

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ
ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: Αγαθοκλέους Θεόφιλος
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Σταυρουλάκης Γεώργιος

Χανιά, Σεπτέμβριος 2013

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία δε θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς τη βοήθεια και υποστήριξη του κ.Γεώργιου Σταυρουλάκη, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Αντρέα και Έρσα για την αμέριστη υποστήριξή τους καθώς και σε όλους τους φίλους μου που με στηρίζουν.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Εισαγωγή.....	3
2. Πιεζοηλεκτρισμός.....	4
2.1 Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού.....	
2.2 Οι εφαρμογές του πιεζοηλεκτρισμού.....	
2.3 Πιεζοηλεκτρικά στοιχεία.....	
3. COMSOL Multiphysics.....	5
4. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	6
4.1 Γενικά στοιχεία.....	
4.2 Ιστορική αναδρομή.....	
4.3 Στάδια εφαρμογής μεθόδου.....	
5. Βισκοελαστικότητα.....	8
6. Επιλογή υλικών διάταξης.....	9
6.1 Επιλογή πιεζοηλεκτρικού υλικού.....	
6.2 Επιλογή συγκολλητικού υλικού.....	
6.3 Επιλογή υλικού βάσης.....	
7. Μεθοδολογία ανάλυσης.....	12
8. Μέρος Α' (PZT-2).....	16
8.1 Στατική ανάλυση.....	
8.1.1 Στατική ανάλυση (πλεγματοποίηση 2 ^{ου} επιπέδου).....	
8.1.2 Συγκριτικά αποτελέσματα.....	
8.2 Ανάλυση εξαρτώμενη από το χρόνο (loss factor 0.3).....	34
8.3 Ανάλυση εξαρτώμενη από το χρόνο (loss factor 0.8).....	45
8.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Α' μέρους.....	53
9. Μέρος Β' (PVDF).....	54
9.1 Στατική ανάλυση.....	
9.2 Ανάλυση εξαρτώμενη από το χρόνο (loss factor 0.3).....	62
9.3 Ανάλυση εξαρτώμενη από το χρόνο (loss factor 0.8).....	70
9.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Β' μέρους.....	77
10. Αλλαγή εξωτερικής δύναμης.....	78
11. Συγκριτικά αποτελέσματα.....	84
12. Συμπεράσματα/Βιβλιογραφία.....	85

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι η αναλυτική παρουσίαση της μοντελοποίησης μιας σύνθετης διάταξης, που αποτελείται από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο τοποθετημένο σε ένα φύλλο αλουμινίου ανάμεσα στα οποία παρεμβάλλεται ένα στρώμα συγκολλητικού υλικού.

Η μοντελοποίηση γίνεται ώστε να συσχετιστούν οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες διαφορετικής προέλευσης πιεζοηλεκτρικών υλικών, με την εφαρμογή εξωτερικής δύναμης στην συγκεκριμένη διάταξη.

Η μοντελοποίηση πραγματοποιείται εξ'ολοκλήρου στο ειδικό πρόγραμμα **COMSOL Multiphysics 3.4**, με κάποιες από τις προσομοιώσεις να πραγματοποιούνται μέσω του server του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η εργασία χωρίζεται σε δύο κύρια μέρη, το πρώτο αναφέρεται στη μοντελοποίηση της διάταξης με τη χρήση του **πιεζοκεραμικού** υλικού **PZT-2**, ενώ το δεύτερο αφορά στην ίδια διαδικασία με την αντικατάσταση του PZT-2 από το **πιεζοπολυμερές PVDF**. Το μοντέλο που κατασκευάστηκε όπως και η ανάλυση είναι τριών διαστάσεων.

2. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

2.1 Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού

Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα κάποιων υλικών (κρυσταλλικών, κεραμικών, η υλικών που σχετίζονται με τη βιολογία όπως το DNA και αρκετές πρωτεΐνες), να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται μηχανική πίεση, τάση ή ταλάντωση. Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο συμβαίνει όταν το υλικό υπόκειται σε παραμόρφωση υπό την επίδραση κάποιας ηλεκτρικής τάσης. Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι στην ουσία το φαινόμενο της μεταφοράς ελεύθερων φορτίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος. Η έννοια της λέξης πιεζοηλεκτρισμός προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις **πίεση** και **ηλεκτρισμός** και δηλώνει τον ηλεκτρισμό που παράγεται από ένα υλικό όταν ασκείται εξωτερική πίεση πάνω σε αυτό. Ο πιεζοηλεκτρισμός ανακαλύφθηκε το 1880 από τους Pierre & Jacques Curie.

2.2 Οι εφαρμογές του πιεζοηλεκτρισμού

Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως σε πάρα πολλές εφαρμογές. Η εκμεταλλευση του φαινομένου σε τεχνολογικό επίπεδο δεν έχει φτάσει σε καμία περίπτωση τα όρια των δυνατοτήτων του. Πολλές πειραματικές μελέτες εξετάζουν την μελλοντική εφαρμογή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου σε όλο και περισσότερα πεδία. Αυτή τη στιγμή το φαινόμενο χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές της ακουστικής (ηλεκτροακουστική), στη βιοιατρική, στην κατασκευή μικροζυγαριών, αισθητήρων (επιταχυνσιόμετρα, μετατροπείς δύναμης και πίεσης κ.α.), διεγερτών, αισθητήρων θορύβου κ.α. Μερικές από τις πιλοτικές εφαρμογές του φαινομένου που θα μελετήσουν την λειτουργικότητα του για μια ευρεία μελλοντική εφαρμογή του φαινομένου αφορούν στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σαν εναλλακτική μορφή ενέργειας με διατάξεις πιεζοηλεκτρικών στοιχείων που αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της πίεσης που δέχονται. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν η τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών πλακών κάτω από το οδόστρωμα, με σκοπό την αποθήκευση ηλεκτρικού ρεύματος λόγω της πίεσης που ασκεί η κυκλοφορία του δρόμου στις πλάκες, η ακόμα και κάτω από τις πλάκες πεζοδρομίων για τη συλλογή ηλεκτρικού ρεύματος που επαρκεί για το νυχτερινό φωτισμό του δρόμου. Όπως μπορεί να διαπιστώσει κανείς από τις πειραματικές και πιλοτικές εφαρμογές του φαινομένου, οι δυνατότητες εφαρμογής και εκμετάλλευσης είναι ακόμα πολύ μεγάλες και η περαιτέρω έρευνα και εξέλιξη θα συμβάλλει ώστε κάποια στιγμή τα οφέλη και οι εφαρμογές του φαινομένου να είναι εύκολα διακριτά ακόμα και στην καθημερινότητά μας αντικαθιστώντας παλιές τεχνολογίες και βελτιώνοντας ίσως την ποιότητα ζωής.

2.3 Πιεζοηλεκτρικά στοιχεία

Από τις αρχές της ανακάλυψης του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου είχαν βρεθεί διάφορα φυσικά υλικά που κατείχαν τις συγκεκριμένες ιδιότητες. Μερικά από αυτά τα υλικά είναι τα ελαστικά, το μαλλί, το μεταξι, το αλάτι Rochelle, ο χαλαζίας (SiO_2) κ.α. Στο εμπόριο σήμερα υπάρχουν πολυάριθμα πιεζοηλεκτρικά υλικά κατασκευασμένα από τον άνθρωπο. Τα σημαντικότερα από αυτά και τα πιο ευρέως

διαδεομένα είναι το τιτανιούχο βάριο (BaTiO), το τιτανιούχο στρόντιο (SrTiO₃), το APD (δισόξινο φωσφορικό αμμώνιο), ο ζirkονιούχος τιτανιούχος μόλυβδος (PZT), Το συνθετικό πολυμερές PVDF (πολυβινυλιδικό φθώριο) κ.α.

3. COMSOL Multiphysics

Το πρόγραμμα COMSOL Multiphysics

Το **COMSOL Multiphysics** είναι ένα ισχυρό πρόγραμμα κατάλληλο για την μοντελοποίηση και την επίλυση όλων των ειδών των επιστημονικών και τεχνικών προβλημάτων που μπορούν να περιγραφούν από **μερικές διαφορικές εξισώσεις**. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις περιγράφουν πολλούς από τους νόμους της επιστήμης και της φυσικής και παρέχουν τη βάση για τη μοντελοποίηση μεγάλου φάσματος φαινομένων. Το λογισμικό COMSOL Multiphysics προσφέρει στον μηχανικό την δυνατότητα επίλυσης σύνθετων και αλληλεπιδραστικών φυσικών φαινομένων με την **μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων**. Αποτελεί ιδανική πλατφόρμα μοντελοποίησης και σχεδιασμού σε πληθώρα εφαρμογών όπως αισθητήρες και μικρόηλεκτρομηχανολογικές συσκευές (MEMS), προβλήματα ανάλυσης κατασκευών, σχεδιασμό RF συστημάτων, σχεδιασμό ηχείων, μικροφώνων και ακουστικών συσκευών, μοντελοποίηση και ανάλυση εναλλακτών θερμότητας, συσκευών ανάμειξης, αντιδραστήρων και γενικότερα οποιουδήποτε προβλήματος σχεδιασμού και μοντελοποίησης συζευγμένων φυσικών φαινομένων. Η πλατφόρμα του COMSOL εμπλουτίζεται συνεχώς με νέα εργαλεία για την μοντελοποίηση όλο και περισσότερων εφαρμογών και προβλημάτων. Πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του προγράμματος είναι η δυνατότητα που παρέχει για αλληλεπίδραση με άλλες πολύ σημαντικές και ευρέως χρησιμοποιούμενες εφαρμογές, όπως η **MATLAB**, το **PROEngineer** και το **AutoCAD**. Η παρούσα εργασία διενεργήθηκε στην πλατφόρμα **COMSOL Multiphysics 3.4**.

4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 Γενικά στοιχεία

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων του μηχανικού.

Οι εφαρμογές της μεθόδου περιλαμβάνουν από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες, έως την ανάλυση πεδίων ροής και τη ρευστομηχανική.

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί σε ελάχιστες περιπτώσεις, μόνο όπου τα προβλήματα είναι πάρα πολύ απλής μορφής.

Η ανάγκη επίλυσης προβλημάτων σύνθετης μορφής οδήγησε στην ανάπτυξη διαφόρων προσεγγιστικών μεθόδων επίλυσης. Μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους τέτοιου είδους είναι και η **μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (finite elements method)**.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, είναι προσεγγιστική, όμως μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και διαθέτει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλων των ειδών τα προβλήματα.

Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα προβλήματα, κάτι όμως που τείνει να εξαληφθεί λόγω της ανάπτυξης και κυκλοφορίας όλο και ισχυρότερων ηλεκτρονικών υπολογιστών.

4.2 Ιστορική αναδρομή

Τα πρώτα βήματα για την ανάπτυξη της μεθόδου έγιναν πίσω στο 1941 με αφορμή την επίλυση προβλημάτων στη δομική ανάλυση αεροσκαφών.

Το 1941 ο Hrenikoff παρουσίασε τη «μέθοδο των δικτυωμάτων».

Το 1943 ο Courant δημοσίευσε μία εργασία, η οποία χρησιμοποιούσε τριγωνική παρεμβολή σε τριγωνικές υποπεριοχές για να μοντελοποιήσει προβλήματα στρέψης. Ο Turner και άλλοι, δημιούργησαν μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς και άλλα στοιχεία και παρουσίασαν τα αποτελέσματά τους το 1956.

Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία πρωτοχρησιμοποιήθηκε το 1960 από τον Clough.

Από τις αρχές του 1960, οι μηχανικοί χρησιμοποιούσαν τη μέθοδο για να δώσουν προσεγγιστικές λύσεις σε προβλήματα ανάλυσης τάσεων, ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας κ.α.

Ο Ιωάννης Αργύρης το 1955 σε ένα βιβλίο για θεωρήματα ενέργειας και μητρικές μεθόδους, έθεσε τα θεμέλια για την μελλοντική ανάπτυξη των μελετών στα πεπερασμένα στοιχεία.

Το πρώτο βιβλίο για πεπερασμένα στοιχεία από τους Zienkiewicz και Chung κυκλοφόρησε το 1967.

Οι μαθηματικές βάσεις της μεθόδου τέθηκαν τη δεκαετία το '70.

4.3 Στάδια εφαρμογής μεθόδου

1. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα **CAD** και δημιουργείται το μοντέλο.
2. Το μοντέλο χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού γίνει η πλεγματοποίηση, επιλέγεται το είδος επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται μέσω των ειδικών προγραμμάτων **pre processor**.
3. Όταν εισαχθούν τα δεδομένα, το μοντέλο εισάγεται στο πρόγραμμα το οποίο θα πραγματοποιήσει την επίλυση του προβλήματος. Τα προγράμματα αυτά καλούνται **solvers** και χρησιμοποιούν τις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης.
4. Μετά το πέρας της επίλυσης καλούνται προγράμματα **post processors** που αναλαμβάνουν την παρουσίαση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων στο μελετητή.

5. ΒΙΣΚΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Βισκοελαστικότητα είναι η ιδιότητα κάποιων υλικών να παρουσιάζουν χαρακτηριστικά τόσο **ελαστικότητας** όσο και **ιξώδους**, όταν υποβάλλονται σε **παραμόρφωση**. Παχύρευστα υλικά όπως το μέλι με μεγάλο ιξώδες, αντιστέκονται στη διατμητική ροή, ενώ εντείνονται γραμμικά με το χρόνο όταν τους ασκείται μία τάση. Τα ελαστικά υλικά εντείνονται όταν τους ασκείται μία τάση, ενώ επιστρέφουν άμεσα στην αρχική τους κατάσταση μόλις απομακρυνθεί η τάση αυτή. Τα βισκοελαστικά υλικά συνδυάζουν ιδιότητες και από τις δύο αυτές κατηγορίες υλικών και ως τέτοια εμφανίζουν εξαρτώμενη από το χρόνο παραμόρφωση.

Στο 19^ο αιώνα φυσικοί όπως οι Maxwell, Boltzmann και Kelvin, ανακάλυψαν τις βισκοελαστικές ιδιότητες καθώς πειραματίστηκαν με τον ερπυσμό, την ανάκτηση σπασμένων γυαλιών, τα μέταλλα και ελαστικά. Η βισκοελαστικότητα εξετάστηκε περαιτέρω στα τέλη του 20^{ου} αιώνα, όταν είχαν κατασκευαστεί τα συνθετικά πολυμερή υλικά και ήταν ευρεία η εφαρμογή τους.

Όλα τα υλικά παρουσιάζουν κάποια βισκοελαστική συμπεριφορά. Στα συνηθισμένα μέταλλα όπως ο σιδηρος ή το αλουμίνιο, σε θερμοκρασία δωματίου και με άσκηση μικρής τάσης, η συμπεριφορά τους δε διαφέρει σημαντικά από τη συμπεριφορά από αυτή της γραμμικής ελαστικότητας. Τα συνθετικά πολυμερή, το ξύλο, ακόμα και τα μέταλλα σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν διακριτές βισκοελαστικές ιδιότητες. Σε κάποιες εφαρμογές ακόμα και μία μικρή βισκοελαστική συμπεριφορά μπορεί να είναι πολύ σημαντική, γι'αυτό για να είναι πλήρης και ακριβής μία ανάλυση που αφορά σε τέτοια υλικά θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει και την ανάλυση της βισκοελαστικής συμπεριφοράς τους.

6. ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

6.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Υπάρχουν δύο κατηγορίες πιεζοηλεκτρικών υλικών που χρησιμοποιούνται ευρέως σαν αισθητήρες ή διεγέρτες, τα **κεραμικά** και τα **πολυμερή**. Το πιο γνωστό πιεζοκεραμικό υλικό είναι ο **ζirkονιούχος τιτανιούχος μόλυβδος** (PZT), με μοριακό τύπο PbZr(X)Ti1(X)O_3 όπου το (X) λαμβάνει τιμές στο διάστημα (0,1). Απαντάται σε πολλές διαφορετικές συστάσεις, όπως PZT-2, PZT-4, PZT-5A, PZT-5H, PZT-G1195, PZT-8. Χρησιμοποιείται ευρέως ως διεγέρτης και αισθητήρας για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και είναι κατάλληλος για απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας. Αναπτύχθηκε από τους φυσικούς Yutaka Takagi, Gen Shirane, Etsuro Sawaguchi στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας του Τόκιο 1952. Από τα πιεζοπολυμερή το πιο γνωστό είναι το πολυβινυλικό φθορίδιο (PVDF) και χρησιμοποιούνται κυρίως σε αισθητήρες. Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε η συμπεριφορά της διάταξης με την παρουσία PZT και πιο συγκεκριμένα PZT-2 και του πολυμερούς PVDF.

Μηχανικές ιδιότητες PZT-2:

The image displays three software dialog boxes for defining the mechanical properties of PZT-2. Each box has a title bar with a close button (X) and a standard Windows-style border.

Elasticity matrix (Ordering: x, y, z, yz, xz, xy)

1.34868e+011[Pa]	6.78883e+010[Pa]	6.80876e+010[Pa]	0[Pa]	0[Pa]	0[Pa]
6.78883e+010[Pa]	1.34868e+011[Pa]	6.80876e+010[Pa]	0[Pa]	0[Pa]	0[Pa]
6.80876e+010[Pa]	6.80876e+010[Pa]	1.13297e+011[Pa]	0[Pa]	0[Pa]	0[Pa]
0[Pa]	0[Pa]	0[Pa]	2.22222e+010[Pa]	0[Pa]	0[Pa]
0[Pa]	0[Pa]	0[Pa]	0[Pa]	2.22222e+010[Pa]	0[Pa]
0[Pa]	0[Pa]	0[Pa]	0[Pa]	0[Pa]	3.34448e+010[Pa]

Buttons: OK, Cancel

Coupling matrix

p[C/m^2]	0[C/m^2]	0[C/m^2]	0[C/m^2]	9.77778[C/m^2]	0[C/m^2]
0[C/m^2]	0[C/m^2]	0[C/m^2]	9.77778[C/m^2]	0[C/m^2]	0[C/m^2]
-1.81603[C/m^2]	-1.81603[C/m^2]	9.05058[C/m^2]	0[C/m^2]	0[C/m^2]	0[C/m^2]

Buttons: OK, Cancel

Relative permittivity

504.1	0	0
0	504.1	0
0	0	270

Buttons: OK, Cancel

6.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Για την κατασκευή της μελετούμενης διάταξης είναι αναγκαία η ύπαρξη συγκολλητικού υλικού το οποίο θα παρεμβάλλεται ανάμεσα στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και τη μεταλλική βάση της διάταξης. Ειδικές εποξικές ρητίνες είναι κατάλληλες για τέτοιου είδους συγκολλήσεις και για το σκοπό αυτό μελετήθηκαν ειδικές εποξικές ρητίνες του εμπορίου για την καταλληλότητα τους για χρήση στη διάταξη. Καθώς τα συγκεκριμένα υλικά δεν υπάρχουν αποθηκευμένα στη βιβλιοθήκη υλικών του COMSOL Multiphysics, τα χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου θα πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα χειροκίνητα.

Μελετήθηκαν τρία διαφορετικά συγκολλητικά υλικά:

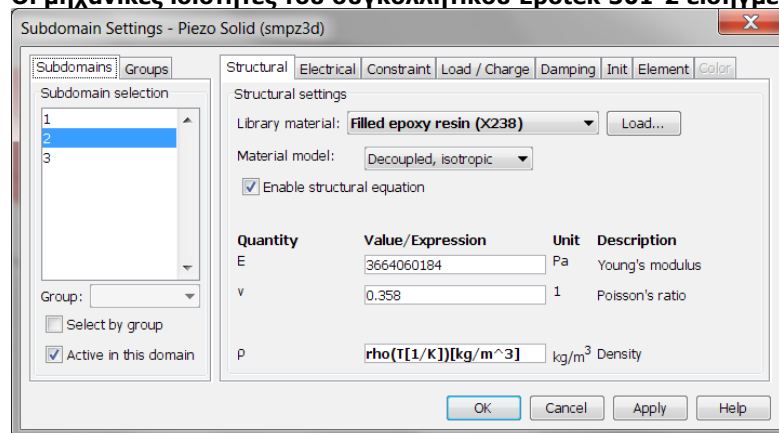
- 1.Epotek 301-2 (Epoxy Technology)
- 2.Hysol 9361 (Henkel)
- 3.Tra-BondF113 (Tra-Con)

Μηχανικές ιδιότητες εποξικών ρητίνων σε πραγματικές συνθήκες:

	Tra-Con F113	Epotek 301-2	Hysol 9361
Young's modulus (E) (psi)	356886 ±12523	531427 ± 6166	154678 ± 1526
Poisson's ratio	0.401 ± 0.003	0.358 ± 0.001	0.433±0.007
Maximum stress (psi)	2539 ± 86	3751± 45	1153± 9

Μετά από μετρήσεις και συγκρίσεις αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη το συγκολλητικό Epotek 301-2 της εταιρίας Epoxy Technology καθώς διαθέτει τα απαιτούμενα για τη συγκεκριμένη διάταξη χαρακτηριστικά.

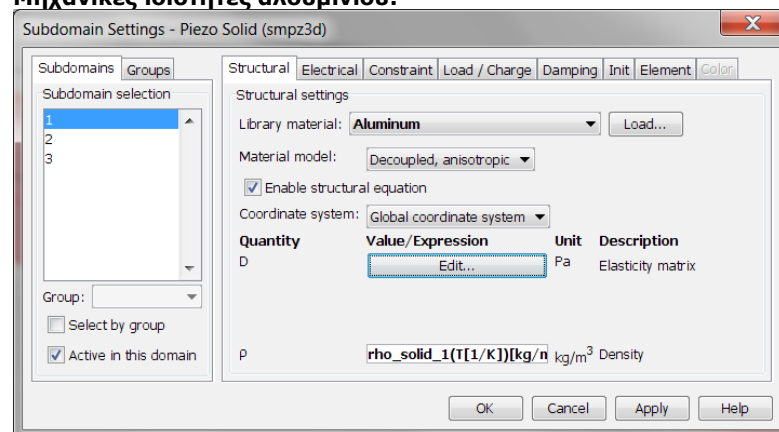
Οι μηχανικές ιδιότητες του συγκολλητικού Epotek 301-2 εισηγμένες στο πρόγραμμα:



6.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ ΒΑΣΗΣ

Για τη στήριξη της διάταξης επιλέχθηκε ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο, το αλουμίνιο.

Μηχανικές ιδιότητες αλουμινίου:



7. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η ανάλυση αποτελείται από δύο κύρια μέρη.

1. Όταν το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είναι PZT-2
2. Όταν το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είναι PVDF

Επιπροσθέτως σε κάθε μέρος διενεργούνται δύο διαφορετικοί τύποι ανάλυσης.

- A) Στατική ανάλυση
- B) Εξαρτώμενη από το χρόνο ανάλυση με αποσβενόμενη ταλάντωση, διαφορετικού ρυθμού απόσβεσης(loss factor)

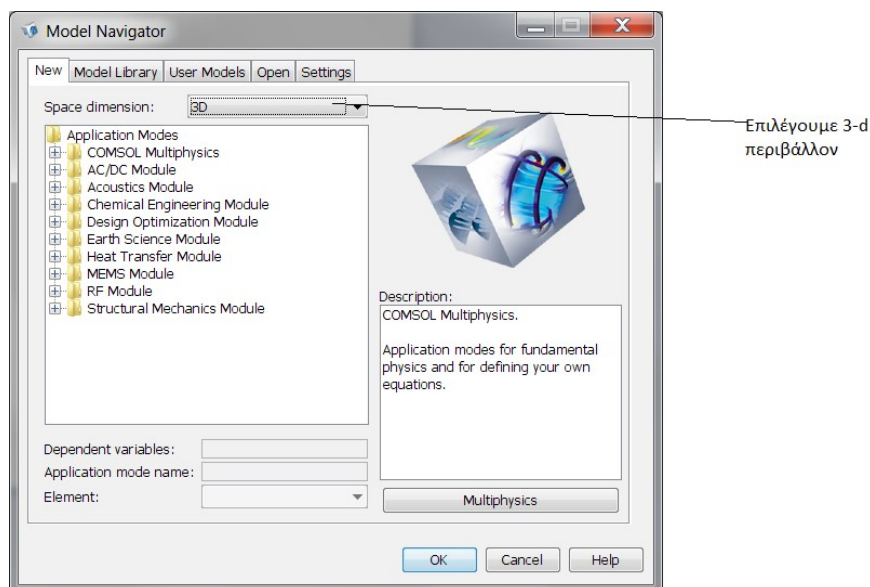
Στην εξαρτώμενη από το χρόνο ανάλυση θα μελετηθεί η συμπεριφορά της διάταξης όταν δημιουργούνται συνθήκες ταλάντωσης στο συγκολλητικό υλικό, λόγω των βισκοελαστικών ιδιοτήτων που παρατηρούνται στα πολυμερή υλικά και πιο συγκεκριμένα στις εποξικές ρητίνες στις οποίες εντάσσεται και το συγκολλητικό υλικό που χρησιμοποιείται στη διάταξη. Τα loss factors που χρησιμοποιούνται είναι 0,3 στη μία περίπτωση και 0,8 στη δεύτερη, ώστε να γίνεται εμφανής η διαφορά αν υφίσταται στη συμπεριφορά της διάταξης.

Αναλυτικά στάδια μοντελοποίησης στο COMSOL Multiphysics.

- 1. Καθορισμός περιβάλλοντος**
- 2. Προσδιορισμός τύπου ανάλυσης**
- 3. Σχεδιασμός διάταξης**
- 4. Προσδιορισμός υλικών, των ιδιοτήτων τους και της συμπεριφοράς του μοντέλου**
- 5. Πλεγματοποίηση (Meshing)**
- 6. Επίλυση**
- 7. Συλλογή αποτελεσμάτων**

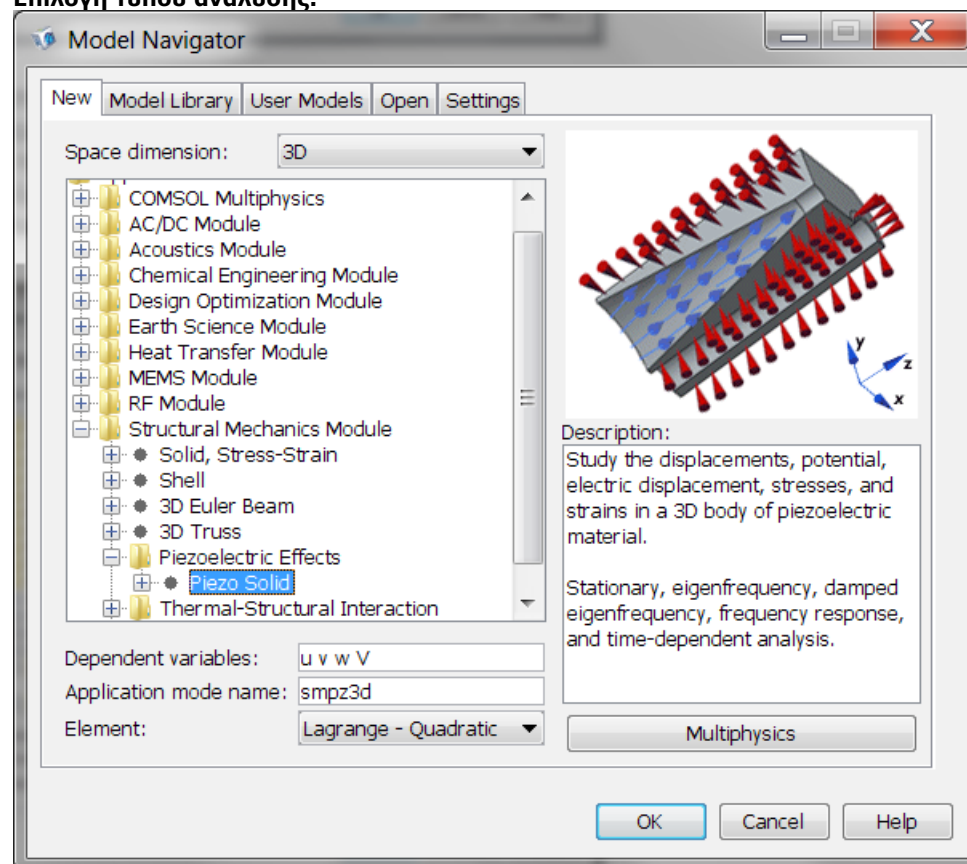
Τα 3 πρώτα στάδια της διαδικασίας μοντελοποίησης είναι πανομοιότυπα σε όλα τα εξεταζόμενα μοντέλα.

Ανοίγοντας το πρόγραμμα COMSOL Multiphysics στο παράθυρο **Model Navigator** που εμφανίζεται επιλέγουμε η ανάλυση να γίνει σε **3-διάστατο** περιβάλλον (1).



Στη συνέχεια επιλέγουμε ανάλογα με την ανάλυση που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε από τα πολυάριθμα είδη που παρέχει το πρόγραμμα. Εδώ πρόκειται για δομική μηχανική ανάλυση που μελετάει το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, οπότε η διαδρομή είναι **Structural Mechanics Module→Piezoelectric Effects→Piezo Solid (2)**.

Επιλογή τύπου ανάλυσης:

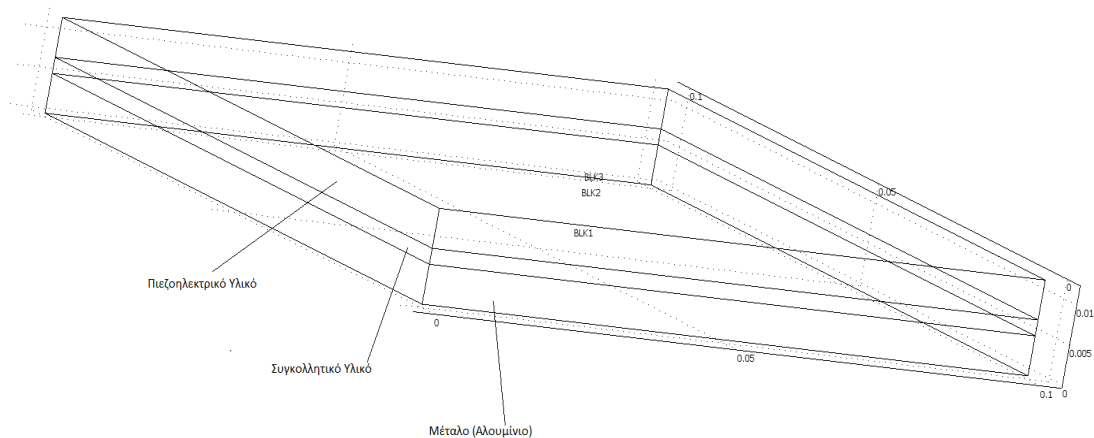


Τέλος απομένει ο σχεδιασμός της προς μελέτη διάταξης (3).

Οι διαστάσεις της διάταξης:

	Μήκος	Πλάτος	Ύψος
Πιεζοηλεκτρικό υλικό (άνω στρώμα)	100mm	100mm	50mm
Συγκολλητικό υλικό (ενδιάμεσο στρώμα)	100mm	100mm	20mm
Μέταλλο (αλουμίνιο, κατώτερο στρώμα)	100mm	100mm	50mm

Η διάταξη σχεδιασμένη με το σχεδιαστικό εργαλείο του COMSOL Multiphysics:



Όπως φαίνεται πρόκειται για μία ορθογωνική διάταξη με τρία «στρώματα». Ξεκινώντας από πάνω, βρίσκουμε το Πιεζοηλεκτρικό υλικό της διάταξης, από κάτω βρίσκεται το συγκολλητικό υλικό και τέλος στο κατώτερο επίπεδο το μέταλλο πάνω στο οποίο εδράζεται η διάταξη.

8. ΜΕΡΟΣ Α΄

Lead Zirconate Titanate (PZT-2)

8.1 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

1.Υλικά και ιδιότητες (Subdomain settings)

Εφ'όσον πρόκειται για απλή στατική ανάλυση, σε αυτό το στάδιο απλά δηλώνουμε τα είδη και τις ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών. Κάποια υλικά βρίσκονται αποθηκευμένα μαζί με τις ιδιότητες του στη Βιβλιοθήκη Υλικών του προγράμματος (**Library Material**). Όσα δεν βρίσκονται εκεί, ή δεν είναι καθορισμένες όλες οι φυσικές τους ιδιότητες, θα πρέπει ο χρήστης του προγράμματος να τα προσθέσει, βρίσκοντας τις ιδιότητες των υλικών αυτών, μελετώντας την κατάλληλη βιβλιογραφία.

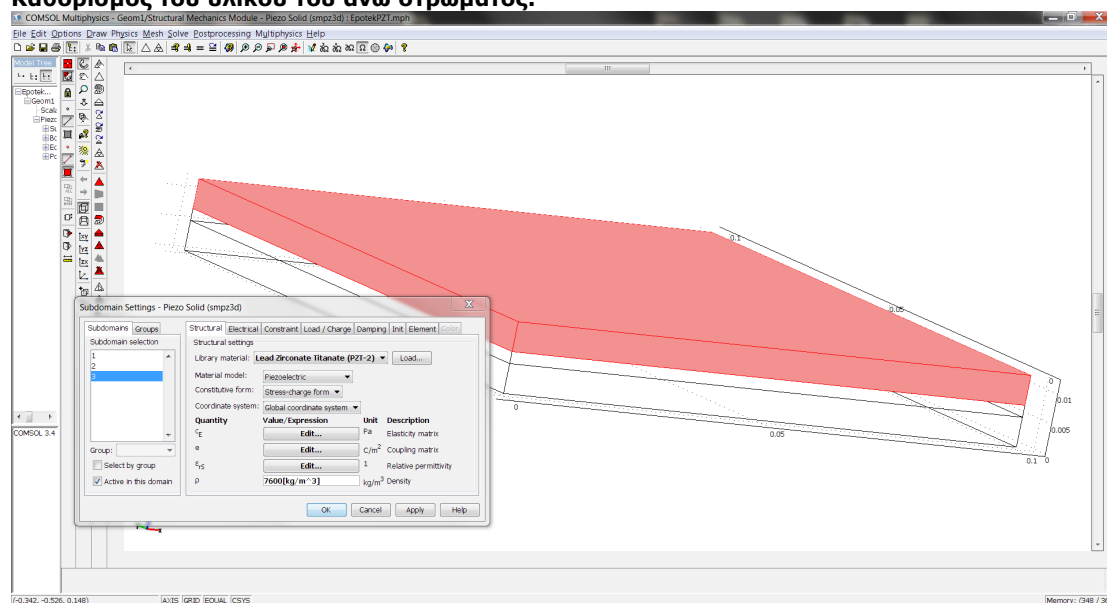
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα υλικά είναι:

Άνω στρώμα: **PZT-2**

Ενδιάμεσο: **Epotek301-2**

Κατώτερο στρώμα: **Αλουμίνιο**

Καθορισμός του υλικού του άνω στρώματος:



PZT-2:

Subdomain Settings - Piezo Solid (smpz3d)

Subdomains Groups

Subdomain selection

1
2
3

Group:

☐ Select by group

☒ Active in this domain

Structural Electrical Constraint Load / Charge Damping Init Element Color

Structural settings

Library material: **Lead Zirconate Titanate (PZT-2)** Load...

Material model: Piezoelectric

Constitutive form: Stress-charge form

Coordinate system: Global coordinate system

Quantity	Value/Expression	Unit	Description
c_E	Edit...	Pa	Elasticity matrix
e	Edit...	C/m ²	Coupling matrix
ϵ_{rs}	Edit...	1	Relative permittivity
ρ	7600[kg/m ³]	kg/m ³	Density

OK Cancel Apply Help

Epotek301-2:

Subdomain Settings - Piezo Solid (smpz3d)

Subdomains Groups

Subdomain selection

1
2
3

Group:

☐ Select by group

☒ Active in this domain

Structural Electrical Constraint Load / Charge Damping Init Element Color

Structural settings

Library material: **Filled epoxy resin (X238)** Load...

Material model: Decoupled, isotropic

☒ Enable structural equation

Quantity	Value/Expression	Unit	Description
E	3664060184	Pa	Young's modulus
ν	0.358	1	Poisson's ratio
ρ	$\rho(T[1/K])[kg/m^3]$	kg/m ³	Density

OK Cancel Apply Help

Υλικό βάσης (αλουμίνιο):

Subdomain Settings - Piezo Solid (smpz3d)

Subdomains Groups

Subdomain selection

1
2
3

Group:

☐ Select by group

☒ Active in this domain

Structural Electrical Constraint Load / Charge Damping Init Element Color

Structural settings

Library material: **Aluminum** Load...

Material model: Decoupled, anisotropic

☒ Enable structural equation

Coordinate system: Global coordinate system

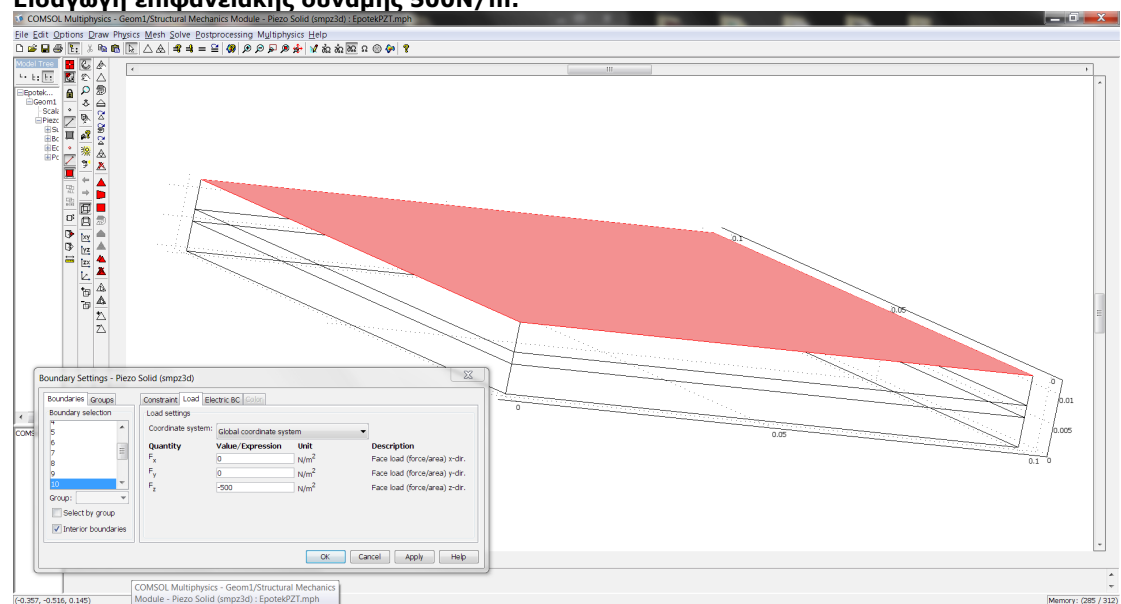
Quantity	Value/Expression	Unit	Description
D	Edit...	Pa	Elasticity matrix
ρ	$\rho_solid_1(T[1/K])[kg/n]$	kg/m ³	Density

OK Cancel Apply Help

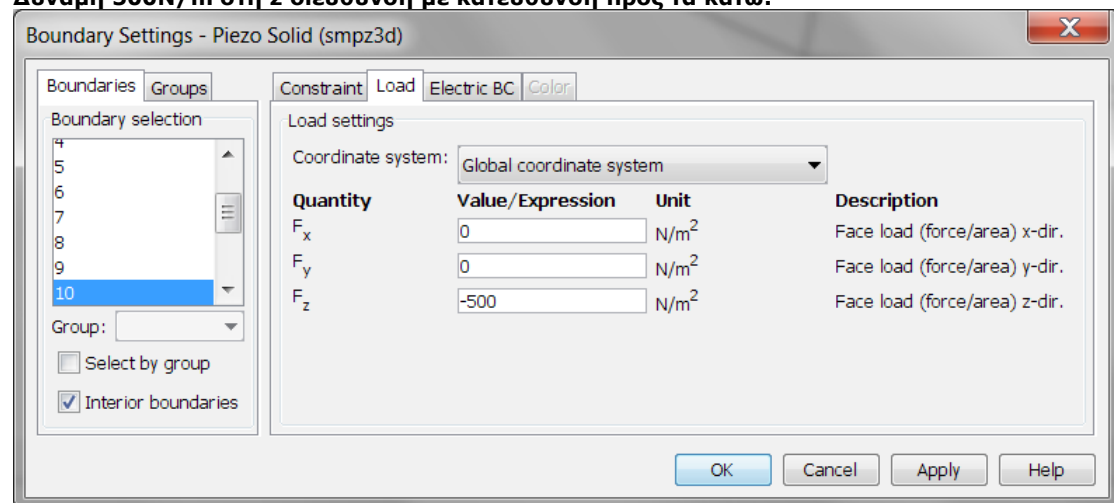
2.Καθορισμός οριακών συνθηκών (Boundary settings)

Πρώτα καθορίζονται οι μηχανικές συνοριακές συνθήκες. Η διάταξη βρίσκεται πακτωμένη και ακίνητη σε ολόκληρη την αριστερή επιφάνεια της και επίσης δέχεται στην άνω επιφάνεια μία εξωτερική δύναμη μέτρου **500N/m** κατά τη **z** διεύθυνση των αξόνων και με κατεύθυνση προς τα κάτω.

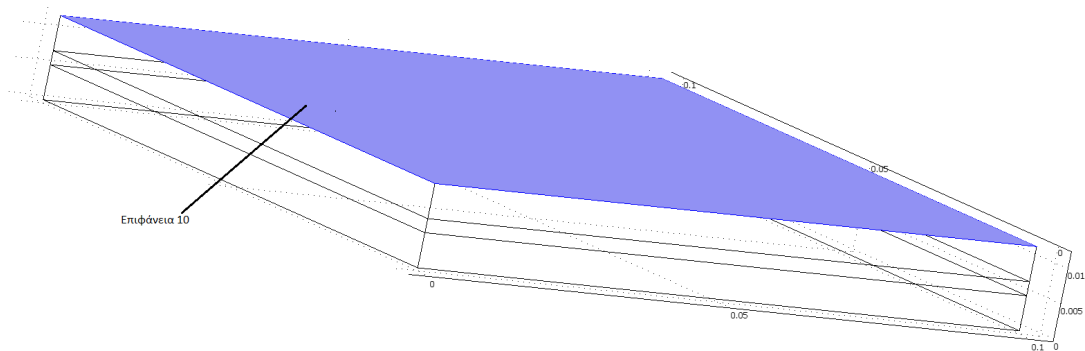
Εισαγωγή επιφανειακής δύναμης 500N/m:



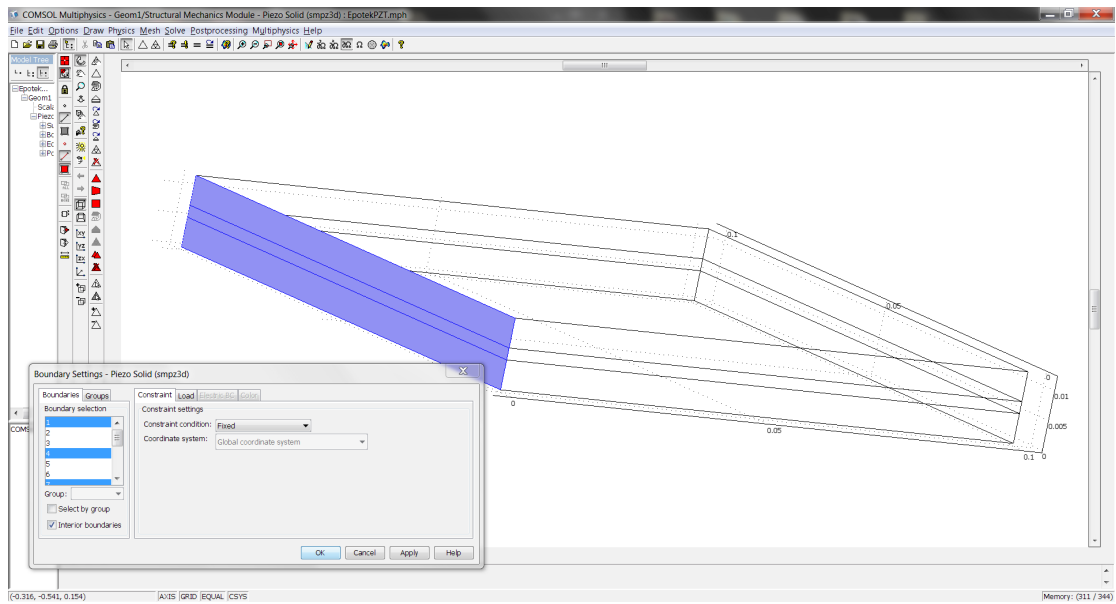
Δύναμη 500N/m στη z διεύθυνση με κατεύθυνση προς τα κάτω:



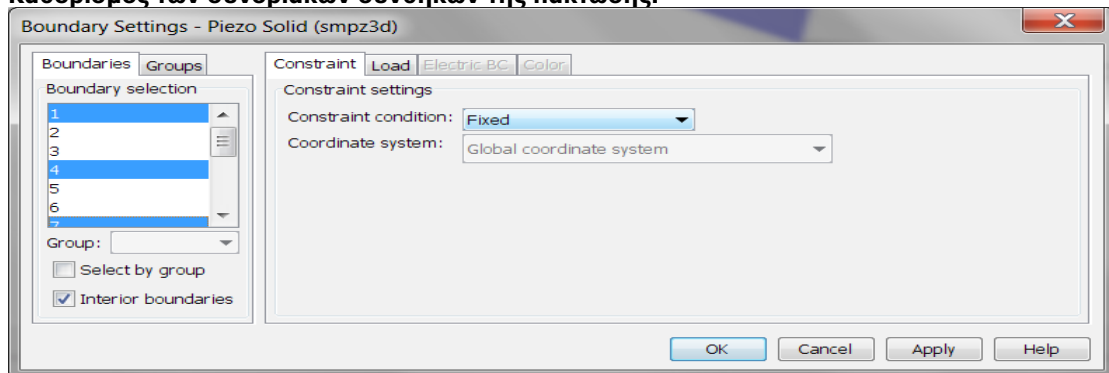
Η επιφάνεια 10 είναι αυτή που δέχεται τη δύναμη:



Οι 3 αριστερές επιφάνειες της διάταξης είναι πακτωμένες και ακίνητες:



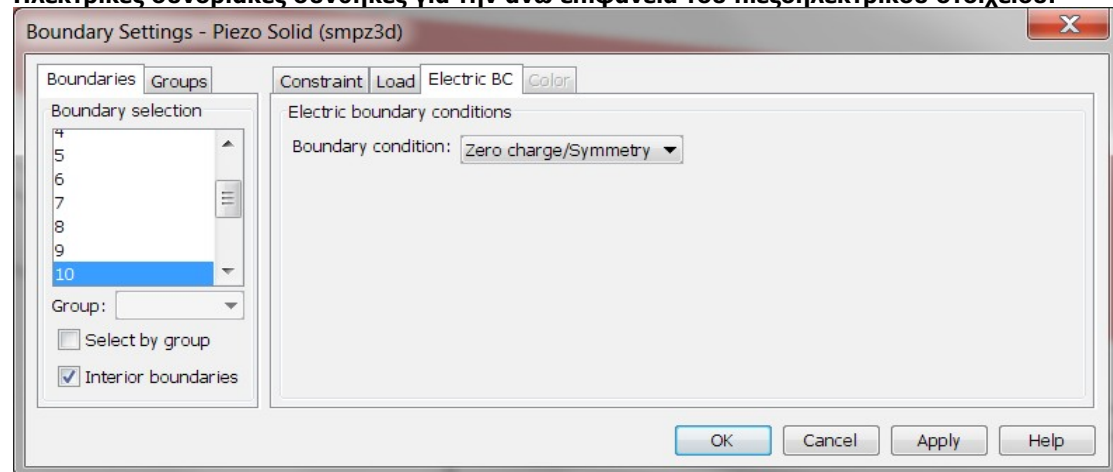
Καθορισμός των συνοριακών συνθηκών της πάκτωσης:



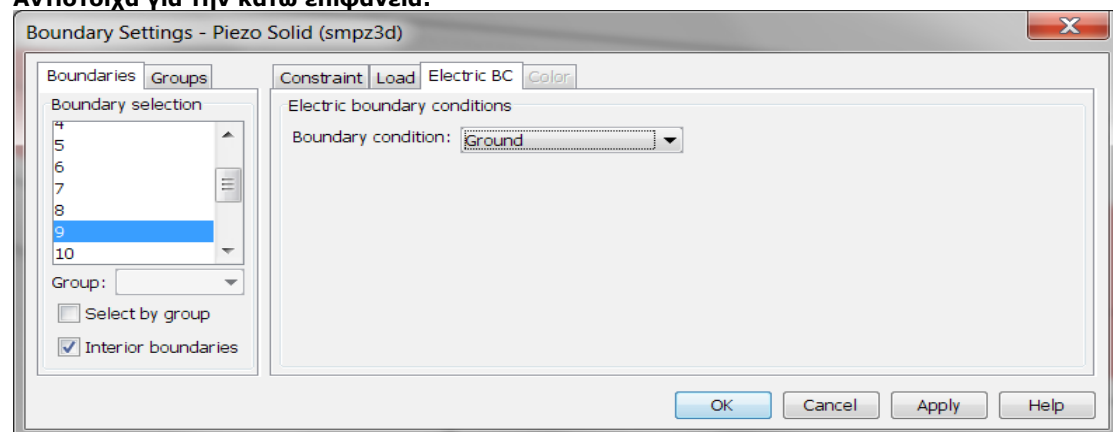
Από τη στιγμή που στη διάταξη υπάρχει πιεζοηλεκτρικό υλικό του οποίου τη συμπεριφορά θέλουμε να μελετήσουμε, είναι αναγκαίο ακόμα, να καθοριστούν οι συνοριακές συνθήκες που θα επικρατούν στις επιφάνειες του πιεζοηλεκτρικού υλικού σε σχέση με τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι η κατώτερη επιφάνεια του

πιεζοηλεκτρικού στοιχείου θα συμπεριφέρεται σαν γείωση ενώ η ανώτερη θα επιτρέπει τη ροή ρεύματος.

Ηλεκτρικές συνοριακές συνθήκες για την άνω επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου:



Αντίστοιχα για την κάτω επιφάνεια:



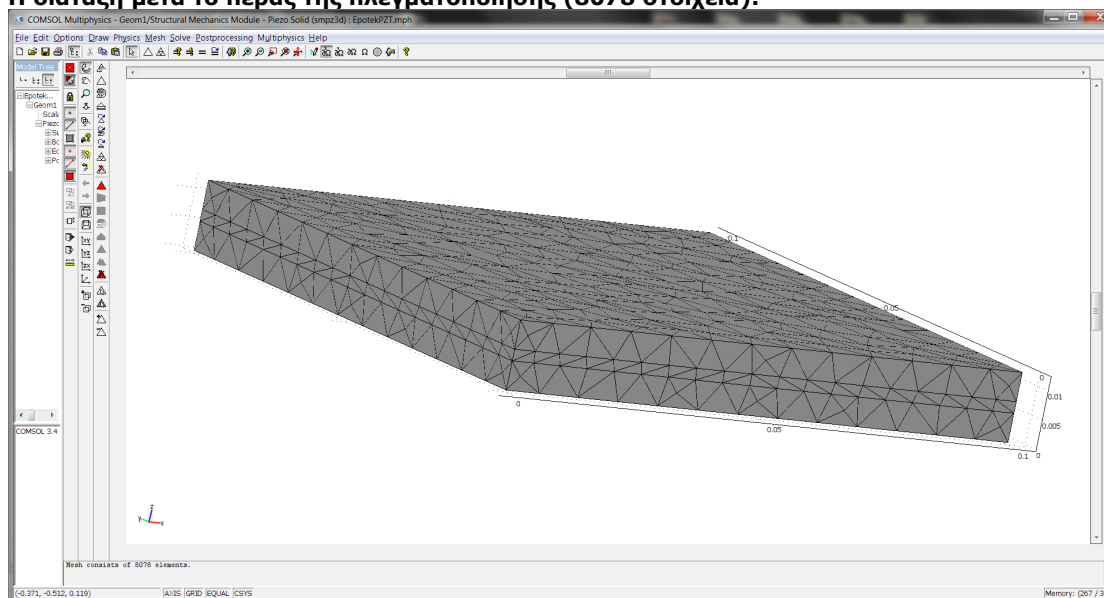
3.Πλεγματοποίηση (Meshing)

Για να εφαρμόσει το **COMSOL Multiphysics** τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στην υπό μελέτη διάταξη και να επιλύσει το πρόβλημα, είναι απαραίτητη η πλεγματοποίηση της διάταξης με το κατάλληλο εργαλείο που παρέχεται απο το COMSOL. Στο σύνολο της εργασίας, πραγματοποιήθηκε πλεγματοποίηση μόνο σε ένα επίπεδο, καθώς η δεύτερη πλεγματοποίηση θα αύξανε σε σημαντικό βαθμό τον υπολογιστικό φόρτο έτσι ώστε η επίλυση από ένα κοινό ηλεκτρονικό υπολογιστή να γινόταν πολύ χρονοβόρα η ακόμα και αδύνατη. Πλεγματοποίηση σε δεύτερο επίπεδο πραγματοποιήθηκε ενδεικτικά σε μία μόνο περίπτωση για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα της πλεγματοποίησης αναλυτικά:

Βαθμοί ελευθερίας	41317
Σημεία πλέγματος	1721
Στοιχεία πλέγματος	8078
Επιφανειακά στοιχεία	3586
Ακμές	268

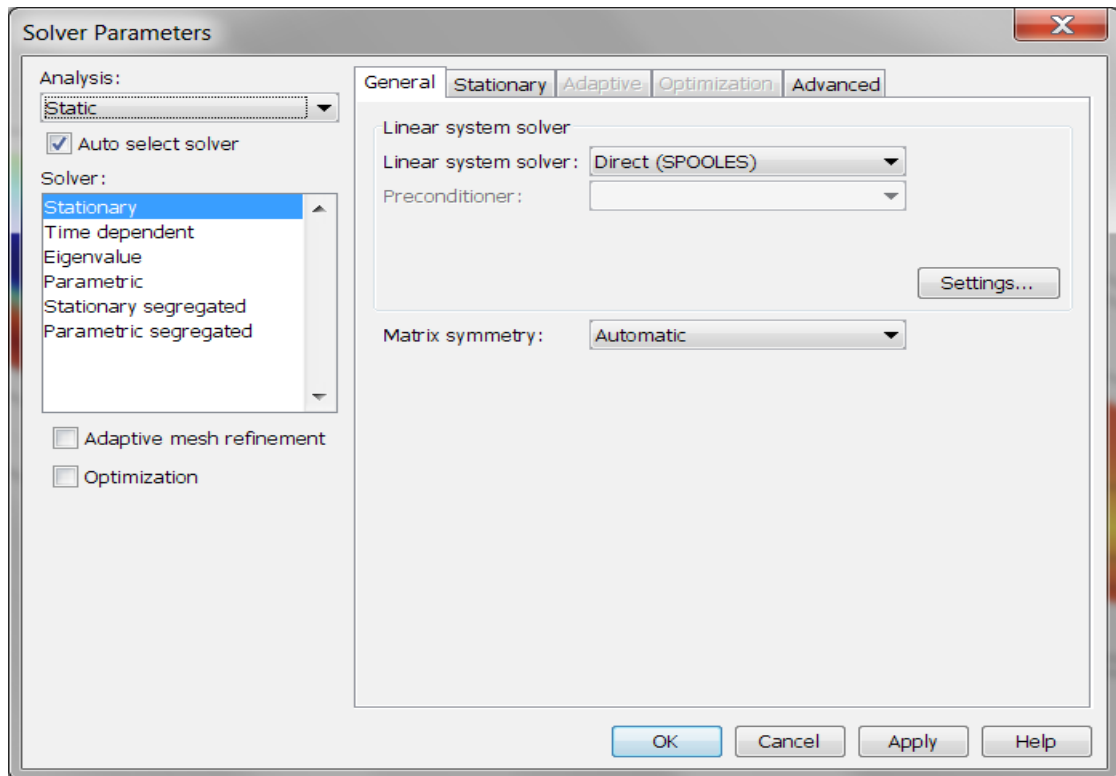
Η διάταξη μετά το πέρας της πλεγματοποίησης (8078 στοιχεία):



4.Επίλυση/Παράμετροι επίλυσης

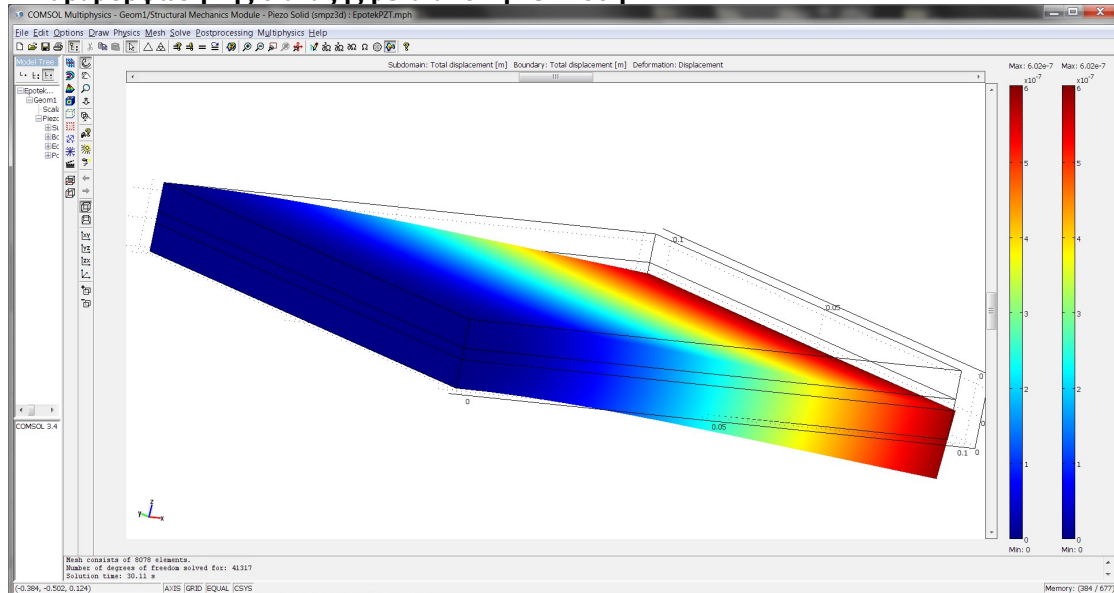
Εφ' όσον έχουν πραγματοποιηθεί όλες οι απαραίτητες προεργασίες και έχουν καθοριστεί όλες οι παράμετροι ώστε η διάταξη να είναι έτοιμη για την πραγματοποίηση της στατικής ανάλυσης, πρέπει να καθοριστούν οι **παράμετροι επίλυσης (solver parameters)**. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί είναι στατική, οπότε επιλέγεται **Analysis→Static** και **Solver→Stationary**.

Παράμετροι επίλυσης για στατική ανάλυση:



Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η επίλυση πραγματοποιείται άμεσα σε χρόνους κοντά στο 1 λεπτό. Αυτό συμβαίνει επειδή η στατική ανάλυση σε μία απλή σχεδιαστικά διάταξη, αποτελεί ένα σχετικά εύκολο πρόβλημα προς επίλυση από τους σύγχρονους ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Η παραμόρφωση της διάταξης μετά από την επίλυση:

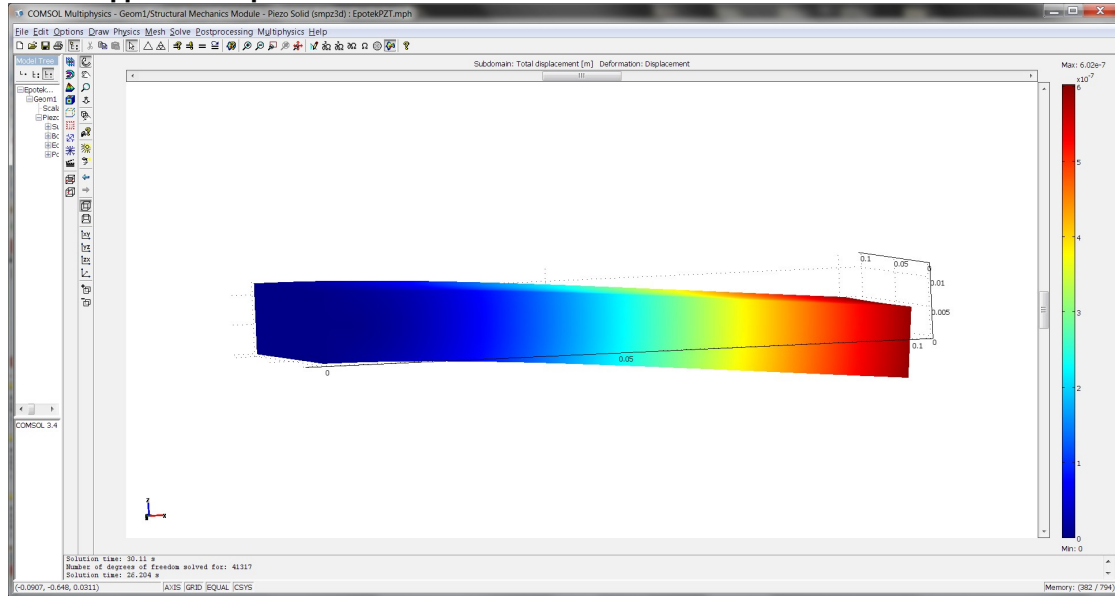


5.Συλλογή και ανάλυση αποτελεσμάτων

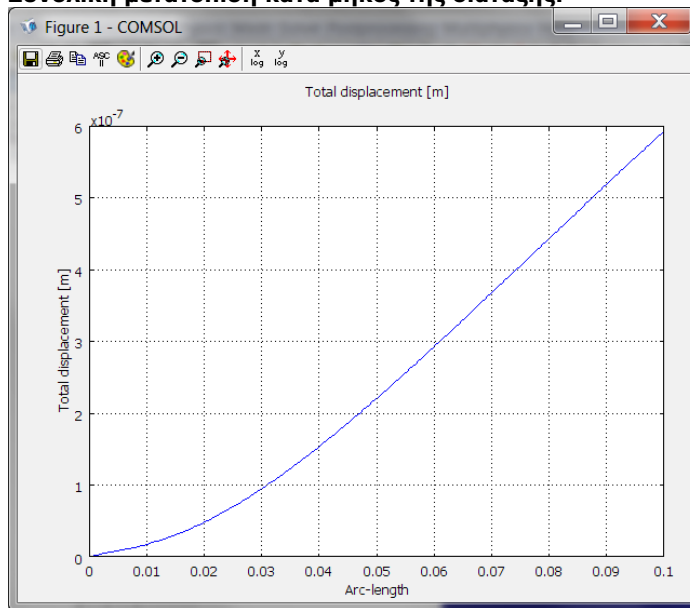
Στο στάδιο αυτό, ύστερα από την επίλυση, είναι δυνατή η συλλογή και η αναλυτική κατόπτευση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων της στατικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος.

Η διάταξη έχει εκτράπει προς τα κάτω υπό την επίδραση της δύναμης, της οποίας η φορά ήταν $-z$. Η **μέγιστη μετατόπιση** παρατηρείται στο ελεύθερο άκρο της διάταξης και είναι **0.602μm**.

Συνολική μετατόπιση:

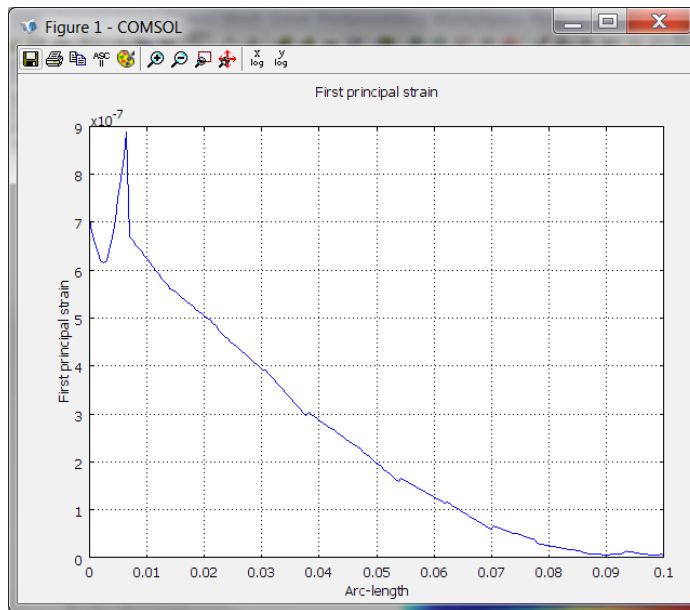


Συνολική μετατόπιση κατά μήκος της διάταξης:

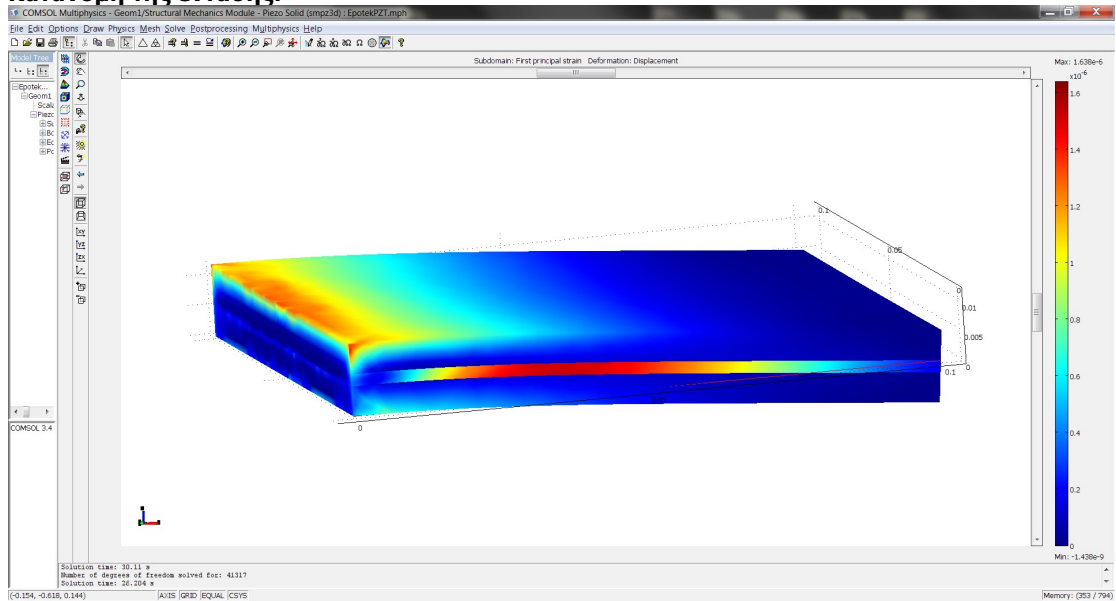


Όπως είναι αναμενόμενο η μεγαλύτερη **ένταση λόγω της εξωτερικής δύναμης** εμφανίζεται στο αριστερό πακτωμένο άκρο της διάταξης καθώς και στο συγκολλητικό υλικό και είναι του μεγέθους **$1.638 \cdot 10^{-6}$** .

Εντάση κατά μήκος της διάταξης:

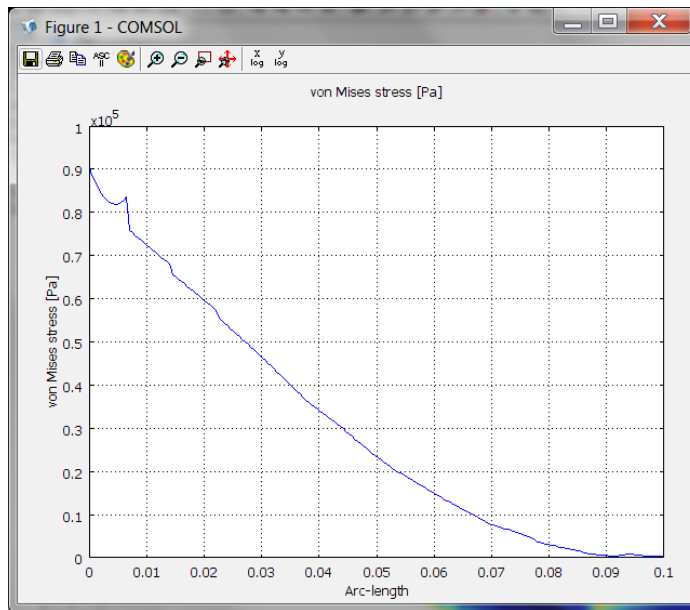


Κατανομή της έντασης:

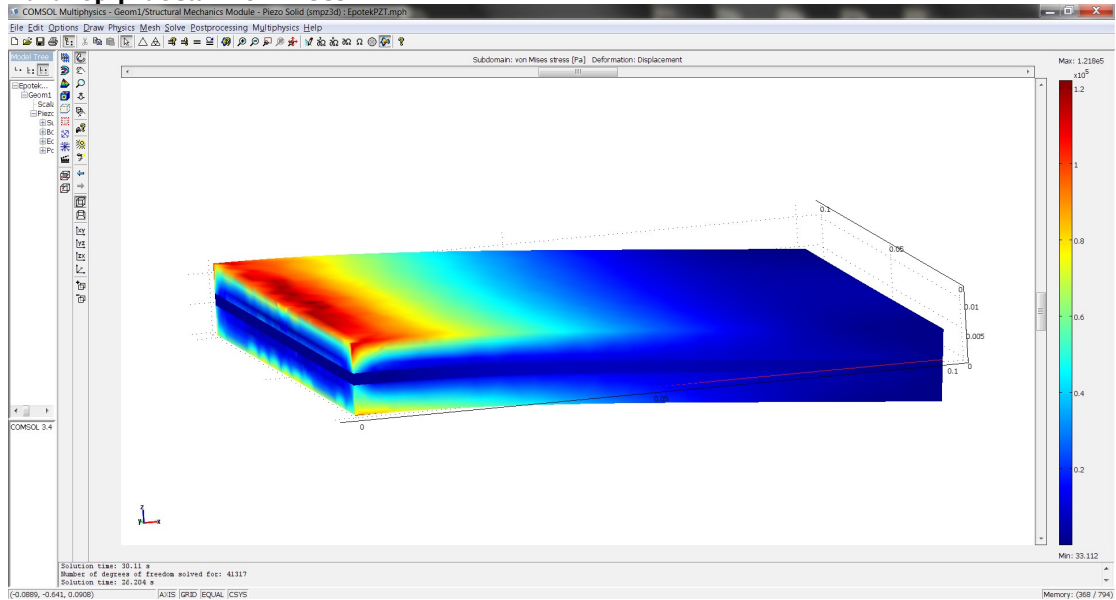


Αναμενόμενη είναι και η κατανομή των τάσεων **Von Mises**, οι οποίες ακολουθούν την κατανομή της έντασης. Η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται και εδώ στο πακτωμένο άκρο της διάταξης και το μέγεθος της είναι **0.122MPa**.

Τάσεις Von Mises κατά μήκος της διάταξης:

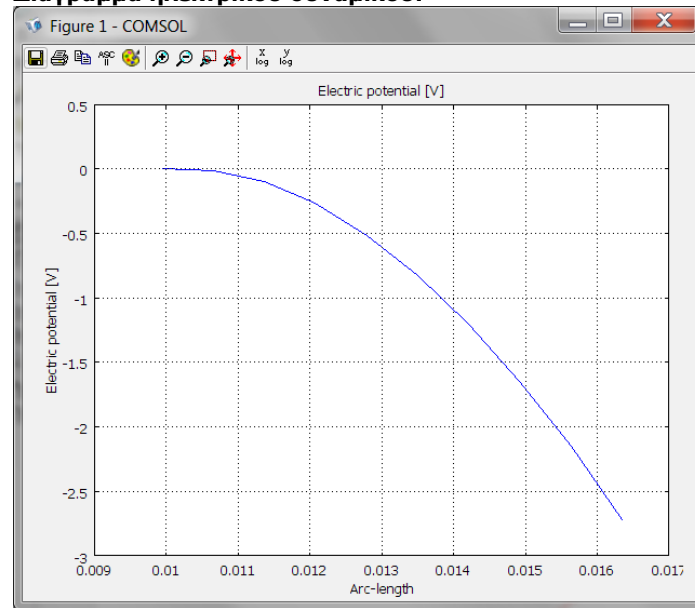


Κατανομή τάσεων Von Mises:

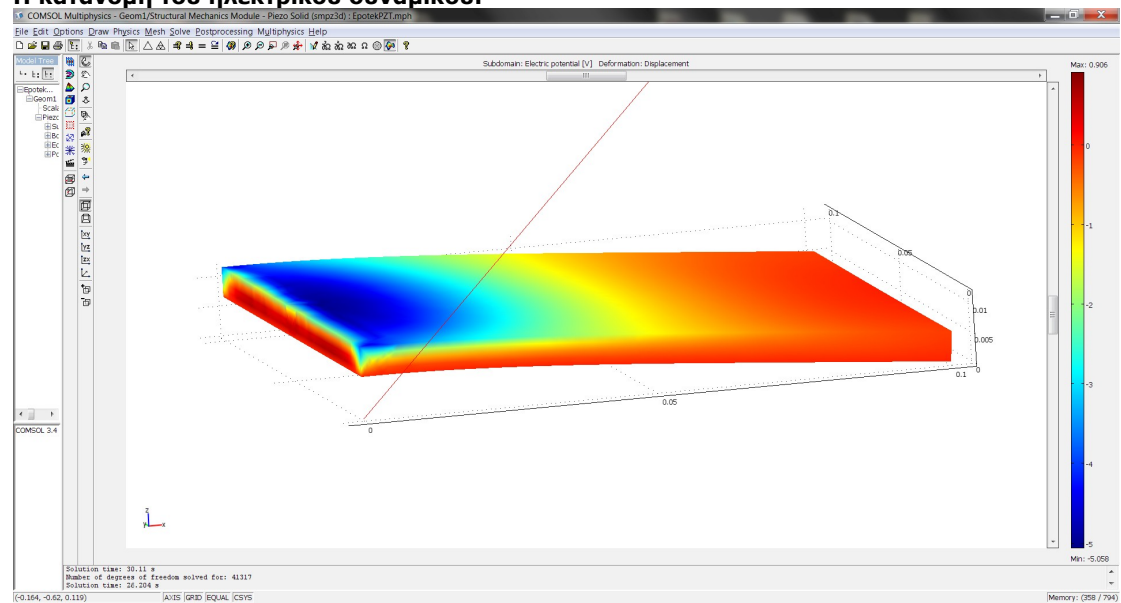


Η σχέση ανάμεσα στην ασκούμενη δύναμη, την ένταση, τις τάσεις που αναπτύσσονται και τις ηλεκτρικές ιδιότητες είναι άμεση. Έτσι είναι αναμενόμενο ότι το **ηλεκτρικό δυναμικό** διαφοροποιείται ανάλογα με την επηρροή της εξωτερικής δύναμης στη διάταξη. Η διαφορά δυναμικού που παρατηρείται στη διάταξη είναι **(0.906,-5.058)V**.

Διάγραμμα ηλεκτρικού δυναμικού:



Η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού:



6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
--	-----------------------------	--------	---------------	---------------------------

MAXIMUM	0.602	$1.638 \cdot 10^{-6}$	0.122	(0.906 , -5.058)
----------------	-------	-----------------------	-------	------------------

8.1.1 Στατική ανάλυση (πλεγματοποίηση 2^{ου} επιπέδου)

Στο στάδιο αυτό, θα πραγματοποιηθεί η ίδια στατική ανάλυση, με τη διάταξη να έχει υποστεί πλεγματοποίηση 2^{ου} επιπέδου. Στο πρόγραμμα COMSOL αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας Refine Mesh από το μενού του Mesh.

Συγκριτικά αποτελέσματα των δύο επιπέδων πλεγματοποίησης:

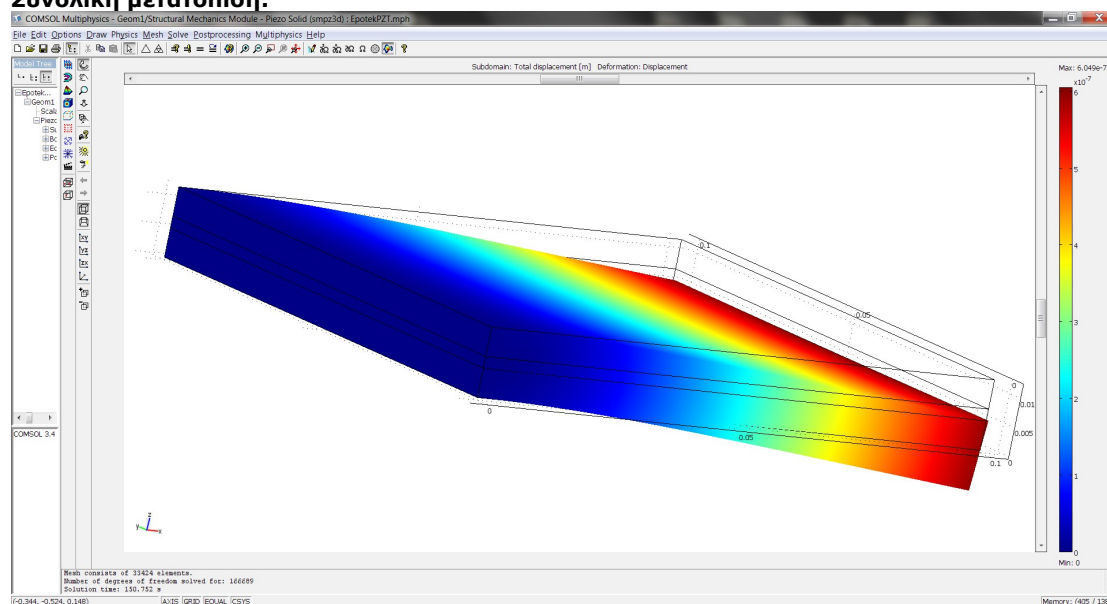
	MESH	REFINE MESH
Βαθμοί ελευθερίας	41317	166689
Σημεία πλέγματος	1721	6948
Στοιχεία πλέγματος	8078	33424
Επιφανειακά στοιχεία	3586	8831
Ακμές	268	453

Όπως φαίνεται από τον πίνακα, η διάταξη έχει χωριστεί σε πολύ περισσότερα τμήματα, επιτρέποντας την ακριβέστερη επίλυση του προβλήματος. Η επίλυση στη συγκεκριμένη περίπτωση πραγματοποιείται περίπου στον τριπλάσιο χρόνο δηλαδή σε 3 λεπτά.

Αποτελέσματα επίλυσης:

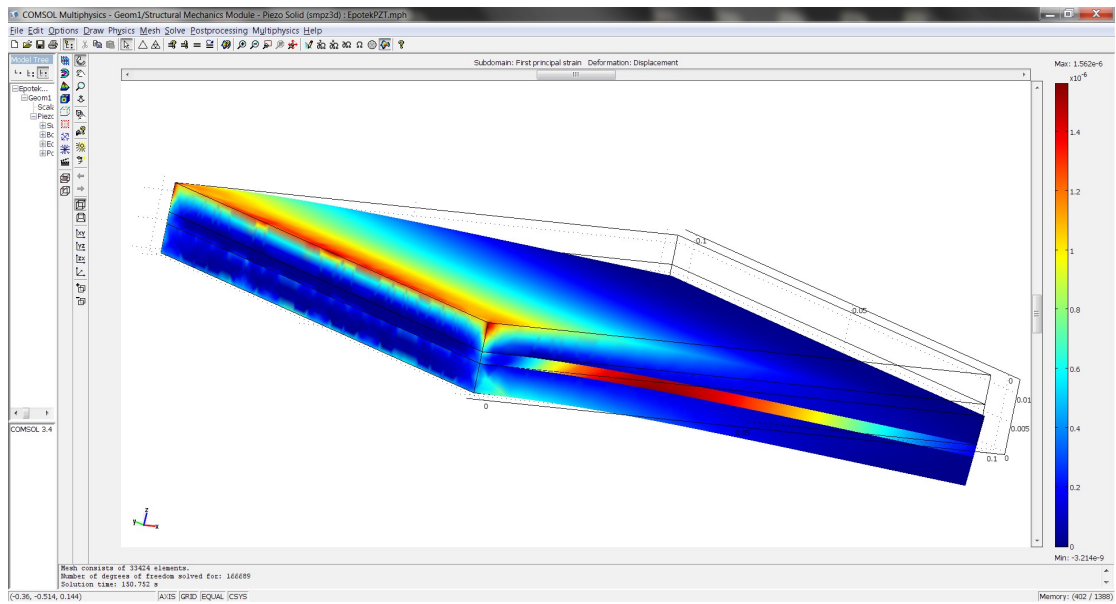
Η συνολική μετατόπιση είναι **0.605μm**.

Συνολική μετατόπιση:



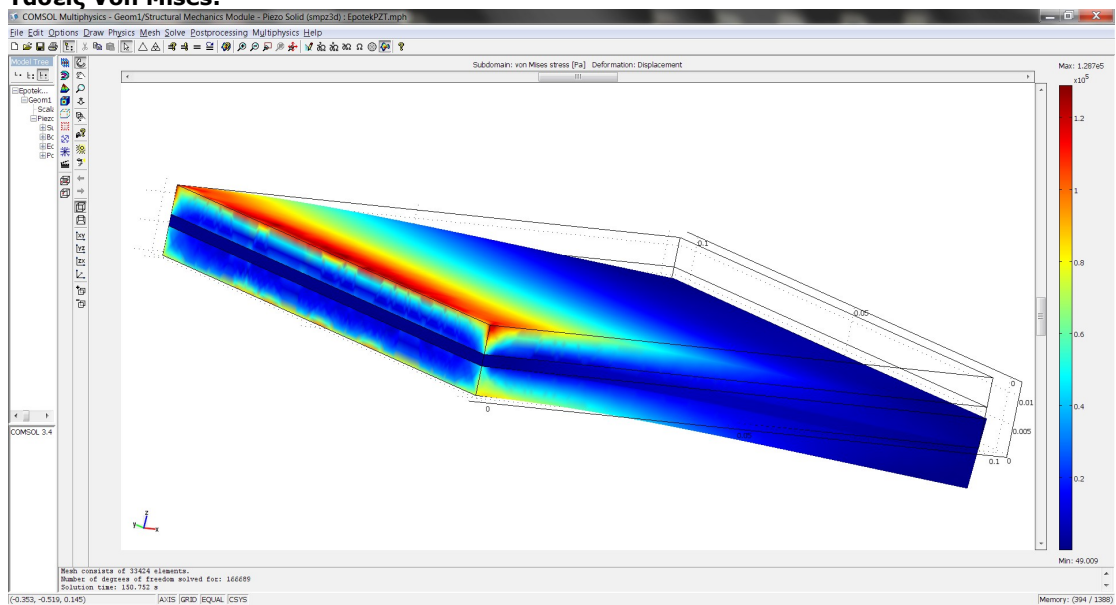
Η μέγιστη ένταση ανέρχεται σε **1.562*10⁻⁶**.

Ένταση:



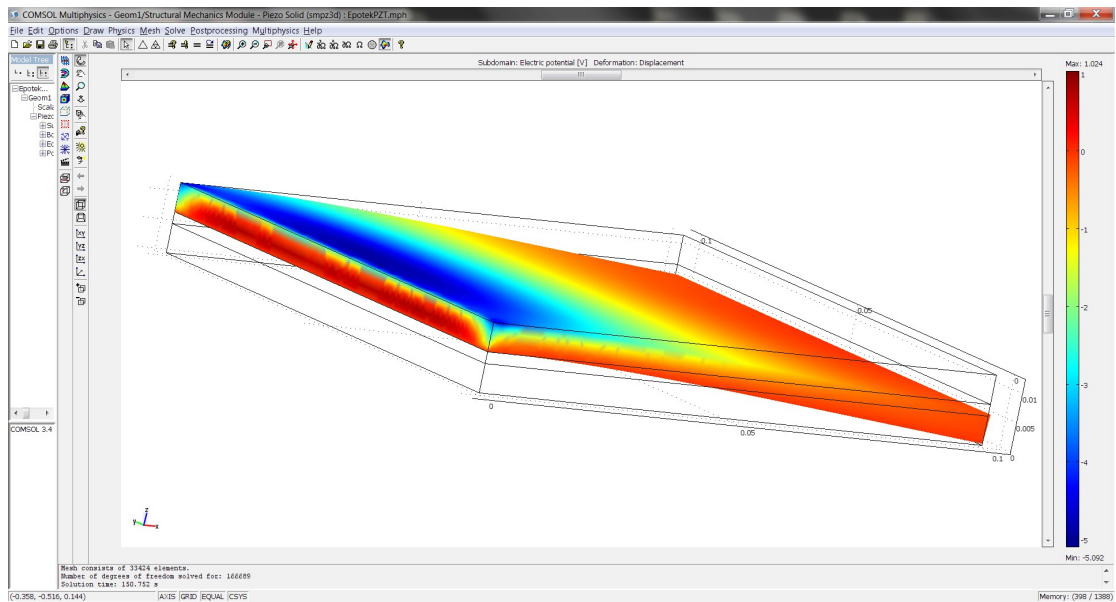
Οι τάσεις Von Mises λαμβάνουν την τιμή **0.129MPa**.

Τάσεις Von Mises:



Το ηλεκτρικό δυναμικό λαμβάνει τις τιμές **(1.024,-5.092)V**.

Το ηλεκτρικό δυναμικό:



8.1.2 Συγκριτικά αποτελέσματα

	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣ H (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
MESH	0.602	$1.638 \cdot 10^{-6}$	0.122	(0.906 , -5.058)
REFINE MESH	0.605	$1.562 \cdot 10^{-6}$	0.129	(1.024 , -5.092)

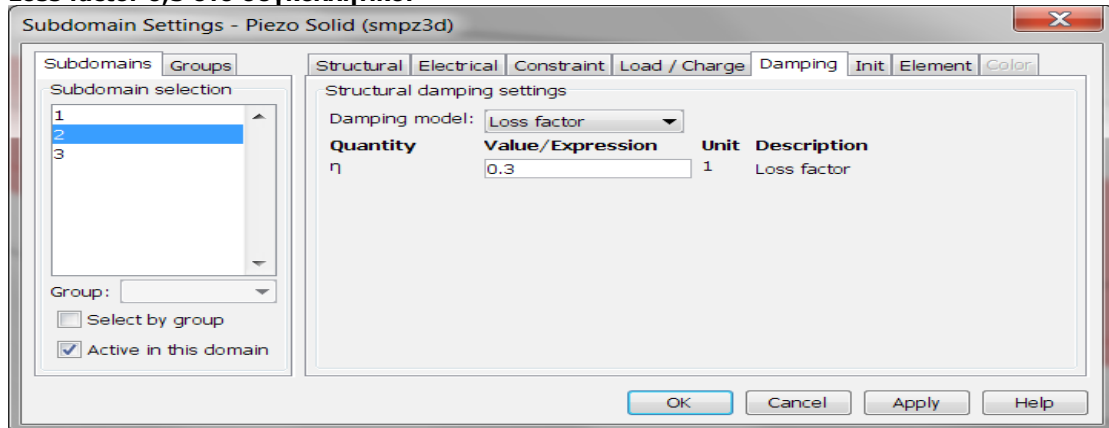
Είναι φανερό ότι η διαφορά των αποτελεσμάτων είναι αρκετά μικρή ώστε να δικαιολογεί τον αυξημένο υπολογιστικό φόρτο που απαιτείται για την πραγματοποίηση της λεπτομερέστερης ανάλυσης στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

8.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΠΟΣΒΕΝΟΜΕΝΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ (συντελεστής απόσβεσης 0.3)

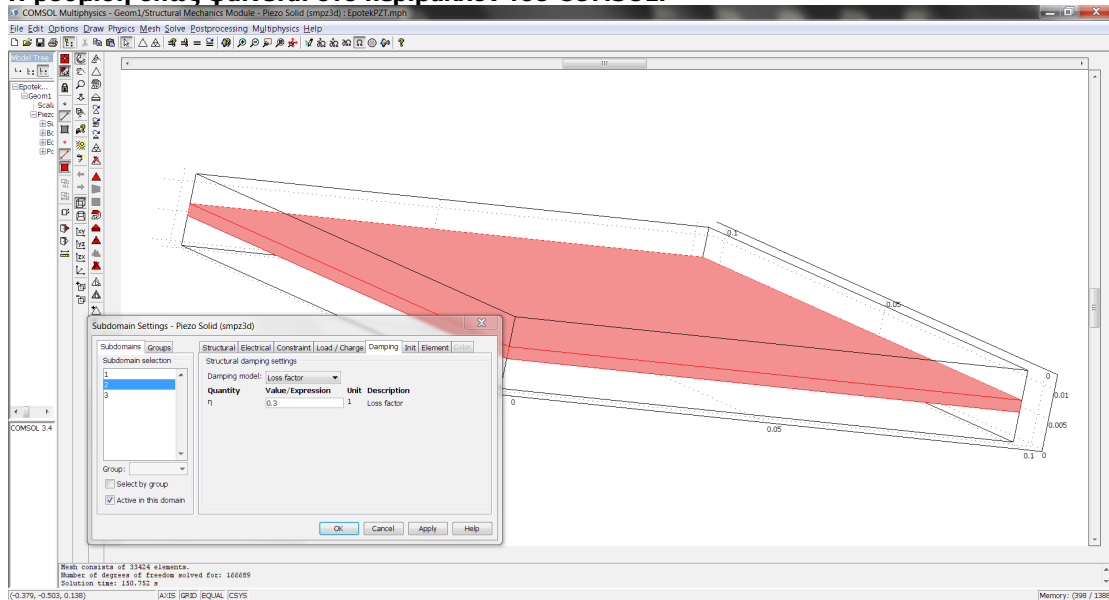
1.Υλικά και ιδιότητες

Τα υλικά της διάταξης παραμένουν ίδια όπως και στην στατική ανάλυση. Θα εισαχθεί στο μεσαίο στρώμα της διάταξης, δηλαδή στο συγκολλητικό υλικό μία αποσβενόμενη ταλάντωση με συντελεστή απόσβεσης (loss factor) 0.3.

Loss factor 0,3 στο συγκολλητικό:



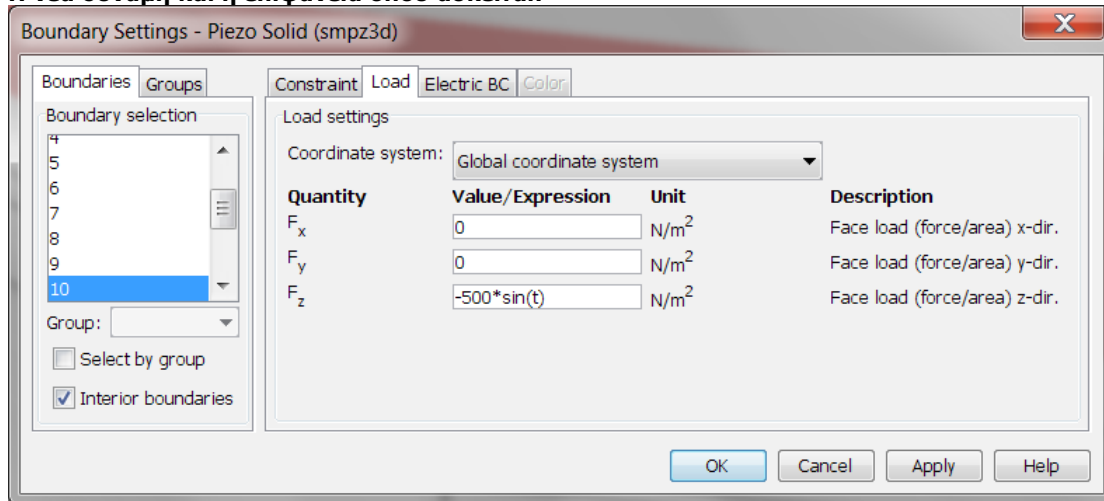
Η ρύθμιση όπως φαίνεται στο περιβάλλον του COMSOL:



2.Καθορισμός οριακών συνθηκών (Boundary settings)

Σε αυτό το στάδιο η βασική διαφορά βρίσκεται στην ασκούμενη δύναμη που πλέον είναι **ημιτονοειδούς μορφής** εξαρτώμενη από το χρόνο ίση με **$F = -500 \cdot \sin(t)$** με $F_{max} = 500$ και φορά όπως η αρχική.

Η νέα δύναμη και η επιφάνεια όπου ασκείται:



3. Πλεγματοποίηση (Meshing)

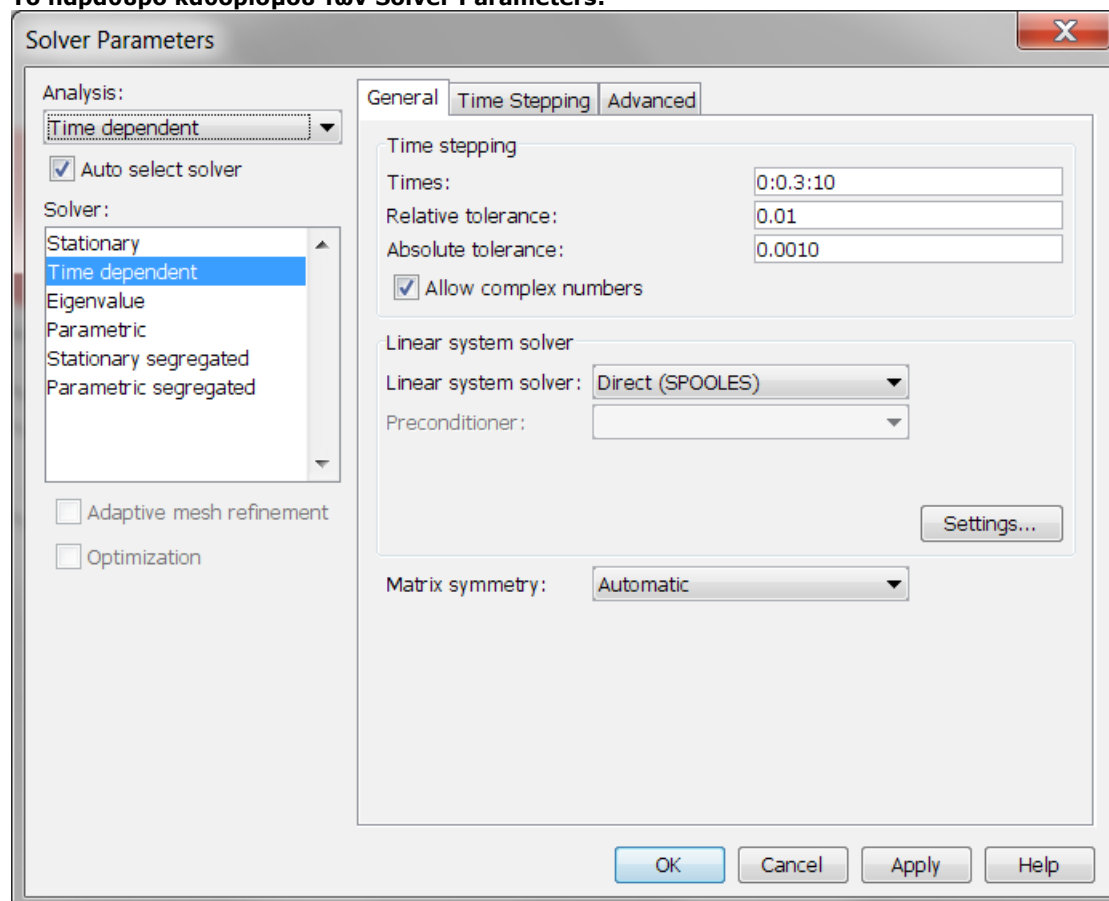
Πραγματοποιείται πλεγματοποίηση σε ένα μόνο επίπεδο. Τα στατιστικά στοιχεία της βρίσκονται στο κεφάλαιο 8.1.

4. Επίλυση/Παράμετροι επίλυσης

Θα πρέπει να τροποποιηθεί το είδος της ανάλυσης εφ' όσον πλέον δεν πρόκειται για απλή στατική ανάλυση. Αυτό επιτυγχάνεται αλλάζοντας τις παραμέτρους επίλυσης από την καταλληλή επιλογή του προγράμματος.

Στο είδος ανάλυσης επιλέγεται **Time dependent**, στο είδος επίλυσης επίσης **Time dependent**, ενώ πρέπει να καθοριστούν και οι ειδικές χρονικές παράμετροι. Η προσομοίωση θα γίνει για **δέκα δευτερόλεπτα** με το **βήμα** να έχει καθοριστεί στα **0,3 δευτερόλεπτα**. Ο χρόνος αυτός επιλέχθηκε ώστε να έχουν πραγματοποιηθεί τουλάχιστον δύο ταλαντώσεις της ημιτονοειδούς συνάρτησης. Ο χρόνος της προσομοίωσης, σε συνδυασμο με το βήμα των 0.3 δευτερολέπτων δεν αποφέρουν τη μέγιστη ακρίβεια, αλλά ο υπολογιστικός φόρτος μιας μεγαλύτερης σε διάρκεια και ακρίβεια προσομοίωσης μπορεί να γίνει απαγορευτικός, χωρίς ωστόσο να αποφέρει σημαντική βελτίωση των λύσεων. Παρ' όλα αυτά, οι επιλεγμένες παράμετροι αρκούν για τη συλλογή ασφαλών αποτελεσμάτων. Η επίλυση αυτού του προβλήματος διαρκεί συνήθως 7 έως 10 λεπτά.

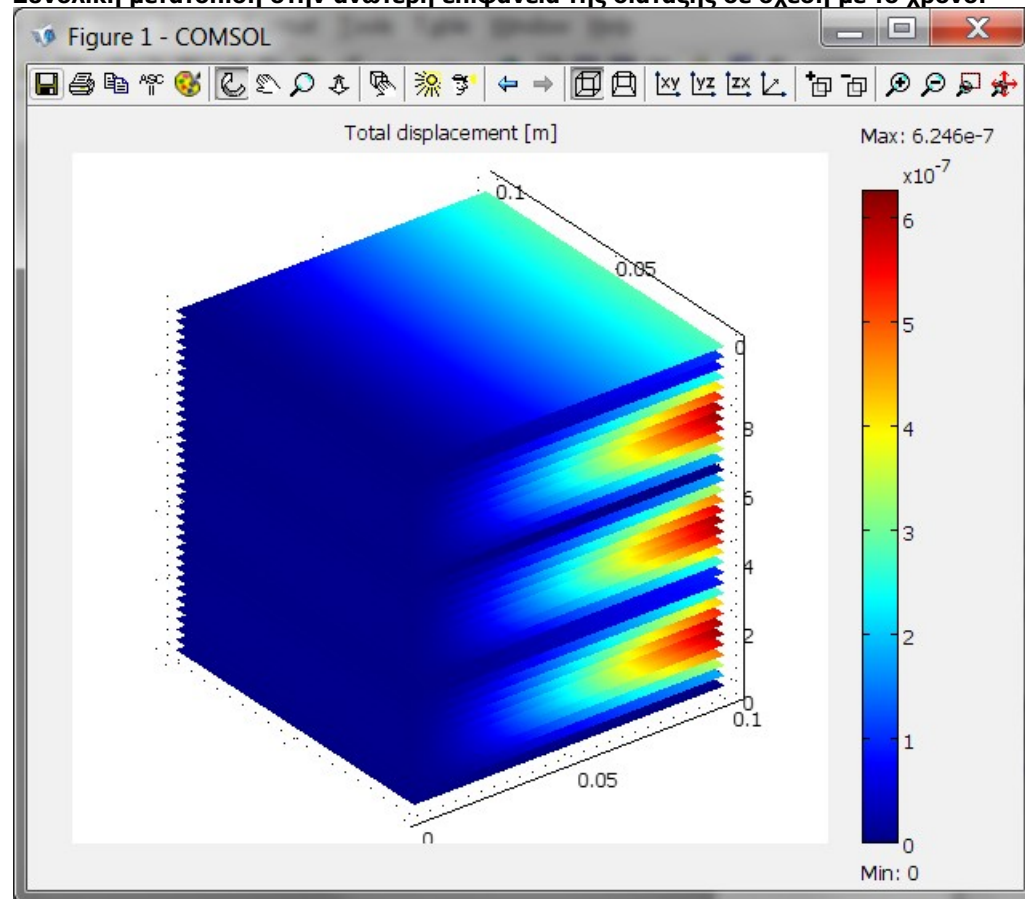
Το παράθυρο καθορισμού των Solver Parameters:



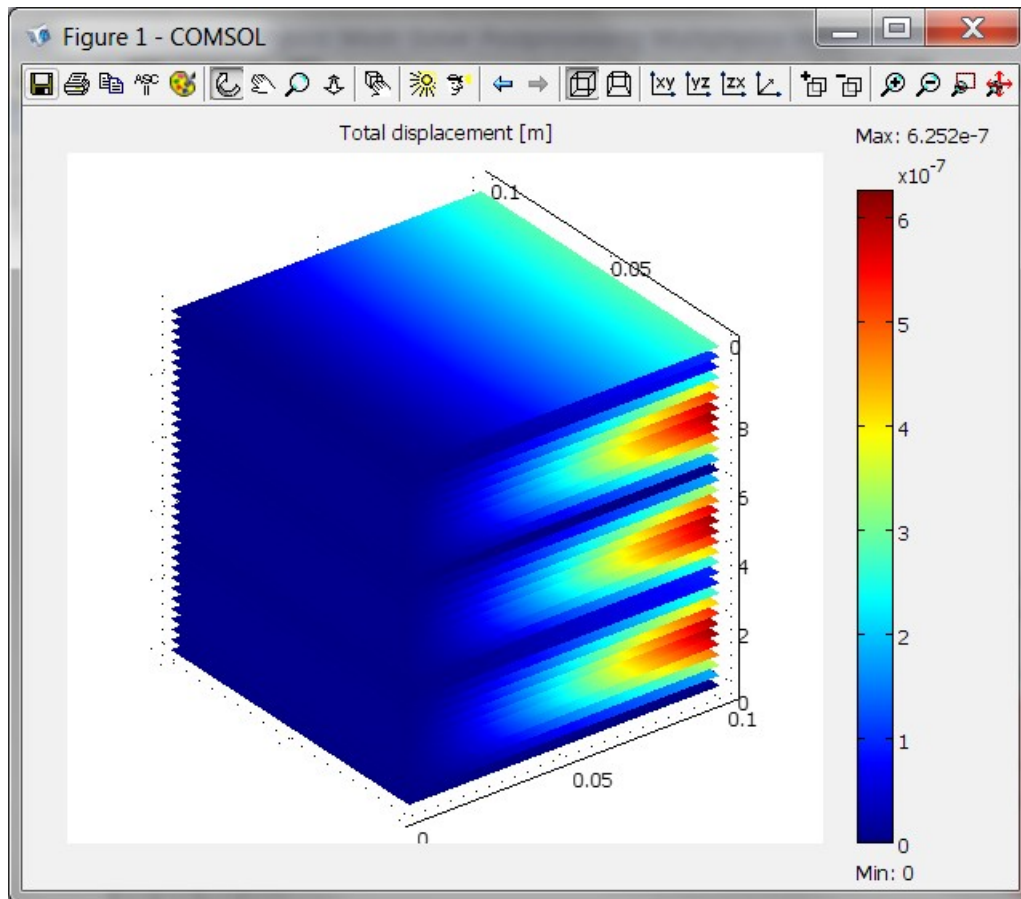
5. Συλλογή και ανάλυση αποτελεσμάτων

Η συνολική μετατόπιση σε συνάρτηση με το χρόνο στις επιφάνειες της διάταξης παρουσιάζεται παρακάτω. Η μέγιστη τιμή της εμφανίζεται στην κατώτερη επιφάνεια και είναι **0.625μm**.

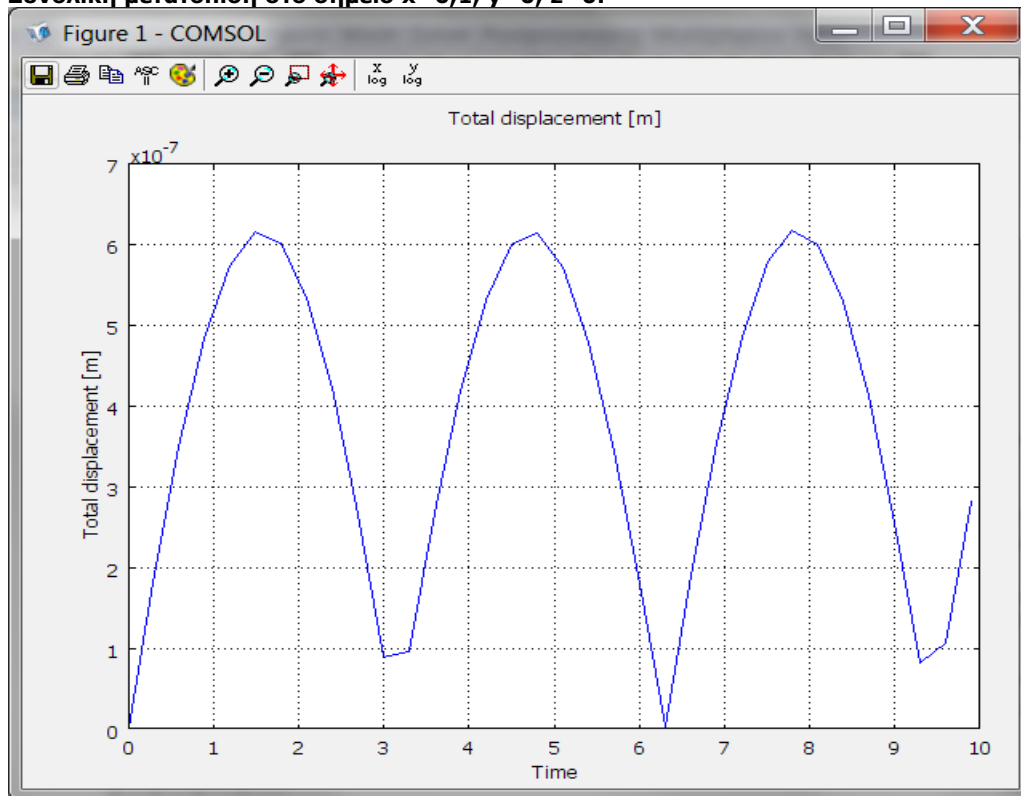
Συνολική μετατόπιση στην ανώτερη επιφάνεια της διάταξης σε σχέση με το χρόνο:

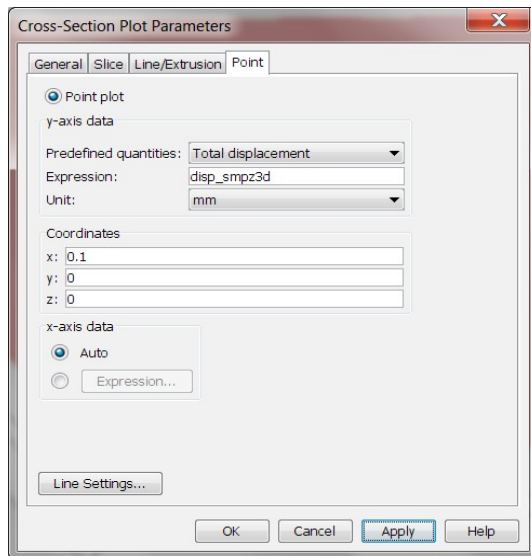


Συνολική μετατόπιση στην κατώτερη επιφάνεια:

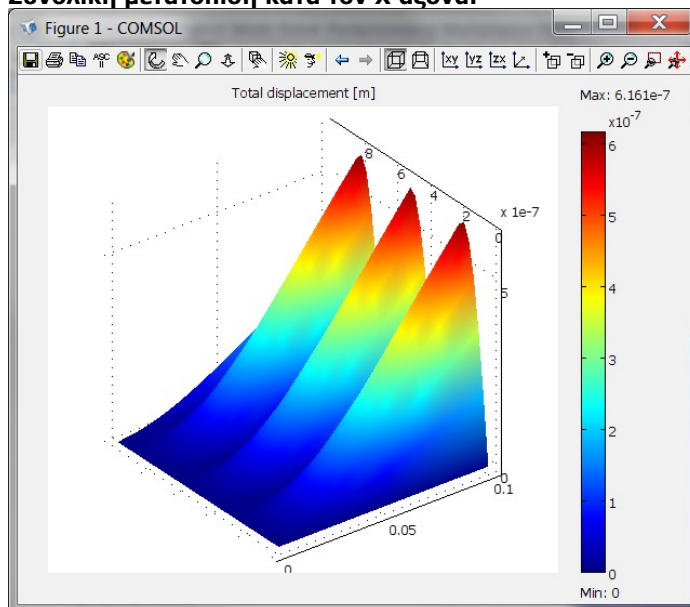


Συνολική μετατόπιση στο σημείο $x=0,1, y=0, z=0$:

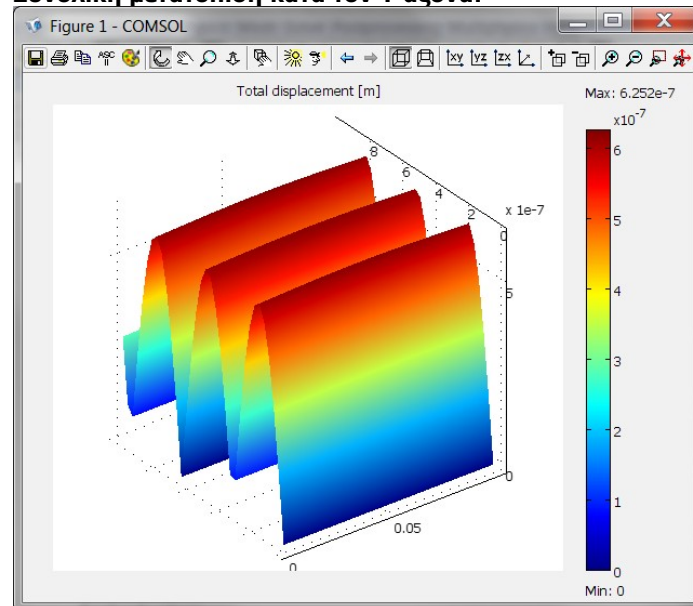




Συνολική μετατόπιση κατά τον X άξονα:

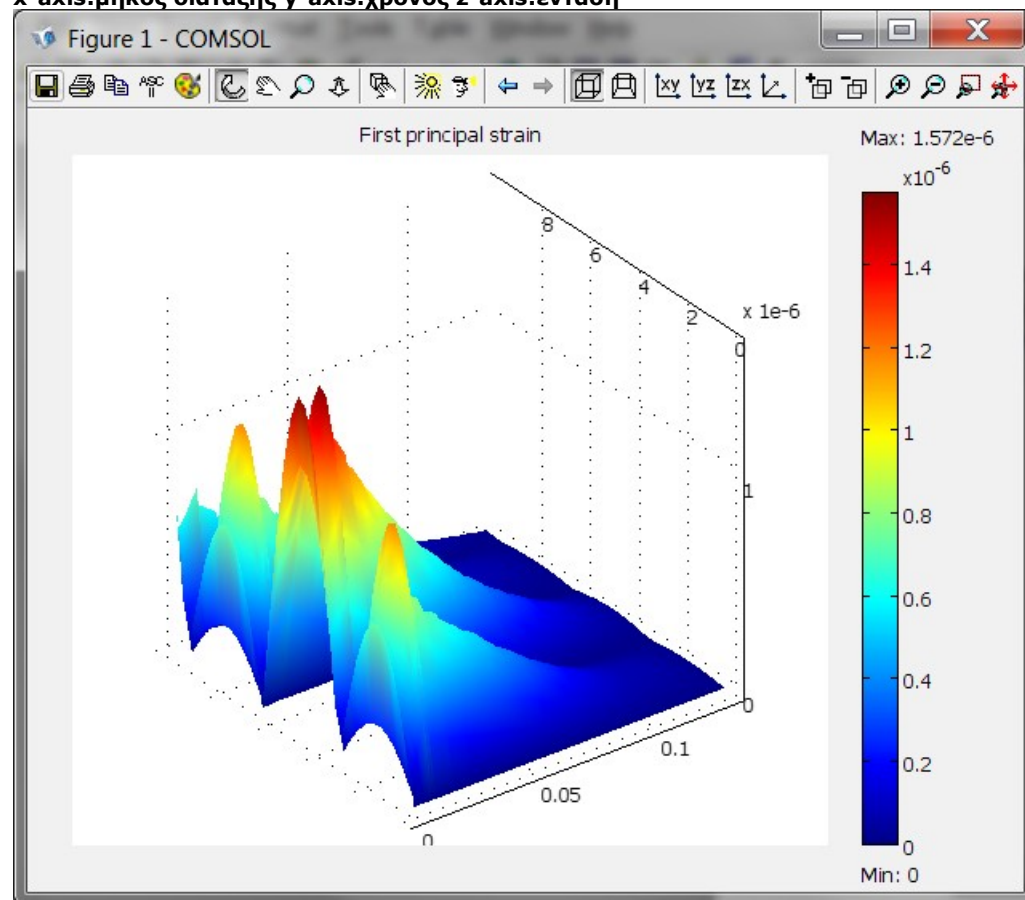


Συνολική μετατόπιση κατά τον Y άξονα:

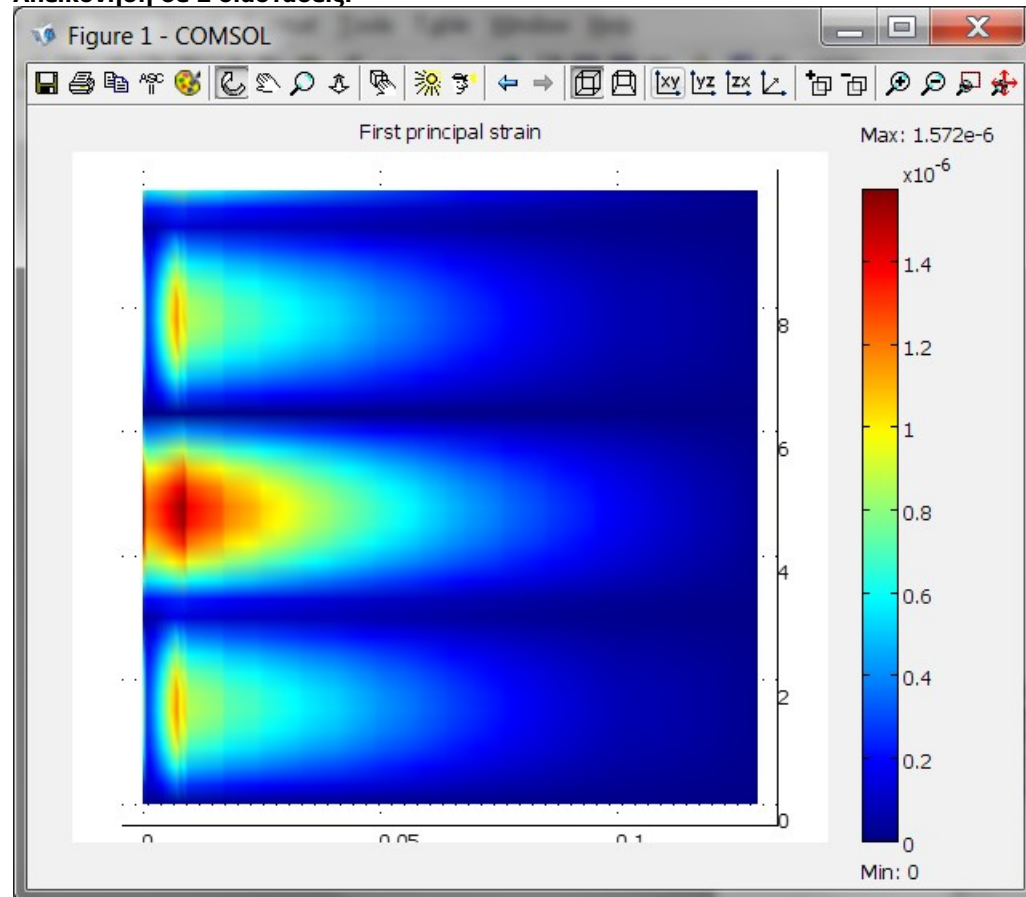


Το διάγραμμα της έντασης κατά μήκος της διάταξης σε συνάρτηση με το χρόνο στην επιφάνεια της διάταξης μας δείχνει ότι η ένταση ακολουθεί την ημιτονοειδή συνάρτηση της ασκούμενης δύναμης. Η μέγιστη ένταση έχει μέτρο **1.572×10^{-6}** και παρατηρείται στο πακτωμένο άκρο.

x-axis:μήκος διάταξης y-axis:χρόνος z-axis:ένταση

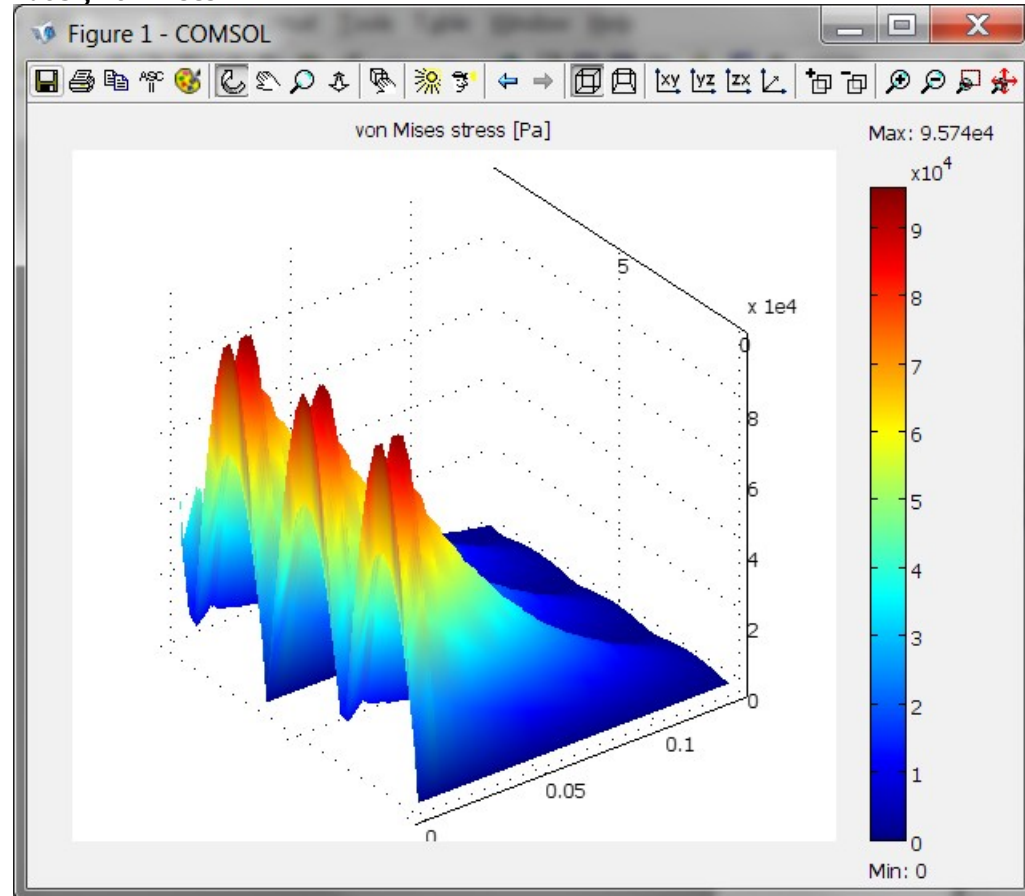


Απεικόνιση σε 2 διαστάσεις:

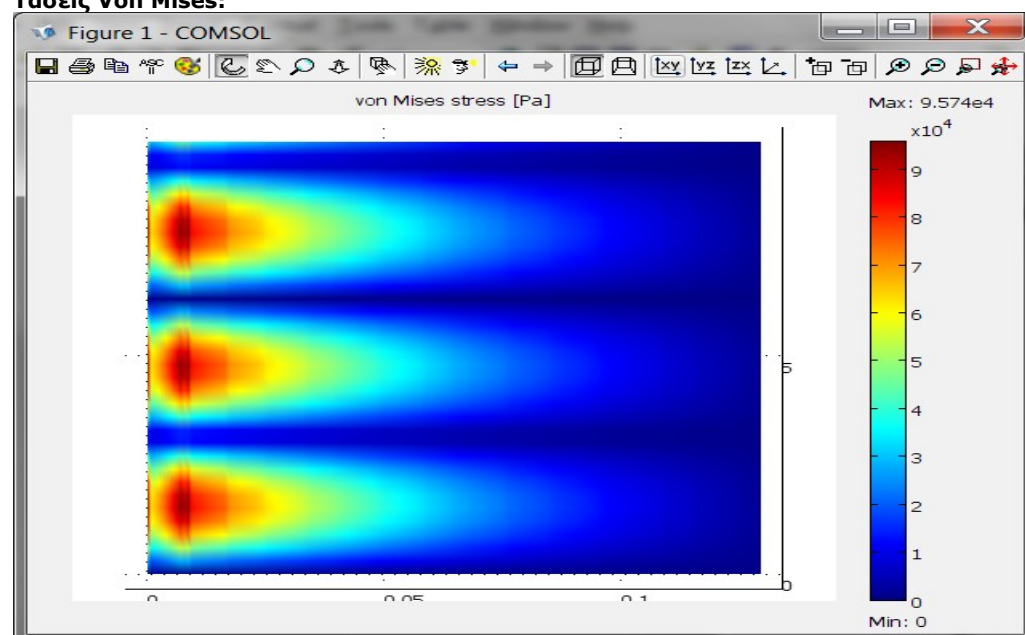


Όπως και στην στατική ανάλυση η συμπεριφορά των τάσεων Von Mises είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά της έντασης. Η μέγιστη τιμή παρατηρείται κοντά στο πακτωμένο άκρο της διάταξης και η αυξομείωση του μέτρου ακολουθά την ημιτονοειδή συνάρτηση του φορτίου που ασκείται. Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι **0.0957MPa**.

Τάσεις Von Mises:

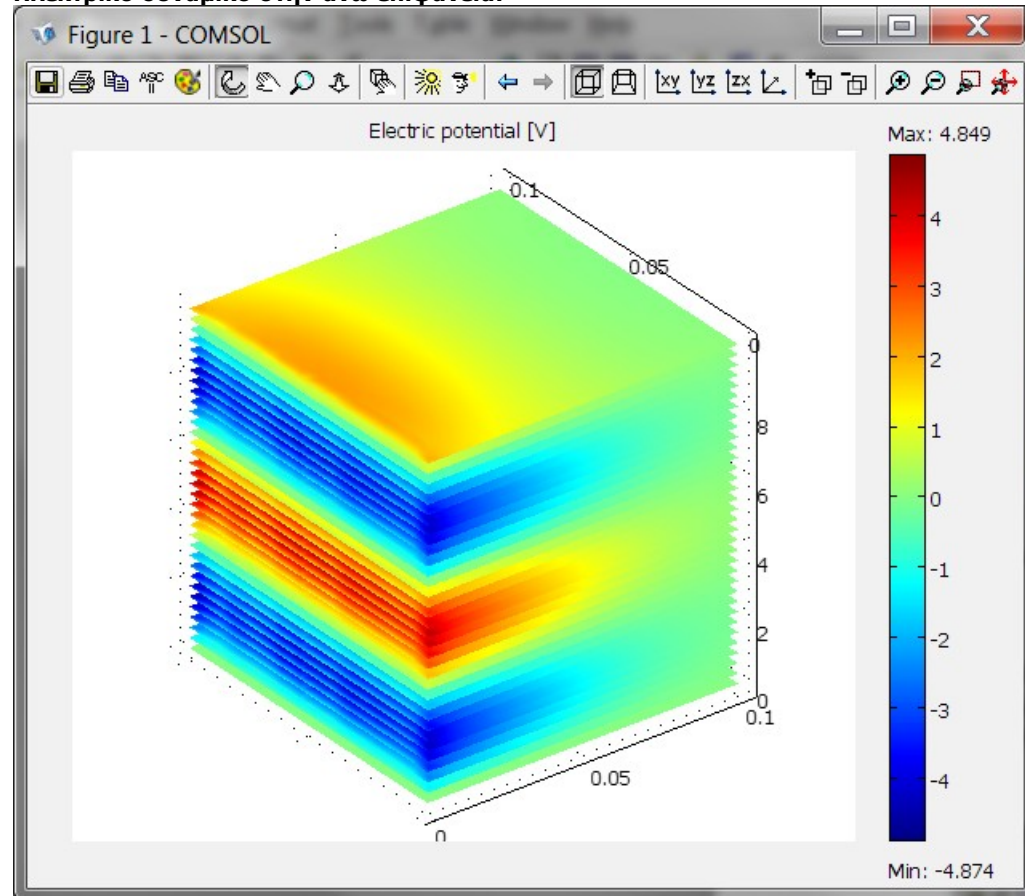


Τάσεις Von Mises:

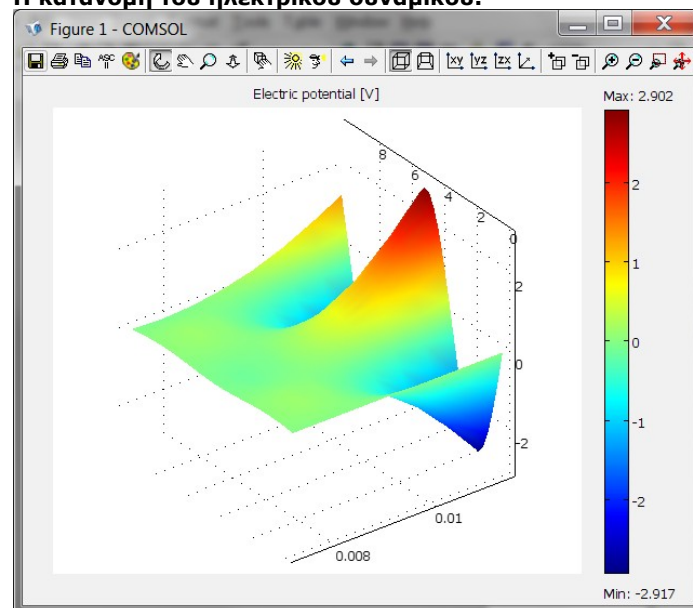


Το ηλεκτρικό δυναμικό που παρατηρείται ακολουθεί και αυτό την ημιτονοειδή συνάρτηση της δύναμης. Η διαφορά δυναμικού που παρατηρείται είναι **(4.849,-4.874)V**.

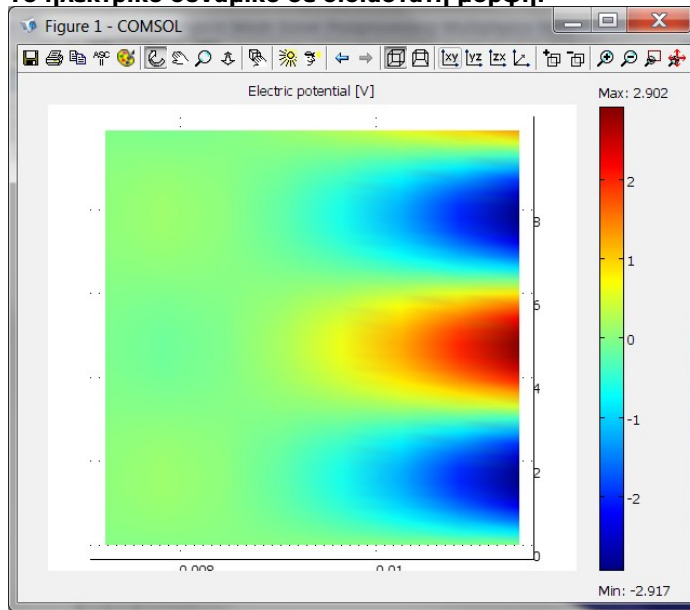
Ηλεκτρικό δυναμικό στην άνω επιφάνεια:



Η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού:



Το ηλεκτρικό δυναμικό σε διδιάστατη μορφή:



6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

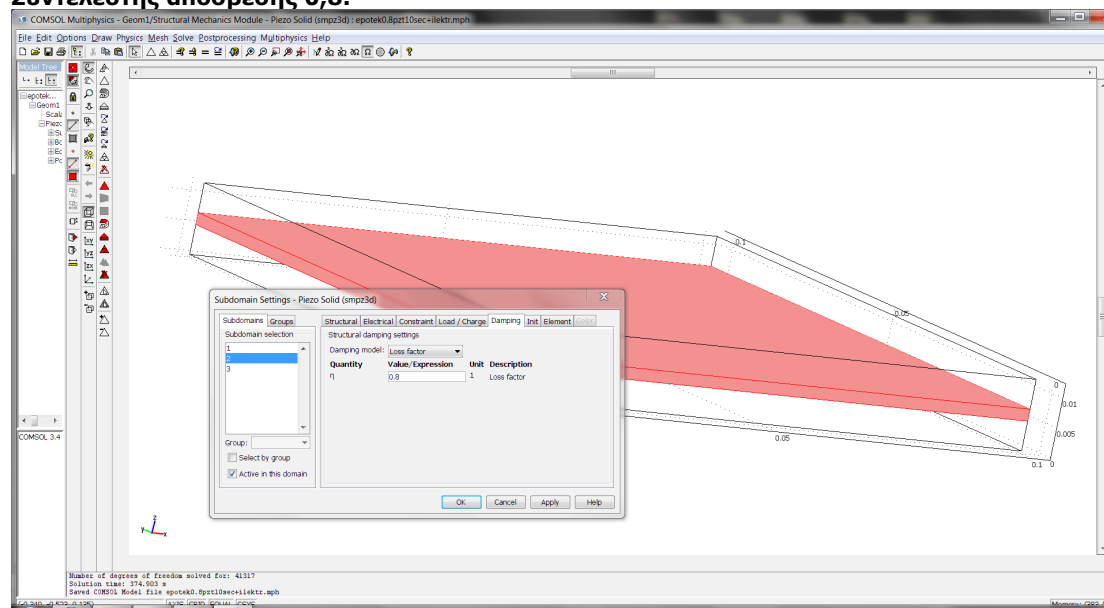
	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
MAXIMUM	0.625	$1.572 \cdot 10^{-6}$	0.0957	(4.849 , -4.874)

8.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΠΟΣΒΕΝΟΜΕΝΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ (συντελεστής απόσβεσης 0.8)

1.Υλικά και ιδιότητες

Το μοναδική αλλαγή που πρέπει να πραγματοποιηθεί σε αυτό το στάδιο είναι η μετατροπή του **συντελεστή απόσβεσης loss factor** που από **0.3** στην προηγούμενη περίπτωση γίνεται **0.8**.

Συντελεστής απόσβεσης 0,8:



2.Καθορισμός οριακών συνθηκών (Boundary settings)

Οι συντοριακές συνθήκες παραμένουν όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η διάταξη βρίσκεται πακτωμένη στην αριστερή της επιφάνεια, ενώ στην άνω επιφάνεια δέχεται την ίδια εξωτερική δύναμη ημιτονοειδούς μορφής.

3.Πλεγματοποίηση (Meshing)

Καμία αλλαγή δεν πραγματοποιείται στην πλεγματοποίηση και στις παραμέτρους της.

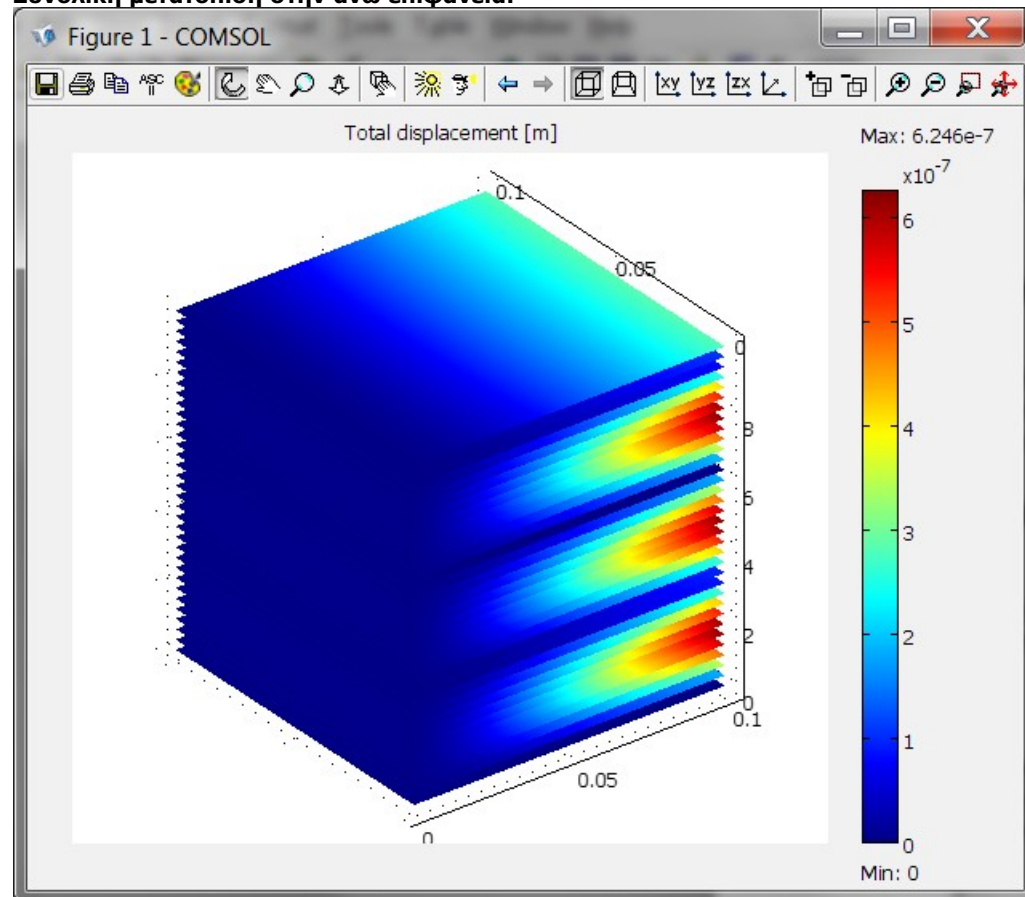
4.Επίλυση/Παράμετροι επίλυσης

Οι παράμετροι επίλυσης παραμένουν ίδιες όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Πρόκειται για ανάλυση εξαρτώμενη από το χρόνο όπως και ο τρόπος επίλυσης. Η επίλυση πραγματοποιείται από το πρόγραμμα συνήθως σε 7-10 λεπτά.

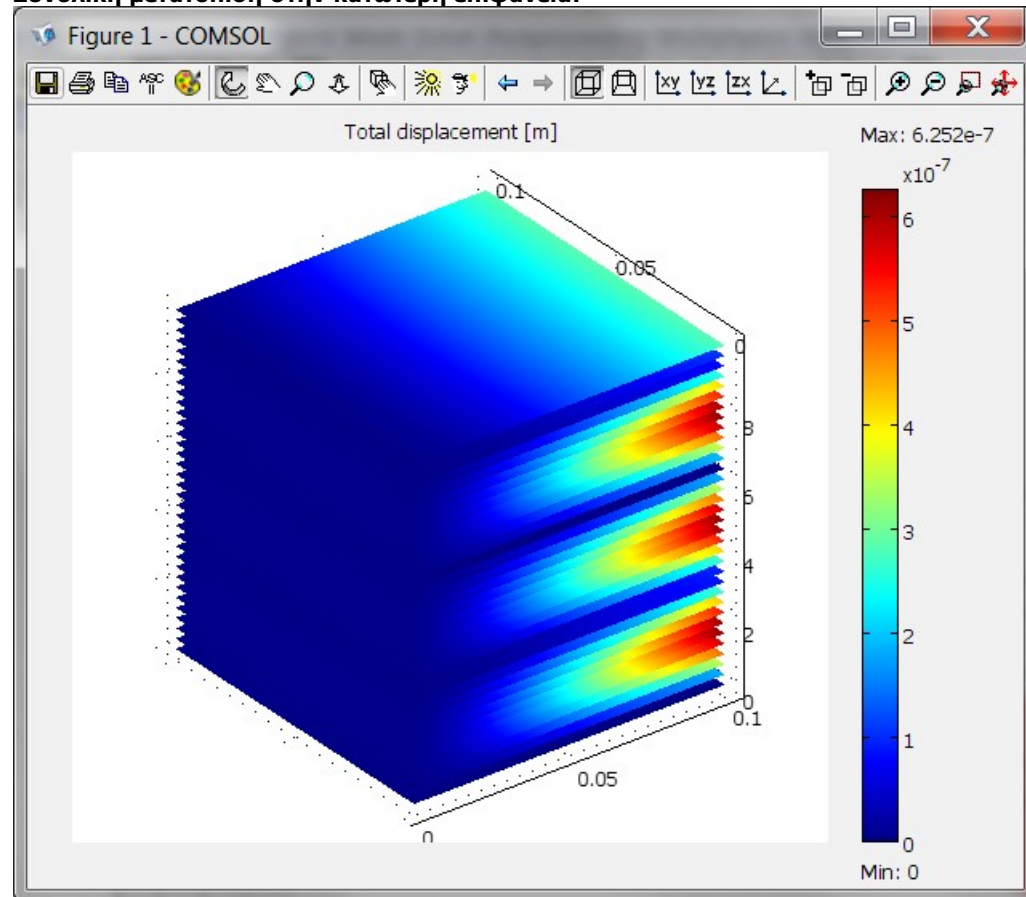
5.Συλλογή και ανάλυση αποτελεσμάτων

Οι μέγιστη τιμή της συνολικής μετατόπισης είναι **0.625μm** και εντοπίζεται στην κατώτερη επιφάνεια της διάταξης.

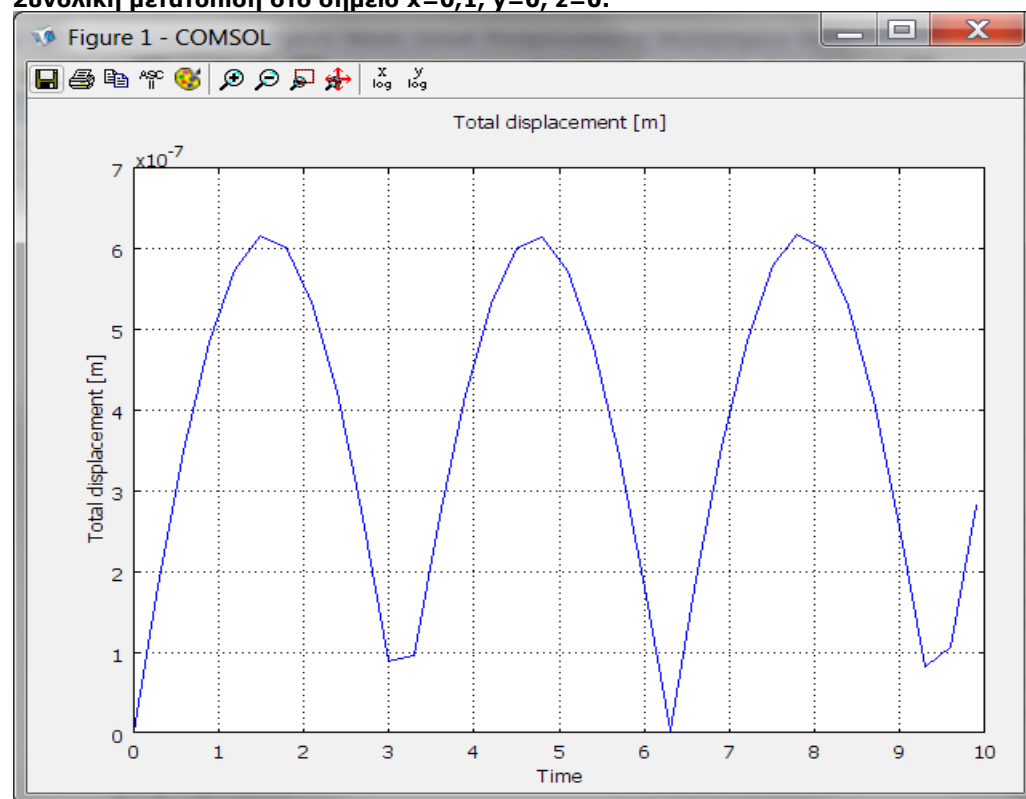
Συνολική μετατόπιση στην άνω επιφάνεια:



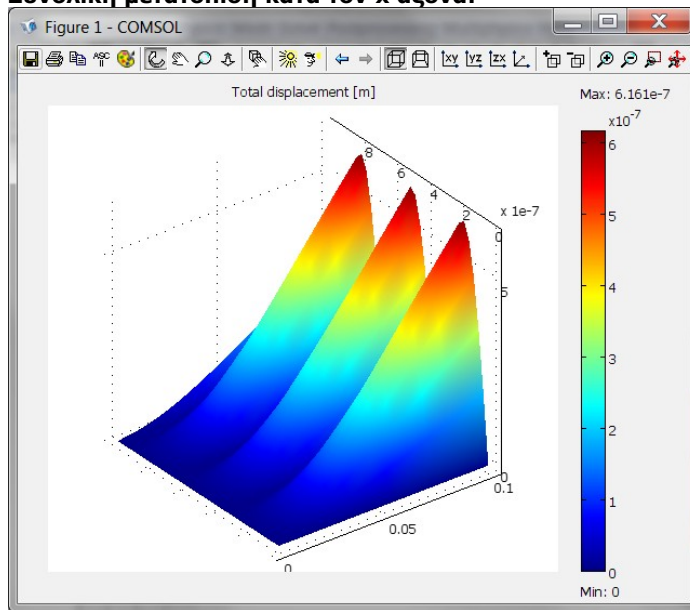
Συνολική μετατόπιση στην κατώτερη επιφάνεια:



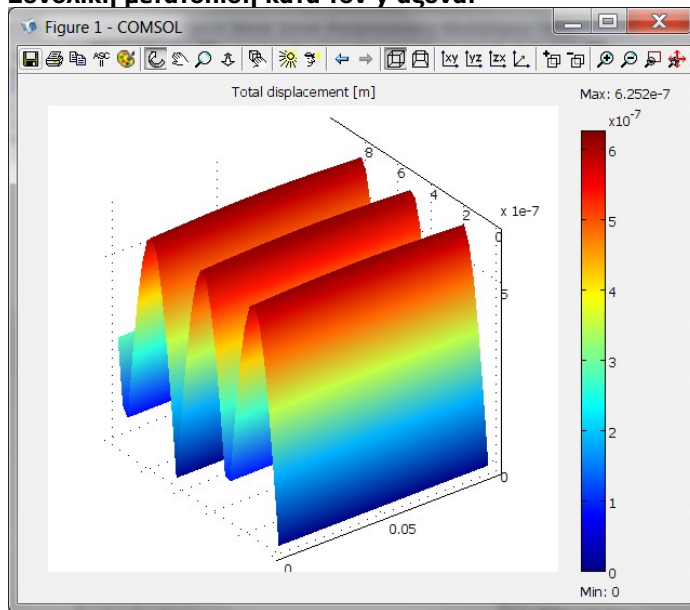
Συνολική μετατόπιση στο σημείο $x=0,1, y=0, z=0$:



Συνολική μετατόπιση κατά τον x άξονα:

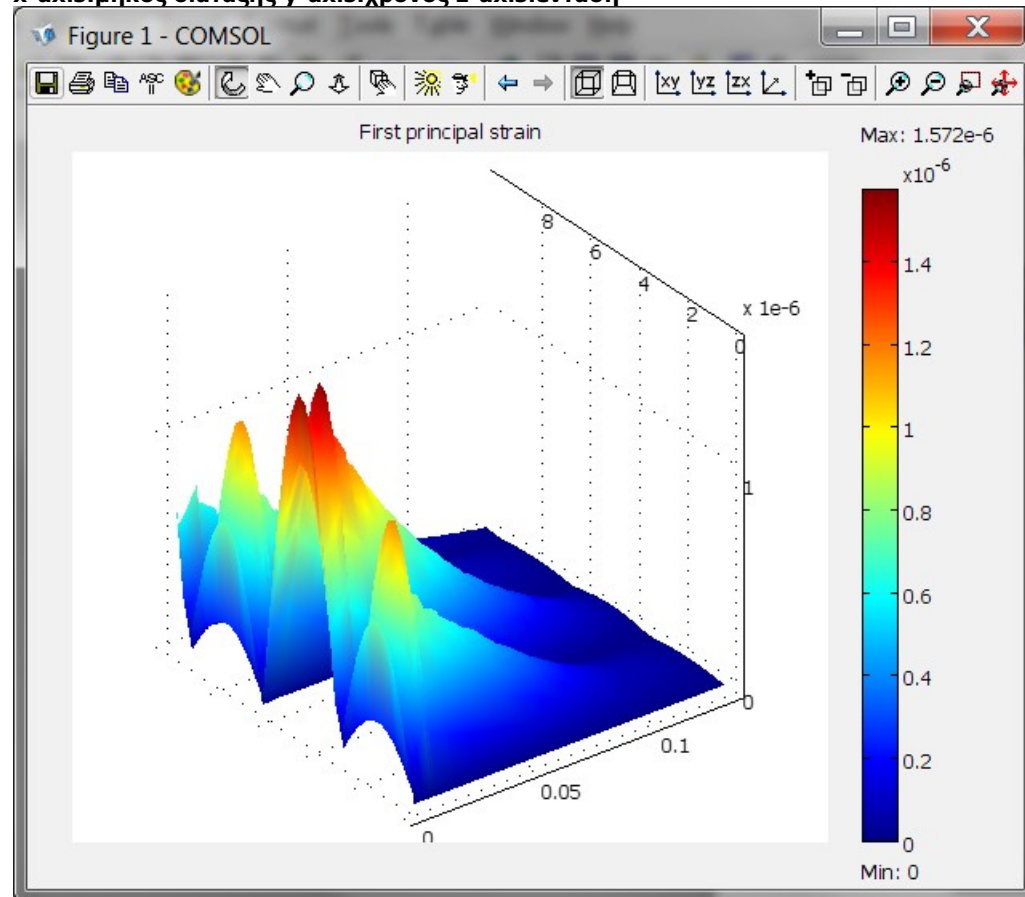


Συνολική μετατόπιση κατά τον y άξονα:

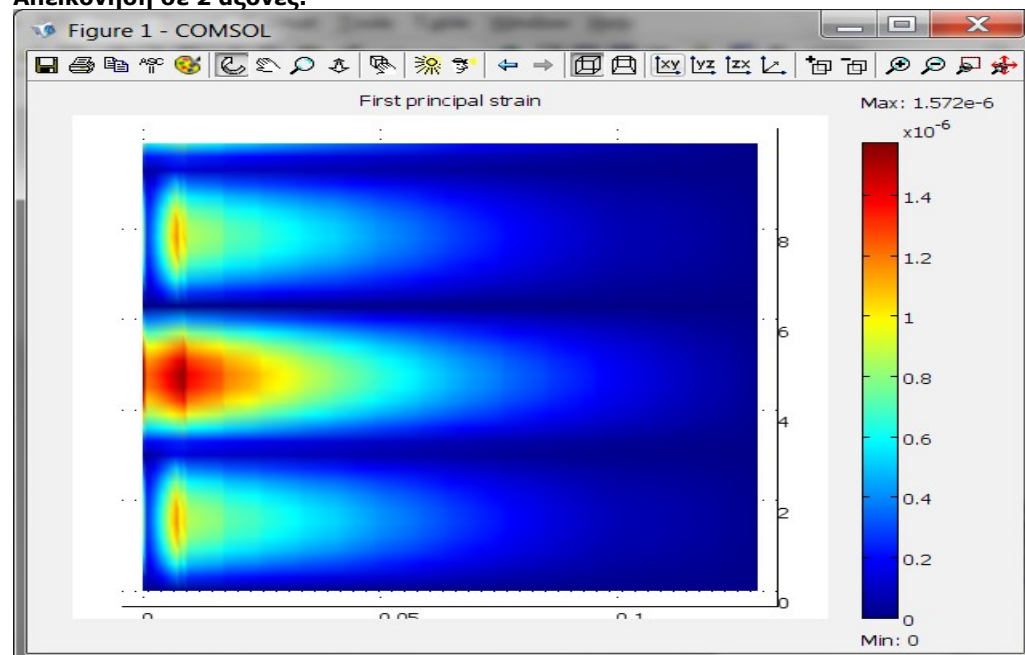


Η μέγιστη ένταση που παρατηρείται στη διάταξη είναι $1.572 \cdot 10^{-6}$.

x-axis:μήκος διάταξης y-axis:χρόνος z-axis:ένταση

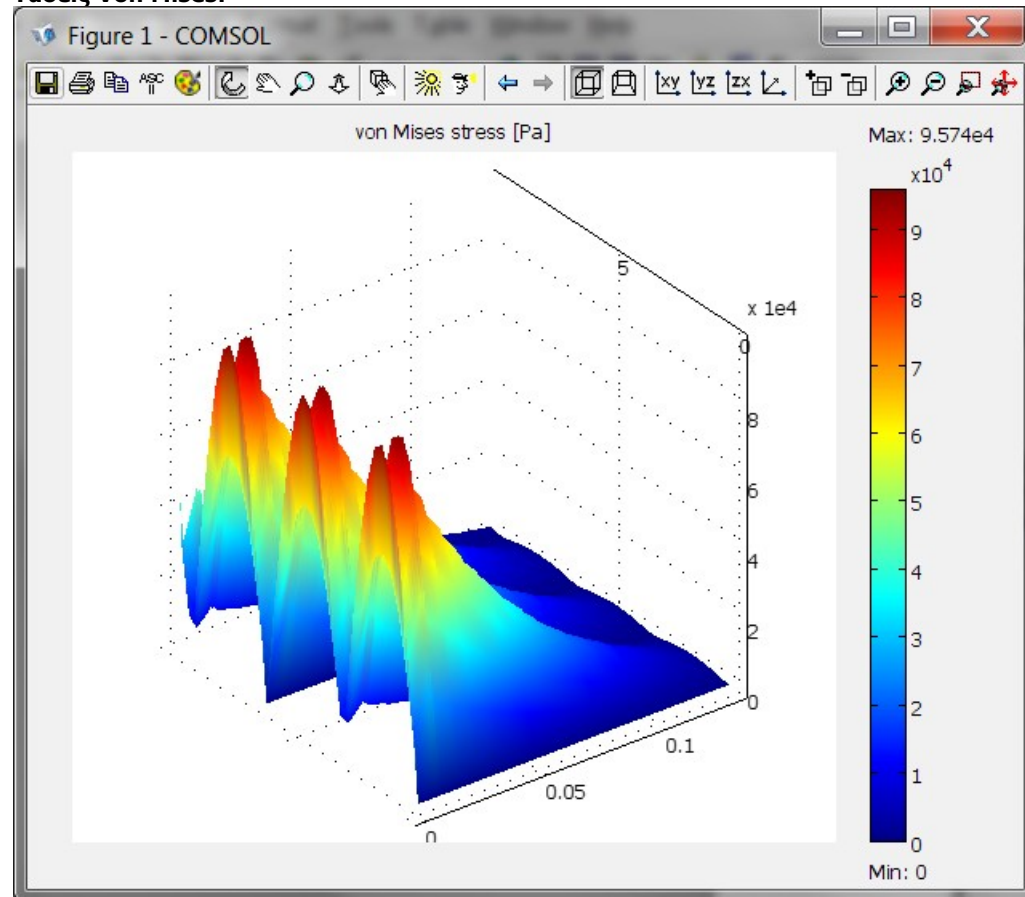


Απεικόνιση σε 2 άξονες:

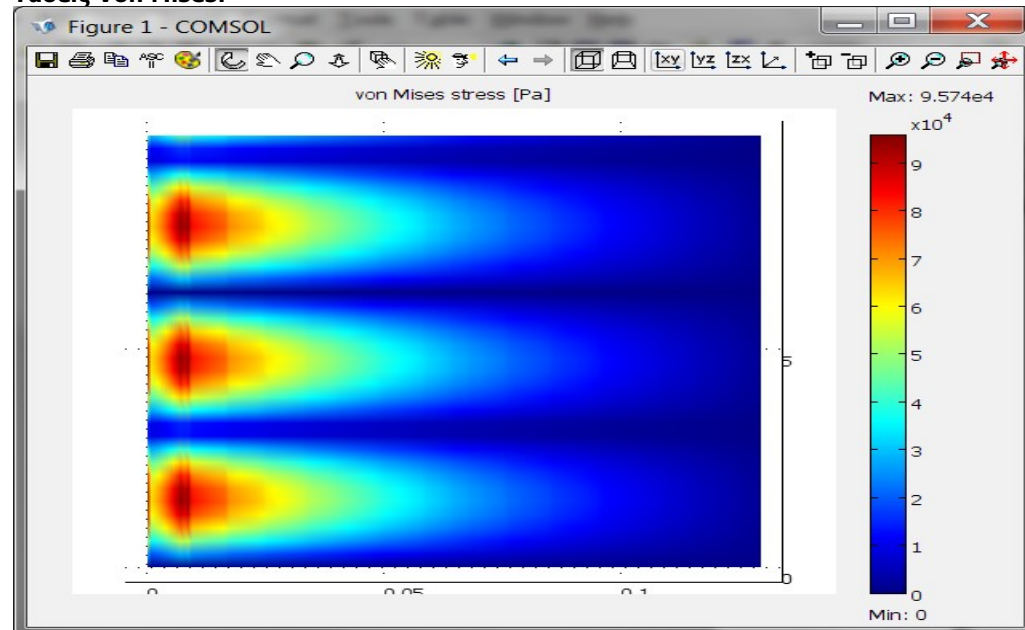


Η μέγιστη τιμή των τάσεων Von Mises που παρατηρείται είναι **0.0957MPa**.

Τάσεις Von Mises:

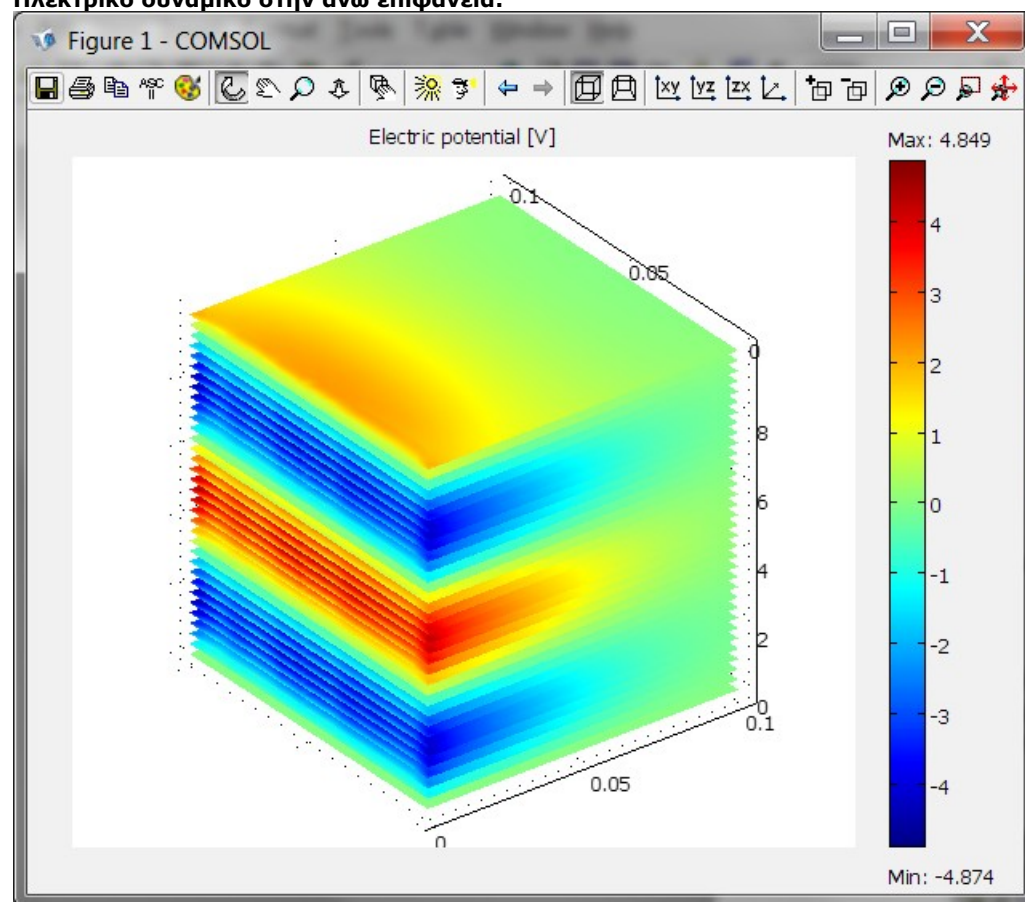


Τάσεις Von Mises:

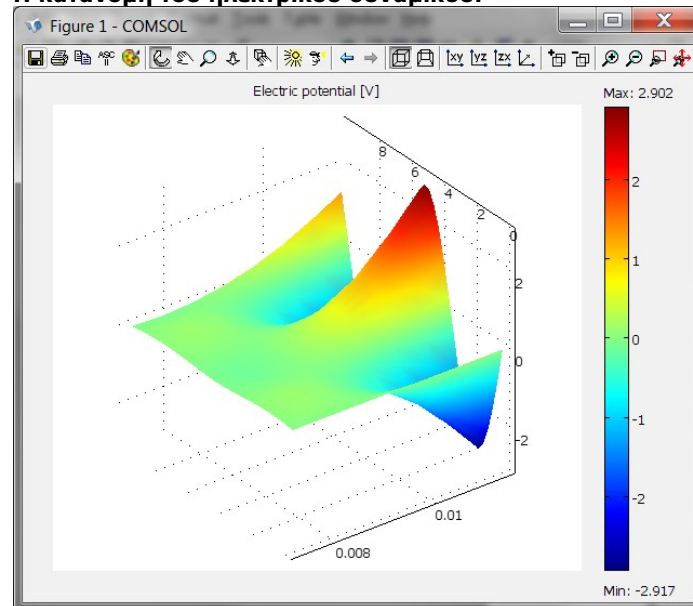


Η διαφορά δυναμικού που παρατηρείται είναι **(4.849,-4.874)V**.

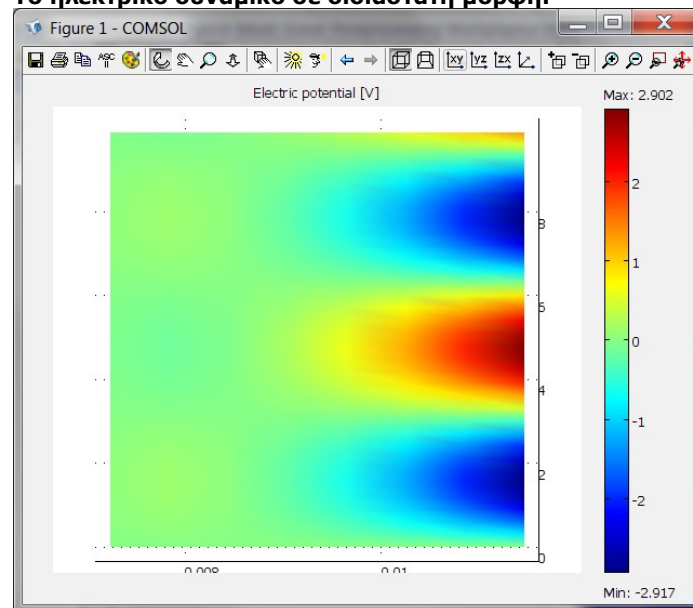
Ηλεκτρικό δυναμικό στην άνω επιφάνεια:



Η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού:



Το ηλεκτρικό δυναμικό σε διδιάστατη μορφή:



6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
MAXIMUM	0.625	$1.572 \cdot 10^{-6}$	0.0957	(4.849 , -4.874)

8.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ Α' ΜΕΡΟΥΣ

PZT-2	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣ H (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
STATIC	0.602	1.638×10^{-6}	0.122	(0.906 , -5.058)
TIME DEPENDENT (0.3)	0.625	1.572×10^{-6}	0.0957	(4.849 , -4.874)
TIME DEPENDENT (0.8)	0.625	1.572×10^{-6}	0.0957	(4.849 , -4.874)

9. ΜΕΡΟΣ Β'

Πολυβινυλικό φθορίδιο (PVDF)

9.1 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

1.Υλικά και ιδιότητες (Subdomain settings)

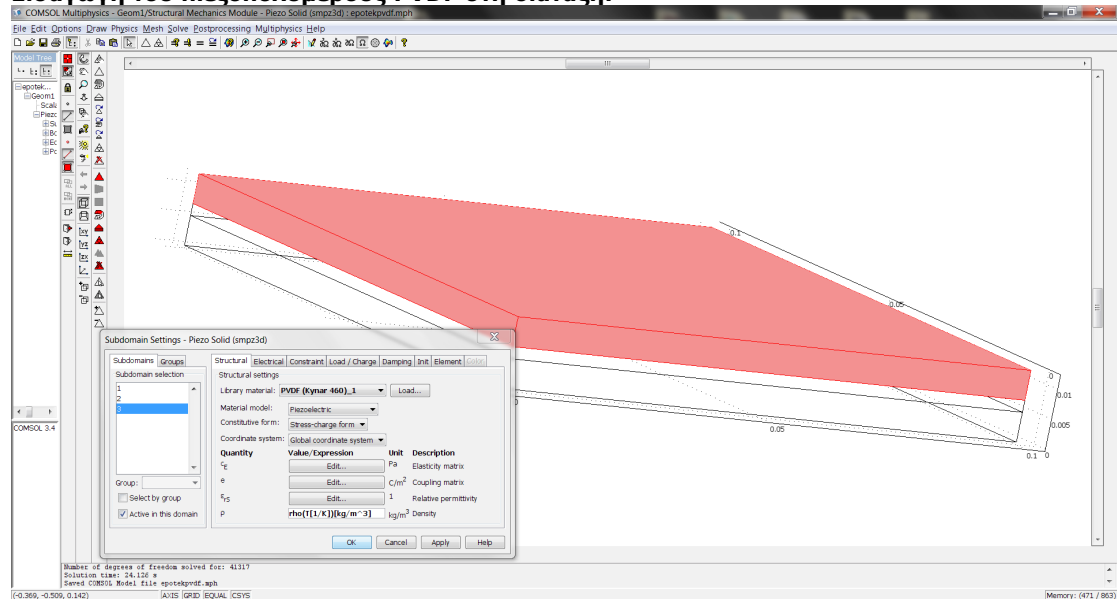
Σε αυτό το μέρος της εργασίας εξετάζεται η συμπεριφορά της ίδιας διάταξης όταν το πιεζοηλεκτρικό υλικό **PZT-2** αντικατασταθεί από το πιεζοπολυμερές **PVDF**. Έτσι η διάταξη τροποποιείται ακολούθως:

Άνω στρώμα: **PVDF**

Ενδιάμεσο: **Epotek301-2**

Κατώτερο στρώμα: **Αλουμίνιο**

Εισαγωγή του πιεζοπολυμερούς PVDF στη διάταξη:



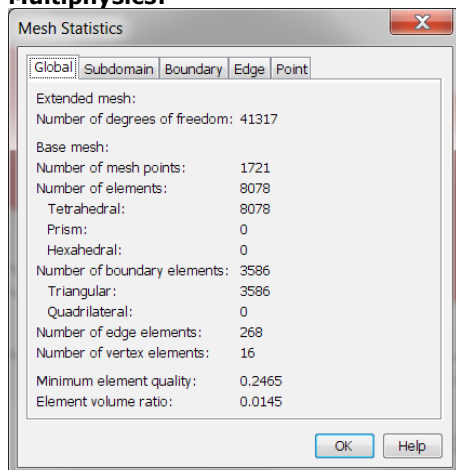
2.Καθορισμός οριακών συνθηκών (Boundary settings)

Σε αυτό το στάδιο δεν πραγματοποιείται καμία αλλαγή στις παραμέτρους, οι οποίες είναι παρόμοιες με τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στη στατική ανάλυση του πρώτου μέρους. Η διάταξη παραμένει πακτωμένη από την αριστερή της πλευρά σε ολόκληρη την επιφάνεια, η εξωτερική δύναμη είναι ίδιου μέτρου και φοράς, όπως και οι ηλεκτρικές ιδιότητες του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.

3.Πλεγματοποίηση (Meshing)

Η πλεγματοποίηση πραγματοποιήθηκε με την ίδια διαδικασία, παρουσιάζοντας τα ίδια στατιστικά στοιχεία.

Τα στατιστικά στοιχεία της πλεγματοποίησης όπως παρουσιάζονται από το COMSOL Multiphysics:



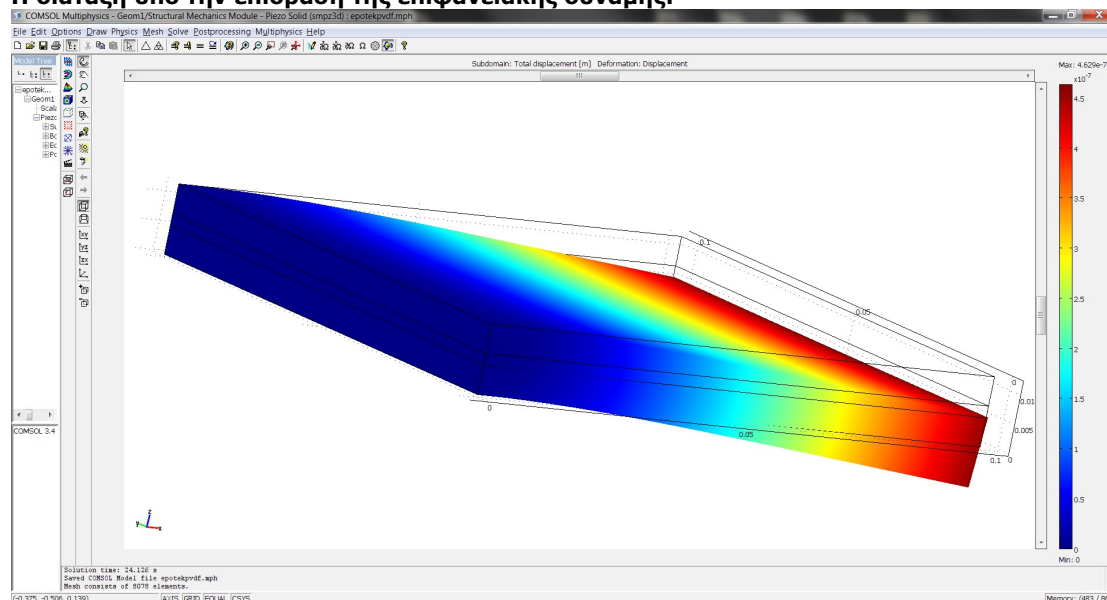
4.Επίλυση/Παράμετροι επίλυσης

Οι παράμετροι επίλυσης είναι οι ίδιες που χρησιμοποιήθηκαν και στην προηγούμενη στατική ανάλυση, ενώ το πρόγραμμα πραγματοποιεί την επίλυση σε χρόνους κάτω του ενός λεπτού, δεδομένου ότι η στατική ανάλυση δεν απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ και δεν δυσκολεύει ένα σύγχρονο Η/Υ.

5.Συλλογή και ανάλυση αποτελεσμάτων

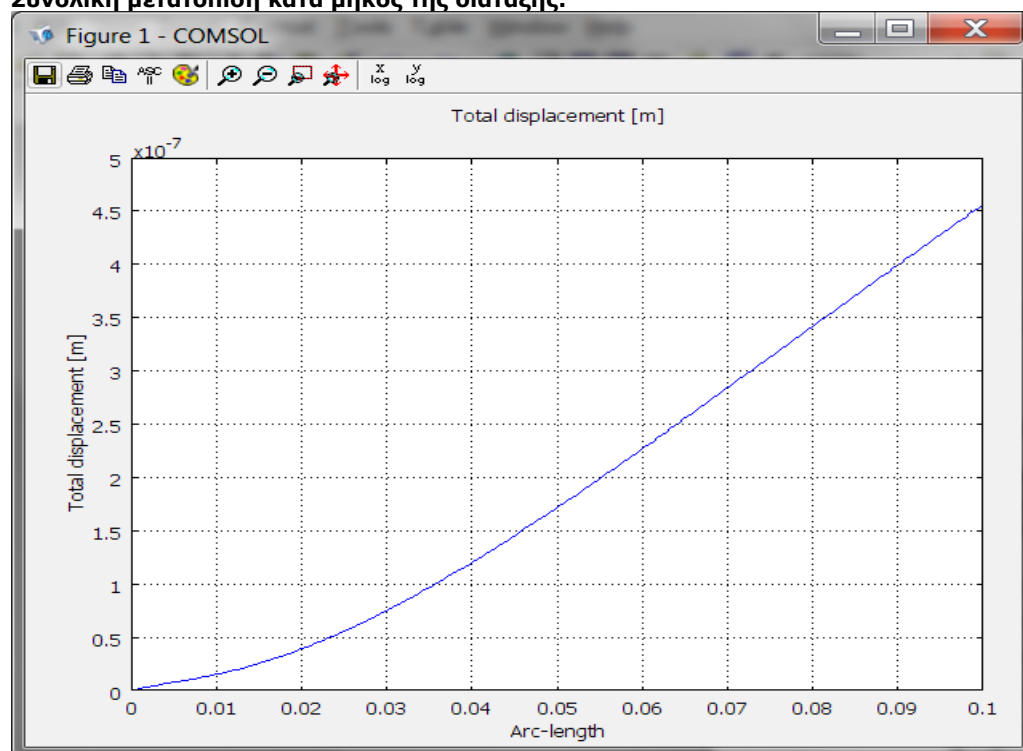
Στο στάδιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης. Όπως είναι αναμενόμενο, η διάταξη υπό την επίδραση της δύναμης έχει εκτραπεί προς τα κάτω στο ελεύθερο άκρο της.

Η διάταξη υπό την επίδραση της επιφανειακής δύναμης:

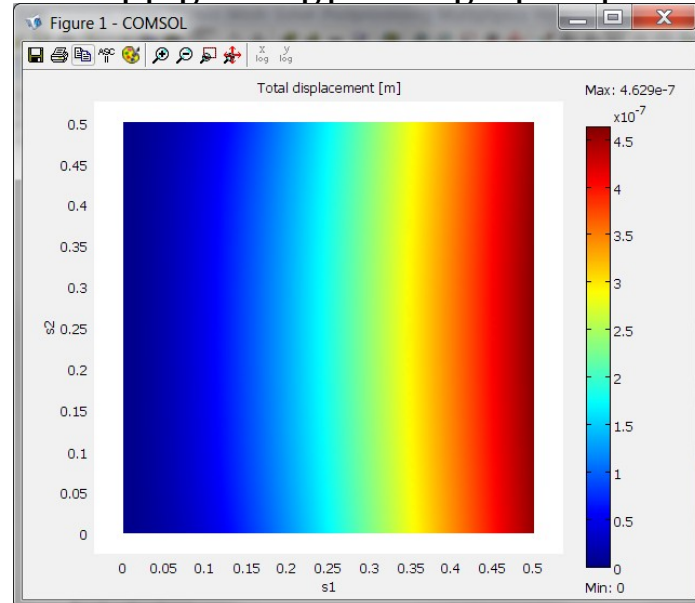


Η μέγιστη μετατόπιση στο ελεύθερο άκρο της διάταξης ανέρχεται σε **0.423 μm** .

Συνολική μετατόπιση κατά μήκος της διάταξης:

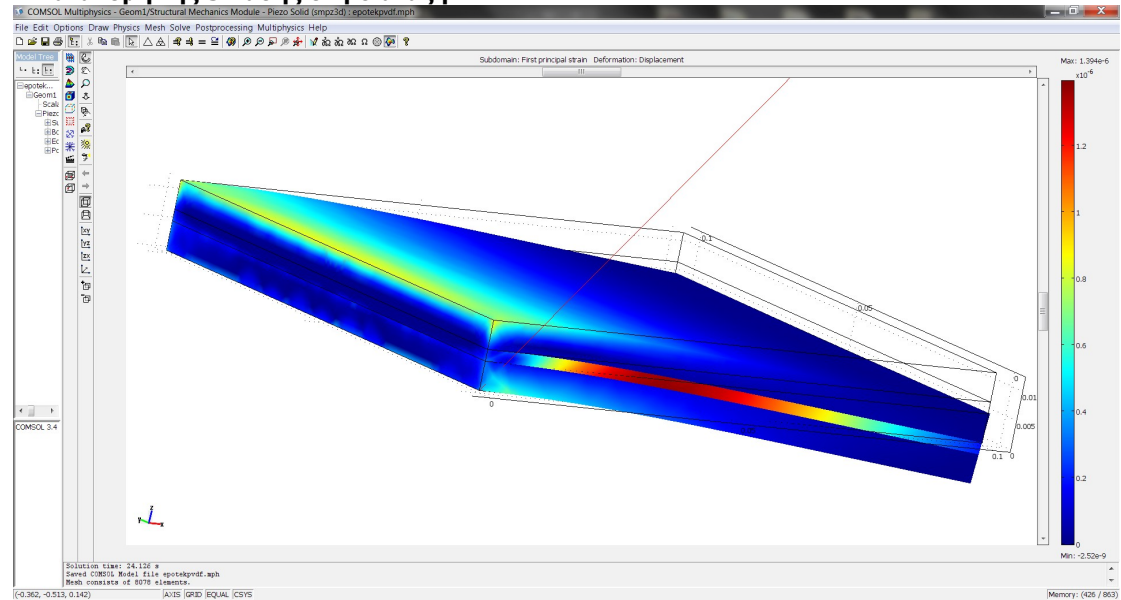


Η κατανομή της συνολικής μετατόπισης σε μία επιφάνεια της διάταξης:

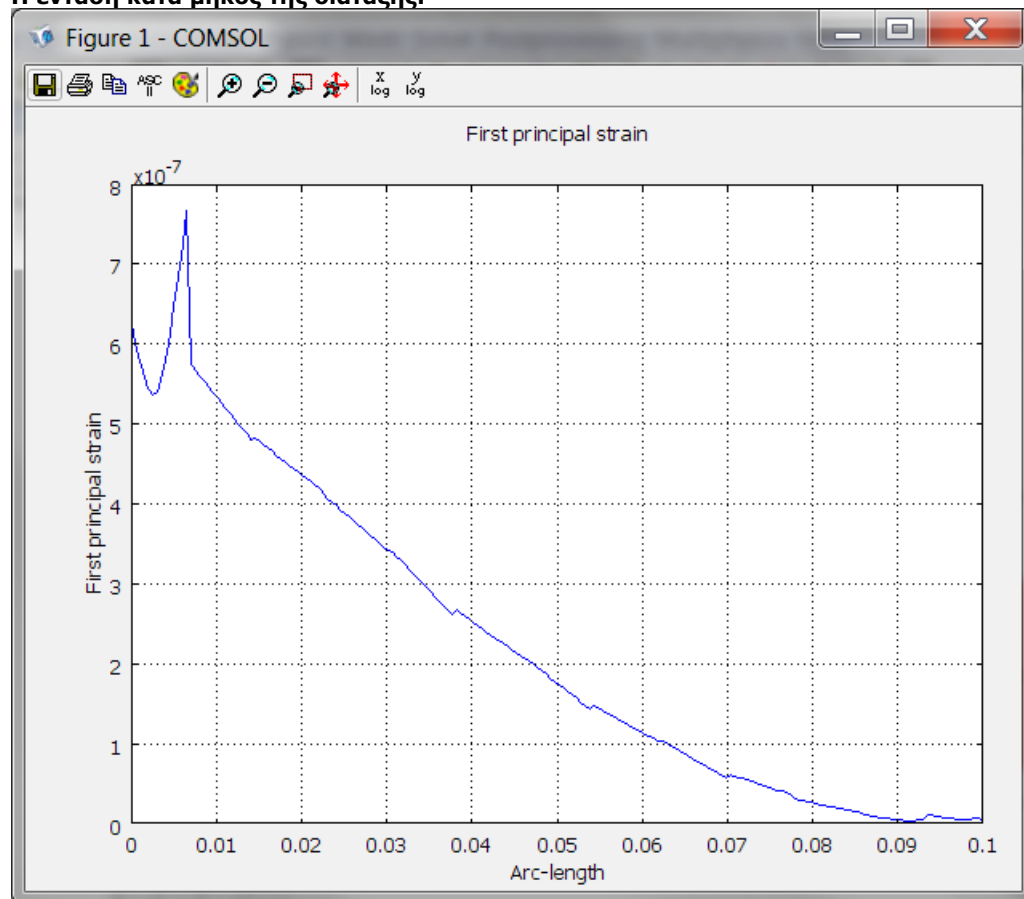


Η μέγιστη ένταση που παρατηρείται στη διάταξη είναι **1.394×10^{-6}** και παρατηρείται στο μεσαίο στρώμα, αυτό του συγκολλητικού υλικού, ενώ υψηλές είναι και οι τιμές που παρατηρούνται στο πακτωμένο άκρο της διάταξης.

Η κατανομή της έντασης στη διάταξη:

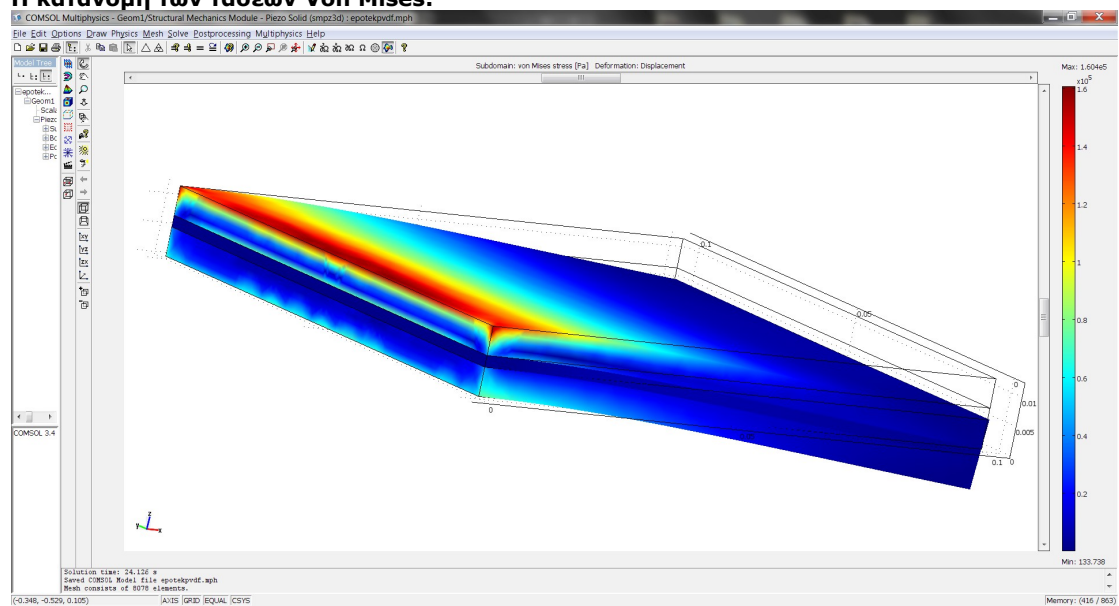


Η ένταση κατά μήκος της διάταξης:

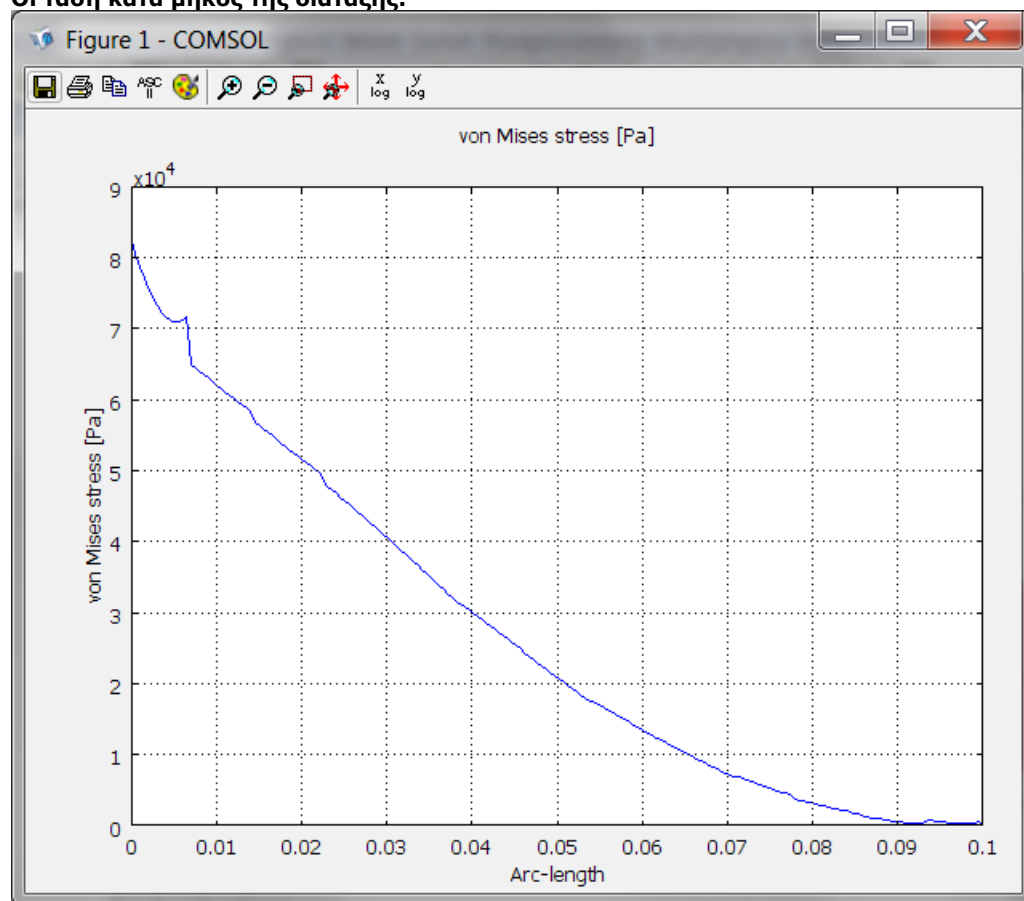


Οι **τάσεις Von Mises** αναπτύσσουν φυσιολογικά τη μέγιστη τιμή τους στο πακτωμένο άκρο της διάταξης. Το μέγιστο μέτρο των τάσεων που αναπτύσσονται είναι **0.16MPa**.

Η κατανομή των τάσεων Von Mises:

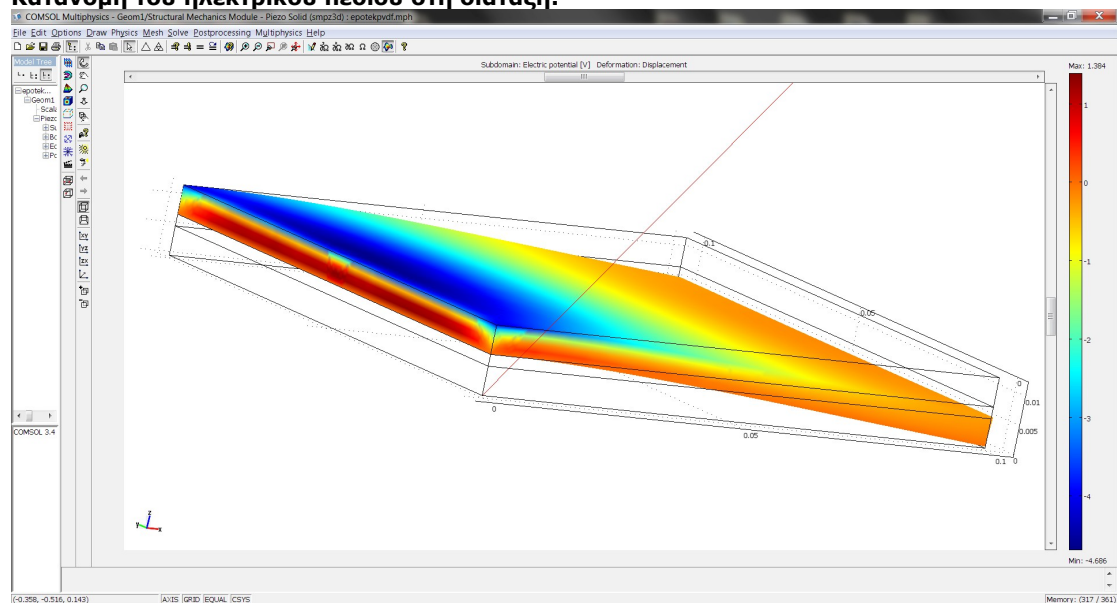


Οι τάση κατά μήκος της διάταξης:

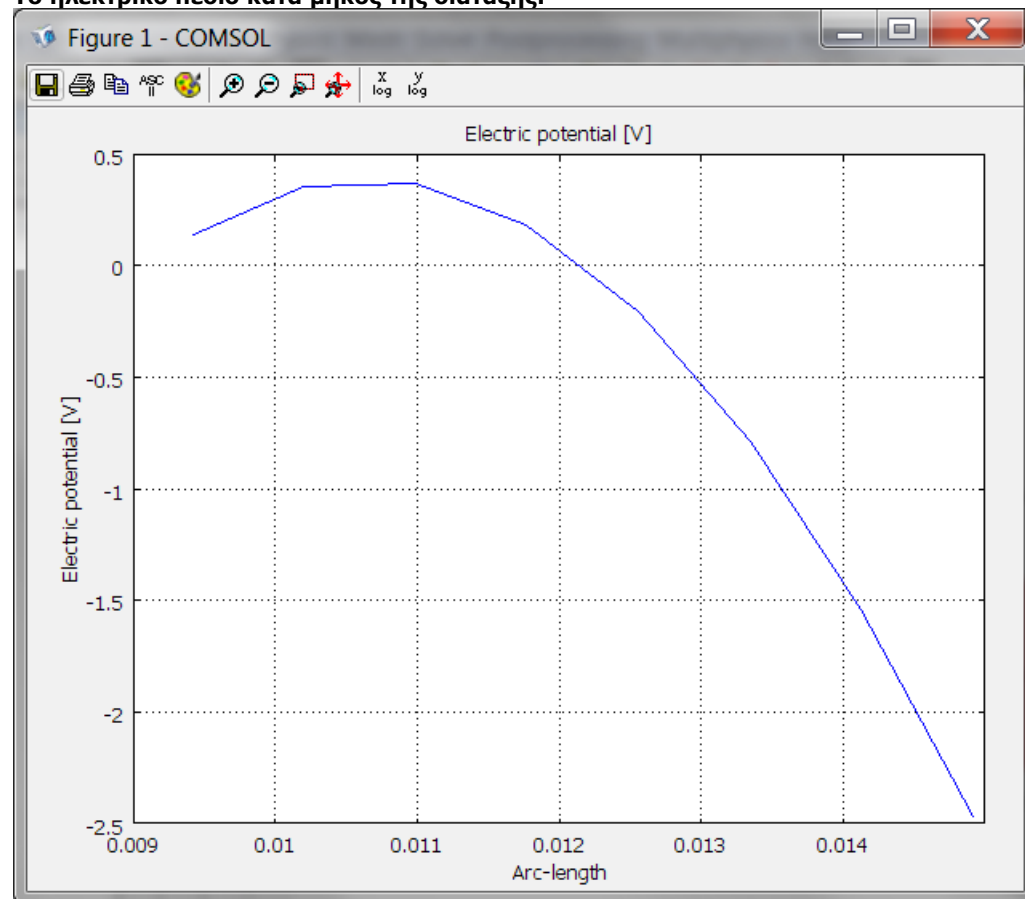


Το **ηλεκτρικό δυναμικό** που αναπτύσσεται στη διάταξη λόγω των ιδιοτήτων που διέπουν τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχει εύρος **(1.384,-4.686)V**.

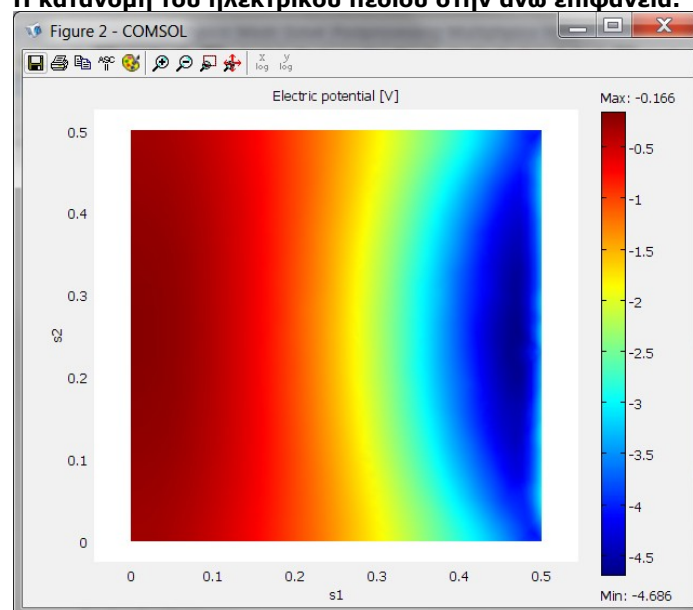
Κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στη διάταξη:



Το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της διάταξης:



Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην άνω επιφάνεια:



6.Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
MAXIMUM	0.423	$1.394 \cdot 10^{-6}$	0.16	(1.384, -4.686)

9.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΠΟΣΒΕΝΟΜΕΝΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ (συντελεστής απόσβεσης 0.3)

1.Υλικά και ιδιότητες

Τα υλικά της διάταξης παραμένουν ίδια όπως και στην στατική ανάλυση. Θα εισαχθεί στο στρώμα του συγκολλητικού υλικού η αποσβενόμενη ταλάντωση με συντελεστή απόσβεσης (loss factor) 0.3 όπως στην περίπτωση του PZT-2.

2.Καθορισμός οριακών συνθηκών (Boundary settings)

Σε αυτό το στάδιο η βασική διαφορά βρίσκεται στην ασκούμενη δύναμη που πλέον είναι ημιτονοειδούς μορφής εξαρτώμενη από το χρόνο ίση με **$F = -500\sin(t)$** με **$F_{max} = 500N$** και φορά όπως η αρχική, ακριβώς όπως στο δεύτερο στάδιο του Α' μέρους κατά τη μελέτη της διάταξης με το πιεζοηλεκτρικό PZT-2.

3.Πλεγματοποίηση (Meshing)

Ακριβώς όπως και στη στατική ανάλυση.

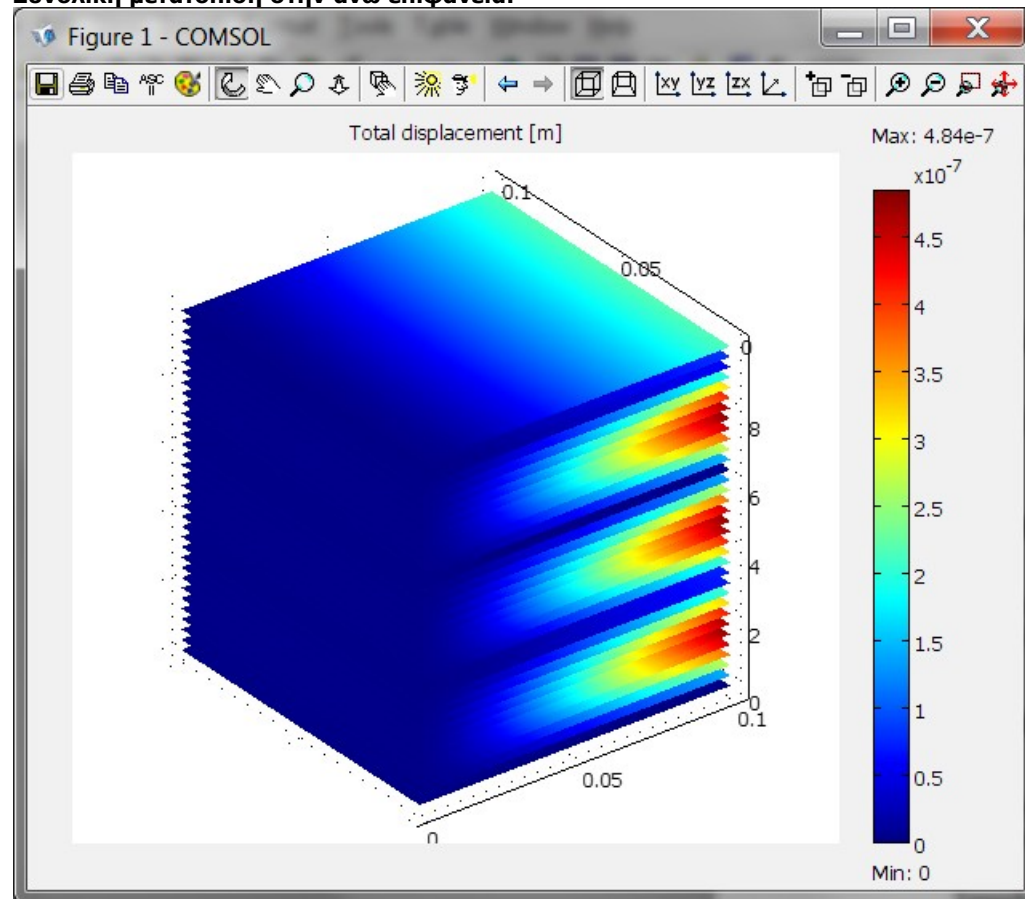
4.Επίλυση/Παράμετροι επίλυσης

Υσχύουν τα ίδια όπως σε κάθε προηγούμενη εξαρτώμενη από το χρόνο ανάλυση. Η επίλυση περατώνεται περίπου σε 7 με 10 λεπτά.

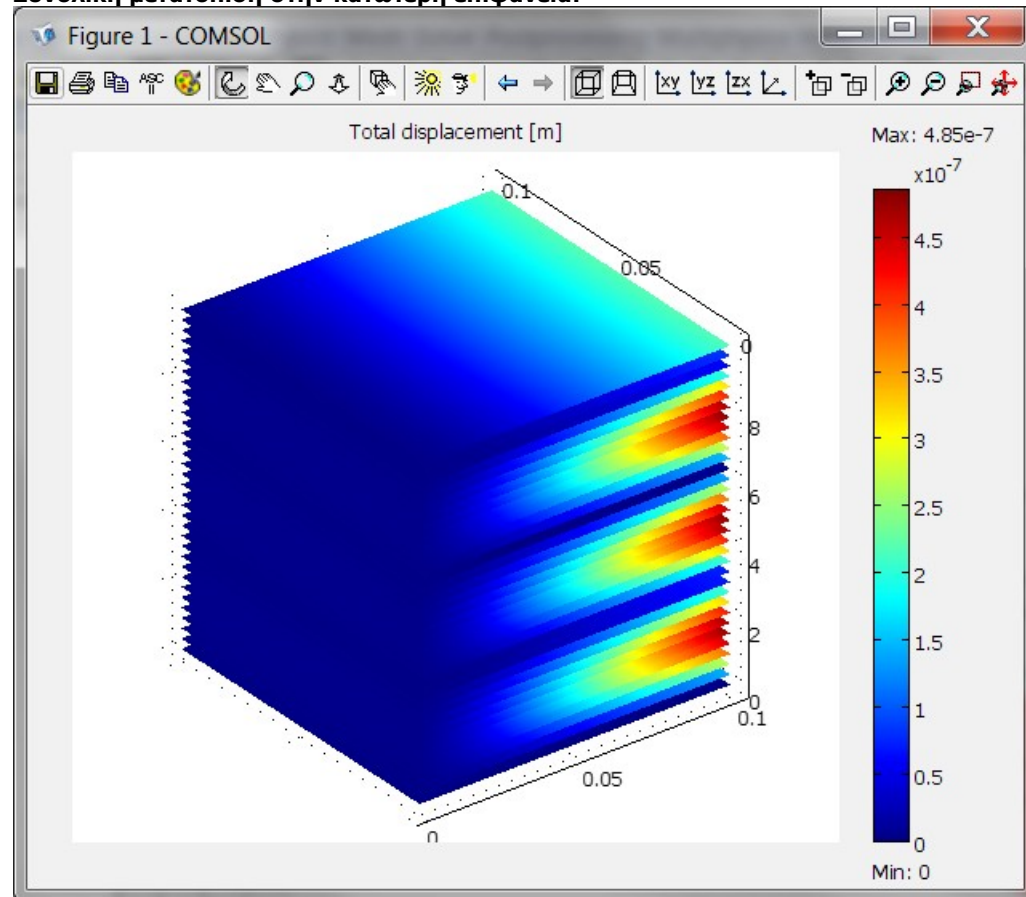
5.Συλλογή και ανάλυση αποτελεσμάτων

Η μέγιστη **μετατόπιση** που παρατηρείται είναι **0.485μm** και εντοπίζεται στην κατώτερη επιφάνεια της διάταξης.

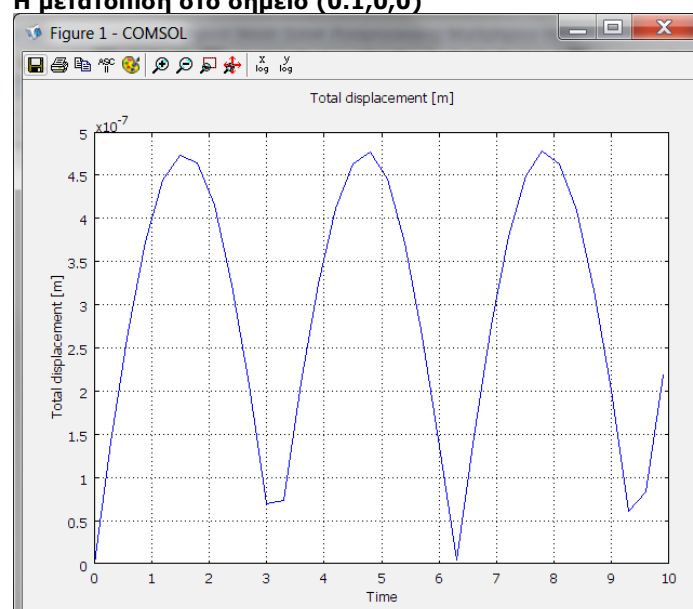
Συνολική μετατόπιση στην άνω επιφάνεια:



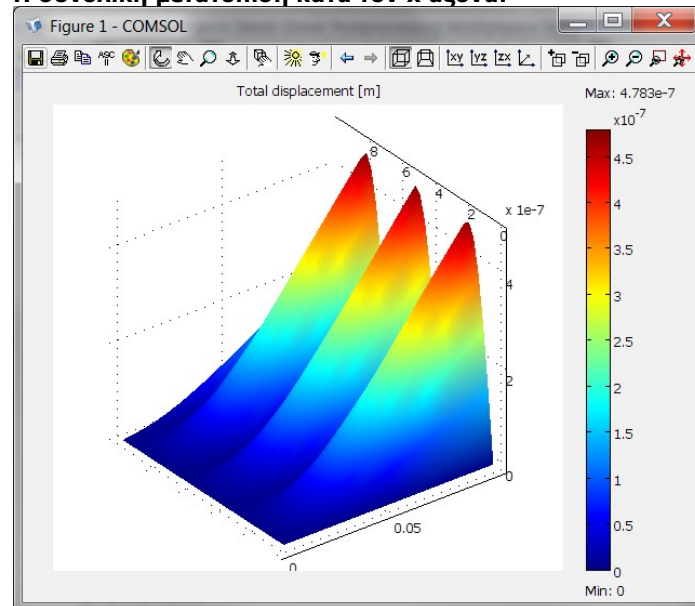
Συνολική μετατόπιση στην κατώτερη επιφάνεια:



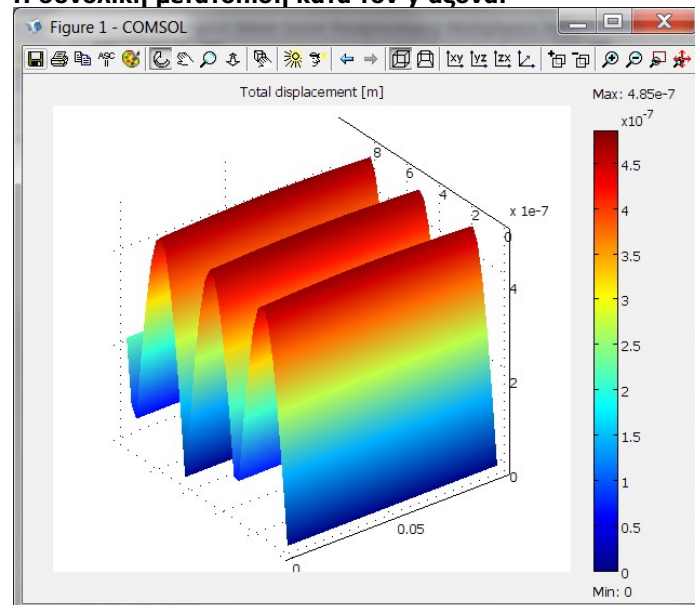
Η μετατόπιση στο σημείο (0.1,0,0)



Η συνολική μετατόπιση κατά τον x άξονα:

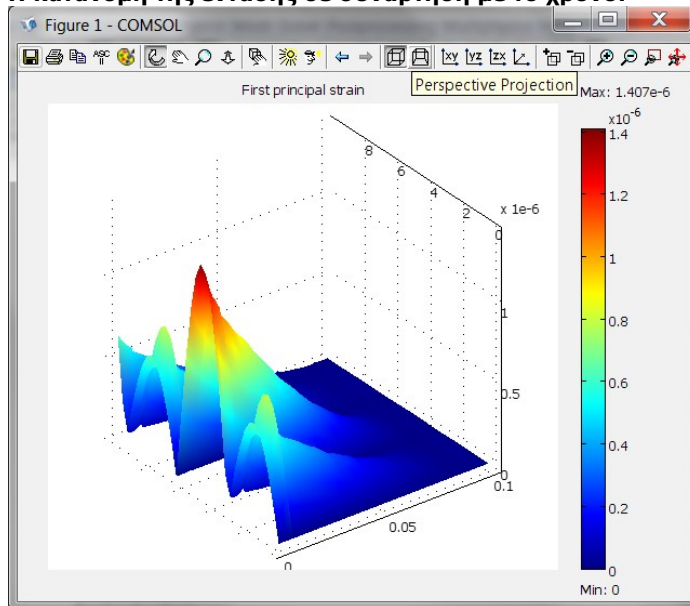


Η συνολική μετατόπιση κατά τον y άξονα:

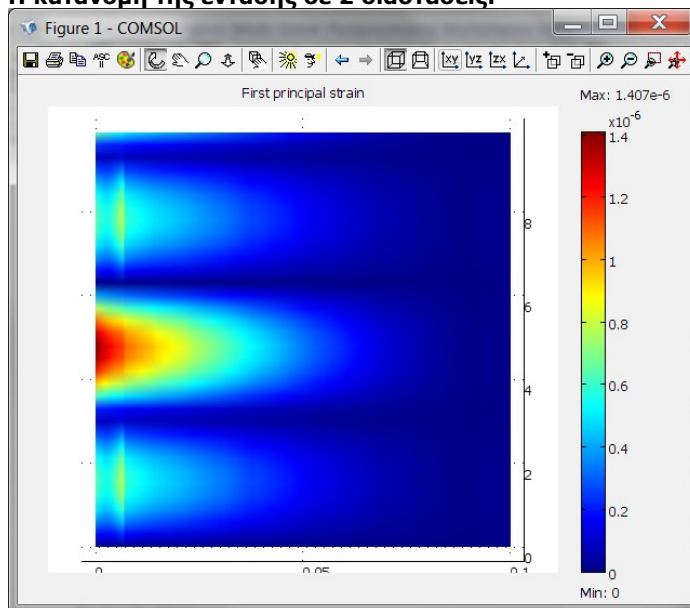


Η μέγιστη τιμή της **έντασης** που παρατηρείται στη διάταξη είναι **$1.407 \cdot 10^{-6}$** .

Η κατανομή της έντασης σε συνάρτηση με το χρόνο:

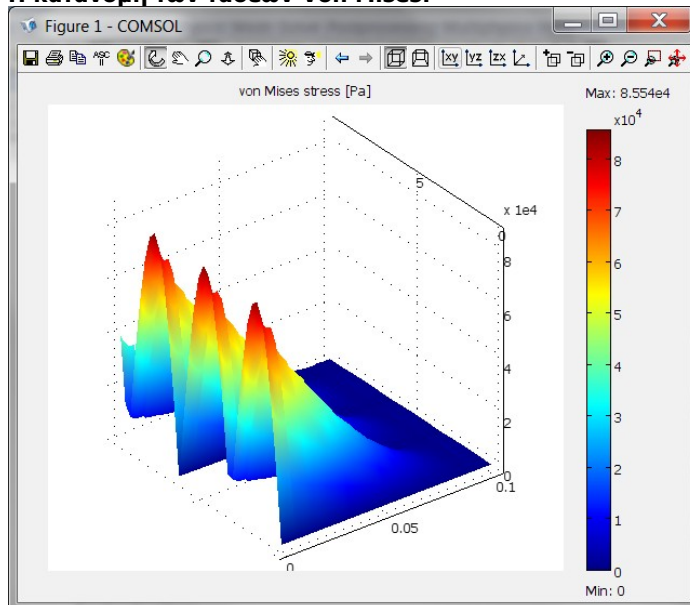


Η κατανομή της έντασης σε 2 διαστάσεις:

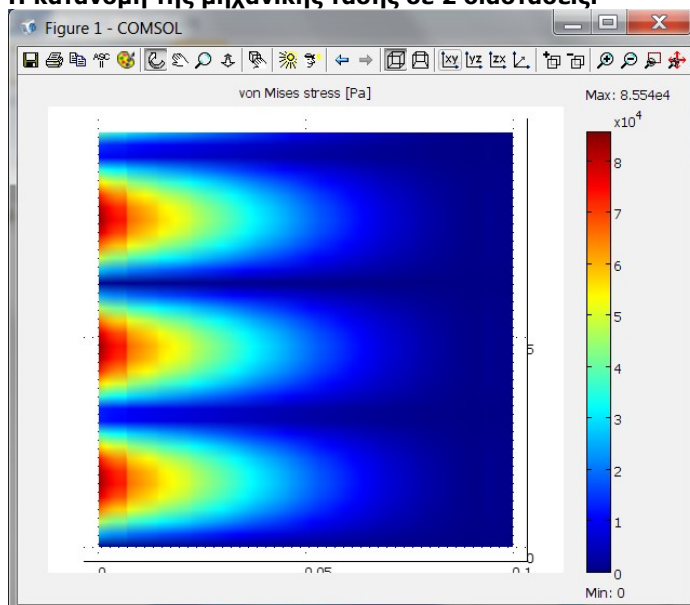


Η μέγιστη τιμή των **τάσεων Von Mises** που αναπτύσσονται στη διάταξη είναι **0.0855MPa**.

Η κατανομή των τάσεων Von Mises:

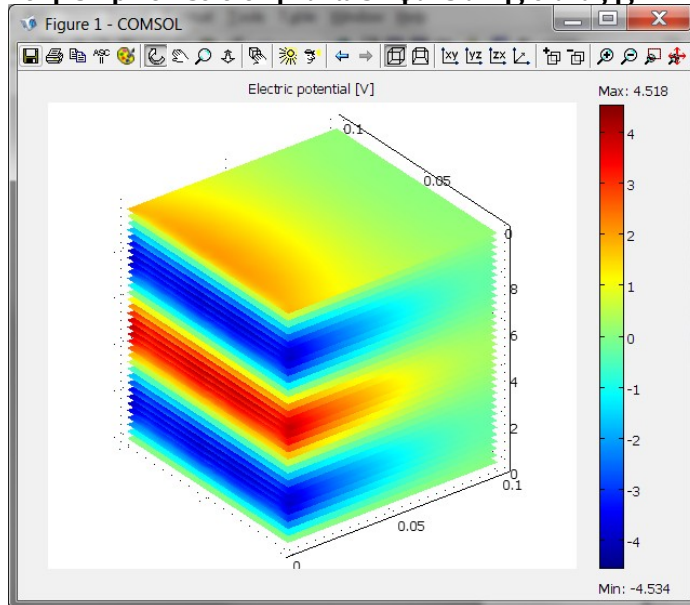


Η κατανομή της μηχανικής τάσης σε 2 διαστάσεις:

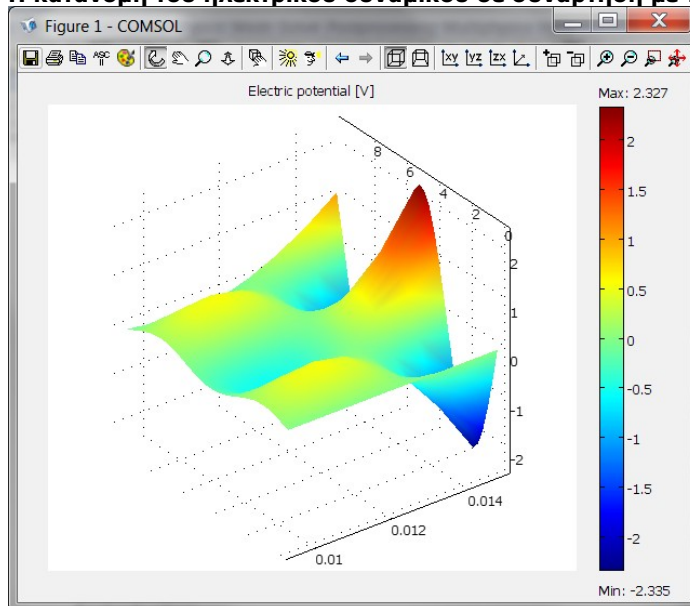


Η **διαφορά δυναμικού** που παρατηρείται είναι **(4.518,-4.534)V**.

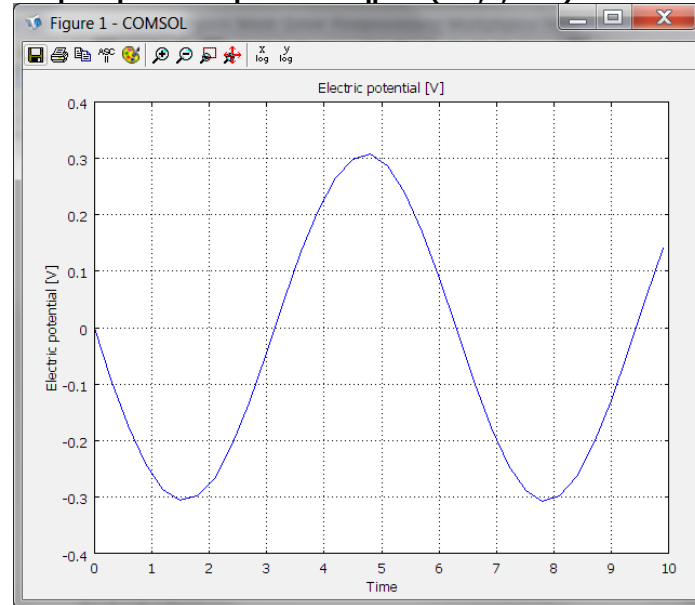
Το ηλεκτρικό πεδίο στην άνω επιφάνεια της διάταξης:



Η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού σε συνάρτηση με το χρόνο:



Το ηλεκτρικό δυναμικό στο σημείο (0.1,0,0.12):



6.Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
MAXIMUM	0.485	$1.407 \cdot 10^{-6}$	0.0855	(4.518, -4.534)

9.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΠΟΣΒΕΝΟΜΕΝΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ (συντελεστής απόσβεσης 0.8)

1.Υλικά και ιδιότητες

Το μοναδικό στοιχείο που αλλάζει στη μοντελοποίηση σε αυτό το στάδιο είναι ο **συντελεστής απόσβεσης** της ταλάντωσης (loss factor), που από **0.3** στην προηγούμενη περίπτωση γίνεται **0.8**.

2.Καθορισμός οριακών συνθηκών (Boundary settings)

Οι συνοριακές συνθήκες παραμένουν όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η διάταξη βρίσκεται πακτωμένη στην αριστερή της επιφάνεια, ενώ στην άνω επιφάνεια δέχεται μία εξωτερική δύναμη ημιτονοειδούς μορφής.

3.Πλεγματοποίηση (Meshing)

Καμία αλλαγή δεν πραγματοποιείται στην πλεγματοποίηση και στις παραμέτρους της.

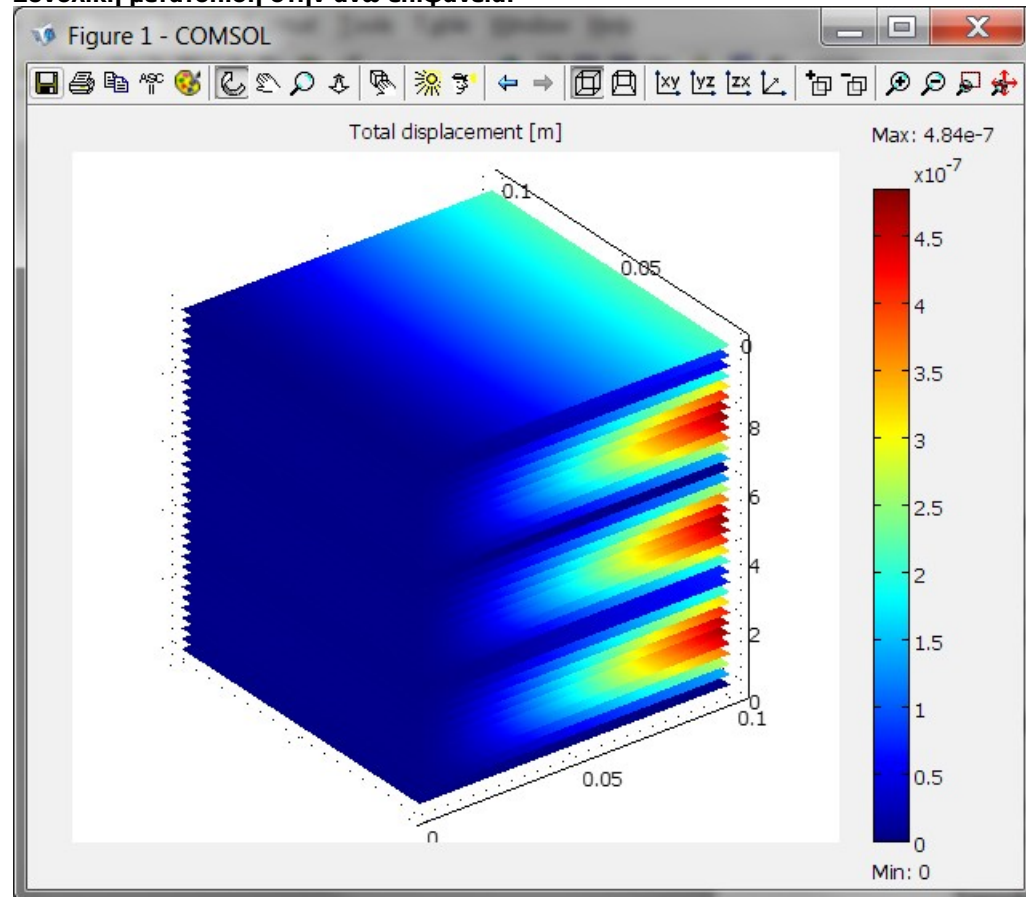
4.Επίλυση/Παράμετροι επίλυσης

Οι παράμετροι επίλυσης παραμένουν ίδιες όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Πρόκειται για ανάλυση εξαρτώμενη από το χρόνο όπως και ο τρόπος επίλυσης. Η επίλυση πραγματοποιείται από το πρόγραμμα συνήθως σε 7-10 λεπτά.

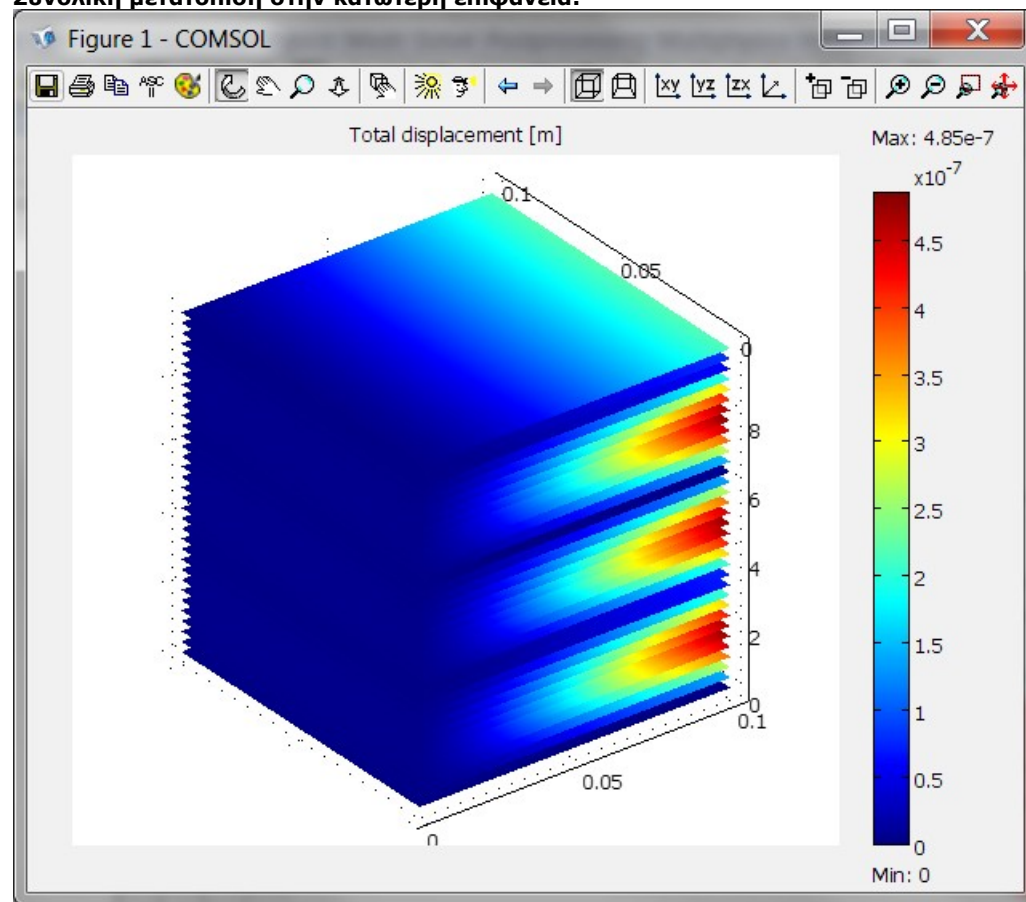
5.Συλλογή και ανάλυση αποτελεσμάτων

Η μέγιστη τιμή της συνολικής μετατόπισης είναι ξανά **0.485μm**.

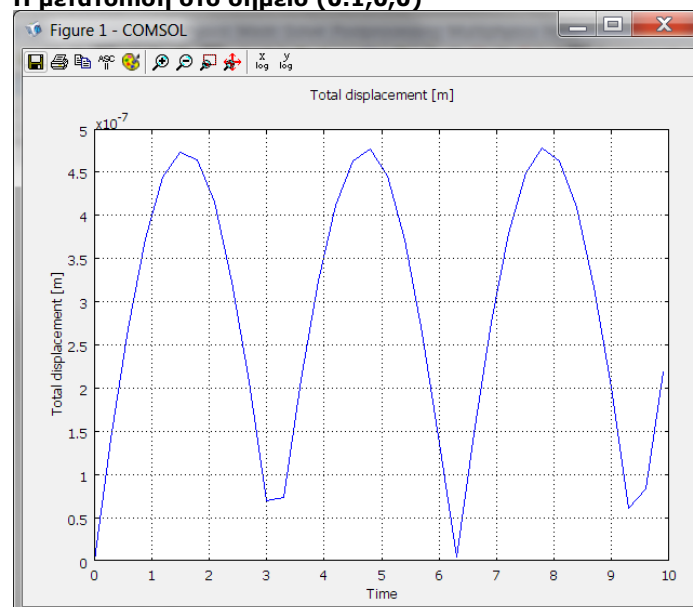
Συνολική μετατόπιση στην άνω επιφάνεια:



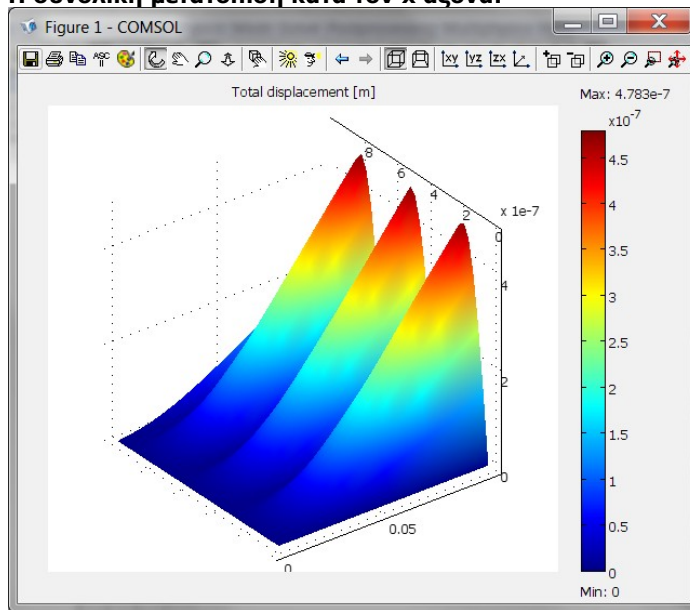
Συνολική μετατόπιση στην κατώτερη επιφάνεια:



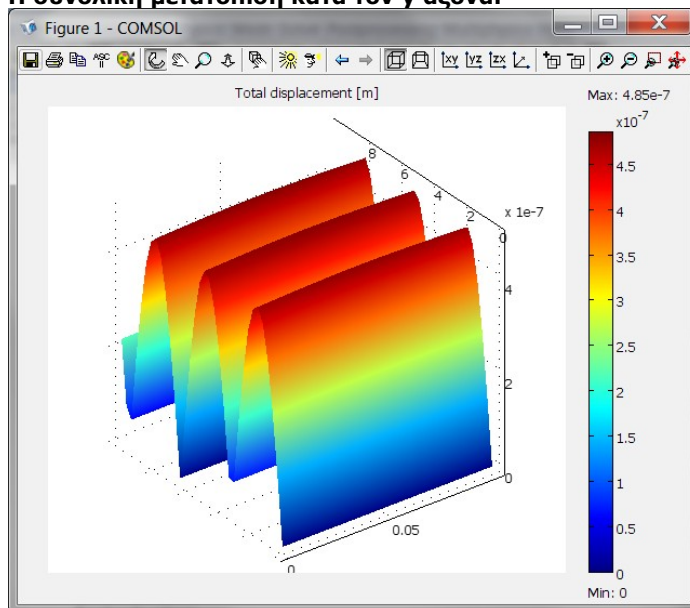
Η μετατόπιση στο σημείο (0.1,0,0)



Η συνολική μετατόπιση κατά τον x άξονα:

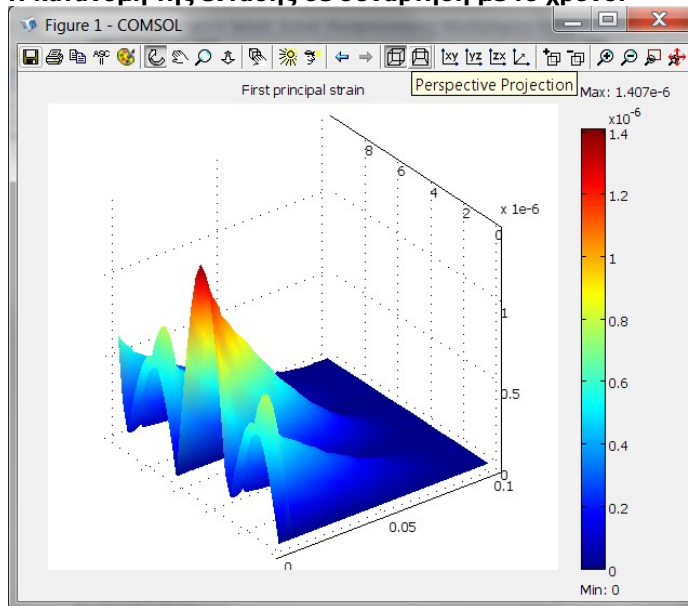


Η συνολική μετατόπιση κατά τον y άξονα:

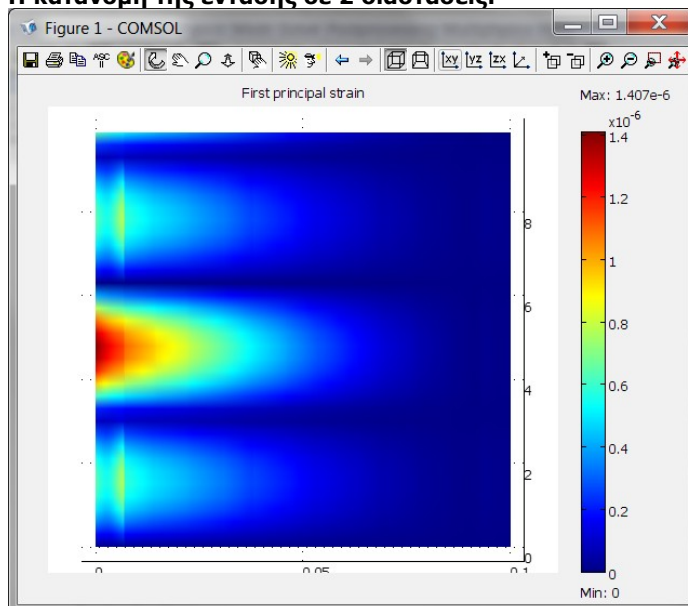


Η μέγιστη τιμή της **έντασης** που παρατηρείται στη διάταξη είναι όπως και στο προηγούμενο στάδιο **$1.407 \cdot 10^{-6}$** .

Η κατανομή της έντασης σε συνάρτηση με το χρόνο:

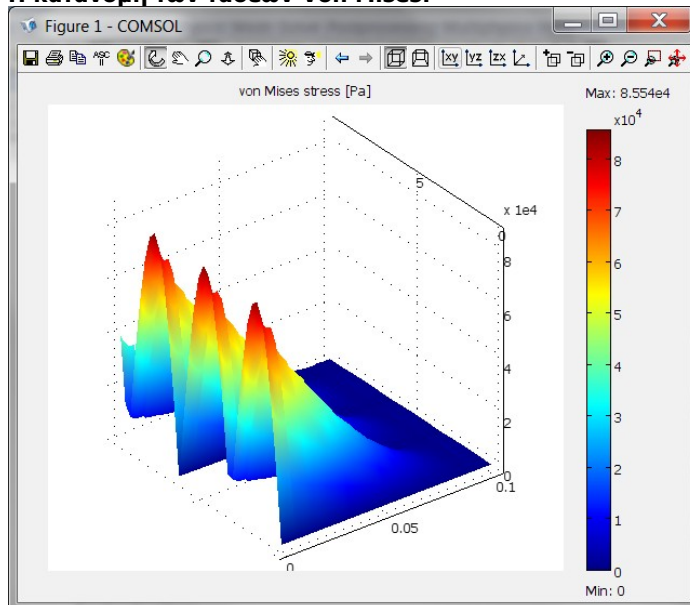


Η κατανομή της έντασης σε 2 διαστάσεις:

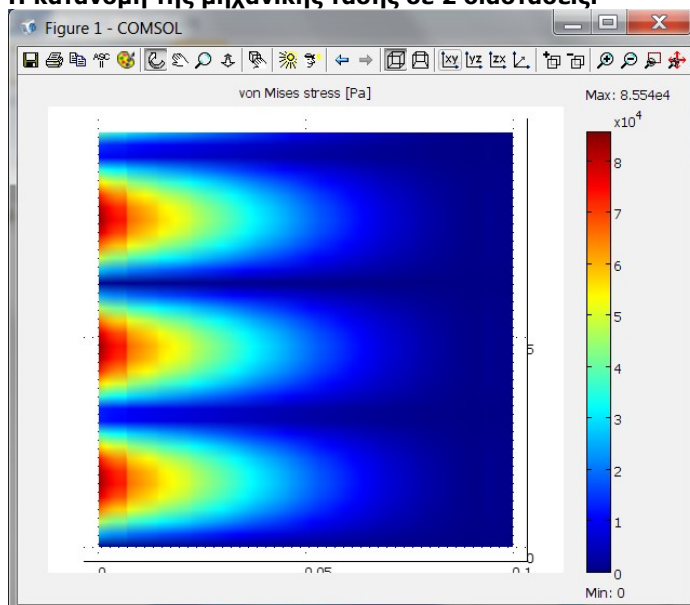


Η μέγιστη τιμή των **τάσεων Von Mises** που αναπτύσσονται στη διάταξη είναι **0.0855MPa**.

Η κατανομή των τάσεων Von Mises:

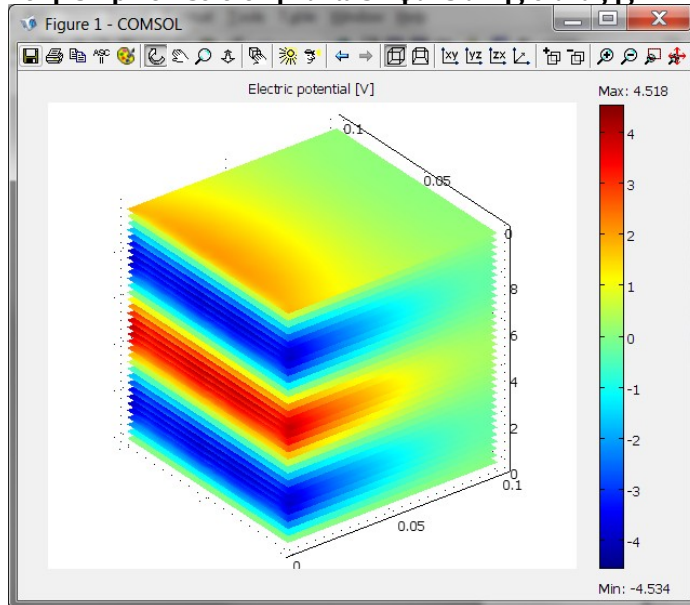


Η κατανομή της μηχανικής τάσης σε 2 διαστάσεις:

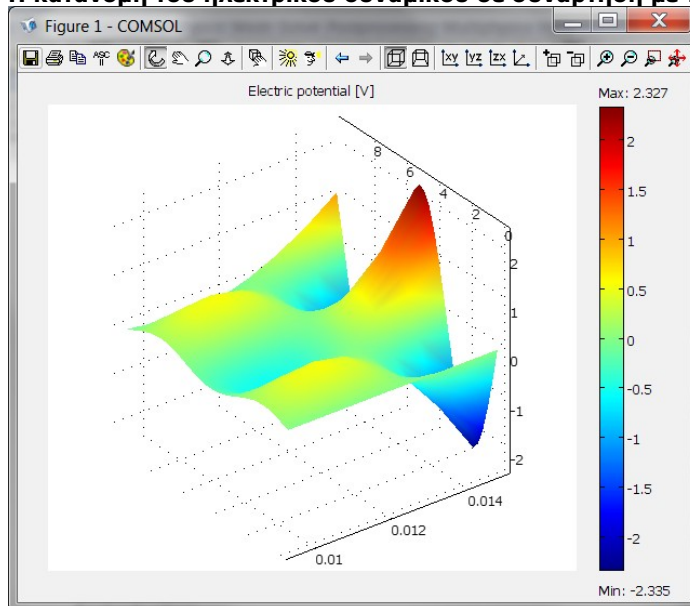


Η **διαφορά δυναμικού** που παρατηρείται είναι **(4.518,-4.534)V**.

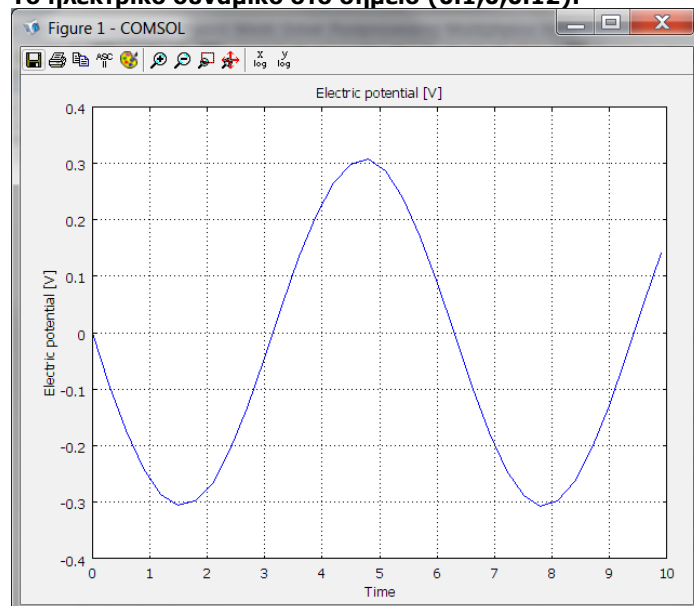
Το ηλεκτρικό πεδίο στην άνω επιφάνεια της διάταξης:



Η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού σε συνάρτηση με το χρόνο:



Το ηλεκτρικό δυναμικό στο σημείο (0.1,0,0.12):



6.Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
MAXIMUM	0.485	$1.407 \cdot 10^{-6}$	0.0855	(4.518, -4.534)

9.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ Β' ΜΕΡΟΥΣ

PZT-2	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
STATIC	0.423	$1.394 \cdot 10^{-6}$	0.16	(1.384, -4.686)
TIME DEPENDENT (0.3)	0.485	$1.407 \cdot 10^{-6}$	0.0855	(4.518, -4.534)
TIME DEPENDENT (0.8)	0.485	$1.407 \cdot 10^{-6}$	0.0855	(4.518, -4.534)

Είναι φανερό ότι η αλλαγή του συντελεστή απόσβεσης (loss factor) δεν επιφέρει ούτε σε αυτή την περίπτωση κάποια αλλαγή στη συμπεριφορά της διάταξης. Θα εξεταστεί αν υπεύθυνη για αυτά τα αποτελέσματα είναι η μορφή της εξωτερικής δύναμης.

10. ΑΛΛΑΓΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

Στο στάδιο αυτό θα γίνει μία συγκριτική δοκιμή, χρησιμοποιώντας τη διάταξη του Α' μέρους, ώστε να διαπιστωθεί αν η μορφή της εξωτερικής δύναμης ευθύνεται για τα όμοια αποτελέσματα στην χρονικά εξαρτώμενη ανάλυση. Η νέα δύναμη που θα χρησιμοποιηθεί, θα είναι η **$F-500\sin(\pi t)$** και εξασφαλίζει σημαντικά πιο γρήγορη απόκριση από την μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενη δύναμη.

1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΠΟΣΒΕΝΟΜΕΝΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ (συντελεστής απόσβεσης 0.3)

Θα παραλειφθούν τα αρχικά στάδια της διαδικασίας και θα γίνει απευθείας παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Η διάταξη αποτελείται από τα εξής υλικά:

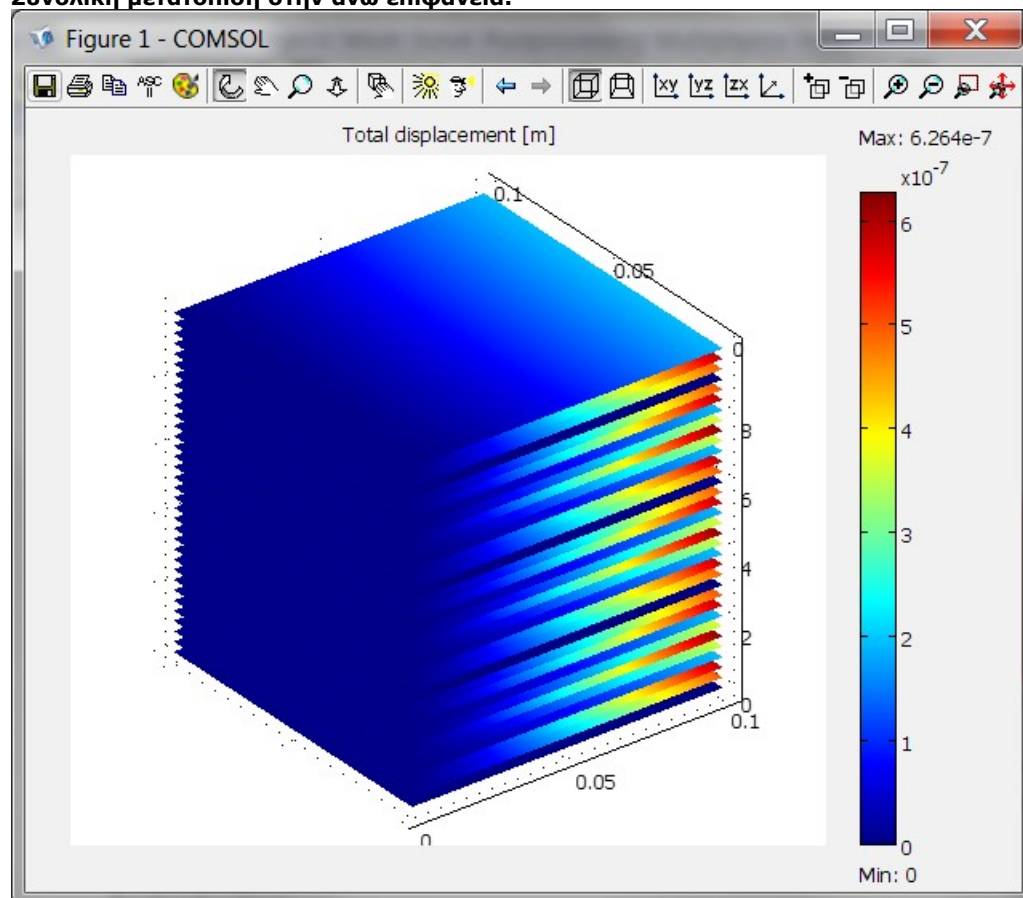
Άνω στρώμα: **PZT-2**

Ενδιάμεσο: **EpoTek301-2**

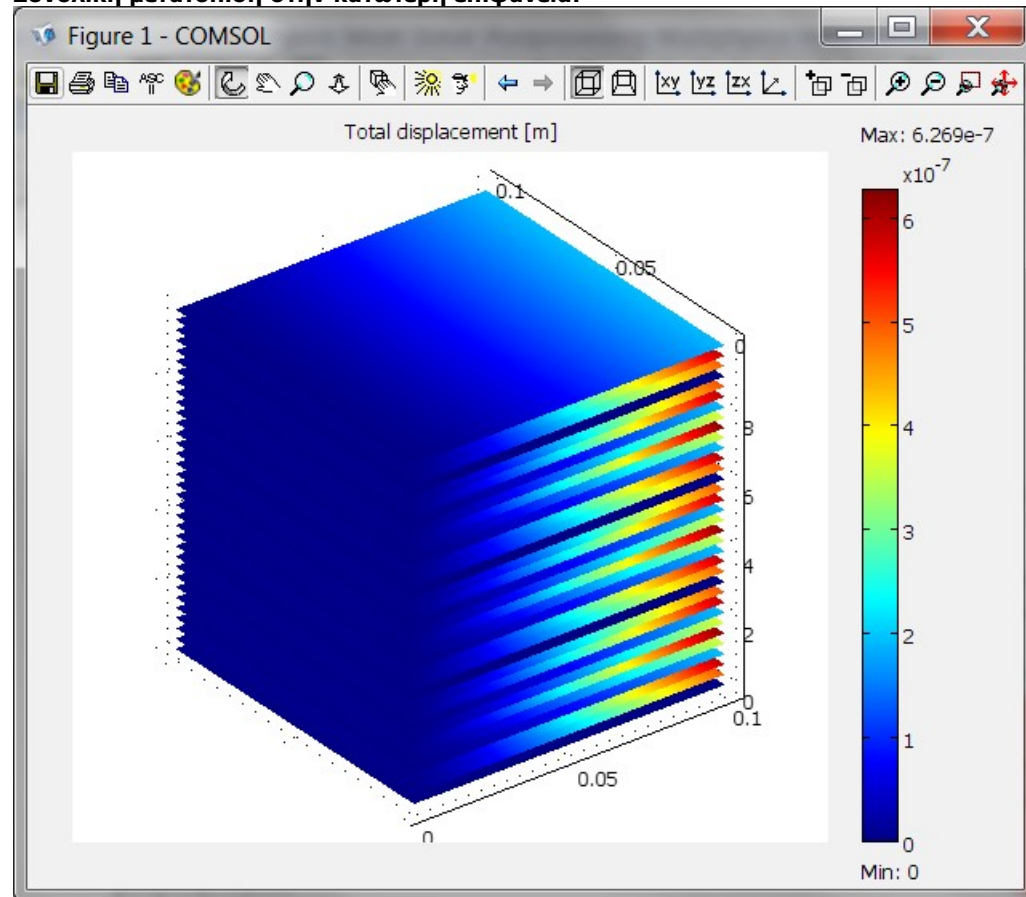
Κατώτερο στρώμα: **Αλουμίνιο**

Συνολική μετατόπιση:

Συνολική μετατόπιση στην άνω επιφάνεια:

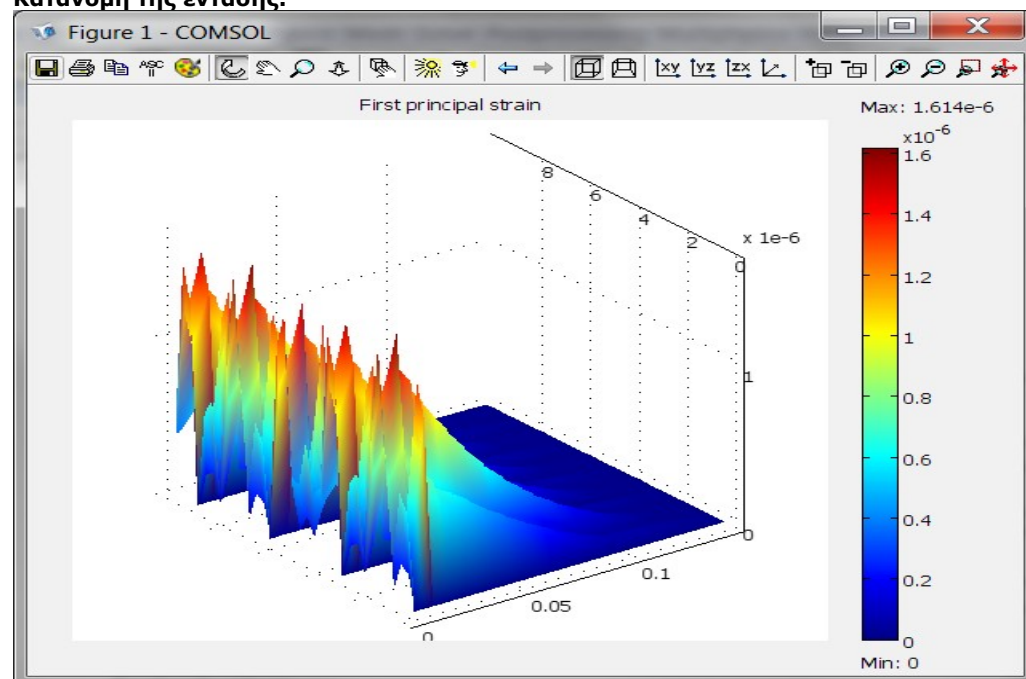


Συνολική μετατόπιση στην κατώτερη επιφάνεια:



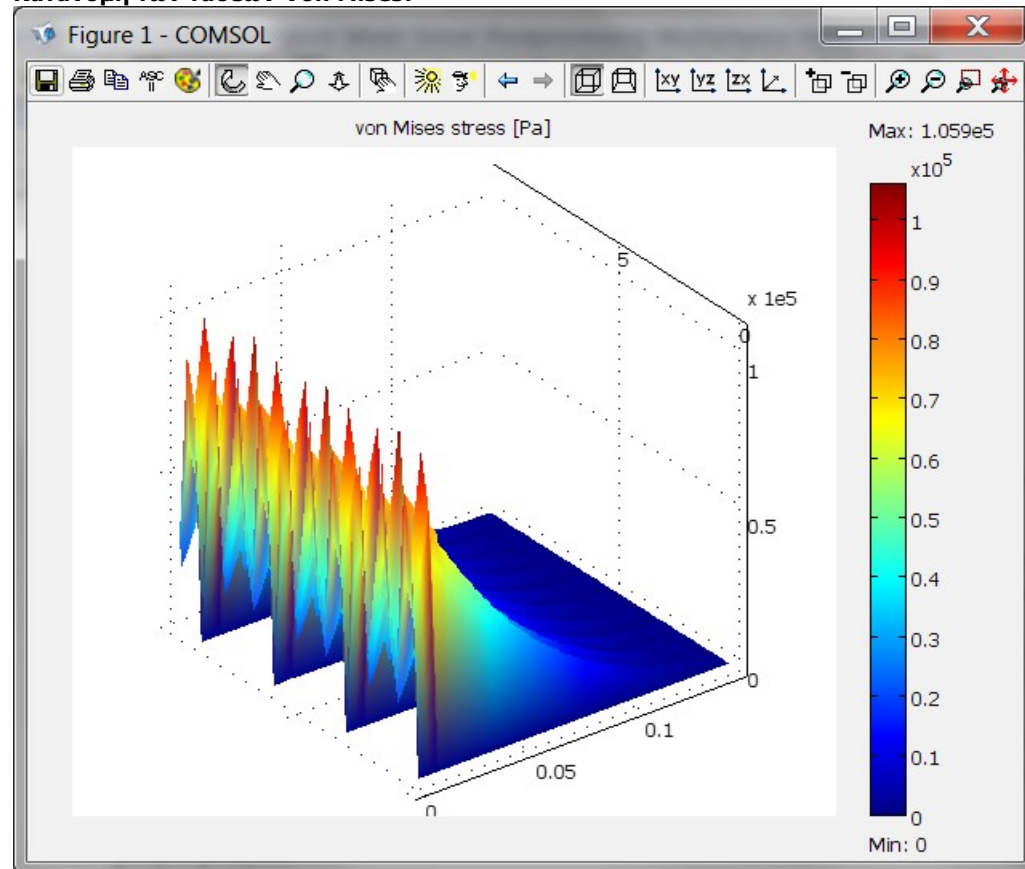
Ένταση:

Κατανομή της έντασης:



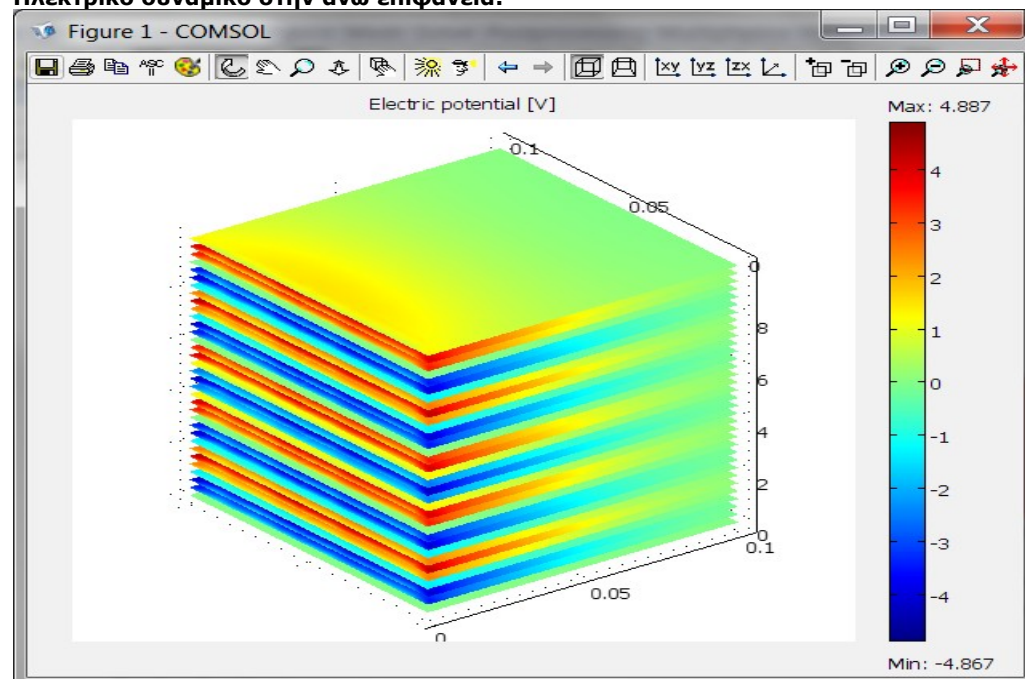
Τάσεις Von Mises:

Κατανομή των τάσεων Von Mises:



Ηλεκτρικό δυναμικό:

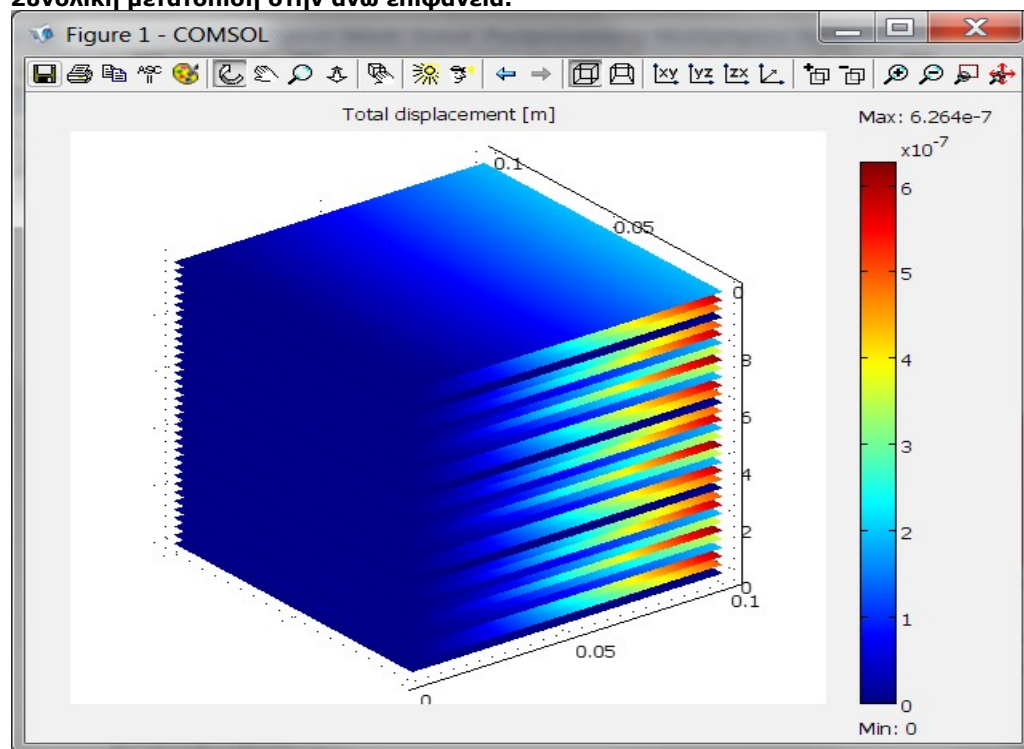
Ηλεκτρικό δυναμικό στην άνω επιφάνεια:



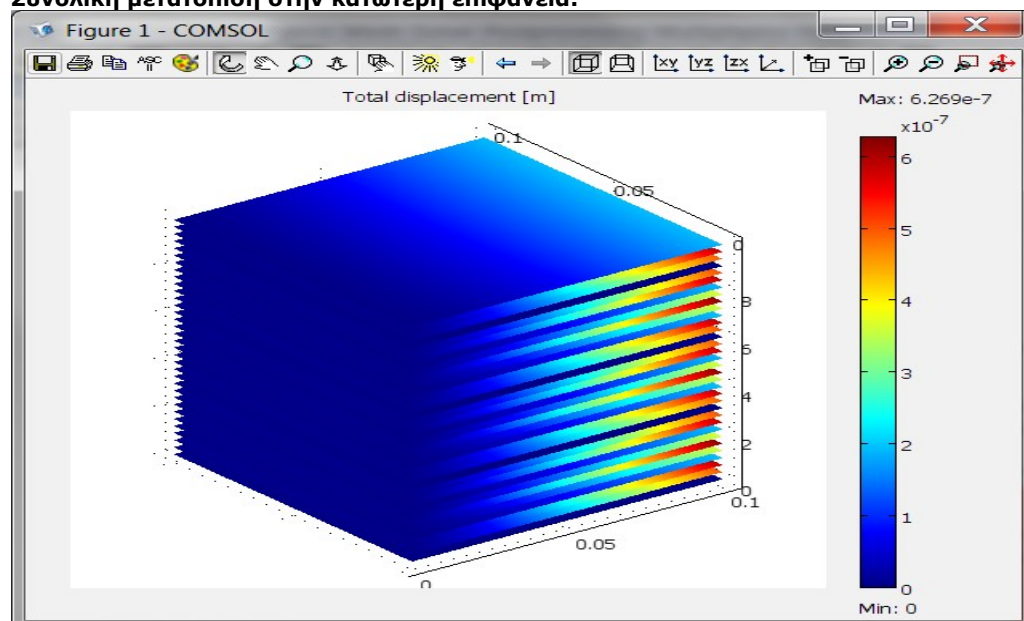
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΠΟΣΒΕΝΟΜΕΝΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ (συντελεστής απόσβεσης 0.8)

Συνολική μετατόπιση:

Συνολική μετατόπιση στην άνω επιφάνεια:

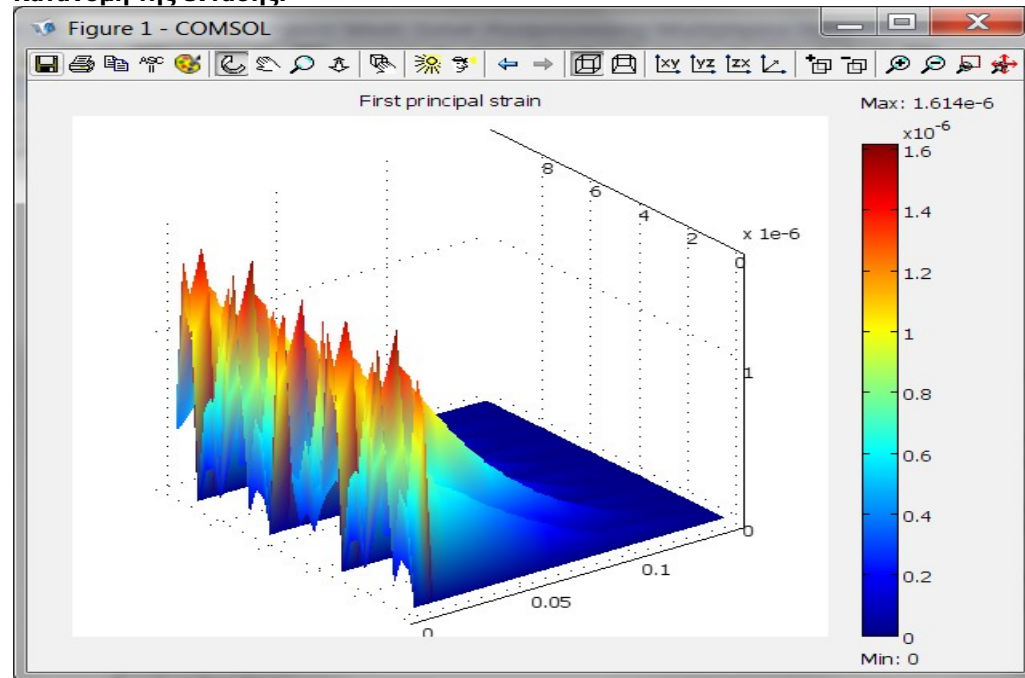


Συνολική μετατόπιση στην κατώτερη επιφάνεια:



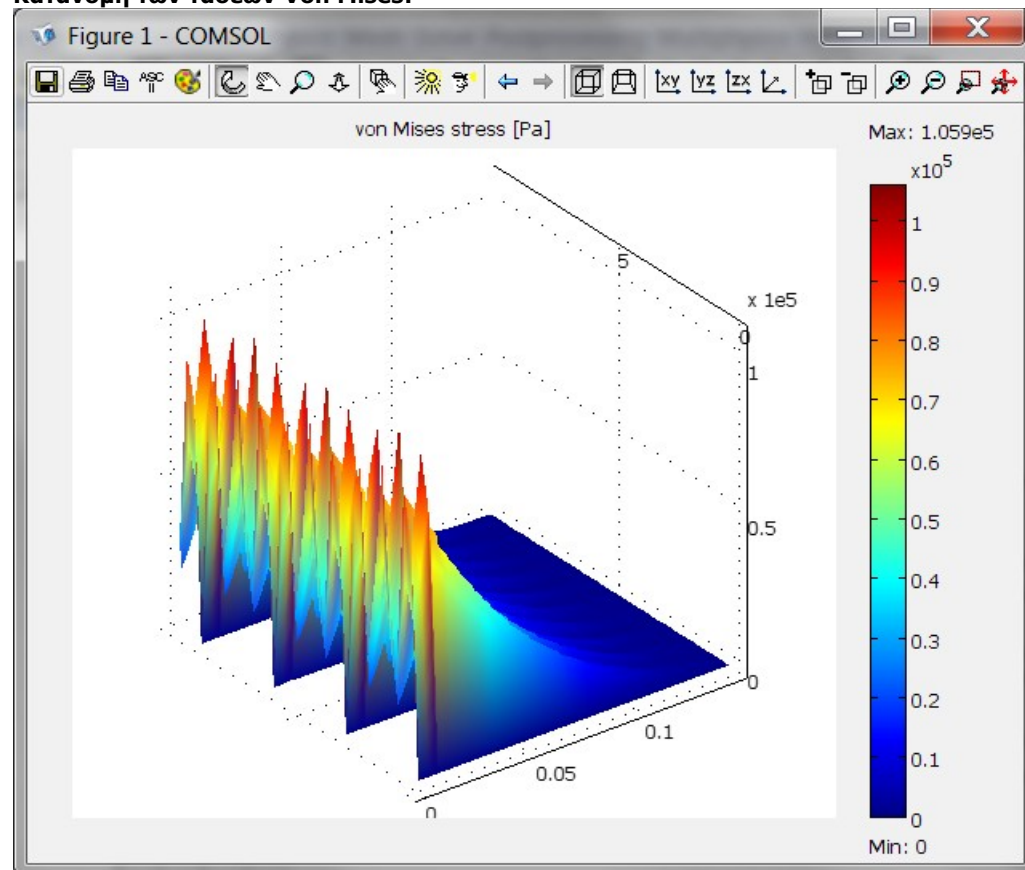
Ένταση:

Κατανομή της έντασης:



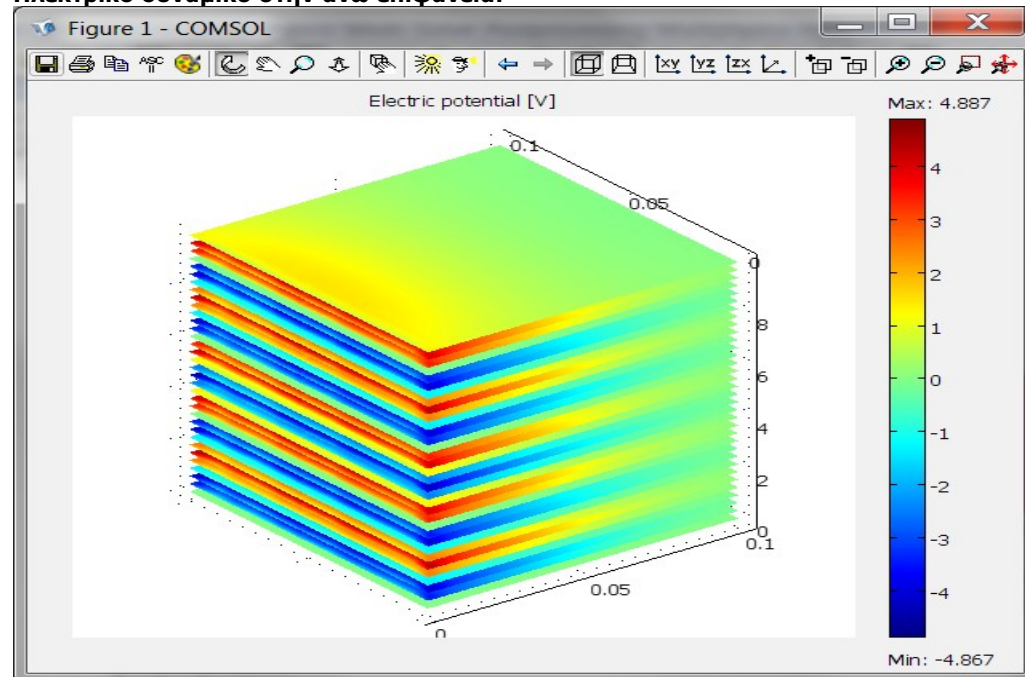
Τάσεις Von Mises:

Κατανομή των τάσεων Von Mises:



Ηλεκτρικό δυναμικό:

Ηλεκτρικό δυναμικό στην άνω επιφάνεια:



3. Συγκριτικά αποτελέσματα

	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣ H (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
TIME DEPENDENT (0.3)	0.626	$1.614 \cdot 10^{-6}$	0.106	(4.887 , -4.867)
TIME DEPENDENT (0.8)	0.626	$1.614 \cdot 10^{-6}$	0.106	(4.887 , -4.867)

Είναι πλέον φανερό ότι η αλλαγή του συντελεστή απόσβεσης δεν επιφέρει καμία αλλαγή στα αποτελέσματα της επίλυσης. Η νέα δύναμη που χρησιμοποιήθηκε, δίνει καλύτερα αποτελέσματα, λόγω της μεγαλύτερης συχνότητας ταλάντωσης που επιβάλλει, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται στο ίδιο χρονικό διάστημα πολύ περισσότεροι κύκλοι και να διασφαλίζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Παρ'όλα αυτά, η διαφορά στα αποτελέσματα οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στην αλλαγή της εξωτερικής δύναμης.

11. ΣΥΝΟΨΗ/ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ Α΄ & Β΄ ΜΕΡΟΥΣ

ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

ΥΛΙΚΟ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
PZT-2	0.602	1.638×10^{-6}	0.122	(0.906 , -5.058)
PVDF	0.423	1.394×10^{-6}	0.16	(1.384 , -4.686)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΠΟΣΒΕΝΟΜΕΝΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ (συντελεστής απόσβεσης 0.3)

ΥΛΙΚΟ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
PZT-2	0.625	1.572×10^{-6}	0.0957	(4.849 , -4.874)
PVDF	0.485	1.407×10^{-6}	0.0855	(4.518 , -4.534)

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΠΟΣΒΕΝΟΜΕΝΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΧΡΟΝΟ (συντελεστής απόσβεσης 0.8)

ΥΛΙΚΟ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (μm)	ΕΝΤΑΣΗ	ΤΑΣΗ (MPa)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (V)
PZT-2	0.625	1.553×10^{-6}	0.0942	(4.849 , -4.874)
PVDF	0.485	1.407×10^{-6}	0.0855	(4.518 , -4.534)

12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι δύο τύποι ανάλυσης, η στατική και η εξαρτώμενη από το χρόνο, χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου στη σύνθετη διάταξη. Η εξωτερική δύναμη των 500N/m ήταν ίδια για τα διαφορετικά πιεζοηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Η ομοιότητα στην ασκούμενη δύναμη, στις συννοριακές συνθήκες και στη γεωμετρία της διάταξης, είχαν ως αποτέλεσμα η σύγκριση των αποτελεσμάτων να είναι αξιόπιστη για κάθε ένα από τα χρησιμοποιούμενα πιεζοηλεκτρικά υλικά. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης, το πιεζοπολυμερές PVDF, παρέχει μια ελάχιστα πιο άμεση απόκριση στη σχέση της ασκούμενης δύναμης με την εμφάνιση πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων. Η εξαρτώμενη από το χρόνο ανάλυση απέδειξε ότι αντικαθιστώντας τη σταθερή εξωτερική δύναμη με ένα δυναμικό φορτίο, οι πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών ενεργοποιούνται πιο άμεσα και η διαφορά δυναμικού που παρατηρείται είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι στην στατική ανάλυση. Μία ανάλυση της ίδιας διάταξης με μικρότερες όμως διαστάσεις, με τέτοιο τρόπο ώστε η διάταξη να έχει πιο άμεση απόκριση στο ασκούμενο φορτίο, θα είχε πολύ μεγάλο ενδιαφέρον όμως αυτό θα αύξανε τον υπολογιστικό φόρτο κατακόρυφα. Άλλη μία αλλαγή που θα μπορούσε να λάβει χώρα, θα ήταν να βελτιωθεί η πλεγματοποίηση του μοντέλου, ώστε να αυξηθούν οι βαθμοί ελευθερίας και να μεγιστοποιηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Τέλος θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον η πραγματοποίηση της ίδιας μελέτης, με αλλαγή όμως του τύπου της ταλάντωσης, ώστε να διαπιστωθεί εάν και ποιά είναι η μεταβολή που παρατηρείται τροποποιώντας τα δεδομένα που διέπουν την ταλάντωση του μεσαίου στρώματος του συγκολλητικού υλικού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Εγχειρίδιο Comsol Multiphysics
- [2] "Finite Element Analysis of Composite Piezoelectric Beam Using Comsol"
Metwally Emam, Drexel University, 2008
- [3] "Προσομοίωση Σύνθετων Πιεζοηλεκτρικών με τη Μέθοδο Πεπερασμένων
Στοιχείων", Διπλωματική Εργασία, Μεταξάς Δρακόπουλος, Πολυτεχνείο Κρήτης
2012
- [4] "Βισκοελαστική Συμπεριφορά Πολυμερικών Νανοσυνθετών MWCNT-Ρητίνης",
Διπλωματική Εργασία, Ξυδού Αναστασία, Πανεπιστήμιο Πατρών
- [5] "Measurement of mechanical properties of three epoxy adhesives at
cryogenic temperatures for CCD construction" H. Cease, P.F. Derwent, H.T.
Diehl, J. Fast, D. Finley Fermi National Accelerator Laboratory Batavia IL
60510 November 6, 2006
- [6] "The Elastic Constants of some Epoxy Resins" A.Smith, S.J.Wilkinson,
W.N.Reynolds, Nondestructive Testing Centre, UK
- [7] "Πεπερασμένα Στοιχεία", Δρ.Πασχαλίδης Κ.Γκότσης
- [8] "The Young's modulus of silica beads/epoxy composites: Experiments and
simulations", Monette, L.Anderson, M. P.Wagner, H.D.Mueller, R.R., Journal
of Applied Physics, 2/1/94, Vol.75 Issue 3, p1442
- [9] "Προσομοίωση Σύνθετων Ευφυών Μηχανικών Συστημάτων με Αισθητήρες και
Διεγέρτες από Πιεζοηλεκτρικά Υλικά, Σύνδεση με Ευφυείς Μεθόδους
Ελέγχου", Γ.Ταϊρίδης, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής
και Διοίκησης, 2009
- [10] "Εντοπισμός και Διόρθωση Βλάβης σε Δομικά Στοιχεία με τη χρήση Ευφυών
Υλικών", Μαρία-Στυλιανή Βουτετάκη, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο
Κρήτης, Γενικό Τμήμα, 2009

ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΣ ΙΣΤΟΣ

www.comsol.com
www.wikipedia.org
www.engineeringtoolbox.com
www.efunda.com
www.translatorscafe.com
www.epotek.com
www.aerospace.henkel.com