



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής και Βελτιστοποίησης

Δυναμική διερεύνηση πιεζοηλεκτρικών κατασκευών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Σπυρίδων Γαλάνης

Επιβλέπων καθηγητής:

Γεώργιος Σταυρουλάκης

Εξεταστική επιτροπή:

Αριστομένης Αντωνιάδης

Μαρία Σταυρουλάκη

XANIA

2014

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη για την ανάθεση της παρούσας εργασίας και τη βοήθεια του στην εκπόνηση αυτής. Νιώθω ακόμα την ανάγκη να εκφράσω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την στήριξη που μου προσέφεραν και την υπομονή που έδειξαν όλα τα χρόνια της ακαδημαϊκής μου εκπαίδευσης και όλη τη δύναμη που μου έδωσαν για να γίνω ο άνθρωπος που είμαι. Ευχαριστώ ακόμα ,θερμά, τους φίλους μου για όλες τις στιγμές που ζήσαμε και έκαναν την διαμονή μου στα Χανιά αξέχαστη.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	5
2. Πιεζοηλεκτρισμός	5
2.1 Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού	5
2.2 Εφαρμογές του πιεζοηλεκτρισμού	6
3 .Comsol Multiphysics.....	6
4. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	7
5.Υλικό Διάταξης	8
6.Μοντελοποίηση	10
7. Ανάλυση Ιδιοσυχνοτήτων (Eigenfrequency Analysis).....	13
7.1 Μοντέλο Πρώτο	13
7.2 Μοντέλο δεύτερο	30
7.3 Μοντέλο τρίτο	44
7.4 Μοντέλο τέταρτο.....	58
8. Συμπεράσματα.....	72
9. Βιβλιογραφία	74

Περίληψη

Στα πιεζοηλεκτρικά υλικά όταν ασκείται πίεση ή υπόκεινται σε ταλάντωση παράγεται ηλεκτρικό δυναμικό. Η ιδιότητά τους αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η παρατήρηση και καταγραφή του ηλεκτρικού δυναμικού, που αναπτύσσεται στην επιφάνεια συγκεκριμένου αντικειμένου, καθώς και η κατανομή αυτού που αντιστοιχεί στην εκάστοτε Ιδιοσυχνότητα.

Η διάταξη αποτελείται από ένα τετράγωνο πλαίσιο διαστάσεων 10x10x4mm με το οποίο εσωτερικά είναι ενωμένο αντικείμενο σχήματος T στο οποίο δίνουμε συνολικά τέσσερις διαφορετικές διαστάσεις. Το αντικείμενο σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Pro Engineer και στη συνέχεια εισήχθη στο Comsol Multiphysics όπου και πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία του. Το πιεζοηλεκτρικό υλικό που επιλέχθηκε είναι ο ζirkονιούχος τιτανιούχος μόλυβδος (PZT). Οι συνθήκες της μελέτης είναι η πλεγματοποίηση του σχεδίου και η καταγραφή της συμπεριφοράς του σε δέκα διαδοχικές ταλαντώσεις.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν για καθένα από τα τέσσερα διαφορετικά T και για κάθε μία ταλάντωση καταγράφονται σε πίνακες ώστε να είναι εύκολη η σύγκριση ή η επιλογή του κατάλληλου σχήματος και Ιδιοσυχνότητας ανάλογα με τη χρήση που προορίζεται.

1. Εισαγωγή

Μια νέα και ενδιαφέρουσα πηγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο πιεζοηλεκτρισμός δηλαδή η παραγωγή ενέργειας από την πίεση που ασκεί ένα βάρος σε μια επιφάνεια. Εφαρμογές αυτού του είδους χρησιμοποιούνται ήδη από χρόνια στην καθημερινότητά μας, όπως για παράδειγμα ο κρύσταλλος που βρίσκεται σε κάθε ηλεκτρικό αναπτήρα, ο οποίος έχει πιεζοηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Η πρόκληση της επιστήμης είναι να επινοήσει τρόπους για να ενσωματωθούν στο αστικό περιβάλλον.

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση και αναλυτική παρουσίαση της συμπεριφοράς πιεζοηλεκτρικών μικρομηχανισμών υπό την επίδραση ταλάντωσης. Οι κατασκευές που θα μελετηθούν αποτελούνται από ένα τετραγωνικό πλαίσιο εντός του οποίου βρίσκονται, προσκολλημένα στην μία πλευρά, διαφόρων μεγεθών σχήματα T ενώ το υλικό που επιλέχθηκε είναι ο ζirkονιούχος τιτανιούχος μόλυβδος (**PZT-2**).

Η μοντελοποίηση των διάφορων κατασκευών γίνεται ώστε να διαπιστωθούν και να καταγραφούν οι ηλεκτρικές τάσεις που παράγονται σε κάθε Ιδιοσυχνότητα (ιδιοσυχνότητα) της ταλάντωσης τους. Το ενδιαφέρον της μελέτης επικεντρώνεται στην ηλεκτρική συμπεριφορά του σχήματος T συγκεκριμένα το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν αισθητήρας ή σαν πηγή ηλεκτρικής ενέργειας για τη φόρτιση μιας μπαταρίας.

Η σχεδίαση της διάταξης πραγματοποιήθηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα **Pro Engineer**, λόγω πολυπλοκότητας και 3-D σχεδιασμού, ενώ η προσομοίωση της ταλάντωσης στο ειδικό πρόγραμμα **Comsol Multiphysics 3.4**.

Η εργασία χωρίζεται σε τέσσερα κύρια μέρη, ένα για κάθε διαφορετική διάσταση του σχήματος T, ακολουθώντας σε όλες τις περιπτώσεις την ίδια ακριβώς διαδικασία με στόχο την εξαγωγή αντίστοιχων αποτελεσμάτων και την αξιόπιστη σύγκριση αυτών.

2. Πιεζοηλεκτρισμός

2.1 Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού

Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα κάποιων υλικών να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική τάση/πίεση ή ταλάντωση. Το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά με τη μεταφορά ελεύθερων φορτίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος. Επίσης, ο όρος περιλαμβάνει και το αντίστροφο φαινόμενο, κατά το οποίο το υλικό παραμορφώνεται, όταν βρεθεί κάτω από ηλεκτρική τάση. Ο πιεζοηλεκτρισμός ανακαλύφθηκε από τον Πιερ Κιουρί το 1880. Οφείλεται σε κρυσταλλικές ασυμμετρίες και αποτελεί φαινόμενο πρώτης τάξης. Παραδείγματα υλικών με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες είναι ο χαλαζίας (SiO_2), το αλάτι Rochelle ή Seignette (τρυγικό καλιονάτριο, $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), το ADP (δισόξινο φωσφορικό αμμώνιο, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), το ένυδρο θειικό λίθιο, ($\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ο τουρμαλίνης, το συνθετικό πολυμερές PVDF (polyvinylidene difluoride), κτλ. Το φαινόμενο τυγχάνει ευρείας εκμετάλλευσης σε διάφορες εφαρμογές της ακουστικής.

2.2 Εφαρμογές του πιεζοηλεκτρισμού

Σήμερα το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού αξιοποιείται σε εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αφού συλλέγεται μηχανική ενέργεια που στην συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική.

Οι δυνατότητες του πιεζοηλεκτρισμού δεν έχουν φτάσει σε τελικό στάδιο. Ακόμα γίνονται έρευνες για το πώς μπορεί να αυξηθεί η απόδοση του έτσι ώστε να μπορεί να ενταχθεί και στο αστικό περιβάλλον αλλά και στην κατοικία. Αν και η χρήση του δεν είναι ευρέως διαδεδομένη, υπάρχουν παραδείγματα εφαρμογής του.

Στο Ισραήλ γίνεται έρευνα έτσι ώστε τοποθετώντας πλάκες πιεζοηλεκτρισμού κάτω από το οδόστρωμα να μπορούν να μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό την ενέργεια από τα διερχόμενα αυτοκίνητα, τα οποία πιέζουν τις πλάκες. Ήδη έχουν τοποθετηθεί σε τμήμα δρόμου του Ισραήλ το οποίο πρόκειται να επεκταθεί σε μήκος ενός χιλιομέτρου και θα παράγουν περίπου 200 κιλοβατώρες για κάθε λωρίδα κυκλοφορίας.

Μια ακόμα εφαρμογή υπάρχει σε μια αλυσίδα σουπερ μάρκετ στην Βρετανία όπου έχουν τοποθετήσει μια εγκατάσταση στην είσοδο του. Έχουν ενσωματώσει στ έδαφος τις πλάκες, πάνω από τις οποίες περνούν τα οχήματα, πιέζοντάς τις. Η πίεση αυτή ενεργοποιεί ένα υπόγειο υδραυλικό σύστημα το οποίο με τη σειρά του ενεργοποιεί τους ηλεκτροκινητήρες που βρίσκονται ακριβώς από κάτω, παράγοντας τελικά γύρω στα 30 kW/ώρα. Με αυτό λειτουργούν οι ταμιακές μηχανές του.

Μια παρόμοια εφαρμογή έχει γίνει και στην Τουλούζη της Γαλλίας όπου μέσω του πιεζοηλεκτρισμού και χρησιμοποιώντας την ενέργεια από τους πεζούς διατηρούνται ανοιχτά τα φώτα του δρόμου.

3 .Comsol Multiphysics



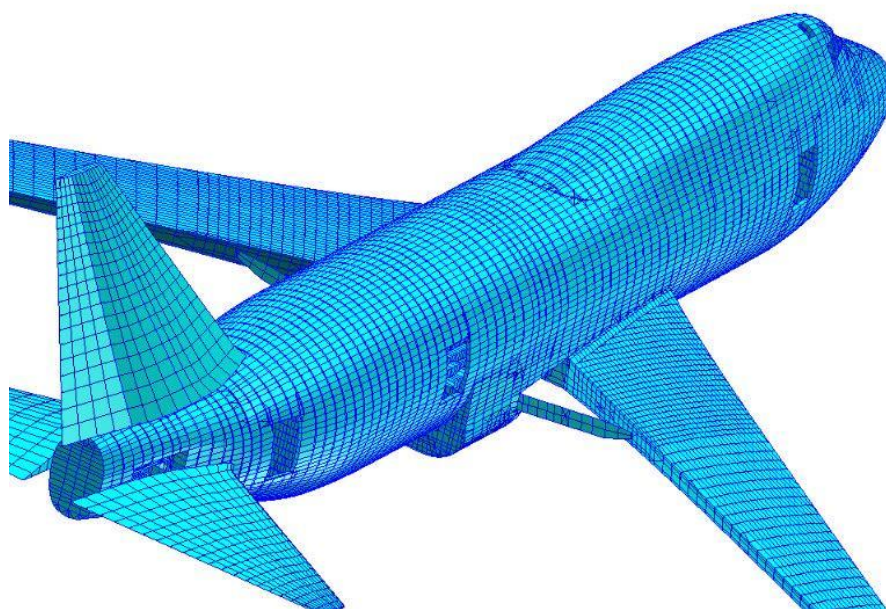
Το **Comsol Multiphysics** είναι ένα λογισμικό που βασίζεται σε προηγμένες αριθμητικές μεθόδους για την μοντελοποίηση, προσομοίωση και επίλυση σύνθετων τεχνικών προβλημάτων μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Διαθέτει ένα σύνολο φυσικών εφαρμογών όπως δομική ανάλυση, στρωτή ροή, ακουστική πίεση, ηλεκτοστατική, ηλεκτρικά ρεύματα, και μεταφορά θερμότητας μέσα τα οποία το καθιστούν κατάλληλο για μοντελοποίηση και σχεδιασμό εφαρμογών όπως αισθητήρες, ακουστικές συσκευές, ηλεκτομηχανολογικές συσκευές, αντιδραστήρες, εναλλάκτες θερμότητας, ανάλυση κατασκευών και γενικά οποιουδήποτε προβλήματος συζευγμένων φυσικών φαινομένων. Παρέχει στον μηχανικό κατάλληλο σχεδιαστικό περιβάλλον για τη δημιουργία του προς

εξέταση μοντέλου σε δύο (2D) ή και τρεις διαστάσεις (3D) αλλά και τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με ευρέως χρησιμοποιούμενα προγράμματα όπως το **PRO Engineer** , το **AutoCAD** και η **MATLAB**.

Στη παρούσα εργασία το μοντέλο σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα PRO Engineer καθώς τα σχεδιαστικά εργαλεία του Comsol Multiphysics 3.4 δεν ήταν επαρκή για τη τρισδιάστατη απεικόνισή του.

4. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Η ανάγκη για επίλυση περισσότερο πολύπλοκων προβλημάτων, οδήγησε στην ανάπτυξη διάφορων προσεγγιστικών μεθόδων. Μια τέτοια μέθοδος είναι η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Είναι μεν προσεγγιστική μέθοδος, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα.



Εικόνα 1. Ανάλυση αεροσκάφους σε πεπερασμένα στοιχεία.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι μια εξέλιξη των μητρώϊκων μεθόδων που έγινε από επιστήμονες όπως ο Αργύρης I., ο Clough, ο Ritz και άλλοι. Οι βασικές ιδέες προήλθαν στις αρχές της δεκαετίας του 40, από εξελίξεις στην δομική ανάλυση αεροσκαφών. Αρχικά ο Hrenikoff χρησιμοποίησε τη “Μέθοδο των δικτυωμάτων”, αργότερα ο Turner δημιούργησε μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς και άλλα στοιχεία. Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκε το 1960. Οι μαθηματικές, βέβαια, βάσεις για την σημερινή μορφή της μεθόδου μπήκαν την δεκαετία του 70. Πλέον αποτελεί ένα ισχυρό

εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων μηχανικού. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες, μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών, μαγνητικής ροής, κ.α. Στην *Εικόνα 1* φαίνεται η ανάλυση ενός αεροσκάφους με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Με την εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων και των συστημάτων CAD, σύνθετα προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν πολύ εύκολα. Με αυτή τη μέθοδο μια πολύπλοκη περιοχή, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται Πεπερασμένα Στοιχεία (Finite Elements). Μια διαδικασία σύνθεσης, η οποία θεωρεί φορτία και περιορισμούς, έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων. Η επίλυση αυτών, δίνει κατά προσέγγιση (με αρκετά μεγάλη ακρίβεια) τη συμπεριφορά του αρχικού πολύπλοκου μοντέλου.

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

1. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.
2. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor.
3. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα λέγονται solvers και χρησιμοποιούνται για τις επιλύσεις αριθμητικών μεθόδων.
4. Όταν τελειώσει η επίλυση πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται post processor, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

5.Υλικό Διάταξης

Το υλικό που επιλέχθηκε για να μελετηθεί στη παρούσα εργασία είναι ο **ζirkονιούχος τιτανιούχος μόλυβδος (PZT)** και πιο συγκεκριμένα το **PZT-2**, που είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά σήμερα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη φύση του, η οποία το καθιστά φυσικά ισχυρό, χημικά αδρανές και σχετικά φθινό στην κατασκευή. Επιπροσθέτως το PZT μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα για να καλύψει τις απαιτήσεις ενός ειδικού σκοπού λόγω της μεγαλύτερης ευαισθησίας του και της υψηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας του σε σχέση με άλλα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά γι αυτό και χρησιμοποιείται ευρέως ως διεγέρτης και αισθητήρας για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των υπερηχητικών εφαρμογών και είναι επίσης κατάλληλο για απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας. Ακολουθεί ο πίνακας των μηχανικών ιδιοτήτων του PZT-2:

Lead Zirconate Titanate (PZT-2)

Crystal symmetry class	Uniaxial
Density	7600 kg/m ³

Constitutive data is presented in the [Strain-Charge](#) format.

Compliance

$$\mathbf{s_E} = \begin{bmatrix} 11.6 & -3.33 & -4.97 & 0 & 0 & 0 \\ -3.33 & 11.6 & -4.97 & 0 & 0 & 0 \\ -4.97 & -4.97 & 14.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 45 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 45 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 29.9 \end{bmatrix} * 10^{-12} \frac{\text{m}^2}{\text{N}}$$

Piezoelectric Coupling

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 440 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 440 & 0 & 0 \\ -60 & -60 & 152 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N}}$$

Relative Permittivity

$$\frac{\boldsymbol{\varepsilon_T}}{\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} 990 & 0 & 0 \\ 0 & 990 & 0 \\ 0 & 0 & 450 \end{bmatrix}, \quad \varepsilon_0 = 8.854 * 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

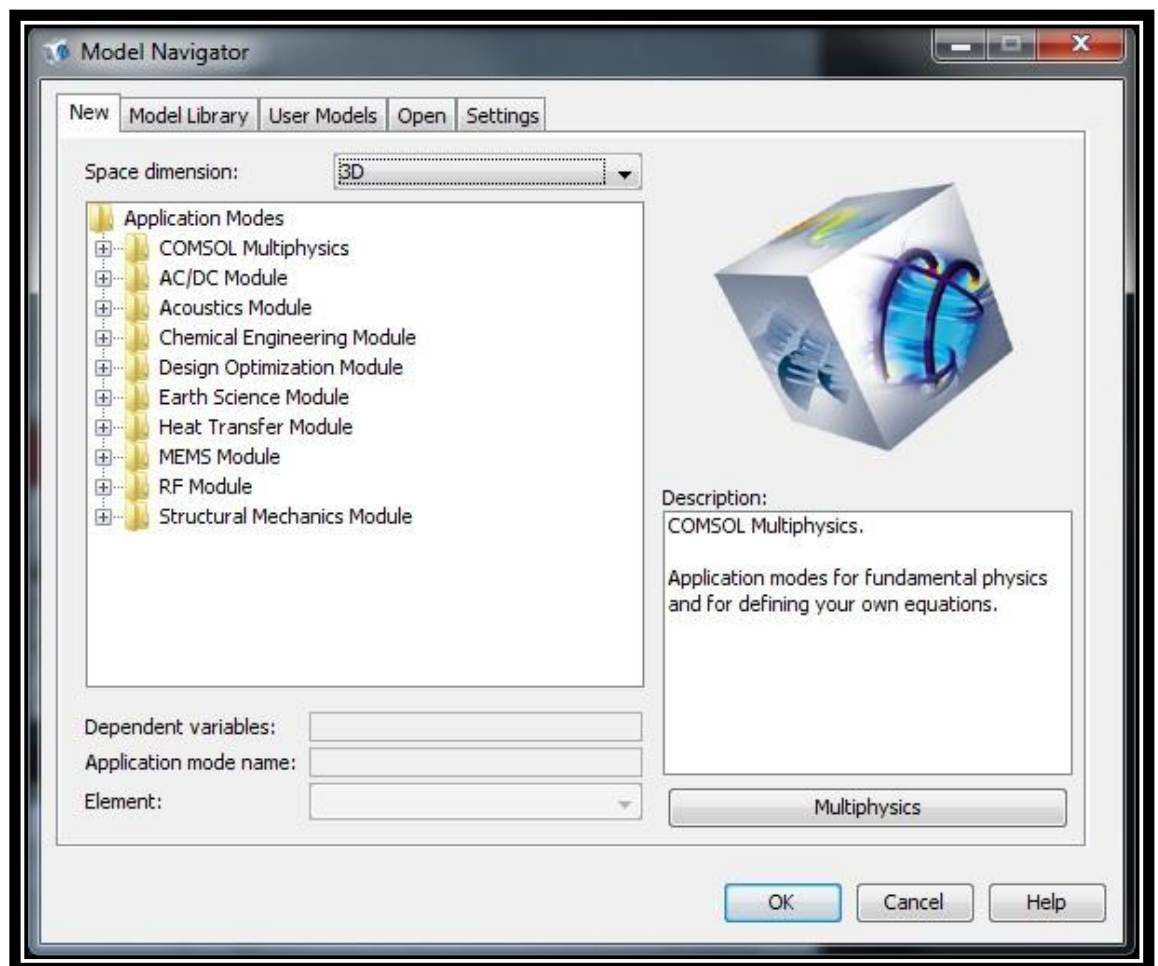
Εικόνα 2 Πίνακες μηχανικών ιδιοτήτων PZT-2

6.Μοντελοποίηση

Στο κεφάλαιο αυτό παραθέτεται, κατά βήμα η κοινή σε όλα τα μοντέλα διαδικασία μοντελοποίησης του προβλήματος

1. Καθορισμός του περιβάλλοντος

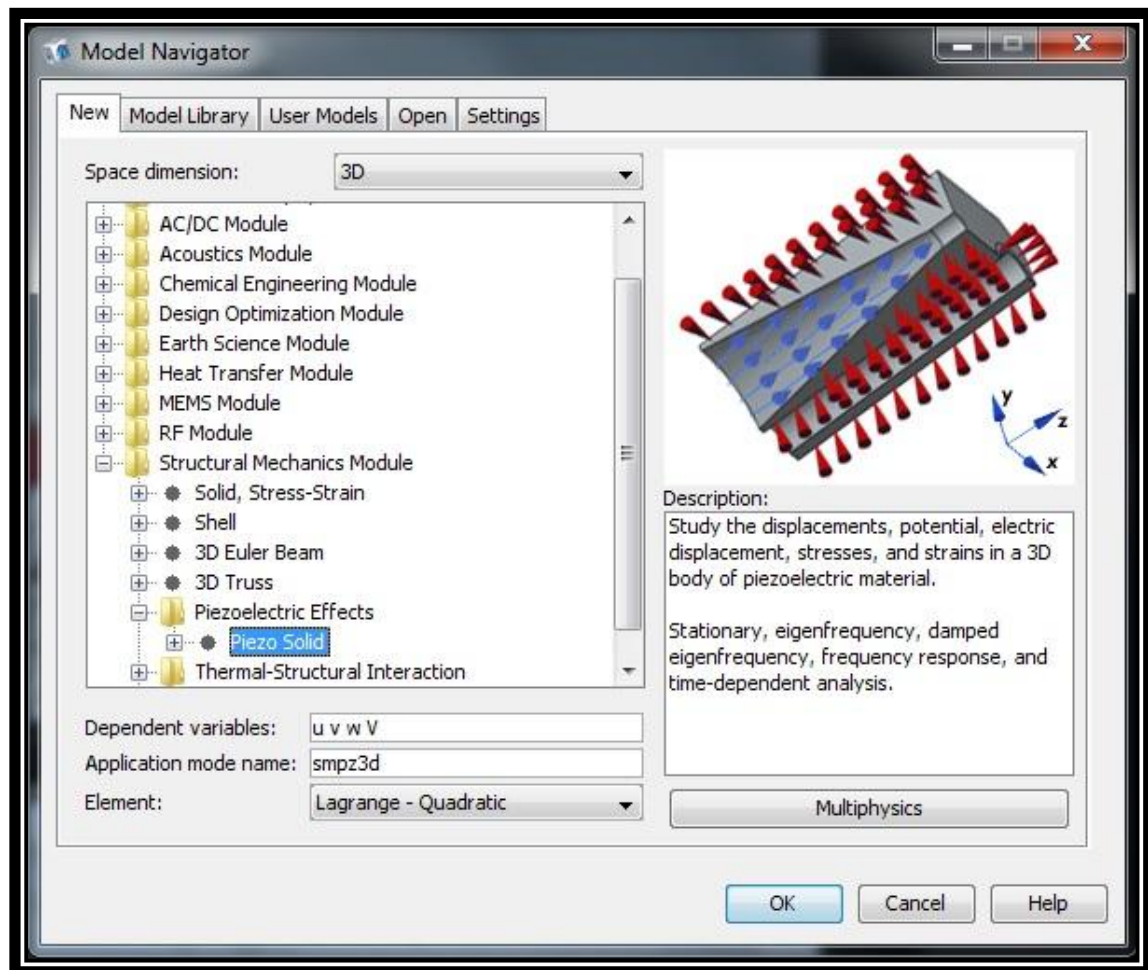
Εκκινώντας το Comsol Multiphysics 3.4 εμφανίζεται το παράθυρο Model Navigator στο οποίο επιλέγεται η ανάλυση να γίνει σε τρισδιάστατο περιβάλλον (**3D**).



Εικόνα 3 Παράθυρο Model Navigator

2. Τύπος ανάλυσης

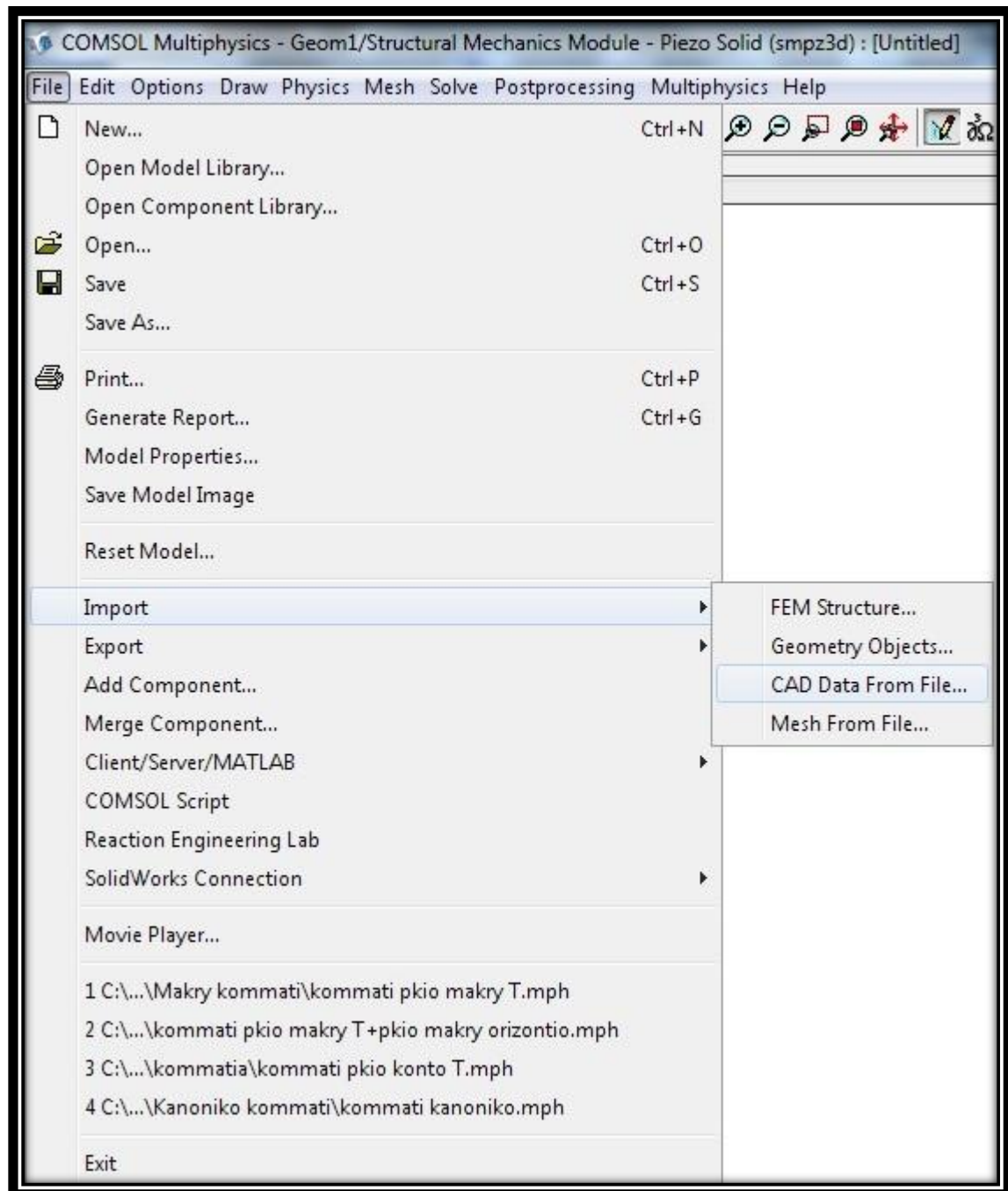
Ακολούθως επιλέγεται ο τύπος της ανάλυσης που θέλουμε να πραγματοποιηθεί από τις διάφορες επιλογές που προσφέρει το πρόγραμμα. Στη παρούσα εργασία θέλουμε να πραγματοποιηθεί δομική μηχανική ανάλυση πιεζοηλεκτρικού υλικού:



Εικόνα 4 Καθορισμός πιεζοηλεκτρικής ανάλυσης

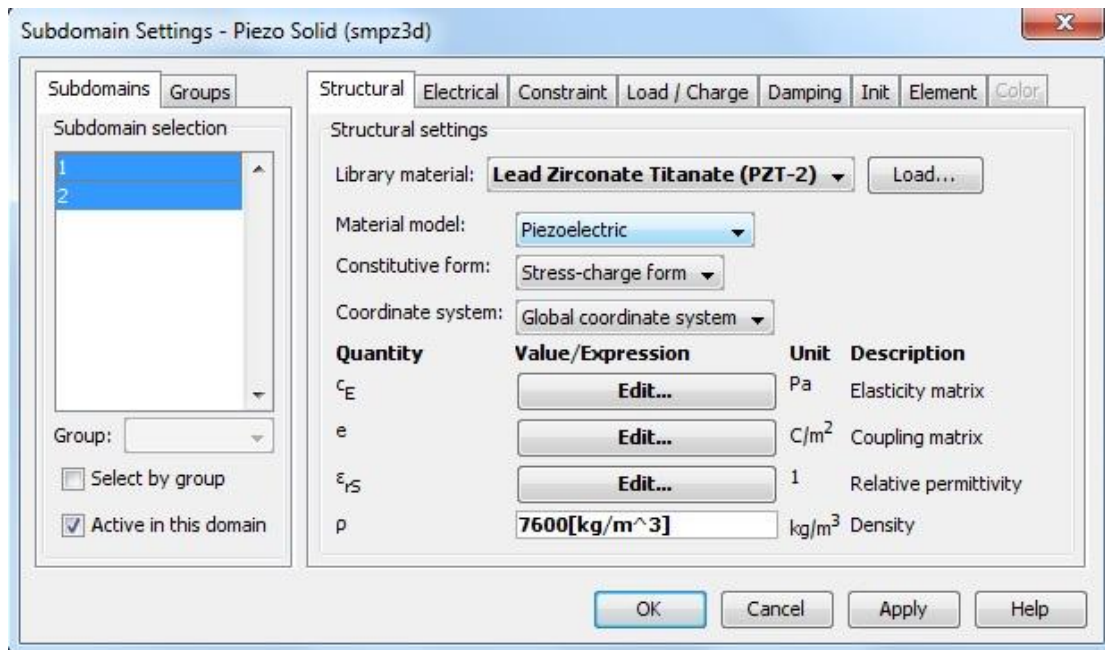
3. Εισαγωγή σχεδίων

Το επόμενο στάδιο της κοινής διαδικασίας είναι η εισαγωγή των σχεδίων CAD στη πλατφόρμα του Comsol Multiphysics 3.4:



Εικόνα 5 Εισαγωγή σχεδίων CAD

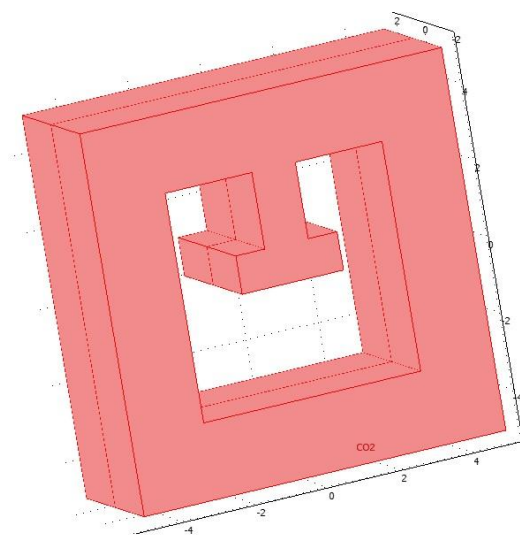
4. Το τελευταίο βήμα της κοινής διαδικασίας είναι η επιλογή του υλικού της διάταξης, που λαμβάνει χώρα αμέσως μετά την εισαγωγή των σχεδίων CAD, επιλέγοντας από τη γραμμή εργαλείων **Physics**→**Subdomain settings** και στο παράθυρο που ανοίγει ορίζουμε το υλικό του κάθε κομματιού :



Εικόνα 6 Επιλογή υλικού

7. Ανάλυση Ιδιοσυχνοτήτων (Eigenfrequency Analysis)

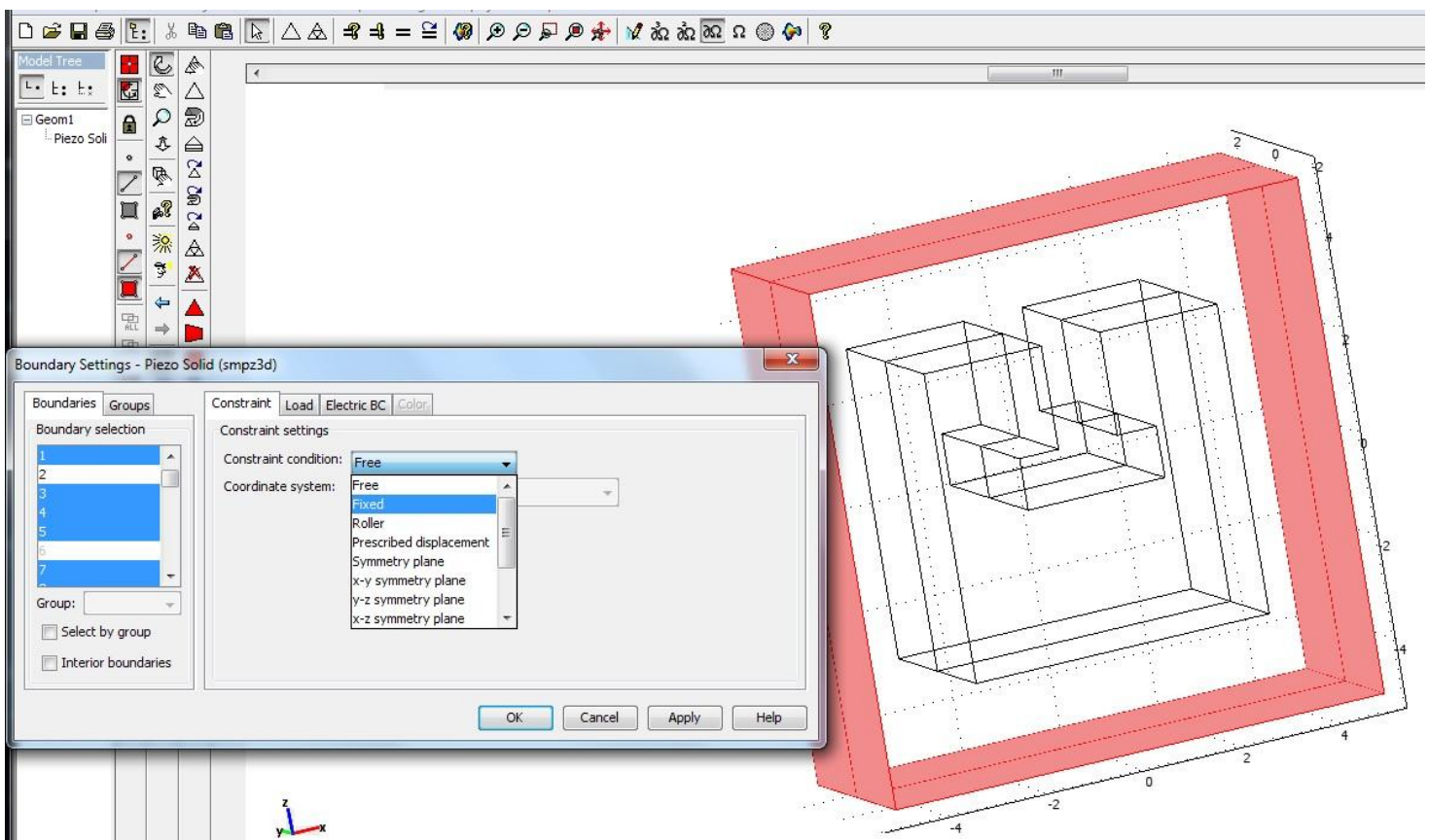
7.1 Μοντέλο Πρώτο



Εικόνα 7 Μοντέλο πρώτο

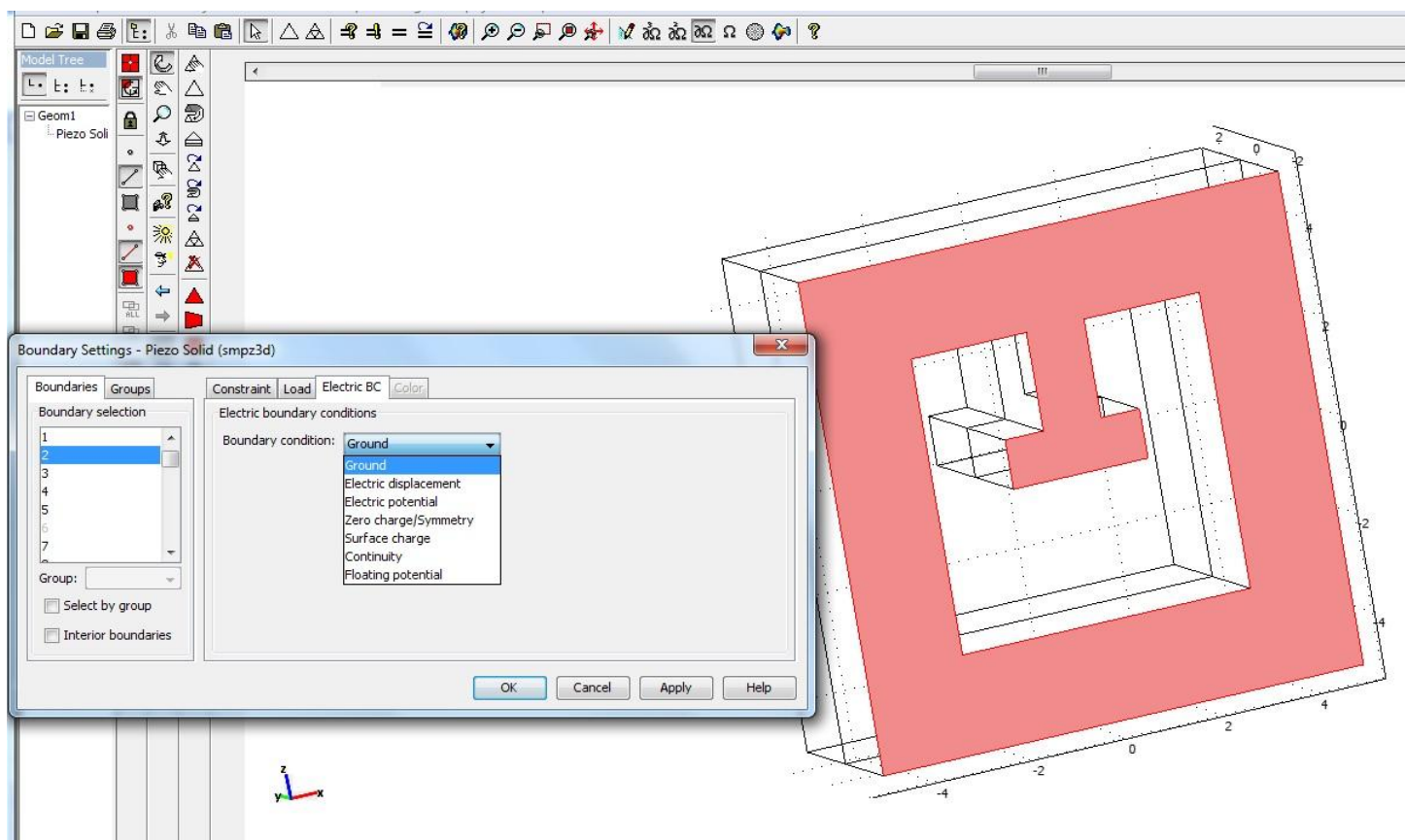
Η διάταξη αυτή αποτελείται από ένα τετραγωνικό πλαίσιο διαστάσεων $10 \times 10 \times 4$ mm εντός του οποίου βρίσκεται, όπως φαίνεται στο σχήμα, εξάρτημα σχήματος T και διαστάσεων $3 \times 2 \times 4$ mm (το πλάτος αναφέρεται στην άνω οριζόντια πλευρά του T). Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω το υλικό της διάταξης επιλέγεται να είναι ο ζirkονιούχος τιτανιούχος μόλυβδος (PZT-2) (βήμα 4).

Στη συνέχεια καθορίζονται οι μηχανικές οριακές συνθήκες του μοντέλου ώστε να πληρούνται οι προϋποθέσεις της μελέτης. Το πλαίσιο πρέπει να παραμένει ακίνητο κατά τη διάρκεια των ταλαντώσεων, αφού ο στόχος είναι να καταγραφούν οι συμπεριφορές του εσωτερικού εξαρτήματος, έτσι επιλέγεται από την γραμμή εργαλείων η εξής διαδρομή **Physics**→**Boundary settings** και στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγονται όλες οι περιμετρικές πλευρές και ορίζονται πακτωμένες (fixed).

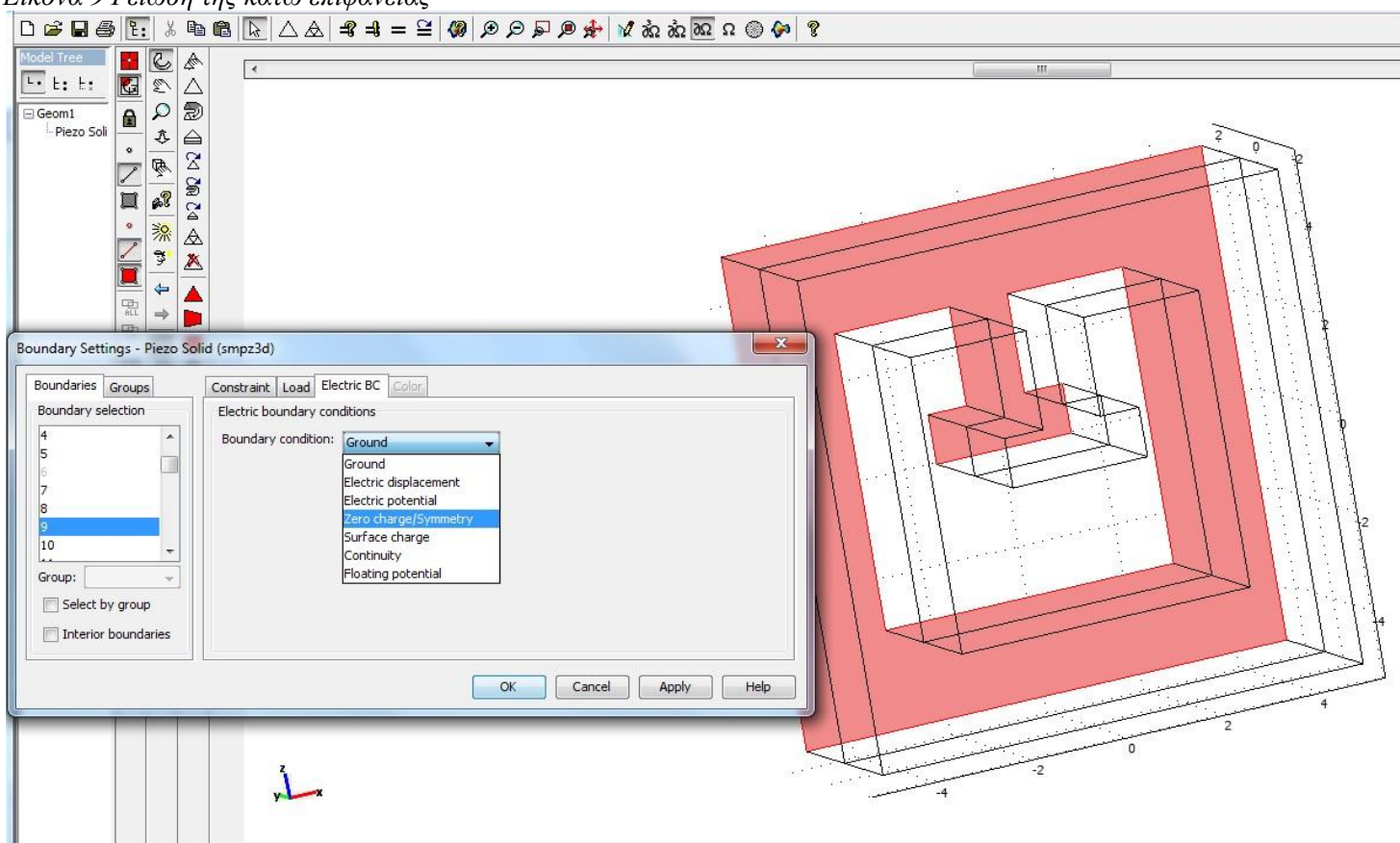


Εικόνα 8 Πάκτωση περιμετρικών πλευρών

Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστούν οι ηλεκτρικές οριακές συνθήκες της διάταξης. Ακολουθώντας την ίδια διαδρομή, **Physics**→**Boundary settings**, επιλέγεται αρχικά η κάτω πλευρά και ορίζεται γειωμένη (**Ground**) και ακολούθως η άνω που ορίζεται μηδενικά φορτισμένη (**Zero Charge/Symmetry**).

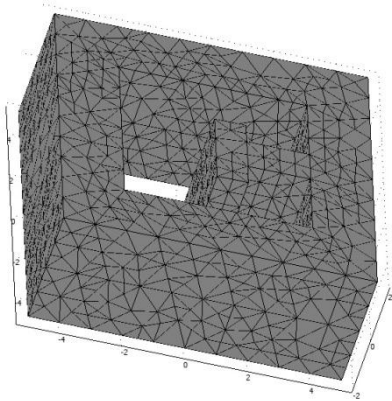


Εικόνα 9 Γείωση της κάτω επιφάνειας

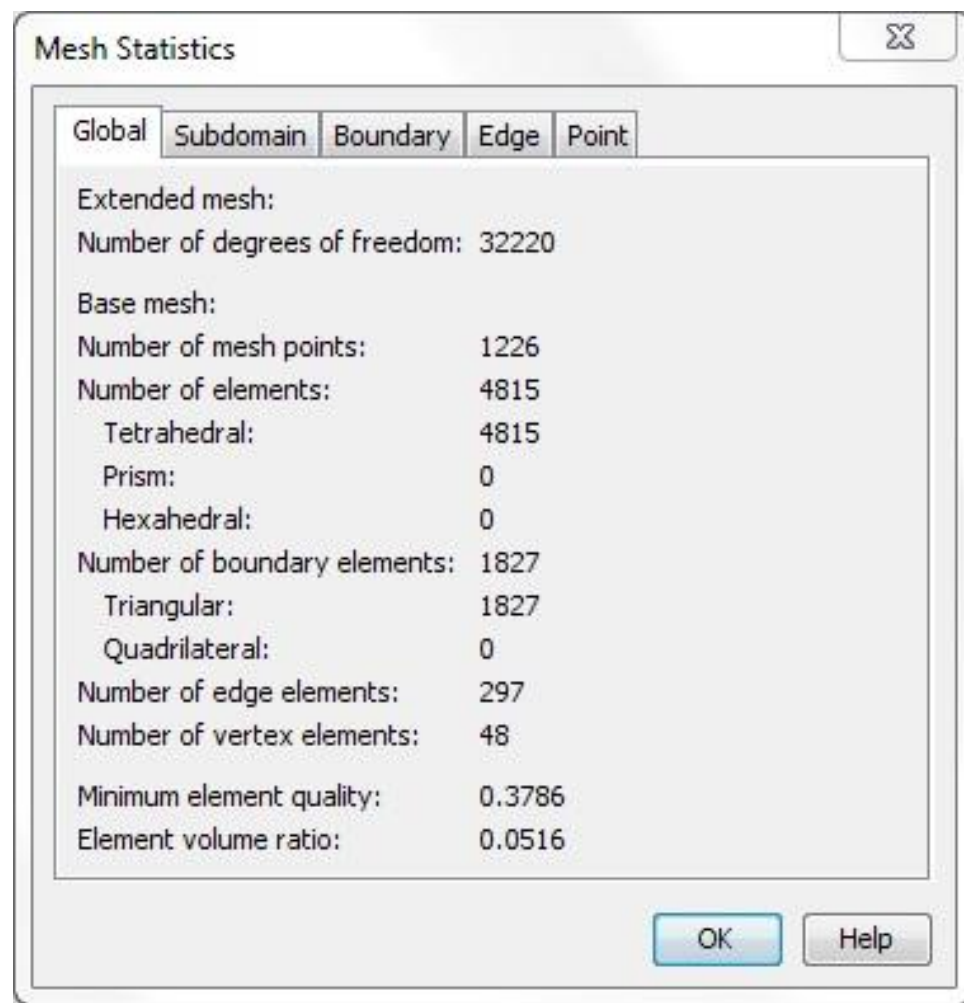


Εικόνα 10 Μηδενικά φορτισμένη άνω επιφάνεια

Ακολουθεί η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων πατώντας από τη γραμμή εργαλείων την επιλογή **Mesh→Initialize Mesh** , αρχικοποίηση πλέγματος δηλαδή του κομματιού με στατιστικά πλεγματοποίησης που φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα:

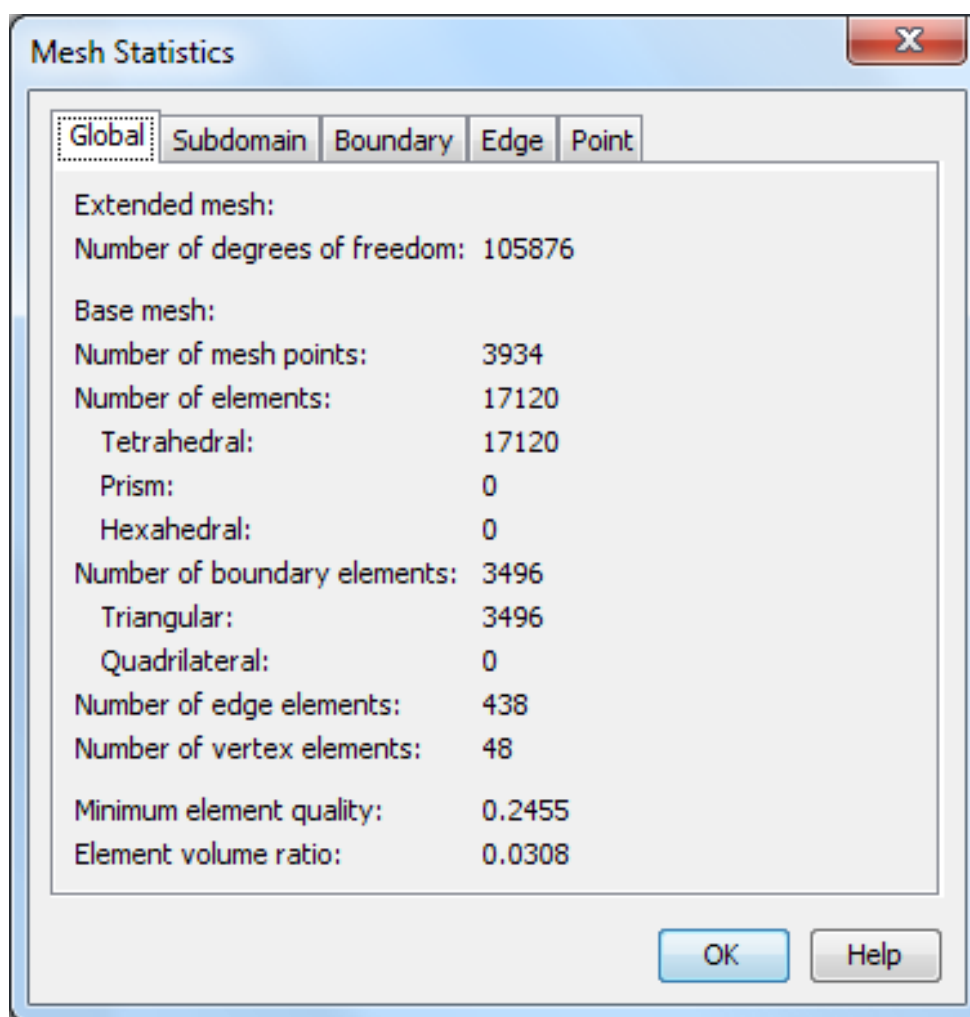


Εικόνα 11 Αρχικοποίηση πλέγματος



Εικόνα 12 Στατιστικά αρχικής πλεγματοποίησης

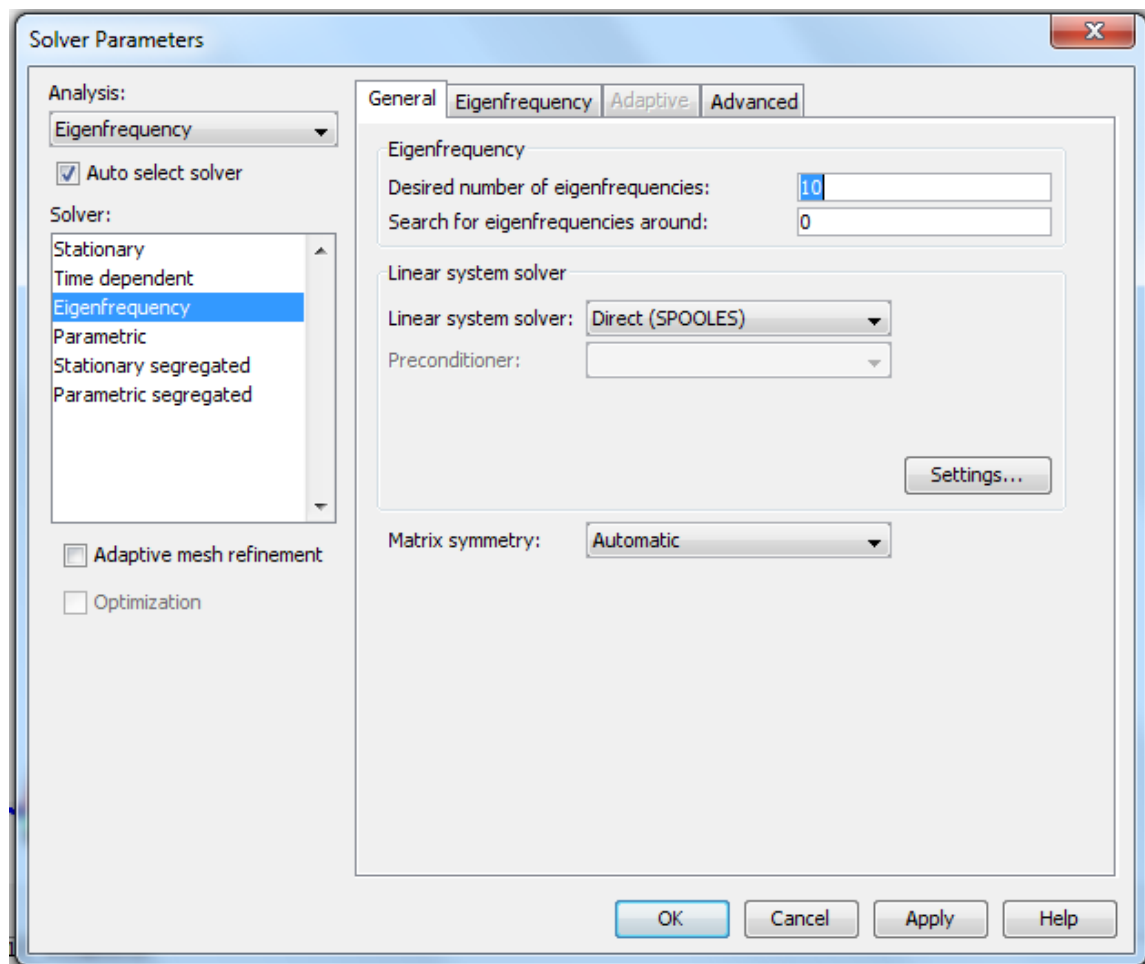
Αμέσως μετά πατώντας πάλι την επιλογή **Mesh** επιλέγεται αυτή τη φορά **Refine Mesh** , βελτιωμένη πλεγματοποίηση δηλαδή , με στόχο την εξαγωγή ακριβέστερων συμπερασμάτων αφού τα υπό μελέτη στοιχεία στα οποία χωρίζεται η κατασκευή αυξάνονται κατά πολύ όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί:



Εικόνα 13 Στατιστικά βελτιωμένης πλεγματοποίησης

Από τους δύο αυτούς πίνακες παρατηρείται μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα δυο επίπεδα της πλεγματοποίησης τόσο στα στοιχεία πλέγματος όσο και στους βαθμούς ελευθερίας. Η υπεροχή του δευτέρου επιπέδου είναι και ο λόγος που η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θα αποφέρει ακριβέστερα και πιο ασφαλή αποτελέσματα. Μια ακόμα πιο λεπτομερής πλεγματοποίηση θα έδινε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα όμως ο υπολογιστικός φόρτος ενός τέτοιου προβλήματος θα καθιστούσε την επίλυση πολύ χρονοβόρα ίσως και αδύνατη , γι αυτό και τα στοιχεία του δευτέρου επιπέδου θεωρήθηκαν αρκετά.

Για να ολοκληρωθεί η ρύθμιση των παραμέτρων (**pre-processor**) του προβλήματος το μόνο που απαιτείται πια , πριν λάβουμε τα αποτελέσματα , είναι να επιλεγεί το είδος της ανάλυσης που θα ακολουθήσει. Στη παρούσα εργασία θα πραγματοποιηθεί ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων οπότε από το μενού του **Solve** → **Solver Parameters** επιλέγεται **Eigenfrequency Analysis** και το σύστημα ρυθμίζεται έτσι ώστε να ταλαντωθεί δέκα φορές γύρω από το μηδέν



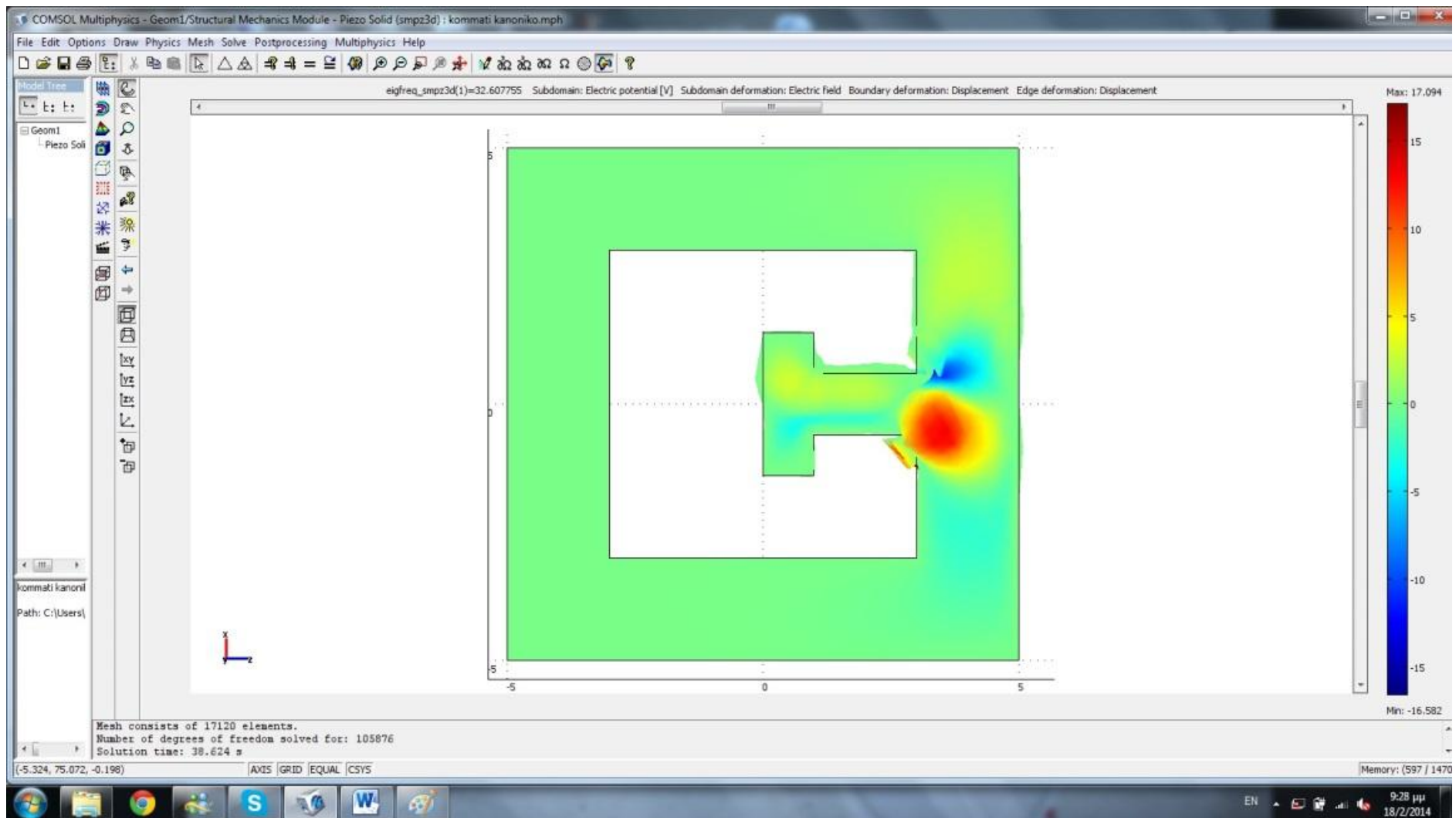
Εικόνα 14 Ορισμός αριθμού ταλαντώσεων

Επιλέγοντας τώρα από το μενού του **Solve** την επιλογή **Solve Problem** το πρόβλημα επιλύεται σε χρόνο κοντά στο ένα λεπτό γεγονός που οφείλεται στην επίπεδη γεωμετρία και στο μικρό μέγεθος του μηχανισμού.

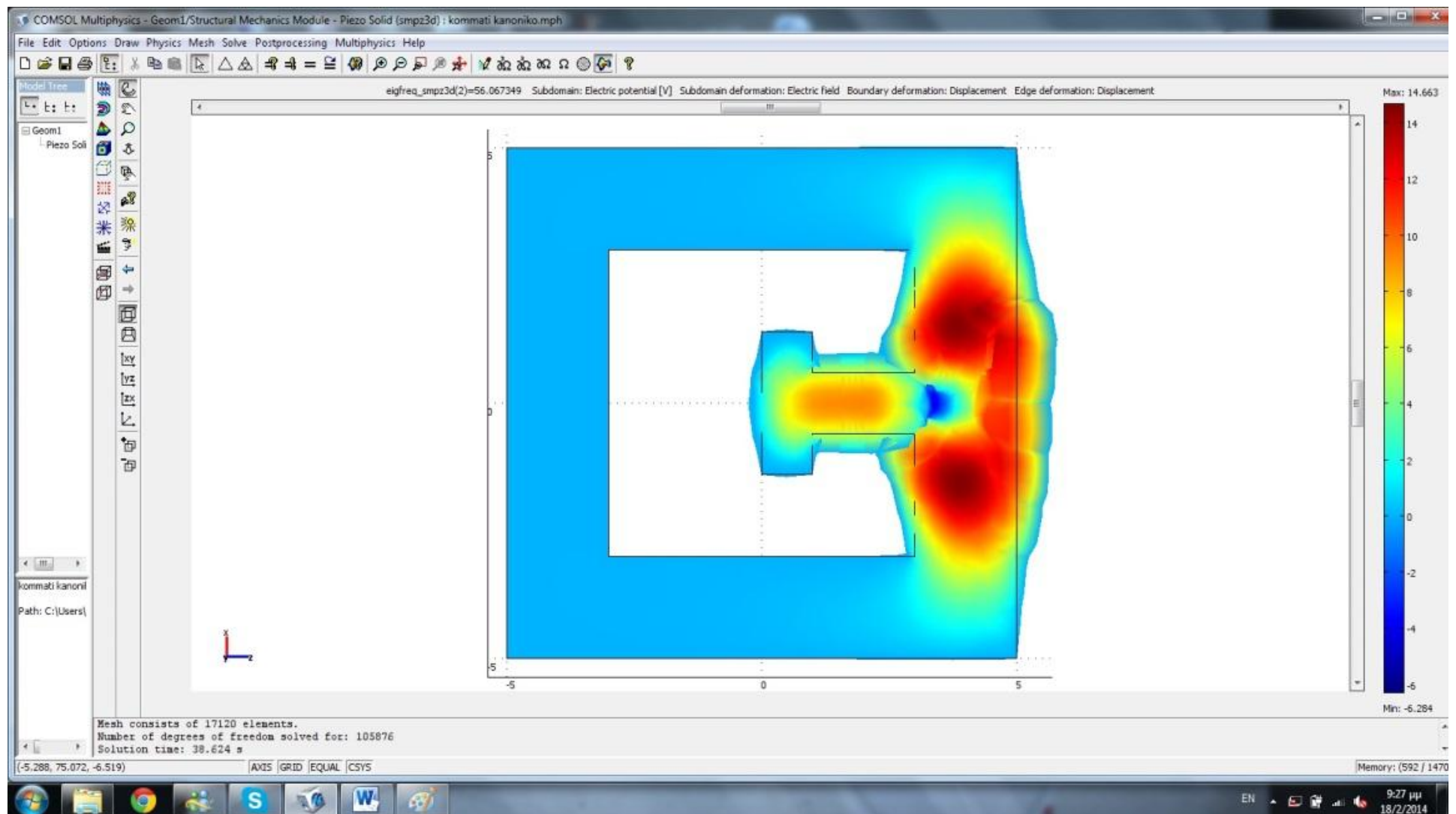
Αφού επιλυθεί το πρόβλημα το **Comsol Multiphysics** προσφέρει τη δυνατότητα να καταγραφούν τόσο αριθμητικά όσο και παραστατικά τα αποτελέσματα. Έτσι κατέστη δυνατή η δημιουργία του πίνακα που αναφέρει αναλυτικά τις αριθμητικές τιμές των επιπτώσεων κάθε ταλάντωσης αλλά και η εικόνα αυτών. Ο πίνακας που ακολουθεί περιέχει στη πρώτη στήλη τις ιδιοσυχνότητες που προέκυψαν από την ανάλυση, ενώ στις επόμενες τις συνέπειες αυτών. Οι εικόνες που παρουσιάζονται είναι ρυθμισμένες ώστε να απεικονίζουν μια παραμόρφωση σε σχέση με το αρχικό σχέδιο, η οποία αντιστοιχεί στο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται λόγω της ιδιότητας του πιεζοηλεκτρικού υλικού.

Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Μέγιστη Μετατόπιση(m)	Μέγιστο Ηλ. Δυναμικό(V)	Μέγιστη Πίεση(Pa)	Μέγιστη Παραμόρφωση
32.607755	1.067e-6	17.094	9535.481	1.583e-7
56.067349	5.589e-7	14.663	7875.722	1.142e-7
59.879549	1.276e-6	22.132	1.581e4	2.488e-7
130.849427	4.266e-7	23.611	1.125e4	1.783e-7
140.419658	1.765e-7	7.863	4457.319	7.143e-8
167.619419	1.417e-7	18.834	3724.622	6.093e-8
201.648308	7.642e-7	20.763	2.232e4	3.228e-7
212.178536	6.206e-8	19.624	2426.907	3.914e-8
229.183702	8.49e-8	16.763	3157.764	4.943e-8
236.088489	1.295e-7	13.412	7203.656	8.346e-8

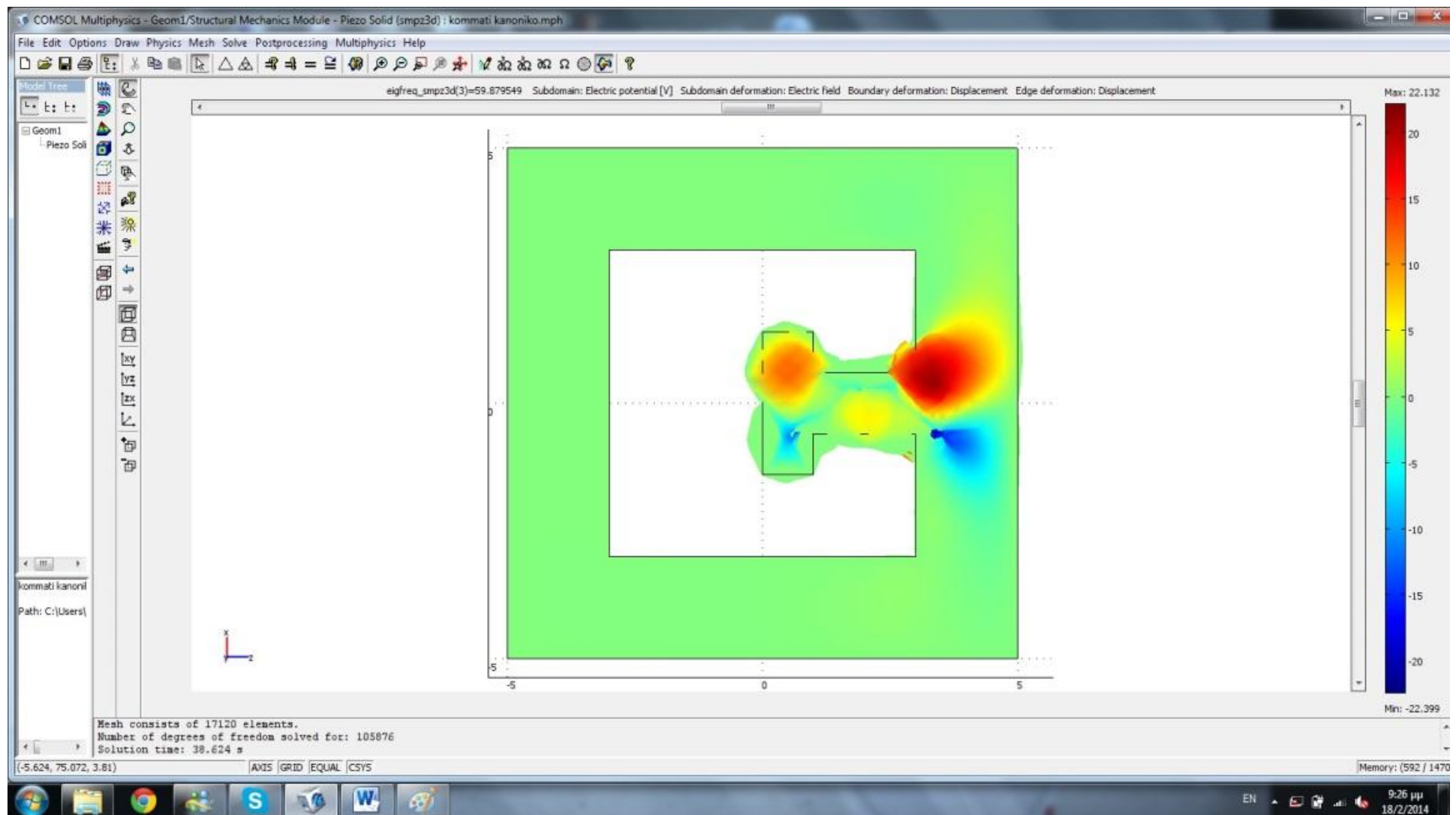
Πίνακας 1 Αποτελέσματα επίλυσης



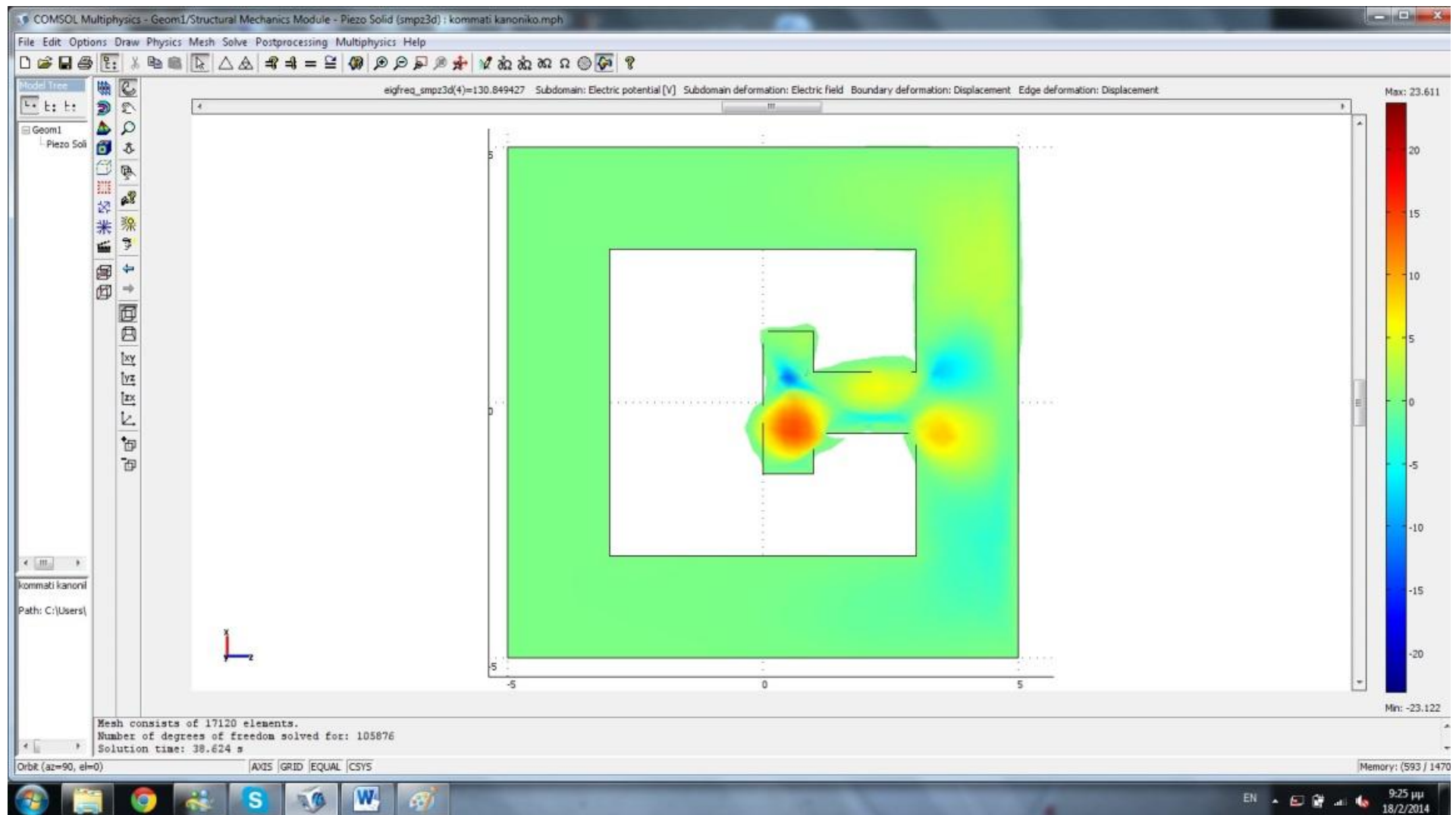
Εικόνα 15 Ιδιοσυχνότητα 32.607755



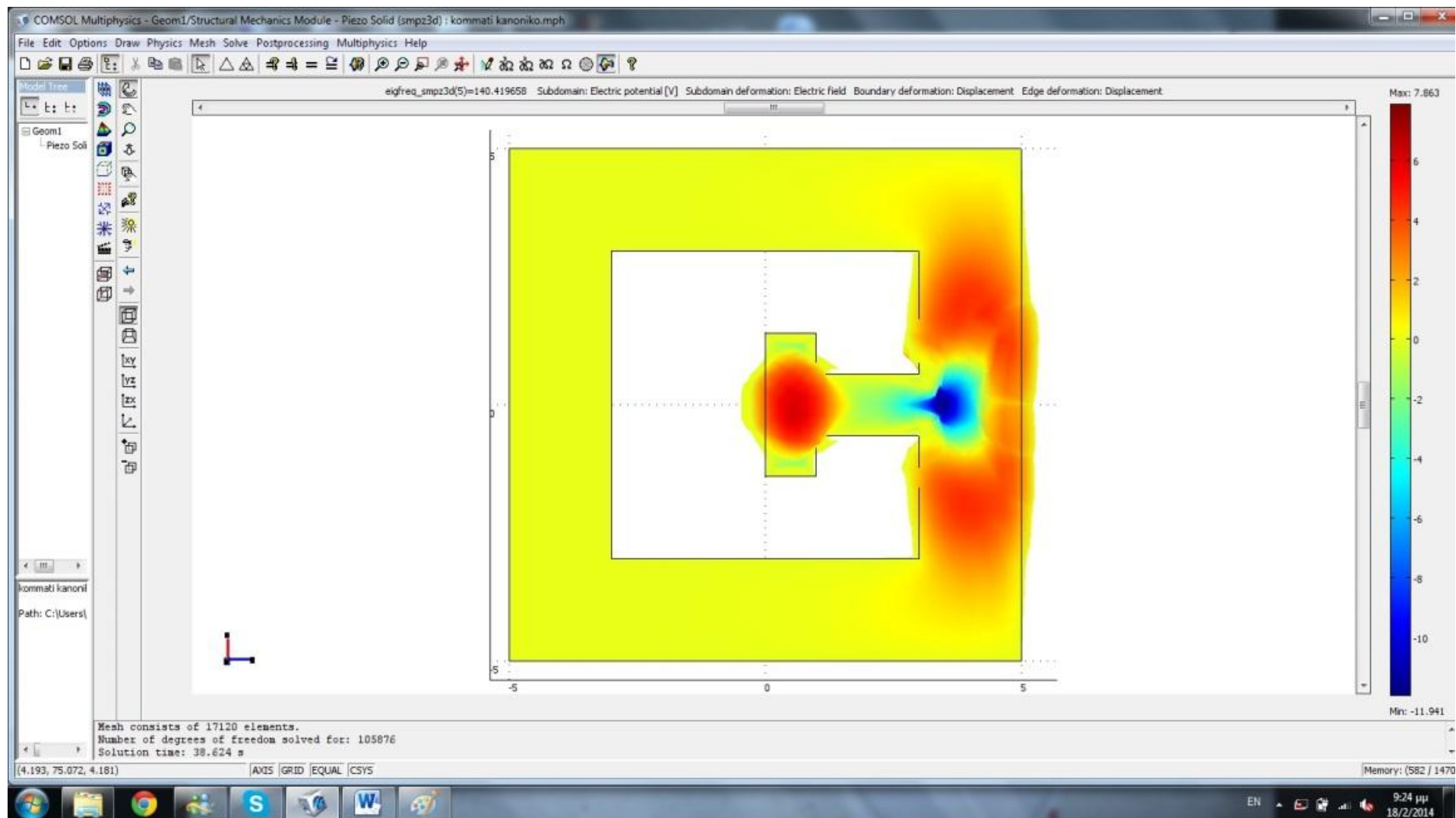
Εικόνα 16 Ιδιοσυχνότητα 56.067349



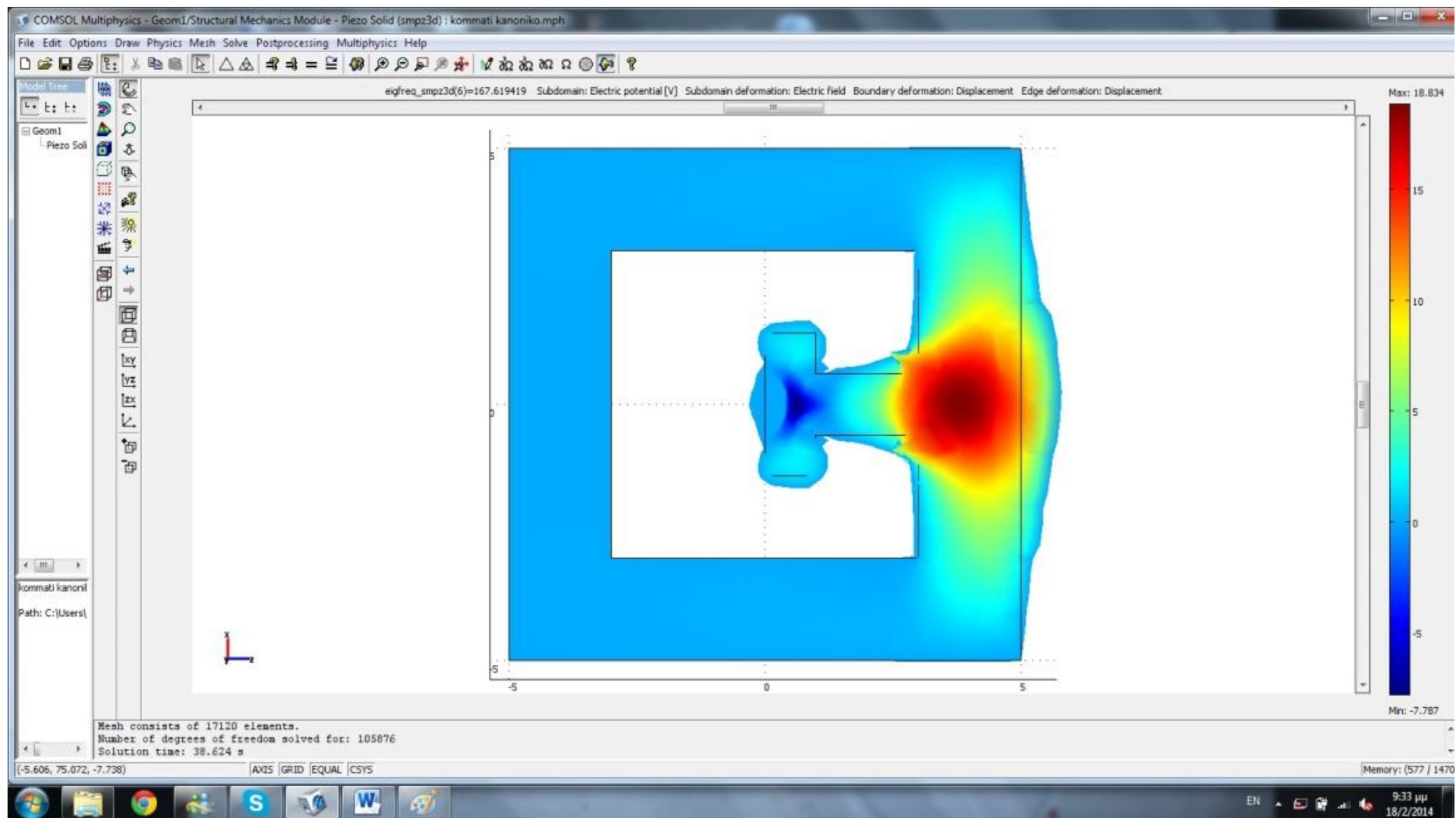
Εικόνα 17 Ιδιοσυχνότητα 59.879549



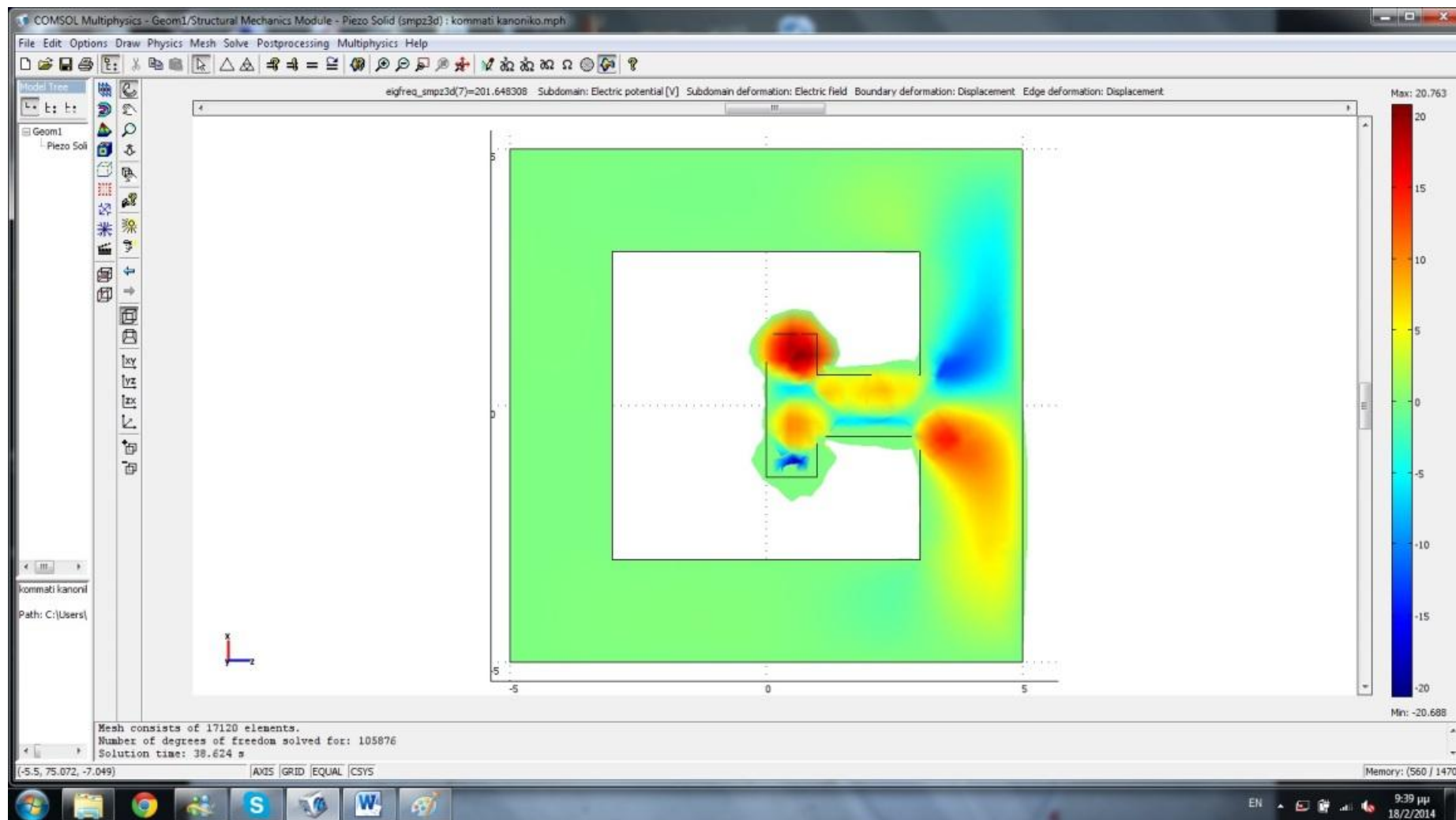
Εικόνα 18 Ιδιοσυχνότητα 130.849427



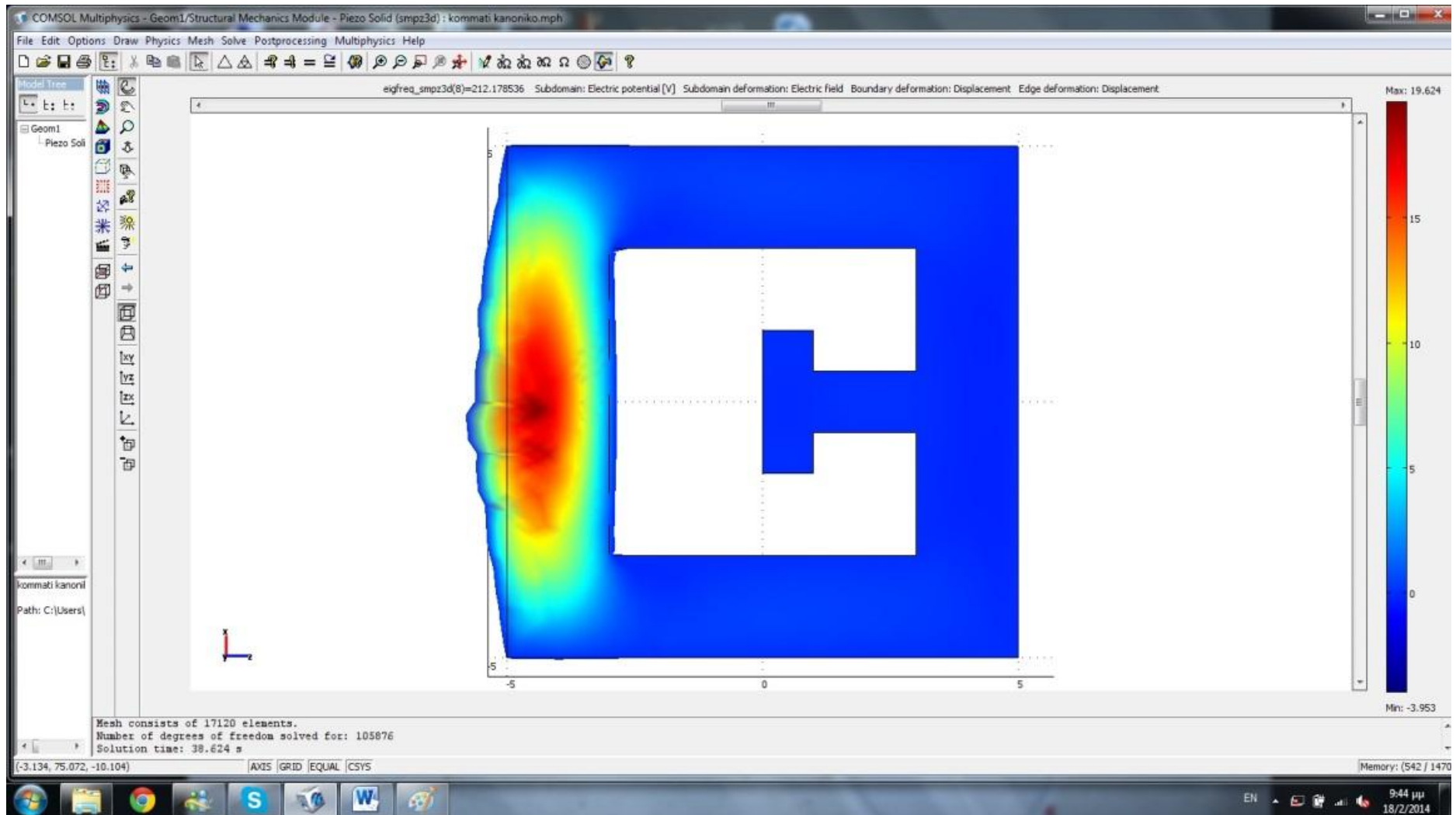
Εικόνα 19 Ιδιοσυχνότητα 140.419658



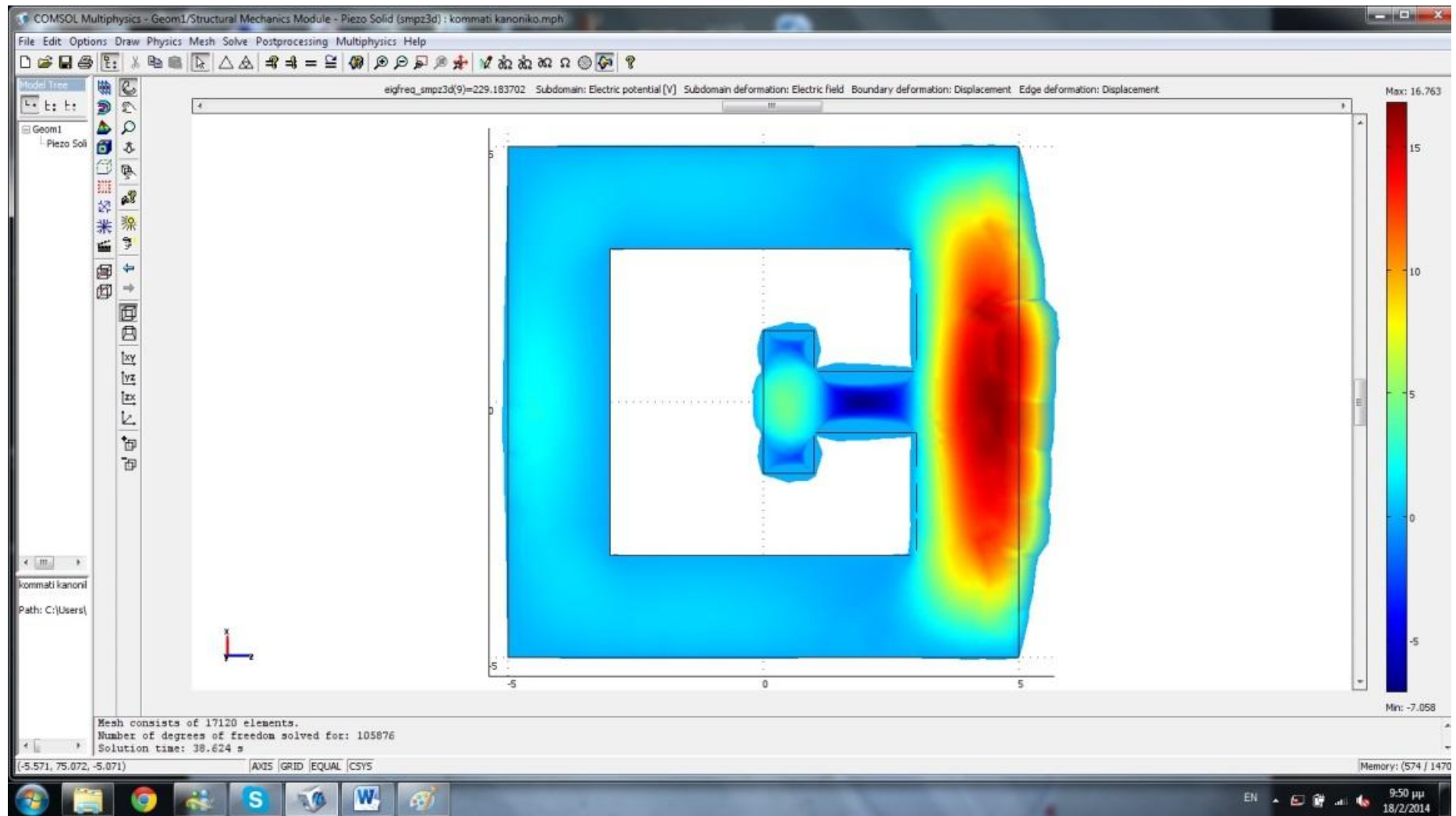
Εικόνα 20 Ιδιοσυχνότητα 167.619419



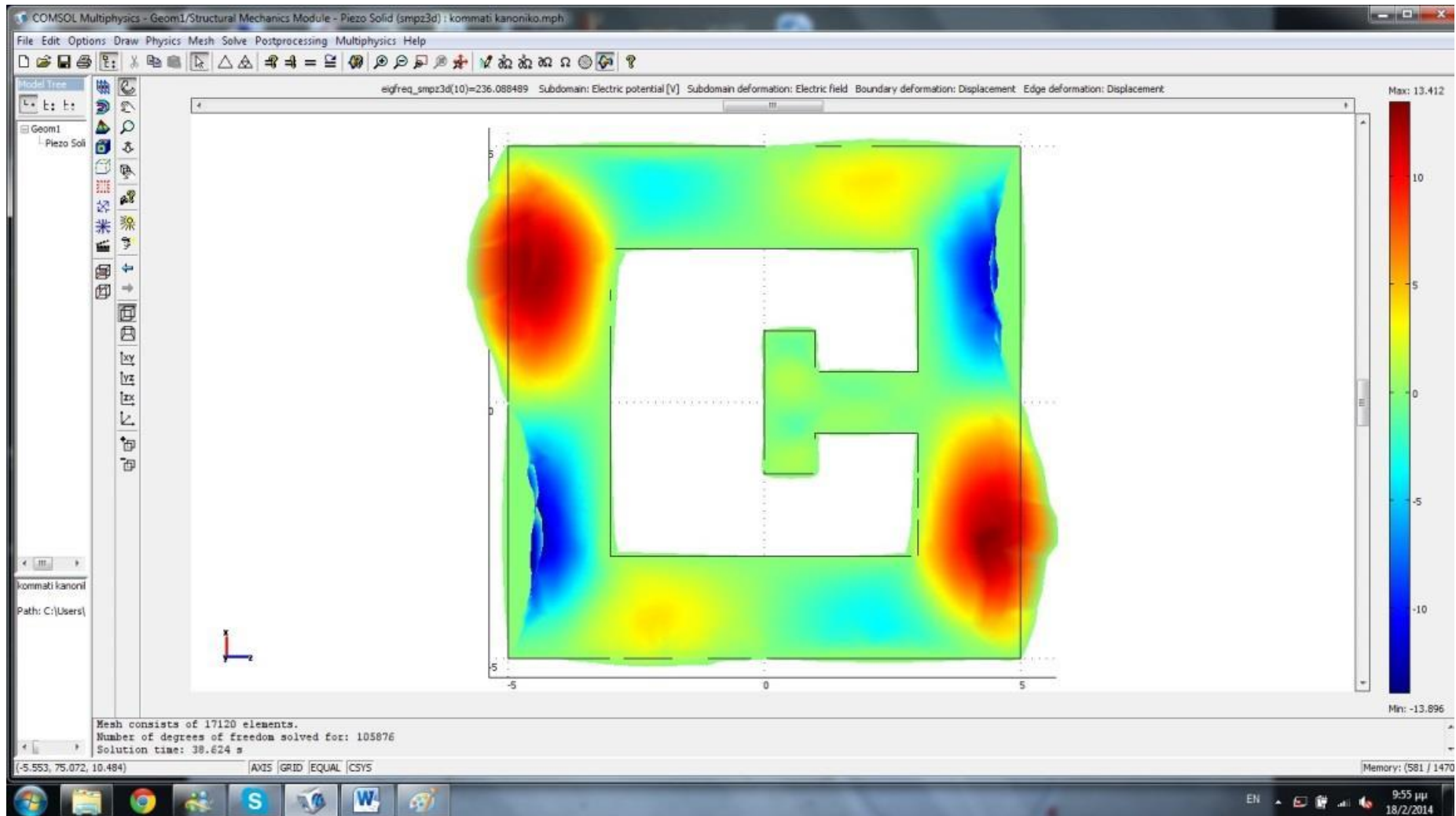
Εικόνα 21 Ιδιοσυχρότητα 201.648308



Εικόνα 22 Ιδιοσυχνότητα 212.178536

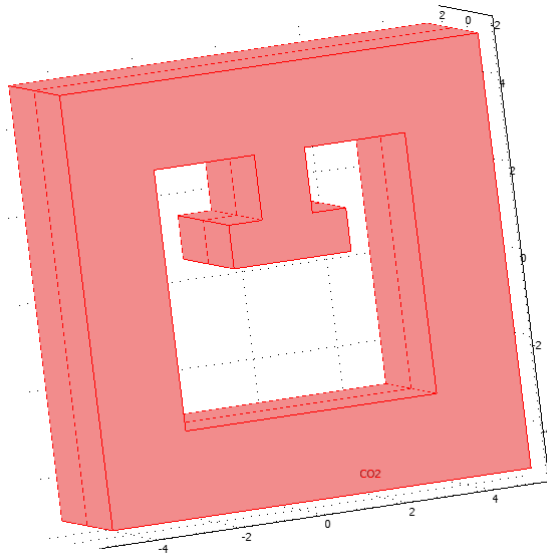


Εικόνα 23 Ιδιοσυχνότητα 229.183702



Εικόνα 24 Ιδιοσυχνότητα 236.088489

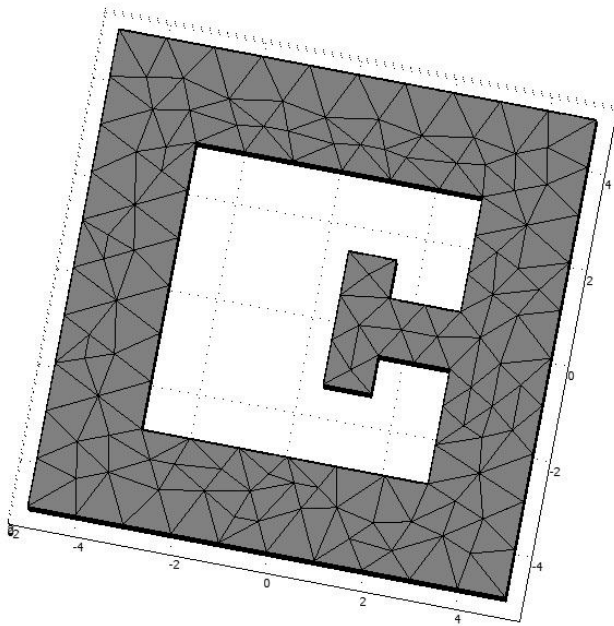
7.2 Μοντέλο δεύτερο



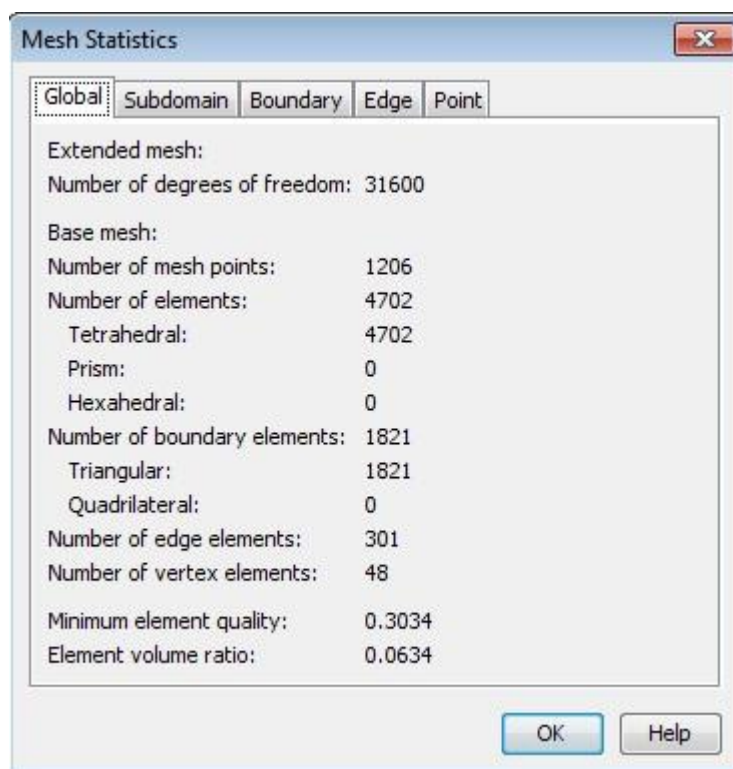
Εικόνα 25 Μοντέλο δεύτερο

Στο μοντέλο αυτό το πλαίσιο παραμένει ίδιων διαστάσεων με το προηγούμενο ενώ το εξάρτημα σχήματος T έχει νέες διαστάσεις, $2,5 \times 2 \times 4$ mm. Στη συνέχεια ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία όσον αφορά στην επιλογή του υλικού και στις ρυθμίσεις των μηχανικών οριακών συνθηκών.

Εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας **Mesh**→**Initialize Mesh** και η αρχικοποίηση πλέγματος παρουσιάζει τα εξής στατιστικά πλεγματοποίησης:

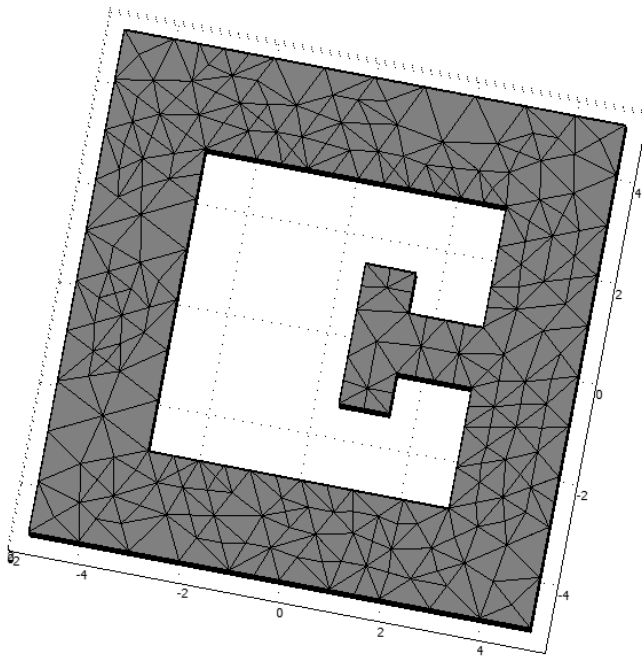


Εικόνα 26 Αρχικοποίηση πλέγματος

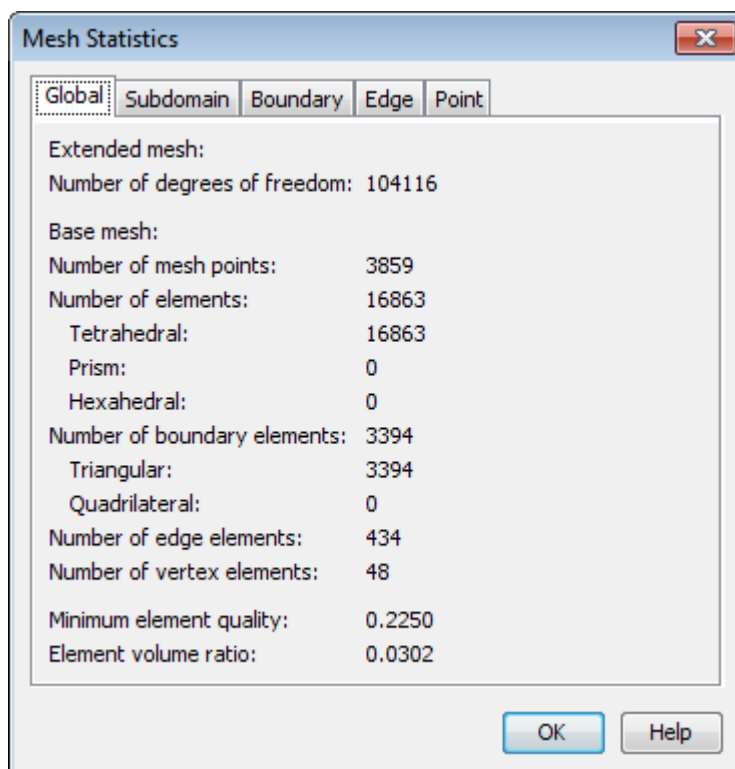


Εικόνα 27 Στατιστικά αρχικής πλεγματοποίησης

Το επόμενο βήμα είναι η βελτιωμένη πλεγματοποίηση **Refine Mesh** η οποία δίνει τα εξής στατιστικά:



Εικόνα 28 Βελτιωμένη πλεγματοποίηση

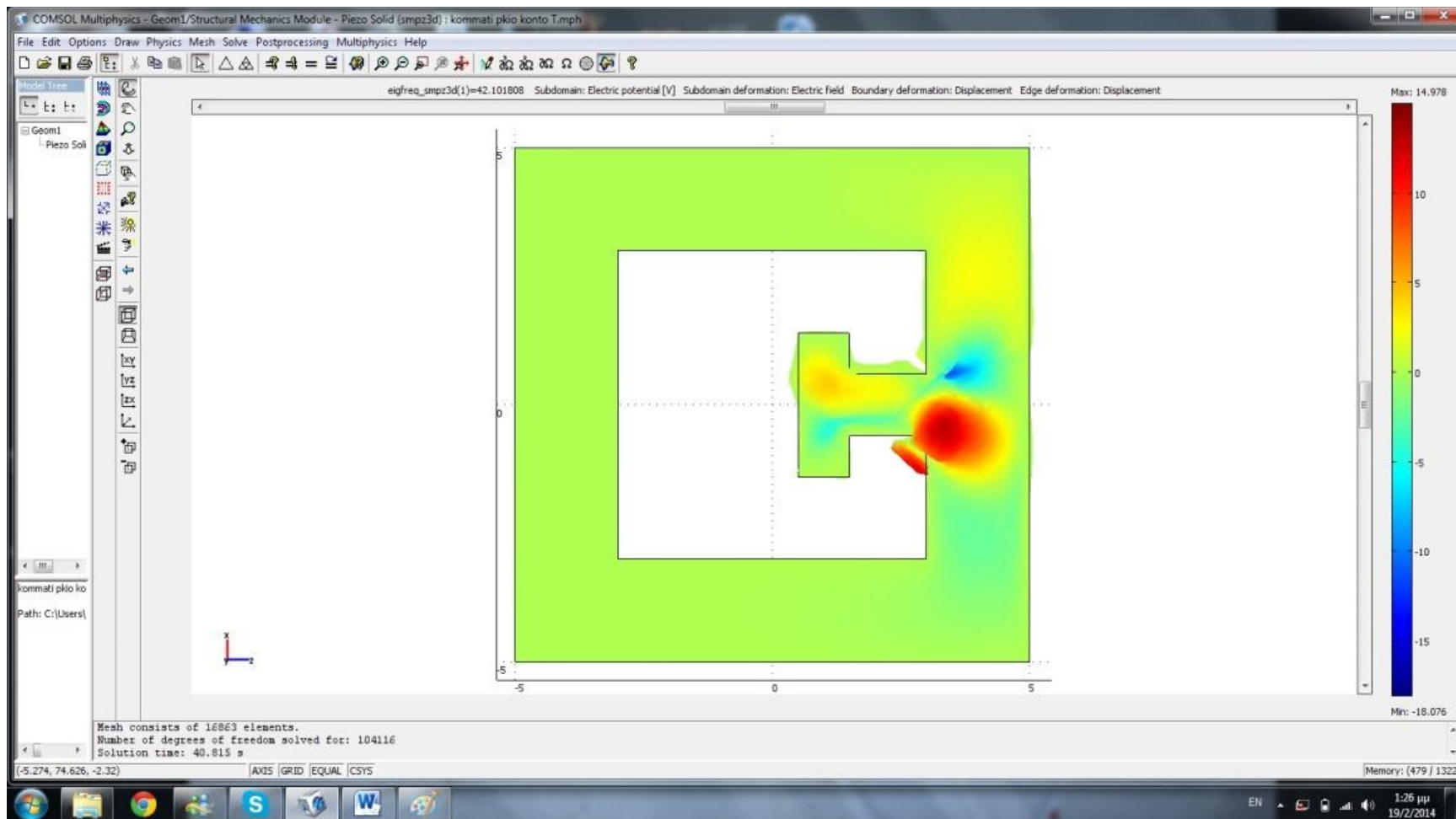


Εικόνα 29 Στατιστικά βελτιωμένης πλεγματοποίησης

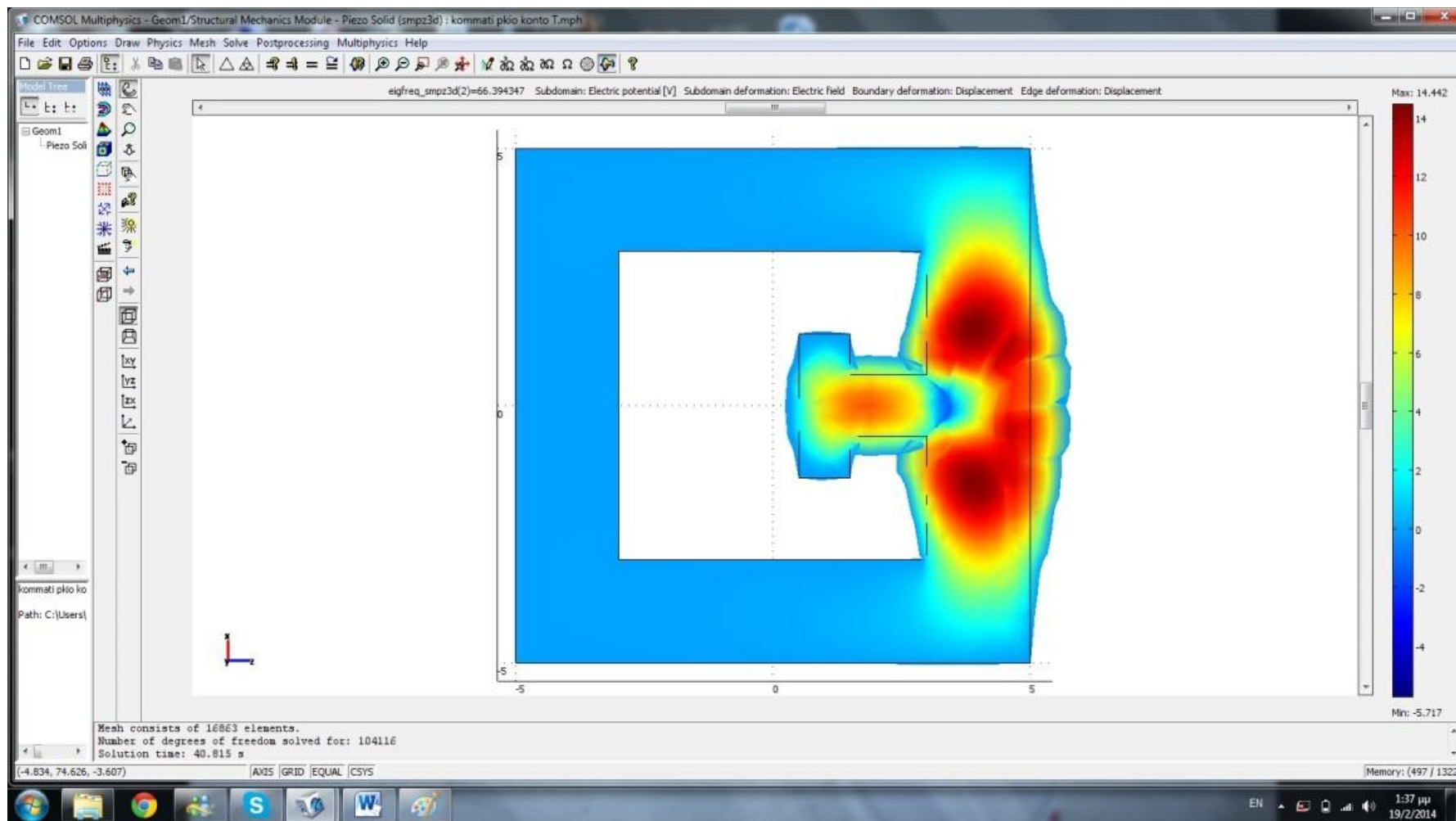
Ακολουθώς ρυθμίζονται ο τύπος ανάλυσης και ο αριθμός των ταλαντώσεων γύρω από το μηδέν και επιλύεται το πρόβλημα με την ίδια διαδικασία που επιλέχθηκε και στο πρώτο μοντέλο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται όμοια με πριν για να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ τους.

Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Μέγιστη Μετατόπιση (m)	Μέγιστο Ηλ. Δυναμικό (V)	Μέγιστη Πίεση (Pa)	Μέγιστη Παραμόρφωση
42.101808	8.156e-7	14.978	9692.123	1.51e-7
66.394347	4.359e-7	14.442	7302.203	1.048e-7
71.398563	1.038e-6	22.249	1.663e4	2.763e-7
149.014087	3.826e-7	15.591	1.14e4	1.778e-7
154.872525	3.826e-7	8.559	4362.86	6.824e-8
181.960594	1.382e-7	20.001	4193.903	6.463e-8
212.236828	6.172e-8	18.598	2329.102	3.781e-8
212.775514	7.603e-7	21.133	2.321e4	3.5e-7
234.60118	8.339e-8	16.345	3302.353	4.954e-8
236.223316	1.32e-7	13.212	7192.505	8.672e-8

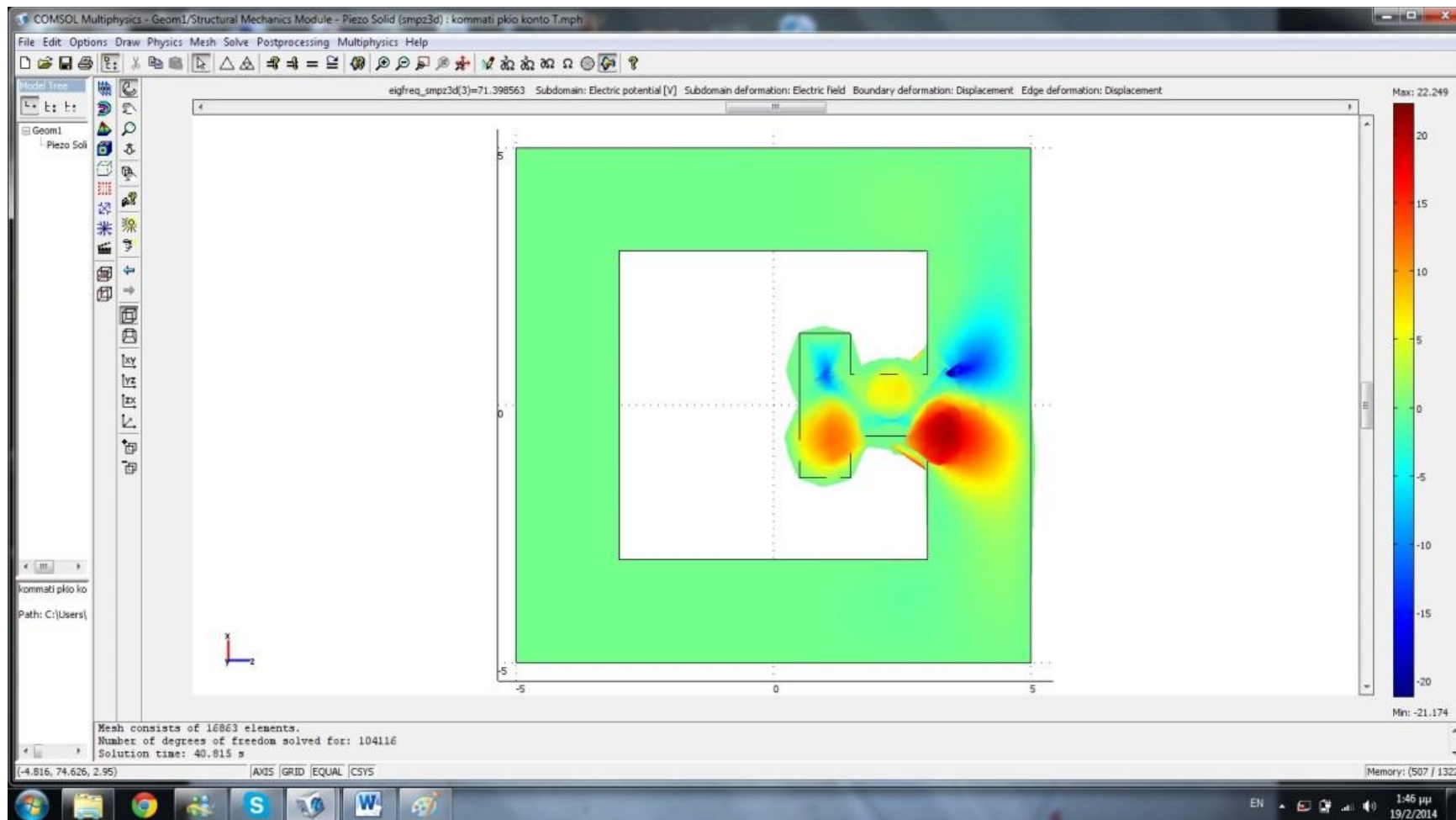
Πίνακας 2 Αποτελέσματα επίλυσης



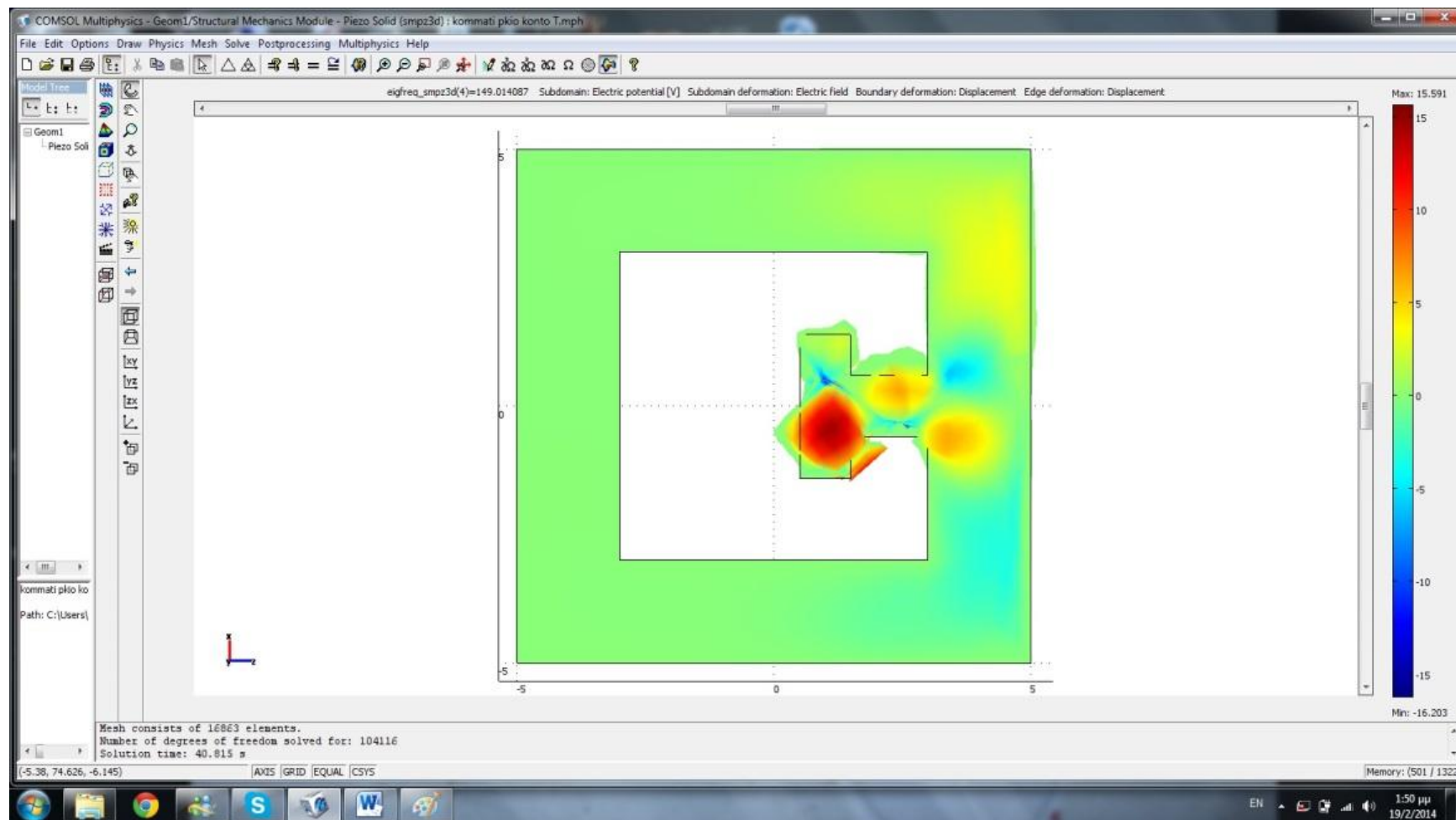
Εικόνα 30 Ιδιοσυχνότητα 42.101808



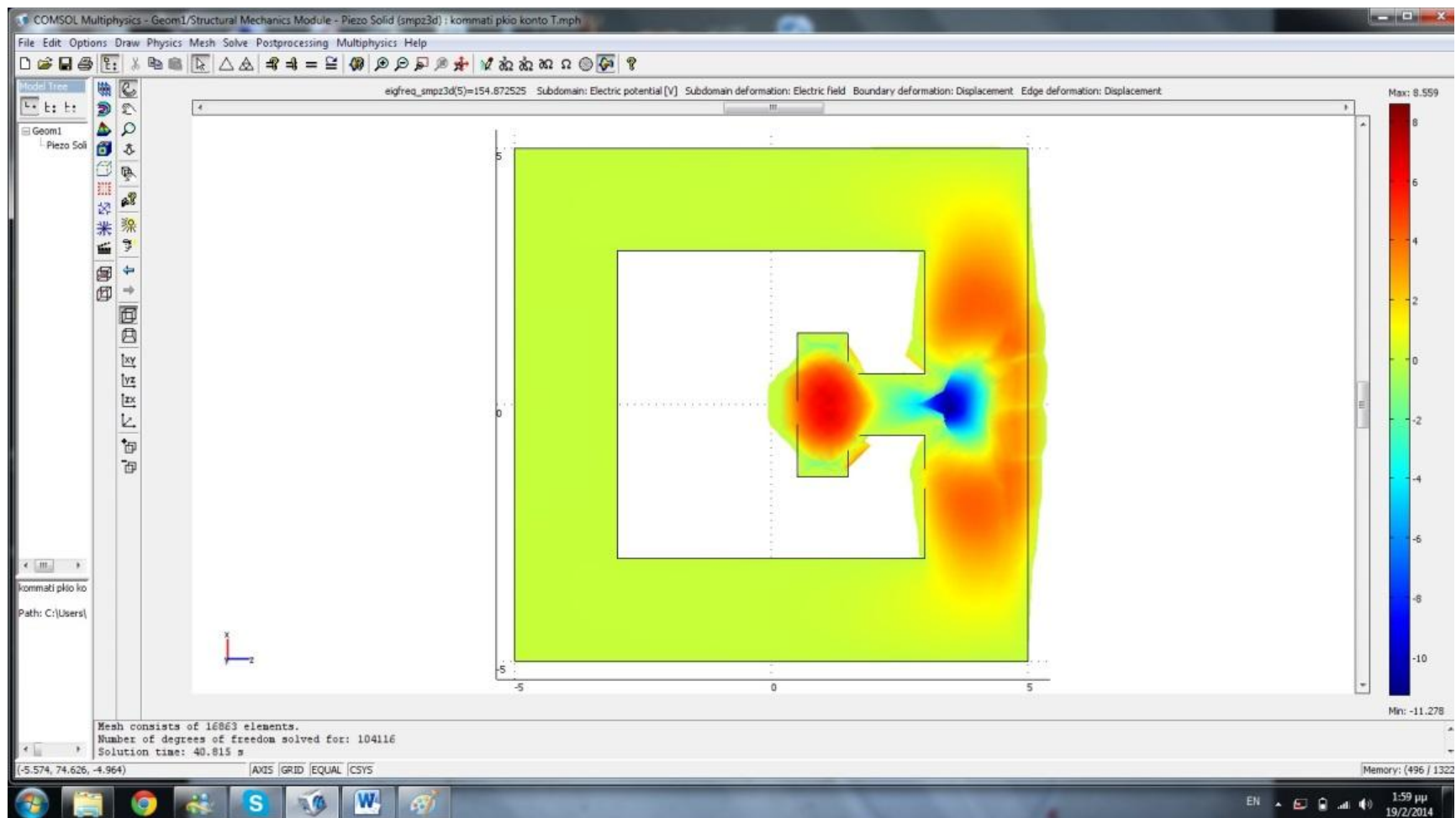
Εικόνα 31 Ιδιοσυχρότητα 66.394347



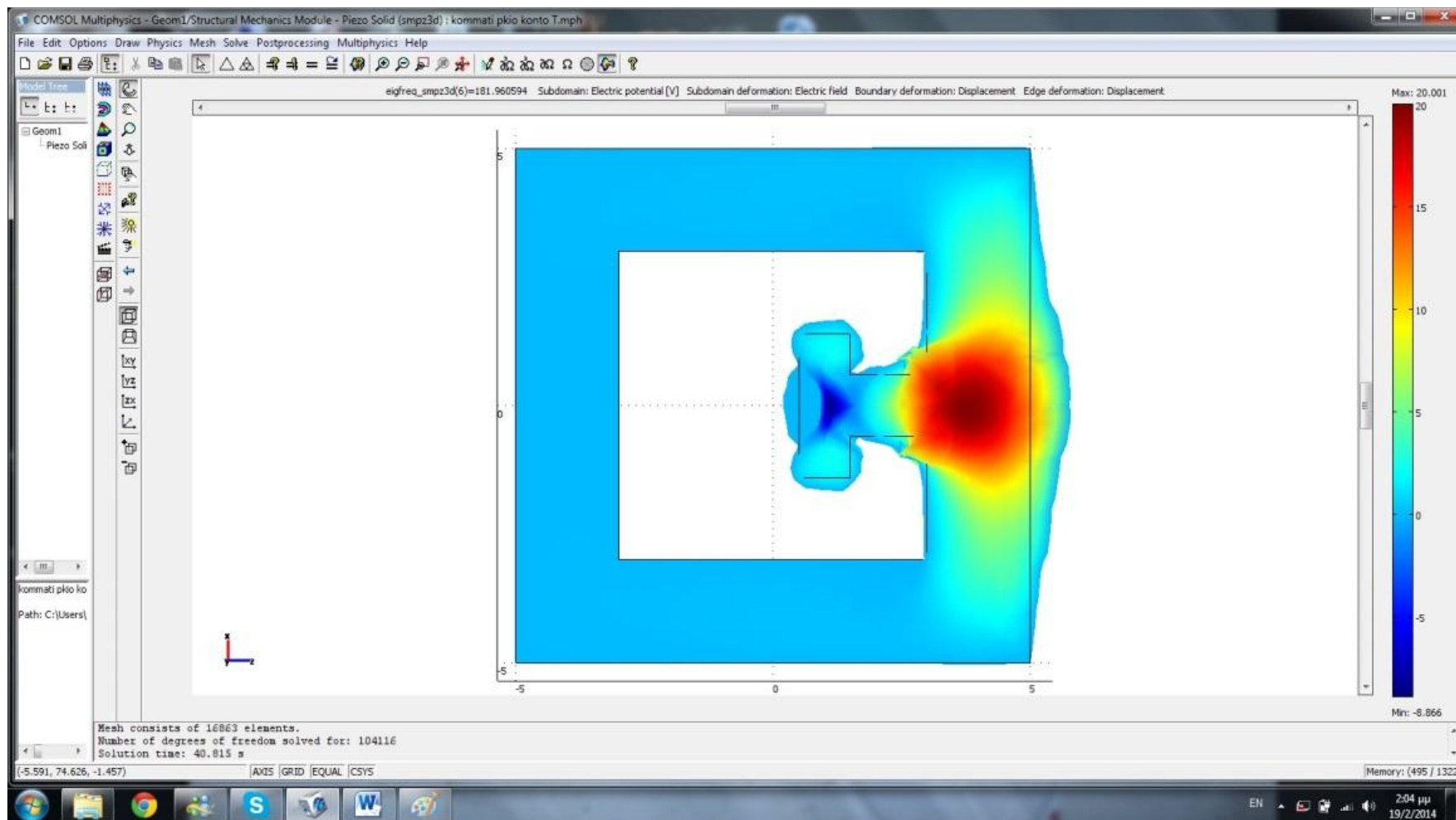
Εικόνα 32 Ιδιοσυχνότητα 71.398563



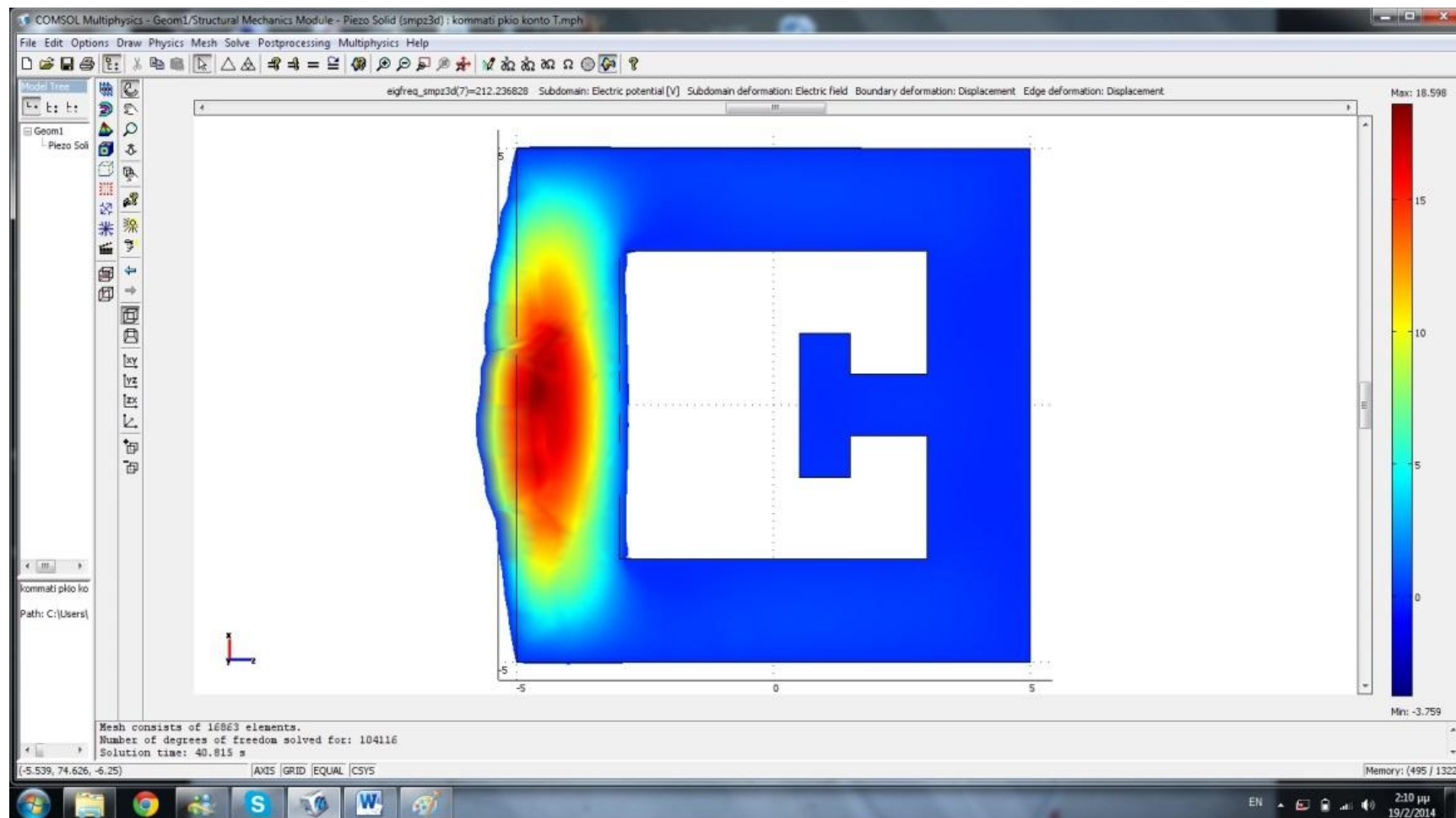
Εικόνα 33 Ιδιοσυχνότητα 149.014087



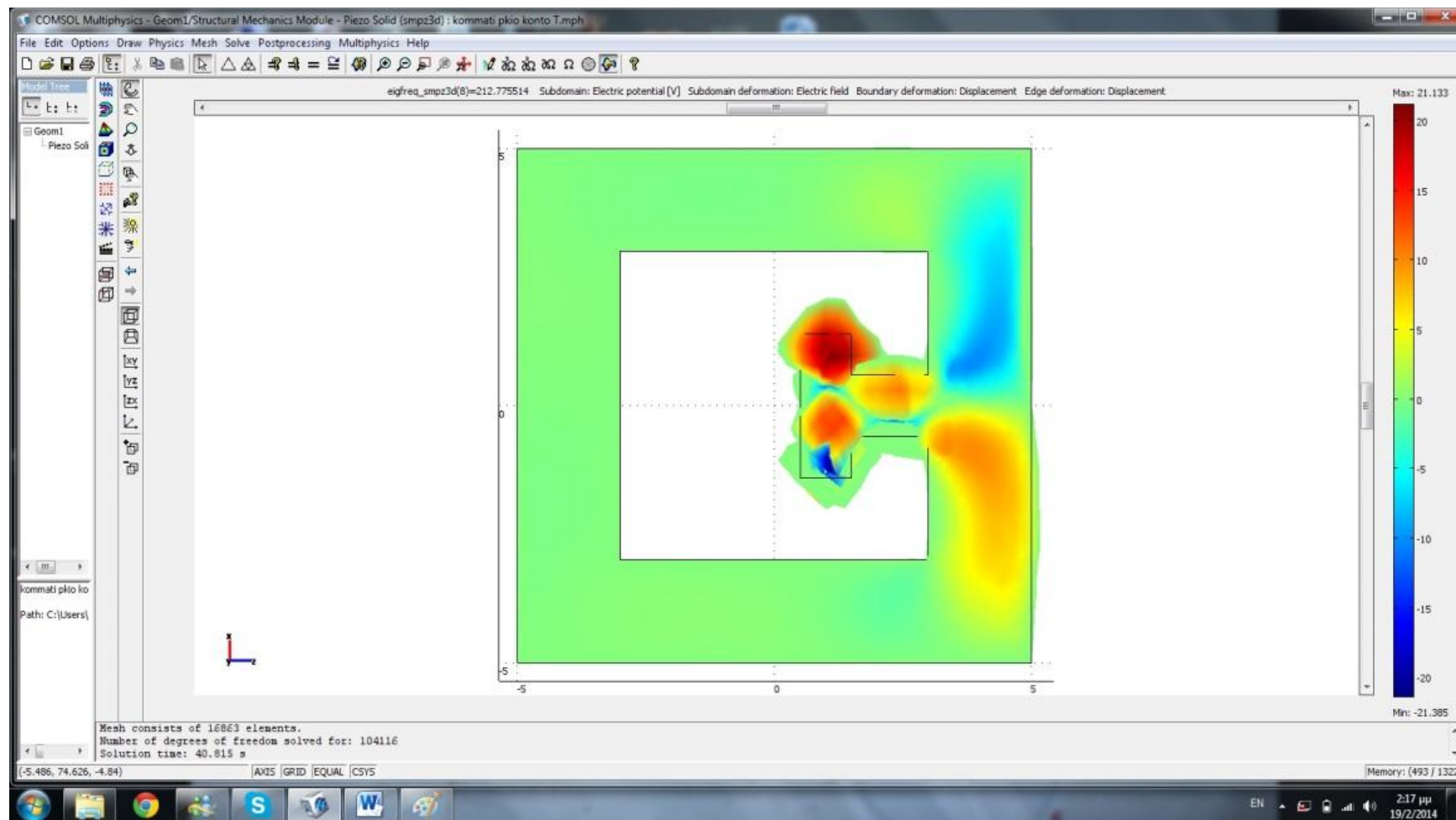
Εικόνα 34 Ιδιοσυχνότητα 154.872525



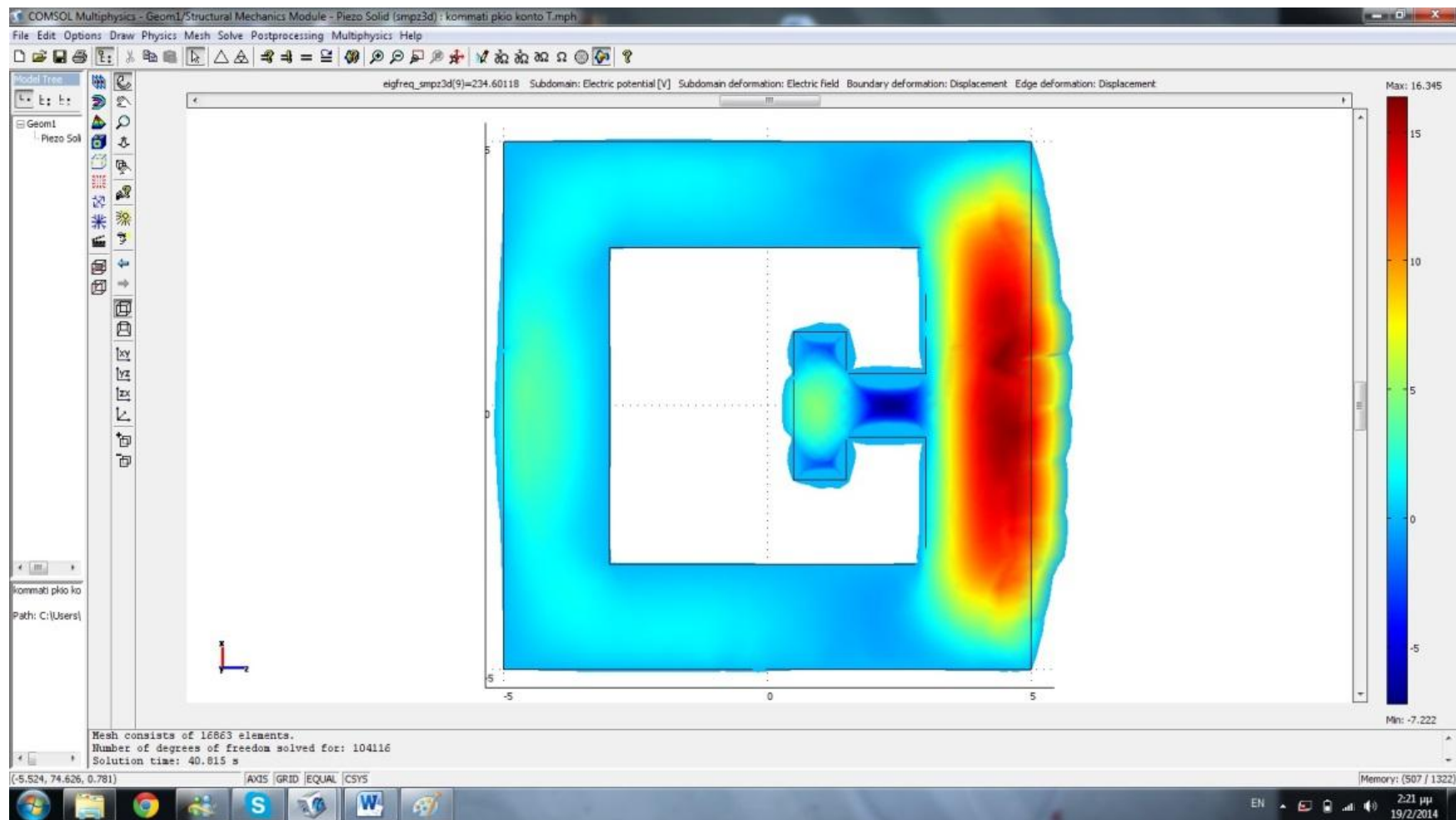
Εικόνα 35 Ιδιοσυχνότητα 181.960594



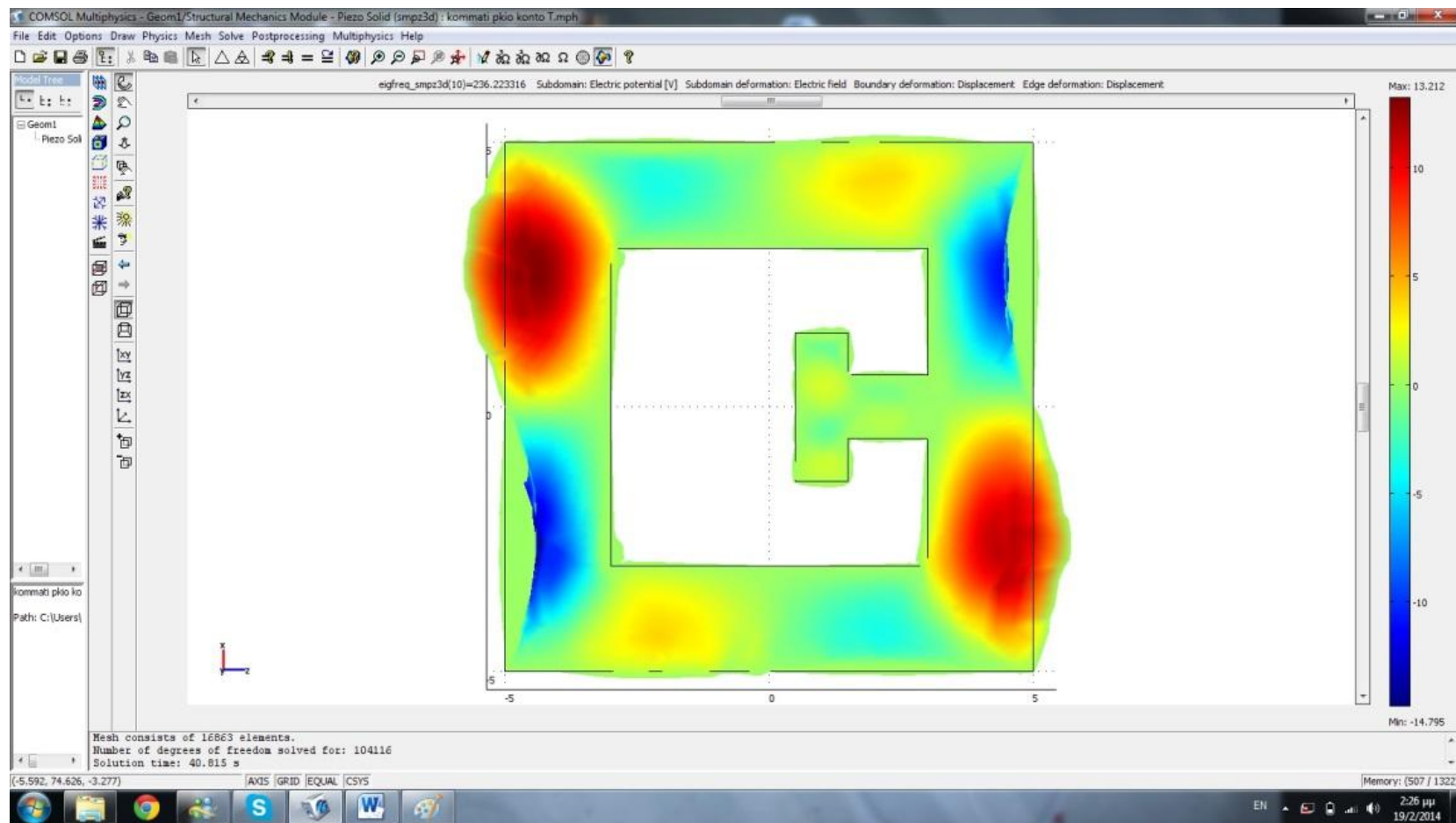
Εικόνα 36 Ιδιοσυνχρότητα 212.236828



Εικόνα 37 Ιδιοσυχνότητα 212.775514

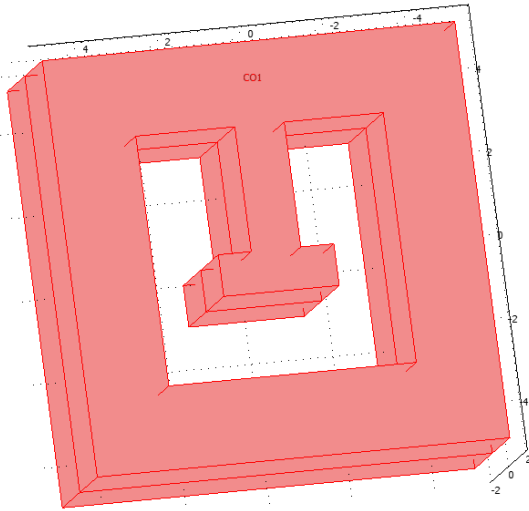


Εικόνα 38 Ιδιοσυχνότητα 234.60118



Εικόνα 39 Ιδιοσυχνότητα 236.223316

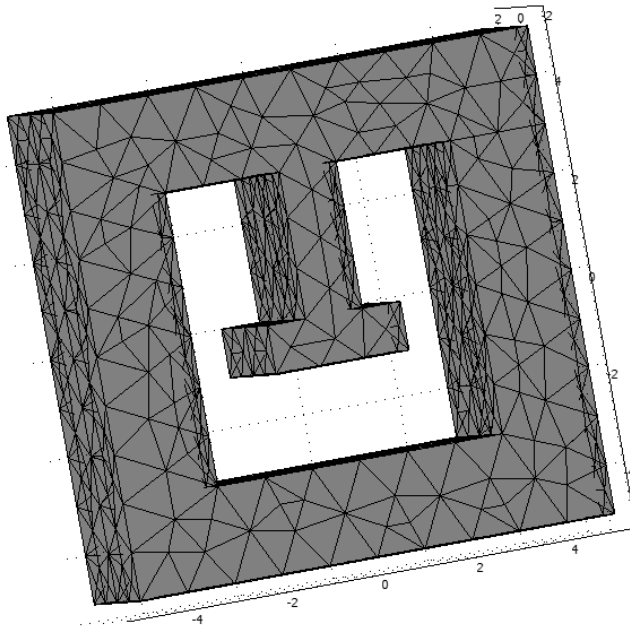
7.3 Μοντέλο τρίτο



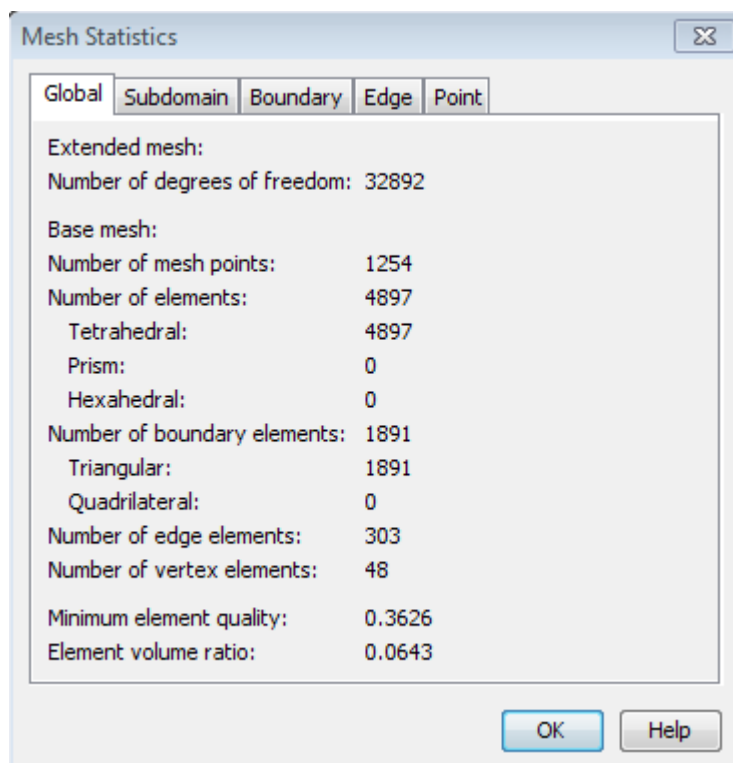
Εικόνα 40 Μοντέλο τρίτο

Το τρίτο μοντέλο αποτελείται από πλαίσιο ίδιων διαστάσεων με τα προηγούμενα ενώ οι διαστάσεις του T αυτή τη φορά είναι $4 \times 2 \times 4$ mm. Η επιλογή του υλικού της διάταξης και οι ρυθμίσεις των μηχανικών οριακών συνθηκών πραγματοποιούνται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στα προηγούμενα μοντέλα και εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Η αρχικοποίηση πλέγματος (**Initialize Mesh**) δίνει τα στατιστικά που φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί :

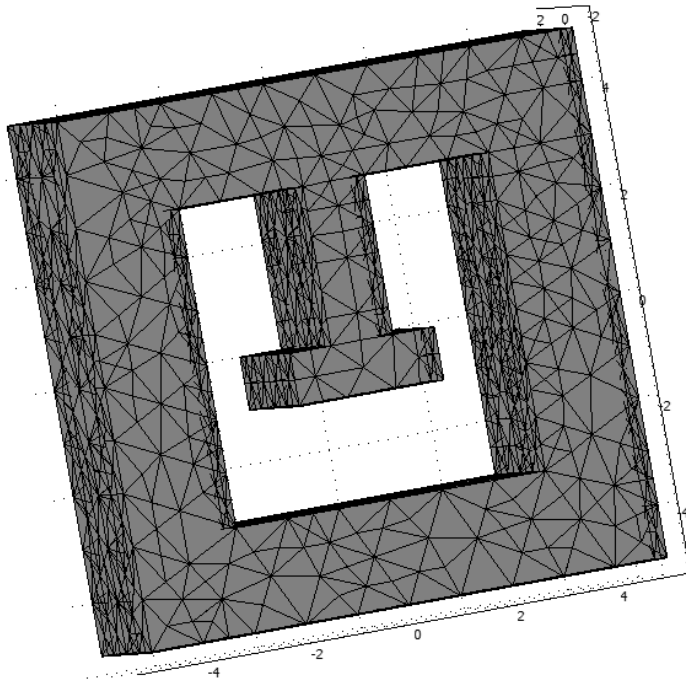


Εικόνα 41 Αρχικοποίηση πλέγματος

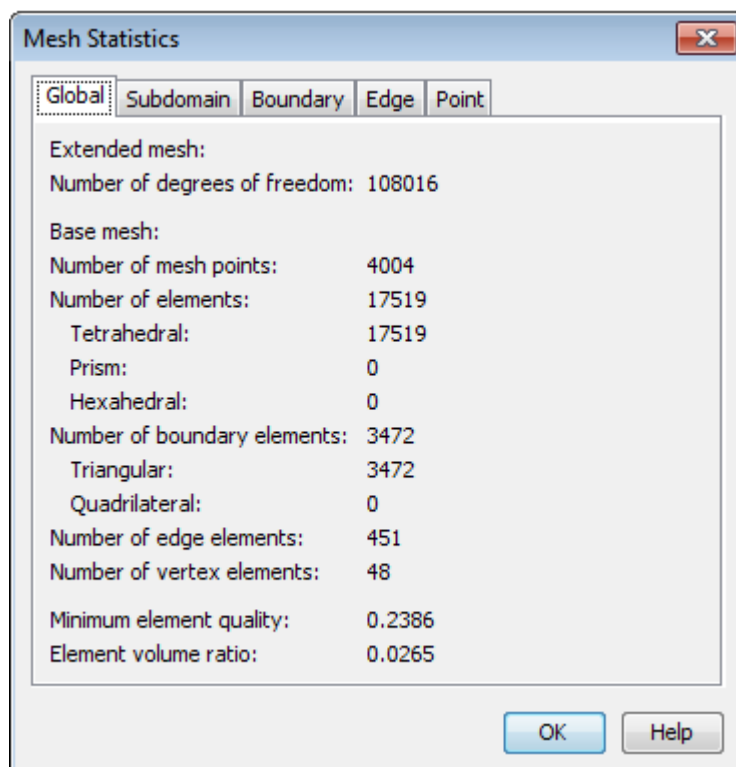


Εικόνα 42 Στατιστικά αρχικής πλεγματοποίησης

Ακολουθεί η βελτιωμένη πλεγματοποίηση (**Refine Mesh**) με στατιστικά πλεγματοποίησης που εμφανίζονται παρακάτω:



Εικόνα 43 Βελτιωμένη πλεγματοποίηση

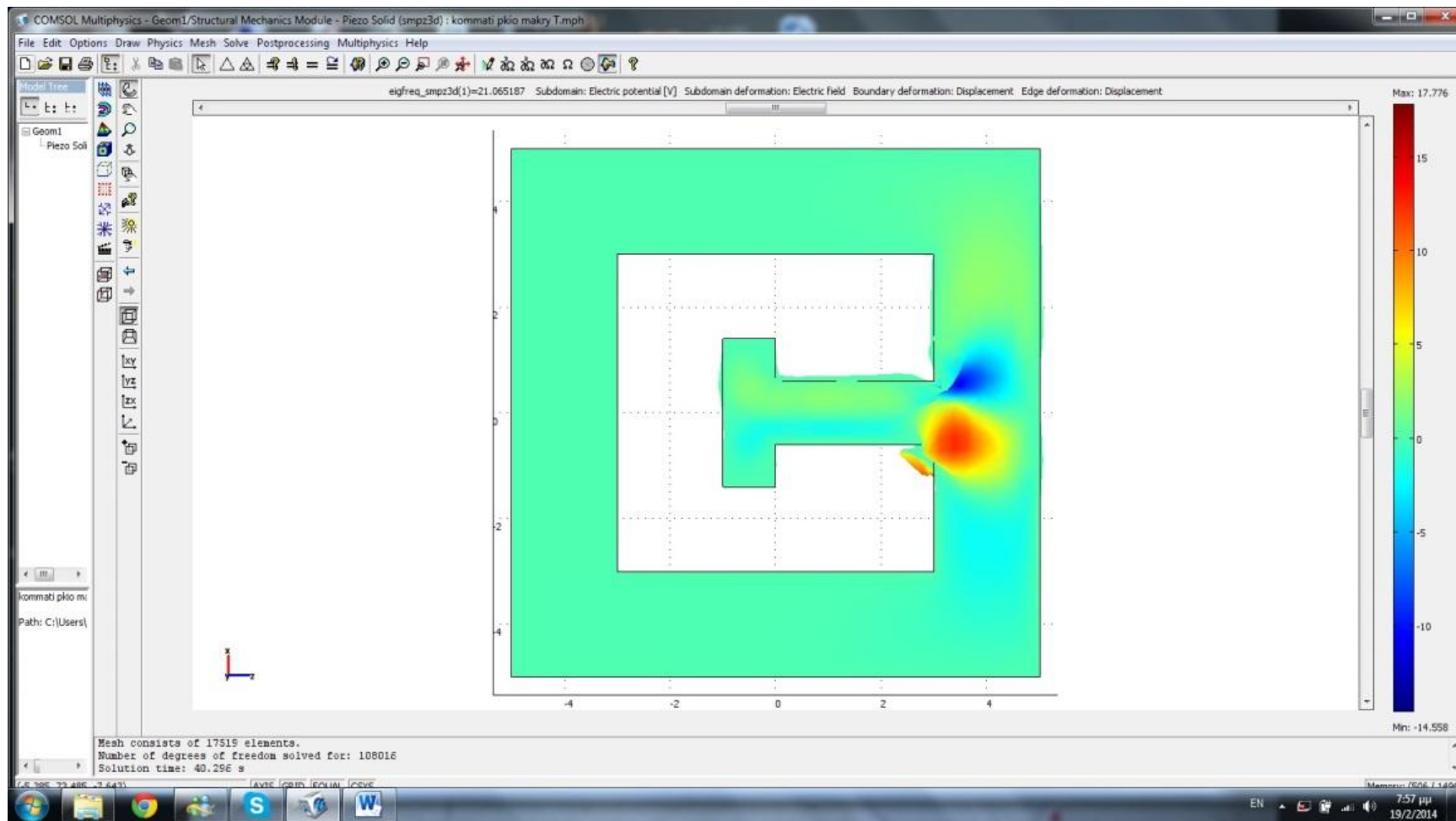


Εικόνα 44 Στατιστικά βελτιωμένης πλεγματοποίησης

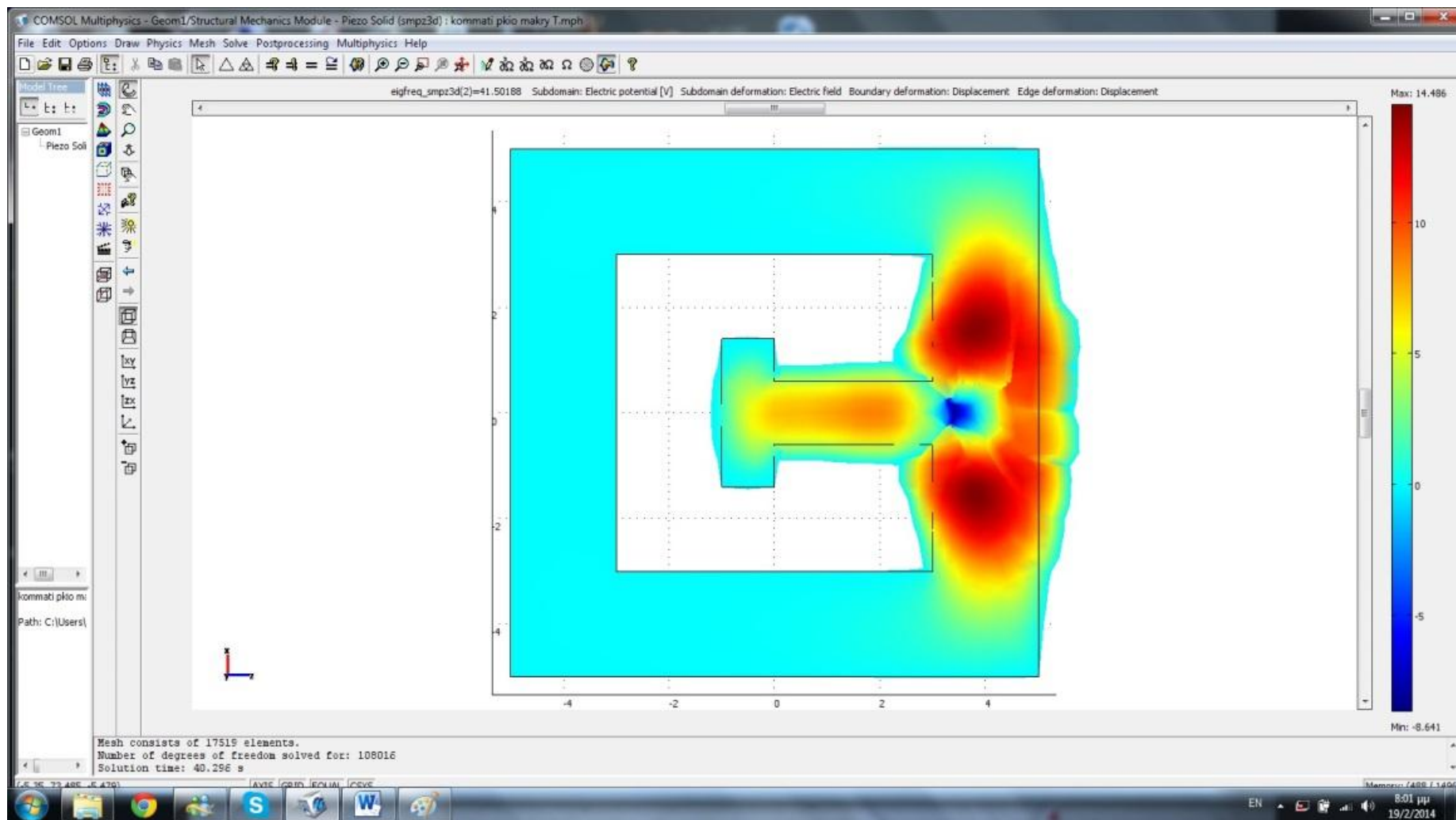
Τα επόμενα βήματα (ρύθμιση τύπου ανάλυσης , αριθμός ταλαντώσεων γύρω από το μηδέν) παραμένουν ίδια με των προηγούμενων μοντέλων και έτσι επιλέγεται η επίλυση του προβλήματος (**Solve problem**) η οποία επιφέρει τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται πιο κάτω.

Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Μέγιστη Μετατόπιση(m)	Μέγιστο Ηλ. Δυναμικό(V)	Μέγιστη Πίεση (Pa)	Μέγιστη Παραμόρφωση
21.065187	1.554e-6	17.776	9695.231	1.517e-7
41.50188	8.042e-7	14.486	9472.737	1.435e-7
45.264556	1.734e-6	23.419	1579e4	2.547e-7
100.728929	4.895e-7	13.198	9570.36	1.475e-7
118.042138	2.106e-7	6.086	4755.402	7.878e-8
141.552018	1.576e-7	16.968	3644.169	4.964e-8
173.102171	6.33e-7	18.679	2.195e4	2.412e-7
212.282424	6.62e-8	20.39	2450.637	4.222e-8
215.934594	1.054e-7	16.537	3696.47	5.409e-8
222.482379	1.946e-7	16.83	1.125e4	1.785e-7

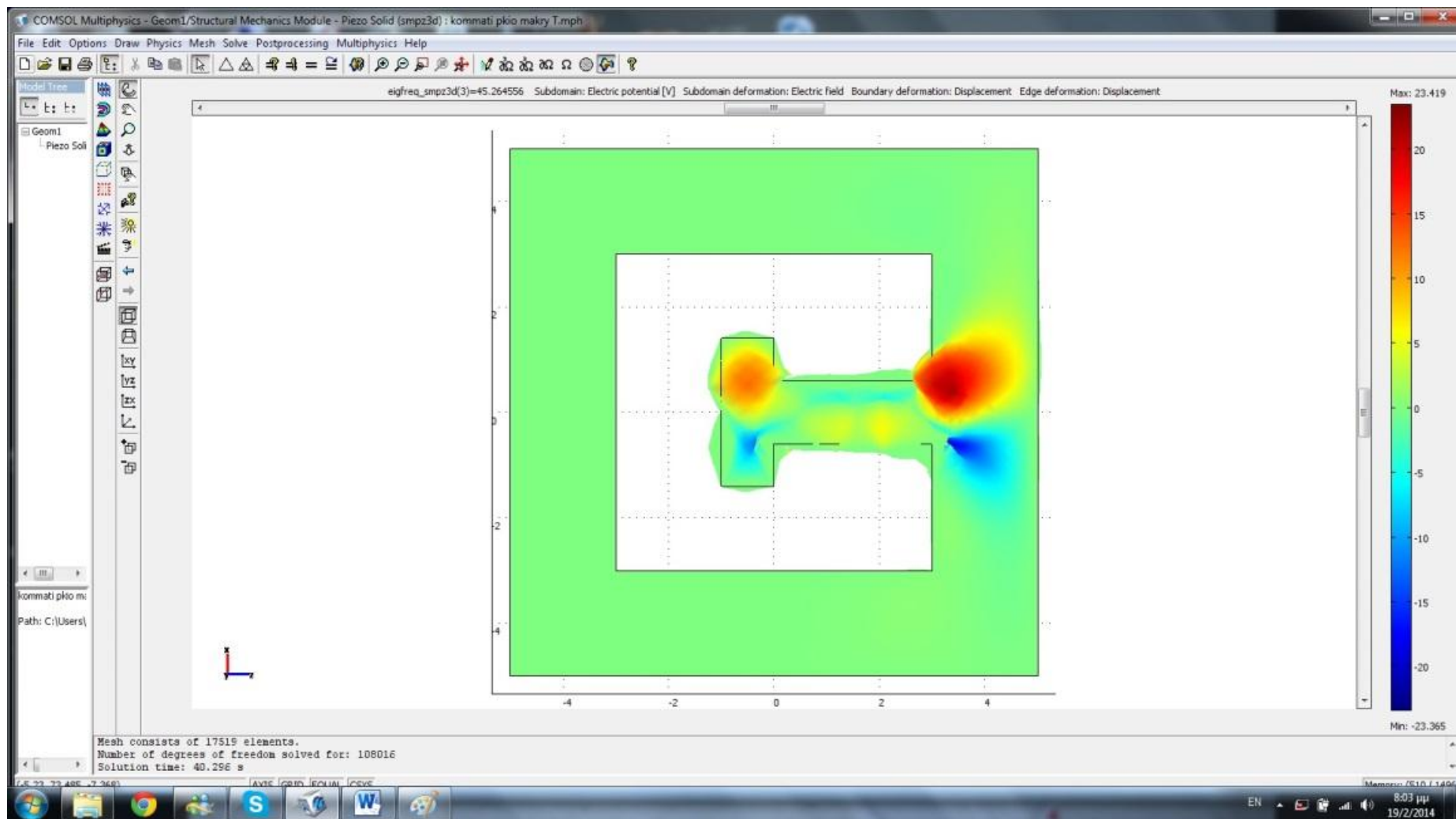
Πίνακας 3 Αποτελέσματα επίλυσης



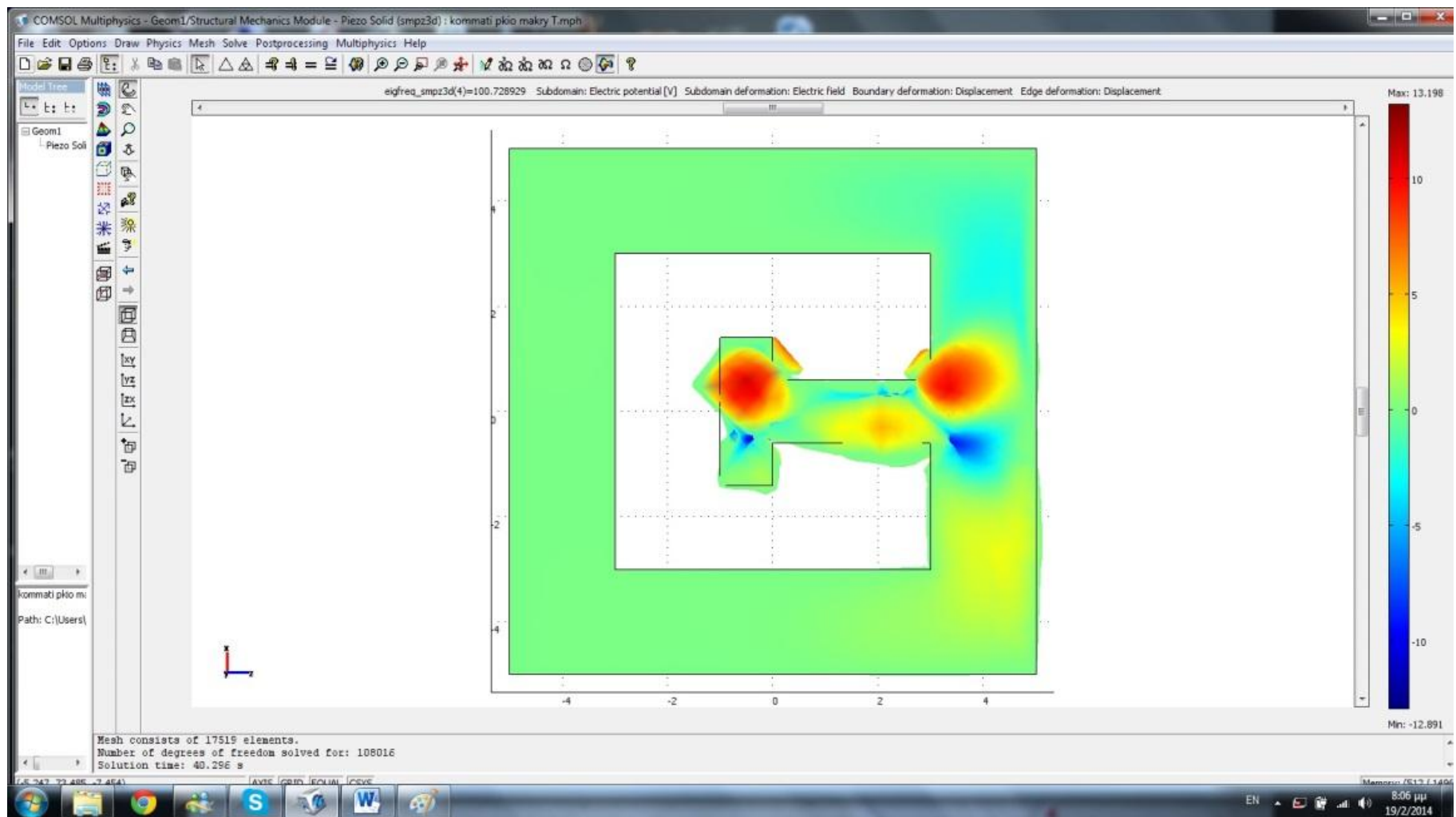
Εικόνα 45 Ιδιοσυχνότητα 21.065187



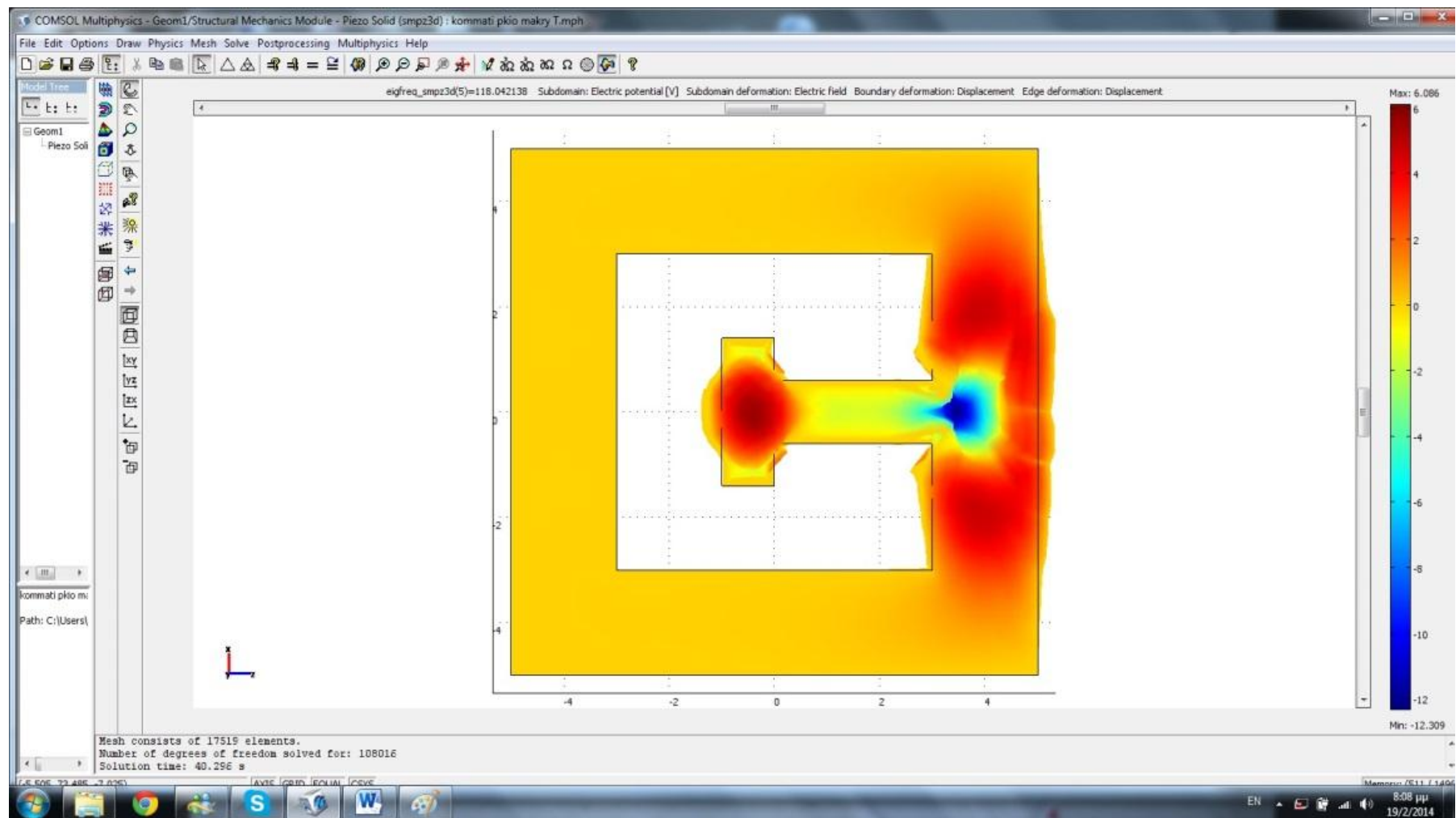
Εικόνα 46 Ιδιοσυχνότητα 41.50188



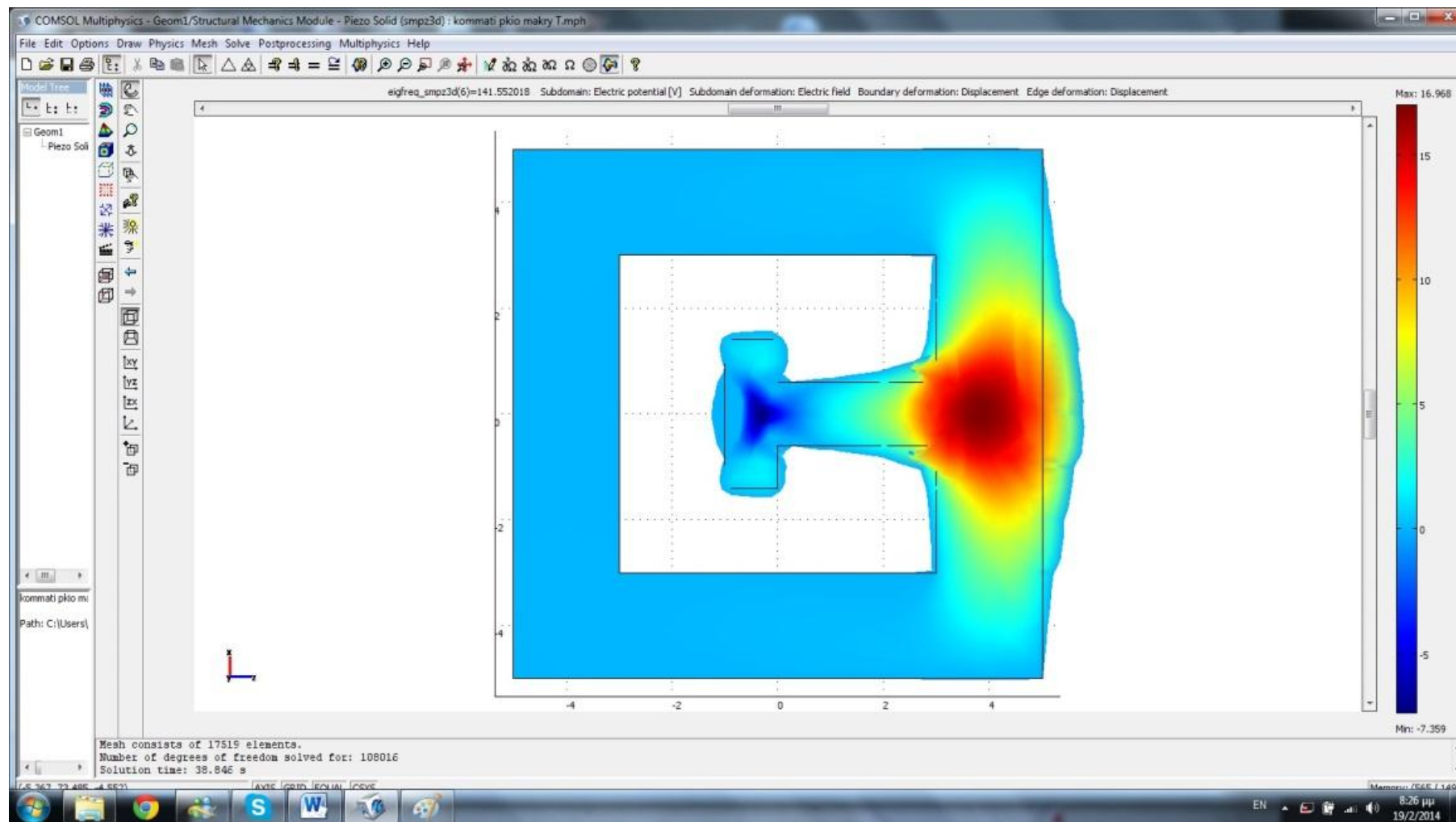
Εικόνα 47 Ιδιοσυχνότητα 45.264556



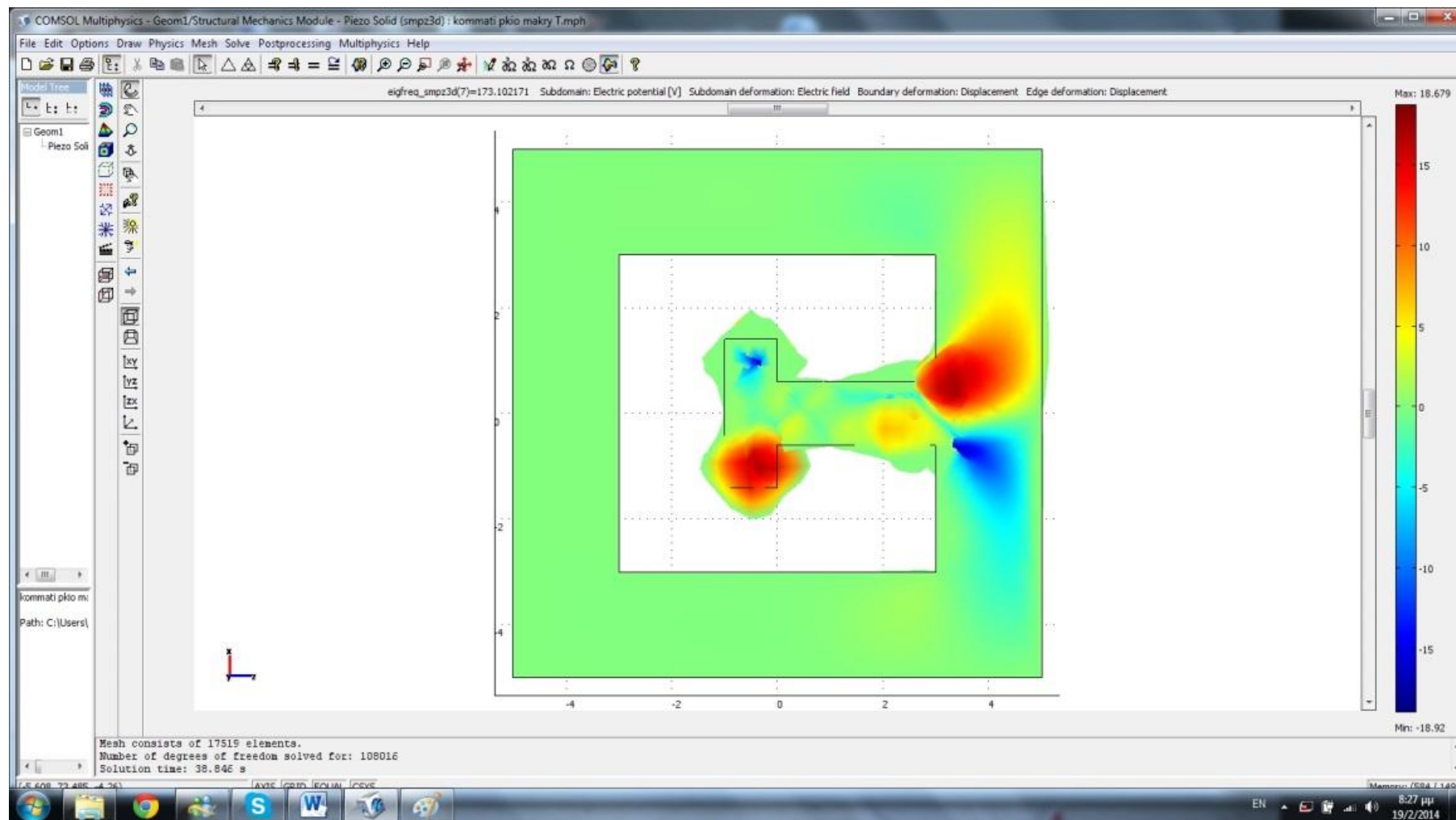
Εικόνα 48 Ιδιοσυχνότητα 100.728929



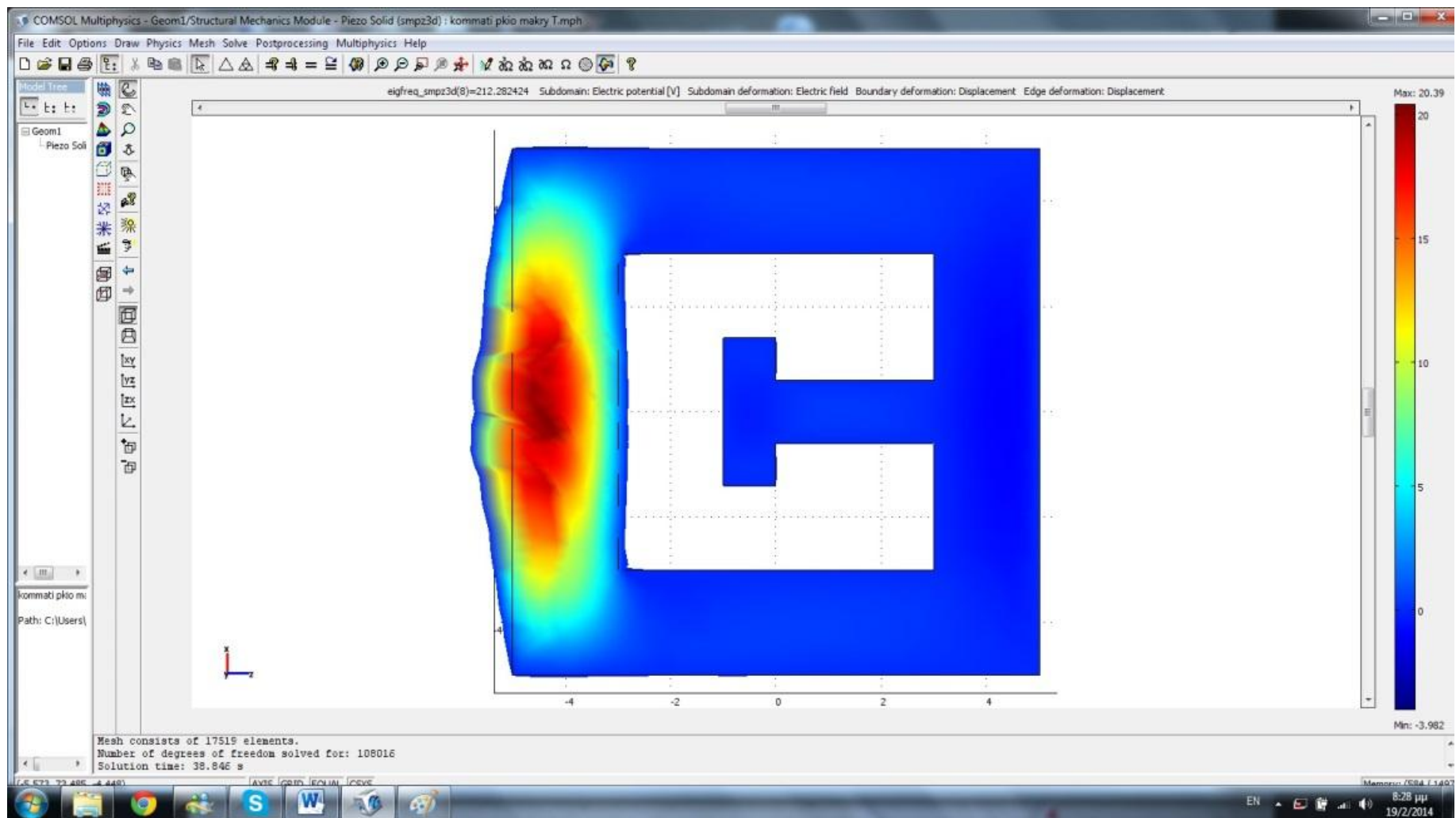
Εικόνα 49 Ιδιοσυχνότητα 118.042138



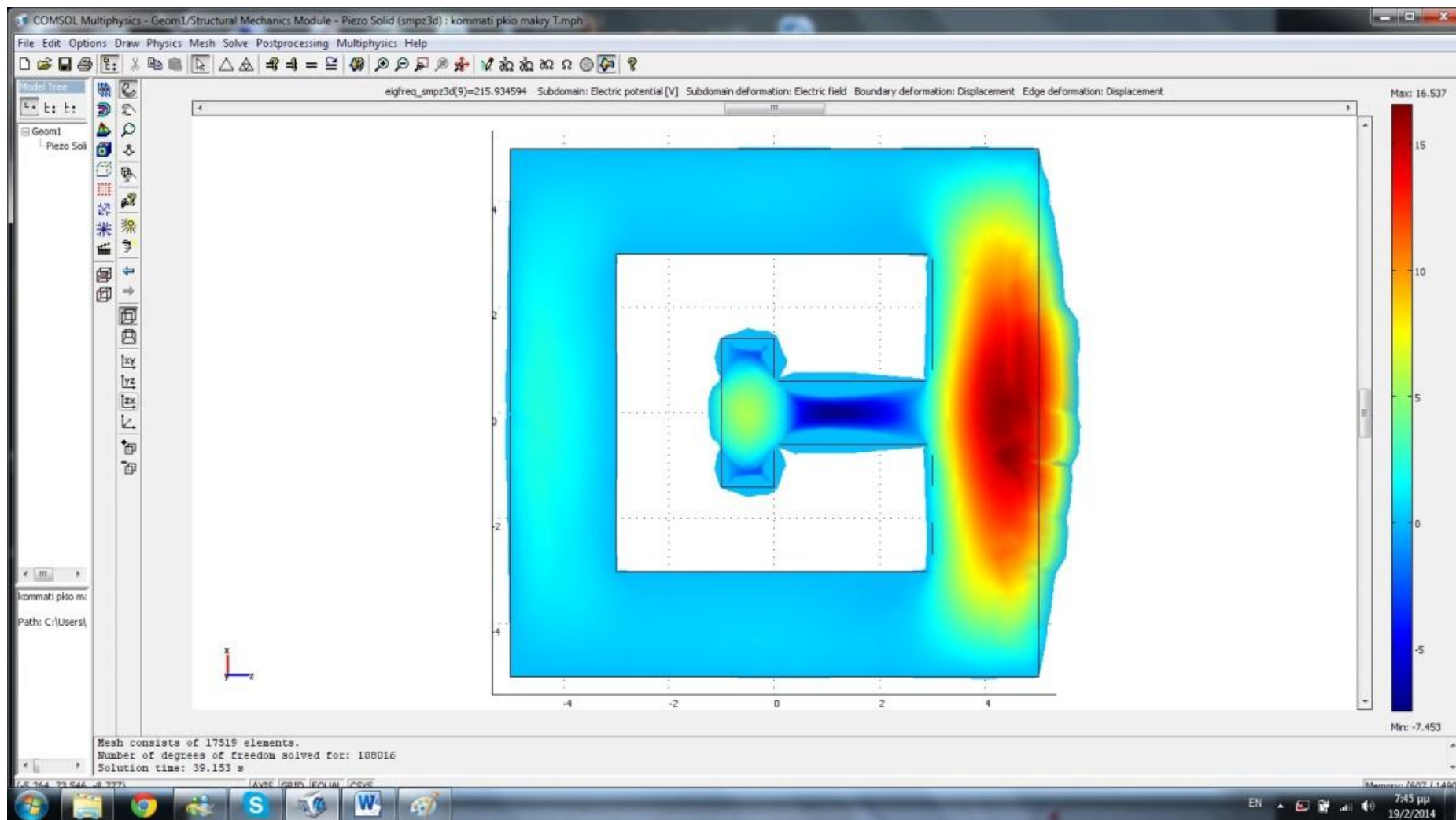
Εικόνα 50 Ιδιοσυχνότητα 141.552018



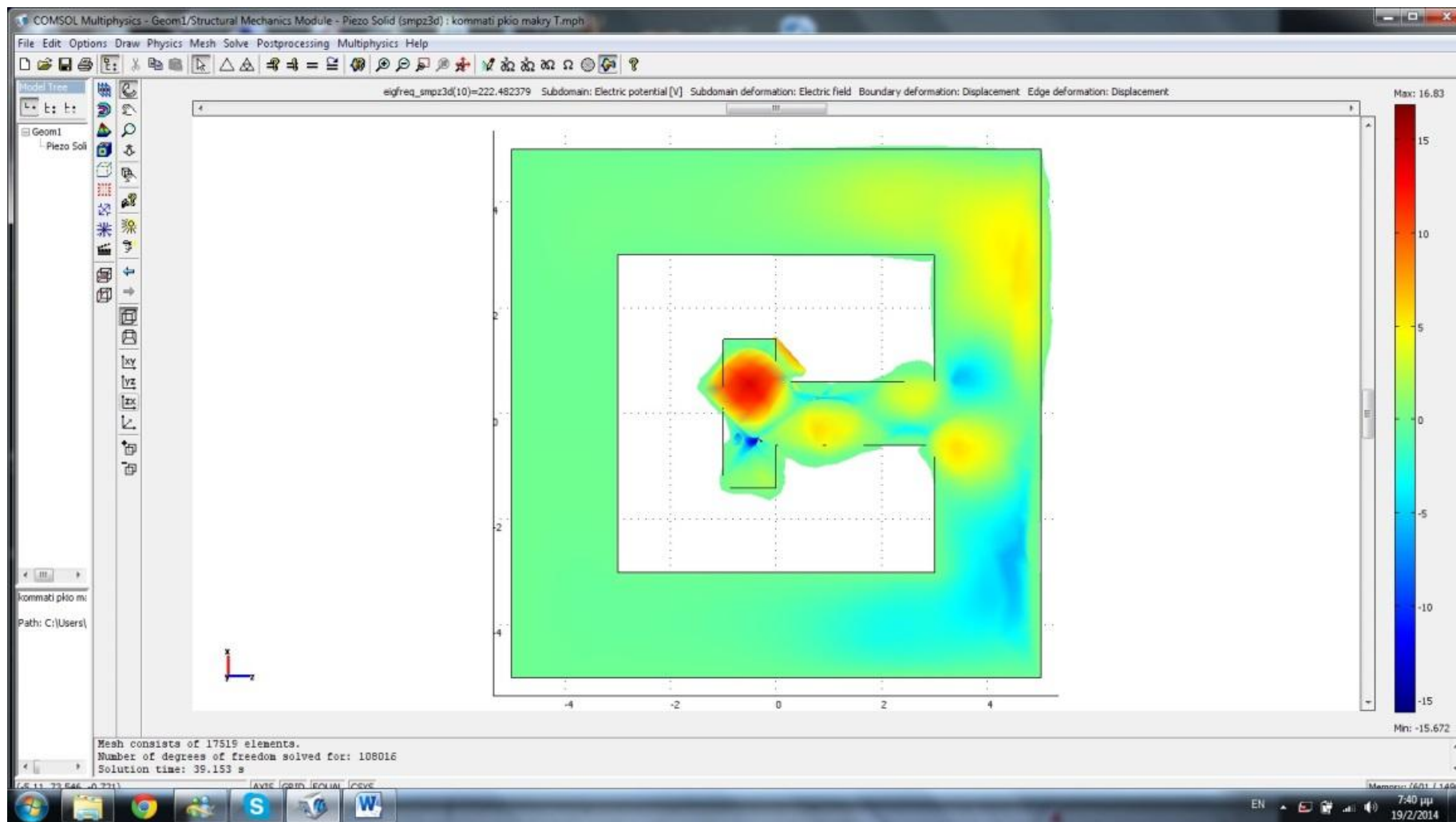
Εικόνα 51 Ιδιοσυχνότητα 173.102171



Εικόνα 52 Ιδιοσυχνότητα 212.282424

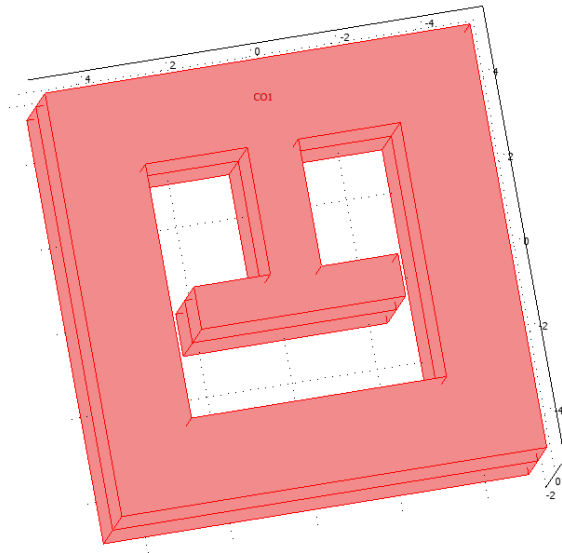


Εικόνα 53 Ιδιοσυχνότητα 215.934594



Εικόνα 54 Ιδιοσυχνότητα 222.482379

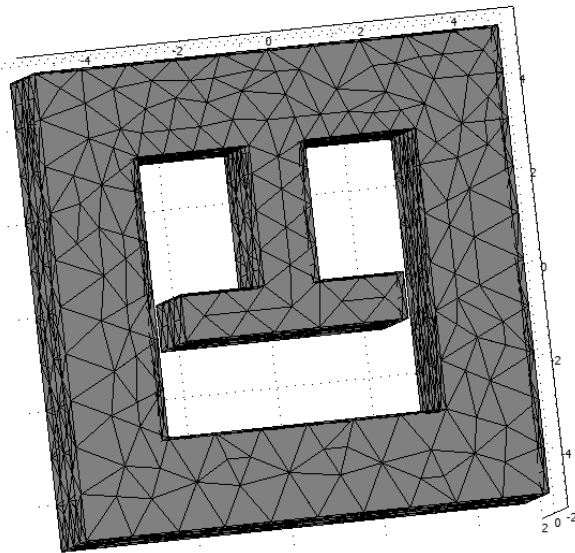
7.4 Μοντέλο τέταρτο



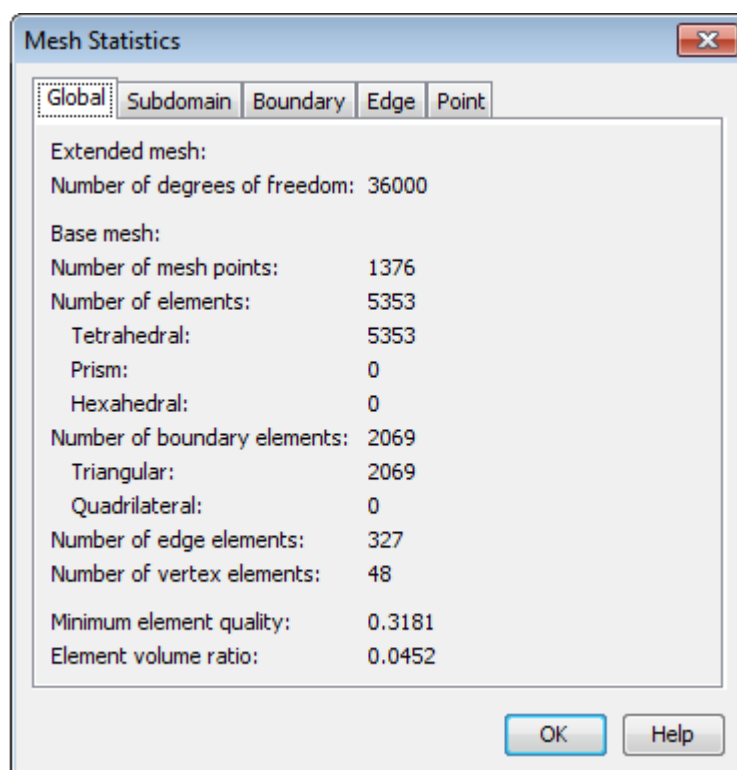
Εικόνα 55 Μοντέλο τέταρτο

Στο τέταρτο και τελευταίο μοντέλο της παρούσας εργασίας το εξάρτημα τύπου T έχει διαστάσεις $4 \times 4,5 \times 4$ mm. Στη συνέχεια ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία όσον αφορά στην επιλογή του υλικού και στις ρυθμίσεις των μηχανικών οριακών συνθηκών και εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Η αρχικοποίηση πλέγματος πραγματοποιείται με τα παρακάτω στατιστικά:

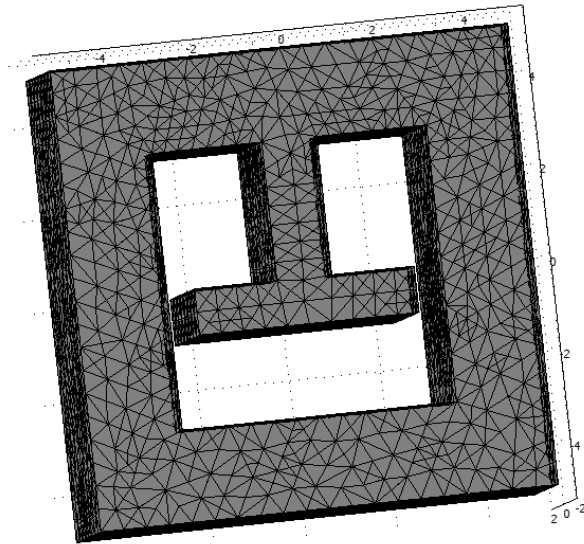


Εικόνα 56 Αρχικοποίηση πλέγματος

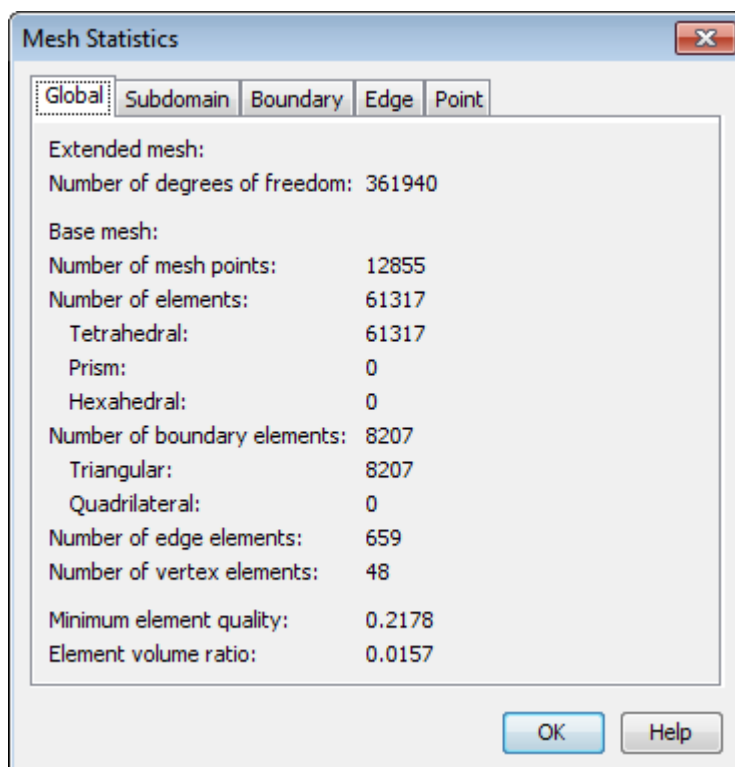


Εικόνα 57 Στατιστικά αρχικής πλεγματοποίησης

Όπως και στα προηγούμενα μοντέλα εφαρμόζεται βελτιωμένη πλεγματοποίηση (**Refine Mesh**) με στατιστικά :



Εικόνα 58 Βελτιωμένη πλεγματοποίηση



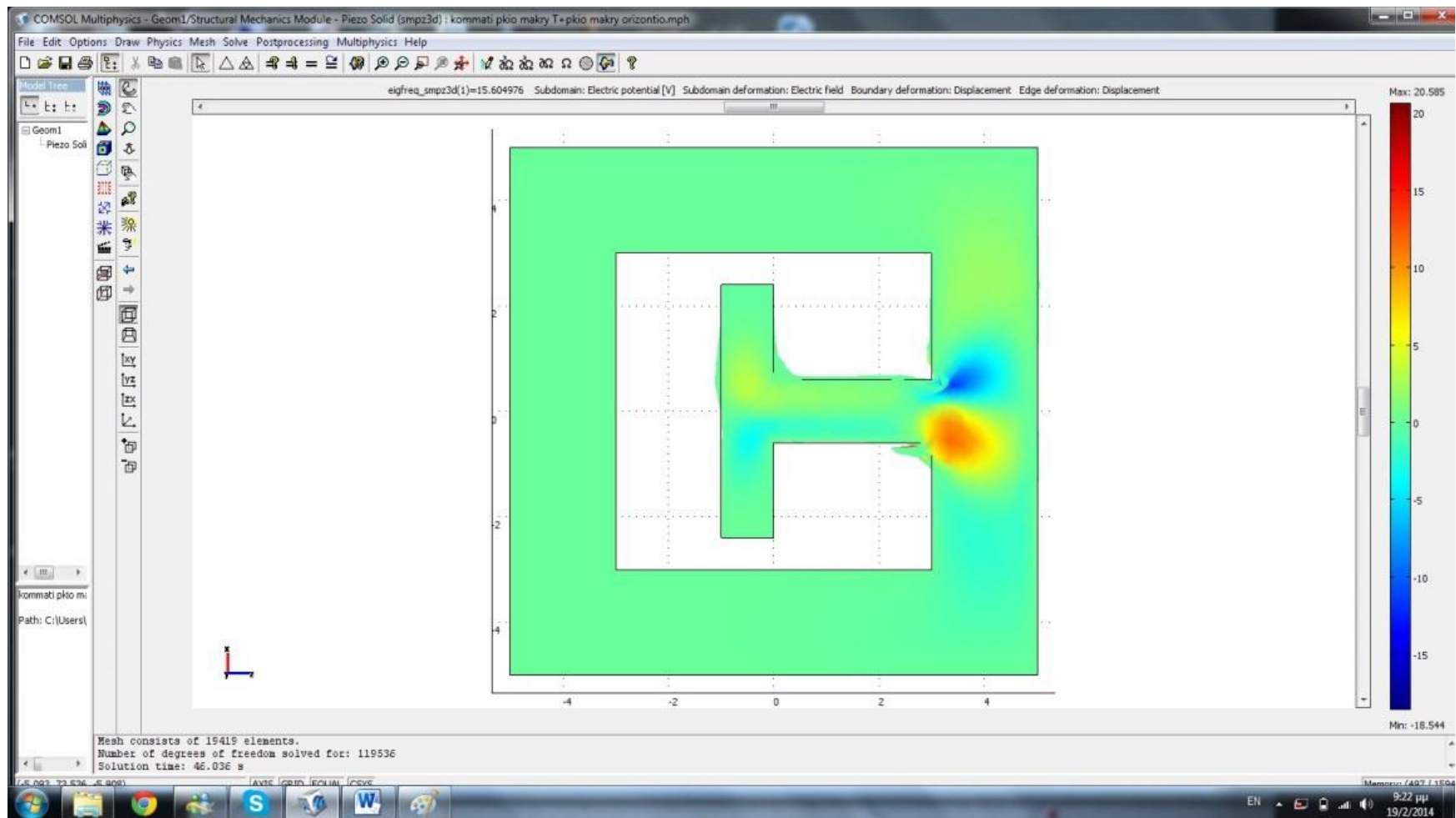
Εικόνα 59 Στατιστικά βελτιωμένης πλεγματοποίησης

Οι ρυθμίσεις του τύπου ανάλυσης και του αριθμού των ταλαντώσεων γύρω από το μηδέν είναι όμοιες με όλων των προηγούμενων μοντέλων και αφού πραγματοποιηθούν επιλύεται το πρόβλημα.

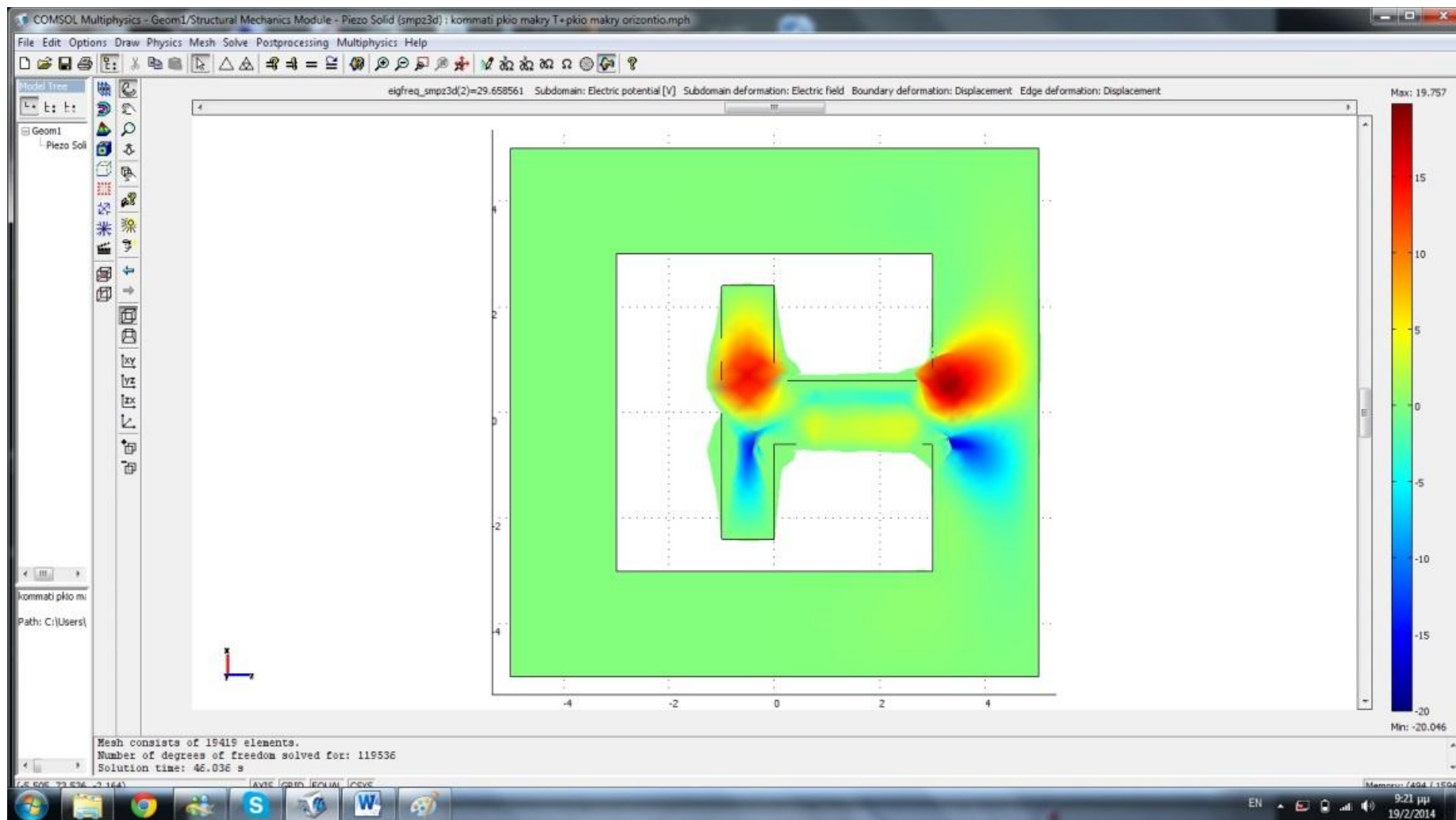
Ακολούθως παραθέτονται τα αποτελέσματα της επίλυσης.

Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Μέγιστη Μετατόπιση(m)	Μέγιστο Ηλ Δυναμικό(V)	Μέγιστη Πίεση (Pa)	Μέγιστη Παραμόρφωση
15.604976	1.868e-6	20.585	1.126e4	1.847e-7
29.658561	2.018e-6	19.757	1.506e4	2.669e-7
33.620586	7.914e-7	13.101	9704.974	1.587e-7
58.230418	5.462e-7	20.599	1.007e4	1.562e-7
82.614381	2.398e-7	19.419	5733.695	8.653e-8
109.889164	3.363e-7	12.798	7125.879	1.066e-7
115.514266	1.066e-6	22.526	2.094e4	2.693e-7
165.028889	1.093e-7	16.876	4409.694	5.83e-8
172.311859	1.188e-7	15.469	4510.688	5.236e-8
185.181777	1.729e-7	18.211	8528.296	1.235e-7

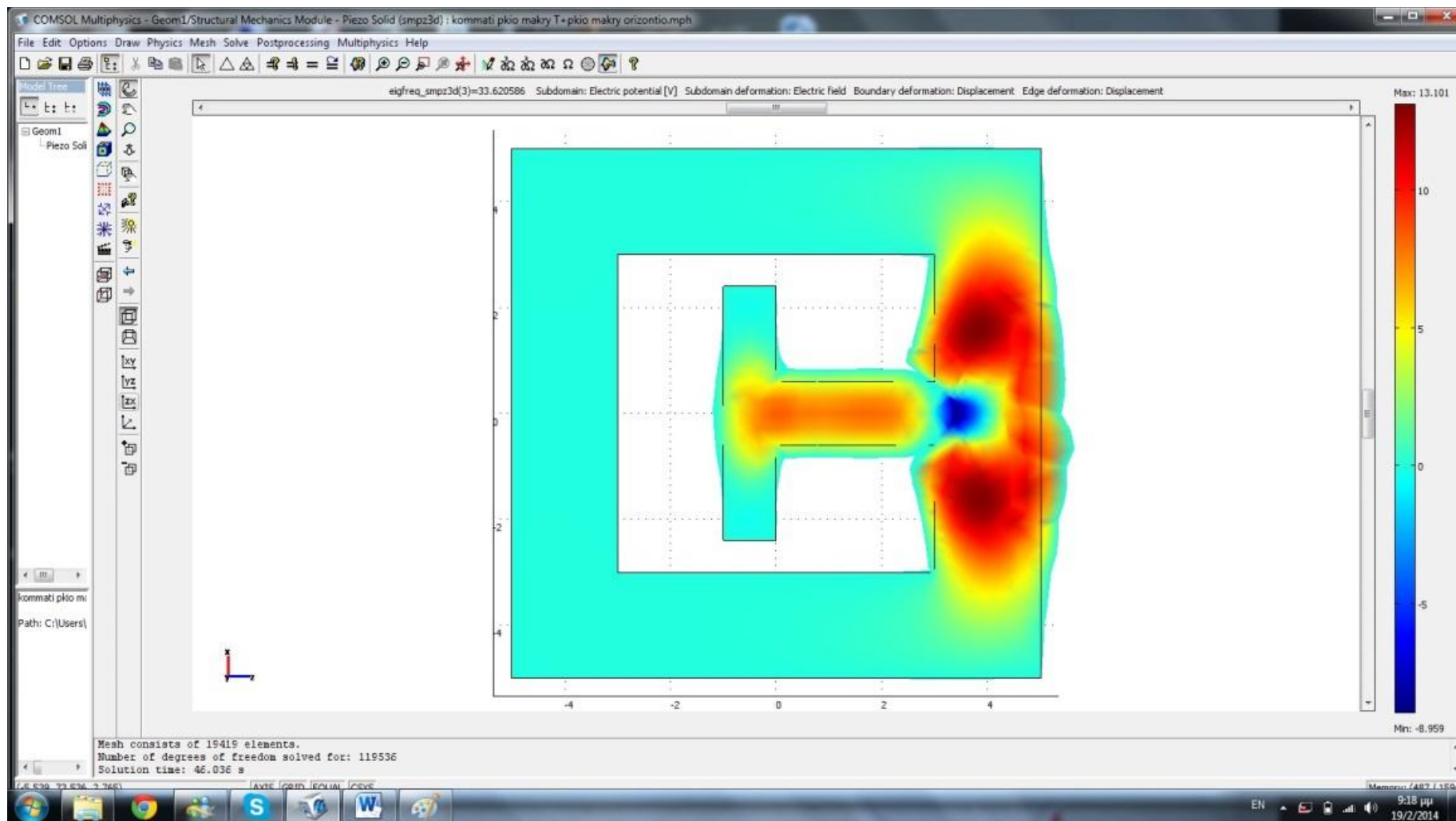
Πίνακας 4 Αποτελέσματα επίλυσης



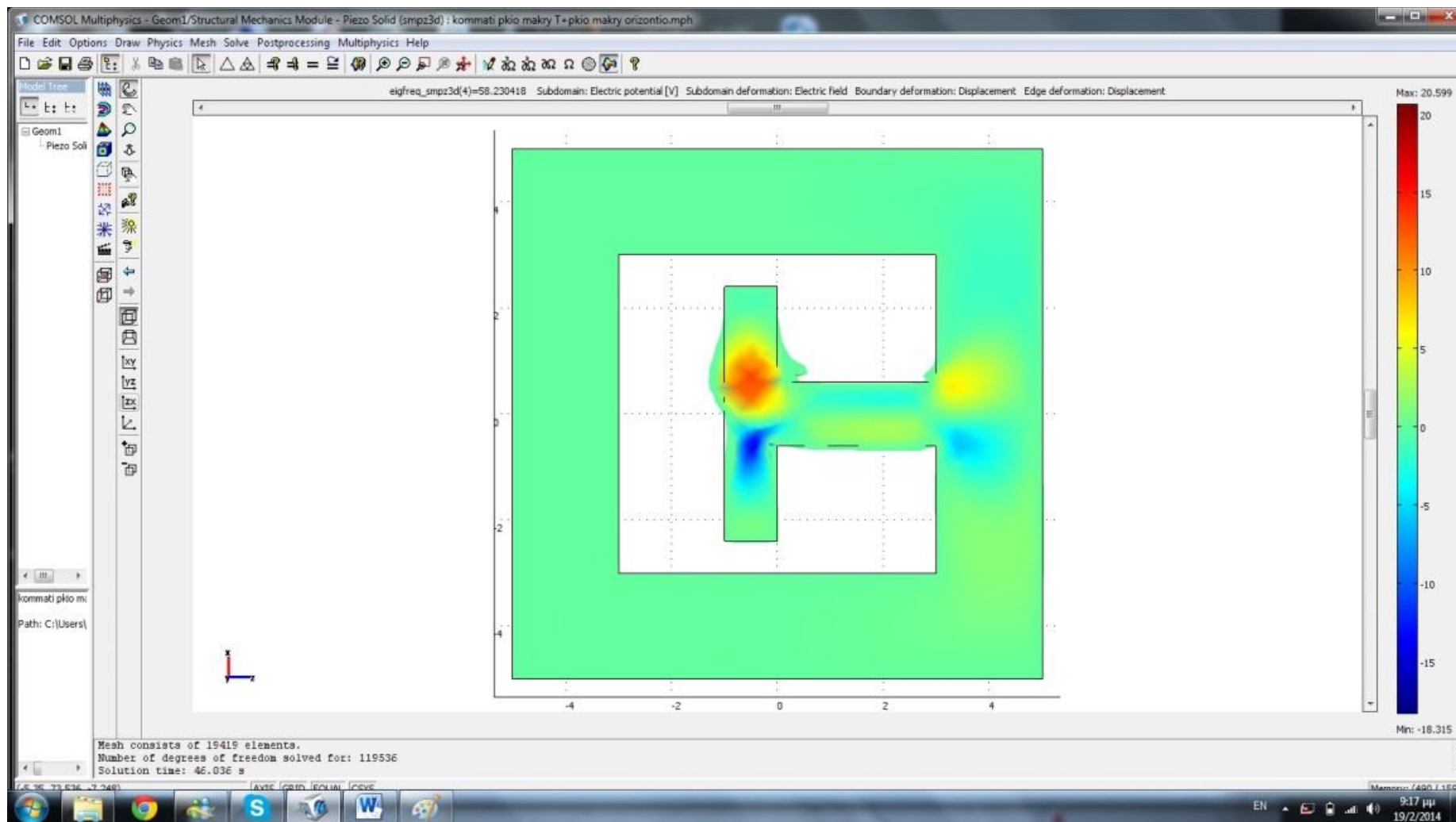
Εικόνα 60 Ιδιοσυχνότητα 15.604976



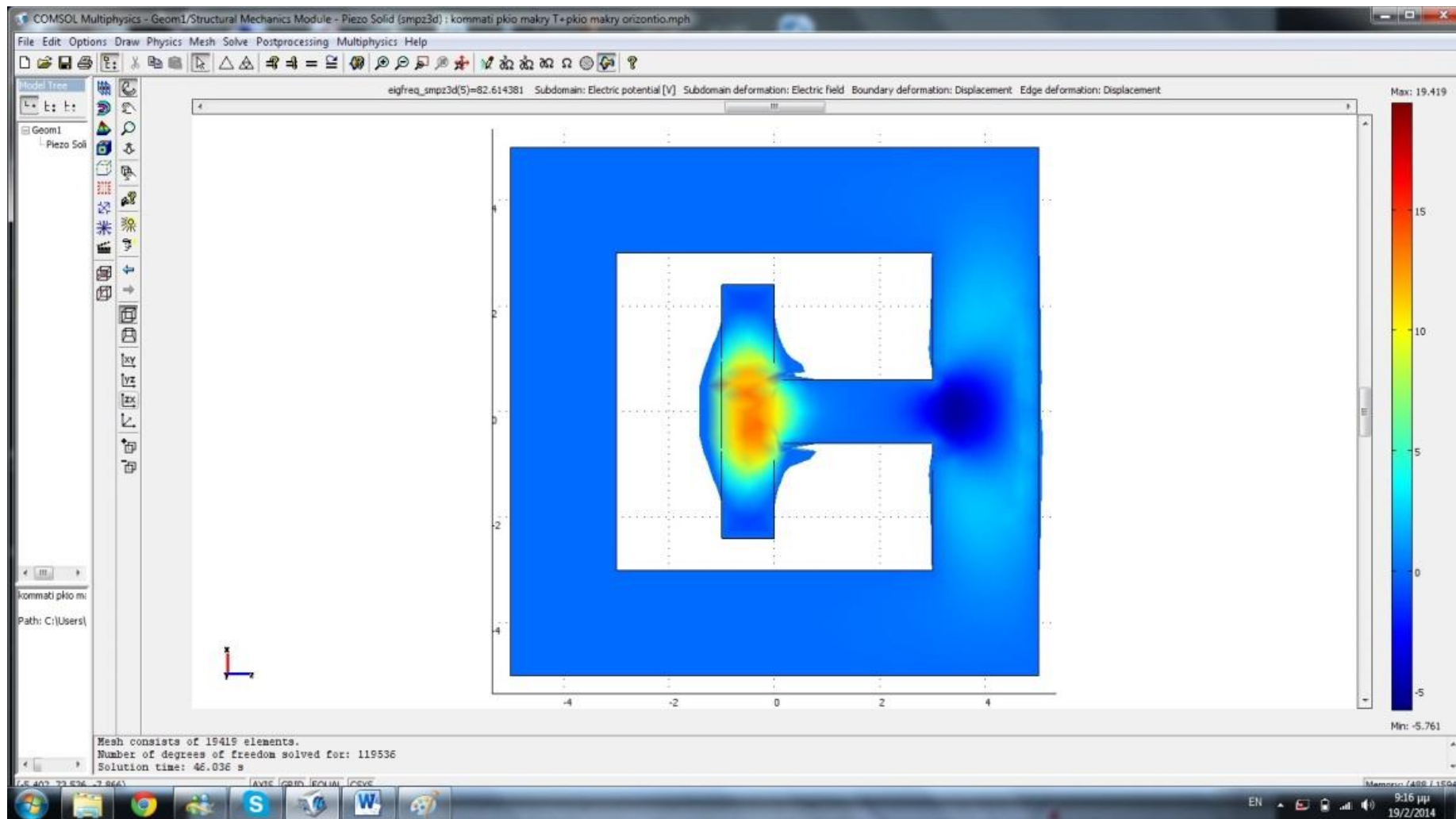
Εικόνα 61 Ιδιοσυχνότητα 29.658561



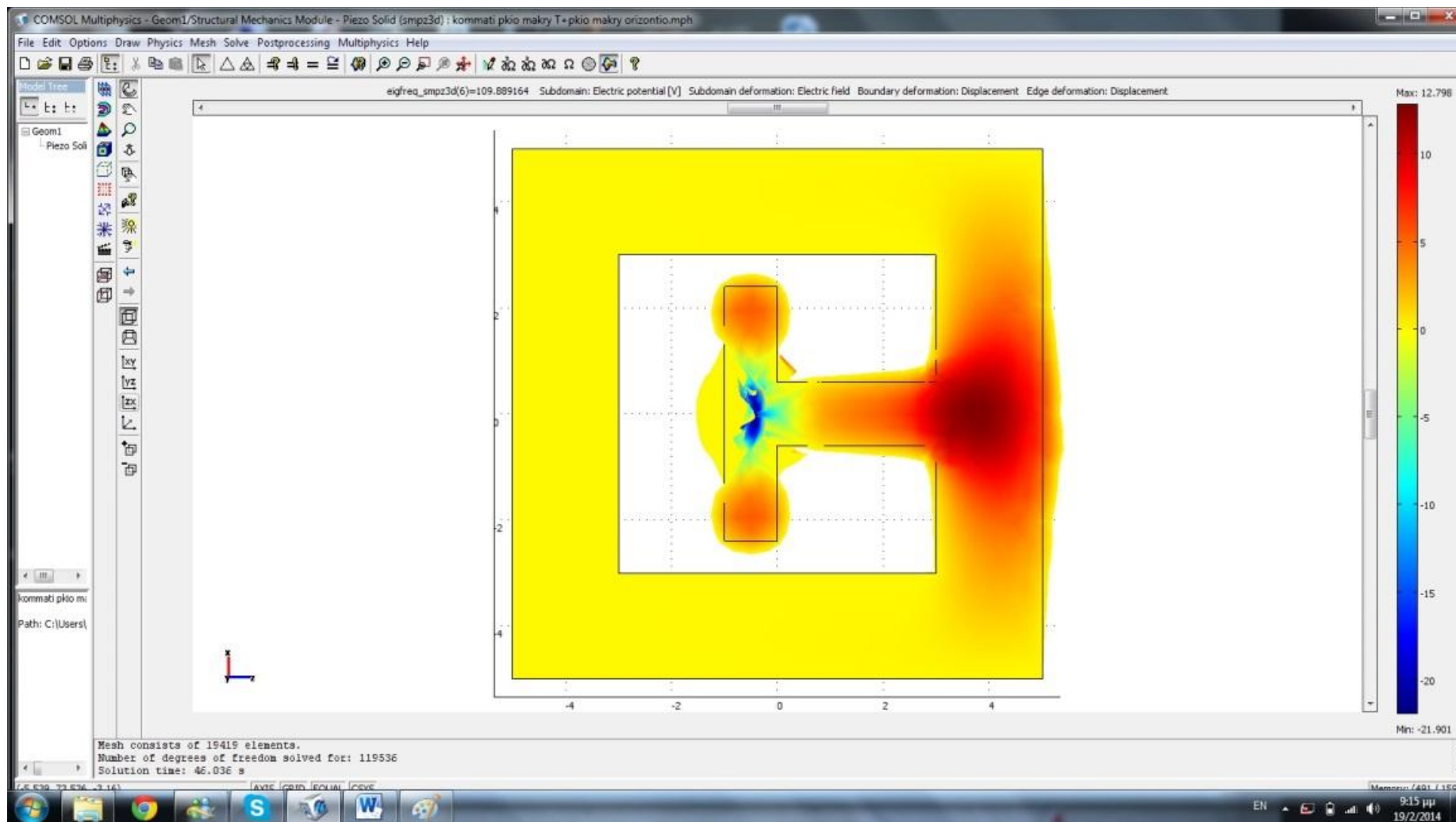
Εικόνα 62 Ιδιοσυχνότητα 33.620586



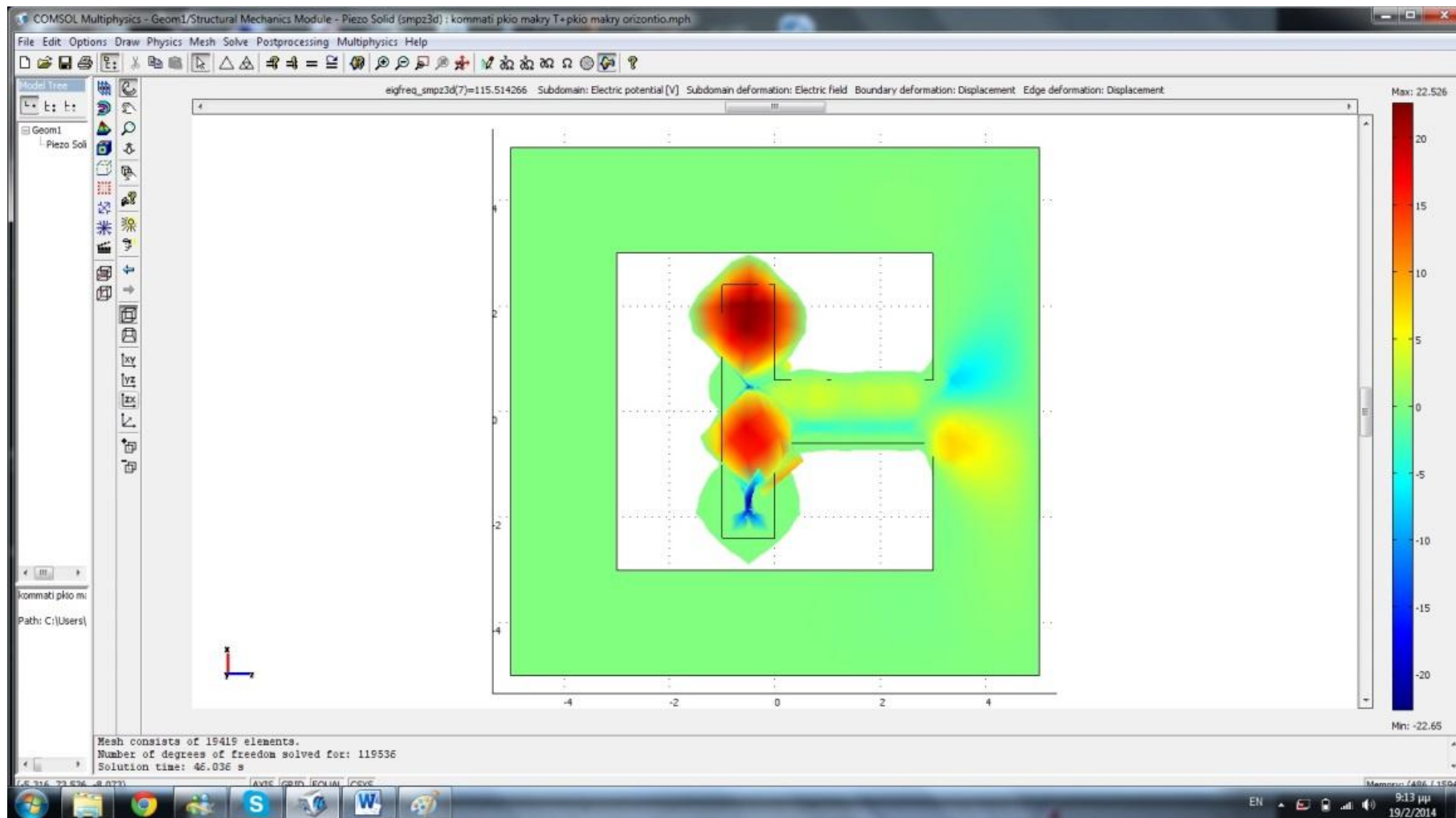
Εικόνα 63 Ιδιοσυχνότητα 58.230418



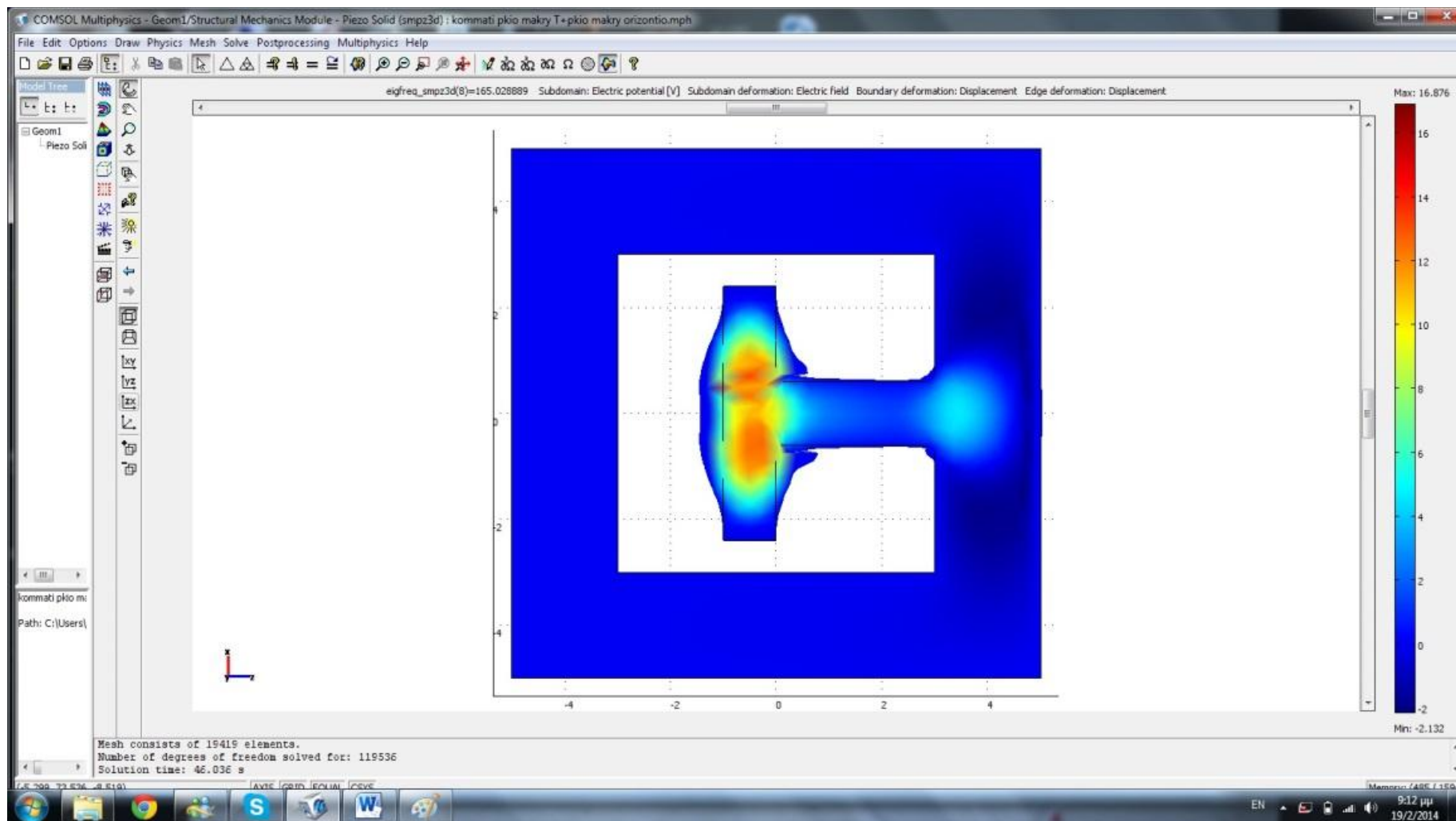
Εικόνα 64 Ιδιοσυχρότητα 82.614381



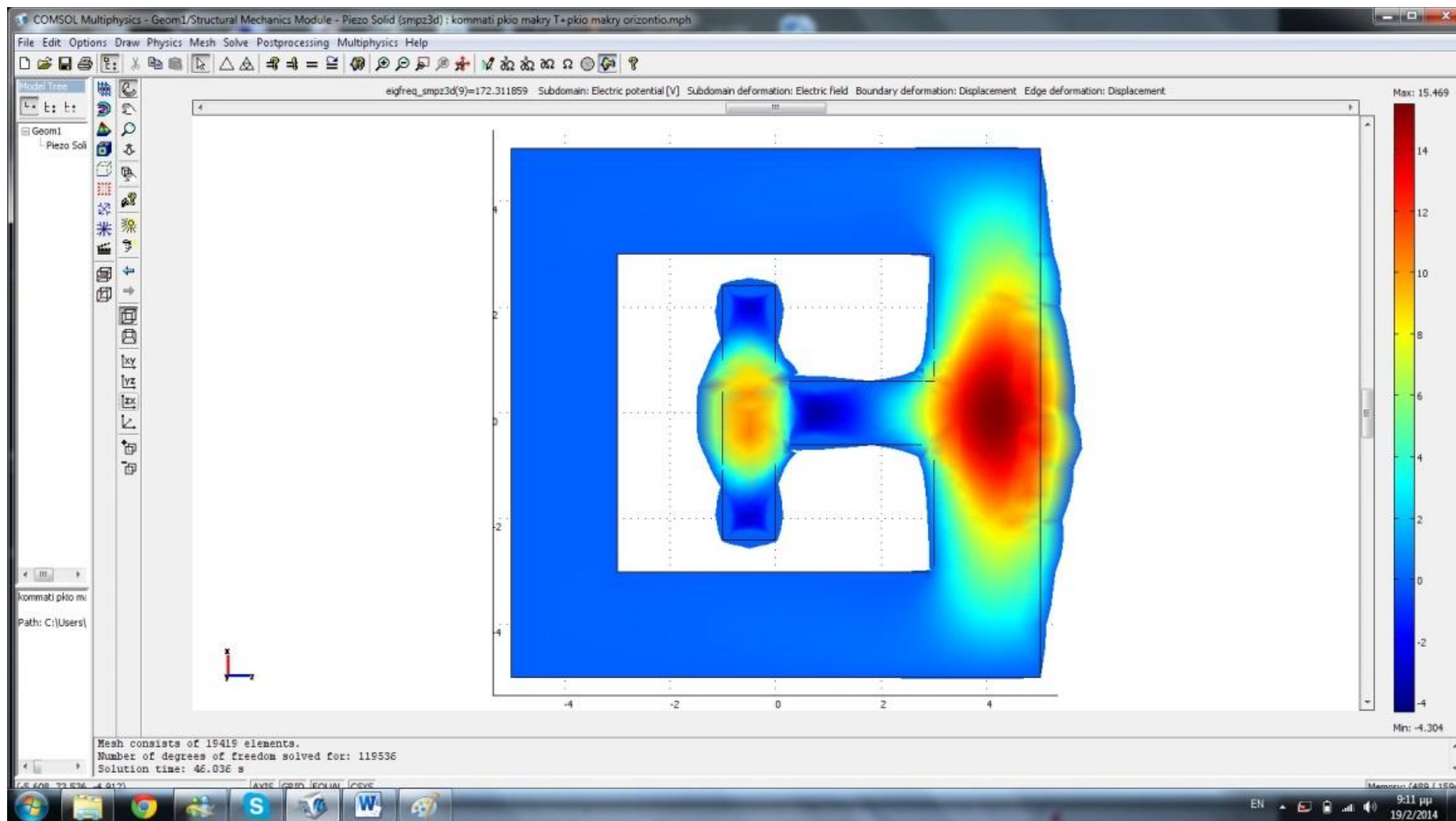
Εικόνα 65 Ιδιοσυχρότητα 109.889164



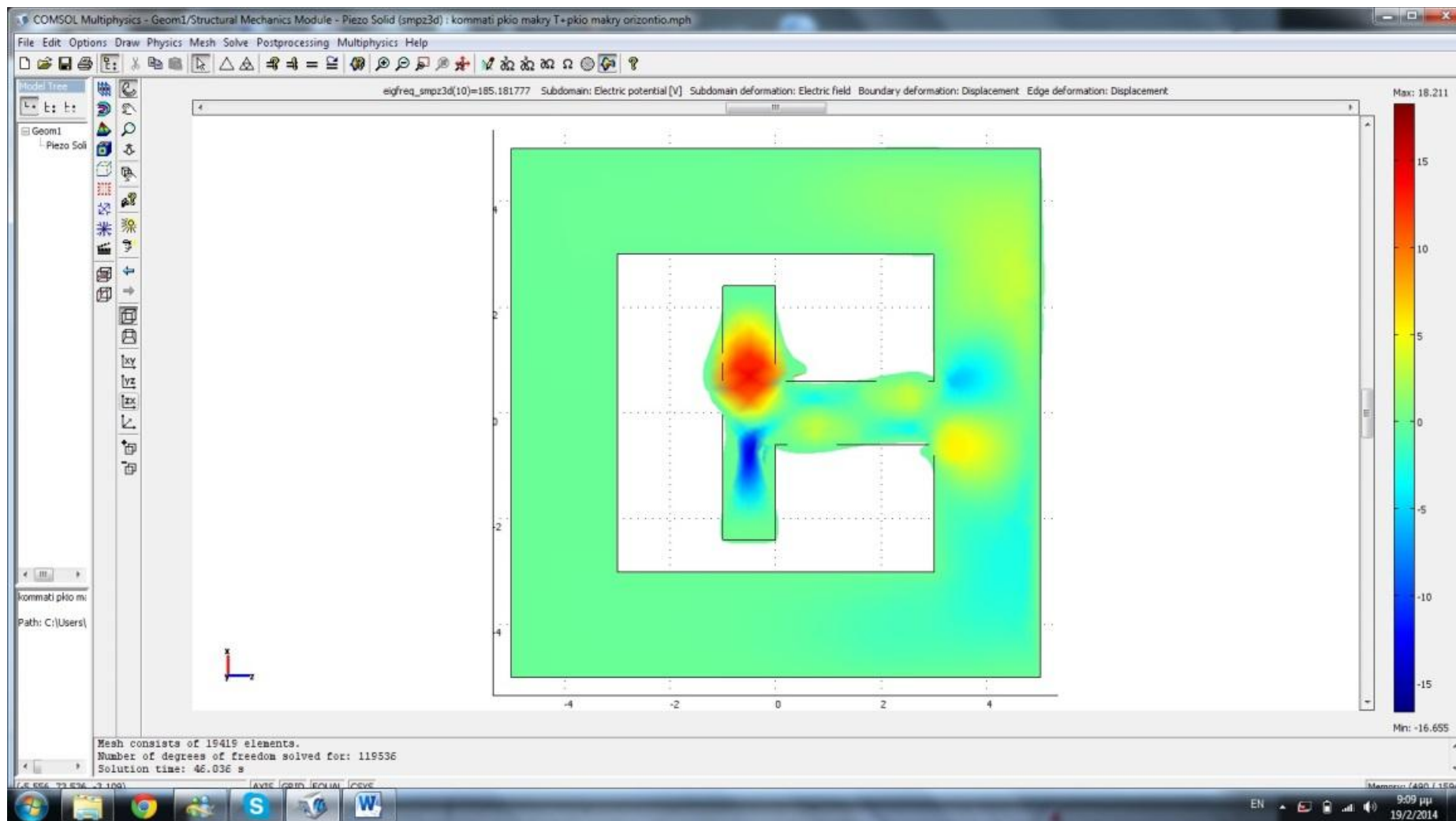
Εικόνα 66 Ιδιοσυχνότητα 115.514266



Εικόνα 67 Ιδιοσυχνότητα 165.028889



Εικόνα 68 Ιδιοσυχνότητα 172.311859



Εικόνα 69 Ιδιοσυχρότητα 185.181777

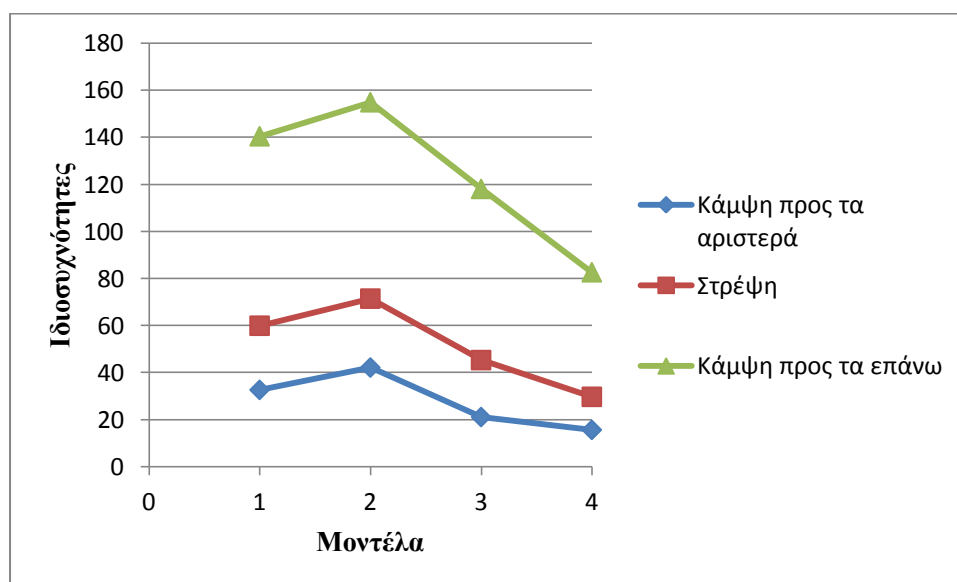
8. Συμπεράσματα

Κάνοντας μία πρώτη ποιοτική παρατήρηση των αποτελεσμάτων που δίνει η προσομοίωση των τεσσάρων μοντέλων διαπιστώνεται ότι τα τρία πρώτα μοντέλα παρουσιάζουν μία κοινή ακολουθία αποτελεσμάτων. Το τέταρτο μοντέλο, όμως, λόγω των μεγάλων διαφοροποιήσεων στις διαστάσεις του, δεν εμφανίζει παρεμφερή ακολουθία αποτελεσμάτων.

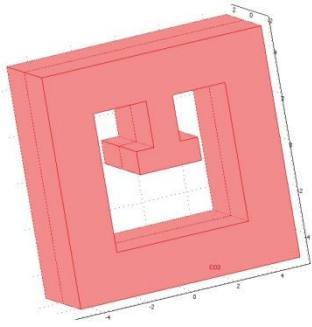
Όσον αφορά στο ηλεκτρικό δυναμικό, εντοπίζοντας τη μέγιστη τιμή του σε κάθε Ιδιοσυχνότητα, αυτή φαίνεται να βρίσκεται είτε στην κορυφή είτε στη βάση του μηχανισμού σχήματος T. Εξαίρεση σε αυτό αποτελεί μία Ιδιοσυχνότητα σε κάθε μοντέλο (πλην του τελευταίου) όπου η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού δυναμικού δεν εμφανίζεται στην κορυφή ή στη βάση του T, αλλά στην κορυφή του πλαισίου. Ακόμη, όταν δημιουργούνται πολλαπλά σημεία υψηλού ηλεκτρικού δυναμικού, η μέγιστη τιμή εξ αυτών έχει χαμηλότερη τιμή από όταν δημιουργείται μεμονωμένο τοπικό μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό. Ένα ακόμα κοινό χαρακτηριστικό των τριών πρώτων μοντέλων είναι ότι η ελάχιστη τιμή της ηλεκτρικής τάσης εμφανίζεται στη πέμπτη ταλάντωση, ενώ στο τελευταίο μοντέλο στην έκτη. Τελικώς από τη προσεκτική παρατήρηση των αποτελεσμάτων συμπεραίνεται ότι το πιο αποδοτικό μοντέλο είναι το τέταρτο καθώς εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές ηλεκτρικού δυναμικού, με μικρή διαφορά ακολουθεί το πρώτο μοντέλο ενώ το λιγότερο αποδοτικό από όλα είναι το τρίτο (συγκρίνοντας πάντα τις τιμές ηλεκτρικού δυναμικού που δίνει η επίλυση του ίδιου προβλήματος σε όλα τα μοντέλα). Ακολουθεί πίνακας συγκριτικών αποτελεσμάτων των ιδιοσυχνοτήτων του κάθε μοντέλου στις οποίες έχει προκληθεί παρόμοια παραμόρφωση καθώς και σχεδιάγραμμα που τις αναπαριστά.

Μοντέλα	1	2	3	4
Κάμψη προς τα αριστερά	32,607755	42,101808	21,065187	15,604976
Στρέψη	59,879549	71,398563	45,264556	29,658561
Κάμψη προς τα επάνω	140,419658	154,872525	118,042138	82,614381

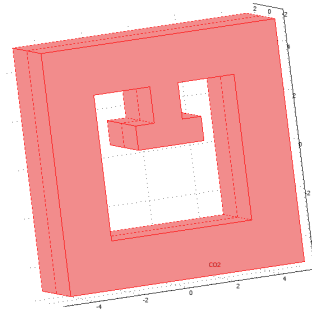
Πίνακας 5 Ιδιοσυχνότητες παραμόρφωσης



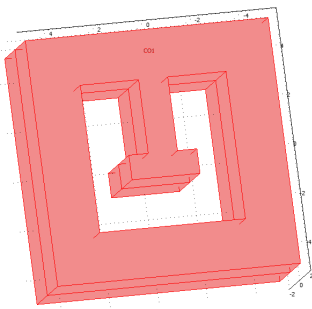
Γράφημα 1 Διάγραμμα παραμόρφωσης των μοντέλων



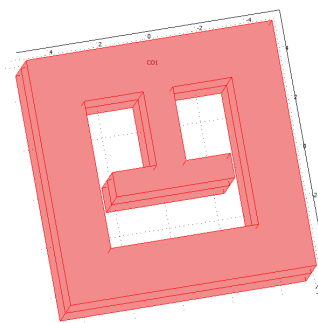
Εικόνα 70 Μοντέλο 1



Εικόνα 71 Μοντέλο 2



Εικόνα 72 Μοντέλο 3



Εικόνα 73 Μοντέλο 4

Παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι το τέταρτο μοντέλο , που είναι και το πιο αποδοτικό, παρουσιάζει τη μικρότερη παραμόρφωση, γεγονός που το καθιστά το πιο εύχρηστο καθώς αυξάνει τις δυνατότητες εκμετάλλευσης του μικρομηχανισμού σε συσκευές μικρού μεγέθους που επιβάλλουν περιορισμένο χώρο διάταξης του μηχανισμού τους.

9. Βιβλιογραφία

file:///C:/Users/user/Downloads/Grysmopolakh_Zagoyrakh.pdf

http://www.renewablesb2b.com/ahk_greece/el/portal/index/news/show/427b7dfbbb88d504

<http://www.comsol.com/comsol-multiphysics>

<http://el.wikipedia.org>

<https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/pzt.html>

<http://www.reade.com/products/41-titanate-compounds-powder/284-lead-zirconate-titanate-powder-pzt-lead-zirconate-titanate-lead-zirconium-titanate-lead-titanate-zirconate-plumbum-zirconate-titanate-cas-12626-81-2>

http://www.efunda.com/materials/piezo/material_data/matdata_output.cfm?Material_ID=PZT-2

<https://www.google.gr>

“Finite element analysis of composite piezoelectric beam using comsol” .A thesis submitted to the faculty of Drexel university by Metwally Emam in partial fulfillment of the requirement for the degree of master of science in mechanical engineering. June 2008.