



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΜΑΚΡΗΣ ΠΕΛΟΠΙΔΑΣ - ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ ΣΕ  
ΠΟΛΥΦΕΡΡΟΪΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

**ΙΩΑΝΝΙΝΑ, 2026**

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση του Διπλώματος Μεταπτυχιακών Σπουδών που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε την 10/03/2026 από την εξεταστική επιτροπή:

- 1. Ευάγγελος Χατζηγεωργίου**, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, **Επιβλέπων**
- 2. Ιωάννης Παναγιωτόπουλος**, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων,
- 3. Κωνσταντίνος Μπέλτσιος**, Καθηγητής της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π

#### ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

*"Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε κάτω από τους διεθνείς ηθικούς και ακαδημαϊκούς κανόνες δεοντολογίας και προστασίας της πνευματικής ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς, δεν έχω προβεί σε ιδιοποίηση ξένου επιστημονικού έργου και έχω πλήρως αναφέρει τις πηγές που χρησιμοποίησα στην εργασία αυτή."*



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής στο εργαστήριο Μαθηματικής Μοντελοποίησης Υλικών και Επιστημονικών Υπολογισμών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Τεχνολογίες Προηγμένων Υλικών», με θέμα «Μελέτη της μαγνητοηλεκτρικής σύζευξης σε πολυφερροϊκά σύνθετα υλικά».

Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Ευάγγελου Χατζηγεωργίου, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για την πολύτιμη καθοδήγηση, υποστήριξη και συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής για τη συμμετοχή τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και του φίλους μου για την υποστήριξη και τη βοήθειά τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, τόσο σε προπτυχιακό όσο και σε μεταπτυχιακό επίπεδο.

Ιωάννινα, Φεβρουάριος 2026

Μακρής Πελοπίδας – Αναστάσιος

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη μαγνητο-ηλεκτρική (ΜΕ) σύζευξη σε πολυφερροϊκά σύνθετα υλικά μέσω αριθμητικής μοντελοποίησης και της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM). Λόγω της σπανιότητας των μονοφασικών πολυφερροϊκών υλικών σε θερμοκρασία δωματίου, η μελέτη επικεντρώνεται στη μηχανικά διαμεσολαβούμενη σύζευξη μεταξύ μιας πιεζοηλεκτρικής (PZT-5H) και μιας μαγνητοσυστολικής (Νικέλιο) φάσης. Δύο διαφορετικές αρχιτεκτονικές προσομοιώθηκαν στο λογισμικό COMSOL Multiphysics: μια πολυστρωματική δομή (2-2) και μια ινοπλισμένη δομή (1-3). Υπό στατικό εφελκυστικό φορτίο 10 MPa, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την επιτυχή δημιουργία ενός «τεχνητού πιεζομαγνητικού» φαινομένου.

## ABSTRACT

This diploma thesis investigates the magnetoelectric (ME) coupling in multiferroic composite materials through numerical modeling and Finite Element Analysis (FEA). Given the scarcity of single-phase multiferroics at room temperature, the study focuses on strain-mediated coupling between a piezoelectric (PZT-5H) and a magnetostrictive (Nickel) phase. Two distinct architectures were simulated using COMSOL Multiphysics: a layered (2-2) structure and a fiber-reinforced (1-3) structure. Under a static tensile load of 10 MPa, the results demonstrate the successful generation of an "artificial piezomagnetic" effect. Comparative analysis reveals that the fiber-reinforced geometry significantly outperforms the layered one, exhibiting a 31.7% increase in average magnetic induction and a 46.2% increase in produced electrical voltage. This superiority is attributed to the intense stress concentration within the ferromagnetic fibers and the localized congestion of the electric field. These findings provide a robust framework for the design of high-sensitivity magnetic sensors and autonomous energy harvesting devices.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ .....	9
ΜΕΡΟΣ Α: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	12
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12
1.1 Γενική εισαγωγή στα πολυφερροϊκά υλικά .....	12
1.2. Μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη και εφαρμογές.....	14
1.3. Σκοπός της Εργασίας .....	15
2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	17
2.1. Φερροϊκά υλικά .....	17
2.2. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών .....	21
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	25
3.1. Φυσική των φερροϊκών φαινομένων .....	25
3.1.1. Μικροσκοπικοί Μηχανισμοί και Βρόχοι Υστέρησης (P – E, M – H).....	26
3.1.1.1. Φερρομαγνητισμός και μαγνητική τάξη .....	27
3.1.1.4. Βρόχος Υστέρησης M-H και Φαινόμενο Villari.....	28
3.1.2. Θεωρία πιεζοηλεκτρισμού και μαγνητοσυστολής .....	28
3.1.2.1. Εξισώσεις πιεζοηλεκτρισμού .....	29
3.1.2.2. Μαγνητοσυστολή και πιεζομαγνητισμός.....	30
3.2. Ανάλυση σύνθετων υλικών.....	31
3.2.1. Ορισμός φάσεων και αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE) .....	31
3.2.2. Υπολογισμός κλασμάτων όγκου και ιδιοτήτων .....	32
3.2.2.1. Κανόνας των μιγμάτων .....	33
3.2.2.2. Μοντέλο Halpin-Tsai .....	33
4. ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΟΛΥΦΕΡΡΟΪΚΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .	39
4.1. Πολύστρωτα πολυφερροϊκά σύνθετα υλικά τύπου (2-2) .....	39
4.2. Ινοπλισμένα πολυφερροϊκά σύνθετα υλικά τύπου (1-3) .....	42
ΜΕΡΟΣ Β: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΟΜΩΝ .....	45
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	45

5.1. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις παρούσες προσομοιώσεις .....	45
5.2 Δημιουργία Πολύστρωτης δομής .....	47
5.3 Δημιουργία της ινοπλισμένης δομής .....	60
<b>6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....</b>	<b>72</b>
6.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης πολύστρωτου σύνθετου υλικού .....	73
6.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης ινοπλισμένου σύνθετου υλικού .....	81
6.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	90
<b>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ .....</b>	<b>93</b>
7.1. Κύρια Συμπεράσματα της εργασίας .....	93
7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογές .....	94
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>96</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Τρισδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση της πολύστρωτης διάταξης (Προσομοίωση A). .....	73
Εικόνα 2: Διακριτοποίηση της γεωμετρίας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. 74	
Εικόνα 3: Απεικόνιση της τάσης von Mises ( $N/m^2$ ) της πολύστρωτης δομής.....	75
Εικόνα 4: Απεικόνιση του μέτρου της μετατόπισης (mm) της πολύστρωτης δομής. 76	
Εικόνα 5: Τρισδιάστατη απεικόνιση διατομών (multislice plot) του ηλεκτρικού δυναμικού. ....	77
Εικόνα 6: Πλευρική απεικόνιση ( $x - z$ επίπεδο) της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού ( $es.V$ ) κατά μήκος του πάχους της πολύστρωτης διάταξης. ....	77
Εικόνα 7: Τρισδιάστατη απεικόνιση διατομών (multislice plot) και δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου. ....	79
Εικόνα 8: Πλευρική απεικόνιση (επίπεδο $x - z$ ) του μέτρου της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην πολύστρωτη διάταξη. ....	79
Εικόνα 9: Κατανομή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής ( $mf.normB$ ) και διανυσματική απεικόνιση της ροής του μαγνητικού πεδίου (Arrow Volume) στο πιεζομαγνητικό στρώμα.....	80
Εικόνα 10: Τρισδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση της ινοπλισμένης διάταξης (Προσομοίωση B). ....	82
Εικόνα 11: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Mesh) για την ινοπλισμένη δομή. ....	83
Εικόνα 12: Απεικόνιση της τάσης von Mises ( $N/m^2$ ) της ινοπλισμένης δομής.....	84
Εικόνα 13: Πλευρική απεικόνιση (επίπεδο $y - z$ ) της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού ( $es.V$ ) στην ινοπλισμένη δομή. ....	85
Εικόνα 14: Τρισδιάστατη απεικόνιση διατομών (multislice plot) του ηλεκτρικού δυναμικού. ....	86
Εικόνα 15: Πλευρική απεικόνιση (επίπεδο $y - z$ ) του μέτρου της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην ινοπλισμένη δομή. ....	87
Εικόνα 16: Τρισδιάστατη απεικόνιση διατομών (multislice plot) της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. ....	87
Εικόνα 17: Πλευρική απεικόνιση (επίπεδο $x - z$ ) της μαγνητικής επαγωγής ( $mf.normB$ ) στην ινοπλισμένη δομή. ....	88
Εικόνα 18: Τρισδιάστατη απεικόνιση διατομών (multislice plot) της μαγνητικής επαγωγής. ....	89

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Ονομασία	Μονάδες (S.I.)
<b>Μηχανικά Μεγέθη</b>		
$\sigma$	Μηχανική Τάση	Pa(N/m <sup>2</sup> )
$\epsilon$	Μηχανική Παραμόρφωση	
$E$	Μέτρο Ελαστικότητας Young	Pa(N/m <sup>2</sup> )
$\nu$	Λόγος Poisson	
$\rho$	Πυκνότητα	kg/m <sup>3</sup>
$u, v, w$	Συνιστώσες Μετατόπισης	m
$S_H$	Μήτρα Ενδοτικότητας υπό σταθερό μαγνητικό πεδίο	1/Pa
$c_E$	Μήτρα Ελαστικότητας υπό σταθερό ηλεκτρικό πεδίο	Pa
<b>Ηλεκτρικά Μεγέθη</b>		
$V$	Ηλεκτρικό Δυναμικό	V
$E$	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου	V/m
$D$	Ηλεκτρική Μετατόπιση	C/m <sup>2</sup>
$\epsilon_0$	Διηλεκτρική Σταθερά του Κενού	F/m
$\epsilon_r$	Σχετική Διηλεκτρική Σταθερά	
$e_{ij}$	Πιεζοηλεκτρικός Τανυστής Σύζευξης	C/m <sup>2</sup>
$d_{ij}$	Πιεζοηλεκτρικός Συντελεστής Σύζευξης	C/N
<b>Μαγνητικά Μεγέθη</b>		
$B$	Μαγνητική Επαγωγή	T
$H$	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου	A/m
$M$	Μαγνήτιση	A/m
$\mu_0$	Μαγνητική Διαπερατότητα του Κενού	H/m
$\mu_r$	Σχετική Μαγνητική	

$d_{ij}$	Διαπερατότητα Πιεζομαγνητικός Τανυστής Σύζευξης	m/A
$\sigma_{\text{cond}}$	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα <b>Μεγέθη Σύζευξης</b>	S/m
$\alpha_{\text{ME}}$	Μαγνητοηλεκτρικός Συντελεστής	T/Pa
$V_f$	Κλάσμα Όγκου	



# ΜΕΡΟΣ Α: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενική εισαγωγή στα πολυφερροϊκά υλικά

Η επιστήμη των υλικών τις τελευταίες δεκαετίες έχει στραφεί προς την ανάπτυξη και τη μελέτη υλικών που παρουσιάζουν πολλαπλές λειτουργικές αποκρίσεις υπό την επίδραση εξωτερικών ερεθισμάτων. Στο επίκεντρο αυτής της έρευνας βρίσκονται τα πολυφερροϊκά υλικά (multiferroics), μια μοναδική κατηγορία συστημάτων που παρουσιάζουν ταυτόχρονα δύο ή περισσότερες από τις πρωτεύουσες "φερροϊκές" ιδιότητες στην ίδια φάση ή στο ίδιο σύνθετο σύστημα <sup>1,2</sup>. Οι ιδιότητες αυτές περιλαμβάνουν τον φερροηλεκτρισμό, όπου το υλικό παρουσιάζει αυθόρμητη ηλεκτρική πόλωση αναστρέψιμη από εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, τον φερρομαγνητισμό, που χαρακτηρίζεται από αυθόρμητη μαγνήτιση αναστρέψιμη από μαγνητικό πεδίο <sup>3</sup>, και τη φερροελαστικότητα, η οποία αφορά την εμφάνιση αυθόρμητης παραμόρφωσης <sup>1,4</sup>. Η συνύπαρξη αυτών των φαινομένων δεν αποτελεί απλώς ένα στατικό χαρακτηριστικό, αλλά ανοίγει τον δρόμο για τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ τους, γνωστή ως μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη <sup>5,6</sup>. Η δυνατότητα να ελέγχεται η μαγνητική κατάσταση ενός υλικού μέσω ενός ηλεκτρικού πεδίου ή, αντίστροφα, η ηλεκτρική του πόλωση μέσω ενός μαγνητικού πεδίου, αποτελεί ένα από τα πιο συναρπαστικά πεδία της σύγχρονης φυσικής στερεάς κατάστασης και της μηχανικής των υλικών <sup>6,7</sup>.

Παρά το τεράστιο θεωρητικό ενδιαφέρον και τις υποσχόμενες εφαρμογές, τα μονοφασικά πολυφερροϊκά υλικά, δηλαδή εκείνα που παρουσιάζουν αυτές τις ιδιότητες σε μία ενιαία κρυσταλλική δομή, είναι εξαιρετικά σπάνια στη φύση <sup>5,8</sup>. Αυτή η σπανιότητα δεν είναι τυχαία, αλλά πηγάζει από θεμελιώδεις κβαντομηχανικούς περιορισμούς και κανόνες συμμετρίας που συχνά καθιστούν τους μηχανισμούς του φερροηλεκτρισμού και του φερρομαγνητισμού αμοιβαία αποκλειόμενους <sup>2,6</sup>. Επιπλέον, τα λίγα γνωστά μονοφασικά υλικά συχνά παρουσιάζουν ασθενή σύζευξη ή λειτουργούν

μόνο σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, γεγονός που καθιστά την πρακτική τους αξιοποίηση σε καθημερινές συνθήκες περιορισμένη<sup>5,9</sup>.

Για να ξεπεραστούν αυτοί οι φυσικοί περιορισμοί, η επιστημονική κοινότητα εστίασε στην ανάπτυξη σύνθετων πολυφερροϊκών υλικών (multiferroic composites). Τα υλικά αυτά ορίζονται ως πολυφασικά συστήματα όπου η συνεργιστική δράση των επιμέρους συστατικών οδηγεί σε βελτιωμένες λειτουργικές ιδιότητες<sup>10</sup>. Τα συστήματα αυτά δημιουργούνται από τον τεχνητό συνδυασμό διακριτών φάσεων: μιας πιεζοηλεκτρικής/φερροηλεκτρικής φάσης και μιας μαγνητοσυστολικής/φερρομαγνητικής φάσης<sup>9,11</sup>. Στα σύνθετα αυτά υλικά, η μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη δεν προκύπτει από κάποια εγγενή ατομική αλληλεπίδραση εντός του κρυστάλλου, αλλά είναι ένα τεχνητό αποτέλεσμα, όπου η συνολική απόκριση υπερβαίνει τις ιδιότητες των επιμέρους συστατικών<sup>11,12</sup>. Η μηχανική παραμόρφωση που προκαλείται στη μία φάση λόγω ενός εξωτερικού πεδίου μεταφέρεται μέσω της διεπιφάνειας στη δεύτερη φάση, προκαλώντας σε αυτήν μια αντίστοιχη απόκριση<sup>13,14</sup>. Για παράδειγμα, η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί παραμόρφωση στο πιεζοηλεκτρικό, το οποίο με τη σειρά του μεταβάλλει τη μαγνητική κατάσταση της φερρομαγνητικής φάσης μέσω του μαγνητοσυστολικού φαινομένου<sup>11,14</sup>.

Η αποτελεσματικότητα αυτής της σύζευξης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωμετρική διάταξη και τη συνδεσιμότητα των φάσεων, όπως οι δομές 0-3, 1-3 και 2-2, καθώς και από την ποιότητα της διεπιφάνειας για τη βέλτιστη μεταφορά των τάσεων<sup>10,12,14</sup>. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τον σχεδιασμό υλικών με εξαιρετικά ισχυρή σύζευξη σε θερμοκρασία δωματίου, χρησιμοποιώντας κοινά υλικά όπως το PZT και το Terfenol-D, καθιστώντας τα ιδανικά για μια νέα γενιά έξυπνων διατάξεων, όπως αισθητήρες μαγνητικού πεδίου και προηγμένα συστήματα αποθήκευσης δεδομένων<sup>6,14,15</sup>. Η ανάγκη για ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς αυτών των σύνθετων συστημάτων καθιστά την αριθμητική μοντελοποίηση μέσω της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων απαραίτητο εργαλείο για τη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους<sup>11,15</sup>.

## 1.2. Μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη και εφαρμογές

Η μαγνητο-ηλεκτρική (Magnetoelectric - ME) σύζευξη αποτελεί τη θεμελιώδη γέφυρα μεταξύ των ηλεκτρικών και μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης, επιτρέποντας τον έλεγχο της μίας παραμέτρου μέσω της άλλης. Η μελέτη της είναι ζωτικής σημασίας για την εξέλιξη των ηλεκτρονικών διατάξεων επόμενης γενιάς, καθώς προσφέρει λύσεις σε προβλήματα ενεργειακής συλλογής και κατανάλωσης<sup>5,6</sup>. Το φαινόμενο ταξινομείται σε δύο κύριες κατηγορίες: την άμεση μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη, όπου ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο επάγει ηλεκτρική πόλωση, και την αντίστροφη (ή έμμεση), όπου ένα ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μεταβολή της μαγνήτισης<sup>6,13,16</sup>.

Στην παρούσα εργασία, η έμφαση δίνεται στη μηχανικά διαμεσολαβούμενη σύζευξη (strain-mediated coupling). Στα σύνθετα υλικά, η αλληλεπίδραση αυτή δεν είναι εγγενής αλλά προκύπτει από τη μεταφορά ελαστικών τάσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ μιας πιεζοηλεκτρικής και μιας μαγνητοσυστολικής φάσης<sup>12,14</sup>. Η θεωρητική βάση αυτής της προσέγγισης εδράζεται στην έννοια της παραγόμενης ιδιότητας, σύμφωνα με την οποία η συνδυαστική απόκριση του συστήματος είναι τάξεις μεγέθους ισχυρότερη από αυτή των μονοφασικών υλικών<sup>17</sup>. Η κατανόηση της δυναμικής αυτής της μεταφοράς είναι το κλειδί για τη βελτιστοποίηση του συντελεστή  $\alpha_{ME}$ , ο οποίος εξαρτάται άμεσα από τη γεωμετρική συνδεσιμότητα (0-3, 1-3, 2-2) και τη μικροδομή των υλικών<sup>11,15,18</sup>.

Η τεχνολογική σημασία αυτού του φαινομένου θεωρείται επαναστατική για τη σύγχρονη μηχανική. Στον τομέα της πληροφορικής, η δυνατότητα εγγραφής μαγνητικών δεδομένων μέσω ηλεκτρικού πεδίου αποτελεί τη βάση για τις μνήμες τυχαίας προσπέλασης MeRAM (Magnetoelectric Random Access Memory)<sup>6,19</sup>. Οι διατάξεις αυτές πλεονεκτούν έναντι των παραδοσιακών τεχνολογιών λόγω της μη-μεταβλητότητας και της εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, καθώς η διαδικασία εγγραφής δεν απαιτεί τη ροή υψηλών ρευμάτων που προκαλούν απώλειες Joule<sup>19,20</sup>.

Επιπλέον, οι μαγνητο-ηλεκτρικοί αισθητήρες προσφέρουν πρωτοφανή ευαισθησία στον εντοπισμό ασθενών μαγνητικών πεδίων σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η ικανότητά τους να λειτουργούν χωρίς την ανάγκη κρυογενικής ψύξης τους καθιστά

ιδανικούς αντικαταστάτες των αισθητήρων SQUID σε βιομηχανικές εφαρμογές ακριβείας και συστήματα ελέγχου<sup>6,17</sup>. Παράλληλα, στον τομέα της συλλογής ενέργειας, τα πολυferroϊκά σύνθετα μπορούν να μετατρέψουν τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο του περιβάλλοντος σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική τάση, προσφέροντας ενεργειακή αυτονομία σε δίκτυα ασύρματων μικροαισθητήρων<sup>6,17,18,21,22</sup>.

Λόγω της πολυπλοκότητας αυτών των συστημάτων, η ανάγκη για ακριβή υπολογιστική μοντελοποίηση είναι επιτακτική. Η χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) επιτρέπει τη διερεύνηση μη-γραμμικών συμπεριφορών και την αξιολόγηση παραμέτρων όπως οι οριακές συνθήκες και η επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση της σύζευξης. Η παρούσα διπλωματική εργασία, μέσω της προσομοίωσης διαφορετικών αρχιτεκτονικών, προσπαθεί να συμβάλει στον ορθολογικό σχεδιασμό αποδοτικότερων πολυferroϊκών διατάξεων για τις προαναφερθείσες τεχνολογίες αιχμής<sup>11,15,23</sup>.

### 1.3. Σκοπός της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην υπολογιστική ανάλυση και τη μοντελοποίηση της μαγνητο-ηλεκτρικής σύζευξης σε σύνθετα υλικά, χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method - FEM). Ο κεντρικός σκοπός είναι η βαθύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η γεωμετρική διάταξη των φάσεων και οι ιδιότητες των επιμέρους υλικών επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της σύζευξης. Δεδομένου ότι στα περισσότερα υλικά ο απευθείας πιεζομαγνητισμός είναι πρακτικά ανύπαρκτος, η έρευνα επικεντρώνεται στη μελέτη της έμμεσης ενεργοποίησης μαγνητικού πεδίου μέσω του ηλεκτρικού πεδίου. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την εφαρμογή εξωτερικής μηχανικής τάσης στο σύνθετο υλικό, η οποία προκαλεί την ηλεκτρική πόλωση της πιεζοηλεκτρικής φάσης μέσω του άμεσου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Η παραγόμενη ηλεκτρική διέγερση, σε συνδυασμό με τη μεταφερόμενη μηχανική παραμόρφωση μέσω των διεπιφανειών, ενεργοποιεί τη φερρομαγνητική φάση, οδηγώντας τελικά στην παραγωγή μαγνητικού πεδίου και τη μεταβολή της μαγνήτισης του συστήματος. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, επιλέχθηκαν δύο θεμελιώδεις

αρχιτεκτονικές σύνθετων υλικών, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις πιο διαδεδομένες προσεγγίσεις στην κατασκευή και μελέτη πολυφαιροϊκών συστημάτων. Η πρώτη αρχιτεκτονική αφορά ένα πολυστρωματικό σύνθετο υλικό (layered composite), γνωστό και ως δομή συνδεσιμότητας τύπου 2-2. Στη δομή αυτή, επίπεδα πιεζοηλεκτρικού και φαιρομαγνητικού υλικού στοιβάζονται εναλλάξ, δημιουργώντας ένα "σάντουιτς" υλικών. Η γεωμετρία αυτή επιλέχθηκε καθώς προσφέρει μια μεγάλη επιφάνεια επαφής μεταξύ των φάσεων, γεγονός που ευνοεί τη μεταφορά των τάσεων, ενώ παράλληλα είναι σχετικά απλή στην υπολογιστική της αναπαράσταση. Η δεύτερη αρχιτεκτονική που μελετάται είναι το ινοπλισμένο σύνθετο υλικό (fiber-reinforced composite), ή δομή τύπου 1-3. Σε αυτή την περίπτωση, φαιρομαγνητικές ίνες βρίσκονται μέσα σε μια συνεχή πιεζοηλεκτρική μήτρα. Η δομή αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της ανισοτροπίας της και της ικανότητάς της να συγκεντρώνει τις τάσεις κατά μήκος του άξονα των ινών, προσφέροντας διαφορετικές δυνατότητες βελτιστοποίησης της μαγνητοηλεκτρικής απόκρισης.

Η εργασία χρησιμοποιεί το λογισμικό COMSOL Multiphysics, το οποίο αποτελεί ένα διαδεδομένο εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων που περιλαμβάνουν πολλαπλά φυσικά πεδία. Η επιλογή του συγκεκριμένου εργαλείου βασίζεται στη δυνατότητά του να συζεύγει άμεσα τις εξισώσεις της ηλεκτροστατικής, της μαγνητοστατικής και της μηχανικής στερεού σώματος σε ένα ενιαίο υπολογιστικό πλαίσιο. Για να διασφαλιστεί ότι η μελέτη έχει πρακτικό αντίκρισμα και δεν παραμένει σε καθαρά θεωρητικό επίπεδο, χρησιμοποιούνται οι φυσικές σταθερές κάποιων κοινών και αξιόπιστων υλικών που απαντώνται στη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, για την πιεζοηλεκτρική φάση χρησιμοποιείται ο τιτανικός ζιρκονικός μόλυβδος (PZT), ενώ για τη φαιρομαγνητική φάση χρησιμοποιείται το νικέλιο.

## 2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

### 2.1. Φερροϊκά υλικά

Η ιστορική διαδρομή των φερροϊκών υλικών, και ειδικότερα των πολυφερροϊκών συστημάτων που συνδυάζουν πολλαπλές φερροϊκές ιδιότητες, αποτελεί μια ενδιαφέρουσα επιστημονική πορεία που εκτείνεται από τις πρώτες εμπειρικές παρατηρήσεις της αρχαιότητας έως τις σύγχρονες, πολυεπίπεδες θεωρίες της φυσικής στερεάς κατάστασης. Η κατανόηση της δημιουργίας και της εξέλιξης αυτών των υλικών κρίνεται απαραίτητη για την πλήρη εκτίμηση της τρέχουσας ερευνητικής δραστηριότητας και των μελλοντικών τεχνολογικών εφαρμογών, ιδιαίτερα στον τομέα της μαγνητο-ηλεκτρικής σύζευξης και των εφαρμογών που μπορεί να ξεκλειδώσει <sup>2</sup>.

Οι απαρχές των ηλεκτρικών φαινομένων εντοπίζονται περίπου στο 600 π.Χ., με τον Θαλή τον Μιλήσιο να παρατηρεί ότι το κεχριμπάρι, κατόπιν τριβής με ύφασμα, αποκτά την ιδιότητα να έλκει ελαφρά σωματίδια. Η ελληνική λέξη «ήλεκτρον», που προσδιορίζει το κεχριμπάρι, αποτέλεσε τη ρίζα για τον μεταγενέστερο όρο «ηλεκτρισμός». Αντίστοιχα, ο μαγνητισμός, ως η αμοιβαία έλξη μεταξύ κομματιών σιδηρομεταλλεύματος, ήταν γνωστός στον αρχαίο κόσμο, με την ονομασία του να αποδίδεται στην περιοχή της Μαγνησίας, η οποία ήταν πλούσια σε κοιτάσματα μαγνητίτη <sup>24</sup>. Παρά τις αρχικές αυτές παρατηρήσεις, απαιτήθηκαν χιλιετίες προκειμένου να ξεκινήσει η συστηματική επιστημονική διερεύνηση και η ποσοτική περιγραφή αυτών των φαινομένων.

Η κλασική εποχή του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού εγκαινιάστηκε τον 18ο αιώνα, με τον Stephen Gray να διακρίνει τις ουσίες σε αγωγούς και μονωτές και τον Du Fay να διατυπώνει την ύπαρξη δύο τύπων ηλεκτρικού φορτίου. Η κατανόηση του μαγνητισμού μεταβλήθηκε ριζικά το 1820 με την ανακάλυψη του Oersted, ο οποίος απέδειξε τη σύνδεση μεταξύ ηλεκτρικού ρεύματος και μαγνητικού πεδίου. Η θεωρητική κορύφωση επήλθε το 1865, όταν ο James Clerk Maxwell ενοποίησε τα δύο πεδία μέσω των περίφημων εξισώσεών του, αποδεικνύοντας ότι οι ηλεκτρικές και μαγνητικές

ιδιότητες είναι αλληλένδετες. Ωστόσο, η μικροσκοπική τους προέλευση παρέμενε διακριτή: τα ηλεκτρικά φορτία των ηλεκτρονίων και των ιόντων ευθύνονται για τις ηλεκτρικές ιδιότητες, ενώ οι τροχιακές και περιστροφικές κινήσεις (spin) των ηλεκτρονίων διέπουν τις μαγνητικές, καθιστώντας την ενοποίησή τους σε ένα ενιαίο υλικό μια διαρκή πρόκληση <sup>24</sup>.

Ένα σημαντικό ορόσημο αποτέλεσε η ανακάλυψη του φερροηλεκτρισμού από τον Valasek το 1921 στο άλας Rochelle, εισάγοντας την έννοια της αυθόρμητης ηλεκτρικής πόλωσης που μπορεί να αντιστραφεί με την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου <sup>5</sup>. Παράλληλα, μέσω του έργου του Louis Néel, ο οποίος ανέδειξε τους μηχανισμούς αυθόρμητης ευθυγράμμισης των spin, η κατανόηση του φερρομαγνητισμού προχώρησε σημαντικά. Η ιδέα της συνύπαρξης αυτών των δύο ιδιοτήτων σε μια ενιαία κρυσταλλική φάση προτάθηκε αρχικά από τους επιστήμονες Smolenskii και Ioffe τη δεκαετία του 1950, οι οποίοι χρησιμοποίησαν τον όρο «φερροηλεκτρομαγνήτες». Παρά τις θεωρητικές προβλέψεις των Landau και Lifshitz το 1959 για την πιθανή ύπαρξη γραμμικής μαγνητοηλεκτρικής σύζευξης, η πειραματική επιβεβαίωση σε ευρεία κλίμακα καθυστέρησε σημαντικά <sup>5</sup>.

Η πρώτη εποχή των πολυφερροϊκών υλικών, κατά τη δεκαετία του 1960, οδήγησε στην ανακάλυψη αρκετών συστημάτων, τα οποία όμως δεν εμφάνιζαν τεχνολογικά εκμεταλλεύσιμες ιδιότητες. Η επικρατούσα «κλασική» θεώρηση υποστήριζε ότι ο φερροηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός ήταν ιδιότητες αμοιβαία αποκλειστικές, καθώς η πρώτη απαιτεί άδεια d-τροχιακά, ενώ η δεύτερη βασίζεται σε ημιπληρωμένα d-τροχιακά. Παρά το θεωρητικό αυτό κώλυμα, ανακαλύψεις όπως το κολοσσιαίο μαγνητοηλεκτρικό φαινόμενο στο βορικό νικέλιο-ιώδιο το 1966 και η ενοποιητική ταξινόμηση των φερροϊκών υλικών από τον Aizu το 1970, έθεσαν τις βάσεις για τη σύγχρονη έρευνα <sup>1</sup>.

Η δεύτερη εποχή των πολυφερροϊκών ξεκίνησε με την αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος τη δεκαετία του 1990, με τον Hans Schmid να καθιερώνει τον όρο «multiferroics» το 1994. Η περίοδος αυτή χαρακτηρίστηκε από την ανάπτυξη προηγμένων θεωρητικών εργαλείων και την ανακάλυψη νέων μηχανισμών προέλευσης του φερροηλεκτρισμού, όπως ο μηχανισμός του μοναχικού ζεύγους (lone-pair) στο

$\text{BiFeO}_3$  και ο μαγνητικά επαγόμενος φερροηλεκτρισμός σε υλικά όπως το  $\text{TbMnO}_3$  <sup>5</sup>. Σήμερα, η έρευνα έχει επεκταθεί πέρα από τα μονοφασικά υλικά, εστιάζοντας σε σύνθετα υλικά (composites) και πολύπλοκες δομές, όπου η μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη μπορεί να μεγιστοποιηθεί μέσω της διεπιφανειακής αλληλεπίδρασης των φάσεων, προσφέροντας νέες προοπτικές σε αισθητήρες και διατάξεις μνήμης <sup>6</sup>.

Πέρα από την ταξινόμηση των φαινομένων, μια από τις σημαντικότερες θεωρητικές προκλήσεις που σφράγισαν την εξέλιξη του κλάδου ήταν η πειραματική επιβεβαίωση του μαγνητο-ηλεκτρικού (ME) φαινομένου. Ενώ οι Landau και Lifshitz είχαν θέσει τις βάσεις, ήταν ο Dzyaloshinskii το 1959 που προέβλεψε συγκεκριμένα ότι το οξειδίο του χρωμίου ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) θα έπρεπε να εμφανίζει γραμμική μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη λόγω της μοναδικής του κρυσταλλικής συμμετρίας. Η πρόβλεψη αυτή επιβεβαιώθηκε σύντομα από τον Astrom το 1960, γεγονός που πυροδότησε ένα κύμα ερευνών για την εύρεση υλικών όπου ένα ηλεκτρικό πεδίο θα μπορούσε να μεταβάλει τη μαγνήτιση και, αντιστρόφως, ένα μαγνητικό πεδίο να επηρεάζει την ηλεκτρική πόλωση <sup>5</sup>. Παρά τον ενθουσιασμό, η έρευνα οδηγήθηκε σε τέλμα κατά τη δεκαετία του 1970, καθώς η σύζευξη στα γνωστά μονοφασικά υλικά παρέμενε εξαιρετικά ασθενής για πρακτικές εφαρμογές, περιοριζόμενη κυρίως σε κρυογονικές θερμοκρασίες.

Η σύγχρονη αναγέννηση των πολυφερροϊκών, που συχνά αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως η «δεύτερη εποχή», ξεκίνησε ουσιαστικά το 2000 με τη δημοσίευση της Nicola Spaldin, η οποία έθεσε το θεμελιώδες ερώτημα: «Γιατί υπάρχουν τόσο λίγα πολυφερροϊκά υλικά;». Η ανάλυσή της ανέδειξε ότι η χημική συμβατότητα του φερροηλεκτρισμού και του φερρομαγνητισμού είναι εγγενώς δύσκολη, καθώς οι περισσότεροι φερροηλεκτρικοί περοβσκίτες απαιτούν μετάλλα μετάπτωσης με διαμόρφωση ηλεκτρονίων  $d^0$  για τη σταθεροποίηση της πολικής τους κατάστασης, ενώ ο μαγνητισμός απαιτεί ημιπληρωμένα  $d$  τροχιακά <sup>24</sup>. Αυτός ο «κανόνας του  $d^0$ » εξήγησε την έλλειψη μονοφασικών υλικών με ισχυρή σύζευξη σε θερμοκρασία δωματίου και έστρεψε την επιστημονική κοινότητα προς την αναζήτηση εναλλακτικών μηχανισμών, όπως οι δομικές αστάθειες και η τάξη φορτίου.

Η ανάγκη υπέρβασης αυτών των φυσικών περιορισμών οδήγησε στην ανάπτυξη των πολυφερροϊκών σύνθετων υλικών. Αντί για την αναζήτηση μιας σπάνιας μονοφασικής κρυσταλλικής δομής, οι ερευνητές άρχισαν να συνδυάζουν πιεζοηλεκτρικές και μαγνητοσυστολικές φάσεις σε πολυστρωματικές (2-2), ινώδεις (1-3) ή κοκκώδεις (0-3) δομές. Σε αυτά τα συστήματα, η μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη δεν είναι μια εγγενής ιδιότητα των υλικών, αλλά ένα «επαγόμενο φαινόμενο» που προκύπτει μέσω της μεταφοράς μηχανικών τάσεων στη διεπιφάνεια των δύο φάσεων <sup>6</sup>. Η ιστορική αυτή στροφή προς τα σύνθετα υλικά επέτρεψε την επίτευξη συντελεστών μαγνητο-ηλεκτρικής απόκρισης αρκετές τάξεις μεγέθους υψηλότερων από εκείνους των μονοφασικών υλικών, καθιστώντας τα ιδανικά για σύγχρονες εφαρμογές σε αισθητήρες μαγνητικού πεδίου και διατάξεις μνήμης χαμηλής κατανάλωσης.

Σήμερα, η ιστορική εξέλιξη των φερροϊκών υλικών συγκλίνει με την επιστήμη των υπολογιστικών προσομοιώσεων. Η χρήση εργαλείων όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) μέσω λογισμικών όπως το COMSOL Multiphysics, επιτρέπει τον ακριβή σχεδιασμό της μικροδομής των σύνθετων υλικών, βελτιστοποιώντας τη γεωμετρία και τις ιδιότητες των φάσεων πριν από την εργαστηριακή σύνθεση. Η δυνατότητα μοντελοποίησης μη γραμμικών φαινομένων και υστερητικών αποκρίσεων, αποτελεί την τρέχουσα επικρατούσα τάση στην έρευνα, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ της κλασσικής θεωρίας και των προηγμένων τεχνολογικών απαιτήσεων του 21ου αιώνα <sup>12,13</sup>.

## 2.2. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών

Η έννοια των σύνθετων υλικών (composite materials), αν και συχνά ταυτίζεται με τη σύγχρονη τεχνολογία αιχμής, έχει τις ρίζες της βαθιά στην ανθρώπινη ιστορία, αντανακλώντας τη διαρκή προσπάθεια του ανθρώπου να δημιουργήσει υλικά με ιδιότητες ανώτερες από εκείνες των επιμέρους συστατικών τους. Όπως επισημαίνει ο Chawla <sup>25</sup>, ένα σύνθετο υλικό ορίζεται ως ένα σύστημα που αποτελείται από δύο ή περισσότερες διακριτές φάσεις, οι οποίες διαχωρίζονται από σαφή διεπιφάνεια και συνεργάζονται για την επίτευξη ενός συνδυασμού μηχανικών ή λειτουργικών ιδιοτήτων που καμία φάση δεν διαθέτει από μόνη της. Η ιστορική εξέλιξη αυτών των υλικών μπορεί να χωριστεί σε τρεις κύριες περιόδους: την εμπειρική χρήση των φυσικών σύνθετων, τη βιομηχανική επανάσταση των δομικών σύνθετων και τη σύγχρονη εποχή των λειτουργικών και «έξυπνων» σύνθετων υλικών.

Κατά την αρχαιότητα, η χρήση σύνθετων υλικών βασιζόταν στην παρατήρηση της φύσης. Το ξύλο, για παράδειγμα, αποτελεί ένα φυσικό σύνθετο υλικό όπου οι ίνες κυτταρίνης παρέχουν εφελκυστική αντοχή εντός μιας μήτρας λιγνίνης. Οι πρώτες τεχνητές εφαρμογές εντοπίζονται στη χρήση αχύρου για την ενίσχυση πλίνθων από λάσπη στην αρχαία Μεσοποταμία και την Αίγυπτο, μια πρακτική που επέτρεπε τη δημιουργία δομικών στοιχείων με αυξημένη αντοχή σε ρηγμάτωση. Παρομοίως, οι αρχαίοι Μογγόλοι κατασκεύαζαν τόξα χρησιμοποιώντας συνδυασμούς ξύλου, οστού και ζωικής κόλλας, επιτυγχάνοντας εξαιρετική ελαστικότητα και μηχανική απόδοση. Αυτές οι πρώιμες προσπάθειες, αν και στερούνταν θεωρητικού υποβάθρου, έθεσαν τις βάσεις για τη θεμελιώδη αρχή της συνεργιστικής δράσης των υλικών <sup>26-28</sup>.

Η σύγχρονη εποχή των σύνθετων υλικών ξεκίνησε ουσιαστικά τον 20ό αιώνα, με την ανάπτυξη των πολυμερών και των ενισχυτικών ινών. Η δεκαετία του 1930 αποτέλεσε ορόσημο με την εφεύρεση των ινών γυαλιού (fiberglass) από την Owens Corning, οι οποίες, όταν συνδυάστηκαν με πολυμερείς ρητίνες, δημιούργησαν ελαφριά και ανθεκτικά υλικά που μεταμόρφωσαν τη ναυπηγική και την αεροπορική βιομηχανία. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, η ανάγκη για υλικά με υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος οδήγησε σε ραγδαία πρόοδο, ενώ η δεκαετία του 1960 σηματοδοτήθηκε από την

εισαγωγή των ιών άνθρακα και βορίου. Όπως αναφέρει ο Haresceugh, η αεροδιαστημική βιομηχανία υπήρξε ο κύριος μοχλός ανάπτυξης αυτών των προηγμένων δομικών σύνθετων, επιβάλλοντας αυστηρά πρότυπα σχεδιασμού και ανάλυσης.<sup>29,30</sup>

Τη δεκαετία του 1970, οι ερευνητές στα εργαστήρια της Philips στην Ολλανδία πραγματοποίησαν τις πρώτες πειραματικές προσπάθειες δημιουργίας μαγνητο-ηλεκτρικών σύνθετων υλικών μέσω της μεθόδου της κατευθυνόμενης στερεοποίησης ευτηκτικών κραμάτων (π.χ.  $BaTiO_3 - CoFe_2O_4$ ). Παρά την επιτυχία της ιδέας, οι πρώτες προσπάθειες περιορίζονταν από τη δυσκολία ελέγχου της μικροδομής και τις υψηλές αγωγιμότητες που οδηγούσαν σε διαρροή φορτίου. Ένα κρίσιμο θεωρητικό βήμα έγινε το 1978 από τον Robert Newnham και τους συνεργάτες του, οι οποίοι εισήγαγαν την έννοια της «συνδεσιμότητας» (connectivity). Η ταξινόμηση των σύνθετων σε δομές 0-3, 2-2 και 1-3 επέτρεψε στους επιστήμονες να κατανοήσουν πώς η γεωμετρική διάταξη των φάσεων επηρεάζει τη μεταφορά των μηχανικών τάσεων και, κατά συνέπεια, την αποτελεσματικότητα της μαγνητο-ηλεκτρικής σύζευξης<sup>9,12,31</sup>.

Η δεκαετία του 1990 και οι αρχές του 2000 χαρακτηρίστηκαν από τη μετάβαση στα πολυστρωματικά σύνθετα τύπου 2-2. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η τοποθέτηση εναλλασσόμενων στρωμάτων πιεζοηλεκτρικών (όπως ο PZT) και μαγνητοσυστολικών υλικών (όπως το Terfenol-D ή το Metglas) προσέφερε πολύ υψηλότερους συντελεστές σύζευξης σε σύγκριση με τα κοκκώδη σύνθετα 0-3, λόγω της μείωσης των ρευμάτων διαρροής και της καλύτερης μηχανικής επαφής. Η περίοδος αυτή συνέπεσε με την ανάπτυξη προηγμένων μεθόδων σύνθεσης, όπως η χημική εναπόθεση ατμών (CVD) και η εναπόθεση με δέσμη λέιζερ (PLD), επιτρέποντας τη δημιουργία σύνθετων δομών σε νανοκλίμακα<sup>32</sup>.

Σήμερα, η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών βρίσκεται στην εποχή του υπολογιστικού σχεδιασμού και των νανοσύνθετων. Η έρευνα εστιάζει πλέον στη βελτιστοποίηση της διεπιφάνειας, καθώς έχει γίνει αντιληπτό ότι η ποιότητα της πρόσφυσης μεταξύ των φάσεων καθορίζει την απόδοση του υλικού. Η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) επιτρέπει την πρόβλεψη της μη γραμμικής συμπεριφοράς και της υστέρησης των σύνθετων, μειώνοντας δραστικά τον χρόνο και το

κόστος των πειραματικών δοκιμών. Επιπλέον, η ενσωμάτωση αρχών βιομημητικής και η χρήση οικολογικών, υλικών χωρίς μόλυβδο, όπως το  $BaTiO_3$  και το  $KNbO_3$ , αποτελούν τις σύγχρονες τάσεις που στοχεύουν στη βιώσιμη ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών<sup>12,18</sup>.

Παράλληλα με την εξέλιξη των υλικών, καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των σύνθετων δομών έπαιξε η πρόοδος στις μεθόδους κατασκευής και επεξεργασίας. Κατά το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα, η μετάβαση από τις απλές μεθόδους χειροκίνητης εναπόθεσης σε αυτοματοποιημένες διαδικασίες, όπως η περιέλιξη ινών και η εξώθηση, επέτρεψε τον ακριβή έλεγχο του προσανατολισμού των ινών και του κλάσματος όγκου των φάσεων. Όπως σημειώνει ο Bowen, η βελτιστοποίηση των μεθόδων αυτών ήταν απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση των εσωτερικών ατελειών, όπως οι πόροι και οι αποκολλήσεις, οι οποίες υποβαθμίζουν δραματικά τη μηχανική και λειτουργική ακεραιότητα του συνθέτου. Η κατανόηση της διεπιφάνειας αναδείχθηκε σε κεντρικό πυλώνα της έρευνας, καθώς η μεταφορά φορτίου ή τάσης από τη μήτρα στην ενίσχυση εξαρτάται αποκλειστικά από την ποιότητα της πρόσφυσης μεταξύ των δύο φάσεων<sup>25,28</sup>.

Η ανάγκη για ακριβή πρόβλεψη των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών οδήγησε στη γέννηση της Μικρομηχανικής. Από τις πρώτες προσεγγίσεις του Voigt και του Reuss, οι οποίες έθεσαν τα όρια των ελαστικών σταθερών μέσω του «Κανόνα των Μιγμάτων», η θεωρία εξελίχθηκε σε πιο σύνθετα ημι-εμπειρικά μοντέλα. Οι εξισώσεις Halpin-Tsai αποτέλεσαν σταθμό στην ιστορία των σύνθετων, καθώς επέτρεψαν στους μηχανικούς να λαμβάνουν υπόψη το σχήμα και τη γεωμετρία της ενισχυτικής φάσης (π.χ. ίνες ή σωματίδια) για τον υπολογισμό των ενεργών ιδιοτήτων. Αυτή η θεωρητική θεμελίωση ήταν το πρώτο βήμα προς τον σχεδιασμό υλικών «κατά παραγγελία», όπου οι ιδιότητες δεν είναι πλέον δεδομένες από τη φύση αλλά καθορίζονται από τον σχεδιαστή<sup>26,33,34</sup>.

Με την έλευση του 21ου αιώνα, η έρευνα στράφηκε στα νανοσύνθετα και στα υβριδικά συστήματα. Η ενσωμάτωση νανοσωλήνων άνθρακα, νανοσωματιδίων και νανοφυλλιδίων σε πολυμερείς ή κεραμικές μήτρες επέτρεψε τη δημιουργία υλικών με εξαιρετικές ιδιότητες σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις ενίσχυσης. Όπως εξηγούν οι Alarifi και Asmatulu, τα υβριδικά σύνθετα, τα οποία συνδυάζουν οργανικές και

ανόργανες φάσεις, προσφέρουν μια μοναδική πλατφόρμα για την ανάπτυξη πολυλειτουργικών υλικών. Σε αυτά τα συστήματα, η τεράστια ειδική επιφάνεια των νανοενισχύσεων δημιουργεί μια κυρίαρχη «διεπιφανειακή φάση» (interphase), η οποία προσδίδει στο υλικό ιδιότητες που ξεφεύγουν από τα όρια των κλασσικών θεωριών των συνεχών μέσων<sup>35,36</sup>.

Ιδιαίτερη σημασία για την εξέλιξη των πολυφερροϊκών σύνθετων είχε η ανάπτυξη των «ευφών» σύνθετων υλικών για εφαρμογές συλλογής ενέργειας και βιοϊατρικής τεχνολογίας. Η βιομιμητική προσέγγιση, η οποία μελετά τις σύνθετες δομές της φύσης όπως το οστό ή το κοχύλι, ενέπνευσε τους ερευνητές να σχεδιάσουν ιεραρχικές δομές με αυξημένη ανθεκτικότητα και απόκριση σε εξωτερικά ερεθίσματα. Η χρήση φυσικών ινών και οικολογικών υλικών αποτελεί την πλέον σύγχρονη τάση, συνδυάζοντας την υψηλή απόδοση με τη βιωσιμότητα και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος<sup>26,36</sup>.

## 3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 3.1. Φυσική των φερροϊκών φαινομένων

Η μελέτη των πολυφερροϊκών σύνθετων υλικών βασίζεται στην κατανόηση των φερροϊκών φαινομένων, τα οποία ορίζονται από την εμφάνιση μιας αυθόρμητης εσωτερικής παραμέτρου τάξης κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία μετάβασης. Πάνω από τη θερμοκρασία αυτή (θερμοκρασία Curie), το υλικό βρίσκεται σε μια κατάσταση υψηλής συμμετρίας, η οποία ονομάζεται παρα-φάση (παραηλεκτρική ή παραμαγνητική κατάσταση). Σε αυτή την κατάσταση, οι εσωτερικές ροπές είναι άτακτα προσανατολισμένες και οι ιδιότητες του φερροηλεκτρισμού ή του φερρομαγνητισμού απουσιάζουν πλήρως<sup>2,37</sup>.

Η εμφάνιση της φερροϊκής τάξης συνοδεύεται από μια διαδικασία θραύσης της συμμετρίας του κρυστάλλου κατά την ψύξη του. Αυτή η δομική αλλαγή επιτρέπει την ανάπτυξη μακροσκοπικών ιδιοτήτων, όπως η αυθόρμητη πόλωση ή μαγνήτιση, οι οποίες αποτελούν τη βάση για τη λειτουργία των πολυφερροϊκών συστημάτων. Σύμφωνα με τη φαινομενολογική θεωρία, η παράμετρος τάξης συνδέεται με την ελαχιστοποίηση της ελεύθερης ενέργειας του συστήματος, οδηγώντας το υλικό σε μια ενεργειακά σταθερή κατάσταση με προτιμητέο προσανατολισμό των διπόλων<sup>8,37</sup>.

Στην παρούσα ενότητα αναλύονται οι θεμελιώδεις αρχές του φερροηλεκτρισμού και του φερρομαγνητισμού, καθώς και η τανυστική περιγραφή των φαινομένων της πιεζοηλεκτρικότητας και της μαγνητοσυστολής, που αποτελούν τους συνδετικούς κρίκους για τη μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μικροσκοπική δομή των υλικών, όπως οι περοβσκίτες και οι δομές Aurivillius, οι οποίες παρουσιάζουν έντονη ανισοτροπία και επιτρέπουν τον έλεγχο των ιδιοτήτων τους μέσω μηχανικών τάσεων. Η κατανόηση αυτών των κρυσταλλικών δομών είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των πιεζοηλεκτρικών συντελεστών υψηλής ευαισθησίας που απαιτούνται στα σύγχρονα λειτουργικά σύνθετα<sup>9,38,39</sup>.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των φερροϊκών υλικών είναι ο σχηματισμός τομέων, οι οποίοι αποτελούν περιοχές ομοιόμορφου προσανατολισμού της παραμέτρου τάξης. Η δυναμική των τοιχωμάτων των τομέων και η διαδικασία αναστροφής τους υπό την επίδραση εξωτερικών πεδίων καθορίζουν τη μη γραμμική απόκριση και την υστέρηση του υλικού. Στα πολυφερροϊκά σύνθετα, η απόκριση αυτή μπορεί να τροποποιηθεί μέσω της επιβολής ελεγχόμενων παραμορφώσεων, επιτρέποντας τη ρύθμιση της μαγνητο-ηλεκτρικής σύζευξης ανάλογα με τις λειτουργικές απαιτήσεις της διάταξης<sup>40,41</sup>.

### 3.1.1. Μικροσκοπικοί Μηχανισμοί και Βρόχοι Υστέρησης ( $P - E, M - H$ )

Η θεωρητική θεμελίωση της φασικής μετάβασης βασίζεται στη φαινομενολογική θεωρία των Landau-Ginzburg-Devonshire (LGD). Σύμφωνα με αυτήν, η ελεύθερη ενέργεια Gibbs ( $G$ ) του συστήματος αναπτύσσεται σε δυναμοσειρά ως προς την παράμετρο τάξης, η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι η πόλωση ( $P$ ). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την περιγραφή της σταθερότητας των φάσεων και της εξάρτησής τους από τη θερμοκρασία<sup>4,42</sup>:

$$G = G_0 + \frac{1}{2}\beta(T - T_C)P^2 + \frac{1}{4}\gamma P^4 + \frac{1}{6}\delta P^6 - EP$$

Όπου:

$T_C$ : Η θερμοκρασία Curie.

$\beta, \gamma, \delta$ : Φαινομενολογικοί συντελεστές που εξαρτώνται από το υλικό.

$EP$ : Ο όρος της αλληλεπίδρασης με το εξωτερικό πεδίο.

Όταν  $T > T_C$ , ο συντελεστής του όρου  $P^2$  είναι θετικός και η ελάχιστη ενέργεια αντιστοιχεί σε μηδενική πόλωση ( $P = 0$ ). Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται κάτω από την  $T_C$ , ο συντελεστής αυτός γίνεται αρνητικός, οδηγώντας σε μια ενεργειακή επιφάνεια με δύο ή περισσότερα ελάχιστα. Αυτά τα ελάχιστα αντιπροσωπεύουν τις ενεργειακά

ευνοούμενες καταστάσεις αυθόρμητης πόλωσης, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη λειτουργία των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στα σύνθετα υλικά <sup>42,43</sup>.

### **3.1.1.1. Φερρομαγνητισμός και μαγνητική τάξη**

Ο φερρομαγνητισμός είναι η ιδιότητα ορισμένων υλικών να παρουσιάζουν αυθόρμητη μαγνήτιση, δηλαδή οι ατομικές μαγνητικές ροπές τους να ευθυγραμμίζονται ομοιόμορφα προς μία κατεύθυνση, ακόμη και χωρίς την παρουσία εξωτερικού πεδίου. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην κβαντομηχανική αλληλεπίδραση ανταλλαγής, η οποία αναγκάζει τα spin των ηλεκτρονίων γειτονικών ατόμων να προσανατολιστούν παράλληλα για να ελαχιστοποιήσουν την ενέργεια του συστήματος <sup>4,44</sup>.

### **3.1.1.2. Η χαμιλτονιανή του Heisenberg και η μαγνητική τάξη**

Η θεωρητική περιγραφή αυτής της αλληλεπίδρασης δίνεται από τη Χαμιλτονιανή του Heisenberg, η οποία εκφράζει την ενέργεια (H) μεταξύ δύο γειτονικών spin  $S_i$  και  $S_j$ :

$$H = -2\sum J_{ij} S_i \cdot S_j$$

Στη σχέση αυτή, το  $J_{ij}$  ονομάζεται ολοκλήρωμα ανταλλαγής. Όταν η τιμή του  $J$  είναι θετική ( $J > 0$ ), η ενέργεια του συστήματος ελαχιστοποιείται όταν τα spin είναι παράλληλα, οδηγώντας σε φερρομαγνητική τάξη. Αντίθετα, αν το  $J$  είναι αρνητικό, τα spin τείνουν να ευθυγραμμιστούν αντιπαράλληλα (αντιφερρομαγνητισμός) <sup>7,44</sup>. Στα σύνθετα πολυφερροϊκά, η επιλογή υλικών με ισχυρή φερρομαγνητική τάξη σε θερμοκρασία δωματίου είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της μαγνητο-ηλεκτρικής σύζευξης <sup>1,45</sup>.

### **3.1.1.3. Μαγνητικοί τομείς και ανισοτροπία**

Παρόλο που η αλληλεπίδραση ανταλλαγής ευνοεί την πλήρη ευθυγράμμιση, ένας κρύσταλλος δεν συμπεριφέρεται πάντα ως ένας ενιαίος μαγνήτης. Για να μειωθεί η μαγνητοστατική ενέργεια (η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου που περιβάλλει το υλικό), ο κρύσταλλος χωρίζεται σε μικροσκοπικές περιοχές που ονομάζονται μαγνητικοί τομείς ή τομείς Weiss<sup>4,46</sup>. Εντός κάθε τομέα, η μαγνήτιση είναι ομοιόμορφη, αλλά οι διαφορετικοί

τομείς έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς, με αποτέλεσμα η συνολική μαγνήτιση να μπορεί να είναι μηδενική.

Τα όρια μεταξύ αυτών των τομέων ονομάζονται τοιχώματα τομέων (Bloch ή Neel walls). Το πάχος αυτών των τοιχωμάτων προκύπτει από τον ανταγωνισμό μεταξύ της ενέργειας ανταλλαγής (η οποία ευνοεί τη δημιουργία ευρύτερων τοιχωμάτων για την ομαλή μετάβαση των spin) και της ενέργειας μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας (η οποία τείνει να περιορίσει το πάχος τους ώστε τα spin να παραμένουν προσανατολισμένα κατά μήκος των αξόνων εύκολης μαγνήτισης του κρυστάλλου)<sup>44,46</sup>. Η κατανόηση αυτών των αξόνων είναι κρίσιμη για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης εφαρμογής του πεδίου στις προσομοιώσεις<sup>47</sup>.

#### **3.1.1.4. Βρόχος Υστέρησης M-H και Φαινόμενο Villari**

Η μακροσκοπική απόκριση του υλικού περιγράφεται από τον βρόχο υστέρησης  $M-H$ . Καθώς αυξάνεται το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $H$ , οι τομείς αναπροσανατολίζονται μέχρι το υλικό να φτάσει στη μαγνήτιση κορεσμού ( $M_S$ ). Με την απομάκρυνση του πεδίου, παραμένει μια υπολειμματική μαγνήτιση ( $M_r$ ), ενώ για τον μηδενισμό της απαιτείται το συνεκτικό πεδίο ( $H_c$ )<sup>4,44</sup>. Στα πολυφερροϊκά σύνθετα, η σύζευξη βασίζεται στο φαινόμενο Villari (αντίστροφη μαγνητοσυστολή). Όταν η πιεζοηλεκτρική φάση παραμορφώνεται, ασκεί μηχανική τάση στη φερρομαγνητική φάση. Αυτή η τάση αλλάζει την ενέργεια ανισοτροπίας του υλικού, αναγκάζοντας τις μαγνητικές ροπές να περιστραφούν και μεταβάλλοντας έτσι τη μαγνητική διαπερατότητα ή την επαγωγή του συστήματος<sup>45,46</sup>. Η επιλογή υλικών με υψηλή μαγνήτιση κορεσμού και έντονη απόκριση στις τάσεις, όπως το Terfenol-D ή οι φερρίτες σπινελίου, αποτελεί τη βάση για τον σχεδιασμό αποδοτικών μαγνητο-ηλεκτρικών διατάξεων<sup>1,45</sup>.

#### **3.1.2. Θεωρία πιεζοηλεκτρισμού και μαγνητοσυστολής**

Η μαθηματική περιγραφή των συζευγμένων πεδίων απαιτεί τη χρήση τανυστών, καθώς οι ιδιότητες των φερροϊκών υλικών παρουσιάζουν έντονη ανισοτροπία. Η

συμμετρία του κρυστάλλου επιβάλλει περιορισμούς στις συνιστώσες των τανυστών σύμφωνα με την αρχή του Neumann: "Οι λειτουργικές ιδιότητες ενός κρυστάλλου πρέπει να περιλαμβάνουν όλα τα στοιχεία συμμετρίας της σημειακής ομάδας του κρυστάλλου"<sup>48</sup>.

### 3.1.2.1. Εξισώσεις πιεζοηλεκτρισμού

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, που ανακαλύφθηκε από τους αδερφούς Pierre και Jacques Curie το 1880, αποτελεί μια θεμελιώδη σύζευξη μεταξύ της μηχανικής και της ηλεκτρικής κατάστασης ενός υλικού. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε κρυσταλλικές δομές που στερούνται κέντρου συμμετρίας, όπου η ύπαρξη πολικών αξόνων επιτρέπει τη δημιουργία ηλεκτρικής διπολικής ροπής<sup>49,50</sup>.

Διακρίνουμε δύο κύριες μορφές του φαινομένου:

**Ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο:** Η εφαρμογή μηχανικής τάσης προκαλεί μετατόπιση των ιόντων στο κρυσταλλικό πλέγμα, οδηγώντας στην εμφάνιση ηλεκτρικού φορτίου στις επιφάνειες του υλικού.

**Αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο:** Η επιβολή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί μηχανική παραμόρφωση (συστολή ή διαστολή) του κρυστάλλου, γεγονός που αξιοποιείται στη δημιουργία διεγερτών<sup>51</sup>.

Η θερμοδυναμική περιγραφή της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης βασίζεται στην πυκνότητα της εσωτερικής ενέργειας  $U$ <sup>52,53</sup>. Για αδιαβατικές μεταβολές, η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας συναρτήσει της παραμόρφωσης  $S_{ij}$  και της ηλεκτρικής μετατόπισης  $D_i$  εκφράζεται ως:

$$dU = T_{ij}dS_{ij} + E_idD_i$$

Από τη διαφορική αυτή μορφή και τη χρήση της ηλεκτρικής ενθαλπίας  $H_e$ , προκύπτουν οι γραμμικές καταστατικές εξισώσεις. Όταν ως ανεξάρτητες μεταβλητές

επιλέγονται το ηλεκτρικό πεδίο ( $E$ ) και η μηχανική τάση ( $T$ ), οι εξισώσεις που περιγράφουν την απόκριση του υλικού είναι:

$$D_i = \epsilon_{ik}^T E_k + d_{ikl} T_{kl} S_{ij} = d_{ijk} E_k + s_{ijkl}^E T_{kl}$$

Στις παραπάνω σχέσεις:

Ο τανυστής  $d_{ikl}$  εκφράζει τις πιεζοηλεκτρικές σταθερές που συνδέουν τα δύο πεδία.

Ο τανυστής  $s_{ijkl}^E$  αντιπροσωπεύει την ελαστική ενδοτικότητα υπό σταθερό ηλεκτρικό πεδίο.

Ο τανυστής  $\epsilon_{ik}^T$  αντιπροσωπεύει τη διηλεκτρική διαπερατότητα υπό σταθερή μηχανική τάση.

Για πολυκρυσταλλικά κεραμικά όπως ο PZT, η διαδικασία της ηλεκτρικής πόλωσης ευθυγραμμίζει τις περιοχές Weiss, προσδίδοντας στο υλικό εξαγωνική συμμετρία ( $C_{6v}$ ). Στην περίπτωση αυτή, η απόκριση του υλικού καθορίζεται κυρίως από τις σταθερές  $d_{33}$  (διάμηκες φαινόμενο) και  $d_{31}$  (εγκάρσιο φαινόμενο), οι οποίες ορίζουν την αποτελεσματικότητα της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικό έργο<sup>54,55</sup>.

### 3.1.2.2. Μαγνητοσυστολή και πιεζομαγνητισμός

Η μαγνητοσυστολή είναι η μεταβολή των διαστάσεων ενός σώματος λόγω μεταβολής της μαγνητικής του κατάστασης. Μικροσκοπικά, οφείλεται στη σύζευξη spin-τροχιάς (spin-orbit coupling), η οποία αναπροσανατολίζει τα ηλεκτρονιακά νέφη καθώς περιστρέφονται οι μαγνητικές ροπές, προκαλώντας παραμόρφωση του πλέγματος<sup>56</sup>.

Η παραμόρφωση λόγω μαγνητοσυστολής  $\lambda$  περιγράφεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_s (\cos^2 \theta - \frac{1}{3})$$

όπου  $\lambda_s$  είναι η σταθερά μαγνητοσυστολής κορεσμού και  $\theta$  η γωνία μεταξύ της μαγνήτισης και της διεύθυνσης μέτρησης.

Για την περιγραφή της σύζευξης σε σύνθετα υλικά υπό συνθήκες ασθενούς πεδίου (small signal), χρησιμοποιούνται οι πιεζομαγνητικές καταστατικές εξισώσεις, οι οποίες είναι μαθηματικά ανάλογες με τις πιεζοηλεκτρικές:

$$S_{ij} = s_{ijkl}^H T_{kl} + q_{kij} H_k B_i = q_{ikl} T_{kl} + \mu_{ij}^T H_j$$

Όπου  $q_{kij} = (\partial S_{ij} / \partial H_k)_T$  είναι οι πιεζομαγνητικές σταθερές, οι οποίες εκφράζουν την ευαισθησία της παραμόρφωσης στο μαγνητικό πεδίο. Στα μαγνητοσυστολικά υλικά όπως το Terfenol-D ( $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ ), οι σταθερές αυτές είναι εξαιρετικά υψηλές, επιτρέποντας την αποτελεσματική μετατροπή της μαγνητικής ενέργειας σε μηχανική<sup>13</sup>.

Η μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη στο σύνθετο υλικό προκύπτει από την αλληλεπίδραση των παραπάνω εξισώσεων μέσω της διεπιφάνειας. Η παραμόρφωση  $S$  που παράγεται στην πιεζοηλεκτρική φάση από ένα πεδίο  $E$  δρα ως επιβαλλόμενη τάση  $T$  στη μαγνητοσυστολική φάση, προκαλώντας μεταβολή στην επαγωγή  $B$ <sup>2,17</sup>.

## 3.2. Ανάλυση σύνθετων υλικών

Η μελέτη των σύνθετων υλικών απαιτεί μια γέφυρα μεταξύ της μικροσκοπικής δομής των επιμέρους φάσεων και της μακροσκοπικής συμπεριφοράς του συνολικού υλικού. Η μικρομηχανική ανάλυση εστιάζει στον προσδιορισμό των "ενεργών ιδιοτήτων" ενός ετερογενούς μέσου, θεωρώντας το ως ένα ισοδύναμο ομογενές μέσο (Equivalent Homogeneous Medium - EHM). Η διαδικασία αυτή, γνωστή ως ομογενοποίηση, επιτρέπει την πρόβλεψη της απόκρισης του υλικού χωρίς την ανάγκη λεπτομερούς μοντελοποίησης κάθε μικροσκοπικού τμήματος<sup>57</sup>.

### 3.2.1. Ορισμός φάσεων και αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE)

Η θεμελιώδης έννοια στη μικρομηχανική είναι το Αντιπροσωπευτικό Στοιχείο Όγκου (Representative Volume Element - RVE). Το RVE ορίζεται ως ένας όγκος  $V$  του

σύνθετου υλικού ο οποίος είναι αρκετά μεγάλος ώστε να περιλαμβάνει έναν στατιστικά αντιπροσωπευτικό αριθμό εγκλεισμάτων και μικροδομικών χαρακτηριστικών, αλλά ταυτόχρονα αρκετά μικρός σε σχέση με τις διαστάσεις του μακροσκοπικού σώματος<sup>58</sup>. Για να είναι έγκυρη η ομογενοποίηση, πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη Hill, η οποία ορίζει ότι η μέση τιμή της πυκνότητας της ενέργειας παραμόρφωσης στο RVE πρέπει να ισούται με την ενέργεια παραμόρφωσης που υπολογίζεται βάσει των μέσων τιμών των τάσεων και παραμορφώσεων:

$$\frac{1}{V} \int_V T_{ij} S_{ij} dV = \langle T_{ij} \rangle \langle S_{ij} \rangle$$

Όπου οι αγκύλες  $\langle \cdot \rangle$  δηλώνουν τον μέσο όρο όγκου:  $\langle T_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int_V T_{ij} dV$ ,  $\langle S_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int_V S_{ij} dV$

Στα πολυφασικά σύνθετα, οι φάσεις ορίζονται ως εξής:

**Συνεχής Φάση (Μήτρα):** Συνήθως η πιεζοηλεκτρική φάση, η οποία περιβάλλει τα εγκλείσματα.

**Διακριτή Φάση:** Η φερρομαγνητική φάση, η οποία μπορεί να έχει τη μορφή σωματιδίων (0-3), ινών (1-3) ή στρωμάτων (2-2).

Η γεωμετρία του RVE εξαρτάται από τη συνδεσιμότητα. Για παράδειγμα, σε ένα ισοπλισμένο σύνθετο (1-3), το RVE μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια κυλινδρική ή τετραγωνική κυψελίδα που περιλαμβάνει μία ίνα, ενώ σε ένα πολυστρωματικό υλικό (2-2), το RVE ανάγεται σε μια μονοδιάστατη τομή των επάλληλων στρωμάτων<sup>59</sup>.

### 3.2.2. Υπολογισμός κλασμάτων όγκου και ιδιοτήτων

Η κυρίαρχη παράμετρος που καθορίζει τις ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού είναι το κλάσμα όγκου (volume fraction) της κάθε φάσης. Αν  $V_f$  είναι ο όγκος της ενισχυτικής φάσης και  $V_m$  ο όγκος της μήτρας, τότε το κλάσμα όγκου της ενίσχυσης  $v_f$  ορίζεται ως:

$$v_f = \frac{V_f}{V_f + V_m}$$

### 3.2.2.1. Κανόνας των μιγμάτων

Ο Κανόνας των Μιγμάτων παρέχει τα θεωρητικά όρια για τις ενεργές ιδιότητες (π.χ. μέτρο ελαστικότητας  $E_{\text{eff}}$ , πιεζοηλεκτρικές σταθερές  $d_{\text{eff}}$ ). Τα όρια αυτά εξαρτώνται από τον τρόπο φόρτισης σε σχέση με τον προσανατολισμό των φάσεων:

Όριο Voigt (Άνω Όριο - Παράλληλη Σύνδεση): Υποθέτει ότι η παραμόρφωση  $S$  είναι ομοιόμορφη σε όλο το RVE. Χρησιμοποιείται για τη φόρτιση κατά μήκος των ινών ή των στρωμάτων:  $P_{\text{eff}} = v_f P_f + v_m P_m$

Όριο Reuss (Κάτω Όριο - Σειριακή Σύνδεση): Υποθέτει ότι η τάση  $T$  είναι ομοιόμορφη. Χρησιμοποιείται για τη φόρτιση κάθετα στα στρώματα:  $P_{\text{eff}} = \left( \frac{v_f}{P_f} + \frac{v_m}{P_m} \right)^{-1}$

Όπου Ραντιπροσωπεύει μια υλική ιδιότητα (ελαστική σταθερά, διαπερατότητα κ.λπ.). Για τα πολυμεροϊκά σύνθετα 2-2, οι σχέσεις αυτές εφαρμόζονται άμεσα για τον υπολογισμό των ενεργών πιεζοηλεκτρικών και πιεζομαγνητικών συντελεστών <sup>60</sup>.

### 3.2.2.2. Μοντέλο Halpin-Tsai

Ο κλασικός κανόνας των μιγμάτων συχνά αποδεικνύεται ανεπαρκής, για τον προσδιορισμό των ενεργών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών με ίνες (συνδεσιμότητα 1-3) ή σωματίδια (συνδεσιμότητα 0-3), καθώς αδυνατεί να προβλέψει με ακρίβεια τις εγκάρσιες ιδιότητες. Οι εξισώσεις Halpin-Tsai αποτελούν μια ευρέως αποδεκτή ημι-εμπειρική προσέγγιση, η οποία γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ των ορίων Voigt και Reuss, ενσωματώνοντας τη γεωμετρία και τον λόγο των διαστάσεων της ενισχυτικής φάσης <sup>25,61</sup>.

Η γενική μορφή των εξισώσεων για τον υπολογισμό μιας ενεργής ιδιότητας  $P_{\text{eff}}$  (όπως το μέτρο ελαστικότητας  $E$  ή οι ελαστικές σταθερές δυσκαμψίας  $c_{ij}$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\text{eff}} = P_m \left( \frac{1 + \xi \eta v_f}{1 - \eta v_f} \right)$$

με τον συντελεστή  $\eta$  να ορίζεται ως:

$$\eta = \frac{(P_f/P_m) - 1}{(P_f/P_m) + \xi}$$

Όπου  $P_f$  και  $P_m$  είναι οι ιδιότητες της ενισχυτικής φάσης και της μήτρας αντίστοιχα, ενώ νείναι το κλάσμα όγκου της ενίσχυσης. Ο παράγοντας ξαποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο του μοντέλου, καθώς συνδέεται άμεσα με τη γεωμετρία της ενίσχυσης και τον τρόπο φόρτισης του υλικού. Για κυκλικές ίνες και υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας κάθετα στον άξονα των ινών, η τιμή  $\xi = 2$  αποτελεί μια συνήθη προσέγγιση. Σε περιπτώσεις ινών με πεπερασμένο μήκος  $l$  και διάμετρο  $d$ , ο παράγοντας  $\xi$  μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του λόγου πλευράς ( $\xi = 2l/d$ ), επιτρέποντας την ακριβέστερη μοντελοποίηση της μεταφοράς τάσεων<sup>25</sup>.

Στην περίπτωση των ινοπλισμένων πιεζοηλεκτρικών σύνθετων, οι εξισώσεις αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τον προσδιορισμό των ενεργών ελαστικών σταθερών  $c_{11}$  και  $c_{12}$ , οι οποίες καθορίζουν την εγκάρσια ακαμψία του συστήματος. Η ακριβής πρόβλεψη αυτών των σταθερών είναι κρίσιμη για τη μελέτη της μαγνητο-ηλεκτρικής σύζευξης, καθώς η παραμόρφωση που παράγεται στην πιεζοηλεκτρική μήτρα πρέπει να μεταφερθεί αποτελεσματικά στις φερρομαγνητικές ίνες. Μοντέλα βασισμένα στη μικρομηχανική ανάλυση, όπως αυτό των Dunn και Taya, έχουν δείξει ότι η χρήση των σχέσεων Halpin-Tsai παρέχει εξαιρετική σύγκλιση με τα αριθμητικά αποτελέσματα για χαμηλά και μεσαία κλάσματα όγκου, καθιστώντας τες απαραίτητο εργαλείο για την επαλήθευση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων<sup>62</sup>.

### 3.3. Μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη και συνδεσιμότητα

Η μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη στα σύνθετα υλικά αποτελεί ένα από τα πλέον υποσχόμενα πεδία της σύγχρονης επιστήμης των υλικών, καθώς επιτρέπει τη δημιουργία συστημάτων με αποκρίσεις που υπερβαίνουν κατά τάξεις μεγέθους εκείνες των φυσικών μονοφασικών κρυστάλλων. Στο επίκεντρο αυτής της συμπεριφοράς βρίσκεται η έννοια της παραγόμενης ιδιότητας, η οποία υποδηλώνει ότι η συνολική απόκριση του σύνθετου υλικού δεν είναι απλώς το άθροισμα των ιδιοτήτων των συστατικών του, αλλά το

αποτέλεσμα της ελαστικής αλληλεπίδρασής τους μέσω μιας κοινής διεπιφάνειας. Ενώ στα μονοφασικά πολυφερροϊκά υλικά η σύζευξη είναι εγγενής και συχνά ασθενής λόγω των κβαντομηχανικών περιορισμών που καθιστούν τον φερροηλεκτρισμό και τον φερρομαγνητισμό αμοιβαία αποκλειόμενους, στα σύνθετα συστήματα η σύζευξη επιτυγχάνεται τεχνητά μέσω της συμβολής μιας πιεζοηλεκτρικής φάσης και μιας μαγνητοσυστολικής φάσης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη χρήση υλικών με εξαιρετικές επιμέρους ιδιότητες σε θερμοκρασία δωματίου, καθιστώντας τα ιδανικά για την ανάπτυξη αισθητήρων μαγνητικού πεδίου υψηλής ευαισθησίας και προηγμένων συστημάτων αποθήκευσης δεδομένων<sup>17,63,64</sup>.

### 3.3.1. Μηχανισμός μεταφοράς τάσεων και θεωρητική περιγραφή

Ο βασικός μηχανισμός στα πολυφερροϊκά σύνθετα υλικά είναι η μηχανικά διαμεσολαβούμενη σύζευξη. Σε αντίθεση με τα απλά υλικά, εδώ η απόκριση προκύπτει από μια «αλυσιδωτή αντίδραση» μεταξύ δύο διαφορετικών φάσεων. Στην παρούσα εργασία, η αλυσίδα αυτή ξεκινά από την εφαρμογή μηχανικής τάσης, η οποία παραμορφώνει το πιεζοηλεκτρικό υλικό παράγοντας ηλεκτρικό φορτίο, και στη συνέχεια μεταφέρεται στο μαγνητικό υλικό προκαλώντας τη μαγνητική του αντίδραση<sup>6,17</sup>.

Η συνολική μαγνητο-ηλεκτρική απόκριση του συνθέτου ( $\alpha_{ME}$ ) δεν είναι εγγενής ιδιότητα των υλικών, αλλά προκύπτει ως το γινόμενο των επιμέρους αποκρίσεών τους. Μαθηματικά, αυτό περιγράφεται από τον «κανόνα της αλυσίδας», ο οποίος συνδέει το ηλεκτρικό αποτέλεσμα με το μαγνητικό ερέθισμα μέσω της μηχανικής παραμόρφωσης (S):

$$\alpha_{ME} = \frac{\text{Ηλεκτρική Απόκριση}}{\text{Μηχανική Παραμόρφωση}} \times \frac{\text{Μηχανική Παραμόρφωση}}{\text{Μαγνητική Διέγερση}}$$

Στη σχέση αυτή, ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την πιεζοηλεκτρική ικανότητα της μίας φάσης και ο δεύτερος τη μαγνητοσυστολική ικανότητα της άλλης. Η αποτελεσματικότητα της παραπάνω «αλυσίδας» εξαρτάται αποκλειστικά από το πόσο καλά συνδέονται τα δύο υλικά μεταξύ τους<sup>17,63</sup>. Η ποιότητα αυτής της σύνδεσης εκφράζεται με έναν συντελεστή μεταφοράς (k):

- Όταν η σύνδεση είναι τέλεια ( $k = 1$ ), όλη η παραμόρφωση περνάει από το ένα υλικό στο άλλο.
- Όταν υπάρχουν ατέλειες ή μεγάλη διαφορά στη σκληρότητα των υλικών, εμφανίζονται φαινόμενα συγκράτησης, τα οποία μετατρέπουν ενέργεια σε μη ωφέλιμες μορφές και μειώνουν σημαντικά την απόδοση του συνθέτου<sup>65</sup>.

Για να είναι χρήσιμο το υλικό σε πρακτικές εφαρμογές (π.χ. αισθητήρες), η παραγόμενη πόλωση πρέπει να μεταφράζεται σε υψηλή ηλεκτρική τάση ( $\alpha_E$ ). Αυτό καθορίζεται από τη σχέση:

$$\alpha_E = \frac{\alpha_P}{\epsilon_{eff}}$$

Η εξίσωση αυτή αναδεικνύει έναν κρίσιμο κανόνα σχεδιασμού: για να πάρουμε ισχυρό ηλεκτρικό σήμα, δεν αρκεί μόνο η καλή μηχανική συνεργασία, αλλά πρέπει το σύνθετο υλικό να διατηρεί τη διηλεκτρική του διαπερατότητα ( $\epsilon_{eff}$ ) σε χαμηλά επίπεδα. Έτσι, η εσωτερική ηλεκτρική πόλωση μπορεί να «εκτονωθεί» ως υψηλή διαφορά δυναμικού<sup>17,66</sup>.

### 3.3.2. Ταξινόμηση Δομών και η Επίδραση της Συνδεσιμότητας

Η γεωμετρική διάταξη των φάσεων, γνωστή ως συνδεσιμότητα (connectivity), αποτελεί τον κρισιμότερο παράγοντα για τη μεγιστοποίηση της μαγνητο-ηλεκτρικής απόκρισης. Σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης που εισήγαγε ο Newnham, οι δομές ορίζονται από τον αριθμό των διαστάσεων στις οποίες κάθε φάση είναι συνεχής, με τις διατάξεις 2-2, 1-3 και 0-3 να αποτελούν τις κύριες αρχιτεκτονικές μελέτης<sup>67</sup>.

#### 3.3.2.1. Πολυστρωματικές δομές (2-2)

Οι πολυστρωματικές δομές τύπου 2-2 αποτελούνται από επάλληλα επίπεδα πιεζοηλεκτρικού και φερρομαγνητικού υλικού. Η διάταξη αυτή θεωρείται η πλέον αποδοτική για την επίτευξη γιγαντιαίας μαγνητο-ηλεκτρικής σύζευξης, καθώς η μεγάλη επιφάνεια διεπιφάνειας επιτρέπει τη βέλτιστη μεταφορά ελαστικών παραμορφώσεων. Για

ένα πολυστρωματικό υλικό με στρώσεις στο επίπεδο  $\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2$ , ο εγκάρσιος μαγνητο-ηλεκτρικός συντελεστής  $\alpha_{E,31}$  υπολογίζεται από το μοντέλο των Harshe-Bichurin:

$$\alpha_{E,31} = \frac{-v(1-v)(d_{31}^p q_{11}^m + d_{31}^p q_{21}^m)}{v\epsilon_{33}^m(s_{11}^p + s_{12}^p) + (1-v)\epsilon_{33}^p(s_{11}^m + s_{12}^m) - 2(d_{31}^p)^2(1-v)}$$

Όπου  $v$  είναι το κλάσμα όγκου,  $d_{31}^p$  η πιεζοηλεκτρική σταθερά και  $q_{ij}^m$  οι πιεζομαγνητικές σταθερές. Οι δομές 2-2 πλεονεκτούν επίσης λόγω των χαμηλών ρευμάτων διαρροής, καθώς η πιεζοηλεκτρική στρώση λειτουργεί ως μονωτικό φράγμα, επιτρέποντας τη μέτρηση υψηλών διαφορών δυναμικού <sup>63,68</sup>.

### 3.3.2.2. Ινοπλισμένες Δομές (1-3)

Η δομή 1-3 αποτελείται από ενεργές ίνες της μίας φάσης εγκιβωτισμένες σε μια συνεχή μήτρα της άλλης. Η αρχιτεκτονική αυτή παρουσιάζει έντονη ανισοτροπία, επιτρέποντας τη συγκέντρωση των τάσεων κατά μήκος του κύριου άξονα των ινών. Ο ενεργός συντελεστής  $\alpha_{E,33}$  για διέγερση κατά τον διαμήκη άξονα ( $\mathbf{x}_3$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha_{E,33} = \frac{v_f d_{33}^p q_{33}^m}{v_f \epsilon_{33}^m s_{33}^p + (1-v_f) \epsilon_{33}^p s_{33}^m}$$

Στις δομές 1-3, η σύζευξη ενισχύεται λόγω της μείωσης του φαινομένου «συγκράτησης» (clamping) από το υπόστρωμα, το οποίο είναι περιοριστικό στις δομές 2-2. Η ικανότητα των ινών να παραμορφώνονται πιο ελεύθερα κατά τον διαμήκη άξονα καθιστά τις δομές αυτές ιδανικές για κατευθυντικούς αισθητήρες και εφαρμογές ναοκλίμακας <sup>64,69</sup>.

### 3.3.2.3. Κοκκώδεις Δομές (0-3)

Στη δομή 0-3, σωματίδια της μίας φάσης είναι διεσπαρμένα σε μια συνεχή μήτρα. Παρά την ευκολία κατασκευής τους, οι δομές αυτές παρουσιάζουν τη χαμηλότερη σύζευξη, καθώς οι μηχανικές τάσεις διαχέονται στη μήτρα και πολλά τοπικά πεδία αλληλοαναιρούνται λόγω της τυχαίας διασποράς. Η μαθηματική ανάλυση δείχνει ότι η απόκριση περιορίζεται από τη σχέση:

$$\alpha_{ME,0-3} \approx v_f \cdot \alpha_{particle} \cdot \beta$$

όπου  $\beta$  είναι ένας συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων. Η σύγχρονη έρευνα στις δομές 0-3 επικεντρώνεται στη χρήση τεχνικών «μηχανικής των τάσεων» (strain engineering) για τη βελτίωση της διεπιφανειακής επαφής και τον περιορισμό των ρευμάτων διαρροής που προκαλούνται από την εγγύτητα των μεταλλικών σωματιδίων<sup>60,70,71</sup>.

## 4. ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΟΛΥΦΕΡΡΟΪΚΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### 4.1. Πολύστρωτα πολυφερροϊκά σύνθετα υλικά τύπου (2-2)

Η πολυστρωματική αρχιτεκτονική, η οποία στην κλασσική ταξινόμηση της συνδεσιμότητας αντιστοιχεί στον τύπο 2-2, αποτελεί διαχρονικά μια αποδοτική προσέγγιση για τη μεγιστοποίηση της μαγνητο-ηλεκτρικής σύζευξης. Στη διεθνή βιβλιογραφία, η μελέτη των δομών 2-2 έχει περάσει από διάφορα στάδια, ξεκινώντας από τη σύγκριση των βασικών μορφών συνδεσιμότητας και καταλήγοντας στον σχεδιασμό σύνθετων διατάξεων με υψηλές αποκρίσεις.

Μια σημαντική μελέτη για τα πολυστρωματικά σύνθετα πραγματοποιήθηκε από την ομάδα του Ryu<sup>72</sup>. Οι ερευνητές διερεύνησαν συστηματικά τη μαγνητο-ηλεκτρική απόκριση σε δομές δίσκου που συνδυάζαν το κράμα υψηλής μαγνητοσυστολής Terfenol-D με το πιεζοηλεκτρικό κεραμικό PZT. Το σημαντικότερο εύρημα αυτής της εργασίας ήταν η ποσοτική σύγκριση μεταξύ των κοκκωδών συνθέτων (0-3) και των πολυστρωματικών διατάξεων (2-2) του ίδιου ακριβώς συστήματος υλικών. Αποδείχθηκε ότι η πολυστρωματική διάταξη παρουσιάζει συντελεστή  $\alpha_E$  έως και δύο τάξεις μεγέθους υψηλότερο από την αντίστοιχη κοκκώδη, φτάνοντας τιμές κοντά στα 4.6 V/(cm · Oe). Η εργασία αυτή ανέδειξε επίσης τον κρίσιμο ρόλο της διεπιφάνειας, δείχνοντας ότι η χρήση εποξειδικών ρητινών με υψηλό μέτρο ελαστικότητας για τη συγκόλληση των στρωμάτων είναι απαραίτητη, καθώς οποιαδήποτε ελαστική ενδοτικότητα στο ενδιάμεσο στρώμα οδηγεί σε μεγάλη απώλεια της μεταφερόμενης παραμόρφωσης. Η ανάλυση αυτή παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο για την παραδοχή της «τέλειας πρόσφυσης» που χρησιμοποιείται συχνά στις προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων<sup>72</sup>.

Σε μια παράλληλη ερευνητική κατεύθυνση, η ερευνητική ομάδα του **Srinivasan**, εμβάθυνε στη μελέτη πολυστρωματικών συνθέτων που συνδυάζουν πιεζοηλεκτρικά κεραμικά PZT με μαλακούς φερρίτες, όπως ο φερρίτης νικελίου ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ) και ο φερρίτης κοβαλτίου ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ). Η έρευνά τους επικεντρώθηκε στην εξάρτηση του

μαγνητο-ηλεκτρικού συντελεστή από την ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου πόλωσης ( $H_{dc}$ ). Διαπιστώθηκε ότι η ME απόκριση παρουσιάζει ένα χαρακτηριστικό μέγιστο σε συγκεκριμένες τιμές του πεδίου  $H_{dc}$ , οι οποίες αντιστοιχούν στο σημείο όπου η πιεζομαγνητική σταθερά  $q = d\lambda/dH$  της μαγνητικής φάσης μεγιστοποιείται. Η μαθηματική περιγραφή που πρότειναν βασίζεται στη σύζευξη των καταστατικών εξισώσεων μέσω των ελαστικών παραμορφώσεων:  $S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k$  και  $S_{ij} = s_{ijkl}^H T_{kl} + q_{kij} H_k$ . Η μελέτη αυτή απέδειξε ότι η επιλογή της μαγνητικής φάσης δεν πρέπει να γίνεται μόνο με βάση τη μέγιστη μαγνητοσυστολή κορεσμού, αλλά κυρίως με βάση την κλίση της καμπύλης μαγνητοσυστολής σε χαμηλά πεδία, γεγονός που καθιστά τους φερρίτες εξαιρετικά ελκυστικούς για εφαρμογές αισθητήρων χαμηλής κατανάλωσης<sup>73</sup>.

Η επίτευξη ακόμη υψηλότερων αποδόσεων αναλύθηκε διεξοδικά από τον Dong και την ομάδα του, οι οποίοι εισήγαγαν την έννοια των σύνθετων δομών τύπου «push-pull» και «bimorph». Χρησιμοποιώντας διατάξεις Terfenol-D/PZT/Terfenol-D, οι ερευνητές απέδειξαν ότι η βελτιστοποίηση του προσανατολισμού της πόλωσης (π.χ. διαμήκης πόλωση έναντι εγκάρσιας) μπορεί να οδηγήσει σε συντελεστές  $\alpha_E$  της τάξης των 20 V/(cm · Oe). Η εργασία τους ανέδειξε τη σημασία της μηχανικής συνοχής και του φαινομένου συγκράτησης, δείχνοντας ότι όταν η πιεζοηλεκτρική φάση περιβάλλεται από δύο μαγνητικές στρώσεις, η μεταφορά των τάσεων γίνεται πιο ομοιόμορφη, μειώνοντας τις απώλειες στις άκρες του δείγματος. Αυτή η γεωμετρική προσέγγιση είναι σημαντική για τη μοντελοποίηση στο COMSOL, καθώς υποδεικνύει ότι ο λόγος πάχους των στρωμάτων και η συμμετρία της διάταξης είναι εξίσου σημαντικοί παράγοντες με τις υλικές σταθερές<sup>74</sup>.

Μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα περίπτωση που επεκτείνει το πεδίο εφαρμογών των πολυστρωματικών δομών 2-2 πέρα από τα παραδοσιακά πιεζοηλεκτρικά κεραμικά αφορά την ενσωμάτωση ημιαγωγών με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες, όπως το αρσενικούχο γάλιο (GaAs). Στην εργασία της ομάδας του **Filippov**, μελετήθηκε διεξοδικά η μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη σε σύνθετες δομές αποτελούμενες από GaAs, νικέλιο (Ni) και κασσίτερο (Sn). Η έρευνα αυτή απέδειξε ότι η δημιουργία πολυστρωματικών συστημάτων GaAs-Ni-Sn-Ni επιτρέπει την εμφάνιση του ME φαινομένου μέσω της

μεταφοράς μηχανικών τάσεων από τη μαγνητοσυστολική φάση του νικελίου στην πιεζοηλεκτρική φάση του ημιαγωγού. Η συγκεκριμένη μελέτη είναι εξαιρετικά σημαντική καθώς αναδεικνύει τη δυνατότητα άμεσης ενσωμάτωσης πολυφερροϊκών λειτουργιών σε ημιαγωγικές διατάξεις, ανοίγοντας νέες προοπτικές για την κατασκευή ΜΕ αισθητήρων συμβατών με τη σύγχρονη τεχνολογία μικροηλεκτρονικής. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η χρήση του κασσιτέρου ως ενδιάμεσου στρώματος βελτιώνει σημαντικά τη μηχανική πρόσφυση και τη σταθερότητα της διεπιφάνειας, εξασφαλίζοντας την αποτελεσματική μεταφορά της παραμόρφωσης ακόμη και σε συνθήκες μεταβαλλόμενων πεδίων. Επιπλέον, η ανάλυση της ΜΕ απόκρισης κατέδειξε ότι οι δομές αυτές παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ευαισθησία, η οποία μπορεί να βελτιστοποιηθεί περαιτέρω μέσω του ελέγχου του πάχους των μεταλλικών στρώσεων. Η προσέγγιση αυτή επιβεβαιώνει ότι η συνδεσιμότητα 2-2 παραμένει η πλέον ευέλικτη αρχιτεκτονική για την υλοποίηση πολυλειτουργικών συστημάτων, επιτρέποντας το συνδυασμό υλικών με διαφορετική φυσική προέλευση για την επίτευξη προηγμένων λειτουργικών αποκρίσεων<sup>75</sup>.

Συμπερασματικά, η συνδυαστική θεώρηση των παραπάνω εργασιών αποκαλύπτει ότι η επιτυχία ενός πολυστρωματικού πολυφερροϊκού συνθέτου 2-2 βασίζεται στην ισορροπία μεταξύ της επιλογής των υλικών, της γεωμετρικής βελτιστοποίησης και της διαχείρισης των διεπιφανειακών τάσεων. Η θεωρητική θεμελίωση της υπεροχής των laminates έναντι των κοκκωδών δομών, η ανάγκη για βελτιστοποίηση του πεδίου πόλωσης και η αξιοποίηση των φαινομένων συντονισμού αποτελούν τους βασικούς πυλώνες πάνω στους οποίους στηρίζεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Η κατανόηση αυτών των μηχανισμών επιτρέπει τη δημιουργία υπολογιστικών μοντέλων που μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά των συστημάτων, μετατρέποντας τις πειραματικές παρατηρήσεις σε έναν αξιόπιστο οδηγό σχεδιασμού για τη σύγχρονη τεχνολογία αισθητήρων και ενεργειακών διατάξεων.

## 4.2. Ινοπλισμένα πολυφερροϊκά σύνθετα υλικά τύπου (1-3)

Η ινοπλισμένη αρχιτεκτονική, η οποία στην ταξινόμηση κατά Newnham αντιστοιχεί στη συνδεσιμότητα τύπου 1-3, αποτελεί μια από τις πλέον υποσχόμενες διατάξεις για την ανάπτυξη προηγμένων πολυφερροϊκών συστημάτων. Σε αυτή τη δομή, οι ενεργές ίνες (συνήθως η φερρομαγνητική φάση) διατάσσονται παράλληλα εντός μιας συνεχούς μήτρας (συνήθως η πιεζοηλεκτρική φάση). Όπως επισημαίνουν οι Lin, η συνδεσιμότητα 1-3 προσφέρει ένα μοναδικό πλεονέκτημα έναντι των κοκκωδών σύνθετων 0-3: οι ίνες επιτρέπουν τη μεταφορά των μηχανικών τάσεων κατά μήκος του κύριου άξονά τους με ελάχιστες απώλειες, ενώ η πιεζοηλεκτρική μήτρα μπορεί να παραμορφωθεί πιο ελεύθερα, οδηγώντας σε σημαντικά υψηλότερους μαγνητοηλεκτρικούς συντελεστές.<sup>13</sup>

Η πρώτη και πλέον καθοριστική μελέτη περίπτωσης προέρχεται από την πρόσφατη έρευνα των Lin και Lin (2024, 2025), οι οποίοι πραγματοποίησαν μια συγκριτική μικρομηχανική ανάλυση μεταξύ των διαφορετικών τύπων συνδεσιμότητας (0-3, 1-3, 2-2). Χρησιμοποιώντας τη θεωρία της απλοποιημένης μοναδιαίας κυψελίδας (unit-cell theory) και το μοντέλο Mori-Tanaka, οι ερευνητές απέδειξαν ότι η διάταξη 1-3 υπερέρχει σημαντικά σε εφαρμογές αισθητήρων. Το κεντρικό εύρημα είναι ότι η μαγνητοηλεκτρική σύζευξη στις ινοπλισμένες δομές είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στον προσανατολισμό της φόρτισης και στο κλάσμα όγκου των ινών. Μέσω της διατύπωσης για μη γραμμικά υλικά, έδειξαν ότι οι ίνες Terfenol-D εντός μιας μήτρας PZT εμφανίζουν τη μέγιστη απόκριση όταν ο λόγος διαστάσεων των ινών είναι υψηλός, καθώς αυτό ελαχιστοποιεί τα φαινόμενα αποπολωτικού πεδίου στις άκρες των ινών. Η μελέτη αυτή υπογραμμίζει ότι η προσομοίωση σε COMSOL πρέπει να δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην ακριβή γεωμετρική αναπαράσταση των ινών, καθώς η τοπική κατανομή των τάσεων γύρω από αυτές καθορίζει τη συνολική απόδοση του συστήματος<sup>12,13</sup>.

Η δεύτερη μελέτη εστιάζει στη νανοκλίμακα και την επεξεργασία των ινών, όπως αναλύεται από τον Zhu και τους συνεργάτες του στην εργασία τους για τις φερροηλεκτρικές νανοϊνες και τις εφαρμογές τους στη συλλογή ενέργειας. Οι ερευνητές εξέτασαν πώς η μορφολογία των ινών, που παράγονται μέσω μεθόδων όπως η

ηλεκτροστατική ινοποίηση (electrospinning), επηρεάζει την κρυσταλλική δομή και την πιεζοηλεκτρική απόκριση. Όπως αναφέρει ο Hariharan, η χρήση πιεζοηλεκτρικών περοβσκιτών υψηλής ευαισθησίας σε μορφή ινών επιτρέπει τη δημιουργία εύκαμπτων σύνθετων υλικών με βελτιωμένη μαγνητο-ηλεκτρική σύζευξη. Το σημαντικό συμπέρασμα από την εργασία του Zhu είναι ότι η διεπιφάνεια ίνας-μήτρας σε αυτά τα συστήματα λειτουργεί ως κανάλι μεταφοράς ενέργειας. Η επιφάνεια των νανοϊνών εξασφαλίζει ισχυρή μηχανική πρόσφυση, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει τον κίνδυνο εμφάνισης ρευμάτων διαρροής. Η παρατήρηση αυτή συνδέεται άμεσα με τα ευρήματα του Wang σχετικά με την επίδραση του διαρρέοντος ρεύματος, υποδεικνύοντας ότι ο σχεδιασμός ινοπλισμένων σύνθετων απαιτεί προσεκτική επιλογή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της μήτρας<sup>39,76,77</sup>.

Η τρίτη μελέτη αφορά τον ρόλο των οριακών συνθηκών και της δομικής ενίσχυσης, στοιχεία που αναλύονται στις εργασίες των Cheng και Alarifi και Asmatulu. Η έρευνα του Cheng επικεντρώθηκε στα φαινόμενα συντονισμού σε ινοπλισμένες δομές, δείχνοντας ότι η παρουσία εξωτερικών περιορισμών ή ενισχυτικών στρωμάτων μπορεί να μεταβάλει τη συχνότητα συντονισμού του συστήματος. Όπως εξηγούν οι Alarifi και Asmatulu στην ανάλυσή τους για τα υβριδικά σύνθετα υλικά, η ενσωμάτωση μεταλλικών στοιχείων σε μια ινοπλισμένη δομή εξυπηρετεί διπλό σκοπό: πρώτον, λειτουργούν ως ηλεκτρόδια για την ομοιόμορφη συλλογή του παραγόμενου φορτίου και, δεύτερον, παρέχουν μηχανική σταθερότητα, προστατεύοντας τις εύθραυστες κεραμικές ίνες. Η χρήση του αλουμινίου, ειδικότερα, προσφέρει έναν συνδυασμό χαμηλής πυκνότητας και καλής αγωγιμότητας, καθιστώντας το ιδανικό για «έξυπνα» σύνθετα. Ωστόσο, ο Matthews προειδοποιεί ότι η εισαγωγή μεταλλικών πλακών πιθανόν δημιουργεί πολύπλοκες διεπιφανειακές τάσεις που πρέπει να μοντελοποιηθούν προσεκτικά μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEA), ώστε να αποφευχθεί η αποκόλληση (delamination) υπό κυκλική φόρτιση<sup>41,78,79</sup>.

Η συνδυαστική θεώρηση αυτών των μελετών αποκαλύπτει ότι η επιτυχία ενός ινοπλισμένου πολυμερικού συνθέτου 1-3 βασίζεται στην ισορροπία μεταξύ γεωμετρίας και συννοριακών συνθηκών. Η θεωρητική θεμελίωση των Lin και Lin για τη μη γραμμική

απόκριση των ινών, σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις των Zhu. για τη νανομορφολογία και την ανάλυση των Alarifi και Asmatulu για την υβριδική ενίσχυση, διαμορφώνουν το πλαίσιο για το δικό μας αριθμητικό πείραμα. Στην παρούσα εργασία, η προσομοίωση στο COMSOL Multiphysics στοχεύει να γεφυρώσει αυτά τα πεδία, εξετάζοντας πώς οι πλάκες αλουμινίου επηρεάζουν τη μεταφορά τάσης από τις φερρομαγνητικές ίνες στην πιεζοηλεκτρική μήτρα. Η κατανόηση των μηχανισμών αυτών, όπως περιγράφονται από τους Matthews, είναι απαραίτητη για την ερμηνεία των κατανομών των πεδίων και την ποσοτικοποίηση της μαγνητο-ηλεκτρικής απόκρισης που θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια.<sup>6,12,13,76,78,79</sup>

## **ΜΕΡΟΣ Β: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΟΜΩΝ**

### **5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση δύο διαφορετικών πολυφαινολικών σύνθετων δομών που αποτελούνται από μια φαινολεστική, μια φαινολεκτρική και μια φαινομαγνητική φάση. Για να κατανοήσουμε επαρκώς τα μοντέλα αυτά πρέπει πρώτα να καθοριστεί με σαφήνεια το πρόβλημα που καλούνται να λύσουν. Είναι γνωστό πως στη φύση ενώ παρατηρείται το φαινολεκτρικό φαινόμενο, δεν υπάρχει κάποιο αντίστοιχο φαινόμενο για τον φαινοτισμό. Στην εργασία αυτή προσομοιώθηκαν σύνθετες δομές με σκοπό να δημιουργηθεί μια τεχνητή φαινολεκτρική απόκριση μέσω της μηχανικά υποβοηθούμενης διέγερσης. Συγκεκριμένα ένα εξωτερικό φαινολεστικό περίβλημα από δομικό χάλυβα περικλείει ένα φαινολεκτρικό κι ένα φαινομαγνητικό υλικό. Τα δύο δοκίμια (Α- πολύστρωτο και Β- ισοπλισμένο) είναι φτιαγμένα στις ίδιες διαστάσεις, από τα ίδια υλικά και με ίδιες συνοριακές συνθήκες ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία δημιουργία των μοντέλων, οι ιδιότητες των υλικών, οι συνοριακές συνθήκες και οι παραδοχές που έχουν ληφθεί υπόψη. Σκοπός είναι να υπολογιστεί ο συντελεστής  $\alpha_{ME}$ .

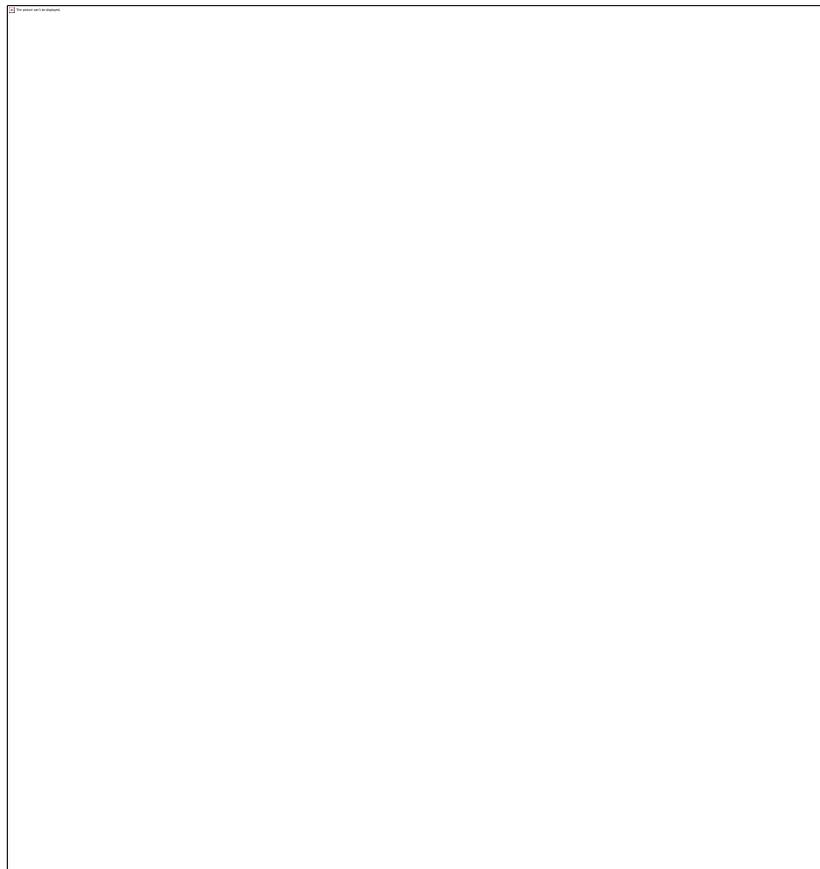
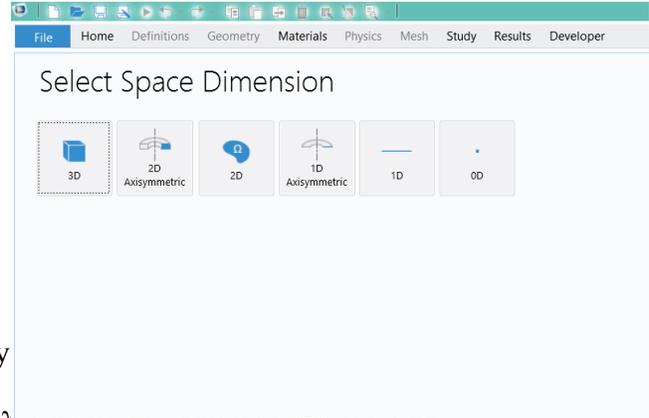
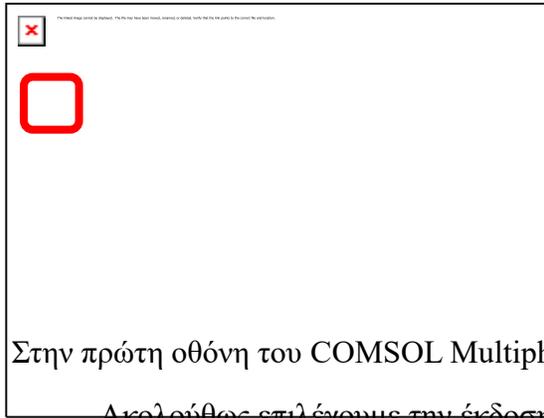
#### **5.1. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις παρούσες προσομοιώσεις**

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται αναλυτικά οι φυσικές ιδιότητες των υλικών και οι οδηγίες μοντελοποίησης που ακολουθήθηκαν στο λογισμικό COMSOL Multiphysics. Η συγκέντρωση των παραμέτρων εισόδου σε έναν ενιαίο πίνακα αποσκοπεί στη διασφάλιση της ακρίβειας και της επαναληψιμότητας της αριθμητικής επίλυσης. Οι τιμές αυτές αποτελούν το θεμέλιο για την υλοποίηση των δύο προσομοιώσεων, επιτρέποντας την ορθή παραμετροποίηση των συζευγμένων πεδίων.

Ιδιότητα	Σύμβολο	Μονάδα	Structural steel	PZT-5H	Nickel
Μέτρο Ελαστικότητας	$E$	$Pa$	$200 \cdot 10^9$	$60 \cdot 10^9$	$200 \cdot 10^9$
Λόγος Poisson	$\nu$	-	0.3	0.3	0.31
Πυκνότητα	$\rho$	$kg/m^3$	7850	7500	8900
Σχετική Διηλεκτρική Σταθερά	$\epsilon_r$	-	1	1700	1
Σχετική Μαγνητική Διαπερατότητα	$\mu_r$	-	1	1	5
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	$\sigma$	$S/m$	$4 \cdot 10^6$	$10^{-10}$	$1.38 \cdot 10^7$
Συντελεστής Πιεζοηλεκτρικής Σύζευξης	$e_{33}$	$C/m^2$	-	15.8	-
Συντελεστής Πιεζομαγνητικής Σύζευξης	$d_{11}$	$m/A$	-	-	$-5 \cdot 10^{-9}$
Μήτρα Ενδοτικότητας (Compliance)	$s_H$	$1/Pa$	-	-	$6 \cdot 10^{-12}$

## 5.2 Δημιουργία Πολύστρωτης δομής

Η πολύστρωτη δομή που δημιουργήθηκε με τη χρήση του προγράμματος COMSOL Multiphysics 6.2 είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας που ακολουθεί στις επόμενες εικόνες.



Στο δέντρο επιλογής Physics, επιλέγουμε τα εξής:

**Structural Mechanics > Solid Mechanics (solid)**

**AC/DC > Electrostatics (es)**

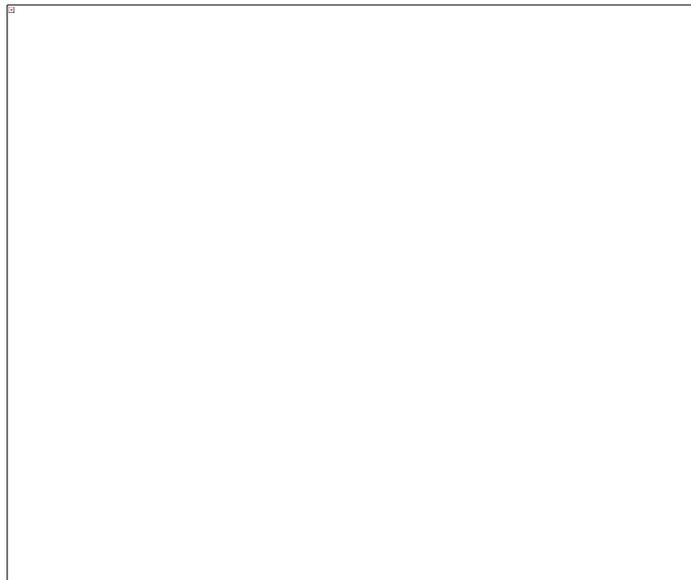
**AC/DC > Magnetic Fields (mf)**

Από την αναζήτηση πρέπει να προστεθούν και οι επιλογές:

**“Piezoelectricity,Solid”** και **“Piezomagnetism”** ώστε να υπάρχουν οι εξισώσεις που περιγράφουν τη σύζευξη.



Όταν αυτές οι επιλογές προστεθούν στον κάτω πίνακα, πρέπει και να επιλεγεί το είδος τη προσομοίωσης (Επιλογή Study).



Στην παρούσα εργασία η μελέτη που επιλέχθηκε για τα δύο αυτά μοντέλα είναι Στατική. (Επιλογή Stationary)

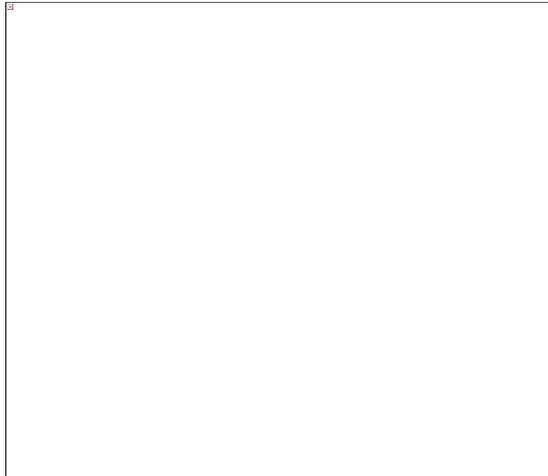
Στην επόμενη οθόνη ορίζεται ως μονάδα μέτρησης του μήκους το “mm”.



Σε αυτό το βήμα ξεκινάει η δημιουργία της γεωμετρίας του δοκιμίου A.



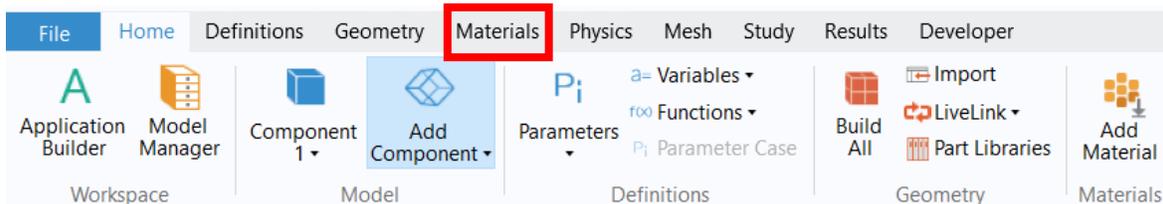
Στην κατηγορία *Geometry* επιλέγουμε το *Block*.



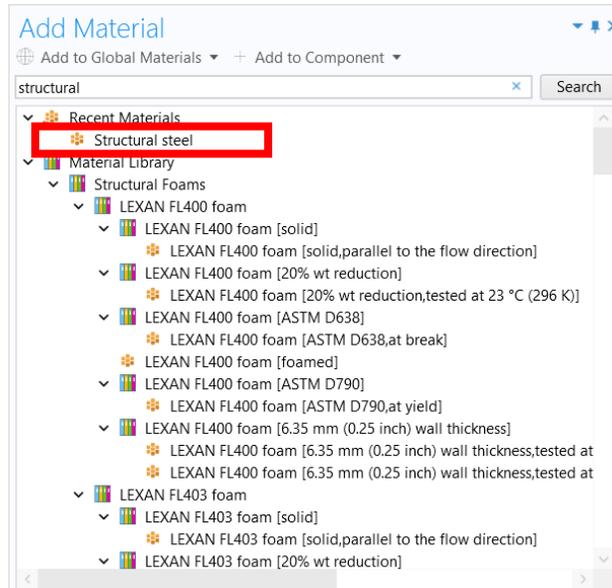
Με αυτές τις παραμέτρους θα δημιουργηθεί το υπόστρωμα του δομικού χάλυβα, με την επιλογή “Build Selected”. Για το φερροηλεκτρικό στρώμα ορίζεται το ύψος (Height: 1.5), ομοίως και για το φερρομαγνητικό. Ο σχηματισμός του πολύστρωτου υλικού καθορίζεται από τι τιμές στην τιμή του  $z$ . Στρώμα 1 (Structural steel):  $z=0$ , Στρώμα 2 (PZT):  $z = 1$ , Στρώμα 3 (Nickel):  $z = 2.5$  και Στρώμα 4 (Structural steel):  $z= 4$ . Τελικά προκύπτει η παρακάτω δομή:



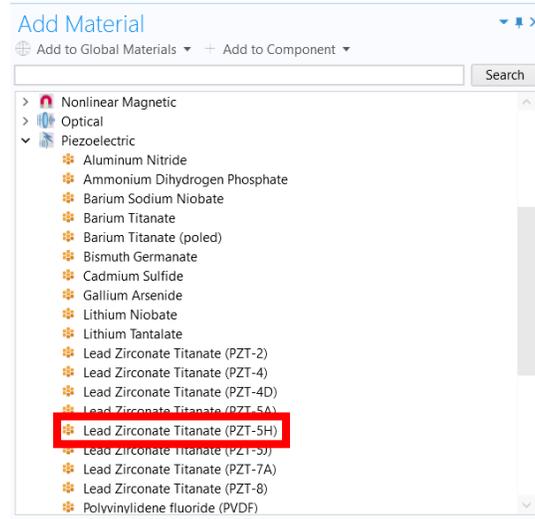
Σε αυτό το σημείο, θα προστεθούν τα τρία βασικά υλικά της προσομοίωσης από την ενσωματωμένη βιβλιοθήκη του COMSOL Multiphysics και θα γίνει αντιστοίχιση με τα επίπεδα της γεωμετρίας. Στην πάνω μπάρα εργαλείων (**Home toolbar**), κάντε κλικ στο εικονίδιο **Add Material** για να ανοίξετε το ομόνυμο παράθυρο.



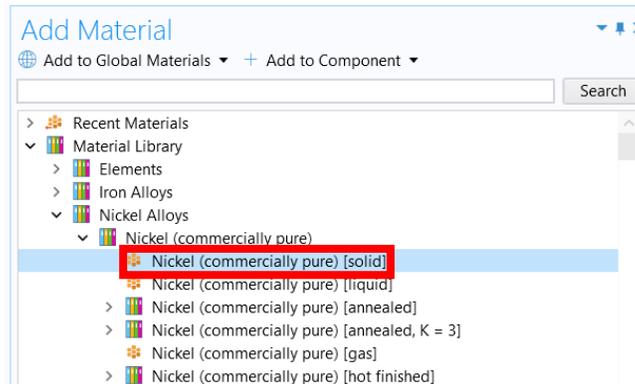
Στο δέντρο επιλογής, πραγματοποιείται μετάβαση στη διαδρομή **Built-in** και επιλέγεται το **Structural steel**.



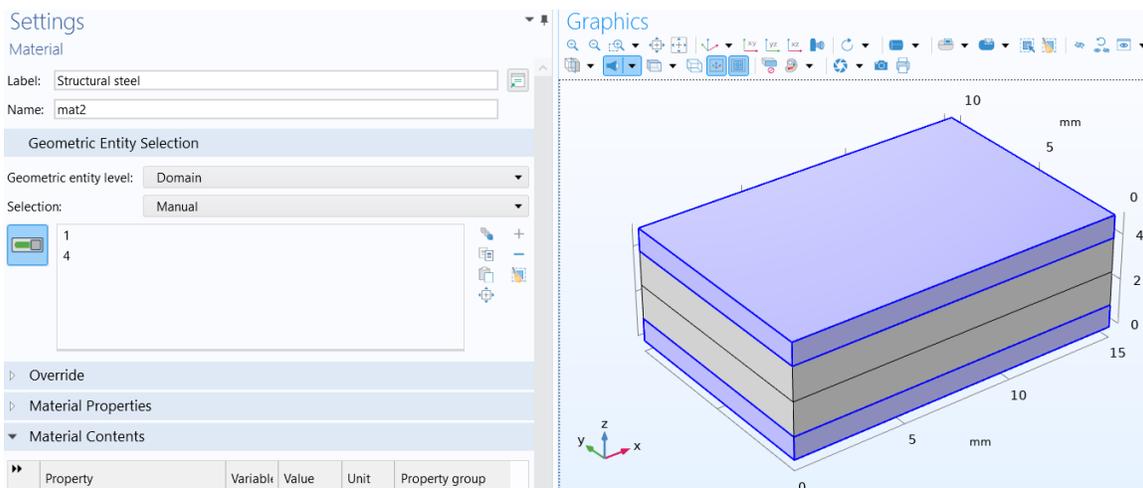
Με δεξί κλικ επιλέγεται το **Add to Component 1 (comp1)**. Στο πεδίο αναζήτησης του παραθύρου, γίνεται αναζήτηση του **PZT-5H**. Επιλέγεται το υλικό από τη διαδρομή **Piezoelectric > Lead Zirconate Titanate (PZT-5H)** και με δεξί κλικ ορίζεται το **Add to Component 1**.



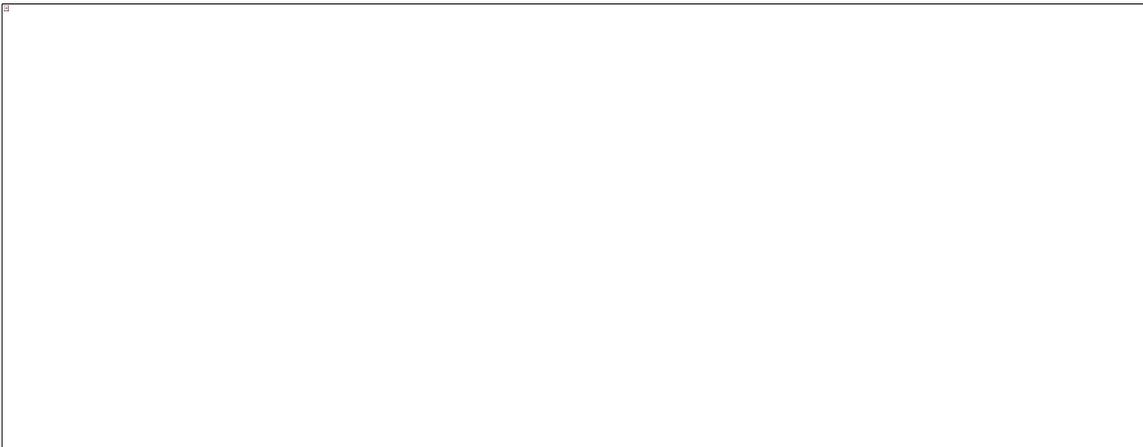
Καθαρίζεται το πεδίο αναζήτησης και γίνεται επιστροφή στο φάκελο **Built-in**. Επιλέγεται το υλικό **Nickel** και με δεξί κλικ ορίζεται το **Add to Component 1**. Γίνεται κλικ στο εικονίδιο **Add Material** για να κλείσει το παράθυρο.



Στο node **Structural steel**, επιλέγονται τα **Domains 1 και 4**.



Στο node **Lead Zirconate Titanate (PZT-5H)**, επιλέγεται το **Domain 2**.

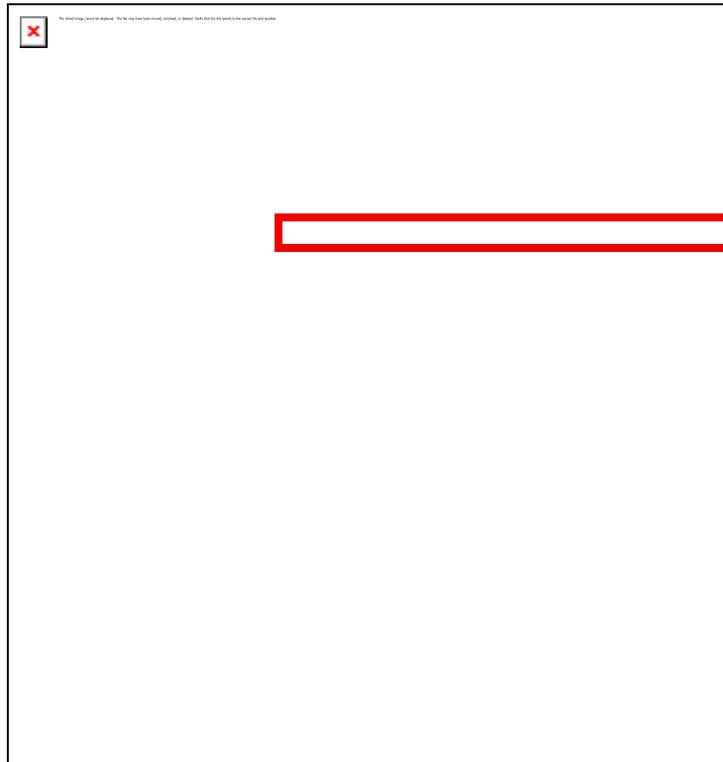


Στο node **Nickel**, επιλέγεται το **Domain 3**.



Πλέον πρέπει να οριστούν οι συνθήκες. Στο COMSOL πρέπει να επιλεγούν ξεχωριστά οι συνθήκες όσον αφορά τα: **Solid Mechanics**, **Electrostatics** και **Magnetic Fields**.

Για να οριστούν οι συνθήκες γίνεται δεξί κλικ στο node των **Solid Mechanics** και επιλέγεται η συνθήκη **Fixed Constraint**.

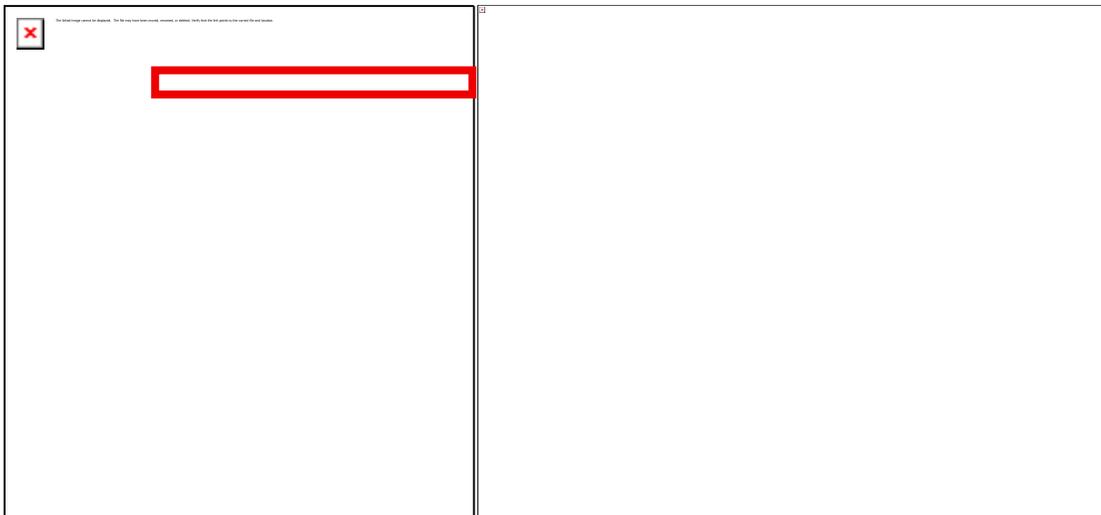


Στον κόμβο **Solid Mechanics** προστίθεται ένα node **Fixed Constraint** και επιλέγεται η πλευρική επιφάνεια στο  $x = 0$ . Με αυτό τον τρόπο η σύνθετη δομή που θα προσομοιωθεί είναι **πακτωμένη** από την μια πλευρά.



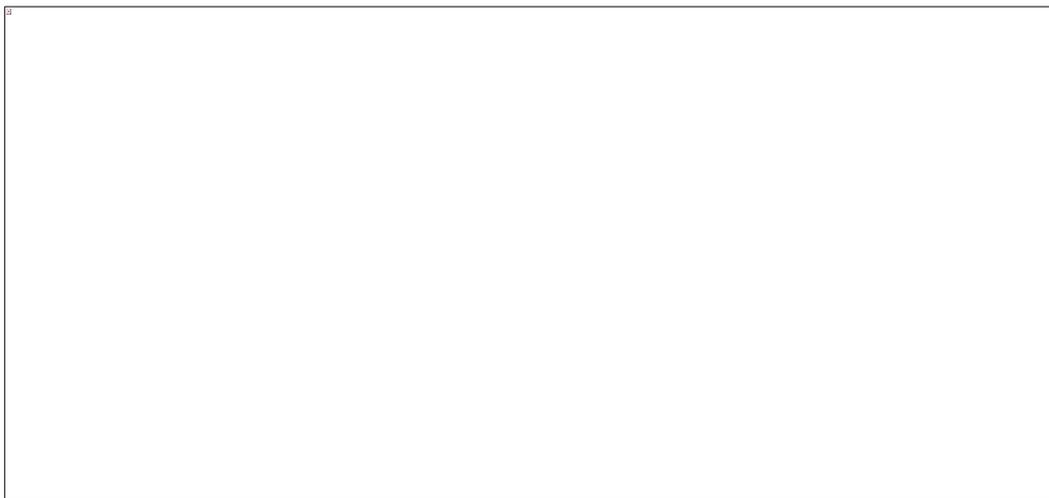
Με τον ίδιο τρόπο προστίθεται ένα node **Boundary Load**, επιλέγεται η πλευρική επιφάνεια στο  $x = 15$  και ορίζεται εφελκυστική τάση  $10 \text{ MPa}$  στην συνιστώσα  $x$ . Έτσι η φόρτιση στην περίπτωση αυτή θα είναι ένας **μονοαξονικός εφελκυσμός** κατά τον άξονα  $x$ .

Όσον αφορά τις συνθήκες για το πιεζοηλεκτρικό μέρος, αυτές ρυθμίζονται από το node **Electrostatics**. Με κλικ στο αντίστοιχο node ανοίγει η λίστα για το Electrostatics και επιλέγουμε με κλικ το στρώμα του PZT, ούτως ώστε οι εξισώσεις επίλυσης να αφορούν μόνο το πιεζοηλεκτρικό στρώμα. Έπειτα με δεξί κλικ στο node επιλέγουμε τη συνθήκη γείωσης (**Ground**), και την εφαρμόζουμε στην διεπιφάνεια μεταξύ του **Structural steel** και του **PZT**.



Προστίθεται ένα node **Charge Conservation** στη λίστα **Electrostatics (es)**. Στο παράθυρο **Settings**, επιλέγονται τα **Domains 1, 3 και 4**. Στην ενότητα **Constitutive Relation**, η σχετική διηλεκτρική σταθερά ( $\epsilon_r$ ) ορίζεται ως **User defined** με τιμή **1**.

Τέλος, πρέπει να ρυθμιστεί το κομμάτι της φερρομαγνητικής φάσης από το node **Μαγνητικά Πεδία (Magnetic Fields)**. Στο node **Ampère's Law, Piezomagnetic 1**, επιλέγεται το **Domain 3**.



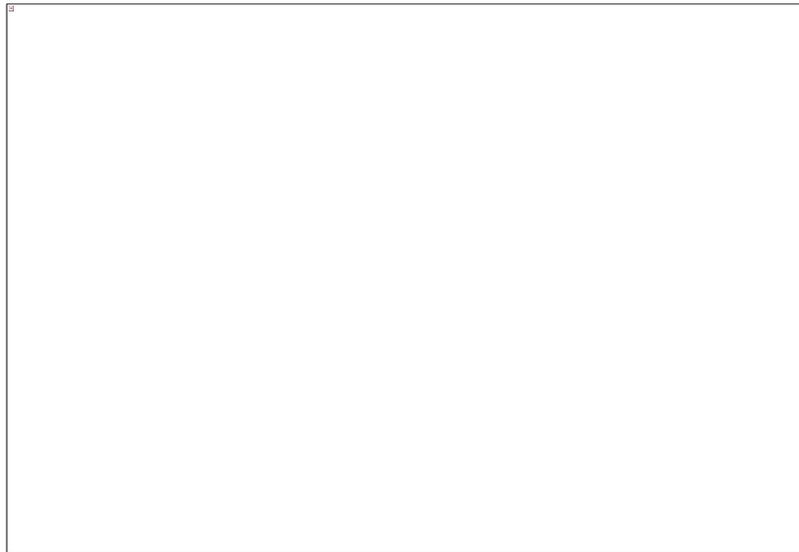
Στην ενότητα **Conduction Current**, η ηλεκτρική αγωγιμότητα ( $\sigma$ ) ορίζεται ως **User defined** με την τιμή  $1.38 \cdot 10^7 \text{S/m}$ .



Τέλος, στο node **Magnetic Insulation 1**, επιβεβαιώνεται ότι η συνθήκη εφαρμόζεται αυτόματα σε όλες τις εξωτερικές επιφάνειες του δοκιμίου.

Εφόσον έχουν οριστεί οι συνθήκες που επικρατούν στις επιμέρους φάσεις του σύνθετου υλικού, πρέπει να ρυθμιστούν και οι συζεύξεις. Ξεκινώντας από τη λίστα Multiphysics, επιλέγουμε το node **Piezoelectricity 1 (pze1)**. Είναι αναγκαίο στο **Domain Selection** να είναι επιλεγμένο μόνο το **Domain 2**. Ακολούθως στο node **Piezomagnetism 1 (pzme1)**, πρέπει στο **Domain Selection** να είναι επιλεγμένο μόνο το **Domain 3**.

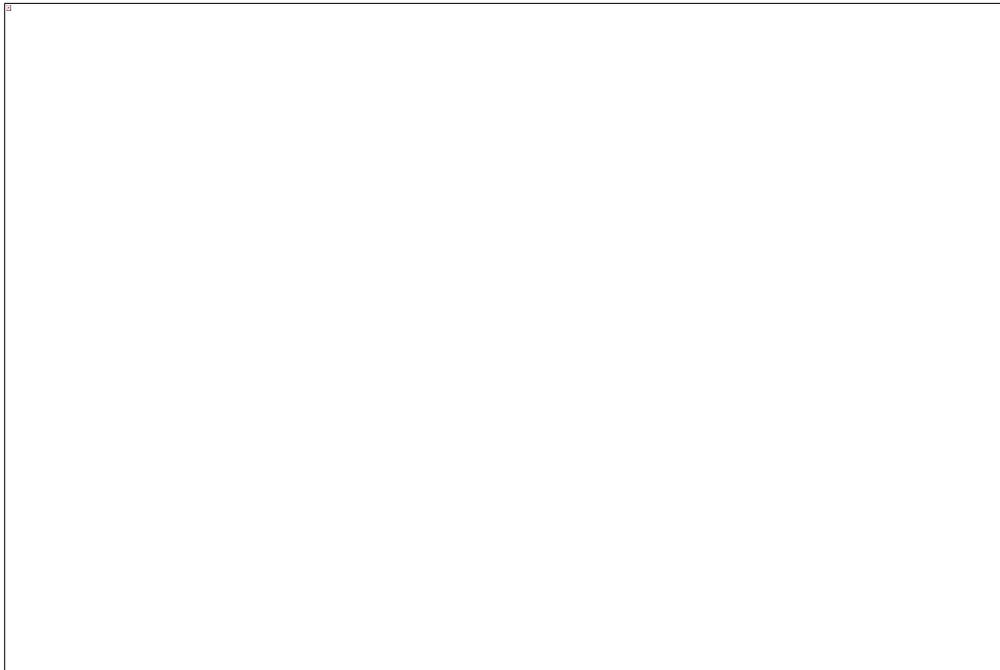
Αφού οι συνθήκες και οι συζεύξεις των φάσεων έχουν ρυθμιστεί, ακολουθεί το στάδιο της διακριτοποίησης του δοκιμίου. Στο node **Mesh 1**, επιλέγεται η ρύθμιση **Physics-controlled mesh**. Στο πεδίο **Element size**, πραγματοποιείται επιλογή της τιμής **Fine**. Πραγματοποιείται κλικ στο κουμπί **Build All** για τη δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.



Το δοκίμιο χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία με τη μορφή τετραέδρων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως κάθε πεπερασμένο στοιχείο μπορεί να περιγράψει τις

ιδιότητες (ελαστικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές κλπ) από μόνο ένα υλικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όλα τα πεπερασμένα στοιχεία να βρίσκονται σε μια μόνο φάση κάθε φορά, γι' αυτό και οι κορυφές των τετραέδρων (κόμβοι) βρίσκονται πάνω στις διεπιφάνειες των φάσεων.

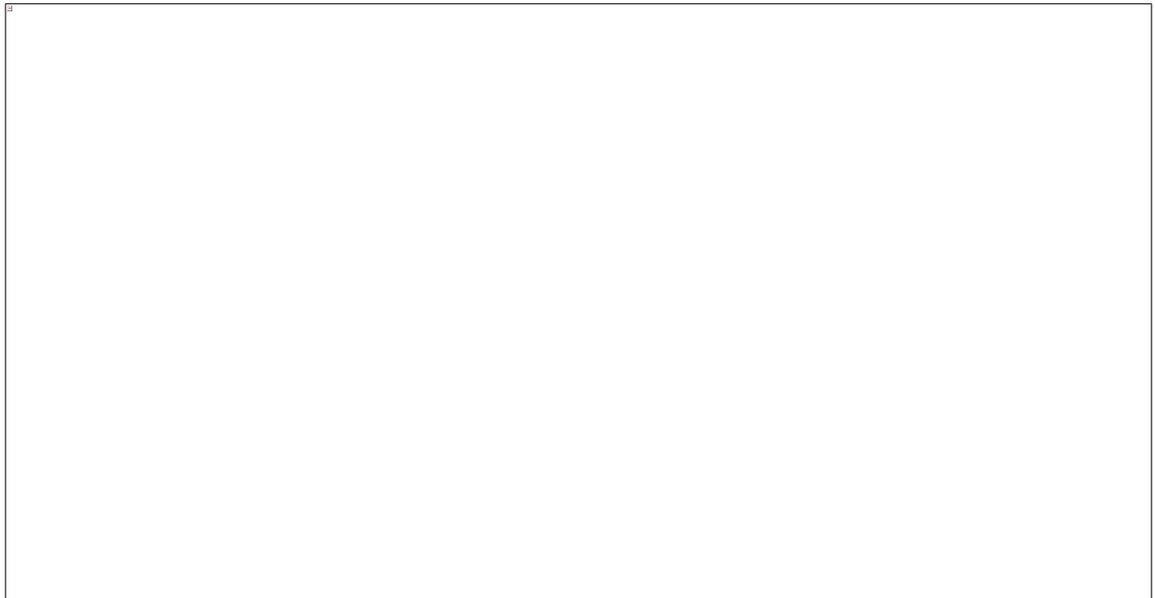
Στο Model Builder, επιλέγεται το **Study 1 > Step 1: Stationary**. Στο παράθυρο **Settings**, εντοπίζεται η ενότητα **Study Settings**. Απενεργοποιείται η επιλογή **Include geometric nonlinearity** για την αποφυγή σφαλμάτων μετακινούμενου πλαισίου. Πραγματοποιείται κλικ στο κουμπί **Compute** στην πάνω μπάρα εργαλείων για την έναρξη της αριθμητικής επίλυσης.



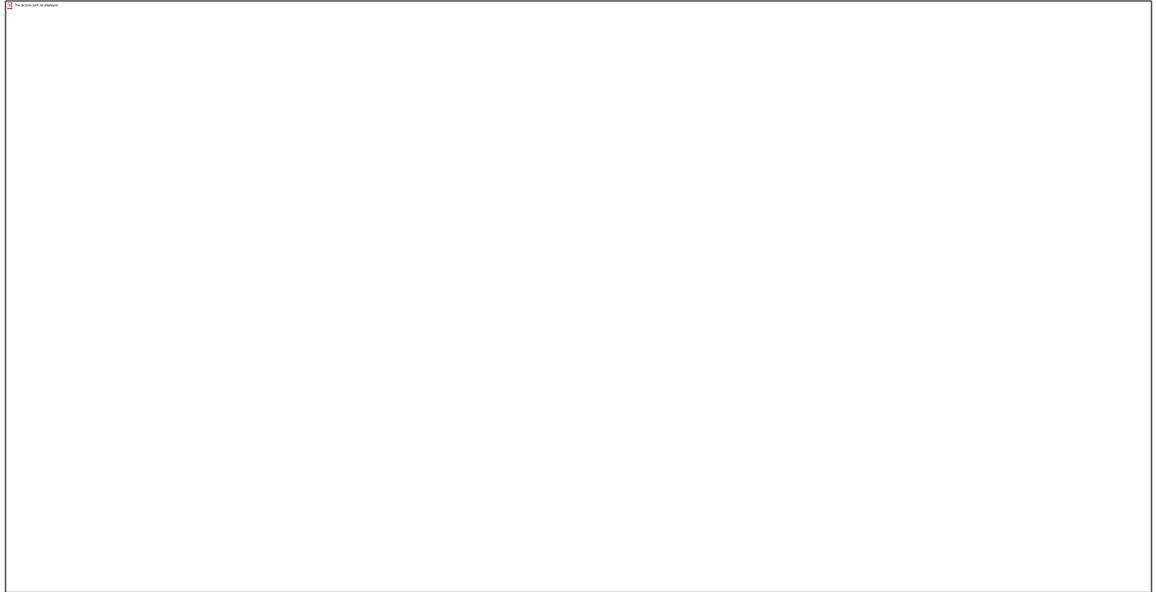
Μετά την ολοκλήρωση της επίλυσης ακολουθεί η συλλογή και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Επιλέγεται το node **Derived Values** με δεξί κλικ και προστίθεται ένα **Average > Volume Average**.



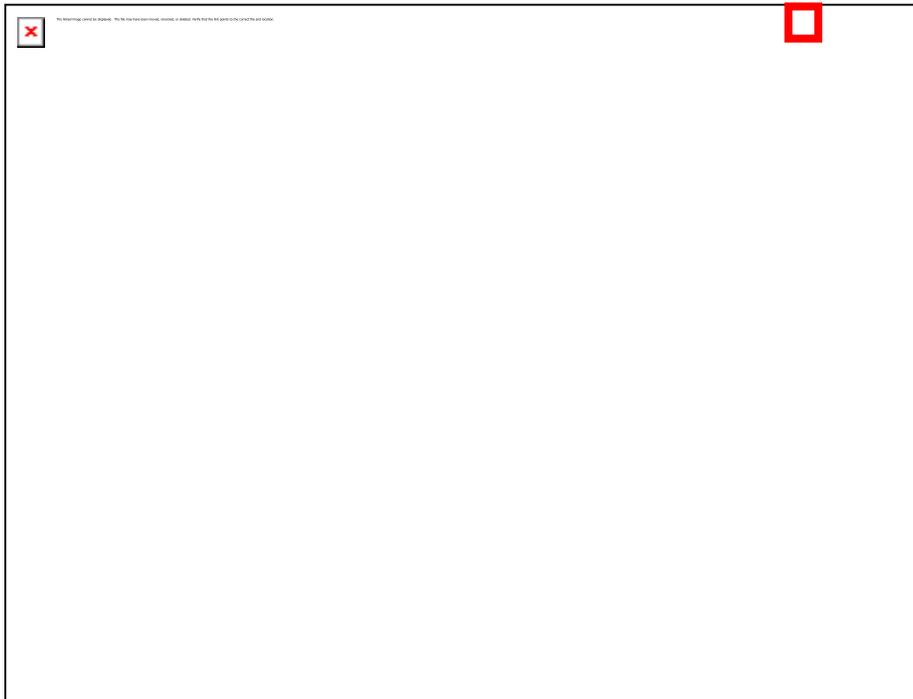
Στο **Selection** επιλέγεται το **Domain 3** και στο πεδίο **Expression** εισάγεται η μεταβλητή **mf.normB**. Πραγματοποιείται κλικ στο εικονίδιο **Evaluate** για τον προσδιορισμό της μέσης μαγνητικής επαγωγής.



Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με νέο **Volume Average** για το **Domain 2**, με expression τη μεταβλητή **V**, για τον υπολογισμό της μέσης ηλεκτρικής τάσης.

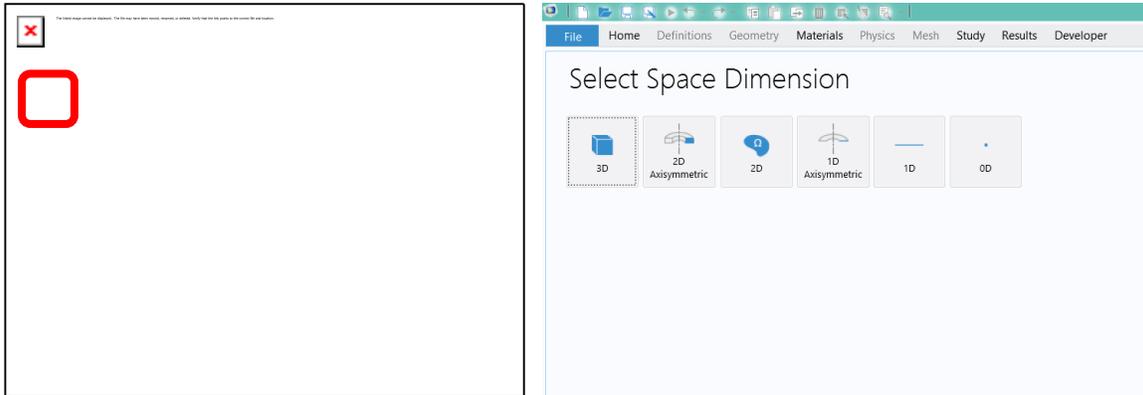


Δημιουργούνται **3D Plot Groups** για την παραγωγή των *screenshot* της τάσης von Mises, του ηλεκτρικού δυναμικού και της μαγνητικής επαγωγής, χρησιμοποιώντας τη λειτουργία **Image Snapshot** για την εξαγωγή τους σε υψηλή ανάλυση.



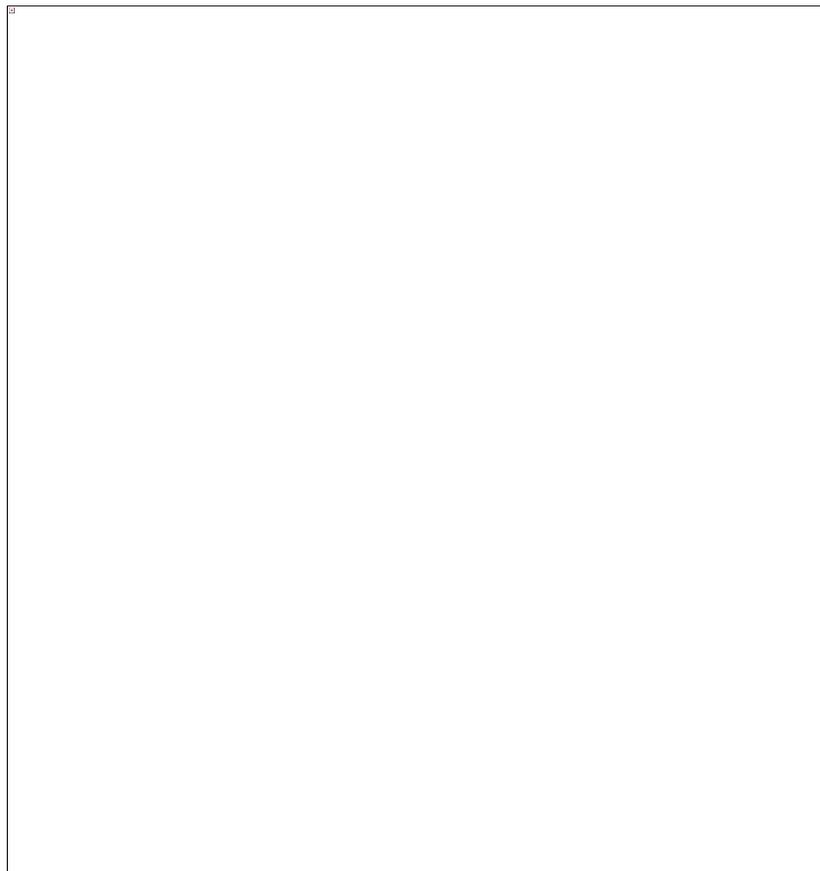
### 5.3 Δημιουργία της ινοπλισμένης δομής

Η πολύστρωτη δομή που δημιουργήθηκε με τη χρήση του προγράμματος COMSOL Multiphysics 6.2 είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας που ακολουθεί στις επόμενες εικόνες.



Στην πρώτη οθόνη του COMSOL Multiphysics 6.2 επιλέγουμε το “Model Wizard”

Ακολούθως επιλέγουμε την έκδοση για τις τρισδιάστατες δομές (3D)



1γ) Στο δέντρο επιλογής Physics, επιλέγουμε τα εξής:

**Structural Mechanics > Solid Mechanics (solid)**

**AC/DC > Electrostatics (es)**

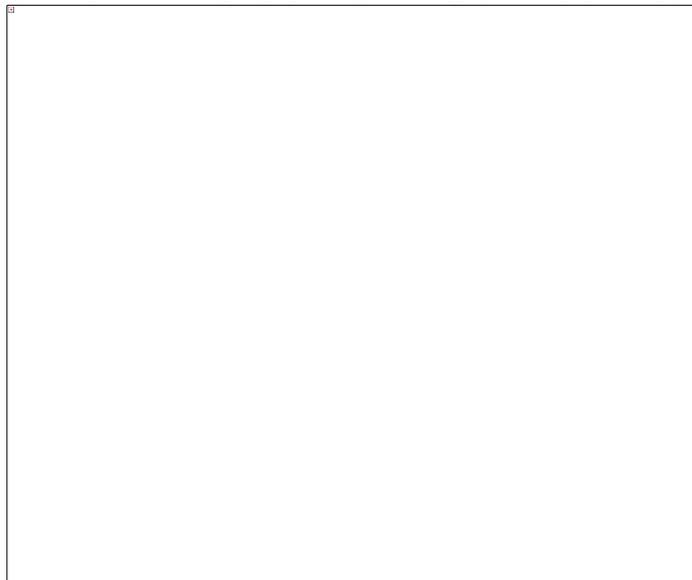
**AC/DC > Magnetic Fields (mf)**

Από την αναζήτηση πρέπει να προστεθούν και οι επιλογές:

**“Piezoelectricity,Solid”** και **“Piezomagnetism”** ώστε να υπάρχουν οι εξισώσεις που περιγράφουν τη σύζευξη.

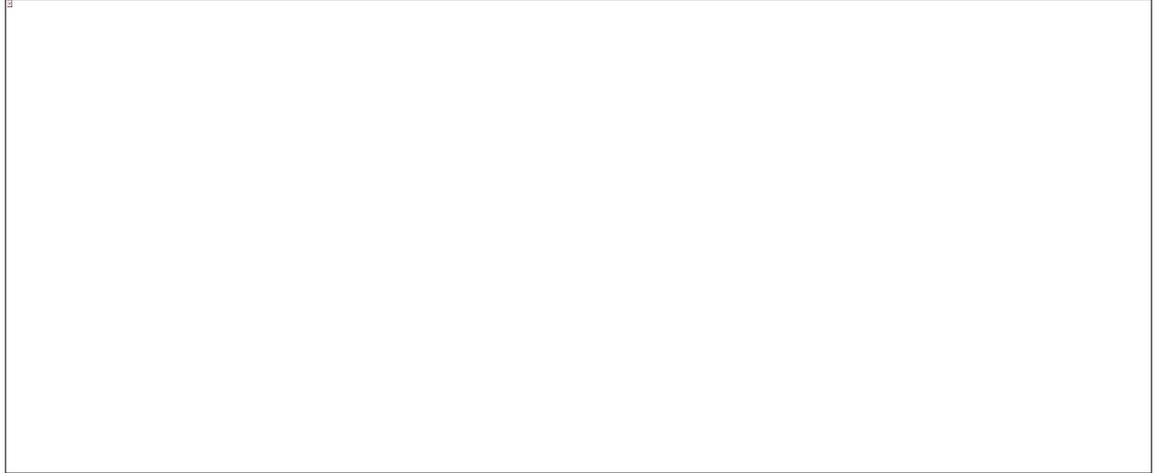


Όταν αυτές οι επιλογές προστεθούν στον κάτω πίνακα, πρέπει και να επιλεγεί το είδος τη προσομοίωσης (Επιλογή Study).

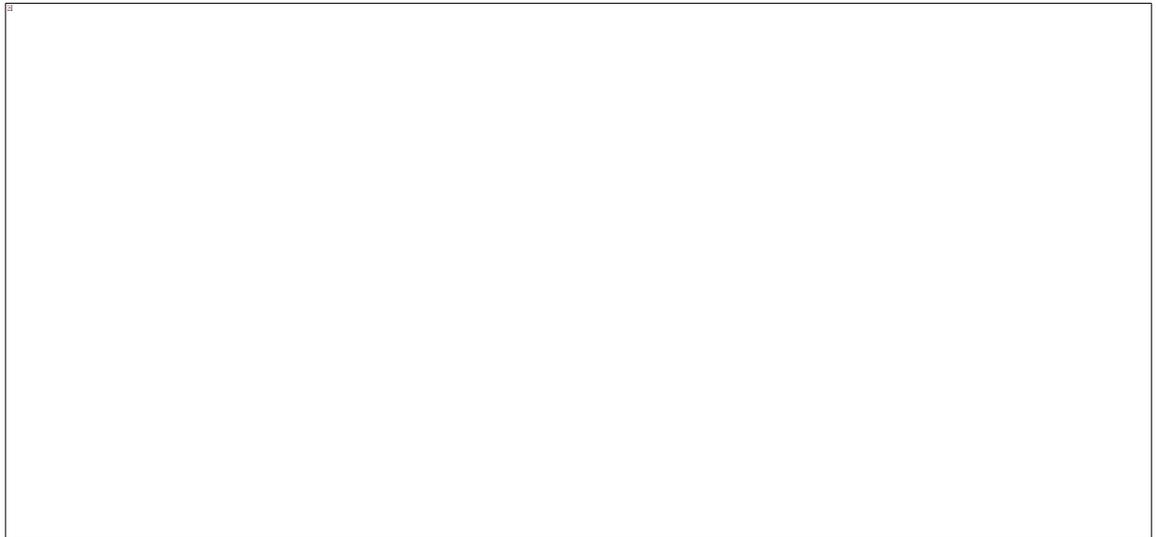


Στην παρούσα εργασία η μελέτη που επιλέχθηκε για τα δύο αυτά μοντέλα είναι Στατική. (Επιλογή Stationary)

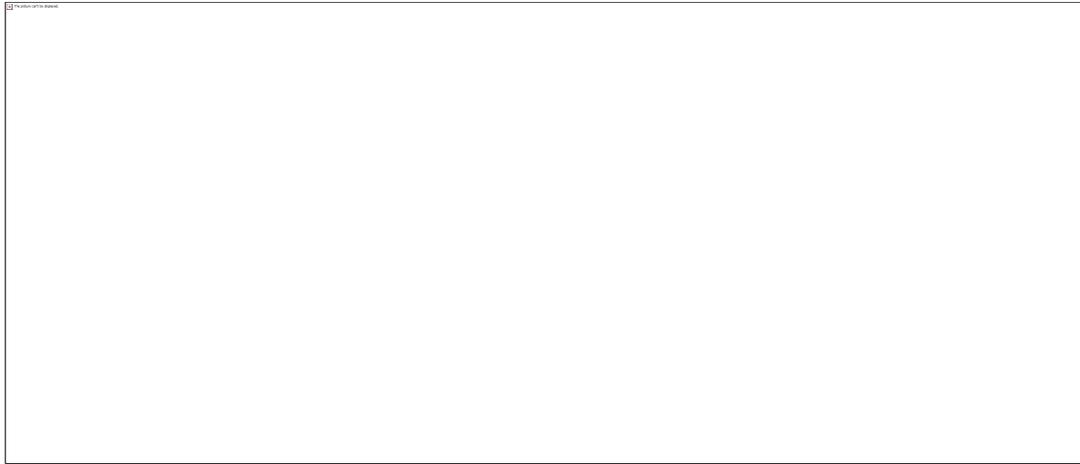
Στο **Model Builder**, κάτω από το **Component 1**, επιλέγεται το node **Geometry 1** και η μονάδα μήκους ορίζεται σε **mm**. Δημιουργείται το **Block 1 (Structural Steel)** με διαστάσεις  $15 \times 10 \times 1$ mm και θέση  $z = 0$ .



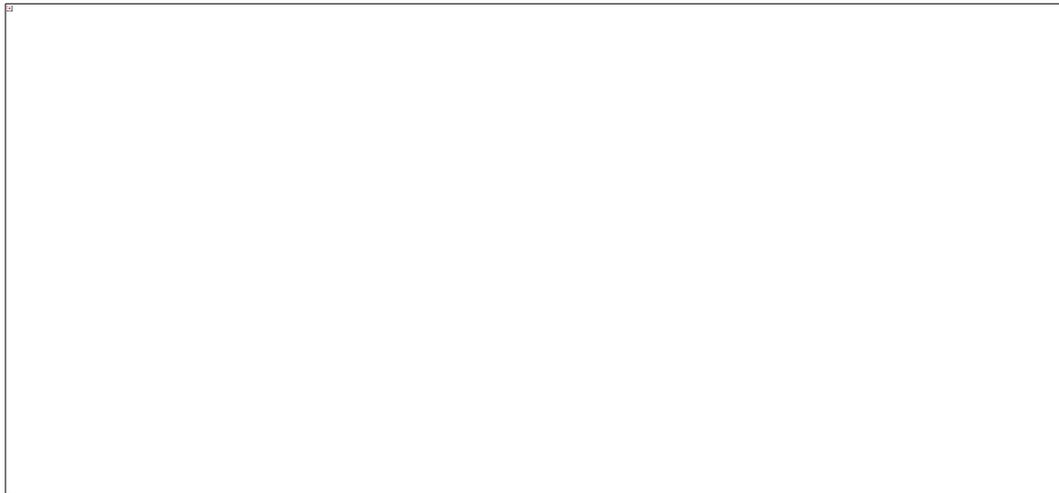
Δημιουργείται το **Block 2 (Μήτρα PZT)** με διαστάσεις  $15 \times 10 \times 2$ mm και θέση  $z = 1$ .



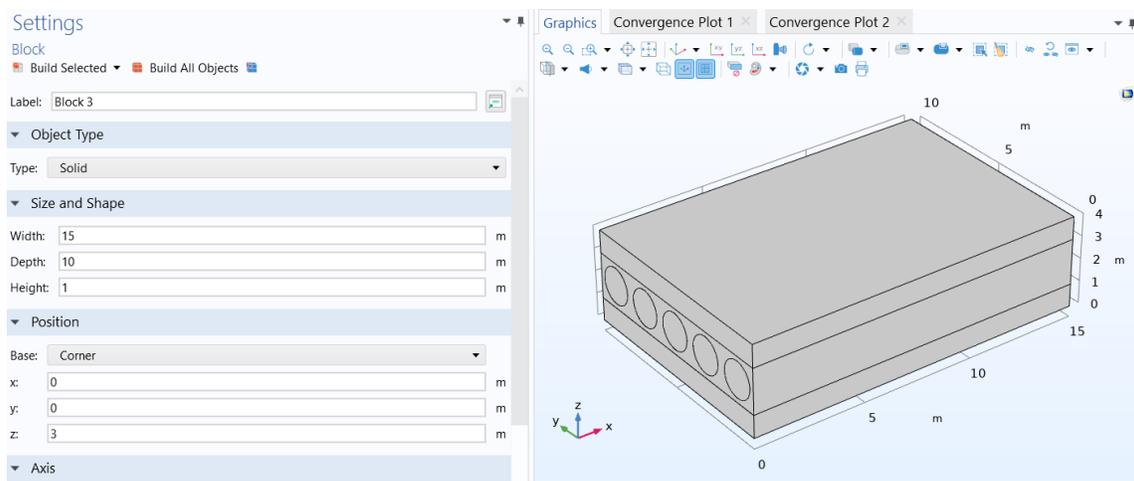
Δημιουργείται ένας κύλινδρος (**Cylinder 1**) με **Axis type: x-axis**, ακτίνα **0.8 mm**, μήκος **15 mm** και θέση  $x = 0, y = 1, z = 2$ . 5



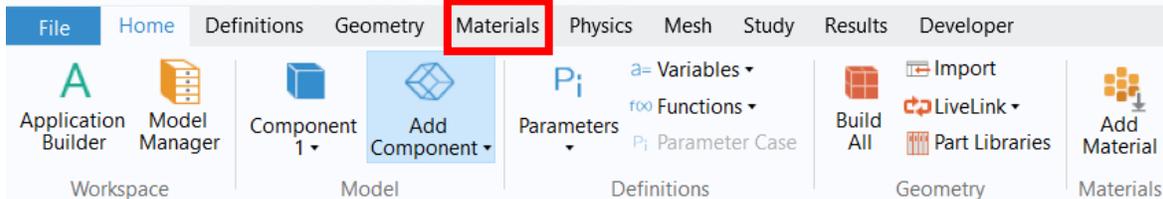
Με δεξί κλικ στο **Geometry 1 > Transforms**, επιλέγεται το **Array**. Επιλέγεται ο κύλινδρος και ορίζεται μέγεθος **5** στον άξονα  $y$  με μετατόπιση (**Displacement**) **2 mm**.



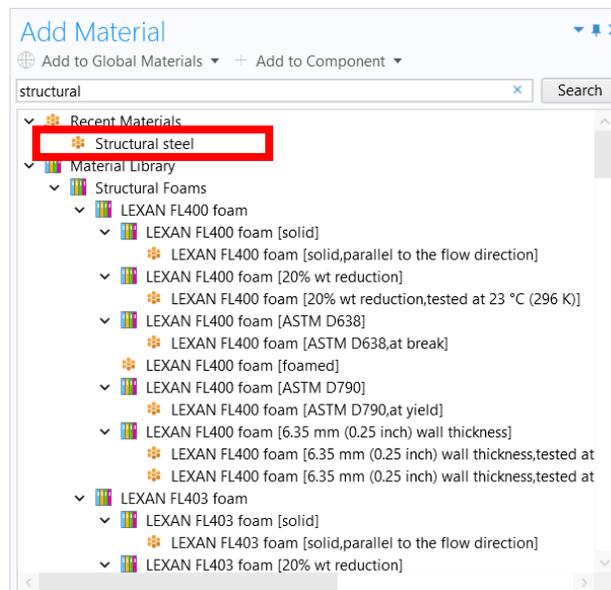
Δημιουργείται το **Block 3 (Structural Steel)** με διαστάσεις  $15 \times 10 \times 1$ mm και θέση  $z = 3$ .



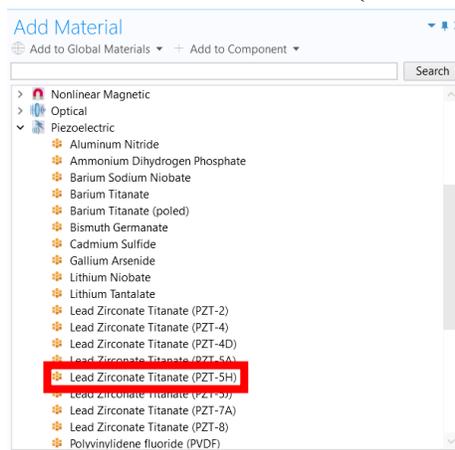
Σε αυτό το σημείο, θα προστεθούν τα τρία βασικά υλικά της προσομοίωσης από την ενσωματωμένη βιβλιοθήκη του COMSOL Multiphysics και θα γίνει αντιστοίχιση με τα επίπεδα της γεωμετρίας. Στην πάνω μπάρα εργαλείων (**Home toolbar**), κάντε κλικ στο εικονίδιο **Add Material** για να ανοίξετε το ομώνυμο παράθυρο.



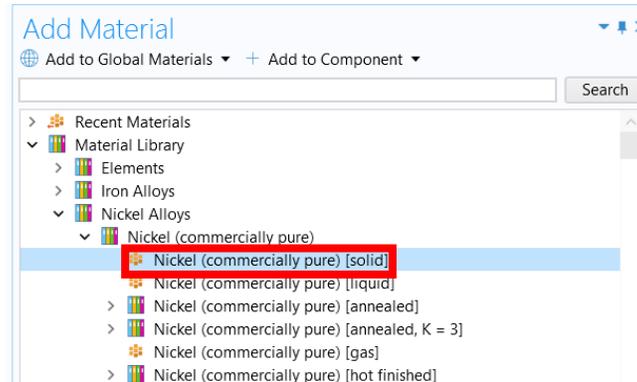
Στο δέντρο επιλογής, πραγματοποιείται μετάβαση στη διαδρομή **Built-in** και επιλέγεται το **Structural steel**.



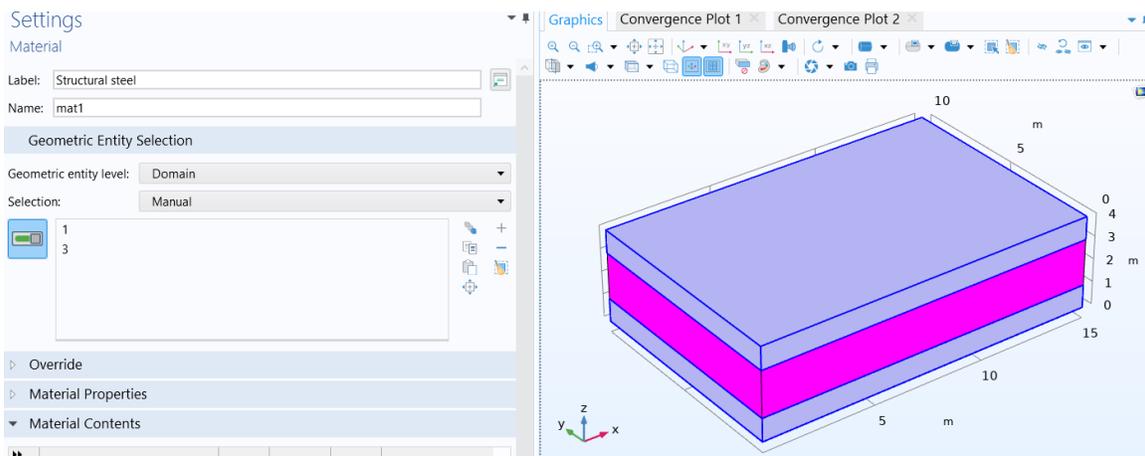
Με δεξί κλικ επιλέγεται το **Add to Component 1 (comp1)**. Στο πεδίο αναζήτησης του παραθύρου, γίνεται αναζήτηση του **PZT-5H**. Επιλέγεται το υλικό από τη διαδρομή **Piezoelectric > Lead Zirconate Titanate (PZT-5H)** και με δεξί κλικ ορίζεται το **Add to Component 1**.



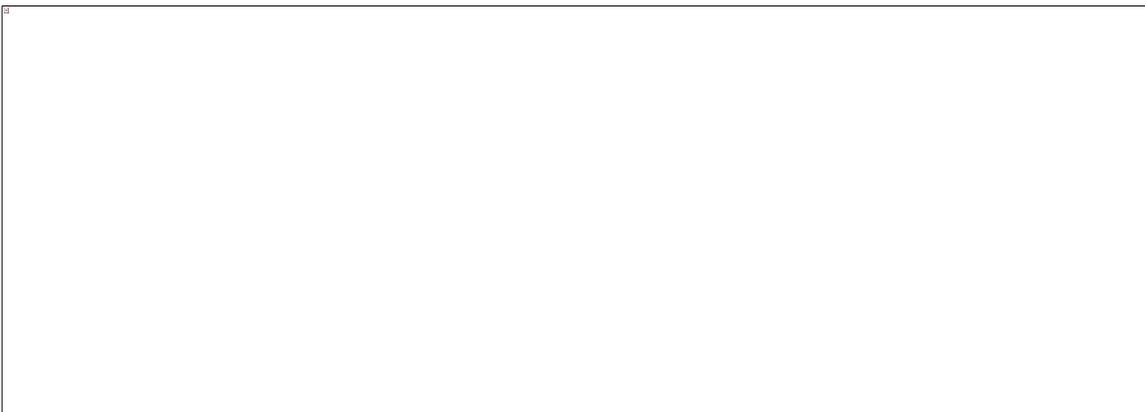
Καθαρίζεται το πεδίο αναζήτησης και γίνεται επιστροφή στο φάκελο **Built-in**. Επιλέγεται το υλικό Nickel και με δεξί κλικ ορίζεται το **Add to Component 1**. Γίνεται κλικ στο εικονίδιο **Add Material** για να κλείσει το παράθυρο.



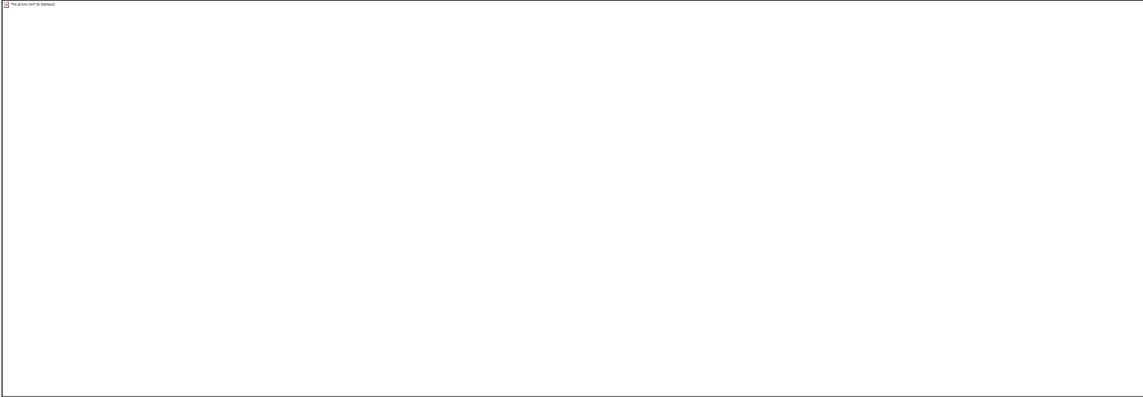
Στο node **Structural steel**, επιλέγονται τα εξωτερικά **Domains 1 και 3**.



Στο node **Lead Zirconate Titanate (PZT-5H)**, επιλέγεται το **Domain 2** (μήτρα).

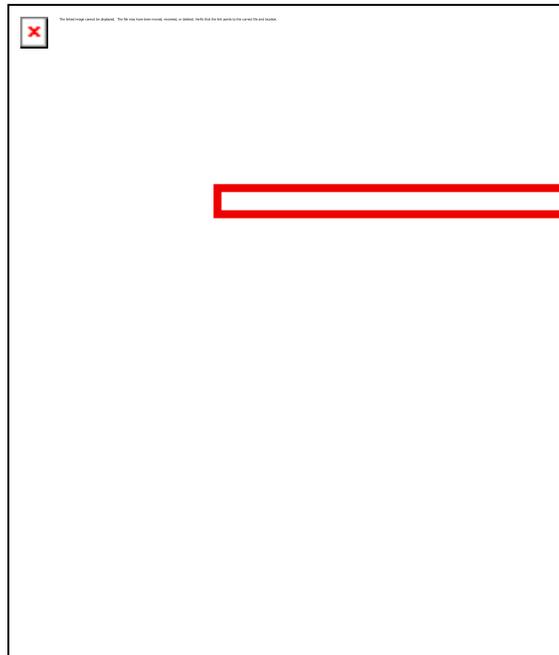


Στο node **Nickel**, επιλέγονται τα **Domains 4 έως 8** (οι 5 ίνες).

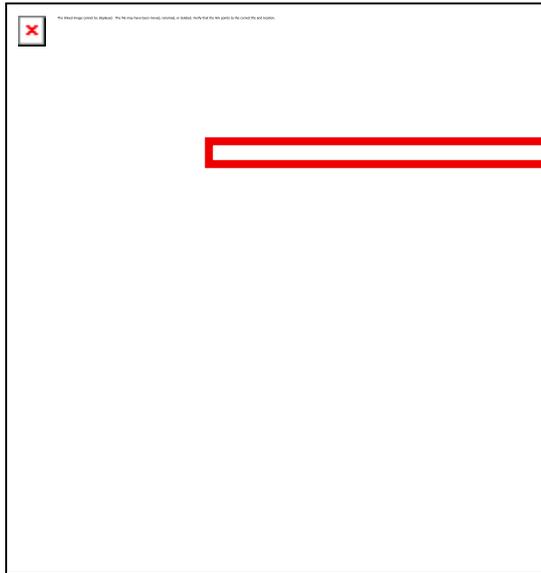


Πλέον πρέπει να οριστούν οι συνθήκες. Στο COMSOL πρέπει να επιλεγούν ξεχωριστά οι συνθήκες όσον αφορά τα: **Solid Mechanics**, **Electrostatics** και **Magnetic Fields**.

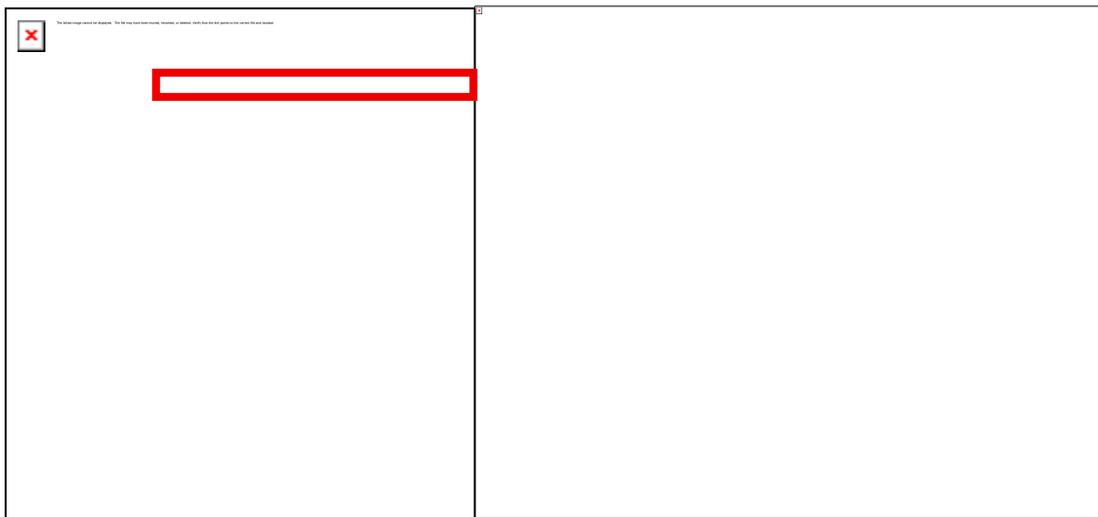
Για να οριστούν οι συνθήκες γίνεται δεξί κλικ στο node των **Solid Mechanics** και επιλέγεται η συνθήκη **Fixed Constraint**.



Στον κόμβο **Solid Mechanics** προστίθεται ένα node **Fixed Constraint** και επιλέγεται η πλευρική επιφάνεια στο  $x = 0$ . Με αυτό τον τρόπο η σύνθετη δομή που θα προσομοιωθεί είναι **πακτωμένη** από την μια πλευρά.

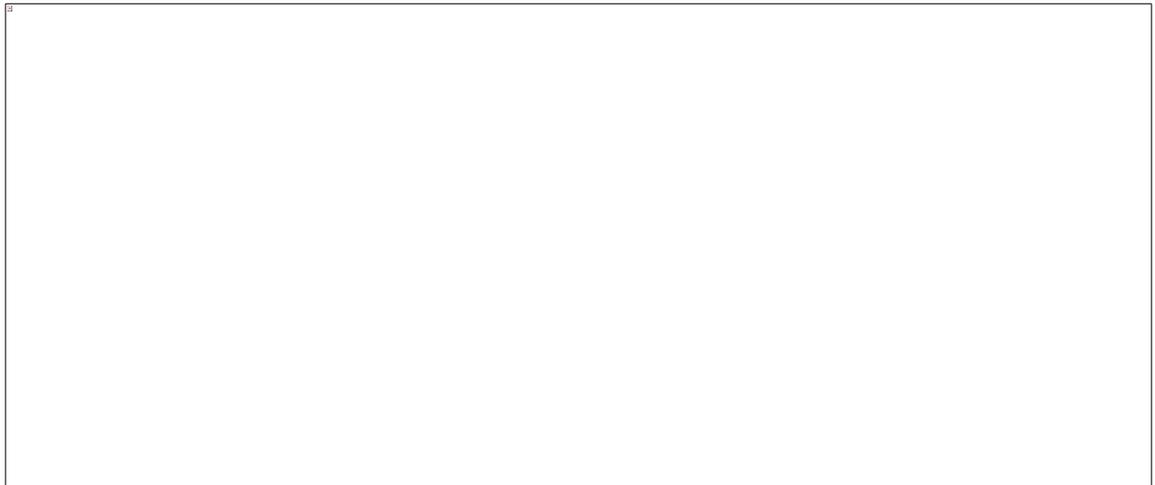


Με τον ίδιο τρόπο προστίθεται ένα node **Boundary Load**, επιλέγεται η πλευρική επιφάνεια στο  $x = 15$  και ορίζεται εφελκυστική τάση  $10 \text{ MPa}$  στην συνιστώσα  $x$ . Έτσι η φόρτιση στην περίπτωση αυτή θα είναι ένας **μονοαξονικός εφελκυσμός** κατά τον άξονα  $x$ . Όσον αφορά τις συνθήκες για το πιεζοηλεκτρικό μέρος, αυτές ρυθμίζονται από το node **Electrostatics**. Με κλικ στο αντίστοιχο node ανοίγει η λίστα για το Electrostatics και επιλέγουμε με κλικ το στρώμα του PZT, ούτως ώστε οι εξισώσεις επίλυσης να αφορούν μόνο το πιεζοηλεκτρικό στρώμα. Έπειτα με δεξί κλικ στο node επιλέγουμε τη συνθήκη γείωσης (**Ground**), και την εφαρμόζουμε στην διεπιφάνεια μεταξύ του **Structural steel** και του **PZT**.



Προστίθεται ένα node **Charge Conservation** στη λίστα **Electrostatics (es)**. Στο παράθυρο **Settings**, επιλέγονται όλα τα **Domains** πλην του **2**. Στην ενότητα **Constitutive Relation**, η σχετική διηλεκτρική σταθερά ( $\epsilon_r$ ) ορίζεται ως **User defined** με τιμή **1**.

Τέλος, πρέπει να ρυθμιστεί το κομμάτι της φερρομαγνητικής φάσης από το node **Μαγνητικά Πεδία (Magnetic Fields)**. Στο node **Ampère's Law, Piezomagnetic 1**, επιλέγονται οι ίνες (Domains 4-8).



Στην ενότητα **Conduction Current**, η ηλεκτρική αγωγιμότητα ( $\sigma$ ) ορίζεται ως **User defined** με την τιμή  $1.38 \cdot 10^7 \text{S/m}$ .

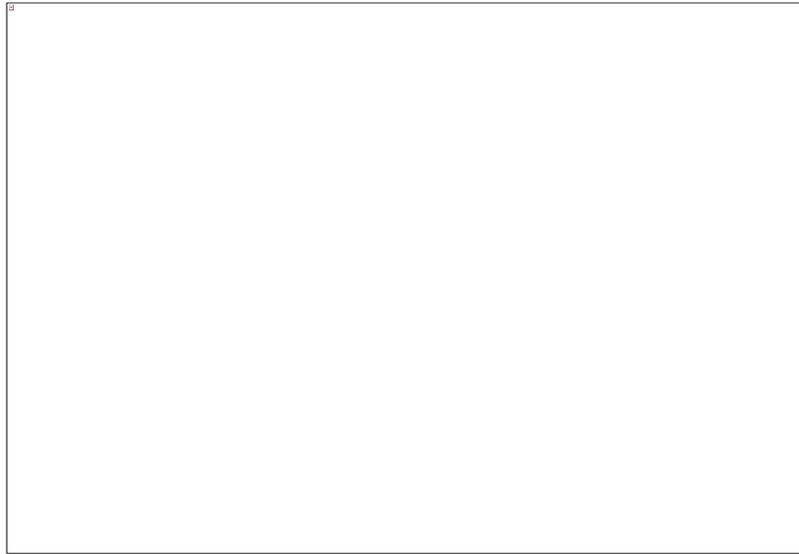


Τέλος, στο node **Magnetic Insulation 1**, επιβεβαιώνεται ότι η συνθήκη εφαρμόζεται αυτόματα σε όλες τις εξωτερικές επιφάνειες του δοκιμίου.

Εφόσον έχουν οριστεί οι συνθήκες που επικρατούν στις επιμέρους φάσεις του σύνθετου υλικού, πρέπει να ρυθμιστούν και οι συζεύξεις. Ξεκινώντας από τη λίστα **Multiphysics**, επιλέγουμε το node **Piezoelectricity 1 (pze1)**. Είναι αναγκαίο στο **Domain Selection** να είναι επιλεγμένο μόνο το **Domain 2**. Ακολούθως στο node

**Piezomagnetism 1 (pzme1)**, πρέπει στο **Domain Selection** να είναι επιλεγμένες μόνο οι ίνες (**Domain 4-8**).

Αφού οι συνθήκες και οι συζεύξεις των φάσεων έχουν ρυθμιστεί, ακολουθεί το στάδιο της διακριτοποίησης του δοκιμίου. Στο node **Mesh 1**, επιλέγεται η ρύθμιση **Physics-controlled mesh**. Στο πεδίο **Element size**, πραγματοποιείται επιλογή της τιμής **Fine**. Πραγματοποιείται κλικ στο κουμπί **Build All** για τη δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.

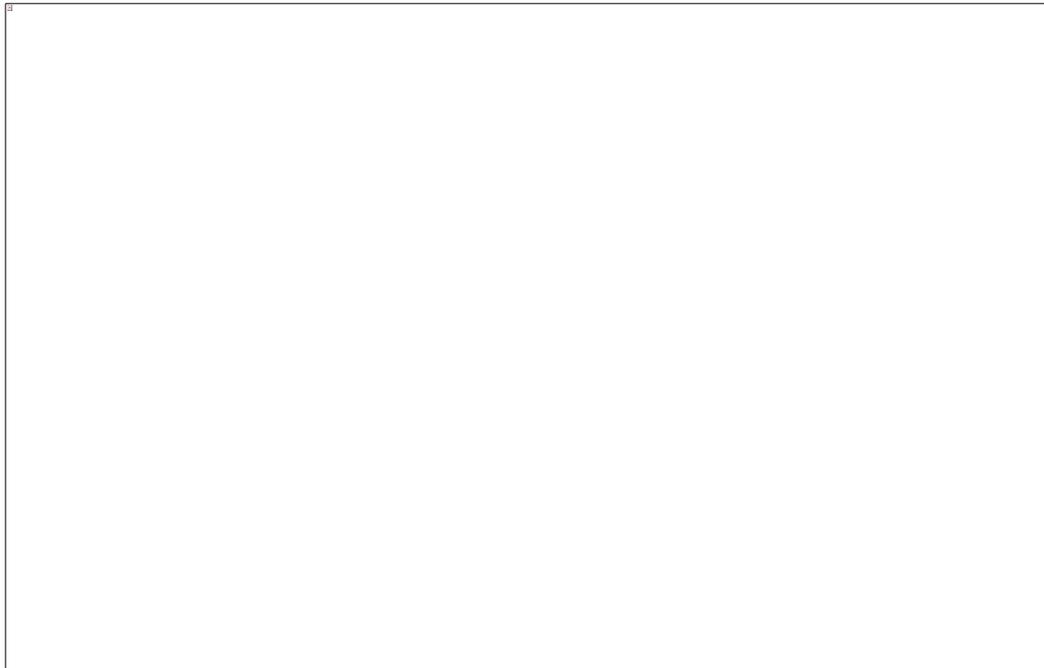


Το δοκίμιο χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία με τη μορφή τετραέδρων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως κάθε πεπερασμένο στοιχείο μπορεί να περιγράψει τις ιδιότητες (ελαστικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές κλπ) από μόνο ένα υλικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όλα τα πεπερασμένα στοιχεία να βρίσκονται σε μια μόνο φάση κάθε φορά, γι' αυτό και οι κορυφές των τετραέδρων (κόμβοι) βρίσκονται πάνω στις διεπιφάνειες των φάσεων.

Στο Model Builder, επιλέγεται το **Study 1 > Step 1: Stationary**. Στο παράθυρο **Settings**, εντοπίζεται η ενότητα **Study Settings**. Απενεργοποιείται η επιλογή **Include geometric nonlinearity** για την αποφυγή σφαλμάτων μετακινούμενου πλαισίου. Πραγματοποιείται κλικ στο κουμπί **Compute** στην πάνω μπάρα εργαλείων για την έναρξη της αριθμητικής επίλυσης.



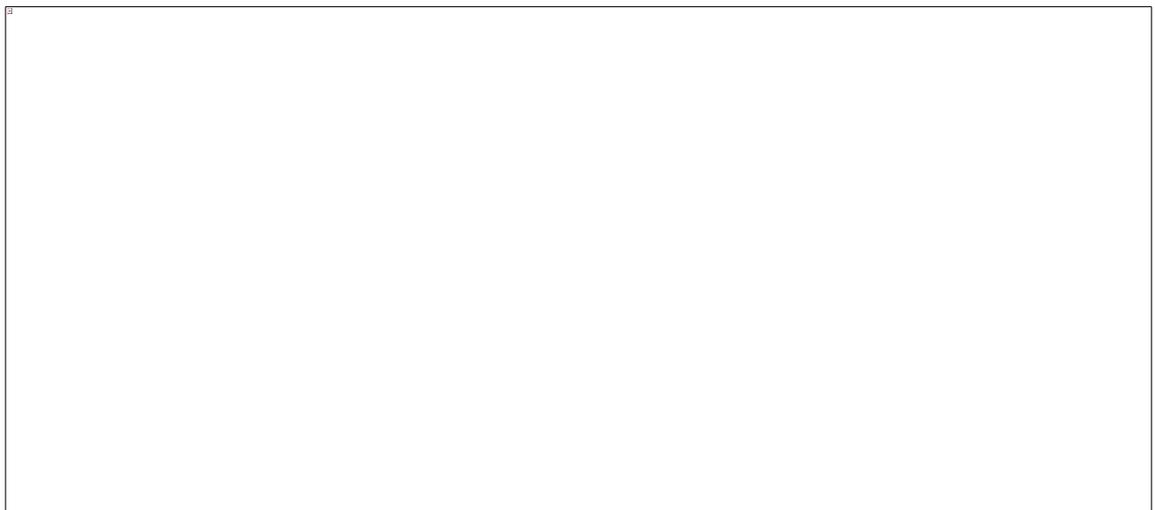
Μετά την ολοκλήρωση της επίλυσης ακολουθεί η συλλογή και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Επιλέγεται το node **Derived Values** με δεξί κλικ και προστίθεται ένα **Average > Volume Average**.



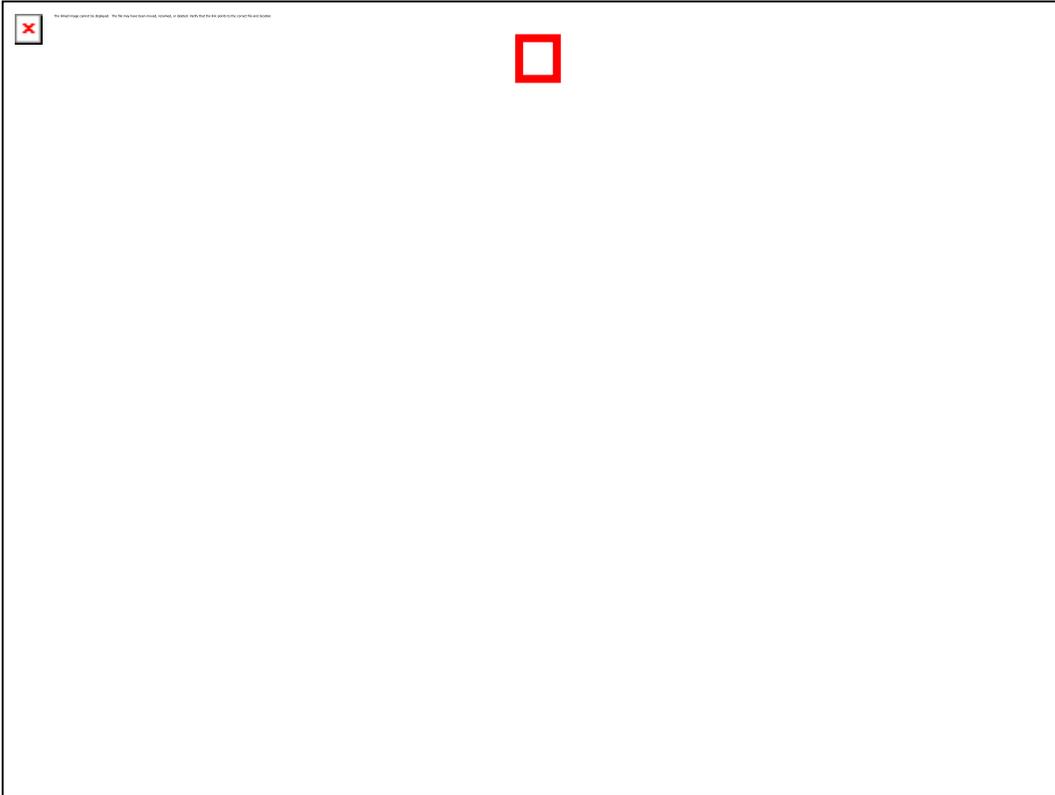
Στο **Selection** επιλέγονται τα **Domains 4-8** και στο πεδίο **Expression** εισάγεται η μεταβλητή **mf.normB**. Πραγματοποιείται κλικ στο εικονίδιο **Evaluate** για τον προσδιορισμό της μέσης μαγνητικής επαγωγής.



Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με νέο **Volume Average** για το **Domain 2**, με expression τη μεταβλητή **V**, για τον υπολογισμό της μέσης ηλεκτρικής τάσης.



Δημιουργούνται **3D Plot Groups** για την παραγωγή των *screenshots* της τάσης von Mises, του ηλεκτρικού δυναμικού και της μαγνητικής επαγωγής, χρησιμοποιώντας τη λειτουργία **Image Snapshot** για την εξαγωγή τους σε υψηλή ανάλυση.



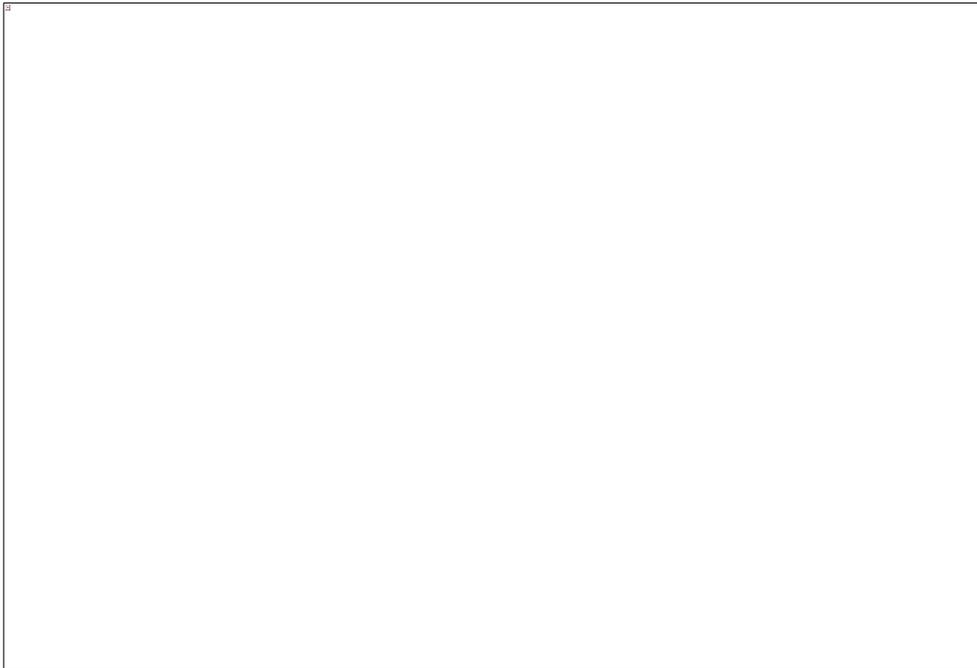
## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η αριθμητική ανάλυση και η σύγκριση των δύο διαφορετικών δομών, με στόχο τη διερεύνηση της μαγνητοηλεκτρικής σύζευξης μέσω μηχανικής διαμεσολάβησης (strain – mediated coupling). Η μελέτη εστιάζει στην τεχνητή δημιουργία ενός φαινομένου ανάλογου του "πιεζο-μαγνητισμού", το οποίο δεν απαντάται σε φυσικά μονοφασικά υλικά.

Η φυσική αλυσίδα του φαινομένου ξεκινά με την εφαρμογή εξωτερικής μηχανικής τάσης, η οποία προκαλεί την ηλεκτρική πόλωση του πιεζοηλεκτρικού στρώματος (PZT – 5H). Το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο, μέσω της μηχανικής σύζευξης στις διεπιφάνειες, διεγείρει το φερρομαγνητικό υλικό (Nickel), οδηγώντας τελικά στην παραγωγή μαγνητικού πεδίου.

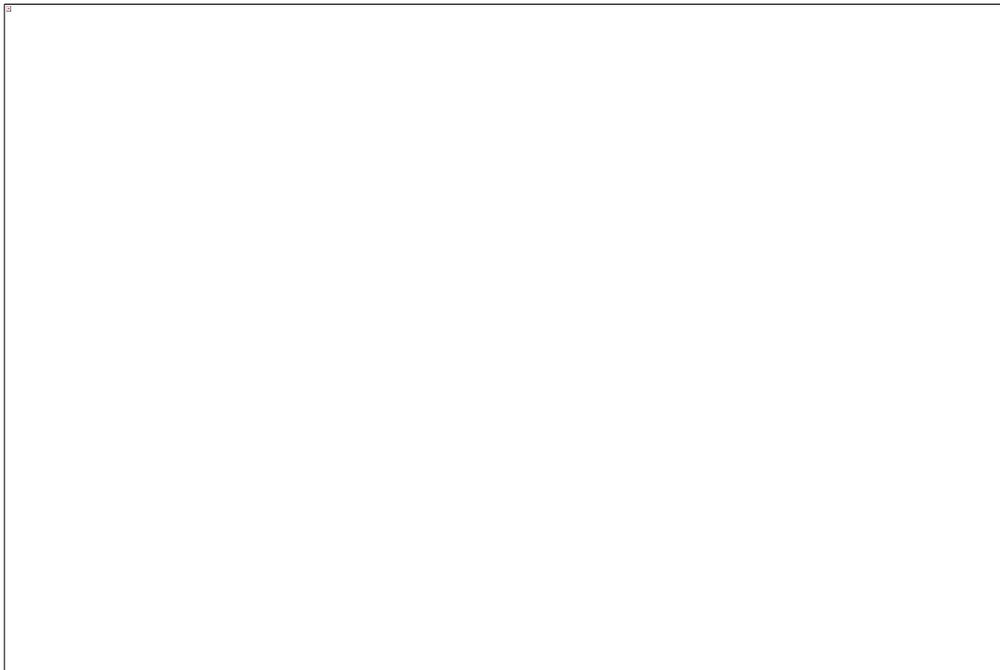
Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό COMSOL Multiphysics σε περιβάλλον τριών διαστάσεων (3D), επιλύοντας ταυτόχρονα τα πεδία της Στερεάς Μηχανικής (Solid Mechanics), της Ηλεκτροστατικής (Electrostatics) και των Μαγνητικών Πεδίων (Magnetic Fields).

## 6.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης πολύστρωτου σύνθετου υλικού



Εικόνα 1: Τρισδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση της πολύστρωτης διάταξης (Προσομοίωση Α).

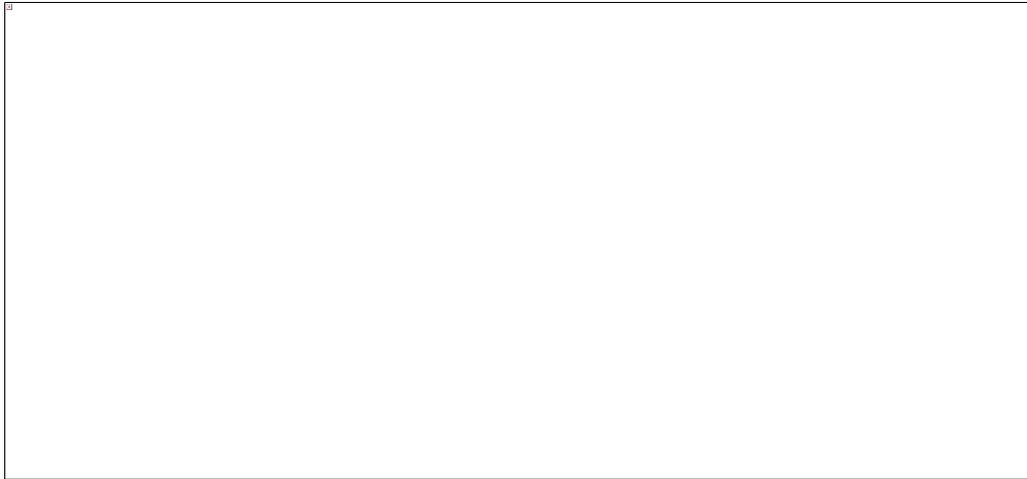
Η γεωμετρία της Προσομοίωσης A σχεδιάστηκε ως μια δομή αναφοράς (reference model) για την αξιολόγηση της μαγνητοηλεκτρικής σύζευξης. Η επιλογή της στρωματικής διάταξης εξασφαλίζει ότι η εξωτερική εφελκυστική τάση, η οποία εφαρμόζεται κατά μήκος του άξονα x, μεταφέρεται ομοιόμορφα μέσω των διεπιφανειών από το πιεζοηλεκτρικό στο πιεζομαγνητικό υλικό. Με πράσινο χρώμα εμφανίζονται τα εξωτερικά προστατευτικά στρώματα δομικού χάλυβα (Structural Steel), με μπλε το πιεζοηλεκτρικό στρώμα (PZT – 5H) και με ματζέντα το φερρομαγνητικό στρώμα (Nickel). Οι συνολικές διαστάσεις του δοκιμίου είναι  $15 \times 10 \times 4\text{mm}$ . Τα εξωτερικά στρώματα χάλυβα λειτουργούν ως μέσα ομοιόμορφης κατανομής του φορτίου και διασφάλισης της μηχανικής ακεραιότητας της διάταξης. Η συγκεκριμένη γεωμετρία επιτρέπει τη μελέτη της "μηχανικά διαμεσολαβούμενης" (strain – mediated) σύζευξης σε μια ελεγχόμενη, μονοδιάστατη μεταφορά παραμόρφωσης, η οποία θα αποτελέσει το μέτρο σύγκρισης για την πιο σύνθετη ινοπλισμένη δομή.



Εικόνα 2: Διακριτοποίηση της γεωμετρίας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η ποιότητα της διακριτοποίησης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη σύγκλιση και την ακρίβεια της επίλυσης. Το πλέγμα αποτελείται από ελεύθερα τετράεδρα στοιχεία

(tetrahedral elements), εξασφαλίζοντας την απαραίτητη γεωμετρική προσαρμοστικότητα για την ανάλυση των επιμέρους στρωμάτων. Στο συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε πλέγμα ελεγχόμενης φυσικής (physics – controlled mesh), το οποίο εξασφαλίζει επαρκή αριθμό στοιχείων κατά μήκος του πάχους των ενεργών στρωμάτων (PZT και Nickel). Η λεπτομερής απεικόνιση των στοιχείων στις διεπιφάνειες είναι απαραίτητη για την ορθή αριθμητική εκτίμηση της μεταφοράς των μηχανικών τάσεων, καθώς οποιοδήποτε σφάλμα στη διακριτοποίηση της παραμόρφωσης θα οδηγούσε σε ανακριβή υπολογισμό του παραγόμενου ηλεκτρικού και, κατ' επέκταση, του μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 3: Απεικόνιση της τάσης von Mises ( $N/m^2$ ) της πολύστρωτης δομής.

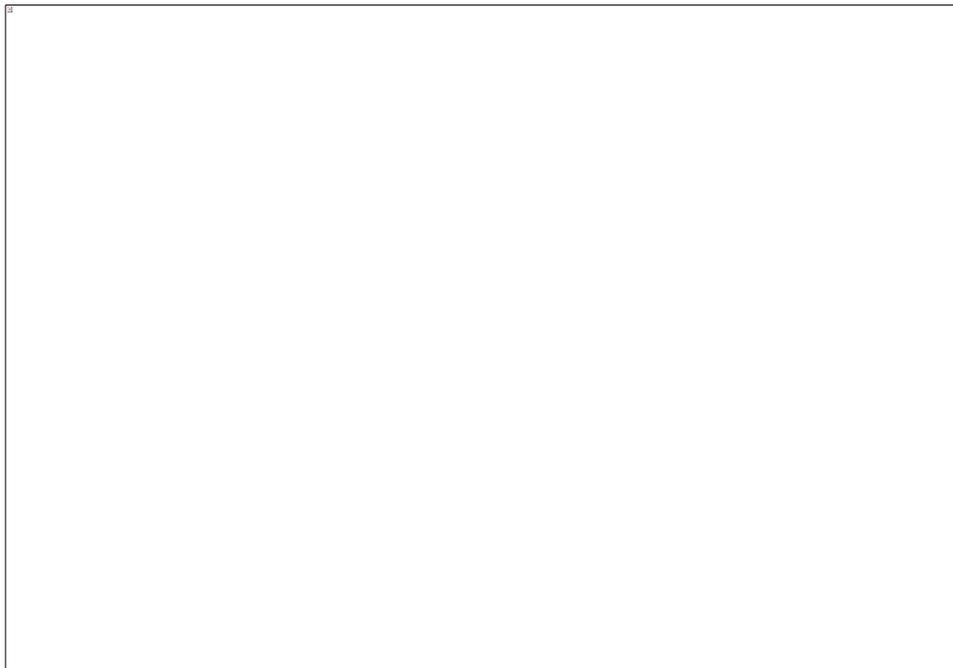


Εικόνα 4: Απεικόνιση του μέτρου της μετατόπισης (mm) της πολύστρωτης δομής.

Στο συγκεκριμένο γράφημα επιβεβαιώνεται η ορθή λειτουργία του μοντέλου υπό εφελκυσμό. Η πρώτη εικόνα αναφέρεται στην εσωτερική μηχανική καταπόνηση, ενώ η δεύτερη καταγράφει την επιμήκυνση του δοκιμίου κατά μήκος του άξονα φόρτισης  $x$ . Η γραμμική διαβάθμιση της μετατόπισης από την πακτωμένη πλευρά ( $x = 0$ ) προς την πλευρά εφαρμογής του φορτίου ( $x = 15$ ) υποδεικνύει μια ομοιόμορφη παραμόρφωση του συνθέτου. Παράλληλα, η κατανομή της τάσης von Mises αναδεικνύει την ανομοιογένεια μεταξύ των στρωμάτων: τα πιο δύσκαμπτα υλικά (όπως ο χάλυβας και το νικέλιο) αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου. Η μηχανική αυτή "διέγερση" των ενεργών στρωμάτων είναι το κρίσιμο πρώτο στάδιο για την παραγωγή του ηλεκτρικού δυναμικού που θα ακολουθήσει.



Εικόνα 5: Τρισδιάστατη απεικόνιση διατομών (multislice plot) του ηλεκτρικού δυναμικού.



Εικόνα 6: Πλευρική απεικόνιση ( $x - z$  επίπεδο) της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού ( $es.V$ ) κατά μήκος του πάχους της πολύστρωτης διάταξης.

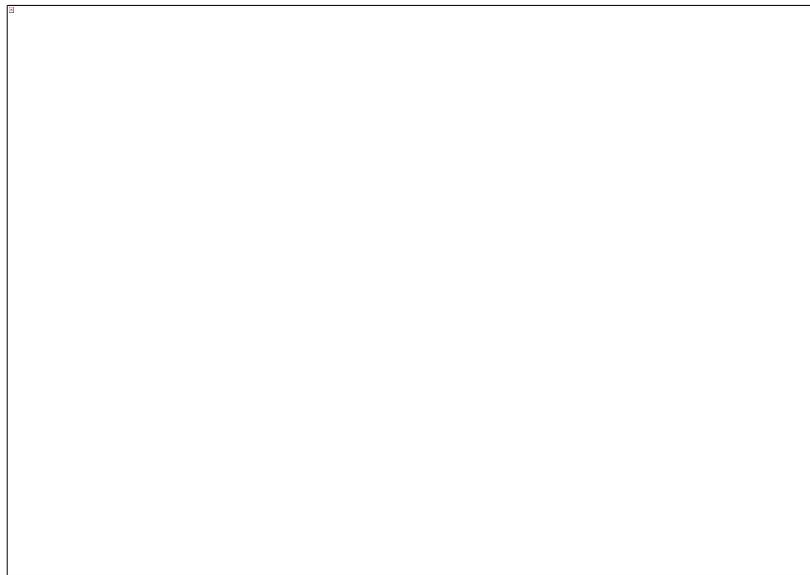
Στα παραπάνω γραφήματα αποτυπώνεται το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο αποτελεί τον πρώτο κρίσιμο κρίκο στην αλυσίδα της μαγνητοηλεκτρικής σύζευξης. Η εφαρμογή της εφελκυστικής τάσης των 10 MPa στον άξονα x προκαλεί, μέσω του φαινομένου Poisson, παραμόρφωση στον άξονα z, η οποία ενεργοποιεί τις πιεζοηλεκτρικές σταθερές του στρώματος PZT – 5H.

Όπως παρατηρείται στην κλίμακα των χρωμάτων, αναπτύσσεται μια σημαντική διαφορά δυναμικού που φτάνει τα  $-163V$ . Η τιμή 0 V αντιστοιχεί στην κάτω επιφάνεια της πιεζοηλεκτρικής στρώσης όπου εφαρμόστηκε η συνθήκη γείωσης (Ground), ενώ το μέγιστο δυναμικό εμφανίζεται στην άνω επιφάνεια. Η αρνητική τιμή του δυναμικού σχετίζεται με τον προσανατολισμό του διανύσματος πόλωσης σε σχέση με το εφαρμοζόμενο φορτίο.

Η ομοιομορφία που παρατηρείται στο multislice plot επιβεβαιώνει ότι η στρωματική δομή μεταφέρει το μηχανικό φορτίο με τέτοιο τρόπο ώστε η ηλεκτρική πόλωση να είναι σταθερή σε όλο το πλάτος του υλικού. Αυτό το "εσωτερικό" ηλεκτρικό πεδίο είναι που θα λειτουργήσει στη συνέχεια ως μέσο διέγερσης για το πιεζομαγνητικό στρώμα, οδηγώντας τελικά στην παραγωγή του επιθυμητού μαγνητικού πεδίου. Η επιτυχής παραγωγή τάσης αυτής της κλίμακας αποτελεί ένδειξη ισχυρής μηχανικής-ηλεκτρικής σύζευξης στη συγκεκριμένη γεωμετρία.



Εικόνα 7: Τρισδιάστατη απεικόνιση διατομών (*multislice plot*) και δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου.

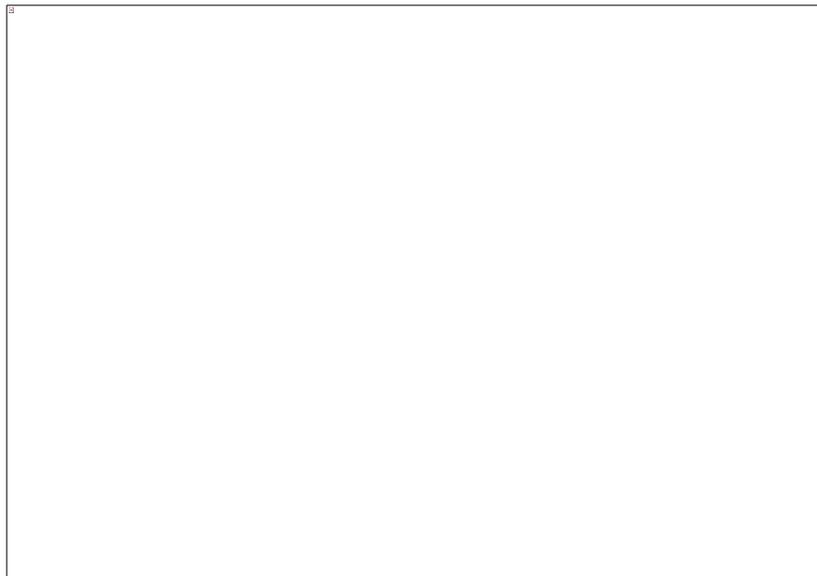


Εικόνα 8: Πλευρική απεικόνιση (επίπεδο  $x - z$ ) του μέτρου της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην πολύστρωτη διάταξη.

Στα παραπάνω γραφήματα παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, η οποία αποτελεί το άμεσο αποτέλεσμα της πιεζοηλεκτρικής μετατροπής. Ενώ το ηλεκτρικό δυναμικό ( $V$ ) μας έδωσε τη διαφορά τάσης, η ένταση του

πεδίου (E) αποκαλύπτει την "πυκνότητα" της ηλεκτρικής ενέργειας που είναι διαθέσιμη εντός της δομής.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η Εικόνα 8, όπου παρατηρείται μια ελαφρά απόκλιση στις άκρες του δοκιμίου, η οποία οφείλεται στις συνοριακές επιδράσεις και στην τρισδιάστατη φύση της παραμόρφωσης Poisson. Αυτό το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο αποτελεί τη θεμελιώδη "γέφυρα" της μαγνητοηλεκτρικής σύζευξης: είναι η δύναμη που θα προκαλέσει τη μετατόπιση των μαγνητικών τοιχωμάτων στο υπερκείμενο στρώμα Νικελίου, οδηγώντας στην τελική παραγωγή της μαγνητικής επαγωγής. Η ποσοτική ανάλυση του πεδίου αυτού επιτρέπει την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η γεωμετρία της πολυστρωματικής διάταξης ευνοεί ή περιορίζει την απόδοση του τεχνητού πιεζομαγνητικού φαινομένου.



Εικόνα 9: Κατανομή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής (*mf. normB*) και διανυσματική απεικόνιση της ροής του μαγνητικού πεδίου (*Arrow Volume*) στο πιεζομαγνητικό στρώμα.

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 9, το ηλεκτρικό πεδίο αναπτύσσεται με μέγιστη ένταση της τάξης των  $1.5 \cdot 10^5 \text{V/m}$ . Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς υποδηλώνει μια ισχυρή πόλωση του στρώματος PZT – 5H. Η ομοιόμορφη κατανομή του πεδίου στο κεντρικό τμήμα της στρώσης επιβεβαιώνει ότι η μηχανική τάση μεταφέρεται

αποτελεσματικά μέσω των εξωτερικών στρωμάτων χάλυβα, προκαλώντας μια σταθερή πιεζοηλεκτρική απόκριση.

Η Εικόνα 10 αποτελεί την τελική επιβεβαίωση της ερευνητικής υπόθεσης: την παραγωγή μαγνητικού πεδίου αποκλειστικά μέσω μηχανικής διέγερσης. Η εφαρμοζόμενη τάση των 10 MPa, αφού προκάλεσε την ηλεκτρική πόλωση του πιεζοηλεκτρικού στρώματος, οδήγησε μέσω της μηχανικής σύζευξης στις διεπιφάνειες στην εμφάνιση μαγνητικής επαγωγής στο στρώμα του Νικελίου.

Όπως φαίνεται στο υπόμνημα, η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής ανέρχεται σε περίπου  $1.87 \cdot 10^{-4} \text{T}$ . Τα κόκκινα βέλη (Arrow Volume) αναδεικνύουν την κατεύθυνση των μαγνητικών γραμμών, οι οποίες ευθυγραμμίζονται με τον άξονα της κύριας παραμόρφωσης. Η ομοιομορφία της κατανομής στο κέντρο του δοκιμίου υποδεικνύει ότι η στρωματική δομή λειτουργεί ως ένας αποτελεσματικός μετατροπέας, μεταφέροντας το μηχανικό φορτίο με τρόπο που μεγιστοποιεί τη μαγνητοηλεκτρική απόκριση. Το αποτέλεσμα αυτό θα χρησιμοποιηθεί ως βάση αναφοράς για τη σύγκριση με την ινοπλισμένη δομή, όπου η γεωμετρική ανομοιογένεια αναμένεται να μεταβάλλει την πυκνότητα της μαγνητικής ροής.

## **6.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης ινοπλισμένου σύνθετου υλικού**

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται η δεύτερη γεωμετρική διάταξη (Προσομοίωση B), η οποία αφορά την ινοπλισμένη δομή του πολυφερροϊκού συνθέτου. Στόχος της συγκεκριμένης προσομοίωσης είναι η διερεύνηση της επίδρασης που έχει η γεωμετρική διαμόρφωση των ενεργών υλικών στην απόδοση της μαγνητοηλεκτρικής σύζευξης. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η περίπτωση όπου το πιεζομαγνητικό υλικό (Νικέλιο) ενσωματώνεται υπό μορφή οριζόντιων ινών, παράλληλων προς τον άξονα φόρτισης, εντός της πιεζοηλεκτρικής μήτρας (PZT – 5H). Η διατήρηση των ίδιων οριακών συνθηκών και ιδιοτήτων υλικών με την Προσομοίωση A καθιστά δυνατή την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη βελτιστοποίηση

του τεχνητού πιεζομαγνητικού φαινομένου μέσω της συγκέντρωσης των μηχανικών τάσεων.



Εικόνα 10: Τρισδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση της ινοπλισμένης διάταξης (Προσομοίωση Β).

Ο σχεδιασμός της ινοπλισμένης γεωμετρίας στοχεύει στη βελτιστοποίηση της μαγνητοηλεκτρικής απόκρισης μέσω της γεωμετρικής διαμόρφωσης των ενεργών υλικών. Με πράσινο χρώμα εμφανίζονται τα εξωτερικά στρώματα χάλυβα (Structural Steel), με ματζέντα η πιεζοηλεκτρική μήτρα (PZT – 5H) και με μπλε οι πέντε οριζόντιες ίνες νικελίου (Nickel). Οι ίνες είναι τοποθετημένες παράλληλα προς τον άξονα  $x$ , ο οποίος αποτελεί και τη διεύθυνση εφαρμογής του εφελκυστικού φορτίου. Σε αντίθεση με την πολυστρωματική δομή της προσομοίωσης Α, εδώ το πιεζομαγνητικό υλικό (νικέλιο) κατανέμεται σε πέντε κυλινδρικές ίνες ενσωματωμένες εντός της πιεζοηλεκτρικής μήτρας. Η οριζόντια διάταξη των ινών επιλέχθηκε στρατηγικά ώστε ο κύριος άξονας του πιεζομαγνητικού υλικού να συμπίπτει με τη διεύθυνση της μέγιστης μηχανικής παραμόρφωσης. Επιπλέον, η συγκεκριμένη γεωμετρία αυξάνει σημαντικά τη συνολική επιφάνεια διεπιφάνειας μεταξύ της μήτρας και των ινών, γεγονός που αναμένεται να ενισχύσει τη μεταφορά των τάσεων και να οδηγήσει σε υψηλότερες τιμές τοπικής μαγνήτισης. Η διατήρηση του ίδιου όγκου ενεργών υλικών με το προηγούμενο μοντέλο

διασφαλίζει ότι οι παρατηρούμενες διαφορές στα αποτελέσματα θα οφείλονται αποκλειστικά στη γεωμετρική διαμόρφωση του συνθέτου.



Εικόνα 11: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Mesh) για την ινοπλισμένη δομή.

Στην ινοπλισμένη δομή, η ποιότητα του πλέγματος είναι ακόμη πιο κρίσιμη σε σχέση με την πολύστρωτη, λόγω της γεωμετρικής πολυπλοκότητας των κυλινδρικών ινών. Χρησιμοποιήθηκε πλέγμα ελεγχόμενης φυσικής (physics – controlled mesh), το οποίο εξασφαλίζει την απαραίτητη πύκνωση των στοιχείων γύρω από τις ίνες. Η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι απαραίτητη για την ακριβή αποτύπωση των φαινομένων συγκέντρωσης τάσεων που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες μεταξύ του PZT – 5H και του νικελίου. Η σωστή διακριτοποίηση αυτών των περιοχών διασφαλίζει ότι η μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ μήτρας και οπλισμού υπολογίζεται με υψηλή ακρίβεια, επιτρέποντας την ορθή εκτίμηση της μαγνητοηλεκτρικής σύζευξης και την αποφυγή αριθμητικών σφαλμάτων κατά την επίλυση των πεδίων.



Εικόνα 12: Απεικόνιση της τάσης von Mises ( $N/m^2$ ) της ινοπλισμένης δομής

Η αριστερή κλίμακα ( $\times 10^7$ ) αντιστοιχεί στην εσωτερική μηχανική τάση, ενώ η δεξιά κλίμακα ( $\times 10^{10}$ ) καταγράφει την κινηματική απόκριση του συνθέτου υπό το εφελκυστικό φορτίο των 10 MPa. Στο συγκεκριμένο γράφημα αποτυπώνεται η θεμελιώδης διαφορά στη μηχανική συμπεριφορά της ινοπλισμένης δομής σε σχέση με την πολύστρωτη. Παρατηρείται έντονο φαινόμενο συγκέντρωσης τάσεων (*stress concentration*) αποκλειστικά εντός των ινών Νικελίου. Λόγω του υψηλότερου μέτρου ελαστικότητας του Νικελίου (200 GPa) έναντι της πιεζοηλεκτρικής μήτρας (60 GPa), οι ίνες λειτουργούν ως τα κύρια φέροντα στοιχεία της εφελκυστικής δύναμης. Η "παγίδευση" αυτή της μηχανικής ενέργειας εντός του πιεζομαγνητικού υλικού είναι καθοριστικής σημασίας για την έρευνα, καθώς η παραγωγή του τεχνητού πιεζομαγνητισμού είναι ευθέως ανάλογη της τοπικής τάσης. Η διαβάθμιση της μετατόπισης επιβεβαιώνει την ορθή επιβολή των συνοριακών συνθηκών, ενώ η ανομοιογένεια στην κατανομή των τάσεων προμηνύει μια πιο ενισχυμένη μαγνητοηλεκτρική απόκριση στις περιοχές των ινών, σε σύγκριση με την ομοιόμορφη αλλά χαμηλότερη τάση που καταγράφηκε στην Προσομοίωση Α.



Εικόνα 13: Πλευρική απεικόνιση (επίπεδο  $y - z$ ) της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού ( $es.V$ ) στην ινοπλισμένη δομή.

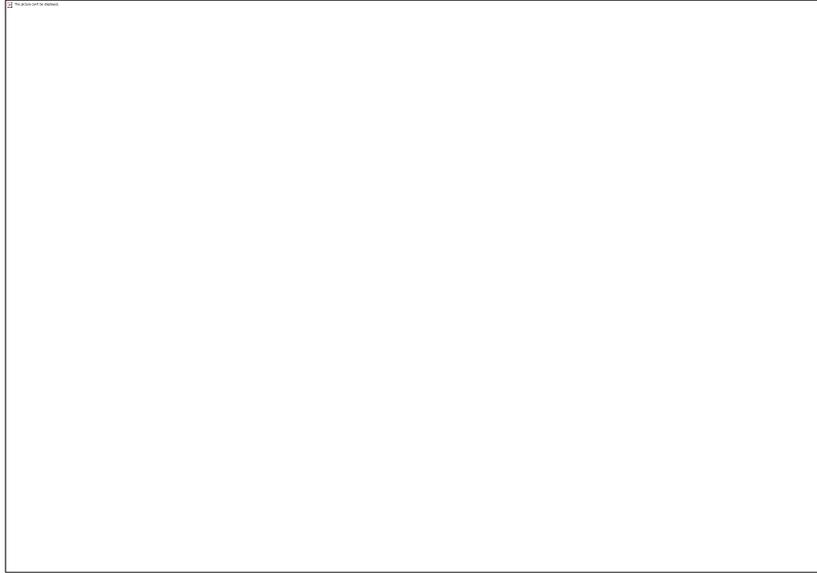
Στην ινοπλισμένη γεωμετρία, η ηλεκτρική απόκριση παρουσιάζει θεμελιώδεις διαφορές σε σχέση με την ομοιόμορφη κατανομή της πολύστρωτης δομής. Η παρουσία των ιών Νικελίου εντός της πιεζοηλεκτρικής μήτρας  $PZT - 5H$  λειτουργεί ως παράγοντας "διατάραξης" και συγκέντρωσης του ηλεκτρικού πεδίου.

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 9α, οι ίνες, λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητάς τους, συμπεριφέρονται ως εσωτερικά ηλεκτρόδια. Αυτό αναγκάζει το ηλεκτρικό δυναμικό να αναπτύσσεται με πολύ πιο έντονο ρυθμό στις περιοχές της μήτρας που βρίσκονται ανάμεσα στις ίνες. Η μέγιστη τιμή του δυναμικού στην Προσομοίωση Β παρουσιάζει μια εντυπωσιακή αύξηση, φτάνοντας τα  $-8.88 \cdot 10^4 V$ . Αυτή η αύξηση οφείλεται στο γεγονός ότι η μηχανική τάση "εγκλωβίζεται" στις ίνες, οι οποίες με τη σειρά τους ασκούν έντονες τοπικές παραμορφώσεις στη μήτρα  $PZT$ , οδηγώντας σε μια εξαιρετικά ενισχυμένη πιεζοηλεκτρική πόλωση.

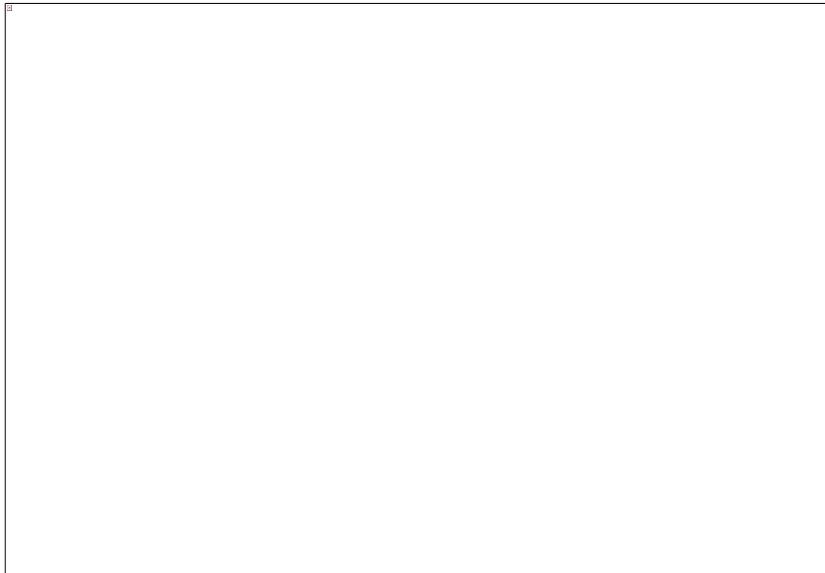


Εικόνα 14: Τρισδιάστατη απεικόνιση διατομών (*multislice plot*) του ηλεκτρικού δυναμικού.

Η Εικόνα 14 αναδεικνύει την τρισδιάστατη φύση αυτής της σύζευξης. Η ανομοιομορφία του πεδίου είναι το "κλειδί" για την ενίσχυση του τεχνητού πιεζομαγνητισμού: η υψηλή συγκέντρωση ηλεκτρικής ενέργειας γύρω από τις ίνες δημιουργεί τις ιδανικές συνθήκες για τη μαγνητική διέγερση του νικελίου. Σε αντίθεση με το πολύστρωτο μοντέλο όπου το πεδίο ήταν απλά μια γραμμική διαβάθμιση, εδώ η γεωμετρία λειτουργεί ως πολλαπλασιαστής ισχύος, αποδεικνύοντας ότι η ινοπλισμένη διάταξη είναι σημαντικά πιο αποδοτική στη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και, τελικά, σε μαγνητική.



Εικόνα 15: Πλευρική απεικόνιση (επίπεδο  $y - z$ ) του μέτρου της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην ινοπλισμένη δομή.

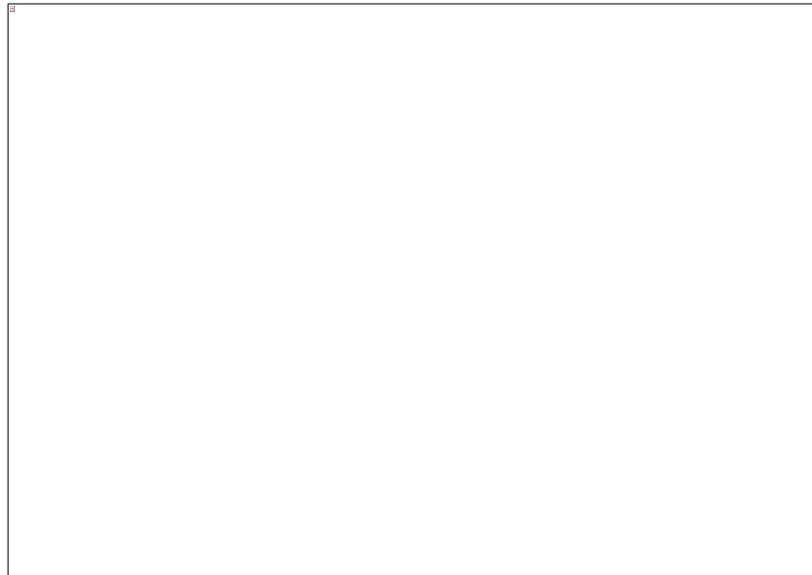


Εικόνα 16: Τρισδιάστατη απεικόνιση διατομών (*multislice plot*) της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

Η ανάλυση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην ινοπλισμένη δομή αποκαλύπτει το φαινόμενο της "συγκέντρωσης πεδίου" (*field crowding*), το οποίο αποτελεί πλεονέκτημα έναντι της στρωματικής διάταξης. Όπως παρατηρείται στην

Εικόνα 15, η μέγιστη ένταση του πεδίου φτάνει τα  $1.9 \cdot 10^5 V/m$ , παρουσιάζοντας αύξηση περίπου 27% σε σχέση με την προσομοίωση A ( $1.5 \cdot 10^5 V/m$ ).

Αυτή η ενίσχυση οφείλεται στη γεωμετρική διαμόρφωση: οι ίνες νικελίου, όντας αγωγίμες και πιο δύσκαμπτες, αναγκάζουν τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου να συσπειρωθούν στον περιορισμένο χώρο της μήτρας  $PZT - 5H$  ανάμεσα στις ίνες. Η τρισδιάστατη απεικόνιση στην Εικόνα 16 επιβεβαιώνει ότι η ηλεκτρική ενέργεια δεν κατανέμεται απλά σε ένα στρώμα, αλλά δημιουργεί "κανάλια" υψηλής έντασης που περιβάλλουν τον οπλισμό. Από φυσικής πλευράς, η υψηλότερη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου υποδηλώνει μια πιο ενεργή πιεζοηλεκτρική απόκριση της μήτρας. Αυτό το ενισχυμένο πεδίο δρα ως ισχυρότερη πηγή διέγερσης για το πιεζομαγνητικό υλικό των ινών. Συνεπώς, η ινοπλισμένη γεωμετρία δεν βελτιώνει μόνο τη μηχανική μεταφορά των τάσεων, αλλά λειτουργεί και ως ένας "ηλεκτρικός συμπυκνωτής", προετοιμάζοντας το έδαφος για μια ανώτερη μαγνητοηλεκτρική απόδοση, η οποία θα αποτυπωθεί στην τελική μέτρηση της μαγνητικής επαγωγής.



Εικόνα 17: Πλευρική απεικόνιση (επίπεδο  $x - z$ ) της μαγνητικής επαγωγής ( $mf.normB$ ) στην ινοπλισμένη δομή.



Εικόνα 18: Τρισδιάστατη απεικόνιση διατομών (*multislice plot*) της μαγνητικής επαγωγής.

Όπως παρατηρείται, η μαγνητική επαγωγή παρουσιάζει μια εξαιρετικά εντοπισμένη κατανομή, με τις μέγιστες τιμές να συγκεντρώνονται στον πυρήνα των ιών Νικελίου. Η μέγιστη τιμή της επαγωγής φτάνει τα  $4.02 \cdot 10^{-4} T$ , γεγονός που καταδεικνύει την επιτυχή λειτουργία της μαγνητοηλεκτρικής σύζευξης στη συγκεκριμένη γεωμετρία.

Η φυσική ερμηνεία αυτού του αποτελέσματος συνδέεται άμεσα με τη συγκέντρωση τάσεων που αναλύθηκε προηγουμένως. Οι ίνες, όντας το πιο δύσκαμπτο στοιχείο της διάταξης και τοποθετημένες παράλληλα προς τον άξονα εφελκυσμού, δέχονται το μέγιστο μηχανικό φορτίο. Αυτή η τάση, σε συνδυασμό με το ηλεκτρικό πεδίο που παράγει η πιεζοηλεκτρική μήτρα, προκαλεί την ευθυγράμμιση των μαγνητικών περιοχών του νικελίου, παράγοντας το παρατηρούμενο μαγνητικό πεδίο.

### 6.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η συγκριτική αξιολόγηση των δύο γεωμετρικών διατάξεων που μελετήθηκαν: της πολύστρωτης δομής (Προσομοίωση Α) και της ινοπλισμένης δομής (Προσομοίωση Β). Η σύγκριση εστιάζει στην ικανότητα κάθε διάταξης να μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε μαγνητική, μέσω του μηχανισμού της "μηχανικά διαμεσολαβούμενης" σύζευξης. Για τη διασφάλιση της εγκυρότητας των συμπερασμάτων, και στα δύο μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν πανομοιότυπες ιδιότητες υλικών, οι ίδιες οριακές συνθήκες φόρτισης (10 MPa εφελκυσμός στον άξονα  $x$ ) και, το κυριότερο, διατηρήθηκε σταθερός ο συνολικός όγκος των ενεργών υλικών (PZT – 5H και Nickel). Με αυτόν τον τρόπο, οι διαφορές που καταγράφονται στην απόδοση αποδίδονται αποκλειστικά στη γεωμετρική διαμόρφωση της διεπιφάνειας των υλικών.

Τα αριθμητικά δεδομένα που εξήχθησαν από το περιβάλλον COMSOL Multiphysics συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. Ως κύριος δείκτης απόδοσης ορίζεται ο Μαγνητοηλεκτρικός Συντελεστής ( $\alpha_{ME}$ ), ο οποίος εκφράζει την παραγόμενη μαγνητική επαγωγή ανά μονάδα εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης.

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης	Πολύστρωτη δομή	Ινοπλισμένη δομή	Επί τοις εκατό μεταβολή
Μέση μαγνητική επαγωγή ( $B_{avg}$ )	Tesla	$1.1255 \cdot 10^{-3}$	$1.4820 \cdot 10^{-3}$	+31.7 %
Μέση ηλεκτρική τάση ( $V_{avg}$ )	Volt	-60.776	-88.840	+46.2 %
Συντελεστής $\alpha_{ME}$	T/Pa	$1.1255 \cdot 10^{-10}$	$1.4820 \cdot 10^{-10}$	+31.7 %
Μέγιστη Τάση von Mises	Pa	$2.41 \cdot 10^7$	$4.02 \cdot 10^7$	+66.8 %

Πίνακας 1: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοιώσεων.

Η πρωταρχική διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων εντοπίζεται στον τρόπο κατανομής του μηχανικού φορτίου, καθώς στην πολύστρωτη δομή η τάση μεταφέρεται ομοιόμορφα σε όλη την έκταση της διεπιφάνειας, οδηγώντας σε μια σταθερή αλλά χαμηλότερη μέση τιμή παραμόρφωσης εντός του πιεζομαγνητικού υλικού. Αντιθέτως, στην ινοπλισμένη δομή η γεωμετρία των ινών προκαλεί το φαινόμενο της συγκέντρωσης τάσεων, με τις ίνες νικελίου να αποτελούν τα στοιχεία που φέρουν το μεγαλύτερο μέρος μηχανικής ενέργειας λόγω του υψηλότερου μέτρου ελαστικότητας και του οριζόντιου προσανατολισμού τους. Η παρατηρούμενη αύξηση της μέγιστης τάσης von Mises κατά 66.8% στην Προσομοίωση B ερμηνεύει την αντίστοιχη ενίσχυση στην παραγωγή μαγνητικού πεδίου, καθώς η μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ της πιεζοηλεκτρικής μήτρας και των ινών δημιουργεί ένα σύνθετο τρισδιάστατο πεδίο παραμορφώσεων που εκμεταλλεύεται βέλτιστα τις συζευκτικές ιδιότητες των υλικών.

Παράλληλα, η ηλεκτρική απόκριση της μήτρας PZT-5H επηρεάζεται άμεσα από την παρουσία των ινών, οι οποίες στην Προσομοίωση B συμπεριφέρονται ως εσωτερικά ηλεκτρόδια λόγω της υψηλής αγωγιμότητάς τους, αναγκάζοντας τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου να συσπειρωθούν στον ενδιάμεσο χώρο της μήτρας. Αυτή η «συμφόρηση» του ηλεκτρικού πεδίου οδηγεί σε αύξηση της μέσης παραγόμενης τάσης κατά 46.2%, ενώ η ενισχυμένη ηλεκτρική πόλωση λειτουργεί σωρευτικά, αυξάνοντας τη δευτερογενή μηχανική πίεση πάνω στις ίνες και ενισχύοντας περαιτέρω το τελικό μαγνητικό αποτέλεσμα. Με αυτόν τον τρόπο, η ινοπλισμένη δομή δεν βελτιστοποιεί μόνο τη μηχανική μεταφορά των φορτίων, αλλά λειτουργεί και ως ένας σημαντικά αποτελεσματικότερος ηλεκτρικός μετατροπέας.

Η συγκριτική αυτή μελέτη αποδεικνύει ότι η γεωμετρική διαμόρφωση είναι εξίσου καθοριστική με την επιλογή των υλικών για τον σχεδιασμό προηγμένων πολυφαινομένων συστημάτων. Η ινοπλισμένη δομή με οριζόντιες ίνες υπερτερεί της κλασικής στρωματικής διάταξης σε όλους τους κρίσιμους δείκτες απόδοσης, επιτυγχάνοντας 31.7% υψηλότερο μαγνητοηλεκτρικό συντελεστή για τον ίδιο ενεργό όγκο υλικού. Επιπλέον, προσφέρει ισχυρότερη τοπική ενίσχυση, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές μικρο-αισθητήρων, και επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της

μαγνητικής ροής μέσω του προσανατολισμού των ινών. Συνοψίζοντας, η δημιουργία «τεχνητού πιεζομαγνητισμού» μέσω ινοπλισμένων συνθέτων αποτελεί την πλέον υποσχόμενη κατεύθυνση για την ανάπτυξη νέων έξυπνων υλικών, προσφέροντας το βέλτιστο αρχιτεκτονικό πρότυπο για μελλοντικές πειραματικές και τεχνολογικές εφαρμογές.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με τη σύνοψη των ευρημάτων που προέκυψαν από την υπολογιστική ανάλυση στο COMSOL Multiphysics. Η μελέτη της μαγνητοηλεκτρικής σύζευξης μέσω μηχανικής διαμεσολάβησης σε σύνθετα υλικά ανέδειξε τη σημασία του γεωμετρικού σχεδιασμού στη δημιουργία προηγμένων "έξυπνων" υλικών με τεχνητές ιδιότητες.

### 7.1. Κύρια Συμπεράσματα της εργασίας

Η ανάλυση και η σύγκριση των δύο μοντέλων οδήγησαν σε ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα, με κυριότερο την επιτυχή δημιουργία «τεχνητού πιεζομαγνητισμού». Η προσομοίωση απέδειξε ότι είναι δυνατή η παραγωγή μαγνητικού πεδίου αποκλειστικά μέσω μηχανικής διέγερσης, επιβεβαιώνοντας τη θεωρία της μηχανικά διαμεσολαβούμενης σύζευξης (strain-mediated coupling) μέσα από την αλυσίδα «Μηχανικό Φορτίο → Ηλεκτρική Πόλωση (PZT) → Μαγνητική Επαγωγή (Nickel)». Παράλληλα, διαπιστώθηκε η σαφής υπεροχή της ινοπλισμένης γεωμετρίας (Προσομοίωση Β) έναντι της πολύστρωτης (Προσομοίωση Α), καθώς η συγκέντρωση των τάσεων εντός των ινών Νικελίου οδήγησε σε αύξηση της μέσης μαγνητικής επαγωγής κατά 31.7%, αναδεικνύοντας τη γεωμετρική ανομοιογένεια ως καθοριστικό πολλαπλασιαστική απόδοσης.

Καθοριστικό ρόλο σε αυτή την ενίσχυση έπαιξε η διαφορά στα μέτρα ελαστικότητας ( $E$ ) μεταξύ μήτρας και οπλισμού, η οποία επέτρεψε στις πιο δύσκαμπτες ίνες να απορροφήσουν και να συγκεντρώσουν τη μηχανική ενέργεια, προκαλώντας σημαντικά ισχυρότερη πιεζομαγνητική απόκριση σε σύγκριση με την ομοιόμορφη κατανομή της πολύστρωτης δομής. Επιπλέον, η παρουσία των ινών λειτούργησε συνεργιστικά και ως ηλεκτρικός ενισχυτής, όπου η «συμφόρηση» του ηλεκτρικού πεδίου (field crowding) ανάμεσα στις αγώγιμες ίνες αύξησε τη μέση παραγόμενη τάση κατά 46.2%, ενισχύοντας περαιτέρω τη συνολική μαγνητοηλεκτρική απόδοση του συστήματος.

## 7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογές

Η επιτυχής μοντελοποίηση του τεχνητού πιεζομαγνητισμού μέσω της ινοπλισμένης δομής ανοίγει έναν ευρύ ορίζοντα για περαιτέρω επιστημονική διερεύνηση και βιομηχανική αξιοποίηση. Μια μελλοντική επέκταση της έρευνας θα μπορούσε να επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση της τοπολογίας και της γεωμετρικής αρχιτεκτονικής, χρησιμοποιώντας προηγμένους αλγορίθμους για τον προσδιορισμό του βέλτιστου σχήματος των εγκλεισμάτων, όπως ελλειψοειδείς ή δενδριτικές ίνες, που θα μεγιστοποιούσαν τη συγκέντρωση των τάσεων. Παράλληλα, η διεξοδική μελέτη της επίδρασης του κλάσματος όγκου και της απόστασης μεταξύ των ινών θα επέτρεπε τον ακριβή έλεγχο της μαγνητικής ροής, αποφεύγοντας φαινόμενα κορεσμού που περιορίζουν την απόδοση.

Πέρα από τη στατική ανάλυση, εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της δυναμικής απόκρισης των υλικών στο πεδίο των συχνοτήτων. Η μελέτη υπό αρμονική μηχανική διέγερση θα επέτρεπε τον εντοπισμό συχνοτήτων ηλεκτρομηχανικού συντονισμού, όπου ο μαγνητοηλεκτρικός συντελεστής  $\alpha_{ME}$  μπορεί να αυξηθεί κατά τάξεις μεγέθους, προσφέροντας τη βάση για αισθητήρες πρωτοφανούς ευαισθησίας. Επιπλέον, η ενσωμάτωση μη γραμμικών μοντέλων υστέρησης, όπως το μοντέλο Jiles-Atherton ή Preisach, θα προσέφερε μια πιο ρεαλιστική εικόνα της ενεργειακής απώλειας κατά τη διάρκεια κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης, ενώ η μετάβαση στη νανοκλίμακα με τη χρήση νανοράβδων ή νανοσυρμάτων αναμένεται να αναδείξει μοναδικά κβαντικά φαινόμενα και αυξημένη επιφανειακή ενέργεια.

Σε επίπεδο τεχνολογικών εφαρμογών, τα ινοπλισμένα αυτά σύνθετα μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για μια νέα γενιά έξυπνων διατάξεων. Στον τομέα της δομικής ακεραιότητας, η ικανότητά τους να παράγουν μαγνητικό σήμα ως απόκριση σε παραμόρφωση τα καθιστά ιδανικά για χρήση ως έξυπνα επιθέματα σε αεροδιαστημικές δομές ή γέφυρες, επιτρέποντας την ασύρματη παρακολούθηση της υγείας των κατασκευών χωρίς την ανάγκη περίπλοκων καλωδιώσεων. Ταυτόχρονα, η χρήση τους σε συστήματα συγκομιδής ενέργειας προσφέρει μια βιώσιμη λύση για τη μετατροπή των

περιβαλλοντικών κραδασμών σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική και μαγνητική ισχύ, εξασφαλίζοντας ενεργειακή αυτονομία σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων IoT.

Οι προοπτικές επεκτείνονται και στη βιοϊατρική μηχανική, όπου τέτοια υλικά θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε εμφυτεύματα που αντιδρούν στις κινήσεις του σώματος για την ενεργοποίηση μαγνητο-ευαίσθητων φαρμάκων ή τη διέγερση νευρικών κυττάρων μέσω τοπικών μαγνητικών πεδίων. Στον κλάδο της πληροφορικής και της spintronics, η δυνατότητα ελέγχου των μαγνητικών ιδιοτήτων μέσω μηχανικής τάσης ανοίγει τον δρόμο για μνήμες χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ η ενσωμάτωσή τους σε μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) επιτρέπει τη δημιουργία ενεργοποιητών υψηλής ακρίβειας για οπτικούς διακόπτες, μικρο-αντλίες και συστήματα προσαρμοστικών φακών.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Wadhawan, V. K. Ferroic materials: A primer. *Resonance* **7**, 15–24 (2002).
2. Yadav, S., Jain, P. & Singh, P. Ferroic Materials: From Past to Present. in *Ferroic Materials-Based Technologies* (eds Inamuddin, Altalhi, T. & Mazumder, M. A. J.) 1–18 (Wiley, 2024). doi:10.1002/9781394238194.ch1.
3. ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ, Ι. *ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ*. (ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ Α.Γ. ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟΣ, 2025).
4. Kasap, S. O. *Principles of Electronic Materials and Devices*. (McGraw-Hill Education, New York, 2018).
5. Lottermoser, T. & Meier, D. A short history of multiferroics. *Phys. Sci. Rev.* **6**, 20200032 (2021).
6. Wanic, M. MAGNETOELECTRIC MULTIFERROICS: FROM FUNDAMENTALS TO TRANSFORMATIVE APPLICATIONS – A MINI REVIEW. (2025).
7. Kittel, C. *Introduction to Solid State Physics*. (Wiley, Hoboken, NJ, 2005).
8. Ilic, N. I. & Stojanovic, B. D. Properties of single multiferroics. in *Magnetic, Ferroelectric, and Multiferroic Metal Oxides* 527–543 (Elsevier, 2018). doi:10.1016/B978-0-12-811180-2.00025-6.
9. Vijatovic Petrovic, M. M., Bobic, J. D. & Stojanovic, B. D. Bulk composite multiferroics. in *Magnetic, Ferroelectric, and Multiferroic Metal Oxides* 545–557 (Elsevier, 2018). doi:10.1016/B978-0-12-811180-2.00026-8.
10. ΜΠΕΛΤΣΙΟΣ, Κ. *ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ*. (ΕΚΔΟΣΕΙΣ Α. ΤΖΙΟΛΑ & ΥΙΟΙ Α.Ε., 2010).

11. Liu, G., Nan, C.-W., Cai, N. & Lin, Y. Calculations of giant magnetoelectric effect in multiferroic composites of rare-earth-iron alloys and PZT by finite element method. *Int. J. Solids Struct.* **41**, 4423–4434 (2004).
12. Lin, C. & Lin, Y.-C. Magnetoelectric coupling in nonlinear three-phase composites: A micromechanical study. *Int. J. Mech. Sci.* **299**, 110425 (2025).
13. Lin, C. & Lin, C.-Y. Micromechanical analysis of magnetoelectric coupling of composites containing nonlinear magnetostrictive and piezoelectric constituents. *J. Magn. Magn. Mater.* **608**, 172421 (2024).
14. Song, R., Zhang, J. & Weng, G. J. Three-dimensional finite element simulation of magnetic-mechanical-electrical coupling in layered cylindrical multiferroic structures. *Mech. Mater.* **175**, 104476 (2022).
15. Zhang, J., Wang, X., Chen, X., Du, H. & Weng, G. J. Finite element analysis of the magnetoelectric effect on hybrid magnetoelectric composites. *Compos. Struct.* **296**, 115876 (2022).
16. Fiebig, M. Revival of the magnetoelectric effect. *J. Phys. Appl. Phys.* **38**, R123–R152 (2005).
17. Nan, C.-W., Bichurin, M. I., Dong, S., Viehland, D. & Srinivasan, G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *J. Appl. Phys.* **103**, 031101 (2008).
18. Arshad, M., Varade, P., Bhojak, K., Khan, W. & Kulkarni, A. R. Optimizing ferroelectric, dielectric, magnetic and strong magnetoelectric coupling through strain engineering in (0–3) types multiferroic composites. *J. Solid State Chem.* **352**, 125590 (2025).

19. Rocha, L. S. R. *et al.* Nonvolatile memories. in *Magnetic, Ferroelectric, and Multiferroic Metal Oxides* 275–282 (Elsevier, 2018). doi:10.1016/B978-0-12-811180-2.00014-1.
20. Eerenstein, W., Mathur, N. D. & Scott, J. F. Multiferroic and magnetoelectric materials. *Nature* **442**, 759–765 (2006).
21. Araujo, L. A. O., Foschini, C. R. & Fortulan, C. A. Piezoelectric energy harvesting device based on quartz as a power generator. in *Magnetic, Ferroelectric, and Multiferroic Metal Oxides* 265–274 (Elsevier, 2018). doi:10.1016/B978-0-12-811180-2.00013-X.
22. Umegaki, T. & Kanno, I. Structural optimization of piezoelectric thin-film vibration energy harvesters based on electric equivalent circuit model. in *Nanoscale Ferroelectric-Multiferroic Materials for Energy Harvesting Applications* 161–179 (Elsevier, 2019). doi:10.1016/B978-0-12-814499-2.00009-8.
23. Sharma, M. K., Singh, D., Chauhan, R., Kumar, R. & Chauhan, V. S. Multi-physics property evaluation and actuation response of first-order fractal-inspired photostrictive composites: a finite element analysis. *Compos. Struct.* **373**, 119671 (2025).
24. Dwivedi, G. D. Multiferroic behavior of ferrites. in *Ferrite Nanostructured Magnetic Materials* 633–649 (Elsevier, 2023). doi:10.1016/B978-0-12-823717-5.00037-1.
25. Chawla, K. K. *Composite Materials*. (Springer New York, New York, NY, 2012). doi:10.1007/978-0-387-74365-3.

26. Alarifi, I. M. & Asmatulu, R. Introduction to hybrid composite materials. in *Advanced Hybrid Composite Materials and their Applications* 1–22 (Elsevier, 2023). doi:10.1016/B978-0-323-99126-1.00001-X.
27. Kelly, A. AN INTRODUCTION TO COMPOSITE MATERIALS. in *Concise Encyclopedia of Composite Materials* xvii–xxix (Elsevier, 1994). doi:10.1016/B978-0-08-042300-5.50011-X.
28. Bowen, D. H. *et al.* Manufacturing Methods for Composites: An Overview. in *Concise Encyclopedia of Composite Materials* 175–199 (Elsevier, 1994). doi:10.1016/B978-0-08-042300-5.50022-4.
29. Haresceugh, R. I. *et al.* Aircraft and Aerospace Applications of Composites. in *Concise Encyclopedia of Composite Materials* 1–31 (Elsevier, 1994). doi:10.1016/B978-0-08-042300-5.50012-1.
30. Bunsell, A. R. *et al.* Silicon Carbide Fibers. in *Concise Encyclopedia of Composite Materials* 253–288 (Elsevier, 1994). doi:10.1016/B978-0-08-042300-5.50027-3.
31. Stojanovic, B. D., Dzunuzovic, A. S., Ilic, N. I. & Vijatovic Petrovic, M. M. Complex composites. in *Magnetic, Ferroelectric, and Multiferroic Metal Oxides* 559–569 (Elsevier, 2018). doi:10.1016/B978-0-12-811180-2.00027-X.
32. Barbier, A. Single and heterostructure multiferroic thin films. in *Magnetic, Ferroelectric, and Multiferroic Metal Oxides* 487–514 (Elsevier, 2018). doi:10.1016/B978-0-12-811180-2.00023-2.
33. Holt, D., Jaffe, M., Hancox, N. L. & Harris, B. Halpin–Tsai Equations. in *Concise Encyclopedia of Composite Materials* 125–146 (Elsevier, 1994). doi:10.1016/B978-0-08-042300-5.50018-2.

34. Chou, T.-W. & Bunsell, A. R. Laminates: Elastic Properties. in *Concise Encyclopedia of Composite Materials* 159–173 (Elsevier, 1994). doi:10.1016/B978-0-08-042300-5.50021-2.
35. Morrell, R. *et al.* Nanocomposites. in *Concise Encyclopedia of Composite Materials* 201–220 (Elsevier, 1994). doi:10.1016/B978-0-08-042300-5.50023-6.
36. Alarifi, I. M. & Asmatulu, R. Synthesis of hybrid composite materials. in *Advanced Hybrid Composite Materials and their Applications* 23–43 (Elsevier, 2023). doi:10.1016/B978-0-323-99126-1.00002-1.
37. Ivanov, M., Macutkevicius, J., Grigalaitis, R. & Banys, J. General view of ferroelectrics. in *Magnetic, Ferroelectric, and Multiferroic Metal Oxides* 5–33 (Elsevier, 2018). doi:10.1016/B978-0-12-811180-2.00001-3.
38. Zhao, H. *et al.* Aurivillius layer-structured multiferroic materials. in *Nanoscale Ferroelectric-Multiferroic Materials for Energy Harvesting Applications* 41–60 (Elsevier, 2019). doi:10.1016/B978-0-12-814499-2.00003-7.
39. Hariharan, R. High-sensitivity piezoelectric perovskites for magnetoelectric composites. in *Hybrid Perovskite Composite Materials* 147–167 (Elsevier, 2021). doi:10.1016/B978-0-12-819977-0.00006-8.
40. Jia, T., Kimura, H., Cheng, Z. & Zhao, H. Domain switching in bismuth layer-structured multiferroic films. in *Nanoscale Ferroelectric-Multiferroic Materials for Energy Harvesting Applications* 1–21 (Elsevier, 2019). doi:10.1016/B978-0-12-814499-2.00001-3.

41. Cheng, Z. *et al.* Strain tuning effects in perovskites. in *Nanoscale Ferroelectric-Multiferroic Materials for Energy Harvesting Applications* 23–39 (Elsevier, 2019). doi:10.1016/B978-0-12-814499-2.00002-5.
42. Xu, Y. Organic ferroelectric materials and piezoelectric composites. in *Ferroelectric Materials and their Applications* 329–362 (Elsevier, 1991). doi:10.1016/B978-0-444-88354-4.50014-0.
43. Damjanovic, D. Enhancement of piezoelectric properties in perovskite crystals by thermally, compositionally, electric field and stress-induced instabilities. (2008).
44. Cullity, B. D. & Graham, C. D. *Introduction to Magnetic Materials*. (IEEE Press, Piscataway, 2009). doi:10.1002/9780470386323.
45. Kong, L. B. *et al.* Theory of ferrimagnetism and ferrimagnetic metal oxides. in *Magnetic, Ferroelectric, and Multiferroic Metal Oxides* 287–311 (Elsevier, 2018). doi:10.1016/B978-0-12-811180-2.00015-3.
46. Srdić, V. V., Cvejić, Z., Milanović, M., Stojanović, G. & Rakić, S. Metal oxide structure, crystal chemistry, and magnetic properties. in *Magnetic, Ferroelectric, and Multiferroic Metal Oxides* 313–332 (Elsevier, 2018). doi:10.1016/B978-0-12-811180-2.00016-5.
47. Dung, D. D. Magnetism in titanates. in *Defect-Induced Magnetism in Oxide Semiconductors* 481–527 (Elsevier, 2023). doi:10.1016/B978-0-323-90907-5.00011-7.
48. Hoffmann, F. *Introduction to Crystallography*. (Springer International Publishing, Cham, 2020). doi:10.1007/978-3-030-35110-6.
49. Haertling, G. H. *Ferroelectric ceramics : History and technology*. (1999).

50. Curie, J. & Curie, P. Phénomènes électriques des cristaux hémihédres à faces inclinées. *J. Phys. Théorique Appliquée* **1**, 245–251 (1882).
51. Uchino, K. Introduction to Piezoelectric Actuators and Transducers. in (2003).
52. Arfken, G. B., Weber, H.-J., Arfken, G. B. & Weber, H.-J. *Mathematical Methods for Physicists*. (Elsevier Academic Press, Amsterdam, Heidelberg, 2008).
53. Boas, M. L. MATHEMATICAL METHODS IN THE PHYSICAL SCIENCES. (2006).
54. Tiersten, H. F. Linear Piezoelectric Plate Vibrations: Elements of the Linear Theory of Piezoelectricity and the Vibrations Piezoelectric Plates. in (1969).
55. Zhou, D. Experimental Investigation of Non-linear Constitutive Behavior of PZT Piezoceramics. (2003).
56. Engdahl, G. *Handbook of Giant Magnetostrictive Materials*. (2000).
57. Milton, G. W. *The Theory of Composites*. (Cambridge University Press, Cambridge, 2002). doi:10.1017/CBO9780511613357.
58. Hashin, Z. Analysis of Composite Materials—A Survey. *J. Appl. Mech.* **50**, 481–505 (1983).
59. Newnham, R. E. *Properties of Materials: Anisotropy, Symmetry, Structure*. (Oxford University Press, 2004). doi:10.1093/oso/9780198520757.001.0001.
60. Nan, C.-W. Magnetoelectric effect in composites of piezoelectric and piezomagnetic phases. *Phys. Rev. B* **50**, 6082–6088 (1994).
61. Halpin, J. C. *EFFECTS OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON COMPOSITE MATERIALS*: <http://www.dtic.mil/docs/citations/AD0692481> (1969) doi:10.21236/AD0692481.

62. Dunn, M. L. & Taya, M. Micromechanics predictions of the effective electroelastic moduli of piezoelectric composites. *Int. J. Solids Struct.* **30**, 161–175 (1993).
63. Palneedi, H., Annapureddy, V., Priya, S. & Ryu, J. Status and Perspectives of Multiferroic Magnetolectric Composite Materials and Applications. *Actuators* **5**, 9 (2016).
64. Ma, J., Hu, J., Li, Z. & Nan, C. Recent Progress in Multiferroic Magnetolectric Composites: from Bulk to Thin Films. *Adv. Mater.* **23**, 1062–1087 (2011).
65. Shindo, Y. *Electromagneto-Mechanics of Material Systems and Structures*. (Wiley, 2015). doi:10.1002/9781118838099.
66. Bichurin, M. I. *et al.* Resonance magnetolectric effects in layered magnetostrictive-piezoelectric composites. *Phys. Rev. B* **68**, 132408 (2003).
67. Newnham, R. E., Skinner, D. P. & Cross, L. E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites. *Mater. Res. Bull.* **13**, 525–536 (1978).
68. Dong, S., Cheng, J., Li, J. F. & Viehland, D. Enhanced magnetolectric effects in laminate composites of Terfenol-D/Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> under resonant drive. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 4812–4814 (2003).
69. Zheng, H. *et al.* Multiferroic BaTiO<sub>3</sub>-CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanostructures. *Science* **303**, 661–663 (2004).
70. Spaldin, N. A. & Ramesh, R. Advances in magnetolectric multiferroics. *Nat. Mater.* **18**, 203–212 (2019).
71. Pradhan, D. K. *et al.* Exploring the Magnetolectric Coupling at the Composite Interfaces of FE/FM/FE Heterostructures. *Sci. Rep.* **8**, 17381 (2018).

72. Ryu, J., Priya, S., Uchino, K. & Kim, H.-E. Magnetolectric Effect in Composites of Magnetostrictive and Piezoelectric Materials. *J. Electroceramics* **8**, 107–119 (2002).
73. Srinivasan, G., Rasmussen, E., Levin, B. & Hayes, R. Magnetolectric Effects in Bilayers and Multilayers of Magnetostrictive and Piezoelectric Perovskite Oxides. *Phys Rev B* **65**, (2002).
74. Dong, S., Xing, Z., Li, J. & Viehland, D. Giant Magnetolectric Effect in Metglas/Polyvinylidene-Fluoride Laminates. *Appl. Phys. Lett.* **89**, 083507–083507 (2006).
75. Filippov, D. A., Tikhonov, A. A., Laletin, V. M., Firsova, T. O. & Manicheva, I. N. Magnetolectric Effect in Gallium Arsenide–Nickel–Tin–Nickel Multilayer Structures. *Tech. Phys.* **63**, 190–192 (2018).
76. Zhu, R., Wang, Z., Cheng, Z. & Kimura, H. Ferroelectric nanofibers and their application in energy harvesting. in *Nanoscale Ferroelectric-Multiferroic Materials for Energy Harvesting Applications* 181–194 (Elsevier, 2019). doi:10.1016/B978-0-12-814499-2.00010-4.
77. Wang, W. *et al.* Effect of leakage current on magnetolectric effect of 0–3 multiferroic composites based on an equivalent circuit model. *Acta Mater.* **285**, 120575 (2025).
78. Alarifi, I. M. & Asmatulu, R. Smart hybrid composite materials. in *Advanced Hybrid Composite Materials and their Applications* 45–66 (Elsevier, 2023). doi:10.1016/B978-0-323-99126-1.00003-3.

79. Matthews, F. L., Davies, G. A. O., Hitchings, D. & Soutis, C. Fracture and fracture mechanics. in *Finite Element Modelling of Composite Materials and Structures* 139–157 (Elsevier, 2000). doi:10.1533/9781855738928.4.139.