



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΜΕ
ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΒΟΡΟΣΤΣΟΥΚ ΙΡΙΝΑ

ΧΑΝΙΑ 2016



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΜΕ
ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΒΟΡΟΣΤΣΟΥΚ ΙΡΙΝΑ

Εξεταστική Επιτροπή:

Σταυρουλάκης Γεώργιος

Μαρινάκης Ιωάννης

Αντωνιάδης Αριστομένης

XANIA 2016

Ευχαριστίες

Από τα βάθη της καρδιάς μου θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν όλο αυτό το διάστημα για να ολοκληρώσω τις μεταπτυχιακές μου σπουδές όσο και τη μεταπτυχιακή μου διατριβή.

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στον καθηγητή μου Κο. Σταυρουλάκη Γεώργιο για την διαρκή και ακούραστη στήριξη του. Οι αστείρευτες γνώσεις του με βοήθησαν να ξεπεράσω όλες τις δυσκολίες.

Ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, καθηγητές κ. Αντωνιάδη και κ. Μαρινάκη, για το χρόνο που διέθεσαν, για την ανάγνωση και τη βελτίωση αυτής της διατριβής.

Ολοκληρώνοντας , θέλω να ευχαριστήσω ξεχωριστά την μητέρα μου Ελένη, και τον Μεταξά για την στήριξη και την υπομονή τους.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	5
2. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	6
3. Πιεζοηλεκτρισμός.....	8
4. Comsol Multiphysics	16
5. Μελέτη Μοντέλου 2d με πακτωμένη τη μία πλευρά	18
Επίλυση/Αποτελέσματα.....	22
6. Μελέτη Μοντέλου 2d με ελεύθερη πλάκα	33
7. Μελέτη μοντέλου 3d με πακτωμένη τη μία πλευρά.....	45
8. Μελέτη μοντέλου 3d με ελεύθερη πλάκα.....	54
9. Συμπεράσματα / Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	60
10. Βιβλιογραφία.....	61

1. Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία, θα σχεδιάσουμε και θα μοντελοποιήσουμε μία σύνθετη πλάκα με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και εποξικό γραφίτη T300/976. Στην πλάκα θα γίνουν αναλύσεις ιδιοσυχνοτήτων (τόσο σε 2d όσο και σε 3d) για 2 περιπτώσεις: α) πλάκα με τη μία πλευρά της πακτωμένη και β) ελεύθερη πλάκα. Ο σχεδιασμός του μοντέλου καθώς και η ανάλυση της συμπεριφοράς του πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics.

Στη συνέχεια, και αφού ασκήσουμε εξωτερική ημιτονοειδή δύναμη, θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά της πλάκας σε συνάρτηση με το χρόνο.

Το σχέδιο της πλάκας καθώς και οι ιδιότητες των υλικών επιλέχθηκαν από το paper με τίτλο A finite-element model for piezoelectric composite laminates (1997) των K Y Lam, X Q Peng, G R Liu and J N Reddy.

Τα στάδια της μοντελοποίησης καθώς και όλα τα αποτελέσματα που εξάγαμε παρουσιάζονται αναλυτικά καθώς και τα συμπεράσματα μας από αυτή την μελέτη.

2. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Αφετηρία για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων υπήρξε η δομική ανάλυση των αεροσκαφών στις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Αρχικά ο Hrenikoff παρουσίασε μια λύση στα προβλήματα ελαστικότητας με τη 'μέθοδο των δικτυωμάτων'. Στη συνέχεια, το 1943, ο Courant δημοσίευσε μία εργασία η οποία χρησιμοποιούσε κατά τμήματα τριγωνική παρεμβολή σε τριγωνικές υποπεριοχές για να μοντελοποιήσει προβλήματα στρέψης. Οι Turner όπως και άλλοι, δημιούργησαν μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς αλλά και άλλα στοιχεία και παρουσίασαν τα ευρήματα τους το 1956.

Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία, έκανε την εμφάνιση του το 1960, και πρωτοειπώθηκε από το Clough. Εκείνη την περίοδο οι μηχανικοί χρησιμοποιούσαν τη μέθοδο για να δίνουν προσεγγιστικές λύσεις σε προβλήματα ανάλυσης τάσεων, ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας καθώς και μιας πληθώρας άλλων εφαρμογών.

Το πρώτο βιβλίο για πεπερασμένα στοιχεία των Zienkiewicz και Chung κυκλοφόρησε το 1967. Ήταν η περίοδος (τέλη '60 αρχές '70) όπου η μέθοδος εφαρμόστηκε και σε μη-γραμμικά προβλήματα καθώς και σε άλλες παραμορφώσεις.

Από τότε και στο εξής, ολοένα και περισσότεροι μηχανικοί χρησιμοποιούν τη μέθοδο αυτή για να δώσουν λύσεις σε σύγχρονα αλλά και κλασσικά προβλήματα καλύπτοντας ένα εκτενέστατο φάσμα επιστημών.

Αν και η αρχική σύλληψη της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είχε στόχο την μητρωική ανάλυση, η θεωρητική της βάση διευρύνθηκε σημαντικά. Αυτό συνέβη γιατί σχετικά γρήγορα έγινε αντιληπτή η δυνατότητα εφαρμογής της στην ανάλυση συνεχών μέσων (κελύφη, ελασματα κτλ.). Πιο συγκεκριμένα, κύριο χαρακτηριστικό της ΜΠΣ είναι η χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων στην προσομοίωση συνεχών μέσων.

Βασικές έννοιες της μεθόδου

Η ΜΠΣ αποτελεί σήμερα ένα πανίσχυρο εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός σημαντικού φάσματος προβλημάτων του μηχανικού καθώς στον πυρήνα της βρίσκεται η δυνατότητα προσομοίωσης μιας πραγματικής, συνεχούς κατασκευής, χωρίς φυσικούς διαχωρισμούς, με τεχνητά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή *πεπερασμένα στοιχεία*, είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά με τους κόμβους να καταλαμβάνουν τις θέσεις των άκρων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται, επομένως, ένας πεπερασμένος αριθμός διακριτών μεταβλητών επι των οποίων είναι εφικτό να εφαρμοσθούν μητρωικές μέθοδοι. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και, σε ορισμένες περιπτώσεις, και οι παράγωγοί τους.

Στην τελευταία αυτή περίπτωση κάνουμε λόγο για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Έτσι, οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους, άρα και το πρόβλημα μετασχηματίζεται από συνεχές σε διακριτό εκφραζόμενο ως ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με μητρωικές μεθόδους. Ωστόσο, μια διακριτή προσομοίωση δεν μπορεί να αποδώσει πάντοτε και με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου, ανεξάρτητα από τον αριθμό των διακριτών μεταβλητών που εκάστοτε χρησιμοποιούνται. Υπάρχει, δηλαδή, πάντοτε το περιθώριο

σφάλματος. Με την ορθή όμως επιλογή των ιδιοτήτων των στοιχείων και την κατάλληλη διακριτοποίηση το αριθμητικό σφάλμα μπορεί να περιορισθεί και να χαρακτηριστεί ως αμελητέο και τοπικό.

Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος για διατύπωσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για γραμμικά στατικά προβλήματα βασίζεται στη μέθοδο των μετατοπίσεων. Άλλοι τρόποι κάνουν χρήση της ισορροπίας δυνάμεων ή άλλων υβριδικών ή και μεικτών μεθόδων. Σε κάθε περίπτωση, όμως, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων, η επίλυση των οποίων δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς.

Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι:

1. Η προσομοίωση (διακριτοποίηση) της κατασκευής με ένα σύνολο στοιχείων που συνδέονται με συντοριακούς κόμβους.
2. Ο προσδιορισμός των γενικευμένων (αγνώστων) μετατοπίσεων που θα καθορίσουν πλήρως την απόκριση της κατασκευής.
3. Η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας που αντιστοιχούν στις άγνωστες κομβικές μετατοπίσεις και η επίλυσή τους.
4. Ο υπολογισμός των εσωτερικών κατανομών των τάσεων των στοιχείων για δεδομένες μετατοπίσεις στους κόμβους.
5. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης (μετατοπίσεις και τάσεις) με βάση τις δεδομένες παραδοχές του προβλήματος.

Οι αυξημένες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος αποτελούσαν για χρόνια το μεγάλο μειονέκτημα της εν λόγω μεθόδου ιδίως όταν εφαρμοζόταν σε σύνθετα μοντέλα. Το μειονέκτημα όμως αυτό αμβλύνθηκε χάρη στη ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστικών μηχανών και των συστημάτων CAD (Computer Aided Design). Σήμερα, εναλλακτικά μοντέλα μπορούν να ελεγχθούν σε ψηφιακό περιβάλλον πολύ πριν την κατασκευή του πρωτοτύπου εκμηδενίζοντας ουσιαστικά το περιθώριο αυτού που παραπάνω κατονομάστηκε ως σφάλμα.

3. Πιεζοηλεκτρισμός

Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού

Το 1880 , οι Jacques και Pierre Curie ανακάλυψαν ένα ασυνήθιστο χαρακτηριστικό σε κρυσταλλικά ορυκτά : όταν υπόκεινται σε μηχανική δύναμη , οι κρύσταλλοι αποκτούν ηλεκτρική πολικότητα. Η τάση και η συμπίεση παράγουν τάση αντίθετης πολικότητας, ανάλογη με την ασκούμενη δύναμη. Ακολούθως , επιβεβαιώθηκε το συμπέρασμα αυτής της σχέσης : όταν ένας από τους παραπάνω ενεργειακούς κρυστάλλους παραγωγής τάσης (Volt) εκτίθεται σε ηλεκτρικό πεδίο έχει τη τάση να επιμηκυνθεί ή να συρρικνωθεί σύμφωνα με τη πολικότητα του πεδίου. Επίσης η δύναμη του πεδίου στο οποίο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο επηρεάζει αναλογικά. Αυτές οι παρατηρήσεις της συμπεριφοράς των κρυσταλλικών δομών υπό πίεση , επισήμαναν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και το αντίστροφο φαινόμενο , αντίστοιχα , από την ελληνική λέξη «πιέζω» piezein .

Αν και η σημασία του μεγέθους της πιεζοηλεκτρικής τάσης , της κίνησης ή ακόμα και των δυνάμεων είναι μικρής κλίμακας συχνά χιάζεται ενίσχυση . Ωστόσο σταδιακά τα πιεζοηλεκτρικά υλικά σταδιακά προσαρμόζονται με εντυπωσιακά αποτελέσματα σε ευρείας κλίμακας εφαρμογές . Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εντοπισμού κίνησης , όπως αισθητήρες δύναμης ή μετατόπισης. Στις αρχές του 20ου αιώνα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά που βασίζονται σε μεταλλικά οξείδια και άλλα υλικά επέτρεψαν στους σχεδιαστές να χρησιμοποιήσουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε καινούργιες , πρωτοπόρες για την εποχή, εφαρμογές. Η σύσταση , το σχήμα ,και οι διαστάσεις ενός πιεζοκεραμικού στοιχείου μπορεί να τροποποιηθεί έτσι ώστε να φτάσει στις απαιτούμενες προδιαγραφές για το συγκεκριμένο σκοπό χρήσης. Το θετικό αυτών των υλικών είναι ότι παρουσιάζουν μια ανθεκτικότητα , είναι χημικά αδρανή και σχετικά φθηνά στην κατασκευή.

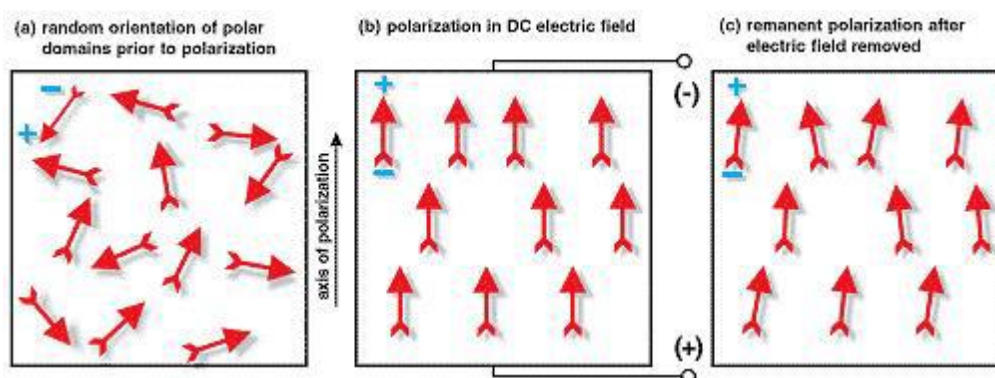
Τα κεραμικά που κατασκευάζονται από τιτανιούχο ζirkονιούχο μόλυβδο παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ευαισθησία και υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας , συγκριτικά με κεραμικά άλλης σύστασης και για αυτό το λόγο είναι αυτή τη στιγμή τα πιο διαδεδομένα σε χρήση πιεζοηλεκτρικά υλικά.

Τρόπος κατασκευής

Το παραδοσιακό πιεζοηλεκτρικό κεραμικό είναι μια μάζα από κεραμικούς κρυστάλλους περοβσκίτη (CaTiO_3) , οι οποίες αποτελούνται από τετρασθενής μεταλλικά ιόντα , συνήθως τιτάνιο ή ζirkόνιο, σε ένα μεγαλύτερο δικτύωμα δισθενούς ιόντων όπως Βάριο (Ba) και O^{2-} ιόντα. Η διάταξη τους στο χώρο παρουσιάζει κυβική συμμετρία στη κρυσταλλική τους μορφή και ο κάθε κρύσταλλος κάτω από ειδικές συνθήκες λειτουργεί ως δίπολο.

Για να προετοιμαστεί ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό , αναμιγνύονται εκλεκτές PZT σκόνες από τα δομικά στοιχεία των μεταλλικών οξειδίων σε προκαθορισμένες αναλογίες. Στη συνέχεια θερμαίνεται για να σχηματιστεί μια ομοιόμορφη σκόνη. Η σκόνη που παράγεται αναμειγνύεται με μια οργανική ένωση και σχηματίζει δομικά στοιχεία με κατάλληλο σχήμα για χρήση (δίσκοι, ράβδοι, πλακέτες).Αυτά τα στοιχεία ακολουθούν

ένα πρόγραμμα επεξεργασίας στο οποίο θερμαίνονται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία με αποτέλεσμα τα μικρά κομμάτια της πιέζο-σκόνης να λιώσουν και το υλικό να πάρει τη πυκνή κρυσταλλική του μορφή. Τέλος τα στοιχεία υφίστανται την τελική τους επεξεργασία και τοποθετούνται σε επιφάνειες κατάλληλα επιλεγμένες. Το σημείο Curie, είναι το κρίσιμο σημείο του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου. Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες του σημείου αυτού, η κρυσταλλική δομή αποκτά τετραγωνική συμμετρία και λειτουργεί σαν δίπολο παρουσιάζοντας ηλεκτρική διπολική ροπή. Γειτονικά δίπολα με τοπική ευθυγράμμιση ονομάζονται τομείς. Αυτή η ευθυγράμμιση δίνει μια δικτυακή διπολική ροπή στο τομέα και αυτό σα συνέπεια μια δικτυακή πολικότητα. Η κατεύθυνση της πολικότητας σε γειτονικούς τομείς είναι τυχαία ωστόσο το κεραμικό στοιχείο δεν έχει συνολική πολικότητα.



ΕΙΚΟΝΑ 1 ΠΟΛΩΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Η ευθυγράμμιση των τομέων σε ένα πιέζο-κεραμικό στοιχείο γίνεται όταν εκτίθεται το στοιχείο σε ένα ισχυρό πεδίο συνεχούς ρεύματος, σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από το σημείο Curie. Με αυτή τη πόλωση τα δίπολα του στοιχείου ευθυγραμμίζονται προς μια κατεύθυνση στο πεδίο. Όταν αφαιρεθεί αυτό το αρχικό ηλεκτρικό πεδίο τα περισσότερα δίπολα διατηρούν τη διάταξη τους. Το στοιχείο πλέον παρουσιάζει μια μόνιμη πολικότητα και μια μόνιμη επιμήκυνση.

Όπως προαναφέρθηκε τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά δε παρουσιάζουν συμμετρία πάνω από τη θερμοκρασία Curie αντίθετα μια συμμετρική δομή πάνω από αυτή τη κρίσιμη θερμοκρασία. Με τα δίπολα τυχαία τοποθετημένα και προσανατολισμένα το στοιχείο δε παρουσιάζει κανένα πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Αντίθετα με την εφαρμογή συνεχόμενης τάσης παρουσιάζεται ευθυγράμμιση των δίπολων άρα πόλωση. Αυτό έχει ως συνέπεια το υλικό να παρουσιάζει πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες ακόμα και μετά την απομάκρυνση της αρχικής τάσης. Μετά τη πόλωση το υλικό διατηρεί μια πολικότητα και πίεση όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα.

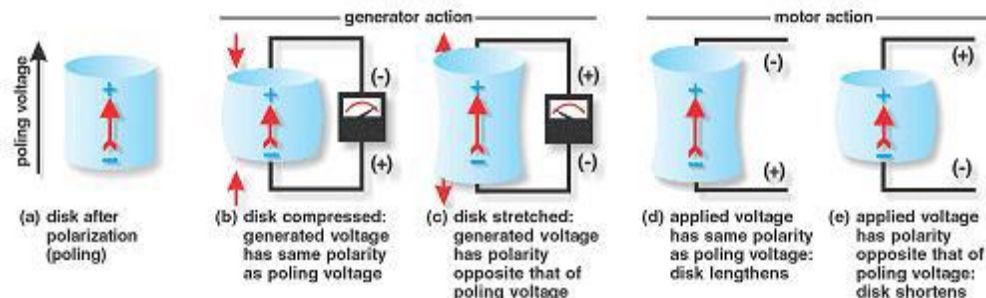
Καθώς στο «πολωμένο» κεραμικό ασκείται πίεση, το κρυσταλλικό δικτύωμα παραμορφώνεται με αποτέλεσμα μερικοί τομείς να μεγαλώνουν σε βάρος άλλων. Αυτή η μεταβολή επηρεάζει τη συνολική διπολική ροπή του υλικού. Σε ένα συγκεκριμένο εύρος πίεσης, αυτή η αλλαγή της διπολικής ροπής αυξάνει τη ιδιότητα του πιεζοηλεκτρικού υλικού με συνέπεια τη πρακτική του χρήση καθώς η αντίδραση του υλικού είναι σχεδόν γραμμική.

Ιδιότητες

Μια μηχανική συμπίεση σε πολωμένο πιεζοηλεκτρικό υλικό αλλάζει τη διπολική ροπή, εμφανίζοντας ηλεκτρική τάση στο σύστημα. Συμπίεση με φορά ίδια με τη πολικότητα ή τέντωμα αντίθετο της κατεύθυνσης πολικότητας, παράγει τάση ίδιας πολικότητας με την αρχική τάση που είχε εφαρμοστεί για τη πόλωση του κεραμικού.

Αυτή η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική τάση είναι οι βασικές δράσης του φαινομένου του πιεζοηλεκτρισμού. Αυτή τη συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών υλικών αρχίζει να χρησιμοποιείται σε ευρύ φάσμα εφαρμογών στη βιομηχανία (συσκευές ανάφλεξης καυσίμων, solid state batteries, μηχανισμοί αισθητήρων δύναμης).

Οι τιμές της ηλεκτρικής τάσης που προκύπτουν από τη συμπιεστική δύναμη, που εφαρμόζεται στο πιεζοηλεκτρικό υλικό, είναι ανάλογες των προδιαγραφών του. Το ίδιο ισχύει και στη περίπτωση που εφαρμόζουμε τάση και παράγεται πίεση στο υλικό. Σε αντίθετη εφαρμογή μπορεί να παραχθεί μηχανική ενέργεια από ηλεκτρική τάση. Σε τάση ίδιας πολικότητας με τη πολικότητα της τάσης πόλωσης του κεραμικού υλικού, το στοιχείο θα επιμηκυνθεί και η διάμετρος του θα γίνει μικρότερη. Με αντίθετη πολικότητα το στοιχείο θα γίνει μικρότερο και πιο φαρδύ. Αν συνδυαστούν αυτές οι δυο μεταβολές στο μέγεθος του υλικού με βάση τη πολικότητα της τάσης που του εφαρμόζεται, το αποτέλεσμα είναι μηχανική ενέργεια που μπορεί να εφαρμοστεί σε κατασκευές με βάση πιεζοηλεκτρικά υλικά.



ΕΙΚΟΝΑ 2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΑΣΚΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Εφαρμογές Πιεζοηλεκτρισμού

Η πιεζο-τεχνολογία χρησιμοποιείται όλο και συχνότερα στις εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας όπως σε ιατρικό και επιστημονικό εξοπλισμό, συστήματα για μετρήσεις αποστάσεων και τέλος στη συγκομιδή ενέργειας ή Energy Harvesting. Οι παραπάνω εφαρμογές επηρεάζουν σταδιακά τη καθημερινότητα του σύγχρονου ανθρώπου ακόμα και αν αυτό δεν είναι άμεσα αντιληπτό. Ωστόσο οι δυνατότητες του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου δεν έχουν φτάσει σε τελικό στάδιο.

Για την αποδοτικότερη λειτουργία και την πιο αξιόπιστη εφαρμογή τους πραγματοποιούνται όλο και περισσότερες επιστημονικές μελέτες. Ένα παράδειγμα καθημερινής εφαρμογής του πιεζοηλεκτρισμού είναι ο ηλεκτρικός αναπτήρας και πιο

συγκεκριμένα ο κρύσταλλος που προκαλεί υψηλή τάση , κατόπιν πίεσης, με αποτέλεσμα να προκαλεί ανάφλεξη του αερίου.

Παρακάτω θα ακολουθήσει αναλυτικότερη περιγραφή σημαντικών τεχνολογικών εφαρμογών, που εκμεταλλεύονται την πιεζο-τεχνολογία.

Τεχνολογίες υγείας

Στις τεχνολογίες υγείας και στους τομείς της βίο-πληροφορικής γίνεται όλο και πιο αναγκαία η χρήση βασικών λειτουργικών στοιχείων , τα οποία πρέπει να είναι γρήγορα, αξιόπιστα και με ελεγχόμενη ενεργειακή κατανάλωση. Σημαντικός παράγοντας σε αυτή την εξίσωση είναι και η κλίμακα των στοιχείων καθώς συνεχώς μικραίνει. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά και οι εφαρμογές τους ταιριάζουν απόλυτα στις σύγχρονες απαιτήσεις της υγείας.

Το μικρό μέγεθος των συσκευών επιτρέπουν την εμφύτευση τους στον ασθενή βελτιώνοντας τη ποιότητα ζωής τους καθώς τους διευκολύνει στη κίνηση. Το πεδίο εφαρμογών αυτών των ιατρικών εμφυτευμάτων ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες , για παράδειγμα από ακουστικά συστήματα σε βαλβίδες μέτρησης φαρμάκων.

Πιεζοηλεκτρικοί υπερηχητικοί μετατροπείς για ανίχνευση φυσαλίδων αέρα

Απλοί πιεζοηλεκτρικοί δίσκοι χρησιμοποιούνται ως υπερηχητικές συσκευές ανίχνευσης σε ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως για παράδειγμα στην ανίχνευση φυσαλίδων σε συστήματα ροής υγρών σε ιατρικά σωληνάκια.

Η μέθοδος ανίχνευσης φυσαλίδας βασίζεται στη μέτρηση χρόνου διάδοσης με υπερηχητική τεχνολογία. Εναλλασσόμενα σήματα διάδοσης και αποδοχής υπερηχητικών παλμών εκπέμπονται , προς τη κατεύθυνση ροής και την αντίθετη της . Ο αισθητήρας πραγματοποιεί μια αναγνώριση φυσαλίδων αέρα στο υγρό , επιτρέποντας τη συνέχιση της διαδικασίας. Η συσκευή πομπού –δέκτη αποτελείται από πιεζοηλεκτρικούς υπερηχητικούς μετατροπείς.

Αυτοί οι ελεγκτές φυσαλίδων αέρα (Air Bubble Detectors) διασφαλίζουν την σωστή ροή αίματος σε μηχανήματα υποστήριξης καρδιάς και πνευμόνων. Επίσης με σωστή προστασία η πιεζο-τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μαγνητικούς τομογράφους.

Επιστημονικός Εξοπλισμός

Τα εξαρτήματα που αποτελούνται από πιεζο-κεραμικά στοιχεία έχουν πλέον εδραιωθεί στις μοντέρνες επιστήμες ως οδηγοί και μετατροπείς. Η αξιόπιστη λειτουργία τους σε ακραίες συνθήκες όπως μαγνητικά πεδία , μεταβλητές θερμοκρασίες και πιέσεις, είναι ο λόγος που έχουν ευρεία εφαρμογή σε παγκόσμιο επίπεδο. Υψηλής ακρίβειας μετρήσεις βρίσκουν εφαρμογή από απλές εργαστηριακές εφαρμογές μέχρι τη βιομηχανία και τις εφαρμογές εξαρτημάτων για διαστημικό εξοπλισμό.

Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες στο διάστημα

Στην αποστολή της NASA στον Άρη το όχημα περιπλάνησης «Curiosity» έγινε χρήση πιεζοηλεκτρικών μηχανισμών. Συγκεκριμένα , στην ανάλυση δειγμάτων από ορυκτά

της επιφάνειας του πλανήτη. Για να πραγματοποιηθεί δειγματοληψία των πετρωμάτων πρέπει αρχικά να γίνει μια ανάλυση και ταξινόμηση τους. Με κατάλληλες συχνότητες γίνεται ο καθορισμός της πυκνότητας και του ομογενούς μεγέθους τους. Αυτή η επιλογή γίνεται με τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες.

Μέτρηση Αποστάσεων

Αισθητήρες υπερηχητικών σημάτων παράγουν υψηλής συχνότητας ηχητικούς παλμούς που δε μπορούν να γίνουν αντιληπτοί από το ηχητικό κατώφλι του ανθρώπου. Το χρονικό διάστημα που ο παλμός κάνει να επιστρέψει, υπολογίζεται ηλεκτρονικά και αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές της μετρολογίας.

Αισθητήρες ελέγχου θέσης παρκαρίσματος

Το κεντρικό κομμάτι του αισθητήρα είναι ένας δίσκος φτιαγμένος από πιεζοηλεκτρικό υλικό συνδεδεμένο με μια σεισμική μάζα. Όταν το σύστημα επιταχύνει, με αποτέλεσμα η μάζα να παράγει μηχανική ενέργεια. Με την ιδιότητα του πιεζοηλεκτρισμού παράγεται μια μετρήσιμη τάση. Οι αισθητήρες παράγουν διαφορετικές συχνότητες ανάλογα με την επιτάχυνση και παρουσιάζεται γραμμική απόκριση κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Αυτοί οι αισθητήρες τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία στα αυτοκίνητα, όπου στέλνουν και λαμβάνουν δεδομένα σε μορφή σημάτων σχετικά με τη θέση τους. Αυτά τα δεδομένα κατόπιν υπολογίζουν τις αποστάσεις και ενημερώνουν τον οδηγό.

Συγκομιδή Ενέργειας «Energy Harvesting»

Η συγκομιδή ενέργειας ή Energy Harvesting αναφέρεται στη παραγωγή ενέργειας από εξωτερικές διαθέσιμες πηγές (π.χ. δονήσεις, θερμοκρασίες περιβάλλοντος, ροή αέρα). Αυτές οι πηγές παρουσιάζονται ως φυσικές ενέργειες όπως αιολική, ηλιακή, κυματική. Η λογική περισυλλογής αυτής της ενέργειας είναι η εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας και η μετατροπή της σε ηλεκτρική.

Η μετατροπή της διαθέσιμης ενέργειας επιτρέπει την ανάπτυξη αυτοτροφοδοτούμενων ενεργειακών μονάδων που διαχειρίζονται από μικρά ενεργειακά φορτία μέχρι μοντέλα μεγαλύτερων ενεργειακά αναγκών.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια ολοένα και αυξανόμενη τάση προς τον τομέα της συγκομιδής ενέργειας. Με τη ραγδαία ανάπτυξη των ασυρμάτων και των μικρο-ήλεκτρο-μηχανικών συστημάτων, το Energy Scavenging παρουσιάζεται ως η εναλλακτική λύση της συμβατικής μπαταρίας. Σε περιοχές όπου η αντικατάσταση / επαναφόρτιση μιας μπαταρίας είναι δύσκολη, το αυτοτροφοδοτούμενο σύστημα είναι απαραίτητο.

Energy harvesting με χρήση πιεζο-κεραμικών υλικών

Σε αυτό το τομέα παρουσιάζονται εφαρμογές όπου γίνεται συγκομιδή ενέργειας από δονήσεις με χρήση πιεζο-κεραμικών. Η πιεζο-τεχνολογία βασίζεται σε μηχανικές δονήσεις που παράγονται από καθημερινά φαινόμενα μηχανικής ταλάντωσης. Ως πηγή

δονήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι μηχανισμών όπως πρόβολοι , κύμβαλα και άλλοι πιο σύνθετοι όπως το ανθρώπινο σώμα .Αυτές οι πηγές μπορούν να παράγουν από mW μέχρι και MW ενέργειας.

Ο Priya παρουσίασε μια αναλυτική αναφορά στην οποία χρησιμοποίησε χαμηλής συχνότητας μετατροπείς για παραγωγή και συγκομιδή ενέργειας με βάση τον πιεζοηλεκτρισμό. Σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς του , η πυκνότητα των πιεζοηλεκτρικών ενεργειακών συλλεκτών είναι 3-5 φορές υψηλότερη από τις αντίστοιχα ηλεκτροστατικές και ηλεκτρομαγνητικές συσκευές.

Μια χαρακτηριστική εφαρμογή συγκομιδής ενέργειας είναι η πρόταση που έκανε ο Paradiso , όπου πρότεινε το πιεζοηλεκτρικό παπούτσι. Η ιδέα βασίστηκε στην εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας, εφαρμόζοντας στη σόλα του παπουτσιού πιεζοηλεκτρικό υλικό. Αυτή η «παρασιτική» συγκομιδή ενέργειας αργότερα τροποποιήθηκε με σκοπό την παραγωγή βέλτιστων αποτελεσμάτων με σκοπό την κάλυψη μικρών ενεργειακών αναγκών.

Μια έξυπνη ιδέα εκμετάλλευσης της δόνησης από ανθρώπινη πηγή μηχανικής τάσης είναι το καθημερινό βάδισμα και η κίνηση των αυτοκινήτων. Πιεζοηλεκτρικές πλάκες τοποθετούνται κάτω από το οδόστρωμα και αφού τους ασκηθεί πίεση από τα διερχόμενα αυτοκίνητα , παράγουν ηλεκτρισμό περίπου 200kW σε μήκος ενός χιλιομέτρου δρόμου. Παρόμοια εφαρμογή στη Τουλούζ της Γαλλίας, στην οποία , πιεζοηλεκτρικές πλάκες τοποθετήθηκαν σε πεζοδρόμιο. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες για το φωτισμό τους συγκεκριμένου δρόμου.

Μεγάλες εταιρίες στο χώρο του Energy Harvesting (Innowat Tech, Ισραήλ) επενδύουν σε καινοτόμες ιδέες χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικά στοιχεία σε αυτοκινητόδρομους, αεροδρόμια και σιδηροδρομικές γραμμές.

Υλικά που εμφανίζουν πιεζοηλεκτρισμό

Από τις 32 κρυσταλλικές τάξεις, 20 είναι μη-κεντροσυμμετρικές. Σε αυτές τις 20 ανήκουν όλοι οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι. Όμως για να είναι ένας κρύσταλλος πιεζοηλεκτρικός θα πρέπει να τηρούνται και άλλες βασικές συνθήκες. Έτσι λοιπόν περιορίζεται ο αριθμός κρυστάλλων που δίδουν πιεζοηλεκτρισμό.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι κρυσταλλικές ομάδες που υποστηρίζουν το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού. Στην πράξη το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε πολύ λίγα υλικά. Μονοκρύσταλλοι από $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, H_2PO_4 , α-χαλαζία, άλας του Rochelle και σε μερικές περιπτώσεις πολυκρυσταλλικά κεραμικά.

Σύστημα	Κρυσταλλογραφικές ομάδες που δίνουν πιεζοηλεκτρισμό	Κρυσταλλογραφικές ομάδες που δε δίνουν πιεζοηλεκτρισμό
Τρικλινές	1	$\bar{1}$
Μονοκλινές	2, m	2/m
Ορθορομβικό	222, mm2	Mmm
Τετραγωνικό	4, 4, 422, 4mm, 42m	4/m, 4/mmm
Τριγωνικό	3, 32, 3m	$\bar{3}$, 3m
Εξαγωνικό	6, 6, 622, 6mm, 6m2	6/m, 6/mmm
Κυβικό	23, 43m	M $\bar{3}$, 432, m 3m

ΕΙΚΟΝΑ 3 - ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΕΣ ΟΜΑΔΕΣ ΠΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ

Υπάρχουν δυο κατηγορίες πιεζοηλεκτρικών που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο δόνησης, τα κεραμικά και τα πολυμερή. Από τα πιο γνωστά πιεζοκεραμικά είναι ο μόλυβδος ζirkονίου τιτανίου (PZT), το οποίο έχει ανακτιήσιμη τάση 0.1% και χρησιμοποιείται ευρέως ως ενεργοποιητής και αισθητήρας για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των υπερηχητικών εφαρμογών και έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια. Τα πιεζοπολυμερή χρησιμοποιούνται πιο πολύ ως αισθητήρες και το πιο γνωστό είναι το PVDF.

Ο πιο γνωστός φυσικός κρύσταλλος που εμφανίζει το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ο κρύσταλλος χαλαζία ο οποίος έχει την μορφή εξαγωνικού πρίσματος. Στην ουσία το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεταφορά μεταξύ ηλεκτρικής και μηχανικής ενέργειας, η οποία μπορεί να προκληθεί όταν τα υλικά είναι ηλεκτρικά φορτισμένα και μπορούν πολωθούν. Στα πιεζοηλεκτρικά υλικά τα οποία παρουσιάζουν ανισότροπη συμπεριφορά, η κρυσταλλική τους δομή δεν έχει κέντρο συμμετρίας. Τα περισσότερα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι στερεά κρυστάλλων, αυτά μπορεί να είναι είτε μονοί κρύσταλλοι σχηματισμένοι φυσικά ή με συνθετικές διαδικασίες, είτε πολυκρυσταλλικά υλικά όπως π.χ. τα φεροηλεκτρικά κεραμικά, στα οποία τους δίνεται μια συμμετρία μονού κρυστάλλου με την διαδικασίας της πόλωσης δηλαδή με την εφαρμογή ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου κοντά σε θερμοκρασία Curie. Τα πολυμερή μπορούν να λειτουργήσουν ως πιεζοηλεκτρικά κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου.

Μαθηματική περιγραφή φαινομένου του πιεζοηλεκτρισμού

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών υλικών αποτελεί το γεγονός ότι οι φυσικές τους ιδιότητες (θερμική, ηλεκτρική αγωγιμότητα, ελαστικότητα, ηλεκτρική πόλωση) εξαρτώνται από την διεύθυνση στην οποία μετρούνται.

Αυτές οι ιδιότητες ονομάζονται ανισοτροπικές. Προκειμένου να προσδιορίσουμε την τιμή αυτών των ιδιοτήτων, χρησιμοποιούμε μαθηματικές ποσότητες που ονομάζονται ταυιστές. Αν δηλώσουμε τους άξονες q, y, z ως 1, 2, 3 αντίστοιχα, τότε οι σχέσεις μεταξύ πόλωσης και έντασης εφαρμοζόμενου P ηλεκτρικού πεδίου E είναι οι παρακάτω:

$$P_1 = \varepsilon_0 \chi_{11} E_1 + \varepsilon_0 \chi_{12} E_2 + \varepsilon_0 \chi_{13} E_3$$

$$P_2 = \varepsilon_0 \chi_{21} E_1 + \varepsilon_0 \chi_{22} E_2 + \varepsilon_0 \chi_{23} E_3$$

$$P_3 = \varepsilon_0 \chi_{31} E_1 + \varepsilon_0 \chi_{32} E_2 + \varepsilon_0 \chi_{33} E_3$$

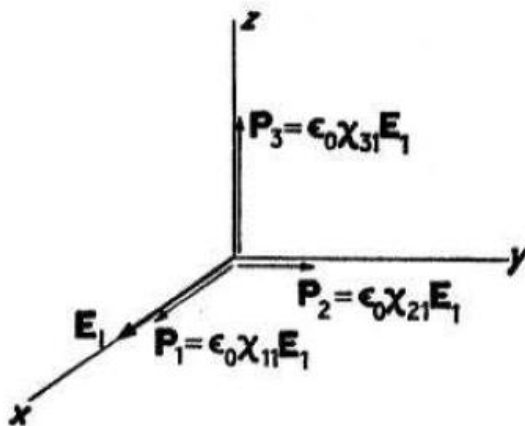
Έτσι ένα πεδίο E_1 θα γεννήσει τρεις συνιστώσες πόλωσης P_1, P_2, P_3 που δίδονται από τις σχέσεις:

$$P_1 = \varepsilon_0 \chi_{11} E_1$$

$$P_2 = \varepsilon_0 \chi_{21} E_1$$

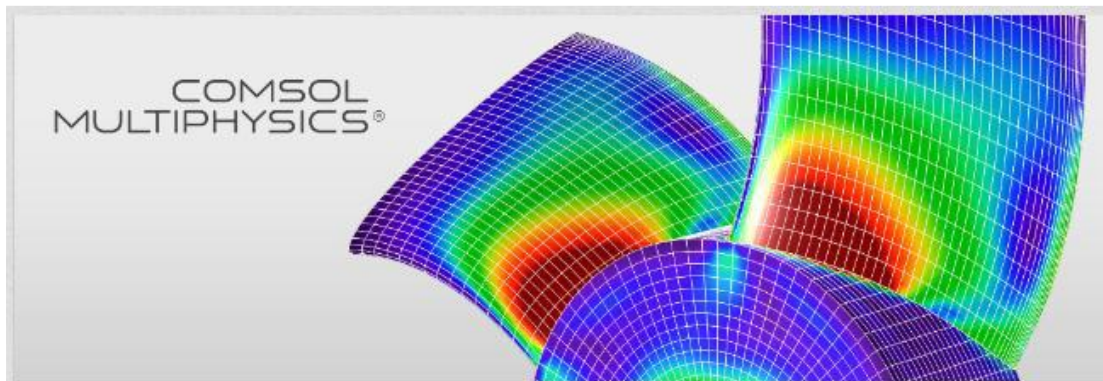
$$P_3 = \varepsilon_0 \chi_{31} E_1$$

Όπου, ε_0 είναι η διαπερατότητα του κενού, χ_{ij} η ηλεκτρική επιδεκτικότητα και ως πίνακοστοιχείο δίδει τη συνισταμένη της πόλωσης κατά μήκος της διεύθυνσης i ως αποτέλεσμα εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου κατά τη διεύθυνση j . Πρέπει να σημειωθεί ότι σε ένα κρύσταλλο όταν εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο \vec{E} στον άξονα 1 θα δημιουργήσει πόλωση κατά μήκος και των τριών αξόνων 1, 2, 3. Έτσι η πόλωση δεν είναι παράλληλη προς το εφαρμοζόμενο πεδίο. Αυτό φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί



ΕΙΚΟΝΑ 4 ΠΟΛΩΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ 3 ΑΞΟΝΩΝ

4. Comsol Multiphysics



Μπορούμε να περιγράψουμε τι συμβαίνει στον κόσμο χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από φυσικούς νόμους. Από τη δεκαετία του 1940, είμαστε σε θέση να χρησιμοποιούμε ηλεκτρονικούς υπολογιστές για να καταλάβουμε τα φυσικά φαινόμενα, παρόλα αυτά οι υπολογιστικές τους δυνατότητες παλιότερα δεν μπορούσαν να ενσωματώσουν το τι ακριβώς συμβαίνει στην πολύπλοκη πραγματικότητα. Το 1986, δύο μεταπτυχιακοί φοιτητές του Royal Institute of Technology (KTH), στη Στοκχόλμη της Σουηδίας, οι Svante Littmarck και Farhad Saeidi, με τη βοήθεια ενός κώδικα που μελετούσαν για ένα μεταπτυχιακό μάθημά τους δημιούργησαν το λογισμικό του Comsol. Το πρόγραμμα **COMSOL Multiphysics** είναι ένα ισχυρό διαδραστικό λογισμικό για την μοντελοποίηση και την επίλυση όλων των ειδών των επιστημονικών και μηχανικών προβλημάτων. Το λογισμικό παρέχει ένα ισχυρό ολοκληρωμένο περιβάλλον εργασίας με ένα μοντέλο Builder (model builder) όπου μπορούμε να έχουμε πλήρη εικόνα του μοντέλου που δημιουργούμε και έχουμε πρόσβαση σε όλες τις λειτουργίες του.

Με τον όρο **multiphysics** εννοούμε τη μελέτη πολλών φυσικών φαινομένων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και τη σύζευξη αυτών σε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης. Ο πραγματικός κόσμος είναι πολυφαινόμενος (multiphysics), για παράδειγμα το κινητό τηλέφωνο, η κεραία λαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά κύματα, η οθόνη αφής ή τα κουμπιά είναι μηχανικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, η μπαταρία έχει να κάνει με χημικές αντιδράσεις, την κίνηση των ιόντων και του ηλεκτρικού ρεύματος και ούτω καθεξής. Πρόκειται για μία μόνο συσκευή που ενσωματώνει πολλά φυσικά φαινόμενα. Με ένα κατάλληλο εργαλείο προσομοίωσης, όπως το Comsol multiphysics είμαστε σε θέση να καταγράψουμε σωστά τις σημαντικές πτυχές της μελέτης μας. Με αυτή τη διενέργεια δεν απαιτείται η εις βάθος γνώση των μαθηματικών ή της αριθμητικής ανάλυσης.

Κατά την επίλυση των μοντέλων, το COMSOL Multiphysics χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Το λογισμικό τρέχει την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων με τη δυνατότητα προσαρμογής του πλέγματος από το χρήστη και με τον ταυτόχρονο έλεγχο λαθών χρησιμοποιώντας μια ποικιλία από αριθμητικά προβλήματα.

Το COMSOL Multiphysics παράγει μία σειρά βημάτων για να μπορέσει να καταγράψει όλα τα βήματα που δημιουργούν τη γεωμετρία, την πλεγματοποίηση, τη μελέτη περίπτωσης και τις παράμετρους επίλυσης με τελικό αποτέλεσμα την απεικόνιση στην οθόνη του υπολογιστή μας του τελικού μοντέλου που θα προκύψει και των σχετικών

διαγραμμάτων. Έχοντας δημιουργήσει αυτά τα βήματα μπορούμε εύκολα να παραμετροποιήσουμε και να μεταβάλλουμε οποιοδήποτε τμήμα του μοντέλου μας απλά αλλάζοντας ένα κόμβο στο δέντρο μοντέλου και ξαντρέχοντας τα δεδομένα. Το πρόγραμμα θυμάται και εφαρμόζει ξανά όλες τις άλλες πληροφορίες και τα δεδομένα του μοντέλου.

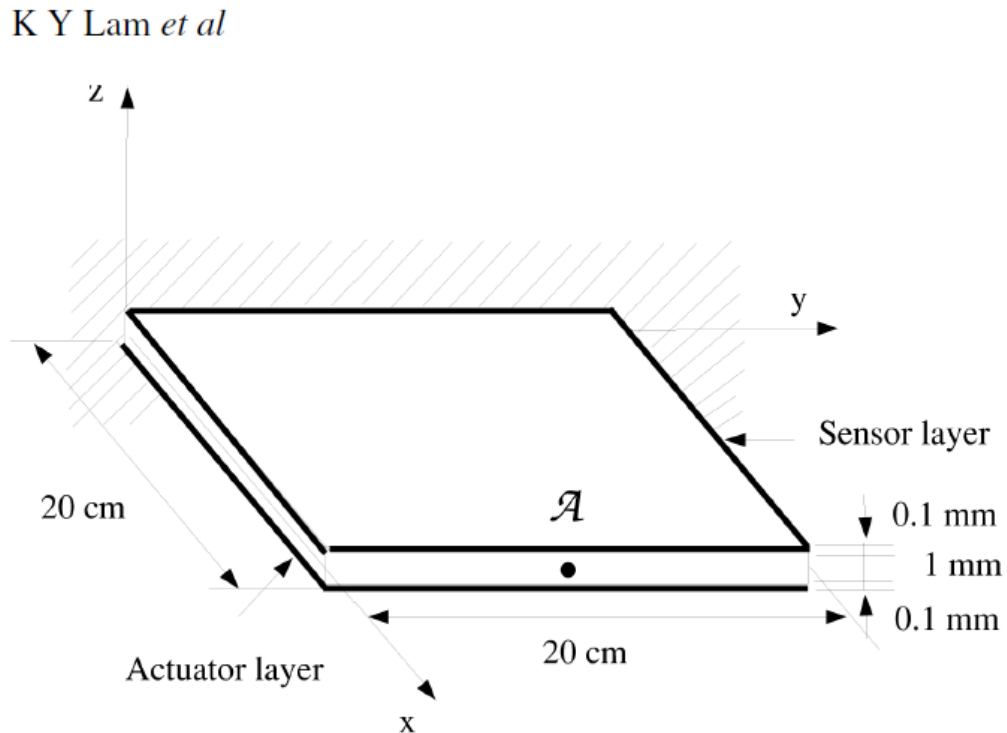
Οι Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις (ΜΔΕ) αποτελούν τη βάση για τους νόμους της επιστήμης και παρέχουν τη βάση για τη μοντελοποίηση σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών και μηχανικών φαινομένων. Αυτές χρησιμοποιεί και το COMSOL σε διάφορες περιοχές εφαρμογών όπως:

- **Ακουστική (Acoustics)**
- **Βιοεπιστήμη (Bioscience)**
- **Χημικές Αντιδράσεις (Chemical reactions)**
- **Οξείδωση και Προστασία Οξείδωσης (Corrosion and corrosion protection)**
- **Διάχυση (Diffusion)**
- **Ηλεκτροχημικά Φαινόμενα (Electrochemistry)**
- **Ηλεκτρομαγνητικά Φαινόμενα (Electromagnetics)**
- **Ανάλυση Κόπωσης (Fatigue analysis)**
- **Ρευστοδυναμική (Fluid dynamics)**
- **Κυψέλες Καυσίμου και Ηλεκτροχημικά Φαινόμενα (Fuel cells and electrochemistry)**
- **Γεωφυσική και Γεωμηχανική (Geophysics and geomechanics)**
- **Μεταφορά Θερμότητας (Heat transfer)**
- **Μικροηλεκτρονικομηχανικά Συστήματα MEMS (Microelectromechanical systems (MEMS))**
- **Μικρορευστομηχανική (Microfluidics)**
- **Μηχανική Μικροκυμάτων (Microwave engineering)**
- **Οπτική (Optics)**
- **Ανίχνευση Σωματιδίων (Particle tracing)**
- **Φωτονική (Photonics)**
- **Φυσική Πλάσματος (Plasma physics)**
- **Ροή Πορώδων Μέσων (Porous media flow)**
- **Κβαντομηχανική (Quantum mechanics)**
- **Εξαρτήματα Συχνότητας Ραδιοφώνου (Radio-frequency components)**
- **Συσκευές Ημιαγωγών (Semiconductor devices)**
- **Δομική Μηχανική (Structural mechanics)**
- **Φαινόμενα Μεταφοράς (Transport phenomena)**
- **Διάδοση Κυμάτων (Wave Propagation)**

Όσον αφορά το *γραφικό του περιβάλλον*, το COMSOL παρέχει το κατάλληλο σχεδιαστικό περιβάλλον προς το χρήστη ώστε να μπορέσει να δημιουργήσει κατάλληλα το εξεταζόμενο μοντέλο σε δύο και τρεις διαστάσεις (2D, 3D). Παράλληλα παρέχεται η δυνατότητα αλληλεπίδρασης με προγράμματα όπως το **ProEngineer**, το **AutoCAD** και η **MATLAB**.

5. Μελέτη Μοντέλου 2d με πακτωμένη τη μία πλευρά

Θεωρούμε την σύνθετη πλάκα 2D του παρακάτω σχήματος, όπου στην άνω και κάτω επιφάνεια της έχουν τοποθετηθεί στρώσεις πιεζοηλεκτρικού υλικού. Η πλάκα αποτελείται από εποξικό γραφίτη T300/976 και ο αισθητήρας ή/και ενεργοποιητής από πιεζοηλεκτρικό υλικό PZT G1195N.



ΕΙΚΟΝΑ 5- ΠΡΟΤΥΠΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

Υποθέτουμε ότι:

- a) τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα (στρώσεις) τοποθετούνται με ακριβώς τις ίδιες πολικές διευθύνσεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διεγέρτες και ως αισθητήρες.
- b) ισχύει γραμμική θεωρία πιεζοηλεκτρισμού.
- c) Το πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι ομοιογενές, εγκάρσια ισοτροπικό και ελαστικό

Ιδιότητες T300/976

Μέτρο Ελαστικότητας Young	E	N/m ²	1,5e11
Λόγος Poisson	v		0,3
Πυκνότητα	ρ	Kg/m ³	1600

Ιδιότητες PZT G1195N

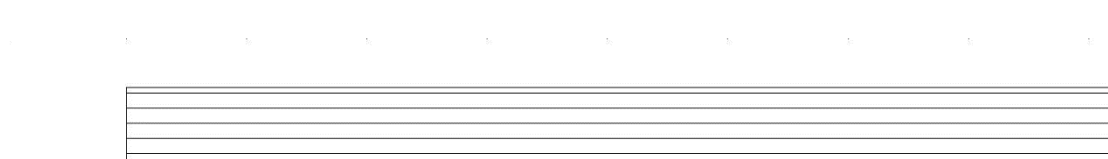
Μέτρο Ελαστικότητας Young	E ₁₁ =E ₂₂ =E ₃₃	N/m ²	6,3e10
Λόγος Poisson	v		0,3
Πυκνότητα	ρ	Kg/m ³	7600
Πιεζοηλεκτρική Σταθερά	d ₃₁ =d ₃₂	m/V	254x10 ⁻¹²
Ηλεκτρική Διαπερατότητα	ε ₁₁ =ε ₂₂ =ε ₃₃	F/m	15,3x10 ⁻⁹
Shear Moduli	G ₁₂ =G ₁₃ =G ₂₃	N/m ²	2,42e10

Συνοριακές Συνθήκες

Στο πρώτο μοντέλο μας, η πλάκα είναι πακτωμένη στη μία πλευρά ενώ όλες οι υπόλοιπες μπορούν να κινούνται ελεύθερα. Οι ηλεκτρικές συνοριακές συνθήκες σε όλες τις πλευρές έχουν ορισθεί ως μηδενικής φόρτισης (Zero Charge / Symmetry).

Πρακτικά **Zero Charge / symmetry** σημαίνει ότι το κάθετο διάνυσμα της ηλεκτρικής μετατόπισης είναι μηδενικό. $\mathbf{n} \times \mathbf{D} = 0$, δηλαδή δεν έχουμε επιβάλει σε κανένα όριο ηλεκτρικό φορτίο.

ΕΙΚΟΝΑ 6- ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΣΤΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ COMSOL

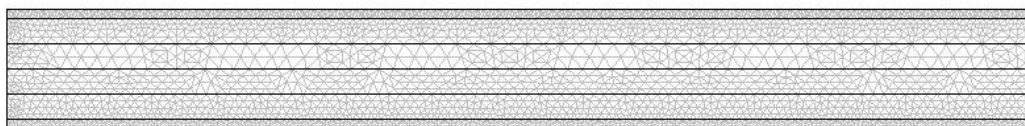


ΕΙΚΟΝΑ 7- ΚΟΝΤΙΝΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΠΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΑΜΕ ΣΤΟ COMSOL

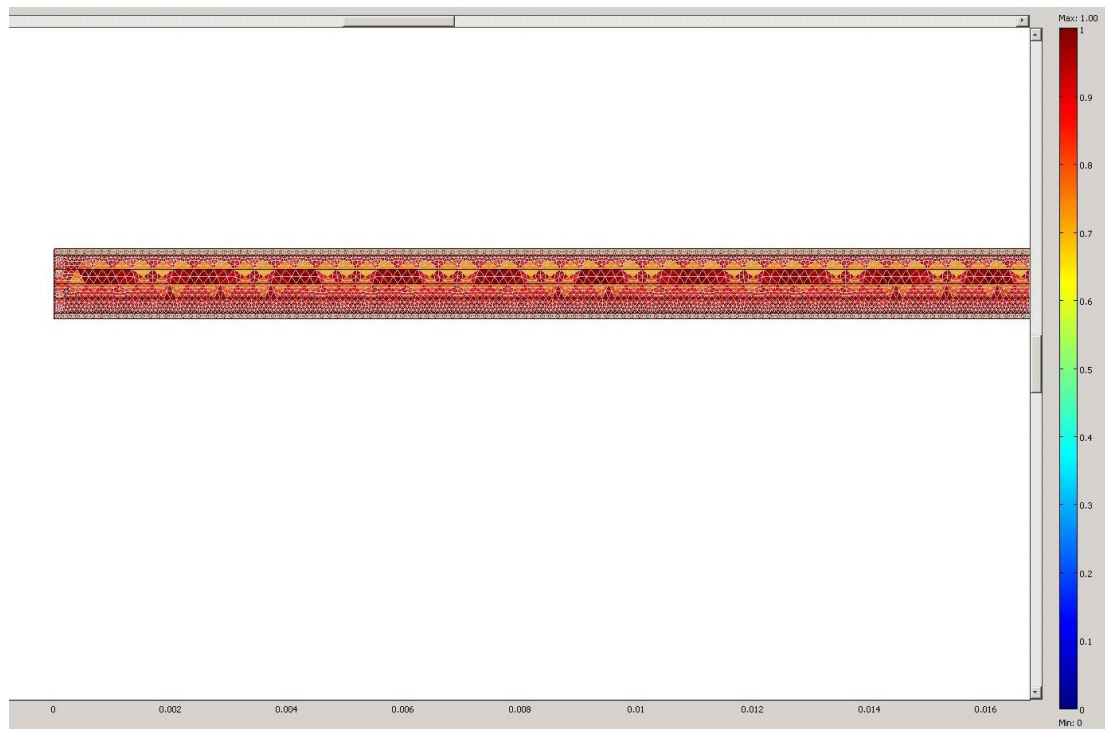
Δημιουργία πλέγματος διακριτοποίησης στο COMSOL

Το πλέγμα της διακριτοποίησης στο Comsol δημιουργείται είτε με τις προεπιλογές του προγράμματος είτε με τρόπο που εισάγει ο χρήστης. Με την αρχική διακριτοποίηση (προεπιλογές Comsol) είχαμε αραιή διακριτοποίηση και μικρό αριθμό στοιχείων και βαθμών ελευθερίας κάνοντας το Comsol να εμφανίζει αποτελέσματα χαμηλής ακρίβειας. Επομένως, από την επιλογή του Comsol *Refine Mesh* αυξήσαμε τον αριθμό στοιχείων και βαθμών ελευθερίας για να έχουμε αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας.

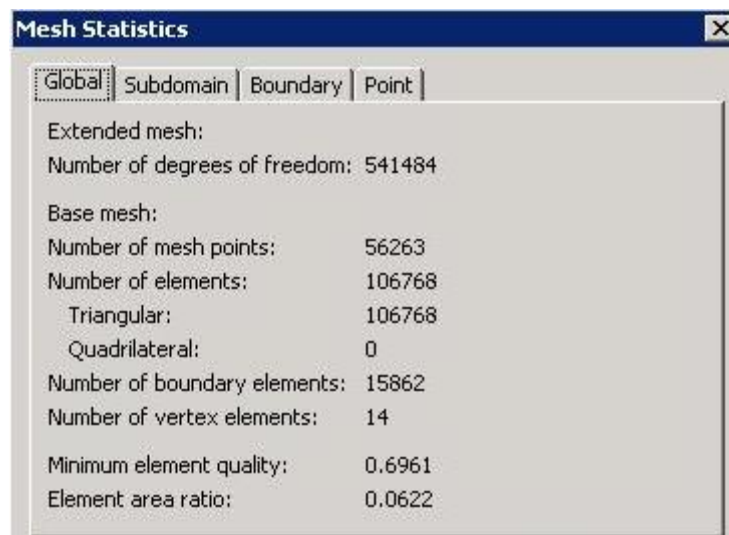
Τελικώς, η κατασκευή διακριτοποιείται σε 106.768 τριγωνικά στοιχεία και συνολικά ορίζονται 541.484 βαθμοί ελευθερίας (DOF).



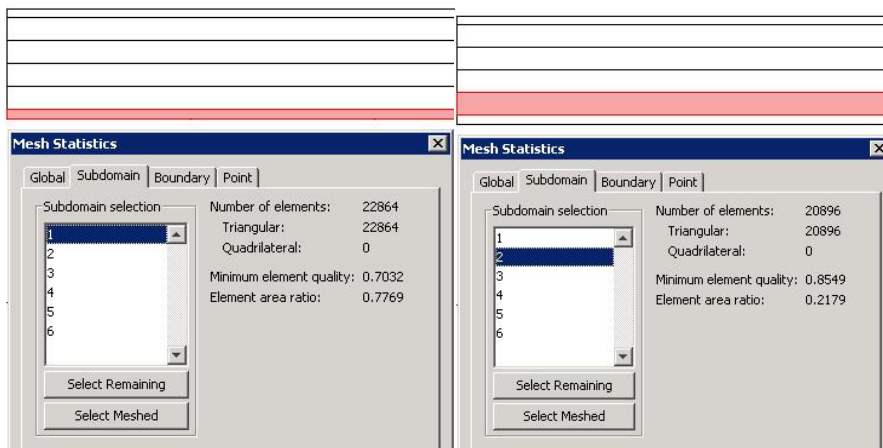
ΕΙΚΟΝΑ 8- ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΚΑΣ



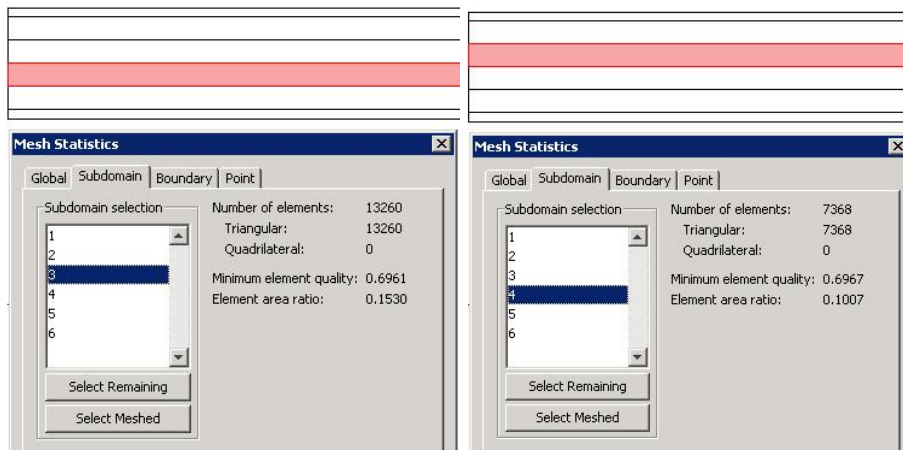
ΕΙΚΟΝΑ 9- ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΛΑΚΑΣ



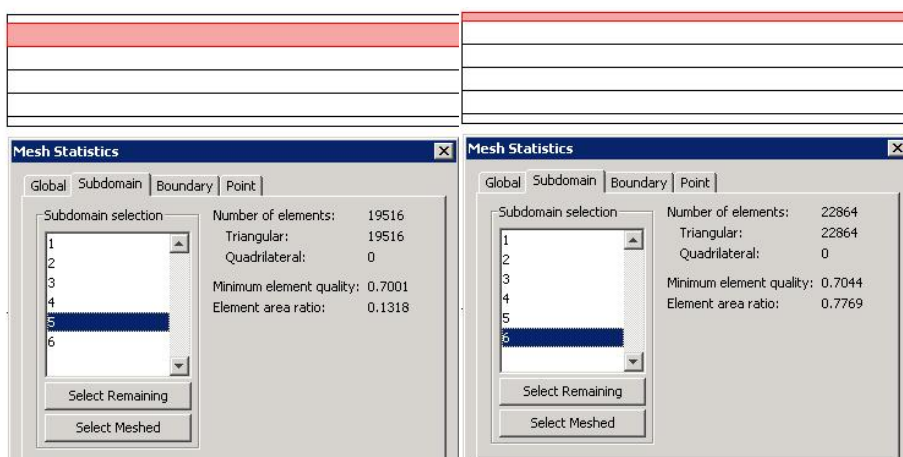
ΕΙΚΟΝΑ 10- ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΛΑΚΑΣ



ΕΙΚΟΝΑ 11- ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΑ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ



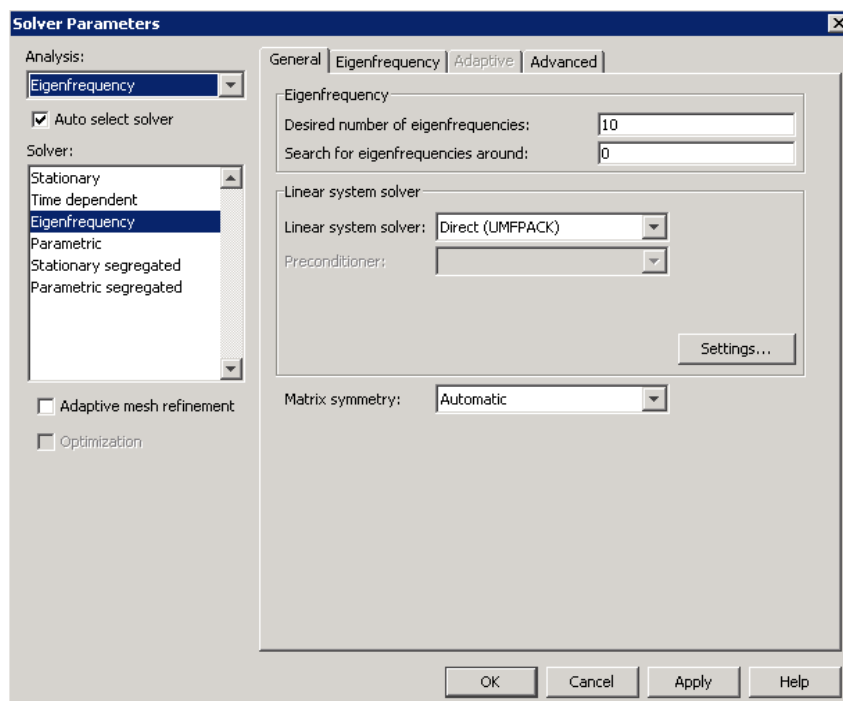
ΕΙΚΟΝΑ 12- ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΑ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ



ΕΙΚΟΝΑ 13-ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΝΑ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

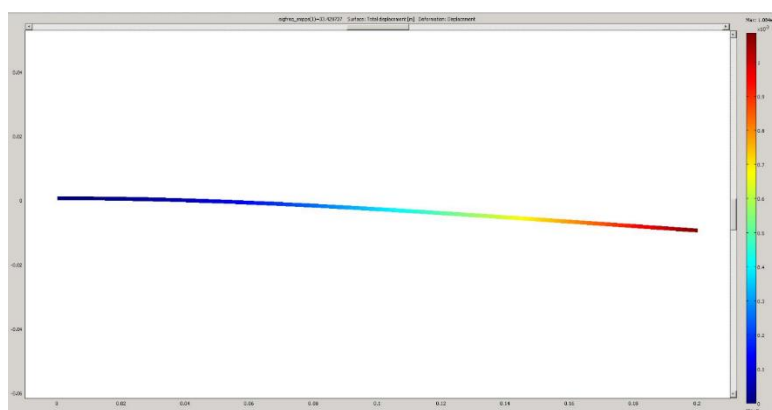
Επίλυση/Αποτελέσματα

Για την επίλυση, επιλέγουμε από την επιλογή Solver Parameters του Comsol σαν solver Eigenfrequencies, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, ενώ αλλάζουμε τον αριθμό των ιδιοσυχνοτήτων από 6 σε 10.

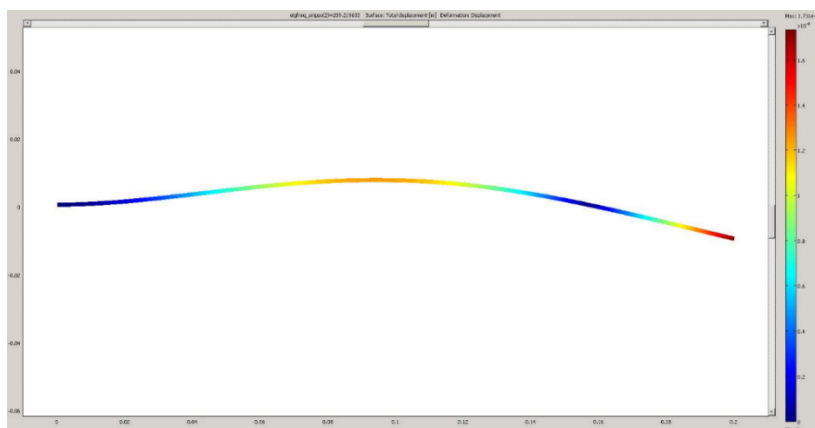


ΕΙΚΟΝΑ 14- ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ SOLVER PARAMETERS

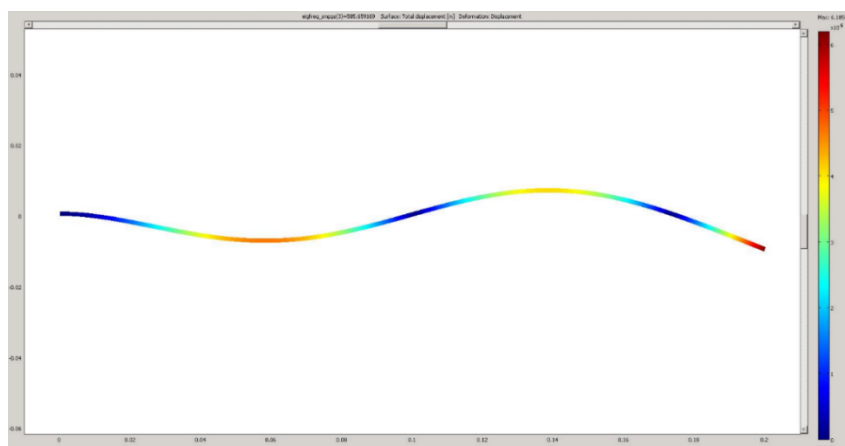
Παρακάτω εμφανίζονται τα αποτελέσματα της συνολικής μετατόπισης της πλάκας για κάθε μία από τις 10 ιδιοσυχνότητες που μας έδωσε σαν αποτέλεσμα το Comsol:



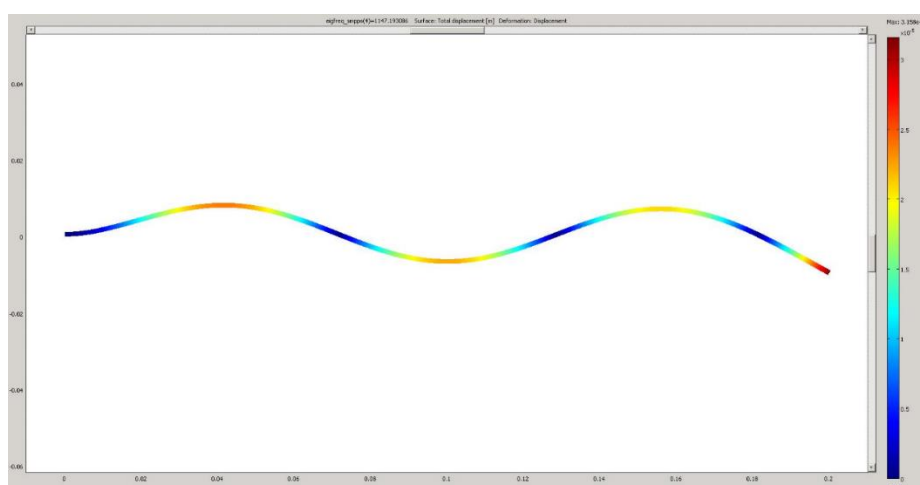
ΕΙΚΟΝΑ 15- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $1,084 \times 10^{-3} \text{m}$) ΓΙΑ 1ST MODE → 33,428737 Hz



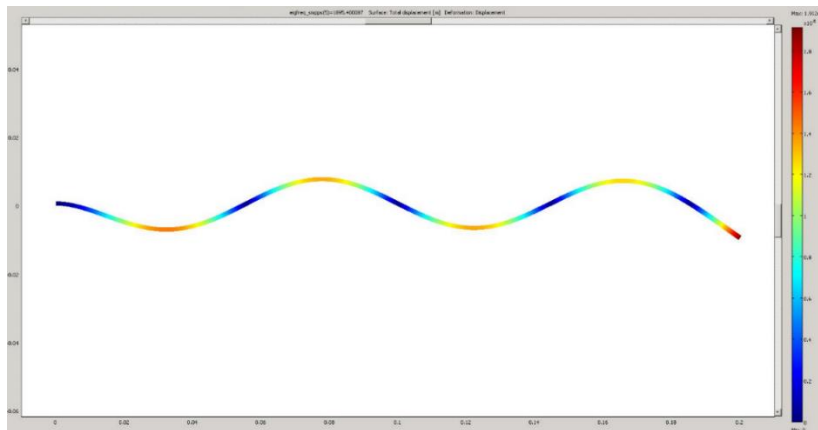
ΕΙΚΟΝΑ 16-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $1,731 \times 10^{-4} \text{m}$) ΓΙΑ 2ND MODE → 209,219633 Hz



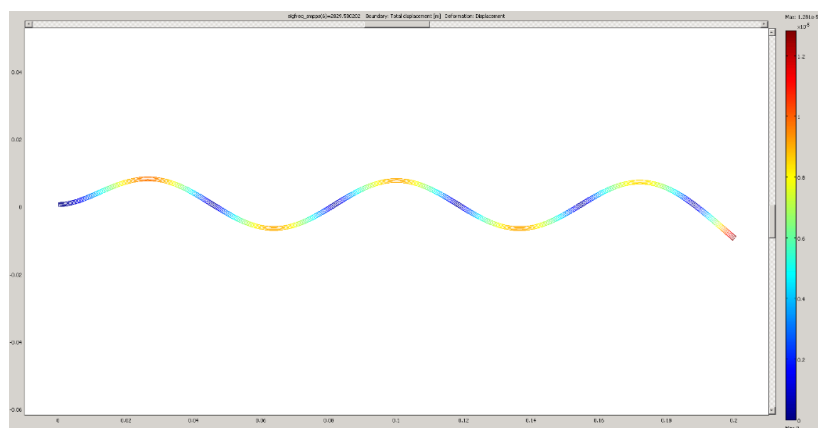
ΕΙΚΟΝΑ 17-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $6,785 \times 10^{-5} \text{m}$) ΓΙΑ 3RD MODE → 585,659169 Hz



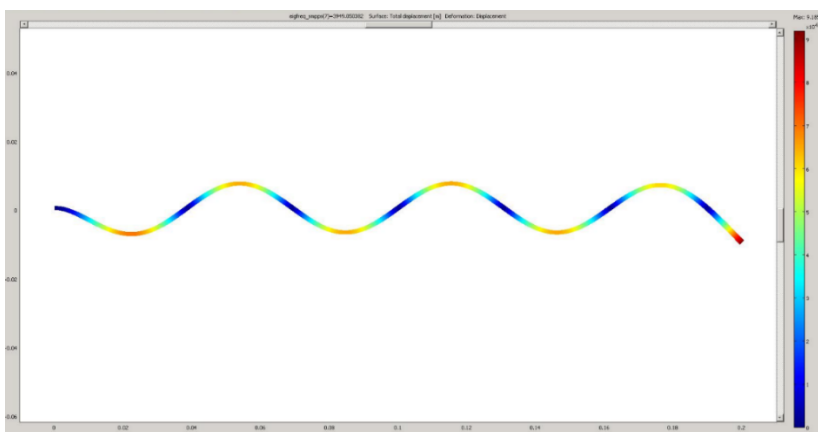
ΕΙΚΟΝΑ 18-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $3,158 \times 10^{-5} \text{m}$) ΓΙΑ 4TH MODE → 1147,193086 Hz



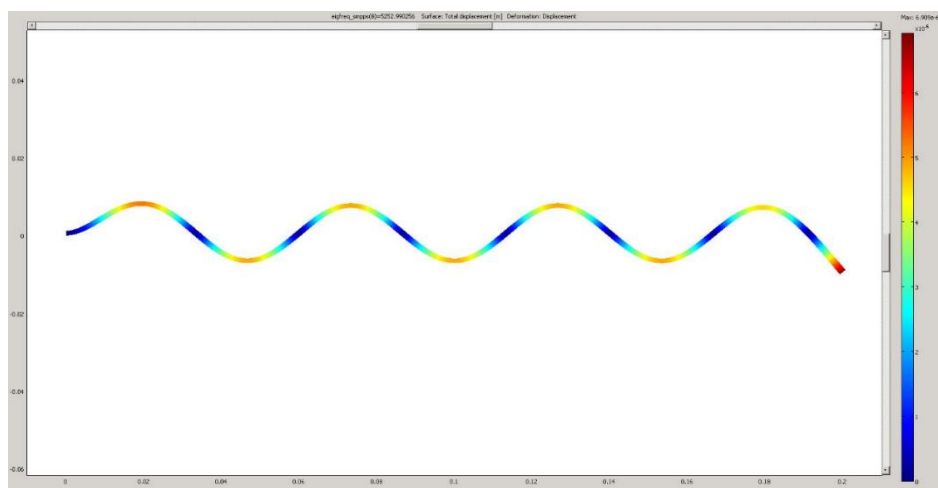
ΕΙΚΟΝΑ 19-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $1,912 \times 10^{-5}$ M) ΓΙΑ 5TH MODE → 1895,400087 Hz



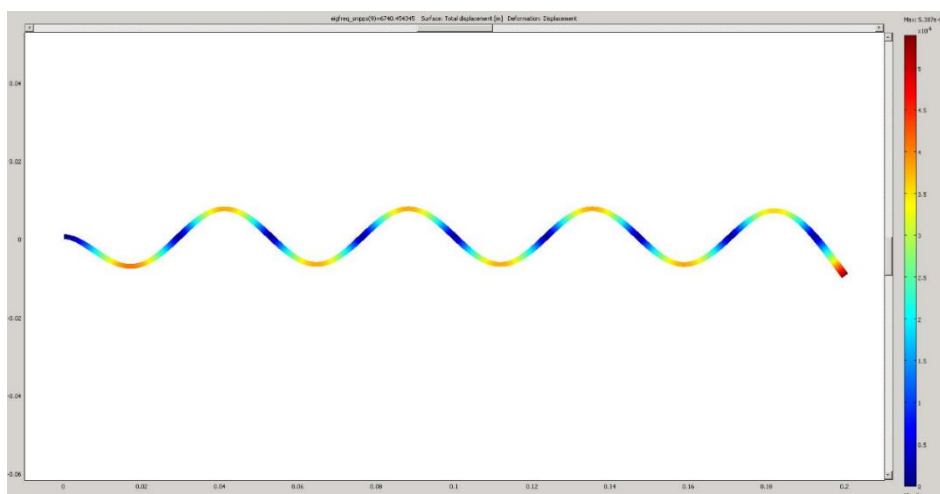
ΕΙΚΟΝΑ 20-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $1,281 \times 10^{-5}$ M) ΓΙΑ 6TH MODE → 2829,580202 Hz



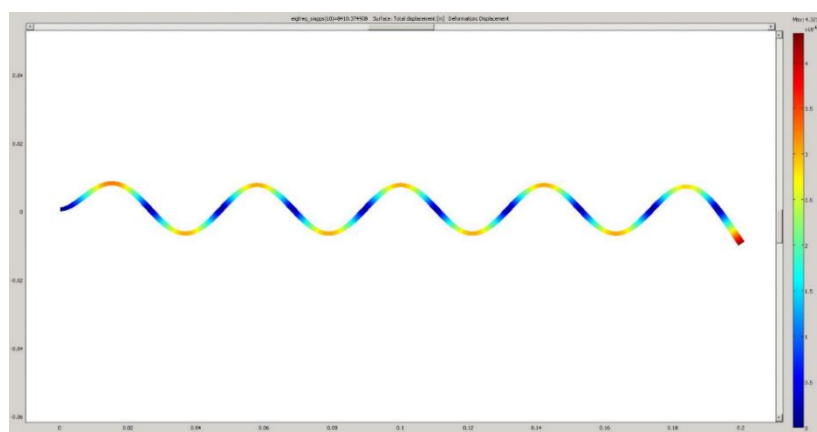
ΕΙΚΟΝΑ 21-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $9,185 \times 10^{-6}$ M) ΓΙΑ 7TH MODE → 3949,050382 Hz



ΕΙΚΟΝΑ 22-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $6,909 \times 10^{-6} \text{m}$) ΓΙΑ 8TH MODE → 5252,990256 Hz



ΕΙΚΟΝΑ 23-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $5,387 \times 10^{-6} \text{m}$) ΓΙΑ 9TH MODE → 6740,454345 Hz



ΕΙΚΟΝΑ 24-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $4,321 \times 10^{-6} \text{m}$) ΓΙΑ 10TH MODE → 8410,374908 Hz

Ανάλυση Time Dependant

Στο δεύτερο στάδιο της διατριβής, θα προσθέσουμε στη μελέτη μας την μεταβλητή του χρόνου και θα εξάγουμε αποτελέσματα που θα εξαρτώνται από τον χρόνο. Δεδομένου ότι η 1^η ιδιοσυχνότητα που μας έδωσε το comsol είναι 33,428737 Hz, θεωρούμε σαν συχνότητα διέγερσης 35 Hz για το εξωτερικό δυναμικό φορτίο.

Πρακτικά, οποιαδήποτε κατασκευή που ταλαντώνεται ακριβώς στην συχνότητα συντονισμού της μπορεί να «καταρρεύσει» καθώς θα έχει φτάσει στο όριο αντοχών τα υλικά που την αποτελούν. Είναι επομένως θεμιτό να γνωρίζουμε τα όρια της κατασκευής και στη συνέχεια να διεγείρουμε την πλάκα σε συχνότητες κοντά στην οριακή (συντονισμού) με αποτέλεσμα να έχουμε την μέγιστη ταλάντωση χωρίς να κινδυνεύει η πλάκα μας. Όσο η συχνότητα ταλάντωσης πλησιάζει στην συχνότητα συντονισμού, όπως είναι λογικό η συχνότητα της πλάκας θα αυξάνει και το ηλεκτρικό δυναμικό το ίδιο.

Στην πλάκα μας, θα ασκήσουμε μία ομοιόμορφη δύναμη F στην άνω επιφάνεια της πλάκας μας, ίση με:

$$F_y = F \sin(2\pi f t)$$

Βασιζόμενοι στα δεδομένα που έχουμε από το στατικό μοντέλο μας, η δύναμη F είναι ίση με -1000 N/m^2 , ενώ η συχνότητα f είναι ίση με 35 Hz όπως είπαμε παραπάνω.

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στην ανάλυση μας για να έχουμε αποδεκτά αποτελέσματα κοντά στα πραγματικά είναι η απόσβεση. Το μοντέλο απόσβεσης που χρησιμοποιούμε στο Comsol είναι του Rayleigh, και εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C = \alpha M + \beta K$$

Όπου C είναι ο πίνακας απόσβεσης, M ο πίνακας μάζας και K ο πίνακας ακαμψίας. Για να υπολογίσουμε τους συντελεστές απόσβεσης α και β θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση που συνδέει το λόγο κρίσιμης απόσβεσης και τις παραμέτρους της απόσβεσης Rayleigh όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{(2w_1)} & \frac{w_1}{2} \\ \frac{1}{(2w_2)} & \frac{w_2}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \end{bmatrix}$$

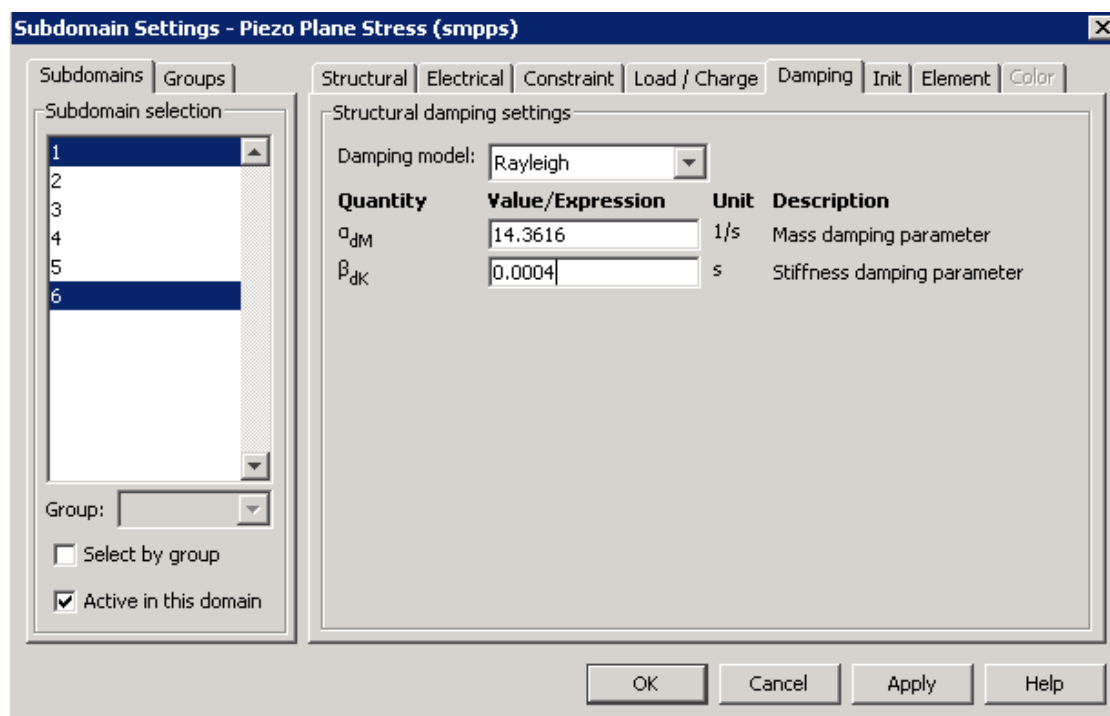
Όπου ζ είναι ο κρίσιμος λόγος απόσβεσης για μία συγκεκριμένη γωνιακή ταχύτητα w . Επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ζεύγη ζ και w με σκοπό να υπολογίσουμε τα α και β . Για να το επιτύχουμε αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τη matlab:

```
b=[0.08;0.08];
A=[1/(2*20*pi) 2*pi*20/2; 1/(2*50*pi) 2*pi*50/2];
dampCoefficients=A\b

dampCoefficients =

    14.3616
     0.0004
```

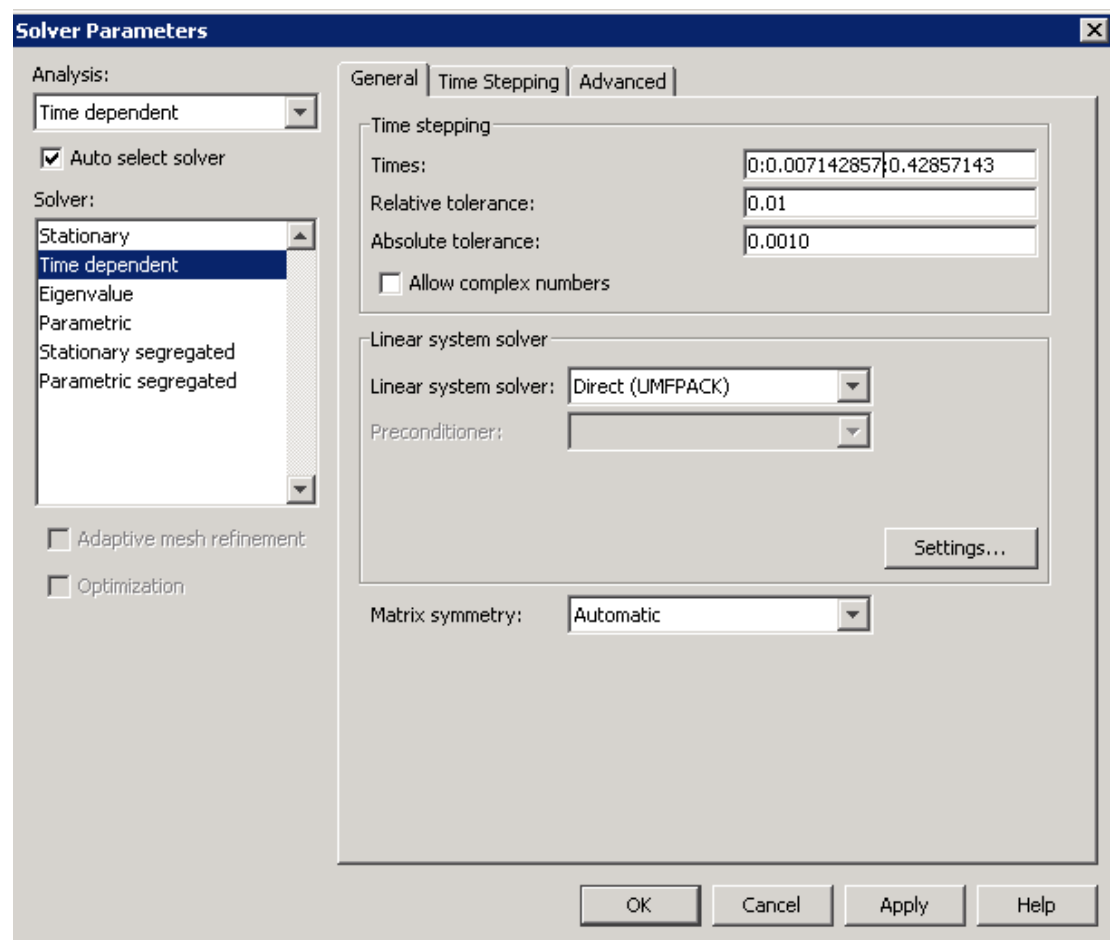
Στη συνέχεια, πάμε στα Subdomain Settings του comsol όπου και προσθέτουμε τις τιμές των μεταβλητών α και β και υπολογίσαμε από την matlab.



ΕΙΚΟΝΑ 25 - ΤΙΜΕΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ RAYLEIGH

Καθώς η Δύναμη που ασκούμε στην πλάκα είναι ημιτονοειδής, πρέπει να επιλύσουμε το μοντέλο για τουλάχιστον 2 κύκλους. Από την άλλη, επιλύοντας για παραπάνω κύκλους θα μας έδειχνε τα πραγματικά αποτελέσματα μετά την πραγματοποίηση της απόσβεσης. Επομένως μία επίλυση 15 κύκλων θεωρείται ικανοποιητική. Στη συνέχεια, πρέπει να αποφασίσουμε πόσο χρόνο θα χρειαστεί η προσομοίωση για να φτάσει τους 15 αυτούς κύκλους. Η συχνότητα που έχουμε θέσει είναι της τάξης των 35 Hz, δηλαδή 35 κύκλοι το δευτερόλεπτο, επομένως ο χρόνος για 15 κύκλους είναι $15/35=0,42857143\text{sec}$. Όπως φαίνεται παρακάτω, θέτουμε σαν χρονικό βήμα $0,007142857\text{sec}$ (που ισοδυναμεί με $0,4285714\text{sec}/60$).

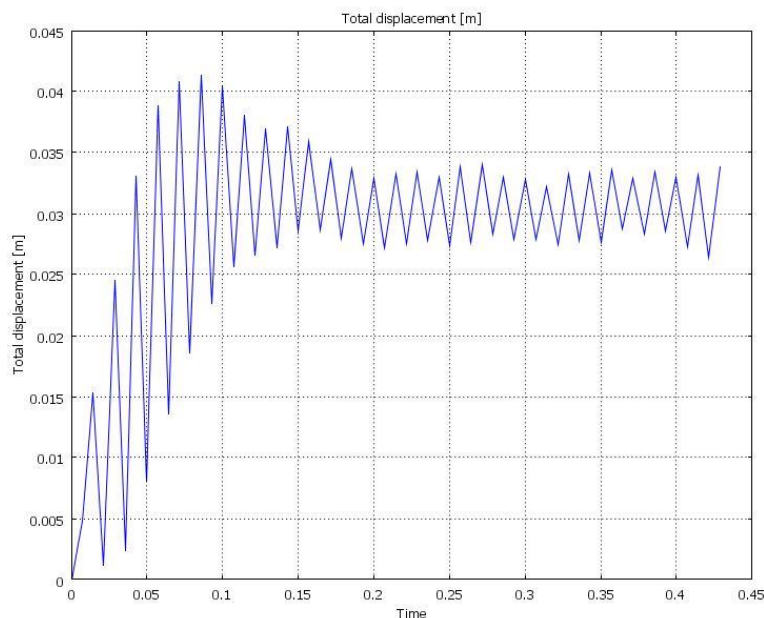
Μετά τις παραπάνω ρυθμίσεις, οι παράμετροι του επιλυτή (time dependent solver στο solver parameters) διαμορφώνονται ως ακολούθως:



ΕΙΚΟΝΑ 26 - ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΛΥΤΗ TIME DEPENDENT

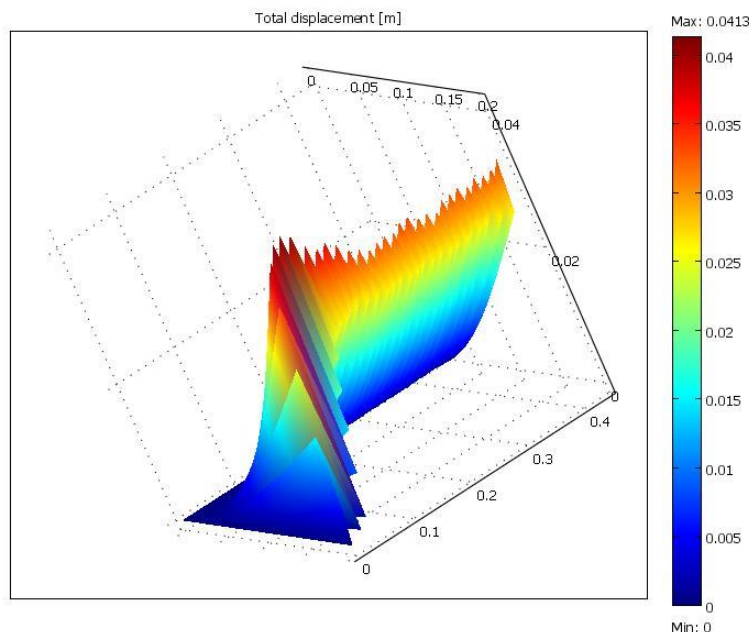
Αποτελέσματα:

Για να δούμε πως μεταβάλλεται η μετατόπιση σε σχέση με το χρόνο, επιλέγουμε σαν σημείο αναφοράς το ελεύθερο άκρο στην μέση της πλάκας (σημείο: $x=0,2m$, $y=0,0006m$). Όπως ήταν αναμενόμενο, μετά από λίγα κλάσματα του δευτερολέπτου, η πλάκα ακολουθεί την ταλάντωση της εξωτερικής δύναμης που ασκήσαμε.



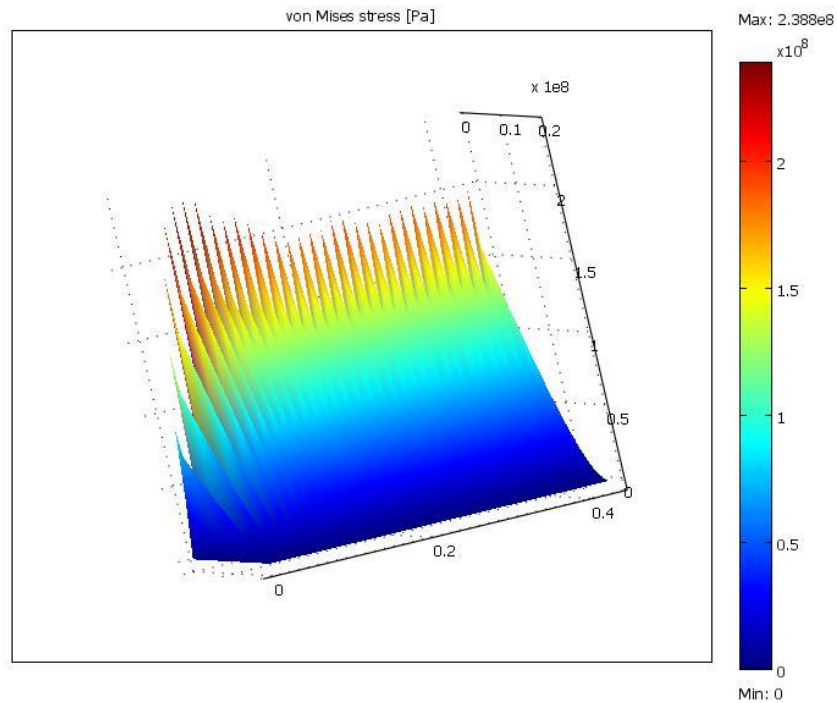
ΕΙΚΟΝΑ 27- ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ $x=0.2$, $y=0.0006$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Ενώ η συνολική μετατόπιση κατά μήκος της μέσης της πλάκας (επιφάνεια: $x=0 \rightarrow 0,2m$, $y=0,0006m$) φαίνεται παρακάτω:

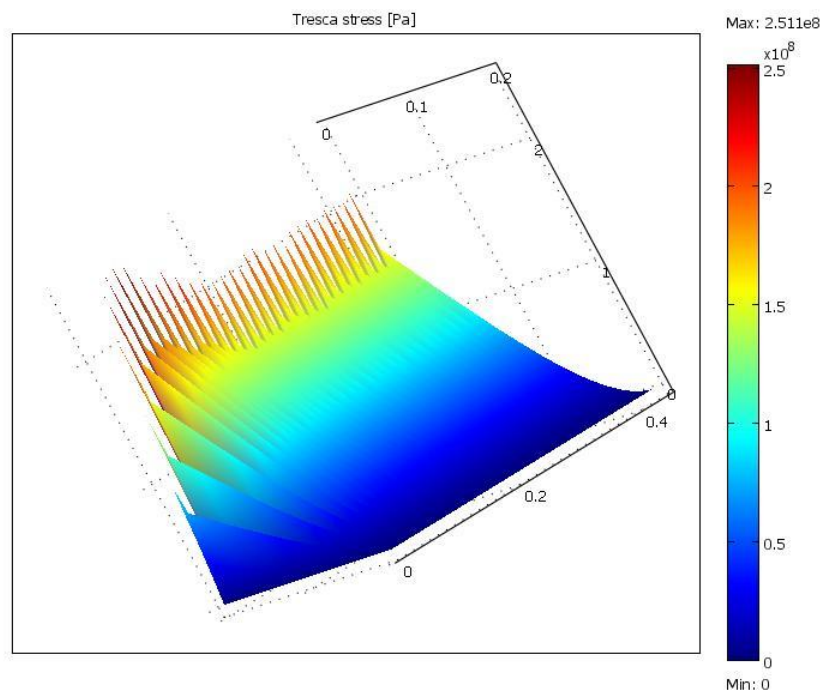


ΕΙΚΟΝΑ 28 - ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $y=0,0006$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Στη συνέχεια, για το διάγραμμα τάσεων von Mises και Tresca, επιλέγουμε να δούμε πως διαμορφώνονται οι τιμές των τάσεων στην πάνω επιφάνεια της πλάκας (επιφάνεια: $x=0 \rightarrow 0,2\text{m}$, $y=0,0012\text{m}$) καθώς στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές των τάσεων.

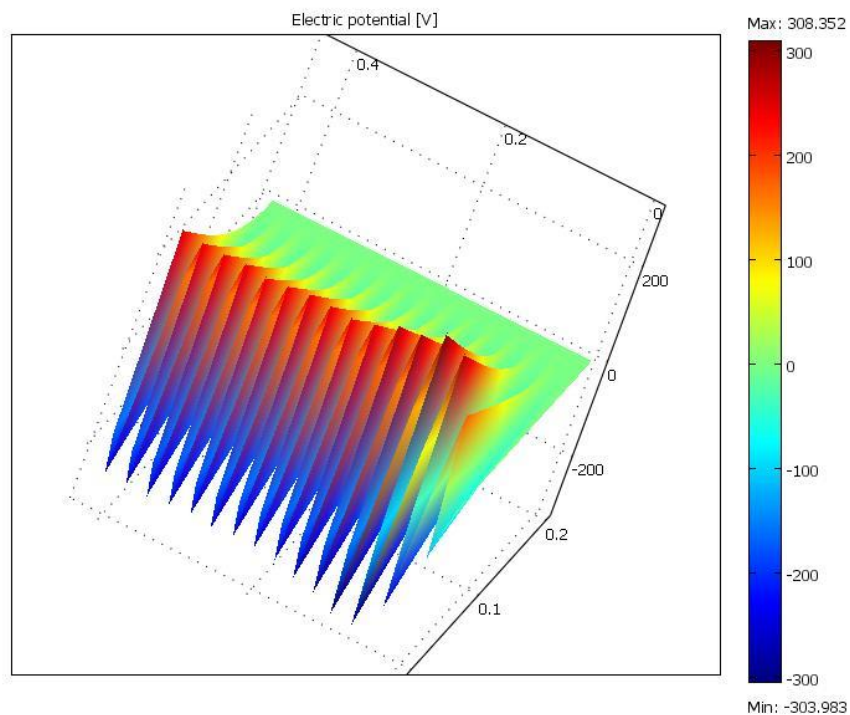


ΕΙΚΟΝΑ 29- ΤΑΣΕΙΣ VON MISES ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $y=0,0012$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

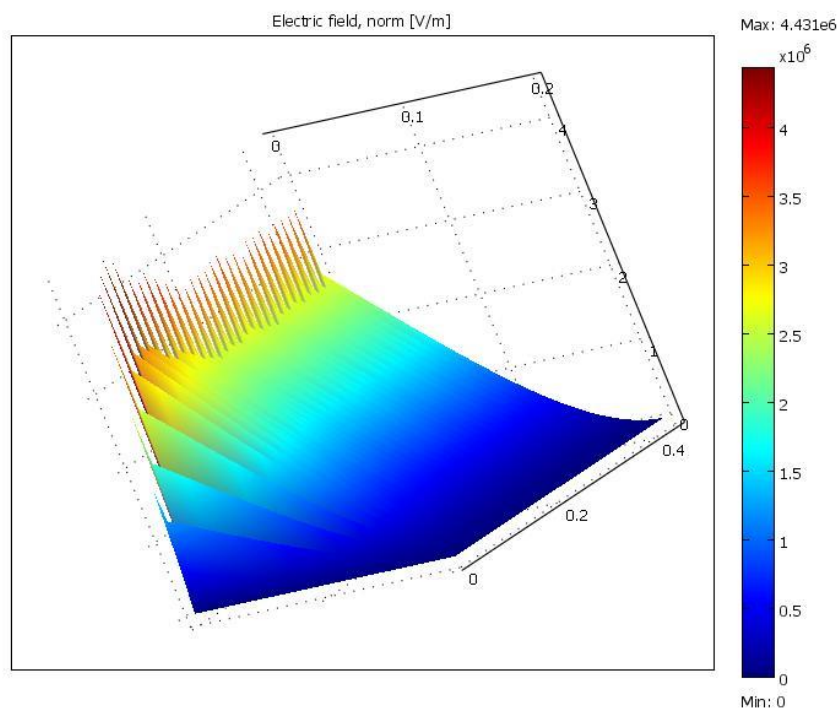


ΕΙΚΟΝΑ 30 - ΤΑΣΕΙΣ TRESCA ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $y=0,0012$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Το ηλεκτρικό δυναμικό και το ηλεκτρικό πεδίο, μεταβάλλονται με το χρόνο ως ακολούθως:

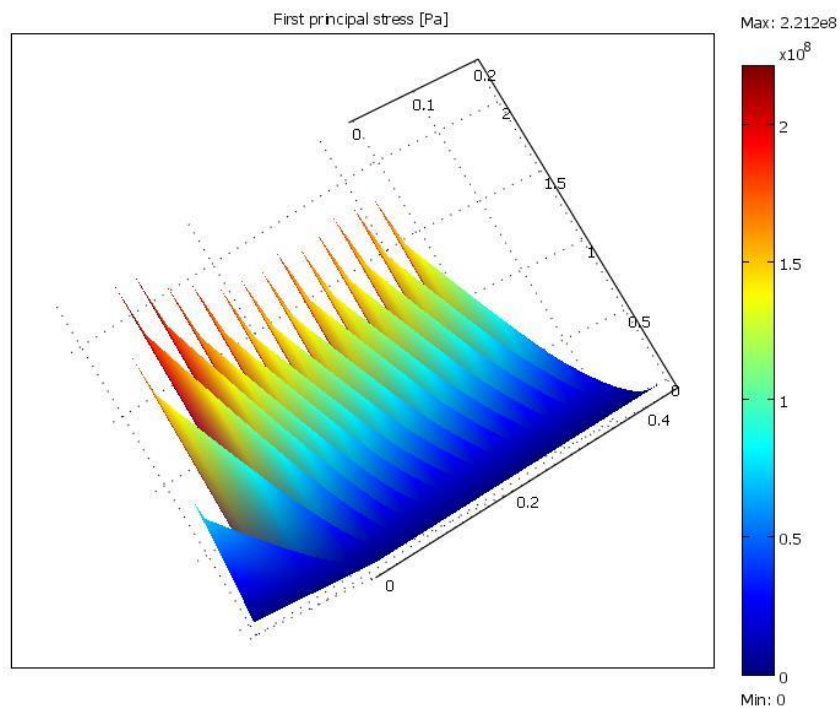


ΕΙΚΟΝΑ 31 - ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $\gamma=0,0012$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

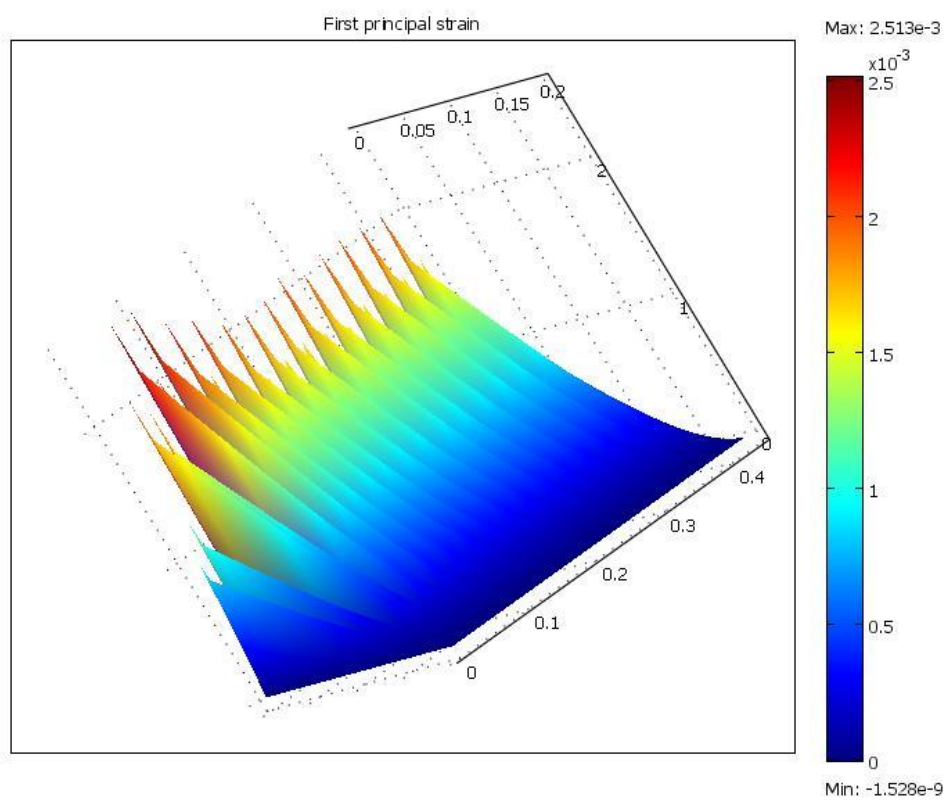


ΕΙΚΟΝΑ 32 - ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $\gamma=0,0012$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Ενώ λοιπές χρήσιμες μονάδες μεταβάλλονται με το χρόνο ως ακολούθως:



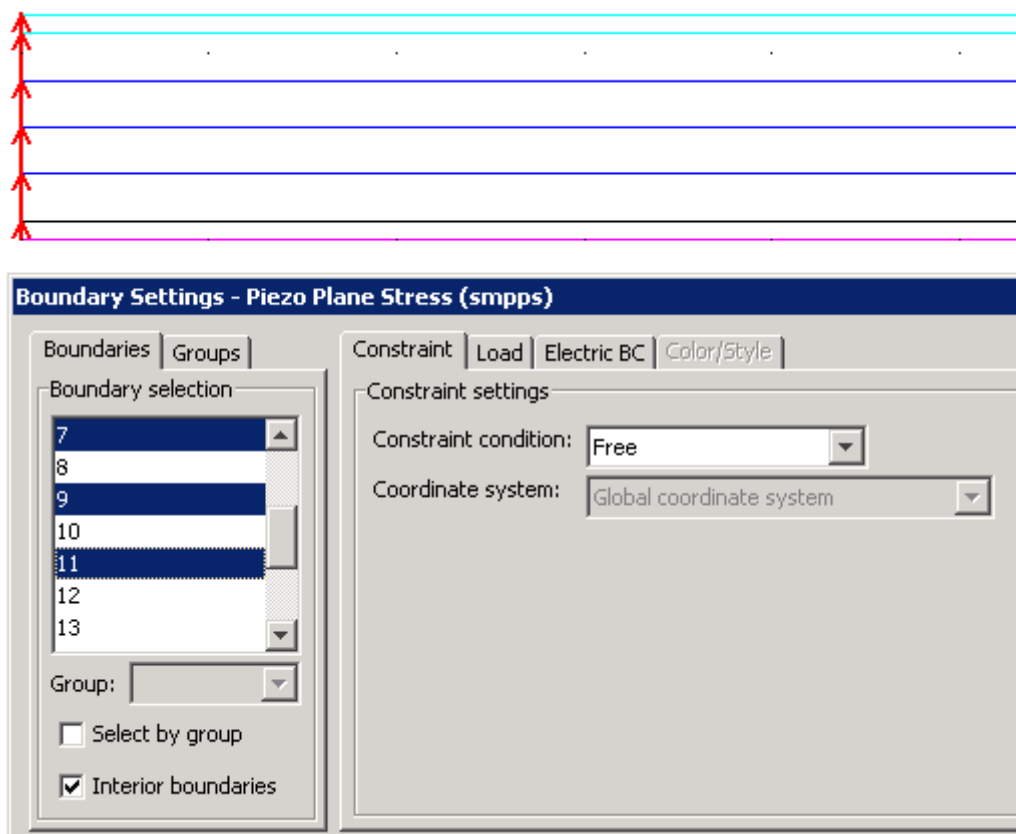
ΕΙΚΟΝΑ 33 - ΜΕΤΑΒΟΛΗ 1ΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $\gamma=0,0012$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ



ΕΙΚΟΝΑ 34- ΜΕΤΑΒΟΛΗ 1ΗΣ ΤΑΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $\gamma=0,0012$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

6. Μελέτη Μοντέλου 2d με ελεύθερη πλάκα

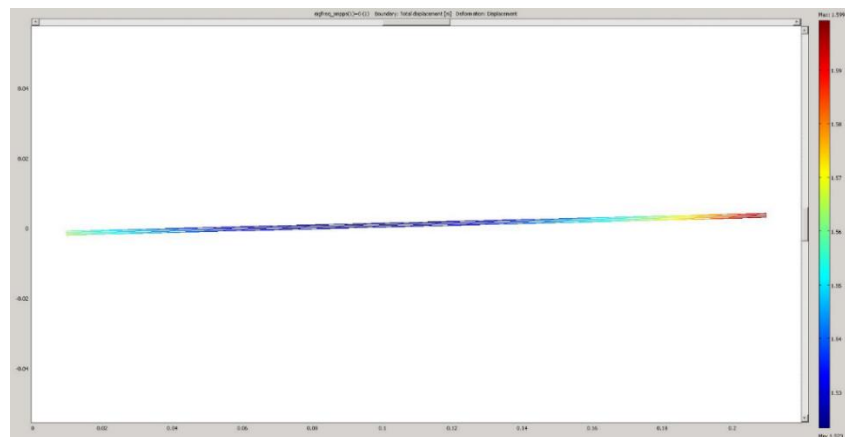
Στη συνέχεια, θα επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία, αλλά για ελεύθερη πλάκα, επομένως θα κάνουμε όλες τις συνοριακές συνθήκες της πλάκας μας ελεύθερες (από fixed που ήταν στο πρώτο σκέλος).



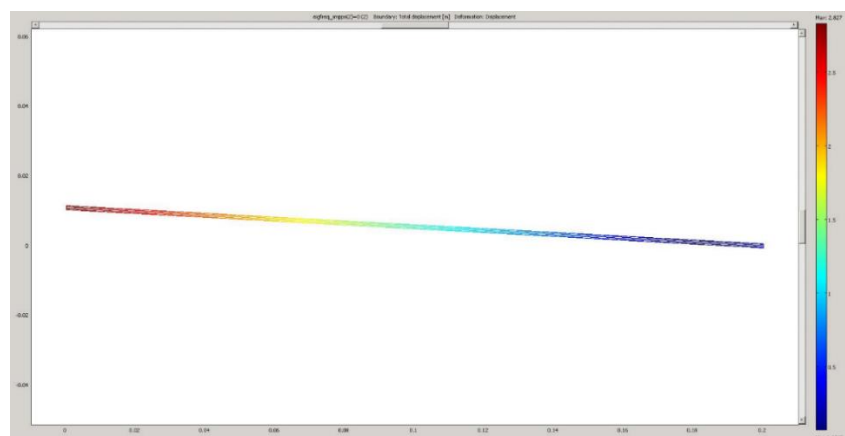
ΕΙΚΟΝΑ 35- ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

Κάνοντας ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων (για τις 10 πρώτες) βλέπουμε ότι οι πρώτες 2 είναι μηδέν (στην πραγματικότητα δεν είναι μηδέν αλλά πολύ κοντά στο μηδέν), οπότε επαναλάβαμε την διαδικασία για τις 12 πρώτες ιδιοσυχνότητες.

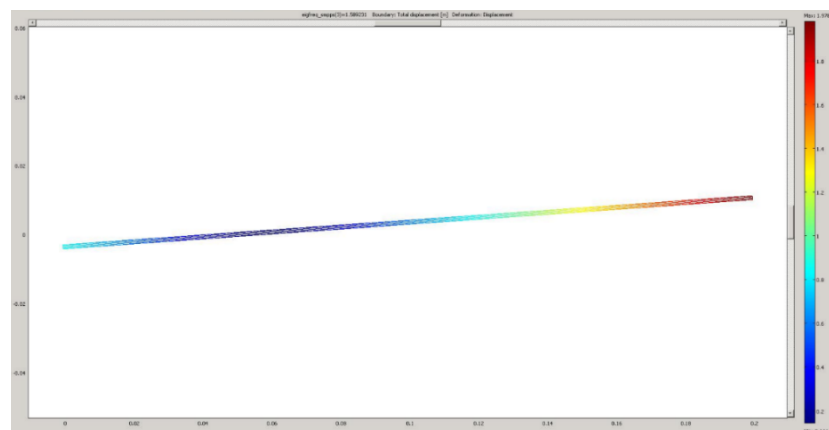
Η συνολική μετατόπιση για τις πρώτες 12 ιδιοσυχνότητες φαίνεται παρακάτω:



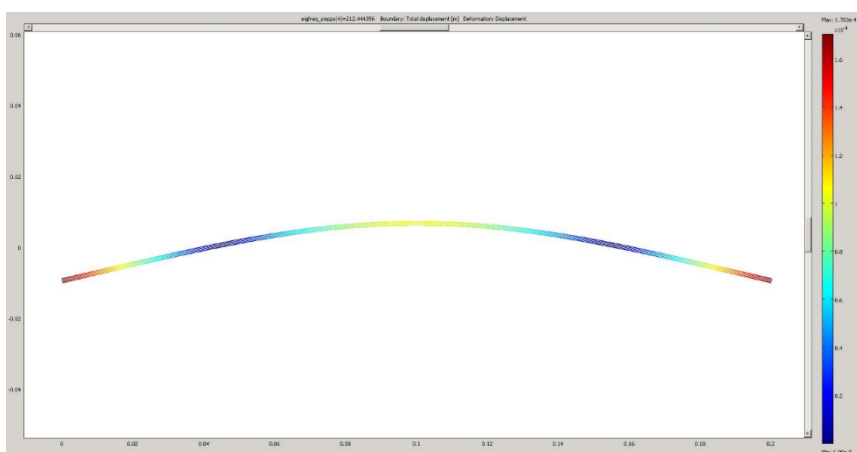
ΕΙΚΟΝΑ 36 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX 1,599) ΓΙΑ 1ST MODE → 0 Hz



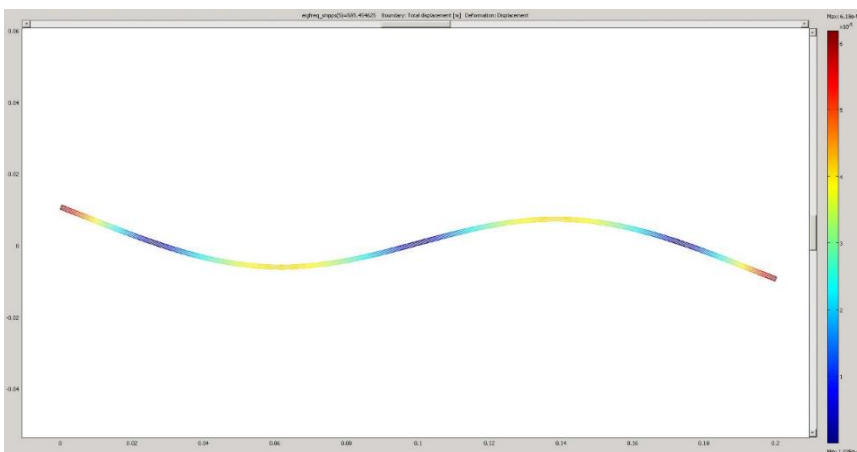
ΕΙΚΟΝΑ 37- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX 2,827) ΓΙΑ 2ND MODE → 0 Hz



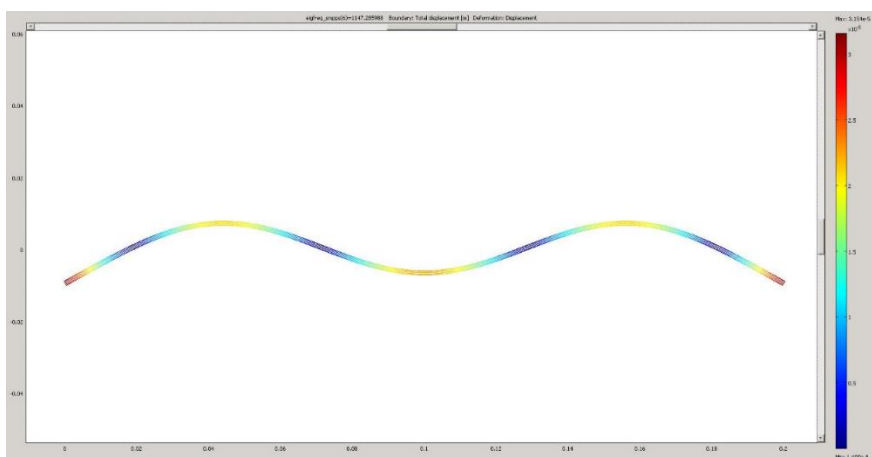
ΕΙΚΟΝΑ 38 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX 1,978) ΓΙΑ 3RD MODE → 1,589231 Hz



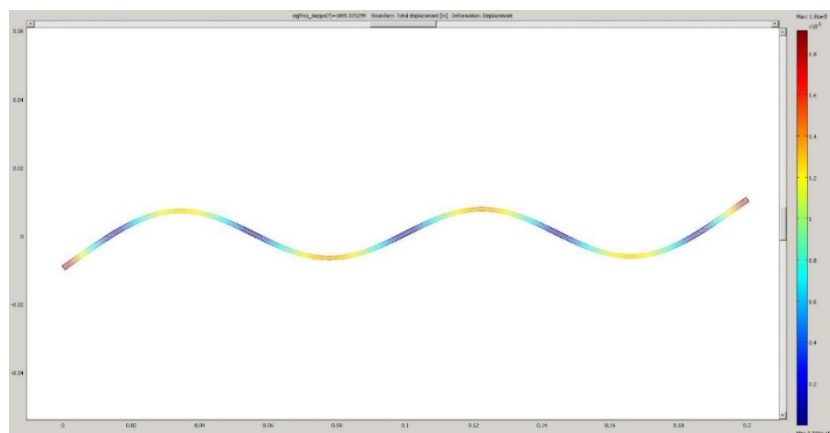
ΕΙΚΟΝΑ 39 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $1,703 \times 10^{-4}$) ΓΙΑ 4TH MODE → 212,444356 Hz



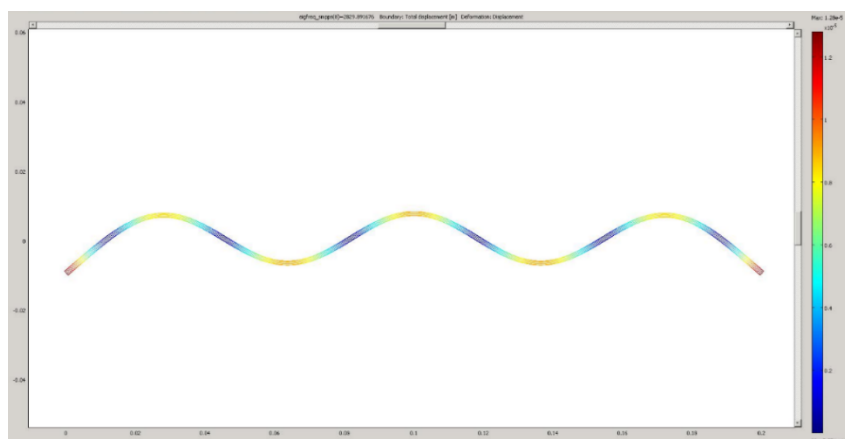
ΕΙΚΟΝΑ 40 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $6,18 \times 10^{-5}$) ΓΙΑ 5TH MODE → 585,454625 Hz



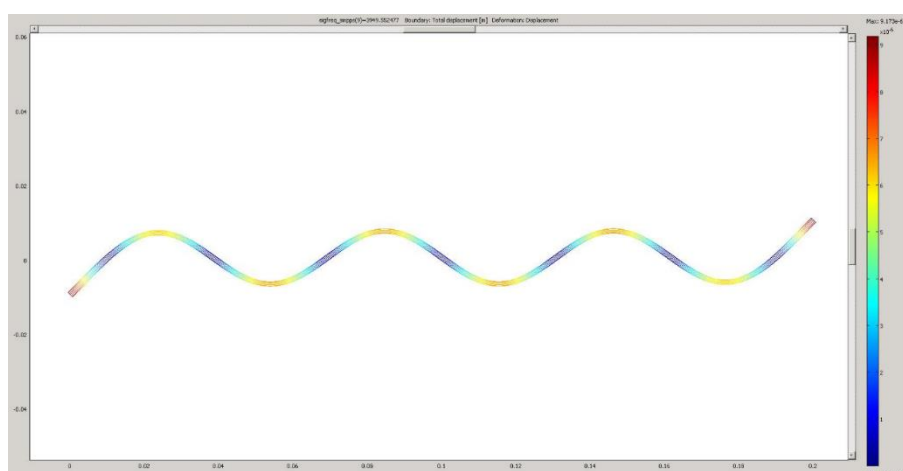
ΕΙΚΟΝΑ 41 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $3,154 \times 10^{-5}$) ΓΙΑ 6TH MODE → 1147,285988 Hz



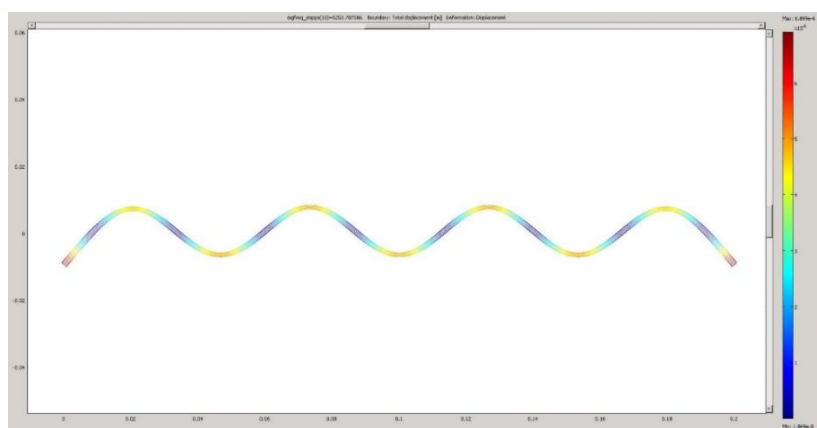
ΕΙΚΟΝΑ 42 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $1,91 \times 10^{-5}$) ΓΙΑ 7Η ΜΟΔΕ → 1895,570299 Hz



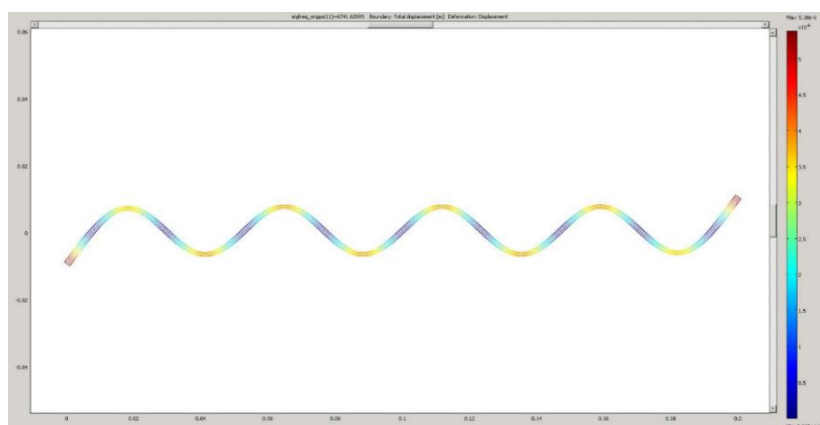
ΕΙΚΟΝΑ 43- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $1,28 \times 10^{-5}$) ΓΙΑ 8Η ΜΟΔΕ → 2829,891676 Hz



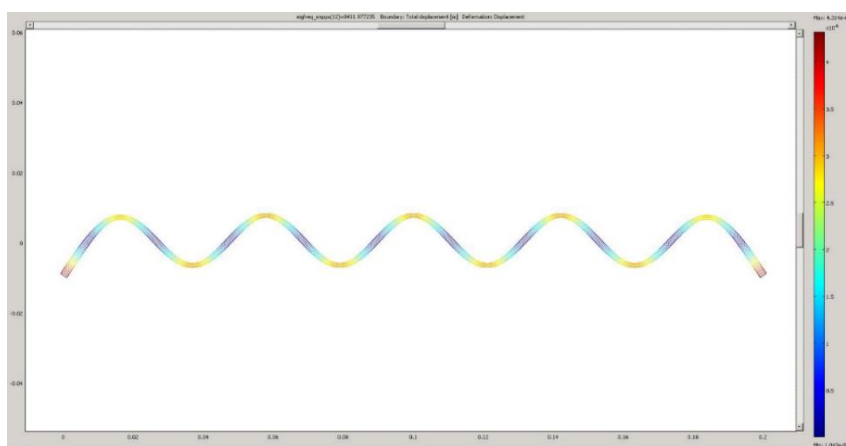
ΕΙΚΟΝΑ 44 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $9,173 \times 10^{-6}$) ΓΙΑ 9Η ΜΟΔΕ → 3949,552477 Hz



ΕΙΚΟΝΑ 45- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $6,899 \times 10^{-6}$) ΓΙΑ 10TH MODE → 5253,787586 Hz



ΕΙΚΟΝΑ 46- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $5,38 \times 10^{-6}$) ΓΙΑ 11TH MODE → 6741,62993 Hz



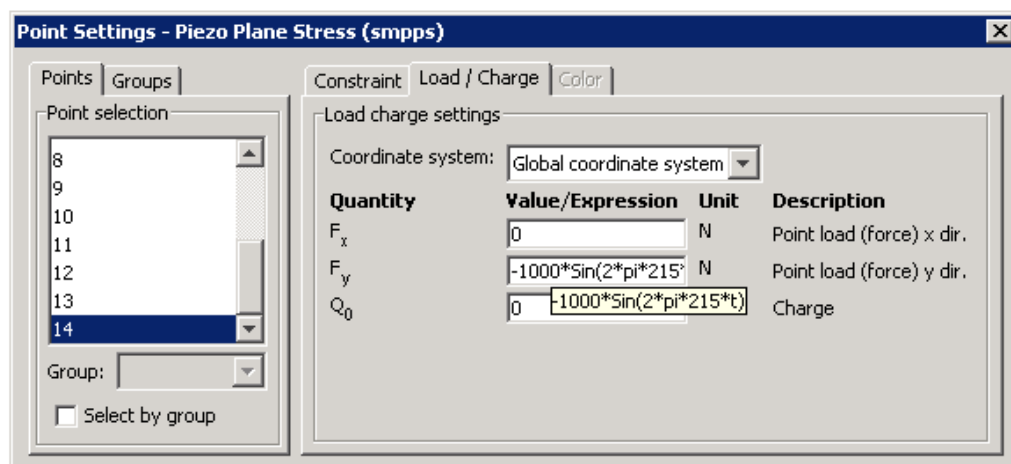
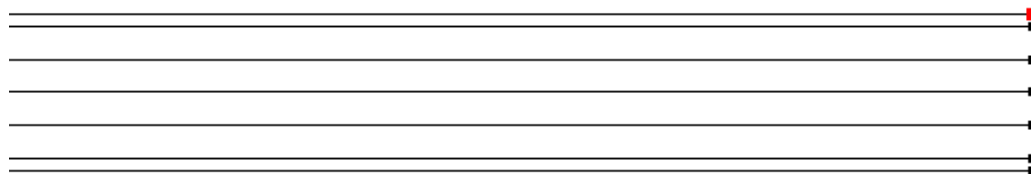
ΕΙΚΟΝΑ 47- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $4,314 \times 10^{-6}$) ΓΙΑ 12TH MODE → 8411,977235 Hz

Στο δεύτερο βήμα, θα προσθέσουμε στη μελέτη μας την μεταβλητή του χρόνου και θα εξάγουμε αποτελέσματα που θα εξαρτώνται από τον χρόνο. Δεδομένου ότι η 1η ιδιοσυχνότητα που μας έδωσε το comsol (μη κοντινή στο 0) είναι 212,4443 Hz, θεωρούμε σαν συχνότητα διέγερσης 215 Hz για το εξωτερικό δυναμικό φορτίο.

Στην πλάκα μας, θα ασκήσουμε μία δύναμη F αυτή τη φορά όμως σε σημείο (το άνω δεξιά άκρο) ίση με:

$$F_y = F \sin(2\pi f t)$$

Βασιζόμενοι στα δεδομένα που έχουμε από το στατικό μοντέλο μας, η δύναμη F είναι ίση με -1000 N/m^2 , ενώ η συχνότητα f είναι ίση με 215 Hz όπως είπαμε παραπάνω.



ΕΙΚΟΝΑ 48 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΘΕΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΣΤΟ ΑΝΩ ΔΕΞΙΑ ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

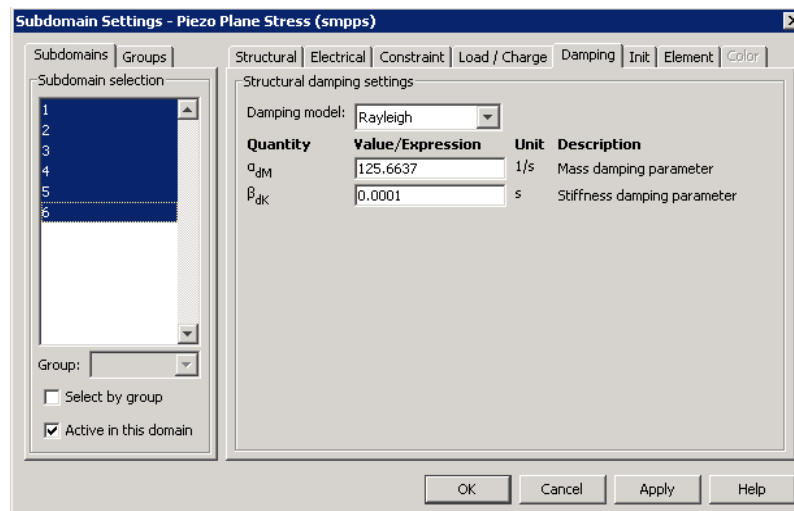
Όπως προηγουμένως, για να υπολογίσουμε τις σταθερές απόσβεσης θα χρησιμοποιήσουμε τη matlab:

```
b=[0.1;0.1];
A=[1/(2*150*2*pi) 2*pi*150/2; 1/(2*300*2*pi) 2*pi*300/2];
dampCoefficients=A\b
```

```
dampCoefficients =

    125.6637
     0.0001
```

Στη συνέχεια, πάμε στα Subdomain Settings του comsol όπου και προσθέτουμε τις τιμές των μεταβλητών α και β και υπολογίσαμε από την matlab.

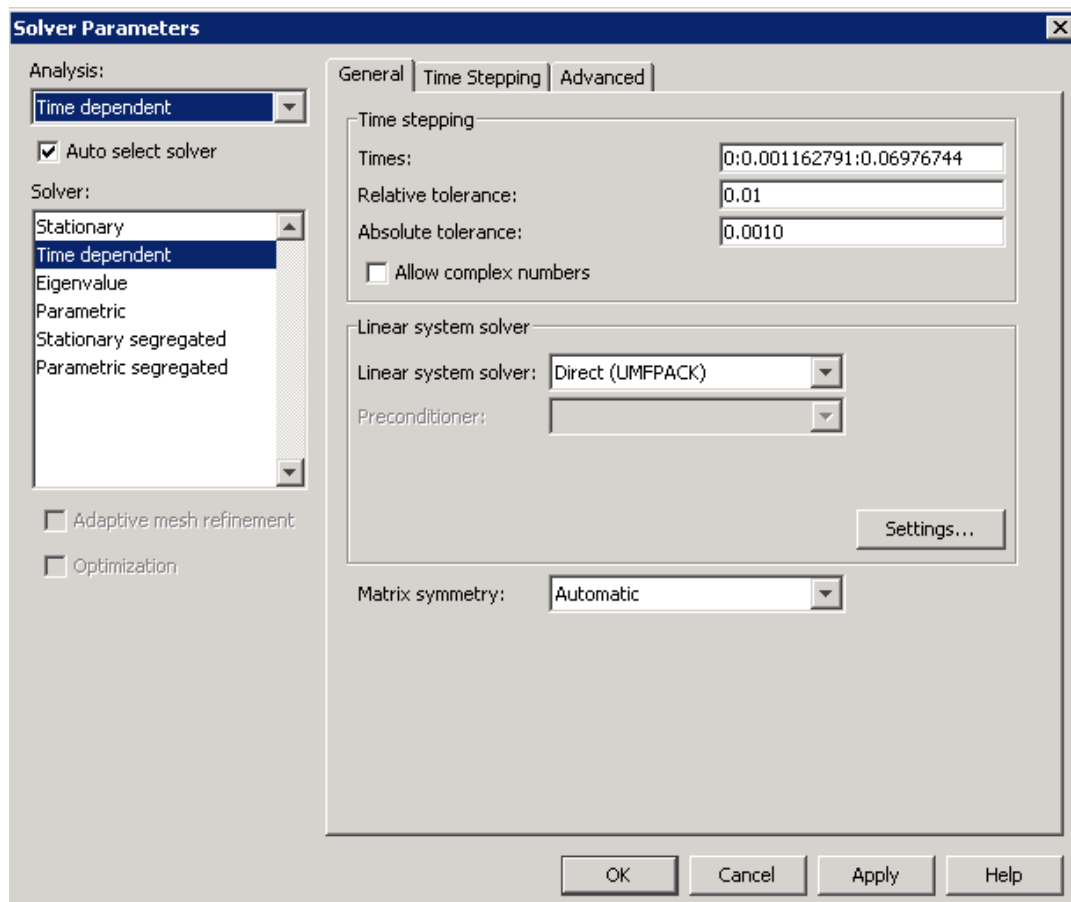


ΕΙΚΟΝΑ 49 - ΤΙΜΕΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ RAYLEIGH

Καθώς η δύναμη που ασκούμε στην πλάκα είναι ημιτονοειδής, πρέπει να επιλύσουμε το μοντέλο για τουλάχιστον 2 κύκλους. Από την άλλη, επιλύοντας για παραπάνω κύκλους θα μας έδειχνε τα πραγματικά αποτελέσματα μετά την πραγματοποίηση της απόσβεσης.

Επομένως μία επίλυση 15 κύκλων θεωρείται ικανοποιητική. Στη συνέχεια, πρέπει να αποφασίσουμε πόσο χρόνο θα χρειαστεί η προσομοίωση για να φτάσει τους 15 αυτούς κύκλους. Η συχνότητα που έχουμε θέσει είναι της τάξης των 215 Hz, δηλαδή 215 κύκλοι το δευτερόλεπτο, επομένως ο χρόνος για 15 κύκλους είναι $15/215=0,06976744\text{sec}$. Όπως φαίνεται παρακάτω, θέτουμε σαν χρονικό βήμα $0,001162791\text{sec}$ (που ισοδυναμεί με $0,06976744\text{sec}/60$).

Μετά τις παραπάνω ρυθμίσεις, οι παράμετροι του επιλυτή (time dependent solver στο solver parameters) διαμορφώνονται ως ακολούθως:

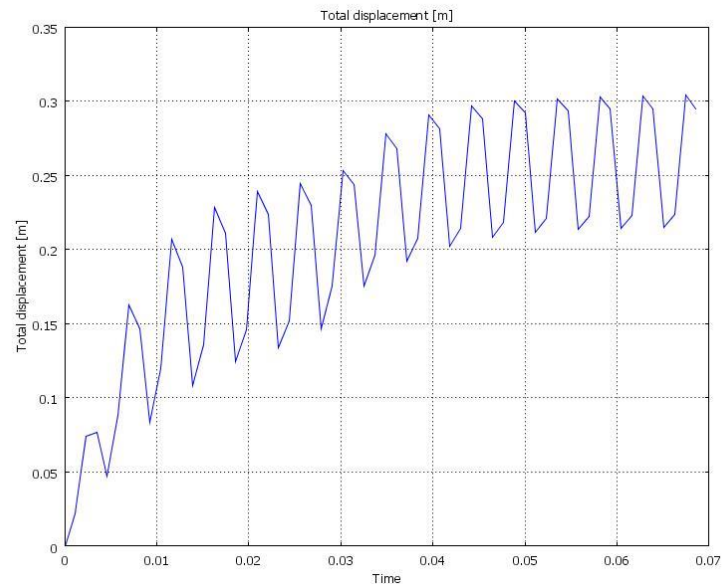


ΕΙΚΟΝΑ 50 - ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΛΥΤΗ TIME DEPENDENT

Αποτελέσματα:

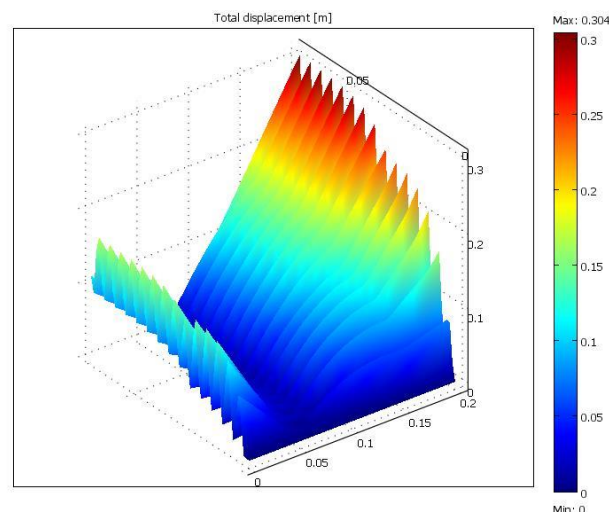
Μετατόπιση

Για να δούμε πως μεταβάλλεται η μετατόπιση σε σχέση με το χρόνο, επιλέγουμε σαν σημείο αναφοράς το ελεύθερο άκρο στην μέση της πλάκας ($x=0,2\text{m}$, $y= 0,0006\text{m}$). Όπως ήταν αναμενόμενο, μετά από λίγα κλάσματα του δευτερολέπτου, η πλάκα ακολουθεί την ταλάντωση της εξωτερικής δύναμης που ασκήσαμε.



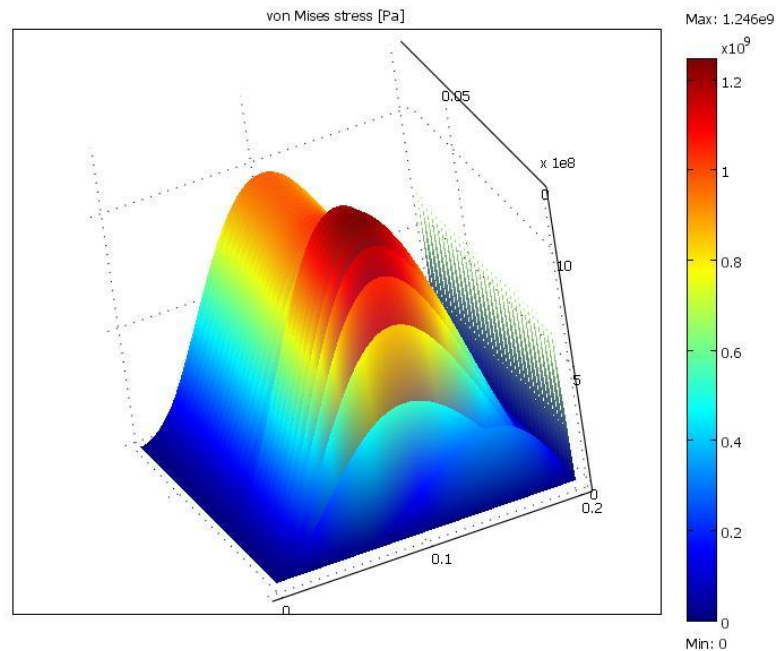
ΕΙΚΟΝΑ 51 - ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ $x=0.2$, $y=0.0006$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Ενώ η συνολική μετατόπιση κατά μήκος της μέσης της πλάκας ($x=0 \rightarrow 0,2\text{m}$, $y=0,0006$) φαίνεται παρακάτω:

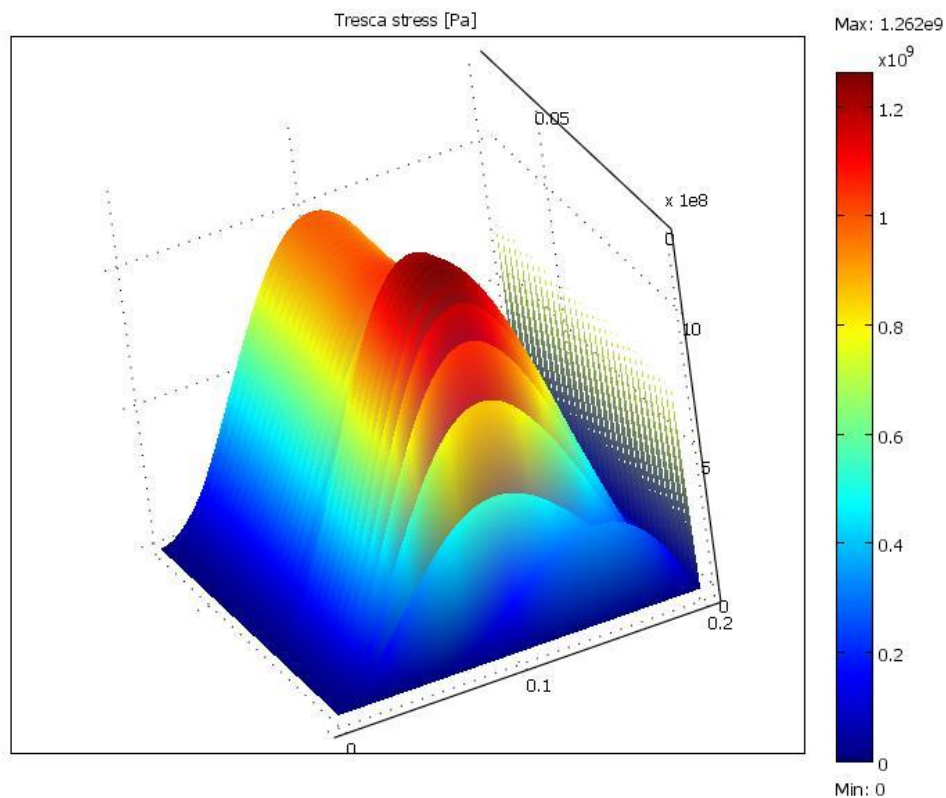


ΕΙΚΟΝΑ 52 - ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $y=0,0006$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Στη συνέχεια, για το διάγραμμα τάσεων von Mises και Tresca, επιλέγουμε να δούμε πως διαμορφώνονται οι τιμές των τάσεων στην πάνω επιφάνεια της πλάκας (επιφάνεια: $x=0 \rightarrow 0,2\text{m}$, $y=0,0012\text{m}$) καθώς στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές των τάσεων.

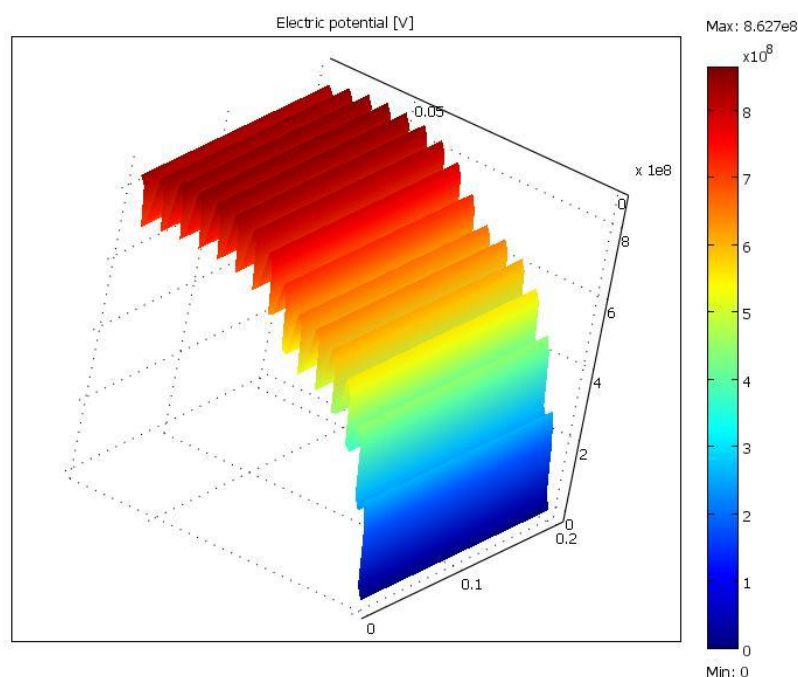


ΕΙΚΟΝΑ 53 - ΤΑΣΕΙΣ VON MISES ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $y=0,0012$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

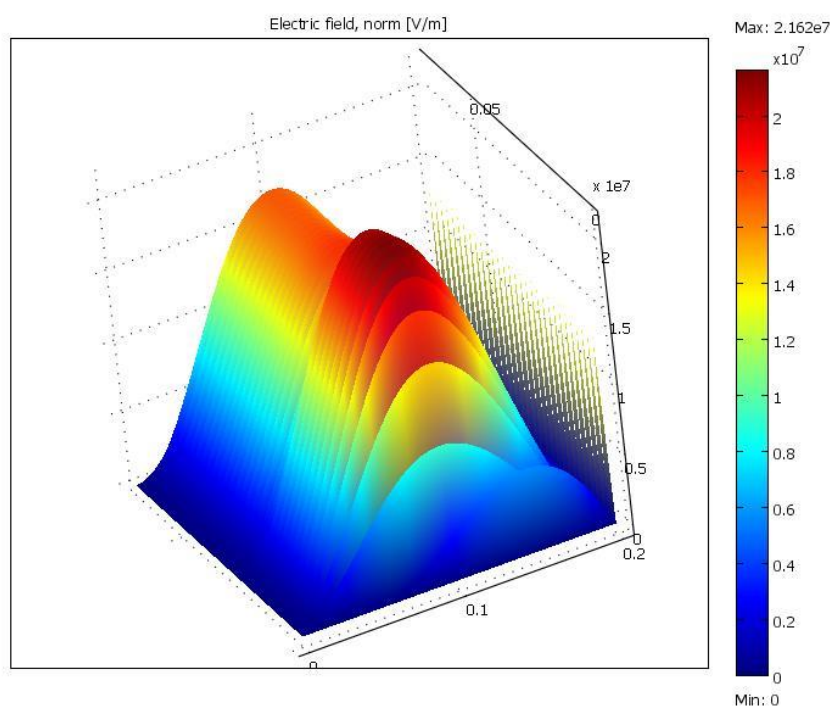


ΕΙΚΟΝΑ 54 - ΤΑΣΕΙΣ TRESCA ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $y=0,0012$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Το ηλεκτρικό δυναμικό και το ηλεκτρικό πεδίο, μεταβάλλονται με το χρόνο ως ακολούθως:

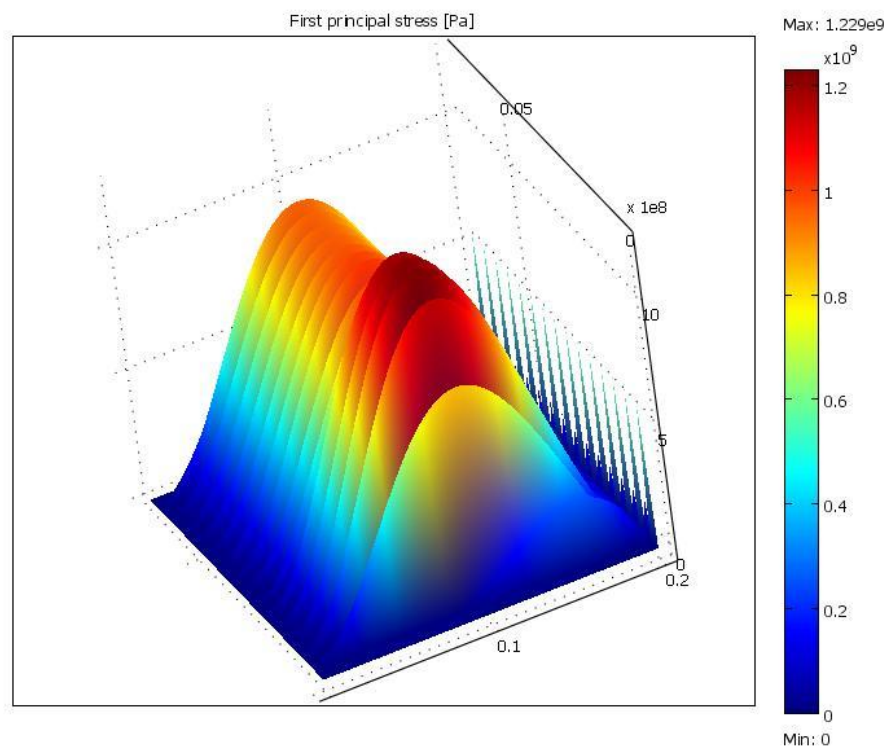


ΕΙΚΟΝΑ 55 - ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $\gamma=0,0012$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

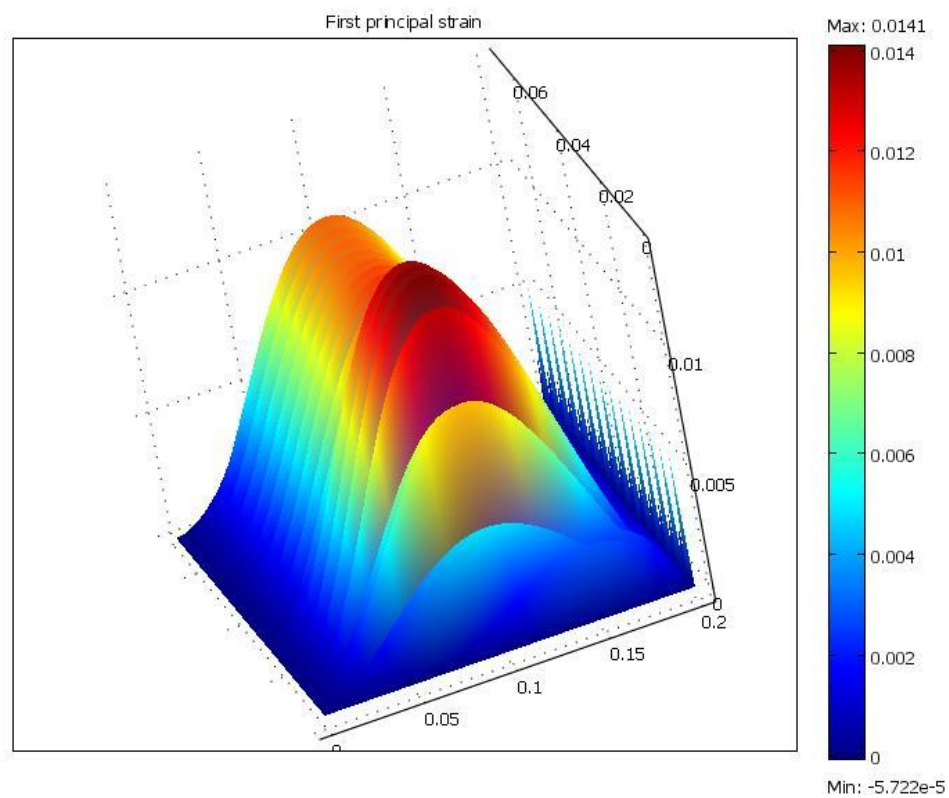


ΕΙΚΟΝΑ 56 - ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $\gamma=0,0012$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Ενώ λοιπές χρήσιμες μονάδες μεταβάλλονται με το χρόνο ως ακολούθως:



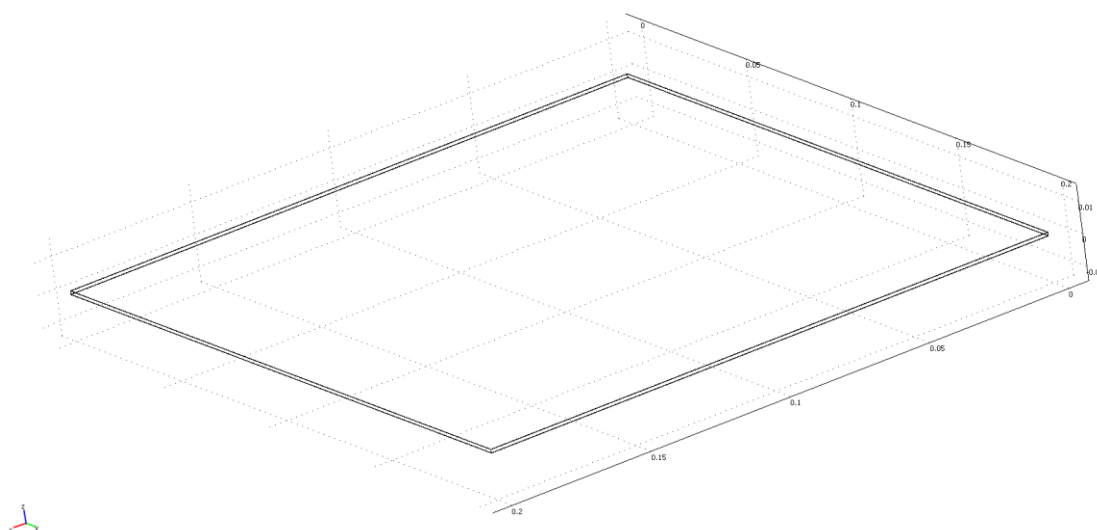
ΕΙΚΟΝΑ 57- ΜΕΤΑΒΟΛΗ 1ΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $\gamma=0,0012$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ



ΕΙΚΟΝΑ 58 - ΜΕΤΑΒΟΛΗ 1ΗΣ ΤΑΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ $\gamma=0,0012$ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

7. Μελέτη μοντέλου 3d με πακτωμένη τη μία πλευρά

Στη συνέχεια, και για να δούμε καλύτερα πως συμπεριφέρεται η σύνθετη πλάκα με τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, σχεδιάσαμε εκ νέου την πλάκα σε 3d καθώς η ανάλυση σε τρεις διαστάσεις θα μας έδινε ασφαλώς μια πιο ξεκάθαρη εικόνα του πώς θα παραμορφωνόταν η πλάκα μας. Δυστυχώς το comsol δεν μπορούσε να εξάγει αποτελέσματα εάν διατηρούσαμε και τις 6 επιφάνειες (λόγω του πολύ μεγάλου πλάτους και μήκους αλλά πολύ μικρού ύψους, η επίλυση διαρκούσε πολλές ημέρες ενώ στο τέλος αδυνατούσε να ολοκληρωθεί η επίλυση), επανασχεδιάσαμε την πλάκα διατηρώντας τις δύο επιφάνειες πιεζοηλεκτρικών στοιχείων αλλά τις 4 επιφάνειες T300/976 τις μετατρέψαμε σε μία ισοδύναμη (με διαστάσεις όπως ίδιες με τις 4 επιφάνειες μαζί).



ΕΙΚΟΝΑ 59 - ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΤΟ COMSOL ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΣΕ ΤΡΙΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

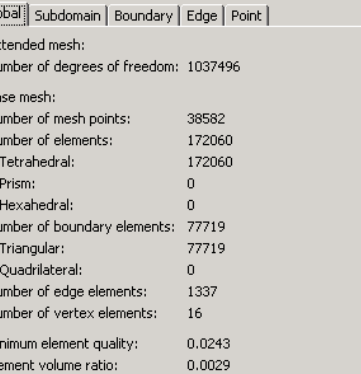
Για τις συνοριακές συνθήκες καθώς και τις ιδιότητες του υλικού χρησιμοποιήσαμε ότι και στο διδιάστατο μοντέλο μας παραπάνω (για ελεύθερη πλάκα αλλά και για πλάκα με πακτωμένη την μία πλευρά αντίστοιχα). Την πάνω πλευρά του κάθε πιεζοηλεκτρικού στοιχείου την θέτουμε zero charge symmetry ενώ την κάτω επιφάνεια Ground.

Θα γίνουν δύο επιλύσεις όπως και στο διδιάστατο μοντέλο μας, μία με πακτωμένη τη μία πλευρά και μία για ελεύθερη πλάκα.

Δημιουργία πλέγματος διακριτοποίησης στο COMSOL

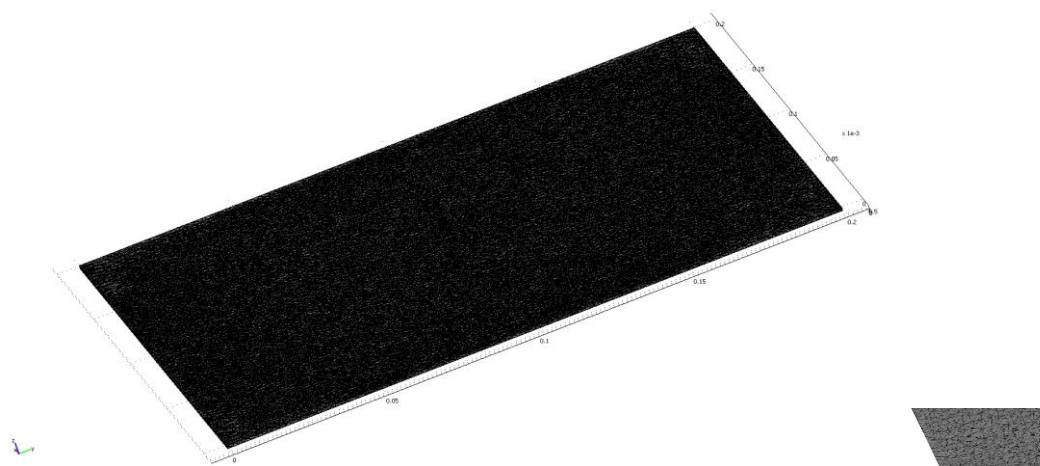
Το πλέγμα της διακριτοποίησης στο Comsol δημιουργείται είτε με τις προεπιλογές του προγράμματος είτε με τρόπο που εισάγει ο χρήστης. Με την αρχική διακριτοποίηση (προεπιλογές Comsol) το comsol δεν μπορούσε να εξάγει αποτελέσματα λόγω του πολύ μεγάλου όγκου δεδομένων προς επεξεργασία. Επομένως, από την επιλογή του Comsol Refine Mesh μειώναμε σταδιακά τον αριθμό στοιχείων και βαθμών ελευθερίας πραγματοποιώντας κάθε φορά επίλυση εκ νέου μέχρι να μπορέσουμε να εξάγουμε λύση έστω και με μειωμένη ακρίβεια.

Τελικώς, η κατασκευή διακριτοποιείται σε 172.060 τετραεδρικά στοιχεία και συνολικά ορίζονται 1.037.496 βαθμοί ελευθερίας (DOF).

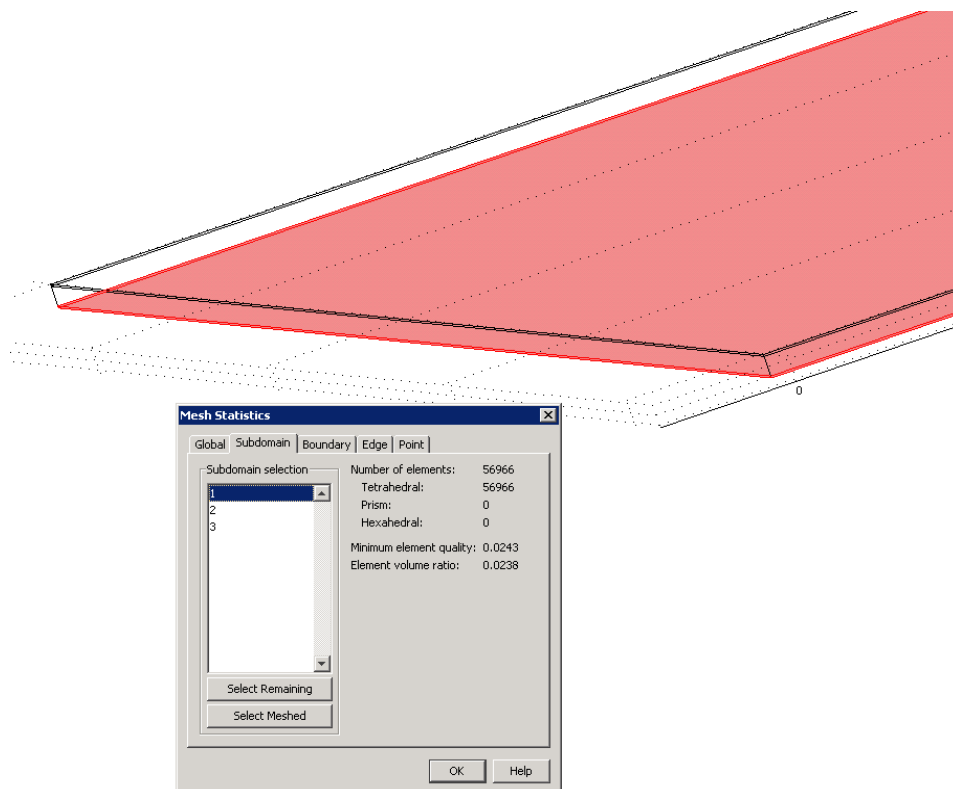


Mesh Statistics				
Global	Subdomain	Boundary	Edge	Point
Extended mesh:				
Number of degrees of freedom: 1037496				
Base mesh:				
Number of mesh points: 38582				
Number of elements: 172060				
Tetrahedral: 172060				
Prism: 0				
Hexahedral: 0				
Number of boundary elements: 77719				
Triangular: 77719				
Quadrilateral: 0				
Number of edge elements: 1337				
Number of vertex elements: 16				
Minimum element quality: 0.0243				
Element volume ratio: 0.0029				

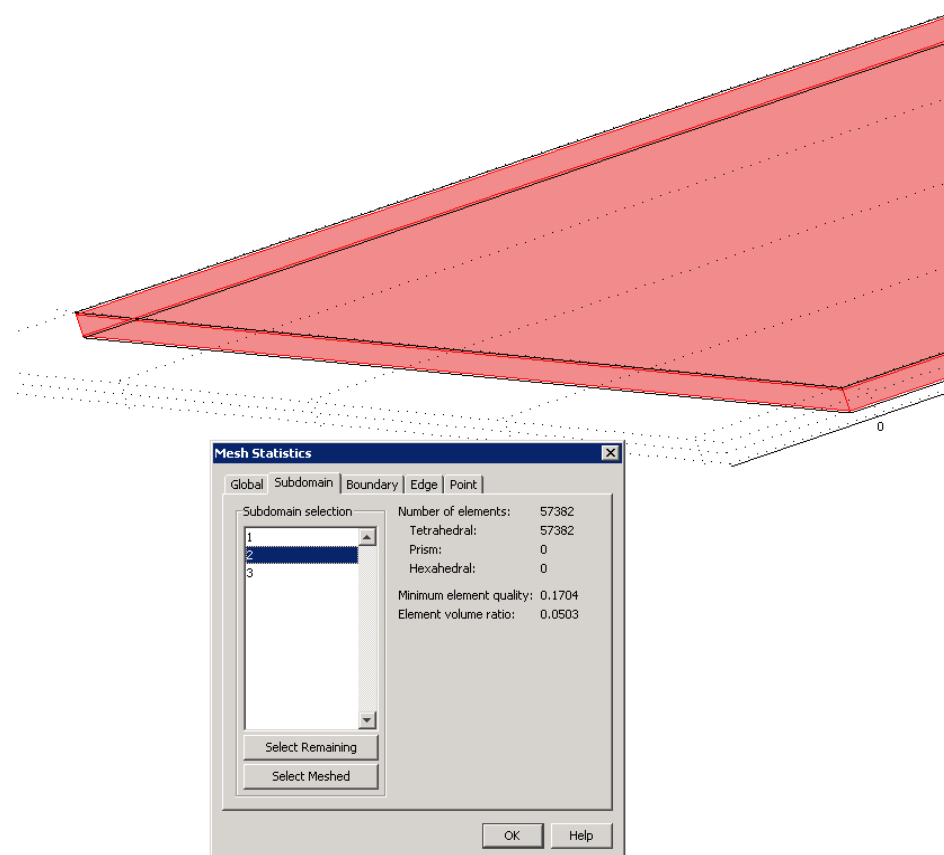
ΕΙΚΟΝΑ 60 - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΛΑΚΑΣ



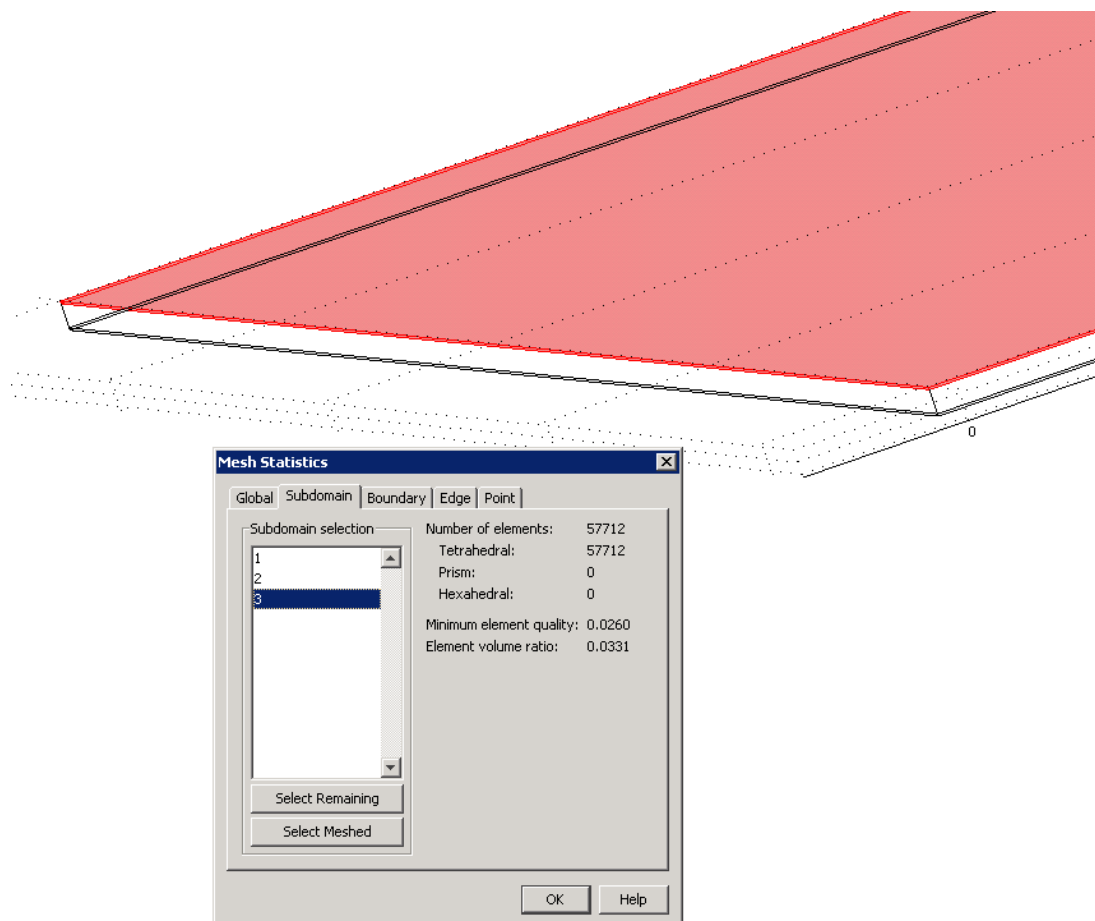
ΕΙΚΟΝΑ 61 - ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ



ΕΙΚΟΝΑ 62 - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΤΩ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ



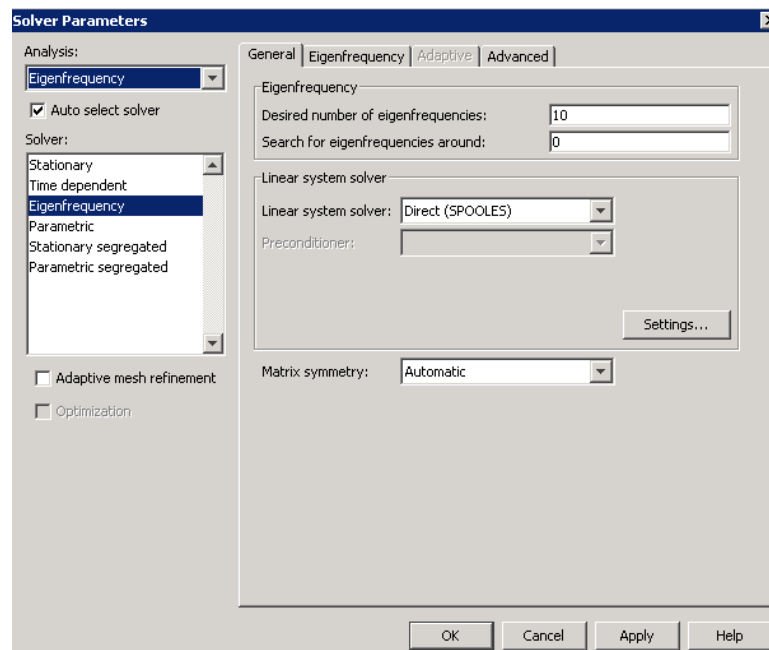
ΕΙΚΟΝΑ 63 - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΠΟΞΙΚΟΥ ΓΡΑΦΙΤΗ T300/976



ΕΙΚΟΝΑ 64 - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΆΝΩ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

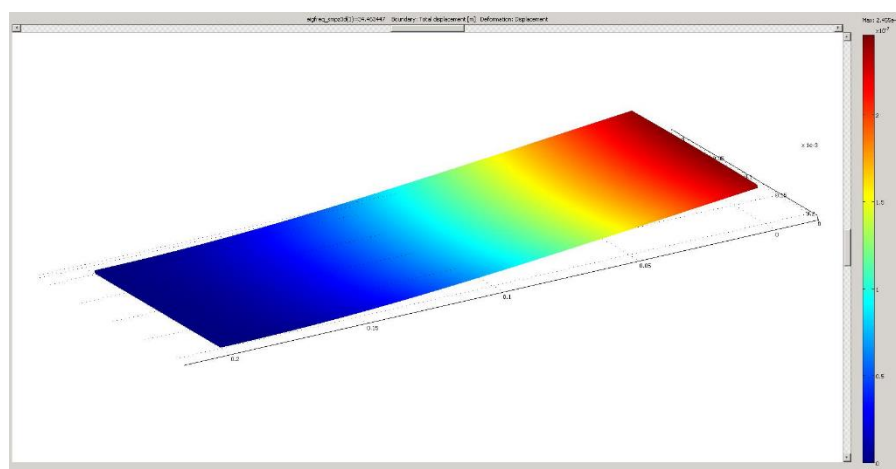
Επίλυση για Σύνθετη πλάκα με πακτωμένη την μία πλευρά

Για την επίλυση, επιλέγουμε από την επιλογή Solver Parameters του Comsol σαν επιλυτή την επιλογή Eigenfrequencies (Ιδιοσυχνότητες), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, ενώ αλλάζουμε τον αριθμό των ιδιοσυχνοτήτων από 6 σε 10.

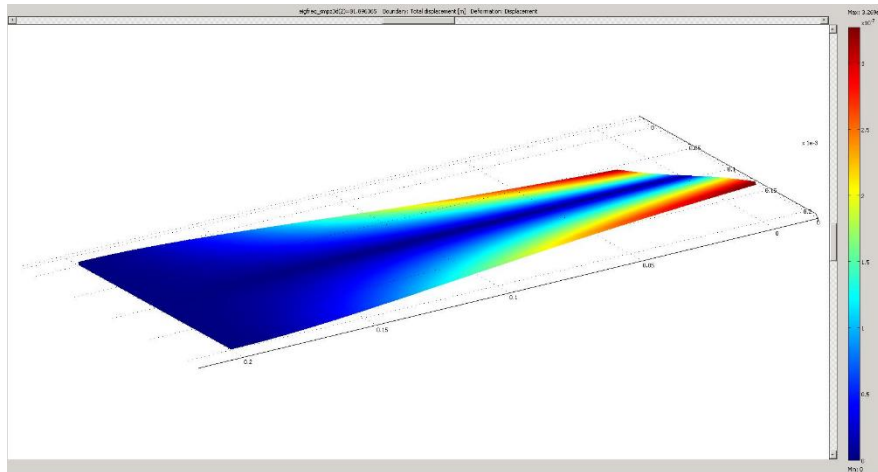


ΕΙΚΟΝΑ 65 - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΛΥΤΗ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

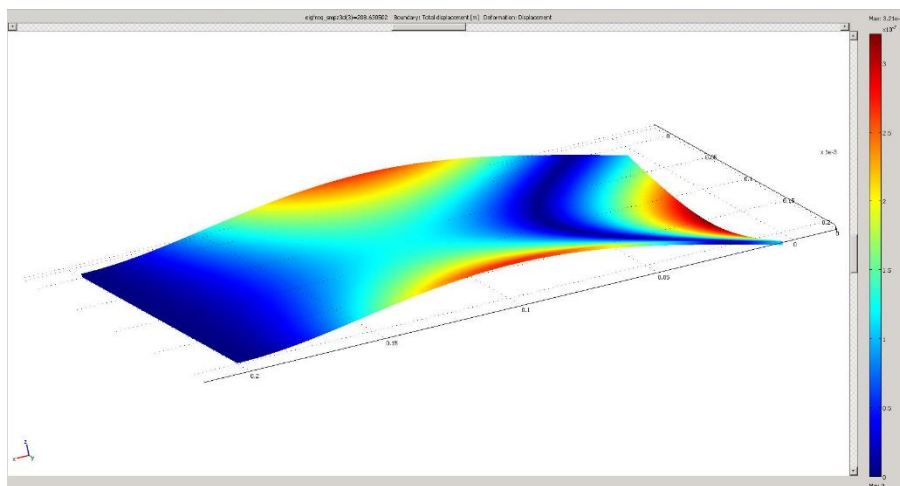
Παρακάτω εμφανίζονται τα αποτελέσματα της συνολικής μετατόπισης της πλάκας για κάθε μία από τις 10 ιδιοσυχνότητες που μας έδωσε σαν αποτέλεσμα το Comsol:



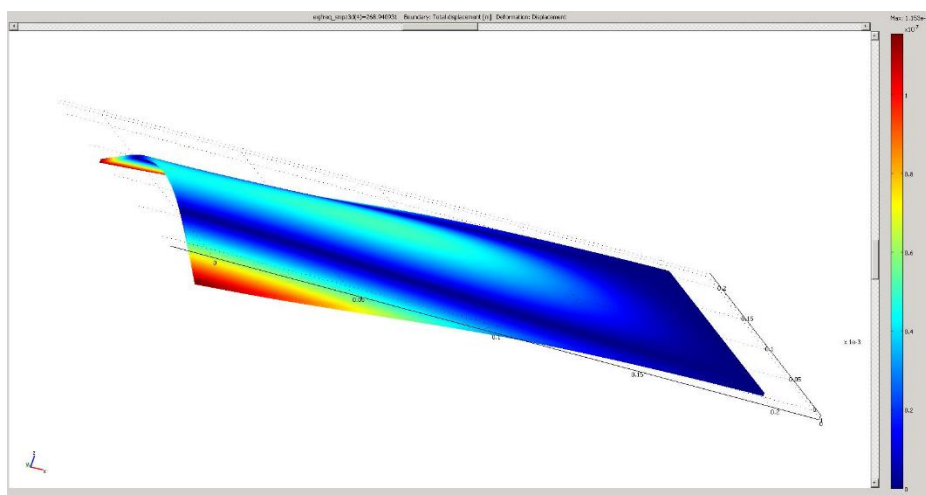
ΕΙΚΟΝΑ 66 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $2,455 \times 10^{-7}$ M) ΓΙΑ 1ST MODE → 34,463447Hz



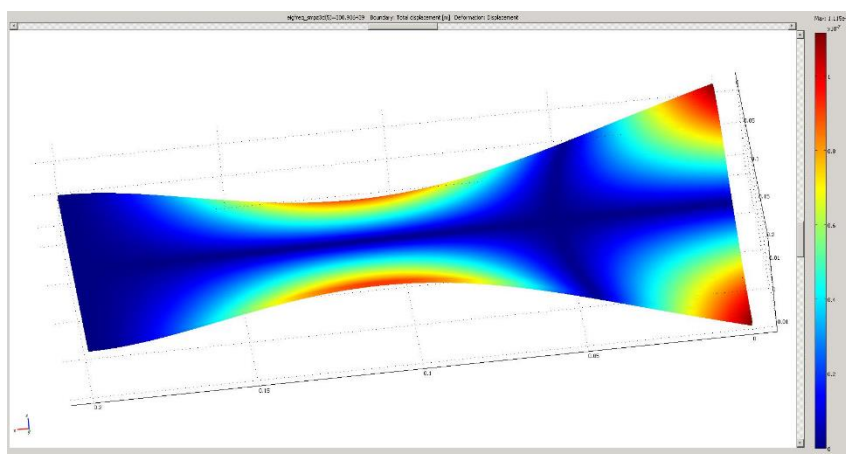
ΕΙΚΟΝΑ 67 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $3,269 \times 10^{-7}$ Μ) ΓΙΑ 2ND MODE → 81,896365Hz



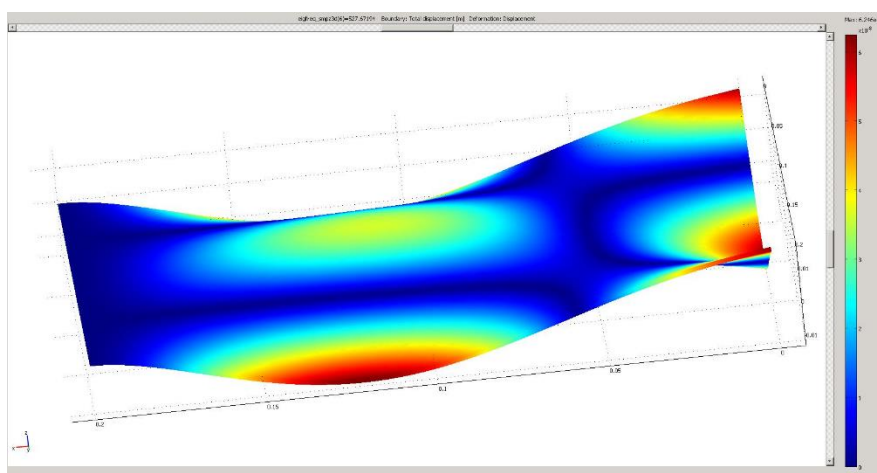
ΕΙΚΟΝΑ 68 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $3,21 \times 10^{-7}$ Μ) ΓΙΑ 3RD MODE → 208,630502Hz



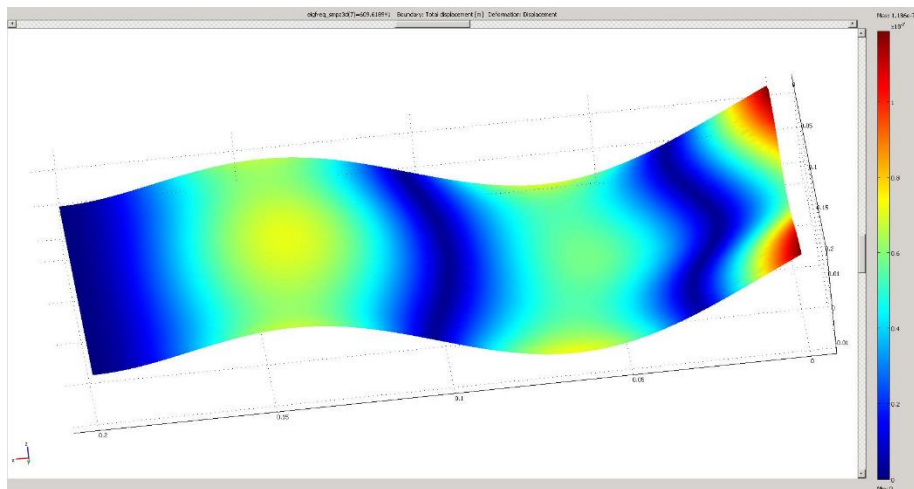
ΕΙΚΟΝΑ 69 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $1,153 \times 10^{-7}$ M) ΓΙΑ 4ΤΗ MODE → 268,940931Hz



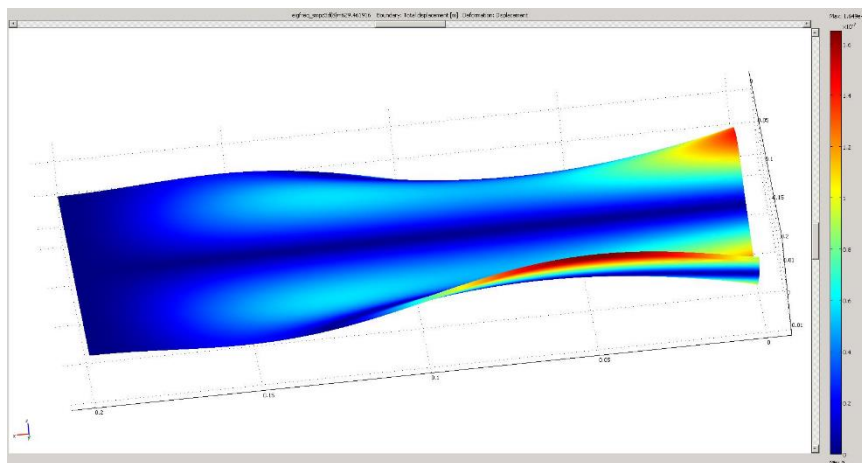
ΕΙΚΟΝΑ 70 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $1,115 \times 10^{-7}$ M) ΓΙΑ 5ΤΗ MODE → 300,936439Hz



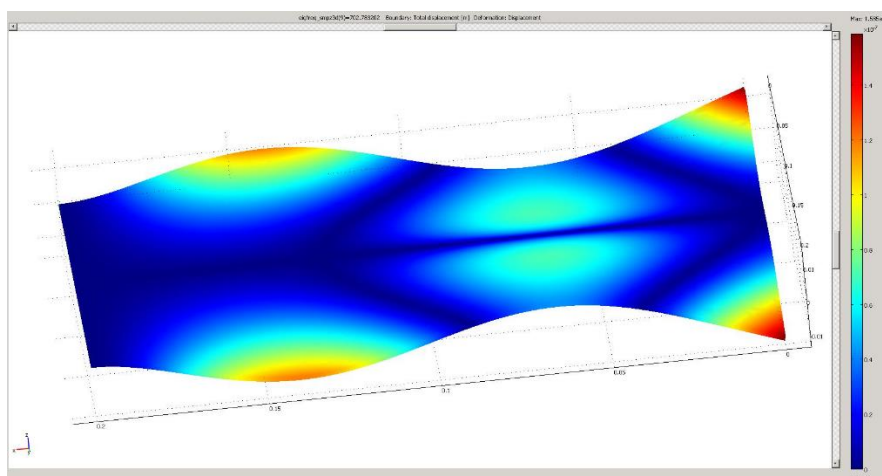
ΕΙΚΟΝΑ 71 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $6,246 \times 10^{-8}$ M) ΓΙΑ 6ΤΗ MODE → 527,67194Hz



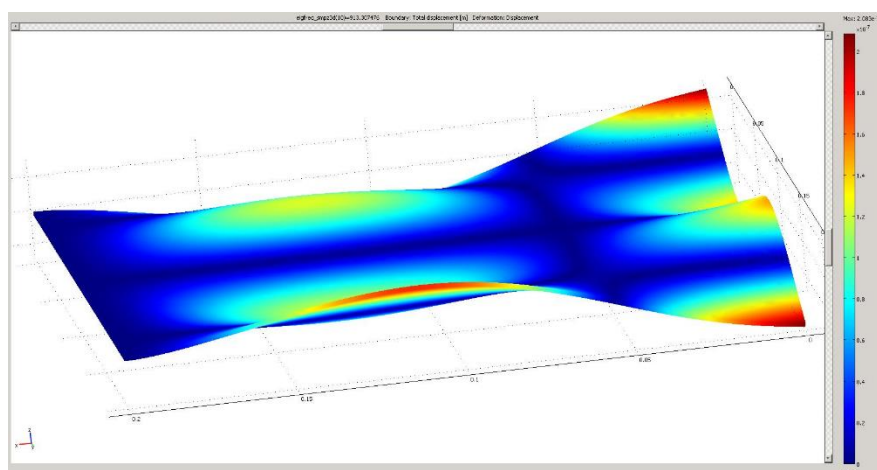
ΕΙΚΟΝΑ 72 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $1,186 \times 10^{-7}$ M) ΓΙΑ 7Η MODE → 609,618941Hz



ΕΙΚΟΝΑ 73 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $1,649 \times 10^{-7}$ M) ΓΙΑ 8Η MODE → 629,461916Hz



ΕΙΚΟΝΑ 74 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $1,585 \times 10^{-7}$ M) ΓΙΑ 9Η MODE → 702,783202Hz

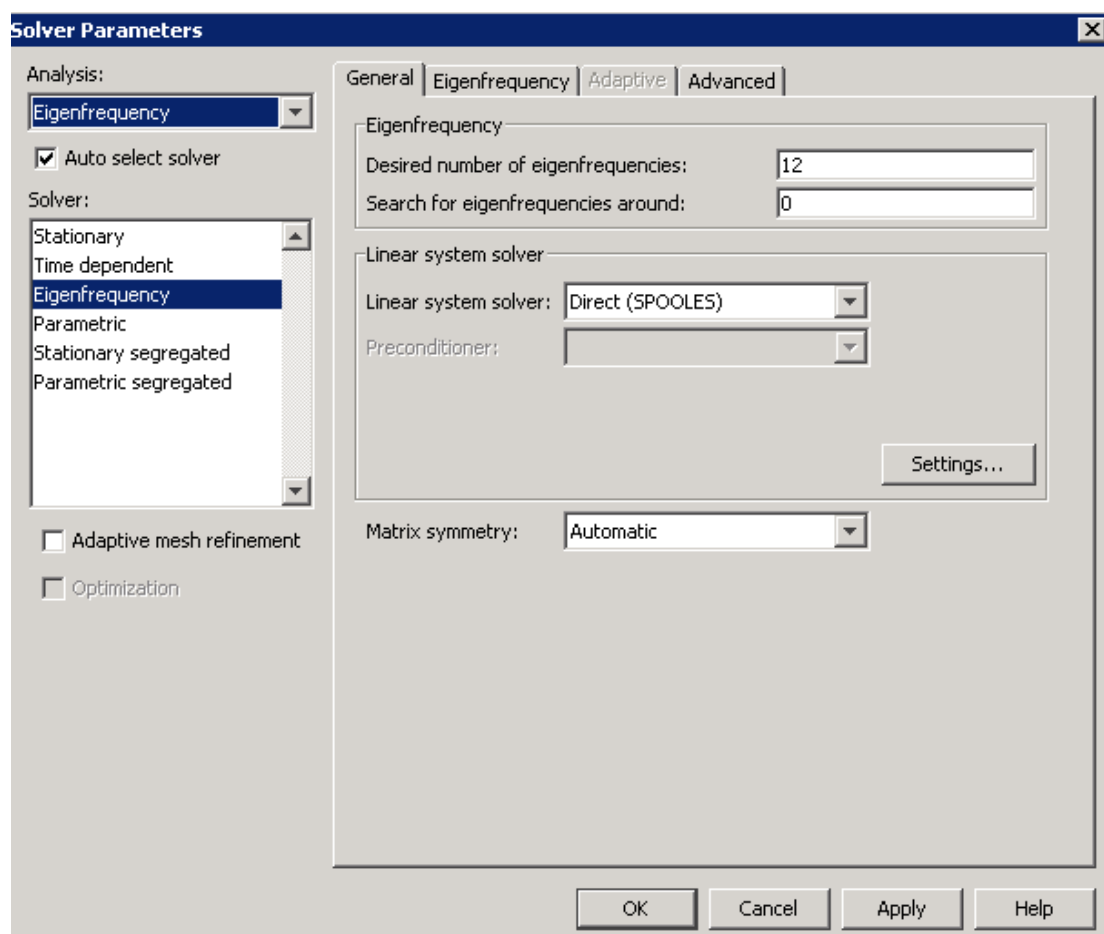


ΕΙΚΟΝΑ 75 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX 2,083x10⁻⁷Μ) ΓΙΑ 10ΤΗ ΜΟΔΕ → 913,307476Hz

8. Μελέτη μοντέλου 3d με ελεύθερη πλάκα

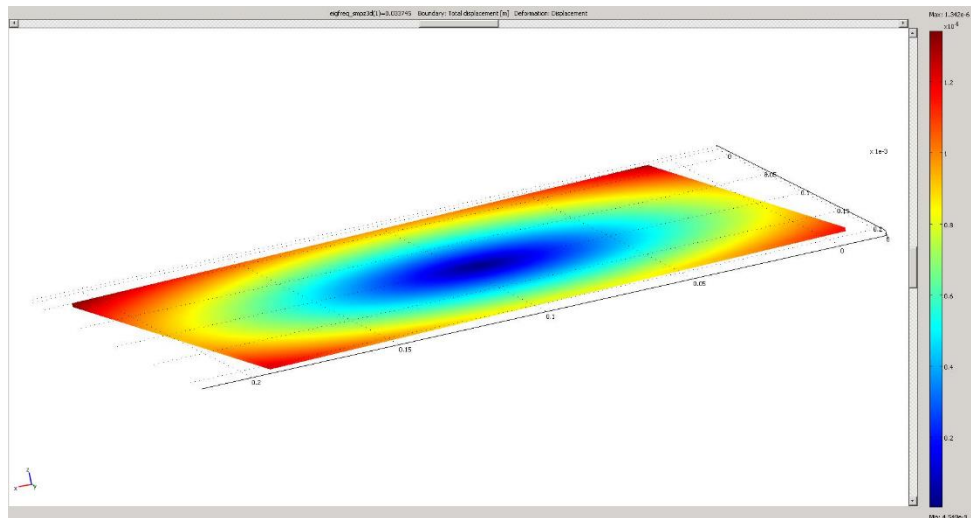
Στη συνέχεια, από τα boundary settings του Comsol, θα αλλάξουμε τις πλευρές της πλάκας που είχαμε πακτωμένες σε ελεύθερες και θα επαναλάβουμε την επίλυση.

Για την επίλυση, επιλέγουμε από την επιλογή Solver Parameters του Comsol σαν solver Eigenfrequencies, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, ενώ αλλάζουμε τον αριθμό των ιδιοσυχνοτήτων από 6 σε 12.

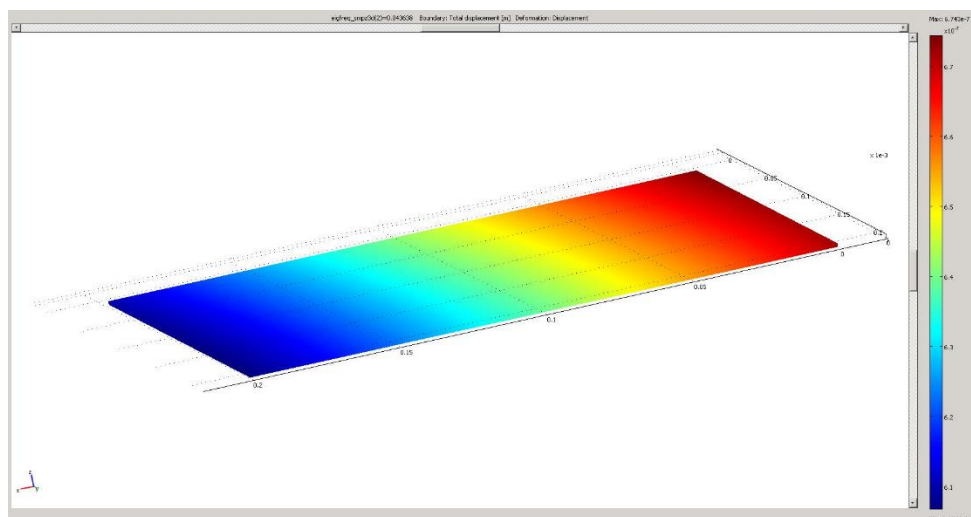


ΕΙΚΟΝΑ 76 - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΙΛΥΤΗ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

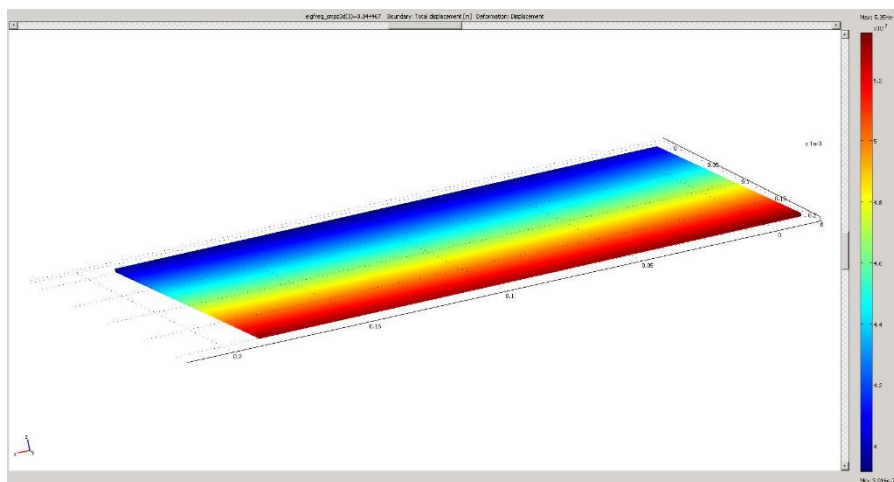
Παρακάτω εμφανίζονται τα αποτελέσματα της συνολικής μετατόπισης της πλάκας για κάθε μία από τις 12 ιδιοσυχνότητες που μας έδωσε σαν αποτέλεσμα το Comsol:



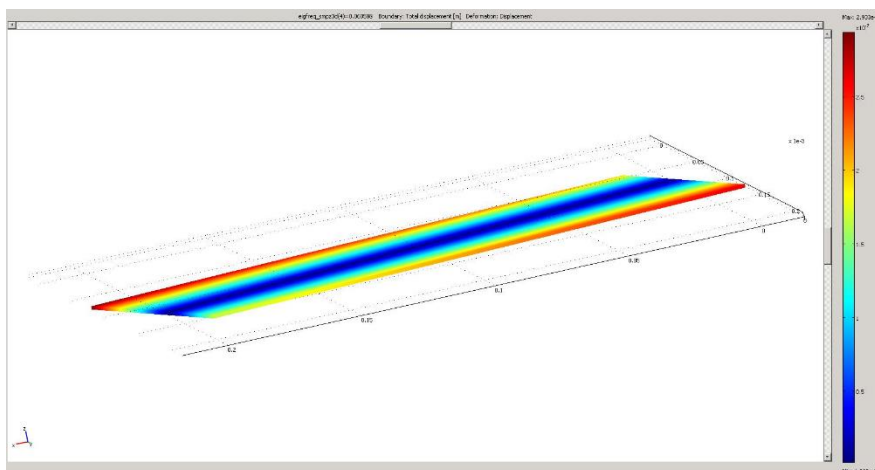
ΕΙΚΟΝΑ 77- ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $1,342 \times 10^{-6}$ M) ΓΙΑ 1ST MODE → 0,033745 Hz



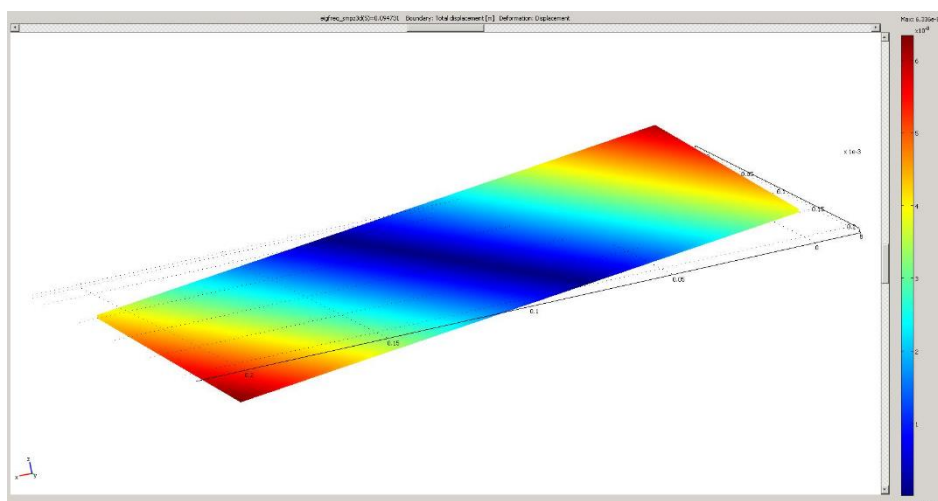
ΕΙΚΟΝΑ 78 -ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $6,743 \times 10^{-7}$ M) ΓΙΑ 2ND MODE → 0,043638 Hz



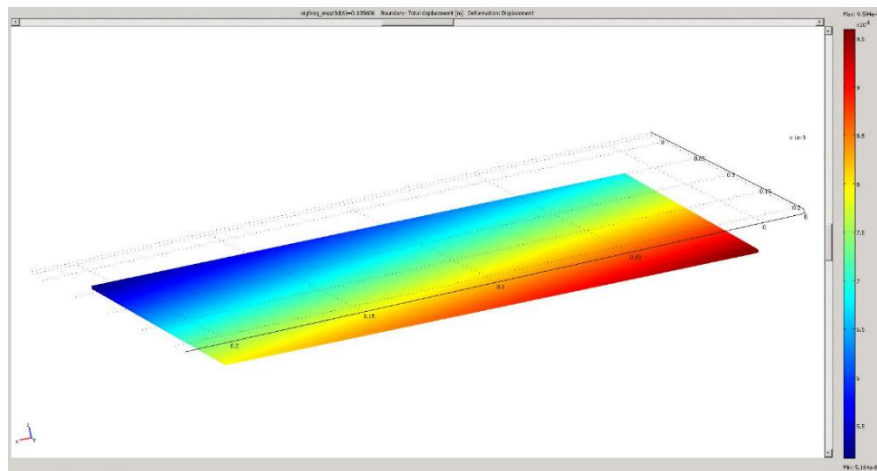
ΕΙΚΟΝΑ 79 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $5,354 \times 10^{-7} \text{m}$) ΓΙΑ 3RD MODE → 0,044467 Hz



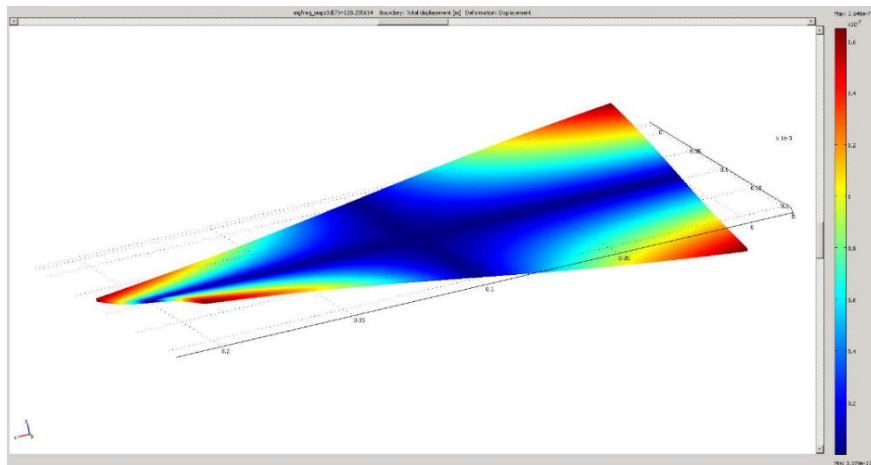
ΕΙΚΟΝΑ 80 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $2,933 \times 10^{-7} \text{m}$) ΓΙΑ 4TH MODE → 0,060588 Hz



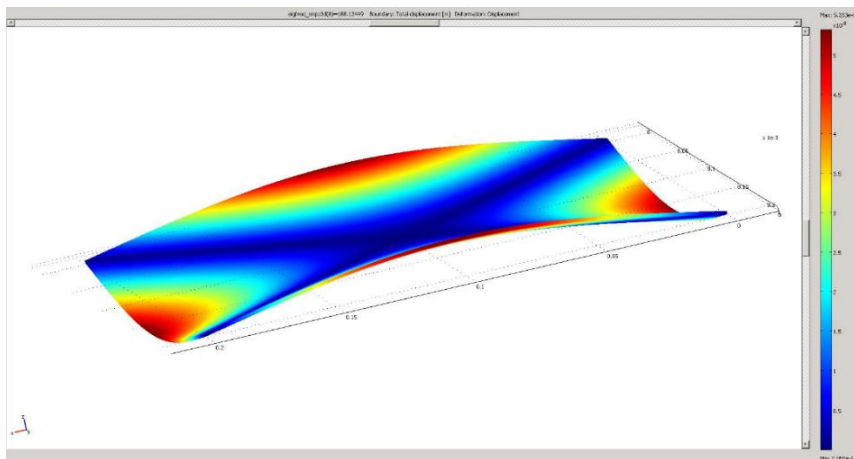
ΕΙΚΟΝΑ 81 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $6,336 \times 10^{-8} \text{m}$) ΓΙΑ 5TH MODE → 0,094731 Hz



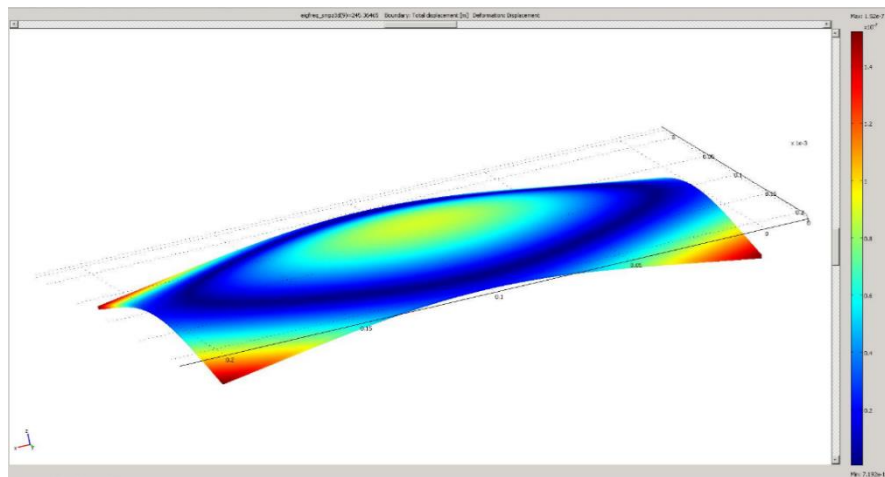
ΕΙΚΟΝΑ 82 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $9,594 \times 10^{-8} \text{m}$) ΓΙΑ 6ΤΗ MODE → 0,105606 Hz



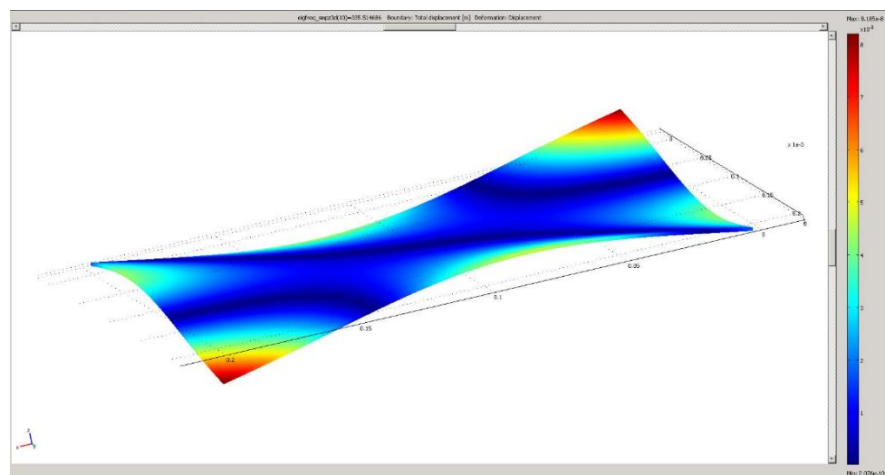
ΕΙΚΟΝΑ 83 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $1,648 \times 10^{-7} \text{m}$) ΓΙΑ 7ΤΗ MODE → 128,255614 Hz



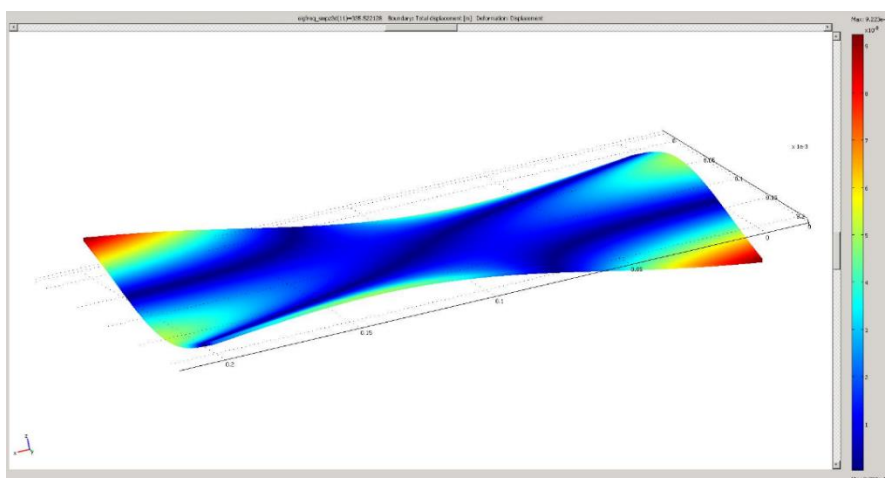
ΕΙΚΟΝΑ 84 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $5,313 \times 10^{-8} \text{m}$) ΓΙΑ 8ΤΗ MODE → 188,13449 Hz



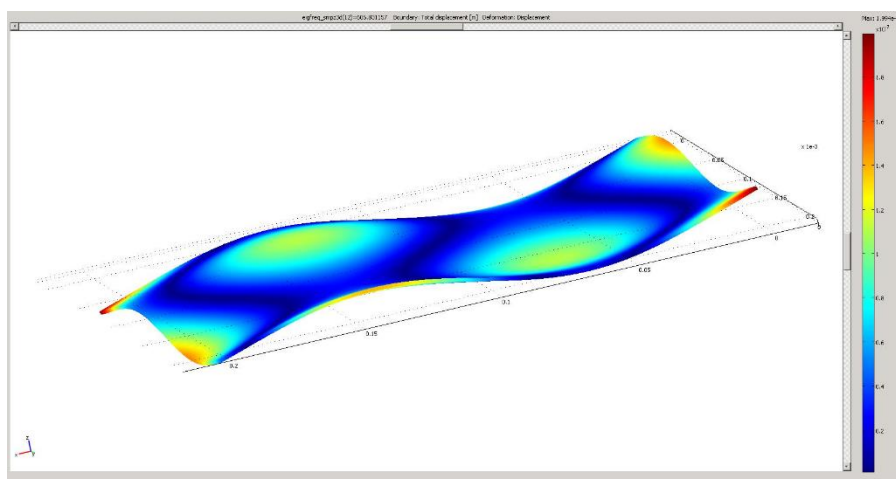
ΕΙΚΟΝΑ 85 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $1,52 \times 10^{-7}$ Μ) ΓΙΑ 9Η ΜΟΔΕ → 245,36465 Hz



ΕΙΚΟΝΑ 86 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $8,185 \times 10^{-8}$ Μ) ΓΙΑ 10Η ΜΟΔΕ → 335,514686 Hz



ΕΙΚΟΝΑ 87 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (ΜΑΧ $9,223 \times 10^{-8}$ Μ) ΓΙΑ 11Η ΜΟΔΕ → 335,522128 Hz



ΕΙΚΟΝΑ 88 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (MAX $1,994 \times 10^{-7}$ M) ΓΙΑ 12ΤΗ ΜΟΔΕ → 606,831157 Hz

9. Συμπεράσματα / Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Μετά από διαδοχικές επιλύσεις, μπορέσαμε να κάνουμε μια ολοκληρωμένη ανάλυση της σύνθετης πλάκας μας, και αν δούμε πως θα ταλαντωθεί εάν ασκήσουμε πάνω της ημιτονοειδή δύναμη με συχνότητα κοντά στην 1^η ιδιοσυχνότητα της.

Δυστυχώς, η χρονική ανάλυση ήταν εφικτή μόνο για πλάκα σχεδιασμένη σε δύο διαστάσεις καθώς ο υπολογιστικός όγκος για την αντίστοιχη πλάκα τριών διαστάσεων έκανε την επίλυση αδύνατη.

Ακόμα και έτσι όμως, τα αποτελέσματα που εξάγαμε είναι πολύ χρήσιμα και μας βοήθησαν ιδιαιτέρως στο να καταλάβουμε πως συμπεριφέρεται η σύνθετη πλάκα που μελετήσαμε υπό την άσκηση ημιτονοειδούς δύναμης. Οι ιδιοσυχνότητες που υπολογίσαμε για όλες τις περιπτώσεις σύνθετων πλακών είναι πάρα πολύ χρήσιμα μεγέθη όταν έχουμε να κάνουμε με κατασκευές που ταλαντώνονται και δίνουν απαραίτητα στοιχεία στον σύγχρονο μηχανικό για πληθώρα εφαρμογών.

Σε επόμενες εργασίες, θα μπορούσε να γίνει προσπάθεια μελέτης αντίστοιχης πλάκας με μικρότερες διαστάσεις όπου θα πιθανόν να ήταν εφικτή η επίλυση υψηλής ακρίβειας και για 3d μοντέλο.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε να γινότανε και μη γραμμική ή ελαστοπλαστική ανάλυση σε αντίστοιχη πλάκα, όπου θα μπορούσαμε να δούμε και εάν υπήρχε αποκόλληση κάποιας επιφάνειας ή θραύση.

10. Βιβλιογραφία

1. Crawley E F and de Luis J 1987 Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures
2. Im S and Atluri S N 1989 Effects of a piezo-actuator on a finitely deformed beam subjected to general loading
3. Lee C K 1992 Piezoelectric laminates: theory and experiment for distributed sensors and actuators *Intelligent Structural Systems* (Deventer: Kluwer)
4. Shen I Y 1995 Bending and torsional vibration control of composite beams through intelligent constrained layer damping treatments *Smart Materials and Structures*
5. Hwang W S and Park H C 1993 Finite element modelling of piezoelectric sensors and actuators
6. Chandrashekhara K and Agarwal A N 1993 Active vibration control of laminated composite plates using piezoelectric devices: a finite element approach *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*
7. Chandrashekhara K and Tenneti R 1995 Thermally induced vibration suppression of laminated plates with piezoelectric sensors and actuators *Smart Mater. Struct.*
8. Tzou H S and Tseng C I 1990 Distributed piezoelectric sensor/actuator design for dynamic measurement/control of distributed parameter system: a piezoelectric finite element approach *J. Sound Vib.*
9. Ha S K, Keilers C and Chang F K 1992 Finite element analysis of composite structures containing distributed piezoceramic sensors and actuators
10. Ηλίας Κ. Παπαλάιος 2013 *Προσομοίωση και Έλεγχος Ευφρών Πιεζοηλεκτρικών Κατασκευών με χρήση Σύγχρονων Υπολογιστικών Συστημάτων*
11. Tzou H S and Zhong J P 1996 Spatially filtered vibration control of cylindrical shells *Shock Vib.*
12. Shi G and Atluri S N 1990 Active control of nonlinear dynamic response of space-frames using piezoelectric actuators *Comput. Struct.*

13. Kim S J and Jones J D 1991 Semi-active control of a composite beam using embedded piezoelectric actuators *Smart Struct. Mater., Winter Annu. Meeting ASME (Atlanta, GA)*
14. Pai P F, Nayfeh A H, Oh K and Mook D T 1993 A refined nonlinear model of composite plates with integrated piezoelectric actuators and sensors. *Int. J. Solids Struct*
15. Reddy J N 1997 *Mechanics of Laminated Plates: Theory and Analysis*. (Boca Raton, FL: Chemical Rubber Company)
16. Tiersten H F 1969 *Linear Piezoelectric Plate Vibrations*. (New York: Plenum)
17. Bathe K J 1987 *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall)
18. K Y Lam†, X Q Peng†, G R Liu† and J N Reddy‡ 1997 A finite-element model for piezoelectric composite laminates
19. Φουρνιανάκης Σ. Ιωάννης, «Μοντελοποίηση Θαλάσσιου Ενεργειακού Συλλέκτη με χρήση Πιεζοηλεκτρικής Τεχνολογίας και ανάλυση με μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων », 2015
20. Βασιλική Κόκκινου, «Ανάλυση και Μοντελοποίηση Μιας γέφυρας με Ενσωματωμένα Πιεζοηλεκτρικά Υλικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων» (2015)
21. Metwally Emam, «Finite Element Analysis Of Composite Piezoelectric Beam Using Comsol»
22. Παπαντωνίου Γιάννης, Χασαπόπουλος Θάνας, «Ευφυείς αυτο-ελεγχόμενες και αυτο-επιδιορθώμενες κοχλιωτές συνδέσεις σε μεταλλικές κατασκευές» (2010)
23. Αγγελόπουλος Δημήτριος, “Σχεδιασμός κατακόρυφου δράπανου και δυναμική ανάλυση μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων” ,2014
24. Δημητρης Σ. Βαρελης, «Ανάπτυξη Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων Για Την Επίλυση Της Συζευγμένης Μη-Γραμμικής Συμπεριφοράς Ευφυών Σύνθετων Πλακών Και Κελύφων Με Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία»
25. Dorina Popovici, Florin Constantinescu, Mihai Maricaru, Florea Ioan Hantila, Miruna Nitescu and Alexandru Gheorghe, «Modeling and Simulation of Piezoelectric Devices»