



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

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΗΜΗΤΡΑ ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗ

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ
ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ
ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

ΙΩΑΝΝΙΝΑ, 2019

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην εξειδίκευση:

Μοντελοποίηση και προσομοίωση

που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε την 23/11/2018 από την εξεταστική επιτροπή:

1. **Ευάγγελος Χατζηγεωργίου**, Αναπληρωτής Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων, **Επιβλέπων**.
2. **Βασίλειος Καλπακίδης**, Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων.
3. **Λεωνίδας Γεργίδης**, Επίκουρος Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων.

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 διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΠΜΣ) «Προηγμένα Υλικά» του τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών στο εργαστήριο Μοντελοποίησης και Προσομοίωσης της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Το θέμα της μου ανέθεσε ο κ. Ευάγγελος Χατζηγεωργίου, αναπληρωτής καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, που ήταν και ο επιβλέπων καθηγητής. Τον ευχαριστώ θερμά για την συνεχή καθοδήγησή του, για τις γνώσεις που μου μετέδωσε και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Επίσης, ευχαριστώ πολύ τον κ. Βασίλειο Καλπακίδη, καθηγητή του ΤΜΕΥ και τον κ. Λεωνίδα Γεργίδη, επίκουρο καθηγητή του ΤΜΕΥ, για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για τη συνεχή υποστήριξή τους και παρότρυνσή τους για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Ιωαννίνα, Ιανουάριος 2019

Δήμητρα Παπαγιάννη

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	14
ABSTRACT	14
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
1.1 Σύνθετα Υλικά.....	16
1.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών	16
1.3 Μηχανικές τάσεις και μηχανικές τροπές, ηλεκτρικό πεδίο και ηλεκτρική μετατόπιση	17
1.3.1 Ο τανυστής τάσεων	17
1.3.2 Ο τανυστής των τροπών – παραμορφωτική κατάσταση σώματος.....	18
1.3.3 Ηλεκτρικό πεδίο και ηλεκτρική μετατόπιση	19
1.4 Ευφυή υλικά.....	19
1.4.1 Εφαρμογές ευφύων υλικών	20
1.5 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	24
1.6 Σκοπός εργασίας	25
1.7 Δομή της εργασίας	25
2.ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ	26
2.1 Φαινόμενο πιεζοηλεκτρισμού	26
2.1.1 Ευθύ και αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	26
2.2 Η ανακάλυψη του Πιεζοηλεκτρισμού	27
2.3 Γραμμική θεωρία πιεζοηλεκτρικών υλικών	28
2.4 Πιεζοηλεκτρικά υλικά.....	29
2.4.1 Η περοβσκιτική δομή του PZT	30
2.5 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών υλικών	32
3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗΣ	36
3.1 Ιστορική αναδρομή αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων.....	36
3.2 Το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE) - η μέθοδος ομογενοποίησης	37
4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	42
4.1 Εισαγωγή στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων	42
4.2 Κατασκευή γεωμετρίας	42
4.3 Εισαγωγή μηχανικών, πιεζοηλεκτρικών και διηλεκτρικών ιδιοτήτων.....	47
4.4 Επαφή σωμάτων	49
4.5 Διακριτοποίηση	50
4.6 Περιοδικές συνοριακές συνθήκες.....	53

4.8	Εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	60
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	62
5.1	Αποτελέσματα από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEA).....	62
5.2	Εικόνες των Rνε μετά την επίλυση για κάθε μία περίπτωση	63
5.3	Παρουσίαση διαγραμμάτων	72
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	78
6.1	Συζήτηση αποτελεσμάτων	78
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	82
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	83
	ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ ΤΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ	84

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: σύνθετο με ίνες	16
Σχήμα 2: Ο τανυστής τάσεων.....	17
Σχήμα 3: Οι εννιά συνιστώσες του τανυστή τάσεων.....	18
Σχήμα 4: Οι έξι συνιστώσες του τανυστή τάσεων λόγω συμμετρίας.....	18
Σχήμα 5: Οι εννιά συνιστώσες του τανυστή απειροστών τροπών.....	19
Σχήμα 6: Οι έξι συνιστώσες του τανυστή απειροστών τροπών λόγω συμμετρίας.....	19
Σχήμα 7: βιοϋλικό - ικρίωμα	21
Σχήμα 8: ηλεκτρονική τεχνολογία-chip.....	22
Σχήμα 9: πιεζοηλεκτρικά υλικά - κεραμικά PZT.....	23
Σχήμα 10: δομή γραφενίου.....	23
Σχήμα 11: βήμα διακριτοποίησης - μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	24
Σχήμα 12: πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.....	27
Σχήμα 13: χαλαζίας.....	29
Σχήμα 14: πιεζοκεραμικό υλικό.....	30
Σχήμα 15: περοβσκιτική δομή υλικών PZT.....	31
Σχήμα 16: εφαρμογή πιεζοκεραμικών υλικών σε βιοϊατρικά εργαλεία.....	33
Σχήμα 17 : σύνθετο πιεζοηλεκτρικό υλικό	34
Σχήμα 18: Επιλογή του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου (RVE).....	38
Σχήμα 19: Περιγραφή συνθήκης μετατόπισης στο αντιπροσωπευτικό στοιχείο RVE.....	39
Σχήμα 20: Το περιβάλλον του Ansys-το πιεζοηλεκτρικό extention - piezo and MEMS.....	42
Σχήμα 21: Η μήτρα και οι ίνες.....	43
Σχήμα 22: Τα τέσσερα μοντέλα σύνθετων υλικών με διαφορετικά ποσοστά όγκου ινών	44
Σχήμα 23: Επιλογή αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου – RVE.....	44
Σχήμα 24: Ονομασία πλευρών του RVE.....	45
Σχήμα 25: Τα τέσσερα αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου με διαφορετικά ποσοστά όγκου ινών.....	46
Σχήμα 26: Δημιουργία ξεχωριστών σωμάτων – επαφών (μήτρα – ίνες).....	47
Σχήμα 27: Οι τέσσερις περιοχές επαφής μεταξύ μήτρας και ινών.....	49
Σχήμα 28: Το διακριτοποιημένο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE).....	50

Σχήμα 29: Ομαλή «διάδοση» του πλέγματος (κόκκινη γραμμή) από υλικό ίνας σε μήτρα.....	51
Σχήμα 30: Περιγραφή του στοιχείου Solid 226.....	52
Σχήμα 31: Περιγραφή του στοιχείου Conta 174.....	52
Σχήμα 32: Επιβολή συνοριακών συνθηκών στην πλευρά Z+ , $u_i=5\mu m$, $\Phi=0V$	54
Σχήμα 33: Επιβολή συνοριακών συνθηκών στην πλευρά X+ , $u_i=5\mu m$, $\Phi=0V$	55
Σχήμα 34: Επιβολή συνοριακών συνθηκών για τον υπολογισμό των C_{44} και e_{15}	56
Σχήμα 35: Επιβολή συνοριακών συνθηκών για τον υπολογισμό του C_{66}	57
Σχήμα 36: Επιβολή συνοριακών συνθηκών για τον υπολογισμό των e_{13}, e_{33}, e_{33}	58
Σχήμα 37: Επιβολή συνοριακών συνθηκών για τον υπολογισμό του ϵ_{11}	58
Σχήμα 38: Επιλογή τύπου solver	60
Σχήμα 39: Λίστα αποτελεσμάτων μετά την επίλυση.....	61
Σχήμα 40: Ορθή τάση μετά από επιβολή μετατόπισης στην επιφάνεια Z+(z διεύθυνση) - T_{33}	62
Σχήμα 41: Ορθή παραμόρφωση μετά από επιβολή μετατόπισης στην επιφάνεια διεύθυνση) - S_{33}	63
Σχήμα 42 : Ορθή τάση μετά από επιβολή μετατόπισης στην επιφάνεια Z+ (x διεύθυνση) - T_{11}	64
Σχήμα 43: Ορθή τάση μετά από επιβολή μετατόπισης στην επιφάνεια X+ (x διεύθυνση) - T_{11}	64
Σχήμα 44: Ορθή παραμόρφωση μετά από επιβολή μετατόπισης στην επιφάνεια X+ (x διεύθυνση) - S_{11}	65
Σχήμα 45: Ορθή τάση μετά από επιβολή μετατόπισης στην επιφάνεια X+ (y διεύθυνση) - T_{22}	65
Σχήμα 46: Διατμητική τάση μετά από επιβολή σύνθετων σ.σ –Υπολογισμός - T_{23}	66
Σχήμα 47: Διατμητική παραμόρφωση μετά από επιβολή σύνθετων σ.σ –Υπολογισμός - S_{23}	66
Σχήμα 48: Ηλεκτρική μετατόπιση μετά από επιβολή σύνθετων σ.σ –Υπολογισμός - D_3	67
Σχήμα 49: Διατμητική τάση μετά από επιβολή σύνθετων σ.σ –Υπολογισμός - T_{12}	67
Σχήμα 50 : Διατμητική παραμόρφωση μετά από επιβολή σύνθετων σ.σ –Υπολογισμός - S_{12}	68
Σχήμα 51: Ορθή τάση μετά από επιβολή μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης στην επιφάνεια Z+ (z διεύθυνση) - T_{33}	68

Σχήμα 52: Ορθή τάση μετά από επιβολή μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης στην επιφάνεια $X+$ (x διεύθυνση) – T_{11}	69
Σχήμα 53: Ηλεκτρικό πεδίο μετά από την επιβολή μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης (διεύθυνση z) – E_3	69
Σχήμα 54: Ηλεκτρική μετατόπιση μετά από την επιβολή μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης (διεύθυνση z) – D_3	70
Σχήμα 55: Ηλεκτρικό πεδίο μετά από την επιβολή μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης (διεύθυνση y) E_2	70
Σχήμα 56: Ηλεκτρική μετατόπιση μετά από την επιβολή μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης (διεύθυνση x) D_1	70

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Φυσικά πιεζοηλεκτρικά υλικά (1).....	29
Πίνακας 2: Φυσικά πιεζοηλεκτρικά υλικά (2).....	30
Πίνακας 3 : Συνθετικά πιεζοηλεκτρικά υλικά.....	30
Πίνακας 4: Συνθετικά πιεζοκεραμικά υλικά.....	30
Πίνακας 5: Ακμές αντιπροσωπευτικών στοιχείων όγκων – RVE και ποσοστά όγκου ινών των πέντε μοντέλων.....	46
Πίνακας 6: Μηχανικές και διηλεκτρικές ιδιότητες υλικού μήτρας.....	47
Πίνακας 7: Μηχανικές πιεζοηλεκτρικές και διηλεκτρικές ιδιότητες υλικού ινών.....	47
Πίνακας 8: Ορθός τρόπος τοποθέτησης σταθερών στο Ansys.....	48
Πίνακας 9: Ορθός τρόπος τοποθέτησης πιεζοελαστικών σταθερών στο Ansys	48
Πίνακας 10: Ορθός τρόπος τοποθέτησης διηλεκτρικών σταθερών στο Ansys	48
Πίνακας 11: Συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στα RVE για υπολογισμό των σταθερών.....	59
Πίνακας 12: Αποτελέσματα της προσομοίωσης.....	62

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: μεταβολή του C_{33} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f	72
Διάγραμμα 2: μεταβολή του C_{13} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f	72
Διάγραμμα 3: μεταβολή του C_{11} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f	73
Διάγραμμα 4: μεταβολή του C_{12} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f	73
Διάγραμμα 5: μεταβολή του C_{44} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f	74
Διάγραμμα 6: μεταβολή του C_{66} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f	74
Διάγραμμα 7: μεταβολή του e_{13} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f	75
Διάγραμμα 8: μεταβολή του e_{33} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f	75
Διάγραμμα 9: μεταβολή του e_{15} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f	76
Διάγραμμα 10: μεταβολή του ϵ_{33} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f	76
Διάγραμμα 11: μεταβολή του ϵ_{11} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f	77

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκαν τέσσερα τρισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα σύνθετου υλικού, με διαφορετικά ποσοστά όγκου ινών από 17% – 54% και τα αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου τους – RVE με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την εύρεση των ελαστικών, πιεζοηλεκτρικών και διηλεκτρικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Μεγάλη έμφαση δόθηκε στην επιβολή συνοριακών συνθηκών ώστε να βρεθούν οι προαναφερθείσες ζητούμενες ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας 2 εμπορικά πακέτα πεπερασμένων στοιχείων. Το Ansys 19.1 μαζί με το Piezo and MEMS extension και το Comsol Multiphysics 5.4

Τα αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου μοντελοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το στοιχείο του Ansys, Solid 226 με δυνατότητα για πιεζοηλεκτρική ανάλυση – τρισδιάστατο ισοπαραμετρικό εξαεδρικό στοιχείο με 20 κόμβους με έως 5 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο.

Τα βήματα τα οποία ακολουθήθηκαν για την μοντελοποίηση ήταν : κατασκευή γεωμετρίας → εισαγωγή μηχανικών ιδιοτήτων → ρύθμιση ιδιοτήτων διεπαφής → διακριτοποίηση → εισαγωγή πιεζοηλεκτρικών και διηλεκτρικών ιδιοτήτων → εφαρμογή περιοδικών συνοριακών συνθηκών → ρυθμίσεις επίλυσης → λήψη αποτελεσμάτων → υπολογισμός ζητούμενων σταθερών. Η διαδικασία μοντελοποίησης ακολουθεί τις ίδιες βασικές αρχές και στα 2 προγράμματα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: σύνθετα υλικά, πιεζοηλεκτρισμός, ομογενοποίηση, πεπερασμένα στοιχεία

ABSTRACT

The present work deals with the modeling of four 3D periodic composites made of piezoceramic fibers and polymer matrix with different volume fractions 17%-54%. We focus on predicting the effective coefficients - elastic, piezoelectric and dielectric properties of periodic transversely isotropic fiber composites using representative volume element method (unit cell method). Great emphasis was placed on the construction of six special cases of boundary conditions in order to find the above mentioned properties of the composite material. The numerical approach used is this of finite element method (FEM) using Ansys 19.1 and Comsol Multiphysics 5.4.

The representative volume element models were modeled using the Ansys element : Solid 226 with the capability of modeling piezoelectric applications hence it is a 3-D, 20-Node Coupled-Field element.

The steps followed in this work were: building the geometry of the four models → adding mechanical properties → adjusting behavior of interface → boundary conditions → solve → results → calculation of elastic, piezoelectric and dielectric properties of the composite material.

KEY WORDS: composites, piezoelectricity, homogenization, finite element method.

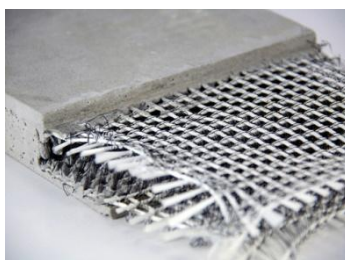
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σύνθετα Υλικά

Ορισμός: (Agarwal – 1990): Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Για ένα σύστημα ο όρος “σύνθετο” σημαίνει ότι αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material). Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του.

Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.



Σχήμα 1: σύνθετο με ίνες

1.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

Ανάλογα με τη μορφή που έχει η ενίσχυση των σύνθετων υλικών μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Ινώδη σύνθετα – ενίσχυση με ίνες
- Στρωματικά σύνθετα – επάλληλες στρώσεις υλικών
- Κοκκώδη σύνθετα – ενίσχυση σωματιδίων διεσπαρμένων στη μήτρα

Ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα – ίνες σε μία μόνο κατεύθυνση
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα σε ακανόνιστες διευθύνσεις.

Ανάλογα με τη μορφή που έχει η ενίσχυση των σύνθετων υλικών μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Ινώδη σύνθετα – ενίσχυση με ίνες
- Στρωματικά σύνθετα – επάλληλες στρώσεις υλικών
- Κοκκώδη σύνθετα – ενίσχυση σωματιδίων διεσπαρμένων στη μήτρα

Ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα – ίνες σε μία μόνο κατεύθυνση
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα σε ακανόνιστες διευθύνσεις

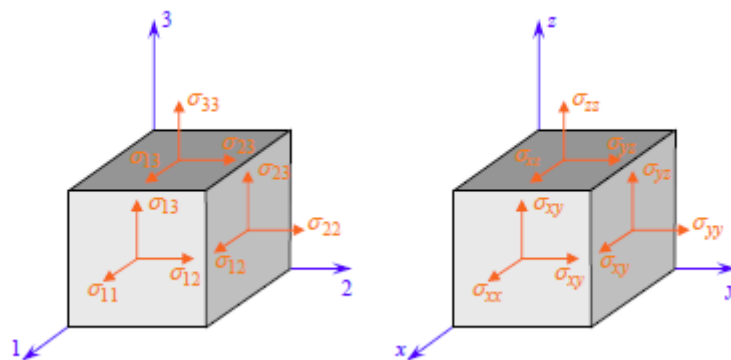
1.3 Μηχανικές τάσεις και μηχανικές τροπές, ηλεκτρικό πεδίο και ηλεκτρική μετατόπιση

1.3.1 Ο τανυστής τάσεων

Η εντατική κατάσταση σε κάθε σημείο M ενός συνεχούς μέσου, προσδιορίζεται πλήρως με τη βοήθεια του τανυστή των τάσεων που συμβολίζεται με $\sigma(M)$. Ο τανυστής αυτός είναι ένας συμμετρικός καρτεσιανός τανυστής δεύτερης τάξης και μπορεί να παρασταθεί με τη βοήθεια ενός συμμετρικού 3×3 πίνακα, στο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς.

$$\sigma(M) = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \text{ με } \sigma_{12} = \sigma_{21}, \sigma_{13} = \sigma_{31}, \sigma_{32} = \sigma_{23}$$

Σχήμα 2: Ο τανυστής τάσεων



Σχήμα 3: Οι εννιά συνιστώσες του τανυστή τάσεων

Η συμμετρία του τανυστή των τάσεων περιορίζει τον αριθμό των απαραίτητων συνιστωσών σε έξι. Για το λόγο αυτό, ο πίνακας με τις εννιά συνιστώσες του τανυστή συχνά αντικαθίσταται από ένα πίνακα στήλη με έξι συνιστώσες, χρησιμοποιώντας μία από τις παρακάτω μορφές:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}$$

Σχήμα 4: Οι έξι συνιστώσες του τανυστή τάσεων λόγω συμμετρίας

1.3.2 Ο τανυστής των τροπών – παραμορφωτική κατάσταση σώματος

Η παραμορφωτική κατάσταση σε κάθε σημείο M του συνεχούς μέσου, προσδιορίζεται με τη βοήθεια του τανυστή των απειροστών τροπών που συμβολίζεται με $\epsilon(M)$. Και αυτός ο τανυστής είναι ένας συμμετρικός καρτεσιανός τανυστής δεύτερης τάξης και μπορεί να παρασταθεί με τη βοήθεια ενός συμμετρικού 3×3 πίνακα, στο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς.

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \text{ με } \varepsilon_{12} = \varepsilon_{21}, \varepsilon_{13} = \varepsilon_{31}, \varepsilon_{32} = \varepsilon_{23}$$

Σχήμα 5: Οι εννιά συνιστώσες του τανυστή απειροστών τροπών

Όπως και στη περίπτωση του τανυστή των τάσεων, η συμμετρία του τανυστή των τροπών περιορίζει τον αριθμό των απαραίτητων συνιστωσών σε έξι και έτσι ο πίνακας με τις εννιά συνιστώσες του τανυστή συχνά αντικαθίσταται από ένα πίνακα στήλη με έξι συνιστώσες, χρησιμοποιώντας μία από τις παρακάτω μορφές:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix}$$

Σχήμα 6: Οι έξι συνιστώσες του τανυστή απειροστών τροπών λόγω συμμετρίας

1.3.3 Ηλεκτρικό πεδίο και ηλεκτρική μετατόπιση

Ηλεκτρικό πεδίο ονομάζουμε το χώρο μέσα στον οποίο όταν βρεθεί ηλεκτρικό φορτίο δέχεται ηλεκτροστατική δύναμη. Είναι ένα διανυσματικό μέγεθος και συμβολίζεται με $\vec{E}$. Μονάδα μέτρησης στο SI είναι $V m^{-1}$.

Η Ηλεκτρική μετατόπιση ορίζεται ως $D = \varepsilon_0 E + P$. Είναι η ποσότητα που σχετίζεται με την αλλαγή του ηλεκτρικού πεδίου. Υπάρχει σε διηλεκτρικά υλικά και επίσης στον κενό χώρο. Το ρεύμα μετατόπισης έχει ίδιες μονάδες με εκείνες του ηλεκτρικού ρεύματος.

1.4 Ευφυή υλικά

Μέσα στην προηγούμενη δεκαετία, η επιστημονική και τεχνολογική πρόοδος στην κατανόηση της συμπεριφοράς και της σχέσης της δομής και των ιδιοτήτων των υλικών έχει οδηγήσει στην εμφάνιση πολλών υλικών που αποκαλούνται έξυπνα ή ευφυή υλικά.

Ως ευφυή υλικά αναφέρονται συστήματα που έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους ή ορισμένα χαρακτηριστικά τους (σχήμα, ιδιοσυχνότητα, συντελεστής απόσβεσης δονήσεων κτλ.) με δεδομένο και ελεγχόμενο τρόπο, μέσω μιας διέγερσης.

Τα τελευταία χρόνια, ερευνητές με διαφορετικούς τρόπους έχουν κάνει τεράστιες και έντονες προσπάθειες για να αναπτυχθούν οι έξυπνες ή ευφυείς δομές, οι οποίες θα μπορούν να επιτηρούν τις συνθήκες τους, να ανιχνεύουν επικείμενη αστοχία, να ελέγχουν ή να θεραπεύουν ζημιές, και να προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα.

Ως προηγμένα λειτουργικά υλικά λοιπόν, ορίζουμε αυτά των οποίων η λειτουργία είναι εξειδικευμένη και διαφορετική από αυτά που απαιτούνται σε παραδοσιακές μεγάλες κατασκευές. Σε αντίθεση με υλικά όπως μέταλλα, κεραμικά, τσιμέντα κ. που χρησιμοποιούνται για χιλιετίες σε κτήρια, μεγάλες κατασκευές, εργαλεία κλπ. τα προηγμένα λειτουργικά υλικά αναπτύχθηκαν κυρίως την τελευταία 60ετία και επέδρασαν καταλυτικά στην ανάπτυξη τεχνολογιών και κλάδων με τεράστια οικονομική σημασία στην ανθρωπότητα, κλάδοι που δεν θα υπήρχαν αν αυτά τα υλικά δεν είχαν επινοηθεί. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ημιαγωγοί χωρίς την ανάπτυξη των οποίων δεν θα είχε αναπτυχθεί η τεχνολογία της Πληροφορίας. Τα προηγμένα λειτουργικά υλικά είναι αποτέλεσμα σύγχρονης έρευνας και τεχνολογίας αιχμής και παρουσιάζουν ιδιαίτερες λειτουργίες, αντιδρούν στα εξωτερικά ερεθίσματα και αποκτούν στοχευμένες ιδιότητες, ανάλογα με την εφαρμογή που προορίζονται και συνεπώς θεωρούνται προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Τέτοια προϊόντα αποτελούν πλέον το ζητούμενο τόσο στον ερευνητικό όσο και στο χώρο της βιομηχανικής παραγωγής σε Ευρωπαϊκό επίπεδο.

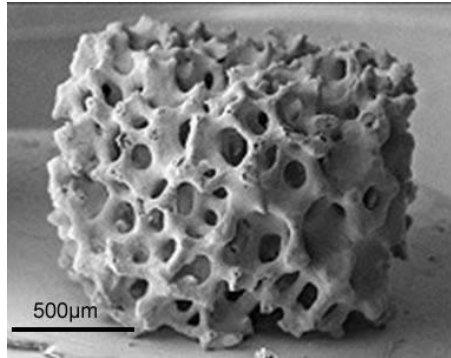
Στη χώρα μας, ο τομέας των προηγμένων λειτουργικών υλικών σχετίζεται ούτως ή άλλως με τις ερευνητικές δραστηριότητες πλήθους ακαδημαϊκών/ερευνητικών ιδρυμάτων, αλλά το πιο σημαντικό είναι ότι έχει άμεσο αντίκτυπο στους μεγαλύτερους βιομηχανικούς της κλάδους : τη χημική βιομηχανία (περιλαμβάνει και τα πλαστικά), τη βιομηχανία μετάλλων και δομικών υλικών.

1.4.1 Εφαρμογές ευφυών υλικών

Μερικές εφαρμογές των ευφυών υλικών βρίσκονται στους παρακάτω τομείς :

Βιοϋλικά

Με τον όρο Βιοϋλικά, περιγράφουμε όλα εκείνα τα υλικά, φυσικά ή τεχνητά, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αντικατάσταση ή σε συνέργεια με βιολογικό υλικό, ή για σκοπούς που εξυπηρετούν βιολογικές λειτουργίες. Η τεχνολογία των βιοϋλικών είναι σε συνεχώς αναπτυσσόμενο στάδιο, ακολουθώντας την εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών και τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις της ιατρικής. Η εξέλιξη των βιοϋλικών έχει ως συνέπεια υλικά και ιατρικές συσκευές με προηγμένες ιδιότητες, όπως βελτιωμένη λειτουργικότητα, αντοχή στο χρόνο και αυξημένη θεραπευτική και διαγνωστική ικανότητα που βελτιώνουν την ποιότητα και το προσδόκιμο ζωής των ασθενών και μειώνουν το κόστος για το Εθνικό Σύστημα Υγείας.



Σχήμα 7: βιοϋλικό - ικρίωμα

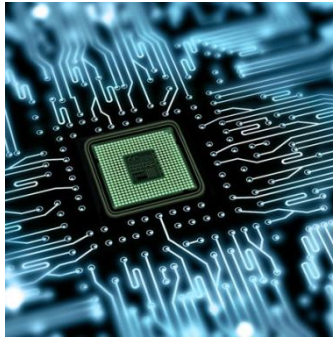
Υλικά για ολοκληρωμένες ηλεκτρονικές και φωτονικές τεχνολογίες

Τα υλικά με εφαρμογή στις ηλεκτρονικές και φωτονικές ολοκληρωμένες τεχνολογίες που απαρτίζουν την μικρο – νανοηλεκτρονική τεχνολογία και επηρεάζουν την ανάπτυξη όλο και μεγαλύτερου αριθμού κλάδων της επιστήμης και της οικονομίας και για τον λόγο αυτό αποτελούν ‘τεχνολογίες κλειδιά’ στην στρατηγική τόσο στην ΕΕ όσο και στον υπόλοιπο πλανήτη.

Οι ηλεκτρικές, μορφολογικές, οπτικές, μηχανικές και μαγνητικές ιδιότητες των υλικών αυτών προσδιορίζονται με εξειδικευμένες μεθόδους χαρακτηρισμού οι οποίες επίσης εξελίσσονται παράλληλα με την εξέλιξη της τεχνολογίας. Οι ολοκληρωμένες τεχνολογίες ηλεκτρονικής και φωτονικής κυριαρχούνται από την τεχνολογία ανόργανων ημιαγωγών (Si, III-V) και από υλικά (αγωγούς και μονωτές) υπό την μορφή λεπτών στρωμάτων και μπορούν να σχηματιστούν με ακρίβεια.

Παράλληλα νέα υλικά, όπως μοριακά υλικά, εμπλουτίζουν τα ήδη υπάρχοντα προσφέροντας καινούργιες ευκαιρίες. Τα μεγάλα κέντρα αποθήκευσης δεδομένων απαραίτητα στην τεχνολογία του διαδικτύου θέτουν προδιαγραφές για ενεργειακά αποτελεσματικότερη νανοηλεκτρονική δημιουργώντας παράθυρο καινοτομικών ευκαιριών για διατάξεις επεξεργασίας και αποθήκευσης της πληροφορίας που μπορούν να λειτουργήσουν με μικρότερη κατανάλωση ισχύος χρησιμοποιώντας καινούργια υλικά. Αναμένεται στην πλατφόρμα πυριτίου να προστεθούν και νέοι ημιαγωγοί (Ge, III-V) με χρήση επιταξιακών διεργασιών καθώς και νέα υλικά (π.χ. οξείδια μετάλλων, μαγνητικά υλικά, 2-διάστατα υλικά) για τα οποία απαιτείται κυρίως η χρήση τεχνολογιών κενού για την ανάπτυξή τους. Τα μικροσυστήματα αποτελούν την διεπιφάνεια αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον (π.χ. αισθητήρες και επενεργητές) και μπορούν να συνδυάζουν ηλεκτρονικές με μηχανικές ή οπτικές ή βιοχημικές λειτουργίες. Έμφαση δίνεται σε μικροσυστήματα που μπορούν να αναπτυχθούν σε ημιαγωγικά υποστρώματα. Ενσωμάτωση υλικών (ανόργανων ή οργανικών) σε μορφή λεπτών υμενίων, νανοσυρμάτων ή νανοσωματιδίων ιδιαίτερα αν αυτά μπορούν να αποκριθούν επιλεκτικά σε εξωτερικά ερεθίσματα.

Υλικά για συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον (π.χ. πιεζοηλεκτρικά, θερμοηλεκτρικά) για ενεργειακά αυτόνομες διασυνδεδεμένες συσκευές. Φωτονικές διατάξεις με έμφαση σε δυνατότητα ολοκλήρωσης στην πλατφόρμα πυριτίου είτε μονολιθικά είτε υβριδικά και σε υλικά για ολοκληρωμένους (on – chip) κυματοδηγούς και φωτοανιχνευτές. Ολοκλήρωση μικρο – ρευστομηχανικών συστημάτων σε επίπεδο ψηφίδας (lab-on-chip) για εφαρμογές σε υγεία και περιβάλλον.



Σχήμα 8: ηλεκτρονική τεχνολογία-chip

Πολύ-λειτουργικά – Ευφυή Υλικά

Σήμερα, υπάρχουν αρκετά υλικά ή συστήματα υλικών που θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν ως πολύ-λειτουργικά, με κάποια από αυτά να χρησιμοποιούνται ευρέως και με κάποια από αυτά να βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της έρευνας ή της ανάπτυξης προϊόντος. Σημειώνουμε ότι στην παρούσα κατηγορία συμπεριλαμβάνονται και τα υλικά που εναποτίθενται με μορφή λεπτού στρώματος χρησιμοποιώντας τεχνικές που βασίζονται σε εναπόθεση από διάλυμα όσο και αυτές που βασίζονται σε εναπόθεση από ατμό.

Σε μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης των πολύ-λειτουργικών υλικών και μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής υποπεριοχές:

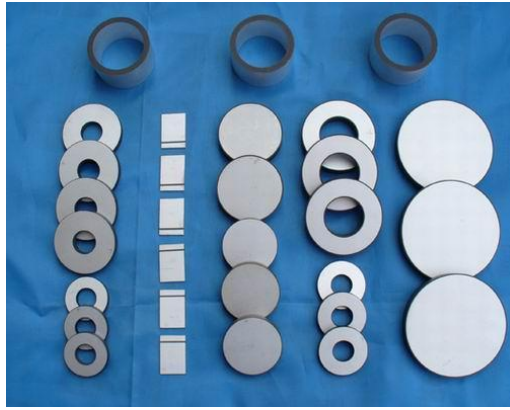
πολυλειτουργικά – ευφυή υλικά που ανταποκρίνονται σε εξωτερικά ερεθίσματα με κυριότερες εφαρμογές στον τομέα των μεταφορών και των κατασκευών

υλικά μνήμης σχήματος: κράματα μετάλλων που μπορούν να μεταβάλλουν με προκαθορισμένο τρόπο το σχήμα τους υπό την επίδραση της θερμοκρασίας. Επίσης πολυμερή που μεταβάλλουν τις εξωτερικές τους διαστάσεις, μεταξύ δύο ή τριών προκαθορισμένων σταδίων, υπό την επίδραση εξωτερικών θερμοκρασιακών, ηλεκτρικών ή μαγνητικών πεδίων ή φωτεινής ακτινοβολίας. Τέλος συμπεριλαμβάνονται υλικά που μπορούν να μεταβάλλουν το σχήμα και τον όγκο τους όταν διεγερθούν από την παρουσία μαγνητικού πεδίου.

πιεζοηλεκτρικά υλικά (Piezoelectric) : Υλικά που μπορούν να οδηγήσουν στην παραγωγή ηλεκτρικής τάσης υπό την επίδραση εξωτερικής μηχανικής φόρτισης.

μαγνητο- και ηλεκτρο-ρεοστατικά υλικά (Magneto – Electro – reostrictive): Συστήματα που αποτελούνται από κολλοειδείς διασπορές σωματιδίων σε κατάλληλους διαλύτες. Οι διαλύτες δεν επηρεάζονται από εξωτερικό ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο, η εφαρμογή των οποίων προκαλεί ελεγχόμενη αλλαγή στο ιξώδες του διαλύματος.

συστήματα Αυτοϊασης (Self-healing systems): Πρόκειται για συστήματα υλικών που φέρουν ενσωματωμένη τη δυνατότητα 'επούλωσης' ρωγμών ή ατελειών που προκαλούνται κατά τη διάρκεια της χρήσης τους, με αποτέλεσμα την παράταση του χρόνου ζωής τους.

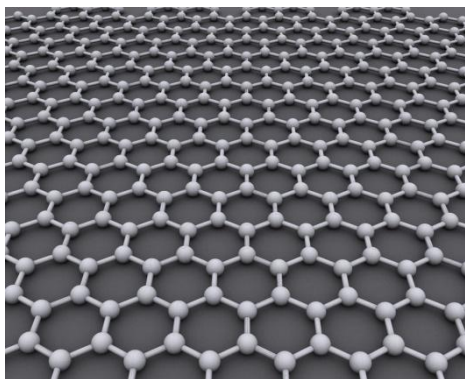


Σχήμα 9: πιεζοηλεκτρικά υλικά - κεραμικά PZT

Προηγμένα νανοϋλικά και νανοςύνθετα υλικά

Τα νανοςύνθετα υλικά κατά κύριο λόγο αποτελούνται από πολυμερική μητρική φάση με οργανικά ή ανόργανα νανο-εγκλείσματα. Τα Νανοϋλικά της διεσπαρμένης φάσης μπορεί να είναι, μεταξύ άλλων: ημιαγώγιμα νανοϋλικά, νανοϋλικά για βιοϊατρικές εφαρμογές, γραφίτης, νανοσωλήνες ή νανοίνες άνθρακα-γραφένιο, άλλα 2 – διάστατα υλικά, Πορώδη οργανικά υλικά, Ανόργανα υλικά (π.χ. πυριτία, μέταλλα), Μαγνητικά υλικά.

Τα πολυμερή υλικά έχουν μοναδικές ιδιότητες όπως χαμηλή πυκνότητα, εύκολη διαμόρφωση, εύκαμπτα σε μεγάλο βαθμό αλλά με μηχανικές ιδιότητες όχι επαρκείς για διεύρυνση των εφαρμογών τους. Απλή ανάμειξη με πρόσθετα υλικά οδηγεί σε μικρή βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Για την βελτίωση των ιδιοτήτων **των** πολυμερών υλικών όπως αντοχή και ακαμψία (strength and stiffness) χρησιμοποιούνται διάφορα είδη οργανικών και ανόργανων νανουλικών, όπως φυτικά υλικά, πυριτικά υλικά, ευγενή μέταλλα, γραφένιο, νανοσωλήνες άνθρακα, κλπ.



Σχήμα 10: δομή γραφενίου

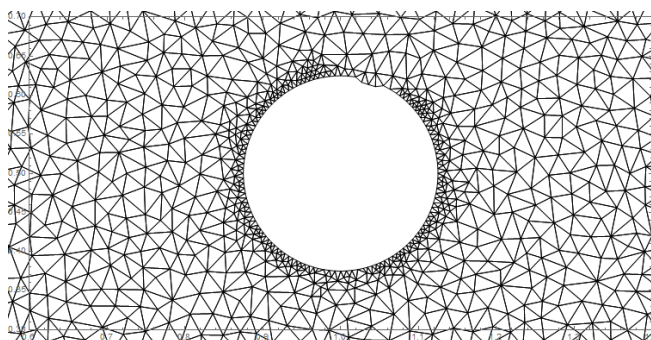
1.5 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι υπολογιστική μέθοδος η οποία επιλύει με προσεγγιστικές και αριθμητικές μεθόδους τις θεμελιώδεις εξισώσεις που διέπουν μία ευρεία ομάδα προβλημάτων συνεχούς μέσου (π.χ. προβλήματα παραμορφώσιμων στερεών, ανάλυσης κατασκευών και δομικών στοιχείων, μετάδοσης θερμότητας, μηχανικής ρευστών κτλ.) τα οποία έχουν αυθαίρετη γεωμετρία, συνοριακές συνθήκες και φόρτιση. Ανάμεσα στα κύρια χαρακτηριστικά την οποία την ξεχωρίζουν από τις άλλες προσεγγιστικές και αριθμητικές μεθόδους, είναι ότι για τη διακριτοποίηση του προβλήματος βασίζεται στο συνδυασμό μεταβαλλόμενων μορφών εξισώσεων ισορροπίας και τοπικών προσεγγίσεων οι οποίες ισχύουν σε περιορισμένη (η πεπερασμένη) περιοχή του μέσου, η οποία ονομάζεται πεπερασμένο στοιχείο. Επανάληψη της τοπικής διακριτοποίησης στον υπόλοιπο χώρο του μέσου καταλήγει στη διακριτοποίηση του προβλήματος σε ισοδύναμες διακριτές εξισώσεις και στην προσεγγιστική λύση τους με τεχνικές γραμμικής άλγεβρας.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

- Κατασκευή ή εισαγωγή γεωμετρίας
- Διαχωρισμός του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία
- Επιλογή είδους επίλυσης και εισαγωγή παραπάνω δεδομένων για ακριβέστερη επίλυση - (στάδιο pre-processor)
- Επίλυση προβλήματος - (στάδιο solver)
- Αποτελέσματα και μελέτη - (στάδιο post-processor)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προσφέρει στον μηχανικό σημαντικές αναλυτικές και υπολογιστικές δυνατότητες οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε σύγχρονα περιβάλλοντα ανάλυσης και σχεδιασμού. Για την ακρίβεια λογισμικό και κώδικες πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν κύρια στοιχεία για την ανάπτυξη και την υλοποίηση των σύγχρονων περιβαλλόντων υπολογιστικά υποβοηθούμενης ανάλυσης και σχεδιασμού.



Σχήμα 11: βήμα διακριτοποίησης - μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

1.6 Σκοπός εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση των ελαστικών, πιεζοηλεκτρικών και διηλεκτρικών ιδιοτήτων σύνθετου υλικού με πιεζοηλεκτρικές ίνες και πολυμερική μήτρα με διάφορα ποσοστά όγκου ινών από 17%-54%. Για την εφαρμογή, αναπτύχθηκαν 4 τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων ενός αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου του σύνθετου υλικού με ίνες μακρές και παράλληλες μεταξύ τους. Επιπλέον μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μικρομηχανική μελέτη με την οποία υπολογίσθηκαν οι ζητούμενες σταθερές και η ιδέα της μεθόδου ομογενοποίησης.

1.7 Δομή της εργασίας

Στο *Κεφάλαιο 1* παρουσιάζονται ο ορισμός των σύνθετων υλικών και οι κατηγορίες που εντάσσονται. Μία εισαγωγή στο τί είναι τα ευφυή υλικά όπου υποκατηγορία τους είναι τα πιεζοηλεκτρικά υλικά που μελετάμε καθώς επίσης και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούμε ως αριθμητική μέθοδο επίλυσης του προβλήματος. Τέλος, ο σκοπός της εργασίας.

Στο *Κεφάλαιο 2* γίνεται η περιγραφή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και η γραμμική θεωρία των πιεζοηλεκτρικών υλικών.

Στο *Κεφάλαιο 3* γίνεται περιγραφή της μεθόδου ομογενοποίησης με την οποία αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα σ αυτή την εργασία καθώς επίσης και μία ιστορική αναδρομή της μελέτης του συγκεκριμένου θέματος.

Στο *Κεφάλαιο 4* περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε για την εύρεση των ελαστικών, πιεζοηλεκτρικών και διηλεκτρικών του ιδιοτήτων.

Στο *Κεφάλαιο 5* παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα και τα διαγράμματα που εξήχθησαν .

Στο *Κεφάλαιο 6* παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα και κατατίθενται προτάσεις για το μέλλον.

2. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

2.1 Φαινόμενο πιεζοηλεκτρισμού

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, που ανακαλύφθηκε από τ' αδέρφια Pierre και Jacques Curie, συνδυάζει ηλεκτρικές με μηχανικές ιδιότητες των υλικών και αντίστροφα. Για παράδειγμα, αν πιεζοηλεκτρικά υλικά (π.χ. χαλαζίας, τουρμαλίνης) υπόκεινται σε ηλεκτρικές διεγέρσεις κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλικών προσανατολισμών, τότε εμφανίζονται, κατά μήκος καλώς ορισμένων κρυσταλλικών προσανατολισμών, μηχανικές παραμορφώσεις. Αντίθετα, μια μηχανική παραμόρφωση του υλικού προκαλεί τη δημιουργία ηλεκτρικών φορτίων πόλωσης.

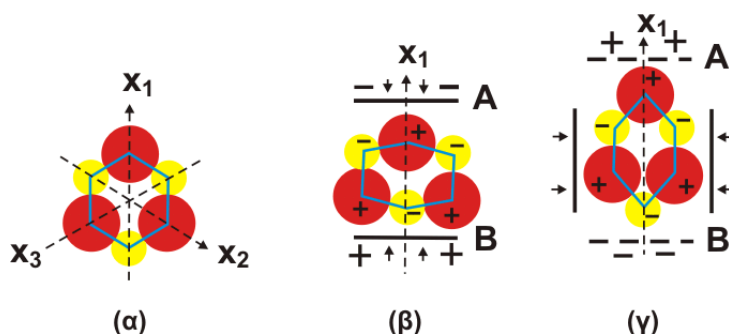
2.1.1 Ευθύ και αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Τα ορυκτά με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητά τους διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες αγωγούς, ημιαγωγούς και μη αγωγούς. Οι χημικοί δεσμοί καθορίζουν σε μεγάλο ποσοστό τις ηλεκτρικές ιδιότητες των ορυκτών. Έτσι, ορυκτά με καθαρά μεταλλικό δεσμό, τα οποία έχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στη δομή τους, είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. π.χ. τα φυσικά μέταλλα και μερικά σουλφίδια. Ορυκτά με ιοντικό και ομοιοπολικό δεσμό είναι μη αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος ή ημιαγωγοί.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός ορυκτού εξαρτάται και από τις κρυσταλλογραφικές κατευθύνσεις. Στον αιματίτη (Fe_2O_3) και το γραφίτη (C) π.χ. η αγωγιμότητα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη κάθετα στον κύριο άξονα απ' ότι παράλληλα σ' αυτόν. Ορυκτά μη αγωγίμα και με κρυστάλλους χωρίς κέντρο συμμετρίας ή με πολικούς άξονες μπορεί να ηλεκτρισθούν με την επίδραση κατευθυνόμενης πίεσεως. Το φαινόμενο καλείται πιεζοηλεκτρισμός

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο λοιπόν παρατηρείται στις κρυσταλλικές δομές που δεν έχουν κέντρο συμμετρίας ως προς τα θετικά και αρνητικά φορτισμένα ιόντα του κρυσταλλικού πλέγματος. Έτσι, η απαραίτητη προϋπόθεση για την εμφάνιση πιεζοηλεκτρικού φαινομένου είναι η ύπαρξη πολικών αξόνων εντός της κρυσταλλικής δομής. Πολικός άξονας είναι η διεύθυνση κατά μήκος της οποίας υπάρχει ηλεκτρική διπολική ροπή που οφείλεται στη κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου στο χημικό δεσμό. Για καλύτερη κατανόηση, θεωρούμε παρακάτω τη στοιχειώδη (μοναδιαία) κυψελίδα του κρυστάλλου α-χαλαζία. Η κυψελίδα, αποτελείται από αρνητικά φορτισμένα ιόντα (ανιόντα) οξυγόνου και θετικά φορτισμένα ιόντα (κατιόντα) πυριτίου. Έχει τρεις άξονες X_1 , X_2 , X_3 , 2ης τάξης περιστροφικής συμμετρίας στο επίπεδο σχεδίασης και ένα άξονα Z, 3ης τάξης περιστροφικής συμμετρίας, κάθετο στο επίπεδο σχεδίασης. Στην κατάσταση αυτή (απαραμόρφωτη) ο κρύσταλλος είναι ηλεκτρικά ουδέτερος, με μηδενική συνισταμένη ηλεκτρική πόλωση. Εάν υπάρξει όμως παραμόρφωση της δομής του κρυστάλλου, για παράδειγμα, κατά μήκος του πολικού άξονα X_1 , εμφανίζεται μια πρόσθετη ηλεκτρική πόλωση P κατά μήκος του άξονα αυτού. Η ηλεκτρική πόλωση, προκαλείται απ' τη μετατόπιση των ανιόντων έναντι των κατιόντων του κρυσταλλικού πλέγματος (σχ-2), με αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικού φορτίου στις εξωτερικές επιφάνειες του κρυστάλλου που είναι κάθετες στον άξονα X_1 και κατά συνέπεια στην εμφάνιση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού δυναμικού πόλωσης. Αυτή η συμπεριφορά του

κρυστάλλου, ονομάζεται ευθύ διάμηκες πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η εφαρμογή όμως θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων κάθετα στον άξονα X_1 , προκαλεί πρόσθετη ηλεκτρική πόλωση με αντίθετο πρόσημο στη διεύθυνση X_1 . Η συμπεριφορά αυτή, ονομάζεται ευθύ εγκάρσιο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Και τα δυο φαινόμενα είναι αντιστρεπτά. Για παράδειγμα, συστολή ή διαστολή της δομής του χαλαζία, εμφανίζεται από την επίδραση ανάλογων προσανατολισμένων ηλεκτρικών πεδίων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.



Σχήμα 12: πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

2.2 Η ανακάλυψη του Πιεζοηλεκτρισμού

Το 1880, το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού ανακαλύφθηκε από τ' αδέρφια Pierre και Jacques Curie . Ωστόσο αυτό δε συνέβη τυχαία. Προηγουμένως, ήταν ήδη γνωστή στην Ινδία και την Κεϋλάνη, η μυστηριώδης συμπεριφορά του ορυκτού τουρμαλίνη. Εάν το συγκεκριμένο ορυκτό το τοποθετούσαν μέσα σε ζεστή τέφρα, τότε απ' τη μια πλευρά προσέλκυε τα σωματίδια τέφρας ενώ απ' την αντίθετη πλευρά τα απέρριπτε. Έπειτα από καιρό, το φαινόμενο της έλξης και της απώθησης αντιστράφηκε. Στις αρχές του 18ου αιώνα και μέσω του εμπορίου, οι κρύσταλλοι τουρμαλίνη εισήχθησαν στην Ευρώπη. Το 1747, ο Linne ονόμασε τους κρυστάλλους τουρμαλίνη lapis electricus. Στον επόμενο αιώνα, ορισμένοι ερευνητές προσπάθησαν να βρουν μια σχέση μεταξύ των φαινομένων μηχανικής πίεσης και ηλεκτρισμού. Ο Becquerel πίστευε ότι ένα τέτοιο φαινόμενο έπρεπε να ήταν αναμενόμενο στους κρυστάλλους. Το 1877, ο Λόρδος Kelvin απέδειξε τη συσχέτιση μεταξύ πυροηλεκτρισμού και πιεζοηλεκτρισμού. Επιβεβαίωσε ότι το μεγαλύτερο μέρος του πυροηλεκτρικού φορτίου του τουρμαλίνη, αποδίδεται στο σχηματισμό πιεζοηλεκτρικής επιφανειακής φόρτισης, η οποία με τη σειρά της προκαλείται απ' την ελαστική παραμόρφωση του κρυστάλλου κάτω από θερμοκρασιακές μεταβολές.

Τα αδέρφια Curie ανακάλυψαν αρχικά το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο στους κρυστάλλους τουρμαλίνη. Διαπίστωσαν ότι μια μηχανική παραμόρφωση σε συγκεκριμένες διευθύνσεις, προκαλεί αντίθετες ηλεκτρικές επιφανειακές φορτίσεις σε αντικείμενες κρυσταλλικές όψεις, οι οποίες είναι ανάλογες της μηχανικής παραμόρφωσης. Το φαινόμενο αυτό, το οποίο παρατηρήθηκε επίσης στον χαλαζία και σε άλλους κρυστάλλους χωρίς κέντρο συμμετρίας, ονομάστηκε πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (απ' την ελληνική λέξη πιέζειν). Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο προβλέφθηκε απ' τον Lippmann, ο οποίος

βασίστηκε σε θερμοδυναμικές μελέτες και κατόπιν επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τους αδερφούς Curie.

2.3 Γραμμική θεωρία πιεζοηλεκτρικών υλικών

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.1 το πιεζοηλεκτρικό πρόβλημα είναι εκείνο στο οποίο μία ηλεκτρική φόρτιση προκαλεί παραμόρφωση (αντίστροφη πιεζοηλεκτρική δράση), ενώ μηχανικές παραμορφώσεις προκαλούν ηλεκτρικό δυναμικό στο υλικό (άμεση πιεζοηλεκτρική δράση). Η σύζευξη μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών πεδίων χαρακτηρίζεται από πιεζοηλεκτρικούς συντελεστές. Τα υλικά αυτά έχουν γραμμική απόκριση στις αλλαγές του ηλεκτρικού πεδίου, της ηλεκτρικής μετατόπισης, της μηχανικής φόρτισης και της μηχανικής μετατόπισης. Ο ενεργός πίνακας σχετίζεται με μέσες τιμές τάσης, μετατόπισης, ηλεκτρικού δυναμικού και ηλεκτρικής μετατόπισης.

$$\begin{bmatrix} \{\bar{T}\} \\ \{\bar{D}\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [C]^{eff} & [e]^{eff} \\ [e]^{eff} & -[\varepsilon]^{eff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\bar{S}\} \\ -\{\bar{E}\} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Όπου C_{ijkl} είναι τανυστής τέταρτης τάξης και αποτελεί την ταυτότητα του υλικού δηλαδή αντιπροσωπεύει τις ελαστικές σταθερές ενός υλικού. Επίσης καλείται και πίνακας ακαμψίας, ε_{kl} είναι ένας τανυστής δεύτερης τάξης και καλείται διηλεκτρική σταθερά και e_{kij} είναι τανυστής τρίτης τάξης που καλείται πιεζοηλεκτρική σταθερά. Το eff σημαίνει ενεργή τιμή και το (-) σημαίνει μέση τιμή.

Αναπτύσσοντας του όρους της εξίσωσης (1) και έχοντας υπόψη ότι το σύνθετο μας είναι εγκάρσιως ισότροπο μιας που οι ίνες είναι παράλληλες μεταξύ τους και φτιαγμένες από ένα εγκάρσιως ισότροπο πιεζοηλεκτρικό υλικό (PZT5H) οι οποίες είναι ενσωματωμένες σε μία ορθότροπη μήτρα ενός τυπικού πολυμερικού υλικού, ο ενεργός πίνακας των ιδιοτήτων, γράφονται με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμείνουν οι 11 ανεξάρτητες σταθερές. Έτσι η εξίσωση (1) γράφεται:

$$\begin{bmatrix} \bar{T}_{11} \\ \bar{T}_{22} \\ \bar{T}_{33} \\ \bar{T}_{12} \\ \bar{T}_{23} \\ \bar{T}_{31} \\ \bar{D}_1 \\ \bar{D}_2 \\ \bar{D}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^{eff} & C_{12}^{eff} & C_{13}^{eff} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{13}^{eff} \\ C_{12}^{eff} & C_{11}^{eff} & C_{13}^{eff} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{13}^{eff} \\ C_{13}^{eff} & C_{13}^{eff} & C_{33}^{eff} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{33}^{eff} \\ 0 & 0 & 0 & C_{66}^{eff} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44}^{eff} & 0 & 0 & e_{15}^{eff} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44}^{eff} & e_{15}^{eff} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15}^{eff} & -\varepsilon_{11}^{eff} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15}^{eff} & 0 & 0 & -\varepsilon_{11}^{eff} & 0 \\ e_{13}^{eff} & e_{13}^{eff} & e_{33}^{eff} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{33}^{eff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} \\ \bar{S}_{22} \\ \bar{S}_{33} \\ \bar{S}_{12} \\ \bar{S}_{23} \\ \bar{S}_{31} \\ -\bar{E}_1 \\ -\bar{E}_2 \\ -\bar{E}_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Τα C_{ij} , e_{ij} , ε_{ij} δηλώνουν τις ενεργές σταθερές του υλικού και τα T_{ij} , S_{ij} , E_i , D_i δηλώνουν τις τάσεις τις μετατοπίσεις, τα ηλεκτρικά πεδία και τις ηλεκτρικές μετατοπίσεις. Αυτές οι σχέσεις αντιπροσωπεύουν τη βάση για τις περαιτέρω θεωρήσεις βασιζόμενες στο αντιπροσωπευτικό στοιχείου όγκου που θα εξετάσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

2.4 Πιεζοηλεκτρικά υλικά

Υπάρχουν πολλά υλικά που παρουσιάζουν το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού κι αυτά μπορεί να είναι φυσικά και συνθετικά, ορυκτά και κεραμικά. Παρακάτω παρατίθενται πίνακες με πιεζοηλεκτρικά υλικά.

Φυσικοί κρύσταλλοι
χαλαζίας
Berlinite (AlPO_4)
σακχαρόζη
Sodium pottasium
τοπάζι
τουρμαλίνης
Lead Titanate (PbTiO_3)

Πίνακας 1: φυσικά πιεζοηλεκτρικά υλικά (1)



Σχήμα 13: χαλαζίας

Φυσικά υλικά
τένοντας
μετάξι
ξύλο
σμάλτο δοντιών
οδοντίνη
DNA
μερικές πρωτεΐνες

Πίνακας 2: φυσικά πιεζοηλεκτρικά υλικά(2)

Συνθετικοί κρύσταλλοι
Lanthanum gallium silicate
Gallium phosphate
Lithium niobate
Lithium tantalate

Πίνακας 3 : συνθετικά πιεζοηλεκτρικά υλικά

Τα κεραμικά με τυχαίως προσανατολισμένους κόκκους πρέπει να είναι σιδηροηλεκτρικά ώστε να παρουσιάζουν το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού. Αυτό συμβαίνει σε πολυκρυσταλλικά, μη-σιδηροηλεκτρικά πιεζοηλεκτρικά υλικά, όπως το AlN και το ZnO. Η οικογένεια κεραμικών με περοβσκίτη, βολφράμιο-χαλκό και σχετικές δομές που παρουσιάζουν το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού είναι:

Συνθετικά Κεραμικά
Barium Titanate (BaTiO_3)
Lead Zirconate Titanate-PZT
Potassium niobate (KNbO_3)
Sodium tungstate (Na_2WO_3)
$\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$
$\text{Pb}_2\text{KNb}_5\text{O}_{15}$
Zinc oxide (ZnO)

Πίνακας 4 : συνθετικά πιεζοκεραμικά υλικά



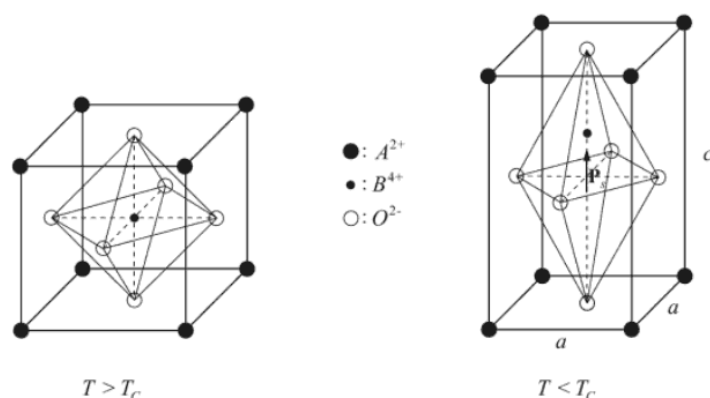
Σχήμα 14: πιεζοκεραμικό υλικό

2.4.1 Η περοβσκιτική δομή του PZT

Το Lead Zirconate Titanate είναι μία ανόργανη ένωση με γενικό χημικό τύπο $\text{Pb} [\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}] \text{O}_3$, ($0 \leq x \leq 1$). Είναι γνωστό ως PZT και είναι ένα κεραμικό υλικό με περοβσκιτική δομή που εμφανίζει αξιοσημείωτες πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Αυτό σημαίνει ότι όταν εφαρμοστεί σ' αυτό ηλεκτρικό πεδίο παρατηρούμε αλλαγή στο σχήμα του - παραμόρφωση. Το PZT είναι

ένα λευκό υλικό αδιάλυτο σε όλους του διαλύτες και χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές που περιγράφονται παρακάτω. Επιπλέον εμφανίζεται σε πολλές παραλλαγές όπως τα PZT-2, PZT-4, PZT-4D, PZT-5A, PZT-5B, PZT-5H, PZT-5J, PZT-5R, PZT-6A, PZT-6B, PZT-7A, PZT-7D, PZT-8 ουσιαστικά σε κάθε παραλλαγή τα ποσοστά των συστατικών είναι διαφορετικά κι ακόμη μπορεί να έχουμε προσθήκη κάποιου στοιχείου πέρα των Pb, Zr, Ti. Όλα τα παραπάνω πιεζοκεραμικά έχουν διαφορετικές ιδιότητες και τιμές των πιεζοηλεκτρικών και διηλεκτρικών τους σταθερών.

Πάνω από μια ορισμένη θερμοκρασία, που καλείται θερμοκρασία Curie T_C , η στοιχειώδης κυψελίδα του PZT έχει κυβική δομή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 15: περοβσκιτική δομή υλικών PZT

Στη κρυσταλλική δομή, δεν εμφανίζεται πιεζοηλεκτρισμός λόγω του υπάρχοντος κέντρου συμμετρίας. Κάτω απ' την θερμοκρασία T_C , η κυβική δομή του κρυσταλλικού πλέγματος μετατρέπεται αυθόρμητα σε τετραγωνική δομή (αυτό αποδίδεται σε ενεργειακά αίτια). Μ' αυτό τον τρόπο το πλέγμα των ανιόντων οξυγόνου εντός της τετραγωνικής δομής, μετακινείται κατά μήκος του κρυσταλλογραφικού c-άξονα. Ταυτόχρονα, το πλέγμα των κατιόντων μετατοπίζεται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Προκαλείται έτσι διαστολή της στοιχειώδους κυψελίδας κατά μήκος του c-άξονα και ταυτόχρονη συστολή κατά μήκος των α-διευθύνσεων, κάθετων στον c-άξονα (Σχήμα 15). Η παραμόρφωση που προκαλείται απ' τη μετάβαση της παρα-ηλεκτρικής στη σιδηρο-ηλεκτρική φάση καλείται αυθόρμητη παραμόρφωση.

Η ηλεκτρική διπολική ροπή, συνδέεται με την αυθόρμητη παραμόρφωση και οφείλεται στην ασυμμετρία της τετραγωνικής μοναδιαίας κυψελίδας. Η ηλεκτρική διπολική ροπή, η οποία σχετίζεται με τον όγκο της μοναδιαίας κυψελίδας καλείται αυθόρμητη πόλωση P_s και έχει παράλληλη ή αντιπαράλληλη διεύθυνση με τον c-άξονα. Η μετάβαση της κυβικής σε τετραγωνική δομή, επιτρέπει τρεις διευθύνσεις για την αυθόρμητη διόγκωση και κατά συνέπεια, έξι διευθύνσεις για την αυθόρμητη ηλεκτρική πόλωση, αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, παράγονται επιπρόσθετα φαινόμενα επαγόμενης ηλεκτρικής πόλωσης και παραμόρφωσης, εξαιτίας της δύναμης κρούσης πάνω στα υπάρχοντα φορτισμένα κέντρα στο εσωτερικό της παραμορφωμένης τετραγωνικής στοιχειώδους κυψελίδας. (αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο). Υποβάλλοντας τη στοιχειώδη κυψελίδα σε εξωτερικό μηχανικό φορτίο, παράγεται νέο πεδίο μηχανικών

τάσεων που ασκείται στα φορτισμένα κέντρα της στοιχειώδους κυψελίδας προκαλώντας νέες μετατοπίσεις. Αυτό προκαλεί με τη σειρά του, πρόσθετη ηλεκτρική πόλωση και παραμόρφωση (ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο). Για περισσότερη κατανόηση της ηλεκτρομηχανικής συμπεριφοράς των σιδηροηλεκτρικών κεραμικών, για παράδειγμα του PZT, είναι απαραίτητη η αναφορά στη θεωρία των περιοχών ηλεκτρικής πόλωσης (domains).

2.5 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών υλικών

Οι εφαρμογές των πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι πολλές και αφορούν ένα πλήθος βιομηχανικών περιοχών. Πιο συγκεκριμένα τα κύρια πεδία εφαρμογής είναι:

Κινητήρες

Υπερηχητικοί κραδασμοί, οι οποίοι παράγονται από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο το οποίο ταλαντώνεται σε κατάσταση συντονισμού, εφαρμόζονται στο στάτορα και δημιουργείται μία διεπαφή ολίσθησης-πρόσφυσης (“slip and grip”) με το ρότορα. Η πιο κοινή χρήση αυτής της αρχής έχει εφαρμοστεί από την εταιρεία Canon την δεκαετία του 1980 στους μηχανισμούς αυτόματης εστίασης φακών. Μεγαλύτερες και πιο ισχυρές μηχανές έχουν από τότε δημιουργηθεί και εξελιχθεί για βιομηχανικές εφαρμογές.

Απεικόνιση

Οι ιατρικοί υπέρηχοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την απεικόνιση εσωτερικών δομών και οργάνων του ανθρώπινου σώματός όπως μύες, ιστοί και αιμοφόρα αγγεία. Το βάθος της διαπερατότητας των υπερήχων και η χωρική ανάλυση της απεικόνισης μπορούν να αυξηθούν με τη μείωση της λειτουργικής συχνότητας και αύξηση της πυκνότητας και του αριθμού των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

Κοπτικά μηχανήματα

Οι υπερηχητικοί κόπτες απαντώνται όλο και πιο συχνά σε ιατρικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Η νέα γενιά ρομποτικών χειρουργικών συστημάτων χρησιμοποιεί ευρέως νυστέρια υπερήχων τα οποία κόβουν τον ιστό και ταυτόχρονα καυτηριάζουν τα αιμοφόρα αγγεία έτσι ώστε να αποφευχθεί αιμορραγία. Στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται στην κοπή γυαλιών, κεραμικών, πολυμερικών και άλλων υλικών με ταχύτητα και, το σημαντικότερο, με ελάχιστο ίχνος κοπής, μειώνοντας ή εξαλείφοντας το χρόνο τροχίσματος ή φινιρίσματος μετά την κοπή.

Μετασχηματιστές

Οι πιεζοηλεκτρικοί μετασχηματιστές έχουν υψηλή απόδοση και καταλαμβάνουν σημαντικά μικρότερο χώρο σε σχέση με τους μαγνητικούς μετασχηματιστές. Χρησιμοποιούνται στις οθόνες των φορητών υπολογιστών και των κινητών τηλεφώνων όπου ο μικρός όγκος εξαρτημάτων είναι υψηλής σημασίας.

SONAR (ηχο-εντοπιστές)

Τα συστήματα “SOUND Navigation and Ranging” χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικά υλικά για τη δημιουργία και διάδοση ηχητικών κυμάτων συνήθως σε υδάτινο περιβάλλον για τη διευκόλυνση της πλοήγησης, επικοινωνίας και εντοπισμού. Εκτός από τις αμυντικές, άλλες εφαρμογές είναι η υποβρύχια ασφάλεια, εντοπισμός ναρκών και ναυαγίων, επικοινωνίες, επιστημονική έρευνα και αναζήτηση, καθώς και εφαρμογές μέτρησης εγγύτητας όπως για παράδειγμα αισθητήρες παρκαρίσματος.

Μη καταστροφικές δοκιμές

Παραδείγματα αποτελούν συστήματα μέτρησης κόπωσης και διάβρωσης μετάλλων στο υπόστρωμα και τις σιδηρογραμμές

Εκνεφωτές

Οι εκνεφωτές χρησιμοποιούνται στη χορήγηση φαρμάκων με την εισπνοή συγκέντρωσης νέφους σταγονιδίων στους πνεύμονες. Τα σταγονίδια συνήθως δημιουργούνται μέσω πεπιεσμένου αερίου ή υπερήχων. Οι ίδιες τεχνικές χρησιμοποιούνται επίσης και στη βιομηχανία για τη διασπορά σωματιδίων και στη νανοτεχνολογία.

Βιολογικά πιεζοηλεκτρικά υλικά

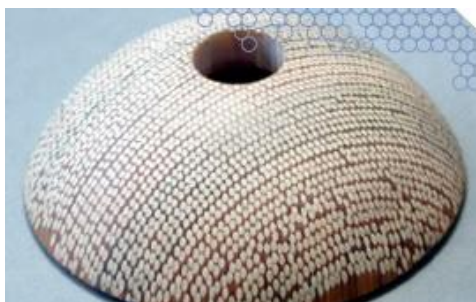
Επίσης γνωστά ως πιεζοηλεκτρικά πολυμερή, όπως το φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF) (λεπτό φιλμ) και άλλα οργανικά πιεζοηλεκτρικά (φιλμ) υλικά που αντιπροσωπεύονται από αυτό. Αυτό το είδος υλικού και η υλική του ευελιξία, η χαμηλή πυκνότητα, η χαμηλή αντίσταση και η σταθερά υψηλής τάσης (g) και άλλα πλεονεκτήματα για την προσοχή και την εξέλιξη του κόσμου είναι πολύ ταχεία, υποβρύχια ακουστική μέτρηση υπερήχων, αισθητήρια πίεσης, έναρξη ανάφλεξης και άλλες πτυχές της εφαρμογής. Το μειονέκτημα είναι ότι η σταθερή πιεζοηλεκτρική τάση (d) είναι χαμηλή, καθιστώντας την πολύ περιορισμένη ως ενεργός μορφοτροπέας εκπομπής.



Σχήμα 16: εφαρμογή πιεζοκεραμικών υλικών σε βιοϊατρικά εργαλεία

Σύνθετα πιεζοηλεκτρικά υλικά

Αποτελούνται από οργανικά πολυμερή υλικά βάσης ενσωματωμένα σε φύλλα, ράβδο, ράβδο ή πιεζοηλεκτρικά υλικά σε σκόνη. Μέχρι τώρα, έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε υποβρύχια ακουστική, ηλεκτροακουστική, υπερήχους, ιατρική και άλλους τομείς. Εάν είναι κατασκευασμένο σε έναν υδροακουστικό μορφοτροπέα, όχι μόνο έχει υψηλό ρυθμό απόκρισης υδροστατικής πίεσης αλλά έχει επίσης αντίσταση στην κρούση, δεν είναι εύκολα φθαρμένη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διαφορετικά βάθη.



Σχήμα 17 : σύνθετο πιεζοηλεκτρικό υλικό

Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθούν και κάποια μειονεκτήματα των υλικών PZT. Ο ζirkονικός - τιτανικός μόλυβδος - PZT χρησιμοποιείται σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών. Υπόκειται όμως σε κάποιους περιορισμούς οι οποίοι ελαττώνουν τις δυνατότητες χρήσης του. Οι λειτουργικές θερμοκρασίες πρέπει να είναι κάτω των 200°C και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπου το χαμηλό βάρος είναι κρίσιμη παράμετρος εξαιτίας της υψηλής πυκνότητάς του ως υλικό. Ο κυριότερος όμως περιορισμός είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε μόλυβδο, ένα στοιχείο του οποίου η χρήση έχει καταργηθεί σε όλες τις άλλες εφαρμογές σε ηλεκτρονικά με οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τον περιορισμό των επικίνδυνων ουσιών.

Επί του παρόντος, η χρήση του μολύβδου επιτρέπεται στα πιεζοηλεκτρικά υλικά, κάτι που είναι προς αναθεώρηση μετά τον Ιούλιο του 2012. Πιθανή κατάργηση του μολύβδου και για τέτοιου είδους εφαρμογές θα αναγκάσει τους κατασκευαστές και προμηθευτές να αναζητήσουν εναλλακτικά υλικά που να μην περιέχουν μόλυβδο. Επιπλέον αρνητική ιδιότητα του ζirkονικού-τιτανικού μολύβδου είναι η εύθραυστη φύση του ιδιαίτερα σε σχέση με τα δομικά κεραμικά υλικά, που καθιστά απαγορευτική τη χρήση τους σε αντίξοες συνθήκες με υψηλούς κραδασμούς.

3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗΣ

3.1 Ιστορική αναδρομή αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα αναλυτικά μοντέλα για την ομογενοποίηση σύνθετων υλικών, συχνά όμως περιορίζονται σε πολύ συγκεκριμένα προβλήματα. Οι αριθμητικές μέθοδοι, όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, φαίνεται να είναι μια καλά προσαρμοσμένη προσέγγιση για να περιγράψει τη συμπεριφορά αυτών των υλικών, επειδή δεν υπάρχουν περιορισμοί στη γεωμετρία, στις ιδιότητες του υλικού, στον αριθμό των φάσεων στο πιεζοηλεκτρικό σύνθετο υλικό και στο μέγεθος.

Η πρόβλεψη των μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πιεζοηλεκτρικών σύνθετων με ίνες, έχει γίνει τα τελευταία χρόνια αντικείμενο ενεργούς μελέτης. Εκτός από τις πειραματικές έρευνες είτε μικροσκοπικά είτε μακροσκοπικά, χρησιμοποιούνται μηχανικές μέθοδοι για να εξαχθούν αποτελέσματα των συνολικών ιδιοτήτων του πιεζοηλεκτρικού σύνθετου με ίνες. Η μικρομηχανική μέθοδος προβλέπει τη γενική συμπεριφορά αυτών των σύνθετων από τις γνωστές ιδιότητες των συστατικών που συνθέτουν το πιεζοηλεκτρικό σύνθετο, δηλαδή τις ίνες και τη μήτρα μέσω της ανάλυσης ενός περιοδικού αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου (RVE) ή μιας περιοδικής κυψελίδας. Από την άλλη πλευρά, στη μακρομηχανική προσέγγιση η ετερογενής δομή του σύνθετου υλικού αντικαθίσταται από ένα ομοιογενές μέσο με ανισοτροπικές ιδιότητες. Το πλεονέκτημα της μικρομηχανικής προσέγγισης είναι ότι μέσω αυτής μπορούν όχι μόνο να προβλεφθούν οι ιδιότητες του σύνθετου αλλά επίσης να εξεταστούν κι άλλα φαινόμενα όπως για παράδειγμα η έναρξη και διάδοση ρωγμών κτλ.

Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι που μπορούν να προβλέψουν και να προσομοιώσουν προβλήματα συζευγμένων πεδίων όπως την πιεζοηλεκτρική και μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών. Έχουν γίνει αναφορές σε βασικές αναλυτικές προσεγγίσεις (πχ. Chan και Unsworth, 1989, Smith και Auld, 1991,) οι οποίες όμως δεν είναι ικανές να προβλέψουν την απόκριση σε γενική φόρτιση δηλαδή δεν μπορούν να δώσουν το σύνολο των παραμέτρων του υλικού. Επίσης έχουν αναπτυχθεί ημιαναλυτικά μοντέλα (Bisegna και Luciano, 1996, 1997) τα οποία είναι χρήσιμα εργαλεία για θεωρητικές εκτιμήσεις και μπορούν να περιγράψουν την πλήρη συμπεριφορά δηλαδή όλα τα στοιχεία των τανυστών του υλικού. Ωστόσο μηχανικές μέθοδοι έχουν επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνουν και ηλεκτροστατικά αποτελέσματα (Benveniste, 1993, Dunn και Taya, 1993; Wang, 1992; Chen, 1993) που βασίζονται σε μία Eshelby τύπου λύση για ένα μοναδικό έγκλεισμα σε μία άπειρη μήτρα (Benveniste, 1992, Dunn και Wienecke, 1997). Οι παραπάνω μέθοδοι χρησιμοποιούν μέσους όρους μηχανικών και ηλεκτρικών πεδίων των συστατικών του σύνθετου. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση περιοδικών προσεγγίσεων ή όπως αλλιώς είναι γνωστά μοναδιαίες κυψελίδες όπου τα πεδία λύνονται αριθμητικά με υψηλή ανάλυση όπως για παράδειγμα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Gaudenzi, 1997). Σε τέτοια μοντέλα, η αντιπροσωπευτική μοναδιαία κυψελίδα και οι συνοριακές συνθήκες έχουν σχεδιαστεί ώστε να καλύπτουν ειδικές περιπτώσεις φόρτισης που συνδέονται με παραμορφώσεις. (, Brockenbrough και Suresh, 1990; Bo'hm, 1993; Gunawardena 1993; Cleveringa κ.ά., 1997). Μια διαφορετική μέθοδος που μπορεί να χειριστεί αυθαίρετα σενάρια φόρτισης είναι η προσέγγιση ασσυμπτωτικής ομογενοποίησης (Suquet, 1987, Bakhvalov and Panasenko, 1989).

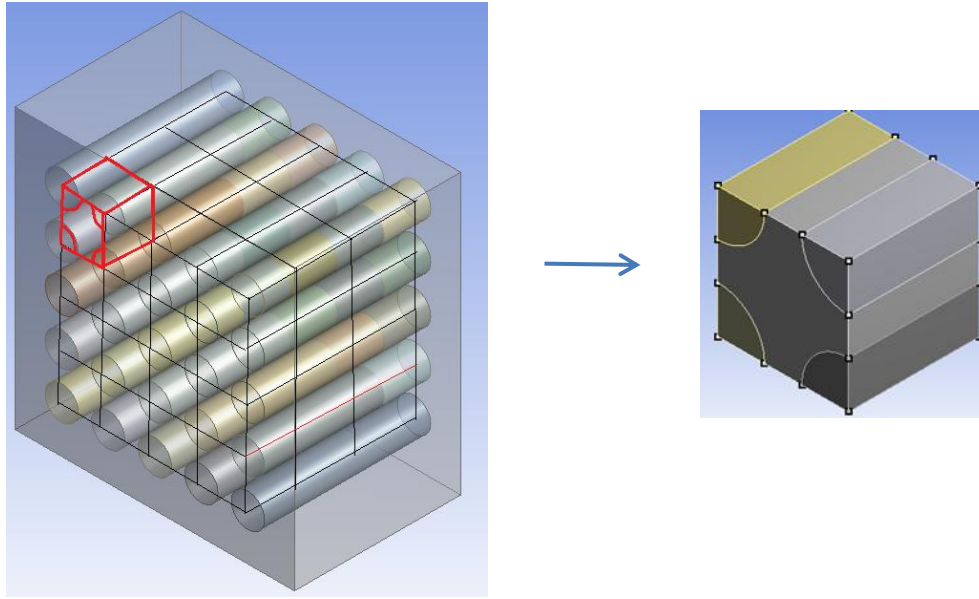
Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων οι Poizat και Sester (1999) διακρίτωσαν το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου του υλικού και εφάρμοσαν συγκεκριμένες περιπτώσεις συνοριακών συνθηκών και υπολόγισαν δύο πιεζοηλεκτρικούς συντελεστές. Θα πρέπει να αναφερθεί όμως ότι το μόνο μοντέλο αντιπροσωπευτικού στοιχείου που περιγράφει σωστά ολόκληρη τη συμπεριφορά είναι αυτή των Terly και Dvorak (1988) και πιο πρόσφατα του Smith (1998).

3.2 Το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE) - η μέθοδος ομογενοποίησης

Στη θεωρία των σύνθετων υλικών το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου είναι ο μικρότερος όγκος που μπορεί να γίνει μια μέτρηση για να δώσει μία τιμή αντιπροσωπευτική του συνόλου. Στην περίπτωση που τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν περιοδικότητα στην γεωμετρία τους (όπως στην περίπτωσή μας), μπορούμε να επιλέξουμε μία μονάδα η οποία επαναλαμβάνεται σε όλο το εύρος του υλικού. Η δική μας μονάδα περιλαμβάνει πιεζοηλεκτρικές και ελαστικές ιδιότητες που περιγράφουν το σύστημα. Για τον προσδιορισμό των υλικών σταθερών ενός ομογενοποιημένου, ετερογενούς υλικού είναι αναγκαίος πρώτα ο υπολογισμός των **μέσων** τάσεων, τροπών, ηλεκτρικών πεδίων και ηλεκτρικών μετατοπίσεων στο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου του υλικού αφού αρχικά τεθούν οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες στο σύνορο του RVE. Τελικά, υπολογίζεται ο «ενεργός πίνακας ακαμψίας» ή ο «ενεργός» πίνακας ευκαμψίας του υλικού.

Όσον αφορά στη δική μας περίπτωση, το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου που επιλέχθηκε απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι επειδή εργαζόμαστε σε τέσσερα μοντέλα με διαφορετικά ποσοστά όγκου ινών, τα αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου έχουν κι αυτά διαφορετικά ποσοστά όγκου ινών και το εύρος τους εκτείνεται από 17% - 54%.

Επομένως, η βασική ιδέα της μεθόδου είναι να απομονώσουμε μία «μονάδα» που θα είναι αντιπροσωπευτική όλου του σύνθετου υλικού και επιλέγοντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες, λύνοντας τις κατάλληλες διαφορικές εξισώσεις παράγονται αποτελέσματα των οποίων οι μέσοι όροι θα είναι αντιπροσωπευτικοί όλου το σύνθετου υλικού εργαζόμενοι μόνο στη μονάδα αυτή.



Σχήμα 18: Επιλογή του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου (RVE)

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο τα σύνθετα υλικά μπορούν να παρουσιαστούν ως μία περιοδική παράταξη αντιπροσωπευτικών στοιχείων όγκων (RVE). Έτσι είναι αναγκαίο να εφαρμοστούν περιοδικές συνοριακές συνθήκες. Αυτό υποδηλώνει ότι κάθε αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE) στο σύνθετο έχει τον ίδιο τρόπο παραμόρφωσης και δεν θα υπάρχει διαχωρισμός ή αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των γειτονικών μονάδων. Αυτές οι περιοδικές συνθήκες δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$u_i = \overline{S_{ij}} x_j + v_i$$

Στην παραπάνω εξίσωση το $\overline{S_{ij}}$ είναι η μέση τιμή των μετατοπίσεων, το v_i είναι το περιοδικό τμήμα των μετατοπίσεων στις συνοριακές επιφάνειες που είναι γενικά μία άγνωστη ποσότητα και εξαρτάται από τα εφαρμοζόμενα φορτία. Οι δείκτες i και j δηλώνουν το τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων από το 1 μέχρι το 3. Οι μετατοπίσεις σε ένα ζεύγος αντίθετων συνοριακών επιφανειών για το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE) περιγράφονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$u_i^{K+} = \overline{S_{ij}} x_j^{K+} + v_i^{K+}$$

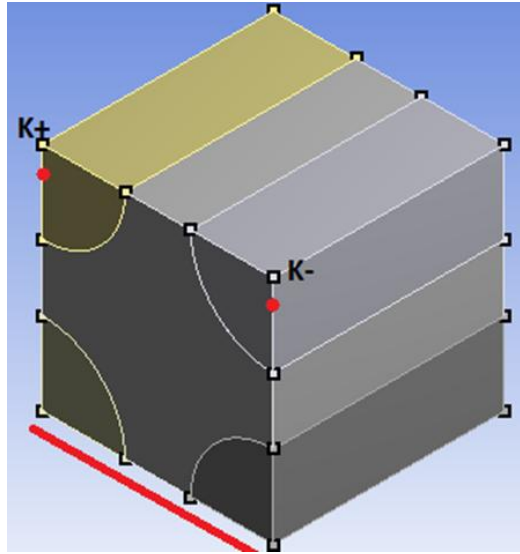
$$u_i^{K-} = \overline{S_{ij}} x_j^{K-} + v_i^{K-}$$

Όπου $K+$ εννοούμε κατά μήκος της θετικής διεύθυνσης x_j και όπου $K-$ κατά μήκος της αρνητικής διεύθυνσης x_j στις αντίστοιχες επιφάνειες $Z+/Z-$, $X+/X-$, $Y+/Y-$. Η τοπική διακύμανση v_i^{K+} και v_i^{K-} σχετικά με τη μέση μακροσκοπική τιμή είναι η ίδια σε δύο αντίθετες επιφάνειες λόγω των περιοδικών συνθηκών των αντιπροσωπευτικών στοιχείων όγκων (RVE). Έτσι η διαφορά μεταξύ των δύο εξισώσεων περιγράφει την εφαρμοζόμενη μακροσκοπική συνθήκη μετατόπισης.

$$u_i^{K+} - u_i^{K-} = \bar{S}_{ij}(x_j^{K+} - x_j^{K-})$$

Ομοίως οι περιοδικές συνοριακές συνθήκες για το ηλεκτρικό δυναμικό δίνεται από το εφαρμοζόμενο μακροσκοπικό ηλεκτρικό πεδίο

$$\Phi^{K+} - \Phi^{K-} = \bar{E}_i(x_i^{K+} - x_i^{K-})$$



Σχήμα 19: Περιγραφή συνθήκης μετατόπισης στο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου – RVE

Τέλος, σχετικά με την μέση τιμή των μηχανικών τάσεων και παραμορφώσεων και των ηλεκτρικών πεδίων και ηλεκτρικών μετατοπίσεων θεωρούμε ότι είναι ίδιες και στο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE) και στο σύνθετο και περιγράφονται από τα παρακάτω ολοκληρώματα:

$$\bar{T}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^{n_{el}} T_{ij}^{(n)} V^{(n)} \quad (3) \quad \bar{S}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^{n_{el}} S_{ij}^{(n)} V^{(n)} \quad (4)$$

$$\bar{E}_i = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^{n_{el}} E_i^{(n)} V^{(n)} \quad (5) \quad \bar{D}_i = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^{n_{el}} D_i^{(n)} V^{(n)} \quad (6)$$

Όπου n_{el} είναι ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων στο πλέγμα της αντιπροσωπευτικής μονάδας (RVE), $V^{(n)}$ είναι ο όγκος του αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου (RVE) και $\overline{T_{ij}}$, $\overline{S_{ij}}$, $\overline{E_i}$ και $\overline{D_i}$ είναι οι τανυστές που υπολογίζονται μέχρι το n_{el} .

Στόχος, η εύρεση των σταθερών ακαμψίας C^{eff} του «ενεργού» πίνακα ακαμψίας οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την εύρεση των ελαστικών, πιεζοηλεκτρικών και διηλεκτρικών ιδιοτήτων των τεσσάρων μοντέλων των σύνθετων υλικών.

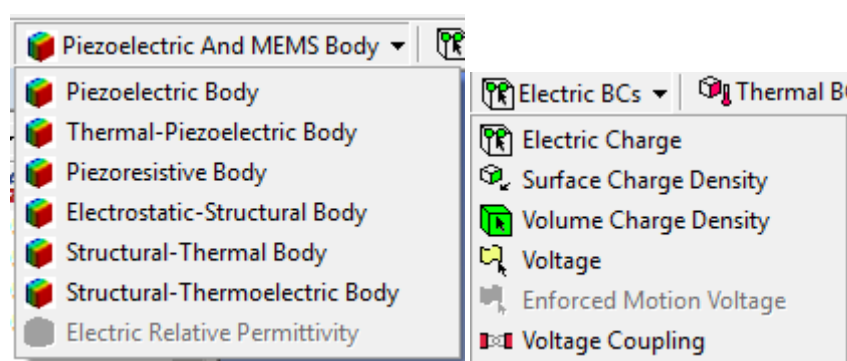
Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιβολή των συνοριακών συνθηκών και να εφαρμοστούν με τέτοιο τρόπο ώστε ο πίνακας ακαμψίας να παραμένει αναλλοίωτος. Όλες οι περιπτώσεις επιβολής συνοριακών συνθηκών και υπολογισμού των μέσων τιμών των τανυστών αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1 Εισαγωγή στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων

Εισερχόμαστε στο περιβάλλον του Ansys – Workbench 19.1 ενεργοποιώντας επίσης το extension Piezo and MEMS το οποίο μας παρέχει τα κατάλληλα εργαλεία για να εργαστούμε με το πιεζοηλεκτρικό μας πρόβλημα.

Επιλέγουμε να εργαστούμε στη στατική δομική ανάλυση αφού μπορούν να προσδιοριστούν οι τάσεις και οι μετατοπίσεις που προκαλούνται από φορτία. Συνδυαστικά με το extension Piezo and MEMS είναι το ιδανικό για να μελετήσουμε το συζευγμένο μας πρόβλημα.



Σχήμα 20: Το περιβάλλον του Ansys - το πιεζοηλεκτρικό extension - piezo and MEMS

4.2 Κατασκευή γεωμετρίας

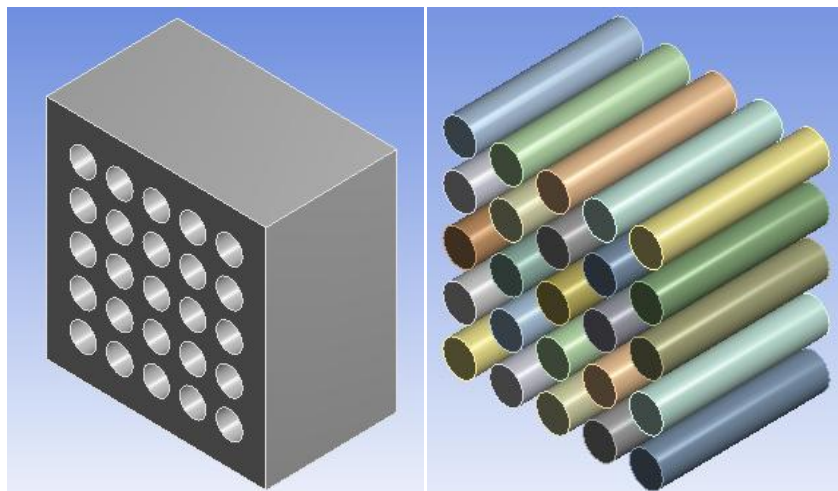
Παρακάτω παρουσιάζεται η γεωμετρία των μοντέλων καθώς και ο τρόπος που σχεδιάστηκαν με τη χρήση του Ansys Workbench 14.5. Αρχικά κατασκευάζουμε τέσσερα μοντέλα σύνθετων υλικών με διαφορετικά ποσοστά όγκου ινών. Έπειτα, κατασκευάζουμε τα αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου (RVE) τους, τα οποία είναι και τα τελικά μοντέλα στα οποία θα εργαστούμε και θα επιλύσουμε, για να προκύψουν οι ζητούμενες σταθερές.

Ανοίγουμε το μπλοκ → Geometry και ξεκινάμε τη σχεδίαση. Αρχικά, σχεδιάζουμε το υλικό της μήτρας επιλέγοντας το σχήμα και τις διαστάσεις, χρησιμοποιώντας τις εντολές: **XY Plane → sketching → rectangle → dimensions**.

Δημιουργείται τρισδιάστατο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με διαστάσεις (420×420×250) μm. Ύστερα, **Modeling → sketch 1 → extrude → depth → geometry → sketch 1 → apply → generate** και δημιουργείται η μήτρα.

Σειρά έχει η δημιουργία των ινών. Επιλέγουμε κυλινδρικές ίνες και εισάγουμε τη διάμετρο (50μm) με τις εντολές: **Sketching → draw → circle → dimensions**.

Χρησιμοποιούμε το **add frozen** για να μπορούμε αν το θέλουμε να ελέγχουμε ξεχωριστά τη μήτρα και ίνες. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι οι ίνες μεταξύ τους έχουν ίσες αποστάσεις. Επομένως στο παράδειγμα του σύνθετου των 25 ινών έχουμε 26 σώματα (solid bodies).



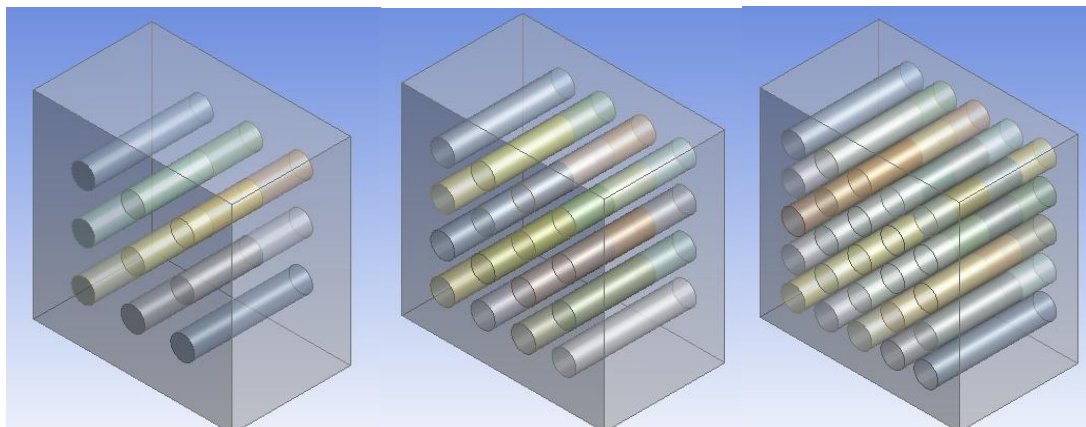
Σχήμα 21: Η μήτρα και οι ίνες

Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάζουμε και τα τέσσερα μοντέλα των σύνθετων υλικών :

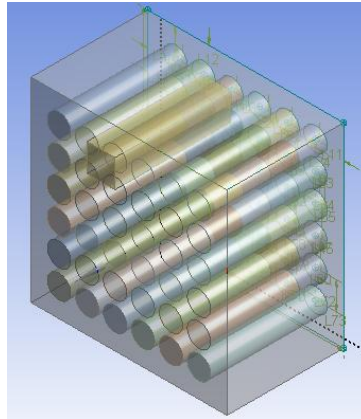
9 ίνες

16 ίνες

25 ίνες

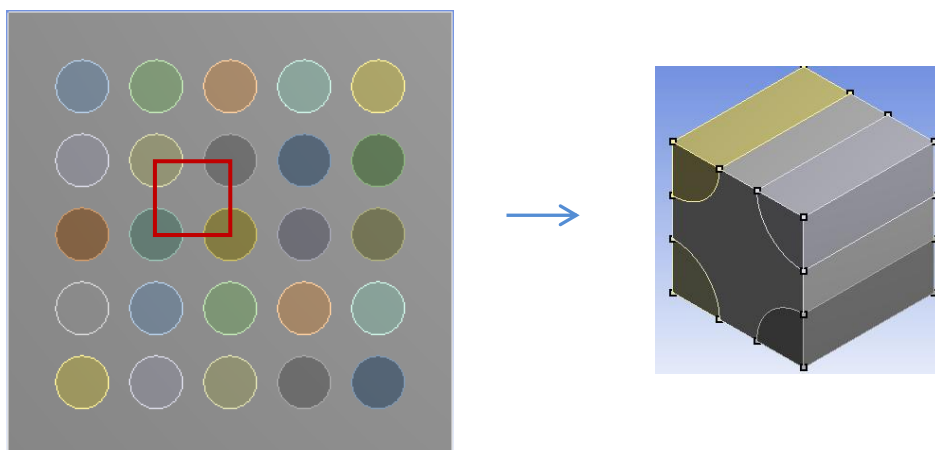


36 ίνες



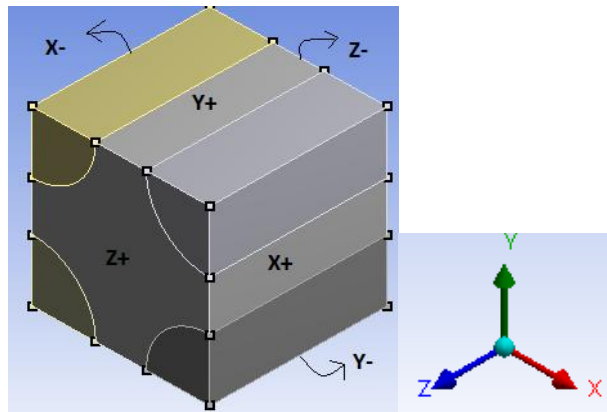
Σχήμα 22: Τα τέσσερα μοντέλα σύνθετων υλικών με διαφορετικά ποσοστά όγκου ινών

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια θα εργαστούμε στα αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου (RVE) των παραπάνω σύνθετων υλικών για τη μείωση του υπολογιστικού κόστους. Τα σύνθετα με παράλληλες ίνες τοποθετημένες με περιοδικότητα μπορούν εύκολα να μελετηθούν με αυτό τον τρόπο αφού η επιλογή του RVE γίνεται εύκολα σε σχέση με άλλα σύνθετα υλικά όπως για παράδειγμα πολυμερικές μήτρες με διάσπαρτες κοντές ίνες. Στην εργασία, επιλέξαμε το συγκεκριμένο αντιπροσωπευτικό στοιχείο, διότι χρησιμοποιώντας συνοριακές συνθήκες μπορούμε με κατάλληλες τεχνικές να ομογενοποιήσουμε και να εξασφαλιστεί η περιοδικότητα.



Σχήμα 23: Επιλογή αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου – RVE

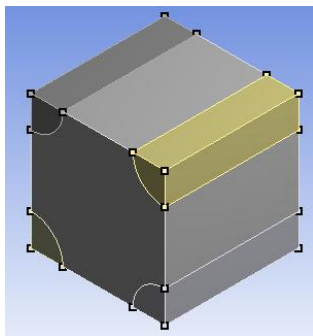
Θα ονομάσουμε τις πλευρές **Z+,Z-** (μπροστά και πίσω επιφάνειες), **X+,X-** (δεξιές και αριστερές επιφάνειες), **Y+,Y-** (επάνω και κάτω επιφάνειες) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και το σύστημα συντεταγμένων είναι το καρτεσιανό (x,y,z) ή (1,2,3).



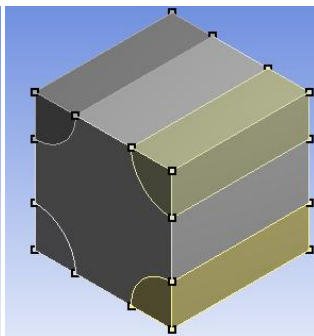
Σχήμα 24: Ονομασία πλευρών του RVE

Τα τέσσερα αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου (RVE) που προκύπτουν από τα τέσσερα σύνθετα υλικά είναι τα παρακάτω. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των ινών μέσα στη μήτρα τόσο μεγαλύτερο είναι και το ποσοστό όγκου ίνας στο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE).

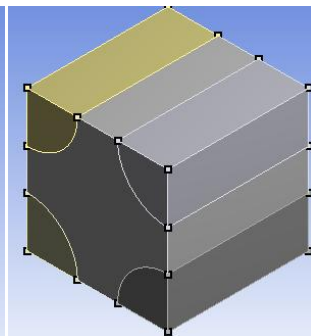
Rve -17%



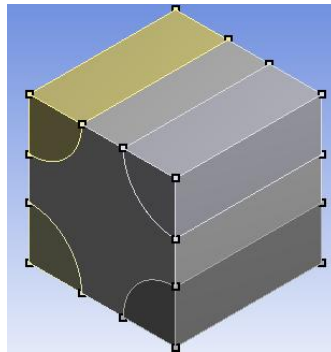
Rve - 27%



Rve - 40%



Rve - 54%



Σχήμα 25: Τα τέσσερα αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου με διαφορετικά ποσοστά όγκου ινών

Υπολογισμός ποσοστού % όγκου ινών

Μπορούμε να υπολογίσουμε το % ποσοστό όγκου ινών με τον τύπο :

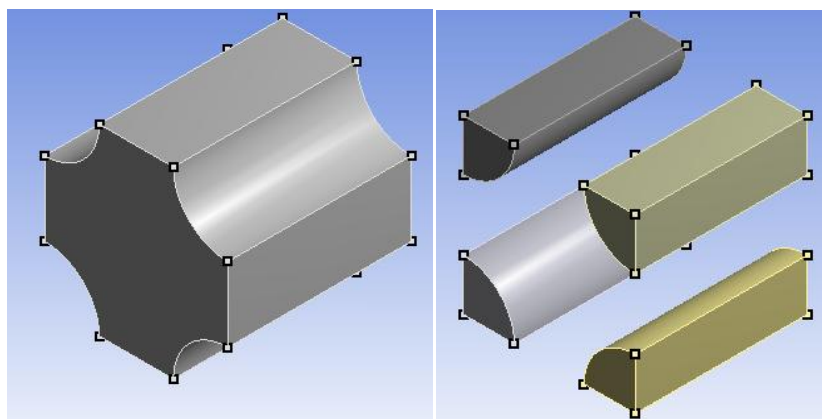
$$V_f = \frac{\alpha_1 \frac{\pi}{4} d_f^2}{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3} \times 100$$

- με $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$ ακμές RVE
- d_f τη διάμετρο των ινών.
- $d_f = 50 \mu\text{m}$

Μοντέλο(RVE)	Ακμή	V_f
1°	105 μm	17%
2°	84 μm	27%
3°	70 μm	40%
4°	60 μm	54%

Πίνακας 5: Ακμές αντιπροσωπευτικών στοιχείων όγκων – RVE και ποσοστά όγκου ινών των πέντε μοντέλων

Ένα κρίσιμο σημείο της σχεδίασης είναι η χρήση της εντολής **Boolean → operation → subtract → tool bodies from target body**. Με την εντολή αυτή εξασφαλίζουμε ότι τα σώματα είναι τέλεια «κολλημένα» μεταξύ τους, ωστόσο δεν είναι ένα ενιαίο σώμα, αλλά πέντε διαφορετικά σώματα με τέλεια διεπαφή. Επιπλέον με τη χρήση αυτής της επιλογής το πρόγραμμα αναγνωρίζει τις περιοχές – επιφάνειες της επαφής και τις δημιουργεί αυτόματα. Αν παραλείπαμε αυτό το βήμα το σώμα θα θεωρούνταν ένα ενιαίο σώμα και δεν θα μπορούσαμε να ορίσουμε πάνω από ένα υλικό.



Σχήμα 26: Δημιουργία ξεχωριστών σωμάτων – επαφών (μήτρα – ίνες)

4.3 Εισαγωγή μηχανικών, πιεζοηλεκτρικών και διηλεκτρικών ιδιοτήτων

Από το κεντρικό μενού επιλέγουμε το μπλοκ **Engineering data** για να ορίσουμε τις μηχανικές ιδιότητες των δύο υλικών μας.

Μήτρα

Η μήτρα μας είναι πολυμερική και ορθότροπη. Επιπλέον έχει διηλεκτρικές σταθερές όπου οι τιμές της ορίζονται στο μπλοκ **Modelling**. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μηχανικές και οι διηλεκτρικές τιμές της μήτρας. Οι μονάδες μέτρησης των σταθερών ακαμψίας είναι σε Pa και των διηλεκτρικών σταθερών σε F/m.

	$C_{11}(10^{10})$	$C_{12}(10^{10})$	$C_{13}(10^{10})$	$C_{33}(10^{10})$	$C_{44}(10^{10})$	$C_{66}(10^{10})$	$\epsilon_{11}(10^{-9})$	$\epsilon_{33}(10^{-9})$
polymer	0.386	0.257	0.257	0.386	0.064	0.064	0.0797	0.0797

Πίνακας 6: Μηχανικές και διηλεκτρικές ιδιότητες υλικού μήτρας

Ίνες

Οι ίνες μας αποτελούνται από πιεζοκεραμικό υλικό και συγκεκριμένα το PZT 5H και είναι ανισότροπο όσο αφορά τις μηχανικές ιδιότητες. Έχει επίσης πιεζοηλεκτρικές και διηλεκτρικές σταθερές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι μονάδες μέτρησης των σταθερών ακαμψίας είναι σε Pa ,των πιεζοηλεκτρικών σταθερών σε C/m² και των διηλεκτρικών σταθερών σε F/m.

	$C_{11}(10^{10})$	$C_{12}(10^{10})$	$C_{13}(10^{10})$	$C_{33}(10^{10})$	$C_{44}(10^{10})$	$C_{66}(10^{10})$	e_{15}	e_{13}	e_{33}	$\epsilon_{11}(10^{-9})$	$\epsilon_{11}(10^{-9})$
PZT5	12.1	7.54	7.52	11.1	2.11	2.28	12.3	-5.4	15.8	8.11	7.35

Πίνακας 7: Μηχανικές πιεζοηλεκτρικές και διηλεκτρικές ιδιότητες υλικού ινών

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στον τρόπο με τον οποίο τοποθετούνται τόσο οι ελαστικές όσο και οι πιεζοηλεκτρικές και διηλεκτρικές σταθερές στους πίνακες του περιβάλλοντος του Ansys μιας που διαφέρει από τον καθιερωμένο τρόπο του οργανισμού IEEE. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας στον οποίο τοποθετούνται με ορθό τρόπο για το Ansys οι ελαστικές σταθερές ακαμψίας του ανισότροπου υλικού μας καθώς επίσης και οι πιεζοηλεκτρικοί και διηλεκτρικοί πίνακες.

C_{11}					
C_{12}	C_{11}				
C_{13}	C_{13}	C_{33}			
0	0	0	C_{66}		
0	0	0	0	C_{44}	
0	0	0	0	0	C_{44}

Πίνακας 8: ορθός τρόπος τοποθέτησης ελαστικών Σταθερών στο Ansys

Σχετικά με τον πιεζοηλεκτρικό και διηλεκτρικό πίνακα θα πρέπει ο χρήστης να επιλέξει ποιος θα είναι ο άξονας πόλωσης και κατά συνέπεια ο τρόπος που θα τοποθετηθούν οι σταθερές. Στην δική μας περίπτωση επιλέγουμε ως **άξονα πόλωσης τον άξονα z** δηλαδή κατά τη διεύθυνση των ινών και οι πίνακες θα έχουν την παρακάτω μορφή:

0	0	e_{13}
0	0	e_{13}
0	0	e_{33}
0	0	0
0	e_{15}	0
e_{15}	0	0

Πίνακας 9: ορθός τρόπος τοποθέτησης πιεζοελαστικών σταθερών στο Ansys

Μία ακόμη σημαντική λεπτομέρεια για τον διηλεκτρικό πίνακα που ακολουθεί είναι ότι οι σταθερές που χρησιμοποιούνται δεν είναι στην απόλυτη τιμή τους αλλά στη σχετική, δηλ. οι τιμές ϵ_{11}/ϵ_0 και ϵ_{33}/ϵ_0 όπου $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ (F/m). Αυτό συμβαίνει όταν χρησιμοποιείται το στοιχείο διακριτοποίησης element SOLID226 για την πιεζοηλεκτρική ανάλυση.

ϵ_{11}/ϵ_0	0	0
	ϵ_{11}/ϵ_0	0
		ϵ_{33}/ϵ_0

Πίνακας 10: ορθός τρόπος τοποθέτησης διηλεκτρικών σταθερών στο Ansys

Τέλος, προσοχή θα πρέπει να δοθεί στις μονάδες μέτρησης και στις σωστές μετατροπές.

4.4 Επαφή σωμάτων

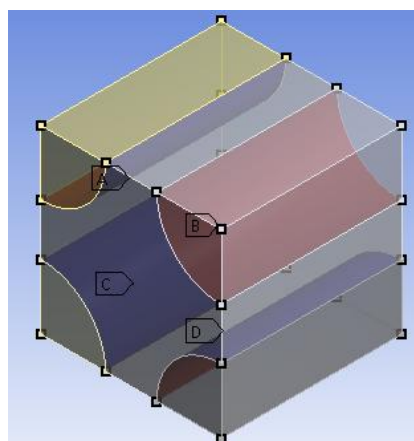
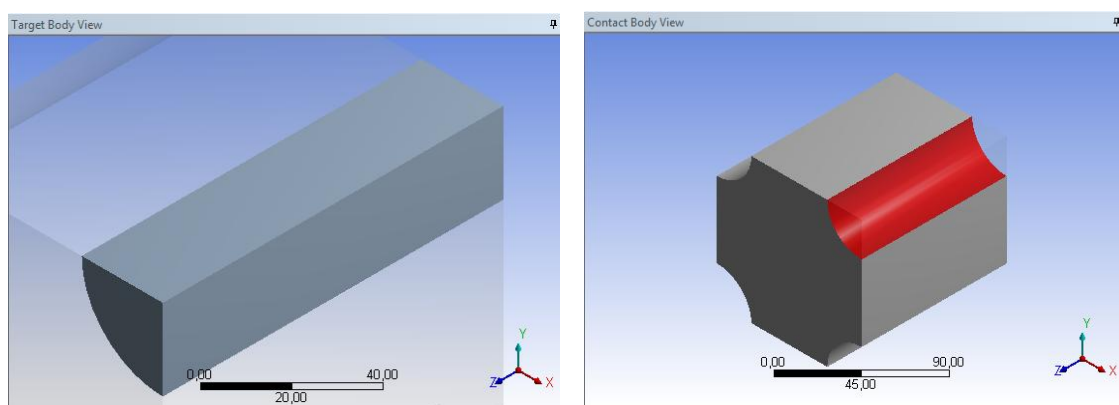
Η μήτρα με τις ίνες έχουν σημαντική διαφορά μέτρων ελαστικότητας. Για τη σωστή μοντελοποίηση απαιτούνται ιδιαίτερες ρυθμίσεις ώστε να εξασφαλίσουμε ότι τα δύο διαφορετικά υλικά που αποτελούν το σύνθετο υλικό, δεν θα αποκολληθούν ή δεν θα διεισδύσουν το ένα στο άλλο και δεν θα υπάρχουν τριβές κατά την φόρτιση.

Ο τύπος της επαφής των σωμάτων είναι επιφάνεια – επιφάνεια και τα πλεονεκτήματά του είναι τα εξής:

- Υποστηρίζουν πεπερασμένα στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους
- Παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα επαφής για μηχανολογικές εφαρμογές
- Δεν έχουν περιορισμούς ως προς το σχήμα της επιφάνειας στόχου

Όπως παρατηρούμε στην εικόνα δημιουργούνται τέσσερις περιοχές επαφών. Ο στόχος (target) – μπλε χρωματισμός, είναι πάντα το υλικό με το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας – στην περίπτωση μας οι πιεζοκεραμικές ίνες ενώ η επαφή (contact) – κόκκινος χρωματισμός είναι το υλικό με το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας – η πολυμερική μήτρα.

Επιλέγουμε ως τύπο επαφής την επιλογή **bonded** για να αποφύγουμε τριβές διεισδύσεις και αποκολλήσεις.



Details of "Contact Region"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	matrix
Target Bodies	fiber
Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Automatic

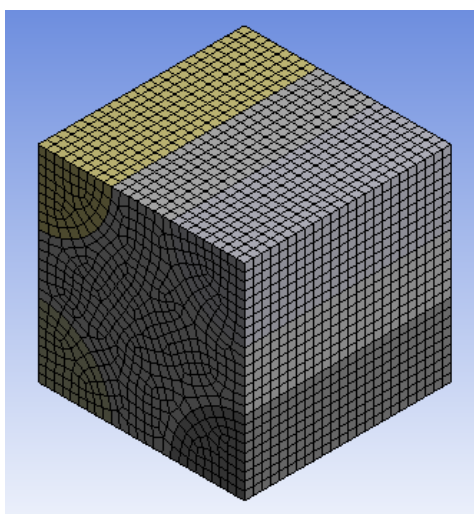
Σχήμα 27: Οι τέσσερις περιοχές επαφής μεταξύ μήτρας και ινών

4.5 Διακριτοποίηση

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Σε μία συνεχή κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα.

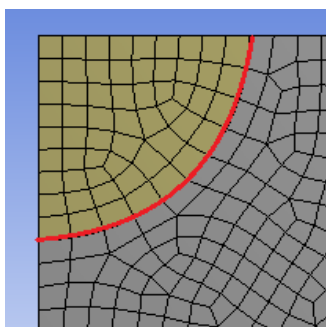
Για να επιτευχθεί ακριβής λύση ενός συγκεκριμένου προβλήματος στη διακριτοποιημένη μορφή του, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβιβαστότητας στο εσωτερικό των στοιχείων αλλά και στα σύνορά τους. Η συμπεριφορά των στοιχείων καθορίζεται από συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τον τρόπο μεταβολής των τάσεων ή των μετατοπίσεων στο εσωτερικό τους. Η ακρίβεια της μεθόδου αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων ή καλύτερα, των κόμβων. Όσο αυξάνεται όμως ο αριθμός των στοιχείων, τόσο αυξάνονται ο χρόνος υπολογισμού και το κόστος.

Τα τέσσερα μοντέλα μας έχουν σχετικά απλή γεωμετρία. Έτσι λοιπόν η μόνη ρύθμιση που απαιτείται είναι η επιλογή του **sizing**. Πιθανές ρυθμίσεις – επιλογές θα ήταν απαραίτητες αν υπήρχε περιπλοκότητα στη γεωμετρία μας.



Σχήμα 28: Το διακριτοποιημένο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE)

Στο μόνο στοιχείο που πρέπει να δώσουμε σημασία στη συγκεκριμένη γεωμετρία είναι η επαφή των δύο σωμάτων που υπάρχει και καμπυλότητα. Λόγω αυτής της καμπυλότητας τα ‘τετράγωνα’ στοιχεία δεν μπορούν να διατηρηθούν όμως αυτό δεν αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για τη λύση. Σημασία πρέπει να δοθεί στην ομαλή διάδοση των στοιχείων από το ένα υλικό στο άλλο όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 29: Ομαλή «διάδοση» του πλέγματος (κόκκινη γραμμή) από υλικό ίνας σε μήτρα

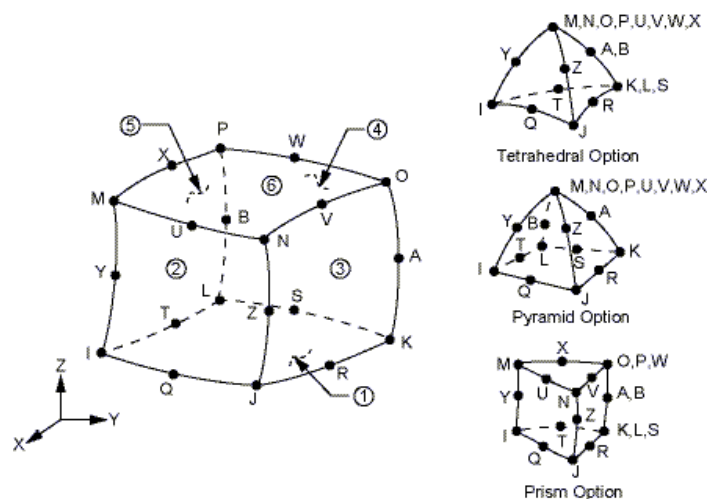
Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι καθώς αυξάνεται το κλάσμα όγκου ινών τόσο μικραίνει το αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE). Όπως παρατηρούμε στον Πίνακα 1 οι ακμές κάθε αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου (RVE) είναι διαφορετικές και επομένως οι όγκοι τους. Είναι αναγκαίο όμως το μέγεθος του πλέγματος να είναι ίδιο, καθώς μικραίνει η αντιπροσωπευτική μονάδα κι αυτό επιτυγχάνεται αλλάζοντας το μέγεθος του στοιχείου σε κάθε μονάδα. Αν για παράδειγμα διατηρούσαμε το ίδιο μέγεθος στοιχείου και για τα τέσσερα μοντέλα, τότε το μοντέλο με κλάσμα όγκου ινών 17% θα είχε ικανοποιητικά διακριτοποιημένο πλέγμα, ενώ το μοντέλο με κλάσμα όγκου ινών 54% θα είχε πολύ αραιό πλέγμα, άρα λιγότερα στοιχεία - λιγότερους κόμβους με συνέπειες στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Περιγραφή Στοιχείων

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στα πεπερασμένα στοιχεία είναι το στοιχείο διακριτοποίησης. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιούνται δύο στοιχεία. Το **SOLID 226**, και το **CONTA 174**.

Περιγραφή στοιχείου Solid 226

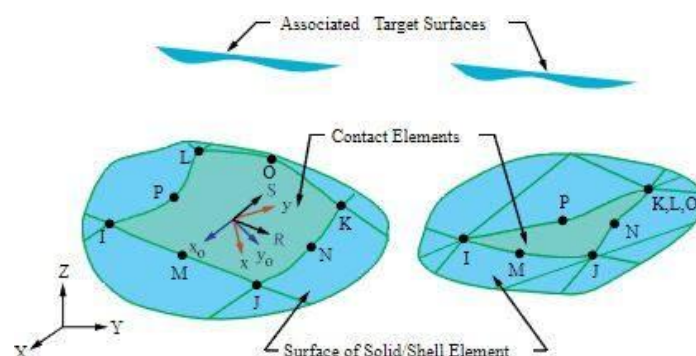
Το SOLID 226 ένα υψηλής τάξης τρισδιάστατο, ισοπαραμετρικό, εξαεδρικό στοιχείο που παρουσιάζει τετραγωνική συμπεριφορά στις μετατοπίσεις. Ορίζεται από 20 κόμβους έχοντας τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο: επικόμβιες μετατοπίσεις στις τρεις διευθύνσεις. Υπάρχει η δυνατότητα της πιεζοηλεκτρικής ανάλυσης και γι αυτό προτιμάται αυτόματα από το πρόγραμμα.



Σχήμα 30: Περιγραφή του στοιχείου Solid 226

Περιγραφή στοιχείου CONTA174

Το CONTA 174 είναι ένα τρισδιάστατο στοιχείο με 8 κόμβους που χρησιμοποιείται για να αντιπροσωπεύσει την επαφή και την ολίσθηση μεταξύ επιφανειών. Αυτό το τρισδιάστατο στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για δομικές αναλύσεις επαφής όσο και αναλύσεις επαφής συζευγμένων πεδίων όπως είναι και η πιεζοηλεκτρική. Το στοιχείο έχει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του στερεού που είναι συνδεδεμένο.



Σχήμα 31: Περιγραφή του στοιχείου Conta 174

4.6 Περιοδικές συνοριακές συνθήκες

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο στόχος της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση των 11 ελαστικών, πιεζοηλεκτρικών και διηλεκτρικών σταθερών του σύνθετου υλικού με πιεζοηλεκτρικές ίνες.

Αυτό θα επιτευχθεί με ειδικές συνοριακές συνθήκες μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης διαφορετικές για την κάθε περίπτωση, έξι για κάθε μοντέλο.

→ 1^η περίπτωση παίρνουμε δεδομένα για τον υπολογισμό των C_{33} και C_{13} .

→ 2^η παίρνουμε δεδομένα για τον υπολογισμό των C_{12} και C_{11} .

→ 3^η παίρνουμε δεδομένα για τον υπολογισμό των C_{44} και e_{15} .

→ 4^η περίπτωση παίρνουμε δεδομένα για τον υπολογισμό του C_{66}

→ 5^η για τον υπολογισμό του ϵ_{11} και

→ 6^η περίπτωση παίρνουμε δεδομένα για τον υπολογισμό των e_{33} , e_{13} και ϵ_{33} .

Έπειτα, οι σταθερές υπολογίζονται από τον μέσο όρο των τάσεων ($\bar{T}$), των μετατοπίσεων ($\bar{S}$), των ηλεκτρικών πεδίων ($\bar{E}_i$) και των ηλεκτρικών μετατοπίσεων ($\bar{D}_i$) που προκύπτουν από τα ολοκληρώματα:

$$\bar{T}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^{n_{el}} T_{ij}^{(n)} V^{(n)} \quad (1) \quad \bar{S}_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^{n_{el}} S_{ij}^{(n)} V^{(n)} \quad (2)$$

$$\bar{E}_i = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^{n_{el}} E_i^{(n)} V^{(n)} \quad (3) \quad \bar{D}_i = \frac{1}{V} \sum_{n=1}^{n_{el}} D_i^{(n)} V^{(n)} \quad (4)$$

Πρακτικά, πολλαπλασιάζουμε τις τάσεις που δρουν στους κόμβους του κάθε στοιχείου, με τον όγκο του κάθε στοιχείου. Έπειτα, αθροίζουμε το γινόμενο που προέκυψε και κατόπιν διαιρούμε με τον όγκο του αντιπροσωπευτικού στοιχείου – RVE. Μ' αυτόν τον τρόπο παίρνουμε τη μέση τιμή των τάσεων. Αντίστοιχα, εργαζόμαστε για τη μέση τιμή των μετατοπίσεων, των ηλεκτρικών πεδίων και των ηλεκτρικών μετατοπίσεων. Τέλος, διαιρούμε τη μέση τιμή τάσης με τη μέση τιμή μετατόπισης ή τη μέση τιμή ηλεκτρικού πεδίου με τη μέση τιμή ηλεκτρικής μετατόπισης, (στις επιθυμητές διευθύνσεις) και προκύπτουν οι σταθερές ακαμψίας C_{ij}^{eff} , οι διηλεκτρικές σταθερές ϵ_{ij} και οι πιεζοηλεκτρικές σταθερές e_{ij} .

Οι τιμές των ελαστικών σταθερών C_{ij}^{eff} είναι σε **GPa**, των διηλεκτρικών σταθερών ϵ_{ij} σε **F/m** και των πιεζοηλεκτρικών σταθερών e_{ij} σε **C/m²**.

Οι ιδιότητες $C_{33}, C_{13}, C_{11}, C_{12}, C_{44}, C_{66}, e_{33}, e_{13}$ υπολογίστηκαν με το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Ansys 19.1 ενώ οι ιδιότητες $e_{15}, \epsilon_{33}, \epsilon_{11}$ υπολογίστηκαν με το πακέτο Comsol Multiphysics 5.4 λόγω κάποιων τεχνικών δυσκολιών.

Αναλυτική περιγραφή εύρεσης σταθερών $C_{33}, C_{13}, C_{11}, C_{12}, C_{44}, C_{66}, e_{33}, e_{13}, e_{15}, \epsilon_{33}, \epsilon_{11}$

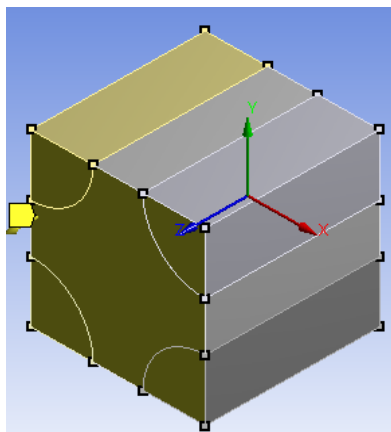
1. Υπολογισμός των σταθερών ακαμψίας C_{33} και C_{13}

Για τον υπολογισμό των σταθερών ακαμψίας C_{33} και C_{13} οι συνοριακές συνθήκες που θα εφαρμοστούν στο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE) πρέπει να εφαρμοστούν με τέτοιο τρόπο ώστε εκτός από την μετατόπιση κατά τη διεύθυνση z όλες οι υπόλοιπες μετατοπίσεις να είναι μηδενικές. Πρακτικά, αυτό θα επιτευχθεί εφαρμόζοντας σε όλες τις πλευρές (Z-, X+, X-, Y+, Y-) μηδενικές μετατοπίσεις εκτός από την πλευρά $Z+$ η οποία θα έχει μία θετική τιμή μετατόπισης χωρίς να υπάρχει κάποιος κανόνας που να απαιτεί συγκεκριμένη τιμή, (στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε η τιμή 5μm).

Επειδή το πρόβλημα μας αφορά πιεζοηλεκτρικό σύνθετο υλικό εφαρμόζουμε δυναμικό (voltage) σε κάθε πλευρά του RVE με τιμή 0 V.

Μπορούμε μετά τη λύση να πάρουμε αποτελέσματα των τάσεων T_{33} κατά τη διεύθυνση z , T_{11} κατά τη διεύθυνση x και μετατοπίσεων S_{33} κατά τη διεύθυνση z . Οι τιμές των $\bar{T}_{33}, \bar{T}_{11}$ και $\bar{S}_{33}$ προκύπτουν από τα ολοκληρώματα (1) και (2). Τέλος υπολογίζουμε τις σταθερές ακαμψίας από τους τύπους :

$$C_{33} = \bar{T}_{33} / \bar{S}_{33} \text{ και } C_{13} = \bar{T}_{11} / \bar{S}_{33}$$



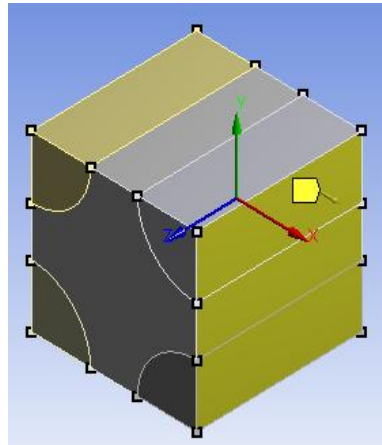
Σχήμα 32: Επιβολή συνοριακών συνθηκών στην πλευρά Z+, $u_i=5\mu m$, $\Phi=0V$

2. Υπολογισμός των σταθερών ακαμψίας C_{11}, C_{12}

Για τον υπολογισμό των σταθερών ακαμψίας C_{11} και C_{12} εργαζόμαστε με τον ίδιο τρόπο όπως και στην παραπάνω περίπτωση μόνο που εδώ, οι συνοριακές συνθήκες πρέπει να εφαρμοστούν με τέτοιο τρόπο ώστε εκτός από την μετατόπιση κατά τη διεύθυνση x , (μετατόπιση με τιμή $5\mu m$ στην πλευρά $X+$) όλες οι υπόλοιπες μετατοπίσεις στις πλευρές ($Z+, Z-, X-, Y+, Y-$) θα είναι μηδενικές. Επιπλέον, το δυναμικό σε όλες τις πλευρές του RVE έχει μηδενική τιμή.

Οι τιμές των $\bar{T}_{11}, \bar{T}_{22}$ και $\bar{S}_{11}$ προκύπτουν από τα ολοκληρώματα (1) και (2). Τέλος, υπολογίζουμε τις σταθερές ακαμψίας από τους τύπους :

$$C_{11} = \bar{T}_{11} / \bar{S}_{11} \text{ και } C_{12} = \bar{T}_{22} / \bar{S}_{11}$$



Σχήμα 33: Επιβολή συνοριακών συνθηκών στην πλευρά $X+$, $u_i=5\mu m$, $\Phi=0V$

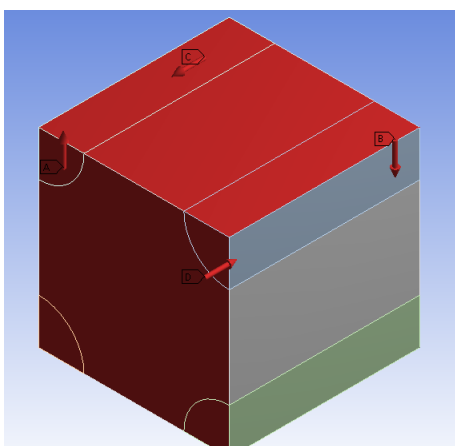
3. Υπολογισμός της σταθεράς ακαμψίας C_{44} και πιεζοηλεκτρικής σταθεράς e_{15}

Για τον υπολογισμό των σταθερών ακαμψίας C_{44} και e_{15} οι μετατοπίσεις στις πλευρές ($X+, X-$) καθώς επίσης και το δυναμικό (voltage) σε όλες τις πλευρές ($Z+, Z-, X+, X-, Y+$ και $Y-$) είναι μηδενικά. Σ αυτή την περίπτωση εκτός από τις μετατοπίσεις και το δυναμικό πρέπει να εφαρμόσουμε διατμητικές δυνάμεις και αυτό το πετυχαίνουμε με τον εξής τρόπο. Εξασκούμε δυνάμεις στις επιφάνειες των πλευρών ($Y+, Y-$) κατά τη διεύθυνση z με τιμές $F_z=+1N$ στην πλευρά $Y+$ και $F_z=-1N$ στην πλευρά $Y-$, δηλαδή ίδια τιμή αλλά αντίθετη διεύθυνση. Ακόμη, εξασκούμε δυνάμεις τιμής $F_y=+1N$ και $F_y=-1N$ κατά τη διεύθυνση y στις πλευρές ($Z+, Z-$). Τέλος, 'κρατάμε' σταθερές τις 2 ακμές που ενώνουν τις πλευρές ($Z+, Y+$) και

(Z-,Y-). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία διατμητική κατάσταση στο αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου RVE.

Μπορούμε μετά τη λύση να πάρουμε αποτελέσματα της διατμητικής τάσης T_{23} , της διατμητικής μετατόπισης S_{23} και της ηλεκτρικής μετατόπισης D_2 κατά τη διεύθυνση y . Οι τιμές των $\bar{T}_{23}$, $\bar{S}_{23}$ και $\bar{D}_2$ υπολογίζονται από τα ολοκληρώματα (1), (2) και (3). Τέλος υπολογίζουμε τις σταθερές ακαμψίας από τους τύπους :

$$C_{44} = \bar{T}_{23} / \bar{S}_{23} \text{ και } e_{15} = \bar{D}_2 / \bar{S}_{23}$$



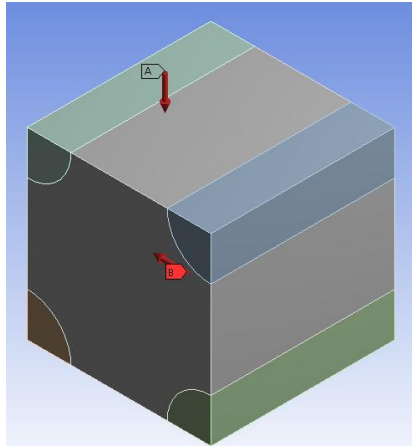
Σχήμα 34: Επιβολή συνοριακών συνθηκών για τον υπολογισμό των C_{44} και e_{15}

4. Υπολογισμός της σταθεράς ακαμψίας C_{66}

Για τον υπολογισμό της σταθεράς ακαμψίας C_{66} οι μετατοπίσεις στις πλευρές (Z+,Z+,) καθώς επίσης και το δυναμικό (voltage) σε όλες τις πλευρές (Z+,Z-,X+, X-, Y+ και Y-) είναι μηδενικά. Και σ αυτή την περίπτωση εκτός από τις μετατοπίσεις και το δυναμικό πρέπει να εφαρμόσουμε διατμητικές δυνάμεις και αυτό το πετυχαίνουμε με τον εξής τρόπο. Εξασκούμε δυνάμεις στις επιφάνειες των πλευρών (X+,X-) κατά τη διεύθυνση y με τιμές +1N στην πλευρά X+ και -1N στην πλευρά X-, δηλαδή ίδια τιμή αλλά αντίθετη διεύθυνση. Ακόμη, εξασκούμε δυνάμεις τιμής +1N και -1N κατά τη διεύθυνση x στις πλευρές (Y+,Y-). Τέλος, 'κρατάμε' σταθερές τις 2 ακμές που ενώνουν τις πλευρές (X+,Y+) και (X-,Y-). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία διατμητική κατάσταση στο RVE.

Μπορούμε μετά τη λύση να πάρουμε αποτελέσματα της διατμητικής τάσης T_{12} και της διατμητικής μετατόπισης S_{12} . Οι τιμές των $\bar{T}_{12}$ και $\bar{S}_{12}$ υπολογίζονται από τα ολοκληρώματα (1) και (2). Τέλος υπολογίζουμε την σταθερά ακαμψίας από τον τύπο :

$$C_{66} = \bar{T}_{12} / \bar{S}_{12}$$



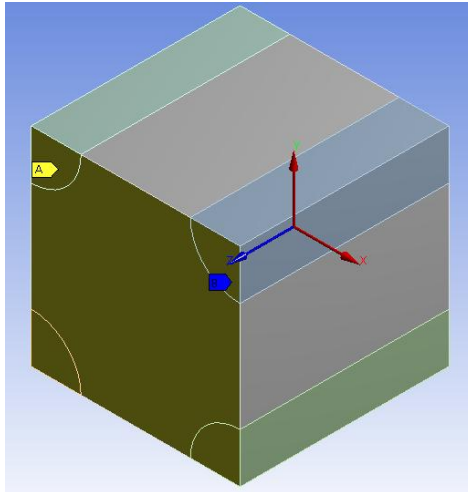
Σχήμα 35: Επιβολή συνοριακών συνθηκών για τον υπολογισμό του C_{66}

5. Υπολογισμός των πιεζοηλεκτρικών και διηλεκτρικής σταθεράς $e_{33}, e_{13}, \epsilon_{33}$

Για τον υπολογισμό των πιεζοηλεκτρικών σταθερών e_{33} και e_{13} και της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_{33} θα εφαρμόσουμε μηδενικές μετατοπίσεις σε όλες τις επιφάνειες των πλευρών (Z+, Z-, X+, X-, Y+ και Y-) και μηδενική τιμή ηλεκτρικού δυναμικού και στις επιφάνειες των πλευρών (Z-, X+, X-, Y+ και Y-). Σ αυτή την περίπτωση εφαρμόζουμε μία θετική τιμή δυναμικού 1V στην πλευρά Z+.

Μπορούμε μετά τη λύση να πάρουμε αποτελέσματα των τάσεων T_{33} κατά τη διεύθυνση z, T_{11} κατά τη διεύθυνση x, ηλεκτρικού πεδίου E_3 κατά τη διεύθυνση z και ηλεκτρικής μετατόπισης D_3 κατά τη διεύθυνση z. Οι τιμές των $\bar{T}_{33}$, $\bar{T}_{11}$ και $\bar{E}_3$ και $\bar{D}_3$ προκύπτουν από τα ολοκληρώματα (1), (2), (3) και (4). Τέλος υπολογίζουμε τις σταθερές από τους τύπους :

$$e_{33} = -\bar{T}_{33} / \bar{E}_3 \quad e_{13} = -\bar{T}_{11} / \bar{E}_3 \quad \epsilon_{33} = \bar{D}_3 / \bar{E}_3$$



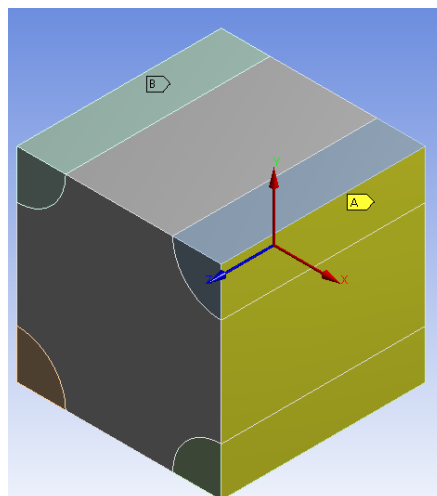
Σχήμα 36: Επιβολή συνοριακών συνθηκών για τον υπολογισμό των $\epsilon_{13}, \epsilon_{33}, \epsilon_{33}$

6. Υπολογισμός των πιεζοηλεκτρικών και διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_{11}

Για τον υπολογισμό της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_{11} θα εφαρμόσουμε μηδενικές μετατοπίσεις σε όλες τις επιφάνειες των πλευρών (Z+,Z-,X+,X-,Y+ και Y-) και μηδενική τιμή ηλεκτρικού δυναμικού και στις επιφάνειες των πλευρών (Z+,Z-,X-,Y+ και Y-) . Σ αυτή την περίπτωση εφαρμόζουμε μία θετική τιμή δυναμικού 1V στην πλευρά X+.

Μπορούμε μετά τη λύση να πάρουμε αποτελέσματα του ηλεκτρικού πεδίου $\mathbf{E}_1$ κατά τη διεύθυνση $\mathbf{y}$ και ηλεκτρικής μετατόπισης $\mathbf{D}_1$ κατά τη διεύθυνση $\mathbf{x}$. Οι τιμές των $\overline{\mathbf{E}}_1$ και $\overline{\mathbf{D}}_1$ προκύπτουν από τα ολοκληρώματα (3) και (4). Τέλος υπολογίζουμε τη σταθερά από τον τύπο :

$$\epsilon_{11} = \overline{\mathbf{D}}_1 / \overline{\mathbf{E}}_1$$



Σχήμα 37: Επιβολή συνοριακών συνθηκών για τον υπολογισμό του ϵ_{11}

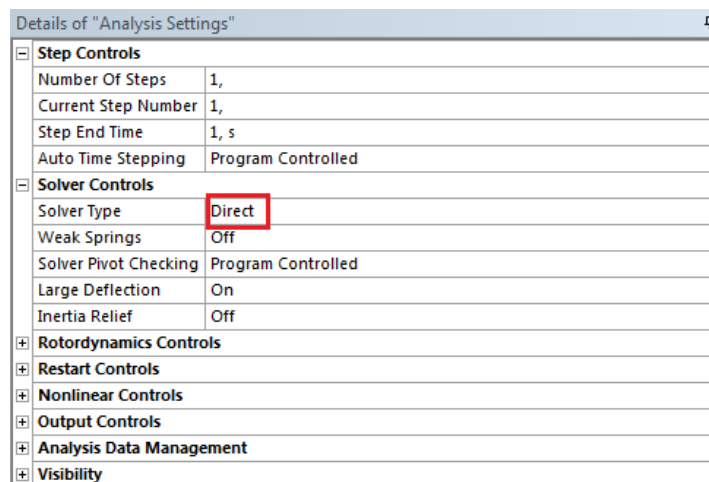
Οι συνοριακές συνθήκες μετατόπισης, φόρτισης και ηλεκτρικού δυναμικού για κάθε πλευρά του RVE συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, όπου u_i η συνθήκη μετατόπισης, Φ το δυναμικό και F η δύναμη που εφαρμόζεται. Οι μονάδες μέτρησης για μετατόπιση σε μm , για ηλεκτρικό δυναμικό σε V και της δύναμης σε N . Με (-) εννοείται καθόλου επιβολή συνθήκης.

Πλευρές	Z+	Z-	X+	X-	Y+	Y-
συνθήκη	$u_i/\Phi/F$	$u_i/\Phi/F$	$u_i/\Phi/F$	$u_i/\Phi/F$	$u_i/\Phi/F$	$u_i/\Phi/F$
ϵ_{11}	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/1\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$
e_{33}, e_{13}, e_{33}	0 $\mu\text{m}/1\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$
C_{66}	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	-/0 $\text{V}/1\text{N}$	-/0 $\text{V}/-1\text{N}$	-/0 $\text{V}/1\text{N}$	-/0 $\text{V}/-1\text{N}$
C_{44}, e_{15}	-/0 $\text{V}/1\text{N}$	-/0 $\text{V}/-1\text{N}$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	-/0 $\text{V}/1\text{N}$	-/0 $\text{V}/-1\text{N}$
C_{11}, C_{12}	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	5 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$
C_{33}, C_{13}	5 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$	0 $\mu\text{m}/0\text{V}/-$

Πίνακας 11: Συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στα RVE για υπολογισμό των σταθερών

4.7 Επίλυση προβλήματος

Το τελευταίο στάδιο μετά την εισαγωγή των οριακών συνθηκών είναι η επίλυση του προβλήματος. Προχωρούμε ορίζοντας κάποιες ιδιότητες που βοηθούν σε καλύτερη επίλυση και αποφυγή ενδείξεων λαθών όπως το να αλλάξουμε την επιλογή του solver σε **direct**. Ακόμη, η σύγκλιση των προβλημάτων επαφής εξαρτάται έντονα από το εκάστοτε πρόβλημα. Το χρονικό βήμα πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε να καταγράφεται κατάλληλη ζώνη επαφής και να είναι ομαλή η μεταφορά των δυνάμεων επαφής. Τέλος, επιλύουμε το πρόβλημα και παίρνουμε τα ζητούμενα γραφικά αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν.



Σχήμα 38: Επιλογή τύπου solver

4.8 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Όπως ήδη αναφέρθηκε σε προηγούμενες ενότητες για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων χρειάζονται οι **μέσες τιμές** των τάσεων (T), των παραμορφώσεων (S), των ηλεκτρικών πεδίων (E) και των ηλεκτρικών μετατοπίσεων (D). Για τον υπολογισμό τους πρέπει να συλλέξουμε όλες τις τιμές των τάσεων (T_{ij}), των παραμορφώσεων (S_{ij}), των ηλεκτρικών πεδίων (E_i) και των ηλεκτρικών μετατοπίσεων (D_i) που επιδρούν στα στοιχεία τα οποία έχουν προκύψει από την διακριτοποίηση. Αυτές οι τιμές που έχουν προκύψει μετά τη λύση, αποθηκεύονται σε φακέλους και οι διεργασίες πρέπει να γίνουν συνολικά σε όλα τα στοιχεία. Για παράδειγμα στο 1^ο μοντέλο – αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (RVE) – 17% ,υπάρχουν 48161 στοιχεία. Για να εφαρμοστούν οι τύποι (1) , (2), (3) και (4) ανοίγουμε το παράθυρο **Worksheet - User defined results** στο οποίο βρίσκονται οι τιμές όλων των πληροφοριών μετά τη λύση. Για τον υπολογισμό των σταθερών ακαμψίας C^{eff} των πιεζοηλεκτρικών σταθερών e_{ij} και των διηλεκτρικών σταθερών ϵ_{ij} αυτά που πρέπει να γνωρίζουμε είναι οι τιμές των ορθών τάσεων (S_x, S_y, S_z)- και παραμορφώσεων ($E_{rel_x}, E_{rel_y}, E_{rel_z}$) του ηλεκτρικού πεδίου (E_x, E_y, E_z) και της ηλεκτρικής μετατόπισης (D_x, D_y, D_z)- (όπου S_i, E_{rel_i}, E_i και D_i οι ονομασίες των αποτελεσμάτων που μας αφορούν στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Ansys) στην επιθυμητή διεύθυνση κάθε φορά καθώς και τους όγκους (Volume) του κάθε στοιχείου. Τέλος, επιλέγουμε την εντολή **elemental mean** και κατεβάζουμε τα αποτελέσματα που θέλουμε στον ηλεκτρονικό μας υπολογιστή. Με τις κατάλληλες διεργασίες στο excel υπολογίζουμε τα αποτελέσματα μας και προχωρούμε στη δημιουργία γραφημάτων. Αντιστοίχως εργαζόμαστε και στο πακέτο Comsol Multiphysics.

Είναι σημαντικό να ελέγχουμε τις μονάδες μέτρησης που δίνονται τα αποτελέσματα. Αυτή η επισήμανση πρέπει να γίνει διότι ενώ τα αποτελέσματα για παράδειγμα των ηλεκτρικών πεδίων δίνονται σε V/m , ο όγκος του αντιπροσωπευτικού στοιχείου είναι σε μm . Ακολουθεί ένα παράδειγμα για τη σωστή μετατροπή των μονάδων μέτρησης.

$$\bar{E}_i = \frac{1}{V_{rve}} \sum E V_i = \frac{1}{\mu m^3} \frac{V}{m} m^3 = \frac{1}{(10^{-6})^3 m^3} \frac{V}{m} m^3 = \frac{V m^3}{m m^3 10^{-18}} = \frac{V}{m} 10^{18}$$

Type	Data Type	Data Style	Component	Expression	Output Unit
U	Nodal	Scalar	X	UX	Displacement
U	Nodal	Scalar	Y	UY	Displacement
U	Nodal	Scalar	Z	UZ	Displacement
U	Nodal	Scalar	SUM	USUM	Displacement
U	Nodal	Vector	VECTORS	UVECTORS	Displacement
S	Element Nodal	Scalar	X	SX	Stress
S	Element Nodal	Scalar	Y	SY	Stress
S	Element Nodal	Scalar	Z	SZ	Stress
S	Element Nodal	Scalar	XY	SXY	Stress
S	Element Nodal	Scalar	YZ	SYZ	Stress
S	Element Nodal	Scalar	XZ	SXZ	Stress
S	Element Nodal	Scalar	1	S1	Stress
S	Element Nodal	Scalar	2	S2	Stress
S	Element Nodal	Scalar	3	S3	Stress
S	Element Nodal	Scalar	INT	SINT	Stress
S	Element Nodal	Scalar	EQV	SEQV	Stress
S	Element Nodal	Tensor	VECTORS	SVECTORS	Stress
S	Element Nodal	Scalar	MAXSHEAR	SMAXSHEAR	Stress
EPEL	Element Nodal	Scalar	X	EPELX	Strain
EPEL	Element Nodal	Scalar	Y	EPELY	Strain
EPEL	Element Nodal	Scalar	Z	EPELZ	Strain

Σχήμα 39: Λίστα αποτελεσμάτων μετά την επίλυση

Στα γραφήματα συγκρίνουμε την εκάστοτε σταθερά για τα τέσσερα μοντέλα δηλαδή για κλάσμα όγκου ινών από 17% μέχρι 54% στη μήτρα.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Αποτελέσματα από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEA)

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα δηλαδή των ελαστικών σταθερών ακαμψίας ($C_{33}, C_{13}, C_{11}, C_{12}, C_{44}, C_{66}$) των πιεζοηλεκτρικών σταθερών (e_{13}, e_{33}, e_{15}) και των διηλεκτρικών σταθερών ($\epsilon_{33}, \epsilon_{11}$) που υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του excel από τη λύση και για τα τέσσερα μοντέλα του σύνθετου υλικού με πιεζοηλεκτρικές ίνες για κλάσματα όγκου ινών : $V_f = 17\%, 27\%, 40\%$ και 54% .

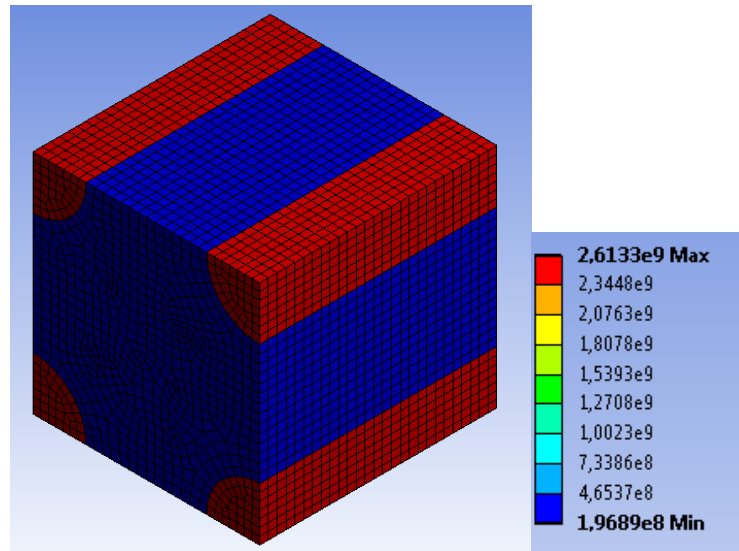
	$V_f = 17\%$	$V_f = 27\%$	$V_f = 40\%$	$V_f = 54\%$
C_{33} (GPa)	13,2	18,42	25	33
C_{13} (GPa)	3,15	3,6	4,3	5,7
C_{11} (GPa)	4,9	5,7	7	9,3
C_{12} (GPa)	3,1	3,4	3,8	4,3
C_{44} (GPa)	0,76	0,86	1,1	1,61
C_{66} (GPa)	0,9	1,3	1,6	2,4
e_{13} (C/m²)	$-4,52 \cdot 10^{-2}$	$-8,00 \cdot 10^{-2}$	$-1,38 \cdot 10^{-1}$	$-2,47 \cdot 10^{-1}$
e_{33} (C/m²)	2,42	4,42	7,24	10,6
e_{15} (C/m²)	$1,47 \cdot 10^{-1}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	$2,15 \cdot 10^{-1}$	$4,07 \cdot 10^{-1}$
ϵ_{33} (F/m)	$1,51 \cdot 10^{-7}$	$1,88 \cdot 10^{-7}$	$2,60 \cdot 10^{-7}$	$3,26 \cdot 10^{-7}$
ϵ_{11} (F/m)	$1,75 \cdot 10^{-7}$	$1,95 \cdot 10^{-7}$	$2,54 \cdot 10^{-7}$	$2,69 \cdot 10^{-7}$

Πίνακας 12: Αποτελέσματα της προσομοίωσης

5.2 Εικόνες των Rve μετά την επίλυση για κάθε μία περίπτωση

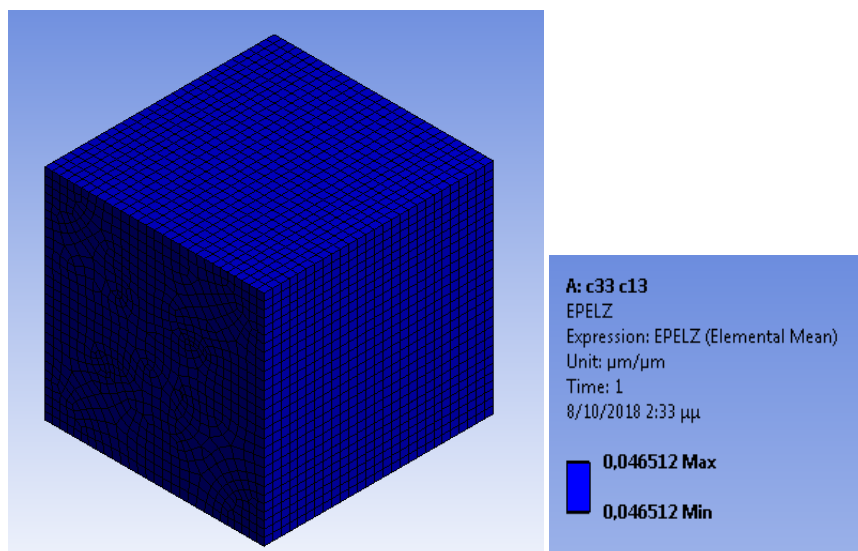
C_{33} , C_{13}

Επιβολή οριακής συνθήκης μετατόπισης κατά τη διεύθυνση z – ορθή τάση, ορθή παραμόρφωση, για τον υπολογισμό της C_{33} .



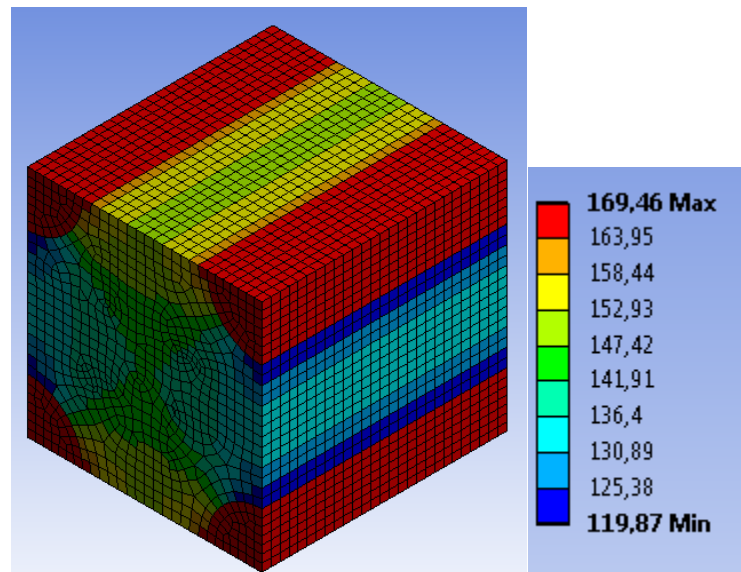
Σχήμα 40 : Ορθή τάση μετά από επιβολή μετατόπισης στην επιφάνεια Z+ (z διεύθυνση) - T_{33}

Επιβολή οριακής συνθήκης μετατόπισης κατά τη διεύθυνση z – ορθή τάση, ορθή παραμόρφωση, για τον υπολογισμό της C_{33}



Σχήμα 41: Ορθή παραμόρφωση μετά από επιβολή μετατόπισης στην επιφάνεια Z+ (z διεύθυνση) - S_{33}

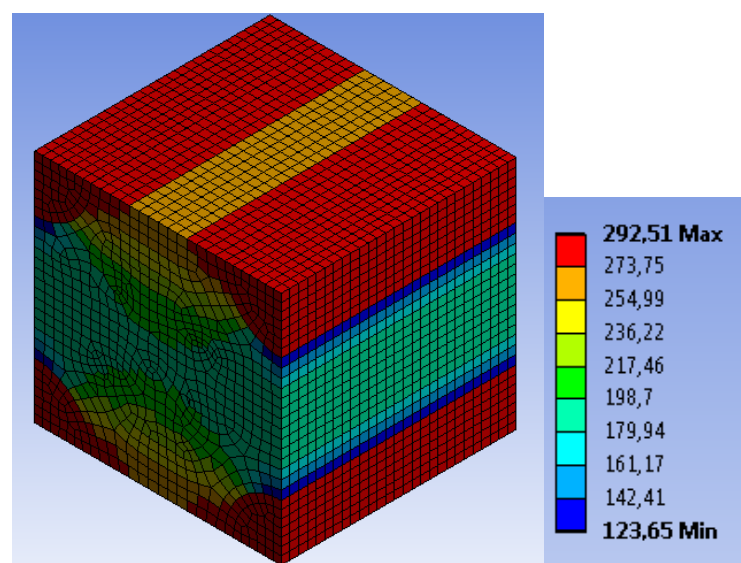
Επιβολή οριακής συνθήκης μετατόπισης κατά τη διεύθυνση x – ορθή τάση για τον υπολογισμό της C_{13}



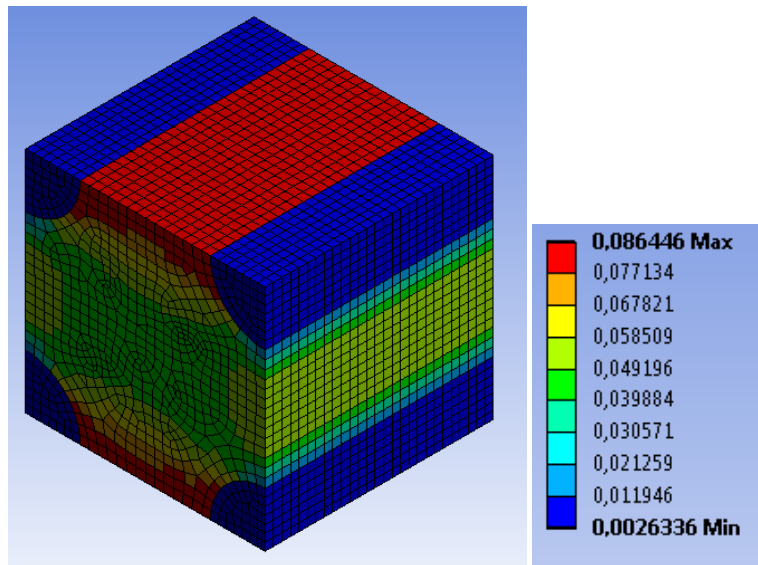
Σχήμα 42 : Ορθή τάση μετά από επιβολή μετατόπισης στην επιφάνεια Z+ (x διεύθυνση) - T_{11}

C_{11}, C_{12}

Επιβολή οριακής συνθήκης μετατόπισης κατά τη διεύθυνση x – ορθή τάση, ορθή παραμόρφωση για τον υπολογισμό της C_{11}

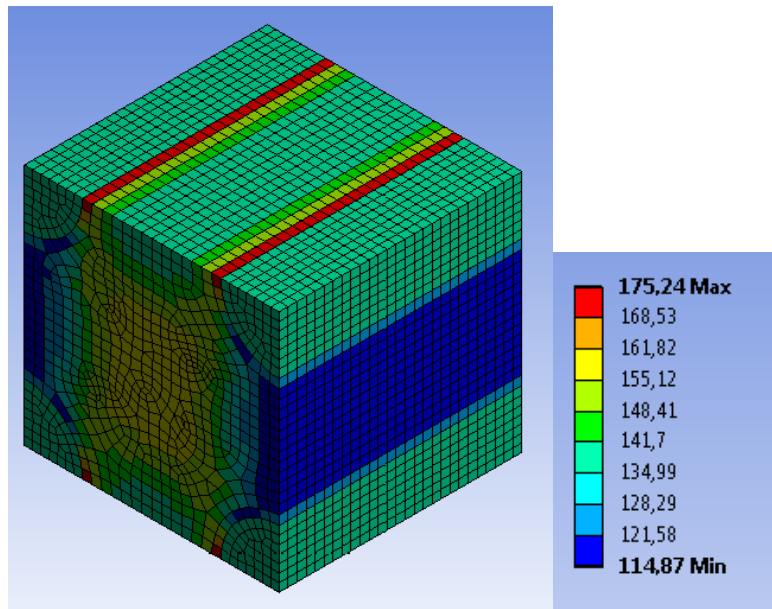


Σχήμα 43: Ορθή τάση μετά από επιβολή μετατόπισης στην επιφάνεια X+ (x διεύθυνση) - T_{11}



Σχήμα 44: Ορθή παραμόρφωση μετά από επιβολή μετατόπισης στην επιφάνεια X+ (x διεύθυνση) - S_{11}

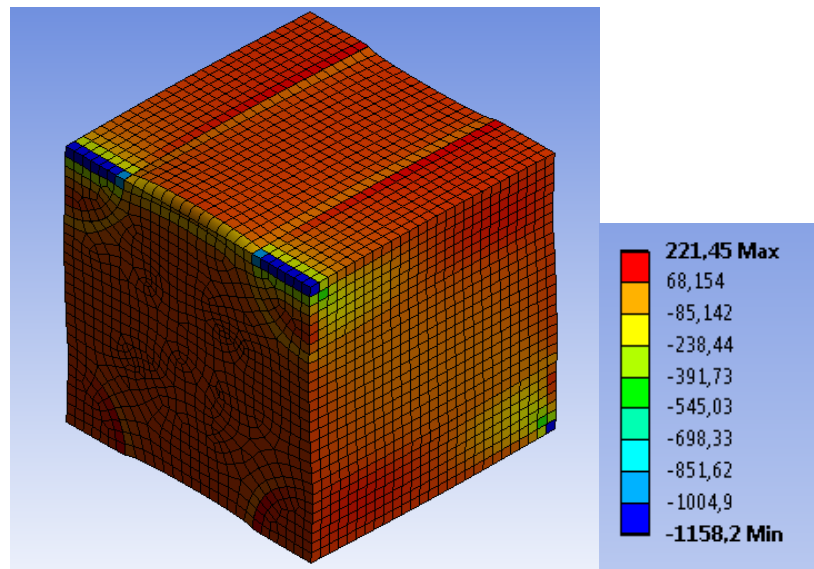
Επιβολή οριακής συνθήκης μετατόπισης κατά τη διεύθυνση x – ορθή τάση για τον υπολογισμό της C_{12}



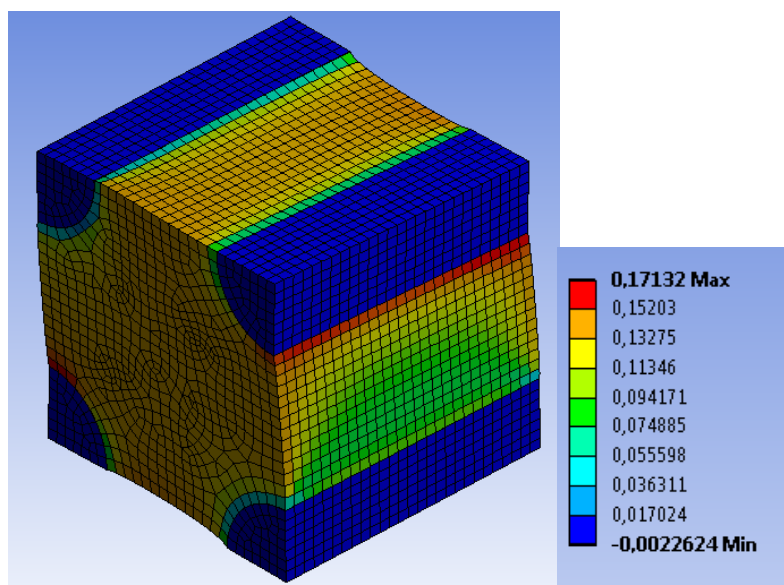
Σχήμα 45: Ορθή τάση μετά από επιβολή μετατόπισης στην επιφάνεια X+ (y διεύθυνση) - T_{22}

C_{44} , e_{15}

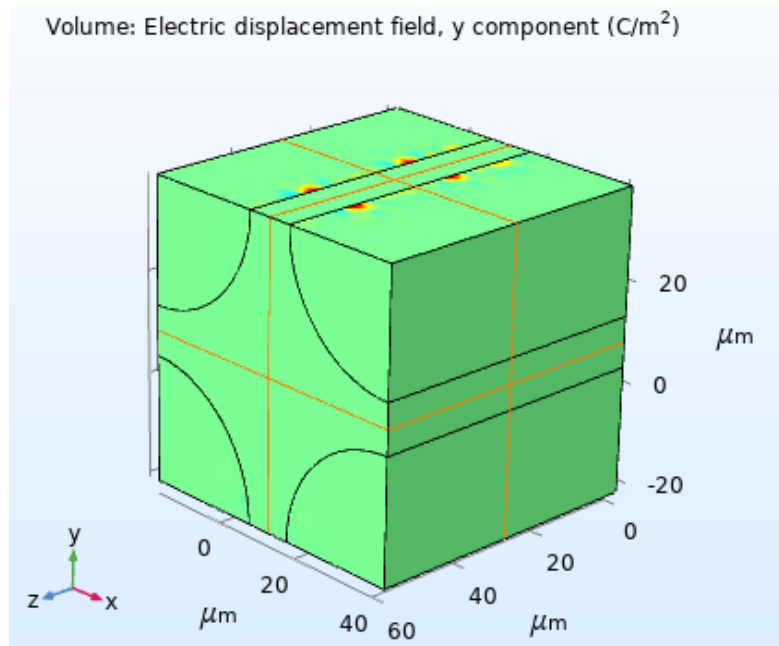
Επιβολή σύνθετων συνθηκών για τον υπολογισμό της C_{44} – διατμητική τάση (T_{23}), διατμητική παραμόρφωση (S_{23})



Σχήμα 46: Διατμητική τάση μετά από επιβολή σύνθετων σ.σ –Υπολογισμός - T_{23}



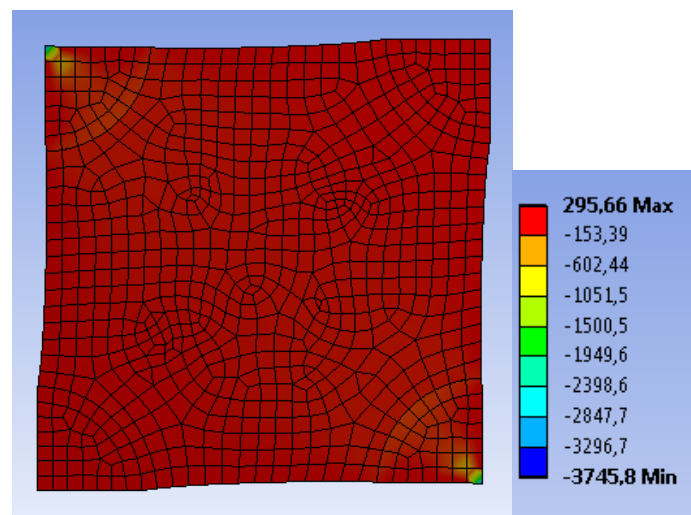
Σχήμα 47: Διατμητική παραμόρφωση μετά από επιβολή σύνθετων σ.σ –Υπολογισμός - S_{23}



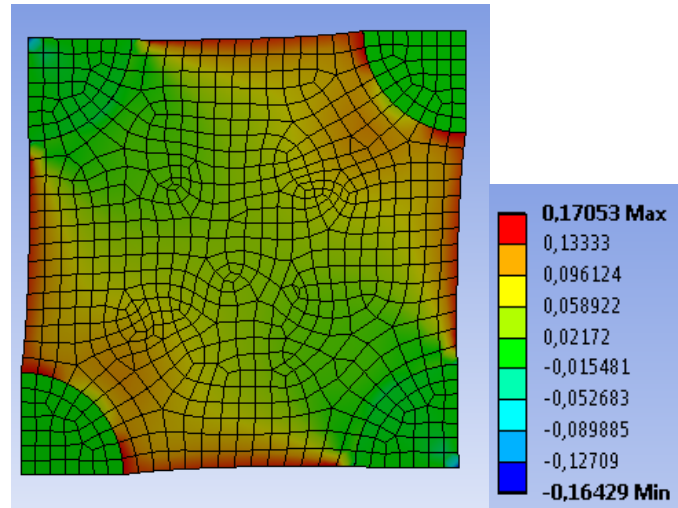
Σχήμα 48: Ηλεκτρική μετατόπιση μετά από επιβολή σύνθετων σ.σ –Υπολογισμός - D_3

C_{66}

Επιβολή συνθηκών για τον υπολογισμό της C_{66} – διατμητική τάση (T_{12}), διατμητική παραμόρφωση (S_{12})



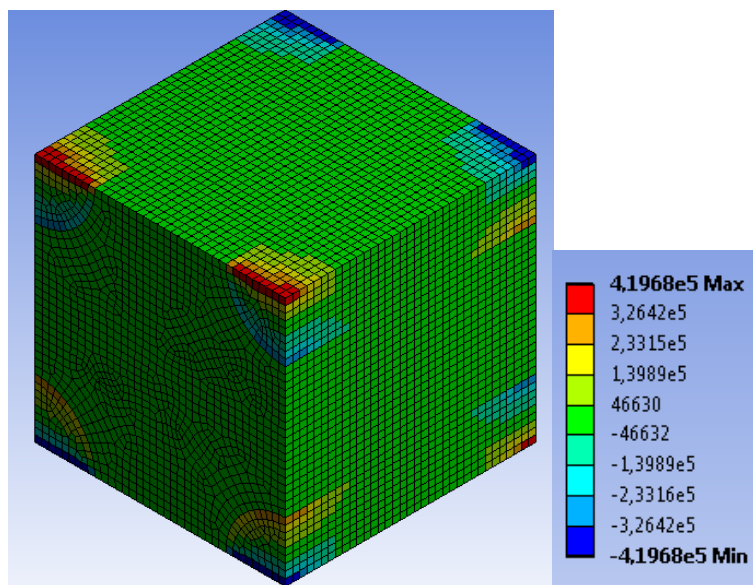
Σχήμα 49: Διατμητική τάση μετά από επιβολή σύνθετων σ.σ –Υπολογισμός - T_{12}



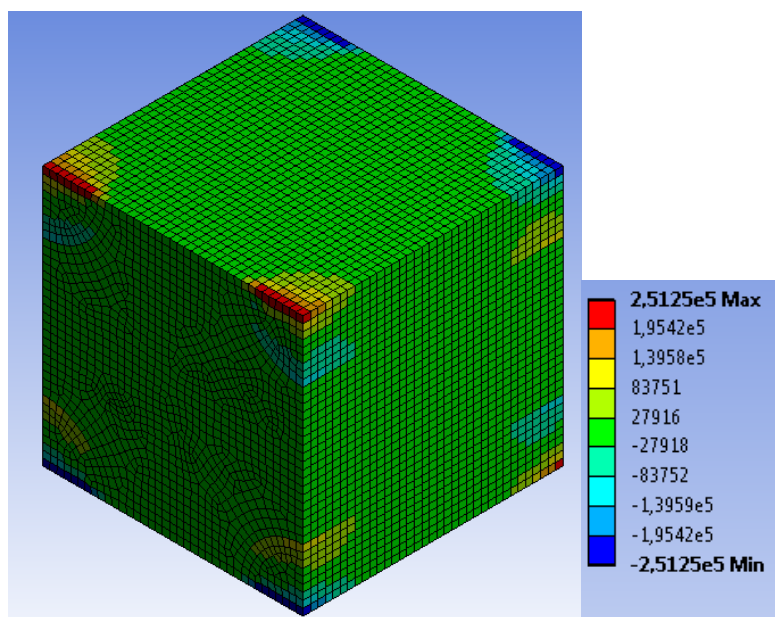
Σχήμα 50 : Διατμητική παραμόρφωση μετά από επιβολή σύνθετων σ.σ –Υπολογισμός - S_{12}

$e_{33}, e_{13}, \epsilon_{33}$

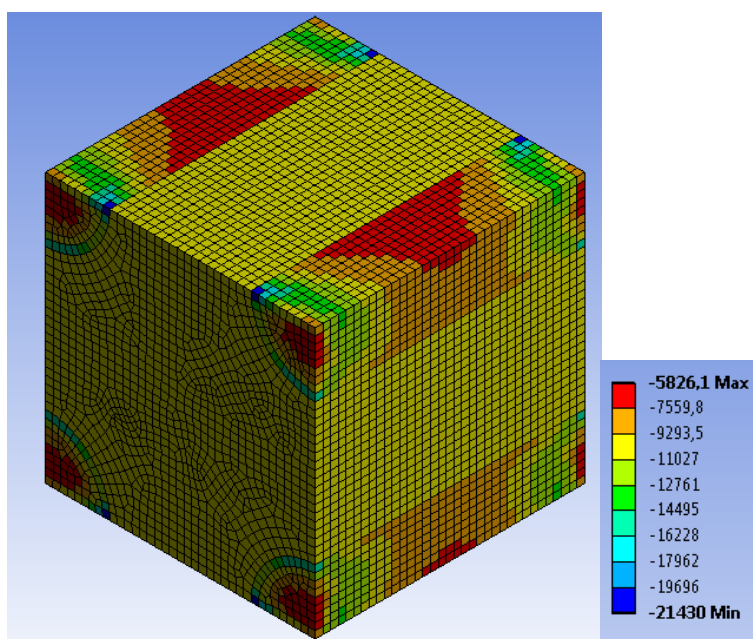
Επιβολή συνθηκών μετατόπισης και ηλεκτρικού φορτίου για τον υπολογισμό των $e_{33}, e_{13}, \epsilon_{33}$



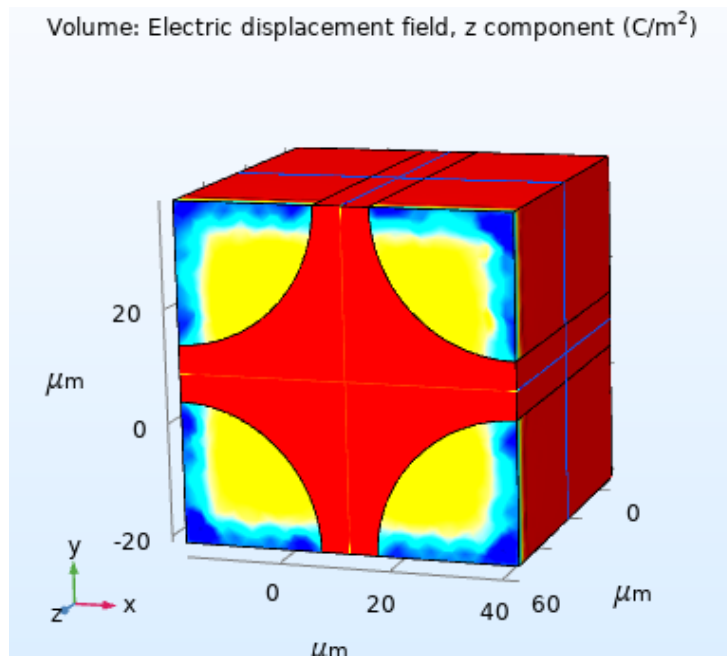
Σχήμα 51: Ορθή τάση μετά από επιβολή μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης στην επιφάνεια Z+ (z διεύθυνση) - T_{33}



Σχήμα 52: Ορθή τάση μετά από επιβολή μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης στην επιφάνεια X+ (x διεύθυνση) – T_{11}



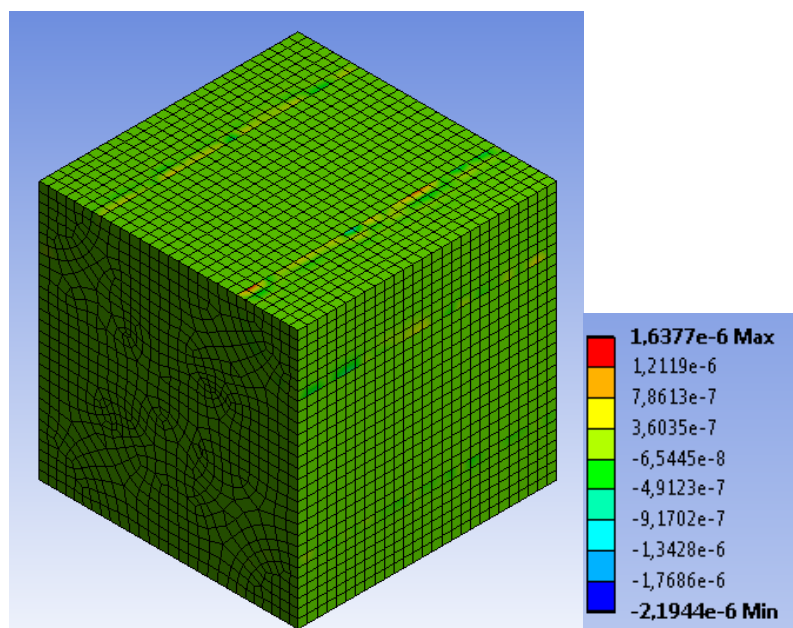
Σχήμα 53: Ηλεκτρικό πεδίο μετά από την επιβολή μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης (διεύθυνση z) – $-E_3$



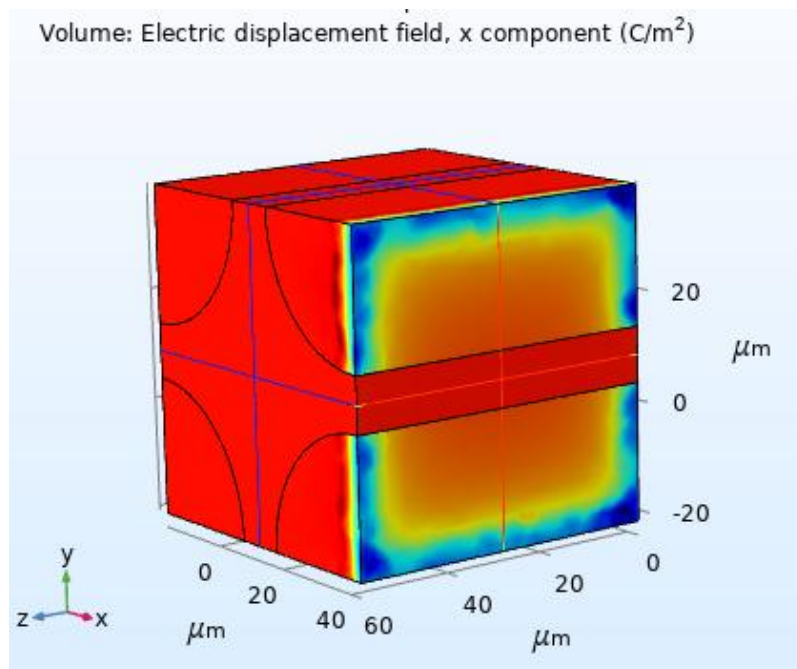
Σχήμα 54: Ηλεκτρική μετατόπιση μετά από την επιβολή μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης (διεύθυνση z) - D_z

ϵ_{11}

Επιβολή συνθηκών μετατόπισης και ηλεκτρικού φορτίου για τον υπολογισμό των ϵ_{11}



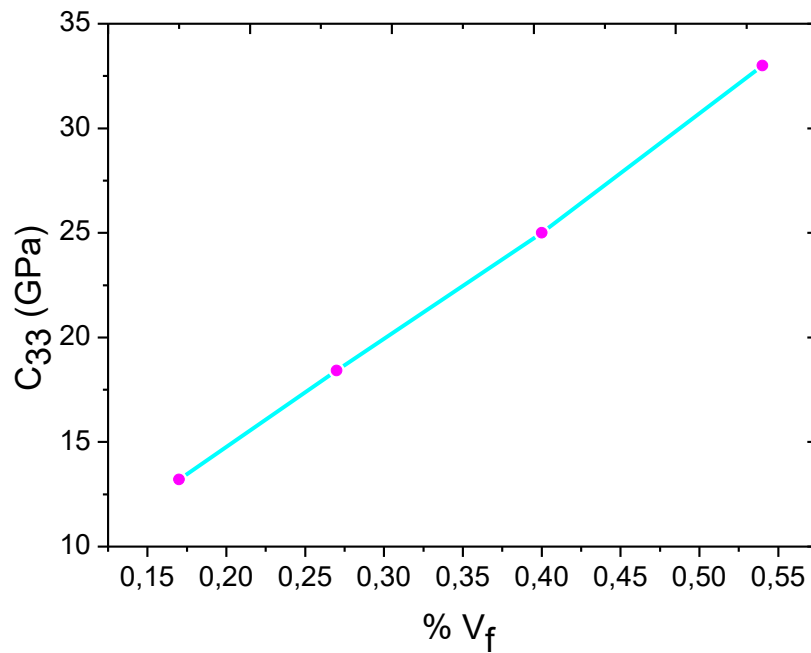
Σχήμα 55: Ηλεκτρικό πεδίο μετά από την επιβολή μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης (διεύθυνση x) E_x



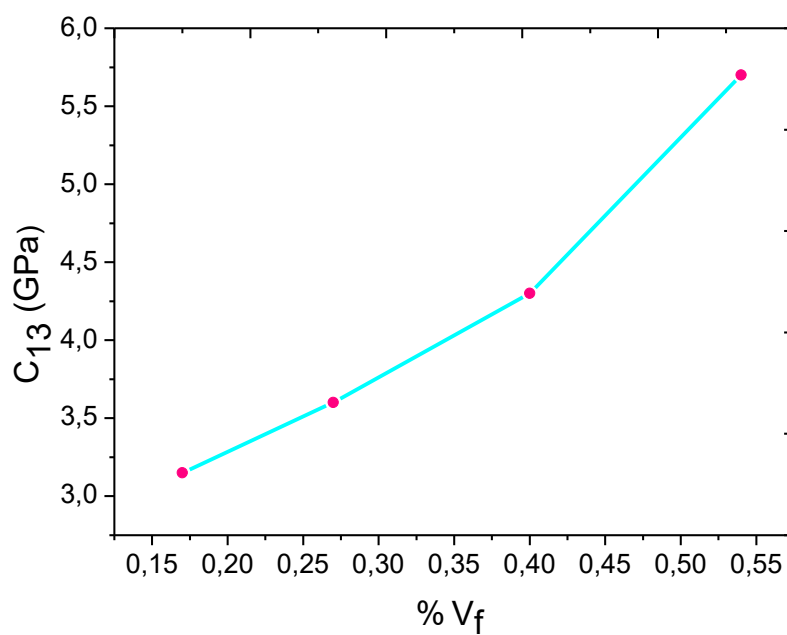
Σχήμα 56: Ηλεκτρική μετατόπιση μετά από την επιβολή μετατόπισης και ηλεκτρικής φόρτισης (διεύθυνση x) D_1

5.3 Παρουσίαση διαγραμμάτων

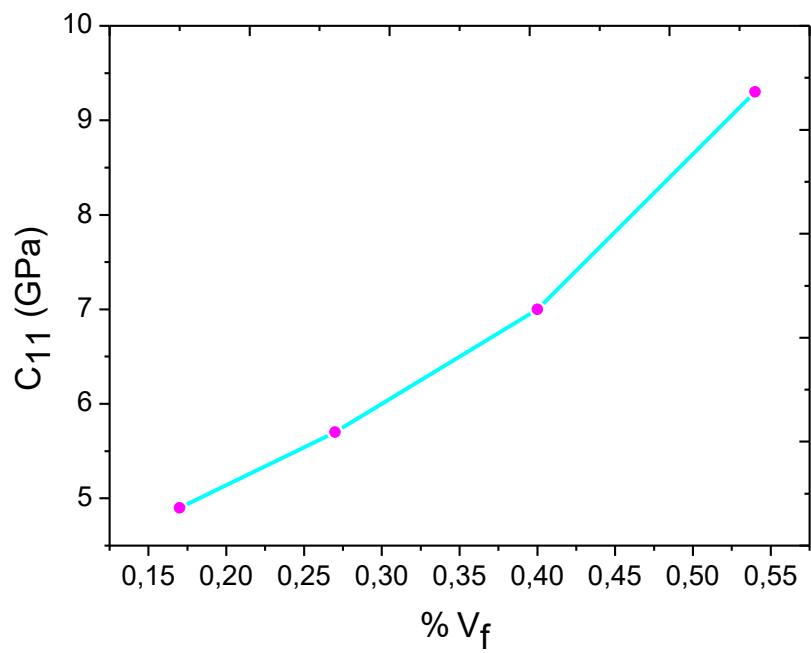
Από τα δεδομένα του Πίνακα 9 κατασκευάζουμε τις γραφικές παραστάσεις των C_{33} , C_{13} , C_{11} , C_{12} , e_{13} , e_{33} , e_{33} , C_{44} , e_{15} , C_{66} και ϵ_{11} σε σχέση με τα κλάσματα όγκου ινών V_f .



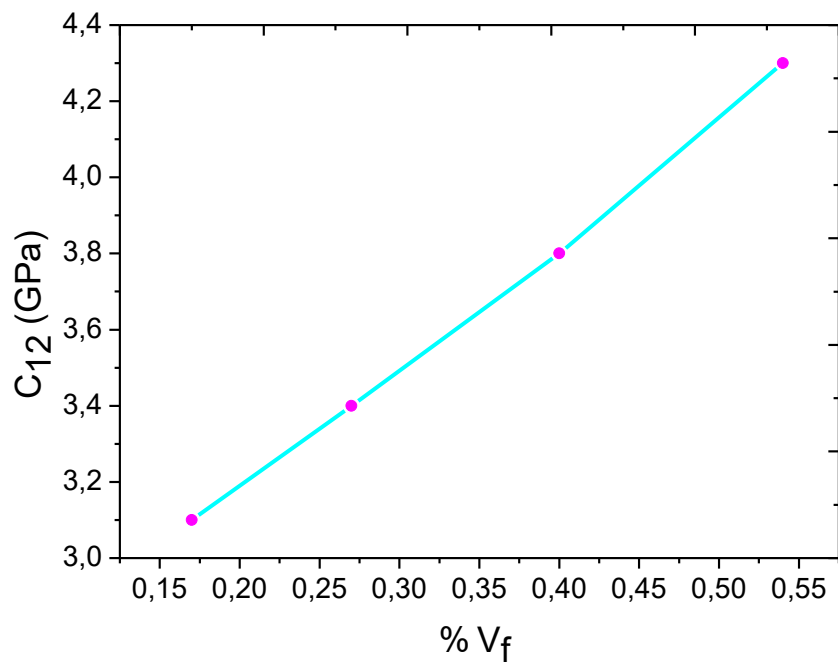
Διάγραμμα 1: μεταβολή του C_{33} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f



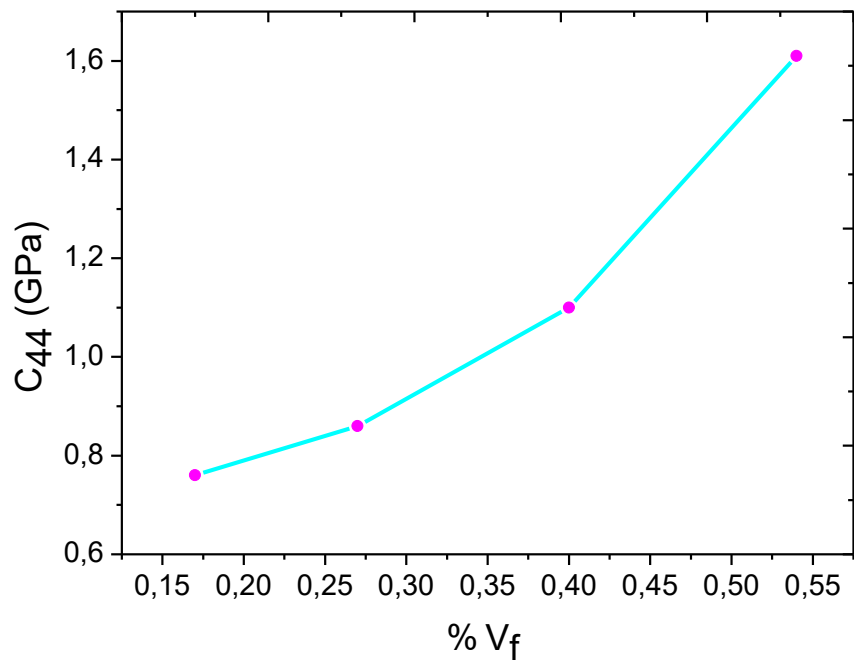
Διάγραμμα 2: μεταβολή του C_{13} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f



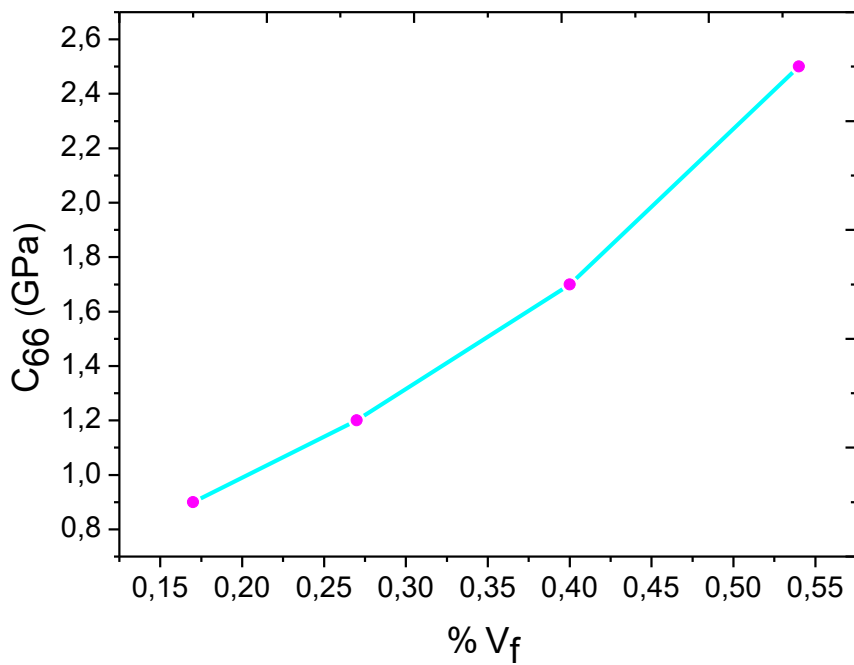
Διάγραμμα 3: μεταβολή του C_{11} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f



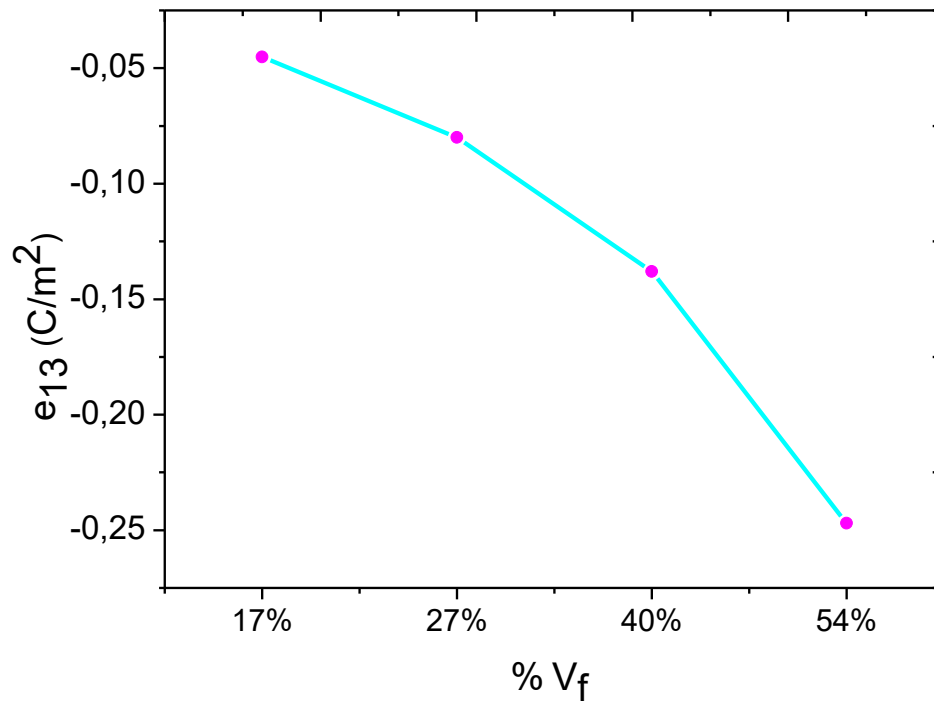
Διάγραμμα 4: μεταβολή του C_{12} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f



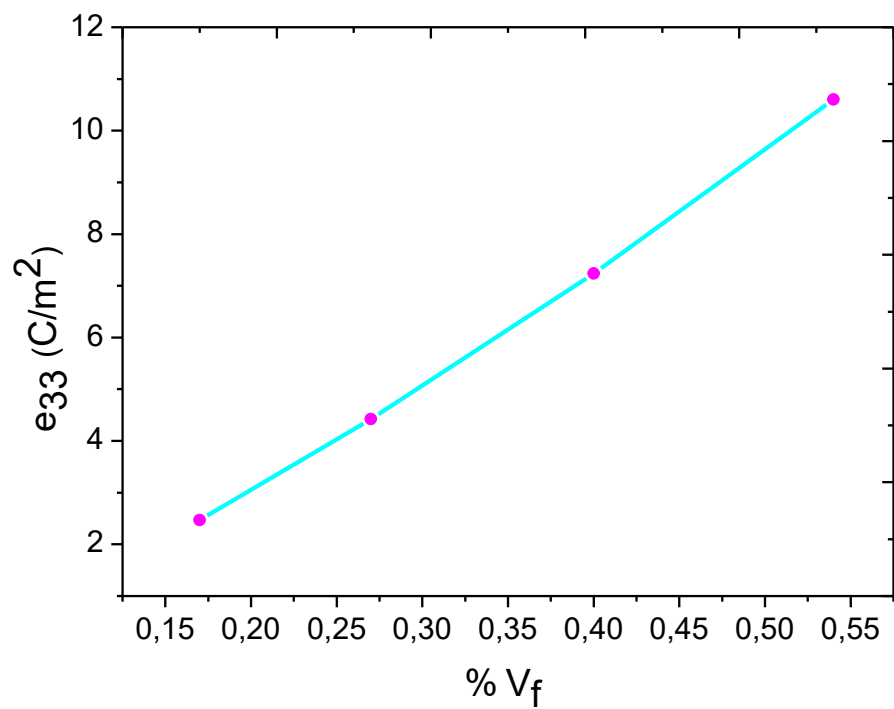
Διάγραμμα 5: μεταβολή του C_{44} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f



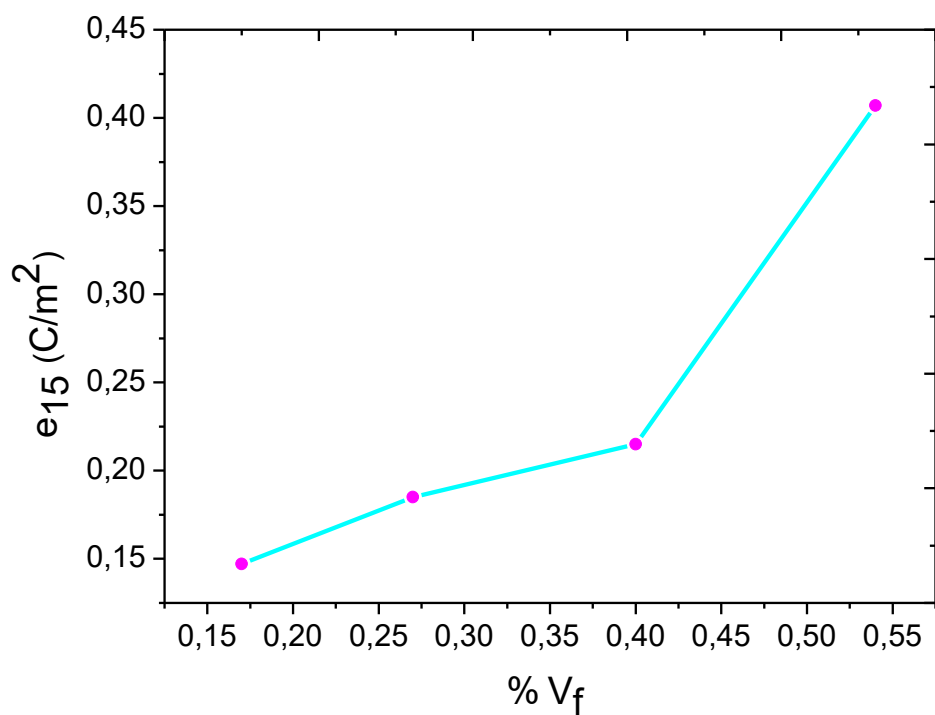
Διάγραμμα 6: μεταβολή του C_{66} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f



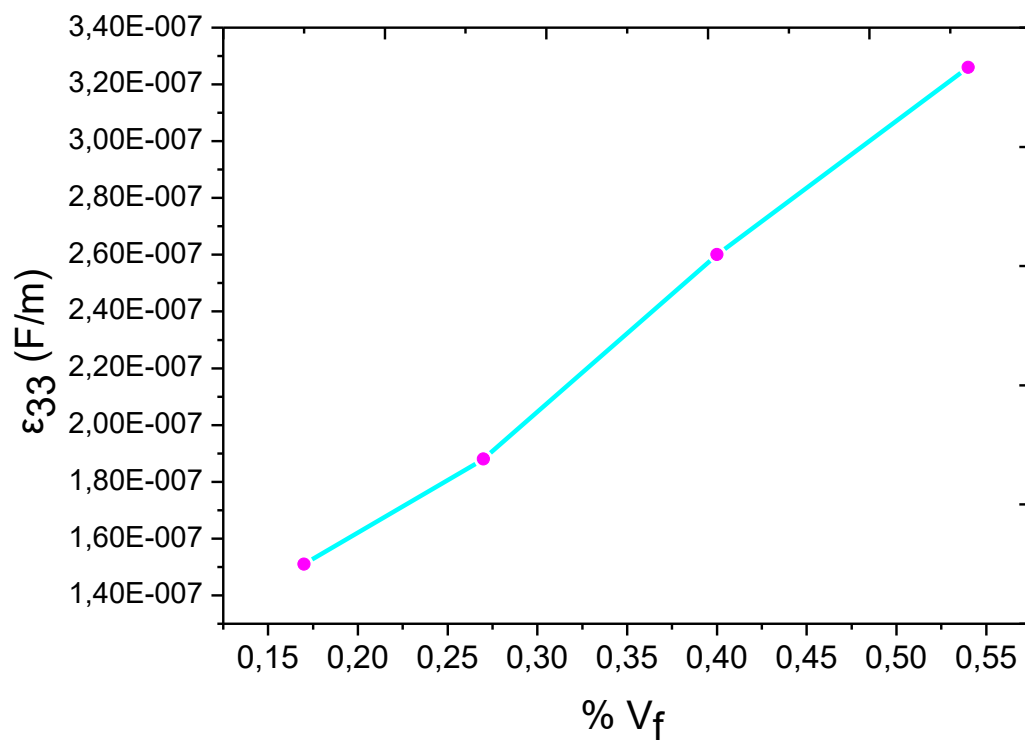
Διάγραμμα 7: μεταβολή του e_{13} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f



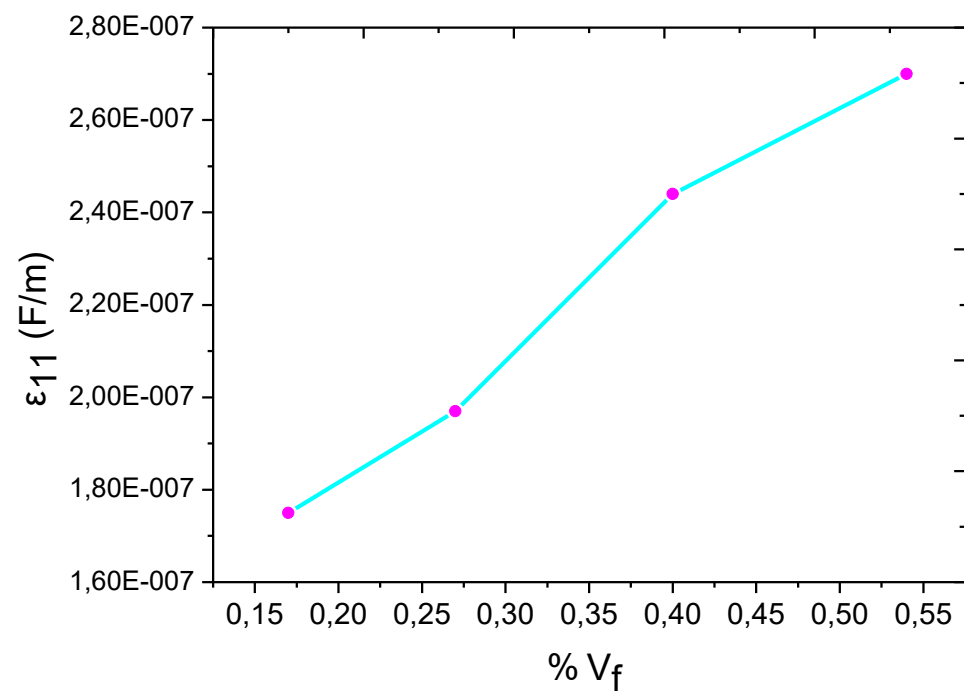
Διάγραμμα 8: μεταβολή του e_{33} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f



Διάγραμμα 9: μεταβολή του e_{15} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f



Διάγραμμα 10: μεταβολή του ϵ_{33} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f



Διάγραμμα 11: μεταβολή του ϵ_{11} συναρτήσει του κλάσματος όγκου ινών V_f

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκαν και μελετήθηκαν 4 μοντέλα - αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου (RVE's) ενός πιεζοηλεκτρικού σύνθετου υλικού με μήτρα πολυμερούς και μακρές παράλληλες ίνες πιεζοηλεκτρικού υλικού ως ενίσχυση. Επιπλέον για την ανάπτυξη και την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μέσω του εμπορικού πακέτου Ansys Workbench 19.1 με το Piezo and MEMS extension και το Comsol Multiphysics 5.4. Για τη διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο, ισοπαραμετρικό, εξαεδρικό στοιχείο με 20 κόμβους - Solid 226. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επιβολή των συνοριακών συνθηκών. Με τη μικρομηχανική προσέγγιση υπολογίσαμε τις έντεκα ανεξάρτητες ελαστικές, πιεζοηλεκτρικές και διηλεκτρικές σταθερές και εφαρμόστηκε η τεχνική της υπολογιστικής ομογενοποίησης. Το κλάσμα όγκου ινών κυμάνθηκε από 17% έως 54%. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με εκείνα του άρθρου [2]. Από τα αποτελέσματα της μελέτης εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται προκειμένου να υπολογιστούν οι ζητούμενες σταθερές σχετίζονται με την εξίσωση (2). Επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε μέσω των συνοριακών συνθηκών, η εξίσωση (2) να απλοποιείται και να μένει μόνο ένας μη μηδενικός όρος από τα διανύσματα των μηχανικών μετατοπίσεων και των ηλεκτρικών πεδίων της εξ. (2) και οι υπόλοιποι όροι να μηδενίζονται. Έτσι, από την κάθε γραμμή θα υπολογίζεται και μία ενεργή ιδιότητα του πιεζοηλεκτρικού σύνθετου υλικού.

Οι τιμές των ενεργών ιδιοτήτων παρατίθενται στο κεφάλαιο 5.3 για τα αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου (RVE's) που μελετήθηκαν για κλάσματα όγκου ινών από $V_f = 17\% - 54\%$ με τη μέθοδο της ομογενοποίησης σύμφωνα με τις εξισώσεις 3, 4, 5 και 6.

Οι τιμές των ελαστικών, πιεζοηλεκτρικών και διηλεκτρικών ιδιοτήτων αυξάνουν ανάλογα με την αύξηση του ποσοστού κλάσματος όγκου ινών.

Τα αποτελέσματα της εργασίας είναι σε συμφωνία με τις αντίστοιχες τιμές του άρθρου [2].

1^η περίπτωση : Υπολογισμός ενεργών ιδιοτήτων C_{33} και C_{13}

Μηδενικές κανονικές μετατοπίσεις στις επιφάνειες του RVE (Z-,X+,X-,Y+,Y-).Μη μηδενική τιμή κανονικής μετατόπισης στην πλευρά του RVE (Z+).Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται :

$$S_{11} = S_{22} = S_{12} = S_{23} = S_{31} = 0 \text{ και } S_{33} \neq 0$$

Μηδενικό ηλεκτρικό δυναμικό σε όλες τις πλευρές του RVE (Z+,Z-,X+,X-,Y+,Y-).Μ αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται: $E_1 = E_2 = E_3 = 0$

Από την 1^η και 3^η γραμμή της εξίσωσης (2) έχουμε :

$$C_{13}^{eff} = \bar{T}_{11} / \bar{S}_{33} \text{ και } C_{33}^{eff} = \bar{T}_{33} / \bar{S}_{33}$$

Αφού :

$$\bar{T}_{11} = C_{11}^{eff} \cdot \bar{S}_{11} + C_{12}^{eff} \cdot \bar{S}_{22} + C_{13}^{eff} \cdot \bar{S}_{33} + 0 \cdot \bar{S}_{12} + 0 \cdot \bar{S}_{23} + 0 \cdot \bar{S}_{31} - 0 \cdot \bar{E}_1 - 0 \cdot \bar{E}_2 - e_{13} \cdot \bar{E}_3 = C_{13}^{eff} \cdot \bar{S}_{33}$$

$$\bar{T}_{33} = C_{13}^{eff} \cdot \bar{S}_{11} + C_{13}^{eff} \cdot \bar{S}_{22} + C_{33}^{eff} \cdot \bar{S}_{33} + 0 \cdot \bar{S}_{12} + 0 \cdot \bar{S}_{23} + 0 \cdot \bar{S}_{31} - 0 \cdot \bar{E}_1 - 0 \cdot \bar{E}_2 - e_{33} \cdot \bar{E}_3 = C_{33}^{eff} \cdot \bar{S}_{33}$$

2^η περίπτωση : Υπολογισμός ενεργών ιδιοτήτων C_{11} και C_{12}

Μηδενικές κανονικές μετατοπίσεις στις επιφάνειες του RVE (Z+,Z-,X-,Y+,Y-). Μη μηδενική τιμή κανονικής μετατόπισης στην πλευρά του RVE (X+). Μ' αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται :

$$\bar{S}_{22} = \bar{S}_{33} = \bar{S}_{12} = \bar{S}_{23} = \bar{S}_{31} = 0 \text{ και } \bar{S}_{11} \neq 0$$

Μηδενικό ηλεκτρικό δυναμικό σε όλες τις πλευρές του RVE (Z+,Z-,X+,X-,Y+,Y-). Μ αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται: $\bar{E}_1 = \bar{E}_2 = \bar{E}_3 = 0$

Από την 1^η και 2^η γραμμή της εξίσωσης (2) έχουμε :

$$C_{11}^{eff} = \bar{T}_{11} / \bar{S}_{11} \text{ και } C_{12}^{eff} = \bar{T}_{22} / \bar{S}_{11}$$

Αφού :

$$\bar{T}_{11} = C_{11}^{eff} \cdot \bar{S}_{11} + C_{12}^{eff} \cdot \bar{S}_{22} + C_{13}^{eff} \cdot \bar{S}_{33} + 0 \cdot \bar{S}_{12} + 0 \cdot \bar{S}_{23} + 0 \cdot \bar{S}_{31} - 0 \cdot \bar{E}_1 - 0 \cdot \bar{E}_2 - e_{13} \cdot \bar{E}_3 = C_{11}^{eff} \cdot \bar{S}_{11}$$

$$\bar{T}_{22} = C_{12}^{eff} \cdot \bar{S}_{11} + C_{11}^{eff} \cdot \bar{S}_{22} + C_{13}^{eff} \cdot \bar{S}_{33} + 0 \cdot \bar{S}_{12} + 0 \cdot \bar{S}_{23} + 0 \cdot \bar{S}_{31} - 0 \cdot \bar{E}_1 - 0 \cdot \bar{E}_2 - e_{13} \cdot \bar{E}_3 = C_{12}^{eff} \cdot \bar{S}_{11}$$

3^η περίπτωση : Υπολογισμός ενεργών ιδιοτήτων C_{44} και e_{15}

Μηδενικό ηλεκτρικό δυναμικό σε όλες τις επιφάνειες του RVE (Z+,Z-,X+,X-,Y+,Y-). Μ αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται: $\bar{E}_1 = \bar{E}_2 = \bar{E}_3 = 0$.

Μηδενικές κανονικές μετατοπίσεις στις επιφάνειες του RVE (X+,X-). Μηδενικές μετατοπίσεις των κόμβων κάθετων στο επίπεδο (Y-Z) ή (2-3.) Διατμητικές δυνάμεις στις πλευρές Z+,Z- κατά τη διεύθυνση γ. Διατμητικές δυνάμεις στις πλευρές Y+,Y- κατά τη διεύθυνση z ώστε να παράγεται μία διατμητική εντατική κατάσταση στο επίπεδο Y-Z ή (2-3). Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται : $\bar{S}_{11} = \bar{S}_{22} = \bar{S}_{33} = \bar{S}_{12} = \bar{S}_{31} = 0$ και $\bar{S}_{23} \neq 0$

Από την 5^η και 8^η γραμμή της εξίσωσης (2) έχουμε :

$$C_{44}^{eff} = \bar{T}_{23} / \bar{S}_{23} \text{ και } e_{15}^{eff} = \bar{D}_2 / \bar{S}_{23}$$

Αφού:

$$\bar{T}_{23} = 0 \cdot \bar{S}_{11} + 0 \cdot \bar{S}_{22} + 0 \cdot \bar{S}_{33} + 0 \cdot \bar{S}_{12} + C_{44}^{eff} \cdot \bar{S}_{23} + 0 \cdot \bar{S}_{31} - 0 \cdot \bar{E}_1 - e_{15}^{eff} \cdot \bar{E}_2 - 0 \cdot \bar{E}_3 = C_{44}^{eff} \cdot \bar{S}_{23}$$

$$\bar{D}_2 = 0 \cdot \bar{S}_{11} + 0 \cdot \bar{S}_{22} + 0 \cdot \bar{S}_{33} + 0 \cdot \bar{S}_{12} + e_{15}^{eff} \cdot \bar{S}_{23} + 0 \cdot \bar{S}_{31} - 0 \cdot \bar{E}_1 - \varepsilon_{11}^{eff} \cdot \bar{E}_2 - 0 \cdot \bar{E}_3 = e_{15}^{eff} \cdot \bar{S}_{23}$$

4^η περίπτωση : Υπολογισμός ενεργής ιδιότητας C_{66}

Μηδενικό ηλεκτρικό δυναμικό σε όλες τις επιφάνειες του RVE (Z+,Z-,X+,X-,Y+,Y-). Μ αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται: $\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_3 = \mathbf{0}$.

Μηδενικές κανονικές μετατοπίσεις στις επιφάνειες του RVE (Z+,Z-). Μηδενικές μετατοπίσεις των κόμβων κάθετων στο επίπεδο (X-Y) ή (1-2). Διατμητικές δυνάμεις στις πλευρές X+,X- κατά τη διεύθυνση y. Διατμητικές δυνάμεις στις πλευρές Y+,Y- κατά τη διεύθυνση x ώστε να παράγεται μία διατμητική εντατική κατάσταση στο επίπεδο X-Y ή (1-2). Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται : $\mathbf{S}_{11} = \mathbf{S}_{22} = \mathbf{S}_{33} = \mathbf{S}_{23} = \mathbf{S}_{31} = \mathbf{0}$ και $\mathbf{S}_{12} \neq \mathbf{0}$

Από την 4^η γραμμή της εξίσωσης (2) έχουμε :

$$C_{66}^{eff} = \bar{T}_{12} / \bar{S}_{12}$$

Αφού:

$$\bar{T}_{12} = 0 \cdot \bar{S}_{11} + 0 \cdot \bar{S}_{22} + 0 \cdot \bar{S}_{33} + C_{66}^{eff} \cdot \bar{S}_{12} + 0 \cdot \bar{S}_{23} + 0 \cdot \bar{S}_{31} - 0 \cdot \bar{E}_1 - 0 \cdot \bar{E}_2 - 0 \cdot \bar{E}_3 = C_{66}^{eff} \cdot \bar{S}_{12}$$

5^η περίπτωση : Υπολογισμός ενεργών ιδιοτήτων $e_{13}, e_{33}, \varepsilon_{33}$

Μηδενικές κανονικές μετατοπίσεις σε όλες τις επιφάνειες του RVE (Z+,Z-,X+,X-,Y+,Y-). Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται : $\mathbf{S}_{11} = \mathbf{S}_{22} = \mathbf{S}_{33} = \mathbf{S}_{12} = \mathbf{S}_{23} = \mathbf{S}_{31} = \mathbf{0}$.

Μηδενικό ηλεκτρικό δυναμικό στις επιφάνειες του RVE (Z-,X+,X-,Y+,Y-). Μη μηδενικό ηλεκτρικό δυναμικό στην επιφάνεια του RVE Z+. Μ αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται:

$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_2 = \mathbf{0}$ και $\mathbf{E}_3 \neq \mathbf{0}$.

Από την 1^η την 3^η και την 9^η γραμμή της εξίσωσης (2) έχουμε :

$$e_{13}^{eff} = -\bar{T}_{11} / \bar{E}_3, \quad e_{33}^{eff} = -\bar{T}_{33} / \bar{E}_3, \quad \varepsilon_{33}^{eff} = \bar{D}_3 / \bar{E}_3$$

Αφού :

$$\bar{T}_{11} = C_{11}^{eff} \cdot \bar{S}_{11} + C_{12}^{eff} \cdot \bar{S}_{22} + C_{13}^{eff} \cdot \bar{S}_{33} + 0 \cdot \bar{S}_{12} + 0 \cdot \bar{S}_{23} + 0 \cdot \bar{S}_{31} - 0 \cdot \bar{E}_1 - 0 \cdot \bar{E}_2 - e_{13} \cdot \bar{E}_3 = -e_{13}^{eff} \cdot \bar{E}_3$$

$$\bar{T}_{33} = C_{13}^{eff} \cdot \bar{S}_{11} + C_{13}^{eff} \cdot \bar{S}_{22} + C_{33}^{eff} \cdot \bar{S}_{33} + 0 \cdot \bar{S}_{12} + 0 \cdot \bar{S}_{23} + 0 \cdot \bar{S}_{31} - 0 \cdot \bar{E}_1 - 0 \cdot \bar{E}_2 - e_{33} \cdot \bar{E}_3 = -e_{33}^{eff} \cdot \bar{E}_3$$

$$\bar{D}_3 = e_{13}^{eff} \cdot \bar{S}_{11} + e_{13}^{eff} \cdot \bar{S}_{12} + e_{33}^{eff} \cdot \bar{S}_{33} + 0 \cdot \bar{S}_{12} + 0 \cdot \bar{S}_{23} + 0 \cdot \bar{S}_{31} - 0 \cdot \bar{E}_1 - 0 \cdot \bar{E}_2 + \varepsilon_{33}^{eff} \cdot \bar{E}_3 = \varepsilon_{33}^{eff} \cdot \bar{E}_3$$

6^η περίπτωση : Υπολογισμός ενεργής ιδιότητας ε_{11}

Μηδενικές κανονικές μετατοπίσεις σε όλες τις επιφάνειες του RVE (Z+,Z-,X+,X-,Y+,Y-). Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται : $\mathbf{S}_{11} = \mathbf{S}_{22} = \mathbf{S}_{33} = \mathbf{S}_{12} = \mathbf{S}_{23} = \mathbf{S}_{31} = \mathbf{0}$.

Μηδενικό ηλεκτρικό δυναμικό στις επιφάνειες του RVE (Z+,Z-,X-,Y+,Y-). Μη μηδενικό ηλεκτρικό δυναμικό στην επιφάνειες του RVE, X+. Μ αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται:

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_3 = \mathbf{0} \text{ και } \mathbf{E}_1 \neq \mathbf{0}.$$

Από την 7^η γραμμή της εξίσωσης (2) έχουμε :

$$\varepsilon_{11}^{eff} = \bar{D}_1 / \bar{E}_1$$

Αφού:

$$\bar{D}_1 = 0 \cdot \bar{S}_{11} + 0 \cdot \bar{S}_{12} + 0 \cdot \bar{S}_{33} + 0 \cdot \bar{S}_{12} + 0 \cdot \bar{S}_{23} + e_{15}^{eff} \cdot \bar{S}_{31} + \varepsilon_{11}^{eff} \cdot \bar{E}_1 - 0 \cdot \bar{E}_2 - 0 \cdot \bar{E}_3 = \varepsilon_{11}^{eff} \cdot \bar{E}_1$$

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ως συνέχεια της παρούσας εργασίας μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

Μελέτη και ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων σύνθετων υλικών με διαφορετικά αντιπροσωπευτικά στοιχεία όγκου – RVE's και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Μελέτη αριθμητικών μοντέλων σύνθετων υλικών αντιπροσωπευτικού στοιχείου όγκου – RVE's με θερμικές ιδιότητες και μαγνητικές ιδιότητες.

Ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων σύνθετων υλικών με διάφορα σχήματα υλικού ενίσχυσης όπως για παράδειγμα κόκκοι, φυλλίδια, κοντές ίνες, διάφορα είδη πλέξεων καθώς επίσης μελέτη διαφορετικών υλικών πιεζοηλεκτρικών ινών και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Mariano, Eduardo Moreno. Volnei, Tita. Flavio, Donizeti Marques. (2009), *"Finite element analysis applied to evaluation of effective material coefficients for piezoelectric fiber composites"*, Brazil
- [2] Berger, H. Kari, S. Gabbert, U. Rodriguez - Ramos, R. Bravo Castellero, J. Guinovart - Diaz, R. Sabina, F.J. Maugin, G.A. (2006), *"Unit cell models of piezoelectric fiber composites for numerical and analytical calculation of effective properties"*, Germany.
- [3] Pal, B. Haseebuddin, M. H. (2012), *"Analytical Estimation of elastic properties of polypropylene fiber matrix composite by finite element analysis"*, India
- [4] Siva, B. Rao, D. (2014), *"Effect of fiber geometry and representative volume element on elastic and thermal properties of unidirectional fiber - reinforced composites"*, India
- [5] Mariano, Eduardo Moreno. Volnei, Tita. Flavio, Donizeti Marques .(2009), *"Influence of boundary conditions on the determination of effective material properties for active fiber composites"*, Brazil
- [6] Berger, H. Kari, S. Gabbert, U. Rodriguez - Ramos, R. Bravo Castellero, J. Guinovart - Diaz, R. Otero, J. (2005), *"An analytical and numerical approach for calculating effective material coefficients of piezoelectric fiber composites"*, Germany.
- [7] Wang , B. Mechanics of Advanced functional materials , Zhejiang University Press Hangzhou and Springer, (2013), Verlag Berlin Heidelberg .
- [8] Rouquette, J. Haines, J. Bornand, V. Pintard, M. Papet, Ph Bousquet, C. Konczewicz, L. Gorelli, F. A. Hull, S. "Pressure tuning of the morphotropic phase boundary in piezoelectric lead zirconate titanate", (2004).
- [9] Moazzami, Reza. Hu, Chenming. Shepherd, William H. "Electrical Characteristics of Ferroelectric PZT Thin Films for DRAM Applications", (September 1992).
- [10] Holler, F. James. Skoog, Douglas A. & Crouch, Stanley R. Principles of Instrumental Analysis (6th ed.) Cengage Learning. p. 9. ISBN 978-0-495-01201-6, (2007).
- [11] Jaffe, B.; Cook, W. R.; Jaffe, H. Piezoelectric Ceramics. New York: Academic, (1971).
- [12] G. H. Heartling. Ferroelectric Ceramics - History and Technology. Journal of the American Ceramic Society, Vol. 82, No.4, pp. 797-818, 1999

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ ΤΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

- [13] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_cou/Hlp_G_COU3_piezo.html
- [14] <https://www.americanpiezo.com/apc-materials/piezoelectric-properties.html>
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity#Mathematical_description
- [16] <http://praxinetwork.gr/en/coop/tom/23421>
- [17] <https://www.maxmag.gr/science/piezoilektrismos-odigise-epistimones-se-ilektriko-revma-apo-dakrya/>
- [18] <http://gr.sinopiezo.net/news/the-use-of-piezoelectric-ceramics-1928867.html>
- [19] <http://www.geo.auth.gr/106/theory/electrical.htm>
- [20] <http://gr.pztpiezo.com/news/what-is-piezoelectric-ceramic-materials-14392294.html>
- [21] https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SOLID226.html