



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Ομογενοποίηση τρισδιάστατου πιεζοηλεκτρικού ελαστικού υλικού

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία του

Τζατζάνη Ανδρέα Εμμανουήλ

Επίβλεψη

Καθηγητής Σταυρουλάκης Γεώργιος

Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Σταυρουλάκης Γεώργιος

Καθηγητής Αντωνιάδης Αριστομένης

Επ. Καθηγήτρια Σταυρουλάκη Μαρία

Νοέμβριος 2014

Περίληψη

Υπάρχουν πολλά ετερογενή φυσικά και τεχνητά υλικά. Ο απευθείας υπολογισμός των αποτελεσμάτων μίας προσομοίωσης με ετερογενή υλικά είναι συχνά χρονοβόρος. Για αυτό συχνά είναι απαραίτητη μία άλλη προσέγγιση. Η λύση που εξετάζεται σε αυτή την εργασία είναι η ομογενοποίηση. Η δημιουργία δηλαδή ενός μόνο υλικού που έχει τις μέσες ιδιότητες των διαφόρων υλικών μίας σύνθετης κατασκευής. Σε αυτήν την εργασία έγινε μία προσπάθεια να ομογενοποιηθεί μία κατασκευή που αποτελείται από ένα πιεζοηλεκτρικό και ένα ελαστικό υλικό. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν την μοναδική ιδιότητα να μετατρέπουν την ηλεκτρική φόρτιση σε μηχανική και το αντίστροφο. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε στο τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να δώσει εύκολα αποτελέσματα καθώς με την βοήθεια εννιά περιπτώσεων φόρτισης υπολογίζεται με μία απλή πράξη κάθε μία από τους παραμέτρους του πιεζοσύνθετου υλικού. Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι αρκετά ενθαρρυντικά καθώς η απόκλιση τους με τα θεωρητικά ήταν μικρή.

Ομογενοποίηση τρισδιάστατου πιεζοηλεκτρικού ελαστικού υλικού

Homogenization of a 3d piezoelectric composite material

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κύριο Σταυρουλάκη Γεώργιο για την ανέλπιστα καλή συνεργασία που είχαμε καθώς και τον συνεργάτη του κύριο Δροσόπουλο Γεώργιο για τις συμβουλές που μου παρείχε.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	6
Κεφάλαιο 1 Πιεζοηλεκτρισμός	7
1.1 Εισαγωγή στον πιεζοηλεκτρισμό	7
1.2 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	7
1.3 Εφαρμογές της πιεζοτεχνολογίας	12
Κεφάλαιο 2 Ηλεκτρικό πεδίο και ηλεκτρική μετατόπιση	22
Κεφάλαιο 3 Πεπερασμένα στοιχεία	24
3.1 Εισαγωγή στα Πεπερασμένα Στοιχεία	24
3.2 Γενική Περιγραφή	24
Κεφάλαιο 4 Ομογενοποίηση	26
4.1. Εισαγωγή	26
4.2. Βασικές παραδοχές	27
Κεφάλαιο 5	28
Θεωρία στην οποία βασίστηκε η προσομοίωση	28
Κεφάλαιο 6 Ομογενοποίηση τρισδιάστατου πιεζοηλεκτρικού ελαστικού υλικού με την βοήθεια του λογισμικού Comsol	32
6.1 Περιγραφή του προβλήματος.	32

6.2 Παράμετροι των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.	32
6.3. Περίπτωση Μηχανικής φόρτισης άξονας x.	34
6.4 Μηχανική φόρτιση στον άξονα z	38
6.5. Μηχανική φόρτιση στον άξονα yz	43
6.6 Ηλεκτρική φόρτιση στον άξονα x	47
6.7 Ηλεκτρική Φόρτιση στον άξονα z	52
6.8. Τελικά αποτελέσματα	56
6.9. Υπολογισμός μέσω ιδιοτήτων βάση της θεωρίας	57
6.10. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα θεωρητικά.	60
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα	61
Κεφάλαιο 8 Επεκτάσεις	62
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	63

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια να εφαρμοστεί μία μέθοδος ομογενοποίησης σε ένα σύνθετο πιεζοηλεκτρικό ελαστικό υλικό. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου η θεωρία του καθώς και οι εξισώσεις που το περιγράφουν. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται κάποιες βασικές έννοιες της ηλεκτροστατικής όπως η ηλεκτρική μετατόπιση και το ηλεκτρικό πεδίο καθώς τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν και διηλεκτρικές ιδιότητες. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξηγείται η μέθοδος της ομογενοποίησης. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της θεωρίας στην οποία βασίστηκε η προσομοίωση. Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μία προσπάθεια ομογενοποίησης ενός πιεζοσυνθέτου υλικού τα με την βοήθεια του λογισμικού Comsol. Στο έβδομο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας. Τέλος στο όγδοο κεφάλαιο αναφέρονται κάποιες επεκτάσεις που θα μπορούσε να έχει η εργασία.

Κεφάλαιο 1 Πιεζοηλεκτρισμός

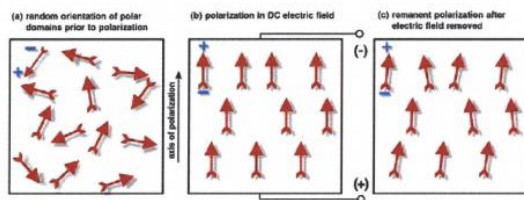
1.1 Εισαγωγή στον πιεζοηλεκτρισμό

Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα κάποιων υλικών (κυρίως κρυσταλλικών υλικών αλλά και μερικών κεραμικών υλικών) να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική τάση/πίεση ή ταλάντωση. Το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά με τη μεταφορά ελεύθερων φορτίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος. Επίσης, ο όρος περιλαμβάνει και το αντίστροφο φαινόμενο, κατά το οποίο το υλικό παραμορφώνεται, όταν βρεθεί κάτω από ηλεκτρική τάση. Αυτό οφείλεται σε κρυσταλλικές ασυμμετρίες και αποτελεί φαινόμενο πρώτης τάξης. Κάποια παραδείγματα υλικών με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες είναι ο χαλαζίας (SiO_2), το αλάτι Rochelle ή Seignette (τρυνικό καλιονάτριο, $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), το ADP (δισόξινο φωσφορικό αμμώνιο, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), το ένυδρο θεικό λίθιο, ($\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ο τουρμαλίνης, το συνθετικό πολυμερές PVDF (polyvinylidene difluoride) κτλ. Το φαινόμενο χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές της ακουστικής (ηλεκτροακουστική, ηλεκτρακουστικοί μορφοτροπείς, βιοϊατρική, μικροζυγαριές κτλ). [1]

1.2 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τους αδελφούς Jacques και Pierre Curie το 1880, οι οποίοι παρατήρησαν ότι υποβάλλοντας σε μηχανική πίεση συγκεκριμένα κρυσταλλικά υλικά, αυτά πολώνονται ηλεκτρικά και ο βαθμός πόλωσης είναι ανάλογος με την εφαρμοσμένη πίεση. Πιεζοηλεκτρισμός είναι η γραμμική ηλεκτρομηχανική αλληλεπίδραση που παρουσιάζεται στο εσωτερικό ορισμένων κρυστάλλων, οι οποίοι είναι μη συμμετρικοί. Αυτό γίνεται αντιληπτό από τα επιμέρους μόρια. Το κάθε μόριο έχει μία πολικότητα, καθώς το ένα άκρο του είναι

περισσότερο αρνητικά φορτισμένο δηλαδή είναι συσσωρευμένα σε αυτό περισσότερα ηλεκτρόνια. Το άλλο άκρο είναι θετικά φορτισμένο και έτσι δημιουργείται ένα δίπολο. Σε έναν πολυκρυστάλλο η κατανομή της συνολικής πολικότητας δεν είναι συμμετρική. Για αυτόν το λόγο δηλαδή, την έλλειψη συμμετρίας, σε κάποια υλικά παρατηρείται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Οι κρύσταλλοι που έχουν κεντρική συμμετρία δεν εμφανίζουν πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. [1] Για να πολωθεί το υλικό, εφαρμόζεται σε αυτό ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο με αποτέλεσμα να ευθυγραμμιστούν όλα τα δίπολα. Φυσικά αυτό πρέπει να γίνει κάτω από το όριο του Curie. Χάρης την πόλωση τα δίπολα του υλικού σχεδόν ευθυγραμμίζονται. Αυτή η μόνιμη πόλωση είναι η απομένουσα πόλωση μετά την απομάκρυνση του ηλεκτρικού λόγω υστέρησης. Τέλος στο υλικό παρατηρείται και επιμήκυνση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται α. τυχαία κατανομή των δίπολων πριν την πόλωση. β. πόλωση με συνεχές ηλεκτρικό πεδίο. γ. Παραμένουσα πόλωση μετά την απομάκρυνση του συνεχούς ηλεκτρικού πεδίου.[2]

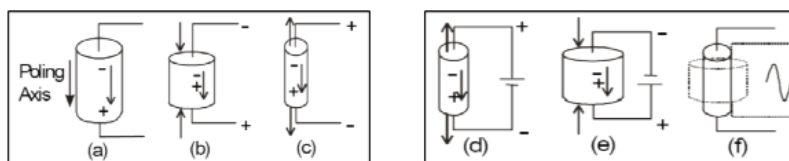


Μετά την διαδικασία ψύξης και την απομάκρυνση του πεδίου πόλωσης, τα ηλεκτρικά δίπολα δεν μπορούν να επιστρέψουν στις αρχικές τους θέσεις και το υλικό γίνεται μόνιμα πιεζοηλεκτρικό, με την δυνατότητα να μετατρέπει την μηχανική τάση σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Η ιδιότητα αυτή χάνεται μόνο όταν η θερμοκρασία υπερβεί την θερμοκρασία Curie, ή όταν η διάταξη μετατροπής υποβληθεί σε πολύ ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. [3] Όταν εφαρμόζεται μία μηχανική τάση σε έναν κρύσταλλο τότε η κρυσταλλική του δομή διαταράσσεται και έτσι αλλάζει η

διεύθυνση της πόλωσης των ηλεκτρικών δίπολων. Αυτό αποτελεί και το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.[2]

Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ονομάζεται η μηχανική παραμόρφωση του υλικού όταν βρίσκεται κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Δηλαδή σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται μεταβολή στο σχήμα του κρυστάλλου όταν βρεθεί μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο.[1]

Η σχηματική παράσταση του φαινομένου είναι η παρακάτω:



Η εικόνα δείχνει ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό προτού αυτό υποστεί κάποια δύναμη ή εφαρμοστεί ρεύμα. Αν το υλικό συμπιεστεί (μηχανική τάση) (b), τότε μια ηλεκτρική τάση ίδιας πολικότητας με την τάση πόλωσης θα εμφανιστεί μεταξύ των ηλεκτροδίων. Αν το υλικό επιμηκυνθεί (c) εμφανίζεται τάση αντίθετης πολικότητας ως προς την τάση πόλωση. Αντίστροφα αν εφαρμοστεί ηλεκτρική τάση, το υλικό θα παραμορφωθεί. Μια τάση αντίθετης πόλωσης ως προς την τάση πόλωσης θα προκαλέσει διαστολή του υλικού (d). Αντίθετα μια τάση ίδιας πολικότητας προκαλεί συστολή-συμπίεση (e) του υλικού. Αν εφαρμοστεί ένα εναλλασσόμενο σήμα τότε το υλικό θα δονείται σύμφωνα με την συχνότητα του σήματος (f). Δηλαδή για κάθε χρονική στιγμή το σώμα θα συστέλλεται ή θα διαστέλλεται ανάλογα προς την πολικότητα της τάσης τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. [3]

Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού απαντάται με δύο τρόπους:

1. Όταν εφαρμόζεται μηχανική τάση στο υλικό και το αποτέλεσμα είναι η ηλεκτρική πόλωση του υλικού, ονομάζεται ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η επίδραση

εξωτερικής δύναμης έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικών φορτίων στις επιφάνειες του κρυστάλλου, ο οποίος υφίσταται την μηχανική παραμόρφωση. Αυτό συμβαίνει διότι η εφαρμογή μηχανικής τάσης προκαλεί διαχωρισμό του «κέντρου βάρους» των θετικών και αρνητικών ιόντων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικής διπολικής ροπής. Κρύσταλλοι οι οποίοι εμφανίζουν κέντρο συμμετρίας δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού αφού δεν μπορούν να διαχωρίσουν τα «κέντρα βάρους» των φορτίων. Με βάση την συμμετρία, στη φύση απαντώνται 32 κατηγορίες (τάξεις) κρυστάλλων. Από αυτές οι 20 είναι μη-κεντροσυμμετρικές και εμφανίζουν πιεζοηλεκτρική συμπεριφορά, καθώς χαρακτηρίζονται από χαμηλή συμμετρία.

2. Όταν το αίτιο είναι το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται στο υλικό και το αποτέλεσμα η εμφάνιση μηχανικής τάσης, τότε το φαινόμενο αυτό καλείται αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Οι καταστατικές εξισώσεις του πιεζοηλεκτρισμού γράφονται σε διάφορες μορφές, ανάλογα με τη μεταβλητή που κρατάμε σταθερή. Αρχικά δημοσιεύτηκαν από την επιτροπή προτύπων IEEE Ultrasonics οι παρακάτω:

$$S = s_E T + d^t E$$

$$D = dT + \varepsilon_T E$$

T = Συνολική τάση (stress)[N/m²]. Δηλώνει το μέσο ποσοστό δύναμης ανά μονάδα επιφάνειας και εκφράζει την ένταση των εσωτερικών δυνάμεων στη τομή.

S = τροπή (strain) [m/m]. Εκφράζει την ανοιγμένη παραμόρφωση ενός σώματος.

s = ελαστικότητα ή ενδοτικότητα υλικού (Elastic compliance) $[m^2/N]$ ή ελαστική παραμόρφωση, όσο μεγαλώνει τόσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση για δεδομένο φορτίο. (Όταν $E=0$, Βραχυκύκλωμα, τότε s αντίστροφο του μέτρου Young.)

c = μέτρο ελαστικότητας Young ή ακαμψία $[Pa=N/m^2]$, όσο μεγαλώνει τόσο μικρότερη είναι η παραμόρφωση για δεδομένο μηχανικό φορτίο.

D = ηλεκτρική μετατόπιση ή πυκνότητα ηλεκτρικής ροής. $[C/m^2]$. Δηλώνει το μέσο ποσοστό ηλεκτρικού φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας.

ϵ = ηλεκτρική διαπερατότητα ή διηλεκτρική σταθερά του μέσου. $[N/mV]$ Εκφράζει το πώς ένα ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται και επηρεάζει ένα διηλεκτρικό μέσο. Ορίζεται από την ικανότητα του υλικού να επιτρέπει ή όχι τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από μέσα του.

E = ένταση ηλεκτρικού πεδίου $[N/C]$ ή $[V/m]$

e = πιεζοηλεκτρική σταθερά σύζευξης για τη μορφή εξισώσεων μηχανικής τάσης-

φορτίου $[C/m^2]$, d = πιεζοηλεκτρική σταθερά (C/N)

Οι καταστατικές εξισώσεις μπορούν να πάρουν και την παρακάτω μορφή

B) ΜΟΡΦΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ-ΦΟΡΤΙΟΥ

$$T = c_E \cdot S - e^t \cdot E \quad (\text{αντίστροφο})$$

$$D = e \cdot S + \epsilon_s \cdot E \quad (\text{ευθύ})$$

Όπου e και c σταθερές πιεζοηλεκτρικού φαινομένου και σταθερά ελαστικότητας αντίστοιχα. [3]

1.3 Εφαρμογές της πιεζοτεχνολογίας

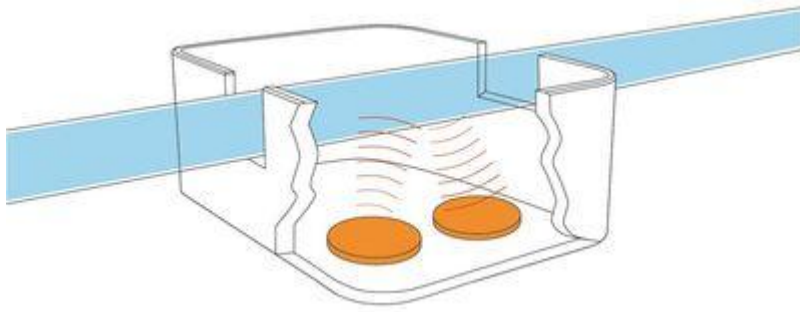
Πιεζοτεχνολογία – Εφαρμογές

Η πιεζοτεχνολογία χρησιμοποιείται σε αγορές υψηλής τεχνολογίας όπως ιατρική, μηχανολογία και τα αυτοκίνητα. Ακόμα έχει χρήσεις στην καθημερινή ζωή όπως στις για παράδειγμα σε γεννήτρια υπερηχητικών δονήσεων για τον καθαρισμό και απολύμανση εργαλείων αλλά και στην ιατρική καθαρισμού δοντιών.

Οι αισθητήρες υπερήχων που χρησιμοποιούνται σε συστήματα ελέγχου παρκαρίσματος για παρκάρισμα και στην παρακολούθηση των παλμών της καρδιάς του μωρού πριν την γέννηση. Υπερηχητικό ορίζεται ως ο ήχος σε συχνότητες μεγαλύτερες από το εύρος των συχνοτήτων που ακούει ο άνθρωπος, ξεκινώντας από τα 16kHz. Η βιομηχανία, η Ιατρική και η έρευνα χρησιμοποιούν το συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων για διάφορους λόγους. Οι εφαρμογές κυμαίνονται από την μέτρηση απόστασης και αναγνώριση αντικειμένων, η υπερηχητική συγκόλληση, η υψηλής ανάλυσης δοκιμή υλικών και η ιατρική διάγνωση και θεραπεία.

Μετρολογία

Οι αισθητήρες υπερήχων εκπέμπουν υψηλής συχνότητας ηχητικούς παλμούς που δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτοί από το ανθρώπινο αυτί και λαμβάνουν σήματα που ανακλώνται από τα αντικείμενα. Ο χρόνος που χρειάζεται για να επιστρέψει το σήμα ηχού επεξεργάζεται ηλεκτρονικά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην μετρολογία.



Μέτρηση ροής με πιεζοαισθητήρες ρυθμού ροής.

Σε πολλούς τομείς, η μέτρηση του ρυθμού ροής είναι πολύ σημαντική για τον έλεγχο διεργασιών. Για παράδειγμα σε ένα κτίριο με σύγχρονες υπηρεσίες, η κατανάλωση νερού, η θερμική ενέργεια καταγράφεται σε αρχείο ώστε να υπάρχει έλεγχος στην παροχή και την τιμολόγηση. Ακόμα χρησιμοποιείται σε βιομηχανικούς αυτοματισμούς και ειδικά στην χημική βιομηχανία, η μέτρηση του όγκου μπορεί να αντικαταστήσει μέτρημα του βάρους των ουσιών. Όχι μόνο η ταχύτητα ροής αλλά και η συγκέντρωση ορισμένων ουσιών μπορεί να ανιχνευθεί.

Ανίχνευση φυσαλίδων φυσικού αερίου

Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες υπερήχων για την ανίχνευση φυσαλίδων

Η αδιατάρακτη ροή ενός μέσου χωρίς θύλακες αέρα ή αερίου απαιτείται σε συστήματα μέτρησης, εμφιάλωσης και σε ιατρικές εφαρμογές.

Μία μέθοδος ανίχνευσης φυσαλίδας είναι η μέτρηση του χρόνου μετάδοσης με την τεχνολογία υπερήχων

Η μέτρηση του χρόνου διάδοσης βασίζεται στην εναλλακτική μετάδοση και λήψη υπερηχητικών παλμών μέσα και αντίθετα στην κατεύθυνση ροής. Ο

αισθητήρας εκτελεί μία ανέπαφη ανίχνευση των φυσαλίδων αέρος και αερίου στο υγρό διαμέσου του τοιχώματος του σωλήνα και έτσι επιτρέπει την συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας. Δύο πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες υπερήχων λειτουργούν ως πομπός και δέκτης

Τεχνολογία υπερήχων στην ιατρική τεχνολογία και βιομηχανία.

Οι δυνατότητες εφαρμογής είναι η ιατρική, η φαρμακευτική και η τεχνολογία τροφίμων. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση μηχανημάτων αιμοκάθαρσης, αντλίες έγχυσης και μεταγγίσεων.

Στην ιατρική τεχνολογία, οι ανιχνευτές φυσαλίδων αέρα(NAB) εξασφαλίζουν την χωρίς φυσαλίδες έγχυση και ροή σε μηχανές για την καρδιά και τα πνευμόνια.

Με κατάλληλη θωράκιση των ηλεκτρονικών, η μη μαγνητική πιεζοηλεκτρική τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και σε ακραία περιβάλλοντα, όπως στην μαγνητική τομογραφία.

Παραδείγματα βιομηχανιών εφαρμογών περιλαμβάνουν την τεχνολογία ελέγχου, όπως την παρακολούθηση των μηχανών δοσολόγησης και γέμισης.

-Ευέλικτοι και συμπιεσμένοι σχεδιασμοί: Δαχτυλίδια, δίσκοι.

-Επιταχυντές υψηλής παραγωγή ισχύος

-Δεν υπάρχει τριβή, δεν χρειάζεται συντήρηση, δεν υπάρχουν τριβές.

-Μείωση του κόστους.

Τεχνολογία υπερήχων

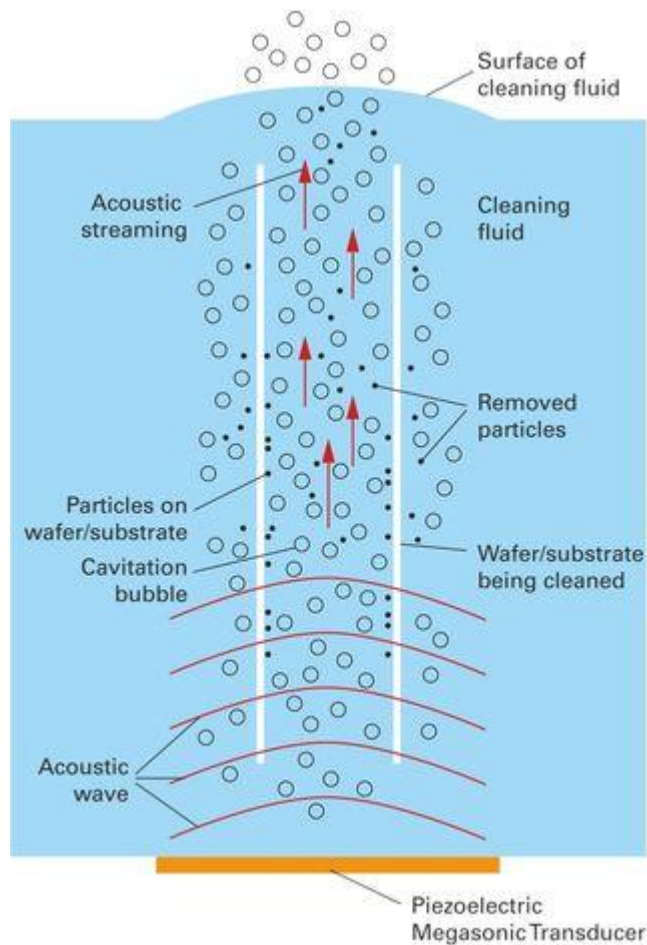
Τα πιεζοκεραμικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία υπερηχητικών κυμάτων στην περιοχή συχνότητας από 20 μέχρι 800kHz. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες διαγνωστικές και θεραπευτικές εφαρμογές , για παράδειγμα στην αφαίρεση πέτρας ή λιθοτριψία , αλλά επίσης και σε τεχνολογία υπερήχων .

Βιομηχανικοί καθαρισμοί με τεχνολογία υπερήχων

Σε μικρού επιπέδου συστήματα καθαρισμού είναι πολύ σημαντικό να μην βλάπτονται οι επιφάνειες των αντικειμένων που θα καθαριστούν.

Τα συστήματα υπερήχων που λειτουργούν σε συχνότητα λειτουργίας μεταξύ 700kHz και 3MHz είναι ότι καλύτερο για τέτοιες εφαρμογές. Με αυτά τα συστήματα, τα σωματίδια βρωμιάς είναι δυνατόν να απομακρυνθούν σε επίπεδο νανόμετρου χωρίς να βλάπτουν τις ευαίσθητες επιφάνειες λόγω της υψηλής πίεσης ή θερμοκρασίας.

Για αυτό η διαδικασία καθαρισμού με υπερήχους είναι το ιδανική για μικρο-συστήματα τεχνολογίας και την παραγωγή ημιαγωγών.



Αρχή του καθαρισμού με υπερήχους.

Αισθητήρας υπερήχων για καθαρισμό

Κάθε ταλάντωση οδηγεί σε φάση υπερ-πίεσης ή χαμηλής πίεσης στο ρευστό ανάλογα με το αν ο μετατροπέας διαστέλλεται ή συστέλλεται. Κατά τη διάρκεια της φάσης χαμηλής πίεσης, λόγω της περιορισμένης αντοχής εφελκυσμού του υγρού, μικρές κοιλότητες σχηματίζονται στο ρευστό. Αυτές είναι οι λεγόμενες φυσαλίδες σπηλαίωσης που συμπυκνώνονται κατά τη φάση υπερπίεσης.

Όταν οι φυσαλίδες σπηλαίωσης συμπυκνώνονται στην επιφάνεια που πρόκειται να καθαριστεί, τα σωματίδια ακαθαρσίας απομακρύνονται.



Πιεζοκεραμικός αισθητήρας υπερήχων για τον καθαρισμών οπτικών φακών

Πιεζοκινητήρας υπερήχων

Ο κεραμικός πιεζοκινητήρας απαλλάσσει από τα κλασσικά μηχανολογικά εξαρτήματα όπως τον άξονα και τον συμπλέκτη με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους και της καλύτερης αξιοπιστίας. Αυτά συστατικά μπορεί να είναι πολύ ευαίσθητα σε φθορά, ειδικά σε συστήματα μινιατούρας.



Πιεζοκινητήρας

Αναπόσπαστο μέρος των πιεζοκινητήρων υπερήχων είναι ένας πιεζοκεραμικός ενεργοποιητής που προεκτείνεται κατά την διεύθυνση ενός κινητού δρομέα μέσω ενός στοιχείου σύζευξης .

Ο πιεζοηλεκτρικός ενεργοποιητής διεγείρεται από υψηλής συχνότητας ταλαντώσεις που έχει σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση του δρομέα. Αυτή η αρχή

κίνησης προκαλεί ένα πολύ δυναμικό ξεκίνημα και σταμάτημα ενώ οι ταχύτητες που φτάνουν μέχρι και αρκετές εκατοντάδες mm/s.

Οι πιεζοκινητήρες είναι αυτοασφαλιζόμενοι.

Εάν ο πιεζοκεραμικός ενεργοποιητής προφορτισθεί έναντι του δρομέα τότε εξασφαλίζει το αυτόματο κλείδωμα της κίνησης, όταν είναι σε ηρεμία ή όταν η ισχύς είναι χαμηλή. Ως αποτέλεσμα, δεν καταναλώνει καθόλου ισχύ, δεν ζεσταίνεται και κρατάει την μηχανολογική του θέση σταθερή.

Εφαρμογές με μικρό κύκλο ή που είναι ευαίσθητες στη θερμότητα ωφελούνται από αυτά τα χαρακτηριστικά.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των παραπάνω γίνεται φανερό σε συστήματα εντοπισμού θέσης.

Ηχοεντοπιστικά συστήματα sonar και υδροακουστική τεχνολογία με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες.

Τα πιεζοκεραμικά υλικά χρησιμοποιούνται στην sonar τεχνολογία και σε υδροακουστικά συστήματα για την μέτρηση και τον εντοπισμό θέσης ειδικά σε θαλάσσιες εφαρμογές.

Η ανάπτυξη των υψηλής ανάλυσης συστημάτων σόναρ, η οποία οδηγήθηκε από στρατιωτικές εφαρμογές, τώρα όλο και περισσότερο αντικαθίστανται από πολιτικές εφαρμογές.

Εκτός του ότι ακόμα χρησιμοποιείται σε υποθαλάσσια συστήματα sonar, χρησιμοποιούνται ακόμα για μετρήσεις βάθους, για τον εντοπισμό ψαριών αλλά και για υποβρύχιες επικοινωνίες.

Ένα ευρύ φάσμα πιεζοκεραμικών χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές , που κυμαίνονται από έναν απλό δίσκο ή πλάκα και στοιβαγμένους αισθητήρες για σόναρ συστοιχίες , οι οποίες καθιστούν δυνατή την επίτευξη μίας γραμμικής παραμόρφωσης του κατευθυντικού χαρακτηριστικού του υπερηχητικού κύματος.



Πιεζο-κεραμικά σε μια δομή πίνακα για τη δημιουργία κατευθυνόμενων υπερήχων.

Επιστημονικά Όργανα

Τα πιεζοηλεκτρικά συστατικά έχουν εδραιωθεί στη σύγχρονη επιστήμη ως αισθητήρες υπερήχων . Δουλεύουν αξιόπιστα ακόμη και κάτω από ακραίες συνθήκες, όπως τα μαγνητικά πεδία , κρυογενικές θερμοκρασίες ή υπερβολικά υψηλό κενό , το οποίο έχει αποδειχθεί σε όλο τον κόσμο σε πολλές εφαρμογές στο διάστημα , σε εργαστήρια και σε μεγάλης κλίμακας ερευνητικές εγκαταστάσεις , όπως η ακτινοβολία synchrotron . Συστήματα μετρήσεων και δοκιμών υψηλής ακρίβειας στη βιομηχανία βασίζονται επίσης σε πιεζοηλεκτρικά στοιχεία.

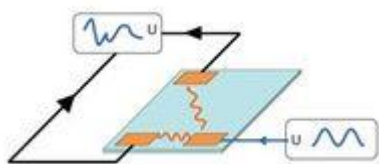


Συγκομιδή Ενέργειας

Ο όρος "ενεργειακή συγκομιδή" αναφέρεται στην παραγωγή ενέργειας από πηγές όπως θερμοκρασία περιβάλλοντος, δόνηση ή ροή αέρα. Μετατρέποντας τη διαθέσιμη ενέργεια από το περιβάλλον δημιουργείται ένας αυτόνομος ενεργειακός εφοδιασμός για μικρά ηλεκτρικά φορτία, όπως αισθητήρες ή ραδιοπομπούς.

Τεχνολογία Προσαρμοστικών Συστημάτων

Η ανάπτυξη των προσαρμοστικών συστημάτων αυξάνει την σπουδαιότητάς της για τη σύγχρονη βιομηχανία. Νοήμονα υλικά, τα λεγόμενα "έξυπνα υλικά", τα οποία διαθέτουν και τα δύο χαρακτηριστικά, του αισθητήρα και του ενεργοποιητή, γίνονται όλο και πιο σημαντικά.



Πιεζοκεραμικά ως έξυπνα υλικά

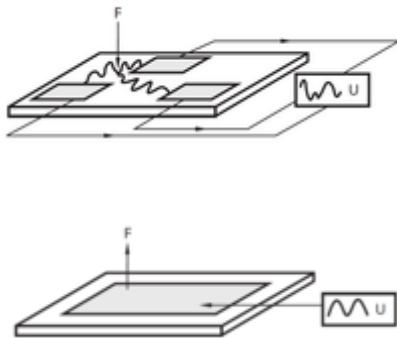
Τα προσαρμοστικά συστήματα αρχίζουν να είναι πολύ σημαντικά για την βιομηχανία όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Εντοπίζουν περιβαλλοντικές συνθήκες όπως πίεση ή κάμψη και αντιδρούν σε αυτές.

Τα πιεζοκεραμικά υλικά ανήκουν στην κατηγορία των έξυπνων υλικών. Εδώ και αρκετό καιρό οι πιεζο-ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται στην παρακολούθηση και απόσβεση ταλαντώσεων υψηλής συχνότητας.

Υπάρχουν αισθητήρες που βασίζονται σε ένα λεπτό πιεζοηλεκτρικό φιλμ το οποίο είναι καλυμμένο με ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό και στην συνέχεια ενσωματώνεται ένα όλκιμο πολυμερές σύνθετο υλικό.

Τα κανονικά εύθραυστα πιεζοκεραμικά υλικά είναι έτσι μηχανικά προφορτισμένα και ηλεκτρικά μονωμένα.

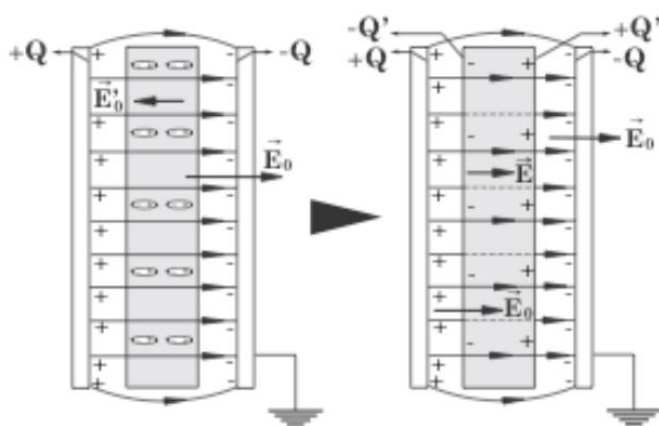
Οι αισθητήρες είναι ενσωματωμένοι σε μία δομή κατά την διάρκεια της βιομηχανικής παραγωγής και, όπου διακρίνουν ή παράγουν δονήσεις ή παραμορφώσεις.



[4]

Κεφάλαιο 2 Ηλεκτρικό πεδίο και ηλεκτρική μετατόπιση

Έστω ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο που σχηματίζεται ανάμεσα στους οπλισμούς ενός επιπέδου πυκνωτή κενού, οι οποίοι φέρουν ηλεκτρικά φορτία $\pm Q$ που είναι σταθερά. Εισάγεται στο πεδίο αυτό μια διηλεκτρική πλάκα, της οποίας οι έδρες είναι παράλληλες προς τους οπλισμούς του πυκνωτή και έχουν το ίδιο εμβαδόν με αυτούς. Τα δίπολα μόρια του διηλεκτρικού υλικού υπό την επίδραση του ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου του πυκνωτή προσανατολίζονται ομοιόμορφα κατά την διεύθυνση των δυναμικών γραμμών του πεδίου με τις ηλεκτρικές του ροπές ομόρροπες προς την ένταση του \vec{E}_0 .



Αποτέλεσμα αυτού του προσανατολισμού των διπολικών μορίων είναι η αμοιβαία εξουδετέρωση των ηλεκτρικών φορτίων των διπόλων στο εσωτερικό του διηλεκτρικού υλικού, ενώ στις περατωτικές του επιφάνειες (έδρες) εμφανίζονται τα ηλεκτρικά φορτία $\pm Q'$, που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα. Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η εμφάνιση των φορτίων $\pm Q'$ πάνω στις έδρες της διηλεκτρικής πλάκας ονομάζεται πόλωση του διηλεκτρικού, τα δε φορτία $\pm Q'$ ονομάζονται δέσμια φορτία ή φορτία πόλωσης του διηλεκτρικού. Τα φορτία αυτά δεν μπορούν να απομακρυνθούν από τις έδρες της διηλεκτρικής πλάκας, κατ' αντίθεση με τα

φορτία $\pm Q$ των οπλισμών του πυκνωτή, που μπορούν να μετακινηθούν από τον ένα οπλισμό στον άλλο και για τον λόγο αυτό ονομάζονται ελεύθερα φορτία.

Τα δέσμια φορτία $\pm Q'$ δημιουργούν στο εσωτερικό της διηλεκτρικής πλάκας ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο έντασης \vec{E}_0' , που οι δυναμικές του γραμμές είναι αντίρροπες προς τις δυναμικές γραμμές του πεδίου \vec{E}_0 . Η επαλληλία των δύο αυτών πεδίων δίνει στο εσωτερικό της πλάκας ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, ομόρροπο προς το ηλεκτρικό πεδίο E_0 που η έντασή του είναι $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_0'$. Η ηλεκτρική μετατόπιση του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό της διηλεκτρικής πλάκας και συμβολίζεται με \vec{D}

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$$

[5]

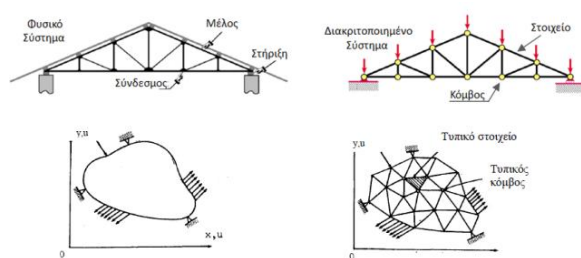
Κεφάλαιο 3 Πεπερασμένα στοιχεία

3.1 Εισαγωγή στα Πεπερασμένα Στοιχεία

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method, FEM) αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο της υπολογιστικής μηχανικής για την αριθμητική επίλυση πολύπλοκων φυσικών προβλημάτων. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι η διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου σε πεπερασμένο αριθμό μικρότερων, συνεχών και γεωμετρικά απλών στοιχείων (elements), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με τους λεγόμενους κόμβους (nodes).[6] Τελικός στόχος είναι η επαρκής μοντελοποίηση ενός πολύπλοκου φυσικού συστήματος από γραμμικές και μη γραμμικές μαθηματικές εξισώσεις που είναι ευκολότερο να επιλυθούν.

3.2 Γενική Περιγραφή

Ένα ελαστικό σώμα καταλαμβάνει ορισμένο χώρο Λ , όπου αυτός ο χώρος μπορεί να χωριστεί σε πεπερασμένο ιδεατό αριθμό περιοχών, επιφανειών ή γραμμών, τα πεπερασμένα στοιχεία. Οι διαστάσεις των στοιχείων, συνήθως είναι αντίστοιχες με τις διαστάσεις του χώρου.



Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια προσεγγιστική αριθμητική μέθοδος. Μέσω αυτής, γίνεται φυσική προσέγγιση του προβλήματος διαμερίζοντας το χώρο σε επιμέρους διακριτά πεπερασμένα στοιχεία στα οποία ορίζονται εξισώσεις που έχουν ευκολότερη λύση. Στη μηχανική το βασικό πρόβλημα που καλούμαστε να

επιλύσουμε είναι ο προσδιορισμός της μετατόπισης $[u]$ σώματος που έχει δεχθεί εξωτερική δύναμη, Το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως $[K] \cdot u = F$. Όπου u διάνυσμα διάστασης n ίσης με τους βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος, όπου κάποιες από αυτές είναι δεσμευμένες ($u_i = 0$ = δέσμευση) και αποτελούν τις συνοριακές συνθήκες Dirichlet. Το F είναι διάνυσμα διάστασης n και περιέχει τις συνοριακές συνθήκες των φορτίσεων, δηλαδή τις δυνάμεις στους κόμβους, τις πιέσεις πάνω στις πλευρές των στοιχείων καθώς και τις μαζικές δυνάμεις (όπως το ίδιο βάρος). Ο πίνακας $[K]$ έχει διαστάσεις $n \times n$ και ονομάζεται πίνακας δυσκαμψίας. Στον πίνακα αυτόν περιέχεται η γεωμετρία του προβλήματος καθώς και οι φυσικές ιδιότητες των υλικών. Ονομάζεται δε πίνακας δυσκαμψίας διότι δείχνει τη «δυσκαμψία» του συστήματος να αντιδράσει σε κάποια επιβολή εξωτερικής φόρτισης ή αλλιώς δείχνει την απόκριση του συστήματος στα εξωτερικά αίτια. Για να σχηματιστεί ο πίνακας $[K]$ γίνεται μια συναρμολόγηση πολλών επιμέρους πινάκων $[K_i]$ κάθε στοιχείου. [3]

Κεφάλαιο 4 Ομογενοποίηση

“4.1. Εισαγωγή

Η υπολογιστική ομογενοποίηση είναι μια τεχνική που ανήκει στην ευρύτερη ομάδα των μεθόδων πολλαπλών κλιμάκων.[7, 8, 9] Βασίζεται στον υπολογισμό της τοπικής μακροσκοπικής απόκρισης από την υποκείμενη μικροδομή μέσω της κατάλληλης κατασκευής και επίλυσης ενός προβλήματος συνοριακών τιμών σε επίπεδο μικροκλίμακας.[10]

Οι βασικές αρχές της κλασικής υπολογιστικής ομογενοποίησης πρώτης τάξης έχουν εξελιχθεί σταδιακά από τις έννοιες που έχουν χρησιμοποιηθεί σε άλλες μεθόδους ομογενοποίησης και μπορούν να ενταχθούν στον αλγόριθμο των τεσσάρων βημάτων που διατυπώθηκε από τον Sequet (1985)[11]:

(α) καθορισμός του αντιπροσωπευτικού όγκου της μικροκλίμακας (RVE), στον οποίο θεωρείται ότι η καταστατική συμπεριφορά των συστατικών του στοιχείων είναι γνωστή,

(β) η διατύπωση των συνοριακών συνθηκών της μικροκλίμακας βάσει των γνωστών μεταβλητών της μικροκλίμακας και η εφαρμογή τους στον αντιπροσωπευτικό όγκο (RVE) (μετάβαση από τη μακροκλίμακα στη μικροκλίμακα)

(γ) υπολογισμός των άγνωστων μεταβλητών της μακροκλίμακας από την ανάλυση του παραμορφωμένου αντιπροσωπευτικού όγκου (μετάβαση από τη μικροκλίμακα στη μακροκλίμακα)

(δ) υπολογισμός της αριθμητικής σχέσης μεταξύ των γνωστών και των αγνώστων μεταβλητών της μακροκλίμακας.

Μεταξύ των πολλών πλεονεκτικών χαρακτηριστικών της τεχνικής της υπολογιστικής ομογενοποίησης αξίζει να αναφερθούν τα παρακάτω:

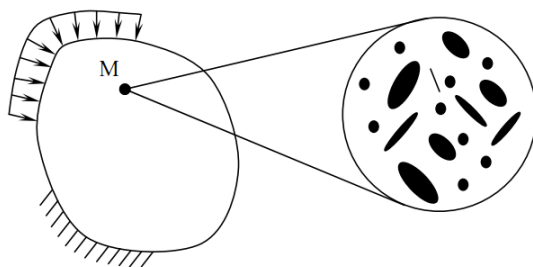
(α) δεν απαιτούνται ακριβείς παραδοχές για τη μορφή της μακροσκοπικής τοπικής καταστατικής απόκρισης, αφού η μακροσκοπική καταστατική συμπεριφορά λαμβάνεται από την επίλυση του αντίστοιχου προβλήματος συνοριακών τιμών της μικροκλίμακας

(β) το μακροσκοπικό καταστατικό μητρώο εξάγεται από το συνολικό μητρώο στιβαρότητας του αντιπροσωπευτικού όγκου στη μικροκλίμακα μέσω στατικής συμπίκνωσης

(γ) η μέθοδος μπορεί να αντιμετωπίσει μεγάλες παραμορφώσεις και στροφές.

4.2. Βασικές παραδοχές

Το υπό θεώρηση υλικό θεωρείται πως είναι μακροσκοπικά επαρκώς ομοιογενές αλλά ετερογενές σε επίπεδο μικροκλίμακας (η μορφολογία συντίθεται από διακριτά συστατικά στοιχεία όπως κοιλότητες). Αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Η κλίμακα μήκους της μακροκλίμακας είναι πολύ μεγαλύτερη από τις μοριακές διαστάσεις, έτσι ώστε η προσέγγιση με βάση τη μηχανική του συνεχούς να έχει νόημα για κάθε συστατικό στοιχείο. Ταυτόχρονα, στα πλαίσια της αρχής του διαχωρισμού των κλιμάκων, η κλίμακα μήκους της μικροκλίμακας πρέπει να είναι μικρότερη από το χαρακτηριστικό μέγεθος του δείγματος της μακροκλίμακας.”



[12]

Κεφάλαιο 5

Θεωρία στην οποία βασίστηκε η προσομοίωση

Η συμπεριφορά ενός εγκάρσια ισοτροπικού (δηλαδή ενός υλικού που παρουσιάζει ταυτόσημη συμπεριφορά στους δύο οριζόντιους άξονες και διαφορετική στην κατακόρυφη κατεύθυνση) σύνθετου 1-3 πιεζοηλεκτρικού υλικού βασίζεται μόλις σε έντεκα ανεξάρτητες σταθερές όπως θα φανεί παρακάτω. Αυτό όμως εξασφαλίζεται μόνο για εξαγωνική διάταξη ινών. Στην συνέχεια θα δούμε ένα παράδειγμα για αυθαίρετη διάταξη ινών οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα ανισοτροπική συμπεριφορά για το σύνθετο υλικό. Οι ιδιότητες του μίγματος συνοψίζονται στον παρακάτω τύπο

$$T = cS - e^1 E$$

$$D = e^2 S + \varepsilon E$$

Όπου T είναι η μηχανική τάση, D η ηλεκτρική μετατόπιση, S η μηχανική παραμόρφωση, E το ηλεκτρικό πεδίο, c εκφράζει την ελαστική συμπεριφορά, e η πιεζοηλεκτρική σταθερά και ε διηλεκτρική σταθερά. Για το εγκάρσιως ισοτροπικό ο παραπάνω τύπος μπορεί να γραφτεί ως

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

Συμπεριφορά εγκαρσίως ισοτροπικού σύνθετου πιεζοηλεκτρικού υλικού

Για ένα ανισοτροπικό σύνθετο πιεζοηλεκτρικό υλικό ο παραπάνω τύπος μπορεί να γραφτεί ως

$$\begin{bmatrix} \bar{T}_{11} \\ \bar{T}_{22} \\ \bar{T}_{33} \\ \bar{T}_{23} \\ \bar{T}_{31} \\ \bar{T}_{12} \\ \bar{D}_1 \\ \bar{D}_2 \\ \bar{D}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^{eff} & C_{12}^{eff} & C_{13}^{eff} & C_{14}^{eff} & C_{15}^{eff} & C_{16}^{eff} & -e_{11}^{eff} & -e_{21}^{eff} & -e_{31}^{eff} \\ & C_{22}^{eff} & C_{23}^{eff} & C_{24}^{eff} & C_{25}^{eff} & C_{26}^{eff} & -e_{12}^{eff} & -e_{22}^{eff} & -e_{32}^{eff} \\ & & C_{33}^{eff} & C_{34}^{eff} & C_{35}^{eff} & C_{36}^{eff} & -e_{13}^{eff} & -e_{23}^{eff} & -e_{33}^{eff} \\ & & & C_{44}^{eff} & C_{45}^{eff} & C_{46}^{eff} & -e_{14}^{eff} & -e_{24}^{eff} & -e_{34}^{eff} \\ & & & & C_{55}^{eff} & C_{56}^{eff} & -e_{15}^{eff} & -e_{25}^{eff} & -e_{35}^{eff} \\ & & & & & C_{66}^{eff} & -e_{16}^{eff} & -e_{26}^{eff} & -e_{36}^{eff} \\ e_{11}^{eff} & e_{12}^{eff} & e_{13}^{eff} & e_{14}^{eff} & e_{15}^{eff} & e_{16}^{eff} & \varepsilon_{11}^{eff} & \varepsilon_{12}^{eff} & \varepsilon_{13}^{eff} \\ e_{21}^{eff} & e_{22}^{eff} & e_{23}^{eff} & e_{24}^{eff} & e_{25}^{eff} & e_{26}^{eff} & & \varepsilon_{22}^{eff} & \varepsilon_{23}^{eff} \\ e_{31}^{eff} & e_{32}^{eff} & e_{33}^{eff} & e_{34}^{eff} & e_{35}^{eff} & e_{36}^{eff} & & & \varepsilon_{33}^{eff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} \\ \bar{S}_{22} \\ \bar{S}_{33} \\ \bar{S}_{23} \\ \bar{S}_{31} \\ \bar{S}_{12} \\ \bar{E}_1 \\ \bar{E}_2 \\ \bar{E}_3 \end{bmatrix}.$$

Συμπεριφορά εγκαρσίως ανισοτροπικού σύνθετου πιεζοηλεκτρικού υλικού

Με την παραδοχή της περιοδικότητας της διάταξης των ινών στο άπειρο σύνθετο, ένας αντιπροσωπευτικός όγκος αναφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για των υπολογισμό των παραμέτρων χρησιμοποιώντας κατάλληλες περιοδικές συνθήκες. Το σχήμα 1 δείχνει παραδείγματα αυτών για διαφορετικούς τύπους ινών.

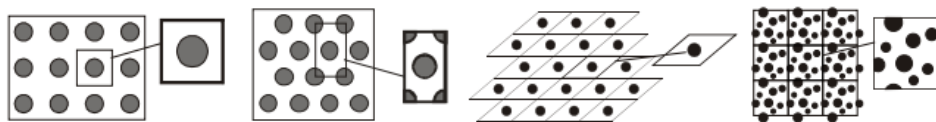


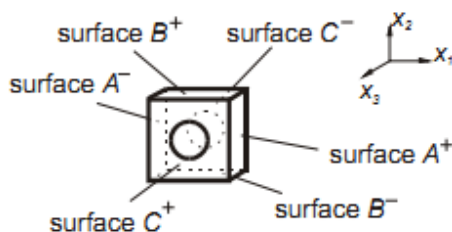
Figure 1. Unit cells for square, hexagonal, rhombic and random arrangement of fibers

Σχήμα 1

Η βασική ιδέα είναι να βρεθεί ένα ομογενές ισοδύναμο με το αρχικό, όπου η ενέργεια παραμόρφωσης που είναι αποθηκευμένη και στα δύο συστήματα να είναι περίπου η ίδια.[13]

Για να βρεθούν οι παράμετροι, θα πρέπει να εφαρμοσθούν ειδικές περιπτώσεις φόρτισης με διαφορετικές συνοριακές συνθήκες με τέτοιο τρόπο ώστε για κάθε μία περίπτωση φόρτισης μόνο ένα μέγεθος του διανύσματος S , E να είναι να είναι διάφορο του μηδενός ενώ όλα τα άλλα να είναι μηδέν. Στην συνέχεια από την εξίσωση μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι χρησιμοποιώντας τις υπολογισμένες μέσες τιμές των μη μηδενικών S , E και των υπολογισμένων μέσων τιμών των T και D .

Οι περιοδικές συνθήκες στις αντίθετες επιφάνειες που φαίνονται στο σχήμα 2



Σχήμα Αντίθετες Επιφάνειες

μπορούν να ορισθούν ως

$$u_i^{K^+} - u_i^{K^-} = \bar{S}_{ij}(x_j^{K^+} - x_j^{K^-}), \quad \Phi^{K^+} - \Phi^{K^-} = \bar{E}_i(x_i^{K^+} - x_i^{K^-})$$

Όπου u το μέγεθος μετατόπισης και Φ το μέγεθος του ηλεκτρικού φορτίου που είναι αποτέλεσμα της μέση παραμόρφωσης S και του μέσου ηλεκτρικού πεδίου E αντίστοιχα. Οι μέσες τιμές αυτών μπορούν να υπολογιστούν για όλο τον όγκο του κυττάρου

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V S_{ij} dV, \quad \bar{E}_i = \frac{1}{V} \int_V E_i dV, \quad \bar{T}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V T_{ij} dV, \quad \bar{D}_i = \frac{1}{V} \int_V D_i dV.$$

Με εννιά περιπτώσεις φόρτισης είναι δυνατό υπολογιστούν όλοι παράμετροι του σύνθετου υλικού. Για να υπολογιστούν για παράδειγμα τα $c_{13}, c_{23}, c_{33}, \dots, e_{33}$ θα πρέπει να εφαρμοστούν οι συνοριακές συνθήκες με τέτοιο τρόπο ώστε μόνον η μέση παραμόρφωση στην διεύθυνση x_3 (\bar{S}_{33}) να είναι διάφορη του μηδενός, ενώ όλες υπόλοιπες καθώς και τα μέσα ηλεκτρικά πεδία να είναι μηδέν. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση κατάλληλων συνοριακών εξισώσεων μεταξύ των αντίθετων επιφανειών. Οι συνοριακές εξισώσεις θα πρέπει να ορισθούν με τέτοιο τρόπο ώστε οι διαφορές των μετατοπίσεων να είναι μηδέν πλην των u_3^-, u_3^+ . Για να γίνει το μέσο ηλεκτρικό πεδίο μηδέν, εφαρμόζεται για όλα α ζεύγη των αντίθετων επιφανειών μηδενική διαφορά τάσης.

Έτσι τελικά το c_{13} υπολογίζεται από τον τύπο $\bar{T}_{11} = C_{13}^{eff} \bar{S}_{33}$. κοκ. [14]

Κεφάλαιο 6 Ομογενοποίηση τρισδιάστατου πιεζοηλεκτρικού ελαστικού υλικού με την βοήθεια του λογισμικού Comsol

6.1 Περιγραφή του προβλήματος.

Στην παρακάτω προσομοίωση έγινε μία προσπάθεια να βρεθούν οι μέσες ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού. Το σύνθετο υλικό αποτελείται από δύο υλικά. Και τα δύο είναι παρμένα από την βιβλιοθήκη υλικών του comsol. Το πιεζοηλεκτρικό είναι το pzt 5h και το μηχανικό ελαστικό είναι το πολυαιθυλένιο.

6.2 Παράμετροι των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Παρακάτω δίνονται τα στοιχεία του κάθε υλικού

Pzt5h

$$\begin{pmatrix} c \\ e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 127 & 80 & 84 & 0 & 0 & 0 \\ 80 & 127 & 84 & 0 & 0 & 0 \\ 84 & 84 & 117 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 23 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 23 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 23.4 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 17.0345 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17.0345 & 0 & 0 \\ -6.62281 & -6.62281 & 23.2403 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} GPa \\ \\ \\ \\ \\ \\ C/m^2 \end{matrix}$$

$$\begin{pmatrix} e^t \\ \varepsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -6.62281 \\ 0 & 0 & -6.62281 \\ 0 & 0 & 23.2403 \\ 0 & 17.0345 & 0 \\ 17.0345 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline 1704 & 0 & 0 \\ 0 & 1704 & 0 \\ 0 & 0 & 1433 \end{pmatrix} C/m^2$$

Για το πολυαιθυλένιο είναι

$$c = 1 \text{ GPa}$$

$$\varepsilon = 2.3$$

Η μίξη των παραπάνω υλικών θα δώσει προφανώς ένα υλικό που έχει ηλεκτρικές, πιεζοηλεκτρικές και ελαστικές ιδιότητες άρα οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τις ιδιότητές του θα έχουν την μορφή

$$T = cS - e^1 E$$

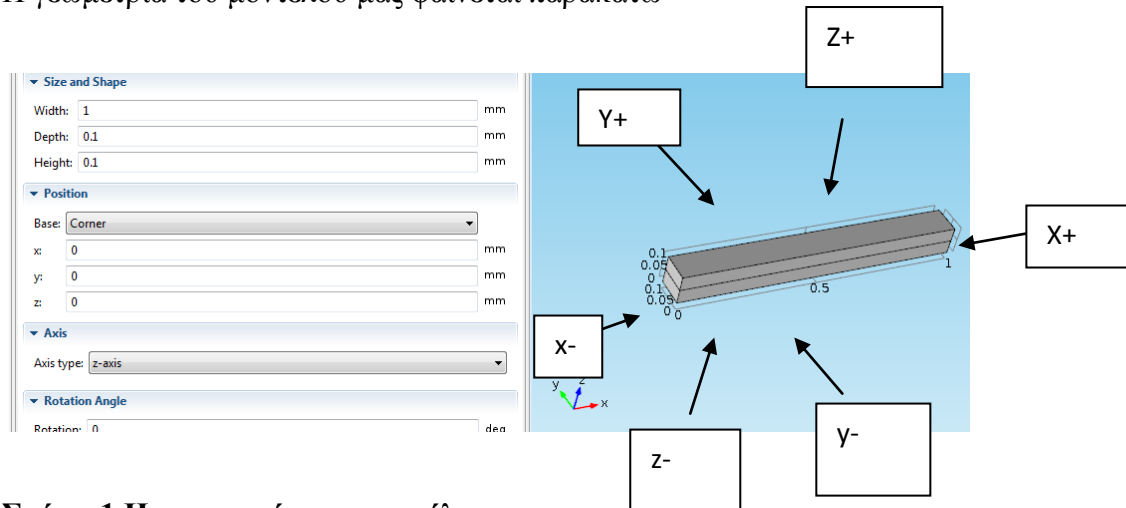
$$D = e^2 S + \varepsilon E$$

$$\begin{pmatrix} \overline{T_{11}} \\ \overline{T_{22}} \\ \overline{T_{33}} \\ \overline{T_{23}} \\ \overline{T_{31}} \\ \overline{T_{12}} \\ \overline{D_1} \\ \overline{D_2} \\ \overline{D_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} & -e_{11}^2 & -e_{21}^2 & -e_{31}^2 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} & -e_{12}^2 & -e_{22}^2 & -e_{32}^2 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} & -e_{13}^2 & -e_{13}^2 & -e_{33}^2 \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} & -e_{14}^2 & -e_{14}^2 & -e_{34}^2 \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} & -e_{15}^2 & -e_{15}^2 & -e_{35}^2 \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} & -e_{16}^2 & -e_{16}^2 & -e_{36}^2 \\ e_{11}^1 & e_{12}^1 & e_{13}^1 & e_{14}^1 & e_{15}^1 & e_{16}^1 & \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ e_{21}^1 & e_{22}^1 & e_{23}^1 & e_{24}^1 & e_{25}^1 & e_{26}^1 & \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ e_{31}^1 & e_{32}^1 & e_{33}^1 & e_{34}^1 & e_{35}^1 & e_{36}^1 & \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \overline{S_{11}} \\ \overline{S_{22}} \\ \overline{S_{33}} \\ \overline{S_{23}} \\ \overline{S_{31}} \\ \overline{S_{12}} \\ \overline{E_1} \\ \overline{E_2} \\ \overline{E_3} \end{pmatrix}$$

Η κύρια ιδέα της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε είναι να βρεθεί ένα ομοιογενές ισοδύναμο του αρχικού συνθέτου υλικού όπου η παραμόρφωση της ενέργειας παραμένει η ίδια. Για να βρεθούν οι παράμετροι εφαρμόζονται εννιά περιπτώσεις φορτίου με διαφορετικές συνοριακές συνθήκες. Οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόζονται με τέτοιο τρόπο ώστε μόνο μία από τις παραμορφώσεις ή τα ηλεκτρικά πεδία να είναι διάφορα του μηδενός και όλα τα υπόλοιπα να είναι μηδέν. Έτσι για παράδειγμα εάν η παραμόρφωση κατά τον άξονα x είναι διάφορη του μηδενός και

όλες οι άλλες είναι μηδέν καθώς και τα ηλεκτρικά πεδία, τότε είναι εύκολο να υπολογιστούν τα στοιχεία της πρώτης στήλης.

Η γεωμετρία του μοντέλου μας φαίνεται παρακάτω

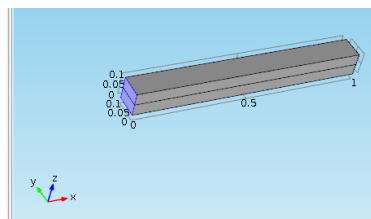
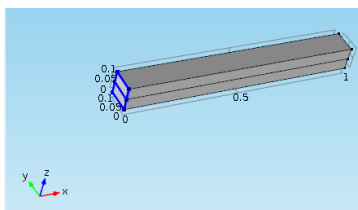


Σχήμα 1 Η γεωμετρία του μοντέλου

Το πιεζοηλεκτρικό είναι το κάτω και το μηχανικό το πάνω

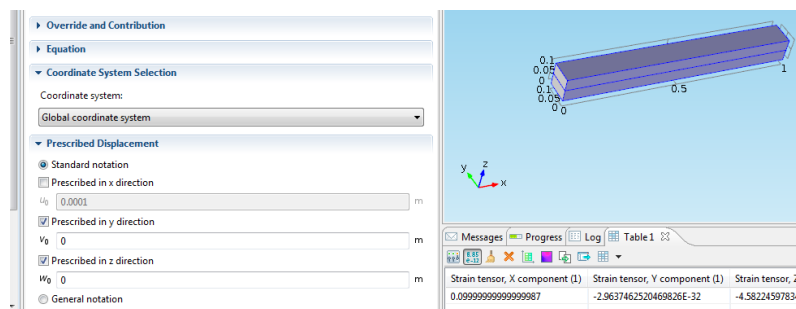
6.3. Περίπτωση Μηχανικής φόρτισης άξονας x

Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε πάκτωση στην πλευρά που είναι στην απέναντι κάθετη πλευρά στην η οποία εφαρμόστηκε η παραμόρφωση.

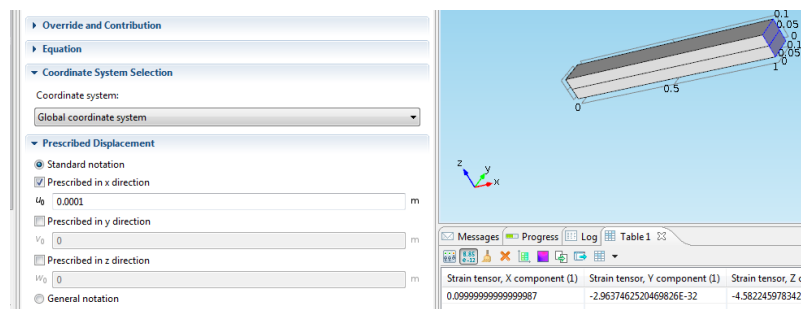


Σχήμα Πάκτωση για περίπτωση παραμόρφωσης στο άξονα x

Όπως αναφέρθηκε θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι συνοριακές συνθήκες με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να μηδενισθούν όλες οι παραμορφώσεις καθώς και τα ηλεκτρικά πεδία εκτός της παραμόρφωσης του άξονα x. Για αυτό τον λόγο για να μηδενισθούν οι παραμορφώσεις κατά τους άξονες y, z, xy, xz και yz. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τις προδιαγεγραμμένες μετακινήσεις του comsol. Ακόμα εφαρμόζετε προδιαγεγραμμένη μετακίνηση στον άξονα x όπως φαίνεται στον παρακάτω σχήμα



Σχήμα Μηδενικές προδιαγεγραμμένες μετακινήσεις¹

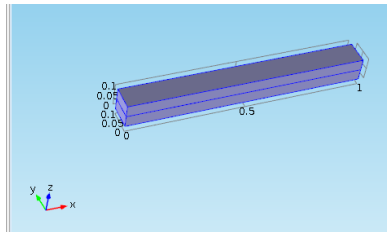


Σχήμα Προδιαγεγραμμένη μετακίνηση στον άξονα x

Για να μηδενιστούν τα ηλεκτρικά πεδία γειώνεται όλη η κατασκευή όπως παρακάτω

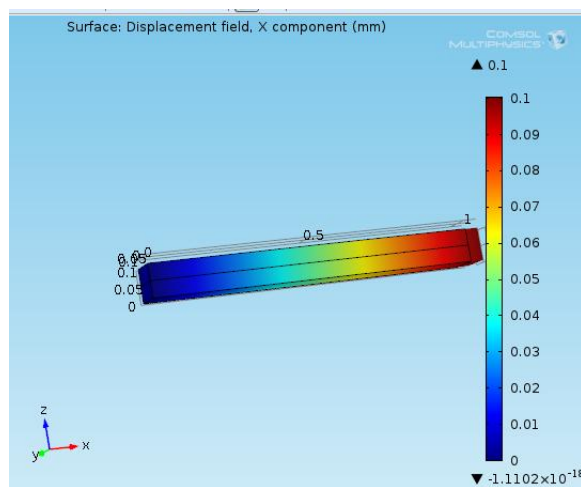
¹ Τα αποτελέσματα της διηλεκτρικής σταθεράς έχουν διαιρεθεί με την διηλεκτρική σταθερά του αέρα

$$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} A^2 s^4 kg^{-1} m^{-3}$$

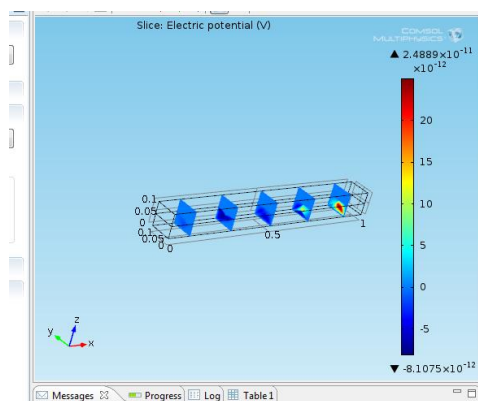


Σχήμα Ηλεκτρικές συνοριακές συνθήκες, γείωση όλης της κατασκευής

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται παρακάτω



Σχήμα Μετακίνηση άξονας x



Σχήμα Ηλεκτρική Τάση

$$\begin{pmatrix} \overline{S_{11}} \\ \overline{S_{22}} \\ \overline{S_{33}} \\ \overline{S_{23}} \\ \overline{S_{13}} \\ \overline{S_{12}} \\ \overline{E_1} \\ \overline{E_2} \\ \overline{E_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.099 \\ -2.9 \bullet 10^{-32} \\ -4.8 \bullet 10^{-32} \\ -1.8 \bullet 10^{-32} \\ -2 \bullet 10^{-16} \\ 4.8 \bullet 10^{-17} \\ 9.2 \bullet 10^{-24} V / m \\ 2.2 \bullet 10^{-24} V / m \\ 1.6 \bullet 10^{-23} V / m \end{pmatrix}$$

Όπως φαίνεται παραπάνω μηδενίζονται όλες οι παραμορφώσεις και τα ηλεκτρικά πεδία εκτός της παραμόρφωσης του άξονα x. Η παραμόρφωση στον άξονα x είναι 0.099.

Οι εξισώσεις του πιεζοσύνθετου υλικού σε αυτήν την περίπτωση γίνονται

$$\begin{pmatrix} \overline{T_{11}} \\ \overline{T_{22}} \\ \overline{T_{33}} \\ \overline{T_{23}} \\ \overline{T_{13}} \\ \overline{T_{12}} \\ \overline{D_1} \\ \overline{D_2} \\ \overline{D_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{21} \\ c_{31} \\ c_{41} \\ c_{51} \\ c_{61} \\ e_{11} \\ e_{21} \\ e_{31} \end{pmatrix} \bullet \overline{S_{11}}$$

Ακόμα οι μέσες μηχανικές τάσεις και ηλεκτρικές μετακινήσεις που υπολογίστηκαν είναι οι παρακάτω

$$\begin{pmatrix} \overline{T_{11}} \\ \overline{T_{22}} \\ \overline{T_{33}} \\ \overline{T_{23}} \\ \overline{T_{13}} \\ \overline{T_{12}} \\ \overline{D_1} \\ \overline{D_2} \\ \overline{D_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.5 \bullet 10^9 \\ 4.2 \bullet 10^9 \\ 4.4 \bullet 10^9 \\ -4.2 \bullet 10^{-22} \\ 9.6 \bullet 10^{-8} \\ 1.4 \bullet 10^{-6} \\ 1.2 \bullet 10^{-16} \\ -3.5 \bullet 10^{-18} \\ -0.331 \end{pmatrix}$$

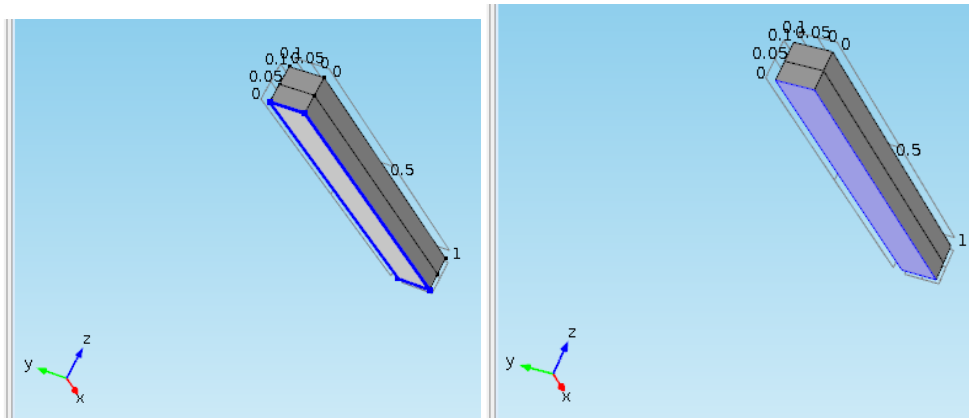
Τελικά οι παράμετροι υπολογίζονται εύκολα και είναι οι παρακάτω

$$\begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{21} \\ c_{31} \\ c_{41} \\ c_{51} \\ c_{61} \\ e_{11}^1 \\ e_{21}^1 \\ e_{31}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 65GPa \\ 42GPa \\ 44GPa \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -3.34C / m^2 \end{pmatrix}$$

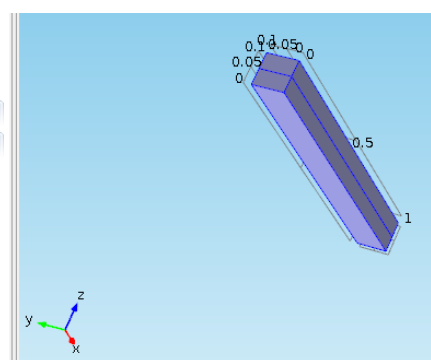
Οι παράμετροι της δεύτερης και τρίτης στήλης, δηλαδή για μηχανική παραμόρφωση στον άξονα y και z αντίστοιχα υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο.

6.4 Μηχανική φόρτιση στον άξονα z

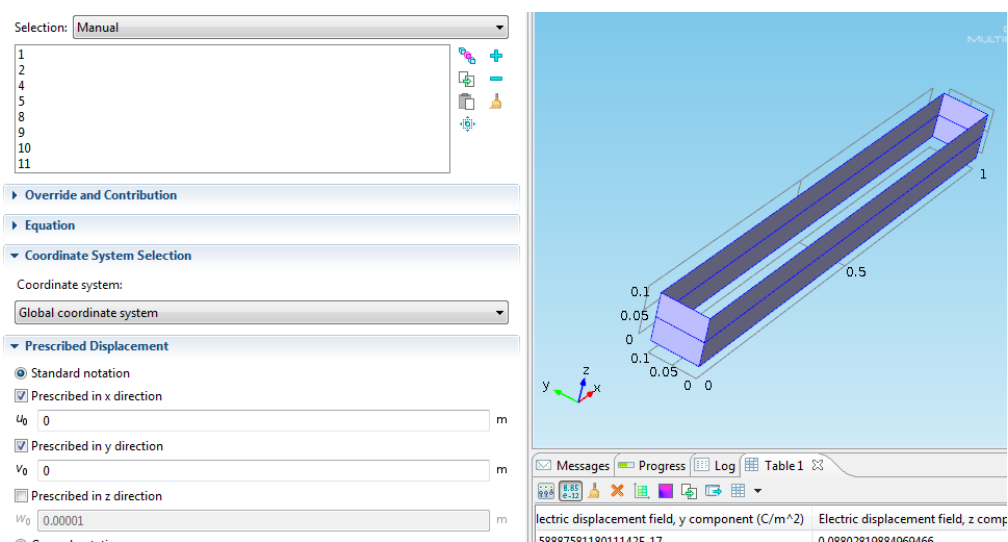
Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να μηδενισθούν οι παραμορφώσεις κατά του άξονες x, y, xy, xz, yz και τα ηλεκτρικά πεδία στους άξονες x, y και z.



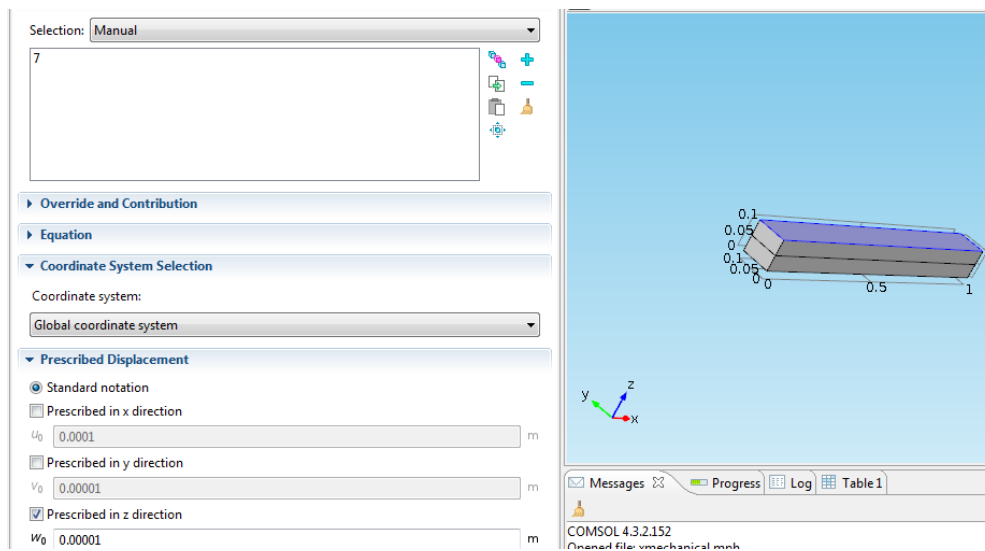
Σχήμα Πακτώσεις



Σχήμα Γείωση σε όλη την κατασκευή

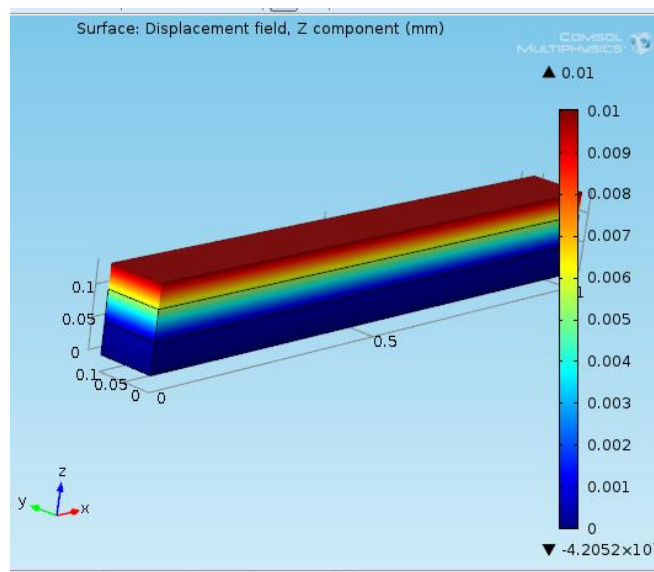


Σχήμα Μηδενικές μετακινήσεις

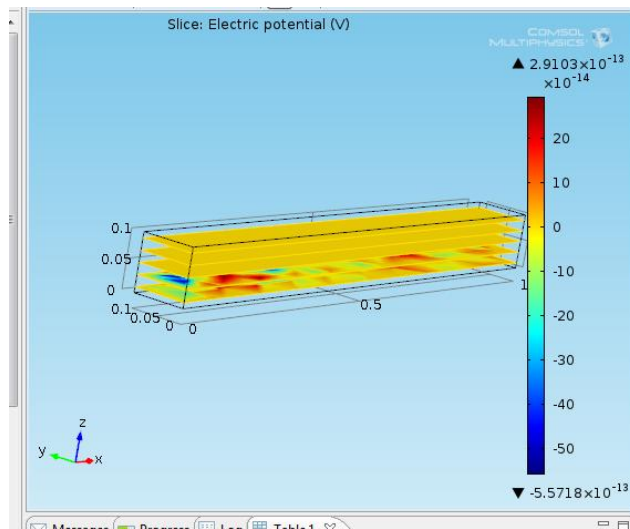


Σχήμα Μετακίνηση στον άξονα z

Τα αποτελέσματα είναι τα παρακάτω



Σχήμα Μετατόπιση στον άξονα z



Σχήμα Ηλεκτρική Τάση

Οι παραμορφώσεις και τα ηλεκτρικά πεδία είναι

$$\begin{pmatrix} \overline{S_{11}} \\ \overline{S_{22}} \\ \overline{S_{33}} \\ \overline{S_{23}} \\ \overline{S_{13}} \\ \overline{S_{12}} \\ \overline{E_1} \\ \overline{E_2} \\ \overline{E_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.7 \bullet 10^{-33} \\ -3.8 \bullet 10^{-32} \\ 0.099 \\ -7.6 \bullet 10^{-18} \\ 4 \bullet 10^{-18} \\ -8.7 \bullet 10^{-34} \\ -4.1 \bullet 10^{-26} V / m \\ 4.6 \bullet 10^{-26} V / m \\ 2 \bullet 10^{-27} V / m \end{pmatrix}$$

Άρα τελικά οι εξισώσεις μπορούν να γίνουν

$$\begin{pmatrix} \overline{T_{11}} \\ \overline{T_{22}} \\ \overline{T_{33}} \\ \overline{T_{23}} \\ \overline{T_{13}} \\ \overline{T_{12}} \\ \overline{D_1} \\ \overline{D_2} \\ \overline{D_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{13} \\ c_{23} \\ c_{33} \\ c_{43} \\ c_{53} \\ c_{63} \\ e_{13} \\ e_{23} \\ e_{33} \end{pmatrix} \bullet \overline{S_{33}} (= 0.099)$$

Οι μηχανικές τάσεις και οι ηλεκτρικές μετατοπίσεις είναι

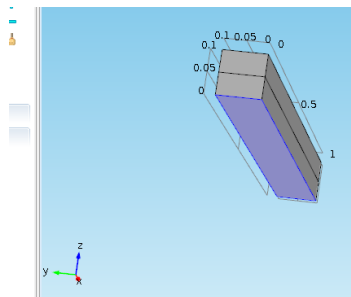
$$\begin{pmatrix} \overline{T_{11}} \\ \overline{T_{22}} \\ \overline{T_{33}} \\ \overline{T_{23}} \\ \overline{T_{13}} \\ \overline{T_{12}} \\ \overline{D_1} \\ \overline{D_2} \\ \overline{D_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.99 \bullet 10^8 \\ 6.99 \bullet 10^8 \\ 8.8 \bullet 10^8 \\ 1.4 \bullet 10^{-8} \\ -1.7 \bullet 10^{-8} \\ -4 \bullet 10^{-24} \\ -1.3 \bullet 10^{-18} \\ 1.5 \bullet 10^{-17} \\ 0.088 \end{pmatrix}$$

Άρα τελικά οι παράμετροι της τρίτης στήλης είναι

$$\begin{pmatrix} c_{13} \\ c_{23} \\ c_{33} \\ c_{43} \\ c_{53} \\ c_{63} \\ e_{13} \\ e_{23} \\ e_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.9GPa \\ 6.9GPa \\ 8.8GPa \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.88C / m^2 \end{pmatrix}$$

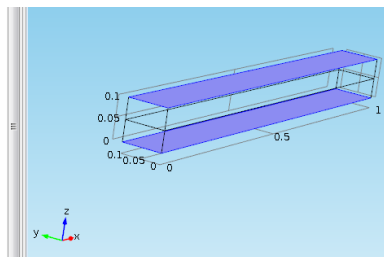
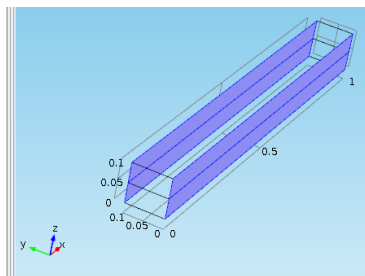
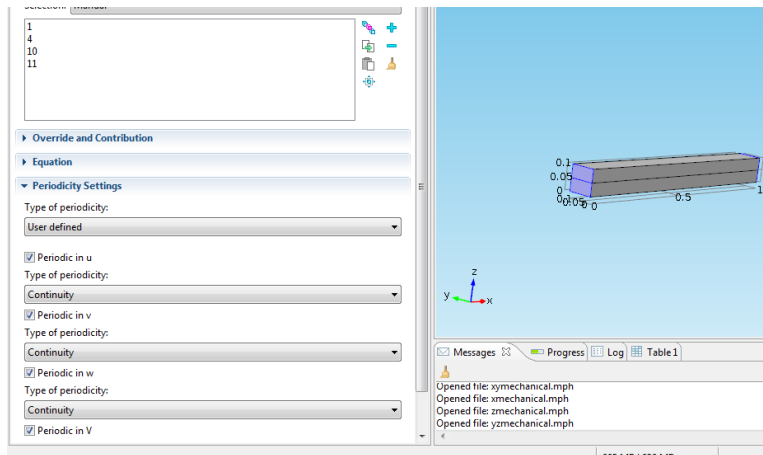
6.5. Μηχανική φόρτιση στον άξονα yz

Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να μηδενισθούν οι παραμορφώσεις κατά x, y, z, xy, xz. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να εφαρμοστεί διατμητική παραμόρφωση. Για αυτό πακτώνεται η z- πλευρά. Η y- πλευρά δεν πακτώνεται για να επιτευχθεί η διάτμηση.



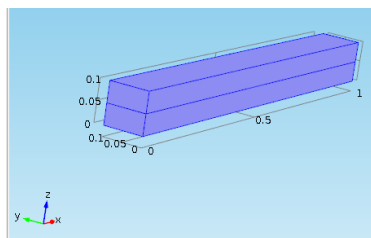
Σχήμα Πάκτωση στην πλευρά z-

Για να μηδενισθούν οι παραμορφώσεις και τα ηλεκτρικά πεδία κατά x, y, z εφαρμόζονται περιοδικές συνθήκες στις x+, x-, y+, y-, z+, z-.



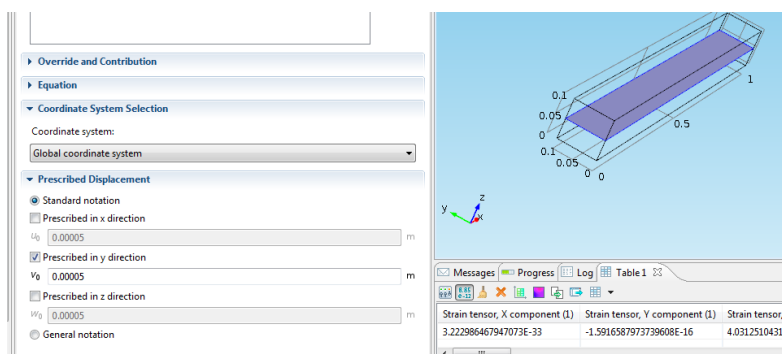
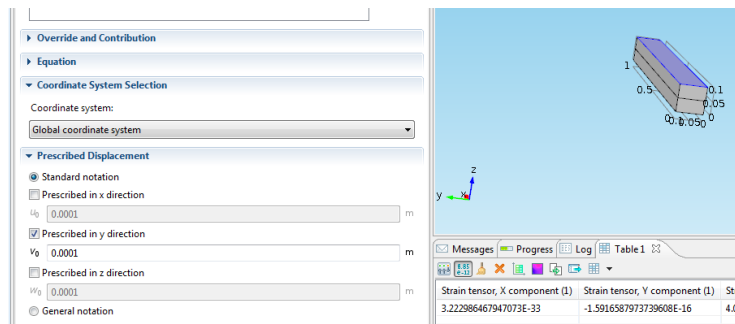
Σχήμα Μηχανικές και ηλεκτρικές περιοδικές συνθήκες

Για τις ηλεκτρικές συνοριακές συνθήκες εφαρμόστηκε γείωση σε όλη την κατασκευή



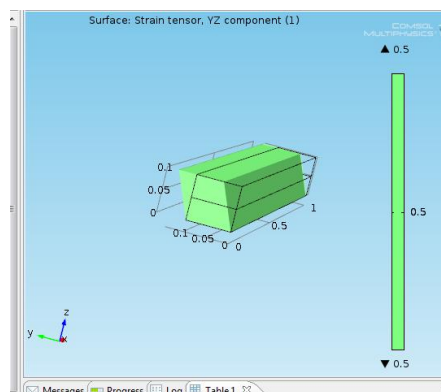
Σχήμα Ηλεκτρικές συνοριακές συνθήκες. Γείωση σε όλη την κατασκευή.

Στην συνέχεια εφαρμόζετε μετακίνηση στην πλευρά z+ κατά τον άξονα y καθώς και στην επιφάνεια επαφής των δύο υλικών.

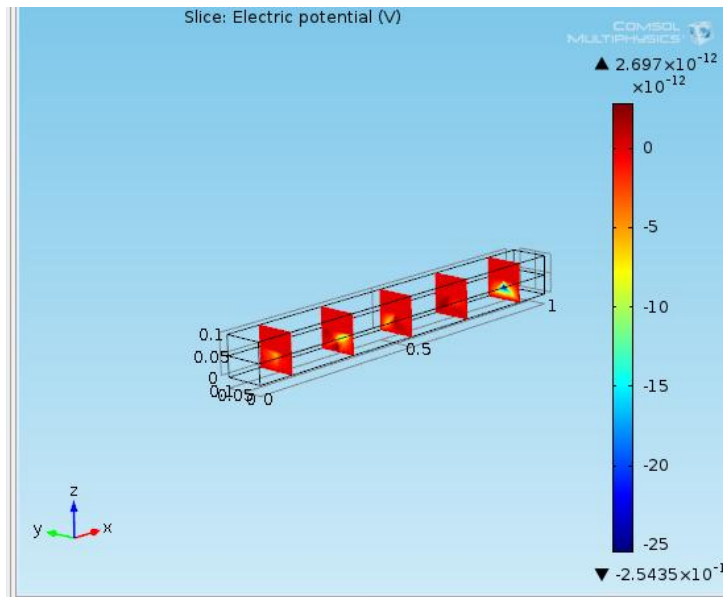


Σχήματα Μετακίνηση στον άξονα y

Η παραμόρφωση που δημιουργήθηκε σχηματικά φαίνεται παρακάτω



Σχήμα Παραμόρφωση κατά τους άξονες yz



Σχήμα Ηλεκτρική Τάση

Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω

$$\begin{pmatrix} \overline{S_{11}} \\ \overline{S_{22}} \\ \overline{S_{33}} \\ \overline{S_{23}} \\ \overline{S_{13}} \\ \overline{S_{12}} \\ \overline{E_1} \\ \overline{E_2} \\ \overline{E_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2 \bullet 10^{-33} \\ -1.5 \bullet 10^{-16} \\ 4 \bullet 10^{-32} \\ 0.49 \\ 8.8 \bullet 10^{-33} \\ 2.5 \bullet 10^{-18} \\ -3.1 \bullet 10^{-24} V / m \\ -2.7 \bullet 10^{-24} V / m \\ -1.9 \bullet 10^{-23} V / m \end{pmatrix}$$

Άρα μηδενίστηκαν όλες οι παραμορφώσεις και τα ηλεκτρικά πεδία εκτός από την παραμόρφωση στον άξονα yz. Επίσης βρέθηκαν οι μηχανικές τάσεις και οι ηλεκτρικές μετακινήσεις.

$$\begin{pmatrix} \overline{T_{11}} \\ \overline{T_{22}} \\ \overline{T_{33}} \\ \overline{T_{23}} \\ \overline{T_{13}} \\ \overline{T_{12}} \\ \overline{D_1} \\ \overline{D_2} \\ \overline{D_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.4 \bullet 10^{-6} \\ -3.3 \bullet 10^{-7} \\ -2.4 \bullet 10^{-6} \\ 1.1 \bullet 10^{10} \\ 1.9 \bullet 10^{-6} \\ 8.5 \bullet 10^{-8} \\ 1.4 \bullet 10^{-15} \\ 8.5 \\ -9.2 \bullet 10^{-16} \end{pmatrix}$$

Άρα οι παράμετροι της τέταρτης σειράς υπολογίζονται εύκολα

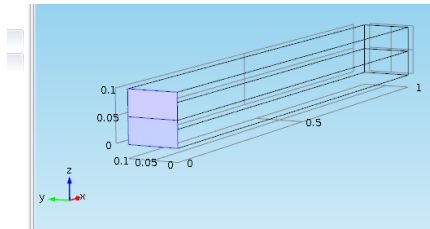
$$\begin{pmatrix} c_{14} \\ c_{24} \\ c_{34} \\ c_{44} \\ c_{54} \\ c_{64} \\ e_{14}^1 \\ e_{24}^1 \\ e_{34}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 22GPa \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 17C / m^2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Όμοια υπολογίζονται και οι παράμετροι της πέμπτης και έκτης στήλης για παραμόρφωση στους xz και xy αντίστοιχα.

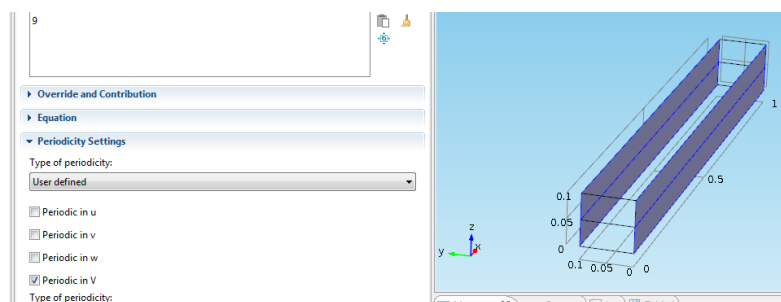
6.6 Ηλεκτρική φόρτιση στον άξονα x

Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να μηδενισθούν όλες οι μηχανικές παραμορφώσεις. Αυτό θα επιτευχθεί εύκολα με την εφαρμογή μηδενικών προδιαγεγραμμένων μετακινήσεων σε όλη την επιφάνεια προς όλες τις κατευθύνσεις.

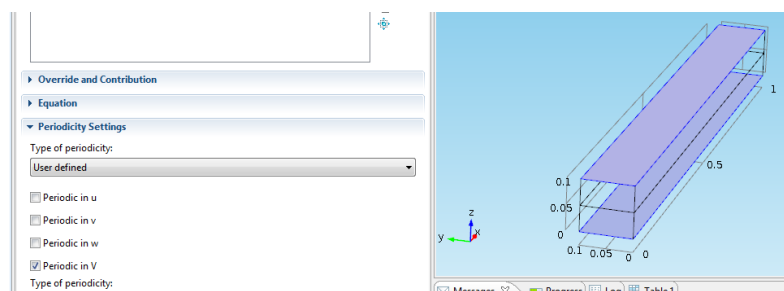
Εφόσον εφαρμόζετε ηλεκτρικό πεδίο στον άξονα x θα χρησιμοποιηθεί ηλεκτρική συνοριακή συνθήκη(γείωση στην πλευρά x-). Ακόμα για να μηδενισθούν τα ηλεκτρικά πεδία στους άξονες y και z εφαρμόζονται ηλεκτρικές περιοδικές συνθήκες στις απέναντι πλευρές y- με y+ και z- με z+.



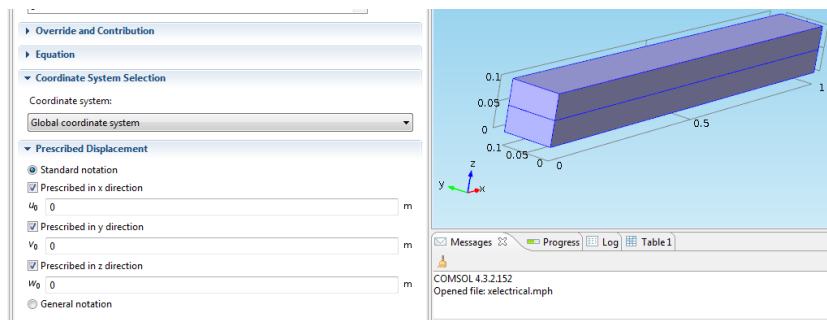
Σχήμα Ηλεκτρική συνοριακή συνθήκη(γείωση) στην πλευρά x-.



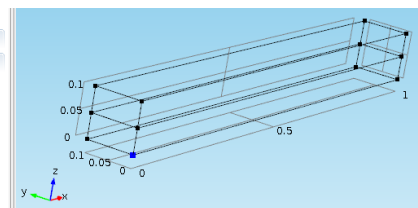
Σχήμα Ηλεκτρική περιοδική συνθήκη στις πλευρές y- και y+



Σχήμα Ηλεκτρικές περιοδικές συνθήκες στις πλευρές z- και z+

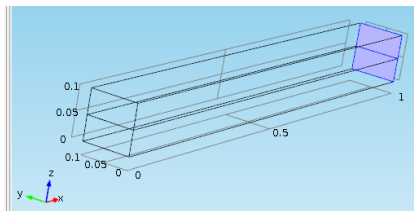


Σχήμα Μηδενικές προδιαγεγραμμένες μετακινήσεις προς όλους του άξονες σε όλο το υλικό

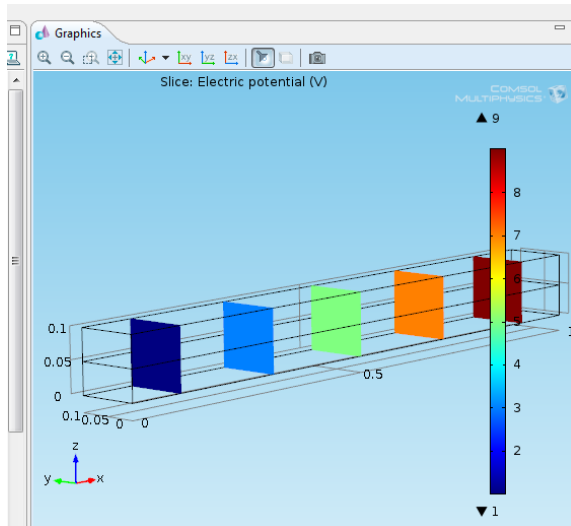


Σχήμα Σημειακή πάκτωση

Το ηλεκτρικό φορτίο που εφαρμόστηκε είναι μία τάση 10V στην πλευρά x+



Σχήμα Ηλεκτρική τάση στην πλευρά x+.



Σχήμα Η ηλεκτρική τάση που προέκυψε

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω

$$\begin{pmatrix} \overline{S_{11}} \\ \overline{S_{22}} \\ \overline{S_{33}} \\ \overline{S_{23}} \\ \overline{S_{13}} \\ \overline{S_{12}} \\ \overline{E_1} \\ \overline{E_2} \\ \overline{E_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \bullet 10^{-37} \\ -1.7 \bullet 10^{-40} \\ -6 \bullet 10^{-37} \\ 4.9 \bullet 10^{-37} \\ -8 \bullet 10^{-38} \\ -1.8 \bullet 10^{-39} \\ -10000 \\ 5 \bullet 10^{-12} \\ -8 \bullet 10^{-12} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \overline{T_{11}} \\ \overline{T_{22}} \\ \overline{T_{33}} \\ \overline{T_{23}} \\ \overline{T_{13}} \\ \overline{T_{12}} \\ \overline{D_1} \\ \overline{D_2} \\ \overline{D_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \bullet 10^{-11} \\ 5 \bullet 10^{-11} \\ -2 \bullet 10^{-10} \\ -2.6 \bullet 10^{-12} \\ 85172 \\ -2 \bullet 10^{-27} \\ -7 \bullet 10^{-5} \\ 2.6 \bullet 10^{-21} \\ 1 \bullet 10^{-19} \end{pmatrix}$$

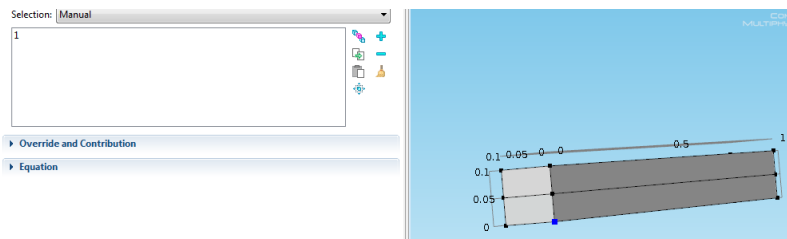
Όπως φαίνεται μηδενίστηκαν όλες οι παραμορφώσεις και τα ηλεκτρικά πεδία εκτός του ηλεκτρικού πεδίου στον άξονα x. Από τα παραπάνω.

$$\begin{pmatrix} e^2_{11} \\ e^2_{12} \\ e^2_{13} \\ e^2_{14} \\ e^2_{15} \\ e^2_{16} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} \\ \varepsilon_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 8.51C / m^2 \\ 0 \\ 853 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

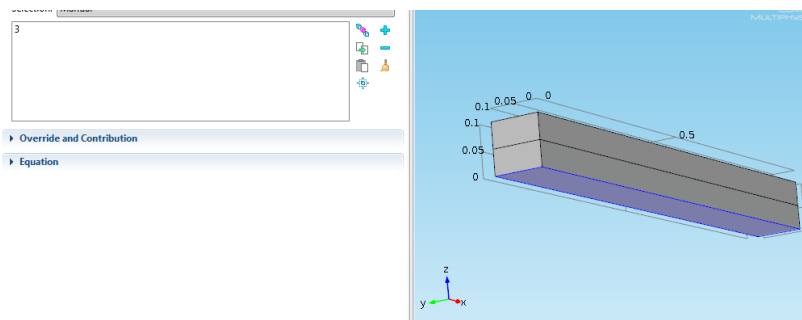
Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται οι παράμετροι της όγδοης και ένατης στήλης για ηλεκτρικό πεδίο στους άξονες y και z αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι για τα αποτελέσματα της διηλεκτρικής σταθεράς έχει προηγηθεί διαίρεση με την διηλεκτρική σταθερά του αέρα $\varepsilon_0 = 8.854 \bullet 10^{-12} A^2 s^4 kg^{-1} m^{-3}$

6.7 Ηλεκτρική Φόρτιση στον άξονα z

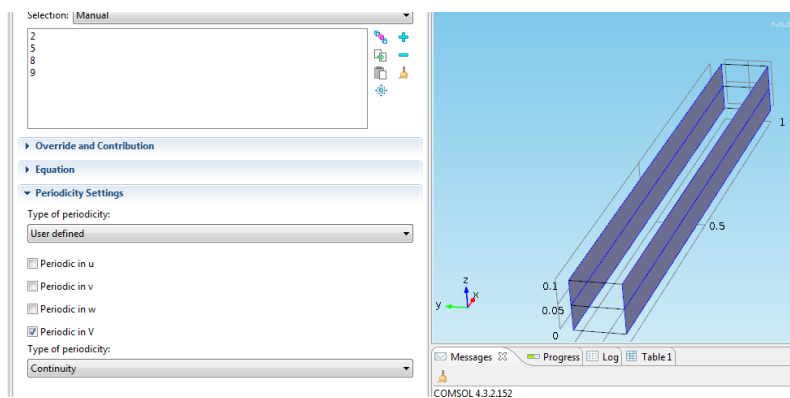
Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει μόνο το μέσο ηλεκτρικό πεδίο στον άξονα z να είναι διάφορο του μηδενός



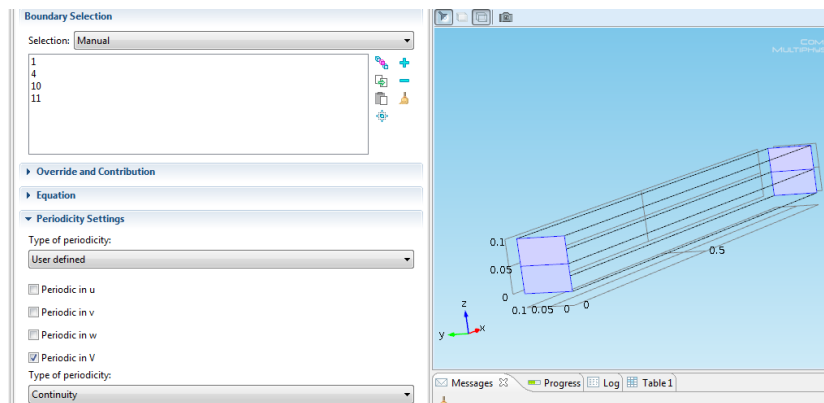
Σημειακή πάκτωση



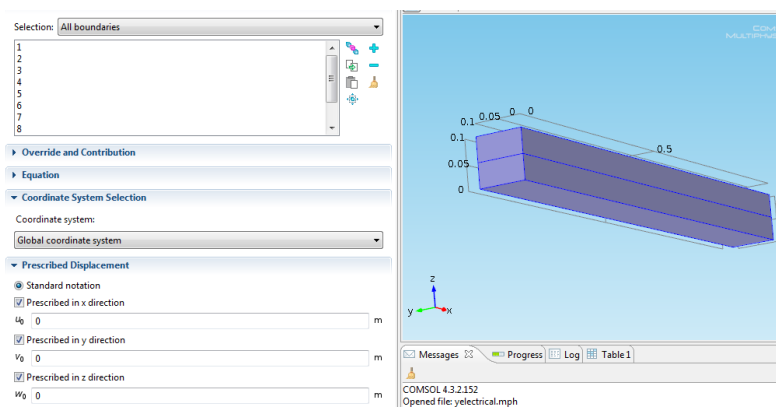
Σχήμα Γείωση



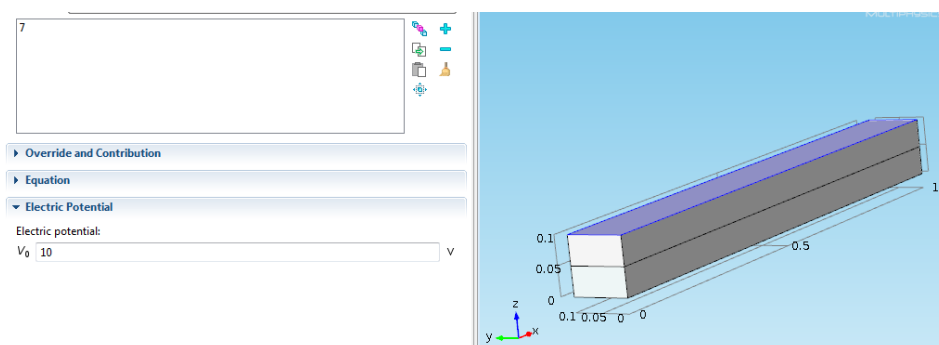
Σχήμα Ηλεκτρική περιοδική συνθήκη για τις δύο απέναντι πλευρές που είναι κάθετες στον άξονα y.



Σχήμα Ηλεκτρική περιοδοική συνθήκη για τις δύο απέναντι πλευρές που είναι κάθετες στον άξονα x.

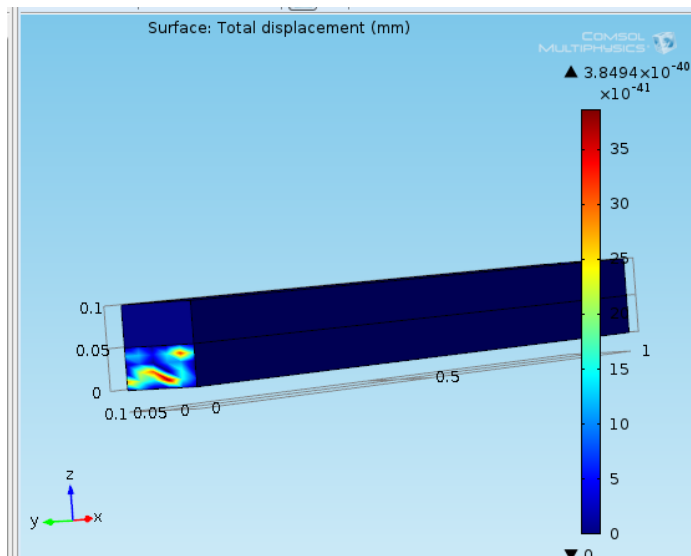


Σχήμα Προδιαγεγραμμένη μηδενική μετακίνηση για όλη την επιφάνεια και για όλες τις κατευθύνσεις.

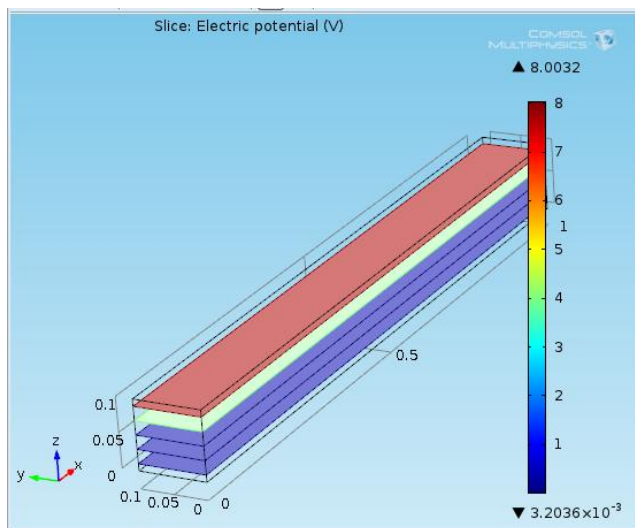


Σχήμα Η ηλεκτρική τάση που εφαρμόστηκε

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω



Σχήμα Μετατόπιση



Σχήμα Ηλεκτρική Τάση

Τα αποτελέσματα για τις παραμορφώσεις και τα ηλεκτρικά πεδία είναι τα παρακάτω

$$\begin{pmatrix} \overline{S_{11}} \\ \overline{S_{22}} \\ \overline{S_{33}} \\ \overline{S_{23}} \\ \overline{S_{13}} \\ \overline{S_{12}} \\ \overline{E_1} \\ \overline{E_2} \\ \overline{E_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -9.9 \bullet 10^{-42} \\ 5.8 \bullet 10^{-40} \\ -1.4 \bullet 10^{-39} \\ 5.7 \bullet 10^{-40} \\ -3.3 \bullet 10^{-40} \\ 2.2 \bullet 10^{-40} \\ -9.7 \bullet 10^{-30} \\ -5.6 \bullet 10^{-13} \\ -100000 \end{pmatrix}$$

Έτσι το μόνο στοιχείο που δεν μηδενίστηκε είναι το ηλεκτρικό πεδίο στον άξονα z.

Έτσι τελικά οι εξισώσεις μπορούν να γραφτούν όπως παρακάτω

$$\begin{pmatrix} \overline{T_{11}} \\ \overline{T_{22}} \\ \overline{T_{33}} \\ \overline{T_{23}} \\ \overline{T_{13}} \\ \overline{T_{12}} \\ \overline{D_1} \\ \overline{D_2} \\ \overline{D_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -e^2_{31} \\ -e^2_{32} \\ -e^2_{33} \\ -e^2_{34} \\ -e^2_{35} \\ -e^2_{36} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \bullet E_3 (= -100000)$$

Επίσης τα αποτελέσματα για τις μηχανικές τάσεις και τις ηλεκτρικές μετατοπίσεις

είναι

$$\begin{pmatrix} \overline{T_{11}} \\ \overline{T_{22}} \\ \overline{T_{33}} \\ \overline{T_{23}} \\ \overline{T_{13}} \\ \overline{T_{12}} \\ \overline{D_1} \\ \overline{D_2} \\ \overline{D_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1060 \\ -1060 \\ 3722 \\ 4 \bullet 10^{-14} \\ -3.5 \bullet 10^{-15} \\ 2.3 \bullet 10^{-30} \\ -3.3 \bullet 10^{-22} \\ -7.7 \bullet 10^{-23} \\ -4.06 \bullet 10^{-6} \end{pmatrix}$$

Έτσι οι παράμετροι υπολογίζονται εύκολα

$$\begin{pmatrix} e^2_{31} \\ e^2_{32} \\ e^2_{33} \\ e^2_{34} \\ e^2_{35} \\ e^2_{36} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0106C / m^2 \\ -0.0106C / m^2 \\ 0.0372C / m^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 4.52 \end{pmatrix}$$

6.8. Τελικά αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η συνολική παρουσίαση των αποτελεσμάτων

$$\left(\frac{c}{e^1} \right) = \left(\begin{array}{cccccc} 65GPa & 42GPa & 6.9GPa & 0 & 0 & 0 \\ 42GPa & 65GPa & 6.9GPa & 0 & 0 & 0 \\ 44GPa & 44GPa & 8.8GPa & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 22GPa & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 22GPa & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 23.8GPa \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 17C / m^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17C / m^2 & 0 & 0 \\ -3.34C / m^2 & -3.31C / m^2 & 0.88C / m^2 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right)$$

$$\left(\frac{e^2}{\varepsilon} \right) = \left(\begin{array}{ccc} 0 & 0 & -0.0106C / m^2 \\ 0 & 0 & -0.0106C / m^2 \\ 0 & 0 & 0.0372C / m^2 \\ 0 & 8.51C / m^2 & 0 \\ 8.51C / m^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline 853 & 0 & 0 \\ 0 & 853 & 0 \\ 0 & 0 & 4.52 \end{array} \right)$$

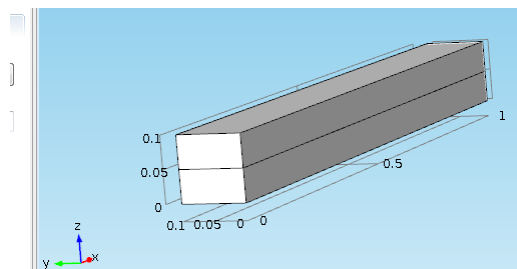
6.9. Υπολογισμός μέσων ιδιοτήτων βάση της θεωρίας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα υπολογιστούν οι θεωρητικές μέσες ιδιότητες των υλικών. Ο υπολογισμός των μηχανικών, πιεζοηλεκτρικών και ηλεκτρικών παραμέτρων γίνεται με τον ίδιο τρόπο. Ουσιαστικά υπάρχουν τρεις περιπτώσεις. Στην μία περίπτωση έχουμε μηχανική παραμόρφωση μόνο κατά x ή μόνο κατά y ή ηλεκτρικό πεδίο μόνο κατά x ή μόνο κατά y. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα δύο υλικά είναι συνδεδεμένα παράλληλα σύμφωνα με το σχήμα. Στην δεύτερη περίπτωση δηλαδή μηχανική παραμόρφωση μόνο στον άξονα z ή ηλεκτρικό πεδίο μόνο στον άξονα z, τα δύο υλικά είναι συνδεδεμένα εν σειρά σύμφωνα με το σχήμα. Η τρίτη

περίπτωση είναι οι διατμητικές παραμορφώσεις στους άξονες xy ή xz ή yz. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι δυνατό να υπολογιστούν οι αντίστοιχες παράμετροι θεωρητικά. Στη συνέχεια θα δειχθούν οι τρόποι που βρέθηκαν τα αποτελέσματα.

1^η περίπτωση παράλληλη σύνδεση

Μέτρο ελαστικότητας (Φόρτιση άξονας x)



$$cS / d = c_1 S_1 / d_1 + c_2 S_2 / d_2$$

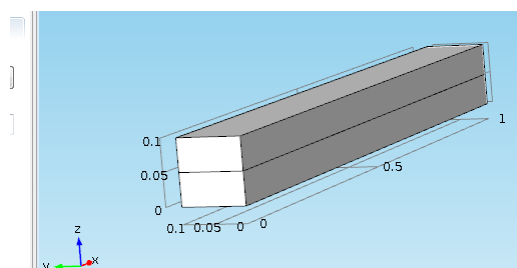
$$cS / d = c_1 S / 2d + c_2 S_2 / 2d$$

$$c = (c_1 + c_2) / 2 = (1 + 127) / 2 = 64 \text{ GPa}$$

Όμοια υπολογίζονται οι παράμετροι για παραμόρφωση στον άξονα y, ηλεκτρική φόρτιση στον άξονα x και y.

2^η περίπτωση εν σειρά σύνδεση

Μέτρο ελαστικότητας (Φόρτιση άξονας z)



$$1/cS/d = 1/c_1S_1/d_1 + 1/c_2S_2/d_2$$

$$d/cS = d/2c_1S + d/2c_2S$$

$$1/c = 1/c_1 + 1/c_2$$

$$c = 2c_1c_2 / (c_1 + c_2)$$

$$c = 2 \bullet 1 \bullet 127 / (1 + 127)$$

$$c = 1.98$$

Όμοια υπολογίζονται οι παράμετροι για ηλεκτρική φόρτιση στον άξονα z

Τα συνολικά αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω

$$\left(\frac{c}{e^1} \right) = \begin{pmatrix} 64 & 40.5 & 2 & x & x & x \\ 40.5 & 64 & 2 & x & x & x \\ 42.5 & 42.5 & 2 & x & x & x \\ 0 & 0 & 0 & x & x & x \\ 0 & 0 & 0 & x & x & x \\ 0 & 0 & 0 & x & x & x \\ \hline 0 & 0 & 0 & x & x & x \\ 0 & 0 & 0 & x & x & x \\ -3.31 & -3.31 & 0 & x & x & x \end{pmatrix} \begin{matrix} \boxed{GPa} \\ \boxed{C / m^2} \end{matrix}$$

$$\left(\frac{e^2}{\varepsilon} \right) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8.5 & 0 \\ 8.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline 853 & 0 & 0 \\ 0 & 853 & 0 \\ 0 & 0 & 4.6 \end{pmatrix} \quad \boxed{C / m^2}$$

6.10. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα θεωρητικά.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω η απόκλιση μεταξύ θεωρητικής και της προσέγγισης του Comsol είναι μικρή στις περισσότερες περιπτώσεις. Στην περίπτωση διατμητικής παραμόρφωσης παρατηρείται ότι οι αντίστοιχοι παράμετροι είναι σχεδόν ίδιοι με του πιεζοηλεκτρικού υλικού (pzt-5h). Αυτό είναι λογικό διότι τα μεγέθη αυτά είναι πολύ μεγαλύτερα στην περίπτωση του pzt-5h σε σχέση με το πολυαιθυλαίνιο.

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια ομογενοποίησης ενός σύνθετου υλικού που αποτελείται από ένα πιεζοηλεκτρικό και ένα ελαστικό υλικό με την βοήθεια του λογισμικού του Comsol. Χρησιμοποιήθηκε γραμμική ανάλυση. Αρχικά θεωρήθηκε ότι όλοι οι παράμετροι του υλικού είναι άγνωστοι. Με εννιά περιπτώσεις φόρτισης και τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες έγινε δυνατό να υπολογιστούν όλοι οι παράμετροι του υλικού με μία απλή πράξη. Στην συνέχεια υπολογίστηκαν με θεωρητικό τρόπο οι παράμετροι του υλικού. Η απόκλιση των παραμέτρων που υπολογίστηκαν με βάση την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε από τις θεωρητικές ήταν σχετικά μικρή και μόνο σε μία περίπτωση φόρτισης(μηχανική παραμόρφωση στον άξονα z) υπήρξε σημαντική απόκλιση. Τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά καθώς οι παράμετροι υπολογίζονται γρήγορα με μία απλή πράξη.

Κεφάλαιο 8 Επεκτάσεις

Οι επεκτάσεις αυτής της εργασίας θα μπορούσαν να είναι οι παρακάτω

1. Να βελτιωθούν οι συνοριακές συνθήκες ώστε το ομογενοποιημένο υλικό να έχει παραμέτρους ακόμα πιο κοντά στο θεωρητικό, ιδιαίτερα στην περίπτωση μηχανική φόρτισης στον άξονα z .
2. Να ομογενοποιηθεί ένα σύνθετο πιεζοηλεκτρικό μη γραμμικό υλικό.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1]Αυτόματος διαχωρισμός ακουστικών σημάτων που διαδίδονται στο ανθρώπινο σώμα και λαμβάνονται από πιεζοκρυστάλλους κατά την διάρκεια ύπνου, Βογιατζή Ελένη, Δερματάς Ευάγγελος, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2013.

[2]Theory of Piezoelectric Materials and Their Applications in Civil Engineering, Ledoux Antoine, Civil and Enviromental Engineering, MIT, 2011

[3]Προσομοίωση και Έλεγχος Ευφών Πιεζοηλεκτρικών Κατασκευών με χρήση Σύγχρονων Υπολογιστικών Συστημάτων, ΠΑΠΑΛΑΪΟΣ ΗΛΙΑΣ, ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013.

[4] 15:00, 29/10/2014, <http://piceramic.com/>

[5]16:19, 15/6/2014, Θεωρία Ηλεκτροστατικής Μέρος γ, Μουστάκας Πάνος, <http://pmfysikos.files.wordpress.com/2012/09/00-ceb7cebbceb5cebacf84cf81cebfcf83cf84ceb1cf84ceb9cebaceb7-mepocf83-ceb3.pdf>

[6] R.D. Cook, D.S. Malkus, M.E. Plesha, R.J. Witt, Concepts and Applications of Finite Element Analysis, forth ed., John Wiley and Sons, Inc, United States, 2002.

[7] V. Kouznetsova, Computational Homogenization for the Multi-Scale Analysis of Multi-Phase Materials, PhD Thesis, Technical University Eindhoven, The Netherlands, 2002.

- [8] V. P. Nguyen, M. Stroeve, L. J. Sluys, Multiscale continuous and discontinuous modeling of heterogeneous materials: A review on recent developments, *J Multisc Model* 3 (2011) 1-42.
- [9] F. Feyel, Multiscale FE2 elastoviscoplastic analysis of composite structures, *Comput Mater Sci* 16 (1999) 344-354.
- [10] T.I. Zohdi, P. Wriggers, *An Introduction to Computational Micromechanics*, Springer, The Netherlands, 2008.
- [11] P.M. Suquet, *Local and Global Aspects in the Mathematical Theory of Plasticity*, *Plasticity Today: Modelling, Methods and Applications*, Elsevier, London, 1985.
- [12] Μέθοδος πολλαπλών κλιμάκων στην επίλυση ελαστοπλαστικών προβλημάτων επίπεδης έντασης Μουσίδης Ανάργυρος, Κουμούσης Βλάσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, 2012.
- [13] R. Hill, Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles, *J Mech Phys Solids* 11 (1963) 357-372.
- [14] A NUMERICAL HOMOGENIZATION TECHNIQUE FOR PIEZOELECTRIC COMPOSITES WITH ARBITRARY FIBER DISTRIBUTION, Harald Berger, Ulrich Gabbert, Institute of Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, University of Magdeburg, Reinaldo Rodriguez-Ramos, Julian Bravo-Castillero, Raul Guinovart-Diaz, Faculty of Mathematics, University of Havana.