

Μαγνητικά Νανοσωματίδια στη Βιοϊατρική

Σιούτη Χριστίνα¹, Γεωργάκος Σπύρος², Τερζίδης Εμμανουήλ³

1^ο Πειραματικό ΓΕ.Λ Θεσσαλονίκης «Μανόλης Ανδρόνικος»

[1christinasiouti@gmail.com](mailto:christinasiouti@gmail.com), [2s.georgakos@hotmail.com](mailto:s.georgakos@hotmail.com), [3manolhss@yahoo.gr](mailto:manolhss@yahoo.gr)

Επιβλέποντες καθηγητές: Δρ Κλαίρη Αχιλλέως⁴, φυσικός &

Δρ Γιώργος Μεμετζίδης⁵, χημικός

1^ο Πειραματικό ΓΕ.Λ «Μανόλης Ανδρόνικος»

[4cachilleosa@gmail.com](mailto:cachilleosa@gmail.com), [5g.memetzidis@gmail.com](mailto:g.memetzidis@gmail.com)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Νανοσωματίδια χαρακτηρίζονται τα σωματίδια με διαστάσεις μικρότερες των 100 nm. Όταν τα νανοσωματίδια είναι μαγνητισμένα τότε χαρακτηρίζονται ως μαγνητικά νανοσωματίδια. Η μελέτη μαγνητικών νανοσωματιδίων με βασικά συστατικά το σίδηρο και το οξυγόνο έχει προσελκύσει τα τελευταία χρόνια το ερευνητικό ενδιαφέρον, λόγω της χρήσης τους σε βιοϊατρικές εφαρμογές. Μια από τις εφαρμογές είναι η μέθοδος της υπερθερμίας, που χρησιμοποιείται στη καταπολέμηση των καρκινικών όγκων. Πρόκειται για μια αναίμακτη μέθοδο, κατά την οποία δεν βλάπτονται τα υγιή κύτταρα.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η σύνθεση νανοσωματιδίων σιδήρου - οξυγόνου, κατάλληλων να χρησιμοποιηθούν για την καταστροφή καρκινικών κυττάρων. Η παρασκευή των σωματιδίων έγινε με τη μέθοδο της θερμικής διάσπασης υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Ο έλεγχος και η μέτρηση του μεγέθους τους πραγματοποιήθηκε με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο υψηλής διακριτικής ικανότητας. Στη συνέχεια μελετήθηκαν οι μαγνητικές ιδιότητες των σωματιδίων, σε θερμοκρασία δωματίου με μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος. Τέλος με πείραμα υπερθερμίας διαπιστώθηκε αν τα νανοσωματίδια που παρασκευάστηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μέθοδο της υπερθερμίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: μαγνητικά νανοσωματίδια, μαγνητικές ιδιότητες, υπερθερμία

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο καρκίνος είναι μια ασθένεια που εμφανίζεται σε όλες τις ηλικίες και από τις πιο συχνές αιτίες θανάτου σε όλο τον κόσμο. Σύμφωνα με έρευνες το έτος 2004, 13% των θανάτων, παγκόσμια, οφείλονταν στον καρκίνο (World Health Organization, 2009).

Για την καταπολέμηση του καρκίνου χρησιμοποιούνται χειρουργικές επεμβάσεις, χημειοθεραπεία και ακτινοθεραπεία. Οι δύο τελευταίες είναι αναίμακτες μεν αλλά συχνά με πολλές παρενέργειες όπως απώλεια μαλλιών, ναυτία, κούραση, εμετός και άλλα [Science Wiki.Βικιπαίδεια]. Επιπλέον και στις δύο παραπάνω μεθόδους εκτός από τα καρκινικά κύτταρα καταστρέφονται και τα υγιή κύτταρα.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια δυναμική ανάπτυξη στη χρήση των μαγνητικών νανοσωματιδίων στις βιοιατρικές εφαρμογές. Τα νανοσωματίδια έχουν διάμετρο μικρότερη των 100nm ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$). Αυτά που έχουν βασικά συστατικά το σίδηρο και το οξυγόνο και με διάμετρο μικρότερη των 50nm, έχουν μαγνητικά χαρακτηριστικά που τα κάνουν κατάλληλα για ιατρικές εφαρμογές και συγκεκριμένα στην καταστροφή των καρκινικών όγκων. Τα τελευταία χρόνια, δοκιμάζεται πειραματικά η μέθοδος της μαγνητικά επαγόμενης υπερθερμίας. Όταν ένα μέταλλο βρεθεί σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο θερμαίνεται. Το φαινόμενο της θέρμανσης ενισχύεται αν το μέταλλο παρουσιάζει μαγνητική συμπεριφορά. Κατάλληλα για το σκοπό αυτό είναι τα μαγνητικά νανοσωματίδια (A. Chalkidou et al., 2011). Μετά από κατάλληλη επεξεργασία των νανοσωματιδίων, οι ερευνητές περιβάλλουν τους καρκινικούς όγκους με αυτά. Η εφαρμογή εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας των καρκινικών κυττάρων τα οποία πεθαίνουν αν η θερμοκρασία τους αυξηθεί πάνω από 43°C. Οι ερευνητές κάνουν δοκιμές με διαφορετικές συχνότητες πεδίου και διαφορετικά μεγέθη νανοσωματιδίων, ώστε να πετύχουν το καλύτερο συνδυασμό που να είναι καταστροφικός για τα καρκινικά κύτταρα χωρίς να βλάψει τα υγιή κύτταρα.

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται κατ' αρχή η παρασκευή νανοσωματιδίων φερριτών νικελίου, NiFe_2O_4 . Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος του μεγέθους τους με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ώστε να βεβαιωθούμε ότι τα σωματίδια βρίσκονται στη νανοκλίμακα. Η μαγνητική τους κατάσταση διαπιστώνεται με μέτρηση της μαγνητισμού τους σε θερμοκρασία δωματίου σε μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος (VSM). Τέλος πραγματοποιείται πείραμα υπερθερμίας ώστε να διαπιστωθεί πόση είναι η άνοδος της θερμοκρασίας σε μαγνητικό υγρό (ferrofluid) όταν αυτό βρεθεί σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Παρασκευή φερριτών νικελίου με τη μέθοδο της θερμικής διάσπασης

Σε τρίλαιμη φιάλη κατάλληλου μεγέθους τοποθετούμε 3,6 mmol ακετυλακετονικού Fe , $\text{Fe}(\text{acac})_3$, 1,8 mmol ακετυλακετονικού Ni , $\text{Ni}(\text{acac})_2$, περίσσεια πολυαιθυλοαινογλυκόλης, PEG 8000, σαν επιφανειοδραστικό και το μίγμα αναδεύεται έντονα για μερικά λεπτά. Κατόπιν προσθέτουμε ποσότητα υδρατίνης, N_2H_4 , υπό ατμόσφαιρα Ar για την αποφυγή οξειδωσης του διαλύματος από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας (ανάδευση για 30 min).

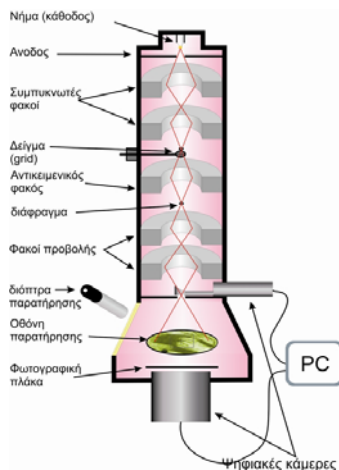
Στη συνέχεια το μίγμα θερμαίνεται στους 200 °C, όπου παραμένει για μία ώρα. Αφήνεται να κρυώσει και όταν το διάλυμα φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου (25 °C) μεταφέρεται σε σωλήνες φυγοκέντρισης, όπου φυγοκεντρείται, γίνονται πλύσεις με

κατάλληλο διαλύτη και τέλος ο διαλύτης εξατμίζεται, ώστε να πάρουμε τη σκόνη των νανοσωματιδίων.

Έλεγχος Μεγέθους Νανοσωματιδίων

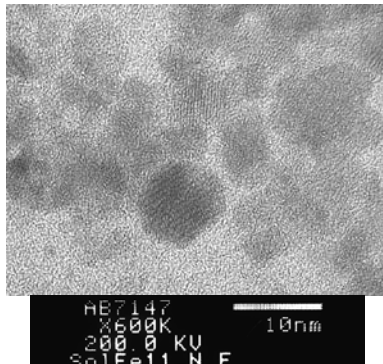
Ο έλεγχος των νανοσωματιδίων έγινε με *Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης (HMD, TEM, Transmission Electron Microscope) τύπου 2010F*. Στο HMD, η πηγή ηλεκτρονίων αποτελείται από ένα νήμα βολφραμίου (ή ακίδα LaB₆), που όταν το διαρρέει ηλεκτρικό ρεύμα πυρακτώνεται και εκπέμπει ηλεκτρόνια. Μεταξύ του νήματος, που αποτελεί την κάθοδο, και της ανόδου εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού (συνήθως της τάξης των 60-100 kV) η οποία επιταχύνει τα ηλεκτρόνια. Η πορεία των ηλεκτρονίων ρυθμίζεται από ηλεκτρομαγνητικούς φακούς, δηλ. ηλεκτρομαγνήτες, στους οποίους αλλάζοντας την ένταση του ρεύματος μεταβάλλεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου, δηλ. η εστιακή τους απόσταση και επομένως εστιάζεται η δέσμη των ηλεκτρονίων πάνω στο παρασκεύασμα (σχ. 1).

Σχήμα 1: Διάγραμμα Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου



Η εικόνα σχηματίζεται πάνω σε μια οθόνη επικαλυμμένη με φωσφορίζουσα ουσία, η οποία διεγείρεται από τα ηλεκτρόνια που πέφτουν επάνω της, αφού αυτά έχουν διαπεράσει το παρασκεύασμα. Τα σημεία του παρασκευάσματος που δεν είναι διαπερατά από τα ηλεκτρόνια (ηλεκτρονικά πυκνές, electron dense) δίνουν σκοτεινές περιοχές στην οθόνη, ενώ αντίθετα τα διαπερατά σημεία (ηλεκτρονικά διαφανή, electron lucent) δίνουν φωτεινές περιοχές. Αυτή η διαφοροποίηση επιτυγχάνεται με την εκλεκτική «χρώση» του παρασκευάσματος. Φυσικά αυτές τις εικόνες εκτός του ότι μπορούμε να τις παρατηρήσουμε απ' ευθείας στην οθόνη του μικροσκοπίου, μπορούμε να τις απεικονίσουμε με ειδικές φωτογραφικές μηχανές που είναι πάντα ενσωματωμένες στα μικροσκόπια (Κ. Φασσέας).

Εικόνα1: Τα νανοσωματίδια όπως παρατηρούνται στο ΗΜΔ



Στην εικόνα 1 φαίνεται η μορφή των νανοσωματιδίων που παρασκευάσαμε, όπως φωτογραφήθηκαν από την φωτογραφική μηχανή του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Με βάση τη μεγέθυνση του ΗΜΔ εκτιμήσαμε το μέγεθος των κόκκων – νανοσωματιδίων. Διαπιστώσαμε ότι το σχήμα τους είναι σφαιρικό και ότι η μέση διάμετρος των νανοσωματιδίων είναι περίπου 9nm.

Μαγνητικός χαρακτηρισμός των νανοσωματιδίων

Τα ηλεκτρόνια των ατόμων εκτελούν δύο κινήσεις. Την κίνηση γύρω από τον πυρήνα του ατόμου και την κίνηση γύρω από τον εαυτό τους. Όπως ξέρουμε το ηλεκτρικό ρεύμα είναι πηγή μαγνητικού πεδίου. Έτσι τα ηλεκτρόνια των ατόμων με τη κίνηση τους δημιουργούν το καθένα το δικό του μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο ενός ατόμου είναι το διανυσματικό άθροισμα όλων των ηλεκτρονικών μαγνητικών πεδίων (Ι.Α. Τσουκαλάς κ.ά.,1983).

Τα ατομικά μαγνητικά πεδία είναι τυχαία προσανατολισμένα, με αποτέλεσμα ένα υλικό δεν εμφανίζει μαγνητικό πεδίο μακροσκοπικά. Όταν όμως το υλικό βρεθεί σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έντασης H , τότε τα μαγνητικά πεδία των ατόμων, ως μικροσκοπικές μαγνητικές πυξίδες, προσανατολίζονται και το υλικό εμφανίζεται μακροσκοπικά μαγνητισμένο. Ο προσανατολισμός των ατομικών μαγνητικών πεδίων έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται σε ένα υλικό συνολικό μαγνητικό πεδίο, έντασης M , όπου το μέγεθος M ονομάζεται και μαγνήτιση του υλικού (Q. A. Pankhurst et al, 2003).

Αν οι μαγνητικές ροπές όλων των ηλεκτρονίων είναι έτσι προσανατολισμένες ώστε να αλληλοαναιρούνται, το άτομο δεν εμφανίζει μαγνητικό πεδίο. Τα υλικά που αποτελούνται από τέτοιου είδους άτομα δεν εμφανίζουν κατ' επέκταση και μαγνήτιση, ακόμα και όταν βρεθούν μέσα σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Τα υλικά αυτά ονομάζονται διαμαγνητικά (Cu, C κ.λπ.). Αν πάλι το διανυσματικό άθροισμα των μαγνητικών πεδίων των ηλεκτρονίων είναι διάφορο του μηδενός, τότε τα υλικά θα εμφανίζουν μαγνήτιση. Τα υλικά αυτά ονομάζονται παραμαγνητικά (Al, Cr, κ.λπ.). Κάποια παραμαγνητικά υλικά εμφανίζουν πολύ ισχυρή μαγνήτιση και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ατομικά μαγνητικά πεδία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτά τα υλικά ονομάζονται σιδηρομαγνητικά (Fe, Co, Ni) ή σιδηριμαγνητικά (φερριτες). Τα

μαγνητικά νανοσωματίδια που χρησιμοποιούνται στην υπερθερμία πρέπει να ανήκουν σε αυτές τις κατηγορίες.

Προκειμένου να χαρακτηρίσουμε μαγνητικά το υλικό μας, μετρήσαμε τη μαγνήτισή του σε θερμοκρασία δωματίου με μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος (Vibrating Sample Magnetometer, VSM).

Σκόνη νανοσωματιδίων μάζας $m=0,0433$ Kg τοποθετήθηκε στη δειγματοδόχη του μαγνητομέτρου. Σε θερμοκρασία δωματίου μετρήσαμε τη μαγνήτιση του υλικού M σε σχέση με την ένταση του εξωτερικού πεδίου, η οποία μεταβλήθηκε από $\mu_0 H=0$ έως $2T$. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές που καταγράφηκαν από τον υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος στη διάταξη του μαγνητομέτρου, ενώ στο Διάγραμμα 1 φαίνεται η αντίστοιχη καμπύλη $M-H$.

Πίνακας 1: Πειραματικές τιμές Έντασης πεδίου- Μαγνήτισης

Ένταση Πεδίου $\mu_0 H$ [T]	Μαγνήτιση $\mu_0 M$ [T]	Ένταση Πεδίου $\mu_0 H$ [T]	Μαγνήτιση $\mu_0 M$ [T]
0,00	0,00	1,00	0,40
0,10	0,23	1,10	0,41
0,20	0,30	1,20	0,41
0,30	0,33	1,30	0,41
0,40	0,35	1,40	0,42
0,50	0,37	1,50	0,42
0,60	0,38	1,60	0,42
0,70	0,39	1,70	0,42
0,80	0,39	1,80	0,42
0,90	0,40	1,90	0,43
		2,00	0,43

Όπως βλέπουμε από την καμπύλη $M-H$, καθώς αυξάνεται η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H , ολοένα και περισσότερο αυξάνει η μαγνήτιση του υλικού, δηλ. ολοένα και περισσότερο προσανατολίζονται τα ατομικά μαγνητικά πεδία στο υλικό. Το φαινόμενο αυτό διαρκεί έως ότου προσανατολιστούν όλα, οπότε η μαγνήτιση κορρένυται. Τα νανοσωματίδια μας έχουν μαγνήτιση κόρου $\mu_0 M_s = 0,43$ T.

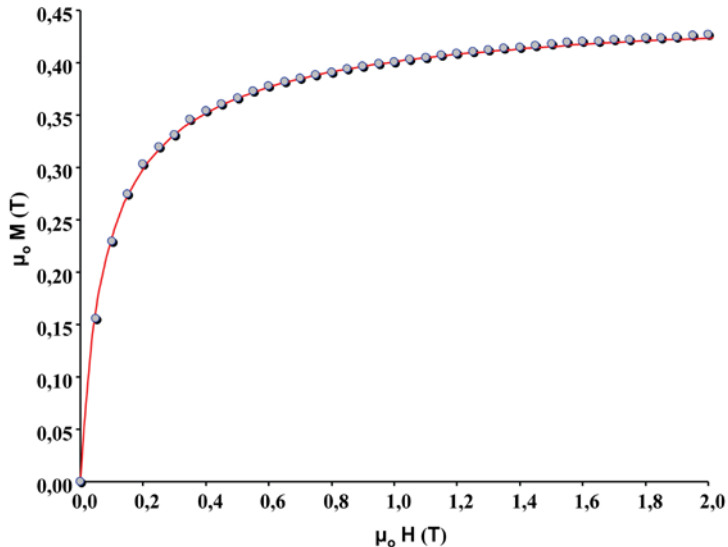
Συγκριτικά αναφέρουμε ότι σε εμπορικούς μαγνήτες, όπως το σιδηρομαγνητικό $AlNiCo$, η μαγνήτιση κόρου είναι $1,25$ T, ενώ στους σιδηρομαγνητικούς φερριτες φθάνει περίπου τα $0,39$ T (I.A. Τσουκαλάς κ.ά., 1983). Συνεπώς τα νανοσωματίδια που παρασκευάσαμε είναι καλώς μαγνητισμένα και κρίνονται, ως προς τις μαγνητικές τους ιδιότητες, κατάλληλα για τη μέθοδο της υπερθερμίας.

Μαγνητική Υπερθερμία

Όταν ένα μαγνητικό υγρό (π.χ. υγρό με μαγνητικά νανοσωματίδια) εκτίθεται σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο τα σωματίδια γίνονται πηγές θερμότητας, αρκετής να

καταστρέφει καρκινικά κύτταρα. Σημειώνεται ότι τα καρκινικά κύτταρα είναι πιο ευαίσθητα από τα υγιή σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 41 °C.

Διάγραμμα 1: Καμπύλη της μαγνήτισης των νανοσωματιδίων συναρτήσει της έντασης εξωτερικού μαγνητικού πεδίου σε θερμοκρασία δωματίου.



Όταν το μαγνητικό υγρό βρεθεί στο εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο τα μαγνητικά σωματίδια εξαναγκάζονται σε μια συνεχή περιστροφική κίνηση λόγω της εναλλαγής του μαγνητικού πεδίου. Αυτή η κίνηση προκαλεί θέρμανση των νανοσωματιδίων που οφείλεται σε δυνάμεις τριβής (S.E.Barry, 2008).

Η θερμότητα που αναπτύσσεται ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα βάρους του μαγνητικού υλικού (W/g) προκύπτει από το ρυθμό ειδικής απορρόφησης, SAR (Specific Absorption Rate) [A. Chalkidou et al, 2011].

$$SAR = \frac{W}{m_{Fe}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t m_{Fe}} = c \frac{m_f}{m_{Fe}} \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

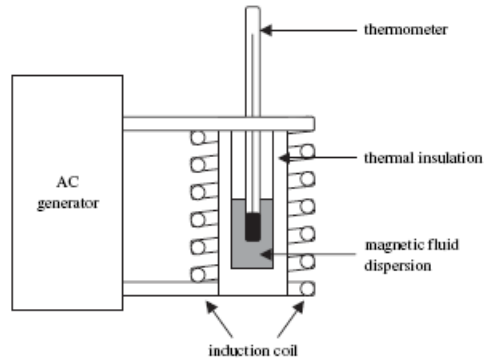
Σχέση 1: Ορισμός του δείκτη SAR

Στη σχέση 1, c είναι η ειδική θερμότητα του δείγματος, m_f η μάζα του διαλύματος, m_{Fe} η μάζα του μαγνητικού υλικού και $\Delta T/\Delta t$ η αρχική κλίση της καμπύλης θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου.

Τα νανοσωματίδια που παρασκευάσαμε διαλύθηκαν σε νερό σε συγκέντρωση 1 g/l. Η επιλογή του νερού ως διαλύτη έγινε γιατί το μεγαλύτερο ποσοστό του ανθρώπινου σώματος είναι νερό. Το διάλυμα τοποθετήθηκε σε δειγματοδόχη, η οποία τοποθετήθηκε με τη σειρά της μέσα σε επαγωγικό πηνίο που ήταν συνδεδεμένο με πηγή εναλλασσόμενης τάσης. Η μέγιστη ένταση του ρεύματος στο πηνίο έφθανε τα

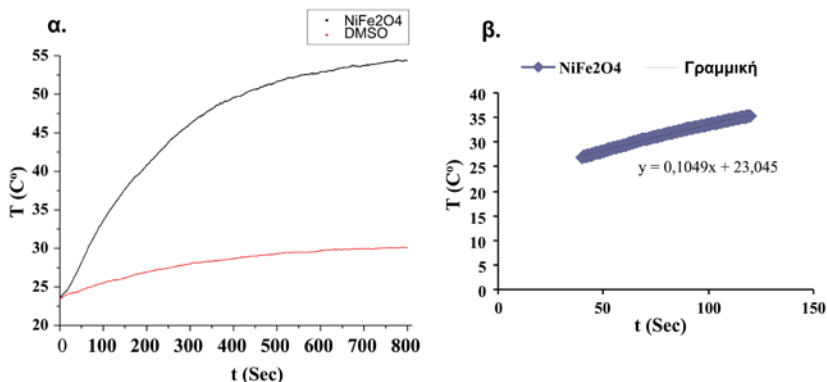
18Α. Είναι γνωστό ότι όταν ένα πηνίο διαρρέεται από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί στο εσωτερικό του εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (Αλεξιάκης Ν κ.α.,2005). Ένα θερμομέτρο, βυθισμένο στο διάλυμα είναι συνδεδεμένο με υπολογιστή, ώστε να καταγράφεται η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας. Στο σχήμα 2 φαίνεται η διάταξη που χρησιμοποιήσαμε.

Σχήμα2: Η διάταξη της μαγνητικής υπερθερμίας.



Η χρονική μεταβολή της θερμοκρασία στο δείγμα μας φαίνεται στο διάγραμμα 3α. Η θερμοκρασία του διαλύματος αυξήθηκε σε χρονικό διάστημα 15 λεπτών από τους 23 στους 52 °C. Από τα πειραματικά δεδομένα με βάση τη σχέση 1 υπολογίστηκε ο δείκτης SAR. Αρχικά βρίσκουμε την κλίση της ευθείας ($\Delta T/\Delta t$) με γραμμική προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων, θεωρώντας ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ακολουθεί “ιδανική” συμπεριφορά (διάγραμμα 3β). Στη προσαρμογή χρησιμοποιήθηκε το χρονικό διάστημα από 40 έως 120 δευτερόλεπτα. Η κλίση της ευθείας προέκυψε 0.1049 °C/s.

Διάγραμμα 3:α) Η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας για το δείγμα και τον διαλύτη του. **β)** Γραμμική προσαρμογή δεδομένων για τον υπολογισμό της κλίσης $\Delta T/\Delta t$



Στη συνέχεια, με δεδομένα την ειδική θερμότητα $c=2,0097 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$, τη μάζα του δείγματος $m_F=1,1004\text{g}$ και τη μάζα των νανοσωματιδίων $m_{Fe}=0,001\text{g}$, υπολογίστηκε από τη σχέση 1 ο δείκτης $SAR=289,89 \text{ W/g}$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι αποδεκτές τιμές του SAR για τη χρήση ενός υλικού στη μέθοδο της υπερθερμίας κυμαίνονται από 200 έως 300 W/g, η τιμή του δείκτη στα νανοσωματίδια μας θεωρείται ικανοποιητική.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα σωματίδια NiFe_2O_4 που παρασκευάσαμε με τη μέθοδο της θερμικής διάσπασης έχουν διάμετρο περίπου 9 nm και εμφανίζουν σιδηριμαγνητική συμπεριφορά στη θερμοκρασία δωματίου, με μαγνήτιση κόρου 0,43T. Συνεπώς πρόκειται για μαγνητικά νανοσωματίδια. Θεωρούνται κατάλληλα για τη μέθοδο της υπερθερμίας με βάση την τιμή του δείκτη SAR που υπολογίστηκε από τα πειραματικά δεδομένα 289,89 W/g.

Τα πρώτα αποτελέσματα είναι θετικά, ωστόσο τα νανοσωματίδια που παρασκευάσαμε πρέπει να δοκιμαστούν *in vitro* σε καρκινικά κύτταρα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τα υλικά παρασκευάστηκαν στο Τμήμα Χημείας ενώ ο πειραματισμός έγινε στο Τμήμα Φυσικής του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Ευχαριστούμε θερμά τους κκ Καθηγητές Κ. Δενδρινού του Τμήματος Χημείας και Κ. Ευθυμιάδη, Ο. Καλογήρου, Ν. Φράγκη του Τμήματος Φυσικής καθώς επίσης και τους επιστημονικούς συνεργάτες τους για την πολύπλευρη βοήθειά τους τόσο στην υλικοτεχνική υποδομή όσο και στην εκτέλεση των πειραμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλεξιάκης Ν. κ.ά., *Φυσική Β τάξης Ενιαίου Λυκείου, Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων*, 2005
- Τσουκαλάς Ι.Α., Παπαδημητράκη-Χλίχλια Ε., *Μαγνητικά Υλικά*, Θεσσαλονίκη 1983
- Φασσέας Κ. (χ.η), Τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια, [http://www.aua.gr/fasseas/electron %20microscopes.htm](http://www.aua.gr/fasseas/electron%20microscopes.htm)
- Barry S.E., *Int. J. Hyperthermia* 24,3, 2008
- Chalkidou A., Simeonidis K, Angelakeris M, Samaras T, Martinez-Boubeta C, Balcells LI, Papazisis K., Dendrinou-Samara C., Kalogirou O., In Vitro application of Fe/MgO nanoparticles as magnetically mediated hyperthermia agents for cancer treatment, *Journal of Magnetism andmagnetic Materials* 323 (2011) 775-780
- Pankhurst Q.A, Conolly J., Jones S.K. and Dobson J., Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine, *J. Phys.D: Appl. Phys.*36 (2003) R167-R181.
- Science Wiki. Βικιπαίδεια, "Η ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια", <http://el.wikipedia.org>.
- World Health Organization, *Fact Sheet No.297*, 2009