

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



ΣΠΥΡΟΥ Μ. ΣΑΜΑΡΑ

Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΧΛΙΩΤΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ
ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ**

ΧΑΝΙΑ , 2009

Η εργασία ολοκληρώθηκε το Σεπτέμβριο 2009 στο Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής και Βελτιστοποίησης του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του καθηγητή Γ.Ε. Σταυρουλάκη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	σελ.5
----------------------	--------------

Κεφάλαιο 1: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ Wildfire Pro-Engineer 2.....	σελ.7
---	--------------

1.1 Μηχανολογικά σχέδια.....	σελ.7
1.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση.....	σελ.11

Κεφάλαιο 2: ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ANSYS (Release 11.0).....	σελ.14
---	---------------

2.1 Γενικά.....	σελ.15
2.2 Σκοπός του πειράματος.....	σελ.15
2.3 Πεπερασμένα στοιχεία SOLID187.....	σελ.15
2.4 Παραδοχές επίλυσης.....	σελ.16
2.5 Παράμετροι προγράμματος ANSYS πριν την επίλυση.....	σελ.16
2.5.1 Ελαστοπλαστικό υλικό με μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα).....	σελ.16
2.5.2 Ελαστοπλαστικό υλικό με μικρές μετακινήσεις (όχι γεωμετρική μη-γραμμικότητα).....	σελ.17
2.5.3 Ελαστικό υλικό χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις.....	σελ.17
2.6 Απεικόνιση κομματιών μετά τη διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (meshing).....	σελ.18
2.7 Ορισμός σημείων μέτρησης και φόρτισης.....	σελ.21
2.8 Ορισμός παραμέτρων για την επίλυση στο ANSYS και επίλυση.....	σελ.24
2.8.1 Ελαστοπλαστικό υλικό με μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα).....	σελ.25
2.5.2 Ελαστοπλαστικό υλικό με μικρές μετακινήσεις (όχι γεωμετρική μη-γραμμικότητα).....	σελ.25
2.5.3 Ελαστικό υλικό χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις.....	σελ.25

Κεφάλαιο 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS.....	σελ.27
--	---------------

3.1 Πίνακες Αποτελεσμάτων.....	σελ.27
3.1.1 Ελαστοπλαστικό υλικό με μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα).....	σελ.27
3.1.2 Ελαστοπλαστικό υλικό με μικρές μετακινήσεις (όχι γεωμετρική μη-γραμμικότητα).....	σελ.28
3.1.3 Ελαστικό υλικό χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις.....	σελ.29
3.2 Απεικόνιση παραμορφωμένης διάταξης.....	σελ.30
3.2.1 Ελαστοπλαστικό υλικό με μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα).....	σελ.30

3.2.2 Ελαστοπλαστικό υλικό με μικρές μετακινήσεις (όχι γεωμετρική μη-γραμμικότητα).....σελ.52	σελ.52
3.2.3 Ελαστικό υλικό χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις.....σελ.63	σελ.63

Κεφάλαιο 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΟΥ J.U.S.T.σελ.71

4.1 Πίνακας Αποτελεσμάτων.....σελ.71	σελ.71
4.2 Το πείραμα του πανεπιστημίου του J.U.S.T. σε εικόνες.....σελ.71	σελ.71

Κεφάλαιο 5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....σελ.76

5.1 Διαγράμματα Μετατόπισης – Φόρτισης.....σελ.76	σελ.76
5.1.1 Ελαστοπλαστικό υλικό με μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα)	
5.2.2 Ελαστοπλαστικό υλικό με μικρές μετακινήσεις (όχι γεωμετρική μη-γραμμικότητα).....σελ.78	σελ.78
5.2.3 Ελαστικό υλικό χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις.....σελ.79	σελ.79
5.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....σελ.81	σελ.81
5.3 Επεξήγηση Αποτελεσμάτων.....σελ.84	σελ.84
5.4 Συμπεράσματα Ανάλυσης.....σελ.84	σελ.84

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ.86

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ιστορικά οι μεταλλικές κατασκευές από χάλυβα είναι γνωστές από τον 18^ο αιώνα. Όλα τα σύγχρονα κτίρια ανά τον κόσμο εμπεριέχουν μεταλλικούς φορείς από χάλυβα. Όμως το συγκεκριμένο είδος κατασκευής αναπτύχθηκε στη χώρα μας την τελευταία δεκαετία κυρίως λόγω έλλειψης της κατάλληλης τεχνογνωσίας από τους μηχανικούς, της απαιτούμενης εξειδίκευσης των τεχνιτών και συνεπώς το μεγαλύτερο κόστος που έχουν.

Πέρα από την αισθητική τέτοιων κατασκευών στο πρακτικό μέρος μια χαλύβδινη κατασκευή προσφέρει αντοχές πολύ μεγαλύτερες από αυτές του μπετόν. Το μέταλλο δίνει τη δυνατότητα στα κτίρια να έχουν πολύ μεγαλύτερη ελαστικότητα κάτι που θεωρείται πολύ μεγάλο πλεονέκτημα καθώς ο κίνδυνος κατάρρευσης ενός φορέα κτιρίου μετά από σεισμό περιορίζεται σε σημαντικό βαθμό. Για τη χώρα μας λοιπόν οι υψηλές κτιριακές αντοχές είναι μείζονος σημασίας εάν αναλογιστεί κανείς ότι είμαστε μια περιοχή με πολύ έντονη σεισμική δραστηριότητα. Επιπλέον ο χρόνος κατασκευής και ανέγερσης μιας μεταλλικής κατασκευής είναι συνήθως πολύ λιγότερος από εκείνο που απαιτείται για μια κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα, γεγονός που επιτρέπει τον καλύτερο σχεδιασμό και τη γρηγορότερη υλοποίηση επενδύσεων.

Όσον αφορά την παρούσα εργασία, σκοπός αυτής είναι η παρουσίαση μιας ελαστοπλαστικής ανάλυσης μεταλλικών φορέων με κοχλιώσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτής σε σχέση με αντίστοιχο πραγματικό πείραμα που έγινε στο Πανεπιστήμιο της Ιορδανίας (J.U.S.T.) από το τμήμα των Πολιτικών Μηχανικών υπό την καθοδήγηση του καθηγητή M. K. Abdalla. Οι λόγοι που οδήγησαν σε μια τέτοια ανάλυση είναι διότι σε μια μεταλλική κατασκευή οι συνδέσεις έχουν τη δυνατότητα μη γραμμικής απόκρισης, η οποία αφενός δεν έχει διερευνηθεί πλήρως και αφετέρου επηρεάζει την όλη συμπεριφορά της κατασκευής και ιδιαίτερα σε ακραίες συνθήκες (διαρροή ή/και κατάρρευση).

Στην εργασία αυτή το πρόβλημα επιλύθηκε με τρεις διαφορετικές παραδοχές για το υλικό μας. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη εκδοχή θεωρεί το υλικό ελαστοπλαστικό με μικρές μετακινήσεις (όχι γεωμετρική μη-γραμμικότητα), η δεύτερη εκδοχή θεωρεί πάλι το υλικό ελαστοπλαστικό αλλά με μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα) ενώ η τρίτη εκδοχή λαμβάνει υπόψη ότι το υλικό είναι μόνο ελαστικό χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις. Σε όλες τις παραπάνω εκδοχές ασκήθηκε φορτίο με διαδοχική αύξηση έως ένα επιλεγμένο ανώτατο επίπεδο και τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης παρουσιάζονται σε μορφή γραφημάτων μετά το πέρας και των τριών εκδοχών. Χρήσιμα συμπεράσματα εξήλθαν από αυτή την ανάλυση, τα οποία και αναλύονται στο τέλος της εργασίας αυτής.

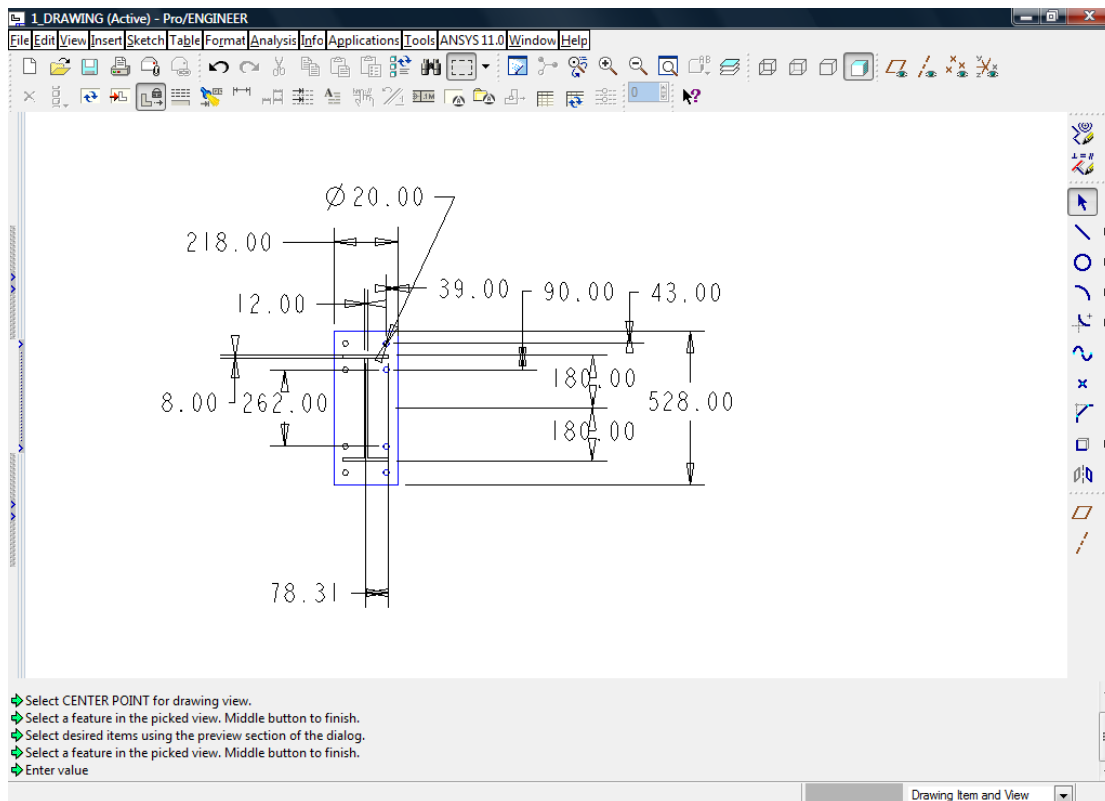
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ Wildfire Pro-Engineer 2.0

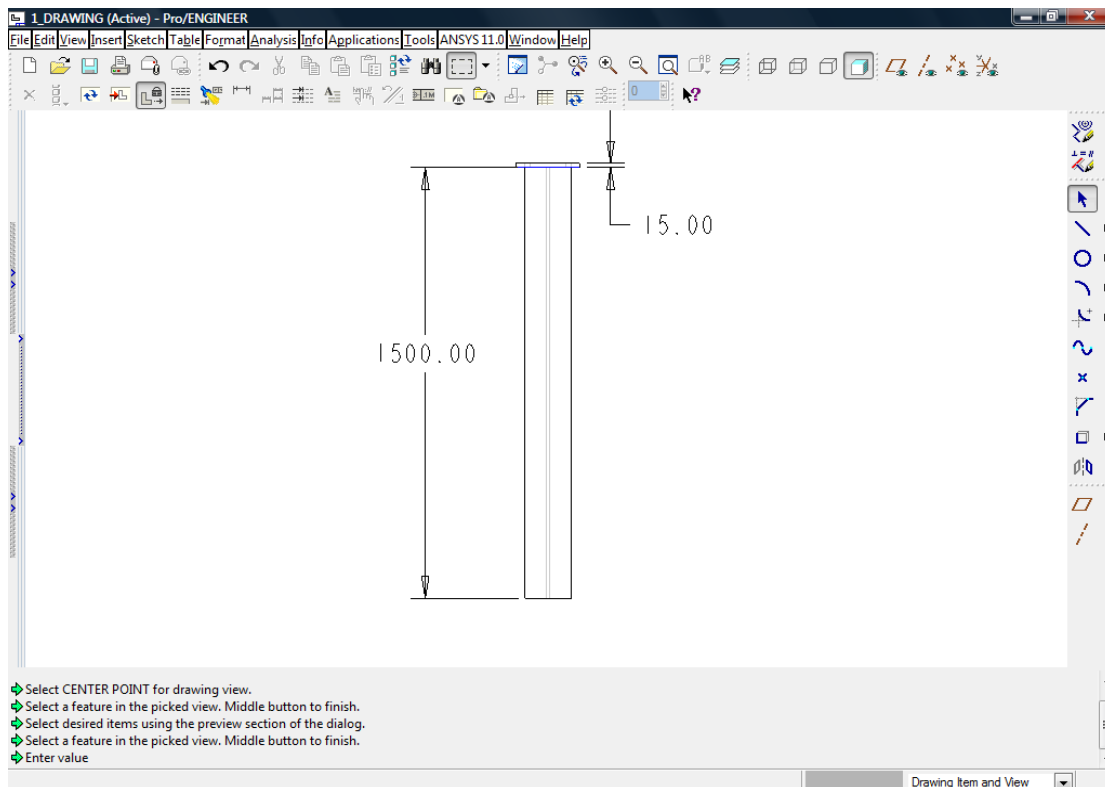
Για την γεωμετρική προσομοίωση του πειράματός μας δημιουργήσαμε μέσω του προγράμματος Pro-Engineer 2.0 τη διάταξη που μας ενδιαφέρει με την παρακάτω διαστασιολόγηση όπως δείχνουν οι παρακάτω εικόνες.

§ 1.1 Μηχανολογικά Σχέδια

Για την οριζόντια δοκό έχουμε τις επόμενες δύο εικόνες:

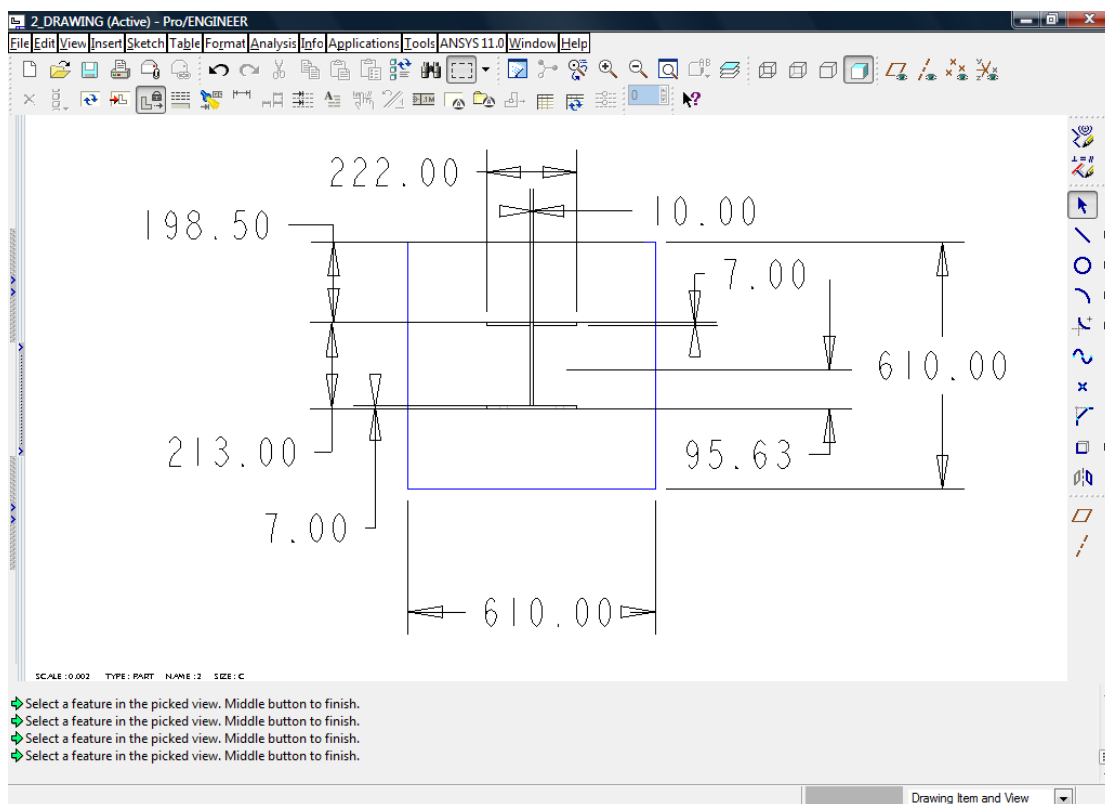


Εικόνα 1: Όψη οριζόντιας δοκού

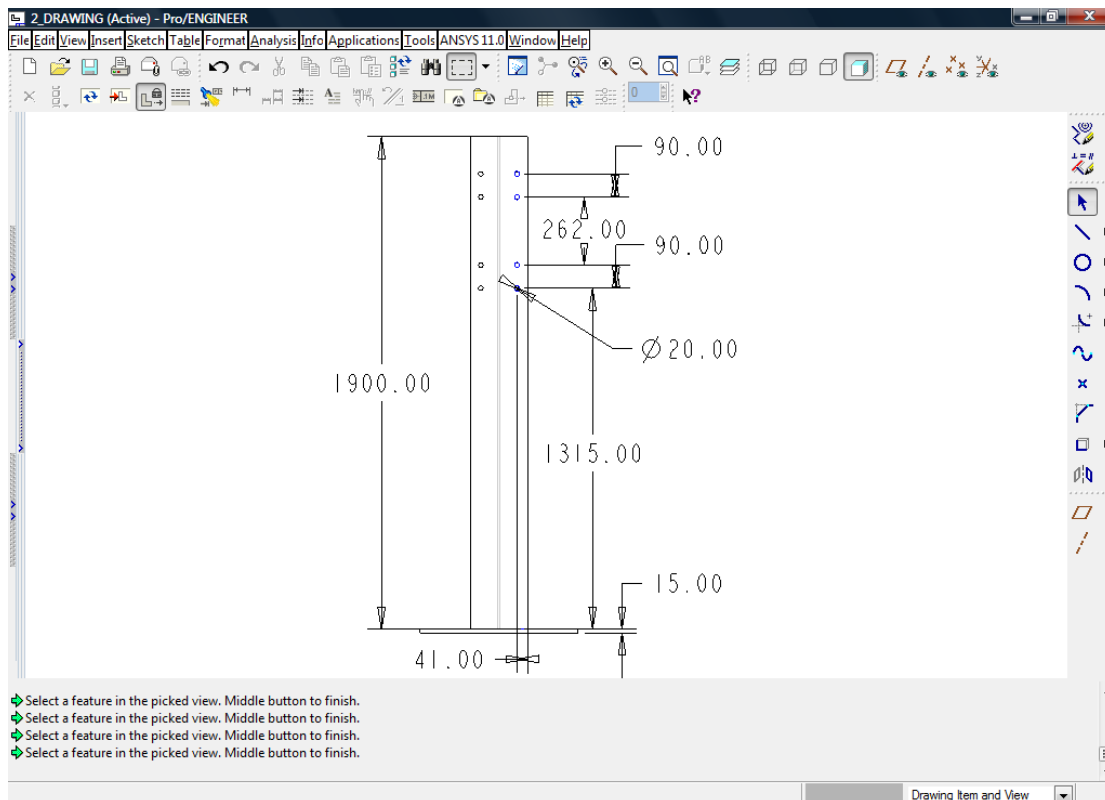


Εικόνα 2: Όψη οριζόντιας δοκού

Για την κάθετη δοκό έχουμε τις επόμενες δύο εικόνες:

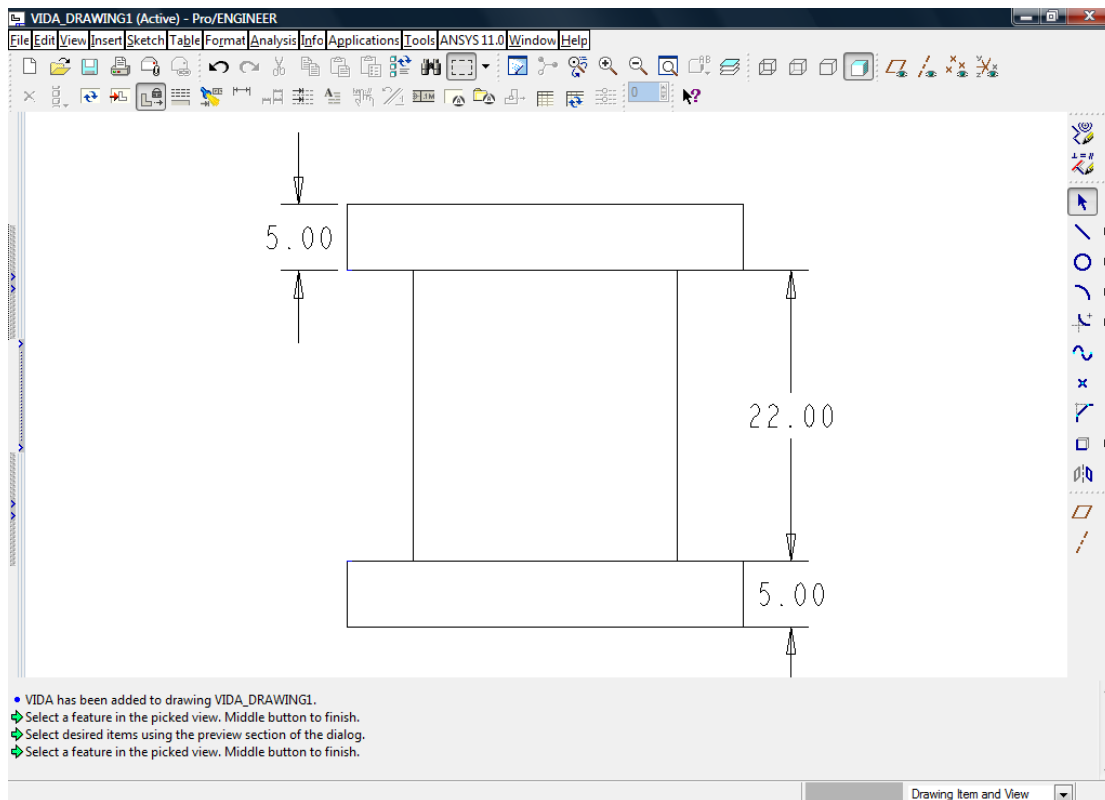


Εικόνα 3: Όψη κάθετης δοκού

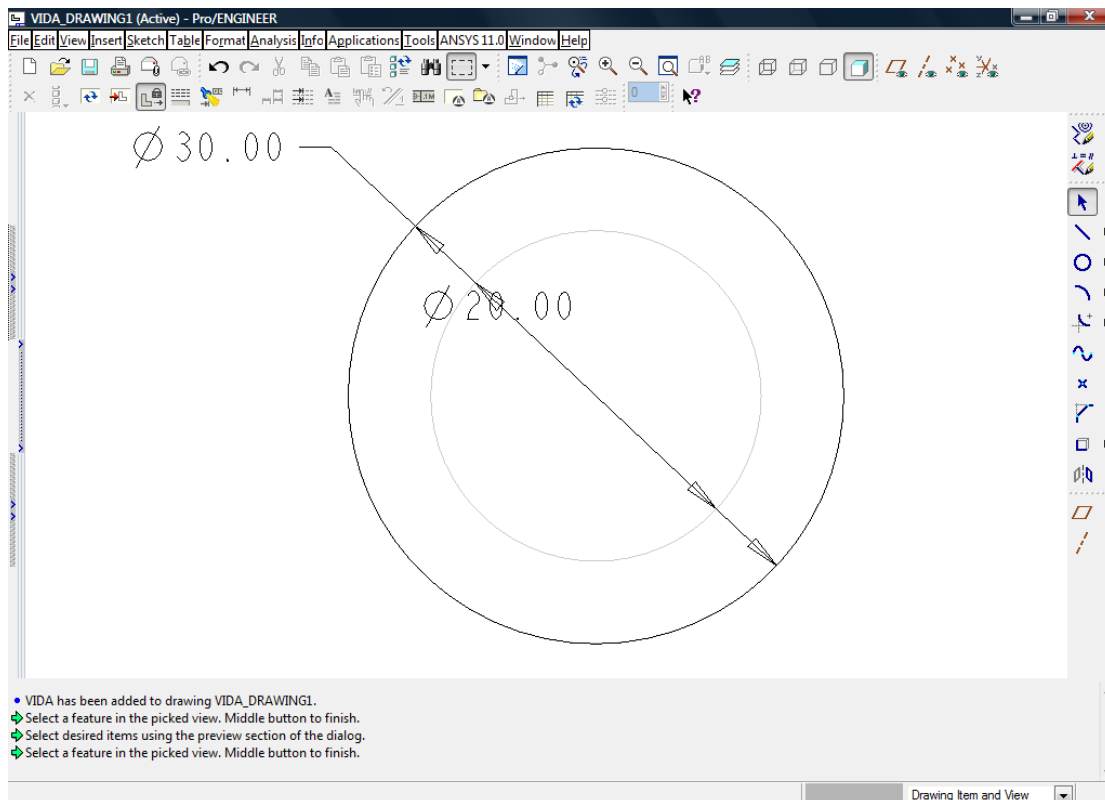


Εικόνα 4: Όψη κάθετης δοκού

Για τους κοχλίες έχουμε τις επόμενες δύο εικόνες:

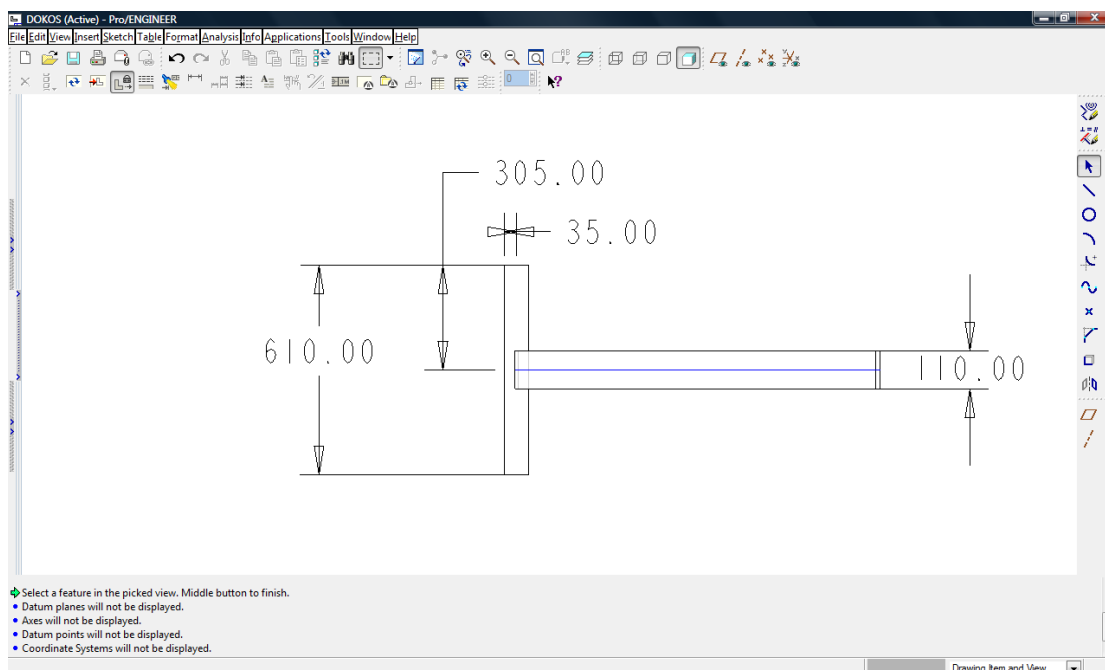


Εικόνα 5: Όψη κοχλία

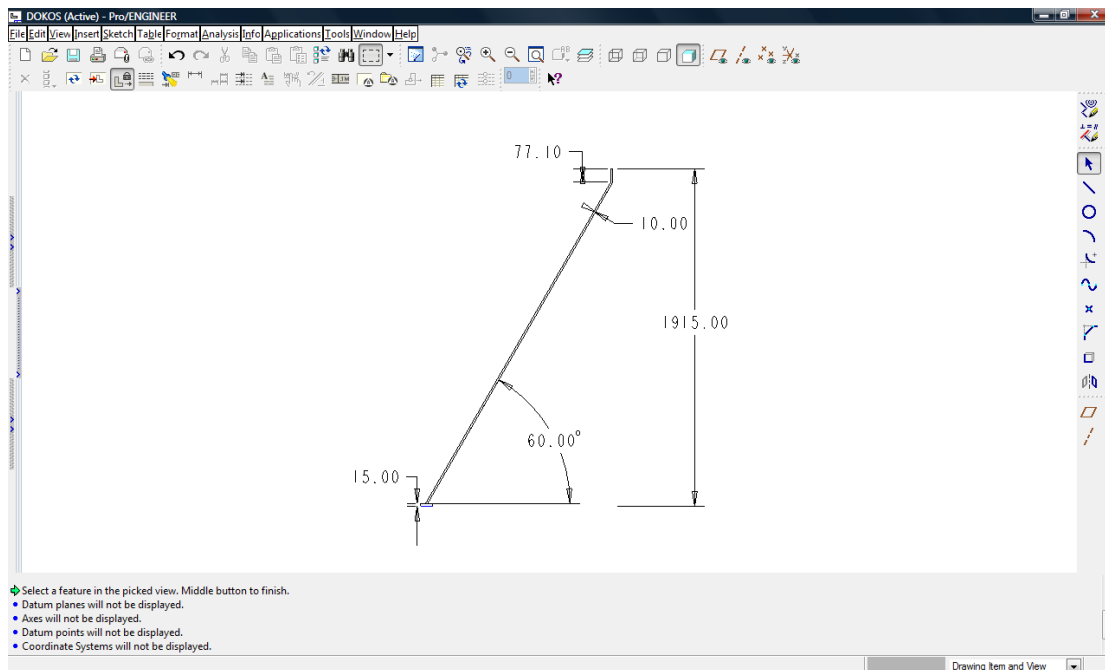


Εικόνα 6: Όψη κοχλία

Για την δοκό συγκράτησης έχουμε τις επόμενες δύο εικόνες:



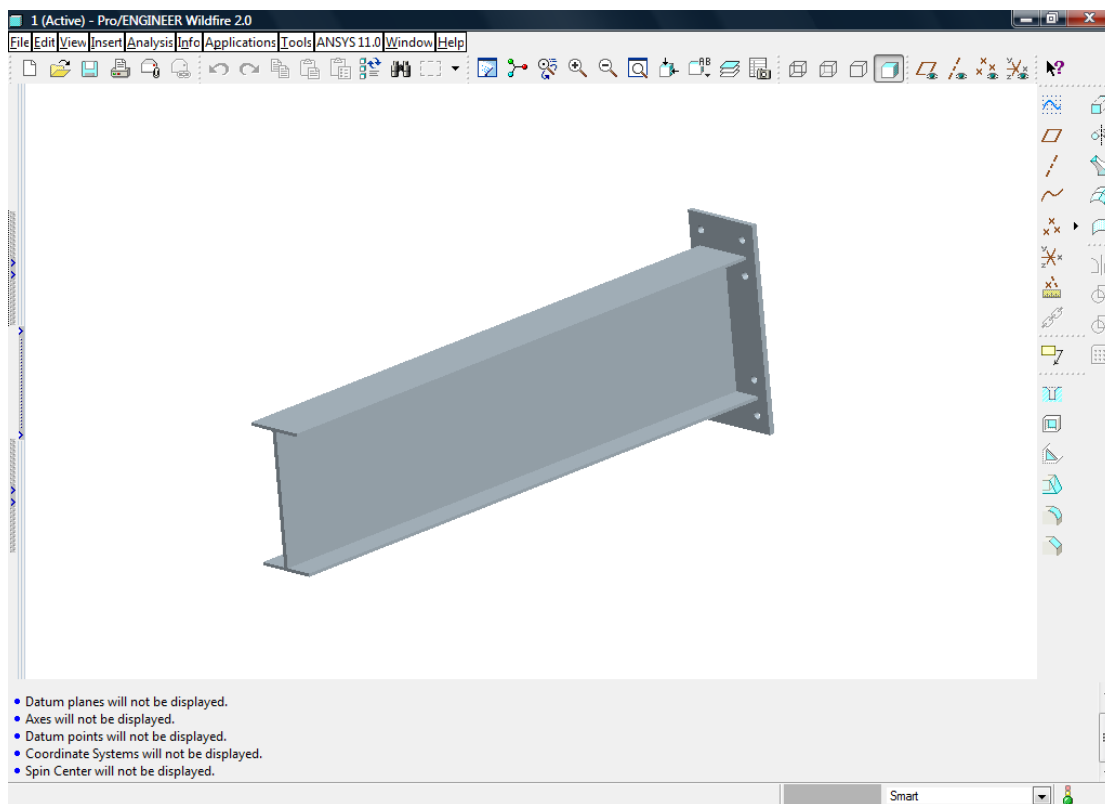
Εικόνα 7: Όψη δοκού συγκράτησης



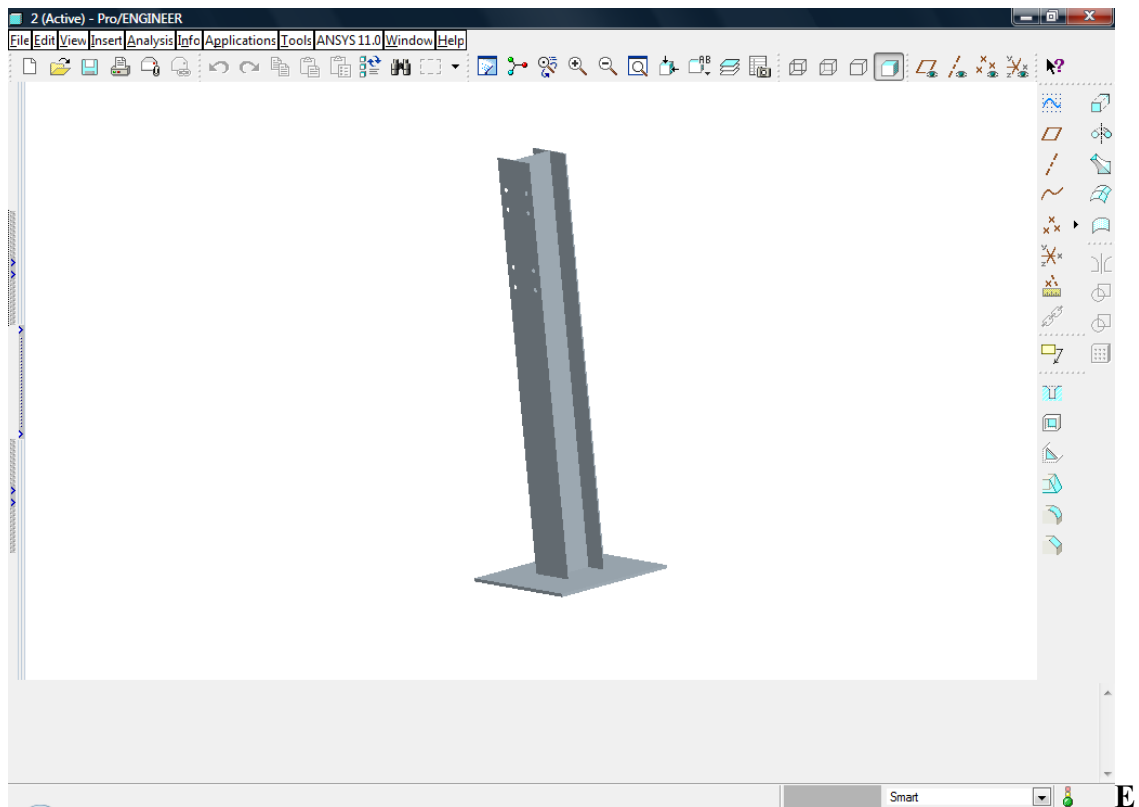
Εικόνα 8: Όψη δοκού συγκράτησης

§ 1.2 Τρισδιάστατη Απεικόνιση

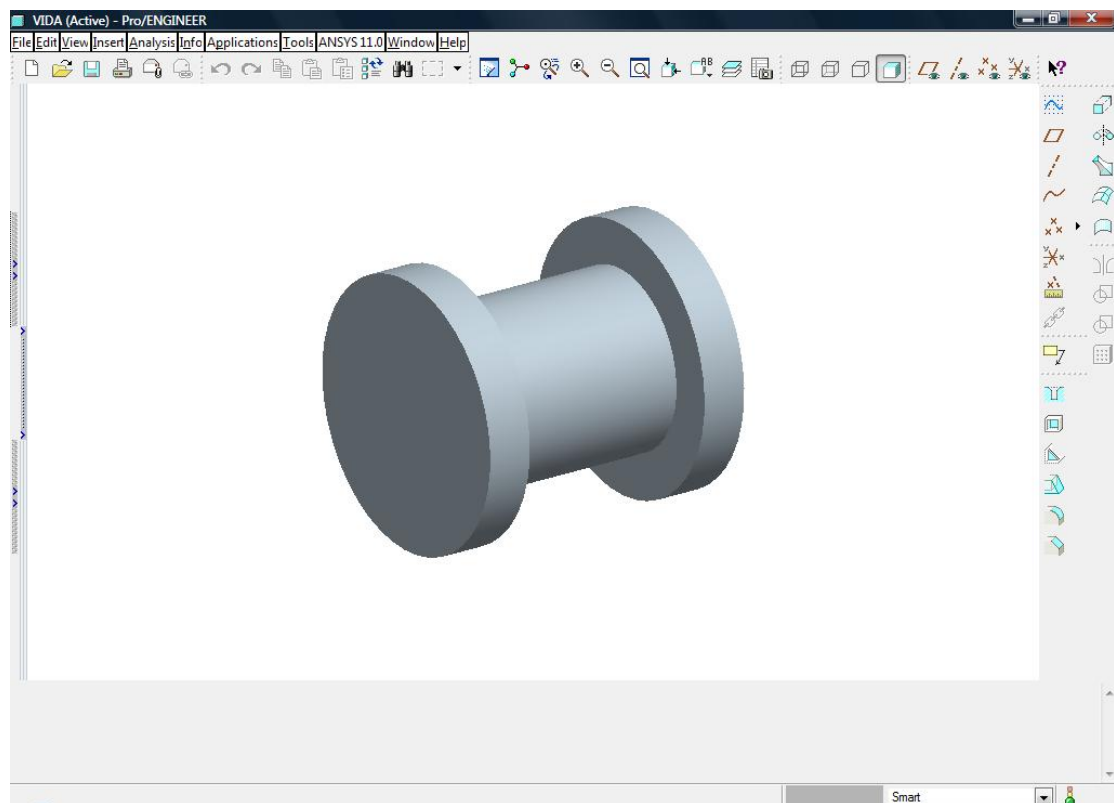
Έτσι η διάταξη πήρε την τελική μορφή όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



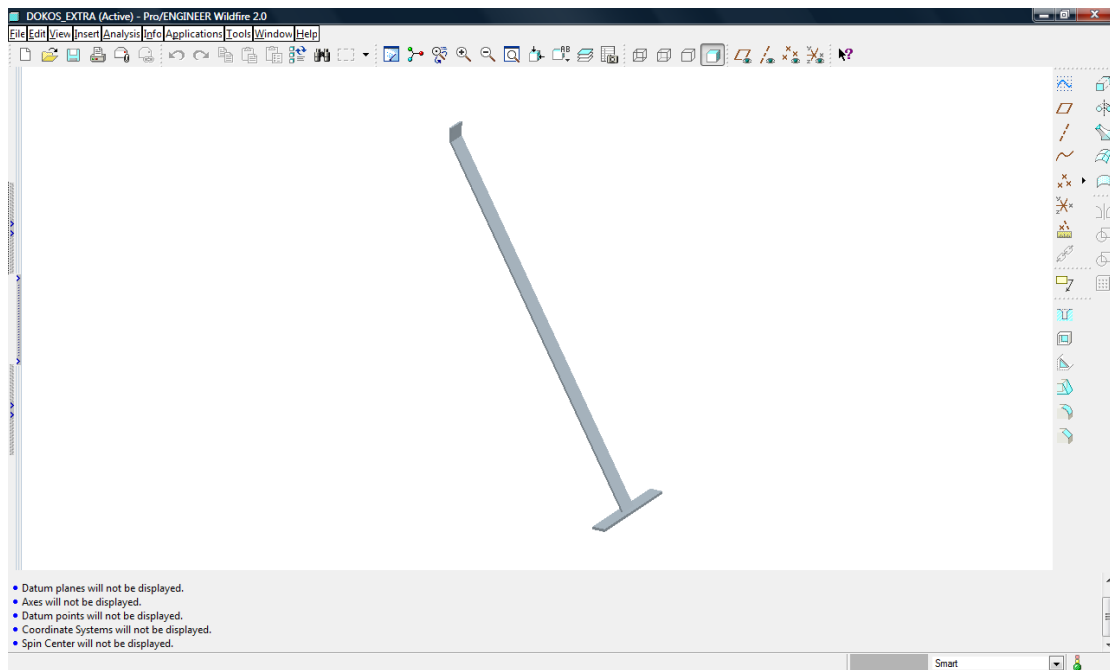
Εικόνα 9: Οριζόντια δοκός διάταξης



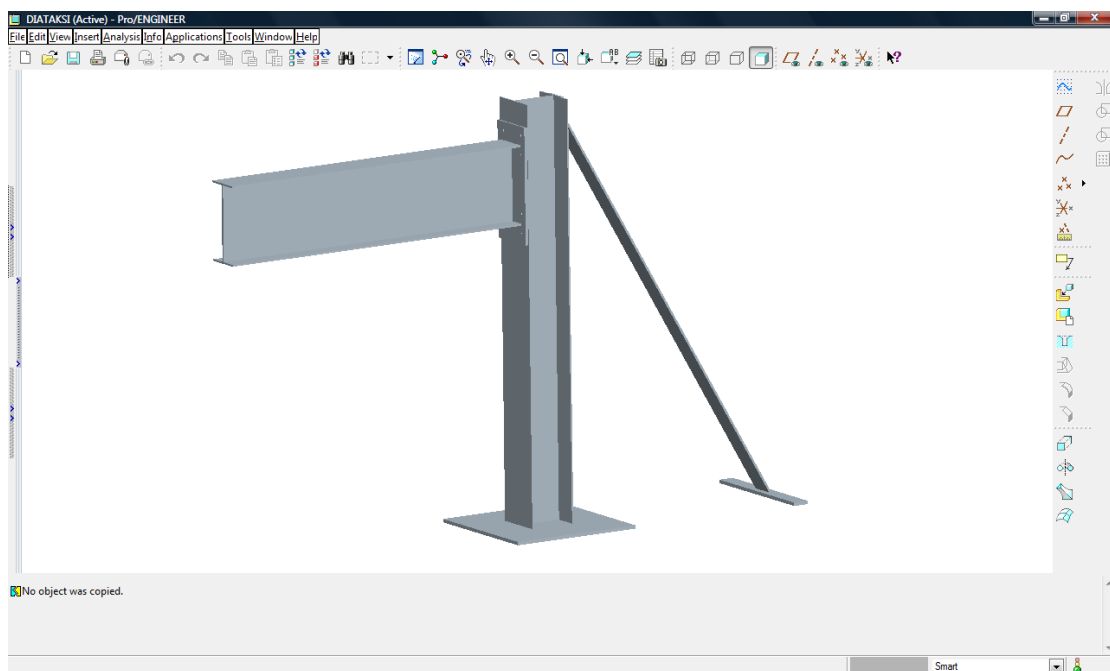
Εικόνα 10:Κάθετη δοκός διάταξης



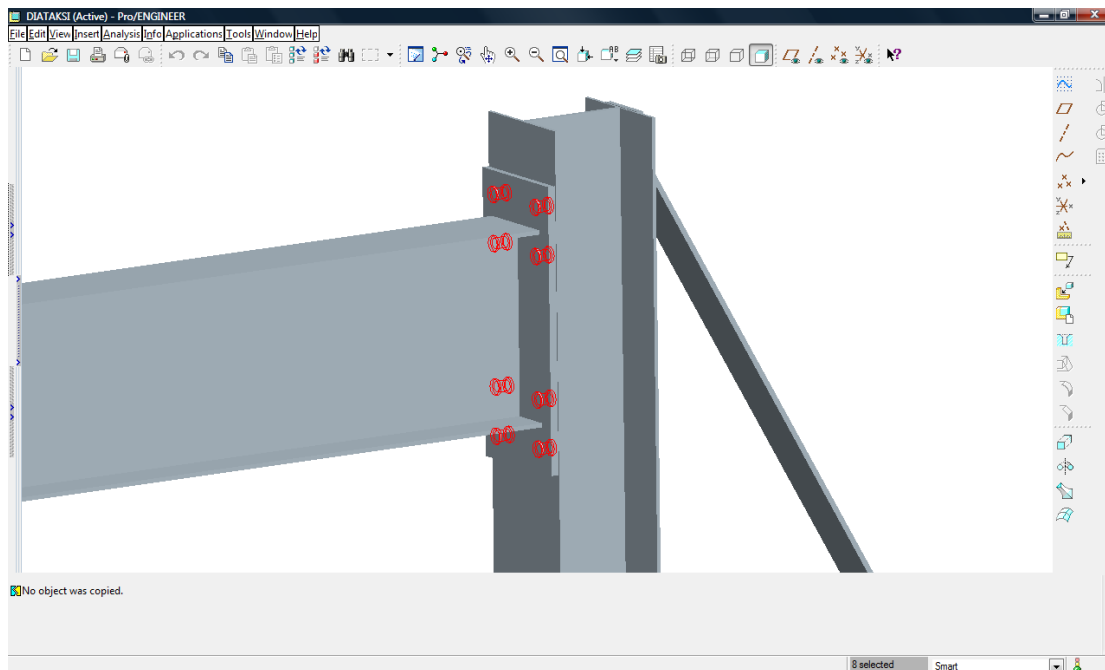
Εικόνα 11: Κοχλίας διάταξης



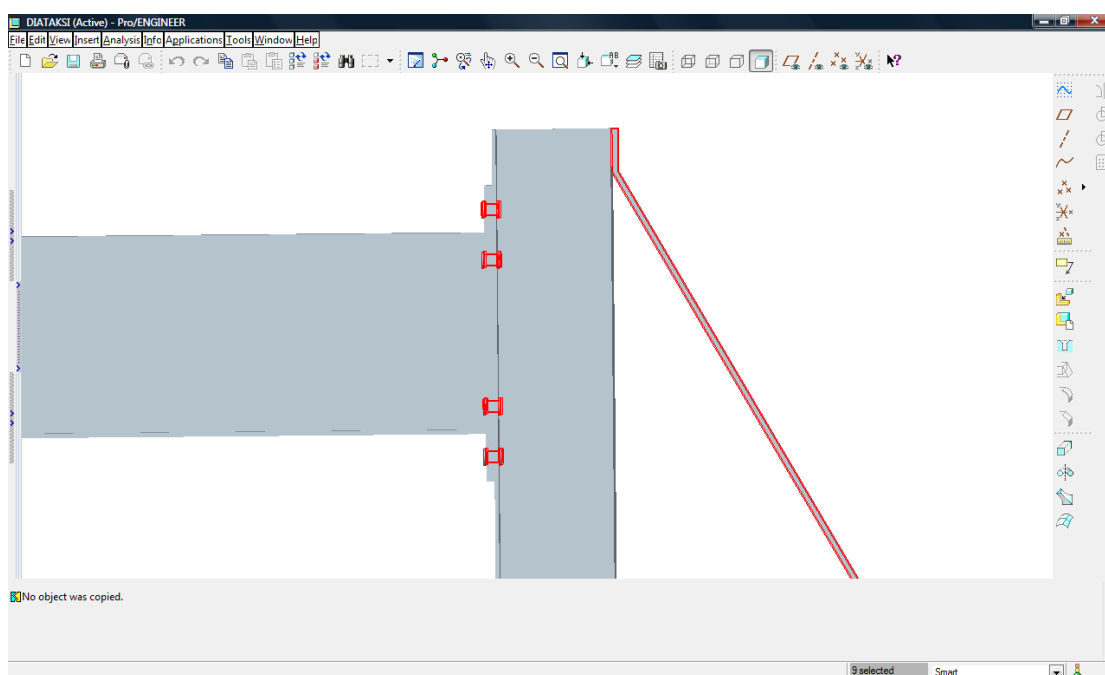
Εικόνα 12: Δοκός συγκράτησης



Εικόνα 13: Συναρμολογημένη διάταξη



Εικόνα 14: Κοντινή προβολή ένωσης δοκών με κοχλίες



Εικόνα 15: Κοντινή (πλευρική) προβολή ένωσης δοκών με κοχλίες και δοκού συγκράτησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ANSYS (Release 11.0)

§ 2.1 Γενικά

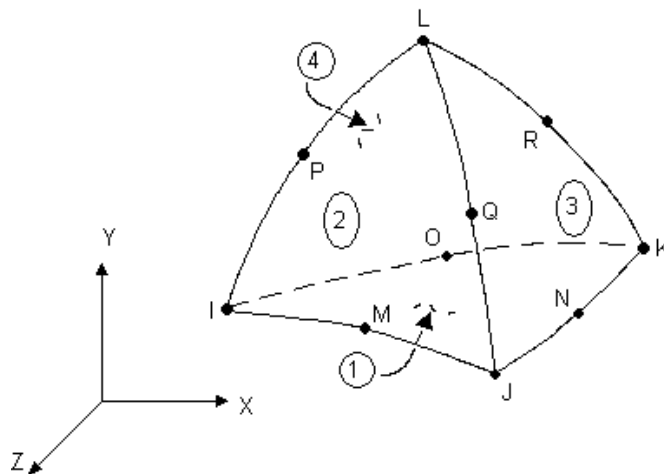
Όσον αφορά τη μοντελοποίηση, η εν λόγω κατασκευή αποτελείται από δέκα κομμάτια (μία κάθετη δοκό, μια οριζόντια δοκό και οχτώ κοχλίες). Πάνω σε αυτά τα κομμάτια ορίζουμε κάποιες παραμέτρους του προβλήματος και κάνουμε και κάποιες παραδοχές που θα μας οδηγήσουν στην επίλυση του πειράματός μας. Όσον αφορά το μέγεθος του προβλήματος, αυτό αποτελείται από ένα αρκετά μεγάλο αριθμό εξισώσεων για επίλυση (~700.000 εξισώσεις) και με αρκετά μεγάλο υπολογιστικό χρόνο της τάξεως των 4-8 ωρών (υπολογιστικό σύστημα: AMD TURION 1,8 GHz , 32BIT , 2GB RAM).

§ 2.2 Σκοπός του πειράματος

Σκοπός του πειράματος αυτού είναι να συγκρίνουμε τα πραγματικά αποτελέσματα δύναμης-παραμόρφωσης που έγινε στο πανεπιστήμιο Jordan University of Science and Technology (Irbid, Jordan) στο τμήμα των Πολιτικών Μηχανικών (Department of Civil Engineering) με τα αποτελέσματα που βγάζει ένα λογισμικό στατικής ανάλυσης όπως το ANSYS.

§ 2.3 Πεπερασμένα Στοιχεία SOLID187

Το στοιχείο αυτό είναι ένα πεπερασμένο στοιχείο ιδανικό για το πείραμα αυτό διότι είναι τρισδιάστατο και χρησιμεύει σε πολύπλοκες διακριτοποιήσεις (meshes) για αντικείμενα όπως αυτά των συστημάτων CAD/CAM. Αποτελείται από 10 κόμβους με 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις στις διευθύνσεις των κόμβων x,y,z). Επίσης έχει τη δυνατότητα ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς καθώς και δυνατότητα για μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις.



Εικόνα 16: Γεωμετρία και σύστημα συντεταγμένων του στοιχείου SOLID 187.

§ 2.4 Παραδοχές Επίλυσης

Θεωρούμε ότι η οριζόντια δοκός είναι κολλημένη(merged) με την κάθετη και επιλύουμε την περίπτωση αυτή χωρίς να έχουμε τη θεώρηση μονόπλευρης επαφής μεταξύ των κομματιών αλλά μια μόνιμη επαφή. Έτσι η διάταξη μας λειτουργεί σαν μια ενιαία οντότητα που παραμορφώνεται στο χώρο. Η ευκολία επίλυσης με μια τέτοια παραδοχή έγκειται στο γεγονός ότι στη διάταξη δεν εισέρχονται και στοιχεία επαφής (contact elements), κάτι που αφενός μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο στην επίλυση και αφετέρου δεν απαιτεί από το χρήστη εμπειρία σε ό,τι αφορά τα στοιχεία επαφής και τις παραμέτρους τους.

§ 2.5 Παράμετροι προγράμματος ANSYS πριν την επίλυση

§ 2.5.1 Ελαστοπλαστικό υλικό με μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα)

Πιο αναλυτικά θέτουμε τις παρακάτω παραμέτρους στο ANSYS πριν την επίλυση:

- File → Import → Pro-E... → ...diataksi.asm (αρχείο assembly του Pro-E)
- Preferences → Structural και h-method
- Preprocessor → Element type → Add/Edit/Delete → Add → SOLID 187
- Preprocessor → Element type → Add DOF → Ux, Uy, Uz
- Preprocessor → Material Props → Material Models → Structural → Linear → Elastic → Isotropic → EX=200000 και PRXY=0.3
- Preprocessor → Material Props → Material Models → Structural → Nonlinear → Inelastic → Rate Independent → Isotropic Hardening Plasticity → Mises plasticity → Bilinear → Yield Stss=314 και Tang Mod=10000

Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι θέτουμε δύο διαφορετικές τιμές (TangMod=10.000 και TangMod=5.000) στην τιμή της εφαπτομένης της καμπύλης για την πλαστική περιοχή. Με άλλα λόγια επιλύουμε το πρόβλημα δύο φορές έτσι ώστε να προσεγγίσουμε καλύτερα τα αποτελέσματα που πήραμε από το πανεπιστήμιο της Ιορδανίας.

- Preprocessor → Meshing → Size Cntrls → Smart size → Adv Opts → OK
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 3 και Mesh Volume 1
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 2
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 3
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 4
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 5
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 6
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 7
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 8
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 9
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 10
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 11
- Preprocessor → Numbering Cntrls → Merge Items → On nodes → OK

§ 2.5.2 Ελαστοπλαστικό υλικό με μικρές μετακινήσεις (όχι γεωμετρική μη-γραμμικότητα)

Πιο αναλυτικά θέτουμε τις παρακάτω παραμέτρους στο ANSYS πριν την επίλυση:

- File → Import → Pro-E... → ...diataksi.asm (αρχείο assembly του Pro-E)
- Preferences → Structural και h-method
- Preprocessor → Element type → Add/Edit/Delete → Add → SOLID 187
- Preprocessor → Element type → Add DOF → Ux, Uy, Uz
- Preprocessor → Material Props → Material Models → Structural → Linear → Elastic → Isotropic → EX=200000 και PRXY=0.3
- Preprocessor → Material Props → Material Models → Structural → Nonlinear → Inelastic → Rate Independent → Isotropic Hardening Plasticity → Mises plasticity → Bilinear → Yield Stss=314 και Tang Mod=5000
- Preprocessor → Meshing → Size Cntrl → Smart size → Adv Opts → OK
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 3 και Mesh Volume 1
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 2
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 3
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 4
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 5
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 6
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 7
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 8
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 9
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 10
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 11
- Preprocessor → Numbering Ctrl → Merge Items → On nodes → OK

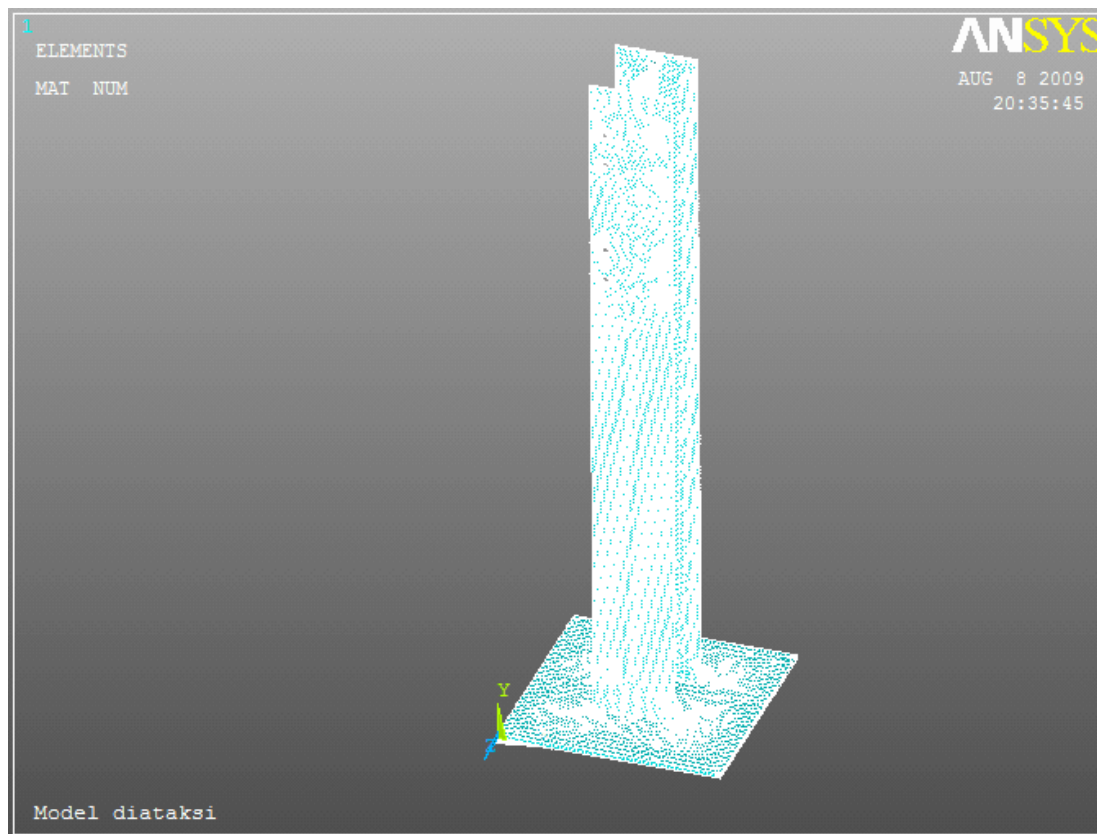
§ 2.5.3 Ελαστικό υλικό χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις

Πιο αναλυτικά θέτουμε τις παρακάτω παραμέτρους στο ANSYS πριν την επίλυση:

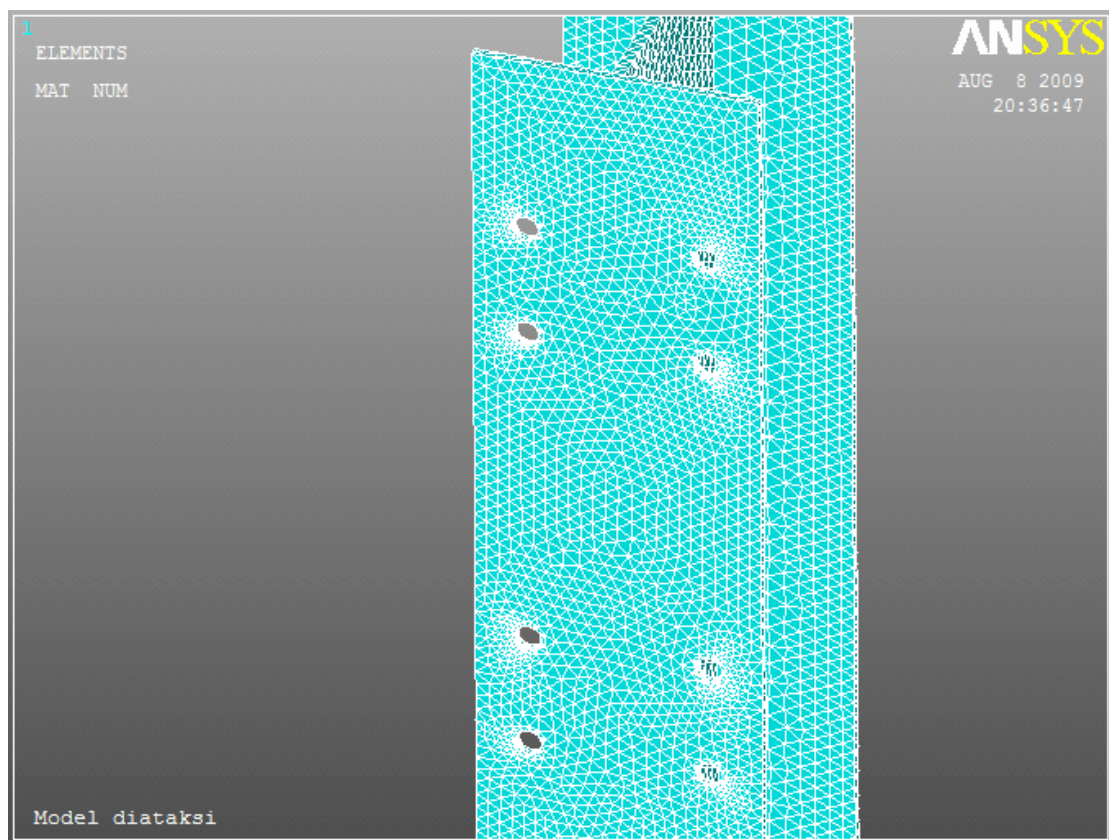
- File → Import → Pro-E... → ...diataksi.asm (αρχείο assembly του Pro-E)
- Preferences → Structural και h-method
- Preprocessor → Element type → Add/Edit/Delete → Add → SOLID 187
- Preprocessor → Element type → Add DOF → Ux, Uy, Uz
- Preprocessor → Material Props → Material Models → Structural → Linear → Elastic → Isotropic → EX=200000 και PRXY=0.3
- Preprocessor → Meshing → Size Cntrl → Smart size → Adv Opts → OK
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 3 και Mesh Volume 1
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 2
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 3
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 4
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 5
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 6
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 7
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 8
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 9
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 10
- Preprocessor → Meshing → Mesh tool → Smart Size = 2 και Mesh Volume 11
- Preprocessor → Numbering Ctrl → Merge Items → On nodes → OK

§ 2.6 Απεικόνιση κομματιών μετά τη διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (meshing)

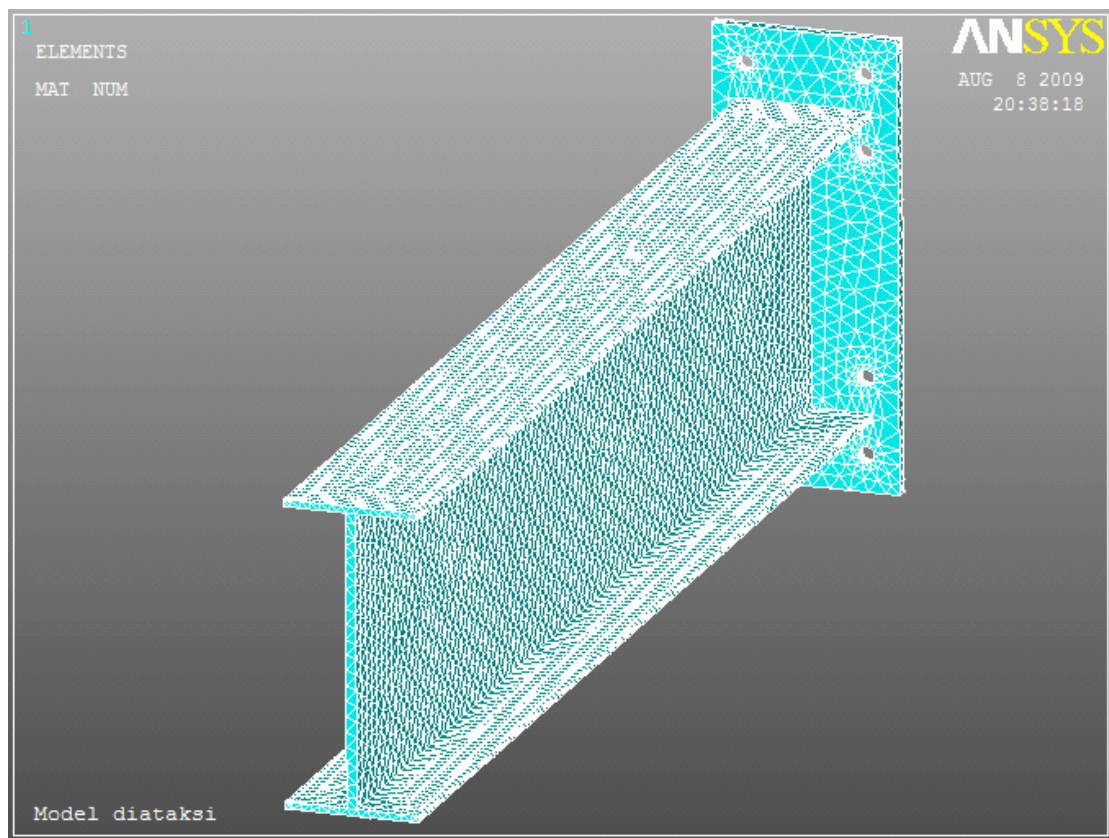
Παρακάτω απεικονίζεται κάθε κομμάτι μετά την διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία:



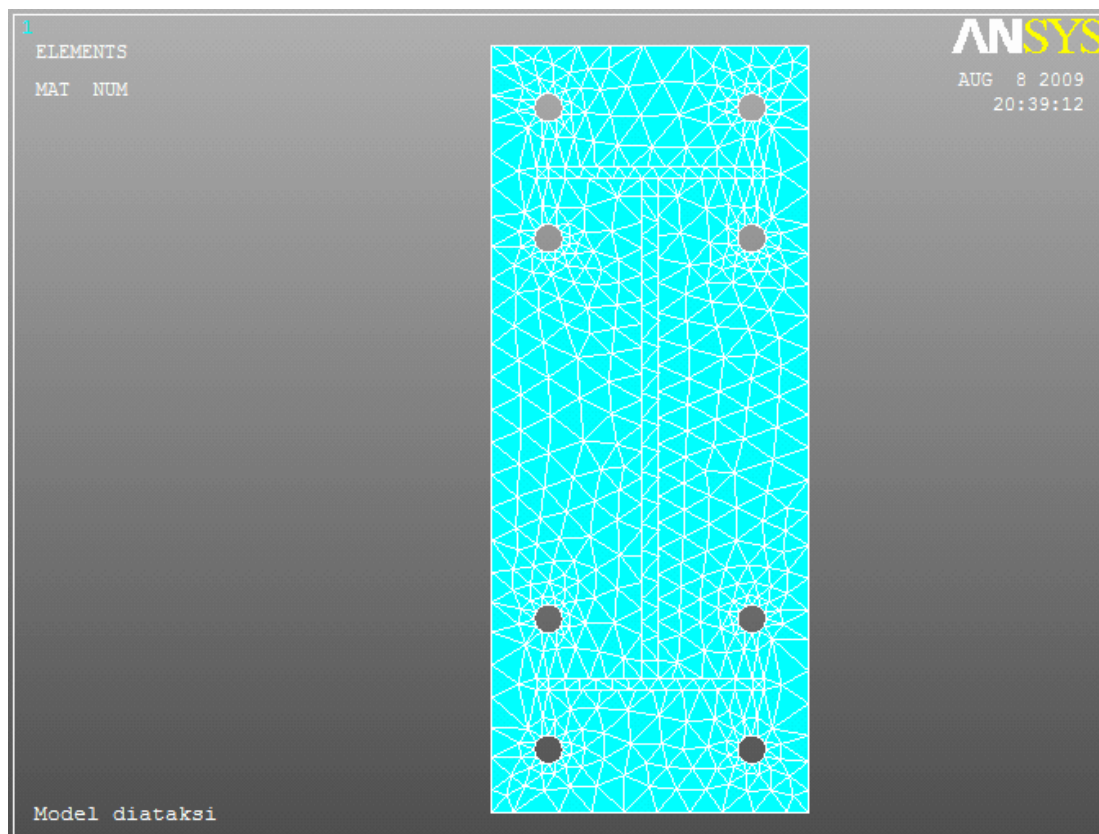
Εικόνα 17: Απεικόνιση της κάθετης δοκού



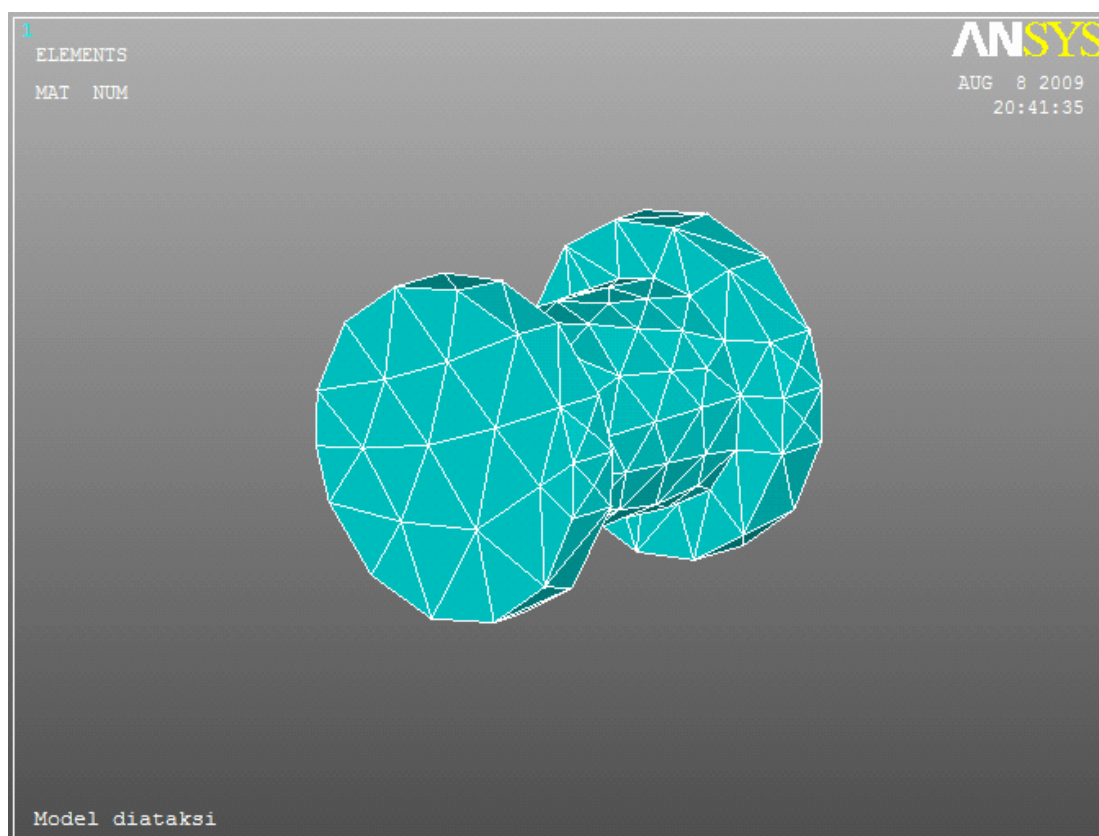
Εικόνα 18: Απεικόνιση της κάθετης δοκού (κοντινή)



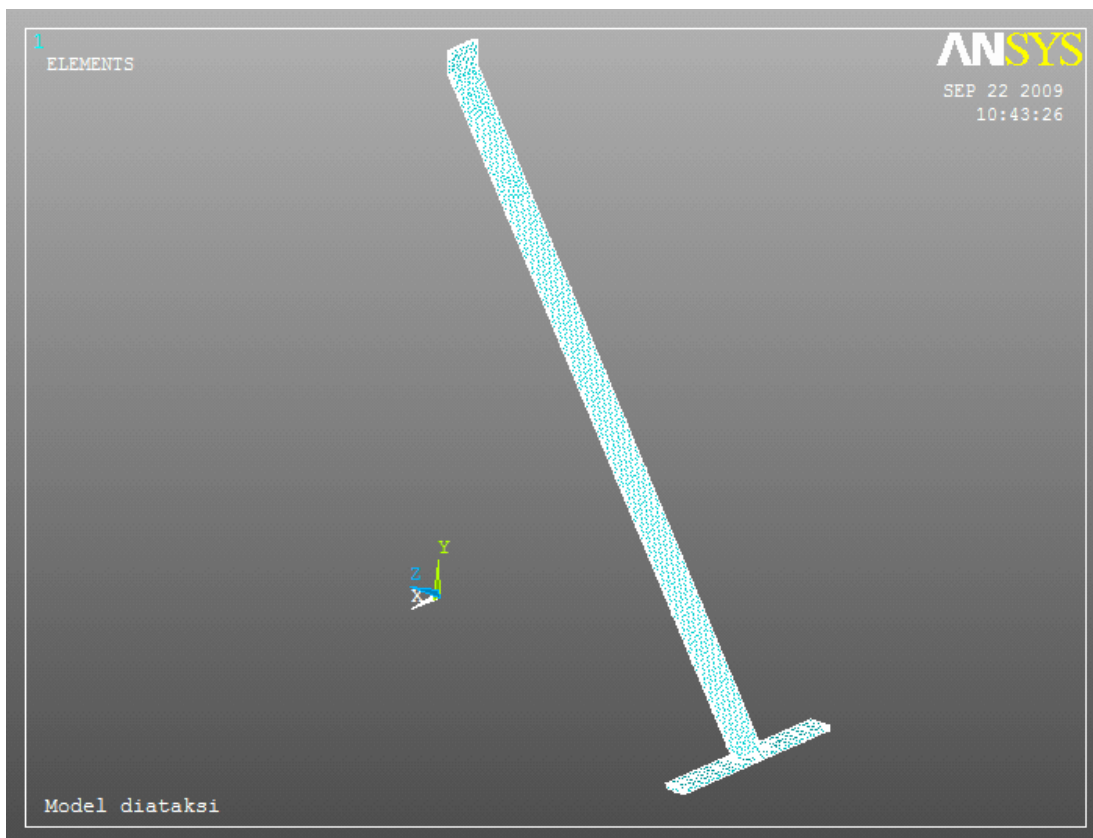
Εικόνα 19: Απεικόνιση της οριζόντιας δοκού



Εικόνα 20: Απεικόνιση της οριζόντιας δοκού (κοντινή)



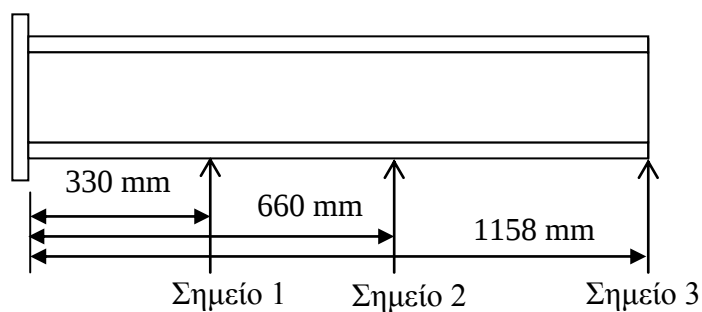
Εικόνα 21: Απεικόνιση του κοχλίου



Εικόνα 22: Απεικόνιση της δοκού συγκράτησης

§ 2.7 Ορισμός σημείων μέτρησης και φόρτισης

Τώρα μας ενδιαφέρει να ορίσουμε σε ποια σημεία θέλουμε να μετρήσουμε τη μετατόπιση καθ' όλη τη διάρκεια άσκησης της φόρτισης. Θυμίζουμε ότι η φόρτιση θα ασκηθεί στο άνω τμήμα της οριζόντιας δοκού σε απόσταση 1158 mm από την αρχή της δοκού (πάνω δηλαδή από το σημείο 3) με κατεύθυνση προς τα κάτω(δηλαδή κατά $-y$). Σύμφωνα με τα δεδομένα του πειράματος τα σημεία που πρέπει να μετρηθεί η μετατόπιση (κατά $-y$) είναι τα εξής:



Εικόνα 23: Σημεία μέτρησης στην οριζόντια δοκό

Για το κάθε σημείο (Εικόνα 23) βρίσκουμε στην διάταξη μας στο ANSYS αντίστοιχους κόμβους (nodes) στους οποίους θα μετρήσουμε τη μετατόπιση τους κάθε φορά σε σχέση πάντα με το ασκούμενο φορτίο. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι λόγω αυξημένου αριθμού κόμβων στα σημεία που μετράμε, αρκεί να πάρουμε σε κάθε σημείο ένα κόμβο κατ' εκτίμηση και να δούμε τη συμπεριφορά του κατά τα στάδια φόρτισης της οριζόντιας δοκού. Εφόσον καθορίσαμε τα παραπάνω σημεία επιλέγουμε τους κόμβους σύμφωνα με την διακριτοποίηση (meshing) που έχουμε κάνει. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε άλλη προσπάθεια διακριτοποίησης της ίδιας διάταξης ο αριθμός των επιλεγμένων κόμβων θα είναι διαφορετικός και αυτό οφείλεται στο ότι το λογισμικό διακριτοποιεί τη διάταξή μας με τυχαίο τρόπο.

Έτσι στη δική μας περίπτωση έχουμε:

Σημείο 1 → Κόμβος 140398

Σημείο 2 → Κόμβος 140014

Σημείο 3 → Κόμβος 140081

Αφού διαλέξαμε τους κόμβους αυτούς, εφαρμόζουμε φορτίο προς τα κάτω(κατεύθυνση -y) στο σημείο που αναφέραμε και προηγούμενα σε απόσταση 1158mm. Οι συντεταγμένες αυτού σύμφωνα με την αρχή των αξόνων στο ολικό σύστημα συντεταγμένων(Global Cartesian coordinates) είναι $(x,y,z) = (305,1731,974.5)$. Για να διαλέξουμε τον κόμβο που βρίσκεται στο σημείο αυτό επιλέγουμε:

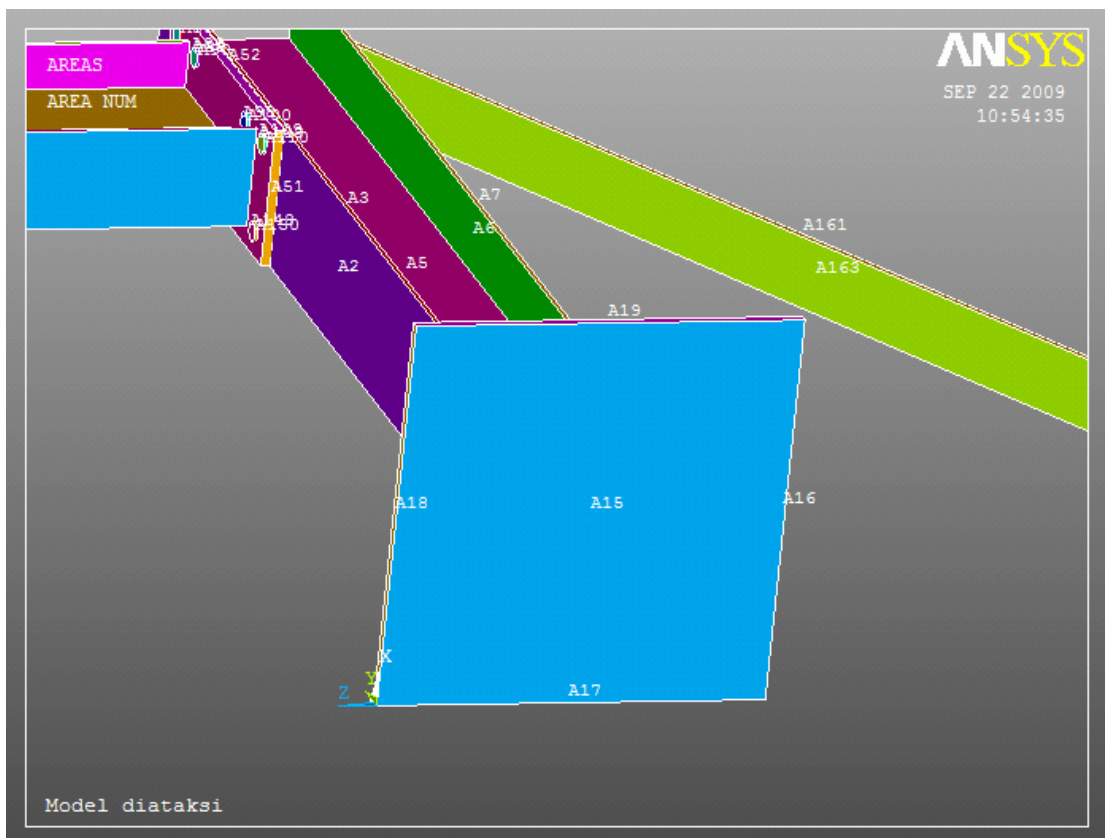
- Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural → Force/Moment → On Nodes

Στο παράθυρο που βγαίνει ορίζουμε τον αριθμό του κόμβου (node) όπως αυτό έχει οριστεί από το πρόγραμμα μετά τη διακριτοποίηση. Στη δική μας διακριτοποίηση ο κόμβος αυτός είναι ο κόμβος με αριθμό 158718. Πατάμε OK και έπειτα ορίζουμε το φορτίο σε Newton (όχι σε kN).

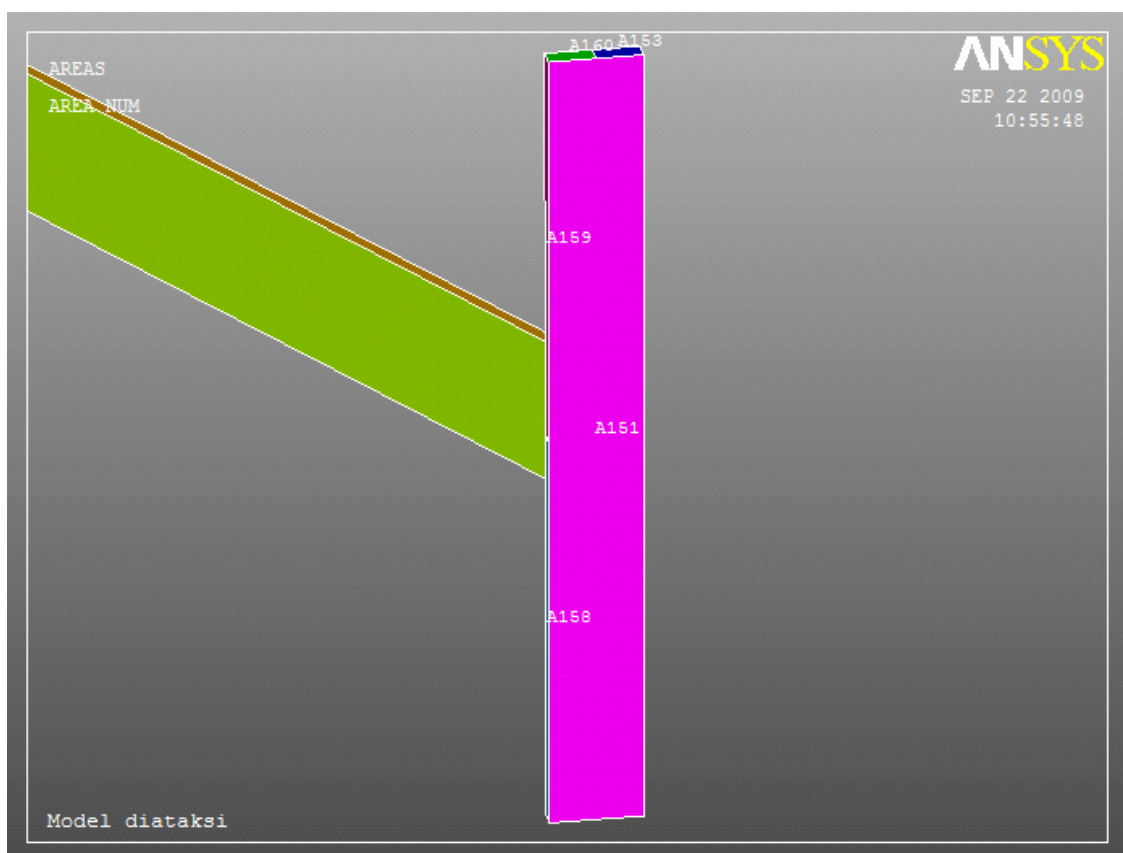
Τώρα θα πρέπει να σταθεροποιήσουμε τις βάσεις της κατασκευής μας. Αυτό θα γίνει θέτοντας μετατόπιση ίση με το μηδέν στις περιοχές που βρίσκονται στο κάτω μέρος της βάσης της κάθετης δοκού και της βάσης της δοκού συγκράτησης. Πιο συγκεκριμένα:

- Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Areas

Στο παράθυρο που εμφανίζεται ορίζουμε τις περιοχές A15 και A151 και θέτουμε μηδέν σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας (All DOFs).



Εικόνα 24: Περιοχή A15 (για σταθεροποίηση βάσης)



Εικόνα 25: Περιοχή A151 (για σταθεροποίηση βάσης δοκού συγκράτησης)

§ 2.8 Ορισμός παραμέτρων για την επίλυση στο ANSYS και επίλυση

Τώρα ορίζουμε κάποιες παραμέτρους που αφορούν στην επίλυση του προβλήματος. Για την ακρίβεια οι παράμετροι αναφέρονται στο ρυθμό με τον οποίο θα ασκηθεί το φορτίο ώστε να οδηγηθούμε στη σύγκλιση και επομένως στην επίλυση. Άρα:

- Solution → Analysis type → Sol'n Controls

§ 2.8.1 Ελαστοπλαστικό υλικό με μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα)

Στο παράθυρο που εμφανίζεται στην καρτέλα Basic ορίζουμε τα παρακάτω:

1. Analysis Options → Large Displacement Static
2. α) Time Control → Time at the end of loadstep = 1.125 (για TangMod=10.000)
β) Time Control → Time at the end of loadstep = 0.80 (για TangMod=5.000)
3. Time Control → Automatic time stepping = Off
4. Time Control → Time Step size = 0.05
5. Write Items to Result file → All solution items
6. Frequency → Write every substep

Επεξήγηση επιλογής των παραπάνω παραμέτρων:

Η επιλογή Large Displacement Static χρησιμοποιείται όταν θέλουμε το υλικό μας να έχει μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα).

Ο χρόνος στο τέλος της φόρτισης θα πρέπει να είναι στο 1,125 με βήμα(substep) 0,05. Επομένως στην περίπτωση μας όπου έχουμε φόρτιση 112,5kN το φορτίο θα ασκηθεί με ρυθμό 0kN,5kN,10kN,...,112.5kN .Αυτός ο ρυθμός ορίστηκε από εμάς ως ο ιδανικότερος γιατί μας βοηθάει στην διαμόρφωση και την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων μας. (Ομοίως σκεπτόμαστε και για την περίπτωση όπου έχουμε φορτίο 80 kN.)

Στο αρχείο RST (.rst file) που καταγράφονται όλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης θέλουμε να γίνει καταγραφή όλων των αποτελεσμάτων κι έτσι επιλέγουμε Write Items to Result file → All solution items

Αυτά τα αποτελέσματα θέλουμε να καταγράφονται σε όλα τα βήματα φόρτισης και έτσι στη συχνότητα καταγραφής (Frequency) επιλέγουμε καταγραφή σε κάθε βήμα (Write every substep)

Τις υπόλοιπες παραμέτρους στο παράθυρο *Sol'n Controls* τις αφήνουμε όπως είναι ορισμένες από το πρόγραμμα ANSYS.

Τέλος καταλήγουμε στην επίλυση πατώντας:

- Solution → Solve → Current LS

§ 2.8.2 Ελαστοπλαστικό υλικό με μικρές μετακινήσεις (όχι γεωμετρική μη-γραμμικότητα)

Στο παράθυρο που εμφανίζεται στην καρτέλα Basic ορίζουμε τα παρακάτω:

1. Analysis Options → Small Displacement Static
2. Time Control → Time at the end of loadstep = 1.125
3. Time Control → Automatic time stepping = Off
4. Time Control → Time Step size = 0.05
5. Write Items to Result file → All solution items
6. Frequency → Write every substep

Επεξήγηση επιλογής των παραπάνω παραμέτρων:

Η επιλογή Small Displacement Static χρησιμοποιείται όταν θέλουμε το υλικό μας να έχει μικρές μετακινήσεις (όχι γεωμετρική μη-γραμμικότητα).

Ο χρόνος στο τέλος της φόρτισης θα πρέπει να είναι στο 1,125 με βήμα(substep) 0,05. Επομένως στην περίπτωση μας όπου έχουμε φόρτιση 112.5kN το φορτίο θα ασκηθεί με ρυθμό 0kN,5kN,10kN,...,112.5kN .Αυτός ο ρυθμός ορίστηκε από εμάς γιατί μας βοηθάει στην διαμόρφωση και την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων μας.

Στο αρχείο RST (.rst file) που καταγράφονται όλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης θέλουμε να γίνει καταγραφή όλων των αποτελεσμάτων κι έτσι επιλέγουμε Write Items to Result file → All solution items

Αυτά τα αποτελέσματα θέλουμε να καταγράφονται σε όλα τα βήματα φόρτισης και έτσι στη συχνότητα καταγραφής (Frequency) επιλέγουμε καταγραφή σε κάθε βήμα (Write every substep)

Τις υπόλοιπες παραμέτρους στο παράθυρο *Sol'n Controls* τις αφήνουμε όπως είναι ορισμένες από το πρόγραμμα ANSYS.

Τέλος καταλήγουμε στην επίλυση πατώντας:

- Solution → Solve → Current LS

§ 2.8.3 Ελαστικό υλικό χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις

Στο παράθυρο που εμφανίζεται στην καρτέλα Basic ορίζουμε τα παρακάτω:

1. Analysis Options → Large Displacement Static
2. Time Control → Time at the end of loadstep = 1.125
3. Time Control → Automatic time stepping = Off
4. Time Control → Time Step size = 0.05
5. Write Items to Result file → All solution items
6. Frequency → Write every substep

Επεξήγηση επιλογής των παραπάνω παραμέτρων:

Η επιλογή Large Displacement Static χρησιμοποιείται όταν θέλουμε το υλικό μας να έχει μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα).

Ο χρόνος στο τέλος της φόρτισης θα πρέπει να είναι στο 1,125 με βήμα(substep) 0,05. Επομένως στην περίπτωση μας όπου έχουμε φόρτιση 112,5kN το φορτίο θα ασκηθεί με ρυθμό 0kN,5kN,10kN,...,112.5kN .Αυτός ο ρυθμός ορίστηκε από εμάς γιατί μας βοηθάει στην διαμόρφωση και την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων μας.

Στο αρχείο RST (.rst file) που καταγράφονται όλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης θέλουμε να γίνει καταγραφή όλων των αποτελεσμάτων κι έτσι επιλέγουμε Write Items to Result file → All solution items

Αυτά τα αποτελέσματα θέλουμε να καταγράφονται σε όλα τα βήματα φόρτισης και έτσι στη συχνότητα καταγραφής (Frequency) επιλέγουμε καταγραφή σε κάθε βήμα (Write every substep)

Τις υπόλοιπες παραμέτρους στο παράθυρο *Sol'n Controls* τις αφήνουμε όπως είναι ορισμένες από το πρόγραμμα ANSYS.

Τέλος καταλήγουμε στην επίλυση πατώντας:

- Solution → Solve → Current LS

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

§ 3.1 Πίνακες αποτελεσμάτων

§ 3.1.1 Ελαστοπλαστικό υλικό με μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα)

Σύμφωνα με το αποτελέσματα του πειράματος που έγινε στο ANSYS βγήκαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα (TangMod=10.000):

Βήμα	Φορτίο(σε kN)	Ροπή Κάμψης (kN.m)	Μετατόπιση (κατά άξονα - y)			Περιστροφή			Μέση τιμή Περιστροφής
			Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0489	4,89	5,66262	1,2387	2,3166	3,9874	0,003754	0,00351	0,003443	0,003569
0,0978	9,78	11,32524	2,4835	4,6449	7,9953	0,007526	0,007038	0,006904	0,007156
0,1467	14,67	16,98786	3,7344	6,9851	12,024	0,011316	0,010583	0,010383	0,010761
0,1956	19,56	22,65048	4,9953	9,3449	16,087	0,015137	0,014159	0,013892	0,014396
0,2445	24,45	28,3131	6,2876	11,764	20,252	0,019053	0,017824	0,017489	0,018122
0,2934	29,34	33,97572	7,6166	14,243	24,521	0,023081	0,02158	0,021175	0,021945
0,3423	34,23	39,63834	8,9508	16,752	28,843	0,027124	0,025382	0,024908	0,025804
0,3912	39,12	45,30096	10,319	19,317	33,262	0,03127	0,029268	0,028724	0,029754
0,4401	44,01	50,96358	11,707	21,921	37,749	0,035476	0,033214	0,032598	0,033763
0,489	48,9	56,6262	13,136	24,604	42,375	0,039806	0,037279	0,036593	0,037893
0,5379	53,79	62,28882	14,576	27,309	47,039	0,04417	0,041377	0,040621	0,042056
0,5868	58,68	67,95144	16,043	30,067	51,795	0,048615	0,045556	0,044728	0,0463
0,6357	63,57	73,61406	17,563	32,925	56,727	0,053221	0,049886	0,048987	0,050698
0,6846	68,46	79,27668	19,124	35,863	61,796	0,057952	0,054338	0,053364	0,055218
0,7335	73,35	84,9393	20,741	38,91	67,055	0,062852	0,058955	0,057906	0,059904
0,7824	78,24	90,60192	22,431	42,096	72,557	0,067973	0,063782	0,062657	0,064804
0,8313	83,13	96,26454	24,172	45,383	78,234	0,073248	0,068762	0,06756	0,069857
0,8802	88,02	101,9272	25,952	48,745	84,043	0,078642	0,073856	0,072576	0,075025
0,9291	92,91	107,5898	27,768	52,178	89,974	0,084145	0,079058	0,077698	0,0803
0,978	97,8	113,2524	29,61	55,658	95,989	0,089727	0,08433	0,082892	0,08565
1,0269	102,69	118,915	31,472	59,18	102,08	0,09537	0,089667	0,088152	0,091063
1,0758	107,58	124,5776	33,338	62,709	108,18	0,101024	0,095014	0,09342	0,096486
1,125	112,5	130,275	35,237	66,304	114,39	0,106779	0,100461	0,098782	0,102007

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος που έγινε στο ANSYS βγήκαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα (TangMod=5.000):

Βήμα	Φορτίο(σε kN)	Ροπή Κάμψης (kN.m)	Μετατόπιση (κατά άξονα - y)			Περιστροφή			Μέση τιμή Περιστροφής
			Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	5	5,79	1,2663	2,3682	4,0763	0,003837	0,003588	0,00352	0,003649
0,1	10	11,58	2,5414	4,7536	8,1825	0,007701	0,007202	0,007066	0,007323
0,15	15	17,37	3,87	7,2403	12,464	0,011727	0,01097	0,010763	0,011154
0,2	20	23,16	5,245	9,8167	16,901	0,015894	0,014874	0,014595	0,015121
0,25	25	28,95	6,6794	12,508	21,54	0,020241	0,018952	0,018601	0,019264
0,3	30	34,74	8,1673	15,304	26,361	0,024749	0,023188	0,022764	0,023567
0,35	35	40,53	9,7327	18,249	31,439	0,029493	0,02765	0,027149	0,028097
0,4	40	46,32	11,396	21,381	36,842	0,034533	0,032395	0,031815	0,032915
0,45	45	52,11	13,164	24,715	42,597	0,039891	0,037447	0,036785	0,038041
0,5	50	57,9	15,042	28,261	48,722	0,045582	0,04282	0,042074	0,043492
0,55	55	63,69	17,012	31,984	55,154	0,051552	0,048461	0,047629	0,049214
0,6	60	69,48	19,039	35,819	61,78	0,057694	0,054271	0,053351	0,055105
0,65	65	75,27	21,129	39,774	68,614	0,064027	0,060264	0,059252	0,061181
0,7	70	81,06	23,337	43,955	75,839	0,070718	0,066598	0,065491	0,067603
0,75	75	86,85	25,781	48,595	83,865	0,078124	0,073629	0,072422	0,074725
0,8	80	92,64	28,441	53,667	92,651	0,086185	0,081314	0,080009	0,082503

§ 3.1.2 Ελαστοπλαστικό υλικό με μικρές μετακινήσεις (όχι γεωμετρική μη-γραμμικότητα)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος που έγινε στο ANSYS βγήκαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα (TangMod=5.000):

Βήμα	Φορτίο(σε kN)	Ροπή Κάμψης (kN.m)	Μετατόπιση (κατά άξονα - y)			Περιστροφή			Μέση τιμή Περιστροφής
			Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0489	4,89	5,66262	1,2356	2,3106	3,9768	0,003744	0,003501	0,003434	0,00356
0,0978	9,78	11,32524	2,4732	4,625	7,9605	0,007495	0,007008	0,006874	0,007125
0,1467	14,67	16,98786	3,7538	7,0207	12,084	0,011375	0,010637	0,010435	0,010816
0,1956	19,56	22,65048	5,0725	9,4895	16,334	0,015371	0,014378	0,014105	0,014618
0,2445	24,45	28,3131	6,4416	12,056	20,755	0,01952	0,018267	0,017923	0,01857
0,2934	29,34	33,97572	7,8567	14,711	25,33	0,023808	0,022289	0,021874	0,022657
0,3423	34,23	39,63834	9,3356	17,487	30,112	0,02829	0,026495	0,026003	0,02693
0,3912	39,12	45,30096	10,877	20,383	35,102	0,032961	0,030883	0,030313	0,031386
0,4401	44,01	50,96358	12,488	23,413	40,325	0,037842	0,035474	0,034823	0,036047
0,489	48,9	56,6262	14,181	26,598	45,816	0,042973	0,0403	0,039565	0,040946
0,5379	53,79	62,28882	15,939	29,907	51,523	0,0483	0,045314	0,044493	0,046036
0,5868	58,68	67,95144	17,749	33,317	57,403	0,053785	0,05048	0,049571	0,051279
0,6357	63,57	73,61406	19,608	36,82	63,445	0,059418	0,055788	0,054788	0,056665
0,6846	68,46	79,27668	21,518	40,418	69,651	0,065206	0,061239	0,060148	0,062198

0,7335	73,35	84,9393	23,487	44,127	76,046	0,071173	0,066859	0,06567	0,067901
0,7824	78,24	90,60192	25,517	47,952	82,641	0,077324	0,072655	0,071365	0,073781
0,8313	83,13	96,26454	27,654	51,978	89,581	0,0838	0,078755	0,077358	0,079971
0,8802	88,02	101,9272	29,972	56,341	97,1	0,090824	0,085365	0,083851	0,08668
0,9291	92,91	107,5898	32,482	61,067	105,24	0,09843	0,092526	0,090881	0,093946
0,978	97,8	113,2524	35,25	66,279	114,22	0,106818	0,100423	0,098636	0,101959
1,0269	102,69	118,915	38,26	71,951	124	0,115939	0,109017	0,107081	0,110679
1,0758	107,58	124,5776	41,464	77,988	134,4	0,125648	0,118164	0,116062	0,119958
1,125	112,5	130,275	44,843	84,351	145,36	0,135888	0,127805	0,125527	0,12974

§ 3.1.3 Ελαστικό υλικό χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις

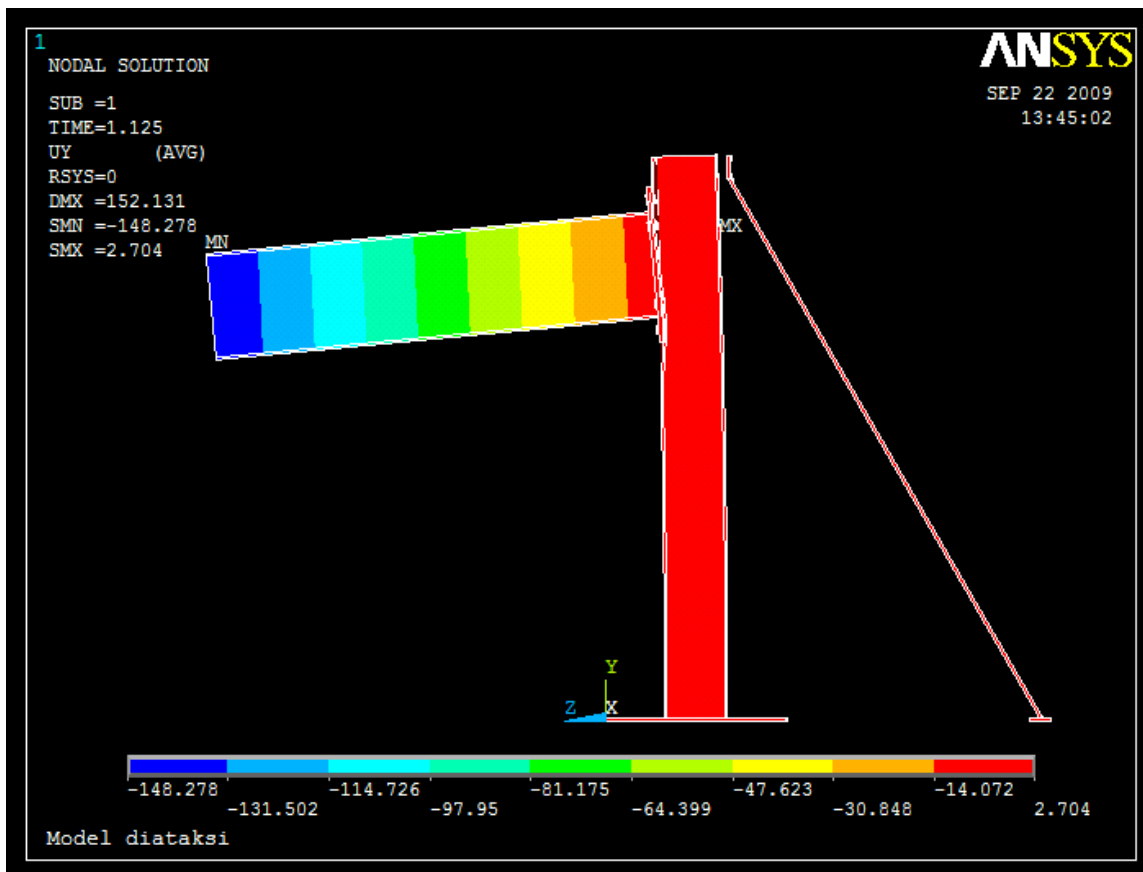
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος που έγινε στο ANSYS βγήκαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα:

Βήμα	Φορτίο(σε kN)	Ροπή Κάμψης (kN.m)	Μετατόπιση (κατά άξονα - y)			Περιστροφή			Μέση τιμή Περιστροφής
			Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0489	4,89	5,66262	1,2387	2,3166	3,9874	0,003754	0,00351	0,003443	0,003568996
0,0978	9,78	11,32524	2,4835	4,6449	7,9953	0,007526	0,007038	0,006904	0,007155963
0,1467	14,67	16,98786	3,7344	6,9851	12,024	0,011316	0,010583	0,010383	0,010761089
0,1956	19,56	22,65048	4,9907	9,3357	16,071	0,015123	0,014145	0,013878	0,014382191
0,2445	24,45	28,3131	6,2518	11,696	20,134	0,018945	0,017721	0,017387	0,018017645
0,2934	29,34	33,97572	7,5172	14,064	24,211	0,022779	0,021309	0,020908	0,021665361
0,3423	34,23	39,63834	8,7877	16,442	28,306	0,026629	0,024912	0,024444	0,025328461
0,3912	39,12	45,30096	10,069	18,841	32,438	0,030512	0,028547	0,028012	0,029023727
0,4401	44,01	50,96358	11,36	21,259	36,602	0,034424	0,032211	0,031608	0,032747598
0,489	48,9	56,6262	12,675	23,72	40,842	0,038409	0,035939	0,035269	0,036539305
0,5379	53,79	62,28882	14,005	26,211	45,132	0,042439	0,039714	0,038974	0,040375708
0,5868	58,68	67,95144	15,337	28,706	49,428	0,046476	0,043494	0,042684	0,044217878
0,6357	63,57	73,61406	16,67	31,201	53,725	0,050515	0,047274	0,046395	0,048061347
0,6846	68,46	79,27668	18,011	33,714	58,054	0,054579	0,051082	0,050133	0,051931198
0,7335	73,35	84,9393	19,369	36,259	62,44	0,058694	0,054938	0,053921	0,05585079
0,7824	78,24	90,60192	20,731	38,811	66,836	0,062821	0,058805	0,057717	0,059780837
0,8313	83,13	96,26454	22,095	41,367	71,241	0,066955	0,062677	0,061521	0,063717515
0,8802	88,02	101,9272	23,475	43,953	75,698	0,071136	0,066595	0,06537	0,067700474
0,9291	92,91	107,5898	24,865	46,56	80,192	0,075348	0,070545	0,06925	0,07171479
0,978	97,8	113,2524	26,263	49,18	84,708	0,079585	0,074515	0,07315	0,075750086
1,0269	102,69	118,915	27,668	51,815	89,25	0,083842	0,078508	0,077073	0,079807513
1,0758	107,58	124,5776	29,084	54,469	93,827	0,088133	0,082529	0,081025	0,083895721
1,125	112,5	130,275	30,515	57,154	98,456	0,09247	0,086597	0,085022	0,088029706

§ 3.2 Απεικόνιση παραμορφωμένης διάταξης

§ 3.2.1 Ελαστοπλαστικό υλικό με μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα)

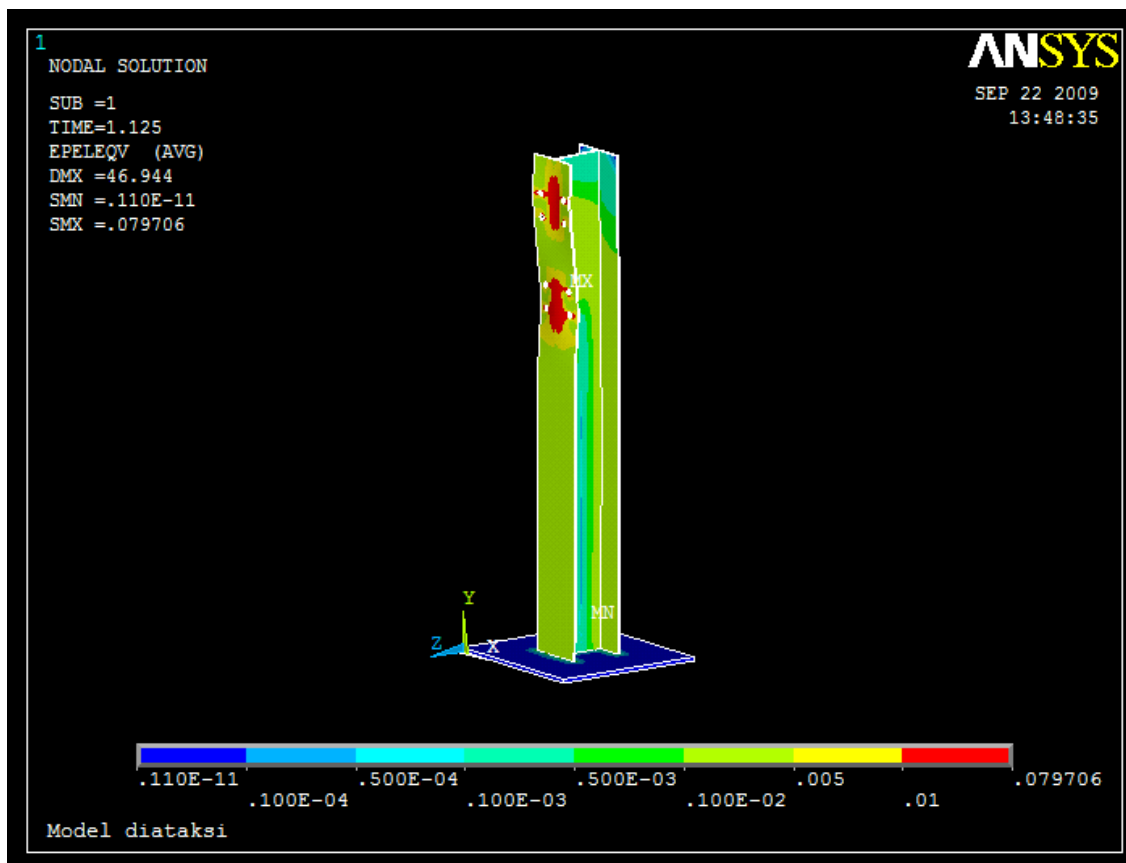
Α) Στην εικόνα 26 παρουσιάζεται η διάταξη όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι διάφορες χρωματικές αποχρώσεις παρουσιάζουν τις ζώνες παραμόρφωσης πάνω στη διάταξη (TangMod=10.000):



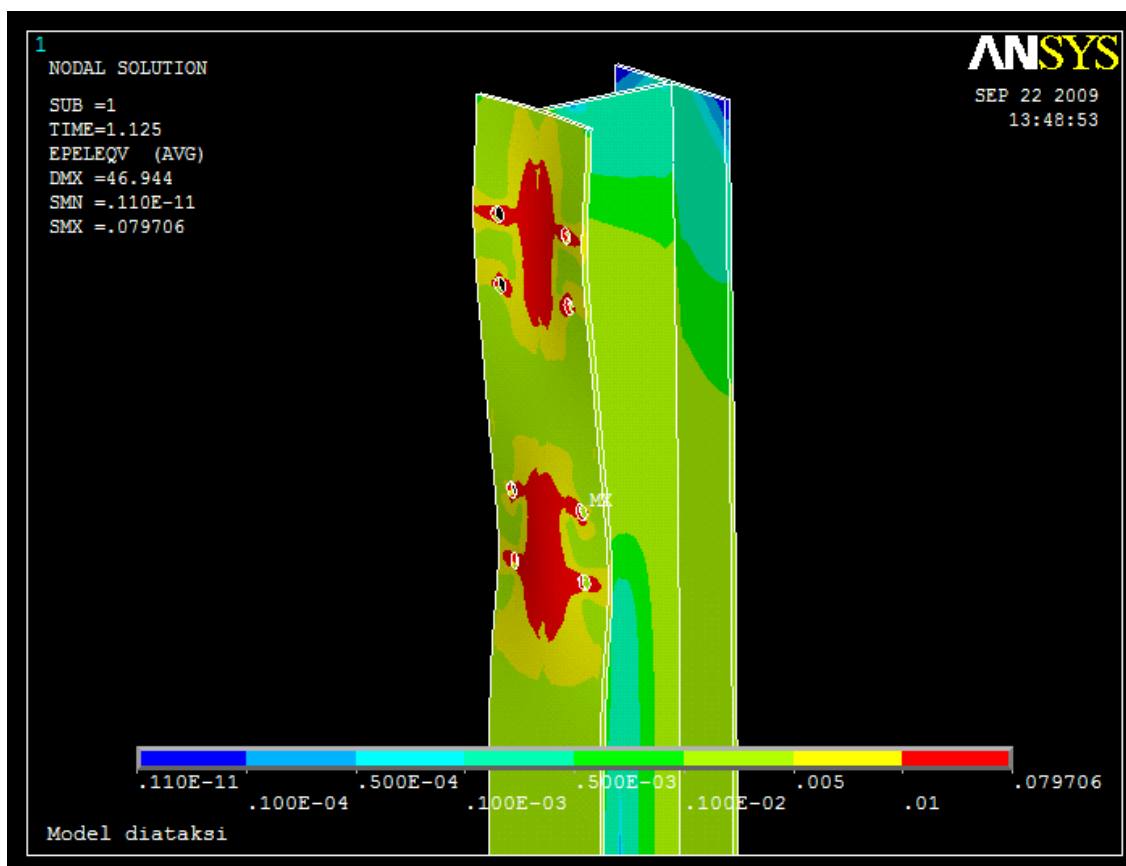
Εικόνα 26: Παραμόρφωση διάταξης (Μέγιστη μετατόπιση=148,278 mm)

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η ελαστική παραμόρφωση κατά Von Mises (Von Mises elastic strain) στα διάφορα κομμάτια της διάταξης μας. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η ισοδύναμη τάση Von Mises παρουσιάζει υπολογιστικό ενδιαφέρον διότι έχουμε μια τρισδιάστατη διάταξη στην οποία ασκούνται ορθές και διατμητικές τάσεις και στους τρεις άξονες x,y,z. Ο τύπος της ισοδύναμης τάσης Von Mises σ_e παρουσιάζεται παρακάτω:

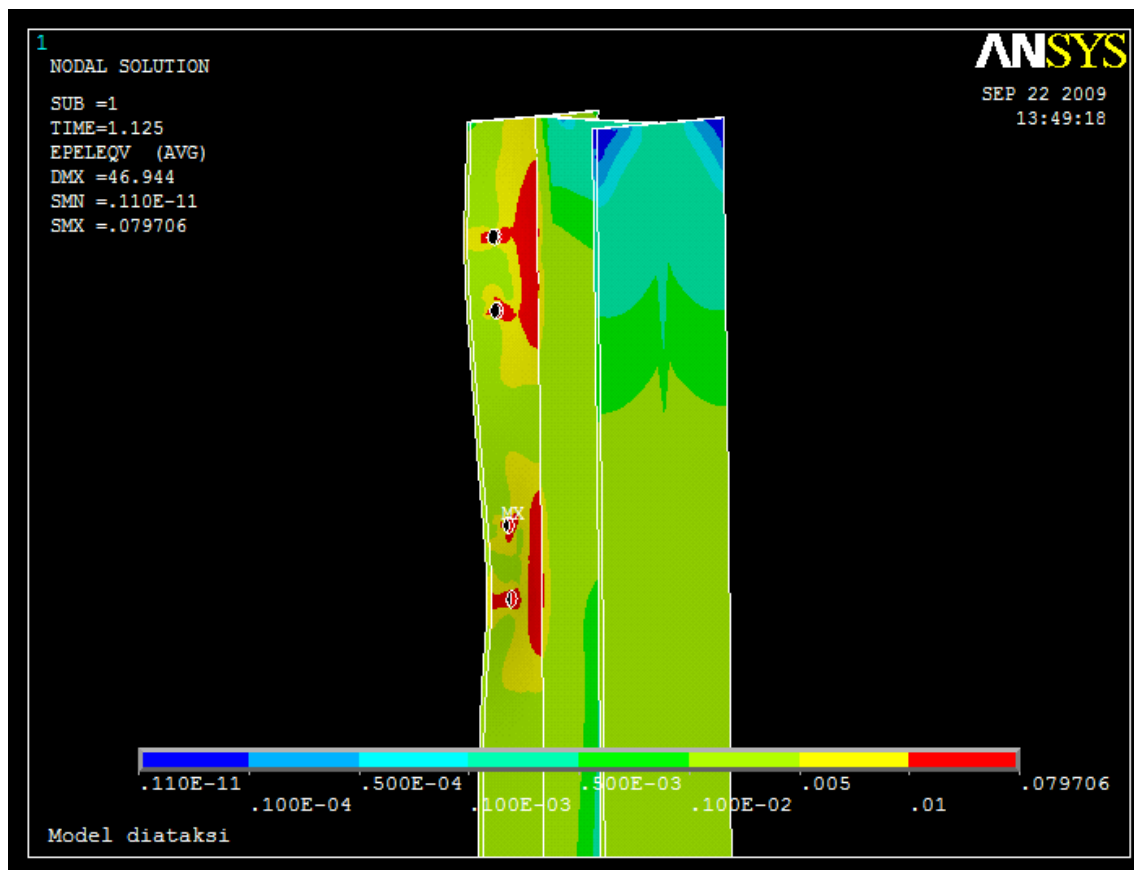
$$\sigma_e = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2)] \right\}^{1/2}$$



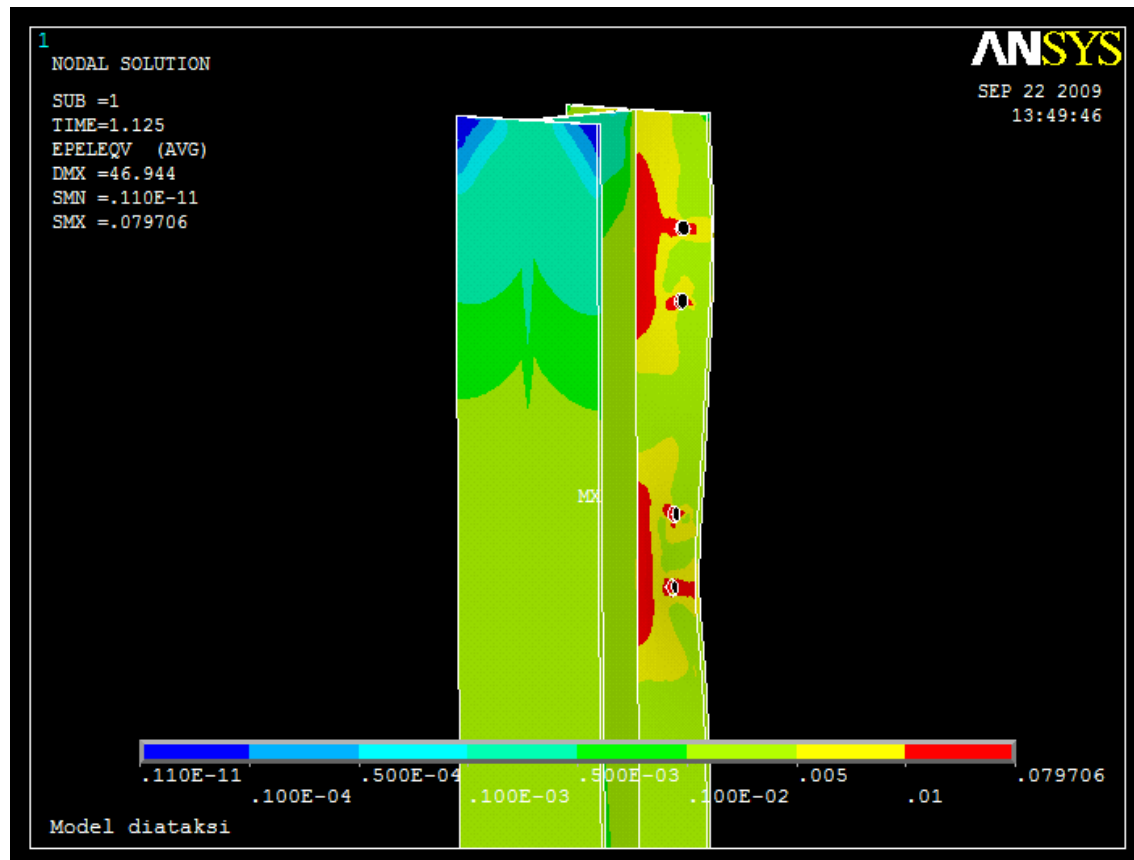
Εικόνα 27: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,079706 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,11 \cdot 10^{-11}$ Μέγιστη μετατόπιση=46,944)



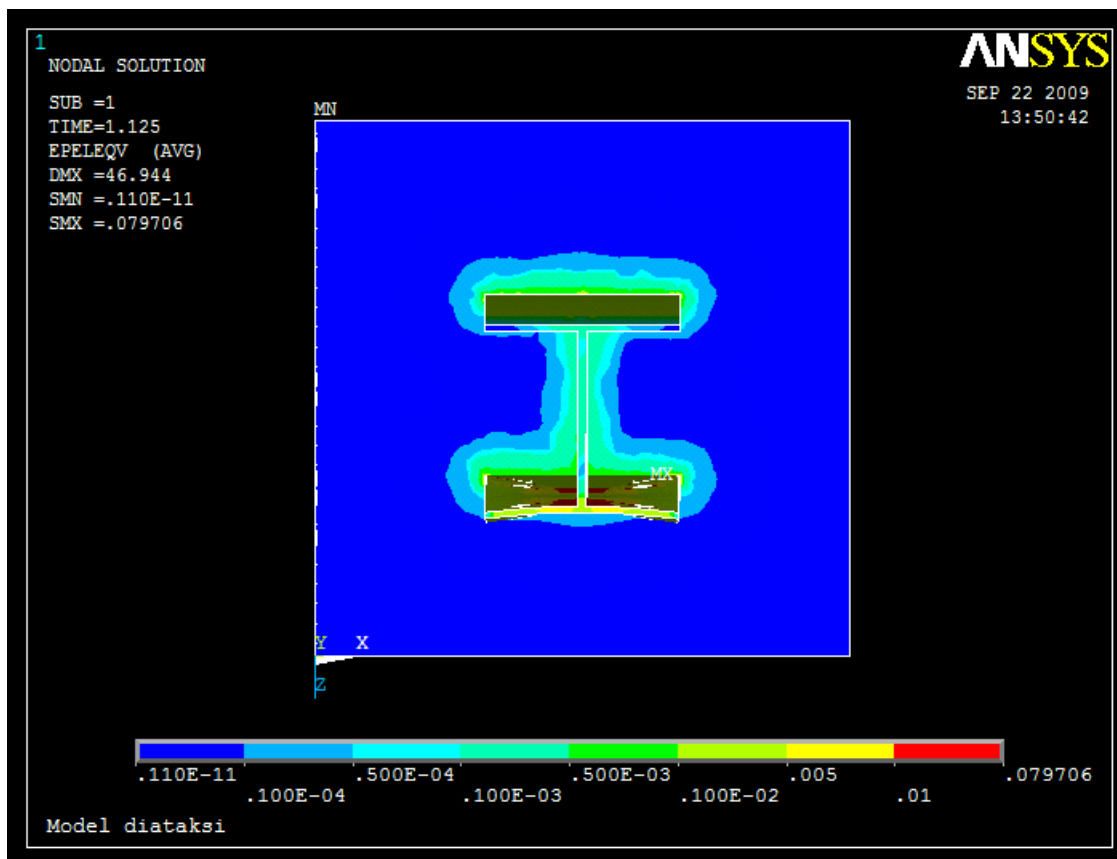
Εικόνα 28: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,079706 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,11 \cdot 10^{-11}$ Μέγιστη μετατόπιση=46,944)



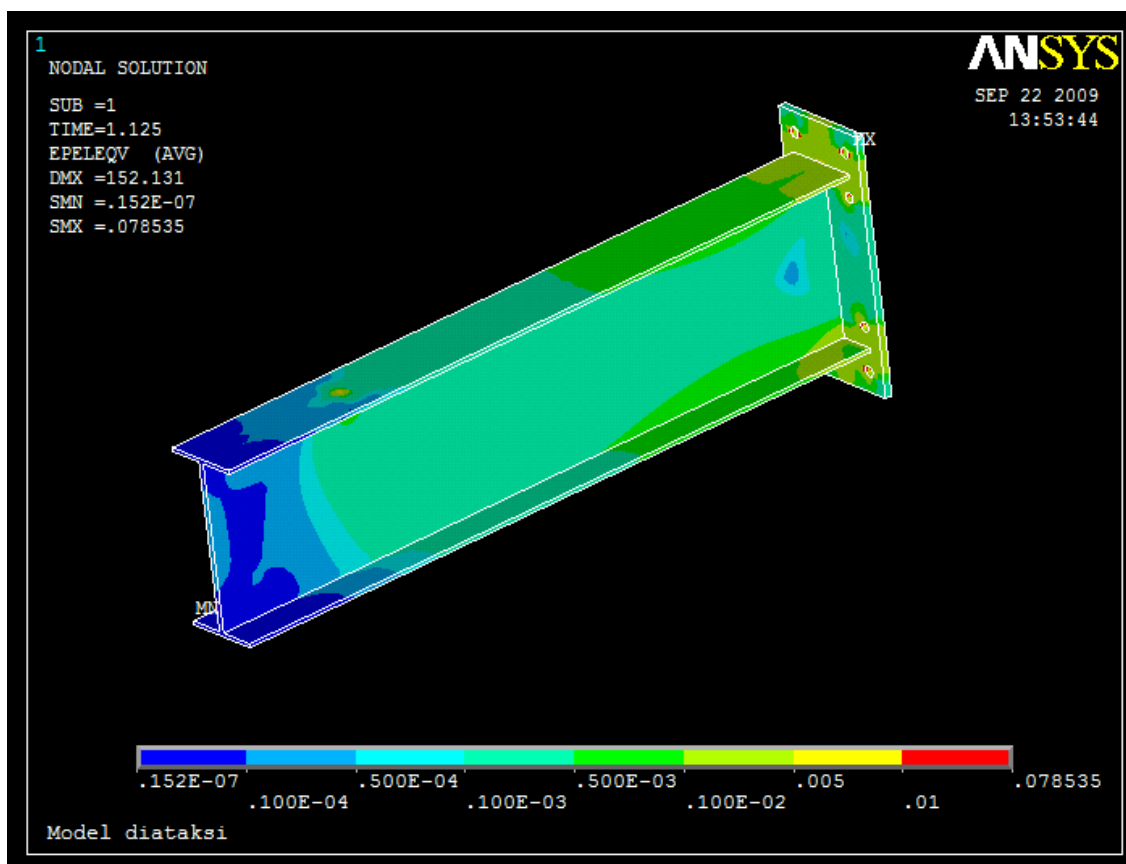
Εικόνα 29: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,079706 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,11*10⁻¹¹ Μέγιστη μετατόπιση=46,944)



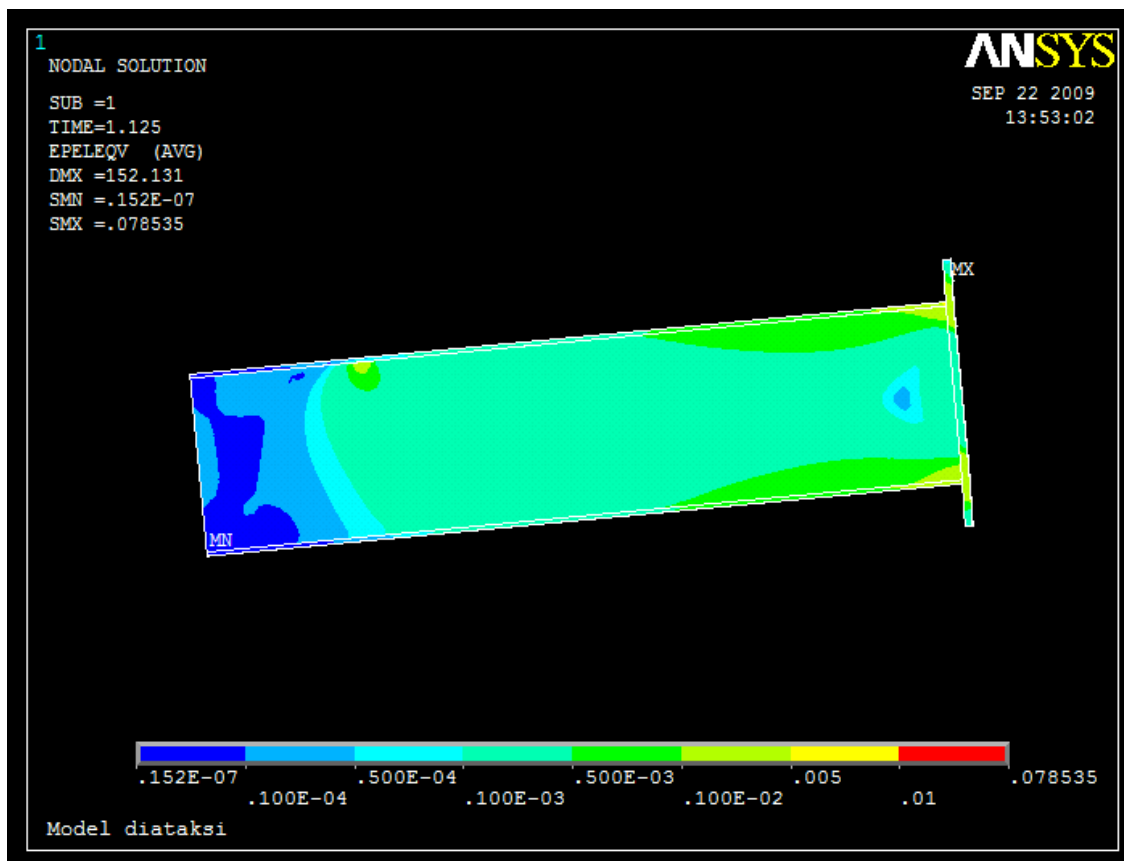
Εικόνα 30: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,079706 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,11*10⁻¹¹ Μέγιστη μετατόπιση=46,944)



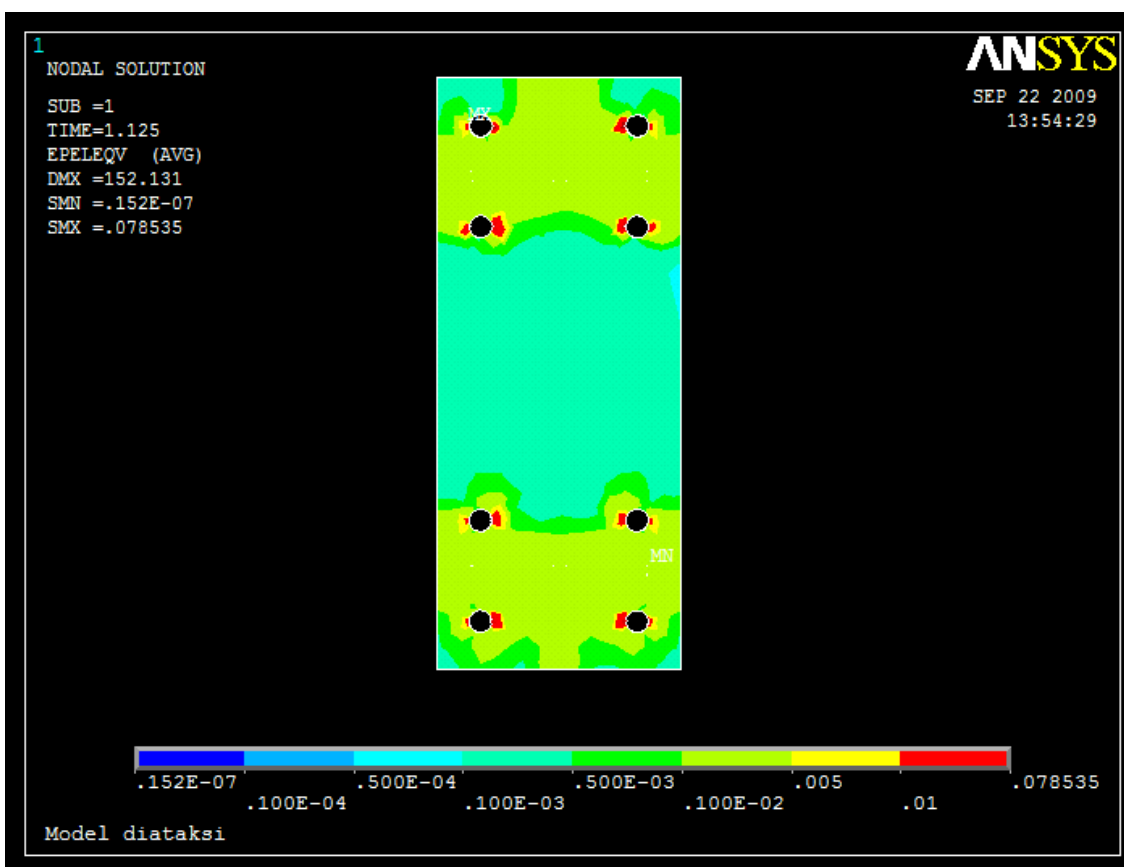
Εικόνα 31: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,079706 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,11 \cdot 10^{-11}$ Μέγιστη μετατόπιση=46,944)



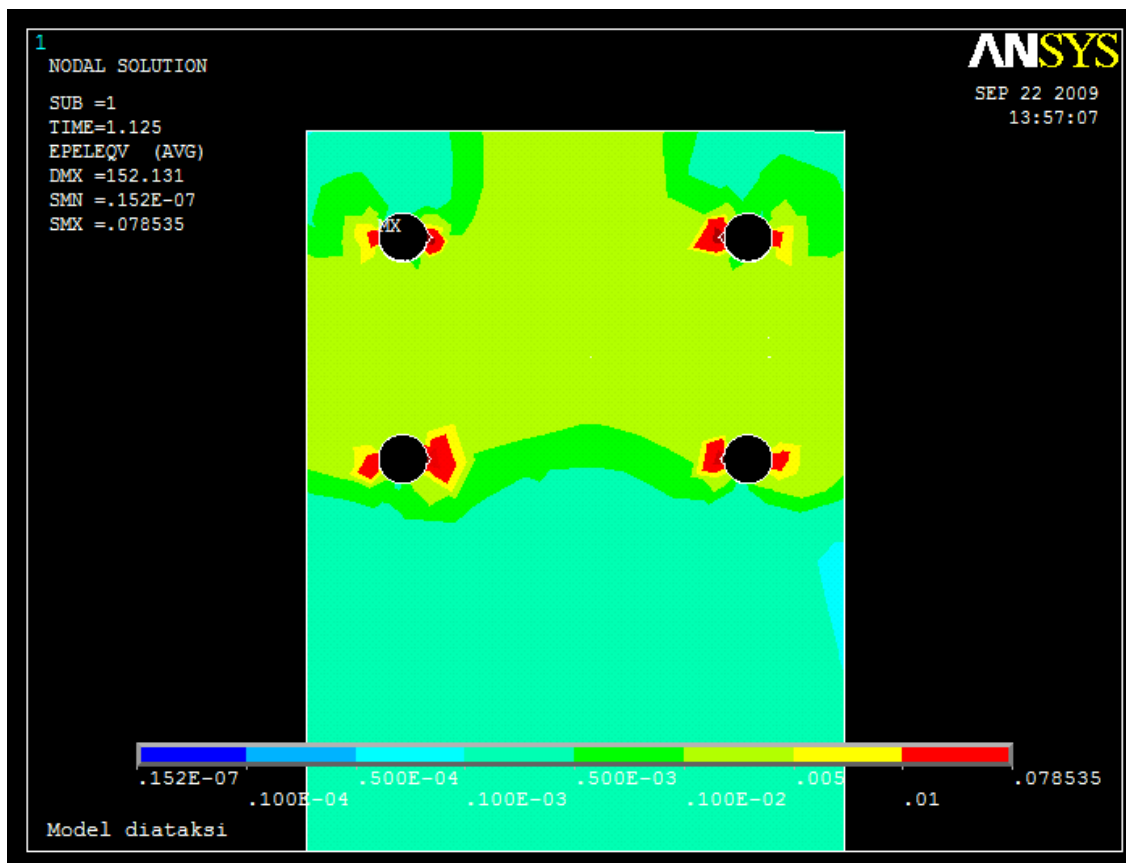
Εικόνα 32: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,078535 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,152 \cdot 10^{-7}$ Μέγιστη μετατόπιση=152,131)



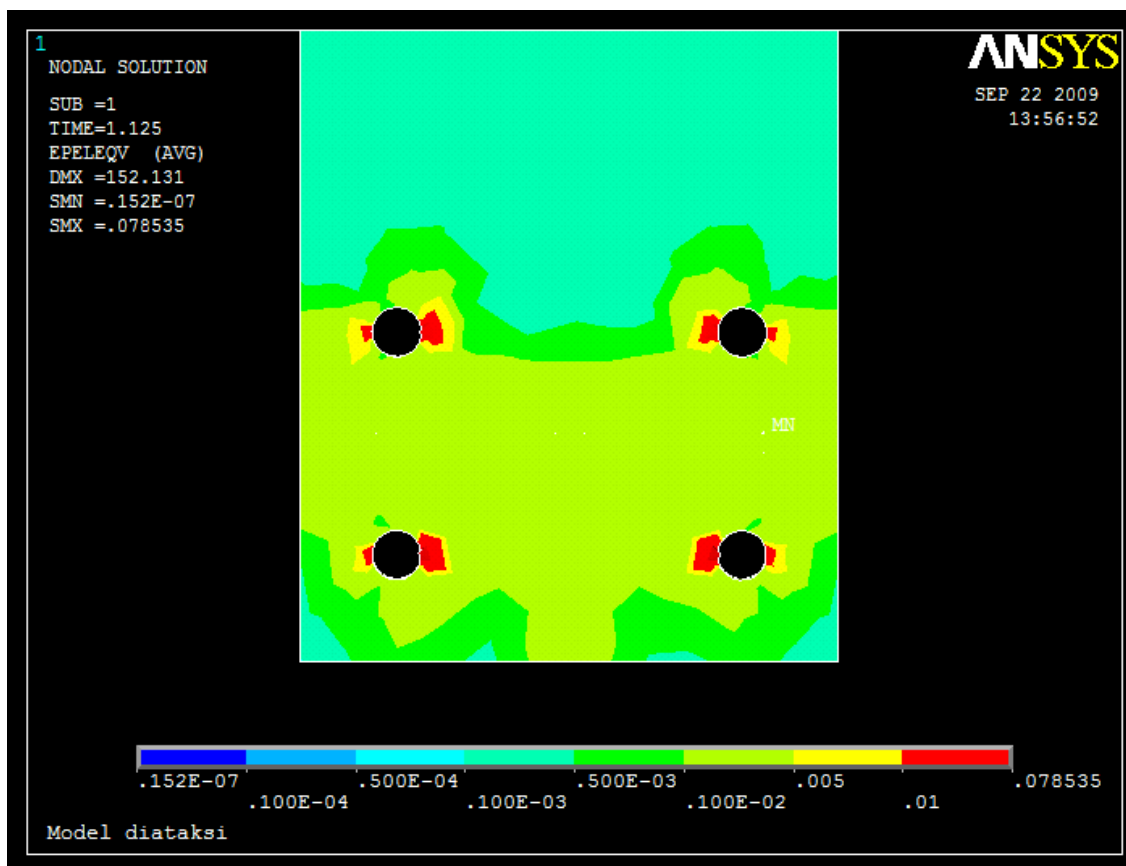
Εικόνα 33: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση= $0,078535$, Ελάχιστη καταπόνηση= $0,152 \cdot 10^{-7}$ Μέγιστη μετατόπιση=152,131)



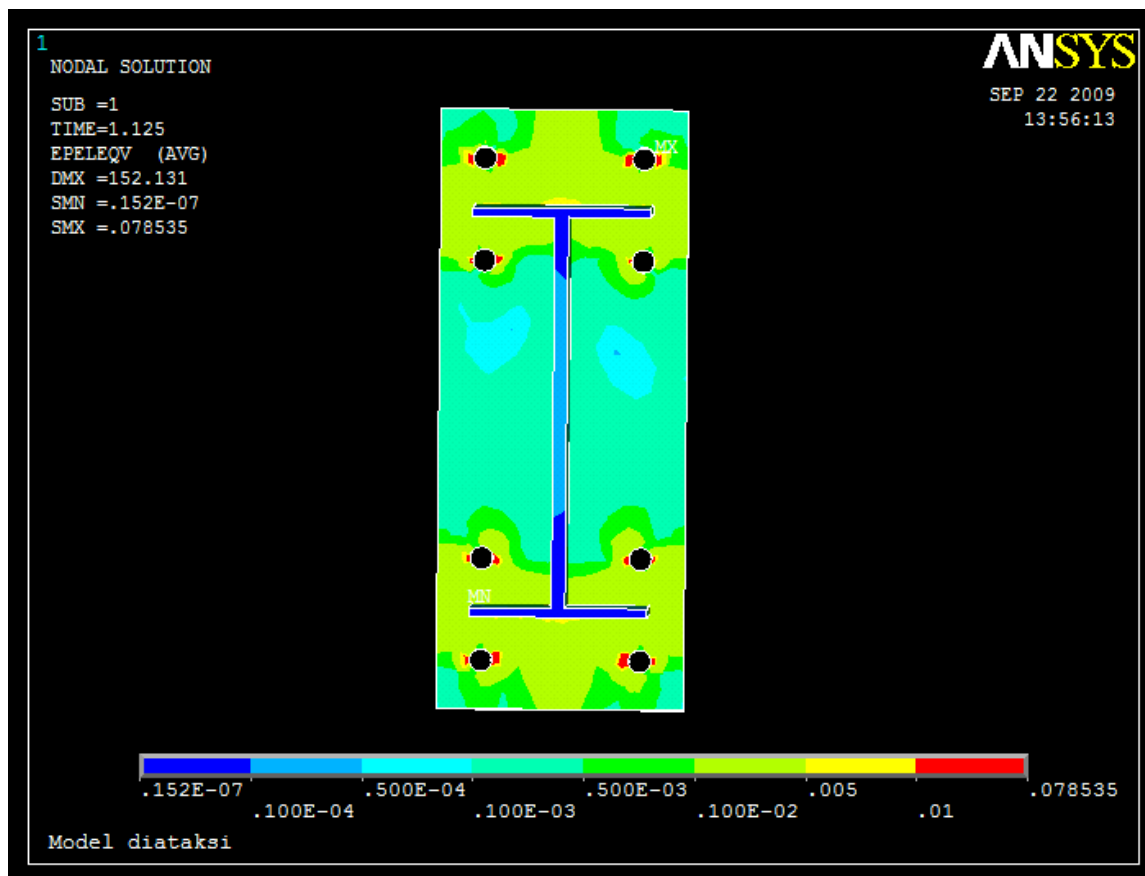
Εικόνα 34: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση= $0,078535$, Ελάχιστη καταπόνηση= $0,152 \cdot 10^{-7}$ Μέγιστη μετατόπιση=152,131)



Εικόνα 35: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,078535 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,152 \cdot 10^{-7}$ Μέγιστη μετατόπιση=152,131)

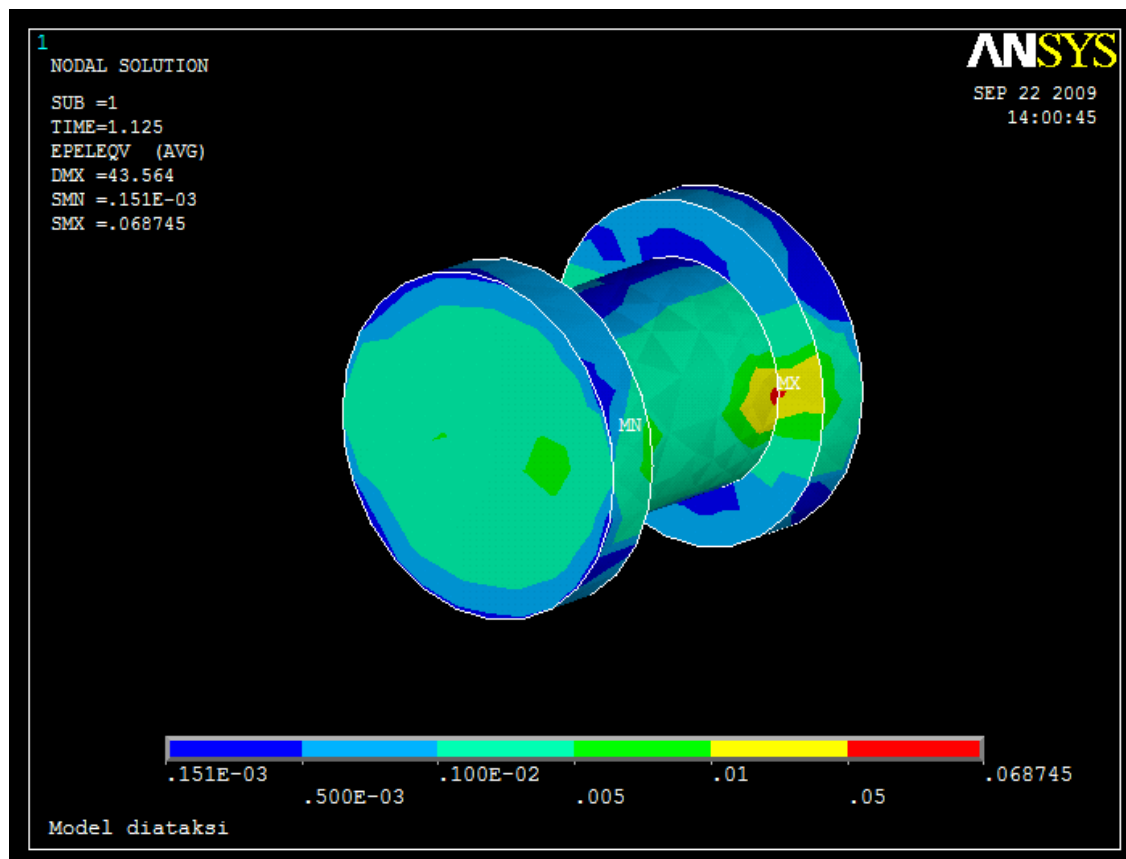


Εικόνα 36: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,078535 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,152 \cdot 10^{-7}$ Μέγιστη μετατόπιση=152,131)

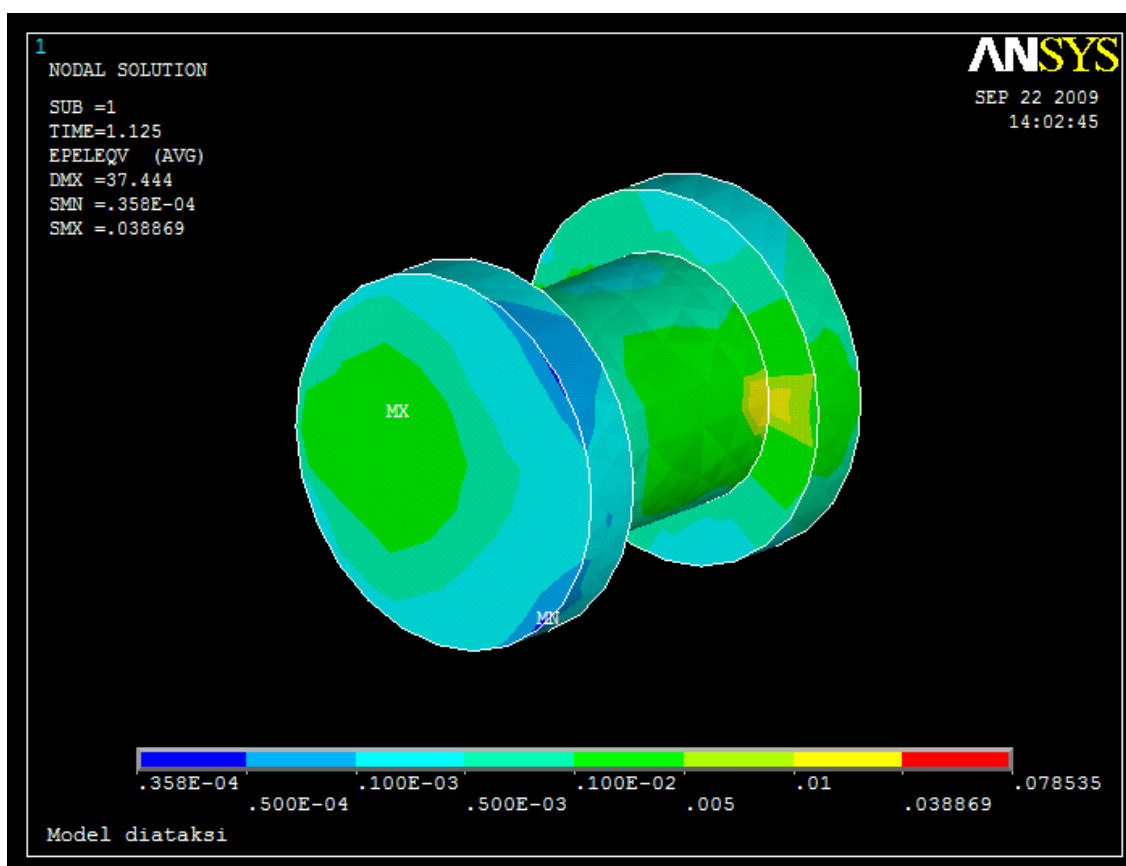


Εικόνα 37: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση= $0,078535$, Ελάχιστη καταπόνηση= $0,152 \cdot 10^{-7}$ Μέγιστη μετατόπιση=152,131)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο από τις κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης:

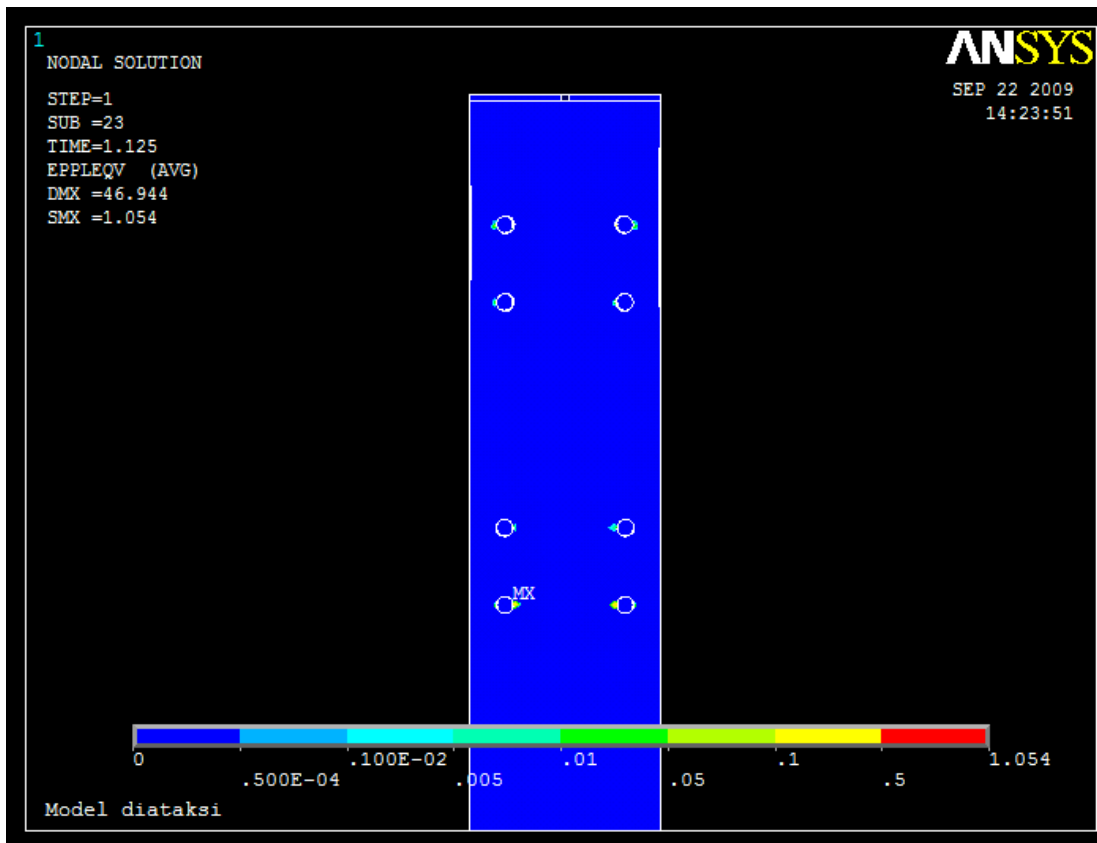


Εικόνα 38: Κοχλίας 3 (Μέγιστη καταπόνηση=0,068745 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,151 \cdot 10^{-3}$ Μέγιστη μετατόπιση=43,564)

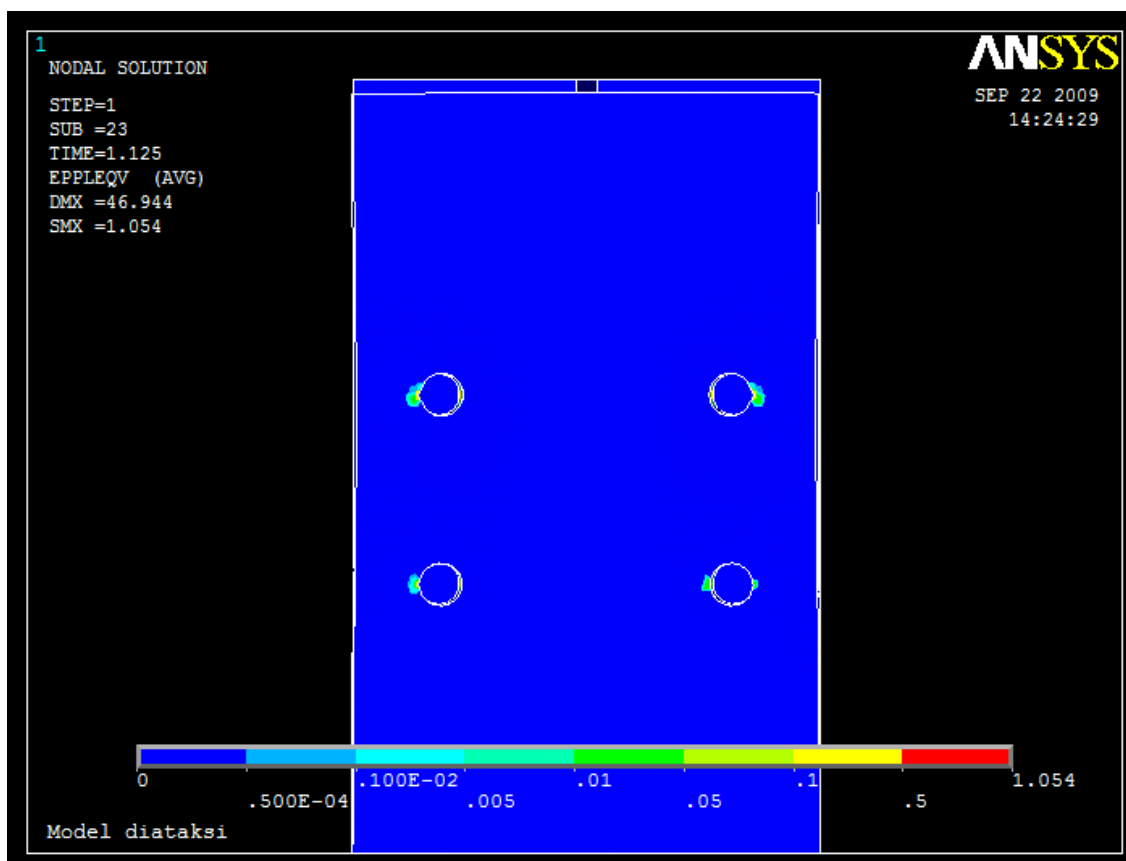


Εικόνα 39: Κοχλίας 4 (Μέγιστη καταπόνηση=0,038869 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,358 \cdot 10^{-4}$ Μέγιστη μετατόπιση=37,444)

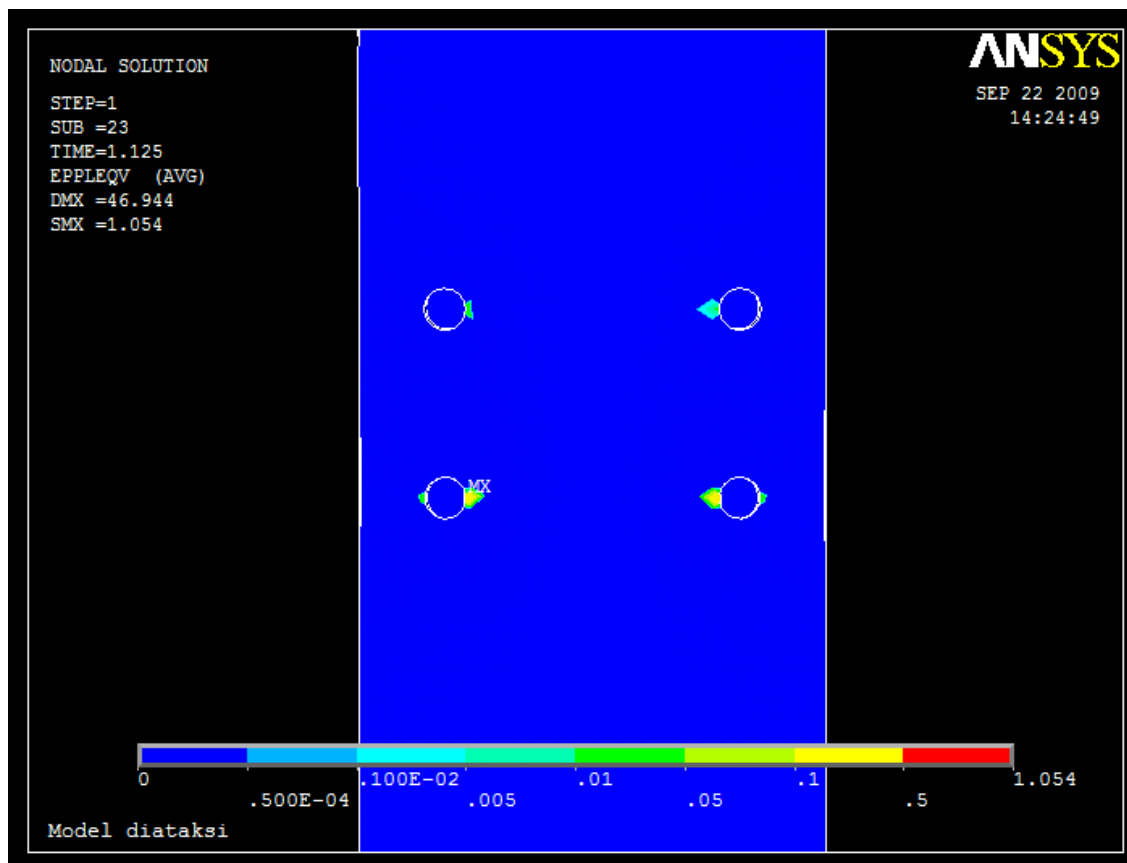
Ακόμα παρουσιάζεται σε εικόνες η πλαστική παραμόρφωση σε όσα σημεία παρατηρήθηκε το φαινόμενο αυτό. Έτσι στην κάθετη δοκό έχουμε τις εικόνες 40,41,42:



Εικόνα 40: Πλαστική παραμόρφωση κάθετης δοκού

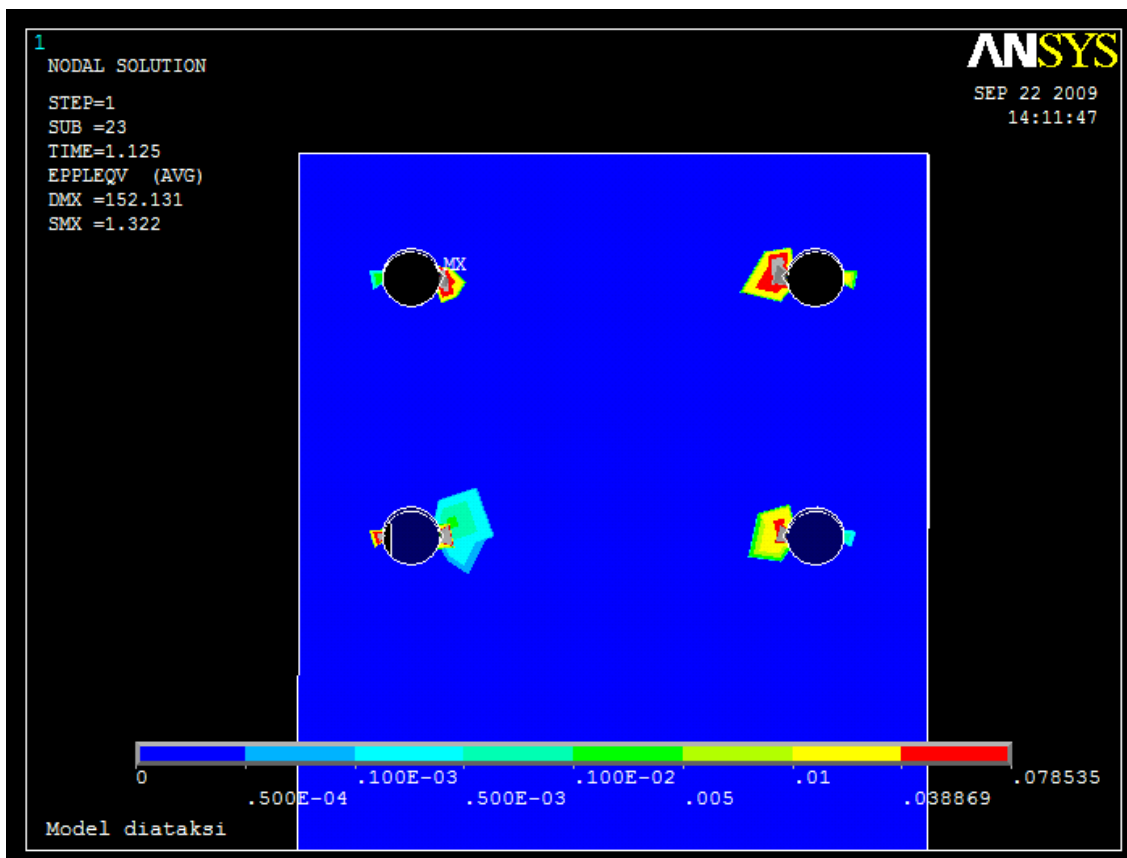


Εικόνα 41: Πλαστική παραμόρφωση κάθετης δοκού

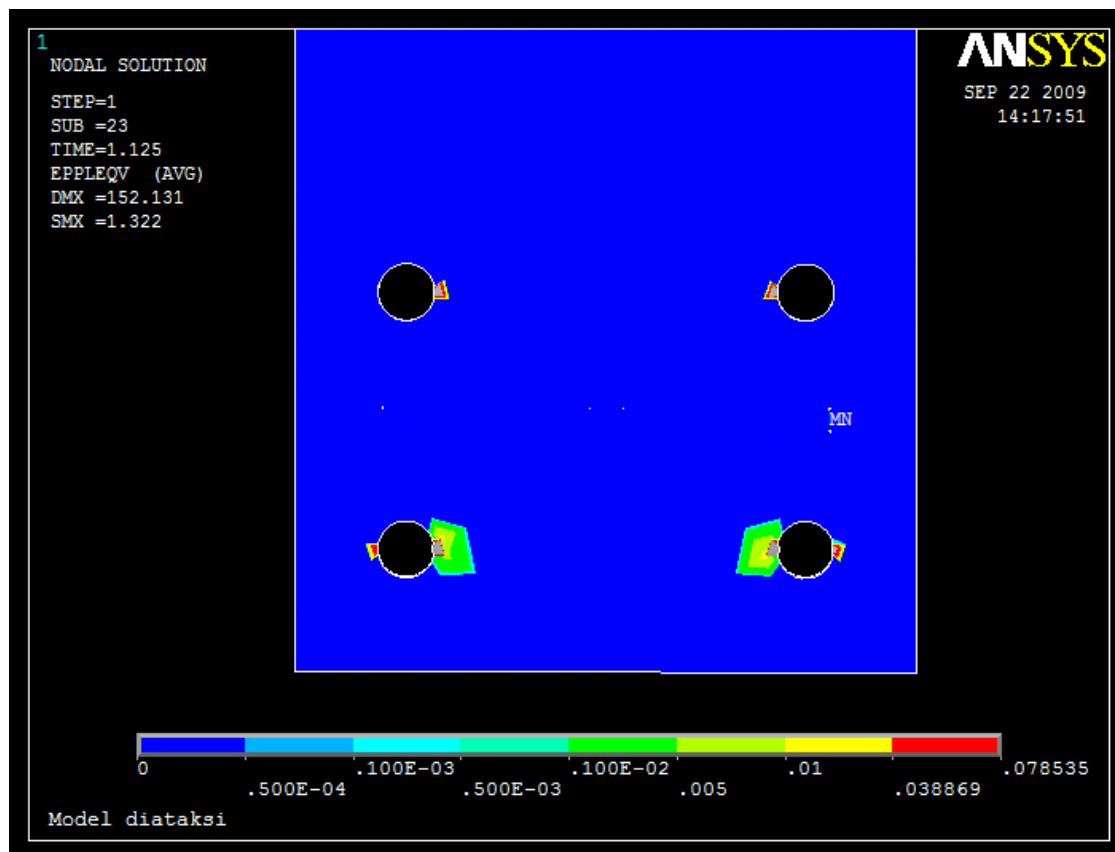


Εικόνα 42: Πλαστική παραμόρφωση κάθετης δοκού

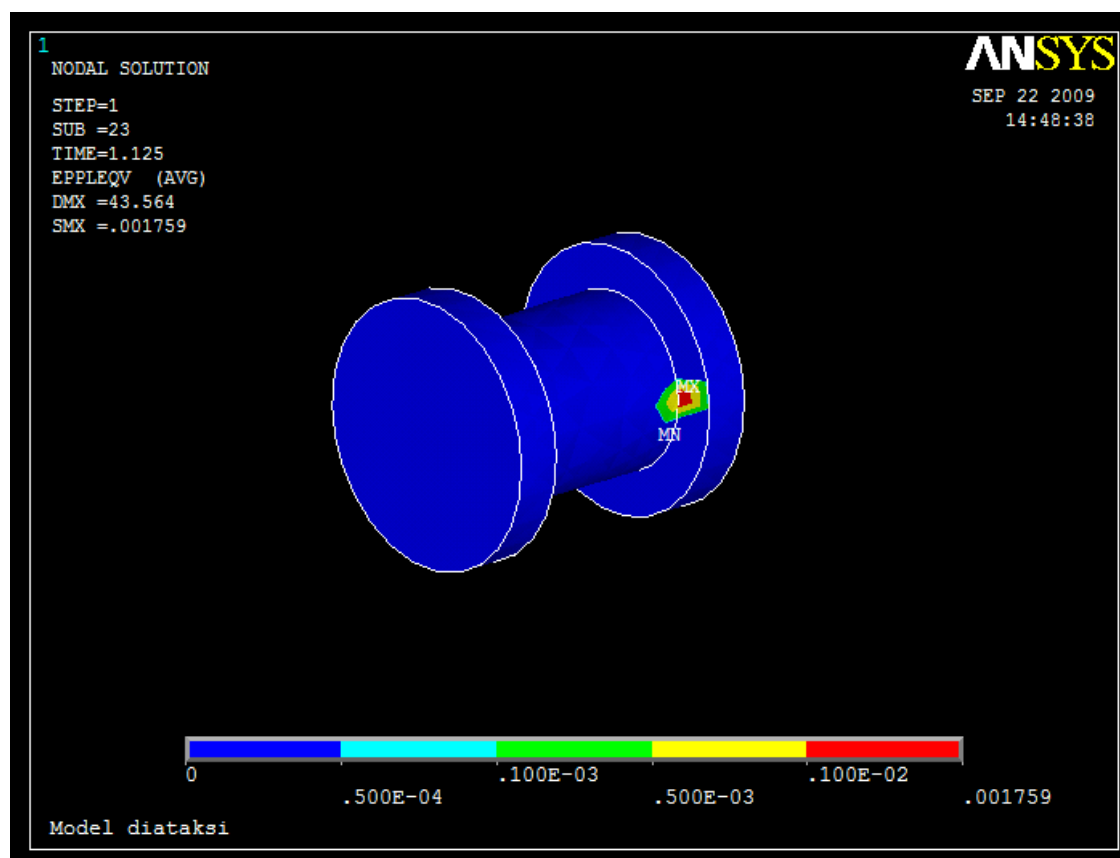
Ομοίως για την οριζόντια δοκό και τους κοχλίες (δίνεται ενδεικτικά ένας):



Εικόνα 43: Πλαστική παραμόρφωση οριζόντιας δοκού

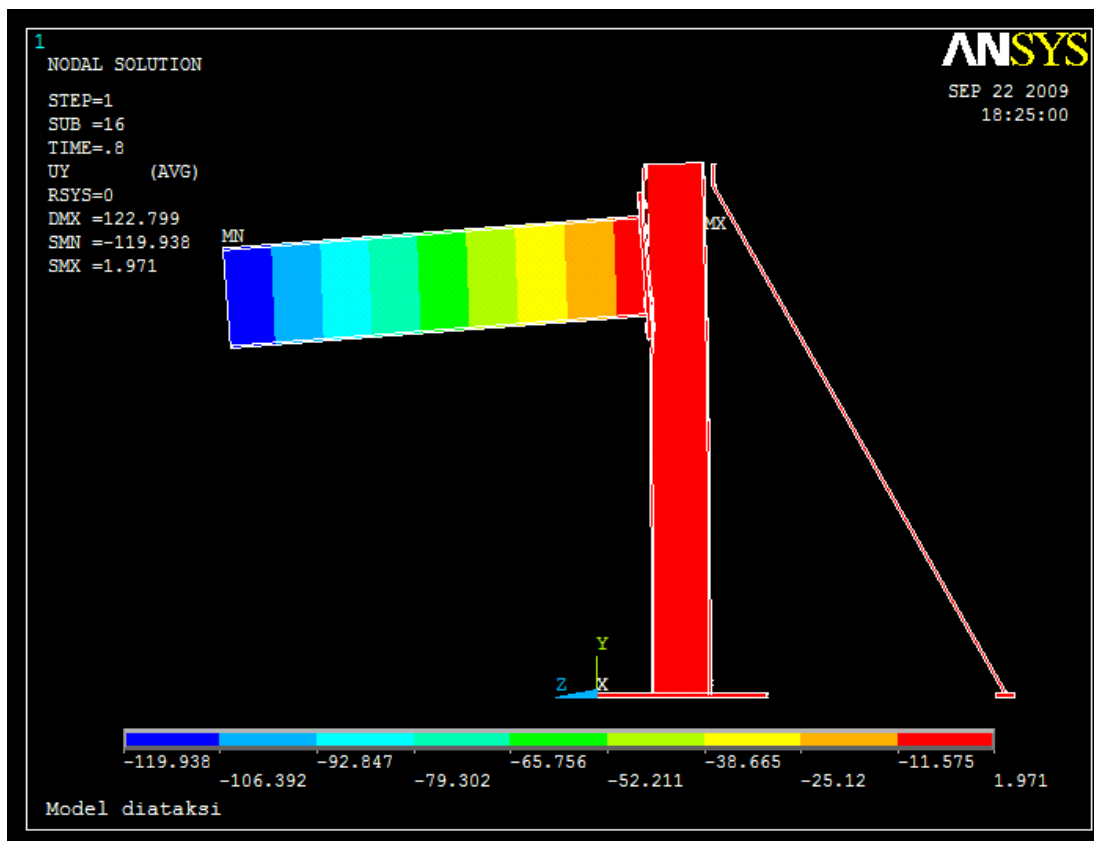


Εικόνα 44: Πλαστική παραμόρφωση οριζόντιας δοκού



Εικόνα 45: Πλαστική παραμόρφωση κοχλία 1

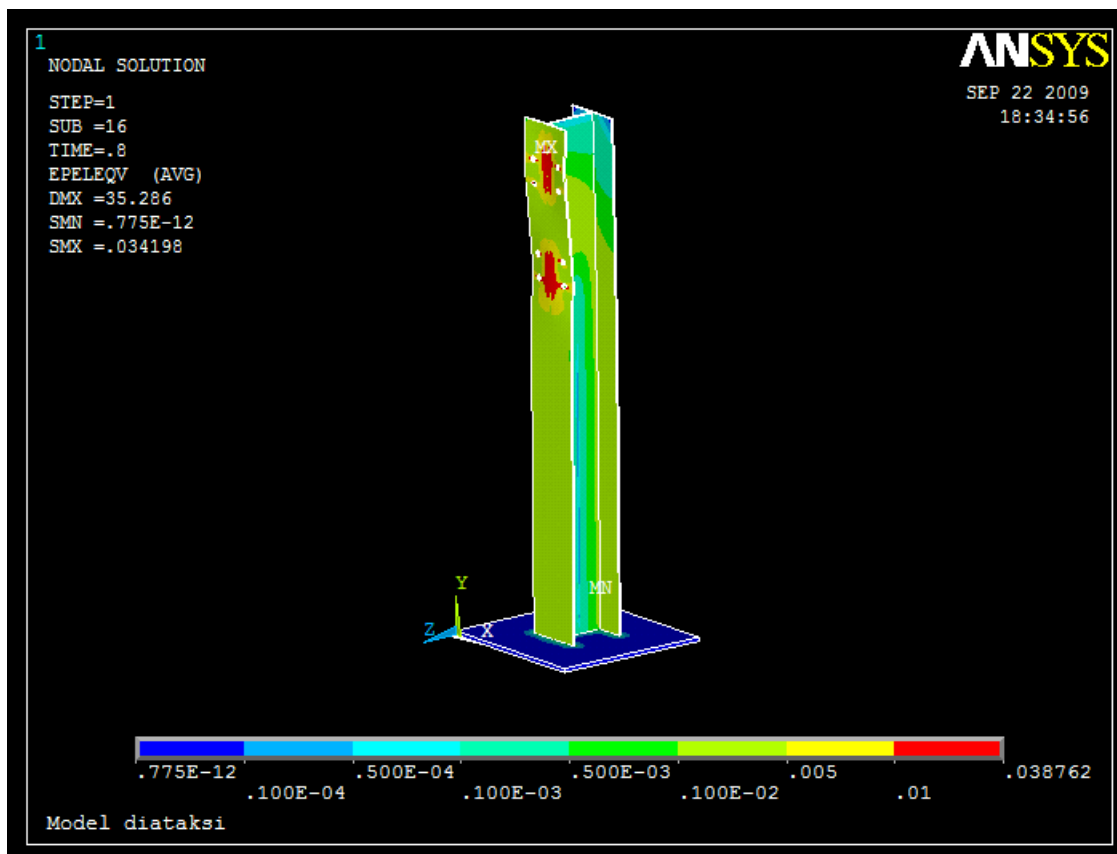
B) Στην εικόνα 46 παρουσιάζεται η διάταξη όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι διάφορες χρωματικές αποχρώσεις παρουσιάζουν τις ζώνες παραμόρφωσης πάνω στη διάταξη (TangMod=5.000):



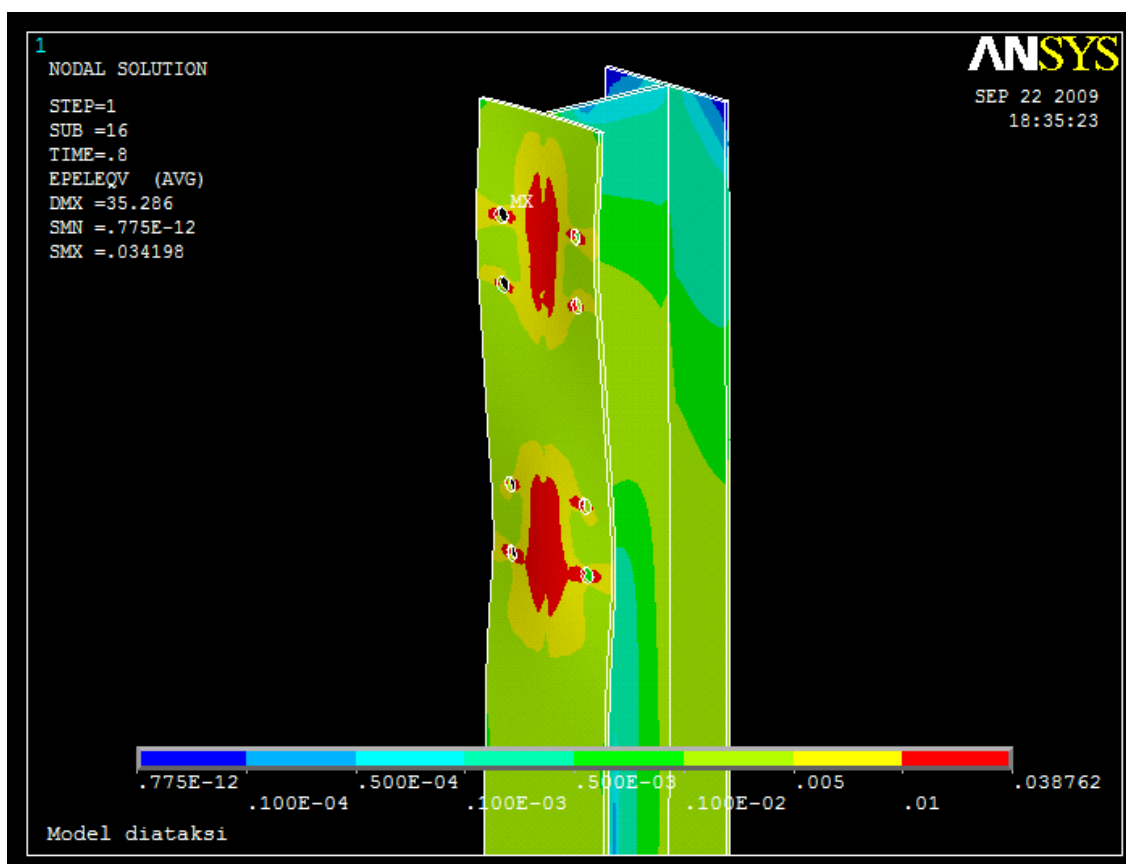
Εικόνα 46: Παραμόρφωση διάταξης (Μέγιστη μετατόπιση=119,938mm)

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η ελαστική παραμόρφωση κατά Von Mises (Von Mises elastic strain) στα διάφορα κομμάτια της διάταξης μας. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η ισοδύναμη τάση Von Mises παρουσιάζει υπολογιστικό ενδιαφέρον διότι έχουμε μια τρισδιάστατη διάταξη στην οποία ασκούνται ορθές και διατμητικές τάσεις και στους τρεις άξονες x,y,z. Ο τύπος της ισοδύναμης τάσης Von Mises σ_e παρουσιάζεται παρακάτω:

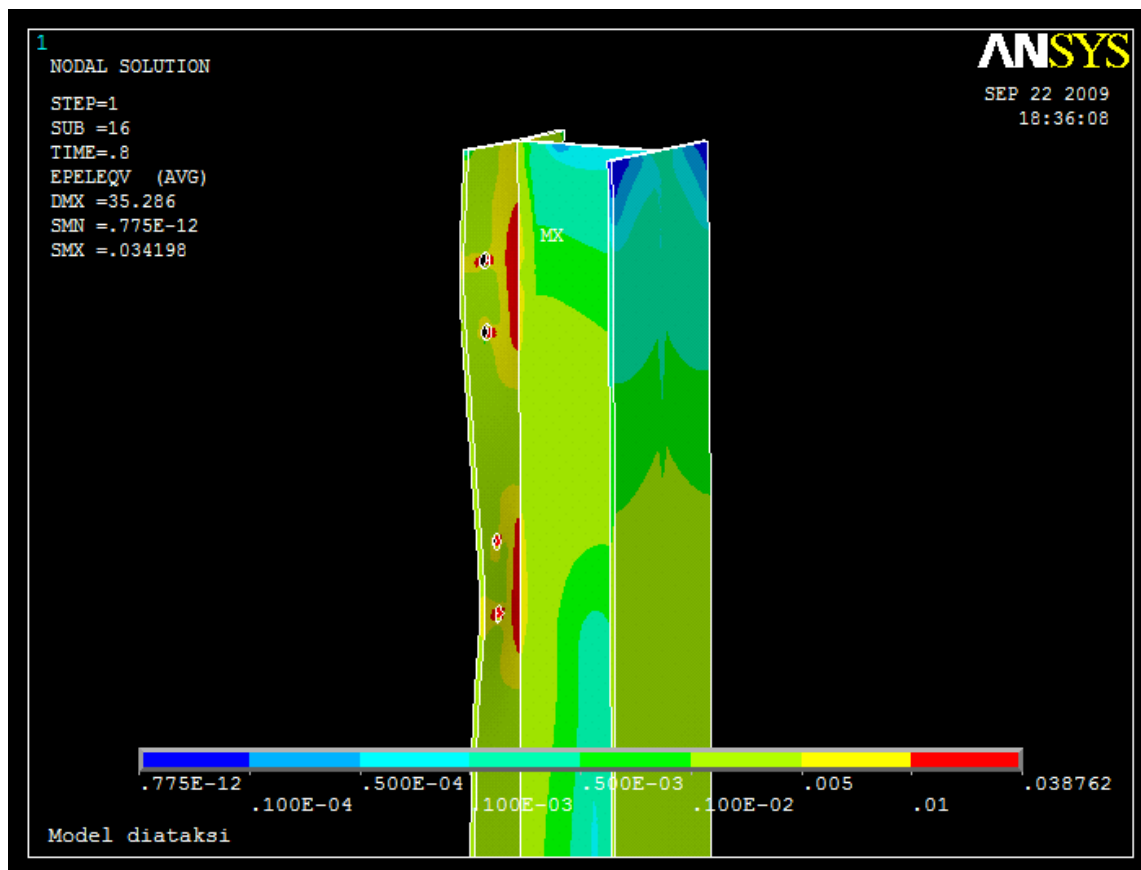
$$\sigma_e = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2)] \right\}^{1/2}$$



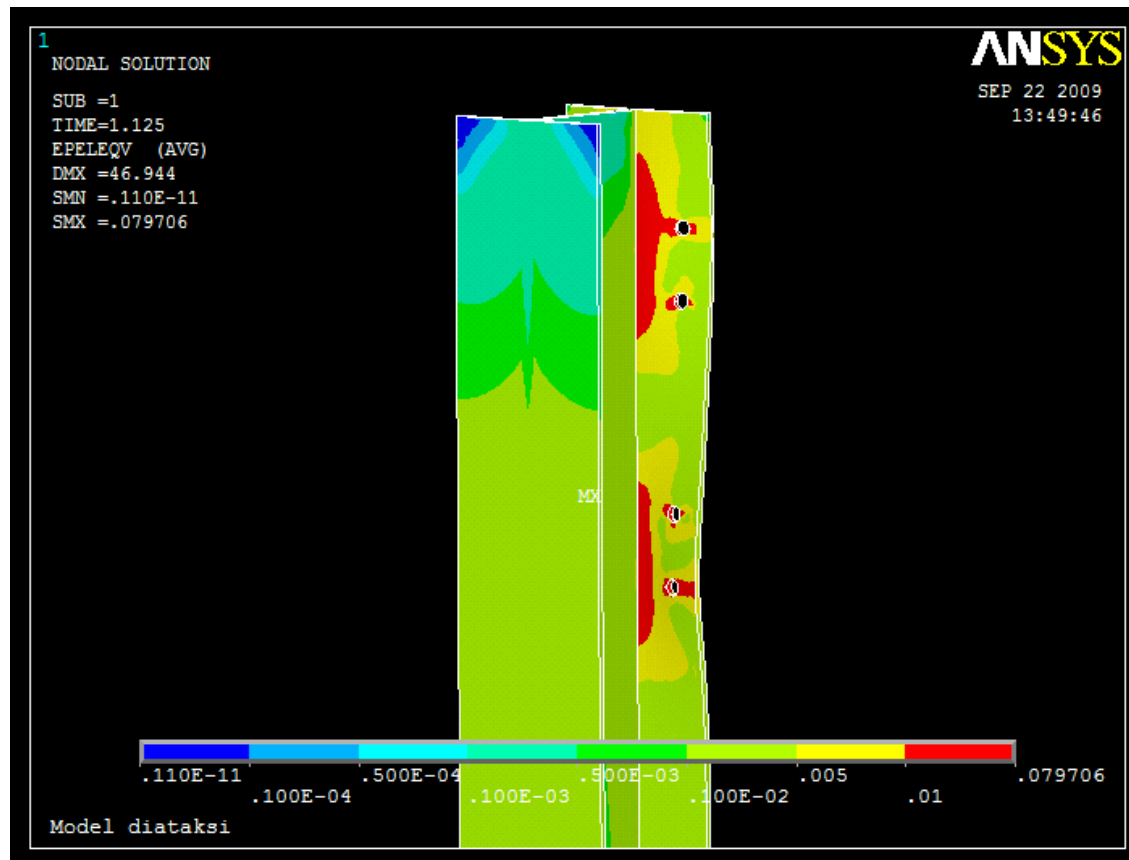
Εικόνα 47: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση= $0,034198$, Ελάχιστη καταπόνηση= $0,775 \cdot 10^{-12}$ Μέγιστη μετατόπιση=35,286)



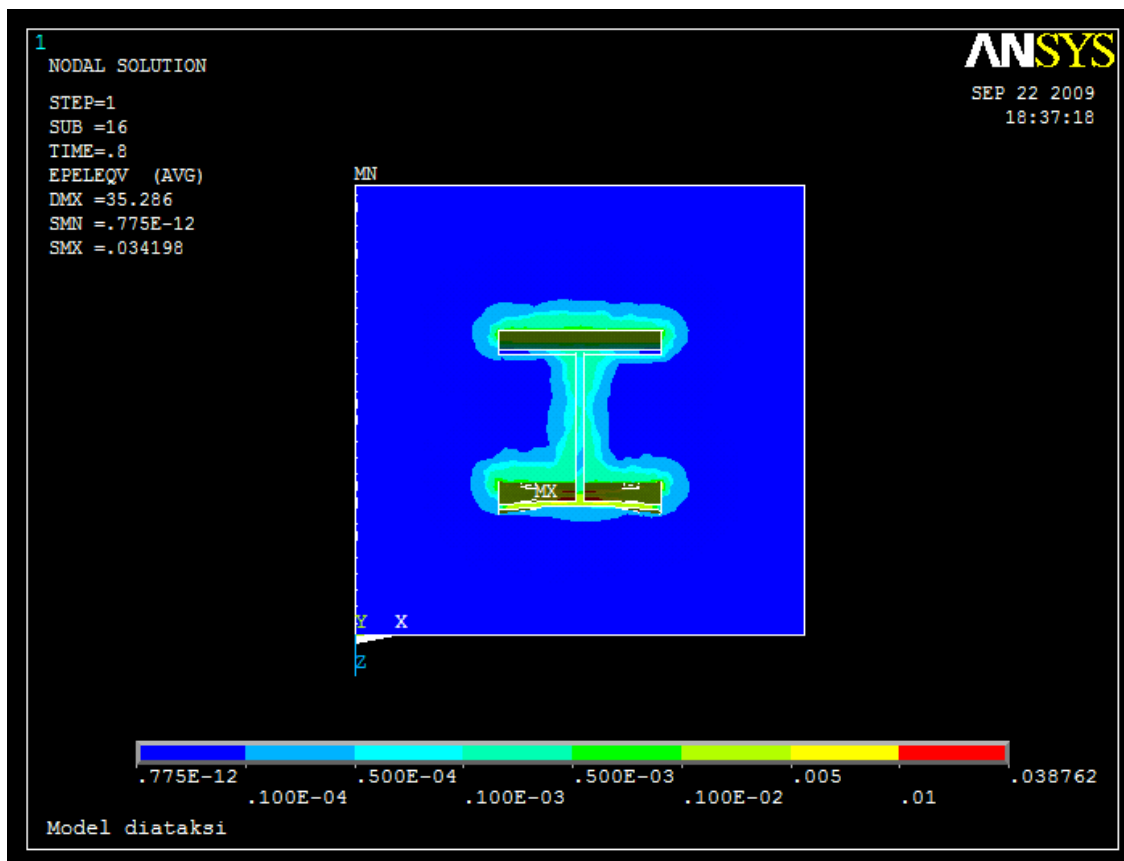
Εικόνα 48: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση= $0,034198$, Ελάχιστη καταπόνηση= $0,775 \cdot 10^{-12}$ Μέγιστη μετατόπιση=35,286)



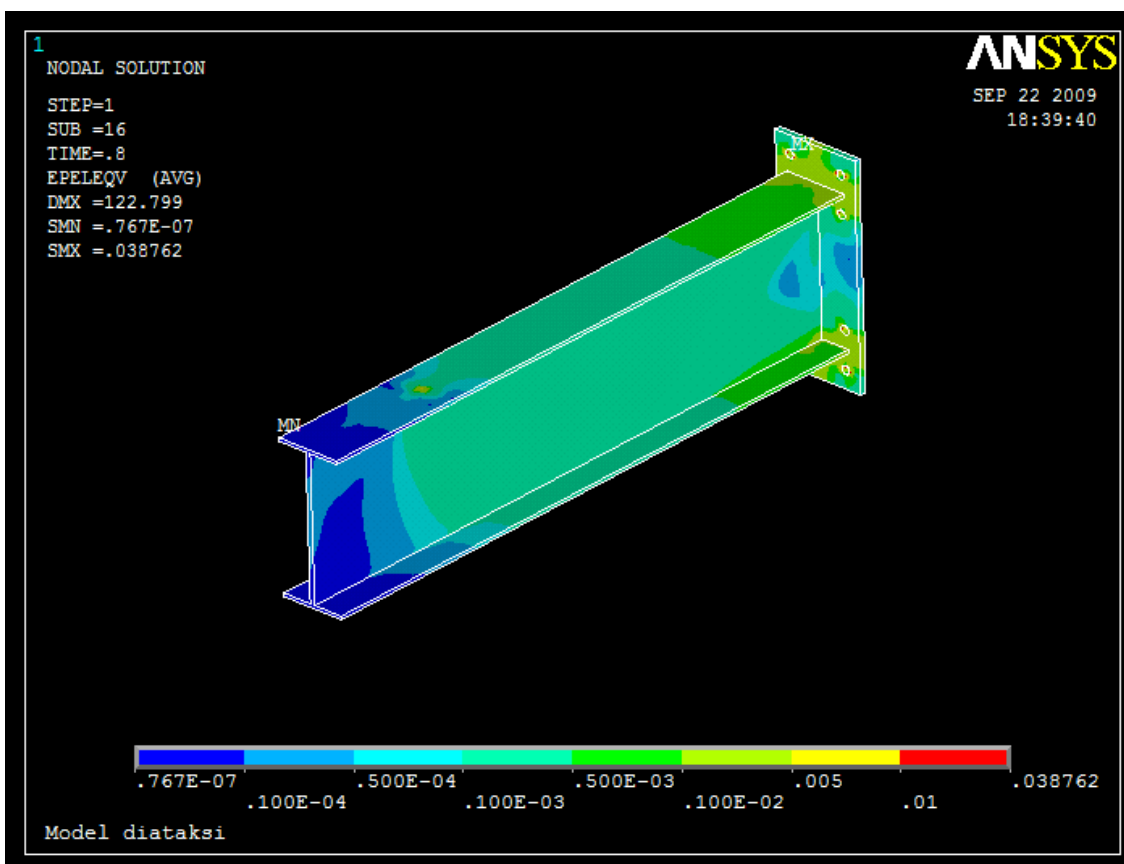
Εικόνα 49: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,034198 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,775 \cdot 10^{-12}$ Μέγιστη μετατόπιση=35,286)



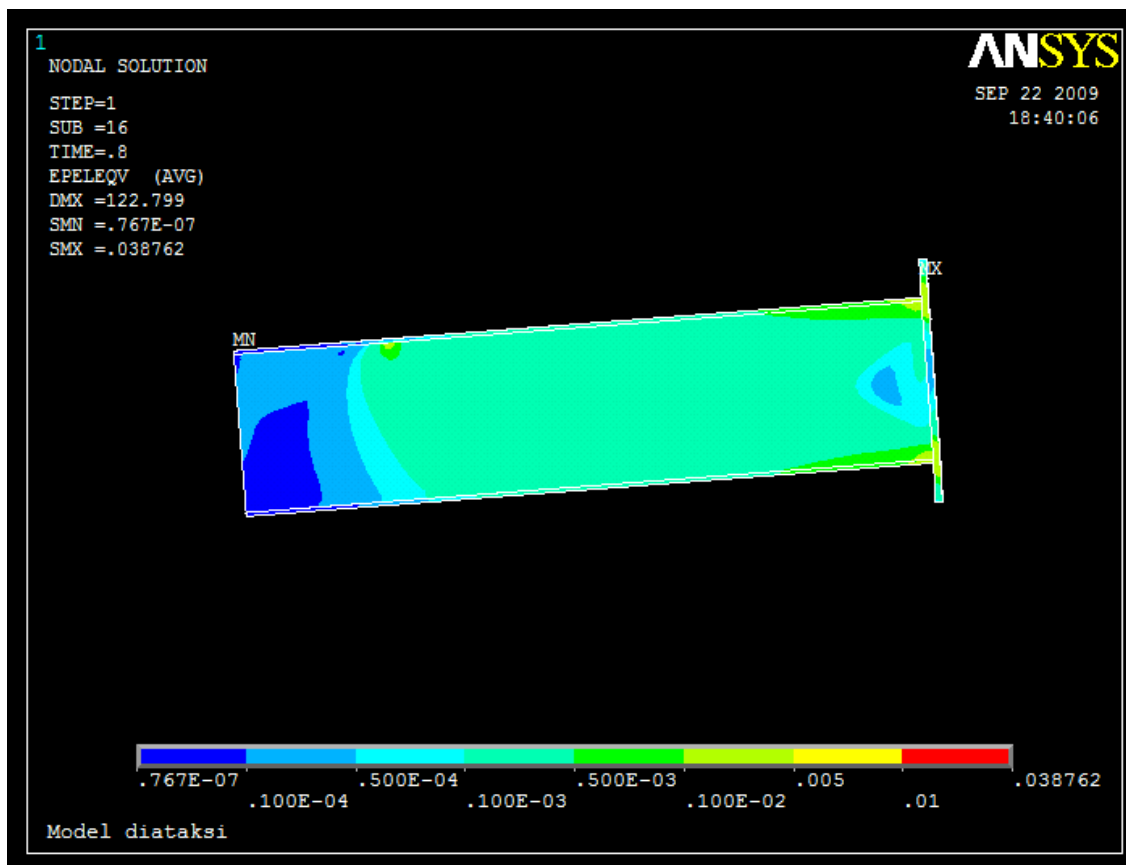
Εικόνα 50: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,034198 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,775 \cdot 10^{-12}$ Μέγιστη μετατόπιση=35,286)



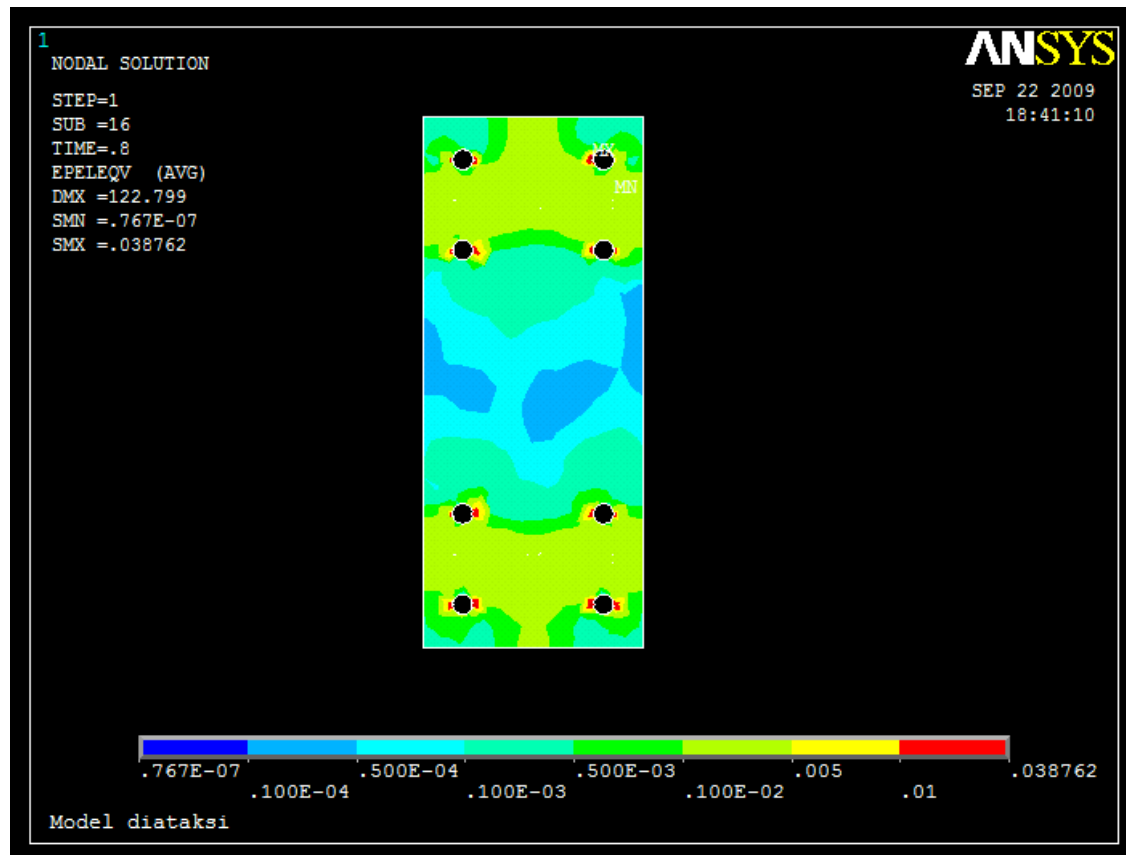
Εικόνα 51: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,034198 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,775 \cdot 10^{-12}$ Μέγιστη μετατόπιση=35,286)



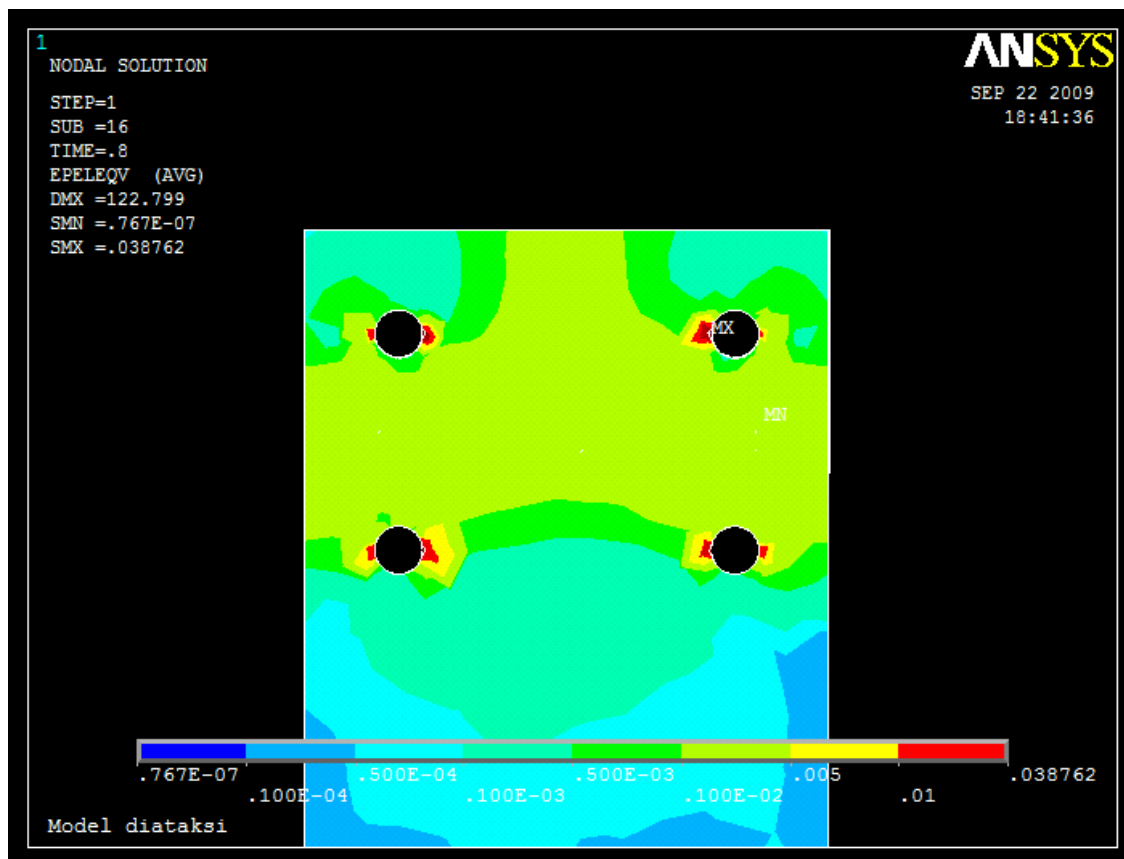
Εικόνα 52: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,038762 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,767 \cdot 10^{-7}$ Μέγιστη μετατόπιση=122,799)



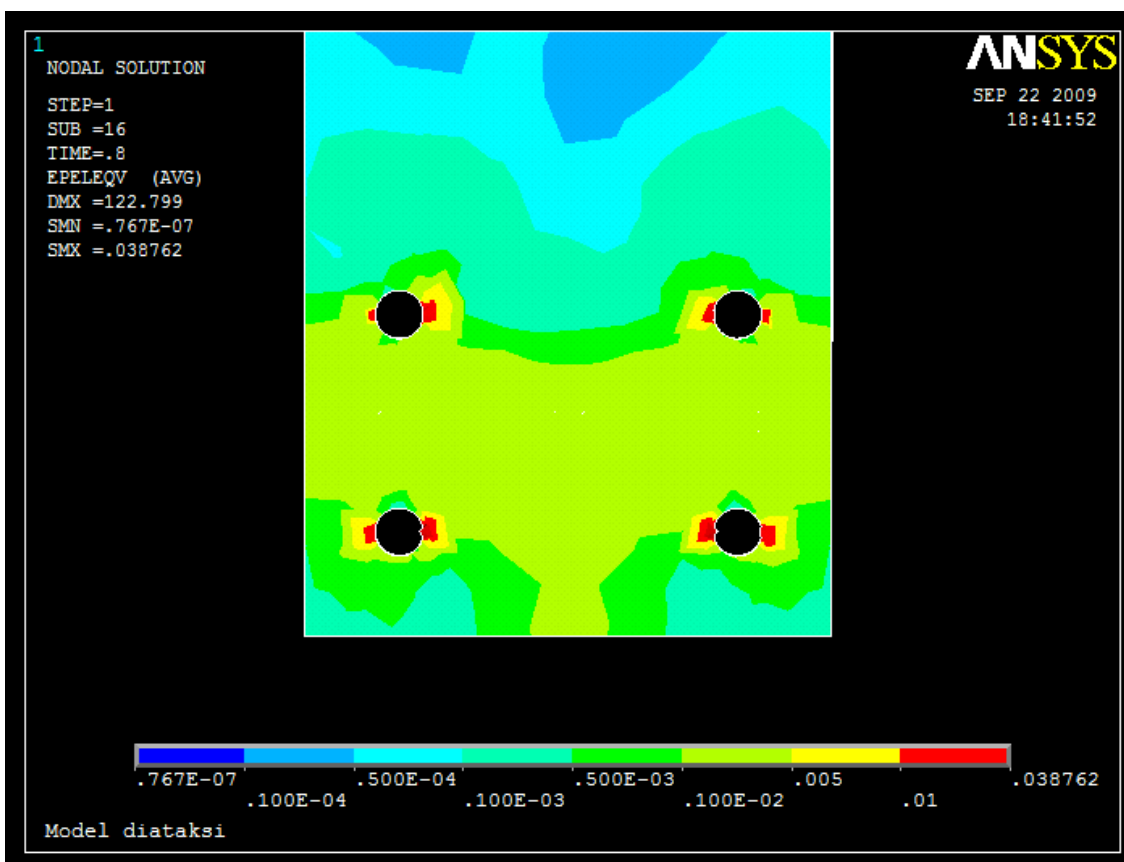
Εικόνα 53: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση= $0,038762$, Ελάχιστη καταπόνηση= $0,767 \cdot 10^{-7}$ Μέγιστη μετατόπιση=122,799)



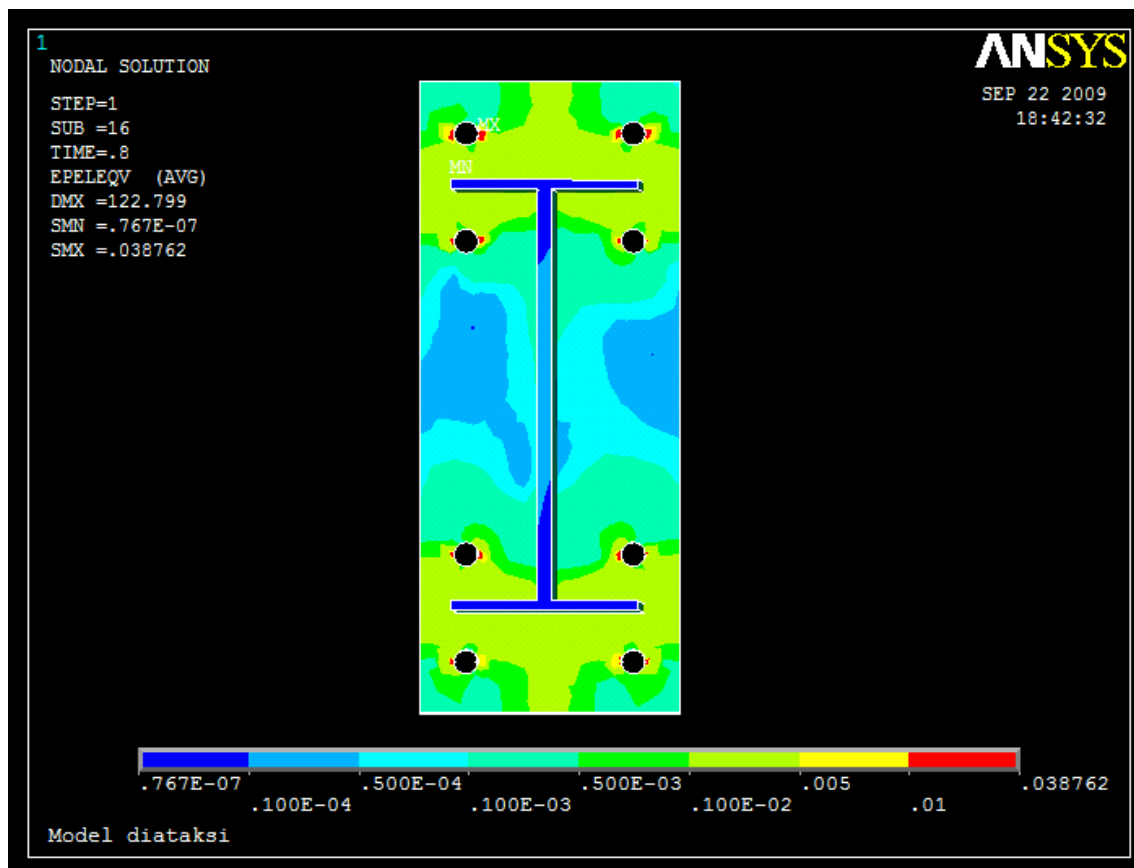
Εικόνα 54: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση= $0,038762$, Ελάχιστη καταπόνηση= $0,767 \cdot 10^{-7}$ Μέγιστη μετατόπιση=122,799)



Εικόνα 55: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,038762 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,767 \cdot 10^{-7}$ Μέγιστη μετατόπιση=122,799)

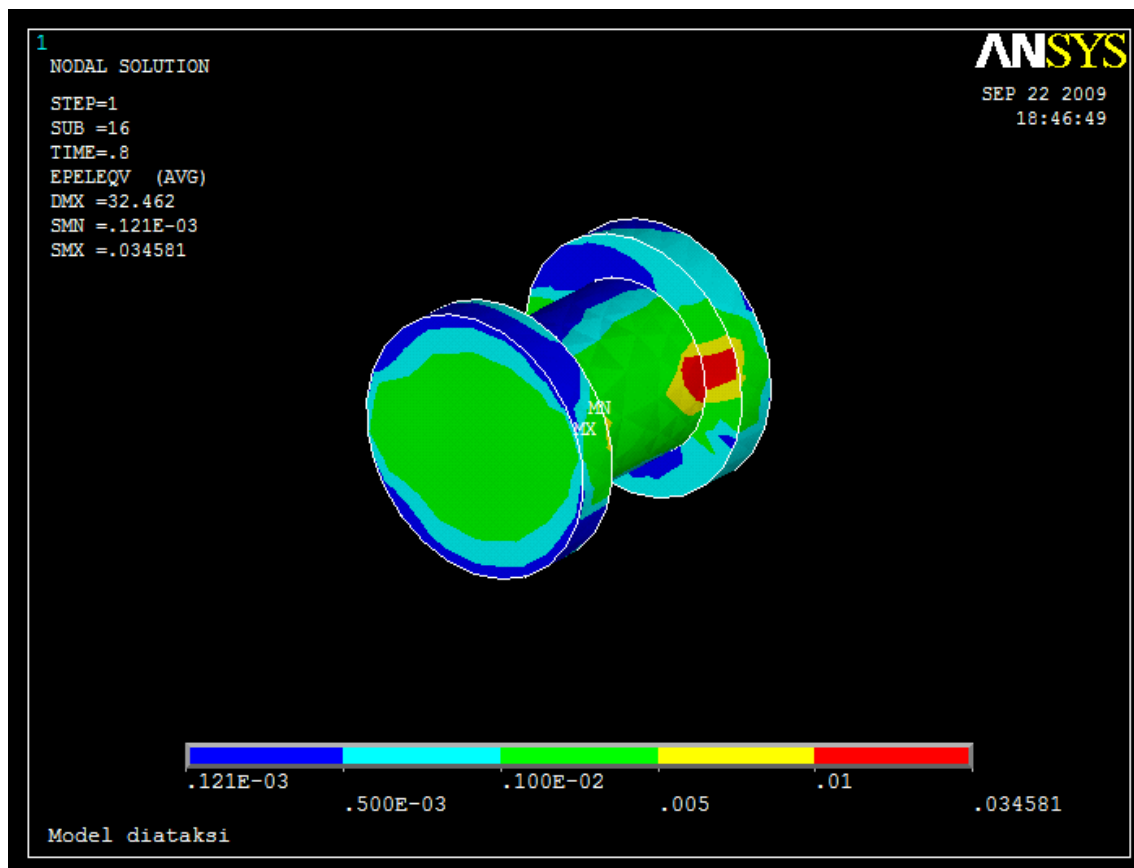


Εικόνα 56: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,038762 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,767 \cdot 10^{-7}$ Μέγιστη μετατόπιση=122,799)

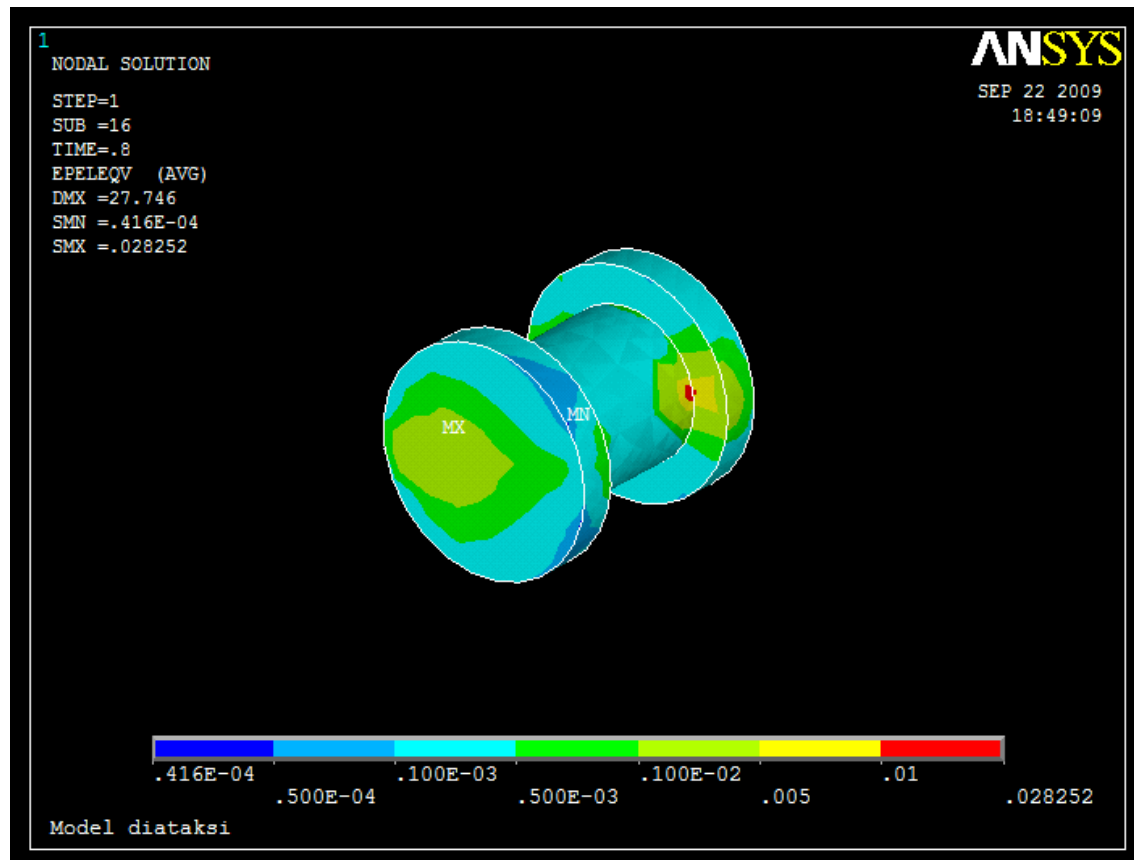


Εικόνα 57: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,038762 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,767 \cdot 10^{-7}$ Μέγιστη μετατόπιση=122,799)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο από τις κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης:

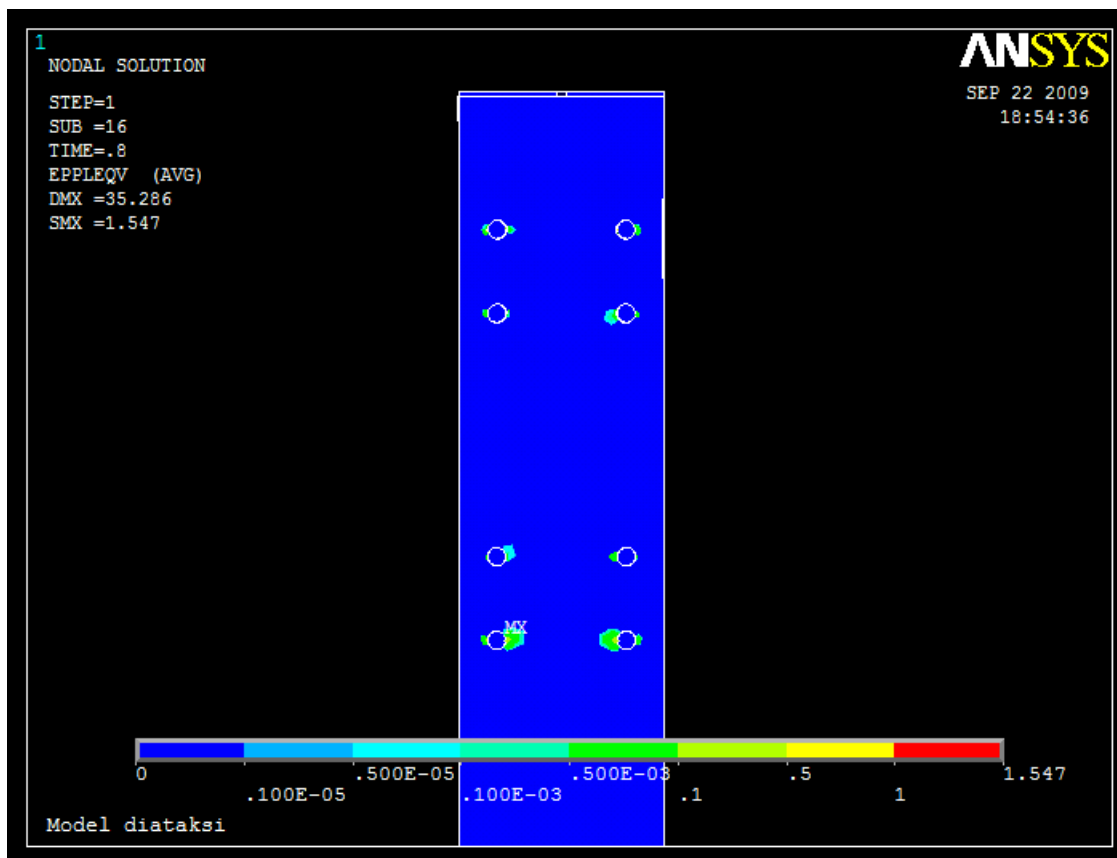


Εικόνα 58: Κοχλίας 1 (Μέγιστη καταπόνηση=0,034581 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,121 \cdot 10^{-3}$ Μέγιστη μετατόπιση=32,462)

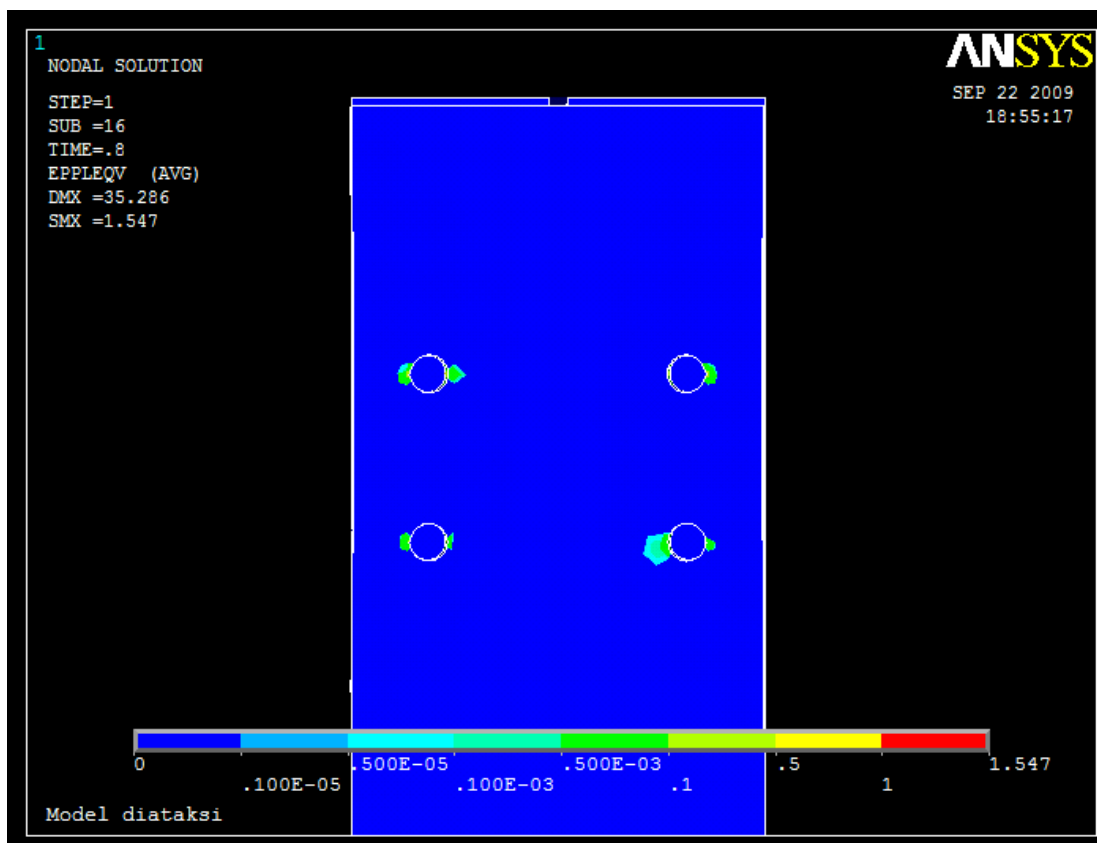


Εικόνα 59: Κοχλίας 2 (Μέγιστη καταπόνηση=0,028252 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,416 \cdot 10^{-4}$ Μέγιστη μετατόπιση=27,746)

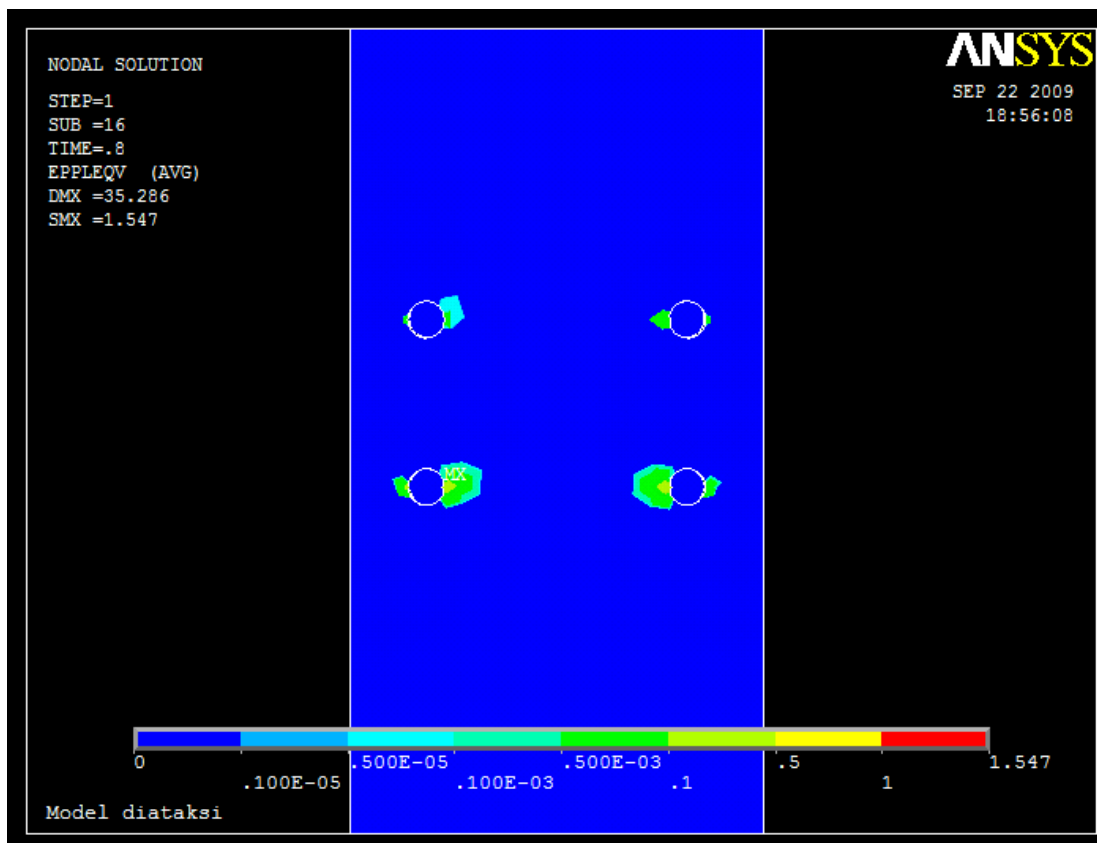
Ακόμα παρουσιάζεται σε εικόνες η πλαστική παραμόρφωση σε όσα σημεία παρατηρήθηκε το φαινόμενο αυτό. Έτσι στην κάθετη δοκό έχουμε τις εικόνες 60,61,62:



Εικόνα 60: Πλαστική παραμόρφωση κάθετης δοκού

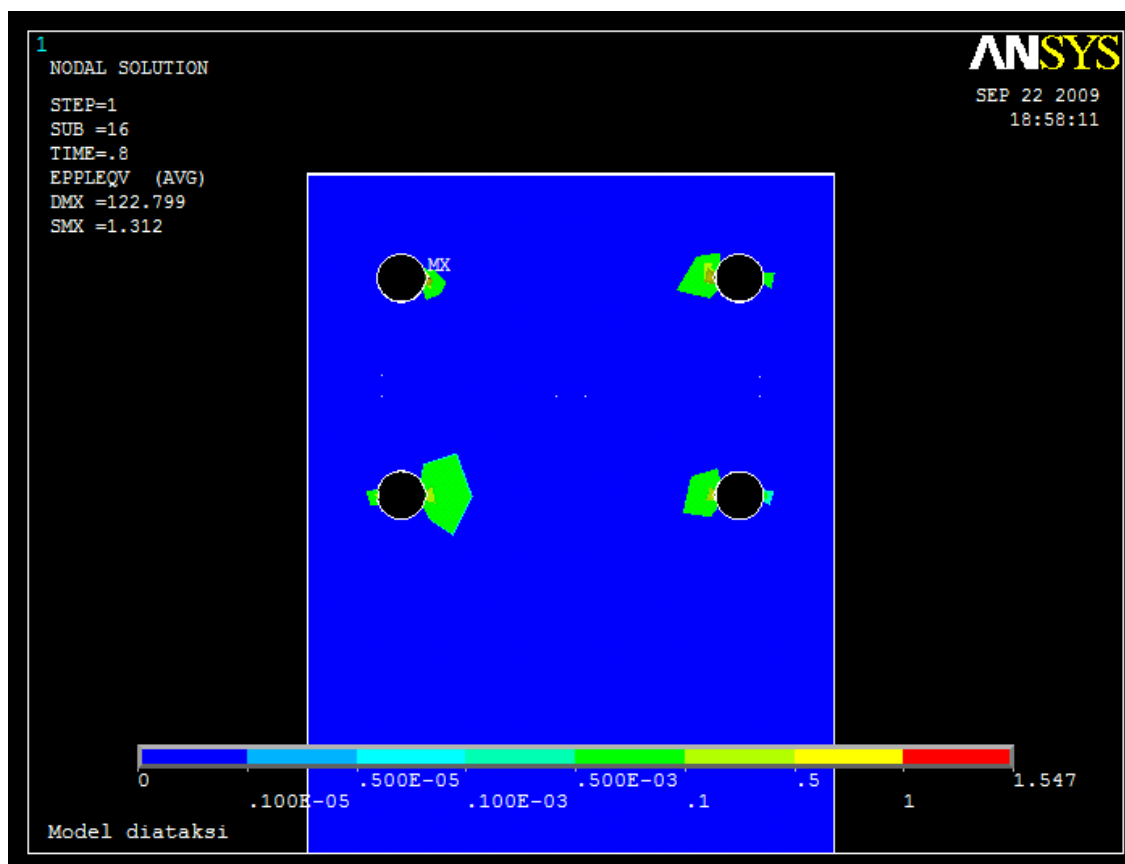


Εικόνα 61: Πλαστική παραμόρφωση κάθετης δοκού

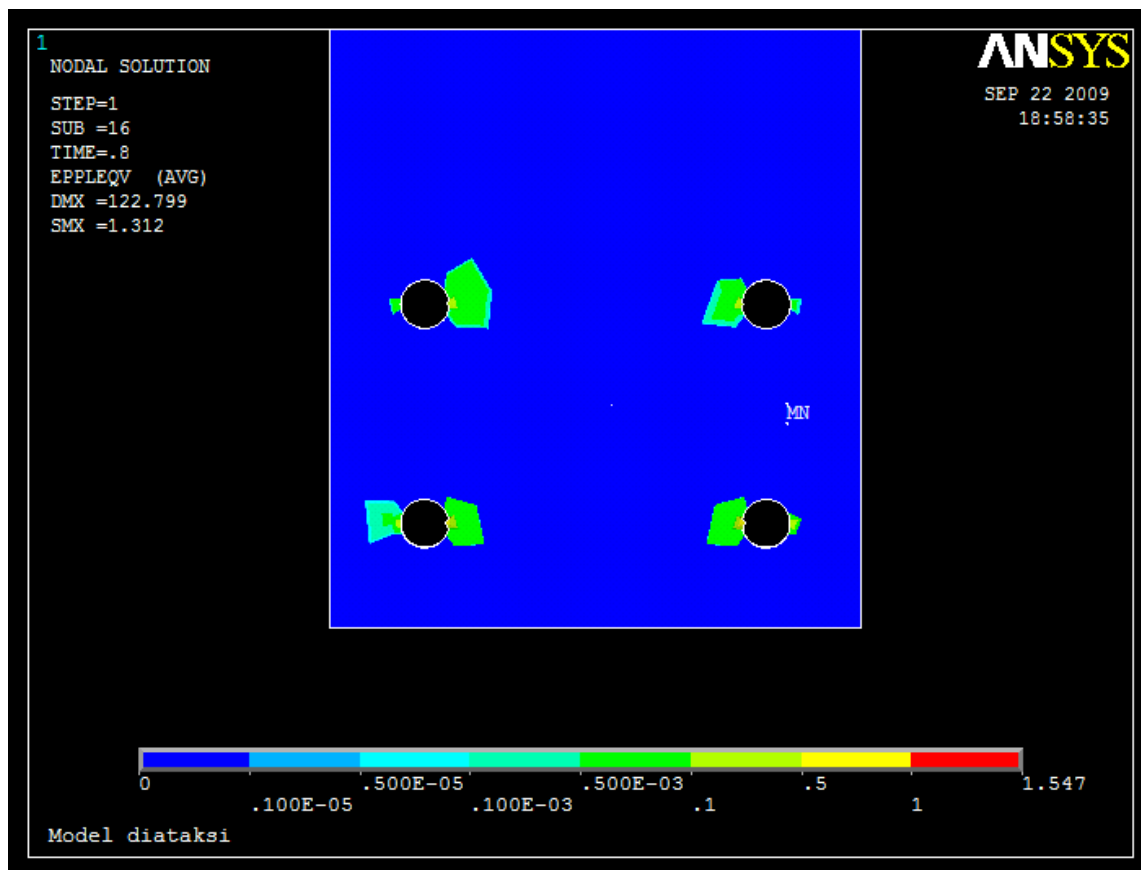


Εικόνα 62: Πλαστική παραμόρφωση κάθετης δοκού

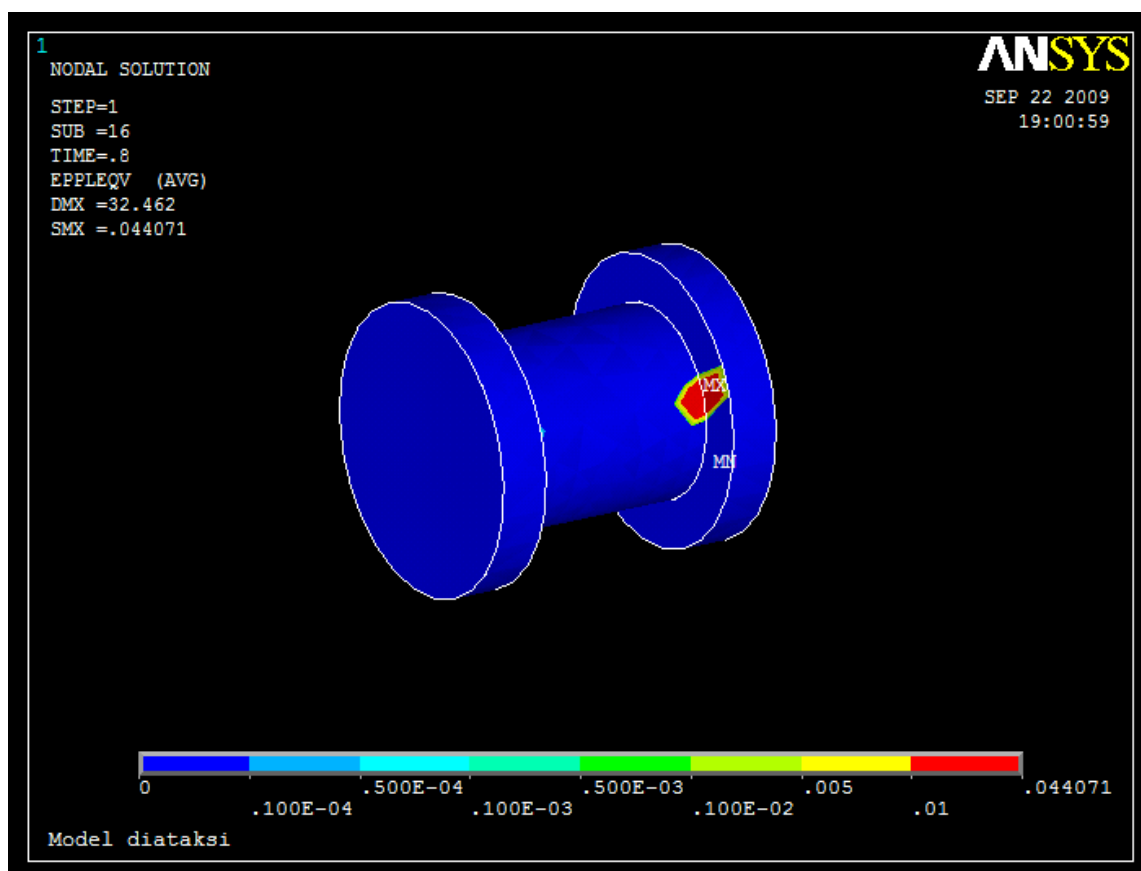
Ομοίως για την οριζόντια δοκό και τους κοχλίες (δίνεται ενδεικτικά ένας):



Εικόνα 63: Πλαστική παραμόρφωση οριζόντιας δοκού



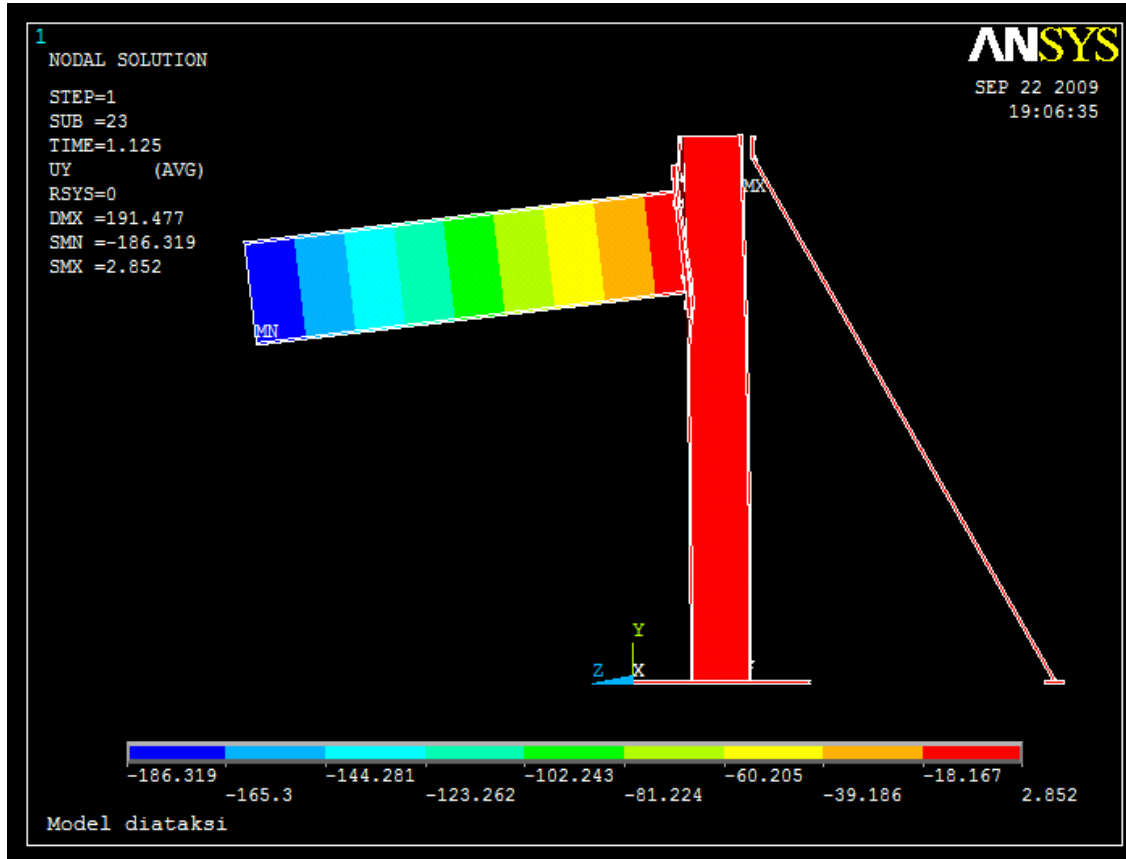
Εικόνα 64: Πλαστική παραμόρφωση οριζόντιας δοκού



Εικόνα 65: Πλαστική παραμόρφωση κοχλία 1

§ 3.2.2 Ελαστοπλαστικό υλικό με μικρές μετακινήσεις (όχι γεωμετρική μη-γραμμικότητα)

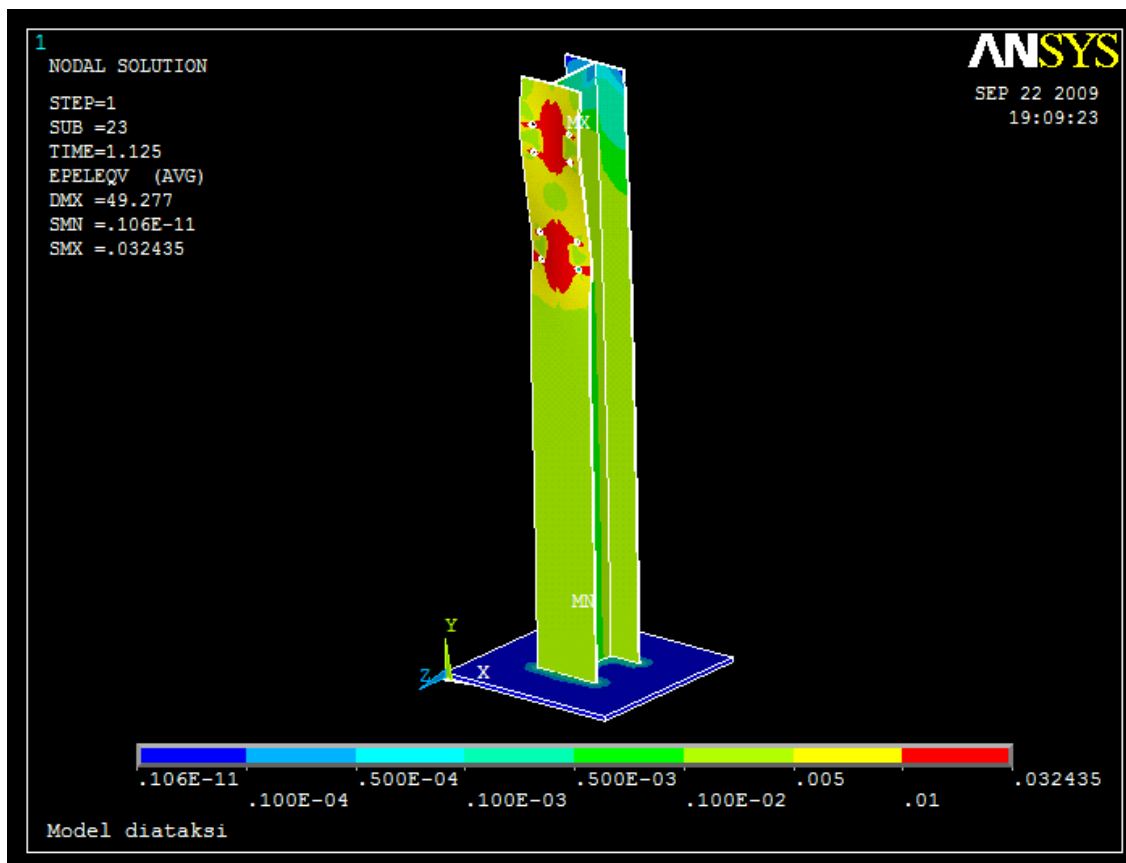
Στην εικόνα 21 παρουσιάζεται η διάταξη σε εικόνες όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι διάφορες χρωματικές αποχρώσεις παρουσιάζουν τις ζώνες παραμόρφωσης πάνω στη διάταξη :



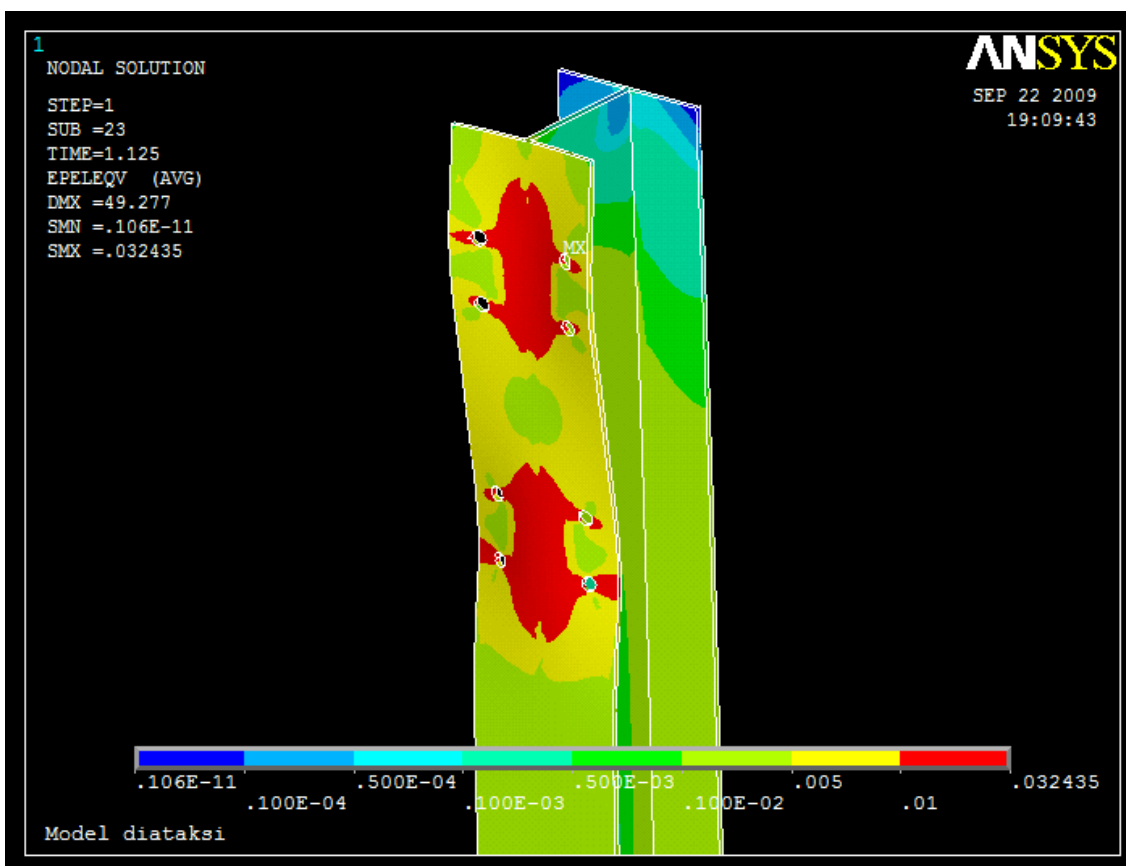
Εικόνα 66: Παραμόρφωση διάταξης (Μέγιστη μετατόπιση=186,319 mm)

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η ελαστική παραμόρφωση κατά Von Mises (Von Mises elastic strain) στα διάφορα κομμάτια της διάταξης μας. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η ισοδύναμη τάση Von Mises παρουσιάζει υπολογιστικό ενδιαφέρον διότι έχουμε μια τρισδιάστατη διάταξη στην οποία ασκούνται ορθές και διατμητικές τάσεις και στους τρεις άξονες x,y,z.Ο τύπος της ισοδύναμης τάσης Von Mises σ_e παρουσιάζεται παρακάτω:

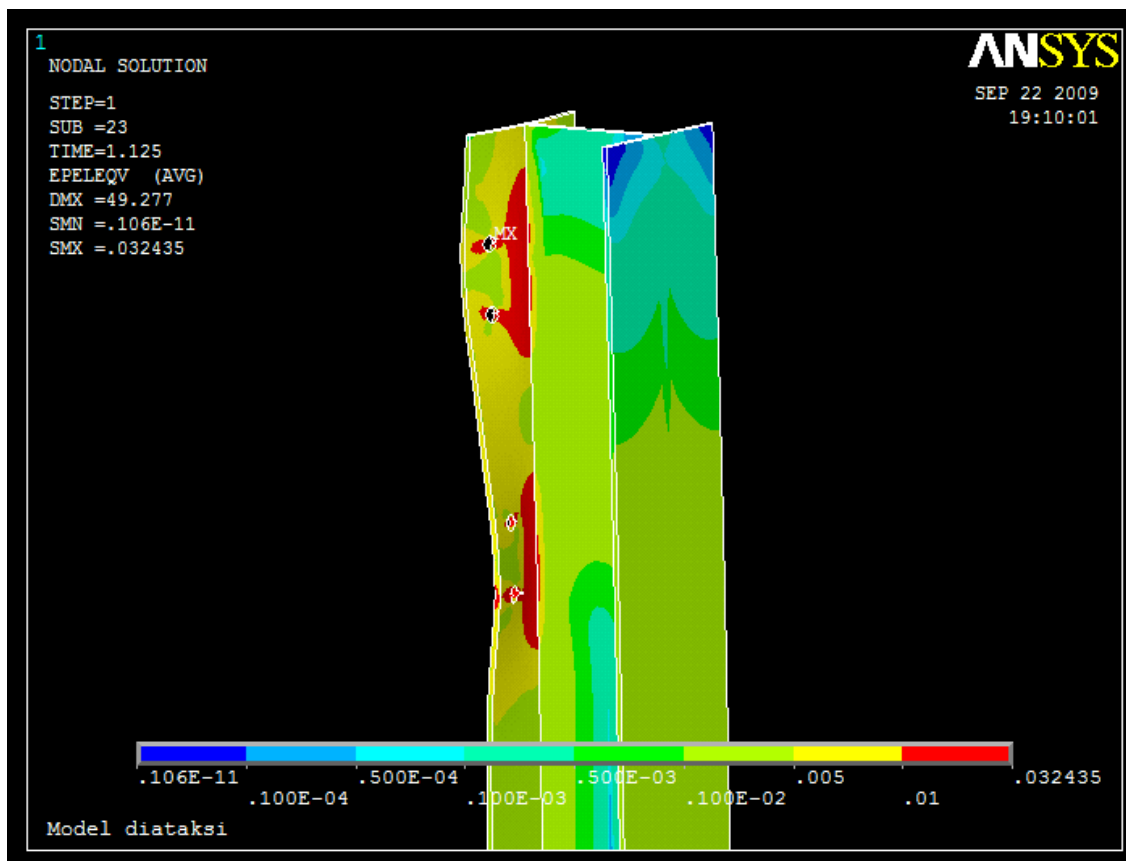
$$\sigma_e = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2)] \right\}^{1/2}$$



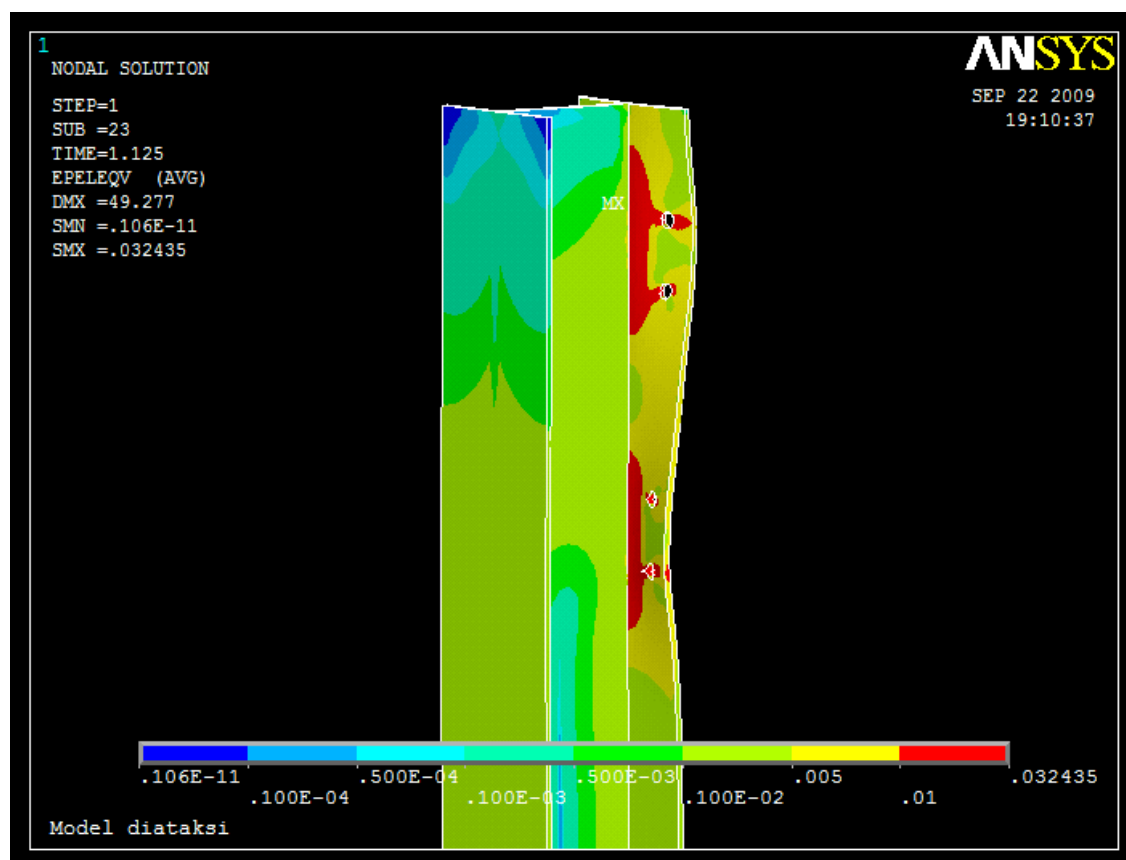
Εικόνα 67: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,032435 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,106 \cdot 10^{-11}$ Μέγιστη μετατόπιση=49,277)



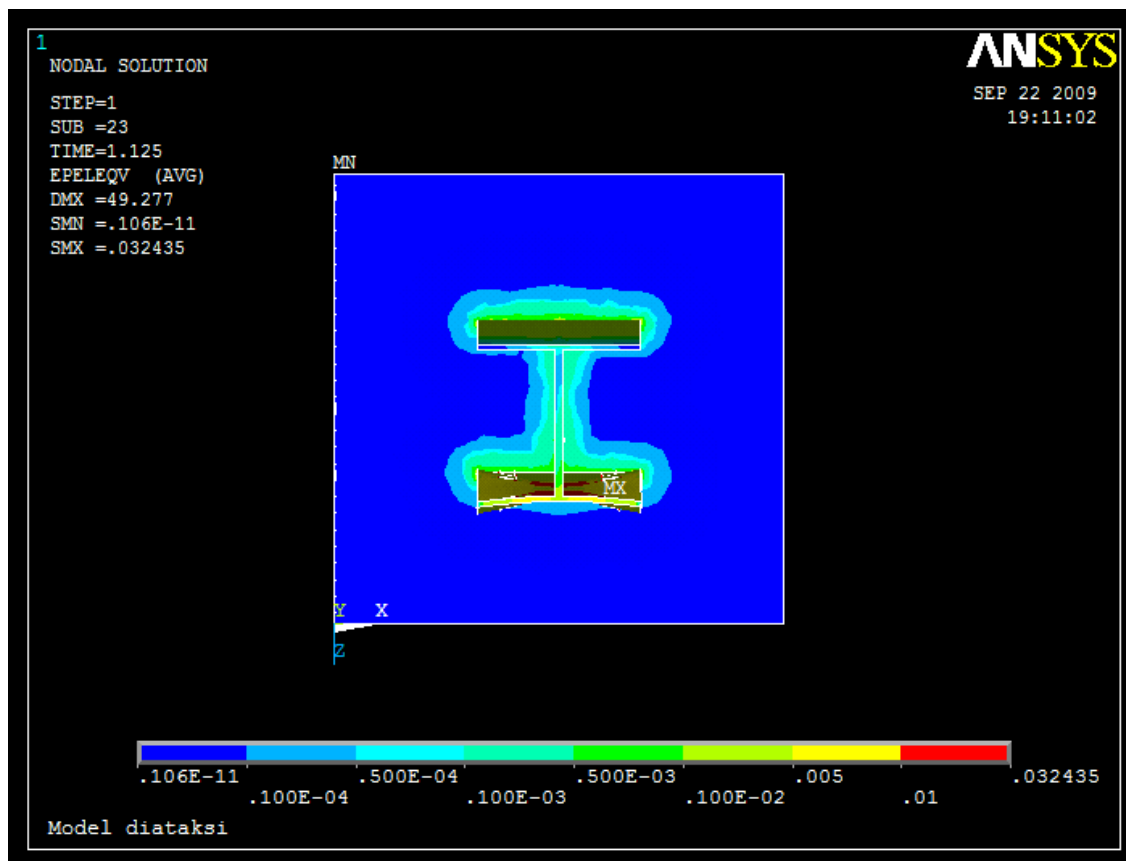
Εικόνα 68: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,032435 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,106 \cdot 10^{-11}$ Μέγιστη μετατόπιση=49,277)



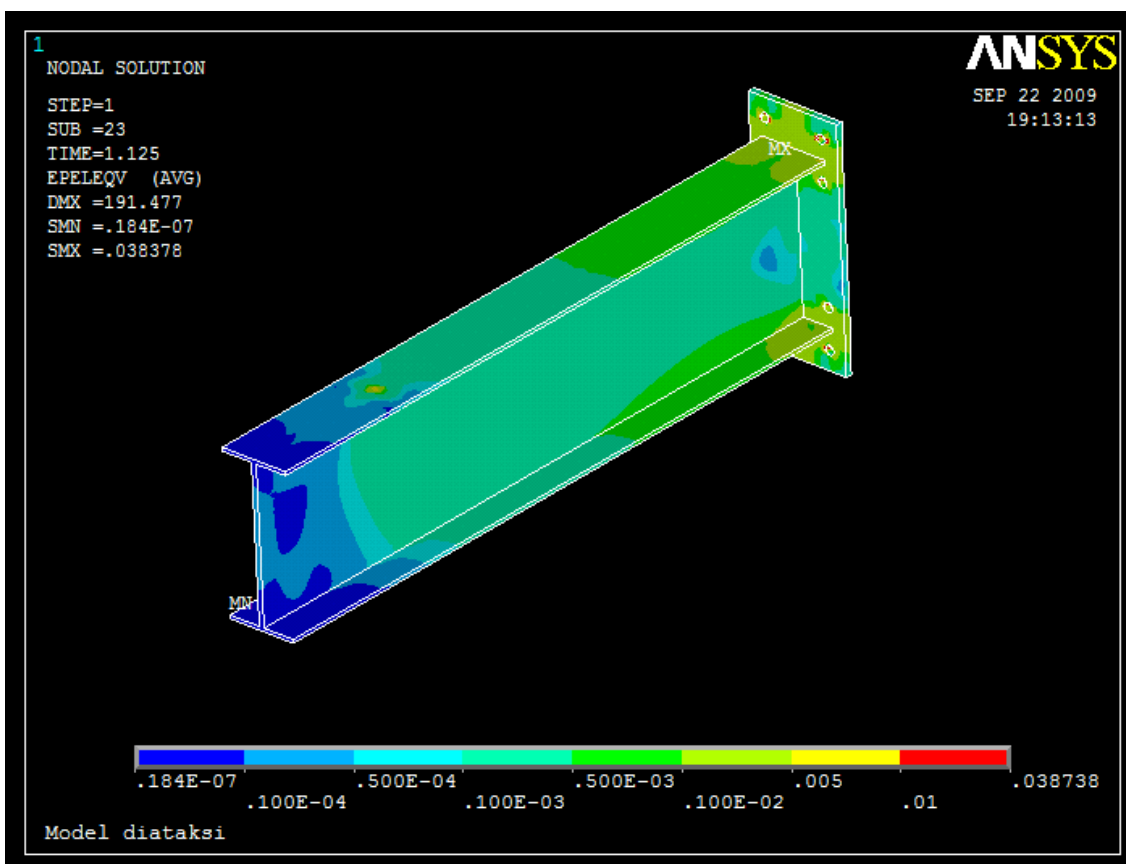
Εικόνα 69: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,032435 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,106*10⁻¹¹ Μέγιστη μετατόπιση=49,277)



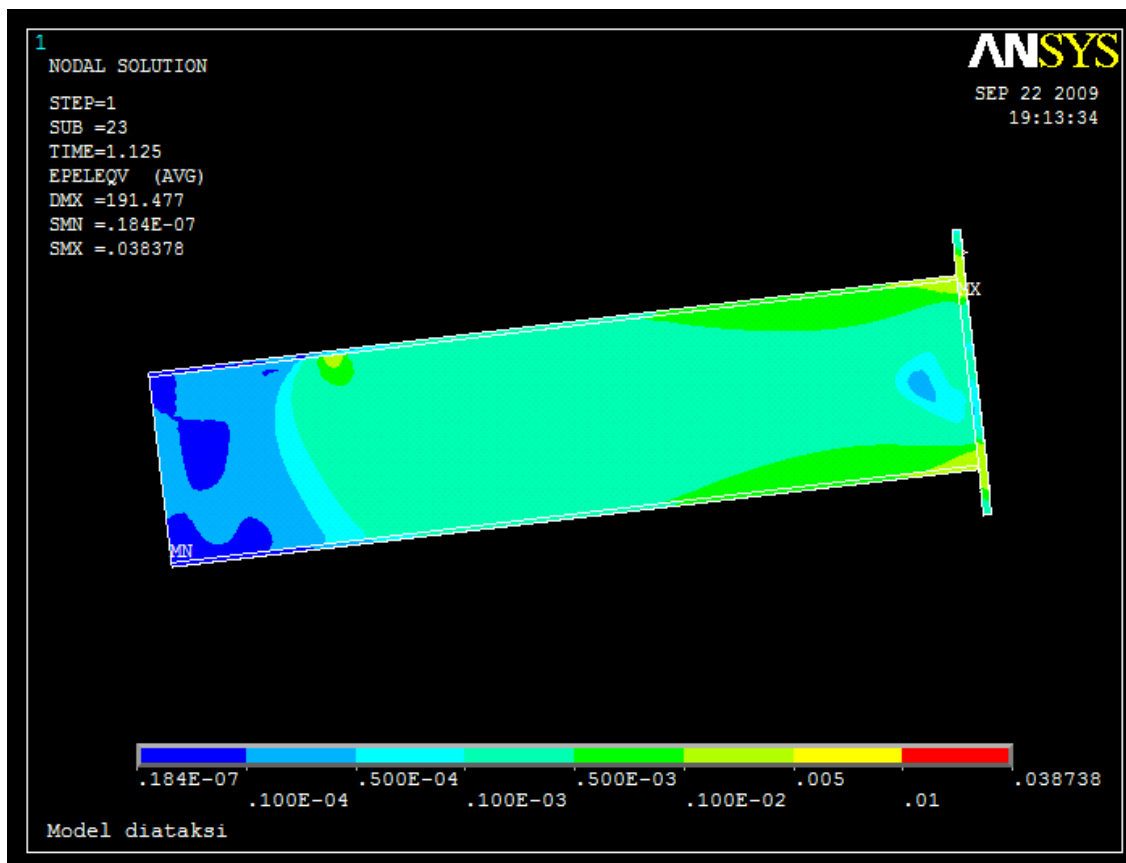
Εικόνα 70: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,032435 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,106*10⁻¹¹ Μέγιστη μετατόπιση=49,277)



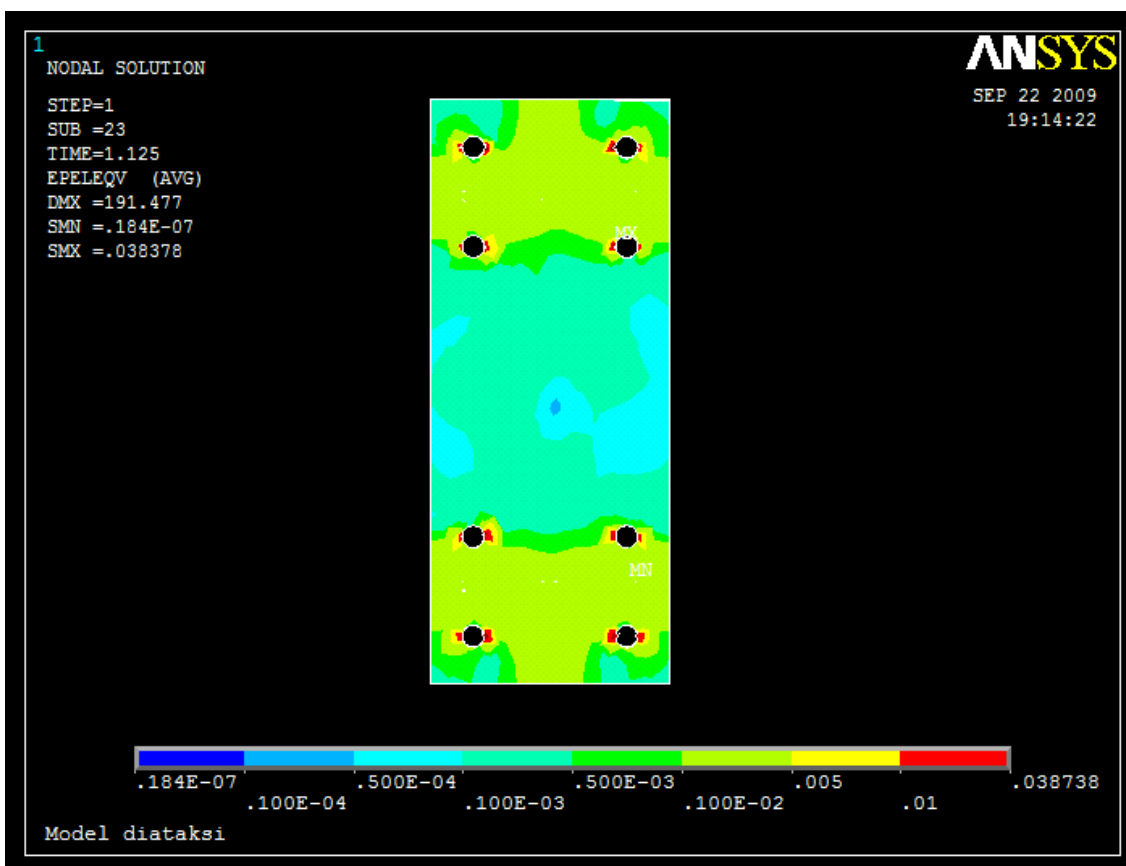
Εικόνα 71: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,032435 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,106*10⁻¹¹ Μέγιστη μετατόπιση=49,277)



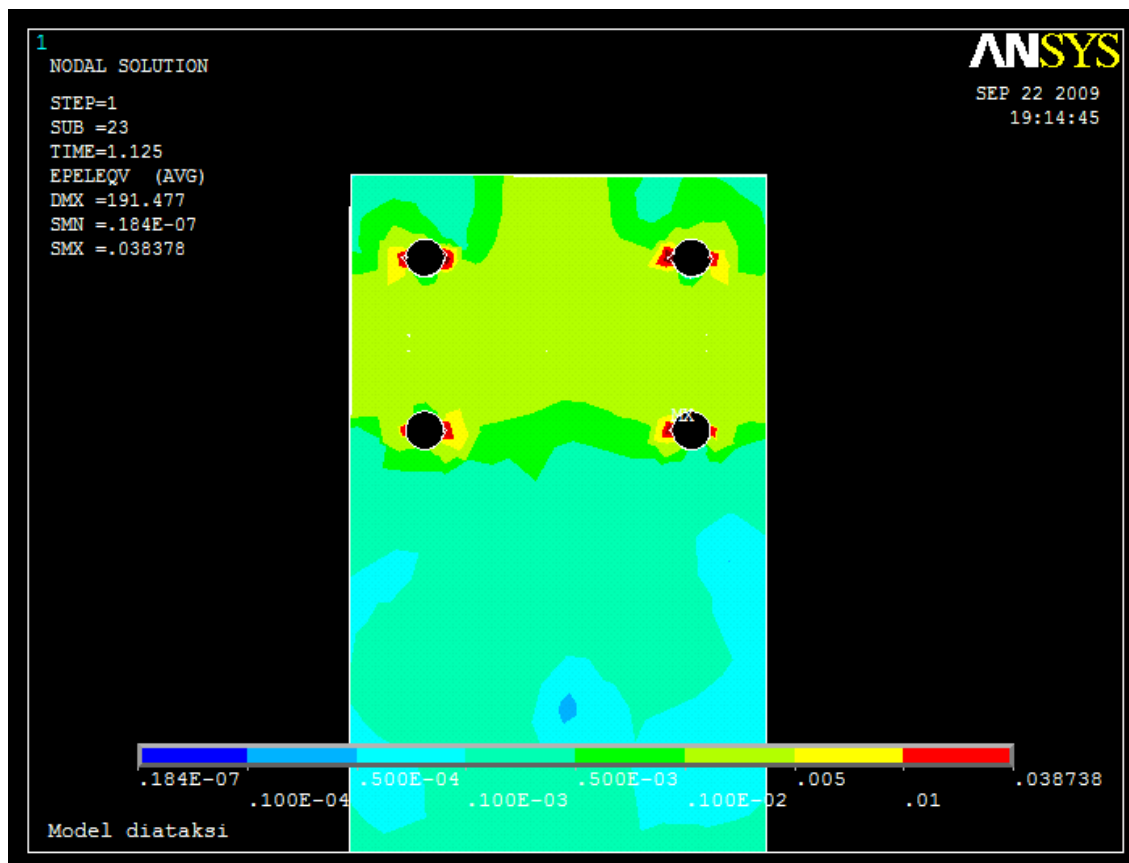
Εικόνα 72: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,038378 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,184*10⁻⁰⁷ Μέγιστη μετατόπιση=191,477)



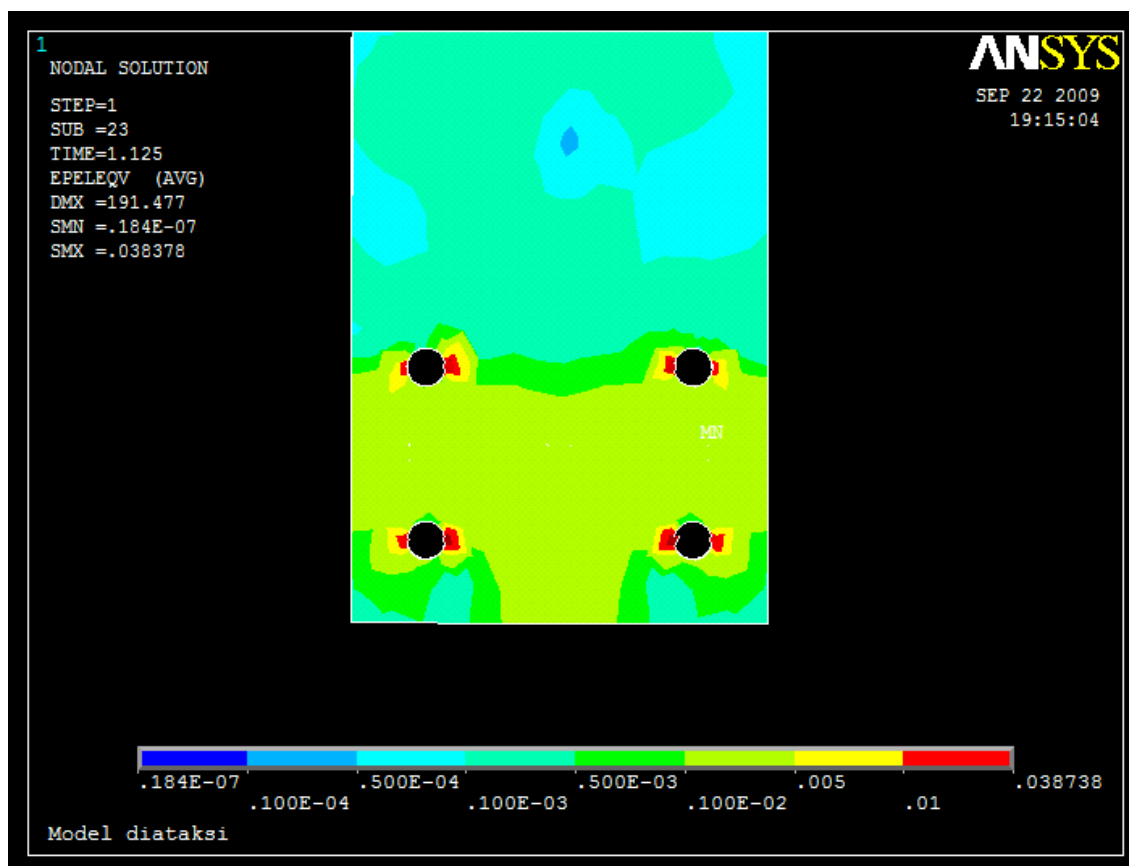
Εικόνα 73: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση= $0,038378$, Ελάχιστη καταπόνηση= $0,184 \cdot 10^{-07}$ Μέγιστη μετατόπιση=191,477)



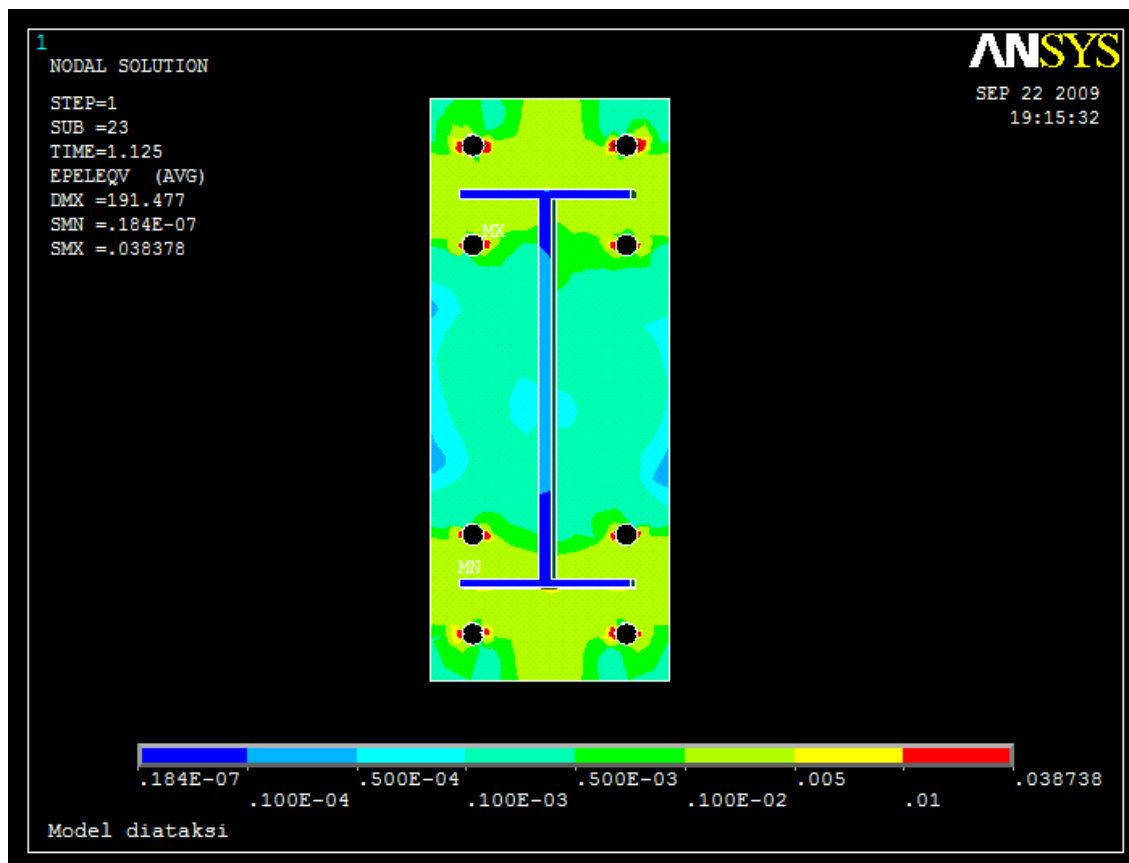
Εικόνα 74: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση= $0,038378$, Ελάχιστη καταπόνηση= $0,184 \cdot 10^{-07}$ Μέγιστη μετατόπιση=191,477)



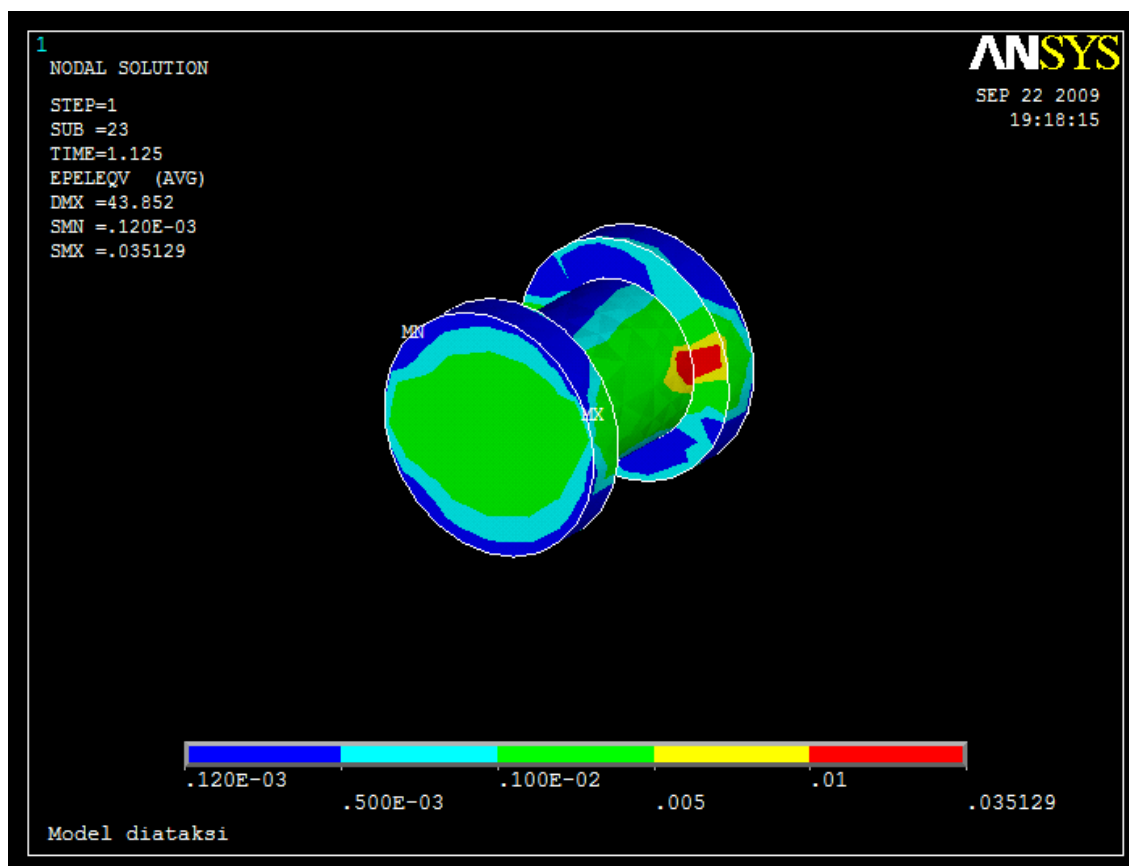
Εικόνα 75: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,038378 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,184 \cdot 10^{-07}$ Μέγιστη μετατόπιση=191,477)



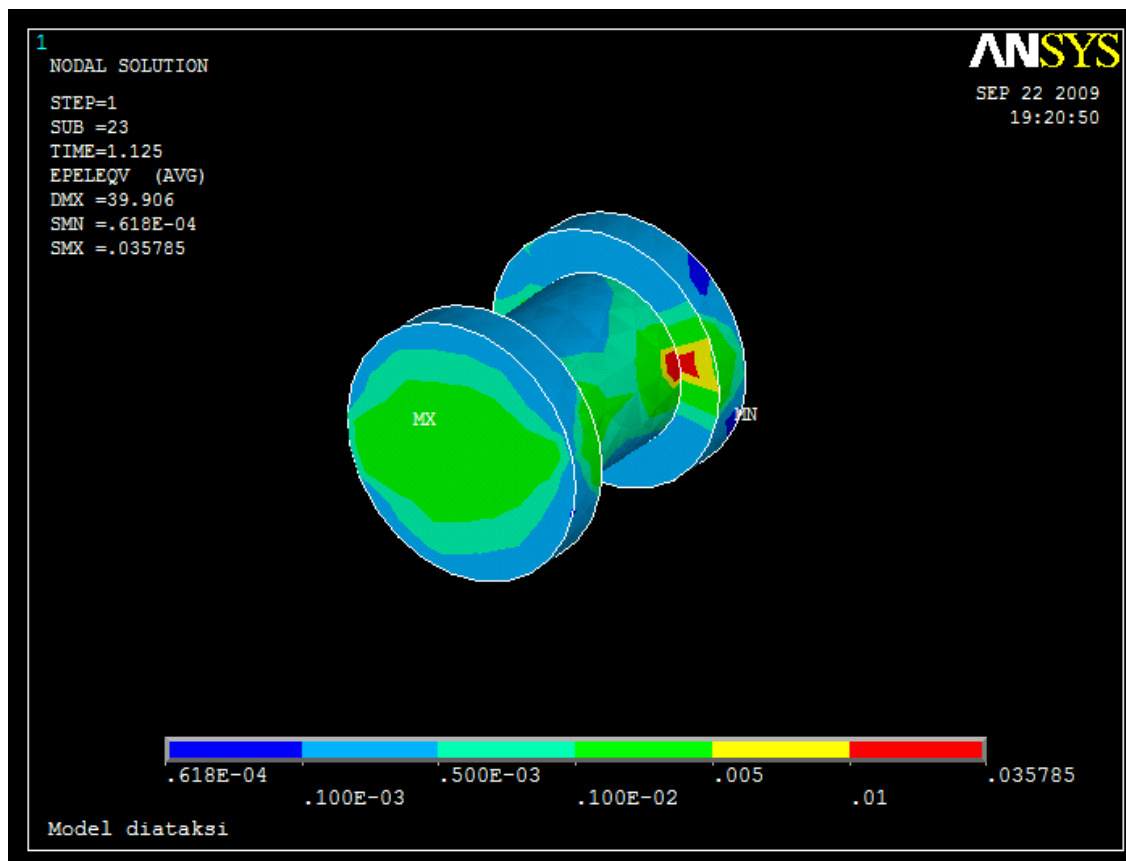
Εικόνα 76: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,038378 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,184 \cdot 10^{-07}$ Μέγιστη μετατόπιση=191,477)



Εικόνα 77: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,038378 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,184 \cdot 10^{-07}$ Μέγιστη μετατόπιση=191,477)

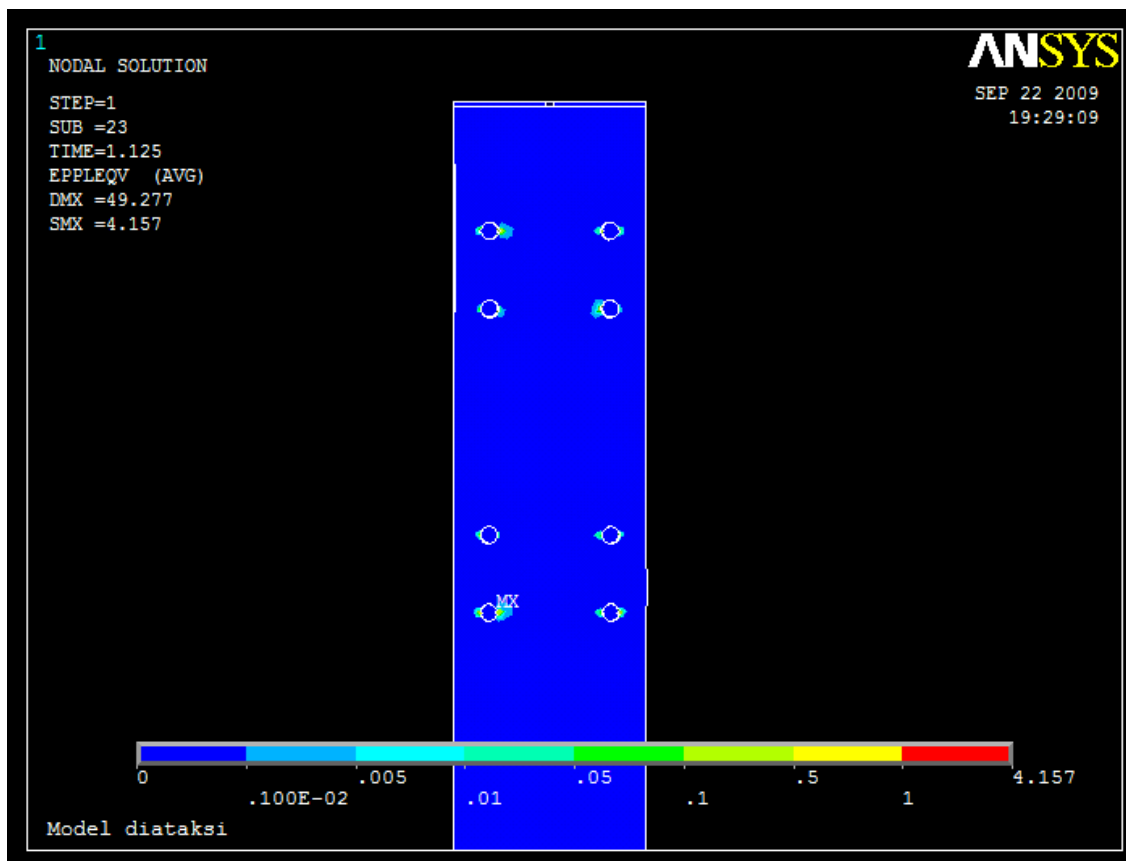


Εικόνα 78: Κοχλίας 1 (Μέγιστη καταπόνηση=0,035129 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,120 \cdot 10^{-3}$ Μέγιστη μετατόπιση= 43,852)

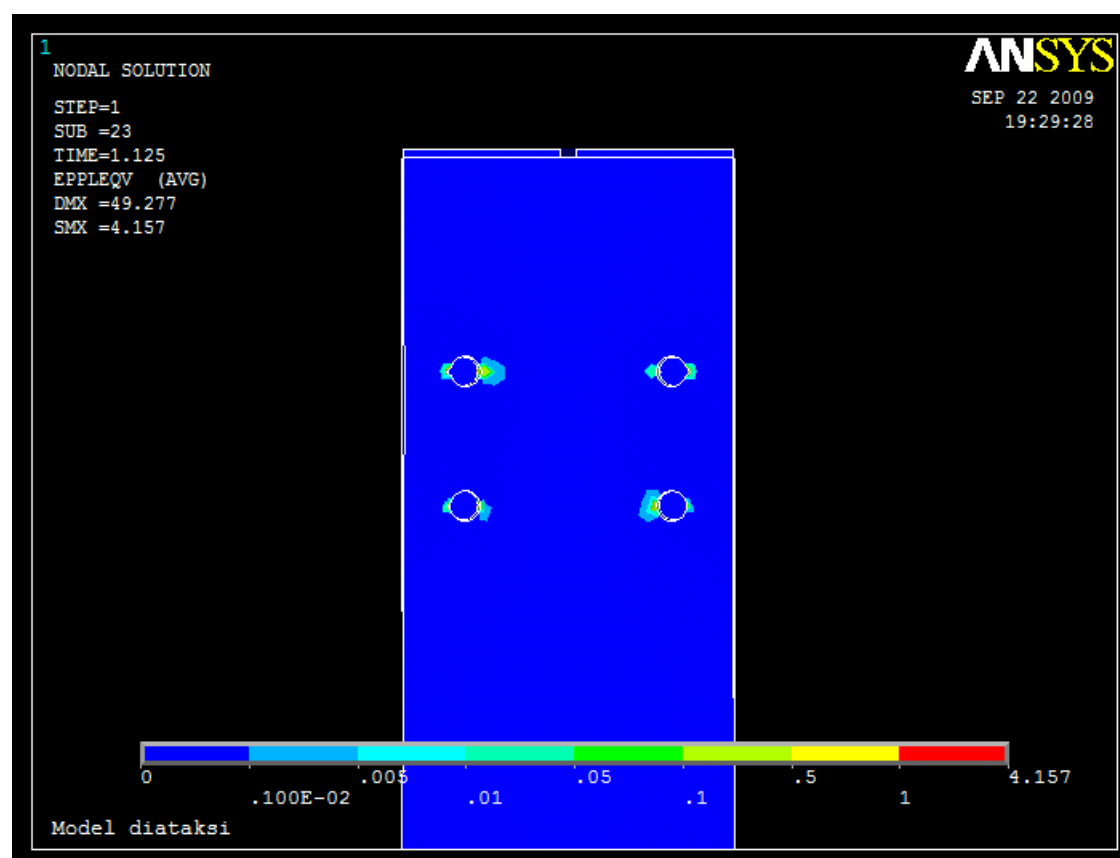


Εικόνα 79: Κοχλίας 1 (Μέγιστη καταπόνηση=0,035785 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,618 \cdot 10^{-4}$ Μέγιστη μετατόπιση= 39,906)

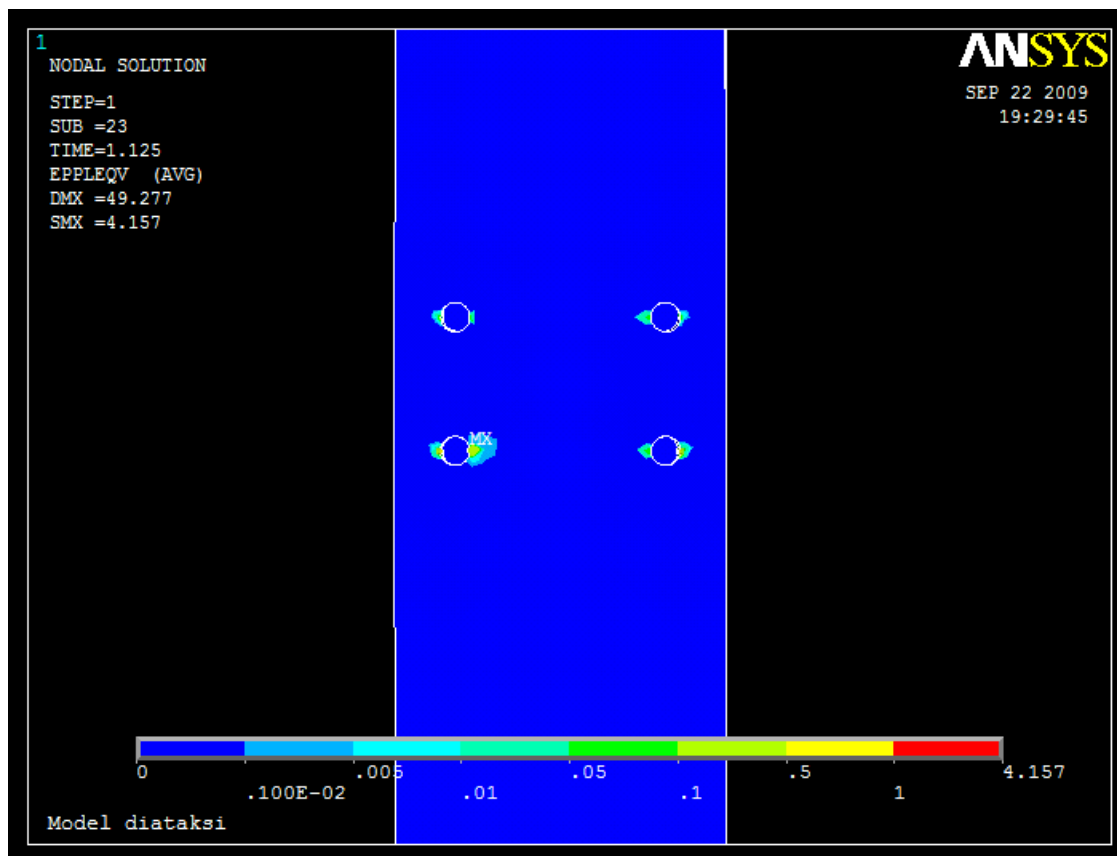
Ακόμα παρουσιάζεται παρακάτω σε εικόνες η πλαστική παραμόρφωση σε όσα σημεία παρατηρήθηκε το φαινόμενο αυτό. Έτσι στην κάθετη δοκό έχουμε τις εικόνες 80,81,82:



Εικόνα 80: Πλαστική παραμόρφωση κάθετης δοκού

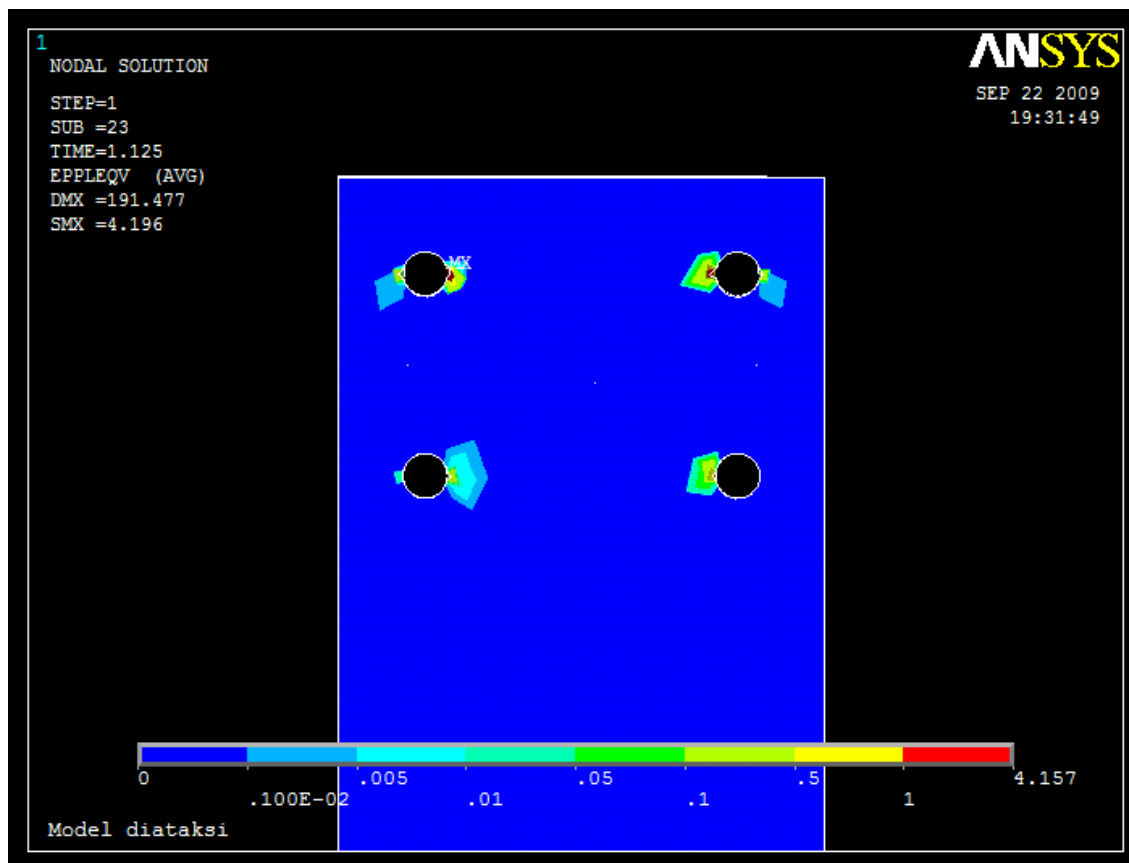


Εικόνα 81: Πλαστική παραμόρφωση κάθετης δοκού

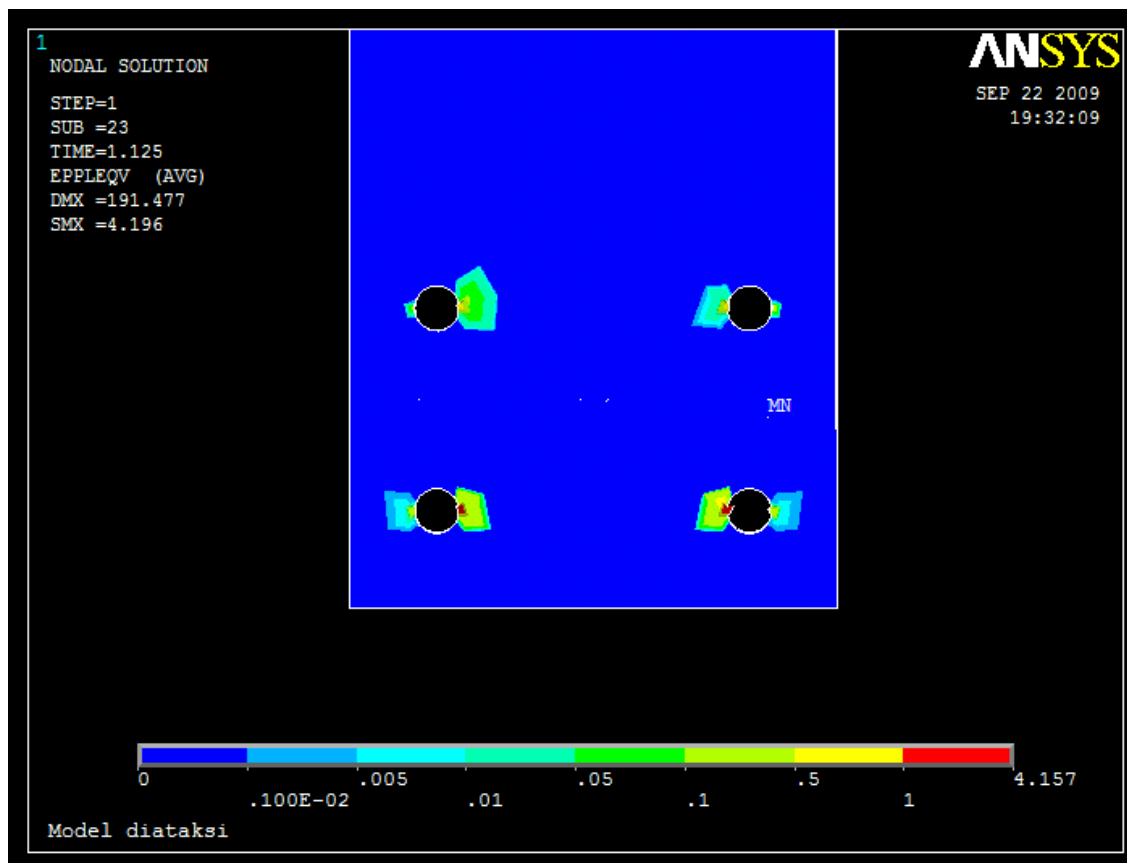


Εικόνα 82: Πλαστική παραμόρφωση κάθετης δοκού

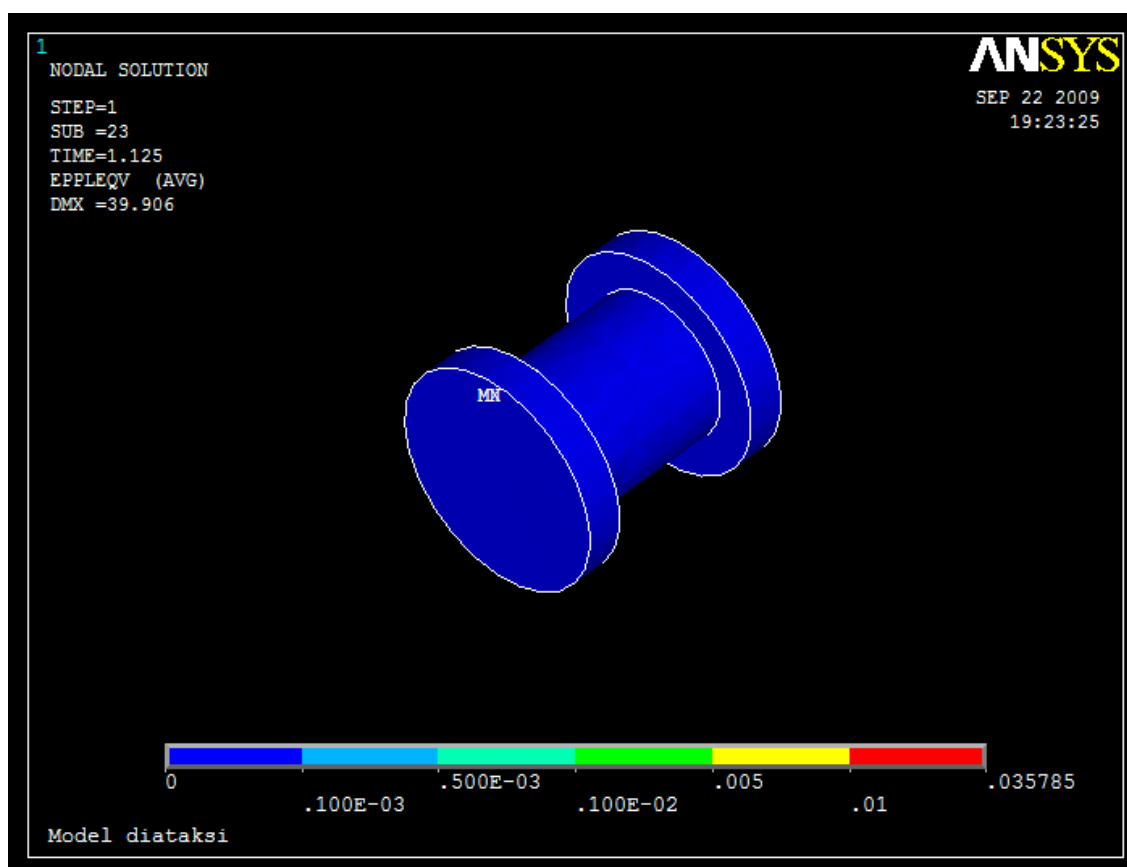
Ομοίως για την οριζόντια δοκό και τους κοχλίες (δίνεται ενδεικτικά ένας):



Εικόνα 83: Πλαστική παραμόρφωση οριζόντιας δοκού



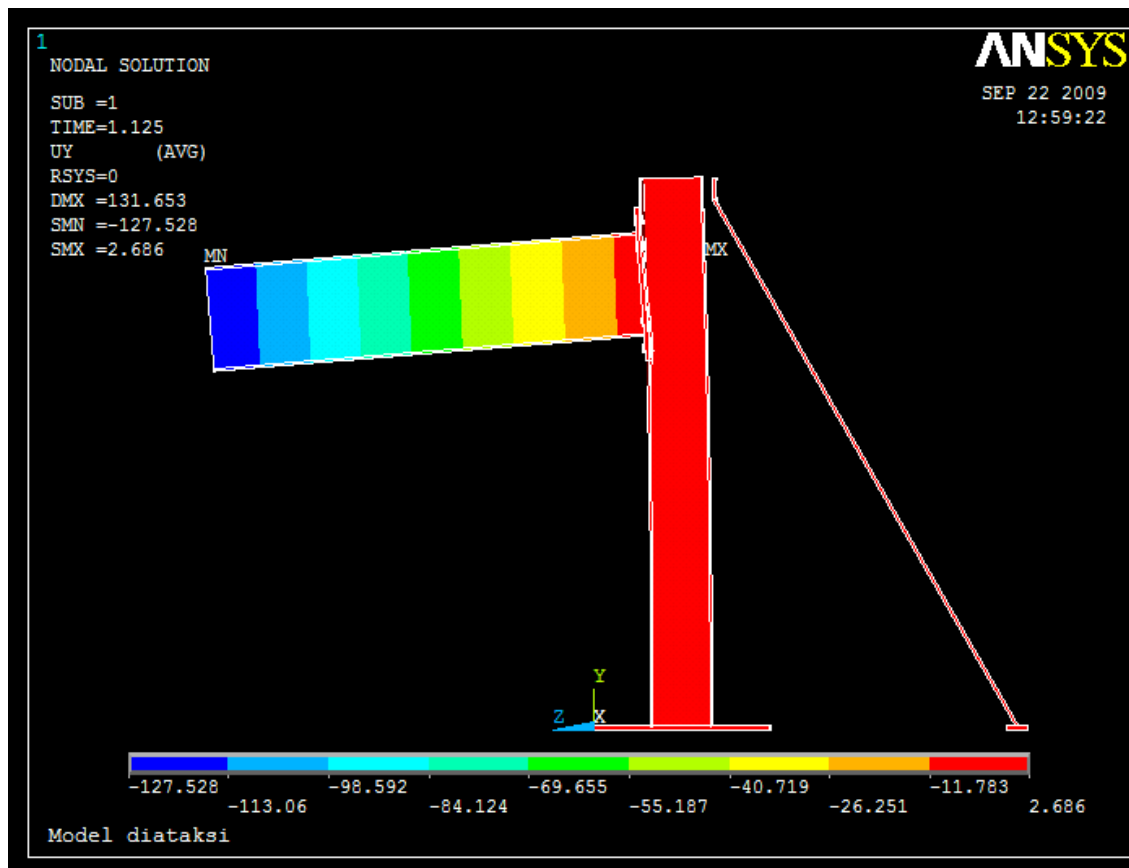
Εικόνα 84: Πλαστική παραμόρφωση οριζόντιας δοκού



Εικόνα 85: Πλαστική παραμόρφωση κοχλία 1

§ 3.2.3 Ελαστικό υλικό χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις

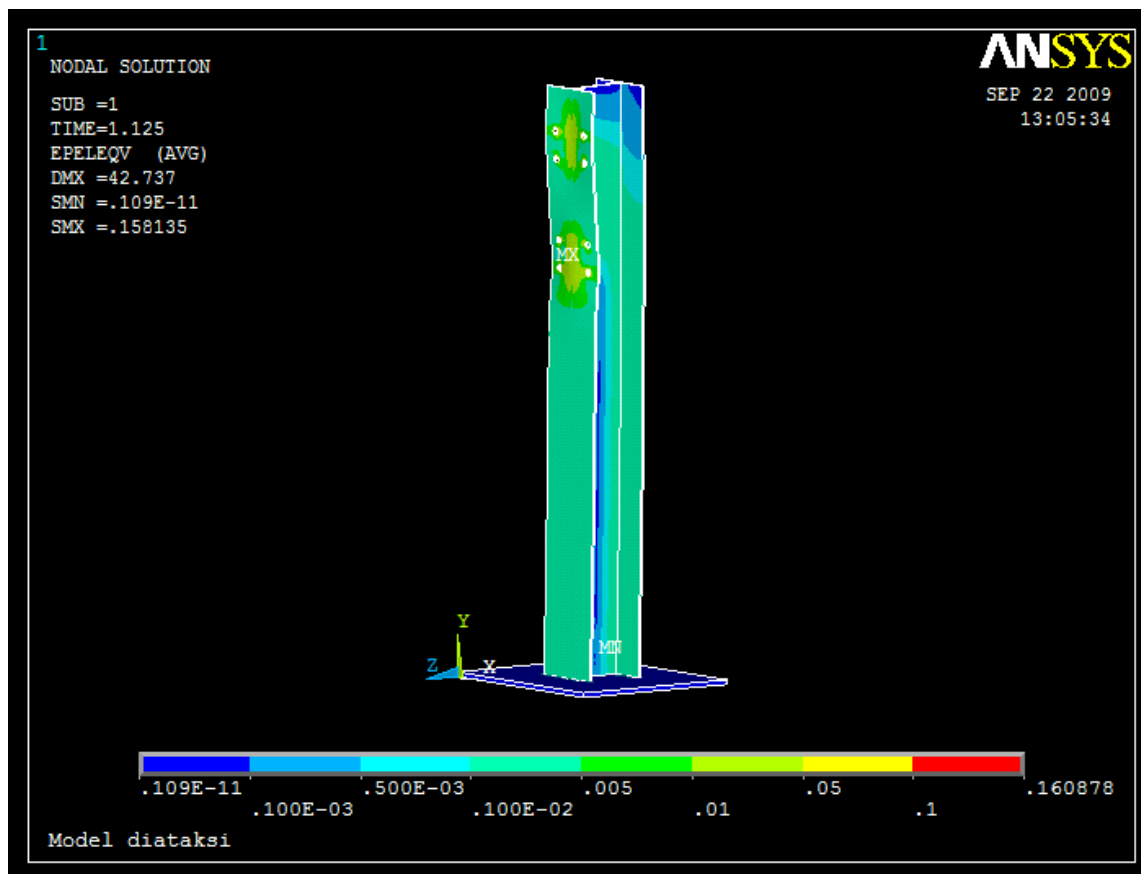
Στην εικόνα 21 παρουσιάζεται η διάταξη σε εικόνες όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι διάφορες χρωματικές αποχρώσεις παρουσιάζουν τις ζώνες παραμόρφωσης πάνω στη διάταξη :



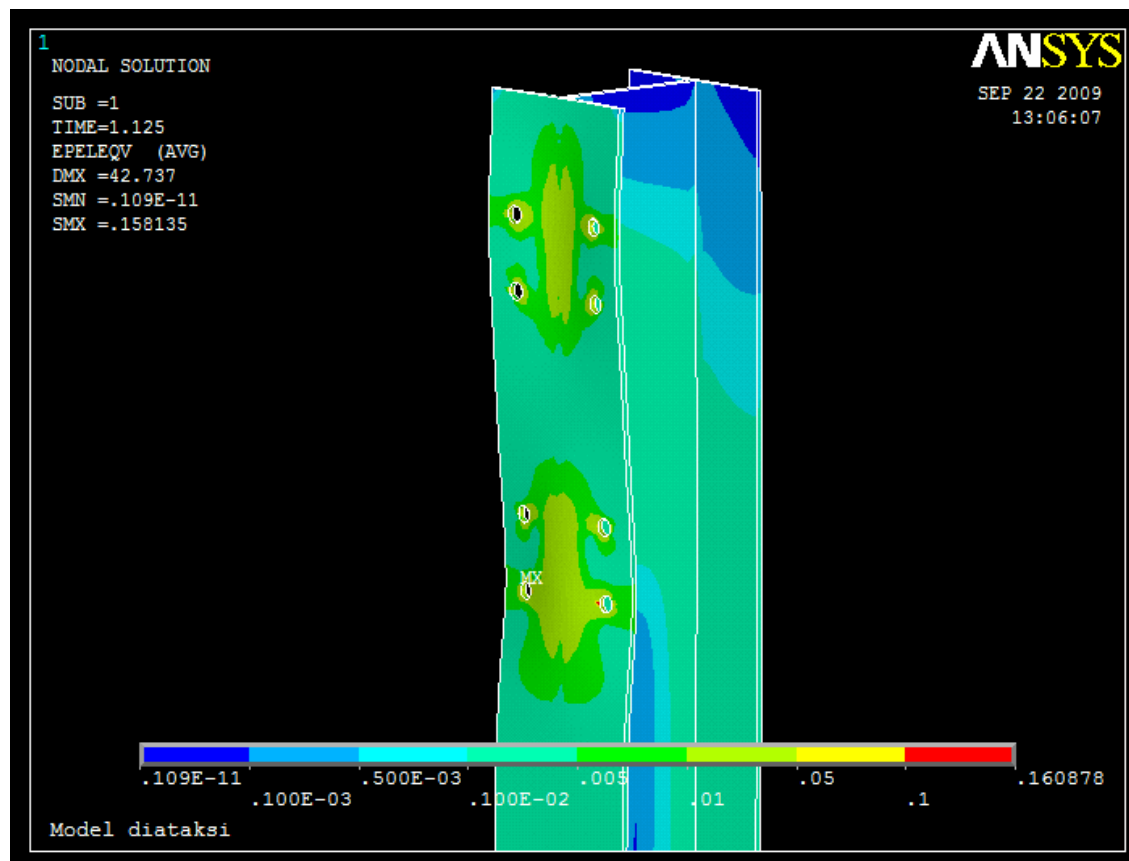
Εικόνα 86: Παραμόρφωση διάταξης (Μέγιστη μετατόπιση=127,528 mm)

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η ελαστική παραμόρφωση κατά Von Mises (Von Mises elastic strain) στα διάφορα κομμάτια της διάταξης μας. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η ισοδύναμη τάση Von Mises παρουσιάζει υπολογιστικό ενδιαφέρον διότι έχουμε μια τρισδιάστατη διάταξη στην οποία ασκούνται ορθές και διατμητικές τάσεις και στους τρεις άξονες x,y,z. Ο τύπος της ισοδύναμης τάσης Von Mises σ_e παρουσιάζεται παρακάτω:

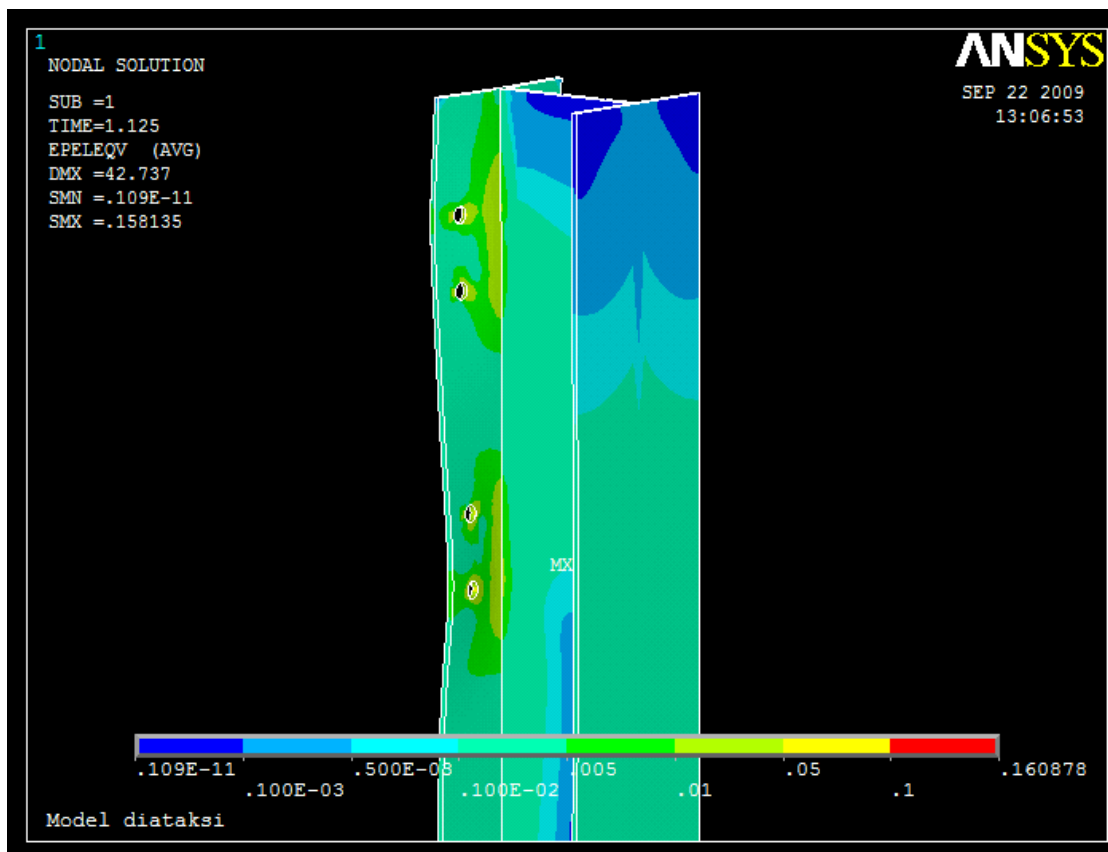
$$\sigma_e = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2)] \right\}^{1/2}$$



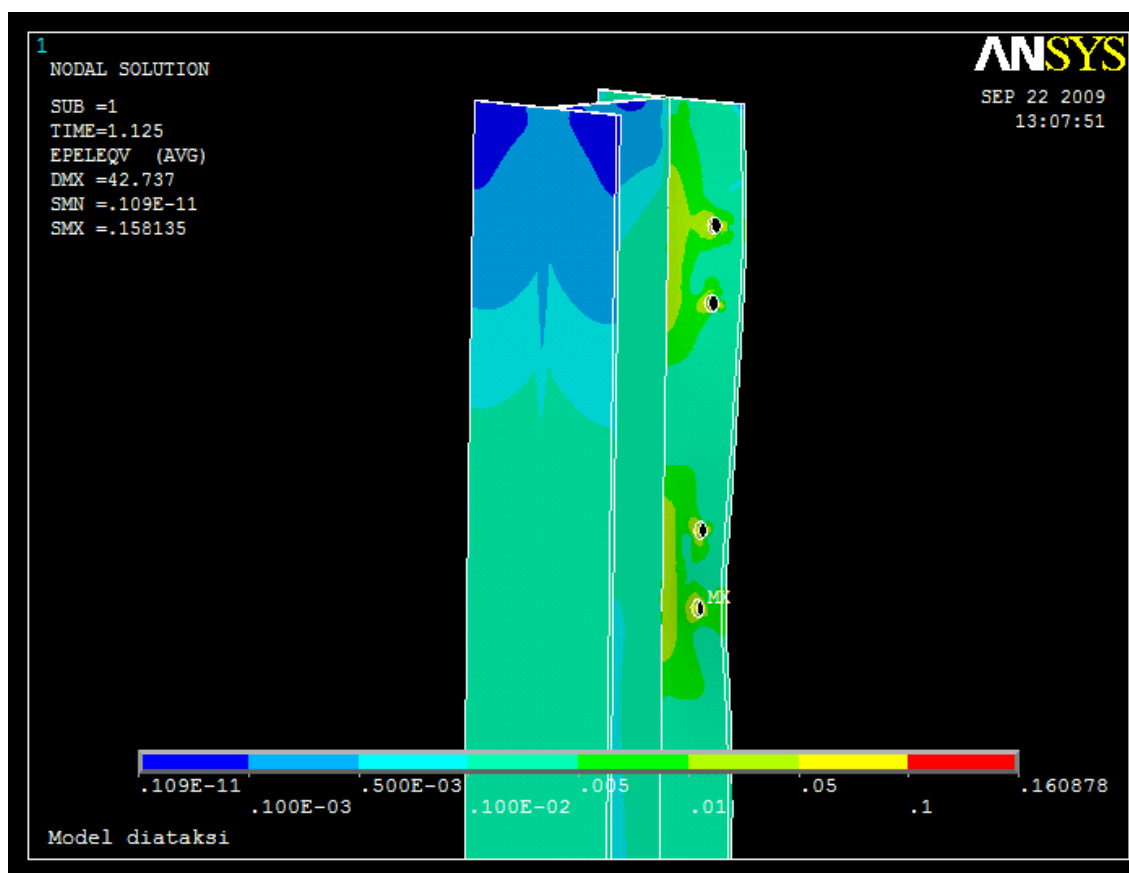
Εικόνα 87: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,158135 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,109*10⁻¹¹ Μέγιστη μετατόπιση=42,737)



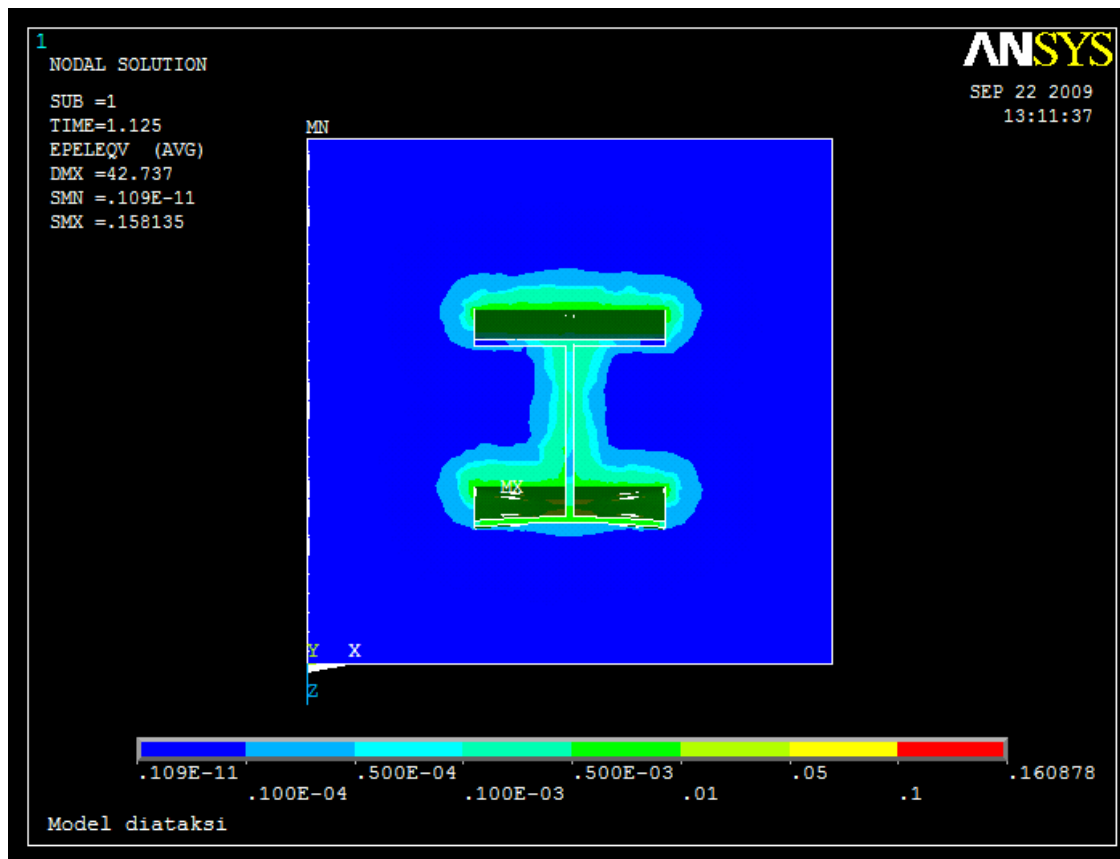
Εικόνα 88: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,158135 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,109*10⁻¹¹ Μέγιστη μετατόπιση=42,737)



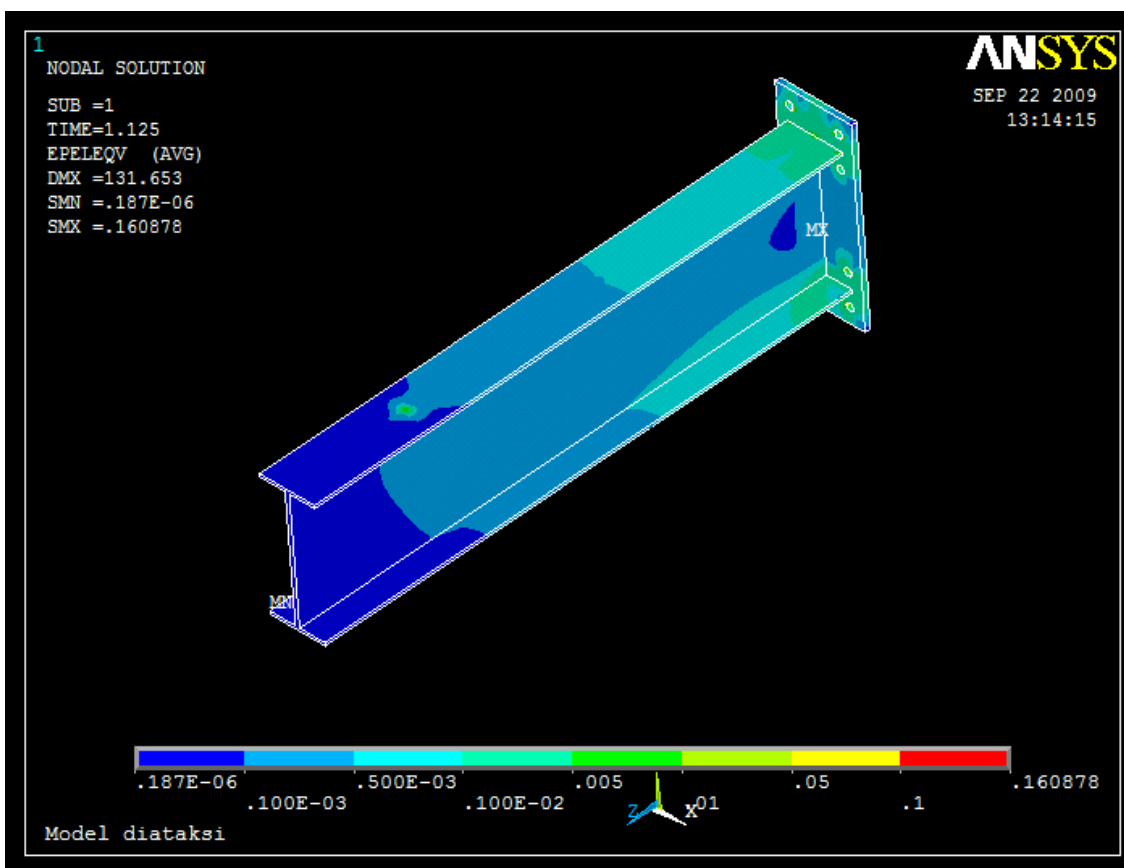
Εικόνα 89: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,158135 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,109 \cdot 10^{-11}$ Μέγιστη μετατόπιση=42,737)



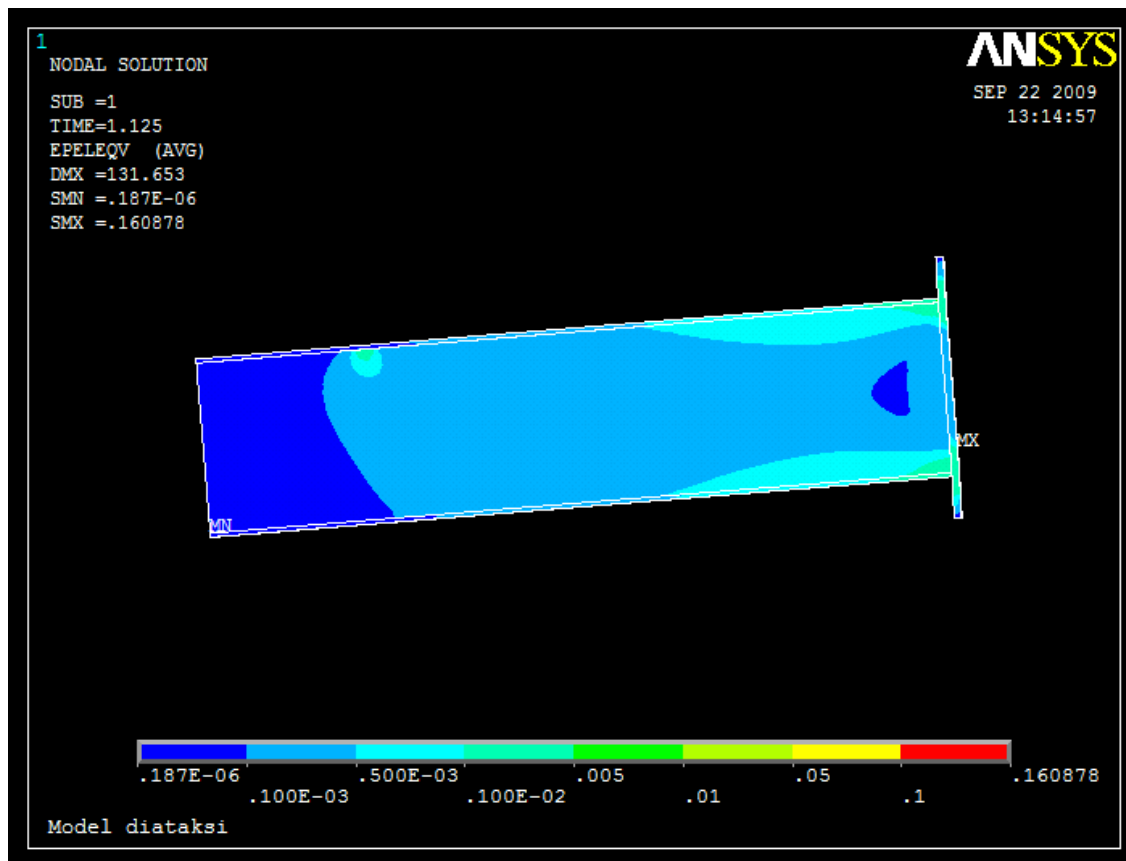
Εικόνα 90: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,158135 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,109 \cdot 10^{-11}$ Μέγιστη μετατόπιση=42,737)



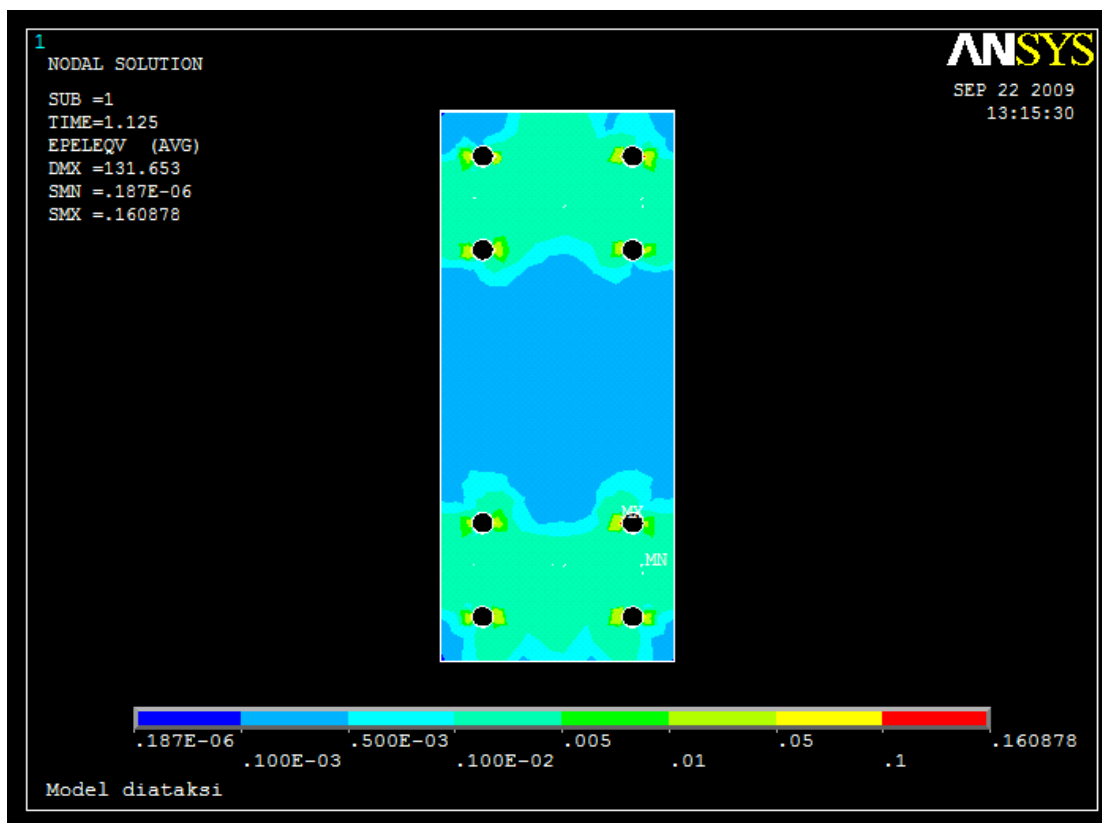
Εικόνα 91: Κάθετη δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,158135 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,109*10⁻¹¹ Μέγιστη μετατόπιση=42,737)



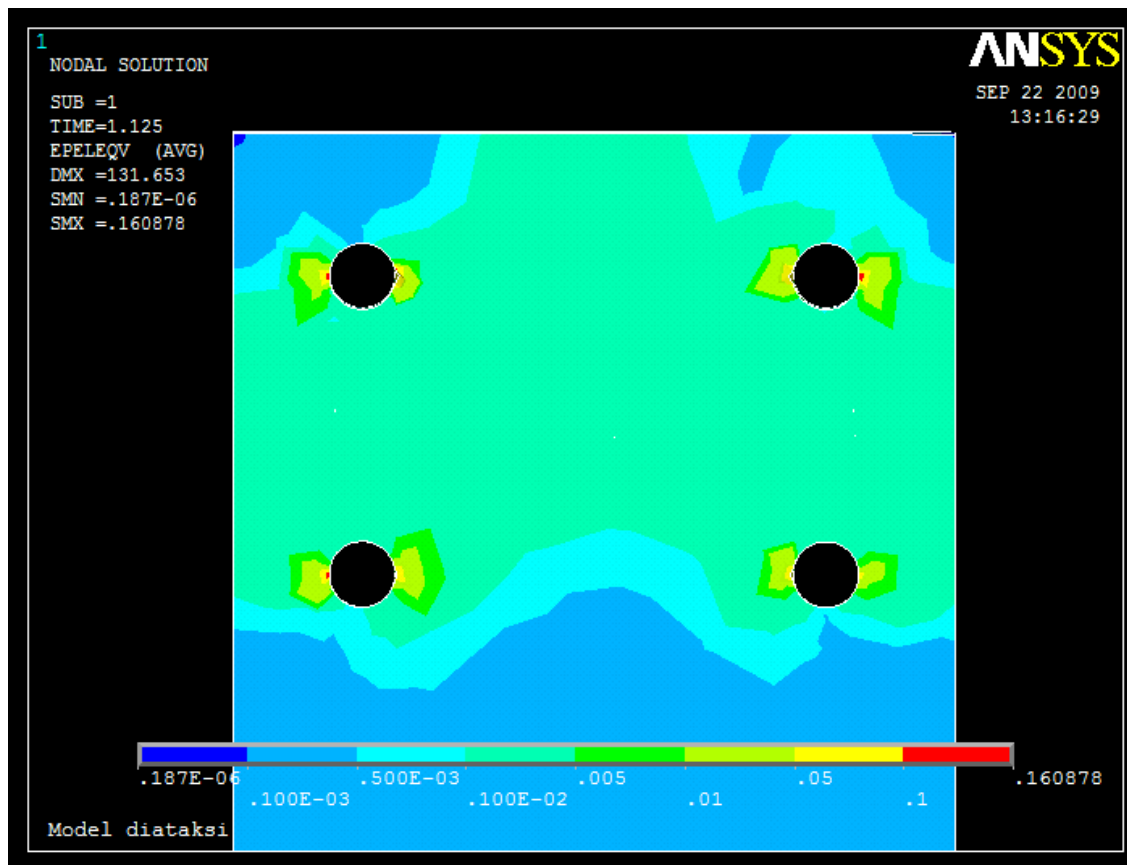
Εικόνα 92: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,160878 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,187*10⁻⁶ Μέγιστη μετατόπιση=131,653)



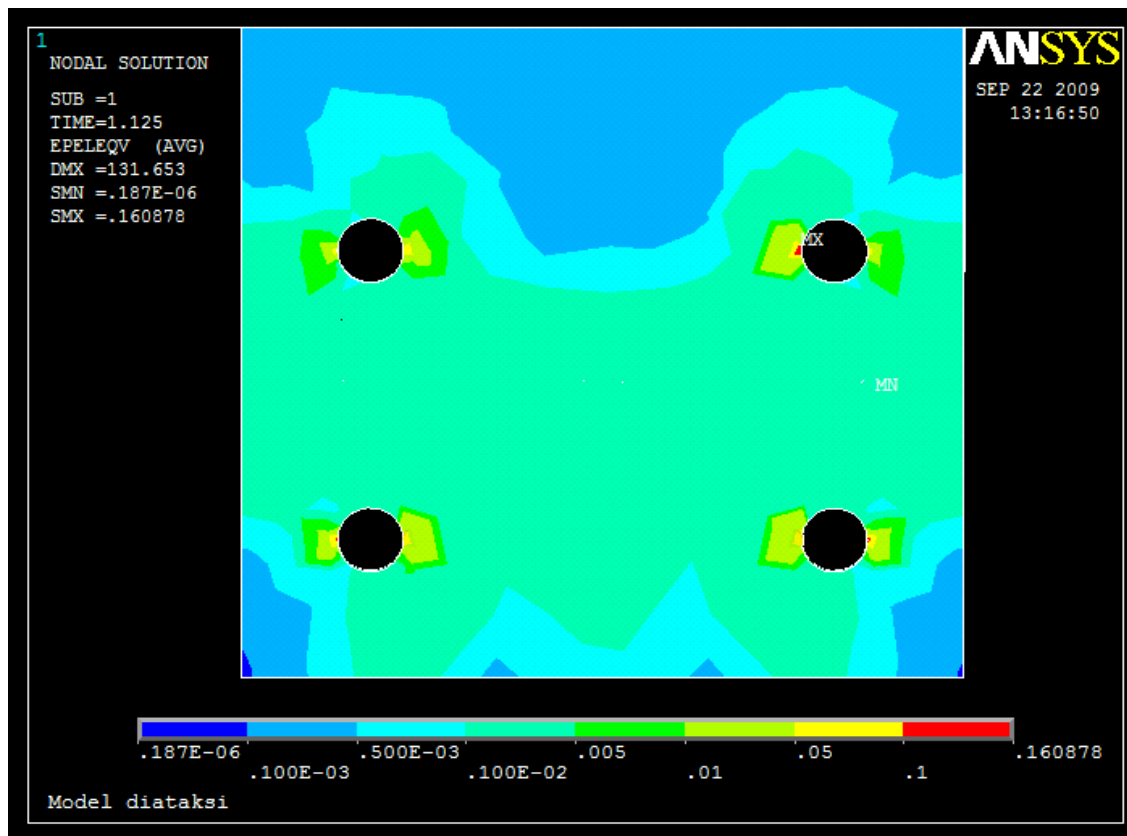
Εικόνα 93: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,160878 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,187 \cdot 10^{-6}$ Μέγιστη μετατόπιση=131,653)



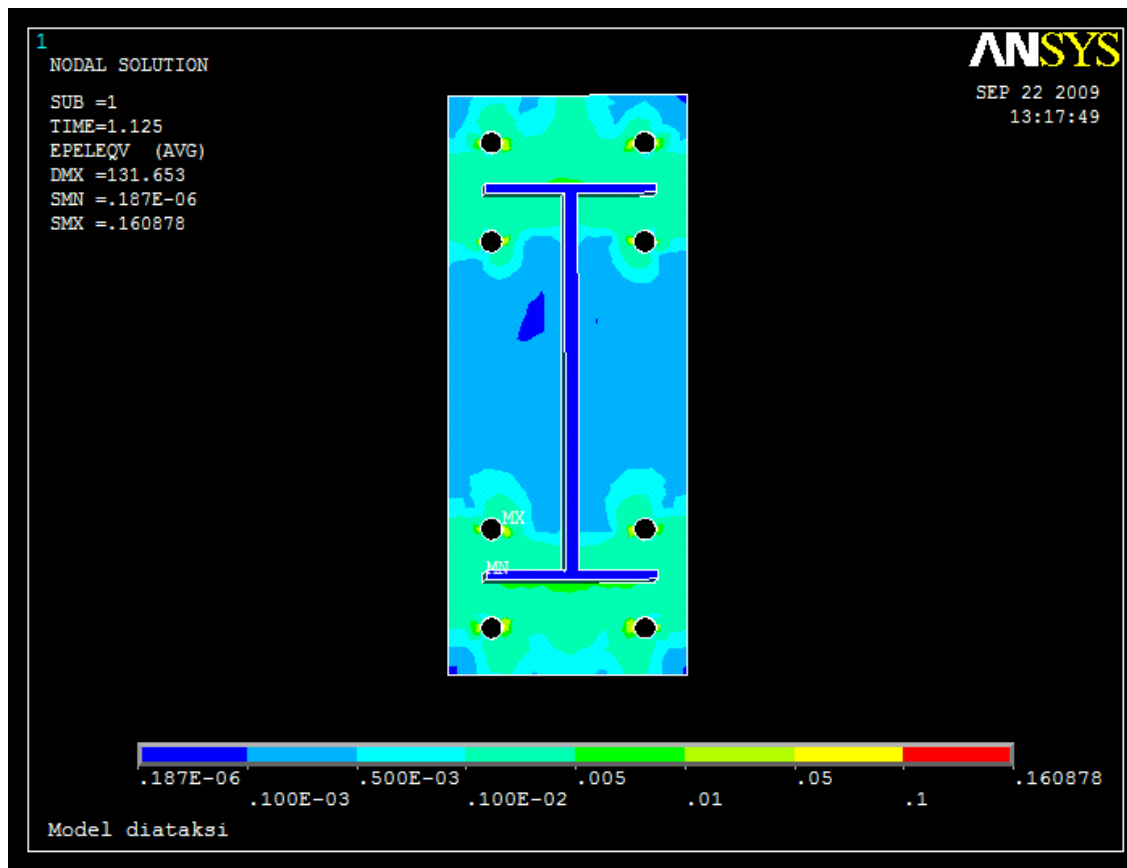
Εικόνα 94: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,160878 , Ελάχιστη καταπόνηση= $0,187 \cdot 10^{-6}$ Μέγιστη μετατόπιση=131,653)



Εικόνα 95: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,160878 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,187*10⁻⁶ Μέγιστη μετατόπιση=131,653)

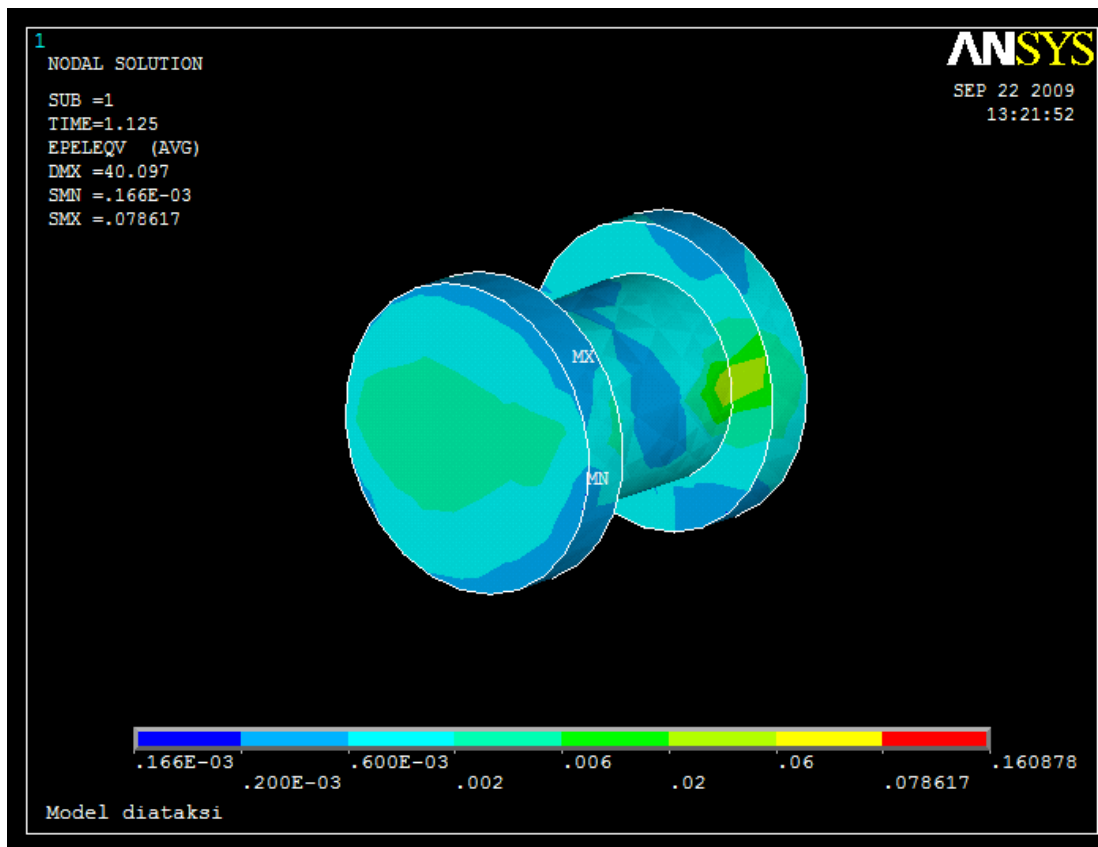


Εικόνα 96: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση=0,160878 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,187*10⁻⁶ Μέγιστη μετατόπιση=131,653)

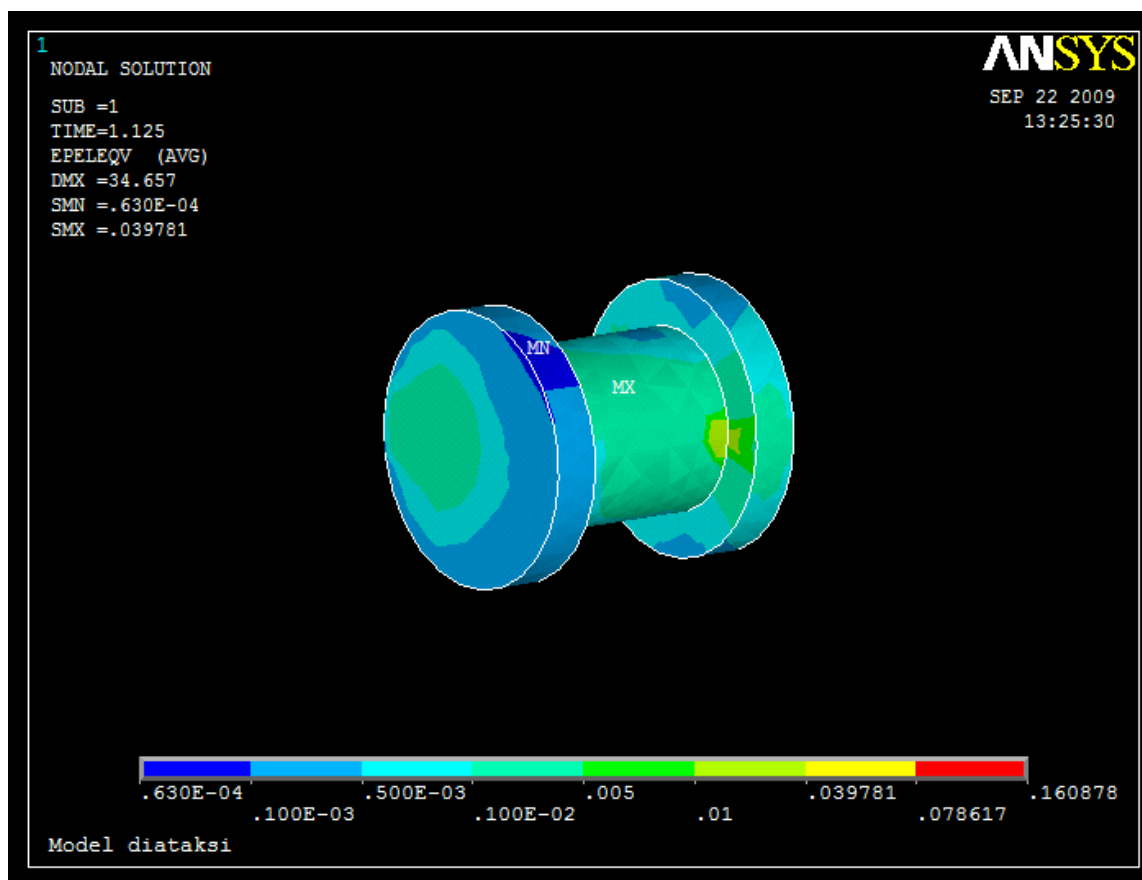


Εικόνα 97: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση= $0,160878$, Ελάχιστη καταπόνηση= $0,187 \cdot 10^{-6}$ Μέγιστη μετατόπιση=131,653)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο από τις κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης:



Εικόνα 98: Κοχλίας 1 (Μέγιστη καταπόνηση=0,078617 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,166*10⁻³ Μέγιστη μετατόπιση=40,097)



Εικόνα 99: Κοχλίας 2 (Μέγιστη καταπόνηση=0,039781 , Ελάχιστη καταπόνηση=0,630*10⁻⁴ Μέγιστη μετατόπιση=34,657)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΟΥ J.U.S.T.

§ 4.1 Πίνακας αποτελεσμάτων

Στο πανεπιστήμιο Jordan University of Science and Technology (Irbid, Jordan) στο τμήμα των Πολιτικών Μηχανικών (Department of Civil Engineering) έγινε αντίστοιχο πείραμα σε πραγματικές συνθήκες υπό την επίβλεψη του αναπληρωτή καθηγητή Khaiderin M. Abdalla. Εκεί η ομάδα του κ. Abdalla έβγαλε τα παρακάτω αποτελέσματα (ΤΕΣΤ 5):

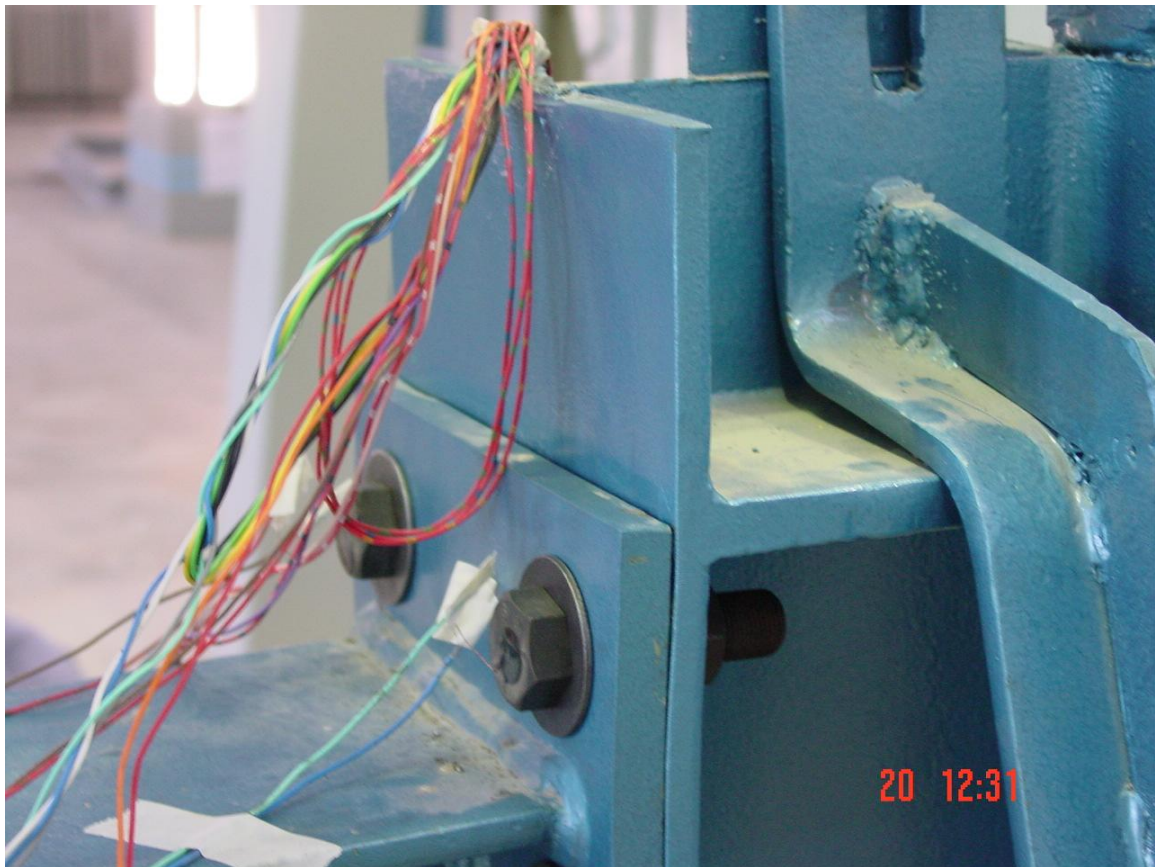
Φορτίο(%)	Φορτίο (σε kN)	Ροπή Κάμψης (KN.m)	Μετατόπιση (σε mm)			Περιστροφή			Μέση τιμή Περιστροφής
			Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	Σημείο 1	Σημείο 2	Σημείο 3	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	10	11,58	2	2	3	0,0060606	0,0030303	0,002591	0,003893861
8	20	23,16	4	3	4	0,0121212	0,0045455	0,003454	0,006706966
12	30	34,74	7	9	13	0,0212121	0,0136364	0,011226	0,015358246
16	40	46,32	8	12	17	0,0242424	0,0181818	0,01468	0,019034909
20	50	57,9	9	14	24	0,0272727	0,0212121	0,020725	0,023070079
24	60	69,48	10	21	33	0,030303	0,0318182	0,028497	0,030206207
28	70	81,06	13	27	41	0,0393939	0,0409091	0,035406	0,038569634
32	80	92,64	15	33	58	0,0454545	0,05	0,050086	0,048513634
36	90	104,22	21	47	82	0,0636364	0,0712121	0,070812	0,06855341
38	95	110,01	22	52	93	0,0666667	0,0787879	0,080311	0,075255142
42	105	121,59	27	64	113	0,0818182	0,0969697	0,097582	0,092123306
45	112,5	130,275	32	83	146	0,0969697	0,1257576	0,126079	0,116268907

§ 4.2 Το πείραμα του πανεπιστημίου του J.U.S.T. σε εικόνες

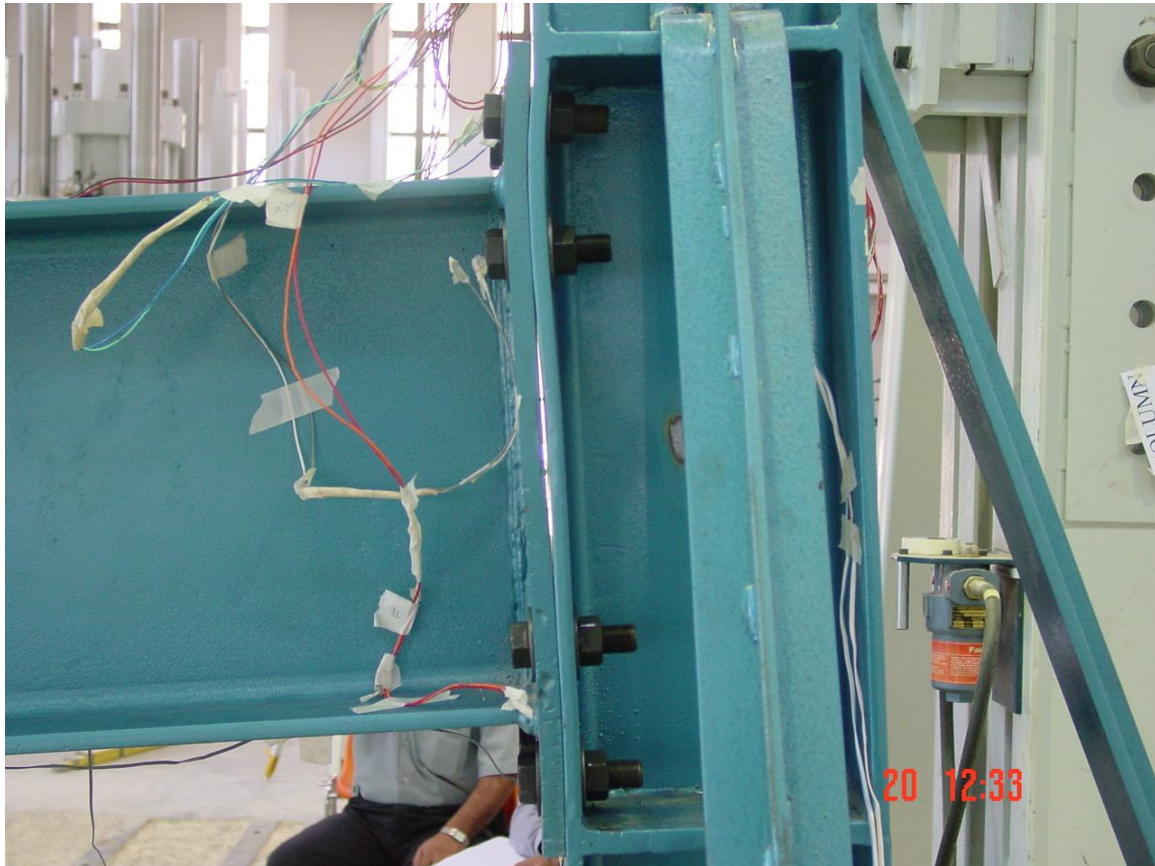
Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές εικόνες από το πείραμα που έγινε στο εργαστήριο του πανεπιστημίου στην Ιορδανία:



Εικόνα 100: Εργαστηριακό πείραμα (Ιδιοκτησία: J.U.S.T/ prof. K.M. Abdalla)



Εικόνα 101: Εργαστηριακό πείραμα (Ιδιοκτησία: J.U.S.T/ prof. K.M. Abdalla)



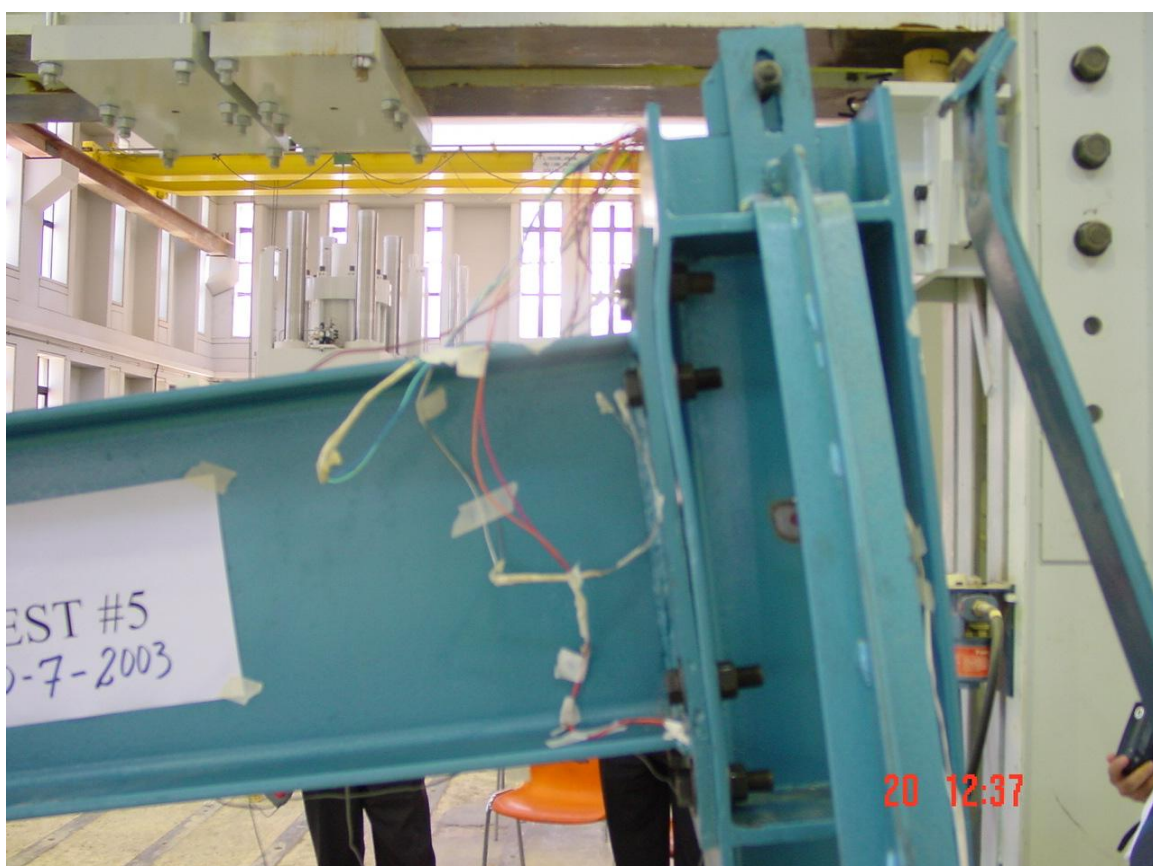
Εικόνα 102: Εργαστηριακό πείραμα (Ιδιοκτησία: J.U.S.T/ prof. K.M. Abdalla)



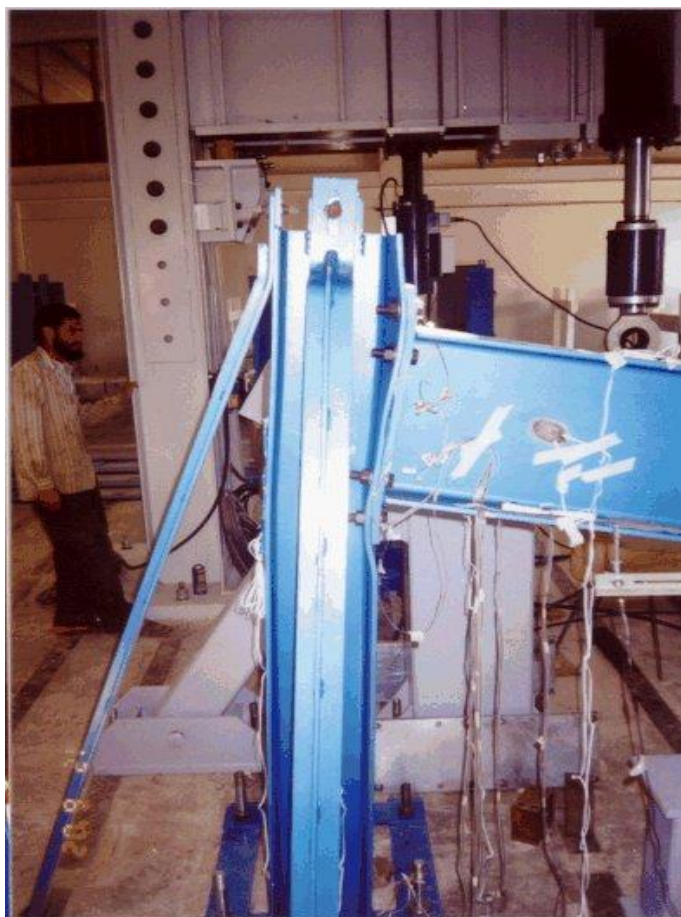
Εικόνα 103: Εργαστηριακό πείραμα (Ιδιοκτησία: J.U.S.T/ prof. K.M. Abdalla)



Εικόνα 104: Εργαστηριακό πείραμα (Ιδιοκτησία: J.U.S.T/ prof. K.M. Abdalla)



Εικόνα 105: Εργαστηριακό πείραμα (Ιδιοκτησία: J.U.S.T/ prof. K.M. Abdalla)



Εικόνα 106: Εργαστηριακό πείραμα (Ιδιοκτησία: J.U.S.T/ prof. K.M. Abdalla)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

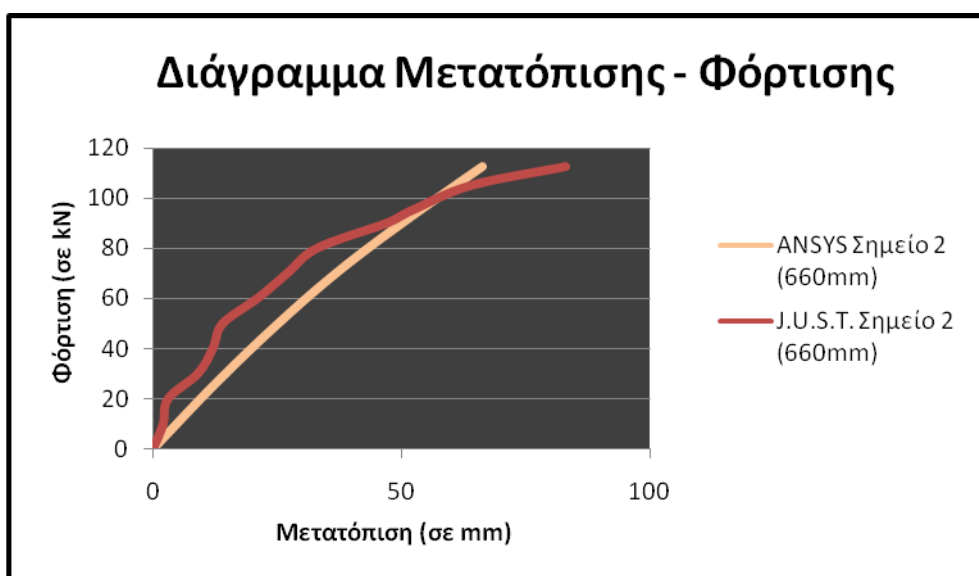
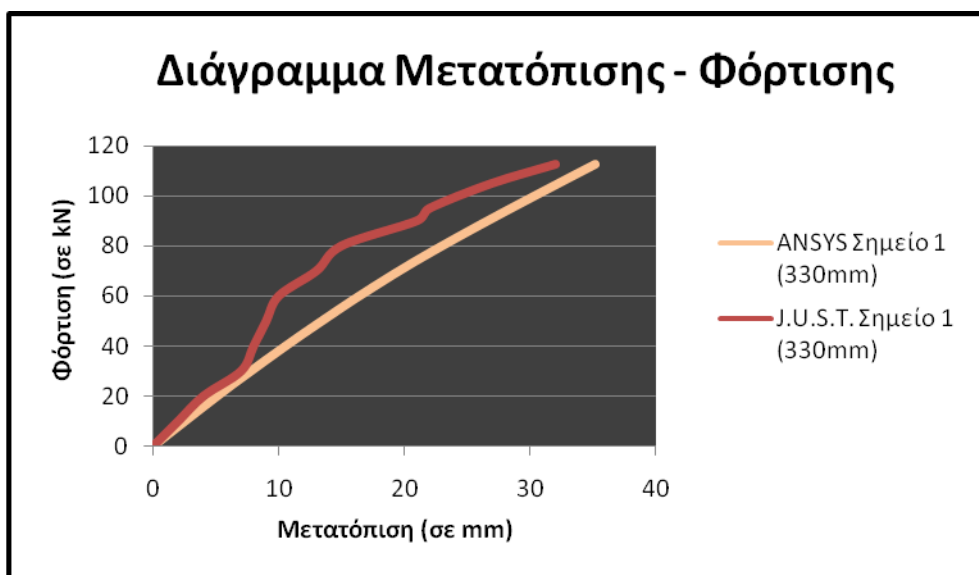
§ 5.1 Διαγράμματα Μετατόπισης - Φόρτισης

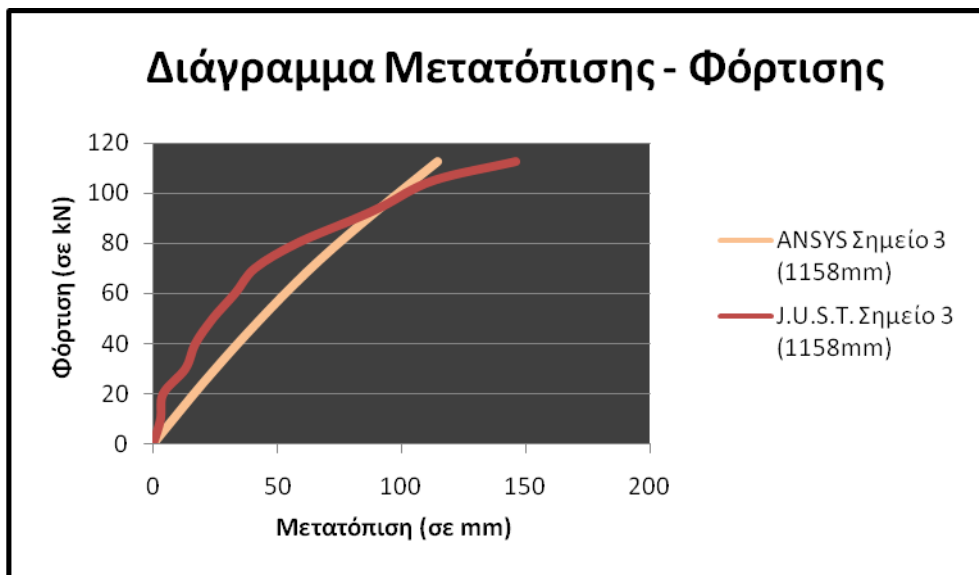
Αναλύοντας και συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα των δύο πειραμάτων διαμορφώνουμε διάφορες γραφικές παραστάσεις οι οποίες μας δίνουν μια σαφέστερη εικόνα για τα αποτελέσματα που εξήχθησαν.

Πιο συγκεκριμένα στα παρακάτω διαγράμματα βλέπουμε πώς μετατοπίζονται τα τρία σημεία κατά τη διάρκεια της φόρτισης συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πανεπιστημίου J.U.S.T. και του πειράματος που έγινε στο ANSYS:

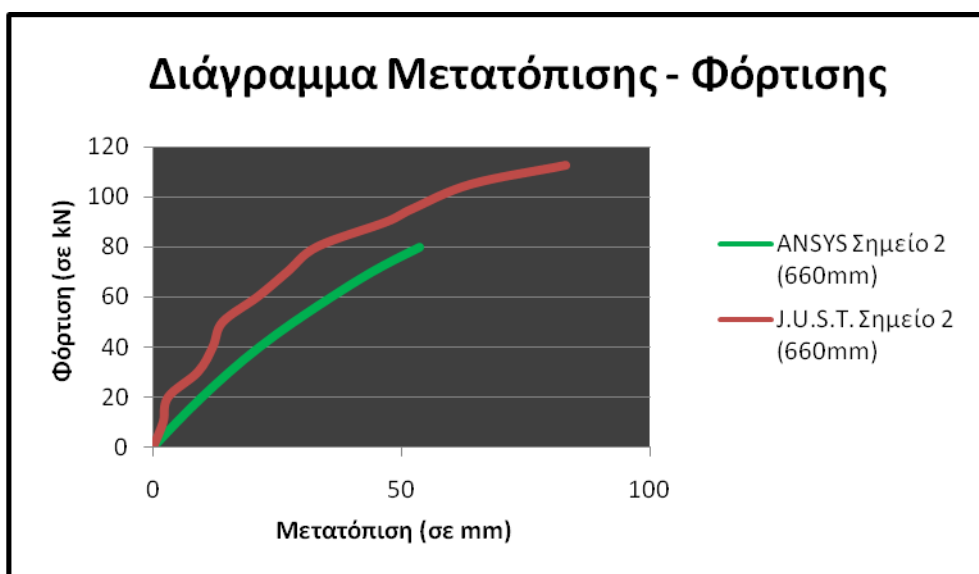
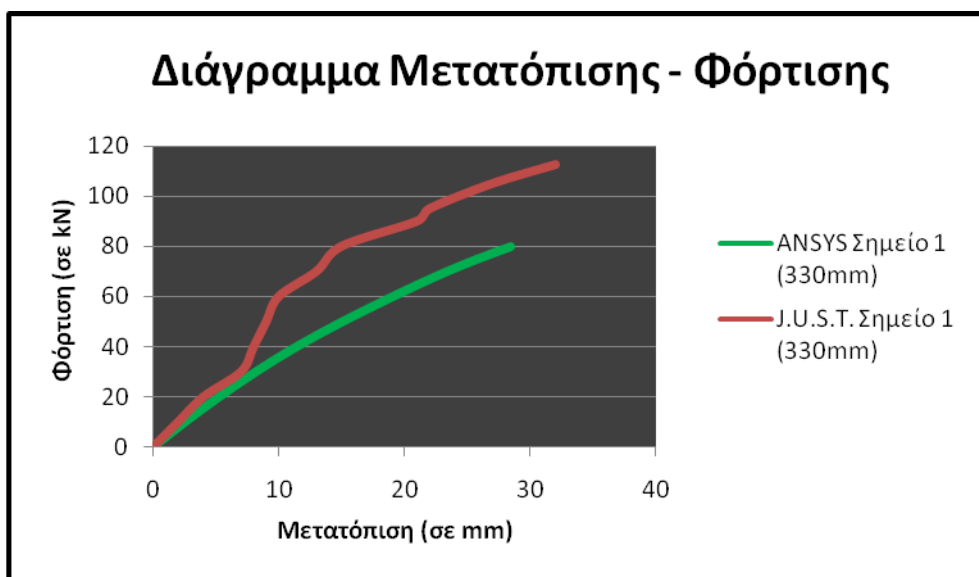
§ 5.1.1 Ελαστοπλαστικό υλικό με μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη-γραμμικότητα)

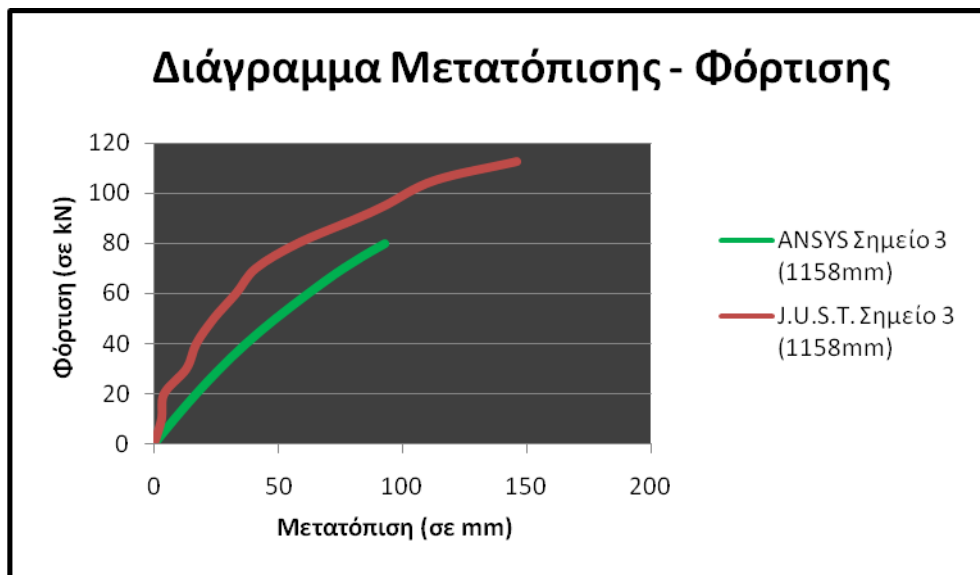
Για την περίπτωση όπου $TangMod=10.000$ έχουμε τα διαγράμματα:





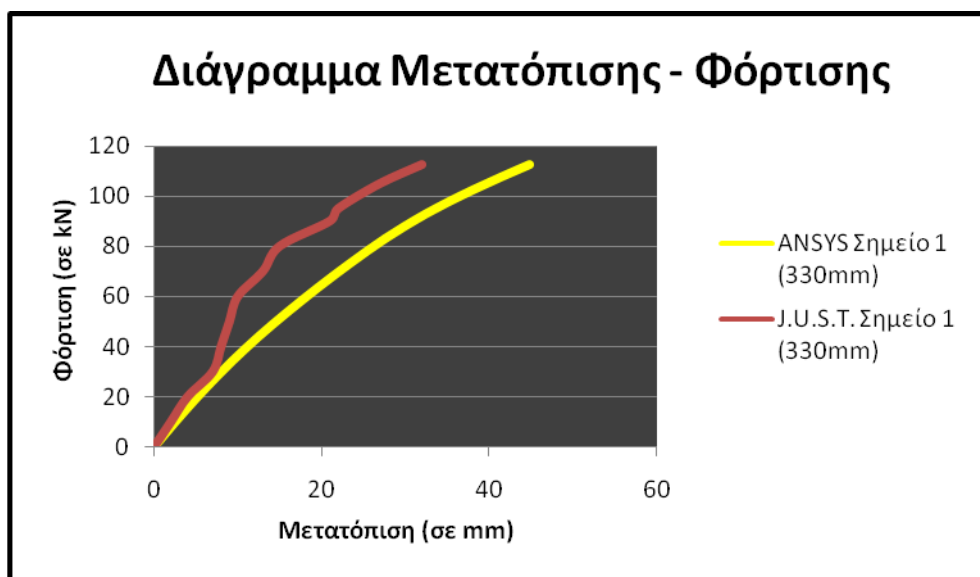
Για την περίπτωση όπου $TangMod=5.000$ έχουμε τα διαγράμματα:

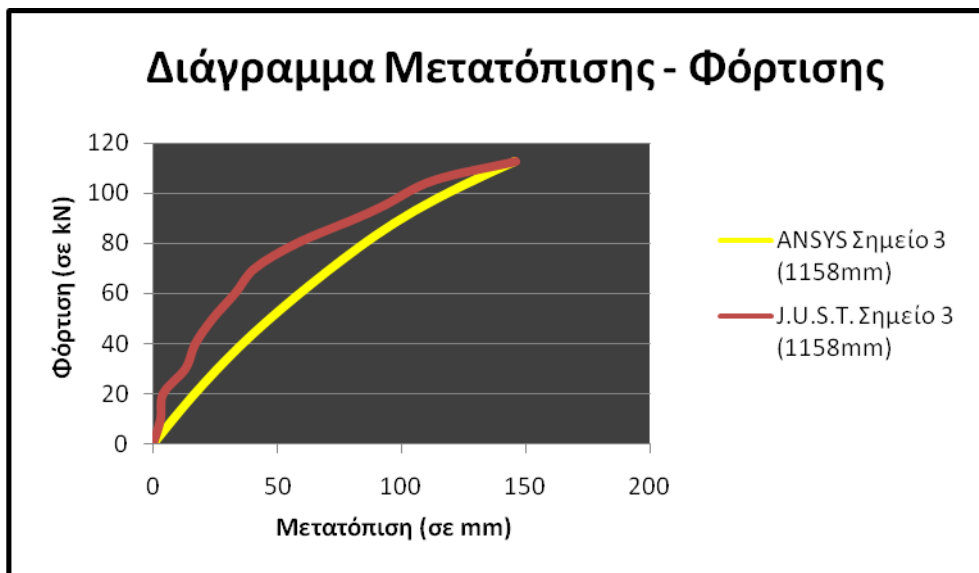
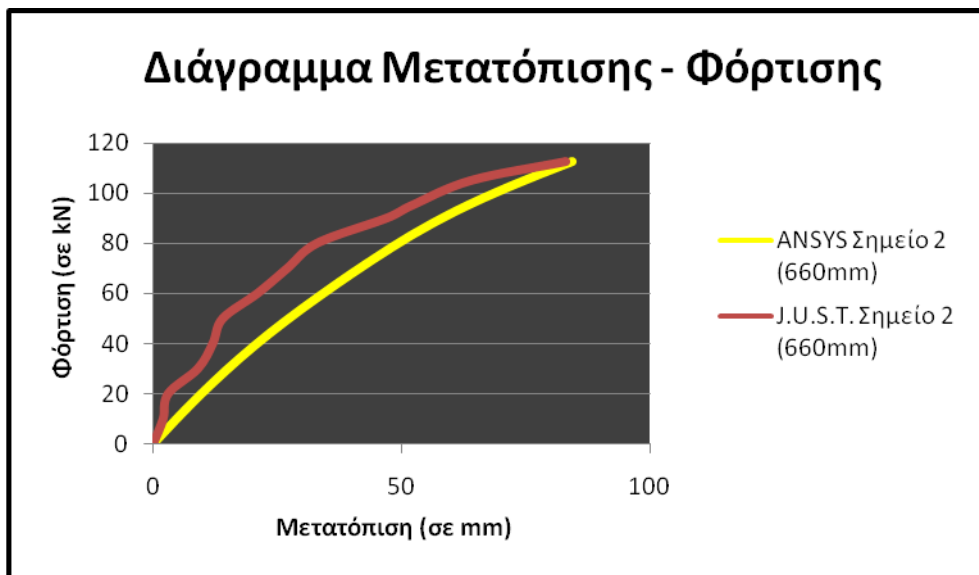




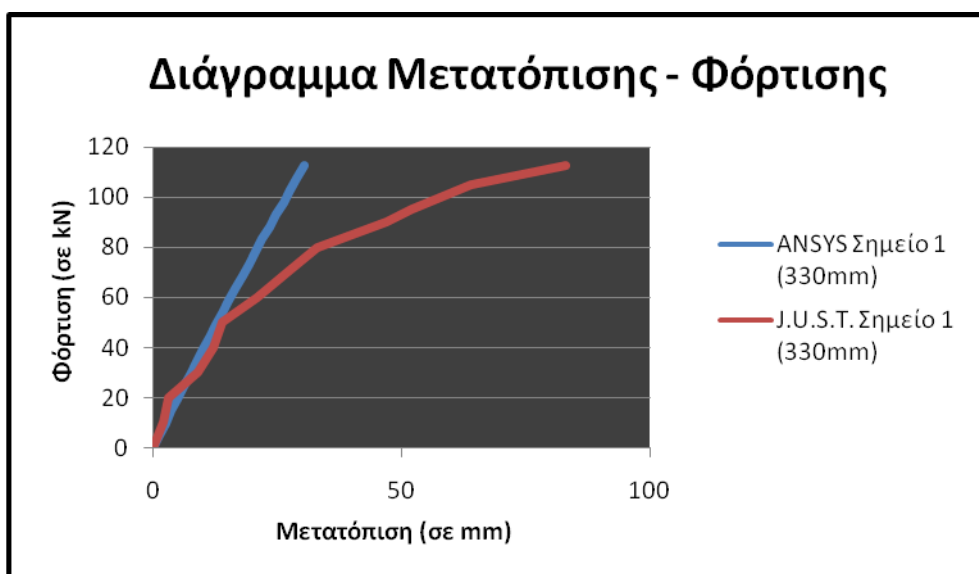
§ 5.1.2 Ελαστοπλαστικό υλικό με μικρές μετακινήσεις (όχι γεωμετρική μη-γραμμικότητα)

Για την περίπτωση όπου $TangMod=5.000$ έχουμε τα διαγράμματα:

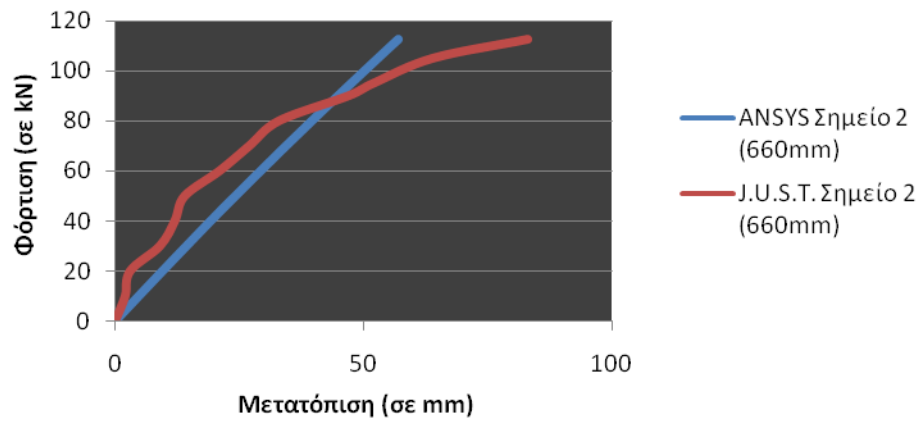




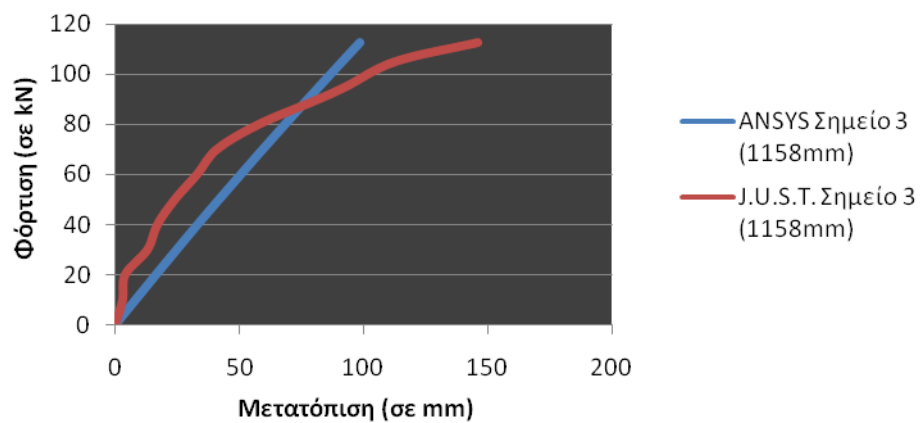
§ 5.1.3 Ελαστικό υλικό χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις



Διάγραμμα Μετατόπισης - Φόρτισης

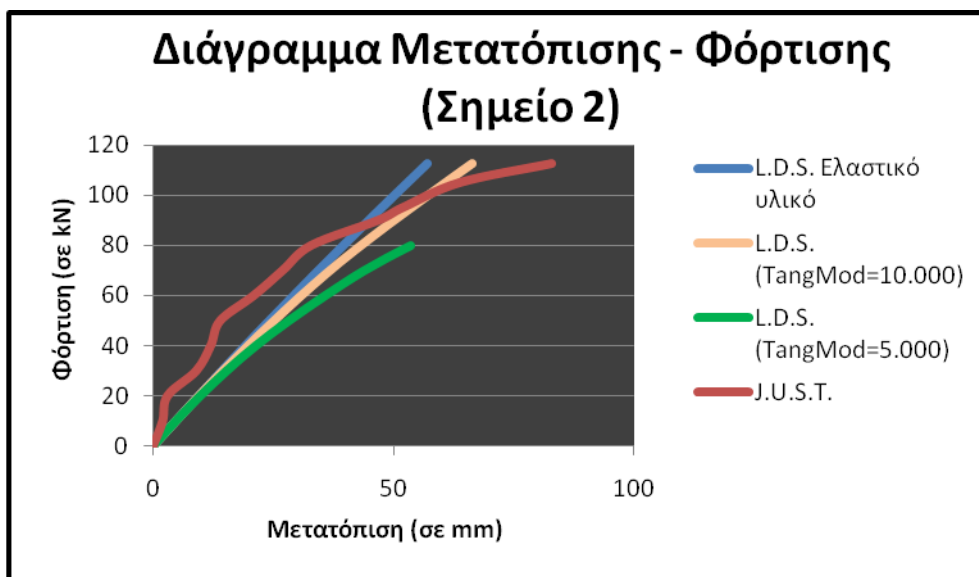
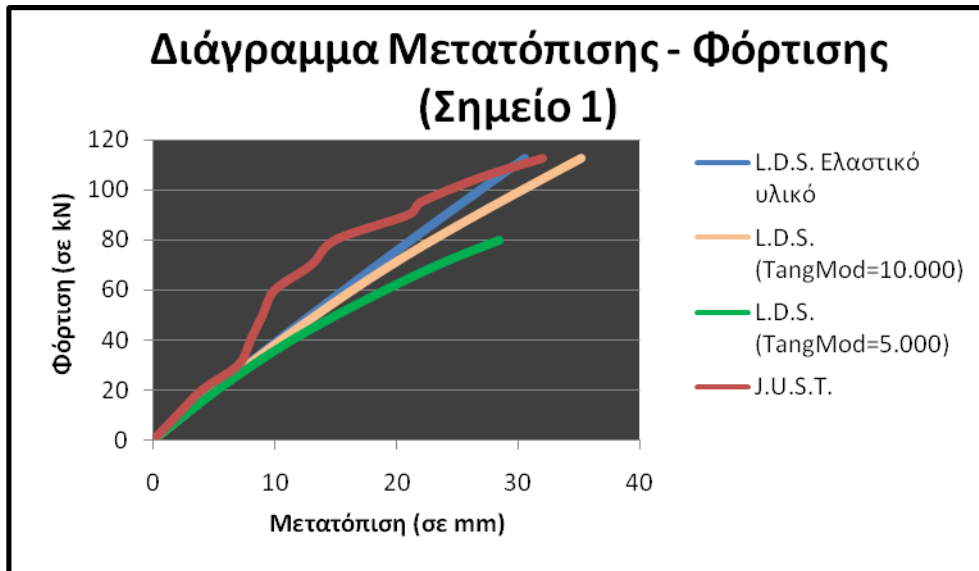


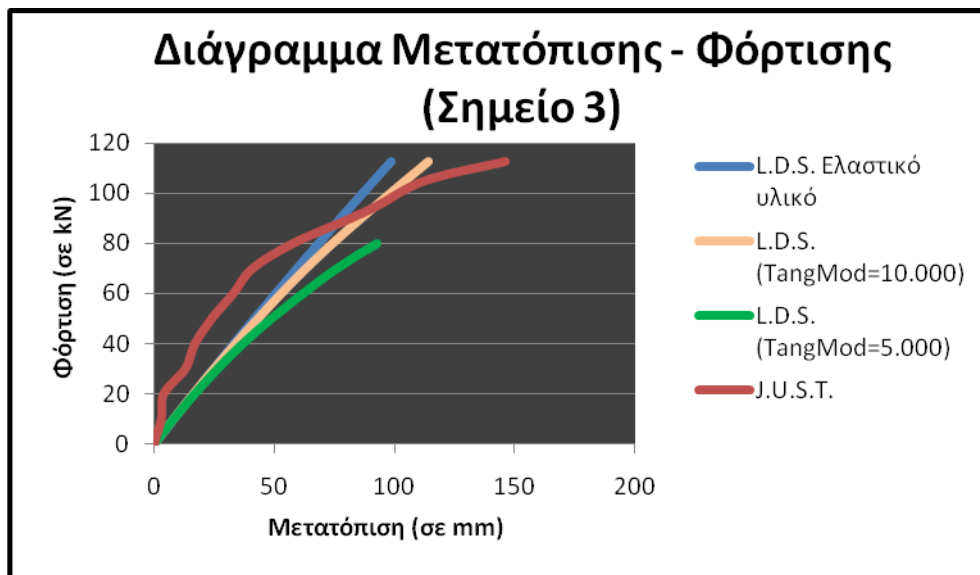
Διάγραμμα Μετατόπισης - Φόρτισης



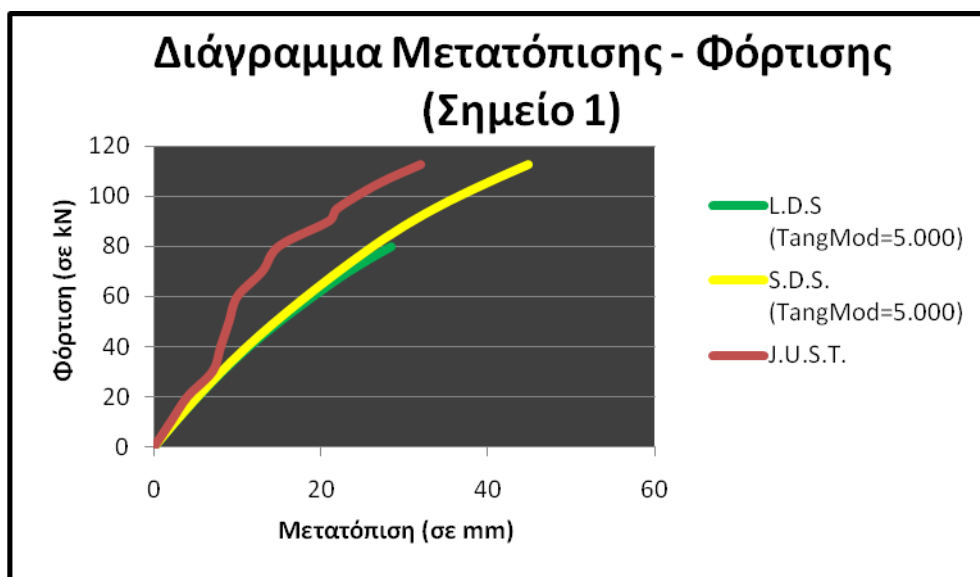
§ 5.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Στα παρακάτω διαγράμματα συγκρίνουμε τις διάφορες επιλύσεις για ελαστοπλαστικό υλικό με μεγάλες μετακινήσεις σε σχέση με τα δεδομένα του πανεπιστημίου της Ιορδανίας:

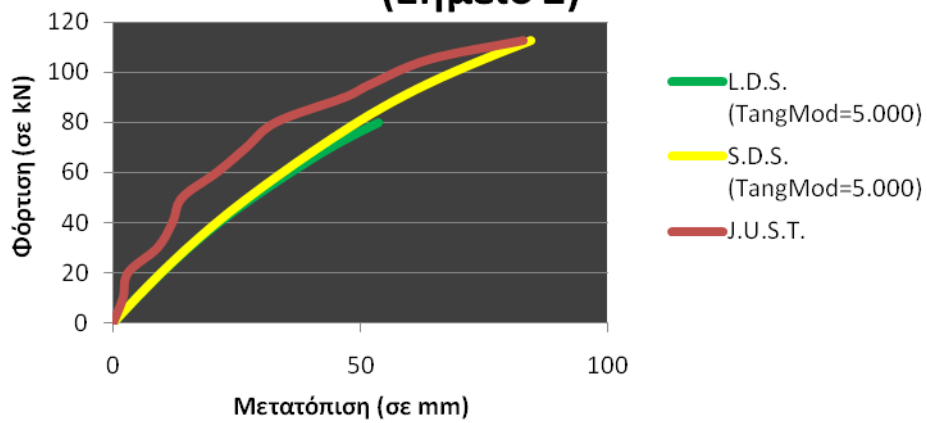




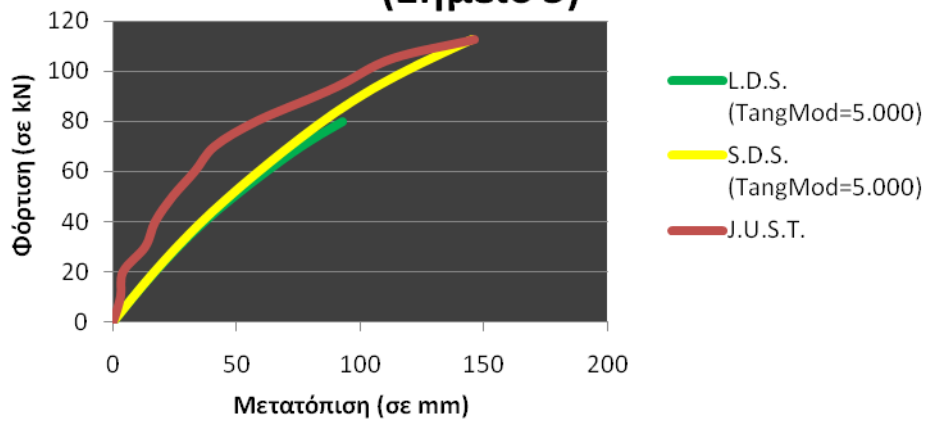
Επίσης συγκρίνουμε και τις επιλύσεις ελαστοπλαστικών υλικών (TangMod=5.000) με μεγάλες και μικρές μετακινήσεις αντίστοιχα σε σχέση με τα δεδομένα του πανεπιστημίου της Ιορδανίας:



Διάγραμμα Μετατόπισης - Φόρτισης (Σημείο 2)



Διάγραμμα Μετατόπισης - Φόρτισης (Σημείο 3)



§ 5.3 Επεξήγηση αποτελεσμάτων

Παίρνοντας σαν πρώτη την επίλυση όπου έχουμε ελαστικό υλικό παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση είναι σχεδόν ευθεία όπως εξάλλου αναμενόταν. Έτσι στην επόμενη επίλυση βάζουμε και στοιχεία πλαστικότητας ώστε να προσεγγίσουμε καλύτερα την καμπύλη του J.U.S.T. πάντα υπό την παράμετρο μεγάλων μετακινήσεων. Η παράμετρος πάνω στην οποία βασιζόμαστε ώστε να πάρουμε μια πιο ρεαλιστική καμπύλη είναι η τιμή της εφαπτομένης της καμπύλης στην πλαστική περιοχή (Tangent Modulus). Το υλικό έχει πλαστικό μέτρο δυσκαμψίας περίπου ίσο με 2.000. Η τιμή όμως αυτή δημιουργεί αριθμητικά προβλήματα συγκλίσεως στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήσαμε. Ξεκινάμε λοιπόν από την τιμή 10.000 και παίρνουμε μια πρώτη προσέγγιση. Τα αποτελέσματα μας αρχίζουν σιγά σιγά να προσεγγίζουν τα αποτελέσματα του J.U.S.T. και γι αυτό ξαναλύνουμε το πρόβλημα με Tangent Modulus = 5.000. Εδώ όμως λόγω της παραμέτρου μεγάλων μετακινήσεων έχουμε πρόβλημα σύγκλισης και το πρόβλημα καταφέρνει να επιλυθεί μόνο μέχρι τα 80kN (αντί των 112,5kN). Επαναλάβαμε τις επιλύσεις και για την περίπτωση μικρών μετακινήσεων, χωρίς τη γεωμετρική μη γραμμικότητα, με στόχο να διερευνήσουμε την επίδρασή της στα αποτελέσματα. Σημειώνουμε τέλος ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε δεν λαμβάνει καθόλου υπόψη φαινόμενα μονόπλευρης επαφής μεταξύ των δύο τμημάτων της σύνδεσης και συνεπώς δεν υπάρχει η δυνατότητα μελέτης της επιρροής της παραμόρφωσης των κοχλιών στην όλη απόκριση της σύνδεσης.

§ 5.4 Συμπεράσματα ανάλυσης

Στην ανάλυση που έγινε σε αυτή την εργασία προσεγγίσθηκε η μηχανική απόκριση κοχλιωτών συνδέσμων μεταλλικών κατασκευών με ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Τέλος είναι ουσιώδες να αναφερθεί πως το συγκεκριμένο μοντέλο θα μπορούσε να δώσει ακριβέστερα αποτελέσματα με τους ακόλουθους τρόπους:

- Διακριτοποιώντας τη διάταξη με περισσότερα και μικρότερα πεπερασμένα στοιχεία του ίδιου τύπου (SOLID 187) ή άλλου παραπλήσιου.
- Εισάγοντας ακόμη περισσότερα στοιχεία στις παραμέτρους του προβλήματος (περισσότερο εξελιγμένο καταστατικό νόμο του υλικού) αλλά και νέες πιο πολύπλοκες μεθόδους για την ακριβέστερη επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος.
- Λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της αποκόλλησης μεταξύ των γειτονικών τμημάτων της σύνδεσης.

Δυστυχώς ο υπολογιστικός χρόνος και στις δύο περιπτώσεις είναι απαγορευτικά μεγάλος και ξεφεύγει αρκετά από τα πλαίσια αυτής της ανάλυσης και των μέσων που είχαμε για την επίτευξη αυτής.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1)ANSYS Help Guide + ANSYS Tutorials (ANSYS Release 11.0)
- 2)University of Alberta ANSYS Tutorials:
<http://www.mece.ualberta.ca/Tutorials/ansys/>
- 3)Nikos D. Nanousis (2005): Design of Steel Structures with Semi-Rigid Connections, Department of Civil Engineering, A.U.Th., PhD Thesis
- 4)Erdogan Madenci and Ibrahim Guven (*The University of Arizona*) (2006): THE FINITE ELEMENT METHOD AND APPLICATIONS IN ENGINEERING USING ANSYS , Springer
- 5) P. Ivanyi and Ivanyi Jr. (2009):On the simulation of failure mechanisms in steel structures, *Advances in Engineering Software* 40 , 871-882
- 6) Gang Shi , Yongjiu Shi , Yuanqing Wang , Mark A. Bradford (2008) : Numerical Simulation of steel pretensioned bolted end-plate connections of different types and details, *Engineering Structures* 30 , 2677-2686
- 7) M.R. Mohamadi-shooreh, M. Mofid (2008): Parametric Analyses on the initial stiffness of flush end-plate splice connections using FEM , *Journal of Constructional Steel Research* 64 , 1129-1141
- 8) G. Vasdravellis, M. Valente , C.A. Castiglioni (2009): Behavior of exterior partial-strength composite beam-to-column connections: Experimental study and numerical simulations , *Journal of Constructional Steel Research* 65 , 23-35
- 9) Minas E. Lemonis, Charis J. Gantes (2009): Mechanical modeling of the nonlinear response of beam-to-column joints , *Journal of Constructional Steel Research* 65, 879-890
- 10) M.J. Kontoleon, C.C. Baniotopoulos (2000):Computational aspects on the frictional unilateral contact problem arising on steel base plate connections , *Computers and Structures* 78 , 303-309
- 11) M.J. Kontoleon, D.N. Kaziolas, M.D. Zygomalas, C.C. Baniotopoulos (2003): Analysis of steel bolted connections by means of a nonsmooth optimization procedure , *Computers and Structures* 81, 2455-2465
- 12) Xiaoyun Liao, G. GaryWang (2007): Non-linear dimensional variation analysis for sheet metal assemblies by contact modeling , *Finite Elements in Analysis and Design* 44, 34-44
- 13) G. De Matteis , M. Brescia , A. Formisano, F.M. Mazzolani (2009): Behaviour of welded aluminium T-stub joints under monotonic loading , *Computers and Structures*
- 14)E.K. Koltsakis , F.G Preftitsi (2008): Numerical investigation of the plastic behaviour of short welded aluminium double-T beams , *Engineering Structures* 30, 2022-2031

15) Angelos Zografos, Daniele Dini , Andrew V. Olver (2009): Fretting fatigue and wear in bolted connections: A multi-level formulation for the computation of local contact stresses , Tribology International ,(υπο εκτύπωση, διαθέσιμο σε ηλεκτρονική μορφή από τον εκδότη Elsevier).