίων. Για πυκνή διάταξη σωματιδίων σφαιρικής γεωμετρίας, ο συντελεστής είναι  $N=1/3$ [19].

### 3.2 Σχεδιασμός πηνίου

Ο σκοπός του πηνίου σε εφαρμογές μαγνητικής υπερθερμίας είναι να παρέχει ένα αδιάκοπο εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο συγκεκριμένης συχνότητας, το οποίο διεισδύει στο δείγμα. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί μία σύντομη αλλά περιεκτική μαθηματική ανάλυση του μαγνητικού πεδίου, για το πηνίο ενδιαφέροντος[1].

Ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου μέσα στο σωληνοειδές στο κενό προκύπτει από το νόμο των Biot-Savart (σχέση 2.1) ο οποίος με βάση το Σχήμα 3 παραμετροποιείται ως εξής:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{Id\mathbf{l}' \times \widehat{\mathbf{r}}_{12}}{r_{12}^2} \quad (3.2)$$

Στην περίπτωση ύπαρξης ύλης η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu = \mu_o \mu_r$  πρέπει να ληφθεί υπόψιν, όπου  $\mu_r$  η σχετική μαγνητική σταθερά του υλικού. Οπότε, με βάση το νόμο Biot-Savart, η μαγνητική επαγωγή πάνω στον άξονα  $z$  που παράγεται από το  $i$ -οστό περιέλιγμα ενός  $N$ -στροφών σωληνοειδούς με ακτίνα  $R$  σε κυλινδρικές συντεταγμένες  $(r, \varphi, z)$  ισούται με[1]:

$$B_{z0i} = \frac{\mu_o I}{2R} \sin^3 \theta = \frac{\mu_o I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (3.3)$$

όπου  $\theta$  είναι η γωνία που απεικονίζεται στην εικόνα 1 και μπορεί να υπολογιστεί από τις τριγωνομετρικές σχέσεις ως  $\sin \theta = R/r_{12}$ . Προφανώς, το συνολικό μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται ως το άθροισμα από τη συνεισφορά όλων των επιμέρους περιελιγμάτων,  $\Sigma B_{z0i}$ . Οπότε, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής σε κάθε σημείο πάνω στον άξονα  $z$  ενός πεπερασμένου λεπτού σωληνοειδούς με αμελητέο πάχος μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

$$B_z = \frac{1}{2} \frac{\mu_o N I}{h} \left[ \frac{-(z-a)}{\sqrt{(R^2 + (z-a)^2)}} + \frac{z+b}{\sqrt{(R^2 + (z+b)^2)}} \right] \quad (3.4)$$

με  $a, b$  να αποτελούν τις αποστάσεις στις οποίες το σημείο παρατήρησης πάνω στον  $z$  χωρίζει το πεπερασμένο μήκος του σωληνοειδούς ( $h = a + b$ ) και το  $N$  αφορά τις στροφές του σωληνοειδούς. Συγκεκριμένα για το μέσο του σωληνοειδούς, όπου  $z=0$ ,  $a=b=h/2$ , η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται ακολούθως:

$$B_0 = \frac{\mu_0 N I}{\sqrt{4 R^2 + h^2}} \quad (3.5)$$

Για ένα ιδανικά άπειρο σωληνοειδές ( $h \rightarrow \infty$ ) η παραπάνω εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$B_{0\infty} = \mu_0 n I \quad (3.6)$$

που πηγάζει από το νόμο του Ampere, με  $n = N/h$  να δηλώνει τον αριθμό των στροφών ανά μονάδα μήκους του πηνίου.

Στην περίπτωση πηνίου που δεν μπορούμε να αμελήσουμε το πάχος του, με  $R_1$  και  $R_2$  την εσωτερική και εξωτερική ακτίνα αντίστοιχα, υπολογίζουμε το μαγνητικό πεδίο ως εξής:

$$B_z = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 N I}{(R_2 - R_1)} \left[ -(z-a) \ln \frac{\sqrt{(R_2^2 + (z-a)^2)} + R_2}{\sqrt{(R_1^2 + (z-a)^2)} + R_1} + (z+b) \ln \frac{\sqrt{(R_2^2 + (z+b)^2)} + R_2}{\sqrt{(R_1^2 + (z+b)^2)} + R_1} \right] \quad (3.7)$$

Ακολούθως, το μαγνητικό πεδίο στο κέντρο ενός τέτοιου σωληνοειδούς είναι:

$$B_z = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 N I}{(R_2 - R_1)} \left[ \ln \frac{\sqrt{(4 R_2^2 + h^2)} + 2 R_2}{\sqrt{(4 R_1^2 + h^2)} + 2 R_1} \right] \quad (3.8)$$

Επιπροσθέτως, θα αναλυθεί αριθμητικά η θέρμανση ενός πηνίου χαλκού με εσωτερική ψύξη νερού σε κυλινδρικές συντεταγμένες ( $r, \varphi, z$ ) χρησιμοποιώντας το μοντέλο αξόνων που φαίνεται στο Σχήμα 5.

Ξεκινώντας από τις εξισώσεις του Maxwell, αξίζει να υπενθυμιστούν κάποιες βασικές αρχές της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Στην ηλεκτροστατική γνωρίζουμε πως ο στροβιλισμός του μαγνητικού πεδίου μηδενίζεται, επομένως μπορούμε να γράψουμε το ηλεκτρικό πεδίο ως βαθμίδα μιας βαθμωτής συνάρτησης, του γνωστού δυναμικού  $V$ . Για το μαγνητικό πεδίο  $B$  είναι γνωστό πως ο στροβιλισμός του δε μηδενίζεται. Γι' αυτό, δεν είναι δυνατόν να παραχθεί το μαγνητικό πεδίο από ένα βαθμωτό δυναμικό αλλά από ένα διανυσματικό πεδίο  $A$ :

$$B = \nabla \times A \quad (3.9)$$

Συνεπώς, η σχέση 2.17 μετατρέπεται:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M} \right) - \omega^2 \varepsilon_0 \left( \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) \mathbf{A} = \mathbf{J}_e \quad (3.10)$$

όπου  $J_e$  η πυκνότητα φορτίου και  $\sigma$  η αγωγιμότητα. Να σημειωθεί πως η σύνθετη σχετική επιτρεπτότητα δίνεται από την εξίσωση:

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (3.11)$$

Επιπλέον, μέσα στο υγρό δείγμα θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και το διάνυσμα της μαγνήτισης  $M$ , όπως φαίνεται στην εξίσωση 3.11.

Η μεταφορά της θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση ισορροπίας ενέργειας[1]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q_{ext} + Q_{cool} + Q_{nano} \quad (3.12)$$

όπου το  $T$  αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία, το  $\rho$  την πυκνότητα, το  $C$  αφορά τη θερμοχωρητικότητα, το  $k$  τη θερμική αγωγιμότητα και το  $t$  τον χρόνο.





### **3.3 Πλήρης παραμετροποίηση διάταξης μαγνητικής υπερθερμίας**

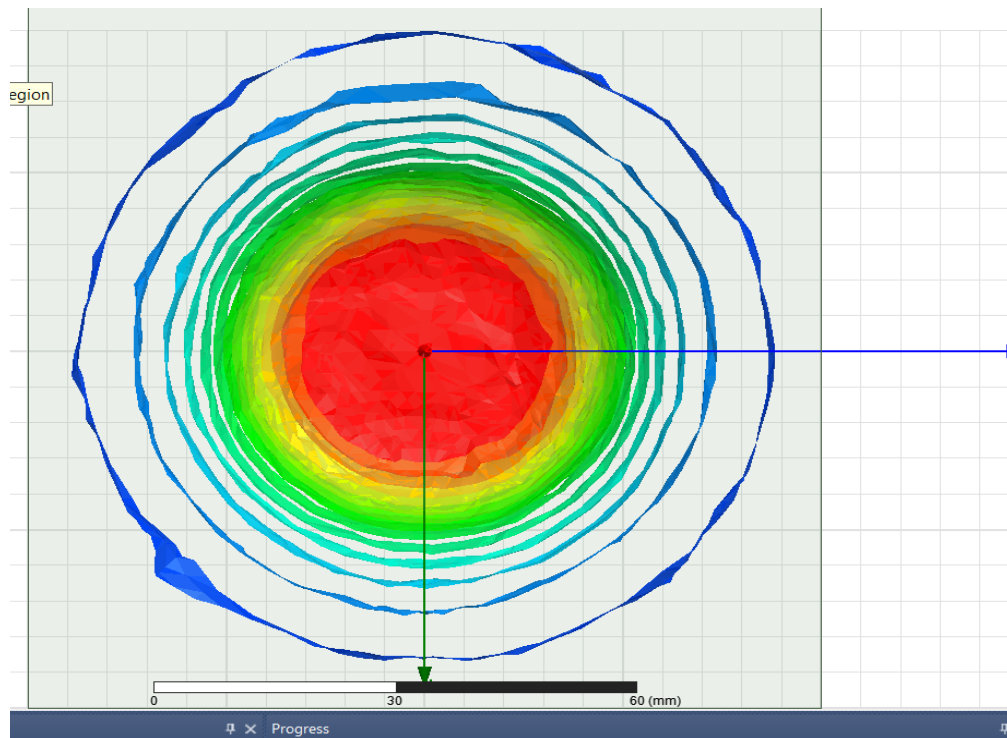
Με τη βοήθεια του λογισμικού ANSYS πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις που ακολουθούν στις επόμενες σελίδες. Το σύνολο της μελέτης μπορεί να διαχωρισθεί σε δύο ενότητες, καθώς εξετάζονται διαφορετικές παράμετροι σε κάθε μία. Αρχικά, μελετήθηκε η κατανομή του μαγνητικού πεδίου που επάγεται από πηνίο συγκεκριμένων χαρακτηριστικών συναρτήσεων διαφόρων παραμέτρων στο χώρο. Η επιλογή της συχνότητας, του ρεύματος και η απόσταση που θα τοποθετηθεί το δείγμα αποτελούν, μεταξύ άλλων, τα βασικά συστατικά της επιτυχίας της μαγνητικής υπερθερμίας, οπότε η βέλτιστη επιλογή όλων των παραπάνω είναι απαραίτητη.

#### **3.3.1 Ένταση Μαγνητικού Πεδίου**

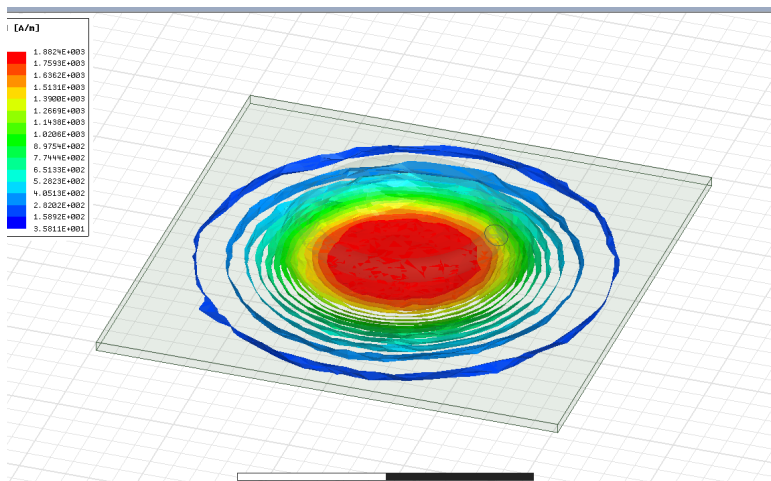
Προκειμένου να ξεκινήσουν να ενεργούν οι μηχανισμοί Neels και Brownian στα σωματίδια, οι οποίοι οδηγούν σε έκλυση θερμότητας, πρέπει να φτάσει σε αυτά ένα αξιοσημείωτο μαγνητικό πεδίο. Για το λόγο αυτό, μελετήθηκε αρχικά η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο χώρο και έπειτα σε σημεία του χώρου σε συγκεκριμένες αποστάσεις.

Χρησιμοποιώντας το ANSYS Maxwell, εφαρμόστηκε ρεύμα 50A και συχνότητας 100kHz σε ένα πηνίο εξωτερικής ακτίνας 20mm και εσωτερικής 2,5mm. Στην εικόνα 8, λοιπόν βλέπουμε πως κατανέμεται το μαγνητικό πεδίο στο χώρο. Αξίζει να σημειωθεί, πως για πρακτικούς λόγους χρησιμοποιήθηκε μία επιφάνεια κενού στο ANSYS έτσι ώστε να καταγραφεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Ο λόγος που δε χρησιμοποιήθηκαν μαγνητικά νανοσωματίδια είναι διότι δεν μπορούσαν να παρατηρηθούν αποτελέσματα σε διάμετρο σωματιδίων που να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, επομένως προτιμήθηκε το κενό προκειμένου να αντληθούν συμπεράσματα και παρατηρήσεις πιο καθολικά για το συγκεκριμένο πηνίο με το συγκεκριμένο ρεύμα και συχνότητα. Έτσι, με τον τρόπο αυτόν είναι εξαιρετικά σαφής η κατανομή του μαγνητικού πεδίου από τις προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν. Αποτυπώθηκαν διάφορες οπτικές της διάταξης με σκοπό την πλήρη οπτικοποίηση του φαινομένου της επαγωγής μαγνητικού πεδίου από ένα πηνίο τέτοιων διαστάσεων.

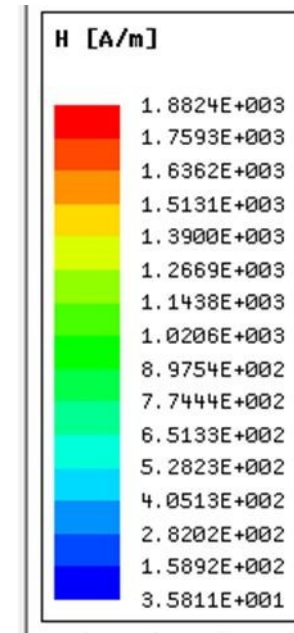
Επομένως, στις δύο διαστάσεις η ένταση  $H$  του μαγνητικού πεδίου φαίνεται στην Εικόνα 8:



(α)



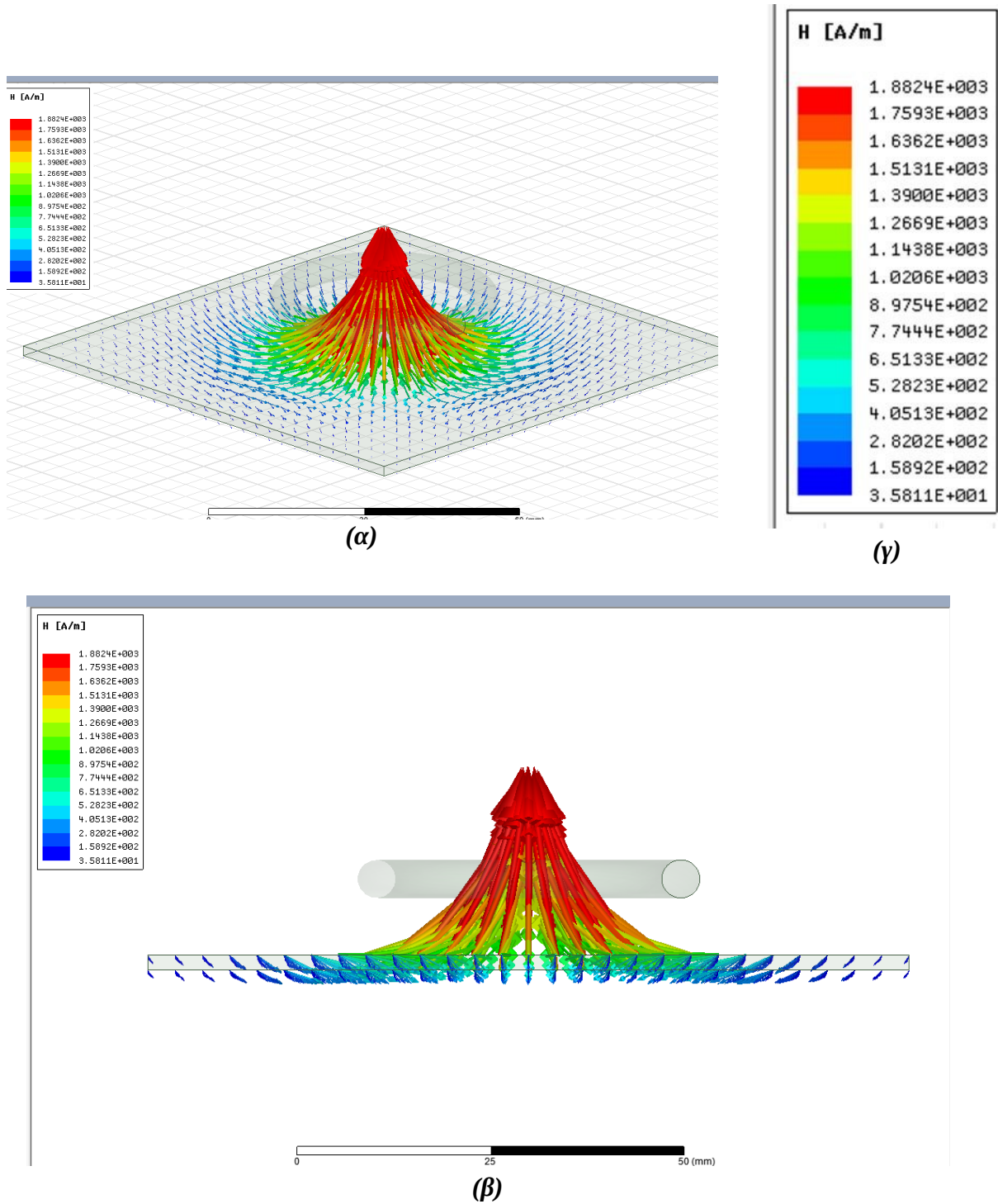
(β)



(γ)

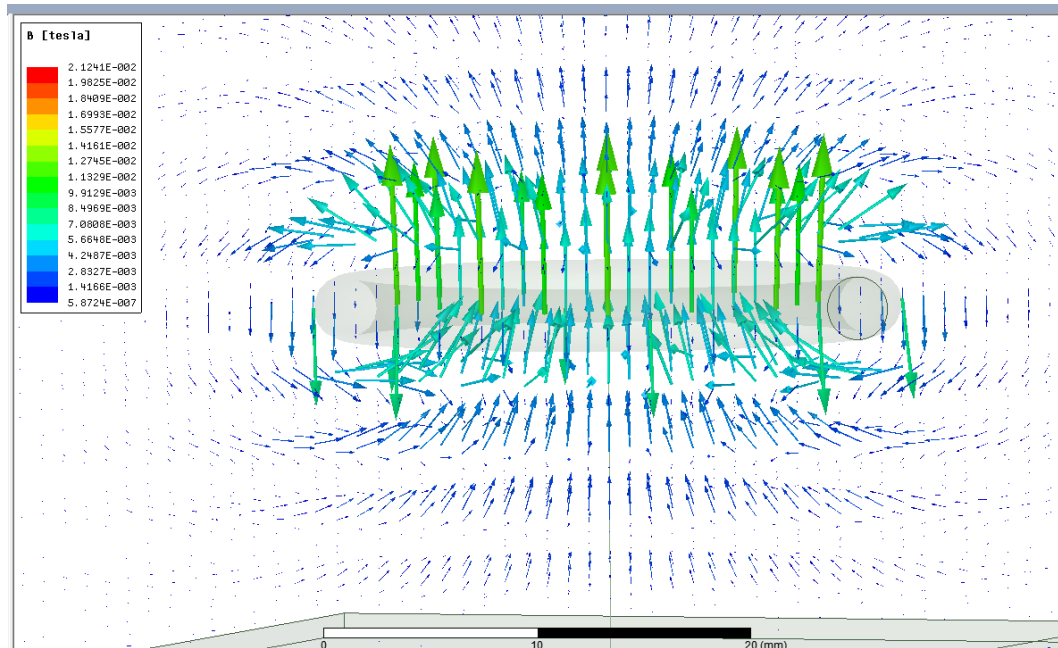
**Εικόνα 8:** Προσομοιωμένο Ηλεκτρομαγνητικό Πεδίο από πηνίο εξωτερικής ακτίνας 20mm και εσωτερικής 2,5mm από διάφορες οπτικές γωνίες στο 2D επίπεδο X-Y (α) και (β). Στα (α) και (β) απεικονίζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου με το χρωματικό διαχωρισμό των τιμών της που φαίνονται ευκρινώς στο (γ).

Ενώ στις 3 διαστάσεις η ένταση του μαγνητικού πεδίου απεικονίζεται στην Εικόνα 9:

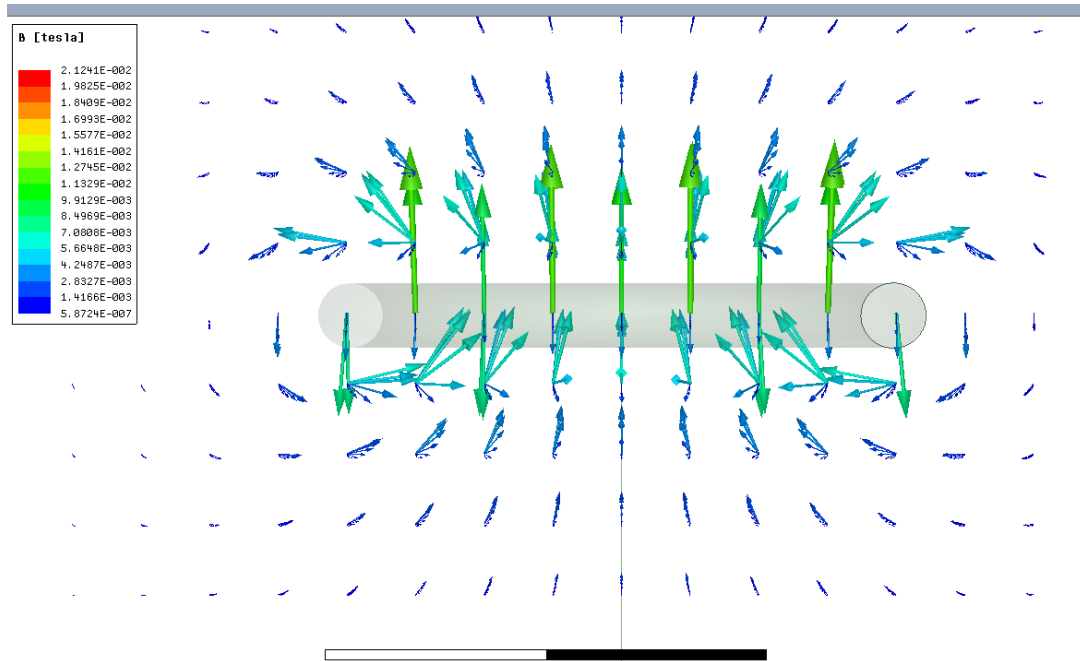


**Εικόνα 9:** Προσομοιωμένο Ηλεκτρομαγνητικό Πεδίο από πηνίο εξωτερικής ακτίνας 20mm και εσωτερικής 2,5mm από διάφορες οπτικές γωνίες στο 3D επίπεδο X-Y-Z. Στα (α) και (β) απεικονίζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου με το χρωματικό διαχωρισμό των τιμών της που φαίνονται ευκρινώς στο (γ).

Στην συνέχεια, στις ίδιες συνθήκες, υπολογίστηκε και απεικονίστηκε η μαγνητική ροή:

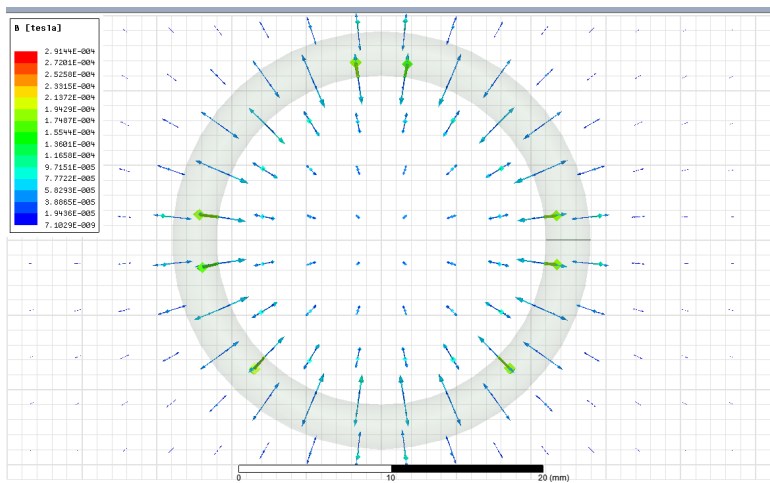


(α)

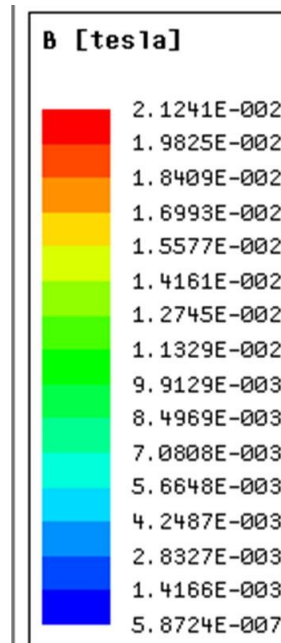


(β)

**Εικόνα 10:** Το μαγνητικό πεδίο, όπως διαμορφώνεται γύρω από το πηνίο στα (α), (β). Τα βέλη απεικονίζουν τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Η πυκνότητά τους είναι ανάλογη της έντασης του πεδίου.



**Εικόνα 10 (γ)**



**Εικόνα 10 (δ)**

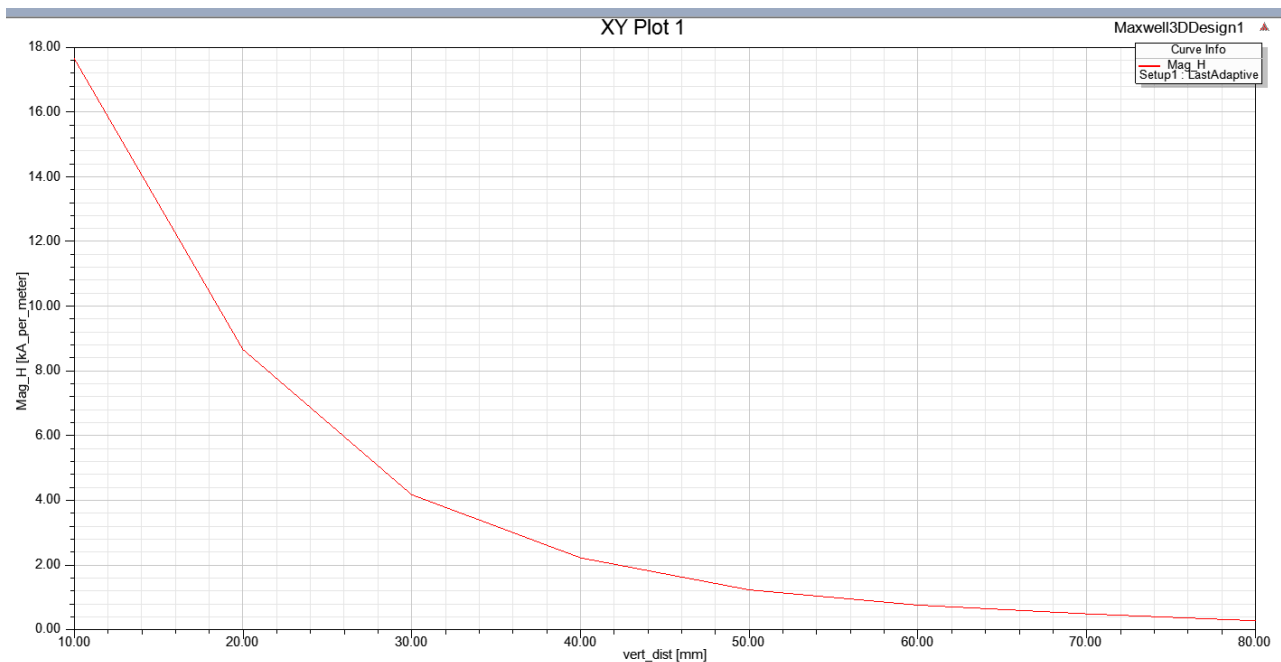
**Εικόνα 10:** Το μαγνητικό πεδίο, όπως διαμορφώνεται γύρω από το πηνίο στο (γ). Τα βέλη απεικονίζουν τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Η πυκνότητά τους είναι ανάλογη της έντασης του πεδίου. Στο (δ) παρουσιάζεται με ευκρίνεια ο χρωματικός διαχωρισμός των τιμών.

Έπειτα, μελετήθηκε η συμπεριφορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε διαφορετικές αποστάσεις από το κέντρο του πηνίου. Στον Πίνακα 2 αναγράφονται οι αποστάσεις αυτές και στην Εικόνα 11 φαίνεται η καμπύλη του μαγνητικού πεδίου καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο του.

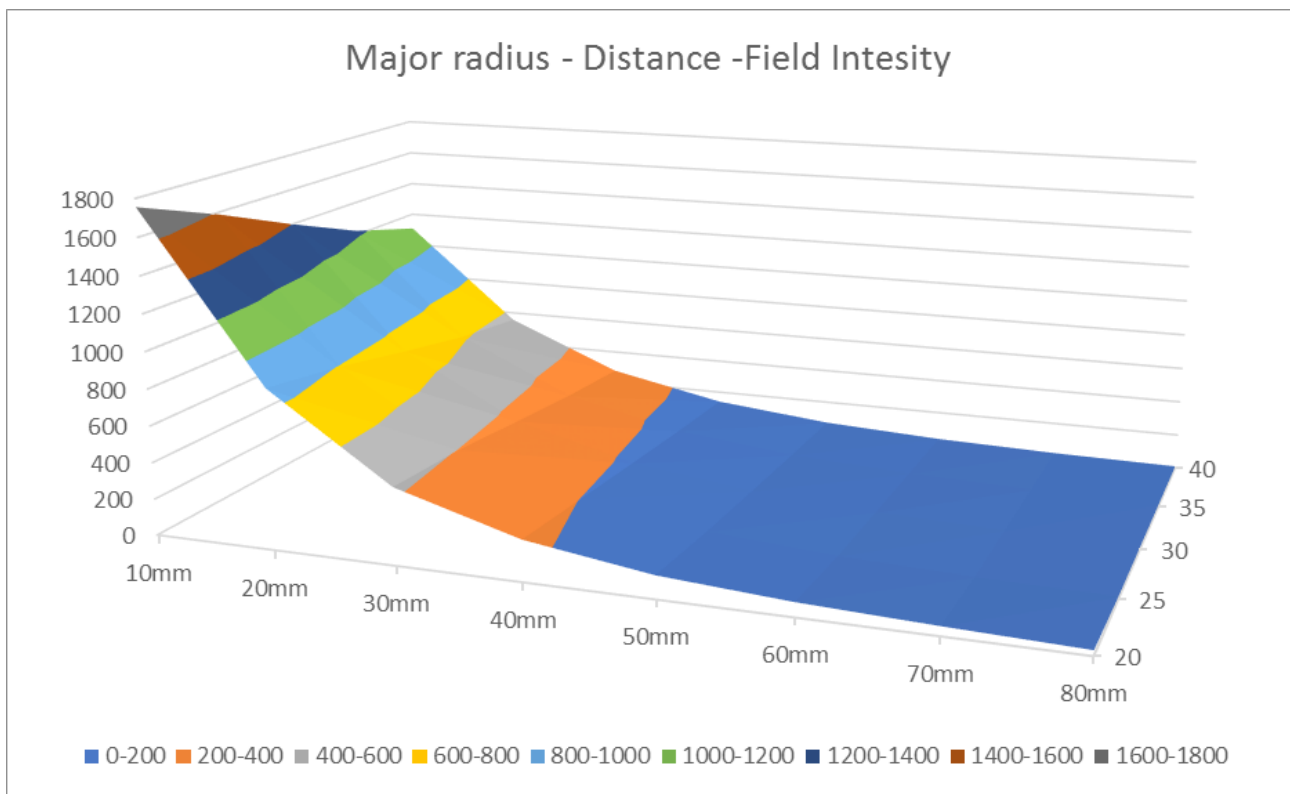
**Πίνακας 2:** Ένταση Μαγνητικού Πεδίου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο του πηνίου, πάνω στον άξονα του πηνίου.

	vert_dist [mm]	Mag H [kA_per_meter] Setup1 : LastAdaptive
1	10.000000	17.657229
2	20.000000	8.666053
3	30.000000	4.177751
4	40.000000	2.229256
5	50.000000	1.238611
6	60.000000	0.769148
7	70.000000	0.498799
8	80.000000	0.286321

Λαμβάνοντας υπόψιν,λοιπόν, τα παραπάνω αλλά και μία ακόμα παράμετρο- την εξωτερική ακτίνα του πηνίου- σχεδιάστηκε ένα γράφημα (Εικόνα 12) τριών διαστάσεων στο οποίο υπολογίζεται η ένταση του μαγνητικό πεδίου συναρτήσει της εξωτερικής ακτίνας του πηνίου ( major radius) και της απόστασης από το κέντρο του. Τα δεδομένα της απεικόνισης αυτής παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.



**Εικόνα 11:** Γραφική απεικόνιση της έντασης του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από ένα πηνίο πάνω στον άξονα του πηνίου, εξωτερικής ακτίνας 20mm και εσωτερικής 2,5mm συναρτήσει της απόστασης.



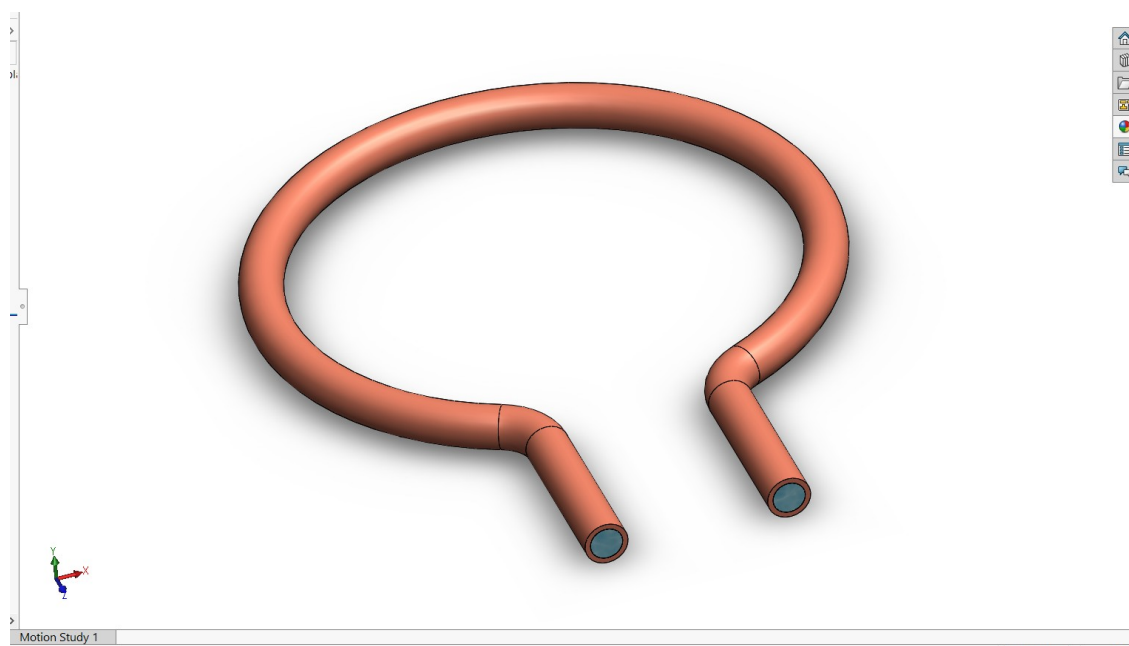
**Εικόνα 12:** Γραφική απεικόνιση της έντασης του μαγνητικού πεδίου που επάγεται από κυκλικό πηνίο, συναρτήσει της εξωτερικής ακτίνας αυτού καθώς και της απόστασης από το κέντρο του.

**Πίνακας 3:** Οι στήλες του πίνακα απεικονίζουν την απόσταση του δείγματος από το κέντρο του πηνίου επάνω στον άξονά του και οι γραμμές αφορούν την εξωτερική ακτίνα του πηνίου.

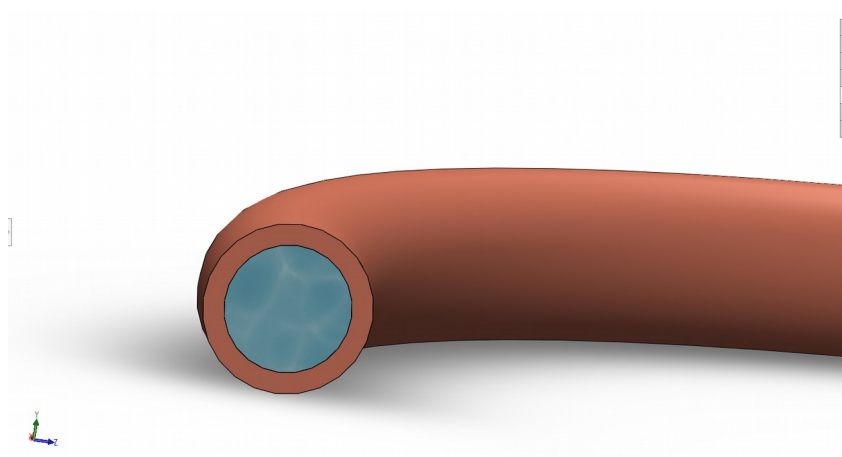
(mm)	10	20	30	40	50	60	70	80
20	1755,5	866,6	417,7	222,9	123,8	76,9	49,8	28,6
25	1588,2	794,1	397,1	198,5	99,3	49,6	24,8	12,4
30	1401,7	700,9	350,4	175,2	87,6	43,8	21,9	11,0
35	1226,8	613,4	306,7	153,4	76,7	38,3	19,2	9,6
40	1106,7	553,4	276,7	138,3	69,2	34,6	17,3	8,6

### 3.3.2 Ψύξη του πηνίου

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SolidWorks, σχεδιάστηκε το παρακάτω πηνίο:



*Εικόνα 13(α): Σχεδιασμός του pancake coil στο SolidWorks.*



*Εικόνα 13 (β): Τομή του πηνίου στο SolidWorks.*



Στη συνέχεια με τη βοήθεια του λογισμικού ANSYS πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός της δομής meshing ως εξής:

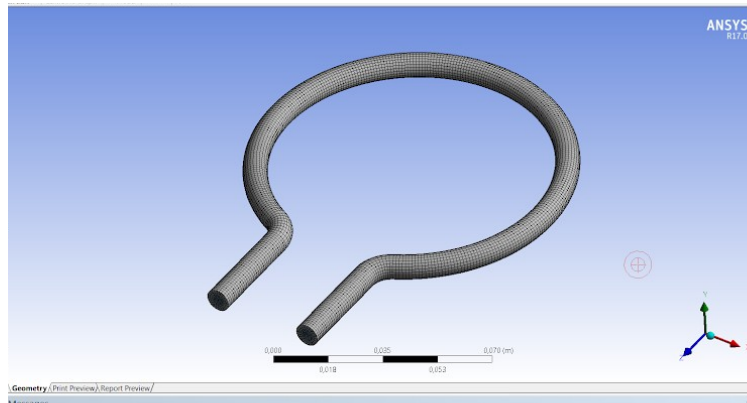
**Πίνακας 4:** Διαχωρισμός της δομής meshing

<b>Statistics</b>	
Bodies	2
Active Bodies	2
Nodes	48942
Elements	38235

Όπως φαίνεται στην Πίνακα 4 σώματα (πηνίο και σώμα νερού στο εσωτερικό του) διαχωρίζονται σε 48942 κόμβους και σε 38235 στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά επιλέγονται να είναι εξάεδρα τα οποία είναι η βέλτιστη δομή για υδροδυναμική ανάλυση.

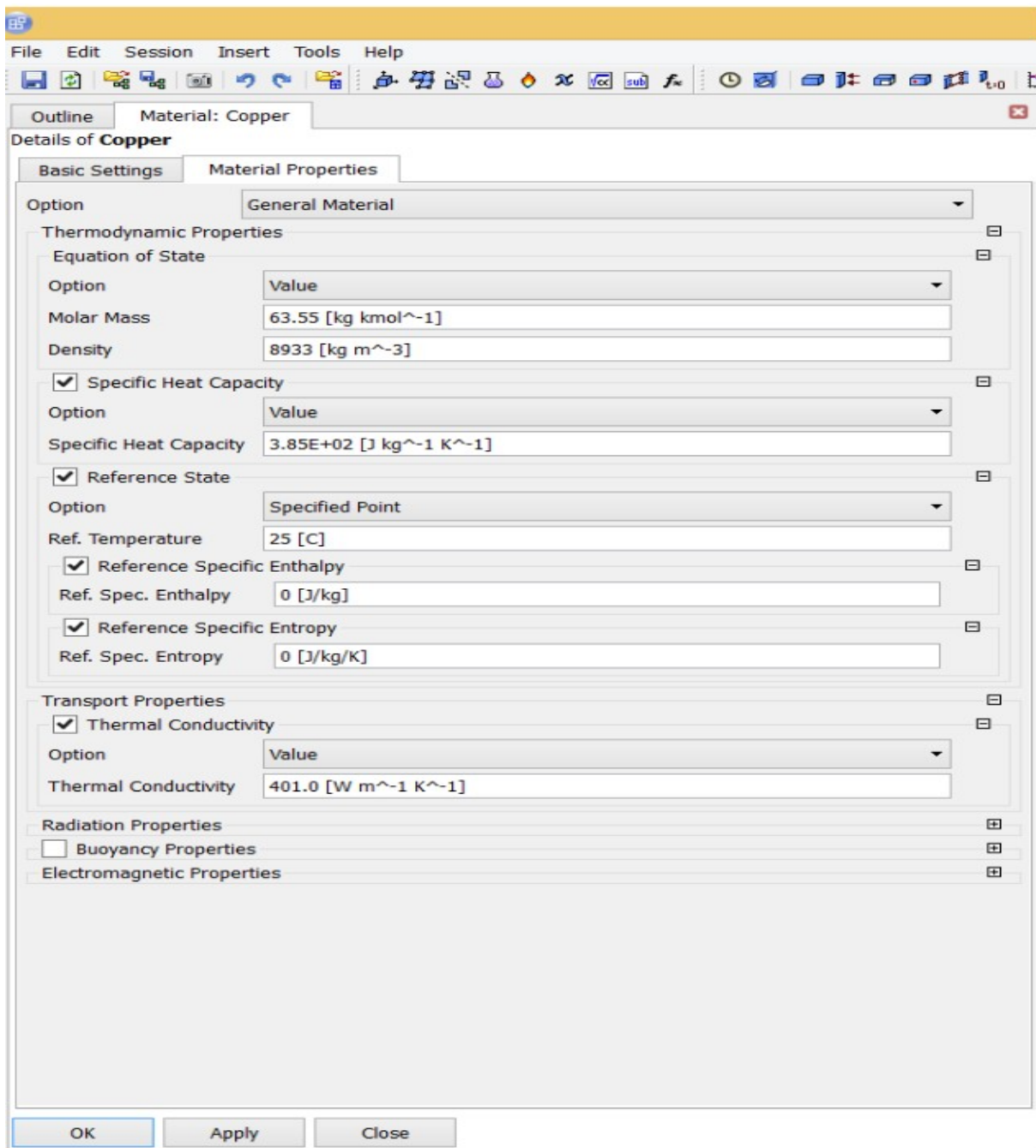
**Πίνακας 5:** Χαρακτηρισμός των στοιχείων της δομής meshing

<b>Sizing</b>	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
Min Size	Default (4,4313e-005 m)
Max Face Size	Default (4,4313e-003 m)
Max Tet Size	Default (8,8625e-003 m)
Growth Rate	Default (1,20 )
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default (2,2156e-005 m)
Minimum Edge Length	6,6242e-003 m

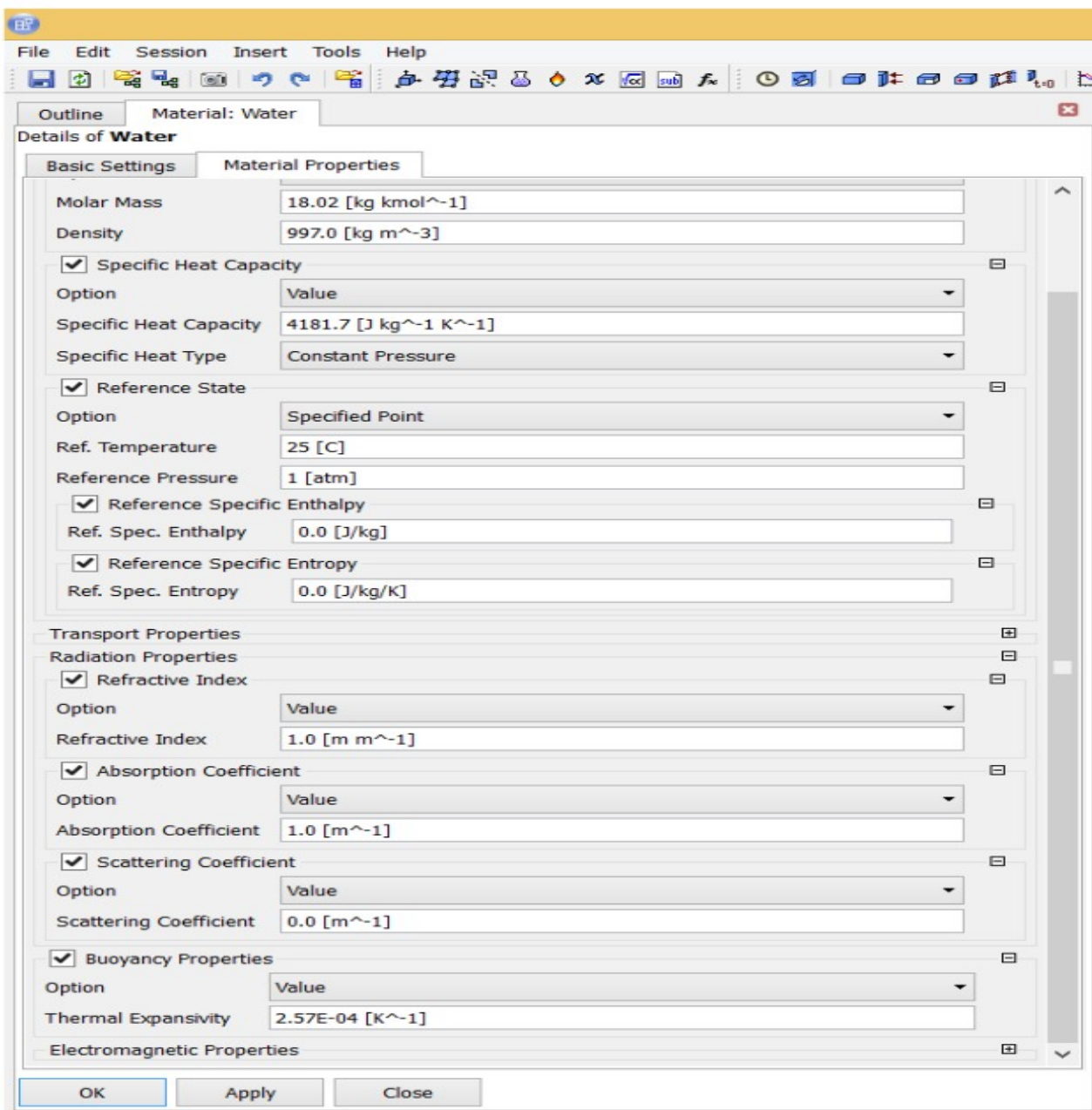


**Εικόνα 14:** Διαχωρισμός της δομής meshing στο ANSYS.

Έπειτα, στο πρόγραμμα ANSYS CFX ορίστηκαν οι ιδιότητες του νερού και του χαλκού, όπως φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες:



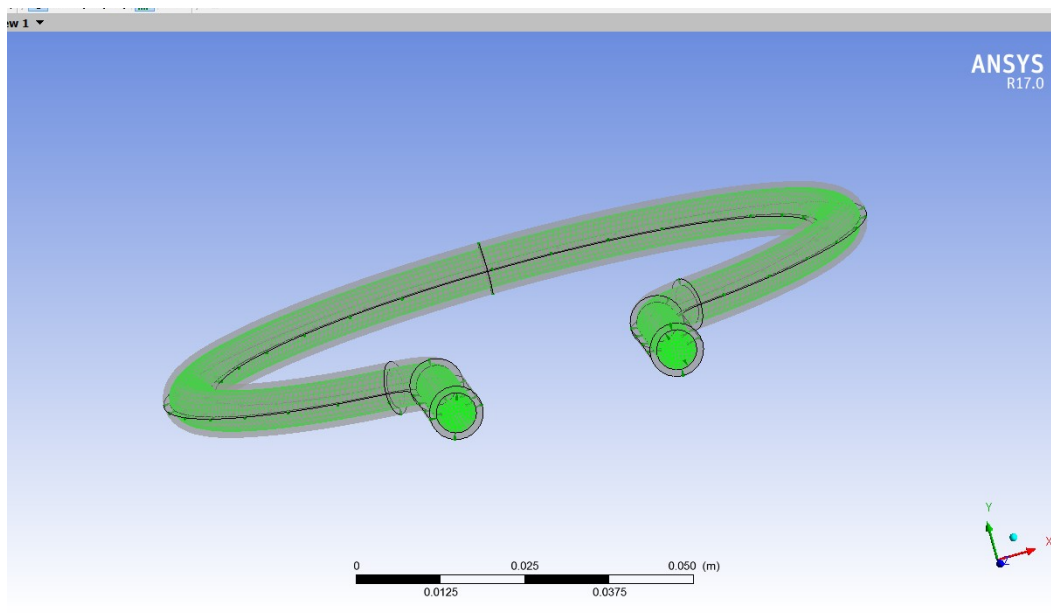
*Εικόνα 15: Ο χαλκός, όπως ορίστηκε στο ANSYS CFX.*



Εικόνα 16: Το νερό, όπως ορίστηκε στο ANSYS CFX.

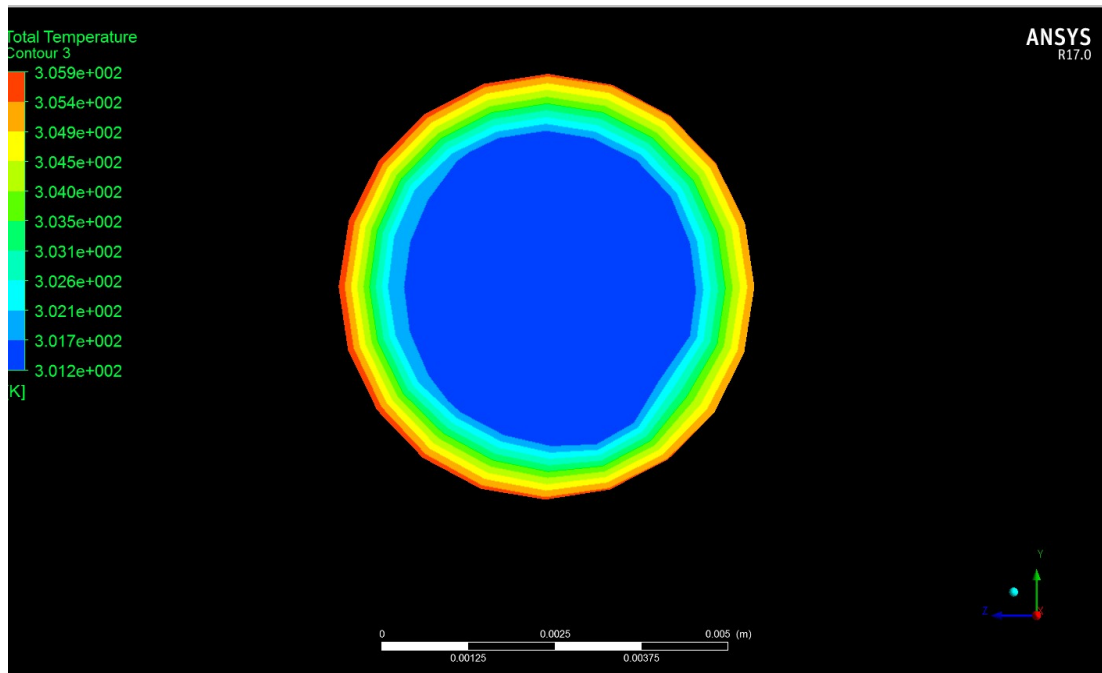
Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο k-epsilon για την περιγραφή της τύρβης. Το μοντέλο k-epsilon βασίζεται στη μοντελοποίηση εξισώσεων μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και το ρυθμό καταστροφής της (dissipation rate). Επίσης είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο τύρβης για βιομηχανικές 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.

Στη συνέχεια, αντιστοιχήθηκαν οι περιοχές της γεωμετρίας με τα υλικά, και καθορίστηκε η είσοδος (inlet) και η έξοδος (outlet) του ρευστού. Το ρευστό εισέρχεται στο σωλήνα χαλκού με  $u=1$  m/s και θερμοκρασία  $25^{\circ}\text{C}$  και για την έξοδο ορίζεται μέση στατική πίεση 1 ατμόσφαιρα. Τέλος, ως πηγή θερμότητας ορίζεται η θερμότητα που προκύπτει από την ανάλυση του εναλλασσόμενου πεδίου από το ANSYS electric.

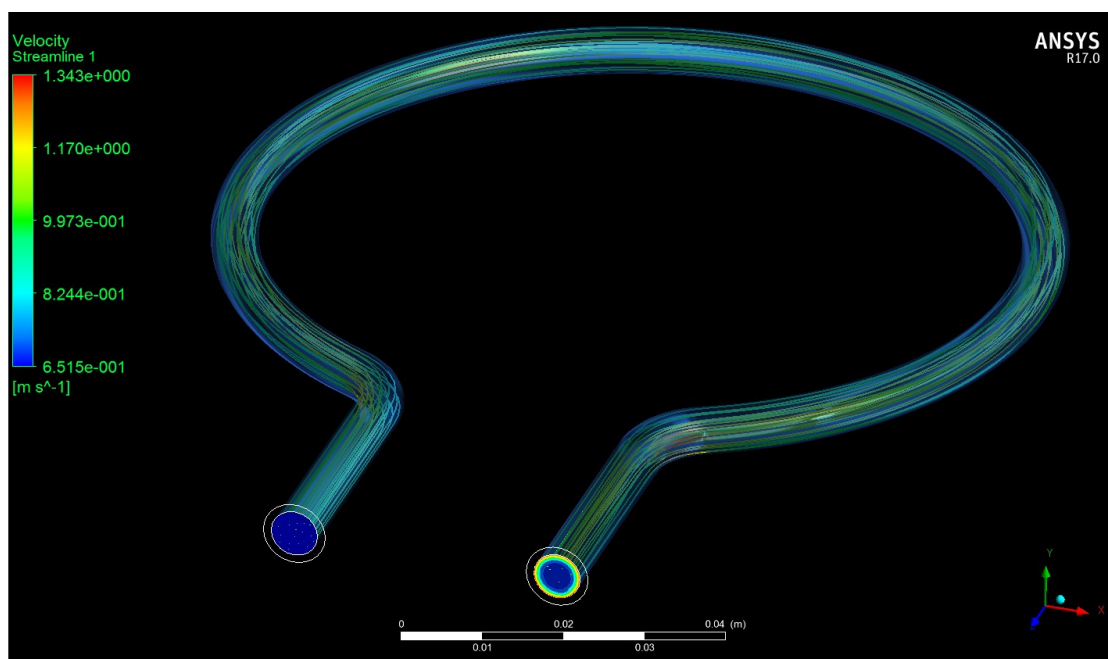


**Εικόνα 17:** Η ροή του νερού μέσα στο πηνίο, στο ANSYS CFX.

Στις εικόνες παρουσιάζεται το προφίλ της θερμοκρασίας του ρευστού ενδεικτικά για ταχύτητα ρευστού 1 m/s καθώς και τα streamlines της ταχύτητας του ρευστού μέσα στο σωλήνα.



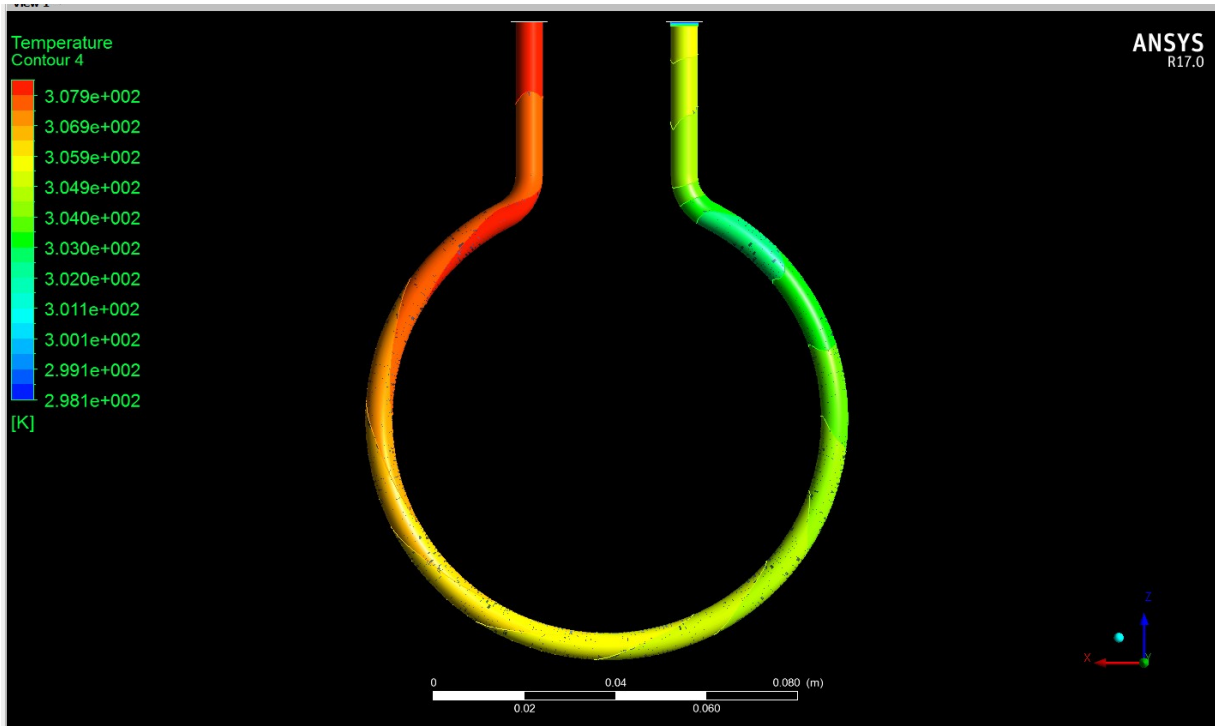
(α)



(β)

**Εικόνα 18:** Θερμοκρασία του ρευστού για ταχύτητα ρευστού 1m/s.

Στην επόμενη ανάλυση παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του πηνίου. Όπως είναι αναμενόμενο, η θερμοκρασία του πηνίου κοντά στο σημείο παροχής είναι χαμηλότερη συγκριτικά με την περιοχή κοντά στην έξοδο καθώς το νερό θερμαίνεται κατά την πορεία του μέσα στο σωλήνα και επομένως απάγει λιγότερη θερμότητα.

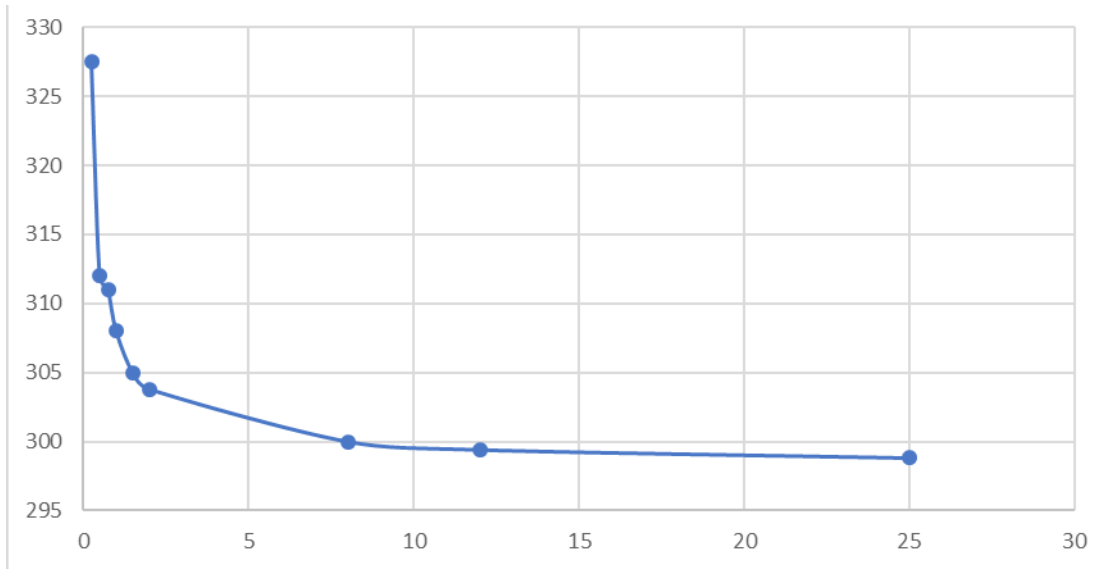


**Εικόνα 19:** Κατανομή της θερμότητας του πηνίου καθώς ρέει νερό στο εσωτερικό του.

Για τις συγκεκριμένες διαφορές θερμοκρασίας, δεν δημιουργείται πρόβλημα αλλά σε πηνία περισσότερων περιελίξεων πρέπει να προσεχθούν μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν τάσεις στο υλικό και επομένως ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

Έπειτα πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για το πηνίο με διαστάσεις 20mm μείζονα ακτίνα και 2,5mm ελάσσονα, για ταχύτητες ρευστού από 0.25 μέχρι 25 m/s που αντιστοιχούν σε παροχή ρευστού 105,97 ml/min μέχρι 10597 ml/min.

Παρατηρείται πως για χαμηλές τιμές παροχής, η θερμοκρασία του ρευστού στην έξοδο είναι μεγαλύτερη από αυτή σε υψηλότερες τιμές παροχής σύμφωνα με το διάγραμμα:



**Εικόνα 20:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού (άξονας Y) συναρτήσει της ταχύτητάς του (άξονας X) για *pancake coil*.

Παρατηρείται ότι μετά από κάποια ταχύτητα ρευστού, η θερμοκρασία στην έξοδο του σωλήνα πλησιάζει ασυμπτωτικά στη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού το οποίο είναι λογικό καθώς τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας πραγματοποιούνται αβίαστα με βάση τη διάταξη που έχει προβλεφθεί.

Επομένως για το συγκεκριμένο πηνίο επιλέγεται ως κατάλληλη τιμή παροχής τα 5m/s τα οποία παρέχουν ικανοποιητική ψύξη χωρίς να καταναλώνεται αλόγιστα ενέργεια για υψηλότερες παροχές.



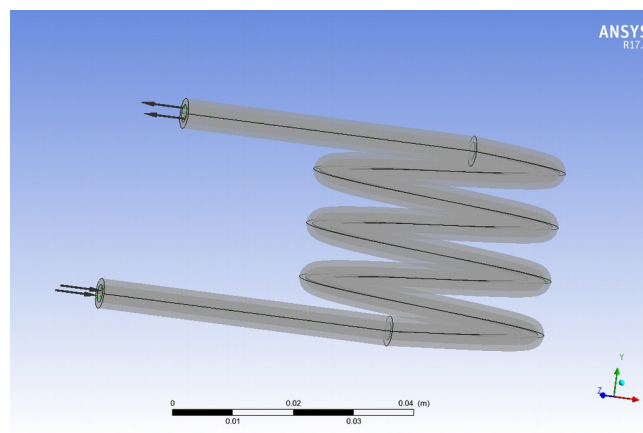
### 3.4 Μελέτη εναλλακτικών πηνίων

Πέρα από το pancake coil που χρησιμοποιήθηκε για την πλήρη μοντελοποίηση, παραμετροποίηση και βελτιστοποίηση του φαινομένου, σχεδιάστηκαν και αναλύθηκαν και άλλα σωληνοειδή με στόχο την ολοκληρωμένη συγκριτική παράθεση τους.

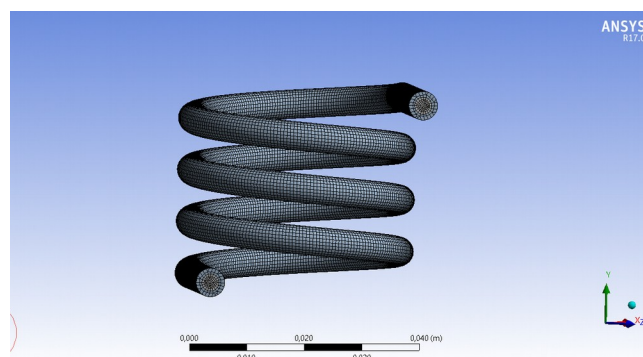
Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν 3 σωληνοειδή και ένα ακόμη πηνίο που δεν αναφέρεται στη βιβλιογραφία και αναλύθηκαν.

Τα 3 σωληνοειδή σχεδιάστηκαν με 5, 7 και 9 σπείρες όπως φαίνεται παρακάτω.

Για τα σωληνοειδή δεν πραγματοποιήθηκε ανάλυση στο ANSYS Maxwell καθώς η θερμότητα που παράγεται δεν επηρεάζεται από τον αριθμό στροφών. Επομένως, επιλέχτηκε για τις αναλύσεις η ίδια θερμοκρασία με το προηγούμενο Κεφάλαιο (400°C).



(α)



(β)

**Εικόνα 21:** Σχεδιασμός σωληνοειδούς 5 στροφών.

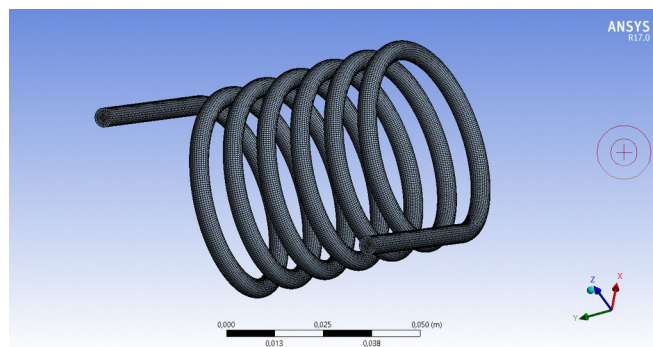
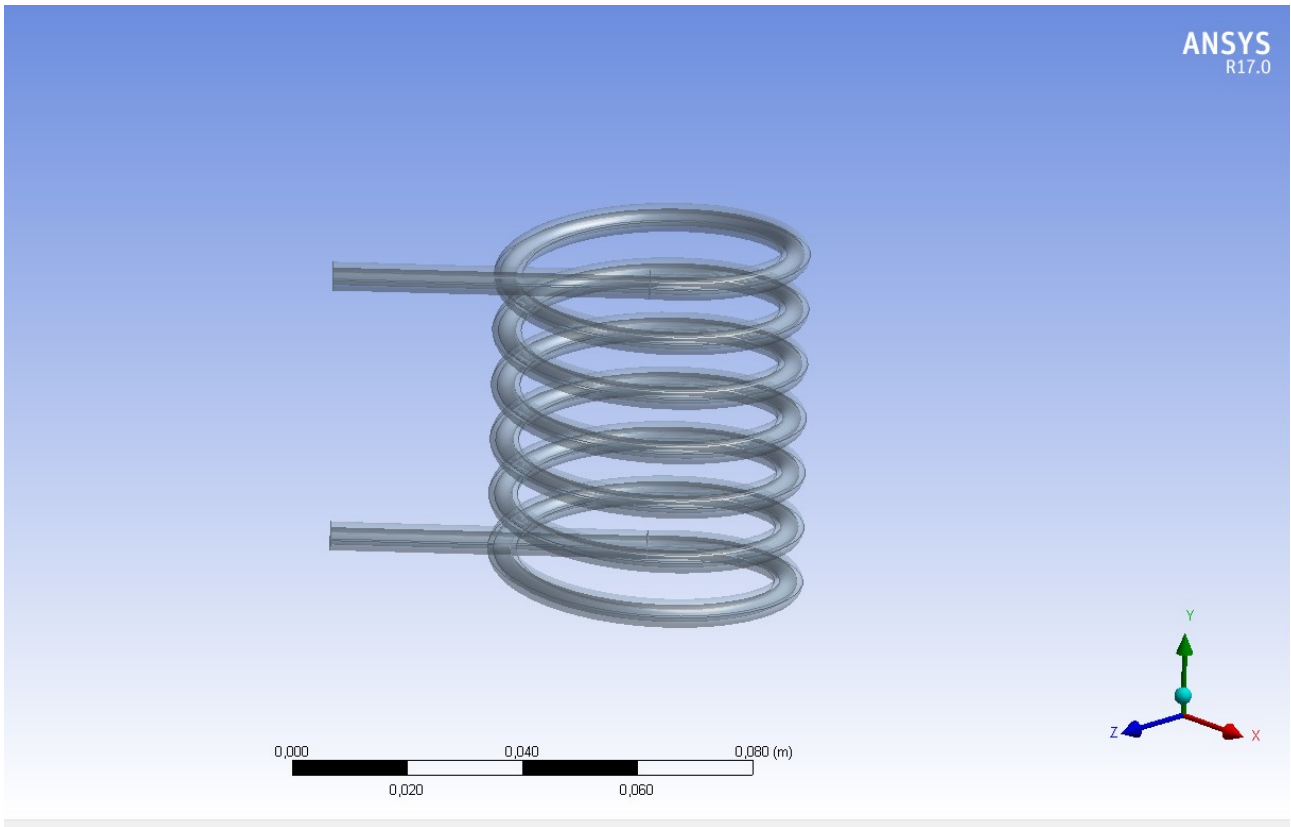
Τα χαρακτηριστικά του mesh για το σωληνοειδές 5 σπειρών παρουσιάζονται στους πίνακες:

**Πίνακας 6:** Διαχωρισμός της δομής meshing για σωληνοειδές 5 σπειρών.

<b>Statistics</b>	
Bodies	2
Active Bodies	2
Nodes	153765
Elements	123971

**Πίνακας 7:** Χαρακτηρισμός των στοιχείων της δομής meshing για σωληνοειδές 5 σπειρών.

<b>Sizing</b>	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
Min Size	Default (5,3062e-005 m)
Max Face Size	Default (5,3062e-003 m)
Max Tet Size	Default (1,0612e-002 m)
Growth Rate	Default (1,20 )
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default (2,6531e-005 m)
Minimum Edge Length	4,7124e-003 m



*Εικόνα 22: Σχεδιασμός σωληνοειδούς 7 στροφών.*

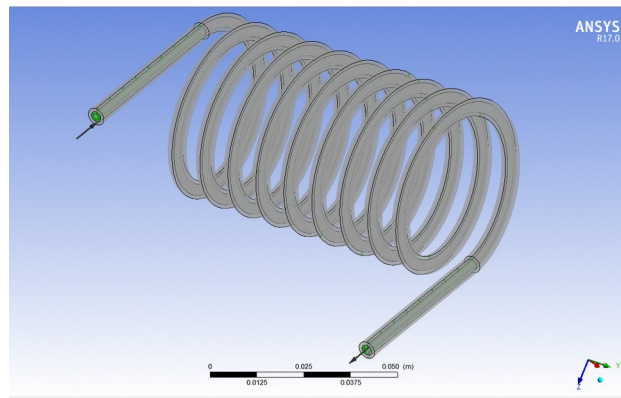
Τα χαρακτηριστικά του mesh για το σωληνοειδές 7 σπειρών παρουσιάζονται στους πίνακες:

**Πίνακας 8:** Διαχωρισμός της δομής meshing για σωληνοειδές 7 σπειρών.

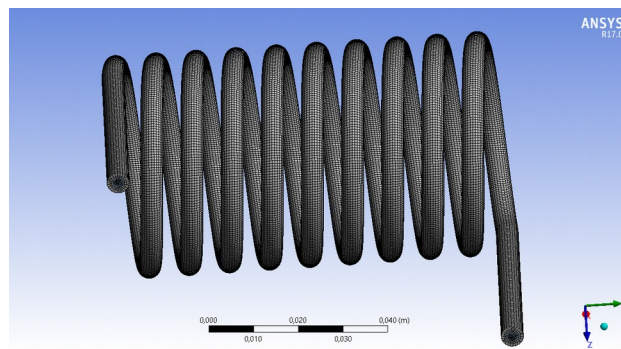
<b>Statistics</b>	
Bodies	2
Active Bodies	2
Nodes	332912
Elements	266324
Mesh Metric	None

**Πίνακας 9:** Χαρακτηρισμός των στοιχείων της δομής meshing για σωληνοειδές 7 σπειρών.

<b>Sizing</b>	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
Min Size	Default (6,9793e-005 m)
Max Face Size	Default (6,9793e-003 m)
Max Tet Size	Default (1,3959e-002 m)
Growth Rate	Default (1,20 )
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default (3,4896e-005 m)
Minimum Edge Length	4,7124e-003 m



(α)



(β)

**Εικόνα 23:** Σχεδιασμός σωληνοειδούς 9 σπειρών.

Τα χαρακτηριστικά του mesh παρουσιάζονται στους πίνακες:

**Πίνακας 10:** Διαχωρισμός της δομής meshing για σωληνοειδές 9 σπειρών.

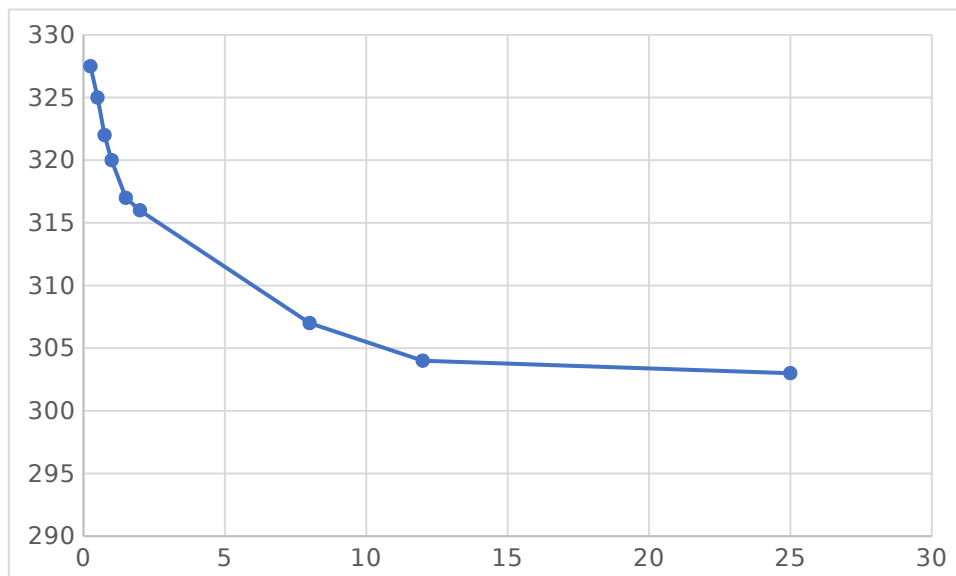
Statistics	
Bodies	2
Active Bodies	2
Nodes	456795
Elements	371460
Mesh Metric	None

**Πίνακας 11:** Χαρακτηρισμός των στοιχείων της δομής meshing για σωληνοειδές 9 σπειρών.

Sizing	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
Min Size	Default (7,1217e-005 m)
Max Face Size	Default (7,1217e-003 m)
Max Tet Size	Default (1,4243e-002 m)
Growth Rate	Default (1,20 )
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default (3,5609e-005 m)
Minimum Edge Length	4,7124e-003 m

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση όπως περιγράφηκε παραπάνω στο πρόγραμμα CFX του ANSYS και αντίστοιχα προσδιορίστηκαν οι ταχύτητες εισόδου του ρευστού που είναι επαρκείς για την ψύξη των σωληνοειδών.

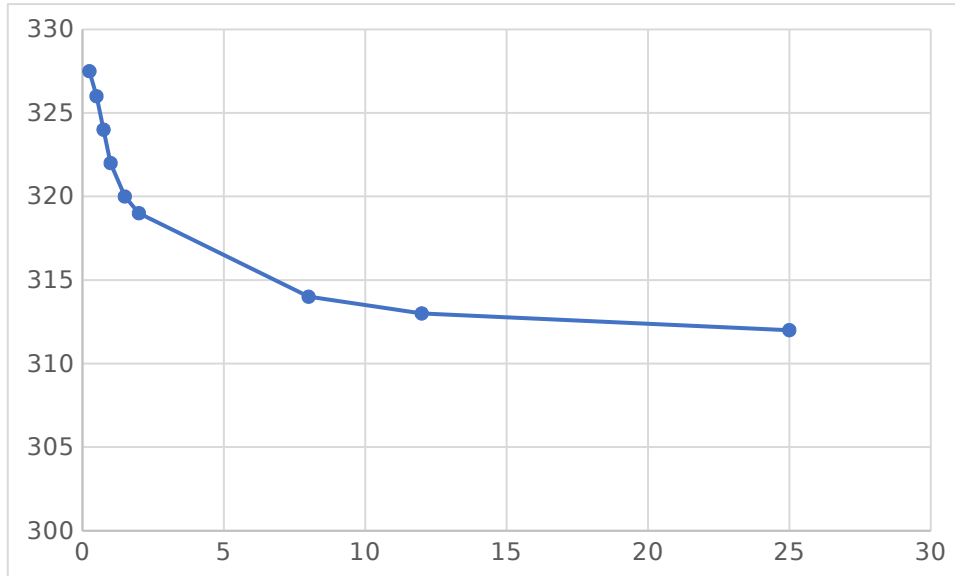
Για το σωληνοειδές των 5 στροφών προκύπτει το διάγραμμα:



**Εικόνα 24:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού (άξονας Y) συναρτήσει της ταχύτητάς του (άξονας X) για σωληνοειδές 5 στροφών.

Παρατηρείται ότι η καμπύλη αρχίζει να εξομαλύνεται για παροχή 7m/s επομένως αυτή θεωρείται η κατάλληλη ταχύτητα παροχής για την επαρκή ψύξη του σωληνοειδούς.

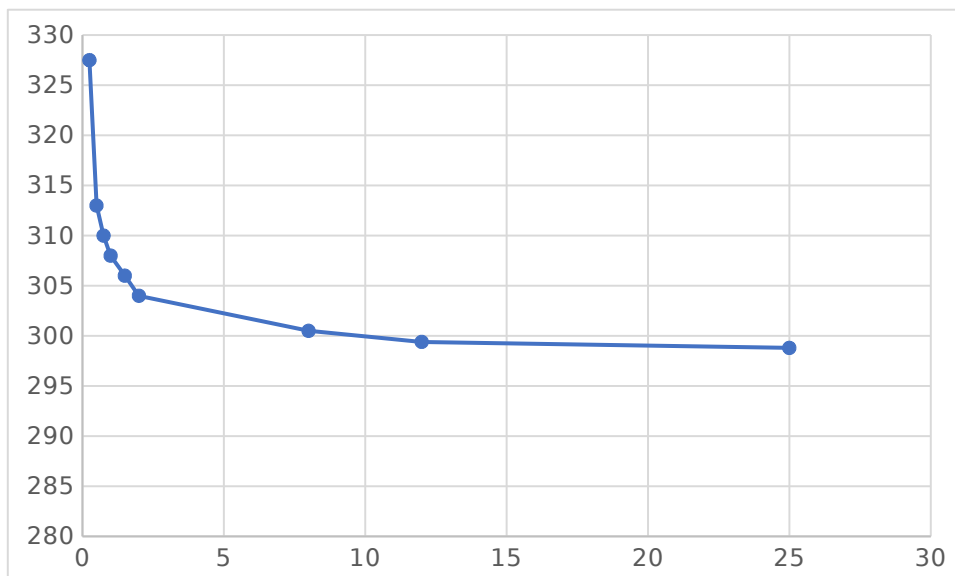
Αντίστοιχα, για το σωληνοειδές των 7 στροφών προκύπτει το διάγραμμα:



**Εικόνα 25:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού (άξονας Y) συναρτήσει της ταχύτητάς του (άξονας X) για σωληνοειδές 7 στροφών.

Παρατηρείται ότι η καμπύλη αρχίζει να εξομαλύνεται για παροχή 10m/s επομένως αυτή θεωρείται η κατάλληλη ταχύτητα παροχής για την επαρκή ψύξη του σωληνοειδούς.

Τέλος, για το σωληνοειδές των 9 στροφών προκύπτει το διάγραμμα:



**Εικόνα 26:** Εικόνα 25: Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού (άξονας Y) συναρτήσει της ταχύτητάς του (άξονας X) για σωληνοειδές 9 στροφών.

Παρατηρείται ότι η καμπύλη αρχίζει να εξομαλύνεται για παροχή 12m/s επομένως αυτή θεωρείται η κατάλληλη ταχύτητα παροχής για την επαρκή ψύξη του σωληνοειδούς.

### 3.5 Μελέτη νέας γεωμετρίας

Τα προηγούμενα πηνία που μελετήθηκαν έχουν το μειονέκτημα ότι η περιοχή δράσης στην οποία πρέπει να βρίσκεται το δείγμα είναι μέσα στο κέντρο των σωληνοειδών. Αν το δείγμα βρίσκεται έξω από το κέντρο του πηνίου, οι τιμές έντασης του μαγνητικού πεδίου που λαμβάνονται είναι πολύ κοντά στις τιμές που λαμβάνονται από το pancake coil που μελετήθηκε αρχικά.

Για αυτό το λόγο η έρευνα στράφηκε στη μελέτη μιας νέας γεωμετρίας η οποία στοχεύει στη βελτιστοποίηση της διάταξης. Η γεωμετρία αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα:

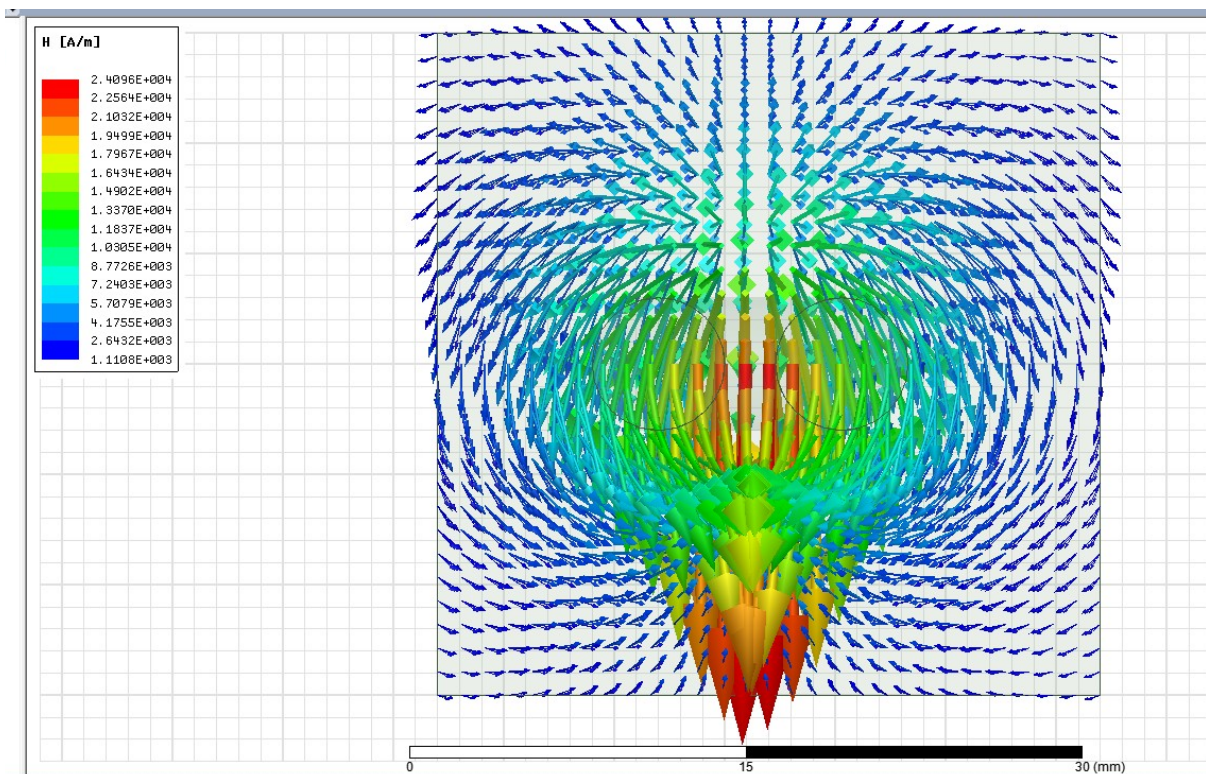


**Εικόνα 27:** Καινοτόμα γεωμετρία πηνίου, με γωνία προσαρμόσιμη στις εκάστοτε ανάγκες.

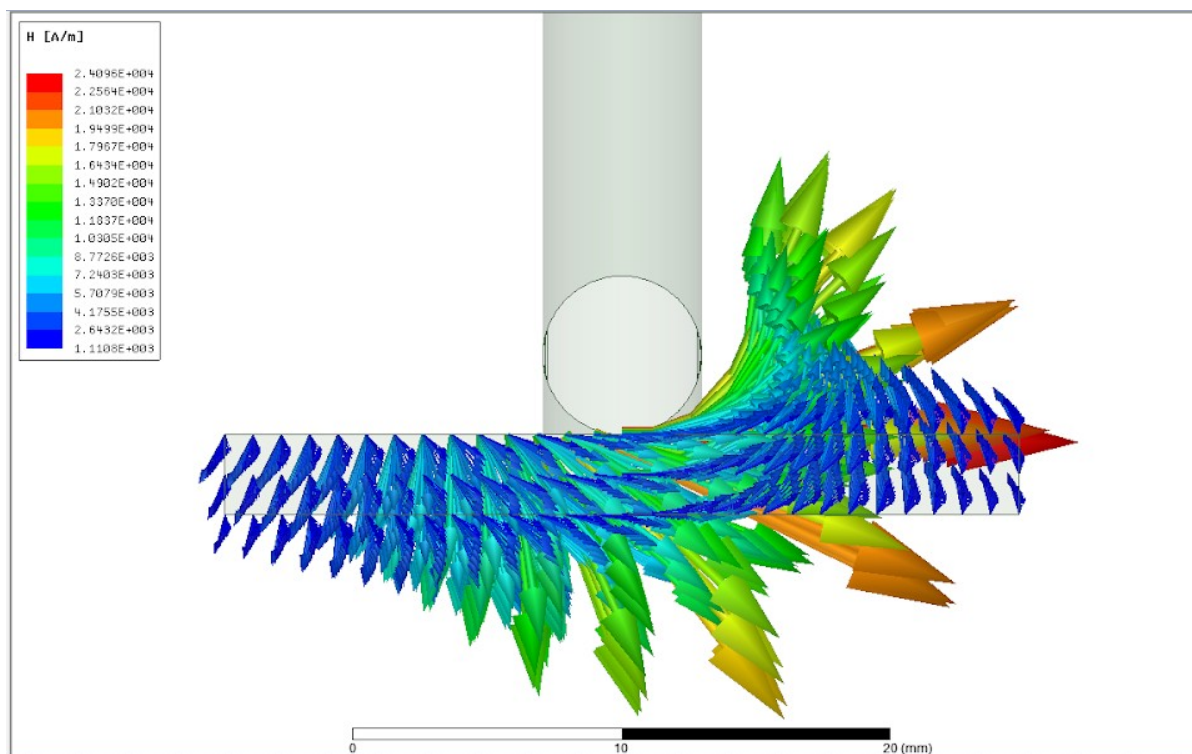
Οι ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για την ακραία περίπτωση που η γωνία είναι  $\sim 0^\circ$  δηλαδή τα 2 τμήματα του αγωγού είναι παράλληλα.

Παρουσιάζονται στη συνέχεια προσομοιώσεις του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τη συγκεκριμένη διάταξη.

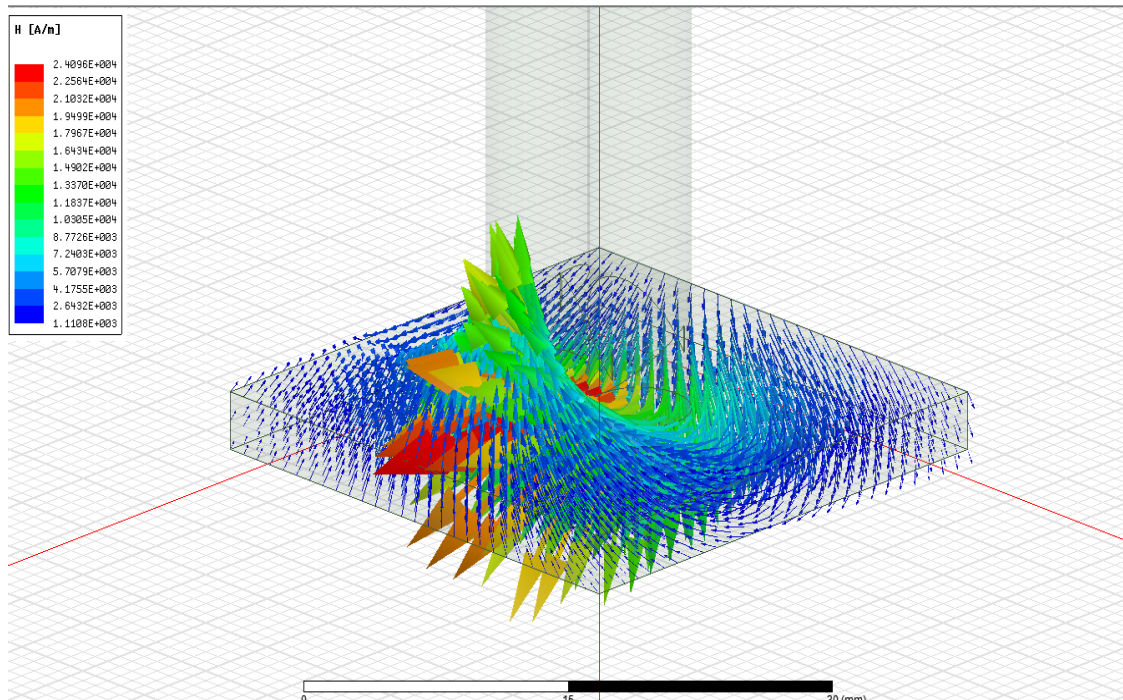




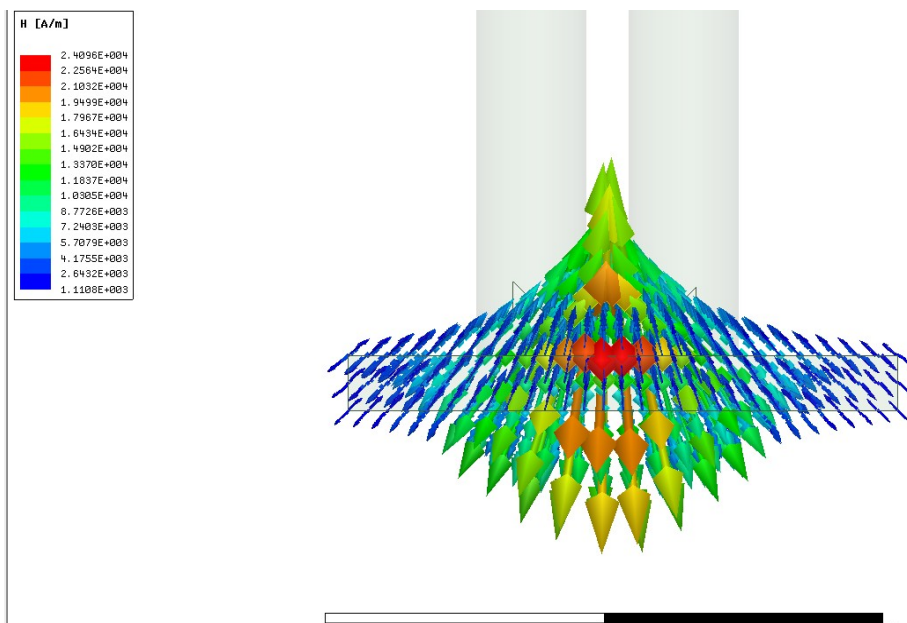
**Εικόνα 28 (α)**



**Εικόνα 28 (β)**

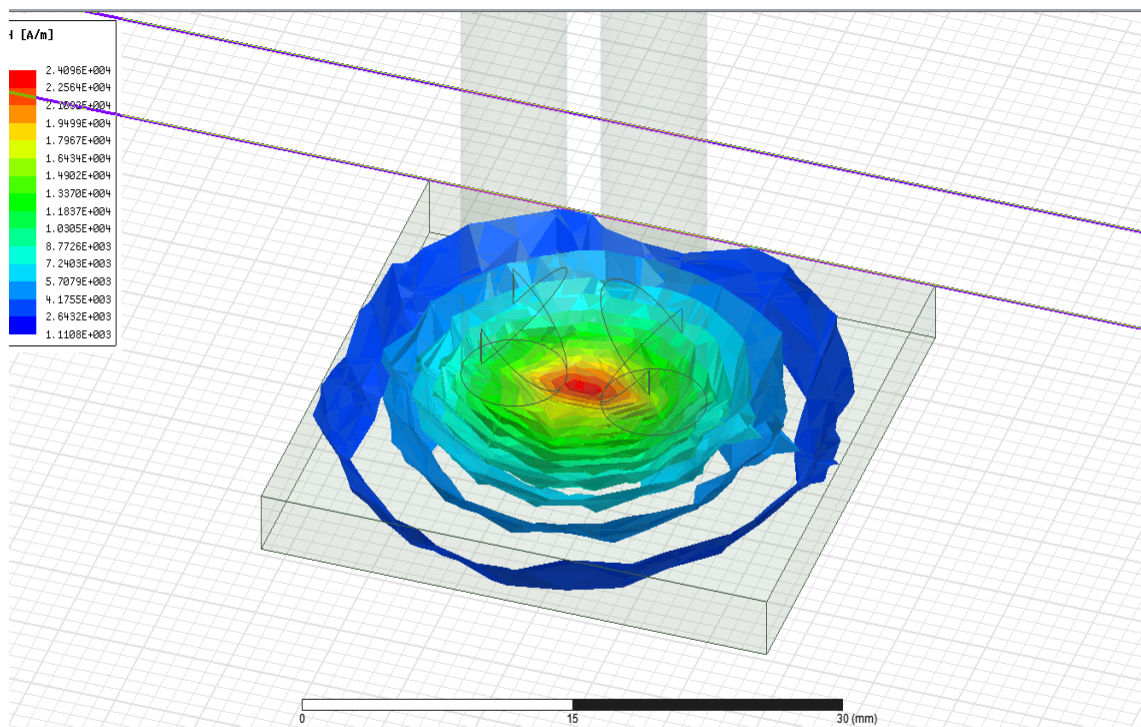


**Εικόνα 28 (γ)**

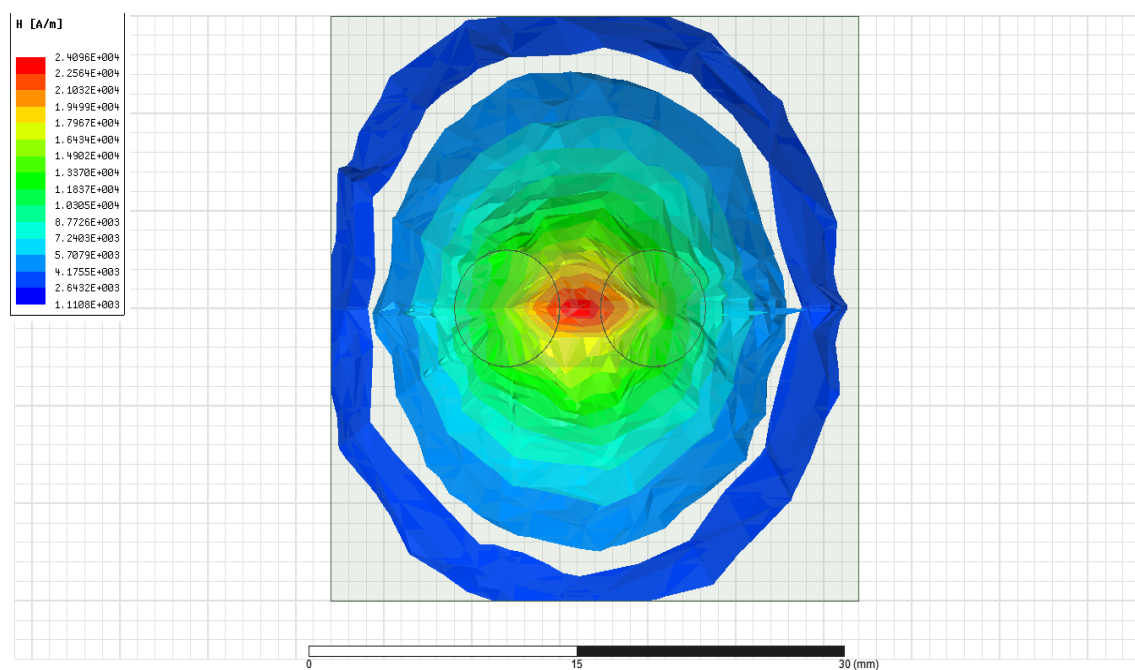


**Εικόνα 28 (δ)**

**Εικόνα 28:** Πλήρης οπτικοποίηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου της νέας γεωμετρίας.



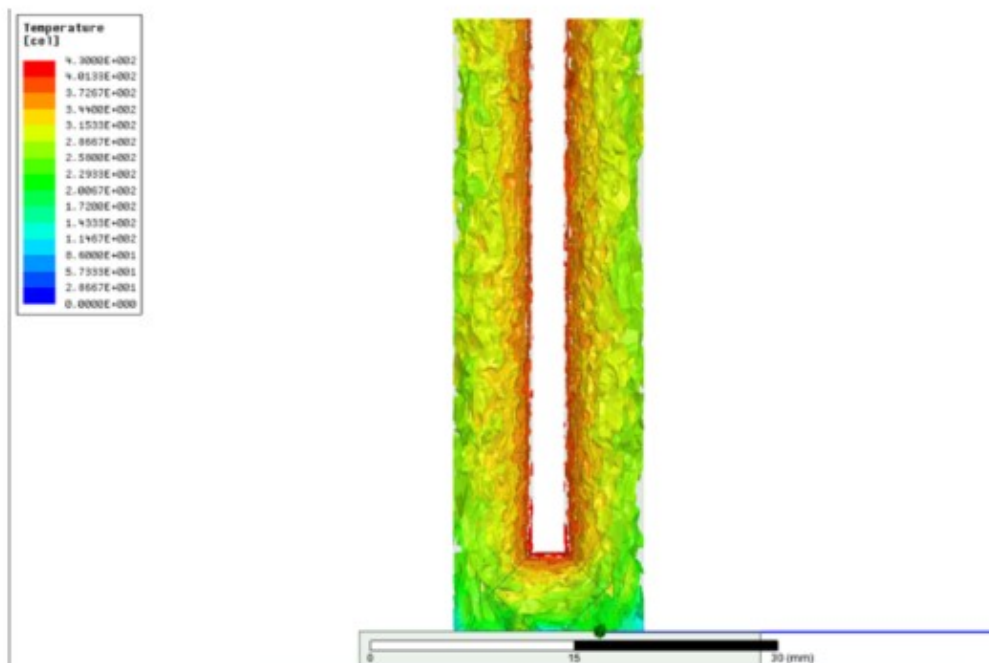
( $\alpha$ )



( $\beta$ )

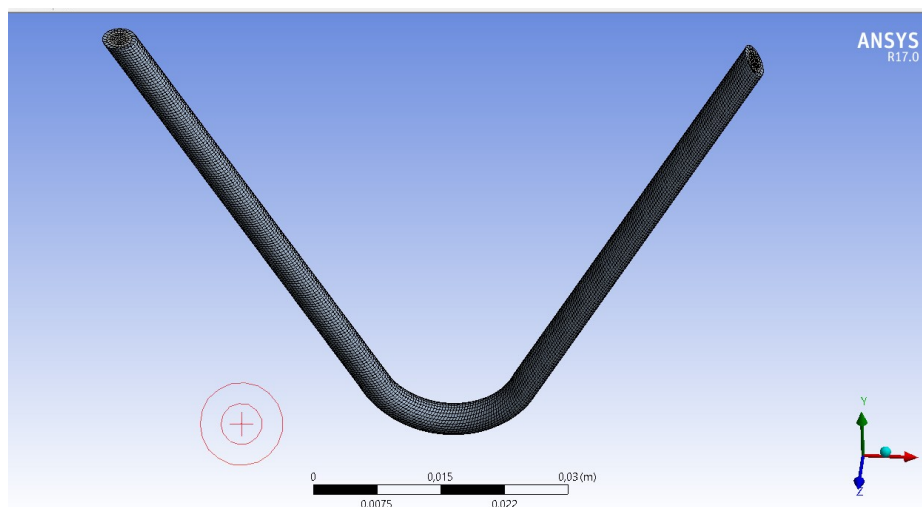
Εικόνα 29: Διάφορες οπτικές της κατανομής της μαγνητικής έντασης στη νέα γεωμετρία.

Η θερμοκρασία που προκύπτει για τα τοιχώματα του πηνίου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



**Εικόνα 30:** Θερμοκρασία στα τοιχώματα της νέας γεωμετρίας.

Για την κατάλληλη ψύξη του πηνίου πραγματοποιείται και πάλι ανάλυση στο ANSYS CFX. Τα χαρακτηριστικά του mesh παρουσιάζονται παρακάτω:



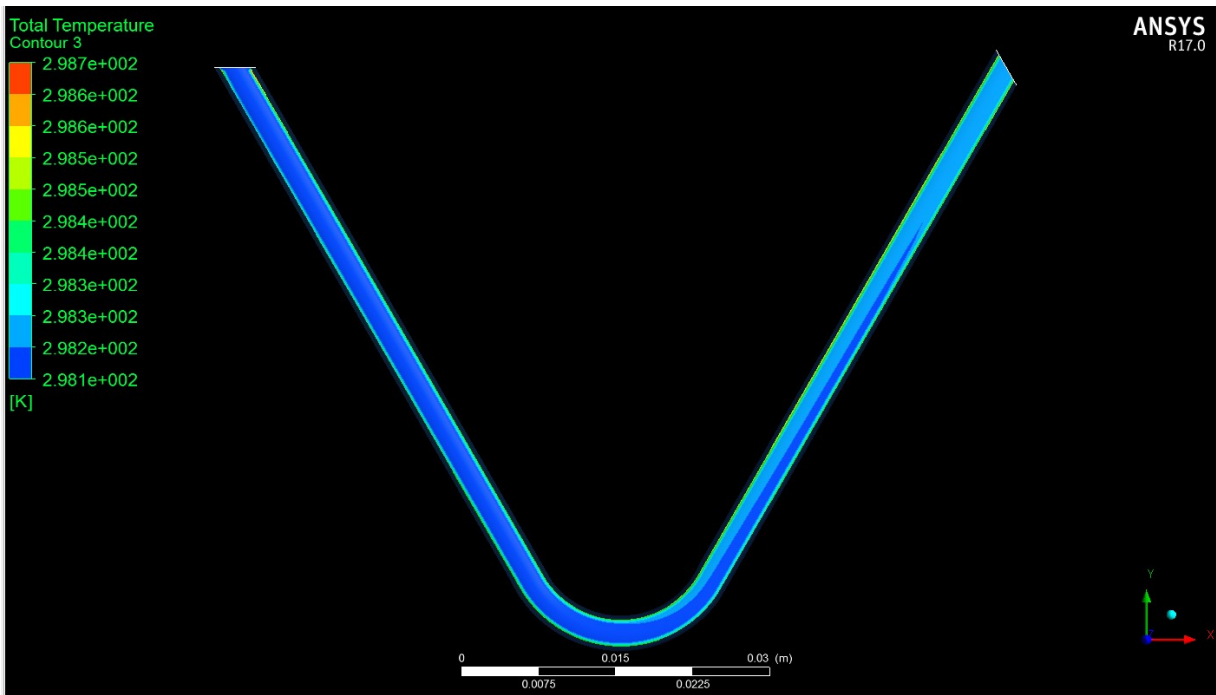
**Εικόνα 31:** Mesh απεικόνιση της νέας γεωμετρίας.

**Πίνακας 12:** Διαχωρισμός της δομής meshing για τη νέα γεωμετρία.

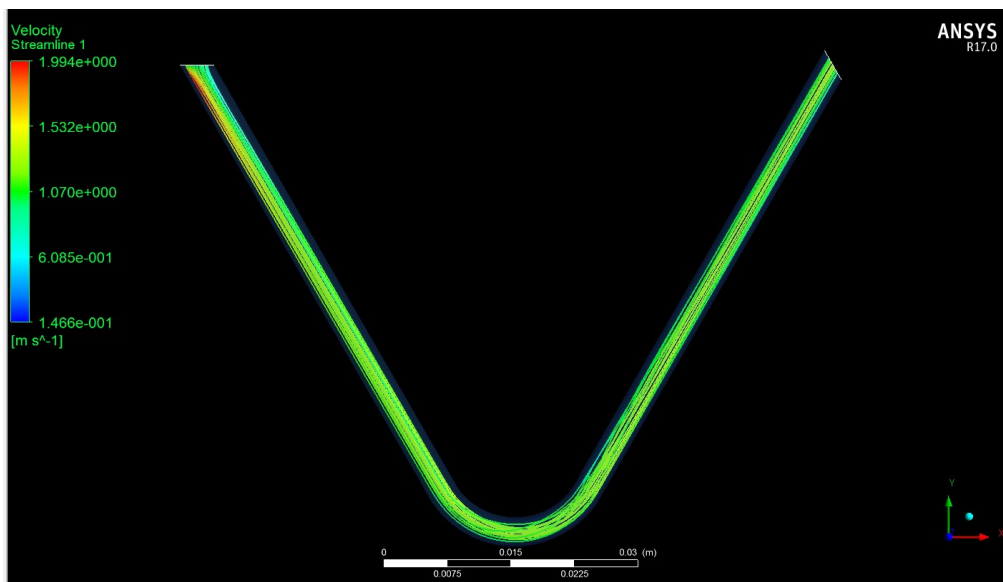
<b>Statistics</b>	
Bodies	2
Active Bodies	2
Nodes	56416
Elements	44150

**Πίνακας 13:** Χαρακτηρισμός των στοιχείων της δομής meshing για τη νέα γεωμετρία.

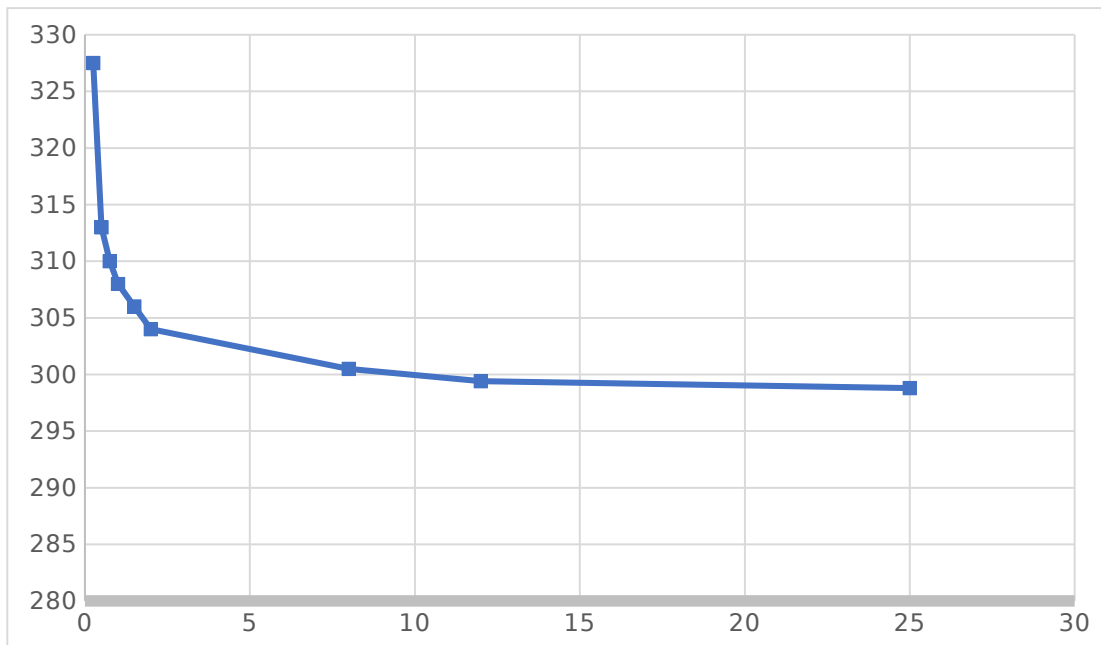
<b>Sizing</b>	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
Min Size	Default (4,8626e-005 m)
Max Face Size	Default (4,8626e-003 m)
Max Tet Size	Default (9,7252e-003 m)
Growth Rate	Default (1,20 )
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default (2,4313e-005 m)
Minimum Edge Length	4,7124e-003 m



*Εικόνα 32: Θερμοκρασία του ρευστού για ταχύτητα ρευστού 1m/s.*



*Εικόνα 33: Κατανομή της θερμότητας του πηνίου καθώς ρέει νερό στο εσωτερικό του.*



**Εικόνα 34:** Μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού (άξονας Y) συναρτήσει της ταχύτητάς του (άξονας X) για το πηνίο νέας γεωμετρίας.

Παρατηρείται ότι η καμπύλη αρχίζει να εξομαλύνεται για παροχή 6m/s επομένως αυτή θεωρείται η κατάλληλη ταχύτητα παροχής για την επαρκή ψύξη του σωληνοειδούς.

Με τη συγκεκριμένη γεωμετρία, λύνεται το πρόβλημα ότι το δείγμα δεν απαιτείται να βρίσκεται εντός του σωληνοειδούς καθώς η μέγιστη ένταση πεδίου παρατηρείται στο σημείο που πραγματοποιείται η γωνία του αγωγού. Καθίσταται, έτσι, αυτή η διάταξη κατάλληλη για εφαρμογές όπου το πηνίο μπορεί να έρθει σχεδόν σε επαφή με το στόχο καθώς και σε περιπτώσεις που απαιτείται συγκέντρωση της έντασης του μαγνητικού πεδίο σε περιορισμένο χώρο.





## 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

Στόχος της εργασίας ήταν η μελέτη του φαινομένου της μαγνητικής υπερθερμίας. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν πηνία τα οποία χρησιμοποιούνται στη μαγνητική υπερθερμία με στόχο τη βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας τους όσον αφορά τα ηλεκτρομαγνητικά τους χαρακτηριστικά όσο και τη θερμική συμπεριφορά τους. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Τα πηνία σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα Solidworks, στη συνέχεια αναλύθηκαν στο πρόγραμμα ANSYS Maxwell όπου έγιναν προσομοιώσεις των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών του κάθε πηνίου παράλληλα με παραμετροποίηση, και στη συνέχεια αφού προσδιορίστηκαν οι κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας, αντλήθηκε από το πρόγραμμα η προκύπτουσα θερμοκρασία για κάθε περίπτωση και τροφοδοτήθηκε στο ANSYS CFX. Στο CFX δόθηκαν διάφορες τιμές ταχύτητας ροής σε θερμοκρασία δωματίου στην είσοδο των πηνίων με στόχο την εύρεση της ελάχιστης δυνατής ταχύτητας η οποία παρέχει ικανή ψύξη.

Τέλος, σχεδιάστηκε ένα πηνίο το οποίο έχει σχήμα «U» που παρέχει κάποια πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα υπόλοιπα, σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

Στον πίνακα παρατίθεται σύγκριση μεταξύ των περιπτώσεων που αναλύθηκαν:

**Πίνακας 12:** Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων (όπου 😊 δηλώνει συμβατότητα)

	Pancake coil	3 turn coil	7 turn coil	9 turn coil	U shape coil
Μαγνητικό πεδίο εκτός του κέντρου του πηνίου	😊				😊
Μαγνητικό πεδίο εντός του κέντρου του πηνίου	😊	😊	😊	😊	
Αποδοτική ψύξη	😊				😊

Όσον αφορά την μελλοντική έρευνα, είναι σαφές ότι πέρα από τη μοντελοποίηση του πηνίου, απαιτείται και πλήρης παραμετροποίηση από την μεριά των νανοσωματιδίων.

Συγκεκριμένα απαιτείται παραμετροποίηση της ακτίνας των νανοσωματιδίων, της συγκέντρωσής τους, το υλικό (μαγνητίτης, μαγκναιμίτης, φερρίτης κ.λπ.) καθώς και ο χρόνος που απαιτείται για την ικανή θέρμανση τους.

Τέλος, αφού βελτιστοποιηθούν όλες οι παράμετροι που συζητήθηκαν, απαιτείται πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.



## Βιβλιογραφία

- [1] Piotr Gas, Eugeniusz Kurgan, “Cooling effects inside water-cooled inductors for magnetic fluid hyperthermia”, 2017
- [2] <https://opentextbc.ca/physicstestbook2/chapter/magnetic-fields-produced-by-currents-ampere-law/>
- [3] <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/a-review-of-basic-magnetic-theories/>
- [4] [http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m\\_b/hg2m\\_b.html#diamagnetism](http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m_b/hg2m_b.html#diamagnetism)
- [5] <https://sciencing.com/differences-between-ferrimagnetism-ferromagnetism-8488277.html>
- [6] Christos Tapeinos, “Magnetic Nanoparticles and Their Bioapplications”, 2018
- [7] Ziba Hedayatnasab, Faisal Abnisa, Wan Mohd Ashri Wan Daud, “Review on magnetic nanoparticles for magnetic nanofluid hyperthermia application”, 2017
- [8] Lina Kafrouni & Oumarou Savadogo, “Recent progress on magnetic nanoparticles for magnetic hyperthermia”, 2016
- [9] <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/HysteresisLoop.htm>
- [10] <https://nptel.ac.in/courses/115103038/module1/lec5/1.html>
- [11] Alison E. Deatsch, Benjamin A. Evans, “Heating efficiency in magnetic nanoparticle hyperthermia”, 2014
- [12] <https://link.springer.com/article/10.1007/s40204-016-0054-6#Fig1>
- [13] Andrew J. Giustini, Alicia A. Petryk, Shiraz M. Cassim, Jennifer A. Tate, Ian Baker, P. Jack Hoopes, “Magnetic Nanoparticle Hyperthermia in cancer treatment”, 2010
- [14] R. K. Gilchrist, “Surgery”, 1957
- [15] Christophe A. Monnier, Federica Crippa, Christoph Geers, Evelyne Knapp, Barbara Rothen-Rutishauser, Mathias Bonmarin, Marco Lattuada and Alke Petri-Fink, “Lock-In Thermography as an Analytical Tool for Magnetic Nanoparticles: Measuring Heating Power and Magnetic Fields”, 2017
- [16] V. Nemkov, R. Ruffini, R. Goldstein, J. Jackowski, T.L. DeWeese, R. Ivkov, “Magnetic field generating inductor for cancer hyperthermia research”, 2011
- [17] Przemyslaw Syrek, Ruxandra Bărbulescu, “Parametric curves to trace the TMS coils windings”, 2017
- [18] David Cabrera, Irene Rubia Rodríguez, Eneko Garaio, Fernando Plazaola, Luc Dupré, Neil Farrow, Francisco J. Terán, Daniel Ortega, “Instrumentation for Magnetic Hyperthermia”, 2019
- [19] R. Bjork, C.R.H Bahl. “Demagnetization factor for a powder of randomly packed spherical particles.” Applied Physics and Letters, 2013