

ΜΕΛΕΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΚΥΡΜΙΟΝΙΩΝ ΜΕ ΜΙΚΡΟΜΑΓΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ FePt

Β. Δ. Σταύρου¹, Δ. Κουρούνης², Ι. Παναγιωτόπουλος¹, Λ. Ν. Γεργίδης^{1*}

¹Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 45110 Ιωάννινα, Ελλάδα

²Nepfan AG, CH-8700 Kussnacht (ZH), Ελβετία

(*Iqergidi@uoi.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η αντιστροφή μαγνήτισης σε μαγνητικά νανოსωματίδια τριγωνικής πρισματικής γεωμετρίας πλευράς 330 nm και πάχους 36 nm με μεταβλητή μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία παρόμοια με εκείνη της FePt με μικρομαγνητικές προσομοιώσεις που χρησιμοποιούν διακριτοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων. Μαγνητικές ιδιότητες και οντότητες όπως η τοπολογική αναλλοίωτη skyrmion υπολογίζονται για τον ποιοτικό και ποσοτικό χαρακτηρισμό των παρατηρηθέντων μικρομαγνητικών διαμορφώσεων τύπου δίνης (vortex). Οι μαγνητικές δίνες και οντότητες σκυρμιονίων αποκαλύπτονται σε διαφορετικά συστήματα που παράγονται από τη μεταβολή του μεγέθους και του σχετικού προσανατολισμού της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας σε σχέση με τη βάση του τριγωνικού πρίσματος. Μικρομαγνητικές διαμορφώσεις με αριθμό σκυρμιονίων άνω του ενός ανιχνεύονται για την περίπτωση όπου η διεύθυνση της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας είναι κάθετη στη βάση των μαγνητικών νανοςωματιδίων. Για συγκεκριμένες τιμές μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας σχηματίζονται μέχρι και τρεις οντότητες σκυρμιονίων και παραμένουν για μια σειρά εξωτερικών πεδίων. Η προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων και οι υπολογισμοί του αριθμού skyrmion αποκάλυψαν ότι μπορούν να δημιουργηθούν σκυρμιονικές οντότητες για συστήματα μαγνητικών νανοςωματιδίων απουσία χειρόμορφων αλληλεπιδράσεων τύπου Dzyaloshinsky-Moriya, αλλά με μεταβολή μόνο της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

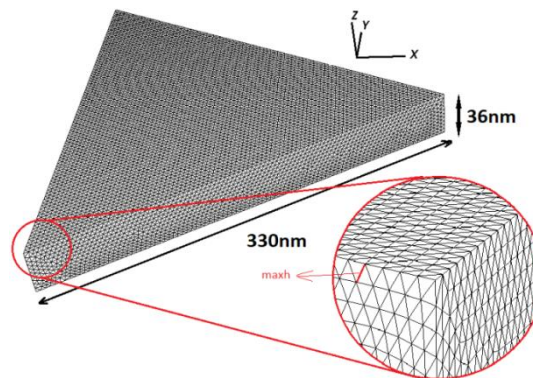
Λόγω της ραγδαίας εξέλιξης της τεχνολογίας κατά την τελευταία δεκαετία στον τομέα της αποθήκευσης με τη συνεχή αύξηση του χώρου αποθήκευσης και την ταυτόχρονη μείωση του μεγέθους των συσκευών αποθήκευσης σε κλίμακα μήκους νανομέτρων η φυσική των νανοδομών αποτελεί μια από τις σημαντικές ερευνητικές περιοχές^[1]. Η αποθήκευση δεδομένων ειδικότερα είναι σημαντική καθώς η μαγνητική εγγραφή είναι ένα πολύ γνωστό πρόβλημα αφού η συρρίκνωση των μαγνητικών περιοχών ανταγωνίζεται την πιθανή απώλεια δεδομένων μέσω θερμικών διακυμάνσεων, απαιτώντας έτσι σκληρά νέα μαγνητικά υλικά και υψηλότερο πεδίο εγγραφής. Τα μαγνητικά skyrmions τα οποία είναι πολύ μικρότερα σε μέγεθος από τις σημερινές περιοχές αποθήκευσης, αποτελούν πιθανή λύση σε αυτό το πρόβλημα καθώς η τοπολογία της μαγνήτισής τους μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερο ενεργειακό φράγμα στην απώλεια - καταστροφή της πληροφορίας^[1]. Τα μαγνητικά σκυρμιόνια είναι τοπολογικές οντότητες που έχουν ιδιαίτερη μαγνητική δομή spin και συνήθως παρατηρούνται σε συστήματα με αλληλεπιδράσεις Dzyaloshinskii-Moriya. Εντούτοις η δημιουργία και η σταθεροποίησή τους αν και επίπονη μπορεί να επιτευχθεί και χωρίς αυτές τις αλληλεπιδράσεις^[2].

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η δυναμική της μαγνήτισης \mathbf{M} μοντελοποιείται από την εξίσωση Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG):

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) - \frac{\alpha\gamma}{(1 + \alpha^2)} \frac{\mathbf{M}}{|\mathbf{M}|} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) \quad (1)$$

Στην προαναφερθείσα εξίσωση το $\alpha > 0$ είναι μια φαινομενολογική αδιάστατη σταθερά απόσβεσης που εξαρτάται από το υλικό και γ είναι ο γυρομαγνητικός λόγος ηλεκτρονίου. Το πεδίο που διέπει τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος έχει συνεισφορές από διάφορα άλλα πεδία και εκφράζεται ως: $\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H}_{\text{Zeeman}} + \mathbf{H}_{\text{exch}} + \mathbf{H}_{\text{anis}} + \mathbf{H}_{\text{demag}}$, με συνεισφορές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου \mathbf{H}_{ext} που σχετίζεται με το Zeeman, του πεδίου ανταλλαγής, του πεδίου ανισοτροπίας και του πεδίου απομαγνήτισης. Το δείγμα περιγράφεται ως ένα τριγωνικό πρίσμα βάσης 330 nm και πάχους 36 nm ^[2] και παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Το τετραεδρικό πλέγμα αποτελείται από 488874 τετράεδρα και 94800 κόμβους. Το χαρακτηριστικό μήκος διακριτοποίησης $maxh$ είναι 3.4 nm για τα τετραεδρικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται τιμή μικρότερη από το μήκος ανταλλαγής του υλικού $l_{\text{exch}} = 3.5$ nm. Οι παράμετροι του υλικού επιλέχθηκαν παρόμοιες με αυτές ενός τυπικού κράματος FePt ^[3] με μαγνήτιση κορεσμού ίση με $\mu_0 M_s = 1.43$ T ($M_s = 1.138$ A/m) και σταθερά ανταλλαγής $A_{\text{exch}} = 11$ pJ/m. Η σταθερά μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας K_u κυμαίνεται από $K_u = 100$ kJ/m³ έως $K_u = 500$ kJ/m³ με διεύθυνση παράλληλη στον άξονα z ([001]) και κάθετη στο υμένιο. Το εύρος του εξωτερικού εφαρμοζόμενου πεδίου ήταν από +1000 kA/m έως -1000 kA/m με βήμα 4 kA/m.



Σχήμα 1. Γεωμετρία μοντέλου μαγνητικού υμενίου FePt με το παραγόμενο πλέγμα διακριτοποίησης με τετραεδρικά στοιχεία.

Η μαγνητική οντότητα του σκυρμιονίου μπορεί να περιγραφεί ποσοτικά από την τοπολογική αναλλοίωτη S που είναι γνωστή ως αριθμός skyrmion και δίνεται από την παρακάτω έκφραση

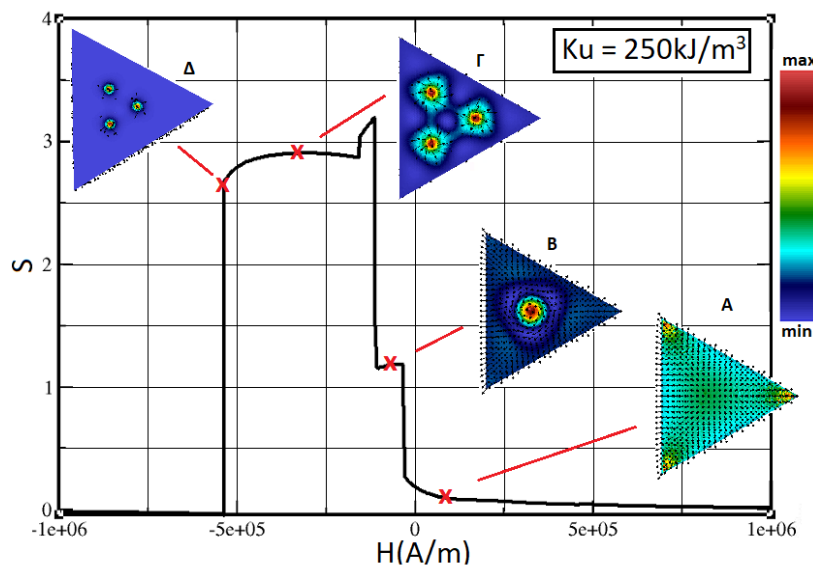
$$S = \frac{1}{4\pi} \int_A \mathbf{m} \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial x} \times \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial y} \right) dA \quad (2)$$

Η ποσότητα \mathbf{m} είναι το διάνυσμα της μαγνήτισης που ορίζεται ως $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_s$ με \mathbf{M} να είναι η μαγνήτιση και M_s η μαγνήτιση κορεσμού. Ο αριθμός skyrmion είναι μια φυσική και τοπολογική ποσότητα που μετράει πόσες φορές το \mathbf{m} περιτυλίγει μια σφαίρα. Ο υπολογισμός του απαιτεί τη γνώση του υπολογισμένου μέσω της επίλυσης της LLG Εξίσωσης 1 κανονικοποιημένου διανύσματος της μαγνήτισης \mathbf{m} . Επίσης η ολοκληρωτέα ποσότητα είναι γνωστή και τοπολογική πυκνότητα q_{sk} .

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η παρούσα μελέτη μπορεί να δώσει ποσοτική περιγραφή σχετικά με τη δημιουργία των σκυρμιονίων. Μπορούν να εξαχθούν ποιοτικά συμπεράσματα σχετικά με τη φυσική πίσω από τα περίπλοκα φαινόμενα που σχετίζονται με το σχηματισμό και τη διατήρηση των σκυρμιονίων. Είναι δυνατό να ερευνηθεί πως σχετίζεται και επιδρά η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία (MCA)

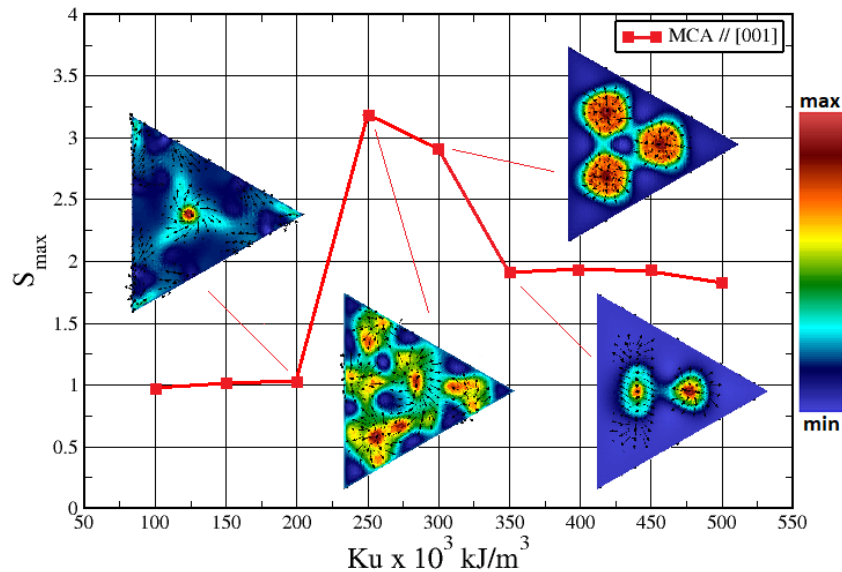
στα φαινόμενα αντιστροφής, στο σχηματισμό και τη διατήρηση των σκυρμιονικών οντοτήτων με δεδομένο πως σχηματισμοί δινών προκύπτουν από τον ανταγωνισμό της ενέργειας ανταλλαγής και της μαγνητοστατικής ενέργειας και αναμένεται να γίνονται εντονότερα στην περίπτωση της κάθετης ανισοτροπίας και πεδίου στην επιφάνεια βάσης του υμενίου FePt όποτε και δημιουργούνται ισχυρά πεδία απομαγνήτισης. Για χαμηλές τιμές μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας $Ku = 100, 150$ και 200 kJ/m^3 η αντιστροφή γίνεται ομαλά μέσω της δημιουργίας ενός σκυρμιονίου στο κέντρο του τριγώνου. Επίσης για μεγαλύτερες τιμές $Ku = 350, 400, 450$ και 500 kJ/m^3 έχουμε την δημιουργία δυο (2) σκυρμιονίων κατά μήκος του ύψους της τριγωνικής επιφάνειας του υμενίου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις για $Ku = 250$ και 300 kJ/m^3 όπου έχουμε την εμφάνιση τριών σκυρμιονίων. Συγκεκριμένα για τιμή $Ku = 250 \text{ kJ/m}^3$ (Σχήμα 2) όσο μειώνεται το πεδίο η αντιστροφή συμβαίνει ομαλά έως την τιμή εξωτερικού πεδίου $H = -32000 \text{ A/m}$ όπου έχουμε το σχηματισμό ενός σκυρμιονίου που διατηρείται μέχρι το $H = -110000 \text{ A/m}$ οπότε και δημιουργούνται τρία σκυρμιόνια και σταθεροποιούνται για ένα μεγάλο εύρος πεδίου ίσο με $410\,000 \text{ A/m}$ αφού η αντιστροφή ολοκληρώνεται και επέρχεται κορεσμός για τιμή πεδίου $H = -532000 \text{ A/m}$.



Σχήμα 2. S ως συνάρτηση του εξωτερικού εφαρμοζόμενου πεδίου για $Ku=250 \text{ kJ/m}^3$ με μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία κάθετη στο υμένιο και παράλληλη στον άξονα z . Επίσης παρουσιάζονται οι μικρομαγνητικές διαμορφώσεις της πάνω επιφάνειας του τριγώνου που δείχνουν την τοπολογική πυκνότητα q_{sk} καθώς και τη μαγνήτιση. Οι πραγματικές τιμές αναπαρίστανται σε χρωματικές ράβδους με μέγιστες και ελάχιστες τιμές αντίστοιχα. A max: 3.419×10^{-5} min: -0.111×10^{-5} , B max: 0.00063 min: -0.00012 , Γ max: 0.0035 min: -0.0002 Δ max: 0.00063 min: -0.00012 .

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές του αριθμού S (S_{max}) για την παράλληλη προς την z κατεύθυνση μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας (MCA) καθώς επίσης απεικονίζονται και κάποιες αντιπροσωπευτικές μικρομαγνητικές διαμορφώσεις σε διάφορες τιμές Ku . Για χαμηλές τιμές μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας και συγκεκριμένα για $Ku=100, 150$ και 200 kJ/m^3 εμφανίζεται ένα σκυρμιόνιο στο κέντρο της βάσης του τριγώνου. Για $Ku=200 \text{ kJ/m}^3$ όπως φαίνεται λαμβάνεται ένα σχεδόν τέλειο κυκλικό σχήμα με τις υψηλότερες τιμές q_{sk} να εντοπίζονται στο κέντρο, οι μαγνήτισεις έχουν μια κυκλοφορία φοράς δεικτών ρολογιού γύρω από το κέντρο του σκυρμιονίου. Στην περίπτωση $Ku = 250 \text{ kJ/m}^3$ το $S_{max} = 3.25$ είναι εμφανείς εκτεταμένες περιοχές στις κορυφές του τριγώνου κατά μήκος των άκρων της τριγωνικής βάσης, αυτή η διαμόρφωση διαφέρει σημαντικά από αυτή με τρία (3) καλά ανεπτυγμένα σκυρμιόνια που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2 στο σημείο Γ. Η μέγιστη τιμή $S_{max}=3$ για την περίπτωση $Ku = 300 \text{ kJ/m}^3$ απεικονίζει τρία (3) σκυρμιόνια τελείως συμμετρικά. Για μεγαλύτερες τιμές μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας και συγκεκριμένα για $Ku=350, 400, 450$ και 500 kJ/m^3 έχουμε το σχηματισμό δύο (2) σκυρμιονίων

στην επιφάνεια του τριγώνου. Η περίπτωση του $Ku=350 \text{ kJ/m}^3$ είναι αντιπροσωπευτική με τα δύο σκυρμιόνια να είναι τοποθετημένα κατά μήκος του ύψους του τριγώνου παράλληλα προς την x κατεύθυνση. Η εξάρτηση του μεγέθους του σκυρμιονίου από τις παραμέτρους του υλικού, τις ενέργειες, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις αλληλεπιδράσεις Dzyaloshinskii-Moriya δεν είναι πλήρως κατανοητή παρά τις έντονες έρευνες που διεξάγονται και χρήζει περαιτέρω μελέτης.



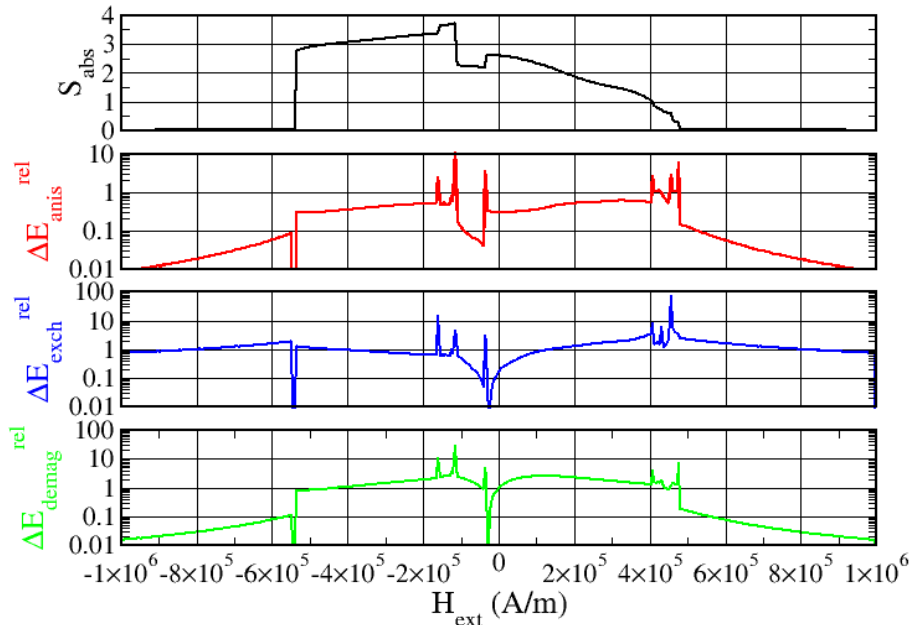
Σχήμα 3. S_{max} συναρτήσει του Ku . Επίσης παρουσιάζονται μικρομαγνητικές διαμορφώσεις επί της επιφάνειας βάσης του τριγώνου που δείχνουν την τοπολογική πυκνότητα q_{sk} καθώς και τη μαγνήτιση. Οι q_{sk} πραγματικές τιμές αναπαρίστανται σε χρωματικές ράβδους με μέγιστες και ελάχιστες τιμές αντίστοιχα. $Ku=200 \text{ kJ/m}^3$ max: 0.00342 min: -0.00643, $Ku=250 \text{ kJ/m}^3$ max: 0.00175 min: -0.00043, $Ku=300 \text{ kJ/m}^3$ max: 0.00135 min: -0.0002, $Ku=350 \text{ kJ/m}^3$ max: 0.00322 min: -0.000096.

Ο σχηματισμός του σκυρμιονίου σχετίζεται με την αλληλεπίδραση ενεργειών και συγκεκριμένα της ενέργειας ανισοτροπίας E_{anis} , απομαγνήτισης E_{demag} και ανταλλαγής E_{exch} . Προκειμένου να μετρηθεί η συνεισφορά του κάθε ενεργειακού τύπου κατά τη διαδικασία της αντιστροφής της μαγνήτισης υπολογίστηκε η απόλυτη σχετική ενεργειακή διαφορά κατά τη μείωση της τιμής του εξωτερικού πεδίου στη διαδικασία της αντιστροφής της μαγνήτισης επί διαδοχικών τιμών του

$$\Delta E_{type}^{rel} = \left| \frac{E_{type}^{i+1} - E_{type}^i}{E_{type}^i} \right| \times 100\%$$

Ο υπολογισμός των ενεργειών και των σχετικών ενεργειακών διαφορών για διάφορες τιμές σταθεράς μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας Ku δίνει πολλά ποιοτικά αλλά και ποσοτικά χαρακτηριστικά. Στο Σχήμα 4 αναπαριστώνται οι προαναφερθείσες σχετικές ενεργειακές μεταβολές οι οποίες καταδεικνύουν έντονες αλματικούς τύπου ασυνέχειες. Αυτές οι ασυνέχειες αντιπροσωπεύουν τα πραγματικά ενεργειακά φράγματα που πρέπει να υπερνικηθούν για σχηματισμό σκυρμιονίων για όλους τους τύπους ενεργειών και καθορίζουν τη διαδικασία αντιστροφής. Οι σκυρμιονικές μαγνητικές οντότητες σχετίζονται με απότομες αλλαγές ενέργειας και υπερκέρραση ενεργειακών φραγμάτων. Οι υπολογισμοί των σχετικών ενεργειών καθώς και του S_{abs} που προκύπτει από την ολοκλήρωση της απόλυτης τιμής της τοπολογικής πυκνότητας q_{sk} απεικονίζονται στο Σχήμα 4 για $Ku = 250 \text{ kJ/m}^3$, περίπτωση στην οποία σχηματίζονται 3 σκυρμιόνια. Όπως παρατηρείται τα πρώτα στάδια της αντιστροφής της μαγνήτισης με ταυτόχρονο σχηματισμό σκυρμιονίων ξεκινούν σε τιμές πεδίου μεγαλύτερες από $H_{ext} = 5 \times 10^5 \text{ A/m}$. Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι στο σημείο αυτό η ΔE_{exch} παρουσιάζει μια ασυνέχεια της τάξης του 90% σε αντίθεση με τις ΔE_{anis} και ΔE_{demag} των οποίων τα «άλματα» είναι κοντά στο 10%. Επίσης και οι τρεις ενέργειες παρουσιάζουν ασυνέχειες για τιμή πεδίου $H_{ext} = -1 \times 10^5 \text{ A/m}$ τιμή στην οποία ξεκινάει ο σχηματισμός τριών (3) σκυρμιονίων. Τέλος σημαντική είναι και η ασυνέχεια

που προκύπτει για τιμή πεδίου $H_{ext} = -5.5 \times 10^5$ A/m για την οποία αν και δεν είναι μεγάλη η επί τοις εκατό αριθμητική αλλαγή είναι ουσιαστικότερη καθώς η αντιστροφή της μαγνήτισης λαμβάνει τέλος και επέρχεται κορεσμός αφού πλέον όλες οι μαγνητίσεις στο τριγωνικό πρίσμα έχουν αντιστραφεί.



Σχήμα 4. S_{obs} και οι σχετικές μεταβολές των ενεργειών ανισοτροπίας, ανταλλαγής και απομαγνήτισης ως συνάρτηση του εξωτερικού εφαρμοζόμενου πεδίου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπολογίστηκε η τοπολογική αναλλοίωτη S που περιγράφει ποσοτικά τη μαγνητική οντότητα του σκυρμιονίου (skyrmion) σε τριγωνικά πρίσματα FePt κατά την διαδικασία αντιστροφής της μαγνήτισης για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία. Ήταν δυνατή η διερεύνηση του σχηματισμού περιοχών με σκυρμιόνια καθώς και ο ποιοτικός και ποσοτικός χαρακτηρισμός τους για διεύθυνση μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας και εξωτερικού πεδίου κάθετη στην επιφάνεια βάσης του υμενίου. Ανιχνεύθηκαν περιοχές με αριθμό skyrmion μεγαλύτερο του ενός και φτάνοντας στην ύπαρξη ακόμα και τριών (3) σκυρμιονίων. Τα σκυρμιόνια μπορούν να παραχθούν σε ένα ευρύ φάσμα εξωτερικού εφαρμοζόμενου πεδίου με το συνδυασμό της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας ακόμη και σε απουσία χειρόμορφων αλληλεπιδράσεων όπως η Dzyaloshinsky-Moriya.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο μεταπτυχιακός φοιτητής κ. Βασίλης Σταύρου υποστηρίζεται από την υποτροφία ΙΚΥ στα πλαίσια του επιχειρησιακού προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση δια βίου Μάθηση» (ΕΣΠΑ 2014-2020), ΠΡΑΞΗ: «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας»-κωδικός έργου: MIS 5000432. Εκφράζουμε θερμές ευχαριστίες στον κ. Κ. Δημακόπουλο για την τεχνική του υποστήριξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] K. Everschor-Sitte, J. Masell, M. Reeve and M. Klau. J. Appl. Phys. 124 (2018) 240901.
- [2] L.N. Gergidis, V.D. Stavrou, D. Kourounis, I. Panagiotopoulos, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 481 (2019) 111-121
- [3] A. Markou, K. G. Beltsios, L. N. Gergidis, I. Panagiotopoulos, T. Bakas, K. Ellinas, A. Tserepi, L. Stoleriu, R. Tanasa, A. Stancu. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 344 (2013) 224–229.