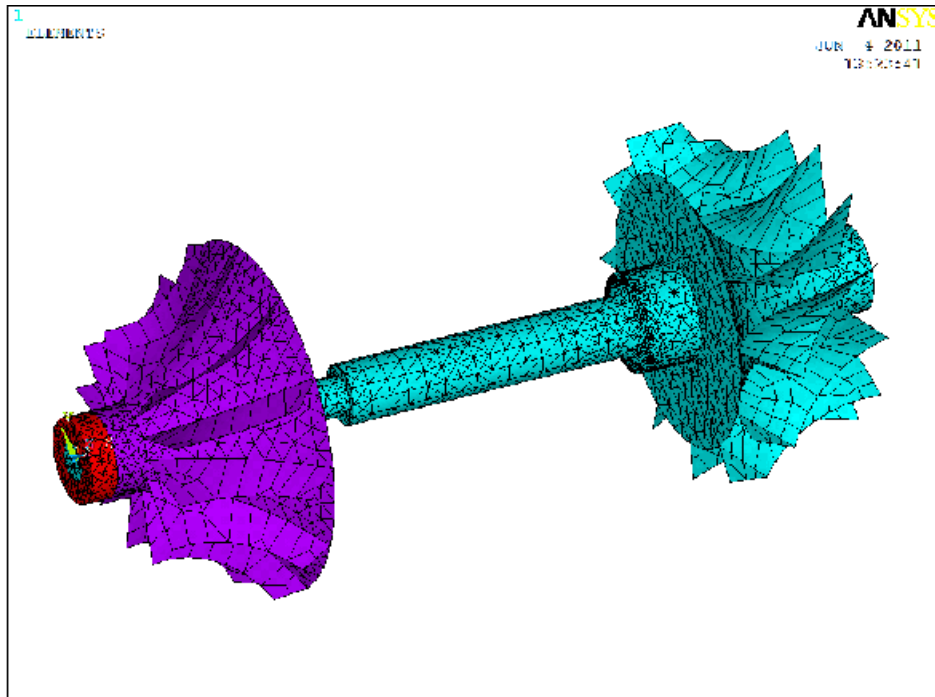


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗ (ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ-ΑΞΟΝΑΣ-  
ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ) ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ  
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΜΠΟΥΡΝΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ  
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2011



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας με θέμα την στατική ανάλυση φυγοκεντρικού στροβιλοσυμπιεστή καυσαερίων (στρόβιλος - άξονας - συμπιεστής). Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού ANSYS.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα επίκουρο καθηγητή κ. Στέφανο Τσινόπουλο, του Τμήματος Μηχανολογίας, για την πολύτιμη βοήθεια, τις προτάσεις και την καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Ιούνιος 2011  
Μπουρνάκης Δημήτριος



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται την στατική επάρκεια και την εύρεση των ιδιομορφών ενός στροβιλοσυμπιεστή καυσαερίων, κατασκευής της Garrett, ο οποίος λειτουργεί σε πετρελαιοκίνητο όχημα. Η στατική μελέτη πραγματοποιήθηκε, προσομοιώνοντας επιφανειακή πίεση στα πτερύγια του στροβίλου και του συμπιεστή. Αξίζει να σημειωθεί ότι βρέθηκε το κέντρο βάρους του στροβιλοσυμπιεστή και βάση αυτού μοντελοποιήθηκαν οι θέσεις έδρασης στον άξονα.

Η στατική ανάλυση και η εύρεση των ιδιομορφών πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με την χρήση του εμπορικού λογισμικού ANSYS.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία απαρτίζεται από τέσσερα κεφάλαια και ένα παράρτημα, τα οποία αναφέρονται στα εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο ιστορικό εξέλιξης των στροβιλοσυμπιεστών καυσαερίων και περιγραφή των μερών του. Ακολουθεί μια επεξήγηση βασικών εννοιών και περιφερειακών συσκευών για την σωστή λειτουργία του στροβιλοσυμπιεστή ως σύστημα. Τέλος γίνεται μια σύντομη περιγραφή της ανάλυσης του στροβιλοσυμπιεστή και στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Πιο συγκεκριμένα αναφέρονται οι δυνατότητες του προγράμματος και περιγράφονται κάποιες βασικές λειτουργίες για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η σχεδίαση και επίλυση τεσσάρων χαρακτηριστικών παραδειγμάτων με τη χρήση του προγράμματος ANSYS, ως αντιπροσωπευτικό δείγμα των προβλημάτων που επιλύθηκαν στο πλαίσιο εκμάθησης του προγράμματος.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η μελέτη του φυγοκεντρικού στροβιλοσυμπιεστή σε στατική και ιδιομορφική ανάλυση, από τις οποίες προκύπτουν τα συμπεράσματα για τη μηχανική συμπεριφορά του.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Η ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ .....	1
1.2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΤΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ .....	4
1.2.1. Υπερπλήρωση .....	4
1.2.2. Πτερωτές στροβιλοσυμπιεστή .....	5
1.3. ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ (TURBOCHARGER) .....	7
1.4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	11
1.5. ΕΔΡΑΣΗ – ΛΙΠΑΝΣΗ .....	13
1.6. ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΜΕ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ .....	15
1.7. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	16
1.8. ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	22
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ANSYS .....</b>	<b>25</b>
2.1. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ .....	25
2.2. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	25
2.3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ .....	29
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΛΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ANSYS .....</b>	<b>35</b>
3.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΑΣ ΠΛΑΚΑΣ ΜΕ ΟΠΗ .....	35
3.2. ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΒΟΛΟΥ ΔΟΚΟΥ (CANTILEVER BEAM) .....	41

3.3. ΑΝΑΛΥΣΗ 2-D ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΟΣ .....	46
3.4. ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΣΥΜΠΑΓΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (3D) ΠΕΤΑΛΙ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ .....	50
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΟ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗ .....</b>	<b>59</b>
4.1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	59
4.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗ.....	59
4.3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗ - ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	67
4.3.1. Τοποθέτηση Εδράνων στον άξονα .....	68
4.3.2 Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων .....	72
4.3.3 Διακριτοποίηση μοντέλου στροβιλοσυμπιεστή .....	74
4.3.4 Προσομοίωση της στήριξης και των φορτίων .....	74
4.4. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	77
Α. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ .....	77
Β. ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ .....	95
4.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	102
4.6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	106
4.7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	117
<b>ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>119</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΒΗΜΑ ΠΡΟΣ ΒΗΜΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ (TUTORIALS) ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3.....</b>	<b>121</b>
Π.1 ΠΡΟΒΛΗΜΑ 3.1: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΑΣ ΠΛΑΚΑΣ.....	121
Π.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑ 3.2: ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΒΟΛΟΥ ΔΟΚΟΥ .....	137
Π.3. ΠΡΟΒΛΗΜΑ 3.3: ΑΝΑΛΥΣΗ 2-D ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΟΣ .....	155
Π.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑ 3.4: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΤΑΛΙΟΥ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ .....	177
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....</b>	<b>219</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....</b>	<b>223</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>225</b>



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

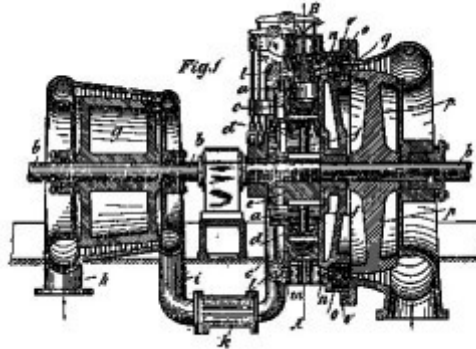
Οι στροβιλοσυμπιεστές καυσαερίων είναι μια ζωτικής σημασίας κατηγορία στροβιλοκίνητων μηχανών που προορίζονται για να αυξήσουν την ισχύ των μηχανών εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.). Η συνολική μελέτη σχεδιασμού τους, όπως και για τις υπόλοιπες στροβιλομηχανές, περιλαμβάνει διάφορους τύπους αναλύσεων, όπως η μηχανική ανάλυση (mechanical analysis), η θερμική ανάλυση (thermal analysis) και η ακουστική ανάλυση (acoustical analysis). Οι μηχανικοί και οι ερευνητές εργάζονται συνεχώς για τη βελτίωση των σχεδίων τους, κρατώντας ισορροπία μεταξύ των αναγκών και του κόστους κατασκευής αλλά και συντήρησης.

### 1.1 Η ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ

Η ιστορία της «Υπερπλήρωσης» είναι σχεδόν το ίδιο παλιά, όσο αυτή του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Οι πρώτες έρευνες για την αύξηση της απόδοσης ισχύος και την παράλληλη μείωση κατανάλωσης καυσίμου μέσω της επανασυμπίεσης του αέρα καύσης, έγιναν το 1885 από τον Gottlieb Daimler και το 1896 από τον Rudolf Diesel.

Ο πρώτος στροβιλοσυμπιεστής καυσαερίων κατασκευάστηκε από τον Ελβετό Δρ. Alfred J. Buchi, την περίοδο 1905 - 1912, εικόνα 1.1.1. Ο Δρ. Buchi ήταν τεχνικός προϊστάμενος του ερευνητικού τμήματος της εταιρείας Sulzer Brothers, στην οποία

κατέθεσε το 1915 πρόταση σχετικά με την ανάπτυξη ενός υπερτροφοδοτούμενου πετρελαιοκινητήρα. Οι ιδέες του κέρδισαν ελάχιστη έως μηδαμινή αποδοχή εκείνη την περίοδο.



**Εικόνα 1.1.1:** Ο πρώτος στροβιλοσυμπιεστής καυσαερίων, από τον Ελβετό Δρ *Alfred J. Buchi*

Το 1910, η General Electric κάνει την είσοδό της στο χώρο των στροβιλοσυμπιεστών. Στη συνέχεια το 1920 το διπλό LePere, εξοπλισμένο με κινητήρα Liberty και Turbo από την General Electric, πραγματοποίησε το ρεκόρ μέγιστου ύψους πτήσης της εποχής στα 33113 πόδια (10092 m).

Οι στροβιλοσυμπιεστές χρησιμοποιήθηκαν σε μικρή κλίμακα στα αεροσκάφη κατά τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο, ενώ η εδραίωσή τους στο χώρο της αεροναυπηγικής ήρθε στις δεκαετίες '30 -'40, αρχής γενομένης από την Ευρώπη και έπειτα ακολουθούν οι Ηνωμένες Πολιτείες. Εντωμεταξύ, στις Η.Π.Α, η General Electric παρήγαγε Turbo για πολεμικά αεροσκάφη, χιλιάδες εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκαν κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο σε μαχητικά και βομβαρδιστικά, όπως το θρυλικό B17.

Η εταιρεία Garrett, που ιδρύθηκε το 1936 από τον J.C. Cliff. Garrett, ανέλαβε τη μελέτη και παραγωγή του εναλλάκτη θερμοκρασίας αέρα (intercooler) που τοποθετούνταν μεταξύ του Turbo της General Electric και του αεροπορικού κινητήρα της Pratt and Whitney, που τοποθετούνταν στα βομβαρδιστικά B17.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, η υπερσυμπιέση αρχίζει με τις μηχανές των φορτηγών. Το 1938, η "Swiss Machine Works Saurer" κατασκεύασε τον πρώτο υπερσυμπιεστή για φορτηγό.

Προς το τέλος της δεκαετίας του '40 και τις αρχές της δεκαετίας του '50, η Garrett στρέφει την προσοχή της στην σχεδίαση μικρών στροβιλοκινητήρων δυναμικότητας 20 – 90 ίππων (15 – 67 KW). Αν και οι κινητήρες αυτοί δεν είχαν ουσιαστικές εφαρμογές, εντούτοις έγιναν η αφορμή για τη δημιουργία ενός πολύ καλού γνωστικού υπόβαθρου σε θέματα μεταλλουργίας κελύφων, στεγανοποίησης αξόνων υψηλής ταχύτητας και φυγοκεντρικών συμπιεστών.

Το 1954, ο Cliff Garrett λαμβάνει την απόφαση να διαχωρίσει το τμήμα υπερσυμπιεστών από το τμήμα στροβιλοκινητήρων της εταιρείας, αφού η εμπορική αξιοποίηση των στροβιλοσυμπιεστών στους πετρελαιοκινητήρες ήταν πλέον δεδομένη. Έτσι δημιουργεί την AiResearch Industrial Division, με σκοπό το σχεδιασμό και παραγωγή στροβιλοσυμπιεστών εξάτμισης, που στην συνέχεια θα μετονομαστεί σε Garrett Automotive.

Το Chevrolet Corvair Monza Turbo και το Oldsmobile Jetfire ήταν τα πρώτα υπερτροφοδοτούμενα επιβατικά οχήματα και έκαναν την εμφάνισή τους στην αμερικανική αγορά το 1962-1963. Παρά όμως τις υψηλές τους τεχνικές προδιαγραφές, η χαμηλή τους αξιοπιστία τα ανάγκασε να εξαφανιστούν γρήγορα από το προσκήνιο.

Μετά από την πρώτη πετρελαϊκή κρίση το 1973, η υπερτροφοδότηση γίνεται αποδεκτή στις εφαρμογές πετρελαιοκίνητων οχημάτων δημοσίας χρήσης και στο μηχανοκίνητο αθλητισμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποδοχή της υπερτροφοδότησης και στα επιβατικά οχήματα.

Προς το τέλος της δεκαετίας του '80, οι όλο και πιο αυστηροί κανονισμοί σχετικά με τις εκπομπές ρύπων οδήγησαν σε αύξηση του αριθμού των υπερτροφοδοτούμενων φορτηγών. Σήμερα όλα σχεδόν τα φορτηγά κάνουν χρήση αυτής της τεχνολογίας.

Σήμερα, η χρήση της υπερτροφοδότησης κινητήρων βενζίνης από τους κατασκευαστές δεν αποσκοπεί πρώτιστα στην αύξηση της ιπποδύναμης αλλά

αντιμετωπίζεται ως μέσο μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου και συνεπώς της περιβαλλοντικής ρύπανσης εξαιτίας των χαμηλότερων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>).

## **1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΤΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗΣ**

Κυρίαρχο χαρακτηριστικό του κινητήρα εσωτερικής καύσης είναι η κατανάλωση αέρα. Αυτό συμβαίνει, διότι για να συντελεστεί η διαδικασία της καύσης, το καύσιμο πρέπει να αναμιχθεί με τον ατμοσφαιρικό αέρα σε κατάλληλη αναλογία ( $\lambda = \text{μέρος αέρα} / \text{μέρος καυσίμου} = 14.7 / 1$ ).

Η προσθήκη καυσίμου πάνω από κάποια στενά όρια δεν επιφέρει αύξηση της ισχύος αλλά συντελεί στην παραγωγή μαύρου καπνού καθώς και στην παροχή άκαυστων υδρογονανθράκων προς την ατμόσφαιρα. Όσο περισσότερο καύσιμο προσθέτουμε, τόσο πυκνότερος είναι ο καπνός. Επομένως, αυξάνοντας την παροχή καυσίμου πέρα από το επιτρεπτό όριο αναλογίας, έχουμε σα συνέπεια την υπερβολική κατανάλωση, τη ρύπανση του περιβάλλοντος, την υψηλή θερμοκρασία καυσαερίων (για πετρελαιοκινητήρες) ή τη χαμηλή θερμοκρασία καυσαερίων (για βενζινοκινητήρες) και τη βράχυνση της διάρκειας ζωής του κινητήρα.

### **1.2.1 Υπερπλήρωση**

Η υπερπλήρωση είναι η εισαγωγή συμπιεσμένου αέρα στους κυλίνδρους του κινητήρα και έχει ως σκοπό την αύξηση της ισχύος του. Για έναν κινητήρα με δεδομένο κυβισμό, η υπερπλήρωση είναι ο μόνος τρόπος αύξησης ισχύος εφόσον, ούτε ο αριθμός στροφών, ούτε η σχέση συμπίεσης μπορούν να αυξηθούν πάνω από κάποιο όριο. Εισάγοντας συμπιεσμένο αέρα στον κύλινδρο, επιτυγχάνουμε την είσοδο μεγαλύτερης μάζας αέρα στον συγκεκριμένο όγκο. Επομένως η καύση γίνεται

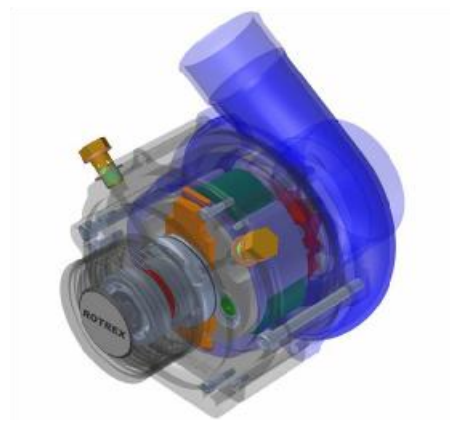
πολύ πιο αποτελεσματικά, αυξάνοντας σημαντικά τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ του κινητήρα και τη μέγιστη ροπή του.

Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την υπερπλήρωση είναι:

- a) Ο στροβιλοσυμπιεστής καυσαερίου. (εικόνα 1.2.1.a turbocharger).
- b) Οι μηχανικοί συμπιεστές, (εικόνα 1.2.1.b supercharger).



(a) Στροβιλοσυμπιεστής καυσαερίων



(b) Μηχανικός συμπιεστής Rotrex

**Εικόνα 1.2.1**

## 1.2.2 Περωτές στροβιλοσυμπιεστή

- **Αεριοστρόβιλος / Περωτή καυσαερίων**

Οι αεριοστρόβιλοι ταξινομούνται ως προς την πορεία που ακολουθεί το ρευστό σε ακτινικής και αξονικής ροής. Πιο συγκεκριμένα:

- ∅ Ο **αεριοστρόβιλος ακτινικής ροής** χαρακτηρίζεται από το συμπαγές και στιβαρό της κατασκευής του, ενώ πλεονεκτεί και ως προς τη μέθοδο κατασκευής, αφού κατασκευάζεται με χύτευση. Έχει λοιπόν εφαρμογή σε μικρού μεγέθους στροβιλοσυμπιεστές και για κινητήρες που χρησιμοποιούν ελαφρά κλάσματα σωματιδίων που επικάθονται σε αυτόν, αφού παρουσιάζονται δυσκολίες στην απομάκρυνση κατά τη λειτουργία.

Για μεγαλύτερες κατασκευές το βάρος αυξάνεται σημαντικά ενώ και η χύτευση μεγάλων κομματιών παρουσιάζει δυσκολίες. Οι απώλειες πίεσης που οφείλονται στη μείωση του μεγέθους για τους αξονικούς στροβίλους δεν επηρεάζουν την λειτουργία τους σε υψηλές πιέσεις.

Στους αεριοστρόβιλους ακτινικής ροής τα καυσαέρια οδηγούνται στο στροφέιο μέσω ενός σπειροειδούς κελύφους το οποίο δίνει τη συστροφή στη ροή. Πριν το στροφέιο μπορεί να παρεμβάλλεται μια σταθερή πτερύγωση, η οποία χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τη γωνία προσπτώσεως της ροής στα κινητά πτερύγια. Με κατάλληλη ρύθμιση της κλίσεως των σταθερών πτερύγιων είναι δυνατή η ρύθμιση της παροχής καυσαερίων, της ισχύος και των στροφών του στροβίλου.

∅ Οι **αεροστρόβιλοι αξονικής ροής** μπορεί να είναι μίας ή σπάνια δυο βαθμίδων. Κάθε βαθμίδα αποτελείται από μια σειρά σταθερών πτερύγιων που ακολουθείται από μια σειρά κινητών πτερύγιων. Μέσα στο στάτορα η ροή αποκτά συστροφή την οποία αφαιρεί το στροφέιο απορροφώντας ενέργεια από το ρευστό. Τα πτερύγια του στροβίλου επειδή διαβρέχονται από τα καυσαέρια, λειτουργούν σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες. Η μεγάλη ταχύτητα περιστροφής τους δημιουργεί ισχυρές φυγοκεντρικές δυνάμεις οι οποίες σε συνδυασμό με τη υψηλή θερμοκρασία καταπονούν ιδιαίτερα τα πτερύγια. Επιπλέον στην περίπτωση υπάρξεως συστήματος παλμών δημιουργούνται ισχυρές ταλαντώσεις στα πτερύγια. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας και της οριακής φορτίσεως θα πρέπει να ελέγχεται συνεχώς η μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων.

- **Αεροσυμπιεστής / Πτερωτή υπερπλήρωσης αέρα**

Πρόκειται για στροφέιο αξονικής ροής στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Οι κύριοι λόγοι καθιέρωσης τους είναι η απλότητα και η στιβαρότητα της κατασκευής τους, το μικρό βάρος άρα και μέγεθος και τέλος ότι με μια βαθμίδα επιτυγχάνεται ικανοποιητικά μεγάλος λόγος πίεσεως που καλύπτει τις ανάγκες υπερπλήρωσης. Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές που δεν χαρακτηρίζονται ως θετικής εκτοπίσεως στηρίζουν την αποτελεσματικότητά τους στο ταχύστροφο της περιστροφής τους.

Στον ακτινικό συμπιεστή ο αέρας εκτός από την περιστροφική κίνηση κινείται κυρίως ακτινικά με την αξονική συνιστώσα να είναι πολύ μικρή. Κατά την περιστροφή του στροφείου προσδίδεται τόσο κινητική ενέργεια όσο και πίεση. Ο διάχυτης (diffuser) καθώς οδηγεί τον αέρα περιφερειακά προς το σπειροειδές κέλυφος τον επιβραδύνει αυξάνοντας την πίεση του. Ο διάχυτης μπορεί να διαθέτει σταθερά πτερύγια ή να αποτελείται από απλά παράλληλα τοιχώματα. Το σπειροειδές κέλυφος είναι αγωγός με συνεχώς αυξανόμενη διατομή. Ο αγωγός περιβάλλει το διάχυτη με τη μορφή σπείρας και συλλέγει τον αέρα από το διάχυτη σε όλες τις περιφερειακές θέσεις, οδηγώντας τον στην έξοδο του κελύφους (case).

### 1.3 ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ (TURBOCHARGER)

Αποτελείται από δύο πτερωτές, έναν στρόβιλο που τοποθετείται στον αγωγό εξαγωγής καυσαερίων και έναν συμπιεστή που συνδέεται στον αγωγό εισαγωγής του αέρα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3.3. Οι δύο πτερωτές είναι κλεισμένες σε δύο ειδικά διαμορφωμένα κελύφη που θυμίζουν το κέλυφος ενός σαλίγκαρου εικόνα (1.3.1a και 1.3.1b).



**Εικόνα 1.3.1a:** κέλυφος εισαγωγής



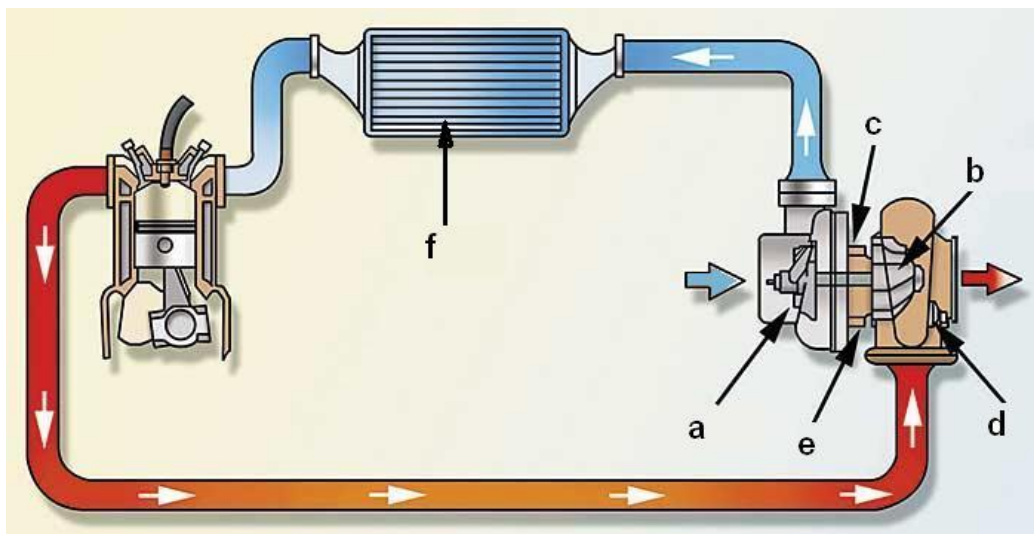
**Εικόνα 1.3.1b:** κέλυφος καυσαερίων

Ο άξονας εδράζεται στο μεσαίο μέλος (εικόνα 1.3.2) όπου γίνεται και η ψύξη του με νερό και λάδι ή σε κάποιες περιπτώσεις μόνο με λάδι όταν οι στροφές περιστροφής του είναι χαμηλές από τον κατασκευαστή (συνήθως στους πετρελαιοκινητήρες).



**Εικόνα 1.3.2:** μέλος στήριξης άξονα του στροβιλοσυμπιεστή

Ο αεριοστρόβιλος κινείται εκμεταλλευόμενος την ενέργεια των καυσαερίων και παράγει ισχύ με την οποία θέτει σε λειτουργία τον αεροσυμπιεστή παρασέρνοντάς τον. Αυτός δέχεται τον αναρροφούμενο αέρα αξονικά και λόγω περιστροφής τον διοχετεύει συμπιεσμένο στους κυλίνδρους και επιτυγχάνει την υπερπλήρωση. Στην εικόνα 1.3.3 φαίνεται ξεκάθαρα η αρχή λειτουργίας του στροβιλοσυμπιεστή καυσαερίων.



**Εικόνα 1.3.3:** Συνδεσμολογία στροβιλοσυμπιεστή

Όπου:

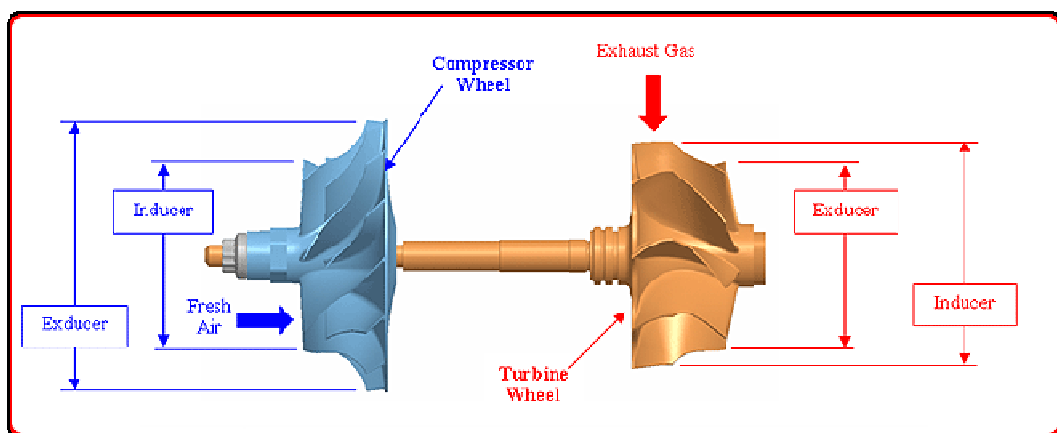
- a. αεροσυμπιεστής (*compressor wheel*)
- b. αεριοστρόβιλος (*exhaust turbine*)
- c. εισαγωγή λαδιού (*pressurized oil feed*)
- d. βαλβίδα ανακύκλωσης (*waste gate flap valve*)
- e. έξοδος νερού ψύξης (*water cooling outlet*)
- f. ψυγείο αέρα (*intercooler*)



Επειδή η περιστροφή της τουρμπίνας γίνεται με την αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας των καυσαερίων δεν έχουμε κατανάλωση ενέργειας. Αξιοποιείται, δηλαδή, ενέργεια η οποία, έτσι κι αλλιώς, θα χανόταν. Η ωφέλιμη περιοχή λειτουργίας των περισσότερων σύγχρονων στροβιλοσυμπιεστών αρχίζει από τις 100.000 rpm και ξεπερνάει τις 150.000 rpm, τη στιγμή που υπάρχουν και ειδικές περιπτώσεις όπου το όριο περιστροφής φτάνει και τις 250.000 rpm.

Όσο πιο μεγάλος ο ρυθμός περιστροφής, τόσο μεγαλύτερη η πίεση, άρα τόσο μεγαλύτερη η αύξηση της ισχύος του κινητήρα, χωρίς να χρειαστεί να αυξήσουμε τον κυβισμό του.

Κάποιες έννοιες της υπερτροφοδότησης αλλά και κάποια χαρακτηριστικά των υπερσυμπιεστών είναι πολύ σημαντικά όπως το trim και το A/R. Για να δώσουμε τον ορισμό του trim πρέπει προηγουμένως να ξέρουμε τι είναι το **inducer** και το **exducer**. Και οι δύο όροι αναφέρονται σε χαρακτηριστικό της φτερωτής είτε του συμπιεστή είτε του στροβίλου, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3.4.



**Εικόνα 1.3.4:** Χαρακτηριστικά φτερωτών

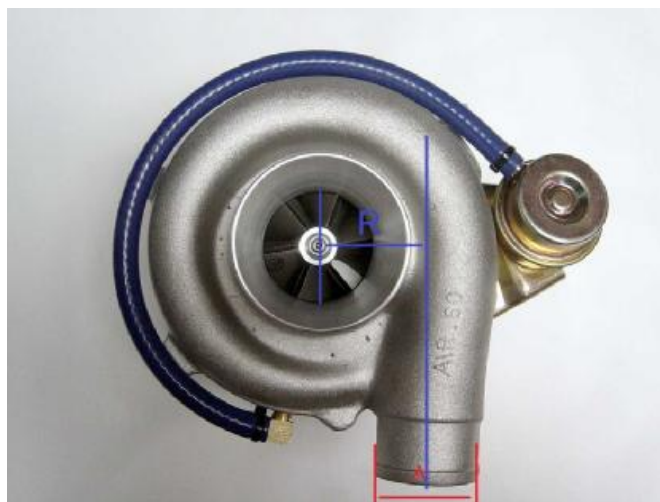
Πιο συγκεκριμένα, η διάμετρος του inducer είναι η διάμετρος από την οποία εισέρχεται ο αέρας ή τα καυσαέρια και η διάμετρος του exducer είναι η διάμετρος από την οποία ο αέρας ή τα καυσαέρια φεύγουν από την φτερωτή. Με βάση την αεροδυναμική αλλά και τις διαδρομές εισόδου του αέρα, στη φτερωτή του συμπιεστή, το inducer είναι η μικρότερη διάμετρος ενώ στη φτερωτή του στροβίλου η μεγαλύτερη.

Trim ή wheel trim είναι ένας όρος που χρησιμοποιούμε για να εκφράσουμε τη σχέση μεταξύ του inducer και του exducer τόσο της φερωτής της τουρμπίνας όσο και του συμπιεστή. Ακριβέστερα, **το trim είναι αναλογία επιφάνειας** και υπολογίζεται από τη σχέση 1.1:

$$\text{trim} = \frac{\text{inducer}^2}{\text{exducer}^2} * 100 \quad (1.1)$$

Είτε για τη φερωτή της τουρμπίνας είτε του συμπιεστή, το trim επηρεάζει την απόδοση του turbo μεταβάλλοντας την δυνατότητα ροής του αέρα. Αυτό όμως δεν σημαίνει «μεγαλύτερο trim συνεπάγεται και μεγαλύτερη απόδοση» καθώς υπάρχουν και άλλα μεγέθη που επηρεάζονται από την αλλαγή του trim και τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν την απόδοση.

Ένα άλλο πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των turbo είναι η **αναλογία A/R**. Το A/R είναι γεωμετρικό χαρακτηριστικό των housings της τουρμπίνας και του συμπιεστή, δηλαδή είναι ο λόγος της διαμέτρου της περιοχής στην είσοδο των καυσαερίων ή έξοδο του αέρα και καλείται A, προς την απόσταση που ορίζεται από το κέντρο της εκάστοτε φερωτής, έως την ακτίνα της περιοχής A και καλείται R. Στο σχήμα 1.3.5, φαίνεται η απόσταση R και η διάμετρος A.



**Εικόνα 1.3.5:** Λόγος επιφανειών A/R

Αυτή η παράμετρος έχει έντονη επίδραση στην απόλυτη επίδοση αλλά και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του στροβιλοσυμπιεστή.

Όσον αφορά το A/R του συμπιεστή, παραδόξως δεν παίζει πολύ μεγάλο ρόλο καθώς η μεταβολή του δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το σύστημα. Η κατάσταση όμως αλλάζει για το A/R του στροβίλου καθώς διαφορετικά A/R χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή της ικανότητας ροής.

Η αλλαγές που λαμβάνουν χώρα καθώς αλλάζει το A/R θα γίνουν περισσότερο κατανοητές με το παρακάτω παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε δύο κινητήρες, με πανομοιότυπα χαρακτηριστικά και η μοναδική παράμετρος που έχουν διαφορετική είναι το A/R στο στροβιλοσυμπιεστή, με τον κινητήρα 1 να έχει μικρό A/R ενώ τον κινητήρα 2 να έχει μεγάλο.

Ο στροβιλοσυμπιεστής με το μικρό A/R αυξάνει την ταχύτητα των καυσαερίων στον στρόβιλο. Αυτό σημαίνει ότι θα έχουμε καλύτερη απόδοση σε χαμηλές στροφές και ταχύτερη αύξηση της πίεσης υπερπλήρωσης. Από την άλλη όμως, εξαιτίας του μικρού A/R, η ροή των καυσαερίων εφαρμόζεται εφαπτομενικά στα πτερύγια της φτερωτής κάτι που περιορίζει την ικανότητα μέγιστης ροής του ρευστού στον στρόβιλο και επειδή αυξάνει υπέρμετρα το backpressure των καυσαερίων, προκαλείται μια μείωση της ταχύτητας περιστροφής του στροβίλου στα μεγάλα φορτία.

Από την άλλη μεριά ο στροβιλοσυμπιεστής με το μεγάλο A/R θα έχει μειωμένη απόδοση στις χαμηλές στροφές ενώ στις υψηλές, επειδή τα καυσαέρια εισέρχονται στην τουρμπίνα ακτινικά σχετικά με την φτερωτή μειώνεται το backpressure και αυξάνεται η ικανότητα μέγιστης ροής με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης.

#### **1.4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**

Πριν μερικά χρόνια το κέλυφος της τουρμπίνας κατασκευαζόταν από χυτοσίδηρο με περιεκτικότητα 20%-30% σε νικέλιο (Ni). Προτεινόταν για περιπτώσεις όπου ο κινητήρας επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί σε συνεχείς υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις όπως στα φορτηγά αγωνιστικά οχήματα και στα αεροσκάφη.

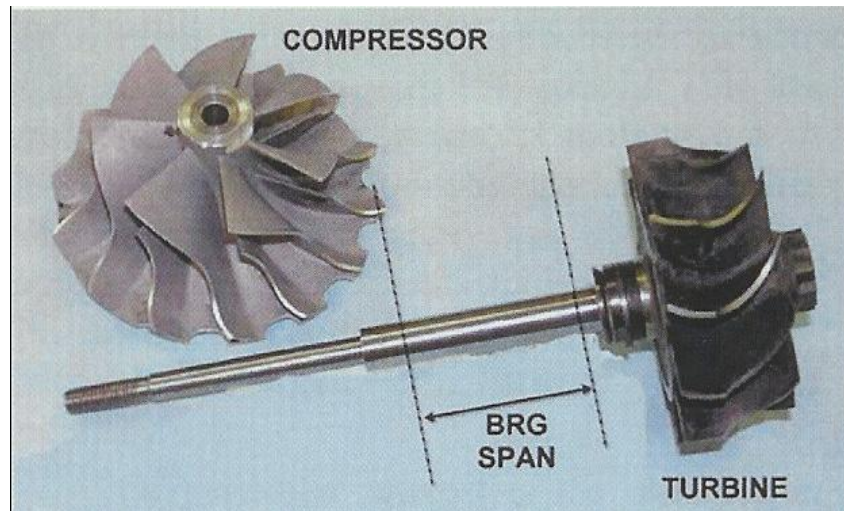
Η χρήση νέων υλικών για την κατασκευή του κελύφους (π.χ. από Niresist D5S σε ωστενιτικό χυτοχάλυβα) έδωσε τη δυνατότητα λειτουργίας με θερμοκρασίες που φτάνουν τους 1050°C.

Το κέλυφος του συμπιεστή κατασκευάζεται συνήθως από αλουμίνιο LM-27-M, εκτός αν ο συμπιεστής είναι κατασκευασμένος από άλλο υλικό εκτός αλουμινίου, όπως τιτάνιο. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι υλικών που κατασκευάζεται το κέλυφος του στροβίλου, ανάλογα την θερμοκρασία λειτουργίας του.

Για θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 700°C και πάνω χρησιμοποιείται σφαιροειδής γραφίτης (SG iron spheroid graphite), για θερμοκρασίες άνω των 750°C χρησιμοποιείται υψηλό πυρίτιο σφαιροειδούς γραφίτη (high-silicon SG iron) και για θερμοκρασίες πάνω από 800 και 900°C χρησιμοποιείται χάλυβας υψηλής αντοχής με υψηλή περιεκτικότητα σε νικέλιο. Όταν όμως το κυρίως ζητούμενο είναι το μικρό βάρος, για ελαχιστοποίηση της αδράνειας, η καλύτερη επιλογή είναι τα πανάκριβα κεραμικά υλικά.

Σε μία διαφορετική κατηγορία, από πλευράς κόστους, βρίσκεται η τουρμπίνα από ελαφρό κράμα τιτανίου, που πρωτοχρησιμοποιήθηκε στο Lancer Evo VI της Mitsubishi.

Παλαιότερα η πτερωτή της τουρμπίνας και ο άξονάς της ήταν δύο διαφορετικά κομμάτια όπου βιδώνονταν το ένα πάνω στο άλλο. Το σύστημα αυτό ήταν πολυέξοδο και χρονοβόρο. Αργότερα τα δύο κομμάτια άρχισαν να συγκολλούνται με διάφορων ειδών συγκολλήσεις. Σήμερα ή είναι δύο κομμάτια όπου συγκολλούνται με τη λεγόμενη «συγκόλληση τριβής» ή η πτερωτή του στροβίλου και ο άξονας χύνονται στο ίδιο καλούπι και δίνουν ένα ενιαίο κομμάτι, όπως φαίνετε στην εικόνα 1.4.1.



**Εικόνα 1.4.1:** χυτός στρόβιλος (*turbine*) με άξονα και συμπιεστή (*compressor*)

Τα υλικά κατασκευής της πτερωτής του στρόβιλου στο πέρασμα του χρόνου ήταν πολλά. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται stellite 31, stellite 152-1, 19-9dl και τα πιο γνωστά gm1 235 και Inconel 713C με μεγάλη περιεκτικότητα σε νικέλιο που αντέχει σε θερμοκρασίες άνω των 750 °C.

Η πτερωτή του συμπιεστή, που βρίσκουμε στους στροβιλοσυμπιεστές αυτοκινήτων, κατασκευάζεται κυρίως από αλουμίνιο LM-16-WP ή C-355T61.

Όσον αφορά τους άξονες, κατασκευάζονται από χάλυβα με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (C1144 steel, EN 19C), με σκληρότητα Rockwell g 60 για χρήση ένσφαιρων τριβών και Rockwell g 35 για χρήση κουζινέτων. Στην εικόνα 1.4.1 φαίνονται τα σημεία που εδράζεται ο άξονας (BRG SPAN).

## 1.5 ΕΔΡΑΣΗ – ΛΙΠΑΝΣΗ

Οι στροβιλοσυμπιεστές των αυτοκινήτων χρησιμοποιούν απλούς τριβείς με έδρανα από κράμα μπρούτζου και μολύβδου επικασσιτερωμένα.

Οι ελευθερίες των τριβέων κυμαίνονται από 0.20 έως 0.05 mm μεταξύ άξονα και δακτυλιδιού και από 0.07 mm έως 0.1 mm μεταξύ δακτυλιδιού και φωλιάς. Οι τριβείς είναι εσωτερικοί (τοποθετημένοι μεταξύ συμπιεστή και στροβίλου) και μια απλή διάταξη που είναι τοποθετημένη προς την πλευρά του συμπιεστή με επίπεδες και κωνοειδείς όψεις.

Η ισχύς που απαιτείται, για να υπερνικήσει τις απώλειες των τριβέων, είναι τυπικά το 5% έως 10% της ισχύος του στροβίλου σε μεγάλες ταχύτητες. Οι απώλειες αυξάνουν όσο μειώνονται οι στροφές, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα. Η λίπανση των στροβιλοσυμπιεστών γίνεται από το δίκτυο της μηχανής μέσω φίλτρου. Σε άλλες περιπτώσεις γίνεται με χωριστές αντλίες λαδιού.

Τα ένσφαιρα ρουλεμάν (αυτά με σφαίρες, εικόνα 1.5.1a) είναι κατάλληλα για ταχύτητες περιστροφής έως και 100.000 rpm ενώ η επιτρεπόμενη φόρτιση τους είναι μικρή διότι η πίεση στο έδρανο περιορίζεται σε ένα σημείο (σημειακή επαφή). Δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, γιατί έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής στις μεγάλες στροφές, είναι πιο δαπανηροί και δύσκολοι στο να αντικατασταθούν.



a) ένσφαιρα ρουλεμάν



b) ρουλεμάν με κυλίνδρους

**Εικόνα 1.5.1: ρουλεμάν**

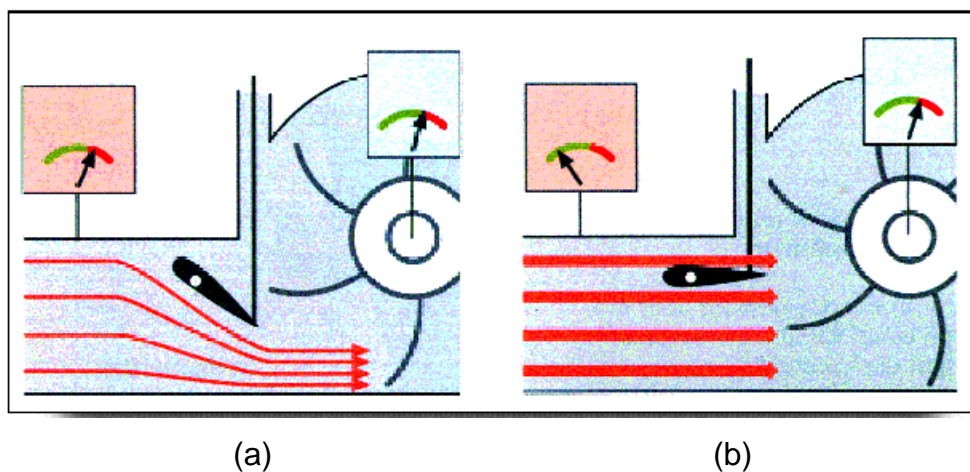
Για μεγαλύτερα φορτία χρησιμοποιούνται τα ρουλεμάν με κυλίνδρους εικόνα 1.5.1b (βαρελάκια), τα οποία όμως χαρακτηρίζονται από την αυξημένη τριβή και θέρμανση κατά την λειτουργία τους λόγω της γραμμικής επαφής τους στο έδρανο.

## 1.6 ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ ΜΕ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ

Πρωτοεμφανίστηκε στο περιορισμένης παραγωγής Ford Shelby CSX-VNT, το 1989. Τα συγκεκριμένα turbocharger δεν άντεχαν τα πολύ θερμά καυσαέρια των βενζινοκινητήρων, μέχρι τη στιγμή που αναβαθμίστηκε το υλικό τους και έτσι τοποθετήθηκαν στην Porsche 911 turbo.

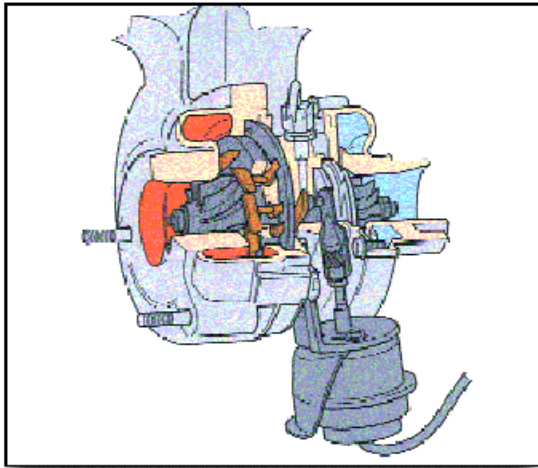
Όταν οι στροφές του κινητήρα είναι χαμηλές, και άρα η παροχή καυσαερίων μικρή, τα πτερύγια που βρίσκονται στην πλάκα (εικόνα 1.6.2a και b) έχουν ελάχιστη κλίση, τα κενά ανάμεσά τους είναι μικρά και τα καυσαέρια κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και με περιφερειακή κατεύθυνση (εικόνα 1.6.1a). Με τον τρόπο αυτό κινούν ταχύτερα τον στρόβιλο, σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν υπάρχουν ρυθμιστικά πτερύγια.

Όταν οι στροφές του κινητήρα ανεβαίνουν, ανοίγουν εντελώς τα ρυθμιζόμενα πτερύγια, και ο στρόβιλος περιστρέφεται όπως σε οποιοδήποτε συμπιεστή (εικόνα 1.6.1b).



**Εικόνα 1.6.1:** ρύθμιση πτερυγίων στροβιλοσυμπιεστή

Έτσι γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας των καυσαερίων, στις χαμηλές στροφές, και αντιμετωπίζεται εν μέρει το μειονέκτημα της καθυστερημένης απόκρισης (turbo lag).



(a)



(b)

**Εικόνα 1.6.2:** πλάκα με κινητά πτερύγια

## **1.7 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΟ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η εύρεση των γραμμικών διανυσμάτων, όπου ο αριθμός τους είναι ίσος με τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος άρα των ιδιομορφών ταλάντωσης που αντιστοιχούν σε κάθε ιδιοσυχνότητα, που δημιουργούνται κατά την περιστροφική κίνηση του στροβιλοσυμπιεστή.

Ο στροβιλοσυμπιεστής που αναλύθηκε είναι κατασκευής της εταιρείας Garrett με κωδική ονομασία GT 2538C και part number code: A6020960899\_454207-001\_GA18892W. Επίσης διαθέτει αναλογία επιφανειών στην είσοδο A/R 51 και στην έξοδο A/R 48. Στο κεφάλαιο 1.3, έχει εξηγηθεί η σημασία της συγκεκριμένης αναλογίας, καθώς και ο τρόπος εύρεσης της. Ο συγκεκριμένος στροβιλοσυμπιεστής προέρχεται από το ημιφορηγό MERCEDES BENZ Sprinter, μοντέλο του 1997 με κινητήρα πετρελαιίου στα 2,9 λίτρα.



Οι πληροφορίες που παρείχε το κεντρικό site της Garrett δεν ήταν ακριβείς μιας και ο συγκεκριμένος στροβιλοσυμπιεστής έχει πάψει να κατασκευάζεται, ενώ στην θέση του διατίθεται ένας παρόμοιος σε διαστάσεις αλλά πιο εξελιγμένος όσον αφορά τον τρόπο έδρασης του.

Να σημειωθεί ότι βρέθηκε στο διαδίκτυο κατασκευάστρια εταιρεία κινέζικης προέλευσης, η οποία συνεχίζει την παραγωγή του στροβιλοσυμπιεστή GT 2538C και τον εξάγει παγκοσμίως με το ίδιο part number που έχει και η γνήσια Garrett.

Ο στροβιλοσυμπιεστής που ανάλυθηκε, αναπτύσσει ταχύτητες περιστροφής περί τις 168000 rpm, μία γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$  που δικαιολογεί την επιλογή της κατασκευάστριας εταιρείας στην χρήση κυμαινόμενων δακτύλιων, *floating bushing bearing*, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7.1.a, αντί ένσφαιρων κυμαινόμενων ρουλεμάν για έδραση και ακόμη περισσότερο thrust bearing, που χρησιμοποιείται σε υψηλές πιέσεις και ταχύτητες περιστροφής, εικόνα 1.7.1.b.



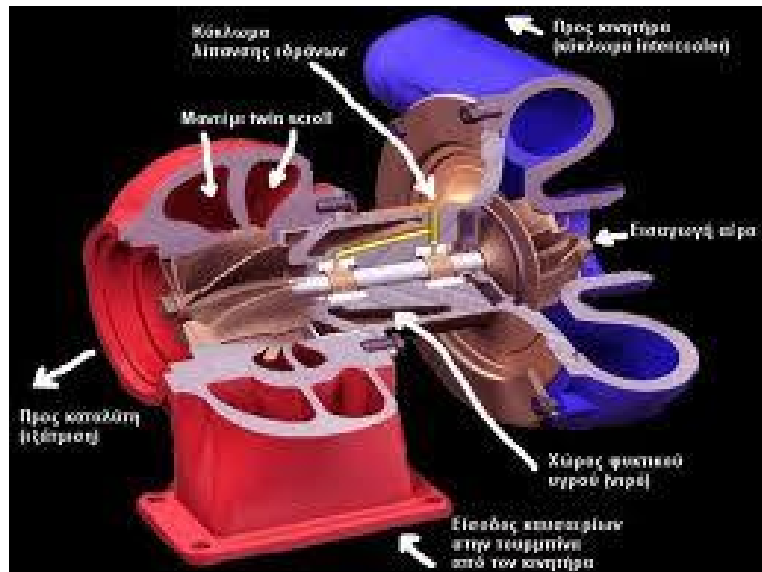
(a) δακτύλιοι



(b) thrust

**Εικόνα 1.7.1: Τύποι ρουλεμάν**

Επίσης η ψύξη γίνεται μέσω λίπανσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.7.2 σε τομή και όχι σε συνδιασμό ψυκτικού υγρού.



**Εικόνα 1.7.2:** Τρόπος ψύξης Στροβιλοσυμπιεστής σε τομή

Από κατασκευαστικής πλευράς, ο στροβιλοσυμπιεστής κρίνεται αρκετός για ιποδυνάμεις που δεν ξεπερνούν τους 140 Ηρ παραγωγίσιμους στο σύνολο με τον κινητήρα.

Ο συμπιεστής είναι κατασκευασμένος από κράμα αλουμίνιου με μέτρο Ελαστικότητας  $E=7.032652 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ , Πυκνότητα  $D=2712.631 \times 10^{-9} \text{ kg/mm}^3$  και λόγο Poisson  $\nu=0.33$ . Διαθέτει έξι μικρά και έξι μεγάλα πτερύγια, πάχους 0.5 mm.

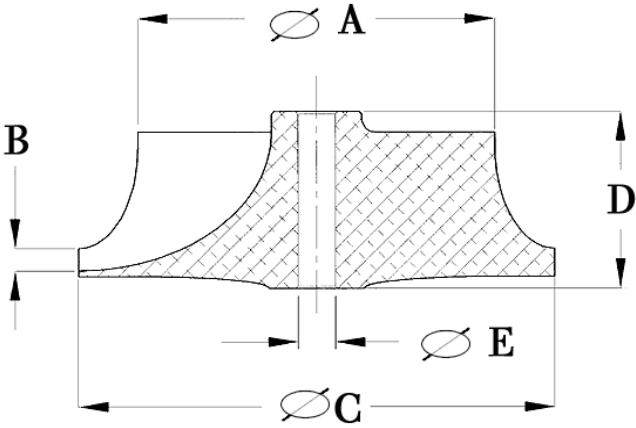
Να σημειωθεί ότι στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, τα πτερύγια προσομοιώθηκαν με στοιχεία κελύφους και για το λόγο αυτό σχεδιάστηκαν ως επιφάνειες, περνώντας το πάχος τους 0.5 mm, ως ιδιότητα (real constant) του στοιχείου.

Ο στρόβιλος είναι χυτός με τον άξονα, κατασκευασμένος από υλικά με βάση το κράμα νικελίου, για υψηλή αντοχή σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους  $750^\circ\text{C}$  και με προσμήξεις χρωμίου και σιδήρου. Έχει μέτρο ελαστικότητας  $2.137375 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ , Πυκνότητα  $D=8580.77 \times 10^{-9} \text{ kg/mm}^3$  και λόγο Poisson  $\nu=0.29$ . Διαθέτει δώδεκα πτερύγια, πάχους 1.0 mm.

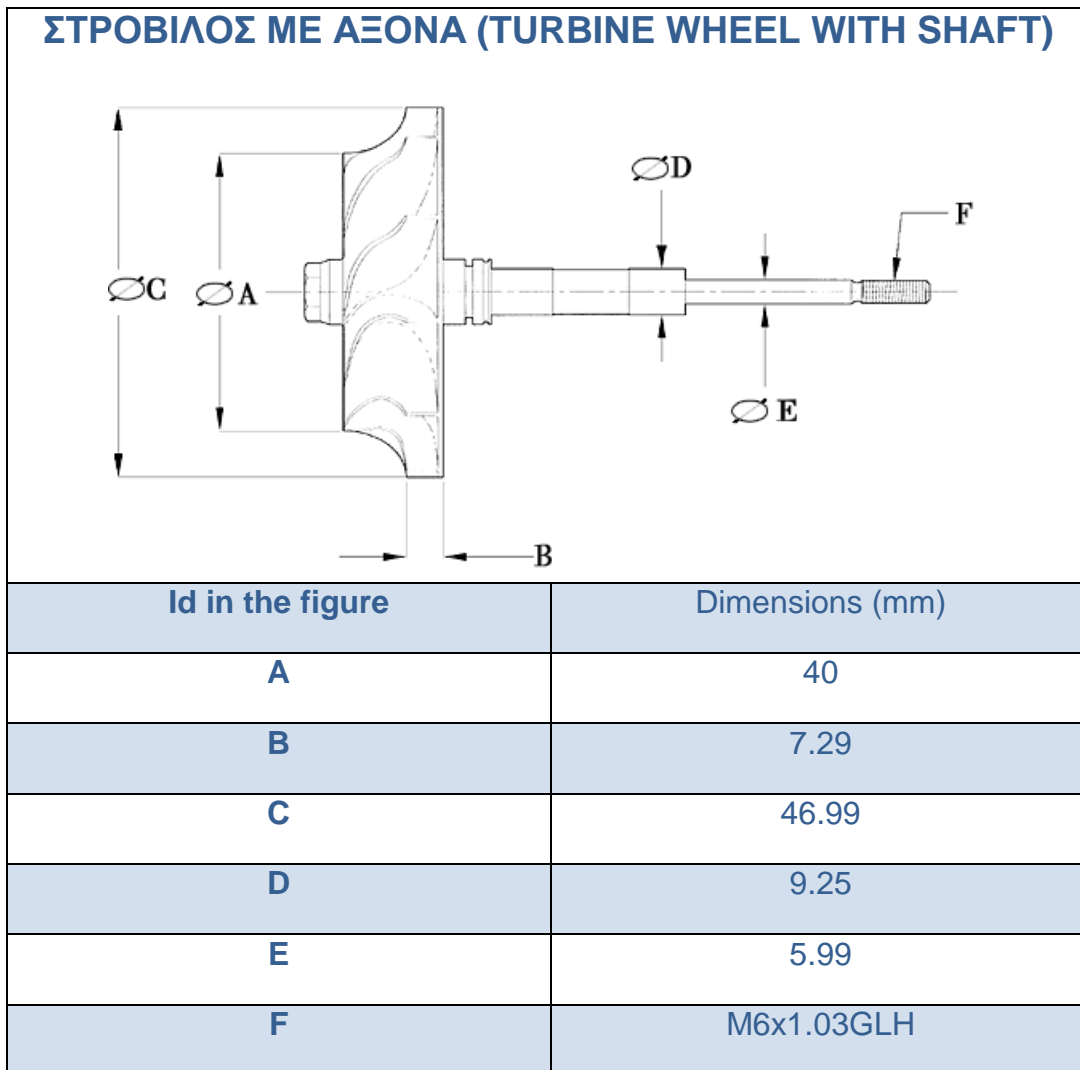
Στην ανάλυση συμβάλει και το βάρος του παξιμαδιού, που συγκρατεί το συμπιεστή στον άξονα, για το οποίο δεν είχαμε καμιά ένδειξη περι τι υλικού πρόκειται και γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιήθηκε χάλυβας με μέτρο Ελαστικότητας  $E=1.902953 \times 10^1$  (N/mm<sup>2</sup>), λόγο Poisson  $\nu=0.31$  και Πυκνότητα  $D=7750.373 \times 10^{-9}$  (Kg/mm<sup>3</sup>).

Παρακάτω (Πίνακες 1.1 και 1.2 για τον συμπιεστή και τον στρόβιλο, αντίστοιχα) δίδονται τα στοιχεία που πάρθηκαν από το κεντρικό site της κατασκευάστριας εταιρείας Garrett για τη συγκεκριμένη κατασκευή που αναλύουμε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων μέσω του πακέτου ANSYS.

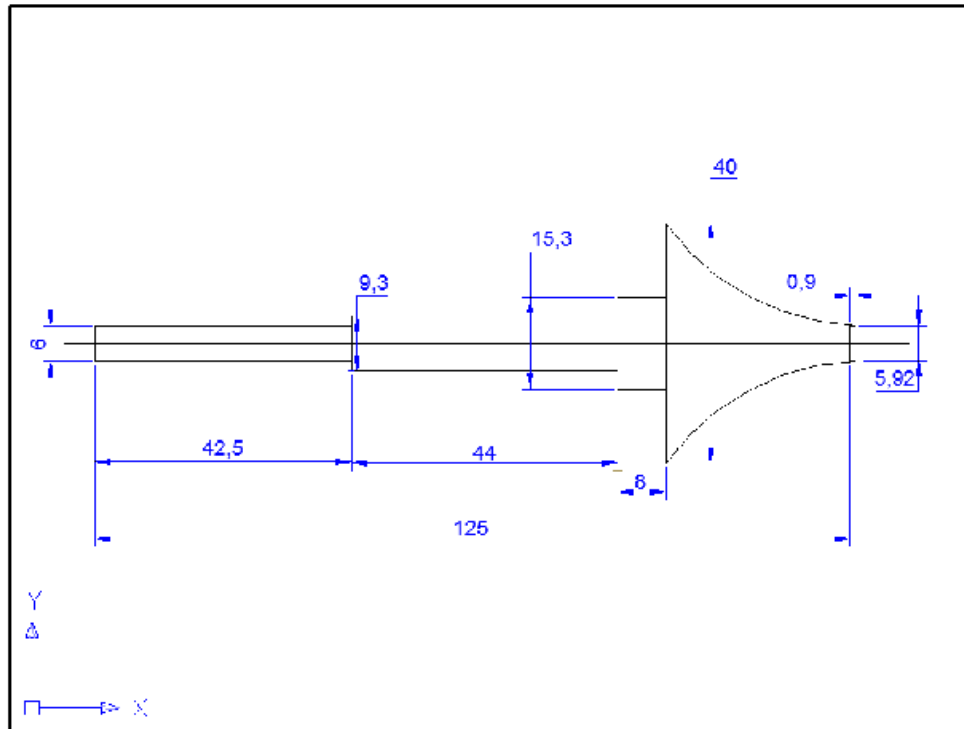
**Πίνακας 1.1: Διαστάσεις Συμπιεστή**

<b>ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ (COMPRESSOR WHEEL)</b>	
	
Id in the figure	Dimensions (mm)
<b>A</b>	38.66
<b>B</b>	3.81
<b>C</b>	52.50
<b>D</b>	25.98
<b>E</b>	5.70

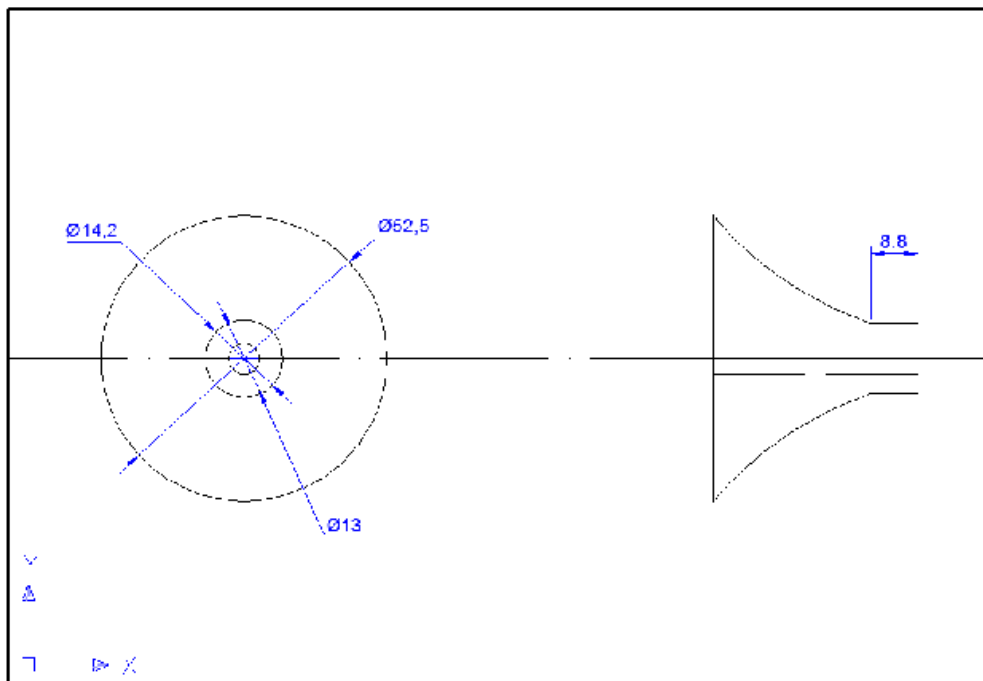
Πίνακας 1.2: Διαστάσεις στροβίλου με άξονα



Όπως πολύ εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κάποιος, οι διαστάσεις που βρεθήκαν για το στροβιλοσυμπιεστή ήταν ανεπαρκείς για την πλήρη σχεδίαση του μοντέλου. Αυτό οδήγησε στην χρήση παχύμετρου για να παρθεί μια πλήρης διαστάσιολόγηση του στροβιλοσυμπιεστή. Οι μετρήσεις που πάρθηκαν, φαίνονται στις εικόνες 1.7.3 και 1.7.4.



**Εικόνα 1.7.3:** Διαστάσεις Στροβίλου και άξονα σε mm



**Εικόνα 1.7.4:** Διαστάσεις Συμπιεστή σε mm

## 1.8 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

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. Όμως, υπάρχει η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι. Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Ο τρόπος επίλυσης προβλημάτων με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων είναι σχεδόν ο ίδιος σε όλες τις περιοχές της επιστήμης του μηχανικού που εφαρμόζεται. Για παράδειγμα για την επίλυση μιας κατασκευής σχεδιάζουμε πρώτα την κατασκευή κατόπιν τη διακριτοποιούμε σε μικρά γεωμετρικά σχήματα π.χ. τρίγωνα ή και τετράπλευρα για αναλύσεις στις δύο διαστάσεις κύβους ή και πυραμίδες για αναλύσεις στις τρεις διαστάσεις, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα που αναλύεται γράφονται για κάθε πεπερασμένο στοιχείο και εκφράζονται ως συνάρτηση των αγνώστων μετατοπίσεων στις κορυφές του πεπερασμένου στοιχείου (μέθοδος των μετατοπίσεων).

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις συνοριακές συνθήκες καθώς και τα φορτία (θερμικά και μηχανικά) η μέθοδος καταλήγει στις εξισώσεις ισορροπίας της κατασκευής. Η λύση του συστήματος των εξισώσεων ως προς τους αγνώστους, οι οποίοι είναι οι κομβικές μετατοπίσεις, είναι η ζητούμενη προσεγγιστική λύση. Γνωστών των κομβικών μετατοπίσεων, υπολογίζονται στα διάφορα σημεία της κατασκευής οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι αντιδράσεις των στηρίξεων.

Με την ανάπτυξη των υπολογιστικών μεθόδων, όπως των πεπερασμένων στοιχείων και με την παράλληλη αλματώδη πρόοδο που επετεύχθη στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, οι μηχανικοί έχουν τη δυνατότητα πλέον να επιλύουν γρήγορα και εύκολα, δύσκολα προβλήματα της μηχανικής, που μέχρι πρόσφατα θεωρούνταν άλυτα. Περαιτέρω, η απαίτηση της αγοράς για χρήση των μεθόδων αυτών από τον μέσο μηχανικό οδήγησε στην ανάπτυξη εύχρηστων γραφικών

περιβαλλόντων εργασίας τα οποία συνοδεύουν την ανάλυση-υπολογισμό που παρέχουν τα πεπερασμένα στοιχεία.

Ο συνδυασμός των γραφικών, με την ανάλυση-υπολογισμό των πεπερασμένων στοιχείων προωθούν την επιστήμη, την απλοποιούν, την κάνουν προσιτή και δημιουργική. Προϊόν της συστηματικής εργασίας των ερευνητών είναι η ανάπτυξη των εμπορικών προγραμμάτων για τον Η/Υ. Τα εμπορικά προγράμματα συνήθως αποτελούνται από δύο μεγάλα τμήματα, το γραφικό περιβάλλον εργασίας (GUI), το οποίο χρησιμοποιείται πριν (pre-) και μετά την ανάλυση (post-processing) και το πρόγραμμα ανάλυσης-υπολογισμού.

- Pre-processing. Με τη χρήση του γραφικού προγράμματος η κατασκευή σχεδιάζεται και κατόπιν διακριτοποιείται στα πεπερασμένα στοιχεία.
- Post-processing. Μετά την ανάλυση γίνονται γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων, όπως είναι οι εικόνες του παραμορφωμένου σώματος, της κατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων εντός του σώματος και πολλά άλλα.

Τα προγράμματα της ανάλυσης χρησιμοποιούνται για τη μελέτη ποικίλων προβλημάτων που μπορεί να αφορούν στη μηχανική των στερεών ή των κατασκευών, στη ροή ρευστών, στη μετάδοση θερμότητας, σε προβλήματα ακουστικής, κατεργασίας μετάλλων, ηλεκτρισμού, ηλεκτρομαγνητισμού και σε πολλές άλλες περιοχές. Όλα τα πανεπιστήμια, τα ερευνητικά ινστιτούτα, τα ερευνητικά τμήματα των βιομηχανιών και οι τεχνικές εταιρίες χρησιμοποιούν εμπορικά πακέτα λογισμικού όπως τα: ANSYS, MARC, ABAQUS, NASTRAN, ADINA, SAP90 και COSMOS. Στη παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων ANSYS στην έκδοση 11.





## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ANSYS**

#### **2.1 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ**

Το ANSYS είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων γενικού σκοπού. Έχει τη δυνατότητα επίλυσης στατικών και δυναμικών προβλημάτων ροής ρευστών, ανάλυσης κατασκευών, μετάδοσης θερμότητας, ακουστικής, ηλεκτρισμού και ηλεκτρομαγνητισμού. Με βάση τις δυνατότητες επίλυσης και το μερίδιο που κατέχει στην αγορά θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα πακέτα πεπερασμένων στοιχείων για πάνω από 30 έτη. Έχει χρήση σε πολλούς τομείς εφαρμοσμένης μηχανικής, συμπεριλαμβανομένης της αεροδιαστημικής, αυτοκίνητης, ηλεκτρονικής και πυρηνικής. Στο σημείο αυτό όμως πρέπει να επισημανθεί ότι προκειμένου να χρησιμοποιήσει κανείς το ANSYS ή γενικότερα οποιοδήποτε άλλο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων γενικού σκοπού, είναι επιτακτικό να καταλαβαίνει πλήρως τις βασικές έννοιες και τους περιορισμούς της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

#### **2.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε το ANSYS 11.0. Το περιβάλλον αυτής της έκδοσης περιέχει δύο παράθυρα:

το κύριο παράθυρο (εικόνα 2.2.1) και ένα παράθυρο πληροφοριών (εικόνα 2.2.2). Το κύριο παράθυρο αποτελείται από πέντε τμήματα:

**1. Μενού βοηθημάτων (Utility menu):** Περιέχει τις λειτουργίες που είναι διαθέσιμες σχεδόν σε όλο το φάσμα λειτουργιών του ANSYS, όπως οι έλεγχοι αρχείων (file), η επιλογή (select), οι γραφικοί έλεγχοι (PlotCtrls), ο ορισμός και η διαχείριση παραμέτρων (Parameters) και το σύστημα βοήθειας (help).

Αναλυτικά το utility menu περιέχει τις εξής λειτουργίες:

- **File:** Έχουμε τη δυνατότητα να εμφανίσουμε ένα αρχείο που είναι αποθηκευμένο στη βάση δεδομένων του υπολογιστή. Επίσης να δημιουργήσουμε ένα καινούριο και να το αποθηκεύσουμε.
- **Select:** Είναι μια δυναμική εντολή με την οποία έχουμε τη δυνατότητα να απομονώσουμε και να επεξεργαστούμε ένα τμήμα του μοντέλου. Κατά την επεξεργασία το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψη μόνο το επιλεγμένο τμήμα του μοντέλου.
- **List:** Έχουμε τη δυνατότητα να εμφανίσουμε καταλόγους που είναι αποθηκευμένοι στη βάση δεδομένων του προγράμματος. Οι κατάλογοι μπορούν να περιέχουν σημεία, γραμμές, επιφάνειες, όγκους, στοιχεία και κόμβους, τα οποία ακολουθούνται από μια συγκεκριμένη αρίθμηση που γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα.
- **Plot:** Μπορούμε να προβάσουμε στο παράθυρο σχεδίασης (ανάλογα με το τι θέλουμε να επεξεργαστούμε) σημεία, γραμμές, επιφάνειες, κ.λπ. του μοντέλου.
- **PlotCtrls:** Περιέχει λειτουργίες που ελέγχουν τα χαρακτηριστικά των γραφικών επιδείξεων.
- **Workplane:** Η χρήση της εντολής αυτής προσφέρει μεγάλη ευκολία στη δημιουργία στερεών πρότυπων μοντέλων. Μας δίνει τη δυνατότητα να

μεταφέρουμε ή και να περιστρέψουμε όπου επιθυμούμε τους άξονες συντεταγμένων.

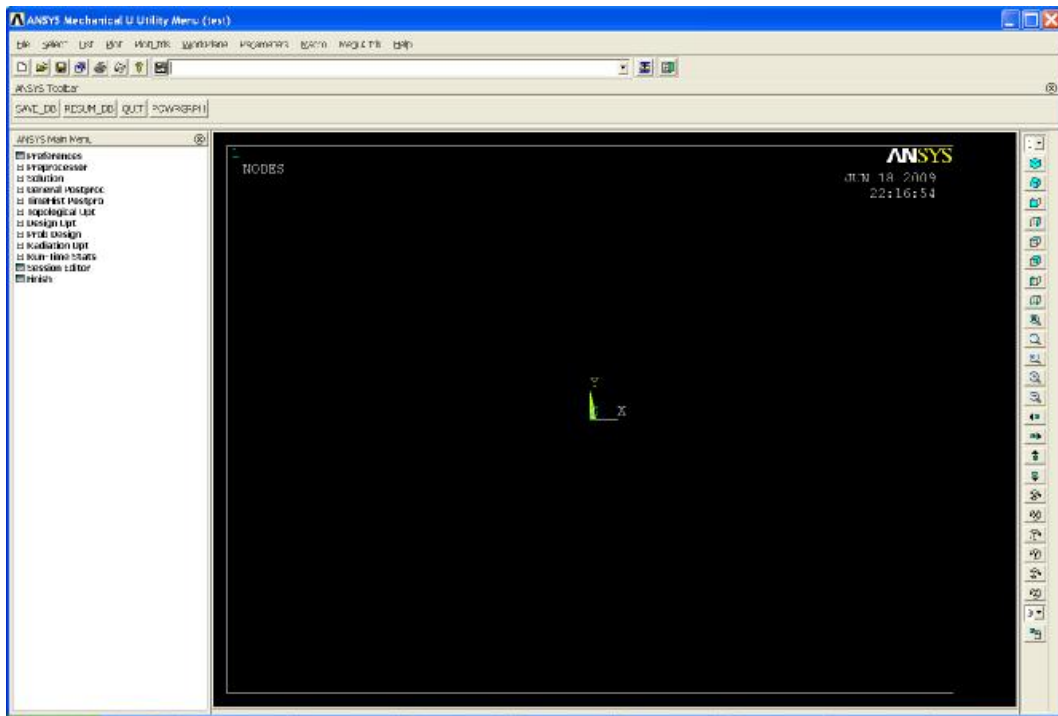
- **Help:** Είναι το σύστημα βοήθειας του προγράμματος στο οποίο μπορούμε να ανατρέξουμε για οποιαδήποτε πληροφορία.

2. **Κύριο μενού (Main menu):** Περιέχει όλες τις εντολές του ANSYS που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του μοντέλου, την επίλυση του προβλήματος και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Οι εντολές έχουν οργανωθεί σε τρεις βασικούς επεξεργαστές, στον **Preprocessor** ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις διαθέσιμες εντολές για την κατασκευή του μοντέλου, στον **Solution** ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις διαθέσιμες εντολές για τον ορισμό της ανάλυσης καθώς επίσης και τις εντολές επίλυσης και τέλος στον **Postprocessor** μέσω του οποίου ο χρήστης επεξεργάζεται τα αποτελέσματα.

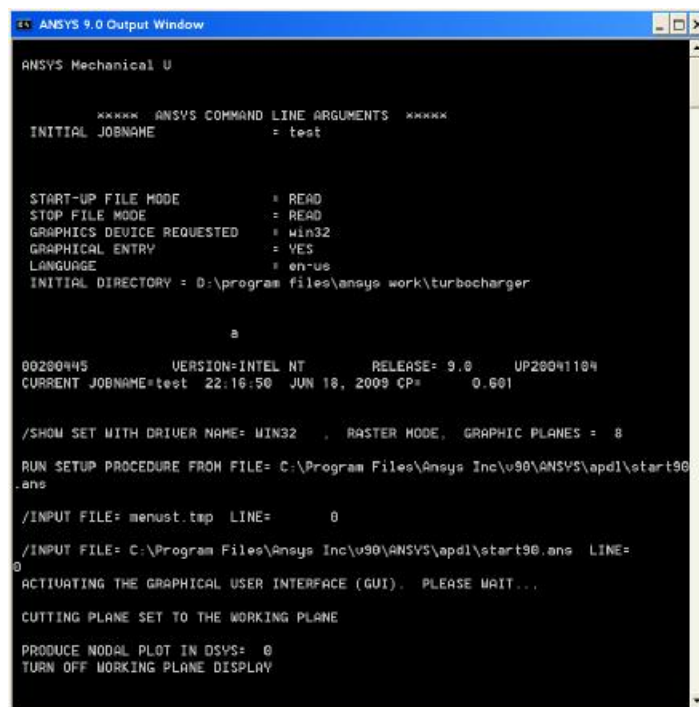
3. **Μπάρα εργαλείων (Toolbar):** Περιέχει κουμπιά με τα οποία μπορούμε να εκτελέσουμε εντολές και λειτουργίες που χρησιμοποιούνται επανειλημμένα κατά τη διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος. Επίσης η μπάρα εργαλείων περιέχει κουμπιά επαναφοράς (Resume\_db) αμέσως προηγούμενων αποθηκευμένων μοντέλων.

4. **Πεδίο εντολών (Input field):** Το πεδίο εντολών μας δίνει τη δυνατότητα να εισάγουμε άμεσα τις εντολές της γλώσσας προγραμματισμού APDL που διαθέτει το ANSYS. Η χρήση εντολών προγραμματισμού είναι ένας εναλλακτικός τρόπος δημιουργίας ενός μοντέλου αντί αυτού μέσω των καρτελών εισαγωγής δεδομένων και ενδείκνυται στην περίπτωση πολύ μεγάλων μοντέλων καθώς επίσης και στην περίπτωση των παραμετρικών αναλύσεων. Όλες οι πρόσφατα δακτυλογραφημένες εντολές αποθηκεύονται σε ένα μενού καταγραφής για εύκολη πρόσβαση.

5. **Γραφικό παράθυρο (Graphics Window):** Είναι το παράθυρο, όπου το μοντέλο αναπαρίσταται γραφικά στα διάφορα στάδια της κατασκευής καθώς επίσης και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση.



**Εικόνα 2.2.1:** Κύριο παράθυρο εργασίας



**Εικόνα 2.2.2:** Παράθυρο πληροφοριών

## 2.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Για την ανάλυση ενός προβλήματος με το ANSYS ακολουθούμε τα εξής βασικά βήματα:

### α) Κατασκευή του μοντέλου με χρήση των εντολών του Preprocessor

Οι σημαντικότερες εργασίες που γίνονται για την κατασκευή ενός μοντέλου είναι οι εξής:

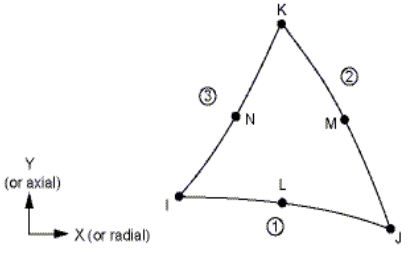
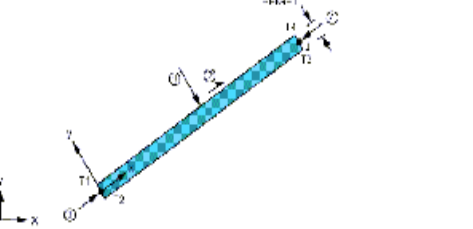
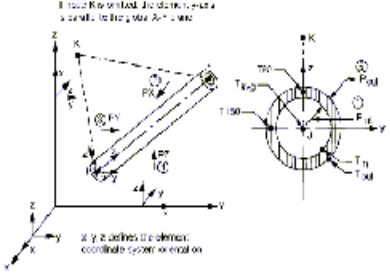
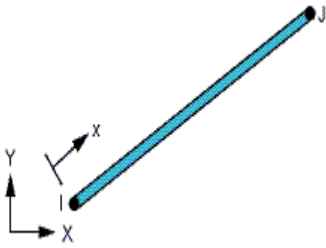
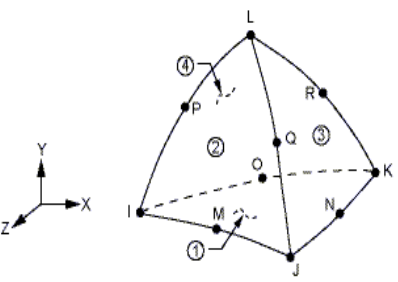
∅ Ορισμός του τύπου στοιχείων (element type): Το ANSYS ανάλογα με τη γεωμετρία, το φυσικό χαρακτήρα του προβλήματος (στατικό, θερμικό, ροή ρευστού, ηλεκτρομαγνητικό) και την μηχανική συμπεριφορά των υλικών της κατασκευής (γραμμικά, μη-γραμμικά, ισότροπα, ανισότροπα), των συναρτήσεων που θα χρησιμοποιηθούν για την προσέγγιση των αγνώστων πεδίων του προβλήματος, διαθέτει περισσότερα από 150 στοιχεία για την ανάλυση όλων των ειδών προβλημάτων. Είναι εύκολα κατανοητό ότι η επιλογή του κατάλληλου είδους στοιχείου είναι πολύ σημαντική για τη διαδικασία της ανάλυσης. Κάθε ένα από τα στοιχεία προσδιορίζεται από την ονομασία μιας κατηγορίας και ακολουθείται από έναν χαρακτηριστικό αριθμό, π.χ. link10, beam3, solid45.

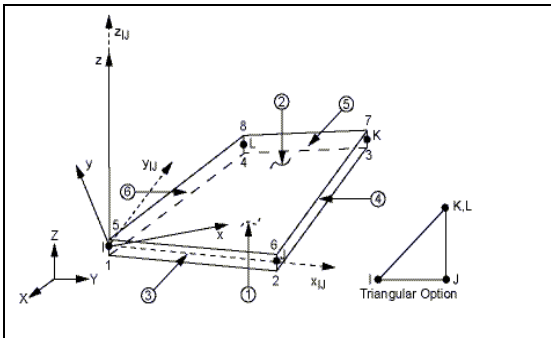
Οι βασικές κατηγορίες των διαθέσιμων στοιχείων είναι οι εξής:

1) Δομικά στοιχεία (structural): Σε αυτή την ομάδα στοιχείων οι βαθμοί ελευθερίας στους κόμβους, είναι συνήθως οι μετατοπίσεις και οι στροφές. Στις δομικές αναλύσεις περιλαμβάνονται, επίπεδα στοιχεία (plane elements), ραβδωτά στοιχεία (link elements), στοιχεία δοκού (beam elements), στερεά στοιχεία (solid elements) και κελυφωτά στοιχεία (shell elements). Όλα αυτά τα στοιχεία περιέχουν ένα πλήθος υποκατηγοριών στοιχείων με διαφορετικούς κόμβους, ο αριθμός των οποίων καθορίζεται από το είδος και το βαθμό των συναρτήσεων προσέγγισης των αγνώστων πεδίων. Για παράδειγμα τα δισδιάστατα στερεά στοιχεία ορίζονται από την κατηγορία plane. Επιπλέον το στοιχείο plane42 είναι ένα τετράπλευρο στοιχείο τεσσάρων κόμβων με δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, μεταφορά σε x και y κατευθύνσεις και χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση δομικών στερεών

προβλημάτων (structural solid). Στο πίνακα 2.1 απεικονίζονται μερικά αντιπροσωπευτικά δομικά στοιχεία.

**Πίνακας 2.1: Αντιπροσωπευτικά δομικά στοιχεία του ANSYS**

	<p>Το στοιχείο <b>(PLANE2)</b> καθορίζεται από 6 κόμβους, με δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (τις μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y)</p>
	<p>Αξονικά δισδιάστατα στοιχεία <b>(BEAM 3)</b>, τα οποία καθορίζονται από τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y και περιστροφή για τον κομβικό Z άξονα)</p>
	<p>Το στοιχείο <b>PIPES 16</b> είναι ένα αξονικό στοιχείο και καθορίζεται από έξι βαθμούς ελευθερίας σε δύο κόμβους (μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X, Y και Z και τις περιστροφές περί τους κομβικούς άξονες X, Y, και Z)</p>
	<p>Ραβδωτά στοιχεία <b>(LINK)</b>, τα οποία είναι τρισδιάστατα στοιχεία γραμμής με δύο κόμβους και τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις σε κάθε άξονα)</p>
	<p>Το στοιχείο <b>SOLID 187</b> έχει 10 κόμβους με τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο: τις μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X, Y, και Z. Το στοιχείο έχει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων πλαστικότητας, υπέρ-ελαστικότητας, ερπυσμού και προβλημάτων με μεγάλες μετατοπίσεις.</p>



Το στοιχείο (**SHELL63**) έχει έξι βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο: μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X, Y και Z και τις περιστροφές περί τους κομβικούς άξονες X, Y, και Z.

2) Θερμικά στοιχεία (thermal): Σε αυτή τη ομάδα στοιχείων οι βαθμοί ελευθερίας στους κόμβους, είναι οι θερμοκρασίες. Στις θερμικές αναλύσεις περιλαμβάνονται στοιχεία μάζας (mass), ραβδωτά (link), στερεά (solid) ή/και κελυφωτά (shell) στοιχεία. Στο πίνακα 2.2 απεικονίζονται μερικά από τα θερμικά στοιχεία.

**Πίνακας 2.2:** Αντιπροσωπευτικά θερμικά στοιχεία του ANSYS.

<p>PLANE55 - 2-D THERMAL (DOF: TEMPERATURE)</p>	<p>Το στοιχείο <b>PLANE 55</b>, είναι ένα τετράπλευρο στοιχείο, έχει τέσσερις θερμικούς βαθμούς ελευθερίας (θερμοκρασία σε κάθε κόμβο) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για δισδιάστατο πρόβλημα.</p>
<p>SOLID70 - 3-D THERMAL (DOF: TEMPERATURE)</p>	<p>Το τρισδιάστατο στοιχείο <b>SOLID 70</b>, είναι ένα κυβικό στοιχείο, έχει οκτώ θερμικούς βαθμούς ελευθερίας (θερμοκρασία σε κάθε κόμβο) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τρισδιάστατο πρόβλημα.</p>

3) Στοιχεία ρευστού (fluid elements): Για αυτήν την ομάδα στοιχείων, ανάλογα με τον τύπο και τους βαθμούς ελευθερίας εμφανίζονται συνήθως ως ζευγάρι στους κόμβους, ταχύτητα-πίεση ή πίεση-θερμοκρασία.

∅ Καθορισμός των πραγματικών σταθερών (Real Constants). Οι πραγματικές σταθερές χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των παραμέτρων του είδους του στοιχείου (element type) που έχει ήδη επιλεγεί. Ανάλογα με το στοιχείο που χρησιμοποιείται μπορεί να εκφράζουν επιφάνεια, πάχος, εσωτερική-εξωτερική διάμετρος, κ.λπ. Είναι προφανές ότι μερικοί τύποι στοιχείων, όπως για παράδειγμα τα στερεά (solids), δεν απαιτούν τον ορισμό πραγματικών σταθερών.

∅ Καθορισμός των ιδιοτήτων των υλικών (Material Properties). Ανάλογα με τον τύπο της ανάλυσης που θα διεξαχθεί, απαιτείται ο ορισμός κάποιων συγκεκριμένων μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών της κατασκευής, όπως είναι για παράδειγμα το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson, η πυκνότητα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής κ.α. Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών μπορεί να είναι:

- Γραμμική ή μη γραμμική καθώς επίσης και
- Ισότροπη ή ανισότροπη.

∅ Σχεδιασμός της πρότυπης γεωμετρίας της κατασκευής. Αποτελεί το σχεδιαστικό μέρος της κατασκευής του μοντέλου, όπου με τις κατάλληλες εντολές τύπου CAD, δημιουργούμε την γεωμετρία της κατασκευής που θέλουμε να αναλύσουμε. Έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε σημεία, γραμμές, επιφάνειες και όγκους.

∅ Διακριτοποίηση (meshing). Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας της υπό ανάλυση κατασκευής γίνεται αποκλειστικά και μόνο για να δημιουργηθεί το πλέγμα της γεωμετρίας, όσο δυνατόν πιο εύχρηστα και αποτελεσματικά. Μόλις ολοκληρωθεί το στερεό πρότυπο, ο χρήστης προβαίνει στην διακριτοποίηση του μοντέλου, αφού πρώτα έχει ορίσει το τύπο των στοιχείων και τις πραγματικές σταθερές αν αυτές χρειάζονται. Το ANSYS προσφέρει διάφορες κατάλληλες επιλογές για να επιτευχθεί η ιδανικότερη διακριτοποίηση. Αυτές είναι η ελεύθερη (free) και χαρτογραφημένη (mapped) διακριτοποίηση. Επίσης παρέχονται στον χρήστη πολλές δυνατότητες για την ρύθμιση του μεγέθους του πλέγματος. Γενικά, ένας μεγάλος αριθμός στοιχείων παρέχει μια καλύτερη προσέγγιση της λύσης. Εντούτοις, σε μερικές περιπτώσεις, ένας υπερβολικός αριθμός στοιχείων μπορεί αυξήσει την πιθανότητα λάθους. Επομένως, είναι σημαντικό το μέγεθος του πλέγματος να είναι επαρκώς αραιό ή πυκνό στις κατάλληλες περιοχές. Πόσο αραιό ή πυκνό πρέπει να είναι το πλέγμα σε



αυτές τις περιοχές είναι μια σημαντική ερώτηση. Δυστυχώς, δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη απάντηση για τον καθορισμό εξ' αρχής του κατάλληλου πλέγματος, δεδομένου ότι εξαρτάται από το συγκεκριμένο φυσικό πρόβλημα που αναλύεται κάθε φορά. Εντούτοις, υπάρχουν μερικές τεχνικές που να είναι χρήσιμες για τον καθορισμό του κατάλληλου μεγέθους του πλέγματος.

Μια από αυτές τις τεχνικές είναι η εξής:

Το μοντέλο αναλύεται με ένα αρχικό μέγεθος πλέγματος, εκτελείται και αναλύεται ξανά με ένα διαφορετικό μέγεθος πλέγματος (συνήθως μιάμιση έως δύο φορές πιο πυκνό). Οι δύο λύσεις συγκρίνονται και εάν τα αποτελέσματα συγκλίνουν μεταξύ τους, η αρχική διαμόρφωση πλέγματος θεωρείται επαρκής. Εάν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των δύο, η ανάλυση πρέπει να συνεχιστεί με πιο πυκνά μεγέθη πλεγμάτων και να συγκρίνονται μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση.

## **β) Ορισμός της ανάλυσης και επίλυση του προβλήματος με χρήση των εντολών του επεξεργαστή Solution**

Οι σημαντικότερες εργασίες που γίνονται στο στάδιο αυτό είναι οι εξής:

Ø **Ορισμός του είδους της ανάλυσης (analysis type) που θα διεξαχθεί.** Το ANSYS ως πρόγραμμα γενικού σκοπού έχει τη δυνατότητα να επιλύσει ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων εφαρμοσμένης μηχανικής. Με έμφαση τα προβλήματα του ενδιαφέροντος ενός Μηχανολόγου Μηχανικού εστιάζουμε στα παρακάτω είδη ανάλυσης:

1) Δομική ανάλυση: Στις αναλύσεις αυτές ζητούμενο είναι η εύρεση της κατανομής των τάσεων, παραμορφώσεων, πιέσεων επιφανείας, καθώς επίσης και των δυνάμεων αντίδρασης σε ένα στερεό σώμα. Μερικές υποκατηγορίες διαθέσιμων αναλύσεων είναι οι εξής.

- *Στατική ανάλυση*: Τα εφαρμοσμένα φορτία και οι συνθήκες στήριξης του στερεού σώματος δεν αλλάζουν με το χρόνο.

- *Ιδιομορφική ανάλυση*: Με αυτό τον τύπο ανάλυσης υπολογίζονται οι φυσικές συχνότητες της ελεύθερης ταλάντωσης της κατασκευής καθώς επίσης και οι αντίστοιχες ιδιομορφές.

- *Αρμονική ανάλυση*: Με την ανάλυση αυτή μελετούμε τη συμπεριφορά μόνιμης κατάστασης μιας κατασκευής που υποβάλλεται σε φορτία αρμονικά σε σχέση με το χρόνο.

- *Μεταβατική ανάλυση*: Τα εφαρμοσμένα φορτία ή/και οι συνθήκες στήριξης του στερεού σώματος αλλάζουν ως συναρτήσεις του χρόνου. Αυτός ο τύπος των αναλύσεων είναι συνήθως και ο πιο χρονοβόρος μιας η λύση προκύπτει κατόπιν ολοκληρώσεως σε όλο το χρόνο εξέλιξης του φαινομένου του προβλήματος.

∅ **Ορισμός συνοριακών συνθηκών (Boundary conditions)**. Το ANSYS έχει τη δυνατότητα να ορίσει σε ένα πρόβλημα φορτία, πιέσεις, στηρίξεις και αντιδράσεις, ανάλογα με το είδος της ανάλυσης. Όλα αυτά για λόγους ευχρηστίας μπορούν να οριστούν πάνω σε σημεία, γραμμές, επιφάνειες, κόμβους και σε στοιχεία και να μεταφερθούν αυτόματα τελικά στους κόμβους του πλέγματος, όπως απαιτείται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

∅ **Επίλυση του προβλήματος**. Το ANSYS επιλύει το πρότυπο πεπερασμένο μοντέλο. Ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος εξαρτάται κάθε φορά από το είδος της ανάλυσης, την ιδιαιτερότητα της γεωμετρίας του μοντέλου, το μέγεθος του πλέγματος και από τη πολυπλοκότητα των οριακών συνθηκών.

**γ) Επεξεργασία των αποτελεσμάτων με χρήση των εντολών του επεξεργαστή Post processor:**

Σε αυτόν τον επεξεργαστή παρατίθενται τα αποτελέσματα τα οποία μπορεί να είναι διανυσματικές επιδείξεις, λίστες αποτελεσμάτων, παραμορφωμένο σώμα, κατανομή μετατοπίσεων και τάσεων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

# **ΕΠΙΛΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ANSYS**

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά η σχεδίαση και η επίλυση τεσσάρων χαρακτηριστικών παραδειγμάτων με τη χρήση του προγράμματος ANSYS, ως αντιπροσωπευτικό δείγμα των προβλημάτων που επιλύθηκαν στο πλαίσιο εκμάθησής του.

### **3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΑΣ ΠΛΑΚΑΣ ΜΕ ΟΠΗ**

#### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ**

Τα προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης (plane stress), επιλύονται με αναλύσεις στις δύο διαστάσεις (2D Problems).

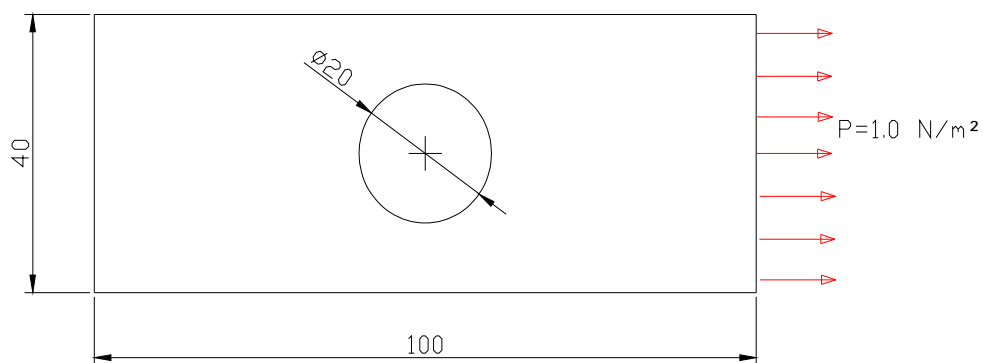
Παρακάτω θα δείξουμε τον τρόπο επίλυσης του προβλήματος του εφελκυσμού ενός λεπτού ελάσματος με τρύπα στο κέντρο, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1.1

Επισημαίνεται, ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να λυθεί με δύο τρόπους, δεδομένου ότι το πρόβλημα είναι συμμετρικό και ως προς τη γεωμετρία αλλά και τις καταπονήσεις.

Ο ένας τρόπος είναι να μοντελοποιήσουμε το ένα τέταρτο της κατασκευής, υιοθετώντας επιπλέον συνοριακές συνθήκες στους άξονες συμμετρίας, ώστε να εξασφαλισθεί η συμμετρική παραμόρφωση. Ο δεύτερος τρόπος είναι να σχεδιάσουμε και να αναλύσουμε όλη την κατασκευή.

Στο παρόν παράδειγμα επιλέγουμε να μοντελοποιήσουμε το ένα τεταρτημόριο. Η ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί θα είναι στις δύο διαστάσεις, δηλώνοντας το πάχος του ελάσματος ως ιδιότητα του υλικού.

Στην εικόνα 3.1.1, οι διαστάσεις είναι σε εκατοστά (cm). Σημειώνεται ότι στο ANSYS δεν εισάγονται μονάδες μετρήσεως, αλλά υπολογιστικές μονάδες. Επομένως θα πρέπει να προσέξουμε ιδιαίτερα, τις μονάδες που θα επιλέξουμε, να είναι στο ίδιο σύστημα ώστε να έχουμε ορθά αποτελέσματα. Το σύστημα μονάδων που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί είναι το SI.



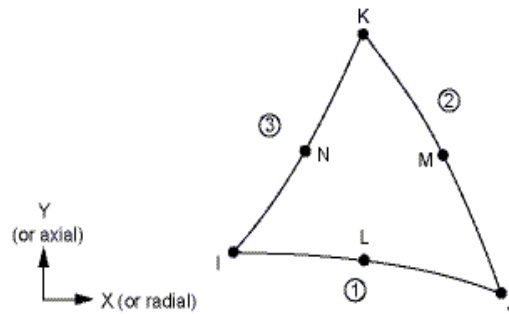
**Εικόνα 3.1.1:** Έλασμα με οπή στο κέντρο

Άρα, έχουμε ένα έλασμα  $1.0 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$  με πάχος  $0.01 \text{ m}$  και διάμετρο τρύπας  $0.2 \text{ m}$ . Το υλικό κατασκευής του ελάσματος είναι χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας  $E = 2.07 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$  και με λόγο Poisson  $\nu = 0.29$ . Το έλασμα καταπονείται με μια εφελκυστική πίεση ίση με  $1.0 \text{ N/m}^2$ , όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1.1.

## ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

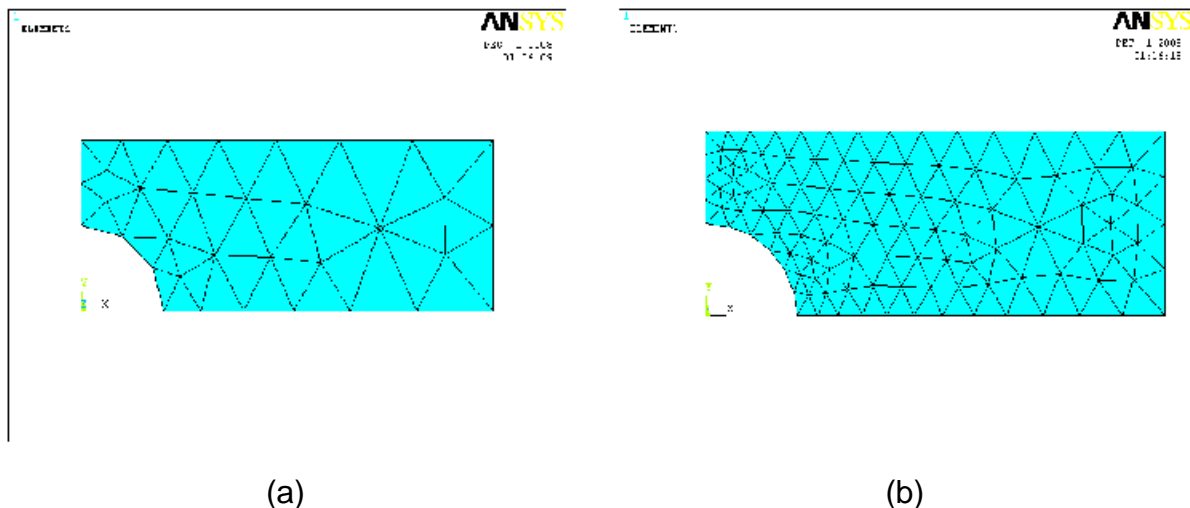
Λόγω του μικρού πάχους της πλάκας σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις της, για την μοντελοποίηση θεωρούμε ότι κατά την καταπόνηση της αναπτύσσεται επίπεδη κατάσταση τάσεων (plane stress). Για το λόγο αυτό για την κατασκευή του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται επιφανειακά δισδιάστατα στοιχεία (PLANE2), διακριτοποιώντας τη μέση επιφάνεια της πλάκας και το πάχος της λαμβάνεται υπόψη ως ιδιότητα του στοιχείου (στο ANSYS μέσω του ορισμού

ενός real constant). Το στοιχείο (PLANE2) καθορίζεται από 6 κόμβους, με δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (τις μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y). Στην εικόνα 3.1.2 που ακολουθεί φαίνεται η γεωμετρία, η τοποθεσία των κόμβων, και το σύστημα συντεταγμένων για το στοιχείο PLANE2.



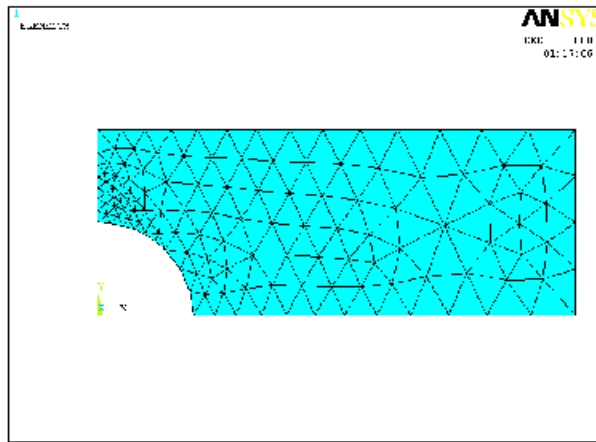
**Εικόνα 3.1.2:** Απεικόνιση του στοιχείου PLANE2

Με σκοπό την πιστοποίηση της σύγκλισης των αποτελεσμάτων η πλάκα διακριτοποιήθηκε με τρία διαφορετικά μεγέθη πλέγματος. Το πλέγμα 1 (το πιο αραιό), εικόνα 3.1.3.a, αποτελείται από 46 PLANE2 στοιχεία (elements) και 113 κόμβοι (nodes) ενώ το πλέγμα 2 (το πιο πυκνό), εικόνα 3.1.3.b, από 184 PALNE2 στοιχεία (elements) και 409 κόμβοι (nodes).



**Εικόνα 3.1.3:** (a) Πλέγμα 1 (46 elements) και (b) Πλέγμα 2 (184 elements)

Το τρίτο πλέγμα της εικόνας 3.1.4, με την τοπική αύξηση, αποτελείται από 228 PLANE2 στοιχεία (elements) και 503 κόμβους (nodes).



**Εικόνα 3.1.4:** Πλέγμα 3 με τοπική αύξηση (228 elements)

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

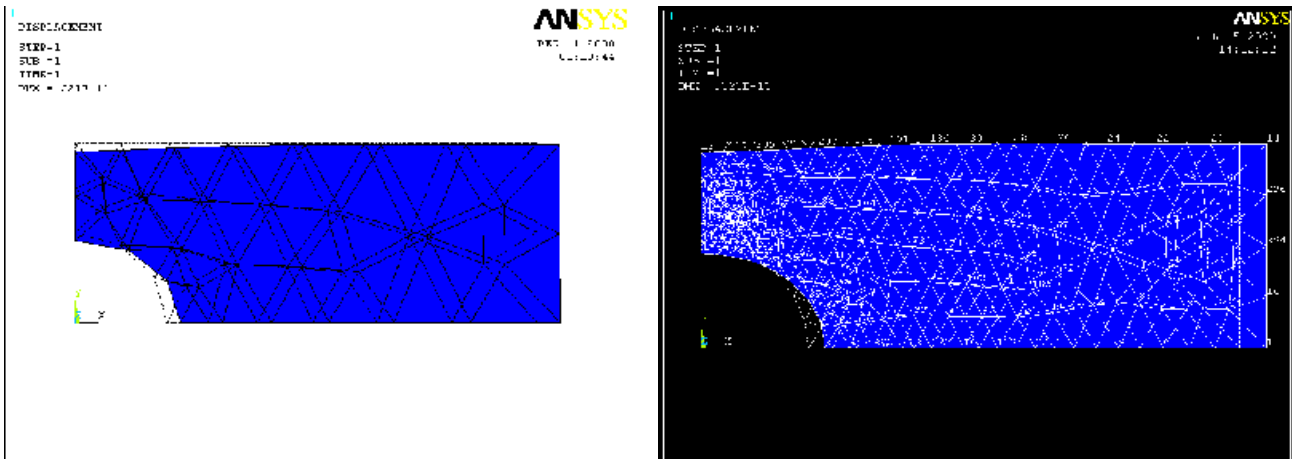
Με την παρούσα ανάλυση υπολογίζεται η κατανομή των παραμορφώσεων και τάσεων του ελάσματος.

Λόγω της ύπαρξης της οπής υπάρχει μια συγκέντρωση τάσεων, η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται είναι:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= k_t * P * (0.4) * (0.01) / [(0.4 - 0.2) * 0.01] = \\ &= 2.17 * 1.0 * (0.4) * (0.01) / [(0.4 - 0.2) * 0.01] = \\ &= 0.00868 / 0.002 = \\ &= 4.34 \text{ Pa}\end{aligned}$$

όπου, για τη συγκεκριμένη γεωμετρία του ελάσματος, ο συντελεστής  $k_t$  ισούται με 2.17. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση, σύμφωνα με την αναλυτική λύση, είναι 4.34 Pa.

Στην παρακάτω εικόνα 3.1.5a παρουσιάζεται η παραμόρφωση του ελάσματος με το αραιό πλέγμα και στην εικόνα 3.1.5b η παραμόρφωση με το πυκνότερο πλέγμα και την τοπική αύξηση. Η παραμόρφωση (DMX) και στις δύο περιπτώσεις είναι  $0.321 \times 10^{-11}$ .

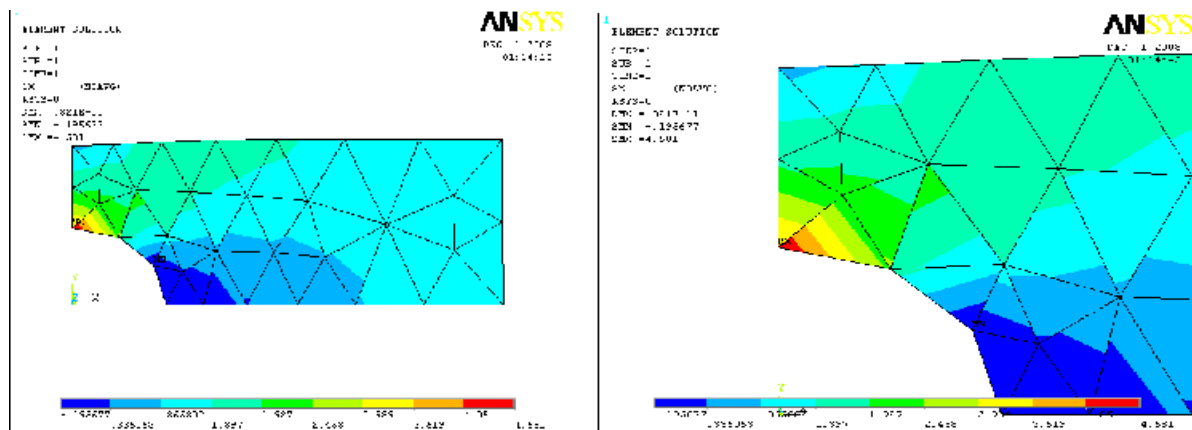


(a)

(b)

**Εικόνα 3.1.5:** Παραμορφωμένο σώμα (a) αραιό πλέγμα (b) πυκνότερο πλέγμα με τοπική αύξηση

Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση ( $\sigma_{max}$ ) ως προς τον άξονα x της πρώτης επίλυσης, είναι 4.581 Pa (εικόνα 3.1.6a και 3.1.6b).

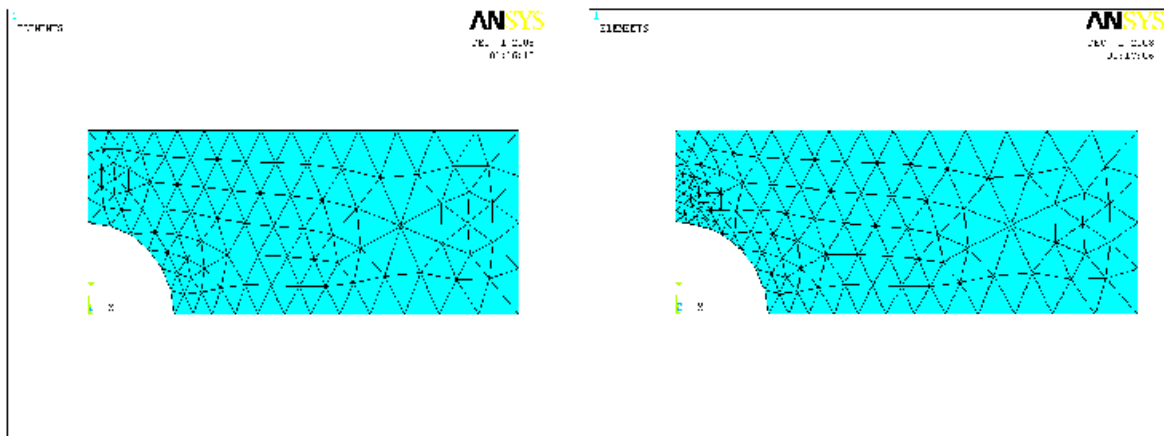


(a)

(b)

**Εικόνα 3.1.6:** Κατανομή μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης (επίλυση 1)

Βλέπουμε ότι, η τιμή της μέγιστης τάσης που βρέθηκε με την ανάλυση του ANSYS δεν συμπίπτει με αυτήν που βρέθηκε γραπτώς και γι' αυτό τον λόγο προχωρήσαμε σε επανάληψη της διακριτοποίησης με περισσότερους κόμβους (εικόνα 3.1.7a). Αυτό όμως δεν είναι αρκετό και επιλέξαμε να κάνουμε μια τοπική αύξηση των κομβικών στοιχείων (εικόνα 3.1.7b), στο σημείο που εντοπίστηκε η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1.6b με κόκκινο χρώμα.

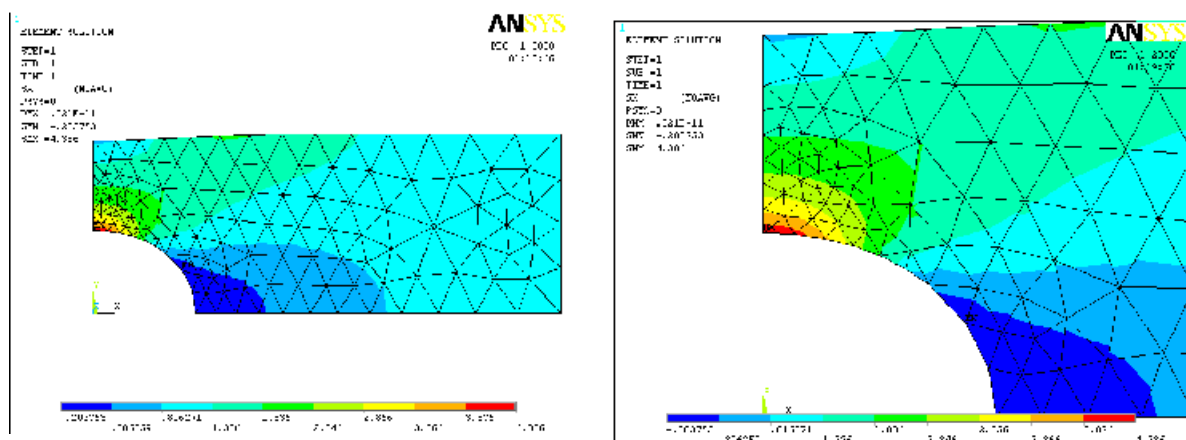


(a)

(b)

**Εικόνα 3.1.7:** (a) Διακριτοποιημένη επιφάνεια (b) Τοπική διακριτοποίηση

Μετά από τη νέα διακριτοποίηση που δείχνουμε στην εικόνα 3.1.7b, η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση βρέθηκε πάρα πολύ κοντά σε αυτήν που υπολογίσαμε με τιμή 4.386 Pa (εικόνα 3.1.8a και 3.1.8b) και έτσι μπορούμε να σταματήσουμε, παίρνοντας τα αποτελέσματα ως σωστά.



(a)

(b)

**Εικόνα 3.1.8:** Κατανομή μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης (επίλυση 2)

Άρα, στο έλασμα, με την εφελκυστική πίεση  $1.0 \text{ N/m}^2$  κατά την διεύθυνση του  $x$  άξονα, βρέθηκε μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση  $\sigma_{max} = 4.386 \text{ Pa}$  και ελάχιστη  $\sigma_{min} = -0.203753 \text{ Pa}$ .

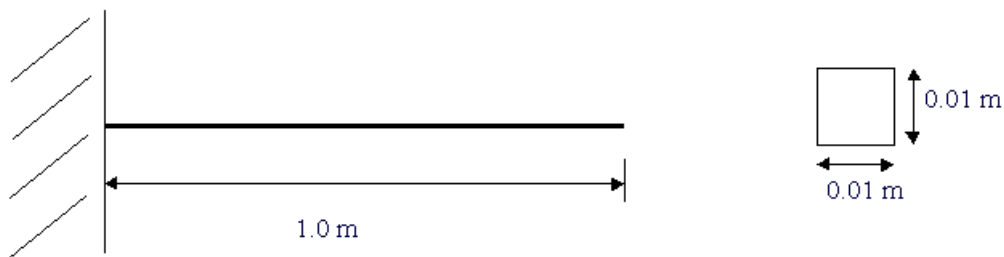
Στη συνέχεια, στο παράρτημα που ακολουθεί, παρουσιάζονται αναλυτικά ένα προς ένα όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου.



### 3.2 ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΒΟΛΟΥ ΔΟΚΟΥ (CANTILEVER BEAM)

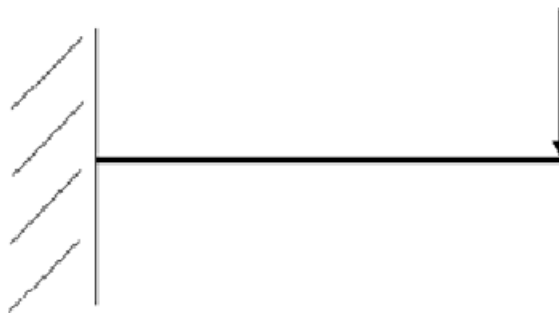
#### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Έστω μια ορθογωνικής διατομής δοκός με διαστάσεις, 0.01 m x 0.01 m και μήκος 1.0 m, εικόνα 3.2.1, κατασκευασμένη από ισότροπο ομογενές υλικό με μέτρο Ελαστικότητας  $E=206800 (10^6) \text{ N/m}^2$ , λόγο Poisson  $\nu = 0.3$  και πυκνότητα  $7830 \text{ Kg/m}^3$ .



**Εικόνα 3.2.1:** Διαστάσεις δοκού

Στη δοκό εφαρμόζεται κυκλική φόρτιση 100 N, στην άκρη του δοκαριού. Το εύρος της συχνότητας που εφαρμόζεται η δύναμη είναι από 0 έως 100 Hz. Στην εικόνα 3.2.2 φαίνεται η εφαρμοσμένη δύναμη.



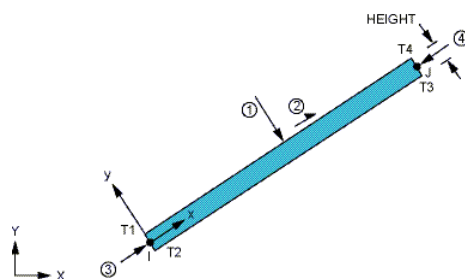
**Εικόνα 3.2.2:** Εφαρμοσμένη δύναμη στην δοκό

Σκοπός της παρούσας ανάλυσης, είναι να δούμε τα βήματα της αρμονικής ανάλυσης σε έναν πρόβολο και να δούμε την απόκριση της αρμονικής ταλάντωσης του δοκαριού για εφαρμοσμένη κυκλική δύναμη 100 N με συχνότητα 0-100Hz.

Για να δημιουργήσουμε τη γεωμετρία της αμφιέρεστης δοκού της εικόνας 3.2.1, θα περάσουμε την διατομή του ως ιδιότητα και θα ορίσουμε τις μεταβλητές που θέλουμε να πλοτάρουμε. Η μεταβλητή 1 (Variable 1) αποδίδεται είτε ως Περίοδο (Time) είτε ως Συχνότητα (Frequency). Στην δικιά μας περίπτωση θα την αποδώσουμε ως συχνότητα. Θέλουμε να δούμε την μετατόπιση ως προς τον y άξονα, στον κόμβο 2.

### ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το πρόβλημα επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) με τη χρήση του εμπορικού πακέτου ANSYS 9.0. Για την κατασκευή του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται αξονικά δισδιάστατα στοιχεία (BEAM 3), τα οποία καθορίζονται από τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X και Y και περιστροφή για τον κομβικό Z άξονα). Στο εικόνα 3.2.3 που ακολουθεί φαίνεται η γεωμετρία, η τοποθεσία των κόμβων και το σύστημα συντεταγμένων για το στοιχείο BEAM 3.



**Εικόνα 3.2.3:** Απεικόνιση του στοιχείου BEAM 3

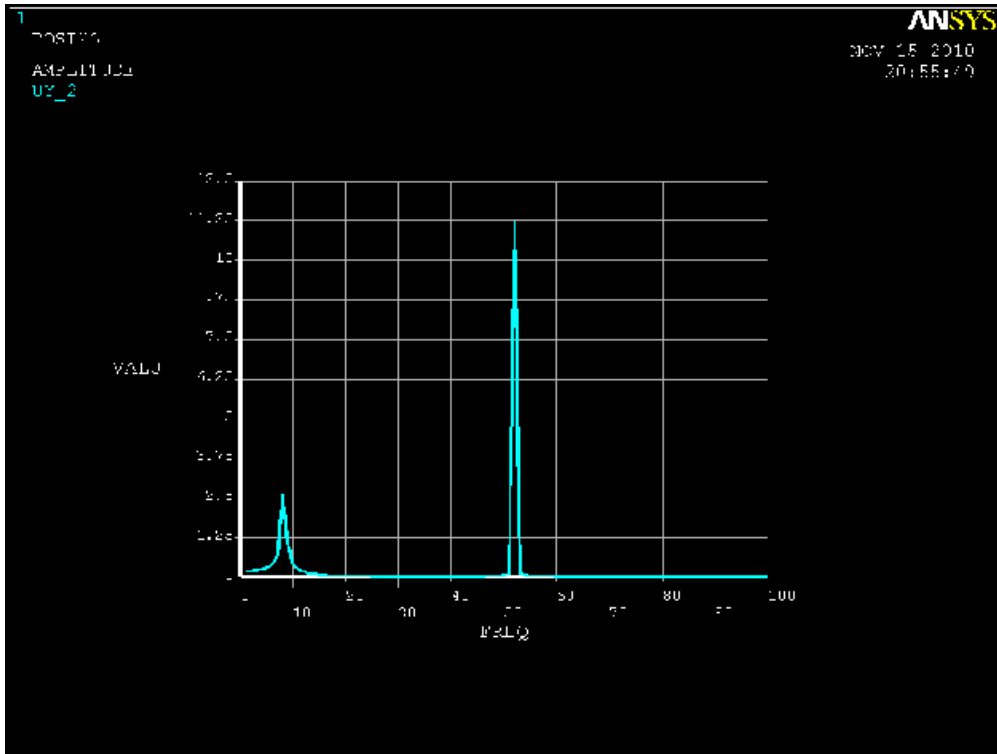
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο ANSYS τα προβλήματα δοκαριών και προβόλων, μπορούν να μελετηθούν ως μια γραμμή, δίνοντας την διατομή σε μια κλίμακα παραμέτρων. Όπως προαναφέραμε, για να λύσουμε το συγκεκριμένο πρόβλημα, πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν κάποιες παραμέτρους όπως είναι το ύψος και το πλάτος της δοκού. Στην δικιά μας περίπτωση ορίζουμε την διατομή ως ιδιότητα (Real Constant) και έτσι δείχνουμε σχηματικά την γεωμετρία της δοκού που θα αναλύσουμε.

Να σημειωθεί ότι υπάρχουν τρεις μέθοδοι για να διεξάγουμε μία αρμονική ανάλυση. Η μέθοδοι είναι η **Full**, η **Reduced** και η **Modal Superposition**. Επιλέχτηκε η **Full** μέθοδος, διότι είναι πιο απλή και εύκολη από τις άλλες δύο μεθόδους

Στην παρακάτω λίστα φαίνεται για συγκεκριμένη συχνότητα 0 έως 100 Hz (το αναφέρει Time), το εύρος και η φάση της απόκρισης της ταλάντωσης.

PRVAR Command		
File		
***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****		
TIME	2 UY	
	UY_2	
	AMPLITUDE	PHASE
1.0000	0.196269	0.00000
2.0000	0.205086	0.00000
3.0000	0.221743	0.00000
4.0000	0.250351	0.00000
5.0000	0.300534	0.00000
6.0000	0.399154	0.00000
7.0000	0.656307	0.00000
8.0000	2.65167	0.00000
9.0000	1.06274	180.000
10.000	0.410084	180.000
11.000	0.242419	180.000
12.000	0.166334	180.000
13.000	0.123261	180.000
14.000	0.957492E-01	180.000
15.000	0.767769E-01	180.000
16.000	0.629770E-01	180.000
17.000	0.525356E-01	180.000
18.000	0.443904E-01	180.000
19.000	0.378787E-01	180.000
***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING *****		
TIME	2 UY	
	UY_2	
	AMPLITUDE	PHASE
20.000	0.325665E-01	180.000
21.000	0.281576E-01	180.000
22.000	0.244434E-01	180.000
23.000	0.212728E-01	180.000
24.000	0.185335E-01	180.000
25.000	0.161405E-01	180.000
26.000	0.140278E-01	180.000
27.000	0.121438E-01	180.000
28.000	0.104469E-01	180.000
29.000	0.890327E-02	180.000
30.000	0.748475E-02	180.000



**Εικόνα 3.2.4:** Πλάτος ταλάντωσης στον κόμβο 2

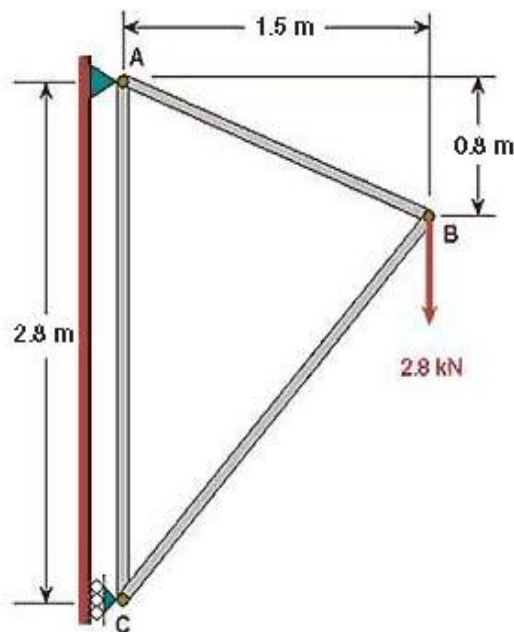
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα παίρνουμε κορυφές (peaks) στις συχνότητες 8.3 και 51 Hz.

Στη συνέχεια, στο παράρτημα που ακολουθεί, παρουσιάζονται αναλυτικά ένα προς ένα όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου.

### 3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ 2-D ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΟΣ

#### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Έστω ένα δικτύωμα με διαστάσεις όπως φαίνονται στην εικόνα 3.3.1. Όλα τα μέλη του είναι κατασκευασμένα από ισότροπο ομογενές υλικό με μέτρο ελαστικότητας  $E=200 \times 10^9$  και λόγο Poisson  $\nu=0.3$ . Η περιοχή διατομής κάθε ενός μέλους είναι 0.01 m.



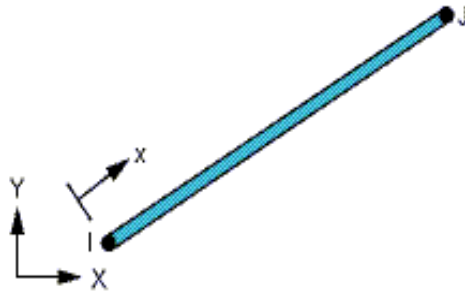
Εικόνα 3.3.1: Δικτύωμα

Το δικτύωμα στηρίζεται σε μια άρθρωση και μια κύλιση στους κόμβους A και C αντίστοιχα, ενώ ασκείται μια δύναμη 2.8 kN στον κόμβο B. Σκοπός του προβλήματος είναι να βρεθούν αν τα μέλη του δικτυώματος κατά την παραμόρφωση του, τανύονται/εφελκύνονται ή συμπιέζονται/θλίβονται.

#### ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το πρόβλημα επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) με τη χρήση του εμπορικού πακέτου ANSYS 11.0. Για την κατασκευή του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται ραβδωτά στοιχεία (LINK), τα οποία είναι

τρισεδιάστατα στοιχεία γραμμής με δύο κόμβους και τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις σε κάθε άξονα). Οι ιδιότητες των διατομών των ράβδων ορίζονται ως σταθερές του στοιχείου (real constants). Στην εικόνα 3.3.2 που ακολουθεί φαίνεται η γεωμετρία ,η τοποθεσία των κόμβων και το σύστημα συντεταγμένων για το στοιχείο LINK 1.

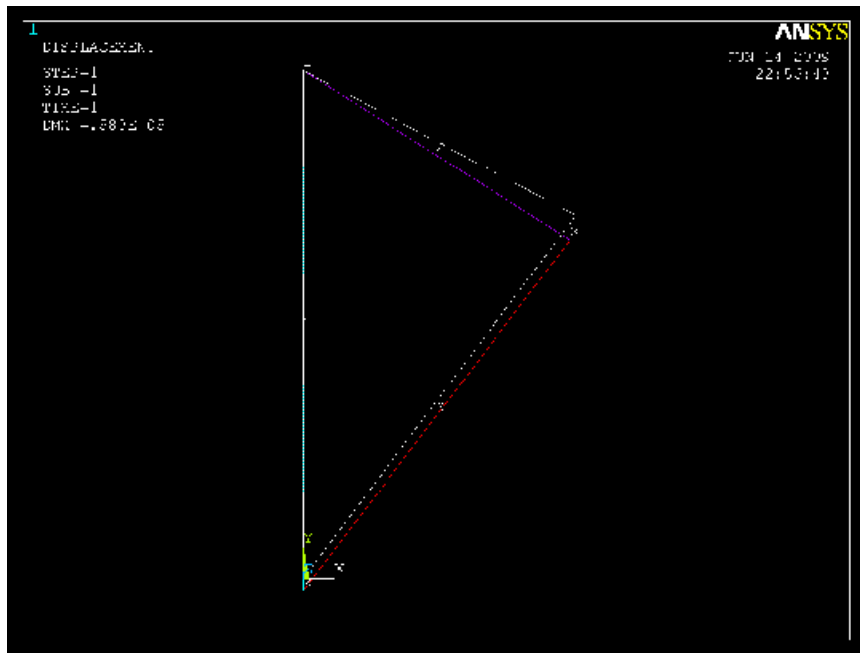


**Εικόνα 3.3.2:** Απεικόνιση του στοιχείου LINK 1

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

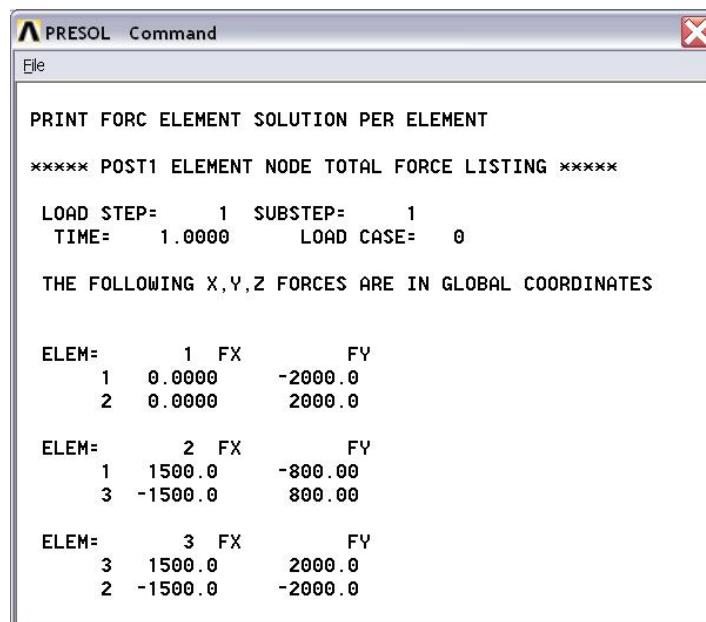
Στην παρακάτω εικόνα 3.3.3, φαίνεται το παραμορφωμένο δικτύωμα όπως προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος. Παρατηρώντας το σχήμα βλέπουμε την παραμόρφωση που θα υποστεί το δικτύωμα με συνεχείς μπλε γραμμή και με διακεκομμένες την αρχική του θέση χωρίς φόρτιση. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη παραμόρφωση που δέχεται το δικτύωμα είναι  $0.583 \times 10^{-5}$  m, όπως φαίνετε και στο παράθυρο του ANSYS, η οποία είναι μικρή αλλά εύλογης παρατήρησης.

Ο κόμβος 1 (A) δεν μετατοπίζεται και ο κόμβος 2 (C) μετατοπίζεται μόνο σε κάθετη διεύθυνση. Από την άλλη ο κόμβος 3 (B) δέχεται μετατόπιση κατά την διεύθυνση και φορά της ασκούμενης δύναμης. Η παραμόρφωση συμφωνεί με τις εφαρμοσμένες οριακές συνθήκες που θέσαμε και με αυτό που περιμέναμε ως διαίσθηση.



**Εικόνα 3.3.3:** Παραμορφωμένο δικτύωμα

Σημειώνεται ότι βρεθήκαν δύο λίστες δυνάμεων στο δικτύωμα. Η πρώτη λίστα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3.4 παρακάτω, εμφανίζει τις δυνάμεις που τα στοιχεία εφαρμόζουν σε κάθε έναν από τους κόμβους τους.



**Εικόνα 3.3.4:** Εφαρμογή δυνάμεων ανά κόμβο



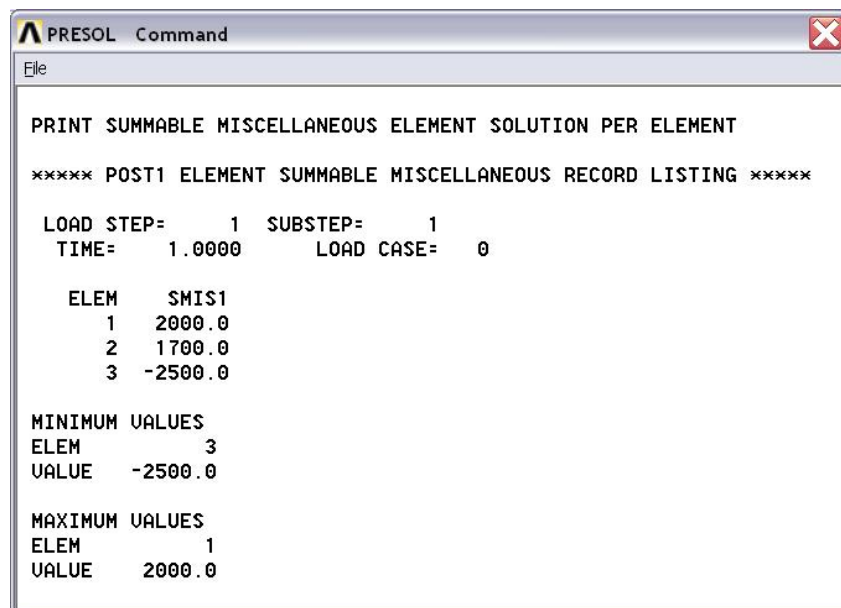
Αυτές οι δυνάμεις στοιχείων που αναφέρονται στο ANSYS, είναι δυνάμεις στο περιβάλλον του από το εκάστοτε στοιχείο και όχι το αντίστροφο. Παραδείγματος χάριν, το στοιχείο 2 ή μέλος AB εφαρμόζει μια δύναμη 1500 N στην x κατεύθυνση και 800 N στην αρνητική y κατεύθυνση στον κόμβο 1 (A).

Αυτό σημαίνει ότι η συνολική δύναμη στο μέλος AB είναι:

$$\sqrt{1500^2 + 800^2} = 1700 \text{ N.}$$

Από A σε B, το μέλος τραβά στο κόμβο 1 (A), επομένως είναι στην τάση/εφελκυσμό. Ομοίως, η δύναμη στο στοιχείο 1 (AC) είναι 2000N και έχουμε εφελκυστική τάση, ενώ στο στοιχείο 3 (BC) είναι 2500 N και έχουμε θλιπτική φόρτιση.

Η δεύτερη λίστα όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3.5, μας δείχνει τις αξονικές δυνάμεις στα στοιχεία. Όπου θετικές τιμές έχουν οι εφελκυστικές φορτίσεις και αρνητικές τιμές οι θλιπτικές.



```
PRESEN Command
File
PRINT SUMMABLE MISCELLANEOUS ELEMENT SOLUTION PER ELEMENT
***** POST1 ELEMENT SUMMABLE MISCELLANEOUS RECORD LISTING *****
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
ELEM SMIS1
1 2000.0
2 1700.0
3 -2500.0
MINIMUM VALUES
ELEM 3
VALUE -2500.0
MAXIMUM VALUES
ELEM 1
VALUE 2000.0
```

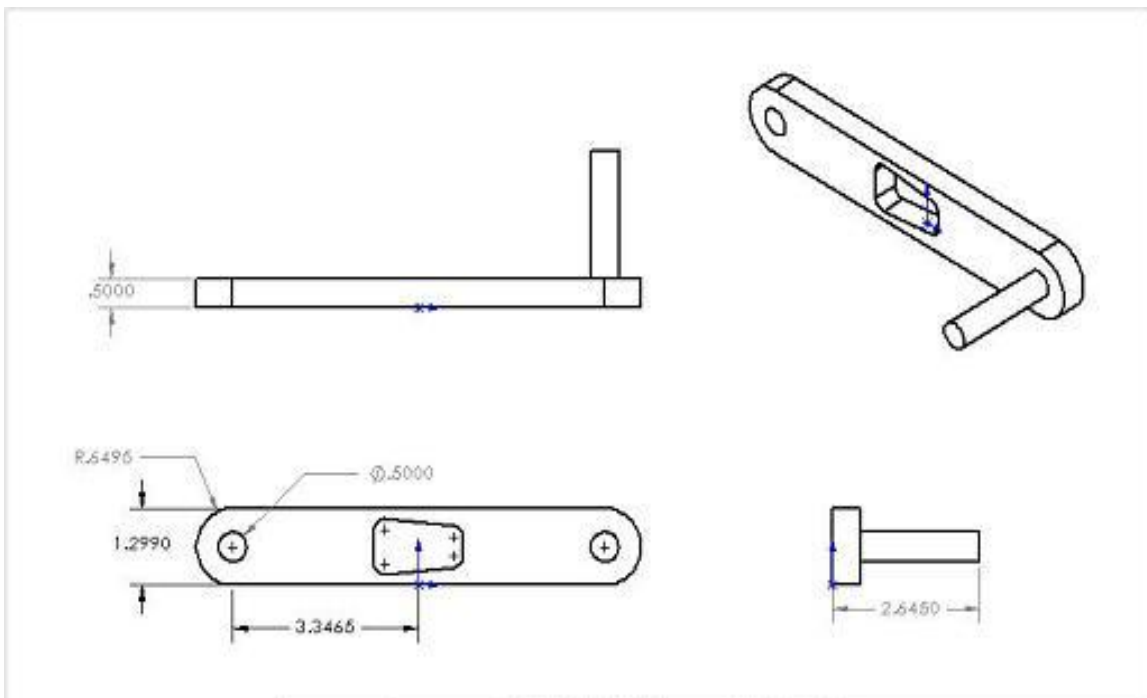
**Εικόνα 3.3.5:** Αξονικές δυνάμεις στα στοιχεία

Στη συνέχεια, στο παράρτημα που ακολουθεί, παρουσιάζονται αναλυτικά ένα προς ένα όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου.

### 3.4. ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΣΥΜΠΑΓΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (3D) ΠΕΤΑΛΙ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ

#### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Έστω ένα τρισδιάστατο μεταλλικό πετάλι ποδηλάτου, με γεωμετρία σε ίντσες όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4.1, το οποίο είναι κατασκευασμένο από ισότροπο ομογενές υλικό με μέτρο ελαστικότητας  $E=2.8 \times 10^7$  psi και λόγο Poisson  $\nu = 0.3$ .



**Εικόνα 3.4.1:** Γεωμετρία κατασκευής

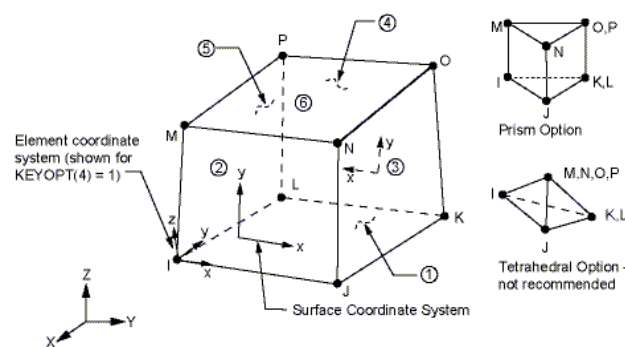
Στον άξονα (shaft) του πεταλιού ασκείται μια ορθή τάση 100 lbf στην διεύθυνση του άξονα y, ενώ το πετάλι (crank) είναι πακτωμένο στην οπή διαμέτρου 0,5 in.

Σκοπός του παρόντος προβλήματος είναι ο υπολογισμός της κατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στο πετάλι, λόγω της ύπαρξης του φορτίου στον άξονα.

## ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

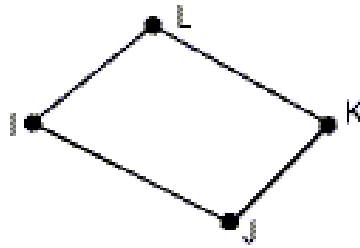
Το πρόβλημα επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) με τη χρήση του εμπορικού πακέτου ANSYS 9.0. Για την κατασκευή του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται στοιχεία όγκου (SOLID 45) και το ψεύτο στοιχείο MESH 200.

Το στοιχείο SOLID 45 έχει 8 κόμβους με τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο: τις μετατοπίσεις στις κομβικές κατευθύνσεις X, Y και Z. Το στοιχείο έχει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων πλαστικότητας, διόγκωσης, ερπυσμού, σκλήρυνση πίεσης και προβλημάτων με μεγάλες μετατοπίσεις. Στην εικόνα 3.4.2, που ακολουθεί φαίνεται η γεωμετρία, η τοποθεσία των κόμβων και το τοπικό σύστημα συντεταγμένων για το στοιχείο SOLID 45.



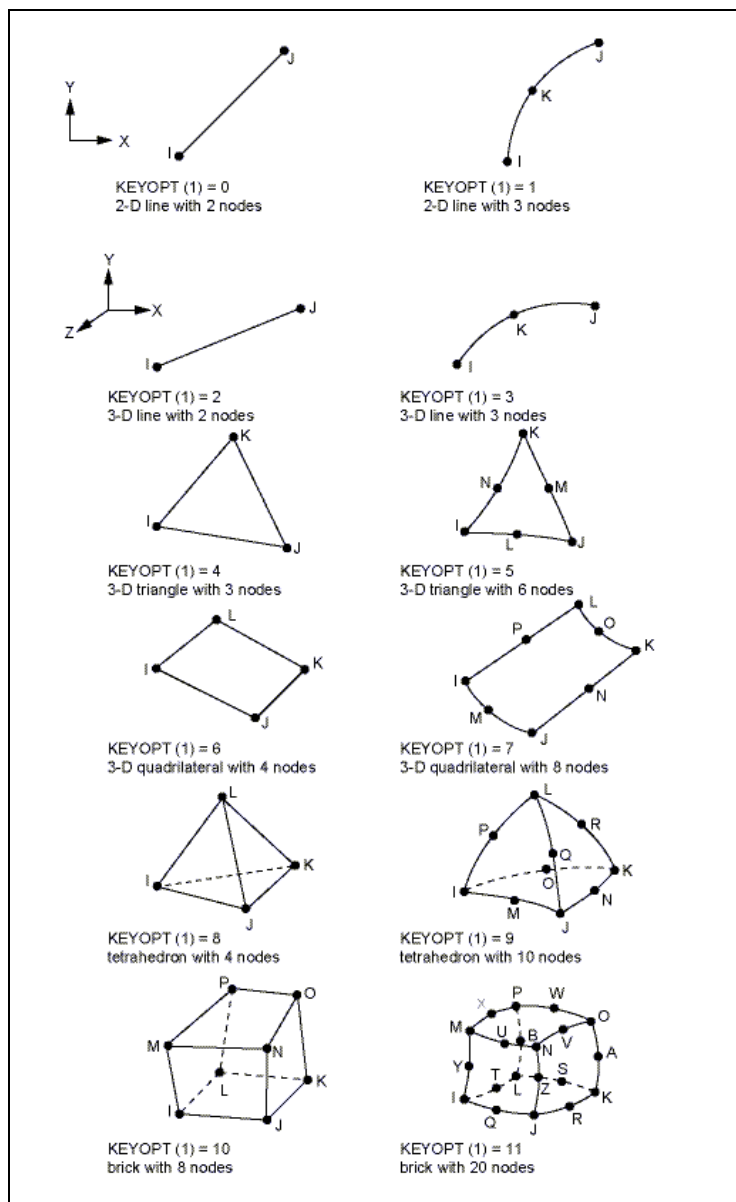
**Εικόνα 3.4.2:** Απεικόνιση του στοιχείου SOLID 45

Το στοιχείο MESH 200 έχει 12 μορφές, όπως φαίνετε και στο σχήμα 3.4.4. Στη παρούσα ανάλυση θα χρησιμοποιήσουμε το τρισδιάστατο (3D) τετράπλευρο με 4 κόμβους (QUAD 4-NODE), εικόνα 3.4.3, για να δημιουργήσουμε ένα δισδιάστατο (2D) πλέγμα από το οποίο θα δημιουργήσουμε μια εξώθηση για να καθορίσουμε το πλέγμα «μόνο» του προσώπου του όγκου (ανάλογο τις δημιουργίας ενός σκίτσου και την εξώθηση του σε συμπαγές/ solidworks). Το στοιχείο MESH 200 δεν συμβάλει στη λύση και επιλέγεται από την ρύθμιση KEYOPT (1) = 6.



KEYOPT (1) = 6  
3-D quadrilateral with 4 nodes

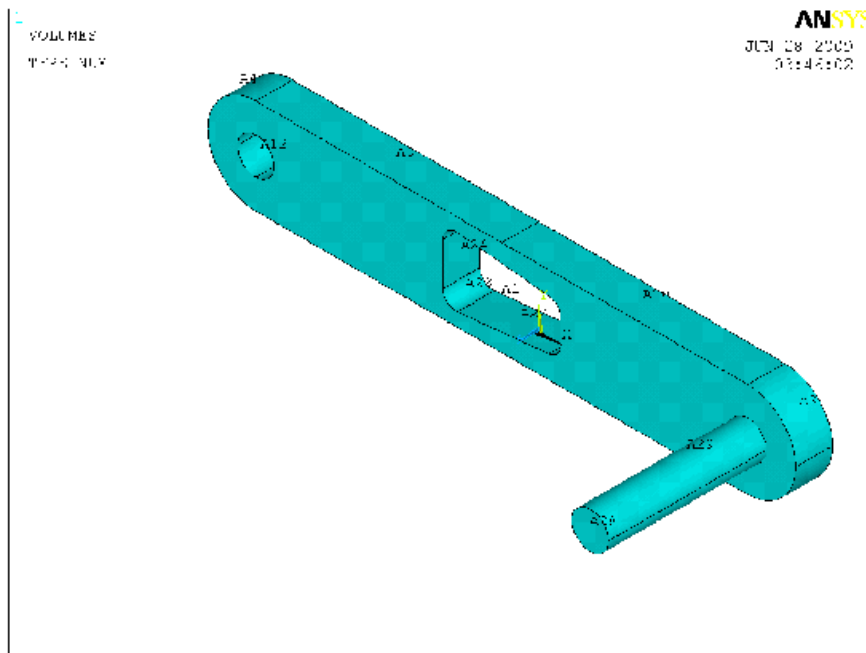
Εικόνα 3.4.3: Απεικόνιση του στοιχείου MESH 200



Εικόνα 3.4.4: Μορφές στοιχείου MESH 200

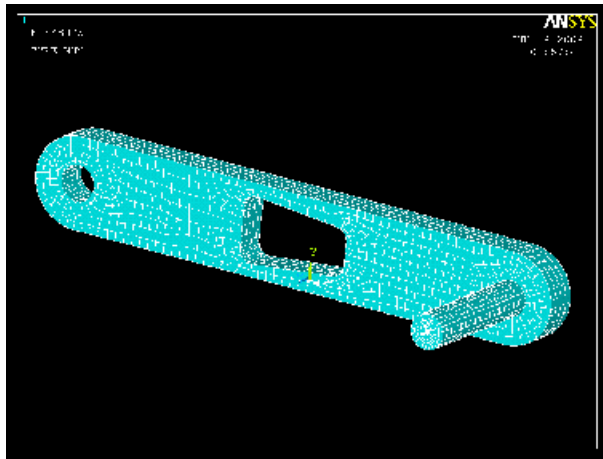
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρακάτω εικόνα 3.4.5 φαίνεται η γεωμετρία της κατασκευής που αναλύσαμε, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία solid 45 και mesh 200 για την διακριτοποίηση του.

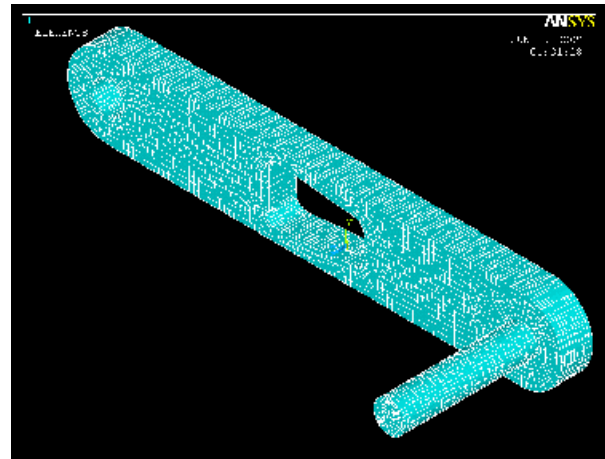


**Εικόνα 3.4.5:** Τρισδιάστατη (SOLID 3D) γεωμετρία πεταλιού με άξονα

Με σκοπό την πιστοποίηση της σύγκλισης των αποτελεσμάτων το πετάλι και ο άξονας διακριτοποιήθηκαν με δυο διαφορετικά μεγέθη πλέγματος. Το πλέγμα 1 (το πιο αραιό), εικόνα 3.4.6a, αποτελείται από 5621 SOLID 45 στοιχεία (elements) και 6498 κόμβοι (nodes) ενώ το πλέγμα 2 (το πιο πυκνό), εικόνα 3.4.6b, από 20778 SOLID 45 στοιχεία (elements) και 23190 κόμβοι (nodes).



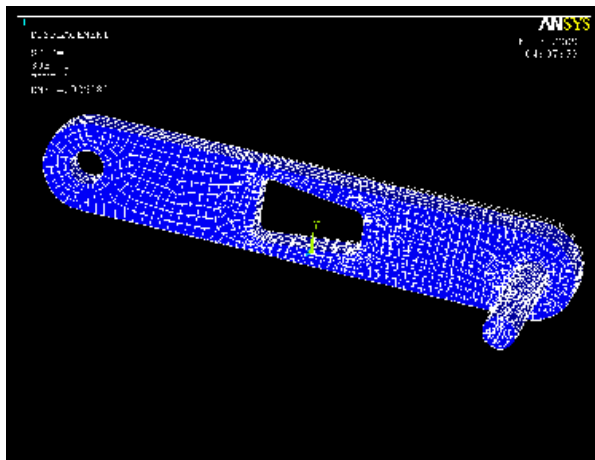
(a)



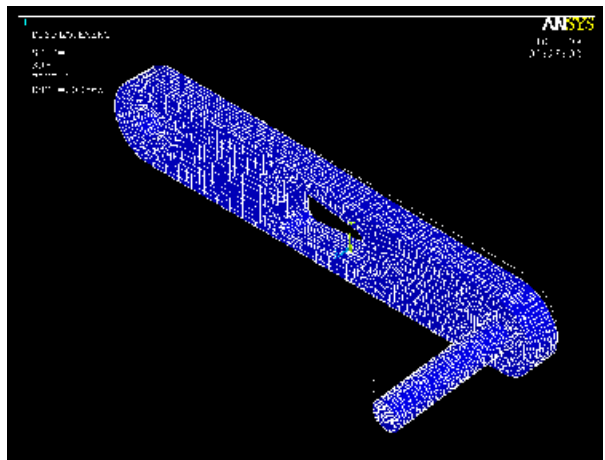
(b)

**Εικόνα 3.4.6:** (a) πλέγμα 1 (5621 elements) και (b) πλέγμα 2 (20778 elements)

Η παραμόρφωση της κατασκευής με το πρώτο πλέγμα, εικόνα 3.4.7a, βρέθηκε 0.026181 in ενώ με το δεύτερο πλέγμα, εικόνα 3.4.7b, βρέθηκε 0.026631 in. Η παραμόρφωση που δέχτηκε η κατασκευή γίνεται δεκτή αφού είναι αυτή που φανταζόμασταν αλλά δεν συγκλίνει με την παραμόρφωση του πρώτου πλέγματος.



(a)

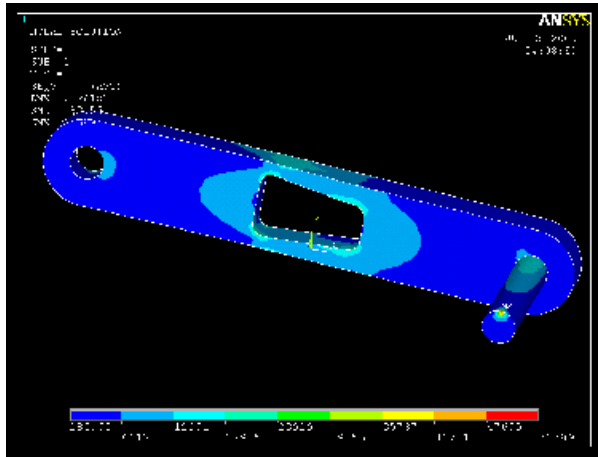


(b)

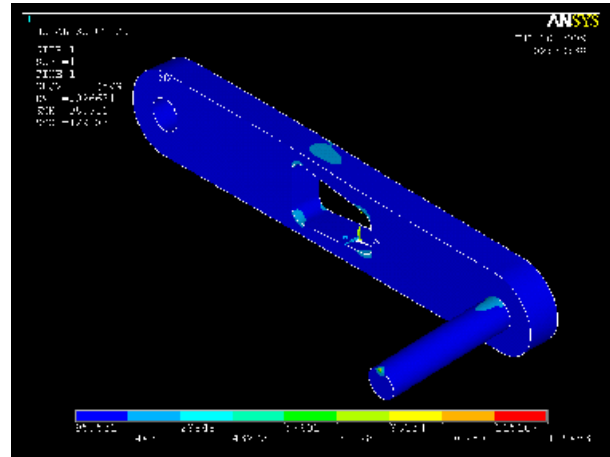
**Εικόνα 3.4.7:** παραμόρφωση κατασκευής (a)  $dmx=0.026181$  in (b)  $dmx=0.026631$  in

Στην εικόνα 3.4.8 παρουσιάζεται η κατανομή της ισοδύναμης τάσης στους κόμβους όπως αυτή προκύπτει από το κριτήριο αστοχίας Von Mises για τα πλέγματα 1 και 2, αντίστοιχα.

Όταν σχεδιάζουμε την κομβική λύση (nodal solution), το ANSYS καθορίζει το μέσο όρο σε κάθε κόμβο των τιμών όλων των στοιχείων που συνδέονται με τον κόμβο. Επίσης, μέσα σε κάθε στοιχείο παρεμβάλλει γραμμικά τη μέση κομβική αξία που λαμβάνετε στο προηγούμενο βήμα.



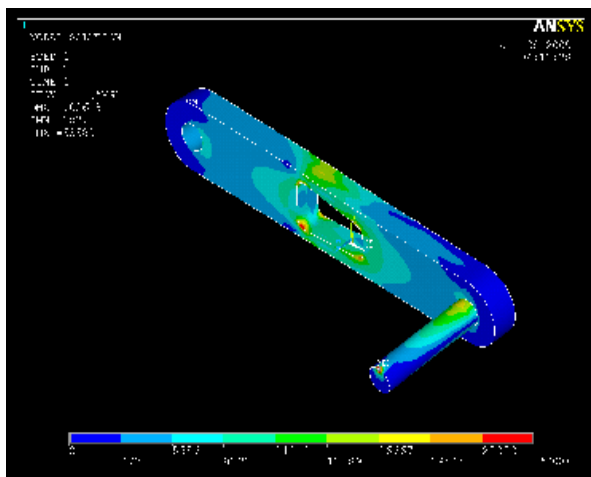
(a) πλέγμα 1



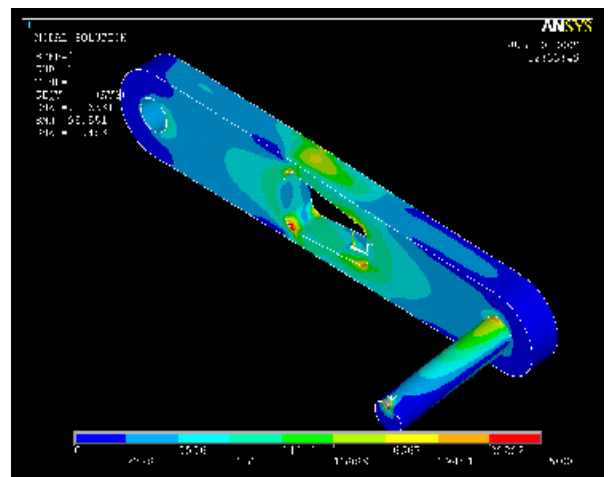
(b) πλέγμα 2

**Εικόνα 3.4.8:** Κατανομή τάσεων στους κόμβους (von mises stress)

Επειδή δεν έχουμε καλή εικόνα των κατανομών τάσεως από τα παραπάνω αποτελέσματα αλλάξαμε το εύρος των τάσεων και έχουμε ένα καλύτερο αποτέλεσμα, αυτό της εικόνας 3.4.9.



(a) πλέγμα 1

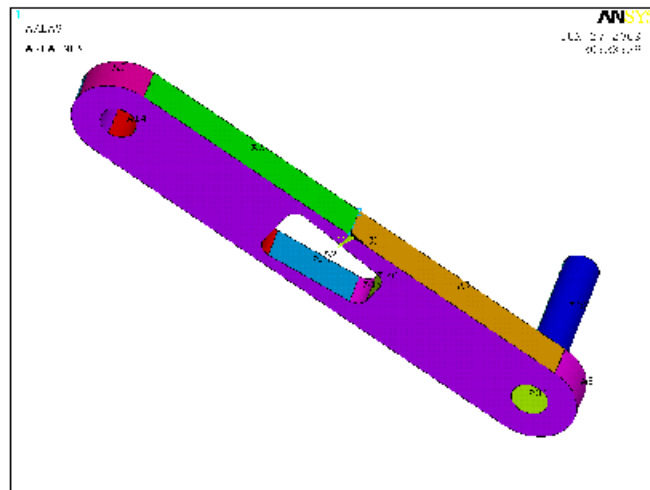


(b) πλέγμα 2

**Εικόνα 3.4.9:** Κατανομή τάσεων στους κόμβους (von mises stress)

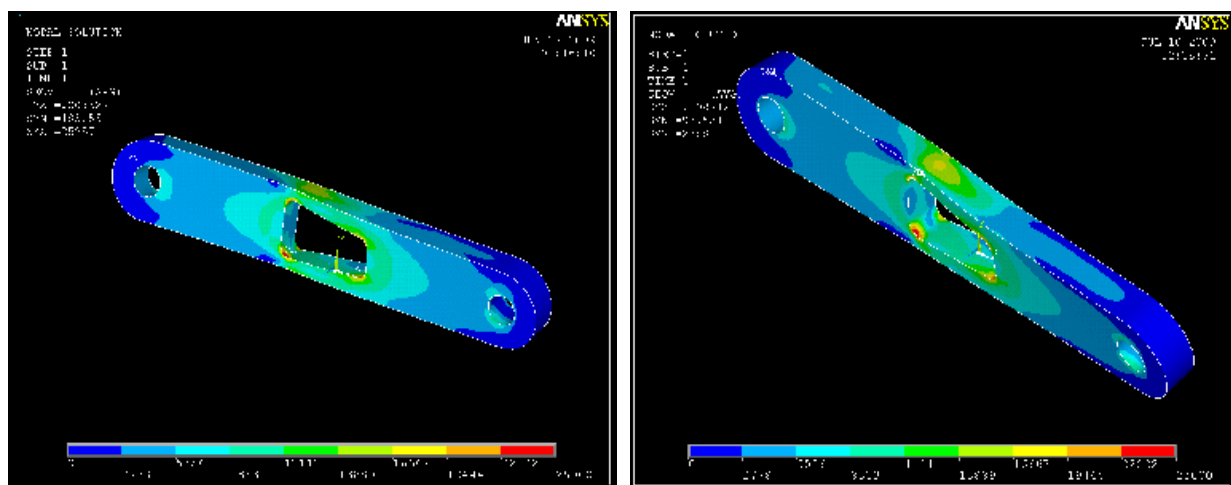
Έτσι μπορούμε να δούμε την μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση ( $\sigma_{max}$ ), με κόκκινο χρώμα, να βρίσκεται στο σημείο που έχει γίνει το ελάφρωμα στο πετάλι (το σημείο που λείπει η επιφάνεια A2 όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4.10)

Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση, βάσει το κριτήριο αστοχίας (Von Misses), στο πρώτο πλέγμα είναι 53589 psi και στο δεύτερο πλέγμα 129483 psi.



**Εικόνα 3.4.10:** Κατασκευή με αριθμημένες επιφάνειες

Η συγκέντρωση της τάσης που βρίσκεται στην άκρη του άξονα μπορεί να αγνοηθεί ως σημειακή φόρτιση λόγω της δύναμης που εφαρμόζεται και κρύβουμε τον άξονα όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4.11a με μέγιστη τάση, στο κριτήριο αστοχίας, 25957 psi για το πρώτο πλέγμα και 3.4.11b με μέγιστη τάση 25881 psi για το δεύτερο.



(a)

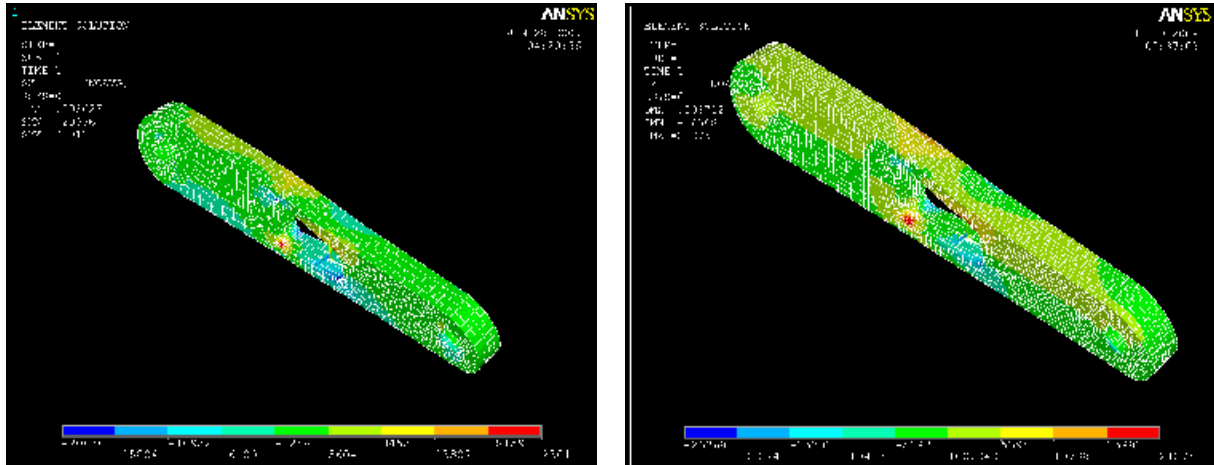
(b)

**Εικόνα 3.4.11:** Κατανομή τάσεων χωρίς τον άξονα (a) πλέγμα 1 (b) πλέγμα 2



Για να ελέγξουμε αν η καμπτική τάση στο πετάλι είναι σχετικά ασήμαντη, συγκρίναμε τις λύσεις των στοιχείων (element solution)  $\sigma_{xx}$  (τάση στον X άξονα / stress in X component) με την στοιχειώδη Von Mises.

Στην εικόνα 3.4.12a και 3.4.12b φαίνεται η λύση των στοιχείων στον X άξονα για το πλέγμα 1 με  $\sigma_{\max xx} = 23011$  psi και για το πλέγμα 2 με  $\sigma_{\max xx} = 21275$  psi, αντίστοιχα.

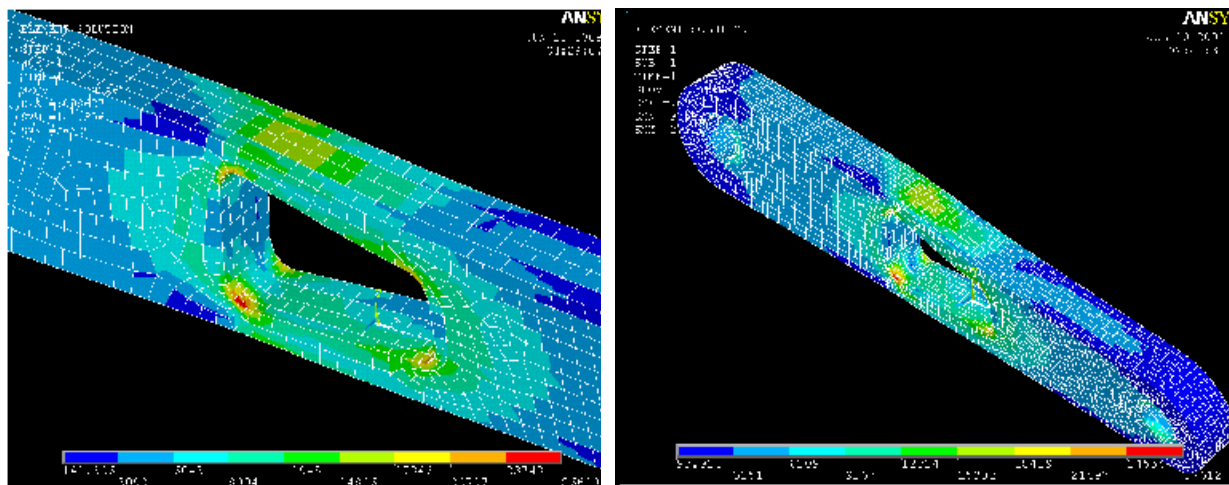


(a)

(b)

**Εικόνα 3.4.12:** Κατανομή τάσεων στον x άξονα (a) πλέγμα 1 (b) πλέγμα 2

Στην εικόνα 3.4.13a και 3.4.13b φαίνεται η λύση των στοιχείων με το κριτήριο αστοχίας Von Mises για τα πλέγματα 1 με  $\sigma_{\max} = 26699$  psi και 2 με  $\sigma_{\max} = 27612$  psi, αντίστοιχα.



(a) πλέγμα 1

(b) πλέγμα 2

**Εικόνα 3.4.13:** Κατανομή τάσεων με το κριτήριο αστοχίας Von Mises

**Πίνακας 3.1:** Παραμορφώσεις και μέγιστες τάσεις για τα δύο πλέγματα.

	<b>ΠΡΩΤΟ ΠΛΕΓΜΑ</b>	<b>ΔΕΥΤΕΡΟ ΠΛΕΓΜΑ</b>
<b>ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ (DMX)</b>	0.026181 in	0.026631 in
<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ (SMX)</b>	26699 psi	27612 psi

Η μέγιστη παραμόρφωση στην άκρη του άξονα είναι 1.8% μεγαλύτερη και η μέγιστη τάση είναι 7.0% λιγότερη στην ανώτερη αριστερή γωνία του ελαφρώματος / της επιφάνειας που λείπει στο πετάλι. Πρέπει να διακριτοποιήσουμε ξανά την κατασκευή για να έχουμε συγκλίνων λύση.

Στο παράρτημα «Βήμα προς βήμα κατασκευή των μοντέλων (tutorials) των προβλημάτων του κεφαλαίου 3», παρουσιάζονται αναλυτικά ένα προς ένα όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΟ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗ**

#### **4.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

Η ανάλυση του στροβιλοσυμπιεστή θα πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος ANSYS 11.0. Αρχικά ο στροβιλοσυμπιεστής σχεδιάζεται ως τρισδιάστατο σώμα, στη συνέχεια από το σχέδιο κατασκευάζεται το προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων και τέλος πραγματοποιούνται: α) στατική ανάλυση (static analysis) για την εύρεση των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων και β) φασματική ανάλυση (modal analysis) για την εύρεση των ιδιομορφών ταλάντωσης ανά ιδιοσυχνότητα.

#### **4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗ**

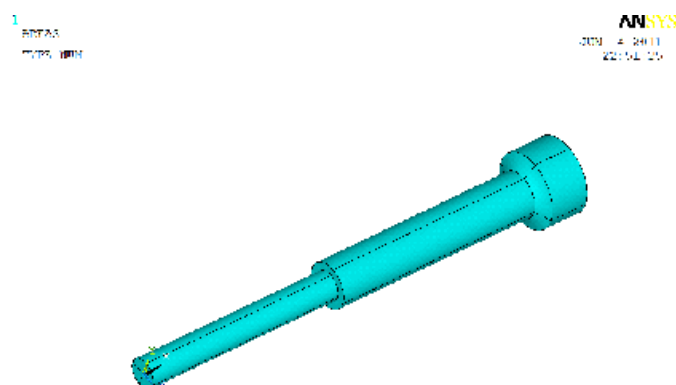
Ο σχεδιασμός του στροβιλοσυμπιεστή ως τρισδιάστατο σώμα, πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας σχεδιαστικό μέρος του προγράμματος ANSYS. Αρχικά ορίζουμε τα απαιτούμενα σημεία (keypoints) για τη δημιουργία της γεωμετρίας του άξονα βάσει των συντεταγμένων του πίνακα 4.1 και ενώνοντας τα δημιουργούμε τη γενέτειρα γραμμή της επιφάνειας πάνω στο επίπεδο εργασίας (workplane), όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι το X-Y επίπεδο.

Σημειώνεται ότι στο ANSYS δεν εισάγονται μονάδες μετρήσεως, αλλά υπολογιστικές μονάδες. Επομένως θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, ώστε οι τιμές των μεγεθών που εισάγονται, να είναι στο ίδιο σύστημα. Το σύστημα μονάδων που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί είναι το SI σε mm.

**Πίνακας 4.1:** Συντεταγμένες σχεδίασης του άξονα

Keypoint id	X	Y	Z
1	0	0	0
2	0	2.995	0
3	42.50	2.995	0
4	42.50	4.595	0
5	86.50	4.595	0
6	88.20	7.50	0
7	96.20	7.50	0
8	96.20	0	0

Στα επόμενα δύο βήματα, δημιουργείται αρχικά η εκ περιστροφής επιφάνεια του άξονα και στη συνέχεια ο όγκος που αυτή περικλείει, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1.1.



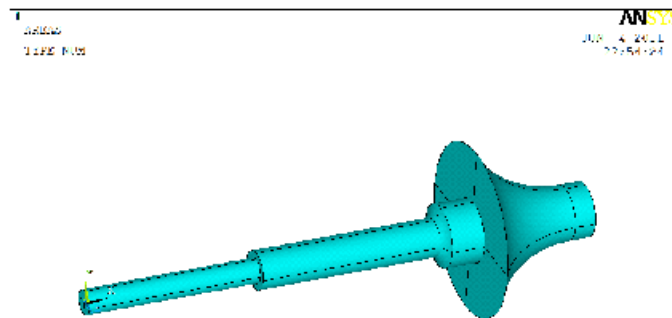
**Εικόνα 4.1.1:** Γεωμετρία Άξονα στροβιλοσυμπιεστή

Με σκοπό να σχεδιάσουμε το στρόβιλο, ορίζουμε σημεία με συντεταγμένες αυτές που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2. Σημειώνεται ότι το keypoint 11 είναι βοηθητικό και είναι το τρίτο keypoint που απαιτείται για να ορισθεί το τόξο με αρχή και τέλος τα 10 και 12 αντίστοιχα.

**Πίνακας 4.2:** Συντεταγμένες σχεδίασης του στροβίλου

Keypoint id	X	Y	Z
9	96.20	20.50	0
10	119.20	6.50	0
11	109.20	8.50	0
12	124.20	6.50	0
13	124.20	0	0

Στη συνέχεια δημιουργούμε την εκ περιστροφής επιφάνεια του στροβίλου, βάσει των keypoints 1 και 13, και από αυτή τον όγκο του, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1.2.



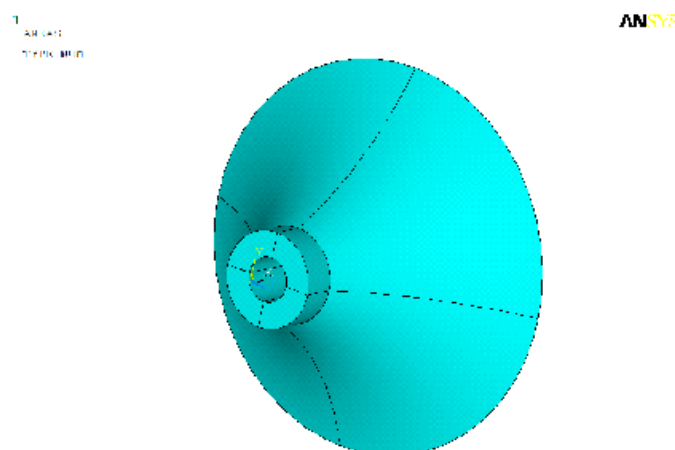
**Εικόνα 4.1.2:** Γεωμετρία στροβίλου

Συνεχίζουμε εισάγοντας συντεταγμένες για την σχεδίαση του αεροσυμπιεστή βάσει του πίνακα 4.3. Σημειώνεται ότι το keypoint 17 είναι βοηθητικό και είναι το τρίτο keypoint που απαιτείται για να ορισθεί το τόξο με αρχή και τέλος τα 16 και 18 αντίστοιχα.

**Πίνακας 4.3:** Συντεταγμένες σχεδίασης του αεροσυμπιεστή

Keypoint id	X	Y	Z
14	4.00	2.995	0
15	4.00	6.50	0
16	8.80	6.50	0
17	20.80	15.00	0
18	28.98	26.085	0
19	28.98	2.995	0

Στη συνέχεια δημιουργούμε την εκ περιστροφής επιφάνεια του συμπιεστή, βάσει των keypoints 4 και 19, και από αυτή τον όγκο του, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1.3.



**Εικόνα 4.1.3:** Γεωμετρία συμπιεστή

Η σχεδίαση του παξιμαδιού μπορεί να γίνει και από έτοιμες εντολές στο GUI, επιλέγοντας από το κεντρικό μενού, preprocessor > modeling > create > volumes > cylinder > hollow cylinder, όπου δηλώνουμε:

**ακτίνα 1:** 6.5,

**ακτίνα 2:** 2.995 και

**βάθος:** 4.0

Πλέον ήμαστε στην διαδικασία σχεδίασης των πτερυγίων για κάθε φτερωτή. Δίνοντας τις συντεταγμένες του πίνακα 4.4 σχεδιάζουμε ένα πτερύγιο στον συμπίεστή.

**Πίνακας 4.4:** Συντεταγμένες σχεδίασης του πτερυγίου στον αεροσυμπιεστή

Keypoint id	X	Y	Z
20	28.98	26.085	0
21	8.80	6.50	0
22	20.80	15.00	0
23	8.80	16.80	4.0
24	25.17	26.085	4.0
25	19.00	19.00	4.0

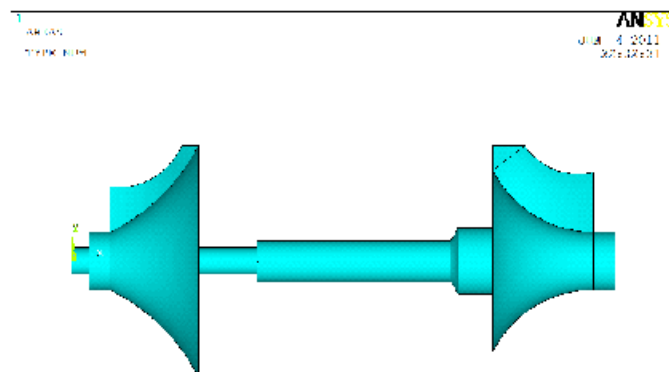
Το keypoint 22 είναι το τρίτο keypoint για το τόξο μεταξύ των συντεταγμένων των keypoint 20 και 21. Επίσης το τρίτο keypoint για το δεύτερο τόξο είναι το 25 για τα keypoint 23 και 24. Στη συνέχεια δημιουργούμε επιφάνεια από τις γραμμές που έχουμε ενώσει.

Όσον αφορά το πτερύγιο του στροβίλου, αυτό δημιουργείται με τις συντεταγμένες του πίνακα 4.5.

**Πίνακας 4.5:** Συντεταγμένες σχεδίασης του πτερυγίου στον στρόβιλο

Keypoint id	X	Y	Z
26	96.20	20.50	0
27	119.20	6.50	0
28	109.20	8.50	0
29	119.20	20.00	-8.00
30	103.49	26.00	4.00
31	107.70	22.00	0
32	96.20	26.00	0

Το keypoint 28 είναι το τρίτο keypoint για το τόξο μεταξύ των συντεταγμένων των keypoint 26 και 27. Δημιουργούμε επιφάνεια από τις γραμμές που έχουμε ενώσει και στην εικόνα 4.1.4 φαίνεται η σχεδίαση του μοντέλου σε επιφάνεια.



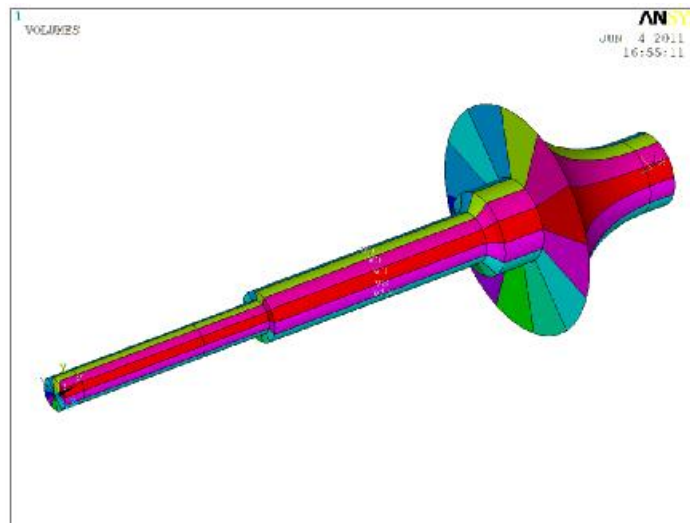
**Εικόνα 4.1.4:** Γεωμετρία πτερυγίων

Για την σχεδίαση των υπόλοιπων πτερυγίων δημιουργήσαμε ένα κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων και χρησιμοποιώντας την εντολή από το κεντρικό μενού Modeling > Copy > Areas, αντιγράψαμε 12 επιφάνειες ανά 30 μοίρες γύρω από τον y άξονα.



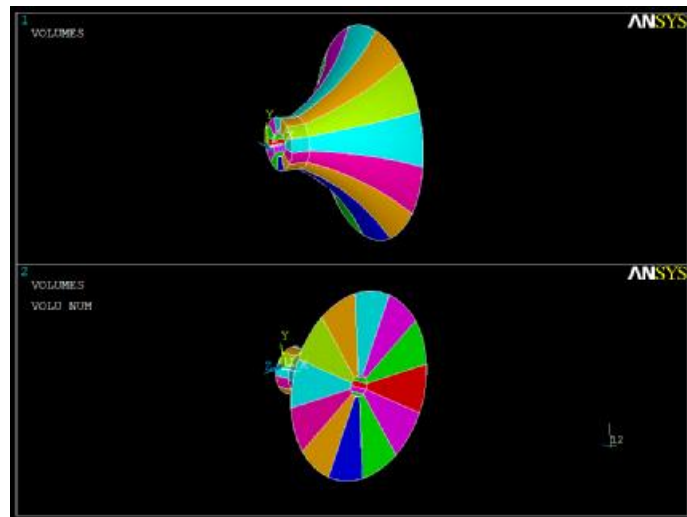
Τα πτερύγια ορίστηκαν με στοιχεία κελύφους SHELL63, ενώ ο υπόλοιπος όγκος με στοιχεία συμπαγής κατασκευής SOLID95.

Για να μην προκύψουν προβλήματα στην σύνδεση των πτερυγίων, που είναι επιφάνειες και όχι όγκοι όπως η υπόλοιπη κατασκευή, διαιρέθηκαν οι όγκοι σε δώδεκα τμήματα, ανά 30° σε μια πλήρη περιστροφή 360°, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1.5 για τον στρόβιλο με άξονα και στην εικόνα 4.1.6 για τον συμπιεστή.



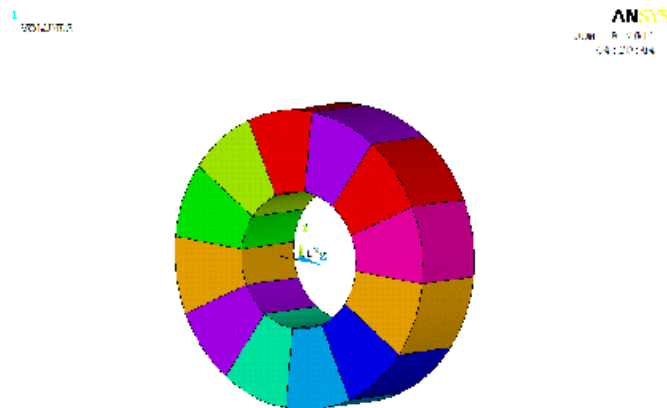
**Εικόνα 4.1.5: Διαίρεση όγκων**

Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που ένας τροχός διαθέτει διαφορετικό αριθμό πτερυγίων από τον άλλο, η παραπάνω διαίρεση δεν είναι εφικτή διότι δεν θα μπορούν να συνεργαστούν οι όγκοι μεταξύ τους.



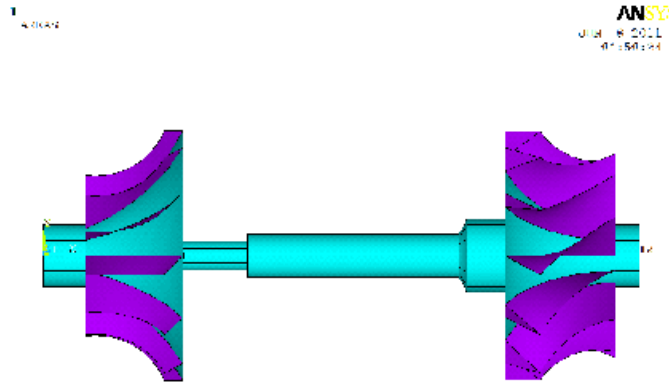
**Εικόνα 4.1.5:** Διαίρεση όγκων συμπιεστή

Επίσης την ίδια διαίρεση θα δεχτεί και το παξιμάδι, εικόνα 4.1.6, και επιπλέον θα χρησιμοποιηθεί η εντολή glue του ANSYS για να δηλωθεί η διαφορετικότητα του ως κατασκευή, με δικό του υλικό αλλά κυρίως για να συμπεριφερθεί μαζί με τον άξονα



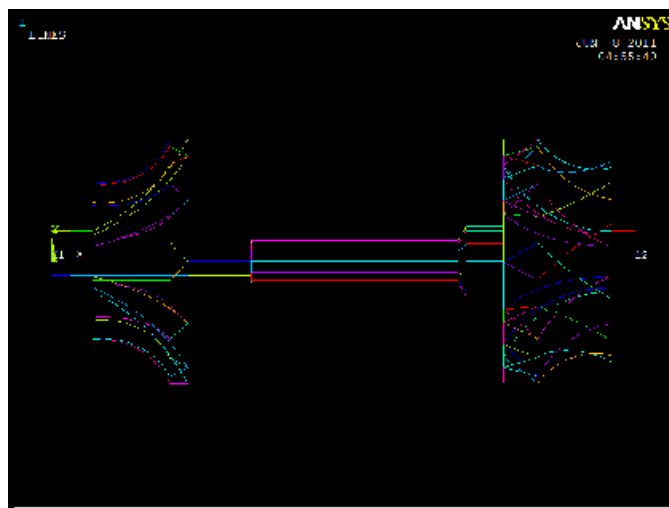
**Εικόνα 4.1.6:** Διαίρεση όγκων παξιμαδιού

Μετά από την διαίρεση των όγκων περιστρέφουμε τα πτερύγια ανά  $30^\circ$  με εντολή που παράλληλα δημιουργεί την επιφάνεια που επιλέξαμε και το αποτέλεσμα θα είναι αυτό της εικόνας 4.1.7.



**Εικόνα 4.1.7:** Δημιουργία πτερυγίων

Παρακάτω, στην εικόνα 4.1.8, βλέπουμε επιλεγμένες τις γραμμές που απαρτίζεται το μοντέλο.



**Εικόνα 4.1.8:** Γραμμές που απαρτίζουν την κατασκευή

#### 4.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΣΥΜΠΙΕΣΤΗ - ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Οι όγκοι και οι επιφάνειες του στροβιλοσυμπιεστή και των πτερυγίων αντίστοιχα, χωρίστηκαν σε κατάλληλα για το πρόβλημα μας πεπερασμένα στοιχεία, ενώ παράλληλα προσομοιώθηκε ο τρόπος περιστροφικής στήριξης του άξονα στα σημεία των εδράνων και τα φορτία που καταπονούν την κατασκευή, ώστε να καταστεί δυνατή η στατική τους ανάλυση και στη συνέχεια η ανάλυση ιδιομορφών.

Στον πίνακα 4.6, παρατίθενται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση του στροβιλοσυμπιεστή.

**Πίνακας 4.6:** Αντιπροσωπευτικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών

Material	Modulus of Elasticity, E (N/mm <sup>2</sup> )	Poisson Ratio $\nu$	Weight Density (Kg/mm <sup>3</sup> )
Aluminium Alloys	$7.032652 \times 10^4$	0.33	$2712.631 \times 10^{-9}$
Inconel Alloys	$2.137375 \times 10^5$	0.29	$8580.77 \times 10^{-9}$
Stainless Steel	$1.902953 \times 10^{11}$	0.31	$7750.373 \times 10^{-9}$

#### 4.3.1 Τοποθέτηση Εδράνων στον άξονα

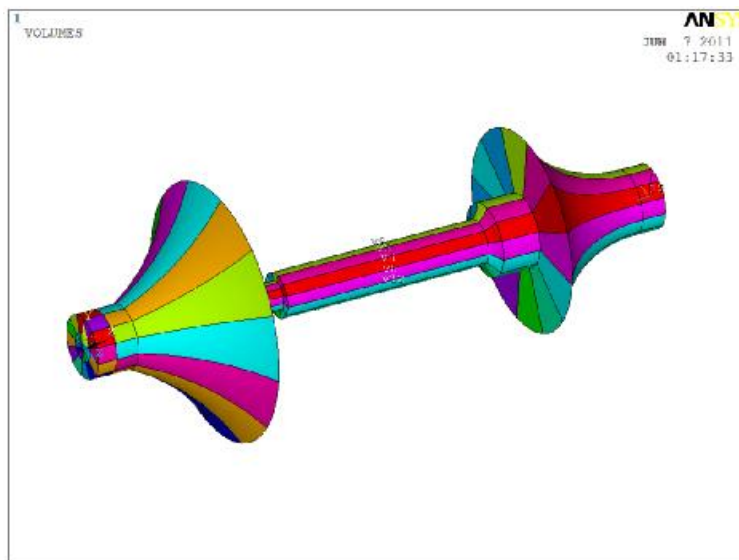
Για να προχωρήσουμε στην διακριτοποίηση πρέπει πρώτα να εφαρμόσουμε τις συνοριακές συνθήκες λόγω των στηρίξεων, οι οποίες στη συγκεκριμένη περίπτωση πρέπει να είναι εκφρασμένες σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων, δεδομένου ότι ο στροβιλοσυμπιεστής είναι φυγόκεντρος και κατά συνέπεια περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του.

Αρχικά, ορίζουμε τις ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση του μοντέλου ανά κατασκευή. Για τον στρόβιλο με άξονα επιλέγεται υλικό inconel, (πίνακας 4.6), με μέτρο ελαστικότητας  $E=2.137375 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>, Πυκνότητα  $D=8580.77 \times 10^{-9}$  kg/mm<sup>3</sup> και λόγο Poisson  $\nu=0.29$ . Επίσης για τα πτερύγια που φέρει ορίζεται το ίδιο υλικό με τη διαφορά ότι στο μοντέλο εισάγουμε το πάχος τους ως ιδιότητα, λόγω του ότι θα χρησιμοποιηθούν στοιχεία κελύφους. Για το συμπιεστή επιλέγεται υλικό από κράμα αλουμίνιου, (πίνακας 4.6), με μέτρο Ελαστικότητας  $E=7.032652 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup>, Πυκνότητα  $D=2712.631 \times 10^{-9}$  kg/mm<sup>3</sup> και λόγο Poisson  $\nu=0.33$ . Επίσης και τα πτερύγια δηλώνουμε το πάχος τους ως ιδιότητα του στοιχείου.

Τέλος για το παξιμάδι επιλέγεται χάλυβας, με μέτρο Ελαστικότητας  $E=1.902953 \times 10^{11}$  (N/mm<sup>2</sup>), λόγο Poisson  $\nu=0.31$  και Πυκνότητα  $D=7750.373 \times 10^{-9}$  (Kg/mm<sup>3</sup>).

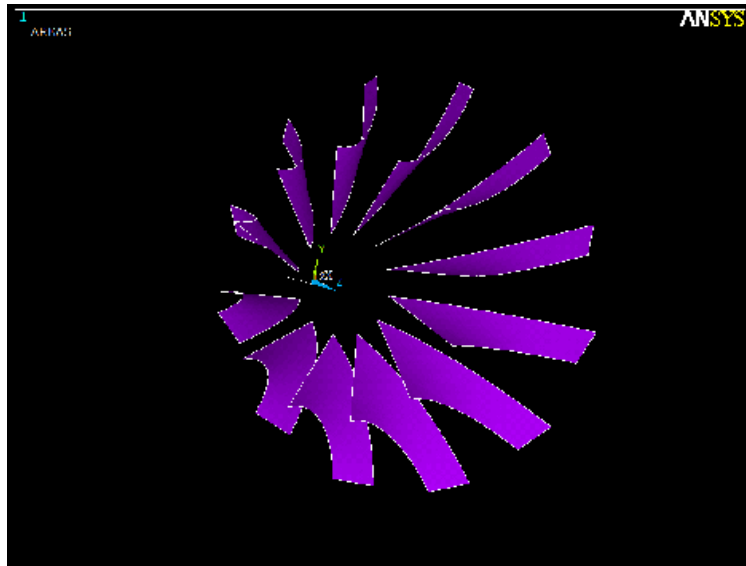
Επιλέγουμε με την εντολή Mesh Attributes το κάθε τμήμα της κατασκευής με διαφορετικό υλικό για να το δηλώσουμε και στη συνέχεια υπολογίζεται το κέντρο βάρους της γεωμετρίας.

Το κέντρο βάρους του τμήματος της κατασκευής που απεικονίζεται στην εικόνα 4.3.1.1, βρέθηκε στα 64.684 mm ως προς τον άξονα x, με συνολική μάζα 0.18250 kg.



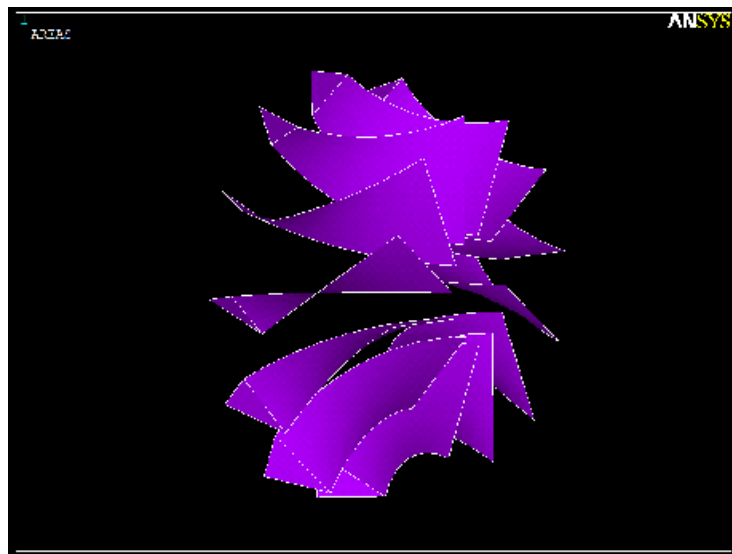
**Εικόνα 4.3.1.1:** Διαιρούμενοι όγκοι στροβιλοσυμπιεστή

Το κέντρο βάρους των πτερυγίων του συμπιεστή, εικόνα 4.3.1.2, βρέθηκε ως προς τον άξονα x, 17.782 mm, με συνολική μάζα  $0.26034 \times 10^{-2}$  Kg.



**Εικόνα 4.3.1.2:** *Επιφάνειες Πτερυγίων συμπιεστή*

Το κέντρο βάρους των πτερυγίων του στροβίλου, εικόνα 4.3.1.3, βρέθηκε ως προς τον άξονα x, 108.50 mm, με συνολική μάζα  $0.29365 \times 10^{-1}$  Kg.



**Εικόνα 4.3.1.3:** *Επιφάνειες Πτερυγίων στροβίλου*

Τελικά, το κέντρο βάρους ολόκληρης της κατασκευής προκύπτει από τα κέντρα των τριών επιμέρους τμημάτων της κατασκευής, βάσει της σχέσης 1.2:

$$X_c^T = \frac{X_c^V \cdot m^V + X_c^{Cb} \cdot m^{Cb} + X_c^{Tb} \cdot m^{Tb}}{m^V + m^{Cb} + m^{Tb}} = \quad (1.2)$$

$$X_c^T = \frac{64.684 \cdot 0.18250 + 17.782 \cdot 0.0026034 + 108.50 \cdot 0.029365}{0.18250 + 0.0026034 + 0.029365} =$$

$$X_c^T = 70.11 \text{ mm}$$

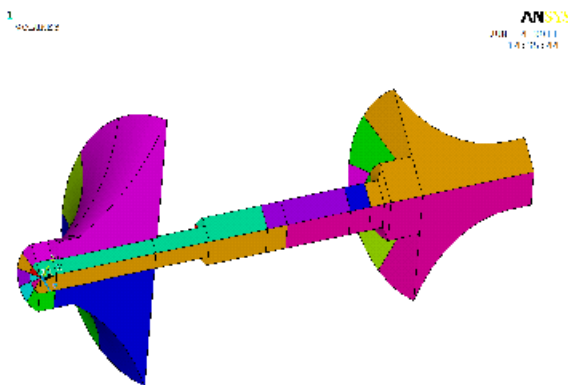
Όπου:

V= volume

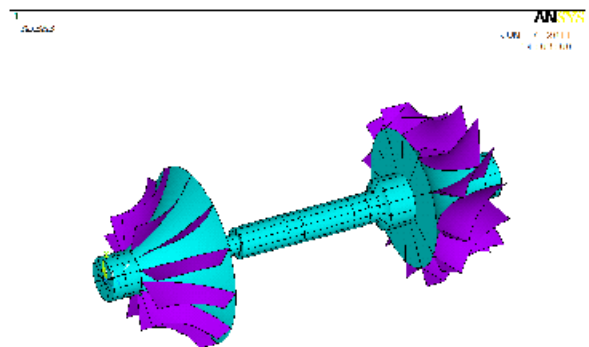
Cb=compressor blade

Tb=turbine blade

Βάσει του κέντρου βάρους που υπολογίστηκε, ορίστηκαν οι θέσεις των εδράνων κύλισης / ρουλεμάν, τα οποία έχουν επιφάνεια έδρασης 5.0 mm. Ο ορισμός τους έγινε με χρήση εντολών διαίρεσης όγκων. Στις εικόνες 4.3.1.4 (τομή) και 4.3.1.5 απεικονίζονται οι θέσεις των ρουλεμάν.



Εικόνα 4.3.1.4



Εικόνα 4.3.1.5

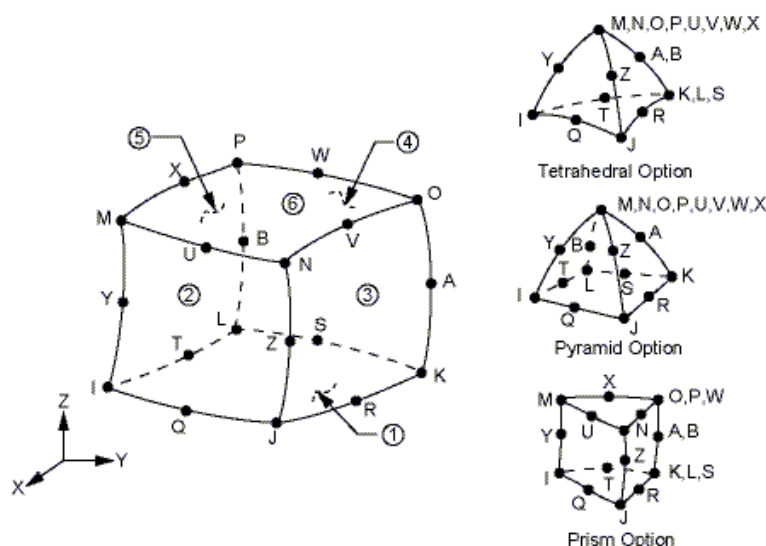
### 4.3.2 Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων

Για την διακριτοποίηση του στροβιλοσυμπιεστή και του παξιμαδιού, επιλέχθηκε το στοιχείο SOLID95 ή με πλήρη ονομασία 20 node 95.

#### Περιγραφή του στοιχείου SOLID95

Το στοιχείο SOLID95 είναι μια νεότερη έκδοση του τρισδιάστατου, 8 κόμβων συμπαγές στοιχείο SOLID45. Μπορεί να ανεχθεί ακανόνιστα σχήματα χωρίς απώλεια της ακρίβειας. Τα στοιχεία του SOLID95 έχουν συμβατά σχήματα μετατόπισης και είναι κατάλληλα για μοντέλα με καμπύλα όρια. Το στοιχείο ορίζεται από 20 κόμβους έχοντας τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο στις μετατοπίσεις  $x$ ,  $y$ , και  $z$  και μπορεί να έχει κάθε χωρικό προσανατολισμό. Το στοιχείο SOLID95 παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά: πλαστικότητα, ερπυσμό, δυσκαμψία, και μεγάλες μετατοπίσεις.

Στην εικόνα 4.3.2.1 που ακολουθεί, φαίνεται η γεωμετρία, η τοποθεσία των κόμβων και το σύστημα συντεταγμένων για το στοιχείο SOLID95



Εικόνα 4.3.2.1 Απεικόνιση του στοιχείου SOLID95

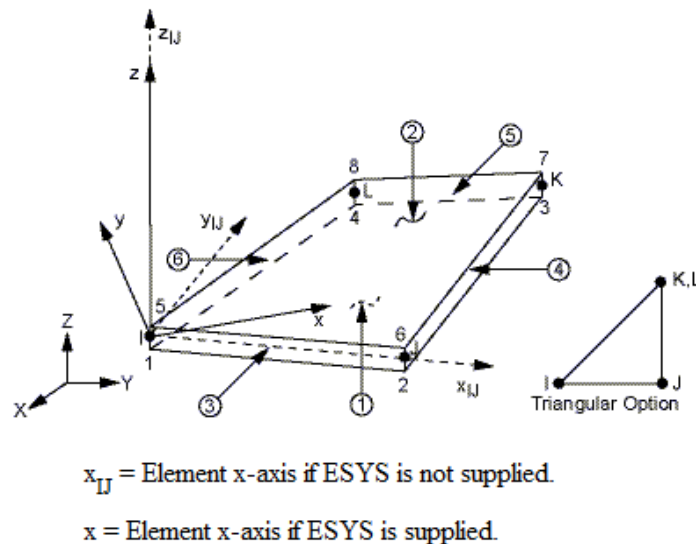


Για την διακριτοποίηση των πτερυγίων, επιλέχθηκε το στοιχείο SHELL63 ή με πλήρη ονομασία, elastic 4node 63

### Περιγραφή του στοιχείου SHELL63

Το στοιχείο SHELL63 έχει ενσωματωμένες τις λειτουργίες πλάκας και μεμβράνης. Έχει έξι βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο στις μετατοπίσεις διευθύνσεων  $x$ ,  $y$  και  $z$  και περιστροφές στους άξονες  $x$ ,  $y$  και  $z$ . Στα χαρακτηριστικά του στοιχείου συμπεριλαμβάνονται η δυσκαμψία και οι μεγάλες ικανότητες εκτροπής. Μια σταθερά εφαπτόμενης δυσκαμψίας είναι διαθέσιμη για χρήση σε μεγάλες παραμορφώσεις (πεπερασμένο σε περιστροφή), στο μητρώο επιλογής.

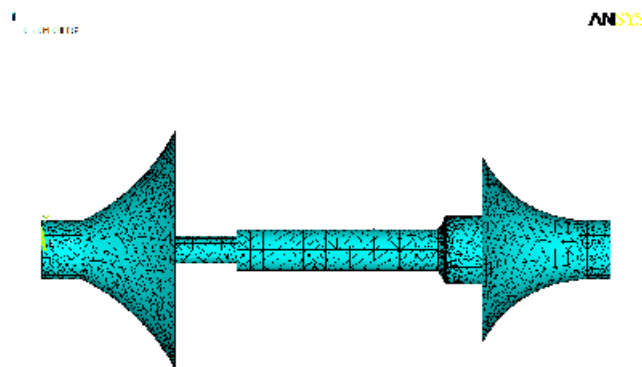
Στην εικόνα 4.3.2.2 που ακολουθεί φαίνεται η γεωμετρία, η τοποθεσία των κόμβων, και το τοπικό σύστημα συντεταγμένων για το στοιχείο SHELL63.



**Εικόνα 4.3.2.2:** Απεικόνιση του στοιχείου SHELL63

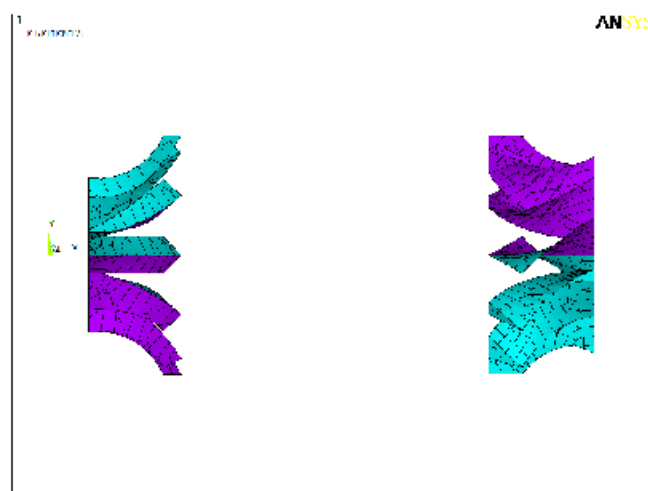
### 4.3.3 Διακριτοποίηση μοντέλου στροβιλοσυμπιεστή

Η διακριτοποίηση του στροβιλοσυμπιεστή σε πεπερασμένα στοιχεία έγινε ορίζοντας τον τύπο των στοιχείων (solid95), τις ιδιότητες των υλικών του πίνακα 4.6, όπως προαναφέραμε και το μέγεθος πλέγματος. Οι όγκοι του στροβιλοσυμπιεστή αποτελούνται στο σύνολο τους από 20541 στοιχεία (elements) και 33578 κόμβους (nodes), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.3.1.



Εικόνα 4.3.3.1: Διακριτοποίηση στερεών (solid)

Τα περύγια διακριτοποιήθηκαν με το στοιχείο SHELL63 και με real constant το πάχος τους όπου 0.5 mm και 1.0 mm για τα περύγια του συμπιεστή και του στροβίλου αντίστοιχα. Αποτελούνται στο σύνολο τους από 618 στοιχεία (elements) και 923 κόμβους (nodes), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.3.2.

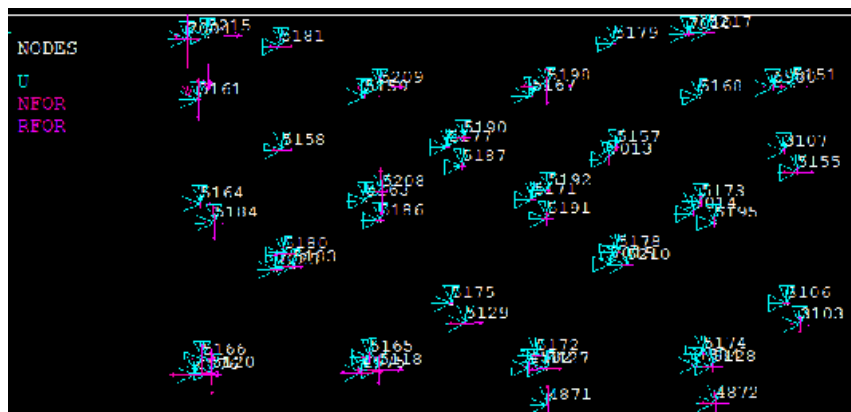


Εικόνα 4.3.3.2: Διακριτοποίηση επιφανειών (shell)

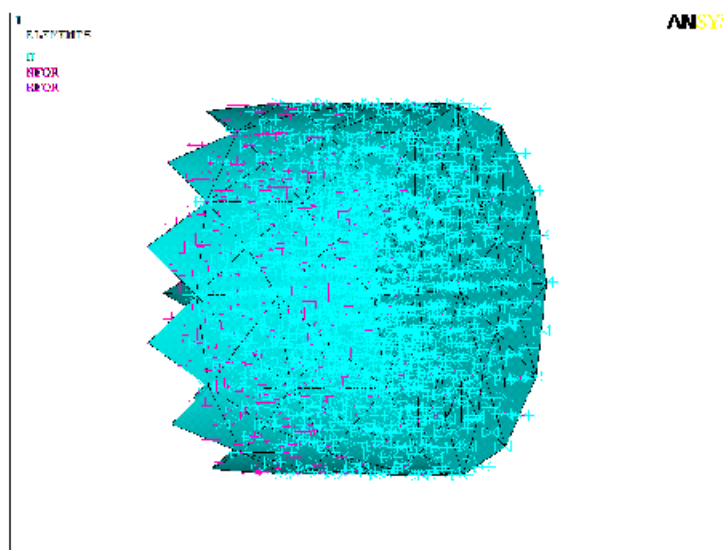
#### 4.3.4 Προσομοίωση της στήριξης και των φορτίων

Για τον ορισμό της περιστροφικής κίνησης του στροβιλοσυμπιεστή γύρω από τον άξονα x και την μοντελοποίηση των ρουλεμάν για κάθε σημείο έδρασης, δημιουργήσαμε ένα κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων.

Επιλέχθηκαν όλοι οι κόμβοι του σημείου έδρασης και ορίστηκαν οι βαθμοί ελευθερίας τους να αναφέρονται πλέον στο ενεργό κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων. Οι συνοριακές συνθήκες στις εδράσεις ορίστηκαν δεσμεύοντας τους ακτινικούς και τους αξονικούς βαθμούς ελευθερίας (εικόνες 4.3.4.1 και 4.3.4.2.). Σημειώνεται ότι οι περιφερειακοί βαθμοί ελευθερίας δεν δεσμεύτηκαν ώστε να προσομοιωθεί η ελεύθερη περιστροφή της κατασκευής ως προς τον άξονα της.



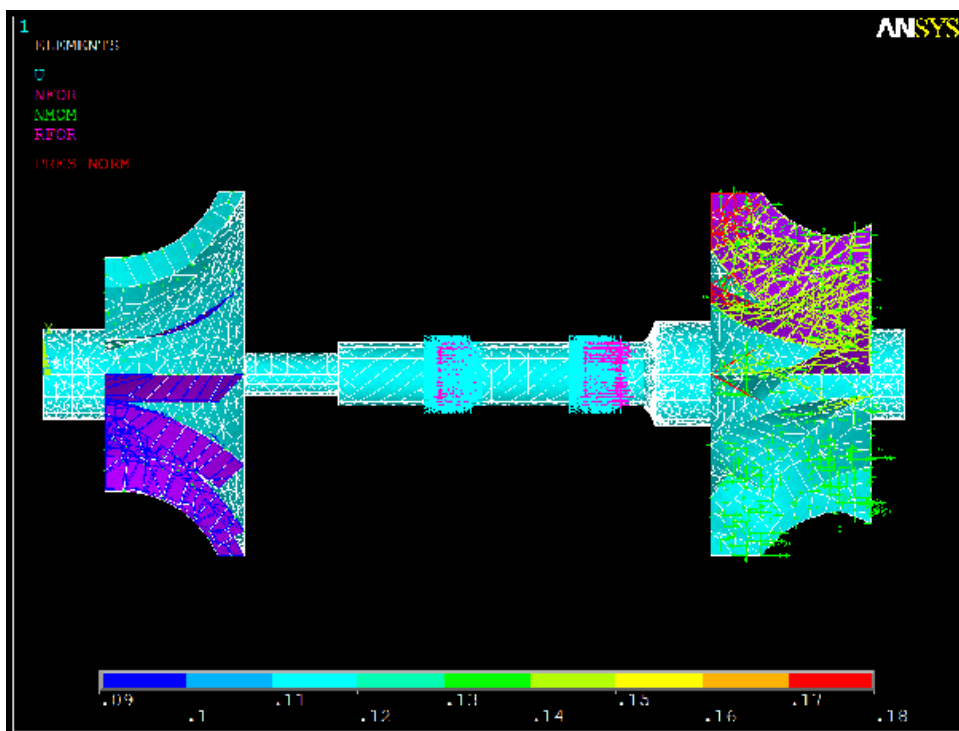
Εικόνα 4.3.4.1: Δεσμευμένοι κόμβοι σε x διεύθυνση



Εικόνα 4.3.4.2: Τρόπος έδρασης άξονα

Σχετικά με τη φόρτιση που δέχεται ο στροβιλοσυμπιεστής κατά τη λειτουργία του, αυτές προσομοιώθηκαν μέσω επιφανειακών πιέσεων στα πτερύγια και όχι με εφαρμογή δυνάμεων στους κόμβους.

Στα πτερύγια του συμπιεστή εφαρμόστηκε πίεση στα 0.9 bar ενώ στα πτερύγια του στροβίλου εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές πιέσεις, στα 1.8 bar στην ακμή του πτερυγίου που δέχεται την πρώτη επαφή με το ρευστό και στα 1.5 bar στην υπόλοιπη επιφάνεια του πτερυγίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3.4.3.



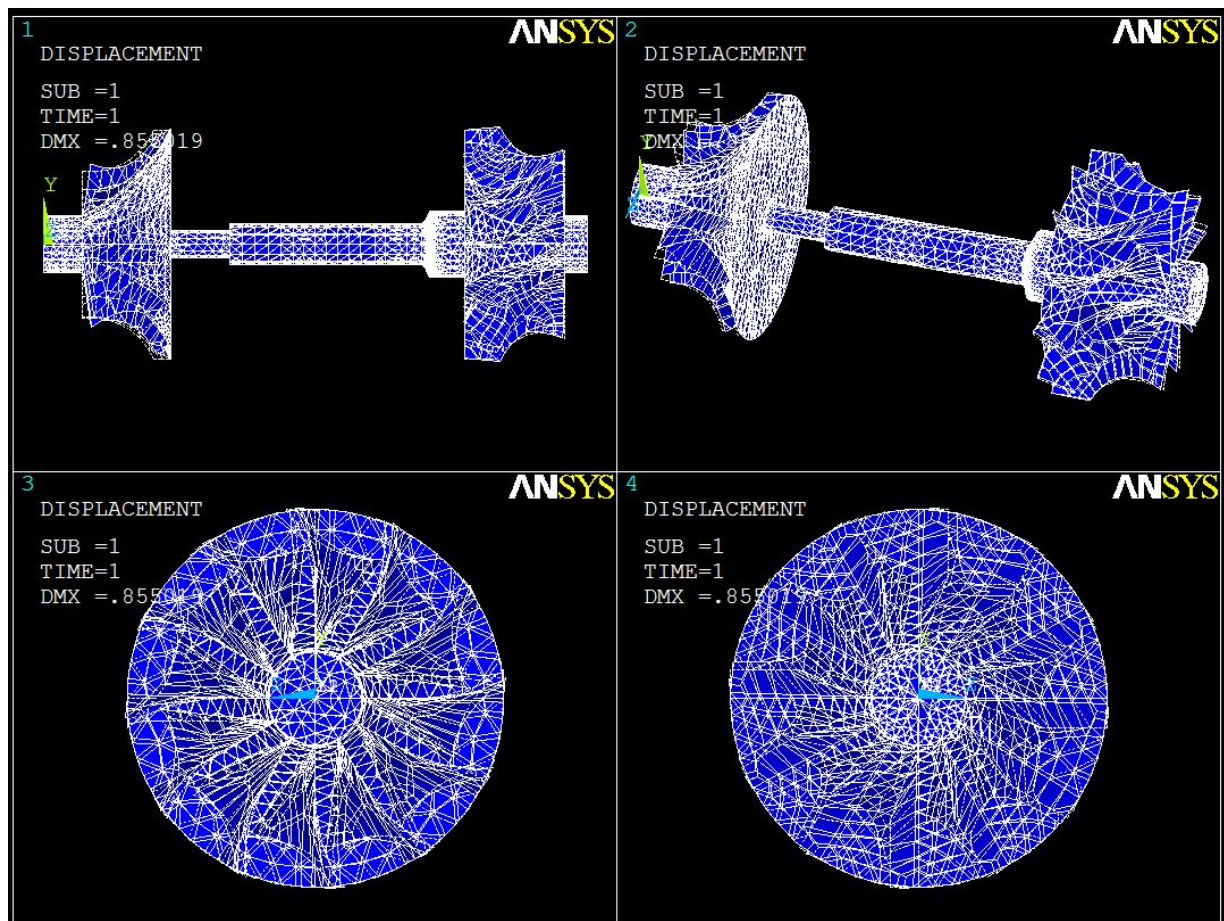
**Εικόνα 4.3.4.3:** Εφαρμοσμένες πιέσεις στα πτερύγια

## 4.4 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### A. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Η παραμορφωμένη κατάσταση του στροβιλοσυμπιεστή παρουσιάζεται στην εικόνα 4.4.1, με την μέγιστη τιμή της μετατόπισης να είναι 0.855019 mm και να εμφανίζεται στα πτερύγια του συμπιεστή.

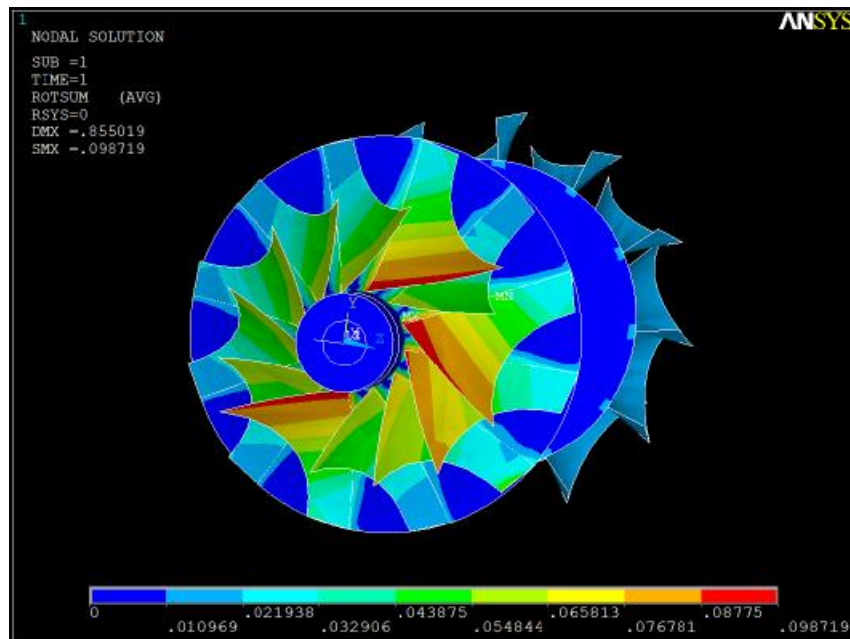
Παρατηρούμε ότι η παραμόρφωση παίρνει μέγιστες τιμές, στα πτερύγια του συμπιεστή λόγω της μεγάλης επιφανειακή πίεσης που ασκείται σε αυτά. Επίσης, όπως είναι αναμενόμενο, παρουσιάζεται μία στρεπτική παραμόρφωση στον άξονα.



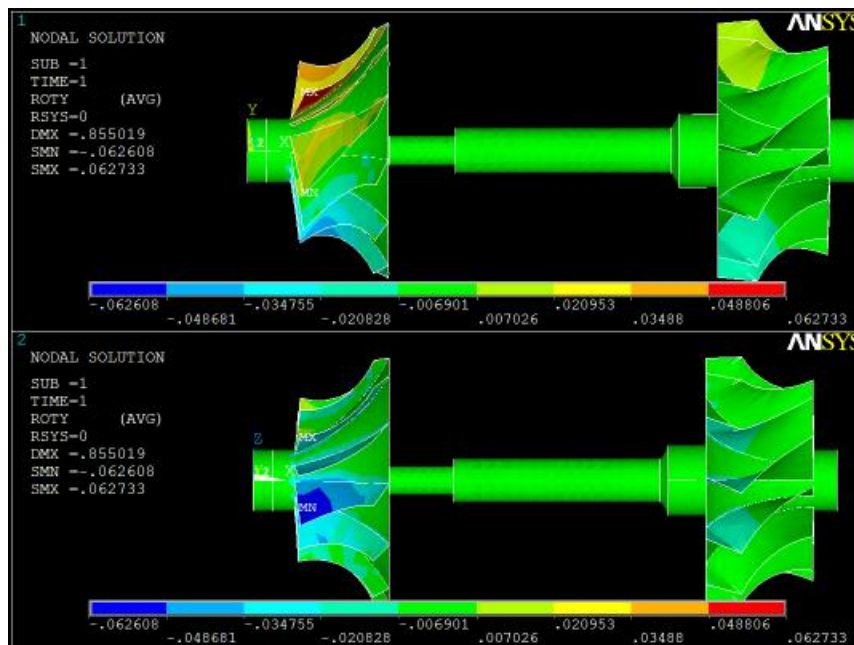
Εικόνα 4.4.1: Παραμόρφωση στροβιλοσυμπιεστή

Η μέγιστη περιστροφική μετατόπιση του στροβιλοσυμπιεστή είναι 0.098719 rad και εμφανίζεται στα εξωτερικά άκρα των πτερυγίων του συμπιεστή, εικόνα 4.4.2. Επίσης η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση του στροβιλοσυμπιεστή, λόγω

περιστροφής, στη διεύθυνση  $y$  είναι  $0.062733 \text{ rad}$  και εμφανίζεται ομοίως στις ακμές των πτερυγίων του συμπιεστή, εικόνα 4.4.3

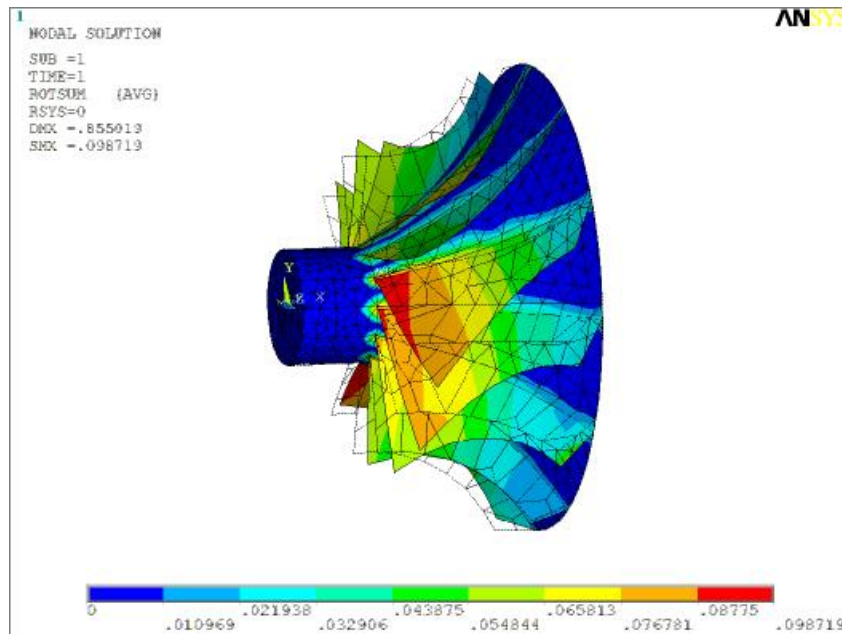


**Εικόνα 4.4.2:** Μετατόπιση πτερυγίων συμπιεστή λόγο περιστροφής

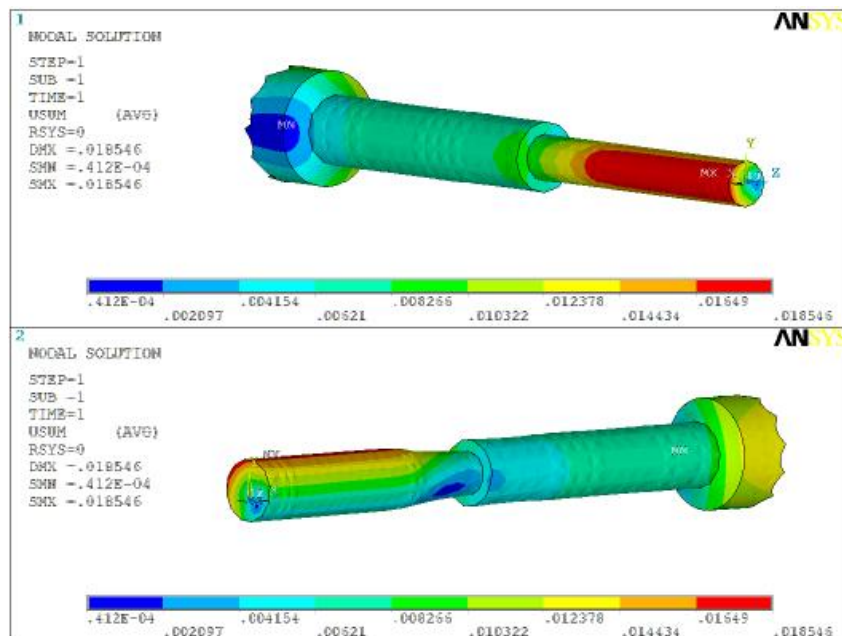


**Εικόνα 4.4.3:** Μετατόπιση στροβιλοσυμπιεστή λόγω περιστροφής ως προς την κάθετη διεύθυνση  $y$

Στην εικόνα 4.4.4 φαίνεται η παραμόρφωση και η συνολική μετατόπιση των πτερυγίων σε σχέση την αρχική κατάσταση τους, η οποία είναι και η μεγαλύτερη της όλης κατασκευής, ενώ στην εικόνα 4.4.5 η μέγιστη μετατόπιση του άξονα ως προς τις θέσεις εδράσεως.

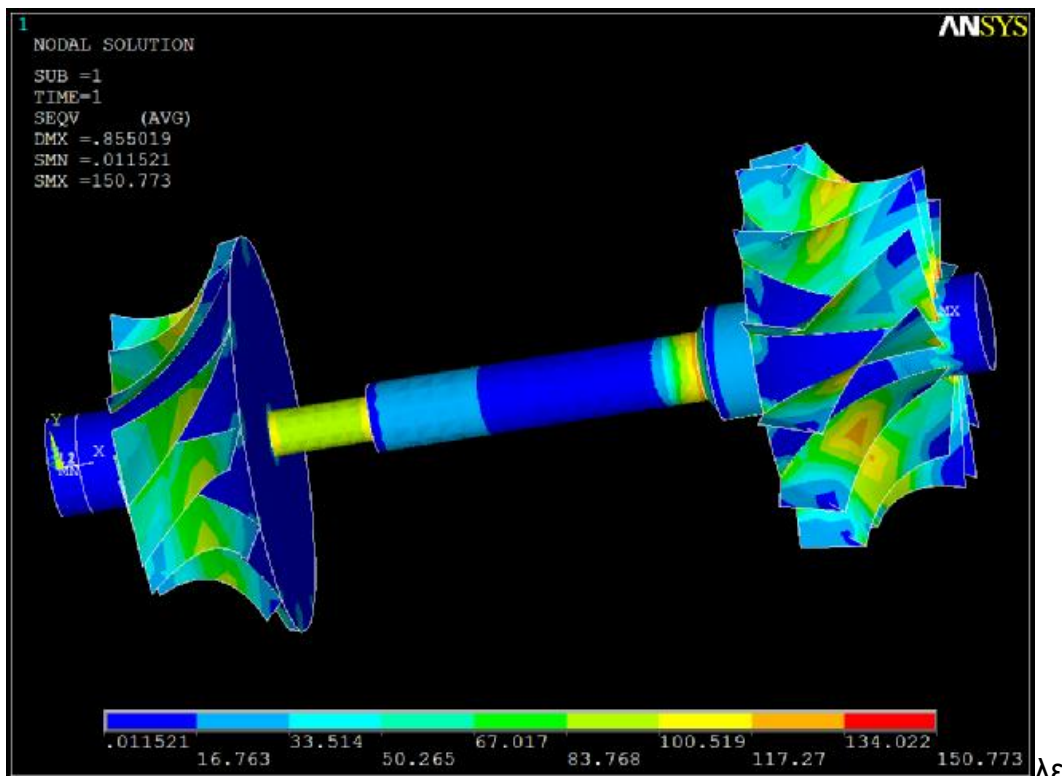


**Εικόνα 4.4.4:** Μετατόπιση πτερυγίων συμπίεστη λόγω περιστροφής



**Εικόνα 4.4.5:** Μετατόπιση άξονα ως προς τις εδράσεις

Στην εικόνα 4.4.6 παρουσιάζεται η κατανομή της ισοδύναμης τάσης στους κόμβους όπως αυτή προκύπτει από το κριτήριο αστοχίας Von Mises. Αυτό που προκύπτει από την λύση, είναι ότι η μέγιστη τάση που κρίνει την αστοχία άρα και θραύση, βρίσκεται στο σημείο που συνδέεται το πτερύγιο του στροβίλου στο σώμα του τροχού, προς την εξωτερική του πλευρά (εικόνα 4.4.6, εκεί που διακρίνεται το σημείο MX, Max).

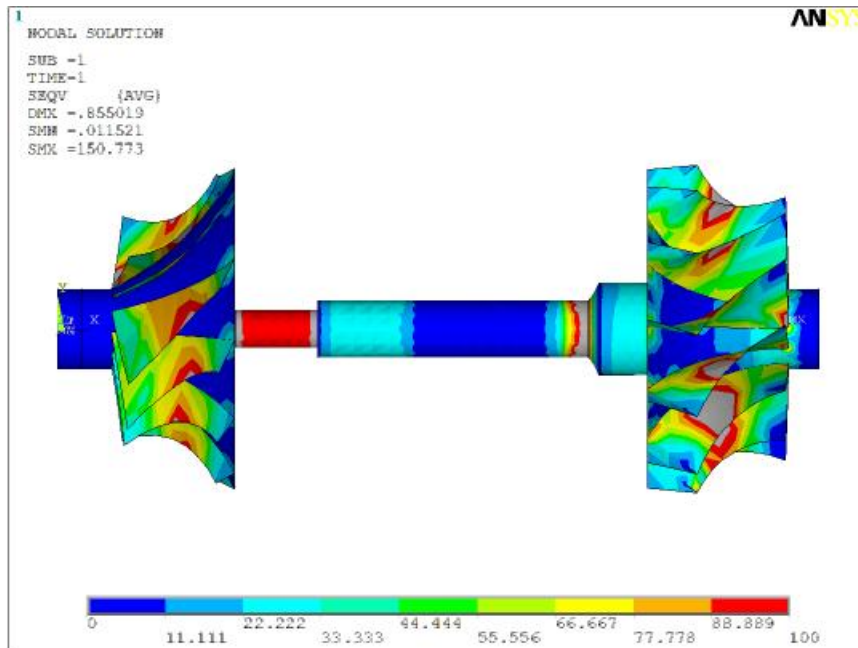


**Εικόνα 4.4.6:** Κατανομή ισοδύναμης τάσης στους κόμβους κατά το κριτήριο αστοχίας (von mises stress)

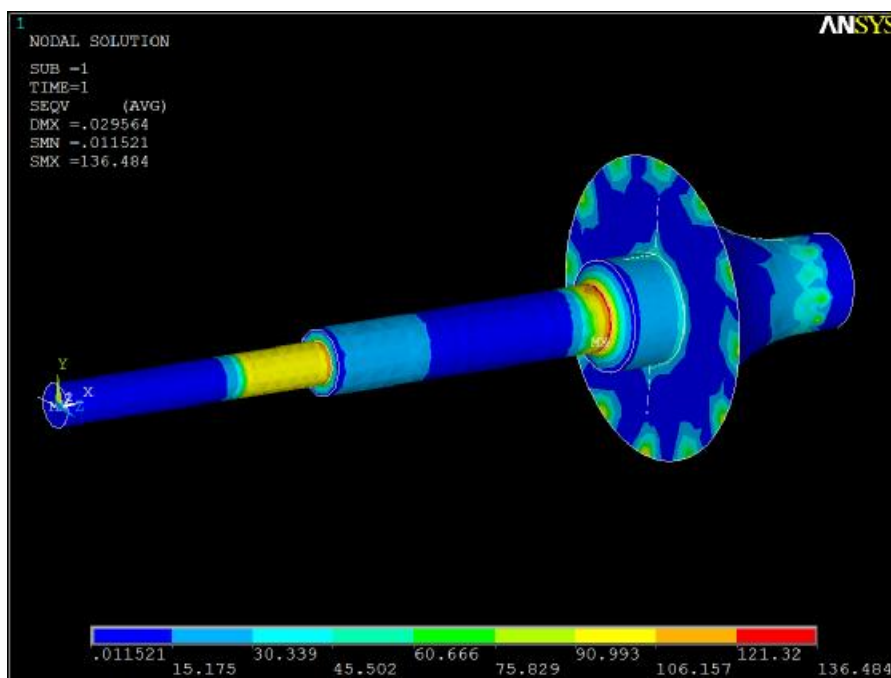
Για να έχουμε καλύτερη ευκρίνεια στην κατανομή των τάσεων μπορούμε να αλλάξουμε το εύρος της μέγιστης και ελάχιστης τάσης στην κλίμακα: ελάχιστη **0** και μέγιστη **100 N/mm<sup>2</sup>**, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4.7.

Στην συνέχεια διακρίνονται τα δυσμενή σημεία της κατασκευής, όπου φαίνονται στις εικόνες 4.4.8, 4.4.9 και 4.4.10.

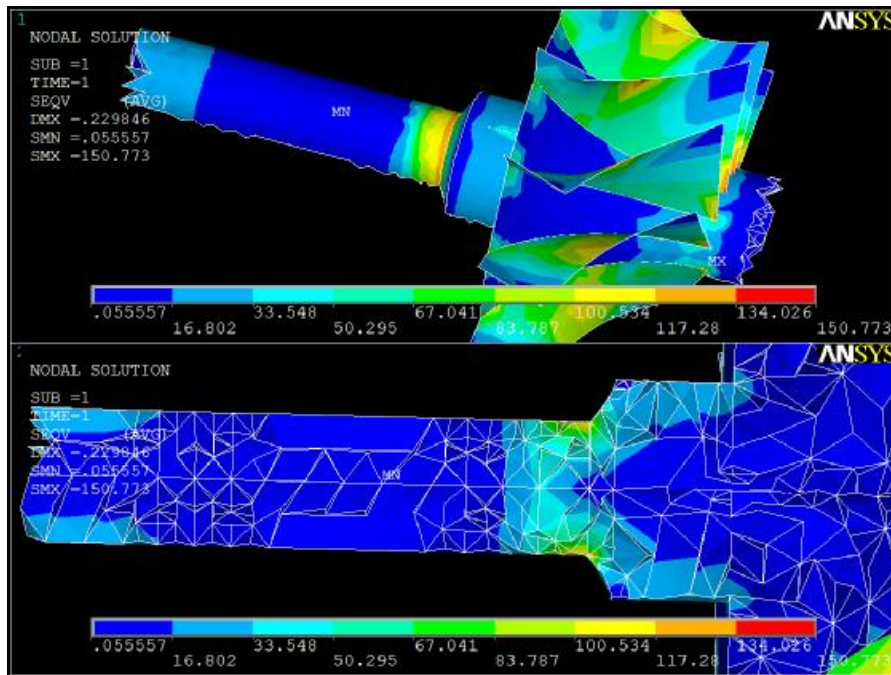




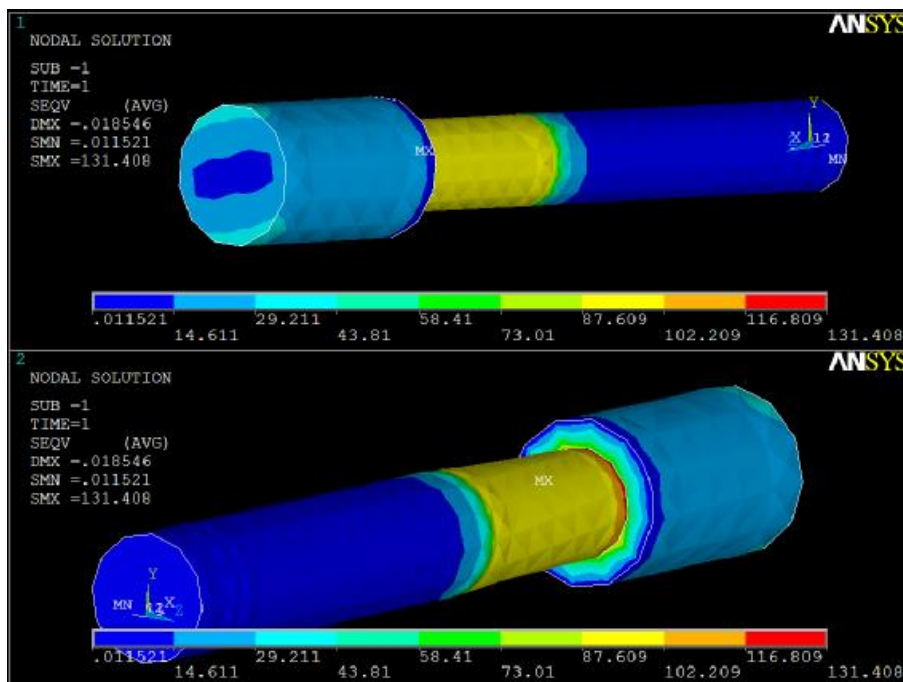
**Εικόνα 4.4.7:** Κατανομή ισοδύναμης τάσης στους κόμβους κατά το κριτήριο αστοχίας (von mises stress) με αλλαγή εύρος τάσεων



**Εικόνα 4.4.8:** Κατανομή ισοδύναμης τάσης στους κόμβους κατά το κριτήριο αστοχίας (von mises stress)



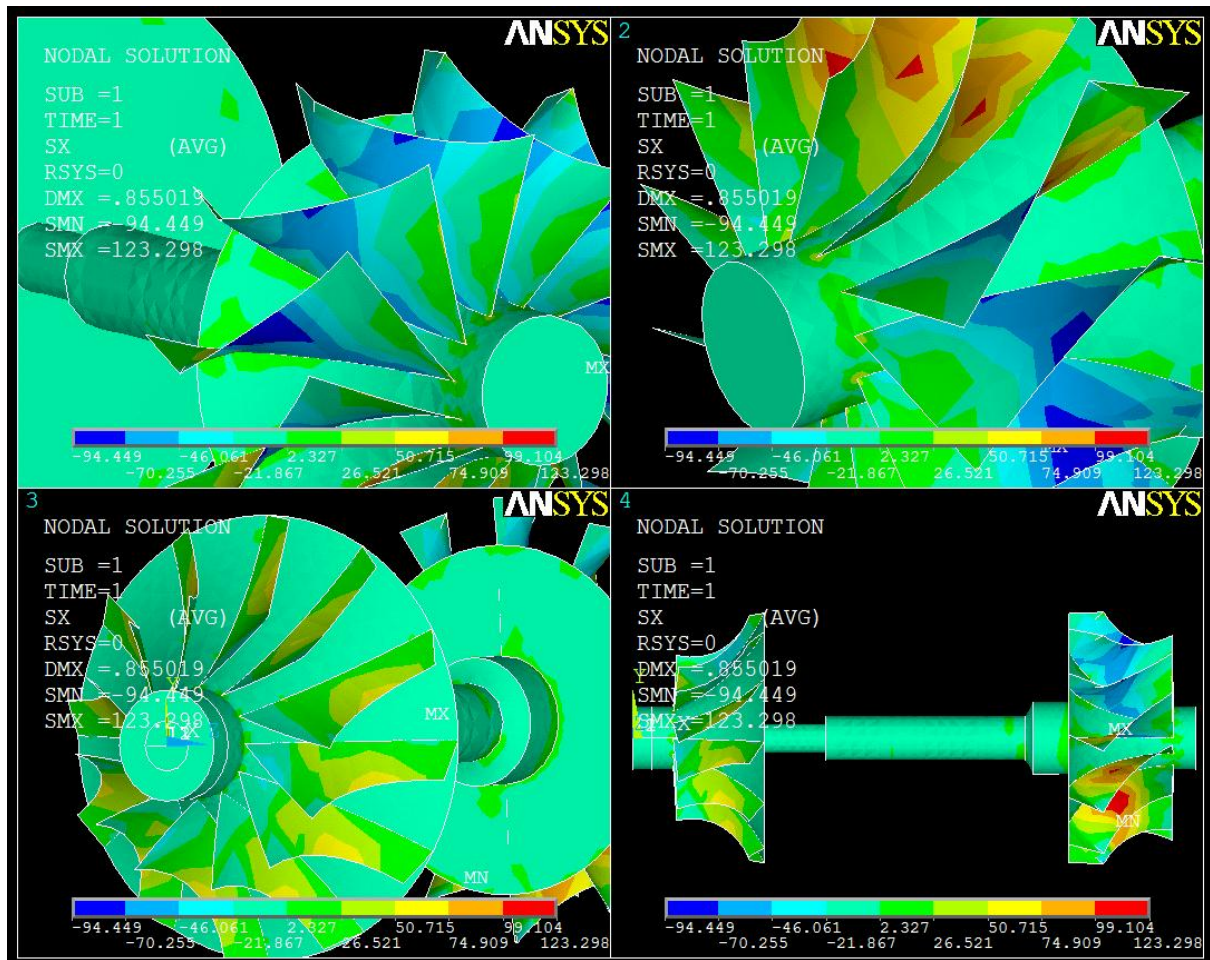
**Εικόνα 4.4.9:** Κατανομή ισοδύναμης τάσης σε τομή στον άξονα και στρόβιλο κατά το κριτήριο αστοχίας (von mises stress)



**Εικόνα 4.4.10:** Κατανομή ισοδύναμης τάσης σε τομή στον άξονα από την μεριά του συμπιεστή κατά το κριτήριο αστοχίας (von mises stress)

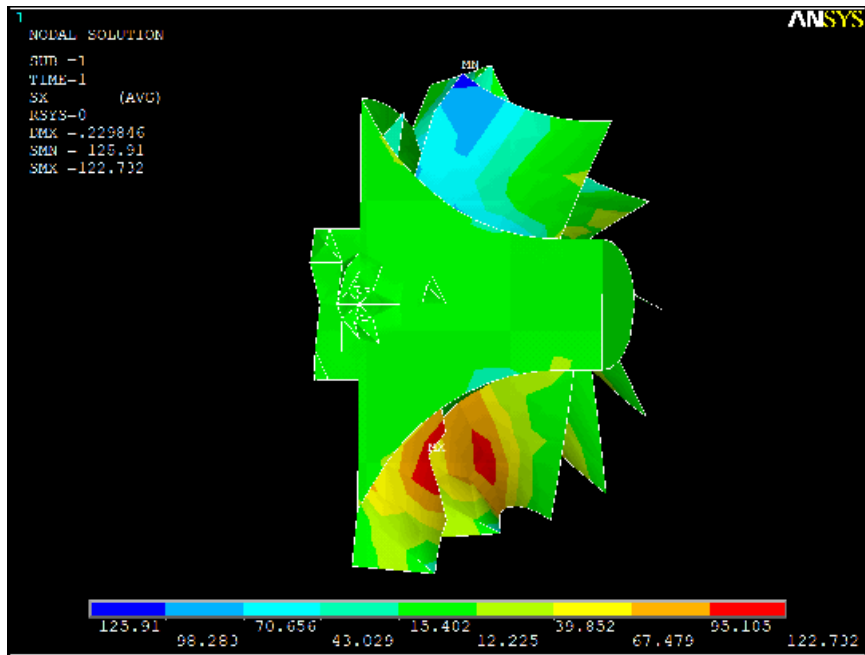
Οι κατανομές των ορθών καμπτικών τάσεων  $\sigma_{xx}$ , του στροβιλοσυμπιεστή παρουσιάζονται στην εικόνα 4.4.11, με την μέγιστη εφελκυστική τάση 123.298 N/mm<sup>2</sup> να εμφανίζεται στο μέσο της επιφάνειας στο περύγιο του στροβίλου. Στο σημείο

αυτό σε πραγματικές συνθήκες, έχουμε την μέγιστη χρονική παραμονή του ρευστού, ουσιαστικά μια αποθήκευση ενέργειας, λόγω γεωμετρίας του πτερυγίου. Στο πίσω μέρος του πτερυγίου, εμφανίζεται θλιπτική τάση ίση με  $94.449 \text{ N/mm}^2$ .



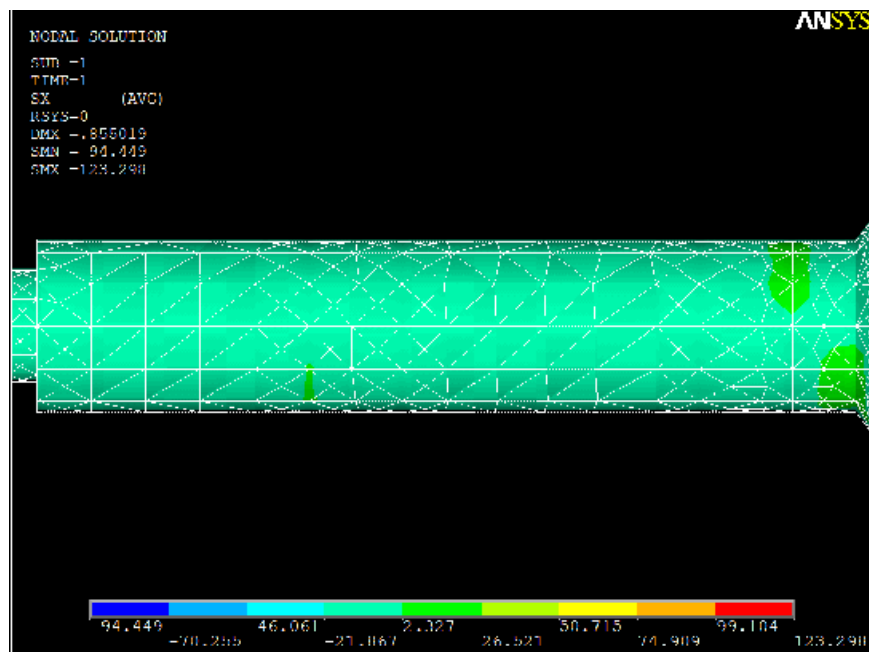
**Εικόνα 4.4.11:** Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων  $\sigma_{xx}$  στον στροβιλοσυμπιεστή

Στην εικόνα 4.4.12, μπορούμε να διακρίνουμε πολύ καλύτερα τις εφελκυστικές και θλιπτικές αναπτυσσόμενες τάσεις που εμφανίζονται στα πτερύγια του στροβίλου. Μετά από την τομή που έγινε στον στρόβιλο παρατηρούμε ότι η εφελκυστική και η θλιπτική φόρτιση που ασκείται στο πτερύγιο είναι αρκετά όμοιες, με την θλιπτική ελαφρώς μεγαλύτερη. Το πτερύγιο δέχεται μέγιστη παραμόρφωση  $0.229846 \text{ mm}$ .



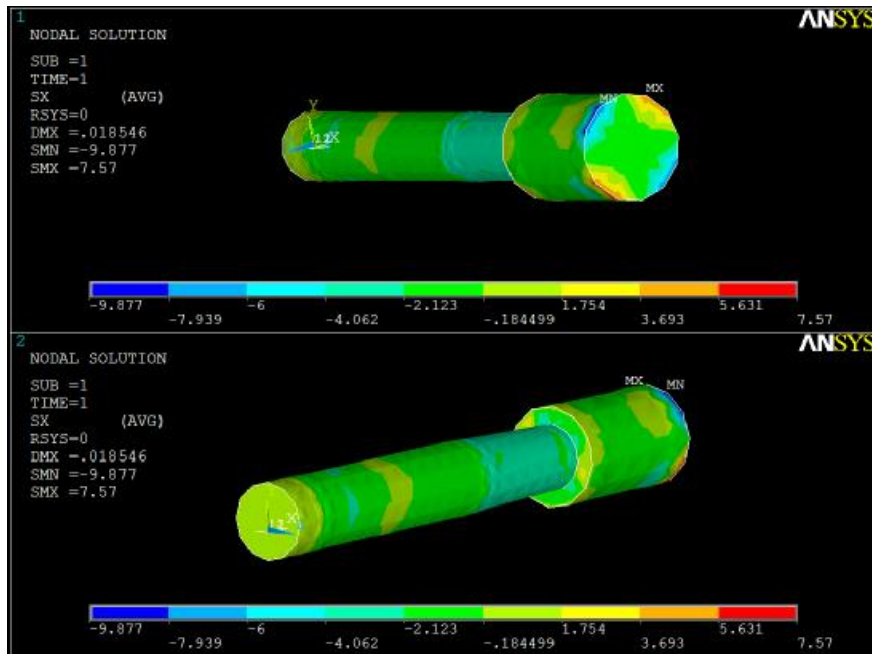
**Εικόνα 4.4.12:** Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων  $\sigma_{xx}$  στα πτερύγια του στροβίλου σε τομή

Ορθές τάσεις, λόγω κάμψης, που είναι αξιοσημείωτες να αναφερθούν, εμφανίζονται και στον άξονα, στις αλλαγές διατομής αλλά κυρίως στα σημεία πριν την αρχή της έδρασης, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4.13, στην μεγέθυνση του άξονα.



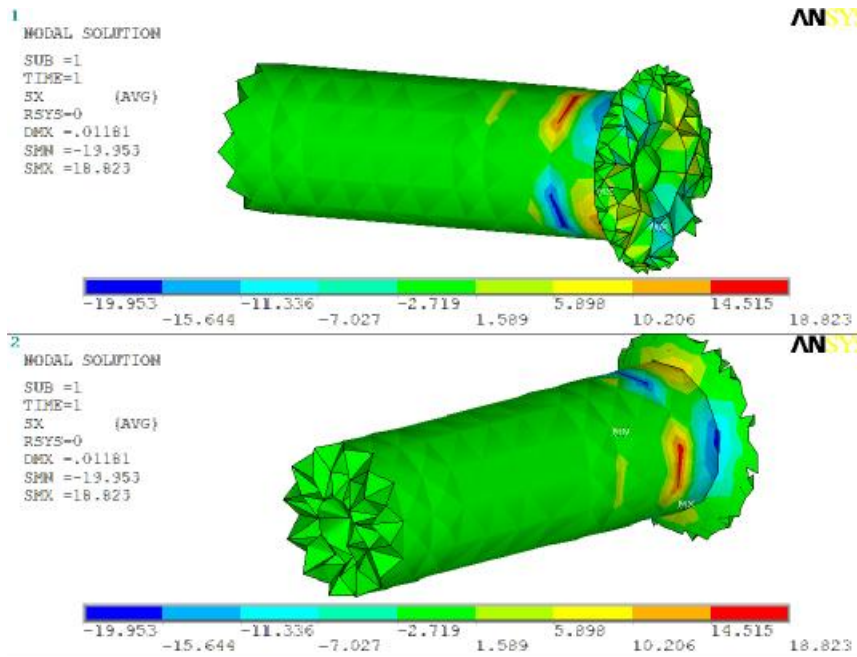
**Εικόνα 4.4.13:** Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων  $\sigma_{xx}$  στα σημεία έδρασης

Στην εικόνα 4.4.14 διαπιστώνουμε ότι τα θλιπτικά φορτία που δέχεται ο άξονας, από την μεριά του συμπιεστή, κοντά στο σημείο έδρασης είναι μεγαλύτερα από τα εφελκυστικά (εφελκυστικός  $7.57 \text{ N/mm}^2$  και θλίψη  $9.877 \text{ N/mm}^2$ ).



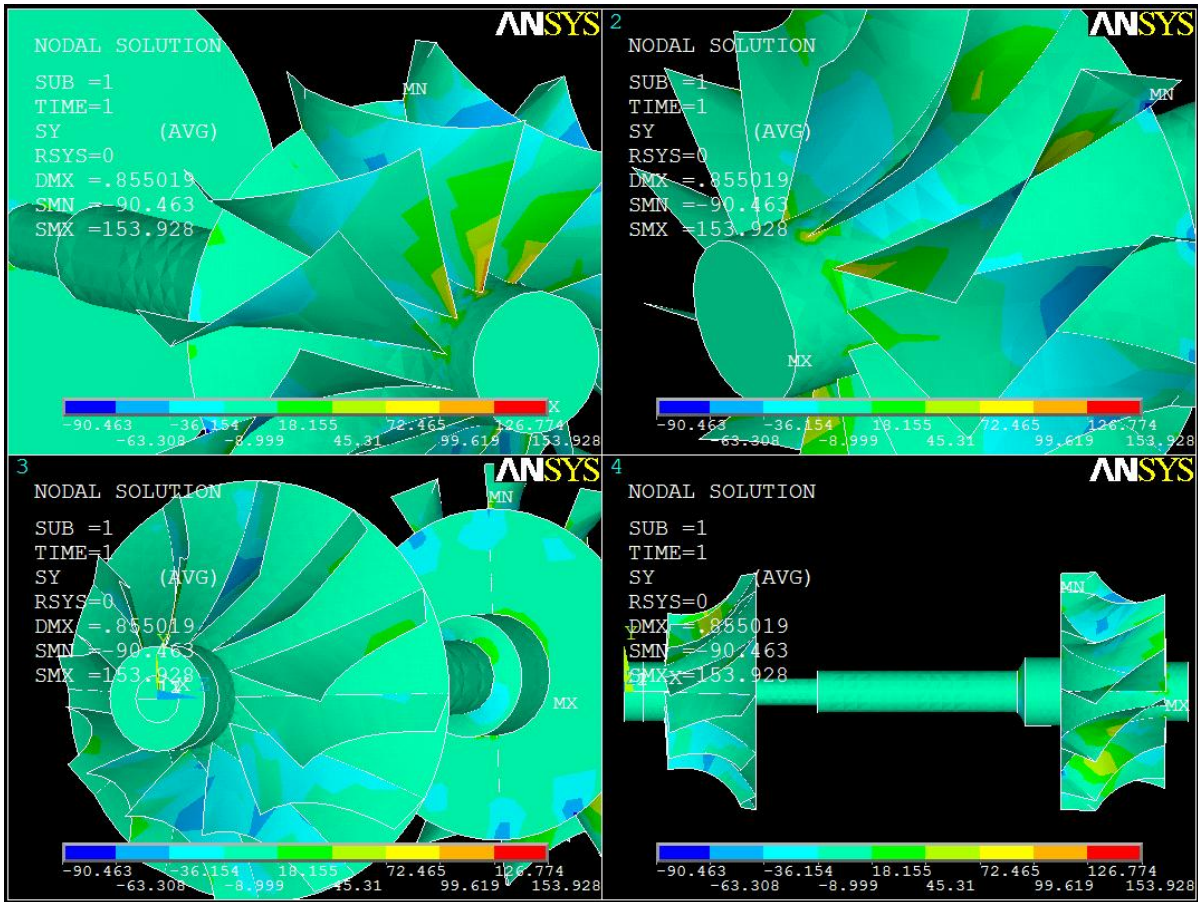
**Εικόνα 4.4.14:** Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων  $\sigma_{xx}$  στην αλλαγή διατομής του άξονα και πριν ξεκινήσει η έδραση (compressor side)

Στην εικόνα 4.4.15, φαίνονται οι καμπτικές ορθές τάσεις στη μεριά του στροβίλου πριν ξεκινήσει η έδραση και στην αλλαγή διατομής. Η μέγιστη εφελκυστική και θλιπτική τάση που αναπτύσσεται στα εκάστοτε σημεία είναι  $18.823 \text{ N/mm}^2$  και  $19.953 \text{ N/mm}^2$  αντίστοιχα.



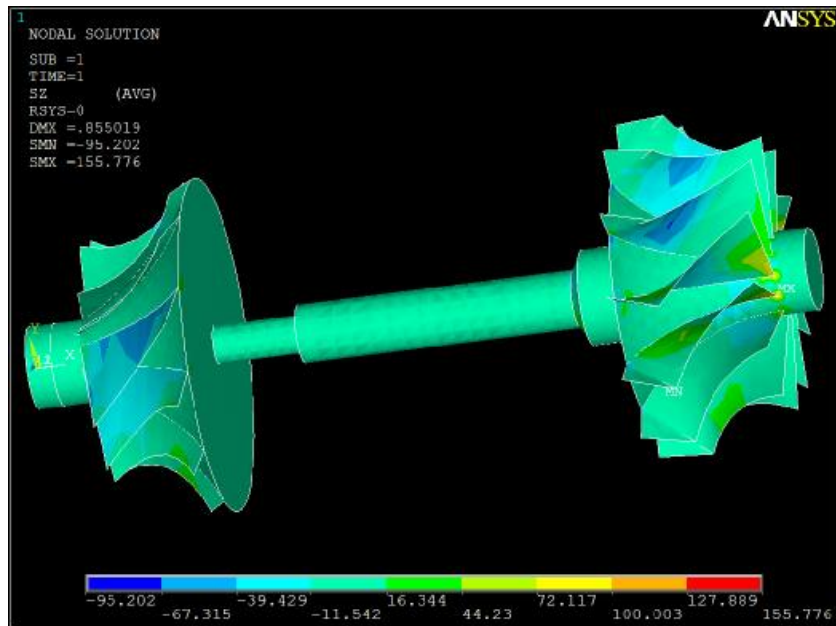
**Εικόνα 4.4.15:** Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων  $\sigma_{xx}$  στην αλλαγή διατομής του άξονα και πριν ξεκινήσει η έδραση (turbine side)

Οι κατανομές των ορθών τάσεων στη διεύθυνση του  $y$  άξονα,  $\sigma_{yy}$ , παρουσιάζονται στις εικόνες 4.4.16. Διακρίνουμε την μέγιστη αναπτυσσόμενη εφελκυστική τάση στα περύγια του στροβίλου  $153.923 \text{ N/mm}^2$ . Η τάση αυτή υπερβαίνει την τάση που μας υποδεικνύει το κριτήριο αστοχίας κατά  $3.250 \text{ N/mm}^2$  και αυτό σημαίνει ότι το σημείο αυτό είναι δυσμενές και χρήζει ενίσχυση. Παρακάτω θα δούμε τι ακολουθείται από τους σχεδιαστές για να αποτρέψουν την θραύση του πτερυγίου, ενισχύοντας το.

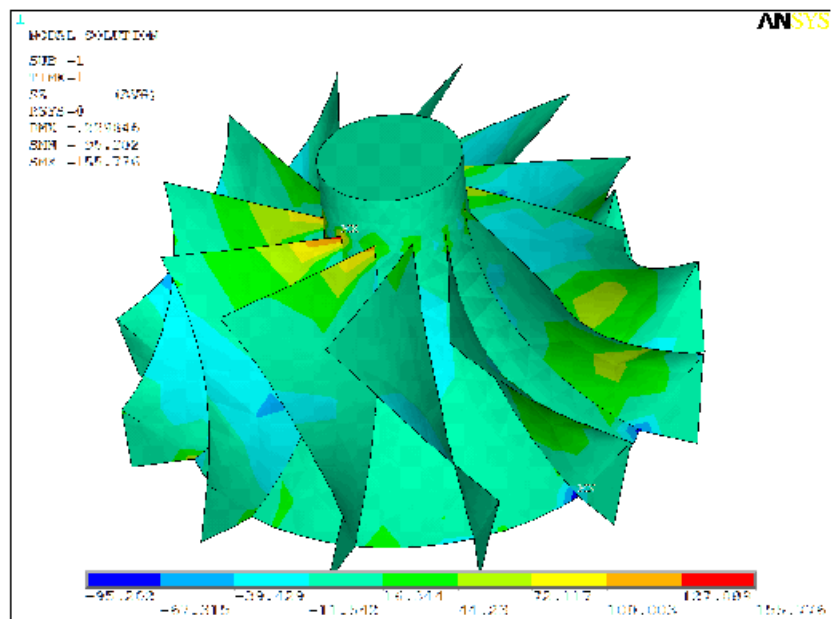


**Εικόνα 4.4.16:** Κατανομή ορθών τάσεων  $\sigma_{yy}$

Στις εικόνες 4.4.17, και 4.4.18, παρουσιάζονται οι κατανομές των ορθών τάσεων στη συνιστώσα του z άξονα,  $\sigma_{zz}$ , με την μέγιστη εφελκυστική στα 155.776 N/mm<sup>2</sup> και θλιπτική στα 95.202 N/mm<sup>2</sup> που αναπτύσσονται στα πτερύγια είναι παρόμοιες με αυτές του άξονα y, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4.16.



**Εικόνα 4.4.17:** Κατανομή ορθών τάσεων  $\sigma_{zz}$  στον στροβιλοσυμπιεστή

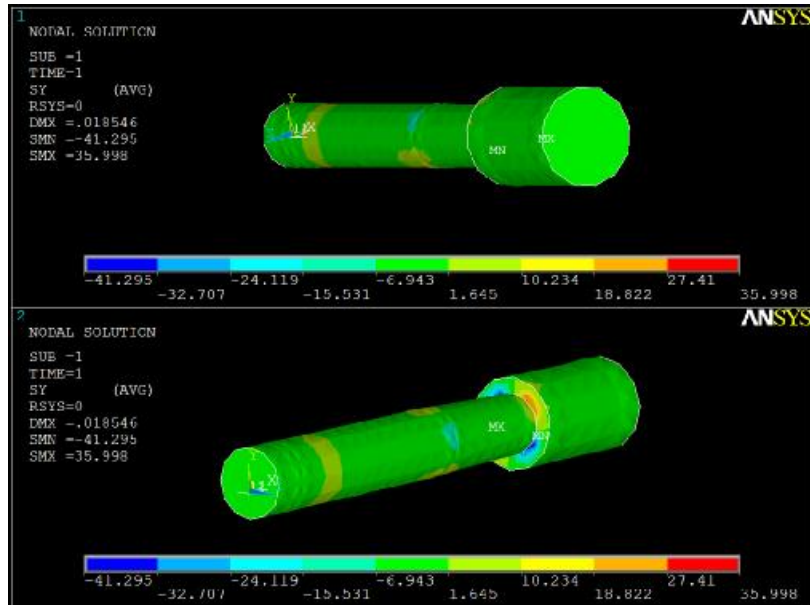


**Εικόνα 4.4.18:** Κατανομή ορθών τάσεων  $\sigma_{zz}$  στον στρόβιλο

Στην τομή του άξονα, εικόνα 4.4.19, παρουσιάζονται οι κατανομές ορθών τάσεων στην  $y$  διεύθυνση για την άμεση σύγκριση με τις καμπτικές ορθές τάσεις στη συνιστώσα του  $x$ . Είναι φανερό, ότι οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις εμφανίζονται στην αλλαγή διατομής και όχι στο σημείο έδρασης. Επίσης διακρίνονται και οι τάσεις στα σημεία που συνδέεται ο συμπιεστής. Η μέγιστη τάση είναι θλιπτική και είναι ίση

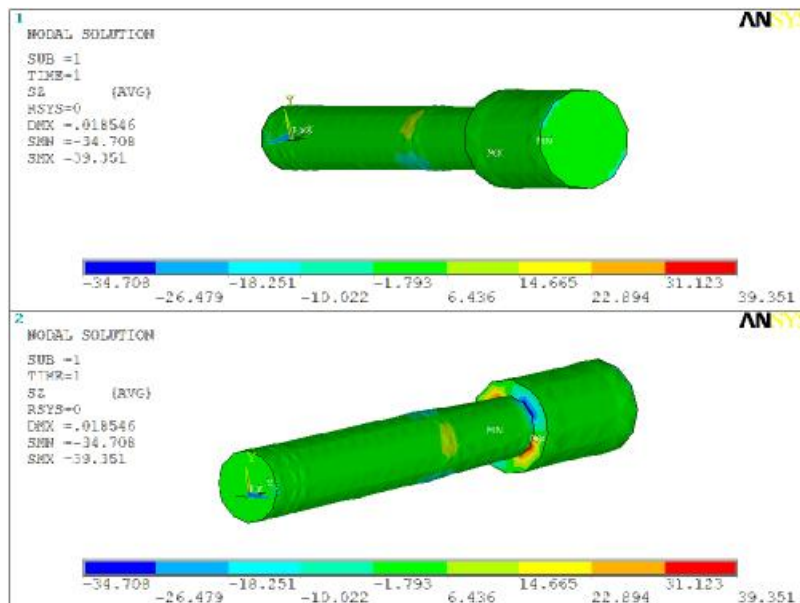


με  $41.295 \text{ N/mm}^2$ . Η παραμόρφωση που δέχεται το συγκεκριμένο κομμάτι του άξονα είναι  $0.018546 \text{ mm}$ .



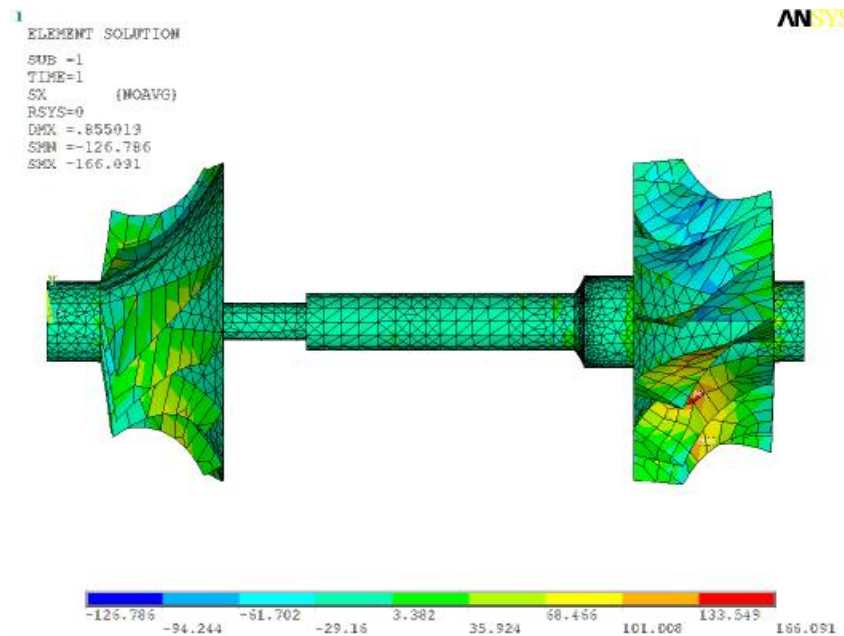
**Εικόνα 4.4.19:** Κατανομή ορθών τάσεων  $\sigma_{yy}$  στον άξονα σε τομή

Στην εικόνα 4.4.20, παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων στην z διεύθυνση οι οποίες είναι παραπλήσιες με αυτές της y διεύθυνσης, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα 4.4.19.



**Εικόνα 4.4.20:** Κατανομή ορθών τάσεων  $\sigma_{zz}$  στον άξονα σε τομή

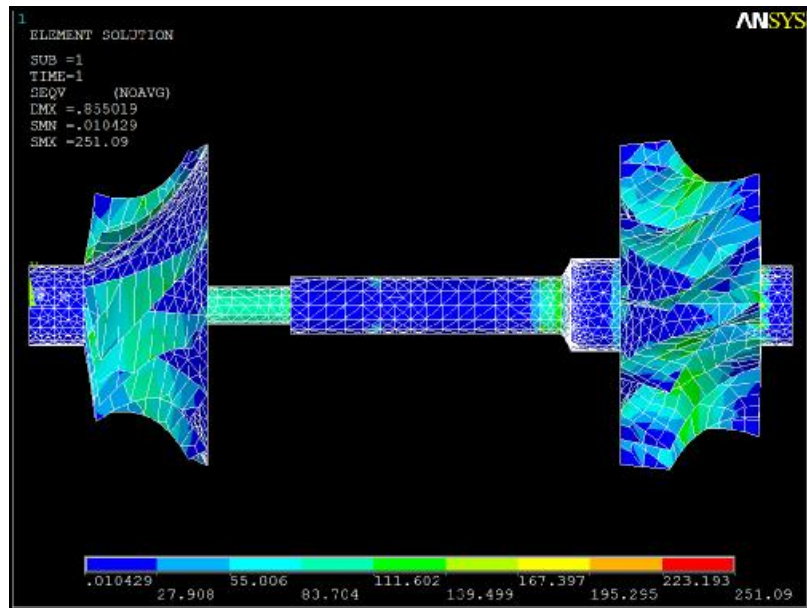
Για να ελέγξουμε αν η καμπτική τάση στον στροβιλοσυμπιεστή είναι σχετικά ασήμαντη, συγκρίναμε τις λύσεις των στοιχείων (element solution)  $\sigma_{xx}$ , εικόνα 4.4.21 με την στοιχειώδη Von Mises, εικόνα 4.4.22.



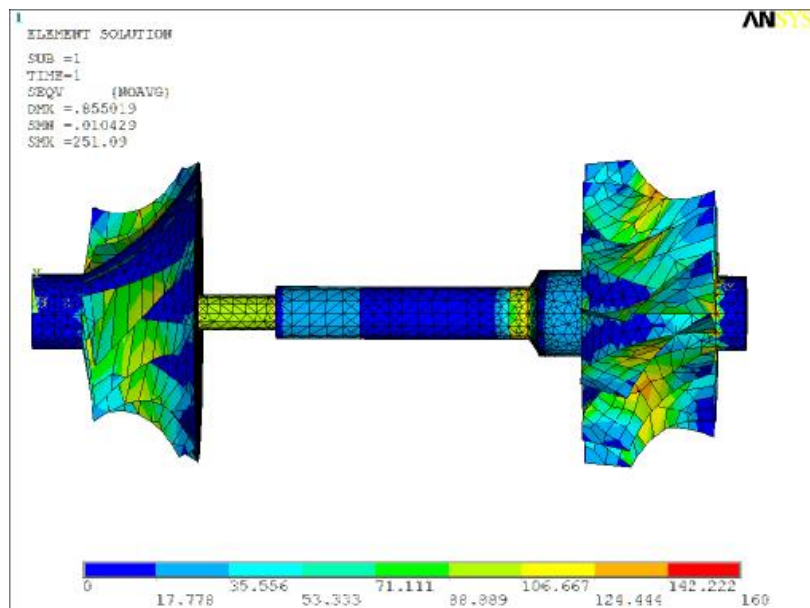
**Εικόνα 4.4.21:** Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων  $\sigma_{xx}$  στον στροβιλοσυμπιεστή

Στην εικόνα 4.4.23, πραγματοποιήθηκε αλλαγή του εύρους των τάσεων στην λύση Von Mises (κριτήριο αστοχίας) και διακρίνονται ξεκάθαρα οι μέγιστες τάσεις και τα σημεία αστοχίας του στροβιλοσυμπιεστή, τα οποία βρίσκονται κυρίως στα πτερύγια του στροβίλου.

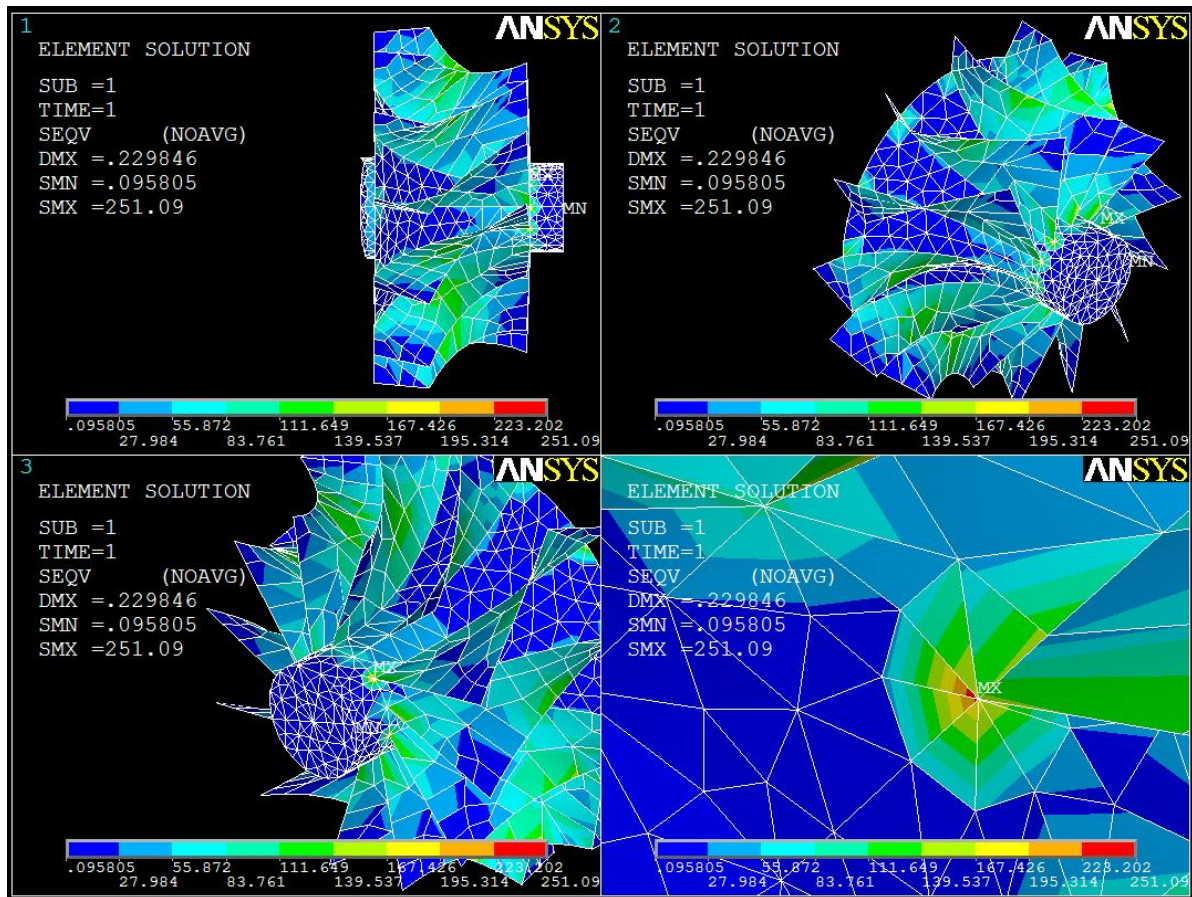
Συγκρίνοντας τις ορθές καμπτικές τάσεις με την στοιχειώδη Von Mises, διαπιστώνεται πως η καμπτική τάση στον x άξονα είναι σχετικά ασήμαντη και δεν επιφέρει αστοχία στο μοντέλο.



**Εικόνα 4.4.22:** Κατανομή ισοδύναμης τάσης στα στοιχεία (elements) κατά το κριτήριο αστοχίας(von mises stress)



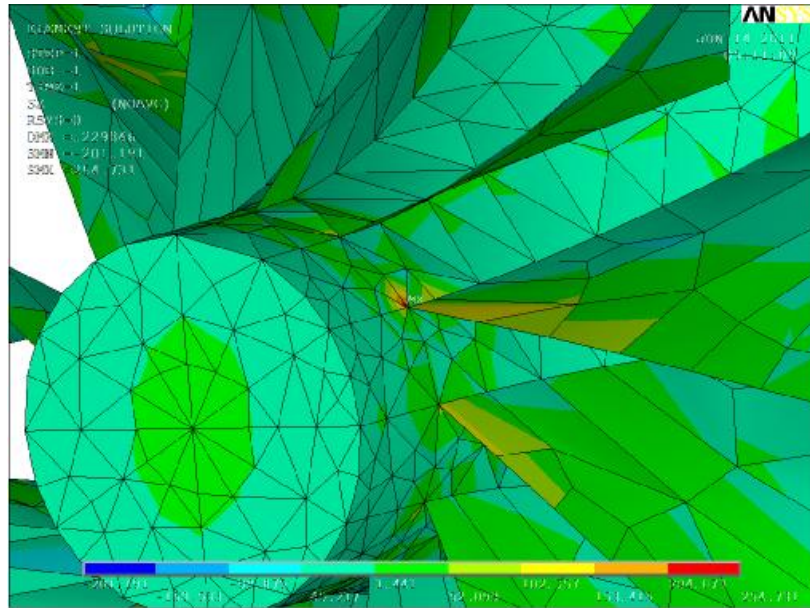
**Εικόνα 4.4.23:** Κατανομή ισοδύναμης τάσης στα στοιχεία (elements) κατά το κριτήριο αστοχίας(von mises stress) με αλλαγή εύρος τάσεων



**Εικόνα 4.4.24:** Κατανομή ισοδύναμης τάσης στα στοιχεία (elements) κατά το κριτήριο αστοχίας (von mises stress)

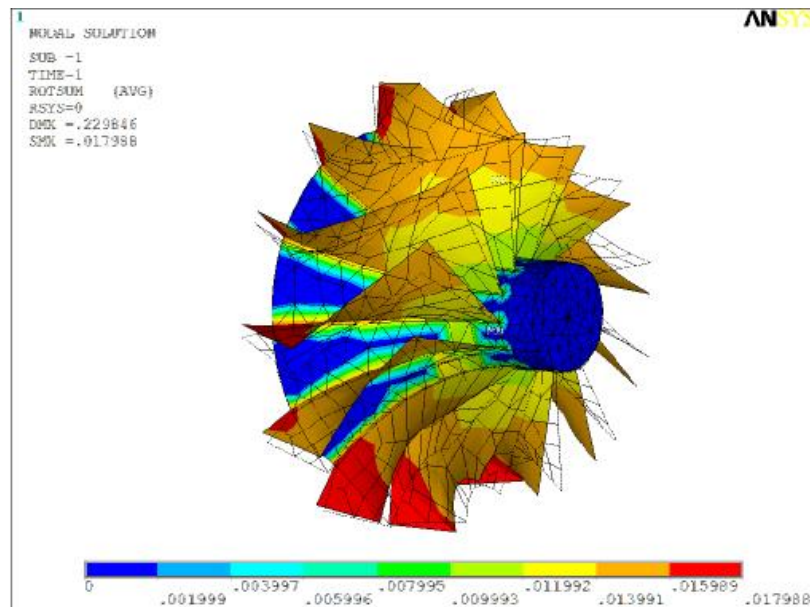
Η μέγιστη τάση βάσει του κριτηρίου αστοχίας, εμφανίζεται στην ακμή του πτερυγίου, κοντά στο παξιμάδι που είναι της τάξεως των  $251.09 \text{ N/mm}^2$ , όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4.24. Αυτό δικαιολογεί την επιλογή των σχεδιαστών στροβιλοσυμπιεστή, για την ενίσχυση του συγκεκριμένο σημείου, στην γεωμετρία του πτερυγίου.

Στην εικόνα 4.4.25 φαίνεται σε μεγέθυνση το σημείο που αναπτύσσεται η μέγιστη εφελκυστική τάση, στον z άξονα,  $\sigma_{\max}^{\text{εφ}} = 254.731 \text{ N/mm}^2$  και οδηγεί το πτερόγιο σε αστοχία.



**Εικόνα 4.4.25:** Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση που οδηγεί σε αστοχία ως προς τον z άξονα

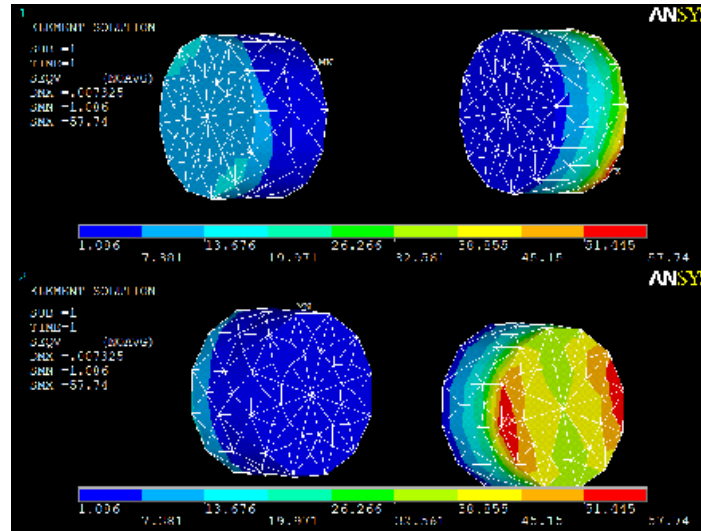
Στην εικόνα 4.4.26 φαίνεται ότι η μέγιστη μετατόπιση των πτερυγίων είναι 0.229846 rad.



**Εικόνα 4.4.26:** Μετατόπιση πτερυγίων στροβίλου λόγω περιστροφής

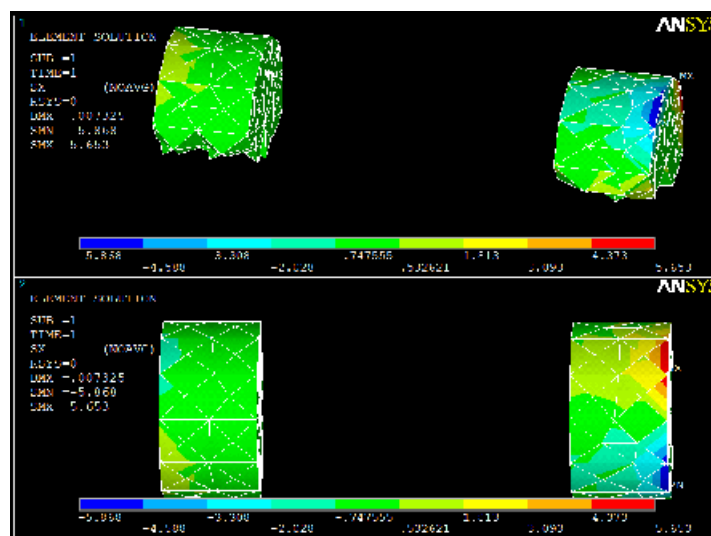
Σημαντικό παράγοντα παίζουν και τα σημεία έδρασης του άξονα και είναι αναγκαίο να επεκταθούμε και στην δικιά τους στατική επάρκεια και συμπεριφορά. Έτσι παρατηρώντας τα από δύο προσανατολισμούς βάσει το κριτήριο αστοχίας,

εικόνα 4.4.27, μπορούμε να πούμε με ακρίβεια ότι η ανατολική έδρα, που βρίσκεται κοντά στον στρόβιλο καταπονείται περισσότερο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στρόβιλος έχει το μεγαλύτερο βάρος της όλης κατασκευής.



**Εικόνα 4.4.27:** Κατανομή ισοδύναμης τάσης στα στοιχεία (elements) στα σημεία έδρασης κατά το κριτήριο αστοχίας (von mises stress)

Στην εικόνα 4.4.28, διακρίνουμε, στα δύο σημεία που εδράζεται ο άξονας σε τομή, την ισοδύναμη τάση βάσει του κριτηρίου αστοχίας Von Mises. Στην ανατολική έδραση, η εφελκυστική τάση είναι των  $5.653 \text{ N/mm}^2$  και η θλιπτική  $5.868 \text{ N/mm}^2$ . Οι τιμές αυτές των τάσεων είναι πολύ μικρές και δεν δείχνουν να επηρεάζουν την στατική επάρκεια των σημείων έδρασης.

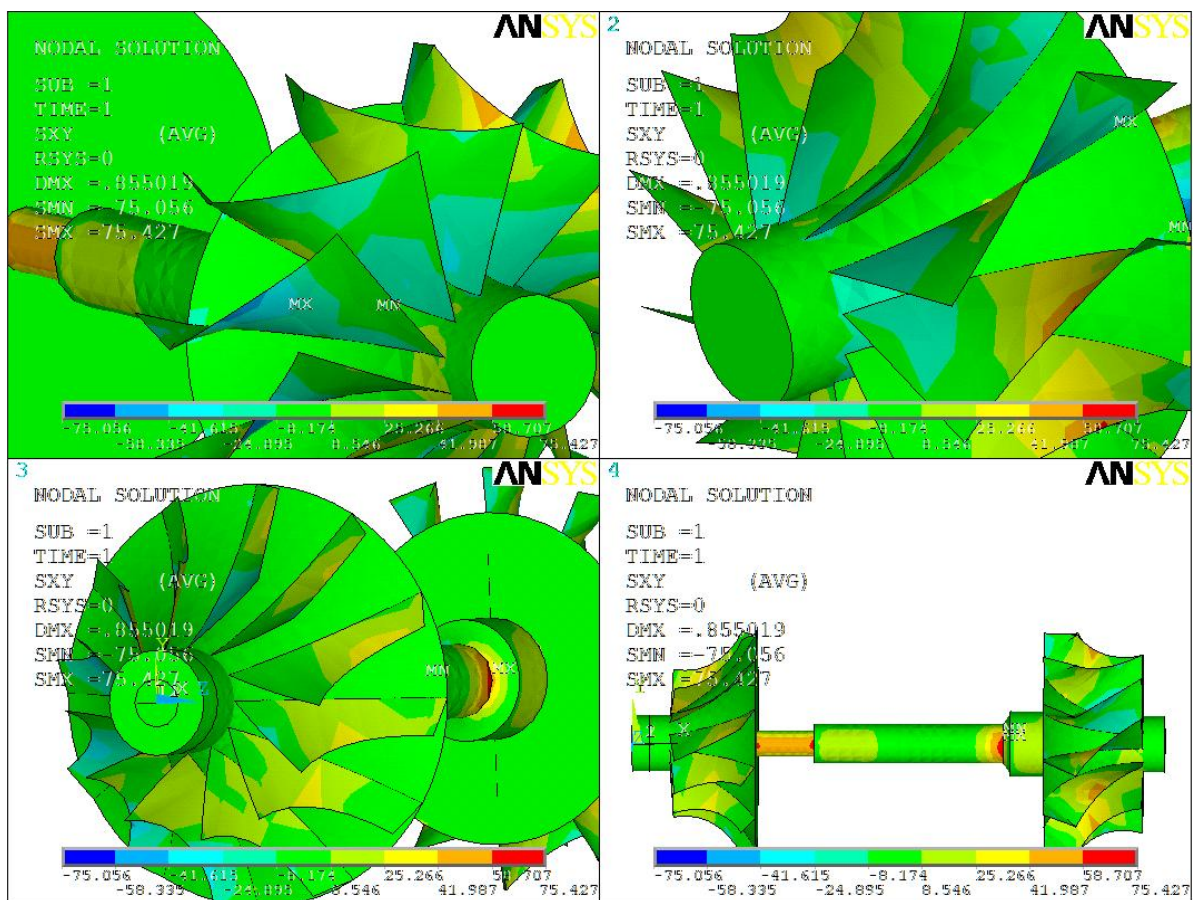


**Εικόνα 4.4.28:** Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων  $\sigma_{xx}$  στα σημεία έδρασης

## B. ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

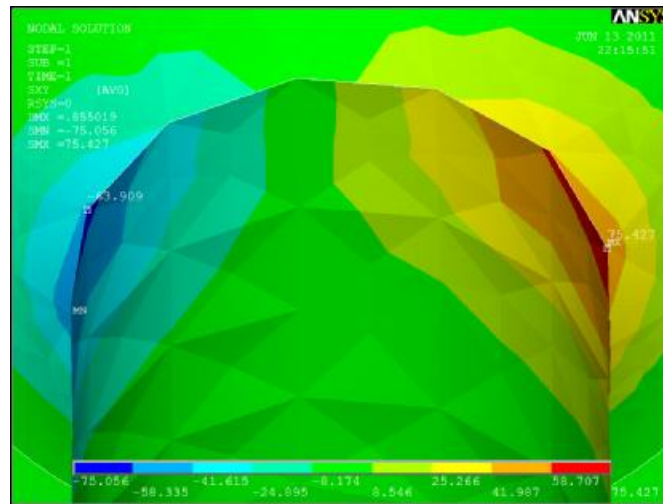
Η κατασκευή δέχεται διατμητικές τάσεις σε όλο το μήκος της, οι οποίες μεγιστοποιούνται κυρίως στην αλλαγή διατομής που βρίσκεται κοντά στον στρόβιλο.

Στις εικόνες 4.4.29 παρουσιάζονται οι διατμητικές τάσεις  $\tau_{xy}$  που αναπτύσσονται. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη διατμητική τάση αναπτύσσεται στην αλλαγή διατομής του άξονα κοντά στον στρόβιλο και είναι ίση με  $75.427 \text{ N/mm}^2$ .



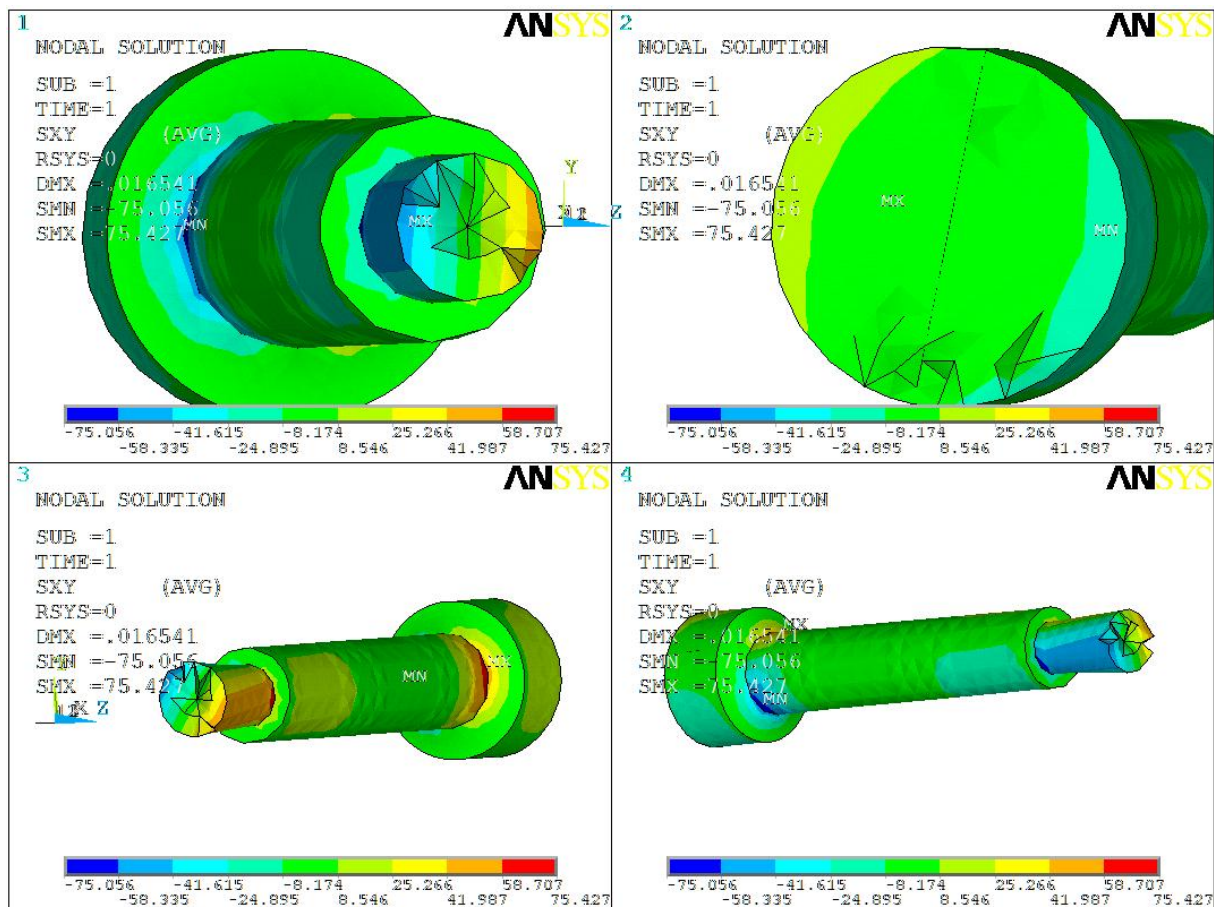
Εικόνα 4.4.29: Διατμητικές τάσεις  $\tau_{xy}$

Στην εικόνα 4.4.30, σε μεγέθυνση το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη διατμητική τάση.



Εικόνα 4.4.30: Μέγιστες διατμητικές τάσεις  $\tau_{xy}$

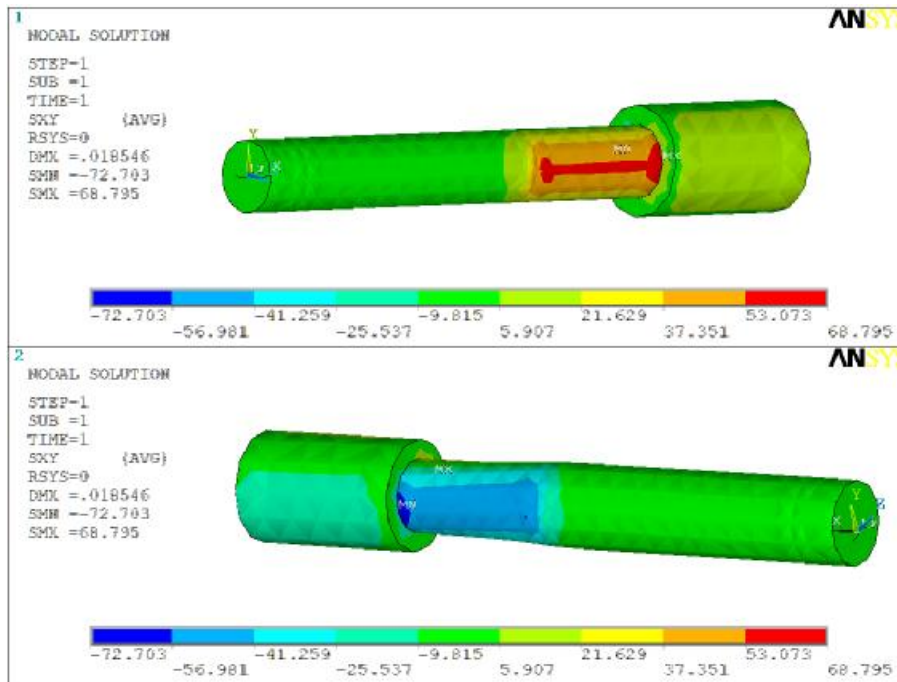
Στην εικόνα 4.4.31 διακρίνονται οι διατμητικές τάσεις  $\tau_{xy}$  που εμφανίζονται στον άξονα σε τομή. Από την τριγωνική κατανομή των διατμητικών τάσεων φαίνεται ότι ο άξονας καταπονείται σε στρέψη.



Εικόνα 4.4.31: Μέγιστες διατμητικές τάσεις  $\tau_{xy}$  στον άξονα

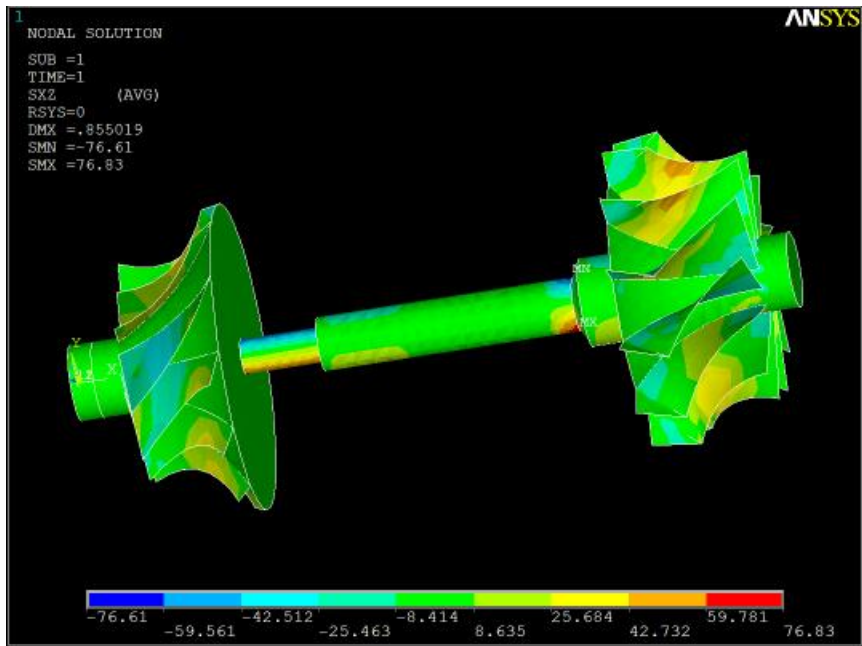


Στην εικόνα 4.4.32, φαίνεται σε τομή ο άξονας, αφού έχει αφαιρεθεί αλλαγή διατομής κοντά στον στρόβιλο. Στην αλλαγή διατομής του άξονα που συνδέει τον συμπιεστή παρατηρούμε ότι η θετική διατμητική τάση ισούται με  $68.795 \text{ N/mm}^2$  και η αρνητική  $72.703 \text{ N/mm}^2$ .

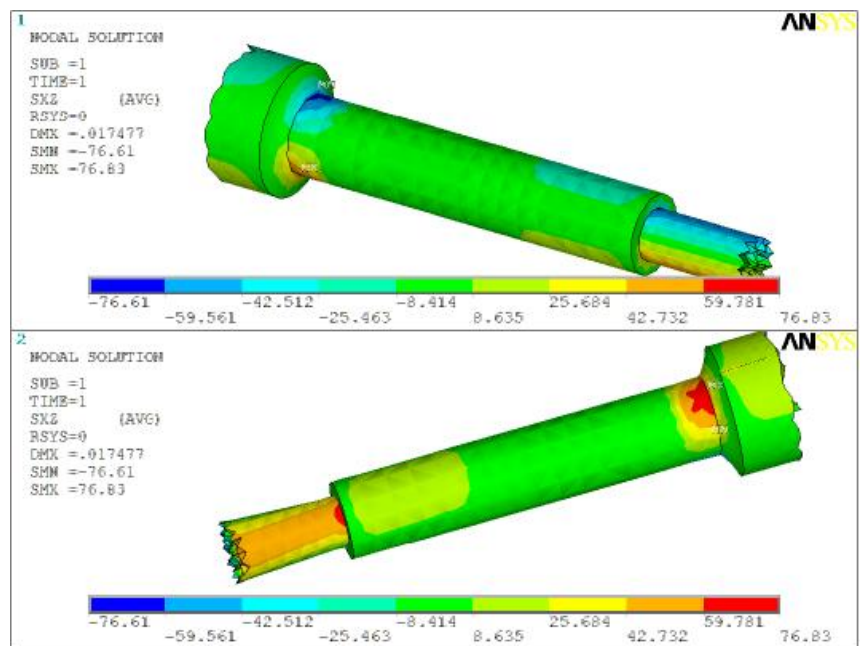


**Εικόνα 4.4.32:** Μέγιστες διατμητικές τάσεις  $\tau_{xy}$  στον άξονα από δυτική πλευρά (compressor side)

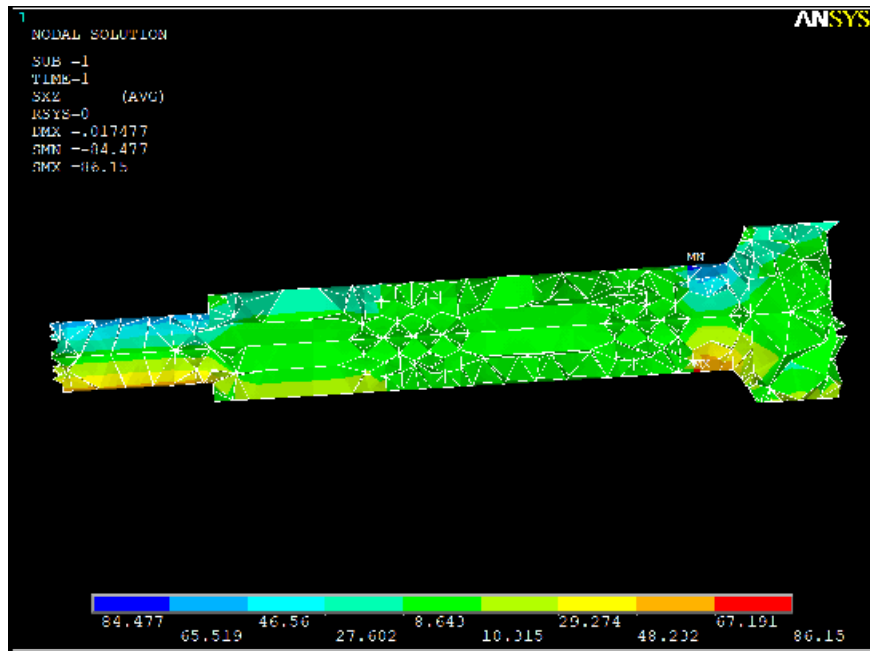
Παρόμοια, στις εικόνες 4.4.33 έως 4.4.35 και 4.4.36 έως 4.4.40 παρουσιάζονται οι διατμητικές τάσεις  $\tau_{xz}$  και  $\tau_{yz}$  αντίστοιχα που αναπτύσσονται στον στροβιλοσυμπιεστή.



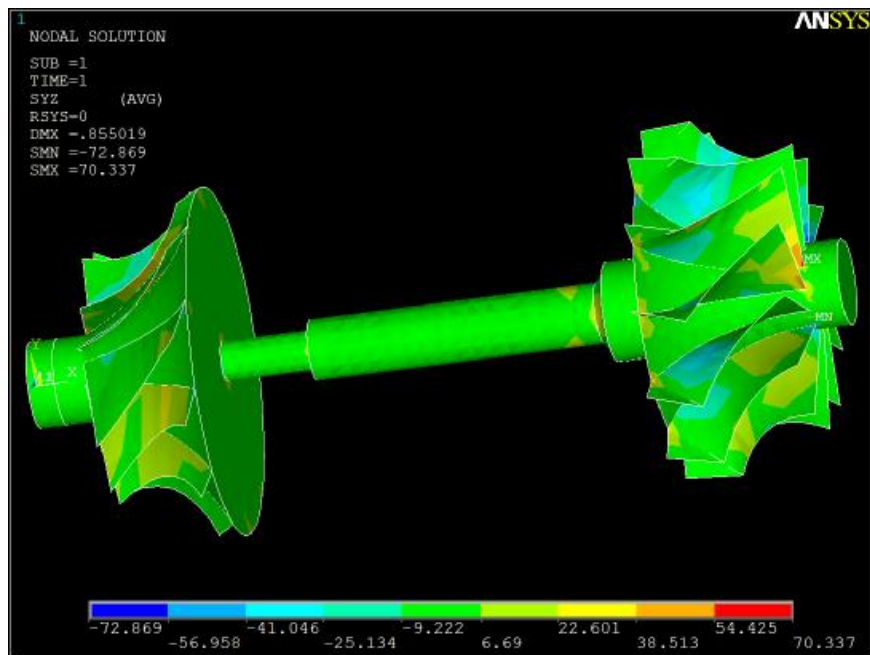
Εικόνα 4.4.33: Διατμητικές τάσεις  $\tau_{xz}$  στον στροβιλοσυμπιεστή



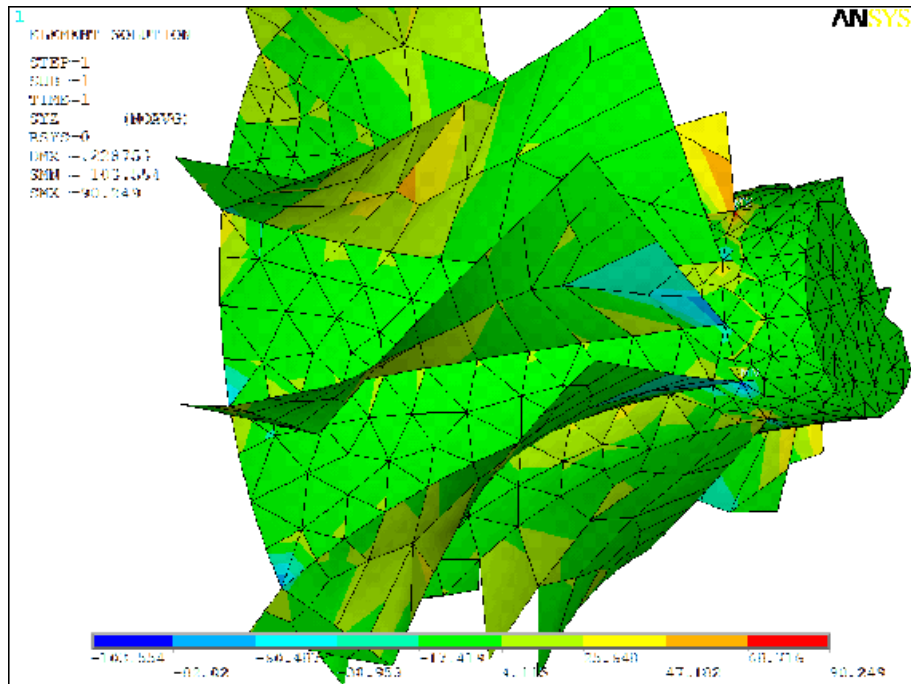
Εικόνα 4.4.34: Μέγιστες διατμητικές τάσεις  $\tau_{xz}$  στον άξονα



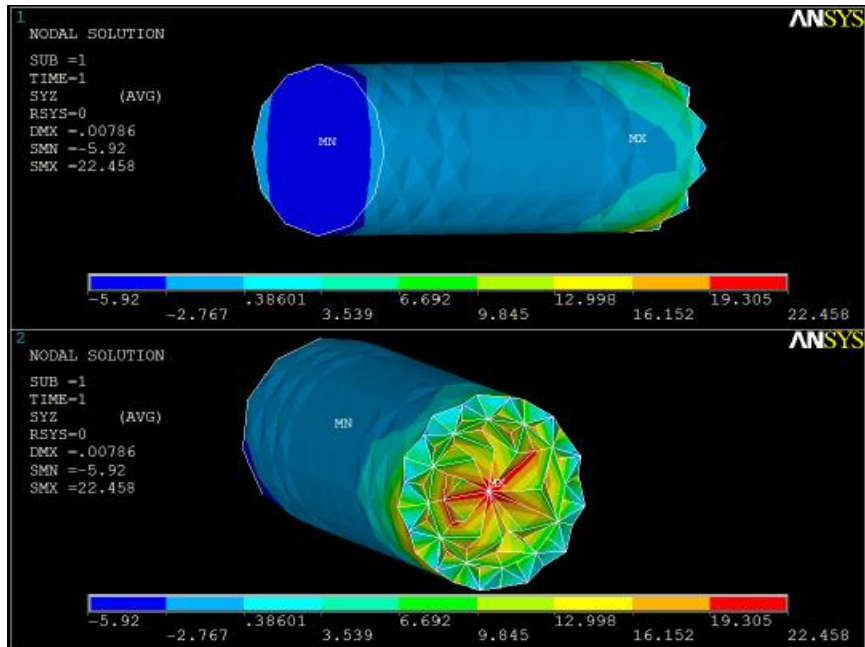
Εικόνα 4.4.35: Διατμητικές τάσεις  $\tau_{xz}$  στον άξονα σε τομή



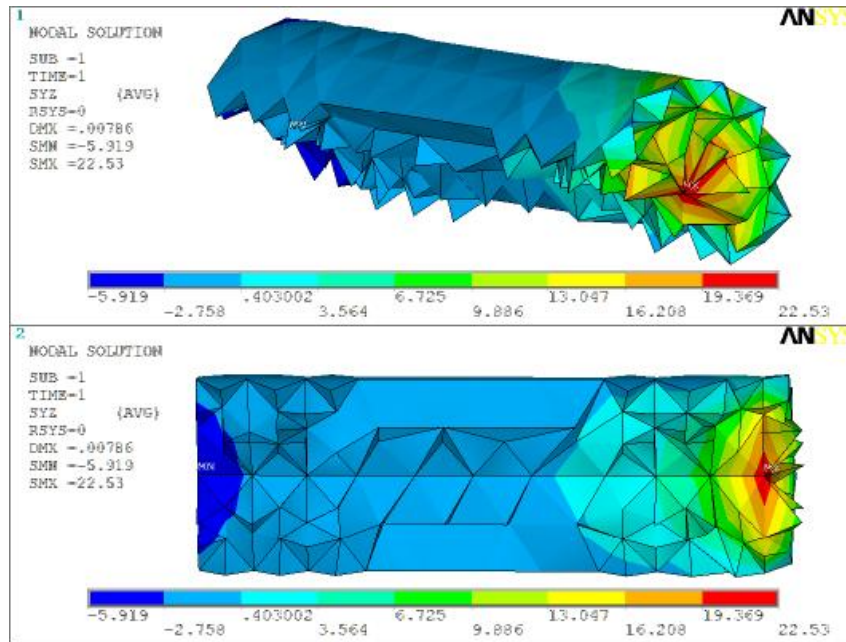
Εικόνα 4.4.36: Διατμητικές τάσεις  $\tau_{yz}$  στον στροβιλοσυμπιεστή



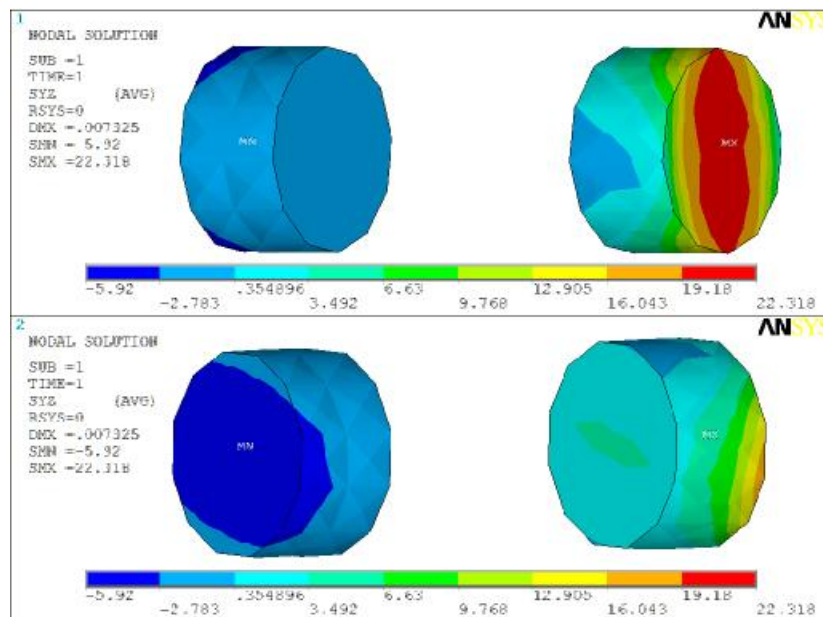
Εικόνα 4.4.37: Μέγιστες διατμητικές τάσεις  $\tau_{yz}$  στα πτερύγια του στροβίλου



Εικόνα 4.4.38: Διατμητικές τάσεις  $\tau_{yz}$  στα σημεία έδρασης



Εικόνα 4.4.39: Διαμητικές τάσεις  $\tau_{yz}$  στα σημεία έδρασης σε τομή στον x άξονα



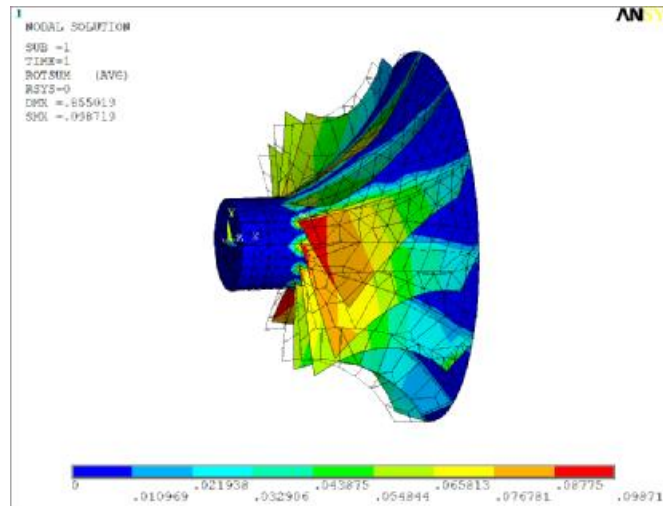
Εικόνα 4.4.40: Διαμητικές τάσεις  $\tau_{yz}$  στα σημεία έδρασης

#### 4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στο πίνακα 4.7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μέγιστες μετατοπίσεις και αναπτυσσόμενες τάσεις των δυσμενών σημείων σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7:** Συνοπτικά αποτελέσματα τάσεων και μετατοπίσεων από την στατική ανάλυση

	ΠΤΕΡΥΓΙΑ		ΑΞΟΝΑΣ	
	Στρόβιλος	Συμπιεστής	Δυτική πλευρά	Ανατολική πλευρά
Μετατοπίσεις από περιστροφή (rad)	0.017988	0.098719	-	-
Μετατοπίσεις από έδραση (rad)	-	-	0.018546	0.013842
Αστοχία Υλικού (N/mm <sup>2</sup> )	150.773	148.573	131.408	136.484
Καμπτικές τάσεις (N/mm <sup>2</sup> )	122.732	72.283	-9.877	-19.953
Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις (N/mm <sup>2</sup> )	155.776	126.779	39.351	41.395
Μέγιστες θλιπτικές τάσεις (N/mm <sup>2</sup> )	95.202	75.955	41.295	40.642
Μέγιστες Διατμητικές τάσεις (N/mm <sup>2</sup> )	-103.554	-65.400	-84.477	86.150



**Εικόνα 4.5.1:** Μετατόπιση πτερυγίων συμπιεστή λόγω περιστροφής σε λύση στοιχείων

Στην εικόνα 4.5.1 φαίνεται η παραμόρφωση των πτερυγίων του συμπιεστή, 0.855019 mm, σε σχέση την αρχική κατάσταση τους, η οποία είναι και η μεγαλύτερη της όλης κατασκευής. Τα αποτελέσματα, της περιστροφικής μετατόπισης στον συμπιεστή είναι της τάξεως των 0.098719 rad και μας επιβεβαιώνουν την αδυναμία των πτερυγίων του συμπιεστή στις υψηλές πιέσεις, κάτι που αποδεικνύεται από την παρακάτω εικόνα 4.5.2, με παραδείγματα κατεστραμμένων πτερυγίων συμπιεστή.



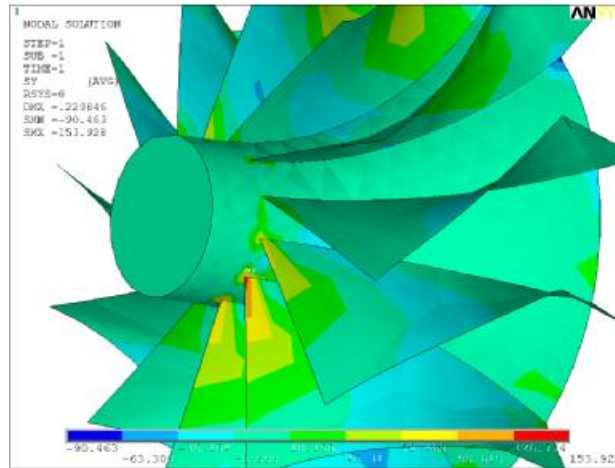
**a**



**b**

**Εικόνα 4.5.2:** Κατεστραμμένα πτερύγια συμπιεστή

Οι κατανομές των ορθών τάσεων στη διεύθυνση του  $y$  άξονα,  $\sigma_{yy}$ , και του  $z$  άξονα  $\sigma_{zz}$  εμφανίζουν την μέγιστη αναπτυσσόμενη εφελκυστική τάση στα πτερύγια του στροβίλου  $153.923 \text{ N/mm}^2$  και  $155.776 \text{ N/mm}^2$  αντίστοιχα. Η τάση αυτή υπερβαίνει την τάση που μας υποδεικνύει το κριτήριο αστοχίας κατά  $3.250 \text{ N/mm}^2$  και  $5.003 \text{ N/mm}^2$  για  $y$  και  $z$  αντίστοιχα και εμφανίζεται στην ακμή του πτερυγίου, κοντά στο παξιμάδι όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5.3.



**Εικόνα 4.5.3:** στρόβιλος με μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στα πτερύγια

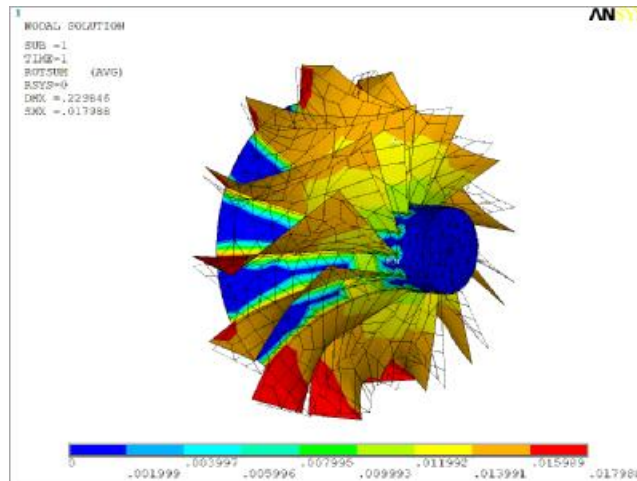
Αυτό σημαίνει ότι το σημείο αυτό είναι δυσμενές και δικαιολογεί την επιλογή των σχεδιαστών στροβιλοσυμπιεστή, για την ενίσχυση του συγκεκριμένο σημείου, στην γεωμετρία του πτερυγίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5.4.

Στην εικόνα 4.5.4, διακρίνεται ένας στρόβιλος που έχουν καταστραφεί τα πτερύγια του, πιθανώς από σπηλαίωση Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα σημεία που είναι κατεστραμμένα τα πτερύγια παρατηρούνται οι μέγιστες μετατοπίσεις (εικόνα 4.5.5).





**Εικόνα 4.5.4:** στρόβιλος με κατεστραμμένα πτερύγια



**Εικόνα 4.5.5:** Μετατόπιση και παραμόρφωση πτερυγίων στρόβιλου λόγω περιστροφής

#### 4.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Με την ιδιομορφική ανάλυση μετατρέπουμε την απόκριση ενός πολυβάθμιου συστήματος σε "άθροισμα" αποκρίσεων μονοβάθμιων ταλαντωτών.

Η ιδιομορφική ανάλυση είναι βασικής σημασίας για την προσέγγιση της επίλυσης προβλήματος δυναμικής (μεταβλητής με το χρόνο) φόρτισης σε ένα σύστημα. Μας δίνει ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά για τις επιβαλλόμενες μετακινήσεις / παραμορφώσεις που θα προκύψουν στο σύστημα άρα και τις δυνάμεις / τάσεις που θα αναπτυχθούν.

Επομένως, οι ιδιομορφές δίδουν μια καλή εποπτεία στο μελετητή για την συμπεριφορά της κατασκευής. Επίσης, υπάρχει και η φυσική έννοια του να εφαρμόζεις στιγμιαία ένα κρουστικό φορτίο σε ποικίλα σημεία της κατασκευής και να παρακολουθείς τα χαρακτηριστικά των ταλαντώσεων π.χ. την μορφή της κατασκευής με τις ελάχιστες (στάσιμα σημεία) και μέγιστες παραμορφώσεις, αλλά και την συχνότητα.

Οι δυναμικές φορτίσεις σε ένα σύστημα μπορεί να είναι περιοδικές (πχ ένα αζυγοστάθμητο περιστρεφόμενο μηχάνημα, έλικα αεροπλάνου κτλ) και μη περιοδικές (πχ ωστικό κύμα πρόσκρουσης αυτοκινήτου σε κτήριο, σεισμός κτλ).

Στους πίνακες 4.8 και παρουσιάζονται οι 30 πρώτες ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές, αντίστοιχα της κατασκευής όπως προέκυψαν από την ανάλυση. Στον πίνακα 4.8 εκτός από τις ιδιοσυχνότητες δίνεται η περιγραφή της παραμόρφωσης που λαμβάνει μέρος στην εκάστοτε ιδιομορφή.

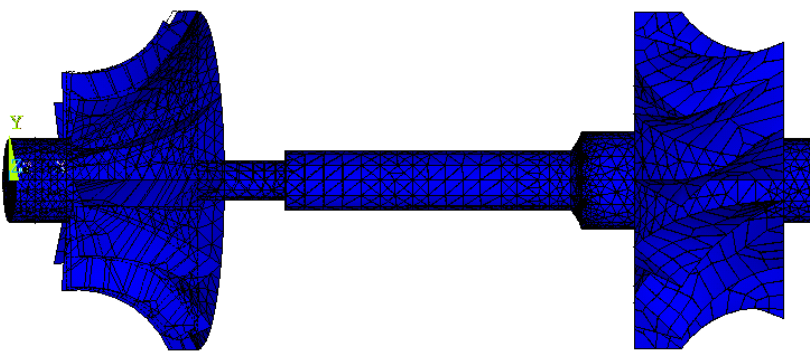
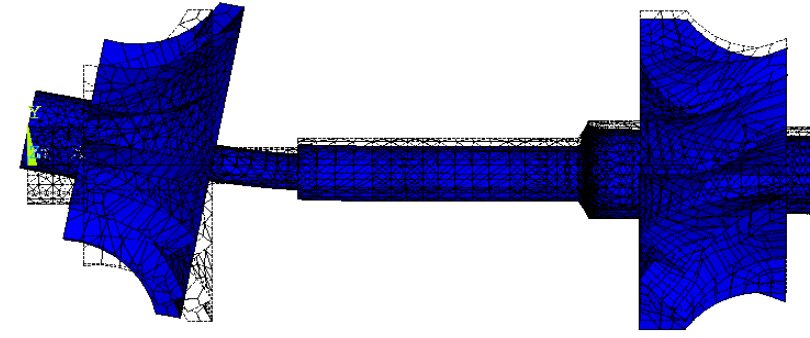
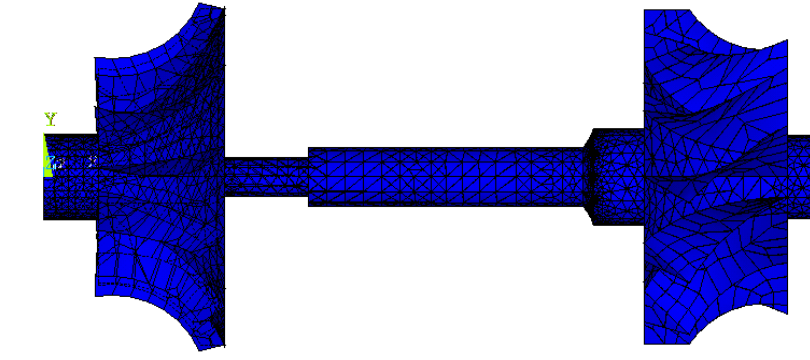
**Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης**

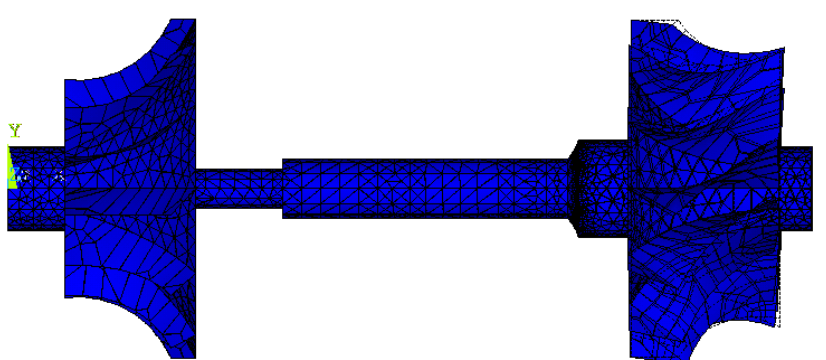
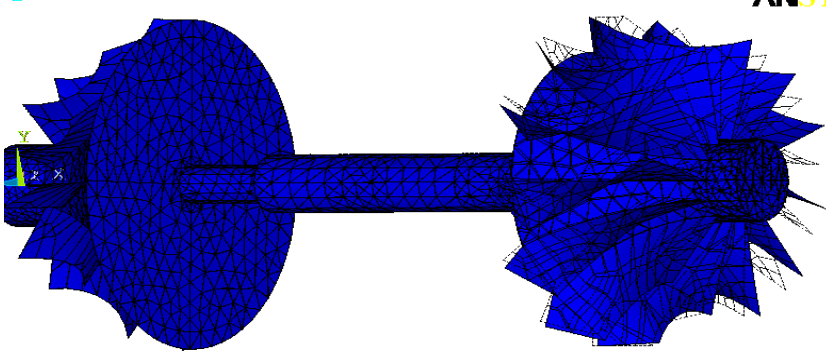
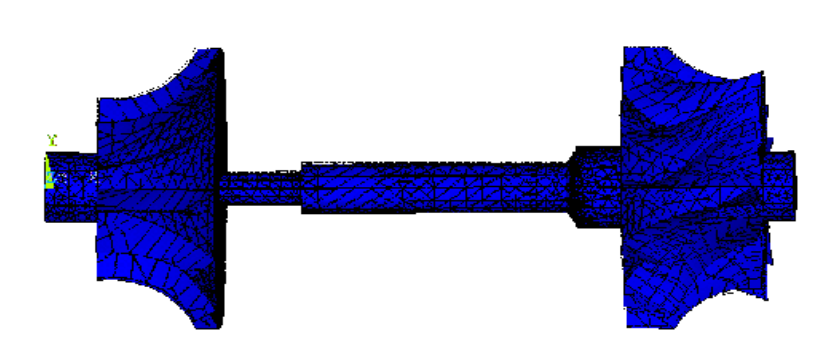
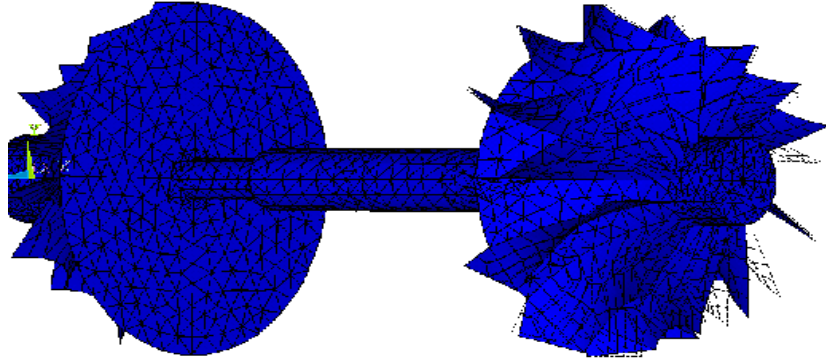
<b>ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ</b> <b>A/A</b>	<b>ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑ</b> <b>(Rad/sec)</b>	<b>ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</b>
1	19.513	Ο συμπίεστές κάμπτεται προς την διεύθυνση του z άξονα
2	22.349	Ο συμπίεστές κάμπτεται προς την διεύθυνση του y άξονα

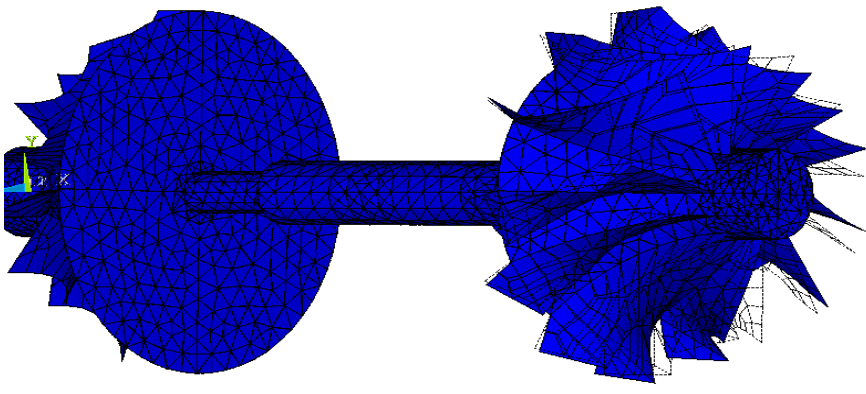
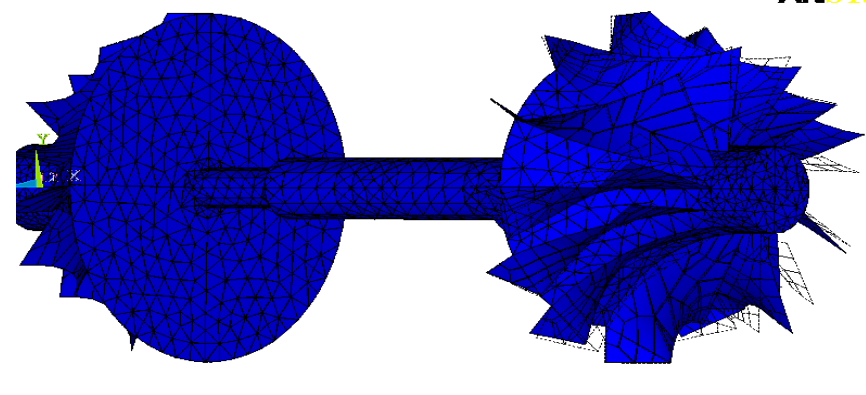
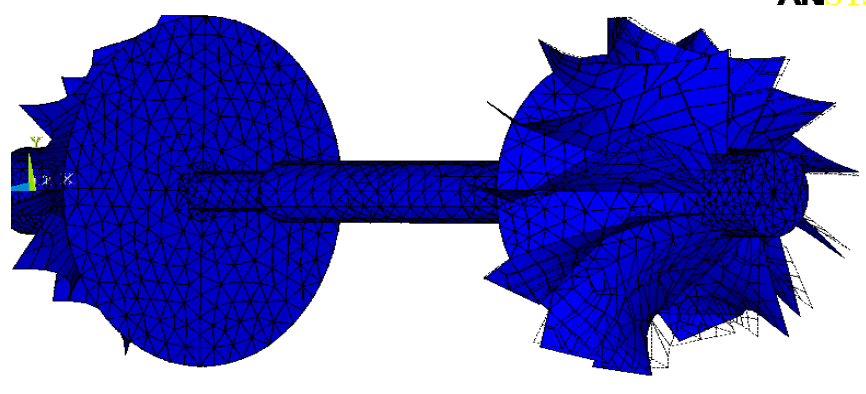
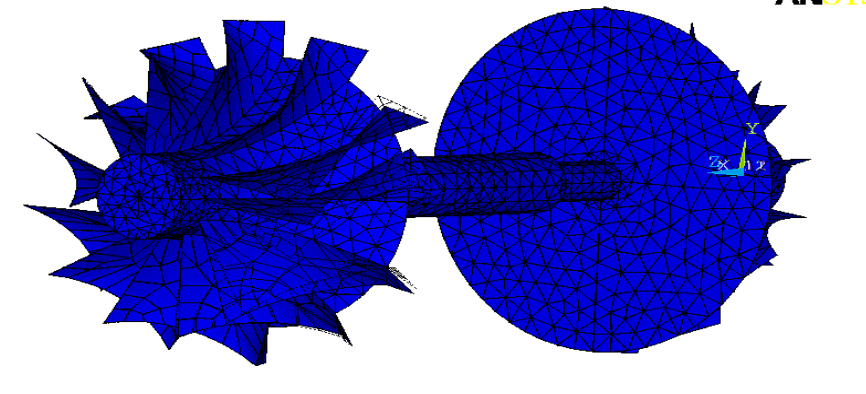
3	40.965	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή
4	59.06	Παραμόρφωση στα πτερύγια του στροβίλου
5	61.347	Παραμόρφωση στα πτερύγια του στροβίλου
6	65.081	Κάμψη στον άξονα και παραμόρφωση πτερυγίων
7	66.558	Παραμόρφωση στα πτερύγια του στροβίλου
8	66.71	Παραμόρφωση σε όλα τα πτερύγια του στροβίλου στα αρνητικά του z άξονα
9	67.252	Παραμόρφωση στα πτερύγια του στροβίλου στα αρνητικά του z άξονα
10	67.383	Παραμόρφωση στα πτερύγια του στροβίλου στα αρνητικά του z άξονα
11	67.927	Παραμόρφωση στα πίσω πτερύγια του στροβίλου στα αρνητικά του z άξονα
12	68.494	Παραμόρφωση στα πάνω πτερύγια του στροβίλου στα αρνητικά του z άξονα
13	69.035	Παραμόρφωση στα εμπρός πτερύγια του στροβίλου στα αρν. του y
14	69.388	Παραμόρφωση στα εμπρός πτερύγια του στροβίλου στα αρν. του y
15	69.597	Παραμόρφωση στα πάνω πτερύγια του στροβίλου στα αρνητικά του z άξονα
16	70.508	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή
17	70.653	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή
18	71.188	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή στα αρνητικά του x
19	74.583	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή στα θετικά του z
20	81.639	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή στα αρνητικά του y
21	83.827	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή στα αρνητικά του z
22	84.225	Παραμόρφωση σε όλα τα πτερύγια και του ίδιου του στροβίλου
23	84.717	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή
24	85.306	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή

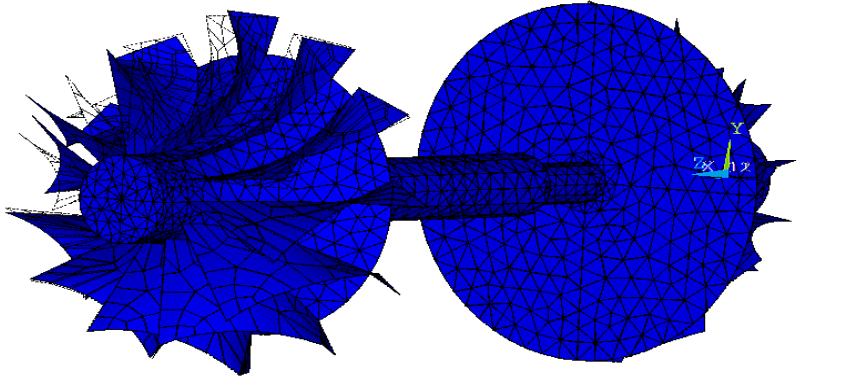
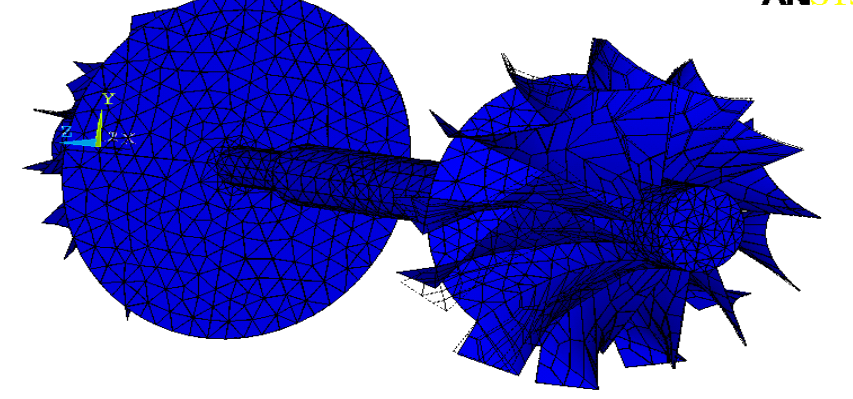
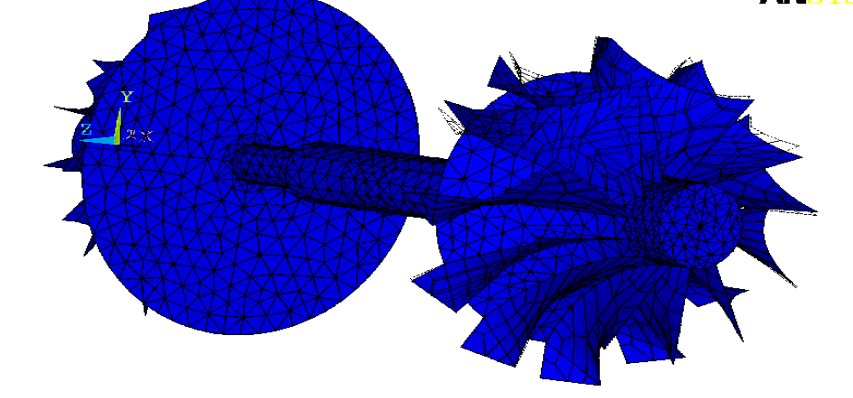
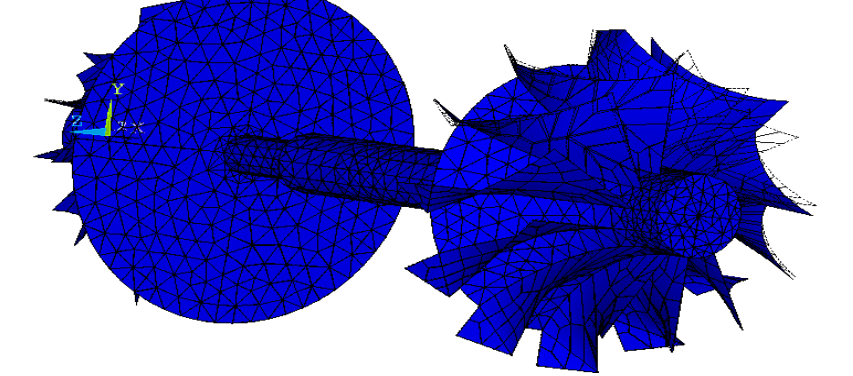
25	85.363	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή
26	86.606	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή
27	87.061	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή
28	90.345	Παραμόρφωση στα πτερύγια του συμπιεστή
29	101.859	Ολική κάμψη συστήματος
30	132.358	Ο συμπιεστής κάμπτεται προς τα θετικά του z άξονα

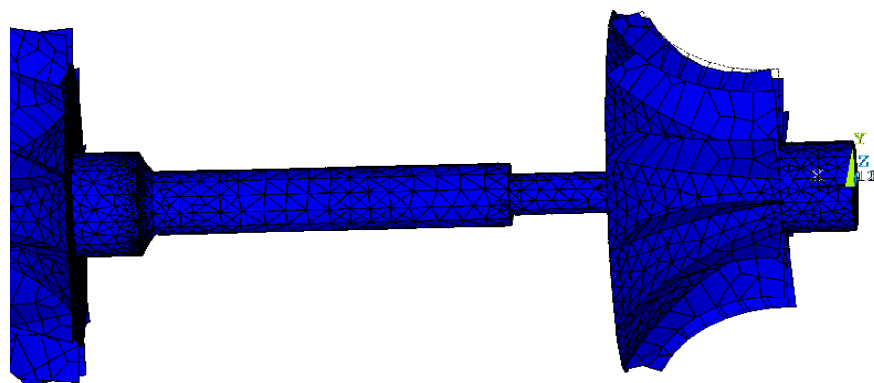
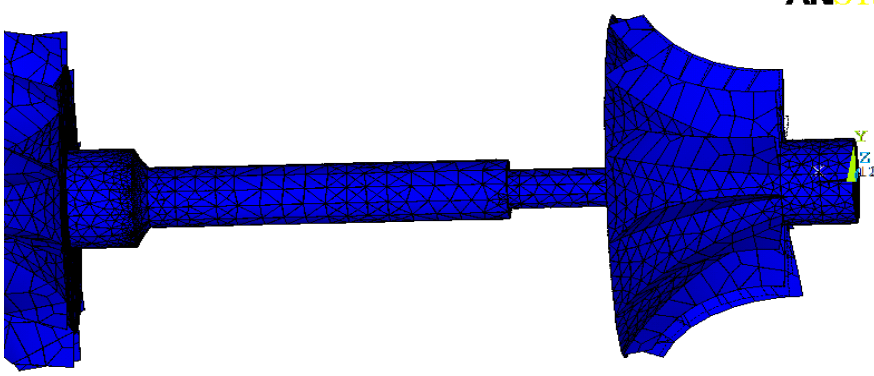
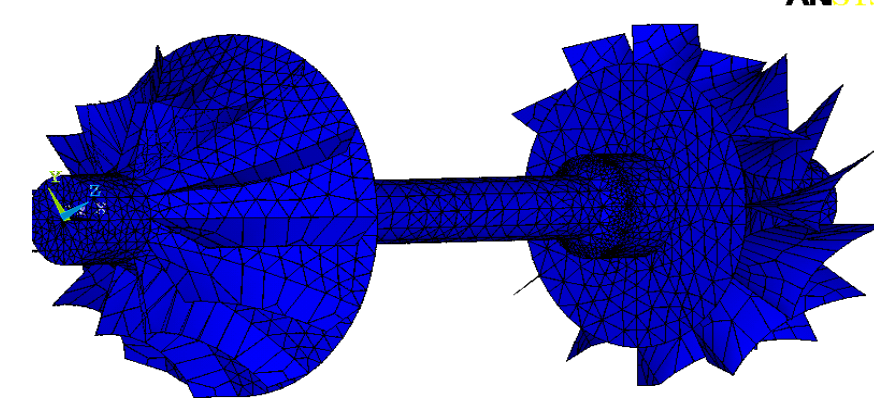
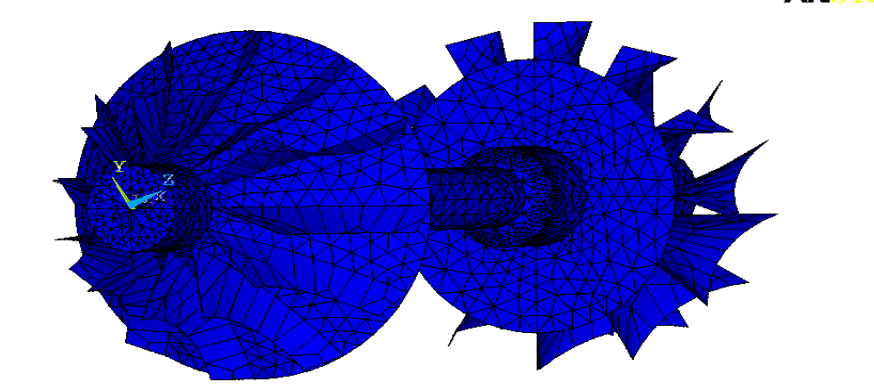
Πίνακας 4.9: Αποκρίσεις συστήματος από ιδιομορφική ανάλυση

<b>1<sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ</b>		<p><b>ANSYS</b></p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =2 FREQ=19.513 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =5.571</p> <p>DSCA=1.115 ZV =1 *DIST=68.876 *XF =62.516 *YF =-34.529 *ZF =1.124 Z-BUFFER</p>
<b>2<sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ</b>		<p><b>ANSYS</b></p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =3 FREQ=22.349 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =5.187</p> <p>DSCA=1.197 ZV =1 *DIST=68.876 *XF =62.516 *YF =-34.529 *ZF =1.124 Z-BUFFER</p>
<b>3<sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ</b>		<p><b>ANSYS</b></p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =4 FREQ=40.965 PowerGraphic EFACET=1 AVRES=Mat DMX =11.222</p> <p>DSCA=.553399 ZV =1 *DIST=68.876 *XF =62.516 *YF =-34.529 *ZF =1.124 Z-BUFFER</p>

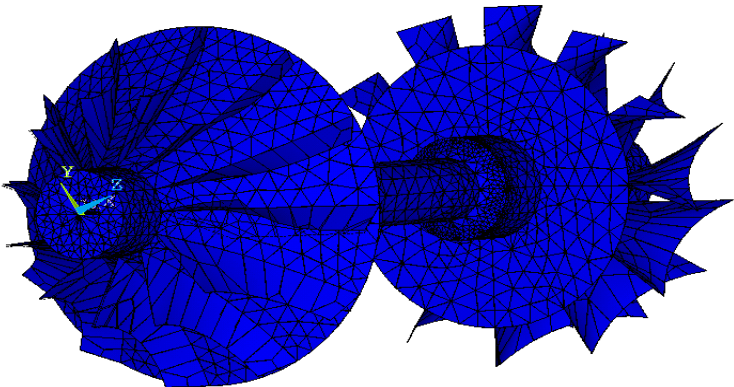
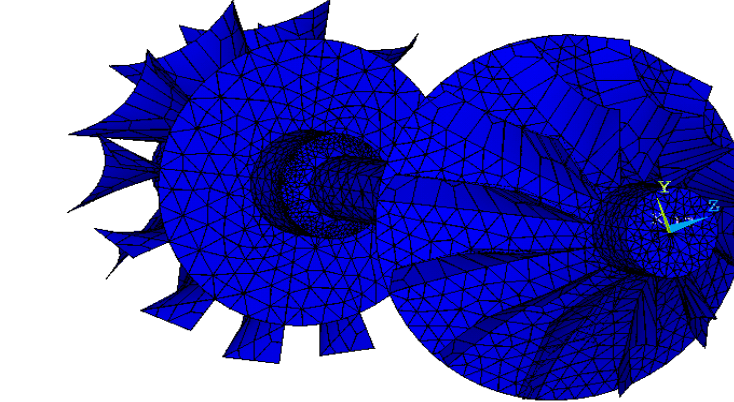
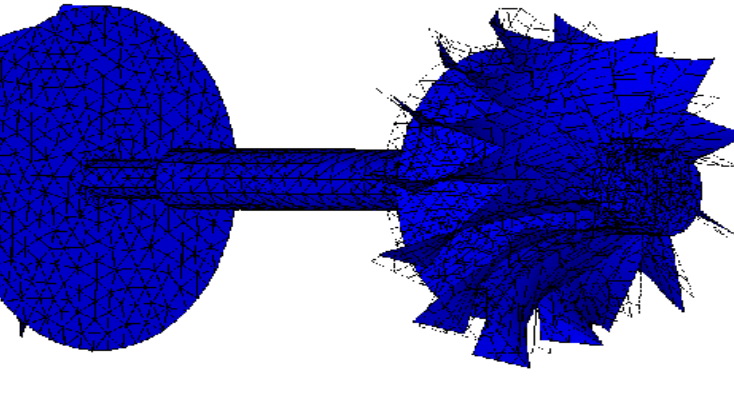
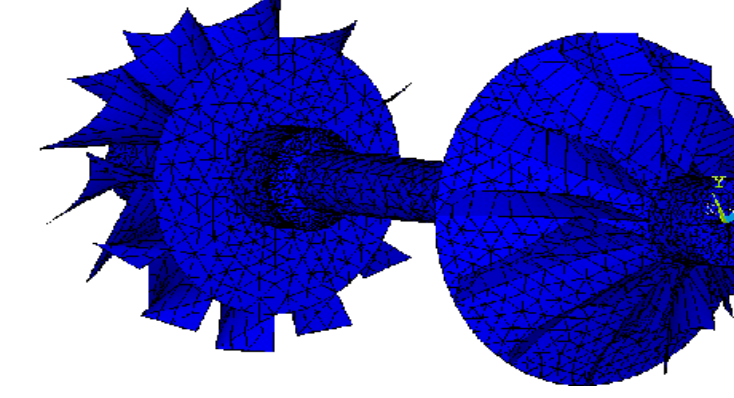
4 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =5 FREQ=59.06 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =18.314</p> <p>DSCA=.339088 ZV =1 *DIST=68.876 *XF =62.516 *YF =-34.529 *ZF =1.124 Z-BUFFER</p>
5 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =6 FREQ=61.347 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =16.149</p> <p>DSCA=.384553 XV =.557693 YV =-.024319 ZV =.829691 *DIST=58.807 *XF =67.519 *YF =-27.44 *ZF =-2.031 A-ZS=-.467032 Z-BUFFER</p>
6 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP 1 SUB 7 FREQ 65.081 PowerGraphics EFACET 1 AVRES Mat DMX 22.178</p> <p>DSCA .280007 XV .036801 YV .012105 ZV .984219 *DIST 68.876 *XF 63.597 *YF -26.805 *ZF -1.891 A-ZS .227361 Z-BUFFER</p>
7 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =8 FREQ=66.598 PowerGraphics EFACET 1 AVRES=Mat DMX =20.847</p> <p>DSCA=.297891 XV .605084 YV -.012939 ZV =.746657 *DIST=54.339 *XF =66.323 *YF = 23.295 *ZF -4.172 A-ZS -.695285 Z-BUFFER</p>

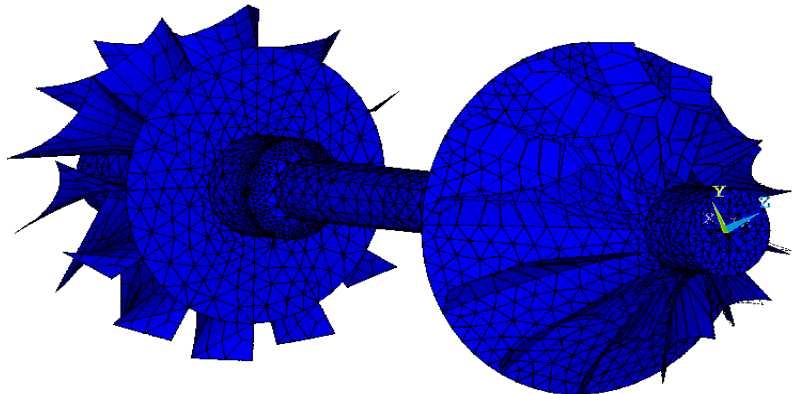
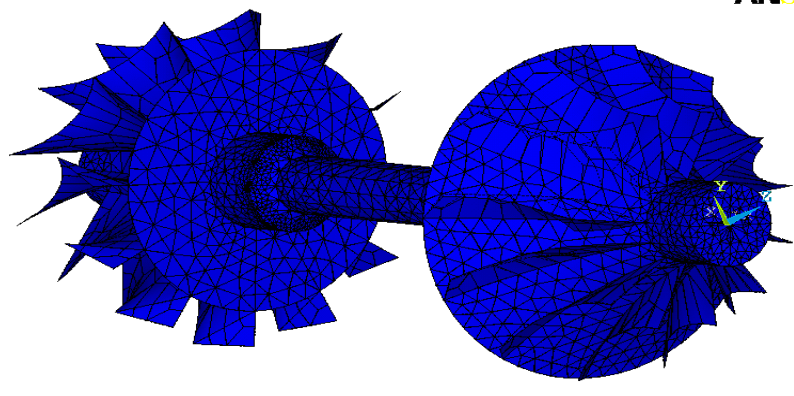
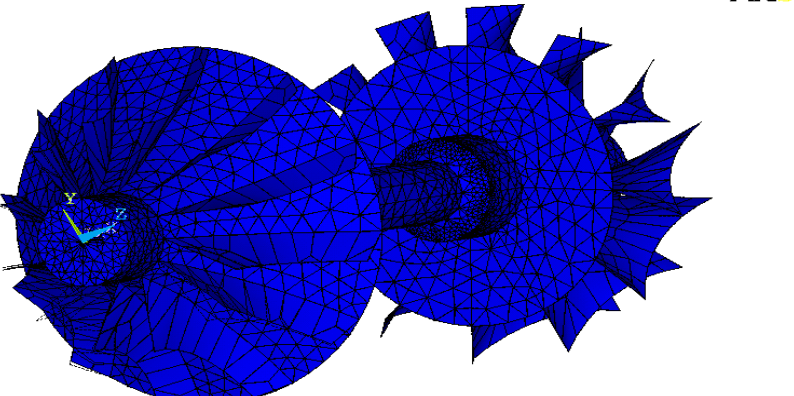
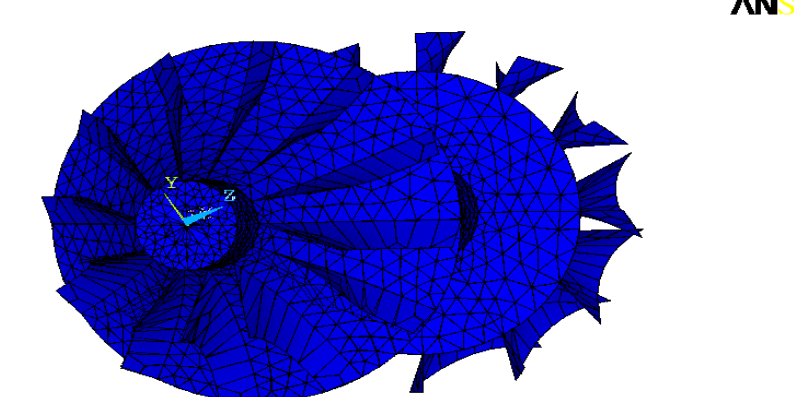
8 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =9 FREQ=66.71 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =20.054</p> <p>DSCA=.30966 XV =.665084 YV =-.012939 ZV =.746657 *DIST=54.339 *XF =66.223 *YF =-23.295 *ZF =-4.172 A-ZS=-.895285 Z-BUFFER</p>
9 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =10 FREQ=67.252 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =21.501</p> <p>DSCA=.28883 XV =.665084 YV =-.012939 ZV =.746657 *DIST=54.339 *XF =66.223 *YF =-23.295 *ZF =-4.172 A-ZS=-.895285 Z-BUFFER</p>
10 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =11 FREQ=67.383 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =26.786</p> <p>DSCA=.231834 XV =.665084 YV =-.012939 ZV =.746657 *DIST=54.339 *XF =66.223 *YF =-23.295 *ZF =-4.172 A-ZS=-.895285 Z-BUFFER</p>
11 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =12 FREQ=67.927 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =36.355</p> <p>DSCA=.170817 XV =.799943 YV =.066073 ZV =-.596428 *DIST=54.339 *XF =66.223 *YF =-23.295 *ZF =-4.172 A-ZS=-2.58 Z-BUFFER</p>

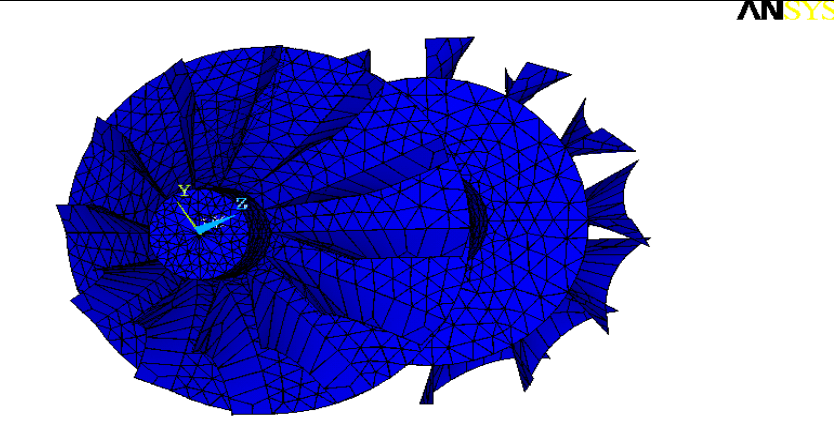
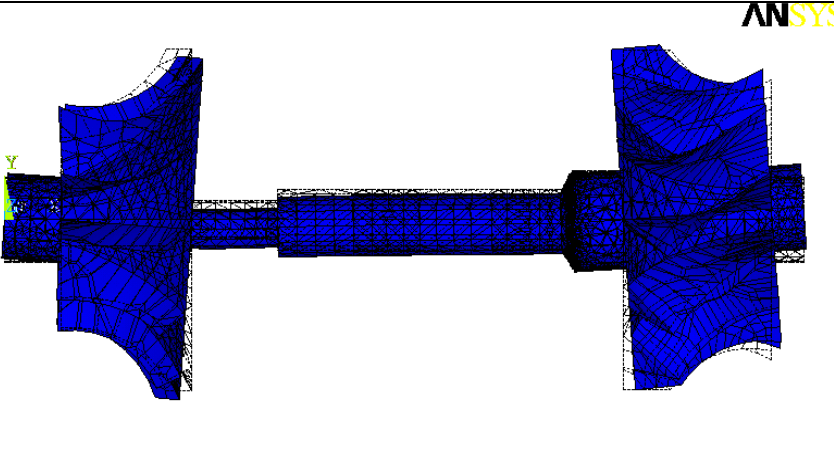
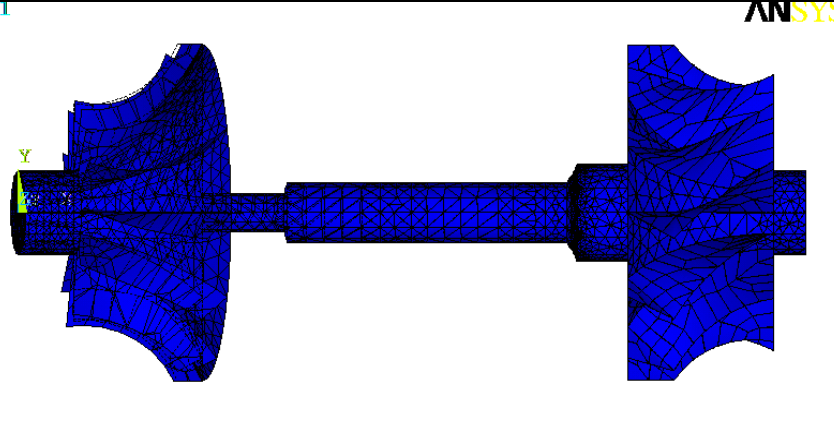
12 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =13 FREQ=68.494 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =27.18</p> <p>DSCA=.228474 XV =.799943 YV =.066073 ZV =-.596428 *DIST=54.339 *XF =66.223 *YF =-23.295 *ZF =-4.172 A-ZS=-2.58 Z-BUFFER</p>
13 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =14 FREQ=69.035 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =39.606</p> <p>DSCA=.156795 XV =.801622 YV =.025049 ZV =.597306 *DIST=54.339 *XF =66.223 *YF =-23.295 *ZF =-4.172 A-ZS=-7.688 Z-BUFFER</p>
14 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =15 FREQ=69.388 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =31.93</p> <p>DSCA=.194487 XV =.801622 YV =.025049 ZV =.597306 *DIST=54.339 *XF =66.223 *YF =-23.295 *ZF =-4.172 A-ZS=-7.688 Z-BUFFER</p>
15 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =16 FREQ=69.597 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =36.798</p> <p>DSCA=.168757 XV =.801622 YV =.025049 ZV =.597306 *DIST=54.339 *XF =66.223 *YF =-23.295 *ZF =-4.172 A-ZS=-7.688 Z-BUFFER</p>

16 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =17 FREQ=70.508 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =182.604</p> <p>DSCA=.034008 XV =-.06106 YV =.332563 ZV =-.941102 *DIST=54.339 *XF =51.436 *YF =-25.661 *ZF =3.957 A-ZS=2.921 Z-BUFFER</p>
17 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =18 FREQ=70.653 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =176.83</p> <p>DSCA=.035118 XV =-.06106 YV =.332563 ZV =-.941102 *DIST=54.339 *XF =51.436 *YF =-25.661 *ZF =3.957 A-ZS=2.921 Z-BUFFER</p>
18 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =19 FREQ=71.188 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =195.709</p> <p>DSCA=.031731 XV =-.67481 YV =-.35214 ZV =.648555 *DIST=53.234 *XF =51.436 *YF =-25.661 *ZF =3.957 A-ZS=21.841 Z-BUFFER</p>
19 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =20 FREQ=74.583 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =208.819</p> <p>DSCA=.029739 XV =-.85108 YV =-.24691 ZV =.463355 *DIST=53.234 *XF =51.436 *YF =-25.661 *ZF =3.957 A-ZS=26.534 Z-BUFFER</p>



20 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =21 FREQ=81.639 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =209.974</p> <p>DSCA=.029575 XV =-.845168 YV =-.239987 ZV =.477595 *DIST=53.234 *XF =51.436 *YF =-25.661 *ZF =3.957 A-ZS=27.524 Z-BUFFER</p>
21 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =22 FREQ=83.827 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =205.626</p> <p>DSCA=.0302 XV =-.87806 YV =.256334 ZV =-.404109 *DIST=53.234 *XF =70.266 *YF =-20.497 *ZF =-7.707 A-ZS=20.147 Z-BUFFER</p>
22 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP 1 SUB =23 FREQ=84.026 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =9.762</p> <p>DSCA=.636157 XV =.689365 YV =-.391782 ZV =.631235 *DIST=53.234 *XF =77.991 *YF =15.584 *ZF =-15.612 A-ZS=-23.004 Z-BUFFER</p>
23 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP 1 SUB =24 FREQ=84.717 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =199.119</p> <p>DSCA=.031187 XV =-.785484 YV =.377201 ZV =.490695 *DIST=53.234 *XF =70.888 *YF =30.614 *ZF =-6.599 A-ZS =21.772 Z-BUFFER</p>

24 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =25 FREQ=85.306 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =158.01</p> <p>DSCA=.039301 XV =-.785454 YV =.377201 ZV =-.490695 *DIST=53.234 *XF =70.688 *YF =-20.614 *ZF =-6.399 A-ZS=24.372 Z-BUFFER</p>
25 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =26 FREQ=85.363 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =156.938</p> <p>DSCA=.03957 XV =-.785454 YV =.377201 ZV =-.490695 *DIST=53.234 *XF =70.688 *YF =-20.614 *ZF =-6.399 A-ZS=24.372 Z-BUFFER</p>
26 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =27 FREQ=86.606 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =179.613</p> <p>DSCA=.034574 XV =-.863441 YV =-.169872 ZV =.474987 *DIST=53.234 *XF =70.688 *YF =-20.614 *ZF =-6.399 A-ZS=26.92 Z-BUFFER</p>
27 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =28 FREQ=87.061 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =176.406</p> <p>DSCA=.035203 XV =-.955174 YV =-.135795 ZV =.263062 *DIST=53.234 *XF =70.688 *YF =-20.614 *ZF =-6.399 A-ZS=29.87 Z-BUFFER</p>

28 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =29 FREQ=90.345 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =208.693</p> <p>DSCA=.029757 XV =-.955174 YV =-.135795 ZV =.263062 *DIST=53.234 *XF =70.688 *YF =-20.614 *ZF =-6.399 A-ZS=29.87 Z-BUFFER</p>
29 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =30 FREQ=101.859 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =13.334</p> <p>DSCA=.465726 ZV =1 *DIST=67.475 *XF =63.293 *YF =-33.988 *ZF =-6.398 Z-BUFFER</p>
30 <sup>η</sup> ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ		<p>ANSYS</p> <p>DISPLACEMENT STEP=1 SUB =31 FREQ=132.358 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DMX =8.685</p> <p>DSCA=.715027 ZV =1 *DIST=67.475 *XF =63.293 *YF =-33.988 *ZF =-6.398 Z-BUFFER</p>

Παρατηρώντας την 1η και 2η ιδιομορφή, βλέπουμε ότι στην κυκλική συχνότητα ανά δευτερόλεπτο 19.513 και 22.349 αντίστοιχα, ο άξονας κάμπτεται στην μεριά του συμπιεστή με εκτόπιση 5.571 mm και 5.187 mm αντίστοιχα.

Στην 3η ιδιομορφή, με συχνότητα 40.965 rad/sec αλλάζει η παραμόρφωση και πλέον παρουσιάζεται στο σημείο των πτερυγίων του συμπιεστή με μετατόπιση

11.222 mm. Τα πτερύγια εκτείνονται προς τα έξω (π.χ. στην θετική για τα πάνω και αρνητική για τα κάτω διεύθυνση του  $y$  άξονα).

Στην συχνότητα 59.06 rad/sec, εμφανίζεται η *4η ιδιομορφή* μετατοπίζοντας τα πτερύγια του στροβίλου στα 18.314 mm και χωρίς καμία μετατόπιση στον συμπιεστή. Παρατηρούμε ότι παρόμοια μετατόπιση σε άλλα πτερύγια του στροβίλου συνεχίζεται και στην πέμπτη ιδιομορφή

Στην *6η ιδιομορφή* με ιδιοσυχνότητα 65.081 rad/sec και μετατόπιση στα 22.178 mm, εκτοπίζεται ο συμπιεστής, τα πτερύγιά του, ο άξονας, ο στρόβιλος και τα πτερύγια του

Από την *7η* έως την *15η ιδιομορφή*, σε συχνότητες από 66.558 έως 69.597 rad/sec, παρουσιάζονται μετατοπίσεις στα πτερύγια του στροβίλου, σε διαφορετικές διευθύνσεις.

Στην *16η ιδιομορφή* αρχίζει η μετατόπιση των πτερυγίων του συμπιεστή με ιδιοσυχνότητα 70.508 rad/sec και μετατόπιση 182.604 mm. Παρατηρούμε μια μεγάλη μετατόπιση σχετικά με τις προηγούμενες ιδιομορφές.

Η μετατόπιση των πτερυγίων συνεχίζεται από την *17η* έως την *21η ιδιομορφή*, με την μεγαλύτερη μετατόπιση να σημειώνεται στην απόκριση της *20ής ιδιομορφής* με 209.974 mm και συχνότητα 81.639 rad/sec.

Στην *22η ιδιομορφή*, ξεκινάει η παραμόρφωση του στροβίλου και των πτερυγίων του με μετατόπιση 9.762 mm στην συχνότητα 84.225 rad/sec. Εδώ παρατηρούμε μια απότομη αλλαγή της απόκρισης του συστήματος. Σχεδόν ακαριαία ζυγοσταθμίζεται και αρχίζει την μετατόπιση ο στρόβιλος.

Στην *23η ιδιομορφή* η απόκριση διακρίνεται στα πτερύγια του συμπιεστή στην συχνότητα 84.717 rad/sec, με μετατόπιση 199.119 mm. Η εκτόπιση των πτερυγίων συνεχίζεται καθώς αυξάνεται η ιδιοσυχνότητα έως την *28η ιδιομορφή* με κυκλική συχνότητα 90.345 rad/sec και μετατόπιση κοντά σε αυτήν της *20ής ιδιομορφής*, που προαναφέραμε, στα 208.693 mm. Να σημειωθεί ότι από την *24η ιδιομορφή*, με μετατόπιση στα 158.010 mm, καθώς αυξάνεται η ιδιοσυχνότητα αυξάνεται και η μετατόπιση των πτερυγίων. Δηλαδή υπάρχει μία πτώση του εκτοπίσματος από τα

199 mm στα 158mm με μόλις μια διαφορά στην κυκλική συχνότητα 0.589 rad/sec και στην πορεία έχουμε την ανάλογη αύξηση ιδιοσυχνότητας – μετατόπισης.

Η 29η ιδιομορφή μας δείχνει μια ολική κάμψη σε όλο το σύστημα στην ιδιοσυχνότητα των 101.859 rad/sec με την μέγιστη μετατόπιση στα 13.334 mm.

Τέλος, στην 30ή ιδιομορφή, βρισκόμαστε στην ιδιοσυχνότητα 132.358 rad/sec και εμφανίζεται η κάμψη του άξονα στην μεριά του συμπιεστή με μετατόπιση 8.685 mm στην αρνητική και θετική διεύθυνση του άξονα z, όπως προκύπτει στην 1η ιδιομορφή.

#### **4.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

Από τις 30 αποκρίσεις ιδιομορφών ταλάντωσης, στις 10 πρώτες βρέθηκαν οι σημαντικότερες αλλαγές. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι περισσότερες ιδιομορφές επηρεάζουν τα πτερύγια του συμπιεστή και του στροβίλου.

Τα πτερύγια του συμπιεστή με 13 διαφορετικές αποκρίσεις τα δε πτερύγια του στροβίλου με 12. Οι υπόλοιπες 5 ιδιομορφές αφορούν κυρίως την κάμψη που δέχεται ο άξονας, όπου τις συναντάμε στις μικρότερες αλλά και μεγαλύτερες ιδιοσυχνότητες που έχουμε αναλύσει.

Στην 29η ιδιομορφή εμφανίζεται η μέγιστη μετατόπιση στα 13.334 mm λόγω κάμψης σε όλο το σύστημα στην ιδιοσυχνότητα των 101.859 rad/sec.



## ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την Πτυχιακή Εργασία ασχοληθήκαμε με την στατική επάρκεια ενός φυγοκεντρικού στροβιλοσυμπιεστή μίας βαθμίδας, ασκώντας του θεωρητικές πιέσεις στα πτερύγιά του, επιλέγοντάς τες από ένα ευρύ φάσμα στροβιλοσυμπιεστών. Επίσης έγινε φασματική ανάλυση για την εύρεση των ιδιομορφών. Σκοπός μας ήταν, η όσο το δυνατόν πιο ακριβής μοντελοποίηση μιας τέτοιας κατασκευής με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και εν συνεχεία η διερεύνηση για το πώς επιδρούν στο φαινόμενο συγκέντρωσης τάσεων διάφορα μέρη της κατασκευής. Η μοντελοποίηση της κατασκευής έγινε στο πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων ANSYS, έκδοσης 11.0.

Αυτού του είδους οι κατασκευές παρουσιάζουν συγκέντρωση τάσεων κυρίως γύρω από την περιοχή των πτερυγίων. Η προσπάθεια που γίνεται από τους κατασκευαστές είναι να περιορίσουν την ταχύτητα αναρρόφησης στη διάμετρο από την οποία εισέρχεται ο αέρας ή τα καυσαέρια, 'μάτι' ή *inducer* (βλέπε ενότητα 1.3). Στη διατομή αυτή η ταχύτητα του ρευστού είναι μία κρίσιμη παράμετρος σχεδιασμού, λόγω υπερβολικών απωλειών ολικής πίεσης και λόγω συμπιεστότητας σε υψηλούς ρυθμούς αναρρόφησης.

Τα αποτελέσματα, από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, μας δείχνουν ως δυσμενέστερη περίπτωση τα πτερύγια του συμπιεστή, έχοντας την μεγαλύτερη μετατόπιση και παραμόρφωση και τα πτερύγια του στροβίλου που συγκεντρώνουν την μεγαλύτερη αναπτυσσόμενη τάση, στα οποία επέλθετε θραύση. Αυτά τα αποτελέσματα, δικαιολογούν τις επιλογές των σχεδιαστών για την ενίσχυση των επιμέρους σημείων ως προς την γεωμετρία τους.

Ο άξονας εμφανίζει καταπόνηση σε κάμψη κυρίως κοντά στον συμπιεστή, όπου υπάρχει και η μικρότερη διατομή σε σχέση τον υπόλοιπο άξονα, σημειώνοντας ένα μικρό σχετικά βέλος κάμψης. Λόγω των συγκεντρωμένων φορτίων στα πτερύγια και καθώς έχουν διαφορετική γωνία πτερύγωσης δημιουργούνται διατμητικές τάσεις οι οποίες μετατρέπονται ουσιαστικά σε στρεπτικές διατμητικές τάσεις όπου καταπονούν τον άξονα σε όλο το μήκος του. Τέλος, οι καταπονήσεις που δέχονται οι

θέσεις εδράσεως είναι αρκετά μεγάλες, κυρίως κοντά στον στρόβιλο, χωρίς όμως να υπάρχει αστοχία στο υλικό και κρίνεται απολύτως αποδεκτό, μιας και δέχονται όλες τις φορτίσεις κατά την περιστροφή του άξονα.



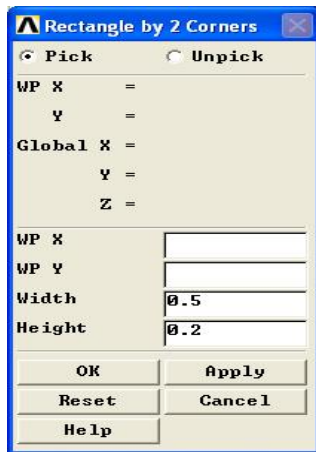


## A) ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ PREPROCESSOR

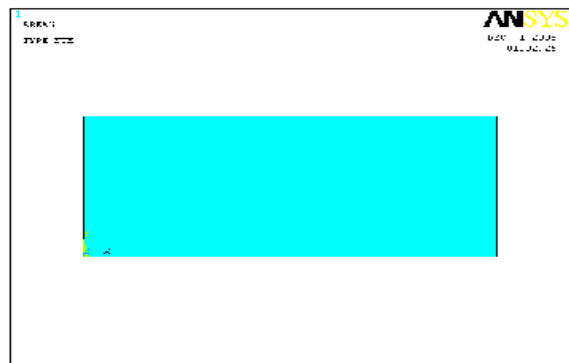
### 1.ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

**Βήμα 2:** Από το αριστερό μενού επιλέγουμε **preprocessor > modeling > create > areas > rectangle > by 2 corners**, για την κατασκευή ενός ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου.

Στο καρτελάκι που εμφανίζεται (σχήμα 1.2), στα workplane x και y μπορούμε να μην γράψουμε τίποτα και έτσι το λαμβάνει ως μηδέν. Δίνουμε μήκος (width) 0.5, ύψος (height) 0.2 και πατάμε OK.



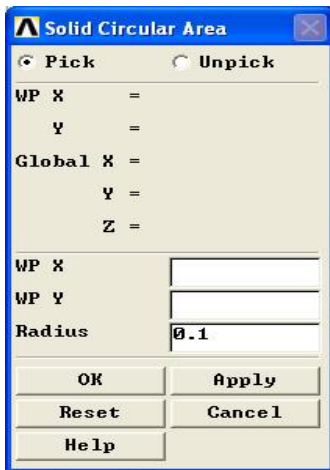
Σχήμα 1.2



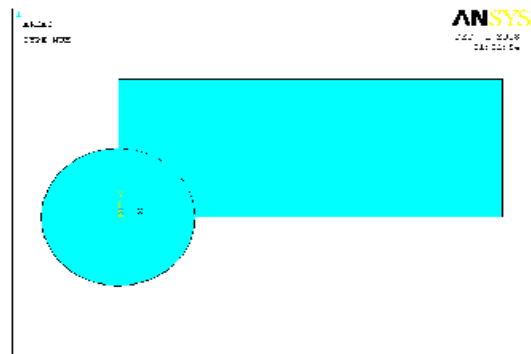
Σχήμα 1.3

Το αποτέλεσμα είναι το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο του σχήματος 1.3.

**Βήμα 3:** Για να κόψουμε το ημικύκλιο θα δημιουργήσουμε έναν κύκλο με κέντρο το 0,0 και ακτίνα 0.1. Από το αριστερό κεντρικό μενού (main menu) επιλέγουμε, **preprocessor > modeling > create > areas > circle > solid circle**. Στο καρτελάκι που εμφανίζετε (σχήμα 1.4) δίνουμε ακτίνα 0.1 και αφήνουμε κενά τα workplane αφού θέλουμε το κέντρο του κύκλου να είναι στο 0,0.



Σχήμα 1.4



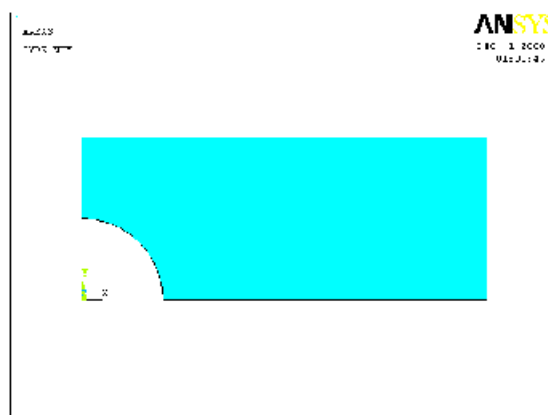
Σχήμα 1.5

Το αποτέλεσμα της δημιουργίας επιφάνειας, είναι στο σχήμα 1.5.

**Βήμα 4:** Τώρα θα κάνουμε αποκοπή του κύκλου και της επιφάνειας που πατάει στο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο. Από το αριστερό μενού επιλέγουμε **preprocessor > modeling > operate > booleans > subtract > areas**.

Εμφανίζετε ένα καρτελάκι και ένας κέρσορας. Κάνουμε αριστερό κλικ στο ορθογώνιο, το κομμάτι δηλαδή που θέλουμε να κρατήσουμε και πατάμε **OK** στο καρτελάκι.

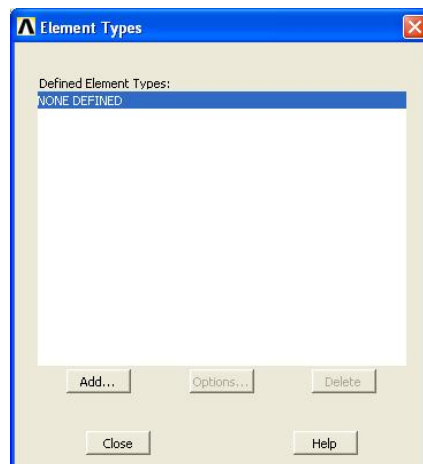
Στη συνέχεια κάνουμε αριστερό κλικ στον κύκλο, δηλαδή το κομμάτι που θέλουμε να διώξουμε και πατάμε **OK**. Έτσι έχουμε κρατήσει την επιφάνεια που θέλουμε όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6



Σχήμα 1.6

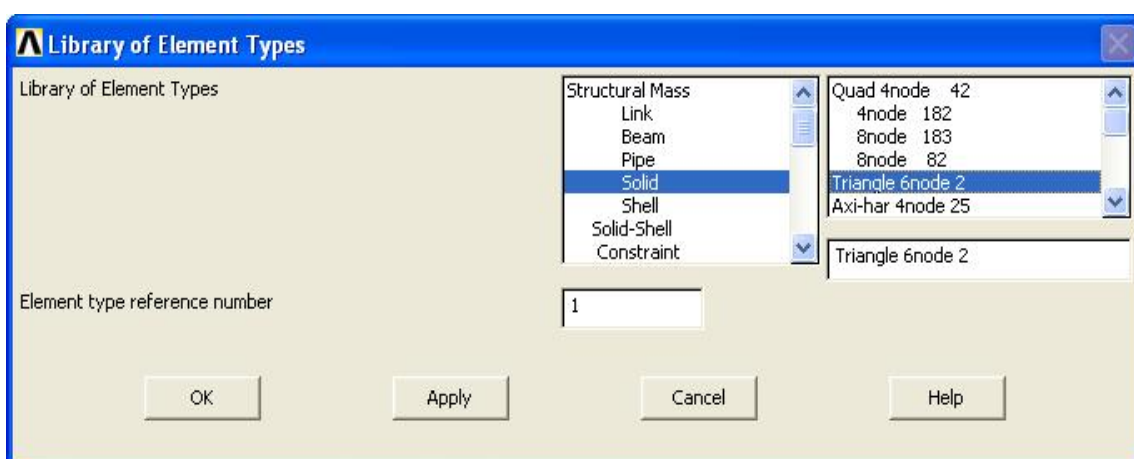
## 2. ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

**Βήμα 5:** Για να γίνει διακριτοποίηση πρέπει πρώτα να επιλέξουμε το στοιχείο και να το ορίσουμε. Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε εξάκομβο τριγωνικού σχήματος στοιχείο για αυτό το πρόβλημα. Άρα από το αριστερό μενού επιλέγουμε **preprocessor > element type > add/edit/delete** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 1.7.



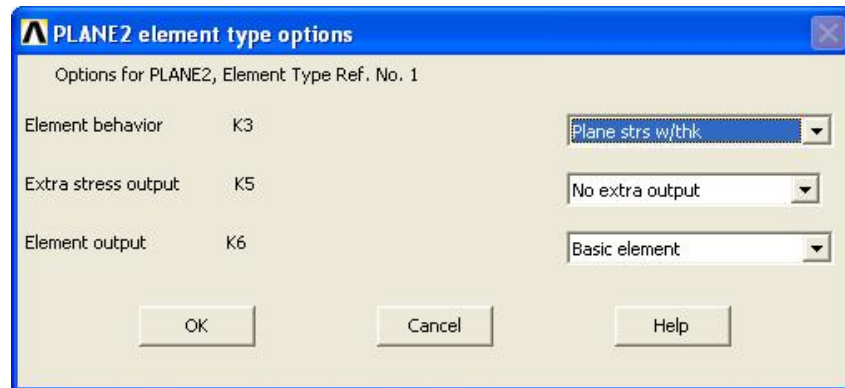
Σχήμα 1.7

Κάνουμε κλικ στο **add** και εμφανίζεται η καρτέλα με την βιβλιοθήκη των στοιχείων του σχήματος 1.8. Επιλέγουμε **solid > triangle 6 node 2** και πατάμε **OK**.



Σχήμα 1.8

Πλέων στην καρτέλα του σχήματος 1.7 έχει ενεργοποιηθεί η επιλογή options και έχει περάσει το στοιχείο μέσα ως επιλεγμένο με ονομασία **PLANE2**. Το στοιχείο αυτό έχει δύο βαθμούς ελευθερίας για κάθε κόμβο στην διεύθυνση x και y. Πατώντας options, στην καρτέλα του σχήματος 1.7, θα περάσουμε το πάχος του ελάσματος ως ιδιότητα του υλικού, επιλέγοντας στην συμπεριφορά του στοιχείου K3, **plane stress with thickness** όπως φαίνεται στο σχήμα 1.9 και πατάμε **OK**.



Σχήμα 1.9

Στην συνέχεια πατάμε close στην καρτέλα του σχήματος 1.7.

**Βήμα 6:** Για το στοιχείο **plane2** που διαλέξαμε αντιστοιχεί και ένα **real constant** που θα δώσουμε το πάχος του ελάσματος, όπου είναι 0.01. Από το αριστερό μενού επιλέγουμε **preprocessor > real constant > add/edit/delete** και εμφανίζετε η καρτέλα του σχήματος 1.10.

Πατάμε **add** για να προσθέσουμε το στοιχείο μας και στην συνέχεια στην εμφανιζόμενη καρτέλα του σχήματος 1.11, πατάμε **OK**.

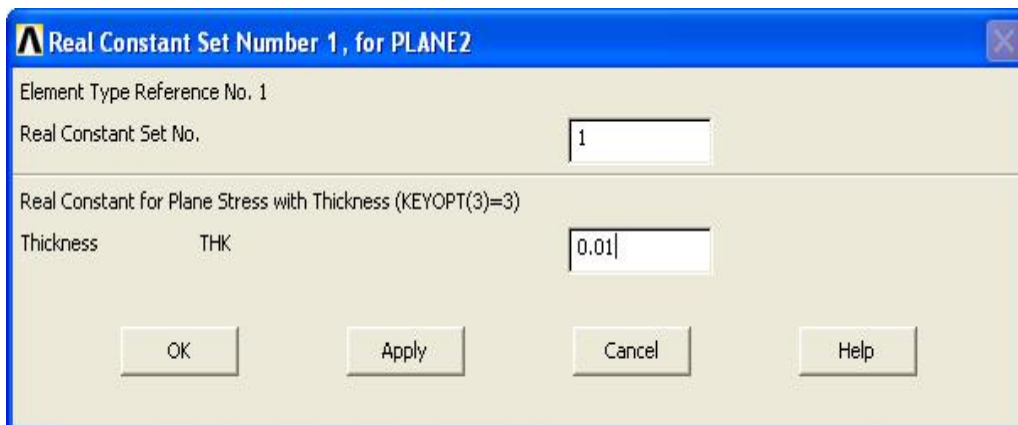


Σχήμα 1.10



Σχήμα 1.11

Στη νέα καρτέλα (σχήμα 1.12) τοποθετούμε το πάχος του ελάσματος **0.01**, πατάμε **OK** και στη συνέχεια **close**.



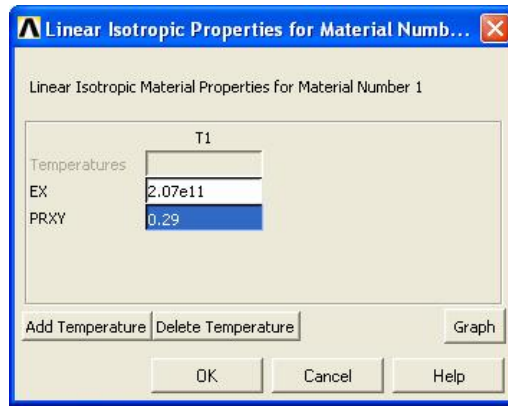
Σχήμα 1.12

### 3. ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

**Βήμα 7:** Από το αριστερό μενού επιλέγουμε **preprocessor > material props > material models** και στην καρτέλα που εμφανίζετε για material model number 1 κάνουμε διπλό κλικ στα **structural > linear > elastic > isotropic**.

Στη νέα καρτέλα δίνουμε το μέτρο ελαστικότητας  $EX = 2.07e11$  και τον λόγο Poisson  $PRXY = 0.29$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 1.13 και πατάμε **OK**.

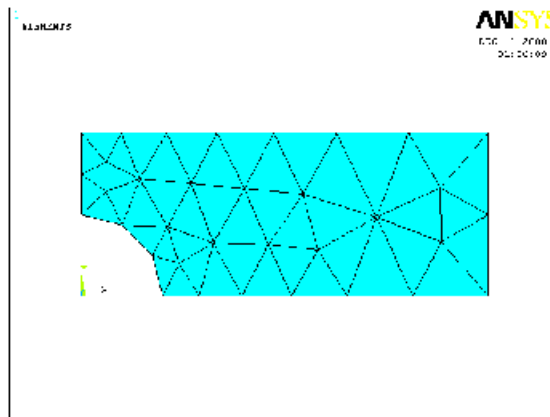
Στην συνέχεια κλείνουμε την καρτέλα που επιλέξαμε την συμπεριφορά του υλικού.



Σχήμα 1.13

#### 4. ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

**Βήμα 8:** Από το αριστερό μενού επιλέγουμε **preprocessor > meshing > mesh > areas > free** . Εμφανίζεται μια καρτέλα και ένας κέρσορας. Κάνουμε κλικ την επιφάνεια που θέλουμε να διακριτοποιήσουμε και πατάμε **OK** στο καρτελάκι. Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 1.14.



Σχήμα 1.14

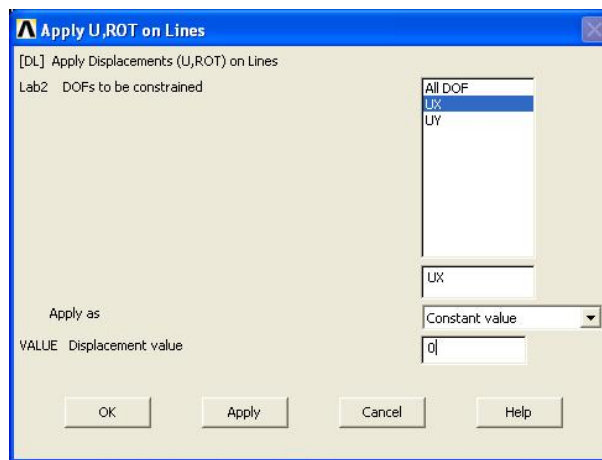
#### 5. ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ

Ως στήριξη του ελάσματος θα θεωρήσουμε πάκτωση για  $x=0$  και  $y=0$  την αριστερή και την κάτω πλευρά του ελάσματος αφού έχουμε λάβει υπ' όψιν το ένα τεταρτημόριο.

**Βήμα 9:** Από το αριστερό μενού επιλέγουμε **preprocessor > loads > define loads > apply > structural > displacement > on lines**.

Εμφανίζεται η καρτέλα και ο κέρσορας με τον οποίο θα επιλέξουμε την αριστερή πλευρά του ελάσματος και θα πατήσουμε **OK**.

Στην συνέχεια μας εμφανίζεται μία καρτέλα που θα επιλέξουμε για  $x=0$ . Άρα, επιλέγουμε **UX** και στο **displacement value** γράφουμε **0**, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.15 και πατάμε **OK**.



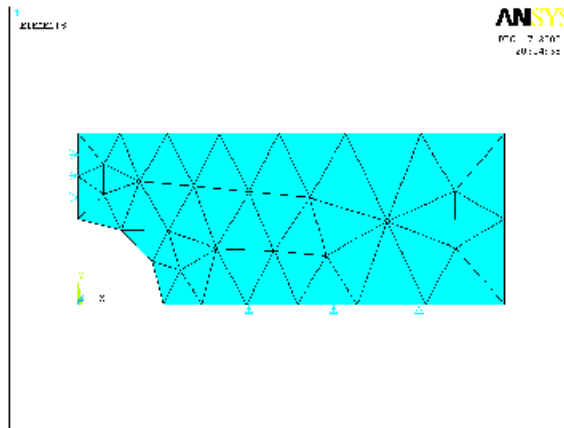
Σχήμα 1.15

Ακριβώς την ίδια διαδικασία ακολουθούμε και για να τοποθετήσουμε πάκτωση στο κάτω μέρος του τεταρτημόριου, με την διαφορά ότι εδώ θα έχουμε  $UY=0$ .

**Βήμα 10:** Από το αριστερό μενού **preprocessor > loads > define loads > apply > structural > displacement > on lines**, επιλέγουμε το κάτω μέρος του τεταρτημόριου και πατάμε **OK**. Στην καρτέλα που εμφανίζεται, όπως αυτή του σχήματος 1.15, επιλέγουμε **UY** και στο **displacement value** γράφουμε **0**.

Πλέον έχουμε βάλει τις στηρίξεις όπως φαίνεται στο σχήμα 1.16



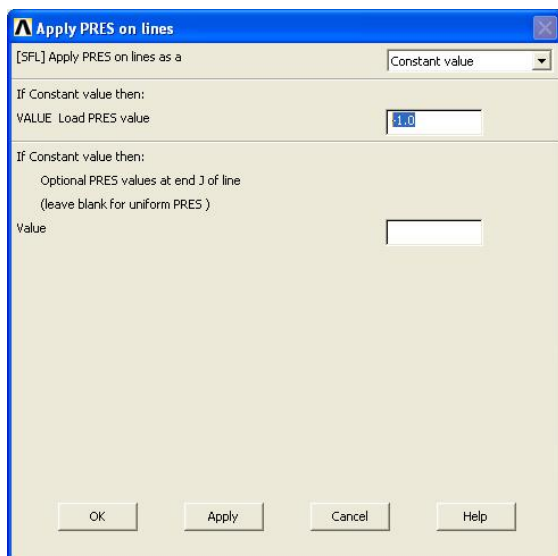


Σχήμα 1.16

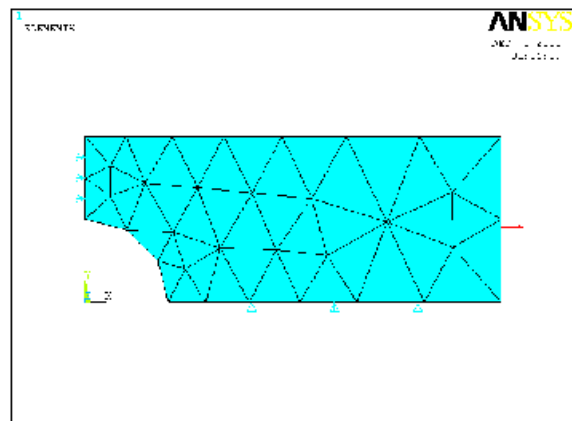
## 6. ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΙΕΣΗΣ

**Βήμα 11:** Από το αριστερό μενού επιλέγουμε **preprocessor > loads > define loads > apply > structural > pressure > on lines** και εμφανίζεται μία καρτέλα και ένας κέρσορας, όπου επιλέγουμε το δεξί μέρος του ελάσματος και πατάμε **OK** στην καρτέλα.

Στην συνέχεια εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 1.17 και γράφουμε, στο **load value pressure**, με αρνητικό πρόσημο την πίεση επειδή είναι εφελκυστική. Πατάμε **OK** στην καρτέλα και η πίεση εμφανίζεται με τη μορφή ενός βέλους, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.18.



Σχήμα 1.17



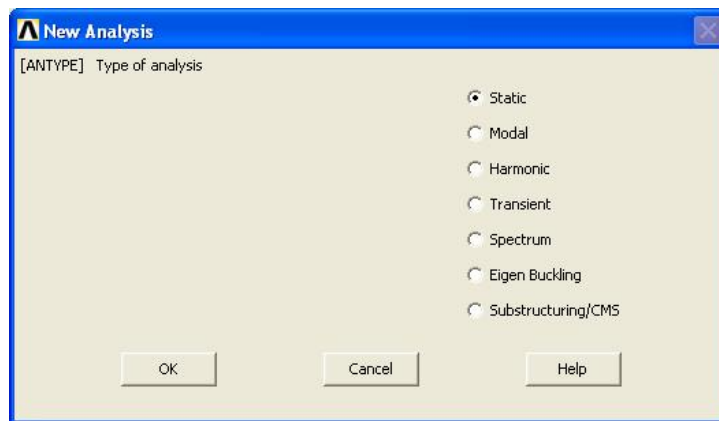
Σχήμα 1.18

## 7. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

Μετά την προεπεξεργασία ακολουθεί η λύση και η ανάλυση του προβλήματος. Έτσι λοιπόν από το αριστερό κεντρικό μενού επιλέγουμε πλέων **solution**.

### B) ΕΠΙΛΥΣΗ SOLUTION

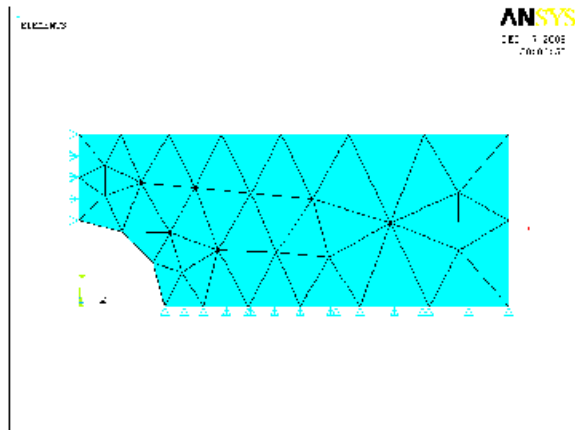
**Βήμα 12:** Για μια καινούρια ανάλυση επιλέγουμε το είδος από το αριστερό μενού **solution > analysis type > new analysis** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 1.19, όπου διαλέγουμε να κάνουμε στατική ανάλυση και πατάμε **OK**.



Σχήμα 1.19

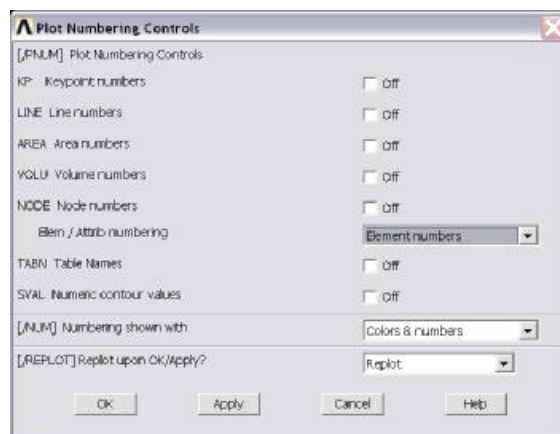
**Βήμα 13:** Στη συνέχεια για να εκτελέσουμε την ανάλυση πηγαίνουμε στο αριστερό μενού **solution > solve > current LS**. Βλέπουμε τι θα λύσει και στην καρτέλα που εμφανίζεται πατάμε **OK**.

Στην συνέχεια εμφανίζεται ένα μήνυμα που μας δηλώνει ότι η λύση έγινε και πατάμε **close** στο καρτελάκι. Επίσης κλείνουμε το παράθυρο με τα options της λύσης και εμφανίζεται το σχήμα 1.20.



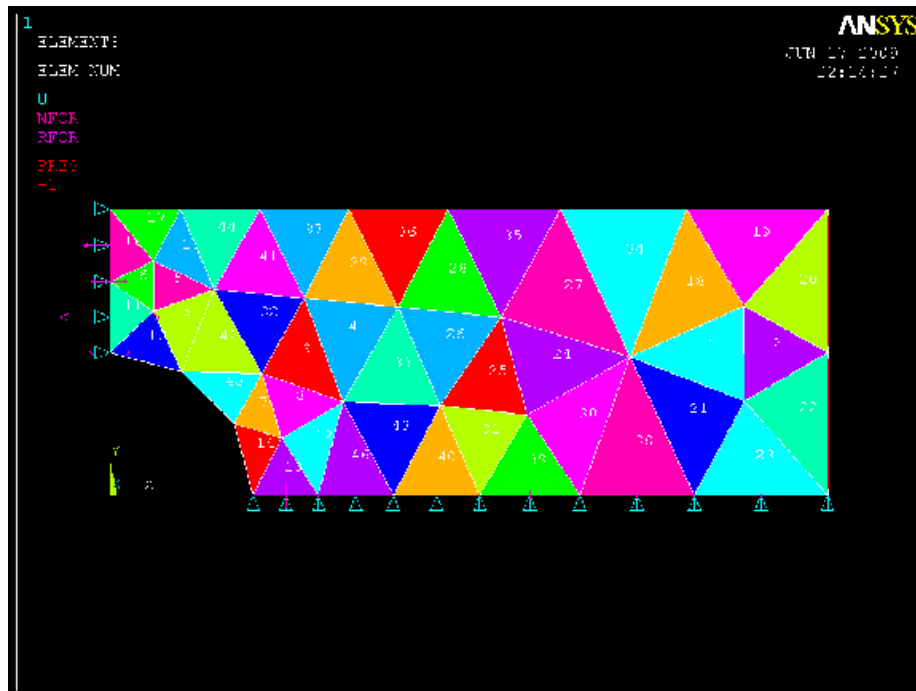
Σχήμα 1.20

Στην περίπτωση που θέλουμε να δούμε τα στοιχεία αριθμημένα θα επιλέξουμε από το **utility menu > plot cntrls > numbering** και στην καρτέλα που εμφανίζεται, σχήμα 1.21, δίπλα στο *elem/attrib numbering* επιλέγουμε **elements number**.



Σχήμα 1.21

Στο σχήμα 1.22 φαίνεται το έλασμα με αριθμημένα στοιχεία.



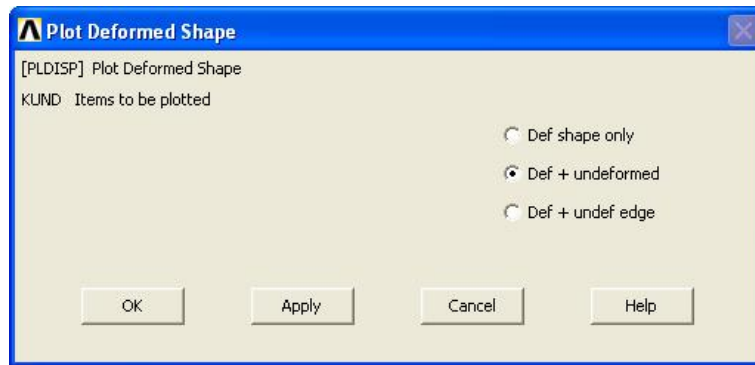
Σχήμα 1.22

### Γ) ΜΕΤΑ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ / ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

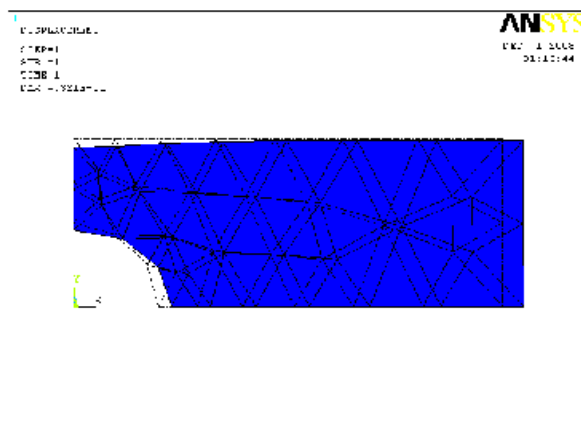
Το επόμενο στάδιο επίλυσης είναι ουσιαστικά και το τελευταίο, αφού έχουμε να δούμε **a)** την μορφή που θα πάρει το έλασμα, **b)** πού θα εμφανιστεί η αναπτυσσόμενη τάση και **c)** ποιά θα είναι η τιμή της. Άρα πλέον αφήνουμε από το κεντρικό μενού την επιλογή **solution** και πάμε στην **general postproc**.

**Βήμα 14:** Το παραμορφωμένο σώμα θα το δούμε από την επιλογή στο αριστερό μενού **general postproc > plot results > deformed shape** και στην καρτέλα, του σχήματος 1.21, που εμφανίζετε επιλέγουμε **def.+Undeformed** και πατάμε **OK**.

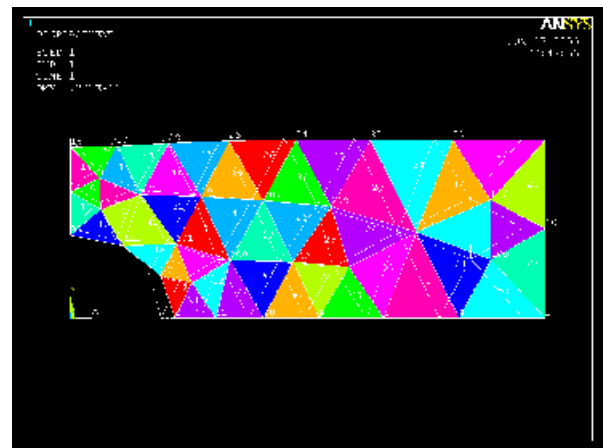


Σχήμα 1.21

Στο σχήμα 1.22(a) και 1.22(b) φαίνετε το παραμορφωμένο σώμα μετά από άσκηση της εφελκυστικής πίεσης του  $1.0 \text{ N/m}^2$  και την εφαρμογή των πακτώσεων όπως έχουμε προαναφέρει.



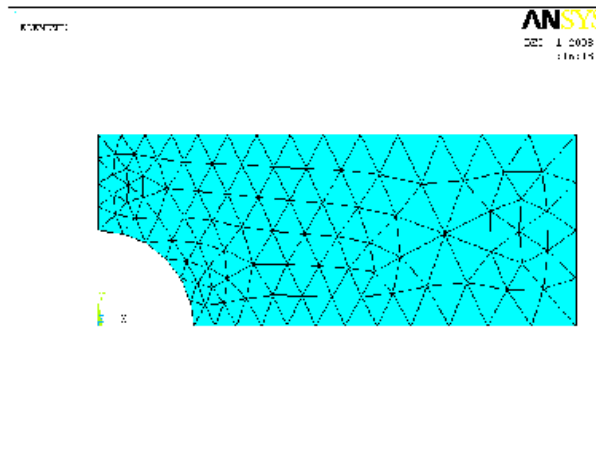
Σχήμα 1.22(a)



Σχήμα 1.22(b)

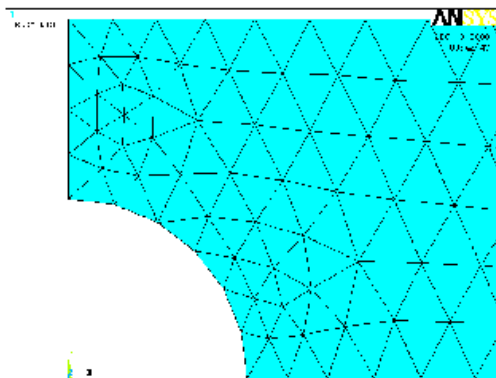
**Βήμα 15:** Τώρα θα δούμε την τάση στον x άξονα. Από το αριστερό μενού **general postproc > plot results > contour plot > element solution** εμφανίζετε ένα πινακάκι και επιλέγουμε **stress > x-component of stress** και πατάμε **OK**. Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 1.23 που μας δείχνει με κόκκινο χρώμα την μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση.



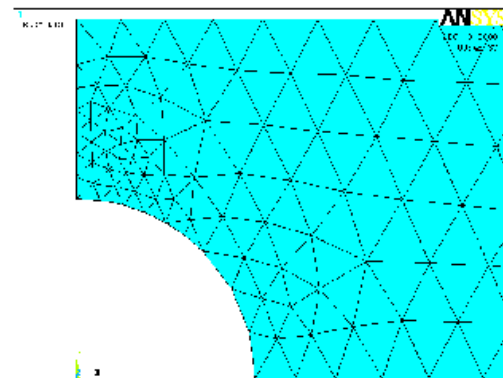


Σχήμα 1.25

**Βήμα 17:** Για καλύτερα αποτελέσματα κάνουμε μια τοπική διακριτοποίηση στους κόμβους, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.26 και 1.27, που βρέθηκε η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση. Από το αριστερό μενού **preprocessor > meshing > modify mesh > refine at > nodes** εμφανίζεται μία καρτέλα και ένας κέρσορας με τον οποίο επιλέγουμε τους τρεις κόμβους στο σημείο που βρίσκεται η μέγιστη τάση, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.26.



Σχήμα 1.26



Σχήμα 1.27

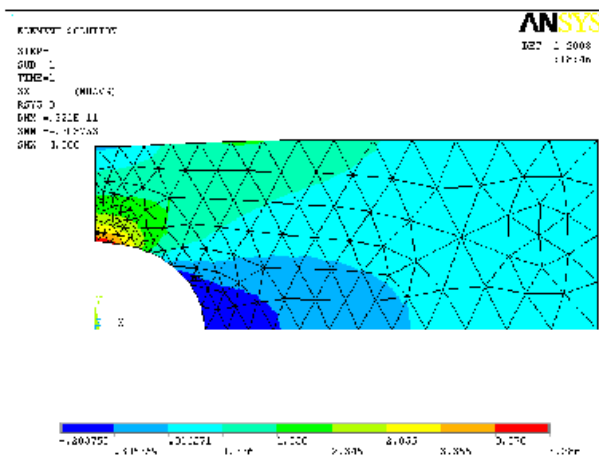
Αφού διαλέξαμε τους τρεις κόμβους πατάμε **OK** στο καρτελάκι και εμφανίζεται η καρτέλα *refine all selections elements* όπου επιλέγουμε για **level of refinement, 1(minimal)** και πατάμε **OK**. Πλέον το σώμα έχει την διακριτοποίηση του σχήματος 1.27.

Τώρα θα επαναλάβουμε τα βήματα 13 και 15 για να δούμε τα νέα μας αποτελέσματα.

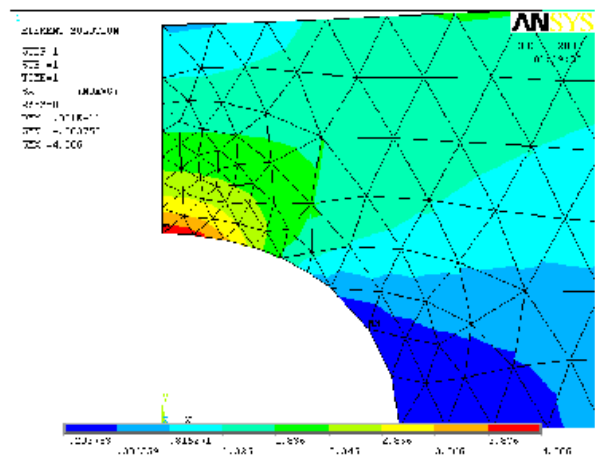
**Βήμα 18:** Από το αριστερό κεντρικό μενού διαλέγουμε **solution > solve > current LS**. Βλέπουμε τι θα λύσει και στην καρτέλα που εμφανίζεται πατάμε **OK**.

Στην συνέχεια εμφανίζετε ένα μήνυμα που μας δηλώνει ότι η λύση έγινε και πατάμε **close** στο καρτελάκι. Παρατηρούμε ότι αλλάζοντας την διακριτοποίηση αυξήθηκαν και τα σύμβολα που ορίζουν την πάκτωση.

**Βήμα 19:** Από το αριστερό μενού, κλείνουμε το μενού του solution και πάμε, **general postproc > plot results > contour plot > element solution**. Εμφανίζετε ένα πινακάκι και επιλέγουμε **stress > x-component of stress** και πατάμε **OK**. Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 1.28, σε μεγέθυνση στο σχήμα 1.29, που μας δείχνει με κόκκινο χρώμα την μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στην λύση των στοιχείων (element solution) στον άξονα x.



Σχήμα 1.28



Σχήμα 1.29



## Π.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑ 3.2: ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΒΟΛΟΥ ΔΟΚΟΥ (CANTILEVER BEAM)

**Βήμα 1:** Αν συνεχίζουμε από πριν τότε πρέπει να δώσουμε ένα νέο Jobname και να αλλάξουμε πιθανών φάκελο, που θα αποθηκεύσουμε το νέο αρχείο db.

Άρα από το **utility menu**, επιλέγουμε **file > clear & start new**, για να ξεκινήσουμε νέο αρχείο. Στο καρτελάκι που εμφανίζετε επιλέγουμε **do not read file** και πατάμε **OK**. Επίσης από το **utility menu** επιλέγουμε ξανά **file > change title** και εμφανίζετε μια καρτέλα όπου δίνουμε το νέο όνομα και πατάμε **OK**.

Στην περίπτωση που ανοίγουμε τώρα το πρόγραμμα ANSYS v 9.0, στο μενού **Launch**, διαλέγουμε το περιβάλλον που θα δουλέψουμε επιλέγοντας **ANSYS** και τον τρόπο επεξεργασίας με άδεια **ANSYS mechanical U**. Στο μενού **File management**, στο working directory επιλέγουμε τον φάκελο που θα αποθηκεύσουμε το αρχείο και στο **Jobname** γράφουμε το όνομα που θ' αποθηκευτεί η δουλειά μας. Στη συνέχεια επιλέγουμε **RUN**.

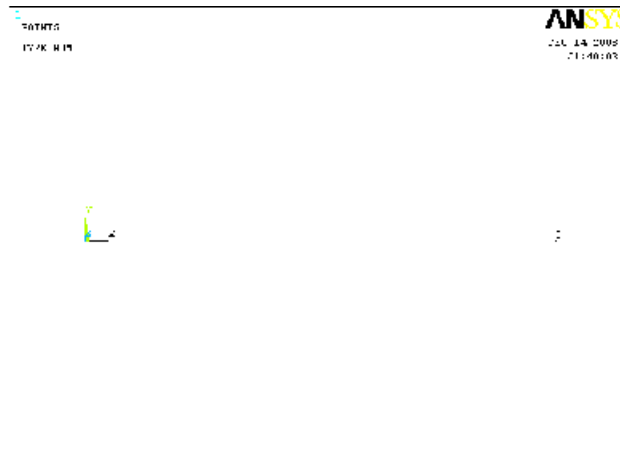
### A) ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ PREPROCESSOR

#### 1.ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

**Βήμα 2:** Από το **main menu** επιλέγουμε **preprocessor > modeling > create > keypoints > in active CS** και στην καρτέλα που εμφανίζετε δίνουμε τα παρακάτω πατώντας **accept** και **OK** αντίστοιχα.

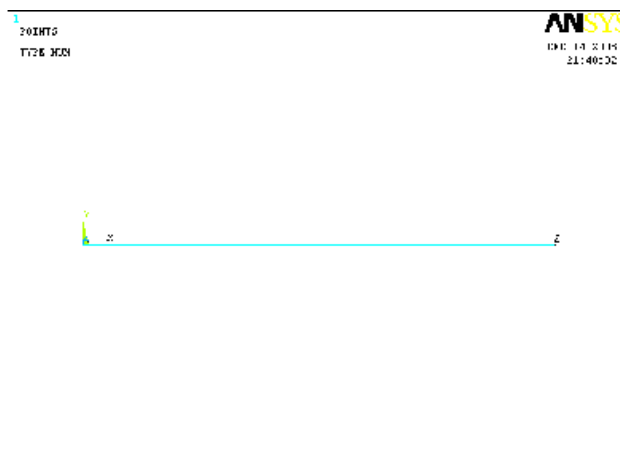
KEYPOINTS	CORDINATE (x, y, z)
1	0, 0, 0
2	1, 0, 0

Μας εμφανίζονται δύο keypoints όπως στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1

**Βήμα 3:** Για να δημιουργήσουμε γραμμή μεταξύ των δύο keypoints επιλέγουμε από το *main menu* > **preprocessor** > **modeling** > **create** > **lines** > **lines** > **in active Coord** και εμφανίζεται μια καρτέλα και ένας κέρσορας με τον οποίο διαλέγουμε το keypoint 1 και 2. Στη συνέχεια πατάμε **OK** και έχουμε το σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2

## 2.ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

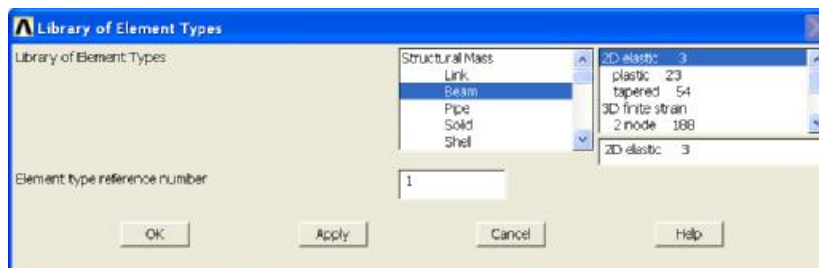
**Βήμα 4:** Για την επιλογή του στοιχείου θα διαλέξουμε, beam εφόσον μιλάμε για δοκάρη και 2D elastic 3. Από το αριστερό κεντρικό μενού επιλέγουμε **preprocessor** > **element type** > **add/edit/delete** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 2.3.



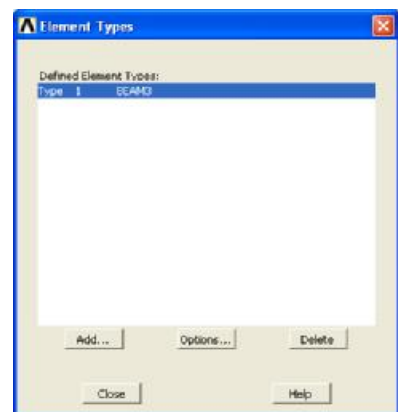
Σχήμα 2.3

Κάνουμε κλικ στο add και εμφανίζεται η καρτέλα με την βιβλιοθήκη των στοιχείων του σχήματος 2.4. Επιλέγουμε **Beam** στο αριστερό τμήμα και **2D elastic 3** στο δεξιό και πατάμε **OK**. Το στοιχείο προστίθεται στην καρτέλα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5 και πατάμε **close**.

Το στοιχείο που διαλέξαμε είναι το **beam3** το οποίο έχει 3 βαθμούς ελευθερίας με τον άξονα x να συμπίπτει με τον διαμήκη άξονα της δοκού και τον άξονα y να κατευθύνεται προς τα κάτω. Οπότε οι άξονες y και z ορίζουν το επίπεδο της διατομής.



Σχήμα 2.4

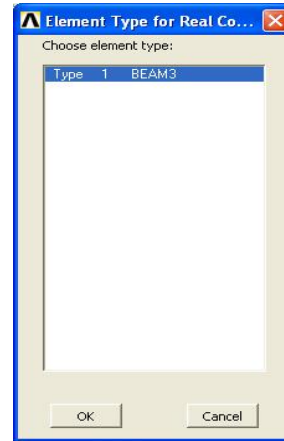


Σχήμα 2.5

**Βήμα 5:** Για να περάσουμε ως ιδιότητα την γεωμετρία του δοκαριού επιλέγουμε από το αριστερό κεντρικό μενού **preprocessor > real constant > add/edit/delete**. Εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 2.6 και πατάμε add για να προσθέσουμε το στοιχείο beam3 όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7 και πατάμε **OK**.

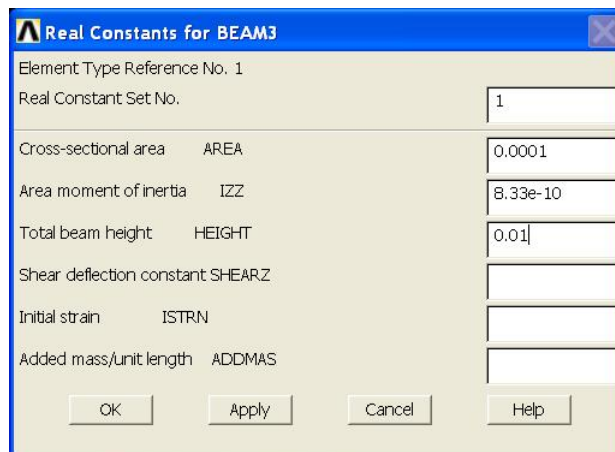


Σχήμα 2.6



Σχήμα 2.7

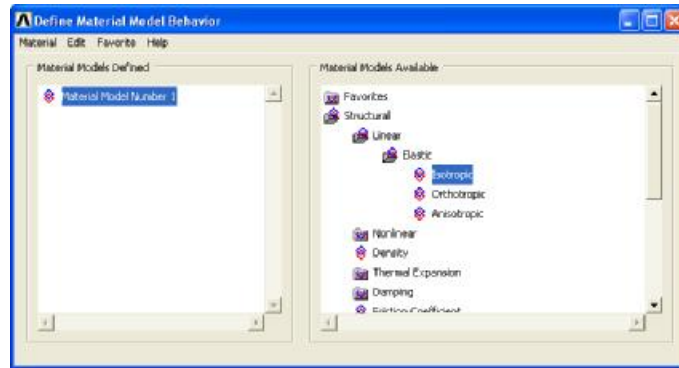
Πατώντας **OK** εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 2.8 όπου θα ορίσουμε τις ιδιότητες του στοιχείου beam3. Συμπληρώνουμε ακολούθως:



Σχήμα 2.8

### 3.ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

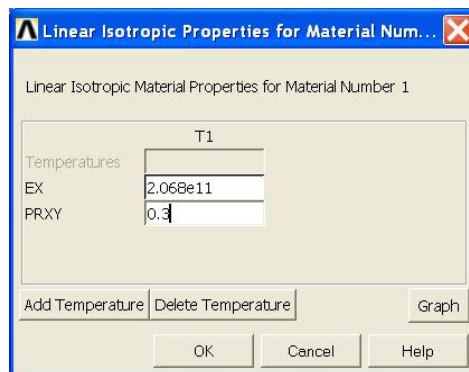
**Βήμα 6:** Από το αριστερό κεντρικό μενού επιλέγουμε **preprocessor > material props > material models** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 2.9 όπου θα επιλέξουμε την συμπεριφορά του υλικού.



Σχήμα 2.9

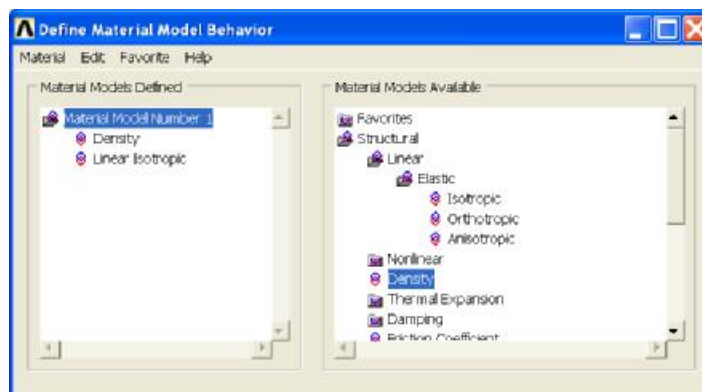
Κάνουμε διπλό κλικ στα **structural > linear > elastic > isotropic** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 2.10.

Δίνουμε μέτρο ελαστικότητας  $E_X = 2.068e11$  και λόγο Poisson  $PR_{XY} = 0,3$ .



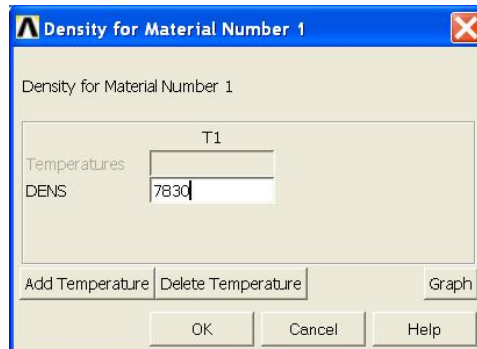
Σχήμα 2.10

Για να δηλώσουμε την πυκνότητα του υλικού επιλέγουμε density, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11

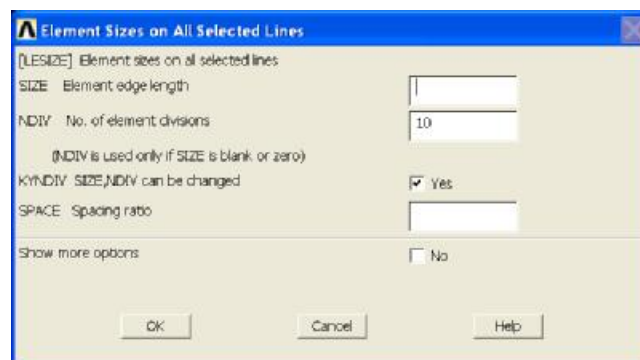
Εμφανίζετε η καρτέλα του σχήματος 2.12 και βάζουμε πυκνότητα  $7830 \text{ kg/m}^3$ . Στην συνέχεια πατάμε **OK**.



Σχήμα 2.12

#### 4.ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

**Βήμα 7:** Από το αριστερό κεντρικό μενού διαλέγουμε **preprocessor > meshing > size cntrls > manual size > lines > all lines** για να καθορίσουμε το μέγεθος του στοιχείου σε όλη την γραμμή/δοκάρι. Γράφουμε στο **No. Of element division**, 10 και πικάρουμε **yes** στο **size can be change**. Στην συνέχεια πατάμε **OK** στην καρτέλα του σχήματος 2.13.



Σχήμα 2.13

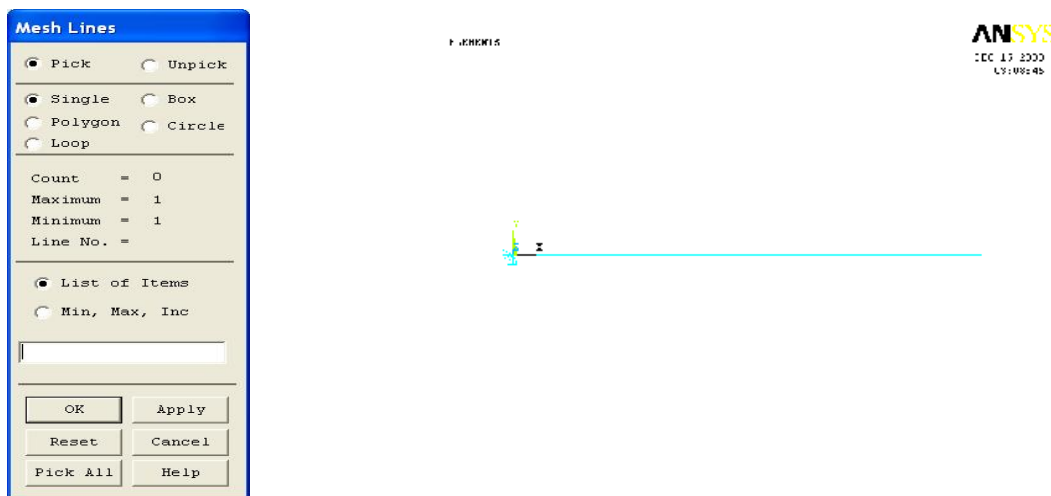
Αυτό που κάναμε, είναι να διαιρέσουμε ανά 10 τα στοιχεία στο συνολικό μήκος του δοκαριού που είναι 1000 mm. Στην οθόνη θα εμφανιστεί όπως στο σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.13

Το 'M' δηλώνει το κέντρο/μέσο της γραμμής

**Βήμα 8:** Για την διακριτοποίηση του δοκαριού, επιλέγουμε από το αριστερό κεντρικό μενού **preprocessor > meshing > mesh > lines** και στην καρτέλα που εμφανίζεται πατάμε **pick all**.



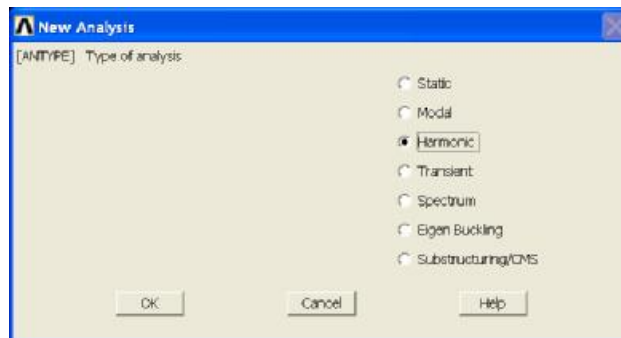
Βλέπουμε ότι μας έδωσε τα keypoints, την διαίρεση ανά 10 και το σύμβολο του μέσου της γραμμής.

## B) ΕΠΙΛΥΣΗ SOLUTION

### 5.ΕΙΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΟΚΑΡΙΟΥ

Μετά την επεξεργασία (preprocessor) ακολουθεί η λύση και η ανάλυση του προβλήματος. Έτσι λοιπόν από το αριστερό κεντρικό μενού επιλέγουμε πλέον **solution**.

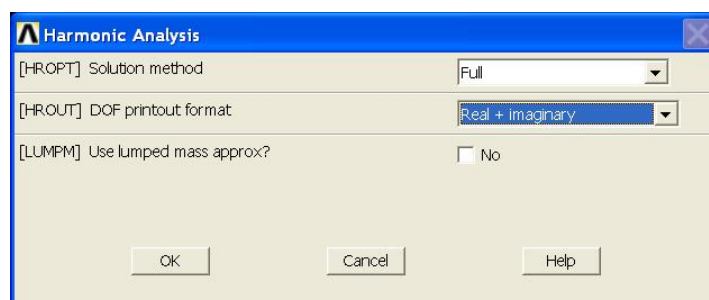
**Βήμα 9:** Για μια καινούρια ανάλυση επιλέγουμε το είδος από το αριστερό μενού **solution > analysis type > new analysis** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 2.14, όπου διαλέγουμε να κάνουμε **αρμονική** ανάλυση και πατάμε **OK**.



Σχήμα 2.14

**Βήμα 10:** Υπάρχουν τρεις μέθοδοι για να διεξάγουμε μία αρμονική ανάλυση. Η μέθοδοι είναι η **Full**, η **Reduced** και η **Modal Superposition**. Εμείς θα επιλέξουμε την **Full**, διότι είναι πιο απλή και εύκολη από τις άλλες δύο μεθόδους.

Επιλέγουμε **solution > analysis type > Analysis Options** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 2.15 και την γεμίζουμε όπως φαίνεται παρακάτω.

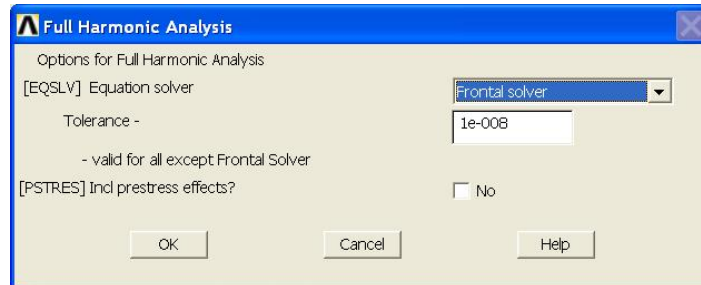


Σχήμα 2.15



Και στην συνέχεια πατάμε OK.

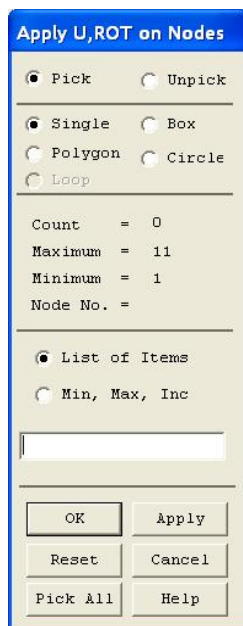
Μας εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 2.16 και την γεμίζουμε όπως φαίνεται παρακάτω. Πατάμε OK.



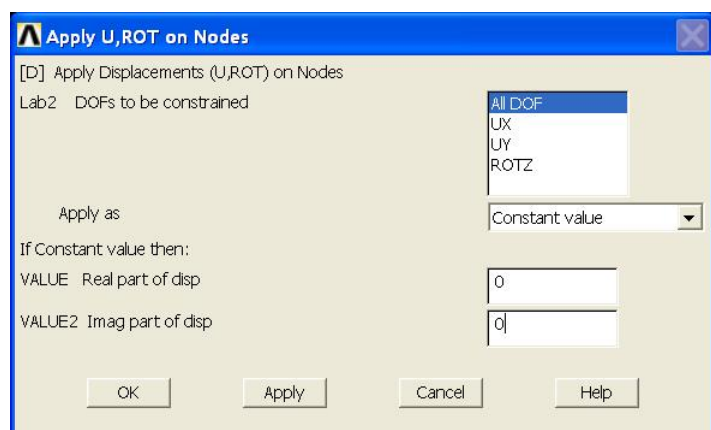
Σχήμα 2.15

## 6. ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ

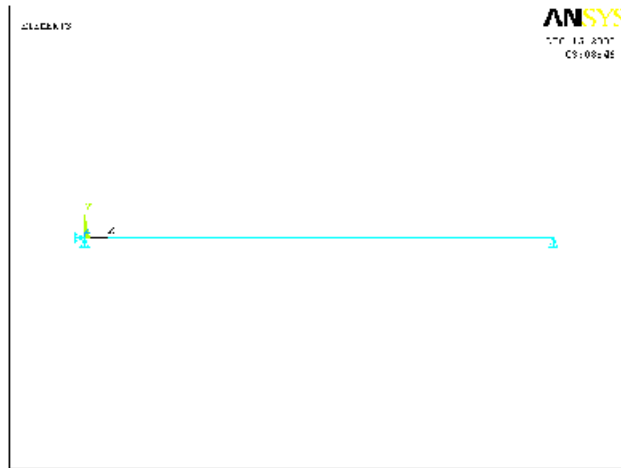
**Βήμα 12:** Για την εφαρμογή των στηρίξεων θα επιλέξουμε **solution > define loads > apply > structural > displacement > on nodes**. Εμφανίζεται μία καρτέλα (σχήμα 2.16) και ένας κέρσορας με τον οποίο θα επιλέξουμε αρχικά το σημείο (*keypoint*) 1 ( $x=0$ ) και θα πατήσουμε **OK**. Στη συνέχεια θα εμφανιστεί η καρτέλα του σχήματος 2.17 και θα επιλέξουμε **All Dof** (ορισμός πάκτωσης) όπως φαίνεται στο σχήμα και θα πατήσουμε **OK**.



Σχήμα 2.16



Σχήμα 2.17



Σχήμα 2.18

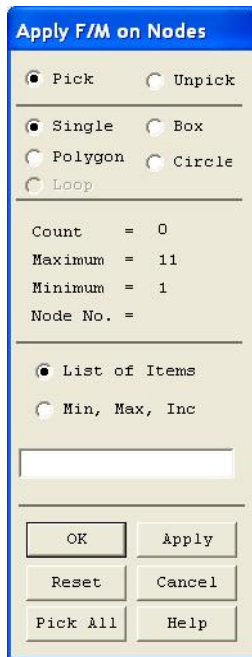
Παραπάνω, στο σχήμα 2.18, φαίνονται η στηρίξεις που τοποθετήσαμε.

## 7. ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

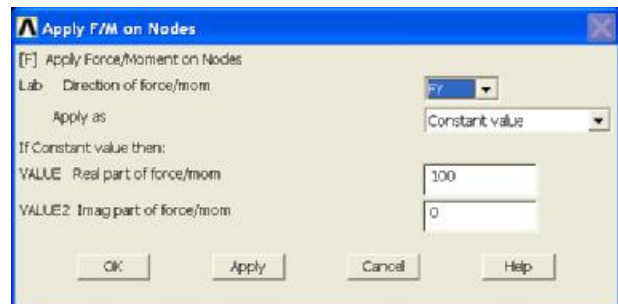
**Βήμα 13:** Από το αριστερό κεντρικό μενού επιλέγουμε **solution > define loads > apply > structural > force/moment > on nodes**. Εμφανίζεται μία καρτέλα (σχήμα 2.19) και ένας κέρσορας με τον οποίο επιλέγουμε το keypoint 2 ( $x=1$ ) και πατάμε **OK**.

Στη συνέχεια εμφανίζεται στην οθόνη μας η καρτέλα του σχήματος 2.20 και δίνουμε διεύθυνση στον  $y$  άξονα, να εφαρμοστεί ως πραγματική δύναμη και με τιμή 100 N. Επίσης γράφουμε την φανταστική τιμή της δύναμης με τιμή 0, όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα και στη συνέχεια πατάμε **OK**.

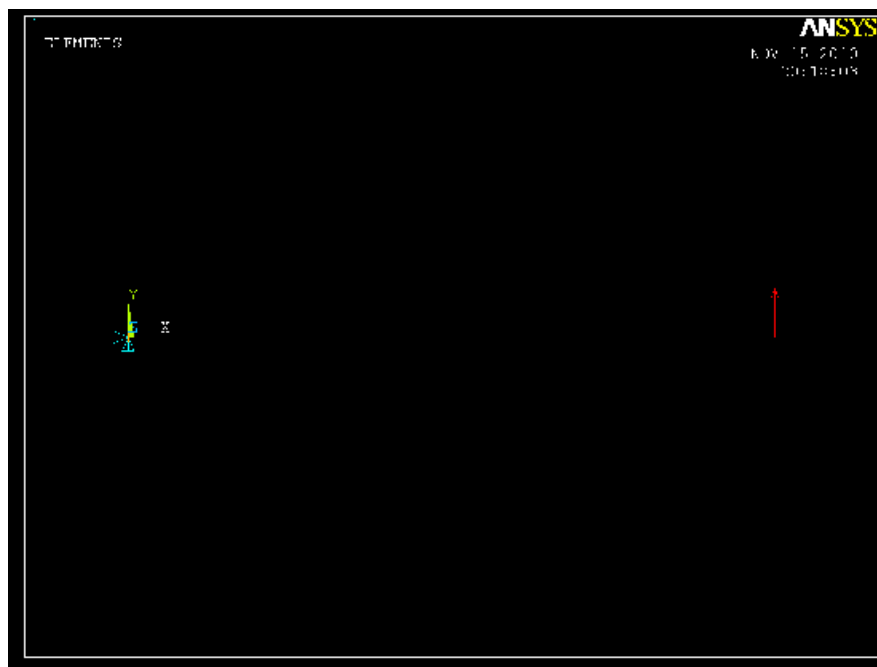
Η εφαρμοσμένη δύναμη θα φανεί με τη μορφή ενός κόκκινου βέλους, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.21 παρακάτω



Σχήμα 2.19



Σχήμα 2.20

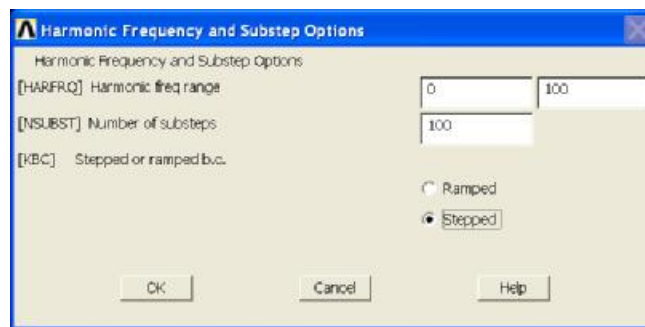


Σχήμα 2.21

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ:** Με 100 δηλώσαμε την φόρτιση και με 0 την φάση. Στην αρμονική ανάλυση τα φορτία που εφαρμόζονται στην κατασκευή πρέπει να έχουν ίδια συχνότητα.

## 8. ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΥΡΟΥΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

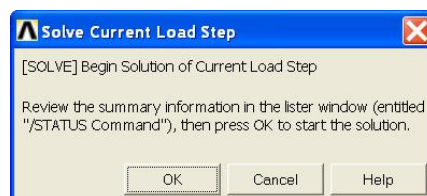
**Βήμα 14:** Επιλέγουμε **Solution > Load step Opts > Time/frequency > Freq and Substps** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 2.22. Δηλώνουμε εύρος από 0 έως 100 Hz και 100 substeps, όπως φαίνεται παρακάτω.



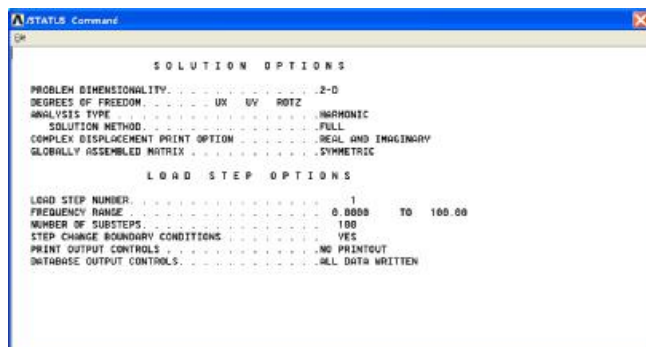
Σχήμα 2.22

## 9.ΑΝΑΛΥΣΗ (Postprocessing)

**Βήμα 15:** Επιλέγουμε από το αριστερό μενού **solution > solve > current LS** και εμφανίζονται οι παρακάτω καρτέλες. Στην καρτέλα του σχήματος 2.23 μας ενημερώνει να ελέγξουμε την κατάσταση του προβλήματος, που έχουμε να λύσουμε όπως φαίνεται στο σχήμα 2.24 και τότε να πατήσουμε **OK** για να ξεκινήσει η λύση.



Σχήμα 2.23



Σχήμα 2.24



Σχήμα 2.25

Πατώντας **OK** εμφανίζετε ένα παράθυρο που μας διαβεβαιώνει ότι η λύση έγινε (σχήμα 2.25) και πατάμε **close** σε αυτό. Στη συνέχεια κλείνουμε το παράθυρο, με την κατάσταση του προβλήματος, το οποίο παραμένει ανοιχτό.

## Γ) ΜΕΤΑ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ / ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

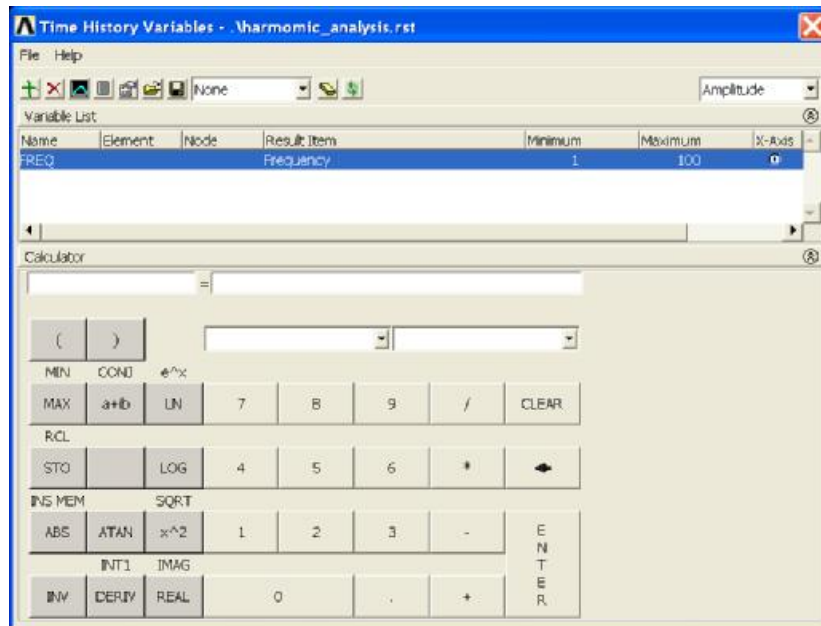
### 10. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

**Βήμα 16:** Θέλουμε να παρατηρήσουμε την απόκριση της συχνότητας στον κόμβο 2 ( $x=1$ ), όπου εφαρμόζεται η δύναμη. Για να γίνει αυτό πρέπει να χρησιμοποιήσουμε από το κύριο μενού την επιλογή **TimeHist Postprocessing** και όχι την επιλογή **General Postprocessing**.


Στην συγκεκριμένη ανάλυση θα ορίσουμε τις μεταβλητές που θέλουμε να πλοτάρουμε. Η μεταβλητή 1 (Variable 1) αποδίδεται είτε ως Περίοδο (Time) είτε ως Συχνότητα (Frequency). Στην δικιά μας περίπτωση θα την αποδώσουμε ως συχνότητα. Θέλουμε να δούμε την μετατόπιση ως προς τον  $y$  άξονα, στον κόμβο 2.

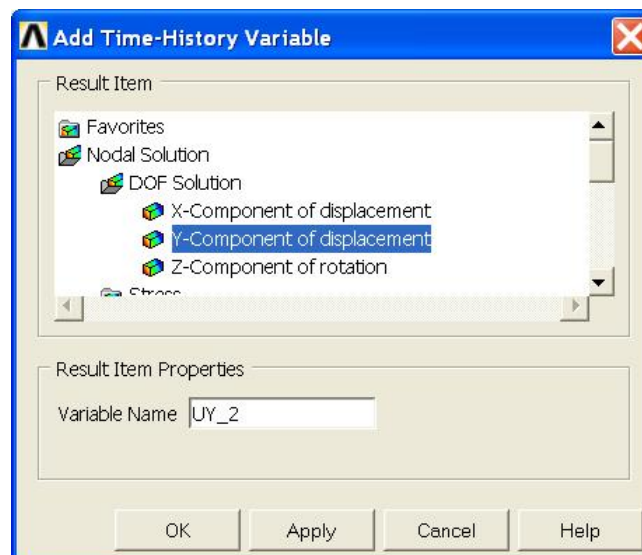
Για να δούμε την λίστα με τους κόμβους επιλέγουμε από το **utility menu > List > nodes**

Ορίζουμε μεταβλητές επιλέγοντας από το αριστερό μενού **TimeHist Postprocessing > TimeHist Postproc > Variable Viewer** και εμφανίζεται η παρακάτω καρτέλα του σχήματος 2.26



Σχήμα 2.26

Επιλέγουμε add  από την παραπάνω καρτέλα και μας εμφανίζεται η παρακάτω του σχήματος 2.27.

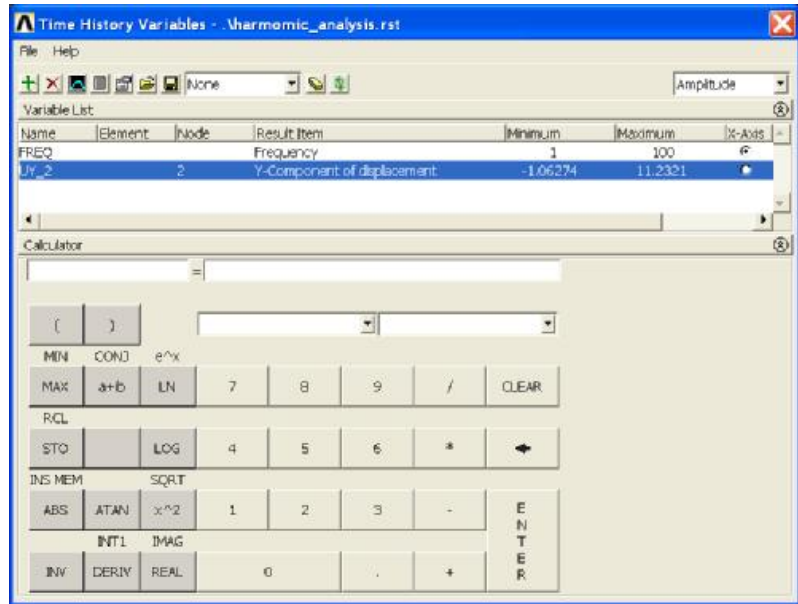


Σχήμα 2.27

Επιλέγουμε **Nodal Solution > Y-Component of Displacement** και πατάμε **OK**. Στην συνέχεια εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 2.28 και επιλέγουμε με τον ενεργό κέρσορα τον κόμβο 2 και πατάμε **OK**.




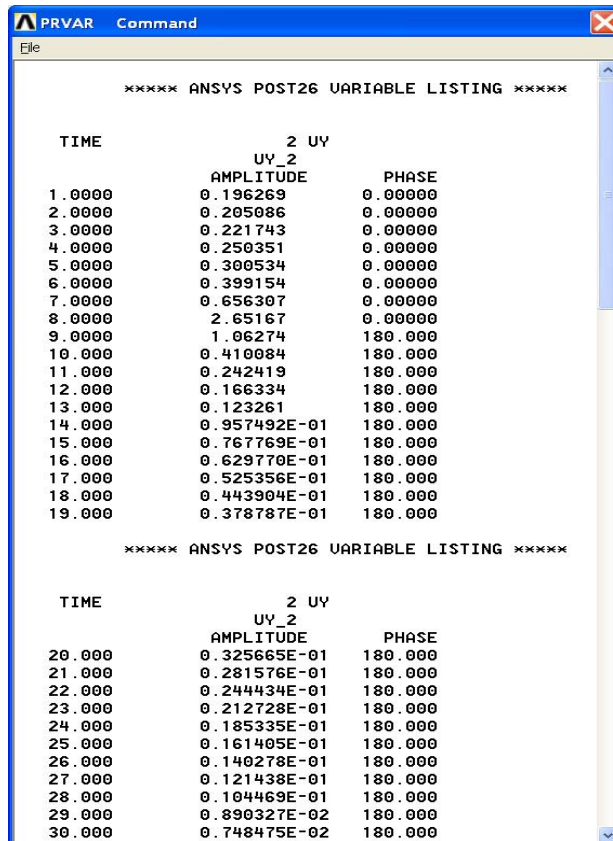
Σχήμα 2.28




Σχήμα 2.29

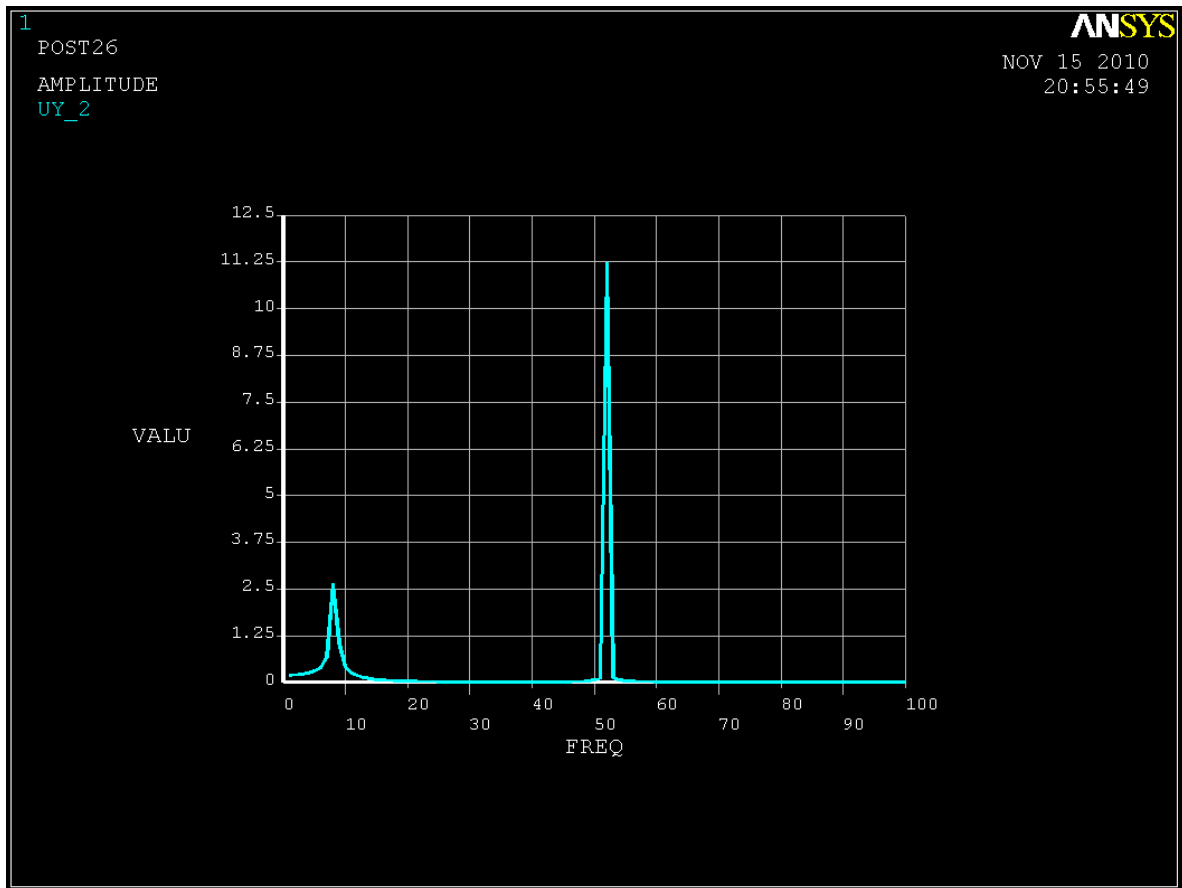
Έτσι περάσαμε την μεταβλητή ως συχνότητα και φαίνεται στο παράθυρο του σχήματος 2.29.

Στο παράθυρο του σχήματος 2.29 πατάμε το List  και εμφανίζεται η λίστα με τις μεταβλητές ανά φάση.



## 10. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ (UY-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ)

**Βήμα 17:** Στο παράθυρο του σχήματος 2.29 επιλέγουμε Plot  και εμφανίζεται το παρακάτω γράφημα του σχήματος 2.30

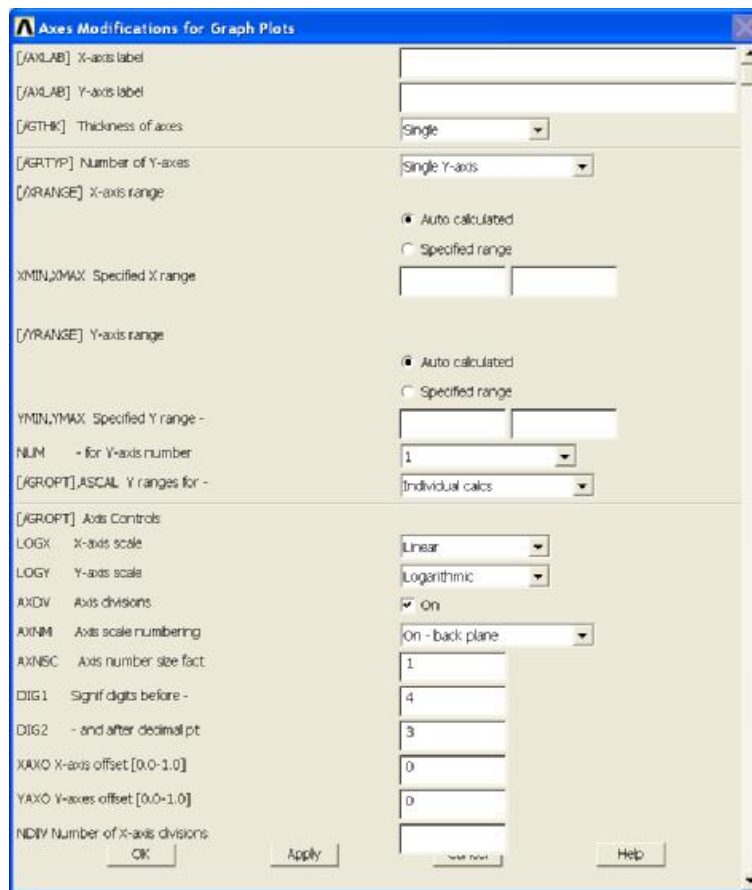


Σχήμα 2.30

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα παίρνουμε κορυφές (peaks) στις συχνότητες 8.3 και 51 Hz.

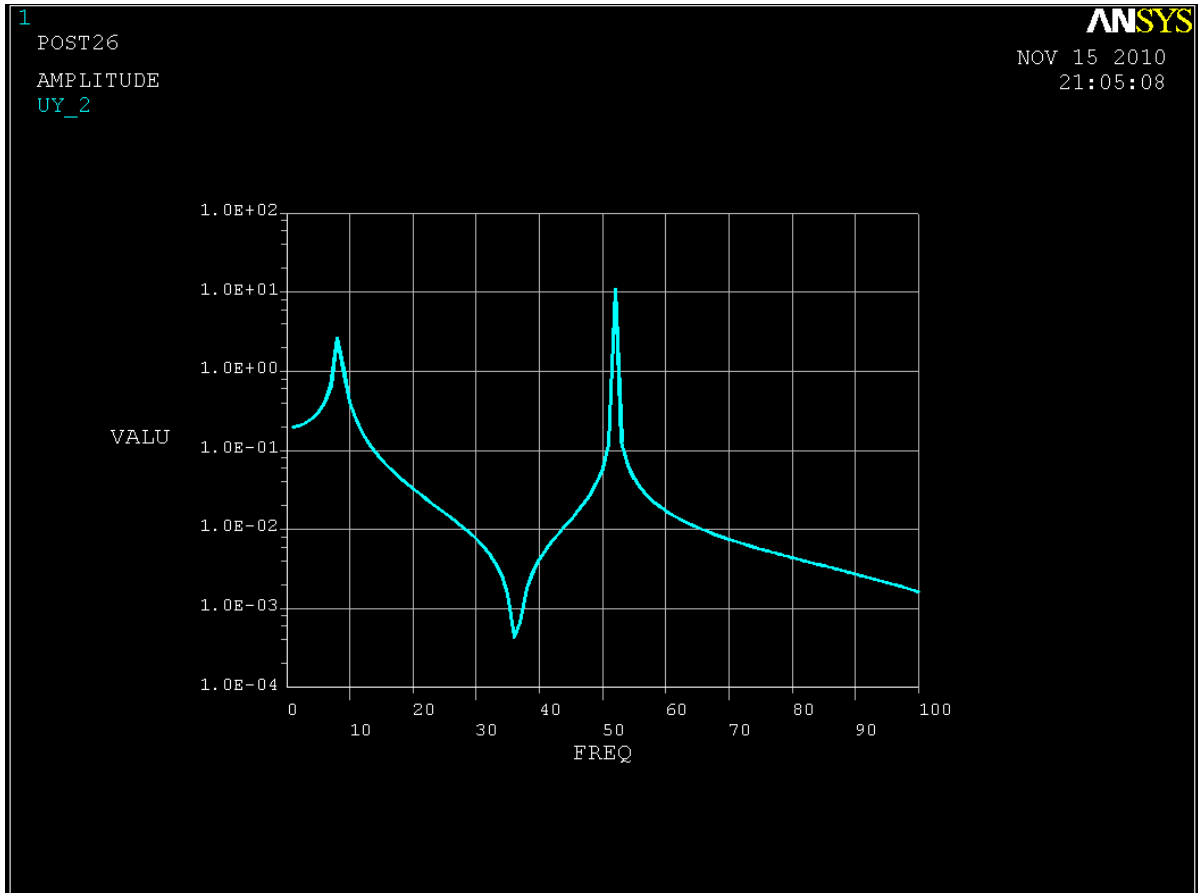
Για να έχουμε μια καλύτερη εικόνα της απόκρισης της αρμονικής ταλάντωσης επιλέγουμε από το **utility menu > Plotctrls > Style > Graphs > Modify Axis** και στην καρτέλα του σχήματος 2.31 που εμφανίζεται γεμίζουμε όπως φαίνεται παρακάτω.





Σχήμα 2.31

Επιλέγουμε **utility menu > Plot > Replot** και εμφανίζεται το παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 2.32



**Σχήμα 2.32**

Αυτή είναι η απόκριση της αρμονικής ταλάντωσης για την κυκλική φόρτιση που εφαρμόζεται στον κόμβο 2 από 0 έως 100 Hz

### Π3. ΠΡΟΒΛΗΜΑ 3.3: ΑΝΑΛΥΣΗ 2-D ΣΤΑΤΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΟΣ

**Βήμα 1:** Αν συνεχίζουμε από πριν τότε πρέπει να δώσουμε ένα νέο Jobname και να αλλάξουμε πιθανών φάκελο, που θα αποθηκεύσουμε το νέο αρχείο db.

Άρα από το **utility menu**, επιλέγουμε **file > clear & start new**, για να ξεκινήσουμε νέο αρχείο. Στο καρτελάκι που εμφανίζεται επιλέγουμε **do not read file** και πατάμε **OK**. Επίσης από το **utility menu** επιλέγουμε ξανά **file > change title** και εμφανίζεται μια καρτέλα όπου δίνουμε το νέο όνομα και πατάμε **OK**.

Στην περίπτωση που ανοίγουμε τώρα το πρόγραμμα ANSYS v 9.0, στο μενού **Launch**, διαλέγουμε το περιβάλλον που θα δουλέψουμε επιλέγοντας **ANSYS** και τον τρόπο επεξεργασίας με άδεια **ANSYS mechanical U**.

Στο μενού **File management**, στο working directory επιλέγουμε τον φάκελο που θα αποθηκεύσουμε το αρχείο και στο **Jobname** γράφουμε το όνομα που θ' αποθηκευτεί η δουλειά μας. Στη συνέχεια επιλέγουμε **RUN**.

#### **A) ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΡΟΤΙΜΗΣΗΣ**

Επιλέγουμε την δομική (*structural*) προτίμηση, για να εργαστούμε, διότι δεν χρειαζόμαστε άλλες επιλογές όπως *thermal* και *fluid* μιας και δεν θα ασχοληθούμε με θερμικά και ρευστομηχανικά προβλήματα. Αυτό βοηθά λίγο πλοηγώντας τις απέραντες επιλογές που έχει το ANSYS.

Από το **main menu** επιλέγουμε **preferences** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 3.6. Επιλέγουμε **structural** και πατάμε **OK**

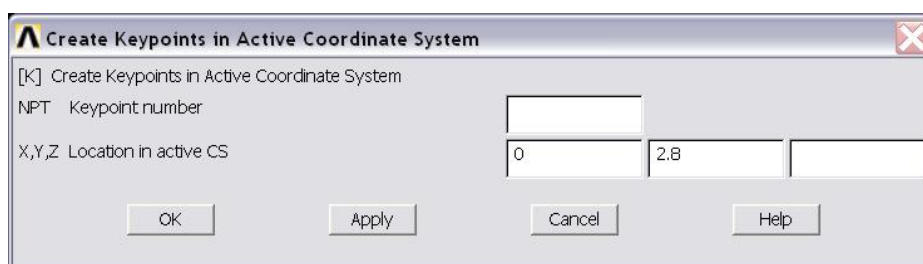


Σχήμα 3.6

## B) ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ PREPROCESSOR

### 1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

**Βήμα 2:** Θέλουμε να δημιουργήσουμε 3 σημεία και να τα ενώσουμε με γραμμές. Από το **main menu** επιλέγουμε, **preprocessor > modeling > create > keypoints > in active cs**, για να δημιουργήσουμε τα σημεία. Μας εμφανίζεται η παρακάτω καρτέλα του σχήματος 3.7. Δίνουμε τις τιμές που φαίνονται στο σχήμα 3.8, πατώντας apply για τα keypoints 1, 2 και OK για το keypoint 3.



Σχήμα 3.7

<b>Keypoint number</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
1	0	2.8	0
2	1.5	2.0	0
3	0	0	0

Σχήμα 3.8

Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 3.9.



**Σχήμα 3.9**

Για να ελέγξουμε αν τα σημεία έγιναν σωστά μπορούμε να επιλέξουμε από το **utility menu > List > keypoints > coordinates only** και μας εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 3.10, όπου μας δείχνει τις συντεταγμένες και τις γωνίες περιστροφής για τα keypoints.

NO.	X,Y,Z LOCATION	THXY, THYZ, THZX	ANGLES
1	0.000000 2.800000 0.000000	0.0000 0.0000 0.0000	0.0000
2	1.500000 2.000000 0.000000	0.0000 0.0000 0.0000	0.0000
3	0.000000 0.000000 0.000000	0.0000 0.0000 0.0000	0.0000

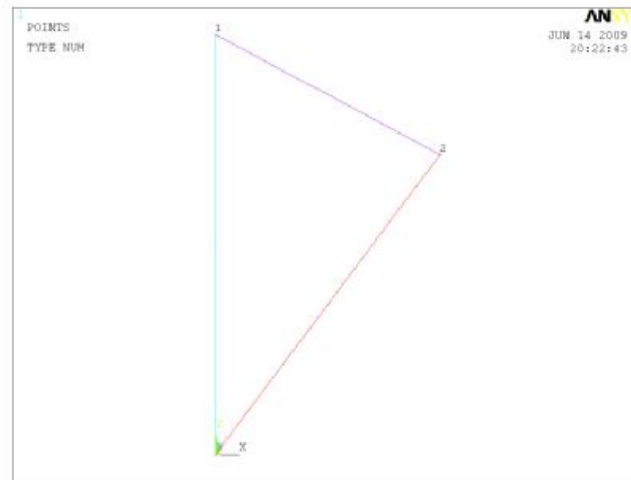
**Σχήμα 3.10**

Μπορούμε να περιστρέψουμε το σύστημα συντεταγμένων που συνδέεται με κάθε σημείο και αυτό είναι που οι γωνίες περιστροφής THXY, THYZ και THZX αναφέρουν. Στην περίπτωση μας δεν πρέπει να περιστρέψουμε το σύστημα συντεταγμένων και έτσι οι γωνίες περιστροφής είναι όμοια μηδέν.

Κλείνουμε το παράθυρο.

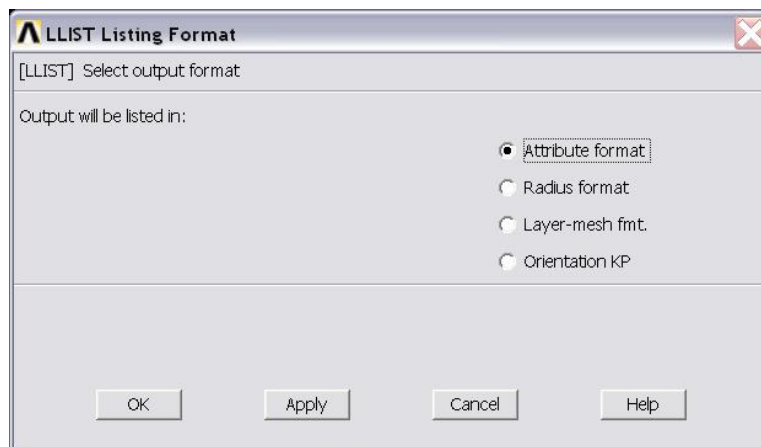
**Βήμα3:** Αφού δημιουργήσαμε τα σημεία, τώρα θα τα ενώσουμε. Από το **main menu > preprocessor > modeling > create > Lines > Lines > In active Coord.** Εμφανίζεται ένα καρτελάκι και ο κέρσορας γίνεται ένα ενεργό βέλος. Επιλέγουμε το

σημείο 1 και το σημείο 3. Ομοίως το σημείο 1 και 2 και τέλος τα σημεία 2 και 3. Πατάμε **OK** στην καρτέλα και έχουμε το αποτέλεσμα του σχήματος 3.11.

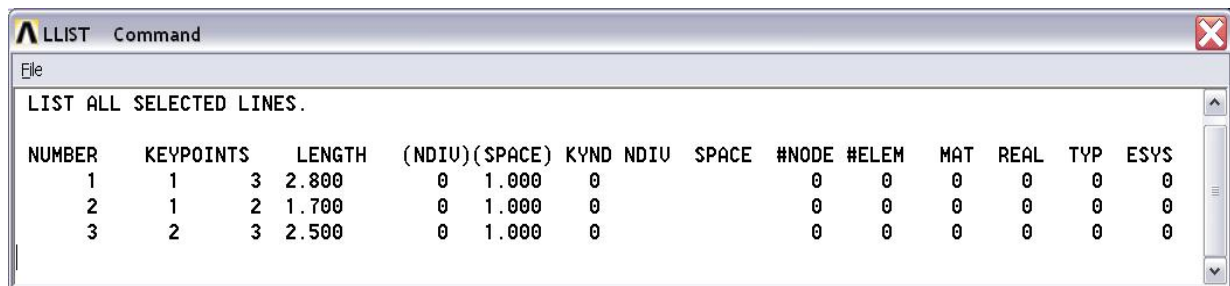


**Σχήμα 3.11**

Για να ελέγξουμε τις γραμμές που δημιουργήσαμε επιλέγουμε από το **utility menu > List > Lines**. Εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 3.12 και την γεμίζουμε όπως φαίνεται παρακάτω. Πατάμε **OK** και εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 3.13.



**Σχήμα 3.12**

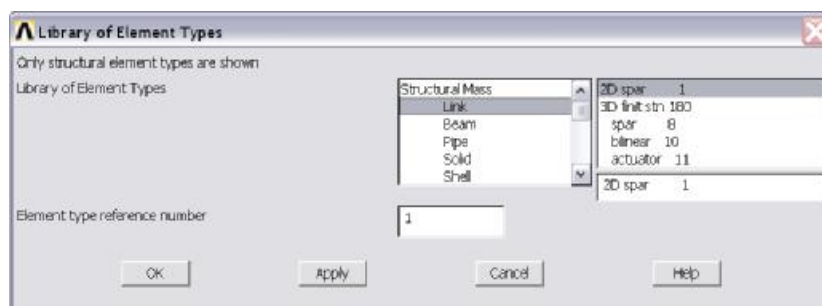


Σχήμα 3.13

Κλείνουμε το παράθυρο **file > close**.

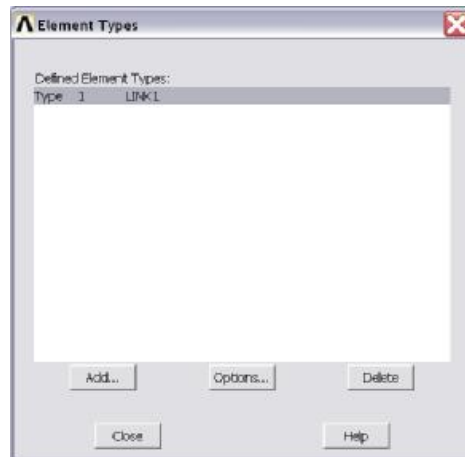
## 2.ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

**Βήμα 4:** Για την επιλογή του στοιχείου θα διαλέξουμε *link* εφόσον μιλάμε για ράβδο και 2D spar 1. Από το αριστερό κεντρικό μενού επιλέγουμε **preprocessor > element type > add/edit/delete**. Στην καρτέλα που εμφανίζεται πατάμε **add** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 3.14.



Σχήμα 3.14

Επιλέγουμε στον αριστερό τομέα **link** και στον δεξιό **2D spar 1** και πατάμε **OK**. Βλέπουμε στο σχήμα 3.15 ότι προστέθηκε το στοιχείο που επιλέξαμε με την ονομασία **LINK1**.



Σχήμα 3.15

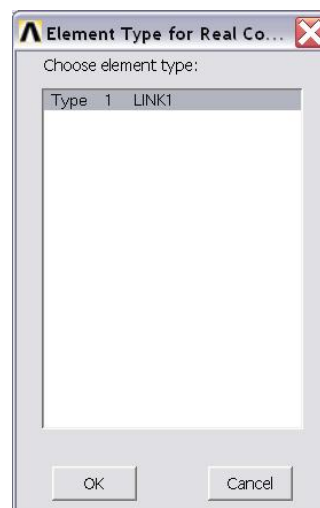
Κλείνουμε την καρτέλα του σχήματος 3.15 πατώντας **close**.

**Βήμα 5:** Για να εισάγουμε την σταθερά της διατομής που έχει κάθε μέλος του στοιχείου link1, ως ιδιότητα, θα επιλέξουμε από το **main menu > preprocessor > real constants > add/edit/delete** και θα εμφανιστεί η καρτέλα του σχήματος 3.16. Πατάμε **add** και μας εμφανίζει την καρτέλα του σχήματος 3.17, όπου βλέπουμε να προστίθεται το στοιχείο μας και πατάμε **OK**.

Ανοίγει η καρτέλα του σχήματος 3.18 για να δώσουμε την διατομή. Δίπλα στο **AREA** γράφουμε **0.01** και πατάμε **OK**.

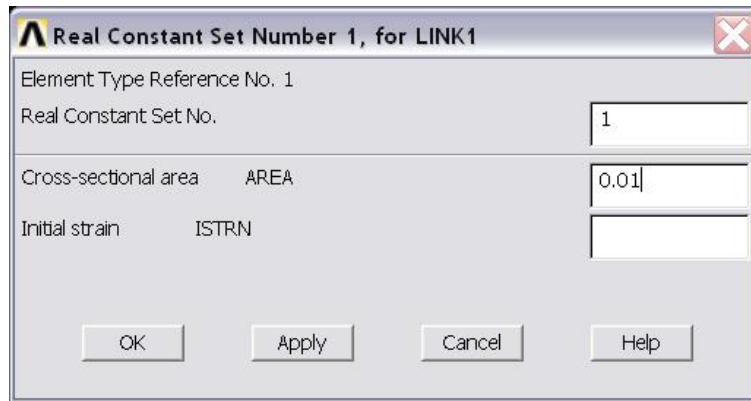


Σχήμα 3.16



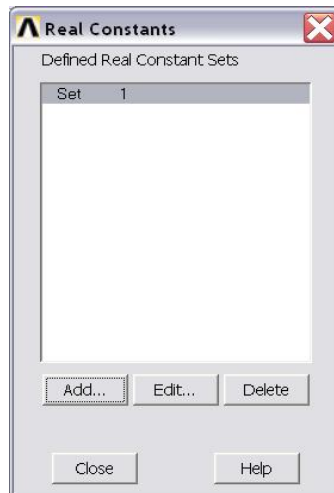
Σχήμα 3.17





**Σχήμα 3.18**

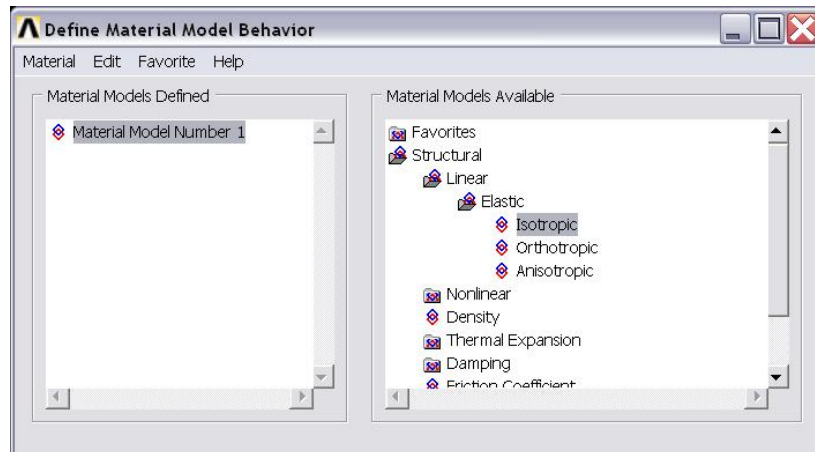
Βλέπουμε ότι στην καρτέλα του *real constant*, σχήμα 3.19, η σταθερά που μόλις δημιουργήσαμε ονομάστηκε **set 1**. Κλείνουμε την καρτέλα πατώντας **close**.



**Σχήμα 3.19**

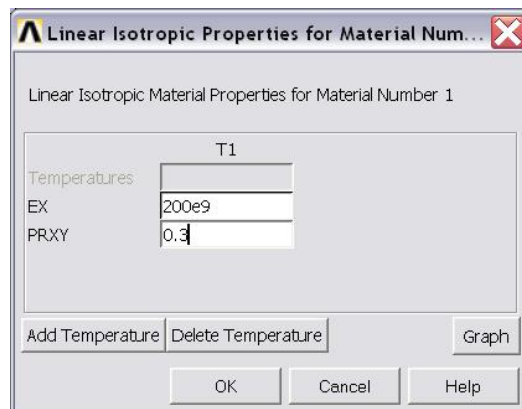
### **3. ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ**

**Βήμα 5:** Για να ορίσουμε το υλικό και τις ιδιότητες του θα επιλέξουμε από το **main menu > preprocessor > material props > material models**. Εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 3.20 και με διπλό κλικ επιλέγουμε **structural > linear > elastic > isotropic** και στη συνέχεια εμφανίζετε η καρτέλα του σχήματος 3.21.



Σχήμα 3.20

Στην καρτέλα του σχήματος 3.21 δίνουμε μέτρο ελαστικότητας **EX** 200E9 και λόγο Poisson **PRXY** 0.3 και πατάμε **OK**.

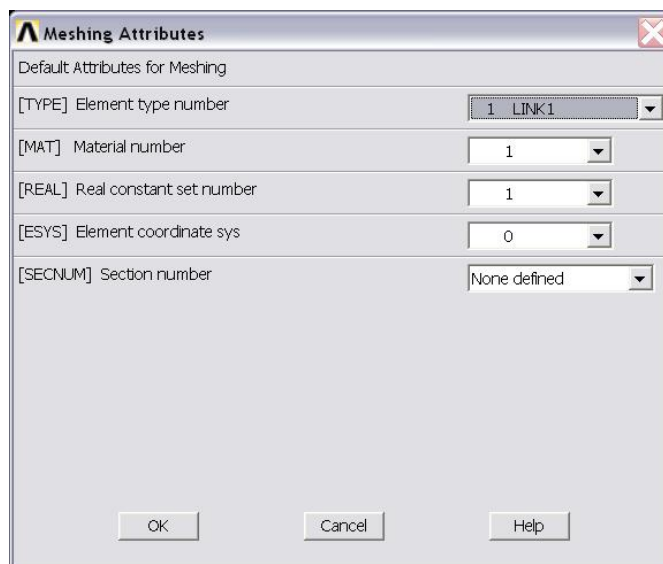


Σχήμα 3.21

#### 4. ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

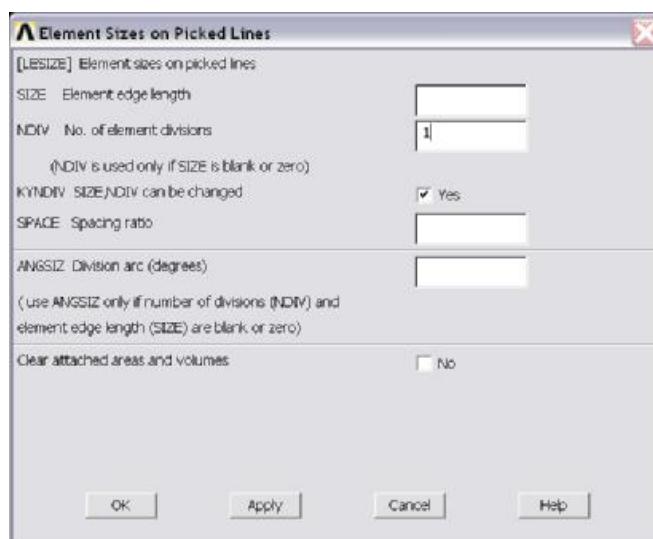
**Βήμα 6:** Από το **main menu > preprocessor > meshing > mesh tool** εμφανίζουμε την καρτέλα του **mesh tool**, σχήμα 3.24, με την οποία θα ορίσουμε τις παραμέτρους για την διακριτοποίηση.

Κάτω από το **element attributes** επιλέγουμε **Global** και πατάμε **set**. Εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 3.22 και βλέπουμε ότι όλα είναι επιλεγμένα όπως τα θέλουμε, αφού έχουμε μόνο ένα στοιχείο. Πατάμε **OK**.



Σχήμα 3.22

**Βήμα 7:** Για να ορίσουμε το μέγεθος του στοιχείου κατά την διακριτοποίηση επιστρέφουμε στην καρτέλα του **mesh tool**, σχήμα 3.24, και κάτω από το **size control** στο **lines** πατάμε **set**. Στην καρτέλα που εμφανίζεται, πατάμε **pick all** και μας εμφανίζει την καρτέλα του σχήματος 3.23. Στην επιλογή: *No of element divisions*, γράφουμε **1** και πατάμε **OK**.



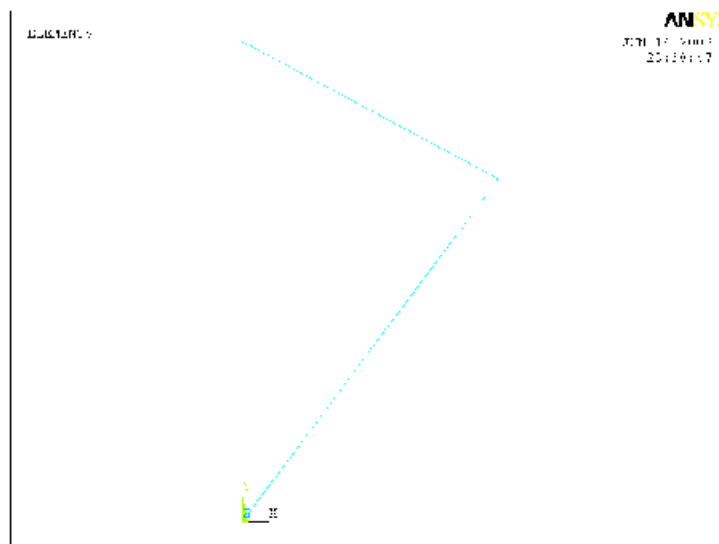
Σχήμα 3.23

**Βήμα 8:** Για να διακριτοποιήσουμε τις γραμμές επιστρέφουμε στην καρτέλα του **mesh tool**, σχήμα 3.24, και δίπλα στο **mesh** επιλέγουμε **lines**. Στη συνέχεια πατάμε

**mesh** και στην καρτέλα που εμφανίζετε επιλέγουμε **pick all**. Έτσι οι γραμμές διακριτοποιήθηκαν και έχουμε το αποτέλεσμα στο σχήμα 3.25.



Σχήμα 3.24



Σχήμα 3.25

**Βήμα 9:** Μπορούμε να δούμε την λίστα με τα στοιχεία μας αν επιλέξουμε από το **utility menu > List > Elements > Nodes + Attributes**. Εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 3.26.

ELIST Command							
LIST ALL SELECTED ELEMENTS. (LIST NODES)							
ELEM	MAT	TYP	REL	ESY	SEC	NODES	
1	1	1	1	0	1	1	2
2	1	1	1	0	1	1	3
3	1	1	1	0	1	3	2

Σχήμα 3.26

Κλείνουμε το παράθυρο με την λίστα των στοιχείων και για να δούμε που βρίσκονται οι κόμβοι θα ανοίξουμε τον κατάλογο των κόμβων, σχήμα 3.28. Από το **utility menu > List > Nodes** επιλέγουμε OK για να δεχτούμε την καρτέλα του σχήματος 3.27, όπου μας ικανοποιεί και εμφανίζεται η λίστα με τους κόμβους.

Sort NODE Listing

[NLIST] Select node-list format and sorting criteria

Output listing will contain

Coord. w/ Angles

Coordinates only

Sort first by: NODE Number

Sort second by: NODE Number

Sort third by: NODE Number

OK Apply Cancel Help

Σχήμα 3.27

NLIST Command						
LIST ALL SELECTED NODES. DSYS= 0						
SORT TABLE ON NODE NODE NODE						
NODE	X	Y	Z	THXV	THVZ	THZX
1	0.0000	2.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
3	1.5000	2.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00

Σχήμα 3.28

Από τους καταλόγους κόμβων και στοιχείων μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι ο κόμβος 1 είναι ο A, ο κόμβος 2 είναι ο C και ο κόμβος 3 είναι ο B. Από την άλλη, το στοιχείο 1 είναι το μέλος AC, το στοιχείο 2 είναι το μέλος AB και το στοιχείο 3 είναι το BC.

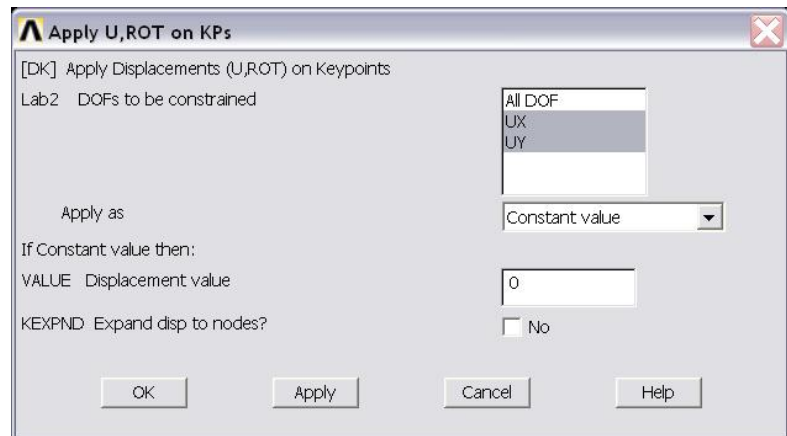
Κλείνουμε το παράθυρο που απεικονίζει τους κόμβους.

## 5. ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ

**Βήμα 10:** Από το **main menu** επιλέγουμε **preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > structural > Displacement > On keypoints** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 3.29. Στη συνέχεια με τον ενεργό κέρσορα επιλέγουμε το σημείο (keypoint) 1 και πατάμε Apply. Εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 3.30 και επιλέγουμε UX, UY και πατάμε Apply.



Σχήμα 3.29

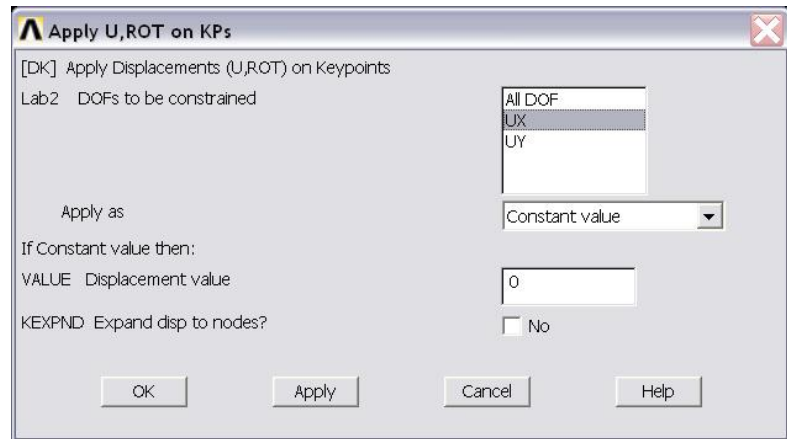


Σχήμα 3.30

Στη συνέχεια θα βάλουμε την κύλιση στο σημείο (keypoint) 3. Επιλέγουμε με τον κέρσορα το σημείο 3 και πατάμε Apply στην καρτέλα του σχήματος 3.31. Στην καρτέλα του σχήματος 3.32 επιλέγουμε UX και πατάμε OK.

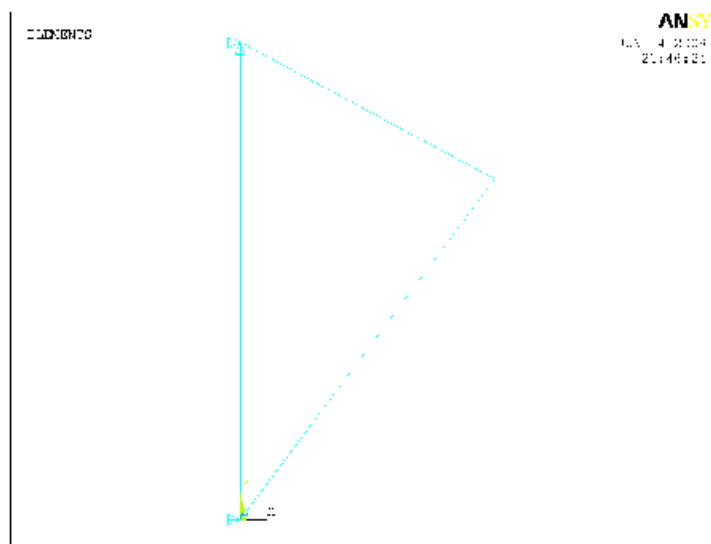


Σχήμα 3.31



Σχήμα 3.32

Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 3.33 όπως φαίνεται στο παράθυρο του ANSYS.



Σχήμα 3.33

**Βήμα 11:** Για να δούμε τις στηρίξεις που βάλαμε επιλέγουμε από το **utility menu > List > Loads > DOF constraints > On All keypoints** και μας εμφανίζει το παράθυρο του σχήματος 3.34, όπου μας δίνει λεπτομερώς τις στηρίξεις που τοποθετήσαμε.

DKLIS Command

File

LIST SELECTED DOF CONSTRAINTS ON ALL SELECTED KEYPOINTS  
CURRENTLY SELECTED DOF SET= UX UY

KEYPOINT	LOAD LABEL	UVALUE(S)		EXP KEY
1	UX	0.0000	0.0000	0
1	UY	0.0000	0.0000	0
3	UX	0.0000	0.0000	0

Σχήμα 3.34

Κλείνουμε το παράθυρο με την λίστα των στηρίξεων.

## 6. ΟΡΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΩΝ/ΔΥΝΑΜΗΣ

**Βήμα 12:** Έχουμε μια δύναμη 2800 N με διεύθυνση προς τα αρνητικά του y στο σημείο 2. Έτσι λοιπόν επιλέγουμε από το **main menu > preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > structural > Force/Moment > On keypoints**. Μας εμφανίζει την καρτέλα του σχήματος 3.35 και επιλέγουμε το σημείο (keypoint) 2 και πατάμε **OK**.



Σχήμα 3.35

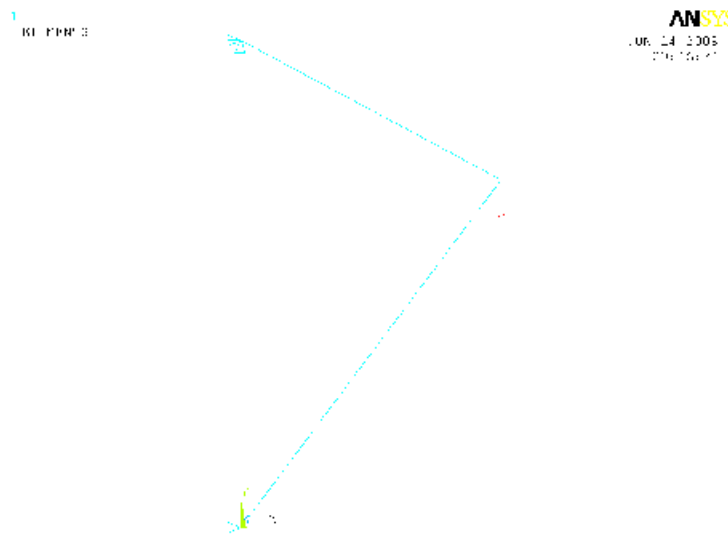
Στην καρτέλα που εμφανίζετε επιλέγουμε την διεύθυνση της δύναμης (*direction of force/mom*) να είναι **FY** και δίνουμε τιμή **-2800**, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.36. Πατάμε **OK**.





Σχήμα 3.36

Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 3.37

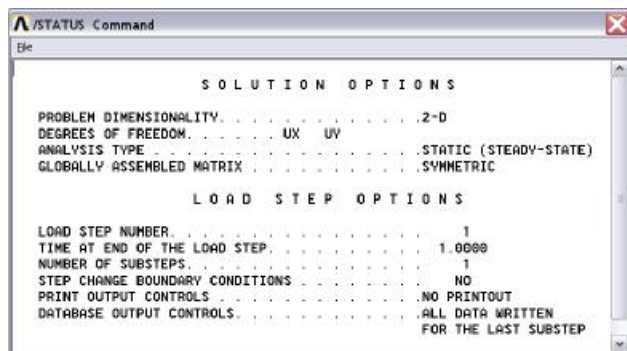


Σχήμα 3.37

## Γ) ΕΠΙΛΥΣΗ SOLUTION

### 7. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 2-D ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΟΣ (solution)

**Βήμα 13:** Για να προχωρήσουμε στην λύση του προβλήματος θα επιλέξουμε από το **main menu > solution > solve > current LS** και θα εμφανιστεί το παράθυρο του σχήματος 3.38 και η καρτέλα του σχήματος 3.39, στην οποία πατάμε **OK**.



Σχήμα 3.38



Σχήμα 3.39

Στη συνέχεια βλέπουμε την καρτέλα του σχήματος 3.40 που μας δηλώνει ότι η λύση έγινε και πατάμε **close**. Επίσης κλείνουμε και το παράθυρο του σχήματος 3.38.



Σχήμα 3.40

## Δ) ΜΕΤΑ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ / ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ POSTPROCESS

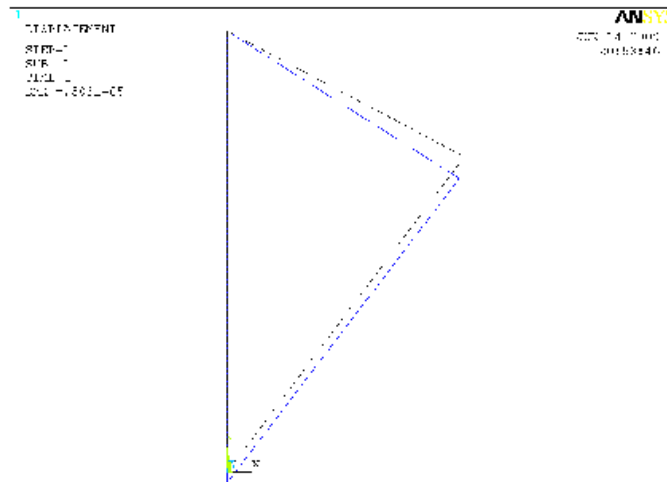
### 8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

**Βήμα 14:** Από το **main menu** επιλέγουμε πλέον, **General postproc > Plot Results > Deformed shape** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 3.41, όπου επιλέγουμε **Def + underformed**, για να δούμε την παραμόρφωση του δικτυώματος με σχέση την αρχική του γεωμετρία και πατάμε **OK**.



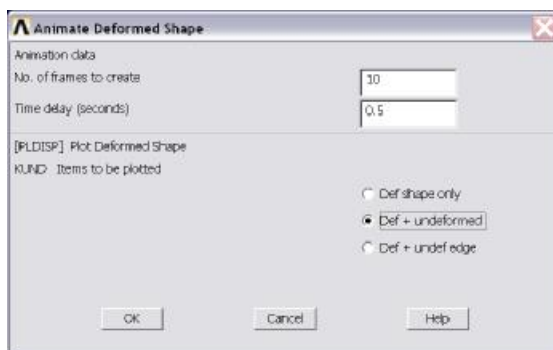
Σχήμα 3.41

Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 3.42, όπου με μπλε γραμμή φαίνεται η παραμόρφωση που θα δεχτεί το δικτύωμα μας.



Σχήμα 3.42

**Βήμα 15:** Για να δούμε την παραμόρφωση σε κίνηση θα επιλέξουμε από το **utility menu > Plotctrls > Animate > Deformed shape** και θα εμφανιστεί η καρτέλα του σχήματος 3.43, στην οποία θα τικάρουμε την επιλογή **Def + undeformed** και θα πατήσουμε **OK**. Στο κοντρόλ του σχήματος 3.44 επιλέγουμε **Forward only** και βλέπουμε την παραμόρφωση σε κίνηση.



Σχήμα 3.43



Σχήμα 3.44

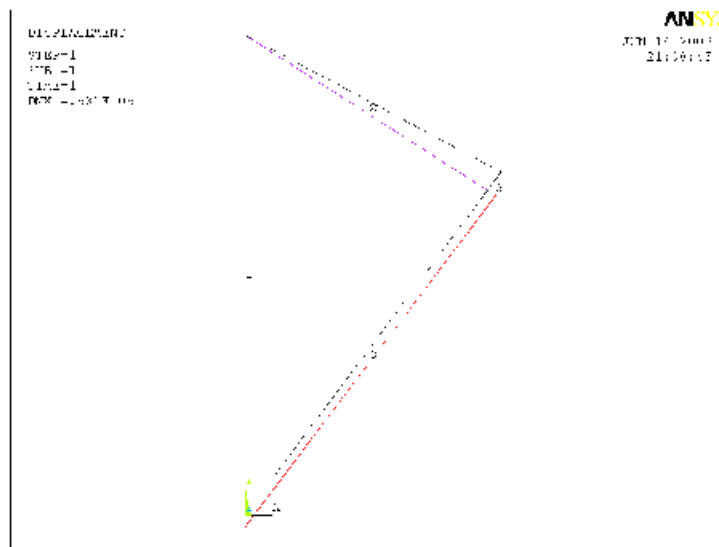
**Βήμα 16:** Προκειμένου να ερμηνευθούν τα αποτελέσματα που θα πάρουμε από το ANSYS, είναι χρήσιμο να ανοίξουμε τους αριθμούς των κόμβων και των στοιχείων που θα φαίνονται επάνω στο δικτύωμα.

Από το **utility menu > Plotctrls > Numbering** επιλέγουμε **ON** στο **node numbers** και στο **Elem/Attrib numbering** επιλέγουμε **Element numbers**. Στη συνέχεια πατάμε **OK** στην καρτέλα του σχήματος 3.45.



Σχήμα 3.45

Πλέον έχουν εμφανιστεί οι αριθμοί σε κόμβους και στοιχεία και έχουμε το αποτέλεσμα του σχήματος 3.46.

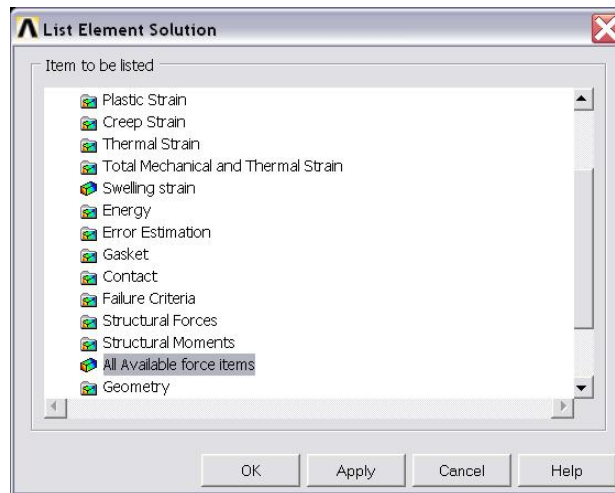


Σχήμα 3.46

## 9. ΛΙΣΤΑ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΩΜΑ: ΜΕΘΟΔΟΣ 1

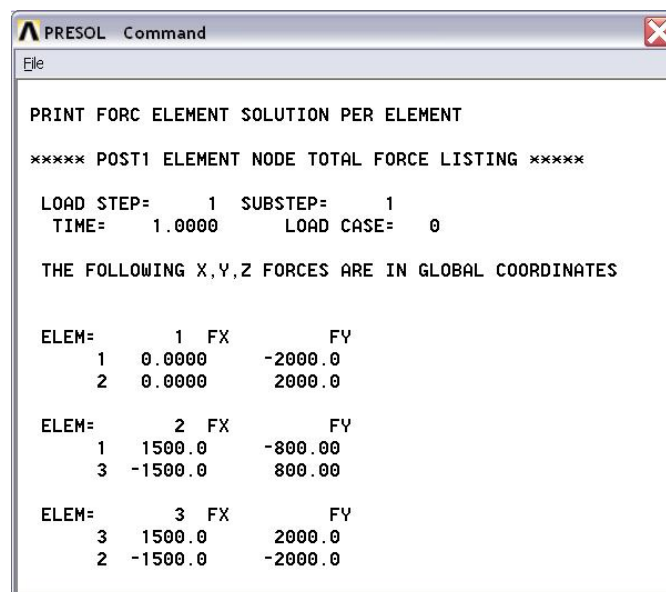
**Βήμα 17:** Από το **main menu > General postproc > List Results > Elements Solution** θα δούμε την λίστα με τις δυνάμεις σε κάθε κόμβο. Επιλέγουμε στην

καρτέλα του σχήματος 3.47 που εμφανίζετε **Elements Solution > All Available force items** και πατάμε **OK**.



Σχήμα 3.47

Το παράθυρο που εμφανίζετε είναι του σχήματος 3.48.



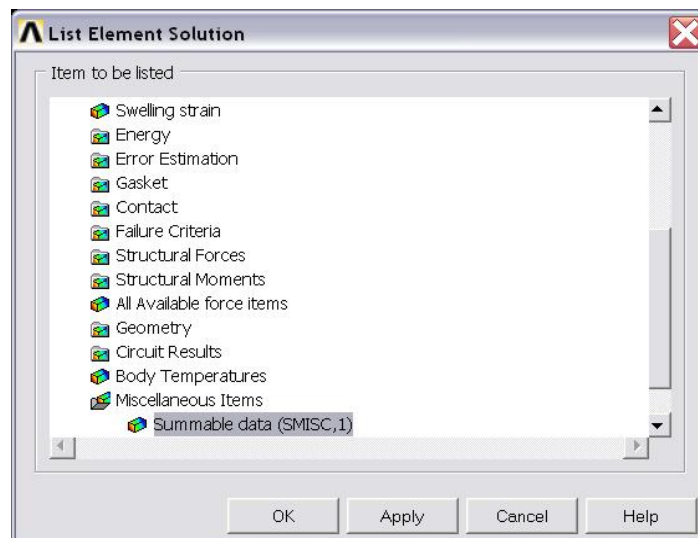
Σχήμα 3.48

## 10. ΛΙΣΤΑ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΩΜΑ: ΜΕΘΟΔΟΣ 2

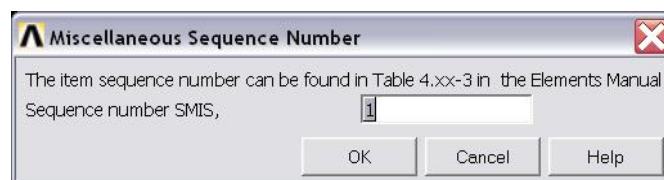
**Βήμα 18:** Από το **main menu > General postproc > List Results > Elements Solution** θα δούμε την λίστα με τις αξονικές δυνάμεις στα στοιχεία. Εμφανίζετε η

καρτέλα του σχήματος 3.49 και επιλέγουμε **Elements Solution > Miscellaneous item > Summable data (SMISC,1)**.

Στην καρτέλα του σχήματος 3.50 που εμφανίζεται γράφουμε για **sequent number SMIS** τον αριθμό **1** και πατάμε **OK**. Επίσης πατάμε **OK** και στην καρτέλα του σχήματος 3.49.



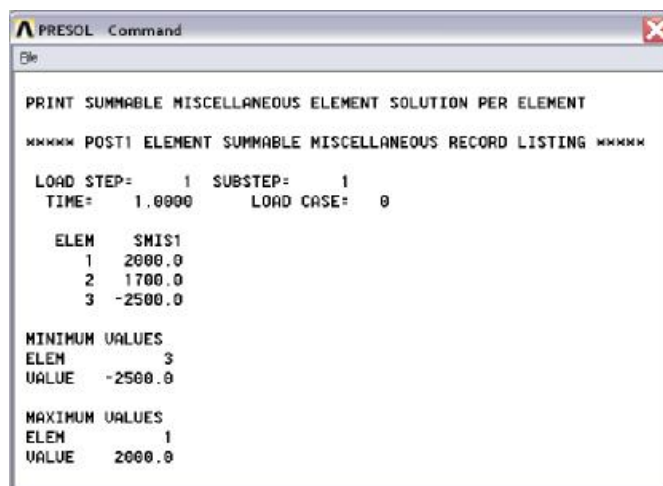
Σχήμα 3.49



Σχήμα 3.50

- **Σημείωση:** Στις περισσότερες περιπτώσεις, πλοτάρουμε τις τάσεις χρησιμοποιώντας από το **main menu > contour plot > nodal solu**. Για τα στοιχεία γραμμών όπως το LINK1, αυτό δεν λειτουργεί και θα πάρουμε μηδενικές τιμές για τις τάσεις. Έτσι χρησιμοποιούμε το **sequence numbers** να φτιάξει τις τάσεις για τα στοιχεία γραμμών.

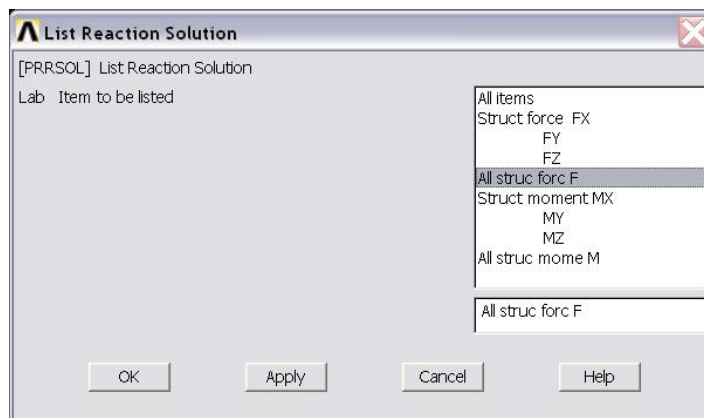
Το αποτέλεσμα του βήματος 18 είναι το παράθυρο του σχήματος 3.51.



Σχήμα 3.51

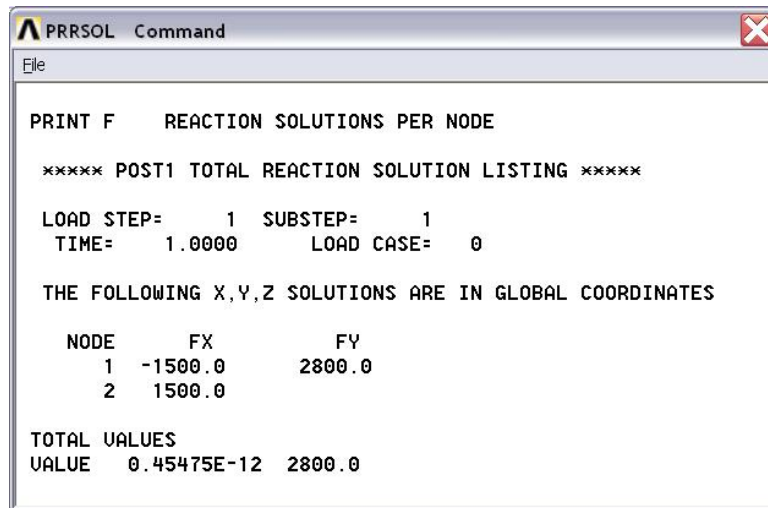
## 11. ΛΙΣΤΑ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ

**Βήμα 19:** Από το **main menu > General postproc > List Results > Reaction Solu** θα δούμε τις δυνάμεις αντιδράσεων στους κόμβους. Στην καρτέλα που εμφανίζεται, σχήμα 3.52, επιλέγουμε **All struc forc F** και πατάμε **OK**.



Σχήμα 3.52

Το παράθυρο που εμφανίζεται, σχήμα 3.53, μας δίνει την συνολική δύναμη αντίδρασης στους κόμβους. Ο κόμβος 1 με διεύθυνση στον y άξονα έχει την μέγιστη αναπτυσσόμενη δύναμη αντίδρασης 2800 N.



```
PRRSOL Command
File
PRINT F REACTION SOLUTIONS PER NODE
***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN GLOBAL COORDINATES
NODE FX FY
1 -1500.0 2800.0
2 1500.0
TOTAL VALUES
VALUE 0.45475E-12 2800.0
```

Σχήμα 3.53

Άρα το ποσό των συνολικών δυνάμεων αντίδρασης (TOTAL VALUES) ισορροπεί το εφαρμοσμένο φορτίο, όπως πρέπει να συμβεί για την στατική ισορροπία.

## 12. ΕΞΟΔΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ANSYS

Από το **utility menu** επιλέγουμε **File > Exit** και στην καρτέλα που εμφανίζεται επιλέγουμε **save everything** και πατάμε **OK**.



#### Π.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑ 3.4: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΤΑΛΙΟΥ ΠΟΔΗΛΑΤΟΥ

**Βήμα 1:** Αν συνεχίζουμε από πριν τότε πρέπει να δώσουμε ένα νέο Jobname και να αλλάξουμε πιθανών φάκελο, που θα αποθηκεύσουμε το νέο αρχείο db.

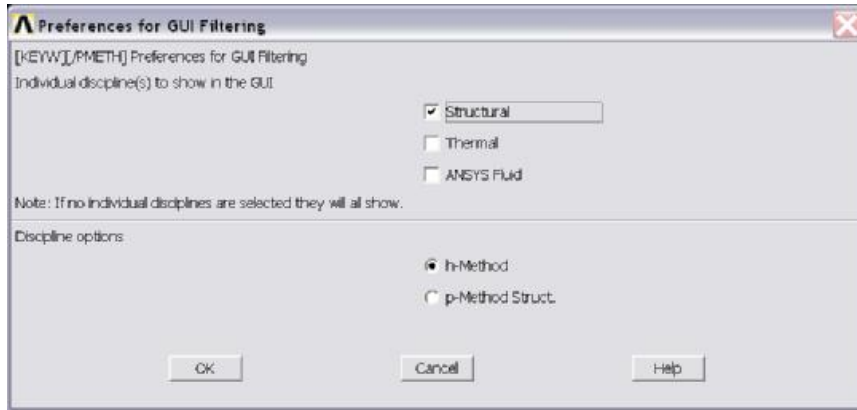
Άρα από το **utility menu**, επιλέγουμε **file > clear & start new**, για να ξεκινήσουμε νέο αρχείο. Στο καρτελάκι που εμφανίζετε επιλέγουμε **do not read file** και πατάμε **OK**. Επίσης από το **utility menu** επιλέγουμε ξανά **file > change title** και εμφανίζετε μια καρτέλα όπου δίνουμε το νέο όνομα και πατάμε **OK**.

Στην περίπτωση που ανοίγουμε τώρα το πρόγραμμα ANSYS v 9.0, στο μενού **Launch**, διαλέγουμε το περιβάλλον που θα δουλέψουμε επιλέγοντας **ANSYS** και τον τρόπο επεξεργασίας με άδεια **ANSYS mechanical U**. Στο μενού **File management**, στο working directory επιλέγουμε τον φάκελο που θα αποθηκεύσουμε το αρχείο και στο **Jobname** γράφουμε το όνομα που θ' αποθηκευτεί η δουλειά μας. Στη συνέχεια επιλέγουμε **RUN**.

#### A) ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΠΡΟΤΙΜΗΣΗΣ

Επιλέγουμε την δομική (*structural*) προτίμηση, για να εργαστούμε, διότι δεν χρειαζόμαστε άλλες επιλογές όπως *thermal* και *fluid* μιας και δεν θα ασχοληθούμε με θερμικά και ρευστομηχανικά προβλήματα. Αυτό βοηθά λίγο πλοηγώντας τις απέραντες επιλογές που έχει το ANSYS.

Από το **main menu** επιλέγουμε **preferences** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 4.1. Επιλέγουμε **structural** και πατάμε **OK**.



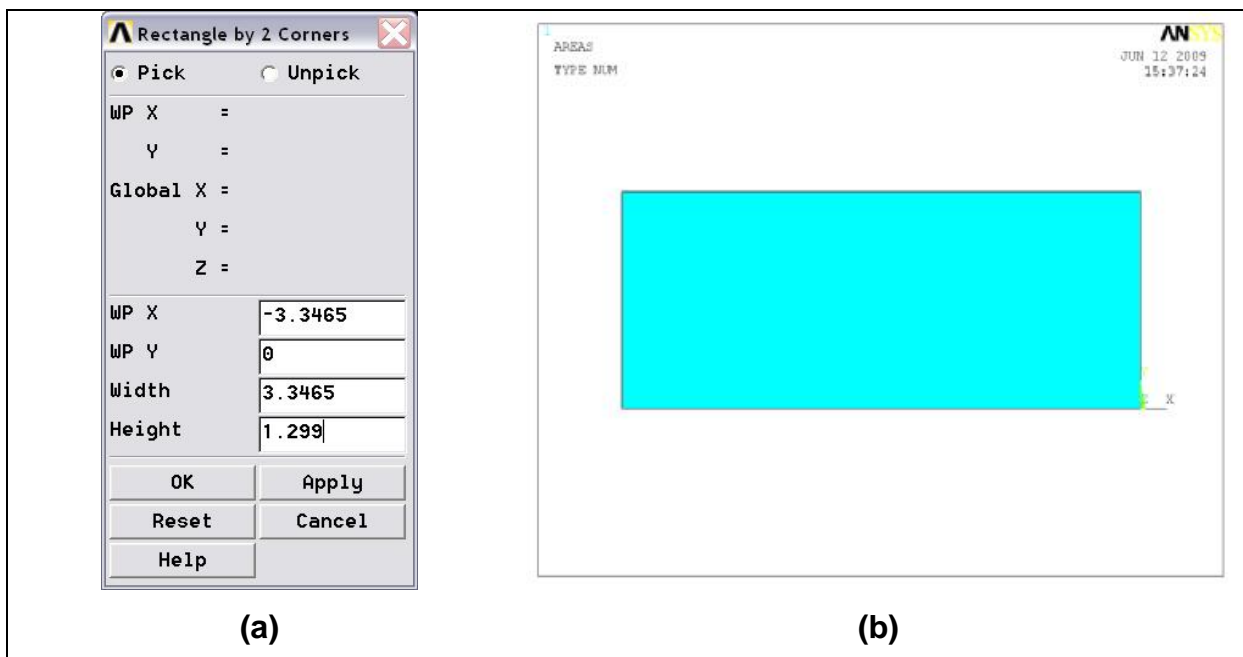
Σχήμα 4.1

## B) ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ PREPROCESSOR

### 1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

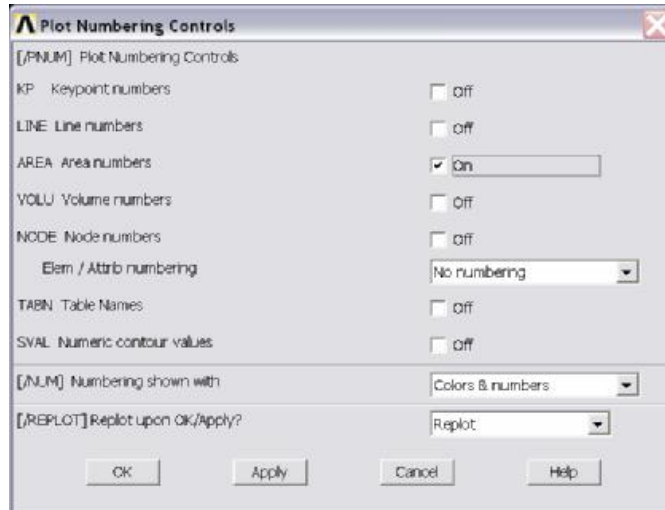
Για να διευκολυνθούμε θα σχεδιάσουμε την μισή κατασκευή και στη συνέχεια θα κάνουμε reflect.

**Βήμα 2:** Από το **main menu** επιλέγουμε, **preprocessor > modeling > create > Areas > Rectangle > By 2 Corners**, για να δημιουργήσουμε την επιφάνεια του σχήματος 4.2b. Γεμίζουμε την καρτέλα του σχήματος 4.2a, όπως φαίνεται παρακάτω.



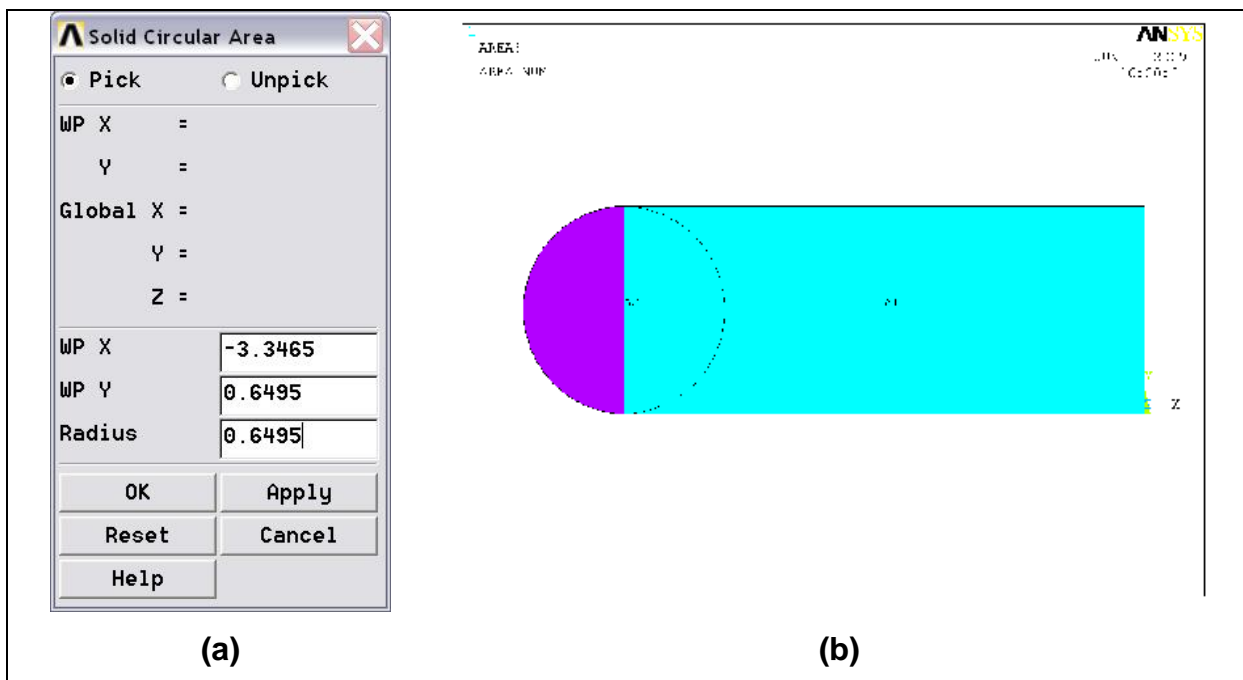
Σχήμα 4.2

Για να εμφανίσουμε τις επιφάνειες αριθμημένες, επιλέγουμε από το **Utility menu > PlotCtrls > Numbering** και στην καρτέλα του σχήματος 4.3 επιλέγουμε στο **AREA Area numbers** να είναι ON και στην συνέχεια πατάμε **OK**.



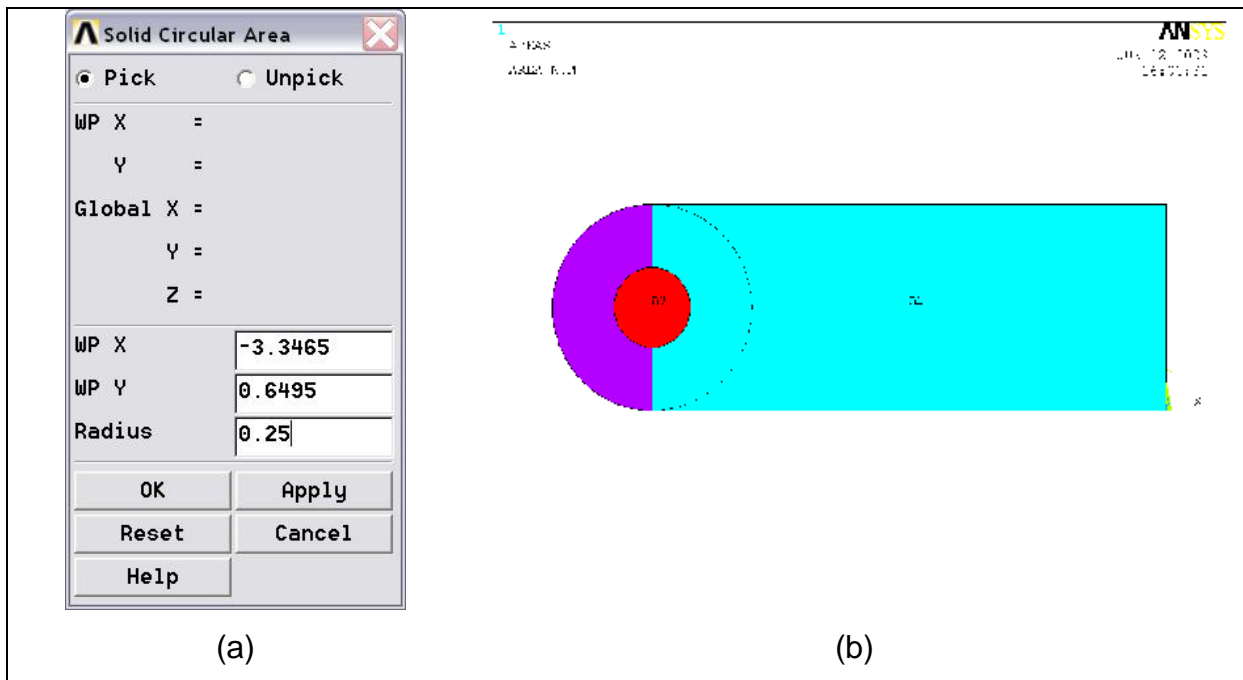
Σχήμα 4.3

Για την δημιουργία των κύκλων θα επιλέξουμε από το **Main Menu > Preprocessor > Modelling > Create > Areas > Circle > Solid Circle** και θα γεμίσουμε την καρτέλα του σχήματος 4.4a όπως φαίνεται παρακάτω. Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.4b.



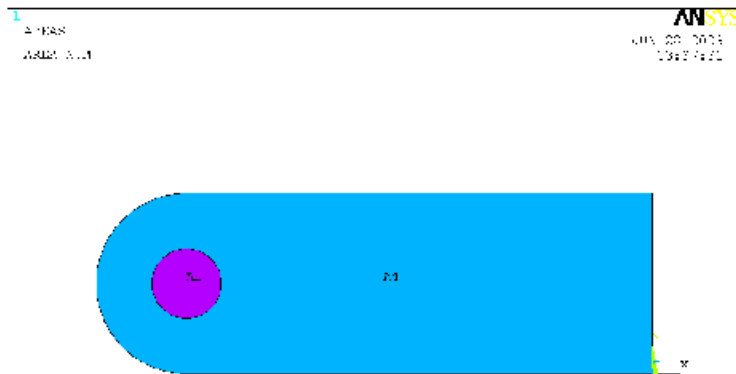
Σχήμα 4.4

Για την δημιουργία του δεύτερου κύκλου, ο μικρότερος, θα επιλέξουμε από το **Main Menu > Preprocessor > Modelling > Create > Areas > Circle > Solid Circle**, ή πατώντας στην καρτέλα του σχήματος 4.4a **apply** και όχι **OK** για να μείνει ενεργή και θα την γεμίσουμε όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 4.5a.



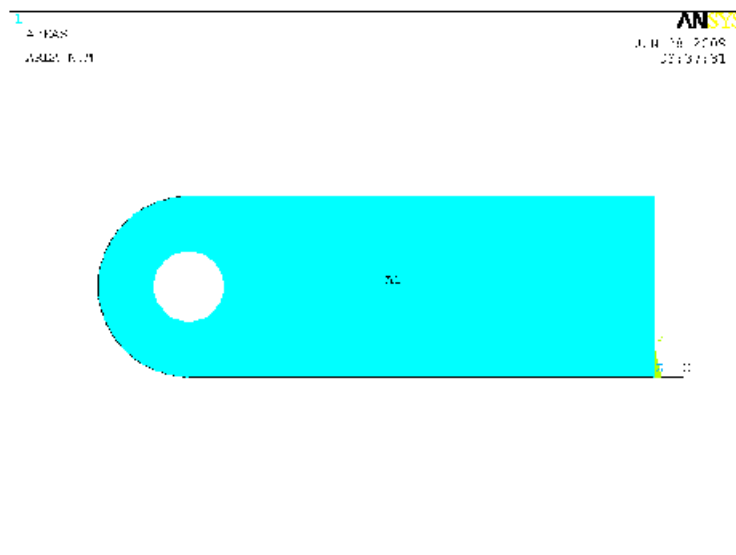
Σχήμα 4.5

**Βήμα 3:** Για να προσθέσουμε τον μεγάλο κύκλο με το τετράγωνο ως ένα όγκο, επιλέγουμε από το **Main Menu > Preprocessor > Modelling > Operate > Booleans > Add > Areas** και με τον ενεργό κέρσορα επιλέγουμε το τετράγωνο και τον μεγάλο κύκλο και πατάμε **OK** στην καρτέλα. Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.6.



Σχήμα 4.6

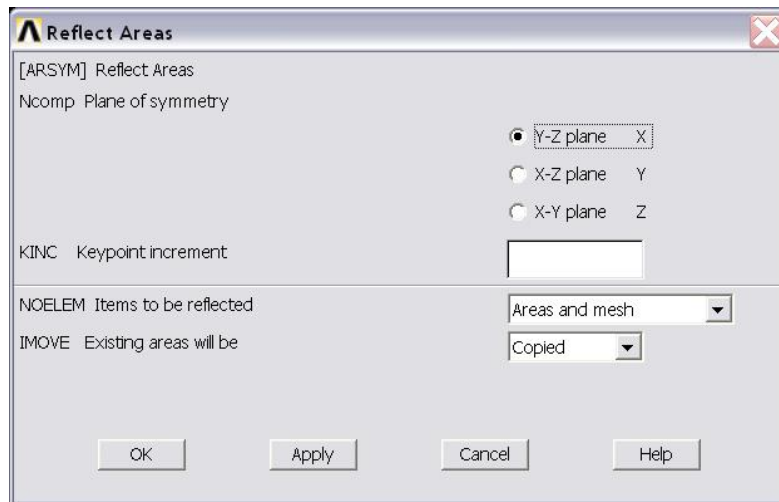
**Βήμα 4:** Για να αφαιρέσουμε την επιφάνεια A2, τον μικρό κύκλο, θα επιλέξουμε από το **Main Menu > Preprocessor > Modelling > Operate > Booleans > Subtract > Areas** και θα επιλέξουμε πρώτα την επιφάνεια που θέλουμε να κρατήσουμε (A1) και μετά την επιφάνεια που θέλουμε να διώξουμε (A2). Το αποτέλεσμα θα είναι αυτό του σχήματος 4.7.



Σχήμα 4.7

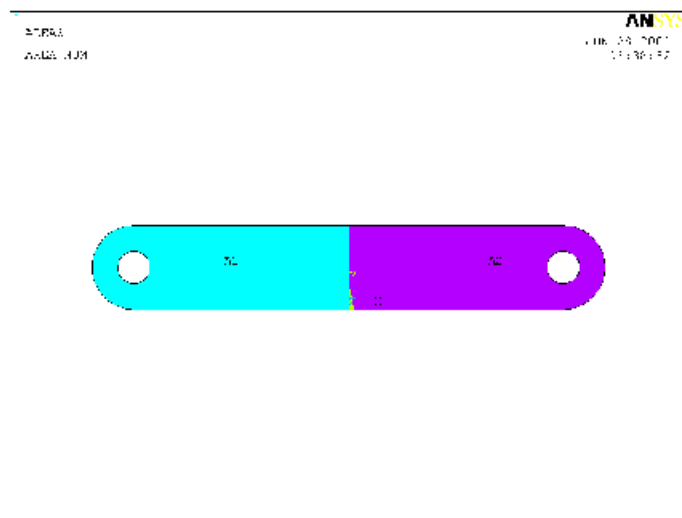
**Βήμα 5:** Για να έχουμε την πλήρη γεωμετρία της κατασκευής, όπως προαναφέραμε, θα κάνουμε reflect απο το **Main Menu > Preprocessor > Modelling > Reflect >**

**Areas** και στην καρτέλα θα επιλέξουμε **Pick All**. Στη νέα καρτέλα του σχήματος 4.8 στην επιλογή *plane of symmetry* επιλέγουμε **The Y-Z plane** και πατάμε **OK**.



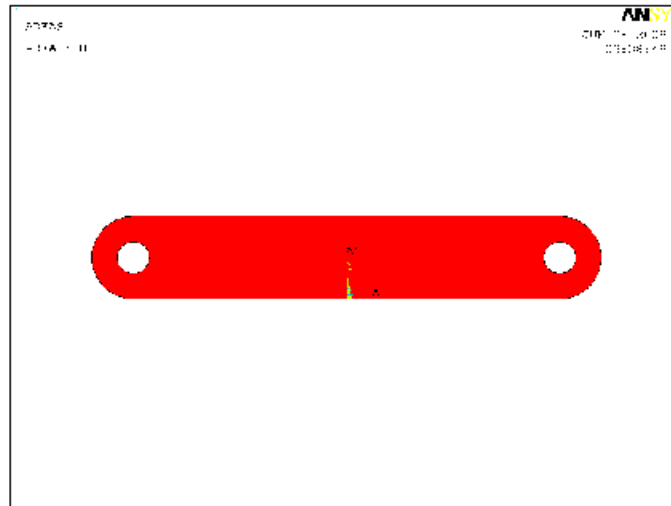
Σχήμα 4.8

Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.9.



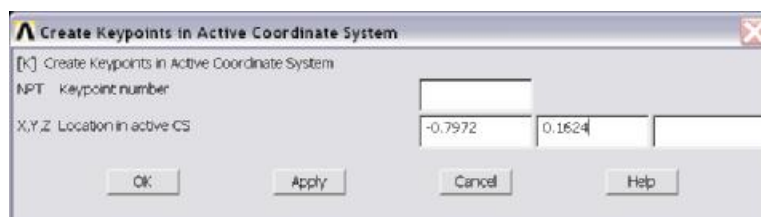
Σχήμα 4.9

Στη συνέχεια θα προσθέσουμε τη νέα επιφάνεια που δημιουργήσαμε από το **Main Menu > Preprocessor > Modelling > Operate > Booleans > Add > Areas** και θα επιλέξουμε στην καρτέλα *pick all*. Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.10.



Σχήμα 4.10

**Βήμα 6:** Από το **main menu** επιλέγουμε, **preprocessor > modeling > create > Keypoints > in active cs**, για να δημιουργήσουμε τα τέσσερα σημεία. Δίνουμε τις τιμές που φαίνονται στο σχήμα 4.11 για το πρώτο keypoint και σχήμα 4.12 για τα υπόλοιπα, πατώντας **apply** για τα keypoints 1, 2, 3 και **OK** για το keypoint 4.

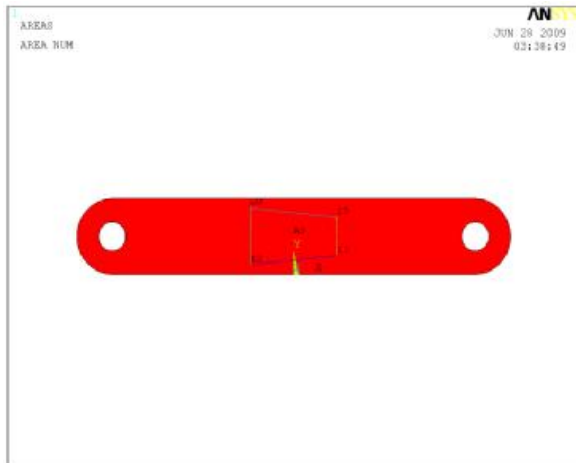


Σχήμα 4.11

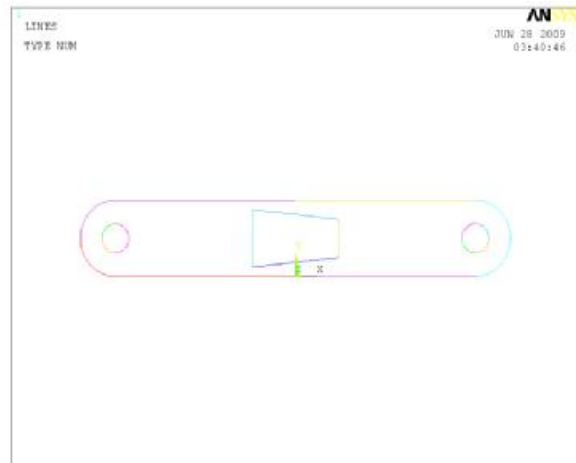
Keypoints id	X	Y	Z
2	0.7972	0.3248	0
3	0.7972	0.9744	0
4	-0.7972	1.1368	0

Σχήμα 4.11

Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.12 και αν θέλουμε να δούμε μόνο τις γραμμές επιλέγουμε από το **utility menu > plot > lines** και έχουμε το αποτέλεσμα του σχήματος 4.13.

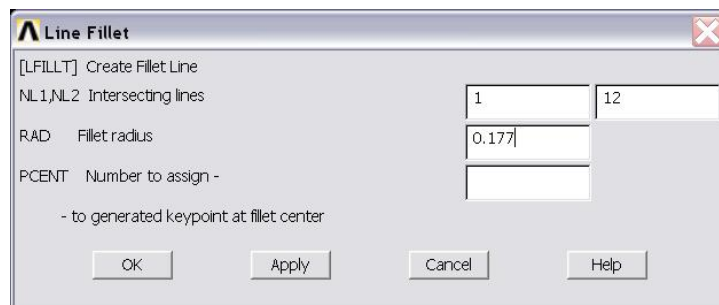


Σχήμα 4.12



Σχήμα 4.13

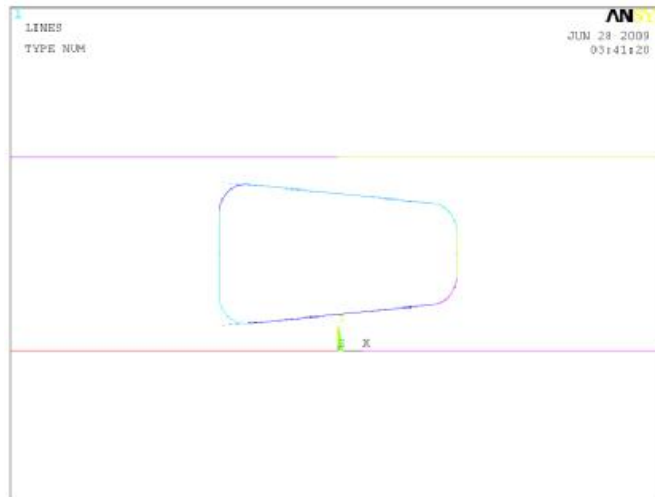
Στην συνέχεια θα κάνουμε fillet τις γραμμές επιλέγοντας από το **main menu > preprocessor > modeling > create > lines > line fillet**. Με τον ενεργό κέρσορα θα επιλέξουμε δύο γραμμές και θα πατήσουμε **OK** στην καρτέλα. Στην καρτέλα του σχήματος 4.14 για ακτίνα του fillet δίνουμε 0.177 και πατάμε **apply**.



Σχήμα 4.14

Επαναλαμβάνουμε και για τις υπόλοιπες γωνίες και πατάμε **OK** στην τελευταία. Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.15.

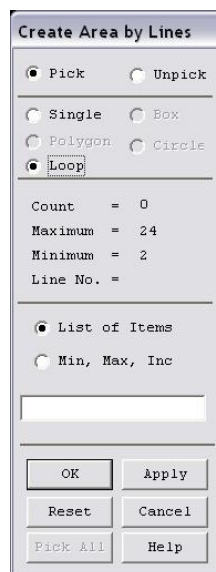




Σχήμα 4.15

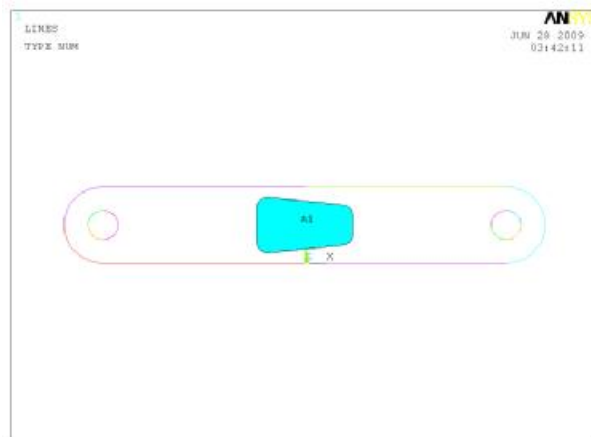
**Βήμα 7:** Στη συνέχεια θα δημιουργήσουμε έναν όγκο μέσα από τις γραμμές που κάναμε fillet για να μπορέσουμε στην συνέχεια να τον αφαιρέσουμε.

Από το **Main Menu > Preprocessor > Modelling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines**. Στην την καρτέλα του σχήματος 4.16 επιλέγουμε Loop και με τον ενεργό κέρσορα επιλέγουμε οποιαδήποτε γραμμή από αυτές που σχεδιάσαμε προηγουμένως. Πατάμε OK και βλέπουμε τον όγκο που δημιουργήσαμε όπως φαίνετε στο σχήμα 4.17.

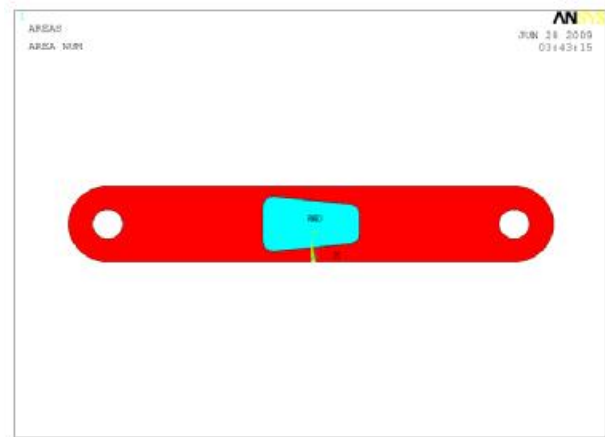


Σχήμα 4.16

Για να εμφανιστεί η γεωμετρία της κατασκευής ως επιφάνεια επιλέγουμε από το **utility menu > Plot > Areas** και στο παράθυρο του ANSYS εμφανίζεται το σχήμα 4.18.

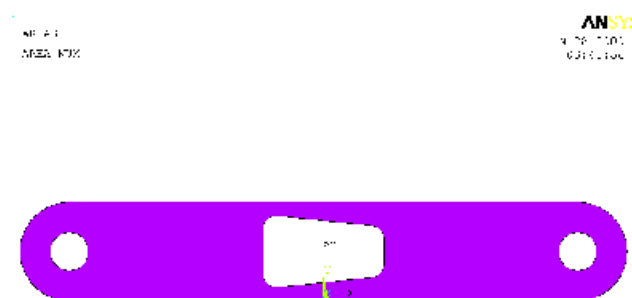


Σχήμα 4.17



Σχήμα 4.18

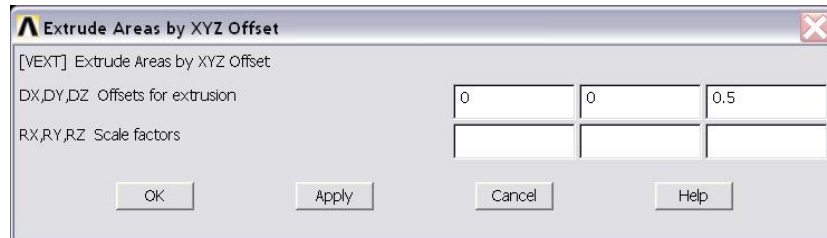
Για να αφαιρέσουμε την επιφάνεια A1, τον όγκο που δημιουργήσαμε πρωτίστως, θα επιλέξουμε από το **Main Menu > Preprocessor > Modelling > Operate > Booleans > Subtract > Areas** και θα επιλέξουμε πρώτα την επιφάνεια που θέλουμε να κρατήσουμε (A2) και μετά την επιφάνεια που θέλουμε να διώξουμε (A1). Το αποτέλεσμα θα είναι αυτό του σχήματος 4.19.



Σχήμα 4.19

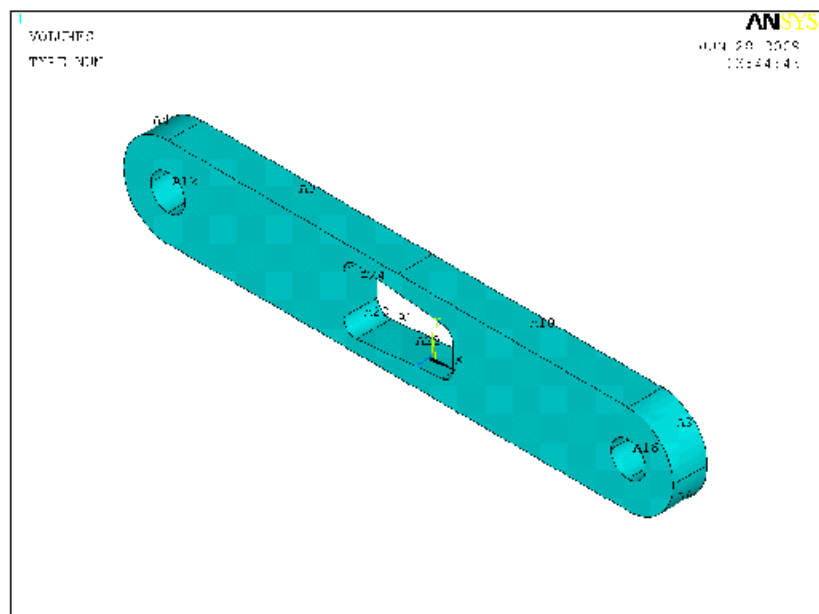
**Βήμα 8:** Στην συνέχεια θα μετατρέψουμε την επιφάνεια που έχουμε δημιουργήσει σε όγκο επιλέγοντας από το **main menu > preprocessor > modeling > operate >**

**extrude > areas > by XYZ offset.** Στην καρτέλα επιλέγουμε *Pick all* και στη νέα καρτέλα του σχήματος 4.20, που εμφανίζεται, αλλάζουμε το offset του άξονα z (DZ offset) σε 0.5 και πατάμε **OK**.



**Σχήμα 4.20**

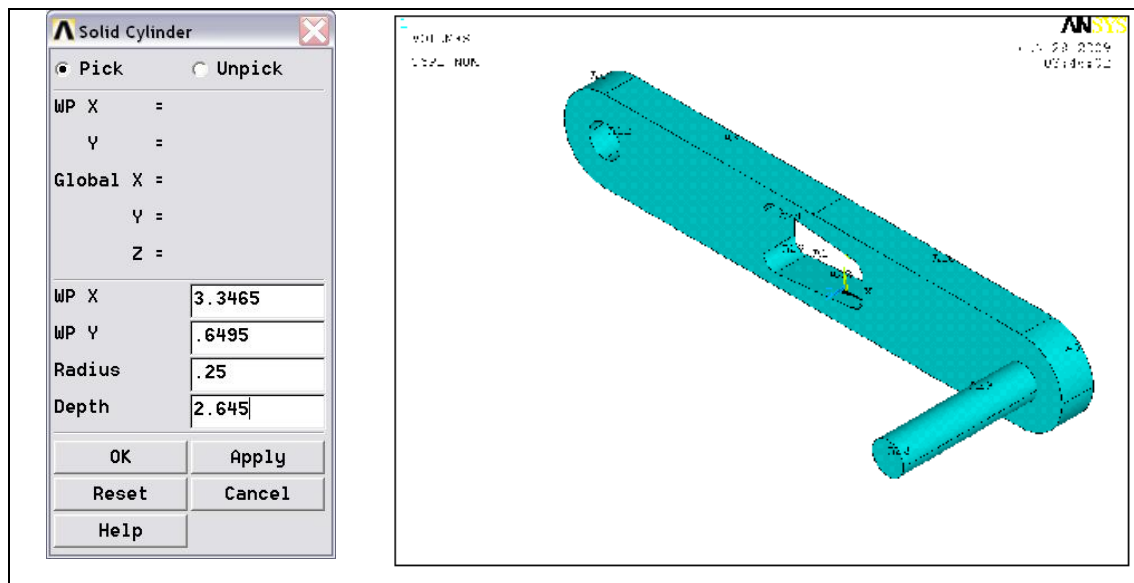
Για να δούμε το αποτέλεσμα επιλέγουμε από το utility menu > Plot > Volumes και έχουμε το αποτέλεσμα του σχήματος 4.21.



**Σχήμα 4.21**

**Βήμα 9:** Για να δημιουργήσουμε τον άξονα θα επιλέξουμε από το **main menu > preprocessor > modeling > create > volumes > cylinder > solid cylinder.**

Εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 4.22a και την γεμίζουμε όπως φαίνεται παρακάτω. Πατάμε **OK** και το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.22b.

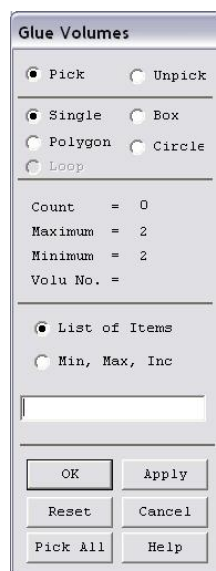


(a)

(b)

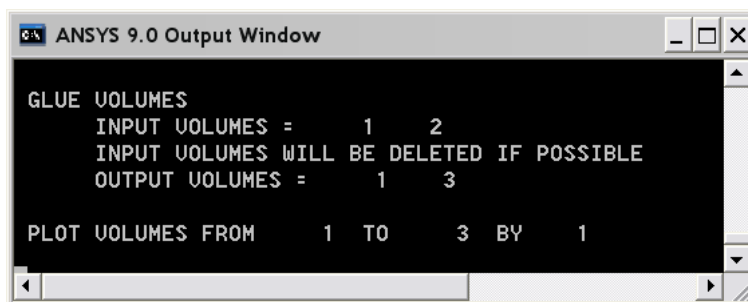
Σχήμα 4.22

**Βήμα 10:** Το πετάλι με τον άξονα είναι κολλημένα και όχι εννοιά (π.χ. χυτή κατασκευή). Για τον λόγο αυτό θα ορίσουμε την κόλληση επιλέγοντας από το **Main Menu > Preprocessor > Modelling > Operate > Booleans > Glue > Volumes** και στην καρτέλα του σχήματος 4.23 επιλέγουμε *Pick all*.



Σχήμα 4.23

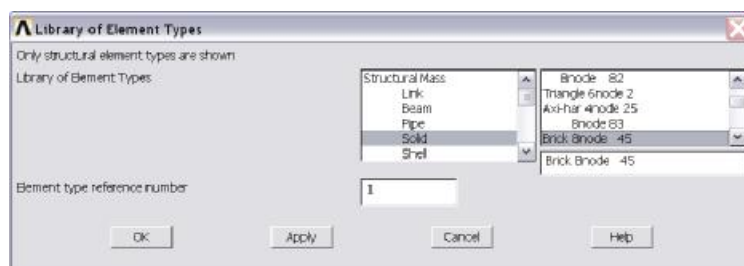
Επειδή δεν έχουμε κάποια διαφοροποίηση οπτικά στην κατασκευή μας, μπορούμε να ελέγξουμε το παράθυρο εντολών του ANSYS για την εντολή “GLUE VOLUMES”, όπως φαίνετε στο παρακάτω σχήμα 4.24



Σχήμα 4.24

### 3.ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

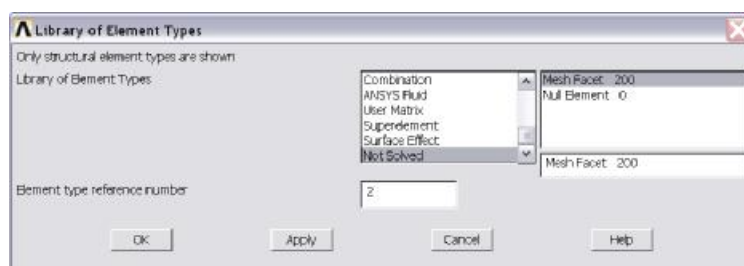
**Βήμα 11:** Από το **main menu > preprocessor > element type > add/edit/delete > add** θα ορίσουμε το στοιχείο (element) που θα χρησιμοποιήσουμε στην ανάλυση της κατασκευής μας. Στην καρτέλα του σχήματος 4.25 επιλέγουμε στην αριστερή περιοχή **structural mass solid brick** και στην δεξιά περιοχή, **8node 45** και πατάμε **Apply**.



Σχήμα 4.25

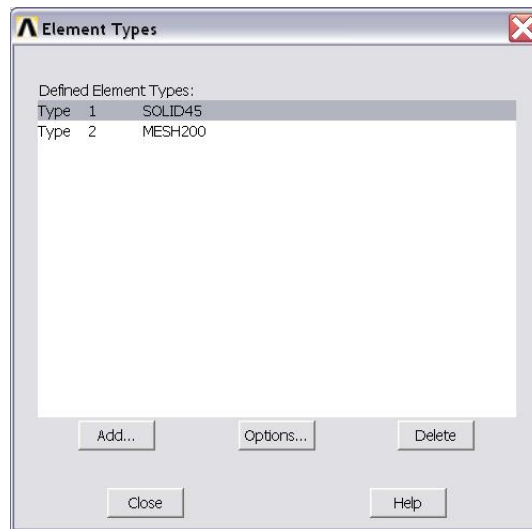
Επιλέγουμε **Not solved** στην αριστερή περιοχή και **Mesh facet 200** στην δεξιά περιοχή, όπως φαίνεται στην καρτέλα του σχήματος 4.26 παρακάτω.

Πατάμε **OK**.



Σχήμα 4.26

Στην καρτέλα των στοιχείων, σχήμα 4.27, επιλέγουμε **MESH200** και **options** για να ορίσουμε την μορφή του στοιχείου.



Σχήμα 4.27

Επιλέγουμε **QUAD 4-NODE** δίπλα στο *element shape and #of nodes K1* και πατάμε **OK**, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.28.

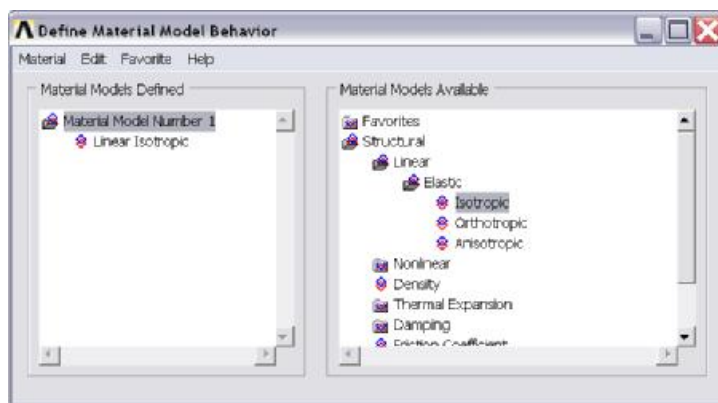


Σχήμα 4.28

Στην συνέχεια κλείνουμε το παράθυρο των στοιχείων πατώντας **close**.

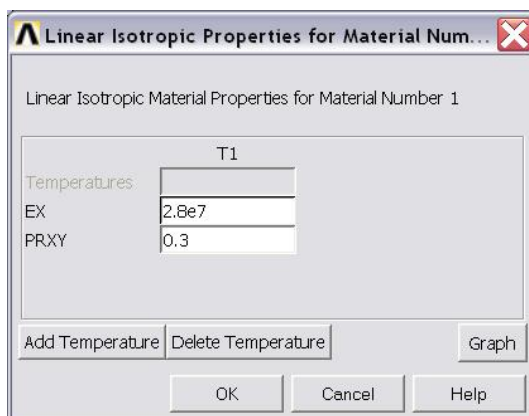
#### 4. ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ

**Βήμα 12:** Για να ορίσουμε τις ιδιότητες του υλικού επιλέγουμε από το **main menu > preprocessor > material props > material models** και επιλέγουμε στην καρτέλα του σχήματος 4.29 **structural > linear > elastic > isotropic**.



Σχήμα 4.29

Στην καρτέλα του σχήματος 4.30 δίνουμε για μέτρο ελαστικότητας (**EX**)  $2.8e7$  και για λόγο Poisson (**PRXY**) 0.3 και πατάμε OK. Κλείνουμε την καρτέλα του σχήματος 4.29.

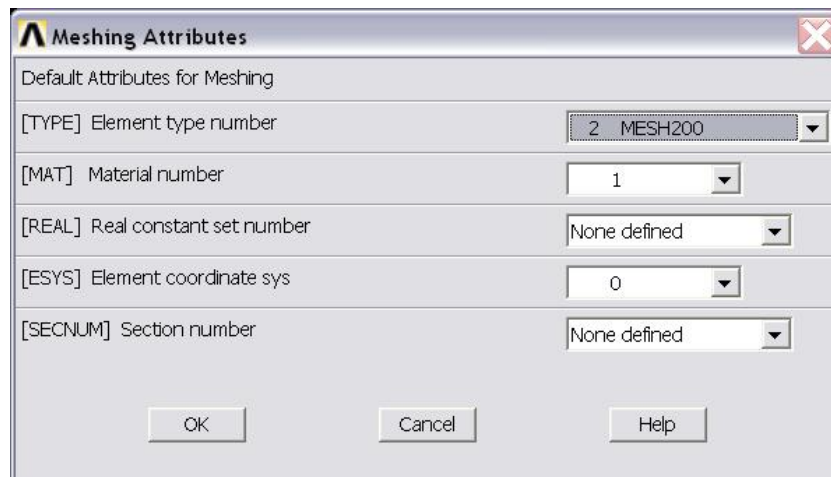


Σχήμα 4.30

## 5. ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

**Βήμα 13:** Για να διακριτοποιήσουμε την κατασκευή μας θα επιλέξουμε από το **main menu > preprocessor > meshing > mesh tool** και στην καρτέλα της διαχείρισης της διακριτοποίησης (mesh tool), σχήμα 4.33, επιλέγουμε **set** δίπλα στο **global element attributes** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 4.31.

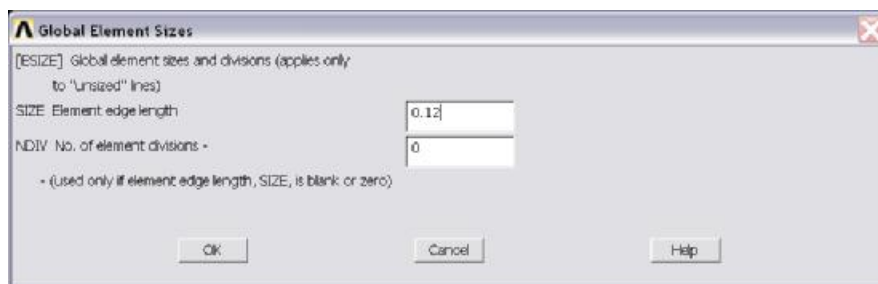
Επιλέγουμε στο **element type number** να βρίσκεται το στοιχείο **Mesh200** και πατάμε **OK**



Σχήμα 4.31

Στην συνέχεια ενεργοποιούμε το smart size επιλέγοντας στο κουτάκι δίπλα του και επιλέγουμε μέγεθος 4.

Επιλέγουμε **set** κάτω από το Global Size Controls και στην καρτέλα του σχήματος 4.32 που εμφανίζετε δίνουμε μήκος (length) **0.12** και πατάμε **OK**.



Σχήμα 4.32

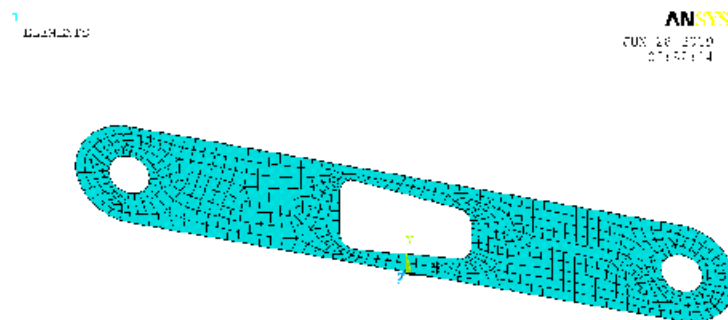
Επιλέγουμε να διακριτοποιήσουμε επιφάνεια (**Areas**) με **Quad** σχήμα και **Free** διακριτοποίηση. Πατάμε **Mesh** και επιλέγουμε το πρόσωπο του πεταλιού. Στην συνέχεια πατάμε **OK**.





**Σχήμα 4.33**

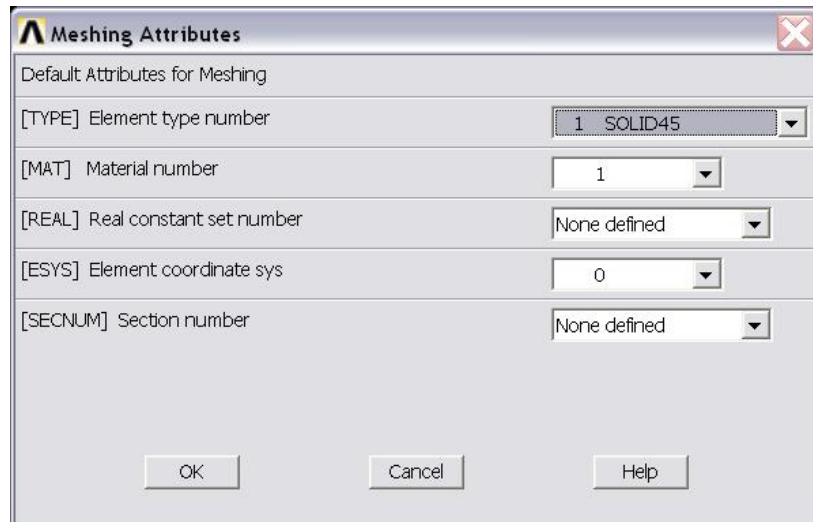
Το αποτέλεσμα της διακριτοποίησης με το στοιχείο Mesh200 είναι αυτό του σχήματος 4.34.



**Σχήμα 4.34**

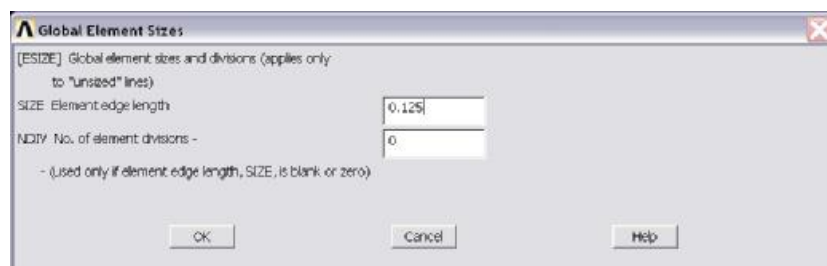
από το **main menu > preprocessor > meshing > mesh tool** και στην καρτέλα της διαχείρισης της διακριτοποίησης (mesh tool), σχήμα 4.37, επιλέγουμε **set** δίπλα στο **global element attributes** και εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 4.35.

Επιλέγουμε στο **element type number** να βρίσκεται το στοιχείο **Solid45** και πατάμε **OK**.



Σχήμα 4.35

Επιλέγουμε **set** κάτω από το Global Size Controls και στην καρτέλα του σχήματος 4.36 που εμφανίζετε δίνουμε μήκος (length) **0.125** και πατάμε **OK**.



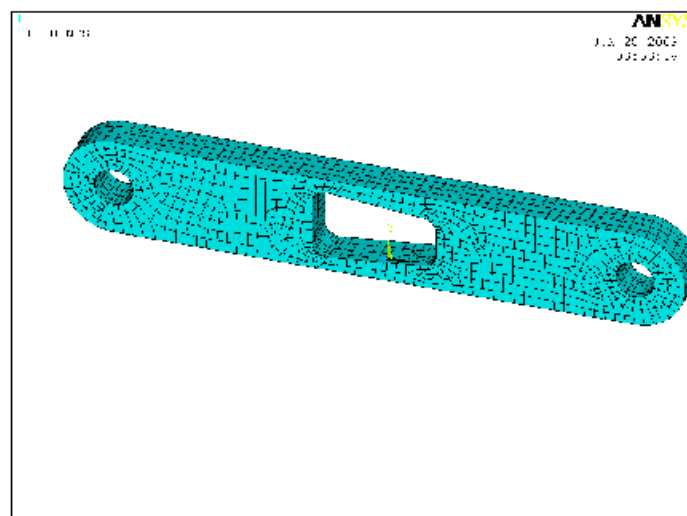
Σχήμα 4.36

Επιλέγουμε να διακριτοποιήσουμε όγκο (**volume**) με σχήμα **Hex / Wedge** και διακριτοποίηση **Sweep**. Επιλέγουμε **Auto Src / Trg** και πατάμε **Sweep**.



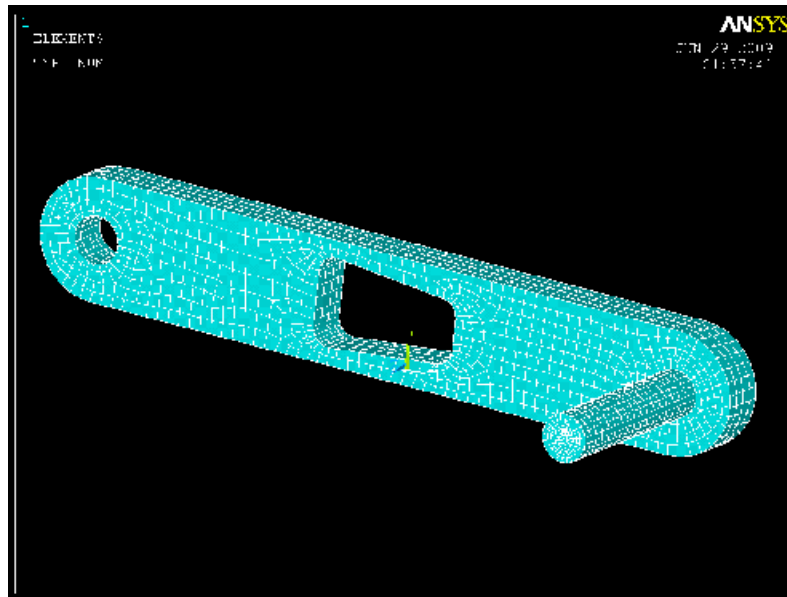
Σχήμα 4.37

Στη συνέχεια επιλέγουμε το πετάλι με τον ενεργό κέρσορα και πατάμε **OK** στην καρτέλα. Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.38.



Σχήμα 4.38

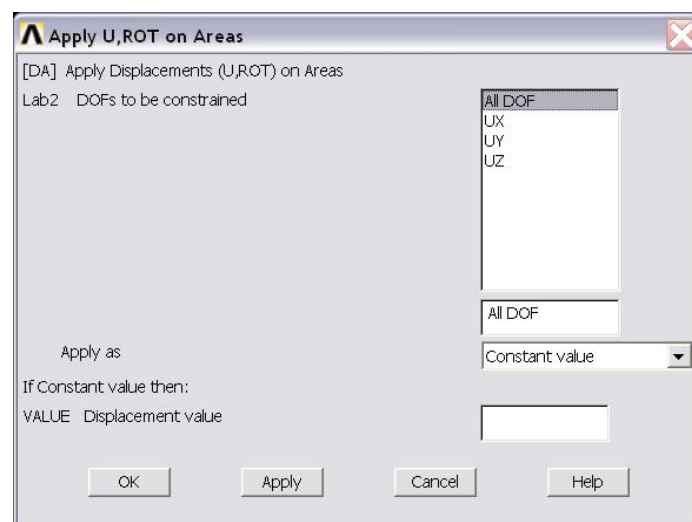
Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία της διακριτοποίησης με το στοιχείο Solid45 και για τον άξονα και έχουμε το αποτέλεσμα του σχήματος 4.39.



Σχήμα 4.39

## 6. ΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

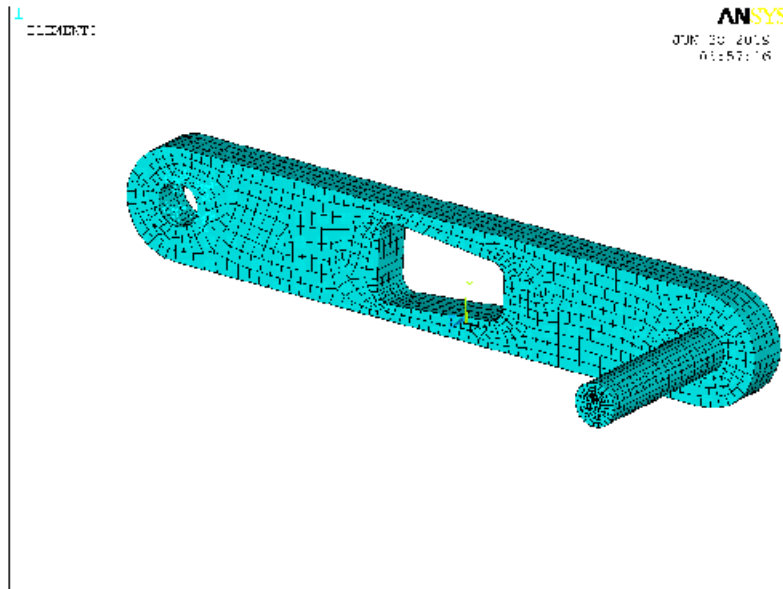
**Βήμα 14:** Από το **Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas**, θα τοποθετήσουμε την πάκτωση στην οπή του πεταλιού με τρεις βαθμούς ελευθερίας. Στην καρτέλα που εμφανίζετε, σχήμα 4.40, επιλέγουμε **ALL DOF** και πατάμε **OK**.



Σχήμα 4.40

Για την διευκόλυνση μας επιλέγουμε να εμφανιστούν οι επιφάνειες από το **Utility Menu > Plot > Areas**. Με τον ενεργό κέρσορα επιλέγουμε τις τέσσερις επιφάνειες της οπής και πατάμε **OK** στην καρτέλα.

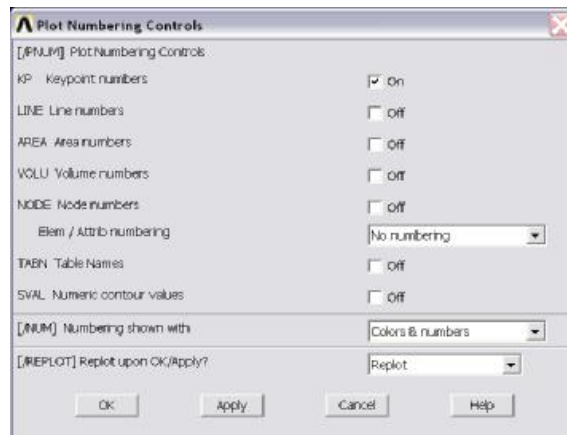
Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.41, όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4.41

Για την τοποθέτηση της δύναμης στον άξονα επιλέγουμε από το **Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Keypoints**

Επιλέγουμε από **Utility Menu > PlotCtrls > Numbering** και δηλώνουμε **On Keypoint Numbers**, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.42 και πατάμε **OK**.



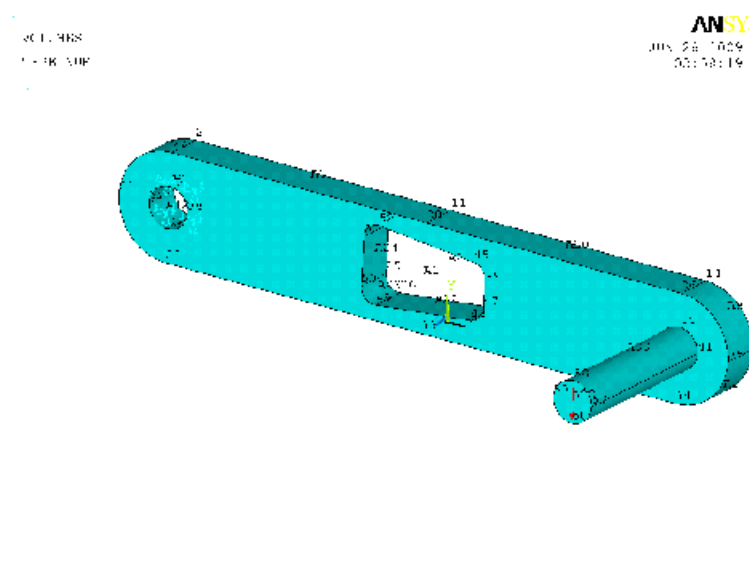
Σχήμα 4.42

Επιλέγουμε το πάνω σημείο (keypoint) στον άξονα, με τον ενεργό κέρσορα και πατάμε OK. Εμφανίζεται η καρτέλα του σχήματος 4.43 και επιλέγουμε διεύθυνση στον y άξονα (FY), στο Force/moment value γράφουμε -100 για να έχει διεύθυνση προς τα κάτω. Στη συνέχεια πατάμε **OK**.



**Σχήμα 4.43**

Το αποτέλεσμα θα είναι αυτό του σχήματος 4.44, όπου φαίνεται η πάκτωση στην οπή και η συγκεντρωμένη δύναμη στον άξονα.

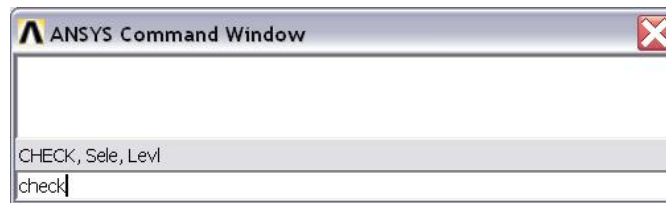


**Σχήμα 4.44**

## **7. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΔΙΕΞΑΧΘΕΙ**

**Βήμα 15:** Στο παράθυρο εντολών γράφουμε check και πατάμε enter, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.45. Αν οι προειδοποιήσεις αφορούν το μέγεθος των στοιχείων, τότε τις

αγνοούμε και συνεχίζουμε, αφού αφορούν το μεγάλο μέγεθος των στοιχείων που έχουμε στο μοντέλο, λόγω του στοιχείου Mesh200.

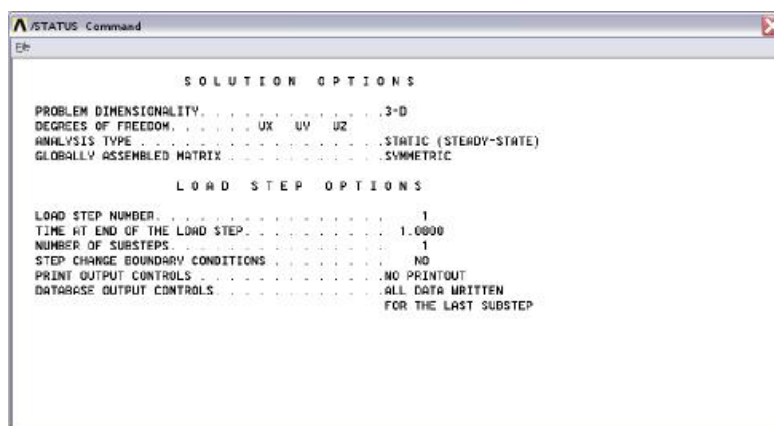


Σχήμα 4.45

### Γ) ΕΠΙΛΥΣΗ SOLUTION

## 8. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (3D) ΠΕΤΑΛΙΟΥ ΜΕ ΑΞΟΝΑ

**Βήμα 16:** Για να προχωρήσουμε στην επίλυση θα επιλέξουμε από το main menu > **solution > solve > current LS** και εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 4.46 που μας δείχνει αναλυτικά τι επρόκειτο να επιλύσουμε. Αν συμφωνούμε πατάμε **OK** στην καρτέλα του σχήματος 4.47.



Σχήμα 4.46



Σχήμα 4.47

Στη συνέχεια εμφανίζετε το παράθυρο του σχήματος 4.48 όπου δηλώνει ότι έγινε η λύση. Πατάμε **close**.



Σχήμα 4.48

## Δ) ΜΕΤΑ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ / ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ POSTPROCESS

### 9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

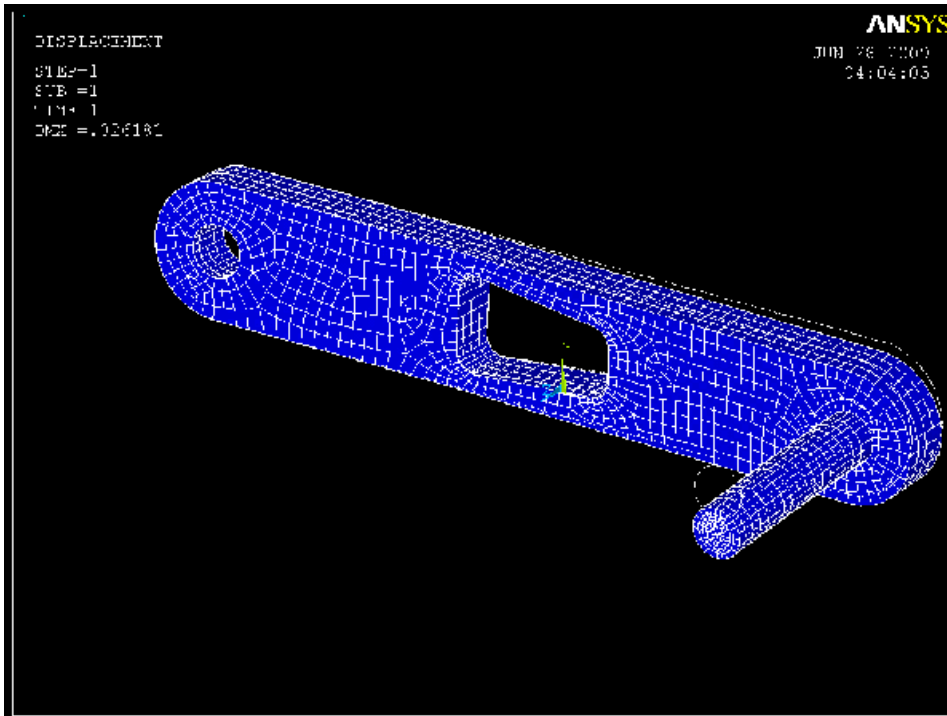
**Βήμα 17:** Στην συνέχεια θα δούμε την παραμόρφωση της κατασκευής επιλέγοντας από το main menu > general postproc > plot results > deformed shape και στην καρτέλα του σχήματος 4.49 επιλέγουμε **Def + undef edge** και πατάμε **OK**.



Σχήμα 4.49

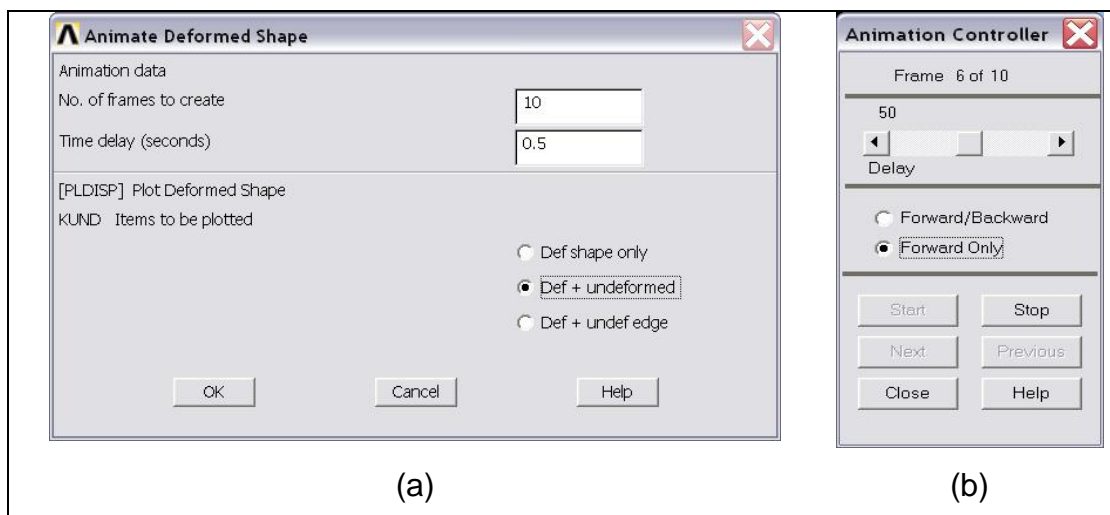
Η μέγιστη παραμόρφωση DMX είναι **0.026181 in**, όπως αναγράφεται στο γραφικό παράθυρο του ANSYS, σχήμα 4.50. Το αποτέλεσμα βγάζει νόημα και είναι ουσιαστικά αυτό που περιμέναμε.





Σχήμα 4.50

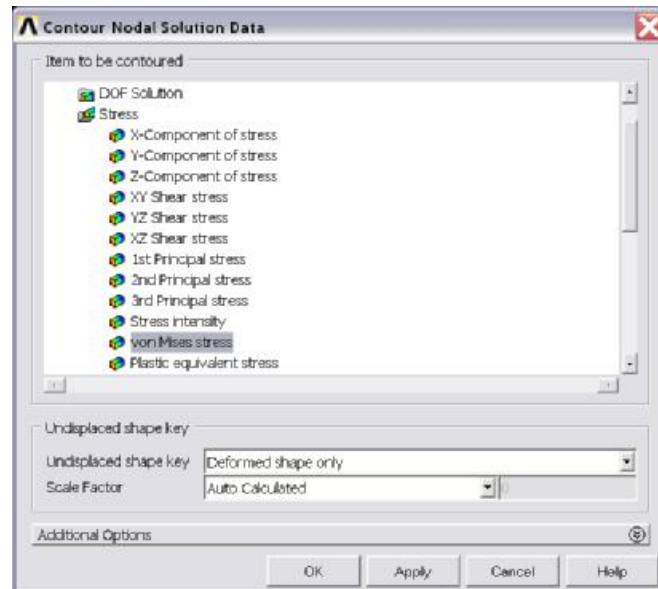
**Βήμα 18:** Στην περίπτωση που θέλουμε να δούμε την παραμόρφωση σε κίνηση θα επιλέξουμε από το **Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Deformed Shape** και στην καρτέλα του σχήματος 4.51a, επιλέγουμε **Select Def + undeformed** και πατάμε **OK**. Στην καρτέλα του σχήματος 4.51b, *Animation Controller*, επιλέγουμε **Forward Only**.



Σχήμα 4.51

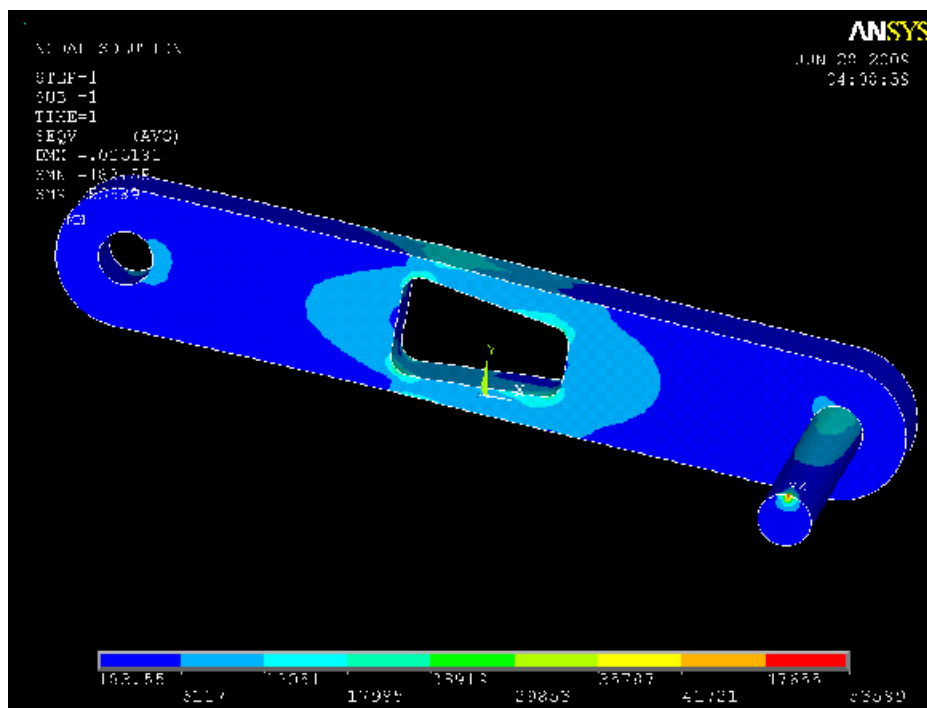
**Βήμα 19:** Για να εμφανίσουμε τα αποτελέσματά της κατανομής των τάσεων στη κομβική λύση (Nodal solution) με βάση το κριτήριο αστοχίας (Von Mises) επιλέγουμε

από το **Main Menu > General Postproc > Plot results > Contour Plot > Nodal Solu** και στη καρτέλα, σχήμα 4.52, που εμφανίζετε επιλέγουμε **Nodal Solution > Stress > von Mises stress** και πατάμε **OK**

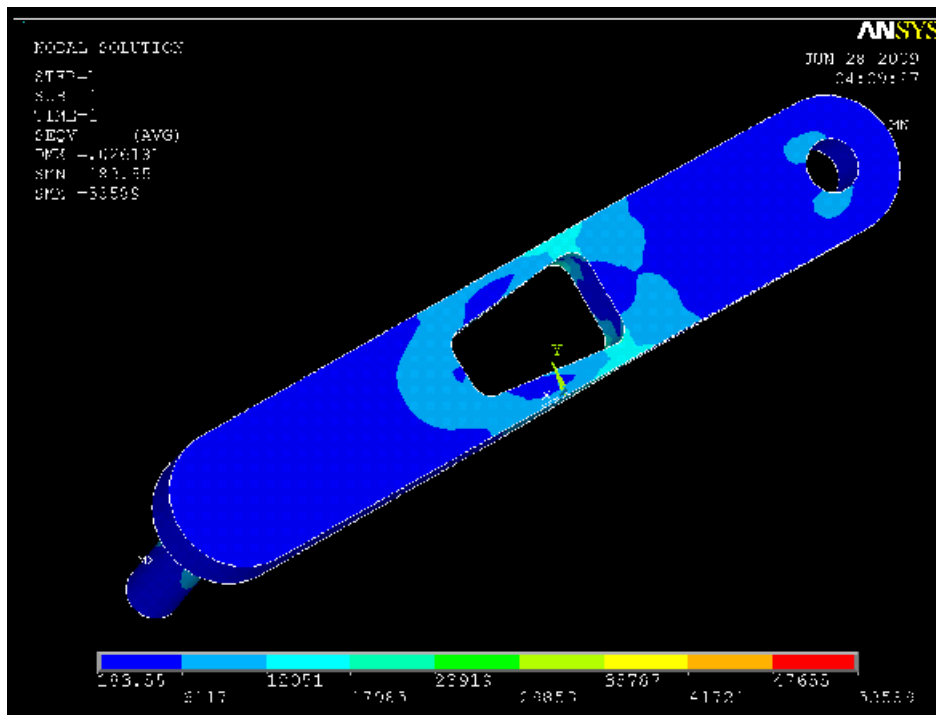


Σχήμα 4.52

Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.53 και 4.54, που δείχνει την κατανομή των τάσεων, στην εμπρός όψη και στην πίσω όψη αντίστοιχα.

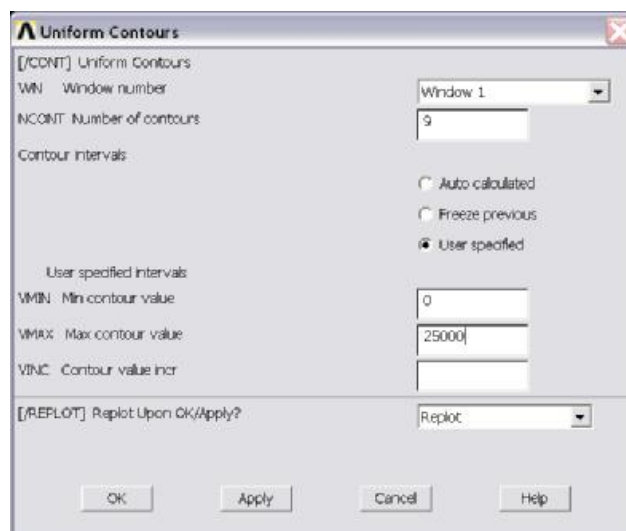


Σχήμα 4.53



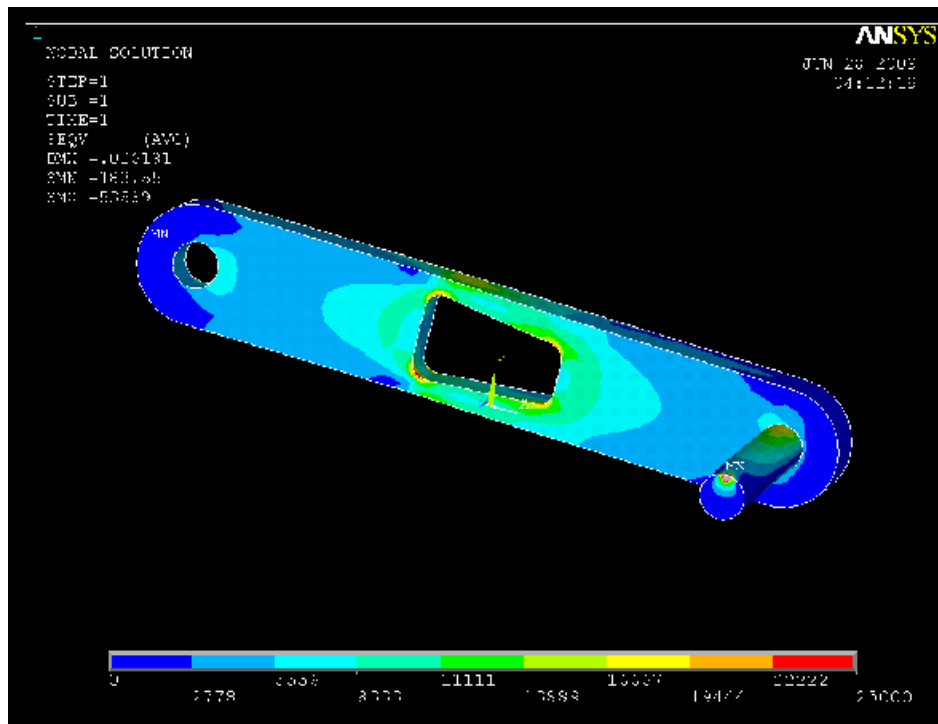
Σχήμα 4.54

Για να δούμε καλύτερα την κατανομή των τάσεων μπορούμε να αλλάξουμε το εύρος της μέγιστης και ελάχιστης τάσης, επιλέγοντας από το **Utility Menu > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours** και στην καρτέλα του σχήματος 4.55, να επιλέξουμε **User specified** και να γράψουμε για ελάχιστη **0** και μέγιστη **25000**, όπως φαίνεται παρακάτω. Στην συνέχεια πατάμε **OK**.



Σχήμα 4.55

Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.56, παρακάτω με μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση 53589psi.

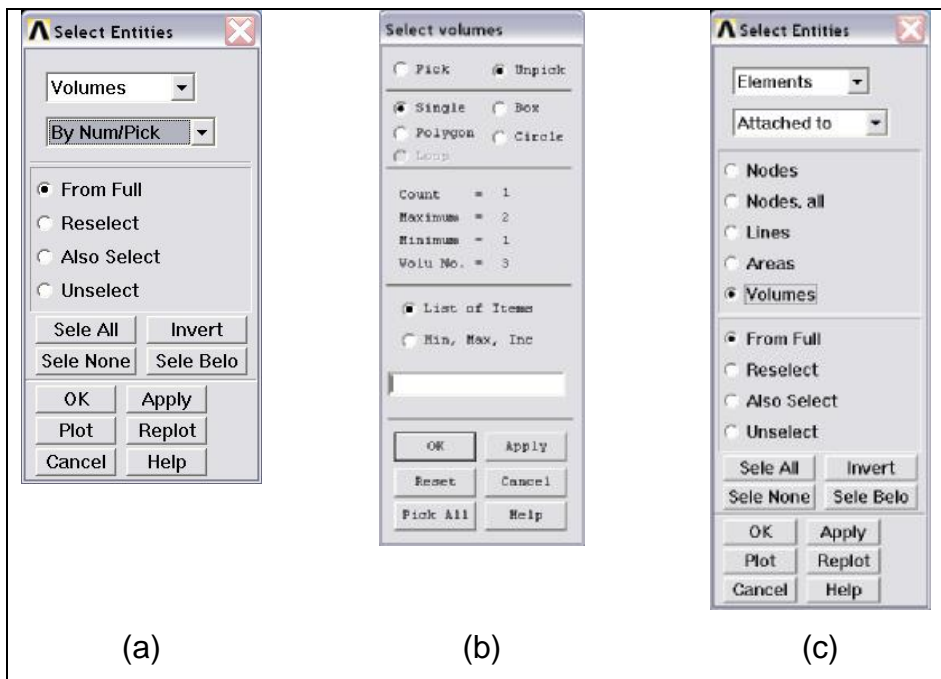


Σχήμα 4.56

**Βήμα 20:** Επειδή η μέγιστη τάση συγκεντρώνεται κυρίως στο πετάλι, ενώ στον άξονα εμφανίζετε σημειακά, εκεί που εφαρμόζεται η δύναμη, ο άξονας μπορεί να αγνοηθεί.

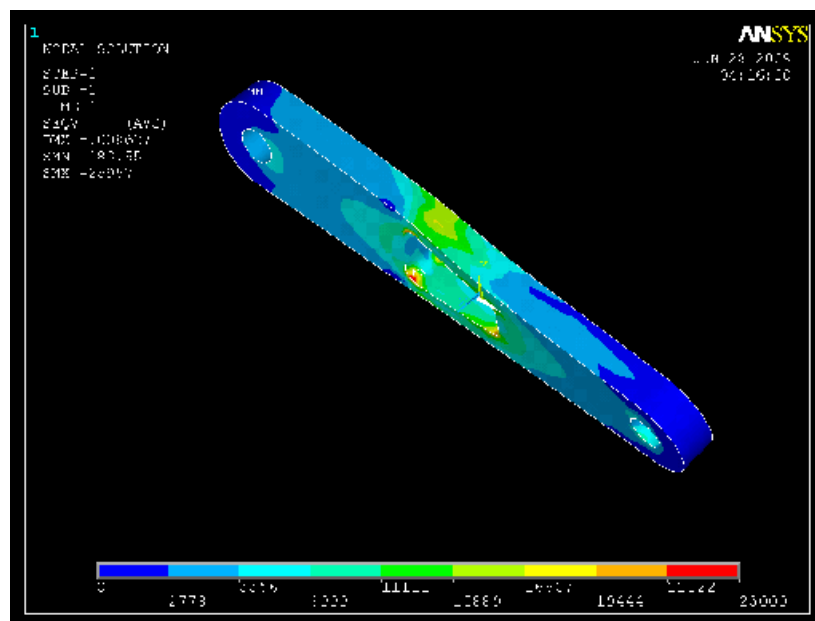
Αυτό γίνεται επιλέγοντας από το **Utility menu > Select > Entities** και στην καρτέλα του σχήματος 4.57a που εμφανίζετε επιλέγουμε **volumes, By Num/Pick, From Full** και πατάμε **Apply**. Με τον ενεργό κέρσορα επιλέγουμε τον όγκο του πεταλιού και πατάμε **OK** στην καρτέλα του σχήματος 4.57b.

Αφού επιλέξαμε τον όγκο του πεταλιού, στην συνέχεια πρέπει να επιλέξουμε όλα τα στοιχεία του όγκου που θέλουμε να κρατήσουμε. Στην καρτέλα *Select Entities* του σχήματος 4.57a επιλέγουμε **Elements, Attached to** και η καρτέλα μετατρέπεται σε αυτήν του σχήματος 4.57c, επιλέγουμε **Volumes** και πατάμε **Apply**. Πατάμε **Replot** για να εμφανιστεί η νέα επιλογή.



Σχήμα 4.57

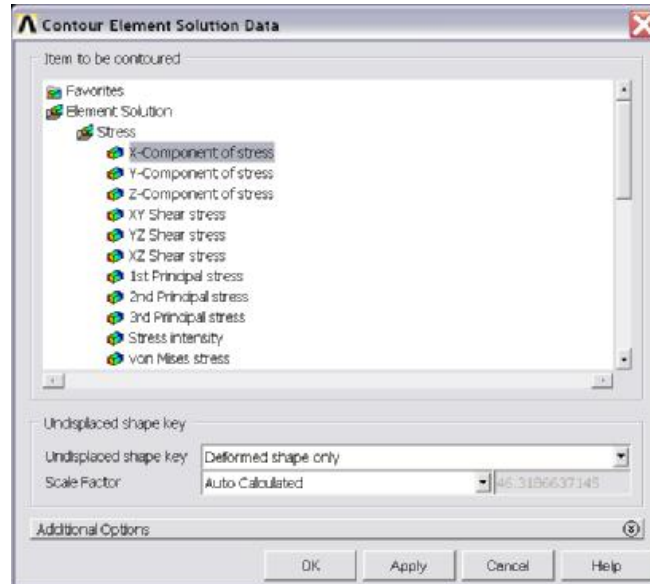
Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.58, όπως φαίνεται παρακάτω. Παρατηρούμε ότι η παραμόρφωση είναι υπερβάλλουσα.



Σχήμα 4.58

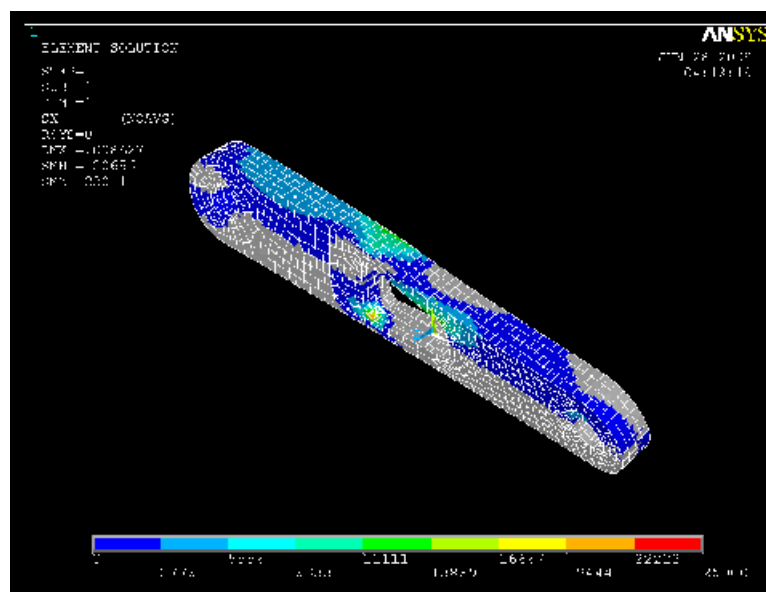
**Βήμα 21:** για να ελέγξουμε ότι η καμπτική τάση στον άξονα είναι σχετικά ασήμαντη, μπορούμε να συγκρίνουμε τη λύση στοιχείων στον x άξονα με τη στοιχειώδη Von Mises.

Από το **main menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Element Solu** επιλέγουμε **element solution > Stress > X-Component of stress** και πατάμε **Apply**.

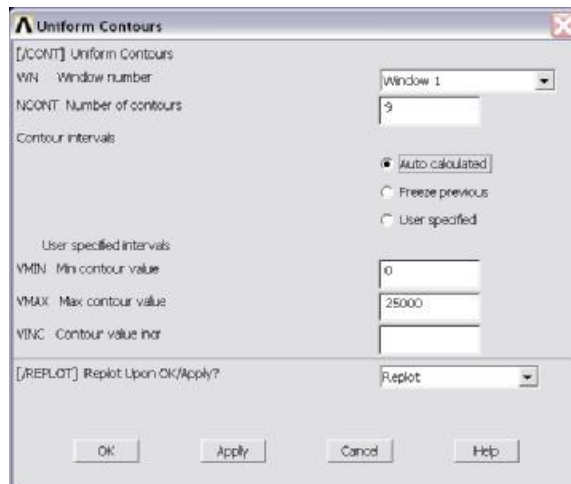


Σχήμα 4.59

Στην περίπτωση μας, εμφανίστηκαν γκρι χρώματος επιφάνειες, σχήμα 4.60, και γι' αυτό τον λόγο επιλέγουμε από το **Utility Menu > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours** και εμφανίζετε η καρτέλα του σχήματος 4.61. Επιλέγουμε **Auto calculated** και πατάμε **OK**.

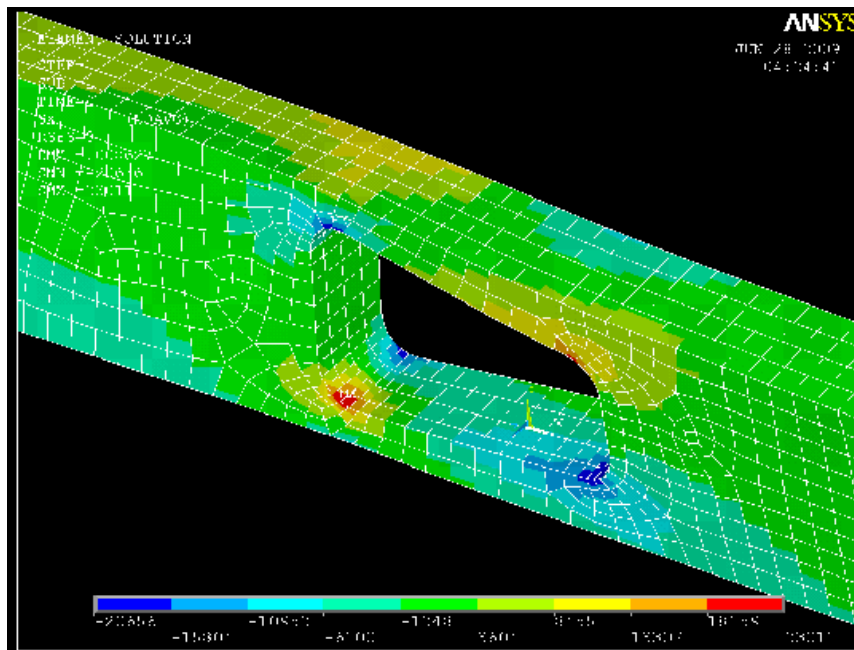


Σχήμα 4.60



Σχήμα 4.61

Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.62



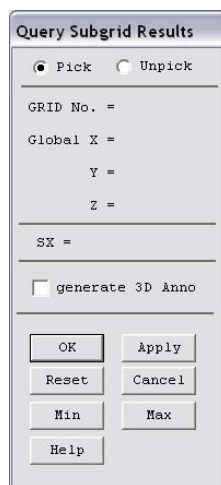
Σχήμα 4.62

Για να βρούμε πληροφορίες για τα συγκεκριμένα σημεία του μοντέλου επιλέγουμε από το **main menu > General Postproc > Query Results > Subgrid Solu** και εμφανίζετε η καρτέλα του σχήματος 4.63. επιλέγουμε **Stress, X-direction SX**, και πατάμε **OK**.



Σχήμα 4.63

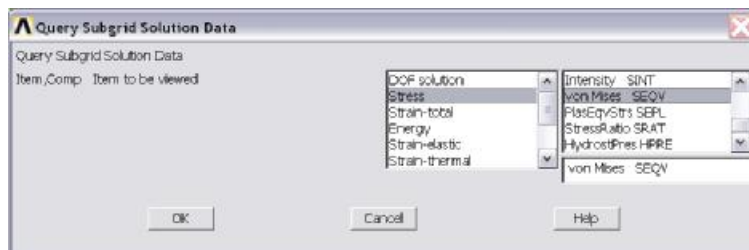
Εμφανίζετε η καρτέλα του σχήματος 4.64 και επιλέγουμε με τον ενεργό κέρσορα οποιοδήποτε σημείο που θέλουμε να ελέγξουμε.



Σχήμα 4.64

Πατάμε **OK** όταν τελειώσουμε.

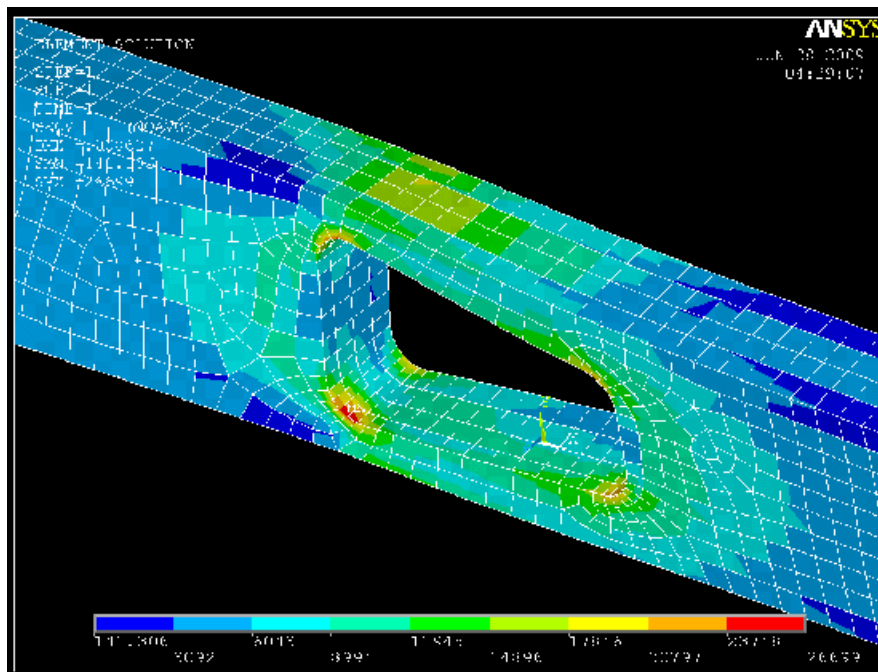
Στην καρτέλα του σχήματος 4.63 επιλέγουμε **stress, von Misses**, σχήμα 4.65, και συγκρίνουμε τα σημεία με την κατανομή στον x άξονα.



Σχήμα 4.65



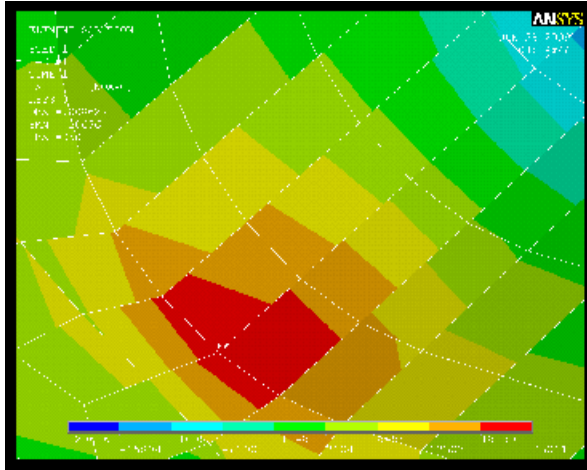
Εμφανίζετε η καρτέλα του σχήματος 4.64 και επιλέγουμε με τον ενεργό κέρσορα οποιοδήποτε σημείο που θέλουμε να ελέγξουμε, σχήμα 4.66.



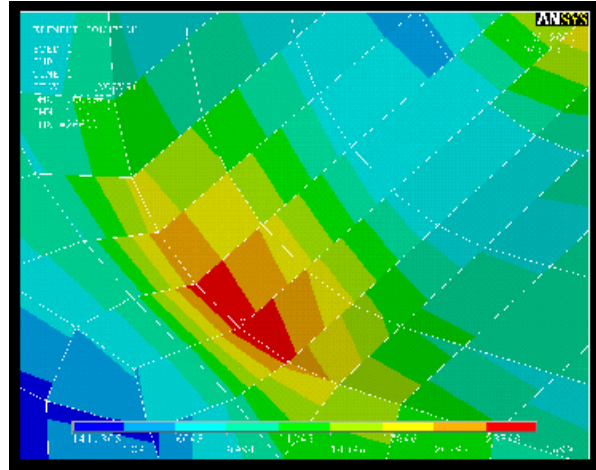
Σχήμα 4.66

**Βήμα 22:** Για να ερευνήσουμε την συγκέντρωση των τάσεων συγκρίνοντας την κομβική λύση με την λύση στοιχείων θα επιλέξουμε από το **main menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Element Solu** και στην καρτέλα επιλέγουμε **Stress > Von Misses Stress** και πατάμε **OK**.

Εμφανίζετε το μοντέλο μας με λύση στοιχείων, σχήμα 4.66 και 4.68 σε μεγέθυνση, βάση το κριτήριο αστοχίας (Von Misses). Συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με αυτά της κατανομής σε x άξονα, σχήμα 4.67 σε μεγέθυνση.



Σχήμα 4.67 X stress element solution

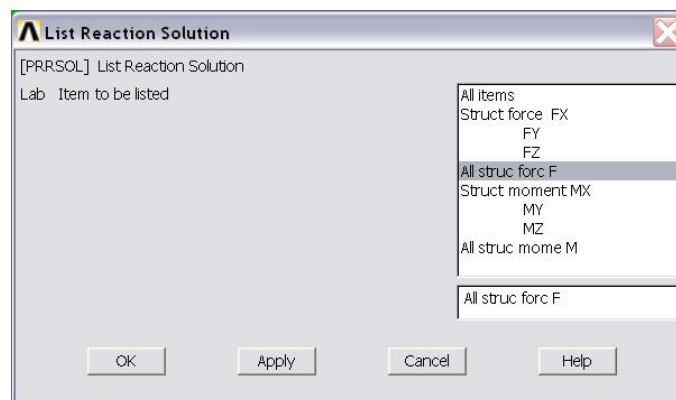


Σχήμα 4.68 Von misses element solution

Το σημείο που συγκεντρώνετε η μέγιστη τάση στην κατασκευή και στις δύο λύσεις είναι αρκετά συνεχείς, που σημαίνει ότι έχουμε επιλέξει ένα καλό πλέγμα. Η λύση με βάση το κριτήριο αστοχίας (Von misses) δείχνει τη μέση τάση και η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση είναι στο ίδιο σημείο με αυτήν της λύσης στον x άξονα (x stress), όπου δηλώνετε με MX επάνω στο μοντέλο.

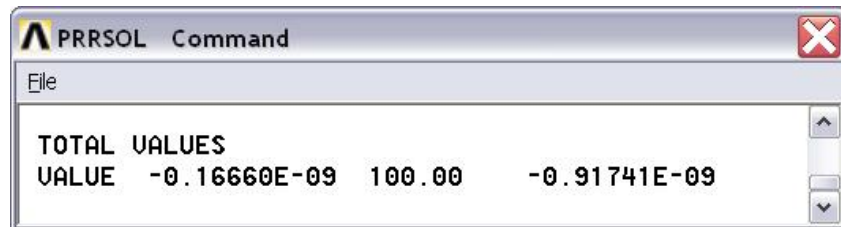
## 10. ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ / ΕΛΕΓΧΟΣ

**Βήμα 23:** Για να ελέγξουμε αν οι αντιδράσεις στις στηρίξεις ισορροπούν τις εφαρμοσμένες δυνάμεις, για να ισχύει η στατική ισορροπία, επιλέγουμε από το **Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solu** και στην καρτέλα του σχήματος 4.69, επιλέγουμε **All struc forc F** για *Item to be listed* και πατάμε **OK**.



Σχήμα 4.69

Εμφανίζετε το παράθυρο του σχήματος 4.70 και βλέπουμε ότι στον x και z άξονα οι δυνάμεις είναι ουσιαστικά μηδέν ( $-0.16660 \times 10^{-9}$  και  $-0.91741 \times 10^{-9}$  αντίστοιχα) ενώ στον y άξονα είναι το φορτίο που έχουμε τοποθετήσει 100 lbf.



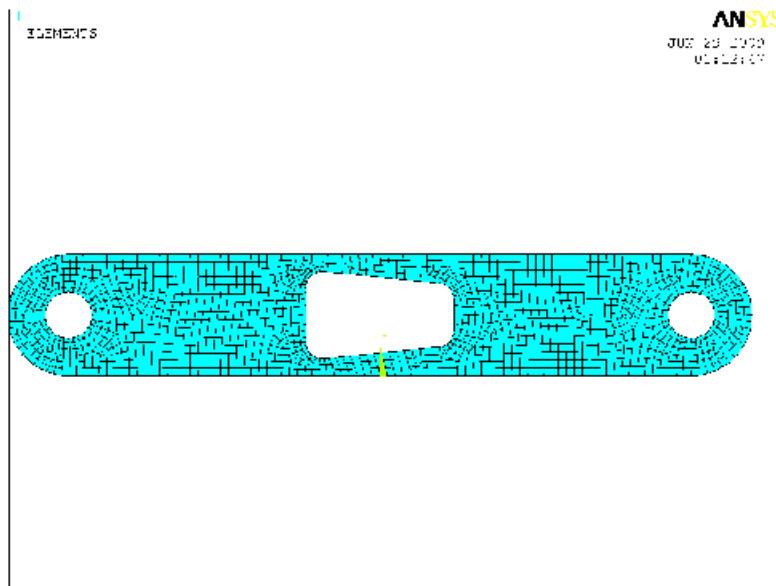
Σχήμα 4.70

**Βήμα 24:** Στην συνέχεια θα επαναλάβουμε την διακριτοποίηση με λεπτότερο πλέγμα ξεκινώντας από το στοιχείο Mesh200, όπου θα χρησιμοποιήσουμε smart size 3 στην καρτέλα εργαλείων διακριτοποίησης (mesh tool) και μήκος στοιχείων 0.08 in, όπως φαίνετε στο σχήμα της καρτέλας 4.71.



Σχήμα 4.71

Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.72, παρακάτω.



**Σχήμα 4.72**

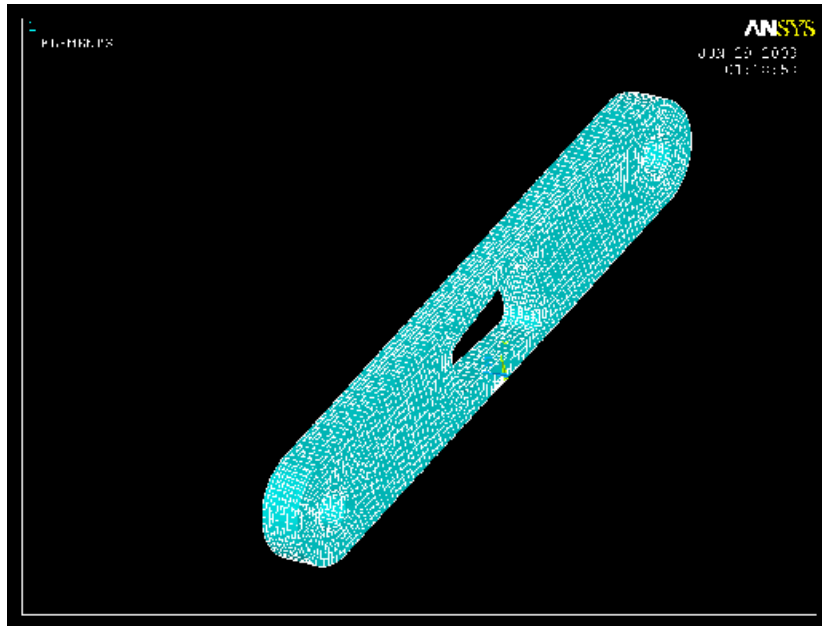
Επίσης θα επαναλάβουμε την διακριτοποίηση και για το στοιχείο solid45 με μήκος στοιχείων (element edge length) 0.05 αντί 0.125, όπως φαίνεται στην καρτέλα του σχήματος 4.73.



**Σχήμα 4.73**

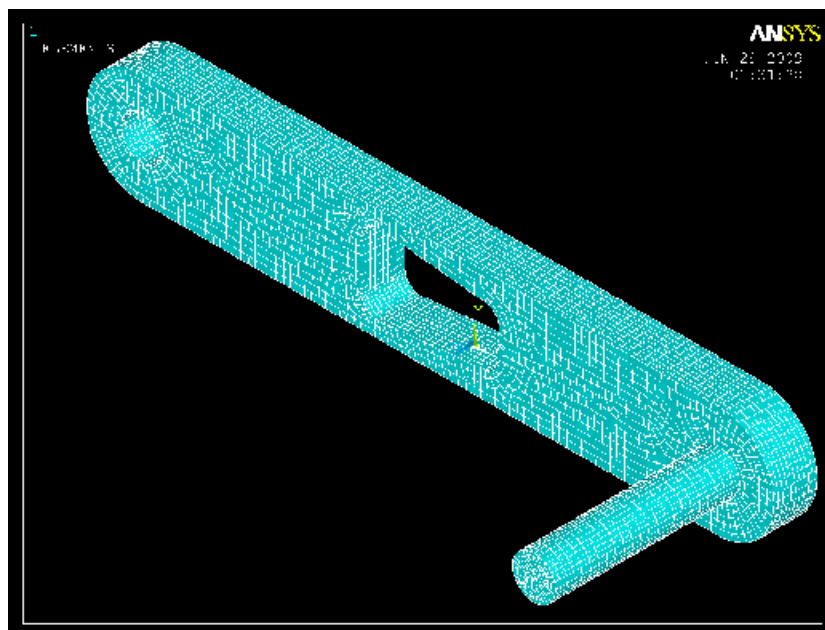
Αυτό θα δημιουργήσει 10 τμήματα μέσω του πάχους του πεταλιού αντί 4. Στην προειδοποίηση ότι ο όγκος είναι ήδη διακριτοποιημένος πατάμε YES και OK για να ξανά-διακριτοποιήσει.

Το αποτέλεσμα είναι αυτό του σχήματος 4.74.

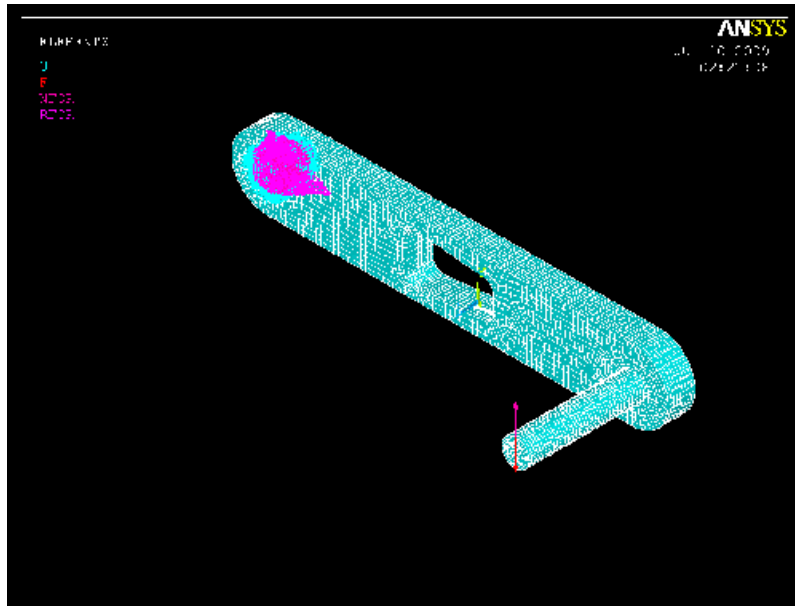


Σχήμα 4.74

Ακολουθως και η δεύτερη διακριτοποίηση του άξονα, στο σχήμα 4.75, με στοιχείο solid45 και μήκος στοιχείων 0.05 όπως και στο πετάλι.

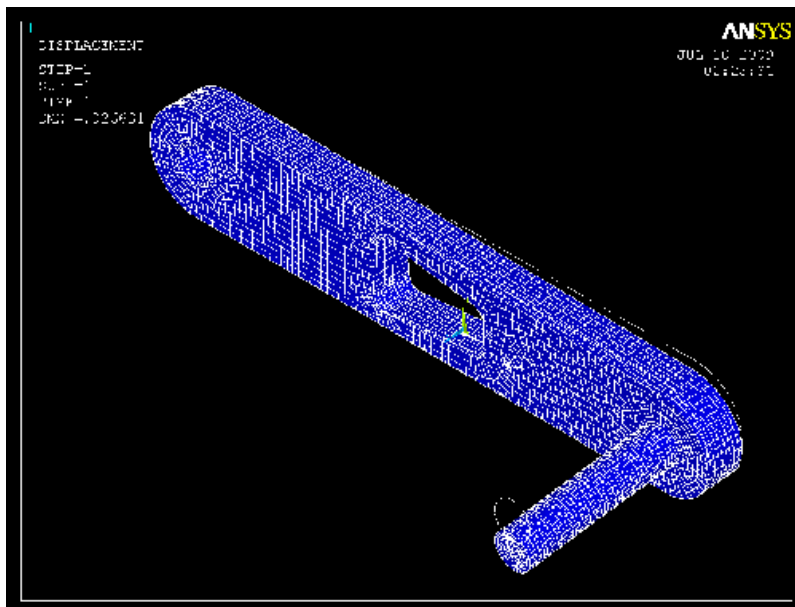


Σχήμα 4.75



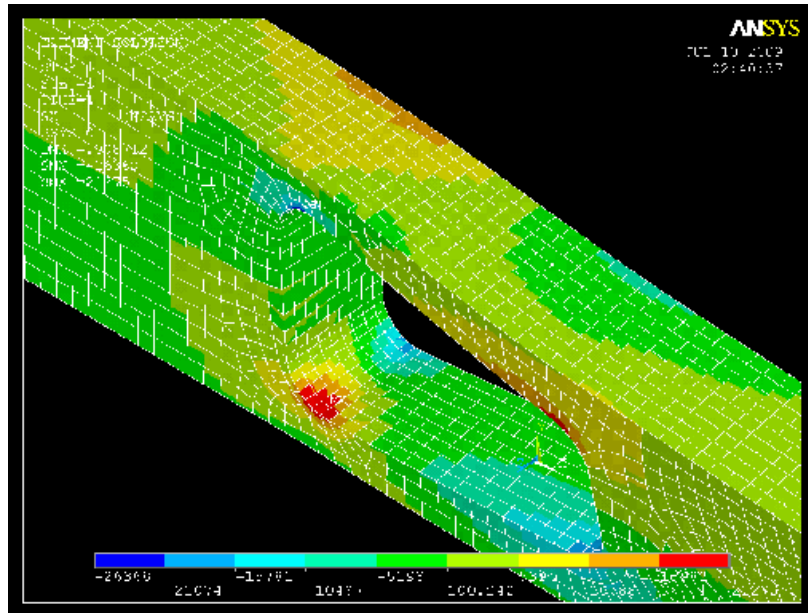
*Εφαρμογή οριακών συνθηκών*

Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

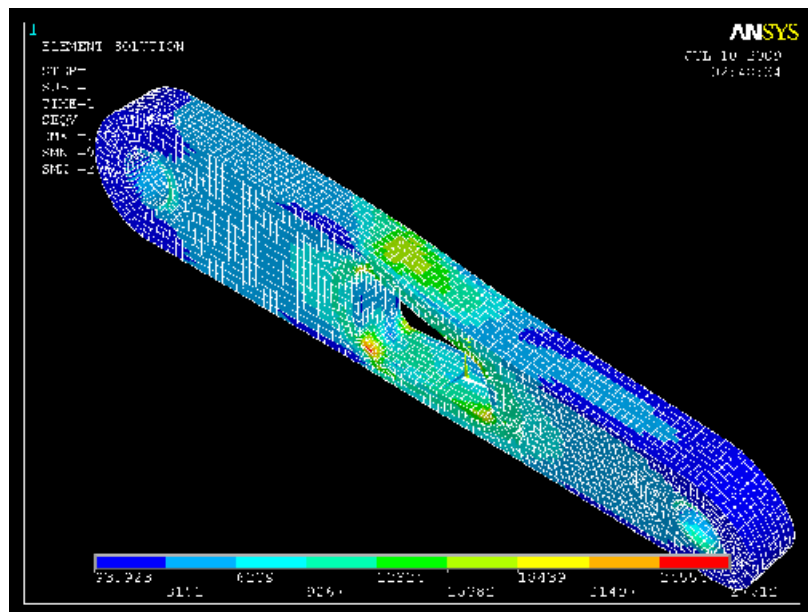


*Παραμόρφωση μετά την δεύτερη διακριτοποίηση*





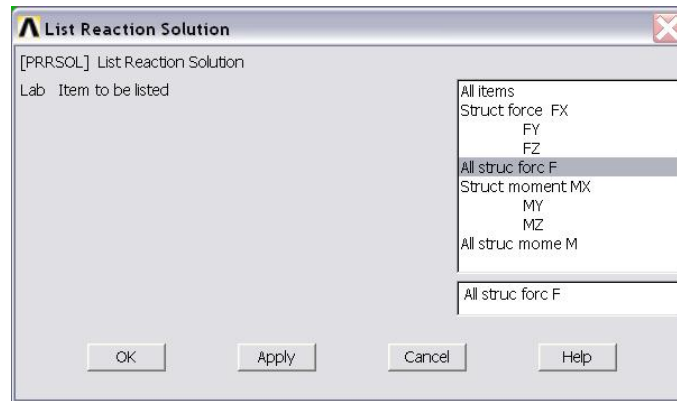
*Κατανομή τάσεων στον x άξονα (element solution)*



*Κατανομή τάσεων με το κριτήριο αστοχίας Von Mises (element solution)*

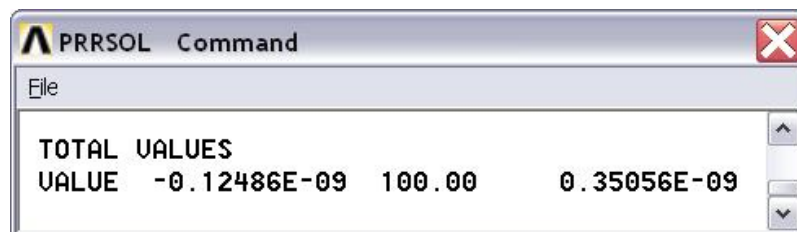
Ελέγχουμε αν οι αντιδράσεις στις στηρίξεις ισορροπούν τις εφαρμοσμένες δυνάμεις, για να ισχύει η στατική ισορροπία, επιλέγουμε από το **Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solu** και στην καρτέλα του σχήματος 4.72, επιλέγουμε **All struc forc F** για *Item to be listed* και πατάμε **OK**.





Σχήμα 4.72

Εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 4.73 και βλέπουμε ότι στον x και z άξονα οι δυνάμεις είναι ουσιαστικά μηδέν ( $-0.12486 \times 10^{-9}$  και  $-0.35056 \times 10^{-9}$  αντίστοιχα) ενώ στον y άξονα είναι το φορτίο που έχουμε τοποθετήσει 100.00 lbf.



Σχήμα 4.73



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1.1: Το πρώτο Turbo, από τον Ελβετό Δρ Alfred J. Buchi .....	2
Εικόνα 1.2.1 a: Στροβιλοσυμπιεστής καυσαερίων .....	5
Εικόνα 1.2.1 b: Μηχανικός συμπιεστής Rotrex .....	5
Εικόνα 1.3.1a: κέλυφος εισαγωγής .....	7
Εικόνα 1.3.1b: κέλυφος καυσαερίων .....	7
Εικόνα 1.3.2: μέλος στήριξης άξονα του στροβιλοσυμπιεστή .....	8
Εικόνα 1.3.3: Συνδεσμολογία στροβιλοσυμπιεστή .....	8
Εικόνα 1.3.4: Χαρακτηριστικά φτερωτών .....	9
Εικόνα 1.3.5: λόγος επιφανειών A/R .....	10
Εικόνα 1.4.1: χυτός στρόβιλος (turbine) με άξονα και συμπιεστής (compressor) .....	13
Εικόνα 1.5.1: ρουλεμάν .....	14
Εικόνα 1.6.1: ρύθμιση πτερυγίων στροβιλοσυμπιεστή .....	15
Εικόνα 1.6.2: πλάκα με κινητά πτερύγια .....	16
Εικόνα 1.7.1: Τύποι ρουλεμάν .....	17
Εικόνα 1.7.2: Τρόπος ψύξης Στροβιλοσυμπιεστής σε τομή .....	18
Εικόνα 1.7.3: Διαστάσεις Στροβίλου και άξονα σε mm .....	21
Εικόνα 1.7.4: Διαστάσεις Συμπιεστή σε mm .....	21
Εικόνα 2.2.1: Κύριο παράθυρο εργασίας .....	28
Εικόνα 2.2.2: Παράθυρο πληροφοριών .....	28
Εικόνα 3.1.1: Έλασμα με οπή στο κέντρο .....	36
Εικόνα 3.1.2: Απεικόνιση του στοιχείου PLANE2 .....	37
Εικόνα 3.1.3: (a) Πλέγμα 1 (46 elements) και (b) Πλέγμα 2 (184 elements) .....	37
Εικόνα 3.1.4: Πλέγμα 3 με τοπική αύξηση (228 elements) .....	38
Εικόνα 3.1.6: Κατανομή μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης (επίλυση 1) .....	39
Εικόνα 3.1.7: (a) Διακριτοποιημένη επιφάνεια (b) Τοπική διακριτοποίηση .....	40
Εικόνα 3.1.8: Κατανομή μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης (επίλυση 2) .....	40
Εικόνα 3.2.1: Διαστάσεις δοκού .....	41
Εικόνα 3.2.2: Εφαρμοσμένη δύναμη στην δοκό .....	41
Εικόνα 3.2.3: Απεικόνιση του στοιχείου BEAM 3 .....	42
Εικόνα 3.2.4: Πλάτος ταλάντωσης στον κόμβο 2 .....	45

Εικόνα 3.3.1: Δικτύωμα .....	46
Εικόνα 3.3.2: Απεικόνιση του στοιχείου LINK 1 .....	47
Εικόνα 3.3.3: Παραμορφωμένο δικτύωμα .....	48
Εικόνα 3.3.4: Εφαρμογή δυνάμεων ανά κόμβο .....	48
Εικόνα 3.3.5: Αξονικές δυνάμεις στα στοιχεία .....	49
Εικόνα 3.4.1: Γεωμετρία κατασκευής .....	50
Εικόνα 3.4.2: Απεικόνιση του στοιχείου SOLID 45 .....	51
Εικόνα 3.4.3: Απεικόνιση του στοιχείου MESH 200 .....	52
Εικόνα 3.4.4: Μορφές στοιχείου MESH 200 .....	52
Εικόνα 3.4.5: Τρισδιάστατη (SOLID 3D) γεωμετρία πεταλιού με άξονα .....	53
Εικόνα 3.4.6: (a) πλέγμα 1 (5621 elements) και (b) πλέγμα 2 (20778 elements) .....	54
Εικόνα 3.4.7: παραμόρφωση κατασκευής a: $dmx=0.026181in$ b: $dmx=0.026631in$ .....	54
Εικόνα 3.4.8: Κατανομή τάσεων στους κόμβους (von misses stress) .....	55
Εικόνα 3.4.9: Κατανομή τάσεων στους κόμβους (von misses stress) .....	55
Εικόνα 3.4.10: Κατασκευή με αριθμημένες επιφάνειες .....	56
Εικόνα 3.4.11: Κατανομή τάσεων στον x άξονα (a) πλέγμα 1 (b) πλέγμα 2 .....	56
Εικόνα 3.4.12: Κατανομή τάσεων στον x άξονα (a) πλέγμα 1 (b) πλέγμα 2 .....	57
Εικόνα 3.4.13: Κατανομή τάσεων με το κριτήριο αστοχίας Von Mises .....	57
Εικόνα 4.1.1: Γεωμετρία Άξονα στροβιλοσυμπιεστή .....	60
Εικόνα 4.1.2: Γεωμετρία στροβίλου .....	61
Εικόνα 4.1.3: Γεωμετρία συμπιεστή .....	62
Εικόνα 4.1.4: Γεωμετρία πτερυγίων .....	64
Εικόνα 4.1.5: Διαίρεση όγκων .....	65
Εικόνα 4.1.5: Διαίρεση όγκων συμπιεστή .....	66
Εικόνα 4.1.6: Διαίρεση όγκων παξιμαδιού .....	66
Εικόνα 4.1.7: Δημιουργία πτερυγίων .....	67
Εικόνα 4.1.8: Γραμμές που απαρτίζουν την κατασκευή .....	67
Εικόνα 4.3.1.1: Διαιρούμενοι όγκοι στροβιλοσυμπιεστή .....	69
Εικόνα 4.3.1.2: Επιφάνειες Πτερυγίων συμπιεστή .....	70
Εικόνα 4.3.1.3: Επιφάνειες Πτερυγίων στροβίλου .....	70
Εικόνα 4.3.2.1 Απεικόνιση του στοιχείου SOLID95 .....	72
Εικόνα 4.3.2.2: Απεικόνιση του στοιχείου SHELL63 .....	73
Εικόνα 4.3.3.1: Διακριτοποίηση στερεών (solid) .....	74
Εικόνα 4.3.3.2: Διακριτοποίηση επιφανειών (shell) .....	74

<b>Εικόνα 4.3.4.1:</b> Δεσμευμένοι κόμβοι σε $x$ διεύθυνση .....	<b>75</b>
<b>Εικόνα 4.3.4.2:</b> Τρόπος έδρασης άξονα .....	<b>75</b>
<b>Εικόνα 4.3.4.3:</b> Εφαρμοσμένες πιέσεις στα πτερύγια .....	<b>76</b>
<b>Εικόνα 4.4.1:</b> Παραμόρφωση στροβιλοσυμπιεστή .....	<b>77</b>
<b>Εικόνα 4.4.2:</b> Μετατόπιση πτερυγίων συμπιεστή λόγω περιστροφής (κομβική λύση)	<b>78</b>
<b>Εικόνα 4.4.3:</b> Μετατόπιση στροβιλοσυμπιεστή λόγω περιστροφής ως προς την κάθετη διεύθυνση $y$ .....	<b>78</b>
<b>Εικόνα 4.4.4:</b> Μετατόπιση πτερυγίων συμπιεστή λόγω περιστροφής σε λύση στοιχείων .....	<b>79</b>
<b>Εικόνα 4.4.5:</b> Μετατόπιση άξονα ως προς τις εδράσεις .....	<b>79</b>
<b>Εικόνα 4.4.6:</b> Κατανομή ισοδύναμης τάσης στους κόμβους κατά το κριτήριο αστοχίας(von mises stress) .....	<b>80</b>
<b>Εικόνα 4.4.7:</b> Κατανομή ισοδύναμης τάσης στους κόμβους κατά το κριτήριο αστοχίας(von mises stress) με αλλαγή εύρος τάσεων .....	<b>81</b>
<b>Εικόνα 4.4.8:</b> Κατανομή ισοδύναμης τάσης στους κόμβους κατά το κριτήριο αστοχίας(von mises stress) .....	<b>81</b>
<b>Εικόνα 4.4.9:</b> Κατανομή ισοδύναμης τάσης σε τομή στον άξονα και στρόβιλο κατά το κριτήριο αστοχίας(von mises stress) .....	<b>82</b>
<b>Εικόνα 4.4.10:</b> Κατανομή ισοδύναμης τάσης σε τομή στον άξονα από την μεριά του συμπιεστή κατά το κριτήριο αστοχίας(von mises stress) .....	<b>82</b>
<b>Εικόνα 4.4.11:</b> Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων $\sigma_{xx}$ στον στροβιλοσυμπιεστή ..	<b>83</b>
<b>Εικόνα 4.4.12:</b> Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων $\sigma_{xx}$ στα πτερύγια του στροβίλου σε τομή .....	<b>84</b>
<b>Εικόνα 4.4.13:</b> Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων $\sigma_{xx}$ στα σημεία έδρασης .....	<b>84</b>
<b>Εικόνα 4.4.14:</b> Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων $\sigma_{xx}$ στην αλλαγή διατομής του άξονα και πριν ξεκινήσει η έδραση (compressor side) .....	<b>85</b>
<b>Εικόνα 4.4.15:</b> Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων $\sigma_{xx}$ στην αλλαγή διατομής του άξονα και πριν ξεκινήσει η έδραση (turbine side) .....	<b>86</b>
<b>Εικόνα 4.4.16:</b> Κατανομή ορθών τάσεων $\sigma_{yy}$ .....	<b>87</b>
<b>Εικόνα 4.4.17:</b> Κατανομή ορθών τάσεων $\sigma_{zz}$ στον στροβιλοσυμπιεστή .....	<b>88</b>
<b>Εικόνα 4.4.18:</b> Κατανομή ορθών τάσεων $\sigma_{zz}$ στον στρόβιλο .....	<b>88</b>
<b>Εικόνα 4.4.19:</b> Κατανομή ορθών τάσεων $\sigma_{yy}$ στον άξονα σε τομή .....	<b>89</b>
<b>Εικόνα 4.4.20:</b> Κατανομή ορθών τάσεων $\sigma_{zz}$ στον άξονα σε τομή .....	<b>89</b>
<b>Εικόνα 4.4.21:</b> Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων $\sigma_{xx}$ στον στροβιλοσυμπιεστή ..	<b>90</b>

<b>Εικόνα 4.4.22:</b> Κατανομή ισοδύναμης τάσης στα στοιχεία (elements) κατά το κριτήριο αστοχίας(von mises stress) .....	<b>91</b>
<b>Εικόνα 4.4.23:</b> Κατανομή ισοδύναμης τάσης στα στοιχεία (elements) κατά το κριτήριο αστοχίας(von mises stress) με αλλαγή εύρος τάσεων .....	<b>91</b>
<b>Εικόνα 4.4.24:</b> Κατανομή ισοδύναμης τάσης στα στοιχεία (elements) κατά το κριτήριο αστοχίας (von mises stress) .....	<b>92</b>
<b>Εικόνα 4.4.25:</b> Μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση που οδηγεί σε αστοχία ως προς τον z άξονα .....	<b>93</b>
<b>Εικόνα 4.4.26:</b> Μετατόπιση πτερυγίων στροβίλου λόγο περιστροφής .....	<b>93</b>
<b>Εικόνα 4.4.27:</b> Κατανομή ισοδύναμης τάσης στα στοιχεία (elements) στα σημεία έδρασης κατά το κριτήριο αστοχίας (von mises stress) .....	<b>94</b>
<b>Εικόνα 4.4.28:</b> Κατανομή ορθών καμπτικών τάσεων $\sigma_{xx}$ στα σημεία έδρασης .....	<b>94</b>
<b>Εικόνα 4.4.29:</b> Διατμητικές τάσεις $\tau_{xy}$ .....	<b>95</b>
<b>Εικόνα 4.4.30:</b> Μέγιστες διατμητικές τάσεις $\tau_{xy}$ .....	<b>96</b>
<b>Εικόνα 4.4.31:</b> Μέγιστες διατμητικές τάσεις $\tau_{xy}$ στον άξονα .....	<b>96</b>
<b>Εικόνα 4.4.32:</b> Μέγιστες διατμητικές τάσεις $\tau_{xy}$ στον άξονα από δυτική πλευρά (compressor side) .....	<b>97</b>
<b>Εικόνα 4.4.33:</b> Διατμητικές τάσεις $\tau_{xz}$ στον στροβιλοσυμπιεστή .....	<b>98</b>
<b>Εικόνα 4.4.34:</b> Μέγιστες διατμητικές τάσεις $\tau_{xz}$ στον άξονα .....	<b>98</b>
<b>Εικόνα 4.4.35:</b> Διατμητικές τάσεις $\tau_{xz}$ στον άξονα σε τομή .....	<b>99</b>
<b>Εικόνα 4.4.36:</b> Διατμητικές τάσεις $\tau_{yz}$ στον στροβιλοσυμπιεστή .....	<b>99</b>
<b>Εικόνα 4.4.37:</b> Μέγιστες διατμητικές τάσεις $\tau_{yz}$ στα πτερύγια του στροβίλου .....	<b>100</b>
<b>Εικόνα 4.4.38:</b> Διατμητικές τάσεις $\tau_{yz}$ στα σημεία έδρασης .....	<b>100</b>
<b>Εικόνα 4.4.39:</b> Διατμητικές τάσεις $\tau_{yz}$ στα σημεία έδρασης σε τομή στον x άξονα ..	<b>101</b>
<b>Εικόνα 4.4.40:</b> Διατμητικές τάσεις $\tau_{yz}$ στα σημεία έδρασης .....	<b>101</b>
<b>Εικόνα 4.5.1:</b> Μετατόπιση πτερυγίων συμπιεστή λόγο περιστροφής σε λύση στοιχείων .....	<b>103</b>
<b>Εικόνα 4.5.2:</b> Κατεστραμμένα πτερύγια συμπιεστή .....	<b>103</b>
<b>Εικόνα 4.5.3:</b> στρόβιλος με μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση στα πτερύγια .....	<b>104</b>
<b>Εικόνα 4.5.4:</b> στρόβιλος με κατεστραμμένα πτερύγια .....	<b>105</b>
<b>Εικόνα 4.5.5:</b> Μετατόπιση και παραμόρφωση πτερυγίων στροβίλου λόγο περιστροφής .....	<b>105</b>
<b>Εικόνα 4.6.1:</b> Παραμόρφωση συστήματος .....	<b>115</b>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Διαστάσεις Συμπιεστή .....	19
Πίνακας 1.2: Διαστάσεις στροβίλου με άξονα .....	20
Πίνακας 2.1: Αντιπροσωπευτικά δομικά στοιχεία του ANSYS .....	30
Πίνακας 2.2: Αντιπροσωπευτικά θερμικά στοιχεία του ANSYS. ....	31
Πίνακας 3.1: Παραμορφώσεις και μέγιστες τάσεις για τα δύο πλέγματα. ....	58
Πίνακας 4.1: Συντεταγμένες σχεδίασης του άξονα .....	60
Πίνακας 4.2: Συντεταγμένες σχεδίασης του στροβίλου .....	61
Πίνακας 4.3: Συντεταγμένες σχεδίασης του αεροσυμπιεστή .....	62
Πίνακας 4.4: Συντεταγμένες σχεδίασης του πτερυγίου στον αεροσυμπιεστή .....	63
Πίνακας 4.5: Συντεταγμένες σχεδίασης του πτερυγίου στον στρόβιλο .....	64
Πίνακας 4.6: Αντιπροσωπευτικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών .....	68
Πίνακας 4.7: Συνοπτικά αποτελέσματα τάσεων και μετατοπίσεων από την στατική ανάλυση .....	102
Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης .....	106
Πίνακας 4.9: Αποκρίσεις συστήματος από ιδιομορφική ανάλυση .....	108





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### ΒΙΒΛΙΑ

1. Γκότσης Κ. Πασχάλης, 'Πεπερασμένα Στοιχεία,' Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2005
2. Τσαμασφύρος, Γ.Ι. και Θεοτοκόγλου, Ε.Ε., 'Η Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων', Αθήνα 1994
3. Δρ. Π. Α. Κακαβάς, 'Η Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων', Επιστημονικές εκδόσεις και λογισμικό, Πάτρα 2005
4. Μ. Παπαδρακάκης, 'Ανάλυση φορέων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων', Παπασωτηρίου, Αθήνα 2001
5. Δρ. Π. Α. Βουθούνης, 'Τεχνική Μηχανική – Αντοχή των Υλικών', Ζ' Έκδοση, Αθήνα 2002
6. Σ. Νατσιάβας, 'Ταλαντώσεις Μηχανικών Συστημάτων', Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2001
7. Καραπάνος Χαράλαμπος, Κοτσιλιέρης Ανάργυρος και Κουντουράς Λίνος, 'Μηχανές Εσωτερικής Καύσης ΙΙ', ΟΕΔΒ, Αθήνα 2002
8. V. G. Rekach, 'Manual of the theory of elasticity', Mir Publishers Moscow, 1979
9. Ali A. Alsaeed, 'Dynamic Stability Evaluation of an Automotive Turbocharger Rotor – Bearing System', Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005
10. Swanson Analysis Systems, Inc. ANSYS (1992), 'User's Manual for Revision 5.0, Procedures' Houston, PA

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. V. Ramamurti, D. A. Subramani and K. Sridhara, 'Free vibration analysis of a turbocharger centrifugal compressor impeller
2. A. H. Liao, H. W. Zhang and C. H. Wu, 'A Finite Element Model for 3D Elastoplastic Frictional Contact Analysis and its application in Numerical Simulation of Turbocharger Compressor'
3. Edgar J. Gunter and Wen Jeng Chen, 'Dynamic Analysis of a Turbocharger in Floating Bushing Bearings
4. Δρ. Στέφανος Β. Τσινόπουλος, Μηχανικές Ταλαντώσεις και Θεωρία Μηχανισμών, Πάτρα 2007

## ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ

1. <http://www.Garrett.com>
2. <http://refone.en.made-in-china.com/>
3. <http://peregrineperformance.com/History.htm>
4. <http://en.Wikipedia.org/wiki/Turbocharger>
5. [www.mece.ualberta.ca](http://www.mece.ualberta.ca)
6. <http://www.ansys.com/>
7. [http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/121/wb2\\_help.pdf](http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/121/wb2_help.pdf)